

CS 57 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

清水建設技術研究所 正会員 長谷川 俊昭

1. はじめに

著者が開発してきた非局所マイクロプレーンモデル（Nonlocal Microplane Model: NMPモデル）及び多等価直列相モデル¹⁾（Multi Equivalent Series Phase Model: MESPモデル）は、本質的に連続体としての挙動から逸脱する破壊局所化現象を連続体力学理論の範疇で取り扱おうとする非局所理論に属するものである。本研究では、両モデルを用いて1軸圧縮軟化の寸法効果解析を実施し既往の実験結果と比較し検討を加えた。

2. 多等価直列相モデルと非局所マイクロプレーンモデル

多等価直列相モデルはコンクリートの微視的レベルの破壊局所化現象を軟化破壊の集中する破壊相と除荷相とからなる直列相でモデル化し、さらに方向によりその長さの異なる直列相を長さ一定の等価直列相に置換することによって巨視的構成関係を式（1）で表現される等価直列相の方向に関する積分に帰着させたものである（図-1）。

$$d\sigma_{ij} = C_{ijrs} \cdot d\varepsilon_{rs} - d\sigma_{ij}'' \quad (1)$$

$$C_{ijrs} = \eta \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\phi=0}^{\phi=\pi/2} \left[n_i n_j n_r n_s C_N^E + \frac{1}{4} (k_i n_j + k_j n_i) (k_r n_s + k_s n_r) C_{TK}^E \right. \\ \left. + \frac{1}{4} (m_i n_j + m_j n_i) (m_r n_s + m_s n_r) C_{TM}^E \right] \sin \phi d\phi d\theta$$

$$d\sigma_{ij}'' = \eta \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\phi=0}^{\phi=\pi/2} \left[n_i n_j d\sigma_N^{E''} + \frac{1}{2} (k_i n_j + k_j n_i) d\sigma_{TK}^{E''} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (m_i n_j + m_j n_i) d\sigma_{TM}^{E''} \right] \sin \phi d\phi d\theta$$

C_N^E 、 C_{TK}^E 及び $d\sigma_N^{E''}$ 、 $d\sigma_{TK}^{E''}$ ：等価直列相の垂直方向とせん断方向の微視的増分剛性及び微視的増分非弾性応力（ $i=K, M$ ）； n_i 、 k_i 、 m_i ：等価直列相の垂直方向とせん断方向を規定する単位ベクトル； $\eta = 1/2\pi$

一方、マイクロプレーンモデルは微視的破壊領域を微小な面（マイクロプレーン）としてとらえ、あらゆる方向を持つマイクロプレーンを球面上に仮定することにより誘導した局所型構成則である（図-2）。マイクロプレーンモデルの巨視的構成関係はマイクロプレーンよりなる球体表面の面積分に帰着し、式（1）における η を $\eta = 3/2\pi$ とし等価直列相の各変数をマイクロプレーンの各変数に置換したものに一致する。等価直列相（上付添字E）及びマイクロプレーン（上付添字M）の微視的弾性剛性を C_{N0}^E 、 C_{T0}^E 及び C_{N0}^M 、 C_{T0}^M としてHookeの法則に従う等方弾性体（ヤング率E、ポアソン比 ν ）を式（1）によって表現することを考えた場合、微視的弾性剛性に関する解析解である式（2）が得られる。

$$C_{N0}^M = \frac{E}{(1-2\nu)} = \frac{1}{3} C_{N0}^E, \quad C_{T0}^M = \frac{(1-4\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} = \frac{1}{3} C_{T0}^E \quad (2)$$

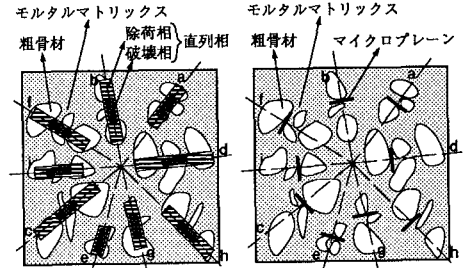


図-1 多等価直列相モデルの概念

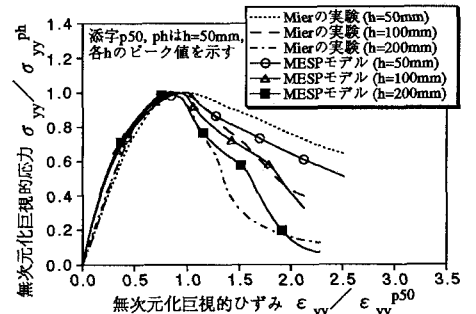
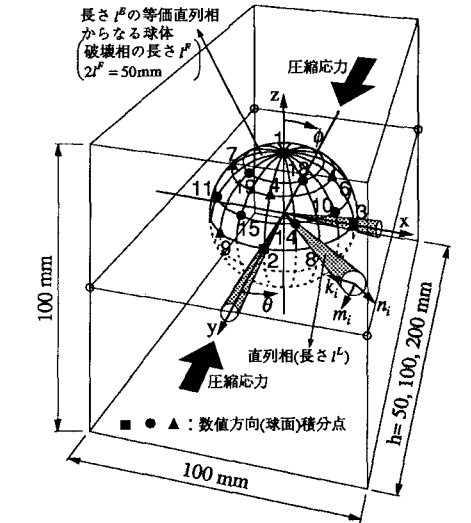


