自動走査式 RI 密度測定技術の開発と粗粒材料への適用

豊 田 光 雄

システム情報工学研究科
筑波大学

2003 年 6 月

目　　次

第１章　序論 1
1.1　はじめに 1
1.2　本研究の背景と展望 2
1.3　本論文の構成 4

第２章　粗粒材料の現場密度の評価における課題 7
2.1　粗粒材料の概要 7
2.2　締固めの意義と現場密度測定の必要性 11
2.3　現場密度試験の課題 13
2.3.1　現場密度測定の実態 13
2.3.2　新しい密度測定法の必要性 19
2.4　第 2 章のまとめ 21

第３章　新しい RI 法による現場密度測定技術の開発 24
3.1　RI 法の発展と現状 24
3.2　自動走査式 RI 密度計（SRID）の開発 26
3.2.1　従来の表面型 RI 密度計の問題点 26
3.2.2　自動走査式 RI 密度計（SRID） 29
3.3　自動走査式フレーム型 RI 密度計（FRID）の開発 78
3.3.1　従来のフレーム型 RI 密度計 78
3.3.2　自動走査式フレーム型 RI 密度計（FRID） 79
3.4　第３章のまとめ 88

第４章　現場締固め特性の合理的な評価方法 90
4.1　締固め密度の統計的性質 90
4.1.1　分布特性 93
4.1.2　乾燥密度の含水比依存性 116
4.2　盛立試験方法の改良 119
4.3　現場締固め曲線の直接評価 124
4.3.1　予備検討（室内締固め試験） 126
4.3.2　振動ローラによる現場転圧のプロクター特性 135
4.3.3　室内締固め試験との比較 151
4.3.4　現場締固め試験の結論 153
4.4　転圧層内の鉛直方向の密度勾配 155
4.4.1　ロック材料の密度勾配 158

4.4.2　フィルター材料の密度勾配 164
4.4.3　密度勾配を生じさせる要因 169
4.4.4　コア材料の積層効果 173
4.5　密度増加と転圧面の挙動 177
4.5.1　コア材料の沈下挙動 177
4.5.2　ロック材料およびフィルター材料の沈下挙動 184
4.6　第 4 章のまとめ 185

第５章　コア材料の転圧厚さの増大に関する検討 189
5.1　はじめに 189
5.2　フィルダムにおけるコア材料の盛立て施工実態 190
5.3　合理化施工に関する課題 195
5.4　転圧厚さが締固め密度に及ぼす影響 197
5.4.1　ケーススタディ 1（HO ダム） 197
5.4.2　ケーススタディ 2（HA ダム、CY ダム） 212
5.4.3　転圧厚さ増大の可能性 218
5.5　第 5 章のまとめ 219

第６章　締固め密度の統計的品質管理手法 221
6.1　従来の締固め管理法の課題 221
6.2　締固め密度の統計的品質管理手法の提案 223
6.3　試行事例 231
6.3.1　ケーススタディ 1（HA ダム） 231
6.3.2　ケーススタディ 2（SU ダム） 239
6.4　リアルタイム品質管理手法 251
6.5　第 6 章のまとめ 254

第 7 章　結論 256
7.1　研究成果の要約 256
7.2　今後の課題 261

付録 A　RI 法の測定原理 263
A.1　ガンマ線密度計 263
A.2　中性子水分計 265

謝辞 271
研究実績（論文リスト）

第1章　序　　論

1.1　はじめに

わが国では、治山治水、都市用水および工業、農業用水などを確保するために多くのダムが築造されてきた。一般にダムと言えば、コンクリートで築造された重力ダムやアーチダムを思い浮かべることが多いが、自然に存在している岩石、土などを用いて築造するダムもあり、これはフィルダムと呼ばれている。日本ではコンクリートダムが多いが、世界的にみれば、フィルダムの方が圧倒的な割合を占めている[1)]。

フィルダムの歴史は古く、日本では1000年以上の昔に弘法大師が築造したと言われる満濃池[2)]が有名であり、現在でも農業用水確保のために利用されている。その後築造されたフィルダムはほとんどがアースダムで、人力と牛馬で掘削、運搬してきた近在の土を締固めて築造されていた。戦後の復興期に入ると、発電、治山治水などを目的とした本格的なフィルダムの建設が始まった。1953年に竣工した石淵ダム[3)]は、上流面に鉄筋コンクリート版を敷設した表面遮水型のロックフィルダムである。当時はまだ大型の運搬車や締固め機械がなかったことから、トロッコなどで運び揚げた堅硬な岩石を高いところから落下して積み上げることによって堤体を築造しており、岩石同士のかみ合せ効果を利用して堤体の安定性が保たれている。ダムの内部に土の遮水壁を有するコア型ロックフィルダムが最初に建設されたのは1957年に竣工した御母衣ダム[4)]である。御母衣ダムの設計では、円形すべり面法を用いた堤体の安定検討が行われた。このとき遮水材料のせん断強度を求めるために三軸圧縮試験が実施されたが、粒径の大きいロック材料のせん断強度は海外の事例を参考にして設定された。この時代に至ってフィルダムの設計もそれまでの経験的手法から脱皮して、近代的な土質力学の手法をとり入れた検討が行われるようになったのである。御母衣ダムはそのきっかけとなったダムである。高度経済成長時代に突入すると、国土の保全、水資源の開発、産業基盤の整備といった観点からダムに対する社会的需要が増大し、1970年頃からフィルダムの建設は最盛期を迎えた。建設省などの公的機関や電力会社によって数多くのフィルダムが建設されており、その過程でフィルダムの設計法や材料試験法が確立されていった。わが国で最も堤高の高い高瀬ダム[5)]（**写真-1.1**）、最も堤体積の大きい寒河江ダム[6)]（**写真-1.2**）などの大規模のロックフィルダムが建設されたのもこの時代である。この時期に確立された多くの技術的な成果は、「最新フィルダム工学」[7)]、「多目的ダムの建設」[8)]などの書籍に集約され、今日のフィルダム建設に受け継がれている。

近年、コンピュータの目覚しい発達と普及に伴って情報化社会が現実のものとなりはじめ、他の工業分野では様々な技術革新が進行しているのは周知のとおりである。その影響はフィルダムの建設技術にも及んでいる。しかしながら、フィルダムの最盛期に確立された設計法、施工法および品質管理手法は、基本的にはほとんど形を変えることなく現在に

至っており、新たな発展はほとんどみられなかったといっても過言ではないように思われる。これはそれまでの技術が改善の余地がないといえるほど完成されたものであったということを意味しているわけではない。ある時点に確立された設計、施工技術は、その時代の技術水準を背景としたものであり、設計理論の深化や周辺技術の発展とともに、より合理的な形に変貌してゆくのは当然である。新しい技術に常に目を配り、現在の技術を柔軟に見直してさらに高いレベルへ進化させてゆくことが、フィルダムに関与する技術者の努めであると考えられる。

このような観点から、筆者が着目したのは 1970 年～80 年にほぼ確立したとみられるフィルダムの施工技術および品質管理技術であり、本研究ではフィル材料の盛立施工に焦点をあて、「締固め密度の評価」に係る様々な問題を論じている。

写真－1.1　高瀬ダム [5)]

写真－1.2　寒河江ダム [6)]

1.2　本研究の背景と展望

フィルダムの堤体設計に用いる盛立材料の密度、せん断強度、透水係数等の設計値は、相似粒度やせん頭粒度でスケールダウンした材料を用いた室内試験で求めるのが一般的である。しかし、設計密度ひとつをとっても、室内締固め試験の結果から現場施工密度を予測する方法が確立されているわけではない。一般的には類似ダムの事例を参考にしながら室内締固め試験の試験粒度、モールドの大きさ、締固めエネルギー等の試験条件を設定して一連の締固め試験を行い、その結果を礫率補正（**4.3 節**参照）して予測することが多いが、室内試験条件を設定する統一した基準はない。また、室内締固め試験と重機転圧による現場の締固め施工では締固め条件が大きく異なっているために、礫率補正だけで実施工時の現場密度を予測する手法にはかなり無理があり、実際、室内試験から予測した密度が現場密度と合わないこともしばしば生じている。このため、本施工の盛立てを始める前に盛立

試験を実施して、現場密度を確認することが一般に行われている。また、盛立時の施工品質管理では、ほとんどのダムで締固め密度の管理が実施されている。これらの盛立試験や品質管理で行われている密度試験は置換法（転圧面に孔を掘り、そこから取り出した材料の質量と掘削した置換孔の容積から求める方法）[9]によるものが圧倒的に多い。

筆者は、多くの盛立試験の報告事例や筆者自身の経験から、これまで長年にわたってフィルダムで採用されてきた置換法による現場密度試験は、不十分な密度評価しかできていないということを痛感している。置換法では現場密度のばらつきにみあう十分な数のデータを得ることが困難であるという不備を補うために、一部のダムでは RI 法[9]（ラジオアイソトープを利用した密度、水分量の非破壊測定法）が併用されたが、少なくとも現時点において、RI 法単独で盛立試験や締固め管理がなされたダムはわが国にはない。わが国でロックフィルダムが本格的に建設されるようになった初期の頃には、他にフィル材料の現場密度を評価する手段がなかったため置換法が採用されたという背景は理解できる。しかし、その後、数十年にわたって置換法がフィルダムの基本的な密度試験法とみなされてきた正当な理由を見出すことは難しい。そもそもフィルダムの締固め施工では、品質管理そのものに対する意識が低かったため、密度試験の信頼性などが真剣に問題にされる環境になかったというのが実態ではなかろうか。この状況は今日においても基本的に変わっていないとみるのは筆者だけではないはずである。

置換法の最大の問題は、破壊試験であるということである。例えば、盛立試験を行って必要な転圧回数を決めようとするとき、転圧回数の異なる試験ゾーンをいくつか造成して各ゾーンの密度を比較するということが行われる。破壊試験である置換法を用いる限り、この方法が最も簡単であり、これ以外の方法は考えられない。一見このような試験は合理的であるように思われるが、大きな落とし穴が隠されている。個々の試験ゾーンは、転圧回数が違っているだけでその他の条件は同じであると暗黙裡に了解されていたが、実際はそうではないということである。これは最近になって、締固め密度の分布実態が詳細にわかるようになって明らかにされた事実である。「比較する場」そのものにこのような目に見えない差があるため、従来の置換法による盛立試験では、転圧回数と密度の関係が理解し難い結果になることが稀ではなかった。この事情は日常の締固め管理試験においても同様である。ひとつの施工ロット内で密度は一定ではなく、測定する場所によってかなりばらついているのが実情である。したがって、数少ない置換法のデータからロットの平均密度を求めてもその評価精度は低く、ましてや全点管理で品質管理をするとなると、設計密度にかなりの余裕を見込まざるを得なくなり、それだけ建設コストの負担は大きくなる。

現場施工密度の分布実態が少しずつ明らかになってきたのは、RI 法が導入されてからである。RI 法は非破壊測定であるから、測定の場を乱すことなく何回でも同じ点で密度を測定することができる。そのおかげで RI 法を用いる盛立試験では、転圧回数の異なる試験ゾーンをいくつか設ける必要は全くなく、ひとつの試験ゾーン内で所定の転圧回数ごとに密度測定を繰り返すだけで目的を達することができる。転圧回数以外の条件が全く変わらな

いから、置換法と比べると試験結果に現れるデータの質の差は歴然としている。しかも RI 法は試験というよりも測定と呼ばれるように、置換法に比べると非常に簡単に短時間でデータが得られるという利点があることから、多点数のデータを容易に収集できるという大きなメリットがある。RI 法によって初めて施工密度の分布特性が明らかになり、締固め管理を合理化する道が開けたのである。しかし、従来の RI 法にも幾つかの難点があった。間接測定であることから、較正曲線の精度が RI 法の信頼性を決定的に左右するため、入念な較正試験が必要であること、水分較正式には材料の種類によって無視できない差がでること、そして、置換法に比べると測定容積が小さいというのがその主なものであろう。このうち粗粒材料への適用を考えたとき、測定容積の問題が最も重要である。

筆者は、置換法や RI 法を用いて行われた多くの盛立試験に携わった経験を踏まえて、今後フィルダムの盛立試験や締固め管理を合理化してゆくためには何をおいても施工密度の実態、とりわけその分布特性を正確に評価できる手段を整備することがすべての出発点になるという結論に達した。

締固め密度を合理的に評価するためには、締固め密度がもっている統計的性質を考慮する必要があり、「多点数データに基づく締固め密度の統計的な評価法」をまず整備することが不可避である。旧来の置換法に固執するかぎりこれは不可能であると判断すると同時に、従来の RI 法でも不十分であると結論し、これらに代わる新しい RI 法の開発に取り組んだ。このような経緯で生まれたのが走査型 RI 密度計 SRID である。次いで、ロック材料の転圧層内で鉛直方向の密度分布を求めるために開発されていた導管フレーム型密度計の有用性を認識し、これを連続走査式に改良した自動走査式フレーム型密度計 FRID を実用化した。そして、いくつかのフィルダムの盛立現場を借りて SRID と FRID の適用性と性能を検証する現場試験を実施するとともに、多数のデータを収集して各材料の締固め密度の分布実態を明らかにしてきた。さらに、現場締固め施工の合理化で課題になっている、コア材料の転圧厚さの増大に関する検証試験を、新しい RI 法とこれをベースにした新しい盛立試験方法を適用して実施し、客観的な展望を示した。また、旧来の方法を一変した統計的品質管理手法の提案なども行ってきた。この論文は筆者が携わってきた以上の一連の研究成果をとりまとめたものである。次にこれらの内容を紹介する。

1.3　本論文の構成

本論文は本章を含み全 7 章より構成されている。

第 2 章では、粒状材料の力学理論や締固め理論および施工実績を土台として、粗粒材料をどのような材料として認識するのか、その盛立施工における本質的な問題は何なのかという観点から、まず、これまでに筆者がかかわったフィル材料の盛立試験や施工管理の経験をもとに、実務的な視点から見た粗粒材料の基本的な特徴を考察して、締固め密度を評

価しこれを管理することの意義と重要性を再確認している。次いでフィル材料の盛立試験や施工管理で用いられている置換法による現場密度試験とRI法を利用した密度測定法の問題点を整理して、粗粒材料を対象にした締固め密度の評価法としての可能性や限界を示し今後の展望をまとめている。

第3章では、前章で整理した従来のRI密度計の問題点を解消することを目指して開発した、粗粒材料に対応できる表面型の自動走査式RI密度計SRIDと、従来のフレーム型RI密度計を改良した自動走査式フレーム型RI密度計FRIDについて、それぞれの開発経緯、測定器の特徴、性能、較正曲線などをとりまとめている。とりわけSRIDは表面型RI密度計に走査式を導入したことによって、測定領域が従来の表面型RI密度計より10倍以上大きくなり、粗粒材料への適用性の問題を払拭したといえる。SRIDの測定容積の大きさ、統計ノイズ、不陸補正法などについても詳細な実験結果をもとに論じている。

第4章では、SRIDやFRIDによって詳細が明らかになった現場密度の実態を論じる。まず転圧後の密度や含水比の分布が示す統計的性質を整理して、締固め密度を統計的に評価することの必要性と意義を強調している。すなわち、統計的性質を理解することが締固め密度を合理的に評価する原点になることを示している（**4.1節**）。次にRI法のような非破壊密度測定法によって可能になった単一ゾーン方式の盛立試験法を提案し、破壊試験である置換法を前提にした旧来の盛立試験法（分離ゾーン方式と呼ぶ）に比べ、はるかに容易にしかも精度の高い転圧効果曲線が得られることを具体的な実例で示している（**4.2節**）。その結果、含水比を変えた盛立試験を行うことによって、現場転圧施工の締固め曲線（プロクター特性）を求めることができるようになったのである。現場締固め試験の具体的な事例を紹介し、室内締固め試験で得られるプロクター特性と比較して類似点や相違点などを考察している（**4.3節**）。以上はSRIDの開発がもたらした成果である。さらにFRIDによって明らかにされたフィル材料の密度勾配（転圧層内の鉛直方向の密度差）の実例を示し、密度勾配の実態や密度勾配を生じさせる要因を考察するとともに（**4.4節**）、転圧時の地表面沈下量とSRIDやFRIDから求められる圧縮率の関係についても考察している（**4.5節**）。

第5章では、フィルダムの施工期間を短縮するうえでネックになっているコア材料の転圧厚さの増大が可能かどうかを検討した事例を述べている。三ヶ所のダムのコア材料を対象にして、締固めには振動ローラを使用し、密度測定にSRIDとFRIDの両方を用いた単一ゾーン方式の盛立試験を行って詳細なデータを収集し、少なくとも50cmまでは締固め厚さを拡大できることを実証している。

第6章では、コア材料を対象にした統計的な品質管理手法を提案している。施工ロット内でSRIDによって得られた多点数の密度データから平均密度を求め、これをコア材料の現場締固め特性と密度および含水比の分布特性をもとに予め設定された管理限界と対比して、施工品質の合否をスピーディに判断する方法を示し、実際のダム現場で試行した事例や、最近の情報技術に対応したリアルタイムの品質管理手法についても述べている。

最後に**第 7 章**は、**第 2 章**から**第 6 章**までの五つの章で述べた論点と結論を要約したものである。

参考文献

1) ICOLD：World Register of Dams，1998
2) 建設省国営讃岐国営まんのう公園工事務所：満濃池関係資料集，1988
3) 建設省東北地方建設局石淵ダム管理所：石淵ダム工事報告書，1952.5.
4) 間組：御母衣ロックフィルダム工事誌，1964.3.
5) 東京電力株式会社：高瀬川電源開発工事報告，1981.10.
6) 建設省東北地方建設局：寒河江ダム工事誌，1991.3.
7) （社）電力土木技術協会：改定新版　最新フィルダム工学，第 1 刷，1981.3.
8) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設（昭和 62 年版），1987.12.
9) 地盤工学会：地盤調査法，第 9 編，pp.383~432，1998.9.

第 2 章　粗粒材料の現場密度の評価における課題

2.1　粗粒材料の概要

粗粒材料と言えば、岩石、砂などのごろごろした、またはさらさらしたイメージを与えがちである。このようなイメージの粗粒材料は、保水性の高い細粒分の含有率が極端に小さいため、自然含水比（原石山などから採取された状態の含水比）も低い。締固めたときの強度を決定づける主要な要因は密度や粒子形状であり、含水比に影響されることはほとんどない。したがって、盛立施工においては密度の管理が重要になる。**写真－2.1** に、このような典型的な粗粒材料の一例を示す。

しかし、粗粒材料はこのようなものばかりではない。河床堆積物や原石山の表層部から採取される粗粒材料はしばしば多くの細粒分を含んでおり、いわば細粒材料と岩石、礫、砂などが渾然と混じりあった複雑な材料であることが多い。この種の粗粒材料は一般に自然含水比が比較的高く、粒度配合がよいので十分に締固めれば、高い止水効果と大きなせん断強度が得られる一方、これらの工学的性質は含水比に大きく影響されるという特徴がある。宅地造成や道路盛土などでは、むしろこの種の粗粒材料が多く用いられている。工学的な観点からみれば、含水比の影響が支配的であるか否かによって、粗粒材料を便宜的に上に述べたように大きく二つのタイプに分類すると都合がよい（ここでは、前者を密度型、後者を含水比型と呼ぶこととする）。両者の締固め密度、透水特性、せん断強度、変形特性などの諸々の工学的性質が大きく異なっていることから、設計や施工上の扱い方も自ずと違ってくるからである。

アースダムやロックフィルダムなどのフィルダムは、これら二つのタイプの粗粒材料の工学的性質の違いをうまく使い分けて築造されている。フィルダム以外の土構造物においては、これまで粗粒材料はあまり使用されてこなかったが、粗粒材料の工学的性質の解明

写真－2.1　粗粒材料の一例

が進み、大型の建設機械が開発されるようになって、空港盛土、宅地造成などでも使用されるようになり、現在、その利用範囲はしだいに広がっている。高速道路の岩塊盛土など一部の例外はあるが、フィルダム以外の分野で用いられているのは、多くの場合、含水比型の粗粒材料である。もちろん外見的には密度型と含水比型の中間的な粒度をもった粗粒材料も多く出現しているが、含水比の影響が無視できない材料は基本的に含水比型として対応することが求められる。いずれのタイプの材料であっても、粗粒材料の工学的特性を十分に理解し、大型施工機械を駆使して適切な品質管理のもとで締固めれば、大きな強度を有する安定した盛土構造物が築造できる。

密度型の粗粒材料の特徴として次の二点を挙げることができる。

①　最大粒径が大きい。

密度型の粗粒材料は砂に比べて極端に大きい粒径をもった岩石を多く含んでいるため、実物材料をそのまま用いて室内試験を実施することは現実的に不可能である。このため室内試験では、相似粒度（実粒度をある最大粒径以下に平行移動した粒度）やせん頭粒度（実粒度においてある粒径より大きい部分を除いた粒度）といった縮小粒度にスケールダウンされた材料が用いられる。しかし、縮小粒度の試験結果から如何にして実物粒度の強度を評価すればよいかという難問をクリアしなければならない。また、現場における粗粒材料の密度や強度の測定には大きな困難を伴う。例えば、ロック材料の盛土の施工管理を行うために現場密度試験を置換法で行う場合、多くの時間と労力を費やしても得られるデータの数は極めて限られており、その精度についてはこれまでほとんど明らかになっていないのが実情である。

②　粒子破砕が生じる。

密度型の粗粒材料には、河床砂礫のように堅硬な円礫を主体とした材料もあるが、多くは原石山から発破などによって材料を取り出す。このために潜在的なクラックをもっているので、砂のように物理的に安定した材料でないことが多く、粒子形状は角ばっている。したがって締固め時やせん断時に粒子接点で応力集中が起こりやすくなり、粒子破砕が問題となる。例えば、室内締固め試験においては、締固めに伴う粒子破砕をどれだけ認めるかによって密度の大きさが変わるので試験条件の設定が難しくなる。強度についても同様のことが言える。粗粒材料は締固めることによってせん断強度や剛性が増大するが、粒子破砕が顕著な場合には、締固めによって生じる粒子破砕が力学特性に好ましくない影響を与えることに留意する必要がある。

密度型の粗粒材料は砂と同じ工学的性質を多く共有していると考えられる反面、上に挙げた二つの特質から砂と異なる側面ももっている。一例をあげれば、砂では粘着力を無視できることが多いが、密度型の粗粒材料の破壊包絡線は一般に湾曲しており、見かけの粘着力を無視するとせん断強度は著しい過小評価になることが多い。また、設計強度をどの

応力範囲で評価すればよいかを決めておかないと、設計者によって設計内容がかなり異なったものになる恐れもでてくる。

密度型の粗粒材料の工学的性質に関しては、フィルダムのロック材料を対象にして 1960－70 年代にかけて、Marachi らのグループ [1]、Marsal[2]等をはじめ、多くの研究者や技術者によって積極的な研究がなされてきた。とりわけ最大粒径とせん断強度（内部摩擦角）の関係や粒子破砕がせん断強度に与える影響に焦点があてられ、大型もしくは超大型の三軸圧縮試験装置を用いて、最大粒径 200 mm までの強度試験が各機関で数多く実施された。いくつか異なる傾向を示した報告もあるが、現在では「相似粒度のもとでは内部摩擦角は粒径が大きくなるとともに若干低下するが大きく変わることはない」という評価が大勢を占めている。粒子破砕の影響に関しては、せん断強度を低下させる方向に働くというのが共通の認識になっているが、同時に粒子破砕がもっている二面性を理解する必要がある。それはせん断強度に対してはマイナスの影響をもつ反面、粒子破砕によって粒子の再配列が起こり、締固めが促進されるというプラスの効果もあるという事実である。密度の増加はもちろんせん断強度や剛性を高める方向に作用するため、せん断強度に対する直接的な負の影響を相殺する効果も無視できなくなる。粒子破砕が極端に大きい脆弱岩や強風化岩などは例外であるが、通常みられる破砕率（数%～10 数%程度）の材料であれば、破砕性のためにその材料が使えないということはほとんどない。また、実際の締固め施工でも粒子破砕が顕著にみられるのは、ほとんど転圧機械のローラーが接する転圧面近傍に限られ、転圧層全体の粒度を締固めの前後で比較してみるとわかるように、粒度分布に目立った差が生じることはない。

他方、含水比型の粗粒材料の最大粒径は密度型の粗粒材料に比べると比較的小さいのが普通なので（フィルダムのコア材料では、最大粒径 100 mm~150 mm 程度の材料を用いることが多い）、粒子径の問題は密度型の粗粒材料の場合ほど深刻ではない。もちろん実物粒径の試験ができないので礫率補正は避けられない。また、含水比型の粗粒材料に含まれる粗粒分は一般に密度型の粗粒材料に比べて風化が進んでいることが多く、破砕性の面でも劣っているが、均等係数が比較的大きく細粒分が粗粒分の間隙を十分埋め尽くしているときには粒子破砕の影響も少ない。これらの要因よりも締固め透水特性やせん断強度が含水比に強く依存することの方がはるかに重要である。施工含水比が高くなると転圧時に過剰間隙水圧が発生し、ウェイビング現象がみられるなど、締固め状況は密度型の粗粒材料の場合と全く異なる様相を示すこともしばしばある。

両タイプの違いは、締固め密度の分布特性にもはっきりと現れる。密度型の粗粒材料は自然含水比が低く含水比の影響が問題になることは少ないのに対して、含水比型の粗粒材料の場合は自然含水比が高く密度の含水比依存性がはっきりと現れる。したがって含水比型の粗粒材料における密度のばらつきには含水比の違いに起因する変動成分が含まれており、転圧効果の比較や品質管理基準の設定においてはこのことを考慮しなければならない。

図－2.1 は、これまで建設省系で築造されたフィルダム材料の粒度分布である [3]。ロック

図−2.1　コア、フィルター、ロック材料の粒度分布 3)

材料はせん断強度が重要視されるため、粒径が約 1000 mm から数ミクロンまで広がっており、大雑把にみて10前後の均等係数をもっている。コア材料の最大粒径は100 mm～150 mm程度が一般的で、せん断強度よりも遮水性が重要視されることから、細粒分の含有率が比較的高い材料が用いられる。フィルター材料はロック材料とコア材料の中間的な粒度をもっている。上に述べたタイプからみると、コア材料は含水比型の粗粒材料であり、フィルター材料とロック材料は密度型の粗粒材料であることが多い。

2.2　締固めの意義と現場密度測定の必要性

フィルダムは、立地点の近くで得られる自然の材料を用いて築造する大型の土構造物である。ゾーン型のフィルダムは、遮水ゾーン、フィルターゾーン、透水ゾーンというように異なった機能と目的をもつゾーンから構成されており、各ゾーンごとに粒度の異なる材料をブルドーザで所定の厚さにまき出し、振動ローラーなどで締固めるという工程を繰り返して築造されている。盛立施工時には締固め密度を指標として品質管理が実施される。

さて、ここで原点に立ち返って締固め管理において密度を重要視するのはなぜか、締固め密度の意義とは何なのかを、改めて確認しておくことは無駄ではないように思われる。これは当たり前のことのようでありながら、実際の設計、施工、品質管理の様々の側面で密度の重要性が叫ばれている割には、それに見合った密度評価法の技術的な進歩があまり見られず、密度管理が形骸化しているのではないかと危惧されることが皆無とはいえないからである。実際、以下の各章で具体的に論じるように、現場密度試験、盛立試験、締固め品質管理方法などは一部を除いて現在においても旧態依然としたものに留まっており、以前からいろいろな問題点が指摘されてきたにも拘らず、改善や進歩がほとんどみられないのが現状である。

ゾーン型フィルダムの力学的、水理的安定性を確保するうえで最も重要な材料物性は、言うまでもなくロック材料のせん断強度とコア材料の透水係数である。フィルター材料はせん断強度と透水係数の両面でコア材料とロック材料の緩衝材として機能することが求められる。品質管理の目的をひとことで言えば、第一に締固め後のこれらの物性値が設計値を満たしていることを保証することである。さらに実際にどのような強度や遮水性をもったダムが築造されたかを記録した正確な情報を残すという役割も貴重である。しかし、転圧地盤のせん断強度を現場で直接求める手法に関しては、これまでにも研究された事例[4),5)]がないわけではないが、品質管理に適用できるほど簡便で完成された方法はない。したがって、強度の管理は“せん断強度と強い相関をもち”、かつ“締固めの結果を的確に表現できる”強度定数以外のわかりやすい指標を用いて、間接的に実行するしか今のところ方法がない。密度がこれら二つの要件をともに満たしていることは明らかである。これ以外にも例えば、古くから沈下量とか弾性波速度なども管理指標として考えられたが、いずれも

要件を部分的にしか満たしていない。最近では振動ローラの車軸に加速度センサーを取り付け、転圧走行時の地盤反力をモニターして締固め状況を判断する方法などが試みられているが[6), 7)]、これも転圧と同時にデータが得られるという点で斬新性はあるものの、せん断強度との相関性や指標の的確性などの面では問題点が指摘されている。したがって、少なくとも現状では管理指標として密度を用いるのが最も合理的な選択といえる。

粗粒材料のせん断強度は密度の他にも、**図－2.2** に示した多くの要因に支配されることが明らかになっている[8)]。材料物性に係わる要因では密度の他に粒径、粒度分布、粒子形状、粒子強度などが挙げられるが、密度は他のどの要因よりも大きな影響をもっていることが知られている。この他に密度を指標とした締固め管理が行われる、もうひとつ重要な背景がある。それは密度以外の要因は材料が選択された段階では、もはやほとんど制御できないということである。もし制御できたとしても、莫大な費用がかかりそのような選択は現実的ではない。フィルダムにしろ他の盛土構造物にしろ、一般に材料選択の自由度は限られており、さらに材料が決まってしまうと制御できるのは密度しかないのである。

図－2.2 粗粒材料のせん断強度に影響を及ぼす諸要因[8)]

2.3　現場密度試験の課題

2.3.1　現場密度測定の実態

(1)　現場密度測定法の概要

粗粒材料を対象とした現場密度試験では、これまでに**表－2.1** に示す方法が用いられており、これらは直接法と間接法に分けられる [9]。直接法というのは、何らかの方法で体積と質量を計量してその比から密度を求める方法で、置換法、全質量法、凍結サンプリング法がこれに属する。フィルダムの盛立試験や品質管理試験では、置換法による密度測定が行われている。他の直接法はほとんど採用されていない。間接法として実用化されているのは、ラジオアイソトープ（RI）を利用して密度を測定する RI 法しかない。フィルダムの盛立試験において、転圧効果などの締固め状況に関する詳細なデータを得るために RI 法が用いられることがある。また、コアの品質管理では、置換法の限られたデータ数を補完する目的で RI 法が用いられることもある。

以下、フィルダムで主に用いられている置換法と RI 法にしぼり、その測定法と課題をまとめる。

表－2.1　現場密度試験の方法 [9]

	試験法		測定項目	試験器具	備　　考
直接法	置換法	水置換法	置換孔の体積掘削質量	ビニールシート、水、はかり	人力掘削、掘削量φ1.0m、h=1.0mの場合約0.7m^{3}以上
		砕石置換法		砕石、はかり	人力掘削、掘削量φ1.0m、h=1.0mの場合約0.7m^{3}以上 砕石質量と置換孔の体積の較正試験が必要
	全 質 量 法		ヤードの測量 運搬質量	レベル、スタッフ、トラックスケール	測定スペースが大きい
	凍結サンプリング		供試体体積 供試体質量	凍結装置、体積測定装置、はかり	研究的に実施された
間接法	R I　法	表 面 型	透過ガンマ線の強さ	表面型RI	測定深さ最大50cm
		導管埋設型		導管埋設型RI、測定導管	盛立て中に測定導管の埋設が必要

(2)　置換法

a)　試験方法

置換法は転圧面で置換孔を掘削し、掘削した材料の質量と置換孔の体積から密度を求めるものである。置換孔の体積は、孔内に水、砂、砕石などを所定の方法で充填して求める。コア材料では砂が、フィルターおよびロック材料では水および砕石が置換材料として用いられ、それぞれ水置換法、砂置換法および砕石置換法と呼ばれている。

置換法による現場密度試験の方法を規定したものとしては、地盤工学会基準（案）[10]、日本道路公団試験方法 [11]、建設省土研仕様 [12]などがある。フィルダムの現場では土研仕様による方法が一般的に採用されている。しかし、土研仕様は置換孔径の大きさ、深さなどについて具体的な数値を示していないため、試験法の詳細は現場ごとに異なっている。

b)　置換法の課題

置換法の課題をまとめると次のようになる。

①　締固め厚さの大きい透水ゾーンのように置換孔が大きくなると、多くの労力を要し時間もかかる。

②　円柱状の掘削ができないので､置換孔の水平断面積は上部ほど大きくなる傾向がある。このような置換孔では、転圧層内で深さ方向に密度が一様でない場合、例えば**図－2.3** に示すような深度方向の密度分布があるときには平均密度が大きめに評価される。

図－2.3　置換孔形状の影響

③　材料の最大粒径に対して、必要かつ十分な置換孔の孔径が明らかにされていない。また、掘削に伴う孔壁周辺のゆるみや、水置換法の場合にみられる遮水シートと孔壁間の密着不良などの誤差要因が無視できない。また、これらに起因する誤差を客観的に評価することが難しいことから、測定精度が曖昧で人的な要因にも左右されやすい。

④　破壊試験であるために、同一地点（測点）での繰り返し測定ができない。このため置換法では転圧効果を正確に評価するのが極めて難しくなる。

上記③に関してはいくつかの研究事例がある。**図－2.4** はロック材料を対象にして置換孔径 d と材料の最大粒径 D_{max} の関係を三つのダムで試験したものである[13]。それぞれのダム材料で試験結果の傾向が異なっており、寒河江ダムのケースでは $d／D_{max}$ が 3 以上で安定した密度が得られているとみえなくもないが、総体的にばらつきが大きく評価が難しい。七ヶ宿ダムのケースでは $d／D_{max}$ が 4 以上になると密度は逆に減少している。C 材料では $d／D_{max}$=4 と 6.5 のデータしかないが、ほぼ一定値を示している。置換孔径をどのくらいの規模にすればよいか判断に迷うところである。一方、置換孔の孔径が材料の最大粒径の何倍必要であるかについて、いくつかのケースをモデル化して計算した結果によれば、最大粒径を有する粒子の含有量が 10%以下のとき、孔径は最大粒径の 3 倍以上必要になることが示されている[14]。

図−2.4　置換孔径／材料の最大粒径と測定密度の関係 13)

置換容積の測定精度に関してもいくつかの試験事例がある。**図−2.5** は水置換法で遮水膜に用いるビニールシートの厚さが測定精度に及ぼす影響を調べたものである 12)。2 つのダム材料で比較されているが、シートの厚さが厚くなれば密度が大きめに評価されることを示唆している。この事例の場合は、シートの厚さが 0.15mm 以下であれば密度はほぼ一定であるが、厚さが 0.3mm になると測定密度が大きくなり、最大約 7%の差が生じている。シートの敷設による置換孔容積の測定誤差を検討した他の事例 15)によれば、予想されるとおり置換孔の寸法が小さく、孔壁が粗く、シートが厚いほど誤差が大きくなることを示し

図−2.5　ビニールシートの厚さと測定密度の関係 11)

ているが、その誤差の大きさは 3%以下であった。また、大きさ 100cm×100cm×70cm のモールド内に最大粒径 15cm の材料を入れて締固めた後に、直径 60cm、深さ 60cm の試験孔を掘削し、厚さ 0.1mm のビニールシートを用いた水置換法で密度を測定した結果によれば、採寸によって求めたモールド内の平均密度に比べて、水置換法の密度は約 5%高めになったという報告がある [16]。さらに、ロック材料の締固め地盤において凍結サンプリング法によって試料を採取し、その密度と水置換法によって求めた密度を比較した結果によると、乾燥密度で 4%の違いが見られたという報告もある [17]。

図－2.6 はコア材料の盛立試験において、RI 法（**第 3 章**で述べる SRID）で測定した密度と、水置換法で求めた密度を比較したものである [18]。転圧密度がほぼ飽和している転圧回数 N＝4、6、8 回において、それぞれの方法で得られた密度を比較している。RI 法のデータは比較的よくまとまっているのに対して、置換法のデータはかなりばらついている。ゼ

図－2.6　RI 法と置換法の密度測定の比較 [18]

ロ空気間隙曲線 Z.A.V.C を越えているデータもかなりあり、これらは明らかに置換法が実際の密度を過大に評価していることを示している。

これらのいくつかの試験例からわかるように、置換法は簡単で非常にわかりやすい方法であるが、「地盤を掘削するときに発生する置換孔周辺のゆるみの問題や容積測定の誤差が避けられないため、実際よりもやや大きめの値が出る傾向がある」というのが一般的な認識となっている。

(3)　RI 法

a)　測定法の概要

RI 法を利用した表面型密度計や水分計には**図－2.7** に示すように、線源を地中に挿入して線源から地表面に設置された検出器に向かって透過してくるガンマ線や速中性子線を検出する透過型と、線源、検出器とも地表面上にあり、地中から散乱されてくるガンマ線や熱中性子線を検出する散乱型の二つのタイプがある。散乱型は密度計も水分計も基本構造

図－2.7　表面型RI測定器の基本型

はほとんど同じであるが、密度計に内蔵されている遮へい鉛のような遮へい材は水分計にはない。これは水分計に用いられている検出器が中性子線源や地盤中から入射してくる速中性子に感応しないので、これらを遮へいする必要がないからである。密度計では線源から直接入射するガンマ線を遮断するためのシールド鉛が線源と検出器の間に必要である。散乱型は地盤面から浅い表層付近の密度や含水量しか測定できないことや、地表面の凹凸に影響されやすいなどの難点があり、線源を挿入できない特殊な材料や条件でしかほとんど使用されていないので、以降このタイプについては言及しない。

透過型 RI 密度計は、線源から放射されたガンマ線が物質中を透過するときに、物質の密度によってガンマ線の透過量が変化することを利用して地盤の湿潤密度を求めるものである。線源から放出されたガンマ線のうち、地盤を透過してきたガンマ線の量を測定し、較正式（基準密度と透過ガンマ線量の関係を表す実験式）から地盤の密度を求める。密度計の較正曲線（較正式を図で表した曲線）は、通常の土や岩石材料であれば土質の違いによって変わるということはない。一方、含水量を測定する RI 水分計は、線源から放出される速中性子線のエネルギーが主として地盤中の水素原子（地盤材料では自由水や拘束水・結晶水・有機物成分などに含まれている）との散乱によって減衰する現象を利用している。水素原子は他の元素よりも中性子に対する減速効果が格段に大きく、このため地盤中に生成される熱中性子の濃度は水素原子の含有率に強く支配される。現在、最も広く普及している透過型 RI 水分計では、地表部の検出器に到達するエネルギーの大きい速中性子量を検出して、地中の含水量（単位体積中に含まれる自由水の質量）を求めている。検出される速中性子線量は地盤中の水素濃度が高くなる（含水量が多くなる）にしたがって急速に低下する。水分計も密度計と同様に、検出される速中性子線量と含水量との関係をあらかじめ較正しておく必要がある。また、その測定原理からわかるように、RI 水分計は地盤工学的に定義されている含水比で表現される自由水のみに感応するわけではない。水素原子を含むその他の成分、すなわち、拘束水や結晶水、有機物などの含有率は材料の種類によって一般に異なっており、これが変化するとみかけ上の較正曲線は異なってくるので、これらの非自由水成分の影響を材料ごとに補正する必要がある。透過型水分計は速中性子を取り込み、これを強制減速して生成した熱中性子を検出するため、検出部の構造は透過型密度計よりも複雑である。RI 法を用いた密度と水分量の測定原理や基本的な特性に関しては**付録**に詳細に示している。

現在、実用されている表面型 RI 測定器は簡単に RI 密度計と呼ばれているが、実際は密度だけでなく水分量も同時に測定する機種を指している（土や岩石材料を対象とする表面型 RI 測定器で、密度あるいは水分量だけを測定する機種は、現在では用いられていない）ので、湿潤密度と同時に乾燥密度や含水比がその場でわかる。土粒子の単位体積重量が予めわかっていれば間隙比、空気間隙率、飽和度などの物性値もすべて求まる。

RI 法は、置換法などに比べて測定時間がはるかに短く、測定に特別な技巧や熟練度を必要としないなどの利点がある。また、非破壊試験であるため同一地点において繰り返し測

定が可能であるという、置換法では望めない大きな利点をもっている。しかし、RI 法の測定領域は、線源深さと検出器の相対位置によって決まるが、置換法のように測定領域の境界を明示することはできない。

b) RI 法の課題

従来の RI 法には以下のような課題がある。

① 測定容積の大きさに限界がある。
② 測定範囲を明確に定義できない。
③ 測定範囲内で測定の重み(感度、影響度)が一定ではない。
④ 間接的な測定法であるために、正確な較正曲線が必要である。
⑤ 水分量測定では、土質の違いによる較正曲線の補正が必要である。

②と③は RI 法の原理そのものに由来しているので避けることはできない。④に関しては、特定の機種について一度較正式を定めれば、機種が変わらない限り較正試験を行う必要がないので実用上は問題にならない。⑤は等価含水量という考え方を用いて、較正曲線から切り離して処理する方法が確立している。

2.3.2 新しい密度測定法の必要性

フィル材料の現場密度を測定する方法を選択するときには、次の点を十分考慮する必要がある。

① フィル材料は、粒径の大きい岩塊や砂礫と細粒分が混合した集合体であり、比較的均質と考えられている細粒の土質材料などに比べると、もともと構造的にはるかに不均質であり、粒度や含水比のばらつきは相対的に大きい。
② 盛立施工では材料の運搬から、まき出し、敷均し、転圧までの一連の工程において、大量の粗粒材料が大型の機械を用いて迅速に処理されるために、多少の粒度分離が起こることは避けられない。このため大型機械化施工に由来する粒度や含水比のばらつきも無視できない。

このようなフィル材料の特徴と施工条件を考えると、転圧後の密度に「ばらつき」が生じることは容易に想像され、これは置換法による密度試験においてもよく経験される事実である。ほんの一例であるが、**図－2.8** は、あるフィルダムにおいて RI 密度計を用いて、ロックゾーン表層部（深さ 30cm まで）の密度と、フィルターゾーン、コアゾーンの全層密度を測定した結果である [19]。この結果をみると締固め後の密度はある幅をもって分布しており、コア材料とフィルター材料の密度の分布形状は正規分布で近似できることがわかる。ロック材料の密度分布は正規分布で表せないようにみえるが、これは盛立施工の過程で材料が変化したためであることがわかっている。**第 4 章**の **4.1.1 項**でフィル材料の密度や含水比などの統計的性質を詳細に分析するが、同一材料の物理的な物性値は近似的に正規分

図－2.8　品質管理試験における乾燥密度分布の一例 19)

布することが多い。このような事実を直視するならば、「フィル材料の締固め密度は本来統計的に評価しなければならない」という指摘は極めて自然なものであり、合理的な盛立試験や品質管理を考える原点である。含水比についても同じことが言える。密度や含水比を統計的に評価するためには、ある程度まとまった数量のデータを、施工スピードにマッチした速さで容易に得られることが前提になり、これを可能にする密度や含水比の測定方法が必要であることを意味している。この条件を満たしていない測定方法に甘んずる限り、締固め密度の評価は極めて不十分なものでしかなく、その信頼性は低いと言わざるを得ない。

以上の観点から、フィル材料のような粗粒材料の密度試験や密度測定に求められる要件をまとめると次のようになる。

A）　１点当りの測定容積が大きい。
B）　測定時間が短く、測定が容易である。
C）　多点数測定が可能である。
D）　測定コストが低い。

A）はフィル材料の粒径が大きい場合には測定容積の不足に起因するばらつきを減らすために、また、B)、C)、D）の３つは多点数標本（データ）に基づく評価が容易にでき

るようになるために必要である。これらの要件を、置換法と RI 法にあてはめてみると、およそ**表−2.2** のような評価になるであろう [19]。密度の統計的評価の必要性を前提に考えるならば、これは置換法についてはその限界を示唆しているといわざるを得ない。従来の RI 法に関しても上の要件からみて、決して満足のゆくものとはいえない。しかし、測定容積の問題が解消できれば、他の要件に対しては置換法に比べてはるかに有利であることから、RI 法の方が上に掲げた条件を満たす可能性は潜在的に大きいと考えられる。

表−2.2　密度測定に求められる要件 [19]

要件	置換法	RI法
A	○	△
B	×	○
C	×	○
D	?	?

○:ほぼ満たしている
△:十分と言えないがある程度満たしている
×:問題が多い
?:データ数に依存する

2.4　第 2 章のまとめ

この章では、本研究が対象とする粗粒材料の本質的な特徴、締固めの意議および現場密度測定の重要性と統計的な密度評価の必要性を論じた。さらに、これまでの現場密度試験の実態と課題を整理して、新しい密度測定法の必要性を展望した。この章の論旨を要約すると次の通りである。

(1) 粗粒材料の特徴

粗粒材料には、最大粒径が大きく細粒分をほとんど含有しない材料と、最大粒径はそれほど大きくないけれども、細粒分をかなり含むため自然含水比が比較的高い材料の二つに大きく分類できる。前者の工学的性質（せん断強度、変形特性、透水性など）は、締固め密度に決定的に左右されることから密度型の粗粒材料と定義し、後者は締固め密度と工学的性質が含水比の影響を強く受けることから含水比型の粗粒材料と定義した。密度型の粗粒材料は最大粒径が大きく、粒子形状や材質によっては粒子破砕が問題になることもある。また、粘土や砂などの土質材料と違って、粒径の制約から室内試験では実物材料を用いることができないので、縮小粒度の試験から現場密度やせん断強度などの設計値を推定しなければならない。一方、含水比型の粗粒材料の場合も密度型ほど深刻ではないものの、やはり実物粒度で試験ができるケースは極めて限られている。

(2) 締固めの意議および現場密度測定の必要性

フィルダムの力学的および水理学的安定性を決定するのは、フィル材料の締固め後のせん断強度や透水係数である。しかし、現場せん断試験を行って、締固め後のせん断強度を

直接的に求めるのはきわめて困難である。そのため、せん断強度を間接的に求めるいろいろな簡便法がこれまで試みられてきたが、強度と関連付けられる指標（例えば、せん断波速度、地盤反力など）の的確性や強度との相関性において疑問や問題点も多く、現状で最も合理的な指標と言えるのは密度しかない。密度はせん断強度との相関性が非常に高く、施工段階で制御可能なほとんど唯一の要因であるといっても過言ではない。フィルダムの設計、施工、品質管理の様々な側面から密度の重要性が叫ばれてきた所以である。

(3) 現場密度試験の実態

フィルダムにおいて､これまで最も多く利用されてきた現場密度試験法は置換法である。置換容積はコア材料の数リットルから、ロック材料の 2～3 m^3 まで、締固め厚さや最大粒径に応じて大きな差がある。置換法は転圧面を掘削し、その置換孔の容積と掘削した材料の質量から密度を求める直接法である。最も単純でわかり易い方法であるが、次のような問題がある。

① 置換孔の掘削および測定に多くの労力と時間がかかるため、許容される時間内に得られるデータの数には限りがある。

② 破壊試験であることから、同一地点(測点)で測定を繰り返すことはできない。

③ 掘削によって生ずる孔壁周辺のゆるみや、遮水シートの密着不良（水置換法の場合）などの誤差要因があり、試験精度を客観的に評価できない。

他方、間接的な現場密度の測定法として RI 法がある。RI 法は置換法に比べて測定時間がはるかに短く、測定に特別な技術や熟練度を必要としないので、多点数のデータを比較的容易に得ることができる。また、置換法と違って非破壊測定法であるため、同一地点で何度でもくり返し測定が可能である。しかし、従来の RI 法にも解決すべき課題がある。特に粗粒材料に対する最大の問題として、「測定容積の不足」があげられる。

(4) 新しい測定法の必要性

フィル材料の特徴と施工条件を考えると、転圧後の密度にばらつきが生じるのは自然な現象である。締固め密度は本来統計的に評価すべき対象であり、そのためにはある程度まとまったデータが必要である。このため、粗粒材料の締固め品質管理に際しては、多点数のデータを短時間で効率よく収集することが可能な密度測定法が求められる。置換法でこの条件を達成することは、ほとんど不可能であるといわざるを得ない。RI 法の場合、測定容積の問題が解消されれば、求められる条件を満たす可能性は潜在的に大きいと考えられる。

参考文献

1) Marachi, N. D. , Chan, C. K. , Seed, H. B. and Duncan, J. M. ：Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materilas, Report No. TE-69－5, p. 1 Univ. of California, 1969.
2) Marsal，R．J．：Mechanical properties of Rockfill，Embankment-Dam Engineering，ed．Hirschfeld and Poulos, John Wiley, 1973.
3) 建設省河川局監修：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編，pp.423~425，1997.10.
4) 山上拓男・森国夫・市橋義治・鈴木壽：締固めた粗粒材料の原位置せん断強度推定法，粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム発表論文集，1999.2.
5) 太田秀樹・西田義親・国安逸朗・金子義信：土の締固め－管理基準と品質検査－，土と基礎，Vol.35，No.5，pp.43~48，1986.
6) 藤山哲雄・石黒健：振動ローラーの加速度応答を利用した粗粒材料の現場締固め管理について，土と基礎，Vol. 48，No.4，pp.17~20，2000.4.
7) 古屋弘・藤原宗一：加速度センサーと GPS を組み合わせた締固め管理システムの開発，土と基礎，Vol. 48，No.4，pp.21~24，2000.4.
8) 土質工学会：粗粒材料の締固め，p.17，1990.12.
9) 土質工学会：粗粒材料の締固め，p.98，1990.12.
10) 土質工学会：JSF　T35－84，シート法による土の密度試験法，1984.
11) 日本道路公団：KODAN　107-1985，シート法による土の密度・含水量測定方法，日本道路公団試験方法，1985.
12) 松本徳久・渡辺和夫・岩田充弘・小川優：粗粒材料の密度試験法に関する実験的研究，建設省土木研究所資料，2333 号，1985.
13) 土質工学会：粗粒材料の締固め，p.119，1990.12.
14) 松本徳久・渡辺和夫：ロック材料の三軸圧縮試験法と強度特性，土木研究所報告第 173 号 p.23，1987.3.
15) Selig E. T. and Ladd, R. S：Evaluation of Relat-ive Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils, ASTM Special Techhnical Publication 523, pp.212～214, 1972.
16) 宮川孝仁：ロックフィルダムの施工管理について（奈良俣ダムの品質管理），第 19 回ダム施工技術講習会資料，日本ダム協会，pp.109~123，1987.
17) 大本家正・柏木順・青木美樹・向後和広：凍結サンプリング法による粗粒材料の盛立て密度測定，第 23 回土質工学会研究発表会論文集，pp.79~80，1988.
18) 豊田光雄・山本重樹：現場密度測定に関する一考察，平成 10 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.594~595，1999.3.
19) 豊田光雄：フィルダム盛立材料の現場密度測定に関する研究,ダム技術 No.125, pp.23~34, 1997.2.

