

フリーメッシュ法によるコンクリートの引張破壊の数値シミュレーション

琉球大学 学生員 富山 潤 琉球大学 正会員 伊良波 繁雄
琉球大学 松原 仁 東京大学 矢川元基

1. はじめに

本研究の目的は、メッシュレス法的一种であるフリーメッシュ法(FMM)¹⁾をコンクリートの引張軟化解析に適用することである。解析では、ひび割れモデルとしてひび割れ帯モデルを用いた。また、増分法の基本式としてスナップバックのような不安定現象が生じた場合でも解析可能となるように動的釣合式である運動方程式を採用した。数値計算例として CT 試験体の解析を行い、本解析手法の妥当性を検討した。

2. フリーメッシュ法

FMM は、図-1 に示すように解析領域内に配置された各節点(中心節点)ごとに、その付近の節点(衛星節点)を集めてローカルな領域で一時的に三角形要素を作る。これらの一時的な三角形要素の要素剛性マトリックスから着目している中心節点に寄与する行成分のみを全体剛性マトリックスに足し合わせる。これをすべての節点で行い、全体剛性マトリックスを作成し、連立一次方程式を解く。このように FMM はローカルな要素生成、全体剛性マトリックスの作成および求解までをシームレスに行うことが可能である。FMM の応力度評価は、節点単位で行う必要があり、その算定は中心節点まわりの一時的なローカル要素の応力の平均値とした。

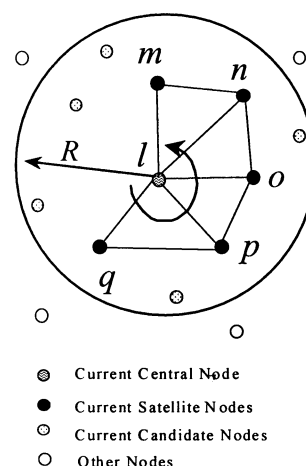


図-1 中心節点に関するローカル要素

3. 解析方法

本解析ではひび割れモデルとして、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。このモデルは、最大主応力がコンクリートの引張強度に達するとひび割れが生じると仮定している(図-2 参照)。また、引張軟化曲線モデルとして図-3 に示す2直線モデルを採用した。式(1)にひび割れ要素の応力-ひずみマトリックス $[D_{cr}]$ を示す。式(1)の1行1列の項 E_{cr} は、ひび割れと直交する方向のコンクリートの特性(軟化特性)を示し、式(2)から求めることができる。

$$[D_{cr}] = \begin{bmatrix} E_{cr} & 0 & 0 \\ 0 & E_c & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 E_c はコンクリートのヤング係数、 G はせん断弾性係数、 β はせん断弾性低減係数(0.0~1.0)である。本解析では、 $\beta=0.001$ を用いた。

$$\begin{aligned} E_{cr} &= E_c \cdot E_{cr1} / (E_{cr1} + E_c) \\ E_{cr} &= E_c \cdot E_{cr2} / (E_{cr2} + E_c) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 E_{cr1}, E_{cr2} はそれぞれ軟化曲線の第一、第二勾配である。

応力状態に対応する E_{cr} を用いることでコンクリートの軟化挙動を表現できる。

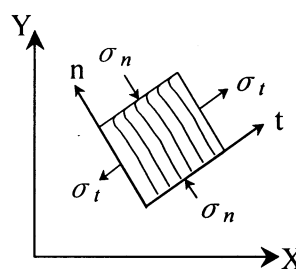


図-2 ひび割れモデル

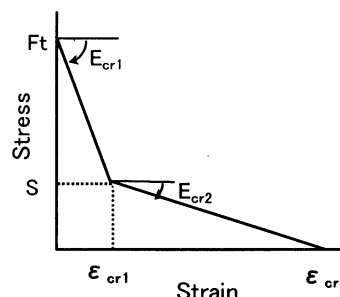


図-3 引張軟化曲線

キーワード: フリーメッシュ法, 引張軟化曲線, 動的釣合式, コンクリート

〒903-0213 沖縄県西原町字千原 1 番地, TEL:098-895-8663, FAX: 098-895-8663

増分法の基本式として、スナップバックのような不安定現象が生じても安定して解析可能な動的釣合式である式(3)に示す運動方程式を採用した²⁾。数値積分法としてはニューマークの β 法を用いた。各増分段階で最大引張主応力を求め、軟化、除荷の判定を行った。なお、解析は変位制御で行った。

$$[M]\{\Delta\ddot{u}\}+[C]\{\Delta\dot{u}\}+[K]\{\Delta u\}=\{\Delta P\} \quad (3)$$

