

## 論文 ジオポリマーコンクリートのひずみ速度効果に関する基礎的研究

別府 万寿博\*1・原田 耕司\*2・合田 寛基\*3・市野 宏嘉\*4

**要旨：**ジオポリマーはセメントを使用しないため、セメントを用いて構造物を建設した場合に比べ CO<sub>2</sub> を 80%程度削減できるなどの大きな特徴がある。近年、ジオポリマーコンクリートの強度特性や耐久性に関する研究が精力的に行われているが、地震や衝撃作用を対象としたジオポリマーコンクリートの動的強度特性に関する研究はほとんど行われていない。本研究は、ジオポリマーコンクリートの急速一軸圧縮および割裂引張試験を実施し、ジオポリマーコンクリートのひずみ速度効果に関する基礎的な検討を行った。試験の結果、ジオポリマーコンクリートはコンクリートと同等のひずみ速度効果を示すことがわかった。

**キーワード：**ジオポリマーコンクリート、ひずみ速度効果、圧縮強度、割裂引張強度

## 1. 緒言

ジオポリマー (GP) は、セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料(活性フィラー) とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液の少なくとも 1 種類 (アルカリ溶液) を用いて硬化させたものの総称である<sup>1)</sup>。GP の材料製造時に発生する CO<sub>2</sub> の排出量は、セメントに比べ少ない。GP で構造物を建設した場合、セメントで建設するより 80%程度 CO<sub>2</sub> を削減できると試算されており<sup>2),3)</sup>、次世代のコンクリートのバインダーとなりうる可能性を有している。また、活性フィラーとしては、フライアッシュや高炉スラグ微粉末以外にも、都市ゴミ焼却灰熔融スラグ微粉末や下水汚泥熔融スラグ微粉末<sup>4)</sup>なども使用でき、産業副産物の有効利用の観点からも優れた技術である。

近年、GP モルタルおよび GP コンクリートの強度特性や耐久性に関する研究が精力的に行われている<sup>5),6)</sup>。GP モルタルや GP コンクリートは、地震や衝撃作用を受ける構造物へも適用されることが考えられるが、これまでに動的強度特性に関する研究はほとんど行われていない。

本研究は、フライアッシュベースの GP コンクリート (GPC) を用いた円柱試験体を用いて急速一軸圧縮および割裂引張試験を実施し、一軸圧縮強度 (圧縮強度) および割裂引張強度 (割裂強度) のひずみ速度効果について基礎的な検討を行ったものである。特に、動的作用に対する構造設計時に必要となる材料特性として、ひずみ速度が大きい場合における、静的強度に対する動的強度の増加率に着目した検討を行った。

## 2. 実験の概要

本研究では、GPC と普通ポルトランドセメントコンク

リート (OPC) を比較して、GPC のひずみ速度効果の検討を行った。

## 2.1 使用材料および試験体の配合

GPC および OPC の使用材料を表-1 に示す。GPC のアルカリ溶液としては、水ガラスと苛性ソーダを混合した溶液を用いた。活性フィラーとしては、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いた。GPC は、一般に蒸気養生 (加熱) が必要なため二次製品への適用が考えられる。そこで圧縮強度は、二次製品で適用されることが多い 30N/mm<sup>2</sup> に設定した。実験に使用した圧縮強度 30N/mm<sup>2</sup> を目指した配合を表-2 に示す。なお、比較のため、表-3 に示す OPC を作製して、比較の基準とした。

## 2.2 練り混ぜ方法および養生方法

GPC の練混ぜは、パン型ミキサ (容量: 50 リットル) を用いた。GPC では、細骨材+フライアッシュで空練りを 30 秒行い、GP 溶液を投入後 1 分間練り混ぜ、一度ミキサを止め 30 秒で掻き落しを行い、最後に粗骨材と高炉スラグ微粉末を投入して 1 分間練り混ぜて排出した。なお、高炉スラグを最後に投入した理由は、高炉スラグを使用すると可使時間が短縮するためである。使用した材料は予め 20℃の室内で保管し温度管理を行った。

フライアッシュベースの GPC は、常温では強度発現が遅いため、一般に蒸気養生 (加熱) を行う。今回の実験では、二次製品の養生方法と同じ養生条件を設定した。具体的には、打設後速やかに恒温恒湿装置に移し、3 時間かけて温度 60℃、湿度 90%まで上昇させ、その後 3 時間その条件で養生し、再び 3 時間かけて温度 20℃、湿度 60%まで下げ、材齢 1 日で脱型した。

