

フリーメッシュ法のコンクリート混合モード破壊解析への適用

琉球大学 学生会員 ○松原 仁・琉球大学 正会員 伊良波 繁雄
 琉球大学 正会員 富山 潤・琉球大学 学生会員 山城 建樹
 東京大学 矢川 元基

1. はじめに

筆者らはフリーメッシュ法 (FMM) ¹⁾ を無筋コンクリートの引張破壊解析適用し良好な結果を得ている。しかし、実際のコンクリート構造物は複雑な応力状態にあり、その破壊挙動も複雑である。そこで本研究では、コンクリートの混合モード荷重下における破壊解析を行い、その適用性を検討した。

2. フリーメッシュ法

FMM は、各節点 (中心節点: l) ごとに、その付近 (検索半径内: R) にある節点 (衛星節点: m, n, o, p) を集めてローカルな領域で一時的に三角形要素を作り (図-1参照)、これらの一時的な三角形要素の要素剛性行列から中心節点に寄与する行成分を集め、全体剛性行列を作成し、得られた全体剛性行列をもとに連立一次方程式を解く手法である。

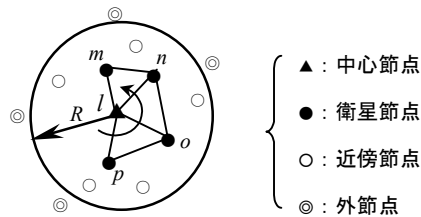


図-1 衛星節点とローカル要素

3. コンクリートのひび割れモデル

引張軟化特性を考慮したモデルとして、図-2に示すような引張応力 - ひずみ関係を採用し、除荷経路は弾性除荷を仮定した。なお、本解析では二直線モデルの折れ曲がり位置が1/3となる1/3モデルを使用した。

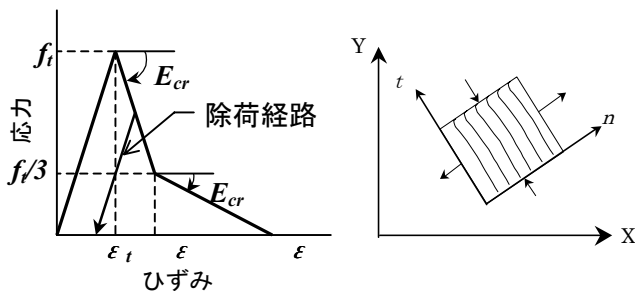


図-2 引張軟化曲線 図-3 ひび割れ帯モデル (局所座標系)

破壊力学を考慮したコンクリートのひび割れモデルとしては、ひび割れ方向を任意に求めることのできるひび割れ帯モデルを用いた。また、ひび割れ発生後の応力 - ひずみ関係は、回転ひび割れモデルを採用し、図-3に示す局所座標系 $n-t$ に対して式(1)で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_n \\ d\sigma_t \\ d\tau_{nt} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \frac{\sigma_n - \sigma_t}{\varepsilon_n - \varepsilon_t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_n \\ d\varepsilon_t \\ d\gamma_{nt} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 E_c はヤング係数、 E_{cr} は図-2 に示すひび割れ発生後の引張軟化特性を表し、 G は、せん断剛性係数、 β' は、せん断剛性低減係数である。

また、ひび割れ要素の剛性行列 $[K_{cr}]_e$ は、全体座標系から局所座標系への応力、ひずみ座標変換行列 $[T_\sigma]$ 、 $[T_\varepsilon]$ を用いて X-Y 座標系に変換した式 (2) を用いた。

$$[K_{cr}]_e = \int_V [B]^t [T_\sigma]^t [D_{cr}] [T_\varepsilon] [B] dV \quad (2)$$

ここで、 $[B]$ は、ひずみ - 変位行列である。

4. 支配方程式

本解析では、基本式として運動方程式を仮想仕事の原理により定式化を行い、加速度項を逐次積分法であるニューマークの β 法を用いて離散化した式 (式(3)) を用いた²⁾。

$$\left[\frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{1}{2\beta \Delta t} [C] + [K] \right] \{\Delta u\} = \{\Delta P\} + [M] \left\{ \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}\} + \frac{1}{2\beta} \{\ddot{u}\} \right\} + [C] \left\{ \frac{1}{2\beta} \{\dot{u}\} + \left(1 - \frac{1}{4\beta}\right) \Delta t \{\ddot{u}\} \right\} \quad (3)$$

ここで、 Δ は、増分記号、 P は荷重、 β は、加速度変化パラメータ、 u 、 \dot{u} 、 \ddot{u} は、それぞれ変位、速度、加速度、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は、質量行列、減衰行列、剛性行列である。なお、加速度変化パラメータ β は、最も計算の安定した $\beta = 0.5$ を用いた。

5. 数値解析例

対象とした実験は、van Mier ら³⁾ の行った両側切欠

キーワード フリーメッシュ法, 混合モード, 引張軟化則, 回転ひび割れモデル

連絡先 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL 098-895-8663

き付きモルタル試験体の引張せん断実験のうち、荷重経路 Lp4b, Lp4c である(図-4 参照). 荷重経路 Lp4b, Lp4c は、それぞれ AH 面にせん断荷重を 5kN, 10kN, 最大せん断耐力 (Ps,max) まで荷重し、それ以降はせん断力を一定とし、AB 面に引張荷重のみを荷重した. 解析は変位制御で行った. 解析に用いた節点分布(335 節点)を図-4 に示し、モルタルの材料特性を表-1 に示す. なお、圧縮に対しては完全弾性体を仮定している. 本解析では AB 上面に実験における荷重板をモデル化した高剛性トラス要素を導入し、AB 面の変位が FE 面と平行になるように解析を行った.

