

## 論文 セメントフリーフライアッシュ GP コンクリートの破壊エネルギー

杉本 啓太\*1・柴山 淳\*2・菊地 道生\*3

**要旨:** 国内においてジオポリマーコンクリート (GPC) の力学特性の検討は少なく、不明な点が多い。本研究では GPC の引張軟化特性の把握を目的として、異なる圧縮強度を持つ GPC 供試体に対して破壊エネルギー試験を実施した。その結果、通常の普通ポルトランドセメントコンクリート (OPCC) と比較して、GPC の圧縮強度に対する引張強度の比は大きく、破壊エネルギーは大きくなり得る傾向を示した。また、荷重一ひび割れ開口変位曲線において GPC の圧縮強度の増加に伴い、最大荷重以降の荷重低下の勾配が大きくなり、脆性的な引張軟化特性を示すことを明らかにした。

**キーワード:** ジオポリマー, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 破壊エネルギー, 引張軟化, 力学特性

## 1. はじめに

日本国内において石炭火力発電所から排出されるフライアッシュは年間 1000 万 t に達しており、その多くがセメント製造に利用されている。しかし、セメントの製造を行う際に、一定量の CO<sub>2</sub> を排出するため、環境負荷軽減の観点から、フライアッシュの他用途の有効利用量の増大が望まれている。そのような観点から、近年、フライアッシュなどの産業副産物を使用し、セメントを使用しない建設材料であるジオポリマーコンクリート (GPC) が注目されている。ジオポリマーは Al や Si を含む活性フィラーを珪酸ナトリウムや水酸化ナトリウムなどのアルカリ刺激材で反応させることにより得られる硬化体と定義されている。一般的に GPC はフライアッシュや高炉スラグ微粉末を水ガラスなどのアルカリ刺激材に反応させ、凝結させる材料である。しかしながら、GPC を製造する際に一般的に使用する水ガラスは比較的高価である上、配合によってはコンクリートが急結する場合があることから、経済性および施工性に問題を抱えている。

それらの問題に対し、菊地ら<sup>2)</sup>は水ガラスを用いずに NaOH のみを使用した、比較的安価での製造が可能なセメントフリーフライアッシュ GP コンクリート (以後、FA-GPC) を開発し、従来の問題点を低減しつつある。この FA-GPC は力学特性に不明な点が多く、実用化していくためには力学特性の把握が必要である。そこで、柴山ら<sup>3)</sup>は、菊地らの配合に従った FA-GPC の基礎的検討として圧縮荷重試験を実施し、圧縮力一ひびみ関係のモデル化を行っており、FA-GPC は普通ポルトランドセメントコンクリート (以後、OPCC) と比較し、圧縮強度に対する弾性係数が低く、圧縮軟化挙動が脆性的であることを明らかにした。一方で、コンクリートの破壊に寄与する指標として圧縮特性のみならず引張特性が重要であ

り、特に引張軟化特性に関わる破壊エネルギーの把握が必要である。また、引張軟化特性を把握することは、設計時の数値解析に適用するために同様に重要である。海外では、Zhu.et.al<sup>4)</sup>により GPC の破壊エネルギーの検証が行われた例がある。しかしながら、筆者らの材料・配合とは異なることに加え、圧縮強度 70MPa 以上の GPC についてしか検証されていない。加えて、日本では、GPC の破壊エネルギーはほとんど検証されていないのが現状である。そこで、本研究では、FA-GPC の引張軟化特性を明らかにするために、圧縮強度の異なる FA-GPC の試験体に対し、破壊エネルギー試験を実施した。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体概要

