

第2章 圧縮下のコンクリートの構成モデルとその数値解析への応用

2.1 はじめに

鉄筋コンクリート（RC）構造物の有限要素解析において重要な問題の一つは圧縮力を受けるコンクリート材料の力学的挙動（破壊の力学的挙動）に関するモデル化である。前章では、1軸応力状態下での硬化コンクリートの圧縮特性について述べたが、本章では圧縮下での構成関係およびモデル化について言及する。以下、1) 破壊特性ならびに構成モデル、2) 弾塑性理論によるひずみ軟化型構成モデルの定式化、さらに、3) 軟化型構成モデルの要素レベルならびに構造レベルにおける予測性能について紹介する。

2.2 圧縮構成モデル

2.2.1 破壊とひずみ軟化

コンクリート材料は摩擦材料であるため、拘束圧が大きい応力状態下では、その圧縮強度（破壊強度）は増加する。これまでに多くの研究者らによる各種3軸実験〔例えば、2.1-2.3〕から破壊強度のデータが収集されてきており、それらのデータを基に破壊曲線または破壊曲面が構築されている。一例として、3軸圧縮実験より得られる破壊強度を、1軸圧縮強度 f'_c で無次元化した応力不変量空間 $(I_1/f'_c - \sqrt{J_2}/f'_c)$ にプロットしたものを

図-2.2.1に示す。ここで、 I_1 および J_2 は、それぞれ応力テンソルの第1次不変量および偏差応力テンソルの第2次不変量を意味する。図中のシンボルは3軸圧縮実験および3軸引張実験による破壊点を、また線（実線および破線）は構成モデルによって与えられる破壊線を示している。一般に、この破壊曲面に達した後、コンクリートは軟化挙動を呈することになる。

第1章で紹介した、単調載荷ならびに繰返し載荷下での圧縮特性、破壊強度特性、および軟化挙動を多軸応力空間でいかに合理的にモデル化するかということが鉄筋コンクリート（RC）構造の解析を行う上で重要となる。また、このひずみ軟化挙動はコンクリート強度の寸法依存性やせん断破壊などの脆性的な挙動にも大きな影響を及ぼすとともに、ひい

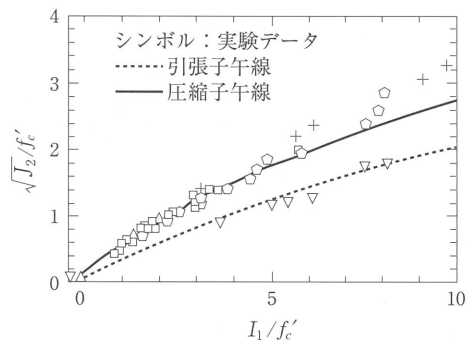


図-2.2.1 破壊強度特性

では部材耐力のレベルにまで影響することが最近の数値解析 [2.4] よりわかってきている。そのため、コンクリートのひずみ軟化挙動を精度良く再現できる、有効な構成モデルの確立とその実用化が望まれている。

2.2.2 圧縮軟化挙動に対する各種の構成モデル

これまで多くの研究者らによって、圧縮下でのコンクリートの非線形特性に関する構成モデル [2.5-2.9] が提案されているが、未だ統一されるまでには至っていない。

コンクリートの構成モデルを規定する場合、対象とする応力とひずみが、どの程度の領域（コントロールボリューム [2.9]）を対象として記述されているかを明確にしておく必要がある。連続体でのコントロールボリュームは理想的には無限小であるが、コンクリートや粒状体では構成粒子以下にコントロールボリュームを設定することは現実的ではなく、骨材最大寸法の数倍をコントロールボリューム（通常用いられるひずみゲージは骨材最大寸法の2~3倍強）に設定することが妥当である。その領域全体で平均化された応力-ひずみ関係を規定する連続体としてのコンクリートの構成モデル、およびコントロールボリューム内のコンクリートの微細構造に立脚した構成モデルなどがこれまでに考えられている。例えば、10 cm 角の立方体供試体を1コントロールボリュームとして考え、その平均応力-平均ひずみ関係を定めることも一つの方法である。

以下では、圧縮軟化ならびに引張軟化挙動を再現可能なコンクリート構成モデルの概要について紹介する。詳細については、文献 [2.7-2.9] を参照されたい。

(a) 非線形弾性モデル

1970年代に提案された非線形弾性モデルは、応力-ひずみの関係にある時点での応力またはひずみの関数として与えているため、特別な取扱いをしない限り繰返し荷重や応力経路などの履歴の影響を考慮できない。しかし、ピーク応力以降のひずみ軟化挙動のモデル化については、割線弾性係数を用いて表現することにより容易に考慮できる。

Ottosen [2.10] は、応力テンソルの第1次不変量および第2次不変量、さらに偏差応力テンソルの第3次不変量から構成される破壊基準 [2.11] と応力-ひずみ関係とを対応させ、圧縮型および引張型の破壊モードを定めて、現在の応力状態と破壊基準、応力状態と1軸強度の関係を表すパラメータで3次元応力状態の割線剛性式を提案した。このモデルは、基本的には、応力経路依存性、除荷挙動、およびダイラタンシーなどを再現できないという欠点がある。

(b) 弾塑性モデル

弾塑性モデルは、降伏曲面、塑性ポテンシャル曲面、流れ則および硬化則の仮定を用いて、応力-ひずみ関係を定めるものである。

応力空間に基づく塑性論によれば、ひずみ軟化挙動と除荷挙動との判別が困難である。そのため、ひずみ軟化挙動を塑性論に基づいて表現する手段として、①ピーク応力前から終局まで、あるいはピーク応力以降の挙動をひずみ空間にてモデル化する方法、②損傷あるいはそれに相当するパラメータを応力空間あるいはひずみ空間にて定義された負荷曲面や破壊曲面に導入して曲面を縮小する方法がある。

これまでの研究成果として、Chen [2.12] ら、Willam [2.13、2.14] ら、水野・畑中 [2.15-2.18]、田辺・呉 [2.19、2.20] らの