

論文 ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状

国枝 稔^{*1}・李 虎^{*2}・上田 尚史^{*3}・中村 光^{*4}

要旨: 本研究は、ジオポリマーコンクリート (GP コンクリート) およびジオポリマーモルタル (GP モルタル) の曲げ破壊性状を評価するにあたり、曲げ強度だけでなく破壊エネルギーや破断面の面積と関連付けて検討を行った。本研究で作製した GP コンクリートは、材齢の増加とともに圧縮強度及び曲げ強度は高くなる傾向にあるが、破壊エネルギーは材齢 7 日までは増加するが、その後、材齢の増加とともに低下する傾向にあった。マトリクスの収縮に伴うと推察されるひび割れが存在しており、これが破壊エネルギーを減少させていることが明らかとなった。

キーワード: ジオポリマー, 曲げ破壊, 破壊力学, 破壊エネルギー, 破断面の形状

1. はじめに

フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, シリカフェームなどのフィラーとケイ酸ナトリウムなどを主材料とするジオポリマーは、セメントクリンカーを使用しないため、セメントクリンカーを使用した場合より、80%程度 CO₂ を削減できると試算されている¹⁾²⁾。さらに、フィラーにフライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, シリカフェームなどの産業副産物を多量に用いることで、廃棄物の再利用も期待される。

これまでに、ジオポリマーの基礎物性、構造利用や耐久性などについていくつかの研究がなされている。上原ら³⁾は、蒸気養生を施したジオポリマーの高強度な特性を利用して PC まくらぎの製造を試みている。河尻ら⁴⁾は配合や養生方法が硬化後のジオポリマーコンクリート (GP コンクリート) の強度等に及ぼす影響について検討しており、20℃気中養生によって、材齢 28 日の圧縮強度が 50MPa 程度の GP コンクリートを製造している。また、耐久性については、原田ら⁵⁾はジオポリマーモルタル (GP モルタル) が高い耐アルカリ骨材反応特性や耐硫酸抵抗性があることを示している。

GP コンクリートを構造部材に適用するためには、ひび割れの進展や終局時の破壊性状について十分な検討を行う必要がある。引張破壊が卓越する一般的なセメントコンクリートにおいては、ひび割れの発生および進展に対する評価指標として、引張軟化曲線や破壊エネルギー G_F などの破壊力学パラメータが用いられ、評価のための試験方法も提案されている。破壊エネルギーは、コンクリートの配 (調) 合、養生条件、材齢などの影響を受けることが知られており、破断面の形成によって消費されるエネルギーであることから、形成された破断面を観

察することによって、物理的な解釈も可能である⁶⁾。

本研究では、GP コンクリートおよび GP モルタルを対象に、切欠きはりの三点曲げ試験を行い、曲げ破壊性状に対して破壊力学的検討を行った。その際、破断面の形状の変化や粗骨材周辺のひび割れ状況の変化の観察結果も併せて考察した。

2. 実験概要

2.1 配合および練混ぜ手順

GP コンクリートと GP モルタルの使用材料を表-1 に、配合 (質量比) を表-2 および表-3 に示す。ケイ酸ナトリウム水溶液は、水道水にて 2 倍に希釈したものを使用した。なお、GP コンクリートで用いた粗骨材の最大寸法は 20mm である。

練混ぜには、容量 55 リットルのパン型強制練りミキサーを用い、1 バッチの練混ぜ容量は 45 リットルとした。練混ぜ手順は、GP モルタルでは、砂, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, シリカフェームを 2 分間空練りし、

表-1 使用材料

略号	備考
FA	フライアッシュ II 種 (密度 2.2g/cm ³)
BS	高炉スラグ微粉末 4000 (密度 2.9g/cm ³)
SF	マイクロシリカ (密度 2.2g/cm ³)
S	川砂 (密度 2.64g/cm ³ , 粗粒率 2.81)
G	川砂利 (最大寸法 20mm, 密度 2.60g/cm ³ , 粗粒率 6.85)
W	ケイ酸ナトリウム水溶液 (2 倍希釈液, 密度 1.29g/cm ³)

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博士(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工) (正会員)

