

論文 水セメント比と材齢の異なるコンクリートの引張軟化特性

田嶋 和樹*1・白井 伸明*2・森泉 和人*3・渡部 憲*4

要旨: 本研究は、比較的实验資料が少ない、材齢 30 日以下のコンクリートおよびモルタル材料の引張軟化特性に関するデータ収集を目的としている。主な実験変動因子は、水セメント比 ($W/C = 40 \sim 60 \%$) と材齢 (1~30 日) である。実験方法は、JCI「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」に従い、材齢 1 日の供試体においても安定した引張破壊靱性の計測が可能であった。実験結果の考察を通じ、引張最大強度は主にセメントペーストの強度発現傾向と比例するが、その後の軟化挙動の違いを説明するには、破面特性の評価も重要であることが分かった。

キーワード: 破壊, 引張軟化特性, 若材齢, 水セメント比, 破面特性, 水和反応

1. はじめに

近年、コンクリートの品質を大きく左右する若材齢時のひび割れに着目し、その挙動を合理的に予測可能な理論モデルの開発が盛んに行なわれている¹⁾。若材齢期のコンクリートは、活発な水和反応によって力学的性質が大きく変化するだけでなく、収縮や発熱膨張による初期応力の発生など、理論モデルの構築において考慮すべき現象が非常に多く、これらは相互に影響を及ぼしている。

こうした問題へのアプローチにおいて、個々の物理・化学現象の記述が簡便となるスケールに限定して理論モデルを構築し、それらを組み合わせる「マルチスケール・コンセプト」は非常に有用であると考えられる。筆者らは、このマルチスケール・コンセプトに基づき、微視スケールのセメントの水和反応モデルと、準微視スケールの熱伝導・熱応力を考慮したひび割れ解析モデルによる連成解析法の開発を進めている²⁾。しかしながら、若材齢コンクリートを対象とした引張軟化特性に関する系統的な実験資料は意

外に乏しく、信頼性の高いモデルの開発にはこれらのデータ収集が課題となっていた。

本研究では、若材齢コンクリートの引張軟化特性に関する基礎データを収集すべく、混和剤を一切使用しないプレーンコンクリートを用いて供試体を作製し、若材齢コンクリートで問題となる収縮や発熱膨張の影響が少ない標準水中養生下において、材齢および水セメント比の異なるコンクリート切欠き梁の 3 点曲げ引張破壊靱性試験を行い、コンクリートの破壊力学に基づく破壊靱性の評価を行った。さらに、試験終了後の破断面を対象として、3 次元スキャナによる破断面形状の観察を行い、破断面の性状が供試体の力学的特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および変動因子

使用材料を表-1 に、計画調合を表-2 に示す。供試体の変動因子は、水セメント比 (40, 50, 60 %) と材齢 (1, 3, 8, 15, 30 日) である。また、引張軟化特性に及ぼす供試体内部の骨材

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*2 日本大学教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

*3 日本大学助手 理工学部建築学科 工修 (正会員)

*4 東急建設(株) 技術研究所建築研究室 工修 (正会員)

の影響を比較するため、水セメント比 50% のモルタル供試体も併せて作製した。以後、供試体シリーズ名は、表-1 に示すように定義する。

本実験では、変動因子ごとに 2 体の供試体を作製するとともに、同一バッチよりシリンダー供試体 ($\phi \times H = 100 \times 200$ mm) を 4 本作製し、圧縮および割裂引張試験を各 2 本行った。なお、型枠には曲げ強度供試体作製用鋼製型枠 (100 \times 100 \times 400 mm) を用い、打設後 1 日で脱型し、試験直前まで標準水中養生した。

2.2 実験方法

図-1 に供試体のセットアップ状況を示す。引張破壊靱性試験は、JCI「プレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)」³⁾に従った。供試体中央の深さ 50 mm の切欠きは、刃厚 2 mm のダイヤモンドカッターを用い、各供試体の载荷直前に作成した。なお、材齢 1 日の供試体においても、切欠きの作製による問題は生じなかった。

