

# 論文 楔挿入割裂試験および3点曲げ試験における破壊力学パラメータの解析

石黒 覚\*

**要旨：**コンクリートのモードⅠ破壊試験法として楔挿入割裂試験および3点曲げ試験の2種類の試験法を適用し、モルタル、コンクリートおよび鋼纖維補強モルタルの破壊試験を実施した。計測した荷重・開口変位の結果から、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線などの破壊力学パラメータを解析し、供試体の寸法および試験法が破壊力学パラメータに及ぼす影響について検討した。破壊エネルギーの算定値は両試験法において差がみられ、また、楔挿入割裂試験ではリガメント長さを大きくすると増加する傾向が認められた。引張軟化曲線は両試験法の計測結果から多直線近似解析法を適用して精度よく推定できることがわかった。

**キーワード：**コンクリート、破壊試験法、破壊エネルギー、引張軟化曲線、破壊特性

## 1. はじめに

コンクリートの破壊現象はひび割れの発生および進展などが大きく関係しており、コンクリートの破壊挙動を精度よく解析するためには、ひび割れに起因するコンクリートの破壊特性を適切に評価できる解析モデルが必要である。現在、コンクリートの破壊特性を評価できるパラメータとして種々のものが提案されており、これらのうち破壊エネルギーと引張軟化曲線がコンクリートの破壊力学パラメータとして重要視されている。これらの破壊力学パラメータは、コンクリートの破壊試験における荷重・開口変位の計測結果から算定されるものであり、これを求めるための試験法としては、切欠き梁の3点曲げ試験法、楔挿入割裂試験法、CT試験法および直接引張試験法などがある。いずれの方法においても、破壊に至るまでの荷重・開口変位の挙動を安定して計測する必要がある。

本研究では、コンクリートの破壊特性の試験法としてTschech らの考案した楔挿入割裂試験法<sup>1)</sup>およびJCI調査研究委員会から提案された切欠き梁の3点曲げ試験法<sup>2)</sup>を適用し、コンクリート、モルタルおよび鋼纖維補強モルタルを対象として両試験法による破壊力学パラメータの算定結果を比較検討した。さらに、3点曲げ

試験の供試体折片を活用し、楔挿入割裂試験法を適用する方法についても検討した。

## 2. 実験および解析方法

### 2.1 楔挿入割裂試験法

楔挿入割裂試験法としてTschech らの考案した試験法<sup>1)</sup>を適用し、荷重・開口変位の挙動を計測した。試験装置ならびに供試体への載荷状態をそれぞれ図-1(a)および(b)に示す。

試験時には、楔、切欠きおよび支点が同一鉛直面内となるように供試体を設置し、電動式一軸載荷試験機により1mm/minの速度で楔を挿入させた。このとき、試験機からの荷重Fmは、容量9.8kNのロードセルにより計測した。なお、楔から荷重伝達版を介して供試体へ載荷される水平方向荷重Fhは、楔の角度αと荷重Fmから $Fh=Fm/(2\tan(\alpha/2))$ の関係式より求めた。

また、載荷点と同じ高さの位置に開口変位測定治具を固定し、容量5mmのクリップ型変位計を取付けて開口変位を測定した。開口変位は供試体の前面と後面の2ヶ所で測定し、それらの平均値で表した。試験機からの荷重および開口変位の各データは、自動デジタルひずみ測定器を用いて1秒間隔で計測および記録した。

楔挿入割裂試験用の供試体として、ここでは、

\* 三重大学助教授 生物資源学部共生環境学科 農博 (正会員)

寸法の異なる2種類の角柱供試体LSおよびSSを使用した。角柱供試体の形状寸法をそれぞれ図-2(a)および(b)に示す。これらは、それぞれ、 $15 \times 15 \times 53\text{cm}$ および $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の曲げ試験用の型枠を用いてコンクリートを打ち込み、試験前にコンクリートカッタを用いて3等分に切断して作製した。なお、供試体には、荷重伝達版の挿入部分として幅40mm、深さ20mmの細長いくぼみ部を設けている。また、試験前に各供試体のくぼみ中央に幅2mm、深さ20~55mmの切欠きを入れ、ひび割れがこの切欠き先端から発生するようにした。