第3章　新しいRI法による現場密度測定技術の開発

3.1　RI法の発展と現状

RI（ラジオアイソトープ）を利用した密度や水分量の測定方法（以降、簡単にRI法と呼ぶ）の開発は、中性子水分計の基本原理がB.Pontecorvoによって発表された1941年に遡り、挿入型水分計が石油探鉱に利用されたのが始まりとされている。1952年には初めて表面型密度計と水分計に関する研究が報告され、それ以来米国を中心にして実用化のための試験研究が推進されてきた[1)]。

わが国においてもかなり以前からRI法を高速道路やフィルダムの密度管理へ適用しようという試みがなされてきており、合理的な品質管理の実現に向けて着実に研究がすすめられてきた。日本にRI法を利用した水分計と密度計が導入されたのは、1957年に建設省土木研究所で購入されたのが最初である。その2年後には日本道路公団や建設業者などでも実用化へ向けた基礎的実験が開始され、1960年代にはいると密度と水分量を同時に測定する機種も市販されるようになった。

盛土の締固め管理に利用されるのは表面型の密度計や水分計である。すでに述べたように、密度計には散乱型と透過型の二つのタイプがあるが、日本にRI法が導入された最初の頃、水分計には散乱型しかなかった。散乱型密度計は完全な非破壊測定器であるが、地表面近傍で測定の重み（感度、影響度）が最大になり、深くなるにしたがって急激に重みが減少するため、測定可能な深度が比較的浅く（10~15cm程度）、測定値が地表面状態の影響を受けやすいという難点があった。この問題は散乱型水分計についても同様に当てはまる。このため、土の締固め管理の分野では散乱型密度計はしだいに姿を消し、測定深さ20cmの透過型密度計に散乱型水分計を組み合わせたRI密度・水分計がしばらく用いられていた。

盛土材料の粒径が大きくなると、測定深さ20cmのRI密度計では測定容積が十分でないことから、当初フィルダム材料のような粗粒材料には適していないという見方があった。1970年代に建設された堤高176mの高瀬ダム（河床砂礫を主要材料とする発電用ロックフィルダム）では、測定深さ30cmの大型密度計の実用試験が実施され、最大粒径200mmまで適用できることが報告された[2)]。大型密度計の開発と同じ頃に、散乱型水分計の欠点を克服するために、わが国で初めて速中性子透過方式を採用した新しい大型RI水分計が開発され、測定深さ30cmの密度と含水比の測定が可能になった。これを境に水分計も散乱型から透過型へ変わり、それ以降わが国では、透過型の密度計と透過型の水分計を一体化した密度水分計が定着した。（注：透過型密度計では測定の重みが深さ方向にほぼ一様であると考えてよいが、透過型水分計の場合は、測定面から深くなるにしたがって測定の重みが減少する。しかし、散乱型と比較すると重みの低下ははるかに緩やかであるため、測定深度を拡大することが可能になった。）1990年に日本道路公団が、高速道路の締固め試験方法をそ

れまでの置換法から RI 法に転換したことを契機として、測定深さ 20cm の密度水分計が標準型として認知され広く用いられるようになった。一方、フィルダムの締固め管理では現在でも置換法による密度試験が基本とされているが、盛立試験などではコアの転圧厚さに合わせて、標準型や測定深さ 30cm の大型密度水分計がしだいに用いられるようになってきた。

ところで、フィルダムのロックゾーンのように締固め厚さが非常に大きい盛立層（1~1.5m で締固められるケースが多い）の密度試験では、大型水置換法がほとんど唯一の方法であったが、1980 年代の後半に、ロックゾーンの転圧層の全深度におよぶ鉛直方向の密度分布を測定することを可能にした、表面型とは全くタイプが異なるフレーム型 RI 密度計が水資源開発公団で開発された [3]。フレーム型では、今のところ水分計が開発されていないので湿潤密度の測定しかできないが、フレーム型 RI 法の出現によって、フィルダムのすべてのゾーンで密度を RI 法で測定できる条件が整ったことになる。その後、筆者も、フレーム型 RI 密度計の測定を自動化することによって連続データが得られるように改良する [4]とともに、ロック材料だけでなくフィルター材料やコア材料へと適用範囲を拡張してきた。そして、表面型 RI 密度計をベースにした（必要に応じてフレーム型 RI 密度計も併用する）密度評価法を前提とした新しい盛立試験の方法と、そこで得られる多点数データを用いて統計的な観点から合理的に締固め度を評価する手法などを提案しており、実際にこれらをコア材料、フィルター材料、ロック材料の盛立試験に応用して有効性を検証してきた。

以上がわが国の締固め施工分野において、RI 法が一般的に利用されるようになるまでの開発と発展のあらましである。その後、筆者は**第 2 章**で述べた従来の表面型 RI 密度計の問題点を解消するため、これまでの固定接地式に代えて、浮上自動走査式の新しい表面型測定器を開発した [5]。これによって、１測点あたりの測定容積が従来の表面型の RI 密度計に比べて 10 倍以上に拡大され、従来の表面型 RI 法の最大の課題であった測定容積の問題を根本的に解決することができた。

現在、フィルダム材料に適用可能な RI 密度計を整理すると**表－3.1** のようになる。まず、測定深度 30cm までの転圧層全体の密度を測定する表面型と転圧層内部の鉛直方向の密度

表－3.1　RI 密度・水分計の分類

測定領域	測定方式	測定方式の細分	備　　考
表　層　部	表　面　型	固定式・接地型	従来型
		自動走査式・浮上型	土木研究所 フィルダム研究室
転圧層内部	フレーム型	固定式・フレーム型	水資源開発公団
		自動走査式・フレーム型	土木研究所 フィルダム研究室

分布を測定するフレーム型に分けられる。ここで、表面型の固定接地式は検出部を地表面に接地して静止状態で測定するものであり、従来からある表面型 RI 密度計は全てこのタイプである。これに対して検出部が定速度で回転しながら密度を測定する方式を自動走査方式と呼ぶ。フレーム型にも同様に固定式と自動走査式がある。フレーム型の自動走査式は深さ方向の直線走査で密度を連続測定している。

3.2　自動走査式 RI 密度計（SRID）の開発

3.2.1　従来の表面型 RI 密度計の問題点

前章で述べたように、フィル材料の締固め密度を評価するときには、多点数のデータを必要とすることから、密度を測定するために用いられる試験法や測定法は、次の二つの基本的な要件を満たしていることが求められる。

a．盛立て材料の最大粒径に比べて、１測点あたりの測定領域が十分大きい。
b．測定作業が容易で測定時間が短い（必要かつ十分な数のデータが所定の時間内に得られること）。

これらの要件に照らして、従来の表面型 RI 密度計の課題と限界を整理すると次のようになる。

図－3.1　固定式大型 RI 密度・水分計の構造

写真－3.1　固定式大型 RI 密度・水分計

(1) 測定容積

写真－3.1、**図－3.1** はフィルダムで用いられている表面型の大型密度水分計の代表例である。従来の表面型では、平坦に均した地盤面に底面が密着するように測定器をセットして密度と含水比を測定する。**表－3.2** に測定器の仕様を示し、**図－3.2** に測定フローを示す。

RI 法は間接測定法であるため、置換法のように測定領域を明確に定義することはできないが、RI 法の測定領域は**図－3.3** に示すように、鉛直断面内の測定領域（測定深さ）と水平面内の測定領域（簡単に測定面積と呼ぶ）に分けて考えるとわかりやすい。透過型 RI 密度計の鉛直断面内の測定領域は線源の挿入深さによって決まり、ガンマ線の中心透過距離（線源と検出器を結ぶ直線距離）を対角線とする長方形で定義するのが妥当と考えられる。一方、ここでは測定面積を、測定地盤面の上方からみて線源から検出器に向かって放射状に開いた扇形で定義する。これらはもちろん実際の測定影響範囲を正確に表現しているわけではない。RI 法と置換法、あるいは RI 密度計の異なる機種間で測定容積の違いを大雑

表－3.2 固定式大型 RI 密度・水分計の仕様（土研式）

名　　称	固定式・接地型 RI 密度計・水分計 （略称　表面型）
測定方式	密度：ガンマ線透過型 水分：速中性子線透過型
測定深さ	密度：30cm 水分：30cm
透過距離	密度：50cm 水分：37cm
測定時間	1 分（標準）
線　　源	密度：ステンレスカプセル密封 ^{60}Co2.6 メガベクレル （半減期 5.263 年） 水分：^{252}Cf1.1 メガベクレル （半減期 2.65 年）
検 出 器	密度：シンチレーション検出器 水分：ヘリウム 3 管

注） BG 測定とは、自然放射線(バックグラウンド)の影響を補正するための測定

図－3.2 固定式大型 RI 密度・水分計測定フロー

把に比較するときの目安となるように、かなり割り切って概念的に定義したものにすぎない。したがって、測定面積の大きさを示す扇形の半径 r や中心角 $\Delta\theta$ の大きさもおおよそのイメージを示唆するものでしかない。

材料の粒径に比べて測定領域が小さすぎると、平均密度に偏り誤差が現れたり、データのばらつきが大きくなる可能性がある。例えば、**図－3.4** に示すように水平面内の礫の分布状態にムラがあると、検出器の設置方向よって密度が異なってくる。深さ方向についても同様である。固定式 RI 密度計の測定面積を増やすためには、線源棒を挿入する線源孔を中心として測定器本体の設置方向を順次ずらして測定を繰り返し、その平均値を求めればよい。実際、これまで粗粒材料の密度測定では、90 度ずつ回転して 4 方向の測定が行われてきた。後に述べるように**写真－3.1** に示した機種の場合、全周をカバーするためには 12 方向以上の測定が必要であるが（**3.2.2 項(7)**参照）、方向数に比例して測定時間や表面処理の時間が増すため、**3.2.1 項**で述べた基本的要件の**b**.と相容れなくなり、品質管理などの実務において大きな負担になる。したがって、一回の測定でカバーできる測定面積をできるだけ大きくすることは基本的に重要な課題である。他方、測定深さの拡大に関しては、わが国の表面型 RI 密度計（密度水分同時測定器）で一般的に用いられている極低レベルの線源を用いる限り、現状の 30cm 以上の拡大には限界がある。このため、現状では測定面積のみに拡大の余地がある。

図－3.3　測定領域の概念図

図－3.4　測定方向間の密度のばらつき

(2)　測定時間の短縮と省力化

従来の表面型 RI 測定器は、平坦な地表面を前提にして較正されているために、実際に測定しようとする地盤面も平坦であることが必要である。不陸のある状態で測定すると、密度と含水量が過小評価されてしまう。しかし、粗粒材料を盛立てる地盤では、**図－3.5** に示すように転圧後においても地表面に不陸が残ることが多い。4 方向測定に必要な、直径 1m 程度の円内を平滑にするのは、かなりの労力と手間がかかる。測定面の凹部に砂や細粒土などを薄く敷均して平坦面を作って誤差をできるだけ小さくすることがあるが（それでもゼロにはならない)、これらの事前の準備作業に測定そのものよりも多くの時間がかかってしまう。表面型の測定時間の短縮と省力化には、この事前の準備作業を簡素化するか、できればこれを回避する方策を講じて、ある程度の不陸があっても測定できるようにすることが望ましい。

図－3.5　測定地盤の状態

3.2.2　自動走査式 RI 密度計（SRID）

(1) SRID の開発経緯

a)　開発目標

自動走査式 RI 密度計（Scanning Radio Isotopic Density Meter：略称 SRID）の開発においては、従来の表面型 RI 密度計の問題点を克服するために、次の 3 つの点を開発目標に定めた。

① 測定面積を限界まで拡大する。これを実現するために、浮上して一定速度で回転しながら測定を行う自動走査式を取り入れる。

従来の RI 密度計が接地固定式（以降、従来の RI 密度計を単に固定式と呼ぶことにする）であるのに対して、SRID では浮上走査式を導入している。SRID は検出部を測定面から 50mm 浮上させた状態で、線源棒を軸にして一定速度で回転しながら 1 周 360 度の走査を行う。走査時間は 1 分である。走査円の直径は密度検出部で 80cm、水分検出部で 48cm（それぞれ検出器の中心と線源間の水平距離の 2 倍）である。測定深さを 30cm とした場合、密度測定におけるガンマ線の地中透過距離が約 50cm となる。すでに指摘したように、これは低レベルの微弱線源を用いるという制約のもとでは分解能の面からほぼ限界に近い値であり、密度と水分の同時測定ではこれ以上透過距離を大きくすることは極めて困難である。したがって、測定深度 30cm の場合、SRID は表面型で達成できる最大の測定容積をもっているといえる。**図－3.6** に SRID と固定式の測定容積の違いを概念的に示す。なお、従来の固定式と SRID の測定容積の比較に関しては以降の **(7)** で詳しく述べる。

図－3.6　SRID と固定式の測定容積の比較(概念図)

②　測定地盤面が平坦であることを前提としない。

SRID では固定式のように測定地盤面を平滑に整地する代わりに、非接触型距離センサーを用いて走査円周上の浮上高さの変動（不陸）の分布を測定し、設計浮上高さ L＝50mm からの差に起因する較正曲線のずれをソフト的に自動補正する方法を採用している。これにより、SRID では測定作業全体の所要時間が大幅に短縮され、多点数測定が容易になった。

③　源挿入孔の削孔に電動ドリルを用いた専用の簡易削孔器を使用し、測定点を無作意に選べるようにすると同時に、測定の準備作業にかかる労力と時間を減らす。

すでに述べたように、フィルダムの盛立施工では大型施工機械を用いて自然の材料を大量に処理するために、施工エリア内では粒度の変動に伴う密度や含水比のばらつきが生じることは避けられない。したがって、盛立層全域（管理対象ロット）の平均密度を正確に評価するときには、測定点が偏って選定されてはならない（標本の無作意性）。**図－3.7** に示すように、測定点を出来るだけ均等に配置すべきである。従来の固定式では、線源棒を挿入するための細孔を、人力によるハンマー打撃で削孔していたため、削孔中に岩礫につきあたるとそれ以上は貫入できず、測定位置を変更する必要があった。このため実際の測定では、岩石や大きな礫が相対的に少ない場所が選ばれてしまう傾向があり、このようなデータサンプリングは偏り誤差をもたらす原因になる。この問題を回避するために SRID では、線源孔の削孔に小型の電動ドリルを用いた専用の簡易削孔器を使用することとした。電動ドリルを用いて削孔すると容易に岩石を貫通する（**写真－3.2**）ので、大きな岩石や礫の分布状況に影響されずに任意の測点で測定できるようになった。これは時間の短縮と省力化という作業面のメリットのほかに、測定点選択の無作意性という意味で重要である。**図－3.8** にハンマー打撃と電動ドリルの削孔状況の違いを概念的に示す。

図－3.7　無作意な測定点の選定

図－3.8　ハンマー打撃と電動ドリルの比較

写真－3.2　ドリル削孔で貫通した岩石

b) 開発の手順

SRID は、開発目標を達成できる可能性を探る個別要素の基礎実験を終えてから、**図ー3.9** に示すように三つの段階を踏んで開発をすすめてきた。試作実験器の段階では、まず較正試験を行って基本仕様を定めるとともに、統計ノイズや分解能、測定容積などの基本特性を評価した。この段階で開発目標に掲げた基本的な要件を達成していることが確認できたので、最初の現場試験を実施して固定式との比較を行って SRID の性能を評価した。しかし、測定器の重量が一人で扱うには少し大きすぎて操作性と機動性にかなり課題が残ったので、主としてこの問題をクリアするために、設計を再検討して実用モデル器を作製した。大幅な軽量化を試みた結果、実用モデル器では機動性の難点が解消された反面、その代償として統計ノイズは約 1.5 倍に増えたが、それでもフィル材料の密度のばらつきに比べると十分小さいことを確認した。さらに較正試験方法を再検討して較正曲線の信頼性を保証するために多数の供試体を作製して較正試験を実施した。測定深さ 30cm のほかに 20cm の測定にも対応すべく、20cm 測定用の較正式もあわせて決定した。実用モデル器は基本性能と機能性の両面で開発目標を達成できたと判断した。しかし、**図ー3.10** を見ればわかるように、全体の形（検出器の向き）が対称になっていないので操作性の面でまだ若干の問題が指摘された。そこで密度検出器を水平配置に変更して、形の面でも質量バランスの面でもほぼ左右対称にして操作性を改善し、改良モデル器を完成させた。**図ー3.10** および**表ー3.3** に SRID 完成までの構造および仕様の変遷を示す。実用モデル器と改良モデル器の仕様は同じである。

図ー3.9 開発のフロー

試作実験器の概要

A；密度検出部
B；走査駆動部
C；水分検出部
D；線源部

実用モデル器の概要

A；密度検出部
B；走査駆動部
C；水分検出部
D；線源部
E；不陸モニター
F；アンテナ

改良モデル器の概要

A；密度検出部
B；走査駆動部
C；水分検出部
D；線源部
E；不陸モニター

図－3.10　SRID の構造の変遷

表－3.3　SRID の仕様の変遷

試作実験器の仕様

測定方法	密度：ガンマ線透過型 水分：速中性子線透過型
走査方式	自動円周浮上走査 （浮上高さ 50mm、 ±15、30mm 調整可）
測定深さ	30cm
走査速度	360 度／分
線　　源	密度：^{60}Co2.6 メガベクレル 水分：^{252}Cf1.1 メガベクレル
検 出 器	密度：Na I シンチレーション 検出器×1 本 水分：^{3}He 比例計数管×2 本
質　　量	約 35 kg

実用モデル器の仕様

測定方法	密度：ガンマ線透過型 水分：速中性子線透過型
走査方式	自動円周浮上走査 （浮上高さ 50mm）
測定深さ	20cm および 30cm
走査速度	360 度／分
線　　源	密度：^{60}Co2.6 メガベクレル 水分：^{252}Cf1.1 メガベクレル
検 出 器	密度：Na I シンチレーション 検出器×1 本 水分：^{3}He 比例計数管×1 本
重　　量	約 17 kg

改良モデル器の仕様

測定方法	密度：ガンマ線透過型 水分：速中性子線透過型
走査方式	自動円周浮上走査 （浮上高さ 50mm）
測定深さ	20cm および 30cm
走査速度	360 度／分
線　　源	ステンレスカプセル密封 密度：^{60}Co2.6 メガベクレル 水分：^{252}Cf1.1 メガベクレル
検 出 器	密度：Na I シンチレーション 検出器×1 本 水分：^{3}He 比例計数管×　1 本
重　　量	約 17 kg

(2)　SRID の構造と測定手順

a)　測定器の構造

図－3.10 に示されているように、地表面にセットされた状態の SRID は、地盤中に挿入された線源棒とその上のベースプレート上にセットする測定器本体からなる。SRID の本体部は、中心に位置する走査駆動部とその両側に地盤面から 5cm 浮かせて互いに向かい合うように対置する密度検出部と水分検出部から構成され、線源棒を中心軸にしてこれらの検出部が一回転しながら透過ガンマ線と透過速中性子線を走査することによって、密度および含水量を同時に測定する。測定地盤面の不陸は密度検出部内に取付けられた非接触型距離センサーで走査される。測定データは内蔵スケーラに取り込まれ、画面上に測定結果を表示すると同時にプリントアウトされる。測定と走査駆動はすべてマイコンで制御されており、SRID をセットしてスタートボタンが押されてから一分後に測定が完了して結果が表示されるまで、すべてのプロセスが自動的に処理される。SRID の全体重量（線源棒とベースプレートを除く）は約 17kg であるが、小移動時の持ち運びや地盤面へのセッティングなどは比較的容易である。**写真－3.3** に SRID の概観図を示す。

写真－3.3　SRID の概観(改良モデル器)

b)　測定の手順

SRID の測定手順は以下に示すように非常に簡単である（**図－3.11**）。

① 測定点を決める。無作意に選ぶためには**図－3.7** に示したグリッドを組むのもひとつの方法である。

② 測定位置において簡易削孔器（**写真－3.4**）を用いて、線源棒を挿入するためのガイド孔（孔径 19mm）を削孔し、その中に線源棒を挿入する。線源棒の上端には円盤状のベースプレート（直径 15cm）が固定されており、これを地盤面に当てることによって線源は所定の測定深さにセットされる。

③ ベースプレートの上に測定器本体を乗せる。

④　スタートボタンを押して RI 測定を開始する（ベースプレートの下に線源棒を装着してスキャニングする測定を RI 測定と呼ぶ)。

⑤　RI 測定が終わると、測定器本体を一旦取り外してベースプレートから線源棒を切り離し、線源を装着していないダミー棒に取り替えてガイド孔に挿入し直す。そして、もう一度ベースプレートの上に測定器本体をセットする。

⑥　再度スタートボタンを押して、大気環境と測定地盤に存在する自然放射能（バックグラウンド：簡単に BG と呼ぶ）の測定を行う（これを BG 測定と呼ぶ)。RI 測定だけでは線源から放射されたガンマ線と BG ガンマ線がともに検出されてしまうので、密度の測定に無関係な BG 成分を除去するために BG 測定が必要である。BG 測定の要領は線源を地中にセットしていない点を除いて、RI 測定と全く同じ操作を繰り返すだけである。BG の強度は地質や地盤の密度によって変化し、場所や天候などの環境条件によっても差がでるので、BG 測定は各測点において RI 測定とペアで行う必要がある。したがって、1ヶ所あたりの SRID の測定時間は RI 測定と BG 測定でそれぞれ１分ずつ計２分かかる。

⑦　BG 測定が終わると、全ての測定結果が画面上に表示されるとともに、プリンターに出力されて測定を完了する。

図－3.11　SRID の測定手順

写真－3.4　簡易削孔器

(3) SRID の較正曲線

RI 密度水分計の場合、地盤中を透過してくるガンマ線や速中性子線の量は、それぞれ地盤の締固め密度と水素原子の含有量によって定まる。詳しくは**付録 A** を参照。これらの関係を表したものが較正曲線である。また、較正曲線を近似式で表示したものが較正式である。一般に透過型の較正曲線は指数関数で近似されることが多い。密度較正式はガンマ線の計数率比 R_ρと湿潤密度 ρ_tとの関係を表す実験式である。同様に水分較正式は、速中性子線の計数率比 R_m と等価含水量 $\rho_m{}^*$との関係を表す実験式である。これらの実験式の定数を具体的に決定することが較正試験の目的である。較正定数は機種ごとに異なるが、一度決定すれば同じ機種の全ての測定器に適用されるので、測定器ごとに較正試験を行う必要はない。較正試験は一般にメーカー側で実施され、測定器のプログラムに書き込まれて提供されるので、較正式はユーザーから見えなくなっている。しかし、較正式は RI 密度計の精度や信頼性を左右する決定的な要素の一つであり、RI 法の特性を理解するためにも重要である。

RI 法では、現場測定時に直接計測されるガンマ線や速中性子線などの放射線の強度は一般に単位時間あたりのカウント数で表し、（現場）計数率と呼ばれている。SRID の場合は単位時間を 1 分としており、計数率は cpm (count per minute) 単位で表す。さらに計数率を以下に述べる標準計数率で除したものを計数率比と呼ぶ。較正曲線の縦軸が計数率ではなく計数率比で表示されるの理由は、線源の強度（単位時間あたりに放出されるガンマ線や中性子線の数）が時間とともに減衰するからである。もし線源の強度が常に一定であれば、較正曲線の縦軸は計数率で表示すればよい。しかし、RI（ラジオアイソトープ）の線源強度は時間とともに指数関数状に連続的に減衰してゆき、減衰する速さは、ある時点の強度が半分に低下するまでに要する時間で示され、これを半減期と呼んでいる。したがって、ある時点の線源強度を N_0、この線源の半減期を T 年とすれば、その時点から t 年経過したときの線源強度を N は次式で表される。

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} \qquad (3.1)$$

SRID の密度測定に用いられている ^{60}Co と水分測定に用いられている ^{252}Cf の半減期は、それぞれ 5.271 年、2.645 年である。線源の減衰があるために計数率で表示した構成曲線を用いると、較正曲線が時間とともに縦軸に沿って下向きに移動することになり、密度や含水量が同じであっても測定する時期によって得られる結果が異なってしまうので具合が悪い。このような不都合を回避するために、較正式は測定される計数率そのものではなく、これをその時点の標準計数率で規格化した「計数率比」を用いて表現する。このようにすれば、線源の自然減衰に伴う強度低下は表に現れず、較正曲線は時間的に不変なものになる。標準計数率は現場測定に先立って標準計数台（Standard Box : 標準計数率をチェック

するために用いられる人工の測定台。測定台そのものが変形したり劣化したりしないことや、測定時の環境条件に左右されないことが必要である。）の上に測定器をセットして測定するのがこれまで一般的であった。しかし、線源の減衰曲線が十分正確に予測できるときには、標準計数率をその都度チェックする必要はなく、減衰曲線から直接求めればよい。SRID の場合も標準計数率は内部プログラムが管理しており、測定時の年月日を参照して減衰式から自動的にセットされるので、標準計数率の測定は不要であり、外部から入力する必要も全くない。

水分較正式の横軸が土質工学的含水量 ρ_mではなく、等価含水量 ρ_m^*で表示する理由は**付録 A.2 節（3）**で説明した通りである。

a） 試作実験器の較正曲線

① 較正曲線

最初に製作した試作実験器の較正試験は、**図－3.12**、**写真－3.5** に示すように、直径 120cm、高さ 40cm の鋼製モールド内に、含水比調整した材料を所定の密度に締固めて供試体を作製し、供試体の採寸密度（供試体の重量と採寸して求めた体積の比）と炉乾燥含水比を決定するとともに、供試体上で SRID の測定を行って応答計数率比を求める方法で行った。ひとつの供試体で一組の較正データが得られる。この作業を含水比と密度を変えながら何度も繰り返して供試体を作製し、幅広いレンジの較正データを収集しなければならないので、較正試験には多大の労力と時間が必要になる。SRID の測定では浮上高さを変えて測定を繰り返し、浮上高さの違いが較正曲線に与える影響についても検討した。較正試験に用いた材料は、**図－3.13** に示す粒度分布をもつロック材料とまさ土である。**図－3.14** に試験を行った 27 供試体の採寸密度と密度計数率比の関係を示す。図から明らかなように、図中に破線で示したライン（これは採寸較正データを単純に指数回帰して求めたものである）に近い較正曲線になることはほぼ明らかであるが、較正データの分布にはばらつきが見られ、

単位　mm

図－3.12　較正用モールド

写真－3.5　較正供試体の作製状況

図－3.13 較正試験用材料の粒度(試作実験器)

一本の曲線で回帰したときには残差変動がかなり含まれることを示唆している。この程度のまとまりでは、較正曲線に十分な信頼性が保証されているとはいい難い。較正データに無視できないばらつきがでた最も大きな理由は、供試体内の密度が十分に均質でないために、SRID が実際に測定している領域内の平均密度が、供試体全体の平均密度（すなわち採寸密度）に合致していない点にある。実際、例えば積層したガラス板の上で SRID の測定を行って、積層厚さと密度計数率比の関係をプロットしてみると、ほぼ正確に指数関数曲線上にのってくることが確かめられており、もし、供試体内全域で密度が一様であれば、このようなばらつきが生ずることはないと考えられるからである。残念なことに、測定容積の大きい SRID の較正試験では必然的に容積の大きい供試体が必要になる。しかしながら、土質材料を用いて十分な容積をもち、しかも密度が一様な供試体を作製するのはきわめて困難なため、ある程度のばらつきがでることは避けられない。これまでの固定式（**写**

図－3.14 採寸密度と密度計数率比の関係

表－3.1 参照）の較正試験では、60cm×60cm の水平断面をもった矩形モールドを使用しており、供試体の高さは 40cm である。SRID の較正試験では高さは同じであるが、回転走査式であることから直径 120cm の円形モールドを用いている。固定式の矩形モールドと比べると、円形の供試体の断面積は 3 倍強になっており、このため均質性を保つことがいっそう困難になったものと考えられる。もちろん、矩形モールドの場合でもガラスのように密度が一様な供試体が造れるわけではないが、供試体内の容積が小さくなるにつれて密度のばらつきも減少するので、SRID の円形供試体に比べればより均質な供試体を作製でき、それだけ較正試験の精度は高くなる。そこで SRID の較正試験の後半では採寸密度を基準にする従来の較正方法を断念して、すでに十分な較正実績をもっている大型の固定式を用いて、SRID と同じ線源孔を中心として多点数測定を行い、その平均値を基準値として採用することにした。このため、供試体の採寸密度とともに固定式 RI 測定を追加して行い、これを RI 基準密度とした。走査式か固定式かの違いを別にすれば、SRID と固定式 RI 密度計は、構造と基本諸元がほとんど同じであることから、この方法は理にかなっているといえる。なぜなら、供試体の多点数測定によって固定式の測定領域を出来るだけ SRID の測定領域に近づけてやれば、SRID の較正試験においても、固定式の較正式とほぼ同等の信頼性を保証できるからである。

図－3.15 は、最終的に較正式を決定するために用いた 20 個の較正データのプロットと指数回帰で求めた密度較正曲線を示したものである。図にプロットされている較正データのうち、13 個の黒く塗りつぶしたデータが、8 方向測定で求めた固定式の平均値と SRID の計数率比との関係を示したものである。白抜きの 7 個のデータは、較正データの数をでき

注)　破線は図－3.14 の曲線

図－3.15　SRIDの密度較正曲線

るだけ多く確保するために、較正試験の前半で得られた固定式の測定データがない 14 個の（採寸）較正データのグループから、固定式の基準密度を採用した較正データの分布傾向に比較的よくマッチしているデータを選別して較正データに加えたものである。**図－3.14** と比較すればわかるように、ばらつきはかなり少なくなっている。また、採寸較正データで求めた回帰曲線とは明らかに差がある。20 個の較正データから決定した試作実験器の密度較正式は次のようになる。

$$\ln R_\rho = \ln A + B \cdot \rho_t \qquad (3.2)$$

$A = 1.8271$，$B = -1.6855$（標本数 $n = 20$，決定係数 $r^2 = 0.9920$）

次に、水分較正式も密度計の場合と同様の手順で決定することができる。基準含水量 ρ_m は湿潤密度 ρ_t と、供試体から採取した試料の含水量試験で求めた炉乾燥含水比 w から算出する。すでに密度計の較正式を決定しているので、湿潤密度はこれを用いて求めればよい。乾燥密度 ρ_d は湿潤密度と炉乾燥含水比から定まり、ρ_m は両者の差で与えられる。

$$\rho_m = \rho_t - \rho_d = \rho_t \cdot \frac{w}{1+w} \qquad (3.3)$$

水分較正曲線の横軸は基準含水量ではなく等価含水量であるため、密度較正式のように単純指数回帰によって較正定数を決定するためには、較正試験に用いた各材料の含水補正係数（α 値）を予め決定しておかなければならない。α 値は土の強熱減量や自然含水比、粗粒材料であれば母岩の風化度などと、ある程度の相関性があることが知られている。粘性土は砂や砂質土よりも一般に α 値は大きく、粗粒材料の α 値も母岩の風化が進むにしたがって大きくなる傾向を示す。しかし、残念ながら現状では何らかの材料試験を行って正確な α 値を求める確かな方法がないので、各材料の α 値も回帰変数として扱い、これらの変数を含めた多重回帰分析を行って、水分計の基本較正定数 C、D と各材料の α 値を同時に決定する方法を用いている。試作実験器の較正試験では三種類の材料が用いられているので、5 個の較正定数を求めることになる。

$$\ln R_m = \ln C + D \cdot \rho_m^* = \ln C + D \cdot \rho_m + D \cdot \sum_{i=1}^{3} \alpha_i \cdot \rho_d \qquad (3.4)$$

上の式で乾燥密度 ρ_d は層別因子も兼ねており、該当しない α の項の乾燥密度はゼロとする。較正試験を行った全 27 個の全ての較正データを用いて多重回帰分析を行い、基本較正定数と各材料の α 値を次のように決定した。

C＝8.1465，D=-7.3781　（標本数 n＝27，決定係数 r^2＝0.9918）

α_1＝0.183　（ロック材１）

α_2＝0.176　（ロック材 2）

α_3＝0.149　（まさ土）

図－3.16 に多重回帰分析から得られた試作実験器の水分較正曲線と、等価水分量で表示した水分較正データのプロットを示す。

図－3.16 SRIDの水分較正曲線

② 浮上高さの違いによる較正曲線の差異

浮上高さ（平坦な地盤面と検出器の離間距離）をクリアランスと呼び記号 L で表す。浮上高さの違いが SRID の較正曲線に与える影響を調べるために、較正試験ではクリアランス $L= L_0$=50mm を基準として（このときの較正曲線を標準較正曲線と呼ぶ)、供試体測定時のクリアランスを $L= L_0, L_0\pm$15mm, $L_0\pm$30mm の 5 段階に変えて較正データを採取した。SRID の密度較正式に含まれる基本的な較正定数 A および B とクリアランスの差 $\Delta L=L-L_0$ との間に次のような対数線形関係を仮定した。以降、ΔL も簡単にクリアランスと呼ぶ。

$$\ln A = a_0 + a_1 \cdot \Delta L \qquad (3.5a)$$

$$B = b_0 + b_1 \cdot \Delta L \qquad (3.5b)$$

これをさきほどの(3.5)式に代入すると

$$\ln R_\rho = a_0 + a_1 \cdot \Delta L + b_0 \cdot \rho_t + b_1 \cdot \rho_t \cdot \Delta L \qquad (3.6)$$

(3.6)式において密度 ρ_t とクリアランス ΔL の交差項 $b_1 \cdot \rho_t \cdot \Delta L$ が出てくるが、これを無視しても得られる較正式はほとんど変わらないことがわかったので、交差項を無視した次の

回帰式を仮定した。

$$\ln R_\rho = \beta_0 + \beta_1 \cdot \Delta L + \beta_2 \cdot \rho_t \qquad (3.7)$$

(3.7)式からわかるように交差項を無視した結果、較正定数 B は ΔL によらないことになり、ΔL の影響は較正定数 A だけに反映されることになる。すなわち、クリアランスが L=50mm と異なるときの較正曲線は、基準較正曲線を片対数軸上で上下に平行移動した曲線となる。標本数 n＝100（供試体数 20）の較正データによる多重回帰分析の結果、得られた回帰係数は次の通りである。

β_0＝0.56147　　β_1＝0.00066379　　β_2＝－1.6669　　（決定係数 r^2＝0.9892）

図－3.17 にクリアランスを変えたときの密度較正曲線の差異を示す。図に示されているように、クリアランスの違いによる密度較正式の差はそれほど大きくないことがわかった。

図－3.17　クリアランスの影響(密度較正曲線)

水分較正曲線に与えるクリアランスの影響についても、密度計の場合と同様にして調べた。すなわち、基本較正定数 C、D と ΔL の間に一次式を仮定して交差項を無視し、水分補正係数とクリアランスの影響を考慮した(3.9)式の水分較正式を用いて多重回帰分析を行った。

$$\ln C = c_0 + c_1 \cdot \Delta L \qquad (3.8a)$$

$$D = d_0 + d_1 \cdot \Delta L \qquad (3.8b)$$

$$\ln R_m = \beta_0 + \beta_1 \cdot \Delta L + \beta_2 \left(\rho_m + \sum_{i=1}^{3} \alpha_i \cdot \rho_d \right) \qquad (3.9)$$

標本数 n=135（供試体数 27）の較正データによる多重回帰分析の結果、得られた回帰係数は次の通りである。

β_0=2.09759　　β_1=－0.0027795　　β_2＝－7.3781　　（決定係数 r^2=0.9918）

図－3.18 にクリアランスを変えたときの水分較正曲線の差異を示す。水分計の場合も密度計と同様に、クリアランスの違いによる較正式の差があまり大きくないことがわかった。

図－3.18　クリアランスの影響(水分較正曲線)

以上の結果より、L=20～80mm の範囲内ではクリアランスの違いが SRID の基本特性に大きく影響することはないことが示された。したがって、検出器の浮上高さは RI の特性面よりも測定器の操作性、例えば実際の現場で予想される不陸の大きさ、測定器のセッティングのし易さ等を考慮して設定すればよく、最終的に SRID の浮上高さを L＝50mm に決定した。

b) 実用モデル器の較正曲線

SRID の実用モデル器は試作モデル器から構造をかなり変更しているので、その較正曲線は改めて較正試験を実施して決定する必要がある。実用モデル器では測定深度 30cm の他に測定深度 20cm の測定にも対応するために、測定深度 20cm の較正試験もあわせて行った。

実用モデル器の較正試験に用いた材料の粒度分布を**図－3.19** に、較正試験のフローを**図－3.20** に示す。実用モデル器の較正試験では、密度や含水量の較正範囲を出来る限り広くするために、砕石からロームまでかなり幅広い材料を用いている。試験では容器の中心に

図－3.19　較正試験用材料の粒度(実用モデル器)

図－3.20　較正試験の手順（1 供試体あたり）

線源孔を設け、まず固定式で 8 方向の測定を行って湿潤密度 ρ_tと等価含水量 $\rho_m{}^*$を求め、これらを基準密度および基準等価含水量とした。SRID の測定では、1 周／分の走査を 8 回繰り返した。

① 測定深度 30㎝ の較正曲線

4 種類の材料を用いた 50 ケースの較正試験から得られた、湿潤密度 ρ_t と密度計数率比 R_ρ との関係および等価含水量 $\rho_m{}^*$ と水分計数率比 R_m との関係を**図－3.21** に示す。基本較正定数は以下の通りである。参考のため、基準となる湿潤密度および等価含水量を定め

図－3.21 SRID の較正曲線（実用モデル器：測定深さ 30cm）

るために用いた、固定式の較正曲線を**図－3.22** に示す。

密度較正式：$\ln R_\rho = \ln A + B \cdot \rho_t$

A＝5.5372　　B＝-1.8205　　（標本数 n＝50，決定係数 r^2＝0.9978）

水分較正式：$\ln R_m = \ln C + D \cdot \rho_m^*$

C＝0.8866　　D＝-7.3616　　（標本数 n＝50，決定係数 r^2＝0.9993）

図－3.22　固定式の較正曲線（測定深さ 30cm）

これらの較正式の決定係数は、いずれも 0.999 程度の値を示しており、**図－3.21** に示されている較正曲線と実際の較正データのプロットを見ればわかるように、信頼性の高い較正曲線が求められたと考えられる。

② 線源深さ 20㎝ の較正曲線

測定深さ 20cm に対する SRID の較正曲線と較正データのプロットを**図－3.23** に示す。**図－3.24** は基準となる湿潤密度および等価含水量を定めるために用いた、固定式の測定深さ 20cm の較正曲線である。SRID の基本較正定数は以下の通りである。測定深さ 30cm

図－3.23 SRID の較正曲線（実用モデル器：測定深さ 20cm）

のときと同様、回帰式の決定係数はいずれも 0.999 程度の値を示しており、信頼性の高い較正曲線であるといえる。

密度較正式：$\ln R_\rho = \ln A + B \cdot \rho_t$

A＝5.3361　　B＝-1.2431　　（標本数 n＝46，決定係数 r^2＝0.9990）

水分較正式：$\ln R_m = \ln C + D \cdot \rho_m^*$

C＝0.8134　　D＝-4.6420　　（標本数 n＝48，決定係数 r^2＝0.9990）

図－3.24　固定式の較正曲線（測定深さ 20cm）

(4) 不陸補正

a) 不陸に対する応答

SRID の測定では、走査円の中心に位置するベースプレートの下端面から所定の深さ（20cm または 30cm）に線源が保持されるようになっているので、ベースプレートの接地面が測定深度や地盤面の不陸を定義する基準面になる（**図－3.10** および**写真－3.3** 参照）。SRID では、特定の円周上で不陸をモニターして、その平均値を用いて不陸の影響を補正する方法を検討した。モニターする代表点としては、**図－3.25** に示すように、中心透過径路（検出器の中心と線源を結ぶ直線）が地表面と交差する点を選んだ。すなわち、回転軸の中心から d_ρが密度計不陸の走査半径に、d_m が水分計不陸の走査半径に相当している。SRID は密度検出器と水分検出器で走査半径が異なっている。二つの走査円上の不陸は一般に異なっており、これらの不陸に何らかの関連性がなければ、それぞれの検出器に対応する代表点で不陸をモニターする必要がある。

試作実験器の開発段階では、不陸（検出器と測定地盤面の離間距離）の影響をソフト的に補正する具体的な方法を模索するため、室内実験と現場試験を行った。室内実験では円形土槽内に所定の密度および含水比をもつ４つの供試体を作製し、測定面上に人為的な不陸を作ってそのつど SRID の測定を行った。ひとつの供試体ごとに、凹凸の状態や大きさが異なる 10 ケースのランダムな不陸状態を作って、不陸に対する SRID の応答（不陸に起因するカウントの変動）を詳細に調べた。

図－3.25 不陸の検出位置

写真－3.6　試作実験器の不陸計測装置

試作実験器で使用した不陸モニターは**写真－3.6** に示すような機械式のものであり、ゴムローラーの上下移動をポテンショメーターで検知している。SRID の測定を行った直後に SRID 本体を支持台から取り外し、代わりに支持台の上に不陸モニターをセットする。そして、密度計と水分計の代表点の不陸量をアナログ的に走査した。

図－3.26 と**図－3.27** に不陸がほとんどない測定面（供試体を作製した直後）と、人為的な不陸がある測定面での走査データの一例を示す。これらは同じ供試体で得られた結果である。SRID の測定では一周走査を 5 回連続して行っており、5 回の繰り返し走査データを全て示している。不陸の測定では一周走査を 3 回繰り返しており、その結果をそのまま示している。密度計と水分計は直線状に対置して同時に走査するので、測定した生データでは走査点の位相が 180 度ずれている。図では対比しやすくするため、この位相のずれを戻して、密度計と水分計の走査位置を合わせて表示している。不陸データについても同様である。折れ線で表されている密度計数率および水分計数率（単位 cps）は、サンプリングタイム 1 秒間（走査角度 6°に相当する）のカウントを示している。

これらの図を比べてみると、不陸の変化に反応して特に密度計数率比に顕著なゆらぎが現れていることがわかる。水分計数率比のゆらぎは小さく識別しにくい（カウント数が少ないので水分計の統計ノイズが相対的に大きくなっていることと、不陸の大きさに差があるため）が、わずかに不陸の影響が認められる。予想されるように、密度計では不陸が大きくなると計数率は増えて密度が低めに評価されることを示している。水分計の場合も同様の傾向を示唆しているように見えるが、密度計ほど敏感ではない。

図－3.26 不陸に対する応答(供試体の仕上り測定面)

図－3.27 不陸に対する応答(人工不陸の測定面)

b）不陸補正法の検討

不陸の影響を定量的に補正する方法を検討するため、まず走査円内の検出器底面と地盤面間の離間距離の一周平均値（クリアランスと呼び L で表す）と設計標準離間距離（50mm）との差 ΔL（クリアランス偏差と呼ぶ）を求め、較正式から得られる SRID の測定値（1 分間の測定値、すなわち一周走査の平均値）との関係を調べた。**図－3.28** に 4 つの供試体で測定されたクリアランス偏差 ΔL と SRID の測定値（不陸補正されていないので見かけの湿潤密度 ρ_t）との関係を示す。各供試体について 10 ケースの異なるクリアランス状態で測定を繰り返している。図からわかるように、ρ_t と ΔL との関係はいずれのケースでも直線で近似できることがわかる。等価含水量 $\rho_m{}^*$ でも同様の関係が得られている。ここで、各供試体ごとに ρ_t および $\rho_m{}^*$ と ΔL の一次回帰式を求めて、$\Delta L=0$（すなわち、クリアランス $L=$ 50mm）のときの値を基準値 ρ_{t0}、$\rho_{m0}{}^*$ とする。基準値に対する各不陸条件下で得られた密度と等価含水量の相対偏差を、次の式で算出する。

$$\Delta \rho_t / \rho_{t0} = (\rho_t - \rho_{t0}) / \rho_{t0} \qquad (3.10a)$$

$$\Delta \rho_m{}^* / \rho_{m0}{}^* = (\rho_m{}^* - \rho_{m0}{}^*) / \rho_{m0}{}^* \qquad (3.10b)$$

これらの湿潤密度および等価含水量の相対偏差と ΔL の関係をプロットすると、**図－3.29** のように整理できることがわかった。密度および等価含水量のばらつきは、それぞれ基準値に対して±1%の範囲内にあり、ばらつきが少ないことから、不陸の大きさを表現するインデックスとしてクリアランスの平均値を用いることができることを示している。両者の線形回帰式を求めると次のような結果が得られた。

$$\Delta \rho_t / \rho_{t0} = -0.00215 \cdot \Delta L \qquad (3.11a)$$

（標本数 n=40　　相関係数 r＝－0.9592）

$$\Delta \rho_m{}^* / \rho_{m0}{}^* = -0.00184 \cdot \Delta L \qquad (3.11b)$$

（標本数 n=40　　相関係数 r＝－0.9636）

クリアランスが基準値より 1cm 大きくなれば、湿潤密度の測定値は基準値より 2.15%減少し、等価含水量の測定値も基準値より 1.84%減少する。これらの結果から標準クリアランス 50mm に対応する湿潤密度および等価含水量を求める不陸補正式をそれぞれ次のように設定することができる（ΔL の単位は mm）。

密度不陸補正式：$\rho_{t0} = \rho_t / (1 - 0.00215 \cdot \Delta L)$　　(3.12a)

水分不陸補正式：$\rho_{m0}{}^* = \rho_m{}^* / (1 - 0.00184 \cdot \Delta L)$　　(3.12b)

ρ_t と $\rho_m{}^*$ は不陸補正されていない見かけの測定値、ρ_{t0} と $\rho_{m0}{}^*$ が不陸補正後の測定値である。

図－3.28　クリアランス偏差と湿潤密度および等価含水量の関係

図－3.29　クリアランス偏差と湿潤密度および等価含水量の相対偏差の関係

c）現場転圧面の不陸状況と不陸補正法の適用性

フィルダムのコア材料を用いて、約 20m 四方の試験ゾーンを造成して振動ローラで締固め、D（転圧回数 N＝10 回）、M（N＝4 回）、L の密度の異なる三つの試験ゾーンを設けた。L ゾーンは地表面を均しただけで振動転圧を行っていない。各ヤード内にそれぞれ 50 点の測点を選び、最初に転圧後の不陸が残っている測定面で SRID（試作実験器）の測定を行った。次いで線源孔を中心とした直径約 1m の円内が十分平滑になるように測定面を整形して

から、同じ線源孔で再度 SRID の測定をして、整形前後のデータを比較した。

図－3.30 に整形前の密度（不陸補正をしていない）と整形後の密度の相関を示す。振動転圧を行っていない L ゾーンではばらつきがやや大きく、破線で示した 1.96σ（σはヒストグラムの標準偏差）の分布範囲をはみ出すデータが数点ある。総じて等値線の下側に分布するデータが多く出現しており、全データの密度偏差の平均は 0.010 t/m³ となっている。これに対して**図－3.31** に示した整形後の密度と、整形前の密度を室内試験で求めた（3.12）式に代入して求めた不陸補正後の密度の相関図では、このような密度の偏りはほとんど消滅しており、データのばらつきも少なくなっている。全データの密度偏差の平均は 0.001 t/m³ まで減少している。整形を施すことによって、地表面の状態が変化する可能性があるため、厳密にいえば整形の前後で全く同じ地盤の密度を測っているとはいえない。しかし、30cm の測定深さがあるので整形による地表面の変化の影響は無視できると仮定すれば、両者の差は主として整形前の不陸に起因していると考えられる。

図－3.30 整形前後の湿潤密度の相関

図－3.31 整形後と不陸補正後の湿潤密度の相関

次に、整形前の不陸補正されていない含水比および不陸補正後の含水比と、整形後の含水比の相関を**図－3.32** および**図－3.33** に示す。密度の場合とは異なり、含水比の測定値は不陸補正をする前の方が多少大きく、全偏差の平均値は 0.22%となっている。不陸補正後でも 0.10%ほどの偏りが残っているが、補正前に比べると偏りは半分以下に低下している。含水比の場合は含水量だけでなく密度も関係しているので、不陸との関係は単純ではない。**図－3.32** で整形前の含水比が整形後よりも高くなったということは、水分計の不陸量が密度計より相対的に小さかった（**図－3.34** 参照）ことから、不陸に起因する密度の過小評価の方が上回ったことを意味している。

以上の結果から、ローラ転圧によって締固められた地盤の密度および含水比の測定において、室内試験で求めた不陸補正係数を適用すれば、地表面の平滑整形をしなくても不陸の影響を消去できることがわかった。しかしながら、筆者のソフト的な不陸補正の手法は、あくまでも試行的に見出した経験的な近似的処方であり、また確実に（あるいは平均的に）

図－3.32　整形前後の含水比の相関

図－3.33　整形後と不陸補正後の含水比の相関

有効性が確認できたにすぎないので、個々の測定点で不陸の影響を完全に払拭できるわけではない。したがって、SRID の測定点数を決めるときには、他のばらつきの要因に加えて不陸補正の近似誤差や確率誤差に起因するばらつきも考慮する必要がある。

図－3.34 は、現場で実際に測定された密度計のクリアランス偏差と水分計のクリアランス偏差の相関を示したものである。参考のため、室内実験で得られた相関もあわせて示している。図から明らかなように、二つのクリアランスにはかなり高い正の相関が認められる。水分計のクリアランスは平均的に見て、密度計のほぼ 60%になっていることがわかる。この値はクリアランスをモニターしている代表点の走査円の半径の比とだいたい等しい。これは中心軸から外側へ向かって放射状にほぼ直線的な不陸が形成されていることを示唆しており、振動ローラの転圧面では、複雑に変化するような不陸はほとんど見られないということを物語っている。このような状況は、振動ローラのような平滑ローラで締固められた盛立て面を実際に観察すれば、極めて自然な傾向であるのがわかる。タイヤローラのような非平滑ローラでは、このような状況は期待できないと考えられるので、不陸補正の有効性は別途確認する必要がある。タンピングローラの場合は表層部を剥ぎ取らない限り、どのような密度試験も不可能である。

密度計のクリアランスと水分計のクリアランスの間に高い相関があり、両者の関係が測定器の構造によってほぼ決まるという事実は、一方の不陸だけをモニターすればよく、測定器のコンパクト化やコストの低減に少なからぬメリットがある。実際、実用器では不陸を連続的にモニターするレーザセンサーを密度検出側に内蔵して密度計の不陸だけをモニターし、水分計の不陸は測定せず密度計の不陸量の 0.6 倍で補正することにしている。

図－3.34 密度計と水分計のクリアランス偏差の相関

d）実用モデル器の不陸補正係数と適用性

実用モデル器は試作実験器より大幅にコンパクトになっている。実用器のクリアランスは、密度走査のときにレーザセンサーが自動的に検出している。RI 測定に係わる基本ディメンジョンは試作実験器と変わっていないが、検出器の寸法と全体の形状寸法がかなり変わっているので改めて室内実験を行い、測定深さ 30cm と 20cm に対応する不陸補正係数を求めた。得られた結果を**図－3.35**～**図－3.38** に示す。それぞれの不陸補正係数も図中に示している。

図－3.35　クリアランス偏差と湿潤密度および等価含水量との関係（測定深さ 30cm）

図－3.36　クリアランス偏差と湿潤密度および等価含水量の相対偏差の関係
（測定深さ 30cm）

図－3.37 クリアランス偏差と湿潤密度および等価含水量の関係（測定深さ 20cm）

図－3.38 クリアランス偏差と湿潤密度および等価含水量の相対偏差の関係
（測定深さ 20cm）

これらの不陸補正係数の適用性を確認するために SRID（実用モデル器）の現場試験を行った。試作実験器を用いた現場での不陸補正試験では、測定地盤面の整形（平滑化）前後の測定値を比較して不陸補正の効果を検証したが、実用モデル器の現場試験では地盤面の整形を行わず、不陸補正した従来の固定式の結果と比較する方法で不陸補正の効果を検証している。

現場試験では、コア材料を転圧回数を変えて振動ローラで締固めた（転圧厚さ 30cm）7m×9mの試験ゾーンを隣接して 3 ゾーン造成し、SRID と固定式の測定を同じ測点で行って、全部で 126 個の比較データを得た（10 回転圧の H ゾーンで 60 点、4 回転圧の M ゾーンで 6 点、1 回転圧の L ゾーンで 60 点）。この試験ゾーンとは別に、振動転圧をしていないコアのストックパイル（La ゾーン）でも 30 個の比較データを採取した。SRID の密度は 4 回走査を行い、クリアランスの測定も 4 回測定している。一方、固定式では 4 方向の密度測定を行い、クリアランスは**写真－3.7** に示すようなゲージ板（L45.1cm×W20.0cm）を用いて手作業で測定した。1 方向の測定数は 6 点であり、密度検出器の位置で行っている（水分検出器の位置では測定していない）。したがって、固定式の密度計クリアランスは 24 個の実測値から求めた平均値である（4 方向×6 点）。

単位　mm

写真－3.7　固定式の不陸測定

図－3.39 に SRID のクリアランスと固定式のクリアランスの関係と両者のヒストグラムを示す。SRID のクリアランス（4 回走査の平均値）は基準値±20mm の範囲内（La ゾーンのデータを除くと－5～＋20mm の範囲に収まっている）にあるのに対し、当然のことながら固定式のクリアランス（4 方向測定の平均値）はすべてプラス側で、0～＋20mm の範囲に分布している。また、十分な転圧をしていないL、La ゾーンでは、相対的にクリアランスが大きくなっている。

図－3.39　SRID と固定式の密度計クリアランス

図－3.40 に不陸補正する前の SRID と不陸補正された固定式の相関を示す（乾燥密度と含水比）。測定深度はいずれも 30cm である。固定式は 4 方向の 1 分測定を行っておりプロット値は 4 方向測定の平均値で、SRID は 1 分 4 回の連続走査の平均値である。固定式の結果は SRID と同じ不陸補正係数を用いて補正している（すでに述べたように、ここで用いた固定式密度計は**図－3.1** に示した機種で、RI 測定における線源と検出器の配置関係が SRID と同じであるため、両者で同じ補正係数を用いることは少なくとも近似的に問題はない）。**図－3.41** は SRID と固定式の密度偏差（測定値の差）と含水比偏差の分布を示したものである（ただし、La ゾーンのデータは除いている）。不陸補正をしない場合、振動転圧で締固めた H、M、L 三ゾーンの SRID の乾燥密度や含水比には、明らかに不陸に起因する偏りが現れている。密度偏差と含水比偏差の平均値はそれぞれ－0.045 t/m^3、0.94 %となっている。一方、振動転圧をしていない La ゾーンでは偏りがほとんど見られない。これは密度

が低いときには不陸の影響がないということを示すものではない。すなわち、**図－3.39** に示したクリアランスの分布状況をみるとわかるように、締固めた H、M、L ゾーンのクリアランスの分布がプラス側に大きく偏っているのに対して、La ゾーンではマイナス側にもかなり多く分布していて（むしろマイナス側の分布の方が多い）、分布の正負の偏りが他のゾーンに比べて少なかったことを反映しているにすぎない。締固めを行っていない La ゾーンのように密度がかなり低い地盤では、SRID のベースプレートが地表面から若干沈み込むことがあるため、負のクリアランスが多くなったものと考えられる。十分に転圧した地盤でも転圧面にはうねりが残っているので、場所によっては負のクリアランスが出ることもあるがその絶対値は比較的小さい。

図－3.40　SRIDと固定式の比較(SRIDの不陸補正をしないとき)

図－3.41　密度と含水比の偏差分布(SRIDの不陸補正をしないとき)

SRID の不陸補正を行うと、**図－3.42** と**図－3.43** に示すように H、M、L ゾーンの密度の偏りは大幅に減少し、密度偏差と含水比偏差の平均値はそれぞれ－0.010 t/m³、0.64 %まで小さくなった。La ゾーンを除いた密度偏差と含水比偏差の標準偏差は、それぞれ 0.020 t/m³、0.48 %となっている。La ゾーンの相関は補正前とほとんど変わっていない。偏差データのばらつきは、大部分 SRID と固定式の測定領域の違いに起因しているものと考えられる。

図－3.42　SRIDと固定式の比較(SRIDの不陸補正をしたとき)

図－3.43　密度と含水比の偏差分布(SRIDの不陸補正をしたとき)

(5) 水分補正係数

a) 水分補正係数の定義

SRID では、**付録 A.2 節**の（A.3）式に示したように、水分補正係数α値を次式によって定義している。

$$\rho_m^* = \rho_m + \alpha \cdot \rho_d = \rho_m + \alpha \cdot (\rho_t - \rho_m) = (1-\alpha) \cdot \rho_m + \alpha \cdot \rho_t \qquad (3.13)$$

ここに、ρ_m^*は等価含水量（**付録 A.2 節（3）**参照）、ρ_mは炉乾燥含水比に対応する含水量、ρ_d、ρ_tはそれぞれ乾燥密度および湿潤密度である。α値は、SRID の測定を行った位置から試料を採取して炉乾燥含水比を求め、炉乾燥含水比と SRID で求めたρ_tからρ_mを計算して上式に代入すれば求められる。すでに述べたようにα値は一度求めれば、材料が変わらない限り変える必要はないが、土質の異なる複数の材料を測定の対象とするときには、材料ごとにα値を設定する必要がある。

b) 水分補正係数の分布

水分補正係数の分布特性を調べるため、フィルダムの盛立場において SRID の測定点から試料を採取した（コア材料 90 点、フィルター材料 63 点、ロック材料 31 点）。採取した試料の全量を用いて含水比試験を行い、各測点のα値を求めた。さらに、コア材料を採取した全測点、フィルター材料の 10 測点およびロック材料の 5 測点について、ふるい分けによる粒度試験を行い、細粒分（－0.075mm）および粗粒分（＋4.75mm および＋37.5mm）の含有率を求めた[6]。

図－3.44 に各材料の粒度分布を、**図－3.45** に求められたα値のヒストグラムを示す。また、炉乾燥含水比とα値の関係、粒度パラメータとα値の関係をそれぞれ**図－3.46**、**図－3.47** に示す。これらの図から次のことが考察される。

① 水分補正係数α値の分布は、いずれの材料でも近似的に正規分布とみなすことができる。ロック材料では分布形状が少し乱れているが、これは標本数が十分でないことによるものと考えられる。

② 各材料のα値を比較すると、コア材料に比べ、フィルター材料、ロック材料のα値は相対的に小さい。フィルター材料とロック材料のα値の差は小さい。すなわち、フィルター材料やロック材料は、吸着水や結晶水などの含有率がコア材料よりも小さいことを示している。これは、細粒分含有率にかなり差があることと関連性があると考えられ、密度型の粗粒材料は含水比型の粗粒材料よりも、吸着水や結晶水が相対的に少ないというこれまでに知られていた一般的な傾向と合致する。

③ 材料ごとにみると、α値と炉乾燥含水比の間には有意な相関は認められない。

図－3.44　採取試料の粒度分布

図－3.45　α値の分布

図－3.46　α値と炉乾燥含水比の関係

④　また、**図－3.44** に示した粒度のばらつきの範囲内では、α値と各粒度パラメータの間にも有意な相関は見られない。

以上の結果から、各材料とも、材料特性が極端に変化しない限り、いいかえれば、含水比や粒度が大きく変わらない範囲内では、α値はこれらに影響されず一定であると考えてよいことがわかる。しかし、同じ材料の中でα値がこのようにばらつくのはなぜかという疑問が残る。これに対しては次のように理解すべきである。α値のばらつきは、主としてSRIDの測定容積とα値をチェックするための試料採取の容積が異なることによって発生しているのである。実際、試料採取の容積はSRIDの測定容積よりもかなり小さいので、採取試料の含水比とSRIDの測定容積内の含水比が同じになるという保証は全くない。むしろ両者間の含水比の差は確率統計的なばらつきを示すのが自然であると考えられる。言い換えれば、α値がばらついているのではなく、測定される容積によって、あるいは採取される容積によって粒度が異なり、したがって含水比がばらつくのである。試料採取の容積をSRIDの測定容積に匹敵するほど大きくしてやればα値のばらつきは減少するはずであるが、このような大量の試料採取は現実的でない（例えばロック材料では最大粒径が数十～数百mmもあるため、このような粒径の岩石塊まで含めて、炉乾燥によって含水比を

図－3.47　α値と粒度パラメータの関係

求めることは実際上不可能である)。このため、現時点では対比データの数をある程度多くとって、その平均α値を用いるのが実用上、妥当かつ十分であると考えられる。しかし、盛立材料が厳しく選別されるフィル材料といえども、材料の性質（材質、粒度、自然含水比など）が少しずつ変化することもあるので、盛立施工が長期間にわたるときには、必要に応じて定期的にα値のチェックを行うことが必要である。

