

破壊力学に基づくコンクリートひび割れ解析モデルの考察

鉄建建設（株）技術研究所	正会員	松岡 茂
同 上	正会員	益田 彰久
同 上	正会員	土井 至朗

1、はじめに

コンクリートのひび割れ発生・進展を考慮した有限要素法解析を行うには、破壊力学の考え方を応用することが有効である。ひび割れのモデル化の手法としては、大きく離散ひび割れモデルと分布ひび割れモデルに分けられる。分布ひび割れモデルではひび割れ発生後もコンクリートを連続体と考えるため、ひび割れの進展による要素の再分割を必要としないが、その一方でモデルの要素形状・大きさによる解析値の依存性やストレスロック等の問題点が指摘されている。

そこでDahlblomら¹⁾により提案されている、離散ひび割れモデルの一手法である仮想ひび割れモデルを分布ひび割れモデルに適用したモデルを用いてプレーンコンクリートのひび割れに関する解析を行い、問題点に対する考察を行った。

2、応力-ひずみ関係と引張軟化曲線のモデル化

圧縮側の応力-ひずみ曲線は二次曲線タイプ²⁾を使用した。また、ひび割れが発生する前の応力-ひずみ関係は二次曲線の初期接線勾配に従うこととした。プレーンコンクリートの引張軟化曲線としては図-1に示すHordijk³⁾が提案した式があるが、ここでは同式の軟化開始時における接線勾配を持つ直線とした。また、ひび割れ開口幅を要素のひび割れ方向の投影長さで除すことにより、応力-ひずみ関係へ変換している。ひび割れ面でのせん断伝達についてもひび割れ開口幅に依存するものと考えた。図-2に示すようなひび割れ開口に伴うせん断剛性の保持率を定め、ひび割れが発生した要素のせん断剛性が式(1)により表されるものとした。

$$G = \beta \frac{E}{2(1-\nu)} \quad (1)$$

ここで、G：ひび割れ発生要素のせん断剛性、E：コンクリートの弾性係数、 β ：せん断剛性保持率、 ν ：コンクリートのポアソン比である。

3、解析手法

解析は有限要素法を用いた。使用要素は平面応力条件下のアイソパラメトリック要素で、最大主応力（引張が正）がコンクリートの引張強度に達したとき最大主応力と直交方向にひび割れが発生するものとした。すなわち最大主応力方向は引張軟化曲線に従い、最小主応力方向はひび割れ発生以外の応力-ひずみ関係に従う、直交異方体要素である。圧縮側の降伏条件はDrucker-Pragerの降伏曲面に従うものとし、降伏後における除荷経路は初期接線勾配に従うものとした。引張側については、ひび割れが局所化するという点に着目し以下のように解析での判定方法を定めた。あるひび割れ発生要素の最大主応力が図-1に示す引張軟化曲線上のA点にあるとした場合、次のインクリメント計算ではそれらのひび割れ発生要素はすべて除荷経路に分岐するものとする。このときのインクリメント計算の結果が同図B点に示すような、最大主応力が引張軟

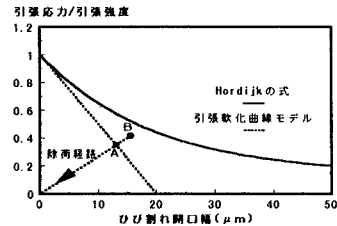


図-1 引張軟化曲線

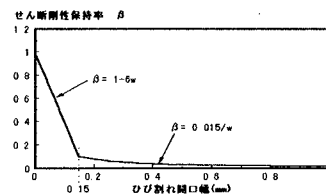
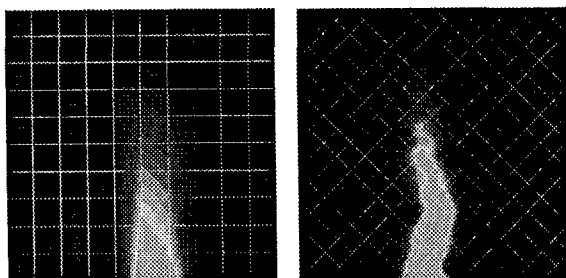