## 2. 2 切欠き梁の 3 点曲げ試験法

プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法として、JCI 調査研究委員会から切欠き梁の 3 点曲げ試験法が提案されている<sup>2)</sup>。この試験法に基づいて作製した 3 点曲げ試験装置の概

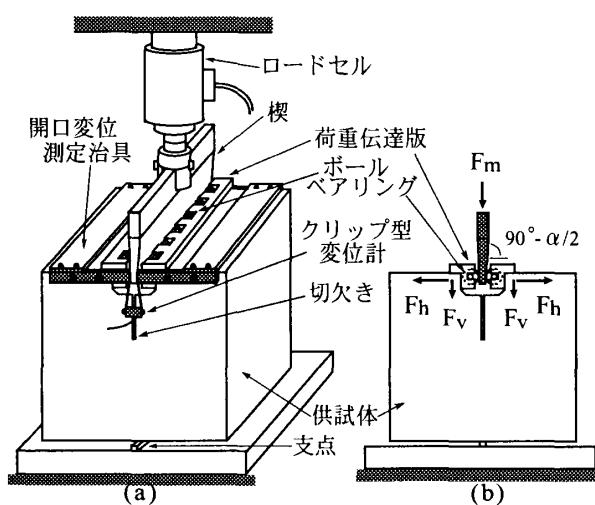


図-1 楔挿入割裂試験の概要

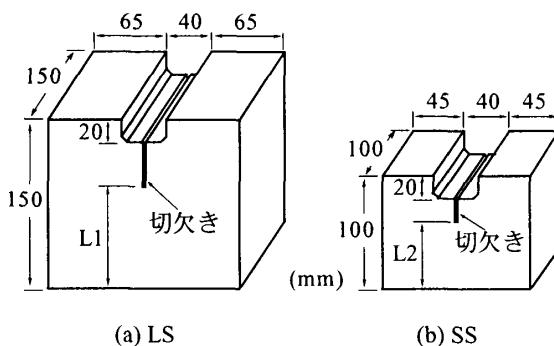


図-2 角柱供試体 LS および SS の形状寸法

要を図-3に示す。試験機のクロスヘッドの速度は0.15mm/minとし、荷重および開口変位の測定には楔挿入割裂試験の場合と同じ計測システムを適用した。ここで、供試体には $10 \times 10 \times 40$ cmの切欠き梁を用い、開口変位は供試体の下面中央の1箇所でクリップ型変位計を用いて計測した。さらに、3点曲げ試験終了後、供試体の折片を活用して楔挿入割裂試験を実施した。このため、図-4(a)に示すように、コンクリートカッタにより供試体の折片を所定の長さに切断し、また、同図(b)に示すように深さ50mmの切欠きを入れて $L_3=50$ mmとし、その後に瞬間接着剤を用いて厚さ20mmのみかけ石を貼り付けて楔挿入割裂試験用の供試体とした。