(6) SRID の測定精度

RI 法は線源の壊変揺動などによって、同じ条件で繰り返し測定を行っても同じ値を示さない。測定時間当りのカウント数（計数率）が十分大きく、その期待値が N であれば、測定値のばらつきは標準偏差 $\sqrt{N}$ の正規分布になることが知られている。このカウント数の揺動が密度測定に与える影響を、簡単に“統計ノイズ”と呼んでいる。RI 法の統計ノイズは測定時間の平方根に反比例して減少する。したがって、単位測定あたりのカウント数が大きくなるほど統計ノイズは減少する。このため、線源強度を大きくすること、検出器の感度を高めること、測定時間を長くすることによって、統計ノイズはいくらでも小さくすることが可能である。しかし、これらは測定器のイニシャルコストや測定時間に直接はねかえるので、適当なレベルで妥協する必要がある。どの程度まで押さえればよいかは、測定する対象物自身がもっているばらつきの大きさと必要精度に依存するので、これらを考慮して決めなければならない。

統計ノイズは較正曲線と標準計数率から理論的に求めることができる。SRID の密度の統計ノイズは**図－3.48** のようになる。また、同じ測定条件のもとで、単純に測定を繰り返してその分布を調べれば、簡単に直接確かめることもできる。実際に較正用の土槽内で SRID の 1 分測定を 200 回繰り返して得られたヒストグラムを**図－3.49** に示す。測定値は理論値とよく一致していることがわかる。

図－3.48　密度の統計ノイズ

図－3.49 測定密度の分布

(7) SRID の測定容積

RI 法はガンマ線や中性子線を利用した間接測定法であるため、すでに述べたように置換法のように測定容積を明示的に表すことはできない。しかし、異なる RI 機種の測定容積の大きさを相対的に比較することは可能である。SRID は従来の固定式の測定領域を最大限に拡大することを第一の目的として開発されたものであるから、両者の測定容積の違いを定量的に評価しておくことは重要である。SRID の深さ方向の測定範囲は固定式と同じであるから、SRID と固定式の測定面積の大きさを比較すればよい。

測定面積の相対比較は、「測面容積の大きさと測定値のばらつきの間に密接な関係がある」という事実に基づいて行うことができる。具体的には、SRID の一周走査データから任意の大きさの走査角（測定面積）に対応する測定値を取り出すことができるので、走査角を変えたとき、測定値のばらつきがどのように変化するかを調べ、固定式のばらつきの大きさに相当する SRID の走査角を求めれば、両者の測定容積の違いがわかるはずである [7]。

a) ばらつきの分解

SRID と固定式の測定面積の差を定量的に比較するために、締固め密度が異なるコア材料の二つの試験ゾーンにおいて、SRID と固定式の対比データを 10 測点づつ（合計 20 測点）採取した。固定式の場合は、各測点で線源孔を中心軸にして 90 度づつ測定器本体の向きを変えて、4 方向の測定を行った。また、SRID の測定は、固定式と線源孔を共有させて同じ位置で行い、一周走査の全てのデータをパソコンに出力した（SRID は走査中に 1 秒ごとにデータをサンプリングしているので、1 分間の一周走査で 60 個のデータが得られる）。

最初に、測定面積の大きさとばらつきの関係を分析するために、SRID の 60 個の一周走査データを直交する 4 方向に分解して、測定面積（走査角）の異なる 4 方向のデータを抽出した。すなわち、**図－3.50** に示すように、各測定方向を中心にして、走査角を $\Delta\theta$＝30 度、60 度、90 度に限定した、三種類の SRID のデータを取り出した。$\Delta\theta$＝90 度のデータは、4 方向測定で一周走査の全域をカバーしている。切り出した扇型の中心軸の向きは固

定式の測定方向と一致させている。これらのデータを用いて 4 方向間の測定値のばらつき（分散）の大きさを調べれば、測定面積とばらつきの関係を知ることができる。次に、固定式の 4 方向測定の結果から、4 方向間の測定値の分散を求め、SRID の 4 方向間の分散と比較すれば、SRID と固定式の測定面積の違いを間接的に評価することができる。なお、試験ゾーンの大きさは約 6m×20m である。

(a)固定式の測定方向　　(b)SRID の測定面積の分割

図－3.50　走査角の異なるデータの抽出(SRID)

一つの試験ゾーンごとに、各ケースのデータを記号 X_{ij} で表す。X は密度または含水比を表しており、i は測点（i＝1～10）を、j は固定式の測定方向または SRID の分割走査の中心方向（j＝1～4）を示す。i 点における 4 方向の平均値と 10 測点の全データの平均値をそれぞれ X_i、$\overline{X}$ で表す。

$$X_i = \frac{1}{4}\sum_{j=1}^{4} X_{ij} \quad (i = 1 \sim 10), \qquad \overline{X} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} X_i \tag{3.14}$$

ここで以下のように定義される分散を考える。

σ_r^2＝X_{ij} の X_i に対する分散
　（測点を中心とした 4 方向間のばらつき：測点近傍の局所的なばらつき）
σ_R^2＝X_i の $\overline{X}$ に対する分散
　（測点間のばらつき：試験ゾーン内の広域的なばらつき）
σ_δ^2＝局所的なばらつきと広域的なばらつき以外の分散
　（残差変動：RI 測定器自体の測定誤差などに起因するばらつき）

$\sigma_T^2 = X_{ij}$ の $\overline{X}$ に対する分散
（全平均値に対するばらつきの総和）

これらの分散の間に次のような関係がある。いいかえれば、データの全分散 σ_T^2 は三つの変動成分に分解することができる。

$$\sigma_T{}^2 = \sigma_r{}^2 + \sigma_R{}^2 + \sigma_\delta{}^2 \qquad (3.15)$$

すなわち、測定データ全体のばらつきは、測点近傍の局所的なばらつき σ_r^2 と、試験ゾーン内の測点間の広域的なばらつき σ_R^2、および測定器自体の測定誤差などに起因するばらつき σ_δ^2 の三つの成分に分解される。測定器自体のばらつき σ_δ^2 は、SRID および固定式とも検出器の性能などの基本仕様が同じであり、 σ_r^2 や σ_R^2 に比べて充分に小さいことがわかっているので、無視できるものと見なし以下では省略する。

なお、各測定ポイントによって、4 方向のばらつきに差があるか否かを調べるため、分散の一様性の検討を行うと、**表－3.4** に示す結果となった。Bartlett 法によると、16 ケース中 4 ケースで統計的に有意な差があると判定された。一方、Hartley の判定結果で有意差が認められたのは、1 ケースだけであった。

表−3.4(a)　4 方向のばらつきの検定結果(Bartlett 法)

ゾーン	物性	走査角度 $\Delta\theta$	分散標本数 k	χ_0^2	$\chi^2(k-1;0.05)$	$\chi^2(k-1;0.01)$	判定
D	ρ_t	固定式	10	11.82	16.92	21.67	
		30°	10	16.84	16.92	21.67	
		60°	10	16.93	16.92	21.67	*
		90°	10	18.46	16.92	21.67	*
	w	固定式	10	15.39	16.92	21.67	
		30°	10	14.18	16.92	21.67	
		60°	10	23.51	16.92	21.67	**
		90°	10	17.08	16.92	21.67	*
M	ρ_t	固定式	10	4.31	16.92	21.67	
		30°	10	14.79	16.92	21.67	
		60°	10	15.56	16.92	21.67	
		90°	10	16.68	16.92	21.67	
	w	固定式	10	14.37	16.92	21.67	
		30°	10	4.13	16.92	21.67	
		60°	10	3.11	16.92	21.67	
		90°	10	8.21	16.92	21.67	

判　　定：1%有意(**)
5%有意(*)
有意性保留(空白)

検定規準：$\chi_0^2 = -\dfrac{1}{c}\sum_{i=1}^{k}\phi_i \ln\dfrac{v_i^2}{v^2}$

検定規則：$R:\chi_0^2 \geqq \chi^2(k-1;\alpha)$

v_i^2: 標本不偏分散(i=1～k)
ϕ_i: 分散の自由度
k : 分散標本数(母集団数)
$v^2 = \Sigma\,\phi_i v_i^2 / \Sigma\,\phi_i$

$$c = 1 + \frac{1}{3(k-1)}\left(\Sigma\frac{1}{\phi_i} - \frac{1}{\Sigma\,\phi_i}\right)$$

表−3.4(b)　4 方向のばらつきの検定結果(Hartley 法)

ゾーン	物性	走査角度 $\Delta\theta$	分散標本数 k	自由度φ	F_{max}	$F_{max}(k,\phi;0.05)$	$F_{max}(k,\phi;0.01)$	判定
D	ρ_t	固定式	10	3	18.3	104	310	
		30°	10	3	47.0	104	310	
		60°	10	3	39.2	104	310	
		90°	10	3	40.0	104	310	
	w	固定式	10	3	59.3	104	310	
		30°	10	3	27.9	104	310	
		60°	10	3	951.3	104	310	**
		90°	10	3	28.5	104	310	
M	ρ_t	固定式	10	3	5.6	104	310	
		30°	10	3	31.4	104	310	
		60°	10	3	25.0	104	310	
		90°	10	3	28.7	104	310	
	w	固定式	10	3	25.8	104	310	
		30°	10	3	8.6	104	310	
		60°	10	3	5.7	104	310	
		90°	10	3	31.2	104	310	

判　　定：1%有意(**)
5%有意(*)
有意性保留(空白)

検定規準：$F_{max} = \dfrac{v_{max}^2}{v_{min}^2}$

検定規則：$R: F_{max} \geqq F_{max}(k, \phi; \alpha)$

v_{max}^2: 標本不偏分散の最大値
v_{min}^2: 標本不偏分散の最小値
φ ：分散の自由度
k ：分散標本数(母集団数)

b) 測定値のばらつきと測定面積の影響

SRID の測定面積を走査角で表し、SRID の 3 種類の走査角 $\Delta\theta$ と、測定値の標準偏差との関係を**図－3.51** に示す。固定式の標準偏差も図中に示して SRID の標準偏差と対比している。これらの図で注目されるのは、まず密度も含水比も「測点近傍の局所的なばらつきよりも、測点間の広域的なばらつきの方が大きい」という事実である。後者（σ_R^2）の寄与率をみると、密度で 70～74 % となっており、σ_r^2 の 2 倍以上を占めている。含水比の場合はもっと顕著で、ばらつき全体の 88% 以上が広域的なばらつきによって占められ、測点近傍の局所的なばらつきは 10 % 程度にすぎなかった。これらの事実は品質管理において十分考慮しなければならない。ロット全体の平均密度を偏りなく評価するためには、データのサンプリングはロット全体で広域的にまんべんなく行う必要があることを強く示唆しているからである。

図－3.51(a) 走査角と標準偏差の関係（密度）

図－3.51(b) 走査角と標準偏差の関係（含水比）

次に SRID の走査角と標準偏差 σ_rの関係をみると、σ_rは$\Delta\theta$が大きくなるにつれてほぼ直線的に減少している点が注目される。これは、「測定面積（容積）の増大に伴って、局所的なばらつきが減少する」ことを意味しており、局所的なばらつきを少なくするためには、測定容積を大きくする必要があるという予想された結果である。固定式のσ_rは、密度でも含水比でも SRID の$\Delta\theta$＝30 度のときのσ_rと同等か、それよりも大きくなっている。言い換えれば、SRID の測定容積は固定式よりも 12 倍以上大きいということを、間接的に実証していることになる。しかし、ここで述べた試験では測点数が 20 点しかないので、12 倍という数値の正確さには問題が残るかも知れない。そのことを考慮しても、およその目安として、「SRID と固定式の測定容積に 10 倍程度の開きがある」という評価は妥当と考えられる。

(8) SRID の測点数

測点間のばらつきσ_R^2は材料の粒度（粒径）や施工条件によって決まるものであるから、管理者の側からは制御することのできない性質のばらつきである。他方、σ_r^2は測定容積を大きくするほど小さくなるので、測定方法を工夫することによって減らすことができる。品質管理においては対象となる締固め後の盛土がもっているばらつきσ_R^2に対して、測定器の統計ノイズや測定容積の不足に帰する変動（σ_r^2とσ_δ^2の和）が十分小さいことが必要である。前項で述べたように、SRID のσ_δ^2はσ_r^2よりも十分小さいから、統計ノイズは無視してよい。したがって、測定容積に起因する変動σ_r^2がσ_R^2に比べて十分に小さければ、どのような方法で測定しても測点数はσ_R^2だけで決まり、反対にσ_r^2がσ_R^2に対して無視できなければ、測点数や測定方向数をさらに増やして測定容積の不足をカバーしなければならない。しかし、一般に測定容積の拡大は管理面の負担（コストや時間・労力）を増大させるので、あるレベル以上になると必ずしも得策とはいえなくなる。RI 法の場合は、SRID が測定容積の面から微弱線源で対応できる限界に近づいていることはすでに述べた。

例えばσ_R=0.050t/m³、σ_r=0.025 t/m³のコア材料の盛立層を想定し（いずれのばらつきも正規分布するものと仮定している）、ρ_t=2.0 t/m³程度の締固め密度を 1%の精度（信頼度を 95%とする）で評価するときに必要な測点数 n は、以下の条件から n=30 となる。

（仮定条件）

平均密度	：	ρ_t	=2.0 t/m³
ロット内の広域的なばらつき	：	σ_R	=0.050t/m³
測定点近傍の局所的なばらつき	：	σ_r	=0.025 t/m³
必要評価精度：	：	$\Delta\rho_t$	=0.02 t/m³（平均値の１%）

（必要条件）

$1.96\,\sigma_{(R+r)}/\sqrt{n} \leqq \Delta\rho_t$　　（ここで、$\sigma_{(R+r)}^2 = \sigma_R^2 + \sigma_r^2$）

もし、測定容積を拡大して $\sigma_r=0$ にできたとしても、$n=24$ にしかならず、測点数を 20%減らせる効果しかないことがわかる。したがって、SRID は実用上フィル材料に対して十分な測定容積（ただし測定深さは 30cm まで）をもっていると考えることができる。前項 **(7)** の結果から、固定式でも 10 方向程度の測定をすれば SRID とほぼ同等の測定面積になるが、測定時間と労力も 10 倍必要になり、これも現実的な解決にはならない。一例として**図－3.52** に示すような分布をもつフィル材料で、各材料の締固め密度を 1%の精度で評価するときに必要な SRID の測点数を求めると、コア材料では 6 点、フィルター材料では 17 点、ロック材料では 37 点となる（少し余裕を見込むとそれぞれ 10 点、20 点、40 点になる）。測点数は分散に比例し、評価精度の二乗に反比例する。ロック材料の密度をコア材料と同じ精度で求めようとすれば約 6 倍のデータ数が必要になるが、これは主としてロック材料とコア材料の密度の分散にそれくらいの差があるからである [7]。

図－3.52　フィル材料の締固め密度の分布例

(9)　従来法との比較

a)　比較試験の概要

SRID をコア材料に適用して固定式の測定結果と比較し、両者の測定容積の違いがどのように測定結果に反映されるかを調べてみた[8]。比較試験を行ったコアゾーンは、振動ローラを用いて仕上り厚さ 30cm で盛立てられている。コア材料はロームと砂礫を 1：3.3 の割合で混合した材料である。その粒度分布を**図－3.53** に示す。

比較試験は約 1 ヶ月の間に、雨天による中断日などを除いて 18 日間行っている。SRID と固定式を用いて、それぞれ 1 日あたり 15～20 点の比較データを収集した。SRID と固定式は線源孔を共用しており、固定式の測定では RI 測定と BG 測定を 4 方向に振り分けてそれぞれ 1 分ずつ行った。1 測点あたりの測定時間は 8 分である。SRID の測定では、測定時間を固定式と合わせるため、RI 走査と BG 走査をそれぞれ 4 回繰り返した。いずれも測定深さはコア材料の転圧厚さと同じ 30cm である。

図－3.53　コア材料の粒度分布

b)　日内データの比較

図－3.54 に 1 日の施工で得られたデータの一例を示す。測定結果を含水比 w と乾燥密度 ρ_dの関係図にプロットしたものである。測定データの白丸は、固定式では各測定方向のデータ、SRID では 1 周走査データを表しており、黒丸は固定式では 4 方向の平均値、SRID では 4 周走査の平均値を表している。固定式の場合は測定方向間の違いによって測定値がばらついているのに対し、SRID の結果では走査間にそのような傾向はあまりみられず、すべてのデータがよくまとまって分布している。すなわち、SRID と固定式の測定面積の違いがこれらの分布にはっきりと現れており、SRID ではコア材の粒径に対して十分な測定容積をもっているため、礫の混入状態の影響による密度のばらつきが少なく、まとまりのよい測定結果が得られている。

図－3.54　日内データの比較

また、SRID の測定面積（直径 80cm）は置換法による密度試験（コア材料では直径 30～40cm 程度）の掘削容積に比べても数倍大きく、十分に各測点近傍の平均密度を代表するデータが得られていると推定される。なお、各測点の平均値（黒丸）をみると、両者の差はかなり小さくなっており、固定式の場合でも 4 方向の測定を行ってその平均をとれば、測点を代表するデータに近づくことを示唆している。

c)　密度のばらつき

図－3.55 に、18 日間に得られた湿潤密度 ρ_tの全データ（各走査または各測定方向）のヒストグラムを示す。SRID の密度分布は、ほとんどのデータが 2.0～2.1t/m³ の範囲にあって、標準偏差 σ は 0.025t/m³ であるのに対し、固定式では 1.9～2.3 t/m³ の範囲にデータが分布し、σ は 0.047 t/m³ と SRID の約 2 倍近い値となっている。一方、**図－3.56** に示した 4 回走査および 4 方向の平均値の度数分布をみると、SRID および固定式ではそれぞれ 1.99～2.14 t/m³、1.99～2.15 t/m³ の範囲に分布し、分布形状もあまり変わらない。同様に標準偏差に着目すると SRID で 0.025 t/m³、固定式で 0.026 t/m³ となっており、その差はわずかではあるが SRID の方がやはり小さい。ここで SRID の走査間のばらつきを、全データの分散と測点データの分散から求めてみる。なお、**図－3.55** と**図－3.56** の標準偏差は、小数第 3 位までしか表示していないが、有効数字 3 ケタではそれぞれ 0.0251t/m³、0.0246 t/m³ となり、走査間のばらつきは 0.005 t/m³（$\sqrt{0.0251^2-0.0246^2}$）となる。この SRID の走査間の標準偏差は、RI 計器特有の統計ノイズの値（SRID の場合には約 0.007 t/m³）と同程度に小さい。すなわち、**図－3.55** の SRID と固定式のばらつきの違いは、ほとんど固定式の測定容積の不足に起因する測定方向間のばらつきによるものであることを示している。

図－3.55　全データのヒストグラム

図－3.56　測点平均値のヒストグラム

3.3　自動走査式フレーム型 RI 密度計（FRID）の開発

3.3.1　従来のフレーム型 RI 密度計

すでに述べたように、フレーム型 RI 密度計は、大きな仕上り厚さ（1.0～1.5mの事例が最も多い）で盛立てられるロックゾーンを対象として、転圧層内部の深さ方向の密度分布を測定するために、水資源開発公団によって開発されたものである[3)]。**図－3.57** にフレーム型 RI 密度計の概要を示す。この RI 密度計は表面型とはタイプが全く異なり、2 本の導管を平行に保つために、導管の上、下端部を梁（H 型鋼）で連結したもの（これを「導管フレーム」、あるいは簡単に「フレーム」と呼んでいる）を、盛立材料をまき出すときに予め盛立て層内に埋設しておく必要がある。そして転圧後に地表面からそれぞれの導管内にガンマ線の線源部と検出部を同じ深度に挿入して、線源から検出器まで盛土内部を水平方向に透過するガンマ線量を測定すれば、導管と導管との間の湿潤密度を求めることができる。導管フレームはおよそ 45 度の傾斜をもたせて埋設する。これはフレームと盛立材料とのなじみを良くするとともに、転圧施工の妨げにならないようにすることを配慮したものである。線源部と検出部の挿入深さを変えることによって、任意の深度において密度が求められる。しかし、フレームの両端から各々20cm（最大）の区間は、固定用の鋼材の影響を受けるため、フレームの導管は測定区間長よりも長くする必要がある。また、地表面から 15～20 cm の区間も、大気と地盤との不連続な境界層の影響を受けるため測定区間から除外される。地表部のデータは SRID で補完することができる（ただし、地表面から 20cm または 30cm 区間の平均密度）。

図－3.57　フレーム型 RI 密度計の概要（転圧厚さ 100cm の場合）

ロックゾーンの密度は、これまで大型の水置換法や砕石置換法によって評価するしか方法がなかった。これらの大型の現場密度試験は多くの時間と労力を要する反面、試験精度が客観的に十分に評価されているとはいえず、しかも、ロック材料の最大粒径からみても試験数量が極めて少ないため、ロックゾーンの締固め密度の評価は不満足な形でしか行われていなかったといわざるを得ない。フレーム型 RI 法の出現はこのような閉塞状況に風穴をあけ、締固め厚さの大きいロック材料の締固め状況を詳細に捉えることを可能にした点で、その意義は大きいといえる。

3.3.2　自動走査式フレーム型 RI 密度計（FRID）

(1)　FRID の概要と特徴

フレーム型 RI 密度計を用いることによって、転圧層内部の密度分布が測定できるようになったが、開発時の設計仕様では導管内の所定の位置に線源部と検出部を静止させて、表面型と同じように 1 分間測定を繰り返していた（例えば 10cm ピッチ）。このために、測定深度を変えるごとに手作業を必要としていた。筆者は、フレーム型の特色を活かし、同時に RI 法の利点である迅速性と簡便性をより効果的に発揮させるため、測定作業を自動化して転圧断面内を連続走査する方式に改良した [4]。**図－3.58** に示すように、改良された自動走査式フレーム型 RI 密度計（Scanning Frame Type Radio Isotopic Density Meter：略称

図－3.58　自動走査式フレーム型 RI 密度計の概要

FRID）では、導管の上端部にガイドパイプを介して小型のシンクロモータを取り付け、一定速度で線源部と検出部を同時に引き上げながら導管間の密度を連続的に測定する。その結果は直ちにパソコンの画面上に表示されるようになっているので、その場で締固め状況を判断することができる。改良前後の測定方法の違いを**図－3.59** に要約している。自動走査式フレーム型 RI 密度計は、導管間隔（ガンマ線の透過距離）が 60 cm の大型と 50 cm

図－3.59　改良前後の比較

表－3.5　自動走査式フレーム型 RI 密度計（FRID）の仕様

測定器	大型	中型
測定方式	ガンマ線透過型	
線源	60Co3.7 メガベクレル	
検出器	NaＩ(Tl)シンチレーション検出器	
走査方式	シンクロモータ制御　引上げ速度 0.55mm／s	
走査速度	10cm／3min（標準）	
透過距離 （導管軸距離）	60cm	50cm
導管フレーム	STPG370 外径 76.3mm 肉厚 4.5mm	STKM13A 外径 65mm 肉厚 4mm

の中型があり、大型はロック材料に、中型はフィルター材料やコア材料に用いられている。**表－3.5** に自動走査式フレーム型 RI 密度計の測定仕様を示す。

(2) 測定手順

自動走査式フレーム型 RI 密度計の測定手順を**図－3.60** に示す。実際の現地測定では、自然放射能（バックグラウンド：BG）の影響を補正しなければならないので、SRID の場合と同様に BG 走査と RI 走査の 2 回の測定が必要である。まず検出器だけを一方の導管内に挿入して、これを引きあげながら地中の BG の分布を測定する。ついで、線源部と検出部の両方をそれぞれの導管内に挿入して、両者をシンクロして同時に引きあげながら、地中を透過するガンマ線の量（BG も含まれている）の分布を測定する。RI 走査のカウントから BG 走査のカウントを差し引いた、有効カウントを測定時の標準計数率で除して計数率

図－3.60 フレーム型 RI 密度計の測定手順

比に変換し、その値を較正式に代入して湿潤密度を求める。これらの測定と計算はパソコンで処理され、結果が直ちにモニター画面上に表示される。現場における測定状況を**写真－3.8** に示す。

盛立試験で所定の転圧回数ごとに FRID によって深さ方向の密度分布を求めると、深度ごとの締固め効果（密度と転圧回数の関係）の差異や、最終転圧後の鉛直方向の密度勾配（密度分布の傾き）などが明らかになる。なお、導管フレームの埋設方法には、まき出しの途中でまき出し層端部の法面上に導管フレームをセットして、さらに後続のまき出しを行う方法（**図－3.61**）と、まき出しを終えてからまき出し面を掘削して、孔壁斜面に導管フレームをセットした後に掘削孔を埋戻す方法（**写真－3.9**）、の二通りの仕方がある。前者はフレームを埋設するために掘削する必要がないので、簡単かつ最も自然な方法であるが、まき出し施工と同時に設置するので慎重に行う必要がある。後者の場合は設置の作業性がよい反面、掘削にかなりの労力と時間がかかり、注意深く行わないとフレーム近傍の初期密度と周辺部の密度に差が出てしまうこともあるので、慎重な埋め戻しが必要である。

写真－3.8　FRID の現場測定状況

写真－3.9　フレームの埋設状況（掘削法）

図－3.61　フレームの埋設状況（法面法）

(3) FRID の較正曲線

較正試験の基本的な方法は SRID の場合と同じである。**図－3.62** に示すように、較正用の試験土槽内に 2 本の導管を設置して、所定の密度になるように材料を締固めた後に FRID の測定を行うという手順を繰り返す。FRID の較正試験では SRID の場合のように、他の RI 密度計で較正基準値を設定することができないので、基準密度には採寸密度を用いるしか今のところ方法がない。このため供試体内部で密度ができるだけ一様になるように仕上げなければならず、締固め作業では細心の注意をはらう必要がある。較正試験では、大型の FRID と中型の FRID ではガンマ線の透過距離（線源孔と検出孔の間隔）が異なるので、大きさが異なる大型用（トラック形断面）と中型用（長方形断面）の 2 種類の較正土槽を用いた。試験材料として、**図－3.63** に示すように粒度分布が大きく異なる 3 種類の材料（砕石、まさ土、山砂）を用意した。砕石は高密度、まさ土は中密度、そして山砂は低密度領域の供試体作製に用いて、広い範囲の密度レンジをカバーするように努めた。

図－3.62　フレーム型 RI 密度計の較正試験容器

図－3.63　較正試験材料の粒度分布

供試体は上下端部の測定除外範囲を考慮して、**図－3.64** に示す三層構造で作製した。すなわち、下層部 20cm 厚さのダミー層の上に、測定の対象となる較正層（厚さ 50 cm または 60 cm）を設け、さらにその上に 20cm の上部ダミー層を設けた。ダミー層の密度は較正層の密度と正確に一致していなくてもよいが、近い値になるように締固めている。ダミー層と較正層の間には薄いビニール膜を敷いておき、供試体の解体時に較正層の正確な厚さを採寸で求めた。供試体の締固めには、鋼製のランマーと電気ハンマーを用いた。材料のまき出しと締固めは 5 層（中型）または 6 層（大型）に分けて行った。1 層当りの締固め厚さを 10cm とし、投入する材料の質量を調整した。較正試験のフローと作業の状況を**図－3.65** および**写真－3.10** に示す。FRID 測定時の走査速度は、線源を装着した状態（RI 走査）では 0.28mm/s、自然放射能の測定（BG 走査）では 0.55mm/s とした。

図－3.64　採用した較正データ区間の説明

山砂を用いた供試体の FRID 測定で得られた、RI 計数率、BG 計数率および実効計数率（RI 計数率－BG 計数率）の一例を**図－3.66** に示す。ダミー層と接する較正層の上下端部の 10 cm 区間はダミー層の影響を受けるため、この部分を除いた 較正層の実効計数率を較正データに採用した。**図－3.67** に較正試験結果と指数回帰曲線を示す。較正式は大型と中型で次の通りとなった。

$$\text{大型}: \ln R_\rho = \ln 12.1855 - 2.4559 \cdot \rho_t \qquad (3.16)$$

（標本数 n=22,　　決定係数 r^2=0.9992）

$$\text{中型}: \ln R_\rho = \ln 4.1080 - 1.9292 \cdot \rho_t \qquad (3.17)$$

（標本数 n=19,　　決定係数 r^2=0.9988）

指数回帰式の決定係数は 0.999 以上を示しており、SRID の場合と同様に信頼性の高い較正式が求められている。

図－3.65　較正試験のフロー

a.　供試体作成

b.　供試体寸法(基準密度)の測定

C.　RI 測定

写真－3.10　FRID の較正試験状況

密度小

供試体番号	5
材料名	山砂
供試体湿潤密度：ρ_{t0} (t/m^3)	1.403
密度標準計数率：S_ρ (cpm)	97787
実効密度計数率：N_ρ (cpm)	37536
実効密度計数率比：R_ρ	0.38385

図－3.66(a) 計数率の一例（密度が小さい場合）

密度大

供試体番号	22
材料名	砕石
供試体湿潤密度：ρ_{t0} (t/m^3)	2.042
密度標準計数率：S_ρ (cpm)	96663
実効密度計数率：N_ρ (cpm)	7879
実効密度計数率比：R_ρ	0.08151

図－3.66(b) 計数率の一例（密度が大きい場合）

図－3.67(a) FRID の較正曲線
（大型用）

図－3.67(b) FRID の較正曲線
（中型用）

3.4 第3章のまとめ

締固め密度を統計的に評価するためには、多点数のサンプルデータを短時間で容易に得られる密度測定法（または密度試験法）が不可欠である。現状の密度評価法の中でこのような要件を満たす可能性があるのはRI法しかない。しかし、従来の固定式の表面型RI密度計では、粗粒材料に対して測定容積がまだ不十分であることや、測定する前に地盤面を平滑にする手作業が必要なため、迅速性に欠けるなどの課題がある。また、深さ方向の密度分布の測定を可能にした、導管フレーム型 RI 密度計においても改良の余地がある。この章では、これらの課題を解決するために開発した、新しい表面型RI密度計（SRID）とフレーム型密度計（FRID）の測定器の構造、較正曲線、測定容積、測定精度などの基本的な特性をとりまとめている。

(1) 自動走査式RI密度計　SRID

① SRIDは、測定容積、測定時間の短縮および省力化などの問題を解決した新しい表面型RI 密度計である。測定面積を可能な限り拡大するために、RI 検出器を一定速度で回転させながら密度および含水比を同時に測定する「自動走査式」を採用している。

② 測定時間の短縮と省力化の面でネックになっていた、測定地盤面の整形(平滑処理)を回避するために、RI測定時に走査円上の不陸分布を同時にモニターして、その影響をソフト的に補正する方法を取り入れた。これによって現場測定作業は大幅に省力化され、多点数のデータが短時間で得られるようになった。

③ 従来の固定式RI密度計と比較すると、SRIDの測定面積 (容積)は約10倍以上大きいことが示された。また、SRID の密度検出器の走査直径が 80cm であることから、置換法(転圧厚さ 30 ㎝の場合は置換孔の直径は 30～40 ㎝が一般的)に比べても、SRID の測定容積は数倍大きい。

(2) 自動走査式RI密度計　FRID

① FRID は、転圧前にまき出し層内に導管フレームを予め設置しておき、転圧後に地表面からそれぞれの導管内に線源および検出器を挿入して、これらを同時に一定速度で引き上げながら導管と導管の間を透過するガンマ線量を走査して、鉛直方向の密度分布を測定するものである。ただし、FRIDのようなフレーム型のRI密度計では、透過型の水分計を装備することが極めて困難であるため、現状では湿潤密度の分布しか測定できない。

② 導管フレーム型密度計は、もともと締固め厚さの大きいロックゾーンの鉛直方向の密度分布を調べることを目的として開発されたものである。FRID はこれを更に改良したもので、主な改良ポイントは、逐次固定式から連続走査式に変えて測定を自動化したこと、測定器を大幅にコンパクト化して測定作業を省力化したことの二点である。これら

の改良によって、連続的な密度プロフィールが容易に測定できるようになった。

参考文献

1）土質工学会：土工管理とラジオアイソトープ（表面型密度計・水分計の取り扱い手引き），
1974.

2) 岩片透：ラジオアイソトープを利用した密度測定方法（RI 法）のフィルダム管理への適用性,土と基礎,pp.63-69, 1975.

3) 瀬古育二他 3 名：ロックフィルダムの粗粒材料の盛立密度測定法,土と基礎,1989.7.

4) 豊田光雄・中村昭・延山政之：自動走査式フレーム型 RI 密度計を利用したロック材料の現場締固め特性の評価,ダム工学,No.22, pp.36-49, 1996.6.

5) 豊田光雄・吉田等・延山政之：自動走査式 RI 密度計（SRID）の開発とフィルダムへの適用,ダム工学,Vol.7, No.2, pp.98-113, 1997.6.

6) 豊田光雄・野村孝：自動走査式 RI 密度計（SRID）の水分補正係数,第 35 回地盤工学研究発表会講演集,pp.1579-1580, 2000.6.

7) 豊田光雄・野村孝：自動走査式 RI 密度計（SRID）の測定容積と精度,第 34 回地盤工学研究発表会講演集,pp.1859-1860, 1999.7.

8) 豊田光雄・吉田等：自動走査式 RI 密度計（SRID）を用いた現場密度測定,ダム技術,No.140, pp.17-26, 1998.5.

第４章　現場締固め特性の合理的な評価方法

4.1　締固め密度の統計的性質

フィルダムのコア、フィルター、ロックいずれの盛立ゾーンにおいても、例えば 1 日あたりの盛立量を単位として分割すれば（品質管理において、品質判定の対象となるひとつの施工単位をロットと呼ぶ)、ロットごとに平均密度は変化している。平均密度の変動が、許容できる範囲内に収まっているかどうかをチェックするのが、品質管理の第一の目的である。一般に、ロット間の密度変動は、主に盛立材料の粒度や含水比の変動を反映したものと理解されている。

ひとつのロットの大きさは、例えば面積で表すと数百～数千 m^2 の規模になるのが普通である。このロットの大きさに比べれば、密度を求める測定容積は、置換法にしろ RI 法にしろ桁違いに小さい注)。このため、ロット内から複数個の密度データを集めて、ロット全体の密度を推定することが行われる。これは、ロット内においても、場所によって密度が異なっているという事実が認識されているからである。品質管理においては、ロット全体の締固め状態を表す指数（例えば平均密度）を求め、その値が許容限界内に入っているか否かによって合否を判定するという方法がとられることが多い。それでは、ひとつのロット内で何個の密度データを集めれば、ロット全体の密度（締固め品質）を的確に、あるいは客観的に評価できるかについて検討しなければならないが、これは材料ごとに異なるロット内のばらつきの大きさに依存する。管理データの標本数は、予め品質管理の基準に定めておかなければならない。このことは品質管理だけでなく、盛立試験のデータ分析においても同じである。必要かつ十分な測定点数を決めるには、密度の分布特性を詳細に把握することが前提になる。密度のばらつきにどのような規則性があるか、その規則性は安定しているかをまず検討し、安定した規則性が確認されれば、具体的にばらつきの大きさを定量化して測定点数を定めることができる。特に締固め管理においては、ロット間変動とロット内変動の相対的な割合が重要である。ロット間変動がロット内変動よりも大きければサンプル数は少なくてよく、逆の場合は多くのデータが必要になる。そのため、密度のばらつきを、まずロット間変動とロット内変動に分解して評価する必要があるが、これらのばらつきは性格が全く異なっている。ロット間変動は品質管理を行って、制御する対

注) SRID の密度検出部は直径 80cm の円周上を走査しているので、正方形でロット内を細分割するとすれば、おおよそ 1m×1m のメッシュ内の密度を求めていることに相当する。ロットの規模が 1000 m^2 であれば、1 点あたりの SRID の測定面積はロット面積の 1/1000 オーダーであると見積ることができる。

象である（母数因子）のに対して、ロット内変動はもともと制御できないばらつきを表している（変量因子）。

水平面内の密度のばらつきを考えるときに、理解しておくべきもうひとつの重要な因子は、用いる測定器の測定容積の違いによって、得られるデータのばらつきの大きさが違ってくるという事実である。もちろん、測定容積の大きい測定器を用いて得られるデータの方が、一般にばらつきは小さくなる。極端なケースとして、ロット全体を一気に測れる手段があれば、ばらつきそのものの意味はなくなる。しかし、測定容積が大きすぎても、逆にロット内部の密度のばらつきがわかりにくくなるので、品質管理の面からは必ずしも好ましいといえない。各ゾーンの材料粒度からみた適度な大きさの測定容積というものが考えられるが、これを客観的に決めるのは意外に難しい。さらに、どのような密度試験法や密度測定器を用いるにしろ、それ自身の測定精度にも限界があるから、これもデータがばらつく無視できない要因のひとつである。以上にあげた、密度データにばらつきをもたらすそれぞれの要因は、締固め密度の分布特性を考えるときには明確に区別しておかねばならない。

ここでは二つのロックフィルダムの盛立場において、SRID を用いて収集された多点数の標本データを例にとり、フィル材料の転圧後の密度と含水比の統計的性質（分布特性および密度の含水比依存性）を分析する。対象データの標本数を**表－4.1** に示す。収集されたデータの数はいずれのダムでもコアゾーンで最も多く、フィルターゾーンやロックゾーンのデータ数はコアゾーンに比べるとかなり少ない。これは、フィルダムではロック材料やフィルター材料などの透水性材料に比べて、ダムの止水機能を左右するコア材料の品質管理が重視されていることを物語っている。SRID の最大測定深さは 30cm であるから、コア材料に対しては転圧厚さ全体をカバーしているが、フィルター材料やロック材料に対しては、地表面から深さ 30cm の表層密度を対象としていることになる。筆者の知る限り、それ以下の深度で水平面内の密度分布を直接調べた事例は見あたらないけれども、粒度分布が表層部と違わなければ、深層部においても表層部と同程度のばらつきを有していると推察するのが自然であろう。しかし、転圧厚さが大きいロックゾーンなどでは、粒度分布が深度方向に一様であるという保証はない。

表－4.1　分析データの標本数

ダム名	コ　ア		フィルター		ロ ッ ク	
	ロット	全データ	ロット	全データ	ロット	全データ
HO ダム	58	820	26	390	24	353
HA ダム	334	3340	20	294	23	343

盛立施工の初期の段階で、集中調査を行ってデータを収集した HO ダムでは、1 ロットあたり 15 点の SRID 測定を行っているが、施工スペースの関係で 15 点に満たないケースも一部ある。他方、SRID による品質管理を試行的に実施した HA ダムでは、1 ロットあたり 10 点の測定を行い、約 1 年間にわたって締固め密度を追跡している。**図－4.1** および **図－4.2** に、両ダムの各ゾーンの粒度を示す。HO ダムでは、フィルター材料とロック材料に河床砂礫を使用し、コア材料には 150 mm 以上の粒径をカットした河床砂礫にローム材を混合したブレンド材を用いている。HA ダムでは、岩質が比較的軟らかい緑色片岩をフィルターゾーンとロックゾーンに盛立て、コアゾーンでは千枚岩の風化した細粒材に緑色片岩の CL 級を混合したブレンド材が使用されている。

図－4.1　盛立材料の粒度分布(HO ダム)

図－4.2　盛立材料の粒度分布（HA ダム）

4.1.1　分布特性

(1)　HO ダムの事例

HO ダムの集中調査で得られた、各材料の物性値（湿潤密度 ρ_t、乾燥密度 ρ_d、および含水比 w）の分布を以下にまとめて示す [1)]。**図－4.3** は全測定データのヒストグラムを示している。集中調査期間内に得られた、全ロットのすべてのデータが含まれている。SRID が直接測定しているのは ρ_t と w（厳密には単位体積あたりの含水量）であり、ρ_d は ρ_t と w から計算で求められた値である。**図－4.4** は各材料のロット平均値のヒストグラムである。また、**図－4.5** には各材料の偏差データのヒストグラムを示している。偏差データは、各ロット内で密度や含水比の測定値とロット平均値との差（記号 $\Delta\rho_t$、$\Delta\rho_d$、Δw で表す）を求めたものであり、**図－4.5** はすべてのロットの偏差データをプールして、これをヒストグラムに表したものである。最後に**図－4.6** に各材料のロット内分散を示す。**表－4.2** に各物性値の統計量をまとめている。

標本数が多い、**図－4.3** の全データのヒストグラムや**図－4.5** の偏差データのヒストグラムをみると、どのヒストグラムも正規分布で良好に近似できるように見える。標本数が十分とはいえないが、コア材料の χ^2 値（偏差平方和と母分散の比）のヒストグラムを、正規分布からのランダムサンプリングを前提にした理論分布曲線（χ^2 分布）と比較すると、**図－4.7** に示すように妥当な対応を示していることがわかる。**図－4.5** に示した偏差

表－4.2　密度および含水比の統計量（HO ダム）

		コア			フィルター			ロック		
		全測点	ロット平均値	ﾛｯﾄ平均値からの偏差	全測点	ロット平均値	ﾛｯﾄ平均値からの偏差	全測点	ロット平均値	ﾛｯﾄ平均値からの偏差
ρ_t	標本数	820	58	820	390	26	390	353	24	353
	最大値　t/m³	2.048	1.991	0.070	2.290	2.239	0.159	2.443	2.292	0.151
	最小値　t/m³	1.853	1.920	-0.100	2.003	2.074	-0.112	2.009	2.194	-0.231
	平均値　t/m³	1.966	1.966	0.000	2.160	2.160	0.000	2.259	2.260	0.000
	標準偏差　t/m³	0.028	0.016	0.024	0.050	0.036	0.036	0.055	0.028	0.047
	変動係数　%	1.42	1.38	－	2.31	1.65	－	2.43	1.24	－
ρ_d	標本数	820	58	820	390	26	390	353	24	353
	最大値　t/m³	1.778	1.682	0.112	2.157	2.107	0.166	2.434	2.223	0.251
	最小値　t/m³	1.447	1.553	-0.112	1.841	1.940	-0.128	1.947	2.053	-0.229
	平均値　t/m³	1.638	1.639	0.000	2.021	2.021	0.000	2.151	2.151	0.000
	標準偏差　t/m³	0.047	0.029	0.037	0.059	0.045	0.040	0.077	0.045	0.063
	変動係数　%	2.87	1.77	－	2.92	2.22	－	3.58	2.11	－
w	標本数	820	58	820	390	26	390	353	24	353
	最大値　%	29.7	23.8	5.9	11.9	8.9	3.4	10.3	7.9	4.2
	最小値　%	13.8	18.1	-5.1	2.6	4.4	-3.8	0.0	2.3	-4.9
	平均値　%	20.0	20.0	0.0	6.9	6.9	0.0	5.1	5.1	0.0
	標準偏差　%	2.09	1.31	1.63	1.71	1.29	1.15	2.15	1.55	1.52
	変動係数　%	10.45	6.55	－	24.78	18.70	－	42.16	30.39	－

図－4.3　密度および含水比の分布（全データ：HO ダム）

図－4.4　ロット平均値の分布（HO ダム）

図－4.5　密度および含水比の分布（偏差データ：HO ダム）

図－4.6　密度および含水比のロット内分散の分布（HO ダム）

図－4.7　コア材料のばらつき（χ^2値）の分布　（HO ダム）

データのヒストグラムと正規分布曲線との良好な対応とあわせて、**図－4.7** は、少なくともロット内の物性値が正規分布することを、肯定的に示唆する材料になると考えられる。

一方、コア材料でもサンプル数が 58 ロットと少ないので、ロット平均値のヒストグラムから各材料の分布形を特定することは難しい。さらにロット数が少ない、フィルター材料やロック材料のロット平均値についてはなおさらである。正規分布の適合性に関しては、**(2)**の HA ダムの事例も含めて**(3)**で再度論じる。

密度の標準偏差は ρ_t、ρ_dともにコア材料で最も小さく、フィルター材料からロック材料へと粒径が大きくなるにしたがって、標準偏差は大きくなっている。含水比は、コア材料（遮水性材料）とフィルター材料やロック材料（透水性材料）では、分布域が大きく異なっているため、標準偏差と粒径との関係は密度の場合のように順序だってはいないが、変動係数でみるとやはり粒径と単調な相関を示すことがわかる。

次に、各材料の物性値（湿潤密度 ρ_t、乾燥密度 ρ_d、および含水比 w）の総変動 σ^2 を、ロット間変動 σ_1^2 とロット内変動 σ_2^2 に分解して、それぞれの寄与率を求めると以下の如くである。総変動 σ^2 はすでに述べたように、一般に次式のように分解することができる。まず SRID の誤差変動 σ_3^2 は、すでに**第 3 章**で述べたように σ_2^2 の 1/10 以下と見積られているので、ここでは無視する（あるいは σ_2^2 に操込まれているものと考える）。

$$\sigma^2 = \sigma_1{}^2 + \sigma_2{}^2 + \sigma_3{}^2 \qquad (4.1)$$

ここで　　σ^2：測定値の総変動

$\sigma_1{}^2$：ロット間変動

$\sigma_2{}^2$：ロット内変動

$\sigma_3{}^2$：測定器の精度に起因する変動（誤差変動）

コア材料の湿潤密度において、ロット間変動の標準偏差は、**図－4.4** の分布から σ_1= 0.016 t/m³ という値が得られている。この値を(4.1)式に代入してロット内変動の標準偏差を求めると σ_2=0.023 t/m³ となる。当然のことながら、この値は**図－4.5** に示されている値 σ_2=0.024 t/m³ とほとんど合致している。これらの試算からコア材料の場合、湿潤密度の変動要因のなかで寄与率が最も大きいのは、ロット内変動であるということがわかる。ロット内変動は総変動の約 74%を占めており、ロット間変動（約 33%）よりも約 2 倍大きい。コア材料の乾燥密度や含水比ついても同様で、ロット内変動は総変動の 60%程度を占めている。これらの寄与率を全ての材料についてまとめると**表－4.3** のようになる。フィルター材料では、各物性値のロット内変動とロット間変動の差は少ない。ロック材料の場合、密度はロット内変動が 70%前後を占めているが、含水比ではほぼ等しくなっている。このように、ロット内変動とロット間変動の寄与率は、材料や物性値によっても変わることを示している。

表－4.3　各ゾーンの分散と寄与率（HO ダム）

ゾーン	項　目	ロット間分散 ① $\sigma_1{}^2$	ロット内分散 ② $\sigma_2{}^2$	総分散 ③ σ^2	寄与率 ①/③ (%)	寄与率 ②/③ (%)
コ　ア	湿潤密度 ρ_t	0.016^2	0.024^2	0.028^2	32.7	73.5
	乾燥密度 ρ_d	0.029^2	0.037^2	0.047^2	38.1	62.0
	含 水 比 w	1.31^2	1.63^2	2.09^2	39.3	60.8
フィルター	湿潤密度 ρ_t	0.036^2	0.036^2	0.050^2	51.8	51.8
	乾燥密度 ρ_d	0.045^2	0.040^2	0.059^2	58.2	46.0
	含 水 比 w	1.29^2	1.15^2	1.71^2	56.9	45.2
ロック	湿潤密度 ρ_t	0.028^2	0.047^2	0.055^2	25.9	73.0
	乾燥密度 ρ_d	0.045^2	0.063^2	0.077^2	34.2	67.0
	含 水 比 w	1.55^2	1.52^2	2.15^2	52.0	50.0

(2) HA ダムの事例

およそ一年間の追跡調査で収集された、HA ダムの各材料の物性値（湿潤密度 ρ_t、乾燥密度 ρ_d、および含水比 w）の分布を、HO ダムのケースに習って以下の各図に示す。**図－4.8** は各材料の全測定データのヒストグラムを示している。**図－4.9** は各材料のロット平均値のヒストグラムである。また、**図－4.10** には各材料の偏差データのヒストグラムを示している。最後に**図－4.11** に各材料のロット内分散を示す。これらのヒストグラムを総括した、物性値の統計量を**表－4.4** にまとめている。

表－4.4　密度および含水比の統計量（HA ダム）

		コア			フィルター			ロック		
		全測点	ロット平均値	ﾛｯﾄ平均値からの偏差	全測点	ロット平均値	ﾛｯﾄ平均値からの偏差	全測点	ロット平均値	ﾛｯﾄ平均値からの偏差
ρ_t	標 本 数	3340	334	3340	294	20	294	343	23	343
	最 大 値 t/m³	2.180	2.122	0.083	2.585	2.425	0.259	2.609	2.535	0.206
	最 小 値 t/m³	1.868	1.984	-0.118	2.010	2.133	-0.217	2.095	2.232	-0.137
	平 均 値 t/m³	2.048	2.048	0.000	2.305	2.305	0.000	2.398	2.398	0.000
	標準偏差 t/m³	0.032	0.024	0.021	0.087	0.058	0.066	0.088	0.069	0.057
	変動係数 %	1.56	1.17	－	3.77	2.52	－	3.67	2.88	－
ρ_d	標 本 数	3340	334	3340	294	20	294	343	23	343
	最 大 値 t/m³	1.912	1.847	0.111	2.558	2.318	0.264	2.521	2.455	0.164
	最 小 値 t/m³	1.516	1.634	-0.120	2.011	2.120	-0.199	2.065	2.198	-0.133
	平 均 値 t/m³	1.742	1.742	0.000	2.266	2.266	0.000	2.329	2.329	0.000
	標準偏差 t/m³	0.042	0.033	0.026	0.075	0.046	0.060	0.076	0.055	0.053
	変動係数 %	2.41	1.89	－	3.31	2.03	－	3.26	2.36	－
w	標 本 数	3340	334	3340	294	20	294	343	23	343
	最 大 値 %	23.5	21.6	4.0	5.5	4.7	1.9	7.1	5.8	3.3
	最 小 値 %	12.5	13.6	-3.7	-0.1	0.4	-2.3	0.0	1.0	-1.9
	平 均 値 %	17.6	17.6	0.0	1.7	1.7	0.0	2.9	3.0	0.0
	標準偏差 %	1.50	1.19	0.92	1.20	1.04	0.62	1.43	1.28	0.70
	変動係数 %	8.52	6.76	－	70.59	61.18	－	49.31	42.67	－

HA ダムではコア材料で 334 ロットの管理データが得られているので、ロット間変動の分布特性が明らかにできる。他方、フィルター材料とロック材料に関しては、ロット数が限られているので（フィルター材料 20 ロット、ロック材料 23 ロット）、HO ダムの場合と同じくロット平均値の分布形はほとんど不明である。

コア材料の各物性値は、全データ、ロット平均値および偏差データの全てが、少なくとも視覚的には正規分布によく適合しているように見える。フィルター材料とロック材料の密度の分布には多少ひずみが見られるけれども、正規分布で近似しても特に実用面で問題がでるほどではないように思われる。ちなみに自由度の大きいコア材料の密度と含水比について、χ^2 値のヒストグラムを χ^2 分布と比べてみると、HO ダムの場合と同様に両者は

比較的よく対応しており、ロット内の標本分布が安定した正規性をもっていることを示唆している（**図－4.12**）。HO ダムのケースと比べて、HA ダムで違いが目立つのがフィルター材料とロック材料の含水比の分布である。平均含水比が小さい（ほとんどのデータが 5%以下に分布している）割には相対的に分散が大きく、正規分布よりも図に示した対数正規分布に近い分布形状になっている。これらの透水性材料の含水比はコア材料よりもかなり低いため、その強度がコア材料のように含水比に敏感に影響されることはない（密度型の粗粒材料）。このため、ロック材料やフィルター材料の含水比が厳しくコントロールされることはほとんどない。締固め密度の管理の方が重要である。したがって比較的狭い範囲に分布する含水比の分布形にこだわる必要もない。フィルター材料の乾燥密度の分布には密度の高い側でひずみを生じているが、これは含水比分布の非正規性と関係するものではない。後に示すように、両者の間にはほとんど相関性が認められないからである。

図−4.8　密度および含水比の分布（全データ：HA ダム）

図－4.9　ロット平均値の分布（HA ダム）

図－4.10　密度および含水比の分布（偏差データ：HA ダム）

図－4.11　密度および含水比のロット内分散の分布（偏差データ：HA ダム）

図－4.12　コア材料のばらつき（χ^2値）の分布（HA ダム）

各材料のロット間変動とロット内変動の寄与率を、**表－4.5** にまとめて示す。HO ダムのコア材料とは対照的に、HA ダムのコア材料の密度と含水比は、いずれもロット間変動がロット内変動よりも多少大きくなっている点が注目される。透水性材料の含水比もロット間変動の方が卓越している。ロック材料の密度でもロット間変動の方がロット内変動よりやや大きくなっているが、フィルター材料の密度は逆の傾向を示している。これは材料そのものがかなり変動していることを示唆しており、このような材料ではロットをあまり大きく設定しないで､材料の変動をきめ細かく追跡する品質管理が必要になる｡ちなみに、**図－4.10** に見られるとおり、コア材料はもとより透水性材料の偏差データは、いずれも比較的よくまとまった分布形状を示しており、ロット内の分布が安定していることを暗示している。

表－4.5　各ゾーンの分散と寄与率（HA ダム）

ゾーン	項　目	ロット間分散 ① σ_1^2	ロット内分散 ② σ_2^2	総分散 ③ σ^2	寄与率 ①/③ (%)	寄与率 ②/③ (%)
コ　ア	湿潤密度 ρ_t	0.024^2	0.021^2	0.032^2	56.3	43.1
	乾燥密度 ρ_d	0.033^2	0.026^2	0.042^2	61.7	38.3
	含 水 比 w	1.19^2	0.92^2	1.50^2	62.9	37.6
フィルター	湿潤密度 ρ_t	0.058^2	0.066^2	0.087^2	44.4	57.6
	乾燥密度 ρ_d	0.046^2	0.060^2	0.075^2	37.6	64.0
	含 水 比 w	1.04^2	0.62^2	1.20^2	75.1	26.7
ロック	湿潤密度 ρ_t	0.069^2	0.057^2	0.088^2	61.5	42.0
	乾燥密度 ρ_d	0.055^2	0.053^2	0.076^2	52.4	48.6
	含 水 比 w	1.28^2	0.70^2	1.43^2	80.1	24.0

(3)　分布の正規性

前項までに示した各物性値のヒストグラムを見ると、標本数が十分に多いケースでは、少なくとも視覚的には正規分布もしくはこれに近い分布形を示す事例が多いことがわかる。しかし、標本数が十分とはいえないロット平均値のヒストグラムから、その分布形を特定することはほとんどできない（HA ダムのコア材料を除く）。十分な標本数があったとしても HA ダムのフィルター材料やロック材料のように、物理的な制約から正規分布とは見なせないものもある。

標本データがある特定の理論分布に従っていると見なせるか否かを統計的に判断するときに、χ^2 検定が用いられることが多い。この方法は、標本数が無限大のときに、ヒストグラムの実測度数と理論度数の差の二乗と理論度数の比の総和が χ^2 分布することを利用して、理論分布との適合性を判定するものである。**表－4.6** に HO ダムと HA ダムの各物性値について、χ^2 法による正規分布への適合性を検定した結果を示す。ロット平均値の場合は標本数が不足しているため、あくまでも参考程度の評価に留まるが、正規分布していないとはいえないと判定されている（ただし、標本数が少ないため検出力は低い）。各物性値およびそれらの偏差データは、全体的に見て HO ダムの方が HA ダムよりも正規性がある（より正確には「正規分布ではないとはいえない」）と判断されているケースが多い。HA ダムでは、ヒストグラムと標本分散から推定した理論正規分布が非常によく一致しているように見える、コア材料の全データと含水比を除いた偏差データが、信頼度 99%のレベルで正規分布と有意な食い違いがあると判定されている。すなわち、正規分布とは見なし難いという結論になっている。実際、両ダムの個々のヒストグラムを比べても、正規分布の近似度にそれほどの差があるようには思われない。HO ダムと HA ダムで適合性の判定結果に差がでたのは、標本数の違いに起因している可能性も考えられる。χ^2 検定の場

