

フライアッシュジオポリマーコンクリートの引張軟化特性

一財) 電力中央研究所 正会員 ○杉本 啓太
一財) 電力中央研究所 正会員 柴山 淳 正会員 菊地 道生 正会員 山本 武志

1. はじめに

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ジオポリマーコンクリート(以後、GPC)が注目されている。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剤によって凝結させる材料であるが、水ガラスは国内では比較的高価である上、配合によっては急結する可能性があることから、経済性と施工性に問題がある。そこで、菊地ら¹⁾は水ガラスを用いずに NaOH のみを使用したセメントフリーフライアッシュ GPC (以後、FA-GPC) を開発し、従来の問題を低減した。この FA-GPC の力学特性は不明な点が多く、実用化する上で力学特性の把握が必要である。本研究では、FA-GPC の引張軟化特性を明らかにするために、破壊エネルギー試験を行うことで引張軟化曲線の算出を試みるとともに、セメントコンクリート(以後、OPCC)と比較を行い、FA-GPC の引張軟化特性について検討した。

表-1 FA-GPC の配合設計

Case	W/P [%]	s/a [%]	Unit content [kg/m ³]			
			P	W	NaOH	S G
WP30	30	44	576	174	76	668 863
WP36	36	46	500	181	79	733 864

表-2 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
WP30	56.7	21.5	4.64	0.156
WP36	41.0	17.4	2.72	0.194

2. 実験概要

本実験は(社)日本コンクリート工学会の規準(JCI-S-001-2003)²⁾に準拠した破壊エネルギー試験を行った。供試体は100×100×400mmの角柱供試体であり、コンクリートカットにより幅4mm、長さ30mmの切欠きを打設面側面に施している。試験はスパン300mmの3点曲げ試験とした。計測項目は、載荷点下端の切欠きのひび割れ開口変位(CMOD)、載荷荷重である。表-1にFA-GPCの配合設計を示す。本実験では、水粉体比(W/P)を変化させた2ケースの配合を用意し、圧縮強度を実験変数とした。使用粉体(P)は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェームの3種類である。アルカリ刺激剤は、純薬のNaOHのみを使用した。養生条件は蒸気養生とした。なお、破壊エネルギーはJCI-S-001-2003に準じ、算出した。

3. 破壊エネルギー

表-2に破壊エネルギーを含む各ケースの力学特性値を示す。図-1に荷重-CMOD関係(P-CMOD)、図-2に図-1より求めた破壊エネルギーと圧縮強度の関係を示す。なお、図中ではOPCCと比較するために、コンクリート標準示方書(以後、示方書)³⁾およびfib Model Code 2010⁴⁾の算定式を示している。本試験の範囲内において、OPCCの各算定式に対し、FA-GPCの破壊エネルギーは大きい。また、圧縮強度の増加に伴い、破壊エネルギーはOPCCでは増加するのに対し、FA-GPCでは減少する傾向を示した。

4. 特性長さ

特性長さは単位面積あたりのひび割れを形成するために必要な破壊エネルギーを内部ひずみエネルギーで除した指標である。この値が小さいほど脆性的な破壊を示すことが知られている。

$$l_{ch} = E \cdot G_f / f_t^2 \quad (1)$$

ここで、 l_{ch} : 特性長さ (mm)、 G_f : 破壊エネルギー (N/mm)、 E : 弾性係数 (MPa)、 f_t : 引張強度 (MPa) とする。

キーワード: ジオポリマーコンクリート, フライアッシュ, 破壊エネルギー, 特性長さ, 引張軟化

連絡先: 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 TEL 070-5587-8032 FAX 04-7183-2962

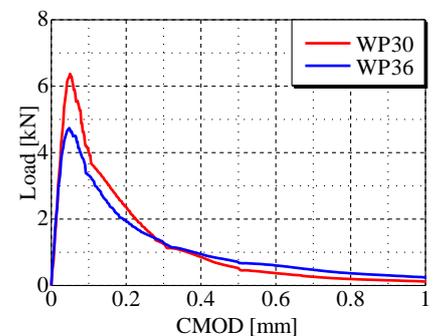


図-1 P-CMOD 関係

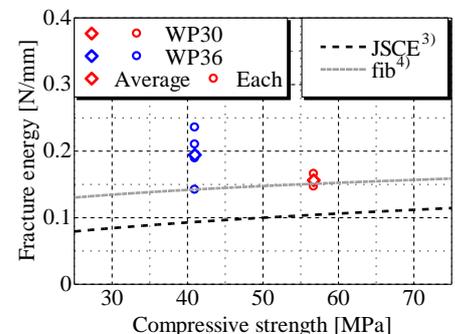


図-2 破壊エネルギー-圧縮強度関係

図-3にFA-GPCの特性長さ l_b と圧縮強度の関係を示す。なお、示方書⁴⁾の各力学特性の算定式より計算されたOPCCの特性長さも併記している。図より、WP36と比較して、WP30の特性長さは50%未満となっており、OPCCと同様に、圧縮強度の増加に伴ってFA-GPCの特性長さは減少する。一方で、圧縮強度の増加に伴う特性長さの減少量はOPCCよりも大きく、脆性が増大しやすい傾向が示された。

