

コンクリートの破壊力学モデル解析

(その1 等価Dugdaleモデルによる逐次解析)

正会員 岸谷孝一^{*1} 同 ○ 平居孝之^{*2} 同 村上 聖^{*3}

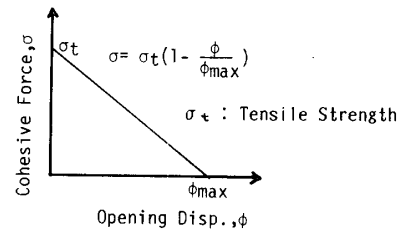
1 序 論

コンクリートの引張破壊過程の特徴が損傷領域の集中局在化にあるため、き裂先端からの幅の狭い塑性域の進展を、仮想き裂面に結合力が作用するモデルで近似した結合力モデル(Cohesive Force Model)の適用性が注目される。これまでに、Hillerborgら、Bazant、Visalvanichら、Wecharatanaら、Rotsらが類似のモデルを用いたコンクリート系材料のひび割れ伝播挙動の解析を試みている。これらの研究で注目されるのは、破壊過程域内部の構成法則に直接引張試験結果による引張応力ひずみ関係を直接的あるいは間接的に利用していることである。

コンクリートの引張破壊過程におけるひずみ軟化特性は、最大耐力点以降観察される主ひび割れ進展に伴う実質的な耐荷断面の減少が無視された、公称応力ひずみ関係に基づく多分に見掛けの巨視的な現象であると考えられるので、局所的な破壊過程域の構成法則の設定には十分な検討を必要とするように思われる。そこで本稿では、個々の構成法則に対応して同一のJ積分を与える等価なDugdaleモデルを利用して近似解析を行い、考察を試みる。

2 解析方法

結合力モデルの基礎概念は、き裂先端からの細長い塑性域の進展を仮想き裂面に結合力が作用するモデルで近似し、仮想き裂先端でもはや応力の特異性を生じない条件(即ち、その先端の応力拡大係数がゼロとなること)から、作用外力、塑性域寸法、き裂開口変位の間の唯一の関係を導くことにある。Dugdaleモデルの場合、結合力は開口変位によらず一定(降伏強度)と仮定しているため、その解析は線形破壊力学で扱える。しかし、結合力を開口変位の関数として導入する場合(Bareublatモデル)には、通常反復計算を含む非線形解析を必要とする。

Fig. 1 σ - ϕ Relation

今回用いたスパン高さ比3の切欠曲げ供試体の中点曲げ載荷の解析手順は次のようである。

- 1) 結合力を開口変位の関数で表す。ここでは図3に示すモデル①～③の3つの型の関数を選んだ。
- 2) ϕ の値を仮定し、同一のJ値を与える降伏強度 σ_Y を求め、等価なDugdaleモデルを設定する。例えば図1に示す結合力が開口変位の一次関数として与えられる場合は、J積分は次のようになるので、

$$J = \int_0^{\phi} \sigma d\phi = \int_0^{\phi} \sigma_t \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{max}}\right) d\phi = \sigma_t \left(\phi - \frac{\phi^2}{2\phi_{max}}\right)$$

$\phi = \phi_{max}$ と仮定したときは $J = \frac{1}{2} \sigma_t \phi$ だから、降伏強度 $\sigma_Y = \frac{1}{2} \sigma_t$ が仮想き裂面に一様に作用する等価なDugdaleモデルで置き換えられる。

- 3) 与えられた ϕ 、 σ_Y に対して、 $X = (E\phi) / (\sigma_Y W)$ を計算する。ただしE:縦弾性係数 W:はりせい
- 4) Xの計算値から、図2に示すDugdaleモデル解析結果を利用して、 $Y = \sigma_b / \sigma_Y$ 、 $Z = (ECMD) / (\sigma_Y W)$ を求め、荷重及びCMDを計算する。

以上の2)～4)を反復計算し、荷重とCMDの関係を求め、ここでは、相対切欠深さ比0.3の供試体に関する最大荷重の測定値と計算値がほぼ一致するように関数中のパラメータ(ϕ_{max} etc.)を定めた。なお、数値計算には筆者らの開発したプログラム^{1,2)}を用いた。

3 実験方法

試験は、寸法100×100×400mmで相対切欠深さ比0.1、0.3、0.5の中央切欠きのある供試体を用い、スパン高さ比3の中点曲げ載荷で行った。荷重と切欠端にナイ

フェッジを介して
取付けたクリップ
ゲージによるCMD
の関係は X-Yレ
コーダによって自
動記録した。

水セメント比50
%、砂体積率50%
(大井川産川砂、最
大寸法5.0mm、FM.
2.85)の調合のブ
レーンモルタルの
供試体で、材令28
日(20℃水中養生)
の湿潤状態で試験
に供した。またφ
100×200mm円柱供
試体の割裂引張強
度を直接引張強度
に換算した引張強
度は35.5kgf/cm²
であり、縦弾性係
数は2.83×10⁵kgf
/cm²であった。