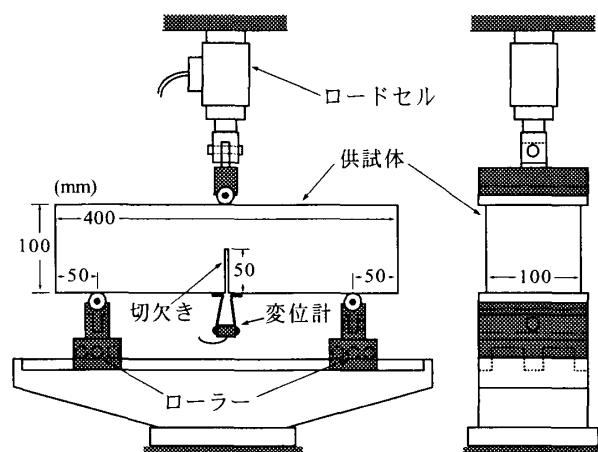


図-3 切欠き梁の3点曲げ試験の概要

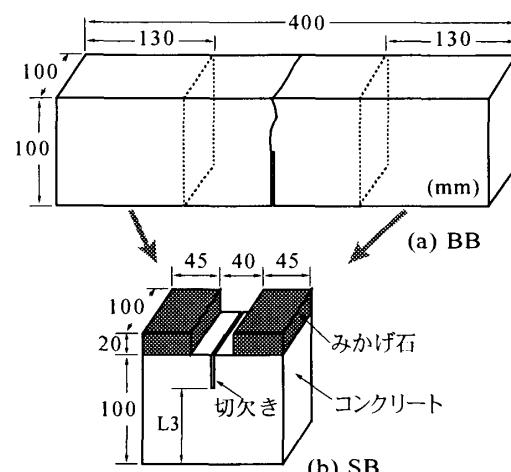


図-4 梁供試体 BB および折片から  
作製した角柱供試体 SB

表-1 コンクリートの力学特性

種類		W/C (%)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
CA	Concrete	60	27.5	2.53	24.5
CB	Concrete	50	35.7	2.79	26.6
MO	Mortar	50	36.0	3.11	21.5
SFM	Steel fiber reinforced mortar ( $V_f=1\%$ )	50	39.5	3.98	22.0

### 2.3 破壊エネルギーの算定

コンクリートの破壊エネルギーは、単位面積のひび割れを作るのに必要なエネルギー量として定義される。ここでは、楔挿入割裂試験法による荷重 - 開口変位の計測結果から、(1)式により破壊エネルギーを算定した。

$$G_f = W_1 / A_{lig} \quad (1)$$

ここで、 $G_f$  はコンクリートの破壊エネルギー ( $N/mm$ )、 $A_{lig}$  はリガメントの面積 ( $mm^2$ ) および  $W_1$  は荷重( $Fh$ ) - 開口変位(CMOD)曲線下の面積 ( $N\cdot mm$ ) を表す。

一方、3点曲げ試験の場合、次式を用いて破壊エネルギーを算定した<sup>2)</sup>。

$$G_f = (0.75W_c + We) / A_{lig} \quad (2)$$

$$We = 0.75[(S/L)m_1 + 2m_2]g \cdot CMOD_c \quad (3)$$

ここで、 $G_f$  はコンクリートの破壊エネルギー ( $N/mm$ )、 $A_{lig}$  はリガメントの面積 ( $mm^2$ )、 $W_c$  は供試体が破断するまでの荷重 - 開口変位(CMOD)曲線下の面積 ( $N\cdot mm$ )、 $S$  は載荷スパン ( $mm$ )、 $L$  は供試体の全長 ( $mm$ )、 $m_1$  は供試体の質量( $kg$ )、 $m_2$  は試験機に取付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量( $kg$ )、 $g$  は重力加速度( $9.807 m/s^2$ )、 $CMOD_c$  は破断時のひび割れ開口変位( $mm$ )を表す。

### 2.4 引張軟化曲線の推定

荷重 - 開口変位の計測結果から引張軟化曲線を解析する方法として、JCI 調査研究委員会から提案された多直線近似解析法を適用した<sup>2)</sup>。本解析では、先ずコンクリートの弾性係数を推定し、次に引張強度、最後に引張軟化曲線

の推定を行うという3段階の手順を適用した。

### 2.5 コンクリートの種類および特性

実験に使用したコンクリートは、表-1に示すようなコンクリート(CA および CB)、モルタル(MO) および鋼纖維補強モルタル(SFM)の4種類である。粗骨材は最大寸法 20mm の川砂利、細骨材には川砂を使用した。なお、鋼纖維は長さ 30mm のせん断ファイバーを使用した。

