

FRP ロッドを補強筋にしたガラス粉体ジオポリマーコンクリート部材の付着性能評価に関する実験的研究

Experimental Study on Bond Characteristics of FRP-Rod Reinforced Concrete Members with Geopolymer based on Waste-Glass Powder

近畿大学工学部建築学科 准教授 寺井 雅和

(研究計画ないし研究手法の概略)

1) 研究概要と目的

コンクリートで使用されるセメントは、その製造工程において大量の CO₂ を排出することが知られている。日本国内のセメント需要は頭打ちとなっているが、近年の新興国におけるセメント生産量・使用量の増加状況を見ると、セメント製造時の CO₂ を抑制するか、セメントそのものの使用を削減できないのであれば、これに代わる代替材料の開発が必要となってきている。そこで、最近、セメントの代替材料としてジオポリマーが期待されている。ジオポリマーは同じ構造物を建設した場合、セメントと比較すると約 80%の CO₂ 排出量を削減できるとの報告があり、この数値が確かなものであれば、今後有効な建設材料になり得る可能性がある。

ジオポリマーコンクリート（以下、GPC）は普通ポルトランドセメントコンクリート（以下、OPC）に比べて収縮が大きい。そのため、GPC はひびわれが多数発生し、内部の補強筋が容易に腐食されることが懸念されることから、補強筋には耐食性が高い FRP やステンレス鋼が有効であると考えられる。GPC の構造利用に当たっては、補強筋との付着特性に関する検討が必要になる。

本研究では、ガラス粉体 GPC を使用し、FRP ロッドを補強筋（主筋、せん断補強筋）に使用した構造部材の曲げせん断性状を、鉄筋コンクリート部材の性能と比較して評価し、GPC 構造の実用可能性を探る研究である。FRP ロッドを鉄筋コンクリートの鉄筋代替材として使用する場合、FRP ロッドは異形鉄筋とは表面状態が異なるため、コンクリートとの付着性状の確認が必要である。そこで、始めに FRP ロッドの引抜き試験（要素実験）を行った。さらに、同じロッドを主筋とした梁部材の曲げ試験（構造実験）を行った。

表－1 コンクリートの使用材料

種類	材料名	記号	密度(g/cm ³)
ジオポリマーコンクリート GPC	活性フィラー	ガラス粉体	GLP 2.41
	AF	高炉スラグ微粉末	BFS 2.90
	アルカリ溶液 GPW	水ガラス1号	WG 1.53
		10molNaOH	NaOH 1.33
		水	W 1.00
	細骨材	砕砂	S 2.64
	粗骨材	砕石	G 2.72
セメントコンクリート OPC	普通ポルトランドセメント		OPC 3.15
		水	W 1.00
		砕砂	S 2.64
		砕石	G 2.72
		高性能AE減水剤	AE -

表－2 コンクリートの配合

種類	単位置量 (kg/m ³)						
	活性フィラー		アルカリ溶液 (GPW)			S	G
GPC	BFS	GLP	WG	NaOH	W		
	132	308	126	63	76	645	968
OPC	W		C		S	G	AE
	223		331		1,242	1,013	4.31

表－3 硬化性状（材齢 28 日）とフレッシュ性状

種類	硬化性状				フレッシュ性状	
	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積質量 (g/cm ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
GPC	15.2	1.72	10,417	2.05	25.0	2.1
OPC	23.3	2.39	23,175	2.20	19.0	3.5

