

コンクリート構造物の 非線形き裂進展解析

岡山大学大学院 学生員 ○ 大杉敏之
岡山大学環境理工学部 正員 廣瀬壮一

1. はじめに

コンクリート材料では骨材によるブリッジングや微小き裂の発生などにより、完全には開口しないき裂面が形成されるため、その破壊挙動は複雑なものとなる。このようなき裂面での力学モデルとして、き裂面に仮想的な力を作用させる結合力モデルがしばしば用いられる。ここではコンクリート構造物の非線形き裂進展挙動の解明を目的として、結合力モデルを用いた有限要素解析を行った。

2. 解析モデル

対象としたモデルは図1左図で示す、3点曲げを受ける無筋コンクリートで、2次元平面ひずみ状態として解析を行った。境界条件として支点での変位がゼロと仮定した。き裂先端での結合応力と開口変位の関係は図1右図に示す引張軟化曲線によって得られ結合応力 F は、き裂面に図1左図のように働く。なお、荷重 P は未知数とし、次節で説明するように解析の結果得られる値である。要素形状は6節点アイソパラメトリック要素を用い、き裂先端近傍に関しては中間点をき裂先端方向の1/4点に移動させた特異要素を用いた。

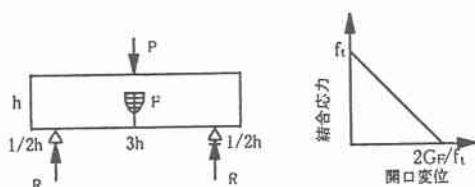


図1 解析モデルと引張軟化曲線

3. 非線形有限要素解析

有限要素法による剛性マトリックスを $[K]$ とすると、節点変位 $\{u\}$ と節点力 $\{f\}$ の間には、

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係を得ることができる。図1より、本解析モデルに作用する節点力は荷重 P 、結合力 F 、反力 R であるから、それぞれの節点力に対応する節点変位を u^P, u^F, u^R とすると、式(1)は次式のように書ける。

$$[K] \begin{Bmatrix} u^P \\ u^F \\ u^R \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P \\ F \\ R \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{あるいは} \quad [\bar{K}] \begin{Bmatrix} u^P \\ u^F \\ R \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P \\ F \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2.b)は、支点での変位境界条件 ($u^R = 0$) を考慮して、式(2.a)を書き換えたものである。式(2.b)の両辺に逆行列 $[\bar{K}]^{-1}$ を掛けると、

$$\begin{Bmatrix} u^P \\ u^F \\ R \\ u \end{Bmatrix} = [\bar{K}]^{-1} \begin{Bmatrix} P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + [\bar{K}]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ F \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

を得る。上式より、荷重 P と結合力 F を求めれば各節点変位ならびに反力を得ることができる。荷重 P と結合力 F は以下のようにして求めた。

結合力 F は引張軟化曲線によって開口変位の非線形関数として与えられる。よって、結合力 F を求めるには繰り返し計算を必要とする。ここでは、第一ステップにおいて適当な結合力 F を初期条件として与え、得られた開口変位より図1の引張軟化曲線を用いて結合力を求め、それを次のステップの既知の結合力とした。

一方、荷重 P はき裂先端での応力拡大係数 K_I がゼロという条件から求めた。前述したように、コンクリート材料のき裂先端は骨材によるブリッジングや微小き裂の発生によって応力の特異性は無く、 $K_I = 0$ の状態にあると考えられる。き裂先端に、特異アイソパラメトリック要素を用いた時、応力拡大係数 K_I とき裂先端近傍の節点変位には

$$K_I = \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \frac{G}{\kappa + 1} \left[4(u_a^F - u_{a'}^F) + (u_b^F - u_{b'}^F) \right] = 0 \dots\dots\dots (4)$$

の関係がある。ここで、 G : せん断弾性係数、 L : 特異要素長、 u^F : 法線方向節点変位で、 $\kappa = 3 - 4\nu$ (ν : ポアソン比) となる。

式3より u^F は P の関数として表されるので、それを式4に代入することにより、 P を求められる。得られた P, F を式3に代入すれば節点変位が得られる。以上のステップを、荷重 P の値が収束するまで繰り返す。なお、実際の計算では、 $[K]^{-1}$ を、直接計算することなくコレスキー分解を用いて計算容量の節約を図っている。

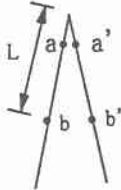


図2 き裂先端付近の4点

4. 解析結果

様々なき裂長に対して解析を行った結果、得られた、荷重－節点変位、荷重－き裂長の関係を図3,4に示す。また、境界条件が少し違うが解析結果との比較のために日本コンクリート工学協会の共通解析問題に依拠して行われた実験結果を図3に重ねて曲線で示す。なお、節点変位は下端中央の変位である。

解析結果から得られる荷重－変位曲線、荷重－き裂長曲線を見ると、荷重値が50KN以下では、実験値が示す範囲内にあるが、それ以上の荷重になると曲線の勾配が変化して、実験値から遠ざかっている。

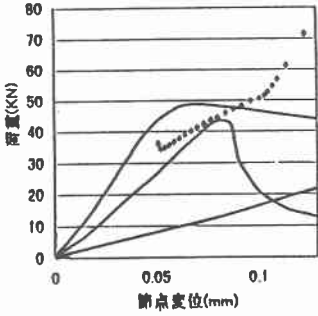


図3 荷重－変位曲線

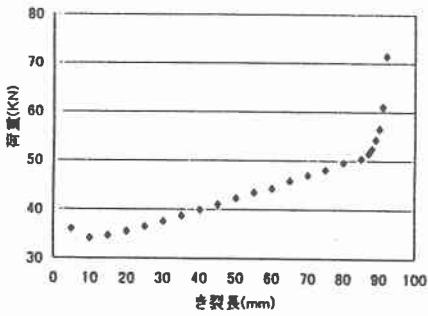


図4 荷重－き裂長曲線

5. あとがき

今回の解析結果は、実験結果と比較すると荷重50KNまではよく類似した解が得られていると思われるがそれ以降は精度の良い解が得られたとは言い難い。今後は、要素の細分割、引張軟化特性、数値的な安定性などを再検討して、解析精度の向上を図る予定である。

参考文献

- 1) 鷲津久一郎、宮本博、山田嘉昭、山本善之、川井忠彦：有限要素法ハンドブックⅠ、培風館、1981
- 2) 谷口健男、廣瀬壮一、松永昭吾、中桐恒明：不均一な材料の力学挙動に関する研究、岡山大学工学部共通講座応用力学研究室、1994