使用粉体は、フライアッシュ (FA)、高炉スラグ微粉末 (GGBS)、シリカフェューム (SF) の 3 種類である。FA は分級処理を施していない原粉、GGBS は、JIS A 6206 における高炉スラグ微粉末 4000、SF は JIS A 6207 に適合する品である。アルカリ刺激剤としては、水ガラスを用いず純薬の NaOH のみを使用した。水は水道水とし、骨材として珪石砕砂および珪石砕石 (G<sub>max</sub>=20mm) を用いた。表-1 に FA-GPC の配合設計を示す。水粉体比 W/P は、30% (WP30) または 36% (WP36) とした。二軸ミキサーを用いて、あらかじめ NaOH を水に溶解し作製した NaOH 水溶液と各種材料を混練した後、型枠に打設した。

養生は表-2 の条件で蒸気養生を施した。打設直後、型枠上面にカバーを施した試験体を蒸気養生槽内に設置し、20℃において 2 時間保持した後、20℃/h の速度で 80℃まで昇温し、表-2 に示す時間保持した。その後、10℃/h の速度で 20℃まで降温し、脱型した。脱型後の試験体は、20℃環境下で 14 日間水中養生を行った。

\*1 (一財) 電力中央研究所 研究員 (正会員)

\*2 (一財) 電力中央研究所 主任研究員

\*3 (一財) 電力中央研究所 主任研究員 博士 (工) (正会員)

表-1 FA-GPCの配合設計

	W/P [%]	s/a [%]	Unit content [kg/m <sup>3</sup> ]						
			FA	GGBS	SF	W	NaOH	S	G
WP30	30	44	432	115	29	174	76	668	863
WP36	36	46	375	100	25	181	79	733	864

ここで、s/aは細骨材率、Wは単位水量、Sは細骨材量、Gは粗骨材量である。

表-2 FA-GPCの蒸気養生条件

Unit	W/P [%]	Curing		
		Temp [°C]	Length [h]	Rising rate [°C/h]
WP30C4	30	80	4	20
WP30C8	30	80	8	20
WP36C4	36	80	4	20

供試体寸法は400×100×100mmの角柱供試体であり、養生後、コンクリートカッターにより幅4mm、長さ30mmの切欠きを打設面側面に施した。また、同配合、同養生条件で材料強度試験用の円柱供試体（直径100mm×高さ200mm）を用意した。

## 2.2 実験・計測

本実験は日本コンクリート工学会より提案される「切欠きはりを有したコンクリートの破壊エネルギー試験方法 (JCI-S-001-2003)<sup>5)</sup>」に準拠し、破壊エネルギー試験を行った。試験は図-1に示す3点曲げ試験装置を用いた。スパンは300mmとし、支点はローラーヒンジおよびピン固定とし、支点間中央上端に丸鋼を用いて載荷点としている。計測項目は、載荷点下端の切欠きのひび割れ開口変位 (CMOD)、載荷点の変位および載荷荷重である。計測にはそれぞれクリップゲージ、変位計およびロードセルを使用した。実際の実験条件を図-2に示す。載荷速度はCMODの増加速度が0.001mm/s程度となる速度とし、供試体が完全に破断するまで載荷を行った。一方、材料強度試験用円柱供試体についても、圧縮および割裂引張試験を行った。なお、圧縮試験においてはコンプレッソメータ（計測区間100mm）を用いて、ひずみの計測を行っている。

## 2.3 破壊エネルギーの算出

JCI-S-001-2003<sup>5)</sup>に準じ、次式を用いて破壊エネルギーを算出した。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75 \left( \frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_c \quad (2)$$

ここで、 $G_F$ : 破壊エネルギー (N/m)、 $W_0$ : 供試体が破断するまでの荷重-CMOD曲線下の面積 (N・mm)、 $W_1$ :

供試体の自重および載荷治具がなす仕事 (N・mm)、 $A_{lig}$ : リガメントの面積 (mm<sup>2</sup>)、 $m_1$ : 供試体質量 (kg)、 $S$ : 載荷スパン (mm)、 $L$ : 供試体の全長 (mm)、 $m_2$ : 試験体に取り付けられておらず、破断するまで供試体に載っている治具の質量 (kg)、 $g$ : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)、 $CMOD_c$ : 破断時のひび割れ開口変位 (mm) とする。

