

I-33 梁の曲げに破壊における亀裂の進展と引張軟化曲線とを構成する数値モデルの研究

岐阜大学工学部 ○正会員 藤井康寿

岐阜大学工学部 正会員 中川建治

1. まえがき

近年、コンクリート等の複合材料に対して破壊力学を適用して、その複雑な破壊現象を説明することを目的とした研究が報告されている。完全に開口しているクラックの先端に微視的現象の生じている領域であるフラクチャープロセスゾーン(破壊進行領域)が存在することにより、コンクリート特有の複雑な破壊現象が生じていると考えられている。コンクリートの破壊現象を予測するためには、このプロセスゾーンをモデル化して解析することが必要である。コンクリートの破壊力学に関する研究では、プロセスゾーン内の挙動について、破壊エネルギーと引張軟化曲線などの引張軟化特性を結び付けてモデル化し、数値解析に取り込むことによって、ひびわれの進展に伴うコンクリートの破壊現象が検討されている。本研究では、梁の曲げ破壊時の荷重-変位の関係及びクラックの進展に伴う応力と開口変位との関係(いわゆる引張軟化曲線)に関して一つの数値モデルを想定して解析を試みたので報告する。

2. 解析方法

クラックを有する板の近似的なモデルとしてクラックを有する半無限板(図-2)の点線で示した部分を想定して、これをコンクリートの四点曲げ破壊試験の供試体(図-1)に相当するものとする。

応力関数は、 y 軸上の区間($a, -a$)を直線状のクラックとする無限弾性板のWestergaard解の虚数部分を採用すると $y = \pm a$ で無限大の応力集中を与えるので実用上は不都合である。しかし、段・中川¹⁾が提唱した重み積分法でリガメント長さ a に関して重み積分すれば、有限な応力集中を構成する解に変換できる。このような応力関数の特徴は、弾性体という仮定でありながらフラクチャープロセスゾーン(破壊進行領域あるいは非線形領域に相当)を形成できるという点である。重み積分法で用いる重み関数は、従来標準化された関数を用いて解析されていたが、図-3に示すようにリガメント長さを表すパラメータ a に対して定義域を $(a, a+b)$ として、定義域内に新たに屈折点 b_1 を設定して総面積が1となる任意重み関数を実現し、本研究で必要とする応力および変位関数を導いている。

最初に、荷重-変位曲線をシュミレーションするために、以下に示す仮定に基づいて解析を試みた。

クラックの生じていない状態では応力と変位は弾性係数の比で増加して行くが破壊強度 σ_{yd} に達するとクラック先端にフラクチャープロセスゾーンが形成されて、耐力は負の勾配で急に減少する。そして真のクラックの増大と開口変位の増加によって、最後に破断する。いずれの段階においても応力集中の最大値は $\sigma_{max} = \sigma_{yd}$ 一定であり、クラック線上(y 軸上)の圧縮応力と引張り応力の総和は等しい。クラックは y 軸上のリガメント長さ a とフラクチャープロセスゾーンの長さ b を足した $a+b$ 上を進行する(換言すれば、 $a+b$ の長さが減少することによりクラック進展が実現する)。

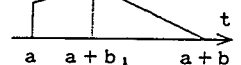
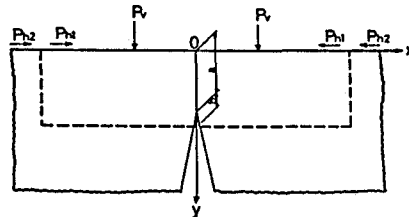
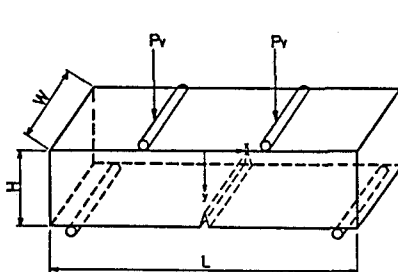


