

破壊力学によるコンクリートのひびわれ進展解析

藤 居 良 夫*

Crack Propagation Analysis of Concrete by means of Fracture Mechanics Yoshio FUJII

Synopsis Recently, the fracture mechanics has been applied with remarkable success to the analysis of fracture phenomena of concrete such as occurrence and propagation of cracks. In the conventional FEM analysis on the basis of the tensile capacity of concrete, if the maximum principal tensile stress exceeds the tensile capacity of concrete, cracks are assumed to develop and the normal stress across a crack may be zero.

On the other hand, in the analysis of concrete by means of the fracture mechanics, the transport systems of stresses between cracked planes are considered after occurrence of cracks.

As for models of the fracture mechanics for concrete, the crack band model and the fictitious crack model are used. Furthermore, the fracture energy and the tension softening curve have an important meaning in analyzing. The analysis by using the crack band model is achieving steady results. In this approach, the analytical treatment in establishment of width of fracture process zone and modification of stress-strain matrix of cracked elements becomes complicated.

However, in the fictitious crack model, the analysis is possible only by expressing crack by separation of nodal points and propagating it one by one.

In this paper, the fictitious crack model is especially taken up and the applicability to concrete and the numerical procedure of this model are explained by way of analytical examples which contain comparison with the crack band model.

I. ま え が き

近年、コンクリートの引張破壊に対して破壊力学を用い、ひびわれの発生・伝播を伴う破壊現象を合理的に解析する試みがなされるようになった。従来の引張強度基準によるFEM解析では、引張応力が引張強度に達してひびわれが発生すると、ひびわれ直交方向の引張抵抗は失われると仮定しているのに対し、破壊力学による解析では、ひびわれ発生後のひびわれ面間の応力伝達機構を、

ひびわれ直交方向の引張軟化特性の仮定により考慮する。破壊力学モデルとしては、仮想ひびわれモデルとひびわれ帯モデルがあげられ、解析においては破壊エネルギーと引張軟化特性の形状が重要な意味をもつ。最近では、ひびわれ帯モデルを用いた解析がよく行われ、かなりの成果を上げている。この場合、ひびわれ破壊領域の幅の設定やひびわれ要素の応力-ひずみマトリックスの修正などの複雑な処理が必要である。一方、仮想ひびわれモデルの場合、ひびわれを節点の分離で表現し、それを1節点ずつ進展させるだけで容易に解析が可能である。ここでは、とくに仮想ひびわれモデルをとりあげ、ひびわれ

* 農村工学講座

帯モデルとの比較を含めた解析例を通してモデルの適用性と数値処理の方法について報告する。

II. 破壊力学モデル

破壊力学の概念の導入は、ひびわれの破壊進行領域の挙動に対して、引張軟化特性と破壊エネルギーを結合してモデル化し、コンクリート構造の破壊現象を巨視的に捉えていくところにある。解析において、この引張軟化曲線と破壊エネルギーも入力すべき材料特性となり、これらの算定が必要になる。一般的に、引張軟化曲線は、切り欠き梁の曲げ試験からJ積分法や新J積分法を用いて間接的に求める方法が提案されている。また、破壊エネルギーは、切り欠き梁の3点曲げ試験の荷重-変位曲線により決定される。ひびわれ帯モデルの場合、ひびわれ帯内に微細ひびわれが一様に分布するとして、コンクリートの構成則は、健全なコンクリートとひびわれコンクリートで表現する。ひびわれコンクリート要素は、ひびわれ直交方向の剛性を零とすることにより、直交異方性の応力-ひずみ関係を用いる。そのマトリックスに対して、破壊エネルギーおよびひびわれ破壊領域の幅を考慮する。ひびわれ要素の応力には、そのときの相当ひずみに基づいて修正した応力を用いる。ひびわれ破壊領域の要素は、限界開口ひずみに達するまで引張軟化特性から与えられる結合応力が作用しているものとする。一方、仮想ひびわれモデルの場合、モードIの1本のひびわれ引張縁から圧縮縁に向かって、直線的に進展する過程を追跡する。解析の各ステップにおいて、ひびわれ先端が引張強度に達し引張軟化開始直前にある、すでに分離された節点には、その幅に応じて引張軟化曲線から定まる結合力を等価節点力として作用させる。各ひびわれ節点での変位の適合条件、ひびわれ先端での力の釣り合い、そして各ひびわれ節点での引張軟化特性を考えて、まず各ひびわれ節点の変位、荷重重および各ひびわれ節点の結合力を未知量とした連立方程式が得られる。これを解くことから得られる荷重重と節点結合力を外力として入力し、全体系をもう一度FEM解析することで、そのステップでの

