

3次元フリーメッシュ法によるコンクリートのひび割れ解析に関する研究

琉球大学 学生会員 ○山城 建樹・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 松原 仁
 東京大学 矢川 元基

1. はじめに

計算機性能の飛躍的な進歩に伴い、解析対象が大型化・複雑形状化する傾向にあり、メッシュレス法の研究が盛んに行われている。本研究ではメッシュレス法の一つであるフリーメッシュ法(FMM)を利用して、アルミニウム製高欄の腐食によるコンクリート地覆の3次元ひび割れ解析を行った。

2. 三次元フリーメッシュ法

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四面体要素を作る。これらの一時的な四面体要素の要素剛性マトリックスから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。これを全ての節点で行い、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及び求解までをシームレスに行うことが可能である。

局所要素生成法として本研究では、比較的ひずみの少ない四面体要素を作成することができるDelaunay分割を導入した。Delaunay分割を用いることによって縮退が生じない場合には常にDelaunay条件を満たすように局所要素生成が行われる。なお、縮退関係にある節点群においては、全体で一意的な節点番号を考慮して局所要素生成を行うことにより、異なる中心節点間の局所要素の一意性が保たれるようにしている。

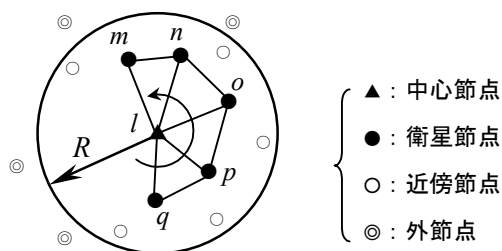


図-1 ローカル要素概念図

3. ひび割れ要素の定式化及び解析法

コンクリート構造物の破壊解析において一般的に用いられるモデルとして、離散ひび割れに対して「仮想ひび割れモデル(Fictitious crack Model)」、分布ひび割れに対して「ひび割れ帯モデル(Crack band Model)」を挙げることができる。増分解析手法が用いられている。しかし、本研究では引張強度に達した後はひび割れ面の応力が0となるような単純な方法を仮定する。すなわち、領域に存在する節点の最大主応力が引張強度に達する荷重比率(変位比率)を計算し、次の段階ではその節点をひび割れ節点とすればよい。具体的に示すと、最大主応力がコンクリートの引張強度に最も近い節点応力($\sigma_{1,max}$)を探索し、この節点をひび割れ節点とする。つぎに、これがコンクリートの引張強度(f_t)になるような倍率(HM)を求め、この倍率をすべての節点のもつ物理量(p_i)に乗じて解とする(式(1)参照)。

$$HM = (\sigma_{1,max} - f_t) / f_t \quad (1)$$

$$P_i = p_i / (1 + HM)$$

ここで、 P_i は変換後の*i*節点の物理量を表す。

次の段階で、健全節点に関しては弾性理論から導かれる応力-ひずみマトリックスを使用し、ひび割れ節点に関しては、ひび割れ帯モデルのひとつである固定ひび割れモデルと同じように、最大主応力方向に垂直な方向にひび割れ方向を仮定し、応力を解放する。

ひび割れ要素の応力-ひずみマトリックスを式(2)に示す。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & E_c & & & & \\ & & E_c & & & \\ & & & G & & \\ & 0 & & & G & \\ & & & & & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_{ns} \\ \varepsilon_{nt} \\ \gamma_{ns} \\ \gamma_{st} \\ \gamma_m \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(2)の E_c はコンクリートのヤング率、 G はせん断剛性係数である。また、ひび割れ要素の剛性マトリック

キーワード フリーメッシュ法, 3次元解析, 簡易ひび割れ解析法

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

ス $[K_{cr}]_e$ は、全体座標系から局所座標系への応力、ひずみ変換マトリックス $[T_\sigma]$ 、 $[T_\epsilon]$ を用いて式(3)のように全体座標系に変換した式を用いた。

$$[K_{cr}]_e = \int_V [B]^T [T_\sigma]^T [D_{cr}] [T_\epsilon] [B] dV \quad (3)$$

