

論文 楔挿入割裂試験におけるコンクリート供試体の形状寸法の影響

石黒 覚^{*1}

要旨：形状寸法の異なる各種供試体を用いてコンクリートの破壊力学パラメータを算定し、供試体の形状寸法の影響、楔挿入割裂試験法および多直線近似解析法の適用性などについて検討した。その結果、楔挿入割裂試験法は各種供試体の荷重 - 開口変位を安定して計測できることが確認できた。また、本試験法から得られたコンクリートの破壊エネルギーは、供試体寸法が大きく、リガメント長さが大きくなるほど増加する傾向を示した。本研究で用いた楔挿入割裂試験法と多直線近似解析法を組合せた方法は、コンクリートの破壊エネルギーと引張軟化曲線の2つの破壊力学パラメータを求めるための有効な方法として適用できた。

キーワード：破壊試験法、破壊エネルギー、引張軟化曲線、コンクリート供試体、ひび割れ

1. はじめに

コンクリートの破壊力学パラメータとしては、現在、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線などがコンクリートのひび割れ抵抗性を評価する有効なパラメータとして考えられている。一般に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ている。現在、これらを求めるための試験法として、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提案されており、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できることが要求される。

本研究では、コンクリートの破壊試験法として Tschegg 博士の考案した楔挿入割裂試験法を適用した¹⁾。この方法は、角柱型あるいは他の形状のコンクリート供試体を用いて比較的容易に試験ができることや破壊に至るまでの荷重 - 開口変位の挙動を安定して計測できるなどの利点を有している。

著者は、Tschegg 博士の開発した楔挿入割裂試験装置を作製し、これまでに各種のコンクリートおよびモルタルを対象としてこれらの破壊試験を実施してきた²⁾。これら既往の試験では高さ寸法が 100mm あるいは 150mm の角柱型供試体

を作製し、楔挿入割裂試験法により荷重 - 開口変位の挙動を計測した。そして、これらの計測結果から破壊エネルギーを算定し、また、多直線近似解析法による引張軟化曲線の解析を実施し、2つの破壊力学パラメータが精度よく得られることを確認してきた。

本研究では、従来から使用している供試体を含め、形状寸法の異なる各種供試体を用いて破壊力学パラメータを算定し、供試体の形状寸法の影響、楔挿入割裂試験法および多直線近似解析法の適用性などについて検討した。

2. コンクリートの破壊試験法

2.1 試験装置

破壊試験法として Tschegg 博士の考案した楔挿入割裂試験法¹⁾を適用し、モード I 破壊試験時の荷重 - 開口変位を計測した。試験装置の概要ならびに供試体への載荷状態は、それぞれ、図-1(a)および(b)に示す。本試験装置は、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 の速度で楔をローラ付き荷重伝達版に沿って鉛直方向に挿入させるものである。このとき、試験機からの荷重 F_m はロードセルにより、開口変位はクリップ型変位計により計

*1 三重大学 生物資源学部共生環境学科 助教授 農博 (正会員)

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 F_h は、楔の角度 α と荷重 F_m を用いて次式から算定した。ただし、本試験における楔の角度 α は 8.5° とした。

$$F_h = F_m / (2 \tan(\alpha/2)) \quad (1)$$

また、載荷点と同じ高さの位置で開口変位測定治具を供試体に固定し、供試体の前面と後面の2ヶ所に容量5mmのクリップ型変位計を取り付けて開口変位を測定した。開口変位はこれらの平均値で表した。また、これ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。

2.2 供試体の種類および作製方法

試験に用いた供試体の種類および形状寸法を図-2(a)～(f)に示す。ここで、供試体LS, MS, SS, CSおよびSLは、供試体作製時に荷重伝達版の挿入部分として幅40mm、深さ20mmの細長い溝を設けている。そして、試験直前にコンクリートカッターを用いて溝中央に切欠きを入れ、この切欠き先端からひび割れが発生するようにした。各供試体のリガメント長さは供試体高さの3/5とした。