OPC に関しては、材齢 1 日で脱型後 56 日間の水中養生を行った後、52 日間の気中養生を行った。

\*1 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科教授 博 (工) (正会員)

\*2 西松建設(株) 技術研究所 主席研究員 博 (工) (正会員)

\*3 九州工業大学 大学院工学研究院建設社会工学研究系准教授 博 (工) (正会員)

\*4 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科准教授 博 (工) (正会員)

表-1 使用材料

材料	品目	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	備考
OPC	セメント	3.15	比表面積
	細骨材 (S)	2.57	海砂
	粗骨材 (G)	2.69	砕石
	AE 減水剤 (M)	1.05	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
GPC	アルカリ溶液 (GP)	1.40	固形分 (SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O) = 35% 水 (H <sub>2</sub> O) = 65%
	フライアッシュ (FA)	2.29	フライアッシュII種 比表面積 3320cm <sup>2</sup> /g
	高炉スラグ (BFS)	2.91	石膏なし 比表面積 4040cm <sup>2</sup> /g
	細骨材	2.57	海砂
	粗骨材	2.69	砕石

表-2 GPC の配合表

粉体溶液比	GP	FA	BFS	S	G
%	kg/m <sup>3</sup>				
80	379	332	144	527	834

表-3 OPC の配合表

W/C	S/a	W	C	S	G	M
%	kg/m <sup>3</sup>					
62	43	160	258	871	998	1

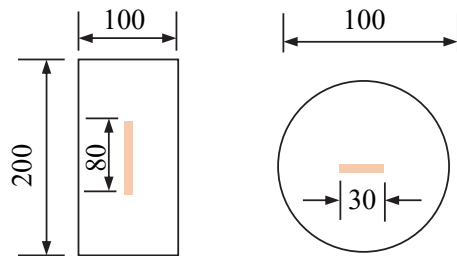
### 2.3 実験方法

実験では静的試験に加え、図-1 に示す高速変形負荷装置を用いて 2 種類の載荷速度 (中速, 高速) で急速一軸圧縮試験 (圧縮試験) および割裂引張試験 (割裂試験) を行った。高速変形負荷装置はサーボ制御で速度を変化する装置で、最大載荷速度は 4m/s、最大載荷容量は 1000kN である。急速圧縮および割裂試験では、載荷速度を 0.1m/s (中速) および 2m/s (高速) に変化させた。対応するひずみ速度は、圧縮試験および割裂試験で変化する。すなわち、圧縮試験におけるひずみ速度は、中速では 0.1~0.2/s、高速では 0.9~1.5/s となる。割裂試験におけるひずみ速度は、中速では 0.007~0.04/s、高速では 0.1~0.3/s 程度である。

試験体の寸法は、前述した材料を用いて直径 10cm、長さ 20cm の円柱試験体を作製した。GPC と OPC 試験体に対して、静的、中速および高速の圧縮・割裂試験をそれ



図-1 高速変形負荷装置の概要



ひずみゲージ 単位: mm  
(a) 圧縮試験 (b) 割裂試験

図-2 ひずみゲージの貼付位置

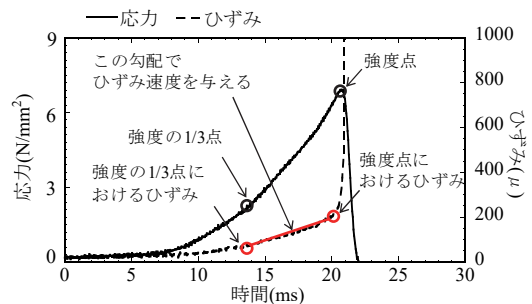


図-3 ひずみ速度の定義

ぞれ 3~4 回行い、合計 41 回の試験を行った。

計測項目は、圧縮および割裂試験ともに荷重を計測した。また、ひずみおよびひずみ速度を計測するために、圧縮および割裂試験において図-2 に示す試験体中央位置に、それぞれ 80mm および 30mm のひずみゲージを対面に貼付した。ひずみ速度については、既往の文献<sup>7)</sup>を参照して、図-3 に示すように、強度の 1/3 の応力に対応するひずみと最大ひずみの勾配をひずみ速度とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 圧縮試験