図-2 せん断剛性保持率



(a) 直交分割（要素一辺 10mm） (b) 斜め分割（要素一辺約 7mm）

図-3 モードⅠのひび割れ状況

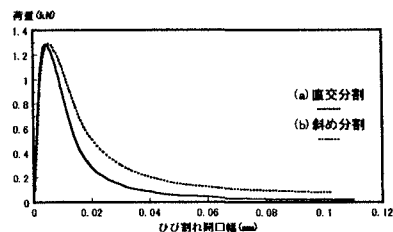
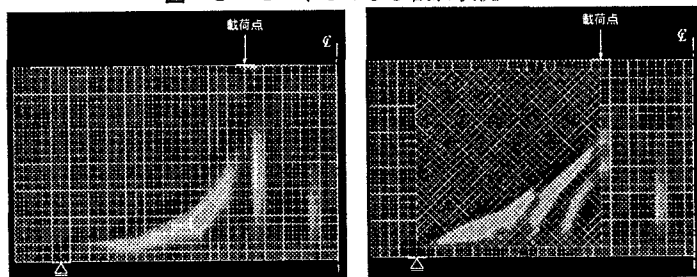


図-4 モードⅠの荷重-変位曲線



(a) 直交分割 (b) 斜め分割

図-5 モードⅡのひび割れ状況

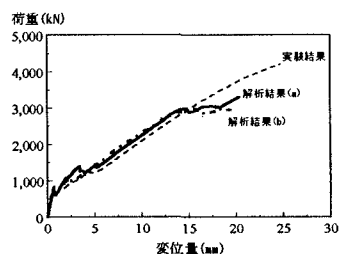


図-6 モードⅡの荷重-変位曲線

化曲線外に位置する要素のみ除荷経路上にないものと判断し、引張軟化曲線上に戻して再度同インクリメントの計算を行うようにした。

4. 解析による検証

図-3に示す要素分割形状および要素の大きさの異なる2つのモデルにより解析を行った。この解析ではモデル左右の両下端を外側へ引っ張り、モードⅠの破壊によりひび割れが発生するようにしている。解析結果として図-3にひび割れ状況を、図-4に荷重-変位曲線を示す。ひび割れ進展はミクロ的にはメッシュ分割方向に依存しているが、マクロ的には同じようなひび割れが発生していると判断される。また荷重-変位曲線も最大荷重までは両者一致し、それ以降もほぼ同じ傾向を示しており、要素寸法・形状による依存性は少ないものと考えられる。次に図-5に示す2つのモデルにより解析を行った。これは梁曲げの解析であり、モードⅡの破壊によりせん断スパン部にひび割れが発生する。解析結果として図-5にひび割れ状況を、図-6に荷重-変位曲線を示す。やはりひび割れの進展はメッシュによる依存性が見られるが、マクロ的には一致している。また図-6では両解析、さらに別途行っている実験結果とも良い一致を示しており、やはりモードⅡにおけるひび割れに対するメッシュ方向の依存性は少ないものと考えられる。

5. まとめ

以上のように分布ひび割れモデルを用いた有限要素法解析では要素の形状・大きさの依存性がないことが確認された。また従来、モードⅡの条件下ではストレスロッキングの発生が指摘されていたが、ひび割れ面でのせん断力の伝達を考慮することによりその影響を回避することができることを確認した。

【参考文献】

- 1) Dahlblom, O. and Ottosen, N.S. : Smeared Crack Analysis Using Generalized Fictitious Crack Model、Journal of Engineering Mechanics、ASCE、Vol.116、No.1、pp.55-76、1990.
- 2) コンクリート標準示方書〔平成8年制定〕設計編、土木学会
- 3) Hordijk, P.A. : Local Approach to Fatigue of Concrete、Doctoral Thesis、Delft University of Technology、1991.