ここで、 $[B]$ はひずみ-変位マトリックスである。

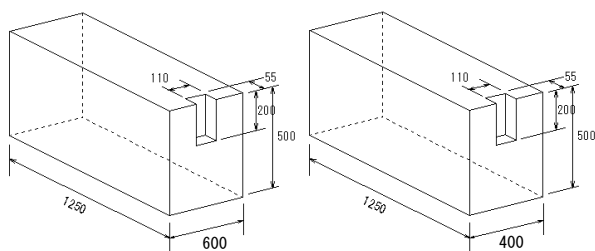
本解析手法は、コンクリートの引張軟化を考慮しておらず、コンクリートのひび割れ現象を簡略化した解析手法であると言える。このような方法は、増分解析のように数値解析上不安定になるようなことはなく、 HM を求め応力が低下するまで繰り返し計算をすることで複雑なコンクリートのひび割れ解析を比較的スムーズに行うことができるのが特徴である。FMMの応力評価やひび割れ評価は節点単位で行っており、その評価方法は文献(2)に詳しい。なお、本解析ではコンクリートの塑性は考慮していない。

4. 数値解析例

ここでは、沖縄県石垣島のS橋高欄支柱の埋め込み部である地覆コンクリートに発生したひび割れ(写真-1)についての解析を示す。解析対象は、橋梁の歩道側及び車道側の地覆部分で、高欄を中心に対称な形状であることから、その1/2領域をモデル化(図-2)し解析に用いた。解析では膨張による力が作用したと仮定し、支持部のコンクリート面に等分布荷重を与え、ひび割れ進展状況と写真-1を比較検討した。なお、車道部および歩道部の総節点数はそれぞれ9354及び9250であり、弾性係数 $25000[N/mm^2]$ 、ポアソン比0.2、引張強度 $3.0[N/mm^2]$ としている。

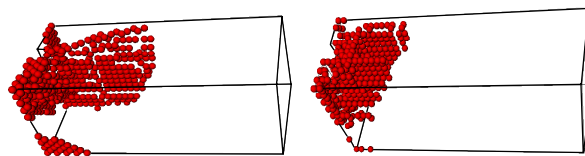


写真-1 S橋地覆の現況写真



(a) 車道側解析モデル (b) 歩道側解析モデル

図-2 解析対象領域の1/2モデル



(a) 車道側解析結果 (b) 歩道側解析結果

図-3 解析結果（ひび割れ状況）

図-3は、解析により得られたひび割れ状況である。ひび割れは歩道車道側とも高欄支柱部の表面の角付近から発生し、ひび割れは橋梁側面及び歩道側面に 45° の方向に進行し写真-1とほぼ一致している。また、歩道側は局所的なひび割れが生じ、車道側はひび割れが分散しているのが確認できる。これは、実際の橋梁調査でも確認できている。本解析での内圧の変化を図-4に示す。

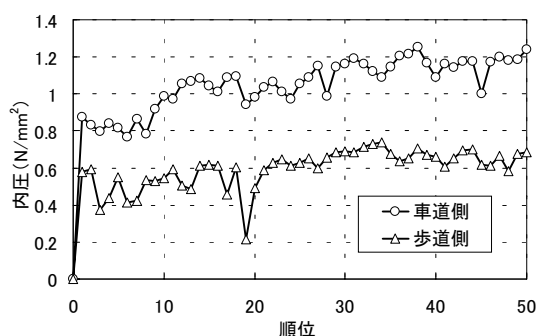


図-4 内圧の変化

図-4より、歩道側は車道側よりも低い内圧でひび割れが発生しており、歩道側の方がひび割れ易いことが分かる。これは、調査においても、歩道側のひび割れが激しく分布していることから、本解析結果は良好な結果であると考えられる。なお、ひび割れ発生時の内圧は歩道側及び車道側でそれぞれ、 $5.81[N/mm^2]$ 、 $8.77[N/mm^2]$ であった。

5. まとめ

本研究では、ひび割れを簡略化した構成式で表現する方法を提案し、数値解析例として実構造物に対するひび割れシミュレーションを行い良好な結果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）の援助を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 矢川基樹・細川孝之：フリーメッシュ法の三次元問題への適用，日本機械学会論文集(A編)，64巻，1998
- 2) 富山潤：コンクリートの引張破壊挙動に関する解析的研究，琉球大学，琉球大学博士論文，2000.3
- 3) 伊良波繁雄・具志幸昌・和仁屋晴謹：有限要素法による鉄筋コンクリートとの付着強度解析，琉球大学，1982