

I-6

コンクリート材料に対する非線形弾性構成モデル

大阪大学工学部	正員	○大谷 恭弘
ハルビン大学工学部		Chen, W. F.
大阪大学工学部	正員	福本 秀士

1. まえがき

計算機能力の発達とあいまって、有限要素法により、複雑な構造物の非線形解析が今日可能と成って来ているが、しかし、本手法の実際問題への適用を考慮した場合、不十分な材料モデル(構成則モデル)の使用などにより、そのより進んだ適用が制限されているのが現状である。この事は、材料挙動が複雑なコンクリート、あるいは鉄筋コンクリート材料に対して、特に言える事である。近年、コンクリートに対する幾多の材料モデルが研究・発表されているが、その中で、一般的な多軸応力下での非線形応力-ひずみ関係を妥当に与えるものは、いまだ限られている。しかもそれらは、広々にして複雑であるが故に、第三者による実際の解析への適用が容易ではない場合が多い。本研究では、増分型非線形弾性理論に基づく比較的簡易なコンクリート材料の一般的な多軸応力下での構成則モデルを提案すると共に、その適用性の評価・検討を行うことを目的としている。

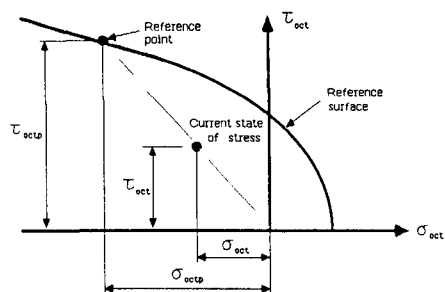
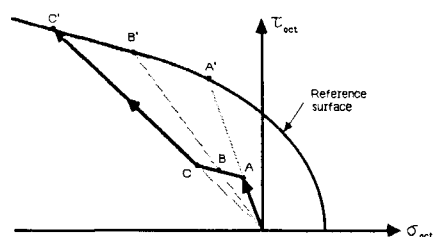
2. モデルの概要

破壊前の材料挙動に対しては、簡便のため増分的に等方であると仮定し、次式で与えられる増分型応力-ひずみ関係式を用いる：

$$\{\Delta \sigma\} = [D^t (K_t, G_t)] \{\Delta \varepsilon\}$$

ここに、 $\{\Delta \sigma\}$ は応力増分、 $\{\Delta \varepsilon\}$ はひずみ増分、そして $[D^t]$ は接線剛性であり、等方性の仮定により2つの接線係数、すなわち体積弾性係数 K_t と、せん断弾性係数 G_t のみにより評価される。これらの係数は、応力状態、ひずみ状態あるいは荷重履歴の関数であり、本手法は、いわゆる変数係数モデルに分類されるものである。本研究では、それぞれの係数のその初期値に対する比を、主応力空間における現在の応力状態を表す点と、本研究で導入した主応力空間で定義される参照曲面との相対位置の関数として表現するという比較的簡単な方法により、算定する(Fig.1)。図中 σ_{oct} および τ_{oct} は、それぞれ八面体垂直およびせん断応力である。また、添え字 p は参照点を示す。参照曲面としては、圧縮応力領域に対して破壊曲面を用いているが、引張あるいは引張-圧縮混合応力領域では、引張応力下でのほぼ線形的な応力-ひずみ関係をモデルするため、破壊曲面を多少修正したものを参照曲面として用いている。

本モデルでは、さらにコンクリート材料の応力-ひずみ関係の不可逆性を考慮するため、硬化型塑性理論において

(a) Procedure to find σ_{octp} and τ_{octp} 

(b) Reference points for the loading path 0-A-B-C-D'

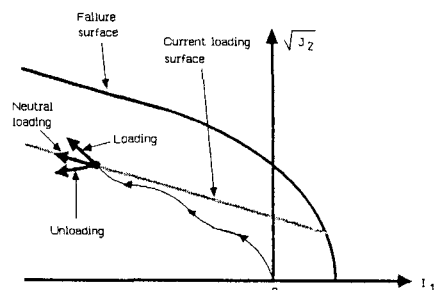
Fig.1 Determination of σ_{octp} and τ_{octp} for Current State of Stress

Fig.2 Loading Criteria

用いられる載荷曲面を、同様に応力空間に定義し、多軸応力下での載荷・除荷の判定を行っている(Fig.2)。

破壊後の材料挙動については、ダイレイタンスーに特に注目し、簡便のため完全塑性を仮定している。この場合、塑性体積変化率を調整するため、非結合流れ則を用いて増分型応力-ひずみ関係式の定式化を行っている。

