

1. はじめに

非関連流れ材料であるコンクリートでは、土質材料などと同様にDruckerの安定仮説が塑性安定性の必要十分条件ではないことが楔試験の例証とともに指摘されている¹⁾。本研究では一般化マイクロプレーンコンクリートモデル²⁾（Enhanced Microplane Concrete Model: EMPCモデル）が楔試験をシミュレートできることを示し、またコンクリートの塑性安定性について検討する。なお本楔試験解析は、土木学会コンクリート委員会のコンクリート標準示方書改訂小委員会力学特性部会ならびに構成モデル小委員会で行なってきた構成則の検証解析³⁾の一つである。

2. コンクリートの楔試験

非関連流れ材料の楔領域は、応力空間における降伏曲面 f の接平面と塑性ポテンシャル曲面 g の接平面とに囲まれた部分であり、図-1はコンクリートの子午面における楔領域を示したものである（ σ_{oct} と τ_{oct} は八面体垂直応力と八面体せん断応力）。楔試験は、3軸圧縮の後にこの楔領域内へ載荷する応力経路をとるものであり、高拘束応力からの楔試験の場合には応力減少をとともなう除荷であるにもかかわらず、塑性ひずみが生じる特異な応答を示す。楔試験では図-1のように応力増分 $d\sigma_{ij}$ と塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ が鈍角をなし負の2次塑性仕事 d^2W_p が生じる。そのため、式(1)で表わされるDruckerの安定仮説（狭義の安定性）を満足せず、材料は塑性不安定状態となりえる。

$$d^2W_p = d\sigma_{ij}d\epsilon_{ij}^p \geq 0 \quad (1)$$

Smithら¹⁾はコンクリートの楔試験を行ない、負の d^2W_p が発生するにもかかわらず塑性安定性が得られることを実験的に確認している。

3. 楔試験の数値解析シミュレーション

本解析は、EMPCモデルを用いてSmithらのコンクリートの楔試験をシミュレートしたものであり、i) 第1載荷： $\sigma_{zz} = \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = f_c$ までの静水圧圧縮（ $\Delta\sigma_{zz} = \Delta\sigma_{rr} = \Delta\sigma_{\theta\theta}, \Delta\tau_{rz} = 0$ ）、ii) 第2載荷： $\sigma_{zz} = 2.4f_c$ までの1軸圧縮（ $\Delta\sigma_{rr} = \Delta\sigma_{\theta\theta} = \Delta\tau_{rz} = 0$ ）、iii) 第3載荷：楔領域内で破壊曲面に達するまでの3軸圧縮除荷（ $\Delta\sigma_{zz}/\Delta\sigma_{rr} = \Delta\sigma_{zz}/\Delta\sigma_{\theta\theta} = \alpha, \Delta\tau_{rz} = 0$ ）とした（ f_c は1軸圧縮強度(-)）。なお、ひずみ増分制御ではなく応力増分制御解析を行なうことにより応力の増減にともなう不安定性を明確に確認できるようにした。Smithらの楔試験は α の値が明確でなかったため、本解析では α をパラメータとしてその影響を検討することとした。図-2は $\alpha = 6/7, 7/7, 8/7$ とした応力経路A, B, CをEMPCモデルによる破壊曲面の圧縮子午線とともに示したものである。楔領域におけるすべての応力経路に対する応答は安定で良好な収束解が得られたが、破壊曲面に達すると同時に収束解が得られず不安定破壊を生じた。ゆえに本解析は、楔領域において塑性安定性が得られるというSmithらの実験結果を再現することができた。

図-3は、EtseらがEtseらの弾塑性モデルを用いた解析結果とSmithらの実験を比較したものであり、同図には本EMPCモデル解析の各応力経路に対する応答結果も示されている。Etseらの弾塑性モデルは静水圧状態の非線形性を表現できないため、第1載荷を線形弾性として実験データを修正し比較を行なっていると考えられる。一方、EMPCモデルは静水圧圧縮実験の非線形性を精度よく評価するため、その応答は実験データによく適合していないように見えるが、前述のことを考慮してはほぼ妥当な結果が得られているといえる。