2) 使用材用

コンクリート：本研究で使用した GPC は、ガラス粉体を活性フィラーに使用している。ジオポリマーは加熱養生により強度発現するが、建築など構造利用のためには常温養生で強度発現が必要となる。常温硬化のためには、活性フィラーを高炉スラグ微粉末で置換することが有効であることが多くの研究で確認されているが、高炉スラグは常温で硬化し高強度化できるというメリットがある一方で、高粘度で可使用時間が短くなるというデメリットがあり、大量に混入（置換）しすぎると施工性が悪くなるため実用的ではない。そこで、本研究では、試作を繰り返し、溶液／粉体比 0.6、粉体の高炉スラグ置換率が 20%、水ガラス 1 号と NaOH の割合 2:1 とした配合が可使用時間 2 時間以上で、4 週強度 17.5N/mm² が得られたので、これを引抜き供試体や梁試験体の配合に採用することにした。コンクリートに使用した材料を表-1 に、配合表を表-2 に示す。GPC との比較のため、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートでも試験体を作製した。表-3 に材齢 28 日目の硬化性状とフレッシュ性状を示す。

ロッド：表-4 に本実験で使用したロッドの諸元を示す。数値は、いずれもメーカーによるカタログ値で、断面積と直径は公称値である。ロッドは、材質によりアラミド 2 種（付着向上のため表面に砂があるものと無いもの）、ガラス、カーボンの FRP が 4 種類と SUS 鋼、比較のために SD 鋼の合計 6 種類を用いた。FRP は、コンクリートとの付着特性を改善するために様々な異形化の方法が考えられており、3 種類の材質の FRP は全て表面形状が異なっている。写真-1 にロッドの表面状態を示す。

表-4 各種ロッドの諸元

種類	記号	表面形状	公称断面積 (mm ²)	公称径 (mm)	単位重量 (g/m)	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
アラミド	AFRP	組紐	147	13.7	173	69	-	1,170
アラミド (砂付き)	A(S)FRP	組紐	147	13.7	173	69	-	1,170
ガラス	GFRP	らせん状	95	13.0	250	60	-	1,000
カーボン	CFRP	より線	116	15.3	218	146	-	3,250
ステンレス鋼	SUS	異形	127	12.7	1,000	210	363	601
普通鋼	SD	異形	127	12.7	995	210	364	531



写真-1 各種ロッドの表面状態

(実験調査によって得られた新しい知見)

1) 引抜き試験 (付着性状)

試験体は、図-1 に示すように、コンクリートブロックを一辺 150mm の立方体とし、その中心軸に補強筋を配置した。コンクリートの割裂防止のため、φ4mm 丸鋼でスパイラル筋を埋め込んだ。加力端側にアンボンド区間 30mm を設けており、公称径に関わらず全ての試験

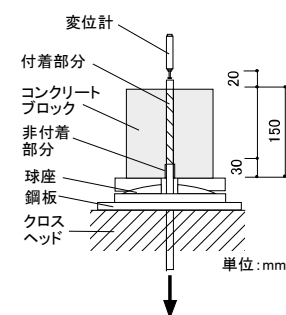


図-1 引抜き試験の载荷方法

体で付着長さは 120mm とした。試験体はロッド毎、コンクリート種類毎に 2~3 体ずつ作製した。コンクリートの練混ぜには、二軸強制型コンクリートミキサーを使用し、補強筋を水平に設置した試験体型枠に横打ちで打設した。加力装置には、1000kN 万能試験機を用い、引抜き試験では、上部クロスヘッド上に試験体を設置し、下部クロスヘッドの中のチャックでロッドを掴み、引張力を加えた。上部クロスヘッドの上には、図-1 に示すように、試験体に偏心荷重が加わらないように、試験体とクロスヘッドの間に球座を配置した。計測は、ロッドのひずみの他に、コンクリートブロックに対するロッドの自由端すべり量を計測した。