また、材令 28 日の円柱供試体による圧縮強度、割裂引張強度および静弾性係数を同表に示した。

破壊試験用の供試体についても材令 28 日まで標準水中養生を行い、供試体数は 3 個とした。

## 3. 結果および考察

### 3.1 荷重 - 開口変位曲線

楔挿入割裂試験により求めたコンクリート(CA および CB)、モルタル(MO) および鋼纖維補強モルタル(SFM)の荷重 - 開口変位曲線を図-5(a)～(d)に示す。ここでは、各供試体の計測データをスプライン関数で補間し、一定の変位刻み幅で補間結果を出力したもの同一変位の荷重について平均した。なお、リガメント長さ  $L_1$  が 75mm、90mm のものは供試体 LS による計測結果、 $L_2$  が 50mm、60mm のものは供試体 SS による計測結果を表す。供試体個々の試験結果は示していないが、計測曲線のばらつきは最大荷重以降の軟化領域で大きくなる傾向が認められた。また、ばらつきの程度は、モルタルの場合が最も小さく、次にコンクリート、鋼纖維補強モルタルが最も大きかった。なお、楔挿入割裂試験では、最大荷重以降において急速な荷重低下はみられず、軟化領域においても安定して荷重 - 開口変位の挙動を計測できた。

3点曲げ試験および楔挿入割裂試験における荷重 - 開口変位曲線を図-6(a)および(b)に示す。ここで、同図(b)は、折片から作製した角柱供試体 SB による試験結果を表す。両試験法により求めた荷重 - 開口変位曲線は、最大荷重の大小関係ならびに曲線の形状においてほぼ同様

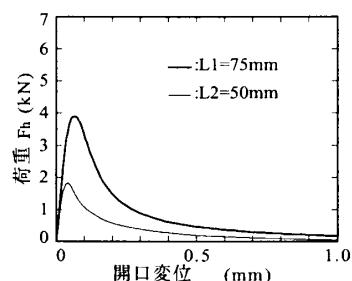
の傾向を示した。この結果から、梁供試体の折片を用いて楔挿入割裂試験を実施することは可能であり、両試験を組合せて強度や破壊特性をより効率的に評価できると考えられる。

また、モルタルの3点曲げ試験を行った際には、最大荷重以降の軟化領域において急激に荷重の低下する現象が認められた。本研究では、データの得られなかつた部分を曲線で補間し、荷重・開口変位曲線下の面積を算定した。このような不安定現象は、載荷試験機および3点曲げ試験装置の剛性が小さいことによるものと考えられる。一方、コンクリートおよび鋼纖維補

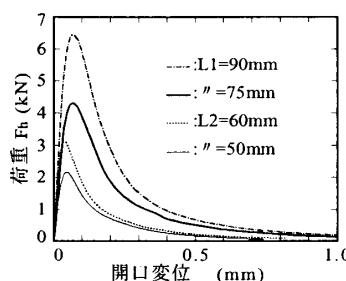
強モルタルの場合には、最大荷重以降においても急激な荷重低下は認められなかった。載荷試験機の剛性が同程度の場合、楔挿入割裂試験のほうが3点曲げ試験に比べて安定して荷重・開口変位の挙動を計測できるものと思われる。

### 3.2 破壊エネルギー

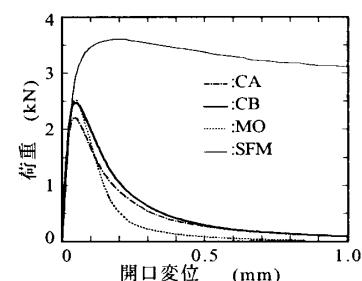
楔挿入割裂試験におけるコンクリート(CA)およびCB)およびモルタル(MO)の破壊エネルギーとリガメント長さの関係を図-7に示す。供試体LSおよびSSの両者において、リガメント長さが大きくなるほど破壊エネルギーの増加する傾向が認められた。六郷らの研究によると、