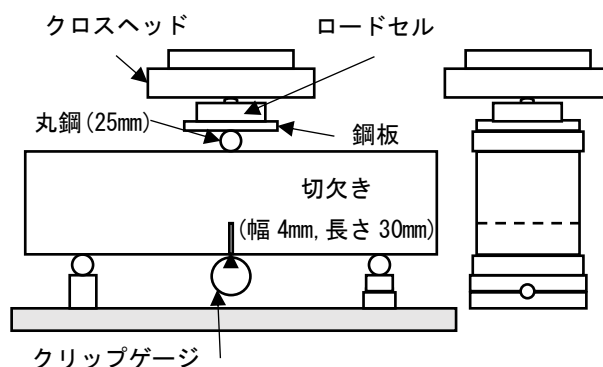


図-1 載荷装置および計測位置

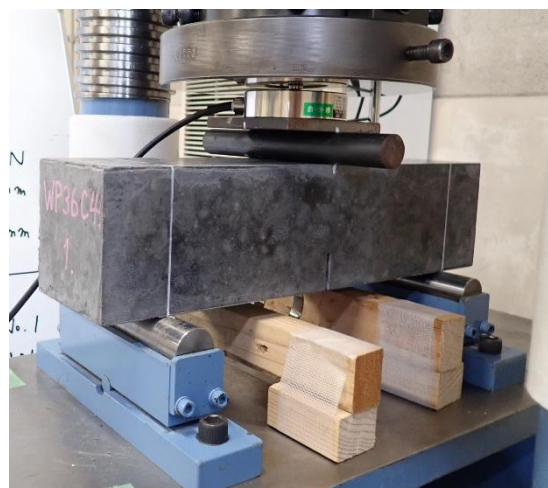


図-2 載荷条件 (写真)

### 3. 材料強度試験

破壊エネルギー試験に伴い行った FA-GPC の材料試験によって得られた力学特性値を表-3 に示す。

#### 3.1 圧縮特性

材料試験より得られた GPC の応力-ひずみ関係の一部を図-3 に示す。図中には、比較のために、Fib Model Code 2010<sup>6)</sup> (以後、Model Code 2010) に示されている、同圧縮強度の OPCC における応力-ひずみのモデル曲線を併記している。また、図-3 の応力-ひずみ曲線を最大荷重時のひずみで正規化したグラフを図-4 に示す。図では最大荷重時のひずみを 1 として各実験およびモデル曲線を示している。圧縮強度に対する弾性係数の関係を図-5 に示す。図中には比較のためにコンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に記載されている OPCC の各力学特性の算定式 (以後、示方書式) を示している。

既往の研究<sup>3), 4)</sup>より、GPC は弾性係数が小さく、応力-ひずみ関係の応力上昇域において勾配が非常に直線性を持つことが示されている。図-3 より既往の研究と同様に弾性係数が小さいことが確認できる。図-4 より、OPCC の Model Code 2010 と比較すると、FA-GPC は応力上昇域において勾配の直線性が高く、OPCC において見られる勾配の変化が比較的小さい。図-5 より、本試験における FA-GPC の弾性係数は柴山らの結果<sup>3)</sup>と概ね同様の傾向を示した。示方書式と比較すると、OPCC の約 6 割程度であり、OPCC よりも弾性係数が小さい点は既往の結果と一致している。

#### 3.2 引張特性

各シリーズの平均圧縮強度に対する引張強度の関係を図-6 に示す。既往の研究<sup>4)</sup>より、GPC の引張強度は OPCC よりも高いことが示唆されている。

図-6 より、圧縮強度 55MPa 以上の試験体に対し、引張強度は OPCC よりも高い傾向を示しており、既往の結果と一致している。しかし、圧縮強度が約 40MPa の試験体については示方書式と引張強度の値が一致しており、同様の傾向は見られなかった。今後は圧縮強度 50MPa 以下の FA-GPC についてさらに検討する必要がある。

