

論文 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

石 黒 覚^{*1}

要旨：川砂利，碎石および人工軽量骨材を用いた３種類のコンクリートを対象として，くさび挿入法によるモードⅠ破壊試験を実施した。計測した荷重－開口変位曲線から破壊エネルギーを算定するとともに，多直線近似解析法により引張軟化曲線を推定した。水セメント比と単位粗骨材容積を同じにして得られたコンクリートの破壊エネルギーは，碎石コンクリートにおいて最も大きく，次いで川砂利コンクリート，軽量骨材コンクリートにおいて最も小さくなった。さらに，引張軟化曲線における同一ひびわれ幅の伝達応力は，碎石コンクリートにおいて最も大きくなることがわかった。

キーワード：コンクリート，ひびわれ，破壊力学，破壊エネルギー，引張軟化曲線

1. はじめに

コンクリートにおける破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊靱性パラメータは，粗骨材の種類や物性，粒度分布および粒形などに影響を受けることが知られており，既にいくつかの研究成果が報告されている¹⁾。これらの影響要因のうち，粗骨材の種類が破壊靱性に及ぼす影響については，小野・大岸²⁾は切欠き梁の４点曲げ試験を行い，それらの結果から，コンクリートの弾塑性破壊靱性値は，碎石，スラグ，川砂利，人工軽量骨材を用いたコンクリートの順に大きいことを示している。また，橋高ら³⁾は，切欠き梁の３点曲げ試験結果に基づいて碎石，川砂利および人工軽量骨材コンクリートの破壊エネルギーを算定し，粗骨材の種類の影響を明らかにしている。さらに，橋高ら⁴⁾は，多直線近似解析法による引張軟化曲線の推定法を提案し，この方法により各種骨材を用いたコンクリートの引張軟化曲線を解析し，骨材の種類によって引張軟化特性に差異のみられることを報告している。

本研究では，川砂利，碎石および人工軽量骨材を用いた３種類のコンクリートを対象として，くさび挿入法によるモードⅠ破壊試験を実施した。そして，計測した荷重－開口変位曲線から破壊エ

ネルギーを算定するとともに，多直線近似解析法により引張軟化曲線を推定し，粗骨材の種類が破壊エネルギーや引張軟化特性に及ぼす影響について検討した。

2. 破壊エネルギーの計測

2.1 試験装置

コンクリートの荷重－開口変位曲線を計測するために，ここでは，Tschegg の考案したくさび挿入試験法⁵⁾を導入した。試験装置は，電動式一軸載荷試験機と鋼製くさびを組合わせたものであり，その概要は図－１に示すとおりである。コンクリート供試体は，鋼製載荷版中央に設けた幅 5mm の支点に設置され，その後，くさび，支点および切欠きが，同一垂直平面内となるようにくさびを挿入させた。このとき，試験機の載荷速度 V_m は 1mm/min とし，載荷荷重はロードセル（容量 9.8kN）を介して測定した。また，供試体への水平方向の載荷速度 V_h は，くさびの角度を α とした場合， $V_h = 2V_m \tan(\alpha/2)$ で与えられる。ここでは，載荷を開始してから供試体にひびわれが貫通し，荷重が十分小さくなるまでの所要時間は 10～12 分となった。

試験機からの荷重 F_m は，荷重伝達版を介して，

*1 三重大学助教授 生物資源学部 農博（正会員）

水平および垂直方向荷重としてコンクリート供試体へ伝達される(図-1(b)参照)。この際、くさびと荷重伝達版の間にローラベアリングを挿入し、その間の摩擦抵抗力を極力小さくするようにした。この摩擦抵抗力が小さいものとして無視し、水平方向荷重 F_h は、くさびの角度 α と荷重 F_m から、式(1)を用いて算定した。