表-1 コンクリートの使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.16 (g/cm ³)
細骨材	君津産山砂 表乾密度 2.57 (g/m ³)
粗骨材	碎石 表乾密度 2.67 (g/m ³) 最大骨材寸法 20 (mm)

表-2 コンクリートの計画調合

シリーズ名	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
C-40	40	168	421	758	1053
C-50	50	202	403	725	1008
C-60	60	232	388	698	970
M-50	50	326	653	1175	0

W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材

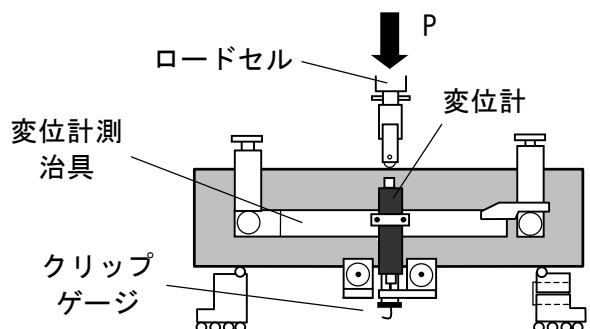


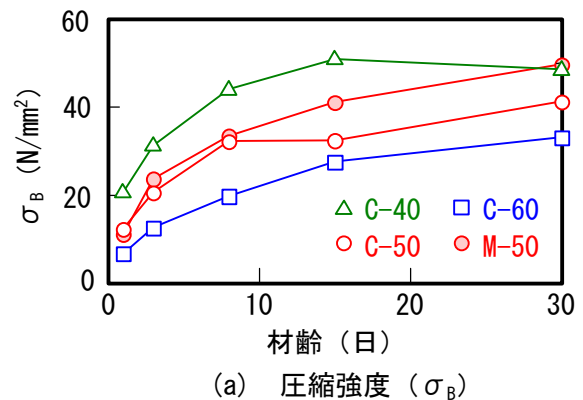
図-1 供試体セットアップ状況

载荷には、軟化応答を安定して制御可能なインストロン型精密万能試験機 (容量 100 kN) を用い、試験機のクロスヘッド速度を 0.01~0.08 mm/min に設定した。载荷点および支承部は、供試体軸方向の伸縮や軸方向まわりのねじれ変形にも滑らかに追従できるように設計されている。荷重は試験機に固定されたロードセルを用いて検出し、開口変位 (CMOD) はクリップゲージ (精度 1/1000 mm) により、荷重点変位は変位計測治具にとりつけた高感度変位計 (精度 1/200 mm) により、それぞれ計測した。

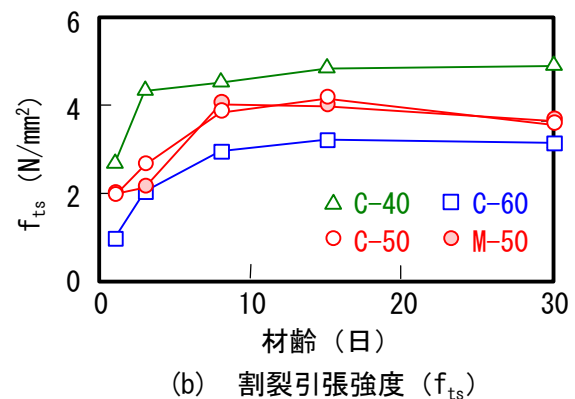
3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの力学的性質

図-2(a) および (b) に、引張破壊靱性試験と同材齢で行ったシリンダー供試体の圧縮および割裂引張強度試験結果 (平均値) をそれぞれ示す。試験に際しては、供試体と試験機間の摩擦の影響を低減するため、重ねたテフロンシートの上にシリコンオイルを塗布し、供試体と試験機の間には挿入した。



(a) 圧縮強度 (σ_B)



(b) 割裂引張強度 (f_{ts})

