

# 38. コンクリートの破壊靱性評価 ( J積分評価法 ) に関する研究

東京大学 岸谷孝一 村上 聖  
大分大学 平居孝之

## 1. はじめに

コンクリートの破壊靱性評価に線形破壊力学 (LEFM) を単純に適用することはできない。それは、切欠き先端前方の (主として、マイクロクラックの発生、伝播に起因する) 非線形破壊過程領域の存在が一般に無視できないためである。このことは、例えば切欠き曲げ供試体の荷重-き裂口変位曲線が荷重初期にすでに線形弾性解析値から逸脱し、徐々に非線形性を増大させていることなどから明らかである。

そこで、小型供試体を用いた破壊靱性評価に種々の非線形破壊力学パラメーターの適用が従来から試みられてきた。そのうちで代表的なパラメーターとして、J積分値が挙げられる。J積分の評価には、実験的方法の Begley-Landes による方法、半解析的手法の Rice の簡便式を用いる方法、あるいは解析的方法の破壊力学モデル解析に基づく間接的評価などがある。

マイクロクラック領域を擬塑性域とみなせば、コンクリートに対しても金属同様、上記の方法を応用し、その適用性について議論することは有用と考えられ、これまでもそれに関連した研究報告がみられる<sup>2~5)</sup>。本研究では、上述の各種 J積分評価法をコンクリートに対して実験的に検討する。

## 2. 各種 J積分評価法

Begley-Landes による実験的方法は、非線形弾性材料に対して J積分がき裂長さの変化に伴うポテンシャルエネルギーの変化を示すことをもとに、切欠き深さの異なる供試体の荷重-載荷点変位曲線を実験的に求め、それにより得られるポテンシャルエネルギーを切欠き面積に対してプロットした曲線の接線勾配から J 値を評価するものである。その 1 例を図 1 に示す。

Rice による半解析的手法は、き裂が深く、荷重-変位曲線が主としてリガメント長さに依存する場合の切欠き曲げ供試体に対して導かれた次式に基づく評価である。

$$J = \frac{2}{B \cdot b} \int_0^{\Delta c} P \cdot d\Delta c$$

ここに、B; はり幅、b; リガメント長さ、P; 荷重、 $\Delta c = \Delta - \Delta_0$ ; 載荷点変位  $\Delta$  のうち切欠きがあるために生じる成分 ( $\Delta_0$ ; 無切欠き曲げ供試体の載荷点変位)。

間接的方法として、本研究では、既に報告した<sup>1)</sup> Dugdale モデルのコンクリートへの適用性を仮定し、そ

の解析結果に基づいて J 値を評価する。

## 3. 実験方法

破壊靱性試験は、寸法 100×100×400mm の切欠き曲げ供試体の中点曲げ載荷 (スパン・高さ比=3) で行った。切欠きは、厚さ 1.0mm のアクリル板を先打ちする方法で入れ、その深さは、はりせいに対する比で 0.1, 0.3, 0.5 の 3 種類を用いた。載荷点変位を計測するために、供試体は材令 21 日 (20°C 水中養生) 後 7 日間空气中で自然乾燥し、供試体両側面の載荷点下にアングル状金具を接着した。また、支承部のめり込みによる変位を除去するために、たわみ測定用治具はピン支持で直接供試体に取り付けた。測定方法は図 2 に示す通りであり、荷

図 1 Begley-Landes による方法

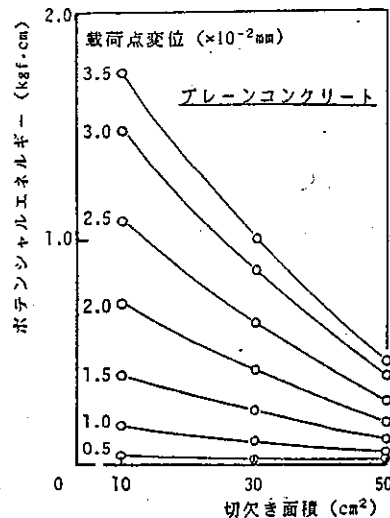


表 1 使用材料

セメント	普通ボルトランド
砂	大井川産川砂 表乾比重 2.62 最大寸法 5.0mm F. M. 2.85
砂利	大井川産川砂利 表乾比重 2.65 最大寸法 15.0mm F. M. 6.50