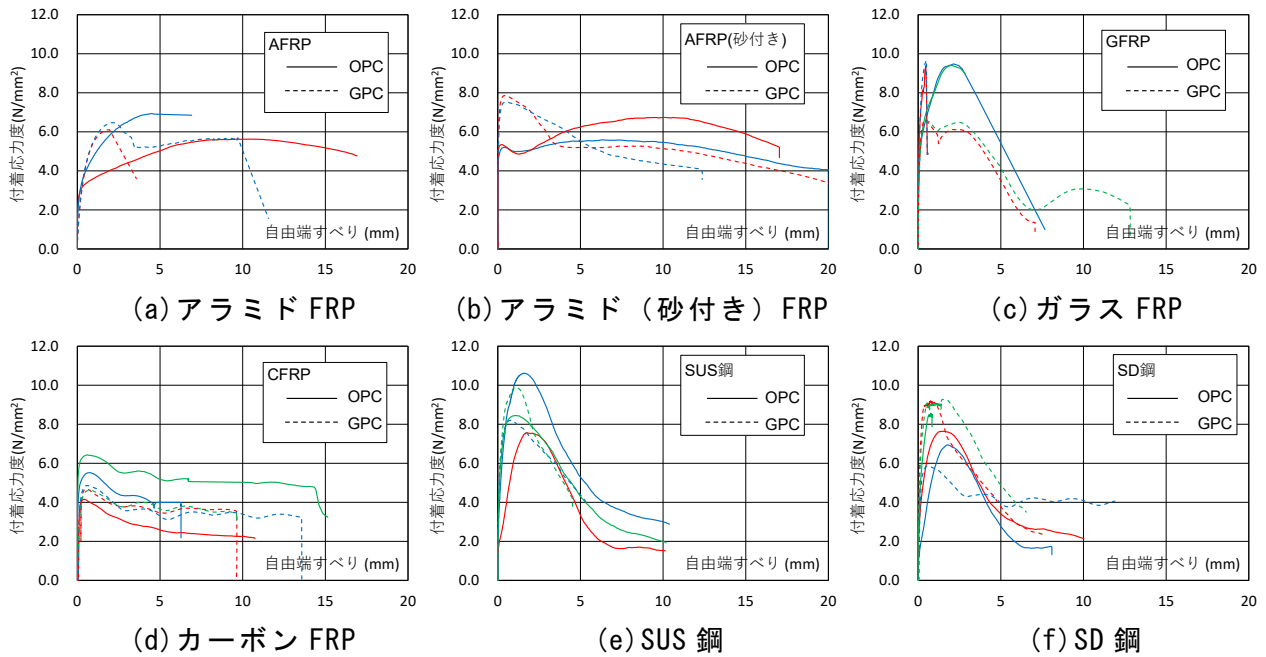


図-2 付着応力度-自由端すべり関係

本実験で得られた各試験体の荷重-自由端すべり曲線を図-2 に示す。補強筋ごとにまとめ、普通コンクリートを実線 (OPC) で、ジオポリマーを点線 (GPC) で描く。最大付着応力度 τ_{max} (N/mm^2) は、最大引抜き荷重 P_{max} を主筋の周長 ϕ と付着長さ l の積で計算される表面積 ($=\phi \times l$) で除した値とする。 τ_{max} およびその時のすべり量を比較すると、GPC の方が相対的に小さくなる結果となった。これは、表-3 に示したように、GPC のヤング係数は OPC の半分以下、圧縮強度も OPC の 65% しかなく、破壊時の挙動が脆性的であることが要因と思われる。ただし、GPC の付着応力度は十分確保されており、OPC と大きな違いはないと言える。SUS 鋼と SD 鋼で OPC と GPC の大きな違いは見られず、最大付着応力、そのときのすべり量、最大付着後の推移など大きな違いはないことがわかる。ただし、SD 鋼の 3 体は鉄筋が降伏し、最大付着応力が得られなかった。

2) 梁実験 (構造性能)

試験体は、図-3 に示すようにはり幅 125mm、高さ 250mm の断面形状とし、せん断スパン 600mm である。表-5 に実験パラメータを示すが、引張主筋には 13mm 筋を 2 本、圧縮主筋には 10mm 筋を 2 本、あばら筋には D6 鉄筋または 8mm のアラミド FRP ロッドを 100mm 間隔で配筋する。試験体は対象ロッド毎に配筋は同一としたセメントとジオポリマー各種 1 体ずつ合計 12 体の梁を作製した。コンクリート打設は鋼製型枠を用い、引抜き試験体と同日に行った。