FA-GPC において弾性係数および引張強度は OPCC と同様に圧縮強度と整合性があり、圧縮強度の増加に伴い、増加することが示された。本試験の FA-GPC において水

表-3 力学特性および破壊エネルギー

Case	圧縮強度	弾性係数	引張強度	破壊エネルギー
	MPa	GPa	MPa	N/mm
WP30C4	56.7	21.5	4.64	0.156
WP30C8	58.6	23.0	4.33	0.179
WP36C4	41.0	17.4	2.72	0.194

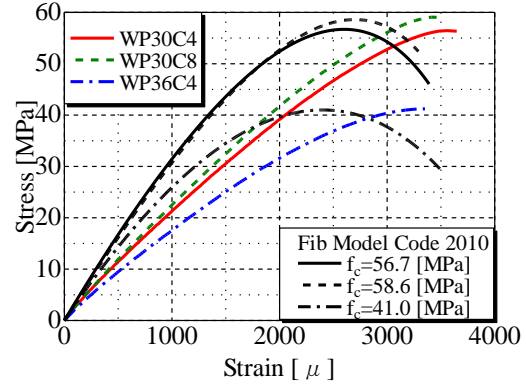


図-3 FA-GPC の応力-ひずみ関係

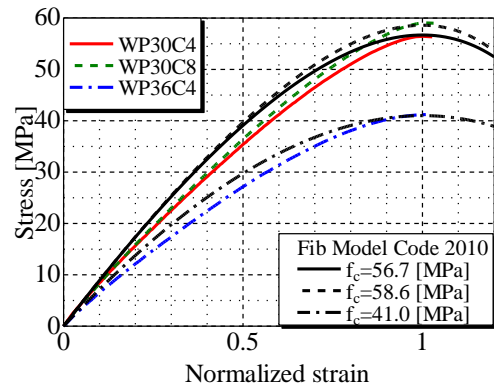


図-4 FA-GPC の応力-ひずみ関係 (最大荷重時のひずみで正規化)

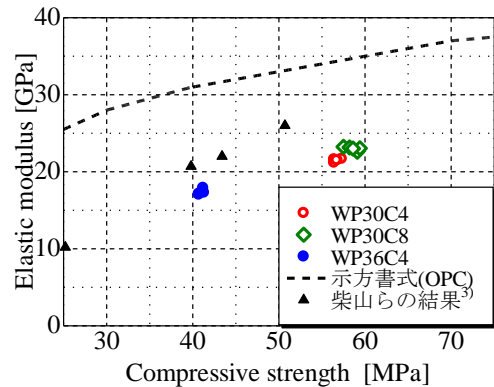


図-5 GPC の弾性係数-圧縮強度関係

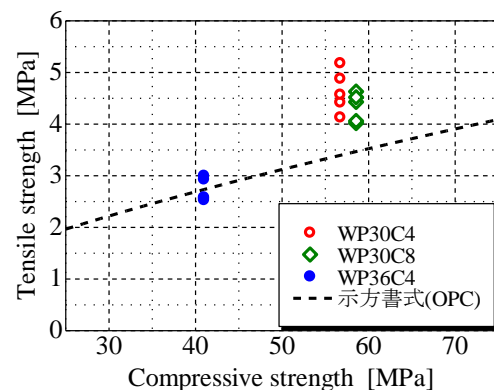


図-6 GPC の引張強度-圧縮強度関係

粉体比は圧縮強度の増減に影響しているが、蒸気養生の時間は大きな影響が見られなかった。

#### 4. 破壊エネルギー試験

破壊エネルギー試験により得られた FA-GPC の破壊エネルギーを表-3 に示した。

##### 4.1 既往の破壊エネルギー予測式

OPCC において、破壊エネルギーと圧縮強度は一定の関係があることが知られている。コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>では、圧縮強度と粗骨材の最大寸法による破壊エネルギーの算定式として式 (3) が記載されている。