その後、ケイ酸ナトリウム水溶液および高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）を加え、均一に練り混ぜられた状態が確認できるまで、60 秒間練混ぜを行った。一方、GP コンクリートでは、粗骨材や細骨材およびその他の粉体を 60 秒間空練りし、その後、ケイ酸ナトリウム水溶液および高性能 AE 減水剤を加え 60 秒間練り混ぜ、掻き落としを行った後、さらに 90 秒間練り混ぜた。

2.2 養生方法

ジオポリマーの硬化反応は、水分の逸散に伴って生じることから、気中での養生が早期強度発現に有効である。一方で、急激な乾燥は硬化時の収縮が大きくなり、ひび割れの発生が懸念されることから、本実験では GP コンクリートおよび GP モルタルのいずれについても、荷重する直前まで 20℃の恒温室内で湿布養生を行った。

2.3 供試体概要

曲げ強度試験（破壊エネルギー試験）を行うために、図-1 に示すような 100×100×400mm の角柱供試体（各シリーズ 5 本）と圧縮強度試験を行うために、φ100×200mm の円柱供試体（各シリーズ 3 本）を作製した。材齢 3 日、7 日、14 日、28 日に圧縮強度試験および曲げ強度試験を実施した。

2.4 破壊エネルギー試験方法

曲げ強度試験は「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法（JCI-S-001-2003）⁷⁾」に従い実施した。荷重直前に、打設面に対して直角な面（型枠面）の一方に、コンクリートカッターを用いて幅約 5mm の切欠きを導入し、図-2 に示すように 3 点曲げ試験を実施した。また、荷重時には容量 50kN（精度 25N）のロードセル、およびクリップゲージ（精度 1/2000mm）を用いて荷重および CMOD（切欠き肩口開口変位）をそれぞれ測定した。

得られた荷重-CMOD 曲線を用いて GP コンクリートと GP モルタルの破壊エネルギー G_F を JCI-S-001-2003 に従い算出した。

$$G_F = (0.75W_0 + W_l) / A_{lig} \quad (1)$$

ここで、 W_0 は供試体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積（N・mm）、 W_l は供試体の自重および荷重治具がなす仕事（N・mm）である。

2.5 破断面の形状測定

本実験では、触針式の 3 次元形状測定装置を使用して、各供試体の破断面の形状を測定した。測定した範囲は、曲げ試験後に得られた破断面（幅 100mm×高さ 67mm）のうち、中央部（幅 90mm×高さ 60mm）を測定対象とした。なお、測定の間隔は 0.4mm とした。図-3 に測定された破断面の例を示す。計測された 3 次元座標を用い、破断面の面積を計算した。