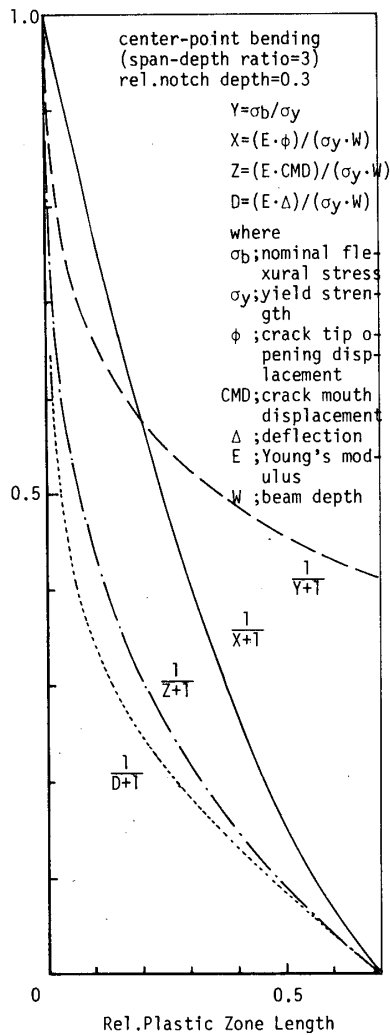


Fig.2 Results of Dugdale Model Analysis

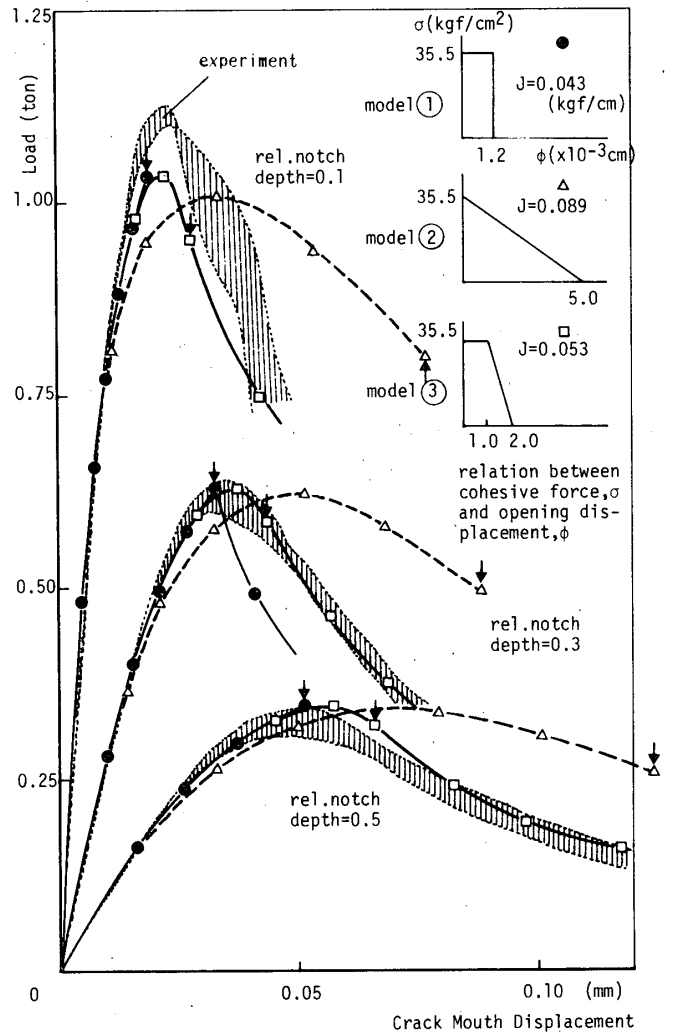


Fig.3 Comparison between Measured and Calculated Load-CMD Curves

4 結果

図3に実験結果と3種類の構成法則に対して求められた解析結果の比較を示す。モデル①は Dugdaleモデル(完全弾塑性)、モデル②はHillerborgらが解析で用いている直線ひずみ軟化則、モデル③は①と②の混合モデルである。モデル②の場合、主ひび割れは最大荷重点からかなり降下した点で生じ(↓印)、他のモデルと比較して同一荷重でより大きな変位を示し、実験結果との差が大きい。モデル③の場合、主ひび割れは最大荷重点から少し降下した時点で生じ、最大耐力点近傍の急激な非線形性の増大及び下降領域の挙動を十分な精度で把えているように思われる。

これらの結果から、切欠先端近傍で主ひび割れ発生前に観察されるヘアー状クラックが結合力低下の引き金となることが予想される。また、各モデルにより評

価された主ひび割れ進展開始時のJ値は、モデル②においてもっとも高く、モデル①と③の差は小さい。このことは、引張応力ひずみ関係を類推して選んだ破壊過程域内部の構成法則の関数の型によっては、危険側の評価をもたらす場合があることを示し、さらに最大荷重の測定値との一致のみから破壊靱性値を間接的に評価することは、構成法則の関数型及び関数中のパラメータの自由度からいって十分ではなく、変位などの他のパラメータとの一致も調べる必要がある。

文献) 1) 岸谷孝一、平居孝之、村上 聖、J-Integral Calculations with Boundary Elements, Proceedings of the Fifth International Conference on Boundary Elements, 1983, Japan 2) 平居孝之、弾性解析プログラムとその使い方、理工図書、1984

(*1 東京大学教授、工博 *2 大分大学教授、工博 *3 東京大学大学院生)