合、同じデータであってもヒストグラムの作りかたによって判定結果が影響を受けたり、度数の少ない両端部の影響を受けやすいなどの問題点が指摘されている。

表－4.6(a)　正規性の検定（χ^2法）

HOダム

ゾーン	項　目		標本数N	判定方法	k	χ_0^2	$\chi^2(k-3;0.05)$	$\chi^2(k-3;0.01)$	判定
コア	全データ	ρ_t	820	A	9	8.294	12.592	16.812	
		ρ_d	820	A	13	12.639	18.307	23.209	
		w	820	A	11	15.100	15.507	20.090	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	58	A	4	1.251	3.841	6.635	
		ρ_d	58	A	5	0.882	5.991	9.210	
		w	58	A	4	1.343	3.841	6.635	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	820	A	13	11.401	18.307	23.209	
		$\Delta\rho_d$	820	A	19	11.174	26.296	32.000	
		Δw	820	A	17	12.430	23.685	29.141	
ﾌｨﾙﾀｰ	全データ	ρ_t	390	A	12	8.406	16.919	21.666	
		ρ_d	390	A	14	7.712	19.675	24.725	
		w	390	A	9	8.923	12.592	16.812	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	26	A	5	1.036	5.991	9.210	
		ρ_d	26	A	5	2.058	5.991	9.210	
		w	26	A	4	0.524	3.841	6.635	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	390	A	9	5.768	12.592	16.812	
		$\Delta\rho_d$	390	A	9	5.945	12.592	16.812	
		Δw	390	A	11	26.532	15.507	20.090	**
				B	11	32.135	15.507	20.090	**
ロック	全データ	ρ_t	353	A	13	14.602	18.307	23.209	
		ρ_d	353	A	17	21.226	23.685	29.141	
		w	353	A	10	12.595	14.067	18.475	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	24	A	4	0.634	3.841	6.635	
		ρ_d	24	A	5	1.576	5.991	9.210	
		w	24	A	4	0.165	3.841	6.635	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	353	A	11	12.635	15.507	20.090	
		$\Delta\rho_d$	353	A	15	16.071	21.026	26.217	
		Δw	353	A	15	7.138	21.026	26.217	

判定方法
　A：全データのσとμで理論分布を算定
　B：μ±3σ内のデータだけでσ、μを再計算して理論分布を算定
A法で有意差(有意水準1%または5%)がでた場合にB法を実施

判　　定：1%有意(**)
　　5%有意(*)
　　有意性保留(空白)

検定規準：$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - f_i)^2}{f_i}$

検定規則：$R : \chi_0^2 \geqq \chi^2(k-3;\alpha)$

n_i：標本度数
f_i：理論度数
k：分割数

表－4.6(b)　正規性の検定（χ^2法）

HAダム

ゾーン	項　目		標本数N	判定方法	k	χ_0^2	$\chi^2(k-3;0.05)$	$\chi^2(k-3;0.01)$	判定
コア	全データ	ρ_t	3340	A	11	28.000	15.507	20.090	**
				B	11	37.257	15.507	20.090	**
		ρ_d	3340	A	13	24.861	18.307	23.209	**
				B	13	29.721	18.307	23.209	**
		w	3340	A	19	43.669	26.296	32.000	**
				B	18	51.404	24.996	30.578	**
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	334	A	7	6.230	9.488	13.277	
		ρ_d	334	A	8	11.415	11.070	15.086	*
				B	8	13.591	11.070	15.086	*
		w	334	A	11	6.055	15.507	20.090	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	3340	A	13	114.009	18.307	23.209	**
				B	13	194.559	18.307	23.209	**
		$\Delta\rho_d$	3340	A	17	64.065	23.685	29.141	**
				B	15	58.267	21.026	26.217	**
		Δw	3340	A	11	14.490	15.507	20.090	
ﾌｨﾙﾀｰ	全データ	ρ_t	294	A	8	7.564	11.070	15.086	
		ρ_d	294	A	7	15.746	9.488	13.277	**
				B	7	13.992	9.488	13.277	**
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	20	A	4	5.236	3.841	6.635	*
				B	4	5.236	3.841	6.635	*
		ρ_d	20	A	4	0.336	3.841	6.635	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	294	A	14	17.877	19.675	24.725	
		$\Delta\rho_d$	294	A	14	9.225	19.675	24.725	
		Δw	294	A	6	13.560	7.815	11.345	**
				B	6	12.263	7.815	11.345	**
ロック	全データ	ρ_t	343	A	9	5.781	12.592	16.812	
		ρ_d	343	A	8	6.899	11.070	15.086	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	23	A	4	0.654	3.841	6.635	
		ρ_d	23	A	4	4.139	3.841	6.635	*
				B	4	4.139	3.841	6.635	*
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	343	A	14	9.856	19.675	24.725	
		$\Delta\rho_d$	343	A	12	5.260	16.919	21.666	
		Δw	343	A	8	9.803	11.070	15.086	

判定方法
　A：全データのσとμで理論分布を算定
　B：μ±3σ内のデータだけでσ、μを再計算して理論分布を算定
A法で有意差(有意水準1%または5%)がでた場合にB法を実施

判　　定：1%有意(**)
　　5%有意(*)
　　有意性保留(空白)

検定規準：$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(n_i - f_i)^2}{f_i}$

検定規則：$R : \chi_0^2 \geqq \chi^2(k-3;\alpha)$

n_i：標本度数
f_i：理論度数
k：分割数

ヒストグラムを用いないで、測定データそのものを用いて分布の適合性を評価する方法として、Kolmogorov-Smirnov 検定（K-S 検定）がある[2)]。K-S 検定では、各データの位置で理論分布の積分曲線と積算度数の開きを逐一チェックして、その最大値から適合性を判定する。χ^2 検定では理論分布のパラメータ（正規分布の場合、母平均と母分散）を標本データから推定することができる。ただし、そのときには χ^2 分布の自由度をパラメータの数だけ下げる必要がある。K-S 検定では理論分布のパラメータを標本データから推定することが許容されていないので、予め何らかの方法で設定しておかなければならない。締固め密度や施工含水比の場合、これはほとんど不可能である。この点で厳密にいえば、K-S 検定法の適用そのものに理論的な問題があるが、ここでは χ^2 検定のときと同様に、検定データから正規分布の母平均と母分散を推定した。**表－4.7** に示した K-S 法の検定結果と、**表－4.6** の χ^2 法の結果を比べると明らかなように、適合性の判定結果はかなり異なっている。HO ダムの場合、K-S 法では全材料の全てのケースで正規分布に適合すると判定されている。また、HA ダムでもフィルター材料とロック材料に関しては、全てのケースで正規性が肯定的に評価されているが、コア材料では危険率 1%水準で 1 ケース（湿潤密度の偏差データ）、また危険率 5%水準でも 2 ケース（乾燥密度の全データと偏差データ）で、正規分布の適合性が否定されている。それでも K-S 法では、χ^2 検定に比べ全体的に分布の正規性がより肯定的に評価されている。

分布の適合性の検定においては、理論分布のパラメータを修正すると判定結果が変わることがあるので注意する必要がある。K-S 検定で正規性が統計的に否定された 5 ケースの各ヒストグラムをよく見ると、数は少ないけれども理論度数がほとんどゼロの端部にもデータが出現しているので、試しに平均値から 3σ 以上離れたデータを除いて分散を求めなおし、母平均は変えず分散だけを修正して、母分散を再推定したときに除外したデータも含めた全データを用いて、再度 K-S 検定を行ってみた。その結果も**表－4.7** に示している。再検定では全てのケースで正規分布の適合性が肯定される結果となった。これは標本データから機械的に推定した正規分布の母数が決して最良ではないということを示す教訓である。いいかえれば最初の検定結果は正規性が否定されたのではなく、分布のパラメータが適切ではなかったということである。

表－4.7(a)　正規性の検定（Kolmogorov-Smirnov 検定）

HOダム

ゾーン	項　　目		標本数N	判定方法	平均値μ	標準偏差σ	D_N	$D_N^{0.05}$	$D_N^{0.01}$	判定
コア	全データ	ρ_t	820	A	1.966	0.028	0.01672	0.04749	0.05692	
		ρ_d	820	A	1.638	0.047	0.02449	0.04749	0.05692	
		w	820	A	20.0	2.09	0.03195	0.04749	0.05692	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	58	A	1.966	0.016	0.08076	0.17857	0.21402	
		ρ_d	58	A	1.639	0.029	0.10011	0.17857	0.21402	
		w	58	A	20.0	1.31	0.10230	0.17857	0.21402	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	820	A	0.000	0.024	0.02555	0.04749	0.05692	
		$\Delta\rho_d$	820	A	0.000	0.037	0.02598	0.04749	0.05692	
		Δw	820	A	0.0	1.63	0.02194	0.04749	0.05692	
ﾌｨﾙﾀｰ	全データ	ρ_t	390	A	2.160	0.050	0.01899	0.06886	0.08253	
		ρ_d	390	A	2.021	0.059	0.03711	0.06886	0.08253	
		w	390	A	6.9	1.71	0.04406	0.06886	0.08253	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	26	A	2.160	0.036	0.22312	0.26000	0.31000	
		ρ_d	26	A	2.021	0.045	0.13797	0.26000	0.31000	
		w	26	A	6.9	1.29	0.09661	0.26000	0.31000	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	390	A	0.000	0.036	0.02570	0.06886	0.08253	
		$\Delta\rho_d$	390	A	0.000	0.040	0.04133	0.06886	0.08253	
		Δw	390	A	0.0	1.15	0.05268	0.06886	0.08253	
ロック	全データ	ρ_t	353	A	2.259	0.055	0.04137	0.07238	0.08675	
		ρ_d	353	A	2.151	0.077	0.03233	0.07238	0.08675	
		w	353	A	5.1	2.15	0.04473	0.07238	0.08675	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	24	A	2.260	0.028	0.12000	0.27000	0.32000	
		ρ_d	24	A	2.151	0.045	0.11808	0.27000	0.32000	
		w	24	A	5.1	1.55	0.07984	0.27000	0.32000	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	353	A	0.000	0.047	0.04801	0.07238	0.08675	
		$\Delta\rho_d$	353	A	0.000	0.063	0.07071	0.07238	0.08675	
		Δw	353	A	0.0	1.52	0.02193	0.07238	0.08675	

判定方法

A：全データのσとμで理論分布を算定

B：μ±3σ内のデータだけでσのみ再計算して理論分布を算定

C：μ±3σ内のデータだけでσおよびμを再計算して理論分布を算定

A法で有意差(有意水準1%または5%)がでた場合はB法を実施し、B法でも有意差がでた場合にはさらにC法を実施

判　　定：1%有意(**)
5%有意(*)
有意性保留(空白)

検定規準：$D_N = \max|F(x) - S_N(x)|$

検定規則：$R : D_N \geqq D_N^{\alpha}$

$F(x)$: 理論分布関数

$S_N(x)$: 累積度数関数

D_N^{α}: 臨界値

表－4.7(b)　正規性の検定（Kolmogorov-Smirnov 検定）

HAダム

ゾーン	項　目		標本数N	判定方法	平均値μ	標準偏差σ	D_N	$D_N^{0.05}$	$D_N^{0.01}$	判定
コア	全データ	ρ_t	3340	A	2.048	0.032	0.02323	0.02353	0.02820	
		ρ_d	3340	A	1.742	0.042	0.02470	0.02353	0.02820	*
				B	1.742	0.041	0.02517	0.02353	0.02820	*
				C	1.742	0.041	0.02517	0.02353	0.02820	*
		w	3340	A	17.6	1.50	0.02198	0.02353	0.02820	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	334	A	2.048	0.024	0.02837	0.07441	0.08918	
		ρ_d	334	A	1.742	0.033	0.06331	0.07441	0.08918	
		w	334	A	17.6	1.19	0.02858	0.07441	0.08918	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	3340	A	0.000	0.021	0.03854	0.02353	0.02820	**
				B	0.000	0.020	0.02317	0.02353	0.02820	
		$\Delta\rho_d$	3340	A	0.000	0.026	0.02377	0.02353	0.02820	*
				B	0.000	0.025	0.01322	0.02353	0.02820	
		Δw	3340	A	0.0	0.92	0.01711	0.02353	0.02820	
ﾌｨﾙﾀｰ	全データ	ρ_t	294	A	2.305	0.087	0.05245	0.07931	0.09506	
		ρ_d	294	A	2.266	0.075	0.07051	0.07931	0.09506	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	20	A	2.305	0.058	0.12712	0.29000	0.36000	
		ρ_d	20	A	2.266	0.046	0.12750	0.29000	0.36000	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	294	A	0.000	0.066	0.04893	0.07931	0.09506	
		$\Delta\rho_d$	294	A	0.000	0.060	0.04503	0.07931	0.09506	
		Δw	294	A	0.0	0.62	0.06208	0.07931	0.09506	
ロック	全データ	ρ_t	343	A	2.398	0.088	0.03515	0.07343	0.08801	
		ρ_d	343	A	2.329	0.076	0.06073	0.07343	0.08801	
	ﾛｯﾄ内平均値	ρ_t	23	A	2.398	0.069	0.10873	0.28000	0.34000	
		ρ_d	23	A	2.329	0.055	0.13135	0.28000	0.34000	
	ﾛｯﾄ内平均値からの偏差	$\Delta\rho_t$	343	A	0.000	0.057	0.03007	0.07343	0.08801	
		$\Delta\rho_d$	343	A	0.000	0.053	0.01915	0.07343	0.08801	
		Δw	343	A	0.0	0.70	0.05630	0.07343	0.08801	

判定方法

A：全データのσとμで理論分布を算定

B：μ±3σ内のデータだけでσのみ再計算して理論分布を算定

C：μ±3σ内のデータだけでσおよびμを再計算して理論分布を算定

A法で有意差(有意水準1%または5%)がでた場合はB法を実施し、B法でも有意差がでた場合にはさらにC法を実施

判　　定：1%有意(**)
5%有意(*)
有意性保留(空白)

検定規準：$D_N = \max|F(x) - S_N(x)|$

検定規則：$R : D_N \geqq D_N^{\alpha}$

$F(x)$: 理論分布関数

$S_N(x)$: 累積度数関数

D_N^{α}: 臨界値

以上に示したように、ここで検討したフィル材料の施工含水比や転圧後の締固め密度は特別の制約がない限り、少なくとも“近似的に正規分布する”とみなすのは、工学的に妥当な評価といえる。品質管理などへの応用にはこれで十分であり、さらに広範な盛立材料について近似的な正規性を確認してゆくことの方が、実用的な価値は大きいはずである。

(4) 分散の一様性

分布の正規性の検証に用いた、締固め密度や施工含水比などの物性データは、ある特定の施工ロットから収集した局所的な標本ではない。コア材料の場合、HO ダムでは 58 ロット、HA ダムでは 334 ロットで得られた、1 ロット当たり 10 点ないし 15 点の測定データを集積した、集合データが用いられている。したがって、そこで得られた結論はこれらのデータが収集された盛立て層全体の広域的な分布特性を表している。それでは、品質管理において合否判定の基本単位になる、個々の施工ロット内の分布についても同じことがいえるであろうか。すなわち、それぞれのロット内でも密度や含水比は正規分布し、分散はロット間で一様であり、広域的に評価された分散と等しいといえるであろうか。すでに見てきたように、分布の正規性やそのパラメータを的確に評価するためには、数多くの標本データ（フィル材料の場合、筆者の経験的な目安では最低でも 100 個以上の標本が必要である）を数十ロットから収集する必要がある。残念ながら、このような目的意識をもって個々のロットから大量に収集された標本は今のところないので、個別ロットの正規性に関しては直接検証することができない。しかし、単一ロット内においても正規分布する可能性は非常に高いと考えられるのが自然である。なぜなら、フィルダムの盛立ては同質の材料を用いて、同じ方法で締固められる施工の積み重ねにすぎないからである。また、各ロットの施工面積も十分広く、ロット間で粒度のばらつきが顕在化することもないので、逆に正規性を壊すような要因を探すほうが難しい。

一方、分散の一様性に関してはこれまでのデータを使って検証することができる。**表－4.8** に示すように、分散の一様性の検定にはいくつかの方法がある [3)]。設定された検定基準の値を計算して、適当な有意水準での棄却限界値と比較する通常の検定法は、いずれも母集団の正規性を仮定している。χ^2 検定を用いる Bartlett の方法では標本分散の自由度が一定でなくてもよいが、分散の最大値や最小値を検定基準にする Hartley の方法と Cochran の方法は計算が簡単である反面、自由度が一定の場合しか使えない。Box の方法は検定基準の代わりに、各母集団から複数個の分散標本を抽出し、その対数を正規母集団からの標本と見なして一元配置の分散分析を行い、分散の有意差を検出するものである。Box の方法は、検定の強靭性や検出力の点で他の方法に優るとされている。筆者らのデータでは、一つのロットから一つの分散標本しか得られていないので、ここでは Bartlett の方法を用いて、HO ダムと HA ダムの全材料と、SU ダムと CY ダムのコア材料について、

表－4.8　等分散の検定方法

適用母集団	自由度	検 定 法	検定規準
正規分布を前提とする	φ:任意	Bartlett の方法	$\chi^2 = -\frac{1}{c}\sum \phi_i \ln \frac{v_i^2}{v^2}$　(注 1)
	φ:一定	Hartley の方法	$F_{\max} = \frac{v^2{}_{\max}}{v^2{}_{\min}}$
		Cochran の方法	$C_0 = \frac{v^2{}_{\max}}{\sum v_i^2}$
必ずしも正規分布を仮定しない	φ:任意	Box の方法	$x_{ij} = \log v_{ij}^2$ （一元配置の分散分析）

注１）表－4.9 参照

分散の一様性を調べた。検定結果を**表－4.9** に示す。HO ダムのコア材料では密度、含水比ともに統計的に有意な差はないが、HA ダムの全ての材料を含めてこれ以外のケースでは､ロット内分散はロット間で一様ではなく､統計的に有意な差があると判定されている。したがって統計的な締固め管理では、分散の一様性を前提にすることはできないが、これは必ずしも絶対的に必要な条件ではない。

締固め密度や含水比の統計的性質は、いうまでもなく品質管理や盛立試験データの解析に役立てるものである。品質管理において管理されるのはロットの平均密度であり、ばらつき（分散）そのものを管理するわけではない。平均密度の合理的な管理限界の設定に密度や含水比の正規性や分散に関する情報が係わってくる。このとき必要になる分散は個別のロットの分散では決してない。実際に必要とされるのは“全てのロットに適用できるばらつきの尺度”であり、このような共通の尺度としては、すでに検討した偏差データの分散（これはある意味で平均的な分散を表現している）を用いるのが、最も理にかなっていると考えられるからである。

表－4.9　等分散の検定（Bartlett の方法）

ダム	ゾーン	物性値	分散標本数 k	χ_0^2	$\chi^2(k\text{-}1;0.05)$	$\chi^2(k\text{-}1;0.01)$	判定
HO	コア	ρ_t	58	73.75	75.62	84.73	
		ρ_d	58	61.13	75.62	84.73	
		w	58	65.59	75.62	84.73	
	フィルター	ρ_t	26	54.12	37.65	44.31	**
		ρ_d	26	58.50	37.65	44.31	**
		w	26	123.79	37.65	44.31	**
	ロック	ρ_t	24	62.92	35.17	41.64	**
		ρ_d	24	70.59	35.17	41.64	**
		w	24	29.42	35.17	41.64	
HA	コア	ρ_t	334	812.09	376.55	395.96	**
		ρ_d	334	583.36	376.55	395.96	**
		w	334	414.22	376.55	395.96	**
	フィルター	ρ_t	20	40.62	30.14	36.19	**
		ρ_d	20	35.87	30.14	36.19	*
		w	20	123.04	30.14	36.19	**
	ロック	ρ_t	23	39.49	33.92	40.29	*
		ρ_d	23	32.31	33.92	40.29	
		w	23	92.36	33.92	40.29	**
SU	コア	ρ_t	236	750.71	271.76	288.35	**
		ρ_d	236	970.99	271.76	288.35	**
		w	236	818.23	271.76	288.35	**
CY	コア	ρ_t	178	240.63	209.04	223.69	**
		ρ_d	178	271.14	209.04	223.69	**
		w	178	312.77	209.04	223.69	**

判　　定：1%有意(**)
5%有意(*)
有意性保留(空白)

検定規準：$\chi_0^2 = -\frac{1}{c}\sum_{i=1}^{k}\phi_i \ln\frac{v_i^2}{v^2}$

検定規則：$R : \chi_0^2 \geqq \chi^2(k\text{-}1;\alpha)$

v_i^2: 標本不偏分散(i=1～k)
ϕ_i: 自由度
k : 分散標本数
$v^2 = \Sigma\,\phi_i v_i^2 / \Sigma\,\phi_i$

$$c = 1 + \frac{1}{3(k-1)}\left(\Sigma\frac{1}{\phi_i} - \frac{1}{\Sigma\,\phi_i}\right)$$

4.1.2　乾燥密度の含水比依存性

HO ダムと HA ダムの各材料ごとに、乾燥密度 ρ_dと含水比 w の相関図を**図－4.13** に示す[4)]。HO ダムのケースを見ると、コア材料では大部分のデータが飽和度 S_r=70～90%の細長い帯状領域に集中しており、ρ_dが w に強く依存していることを示している。また、w が低下するにしたがって飽和度も緩やかに低下する傾向が認められる。フィルター材料の含水比は、主要部分が w=3～11%の範囲に分布しており、含水比の分布幅はコア材料よりも狭い。密度の含水比依存性はコア材料ほど顕著ではないが、乾燥側で密度は大きく、含水比が大きくなるにつれて密度が減少する傾向が認められる。飽和度はコア材料に比べ低く、その分布域はかなり広くなっている。ロック材料では、ほとんどのデータが 10%以下の含水比範囲に分布しており、全体としてはフィルター材料よりも広い範囲にデータが分散している。ロック材料においても、コア材料、フィルター材料と同様に、ρ_d～w 関係は右下がりの分布傾向をはっきりと示している。飽和度はフィルター材料と同様に低く、その分布範囲は広い。

一方、HA ダムのケースでも、コア材料の含水比依存性が明確に認められる。HO ダムに比べると、飽和度は高く 70～100%のやや広い範囲に分布している。他方、フィルター材料とロック材料では、ほとんどのデータが w＝0～5%の狭い範囲内に分布しており、含水比の分布幅が狭いこともあって有意な含水比依存性は見られない。

以上に示したように、HA ダムのフィルター材料とロック材料を除き、各材料とも締固め密度は施工含水比と強い相関をもっており、このため**図－4.3** と**図－4.8** に示した ρ_dの分散には、含水比の変化に起因する変動成分が含まれている。そこで、含水比に依存しないばらつきの成分を評価するため、**図－4.13** に示した回帰線からの ρ_d の偏差を求め、そのヒストグラムを**図－4.14** に示す。**表－4.10** には含水比に依存する分散成分の割合を示している。HO ダムでは、含水比に依存しない成分はコア材料で約 15%であるのに対し、ロック材料では約 51%、フィルター材料では約 87%にも達している。HA ダムのコア材料では、全変動の約 4 割が含水比に依存しない、材料自身のばらつきに起因する変動である。このように、特にコア材料の密度は含水比に強く依存しており、転圧効果の判断や品質管理基準の設定においては、この事実を十分考慮しなければならない。フィルター材料やロック材料ではコア材料ほど強くはないが、やはり含水比依存性を示すことがあり、この場合には当然のことながら、コア材料と同様の配慮が必要である。

図－4.13 乾燥密度と含水比の関係図（全データ）

図－4.14 回帰偏差の分布(乾燥密度)

表－4.10 乾燥密度の含水比依存性

ダム名	材料	ρ_d 偏差の分散 $\sigma_{\Delta\rho}^2$ ①	全体の分散 σ_{ρ}^2 ②	①／②（%）
HO ダム	コア材料	0.018^2	0.047^2	15
	フィルター材料	0.055^2	0.059^2	87
	ロック材料	0.055^2	0.077^2	51
HA ダム	コア材料	0.027^2	0.041^2	41

4.2　盛立試験方法の改良

従来の盛立試験では、所定の転圧回数ごとに試験ゾーンを設けて、転圧効果（転圧回数と密度との関係）を調べるのが一般的であった。このような盛立試験ゾーンの構成（ここでは分離ゾーン方式と呼ぶ)は､密度を置換法によって求めることと密接に関係している。置換法は転圧面に置換孔を掘削するので一種の破壊試験であり、試験後に置換領域を原状に復元することができない。したがって同じゾーン内で転圧効果を調べようとすると、転圧回数の設定水準ごとに試験位置をかえなければならない。同じポイントで繰返し試験ができないからである。このため、試験ゾーンは広いエリアを占めることになり、施工土量もそれだけ多くなる。従来の盛立試験ではこのような形式をとらず、**図－4.15** に示すように転圧回数ごとに試験位置を分ける方式がとられてきた。

図－4.15　分離ゾーン方式のゾーン構成

分離ゾーン方式の盛立試験で得られた､転圧回数と密度の関係を示す事例を**図－4.16** に示している [5),6)]。これは一例にすぎないが、他の多くの事例においても、この図と同じように転圧効果を客観的に評価することが困難な場合が多い。

分離ゾーン方式で行われた転圧試験の最大の欠陥は、各ゾーン間にすでに「材料の違い（粒度と含水比の変動)という予測できない密度の変動要因が潜在している」ことである。これは、材料の粒度や含水比をゾーン間で完全に一様にすることが事実上不可能であることに起因している｡ゾーン間の粒度や含水比が一様であることをチェックする方法はなく、また、たとえ事前にわかったとしてもその結果が密度にどの程度影響するかを予測することはできない。従来の分離ゾーン方式の盛立試験では、ゾーン間に材料差はないものと暗黙裡に理解されていたが、これは実態を正しく反映していない。しかも、眼に見えない材料差の影響は、無視できるほど小さくないということも明らかにされている。

ロック材料

コア材料

図－4.16　分離ゾーン方式の結果例(ロック材料[5]、コア材料[6])

一方、SRID は測点ごとに線源捧（φ16 mm）を挿入するための細孔（φ19 mm）をドリルで削孔する必要があるが、これ以外は地盤状態を全くかえないで密度を求めることができる。測定後に挿入孔内に保護捧を差込んでおけば、以降の転圧時に挿入孔が損傷を受けたり閉塞したりする心配はない。このため転圧を続行しながら、所定回数の転圧をするたびに、同じポイントにおいて何度でも測定を行うことができる。したがって、最初に選定しておいた複数の測点において、転圧回数が違うということ以外は全く同じ条件のもとで、転圧に伴う密度の変化をとらえることが可能になる。これは RI 法がもっている“本質的に非破壊測定法である”という特質がもたらした利点である。このように SRID を用

図－4.17　単一ゾーン方式の盛立試験ゾーン

いると**図－4.17** に示すように、たったひとつの試験ゾーン（単一ゾーン方式と呼ぶ）の中で、転圧効果に影響を及ぼす他の要因を排除して、転圧回数の差だけによって生ずる密度の変化を追跡できることから、非常に効率のよい盛立試験が可能になった。**図－4.18** に単一ゾーン方式の試験例を示す。試験ゾーン内の密度にはばらつきがあり、転圧効果の評価にはしかるべき個数のまとまったデータが必要であることを示唆しているが、いずれの例でも転圧回数ごとの平均値は回数が増えるにしたがって単調に増加しており、ある回数を越えると密度の上昇が少なくなって、しだいに限界密度に収束してゆく傾向が明確にとらえられている。**図－4.16** の分離ゾーン方式と比べれば、結果の違いは歴然としている。

図－4.18　単一ゾーン方式の結果例(ロック材料、コア材料)

転圧回数と密度との関係を表す転圧効果曲線は、**図－4.18** の事例からもわかるように、一般に双曲線を用いて表現することができる。双曲線式には二つのパラメータがあるが、**図－4.19** に示すように、双曲線を直線に変換した図の座標軸上で、*a* 値は直線の勾配、*b* 値は縦軸の切片を表している。また、(4.2b) 式からわかるように、*b* 値は収束密度増分（漸近密度増分）の逆数である。*a* 値は双曲線の曲率と関係しており、*a* 値が小さいほど少ない転圧回数で密度が収束に近づき、締固めが完了することを表している。一般に、盛立材料をまき出して敷均した直後の初期密度は、まき出しや敷均し時の重機走行の影響を受けるので、同一材料であっても *a* 値はばらつき易く不安定である。このため *a* 値は工学的にはあまり有用とはいえない。一方、*b* 値は物理的意味が簡明であり、締固め効果を比較する指標として重要である。

$$\rho(N) = \rho_0 + \frac{N}{a + b \cdot N} \qquad (4.2a)$$

または

$$\frac{1}{\Delta\rho(N)} = \frac{a}{N} + b \qquad (4.2b)$$

$$(\Delta\rho(N) = \rho(N) - \rho_0)$$

ここで、

N：転圧回数、ρ_o：初期密度

$\rho(N)$：N 回転圧後の密度

a, b ：回帰係数

図－4.19 転圧効果の双曲線近似

分離ゾーン方式の問題点として指摘した試験ゾーン間に潜在する材料のばらつきの問題は、単一ゾーン方式の盛立試験の場合でも念頭においておかなければならない。同じ材料を用いて単一ゾーン方式の盛立試験を何回か繰り返して行ったとき、それぞれの転圧効果曲線が同じ結果になることはないからである。**図－4.20** は単一ゾーン方式の盛立試験を 3 層連続して行って得られた、各層の転圧効果曲線の一例を示している。2 層目と 3 層目の結果を見ると、初期密度にかなり差があるが、収束密度はほぼ等しくなる傾向を示している。初期密度の違いは上に述べたように、材料をまき出したときの状態や、敷均し施工時の重機走行の状態が各層間で一様でないことを物語っている。しかし、1 層目の転圧効果曲線から読み取れる収束密度は、明らかに他のケースと異なっている。これは各層間の材料（粒度）差を反映したものと考えるべきである。したがって、単一ゾーン方式を採用するときでも、盛立試験は何層かにわたって繰り返す必要がある。従来の分離ゾーン方式の盛立試験でも、1 層だけで結果を出すのはむしろ稀である。多くの場合、3 層くらいの繰り返し試験を行っている。これは、おそらく透水試験を行う必要上、最低でも 2～3 層の

図－4.20 三層繰り返し試験結果の一例(単一ゾーン方式)

厚さが必要であるという理由に基づいており、転圧層間の材料差が意識されていたためかどうかは定かでない。単一ゾーン方式の盛立試験でも、粒度のばらつきなどを考慮するならば、少なくとも 3 層ぐらいの繰り返し試験が必要である。

いずれにしろ、単一ゾーン方式では、分離ゾーン方式よりも少ない土量ですむという経済的な便益も少なくないが、それよりもむしろ得られるデータの量と質の違いによってもたらされる便益（結果の信頼性、客観性）の方がはるかに大きい。単一ゾーン方式の盛立試験が可能になったのは、RI 法による非破壊密度測定法、とりわけ SRID のような粗粒材料にも適用できる RI 密度計が開発されたからである。唯一、単一ゾーン方式の欠点は、最終転圧回数を終えた後でなければ、透水試験ができないということである。透水試験も破壊試験である。分離ゾーン方式では各ゾーンで転圧回数が固定されているから、転圧回数と透水係数の関係を一応調べることができる。ただし、これも見かけだけであって、ゾーン間の透水係数の違いには転圧回数の差違だけでなく、ゾーン間の材料変動の影響が含まれていることを思い起こす必要がある。単一ゾーン方式では、広い転圧回数の試験条件を設定することができるので、これ以上密度の上昇は期待できないという意味での収束（飽和）密度の値を、ほぼ正確に評価できるという利点があり、同じゾーン内で透水試験ができないという難点を十分補っている。このようにして得られた収束密度（限界密度）を用いて、各転圧回数の締固め効果を相対的な締固め度で表現することができるので、最適な転圧回数を客観的に決定できるからである。従来の分離ゾーン方式では、例えば転圧回数を 3 水準設ける場合、4 回、6 回、8 回というように比較的狭い範囲で設定されることが多い。転圧回数の水準数を多くするということは、転圧の労力と時間が増すだけにとどまらず、ゾーン数が増える分だけ土量も増えるので、試験に要するコストは転圧回数の水準数に比例して増大する。このため、現実的に転圧回数の水準数は 3 水準より多くとることはほとんどなく、過去の事例などからある程度転圧回数をしぼり込んで、その前後の±2 回ゾーンを加えるというやり方が一般的であった。このような盛立試験では転圧効果曲線という形で結果を評価することはできず、したがって、収束密度にどの程度達しているのかという判断もできない。

盛立試験の結果は、施工基準を設定するための基礎データとして有用であるだけでなく、品質管理基準の設定においても積極的に活用する必要があることを理解すべきである。なぜなら、室内試験で得られる締固めデータを基本にするよりも、実際の施工条件を模擬して、実際の盛立材料を実粒度のもとで締固める転圧試験の結果を基本に据える方が、材料の実態を的確に反映しているという意味で、合理的な管理基準を設定できるからである。

4.3　現場締固め曲線の直接評価

初期のゾーン型ロックフィルダムでは、ダムの安定性を維持するロック材料は、均等係数が小さい硬質の岩石材料が理想と考えられていた。また、コア材料には止水機能の面から透水係数の小さい細粒の土質材料が必要とされ、コアゾーンとロックゾーンの接合部には粒度的な緩衝帯として、両者の中間的な粒度の材料を用いるフィルターゾーンが設けられた。しかし、理想的な材料が調達できる立地点が少なくなるとともに、盛立材料もしだいに多様化してきた。現在のフィルダム材料をみると、ロック材料の均等係数は大きくなる傾向にあり、コア材料も粗粒分を多く含む材料へと変化してきている。このような比較的滑らかな粒度をもつ粗粒材料は締固め効果が大きく、締固めることによって所定のせん断強度や透水係数を確保するという考え方が、現在の堤体設計の基本になっている。

盛立材料の変遷とともに、盛立施工方法も初期のリフト工法や水締め工法などから薄層転圧工法へと発展し、効率の良い振動ローラーなどを用いる機械化施工が定着してきた。同時に締固め密度の管理が、施工品質管理の基本項目のひとつとして位置づけられた。

このような背景のもとに、試験材料の粒径をできるだけ実物材料の粒径に近づけるため、室内締固め試験に用いるモールドも大型化し、コア材料の締固め試験では従来の直径10cm のモールドに加えて、直径 30cm クラスの突き固め試験や振動締固め試験がしばしば行われている。それでも試験できる最大粒径は 50～60mm 程度が限界であるから、実物材料をそのまま試験に用いることは不可能である。このため室内締固め試験で得られた密度を礫率補正[注1)]して現場密度を推定することが一般に行なわれている。しかしながら、モールドの直径に対して試験材料の最大粒径をどこまで許容できるのか、締固めエネルギーはいくらにすればよいのかなど、試験法に関する具体的な基準はなく、各機関やダム技術者が過去の事例を参照しながら判断して処理しているのが実情である。実際、「室内試験で得られた密度と、実際の現場転圧で得られる密度との間にどういう関係があるのか」という基本的な命題について、これまで多くの実験的な検討がなされてきたけれども、現在においても室内締固め試験データから現場施工密度を的確に予測する客観的な手法が確立されているわけではない。

このような現状において、筆者は当面なすべき最も重要な課題のひとつは、「現場締固め施工における、締固め特性の実態を正確に把握する」ことであると考える。筆者らは、新しい RI 法の開発（SRID、FRID）によって現場密度の詳細なデータが得られるようになったことから、**4.2 節**で述べた合理化された盛立試験の方法を用いることにより、“ 現場転圧施工の締固め曲線を現場試験によって直接評価する ” ことが可能になったと判断し、実際にそのような試験を試みた。現場締固め試験[注2)]の手法そのものはきわめて単純である。室内の締固め試験に習って、通常行われている自然含水比の盛立試験を、材料の含水比を人為的に変えて数ケース繰り返すだけである。この一連の盛立試験のなかで、必要かつ十分な数の密度データを収集して、その結果を統計的に評価することによって、現場締

固め施工の締固め曲線が求められるはずである。

4.3.2 項で、筆者らが行った含水比を変えた現場盛立試験の結果に基づいて、振動ローラーを用いたときのコア材料の現場締固め特性、とりわけ現場の締固め曲線（密度と含水比の関係）について論じるが、そのまえに**4.3.1 項**では、室内締固め試験で使用するモールドの大きさの違いと礫率補正密度の関係、および突固め法と振動締固め法の差異に関して行った、実験的な考察を示す。

注1）室内締固め試験に適用できる最大粒径を境にして、これよりも粒径の大きい粗粒分を仮に「礫」と呼び、礫を除いた細粒分を「土」と呼ぶ。Walker－Holtz の礫率補正 [7]は、土と礫の混合物の締固め密度と含水比を、室内締固め試験で求められた土の締固め密度と含水比から次のように予測する。

$$\frac{1}{\rho_d} = \frac{(1-P)}{\rho_{dS}} + \frac{P}{\rho_{dP}} \tag{4.3}$$

$$w = (1-P) \cdot w_S + P \cdot w_P \tag{4.4}$$

ここで、
ρ_d ：土と礫からなる混合物の乾燥密度
ρ_{dS} ：土の乾燥密度
ρ_{dP} ：空気間隙がないとした礫の密度
P ：礫率（礫分の含有率：乾燥重量比）
w ：土と礫からなる混合物の含水比
w_S ：土の含水比
w_P ：礫の含水比

図－4.21　土と礫の密度と含水比

（4.3）、（4.4）式で、含水比や礫率は%ではなく小数で表しており、間隙水の単位体積質量は 1.0t/m³ としている。w_P の値には、表乾状態の含水比に相当する礫の吸水率を用いることが多い。

（4.3）式の物理的な意味は、混合土の土部分は土のみを締固めたときの密度になっており、その中に空気間隙を持たない礫が混在している状態を表しており、このときの混合状態の密度が ρ_d になることを仮定している。礫率が大きくなると礫の存在によって土の部分の締固め効果が阻害されるため、この式が適用できるのは礫率が 30%程度までとされている [8)]。

この式を用いて室内締固め試験の結果から現場密度を予測するときには、一般に礫率が適用限界以下であるかどうかに注意が払われるが、混合土も土と同じ方法で締固めることが前提になっていることを忘れてはならない。フィルダムの場合、「突固め」という室内の締固め方法が、振動ローラーなどの重機転圧による締固め施工と同等と見なせるという根拠はない。

注 2) 自然含水比の材料を用いて行われる現場転圧試験は、一般に「盛立試験」と呼ばれているが、人為的に含水比をいくつかの水準に調整した材料を用いて盛立試験を繰り返し、現場転圧時の「最適含水比」や「最大乾燥密度」を直接求める手法を、ここでは「現場締固め試験」と呼んでいる。

4.3.1　予備検討（室内締固め試験）

(1)　はじめに

フィルダムの堤体設計においては、室内締固め試験によって現場密度を予測し、その後、実施工に先だって盛立試験を行って、設計密度を確保できる盛立仕様を決定するという手順が基本になっている。このとき、室内締固め曲線の最適含水比を礫率補正して現場の最適含水比を推定しており、これが実施工における転圧時の最適含水比に等しくなることが暗黙裡に仮定されている。しかし、この仮定の妥当性に関しては、現場の締固め施工条件下で直接的に確かめられているわけではない。締固め特性の本質に関わるこれらの問題も含めて、室内での締固め特性と現場での締固め特性との関係については現状でも未解明な事柄が多く、今後、具体的に検証していくことが必要である。本節ではそのための予備検討として、以下の二つの主題について考察する。

①　突固め試験における、モールドの直径と最大粒径がプロクター特性に及ぼす影響

室内試験でモールドの大きさや材料の最大粒径を変えて、同じエネルギー密度で突固めたときに得られる、それぞれの締固め特性にはどのような関係がみられるのか。言い換えれば小さなモールドを用いて、小さな粒径の材料を用いた締固め試験の結果から、大きなモールドを用いたより粒径の大きな材料の締固め特性を予測することはどのような条件のもとで可能なのか、いわゆる礫率補正の仮定が室内試験レベルでどの程度の精度で成り立っているか。

② 振動締固め試験の締固め特性および締固め層厚とモールド内の密度勾配の関係

単層の振動締固め試験でも、突固め試験でみられるような最適含水比が存在するか。また、締固め層厚によってモールド内の密度勾配はどのように変わるか。

室内試験では材質の異なるコア材料とフィルター材料を用い、これらの材料を**図－4.22**に示すせん頭粒度に調整して、1Ec 相当の突固め試験と振動締固め試験を行った。

図－4.22 試験材料の粒度分布

(2) モールド径と最大粒径の影響

突固め試験を行ったモールドの直径 D と試料の最大粒径 d_{max} を組合せた試験条件は、**表－4.11** に示す 6 ケースである。

表－4.11 試験条件

モールド直径 D (cm)	ランマー質量 (kg)	落下高さ (cm)	突固め回数 (回/層)	突固め層数	材料の最大径 $d$max (mm)	D/d_{max}
10	2.5	30	25	3	19	5.3
15			55		19	7.9
					26.5	5.7
30	10.0	50	94		19	15.8
					26.5	11.3
					53	5.7

注）試料の準備方法は湿潤法、使用方法は非繰返し法を採用した。

図－4.23 に得られた締固め曲線を示す。コア材料の結果ではモールド径 D＝300mm、最大粒径 d_{max}=53mm の締固め曲線だけが、他の一群からかなり離れて位置しており、最適含水比 w_{opt} が最も小さく、最大乾燥密度 $\rho_{d\,max}$ は最も大きい。**図－4.24** は最適含水比と最大乾燥密度の関係を示しており、両材料とも w_{opt} と $\rho_{d\,max}$ はほぼ一直線上に並んでいる。**図－4.25** はモールド径と最大粒径の比 $D／d_{max}$ と、最大乾燥密度 $\rho_{d\,max}$ および最適含水比 w_{opt} の関係を示したものである。図中の点線は最大粒径が同じ条件のデータを結び、実線はモールド径が同じ条件のデータを結んで、データが示す傾向を見やすくしたものである。それぞれの条件内で見れば、一応滑らかな曲線上にプロットされている。しかし、$\rho_{d\,max}$、w_{opt} いずれの場合もモールド径と粒径の影響を、$D／d_{max}$ のような単一の複合パラメータで表現することは、当然のことながらできない。次に、各データを最大粒径 53mm に礫率補

図－4.23　突固めによる締固め曲線

図－4.24　最適含水比と最大乾燥密度の関係

図－4.25 $D／d_{max}$ と最大乾燥密度、最適含水比の関係

正してプロットし直すと、**図－4.26** のようになり、$\rho_{d\,max}$ や w_{opt} の変化域はずっと狭くなる。コア材料では w_{opt} の分布幅が約 2%ほどあるが、$\rho_{d\,max}$ は 0.02 t/m³ 程度の小さい範囲に収まっている。フィルター材料の w_{opt} は $D／d_{max}$ が大きくなると減少し、これに伴って $\rho_{d\,max}$ は若干増加する傾向がみられる。**図－4.27** に礫率補正後の w_{opt} と $\rho_{d\,max}$ の関係を示す。少しばらつきがあるが、各プロットは狭い範囲でほぼ直線上にのっている。w_{opt} の分布幅はコア材料で約 2.5%、フィルター材料で約 1～1.5%ある。この幅は小さいとはいい難いが、ここに示した試験条件のもとで、しかもそれほど広くない粒径の範囲内であれば、礫率補正がある程度有効とみなすことができそうである。ちなみに**図－4.22** に示されているように、最も細粒側に位置する材料の最大粒径 19.0 mm 以上を礫分とみなせば、どの試験粒度の礫率も 30%以下であり、礫率補正が成り立つとされる礫率限界内に入っている。

以上の結果は、一般的に認知されている Walker－Holtz の礫率補正が近似的に有効であることを支持していると考えられるが、予測値にはばらつきがある。さらに、室内から現場へと一気に条件を広げてしまうと、単にスケールの問題だけでなく、締固め方法などが根本的に異なることから、現場締固め密度の予測において Walker－Holtz の礫率補正がどこまで有効であるかを判断できる根拠は、少なくとも現時点ではないと言わざるを得ない。

図－4.26 $D／d_{max}$ と最適含水比および最大乾燥密度の関係(礫率補正後)

図－4.27 最適含水比と最大乾燥密度の関係(礫率補正後)

(3)　振動締固め試験の締固め曲線

最大粒径53 mmのコア材料およびフィルター材料を用いて、電気ハンマー（重量476N、打撃数 900 回/分）による振動締固め試験を行った。この試験では内径 30 cm の鋼製モールドの中に、締固め厚さ H =10 cm、H =20 cm、H =30 cm の 3 ケース（**図－4.28**）、試料の含水比 5 ケースの組み合わせ条件で、合計 30 個の供試体を作製した。締固め厚さ H =20 cm、H =30 cm の試験では、H =10 cm ごとに仕切り（紙またはビニール）を入れて締固め後に各層の密度を求めた。

図－4.28　締固め厚さを変えた振動締固め試験

図－4.29 に、コア材料およびフィルター材料の締固め時間と乾燥密度の関係を示す。これらの図には、自然含水比 w_n およびこれより最も湿潤側と最も乾燥側のデータをそれぞれ示している。どのケースでも締固め時間とともに密度が滑らかに増加しながら収束してゆく傾向がみられ、転圧厚さによらず、これらの関係は双曲線で近似できることがわかる。予想されるように締固め厚さが薄いほど締固め密度は大きくなっているが、コア材料では含水比が下がるにしたがってその差は大きくなる傾向を示している。

図－4.30 は、密度がほぼ収束しているとき（締固め時間 120 秒）の含水比と乾燥密度の関係を示したものである。コア材料の H =30cm のケース（エネルギー密度が最も小さい）をみると、最適含水比は w_{opt}　20%で最大乾燥密度は $\rho_{d\,max}$　1.7t/m^3 となっている。前項で述べた突固め試験の結果（モールド径 300mm、最大粒径 d_{max}=53mm のケース）と比べると w_{opt} は約 3%大きく、$\rho_{d\,max}$ は約 0.1t/m^3 小さい。H =20cm から H =10cm へと締固め厚さが小さくなって、エネルギー密度が上がるとプロクター曲線のピークはわずかに左に傾斜しながら上方へ移行し、H =20cm のときには湿潤側の締固め曲線がゼロ空隙間隙曲線 Z.A.V.C.とほとんど重なるようになる。このように、コア材料の場合には振動締固めにおいても突固め試験の場合と同様の締固め曲線が得られ、最適含水比が明確に示されるが、曲線の形状は突固めのときよりも鋭くなる傾向にある。なお、ここでの比較によれば、突固め試験方法の密度が振動試験法の密度に比べて大きい値を示したが、他のコア材料で締固め方法の違いに着目した室内試験によれば、振動締固めの方が突固めよりも大きくなるという結果もある [9]。

図－4.29(a)　締固め時間と乾燥密度の関係（コア材料）

図－4.29(b)　締固め時間と乾燥密度の関係（フィルター材料）

フィルター材料では、含水比が高くなると締固め中に脱水現象が確認された。すなわち、振動が加えられると間隙中の水が容易に分離して、いわゆるコンクリートの締固め時にみられるブリージングに似た状態となり脱水し始めた。このため含水比の高い試験ケースでは締固め中に含水比が低下して、試験後の供試体の平均含水比は試験前よりも低くなっている。コア材料では含水比が高い場合でも、フィルター材料のような脱水傾向は見られなかった。フィルター材料の締固め曲線をみると、データに少しばらつきがあるが、含水比が大きくなるにつれて密度は直線的に上昇し Z.A.V.C.線に交差している。しかし、Z.A.V.C.線に近づくにつれて含水状態が不安定になるので、最適含水比の概念そのものが意味をなさなくなる。現場の締固め施工ではモールド内のような完全な側方拘束状態ではないので、脱水現象が生ずるほど含水比が高い状態では振動ローラーが走行できなくなる。したがって、**図－4.30** は保水性の低いフィルター材料やロック材料の締固めでは、振動ローラーが走行できる含水比以下であれば、含水比が高いほどよく締まることを示している。この種の材料ではいわゆる水締め効果が期待される所以である。

図－4.30　振動締固めによる締固め曲線

図－4.31 は締固め厚さ 20cm と 30cm のケースで、鉛直方向の 10cm 区間ごとの密度を示したものである。例外もあるが、全体的にみると下層よりも上層の方で密度が大きくなる傾向が現れている。このような鉛直方向の密度差を直線近似したときの密度の傾斜度合い、すなわち単位長さ当たりの密度差を密度勾配と呼ぶ。**図－4.32** には密度勾配と含水比の関係を示す（締固め厚さが 30㎝ の場合は、一層目と二層目間の勾配と二層目と三層目間の勾配の平均勾配を示している）。コア材料の場合は、含水比が低いと密度勾配が大きくなることを示している。これは含水比が下がると粒子間の摩擦抵抗が大きくなって、締固めエネルギーが上層部でより多く吸収され減衰するためであると解釈される。フィルター材料の場合も類似した傾向を示唆しているように見えるが、含水比の範囲が少し狭いこともあって、コア材料の場合ほど明瞭ではない。密度勾配の問題は、実施工においてもしばし

ば確認されており、フィルター材料やロック材料では、強度の大きい角礫材で密度勾配が大きくなる傾向がある（**4.4節**参照）。逆に軟弱材では、一般に締固め層全体の平均密度は低いが、密度勾配が生じることは少ない。密度勾配の問題を設計上どのように考慮するかについては今後の大きな課題である。

図－4.31　締固め後の鉛直方向の密度分布

図－4.32　密度勾配と含水比の関係

4.3.2　振動ローラーによる現場転圧のプロクター特性

(1)　含水比を変えた現場締固め試験の方法

現場締固め試験は、ロームと河床砂礫の混合材（以降 CY 材料という）と、ロームと軟岩（緑色片岩）の混合材（以降 HA 材料という）の二種類のコア材料を用いて行った。現場試験材料の粒度を**図－4.33** に示す。HA 材料の最大粒径は d_{max}＝75mm、細粒分含有率は f_c＝25～35%、CY 材料の方は、それぞれ d_{max}=150mm、f_c=14～26%である。**写真－4.1** に CY 材料と HA 材料のそれぞれ材料を示す。

図－4.33　現場締固め試験材料の粒度分布

CY 材料　河床砂礫と細粒材の混合

HA 材料　緑色片岩と細粒材の混合

写真－4.1　2 種類のコア材料

現場締固め試験では、乾燥側から湿潤側まで試験含水比を 4 段階に調整して、各材料について 4 ケースの盛立試験を行った。それぞれの試験ケースごとに**図－4.34** に示した試験ゾーンを造成して、1 層目の造成と試験を行った後、その上にさらに 2 層目の盛立てを行って試験を繰り返した。

試験に使用した材料は混合コア材料であるため、粗粒材と細粒材を交互に積み重ねて盛立てたストックパイルから、ブルドーザーで斜めにスライスカットして混合処理を行った。

自然含水比よりも乾燥側の材料は、バックホウを用いて曝気乾燥を繰り返して調整し、自然含水比よりも湿潤側の材料は加水混合して調整した。このようにして含水比調整した材料を試験ゾーンにまき出して、転圧後の厚さが 30cm になるようにブルドーザーで敷均し、振動ローラー（自重 112kN，最大起振力 206kN）で転圧した。

現場密度および含水比の測定には、SRID を用いた。また、現場透水係数は、2 層目の試験層の最終転圧（HA 材料：転圧回数 N =10 回、CY 材料：N =14 回）を終えた後に内径 30cm、深さ 30cm の試験孔を掘削し、地盤工学会基準に準拠 [10]した現場透水試験（定水位法）を行って求めた。試験条件を**表－4.12** に示す。転圧回数の水準数が違っている他は、試験条件は基本的に両材料で同じである。試験含水比（目標値）は最適含水比 w_{opt} からの

図－4.34　現場締固め試験ゾーンの構成

距離で表している。例えば、w_{opt}－6 は最適含水比から 6%乾燥側のケースを表しており、w_{opt}＋3 は最適含水比から 3%湿潤側のケースを表している。ただし、最適含水比 w_{opt} の絶対値は CY 材料と HA 材料で異なっている。CY 材料の場合は、室内試験から求めた 63.5 mm 以下の最適含水比（w_{opt}＝16.0%）を基準にして各ケースの試験含水比を設定している（すなわち、w_{opt}－3＝13.0%、w_{opt}－1＝15.0%、w_{opt}＋1＝17.0%、w_{opt}＋3＝19.0%）。これらを礫率補正して全粒径の目標含水比を求めると表中のカッコ内に示した値になる。他方、HA 材料の場合は、まず室内試験から求めた 19.0 mm 以下の最適含水比（w_{opt}＝18.0%）を礫率補正して全粒径の最適含水比 w_{opt} を求め（16.3%になる）、これを基準にして各ケースの試験含水比を設定している。例えば、表中のカッコ内に示したように HA 材の最も乾燥側のケース(w_{opt}－6)の全粒径の目標含水比は 10.3%、最も湿潤側のケース(w_{opt}＋3)の全粒径の目標含水比は 19.3%である。

転圧に用いた振動ローラー（**写真－4.2**）の仕様を**表－4.13** に示す。

表－4.12　現場締固め試験条件

項　目	水準数	摘　　要
まき出し機種	1	ブルドーザー（D3 級、自重 69kN）
転　圧　機　種	1	112kN 級振動ローラー（SV510DV）
転　圧　厚　さ	1	H=30cm
含　水　比	4	CY 材：w_{opt}－3，w_{opt}－1，w_{opt}＋1，w_{opt}＋3 （ 9.7%，　11.1%，12.5%，13.9%）
		HA 材：w_{opt}－6，w_{opt}－2，　w_{opt}，　w_{opt}＋3 （10.3%，　14.3%，16.3%，19.3%）
転　圧　回　数	6	CY 材：N=0，2，4，6，10，14 回
	5	HA 材：N=0，2，4，6，10 回
転　圧　速　度	1	V=3km／時
試　験　層　数	2	試験層 2 層

写真－4.2　振動ローラー

表－4.13　振動ローラーの諸元

名称	SV510DV
総重量	112kN
起振性能	振動数 低振幅　2400 rpm 振動数 高振幅　1800 rpm 起振力 低振幅　167 kN 起振力 高振幅　206 kN
車両寸法	全長　5680mm 締固め幅　2150mm
起振装置	2 軸偏心、可変式

(2) 転圧効果曲線（転圧回数と密度の関係）

CY 材料について、設定含水比水準ごとに湿潤密度および乾燥密度の転圧効果曲線を**図－4.35** に示す。転圧回数ごとに実測値（○印）とその平均値（●印）をプロットしている。**図－4.35(a)**が一層目、**図－4.35(b)**が二層目のデータである。

乾燥側のケース（w_{opt}－3%、w_{opt}－1%）では、転圧回数が増すにつれて平均密度が滑らかに上昇しており、比較的大きな転圧効果が現れている。転圧回数と密度の関係は、室内試験の場合と同様に双曲線で近似することができる。他方、湿潤側のケース（w_{opt}＋1%、w_{opt}＋3%）では、密度の増加量は小さく転圧効果は少ない。実際、2 回の転圧回数で密度はほとんど限界値に達しており、それ以上の転圧では密度がほとんど変化していない。転圧前の初期密度は、乾燥側が湿潤側より小さいが、最終転圧時（N =14 回）には乾燥側が湿潤側を上回っている。

転圧回数ごとの含水比は、いずれのケースでも時間とともに多少変動しており、この変化量は 0.1～1.1%の範囲にある。変化量が最も大きかったのは、設定含水比 w_{opt}＋1%のケースであり、この含水比の変化によるものかどうかは不明であるが、後述する現場プロクター曲線において、このケースのデータは全体の傾向よりややはずれる結果となった。それぞれのケースで密度と含水比のばらつきを見てみると、転圧回数 N =6 回で乾燥密度の標準偏差は 0.021～0.055t/m^3 を示し、含水比の標準偏差は 0.6～1.3%の範囲内にあった。密度や含水比のばらつきは湿潤側より乾燥側の方で大きくなっている。