表-2 GP モルタルの配合

質量比 (%)					
W	SF	BS	FA	S	SP
20.0	8.8	12.8	20.0	38.4	0.416

表-3 GP コンクリートの配合

質量比 (%)						
W	SF	BS	FA	S	G	SP
12.1	2.1	7.7	12.9	24.8	40.4	0.227

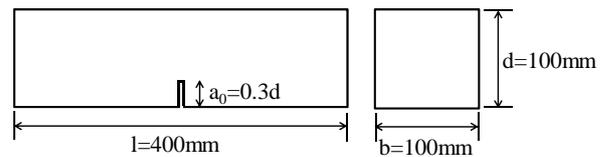


図-1 供試体寸法

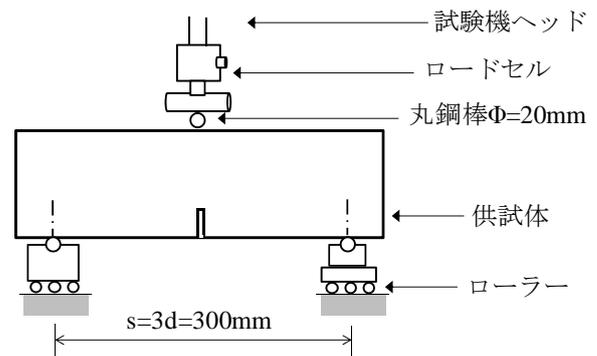


図-2 破壊エネルギー試験⁷⁾

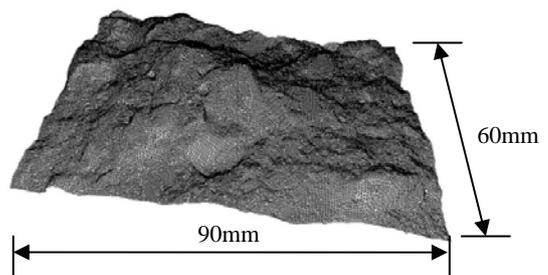


図-3 3D データ化された破断面の例
（材齢 3 日における GP コンクリート）

2.6 SEM による観察

セメントコンクリートにおいては、特に粗骨材とセメントペーストとの界面に遷移帯が形成されることが知られている⁸⁾。この遷移帯は、物質移動に対する抵抗性の低下を招くだけでなく、力学的な弱点となることから、その状態を把握しておくことは重要である。本研究で対象とする GP コンクリートにおける遷移帯の形成状況を

把握することは、ひび割れ進展のメカニズムを解明する上でも重要であることから、本研究では、走査型電子顕微鏡（SEM）の反射電子像を用いて、材齢3日、7日、14日、28日における粗骨材界面の観察を行った。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

本研究で作製した GP コンクリートおよび GP モルタルの各材齢における圧縮強度試験結果を図-4 に示す。GP コンクリートおよび GP モルタルは、いずれも材齢の増加とともに圧縮強度が増加する傾向を示した。また、粗骨材を用いたコンクリートよりモルタルのほうがやや高い圧縮強度を示した。

3.2 曲げ強度

各材齢における GP コンクリートおよび GP モルタルの曲げ強度を図-5 に示す。曲げ強度に関しては、コンクリートおよびモルタルの違いに関わらず、材齢の増加とともに高くなることが分かり、このことは圧縮強度で得られた傾向と同様であった。なお、圧縮強度はコンクリートに比べてモルタルの方が高いが、曲げ強度では逆の傾向になった。これは、ジオポリマーの硬化は水分の逸散に伴って生じるが、供試体内部に比べて表面の方が乾燥し、表面に収縮に伴う内部応力が生じていると考えられ、この影響がコンクリートに比べてモルタルに顕著に表れたものと現段階では推察している。

3.3 荷重-CMOD 曲線および破壊エネルギー

各材齢における曲げ強度試験から得られた GP コンクリートおよび GP モルタルの荷重-CMOD 曲線の平均曲線を図-6 に示す。なお、各供試体に対する実験結果を図-7 に示す。GP コンクリートでは、材齢の増加とともに、最大荷重は大きくなるが、最大荷重以降の荷重の低下が著しい傾向にあった。破断面の目視による観察結果では、写真-1 に示すように、材齢7日以降には粗骨材の割れも認められ、材齢の増加とともにややその割合が増加したが、一方で粗骨材の形状に依存した凹凸（粗骨材とモルタルマトリクスとの剥離）も多く認められた。

一方、GP モルタルでは GP コンクリートと同様に、材齢の進行とともに、最大荷重は大きくなった。GP モルタルに関しても、特に材齢28日において最大荷重以降の荷重の低下が著しいことが分かるが、その程度は GP コンクリートに比べれば小さい。

荷重-CMOD 曲線のばらつきに関しては、特に最大荷重以降の軟化域において、GP モルタルに比べて GP コンクリートのばらつきが相対的に大きいことが分かる。これは、ひび割れ進展の経路上に粗骨材が介在するか否かで靱性が異なることによる。