##### (1) 破壊性状および応力~ひずみ関係

図-4 に、OPC および GPC の破壊例を示す。図から、

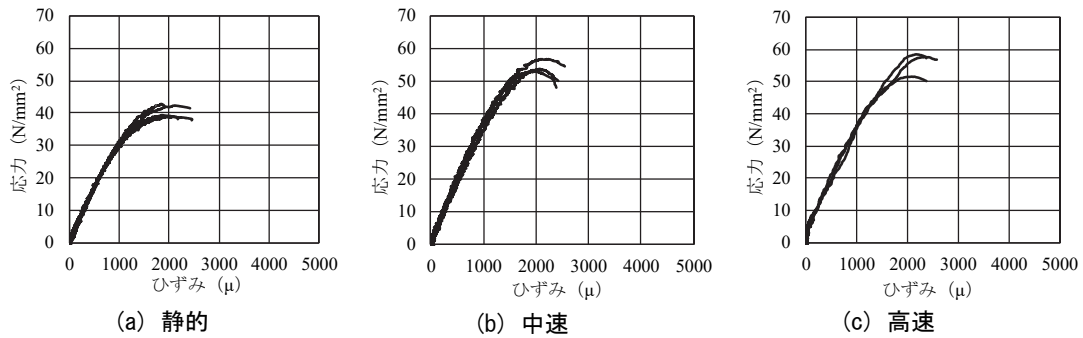


図-5 OPCの応力～ひずみ関係（圧縮試験）

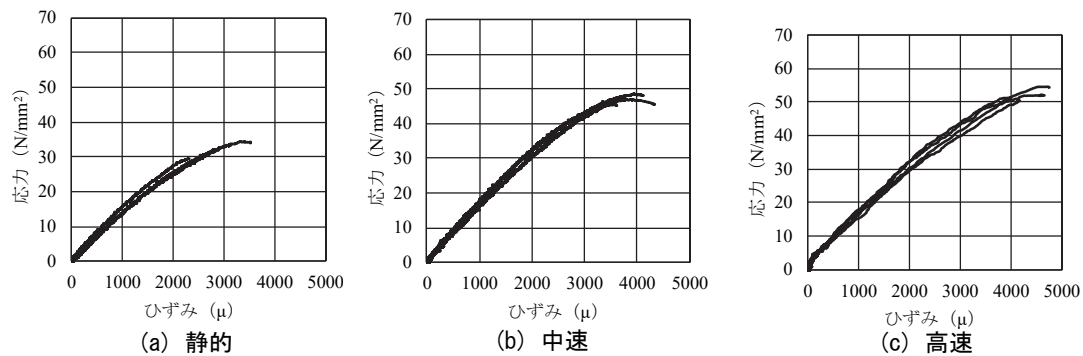


図-6 GPCの応力～ひずみ関係（圧縮試験）

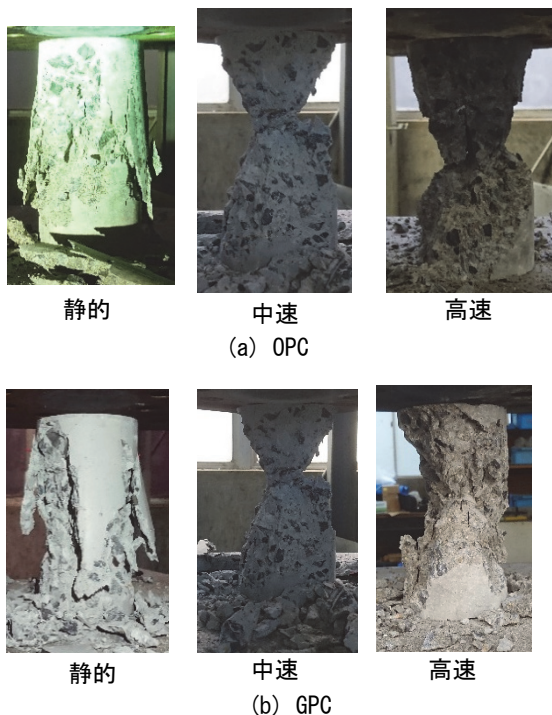


図-4 破壊性状（圧縮試験）

OPC および GPC のいずれも、荷重速度によらずせん断破壊あるいは縦割裂型の破壊性状を示し、両者に大きな差異は認められなかった。

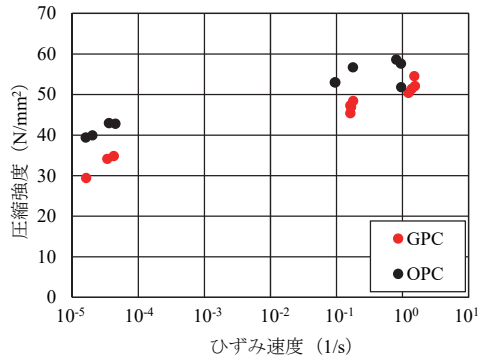
図-5 および図-6 に、それぞれ OPC および GPC の応力～ひずみ関係を示す。図-5 に示す OPC の応力～ひず

み関係から、静的荷重における圧縮強度は約  $40\text{N/mm}^2$ 、圧縮強度時のひずみは約  $2000\mu$  である。中速および高速荷重の場合には、ひずみ速度効果によって強度が上昇し、圧縮強度はそれぞれ約  $55\text{N/mm}^2$  および約  $56\text{N/mm}^2$  へ増加した。一方、圧縮強度時のひずみについては、中速および高速荷重のいずれも静的荷重時とあまり変化はなかった。