図－4.36 に示した HA 材料の転圧効果曲線にも、概ね CY 材料と同様の傾向が認められる。湿潤側の 2 ケース（w_{opt}＋3%と w_{opt}）では転圧に伴う密度増加が小さく、初期状態ですでに飽和状態に近いことを示している。一方、乾燥側の 2 ケース（w_{opt}－2%と w_{opt}－6%）では、転圧回数が増すにつれて密度は双曲線状に滑らかに上昇している。すなわち、CY 材料の場合も乾燥状態になるにつれて転圧効果が大きくなり、乾燥密度の変化量は w_{opt}－6%のケースの 1 層目で最も大きく 0.170t/m^3 の上昇を示した。また、転圧回数ごとの含水比は、どのケースでも多少変動しており、全体的には時間の経過とともに、含水比は若干低下する傾向を示している。変化量は、湿潤側で大きくなっているが、大きくても 1%程度であった。

図－4.35(a)　CY 材料の転圧効果曲線（１層目：w_{opt}＝11.8%）

図－4.35(b)　CY 材料の転圧効果曲線（２層目：w_{opt}＝11.8%）

図－4.36(a) HA 材料の転圧効果曲線（１層目：w_{opt}＝16.3%）

図－4.36(b)　HA 材料の転圧効果曲線（２層目：w_{opt}＝16.3%）

(3) 現場のプロクター特性（締固め曲線）

図－4.37 は、試験を行った 2 層分の全データ用いて、CY 材料の転圧回数ごとの含水比と乾燥密度の関係をプロットしたものである。上段の図は 10 点ずつの実測値の分布を、下段の図は 10 点の平均値と標準偏差の幅を示しており、平均値のプロットから推定されるプロクター曲線を描いている（転圧回数 N =0 のケースを除く）。

CY ダムの試験材料は、63.5mm 以上の礫分が 30%近くを占めており、全体的に粗粒分の多い材料であったため、施工可能な含水比の範囲が狭い（9～14%）という制約があった。このため、なかには目標とする平均含水比にうまく調整できなかった試験ゾーンもある。平均含水比の調整可能範囲と、試験ゾーン内の含水比のばらつき（分布範囲）が同程度であるという状況であったため、**図－4.37** に示した個々のデータをプロットした上段の図からは、締固め曲線をイメージすることがほとんど出来ない結果となっている。一方、各図の下段に示したように、平均値のプロットを追跡すると、転圧回数（エネルギー）ごとのプロクター特性がかなり明瞭に描出できることがわかる。初期状態（N =0）では、乾燥側から湿潤側に向けて密度がほぼ直線的に大きくなっているが、N =2 回以降は多少のばらつきがあるものの、平均値を滑らかに結ぶと締固め曲線上で上に凸のピークを確認することができる。このピーク点が現場転圧の最適含水比と最大乾燥密度を表している。

図－4.38 は、転圧回数ごとの締固め曲線をまとめて示したものである。図中の破線は、締固め曲線上のピーク点の動きをトレースしている。全てのピーク点がこの破線上を正確に通っているわけではないが、転圧回数（エネルギー）の増加に伴って、最適含水比と最大乾燥密度はだいたいこの径路をたどるものと考えられる。含水比が 12%を超えると、密度は転圧回数にほとんど依らなくなり、このラインが振動ローラーの限界密度を表している。反対に、乾燥側の締固め曲線をみると、N =10 回まではほぼ等間隔を保って平行に並んでおり、N =10 回以降の転圧では、密度の上昇がほとんど期待できないことを示している。**図－4.39** は、乾燥密度およびその増分と含水比の軌跡を示したものである。

図−4.37(a) CY 材料の現場締固め曲線（N=0,2,4）

図－4.37(b)　CY 材料の現場締固め曲線（*N*=6,10,14）

図－4.38 転圧回数による締固め曲線の変化（CY 材料）

図－4.39(a) 締固め密度の軌跡
(CY 材料)

図－4.39(b) 締固めに伴う密度増分の軌跡
（CY 材料）

次に、HA 材料の現場締固め曲線を**図－4.40** に示す。HA 材料の試験でも降雨などの影響で含水比の調整が非常に難しく、全体的に目標含水比が湿潤側へずれる結果になった。しかし、結果的に含水比のレンジが CY 材料の場合（約 5%）よりも広くとれたこともあって、CY 材料に比べると、まとまりの良いデータが得られている。すでに初期状態において上に凸の分布傾向が現れていたために、実測値のプロット図においても、締固め曲線の傾向を読み取ることができる。下段の図に示した平均値のプロットをたどることによって、締固め曲線をほぼ確定できる。HA 材料の場合、曝気乾燥を繰り返しても、含水比を

図−4.40(a) HA 材料の現場締固め曲線（N=0,2,4）

図−4.40(b)　HA 材料の現場締固め曲線（*N*=6,10）

12%以下に下げることが極めて困難であったため、乾燥側の締固め曲線は湿潤側に比べてやや精度が劣るが、少なくとも最適含水比の位置は特定できていると考えられる。

転圧回数ごとの締固め曲線をまとめると、**図－4.41** のようになった。転圧回数が増えるとともに締固め曲線が少しずつ接近してくる様子が認められるが、N =10 回ではまだ限界ラインに達しているとは断定できない。また、HA 材料の場合、最適含水比が N =6 回以降ではあまり低下しなくなる傾向がみられる点で、CY 材料の場合と少し様相が異なっている。**図－4.42** には乾燥密度とその増分の軌跡をそれぞれ示している。

図－4.41 転圧回数による締固め曲線の変化（HA 材料）

図－4.42(a) 締固め密度の軌跡（HA 材料）

図－4.42(b) 締固めに伴う密度増分の軌跡（HA 材料）

最後に、両材料の転圧回数ごとの最適含水比と最大乾燥密度をまとめて**表－4.14** と**図－4.43** および**図－4.44** に示す。CY 材料に比べて、細粒分の多い HA 材料の最大乾燥密度と最適含水比は、ともに転圧回数の増加に伴ってやや大きく変化している。

以上の結果は、含水比を変えた盛立試験を行い、転圧回数ごとに多点数の密度データを収集してその平均密度の変化に着目することによって、現場施工のプロクター特性を直接的に確認することが可能であることを実証している。

表－4.14　現場締固め試験による最適含水比と最大乾燥密度

CY 材			HA 材		
N	w_{opt}(%)	ρ_{dmax}(t/m³)	N	w_{opt}(%)	ρ_{dmax}(t/m³)
—	—	—	0	16.8	1.722
2	11.7	1.894	2	15.0	1.761
4	11.2	1.905	4	14.0	1.790
6	11.1	1.930	6	13.5	1.815
10	10.5	1.945	10	13.5	1.836
14	10.3	1.950	14	—	—

N：転圧回数，w_{opt}：最適含水比，ρ_{dmax}：最大乾燥密度

図－4.43　転圧回数と最適含水比、最大乾燥密度の関係

図－4.44　最適含水比と最大乾燥密度の関係

4.3.3　室内締固め試験との比較

CY 材料と HA 材料の室内試験から得られた締固め曲線と、現場試験で評価された締固め曲線を比較すると**図－4.45** のようになる。CY 材料の室内締固め曲線は 63 ㎜以下のせん頭粒度の突固め試験から求められているが、これに最も近い現場締固め曲線は N =10 回のときで、このとき最大乾燥密度がほぼ同じになった。しかし、最適含水比には少なくとも 1%程度の開きがあり、現場の方が低くなっている。礫率補正して現場粒度に変換すると、もはや現場では達成できない締固め曲線になっている。一方、HA 材料の室内締固め曲線は、19 ㎜以下のせん頭粒度の突き固め試験から求められている。礫率補正後の最大乾燥密度は N =6 回のケースにほぼ等しくになっているが、最適含水比には約 3%の開きがある。

図－4.45　室内と現場の締固め密度の比較

次に、現場と室内の透水係数を比べると**図－4.46** のようになった。相対的に最適含水比が高い HA 材料の現場透水係数 k は、13%以下の乾燥側の一部を除いて最適含水比から湿潤側ではほとんど変化せず、k=10^{-5}～10^{-6} cm/s の幅の中に分布している。これに対して最適含水比が低い CY 材料の現場透水係数は、最適含水比から湿潤側へプラス 3%付近まではほぼ直線的に低下しており、HA 材料とは異なった傾向を示している。

これらの結果を総合して、室内と現場の締固め特性の類似点や相違点を定性的にまとめると**表－4.15** のようになる。

図－4.46　室内と現場の透水係数の比較

表－4.15　室内と現場の締固め特性の対比

項目	室内締固め	現場締固め		類似性	
		CY 材	HA 材	CY 材	HA 材
最適含水比 w_{opt}	存在する	存在する	存在する	○	○
最適含水比 w_{opt} と エネルギー E の関係	w_{opt} は E に対して単調減少	w_{opt} は E に対して単調減少	w_{opt} は E に対して単調減少	○	○
最大乾燥密度 $\rho_{d\,max}$ と エネルギー E の関係	$\rho_{d\,max}$ は E に対して単調増加	$\rho_{d\,max}$ は E に対して単調増加	$\rho_{d\,max}$ は E に対して単調増加	○	○
透水係数 k と 含水比 w の関係	w_{opt} より少し湿潤側で k_{min} が存在	k は湿潤側でも単調減少	k_{min} の存在は明確ではない	×	△

注）エネルギーとは室内締固めでは締固めエネルギーを、現場試験では転圧回数を示す。

4.3.4　現場締固め試験の結論

試験事例はここに示した 2 ケースしかないが、含水比を変えた盛立試験から、SRID を用いた多点数のデータサンプリング法によって、振動ローラーの現場締固め曲線を評価することが可能になったと考えられる。現場施工時の最適含水比と最大乾燥密度を室内試験から予測するのではなく、実施工条件下で直接求めることができたわけである。しかし、室内締固め特性との比較では、これまでもそうであったが、あまり展望がもてる結果は得られなかった。

現場締固め特性の直接評価が可能になれば、堤体設計においても従来の室内試験データをベースにした設計から、より確実な実際の施工含水比と現場密度をベースにした設計へと合理化する道が開ける。施工含水比と現場密度を基準にして力学試験や透水試験を行い、その結果に基づいて設計定数を決定すれば、現場との対応の面で不確実な要因が介在する現状の室内試験を基準にする場合よりも最適設計に近くなるはずであり、信頼性も高まると考えられるからである。同じことは、締固めの品質管理の分野においても指摘できる。もちろん設計に必要な強度や透水係数は、現状では室内試験で評価するしか他に方法がない。しかし、室内の力学試験や透水試験では、現場粒度の材料をそのまま用いることができないので、何らかの縮小材料で処理しなければならない。このとき、縮小材料の試験から推定した実物材料の強度や透水係数の精度や信頼性が問われるが、これはまた別の問題である。

しかしながら、これらの含水比を変えた盛立試験にも問題がないわけではない。一般にコア材料は保水性が高いけれども、長年にわたる堆積過程をへて到達したと考えられる自然含水比のときが、最も安定した含水状態にあると考えられる。このため自然含水比から離れるにつれて安定していた保水バランスが破られることになり、そのような状態を人為的につくりだして、数日間にわたって維持することは決して易しいことではない。材料の含水比調整に多くの時間と手間がかかり、天候にも大きく左右されるのでコスト的に割高になるのは避けられない。一方、一般にコア材料として使われている材料は、筆者の試験例からもわかるように、自然含水比はほとんどの場合最適含水比もしくはそれよりも湿潤側にある。そうであることが明らかであれば、自然含水比のままでコア材料として機能しうる強度と透水係数をもつことを確認するだけで十分であるとする見方もできる。自然含水比が最適含水比からどのくらい離れているかを知ることは、工学的には重要であるが、これが設計の実務面で決定的な情報になるわけではない。このような観点にたてば、含水比を変える現場締固め試験は常に必要というわけではなく、自然含水比の材料だけの盛立試験で設計に必要なデータは十分得られるはずである。

問題の本質的な点は、室内試験データに基づく設計では、室内の締固め試験データから現場施工で実現される密度を確実に予測できる手法がない以上、設計の信頼性が保証できないということである。そのため、これまでのように盛立試験を行って「確認」する必要があり、事実、従来の盛立試験はそのような位置づけのもとに行われてきた。しかしなが

ら、盛立試験による確認という作業は、十分であるか否かは判断できても、必要性に関しては不十分な検証しかできないという問題が指摘される。確認のため、どのみち盛立試験を実施するということであれば、むしろ盛立試験から得られる実施工の情報を、設計のベースに据える方が合理的であると考えられる。従来、このようなプロセスがとられなかった最大の理由は、現場密度データの信頼性が十分でなかったことにあると推察される。室内試験データの方が、精度が高いとみなされていたわけであり、このような状況のもとでは、室内試験データを用いて設計するという考え方は自然な選択であったかも知れない。しかし、SRID などの新しい RI 法の開発によって、現場データの信頼性という面では、状況が大きく変化しつつある。今後は現場データの価値を客観的に再評価して、設計の合理化に積極的に活用する必要があると筆者は考える。

4.4　転圧層内の鉛直方向の密度勾配

ロックフィルダムのロックゾーンの盛立ては、締固め厚さ 1.0～1.5m で施工されることが多い。このような厚い層を、地表面から大型振動ローラーの転圧で一気に締固めた場合、転圧層内の密度は鉛直方向に一様になるであろうか。機械転圧による締固めが主流になるとともに、この疑問はかなり以前から指摘されていたようである。もし、転圧層内の密度が鉛直方向に一様ではなく、密度勾配が生じているとすれば、堤体の安定設計面でこの問題に如何に対処するのかという本質的な課題とともに、置換法による密度試験に無視できない大きな誤差要因をもたらすことになる。一般に、手掘りや機械で掘削した置換孔は、円柱状に仕上げることは難しく、逆円錐台もしくはいわゆる「お椀状」になるのが普通である。深さ方向に密度が一定であれば、どのような形状の置換孔であっても問題はないが、密度分布が一定でないときには、**第 2 章**の**図－2.3** に示したように、密度勾配によって偏った平均密度が評価されてしまうことになる。また、置換法による密度は、置換孔の形状によって異なった値を示すことになる。簡単のため、これらを置換孔の「形状誤差」と呼ぶ。**図－4.47** に深さ方向に 10cm ずつの区間に分割して、各区間の密度を求めた一例を示す [11]。置換孔の形状誤差は、これまであまり指摘されることがなかったが、転圧厚さの大きいロックゾーンの密度試験では、主要な誤差要因のひとつになることは明らかである。また、転圧厚さが大きくなると、振動ローラーの締固めエネルギーが、転圧層の下層部まで十分にゆきわたるどうかという疑問もあり、これを確めるために、転圧時に締固め層内部の動土圧や加速度の分布が測定されることがある。それらの結果によると、**図－4.48** に一例を示すように、動土圧も加速度も地表面から深くなるにつれて、急速に減衰することが知られている [12]。これらの事実も鉛直方向の密度の一様性を調べる動機のひとつになっていたと考えられる。

図－4.47　置換孔の形状と密度の湿度分布(密度勾配)[8]

図－4.48 土中応力の深度分布 [12)]

置換法という密度試験法しかなかった時代には、同じ位置で掘削置換を鉛直方向に分割して段階的に行い、各分割層の密度を比較してこのような疑問に答えを見出そうとしてきた。置換法の代わりに RI 法（SRID ではなく従来の固定式）を用いて、同じように段掘りしながら密度を測定した例もある。例えば上段と下段の二層に分割したり、上、中、下の三層に分割して密度の違いを調べた報告がある（**図－4.49**）[5),12)]。しかし、このような試験例はきわめて少なく、密度勾配の実態は十分解明されているとはいい難い。

他方、コアゾーンの転圧厚さは、これまで 20～30cm が一般的で、30cm を越える事例は最近までほとんどなかった。ロックゾーンの転圧厚さに比べると数分の一以下であり、鉛直方向には一様な密度に締固められているものと、暗黙のうちに了解されていたと考えられる。最近、施工の合理化が求められる状況下で、コアゾーンの施工厚さを拡大することが、合理化のテーマのひとつになってきたが、コアゾーンの転圧厚さを大きくするときには、平均密度が所要のレベルに達するまで十分に締固められるかという問題に加えて、鉛直方向の密度の一様性についても注意する必要がある。フィルターゾーンの締固め厚さはロックゾーンとコアゾーンの中間にあるが、鉛直方向の密度の一様性に関しては、だいたいコアゾーンと同じような認識がもたれていたように思われる。

すでに述べたように、フレーム型 RI 密度計は、もともと転圧層の厚いロック材料を対象にして、このような課題に対処するために開発されたものであるが、その後フィルター材料やコア材料にも適用されるようになった。フレーム型 RI 密度計は材料のまき出し時に導管フレームを予め埋設しておく必要があるので、測定は SRID ほど簡便ではなく、測定にもある程度時間がかかる（例えば、転圧厚さが 1m の場合 20～30 分）。従って、SRID のように多点数データを収集する能力はないし、フレームの埋設があるため品質管理の場で活用することも難しい。このような制約があるため、フレーム型 RI 密度計が用いられ

(a)高瀬川ダム 12)　円礫材

(b)七ヶ宿ダム 5)　角礫材

図－4.49　置換法による密度の深度分布の測定例(ロックゾーン)

るのは盛立試験に限られており、今のところ測定事例もそれほど多いとはいえない。それでも筆者は、地道にデータを積み上げてきており、鉛直方向の密度勾配が発生するかどうかは単に転圧厚さや振動ローラーの起振力の大きさだけでは決まらず、ロック材料やフィルター材料ではまき出し時の粒度分離が重要な因子になっていることや、コア材料の場合には施工含水比が大きく影響しているといった実態を、少しずつ明らかにしてきた。また、フレーム型 RI 密度計は単一層だけでなく、導管を継ぎ足してゆけば複数の層にわたって測定することができるので、この特徴を生かして、例えば、「上位層の転圧によってその直下の既転圧層の密度は変化するか」といった問題、いわゆる積層効果の解明などにも役立てることができる。

以下に、これまでに測定されてきた転圧層内部の密度分布例を取り上げ、ロックゾーンやフィルターゾーンの密度勾配の実態と、コア材料の積層効果の有無について考察する。

4.4.1　ロック材料の密度勾配

MD ダム、HA ダムおよび CY ダムの三つのダムで行われたロック材料の盛立試験結果から、FRID によって測定された転圧時の層内密度の鉛直分布（密度プロフィール）の変化を示す。**図－4.50** に各ロック材料の粒度分布を示す。MD ダムのロック材料は比較的新鮮な結晶質石灰岩(絶乾比重 G_b =2.51～2.68、吸水率 Q=0.3～2.0%)で、全体の 60～80%が粒径 100 mm 以上の岩塊で占められている。間隙比 e＝0.33～0.35 で内部摩擦角φ＝40～41 度を示す。HA ダムのロック材料は軟質の緑色片岩（G_b=2.75～2.86、Q=1.2～2.0%）であるため、比重、吸水率は粒径によってかなり変化している（**図－4.51**）。本材料は気乾状態と飽和状態の違いによってφが異なる。e＝0.30 のとき気乾状態でφ＝40 度が飽和状態ではφ＝37 度となり、かなり強度が低下する。両材料はいずれも原石山から採取された角礫材である。他方、CY ダムでは円礫の河床堆積物(G_b =2.43～2.59、Q=1.9～4.1%)をロック材料に使用しており、上の二ダムのロック材料とは粒子形状が異なっている。内部摩擦角は e＝0.32 でφ＝40 度である。これらのロック材料の転圧に用いられた振動ローラーの重量と起振力を**表－4.16** に示す。

図－4.50　ロック材料の粒度分布

図－4.51　絶乾比重と吸水率の関係（緑色片岩）

表－4.16　振動ローラーの重量と起振力（ロック材料）

ダ　ム	機　種	重量(kN)	起振力(kN)
MD	SV510D	106	225
HA	SV510DV	111	274
CY	SV160DV	174	343

図－4.52 の事例は、MD ダムにおけるロック材料の盛立試験で得られた FRID の測定結果である。FRID の測定は転圧前（N =0 回）と、その後の 5 段階の転圧水準で行われている。ひとつの試験ゾーン内にフレームは 3 ヶ所埋設されており、図にはフレームごとの測定データと、3 フレームの平均値で描いたプロフィールを示している。深さ 15cm の位置にプロットされている SRID の測定結果（測定深度 30cm）は、フレームを埋設したポイントでの値ではなく、試験ゾーン全体に配置された 10 測点の平均値を所定の転圧回数ごとに示している。そのため、FRID の分布傾向を上方へ外挿したポイントと必ずしも一致するとは限らないが、3 フレームの平均プロフィールから推定される外挿値とは、概ね良い一致を示すことが多い。**図－4.52** もそのような事例となっている。密度分布のプロフィールは、場所によって密度がばらついているため、一般にフレームごとに異なっており、単独のフレームの測定結果から、試験ゾーン全体の平均的な分布傾向を予測することはできない。この図からもわかるように、平均的なプロフィールを評価するためには少なくとも 3 本くらいのフレームを用意する必要がある。プロフィール上に見られる不規則な波状の密度のゆらぎは、主として局所的な粒度分布のムラ（特に粒径の大きな材料の分布状態のばらつき）によって生じていると考えられる。転圧中に個々の岩石粒子が大きく動くことはないので、転圧が進んでもこのような密度のゆらぎが解消することはほとんどない。転圧の進捗とともに分布曲線は右側に移動し、締固めが進行してゆく様子がよくわかる。最終転圧後のプロフィールを見ると、転圧面から深くなるにしたがって、密度が低くなる傾向（これを正の密度勾配、逆の場合を負の密度勾配と呼ぶ）がはっきりと現れている。この密度勾配はすでに転圧する前から存在しており、必ずしも転圧によって発生しているわけではない。しかし、このケースでは転圧とともにわずかではあるが、密度勾配が大きくなる傾向が認められる。転圧層内を 20cm ずつ五つの層に分けて、各深度区間の転圧効果曲線を求めると**図－4.53** のようになる。この図からも上に述べた締固め状況を確認することができる。

粒子形状は同じ角礫材であるが、MD ダムよりも軟質な HA ダムの試験事例を**図－4.54** と**図－4.55** に示す。転圧厚さは 1.2m である。この材料の場合は MD ダムと比較して密度分布のゆらぎが少なく密度勾配も小さい。表層 30cm の SRID の測定値との間には少しギャップがみられるが、これは、このダムのロック材料が軟質で破砕しやすい材料であるため、表層部は粒子破砕によって密度が大きくなっている可能性を示唆している。**図－4.55** に示した各深度区間の転圧効果曲線は、MD ダムの場合と同様に上層部ほど転圧に伴う密

図－4.52 転圧時の密度プロフィールの変化（MD ダムロック材料、角礫材）

図－4.53 締固め層内部の転圧効果曲線（MD ダムロック材料、角礫材）

図－4.54 転圧時の密度プロフィールの変化（HA ダムロック材料、角礫材）

図－4.55 締固め層内部の転圧効果曲線（(HA ダムロック材料、角礫材)

度の増加が大きく、最終 14 回の転圧後の密度増分には上層部と下層部で 2.5 倍程度の開きがある。

図－4.56 は円礫材（CY ダム）の事例である。このダムでは、転圧厚さの影響を調べる試験（80cm、100cm、120cm の 3 ケース）を行っており、図には各ケースの 3 フレームの平均プロフィールを示している。前の二つの事例と比較してみると、明らかに異なる特徴として転圧に伴う密度増分が深度によってほとんど変わらず、深度方向のプロフィールがほぼ平行して並んでいる点が注目される。このため、**図－4.57** に示した深度区間別の転圧効果曲線は、深度によってあまり差がなくほとんど重なっている。さらにこのケースでは、上層部と下層部の密度が転圧厚さによらずほとんど同じであるという結果となっており、このため転圧厚さが大きくなるほど密度勾配はむしろ緩やかになっている。これらの傾向は MD ダムや HA ダムの角礫材の場合にはみられず、CY ダムと MD ダムのロック材料の母岩は堅硬であることから粒子形状の違いが影響していることを強く示唆していると考えられる。

図－4.56 転圧時の密度プロフィールの変化（CY ダムロック材料、円礫材）

図 4-57　締固め層内部の転圧効果曲線（CY ダムロック材料、円礫材）

4.4.2　フィルター材料の密度勾配

ロック材料の事例で取り上げた、HA ダムと CY ダムに SU ダムを加えた、3 ダムの FRID の測定事例を以下に示す。ロック材料の場合と同じく、フィルター材料の盛立試験において、転圧に伴う転圧層内部の密度プロフィールの変化を追跡したものである。HA ダムと CY ダムのフィルター材料は、ロック材料と母岩が同じである。SU ダムの粗粒フィルターは、花崗岩（絶乾比重 G_b =2.31～2.53、吸水率 Q=1.7～5.4%）で、細粒フィルターは花崗岩と河床砂礫の混合材（G_b =2.20～2.48、Q=2.7～7.9%）である。各材料の粒度分布を**図－4.58** に示す。図からわかるように SU ダム（粗粒）、SU ダム（細粒）、CY ダム、HA ダムの順に粒径が小さくなっている。これらのフィルター材料の転圧に用いられた、振動ローラーの重量と起振力を**表－4.17** に示す。HA ダムと CY ダムでは、ロック材料の転圧に使用された機種と同じ機種が用いられている。

図－4.58　フィルター材料の粒度分布

表－4.17　振動ローラーの重量と起振力（フィルター材料）

ダ　ム	機　種	重量(kN)	起振力(kN)
HA	SV510DV	111	274
CY	SV160DV	174	343
SU	SV160D	171	294

HA ダムの盛立試験は二層連続して行っており、各層の密度プロフィールの変化と深度区間別の転圧効果曲線をそれぞれ**図－4.59** と**図－4.60** に示す。一層目と二層目でほぼ同様の結果を得ており、この材料では密度勾配が比較的顕著に現れている。転圧面から深くなるにしたがって転圧効果が減少する傾向は、同ダムのロック材料の場合と類似している。

なお、図の中で斜線を施した深度区間は、鉛直方向に密度が不連続に変化する層境界を FRID が通過するときに見られる遷移帯を示している。透過型 RI 測定の一種である FRID では走査方向に有限の測定影響範囲がある。測定の重みは影響範囲内で一様ではなく、ガンマ線の透過中心部で重みが最大になり、透過中心から離れるにしたがって重みはガウス関数状に減衰する。このため、FRID が層境界のような密度の不連続面を通過するとき（例えば、締固めが完了した層の上に次の層をまき出して、上層を転圧する前の密度を下層から連続して測ったときなど）にはこのような遷移帯が現れる。

図－4.61 と**図－4.62** は CY ダムの円礫材の事例であり、転圧厚さを変えた盛立試験（60cm と 80cm の二ケース）の結果を示している。初期密度の分布にかなりゆらぎがあったためか、**図－4.62** の転圧効果曲線では深さによって密度増分に差がでているが、**図－4.61** のプロフィールの変化パターンには、ロック材料のパターンと共通した特徴が認められる。

SU ダムでは細粒フィルターと粗粒フィルターの盛立試験を行っており、その結果を**図－4.63** と**図－4.64** に示す。転圧後の密度は細粒フィルターの方が大きくなっているが、これは粒度の影響（均等係数を見ると、粗粒フィルターよりも細粒フィルターの方が多少大きい）を表していると考えられる。また、密度プロフィールの変化パターンは、それほど顕著ではないけれどもどちらかというと円礫材に近い傾向を示している。

以上に示したいくつかの事例比較からわかるように、転圧に伴うロック材料とフィルター材料の密度プロフィールの変化傾向は比較的よく似ており、本質的な差はほとんどないといってよい。一般にフィルダムの透水性材料は、同じ原石山や採取場から得られる材料を粒度調整して、粒径が比較的小さいものをフィルター材料に用い、粒径の大きなものをロック材料に用いることが多く、母岩が全く異なる材料を使うことは最近のフィルダムではむしろ稀である。粒度調整も最大粒径が違うものの、比較的類似した粒度分布パターンになることが多く（例えば、ロック材料からある粒径以上をカットしてフィルター材料に用いる場合など。すなわち、せん頭粒度）、ロック材料とフィルター材料の締固め特性が類似しているのは、自然な結果であると考えられる。

しかし、ここに示した事例からもわかるように、密度勾配の大きさや転圧によって得られる最大（収束）密度などは、個々の材料によって異なるので、実際に盛立試験を行って確認する必要がある。実証事例が少ないけれども、角礫材の場合は円礫材よりも密度勾配が出やすいという傾向が示唆されているので注意が必要である。

図－4.59　転圧時の密度プロフィールの変化（HA ダムフィルター材料、角礫材）

図－4.60　締固め層内部の転圧効果曲線（HA ダムフィルター材料、角礫材）

図－4.61　転圧時の密度プロフィールの変化（CY ダムフィルター材料、円礫材）

図－4.62　転圧層内部の転圧効果曲線（CY ダムフィルター材料、円礫材）

図－4.63(a)　転圧時の密度プロフィールの変化
（SU ダム細粒フィルター材料、角礫材と円礫材の混合）

図－4.63(b)　転圧時の密度プロフィールの変化（SU ダム粗粒フィルター材料；角礫材）

図－4.64　転圧層内部の転圧効果曲線（SU ダムフィルター材料、角礫材）

4.4.3　密度勾配を生じさせる要因

(1) 締固めエネルギーの減衰

転圧時に締固め層内に密度勾配を生じさせる主たる要因として、まず自然に考えられるのが、振動エネルギーの伝搬に伴う深度方向への減衰である。エネルギーの減衰は締固めに伴う消費と幾何学的な分散によって発生する。転圧時のエネルギー減衰は、まき出し時に加速度計や動土圧計を異なる深さに埋めておいて、振動ローラーが通過するときに観測されるこれらの波形振幅の大きさから間接的に推定することができる。

これまでに報告されている振動締固め時の動土圧分布の事例を、すでに**図－4.48** に示しているが、ここでは筆者が実際に測定した一例を**図－4.65** に示す[13)]。計器の設置深度によって最大振幅を生ずる時刻がずれているのは、計器埋設の都合で振動ローラーの走行方向に位置を少しずらして設置しているためである。鉛直方向の加速度は振動ローラーの接地面直下 25㎝ および 50㎝ で振幅が大きく、150㎝（最深部）では振幅がかなり減衰している。動土圧も加速度と同様の傾向にある。振幅の持続時間をみると、振動ローラーの接地面直下では加速度（土圧）の振幅は大きいが持続時間は短い。そして、下層部へゆくに従い振幅は急速に減衰するが、振幅の減少にほぼ反比例して持続時間は長くなっている。最大加速度振幅および最大動土圧と転圧面からの深さとの関係を示すと、**図－4.66** のようになる。加速度振幅は深さ方向に直線的に減衰している。また、転圧回数が増えて密度が大きくなるにしたがって、加速度振幅はどの深度でも少し大きくなっている。最大動土圧の場合、深さ方向に急激に減衰する傾向は加速度の場合と同じであるが、減衰曲線は双曲線もしくは指数曲線に近い。加速度の場合と同様に、転圧回数が増えるにしたがってどの深度でも

(a)加速度計及び土圧計埋設断面図

a．加速度計および土圧計埋設断面図

(b)6 回転圧時の測定波形

6 回転圧時の測定波形

図－4.65　加速度計と土圧計の観測波形

動土圧は大きくなり減衰曲線は右側へ移行する傾向を示している。このような加速度や動土圧の深度方向への減衰パターンは、他の観測事例に共通してみられるものである。しかし、締固めエネルギーの減衰だけで、転圧に伴う実際の密度分布の変化を説明することは難しい。これは、例えば円礫ロック材料の事例を見れば明らかである（**図－4.56** に示したように、この場合密度の増分量は上層部と下層部でほとんど変わっていない）。

図－4.66　転圧層内部の加速度と動土圧の分布

(2) 初期の密度勾配と粒度分離の影響

密度勾配は、転圧を開始する前にすでに発生していることが多い。しかも初期の密度勾配が転圧に伴って減少したり、消滅したりすることはほとんどない。初期の密度勾配を発生させる最大の背景要因は、材料をまき出す時に生じる粒度分離にあると考えられる。材料をダンプダウンするときの状況を観察するとよくわかるが、大粒径の岩塊や大礫はどうしてもまき出し層の下方に集まりやすいので、まき出し層の下層部では大粒径のものが、上層部では小粒径のものがより多く分布する傾向がある。このような材料の粒度分離は、現状の施工方法のもとではある程度避けられないのが実情である。**図－4.67** に示した、現場転圧試験で転圧後の置換孔の上層部と下層部の粒度を調べた事例でも、このような傾向が示されている [11]。粒子径の大きな材料が偏って分布すると、粒度配合が悪くなって空隙が多くなるため締固め密度はあまり上がらず、大粒径の材料が少なくても粒度分布のよい上層部の方が、材料のつまり具合がよくなって密度が大きくなる可能性が高くなる。

図－4.67　上層部と下層部の粒度差の一例 [11]

図－4.68 は、室内実験で直径 30cm、高さ 60cm のモールド下部に相対的に粒径の大きい材料を多く入れ、上部には粒径の小さい材料を多く入れて上端面から振動バイブレーターで締固めた後に、**図－4.69** に示す一次元 RI 密度走査装置を用いて、供試体下端面から上端面にかけて供試体内部の密度分布を走査した結果を示したものである [13]。粒度分離が顕著なケースでは、底部に近いところを除いて、材料投入後においてすでに小粒径の材料が多い供試体上層部で密度が大きくなっている。締固め後においてもこの傾向が変わらず、むしろ密度差は大きくなる傾向を示している。これらのことから、材料の粒度分離は、まき出し層内に密度勾配を生じさせる大きな要因となっていることがわかる。

図－4.68　粒度分離が密度分布に与える影響(室内実験)[13)]

図－4.69　一次元 RI 密度走査装置

4.4.4　コア材料の積層効果

すでに指摘したように、フィルダムにおける盛立施工の合理化の一環として、コアゾーンの締固め厚さを大きくすることが検討されている。コア材料の締固め厚さの限界は、①層全体として所要の締固め度および遮水性が確保できるのか、②転圧層内部で鉛直方向の密度に差が生じないか、によって決まると考えられる。同時に、もともとコア材料の転圧厚さは、フィルター材料やロック材料に比べてかなり小さいので、次層の盛立てによって下位層の密度が変化（増加）する可能性（簡単のため、これを積層効果と呼ぶ）についても検証しておく必要があると考えられる。ここでは、FRID を用いて内部密度の測定が行われたコア材料の盛立試験の結果から、積層効果を調べた結果を以下に示す。

(1)　測定概要

FRID の密度測定では導管を上方へ継ぎ足して延長することができるので、後続の上位層の転圧時に、転圧層と下位層の密度を同時に測定することによって積層効果を調べることができる。材料や施工条件が異なる 6 ケースのコア材料の盛立試験（**表－4.18**）において、FRID を用いて積層効果の有無を調べた。**図－4.70** に各コア材料の粒度分布を示す。

表－4.18　対象材料と締固め方法

材料名	材料	締固め機械 (注)	転圧厚さ（cm）
HO	ローム＋砂礫	VR	20，30，40
MI	風化岩	VR	20
CY	ローム＋砂礫	VR，TR	30
SU	ローム＋風化岩	VR	30
TU	がいすい	VT	30
HA	ローム＋軟岩	VR	20，30，40

（注）VR：振動ローラー、VT：振動タンピングローラー、TR：タンピングローラー

図－4.70　コア材料の粒度分布

(2) 転圧層内の密度分布と積層効果

図－4.71 と**図－4.72** に測定結果を示す[14]。**図－4.71** は転圧厚さ 30cm のケースを比較したものである（HA 材料の 30cm の結果は次の**図－4.72** 参照）。また、**図－4.72** は HA 材料のケースで転圧厚さが 20、30、40cm のときの密度分布を比較している。これらの図で斜線を施した深度区間は、境界面を通過する遷移領域に相当している。プロフィールでは、上層を転圧しているときに下層の上端面近傍の密度が少し変化しているように見えるが、**4.4.2 項**のフィルター材料の事例で説明したように、実質的な密度増加ではなく、上層下部の密度増加の影響による見かけの増加であると考えられる。少なくとも遷移領域以下の領域では、いずれのケースにおいても、上位層を転圧しているときには、下位層の密度はほとんど変化していない。施工前後の遷移領域を除いた下位層の平均密度を比べると、**図－4.73** のようになっている。上位層の転圧によって発生する下位層の密度増加は 1%以下であり、積層効果はあったとしても、わずかであることが示された。

図－4.71 密度分布の変化(転圧厚さ 30cm)

図－4.72　密度分布の変化（HA 材料）

図－4.73　転圧直下層の積層効果

4.5　密度増加と転圧面の挙動

盛立試験では、締固め密度の測定とともに転圧面の沈下量がレベル測量によって求められることが多い。締固め密度との関係が明らかになれば、沈下量は締固め効果を評価する簡便な指標として利用できるかも知れない。転圧時の沈下量が着目されてきたのは、このような動機によるものと考えられる。しかし、転圧時に観察される転圧面の沈下挙動は、直感的にイメージされるほど単純ではなく、特に透水係数の小さいコア材料では間隙水圧の発生などの複雑な現象を伴うため、沈下量から締固め密度を推定することは極めて困難である。実際、転圧効果の収束傾向をみる以外に沈下量が利用されることは、これまでほとんどなかった。沈下量は密度や他の設計値に変換されないと、設計と対比できないからである。ここでは、施工含水比を変えて行ったコア材料の盛立試験で得られた転圧時の詳細な沈下挙動データや、各所のフィルダムで測定された密度増加と沈下量の関係データをもとに、沈下挙動の実態と問題点を考察する。

4.5.1 コア材料の沈下挙動

(1)　沈下量の測定

HAダムでは**4.3.2項**に示した現場締固め試験に先行して同様の現場試験が行われており、そこでは転圧時の沈下挙動を詳細に調べている。この盛立試験では、全粒径の自然含水比を基準にして、4ケースの目標含水比（w_n－6%、w_n－2%、w_n、w_n＋3%）を設定した。また、転圧回数は6水準設定しているが、施工含水比と転圧回数以外の試験条件は**4.3.2項**のHA材料のケースと全く同じである（**表－4.12**参照）。測定は各転圧ゾーンにおいて、所定の転圧回数（N＝0、2、4、6、10、14回）ごとに、SRIDによる密度測定とレベル測量による地表面沈下量の測定を、それぞれ10測点で行っている。転圧時の沈下挙動を詳しく調べるため、所定回数の転圧完了後の沈下量だけではなく、各レーンの転圧を終えるごとにレベル測量を行って、転圧面の動きを細く追跡している。また、10ヶ所の沈下量測点には固定ピンのついた直径10cm、厚さ1cmの鉄製の円板標的を設置して測定位置を固定した。**図－4.74**に転圧レーンと測定エリアを示す。

図－4.74　転圧レーンと沈下量の測定エリア

他方、**4.3.2 項**に示した CY ダムの盛立試験でも、4 種類の含水比を変えた試験ゾーン（w_{opt}－3%、w_{opt}－1%、w_{opt}、w_{opt}＋1%、w_{opt}＋3%）を設けて、所定の転圧回数（N＝0，2，4，6，10，14 回）ごとの沈下量と密度の測定を行った。それぞれの材料の粒度は **4.3.2 項**の**図－4.33** に示している。

(2) 含水比と沈下量

HA ダムの各試験ゾーンにおいて、2 層目を盛立てたときの転圧回数と密度および沈下量の関係を**図－4.75** に示す[15)]。転圧は第 1 レーンから始まり、順次第 2 レーン、第 3 レーンへと進み、最後の第 4 レーンを転圧して終了する。図では横軸上のプロット位置を少しずつ右側へずらして、所定の転圧回数ごとに各レーンの転圧後の沈下量をすべてプロットした。白丸は 10 個の実測値を、黒丸はその平均値を表している。各転圧回数における四つのプロット群は、第 1 レーンから始まり（最も左側のプロット）、第 4 レーンを転圧した後の沈下量（最も右側のプロット）で完結する。他方、転圧回数と湿潤密度の関係図には、測定値のプロットとともに、平均密度の回帰曲線（双曲線近似）を示している。

転圧回数と沈下量の関係をみると、沈下挙動も含水比によってかなり異なる様相を示すことがわかる。乾燥側の w_n－6%や w_n－2%のケースではウェービングが生じていないので、転圧回数の増加とともにすべての点で徐々に沈下量が大きくなっており、転圧レーン間の沈下量の差はあまりない。これとは対照的に、含水比の高い w_n や w_n＋3%のケースでは、各測点の沈下標的がかなり複雑に動いている。標的はウェービングに伴って浮き上がりと沈み込みを繰り返しており、含水比が高くなるほど変位振幅も大きくなっている。1～2 レーンの転圧後に平均値が浮き上がり状態になっているところもある。すでに **4.3.2 項**の **(2)** で述べたように、この試験でも含水比の違いによって転圧回数に伴う密度の増加傾向が異なっている。乾燥側（w_n－6%のケース）では、転圧効果が比較的明瞭に現れているのに対し、湿潤側（w_n＋3%のケース）では、転圧回数が増えてもわずかな密度増加しか生じていない。

他方、**図－4.76** に示すように、CY ダムのデータでも（このダムではレーン転圧ごとの沈下量の追跡はしていない）、含水比の低い w_{opt}－3%、w_{opt}－1%のケースでは、標的は比較的滑らかに沈下しているのに対して、含水比の高い w_{opt}＋1%、w_{opt}＋3%のケースでは、かなり複雑な挙動を示しており、全体的な沈下挙動は HA ダムとよく似ている。

図－4.75 転圧回数と密度および沈下量の関係（HA ダム）

図−4.76 転圧回数と密度および沈下量の関係（CY ダム）

(3) 密度増分と沈下量の関係

転圧時に生ずる地盤面や土中の変位成分は、鉛直成分（沈下や浮き上がり）が支配的であるが、材料や試験条件によっては水平成分（側方流動）も無視できなくなる。また、観測される地表面の沈下量には、下位層の沈下量も含まれている。側方流動や下位層の沈下が無視できるときには、沈下量と密度増分は一義的に対応するので、沈下量から密度増分を求めることができる。すなわち、沈下量を観測すれば密度がわかることになる。下位層の沈下がなく、一次元圧縮の仮定のもとでは、転圧層の沈下率および密度増分による圧縮率は次のように表される（**図－4.77**）。沈下率と圧縮率をこのように定義すれば、含水比が一定であるとき $\eta_S = \eta_\rho$ となる。

沈下量による沈下率　：$\eta_S = \dfrac{H_0 - H_N}{H_0} \times 100\ (\%)$　（4.5a）

密度増分による圧縮率：$\eta_\rho = \dfrac{\rho_{tN} - \rho_{t0}}{\rho_{tN}} \times 100\ (\%)$　（4.5b）

ΔH_N：N回転圧後の沈下量
H_{SN}：N回転圧後の層厚
H_0：転圧前の層厚
ρ_{t0}：転圧前の湿潤密度
ρ_{tN}：N回転圧後の湿潤密度

図－4.77　一次元圧縮時の沈下率と圧縮率の関係

図－4.78 に HA ダムと CY ダムで求めた、転圧回数と沈下率 η_S の関係および転圧回数と圧縮率 η_ρ の関係を示す。両者の関係は、常に η_S が η_ρ よりも大きくなっている。全体的にながめると、HA ダムでは沈下率が相対的に小さく（8%以下）、ゾーン間の差もそれほど大きくない。w_{opt}＋3%のケースを除くと、η_S と η_ρ は比較的よい対応を示している。他方、CY ダムの場合は、乾燥側でも湿潤側でも沈下率はかなり大きく、η_S と η_ρ の対応もよくない。乾燥側よりも湿潤側のケースで、両者の開きが著しく大きくなっている。湿潤側のケースでは転圧が進んでも、密度増分からみるとほとんど圧縮していないにも拘らず沈下は進み続けており、沈下挙動は密度と全く異なった傾向を示している。これらの結果は、「観測されている沈下量は、圧縮に伴う沈下現象だけを反映したものではなく、大部分が側方流動などに伴う見かけ上の沈下にすぎない」ことを強く示唆している。HA ダムと CY ダムの沈下挙動の違いには、コア材料に含まれる粗粒分の粒子形状の違いが影響しているものと考

えられる。HA ダムでは角礫の緑色片岩を、CY ダムでは円礫の河床砂礫を細粒材と混合したブレンドコアが用いられている。円礫は角礫よりも一般に流動性があり、含水比が高いときには振動効果によって側方へ流動しやすくなったものと考えられる。

図－4.78　転圧回数と圧縮率および沈下率の関係

最終転圧後のη_Sとη_ρの関係を**図－4.79** に示す。CY ダムでは参考のため、締固め厚さ20cm の盛立試験ケースの結果も含めている。ほとんどのケースで、コア材料の沈下量は密度の増分から推定される圧縮量を上回っており、圧縮に伴う沈下量と側方流動などに付随するみかけの沈下成分が混在していることを示している。最適含水比から乾燥側に限っても、η_Sはη_ρの 1～2 倍の範囲でばらついている。湿潤側になるとη_Sはη_ρよりもさらに大きくなり、CY ダムのコア材料ではその傾向が特に強い。

図－4.79　圧縮率と沈下率の関係（コア材料）

以上に示した事例から、転圧厚さが 20～30cm と比較的薄いにも拘らず、材料によっては含水比が高くなると、コア材料の転圧時の沈下量には一次元圧縮だけでは説明できない沈下成分（側方への流動、下位層の沈下など）がかなり含まれていることがわかる。このため実際に観測される沈下量は、締固め密度の増加量から一次元圧縮の仮定のもとに推定した圧縮量とは一致せず、常に前者の方が大きくなる。一般に、材料の流動性が高いほど両者の開きも大きくなる。したがって、角礫材よりも円礫材の方が、そして円礫材でも含水比が高くなるほど、転圧に伴う沈下量と転圧層の圧縮量の開きは大きくなる。このため沈下量から単純に締固め密度を推定することは、一般にはできない。なお、η_Sの算出においては、下位層の沈下がないものと仮定しているが、このことについても今後さらに検証する必要がある。

4.5.2 ロック材料およびフィルター材料の沈下挙動

ロック材料やフィルター材料はコア材料よりも粒径が大きいため、粒径に応じて盛立時の締固め厚さも一般に大きくなる。コアゾーンの締固め厚さと比べると、フィルターゾーンでは 1.5～3 倍程度、ロックゾーンでは 3～5 倍程度の差がある。これらのいわゆる透水性材料は、細粒分含有率が非常に少ないため、施工含水比は低く、コア材料を湿潤側で転圧した時に見られるようなウェイビングを起こすこともほとんどないので沈下挙動は比較的単調である。低含水比のコア材料の場合と同様に、転圧が進むにつれて沈下量は双曲線状に滑らかに収束する傾向を示すのが普通である。

図－4.80(a)にロック材料およびフィルター材料の η_S と η_ρ の関係を示す。この図では SRID の密度から η_ρ を求めている。この場合は表層部 30cm の密度で全層の平均密度を代表させているため、転圧層内で正の密度勾配が生じているときには、密度から求めた圧縮量は実際の沈下量よりも過大になり、負の密度勾配が生ずると逆に圧縮量を過小評価することになる。**図－4.80(a)**でみる限り、η_S と η_ρ の関係は $\eta_S = \eta_\rho$ の等値線上の周りに比較的まとまって分散しており、コア材料のように等値線から上方に大きく偏って分布する傾向はみられない。しかし、個々のプロットにはかなりばらつきがみられる。SRID と FRID の測定結果を合成して全層の平均密度を評価しなおして η_ρ を求め直すと、η_S と η_ρ の関係は**図－**

図－4.80 圧縮率と沈下率の関係(ロック材料、フィルター材料)

4.80(b)のようになる。**図－4.80(a)**に比べると、プロットのばらつきはやや少なくなるが、全体的にη_sよりもη_ρの方が若干大きくなっている。このような傾向をもたらす要因は考えにくいので、これは FRID の標本数が少ないことが影響した結果であるとみるのが妥当と考えられる（SRID は 10 測点で測定されているのに対して、FRID の測点、すなわちフレームの埋設数は三つしかない）。

4.6 第 4 章のまとめ

第 4 章では、新たに開発された SRID と改良された FRID を適用することによって明らかになった、フィルダムの締固め密度の実態と締固め特性などを考察した。具体的には、密度および含水比の分布にみられる統計的性質、現場盛立試験方法の改良、現場締固め曲線の直接的評価、転圧層内の鉛直方向の密度勾配、密度と沈下量の関係について論じている。これらのほとんどの内容は、置換法の時代にはほとんど見ることができなかったものであり、今後のフィルダムの設計や施工に十分反映させてゆく必要があると考えている。

(1) 締固め密度の統計的性質

① 分布を規制する物理的な制約がない限り、フィル材料の密度や含水比の分布をヒストグラムに表すと、正規分布によく似た分布形状を示す。統計的に検定すると、分布の正規性が肯定されないケースも少なくないが、「フィル材料の施工含水比や締固め密度は、物理的な制約がない限り、“ 近似的に正規分布する ”」と見なしても、工学的には妥当な評価であると考えられる。フィル材料の締固め品質管理などの実務的な適用に際しては、近似的な正規性があれば十分だからである。

② ロット内の密度や含水比の分散もロット間で一様であるとはいえない（Bartlett 法による検定）。ロット間で粒度分布の変動がある以上(**図-4.1** と**図-4.2**)、ロット内の含水比や密度の分散がロット間で多少変化するのは、むしろ自然なことである。締固め密度の統計的品質管理において必要なのは、個々のロットの分散ではなく“ 全てのロットに適用できる、ばらつきの尺度 ” になりうる分散である。このような共通分散としては、複数ロットの偏差データの分散から推定した平均分散が最も理にかなっている。

③ コア材料の乾燥密度は含水比に強く依存しており、両者の関係は直線近似で表すことができる。転圧効果の比較や品質管理基準の設定においては、これらの事実を十分に考慮する必要がある。

(2) 盛立試験方法の改良

① 従来の、「転圧回数ごとに試験ゾーンを設ける“ 分離ゾーン方式 ” の盛立試験」に潜在する問題点を指摘し、これに代わる「ひとつの試験ゾーンで転圧回数と密度の関係を求める“ 単一ゾーン方式 ” の盛立試験」を提案した。

② 単一ゾーン方式の盛立試験は RI 法のような非破壊密度測定法によって初めて可能になった。分離ゾーン方式では避けられないゾーン間の材料のばらつきを排除できるため、純粋に転圧効果だけを抽出できる。単一ゾーン方式の盛立試験で得られた転圧効果曲線（転圧回数と密度の関係）は、双曲線で近似できる。

(3) 現場締固め曲線の直接的評価

① 現場締固め試験では、大量のコア材料の含水比を人為的に調整するため、試験データにはかなりのばらつきが避けられないが、SRID で得られた多点数データ（含水比と乾燥密度）の平均値を追跡することによって、振動ローラーの現場締固め曲線をとらえることができる。すなわち、「現場施工条件下の締固め特性を直接求める」ことが可能であることを実証した(**図-4.37** と**図-4.40**)。

② 現場締固め曲線の形状を見ると、乾燥側では転圧回数の増加に伴って密度の上昇が大きく、含水比が高くなるにつれて密度増加は減少する。そして、ある含水比を越えると、締固め密度は転圧回数の増加によらなくなり、締固め曲線はほとんど一致する。

③ 室内の締固め試験結果を礫率補正して求めた締固め曲線と現場締固め曲線を比較すると、両者はかなり異なっており、最適含水比と最大乾燥密度が共に一致する条件を見出すことはできなかった(**図-4.45**)。このように、両材料とも室内と現場の締固め特性は定性的に類似してはいるものの、簡単な礫率補正で定量的に結びつけることは不可能である。したがって、室内の締固め試験の結果から、実施工条件下の最適含水比や最大乾燥密度を正確に予測することは極めて困難である。同様に、含水比と透水係数の関係においても、現場試験結果と室内試験結果の間に良好な合致は認められなかった(**図-4.46**)。

④ 以上の結果から示唆されるように、事前の室内試験結果に頼る現状の設計では不確実な要素が多いため、最低でも自然含水比材料の盛立試験を行い、十分な現場施工の締固めデータを収集して、事前設計を照査する必要がある。

(4) 転圧層内の鉛直方向の密度分布

① ロック材料やフィルター材料などの透水性材料（密度型粗粒材料）の転圧では、一般に締固め厚さが大きいことから、深さ方向の密度分布が一様になることはほとんどなく、程度の差はあるけれども、転圧面から深くなるに従って密度が低くなる傾向（正の密度勾配）が見られることが多い。フィルター材料の締固め厚さはロック材料の約半分程度であるが、密度勾配の傾向はロック材料の場合と比較的よく似ている。

② 密度型の粗粒材料の場合、密度勾配を生じさせる要因は締固めエネルギーの減衰と材料の粒度分離であり、特に後者の要因の影響が大きい。締固め厚さが大きいため、材料をまき出すときに大粒径の岩石が低部に集まりやすく、小粒径の材料ほど表層部の残留する可能性が高いので、下層部ほど空隙ができやすくなる。したがって、密度勾配の大部分は転圧する前にすでに発生しており、転圧によって粒度分布の構造が大きく変化す

ることはないので、密度勾配が解消されることもほとんどない。

③　コア材料のような含水比型の粗粒材料は、密度型の粗粒材料よりも相対的に粒子の移動性が高いので、密度勾配の発生は、密度型の粗粒材料の場合ほど明瞭ではない。特に、コア材料のように含水比が高くなると、間隙水圧が発生して有効応力が減少するので、粒子の移動性はさらに高まり、初期状態で存在していた密度勾配が転圧後に解消されることもある。さらに、コア材料の締固め厚さがロック材料やフィルター材料に比べてかなり小さいことも、密度勾配が発生しにくい要因になっていると考えられる。それでも見かけ上密度勾配のように見える鉛直分布を示すことが少なくないが、これらは密度勾配というよりも、粒度分布の場所的な偏りを反映しているものと考えられる。

(5) 密度増加と転圧面の挙動

①　振動ローラーを用いて盛立てたときのコア材料の沈下量は、約 15%以下であることが多いが、施工含水比が高くなって側方流動が顕著になると、沈下量が 20%以上になることもある。これに対して、SRID で測定した密度増分から求めた圧縮量は沈下量よりも常に小さく、最大で 10%程度である。これらの結果は、コア材料の見かけの沈下量には鉛直方向の圧縮成分の他に、側方流動や下位層の沈下などの要因によって生じる成分が、かなりの割合で含まれていることを示している。もし下位層の圧縮や沈下が無視できるならば、それは側方流動に付随する成分であると考えられる。側方流動に伴う沈下成分は施工含水比が高くなればなるほど大きくなる。

②　フィルター材料やロック材料などの透水性材料の沈下量と圧縮量は、コア材料よりも小さく、締固め層厚によらず 5～10%の範囲にあることが多い。透水性材料の沈下成分はほとんど圧縮に伴う沈下であると考えられる。

③　以上のように、沈下に現れる背景要因は、密度型の粗粒材料か含水比型の粗粒材料かによって異なっている。また、たとえ初期密度がわかっていたとしても、沈下量から転圧後の密度を正確に見積もることは極めて困難である。

参考文献

1) 豊田光雄・角田裕志：SRID によるフィル材料の締固め密度の分布特性,第 35 回地盤工学研究発表会講演集,pp.1581-1582, 2000.6.

2) J.R.Benjamin,C.A.Cornell: Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers, pp.460-475.

