

メタケイ酸ナトリウム九水和物を使用したジオポリマーコンクリート梁の材料・力学的特性

京都大学大学院 学生会員 ○篠原 弘充
京都大学大学院 非会員 長谷川 樹
京都大学大学院 正会員 安 琳
京都大学大学院 正会員 高橋 良和

1. 研究背景・目的

国内外における土木分野でのジオポリマーコンクリート(GPC)の実用化事例は、いくつかあるが限定的なものである。特に鉄筋コンクリート(RC)部材としての実用事例は極めて少なく、GPCを構造部材として利用することの展望は開けているとは言い難い。梁等の構造部材へのGPC適用には、その曲げ強度や圧縮強度に関する知見の蓄積はもちろんのこと、大規模な土木現場を想定した使用材料・施工方法に関する検討は必要不可欠である。

そこで、本研究では粉体状で施工性に優れ、環境に優しいメタケイ酸ナトリウム九水和物(SS)のみを使用したGPCでRC梁を作製し(GPC梁)、載荷試験結果からその力学的特性について考察した。また、ポルトランドセメントコンクリート(OPCコンクリート)を使用したRC梁(OPC梁)を作製し、力学的特性の比較を行った。

2. 実験概要

本実験のGPCおよびOPCコンクリートの配合を表-1、表-2に示す。供試体は幅100mm、高さ200mm、長さ1600mmの梁供試体とし、GPC梁は2体(それぞれGPC1、GPC2とする)、OPC梁は1体作製した。供試体の諸元を図-1に示す。主鉄筋(D13-SD345)は2本単段配筋とし、最終破壊形式が曲げ破壊になるように、せん断補強鉄筋(D6-SD295A)を梁全体に100mm間隔で配筋し、せん断補強鉄筋の固定のため、圧縮側には竹ひごを配置した。練り混ぜ方法は粉体材料を空練りし、水を加えるだけの乾式方法とした。養生方法は、全体をプラスチックシートで覆い、水分が保持されるように試験時(材齢28日)まで、20℃60%RHの恒温室内で常温封緘養生とした。載荷方法は等曲げモーメント区間の長さを300mm、支点間距離を1400mmとし、2点の単調曲げ載荷を行った。測定項目は、供試体のたわみ、荷重、主鉄筋のひずみ、コンクリートのひずみを測定した。図-1に示すように、コンクリートのひずみの測定は、両側面に各4点で測定し、主鉄筋のひずみは1本あたり9点で測定した。

3. 実験結果及び考察

(1) 材料試験結果

材料試験の結果を表-3に示す。OPCコンクリートの方が約5MPa圧縮強度が大きくなったにも関わらず、引張強度はGPCの方が大きくなり、静弾性係数は同程度である。これは、水ガラスと水酸化ナトリウムを

表-1 GPCの配合

配合(g/L)					
水	メタケイ酸 ナトリウム 九水和物	フライ アッシュ	高炉スラ ブ微粉末	細骨材	粗骨材
125.0	61.2	156.8	235.2	815.8	989.5

表-2 OPCの配合

配合(g/L)			
水	セメント	細骨材	粗骨材
167.0	278.3	760.0	921.8

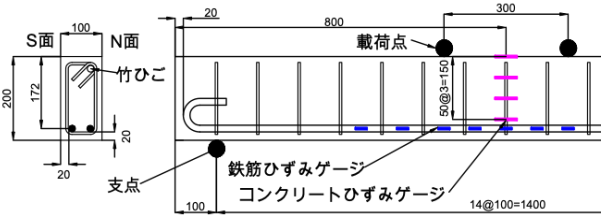


図-1 供試体諸元

表-3 材料試験の結果

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	引張強度/ 圧縮強度	静弾性係数 (GPa)	圧縮強度時の ひずみ (μ)
GPC	34.9	3.81	0.109	30.5	1986
OPC	39.8	3.24	0.081	30.6	2255