供試体BSは、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の曲げ試験用供試体を試験直前にコンクリートカッターを用いて3等分に切断し、その後、中央に切欠きを入れ、さらに、瞬間接着剤を用いて厚さ20mmのみかけ石を2枚貼り付けて作製した。供試体の

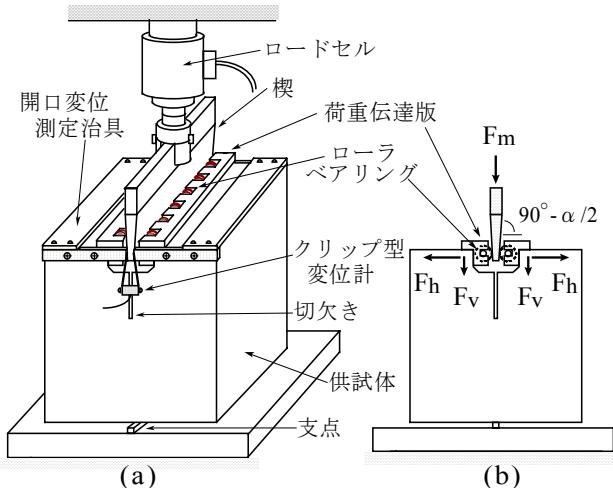


図-1 楔挿入割裂試験法の概要

リガメント長さは60mmとした。なお、BS供試体は、曲げ試験後の折片を用いて楔挿入割裂試験を行うことを想定したものである。

各供試体の質量は、普通コンクリートを用いた場合、LS, MS, SS, CS, SLおよびBSにおいて、それぞれ、18kg, 7.5kg, 2.2kg, 5.6kg, 2.8kgおよび3.5kg程度である。作製したいずれの供試体も供試体数は3個とし、試験材齢は28日とした。

