

三軸応力下のコンクリート構成モデルの構築

中部大学 正員 ○伊藤 睦 中部大学 正員 水野英二

1. 序論

現状の実務解析や汎用解析コードで最も使用されているコンクリートの構成モデルは、引張応力状態に対しては非線形破壊力学モデルを考慮した多方向分散ひび割れモデルであり、圧縮応力状態に対して弾塑性理論に立脚した構成モデルである。そのため、従来のモデルの多くが、一度ひび割れが発生した後に応力状態が三軸圧縮状態になったとしても、従来の直交異方性モデルでは十分にその挙動特性を表現することができない。それは、例えば震災後に補修を施し、鋼板巻立て等による補強を施した後の構造部材の耐力・変形性能を適切に評価することができないなどである。そこで本研究では、直交異方性モデルを使用して多軸圧縮下の強度増加、およびポアソン効果が評価可能なコンクリート構成モデルの構築を行った。

2. 多軸圧縮応力下の直交異方性コンクリート構成モデル

著者は、これまで格子等価連続体モデル¹⁾と称する亜弾性の直交異方性モデルの開発を進めてきた。本研究では、三次元問題で、補強鉄筋や鋼板などにより補強された部材の挙動を精度良く予測することを目的に、受動側圧を受ける多軸圧縮下のコンクリートの挙動に見られる強度増加、ひずみ軟化領域における延性挙動、およびポアソン効果を直交異方性モデルの枠組みで評価可能な構成モデルを提案する。

2. 1 多軸応力下の一軸応力-ひずみ関係

図-1は、水野らが提案する塑性モデル²⁾により得られた側圧を変化させた場合の応力-ひずみ関係の一例である。この様な三軸圧縮下の挙動を表現する一軸応力-ひずみ関係は、畑中ら、Fafitis ら、Ahmad らなどによって、様々なモデルが提案されている。これらのモデルは、彼らの実験結果に基づいた破壊曲面より計算された最大応力点や、その時のひずみ、側圧などをパラメータに、実験結果と提案モデルの挙動が整合するような適切な関数を用いて表現するものである。しかしながら、これらのモデルは、能動的側圧を受ける場合のモデルであって、側圧の大きさが既知の場合の時に使用することが可能なモデルであり、側圧が絶えず変動する一般的な構造解析にはそのまま使用することができない。この問題に対して本モデルでは、水野らによって提案された等価拘束圧の概念³⁾を用いる。一般に、一定側圧 σ_c を受ける三軸圧縮下の応力経路は、図-2に示すように、 I_1-J_2 空間で、 $1/\sqrt{3}$ の傾きをもって応力が増加する経路をたどる。ここで、同一偏差平面状にある任意経路をたどるA点と、一定側圧を受ける三軸圧縮経路のB点の損傷度は等しいと仮定することにより、任意経路の応力状態が、一定側圧圧縮実験の応力状態と等しいものとする。即ち、図-2の場合、A点の応力状態（同一負荷曲面上の応力状態）は、一定側圧 σ_c を受けるB点の三軸圧縮状態と等しいとする。なお、この側圧 σ_c が等価拘束圧である。この概念により、任意の応力状態と等価な拘束圧 σ_c を受ける三軸圧縮状態の評価が可能であり、その応力状態で使用を一軸応力-ひずみ関係は、 σ_c を変数に図-1より求めることができる。なお、この手法は、暗黙のうちに応力を算定する3つの軸に対して、同一の一軸応力-ひずみ関係を仮定することになる。この仮定の妥当性には議論を要するが、過去の多くのモデルもこの仮定を使用している。

2. 2 ポアソン効果のモデル化

せん断補強筋や鋼管により拘束されたコンクリートは圧縮時に受動拘束圧を受けるが、この側圧の大きさは、コンクリートのポアソン効果によって決定される。そのため、拘束効果の評価には、ポアソン効果の考慮が必要とされるが、一般的な応力-等価一軸ひずみ関係を使用した直交異方性モデルでは、基本的に材料の $[D]$ マトリクスは、応力を計算する軸に対して対角項のみであることから、ポアソン効果による膨張は必ずしも考慮されていない。本モデルでは、ポアソン効果による変形を、Selby・Vecchio ら³⁾が提案するように、初期ひずみとして与えることにより表現する。この時、応力計算に使用される応力を発生させるひずみ ε^σ は次式で与えられる。

$$\varepsilon_1^\sigma = \varepsilon_1^D - \varepsilon_2^P - \varepsilon_3^P = [B]\{u\} - \varepsilon_2^P - \varepsilon_3^P, \quad \varepsilon_2^\sigma = \varepsilon_2^D - \varepsilon_1^P - \varepsilon_3^P, \quad \varepsilon_3^\sigma = \varepsilon_3^D - \varepsilon_1^P - \varepsilon_2^P$$

ε^D は変形によるひずみであり、 ε^P はポアソン効果により側方向に発生するひずみである。Selby・Vecchio らや長沼は、実験結果から非線形なポアソン比を同定し、 ε^P を増分形式で与えているが、本モデルでは、図-1に示