ここで、 Δ は、増分記号、 P は荷重、 u 、 $\dot{u}$ 、 $\ddot{u}$ は、それぞれ変位、速度、加速度、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は、質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。

4. 数値解析例

ここでは、本解析手法の妥当性を検討するために図-4に示すスケールの異なるCT試験体3体(Large, Medium, Small)の引張軟化解析を行い、六郷³⁾の実験結果と比較した。コンクリートの材料特性および寸法を表-1に示す。また、解析では対称性を用い供試体半分をモデル化し、その節点分布を図-5に試験体 Large(1338 節点)の場合のみ示した。なお、試験体 Medium(1789 節点)、Small(676 節点)の場合も Large 同様切欠き付近の節点分布を密にして解析を行った。

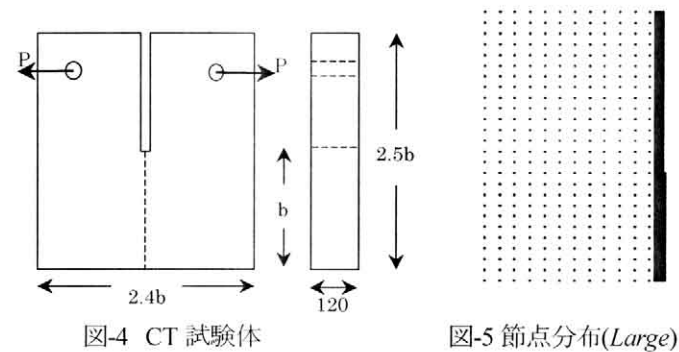


表-1 試験体の材料特性および寸法

	Large	Medium	Small
b (mm)	600.0	300.0	150.0
f_t (N/mm ²)	4.29	4.29	4.29
E_c (N/mm ²)	30438.8	30438.8	30438.8
ポアソン比	0.15	0.15	0.15

解析では、ひび割れは切欠き線上にのみ生じるとし、引張軟化曲線は折れ曲がり荷重が引張強度の 1/4 にある 1/4 モデルを用いた。

解析結果は、図-6 に荷重と開口変位(COD)の関係として示した。

図-6 より、Large の解析結果は最大荷重で 8% 程度低めとなっているが、実験同様最大荷重後、変位の増加とともに荷重は低下した。試験体 Medium, Small の解析結果はともに実験結果と良好な一致を示した。また、軟化は切欠き先端からほぼ垂直に進行するのを確認している。

5. まとめ

本論文では、比較的新しい数値解析手法であるフリーメッシュ法をコンクリートの引張軟化解析に適用した。適用例としてCT試験体の引張軟化の解析を行い、実験結果と良好な一致を示した。

以上のように本解析手法の妥当性を示された。

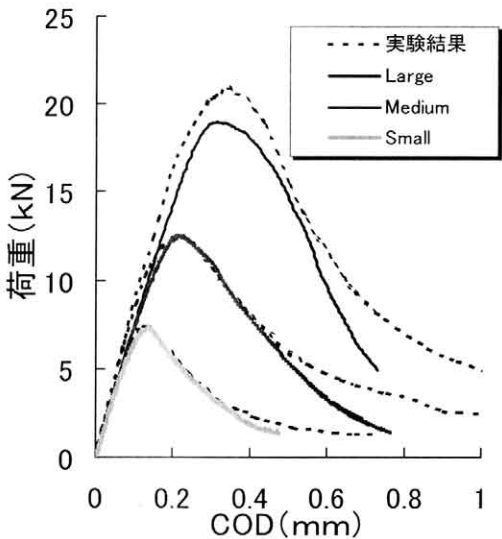


図-6 荷重-COD 曲線

【参考文献】

- 1) 山田知典: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, 他: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) K.Rokugo, F.H.Wittman, P.E.Roelfstra, E.Brunwiler : Different Methods to Determine Fracture Energy and Strain Softening of Concrete, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, pp.663-668, 1987