3) 近藤良夫、舟阪　渡（編）:「技術者のための統計的手法」、pp.129-132、共立出版

4) 豊田光雄・山本重樹・富永靖章：RI 工法によるフィル材料の締固め密度管理データに関する考察,土木学会東北支部技術研究発表会（平成 10 年度）概要集,pp.348-349, 1999.3.
5) 松本徳久・渡辺和夫・小川優・岩田充弘：粗粒材料の密度試験に関する実験的検討,土木研究所資料第 2233 号,1985.5.
6) 九州電力株式会社：天山ダム,発電所建設工事報告,pp253～261,1990.6.
7) Walker, F.C. and Holtz, W.G.：Control of embankment material by laboratory testing, Proc. ASCE, No.108, pp.1-25, 1951.
8) 久野悟郎：土の締固め（技報堂全書　57）1963.
9) 原成市・片山善郎・平原由夫・豊田光雄：締固め方法の違いによるコア材料の締固め・透水性の比較,第 35 回地盤工学研究発表会講演集,pp.1587-1588, 2000.6.
10) 地盤工学会：地盤調査法,第 7 編,第 7 章締め固め地盤の透水試験,pp305～311,1995.
11) 土質工学会：粗粒材料の締固め,pp124～149,1990.12.
12) 東京電力株式会社：高瀬川電源開発工事報告,pp491～492,1981.10.
13) 粗粒材料の現場締固めの評価に関する研究委員会：粗粒材料のまき出し層内の密度勾配に関する一考察,粗粒材料の現場締固め評価に関するシンポジウム,pp.65-72, 1990.11.
14) 豊田光雄・角田裕志：コア材料の現場締固めにおける積層効果,第 34 回地盤工学研究発表会講演集,pp.1863-1864, 1999.7.
15) 豊田光雄・楠貞則：粗粒材料における密度と沈下量に関する考察,第 34 回地盤工学研究発表会講演集,pp.1867-1868, 1999.7.

第 5 章　コア材料の転圧厚さの増大に関する検討

5.1　はじめに

ゾーン型ロックフィルダムの堤体は、その 80%がロックゾーンで占められており、ダムの止水機能を担うコアゾーンの堤体積は 20%以下である。しかし、いうまでもなくコアゾーンはダムの使命である止水機能を担っており、このためにコア材料は粒度分布（特に透水係数に影響が大きい細粒分含有率）や施工含水比が厳しく規制され、ロック材料の数分の一の締固め厚さで、転圧後の密度を管理しながら慎重に盛立てられている。降雨時には盛立てはできないので、コア材料の盛立施工には天候に大きく左右される。タンピング系のローラーで締固めるときには、夜間の降雨対策（締固め後の転圧面がかき乱された状態になっているので（**5.4.1(4)項** に示す**写真－5.1** 参照)、降雨が浸透しないように処置する必要がある）のために、フラットローラーを用いて整地しなければならない。逆に、振動ローラーで締固めるときには、平滑な仕上がり面になるので、その状態のまま次の層を盛立てると、境界面が水理的な弱面になる可能性が懸念されるため、材料をまき出す前に平滑面をレーキングしてかき乱している。ロックゾーンは堤体積が大きいが、多少の降雨があってもほとんど盛立ての支障にはならず、転圧面の処理も必要ないので、コア材料に比べると施工速度はずっと速い。したがって、フィルダム全体の施工速度を左右しているのは、コアゾーンの盛立てである。

コア材料の施工速度を上げる最も簡単な方法は、締固め厚さを大きくすることである。コア材料の転圧厚さは、つい最近まで 20cm が一般的で、約 30 年間ほとんど変化がなかった。この理由として、締固め機械が限定されていた（ほとんどがタンピング系であった）ことや、締固め効果を確実に評価できる方法がなかったことなどがあげられる。しかし、現在では締固め機械の面でも、締固め効果の評価の面でも、状況が変化してきている。転圧機種に関しては、これまで締固め厚さの大きいロック材料やフィルター材料だけに用いられていた振動ローラーを、コア材料の締固めにも適用する事例が増えてきた。また、**第 4 章**で論じたように、多点数データを収集することによって、客観的に転圧効果を評価できるようになったので、コアの締固め厚さを拡大できるか否かを実証できる状況になってきたと考えられる。一層当りの転圧厚さを増大できれば、ダム全体の建設工期の短縮やコストの縮減につながるため、経済性の面で施工の合理化につながることは明らかである。

この章では、まず過去 24 年間のフィルダムコア材料の施工実態を簡単にふり返り、転圧厚さを増大するための課題を整理する。次いで、新しい試験法および密度評価法を適用して行った、転圧厚さの増大を目指した現場比較試験の結果を考察して、コア材料の締固め厚さを増大することが可能であることを示す。

5.2　フィルダムにおけるコア材料の盛立て施工実態

表－5.1 は、1968 年から 1992 年までに竣工した建設省系の土質遮水壁型ロックフィルダム（26 ダム）から、コア材料の概要、重機転圧による締固め施工法、品質管理基準などについて実績をとりまとめたものである [1)]。最近、竣工したフィルダムについては工事誌などが出ていないので含まれていない。施工実態の要点を要約すると以下のようである。

(1)　粒度分布

コア材料には、崖錐、まさ土、ローム、シルトなどに風化岩や砂礫などが混ざった粗粒材料が用いられており、最大粒径は 100～150mm 以下に制限されている。**図－5.1** に調査したコア材料の粒度分布曲線の範囲を示す [1)]。75μmm 以下の細粒分を 15～25%含み、19mm 以上の粒径が 20～40%を占め、53mm 以上の岩塊は 20%以下というのが代表的な粒度である。コア材料といえば一般に細粒土を連想しがちであるが、これらのフィルダムのコア材料には、細粒分と粗粒分が適度に混合した、滑らかな粒度分布をもった材料が用いられているという共通した特徴がある。コア材料に求められる安定性と止水機能の両面

図－5.1　調査したコア材料の粒度範囲

を考えると、細粒土単体よりもこのような粗粒分を多く含むコア材料の方がむしろ優れている。粒度分布がよいので締固め効果が大きく、十分な止水性をもち、かつせん断強度も大きい安定した遮水ゾーンが可能になるからである。また、十分なせん断強度があるので、締固め能力が大きい振動ローラーも適用できるので、施工性の面からも好ましい材料である。さらに、コア材料の選択肢が広がることから、現地材料を有効に活用できるなどのメリットも大きい。

表－5.1(1)　コア材料の施工法および品質管理基準(過去の事例)

番号	ダム名	着手年度	竣工年度	コア材の岩種･土質名称･土質分類等	コア材の粒度特性		室内締固め特性				コア材の転圧仕様			現場密度試験(品質管理)		品質管理基準			
					最大粒径 Dmax (mm)	細粒分含有量 fc (%)	モールド直径 (mm)	試験最大粒径 (mm)	w_{opt} (%)	ρd max (t/m^3)	転圧機種	転圧回数 (回)	仕上り厚 (cm)	試験法	ロットおよび点数	含水比 $w_n - w_{opt}$ (%)	密度 t/m^3	粒度	透水係数 cm/s
1	九頭竜	1962	1968	風化岩および崖錐(GC)	60	17.9～19.1	不明	15	17.5	1.8	ｼｰﾌﾟｽﾌｰﾄﾛｰﾗ20t	12回以上	20	置換法(ベントナイト溶液)砂置換法	10回／日	0～+3 (-15mm)	D≧90%	細粒分fc≧10%	不明
2	大雪	1965	1975	風化粘板岩(SC)	150	不明	150	19.1	8.9～11.0	2.151	ｼｰﾌﾟｽﾌｰﾄﾛｰﾗ20t	12回	15	砂置換法(φ20cm×h20cm)	2回／日 3点／回	w_{opt} (-19.1mm)のやや湿潤側	D≧98.5%	fc：10～20% -4.8mm：40～70% -19.1mm≧65%	k≦1×10^{-5}
3	岩屋	1966	1976	風化岩、崖錐(SC、GC)	150	20.2	100	15	15.8～18.5	1.68～1.79	振動ﾛｰﾗ(BW-200)(EL324.7まで) ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗ(WS-21,CAT-825)(EL324.7から)	6回 12回	20 15	ベントナイト置換法(φ30cm×h25cm)およびRI法	1回／層 3点／ﾘﾌﾄ(置換法) 3点／層(RI)	0～+3 (-15mm)	D≧95% ρd≧1.762(全粒径)	fc：12～30% -4.76mm：40～60%	不明
4	三保	1969	1978	ｽｺﾘｱローム(SM)および凝灰岩(GW)	150	不明	100	15.9	17.6	1.82	ｼｰﾌﾟｽﾌｰﾄﾛｰﾗ20t	12回	20(撒出)	水置換法	2回／ﾘﾌﾄ	-1～+2 (-15.9mm)	D≧96%	fc：≧10% -15.9mm≧65%	不明
5	寺内	1970	1979	黒色片岩、風化土(SC)	60 (1-A) 100 (1-B)	35 (1-A平均) 22 (1-B平均)	100	15.9	13.5 (1-A) 12.0 (1-B)	1.89 (1-A) 1.96 (1-B)	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗ30t	12回	15	砂置換法(φ20cm×h20cm)およびRI法	1回／層 3点／回	-1～+0.3 (最大粒径不明)	D≧95%	fc≧30%(1-A) fc≧5% (1-B)	k≦5×10^{-6}
6	手取川	1969	1979	風化岩、崖錐(GC)	150	18.3(平均)	不明	15	14.2	1.90	ｼｰﾌﾟｽﾌｰﾄﾛｰﾗ20t	不明	不明	ベントナイト置換法およびRI法	1回／層	1～+3 (-15mm)	D≧95% ρd≧1.90(全粒径)	fc：13～30% -15mm：60～80mm	k≦1×10^{-5}
7	漁川	1971	1980	安山岩(GW)および沖積土(CL)	100	不明	不明	19	14.5～15.5	不明	振動ローラ8t	6回	30	砂置換法(φ30cm)	1回／層	0～+2 (-19mm)	D≧98%	fc：10～20% -4.8mm：35～70% -19.1mm≧45%	k≦1×10^{-5}
8	漆沢	1968	1980	風化凝灰岩、凝灰角礫岩(GC～SC)	150	27.6～42.6	不明	19	不明	不明	振動ﾛｰﾗ8t	6回	20(撒出)	砂置換法(φ15cm×h25cm)	2回／日	0～+3 (-19mm)	D≧98% ρd≧1.401(-19mm)	fc≧15% -4.76mm≧50% -19.1mm≧80%	k≦1×10^{-5}

表－5.1(2)　コア材料の施工法および品質管理基準(過去の事例)

番号	ダム名	着手年度	竣工年度	コア材の岩種･土質名称･土質分類等	コア材の粒度特性		室内締固め特性				コア材の転圧仕様			現場密度試験(品質管理)		品質管理基準			
					最大粒径 Dmax (mm)	細粒分含有量 fc (%)	モールド直径 (mm)	試験最大粒径 (mm)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (t/m^3)	転圧機種	転圧回数 (回)	仕上り厚 (cm)	試験法	ロットおよび点数	含水比 $w_n - w_{opt}$ (%)	密度 t/m^3	粒度	透水係数 cm/s
9	御所	1967	1981	風化凝灰岩	60	不明	300	60	不明	不明	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗ 30t	12回	20	RI法	1回／日または 1回／層 2点／回	w_n 17～20 (全粒径)	D≧95% ρd≧1.65 (全粒径)	fc：15～30%	k≦5×10^{-6}
10	白川	1968	1981	風化花崗岩(SC)	150	19.9	100	不明	11.0	1.89	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ15t	8回 以上	20 (撒出)	水置換法 (φ25cm×h25cm)	1回／層 3点／回	w_n：9～12 (最大粒径不明)	ρd≧2.0 (最大粒径不明)	fc：10～25%	k≦5×10^{-6}
11	七北田	1972	1984	風化玄武岩	50.8	18.1 (平均)	100	20	不明	不明	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ20t	12回 以上	20	砂置換法 およびRI法	2回／日 (砂置換) 4回／日 (RI)	0～+3 (-20mm)	D≧95% ρd≧1.5 (-20mm)	fc≧12%	k≦5×10^{-6}
12	高見	1974	1983	風化頁岩および輝緑凝灰岩の崖錐堆積物	150	11.3～15.5	不明	63.5	不明	不明	振動ﾛｰﾗｰ8t	6回	20～30 (撒出)	RI法	6点／層	0.5～+2.5 (EL150まで) 0～+2 (EL150から) 最大粒径不明	D≧95% ρd≧2.04 (最大粒径不明)	fc≧10% -2mm≧20% -15.9mm≧45% -63.5mm≧70%	k≦1×10^{-5}
13	四時	1970	1983	風化緑色片岩	100	19.35～34.1	不明	20	14.1～20.43	不明	ｼｰﾌﾟｽﾌｰﾄﾛｰﾗｰ20t	10回	20	砂置換法	2回／日 3点／回	-1～+2.5 (-20mm)	D≧95% ρd (全粒径) ≧1.85	fc：15～35% -4.76mm：40～70% -9.52mm：50～85%	k≦1×10^{-5}
14	寺山	1972	1984	風化流紋岩およびローム	150	21.2±2.5	不明	不明	不明	不明	振動ﾛｰﾗｰ (BW-210) および ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗ (825B)	6回 12回	20 20	RI法および砂置換法	1回／層 5点／回 (RI法) 1回／日 3点／回 (砂置換)	0～+3 (最大粒径不明)	D≧96%	fc≧15% -4.76mm≧45% -25.4mm≧70% -50mm≧80%	k≦1×10^{-5}
15	有間	1969	1985	風化砂岩、泥層土	19.1	23.5 (平均)	150	不明	17.0	1.735	ｺﾝﾊﾟｸﾄﾄﾞｰｻﾞ 30t	12回	15	RI法	1回／10000m^3 3点／回	0～+5 (25.4mm)	D≧95% ρd≧1.70 (最大粒径不明)	fc≧16～26% -5mm：45～64%	k≦1×10^{-5}
16	十勝	1970	1984	風化粘板岩	50.8	不明	300	不明	不明	不明	ｺﾝﾊﾟｸﾄﾄﾞｰｻﾞ 33t	8回	20	砂置換法およびRI法	1回／層 3点／回	不明	D≧95%	不明	不明

表－5.1(3)　コア材料の施工法および品質管理基準(過去の事例)

番号	ダム名	着手年度	竣工年度	コア材の岩種・土質名称・土質分類等	コア材の粒度特性		室内締固め特性				コア材の転圧仕様			現場密度試験（品質管理）		品質管理基準			
					最大粒径 Dmax (mm)	細粒分含有量 fc (%)	モールド直径 (mm)	試験最大粒径 (mm)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (t/m3)	転圧機種	転圧回数 (回)	仕上り厚 (cm)	試験法	ロットおよび点数	含水比 $w_n - w_{opt}$ (%)	密度 t/m^3	粒度	透水係数 cm/s
17	荒川	1973	1985	崖錐土（GM)、礫混り砂質シルト（SM)、凝灰質集塊岩、	100	21.3～27.9	不明	15.9	19.5～23.3	1.601～1.700	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗ (825B)	不明	不明	RI法および ベントナイト置換法	1回／層 3点／回	0～+3 (-15.9mm)	D≧95%	fc：10～30% -4.76mm：50～80% -19.1mm：65～95% -50.8mm：80～100%	k≦1×10^{-6} (室内)
18	下湯	1971	1988	凝灰角礫岩、風化安山岩	150	22.2～25.7	300	63.5	不明	不明	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ20t	12回	20 (撒出)	砂置換法およびRI法	2回／日 3点／回	0～+3 (-63.5mm)	D≧95%	fc≧20% -4.8mm≧45% -15mm≧60%	k≦5×10^{-6}
19	奥野	1972	1989	凝灰角礫岩、風化安山岩	150	11.3～35	100	15.9	不明	不明	ｺﾝﾊﾟｸﾄﾄﾞｰｻﾞ 31t	12回以上	25 (撒出)	RI法およびベントナイト置換法 (φ25cm×h20cm)	1回／日 3点／回	-1～+3 (-15.9mm)	D≧95% ρd≧1.508 (-15.9mm)	fc：10～35% -15.9mm≧55%	k≦1×10^{-5}
20	寒河江	1972	1990	風化安山岩、風化玄武岩	150	15.0	不明	不明	不明	不明	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ30t	12回以上	15	RI法および 砂置換法 (φ30cm×h30cm)	1回／層 10点／回 (RI) 3点／回 (砂置換)	1～+4 (最大粒径不明)	D≧95% ρd≧1.70 (最大粒径不明)	fc≧14% -4.8mm：50～75% -19.1mm：60～85%	k≦1×10^{-6}
21	奈良俣	1973	1990	角礫混りまさ質堆積物	150	15.5～17.8	100	15.9	10.3～11.1	1.976～2.003	振動ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ20t	8回	30	砂置換法およびRI法	1回／層 3点／回	-0.5～+2 (-15.9mm)	D≧95%	fc≧12% -4.8mm≧60%	k≦1×10^{-6}
22	福地	1978	1990	風化ローム貢岩	50.8	34.2～72.1	不明	不明	15.3～19.5	1.645～1.798	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ20t	8回	20 (撒出)	砂置換法	不明	-2～+3 (最大粒径不明)	不明	fc：30～85% -4.76mm≧60%	不明
23	阿木川	1969	1990	流紋岩	150	不明	不明	不明	不明	不明	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ30t	12回	15	砂置換法およびRI法	1回／層 3点／回	0～+3 (-15.9mm)	D≧95%	fc≧15% -4.8mm≧40%	k≦1×10^{-5}
24	七ヶ宿	1973	1991	シルト質～砂礫質土および新規火山砕屑物	150	15.0 (平均)	100	19.1	14.2	1.88	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ30t	8回	20	砂置換法 (φ20cm×h20cm) およびRI法	4カ所／日 (砂置換) 12カ所／日 (RI法)	-0.5～+2.5 (-19.1mm)	D≧95% ρd≧1.97 (全粒径)	fc≧15% -4.76mm：40～60% -19.1mm：55～75%	k≦5×10^{-6}
25	山瀬	1977	1991	泥流堆積物	100	15.3～28.8	100	19.1	不明	不明	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ17t	10回以上	20	砂置換法 (φ25cm×h25cm)	1回／3層 3点／回	0～+3 (-19.1mm)	D≧95%	fc≧10% -19.1mm≧60%	k≦1×10^{-5}
26	美利河	1975	1991	シルト～砂質シルト	150	19.8 (平均)	不明	19.1	不明	不明	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ31t	16回	20	砂置換法およびRI法	1回／日	0～+3 (-19.1mm)	D≧95% ρd≧1.71 (最大粒径不明)	fc：17～23% -19.1mm：65～95%	k≦1×10^{-5}

(2) 室内試験の粒度

コア材料の締固め透水特性は、まず室内の突固め試験と透水試験によって評価されている。室内試験では直径 10cm の標準モールドを用いる事例がほとんどで、15mm または 19mm 以上の粒径をカットしたせん頭粒度で試験がなされており、1×10^{-6}cm/s 以下の透水係数が得られるか否かを目安にして、コア材料としての適性を判断しているダムが多い。直径 30 cm の大型モールドを用いて *d*max＝60～63.5mm で突固め試験を行っているダムが 2 例あるが、このような事例は少ない。

(3) 転圧仕様

盛立施工では、仕上り厚さ（または、まき出し厚さ）を 20cm とする事例が大半を占めているが、これより小さい 15cm の施工例もいくつかみられる。仕上り厚さ 30cm の施工事例が二つあるが、1990 年以前に 20cm を越える締固め厚さでコアが盛立てられたダムは非常に少ない。転圧機種は、**図－5.2** に示すようにタンピング系が多く採用されており、振動ローラーを用いた事例はわずかである。タンピング系のローラーで締固める場合の転圧回数は８～12 回が採用されており、振動ローラーの場合は６回転圧が標準的に採用されている。コア材料の締固めにおける機種の適性の評価については、現状においても客観的な評価が定まっているわけではない。これまでにタンピング系の使用事例が多い理由のひとつとして、材料をほぐしながら締固められるという振動ローラーにないメリットが考えられる。しかし、すでに述べたように当時の盛立試験の精度では、機種間の転圧効果の違いを明確に識別できなかったために、過去の実績を尊重するという事例主義に傾斜する姿勢が現れているように思われる。

締固め厚さ（仕上がり厚）

転圧機種の使用状況

図－5.2 転圧厚さおよび転圧機種の比率

(4)　現場密度試験

過去の事例はもとより、現状でも現場密度試験では標準的に置換法が採用されている。1回当たりの試験点数は3点が標準となっている。RI法による密度試験はフィルダムでは標準的な試験法にはなっていないが、**表−5.1**をみると、砂置換とRI法を併用しているダムが意外に多いことに気づく。RI法のみで品質管理を行った事例も3ヶ所ある。これは、RI法のもつ即時性、簡易性などが注目されて、置換法の弱点（得られるデータ数が少ない）を補う手段として利用されたものと考えられる。ロットの基本単位は1日または1層とされることが多いが、施工土量でロットの大きさを決めた例や、3層に1回や1日に2回などとする例も少なからずある。

(5)　品質管理基準

施工含水比は最適含水比 w_{opt} より湿潤側で、w_{opt}＋2〜5%以下の範囲に制限されている。上限界を w_{opt}＋3%とする事例が最も多い。ただし、w_{opt} は室内試験の結果を礫率補正して推定した値である。締固め密度に関しては、すべてのダムで締固め度の管理（D 値管理）が行われている。D 値とは下式に示すとおり、現場の乾燥密度とある一定の突固めエネルギーで得られる最大乾燥密度の比である[2)]。

$$D = \frac{\text{盛土の乾燥密度}}{\text{室内締固め試験の最大乾燥密度}} \times 100 \quad (\%)$$

管理限界（D 値の下限値）は90〜98.5%の範囲で設定されており、95%とする事例が多数を占めている。粒度については75μ以下の細粒分含有率 fc の下限界が例外なく定められており、fc の許容最低値は10%となっている。ダムによっては、fc の下限値だけでなく上限値も設けたり、中間粒径（特に室内試験の最大粒径）の加積通過率を制限しているケースもある。現場透水係数に関しては、1×10^{-5}cm/s もしくは 5×10^{-6}cm/s を許容限界としており、それ以外の上限値はみあたらない。

5.3　合理化施工に関する課題

過去のコア材料の盛立実績を踏まえ、今後、盛立施工の合理化を進めるうえで、筆者が重要と考える課題を次に述べる。

(1)　締固め機械の選定

コア材料の締固めでは、一般にタンピングローラーが有効であるという認識が暗黙裡にもたれているが、このことを実証する客観的なデータはほとんどない。これにはいくつかの技術的な理由があると考えられる。とりわけ、これまでは締固め密度を求めるときに置

換法による密度試験が主として用いられていたために、得られるデータ数が少なく密度の分布特性が十分明らかにできなかったことが指摘される。このため、盛立試験で機種の比較を行っても機種間の差違がデータのばらつきの中に埋没してしまい、定量的な評価を下すことがほとんどできなかったわけである。このような状況では、定量的あるいは客観的な判断基準がないために、経験や実績などに頼るほかなく恣意的な評価に陥りやすくなる。当然のことながら、施工の合理化を目指すならば、これからは締固め機械の選定においてもより客観的な判断基準を追求すべきであり、すでに指摘したように新しい RI 法の出現でそのような環境は整っている。粗粒材料の現場締固め密度の評価においては、何よりも信頼できる多点数のデータが不可欠であることを認識することが重要である。

(2) 盛立試験法の問題

締固め機械の性能を評価して材料に適した機種を選ぶとき、あるいは転圧厚さによって締固め密度がどのように変わるかを検証するときに、機種や転圧厚さなどの目的因子を何ケースか変えて盛立試験が行われる。このとき、目的因子以外の隠れた要因の影響を十分に洞察することが肝要である。**第 4 章**で論じたように、置換法を用いた分離ゾーン方式の盛立試験には致命的ともいえる欠陥が潜在しているため、施工の合理化を目指した比較検証試験に適しているとはいえない。今後は SRID などの新しい RI 法を活用した、単一ゾーン方式の盛立試験に変えてゆく必要がある。

(3) RI 法の改良

施工方法や品質管理試験をより合理的な形に改めてゆくためには、何をおいても転圧後の密度分布の実態を正確に把握することが重要である。置換法による密度試験で日常的に多点数データを集めることには明らかに限界がある。しかし、従来の RI 法にも改良すべき課題がいくつかあり、これまでの固定式のままではフィル材料の密度測定に十分適用できるとはいえない。筆者はこれらの課題に応えるべく、すでに新しい方式の RI 密度計（SRID など）を開発してきており [3)]、これについては**第 3 章**で詳細に論じた。

5.4　転圧厚さが締固め密度に及ぼす影響

材料が異なる 3 ダムのコア材料を対象として、転圧厚さが締固め密度に及ぼす影響を検証する一連の盛立試験を実施した。**表－5.2** にコア材料の種類と試験条件を示す。ケーススタディとして、最初に 1996 年に試験を実施した HO ダムの事例をとりあげ、次いで 1998 年に試験を実施した CY ダムと HA ダムの事例を考察する。

表－5.2　締固め厚さを変えた盛立試験の概要

対象ダム	試験年	材　　料	試験条件と測定器
HO ダム	1996 年	河床砂礫とロームの混合（混合法：ｽﾀﾋﾞﾗｲｻﾞｰ）	転圧厚さ：20、30、40cm 転圧機種：タンピングローラー、振動ローラー RI 密度計：(大型表面型密度計、ﾌﾚｰﾑ型 RI 密度計)
CY ダム	1998 年	河床砂礫とロームの混合（混合法：ｽﾄｯｸﾊﾟｲﾙの切り出し）	転圧厚さ：20、30、35、40cm 転圧機種：タンピングローラー、振動ローラー RI 密度計：（SRID、FRID）
HA ダム	1998 年	緑色片岩と千枚岩の混合（混合法：ﾛｰﾀﾘｰﾃｨﾗｰ）	転圧厚さ：20、30、40、50cm 転圧機種：振動ローラー RI 密度計：（SRID、FRID）

5.4.1　ケーススタディ 1（HO ダム）

(1)　はじめに

HO ダムは、堤高 57m、堤頂長 390m、堤体積 1,889,000m^3（コア盛立量 238,000 m^3）の規模を有する中央コア型のロックフィルダムで、2000 年 11 月に竣工した。当ダムは河床堆積物の有効利用を図るために、フィルター材料とロック材料には河床砂礫を用い、コア材料には河床砂礫とその上に堆積するロームを混合した材料を用いている。ここでとりあげた盛立試験では、コア材料の転圧厚さの影響以外に転圧機種の比較、材料の混合方法についても検討している [4]。なお、HO ダムの盛立試験時には SRID および FRID が開発途上であったので、転圧層の平均的な密度測定には大型の固定式 RI 密度計、深さ方向の内部密度分布の測定には、自動走査方式に改良される前のフレーム型 RI 密度計を用いた。

(2)　コア材料の性質

a)　材料物性

コア材料は河床砂礫（以降、砂礫という）とロームの混合材料である。砂礫の物性は、最大粒径 d_{max}=100mm、絶乾比重 G_b=2.36～2.52、吸水率 Q=3.0～5.3%である。ロームの物性は、最大粒径 d_{max}=19mm、土粒子の比重 G_S=2.72~2.78、細粒分含有率 fc=38～57%、自然含水比 w_n=80～90%である。コア材料の粒度分布を**図－5.3** に示すが、これまでに建設された建設省系のダムに比べると、やや粗粒側に位置している [5]。

図－5.3　HO ダムコア材料の粒度分布

図－5.4　混合比率と室内試験粒度

b)　室内試験による締固め密度と透水特性

盛立試験に先だち、コア材料の遮水性を損なわない範囲で、どこまでコア材料を粗粒化させることができるかについて調べるために、砂礫とロームの混合比を変化させた材料を用いて、直径 30cm の大型モールドによる締固め試験と透水試験を実施した。

図－5.4 に、ロームと砂礫の原粒度と混合後の試験粒度を示す。試験に用いる砂礫の最大粒径は 53mm とした。ロームと砂礫の乾燥重量混合比（以下単に「混合比」と呼ぶ）は、3：7、1：3、1：4、1：5、1：6 の 5 ケースとした。締固めは電気ハンマーによる振動締固め法で行った（**図－5.5**）。締固め時間は、混合比 3：7 の材料を用いて締固め時間と密度の関係を調べ、地盤工学会基準に準拠した突固め試験の突固めエネルギー1E_c に対応する密度が得られる時間を採用した [6]。

混合比と最適含水比、最大乾燥密度および最小透水係数の関係をまとめて、**図－5.6** に示す。砂礫の混合比が大きくなると、最適含水比が減少して最大乾燥密度が大きくなる。透水係数にはばらつきがみられるが、各混合比とも最小透水係数は最大乾燥密度が生じる含水比よりやや湿潤側で得られ、いずれのケースでも 1.0×10^{-6}cm/s 程度の値となり、混合比による明確な差は見られなかった。透水係数は一般に材料の粒度、含水比、締固め密度などの要因に左右されるが、なかでも細粒分の含有率 *fc* の影響が大きく、*fc* が減ると透水係数は大きくなる [7]。また、他の条件が同じであれば、密度が高くなると透水係数は小さくなる。今回の試験条件のもとで最小透水係数にほとんど差が現れなかったのは、これらの二つの要因が相乗的に作用したことを示唆している。

c)　砂礫とロームの混合方法

当初、砂礫とロームを交互に積み上げて（混合比に合わせて砂礫とロームのまき出し厚さを変える）ストックパイルを造成し、ブルドーザーによりストックパイルの法面からスライス状に薄く切下ろす方法で混合コア材料を製造した。しかし、この方法では混合度合いが十分でなく、ロームの固まりが団子状に残って透水係数がやや大きくなることがわかった。このため混合方法を見直し、ストックパイルから切り出した材料をまき出し後に、さらにスタビライザーを用いて強制混合する方法を最終的に採用した。

図－5.5　電気ハンマーによる締固め試験装置

図－5.6　含水比と乾燥密度および透水係数の関係

(3)　盛立試験の概要

a)　試験方法

盛立試験は、**表－5.3** に示すように試験Ａと試験Ｂに分けて行った。それぞれの試験に先立って、ストックパイルで材料の 53mm以下の含水比をチェックして、最適含水比～＋3%の範囲に入っている材料だけを使用した。

試験Ａは、転圧機種と混合比を選定するために、砂礫とロームの混合比、転圧機種、転圧厚さの三つの要因を適宜組合わせて、締固め密度と透水係数を比較した。密度測定は転圧回数 N=0、2、4、6、10、16 回の 6 段階で行い、透水試験は最終転圧回数（N=16 回）時に行った。なお、この試験Ａではフレーム型 RI 密度計は用いず、固定式の表面型 RI 密度計を用いて転圧層全体の平均的な締固め密度を測定している。ただし、転圧厚さ 40cm のケースは、地表面から深さ 30cm までの密度で転圧効果を評価している。

試験Ｂでは、コアの転圧厚さを増大させることの可能性を検討するために、転圧機種と混合比を固定して転圧厚さだけを変えて締固め密度と透水係数を比較した。この試験では

転圧機種を振動ローラー、材料の混合比を 1：4 に固定し、転圧厚さ H=20、30、40cm の 3 ケースについて転圧面内の密度分布を測定した。また、フレーム型 RI 密度計を用いて転圧層内部の深さ方向の密度分布も測定した。密度測定は転圧回数 N=0、2、4、6、10 回の 5 段階で行い、最終転圧回数 N=10 回のときには密度測定後に透水試験を行った。

表－5.3　盛立試験ケース

試験種別	試験ｹｰｽ	材　料混合比	仕上り層　厚	試験層数	転圧機種	混合方法[注1)]
A	C-1	1:4	20	4	振動ローラー	BH・ST[注2)]
	C-2	1:4	30	3	〃	ST
	C-3	1:3	30	3	〃	ST
	C-4	1:5	30	3	〃	ST
	C-5	1:4	20	3	ﾀﾝﾋﾟﾝｸﾞﾛｰﾗｰ	BH
	C-6	1:4	40	3	振動ローラー	ST
B	C-7	1:4	20	2	〃	ST
	C-8	1:4	30	2	〃	ST
	C-9	1:4	40	2	〃	ST

注 1）　BH：バックホウ使用、ST：スタビライザー使用
注 2）　1～3 層目（BH）、4 層目（ST）
　　施工含水比、最適～最適＋3%

フレーム型 RI 密度計の測定では、転圧厚さの異なる三つの試験ゾーンに導管フレームをそれぞれ 3 個づつ設置した。**図－5.7** に示すように、1 層目のまき出しを終えた後に図の斜線部を掘削し、約 45 度の傾斜をもたせてフレームを設置して掘削土を埋戻した。測定は導管に沿う方向に 5cm ピッチ（鉛直方向の測定ピッチは約 3.5cm）で行った。なお、線源導管と検出器導管の間隔は 48cm あり、これは材料の最大粒径（10cm）の約 5 倍に相当する。

図－5.7　導管フレームの埋設方法

現場透水試験は、**表－5.4** に示すように、転圧厚さに応じた試験孔を掘削して変水位法[8)]で行った。透水試験では、転圧層の下位層も試験の領域に含まれるため、現場透水試験の位置は前層の試験位置と重ならないように配置した。

表－5.4　現場透水試験の方法

転圧層	孔径	孔深	測定法
20cm	φ25cm	20cm	変水位法
30cm	φ35cm	30cm	〃
40cm	φ45cm	40cm	〃

b)　試験層の造成と転圧方法

図－5.8 に試験ゾーンと密度、透水係数の測定場所を示す。試験ゾーンの造成にあたっては、基盤面の不陸を修正するための基盤処理層を設け、その上に基層（試験層と同じ材料）を設けた上に試験層を 3 層盛立てた。試験盛土の造成は、まず 11 t ダンプで運搬した材料を試験ゾーンの手前でダンプダウンした後、軽量のブルドーザー（D3 級）で敷均した。これは試験面がダンプトラックの輪荷重の影響を受けないようにして、転圧機械による締固め効果だけを評価できるように配慮したものである。試験層間の境界はブルドーザーでレーキングしている。締固めに用いた振動ローラーの主要諸元を**表－5.5** に示す。振動ローラーの総重量は 112kN で、最大 206kN の起振力を有している。一方、タンピングローラーは総重量 302kN である。

図－5.9 に試験工程のフローを示す。転圧機械による締固めと RI 測定器による密度測定を最終転圧回数まで交互に繰返した後、最終層で透水試験を行った。

図－5.8　試験ゾーンの構成と測定位置

表－5.5　締固め機械の主要諸元

機種	振動ローラー	タンピングローラー
形　　式	SV510DV	CAT825C
総　重　量	112kN	302kN
振動輪荷重	64kN	
線　　圧	296(N/cm)	
振　動　数	1,800(rpm)	
起　振　力	206kN	
全　　長	5.68m	7.69m
全　　幅	2.35m	4.54m
全　　高	2.22m	3.91m
軸　　距	3.00m	3.53m
締 固 め 幅	2.15m	2.25m

注１）　試験ケース C-5 では沈下量測定はなし
注２）　フレーム型 RI は C-7,8,9 のケースのみ

図－5.9　盛立試験のフロー

(4)　転圧機種と密度・透水係数の関係

写真－5.1 に振動ローラーとタンピングローラーによって締固めを行った転圧面の状態を示す。タンピングローラーは、ローラー部に取りつけられた突起(爪)によって締固めを行うために転圧面には凹凸が残り、目視観察によって締固め効果を判断することはできない。また、タンピングローラーの転圧では、転圧回数が増えて十分に締め固まってくると爪が浮き上がってくるウォークアウト現象[9]によって締固めが完了するといわれているが、コア材料の含水比が高いためそのような現象は全く認められなかった。

写真－5.1(a)　転圧面の状態
(振動ローラーの場合)

写真－5.1(b)　転圧面の状態
(タンピングローラーの場合)

図－5.10 に転圧回数 N と乾燥密度 ρ_dの関係（転圧効果曲線）を示す。乾燥密度は 30 個（10 測点×3 層）の測定データの平均値をプロットしている。個々の RI 測定値は各測定点での 4 方向測定の平均値である。両機種とも転圧回数 N の増加に伴い、密度 ρ_dはほぼなめ

図－5.10　転圧回数と乾燥密度の関係(機種の比較)

らかに増加し、N=6 回で密度はほぼ収束していると判断される。N=2 回以降の密度の増加は、振動ローラーの方がタンピングローラーに比べて多少大きい値を示している。本材料に対しては振動ローラーの転圧効果の方が若干大きいと考えられる。 **図－5.11** は、転圧がほぼ収束したと考えられる N=6 回転圧後の含水比、乾燥密度、透水係数の測定値およびその平均値と標準偏差の大きさを示している。平均含水比は振動ローラーの転圧ゾーンの方が若干高いにも拘らず、密度も高くなっていることから乾燥密度の差は転圧機種の違いによるものと考えられる。すなわち、コア材料に対して振動ローラーがタンピングローラーと同等もしくはそれ以上の締固め効果をもっていることを実証する結果となっている。

図－5.11 含水比、乾燥密度、透水係数の比較（N=6 回）

図－5.12 は、N=6 回転圧後の含水比 w と乾燥密度 ρ_dの関係を示す。図中には室内試験で得られた締固め曲線と、これを礫率補正した締固め曲線を併記しているが、現場で得られた ρ_dは、礫率補正した室内試験結果よりも少し低い値を示している。現場データは飽和度 Sr が約 70～90%の範囲内に分布しており、w が大きくなるにしたがって ρ_dは小さくなっている。振動ローラーよりもタンピングローラーのばらつきが大きくなっている理由は、タンピングの爪で乱された地表部分を削りとって測定しなければならないため、測定面の乱

れや層境界が明確に指定できなくなってしまうことが影響したものと考えられる。

図－5.13 に示した含水比 w と透水係数 k の関係、**図－5.14** に示した乾燥密度 ρ_d と透水係数 k の関係から、スタビライザーを用いて十分な混合を行えば、振動ローラーを用いることにより k は 1×10^{-5}cm/s 以下になることが示された。また、k の値は w が大きくなれば減少し、ρ_d が大きくなれば k が小さくなるという一般に予想される傾向は、ばらつきに隠れて明確には認められなかった。

図－5.12 含水比と乾燥密度の関係

図－5.13 含水比と透水係数の関係

Lm:Tr=1:4 H=20cm			
ケース	機種	測定値	平均値
C-1	VR	○	●
C-5	TR	△	▲
‐‐‐‐‐‐‐‐		室内締固め	
————		礫率補正	

VR：振動ローラー

TR：タンピングローラー

図－5.14 乾燥密度と透水係数の関係

(5)　材料の混合比と密度・透水係数の関係

混合比の検討は、転圧機種を振動ローラーに、転圧厚さを 30cm に固定して行った。**図－5.15** に示した転圧効果曲線をみると、いずれの場合でも転圧回数 *N*=4 回もしくは 6 回以降は密度がほとんど変化していないが、混合比によって転圧後の密度に明らかに有意な差が認められ、砂礫の混合比が大きくなるにしたがって高い密度が得られることを示している。しかし、転圧前の初期密度にすでに差があることや、**図－5.16** に示したように、施工含水

図－5.15　転圧回数と乾燥密度の関係（混合比の比較）

図－5.16　含水比、乾燥密度、透水係数の比較(*N*= 6 回)

比が密度とは逆に、砂礫の混合比が多くなると低下していることに留意する必要がある。**図－5.17** に示す N=6 回のときの w～ ρ_d図からわかるように、密度と含水比の関係が飽和度 Sr=85%ラインを中心として±5%の帯の中に分布しており、密度が混合比だけでなく含水比とも密接に関係していることを示しているからである。

図－5.18 に w と k の関係、**図－5.19** に ρ_dと k の関係を示す。透水係数 k は、平均値でみると砂礫の含有率が最も小さい混合比 1：3 で最小値を示しているものの、他の混合比でもこれとほとんど差がない結果になっている。すなわち、この試験条件の範囲内では混合比による透水係数の差は小さく、粗粒分が最も大きい混合比 1：5 のケースの 3 点を除くとすべて k=1×10^{-5}cm/s 以下の値が得られている。

図－5.17 含水比と乾燥密度の関係

図－5.18 含水比と透水係数の関係

図－5.19 乾燥密度と透水係数の関係

VR転圧 H=30cm			
ケース	Lm:Tr	測定値	平均値
C-3	1:3	○	●
C-2	1:4	△	▲
C-4	1:5	□	■
------	室内締固め		
———	礫率補正		

以上の試験結果から、混合比を変えると当然のことながら混合材の含水比も同時に変化するので、これら二つの要因が締固め密度に影響を与えたということができる。母材の含水比を調整しない限り、密度や透水係数に対する混合比の影響は含水比と密接に関係する（すなわち混合比と含水比は独立ではない）。また、混合比を変えると含水比と同時に粒度も変化するので、含水比と粒度が密度や透水係数に及ぼす影響を個別に分離して評価することはできない。結論として、混合比が 1：3～1：5 の範囲内では、**図－5.15** に現れた混合比による密度の差は粒度の違いよりも、**図－5.17** からわかるように含水比の影響が強く反映された結果であると解釈するのが妥当と考えられる。

(6) 転圧厚さの影響

a) 転圧厚さと密度・透水係数の関係

試験Ａの結果をもとに転圧機種として振動ローラーを選び、混合比を 1：4 に固定して、転圧厚さだけを変化させた場合の転圧層内の平均的な密度と透水係数を調べた。**図－5.20**～**図－5.24** に転圧効果曲線（N と ρ_dの関係）、転圧厚さ H と w、ρ_d、k の関係および各物性値の相関（w～ ρ_d図、w～k 図、 ρ_d～k 図）を示す。

転圧厚さ 20cm と 30cm のケースでは、密度の増加は転圧回数 N =6 回でほぼ収束しているが、40cm の場合は収束までに 10 回の転圧が必要である。転圧後の密度には有意な差が生じているが、前項の混合比の場合と同様に、これらの密度の差を単純に転圧厚さの影響だけに帰することはできない。試験ケース間で含水比が多少異なっているからである。密度と転圧厚さの関係よりも、むしろ**図－5.22** に示すように密度と含水比の関係に一義的な対応が認められることから、密度の差をもたらした主要因は含水比の違いであると考えられる。透水係数は、すべての測定データが 1×10^{-5}cm/s 以下になり、転圧厚さによる有意な差はほとんど見られない。また、飽和度も混合比の場合と同様に、Sr=85％ラインを中心にして±5％の範囲に分布していて比較的よくまとまっている。

これらの結果から、転圧層内の平均密度や平均透水係数でみる限り、転圧厚さが H=20～40cm の範囲では転圧厚さの直接的な影響は小さく、むしろ含水比の影響の方が大きいと判断される。ちなみに、ほぼ同じ含水比で行った追加試験でも、**図－5.25** に示すように密度や透水係数は、転圧厚さによってほとんど差がないことが再確認されている。

なお、風化花崗岩とロームを混合したコア材料を用いて転圧厚さを検討した事例でも、H＝20cm～40cm の範囲でその差は少ないという結果が得られている [10)]。

図－5.20　転圧回数と乾燥密度の関係(締固め厚さの比較)

図－5.21　密度、含水比、透水係数の比較(N= 6 回、透水係数は N=16 回)

図−5.22 含水比と乾燥密度の関係

図−5.23 含水比と透水係数の関係

図−5.24 乾燥密度と透水係数の関係

VR転圧 Lm:Tr=1:4			
ケース	層厚 H	測定値	平均値
C-1	20cm	○	●
C-2	30cm	△	▲
C-6	40cm	□	■
------	室内締固め		
———	礫率補正		

図−5.25 含水比と乾燥密度の関係(追加試験)

b) 転圧層内部の深さ方向の密度分布

図－5.26 に、フレーム型 RI 密度計による転圧層内部の密度分布の測定結果を示す。各ゾーンに設置した三つのフレームの平均値を用いて、所定の転圧回数ごとに深度方向の密度分布のプロフィールを示した。測定は 2 層目の転圧時に行っているので、1 層目のプロットは 2 層目を転圧している時の直下層の密度変化を表している。

この図より、いずれの転圧厚さにおいても層境界近傍の密度遷移帯を除くと 1 層目の密度変化はほとんどなく、上層の転圧効果は下層部には及んでいないことを示している。層境界部では、RI 密度計の測定領域が両層にまたがるため、下層の境界近傍の測定値は上層の境界近傍の密度に影響される。したがって、図に示されている境界面直下の下層密度の増加は、上層下部の影響を受けたみかけ上の変化であると考えられる。実際には 1 層目の境界近傍の密度はほとんど変化していないとみるのが妥当である。すなわち、上位層の締固めにより下位層の密度が増加するという積層効果は認められなかった。

2 層目の密度は、どの測点においても転圧に伴って上昇している。転圧厚さが 30cm や 40cm の場合においても、ひとつの転圧層内の下半部は上半部と同様に上昇しており、下層部が締まりにくくなるという傾向は認められない。むしろ、まき出し直後（N=0）には、密度分布にかなりばらつきがあったものが（特に転圧厚さ H=30cm のケース）、転圧が進むにつれて次第にばらつきが減り、層全体がより均質に締固まっていく傾向が示されている。しかし、1 層目の密度分布には深度方向に傾斜や凹凸が残っていることからわかるように、転圧後に密度の分布が層内で常に一様になるというわけではない。十分な転圧を施した後に残留するこのような密度分布の凹凸は、主として大礫の分布の仕方によって生じるものと推定される。

図－5.26 転圧層内の密度分布の比較（締固め厚さの比較）

なお、N =6 回と 10 回の間の密度上昇は小さいことから、試験Aの表面型 RI 法で転圧層全体の締固め密度の増加が N =6 回で収束しているのと同様に、転圧層内部の締固め密度の増加も N =6 回でほぼ収束していることが確認された。

5.4.2 ケーススタディ 2（HA ダム、CY ダム）

(1) はじめに

HA ダムは堤高 66.5m、堤頂長 198m、堤体積 1,050,000m^3（コア盛立量 133,000 m^3）の中央コア型のフィルダムで 2000 年 3 月に完成した。一方、CY ダムは、堤高 78.5m、堤頂長 595m、堤体積 7,740,000m^3（コア盛立量 920,000 m^3）の中央コア型のフィルダムと重力式コンクリートダムからなる複合ダムであり、現在建設中である。盛立試験は両ダムとも 1998 年に行われ、HA ダムでは転圧厚さ H=20～50cm[11)]まで、CY ダムでは H=20～40cm[12)]までの試験を実施している。これらのダムでは本格的に SRID と FRID[13)]を用いた盛立試験が行われた。

(2) 盛立試験の概要

HA ダムのコア材料は、緑色片岩（角礫材、絶乾比重 G_b=2.9、吸水率 Q=1%）と細粒材（千枚岩の風化した材料）を質量比 1：9 で混合したものである。CY ダムでも河床砂礫（円礫材、絶乾比重 G_b=2.5、吸水率 Q=2%）と細粒材（ローム）を 2：1 の質量比で混合したコア材料が用いられている。**図－5.27** にそれぞれの平均的な粒度分布を示す。これらのコア材料は粒度だけでなく、材質や粒子形状なども異なっている。

図－5.27 コア材料の粒度分布（HA ダムと CY ダム）

締固め厚さの影響を調べる盛立試験には、鉛直動が卓越する自重 112kN 級の振動ローラーを用い、SRID と FRID による現場密度の測定と定水位法による透水試験を行った。試験条件を**表－5.6** に示す。転圧厚さ 20 cm、30cm のケースでは、まき出し厚さと転圧厚さが

同じであるが、転圧厚さ 40 cm、50cm のケースでは、転圧層内の粒度分布をできるだけ均質にするため、まき出し厚さを転圧厚さの半分とし、2 層に分けてまき出した後に転圧を行っている。

表－5.6　試験条件

転圧厚さ	試験層数		まき出し厚さ	施工含水比：最適含水比 転圧速度 V：V=3km/時 転圧回数 N：N=0,2,4,6,10,14 透水試験：最終層で実施
	HA	CY		
20cm	3	1	20cm	
30cm	3	4	30cm	
40cm	3	2	20cm×2 回	
50cm	1	―	25cm×2 回	

注）実際のまき出し厚さは、転圧後に所定の仕上り厚さになるように、やや厚めに設定している。

(3)　転圧厚さの影響

図－5.28 に、HA 材料の転圧厚さごとの転圧効果曲線を示す。図の（a）は乾燥密度と転圧回数の関係を表しており、（b）は乾燥密度の増分と転圧回数の関係を示している。図中にプロットされているのは、各転圧回数における全測定データの平均値である。なお、転圧厚さ 50cm の場合は、敷均し後と転圧回数 6 回のときのみ測定が行われている。図（a）からわかるように、転圧厚さ 20～40cm の 3 ケース間では転圧効果曲線の傾向に大きな違いが認められない。また転圧厚さ 50cm のケースをみると、6 回転圧時の密度がこれら 3 ケースよりも小さくなっているが、初期密度も同様に最も小さくなっており、転圧に伴う密度増加は他のケースとほとんど差がない。実際、図（b）はそのことをはっきりと示している。

図－5.29 に示した CY 材料の場合を見ても、転圧厚さの違いによって有意な密度の差は出ていない。この試験例では、むしろ転圧厚さが一番大きい H=40cm のケースで密度増分が最も大きく現れている。これらの事実が示唆しているように、転圧厚さよりももっと大きく密度に影響する要因が背後に隠れていることを理解する必要がある。それは、たびたび指摘してきたように、転圧効果（締固め密度）の施工含水比依存性にほかならない。それは**図－5.30** と**図－5.31** に示した、施工含水比と乾燥密度の関係をみれば明らかである。HA、CY 材料とも締固め密度は含水比に強く依存しており、測定データはゼロ空隙間隙曲線（Z.A.V.C）にほぼ平行するように分布している。すなわち、施工含水比の影響に比べれば転圧厚さの影響は非常に弱く、工学的には無視してよいと判断できる。

図－5.32 に乾燥密度およびその増分と転圧厚さの関係をまとめているが、図（a）に現れている密度の違いは転圧厚さの影響を表すものではなく、試験ゾーン間の粒度や含水比のばらつきを反映しているだけにすぎない。図（b）に示されているように、密度増分は転圧厚さによってほとんど変わらない。

図－5.28　転圧回数と乾燥密度および密度増分の関係(HA ダム)

図－5.29　転圧回数と乾燥密度および密度増分の関係(CY ダム)

図－5.30 含水比と乾燥密度の関係（HA ダム）

図－5.31 含水比と乾燥密度の関係（CY ダム）

図－5.32　転圧厚さと乾燥密度（平均値）および密度増分の関係

(4)　転圧層内の深さ方向の密度分布

HA 材料では転圧厚さ 20 cm、30 cm、40cm の 3 ケース、CY 材料では 30cm と 40cm の 2 ケースで測定された FRID の結果を**図－5.33** に示す。これらの図は、最上位層のまき出し後(転圧前)と 6 回転圧後に測定した、全試験層の湿潤密度の深度分布を表している。20～40cm のいずれの転圧厚さにおいても、各転圧層内の上半部と下半部で大きな密度差は見られず、また、各層間においても大きな密度差は認められない。したがって、転圧厚さを 20 cm から 40cm まで拡大しても、転圧層内の鉛直方向の密度が不均質になることはないと判断される。また、最上位層を転圧しているときに下位層の密度は変化しておらず、上位層の転圧による下位層の積層効果も認められなかった。

(5)　転圧厚さと透水係数

図－5.34 は、最終層の最終転圧回数（HA 材料は N=10 回，CY 材料は N=14 回）で求めた、乾燥密度と透水係数の関係である。ただし、50cm のデータは転圧回数 6 回のときの値である。透水係数は転圧厚さに応じた大きさの試験孔（例えば転圧厚さ 30cm では直径約 30~40cm、深さ 30cm）を用いて定水位法（地盤工学会基準 [14]JGS1316－1995：締固めた地盤の透水試験方法）によって求めている。透水係数は、コア材料の設計値（1×10^{-5}cm/s）以下に分布しているが、ばらつきが大きいため、この密度の範囲内においては、密度と透水係数の相関は低い。また、両材料とも転圧厚さの違いによって、透水係数に有意な差は認められなかった。

図－5.33　転圧層内の密度分布(締固め厚さの比較)

図 5-34　乾燥密度と透水係数の関係

5.4.3　転圧厚さ増大の可能性

3 ダムのコア材料の転圧厚さを 50cm まで拡大できたのは、振動ローラーの振動締固め効果と起振力の大きさが有効に作用したことがまず考えられるが、コア材料の性質そのものの影響を見逃してはならない。筆者はむしろ後者の要因によるところが大きいと考えている。その理由はコア材料の締固め現象を以下のように理解するからである。

コア材料の締固め厚さを拡大できるか否かは、すでに述べたように、つぎの二つの要件によってきまる。これらの要件が達成される理由を考えてみる。

(a) 転圧層内に密度勾配が発生しないこと。
(b) 平均密度が低下しないこと。

(a)の要件については、コア材料で試験された最大厚さ 50cm に比較的近い、締固め厚さ 60cm で得られたフィルター材料の FRID の測定結果が参考になる。測定事例は少ないが、**4.4.2 項**で示したように、FRID による密度分布の測定では、フィルター材料の密度勾配と粒子形状の関連性を示唆する結果が得られている。すなわち、角礫材の場合は転圧面に近くなるほど転圧効果（密度の増加）が大きくなるので、密度勾配が現れやすくなるのに対して、円礫材では深さ方向の転圧効果の差があまりないため密度勾配も小さい。角礫材と円礫材を混合したコア材料では、密度勾配の出方が両者の中間的な傾向を示した。このような結果が得られた理由として、つぎのような解釈が考えられる。

“角礫材は円礫材よりもインターロッキングの効果が大きいため、振動締固めに伴う粒子の移動（再配列）が生じにくいと考えられる。締固めが促進されるためには、粒子が互いに移動して再配列が起こることが必要である。再配列によって粒子間隙がしだいに縮小し密度が上昇する。それと同時に粒子間のインターロッキングがさらに強化されるため、粒子の再配列が抑制されることになり、密度の増加率はしだいに低下する。粒子間で相対移動できなくなると、これ以上転圧しても密度は変わらなくなる。このときの密度が限界密度である。締固めに対する抵抗が強い材料ほど、締固め密度はエネルギーに大きく依存するので、密度に現れる締固め効果は転圧面から深くなるにしたがって低下することになる。円礫材は角礫材に比べるとインターロッキングの効果が相対的に弱いので、エネルギー密度が低い転圧層の下層部でも上層部とそれほど差のない締固め効果が得られたものと考えられる。”

このような解釈は複雑な締固め現象を極度に単純化しているけれども、本質的なメカニズムの一端を突いていると考えられる。

一方、コア材料の場合はロック材料やフィルター材料などの透水性材料よりも細粒分含有率がはるかに高く、最適含水比よりも湿潤側（すなわち、含水比が高い条件）で締固められるので、転圧時の振動によって粒子は透水性材料よりもかなり容易に移動すると推察される。振動ローラーが転圧できる限界に近い含水比になると、間隙水圧の上昇も加わっ

てウェービングや側方流動が発生するようになる（**4.5 節**参照）。このようなコア材料の特殊性を考えると、振動締固めに伴って発生する粒子の再配列は、透水性材料よりもはるかに生じやすくなると考えるのが自然である。したがって、転圧厚さが大きくなっても、密度勾配は発生しにくくなるはずであり、実際そのような結果が得られていることから、上に述べた定性的なメカニズムはコア材料の締固め時の挙動をある程度説明していると考えられる。

次に**(b)**の要因であるが、転圧厚さを 50cm まで拡大しても平均密度が低下しなかった理由も、含水比型の粗粒材料であるコア材料の特質に求めることができる。**4.3.2 項**にとりまとめた現場締固め試験の結果（例えば、**図－4.38** や**図－4.41** の現場締固め曲線）が示しているように、湿潤側の締固め曲線はある含水比を越えると、転圧回数によらずほとんど一致している。また、本章で示した含水比と乾燥密度の関係図（**図－5.12**、**図－5.17**、**図－5.22** など）に見られるように、コア材料の湿潤側の締固め密度を決定するのは、転圧機種、締固め厚さなどの外的な施工条件ではなく、材料の含水比に他ならないということを示している。これは間隙水圧の発生と密接に関係しているはずである。コア材料のような難透水性材料では、間隙水圧が発生すると、その消散に時間がかかるため、転圧を続行しても瞬時に密度が増加することはなく、ウェービングや側方流動のような等体積的な変形挙動を繰返すだけになる。上に引用した各図が強く示唆しているように、間隙水圧が発生するときの密度は含水比によって決まるので、転圧厚さを大きくしても密度が低下しないという結論は、コア材料の性質からみればごく自然な結果であると考えられる。

5.5 第 5 章のまとめ

① 転圧厚さを変えた HO ダムの盛立試験の結果を見ると、転圧厚さによって多少締固め密度に差が見られるが、これは転圧厚さの差異によるものではなく、含水比の差に起因する密度変動であると考えられる。このことは、含水比の差がなかった転圧厚さ 30cm と 40cm のケースでは、締固め密度がほとんど同じになったということや、その後ゾーン間の含水比の差を出来るだけ小さくして行った追加試験よっても確認された。

② HA ダムや CY ダムにおいても、転圧厚さを 20 cm から 50cm まで拡大しても締固め効果が低下する傾向は認められず、転圧層内で深さ方向に密度差が生じるという状況も見られなかった。また、透水係数にも転圧厚さの違いによる有意な差は認められなかった。

③ これら 3 ダムの結果から、試験の対象となったコア材料の場合、起振力の大きい振動ローラーを用いることによって、「転圧厚さを 40cm（HO 材料、CY 材料）または 50cm（HA 材料）まで拡大しても、締固め品質は 20cm で締固めたときと変わらない」ことが確認された。他のコア材料でも転圧厚さを拡大できる可能性は高いと考えられる。

④　コア材料の転圧厚さを拡大できる理由（背景要因）として、含水比型の粗粒材料であるため、密度型の粗粒材料のように密度勾配が発生しにくいことや、一般に施工含水比が高いので、少ない締固めエネルギーで飽和密度に達することが考えられる。

参考文献

1) 建設省東北地方建設局森吉山ダム工事事務所：フィルダムコア材料事例調査結果,1997.9.
2) 地盤工学会編：地盤調査法,p.385,1995.
3) 豊田光雄・吉田等・延山政之：自動走査式 RI 密度計（SRID）の開発とフィルダムへの適用,ダム工学 Vol.7, No.2, pp.98～113, 1997.6.
4) 豊田光雄・吉田等・堀田洋一・橋本忠助：RI 法によるコア材料の盛立試験と転圧厚さに関する実験的検討,ダム技術,No.135, pp.17～28, 1997.12.
5) 建設省河川局監修：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編,pp.425, 1997.10.
6) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説（第一回改訂版）,p.256,2000.
7) 例えば,水資源開発公団・中部電力：岩屋ダム工事誌,p809,1978.3.
8) 建設省河川局監修：多目的ダムの建設（第 3 巻）,p.304,1977.
9) 土質工学会編：土の締固めと管理,土質基礎ライブラリー36,p.44, 1991.
10) 中村昭・豊田光雄・山本裕之：盛立て試験によるコア材料のまき出し厚さに関する検討,ダム技術,No.110, pp.25～37, 1995.11.
11) 豊田光雄・橋村潔・瀬戸楠美・村瀬俊彦：転圧厚さを増大させたフィルダム・コア材料の締固め・透水特性,平成 10 年度土木学会西部支部研究発表会講演集,pp.594～595, 1999.3.
12) 江畑一男・豊田光雄・山本重樹・楠貞則：新方式の RI 密度計を用いたコア材料の現場締固め特性の評価,土木学会北海道支部論文報告集第 53 号(A) ,pp.638～643, 1999.2.
13) 豊田光雄・中村昭・延山政之：自動走査式フレーム型 RI 密度計を利用したロック材料の現場締固め特性の評価,ダム工学,pp.36～49, 1996.6.
14) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説（第一回改訂版）,pp.305～311,1995.