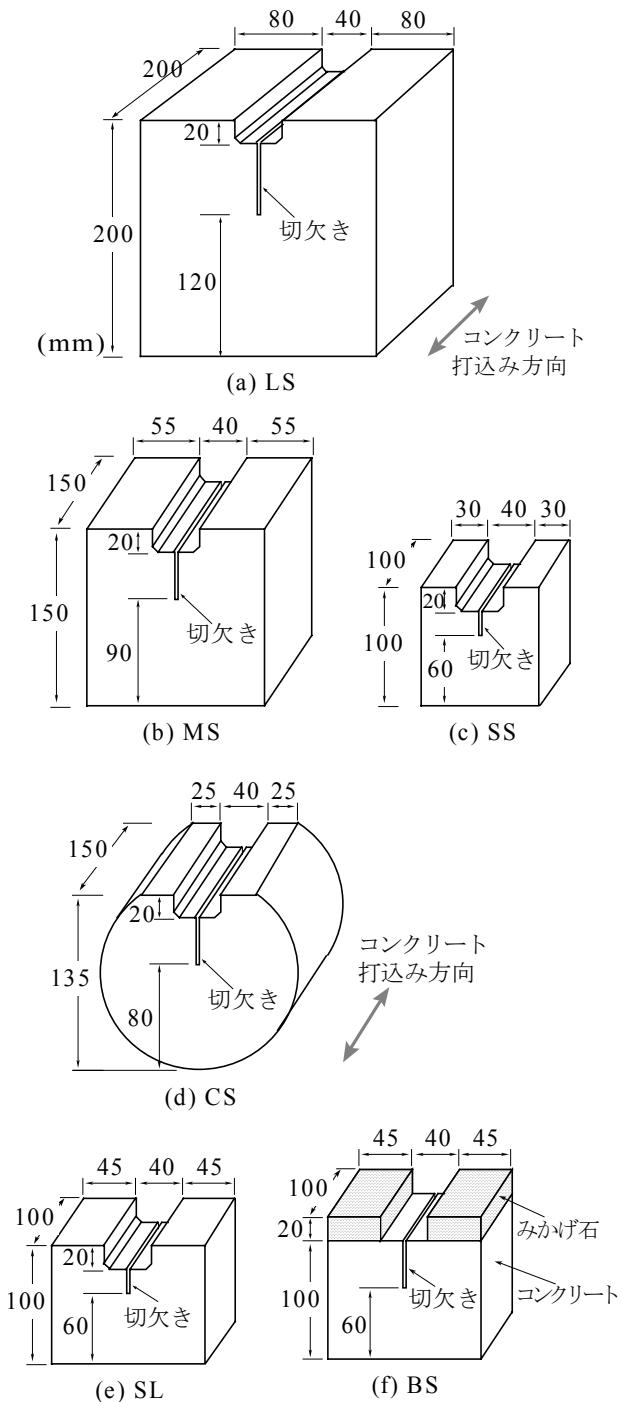


図-2 供試体の種類と形状寸法

表-1 コンクリートの配合

種類	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ(cm)	水セメント比(%)	空気量(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m ³)				
						水W	セメントC	細骨材S	粗骨材G	混和剤A
CA	20	8~12	60	4.5~6.5	45	168	280	808	1016	1.400
CB	20	8~12	50	4.5~6.5	43	168	336	750	1025	1.512

2.3 コンクリートの配合および力学特性

試験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートは水セメント比50%および60%の2種類のもの(CAおよびCB)を作製した。ここでは材料として川砂利(三重県雲出川産、最大寸法20mm、密度2.66g/cm³、粗粒率6.60)、川砂(密度2.58g/cm³、粗粒率2.87)、普通ポルトランドセメント、水道水および高性能AE減水剤を使用した。また、材齢28日のコンクリートの圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度などの力学特性は表-2に示すとおりである(直径10cm、高さ20cmの円柱供試体による)。

3. 破壊試験の結果および考察

3.1 荷重 - 開口変位曲線

各種供試体の荷重(Fh) - 開口変位(CMOD)曲線を図-3(a)および(b)に示す。ここで示した荷重 - 開口変位曲線は、同種供試体の計測結果について同一変位の荷重を平均化して表したものである。角柱型供試体LS、MSおよびSSの結果によると、供試体の寸法が大きくなると最大荷重は著しく大きくなることがわかる。また、リガメント長さを60mmとしたSLは、SSに比べて供試体の幅が大きいために最大荷重も大きくなっている。本試験法では、円柱型供試体CSやみかげ石を接着した供試体BSなどを含め、いずれの供試体においても破壊に至るまでの荷重 - 開口変位を安定して計測できた。また、同種供試体の個々の計測曲線は、最大荷重付近までは良く一致しており、最大荷重以降の下降域においてばらつきの大きくなる傾向がみられた。