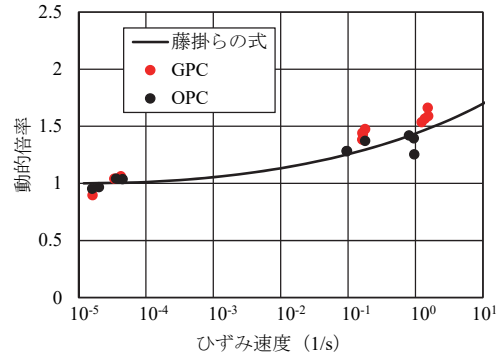
図-6 に示す GPC の応力～ひずみ関係から、静的荷重における圧縮強度は約  $32\text{N/mm}^2$ 、圧縮強度時のひずみは平均して  $2800\mu$  であった。OPC と比較すると、圧縮強度はやや小さいが、圧縮強度時のひずみは 1.25 倍程度大きい結果となった。中速荷重の場合には、ひずみ速度効果によって強度が上昇し、圧縮強度は約  $48\text{N/mm}^2$  であった。圧縮強度時のひずみは平均して  $3800\mu$  であり、静的荷重時および OPC と比較して 1.5 倍～2.0 倍大きくなった。高速荷重の場合には、圧縮強度は平均で約  $55\text{N/mm}^2$  となり、高いひずみ速度依存性を示した。圧縮強度時のひずみも約  $4200\mu$  となり、静的、中速荷重試験および OPC のケースと比較して大きな値となった。

## (2) 強度の増加率

図-7 に、GPC と OPC の圧縮強度～ひずみ速度関係および圧縮強度の増加率を示す。強度の増加率とは、静的荷重時の値に対する動的荷重時の増幅率を意味する。なお、図-7(b) に示す圧縮強度の増加率には、藤掛らがプレーンコンクリートに対して提案した圧縮強度増加率の