第 6 章　　締固め密度の統計的品質管理手法

フィルダムをはじめ、高速道路、空港などの重要構造物の盛立施工において、締固め後の品質管理が重要であることはいうまでもない。品質管理の目的は、単に設計値が満たされていることを確認するだけではなく、「どのような品質の物が造られたか」についての正確な記録を保存して、将来の設計にフィードバックしたり施工方法の改良を促すことによって、さらに安全で経済的な構造物の建設をめざすという重要な役割も担っている。設計値の確認にしろ、品質データの収集にしろ、「正確な品質評価」がなされていることが基本であり、品質評価に対する信頼がなければ、品質管理は形骸化してほとんど有名無実になり、場合によっては施工の弊害にさえなりかねない。本来、品質管理は施工とは独立した立場にたって機能しなければその目的を達成することはできない。独立した地位を確保するためには、品質管理が施工者側にも信頼され、施工にとって有益であると認識されていることが前提になる。

それでは、従来の締固め品質管理はこのような形で機能してきたといえるだろうか。残念ながら、肯定的な評価は少ないように思われる。その理由の一つとして、品質管理に期待されている本来の目的が明確に意識されず、単に「設計値が満たされていることを確認する」という狭い意味でしか理解されていなかったことが指摘される。また、正確な品質評価の面でも、信頼度を高めるために十分な努力が尽くされてきたとは言い難い。このため、ややもすると前例主義に陥る傾向があったと考えられる。これらの指摘は、すでに**第 5 章 5.2 節**で述べたように、過去四半世紀の締固め品質管理の実態を見れば、決して誇張とは言えないはずである。

前章までに論じてきたように、現場締固めの「正確な品質評価」を行うための技術は、SRID や FRID などの新しい RI 法の開発によって大きな前進があったと考えられる。筆者は、これらの新しい測定技術と現代的な統計的品質評価の手法を取り入れて、コア材料の締固め品質管理を合理化することを提案[1)]してきた。本章ではこれらの具体的な方法と試行事例を示す。なお、締固め管理には、材料の粒度管理も含まれるがこれは締固め密度の管理とは別に実施される。もちろん、筆者が提案した新しい管理法でも、粒度管理をしなくてもよいと述べているわけではない。ここでは締固め密度の管理に焦点をあてる。

6.1　従来の締固め管理法の課題

これまでのフィルダムコア材料の締固め品質管理方法の要点を整理すると**図－6.1** のようになる[2)]。一言でいえば、置換法による現場密度から礫率補正して求めた細粒成分（ここでは試験モールドに許容される限界粒径以下の材料を細粒成分といい、これ以上の粒径をもつ材料を粗粒成分と呼ぶ）の密度と、室内締固め試験で得られる密度を比較して締固め

状態を判定しようとするものである。室内締固め試験が可能な粒径以下の細粒成分に着目した従来の品質管理方法を、ここでは「細粒径管理」と呼ぶことにする。これと対比するため、ここで提案する品質管理方法を、現場密度そのものに着目するという意味で、仮に「全粒径管理」と呼ぶ。このような呼び方は、それぞれの方法の一面しか言い表していないのでやや妥当性を欠いているが、いまのところ適切な呼称がないため、本文ではこのような呼び方を用いる。

細粒径管理の考え方には若干のヴァリエイションはあるが、わが国では初期のフィルダムの建設当初から、今日に至るまで本質的な変更をみずに踏襲されてきているといってよい。細粒径管理の要点と課題をまとめると次のようである。

① 室内締固め試験を基準に据えた管理方法である。

② 室内締固め試験で得られた最大乾燥密度と対比して「締固め度」D 値 [2)]を求めるため、細粒成分だけに着目した乾燥密度を必要とする。細粒成分の密度は現場で直接求めることができないので、日常の品質管理試験では礫率を測定して全粒径の現場密度から間接的に求めるしか方法がない。

③ 締固め密度の分布にみられる統計的性質が考慮されていない。そのため、管理基準や管理点数などを規定する根拠があいまいである。

図－6.1 従来の締固め品質管理法の流れ

④　締固め密度の含水比依存性が十分に考慮されているとはいい難い。
⑤　現場密度試験は手間と時間がかかる置換法を用いているために、数少ないデータで品質を判断しなければならない。このため、施工ヤード全体の品質評価に対する信頼性に問題を残している。

このように細粒径管理には多くの批判があり、合理化する必要があると考えられる。しかし、品質管理の合理化は、概念だけで達成されるものではない。それらを実行できる試験方法や測定器が実用化されて、はじめて実際に適用できるようになる。この意味で、細粒径管理は置換法による現場密度試験しか密度を求める方法がなかったという状況のもとでは、合理的な管理方法であったといえるかもしれない。しかし、SRID のような新しい RI 測定器が出現し、締固め密度についての豊富なデータが容易に入手できるようになった現在では、より合理的な品質管理方法を提案できる条件が整ってきたと考えられる。以下に、現状の測定技術のもとで最も合理的と考える締固め管理の方法について述べる。

6.2　締固め密度の統計的品質管理手法の提案

コア材料の締固め品質管理においては、次の二つの視点をもつことが最も重要と考えられる。

①　品質評価に統計的な考え方を導入する。

第 4 章で検証したように、転圧後の密度や含水比には自然なばらつきが存在し、管理された盛立施工条件のもとでは密度や含水比の分布が正規分布で近似できることを理解する必要がある。単に密度や含水比がばらついているという事実だけではなく、それらが統計的なまとまりをもって分布していることに重要な意味がある。言いかえれば、締固め施工において品質管理の指標となっている密度や含水比は統計的な対象に他ならないということである。したがって、コア盛立ての品質管理に統計的な考え方を導入するのはきわめて自然であり、そうすることによって管理基準の意味や管理のために必要なデータ数などを客観的に定めることができるのである。

②　現場締固め特性と整合した管理手法とする。

近年、SRID や FRID などの新しい密度測定法が開発された結果、フィル材料の盛立試験の方法が大幅に改善され、いろいろな施工条件下での現場締固め特性が精度よくわかるようになってきた。このため、これまでは主として設計条件の確認という傾向が強かった盛立試験の役割が変化しつつある。**第 4 章 4.2 節**で論じたように、これまでの考え方に従うと、設計段階では現場施工条件が厳密には不明であるから室内試験の結果に頼

らざるを得ないが、室内締固め特性と現場締固め特性の関係についてはいまだに不明な事柄が多く、本施工に先だって盛立試験を行って設計値が満たされることを確認する必要があった。しかし、現在の新しい方式の盛立試験では確認作業にとどまらず、想定されるいくつかの施工条件に対して、それぞれの転圧効果が定量的な現場データに基づいて比較できるようになっている。このため、盛立試験から得られるこれらの締固め情報を活用すれば、現場締固め特性を忠実に反映した管理基準を設定できるので、経済的で合理的な品質管理が可能になるはずである**(図－6.2)**。

図－6.2　従来の管理と新しい管理の対照キーワード

以下に、新しい品質管理について具体的な内容を述べる。

(1)　全粒径管理

これまでの数多くの試験事例が示しているように、コア材料の現場締固め密度は、湿潤側の締固め曲線のまわりに帯状に分布するという明確な傾向を示している。このような現場締固め特性を考慮し、現場密度（全粒径密度）の分布そのものに着目した締固め管理を導入することが考えられる。これを全粒径管理と呼ぶ。すなわち、全粒径管理では現場粒度での施工含水比を規制し、現場で直接得られる現場密度そのものに着目した管理基準を定めて、品質の判定を行うものである。全粒径管理の特徴を要約すると次のようになる。

① 現場密度を管理指標に用いる（全粒径レベルの品質評価）。
② 多点数データにもとづいて品質を判定する（統計的品質管理）。
③ 管理基準は盛立試験および本施工に入った初期の段階で収集した密度および含水比の分布特性と相関性（乾燥密度の含水比依存性）から定める。

このやり方は、従来の細粒成分の締固め密度を管理の基本指標とする D 値管理に比べると、礫率が介在しないのできわめて簡明である。現場密度や施工含水比に関する多点数データを短時間で求める測定法もすでに実現しているので、現実的に実行が可能である。また、試料のふるい分けや突固め試験、含水比試験などの品質管理試験には大きな労力と時間がかかるため、スピーディな品質管理ができないという細粒径管理の難点をほとんど解決することになる。

(2) 平均値管理

従来の細粒径管理では、ほとんどのダムで 1 回あたりの現場密度試験個数を 3 点としている。このとき、3 点のすべてが基準を満たすことを要求する下限値管理を行っている（全点管理）。ここで提案する全粒径管理では、管理データを統計的に扱うため全点の平均値をもって評価する。全粒径管理では、全点管理か平均値管理かという問題は本質的な意味をもたなくなり、どちらの立場に立つかによって管理限界が異なるだけである。もともと個々のデータにとらわれずに全体をみて評価するという統計的管理の考え方からみれば、平均値管理の方が自然であり、管理を簡素化するうえからも現実的であると考えられる。平均値管理では、予め定められたロット内で無作意に測点を選んで、定められた点数のデータを集め、その平均値を管理限界と比較して判定するだけでよく、管理実務はきわめて簡素になる。

(3) 管理点数

細粒径管理で採用されている 3 点という試験個数の根拠は明らかではないが、品質のばらつきを考慮したというよりも、むしろ置換法による密度試験では管理コスト（時間と労力）の面から、日常の品質管理では 3 点程度の試験個数が、無理なく運用できる限界であるという、コスト上の制約から決められたものと推察される。しかし、品質のばらつきを考慮するならば、ロック、フィルター、コア材料の全てにおいて試験個数が 3 点でよいという規定は合理性を欠いているといわざるを得ない。全粒径管理では、多点数データに基づいて品質を判定するという立場を原則としているが、これはコア材料の締固め後の密度や含水比が確率統計的なばらつきをもっているためであって、密度測定法の精度に問題があるからではもちろんない。RI 法は固有の測定値のばらつき（統計ノイズと呼ばれる確率的なばらつき）の要因をもっているが、その大きさは正確にわかっており、例えば SRID の統計ノイズに伴う湿潤密度の分散を、**第 4 章 4.1 節**に示した測定値のばらつきと比べるとわかるように、実際上無視できるほど十分小さい。

全粒径管理における 1 回あたりの必要な測点数は、第一に密度分布の分散の大きさに依存する。コア材料とロック材料では分散に差があるから、もし必要評価精度（信頼限界）が同じなら、測点数は当然異なる値に設定されることになる。これについても**第 3 章 3.2 節**でばらつきの大きさに応じた測点数の考え方を示した。しかし、分散の大きさだけでは測点数を具体的に決定できず、平均値の評価精度をいくらにするかを予め決めておかなければならない（これは設計や施工の精度などを考慮して決めることになるので、高度の工学的判断が必要である）。逆に、品質管理の迅速性や管理コストなどを考慮して無理なく実行できる点数の方を先に決めて、それに整合するように管理限界を設定するなどの方法をとってもよい。例えば、平均値の信頼限界（信頼度 95%）を標準偏差の 1/2 とし、湿潤密度の標準偏差が既知で仮に 0.025t/m^3 とすれば、必要となる測定点数は次式から簡単に求まる。

$$\frac{1.96}{\sqrt{n}}\sigma \leqq \sigma \times \frac{1}{2} \quad (n：測点数,\ \sigma：標準偏差) \tag{6.1}$$

すなわち、n＝15～16 個の標本データが必要になる。例えば、振動ローラーで転圧した測定面において SRID を用いると、これに要する測定時間は 2 分×15 点=30 分であるが、線源孔の削孔などの準備作業やロスタイムを含めても 1 時間以内に合否判定が可能である。したがって、通常のコア材料の締固め品質管理では n=15 程度がひとつの目安になるものと考えられる。

(4)　管理限界

第 4 章 4.1 節で述べてきたように、全粒径管理の管理限界（許容される締固め状態の範囲）は、乾燥密度と含水比の相関図（ρ_d～w 図）上で設定するのが最も自然である。コア材料の締固め特性からみても合理的な方法であり、必要な方法でもある。これは従来の細粒径管理で用いられている D 値管理においても同様である。両者の違いは細粒径管理が室内突固め試験との対比を前提にしているのに対して、全粒径管理においては、“所定の施工基準に則って達成される現場密度の分布実態”に着目して密度の管理限界を定める点にある。盛立試験によって設計条件を満たす締固め施工方法（転圧機種や転圧厚さ）が決定された後の施工品質管理の段階においては、室内での締固め特性を直接参照する必要はなくなる。これはモールドのような完全に側方拘束条件のもとで、突固めやバイブレータを用いて行われる室内での締固めと、重機転圧による野外のゆるやかな側方拘束条件下での現場締固めとの間には、締固めのメカニズム（突固めやバイブレータとローラー転圧の違い、振動の有無、エネルギー密度、拘束条件等々）に大きな相違があると考えられ、両者の関係を一義的に結びつけることは、少なくとも現状では無理であるという認識によるものである。全粒径管理では、施工と直結している盛立試験を室内試験と同等あるいはそれ以上に位置づけ、ここから得られるデータを品質管理において積極的に活用することを意図している。

図－6.3 に全粒径管理における管理限界の概念図を示す。ここで領域GHIJは設計条件から決まる設計限界、領域AEFBは現場密度の分布から定められる施工管理限界である。設計限界は設計条件を満足する最大の領域を意味しており概念上は明白であるが、室内の材料試験でこの境界を正確に決定することはきわめて困難であり現実的でもない。一方、施工管理限界の方は以下に具体的に示すように容易に決定できる。したがって、もし可能ならば（設計段階で盛立試験ができる状況にあれば）先に盛立試験を行って施工管理限界の方を定めておき、これにある程度余裕を見込んで設計限界を推定するというやり方も考えられる。そのようにして求めた設計限界上で力学試験や透水試験を行って設計すれば、最も経済的な設計になることは明らかである。実際には設計と盛立試験のタイミングに大きなズレがあるため、「仮設計とその後に実施する盛立試験による設計の照査、および必要であ

れば設計変更を行う」という一連のプロセスを有機的に組織化した設計システムを構築して、材料特性や施工条件に柔軟に対応することが望まれる。これは設計側で応えるべき課題である。

図－6.3 管理限界の概念図

施工管理限界を決定する手順を要約すると次の通りである。

① 盛立試験および初期施工の段階で、施工含水比と締固め密度の多点数データ（例えば 1 ロット 10 点以上で 30 ロット程度）を収集する。

② 含水比の分布を整理して、そのロット内分散と平均値のロット間変動を求める。ロット間変動の上･下限値を w_a、w_b とすると、これらと設計含水比限界 w_1、w_2 との間には次の包含関係がなりたっていることが必要である。

$$(w_a, w_b) \subset (w_1, w_2) \tag{6.2}$$

この包含関係が満たされないときは、材料や設計の見直しを行うことになる。包含関係が満たされれば、含水比の管理限界 w_A、w_B は、含水比の偏差分布の正規性（**図－6.4**）を考慮して次のように設定する。なお、含水比の平均値はロットごとに変動するが、ロット内の含水比の分散は変わらないものと仮定している。（**第 4 章 4.1 節**で考察したように、この仮定は具体的なデータに基づいて実証されているわけではない。ま

た、ロット内分散の一様性は必ずしも必要な条件でもない。曖昧な言い方ではあるが、近似的な一様性があれば少なくとも品質管理においては十分である。この意味で、偏差分布の分散を用いるのである。）

$$w_A = w_a - \alpha \cdot \sigma_w / \sqrt{n} \tag{6.3a}$$

$$w_B = w_b + \alpha \cdot \sigma_w / \sqrt{n} \tag{6.3b}$$

ここで、σ_wは含水比偏差（各ロットにおける各測点データとロット平均値との差）分布の標準偏差、nは１ロットあたりの管理点数、αは信頼度を保証するための係数である。

図－6.4　含水比の管理限界の説明

③ これまでに多くのデータから実証されているようにρ_dは w に強く依存しており、自然含水比が施工時の最適含水比（室内締固め試験での最適含水比ではない）よりも大きいとき、言い換えれば湿潤側の施工条件のもとでは両者の関係は直線で近似できることがわかっているので、その一次回帰式を求める（**図－6.3** の CD 線）。w～ρ_d回帰線のまわりのばらつきとロット間変動を考慮して、回帰線CDから次式で求められる$\Delta\rho_d$だけ下方に平行移動して、密度の施工管理下限界EFを設定する（**図－6.3** の EF 線）。

$$\Delta\rho_d = \sqrt{\alpha_1^2 \cdot \sigma_1^2 / n + \alpha_2^2 \cdot \sigma_2^2} \tag{6.4}$$

ここに、α_1、α_2は信頼度を保証するための係数、σ_1は w～ρ_d回帰線からのρ_dの偏差分布の標準偏差、σ_2はρ_dのロット間変動の標準偏差を表す。**図－6.5** に以上の乾燥密度管理下限界を求める手順をまとめた。なお、密度の上限界はゼロ空気間隙曲線（Z.A.V.C）である。

①ρ_d～w図において、全データをプロットする。
ρ_d～wの直線回帰式を求める。

$$\rho_d = a - b \cdot w$$

a , b : 回帰定数

②回帰式からの密度偏差の度数分布を作成し、
標準偏差σ_1を求める。

③ロットの平均値の度数分布を作成し、
その標準偏差σ_2を求める。

④回帰式より$\Delta\rho_d$だけ下方にずらす。
$\Delta\rho_d$は次式により計算する。

$$\Delta\rho_d = \sqrt{(\alpha_1 \cdot \sigma_1)^2 / n + (\alpha_2 \cdot \sigma_2)^2}$$

n：１ロットあたりの管理点数
α_1 , α_2：信頼度(片側信頼度95%または99%を用いる)の係数

図－6.5　乾燥密度管理下限界の説明

以上の説明からわかるように、この管理限界は現場締固め特性（含水比および乾燥密度の分布と両者の相関関係）だけで設定しており、室内の締固め特性は全く用いていない。この管理限界の意味は「盛立試験で決定された施工条件で転圧すれば、密度は確率統計的にこの管理限界内に十分入るはずである」とみなされる範囲を示しているということである。もちろん、この管理限界は設計限界に包含されているので、設計条件は常に満たされている。施工含水比によって密度の許容下限値が変化するような管理限界の設定は、湿潤側の締固め曲線と整合していることからもわかるように、きわめて自然なものといえる。なお、CD ライン上では飽和度の差が小さいので、ここで提案した全粒径管理の管理限界は、近似的に飽和度の管理に等価であるとみることもできる。しかし、CD ライン上では一般に含水比が低くなるにつれて飽和度は多少低下するので、正確には飽和度の管理とは一致しない。

全粒径管理で用いる管理限界の特徴のひとつとして、その「柔軟性」に注目する必要がある。これは次のような意味をもっている。含水比の限界は、初期の施工データに基づい

て決められているので、施工が進むにつれて材料が変化してくると、管理限界からはみ出すケースがでてくる可能性を常に意識しておく必要があるという点である。これまでの絶対的な管理限界では、このようなときにはその材料は拒否されることになる。しかし、全粒径管理では管理限界を外れていても、外れの度合いが小さく設計限界の中には十分入っていると判断できるときには、その材料を許容してよいと考える。密度の限界についても同様の柔軟性をもって解釈すべきである。もちろん、このような措置ができるためには、設計限界に対する十分な理解とそれを裏づけるデータが必要である。全粒径管理の柔軟性は材料の変動に合わせて、材料特性をチェックしたうえで管理限界を修正することもできるということも意味している。言い換えれば、管理限界を固定的なものとみなすのではなく、材料の採取状況に弾力的に対応して、無駄のない施工をめざすものである。

ところで、この管理限界図は、コア材料のストックヤードにおいてほぼ同じ粒度の材料が搬入されてくることを想定している。もちろん、搬入時において粒度試験が行なわれ、基準粒度の範囲内にあるかが確認される。いくつかの粒度分布の異なる材料を用いて施工するときには、それぞれの粒度に応じた管理限界図を作成する必要がある。それぞれの粒度における盛立試験などを行ないデータ収集し、先の述べた手順により管理限界を決めることになる。

以上に述べた SRID を用いたコア材料の統計的締固め管理方法の内容と手順をまとめると**図－6.6** のようになる。

図－6.6　SRID による統計的管理のフロー

6.3　試行事例

ここでは、二つのフィルダム（HA ダム、SU ダム）の施工に適用した事例を述べる。HA ダムについて、堤体施工がほぼ完了するまでの約 1 年間に収集された品質管理データを考察する。一方、SU ダムでは 10 ヶ月間のデータを収集し、1 ヶ月ごとの品質の動向を追跡した。

6.3.1　ケーススタディ１(HA ダム)

(1)　初期施工段階のデータ収集

SRID を用いて 1 ロットあたり 10 点の測定を繰り返して、合計 35 ロット、350 点の初期施工データを収集した。35 個のロット平均値の分布を含水比 w～乾燥密度 ρ_d図に表してみると**図－6.7** に示すように、2 つのグループに分けられることがわかった。

図－6.7　含水比と乾燥密度の関係
（ロット平均値：No.1～35 まで）

図－6.8 密度および含水比のロット間変動（A グループ）

両者の飽和度に明らかに差があることから、A グループと B グループでは材料が異なっていることを示唆している。B グループのデータは採取材料が十分に安定していない初期の施工段階で見られる、少し物性の異なる材料が一部で使用されたことを示すものと推察される。そこで、その後の材料変動を注視してゆくこととして、当面の施工に適用する管理限界は、多数を占めている A グループのデータ（28 ロット 280 点）を用いて決定することにした。**図－6.8** に A グループの密度および含水比のロット間変動を示す。

(2) 管理限界の設定

管理限界の設定では、**6.2 節**の **(4)** でも説明したように、まず含水比の管理限界を設定し、次いで乾燥密度の管理限界を設定する。**図－6.9** に含水比の偏差分布とロット内平均値の分布を示す。**図－6.9(a)**によると、含水比偏差の標準偏差は σ_w＝0.94%であった。また、**図－6.9(b)**においてロット平均値の最低値は w_a=15.5%、最大値は w_b=18.7%となっており、これらの値を用いて求めた管理限界（信頼度 95%のとき α=1.96、信頼度 99%のとき α=2.58）の試算例を**表－6.1** に示す。なお、管理点数 n はロット内変動の大きさや、管理のスピードアップと施工との調整などを考慮して n=10 とした。含水比に端数が生じるため 0.5%ピッチで丸めると、w_A、w_B はそれぞれ 14.5%、19.5%となり、これを含水比の管理限界値とした。

図－6.9(a) 含水比偏差の分布

図－6.9(b) ロット平均含水比の分布

表－6.1 HA ダムの含水比管理限界（n＝10 のとき）

含水比の母標準偏差		σ_w	(%)	0.94
ロット間変動の最小値		w_a	(%)	15.5
ロット間変動の最大値		w_b	(%)	18.7
管理限界	下限界	w_A	(%)	14.92
（信頼度 95%）	上限界	w_B	(%)	19.28
管理限界	下限界	w_A	(%)	14.73
（信頼度 99%）	上限界	w_B	(%)	19.47
含水比管理値	下限含水比	w_A	(%)	14.5
	上限含水比	w_B	(%)	19.5

図－6.10 に A グループ全データの含水比 w と乾燥密度 ρ_dのプロットを示す。データはゼロ空隙間隙曲線（Z.A.V.C）にほぼ平行した右下がりの分布を呈している。これより一次回帰式を求めると次式が得られる。

$$\rho_d = 2.258 - 0.0288 \cdot w \text{（標本数} n = 280\text{，相関係数} r = -0.7968\text{）} \tag{6.5}$$

回帰式からの密度偏差を求め、**図－6.11(a)**にその分布を示す。図示しているように、標準偏差 σ_1=0.022t/m^3 が得られる。一方、乾燥密度のロット平均値の分布を**図－6.11(b)**に示す。同様に標準偏差を求めると σ_2=0.023t/m^3 が得られる。これらの値を用いると管理下限界と回帰式までの密度差 $\Delta\rho_d$ は次のように求まる。ここで、α_1 および α_2=2.33（片側信頼度 99%）と n=10 を用いた。

$$\Delta\rho_d = \sqrt{2.33^2 \times 0.022^2 / 10 + 2.33^2 \times 0.023^2} = 0.056 \ (\mathrm{t/m^3})$$

したがって、密度の管理下限界は次式で表される。

$$\rho_{dmin} = 2.202 - 0.0288 \cdot w \tag{6.6}$$

このようにして決定した管理限界と A グループのロット平均値の分布（初期施工データ）を**図－6.12** に示す。

図－6.10　含水比と乾燥密度の関係(初期ロット)

図－6.11(a)　密度偏差の分布

図－6.11(b)　ロット内平均密度の分布

図－6.12　管理限界と初期ロットの分布

(3)　日常の品質管理データ

この管理基準を 1 年間の本施工の締固め密度試験結果に適用してみた。日常の品質管理では 334 ロット（計 3,340 点）のデータが得られており、全ての管理データの詳細な分布形が**第 4 章**の **4.1.1(2)**に示されている。

図－6.13 に湿潤密度 ρ_t、乾燥密度 ρ_d、含水比 w のロット間変動（時系列変動）を示す。ロット番号は値が増すにしたがって、施工が堤体下部から堤体上部へと進捗していることを表している。図中にはロット内における測定データの最大値と最小値の幅と平均値（黒丸）を示している。ロットの平均値でみると、ρ_tは約 1.98～2.18t/m³、ρ_dは約 1.63～1.85 t/m³、w は約 13～22%の範囲で変動している。ロット内の最大値と最小値の差は、ρ_tで最大 0.16 t/m³、最小 0.02 t/m³、ρ_dで最大 0.20 t/m³、最小 0.02 t/m³、w で最大 6%、最小 1%であった。

これらのデータ（ロット平均値）のすべてを w～ρ_d管理図にプロットしたものを**図－6.14** に示す。大部分のデータは CD ラインを中心としたバンド内（飽和度でおよそ 85%～95%の範囲）に分布しており、密度の分布幅は管理限界の密度幅のおよそ半分である。334 ロットのほとんどのデータは管理限界の枠内に分布しているが、w の上限値を超えているものが十数点あり、このうち 2 点は含水比が管理限界の上限値(w_B=19.5%)よりも 2%も高い。また、含水比が下限値(w_A=14.5%)を下回るデータが 2 点ある。含水比の上限界を超えたデータは**図－6.13** に示すロット番号 270 以降に発生しており、これらはコアの盛立て終盤の施工段階で発生していることがわかる。明らかにこの段階で材料物性が少し変化しており、管理限界の見直す必要がある。他方、含水比が下限値を下回った 2 点のデータは、時系列変動でみるとロット No.271 と No.272 にあたり、その後しばらくしてロット No.300 付近

図-6.13 密度および含水比のロット間変動

図－6.14　全ロットの含水比と乾燥密度の関係(ロット平均値)

から施工含水比が上昇しはじめ、上限界をはみ出すデータが出現していることが示されている。下限界を下回ったデータは 2 点しかないので、管理限界を乾燥側へ修正する必要性についてはロット No.272 の施工直後においては判断が微妙である。しかし、その後は下限界を下回るデータが出ていないので、結果的には修正する必要はなかったということになる。ただし、この 2 点の品質に関しては入念な照査を行って、含水比が想定以上に低くなった理由と、これに対する措置、特に透水性に問題がないことを確認して記録に残すことが重要である。逆に、含水比の上限界を超えたデータが連続して出始めたロット No.302 の時点では、直ちにその後の使用予定材料の含水比を予測するとともに強度のチェックを行って、必要と判断すれば管理限界を修正しなければならない。そして、これらの一連の処置と管理者の所見を記録する必要がある。

一方、密度に関しても下限値より小さいデータが数点出現している。これらはほとんど管理限界の設定で説明した B グループのデータであり、その後は EF 線を下回る連続したデータは出現していない（１点だけ出ているが、EF 線からのはみ出しは極わずかであるため、以降のデータに注意を払えばよい)。**図－6.15** および**図－6.16** に示した粒度分布の管理データに示されているように、施工初期の段階では粒度（特に細粒分含有率）がやや不安定であるために、施工品質にもばらつきが出やすい状況にあることは容易に想像できる。B グループのデータなどは、このような状況が反映されたものと推察される。

以上にまとめた状況から、少なくともロット No.269 までは締固め管理データはおおむね管理限界内にあり、管理限界の修正を要するほどの材料の変化はなかったことがわかる。

図−6.15　粒度管理パラメータのロット間変動

図－6.17 には全ロットの密度および含水比（ロット内平均値）の分布と、乾燥密度の管理下限界からの偏差分布を示す。密度および含水比のロット間変動が近似的な正規性をもっていることが確認できる。

図－6.16　本施工材料の粒度分布

図－6.17　全ロットの密度および含水比の分布(ロット内平均値)

6.3.2　ケーススタディ 2(SU ダム)

SU ダムでは、2000 年 5 月から 11 月までと、冬季の施工中断期間をはさんで翌 2001 年の 6 月までの 14 ヶ月間（実質施工期間は 10 ヶ月である）にわたって、コアゾーンで SRID の測定を継続し、各施工ロットの締固め品質を月ごとに追跡した。収集した管理データの数量を**表－6.2** に示す。1 ロット当り 10 測点を原則としているが、施工上の理由により 10 点に満たないロットも一部含まれている。このうち、2000 年 5～6 月（28 ロット）の期間のデータを品質管理限界の設定に用い、7 月以降の締固め管理データにこの管理基準を適用した。

表－6.2　SU ダムコアゾーンの測定数量

測 定 時 期	ロット No.	ロット数	測点数	検 討 項 目
2000 年 5～6 月	1～28	28	216	管理限界の設定データ
2000 年 7 月	29～58	30	268	月ごとの管理データ
2000 年 8 月	59～94	36	360	
2000 年 9 月	95～122	28	280	
2000 年 10 月	123～150	28	280	
2000 年 11 月	151～178	28	280	
2001 年 4～6 月	179～236	58	554	
合　　計	1～236	236	2238	

(1)　管理限界値の設定

品質管理限界を定めるために、ロット No.28 までの乾燥密度 ρ_d と含水比 w のロット平均値を ρ_d－w 図上にプロットしてみると**図－6.18** のようになった。ほとんどのデータが飽和度 80～90%のなかに含まれるが、**図－6.19** の密度および含水比のロット間変動からわかるようにロット No.4 と No.21 の 2 点だけは飽和度が 95%を越えており、飽和度がかなり異なっていることから、これ以外のデータ群とは材料的な差があったものと判断し、これらのロットを除いた 26 ロットのデータを用いて管理限界を設定した。

図－6.20(a) に示す含水比偏差の分布から、その標準偏差 σ_w は 0.72%である。**図－6.20(b)** は 26 ロットの平均含水比の分布である。最小値 w_a は 10.3%、最大値 w_b は 12.8%である。含水比の管理基準 w_A と w_B は、**6.2.4 項**で述べた計算式に従って求め、さらに 0.5%ピッチで丸めると、下限値 w_A=9.5%、上限値 w_B=13.5%となる（**表－6.3**）。上、下限値の範囲は 4%となり、これは先の HA ダムの場合と比べると１%狭い。

図－6.18　含水比と乾燥密度の関係(初期ロット)

図－6.19　密度および含水比のロット間変動(ロット No.1～28)

図－6.20(a) 含水比偏差の分布

図－6.20 (b) ロット平均含水比の分布

表－6.3 SU ダムの含水比管理限界(n=10 のとき)

含水比の母標準偏差		σ_w	(%)	0.72
ロット間変動の下限値		w_a	(%)	10.3
ロット間変動の上限値		w_b	(%)	12.8
管理限界	下限界	w_A	(%)	9.9
(信頼度 95%)	上限界	w_B	(%)	13.2
管理限界	下限界	w_A	(%)	9.7
(信頼度 99%)	上限界	w_B	(%)	13.4
実用管理値	下限含水比	w_A	(%)	9.5
	上限含水比	w_B	(%)	13.5

次に、**図－6.21** に上記 26 ロット分の ρ_d と w の関係を示す。これより w と ρ_dの一次回帰式を求めると次のようになる。

$$\rho_d = 2.358 - 0.0358 \cdot w \text{（標本数} n = 202,\ \text{相関係数} r = -0.7777\text{）} \tag{6.7}$$

この回帰式からの密度偏差のヒストグラムは**図－6.22(a)**のようになる。また、**図－6.22(b)**に示した ρ_d のロット平均値のヒストグラムから、標準偏差 σ_2 を求めると σ_2=0.022t/m^3 が得られる。CD 線と EF 線の密度差Δ ρ_dは次のようになる。

$$\Delta\rho_d = \sqrt{2.33^2 \times 0.021^2/10 + 2.33^2 \times 0.022^2} = 0.054\ (\mathrm{t/m^3})$$

図－6.21 含水比と乾燥密度の関係
（初期ロット、全データ）

図－6.22(a) 密度偏差の分布

図－6.22(b) ロット内平均密度の分布

図－6.23 管理限界と初期ロットの分布

したがって、密度の管理下限線 $\rho_{d\,min}$ は次のように求められる。

$$\rho_{dmin} = 2.304 - 0.0358 \cdot w \tag{6.8}$$

下限含水比 w_A=9.5%、上限含水比 w_B=13.5%を上式に代入すると、下限界線上の最大密度（左端点）と最小密度（右端点）は、それぞれ ρ_d=1.964t/m^3、1.821 t/m^3 となる。管理限界図を**図－6.23** に示す。図中には、管理限界を定めた初期データのロット平均値をプロットしている。

(2) 月ごとの密度管理値の変動

管理限界を設定してから後の、月ごと（1 ヶ月あたり約 30 ロット）の密度と含水比の変動状況を追跡した結果を要約すると以下の通りである。対象データは 208 ロット 2022 測点である。なお、最後の 3 ヶ月間（計 58 ロット）のデータは一つにまとめて示した。**図－6.24** に月ごとの含水比 w～乾燥密度 ρ_d関係、**図－6.25** に月内の各物性値の時系列変動を示す。

① 2000 年 7 月は、ほとんどのデータが w～ ρ_d管理限界枠のほぼ中央に位置しているが、w の下限値付近に二つのデータが出現している（ロット番号 41 と 47）。No.47 は w の管理下限界を下回っているが、下限値との差はわずかである。ロット変動図でみるとわかるように、この二つのロットだけ他のロットよりも含水比が低く、これを除けば含水比の変動は落ち着いており、管理限界値からも十分余裕がある。この 2 点を含めて密度は余裕をもって安定しており、管理下限界を下回った一点の透水係数に問題がなければ品質に不安はなく、十分に許容できると判断される。

② 8 月測定分にも、密度、含水比とも管理限界値に近いデータが 3 ロットあるが、管理限界をはみ出すデータは出ていない。これらの三つのロットは連続して出現している（ロット No.79～81）。ρ_dの管理下限値からの余裕は、7 月までのデータに比べると全体的にやや小さくなっている。期間の前半においては、密度に 0.05t/m^3 程度かもしくはそれ以上の余裕があるが、中盤から後半にかけて密度がやや低下して余裕が少なくなっている。

③ 9 月測定分は、プロットが細長い帯状を示しており、ρ_dの w 依存性が最もよく現れたデータとなっている。ロット間変動が他の期間に比べて小さく、一部を除いて ρ_d の管理下限値からの余裕は 0.05t/m^3 前後の値を示しており、この期間の盛立品質が非常に安定していることを示している。

④ 10 月の w～ ρ_d関係は、管理限界内の中央部に密集している。この期間ではさらに盛立品質が安定し、しかも均質性が高いことを示している。ρ_dは管理下限界から 0.05t/m^3 程度の余裕をもつデータが多い。

⑤ 11 月測定分の w～ ρ_d関係をみると、当初の CD 回帰線よりもやや下側で帯状に分布している。ρ_dの管理下限値からの余裕は後半で 0.05t/m^3 を下回るものが多くなっているが、

まだ余裕を残している。含水比も上限、下限とも十分に余裕があり、この期間の盛立品質も安定していると判断される。この月の施工を終えて冬季の休止期間に入り、翌年の 4 月まで盛立施工が中断している。

⑥　2001 年の 4 月から 6 月までのデータは、通常の施工ペースからみればほぼ 2 ヶ月分に相当する量である。管理図のプロットが示しているように、全体的に含水比は低めになり、密度も前年に比べると低めになっている。しかし、分布は非常に安定しており、バンドの中心線は CD 線と EF 線の中間よりも少し上に位置している。品質的には問題ないが、前年度の管理図上のプロットと比較すると、材料の物性（おそらく粒度）が少し変化してきたことを示唆している。

⑦　以上の考察から、SU ダムのコア盛立はこれまで安定した品質を保っていると判断して差し支えないものと考えられる。管理限界からわずかに外れるロットが１点だけあったが、一時的な現象であり、また設計限界内には収まっていると考えられるため、このことによって当初設定した管理限界を見直す必要は今のところないと判断される。しかし、施工年度が変わって材料物性に変化の兆しが若干見られるので、その後の推移を注意深く追跡して、場合によっては管理限界の見直しが必要になることも視野に置くべきであると考えられる。特に含水比が乾燥側へ移行する可能性があるので、管理限界を乾燥側へ動かすときには、透水係数に支障がでないことを十分にチェックする必要がある。

全ロットのデータを総合した含水比 w～乾燥密度 ρ_d関係を**図－6.26** に示す。一部に飽和度の高いデータが散見されるが、大部分のデータは全体的に帯状に分布しており、乾燥密度の含水比依存性が再確認できる。また、**図－6.27** に示した密度および含水比のヒストグラム（ロット内平均値）と、**図－6.28** に示したロット内分散のヒストグラムを見ると、これらの物性値のロット内分散が安定していることや、ロット平均値の分布が正規分布に近い形状を示していることがわかる。

図－6.24　管理データの分布(ρ_d～w 関係)

図－6.25(a)　密度および含水比のロット間変動(その１)

図－6.25(b)　密度および含水比のロット間変動(その２)

図－6.25(c)　密度および含水比のロット間変動(その３)

図－6.26 全ロットの含水比と乾燥密度の関係(ロット平均値)

図－6.27 全ロットの密度および含水比の分布(ロット内平均値)

図－6.28 ロット内分散の分布

6.4　リアルタイム品質管理手法

SRID を用いると、例えば管理点数を 10 点とした場合、転圧が終了したロットの締固め品質を１時間以内に掌握して、施工の合否を判断することができる。測定作業自身は、SRID の正味の測定に 30～40 分（１点あたり、RI 走査と BG 走査にそれぞれ１分、ロット内の移動と線源棒挿入孔の削孔などのロスタイムに１～2 分）で完了する。従来の置換法による密度試験と炉乾燥法による含水比試験をベースにした品質管理では、翌日まで待たないと結果が出なかった状況に比べれば、はるかにスピーディな品質管理システムが実現される。しかも、統計的に定められた必要かつ十分な標本数のデータに基づいて、客観的に品質を評価するため、その評価に対する信頼性に関しても、従来の管理法をはるかに凌いでいる。このような新しい品質管理手法の特長を施工全体の合理化に反映させるためには、もう一段のステップアップが必要である。それは品質管理手法をどのように運用するかという問題である。

品質管理を行う目的は次の三つに集約される。

① 所要の品質が確保できていることを保証する。
② 施工者に締固め品質に関する情報を提供して、材料採取計画の変更や設計の変更を円滑に機能できるようにする。これによって無駄のない経済的な施工を達成する。
③ 詳細な締固め品質データの記録を残して、今後のダムの設計や施工の合理化に資する。

これらの目的から明らかなように、品質管理で得られたデータは品質管理担当技術者だけが掌握しておればよいというものではなく、発注者、施工実務者および品質管理担当技術者の間で常に共有できる体制が求められる。しかも、時間的な遅滞をできるだけなくして、必要なときにはいつでもアクセスできるシステムを構築する必要がある。

このような観点から、筆者は SRID をベースにした全粒径管理のデータを、通信回線を介いてパソコン上で共有し、リアルタイムで運用するシステムを構築した。この手法は、現場で品質管理を実行する現場代理人、施工業者事務所の品質管理担当責任者および発注者側の建設事務所の三者間を無線ネットワークで結んで、品質管理データを常時参照できるようにするものである。

図－6.29 は、リアルタイム品質管理手法の概要である。SRID の測定が完了すると、現場でノート型パソコン上に結果を表示して品質を判定した後、直ちに施工業者事務所に転送するか、もしくは持ち帰り、品質管理責任者が管理するサーバー内の品質管理データベースに取り込む。データベースを管理する品質管理責任者は必要に応じて材料採取管理者や発注者側と電話回線で連絡をとって協議を行い、盛立て施工の効率的な遂行に努める。

これまでの締固め管理では、日々の施工状態は現場管理者によって後日発注者側に報告されていたが、リアルタイム品質管理手法では、発注者にも現場管理者から生のデータが

随時転送されてくるため、現場にいなくても施工に関する指示が可能となる。また、これまでは監視カメラによって施工状況が確認されていたが、画面上での施工状況の視認だけでなく、施工品質に関しても現場、現場試験室、建設事務所の三者間でほとんど同時的に管理データを共有することができ、品質に問題が発生したときにも遅滞なく有機的に対処できるようになった。

図－6.29(1)　リアルタイム品質管理手法の概念図

表示されるデータの一例

測定値

密度・含水比

時系列

図－6.29(2)　リアルタイム品質管理手法の概念図

6.5 第 6 章のまとめ

SRID を利用した新しい締固め品質管理の方法を提案し、2 ヶ所のダムで試行データを収集して有用性を確認した。さらに、実施工においてこの締固め品質管理方法を最も効果的に運用するための「リアルタイム品質管理手法」についても述べた。これらの成果を要約すると次のとおりである。

(1) 新しい品質管理手法の特徴

① 全粒径管理法である。

② 多点数データを用いて、施工含水比と締固め密度を統計的に管理する。

③ 現場施工データを重視し、盛立試験または初期施工段階のデータから、密度および含水比の分布特性を分析して管理基準を設定する。

④ コア材料の現場締固め特性と整合した管理法である。

⑤ 従来の管理方法との相違を比較すると**表－6.4** のようになる。

表－6.4 品質管理方法の対比

項目	従来の管理方法	提案
基礎データ	室内締固め試験	現場分布特性
管理指標と管理限界（例）	D 値≧95%	ρ_d～w 管理図
対象粒径	細粒径管理	全粒径管理
代表的な管理点数（1 回当り）	3 点	10～15 点
密度測定法	主に置換法	RI 法（SRID の使用）
統計的性質	考慮していない	全面的に考慮する

(2) 試行事例

二つのダムにおいて初期の施工データをもとに管理限界を設け、その後の管理データを追跡して適用性を検証した。

① HA ダムにおいては、ほとんどのデータが管理限界内に入っており、設定した管理限界が妥当なものであることを実証できた。妥当という意味は密度や含水比の自然なばらつきに対して程よい余裕度があること、そして施工不良や不適切材料を完全に排除できる十分な規制力をもっていることである。

② しかし、一部に管理限界を外れるデータも出現しており、このようなデータに対する評価と処理方法について説明した。HA ダムの盛立施工の後半では、材料の変化に伴う管理限界の修正を指摘した。これらの対応において「管理限界の柔軟性」について論じた。これはフィル材料の統計的品質管理において重要な概念である。

③ SU ダムでも管理限界の妥当性を再確認するとともに、施工年度が変わって材料変化の兆しがあることを指摘した。将来の予測には常に不確実性が伴っているが、管理データを追尾するだけではなく、管理データに基づく評価と措置に加えて、トレンドの予測は品質管理の重要なアクションであることを認識する必要がある。

(3) リアルタイム品質管理手法

新しい品質管理手法を施工全体の合理化に結びつけるためには、品質管理データを関連部署で共有するシステムを構築して、有機的に運用することが必要であるという観点から、パソコンを活用した「リアルタイム品質管理手法」を提案し、その具体的なモデルを示した。

参考文献

1) 豊田光雄・延山政之：現場締固め特性に着目した統計的品質管理の方法,土と基礎,Vol.48, No.4, pp.5～8, 2000.4.
2) 建設省河川局：多目的ダムの建設,第 5 巻,施工編,pp.333～338,1988.

第7章　結　　論

7.1　研究成果の要約

本章では、**第2章**から**第6章**までの各章で論じてきた論点と結論をとりまとめる。

第 2 章では、粗粒材料の特徴、盛立施工において締固め密度を管理することの意義、現場密度試験法に求められる基本的な要件を整理したうえで、代表的な現場密度評価法として現在最も多く利用されている置換法による現場密度試験法と RI 法をとりあげ、これらの粗粒材料への適用性と限界、現状の問題点などを論じた。

① 粗粒材料が砂や粘土などの土質材料と区別して扱われる最大の理由は、「最大粒径が極めて大きい」ということと、「粒子破砕が無視できない」という粗粒材料の本質的な特徴にある。前者は当たり前のことのようにみえるが、密度、せん断強度、透水係数などの工学的性質の評価を著しく困難にしている点において深刻である。後者はいつも問題になるというわけではないが、粗粒材料の工学的性質に影響を与える無視できない要因の一つである。

② 粗粒材料は、その工学的性質に与える含水比の影響という側面から「密度型」と「含水比型」の二つのタイプに分けて扱う必要がある。密度型の粗粒材料は細粒分の含有率が低いため自然含水比が低く、含水比の差が問題になることはほとんどない。むしろ粒子形状や締固め密度に与える粒子破砕の影響などのほうが重要である。逆に含水比型の粗粒材料は細粒分含有率が比較的高い材料であり、このため一般に止水効果が大きい。含水比型の粗粒材料の最も重要な特徴は、締固め密度が施工含水比によって大きく左右されるという点にある。このため、工学的性質の評価においては、何よりも含水比の影響を考慮しなければならない。

③ 粗粒材料の締固め密度の評価においては、転圧後の密度の「ばらつき」を直視しなければならない。多くの粗粒材料の施工含水比や締固め密度の分布は正規性を示すことが知られており、その分散は最大粒径に依存することもわかっている。このような統計的性質を理解することが肝要である。

④ 粗粒材料の締固め密度を求める測定方法や試験方法が具備すべき要件は、材料の最大粒径に対して測定容積が十分大きいこと、多点数測定が可能であること（すなわち、試験や測定が容易で測定時間が短いこと、測定費が安いこと）の二点に集約される。粗粒材料の締固め密度を求める方法として、置換法による現場密度試験がこれまで一般的に用いられてきた。置換法の最大の問題点は、破壊試験であるということにある。また、多大な労力と時間を要するので試験点数が限られ、測定精度の面でも課題が多い。この

ため、上の二つの必要条件を同時に満たすのは極めて困難である。置換法ほど一般的ではないが、RI 法を利用した密度測定法も少なからず用いられている。RI 法の場合は非破壊測定法であるという本質的な利点から、二番目の必要条件を満たす可能性は大きいが、従来の RI 法は最初の必要条件を満たしているとはいえない。

第 3 章では、粗粒材料の密度測定に求められる二つの条件を同時に満たすことを目標にして新しく開発した、自動走査式 RI 密度計 SRID の特徴、較正曲線、測定精度、測定容積などを詳細に論じた。また、従来型を改良した自動走査式フレーム型 RI 密度計 FRID の特徴や較正曲線などもとりまとめた。

(1)　自動走査式 RI 密度計 SRID の特徴

① 測定容積を最大限まで拡大するため、SRID では従来の接地固定式の表面型 RI 密度計と異なり、検出部を測定地盤面より浮上させた状態で回転しながら密度および含水比を測定する自動走査式を導入した。

② SRID では走査中に測定地盤面の不陸状態をモニターして、その影響を自動的に補正するので、従来型のように測定面を平滑化する作業は不要になった。

③ 線源棒を地中に挿入するためのガイド孔の削孔に簡易削孔器（電動ドリル）を導入したことにより、測定点をランダムに選ぶことができるようになり、測定値に恣意的な要素が入らず公平なデータサンプリングができるようになった。同時に、測定の準備作業が省力化され時間も大幅に短縮されている。

(2)　SRID の測定精度、測定容積

① RI 法の精度は較正式の正確さ（信頼性）とばらつきの大きさ（統計ノイズ）によって決まる。現場密度の場合、いわゆる「真値」がわからないので、較正式の正確さを厳密に見積もることは不可能であるが、SRID の開発に際しては入念な較正試験を実施して具体的な較正データに基づいて較正式の信頼性を保証している。一方、統計ノイズの方は理論的に正確に予測でき、実際に確かめることもできる。実測によると SRID の密度の統計ノイズは 1%であり、この値は理論値とほぼ一致している。

② 測定容積が大きくなると測定値の局所的なばらつきは減少する。このことを利用して局所的な測定値のばらつきの違いから SRID と従来の固定式 RI 密度計の測定容積を推定すると、SRID は従来型に比べて 10 倍以上の測定容積を有していることが示された。また、SRID の一周走査時の測定容積は置換法の容積と比べても数倍大きい。これによって、SRID は粗粒材料の締固め密度を測定する方法に求められる二つの要件を同時に満たすことが可能な測定器となった。

(3)　自動走査式フレーム型 RI 密度計（FRID）

FRID は新規に開発した機種ではなく、従来のフレーム型 RI 密度計を自動走査式にして、連続的な密度分布のプロフィールが得られるように改良したものである。密度の分布状況がモニター画面上で直ちに確認できることや、従来のフレーム型 RI 密度計よりも装置が大幅に軽量化されたことなどの改善によって操作性が一段と向上した。

第 4 章では多くの盛立試験や、実施工でのデータ収集などによって、SRID と FRID の粗粒材料への適用性を検証するとともに、これらの実証データに基づいてフィル材料の締固め密度の実態を詳細に論じた。過去に実施された置換法による盛立試験のデータや品質管理データと比較してみれば、データの質と得られる情報量の両面で大きな開きがあることを示した。

(1)　締固め密度の統計的性質

① 二つのフィルダムの品質管理データを分析して、コア材料の転圧後の密度および含水比の分布が正規分布で近似できることを示した。正規性は測定値の偏差データでも確認できた。フィルター材料やロック材料でも同様である。密度の分散はフィル材料の最大粒径と密接な相関があり、最大粒径が大きくなるほど分散も大きくなる。フィル材料がもっているこれらの統計的性質は、盛立試験で要因効果を評価するとき、あるいは品質管理の管理基準を設定するときに欠かせない基礎データである。

② 測定データのばらつきは、材料の変化に伴うロット間変動、測点間で生じるロット内変動、測定器の統計ノイズによる変動の三つの成分に分解することができる。盛立材料がよくコントロールされた施工のもとでは、普通、ロット間変動はロット内変動よりも小さいが、材料によっては逆転する場合もある。SRID の統計ノイズは、フィル材料のロット間変動やロット内変動に比べて非常に小さい。

③ コア材料の締固め密度は含水比に強く依存することが確かめられた（含水比型の粗粒材料）。HO ダムのコア材料のように、含水比に依存する変動成分が全変動の約 85%に達する場合もある。

(2)　盛立試験方法の改良

① SRID を用いた単一ゾーン方式の盛立試験方法を提案して、多くの実例によってその有用性を示した。従来の盛立試験では、破壊試験である置換法によって密度を測定するため、転圧回数ごとに独立した試験ゾーンを配置する必要があった。このような分離ゾーン方式で行われる転圧試験の最大の欠陥は、各ゾーン間にすでに材料の違いという予測できない密度の変動要因が潜在していることである。SRID などの RI 法は非破壊測定法であるため、ただ一つの試験ゾーンだけで転圧前の初期密度の測定を含め、任意の転圧回数で締固め密度を求めることができる。全く同じ条件で転圧回数の効果だけを抽出できるので、転圧効果を正確に評価することができる。

② 単一ゾーン方式の盛立試験で得られた転圧回数と密度の関係（転圧効果曲線）は、一般に双曲線で近似することができる。これより収束（最大）密度を推定すれば、決定した転圧回数の密度を相対的に評価することもできる。

③ 従来の分離ゾーン方式では 3 ゾーン構成で行われることが圧倒的に多い。これと比較すると単一ゾーン方式ではおよそ三分の一の土量で済むので、試験そのものが非常に簡単になり、試験に要する日数やコストを大きく削減することができる。

