

論文 軽量ポーラスコンクリートの破壊パラメータの解析

石黒 覚*

要旨：人工軽量骨材を用いたポーラスコンクリートの破壊特性を調べるために、くさび挿入法に基づくモード I 破壊試験を実施した。荷重 開口変位の計測結果から、破壊エネルギーおよび引張軟化曲線などの破壊パラメータを解析した。空隙率を 20~30%、ペーストの水セメント比を 30 および 40%とした場合、軽量ポーラスコンクリートの圧縮強度は 4~8MPa、破壊エネルギーは 26~31N/mとなった。圧縮強度は空隙率やペーストの水セメント比が小さいほど増加したが、破壊エネルギーは圧縮強度と異なる傾向を示した。破壊エネルギーは骨材のかみ合い効果の影響が大きいことを引張軟化曲線および破断面の解析結果から考察した。

キーワード：ポーラスコンクリート、破壊エネルギー、引張軟化曲線、人工軽量骨材

1. はじめに

近年、ポーラスコンクリートが植栽基盤や生物共生用コンクリートとして利用されることも多くなり、生物共生型コンクリートとして環境保全や自然と調和した環境の創出に貢献している¹⁾。一般に、普通骨材を用いたポーラスコンクリートは、河川環境整備や護岸整備に利用され、緑化や水質浄化などの効果が期待されている。一方、軽量骨材を用いたポーラスコンクリート(軽量ポーラスコンクリート)は、浮体構造として水生植物などの植栽基盤用コンクリートとして、あるいは水質浄化用コンクリートとして利用し、湖沼や溜池などの水辺環境保全に有効活用できると考えられる。

このような利用を目的として、本研究では、人工軽量骨材を用いて軽量ポーラスコンクリートを製造し、まず、基礎的な物性や強度特性を調べた。つぎに、軽量ポーラスコンクリートの破壊特性に着目して、くさび挿入法に基づくモード I 破壊試験を実施し、荷重 開口変位の計測結果から破壊エネルギーを算定した。さらに、仮想ひび割れモデルに基づく FEM ひび割れ進展解析をポーラスコンクリートに適用し、多直線の引張軟化曲線を仮定して荷重 開口変位を解析し、解析および計測結果が良好に一致するように逆解析により引張軟化曲線を推定した。

2. 実験方法

2.1 ポーラスコンクリートの製造

(1) 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント(密度:3.17g/cm³,比表面積:3320cm²/g),細骨材として細砂(密度:2.58 g/cm³,粗粒率:0.96)および粗骨材として球形状の人工軽量骨材(密度:0.91 g/cm³,吸水率:5.0%,粗粒率:6.42,骨材最大寸法:15mm,実積率:60.6%)を使用した。練り混ぜ水には水道水,混和剤にはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(標準形)を使用した。

ポーラスコンクリートの配合を表 - 1 に示す。ここでは,ペーストの水セメント比を 30 および 40%,空隙率を 20~30%とした合計 6 種類のポーラスコンクリートを製造した。

(2) 供試体の作製

モルタルミキサ(容量 5 l)を用いて水,混和剤,セメントおよび細砂を 4 分間練り混ぜてペーストを製造し,さらに,ペーストと軽量骨材をオムニミキサ(OM-10E)を用いて 1 分 30 秒間練り混ぜた。練り混ぜ終了後にコンクリートを型枠に 2 層に分けて打ち込み,振動テーブルで締め固めた。なお,圧縮強度試験用には型枠底面に薄くペーストを敷き,また,24 時間以上経過後にキャッピングを行った。脱型後の各供試体は,試験材令まで標準水中養生を行った。

* 三重大学助教授 生物資源学部共生環境学科 農博 (正会員)

表 - 1 ポーラスコンクリートの配合

種類	水セメント比 W/C (%)	ペースト粗骨材容積比 M/G (%)	空隙率 (実測) (%)	単体量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細砂 S	粗骨材 G	混和剤 SP
LG40A	40	30.3	20.6	62.1	159	136	501	1.59
LG40B	40	27.3	22.6	55.2	144	122	501	2.16
LG40C	40	22.7	27.3	45.4	120	102	501	2.40
LG40D	40	18.9	30.2	37.9	99.6	84.7	501	1.99
LG30E	30	31.6	20.2	70.0	238	71.2	501	1.19
LG30F	30	23.7	26.1	52.1	178	53.4	501	1.34