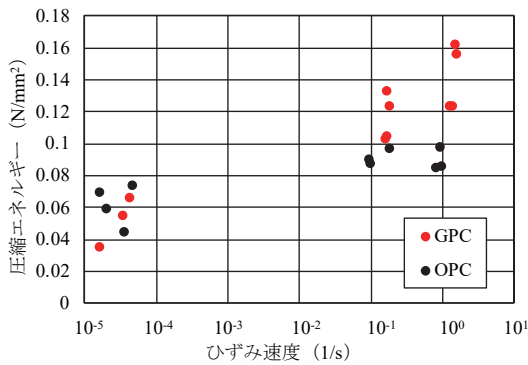


(a) 圧縮強度～ひずみ速度関係

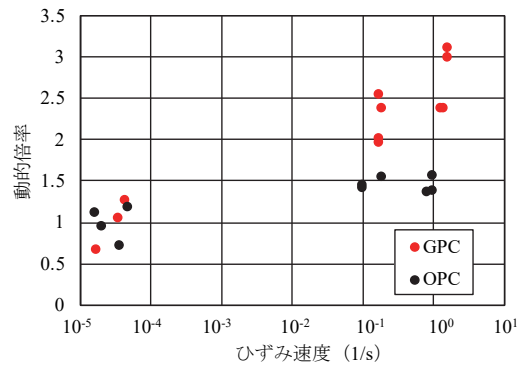


(b) 圧縮強度の増加率

図-7 圧縮強度の動的特性



(a) 圧縮エネルギー～ひずみ速度関係



(b) 圧縮エネルギーの増加率

図-8 圧縮エネルギーの動的特性

評価式<sup>8)</sup>も示している。藤掛らの評価式は次式で表される。

$$\frac{f'_{cd}}{f'_{cs}} = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{0.006 \left[ \log \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \right]^{1.05}} \quad (1)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$ は静的ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 $f'_{cs}$ は静的圧縮強度、 $f'_{cd}$ は動的圧縮強度である。

図-7(a)に示す圧縮強度～ひずみ速度関係から、GPCとOPCのいずれもひずみ速度の増加とともに圧縮強度が増加している。図-7(b)に示す圧縮強度の増加率から、OPCの強度増加率と藤掛らの式はある程度整合している。GPCとOPCを比較すると、GPCの強度増加率は、ひずみ速度 $10^0/s$ では、OPCよりも10%程度高い傾向が認められるが、全体的にはプレーンコンクリートに対して提案された藤掛らの式を用いることで保守的な評価が可能である。GPCとOPCのひずみ速度 $1.5 \times 10^{-1}/s$ および $1.5 \times 10^0/s$ における圧縮強度の増加率は、平均してそれぞれ1.4および1.5であった。

前述したように、GPCの圧縮強度時のひずみは、OPCと比べて大きい傾向が認められた。そこで、応力～ひずみ関係を圧縮強度まで積分して求めた単位体積当たりのエネルギー（圧縮エネルギー）を比較した。図-8に、圧



静的 中速 高速  
(a) OPC



静的 中速 高速  
(b) GPC

図-9 破壊性状（割裂試験）

縮エネルギー～ひずみ速度関係および圧縮エネルギーの増加率を示す。図-8(a)に示す圧縮エネルギー～ひずみ速度関係から、ひずみ速度 $10^{-5}/s$ （静的）におけるGPCとOPCの圧縮エネルギーはほぼ同等である。しかし、ひずみ速度が $10^{-1} \sim 10^0/s$ になると、GPCの圧縮エネルギーはOPCよりも平均して1.2～1.6倍程度大きくなった。図-8(b)に、圧縮エネルギーの増加率を示す。図から、OPCの場合は、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^0/s$ における圧縮強度の増加率が1.5程度である。一方、GPCの場合では、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^0/s$ において、圧縮エネルギーの増加率は2.0

