

1. はじめに

著者は、コンクリートのあらゆる応力状態に適用可能である汎用的な局所型構成則として一般化マイクロプレーンコンクリートモデル（Enhanced Microplane Concrete Model: EMPCモデル）を開発してきた¹⁾²⁾。EMPCモデルは、非局所型構成則である多等価直列相モデルの核として使用することも可能である³⁾。本論文は、くりかえし載荷に対するEMPCモデルの有効性を示すために行なった解析の結果について述べるものである。

2. 一般化マイクロプレーンコンクリートモデル

マイクロプレーンコンクリートモデル（Microplane Concrete Model: MPCモデル）は、高拘束圧下でのぜい性-塑性遷移特性を良好に記述できないことが明らかにされている。EMPCモデルは、このMPCモデルの欠点を克服するために、マイクロプレーンでの側方応力が垂直圧縮応答へ与える効果を考慮し、またマイクロプレーンのせん断応答が圧縮直応力の増加とともに軟化型から完全塑性型へ遷移するというモデル化を採用した²⁾。これらの付加静的拘束条件によって、運動学的拘束条件のみでは表現できなかったマイクロプレーン間の複雑な相互作用がモデル化された。

3. くりかえし応答における不変量関係の検討

図-1および2は、van Mier⁴⁾によるコンクリートのくりかえし1軸および2軸圧縮実験に対して、EMPCモデルを用いて実施した解析の結果を比較したものである。図-1および2の結果は、EMPCモデルが単調載荷のみではなく、くりかえし載荷に対しても汎用的かつ実用的な精度を持つ構成則であることを示すものである。図-3は、図-2のくりかえし2軸圧縮解析における各マイクロプレーンでの応答と平均体積応答を表わしたものである。図-3の微視的な応答と図-2の巨視的な応答を比較すると、巨視的なヒステリシスループの形状、特にコンクリートに特有な低応力レベルでのヒステリシスループの折れ曲がり、マイクロプレーンでの圧縮から引張への交替載荷応答に起因していることがわかる。これは、巨視的に発生しない引張応力が微視的には発生するため、コンクリートの複雑なヒステリシス特性が現われるということを示唆しているものと考えられる。図-1と2および別

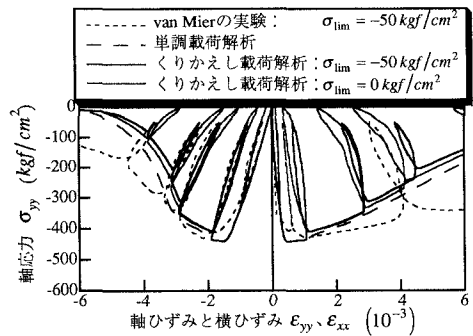


図-1 くかえし1軸圧縮解析

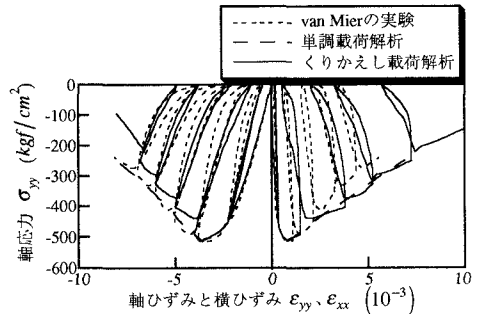


図-2 くかえし2軸圧縮解析

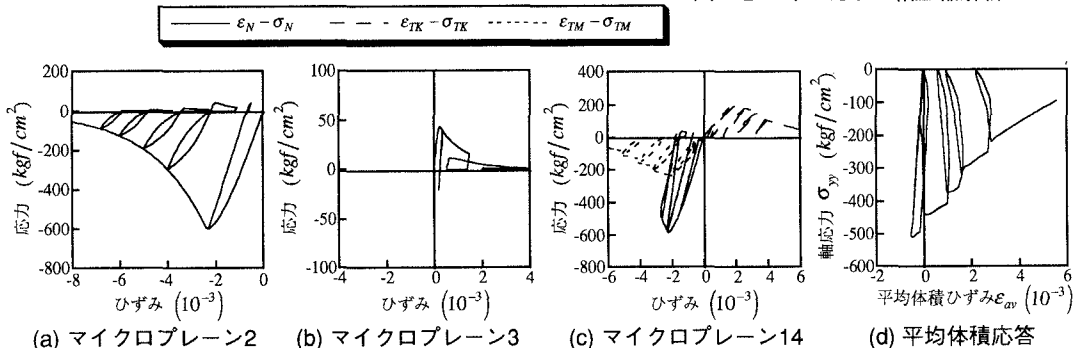


図-3 くかえし2軸圧縮解析におけるマイクロプレーンの応答と平均体積応答

途実施したくりかえし3軸圧縮解析の結果より、除荷後の残留ひずみを除荷開始時の塑性ひずみと考慮して、全ひずみテンソル ϵ_{ij} を弾性ひずみテンソル ϵ_{eij} と塑性ひずみテンソル ϵ_{pij} に分解し、それらのテンソルの不変量を計算した。図-4(a)は、そのようにして解析から求められた弾性偏差ひずみテンソルの修正2次不変量 $J_{2e}^{\text{mod}}/\epsilon_{c0}'$ と破壊パラメータ K の関係であり、また図-4(b)は、塑性偏差ひずみテンソルの修正2次不変量 $J_{2p}^{\text{mod}}/\epsilon_{c0}'$ と塑性ひずみテンソルの修正1次不変量 $I_{1p}^{\text{mod}}/\epsilon_{c0}'$ の関係であり、それぞれvan Mierの実験結果と比較がなされている。ここで、

$$J_{2e}^{\text{mod}} = \sqrt{\frac{1}{2} e_{eij} e_{eij}}, \quad J_{2p}^{\text{mod}} = \sqrt{\frac{1}{2} e_{pij} e_{pij}}, \quad I_{1p}^{\text{mod}} = \frac{1}{3} \epsilon_{pii}, \quad K = \frac{J_{2e}^{\text{mod}}}{2G^0 J_{2e}^{\text{mod}}}$$

e_{eij} と e_{pij} :弾性および塑性偏差ひずみテンソル、 J_{2e}^{mod} :偏差応力テンソルの修正2次不変量、 G^0 :初期せん断係数、 ϵ_{c0}' :1軸圧縮強度 f_c 時の軸ひずみ(+).