解が求められる。両モデルとも、常にひびわれ先端の応力は引張強度に達しているものとして、ひびわれ要素を1要素ずつ、あるいはひびわれ節点を1節点ずつ進展させて逐次計算を行う。コンクリートの引張軟化特性を両モデルで図示すると、Fig.1のようになる。また、両モデルの引張軟化特性を一般によく用いられる2直線モデル(1/4モデル)で表すとFig.2のようになる。ここで、 f_t は引張強度、 G_F は破壊エネルギー、CBWはひびわれ破壊領域の幅である。

III. 解析例

中央に集中荷重が作用する中央下端に切欠きのある無筋コンクリート梁供試体を考え、その右半分の要素分割図をFig.3に示す。ひびわれ帯モデルでは、左端の暗く塗った要素例をひびわれ破壊領域とした。仮想ひびわれモデルでは、左端の節点を分離していった。また、六郷氏らの実験結果から、次の材料特性を用いた。

$$f_t = 34 \text{ kgf/cm}^2, G_F = 0.194 \text{ kgf/cm}$$

弾性係数 $E = 400000 \text{ kgf/cm}^2$, ポアソン比例 $\nu = 0.2$
 引張軟化特性はFig.2のような2直線モデルを用い、ひびわれ領域以外は弾性体と仮定して定ひずみ三角形要素を用いた。仮想ひびわれモデルによる解析結果について、各ステップでのひびわれ面における結合力の分布状態をFig.4に示す。ひびわれ開始直前における節点は引張強度に相当する引張力が作用していて、すでにひびわれの発生している節点にも引張軟化状態の結合力が作用していることがわかる。両モデルによる荷重-載荷点変位の解析

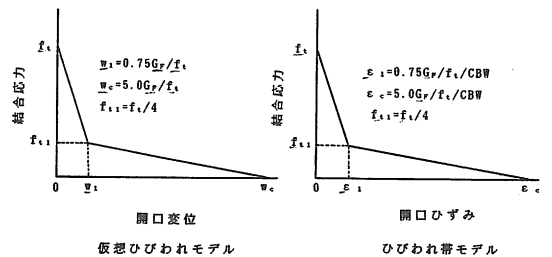


Fig.2 2直線モデル (1/4モデル)

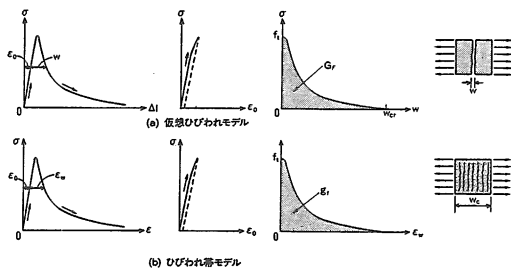


Fig.1 引張軟化特性のモデル化¹⁾

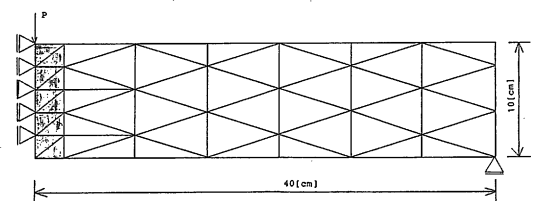


Fig.3 コンクリート梁の要素分割²⁾

結果をFig.5に示す。両モデルで、最大荷重以降において多少差が認められるが、最大荷重の大きさ、曲線の立ち上がり、荷重下降域の曲線などは実験結果をうまく表現している。従って、数値処理などの容易な仮想ひびわれモデルも、適切な引張軟化特性を与えれば十分適用性があるといえる。