(3) 現場締固め曲線の直接評価

① それぞれの転圧回数ごとに平均含水比と平均密度の関係をプロットすると、転圧回数ごとのプロクター特性を抽出することができることを実証した。このような現場施工条件の締固め特性が現場試験によって直接明らかにできたのは、単一ゾーン方式の盛立試験方法と SRID のようなデータサンプリング効率の高い測定器の開発によるものである。このような試験が実用化されれば、従来の室内締固め試験データをベースにした設計から、現場締固め試験データを設計に直接取り込む考え方に転換することも不可能ではなくなり、これまで設計時に悩まされてきた不確実な現場密度の予測問題を回避することができる。現状のフィルダム建設のプロセスでは、盛立試験に用いる実際の材料が出現するのは本体工事が近づいてからになるので、上述の考え方を実現するためには今後さらにいろいろな工夫が必要である。

② 室内試験と現場のプロクター特性を比較すると、室内でも現場でも最適含水比が存在するという点では同じであるといえるが、最適含水比と最大乾燥密度がともに一致することはなかった。締固め曲線の形状も違っている。室内と現場では最大粒径などの材料条件や締固め条件など様々な要因が異なっており、一義的な関係が得られなかったのは当然の結果であると考えられる。

(4) 転圧層内の鉛直方向の密度勾配

① 密度型の粗粒材料であるロック材料、フィルター材料では、転圧層内部の上部で密度が大きく下部で密度が小さいといった密度勾配を生じることがある。この密度勾配は転圧回数が増加するにしたがって勾配が大きくなることもあれば、勾配はほとんど変わらず密度分布のプロフィールがほぼ平行移動する場合もある。このような傾向の違いは材料の粒子形状に関係している可能性が示唆された。また、密度勾配が生じる理由として、これまで締固めエネルギーの減衰に目が向けられてきたが、それ以上に大きな要因としてまき出し時の材料分離に起因する粒度差の影響に注目する必要がある。

② コア材料の積層効果（上位層の転圧によって生ずる下位層の密度増加）は小さく、材料の種類、転圧層の厚さによらず約 1%以下である。また、転圧層内部の鉛直方向の密度分布には、ロック材料やフィルター材料の場合のようなはっきりした密度勾配は認められなかった。

(5)　密度増加と転圧面の挙動

①　コア材料の沈下挙動は、材料の施工含水比に大きく左右される。沈下量の方が圧縮量に比べ常に大きいことから、全沈下量には圧縮に伴う沈下の他に側方流動などに起因する沈下量が含まれており、後者の割合は含水比が高いときほど顕著である。

②　ロック材料やフィルター材料では、転圧回数の増加に伴って沈下量は密度の転圧効果曲線と同様に双曲線的に増加し、沈下量の収束傾向も密度の場合とよく似ている。SRID と FRID のデータを用いて、転圧層内を鉛直方向に分割して各分割層の密度増分から求めた合成圧縮量は、多少ばらつきがあるもののおおよそ沈下量と合致することがわかった。これはコア材料のような含水比型の粗粒材料と違って、密度型の粗粒材料であるロック、フィルター材料の沈下成分は、大部分圧縮に伴う純粋の沈下であることを示している。

以上に挙げた知見は、いずれも多点数データに基づいて得られた結論であり、粗粒材料の締固め密度の評価において、多点数データによる統計的な見方がいかに重要であるかを物語っている。同時に、SRID や FRID のような非破壊測定器の導入によって、同じ試験ゾーンの中で目的とする要因の比較が可能になり、このことが試験結果の信頼性を著しく向上させている事実も見逃せない。

第 5 章では、コア材料の転圧厚さの増大を目指して、3 ヶ所のダムで行った最大締固め厚さ 50cm までの単一ゾーン方式の盛立試験の結果を分析して、以下の結論が得られた。

①　コア材料は典型的な含水比型の粗粒材料であるため、締固め密度は施工含水比に強く依存する。転圧厚さの違いによる締固め効果の差異を判断するときには、含水比に起因する密度差を除去しなければならない。このようにして得られた締固め密度を比較すると、転圧厚さの違いによって締固め密度に有意な差は認められなかった。また、転圧厚さが大きくなったとき、転圧層内で深さ方向に密度差が生じ易くなるという状況も見られなかった。同様に透水係数にも有意な差は認められなかった。

②　これらの結果から、試験の対象になったコア材料の場合、転圧厚さを 50cm まで拡大することは十分可能であると結論された。

第 6 章では、コア材料の現場締固め特性に着目した新しい統計的品質管理手法を提案し、二つのダムで試行した結果からその適用性を検証した。

①　筆者が提案した品質管理方法は、「統計的な判定手法の導入と現場締固め特性との整合性」を特徴とする全粒径管理法であり、多点数の管理データを採取して締固めの品質を統計的に判断するものである。また、盛立試験や施工初期のデータから管理基準を設定

するのもこの管理法の特徴の一つである。

② 二つのダムの試行事例によって、設定した管理限界は密度や含水比の自然なばらつきに対して程良い余裕があり妥当であることが示された。ここで提案した統計的管理法では、「柔軟な管理限界」という考え方を取り入れており、従来の管理法のように管理限界を固定的、絶対的なものとは考えない。ロットの平均密度が管理限界からはずれた場合でも、データの分布に異常がなければ直ちに不適切な材料とみなすのではなく、平均密度や透水係数が設計限界内にあると判断できるときには、そのロットを許容できるものとしている。ただし、その場合でも管理限界を外れた理由を必ずチェックし、その後の管理データを監視しながら必要であれば管理限界を変更する。このような管理法には一見、品質管理を曖昧にしてしまう危険性がないとはいえないが、絶えずそれまでの管理データ全体の中で個々のデータを評価し、管理限界の変更に際しては十分な根拠を記録に残すことを義務づけることによって、盛立材料の無駄を防ぎながら、同時に施工不良も厳しくチェックできると考えている。

③ 新しい品質管理手法を施工全体の合理化に結びつけるためには、品質管理データを関連する部署間で即時的に共有できるシステムを構築して、発注者と施工者間で有機的に運用することが必要であるという観点から、パソコンを利用したリアルタイム品質管理手法を提案した。

7.2 今後の課題

SRID、FRID のような簡便で高精度の RI 密度計を得たことにより、締固め密度の評価に統計的な考え方を導入することが可能になった。これによって盛立試験や品質管理がより現代的な姿に刷新されてゆき、その成果は遠からずフィルダムの施工技術や設計の合理化につながってゆくものと期待される。以下に今後の課題を二、三指摘して本論文の結びとする。

① 筆者は、品質管理の目的として品質の保証と同時に、ダムの物性に関する正確な情報を後世に残すことの重要性を指摘してきた。これはダムの建設技術を発展的に継承してゆくために不可欠であるといっても過言ではない。この意味で、これからは盛立試験や品質管理で蓄積される豊富なデータを設計に反映させて、設計理論や設計技術の進化に役立ててゆく努力が必要であると考えている。また、規模の大きいフィルダムでは数多くの埋設計器が設備されており、施工中から建設後の長期間にわたって堤体の挙動観測が行われている。これらの観測データを施工時の物性データと関連づけるとともに、ダムの力学的、水理的な挙動を入念に検証してその成果を設計にフィードバックする必要があると考えている。この分野の研究努力はこれまで十分に継承されてきたといえるだ

ろうか。その成果は明らかにされているといえるだろうか。このような疑問を払拭するためにも、この方面において今後地道な努力が求められているように思われる。いずれにしてもまずは信頼できる現場試験データの蓄積が必要である。

② コア材料の施工品質管理では締固め密度とともに透水係数の管理（止水性の保証）が重要であり、置換法による密度管理の時代には密度試験を行った後に、その掘削孔を利用して現場透水試験が実施されてきた。しかし、従来の現場透水試験では翌日にならないと結果がわからないので、どうしても後追い的な確認試験としてしか機能していなかったように思われる。締固め密度と透水係数がコアの品質を確定する両輪である以上、本論文で提案した締固め密度の管理に透水係数の管理も組み込んで、一体化した品質管理システムの中で運用する必要がある。そのような管理システムを実現するためには、密度管理にマッチした簡便性とスピードを兼ね備えた現場透水試験法、あるいは間接的に透水係数を推定する方法の開発が必要である。

③ 近年、ダムはもとより高速道路や宅地造成などの大型土工事が沿岸部から内陸部へ展開するようになって、粗粒材料を扱う機会がますます多くなってきている。締固め機械もしだいに大型化し施工速度があがるにつれて、従来の品質管理手法ではもはや対応することが難しくなり、一部には品質管理を工法管理で代用することが考えられているようである。同時に、締固め度の評価に密度管理に代わるいろいろな簡易法が模索されている。このような動向は品質管理をより合理的なものに発展させることを意図しているというよりも、より簡便なもので品質管理の負担を軽減しようとする考え方が優先されているのではないかという懸念を感じるのは筆者だけではないと考える。今一度、「品質管理とは何か、締固め管理は何のためにするのか」という、締固め管理の原点に立ち返ってその意義を問い直してみる必要がある。これも当面の課題の一つかも知れない。

最後に、SRID および FRID を用いたコア材料の盛立試験は、本研究のなかでも実施してきたが、これらの手法はすでにいくつかのフィルダムに応用された結果、転圧厚さ 30 ㎝の施工事例が増えつつあり、工期短縮やコスト削減などの成果につながっている。SRID を用いたリアルタイムの品質管理手法についてはこれからである。これらの新しい技術ができるだけ多くのフィルダムの盛立試験や品質管理に利用されて、フィルダムや各種の盛土構造物の施工の合理化に貢献できることを願っている。そして、それほど遠くない将来に、新しい品質管理のもとで蓄積されたデータが設計法に反映されることを期待している。

付録A　RI 法の測定原理

A.1　ガンマ線密度計

(1)　ガンマ線と物質との相互作用

RI（ラジオアイソトープ）すなわち放射性同位元素は、人工のまたは天然に存在する不安定な核種の総称である。RI はアルファ線、ベータ線、ガンマ線などの放射線を放出して安定した核種に遷移する。RI 密度計には、^{137}Cs（セシウム 137）や ^{60}Co（コバルト 60）が用いられる。^{137}Cs は 0.662MeV の単一エネルギーのガンマ線を放出し、^{60}Co は 1.172MeV と 1.333MeV の異なったエネルギーのガンマ線を放出して、それぞれ安定したバリウム 137 とニッケル 60 になる。

すでに述べたように RI 密度計は、RI 線源から放出されるガンマ線が土などの物質中を透過するときに、散乱や吸収によって減衰する度合いが、物質の密度に強く依存する性質を利用している。ガンマ線が物質内を透過するとき、物質を構成する原子との間に相互作用を引きおこし、しだいにエネルギーを失ってゆく。相互作用はガンマ線と物質を構成している原子の軌道電子の間で発生し、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の三種類の相互作用がある。光電効果はガンマ線による電離作用であり、原子内に束縛された軌道電子の結合エネルギーより大きいエネルギーのガンマ線が軌道電子を解離する作用をいう。両者のエネルギー差は、解離された電子の運動エネルギーとなって持去られる。コンプトン散乱は、軌道電子とガンマ線との弾性散乱であり、反応の前後で運動量とエネルギーが共に保存される。コンプトン散乱の確率は吸収物質の原子番号に比例し、ガンマ線のエネルギーに反比例する。ガンマ線は、物質中でコンプトン散乱を生ずるとエネルギーの一部を失うが、光電効果のように完全に消滅するわけではないので、更に何回かのコンプトン散乱を繰り返す。そして、エネルギーが減少すると光電効果の確率が増加し、最終的には光電効果によって消滅する。最後に、電子の静止質量エネルギーの 2 倍（約 1.02MeV）以上のエネルギーをもつガンマ線が物質中の原子核の近傍で消滅して、一対の電子と陽電子を生みだす反応があり、これを電子対生成という。しかし、^{137}Cs のガンマ線エネルギーは電子対生成のしきい値よりも低いので電子対生成は発生しない。また、^{60}Co の場合もガンマ線のエネルギーとしきい値との差が僅かしかないので、電子対生成が生じる確率は実際上無視することができる。

(2) 密度計の測定機構

透過型ガンマ線密度計は、ガンマ線源を先端に封入した線源棒を地中に所定の深度まで挿入して、地表面におかれた検出器に入射する透過ガンマ線の強度を計測して物質の密度を求めるものである（**図－A.1**）。

図－A.1 透過型ガンマ線密度計の概念図

検出器へ入射するガンマ線の強度（単位時間当たりのガンマ線のカウント数 N で表し、計数率と呼ぶ）と物質の密度ρとの関係は、近似的に（A.１）式で与えられる。

$$N = S \cdot B \cdot \exp(-\Sigma \cdot l \cdot \rho) \qquad \text{（A.1）}$$

ここで l：線源と検出管中心との間の距離（ガンマ線の透過距離）

Σ：物質の質量吸収係数（ガンマ線を散乱吸収する割合）

S：線源のガンマ線強度

B：ビルドアップ係数

実際に検出器に入射するのは線源から直接透過する一次ガンマ線ばかりではなく、散乱ガンマ線も含まれる。ビルドアップ係数はこれらの散乱ガンマ線の寄与を表している。ビルドアップ係数は減衰距離（$\Sigma l \rho$）の関数であり、検出管の種類や寸法にも依存するので一義的には定められない。しかし、土や岩石の密度領域内では、透過型ガンマ線密度計の応答特性はビルドアップ係数を指数関数にくり込むことがでるので、簡単に次式で表すことができる。

$$N = K \cdot \exp(-\Sigma_{\mathrm{eff}} \cdot l \cdot \rho) \qquad (K:\text{定数}) \qquad \text{(A.2)}$$

特定の物質においては、実効質量吸収係数Σは定数になるので、（A.2）式から N はρのみに依存することがわかる。以降、簡単のためΣ_{eff}を単にΣで記す。

(3) 土質の違いによる影響

土を構成する元素は、珪素・酸素を主体とした軽・中重核に限られるが、その含有比率は一般に土の種類によって異なっている。したがって、先に述べた物質の∑は土質の種類によって変動する。軽・中重核の元素に対しては、ガンマ線のエネルギーが 0.2～3MeV の範囲においてコンプトン散乱が最も優勢であり、光電効果はこれより低いエネルギー領域で支配的になる。コンプトン散乱の理論によれば、質量吸収係数∑は元素の原子番号Ｚに比例し、質量数 *A* に反比例する。土中の主な元素の *Z*／*A* の値は**表－A.1** に示すように水素の場合だけが、他の元素の約 2 倍の値である点を除けばあまり差がないことがわかる。土中の水素はほとんど水分子（H_2O）の化合体として存在しているので、この点を考慮すれば他の元素と大きな差にはならない。

一方、多くの元素の混合体である土では、各元素の含有率で重みをつけて合成した（*Z*／*A*）の土質の違いによる差は**表－A.1** にみられる各元素間の（*Z*／*A*）の差よりもはるかに小さくなることが示される。例えば、砂で 0.4959、コンクリートで 0.4878、磨板ガラスで 0.4921 の値になる。これらの数値はほぼ一定とみなすことができ、したがってコンプトン散乱による質量吸収係数は、土質の差異にほとんど影響を受けないという結論になる。

他方、0.2MeV より低いエネルギー領域で主要な寄与をする光電効果の場合はこのように簡単ではないが、土の場合、実効原子番号が Al（*Z*＝13）に近く、土質によって大きな差異を生じないことから、金属鉱床などの重い元素を多く含む場合を除いて無視できる。これは、多くの種類の土や粗粒材料に対してこれまでに各所で実施されてきた RI 密度計の較正試験によって確められている。

表－A.1　主な元素と水の *Z*／*A* の値

元素	*Z*／*A*	元素	*Z*／*A*
H	0.9921	Si	0.4984
C	0.4995	S	0.4990
N	0.4997	Cl	0.4795
O	0.5000	K	0.4859
Na	0.4784	Ca	0.4990
Mg	0.4934	Fe	0.4655
Al	0.4818	H_2O	0.5521

A.2　中性子水分計

(1) 速中性子の減速

中性子水分計に用いられる ^{252}Cf（カリフォルニウム 252）は、非常に重い人工の元素で通常の自然壊変ではなく自ら核分裂をひきおこし、このときに数個の速中性子を放出する。また、α崩壊性の同位元素（例えば ^{241}Am）を Be で包みこむとα粒子と Be 核とが核反応

をひきおこし、この際に中性子を 1 個放出するので、この種の核反応による中性子線源が用いられることもあった。これらの中性子線源から放出される中性子のエネルギーはガンマ線のように単色ではなく連続スペクトルをもっており、平均エネルギーは数 MeV に達する。現在、RI 水分計に最も多く用いられている中性子線源は ^{252}Cf（カリフォルニウム 252）であるが、その平均エネルギーは 2.35MeV である。

中性子と物質との相互作用は複雑であり、中性子のエネルギーによってその様相が著しく異なる。このため、中性子はその運動エネルギーによって高速中性子、エピサーマル中性子、熱中性子などに分類される。荷電粒子（α線、β線）やガンマ線の検出は、電離作用を利用して行われるが、電荷をもたない中性子は核反応を利用して検出しなければならない。しかし、エピサーマル以上の高いエネルギーをもつ中性子が核反応を引き起こす確率は非常に小さいため、これらの中性子を直接とらえることは難しい。通常用いられている ^{3}He やフッ化ホウ素を封入した比例計数管は熱中性子だけを検出している。

線源から土中に放出された速中性子群は、土を構成している元素の原子核と主に弾性散乱を引きおこすことによって自己の運動エネルギーをしだいに消失していく。この種の散乱はいわゆる玉突型衝突として取扱うことができ、何回かの衝突によって中性子のエネルギーが構成原子の格子振動の熱エネルギーと平衡するまで低下すると、これ以上はエネルギーを失うことができず、この状態の中性子は特に熱中性子と呼ばれている。熱中性子の平均エネルギーは 1/40eV で、その平均速度は 2.2km/s である。

このように速中性子が、土中で拡散しながら弾性散乱によってエネルギーを失い熱中性子化する現象を“中性子の減速”と呼ぶ。一回の衝突で中性子が失うエネルギーの量は、衝突される原子核の質量が小さい程大きくなるので、最も軽い水素原子核（中性子とほとんど等しい質量をもつ陽子）と衝突するときに失われるエネルギーが最大になる。物質中で生成される熱中性子の数やその分布は、物質を構成する元素の中性子に対する減速能力によって異なり、これを表わすパラメータとして“減速能”という用語がある。土を構成する元素の減速能と熱中性子の吸収能力（吸収断面積という）を**表ーA.2** に示す。この表で注目されることは、水素の減速能が他の元素と比較して著しく大きいことである。したがって、第一近似として土中で生成される熱中性子量は、土中の水素濃度に支配されることになる。土中の水素濃度は大部分が水分子に含まれているので、熱中性子量を検出することによって土の水分量を間接的に知ることができる。

(2) 水分計の測定機構

このように中性子水分計は、速中性子の減速に対して水素が他の元素よりきわだって効果的であることに着目し、速中性子源と熱中性子検出管を一定の幾何学的条件のもとに設置することによって、土中の熱中性子量を測定して間接的に土中水分量を求める装置である。したがって、水分計の応答を理論的に説明するためには“拡散”と“減速”の過程を共に考慮したモデルが必要になるが、これらの理論的計算モデルとして、代表的なものに

表－A.2　中性子に対する元素の核的性質

元素	原子量	エネルギー対数の平均減少率 ξ	熱中性子になるまでの平均衝突回数	熱中性子の吸収断面積 σ_a バーン	散乱断面積バーン	
					熱中性子 σ_p	エピサーマル中性子 σ(epi)
H	1.008	1.0	18	0.332	38	20.4
B	10.82	0.176	103	755	4	3.7
C	12.01	0.159	115	0.0032	4.8	4.66
N	14.008	0.137	134	1.88	10	9.9
O	16.000	0.121	152	0.00019	4.2	3.75
Na	22.997	0.085	215	0.505	4.0	3.1
Mg	24.32	0.087	224	0.063	3.6	3.4
Al	26.97	0.073	252	0.230	1.4	1.4
Si	28.06	0.070	261	0.13	1.7	2.2
P	30.98	0.064	288	0.19	5	3.4
S	32.06	0.062	297	0.49	1.1	1.1
Cl	35.457	0.056	324	31.6	16	
K	39.096	0.051	361	1.97	1.5	2.1
Ca	40.08	0.050	370	0.43	3	3.0
Ti	47.90	0.042	443	5.6	4	4.2
Cr	52.01	0.038	475	2.9	3.0	3.9
Mn	54.93	0.036	507	13.2	2.3	1.9
Fe	55.85	0.036	516	2.53	11	11.4
Co	58.94	0.034	538	37.0	7	5.8
Ni	58.69	0.034	535	1.6	17.5	17.4
Cu	63.57	0.031	580	3.62	7.2	7.7
Zn	65.38	0.031	597	1.06	3.6	4.0
Cd	112.41	0.018	1022	2550	7	

フェルミ年令理論、二群拡散理論および他群拡散理論などがあり、またシミュレーションの方法を利用したモンテカルロ法などもある。

さて、無限に広い物質中に速中性子源をおいたとき、上に述べた減速効果と拡散現象によって物質中には様々のエネルギーレベルの中性子群が分布することになるが、エネルギーが一定の中性子群に着目すると、その分布は線源を中心として近似的に球状ガウス分布することが知られている。十分広い一様な物質中では熱中性子の密度分布は、線源からの距離と物質中の水素含有量によって定まる。

すでに述べたように表面型水分計の場合、測定機構の異なる二つの形式がある。一つは散乱型または熱中性子検出方式といわれるもので、中性子線源と熱中性子検出器とを比較的近接して設置し、地表面から土中の熱中性子量を直接検出する方法である（**2.3.1項 (3)** の**図－2.7**）。測定原理および、散乱型の測定機構から明らかなように、散乱型の較正曲線では計数率比が含水量の増加関数で表される。もう一つの形式は透過型あるいは速中性子検出方式と呼ばれるものである。その名の如く、土中で熱中性子になりきらない状態で地表面へ透過してくる、熱中性子よりもエネルギーの高い中性子を検出する方法である。いずれの方式であっても水分測定の原理そのものが異なるわけではない。透過型と散乱型は

いわば表と裏の関係にあるとみることができるので、透過型の較正曲線では計数率比が含水量の減少関数で表される。

透過型水分計は**図ーA.2** に示すように速中性子検出部、熱中性子吸収材、および地中に挿入された速中性子源から構成されている。速中性子検出部は減速材と熱中性子検出管を組み合わせたものである。検出部を被覆する熱中性子吸収材は土中で生成された熱中性子を吸収して遮断する。減速材は熱中性子吸収材を透過してくるエピサーマル以上の速中性子を減速して熱中性子に強制的に転化する。そして、熱中性子検出管が減速材中で生成された熱中性子を検出する。以上の構造から、透過型水分計の場合、線源から発生するエネルギーの高い速中性子のうち一部は土中で熱中性子となり、一部は比較的高いエネルギーのまま検出部に入射する。土中で生成した熱中性子は熱中性子吸収材によって遮断されるので、ほとんど検出管に達することができない。エピサーマル領域以上の中性子のみが大部分吸収材を透過し、減速材中で強制減速されて熱中性子になり、その量を熱中性子検出管で計測することによって検出部に入射した速中性子線量を間接的に求めている。

図ーA.2　透過型中性子水分計の構成要素

(3)　土質依存性と等価含水量

以上の説明から明らかなように、中性子線を利用した RI 水分計は原理的には水素濃度計と呼ぶべきものであり、その応答は物質中の水素原子の濃度によって決まる。岩石や土に含まれる水素原子の大部分は自由水（土質工学的には 110℃の炉内で 24 時間強制乾燥させたときに分離される水の量を意味している）に含まれており、この自由水の量を決定するために中性子水分計を応用している。しかし、土の中には自由水以外にも微量の結晶水、拘束水、有機質成分などに含まれる水素原子があり、中性子水分計はこれらの水素原子と自由水中の水素原子を区別できない。しかもこれらの自由水以外の水素含有率は地盤材料の種類によって多少異なっている。RI 水分計は全水素濃度を含水量に換算して取り扱っており、水分計が直接感応する含水量 ρ_m*を「等価含水量」と呼ぶ。ρ_m*は、土質工学的に定

義される含水量 ρ_m と乾燥密度 ρ_d を用いて次の式で表わされる。

$$\rho_m^* = \rho_m + \alpha \cdot \rho_d \qquad (A.3)$$

ここで、α は水分補正係数（または α 値）と呼ばれ、土中に含まれる結晶水や有機質成分に含まれる水素原子の寄与を、等価的に土質工学的含水量に変換するために導入されたパラメータである。水分補正係数は土質の種類に依存するため、較正式とは切り離して土質の種類ごとに設定する必要がある。

謝　辞

本研究は筑波大学機能工学系山田恭央教授のご指導の下にまとめたものです。論文作成にあたり、同教授には細部にわたる貴重なご意見とご指導をいただきました。同教授の御心労を思い、ここに深く感謝の意を表します。

また、筑波大学機能工学系山本泰彦教授、松島亘志助教授、庄司学講師、三木博史教授（独立行政法人土木研究所総括研究官）の諸先生からは、論文の内容に関して貴重な御助言をいただき、ありがとうございました。

本研究は、筆者が 1986 年、粗粒材の現場締固めの評価に関する研究委員会（地盤工学会（当時土質工学会））に始まり、その後、建設省土木研究所フィルダム研究室において取り組んできた、粗粒材料の締固め密度などに関する一連の研究成果をとりまとめたものです。新しく開発、改良した RI 測定器による現場データの収集や数々の盛立試験に際しては、現場事務所の方々や直接試験に携わったコンサルタントおよびゼネコンの方々の協力なしには数多くの貴重なデータを得ることはできませんでした。これらの方々に深く感謝の意を表します。

特に、地盤工学の分野で 1970 年頃より RI 法による密度測定技術に先鞭をつけられた㈱ソイルアンドロックエンジニアリングの取締役、延山政之さんには心より深く感謝の意を表します。延山さんとは、1986 年以来、粗粒材の現場締固めの評価に関する研究委員会より盛土構造物の締固めにおける密度測定の大切さを共有してきました。また、RI 法の基礎知識や多くのダム現場での体験に基づく粗粒材料の密度測定のあり方など多くの知見と助言をいただき、ありがとうございました。同社の野村孝さんには図面の作成に御協力いただきありがとうございました。

最後に、本研究をとりまとめるにあたって御協力いただいた独立行政法人土木研究所ダム構造物チームのみなさんに深く感謝の意を表します。

研究実績　1. 査読付論文

ID	論　文　名	執筆著者	書　籍　名	巻　号	頁	発行年月
1	粗粒材の三軸試験における供試体作成方法とせん断強度	渡辺和夫・豊田光雄・松本徳久	粗粒材料の変形強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集		27～32	1986年10月
2	フィル材料の経時的劣化とその試験法	松本徳久・渡辺和夫・豊田光雄	粗粒材料の変形強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集		157～160	1986年10月
3	比較的軟質なロック材料の強度・変形特性	山本裕之・豊田光雄・中村　昭	堆積質軟岩による盛土の工学的諸問題に関するシンポジウム発表論文集		267～272	1995年2月
4	自動走査式フレーム式ＲＩ密度計を利用したロック材料の現場締固め特性の評価	豊田光雄・中村　昭・延山政之	ダム工学	№ 22	36～49	1996年6月
5	自動走査式ＲＩ密度計(ＳＲＩＤ)の開発とフィルダムの適用	豊田光雄・吉田　等・延山政之	ダム工学	Vol.7,No.2	98～113	1997年7月
6	ＣＳＧの工学特性と構造物の築造 Mechanical Properties of Cement Sand and Gravel and Construction of Embankment Dams	豊田光雄・吉田　等・川口昌尚	Chaina-Japan joint Symposium on Recent Development of Theory and Practice in Geotechnology		15～20	1997年10月
7	横方向ロッド載荷試験による軟質岩盤の変形係数の評価	豊田光雄・吉田　等	第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集		623～628	1998年1月
8	フィル材料の現場締固め密度を評価する新しいＲＩ法	豊田光雄・延山政之	土と基礎	Vol.47 № ３	９～12	1999年3月
9	ＣＳＧ工法の施工と構造物の経時変化	豊田光雄・有銘伸予・今井裕一	第3回環境地盤工学シンポジウム論文集		49～54	1999年11月
10	Application of Newly Developed RI Methods to the In-situ Evaluation of the Compaction Density of Embankment	Mitsuo.Toyoda,Yuichi.Imai	Second China-Japan Joint Symposium on Recent Development of Theory and Practice in Geotechnology		413～420	1999年12月
11	現場締固め特性に着目した統計的品質管理の方法	豊田光雄・延山政之	土と基礎	Vol.48 № 4	5～8	2000年4月

研究実績　2. その他の論文･シンポジウム･雑誌など

ID	論　文　名	執筆著者	書　籍　名	巻　号	頁	発行年月
1	ダムにおける地震観測	北条紘次・松本徳久・豊田光雄	土木技術資料	20-11	21～25	1978年11月
2	コンクリートダムの地震解析及び実測との比較	松本徳久・豊田光雄	土木技術資料	20-11	15～20	1978年11月
3	ロックフィルダムの模型振動実験	松本徳久・豊田光雄・志賀三智	土木技術資料	25-6	45～50	1983年6月
4	三保ダムにおける実測地震記録の解析	松本徳久・豊田光雄・安田成夫・志賀三智	土木技術資料	26-7	9～15	1984年7月
5	ロックフィル材料の粒径が地震時表面すべりに与える影響に関する実験	豊田光雄・志賀三智・松本徳久	土木学会地震工学研究発表会（第18回）		449～452	1985年7月
6	地震時におけるロックフィルダム表層すべりの安全性におよぼす最大粒径、粒度等の影響	松本徳久・豊田光雄・志賀三智	大ダム	№ 118	1～11	1986年12月
7	ロック材料の劣化に関する室内実験	豊田光雄・松本徳久	第22回土質工学研究発表会講演集	２分の１	969～970	1987年6月
8	ロック材料のせん断強度の拘束圧依存性	豊田光雄	第26回土研研究発表会論文集	第2521号	９～12	1987年12月
9	気乾・飽和状態がロック材のせん断強度に与える影響	豊田光雄・安田成夫・松本徳久	第23回土質工学研究発表会講演集	２分の１	479～480	1988年6月
10	ロック材料の内部摩擦角の拘束圧依存性	松本徳久・豊田光雄・安田成夫	ダム技術	№ 25	24～32	1988年8月
11	ロック材料のせん断強度の諸因子	豊田光雄・松本徳久	第24回土質工学研究発表会講演集	２分の１	557～558	1989年6月
12	飽和状態のロック材料のせん断強度	松本徳久・豊田光雄	土木技術資料	31-7	58～63	1989年7月
13	ロック材料のせん断強度に関する要因	松本徳久・豊田光雄	ダム技術	№ 44	21～34	1990年5月
14	ロック材料の三軸試験値のばらつき	伊藤基博・豊田光雄・松本徳久	第25回土質工学研究発表会講演集	２分の１	561～562	1990年6月
15	ロック材のひずみの大きさと排水せん断強度	豊田光雄・松本徳久	第25回土質工学研究発表会講演集	２分の１	559～560	1990年6月
16	ロック材料のせん断強度定数に関する実験的検討	松本徳久・豊田光雄	ダム技術	№ 57	40～52	1991年6月
17	ロック材料の密度と排水せん断強度	豊田光雄・松本徳久	第26回土質工学研究発表会講演集	２分の１	479～480	1991年7月
18	ロック材料の密度と排水せん断強度（その２）	小川直樹・豊田光雄・藤沢侃彦	第27回土質工学研究発表会講演集	２分の１	601～602	1992年6月
19	粗粒材料の内部摩擦角における力学的要因の実験的検討	豊田光雄・藤沢侃彦	第27回土質工学研究発表会講演集	２分の１	595～596	1992年6月
20	ＲＩ密度計を用いた粗粒材料の現場転圧試験	藤沢侃彦・豊田光雄	ダム技術	№73	24～35	1992年10月
21	簡易な原位置載荷試験による岩盤の変形測定に関する実験的検討	豊田光雄・中村　昭	土木学会第25回岩盤力学シンポジウム		566～570	1993年2月
22	岩石質材料の原位置曝露試験	矢萩賢仁・豊田光雄・中村　昭	土木学会第25回岩盤力学シンポジウム		611～615	1993年2月
23	粗粒材料用に工夫されたＲＩ密度計を用いた現場転圧試験	中村　昭・豊田光雄	大ダム		75～86	1993年3月
24	粗粒材料の大型圧縮試験における試験条件の影響	佐藤小次郎・豊田光雄中村　昭	第28回土質工学研究発表会講演集	２分の１	823～824	1993年6月
25	大型圧縮試験による岩石質材料の変形特性	豊田光雄・中村　昭	第28回土質工学研究発表会講演集	２分の１	831～832	1993年6月
26	Ｃ・Ｓ・Ｇの材料試験および施工	藤沢侃彦・中村　昭・豊田光雄・石川高史・山上和彦	ダム技術	№ 83	41～51	1993年8月
27	粗粒材料の透水係数に及ぼす材料要因の影響	佐藤小次郎・豊田光雄中村　昭	土木学会第48回年次学術講演会講演概要集	3	1074～1075	1993年9月
28	試験法の違いによる粗粒材料の非線形弾性係数の比較	豊田光雄・中村　昭	土木学会第48回年次学術講演会講演概要集	3	1450～1451	1993年9月

研究実績　2. その他の論文･シンポジウム･雑誌など

ID	論　文　名	執筆著者	書　籍　名	巻　号	頁	発行年月
29	岩石質材料（泥流堆積物）の工学的特性	中村　昭・豊田光雄	ダム技術	№ 86	35～45	1993年11月
30	フィルダム基礎岩盤の変形試験法への横方向ロッド載荷試験の適用性に関する検討	中村　昭・豊田光雄	ダム技術	№ 92	25～34	1994年5月
31	岩石質材料の透水係数に影響する材料要因	小川直樹・豊田光雄・佐藤小次郎･中村　昭	第29回土質工学研究発表会講演集	３分の３	1893～1894	1994年6月
32	セメントを添加した砂礫材料のせん断強度	佐藤小次郎･豊田光雄･中村　昭	第29回土質工学研究発表会講演集	３分の１	689～690	1994年6月
33	セメントを添加した砂礫材料の締固めおよび透水性	小嶋光博･佐藤小次郎･豊田光雄・中村　昭	第29回土質工学研究発表会講演集	３分の３	2075～2076	1994年6月
34	粗粒材料の現場締固め特性に関する実験的検討	豊田光雄・中村　昭	第29回土質工学研究発表会講演集	３分の３	2073～2074	1994年6月
35	セメントを添加した砂礫材料の密度とせん断強度および変形性	小川直樹・豊田光雄・佐藤小次郎･中村　昭	第49回土木学会年次学術講演会概要集	３－Ａ	16～17	1994年9月
36	セメントを添加した砂礫材料の耐久性及び越流抵抗性に関する検討	吉田　満・酒井信義・豊田光雄・中村　昭	第49回土木学会年次学術講演会概要集	３－Ａ	18～19	1994年9月
37	セメントを添加した砂礫材料のせん断強度に関する基礎的検討	佐藤小次郎･豊田光雄･中村　昭	第49回土木学会年次学術講演会概要集	３－Ａ	20～21	1994年9月
38	ＣＳＧの工学的性質に関する実験的検討	中村　昭・豊田光雄・佐藤小次郎	ダム技術	№ 96	35～46	1994年9月
39	セメントを添加した砂礫材料の現場締固め特性	豊田光雄・中村　昭・酒井信義・古川保典	第49回土木学会年次学術講演会概要集	３－Ｂ	1448～1449	1994年9月
40	ＣＳＧの工学的性質と施工	中村　昭・豊田光雄・山本裕之・川口昌尚	土木技術資料	36-10	40～45	1994年10月
41	ＣＳＧの室内試験と現地コアのせん断強度の比較	川口昌尚・豊田光雄・山本裕之・中村　昭	平成６年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集			1995年1月
42	セメントを添加した改良盛立材料の開発	中村　昭・豊田光雄	土と基礎	Vol.43	41	1995年3月
43	フィルダム・ロック材料の現場盛立試験における締固め度の評価法	豊田光雄・山本裕之	土木技術資料	37－6	38～43	1995年6月
44	層厚の大きいロック材料の転圧層内部の締固め状況	豊田光雄・山本裕之・中村　昭	第30回土質工学研究発表会講演集	３分の３	2057～2058	1995年7月
45	ロック材料のせん断強度定数	山本裕之・豊田光雄・中村　昭	第30回土質工学研究発表会講演集	３分の１	735～736	1995年7月
46	ＣＳＧの現場締固め特性	小嶋光博・川口昌尚・豊田光雄・中村　昭	第30回土質工学研究発表会講演集	３分の３	2309～2310	1995年7月
47	母材が異なるＣＳＧのせん断強度	川口昌尚・豊田光雄・山本裕之・中村　昭	第30回土質工学研究発表会講演集	３分の３	2311～2312	1995年7月
48	ＣＳＧの動的変形特性	川口昌尚・豊田光雄・中村　昭	第50回土木学会年次学術講演会概要集	３－Ａ	828～829	1995年9月
49	現位置におけるＣＳＧの変形特性	小嶋光博・豊田光雄・川口昌尚・山本裕之・中村　昭	土木学会第50回年次学術講演会概要集	３－Ａ	826～827	1995年9月
50	フィルダム材料（泥流堆積物）の有効利用に関する検討	中村　昭・豊田光雄・山本裕之	土木技術資料	37－9	52～57	1995年9月
51	遮水材料の現場締固め特性	豊田光雄・山本裕之・中村　昭	第50回土木学会年次学術講演会概要集	III－Ａ	830～831	1995年9月
52	盛立試験によるコア材料のまき出し厚さに関する検討	中村　昭・豊田光雄・山本裕之	ダム技術	№ 110	25～37	1995年11月
53	ＣＳＧのせん断強度特性	豊田光雄・中村　昭・川口昌尚	第６回ダム工学研究発表会講演集		19～21	1995年11月
54	ＣＳＧの引張強度に関する実験的検討	山本裕之・川口昌尚・豊田光雄・中村　昭	第23回関東支部技術研究発表会講演概要集		624～625	1996年3月
55	横方向ロッド載荷試験機を用いた比較的軟質な岩盤の変形特性	豊田光雄・木村清隆	平成７年度土木学会東北支部技術研究発表会概要集	III－36	380～381	1996年3月
56	ＣＳＧ工法を用いた締切堤袖部の擁壁の施工	渡辺秀之・安斉功幸・宮川浩幸・豊田光雄	平成７年度土木学会東北支部技術研究発表会概要集		726～727	1996年3月

研究実績　2. その他の論文･シンポジウム･雑誌など

ID	論　文　名	執筆著者	書　籍　名	巻　号	頁	発行年月
57	ロック材料のせん断強度定数の評価	中村　昭・豊田光雄	土木技術資料	38－3	38～43	1996年3月
58	自動走査式ＲＩ密度計（ＳＲＩＤ）の開発と適用に関する検討	豊田光雄・中村　昭・延山政之	第23回土木学会関東支部技術研究発表会概要集		704～705	1996年3月
59	静的繰返し試験におけるＣＳＧの強度変形特性	川口昌尚・豊田光雄・山本裕之・中村　昭	第31回地盤工学研究発表会講演集	２分の１	929～930	1996年7月
60	凝灰岩を用いたＣＳＧの原位置コアによるせん断強度	山本裕之・豊田光雄・川口昌尚・中村　昭	第31回地盤工学研究発表会講演集	２分の１	927～928	1996年7月
61	粗粒材料に適用できる自動走査式ＲＩ密度計（ＳＲＩＤ）の開発	豊田光雄・中村　昭・延山政之	第31回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2381～2382	1996年7月
62	自動走査式ＲＩ密度計によるフィル材料の現場密度計測技術	豊田光雄	土木技術資料	vol.38	8～9	1996年8月
63	ＣＳＧの締固め特性と一軸圧縮強度に関する実験的検討	山本裕之・豊田光雄・川口昌尚・亀山康樹	第51回土木学会年次学術講演会概要集	３－Ｂ	720～721	1996年9月
64	軟化過程を考慮したＣＳＧの力学モデルと基礎的解析	川口昌尚・豊田光雄・中村　昭・山本裕之	第51回土木学会年次学術講演会概要集	３－Ｂ	718～719	1996年9月
65	自動走査式ＲＩ密度計における測定地盤面の不陸の影響	豊田光雄・中村　昭・延山政之	第51回土木学会年次学術講演会概要集	3	728～729	1996年9月
66	盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例 8.堆積軟岩を用いたフィルダム	大山英治・谷　　茂・豊田光雄・延山政之	土と基礎	Vol.44 № 10	49～54	1996年10月
67	フィルダムに適用できるＲＩ密度・水分計と概要と機種	豊田光雄	ダム技術	№ 120	69～70	1996年11月
68	フィルダム堤体下流法面上の盛土の留意点	吉田　等・豊田光雄	土木技術資料	vol.39 № 1	10～11	1997年1月
69	ＣＳＧ工法による締切堤の築造	渡部秀之・安斉功幸・宮川浩幸・吉田　等・豊田光雄・山本裕之	第５回研究発表会講演集		21～26	1997年2月
70	フィルダム盛立材料の現場密度測定に関する研究	豊田光雄	ダム技術	№ 125	23～34	1997年2月
71	改良型横方向ロッド載荷試験による岩盤の変形性に関する実験的検討	京極正昭・栗山和宏・腰山武治・豊田光雄	ダム技術	NO.125	40～46	1997年2月
72	廃棄岩（火山礫凝灰岩）を用いたＣＳＧ工法による締切堤の築造	渡部秀之・安斉功幸・宮川浩幸・吉田　等・豊田光雄・山本裕之	ダム技術	№ 125	47～54	1997年2月
73	フィルダム・コア材料の転圧厚さに関する実験的検討	豊田光雄・堀田洋一	平成８年度土木学会東北支部技術研究会講演概要		320～321	1997年3月
74	フィルダム材料の品質管理試験における密度のばらつき	山本裕之・豊田光雄・吉田　等	第32回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2189～2190	1997年7月
75	コア材料の礫率補正に関する一考察	豊田光雄・延山政之	第32回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2193～2194	1997年7月
76	コア材料の転圧層内部の密度分布と積層効果に関する実験的検討	豊田光雄・米田哲哉・間瀬勝則	第32回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2191～2192	1997年7月
77	フィルダム盛立材料としての円礫材の現場締固め特性	豊田光雄・川口昌尚・稲葉修一・堀田洋一	第32回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2195-2196	1997年7月
78	ＣＳＧの単位セメント量試験方法に関する一検討	松岡　博・星　典行・豊田光雄・吉田　等・山里剛史・尾宮邦明	第９回地盤工学シンポジウム論文集		1～4	1997年7月
79	Q.73-a R.37 ＲＩ密度計を用いた土質コア材料の締固め効果の評価	藤沢侃彦・中村　昭・豊田光雄	大ダム	No.160	33～41	1997年7月
80	自動走査式ＲＩ密度計(ＳＲＩＤ)の較正曲線と測定容積	豊田光雄	第32回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2187～2188	1997年7月
81	変わる土木　－回って測る締固め地盤の密度－	豊田光雄	土木技術資料	39-8	14	1997年8月
82	ＣＳＧの配合特性	山本裕之・豊田光雄・吉田　等	土木学会第52回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	614～615	1997年9月
83	粒度の異なるＣＳＧのせん断強度特性	山本裕之・豊田光雄・吉田　等・川口昌尚	土木学会第52回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	616～617	1997年9月
84	材令の違いによるＣＳＧのせん断強度特性	豊田光雄・山本裕之・吉田　等	土木学会第52回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	618～619	1997年9月

研究実績　2. その他の論文･シンポジウム･雑誌など

ID	論　文　名	執筆著者	書　籍　名	巻　号	頁	発行年月
85	転圧境界面部のＣＳＧのせん断強度に関する検討	松岡　博・池上真二・山本裕之・豊田光雄・森田悠紀雄・豊岡義則	土木学会第52回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	620～621	1997年9月
86	ＣＳＧの締固めとせん断強度	豊田光雄・吉田　等・山本裕之	土木技術資料	39-10	38～43	1997年10月
87	ＲＩ法によるコア材料の盛立試験と転圧厚さに関する実験的検討	豊田光雄・吉田　等・堀田洋一・橋本忠助	ダム技術	№ 135	17～28	1997年12月
88	母材が異なるＣＳＧによる一軸圧縮強度の比較	豊田光雄・山本裕之・山里剛史	平成９年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集		743～744	1998年3月
89	改良型横方向ロッド載荷試験機(ＳＬＬＴ)を用いた軟質岩盤の変形特性	腰山武治・豊田光雄	土木学会東北支部研究発表会講演概要集		352～353	1998年3月
90	ＣＳＧ工法を適用したフィルダム堤体の安定性に関する一検討	足立辰夫・篠原昌秀・才田　進・田中昭二・豊田光雄	平成９年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集	その２	912～913	1998年3月
91	粘板岩を用いたＣＳＧの締固め・透水および強度特性	森川幹夫・前廣利一・豊田光雄・亀山康樹	平成９年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集	その１	530～531	1998年3月
92	ＣＳＧの変形特性を考慮した堤体の安定性に関する一検討	豊田光雄・川口昌尚	第25回土木学会関東支部研究発表会講演概要集		518～519	1998年3月
93	ＣＳＧ構造物の動的解析による一検討	豊田光雄・花篭利行	平成９年度土木学会東北支部研究発表会講演概要集		304～305	1998年3月
94	自動走査式ＲＩ密度計（ＳＲＩＤ）を用いた現場密度測定	豊田光雄・吉田　等	ダム技術	№ 140	17～26	1998年5月
95	横方向ロッド載荷試験（ＳＬＬＴ）による軟質岩盤の簡易変形試験	豊田光雄・吉田　等	土木技術資料	Vol.40 № ５	４～５	1998年5月
96	振動タンピングローラによる現場締固め特性	豊田光雄・吉田　等	第33回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2049～2050	1998年7月
97	走査式（ＳＲＩＤ）および固定式ＲＩによるフィルダムコア材の締固め密度に関する考察	豊田光雄・延山政之	第33回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	2045～2046	1998年7月
98	ＣＳＧの転圧厚さと締固め密度および転圧層内の密度分布	豊田光雄・森川幹夫・山田康陽・村瀬祐司	土木学会第53回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	652～653	1998年10月
99	ロックラダーによるＣＳＧの混合と現位置コアのせん断強度	豊田光雄・森川幹夫・前廣利一・亀山康樹	土木学会第53回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	654～655	1998年10月
100	外荷重を考慮したＣＳＧ構造物の応力解析	川口昌尚・豊田光雄	土木学会第53回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	658～659	1998年10月
101	廃棄岩にセメントを添加した材料（ＣＳＧ）による転流工擁壁の施工	豊田光雄・吉田　等・渡部秀之	コンクリート技術シリーズ コンクリートと資源の有効利用		97～104	1998年10月
102	ＣＳＧ構造物の応力ひずみ関係と応力解析	豊田光雄・川口昌尚	土木学会第53回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	656～657	1998年10月
103	粘板岩を用いたＣＳＧの材料特性と施工法に関する実験的検討	豊田光雄・山本重樹・前広利一・山田康陽	ダム技術	№ 147	39～48	1998年12月
104	新方式のＲＩ密度計を用いたコア材料の現場締固め特性の評価	江幡一男・豊田光雄・山本重樹・楠　貞則	平成10年度論文報告集	第55号-Ａ	638～643	1999年2月
105	フィル材料の現場締固めを評価する新しい技術	豊田光雄	平成10年度技術発表会		36～41	1999年2月
106	ＣＳＧ構造物の弾性波探査などによる変形特性	豊田光雄・楠　貞則・山本重樹	平成10年度研究発表会講演概要集		345～346	1999年3月
107	最大粒径の異なるＣＳＧのせん断強度に関する実験的検討	山本重樹・豊田光雄	平成10年度研究発表会講演概要集		347～348	1999年3月
108	ＣＳＧの耐酸性評価に関する一考察	山本重樹・楠　貞則・豊田光雄	第26回関東支部技術研究発表会講演概要集		510～511	1999年3月
109	ＣＳＧの耐凍害性評価	楠　貞則・豊田光雄	第26回関東支部技術研究発表会講演概要集		512～513	1999年3月
110	施工条件を考慮したＣＳＧのせん断強度に関する検討	豊田光雄・山本重樹・楠　貞則	平成10年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集		504～505	1999年3月
111	転圧厚さを増大させたフィルダム・コア材料の締固め・透水特性	豊田光雄・橋村　潔・瀬戸楠美・村瀬俊彦	平成10年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集		594～595	1999年3月
112	現場密度測定に関する一考察	豊田光雄・山本重樹	平成10年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集		592～593	1999年3月

研究実績　2. その他の論文･シンポジウム･雑誌など

ID	論　文　名	執筆著者	書　籍　名	巻　号	頁	発行年月
113	ＲＩ法によるフィル材料の締固め密度管理データに関する考察	豊田光雄・山本重樹・富永靖章	平成10年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集		348～349	1999年3月
114	自動走査式(ＳＲＩＤ)の測定容積と精度	豊田光雄・野村　孝	第34回地盤工学研究発表会講演集		1859～1860	1999年7月
115	コア材料の現場締固めにおける積層効果	豊田光雄・角田裕志	第34回地盤工学研究発表会講演集		1863～1864	1999年7月
116	含水比をかえた粗粒材料の盛立試験による現場締固め特性	豊田光雄・山本重樹	第34回地盤工学研究発表会講演集		1865～1866	1999年7月
117	祖粒材料における密度と沈下量に関する考察	豊田光雄・楠　貞則	第34回地盤工学研究発表会講演集		1867～1868	1999年7月
118	コア盛立材料の品質管理手法に関する一提案	豊田光雄	第34回地盤工学研究発表会講演集		1861～1862	1999年7月
119	ＣＳＧの現地混合に関する検討	山本重樹・豊田光雄	土木学会第54回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	672～673	1999年9月
120	ＣＳＧの転圧厚さと転圧層内の密度分布	豊田光雄・楠　貞則	土木学会第54回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	674～675	1999年9月
121	ＣＳＧ構造物の植生に関する一考察	豊田光雄・山内可奈子・篠　文明	土木学会第54回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	446～447	1999年9月
122	ＣＳＧ構造物の弾性波および表面波による速度分布特性	豊田光雄	土木学会第54回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	676～677	1999年9月
123	フィルダム・コア材料の転圧厚さの増大に関する実験的検討	豊田光雄・有銘伸予	土木技術資料	Vol.42 № 2	38～43	2000年2月
124	不攪乱試料を用いたＣＳＧの凍結融解試験の一考察	楠　貞則・山田康陽・豊田光雄	平成10年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集			2000年3月
125	軸ひずみ測定法の違いによるセメント改良土の動的変形特性の比較	村山邦彦・豊田光雄	第27回関東支部技術研究発表会講演概要集		496～497	2000年3月
126	原位置コアを用いたＣＳＧの動的変形特性	有銘伸予・豊田光雄	第27回関東支部技術研究発表会講演概要集		502～503	2000年3月
127	越流したＣＳＧ構造物の実態調査	今井裕一・豊田光雄・有銘伸予	第27回関東支部技術研究発表会講演概要集		504～505	2000年3月
128	越流によるＣＳＧ構造物の植生変化	山内可奈子・山田昌信・豊田光雄	第27回関東支部技術研究発表会講演概要集		520～521	2000年3月
129	フィルダム・コア材料の現場締固め特性	豊田光雄・有銘伸予	第27回関東支部技術研究発表会講演概要集		438～439	2000年3月
130	新しいＲＩ法による盛土地盤の密度測定技術	豊田光雄	検査技術		49～55	2000年4月
131	掘削残土・河床堆積物を用いたＣＳＧ構造物	豊田光雄・有銘伸予・今井裕一	土木技術資料		20～25	2000年5月
132	ＲＩ法によるコア盛立材料の品質管理	豊田光雄	第35回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	1583～1584	2000年5月
133	ＳＲＩＤによるフィル材料の締固め密度の分布特性	豊田光雄・角田裕志	第35回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	1581～1582	2000年6月
134	自動走査式ＲＩ密度計(ＳＲＩＤ)の水分補正係数	豊田光雄・野村孝	第35回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	1579～1580	2000年6月
135	簡易プラント法によるコア材混合に関する実験的検討	有銘伸予・豊田光雄	第35回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	1591～1592	2000年6月
136	砂礫・細粒材を混合したフィルダム・コア材料の力学特性	今井裕一・豊田光雄	第35回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	1589～1590	2000年6月
137	粗粒分を含むフィルダムコア材料の室内締固め・透水・強度特性	村山邦彦・川村公一・豊田光雄	第35回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	1585～1586	2000年6月
138	締固め方法の違いによるコア材料の締固め・透水性の比較	片山善郎・平原由夫・豊田光雄	第35回地盤工学研究発表会講演集	２分の２	1587～1588	2000年6月
139	ＣＳＧの単位セメント量、母材、密度の違いによる剛性率および減衰定数	今井裕一・豊田光雄	土木学会第55回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	502～503	2000年9月
140	締固めエネルギーを一定としたＣＳＧのせん断強度	有銘伸予・豊田光雄	土木学会第55回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	500～501	2000年9月

研究実績　2. その他の論文･シンポジウム･雑誌など

ID	論　文　名	執筆著者	書　籍　名	巻　号	頁	発行年月
141	圧密応力比の違いによるＣＳＧの動的変形特性と単調載荷における変形特性との比較	村山邦彦・豊田光雄	土木学会第55回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	504～505	2000年9月
142	ＣＳＧの耐久性試験に関する一考察	楠貞則・豊田光雄	土木学会第55回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	506～507	2000年9月
143	ＣＳＧ構造物に対する緑化促進試験	吉田可奈子・豊田光雄	土木学会第55回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	698～699	2000年9月
144	弾性波探査などによるＣＳＧ構造物の工学特性	豊田光雄・今井裕一	土木学会第55回年次学術講演会講演概要集	３－Ｂ	508～509	2000年9月
145	ＣＳＧ構造物の工学的性質の経時変化	芳賀敏二・豊田光雄・今井裕一・有銘伸予	ダム技術	No.169	49～60	2000年10月
146	簡易混合機を用いたコア材料の締固め・透水特性	豊田光雄・有銘伸予	第28回関東支部技術研究発表会講演概要集		810～811	2001年3月
147	CSG構造物の密度分布特性	有銘伸予・豊田光雄	第36回地盤工学研究発表会講演集	２分の1	885～886	2001年6月
148	CSG構造物の原位置せん断強度特性	豊田光雄	第36回地盤工学研究発表会講演集	２分の1	883～884	2001年6月
149	室内試験におけるCSGの施工条件を考慮したせん断強度	有銘伸予・豊田光雄	土木学会第56回年次学術講演会講演概要集	III－B	442～443	2001年10月
150	一軸圧縮試験によるCSGの圧縮強度と変形特性	豊田光雄	土木学会第56回年次学術講演会講演概要集	III－B	438～439	2001年10月
151	コア材料の簡便混合法による実験的検討	豊田光雄	ダム技術	No.185	3～15	2002年2月
152	セメント改良土の経時変化による一軸圧縮強度	町田宗久・豊田光雄	第29回関東支部技術研究発表会講演概要集		III－42	2002年3月
153	簡便法による現場透水試験の適用	豊田光雄、金子裕司	第37回地盤工学研究発表会	２分の２	1287～1288	2002年7月
154	ＣＳＧの繰返し三軸試験による変形特性	豊田光雄	土木技術資料	Vol.44	66～71	2002年8月
155	リアルタイム品質管理システムの施工事例	町田宗久、豊田光雄、金子裕司	土木学会第57回年次学術講演会講演概要集	VI－251	501～502	2002年10月
156	フィルダム・コア材料のリアルタイム品質管理システムの開発	豊田光雄	土木学会第57回年次学術講演会講演概要集	VI－250	499～500	2002年10月
157	フィルダム・コア材料のリアルタイム品質管理システムの試み	豊田光雄	ダム技術	No.195	1～13	2002年12月
158	低品質材料のせん断強度および変形特性	豊田光雄、金子裕司	第30回土木学会関東支部技術研究発表会		III-50	2003年3月