2.2 物性および強度試験

空隙率（全空隙率）試験²⁾および静弾性係数試験（JIS A 1149）は材令 28 日，圧縮強度試験（JIS A 1108）は材令 7，28 および 91 日，割裂引張強度試験（JIS A 1113）は材令 7 および 28 日においてそれぞれ実施した。供試体数は 5 個とし，10×20cm の円柱供試体を使用した。

2.3 破壊パラメータ試験

(1) くさび挿入試験法

モード 破壊試験法としてくさび挿入試験法^{3),4)}を適用し，荷重 開口変位を計測した。くさび挿入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，くさび，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 の速度でくさびを挿入させた。このとき，試験機からの荷重 F_m は，容量 9.8kN のロードセルにより計測した。また，くさび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，くさびの角度 θ と荷重 F_m から $F_h = F_m / (2 \tan(\theta/2))$ の計算式により求めた。

開口変位は，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測定した。なお，開口変位は供試体の前面と後面の 2ヶ所で測定し，こ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。

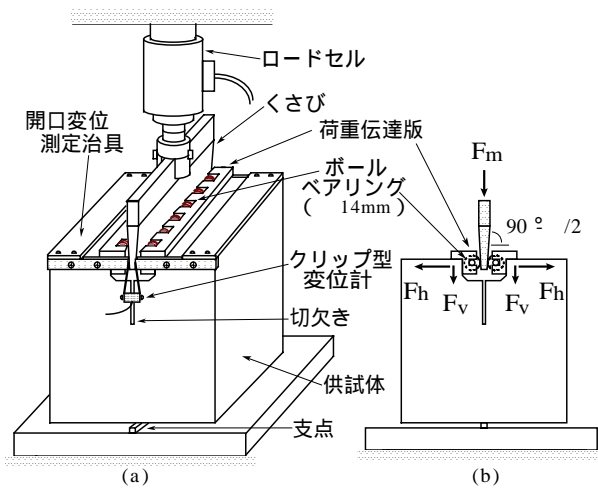


図 - 1 くさび挿入試験装置

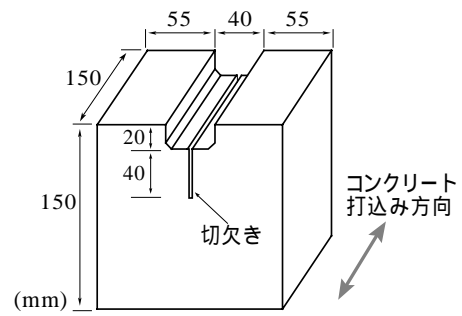


図 - 2 コンクリート供試体の形状寸法

破壊試験に用いたコンクリート供試体の形状寸法を図 - 2 に示す。供試体数は 4 個とし，供試体の作製に際しては，荷重伝達版の挿入部分として幅 40mm，深さ 20mm の細長いくぼみ部分を成形できる型枠を使用した。また，試験直前にコンクリートカッターを用いて供試体のくぼみ中央に幅 2mm，深さ 40mm 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) 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、くさび挿入試験法による荷重 開口変位の計測結果（図 - 7 参照）から、曲線下の面積を数値積分により求め、 $G_f=W_l/A_{lig}$ により破壊エネルギーを算定した。なお、 G_f はコンクリートの破壊エネルギー（N/m）、 A_{lig} はリガメントの面積（ m^2 ）および W_l は曲線下の面積（ $N \cdot m$ ）を表す。

(3) 切欠き引張強度の算定

切欠きを有するコンクリートの曲げ引張強度（以下、切欠き引張強度 σ_b と呼ぶ）は、荷重 開口変位の計測結果から、次式により算定した⁵⁾。

$$\sigma_b = M/W_{lig} + F_{hmax}/A_{lig} \quad (1)$$

$$M = y \cdot F_{hmax} \quad (2)$$

$$W_{lig} = (B_{lig} \cdot H_{lig}^2)/6 \quad (3)$$

ここで、 F_{hmax} は最大荷重、 M は最大曲げモーメント、 y はリガメントの中心から载荷点までの距離、 A_{lig} はリガメントの面積、 W_{lig} は切欠き先端における断面係数、 B_{lig} および H_{lig} は、それぞれ、リガメントの幅および高さを表す。

(4) 引張軟化曲線の評価

荷重 開口変位の計測結果から引張軟化曲線（引張応力とひび割れ幅の関係）を評価する方法として、JCI 委員会から提案された多直線近似解析法を適用した⁶⁾。また、この解析法を用いて、軽量ポーラスコンクリートの弾性係数および引張強度の値も同時に推定した。