3. 応力-ひずみ関係の算定と実験結果との比較

本研究では、上記に述べたモデルを3種類の異なる既存の破壊関数に対して適用し、構成則の定式化をそれぞれについて行っている。Fig.3 には、その一例として圧縮応力領域に対し Drucker-Prager モデルを、引張あるいは引張-圧縮混合応力領域に対し Chen-Chenモデル¹⁾により引張領域のカット・オフを行った複合破壊曲線を示す。Fig.4 に、この破壊曲線に対する応力-ひずみ解析結果（実線）および、Kupfer等²⁾による2軸載荷実験結果（シンボル付き破線）との比較を示す：

- a) 単軸圧縮 (-1.0 : 0.0 : 0.0)
- b) 等二軸圧縮 (-1.0 : -1.0 : 0.0)
- c) 二軸圧縮 (-1.0 : -0.52 : 0.0)

縦軸は、単軸圧縮強度によって無次元化された主要応力の値を示す。図中、上段は応力-ひずみ、下段は応力-体積ひずみの関係を示す。比較的簡易なモデルにもかかわらず、十分に妥当な結果を与えることが図より明らかである。

4. 備考

本モデルは、有限要素解析に適用可能であるが、下記の点に留意を要する。適用範囲は、主として破壊前の非線形挙動の解析であり、応力状態が低側圧下のものである。増分型非線形弾性モデルの短所として、中立載荷に対し応力-ひずみ関係に不連続が存在する。増分的に等方性を仮定しているため、不等方性が著しい材料の解析には適用すべきではない。

（参考文献）

- 1) Chen, A. T. C. and W. F. Chen, "Constitutive Relations for Concrete," J. Eng. Mech. Div. ASCE, Vol. 101, No. EM4, Aug. 1975, pp. 465-481.
- 2) Kupfer, H., H. K. Hilsdorf, and H. Rusch, "Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses," ACI Journal, Vol. 66, No. 8, Aug. 1969, pp. 656-666.

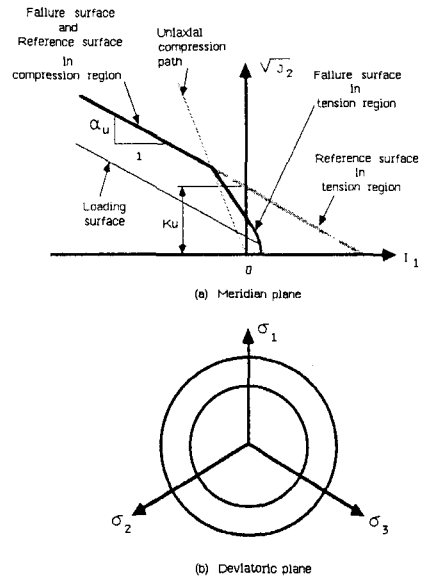


Fig.3 A Combined Drucker-Prager and Chen-Chen Failure Surface

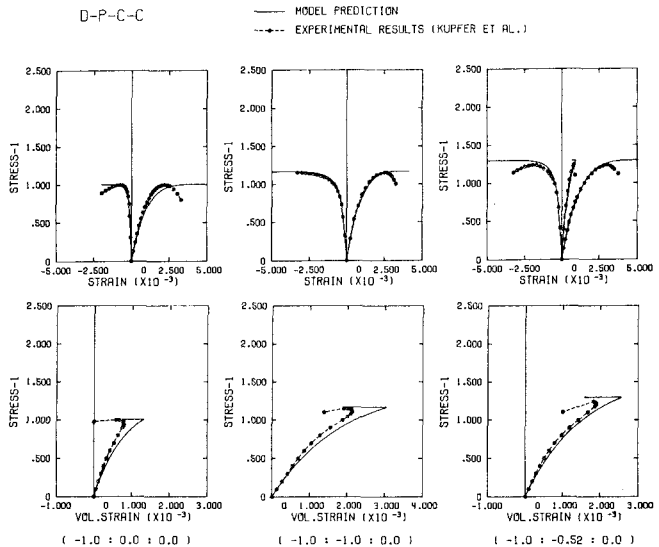


Fig.4 Prediction of Stress-Strain Response and Comparison with Experimental Results by Kupfer et al.