

第1章 序 論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 コンクリート構造物の衝撃解析における問題点

近年、原子力発電関連施設、重化学工業施設あるいは落石防護構造物など、高度の安全性が要求される構造物の建設にあたっては、衝撃荷重（物体の衝突によって発生する荷重および爆薬・火薬・ガス等の爆発による荷重）に対する安全性の照査と設計が重要になってきている。すなわち、土木・建築構造物の建設にあたっては、落石、土石流などの自然的要因あるいは車両・船舶・航空機や重量物等の衝突事故や爆薬・火薬・ガス等の爆発事故などに起因する人為的要因によって発生する種々の衝撃外力を受けることが予想される構造物の安全性を確保するための耐衝撃設計（防護設計とも呼ばれる）法を確立することが重要である^{1),2)}。

コンクリート構造物が衝撃力の作用を受けると、静的荷重や振動などの一般的な動的荷重を受ける場合と異なり、①構成材料であるコンクリートや鉄筋は、ひずみ速度効果により材料特性が変化すること、②載荷速度が大きくなると、部材には全体破壊モード（全体曲げ破壊、パンチングシアによる押し抜きせん断破壊など）ではなく局部的な破壊モード（表面破壊、貫入、裏面剥離、貫通など）が卓越すること、③応力波の発生による、伝播・反射・重複による引張・圧縮の破壊現象が生じること、など衝撃特有の挙動が現れることが知られている。したがって、衝撃外力（または、衝撃荷重）を受けるコンクリート構造物の耐衝撃性を調べ防護設計を確立するためには、構造物が終局状態に至るまでの破壊挙動およびそのメカニズムを実験的・解析的に検討することが必要となる。

コンピュータの飛躍的な進歩や数値計算工学の発展により、衝撃荷重の作用を受ける構造物の破壊挙動や破壊メカニズムを解明するための衝撃解析コードがこれまで数多く開発されている。これらは、DYNA-3D, LS-DYNA, AUTODYN-3D等の有限要素法に基づくもの、有限差分法、個別要素法によるものが主流である。いずれの衝撃解析コードにおいても、コンクリートや鉄筋の材料物性には、単純引張や単純圧縮など1軸応力下における材料試験の結果に基づいてモデル化した簡便な構成則が一般的に用いられている。また、材料物性モデルとしては、①静的試験から得られた結果だけに基づくモデル、あるいは②①のモデルに、ひずみ速度効果による強度の増加だけを考慮したモデルが一般に用いられており、③最大強度以降のひずみ軟化特性までも考慮したモデルは、極めて少ない。

Aizawaら³⁾は、既存の衝撃解析コードによる解析結果の信頼性を調べるための検討

を行っている。検討にあたっては、代表的な 12 種類の解析コードを用いて鋼製キャスク落下に対する同一例題を解析し、得られた結果の比較とばらつきを調べている。例えば、鋼製キャスク頭部の最大沈下量の大きさは、最大約 38%の相違が生じている。この検討では、どの解析コードが実現象に近い結果を与えるかということではなく、各種解析コードにはこの程度のばらつきが鋼材に対しても認められるということを描している。この結果をみると、金属材料よりも複雑な非線形挙動を示すコンクリート材料を対象とした比較解析を同様に行えば、そのばらつきはもっと大きくなることは容易に予想できる。したがって、衝撃荷重下の構造物の挙動を調べる上で、精度と信頼性の高い解析結果を得るためには、高ひずみ速度、多軸・複合応力など、より実現象に近い条件下でのコンクリートの材料特性を定性的・定量的に把握することが重要となる。

1. 1. 2 動的荷重下のコンクリートの材料特性に関する既往の研究

一軸かつ静的荷重下のコンクリート特性（静力学特性）は、種々の荷重を受けるコンクリート構造物の挙動を解析する上での基本特性であることは間違いない。しかしながら実際構造物は、地震に代表される動的荷重や事故時の衝撃荷重など載荷速度が大きい荷重を受けることが多く、また構造部材内の材料は複合荷重の作用や鉄筋等による拘束のため、複雑な多軸応力状態にあると考えられる。

この観点から、一軸載荷を受けるコンクリートの動力学特性に関してこれまで数多くの実験研究が行われている^{4)~22)}。この成果によれば、以下の事項が明らかにされている。