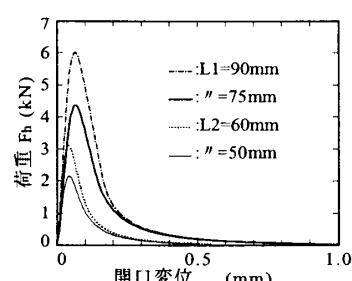
(a) CA



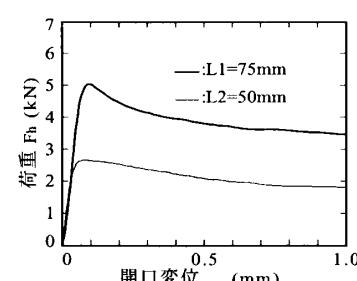
(b) CB



(a) 3点曲げ試験



(c) MO



(d) SFM

図-5 楔挿入割裂試験により計測した各種コンクリートの荷重・開口変位曲線

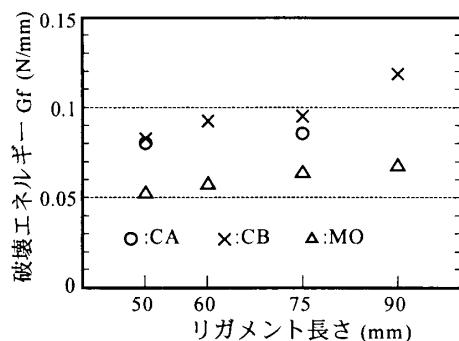
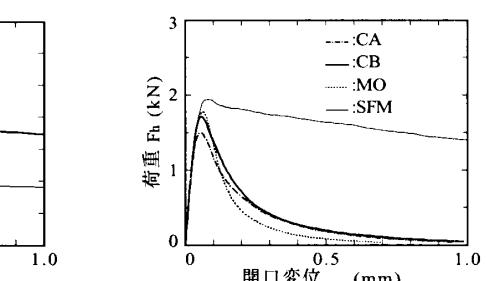


図-7 破壊エネルギーに及ぼすリガメント長さの影響



(b) 楔挿入割裂試験

図-6 3点曲げおよび楔挿入割裂試験法による荷重・開口変位曲線

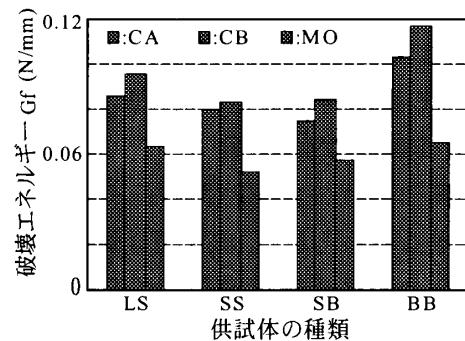


図-8 各種供試体により求めた破壊エネルギーの比較

リガメント長さが300mm程度までは、リガメント長さの増加に伴って破壊エネルギーは増加することが報告されている<sup>3)</sup>。本結果においても、これを裏付ける傾向を示している。

供試体の種類とコンクリート(CAおよびCB)およびモルタル(MO)における破壊エネルギーの関係を図-8に示す。ここでは、楔挿入割裂試験に用いた角柱供試体(LS, SSおよびSB)および3点曲げ試験に用いた梁供試体(BB)の4種類を比較した。なお、LSおよびSSの値は、リガメント長さが供試体高さの1/2の場合のものである。これらの結果においては、3点曲げ試験によるBBの破壊エネルギーが最も大きくなり、楔挿入割裂試験によるSBの値に比べて、CAおよびCBではそれぞれ37%および38%, MOでは14%大きい値を示した。神山らの研究では楔挿入割裂試験と3点曲げ試験の結果は同程度になることが報告されており<sup>4)</sup>、今後、さらに試験データを蓄積して検討する必要がある。