3. 結果および考察

3.1 物性および強度

(1) 密度

図 - 3 に密度と空隙率の関係を示す。空隙を含む見かけの密度は、空隙率の増加に伴い減少し、軽量骨材の使用により $0.85 \sim 0.97 g/cm^3$ の小さい値となった。一方、計算より求めた空隙を

含まない実質の密度はすべて $1.1 g/cm^3$ 以上となり、水上で浮体構造として利用するにはさらに軽量化が必要と考えられる。

(2) 圧縮強度

図 - 4 に圧縮強度と空隙率の関係を示す。圧縮強度は空隙率が小さくなるほど大きくなった。また、材令 28 日の $W/C=30\%$ の圧縮強度は、同材令の $W/C=40\%$ に比べて大きく、普通骨材を用いた場合と同様に、圧縮強度はペーストの W/C の小さいほうが増加した。

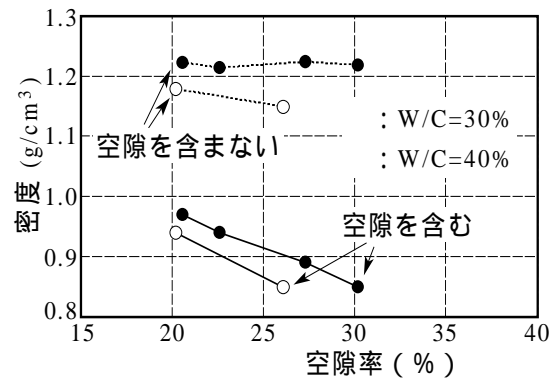


図 - 3 密度と空隙率の関係

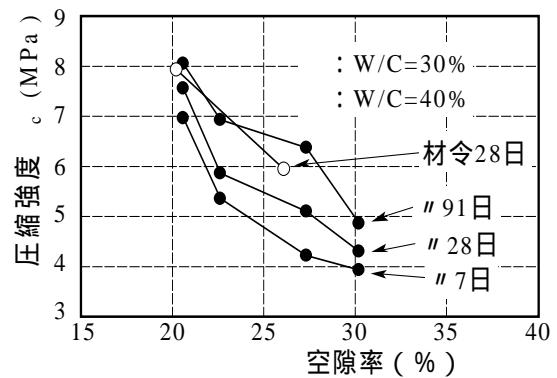


図 - 4 圧縮強度と空隙率の関係

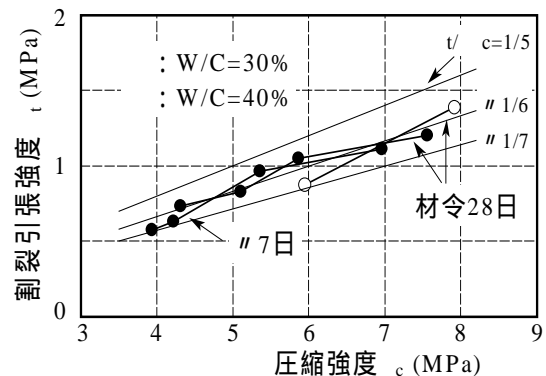


図 - 5 割裂引張強度と圧縮強度の関係

(3) 割裂引張強度

図 - 5 に割裂引張強度と圧縮強度の関係を示す。材令 28 日の圧縮強度に対する割裂引張強度の比率は約 1/6 であり、普通コンクリートの場合(1/10~1/13)に比べて大きくなった。

(4) 静弾性係数

図 - 6 に静弾性係数と空隙率の関係を示す。静弾性係数は空隙率の増加に伴って低下し、その割合は同材令の圧縮強度のそれと大体同じであった。軽量ポーラスコンクリートは骨材自身の弾性係数が小さいために、普通骨材を用いた場合に比べて変形が大きくなると考えられる。

3.2 破壊パラメータ

(1) 荷重 開口変位曲線

図 - 7(a) ~ (f) は 材令 28 日における荷重(F_h) 開口変位(CMOD)の計測結果を示す。空隙率の小さい LG40A は、空隙率の大きい LG40D に比べて最大荷重は大きくなる反面、ピーク以降の荷重低下が大きく、荷重が零となる開口変位は小さくなる傾向を示した。また、 $W/C=30\%$ の LG30E および LG30F は、空隙率がこれらと大体同じである $W/C=40\%$ の LG40A および LG40C