3.2 破壊エネルギー

破壊エネルギーは、荷重(Fh) - 開口変位(CMOD)の計測結果から、次式により算定した。

表-2 コンクリートの力学特性

種類	圧縮強度(MPa)	引張強度(MPa)	静弾性係数(GPa)
CA	22.6	2.03	23.2
CB	32.0	2.71	25.7

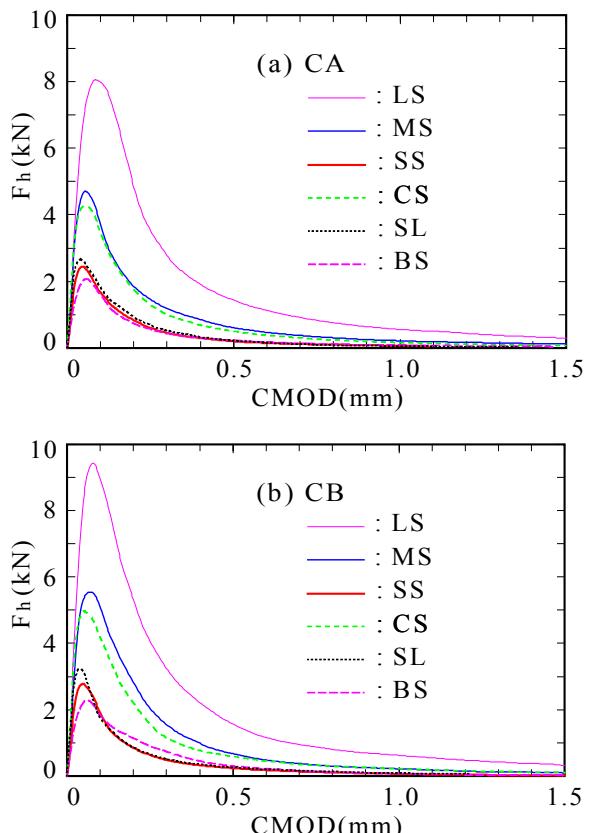
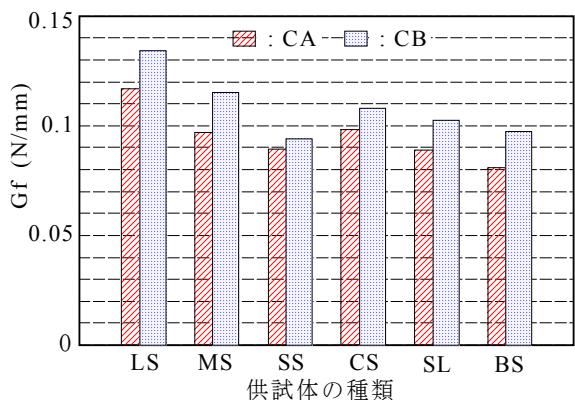


図-3 荷重(Fh) - 開口変位(CMOD)曲線

図-4 コンクリートの破壊エネルギー(G_f)

$$Gf = W_1 / A_{\text{lig}} \quad (2)$$

ここで、 Gf は破壊エネルギー (N/mm), W_1 は荷重 - 開口変位曲線下の面積 (N·mm) および A_{lig} はリガメント (破壊域) の面積 (mm^2) を表す。なお、 A_{lig} は切欠き先端と支点を含む垂直な平面に破壊域を投影した面積である。

図-4 は各種供試体から求めた破壊エネルギー (Gf) を示す。供試体 LS, MS および SS の比較結果においては、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。既往の研究においてもリガメント長さが 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の増加することが報告されている。本試験結果においても、供試体寸法が大きく、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を示した。供試体 SS, SL および BS においてはリガメント長さが 60mm であり、これらの供試体から求めた破壊エネルギーの値は、供試体 LS および MS に比べて小さくなることを認識しておく必要がある。

また、供試体 MS および CS の結果においては大きな差ではなく、供試体寸法やリガメント長さが同程度であれば、角柱あるいは円柱型供試体を用いても大体同じような破壊エネルギーの値が得られるものと思われる。

4. 引張軟化曲線の解析

4.1 解析方法

引張軟化曲線は荷重 - 開口変位の計測結果から多直線近似解析法を適用して推定した³⁾。図-5 は引張軟化曲線の解析フローを示す。ここでは、まず、荷重 - 開口変位の計測結果からコンクリートの弾性係数 E_c および軟化開始点応力 F_t を推定する。つぎに、多直線近似によって引張軟化曲線を仮定し、推定した E_c および F_t を用いて FEM ひび割れ進展解析を実施する。そして、荷重 - 開口変位の解析値と計測値を比較し、両者が十分に一致するまで繰返し計算を行い、引張軟化曲線の全体形状を決定する。

図-6 は解析に用いた供試体半断面の FEM メッシュ分割例 (供試体 MS および SS)