得られた荷重-CMOD 曲線を用いた算出した GP コン

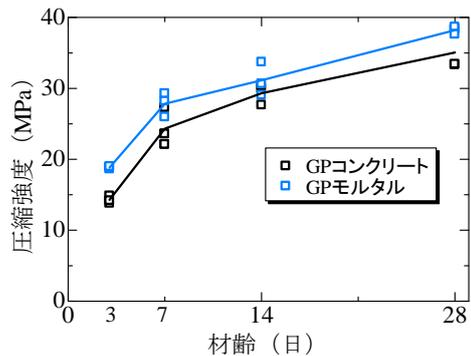


図-4 GP コンクリートおよび GP モルタルの圧縮強度の経時変化

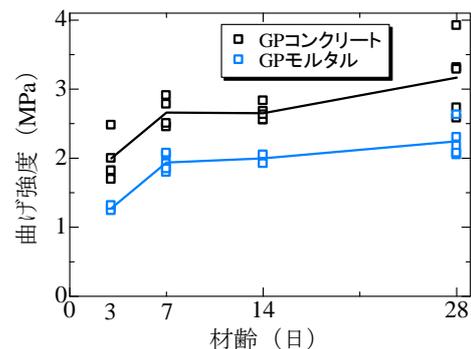
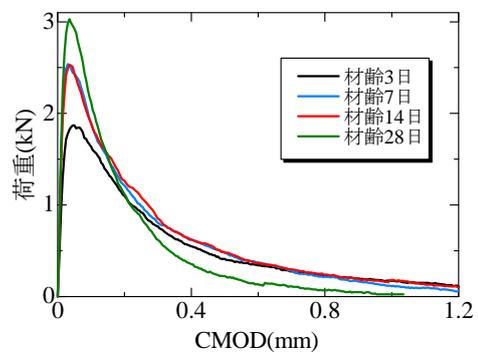
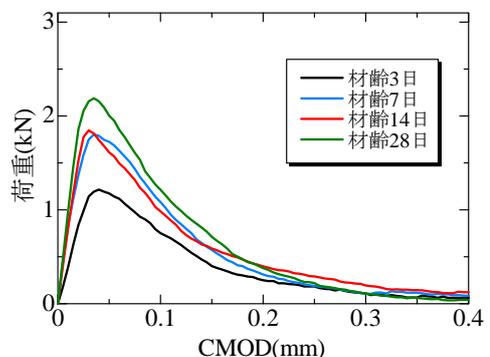


図-5 GP コンクリートおよび GP モルタルの曲げ強度の経時変化



(a) GP コンクリート



(b) GP モルタル

図-6 荷重-CMOD 関係の経時変化

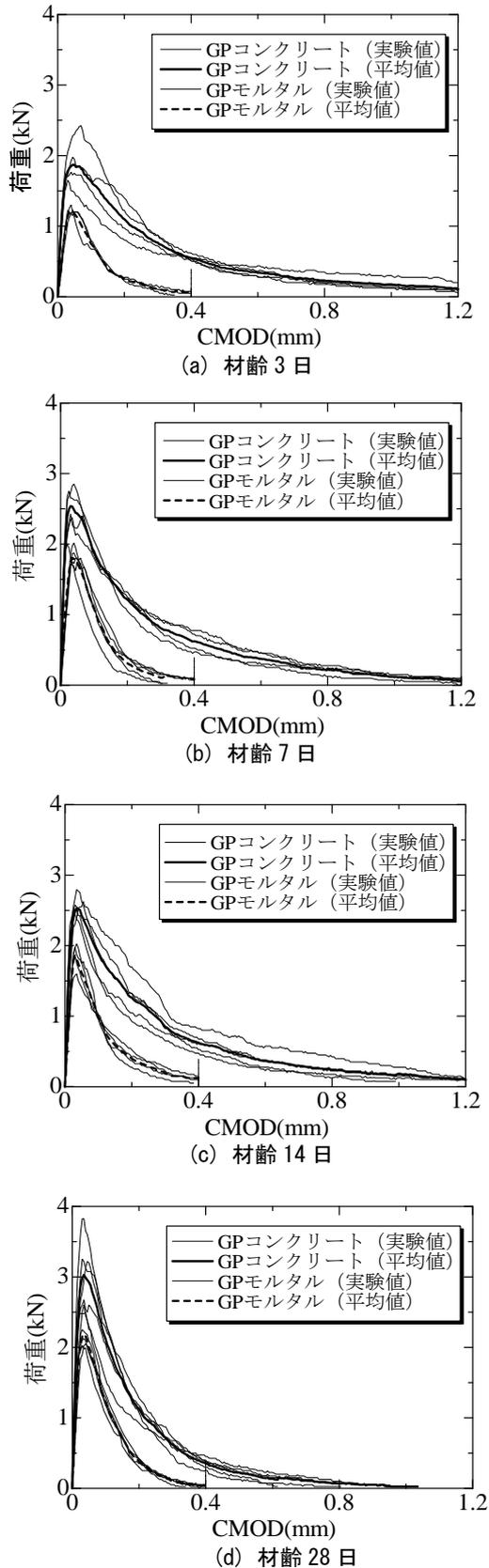
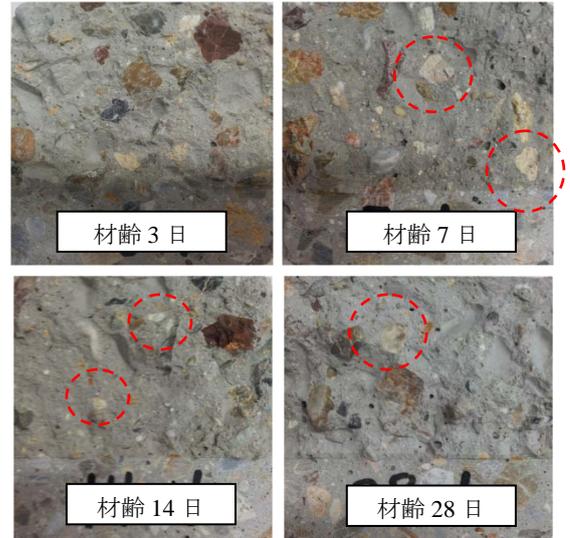