に比べて最大荷重は大きくなり、荷重が零となる開口変位は小さくなった。このことは、最大荷重が大きくなって必ずしも破壊エネルギーは大きくならないことを示している。

(2) 破壊性状

図 - 8 は、供試体の破断面(断面積: $90\text{mm} \times 150\text{mm}$)における割れた骨材の個数を示している。空隙率が小さい供試体ほど、つまり、ペースト粗骨材容積比 M/G が大きくなるほど割れた骨材の個数は多くなった。また、 $W/C=30\%$ の供試体(LG30E, LG30F)における割れた骨材の個数は、 $W/C=40\%$ (LG40A~LG40D)のそれら

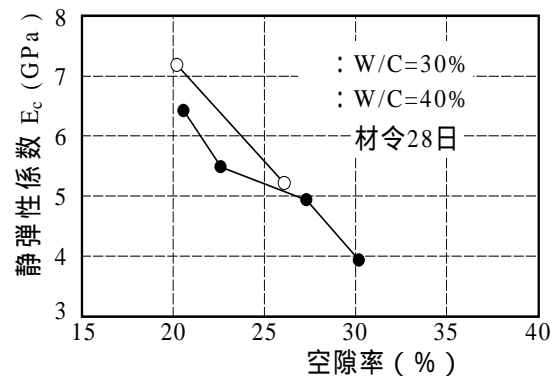


図 - 6 静弾性係数と空隙率の関係

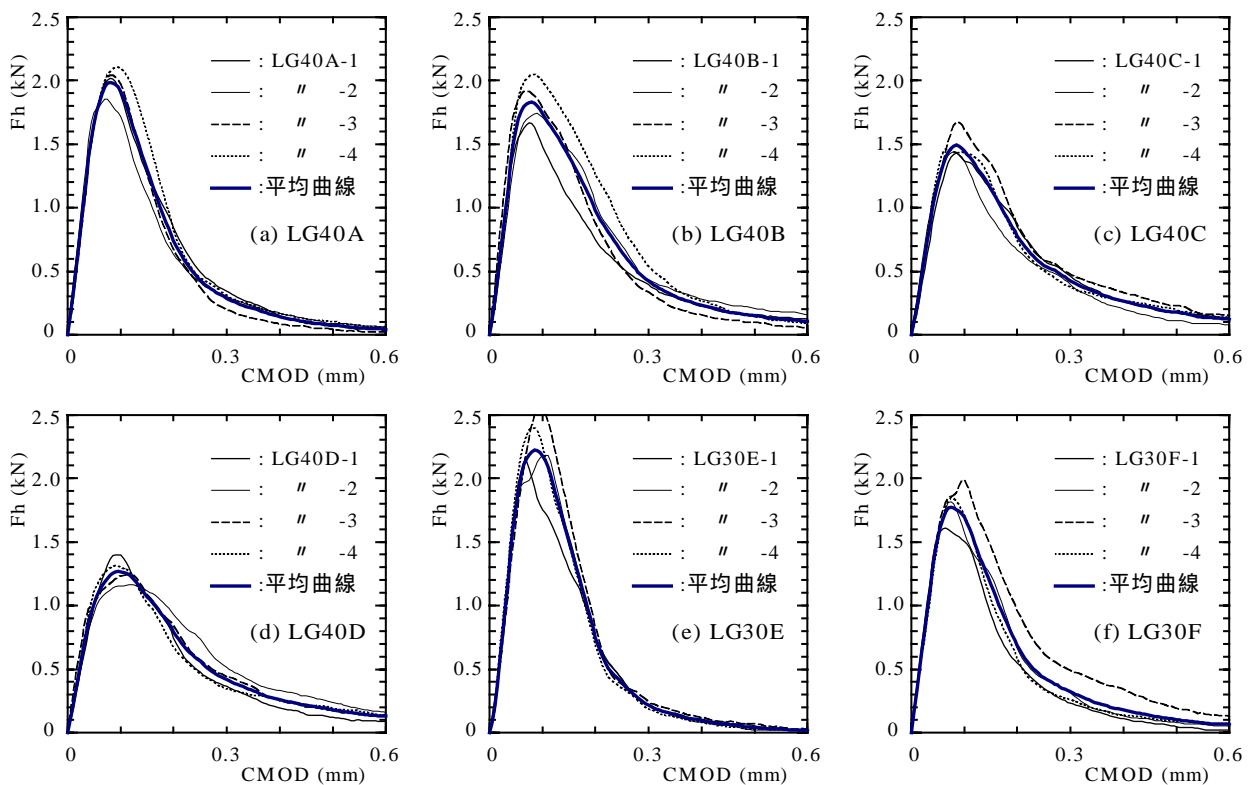


図 - 7 荷重(F_h) - 開口変位(CMOD)曲線

よりも多くなった。空隙率やペーストの W/C が小さい場合、ペーストの接着強度が大きくなるためにペースト部分の破壊が減少し、骨材の破壊が増加したものと考えられる。