次に、近年重要性を増しているフィルダム監査廊の内空部上端に温度ひびわれが発生した場合を考える。従来の解析や経験より、まず最初に問題になるひびわれがこの内空部上端に発生することが知られていることから、この部分の温度ひびわれを取り上げ、堤体荷重によるひびわれの進展を仮想ひびわれモデルで調べた。Fig.6に解析断面を、また次の材料特性を用いた。

コンクリート $f_t=30\text{kgf/cm}^2$, $G_F=0.1\text{kgf/cm}$
 $E=210000\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.17$
 岩盤 $E=15000\text{kgf/cm}^2$, $\nu=0.2$

その結果、各ステップでのひびわれ面における結合力の分布状態をFig.7に示す。この場合も、ひびわれ開始直前である節点は引張強度に相当する引張力が、すでにひびわれの発生している節点には引張軟化状態の結合力が作用していることがわかる。そして、内空部上端に発生したひびわれが進展していくには、最終的に設計荷重(堤高約100m程度の堤体荷重を考えた)の10倍以上の荷重が必要で、現実に問題になることはないといえる。

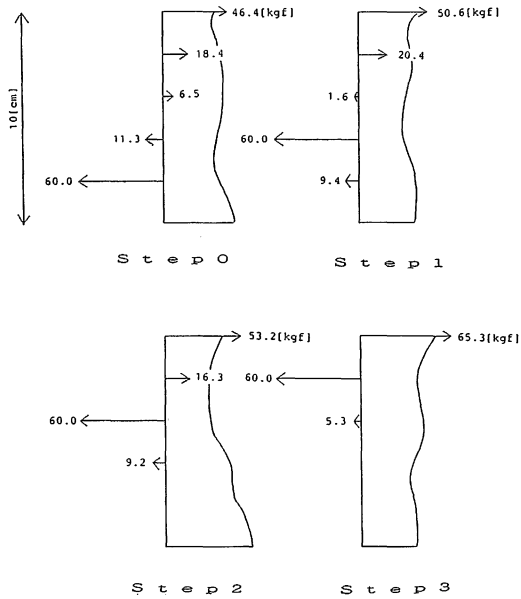


Fig.4 ひびわれ面の結合力の分布状態

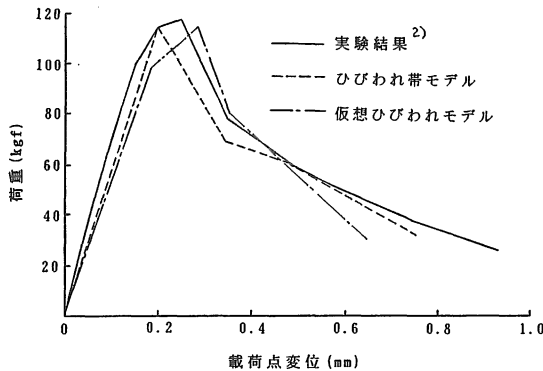


Fig.5 荷重-載荷点変位の関係

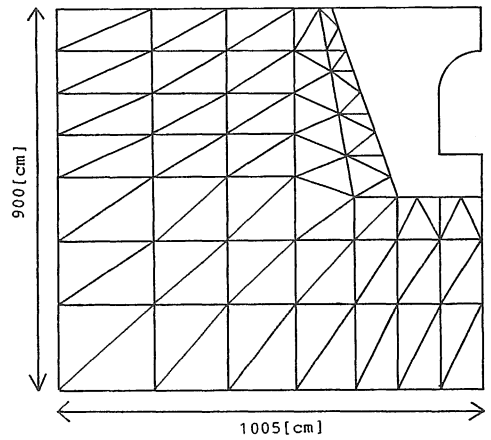


Fig.6(a) フィルダム監査廊の解析断面

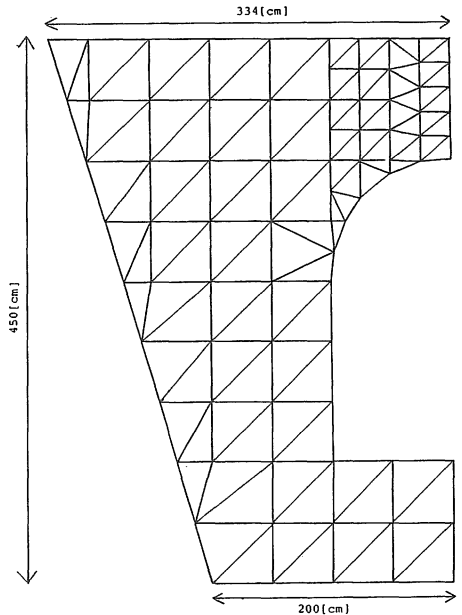