図-7 同材齢における荷重-CMOD 関係

クリートおよび GP モルタルの破壊エネルギーを図-8 に示す。なお、GP コンクリートの場合は CMOD が 1mm、GP モルタルの場合は CMOD が 0.3mm となるまでの荷重



※破線は破断した粗骨材を示す。

写真-1 各材齢の破断面の状況 (GP コンクリート)

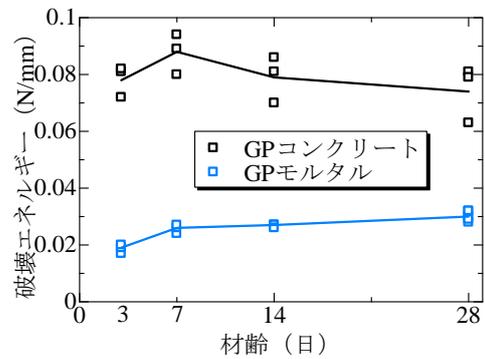


図-8 破壊エネルギーの経時変化

—CMOD 曲線の面積を対象として破壊エネルギーを算出した。

GP コンクリートの場合、材齢 3 日から材齢 7 日まで、破壊エネルギーが大きくなるが、それ以降は減少する傾向が見られた。この原因については、次項にて考察する。

通常のコンクリートの破壊エネルギーが、0.1～0.15N/mm である⁹⁾ことから、GP コンクリートでは通常のコンクリートと比較して破壊エネルギーがやや小さいことが分かる。GP モルタルにおいては材齢 3 日から 7 日まで破壊エネルギーが急増し、それ以降も変化は小さいが増加傾向にあった。なお、破壊エネルギーの絶対値に関しては、GP モルタルの破壊エネルギーは GP コンクリートのその 1/3 程度であることが分かる。これは、GP モルタルにおいて先述のとおり硬化時の収縮に伴う内部応力の影響も含まれてはいるものの、粗骨材を用いていないことによってひび割れ進展に対する抵抗性が減少しエネルギー吸収が小さくなっているメカニズム⁹⁾によると考えられる。