(1) 一軸応力下のコンクリートの動力学特性

1) ひずみ速度の影響

a. 圧縮特性に及ぼす影響

ひずみ速度がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を初めて明らかにしたのは Abrams (1907 年)⁴⁾であると言われている。その後、多くの研究者によってひずみ速度と一軸圧縮特性の関係が調べられている。

a) 圧縮強度に及ぼす影響

ひずみ速度の増大にともなって、圧縮強度は増加することが報告されている。

b) 圧縮強度時のひずみに及ぼす影響

圧縮強度時のひずみとひずみ速度の関係については、研究者によって異なる結果が報告されている。Takeda ら⁷⁾は、ひずみ速度が増大するにしたがって圧縮強度時のひずみは徐々に増加することを報告している。また Cowell⁸⁾は、ひずみ速度によらず一定値を示すことを述べている。一方、Dilger ら¹⁰⁾は、ひずみ速度

の増大とともに減少すると報告している。

c) 弾性係数に及ぼす影響

Watstein⁹⁾を始めとする多くの研究者によって、弾性係数はひずみ速度の増大とともに増加することが報告されている。

b. 引張特性に及ぼす影響

動的圧縮特性に関する研究と比較すると、急速一軸引張载荷を受けるコンクリートの力学特性に関する実験的研究は極めて少ない。例えば、畑野²³⁾、竹田ら²⁴⁾、Zielinskiら²⁵⁾による研究があるにすぎない。これは、コンクリートの急速一軸引張载荷試験を行う場合には、①供試体の作製や引張治具の取り付け方法および応力やひずみの計測方法等が非常に困難であること、②コンクリートの引張強度が圧縮強度の約 1/10 程度であり、極めて脆性的なひび割れ・破壊挙動を示すため通常の設計では引張特性については考慮されないこと、などの理由によると考えられる。

畑野は、コンクリートおよびモルタルの供試体に最大ひずみ速度 5×10^{-3} (1/sec) までの一軸引張载荷試験を行っている。その結果から、ひずみ速度の増大にともなって引張強度は増加するが、その時のひずみはひずみ速度によらず一定であることを報告している。

Zielinski らは、SHPB 試験装置を用いて水セメント比や最大粗骨材寸法および供試体の含水量をパラメータとした一軸引張試験を行い、弾性係数、引張強度ならびにその時のひずみの大きさはひずみ速度の増大にともなって増加し、引張強度は応力速度が 3×10^4 (N/mm²/sec) で静的強度の 2 倍程度に増加することを報告している。また、ひずみ速度が最大引張応力の大きさに及ぼす影響は、最大粗骨材寸法や水セメント比が大きくなるほど小さくなる傾向を示すことが示されている。

Suaris ら²⁶⁾は、既往の急速一軸圧縮・引張载荷試験の結果から、応力速度あるいはひずみ速度に対する依存性はコンクリートの引張強度の方が圧縮強度に比べて顕著であることを報告している。

2) 材料特性に及ぼす各種要因

既往の研究報告によれば、ひずみ速度が材料特性に及ぼす効果について各研究者によって報告された結果には大きなばらつき、あるいは異なった見解がある。この原因としては、試験に用いられたコンクリート供試体の形状・寸法、水セメント比、材齢、養生方法、含水量等の相違による影響が考えられる。

a. 形状・寸法

静的载荷試験においては、コンクリートの圧縮強度や引張強度は供試体の形状・寸法による影響が大きいことが知られている^{27), 28)}。しかしながら、急速载荷試験においてコンクリート供試体の形状・寸法の違いが、コンクリートの力学特性に及ぼす影響について検討した研究はほとんど行われていない。

b. 水セメント比

Atchely ら¹²⁾は、最大粗骨材寸法が 19mm で水セメント比を 40, 61 および 90% と変えた円柱供試体（直径 152mm, 高さ 305mm）に対して急速載荷試験を行い、静的圧縮強度に対する動的強度（急速載荷時の圧縮強度）の増加率とひずみ速度の関係は水セメント比の相違によらず、ひずみ速度が 3.5×10^0 (1/sec) のとき、圧縮強度の増加率は 1.5~1.6 程度であることを報告している。この結果は、Watstein⁹⁾、勝田¹³⁾、高橋ら²²⁾による報告と同様である。