表2 使用調査

シリーズ	調査	引張強度* (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
モルタルA	水セメント比=60% 砂セメント比=2.0 (豊浦標準砂)	19.9	2.09
モルタルB	水セメント比=50% 砂体積率=0.5	27.8	2.49
ブレン コンクリート	水セメント比=50% 砂体積率=0.3 砂利体積率=0.4	32.8	3.36

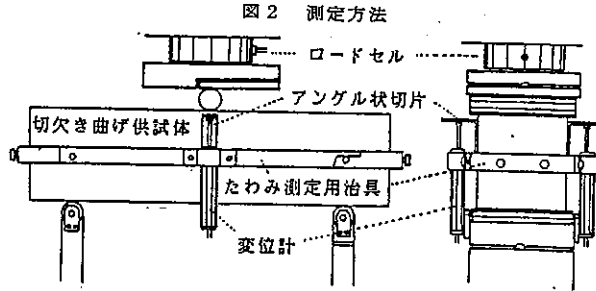
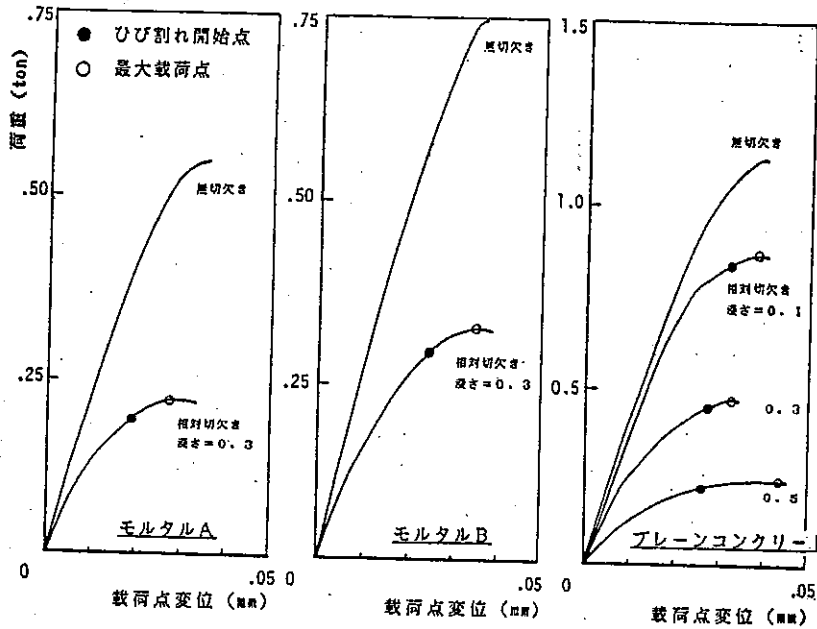


図3-1 荷重-載荷点変位曲線



重と変位との関係は、Y-Xレコーダーにより自動記録した。使用材料及び調査は、それぞれ表1、2に示す通りで、供試体は同一条件ごとに各3個ずつ作製した。

引張強度及び静弾性係数は、それぞれφ100×200mm円柱供試体3個の測定値の平均であり、前者については割裂引張強度を直接引張強度に換算した値を用い(換算式は文献7によった)、後者については圧縮割裂係数

の測定値である。

#### 4. 実験結果

図3~1, 2は、3種類の調査の供試体に関する荷重-載荷点変位曲線、並びに各種J値-変位曲線を示す。ただし、測定値は供試体3個の平均値である。また、同図中の●印はひび割れ開始点を、○印は最大荷重点を表す。Begley-Landesによる方法及びRice式による方法