$$G_F = 10(d_{max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (3)$$

ここで、 $d_{max}$ : 粗骨材の最大寸法 (mm)、 $f_{ck}$ : 圧縮強度の特性値 (MPa) である。

また、同様に CEB-FIP Model Code 90<sup>8)</sup> (以後、Model Code 90) では、圧縮強度と粗骨材の最大寸法による破壊エネルギーの算定式として式 (4) が記載されている。

$$G_F = a_d \cdot f_{cm}^{0.7} \quad (4)$$

ここで、 $f_{cm}$ : は平均圧縮強度 ( $f_{ck} + 8$ ) (MPa)、 $a_d$ : 粗骨材の最大寸法に関する係数である。

同様に Model Code 2010<sup>9)</sup>では、圧縮強度による破壊エネルギーの算定式として式 (5) が記載されている。

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0.18} \quad (5)$$

ここで、 $f_{cm}$ : は平均圧縮強度 ( $f_{ck} + 8$ ) (MPa) である。

##### 4.2 破壊エネルギー—圧縮強度

破壊エネルギー試験より得られた圧縮強度と破壊エネルギーの関係を図-7 に示す。図中には、比較のために OPC の破壊エネルギーの示方書式<sup>7)</sup>および各 Model Code<sup>6), 8)</sup>の算定式も記載している。なお、Model Code 90 における係数  $a_d$  を表-4 に示す。ここで、粗骨材の最大寸法が 20mm の場合の係数  $a_d$  は記載されていないため、前後の値から線形近似した式 (6) から算出した値 ( $a_d =$

7) を使用した。

$$\alpha_d = 0.25 \cdot d_{max} + 2 \quad (6)$$

ここで、 $d_{max}$ : 粗骨材の最大寸法 (mm) である。

既往の研究<sup>4)</sup>より、圧縮強度が約 70MPa から約 80MPa の範囲において、GPC の破壊エネルギーは OPCC よりも低いことおよび圧縮強度の増加に伴い減少する傾向が示されている。しかし、図-7 より本試験では、圧縮強度が約 40MPa から約 60MPa の範囲において、OPCC の破壊エネルギーの各算定式に対し、FA-GPC の破壊エネルギーは大きく、既往の研究と逆の傾向を示した。この傾向の差異について、GPC の破壊エネルギーに対する知見が少ないことから、今後の更なる検討が必要である。また、上記の圧縮強度の範囲において、OPCC は圧縮強度の増加に伴い、破壊エネルギーが増加する傾向を示す。しかし、本試験において FA-GPC は圧縮強度の増加に伴い、破壊エネルギーが減少する傾向を示した。これは既

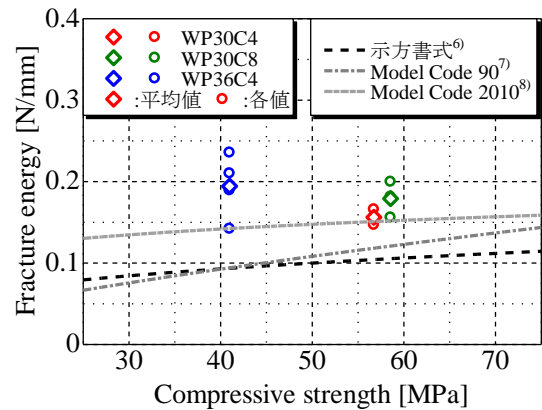
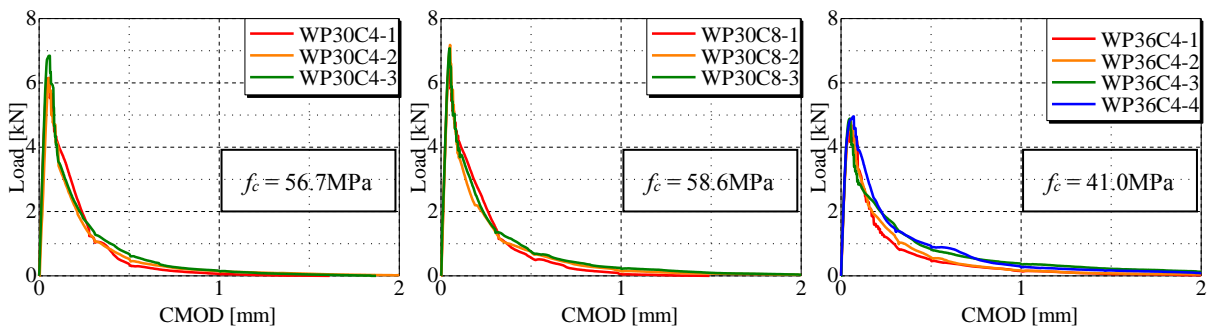