一方 Cowell⁸⁾は、最大粗骨材寸法が 19mm で水セメント比が 48 と 76% の円柱供試体（直径 76mm, 高さ 229mm）を用いて急速載荷試験を行い、ひずみ速度が圧縮強度に及ぼす影響は水セメント比が大きいほど顕著となることを示している。この結果は、Hughes ら¹⁴⁾、Evans¹⁵⁾による報告と同様である。

c. 材 齢

Kaplan¹⁹⁾は、水中養生を行った水セメント比 53%、材齢 3, 7 および 36 日の 3 種類のコンクリート供試体に対して急速一軸載荷試験を行っている。この結果によれば、圧縮強度は、材齢 36 日のコンクリート供試体では応力速度の対数値にほぼ比例して増加すること、それより若材齢では応力速度が 1 (N/mm²/sec) 程度以降で増加が大きくなることが示されている。

d. 養生条件

勝田¹³⁾は、気乾養生と湿潤養生した 2 種類のコンクリート供試体に対する急速載荷試験を行い、ひずみ速度が圧縮強度に及ぼす影響は湿潤養生した供試体の方に大きく現れることを報告している。

e. 含水量

白井ら²⁰⁾は、油圧式急速載荷装置および SHPB 試験装置を用いて、標準養生した供試体と 105℃ の乾燥炉で乾燥させた供試体に対してひずみ速度 ($10^{-1} \sim 5 \times 10^1$ 1/sec) と圧縮強度の関係を調べている。その結果から、標準養生した湿潤供試体ではひずみ速度の増大にともなって圧縮強度が増加するのに対して、乾燥させた供試体の場合にはひずみ速度が 10^0 (1/sec) までは圧縮強度の増加の程度は小さい、ことを報告している。

(2) 三軸応力下のコンクリートの動力学特性

静的載荷に対する多軸応力下のコンクリートの最大応力は応力状態に依存し、その時の応力状態を表す点の集合は応力空間で破壊曲面を形成することが知られている。また最近の研究は、破壊曲面を応力状態の関数で表す破壊基準を定式化する試みが多い^{29)~31)}。しかしながら、三軸応力下のコンクリートの動力学特性に関する実験的研究は、特殊な試験装置を必要とするためあまり行われていない。山口ら³²⁾は、圧縮強度 $f_c = 24.5$ N/mm² の普通強度コンクリート供試体を用いて、最大ひずみ速度が

2.5×10⁻¹(1/sec)までの急速三軸圧縮載荷試験を行っている。その結果に基づいて、多軸応力下の破壊曲面はひずみ速度が大きくなるにしたがって等方的に拡大することを示し、等方性非線形弾性型の構成則を提示している。非線形弾性型の定式化はひずみ速度の影響を考慮することが比較的容易であり、かつ、有限要素解析法への導入も容易である。しかしながら、山口らの研究においては、①対象としたコンクリートの強度が普通強度の1種類であること、②載荷速度が大きくないこと、③軟化挙動を考慮することが困難であること、など汎用性に対する問題がある。

したがって、三軸応力下におけるコンクリートの動力学特性は未だ十分に把握されているとは言えない。このため、三軸応力下におけるコンクリートの動力学特性は静的載荷で得られた破壊曲面に一軸応力下における圧縮および引張強度の増加率とひずみ速度の関係を考慮することによって仮定・評価しているのが現状である。しかしながら、より精度の高い三軸応力下における動的破壊基準を定めるためには、ひずみ速度が圧縮および引張特性に及ぼす影響を同時に評価すべきであり、それぞれ単独の試験で得られた一軸応力下における圧縮および引張強度の増加率を用いることの是非について十分検討する必要がある。

また、衝撃荷重を受けるコンクリート構造物が終局状態に至るまでの破壊挙動を解析的に検討する上では、三軸応力下におけるコンクリートの動力学特性を適切にモデル化した汎用性のある構成則を開発することが望まれている。

(3) コンクリートの動的軟化特性

一般に、コンクリートは引張および圧縮のそれぞれの載荷に対して、最大荷重に達した後も載荷を継続すると、変形は増加するが荷重が低下する軟化現象が生じることが知られている。静的載荷を受けるコンクリートの軟化特性については、ここ二十数年の間、重要な研究テーマとして研究が行われ^{33)~46)}、成果が蓄積されている。例えば、道路橋示方書の耐震設計編では、橋脚の保有水平耐力の評価に最大圧縮応力以降の軟化領域における応力～ひずみ関係を考慮する⁴⁷⁾ようになっており、その成果が活かされている。

衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の安全性を解析手法を用いて照査する場合、解析用のモデルは、現状では、①最大応力以降、応力を保持したままひずみが増大する^{48), 49)}、②最大応力以降、ひずみの増大はなく応力はゼロとなる^{54), 55)}、③最大応力以降、負の傾きを有する直線仮定した軟化特性^{51)~53)}、が用いられている。しかしながら、解析の対象構造物や解析目的に応じて、実際の現象をより適切に表現したコンクリートの動的軟化挙動を用いることが重要であると考えられる。

実際、ひずみ速度が材料特性に及ぼす影響を調べるための急速載荷試験を行っても、実験装置や治具の制約あるいは計測法において最大応力以降の軟化挙動を計測することは極めて困難である。このため、既往の解析的研究では、コンクリートの動的軟化

特性を当初から無視するか、特性を表現する適当な仮定式を用いているのが現状である^{56), 57)}。

1. 2 本研究の目的および論文の構成・概要

1. 2. 1 本研究の目的

本研究は、衝撃荷重を受けるコンクリート構造物の耐衝撃性・安全性を照査するために、衝撃解析コード用のより精度の高いコンクリート材料物性モデルを構築することを目的としている。このため、コンクリートの基本的特性として必要な引張および圧縮特性において、①主として一軸および三軸応力下でのひずみ速度が各特性に及ぼす影響ならびに最大応力以降の軟化挙動について実験的に調べる、②各種実験で得られた結果に基づいて各特性を定式化する、ことに力点を置いている。

本研究で検討の対象とするコンクリートの基本的特性およびその内容は、以下の通りである。

(1) 動的一軸引張特性

静的載荷におけるコンクリートの引張特性は、試験に用いる供試体の寸法の影響を受けることが指摘されている。そこでまず本研究では、動的試験における供試体の寸法効果についても確認する目的から、高さ寸法が異なる円柱供試体を用いた動的載荷試験を行う。また、引張軟化挙動を計測するために新たに考案した試験体を用いて、載荷速度をパラメータとする急速一軸引張試験を行う。試験結果に基づいて、供試体寸法がコンクリートの動的一軸引張特性に及ぼす影響、載荷速度が引張軟化挙動に及ぼす影響について調べ、コンクリートの動的一軸引張構成則を定式化する。

(2) 動的一軸圧縮特性

まず、急速一軸圧縮載荷を受けるコンクリートの圧縮軟化挙動を計測するための手法について検討する。次に、圧縮軟化挙動に影響を及ぼすと考えられる供試体の長さ寸法、供試体の材端の拘束条件および載荷速度の3つをパラメータとする急速一軸圧縮載荷試験を行い、各パラメータが軟化領域を含む応力～ひずみ関係に及ぼす影響について考察するとともに、応力～ひずみ関係を定式化する。

(3) 動的三軸圧縮特性

本研究では、動的三軸圧縮特性を評価する目的から、既存の急速載荷装置に組み込んで使用できる三軸圧縮装置を新たに開発した。これを用いた急速三軸圧縮試験では、コンクリート供試体の静的圧縮強度、供試体の側面に作用させる側圧の大きさ、および載荷速度の3つをパラメータとした試験を行っている。得られた結果に対して、これらのパラメータが三軸応力下のコンクリートの破壊基準に及ぼす影響を定性的・定

量的に考察し、動的破壊基準の定式化を行う。さらに、等価一軸ひずみの概念を用いて、ひずみ速度の影響を考慮した増分型の直交異方性構成モデルの定式化を行う。

1. 2. 2 論文の構成と概要

本論文は、7章で構成されている。第1章は『序論』で、本研究の背景と現状の問題点を述べている。

第2章『コンクリート材料の動的引張・圧縮特性評価のための衝撃および急速載荷試験法』では、衝撃載荷と急速載荷の相違について明らかにするとともに、材料に高ひずみ速度効果を与えるための動的試験法と載荷方式、各種試験装置の概要および急速載荷装置の作動原理について概説している。