リガメント長さが50mmのSSおよびSBでは、

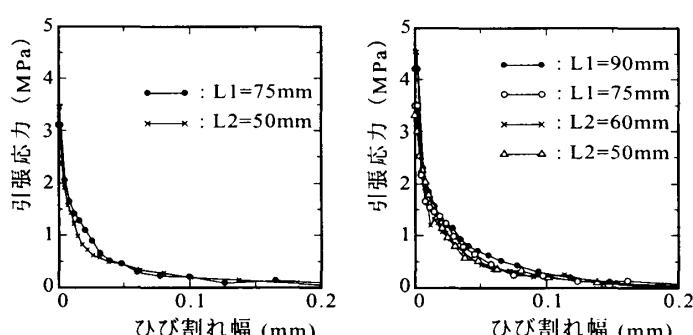
両者の破壊エネルギーの値はほぼ同程度になり、また、SSのそれはLSの82~94%の値となった。

### 3.3 引張軟化曲線

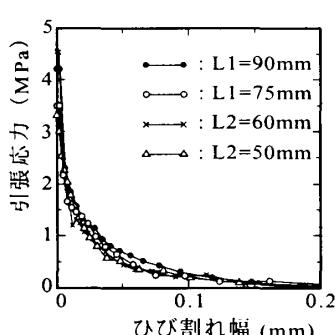
各種コンクリートの引張軟化曲線を図-9(a)~(d)に示す。これらは、それぞれ、図-5(a)~(d)に示した荷重-開口変位曲線から推定したものである。リガメント長さの異なるコンクリートおよびモルタルの推定結果は、軟化開始点応力において差はみられたが、引張軟化曲線は同様の形状を示すことがわかった。

また、3点曲げ試験および折片の楔挿入割裂試験の結果から推定した引張軟化曲線を図-10(a)および(b)に示す。これから、推定した各コンクリートの引張軟化曲線は、両試験法において大体同じような傾向を示すことがわかった。

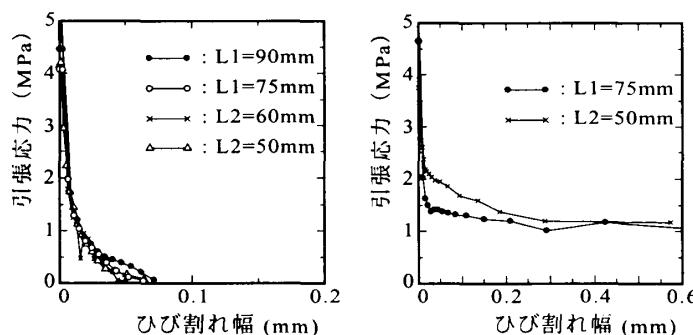
なお、ここでは解析結果を示していないが、推定した引張軟化曲線を入力データとした順解析(荷重-開口変位の解析)結果は、3点曲げ試験あるいは楔挿入割裂試験の計測結果と良好に一致し、多直線近似解析法が引張軟化曲