図-2 圧縮および割裂引張強度試験結果

圧縮強度 (σ_B) と割裂引張強度 (f_{ts}) の発現傾向を比較すると、 f_{ts} は材齢 8 日以降でほぼ一定となるのに対し、 σ_B は材齢 30 日に至るまで上昇を継続しており、両者の強度の発現速度には違いが見られる。次に、水セメント比 (W/C) の違いが強度の発現速度に及ぼす影響を比較すると、W/C が小さいほど σ_B および f_{ts} が高くなるだけでなく、早期に発現する傾向が共通してみられる。また、コンクリート (C-50) とモルタル (M-50) の σ_B および f_{ts} の発現速度には大きな差異は認められなかった。

3.2 荷重点荷重 (P) -CMOD 関係

図-3(a)~(d)に、全供試体の引張破壊靱性試験の荷重 (P) -CMOD 関係を、供試体シリーズ別に示す。P-CMOD 関係の全体的な傾向を整理すると、供試体の材齢が上昇するほど、または W/C が低いほどピーク荷重が増大し、それに応じて軟化性状は次第に脆性的になっている。また、粗骨材の有無による P-CMOD 曲線の違いを C-50 と M-50 で比較すると、粗骨材の存在は、ピーク荷重値の増大とその後の引張破壊靱性の上昇にも影響を与えていることが分かる。また、モルタル供試体の P-CMOD 曲線に関して、同一材齢供試体 (2 体) における曲線のバラツキが非常に小さいことが注目される。

3.3 引張軟化特性

はじめに、実験から得られた P-CMOD 曲線から引張軟化曲線 (TSD) を推定する。TSD の推定には、橋高が公開している引張軟化曲線の逆解析プログラム⁴⁾を用いた。図-4(a)~(d)に推定された TSD を供試体シリーズ別に示す。

コンクリートを用いたシリーズ (C-40, C-50, C-60) において、材齢および水セメント比 (W/C) が TSD に及ぼす影響を検討すると、材齢が上昇し、W/C が小さいほど、最大結合応力 (F_{tmax}) が大きい値を示している。また、軟化開始点からの軟化勾配が急峻になり、軟化テール部のバラツキが顕著である。続いて、M-50 と C-50 を比

較し、粗骨材の存在が TSD に及ぼす影響を検討する。粗骨材を含む C-50 の方が、 F_{tmax} の値が大きく、軟化テール部のバラツキが目立つが、軟化開始点からの軟化勾配については、両者の間で差は特に見られない。