Fig.6(b) 監査廊の要素分割

IV. あとがき

以上のひびわれ進展解析結果から次のような結論が得られた。

1) 破壊力学パラメータとして、破壊エネルギーを用いた

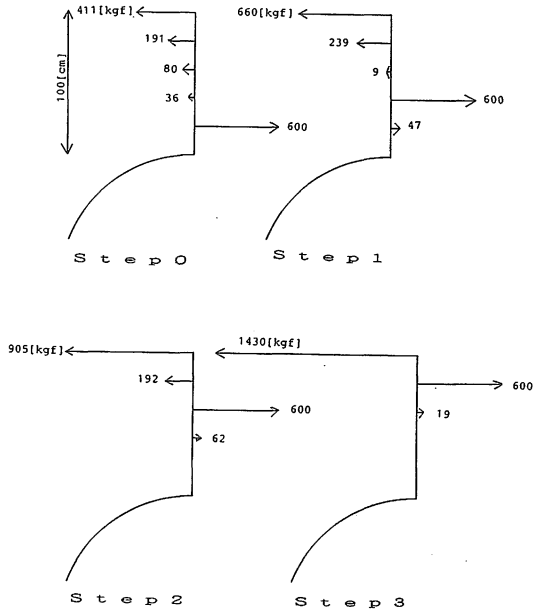


Fig.7 ひびわれ面の結合力の分布状態

場合、コンクリートに特有な性質である引張軟化挙動のモデル化が容易に行える。

- 2) 切欠きのあるコンクリート梁の解析より、コンクリートの破壊エネルギー、引張軟化特性、引張強度などが結果に及ぼす影響の程度を知ることが出来る。
- 3) ここで用いた仮想ひびわれモデルによるコンクリート梁の解析は、ひびわれ帯モデルによる解析と同程度に実験を合理的に表現できる。
- 4) フィルダム監査廊の内空部上端に発生した温度ひびわれは、堤体荷重の増加により進展していくが、この進展には設計荷重の何倍もの荷重が作用した場合である。従って、内空部上端の温度ひびわれの発生によるひびわれ断面の耐力低下は問題にならない。

引用文献

- 1 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム，1990
- 2 ROKUGO, K., IWASA, M., SUZUKI, T. and KOYANAGI, W.: Fracture Toughness and Fracture Energy, ed. H. Mihashi et al., Balkema: 153-163, 1989
- 3 RILEM: Fracture Mechanics of Concrete Structures, ed. L. Elfgren, CHAPMAN AND HALL, 1989