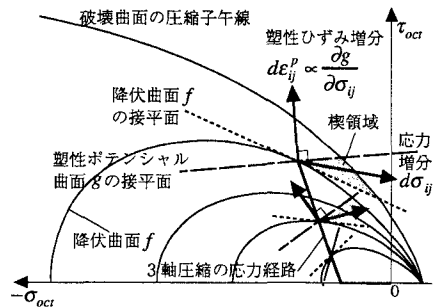


図-1 子午面における楔領域

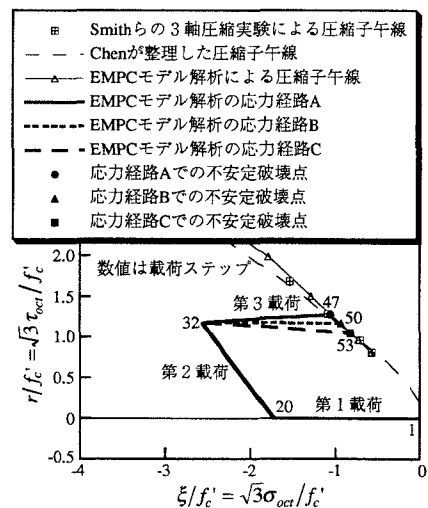


図-2 楔試験解析の応力経路

4. 2次仕事と2次塑性仕事の履歴

各応力経路の解析結果から式(2)および(3)によって2次仕事 $\Delta^2 W$ と2次塑性仕事 $\Delta^2 W_p$ を計算した。

$$\Delta^2 W = \Delta \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta^2 W_p = \Delta \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij}^p = \Delta^2 W - \Delta^2 W_e = \Delta \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij} - \Delta \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij}^e \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \sigma_{ij}$ ：応力増分； $\Delta \varepsilon_{ij}$ 、 $\Delta \varepsilon_{ij}^e$ 、 $\Delta \varepsilon_{ij}^p$ ：ひずみ増分，弾性ひずみ増分，塑性ひずみ増分； $\Delta^2 W_e$ ：2次弾性仕事； E_{ijkl}^{-1} ：弾性コンプライアンス。図-4では、応力経路Aに関する $\Delta^2 W$ と $\Delta^2 W_p$ の履歴が、Smithらの実験結果からEtseらによって計算されたもの⁴⁾およびEtseらの弾塑性モデルによる解析結果と比較されており、各仕事は2次仕事の最大値 $\Delta^2 W^{\max}$ で正規化されている。図-4のSmithらの実験結果は第1载荷の初期から $\Delta^2 W_p$ が $\Delta^2 W$ とほぼ同程度に大きくなっている。これは、低静水圧圧縮状態では塑性が小さく弾性的挙動が支配的であるという実験事実とそぐわず、図-3において指摘したことを考えあわせてEtseらの $\Delta^2 W_p$ の評価法に問題のあることが予想される。一方、EMPCモデルの場合 $\Delta^2 W$ に対する $\Delta^2 W_p$ の比率は载荷ステップとともに増大しており、塑性進行状況をよく表現していると考えられる。図-5は、各応力経路に関する $\Delta^2 W_p$ の履歴を楔領域内の第3载荷（载荷ステップ32以降）について示したものであり、図-4と同様な比較がなされている。各応力経路の $\Delta^2 W_p$ は、楔領域内で第3载荷の開始から载荷ステップ39ないし42まで非常に小さな負値へ変化し、その後正值へ回復しており、実験の傾向とよく対応している。 $\Delta^2 W_p$ が非常に小さな負値となった原因としては、i) 1軸圧縮応力レベルが低い場合ダイラタンシーが小さい、ii) 楔領域は後続降伏曲面とともに変化する、iii) $\Delta \varepsilon_{ij}^p$ と $\Delta \sigma_{ij}$ の交角が直角に近い、などが考えられる。以上の検討よりEMPCモデルは、塑性ポテンシャル理論に基づく構成モデルではないが、負の2次塑性仕事が生じても塑性不安定状態にはならない楔試験の実験的事実を再現できることが証明された。

5. まとめ

一般化マイクロプレーンコンクリートモデルは、負の2次塑性仕事を生じても塑性安定性が得られるという楔試験を再現することができた。すなわち、Druckerの安定仮説は非関連流れ材料のコンクリートが安定であるための十分条件であって必要条件ではないことを本モデルによって数値解析的に証明できた。

【参考文献】

- Smith, S. S., Willam, K. J., Gerstle, K. H., and Sture, S.: Concrete over the top, or: Is there life after peak?, *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 5, pp.491-497, 1989.
- 長谷川俊昭：一般化マイクロプレーンコンクリートモデルの再構築，土木学会論文集，No. 538/V-31, pp.129-147, 1996年5月。
- 長谷川俊昭：構成則の検証解析（第3案），土木学会コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会力学特性部会 資料，1995年5月。
- Etse, G. and Willam, K.: Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 120, No. 9, pp.1983-2011, 1994.

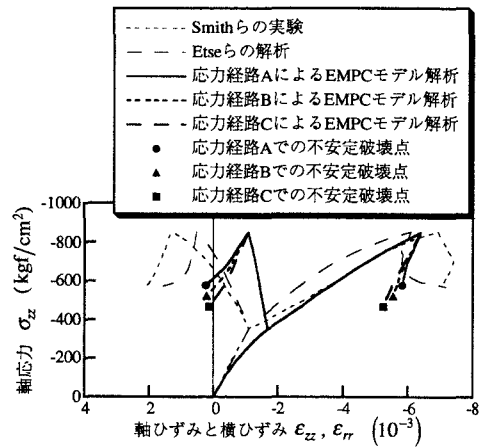


図-3 楔試験解析の応答

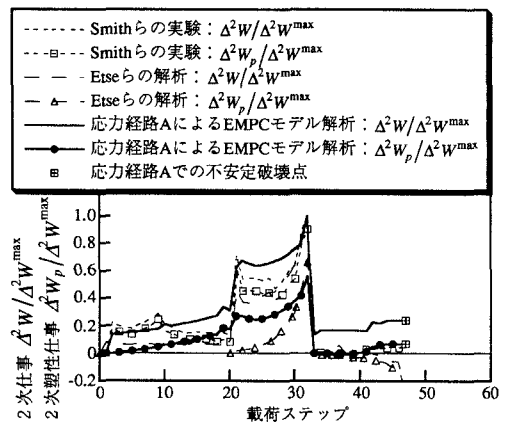


図-4 2次仕事と2次塑性仕事の履歴

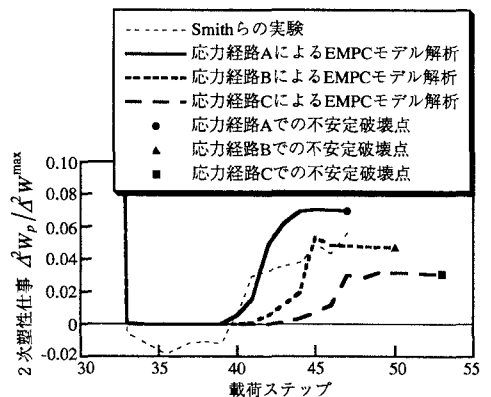


図-5 楔領域における2次塑性仕事の履歴