図-2 二次元問題へのモデル化 図-3 任意重み関数の形状

図-1 コンクリートの四点曲げ破壊試験の供試体

y 軸上の長さ $a+b$ を次第に減少させるときに藤井・段・中川²⁾ が提唱した拘束条件を満たす未定係数を選点法によって求める。この未定係数を各応力関数に乗じて総和して荷重-変位曲線を描く。さらに、リガメント長さ a とフラクチャープロセスゾーンの長さ b との和に対応する引張軟化曲線を描く。一例として断面の諸元を $L \times W \times H = 30 \times 7.5 \times 7.5$ (cm)、 $\sigma_{ca} = 58$ (kgf/cm²)、 $\nu = 0.2$ 、 $E = 2.8 \times 10^5$ (kgf/cm²)、 $a = 5.5$ (cm)、 $b = 2.0$ (cm) を初期値として与えた結果を図-4、図-5に示す。

図-4は $a+b$ の長さの減少に伴う荷重-変位、図-5は $a+b = 7.5$ (cm) (梁の底面) の引張軟化曲線を示している。図中の1~5の数字は下図の任意重み関数の形状及び右表の数字に対応している。また、右表のアンダーラインを引いた数字は屈折点 b_1 の初期値を示している。

4. まとめ

図-4、図-5に示した結果を比較して次の結論が得られる。

1) 本研究で提案した複素解析モデルは完全な弾性解でありながら材料の軟化特性と破壊過程を近似的に表現できる。このことは従来混成材料に対して用いられてきた FEM や BEM の数値解析法とは異なり、簡単な数値モデルを設定して、リガメント長さ a とプロセスゾーン長さ b の和を変化させることによって、耐力と開口変位の関係を有効的に追跡できるのが特徴である。

2) クラック進展後の荷重-変位曲線はいずれも下に凸の滑らかな曲線が得られ妥当性のある結果と言えよう(図-4参照)。

3) 図-5に示すように重み関数を任意形状とするために新しく導入したパラメータ b_1 の設定により、コンクリートの破壊力学で、引張軟化曲線をモデル化するために提案されている多直線モデルや曲線モデルを自由にコントロールすることが可能である。ただし、本研究で提案した引張軟化曲線(応力-開口変位曲線)は弾性体と仮定して解析を行っているため、クラックの進展による弾性エネルギー解放率 J を求めることには適しているが、非弾性仕事及び損失エネルギーをも含めた破壊エネルギー G_c を求めることは不可能である。

4) 今後の研究課題として、実際の実験値に適合した連続部分を構成する a 及び b の値を求めることとこの値が実際の材料特性の何を表しているかを検討する必要がある。次に上記3)で指摘した非弾性部分も考慮する応力関数を導く必要がある。

最後に、本解析に御協力いただいた卒業生の伊藤淳樹君に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 段・児島・中川：亀裂先端部分で有限な応力集中を与える応力関数、土木学会論文集、NO. 374, PP. 399-407 (1986)。
- 2) K. Fujii, S. Duan and K. Nakagawa, A MATHEMATICAL MODEL FOR FRACTURE PROCESS OF FOUR POINT BENDING CONCRETE BEAM. Engng Fracture Mech. (In press)

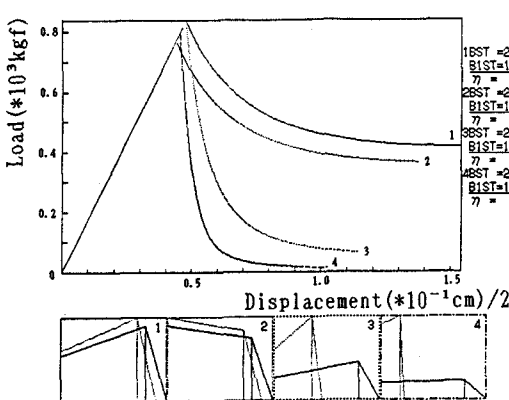


図-4 荷重-変位曲線

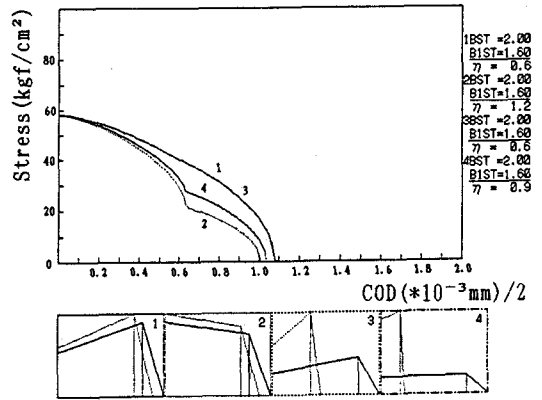


図-5 応力-開口変位曲線(引張軟化曲線)