

## FE-RBSM の開発及びコンクリートの破壊解析への適用

琉球大学 学生会員 ○神田 康行 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

## 1. 目的

固体を有限要素の集合体に理想化した場合の変形は、要素内部の変位と要素間のすべりによる変形の2つに支配され、弾性域では前者が重要で、塑性域では後者が重要となる<sup>1)</sup>。このような観点から本研究では、変位の連続性が保証される弾性域は有限要素法(FEM)、要素間のすべりが重要となる塑性域は極限解析専用モデルである剛体ばねモデル(RBSM)を用いるという離散ひび割れ解析法の一つとして、有限要素-剛体ばねモデル(FE-RBSM: Finite Element-Rigid Bodies-Spring Model)を提案する。

## 2. FE-RBSM の計算方法

## 2. 1 FEM と RBSM の要素内自由度の関係

一般に、FEM で用いる有限要素の自由度は2でありRBSMの自由度と一致しない。しかし、有限要素に回転角の自由度を導入すると有限要素の自由度は3となりRBSMの自由度と一致する。よって、弾性域はFEMで計算し、塑性域ではRBSMで計算するということが可能になる。本研究では使用する有限要素として、関口、菊池の仮定<sup>2)</sup>に基づいた回転自由度を有する平面三角形要素(TDs: Sekiguchi's Triangular element with Drilling dofs)を用いることにした。図-1にTDsの変位場を示す。

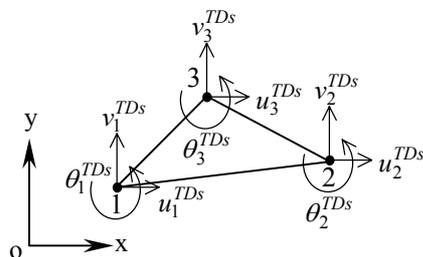


図-1 回転自由度を有する三角形要素

## 2. 2 TDs の精度評価

TDsの精度評価として形状関数が1次、2次の三角形要素と比較を行った。解析モデルは図-2に示す

1:10の片持ち梁で行い、ヤング係数は30000.0N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は0.25である。なお、TDs及び2次要素の面積積分はガウスの3点積分を用いた。

図-3に得られた結果を示す。T3は1次要素、T6は2次要素である。図-3からT6が最も精度が良く、T3の精度は理論解に達していない。TDsは1次要素と2次要素のちょうど中間にあり、2次要素に近い精度を持つのがわかる。

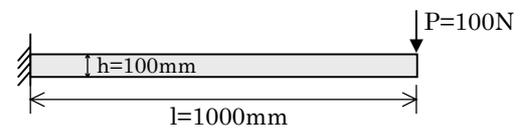


図-2 精度評価解析モデル

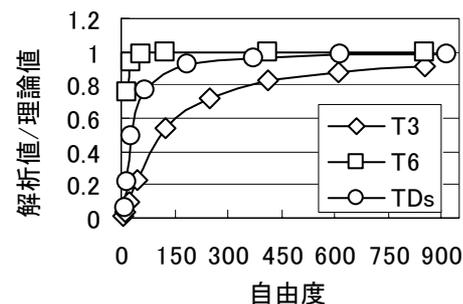


図-3 TDsの精度評価

## 2. 3 要素内すべりをRBSMで表す方法

有限要素解析で要素が降伏した後は要素間のすべりが重要になる。本研究では有限要素の降伏後は剛体要素になると仮定し、すべりは剛体要素内を3分割した剛体要素境界にばねを設けることで評価する。すべりの方向は主応力方向と垂直に入ることを考慮して図-4のように要素内を分割した。

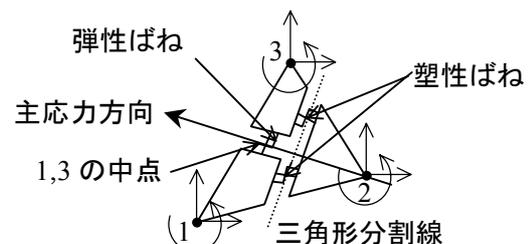


図-4 剛体要素内分割

キーワード 有限要素法, 剛体ばねモデル, 自由度の数, 離散ひび割れ解析

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

また、有限要素降伏後の RBSM のばね剛性として、すべり方向にある 4 つのばねは塑性とし残りの 2 つのばねは弾性とした。

3. 数値解析例

数値解析例として、Cornelissen<sup>3)</sup>らが行ったコンクリートの直接引張試験をシミュレートした。解析モデルは図-5 であり、解析領域は対称性を考慮して全体の 1/4 のみ要素分割を行った。