表-4 計算式と実験式の比較

	ひび割れ 発生荷重 Pcr (MPa)			主鉄筋降伏荷重 Py (MPa)			主鉄筋降伏時の 中立軸位置 x (mm)			最大荷重 Pu (MPa)		
	計算	実験	実験/ 計算	計算	実験	実験/ 計算	計算	実験	実験/ 計算	計算	実験	実験/ 計算
GPC1	4.01	5.24	1.31	24.1	24.4	1.01	61.9	63.6	1.03	27.9	30.6	1.10
GPC2		4.93	1.23		26.8	1.12		64.4	1.04		28.9	1.03
OPC	4.28	4.93	1.15	24.1	25.5	1.06	62.0	65.7	1.06	28.3	32.1	1.14

使用するGPC(一般的なGPC)とは異なる特性である。

(2) 設計式と実験式の比較

設計式と実験式を比較したものを表-4に示す。設計式に関して、ひび割れ荷重の算出には、以下の式を用いた。

$$P_{cr} = \frac{f_b z}{a}, \quad f_b = 0.56 \sqrt{f_c}$$

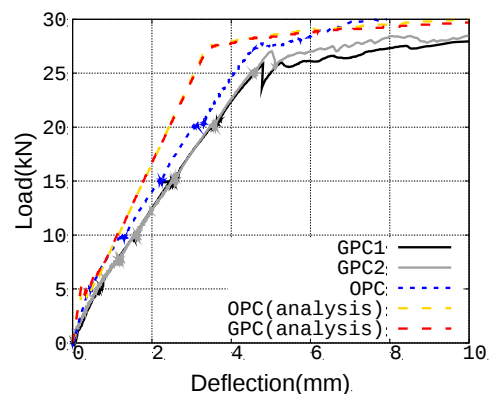
このとき、 P_{cr} :ひび割れ荷重(MPa), f_b :コンクリートの曲げ引張強度(MPa), z :断面係数(mm³), a :支点から載荷点までの距離(mm), f_c :コンクリートの圧縮強度(MPa)である。また、主鉄筋降伏荷重および主鉄筋降伏時の中立軸位置は、コンクリートの引張応力を無視し、平面保持の仮定

のもと弾性解析によって算出した。最大荷重は、等価応力ブロック法を用いて算出した。表-4 から、本実験で使用した GPC 梁は現行の RC 部材の設計式で概ね評価可能であることがわかる。

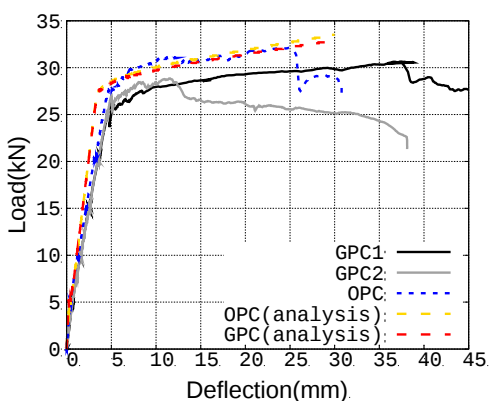
(3) 荷重—たわみ関係

図-2(a)は梁のたわみが 10mm までの荷重—たわみ関係であり、図中には理論値として梁全体をファイバー要素でモデル化した数値解析の結果を示した。数値解析の結果と比較すると、ひび割れ発生荷重は概ね実験結果と一致しているが、それ以降の主鉄筋の降伏までの挙動に乖離がある。これは、本解析では、主鉄筋とコンクリートを完全付着でモデル化していることが原因として考えられる。また、GPC 梁は、主鉄筋降伏付近で荷重が一時的に低下していることが確認できる。本実験では、比較できる供試体の数が限定的であるため、この荷重低下に関する明確な原因の究明は困難であり、今後の検討が必要である。また、GPC 梁の曲げ剛性は OPC 梁よりが低くなった。これは、一般的な GPC を使用した梁と同様な特性で、GPC 梁の乾燥収縮が原因である可能性が考えられる。