第3章『コンクリートの動的一軸引張特性に及ぼす載荷速度と供試体寸法の影響』では、既往の多くの静的一軸引張試験結果において指摘されている供試体の寸法効果を動的試験においても確認する必要性から、用いるコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張強度まで（プレピーク領域）の動的特性に及ぼす影響について、急速一軸引張試験の結果に基づき定性的・定量的な考察を行っている。さらに、ひずみ速度とコンクリートの引張強度の増加率、引張強度時のひずみの増加率および弾性係数の増加率等の関係を与える評価式を定式化している。

第4章『コンクリートの動的引張軟化挙動の計測とその定量的評価』では、まず、従来困難であったコンクリートの動的引張軟化挙動を計測するための試験方法について検討を行っている。すなわち、両端が剛に結合されたコンクリートと鋼材から成る合成構造の供試体を考案している。これを用いることにより、コンクリートの動的引張軟化挙動の計測が可能となった。本供試体を用いた試験方法による結果に対して、載荷速度（ひずみ速度）が引張軟化挙動に及ぼす影響を考察し、ひずみ速度効果を考慮したコンクリートの引張軟化則を定式化している。

第5章『コンクリートの一軸圧縮特性に及ぼすひずみ速度の影響』では、ひずみ速度がコンクリートの最大圧縮応力以降（ポストピーク）の軟化挙動に及ぼす影響を調べるため、急速一軸圧縮試験を行っている。従来から、ポストピークにおける挙動を実験計測することは極めて困難であった。ここでは、アクリル棒を用いて行う計測法を新しく提案することにより、軟化挙動の計測が可能であることを示している。試験では、コンクリート円柱供試体の長さ寸法、供試体材端の拘束条件および載荷速度をパラメータとし、これらがプレピークにおける圧縮特性値、ポストピークにおけるひずみの局所化と軟化挙動に及ぼす影響について定性的・定量的な検討を行っている。さらに、その結果に基づいて、終局状態までのコンクリートの圧縮応力～平均ひずみ関係を定式化している。

第6章『高ひずみ速度・三軸高応力下におけるコンクリートの圧縮特性と破壊基準』では、載荷速度（ひずみ速度）が多軸応力下におけるコンクリートの力学性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、急速三軸圧縮載荷試験を行っている。この試験を行うためには、荷重を高速で載荷できる急速載荷装置および供試体に高圧三軸応力状態を負荷する装置が必要である。本研究では、油圧による軸対称三軸圧縮載荷方式の装置を開発し、これを既存の急速載荷装置に組み込むことにより高速・高圧三軸圧縮載荷試験を可能とした。試験では、コンクリート円柱供試体の静的圧縮強度、側圧および載荷速度の3つをパラメータとし、主として載荷速度（ひずみ速度）が三軸応力下のコンクリートの破壊曲面に及ぼす影響を調べている。また、試験結果に基づいて、三軸応力下におけるコンクリートの動的破壊基準の定式化を行っている。さらに、等価一軸ひずみの概念に基づいてひずみ速度の影響を考慮した増分型の直交異方性構成モデルの定式化を行っている。