(a) CA



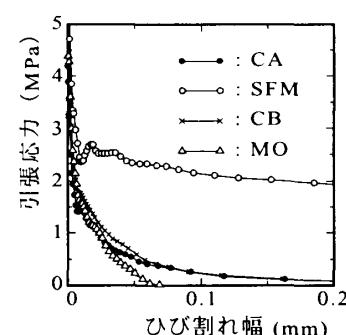
(b) CB



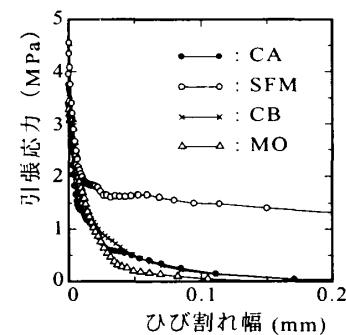
(c) MO

(d) SFM

図-9 楔挿入割裂試験の結果から推定した各種コンクリートの引張軟化曲線



(a) 3点曲げ試験



(b) 楔挿入割裂試験

図-10 両試験法の結果から推定した引張軟化曲線

線を精度よく推定していることを確認した。

### 3.4 両試験法の比較

コンクリートの破壊特性の標準試験法としては、1)既存の試験装置が利用できること、2)安定して荷重－開口変位の挙動を計測できること、3)取扱いが容易であることなどが重要と考えられる。1)に関しては3点曲げ試験が有利であり、2)に関しては楔挿入割裂試験が有利と考えられる。また、3)に関しては、本実験を実施した上においては同程度と思われた。

楔挿入割裂試験では破断（荷重が零となる）時の開口変位が得られない場合もあり、そのときは最大荷重以降の計測値を当てはめ曲線を用いて最小二乗法で近似し、外挿により荷重が零の開口変位を求めた。一方、楔挿入割裂試験の利点としては、破壊エネルギーの算定において自重の影響を考慮する必要がない、リガメント面積が同じであれば3点曲げ試験に比べて供試体を小型化できるなどの点が挙げられる。

### 3.5 多直線近似解析法の比較

公開されている多直線近似解析法の各種解析プログラム<sup>2)</sup>と本研究で用いた解析プログラムの比較結果の一例を図-11に示す。本解析プログラムは、内田の提案した解析法（JCI推奨法）に基づいて作成しているので、それとほぼ一致した結果を示している。また、橋高の解析プログラムはインターネットウェブ上で引張軟化曲線を推定するもので、この解析プログラムによっても同じような結果が得られた。したがって、本解析プログラムはJCI推奨法と同等の結果を与えているものと考えられる。

## 4.まとめ

本研究の結果から、以下のようないくつかの結論を得た。

- (1) 楔挿入割裂試験は各種コンクリートの荷重－開口変位の挙動を安定して計測できた。また、破壊エネルギーの算定値はリガメント長さが大きいほど増加する傾向を示した。
- (2) 破壊エネルギーの算定値は楔挿入割裂試験

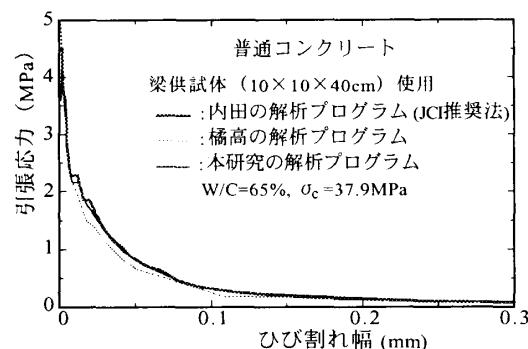


図-11 各種解析プログラムによる  
引張軟化曲線の推定結果

および3点曲げ試験において異なり、後者のほうが大きくなる傾向が認められた。

- (3) 梁供試体の折片を用いて楔挿入割裂試験を実施することができた。得られた破壊エネルギーの値は、同じリガメント長さの角柱供試体から求めた値とほぼ同程度となった。
- (4) 引張軟化曲線は、楔挿入割裂試験あるいは3点曲げ試験の結果から多直線近似解析法を適用して精度よく推定できた。

謝辞 本研究を進めるに当たり、平成14年度本学部大学院修了の宮本高宏君に多くのご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Tschegg, E. K.: New Equipments for Fracture Tests on Concrete, Materials Testing, Vol.33, pp.338-342, 1991
- 2) (社)日本コンクリート工学協会:コンクリートの引張軟化曲線の評価方法(案),コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書, pp.401-426, 2001.5
- 3) Rokugo, K. et al: 各種方法によるコンクリートの破壊エネルギーとひずみ軟化曲線の定量化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, pp.663-668, 1987.6
- 4) 神山 力, 橋高義典, 田村雅紀:各種コンクリートの破壊特性の試験方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.91-96, 2001.6