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

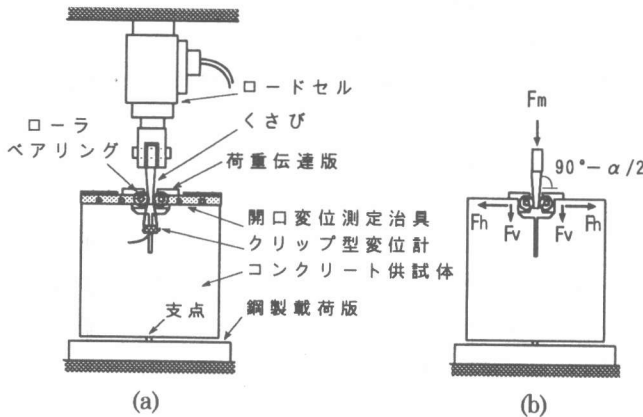


図-1 くさび挿入試験装置の概要

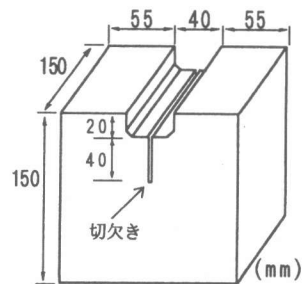


図-2 供試体の形状寸法

供試体の開口変位として、載荷点と同じ高さの水平方向変位を測定するために、図-1(a)に示すように、コンクリート供試体に開口変位測定治具を取付けた。そして、容量 5mm のクリップ型変位計を用いて、供試体の前面と後面の 2ヶ所で変位を測定し、これらの平均値により開口変位を表すものとした。なお、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 2秒間隔で計測した。

2.2 供試体の形状寸法

くさび挿入試験に用いたコンクリート供試体は、図-2に示すような形状寸法を有している。一辺 150mm の立方体の一端に、供試体への荷重伝達部として幅 40mm、深さ 20mm のくびれ部を設けた。そして、試験直前にくびれ部の中央にコンクリートカッタを用いて切欠きを入れ、この切欠き先端からひびわれが発生するようにした。切欠きの幅は 2mm、長さは 40mm、リガメントの長さは 90mm とした。

2.3 破壊エネルギーの算定方法

コンクリートの破壊エネルギーは、RILEM から提案されたモード I 破壊時の破壊エネルギーの定義⁹⁾をくさび挿入試験結果に適用することにより算定した。すなわち、図-3に示すような荷重-開口変位曲線の計測結果から、曲線で囲まれる

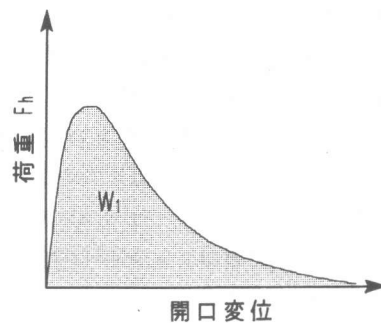


図-3 荷重-開口変位曲線

面積 W_1 を数値積分により求める。そして、破壊エネルギー G_f (単位ひびわれを作るのに必要なエネルギー) は、この値を用いて式(2)により算定するものとした。

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

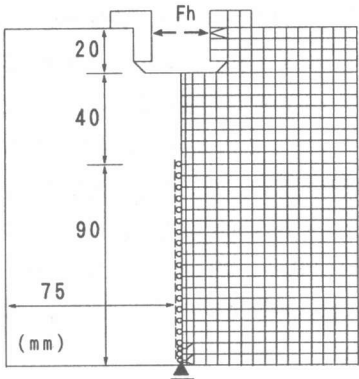
ただし、ここでは自重の影響は考慮しないものとした。ここで、 W_1 は曲線で囲まれる面積、す

なわち、供試体をひびわれ破壊させるのに要したエネルギーを表す。また、 A_{lig} は、垂直な平面に破壊域を投影した面積を表している。

3. 引張軟化曲線の推定

コンクリートの引張軟化特性は、ひびわれ発生後における伝達応力（引張応力）とひびわれ幅の関係を表すものであり、軟化開始点応力と軟化曲線の形状により定義される。その決定方法として、ここでは、多直線近似解析法を適用した。この解析法は、仮想ひびわれモデルに基づくひびわれ進展解析から得られる荷重－開口変位関係が、試験による荷重－開口変位曲線と良好に一致（ここでは、許容誤差 0.1%以下）するように、多直線により引張軟化曲線を推定する方法である。この方法は橋高ら ⁴⁾により提案され、栗原ら ⁷⁾はこの方

では、後者の考え方を基本として、くさび挿入試験結果に適用できるようにプログラムを作成した。図－4 は、ここで用いた FEM 解析モデルの寸法とメッシュ分割（右半断面）を表している。