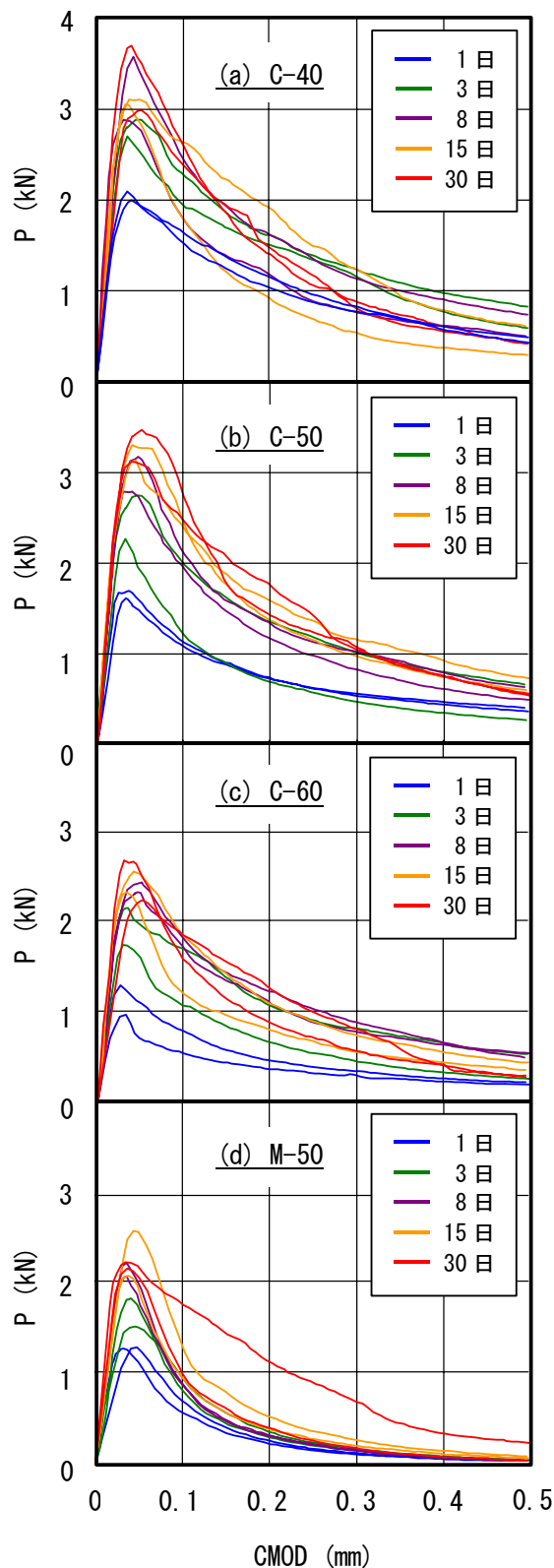


図-3 荷重 (P) -CMOD 関係

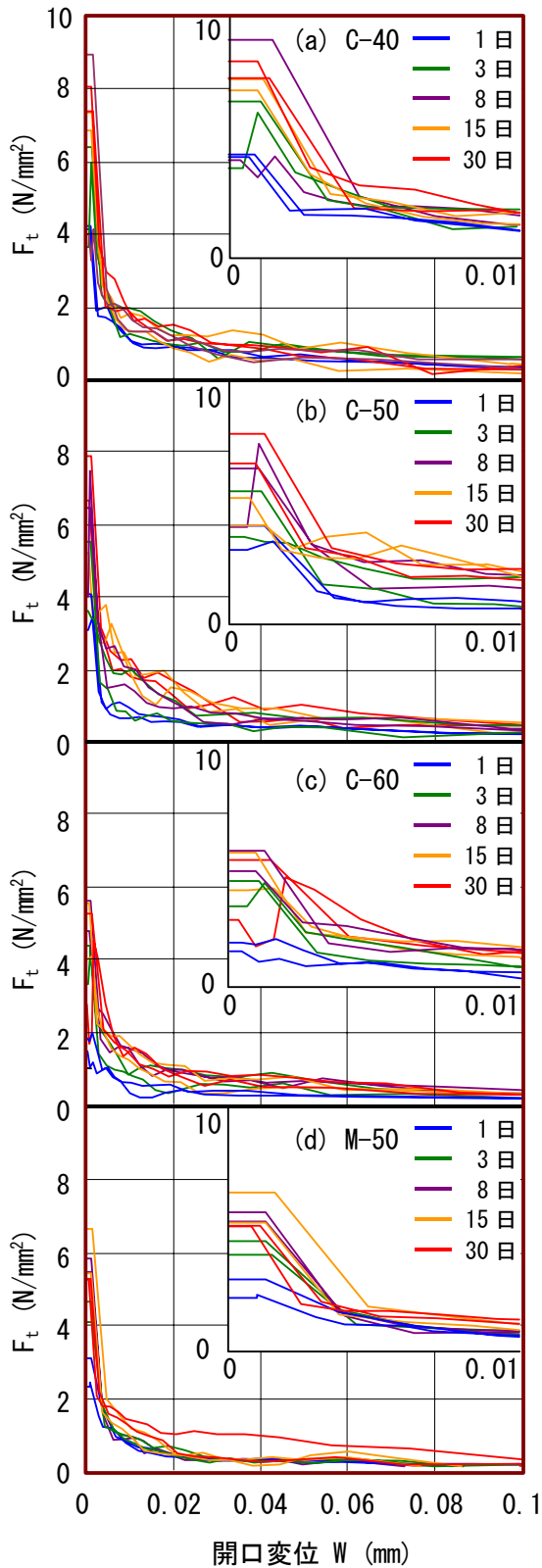


図-4 引張軟化曲線

次に、実験から得られた P-CMOD 曲線から破壊エネルギー (G_F) を算出する。図-5 に、文献³⁾に従い、実験から得られた P-CMOD 曲線から求めた G_F と材齢の関係を示す。コンクリート