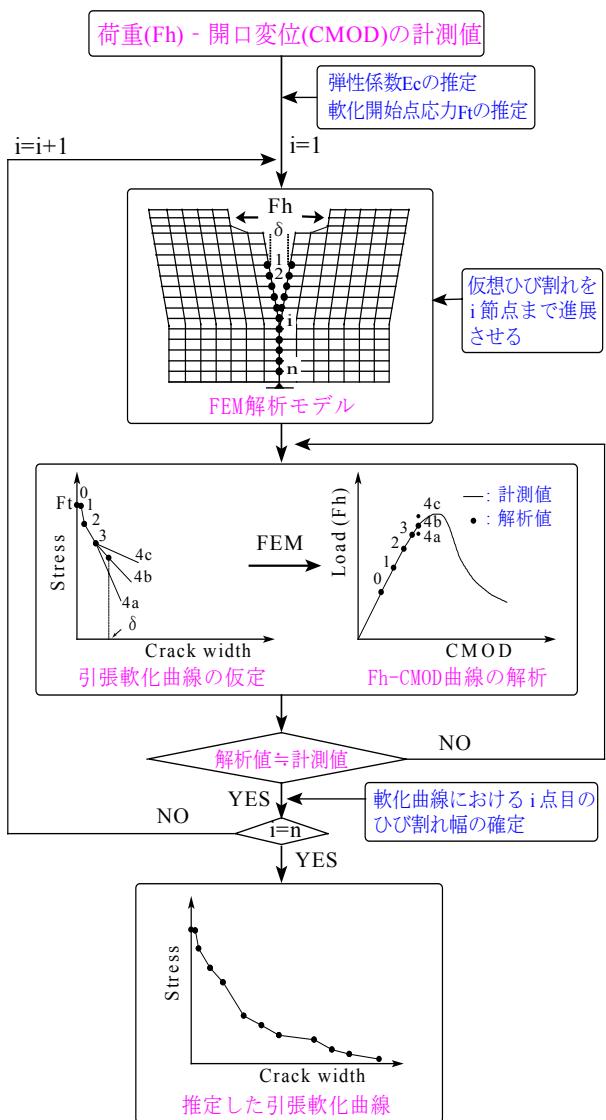


図-5 引張軟化曲線の解析フロー

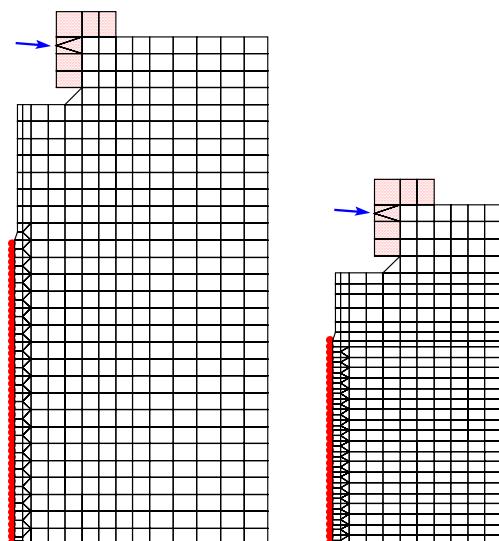


図-6 メッシュ分割例 (供試体 MS および SS)

ッシュ分割の例であり、切欠き先端から支点までを仮想ひび割れとして、それらの節点を切欠き先端から1個ずつ分離してひび割れの進展を表現する。この際、分離した節点にはひび割れ幅に対応した結合応力が載荷される。

4.2 解析結果および考察

(1) 引張軟化曲線

引張軟化曲線の解析結果を図-7(a)および(b)に示す。これらは図-3(a)および(b)に示した荷重-開口変位曲線から推定した。得られたコンクリートの引張軟化曲線は、CAおよびCBとともに角柱や円柱型供試体において大体同じような曲線形状を示している。このことから、多直線近似解析法を適用することにより、形状寸法の異なる供試体を用いた場合でも引張軟化曲線の推定は可能と思われる。

(2) 弹性係数

図-8は解析によって求めた供試体コンクリートの弾性係数(E_c)を示す。CAの解析値は20.5~23.0GPa(平均21.8GPa)、CBにおいては22.5~25.5GPa(平均24.0GPa)となった。また、試験から求めたCAおよびCBの弾性係数の値は、表-2に示したように、それぞれ23.2GPaおよび25.7GPaであり、解析値と試験値は比較的よく一致しているといえる。このことから、本解析法によって推定した弾性係数は、妥当な値を示しているものと思われる。

