

第7章 結 論

7. 1 はじめに

衝撃力の作用を受けるコンクリート構造物（例えば、原子力発電関連施設、重化学工業施設および落石防護構造物など）の耐衝撃性や安全性を照査するために、衝撃実験や解析が行われる。一般に、物体の衝突や爆破によって生じる衝撃荷重は載荷速度が大きく、コンクリート構造物を構成する構造部材の材料に高ひずみ速度を生じさせることが知られている。また、材料内部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。このように、衝撃力の作用下で材料は複雑な挙動を示すことが既知の事実であっても、現行の構造物の衝撃解析においては、材料物性モデルとくにコンクリート材料は静的一軸応力下の実験結果に基づいた単純なモデルが用いられているのが実情である。このため、解析結果に対する精度や妥当性についての信頼性が疑問視されている。一方、コンクリートの物性に関する分野では、従来からひずみ速度が材料特性に及ぼす影響についての研究が数多く実施されているが、主として一軸応力（引張あるいは圧縮）下における動力学特性に関するものがほとんどである。したがって、高ひずみ速度・三軸応力下でのコンクリートの材料特性に関する研究例は極めて少なく、不明な事項が多く残されている。

そこで本研究では、コンクリートの動力学特性に関してこれまで報告された研究成果において、未解明あるいは不十分と考えられるコンクリートの特性（動的一軸引張、動的一軸圧縮および動的三軸圧縮特性）について基本的な観点から調べるとともに、解析精度の向上を図るために高ひずみ速度・三軸応力下におけるコンクリートの材料モデルの構築について検討を行ったものである。

7. 2 コンクリートの動力学特性に関する研究成果の要約

7. 2. 1 コンクリートの一軸引張特性に及ぼすひずみ速度と供試体寸法の影響

- (1) 動的一軸引張試験において載荷速度が増大すると、コンクリート供試体の破壊は、静的載荷を受ける場合の破壊モードとは大きく異なる。すなわち、① 載荷速度が大きくなると供試体の破断面に存在する骨材自体が破断する、および② 供試体に生じる破断面は一つではない。
- (2) コンクリート円柱供試体の高さ寸法は、ひずみ速度の相違によって引張強度および引張強度時におけるひずみの大きさに影響を及ぼす。ただし、弾性係数の大きさに及ぼす供試体寸法の影響は無視できる。

- (3) コンクリート円柱供試体の高さ (H) と直径 (D) の比 (H/D) が $H/D \geq 2$ では、引張強度および引張強度時のひずみの大きさはほとんど変化しない。
- (4) 急速載荷 (動的) 時のコンクリートの引張強度・引張強度時におけるひずみおよび弾性係数の増加率 (= 動的/静的) は、供試体寸法によらずひずみ速度のみに依存する。

7. 2. 2 コンクリートの引張軟化挙動に及ぼすひずみ速度の影響

- (1) 従来困難とされてい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として、両端を剛に結合したコンクリートと鋼材から成る合成構造の供試体を提案した。
- (2) ひずみ速度の大きさは、コンクリートの引張軟化挙動に影響を及ぼす。ひずみ速度が大きくなるにつれて破壊エネルギーは増大するが、軟化曲線の負勾配が増加することにより脆性的な破壊が生じる傾向がある。この傾向は、コンクリート材料が有する弾性エネルギーと破壊エネルギーの比で定義される脆性化指標を用いることにより評価することができる。

7. 2. 3 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

- (1) コンクリートの動的圧縮強度、その時のひずみおよび初期弾性係数の増加・変化率 (静的載荷時の各値に対する割合) は、それぞれひずみ速度のみに依存する。
- (2) コンクリートが急速一軸圧縮載荷を受ける場合、ひずみの局所化が供試体の特定の領域に生じる。また、その発生は最大応力時に起きる。局所化した領域におけるひずみ分布のモードは、供試体端面の拘束条件の違いによって大きく異なる。
- (3) コンクリートの圧縮軟化挙動は、載荷速度 (ひずみ速度)、供試体の長さ、端面の拘束条件による影響を強く受ける。また、ひずみ速度の増大とともに圧縮軟化勾配は大きくなり、脆性的になる。
- (4) ポストピークにおける圧縮破壊エネルギーは、材端の拘束条件が同じであれば供試体の長さにはよらず、ひずみ速度の増加とともに増大する。
- (5) 供試体長さが異なる場合の応力～ひずみ関係は、供試体に現れる非破壊領域と破壊領域におけるそれぞれの挙動を重ね合わせるにより求めることができる。