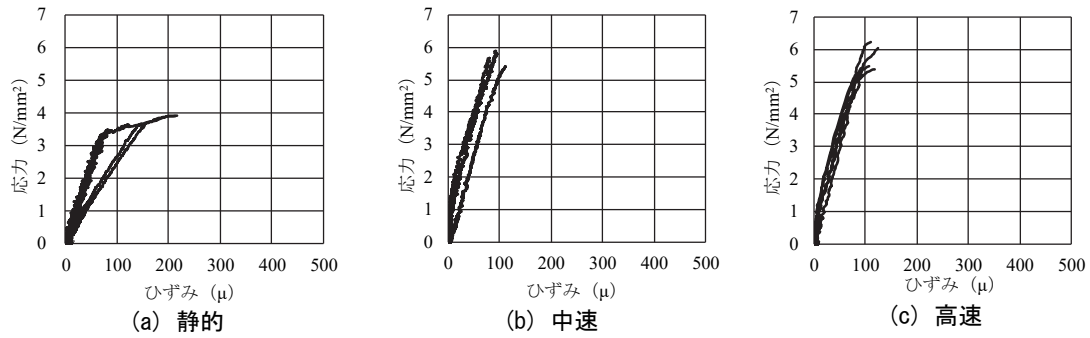


図-10 OPCの応力～ひずみ関係（割裂試験）

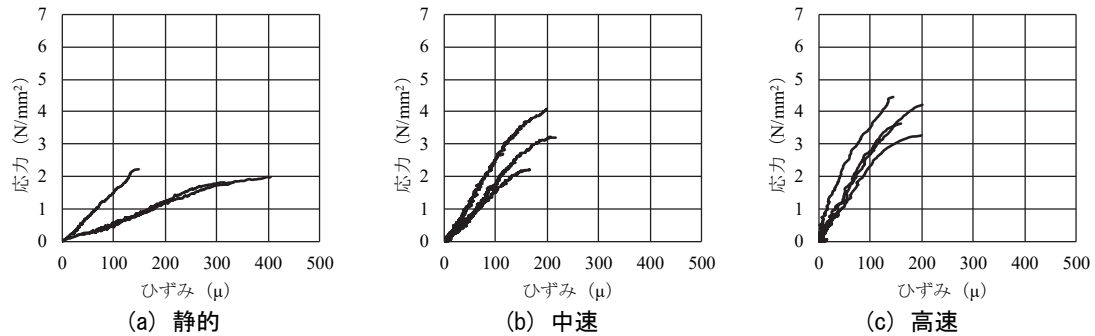


図-11 GPCの応力～ひずみ関係（割裂試験）

～3.0 を示し、OPC と比べて約 1.8 倍の増加率を示すことがわかる。

### 3.2 割裂試験

#### (1) 破壊性状および応力～ひずみ関係

図-9 に、OPC および GPC の破壊例を示す。図から、OPC および GPC のいずれも、載荷速度によらず縦方向に割裂ひび割れが生じ、両者に大きな差異は認められなかった。

図-10 および図-11 に、それぞれ OPC および GPC の応力～ひずみ関係を示す。なお、ひずみについては、便宜的に 30mm のひずみゲージで計測したひずみを使用した。いずれの場合も、ひずみゲージの貼付位置に骨材が存在している影響を受けて、圧縮載荷時の応力～ひずみ関係と比較すると、ひずみの値にばらつきが認められた。図-10 に示す OPC の応力～ひずみ関係から、静的載荷における割裂強度は約 4.0N/mm<sup>2</sup> であった。中速載荷の場合には、ひずみ速度効果によって強度が上昇し、割裂強度は約 5.5～6.0N/mm<sup>2</sup> であった。高速載荷時の割裂強度は約 5.5～6.3N/mm<sup>2</sup> となった。

図-11 に示す GPC の応力～ひずみ関係から、静的載荷における引張強度は約 2.0～2.2N/mm<sup>2</sup> であった。引張/圧縮強度比がやや小さくなった要因については、相対的に低アルカリ水比のアルカリシリカ溶液を使用したことにより収縮が生じ、その余応力が引張強度を小さくした可能性がある。中速載荷の場合には、ひずみ速度効果に

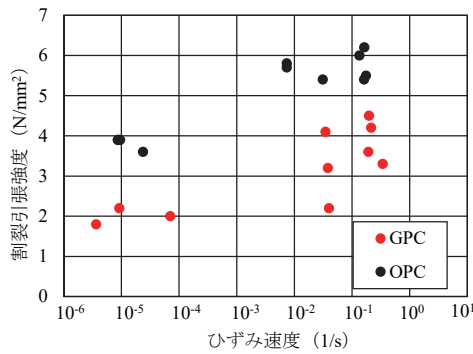
よって強度が上昇し、割裂強度は約 2.2～4.0N/mm<sup>2</sup> であった。高速載荷の場合には、割裂強度は約 3.3～4.5N/mm<sup>2</sup> であった。ただし、OPC と比較すると、載荷速度によらず強度のばらつきが大きい傾向が認められる。なお、圧縮載荷の場合には、大きなばらつきは認められなかった。なお、GPC の割裂強度時のひずみについては、圧縮載荷と同様に、ひずみ速度が高くなると OPC と比べて大きくなる傾向が認められた。割裂試験で得られたひずみは、ひずみゲージで計測している領域が理論よりも大きいため、今後、一軸引張試験を行って GPC の引張ひずみ特性を詳細に検討する必要がある。参考までに、図-10 および図-11 に示す応力～ひずみ関係を積分して単位体積当たりのエネルギー（引張エネルギー）を試算した。その結果、GPC と OPC のいずれも載荷速度によらずほぼ一定値を示すが、GPC の引張エネルギーは OPC に対して 1.1 倍程度大きい値を示した。