EMPCモデルは不変量を用いることなく導出された構成則であるが、既往の構成則で仮定される前述のような不変量関係を解析的に表現することが可能であるため、くりかえし載荷応答を良好に記述できる。

4. 微小載荷パルスを導入したくりかえし載荷解析

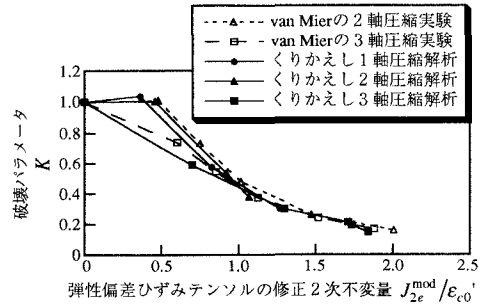
小田川ら⁵⁾は、くりかえし1軸圧縮の除荷再載荷過程で高速度の微小載荷パルスを導入することによって、応力経路や時間に依存せず応力レベルのみに依存する非線形弾性可逆剛性を実験的に抽出している。図-5は、EMPCモデルによって小田川らの実験をシミュレートした結果である。図-6は、図-5より求めた微小載荷パルスの導入開始応力レベル $\bar{\sigma}_{yy}^{\text{pul}}/f_c$ と非線形弾性可逆剛性 $\bar{D}_{yy}^{\text{rev}}$ の関係であり、小田川らの実験結果との比較を示してある。実験での破壊パラメータ K と解析でのくりかえしサイクルとが一对で対応していないので直接的な比較ができないが、本解析は実験での $\bar{D}_{yy}^{\text{rev}}$ の傾向を非常に良好にとらえていると思われる。

5. まとめ

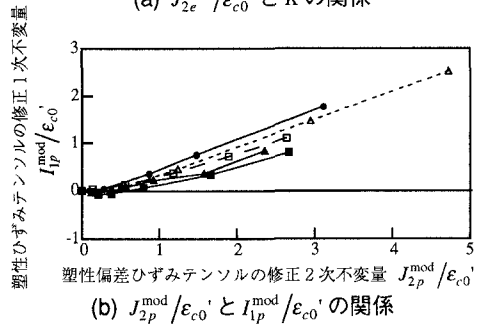
本論文では、EMPCモデルを用いてくりかえし載荷解析を実施し、テンソル不変量の関係および非線形弾性可逆剛性を抽出して実験結果との比較を行なうことによって、くりかえし載荷に対するEMPCモデルの有効性を検証した。

【参考文献】

- 1) Hasegawa, T. and Bazant, Z. P.: Nonlocal microplane concrete model with rate effect and load cycles. I and II, J. Mater. Civ. Engrg., ASCE, 5(3), pp.372-410, 1993.
- 2) 長谷川俊昭: マイクロプレーンコンクリートモデルの開発、東京大学博士学位論文、1994年6月。
- 3) 長谷川俊昭: コンクリートの多等価直列相モデルと非局所マイクロプレーンモデル、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.4-5、1993年。
- 4) van Mier, J. G. M.: Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions, Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, the Netherlands, 1984.
- 5) 小田川昌史、李宝禄、前川宏一: 高応力繰返し履歴下におけるコンクリートの塑性挙動、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.313-314、1986年。



(a) $J_{2e}^{\text{mod}}/\epsilon_{c0}'$ と K の関係



(b) $J_{2p}^{\text{mod}}/\epsilon_{c0}'$ と $I_{1p}^{\text{mod}}/\epsilon_{c0}'$ の関係

図-4 抽出した不変量の関係

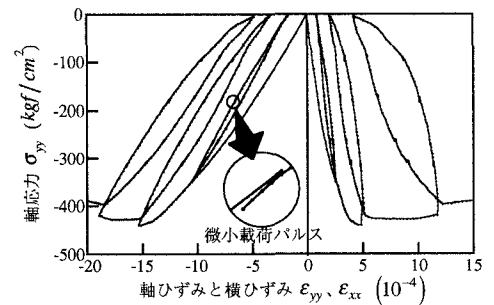


図-5 微小載荷パルスを導入したくりかえし解析

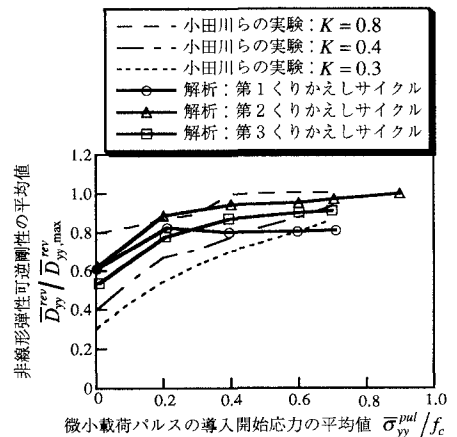


図-6 非線形弾性可逆剛性