図－4 解析モデルの寸法とメッシュ分割

表－1 粗骨材の特性

種 類	比 重	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)
川砂利	2.66	0.96	6.60	1.63	61.9	20
砕 石	2.84	1.46	6.67	1.65	59.0	20
軽量骨材	1.44	12.8	6.29	0.83	64.6	15

表－2 コンクリートの配合

種 類	粗骨材 最大寸 法 (mm)	スラン プの範 囲 (cm)	空気量の 範 囲 (%)	水セメ ント 比 W/C (%)	細 骨 材 率 s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
						水	セメ ント	細骨材	粗骨材	混和剤
川砂利コンクリート (NG)	20	5～10	4.5±1	60	45	168	280	808	1016	1.12
砕石コンクリート (CS)	20	5～10	4.5±1	60	45	168	280	808	1085	1.12
軽量骨材 “ (LW)	15	5～10	4.5±1	60	45	168	280	808	550	1.12

法を FEM 解析に組入れて、各種繊維補強コンクリートの引張軟化曲線の推定を行い、解析法の適用性を検証している。また、土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会 ⁸⁾では、後者の方法に基づいて、切欠き梁の破壊試験結果から引張軟化曲線を推定するプログラムを提示している。ここ

4. 試験に用いた骨材およびコンクリート

4. 1 骨材の特性

細骨材としては、川砂（三重県雲出川産、比重 2.60、粗粒率 2.87）を使用した。また、粗骨材としては、川砂利（三重県雲出川産）、安山岩碎石および人工軽量骨材（絶乾比重 1.28）の 3 種類を

使用した。粗骨材の特性を表-1に示す。

4.2 コンクリートの配合

粗骨材として川砂利を用いたコンクリート（川砂利コンクリート：NG），碎石を用いたコンクリート（碎石コンクリート：CS）および人工軽量骨材を用いたコンクリート（軽量骨材コンクリート：LW）の3種類のコンクリートを作製した。コンクリートの配合を表-2に示す。ここでは，各コンクリートの水セメント比ならびに単位粗骨材容積を同じにした。また，混和剤として標準形高性能 AE 減水剤を使用した。スランプの実測値は，NG：9cm，CS：5cm，LW：7cm，空気量の実測値は，NG：4.5%，CS：3.6%，LW：5.1%となった。

5. 結果および考察

5.1 破壊エネルギー

コンクリートの荷重-開口変位曲線の計測結果は，図-5(a)，(b)および(c)に示すとおりである。また，表-3は，コンクリートの強度および破壊特性を示したものである。ここで，破壊エネルギーおよび最大荷重は，供試体6個の平均値を示し，また，圧縮および引張強度，静弾性係数などは，円柱供試体（直径10cm，高さ20cm）4個の平均値を示している。

川砂利コンクリート(NG)に対する碎石コンクリート(CS)および軽量骨材コンクリート(LW)の破壊エネルギー G_r の比率は， $G_r(CS)/G_r(NG)=1.46$ ， $G_r(LW)/G_r(NG)=0.73$ となり，CSが最も大きくなった。この結果は，小野・大岸の研究結果と同様の傾向を示している。また，LWの破壊エネルギーは最も小さくなっているが，これは粗骨材種類の影響だけでなく，粗骨材最大寸法が他のものに

比べて小さいことも一因と考えられる。さらに，供試体破断面の観察結果によると，LWの破断面は他のものに比べてフラットであることから，骨材のかみ合い効果等による伝達応力も小さく，破壊エネルギーが減少したものと推察される。