試験体はすべて単純梁形式で、4点曲げ
 載荷試験を行う。載荷は 1000kN 万能試験
 機を使用し、単調増加で試験体が破壊する
 まで行った。ひび割れを観測し、梁下面の
 たわみと引張主筋両端部のすべり量を変
 位計で測定した。

図-4 に SD 鋼および SUS 鋼を使用した
 試験体の、実験終了後の最終ひび割れ発生
 状況を示す。ほぼ全ての試験体は、引張側
 の主筋が降伏した後に圧縮側のコンクリ
 ートが圧壊する曲げ圧縮となった。ひびわ
 れ発生は、コンクリート種類、ロッドの種
 類に関わらず、明瞭な差がなかった。これ
 は、引抜き試験で明らかになったように、
 主筋の付着応力度はコンクリート種類で
 大きな違いが見られなかったためと推測
 される。

図-5 に、全試験体の荷重 - たわみ関係
 を示す。横軸のたわみは、加力点下 2 点と
 試験体中央 1 点、合わせて 3 カ所の変形量
 を平均したものである。なお、変位計ストロークの限界から、最大荷重値が記録できていな
 い試験体がある。

コンクリートによる違い：同一配筋で、コンクリート種類だけ異なる試験体を比較すると、
 荷重、剛性の推移は GPC の方が OPC より小さいことが分かる。これは、GPC のコンクリ
 ート強度が OPC より 2/3 程度小さく、ヤング係数が 1/2 程度であるためと考えられる。

主筋の素材による違い：初期剛性は SD 鋼材で大きく、FRP は小さいことが分かる。これは、
 FRP のヤング係数は SD 鋼の 1/3 程度であるためである。また、FRP は 10kN 程度で曲げひび
 割れが発生した後は、剛性が大きく低下する。SD 鋼は 60kN 程度で降伏するので大きく荷重
 は上がらないが、降伏後や荷重低下がないので、安定した履歴で推移していることがわかる。

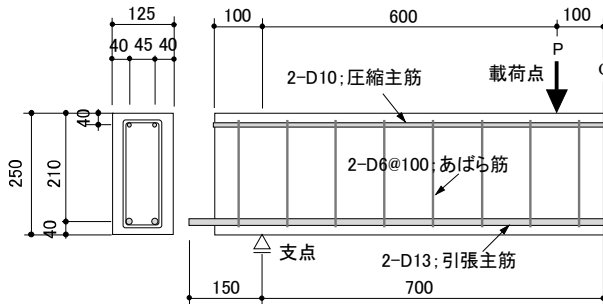


図-3 はり試験体配筋図

表-5 試験体一覧

試験体名	引張主筋 圧縮主筋	あばら筋	コンクリート
A(S)FRP(OPC)	アラミド (砂付き)	FRP	OPC
A(S)FRP(GPC)			GPC
AFRP(OPC)	アラミド	SD	OPC
AFRP(GPC)			GPC
CFRP(OPC)	カーボン	SD	OPC
CFRP(GPC)			GPC
GFRP(OPC)-S_SD	ガラス	SD	OPC
GFRP(GPC)-S_SD			GPC
GFRP(OPC)-S_FRP		FRP	OPC
GFRP(GPC)-S_FRP			GPC
SD(OPC)	鋼	SD	OPC
SD(GPC)			GPC