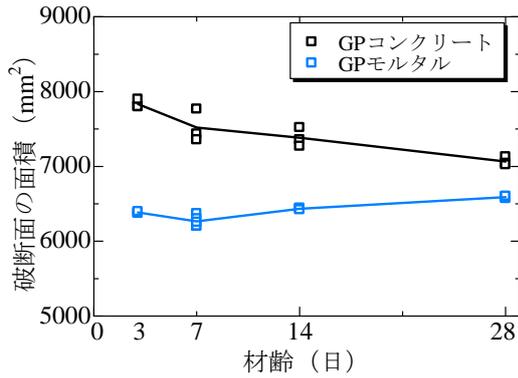


図-9 破断面の面積の経時変化

3.4 破断面の面積およびSEMによる粗骨材界面の観察

(1) 破断面の面積の経時変化

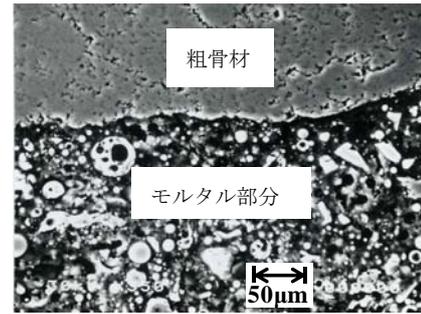
図-9にGPコンクリートおよびGPモルタルの破断面の面積の経時変化をそれぞれ示す。GPコンクリートでは、材齢3日から材齢7日までにやや急激に減少し、それ以降の減少は緩やかとなった。すなわち、材齢の増加とともに、破断面の凹凸が小さくなっていることが分かる。しかし、材齢3日の面積に対する材齢28日の面積は約10%の減少、材齢7日の面積に対する材齢28日の面積は約5%の減少であり、ごく僅かであった。写真-1に示すように、材齢7日以降では破壊した粗骨材が多くみられたことから、破断面はより平滑となり、その面積も小さくなったと考えられる。一方、GPモルタルでは材齢が増大しても面積は6200~6500mm²の範囲となりほぼ一定であった。

(2) 粗骨材周辺のひび割れ

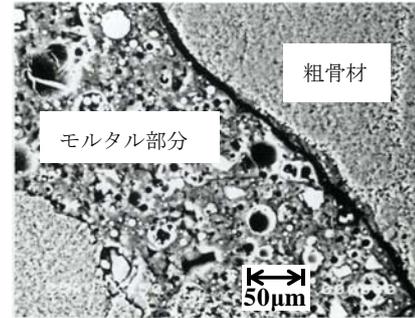
写真-2にSEMにより撮影された粗骨材周辺の状況の反射電子像を示す。これによると、材齢3日の画像では、粗骨材とマトリクスの界面部にひび割れが認められないが、材齢7日から粗骨材とマトリクスの界面部のひび割れ（ボンドひび割れ）が顕在化し、材齢28日では粗骨材から周辺方向に進展する微細なひび割れが観察された。本研究で使用したGPモルタルと同程度の配合において、材齢7日での収縮量が 3500×10^{-6} 程度である結果が得られており⁴⁾、マトリクスの硬化時の収縮量が非常に大きく、粗骨材の周辺方向に微細なひび割れが生じたものと考えられる。

(3) 破断面の観察結果および粗骨材周辺のひび割れと破壊性状との関係に関する考察

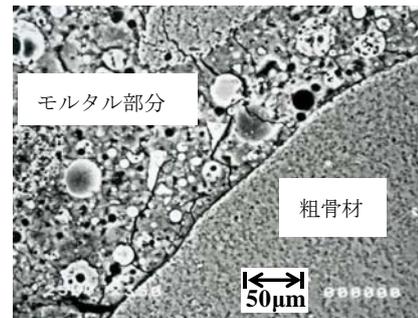
図-10に最大荷重と破断面の面積の経時変化を示す。最大荷重の大きな供試体ほど破断面の面積がやや小さい結果となった。理由としては、先のSEMの観察結果にあるように、材齢7日以降には粗骨材とマトリクスの界面部にボンドひび割れが生じてはいるが、マトリクスは粗骨材周辺のボンドひび割れなどとは関係なく、材齢



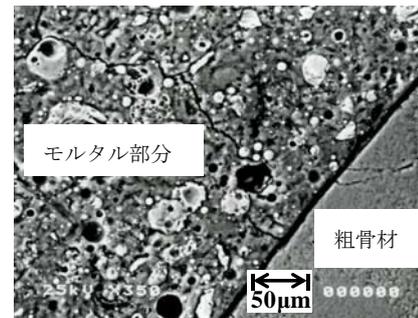
a) 材齢3日



b) 材齢7日



c) 材齢14日



d) 材齢28日

写真-2 SEMによるGPコンクリートの観察結果

の増加とともに高強度化したものと推察できる。最大荷重に至るまでにボンドひび割れ等の更なる進展が生じれば、荷重-CMOD関係において早い段階で非線形性が生じるが、図-6に示される材齢28日におけるGPコンクリートでは荷重とCMODの関係が最大荷重までほぼ線形関係であることから最大荷重へのボンドひび割れの影響は小さいと推察できる。