図-2(b)は荷重—たわみ曲線の全体図である。主鉄筋降伏後の OPC 梁の荷重—たわみ曲線は解析結果と、概ね一致していることがわかる。GPC 梁は解析結果より主鉄筋降伏後の荷重増加が緩やかであり、GPC1 の終局ひずみは OPC 梁の 1.48 倍程度大きくになっている。このことから、本実験で使用した梁は、OPC 梁より靱性に富んだ曲げ性能を有する可能性がある。一方、GPC2 はたわみ 13mm 付



(a) たわみ 10mm まで



(b) 全体

図-2 荷重—たわみ関係

近で荷重が低下している。これは、GPC2 の竹ひごが他供試体より外側にあり、かぶり部のコンクリートに悪影響を与えたことが原因の一つとして考えられる。

(4) ひび割れ性状および主鉄筋のひずみ

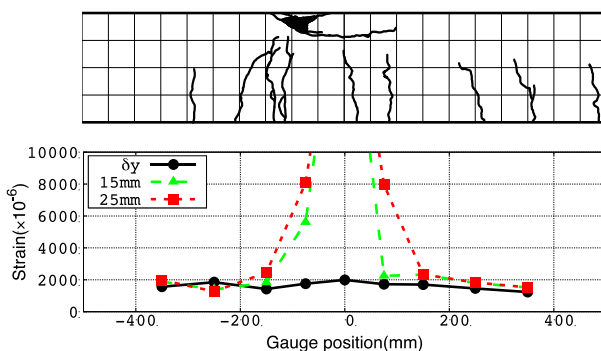
図-3 は終局時の OPC 梁と GPC1 のひび割れ性状および主鉄筋降伏以降の主鉄筋ひずみである。図からわかる通り、GPC1 の方が、ひび割れが広範囲に発生しており、それに伴って主鉄筋のひずみも広範囲で増幅していることがわかる。このことから、GPC1 の方が、ひび割れ分散性に優れ、それによって、靱性の向上に影響を与えていると考えられる。

5. まとめ

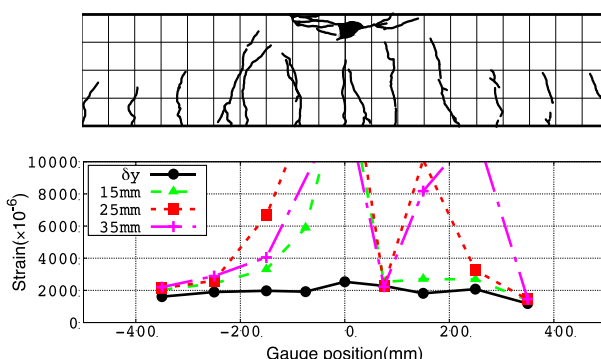
粉体アルカリ活性化剤であるメタケイ酸ナトリウム九水和物を使用した GPC 梁の曲げ載荷試験を行った結果、構造部材としての耐荷性能は現行の RC 部材の設計式で概ね評価可能であることがわかった。荷重—たわみ関係において、GPC 梁は主鉄筋降伏付近で一時的な荷重の低下が確認されたものの、OPC 梁より靱性に富んだ曲げ性能を持つ可能性があることがわかった。また、GPC 梁はひび割れ分散性に優れ、それによって、靱性の向上に影響を与えていると考えられる。

参考文献

- 1) Tung T. Tran, Thong M. Pham, Hong Hao : Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of ambient cured geopolymer concrete beams reinforced with steel fibers, Engineering Structures, Volume 200, 1 December 2019, 109707



(a) OPC 梁(終局時たわみ 25.7mm)



(b) GPC1(終局時たわみ 37.9mm)

図-3 終局時ひび割れ性状(上), 降伏後の主鉄筋ひずみ(下)