#### (2) 強度の増加率

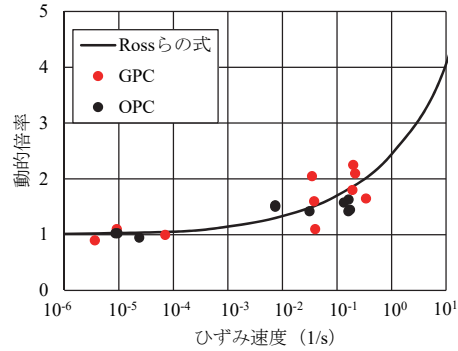
図-12 に、GPC と OPC の割裂強度～ひずみ速度関係および割裂強度の増加率を示す。図-12 (b) に示す割裂強度の増加率には、Ross らがプレーンコンクリートに対して提案した一軸引張増加率の評価式<sup>9)</sup>も示している。Ross らの評価式は、次式で表される。

$$\frac{f_{td}}{f_{ts}} = \exp \left[ 0.00126 \left( \log \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{3.373} \right] \quad (2)$$





(a) 割裂強度～ひずみ速度関係



(b) 割裂強度の増加率

図-12 割裂強度の動的特性

ここに、 $f_{ts}$  は静的引張強度、 $f_{td}$  は動的引張強度である。

なお、この評価式は割裂強度の増加率へも適用可能であることが報告されている<sup>7)</sup>。図-12(a)に示す割裂強度～ひずみ速度関係から、GPC と OPC のいずれもひずみ速度の増加とともに割裂強度が増加していることがわかる。図-12(b)に示す割裂強度の増加率から、OPC の強度増加率と Ross らの式はある程度整合している。GPC と OPC を比較すると、GPC の強度増加率は、ひずみ速度  $10^{-1}/s$  において OPC よりも 5～10%程度高い傾向が認められるが、全体的にはプレーンコンクリートに対して提案された Ross らの式を用いて評価可能であると言える。ひずみ速度  $5 \times 10^{-2}/s$  および  $3 \times 10^{-1}/s$  における割裂強度の増加率は、平均してそれぞれ 1.5 および 1.8 であった。

#### 4. 結言

本研究は、ジオポリマーコンクリートを用いた円柱試験体を用いて急速一軸圧縮および割裂試験を実施し、圧縮および割裂強度のひずみ速度効果について検討を行ったものである。本研究の成果を以下に要約する。

- (1) 本研究におけるジオポリマーコンクリートの圧縮強度の増加率は、ひずみ速度  $1.5 \times 10^0/s$  以下において、藤掛らがプレーンコンクリートに対して提案した評価式で保守的に評価可能である。また、ジオポリマーコンクリートは、ひずみ速度が高くなると、圧縮強度時までの吸収エネルギーが大きくなることがわかった。
- (2) 本研究におけるジオポリマーコンクリートの割裂強度の増加率は、ひずみ速度  $3 \times 10^{-1}/s$  以下において、Ross らがプレーンコンクリートに対して提案した評価式で評価可能である。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、当時防衛大学校理工学研究科前期課程学生 長谷川大氏、現防衛大学校理工学研究科前期課程学生 清田翔吾氏のご協力をいただきました。

ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 甲本達也：フライアッシュをベースとしたジオポリマーによるバンコック粘土の固化について、佐賀大学農学部彙報，第94号，pp.15-22，2009.2
- 2) 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
- 3) J. Davidovits：GEOPOLYMERS，JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS，Vol.37，pp.1633-1656，1991
- 4) Norio, Y. and Ko, I.: Preparation of geopolymeric materials from sewage sludge slag with special emphasis to the matrix compositions, Journal of the Ceramic Society of Japan, 118[2], pp.107-112, 2010
- 5) 原田耕司，一宮一夫，津郷俊二，池田 攻：ジオポリマーモルタルの耐久性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.1937-1942，2011.7
- 6) 原田耕司，合田寛基，一宮一夫，日比野 誠：ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2236-2241，2014.7
- 7) 江田 智，別府万寿博，大野友則，佐藤紘志：異なる急速引張試験法によるコンクリートの動的引張強度特性の評価，構造工学論文集，Vol.50A，pp.1305-1315，2004.3
- 8) 藤掛一典，上林勝敏，大野友則，水野 淳，鈴木 篤：ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.109-123，2001.2
- 9) Ross, C.A., Thompson, P.Y. and Tedesco, J.W. : Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Material Journal, Vol.86, pp.475-481, 1989