第7章『結論』では、本研究によって得られた成果を総括し、今後さらに検討すべき課題について言及している。

【第1章の参考文献】

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，1993年12月。
- 2) 土木学会：ロックシェッドの耐衝撃設計，構造工学シリーズ8，1998年11月。
- 3) Aizawa, T., Ohtubo, H. and Yagawa, G. : Round robin benchmark tests of impact transient calculations of shipping cask vessels: in Impact effects of fast transient loadings, Ammann et al.(eds.), Balkema, Rotterdam, pp.287-316, 1988.
- 4) Abrams, D. A. : Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete, ASTM, Vol.17, Part II, pp.364-365, 1917.
- 5) Perry, S. H. and Bischoff, P. H. : Impact behavior of plain concrete loaded in uniaxial compression, Journal of Engineering Mechanics, Vol.121, No.6, pp.685-693, June, 1995.
- 6) Bischoff, P. H. and Perry, S. H. : Compressive behaviour of concrete at high strain rates, Materials and Structures, pp.425-450, 24, 1991.
- 7) Takeda, J. and Komoto, H. : Rate effects on crack propagation in concrete and brittle fracture of concrete structures, Proc. of The 6th Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, July, 1991.
- 8) Cowell, W. L. : Dynamic properties of plain Portland cement concrete, Technical Report No.R447, US Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, 1966.
- 9) Watstein, D. : Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete, ACI J., V.49, No.8, pp.729-744, Apr., 1953.
- 10) Dilger, W. H., Koch, R. and Kowalczyk, R. : Ductility of plain and confined concrete under different strain rates, ACI J., V.81, pp.73-81, Jan.-Feb., 1984.
- 11) Tang, T., Malvern, L. E. and Jenkins, D. A. : Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete, Journal of Engineering Mechanics, Vol.118, No.1, pp.108-124, Jan., 1992.
- 12) Atchley, B. L. and Furr, H. L. : Strength and energy absorption capabilities of plain concrete under dynamic and static loadings, ACI J., Vol.64, pp.745-756, Nov., 1967.
- 13) 勝田千利：高速圧縮荷重に対するコンクリートの力学的性質（第1報），建築学会論文集，第29号，pp.268-274，昭和18年5月。
- 14) Hughes, B. P. and Gregory, R. : Concrete subjected to high rates of loading in compression, Magazine of Concrete Research, Vol.24, No.78, pp.25-36, March 1972.
- 15) Evans, R. H. : Effect of rate of loading on the mechanical properties of some materials, The Institution of Civil Engineers, V.18, No.7-8, pp.296-306, June 1942.
- 16) Sparks, P. R. and Menzies, J. B. : The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.83, pp.73-80, June, 1973.
- 17) Spooner D. C. : Stress-strain-time relationships for concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.23, No.75-76, pp.127-131, June-September 1971.
- 18) Dhir, R. K. and Sangha, C. M. : A study of the relationships between time, strength, deformation and fracture of plain concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.24, No.81, pp.197-208, December 1972.
- 19) Kaplan, S. A. : Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.32, No.111, pp.79-88, June, 1980.

- 20) 白井孝治, 島村和夫, 實晃司, 伊藤千浩, 大沼博志: コンクリート強度のひずみ速度依存性の定式化 - ホプキンソン棒法式衝撃試験方法の適用と圧縮強度試験結果 -, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1793-1804, 1998.3.
- 21) Soroushian, P., Choi, K. and Alhamad, A. : Dynamic constitutive behavior of concrete, ACI J., Vol.83, pp.251-259, Mar.-Apr., 1986.
- 22) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1567-1580, 1991.3.
- 23) 畑野 正: 衝撃引張荷重によるコンクリートの挙動, 土木学会論文集, 第73号, pp.28 - 34, 1961年3月.
- 24) 竹田仁一, 立川博之: 直接引張法によるコンクリート高速引張実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.73 - 74, 1970年9月.
- 25) Zielinski, A. J., Reinhardt, H. W. and Kormeling, H. A. : Experiments on concrete under uniaxial impact tensile loading, *Materiaux et Constructions*, Vol.14, No.80, pp.103 - 112, 1981.
- 26) Suaris, W. and Shah, S. P. : Constitutive model for dynamic loading of concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.111, No.3, pp.563 - 576, March, 1985.
- 27) Spetla, Z. and Kadlecik, V. : Effect of slenderness on the direct tensile strength of concrete cylinders and prisms, *RILEM Bulletin*, No.33, new series, pp.403-412, December, 1966.
- 28) 破壊力学の応用研究委員会: コンクリート構造への破壊力学の応用に関する研究と技術の現状, 委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993.10.
- 29) Chen, W. F. : *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill (色部 誠・河角 誠・安達 洋監訳) コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985.
- 30) 大沼博志・青柳征夫: 三軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度特性, 電力中央研究所報告, 研究報告 381021, 昭和56年12月.
- 31) Kotsovos, M. D. : A mathematical description of the strength properties of concrete under generalized stress, *Magazine of Concrete Research*, Vol.31, No.108, September, 1979, pp.151-158.
- 32) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高压3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その2 高速載荷, 日本建築学会構造系論文報告集, 第396号, pp.50-59, 1989年2月.
- 33) Jansen, D. C. and Shah S. P. : Effect of length on compressive strain softening of concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, pp.25-35, Jan. 1997.
- 34) Choi, S., Thienel, K. -C. and Shah, S. P. : Strain softening of compression under different end constraints, *Magazine of Concrete Research*, 48, No.175, pp.103-115, June, 1996.
- 35) Torrenti, J. M., Benaija, E. H. and Boulay, C. : Influence of boundary conditions on strain softening in concrete compression test, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.119, No.12, pp.2369-2384, Dec., 1993.
- 36) Kotsovos M. D. : Effect of testing techniques on the post-ultimate behavior of concrete in compression, *Materials and Structures*, Vol.16, pp.3-12, 1983.
- 37) Bazant, Z. P. : Identification of strain-softening constitutive relation from uniaxial tests by series coupling model for localization, *Cement and Concrete Research*, Vol.19, pp.973-977, 1989.
- 38) 小阪義夫, 谷川恭雄, 畑中重光: 低側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動, *材料*, Vol.34, No.376, pp.19-25, 1985年.
- 39) 小柳洽, 六郷恵哲, 内田裕市: コンクリートの圧縮靱性, *セメント技術年報*, 37,