図 3-2 各種 J 値 - 載荷点変位曲線

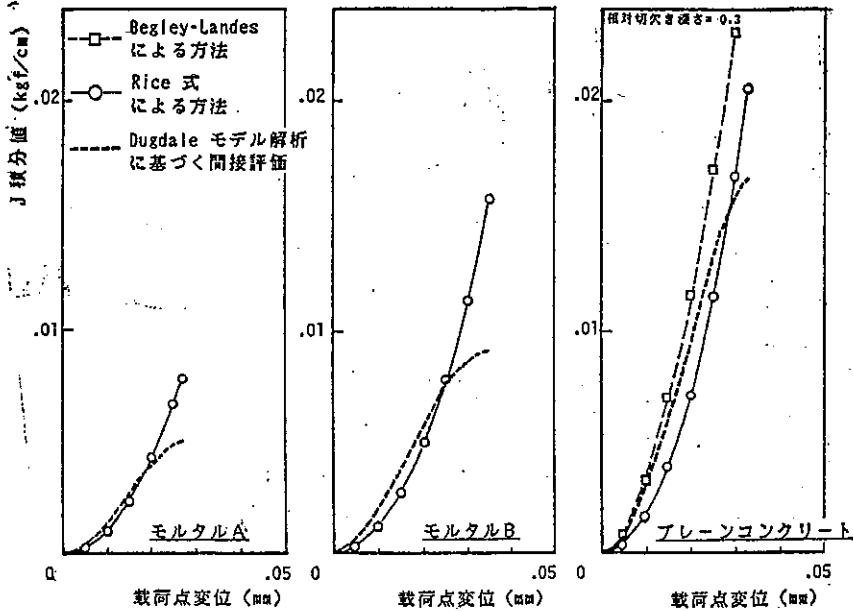
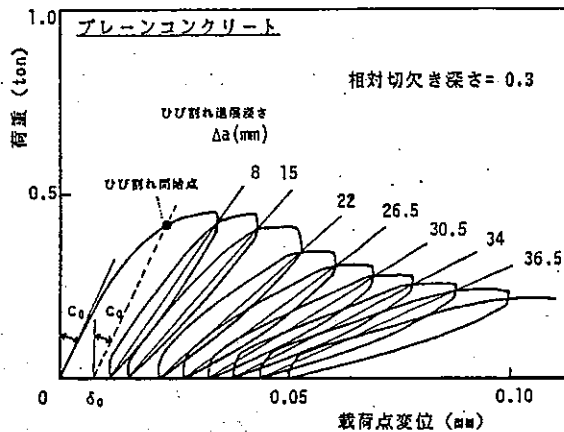


図 4 ひび割れ開始点の評価 - I



において荷重-載荷点変位曲線下の面積(ポテンシャルエネルギー)は、数値積分によって求めた。Dugdaleモデル解析に基づく間接評価では、引張強度に対する外力(公称曲げ応力度)比から解析的に一意的に定まる J 値を間接的に評価した。

ところで、ひび割れ開始点の検出は以下の方法を採用した。

(1) 繰返し載荷曲線のコンプライアンス増加率から解析的にひび割れ進展深さを予測する。その 1 例を図 4 に示す(評価された進展深さは、除荷後、染色により測定された深さにほぼ一致していることが確認された)。