供試体において P-CMOD 関係のバラツキが大きく、 G_F 値も大きく異なったことから、図中では、同一材齢供試体 2 体の G_F 値をエラーバーにより表示し、それらの平均値の推移を併せて示している。なお、図-6 には P-CMOD 関係から求めた G_F と推定された TSD から求めた破壊エネルギー (G_F^{TSD}) の関係を示すが、両者は線形関係にあり、 G_F^{TSD} は G_F の 80 % 程度の値を示している。

図-5 を見ると、モルタル供試体の G_F 値は、材齢の上昇に伴い、徐々に増加を続けるが、コンクリート製供試体の場合、材齢の上昇に伴って G_F が必ずしも上昇するとはいえない。材齢 3 日から 8 日において一度大きな値を示すが、その後、若干の減少傾向もうかがえる。これは、コンクリートのひび割れ解析モデルを構築する際、材齢に応じた引張破壊靱性を考慮するとともに、多相材料レベルから強度・破壊靱性特性をモデル化することの重要性を示唆していると思われる。

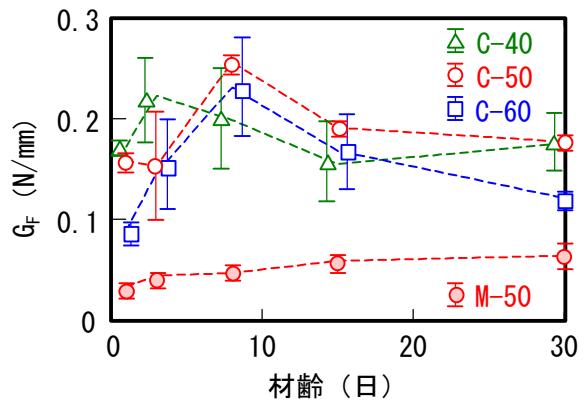


図-5 破壊エネルギー (G_F) - 材齢関係

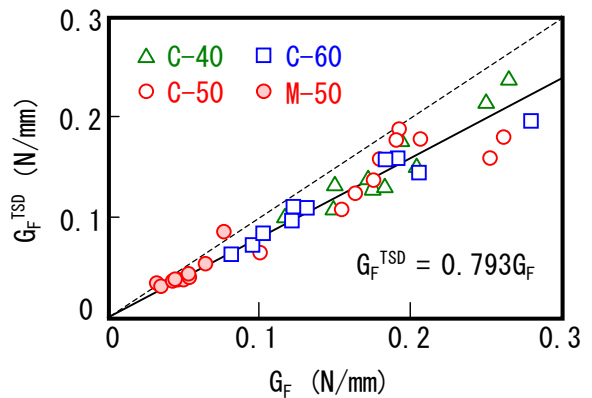


図-6 G_F^{TSD} - G_F 関係

4. 材齢に伴う材料強度・軟化性状の変化に関する考察

4.1 材料強度と水和反応

圧縮および割裂引張強度の発現性状に及ぼす材齢およびW/Cの影響を、セメントの水和反応に基づいて考察する。

図-7に、本供試体の調合設計データを用いて行った、HYMOSTRUC⁵⁾による水和反応シミュレーション結果((a)水和反応曲線、(b)セメント粒子の膨張状態)を示す。HYMOSTRUCは、セメントの粒度分布を考慮し、水和によって膨張したセメント粒子が周辺の粒子を埋め込むというような、粒子相互作用のモデル化を行った水和反応モデルである。セメントクリンカー組成、W/Cおよびセメント粒子の比表面積等をパラメータとし、セメントの水和度を計算する。

材料試験結果(図-2)と水和シミュレーション結果(図-7)を比較すると、水和反応曲線は、材齢の上昇に伴う材料強度の発現速度をおおよそ表現している。また、W/Cが大きいほど材料強度(σ_B および f_{ts})が低くなる傾向を、ペースト中の水量に基づくセメント粒子の間隔、つまり粒子の結合状態で表している。しかしながら、 σ_B と f_{ts} の発現速度を注意深く比較すると、実験では σ_B に比べて f_{ts} の頭打ちが早く現れており、このような違いを考慮するためには、水和反応から直接材料強度を推定するのではなく、粗骨材や供試体に生じる応力分布等の影響を正確に考慮する必要があると考えられる。