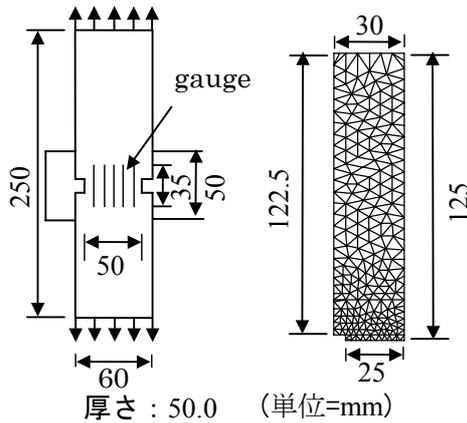


図-5 解析モデルと要素分割

解析には、コンクリートの引張破壊挙動として、一般的に良く用いられる引張軟化曲線の二直線モデル<sup>3)</sup>を用いた。本研究ではこの軟化則を降伏後の塑性垂直ばねに用い、塑性せん断ばねにはせん断弾性低減係数として 0.4 を乗じた。解析に用いた諸係数を表-1 である。载荷は変位制御で行い、強制変位増分  $\Delta u = 1 \times 10^{-4}$  (mm) を作用させた。

解析より、得られた切り欠き内部の平均主応力とエクステンソメーターの伸びの関係を図-6 に示す。Cornelissen らが行った実験範囲と本解析結果は比較的良好な一致をしている。

次に、破壊進行状況を図-7 に示す。まず、切り欠きの左端からひび割れが入り (a)、ひび割れは右端に向かって、徐々に進行していきやがて到達する (b)。また、第一勾配終了時には、第二勾配に入るばねが見られ始め (c)、最終的にはほとんどのばねが第二勾配に入るといのが確認できた (d)。

表-1 コンクリートの材料特性及び解析条件

弾性係数 $E(N/mm^2)$	39270.0
ポアソン比	0.3
引張強度 $f_t(N/mm^2)$	3.2
破壊エネルギー $G_f(N/mm)$	0.10313
引張軟化モデル	1/4モデル

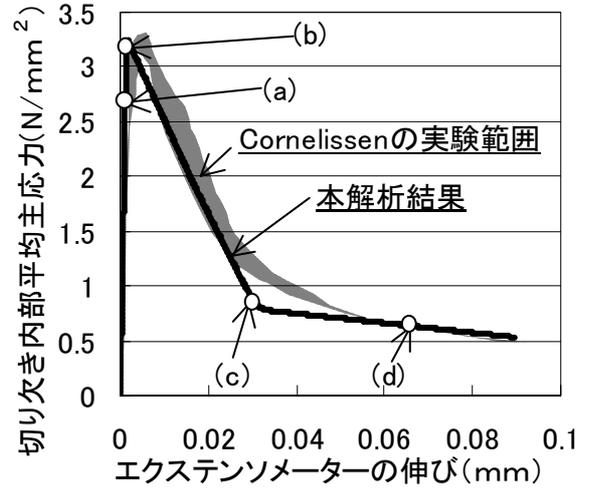


図-6 切り欠き内部平均主応力とエクステンソメーターの伸びの関係

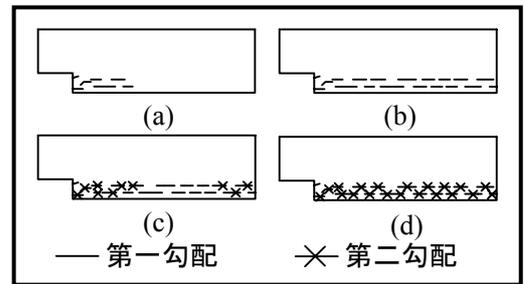


図-7 切り欠き内部破壊進行状況

4. まとめ

本研究では、FEM と RBSM を融合した離散ひび割れ解析手法の一つである FE-RBSM を提案した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) FE-RBSM の特徴として、弾性域は FEM で計算し、塑性域は RBSM で計算するため、弾塑性解析において良い解を期待できる。
- 2) FE-RBSM によるコンクリートの直接引張試験をシミュレートした結果、Cornelissen らが行った実験範囲と比較的良好な一致を示した。

参考文献

- 1) 川井忠彦編：固体力学諸問題の離散化極限解析，生研セミナーテキスト，生産技術奨励会，1982
- 2) Sekiguchi, M and Kikuchi, N: Re-examination of membrane elements with drilling freedom, Proceedings of the fifth world congress on computational mechanics, 2002
- 3) 伊良波繁雄，富山 潤：離散ひびわれ用のハイブリッドストレス要素を用いたコンクリートの破壊解析，土木学会論文集，No.739, pp.121-135, 2003.8