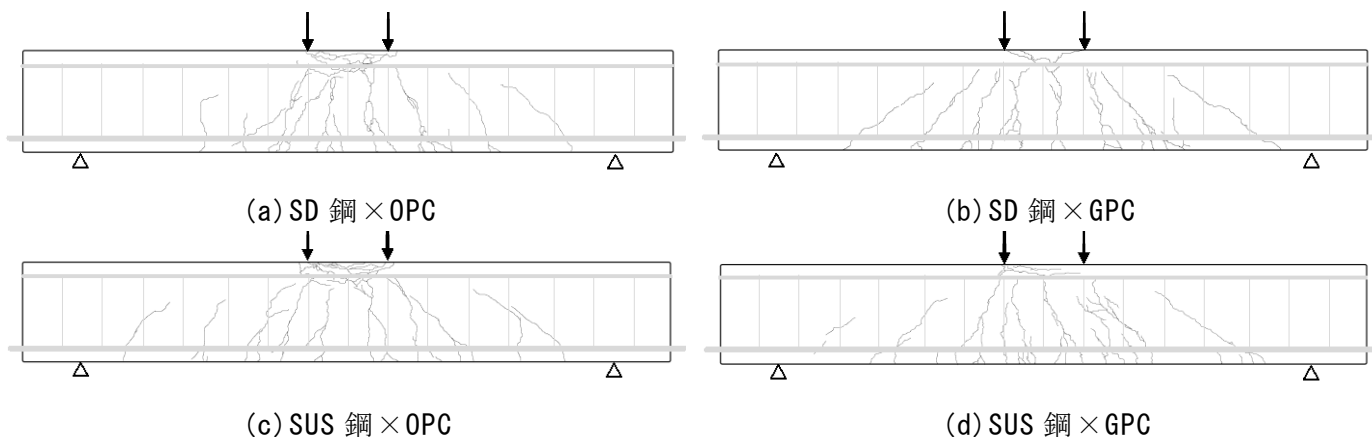


図-4 最終ひびわれ状況

一方, FRP は降伏せず, 引張強度も非常に高いので, 梁の耐力は圧縮側コンクリートの圧壊, もしくは主筋の付着すべりや主筋沿いの付着割裂で決まる。特に, GPC はコンクリート強度が低いので付着力も小さく, 全ての試験体で大きなすべりが確認されており, これによって, 荷重が低下している。ただし, カーボン FRP のように表面がより線状で凹凸が大きいものは, すべりが生じても安定して力の伝達がされるので, 荷重低下は小さかった。

あばら筋の素材による違い : ガラス FRP の試験体は, あばら筋を FRP と SD 鋼の 2 種類で比較した。最大耐力までの推移と破壊性状はほぼ変わりが無いが, 最大荷重値とその時のたわみは, FRP 補強の方がやや大きくなっている。