7. 2. 4 コンクリートの三軸圧縮特性に及ぼすひずみ速度の影響

- (1) 供試体の破壊は、側圧の大きさが増大するにしたがって、斜めひび割れと割裂の

混合型モードからせん断滑りモードへ、そして圧壊型モードへと変化する。混合型モードおよびせん断滑りモードで破壊した供試体においては、最大圧縮応力以降に軟化現象が生じる。圧壊型モードによる破壊では、軟化現象は生じない。

- (2) せん断滑りモードにおける滑り面の角度は、コンクリートの圧縮強度および載荷速度の大きさによらずほぼ一定値である。ただし、高強度コンクリートでは、高側圧下において載荷速度の影響が認められる。
- (3) 三軸応力状態で高速載荷の場合には、載荷速度および側圧の大きさによって最大圧縮応力の値が変動する。
- (4) 静的破壊基準の一つである Leon モデルを準用し、これに任意のひずみ速度に対応する一軸圧縮強度点および一軸引張強度点を必ず通るという条件を与えることにより、動的破壊基準を定義した。
- (5) 有限要素解析法に容易に取り込むことができる等価一軸ひずみの概念に基づくひずみ速度効果を考慮した直交異方性構成モデルを提案した。本研究で提案した直交異方性構成モデルを用いた解析結果と試験結果との比較を行った結果、本提案モデルが急速三軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力～ひずみ関係を良好な精度で算定できることが実証された。

7. 3 総 括

従来、ひずみ速度が大きくなるに従い一軸圧縮強度や一軸引張強度が増加するという結果から、多軸応力下においても、ひずみ速度が大きくなるに従い最大応力は増加する、つまり破壊曲面は拡大すると考えられてきた。しかしながら、実際に急速三軸圧縮載荷試験を行った結果、ひずみ速度が三軸応力下における最大応力に及ぼす影響は複雑で応力状態によって大きく異なり、必ずしも最大応力を増加させるとは限らないことが分かった。すなわち、一軸応力下における圧縮強度や引張強度にひずみ速度が及ぼす影響は、三軸応力下の破壊曲面にひずみ速度が及ぼす影響の単なる一面を捉えているに過ぎないことが明らかとなった。したがって、コンクリートの力学的特性にひずみ速度が及ぼす影響は三軸応力下で統一的に評価することが重要であると言える。

衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリート構造物あるいは鉄筋コンクリート部材の挙動を解明する上で、解析結果に対する評価を困難にする大きな要因がコンクリート材料の多軸応力下における動力学特性であることは確かである。したがって、衝撃荷重を受けるコンクリート構造物に対して、終局状態に至るまでの挙動を解析的に検討するには、高ひずみ速度・多軸高応力下におけるコンクリートの材料特性をできる限り忠実に把握するとともに、その特性を適切にモデル化した精度および信頼性の高い構成モ

デルを構築することが不可欠である。このような観点から、ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの構成モデルを構築するための研究は今後も重要な課題である。すなわち、以下の事項についての継続研究が必要である。

- (1) 任意の荷経路に対する急速三軸荷実験によるひずみ速度が破壊曲面に及ぼす影響の把握
- (2) 実験による多軸応力状態での動的軟化特性の把握
- (3) 高ひずみ速度・三軸高応力下におけるコンクリートの破壊メカニズムを説明するための理論モデルの構築
- (4) 構築された材料モデルの妥当性に関する検証

などである。

本研究で提示したひずみ速度効果を考慮した動的な破壊基準や構成則の適用性や精度を調べるためには、提案した構成モデルを解析コードに導入して衝撃解析を行う必要がある。この点で、衝撃解析用としての本提案モデルの妥当性を示すまでには至らなかった。しかしながら、高ひずみ速度・三軸高応力下におけるコンクリート材料のモデル化の構築を目的として行った本研究の過程において、新しく提案した実験・計測手法、コンクリートの動力学特性に関する事項およびモデル化の考え方などが、コンクリート構造物の衝撃問題を実験的・解析的に検討する上での一助になれば幸いである。