- pp.268-271, 1983年.
- 40) Van Mier, J. G. M. : *Fracture Processes of Concrete*, CRC Press, pp.178-189
 - 41) Ahmad, S. H. and Shah, S. P. : *Behavior of hoop confined concrete under high strain rates*, ACI J., V.82, pp.634-647, Sep.-Oct., 1985.
 - 42) 平井圭, 中村光, 檜貝勇 : *コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究*, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.339-344, 1995年.
 - 43) Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P. E. : *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*, Cement and Concrete Research, Vol.6, pp.773-782, 1976.
 - 44) 野村希晶・三橋博三 : *破壊エネルギー試験結果を用いたコンクリートの引張軟化則簡易決定法*, コンクリート工学論文集, Vol.7, No.2, 1996.7, pp.119-126.
 - 45) 橋高義典・上村克郎・中村成春 : *コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析*, 日本建築学会構造系論文報告集, 第453号, 1993.11, pp.15-25.
 - 46) 中村成春・橋高義典・三橋博三・内田裕市 : *コンクリートの引張軟化特性の標準試験方法に関する基礎的検討*, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.1, 1999.1, pp.151-164.
 - 47) 日本道路協会 : *道路橋示方書耐震設計編*
 - 48) 岸 徳光・三上 浩・松岡健一・安藤智啓 : *静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析*, 土木学会論文集, No.619, I -47, pp.215-233, 1999年4月.
 - 49) Tsubota, H., Mizuno, J., Kusama, K. and Momma, T. : *Experimental studies on the inelastic behavior of reinforced concrete panels under high-speed loading Part 1. Effects of dynamic loading*, Structures Under Shock and Impact V, Jones et al.(eds.), Thessaloniki, Greece, pp.743 -758, 1998.
 - 50) 宮本文穂・三戸雅文・中村秀明 : *せん断補強筋を用いた RC 版の 3 次元衝撃破壊挙動解析と耐衝撃性評価*, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1547-1554, 1997年3月.
 - 51) 山口 弘・藤本一男 : *鉄筋コンクリート版の衝撃応答に及ぼすひずみ速度効果*, 日本建築学会構造系論文報告集, 第406号, pp.25-35, 1989年12月.
 - 52) 高橋芳彦・大野友則・太田俊昭・日野伸一 : *高速载荷を受ける鉄筋コンクリートはりの終局限界変形量の推定法*, 土木学会論文集, No.432/ I -16, pp.99-108, 1991年7月.
 - 53) Johnson, G. R., Beissel, S. R., Holmquist, T. J. and Frew, D. J. : *Computed radial stresses in a concrete target penetrated by a steel projectile*, Structures Under Shock and Impact V, Jones et al.(eds.), Thessaloniki, Greece, pp.793 -806, 1998.
 - 54) 宮本文穂・三戸雅文・北山 篤 : *積層コンクリート版の衝撃特性と耐衝撃性の評価*, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.1277-1288, 1995年3月.
 - 55) 大沼博志・伊藤千浩・佐藤宏一・高野 博 : *鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性および有限要素法による解析*, 電力中央研究所報告 384027, 1985年4月.
 - 56) 井元勝慶 : *原子力施設鉄筋コンクリート構造物の非線形挙動と衝撃挙動に関する研究*, 名古屋大学学位論文, 1994.12.
 - 57) Eibl, J. and Schmidt-Hurtienne B. : *A strain history dependent model for concrete*, Structures Under Shock and Impact V, Jones et al.(eds.), Thessaloniki, Greece, pp.649-660, 1998.