図 - 9 は、軽量ポーラスコンクリート供試体におけるひび割れ進展の模式図を表している。同図(a)に示すように、空隙率やペーストの W/C が小さい場合、骨材自身の破壊が多くなり、破断面もフラットになる。これに対して、同図(b)に示すように空隙率やペーストの W/C が大きい場合、ペースト部分の破壊が多くなり、破断面の凹凸も大きくなる。このような傾向は破断面の観察結果とも良く一致した。

(3) 切欠き引張強度

図 - 10 は、式(1)より求めた切欠き引張強度と圧縮強度の関係を示す。切欠き引張強度は圧縮強度にほぼ比例して大きくなり、それらの強度比率は 1/6~1/7 であり、割裂引張強度と圧縮強度の比率と大体同じ結果となった。

(4) 破壊エネルギー

図 - 11 に破壊エネルギーと圧縮強度の関係を示す。空隙率が 20~30%、ペーストの W/C が 30 および 40% の場合、圧縮強度は 4~8MPa、破壊エネルギーは 26~31 N/m となった。このとき、破壊エネルギーは圧縮強度が増加しても単調に増加せず、減少する場合もみられた。また、W/C=30% の破壊エネルギーは、W/C=40% のそれと同等か小さくなった。

圧縮強度の増加に対して破壊エネルギーが単調に増加しない理由として、次のことが考えられる。1) 圧縮強度が大きいほど破断面における骨材の破壊個数が増加し、これに伴って骨材のかみ合い効果が小さくなり、ひび割れ進展に対する抵抗性が減少する。2) 圧縮強度が大きいほど荷重 開口変位曲線における最大荷重は増加するが、ピーク以降の荷重低下の割合が大きくなる。これも骨材のかみ合い効果の低下に起因している。したがって、軽量ポーラスコンクリートの破壊エネルギーは、圧縮強度を大きくしても必ずしも増加しないと考えられる。

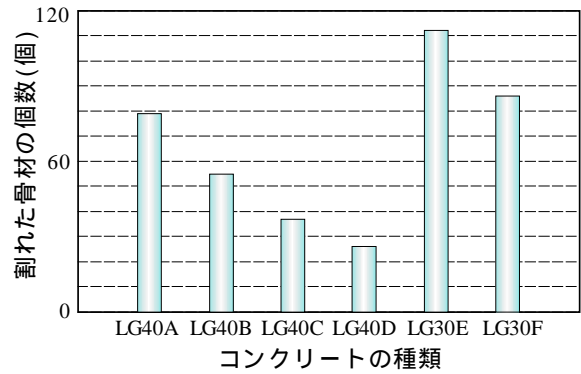
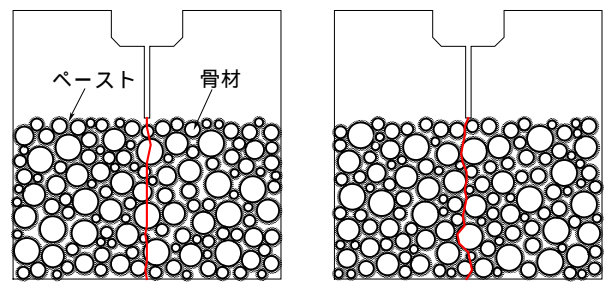