図-3 多等価直列相モデルによる解析要素と寸法効果の解析結果

$$C_{N0}^E = C_{N0}^M, C_{T0}^E = C_{T0}^M \text{ と再定義し式 (1)}$$

における η を $\eta = 3/2\pi$ とすれば、マイクロブレンモデルのマイクロ構成則を多等価直列相モデルの破壊相に対して直接用いることが可能となり、また両モデル相互の比較が容易にできる

非局所マイクロブレンモデルでは、通常の局所巨視的ひずみ ϵ_{ij} 及び式 (3)

で表現される非局所巨視的ひずみ $\bar{\epsilon}_{ij}$ から運動学的拘束条件によって計算した局所

微視的ひずみ ϵ_N, ϵ_T 及び非局所微視的ひずみ $\bar{\epsilon}_N, \bar{\epsilon}_T$ をマイクロ構成則内で使用することによって局所型構成則であるマイクロブレンモデルを用いながらも非局所な力学モデルが構築されるのである。

$$\bar{\epsilon}_{ij}(x) = \frac{1}{V_r(x)} \int_V \alpha(s-x) \epsilon_{ij}(s) dV, \quad V_r(x) = \int_V \alpha(s-x) dV \quad (3)$$

x, s : 連続体内の局所点座標ベクトル; $\alpha(x)$: 非局所重み関数; V : 構造物の全体積

3. 数値計算と実験の比較

図-3は、高さ h の異なる解析要素に関して前述の多等価直列相モデルによって計算した1軸圧縮構成関係を $Micr^{(2)}$ の寸法効果実験の結果とともに示したものである。図-4は、高さ h の異なる有限要素解析モデル (5×5要素) について非局所マイクロブレンモデルによる有限要素解析を行なった結果である。なお多等価直列相モデルでの破壊相の長さ l^F と非局所マイクロブレンモデルでの特性長 l_{ch} に関して、 $2l^F = 50\text{mm} \approx l_{ch} = 48\text{mm} = 3G_{max}$ 、 (G_{max} : 粗骨材最大寸法)

とすることによって両モデルの比較を行なうこととした。非局所マイクロブレンモデルではほとんど寸法効果が現れないが、多等価直列相モデルは高さ h の増大に伴う軟化勾配の変化を概ね再現しているといえる。図-5は多等価直列相モデル解析における等価直列相 2、3、14 (図-3参照) の各微視的応答を示したものである。解析要素の高さ h が異なると直列相の長さ l^L の差異が微視的軟化応答に変化をもたらし、これが巨視的軟化応答に関する寸法効果を生じさせていることがわかる。

4. まとめ

非局所型構成則である多等価直列相モデル及び非局所マイクロブレンモデルを用いて1軸圧縮軟化の寸法効果解析を実施し実験と比較した結果、前者は軟化勾配の寸法効果を概ね表現できたが、後者はそれを表現しえなかった。

[参考文献]

- 1) 長谷川俊昭: コンクリートの非局所型構成則としての多等価直列相モデル、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、第V部、pp.18-19、1992年。
- 2) van Mier, J.: Multiaxial strain-softening of concrete, Materials and Structures, Vol.19, pp.179-200, 1986.

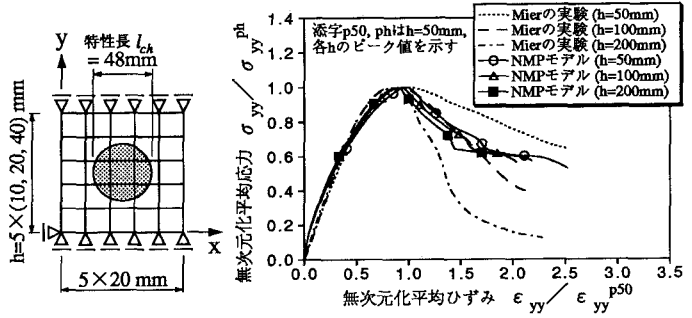


図-4 非局所マイクロブレンモデルによる有限要素解析モデルと寸法効果の解析結果

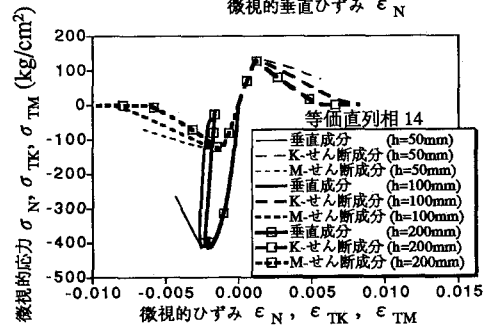
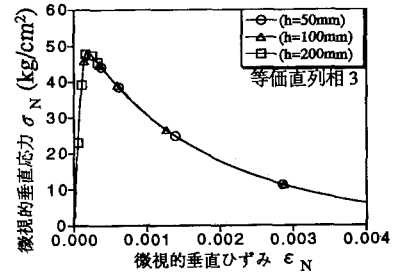
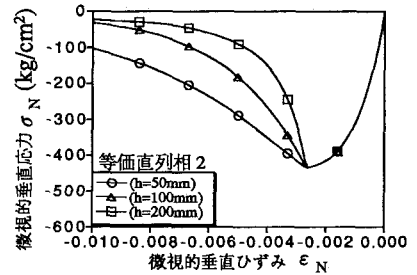


図-5 等価直列相 2、3、14 の各微視的応答