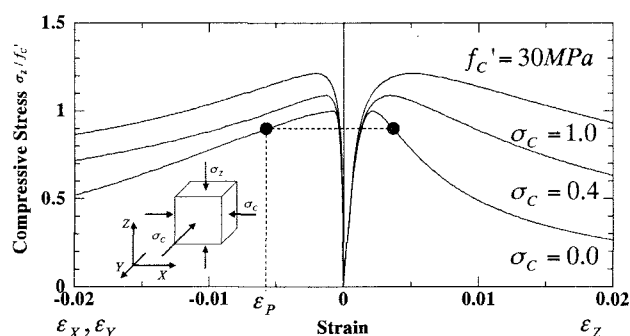


図-1 応力-ひずみ関係

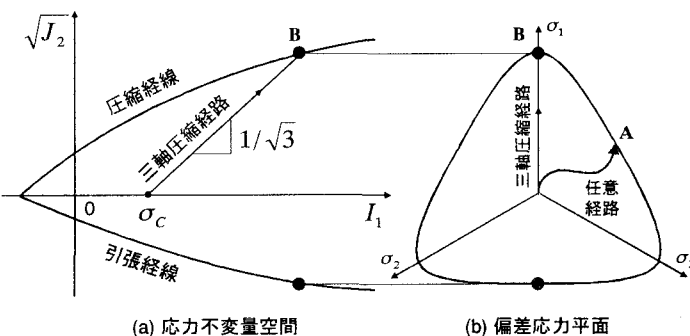


図-2 応力経路と等価拘束圧

す一軸応力-ひずみ関係から、等価拘束圧と载荷方向の応力の値を使用して全ひずみとして評価する。なお、この計算過程にはリターンマッピング的な操作は行わないが、イタレーション計算過程において、载荷方向の i イタレーション時の応力 σ_i は、 $i-1$ イタレーション時の応力状態から求められる $\sigma_{c,i-1}$ を用いて決定された一軸応力-ひずみ関係を使用して評価することから、 ϵ_i^P は、 $\sigma_{c,i-2}$ と σ_{i-1} を用いて評価するというように、イタレーション計算内で逐次更新して評価している。

2. 3 履歴ルール

応力計算に使用する一軸応力-ひずみ関係は、応力状態（イタレーション毎）によって変化するため、現在の応力状態とその後の応力状態とを結ぶ適切な履歴ルールが必要となる。この履歴ルールは、応力を発生させるひずみの増減に対して、ひずみが減少する除荷の場合、ひずみが増加する载荷、再载荷の各場合に対し、等価拘束圧が増減する計6ケースを考慮する必要がある。なお、現モデルでは、除荷、再载荷の応力履歴には、過去最大のひずみとその時の応力点と原点とを結ぶ原点指向型の履歴ルールを仮定している。これは、繰返し载荷状態においても、応力から側方向のポアソン効果によるひずみを求めるために使用したものであり、より適切な履歴ルールを表現することも可能である。

2. 4 応力計算軸

本モデルでは、応力レベルが小さく弾性状態とみなせる場合には、一般的な弾性 $[D]$ マトリクスを使用して応力を計算し、非線形性が表れる場合には、上述の直交異方性モデルを使用している。なお、本モデルではこの弾性限界を最大圧縮主応力が一軸圧縮強度の $1/3$ に達するまでと仮定し、直交異方性モデルで応力を計算する局所座標系は、最大圧縮主応力が弾性限界に到達した時の主応力方向に固定している。ただし、局所座標系で計算される応力の主応力方向が、現在の応力計算軸と比較して $\pm 22.5^\circ$ 以上変化する場合には、その主応力方向に新たな応力計算軸を設定する。応力計算軸を固定する理由は、第一に計算が容易であることと共に、図-1 に示す応力-側方向ひずみ関係からも分かる様に、応力が最大強度付近またそれ以降に到達する場合には、ポアソン効果によりひび割れが発生するに十分な膨張が見られるためである。即ちこれは、固定ひび割れモデルと同様な概念を使用するものであり、例えば繰返し载荷等の場合、ひずみ軟化領域にまで圧縮载荷された後にその直交方向引張応力が作用した場合には、応力のみによるひび割れ判定は不適切と考えられることから、このような場合のひび割れ判定基準に対して、過去の変形履歴を使用するためでもある。ただし、一般的な柱の一方向の繰返し载荷の場合には、ひび割れは要素内の過去の最大圧縮応力の流れ方向とほぼ垂直方向に発生することから、この問題はそれほど critical でないとも考えられるが、その場合であっても、また荷重が多方向に輸入される場合に、主鉄筋に沿った付着割裂ひび割れの発生に影響を及ぼすことが十分に考えられる。

参考文献

- 1) 田辺忠顕編著：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム、技報堂出版、2004。
- 2) 水野英二、畑中重光：コンクリートのひずみ軟化型構成モデルの開発とコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析、土木学会論文集, No.571/V-36, pp.185-197, 1997。
- 3) R. G. Selby, F. J. Vecchio: THREE-DIMENSIONAL CONSTITUTIVE RELATION FOR REINFORCED CONCRETE, University of TORONTO, No.93-02, 1993。