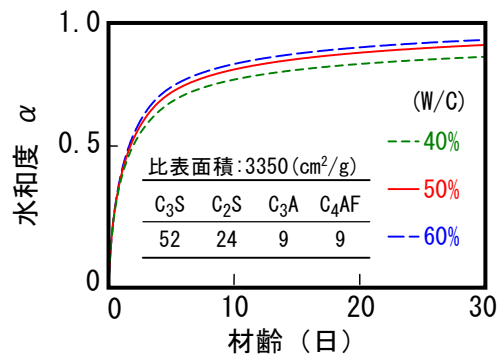
4.2 破面特性と引張軟化特性

材齢の上昇に伴う軟化性状の変化については、水和反応の観点からのみ論ずることは難しく、供試体の破面特性の観点から考察を試みる。

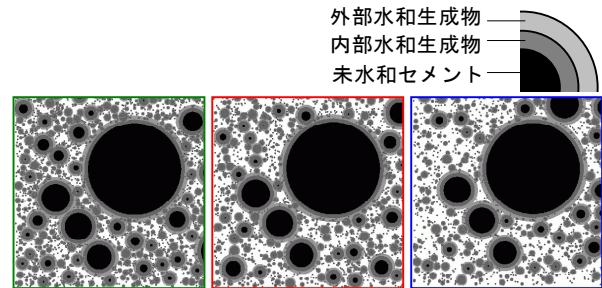
破断面凹凸状況の測定は、KUNIEDA⁶⁾の研究を参照して、破断面鉛直方向(Z軸)の測定精度0.025mmを有するローランド社製の接触型3次元スキャナを用いて行った。なお、コンクリート破断面の計測に基づく粗さ評価に関する研究では、破断面平行(XY面)方向の解像度を数種

類変化させた測定結果に基づいて、フラクタル次元により評価する手法が一般的であるが、本研究では、XY面のスキャンピッチを0.5mmに固定し、工業製品の表面粗さを表すパラメータの一つである算術平均粗さ(R_a)により評価した。

図-8に、本研究で採用したJIS-B-601「表面粗さ一定義及び表示」に示されている R_a の定義を示す。粗さ曲線とは、断面曲線において所定の波長より長い表面のうねり成分を除去したものと定義されるが、本研究では、粗骨材の成分が除去されないように、断面曲線から直接 R_a 値を求めている。また、引張軟化特性を支配する有意な破面情報は、ノッチ近傍に多いことが一般に知られていることから、図-9に示す領域のXおよびY方向に断面曲線を設定した。



(a) 水和反応曲線



(b) セメント粒子の膨張状態 ($\alpha = 0.8$)