図 - 8 破断面における割れた骨材の個数



(a) 空隙率:小,W/C:小 (b) 空隙率:大,W/C:大

図 - 9 ひび割れ進展の模式図

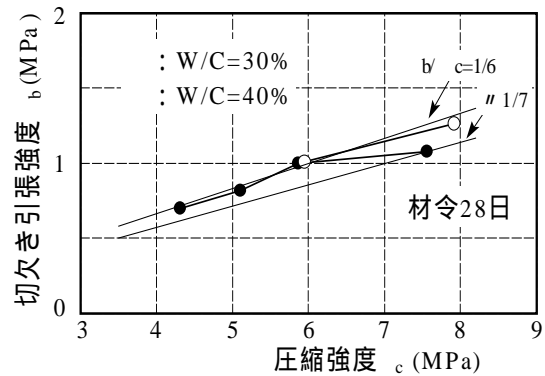


図 - 10 切欠き引張強度と圧縮強度の関係

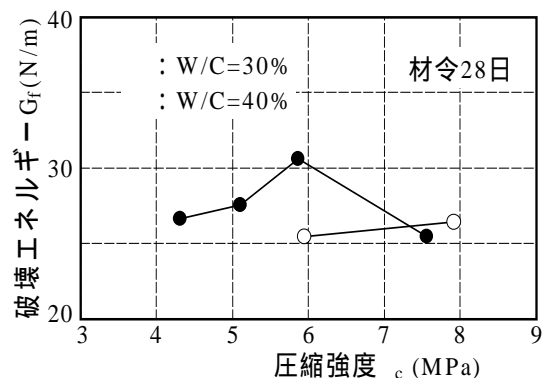


図 - 11 破壊エネルギーと圧縮強度の関係

(5) 引張軟化曲線

図 - 12 に多直線近似解析法により推定した引張軟化曲線を示す。これらの解析結果は、図 - 7 に示した荷重 開口変位の平均曲線から推定したものである。また、同時に推定した弾性係数 E_{ca} および引張強度 t_a の値も図中に示した。材令 28 日の引張軟化曲線は、空隙率やペーストの W/C が小さい場合、つまり、圧縮強度が大きいほど軟化開始点応力(ひび割れ幅が零のときの引張応力)が大きくなり、軟化曲線の後半部分の引張応力は小さくなった。このときの限界ひび割れ幅(引張応力が零となるひび割れ幅)は 0.1mm 程度であった。

引張軟化曲線の後半部分における引張応力の大小は、ひび割れ面における骨材のかみ合い効果の大小に対応している。このことから、空隙率やペーストの W/C が小さい場合、つまり、圧縮強度が大きくなると曲線後半部分の引張応力が低下し、骨材のかみ合い効果は小さくなることわかる。

4. まとめ

くさび挿入試験法と多直線近似解析法を適用して軽量ポーラスコンクリートの破壊パラメータを解析し、以下のような結果を得た。

- (1) 空隙率が 20~30%、ペーストの W/C が 30 および 40% の場合、圧縮強度は 4~8MPa、破壊エネルギーは 26~31N/m となった。
- (2) 圧縮強度は空隙率やペーストの W/C が小さいほど増加したが、破壊エネルギーは圧縮強度と異なる傾向を示した。
- (3) 圧縮強度が大きくなると破断面における骨材の破壊個数は増加し、骨材のかみ合い効果は小さくなる。このため、コンクリートの破壊エネルギーは必ずしも増加しない。
- (4) 切欠き引張強度は圧縮強度にほぼ比例して増加し、その比率は 1/6~1/7 となった。
- (5) 空隙率やペーストの W/C が小さい場合、引張軟化曲線における軟化開始点応力が増大し、曲線後半部分の引張応力は低下した。

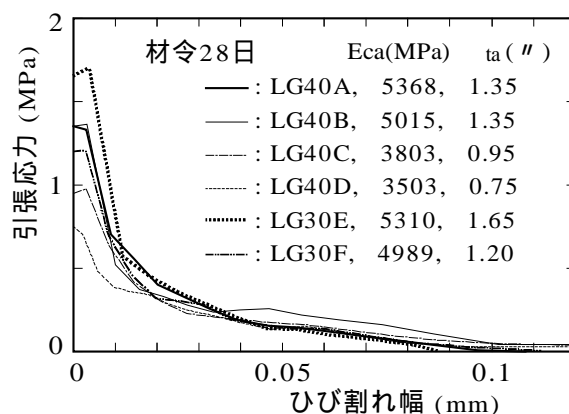


図 - 12 引張軟化曲線の解析結果

謝辞 本研究を進めるに当たり、平成 12 年度本学部卒業生の吉羽祐路君ならびに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) 水口裕之：エココンクリートとは、コンクリート工学，Vol.36，No.3，pp.9-12，1998.3
- 2) 岡本享久 他：ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法，コンクリート工学，Vol.36，No.3，pp.52-62，1998.3
- 3) 石黒 覚：各種骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギーと引張軟化曲線，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.139-144，1998.6
- 4) Tschegg, E. K.: New Equipments for Fracture Tests on Concrete, Materials Testing, Vol.33, pp.338-342, 1991
- 5) Tschegg, E. K., Elser, M. and Stanzl, S.E.-Tschegg : Biaxial Fracture Tests on Concrete - Development and Experience, Cement and Concrete Composites, Vol.17, pp.57-75, 1995
- 6) (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.418-426，2001