## 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繊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 Tschegg 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,モルタルおよび鋼繊維補強モルタルを 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 Tschegg 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 と荷重Fm からFh=Fm/(2tan( /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、 15×15×53cmおよび10×10×40cm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









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 10×10× 40cm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 L3=50mm とし,その後に瞬間 接着剤を用いて厚さ 20mmのみかげ石を貼り付 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

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 $(V_c = 1\%)$	50	39.5	3.98	22.0

表 - 1 コンクリートの力学特性

## 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<sub>f</sub>=W<sub>1</sub>/A<sub>lig</sub> (1) ここで,G<sub>f</sub>はコンクリートの破壊エネルギー (N/mm),A<sub>lig</sub>はリガメントの面積(mm<sup>2</sup>)お よび W<sub>1</sub>は荷重(Fh) 開口変位(CMOD)曲線下 の面積(N·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>。

 $G_{f} = (0.75W_{C} + We)/A_{lig}$   $\tag{2}$ 

We=0.75[(S/L) $m_1$ +2 $m_2$ ]g·CMODc (3)

 ここで,G<sub>f</sub>はコンクリートの破壊エネルギー(N/mm),A<sub>lig</sub>はリガメントの面積(mm<sup>2</sup>),Wc 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・mm),S は載荷スパン(mm),Lは供試体の全長(mm),m<sub>1</sub>は供試 体の質量(kg),m<sub>2</sub>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(9.807m/s<sup>2</sup>),CMODc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)および鋼繊維補強モルタル(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,鋼繊 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 開口变位曲線

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)および鋼繊 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を同一変 位の荷重について平均した。なお,リガメント 長さ L1 が 75mm, 90mm のものは供試体 LS に よる計測結果, L2 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、 鋼繊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 激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っ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繊維補 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,



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4),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



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,橘高の解析 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

- Tschegg, E. K.: New Equipments for Fracture Tests on Concrete, Materials Testing, Vol.33, pp.338-342, 1991
- (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
- 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,橘高義典,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