図-7 水和シミュレーション結果

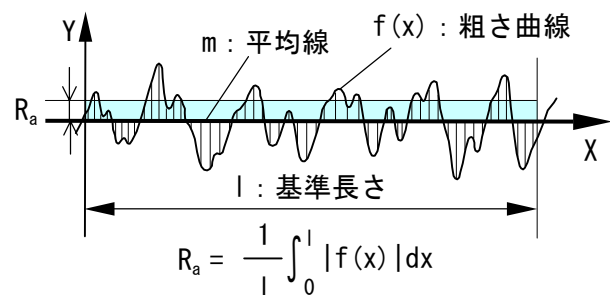


図-8 R_a の定義

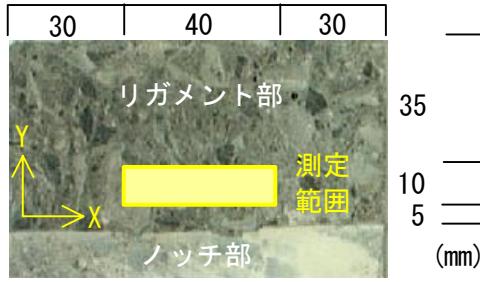


図-9 R_a 評価範囲

計算した R_a 値の平均を求め、供試体の R_a 値と G_F との関係について整理したものを図-10 に示す。バラツキはあるものの、 R_a の増加に伴い、 G_F も増加する傾向がみられるが、図中の A、B 点は、他のデータ群に比べて、大きな R_a 値を示している。図-11 に、A および B に対応する供試体の破断面の鳥瞰図を示す。両供試体ともノッチ近傍に粗骨材が存在しており、これが大きな R_a 値を示した原因となっている。A および B の G_F が R_a 値に比べて小さいことは、次のように考えられる。A は材齢 1 日の C-60、B は材齢 3 日の C-40 であり、両供試体ともペースト-粗骨材界面の強度があまり発現されておらず、ノッチ近傍の骨材が介在することによるひび割れ迂回効果が、供試体の引張軟化特性に与えた影響が小さかったと解釈される。

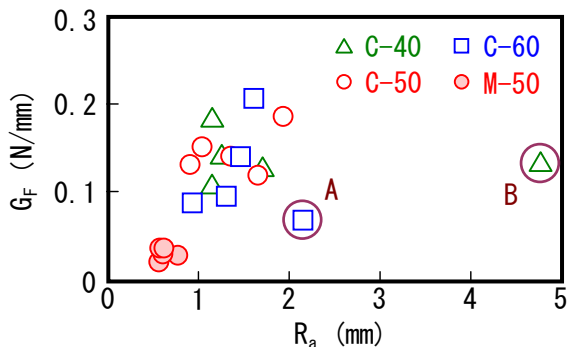


図-10 G_F - R_a 関係

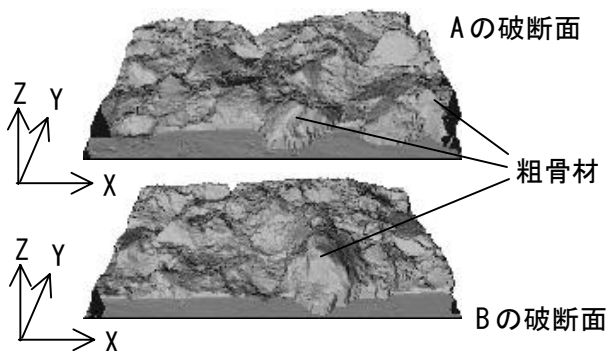


図-11 破断面形状

5. まとめ

- 1) 材料強度に及ぼす材齢および W/C の影響は、水和反応曲線およびセメント粒子の結合状態によりおおよそ表現されるが、水和反応から材料強度を推定する場合には、粗骨材等の影響を正確に考慮する必要がある。
- 2) 粗骨材の存在により非常に複雑であるコンクリートの引張軟化特性を評価するためには、セメントペースト-粗骨材界面の状態を把握する必要がある。
- 3) ひび割れ解析モデルを構築する際、材齢に応じた引張破壊靱性を考慮するとともに、多相材料レベルから強度・破壊靱性特性をモデル化する必要がある。

謝辞

本研究の実施にあたり、東急建設技術研究所を利用させていただいた。さらに実験試料の提供と研究遂行上の数々の助言も受けた。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。また、本研究の一部は文科省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）：研究課題「環境・防災都市に関する研究（研究代表者：川幡長勝）」の一環として実施したものであり、一部は科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)課題番号:12650588, 代表者:白井伸明)の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) International Workshop on Control of Cracking in Early-Age Concrete, Tohoku University, 2000
- 2) Tajima, K., Moriizumi, K., and Shirai, N.: Numerical Calculation Mechanics Model Considering Hydration of Concrete, Proc. FRAMCOS-4(Paris), Vol. 1, pp.107-114, Jun. 2001
- 3) 日本コンクリート工学協会：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. 401-405, 2001. 5
- 4) 橋高義典：引張軟化曲線の逆解析プログラム (<http://www.arch.metro-u.ac.jp/~kitsu/fmpana-j.html>)
- 5) K. van Breugel: Simulation of hydration and formation of structure hardening cement-based materials, PhD thesis, Delft University of Technology, 1997
- 6) Kunieda, M.: Surface Properties and Performance of Concrete Members, Ph.D Thesis, Gifu University, Jul. 1999