(3) 軟化開始点応力

図-9は解析によって求めた軟化開始点応力(F_t)を示す。CAの解析値は2.38~3.50MPa(平均2.99MPa)、CBにおいては2.90~4.13MPa(平均3.65MPa)である。また、試験から求めたCAおよびCBの割裂引張強度は、表-2に示したように、それぞれ2.03MPaおよび2.71MPaであり、解析値の平均は、割裂引張強度に比べてそれぞれ1.5倍および1.3倍程度大きくなっている。つまり、引張軟化曲線における軟化開始点応力を引張強度として評価した場合、その値は割裂引張強度に比較して大きくなるといえる。

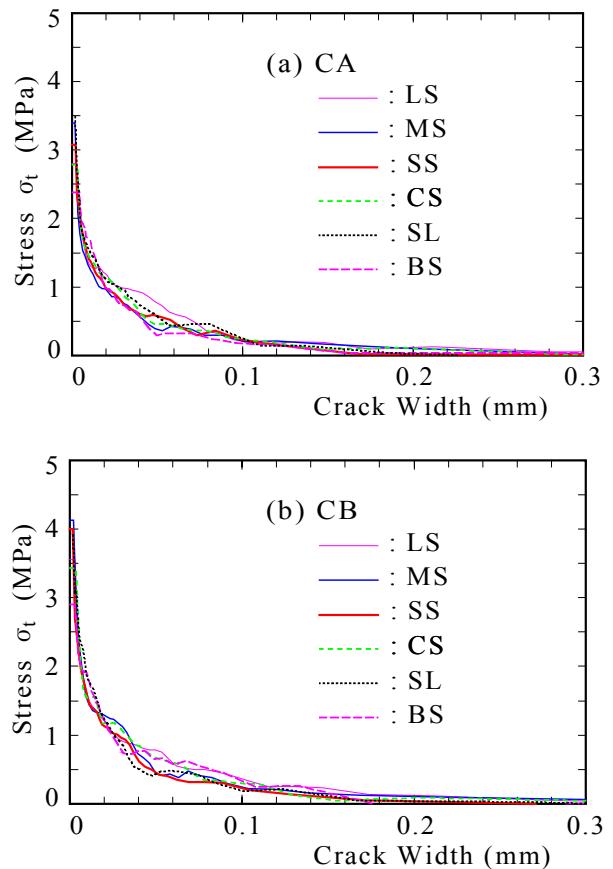


図-7 コンクリートの引張軟化曲線

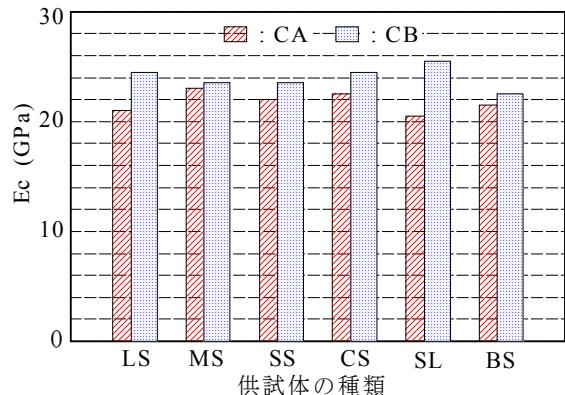


図-8 弹性係数(E_c)の推定結果

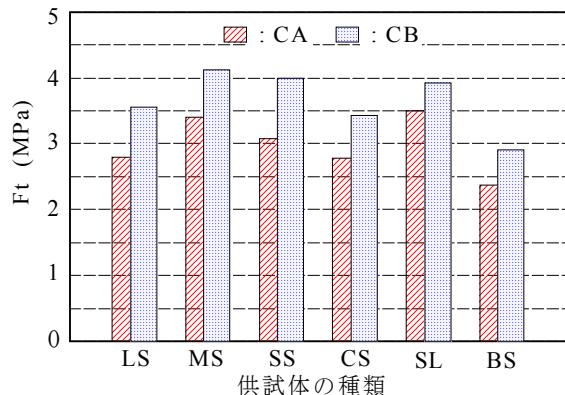


図-9 軟化開始点応力(F_t)の推定結果

5. 供試体の試験状況およびひび割れ性状

図-10 は供試体 CS の破壊試験の状況を示している。円柱型供試体 CSにおいては、ひび割れは切欠き先端から鉛直方向に進展するものが多かったが、鉛直方向から少しずれて進展する供試体もみられた。