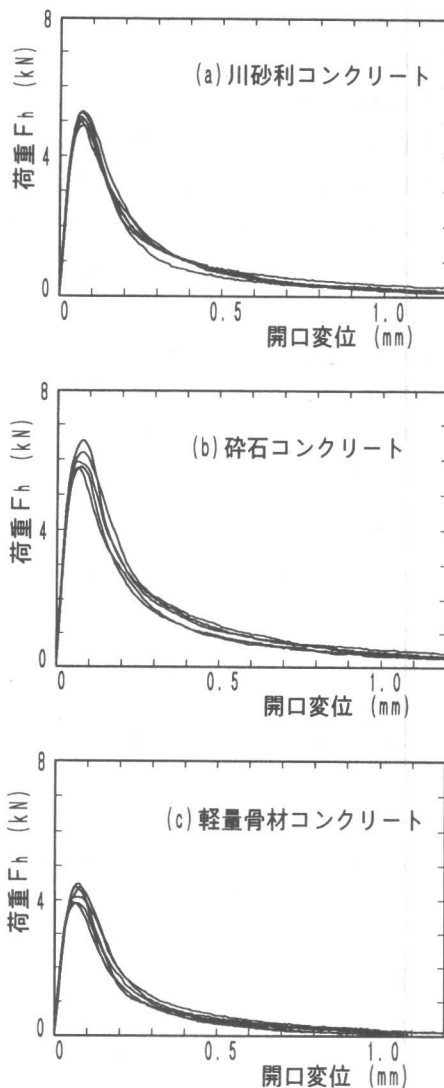


図-5 荷重-開口変位曲線の計測結果

表-3 コンクリートの強度および破壊特性

種 類	圧縮強度 σ_c (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	静弾性係数 E_c (GPa)	破壊エネルギー G_r (N/m)	最大荷重 F_{hmax} (kN)
川砂利コンクリート (NG)	22.3 (100)	2.17 (100)	22.6 (100)	98.2 (100)	4.98(100)
碎石コンクリート (CS)	25.2 (113)	2.61 (120)	28.8 (127)	143.3 (146)	5.91 (119)
軽量骨材コンクリート (LW)	20.9 (94)	2.03 (94)	17.3 (77)	71.4 (73)	4.10 (82)

*CS および LW における括弧内の数値は，NG における各特性値を 100 とした場合の比率を表している。

骨材種類の相違が破壊エネルギーに及ぼす影響は、最大荷重、強度および静弾性係数に及ぼす影響と同様の傾向を示しているが、最大荷重、強度および静弾性係数の変化割合の程度よりも大きくなっているのが特徴と思われる。

5.2 引張軟化曲線

コンクリートの引張軟化曲線の推定結果は、図-6に示すとおりである。ここでは、各コンクリートの平均した荷重-開口変位曲線を用いて解析した。また、図-7は、得られた引張軟化曲線を入力データとして荷重-開口変位曲線を解析し、各コンクリートの計測値と比較したものである。当然であるが、解析値と計測値はよく一致した結果を示しており、推定した引張軟化曲線は妥当な結果を示していると考えられる。なお、ここでは、円柱供試体により求めた静弾性係数を用いて引張軟化曲線を推定しているために、解析および計測した荷重-開口変位曲線の初期勾配において差が生じる場合があるので、解析におけるひびわれ発生荷重点と計測による荷重-開口変位曲線が一致するように、計測結果の補正を行い、この補正後の荷重-開口変位曲線に基づいて引張軟化曲線を推定した。

推定したコンクリートの引張軟化曲線は、図-6からわかるように骨材種類によって差異がみられる。既往の研究結果から、引張軟化曲線の前半部分は、コンクリートの不連続な微細ひびわれの発生している領域に対応し、軟化曲線の後半部分は骨材のかみ合い効果等による応力伝達が行われている領域に対応しているとの考え方⁹⁾が示されている。この考え方に従えば、CSの引張軟化曲線は、NGやLWに比べて曲線の後半部分の引張応力が大きい、つまり、同一のひびわれ幅に対する伝達応力が大きくなっている。したがって、CSの骨材のかみ合い効果等が、NGやLWのそれらに比べて相対的に大きいことを示している。ところで、引張軟化曲線の囲む面積は、式(2)で求めた破壊エネルギーと等価であるから、CSの破壊エネルギーがNGやLWよりも大きくなるのは、軟化曲線の後半部分の引張応力が大きいこと、す