図-11に破壊エネルギーと破断面の面積の関係を示す。これによれば、破断面の面積が大きくなっても、破

壊エネルギーがほとんど変化していないことが分かる。SEMによる観察結果から、材齢の増加に伴い粗骨材周辺のひび割れが増加していることが確認でき、最大荷重以降のひび割れの進展に伴って、粗骨材周辺のひび割れが互いに結合するなどして、見掛け上は粗骨材の形状・寸法に依存した凹凸のある破断面が形成された。しかし、実際にはボンドひび割れなどの発生に伴い、粗骨材とマトリクスの界面部の破壊靱性は小さく、破壊エネルギーの増加へと結びつかなかったメカニズムによると推察できる。なお、このメカニズムに関しては、マトリクスの収縮特性、粗骨材寸法や粗骨材量によっても異なると思われることから、今後データの蓄積が必要である。

4. 結論

本研究は、GP コンクリートおよび GP モルタルの曲げ破壊性状について破壊力学的な検討を行った。本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 本研究で使用した GP コンクリートでは、曲げ強度は材齢の増加とともに高くなったが、破壊エネルギーはほとんど変化しないか、やや低下する傾向にあった。粗骨材周辺にボンドひび割れおよび硬化時の収縮に伴うと推察される微細ひび割れが影響していると推察される。
- (2) 本研究で使用した GP コンクリートの破壊エネルギーは、0.07~0.09N/mm であり、同程度の強度を有する通常のセメントコンクリートと比較してやや小さい結果となった。また、GP モルタルの破壊エネルギーは、さらに小さく 0.03N/mm 以下であった。このことから、粗骨材を用いたことにより GP コンクリートの破壊靱性が改善したと考えられる。
- (3) 本研究で使用した GP コンクリートでは、材齢 7 日以降の破断面の形状は目視ではその変化が確認できなかった。なお、破断面の面積を測定した結果、材齢の増加とともに破断面の面積はやや小さくなっていった。

参考文献

- 1) 池田攻：二酸化炭素問題とジオポリマー技術，耐火物，Vol.17, No.5, pp.87-95, 1979.5
- 2) Davidovits, J : GEOPOLYMERS, Journal of Thermal Analysis, Vol.37, pp.1633-1656, 1991
- 3) 上原元樹，束原実，横川勝則：ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの作製，土木学会年次学術講演会講演概要集，V 部門，pp.733-734, 2009
- 4) 河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマ

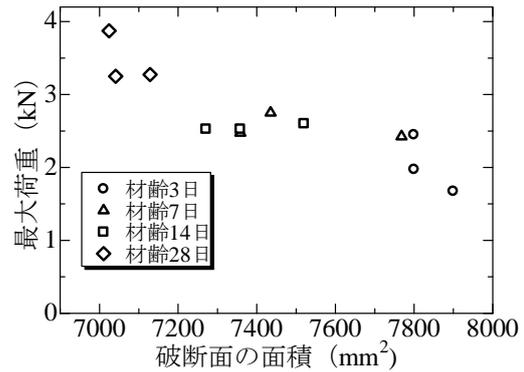


図-10 最大荷重と破断面の面積の関係 (GP コンクリート)

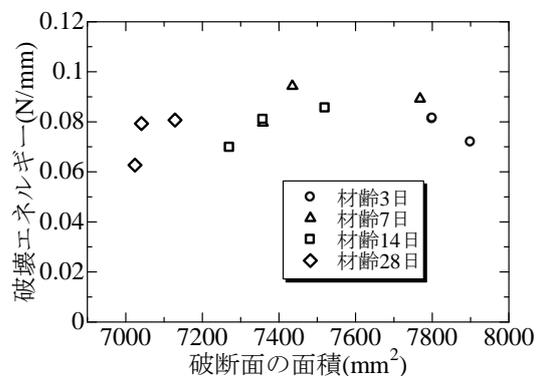


図-11 破壊エネルギーと破断面の面積の関係 (GP コンクリート)

一の基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011

- 5) 原田耕司，一宮一夫，津郷俊二，池田攻：ジオポリマーの諸特性に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1894-1899, 2012
- 6) 国枝稔，島崎磐，鎌田敏郎，六郷恵哲：再生骨材の特性がコンクリートの曲げ破壊性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21, No.1, pp.223-228, 1999
- 7) 日本コンクリート工学会：切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法 (JCI-S-001-2003)，2003
- 8) 内川浩ほか：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討，コンクリート工学論文集，Vol.4, No.2, pp.1-8, 1993
- 9) 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，1993