図-11 は破壊試験後のひび割れ状況を示す。角柱型供試体 LS, MS, SS および SL におけるひび割れは、切欠き先端から支点に向かって進展し、側面方向へのひび割れ進展はみられなかった。また、供試体 BS では、みかけ石とコンクリートの接着面が剥離することもなく、溝を設けた他の供試体と同様に安定して破壊試験ができた。

6. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 楔挿入割裂試験法を適用することにより、形状寸法の異なる各種供試体の荷重 - 開口変位が、破壊に至るまで安定して計測できた。
- 2) 本試験法より得られたコンクリートの破壊エネルギーは、供試体寸法が大きく、リガメント長さが大きくなるほど増加する傾向を示した。
- 3) 多直線近似解析法を適用することにより、形状や寸法の異なる供試体の計測結果から、大体同じような傾向の引張軟化曲線が推定できた。また、推定した軟化開始点応力は、割裂引張強度に比べて大きくなる傾向が認められた。
- 4) 楔挿入割裂試験法と多直線近似解析法を組合せた方法は、コンクリートの破壊エネルギーと引張軟化曲線の 2 つの破壊力学パラメータを求めるための有効な方法として適用できた。

参考文献

- 1) Tschegg, E. K.: New Equipments for Fracture Tests on Concrete, Materials Testing, Vol.33, pp.338-342, 1991.11-12
- 2) 石黒 覚, 小合俊平: 充てんモルタルの破壊力学特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, pp.447-452, 2004.7

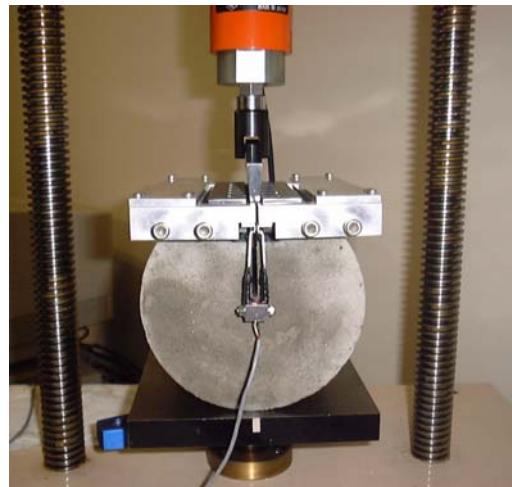


図-10 破壊試験の状況（供試体 CS）

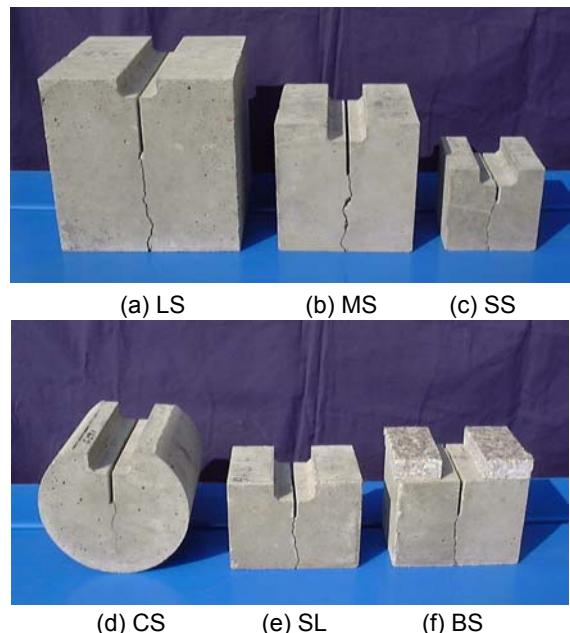


図-11 各種供試体のひび割れ性状

- 3) (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
- 4) Uchida, Y. and Barr, B.I.G.: Tension softening curves of concrete determined from different test specimen geometries, Proceedings FRAMCOS-3, Vol.1, pp.387-398, 1998.10