5. 引張軟化曲線

本研究ではJCI-S-001-2003²⁾に記載がある、引張軟化曲線多直線近似解析(FEM FT法)を解析プログラムとして、図-1のP-CMODから引張軟化曲線を算出した。なお、図-4に示すように推定された引張軟化曲線の引張強度点は割裂引張強度とは異なる。そこで、本研究では既往の研究⁵⁾と同様に軟化曲線の引張強度点を割裂引張強度に置換し、軟化曲線に接線を引くことで補正した。図-5に補正したFA-GPCの引張軟化曲線を、図-6に無次元化した引張軟化曲線を、表-3に図-6の勾配変化点の特性値を示す。なお、図-6にOPCCの軟化モデル³⁾を併記している。

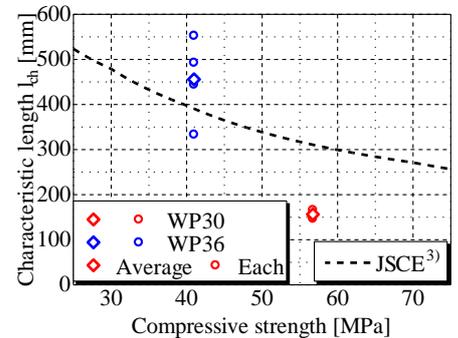


図-3 特性長さ-圧縮強度関係

図-5より結合応力が引張強度の30%程度まで低下した点のひび割れ幅は、WP30では0.01mm付近である一方で、WP36では0.03mm付近である。前者では結合応力を維持できるひび割れ幅が小さいこと、すなわち、FA-GPCでは圧縮強度が高いほど脆性的な軟化性状となることを示した。これは破壊エネルギーおよび特性長さの結果と一致する。図-6、表-3より、本試験の範囲内では、OPCCのモデルと比較して、FA-GPCは初期勾配が急であるとともに、勾配変化点の結合応力とひび割れ幅が小さいことから、引張軟化性状が脆性的であることを示した。OPCCのモデルをFA-GPCへ適用する場合、初期勾配と勾配変化点の乖離があることから、別途FA-GPCに対するモデルが必要な可能性がある。しかし、引張軟化曲線は算出例が少ないため、更なる検討が必要である。

表-3 無次元化引張軟化曲線の特性値

Case	勾配変化点 結合応力	勾配変化点 ひび割れ幅	初期勾配
WP30	0.126	0.512	-1.71
WP36	0.024	0.587	-1.66
1/4モデル	0.250	0.750	-1.00
CEB-FIP	0.200	1.000	-0.80

6. まとめ

FA-GPCの破壊エネルギーはOPCCより大きく、圧縮強度の増加に伴い減少する傾向を示した。また、特性長さはOPCCと同様に圧縮強度の増加に伴って減少するが、その減少量がOPCCよりも大きい傾向を示した。さらに、FA-GPCの引張軟化曲線を算出した。ここで、無次元化した引張軟化曲線は、OPCCと比較して初期勾配が急であるとともに、勾配変化点の結合応力と仮想ひび割れ幅が小さいことから、脆性的な軟化性状となることを示した。

謝辞：本研究は環境省地球環境局「平成30年度CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業/CO₂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。

参考文献

- 1) 菊地道生他：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，
- 2) 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，
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2017，
- 4) Federation Internationale du Beton: fib Model Code for Concrete Structures 2010, 2013，
- 5) 内田裕市他：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，Vol.14，pp.203-212，1991

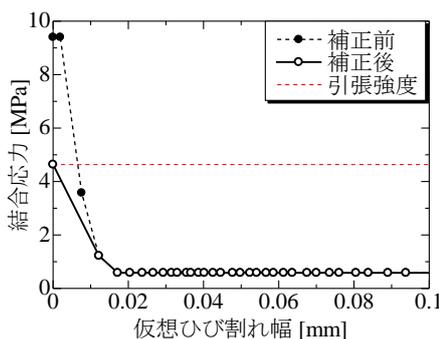


図-4 補正の概念図

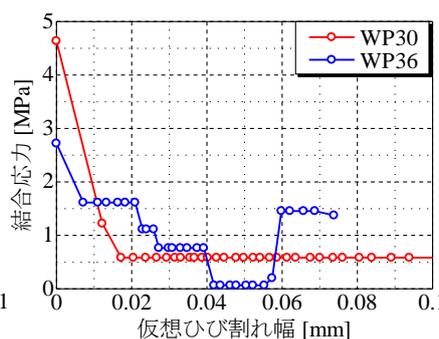


図-5 補正後の引張軟化曲線

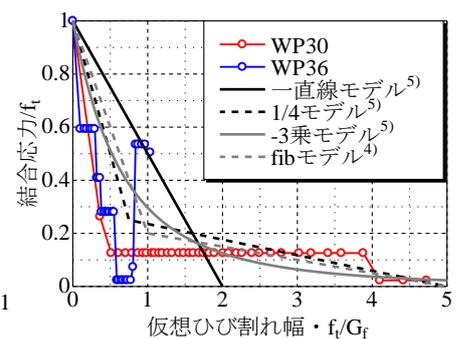


図-6 無次元化した引張軟化曲線