図-7 FA-GPC の破壊エネルギー—圧縮強度関係

表-4 Model Code 90 における係数

$d_{max}$	$a_d$
8	4
16	6
32	10



(a) WP30C4 シリーズ

(b) WP30C8 シリーズ

(c) WP36C4 シリーズ

図-8 FA-GPC の荷重—CMOD 関係



往の結果と一致している。

### 4.3 荷重-開口変位 (CMOD)

実験より得られた荷重-CMOD 曲線を図-8 に示す。図-8 より通常の OPCC と同様に曲げひびわれ発生後に急激に荷重が低下していることがわかる。図-7 では FA-GPC の破壊エネルギーは圧縮強度の増加に伴い減少する傾向が見られたが、最大荷重は増加することが確認できる。ここで、破壊エネルギーが減少するためには、荷重-CMOD 曲線下の面積が小さくなる必要がある。つまり、最大荷重は増加し、荷重-CMOD 曲線下の面積が小さくなるためには、ある荷重におけるひび割れ開口変位が小さくなっていることが考えられる。図-8 より定性的に最大荷重後の勾配が圧縮強度の増加に伴い、急激となっている傾向が見られる。よって、圧縮強度の増加に伴い、脆性が高まる可能性が示唆された。

これを定量的に評価するために、CMOD と圧縮強度の関係を図-9 に示す。この図では最大荷重時の CMOD および最大荷重後の荷重低下域における最大荷重の 1/2, 1/3, 1/4 の荷重時における CMOD を示しており、各荷重時における最小二乗法によって得られた線形近似直線を併記している。図より最大荷重時の CMOD はどのシリ