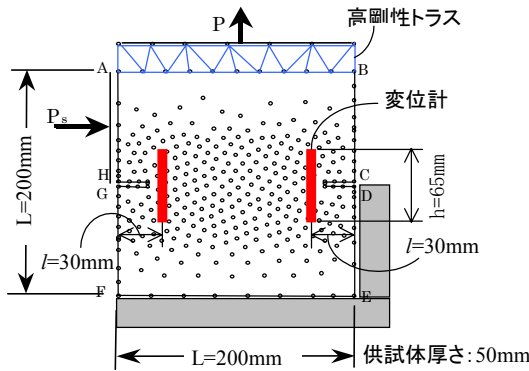


図-4 DEN 供試体 (335 節点)

表-1 材料特性

弾性係数 Ec(N/mm ²)	ポアソン比 ν	引張強度 ft(N/mm ²)	破壊エネルギー Gf(N/mm)
30000.0	0.2	3.0	0.1

図-5は、Lp4b, Lp4c の引張荷重—引張変位関係を示した図である. なお、引張変位とは図-4中にある変位計先端の節点変位の平均値を意味する. 本手法より得られた Lp4b の結果は、実験に比較し最大荷重でかなり高めではあるが、J.Pamin らの解析値⁴⁾とほぼ近い値を示した. Lp4c の実験結果はせん断載荷において試験体内のひび割れ面に骨材のかみ合いによるせん断摩擦が生じ、これが引張荷重によって開放されないで圧縮反力が生じている. 本手法や J.Pamin らの解析結果も実験値同様に圧縮反力が生じている (図-5 下段).

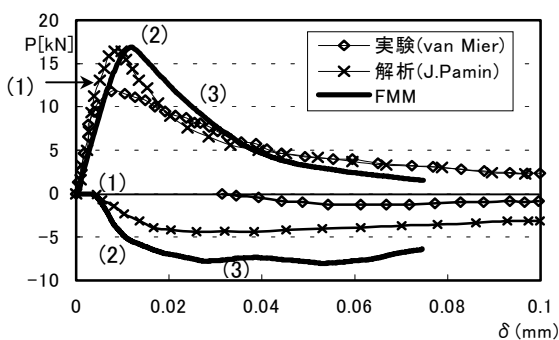


図-5 引張荷重—引張変位関係 (Lp4b, Lp4c)

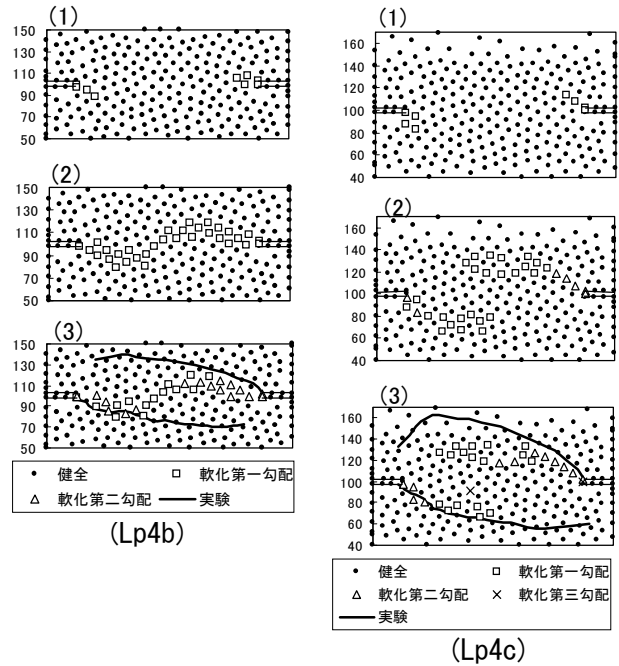


図-6 ひび割れ図

図-6は Lp4b, Lp4c の図-5に示した荷重レベルでのひび割れ状態であり、van Mier らの実験³⁾による最終ひび割れも示した. Lp4b は切欠き先端から発生し、せん断の影響でふくらみを持って進展し、中央でS字形に連結し、Lp4c はほぼ実験結果と同様な結果を得た.

6. おわりに

FMM で、コンクリートの混合モード破壊解析を行い、有効な解を得ることができた.

謝辞: 本研究は、文部省科学研究費 (課題番号: 13355005) の援助を受け、清水建設 (株) の長谷川俊昭様から有益なご意見を頂いた. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 山田典典: フリーメッシュ法の並列化, 東京大学修士論文, 1997
- 2) 富山潤, 伊良波繁雄, 矢川元基, 矢吹哲哉: フリーメッシュ法によるコンクリートの引張破壊挙動の解析, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.1, pp.29-38, 2000.3
- 3) van Mier, J. G. M., Schlangen, E., and Nooru-Mohamed, M. B.: Shear fracture in cementitious composites Part I: Experimental observations, Proceedings of the First International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS-1), Elsevier Applied Science, pp. 659-670, 1992
- 4) Pamin, J., and de Borst, R.: Gradient-enhanced smeared crack models for finite element analysis of plain and reinforced concrete, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings of FRAMCOS-2, AEDIFICATIO Publishers, Germany, pp.871-884, 1995