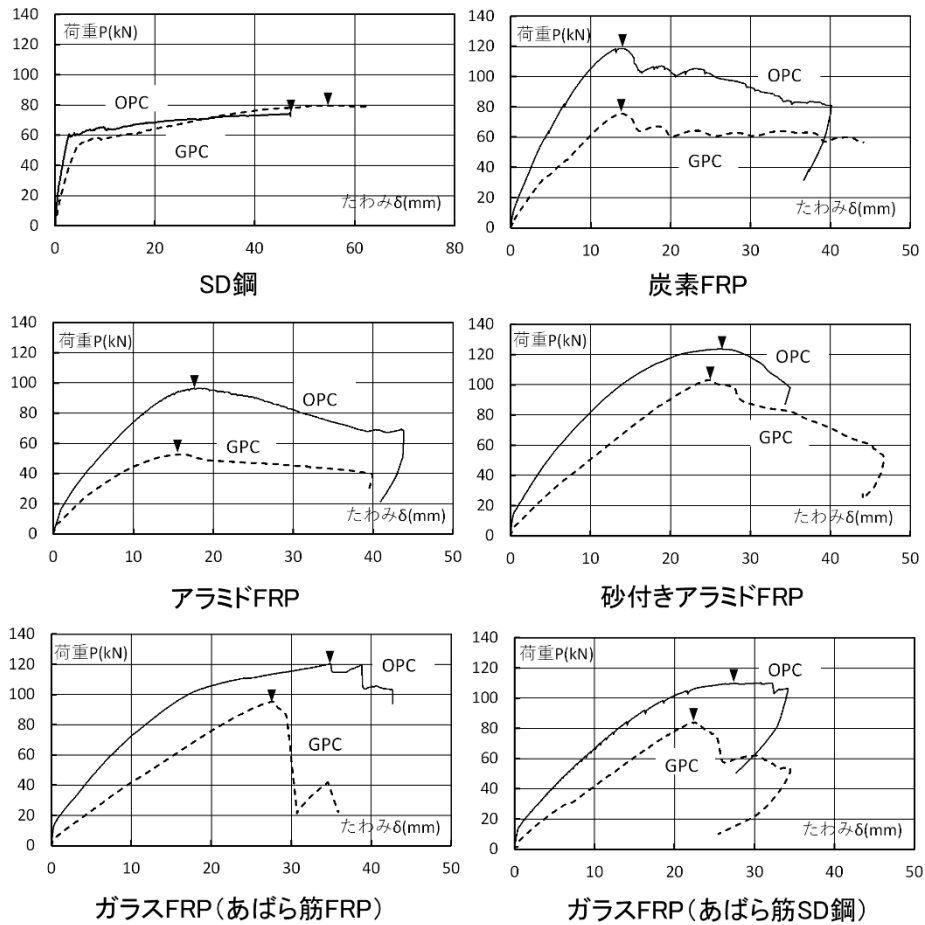


図-5 荷重-たわみ関係 (▼は最大荷重時)

(OPC : 普通セメントコンクリート, GPC : ジオポリマーコンクリート)

3) まとめ

- ・ ガラス粉体を活性フィラーに用いたジオポリマーコンクリートの製作において, 溶液/粉体比 0.6, 粉体の BFS 置換率 20%, 水ガラス 1 号と NaOH の割合 2:1 とした配合が可使時間 2 時間以上となり, 常温養生下で 4 週強度は 17.5N/mm^2 が得られた。
- ・ 引抜き試験において, GPC は OPC に比べコンクリート強度が 65% と低かったにもかかわらず τ_{\max} 値に大きな差が無かったことから, τ_{\max} 値はコンクリート強度には依存しないと言える。
- ・ 付着応力度は, コンクリート種類やロッドの材質による違いというより, ロッドの表面形状が少なからず影響を与えていると言える。
- ・ 曲げ梁のひびわれ発生状況は, コンクリート種類, ロッド種類に関わらず, 明瞭な差が

なかった。

- ・ 同一配筋で、コンクリート種類だけ異なる梁試験体を比較すると、荷重、剛性の推移は GPC の方が OPC より小さいことが分かる。これは、GPC のコンクリート強度が OPC より 2/3 程度小さく、ヤング係数が 1/2 程度であるためと考えられる。

(発表論文)

- ・ ジオポリマーコンクリートと各種ロッドの付着性状に関する基礎的研究：寺井雅和，コンクリート工学年次論文集 45(2)，2023 年 7 月
- ・ ステンレス鉄筋を用いたジオポリマーコンクリートはりの曲げ特性：寺井雅和，日本建築学会技術報告集，日本建築学会（投稿予定）
- ・ Experimental Study on Bending Performance of Geopolymer Concrete Beams with FRP Rods : Masakazu TERAJ, Journal of Building Engineering, Elsevier（投稿準備中）

参考文献

1. 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，公益社団法人日本コンクリート工学会，2017
2. 太田周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：ジオポリマーモルタルと鉄筋との付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2313-2318，2016
3. Nagajothi S. and Elavenil S.: Shear Prediction of geopolymer concrete beams using Basalt / Glass FRP bars, Journal of Advanced Concrete Technology, Volume 19, Issue 3, Pages 216-225, 2021.
4. 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
5. Manikandan, P. and V. Vasugi: A Critical Review of Waste Glass Powder as an Aluminosilicate Source Material for Sustainable Geopolymer Concrete Production, Silicon 13, pp.3649-3663, 2021.
6. 太田周，佐川康貴，原田耕司，西崎丈能：ジオポリマーモルタルと鉄筋との付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2313-2318，2016