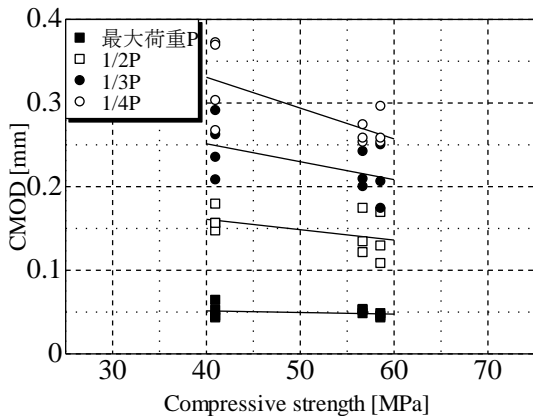


図-9 CMOD と圧縮強度の関係

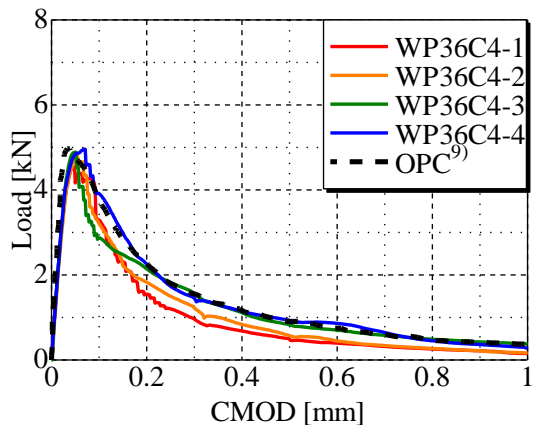


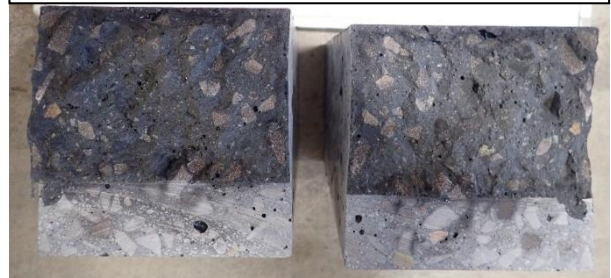
図-10 荷重-CMOD 関係の比較

(圧縮強度 FA-GPC : 40.1MPa, OPC : 39.9MPa)

ーズでも概ね一致している。しかし、圧縮強度が高いシリーズほど荷重低下域における各荷重時の CMOD が小さい。つまり、ひび割れが開口する過程で圧縮強度が高いシリーズほど急激に荷重が低下していることがわかる。よって、荷重-CMOD 曲線において、FA-GPC は圧縮強度の増加に伴い、最大荷重後の軟化勾配が大きくなり、脆性的な破壊を示すことが定量的に示された。

ここで、圧縮強度 40.1MPa である WP36C4 シリーズに

圧縮強度 : 56.7MPa  
平均破壊エネルギー $G_f$  : 0.156N/mm  
最大荷重 : 6.84kN, CMOD<sub>c</sub> : 1.87mm



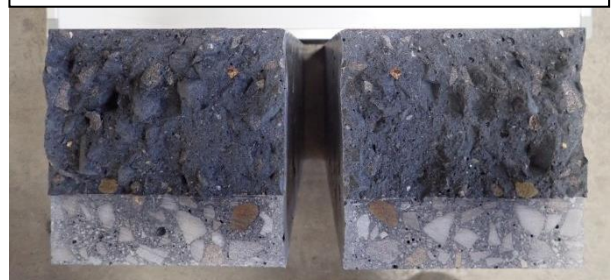
(a) WP30G4 シリーズ

圧縮強度 : 58.6MPa  
平均破壊エネルギー $G_f$  : 0.179N/mm  
最大荷重 : 7.08kN, CMOD<sub>c</sub> : 2.80mm



(b) WP30C8 シリーズ

圧縮強度 : 41.0MPa  
平均破壊エネルギー $G_f$  : 0.194N/mm  
最大荷重 : 4.89kN, CMOD<sub>c</sub> : 5.28mm



(c) WP36C4 シリーズ

図-11 破壊エネルギー試験後の破断面

対し、高地ら<sup>9)</sup>が報告している圧縮強度 39.9MPa である OPCC の結果を重ねた荷重-CMOD 曲線を図-10 に示す。なお、高地らが行った OPCC の破壊エネルギーの算出方法は本報とは異なり、リガメント面積 $A_{lig}$ を投影面積ではなく表面積としている。値は 0.156N/mm である。リガメント面積を投影面積 7000mm<sup>2</sup>として補正すると、破壊エネルギーは約 0.193 N/mm となり、WP36C4 シリーズと同程度である。図-10 より、荷重-CMOD 曲線における FA-GPC の最大荷重は OPCC と同程度であることがわかる。しかしながら、最大荷重前の荷重上昇域において、FA-GPC は OPCC よりも勾配が小さい。つまり、曲げ剛性が小さいことがわかる。これは図-4 より示した、FA-GPC の弾性係数は OPCC よりも小さいことと一致する。また、最大荷重後の同 CMOD において、FA-GPC の荷重は OPCC と比較して小さい傾向がわかる。つまり、FA-GPC は最大荷重後の軟化勾配が OPCC と比較し、大きい。本報では 1 シリーズのみの比較結果について考察を行ったが、他の圧縮強度レベルにおいても同程度の圧縮強度を持つ OPCC の試験体と比較を実施する予定である。