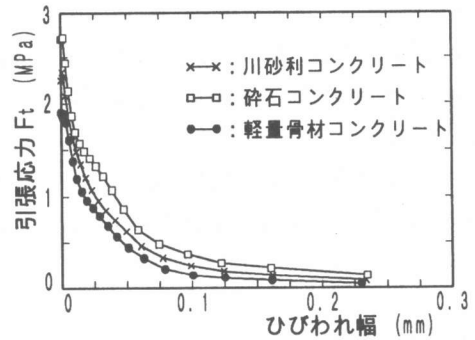


図-6 引張軟化曲線の推定結果

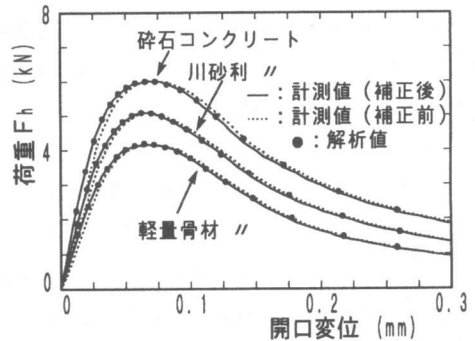


図-7 荷重-開口変位曲線の解析結果

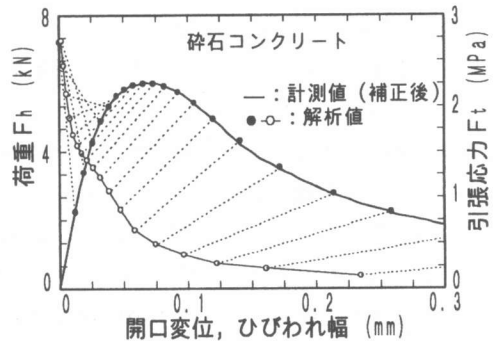


図-8 引張軟化曲線の解析値と荷重-開口変位曲線との関係

なわち、骨材のかみ合い効果等が相対的に大きいことが一因であると考えられる。

図-8は、砕石コンクリートにおける引張軟化曲線の解析値と荷重-開口変位曲線の計測値ならびに解析値との関係を示している。ひびわれの進展と荷重-開口変位の非線形性が良好に対応

づけられていることが認められる。特に、推定した軟化曲線の負の勾配の大きさは、荷重-開口変位曲線におけるピーク以降の荷重低下の程度によく合致している。このことから、多直線近似解析法により求めた引張軟化曲線は、骨材種類などが引張軟化特性に及ぼす影響をより詳細に比較検討するのに適していると考えられる。

6. 結 論

川砂利、碎石および人工軽量骨材を用いた3種類のコンクリートを対象として、破壊エネルギーと引張軟化曲線を求め、破壊靱性に及ぼす粗骨材種類の影響について検討した。本研究の結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 水セメント比と単位粗骨材容積を同じにして得られたコンクリートの破壊エネルギーは、碎石コンクリート(CS)において最も大きく、次いで川砂利コンクリート(NG)、軽量骨材コンクリート(LW)において最も小さくなった。各コンクリートにおける破壊エネルギー G_f の大きさは、以下のような関係となった。

$$G_f(CS)/G_f(NG)=1.46$$

$$G_f(LW)/G_f(NG)=0.73$$

- 2) 引張軟化曲線における同一ひびわれ幅の伝達応力は、碎石コンクリート(CS)において最も大きく、次いで川砂利コンクリート(NG)、軽量骨材コンクリート(LW)において最も小さくなった。これは、CSにおける骨材のかみ合い効果等が相対的に大きいためと考えられ、また、CSの破壊エネルギーが相対的に大きくなる一因と考えられる。

<謝辞> 本研究を実施するに当たり、三重大学生物資源学部平成9年度卒業生の松本好史君にご助力を頂いた。また、くさび挿入試験装置の作製

に際しては、ウィーン工科大学のTschegg博士から貴重な文献資料を頂いた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書，pp.57-62, 1993
- 2) 小野博宣，大岸佐吉：コンクリートの破壊靱性(K_{IC} , G_{IC} , J_{IC})に及ぼす骨材種別の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10, No.2, pp.403-408, 1988
- 3) 橋高義典，上村克郎，高瀬憲克：高強度コンクリートのボルト引き抜き耐力に及ぼす粗骨材種類の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13, No.1, pp.245-250, 1991
- 4) 橋高義典，上村克郎，中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析，日本建築学会構造系論文報告集，453号，pp.15-25, 1993
- 5) Tschegg E.K. : New Equipments for Fracture Tests on Concrete, Materials Testing, 33, pp.338-342, 1991
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム，第一部（委員会報告），pp.150-152, 1990
- 7) 栗原哲彦，安藤貴宏，国枝 稔，内田裕市，六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.532, pp.119-129, 1996
- 8) 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会：コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線，コンクリート技術シリーズ，pp.74-87, 1997
- 9) H.Horii : Models of Fracture Process Zone and a System of Fracture Mechanics for Concrete and Rock, Proc. of Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy, Sendai, pp.325-337, 1988