(2) ひび割れ進展深さに対して残留変位及びコンプラ

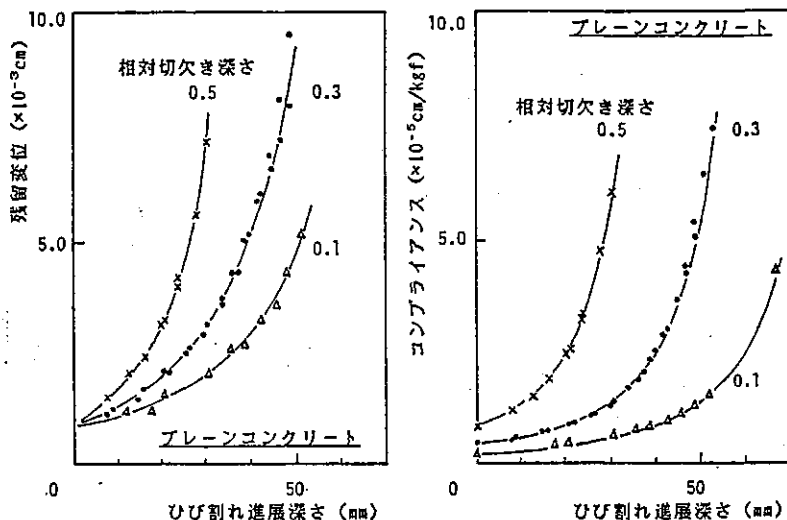
イアンスをプロットする(図 5)。

(3) ひび割れ進展深さが 0 のときの残留変位及びコンプライアンスの外挿値  $\delta_0$ 、 $C_0$  からひび割れ開始点を評価する(図 4)。

### 5. 考察

図 3-2 から推察されるように、ひび割れ開始点に至るまでの各種 J 値-変位曲線は、大体一致した挙動を示し、破壊靱性の大きい材料ほどその立ち上がり勾配が増加し、同一変位でより高い値を与える。また、最大荷重点で評価された J 値は、Dugdale モデル解析に基づく評価と他の 2 者の方法との間で大きな差を生じている。これは、ひび割れ開始後の荷重に比し変位の伸びが急増

図5 ひび割れ開始点の評価 - II



する領域で、評価に荷重値のみを用いる Dugdale モデル解析に基づく評価において変位に対する J 値の増加率が低減するためであり、この傾向は図に顕著に現れている。このターニングポイントは、ひび割れ開始点にほぼ一致しているように思われる。

このことは、逆に他の 2 者の方法の場合には、評価点即ち、ひび割れ開始点あるいは最大荷重点等の選定が得られる J 値に大きく影響することを示しているものと考えられる。特に、鋼繊維補強コンクリートのように、最大荷重点に達する前にすでにマトリックスひび割れがかなり進展し、そのために大きな非線形性を示す材料において上記のことはさらに顕著となり、従って、J 積分評価ではひび割れ開始点の検出が重要な課題であるように思われる。

## 6. まとめ

以上の結果から、本実験の範囲内で次のような知見が得られた。

(1) 切欠き先端の非線形挙動を間接的に知る上で、J 値-載荷点変位曲線は有効であり、コンクリートにおいても変位に対する J 値の変化は、初期の非線形から次第に線形的な増加に移行する様相が観測された。また、破壊靱性の大きい材料ほど、その曲線の立ち上がり勾配が増大し、同一変位でより高い J 値を与える。

(2) ひび割れ進展深さに対して残留変位及びコンプライアンスをプロットすることによって評価されたひび割れ開始点に至るまで、J 値-載荷点変位曲線は、Begley-Landes による実験的方法、Rice の簡便式を利用する半解析的手法、及び Dugdale モデル解析に基づく

間接的評価の 3 者の中で比較的一致した挙動を示し、ひび割れ開始点で評価された J 値はほぼ一致している。ただし、Begley-Landes による方法は、他の 2 者よりもやや高めの J 値を与えるようである。

(3) 最大荷重点で評価された J 値は、Dugdale モデル解析に基づく間接評価と他の 2 者による方法との間で大きな差を生じ、後者の場合には、評価点の選定が得られる J 値に大きく影響することが予想されるために、J 積分評価ではひび割れ開始点の検出が重要な課題であるように思われる。このことは、特に鋼繊維補強コンクリートのようにマトリックスひび割れ開始後かなりの耐力の増加がみられる材料では、さらに重要となることが予想される。

## 文 献

- 1) 岸谷他、コンクリートの破壊靱性に関する研究、セメント技術年報 38, 1984
- 2) S. Mindess et al., The J-integral as a Fracture Criterion for Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 7, 1977
- 3) V. Velazco et al., Fracture Behavior and Analysis of Fiber Reinforced Concrete Beams, Cement and Concrete Research, Vol. 10, 1980
- 4) A. Carpinteri, Static and Energetic Fracture Parameters for Rocks and Concretes, Materials and Structures (RILEM), Vol. 14, No. 81, 1981
- 5) 大郷他、J 積分によるコンクリートの破壊靱性の評価、第 2 回コンクリート工学年次講演論文集, 1980
- 6) 三好他、数値破壊力学、実教出版, 1980
- 7) 茂辺他、コンクリートの引張強度に関する研究、セメント技術年報 38, 1984