#### 4.4 破断面に関する考察

破壊エネルギー試験後の試験体の破断面を図-11 に示す。一般的に本研究で扱った範囲の圧縮強度であれば、プレーンコンクリートの曲げ破壊には粗骨材が抵抗することが知られている。破断面の観察より、図-11 (c) に示す圧縮強度 41.0MPa の WP36C4 シリーズでは、粗骨材とペーストの界面で破断面が進展していることが多いため、粗骨材の破壊は少なく、凹凸面が大きいことが確認された。一方で図-11 (a), (b) に示す圧縮強度 56.8MPa の WP30C4 シリーズ、圧縮強度 58.6MPa の WP30C8 シリーズでは、WP36C4 シリーズと比較して粗骨材が破壊している箇所が明らかに多く、凹凸面が少ないことが確認された。したがって、圧縮強度が高い試験体ほど粗骨材とペーストの界面の付着強度が強く、骨材で破壊するために、抵抗機構が小さいと考えられる。これは、圧縮強度が高い試験体ほど脆性的な破壊を示した結果と一致する。高強度コンクリートについても同様の傾向が見られることから、FA-GPC の破壊特性を把握するために同程度の圧縮強度を持つ OPCC の破断面との比較が必要である。

#### 5. 結論

FA-GPC に対し、材料試験および破壊エネルギー試験を行い、FA-GPC の力学特性について検討した。本研究の範囲内から得られた知見を以下に示す。

(1) FA-GPC の弾性係数はコンクリート標準示方書の OPCC の算定式と比較し、6 割程度である。また、圧

縮試験による応力-ひずみ関係において応力上昇域の勾配の直線性が OPCC に対して、高い。

- (2) コンクリート標準示方書の OPCC の算定式と比較して、FA-GPC の引張強度は高い。
- (3) FA-GPC の破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書の OPCC の算定式と比較して、高い。
- (4) FA-GPC では、約 40MPa から約 60MPa の範囲における圧縮強度の増加に伴い、破壊エネルギーは減少する。
- (5) FA-GPC の荷重-CMOD 曲線における最大荷重後の軟化勾配は、圧縮強度の増加に伴い、大きくなり、脆性的な引張軟化特性になることを示した。

#### 謝辞

本研究は環境省地球環境局「平成 30 年度 CO<sub>2</sub> 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業/CO<sub>2</sub> 低排出型コンクリート製建設資材の製造技術高度化及び実用化実証」において得られた成果です。また、本実験の実施に当たり、(株)セレスのご協力を頂きましたことに、感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) J. Davidovits: Geopolymer Chemistry and Applications, INSTITUT GEOPOLYMER, 2015
- 2) 菊地 道生, 山本 武志, 大塚 拓: 結合材種類および前養生が蒸気養生を施したジオポリマー硬化体の物理的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2283-2288, 2016
- 3) 柴山 淳, 菊地 道生, 山本 武志: セメントフリーフライアッシュ GP コンクリートの圧縮応力ひずみ関係, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.27, pp.297-302, 2018
- 4) Zhu Pan, Jay G. Sanjayan, B. Vijay Rangan.: Fracture properties of geopolymer paste and concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.63, No.10, pp.763-771, 2011
- 5) JCI-S-001-2003: 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
- 6) CEB-FIP : Model Code 2010, Final draft, Volume 1, 2012
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017
- 8) Hilsdorf HK and Bramshuber W: Code-type formulation of fracture mechanics concepts for concrete, International Journal of fracture, Vol.51, pp.61-72, 1991
- 9) 高地 透, 栗原 哲彦: 加熱時の昇温・降温状況がコンクリートの破壊力学パラメータに及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.625-636, 2011