

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^{*1}

要旨：本研究では、ジオポリマーコンクリートを構造物で利用するにあたり、コンクリートとロッドの付着性状を調べるため、複数のロッドを対象に引抜き試験を行った。始めに、セメントの代替材料として、産業副産物のガラス粉末を有効利用したジオポリマーコンクリートを試作し、可使時間が2時間以上、圧縮強度15N/mm²以上となるコンクリートの配合条件を決定した。引抜き試験では、FRP やステンレス鋼など耐食性の高いロッドを対象に、ロッドの表面形状や材質の違いによる検討のほか、従来の普通ポルトランドセメントコンクリートと比較し付着性状の違いについて検討した。

キーワード：ジオポリマー、ガラス粉体、付着、FRP、ステンレス鋼、引抜き試験

1. はじめに

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¹⁾。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た。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²⁾。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。

ジオポリマーは、フライアッシュや高炉スラグ微粉末など産業副産物を原料として使用するため、資源の有効利用としても活路が期待されている。本研究では、活性フィラーとしてガラス粉体を利用している。今日において生活に欠かすことがないガラスだが、その使用用途は窓ガラスや瓶、自動車ガラス、太陽光パネル、耐熱容器等身近に使われているものが多い。これらのガラスのリサイクル用途としては、その大半が原材料として、建築用ガラス、ガラスびん、道路塗装材、グラスウール、軽量発泡土木資材等へ使用されている。しかしながら、これらの用途へリサイクルできないものについては埋立処分されており、最終処分場の延命を考えると、他用途での検討が必要となっている³⁾。実際、日本では2019年にガラスびんは126.6万トン国内出荷されていて、その中の85.6万トンが原料として再利用され、最終処分量は38.3万トンであった。また、国内での太陽光発電の導入も増加しており、将来的には、それらに使用される太陽

光パネルの廃棄量の増加も予想されている。太陽光パネルは構造上ガラスの構成比が高い為、これらのガラスのリサイクルニーズは高まることが想定される。

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³⁾。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（以下、SUS 鋼）が有効であると考えられる。そこで、GPCの構造利用に当たっては、GPCと補強筋との付着特性に関する検討が必要になる。OPCとSUS 鋼^{4),5)}、OPCとFRP^{6),7)}、GPCと普通鋼（以下、SD 鋼）^{8),9)}を組合せた付着性状に関する研究事例は多いが、GPCとSUS 鋼やFRPを組合せた研究は少ない。Nagajothi ら¹⁰⁾は、GPC梁をガラス FRP ロッドで補強した構造部材の実験を行っているが、梁部材のせん断性能を検討したものであり、この実験では付着性状については触れていない。

本研究では、環境問題や資源活用の観点から、ガラス粉体を使用したGPCと耐食性が高いSUS 鋼やFRP ロッドを組合せた構造物の実現を目標としている。本論では、構造物での利用を検討するにあたり、GPCとSUS 鋼、FRP ロッドの付着性状を確認するため抜き試験を行い、OPCやSD 鋼との違いを確認することを目的とする。

2. ガラス粉体を使用した GPC

本研究では、ガラス粉体を活性フィラーに使用したGPCについて、コンクリート構造物での利用を考える。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

^{*1} 近畿大学 工学部建築学科 准教授 博士（工学）（正会員）

(以下、BFS)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¹¹⁾。BFS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)し過ぎると施工性が悪くなるため実用的ではない。本章では、引抜き試験体を作製するにあたり、コンクリート材料の試作を行い、可使用時間が2時間以上、材齢28日で圧縮強度15N/mm²以上のGPCになる配合条件を決定した。なお、以下本文中で使用する記号は、表-1、表-2に示すものを使用する。

2.1 ガラス粉体

蛍光X線分析により、各種粉体の成分分析を行った結果を表-1に示す。本実験で使用したガラス粉体は、リサイクルで家庭から出る透明ガラスや色付きガラスが混合されたものを粉砕しており(表-1の混合ガラス)、主成分はSiO₂で、CaOがその次に多く含まれる。一般的なGPCの活性フィラーであるBFSやFAと比較すると、ポリマー化に寄与するAl₂O₃も多少含まれるが、BFSやFAより少ないことが分かる。FAと比較するとSiO₂は多いが、Al₂O₃が少なく、CaOは多く含まれている。ジオポリマーの活性フィラーには、Si、Alを主成分としたガラス質の材料であれば、FA以外にも多くの材料が使用される¹⁾。近年、ガラス粉体を活性フィラーに使用したGPCの研究事例があり¹²⁾、廃ガラスの有効利用の観点から本論でもガラス粉体の使用を試みた。

2.2 配合設計

表-2に本試験で使用する材料一覧を、配合条件と実験結果を表-3に示す。溶液粉体比、アルカリ溶液、BFS混合割合をパラメータに7種類の供試体を作製し、フレッシュ性状として可使用時間を計測し、硬化性状は4週材齢で単位体積重量と圧縮強度を測定した。ここで、可使用時間とは、JASS5および既往の文献¹²⁾を参考にして、練り混ぜ開始から貫入抵抗値が0.50N/mm²になるまでの時間とし、表-3に記載した。

ガラス粉体100%のNo.2供試体では、5時間以上経過しても硬化しなかった。そして、硬化後も強度が出ていない。BFS置換率30%のもの(No.1, No.3~5)は、いずれも40分経過する前に硬化が始まり、硬化後数分以内に急結したので、構造利用には不適と判断した。また、水量が多いとセメント同様柔らかくなり、粘度は低くなるので施工性は向上するものの、急結するため施工時間の管理が困難となることが分かった。そこで、急結を起こさないよう溶液/粉体比を下げ、BFS置換率を20%、10%と下げていくと20%程度のところで可使用時間が120分以上得ることができた。試作において圧縮強度が30N/mm²を超えるものもあったが、可使用時間が短く、急

結を起こしたので施工性の点から採用しなかった。

以上より、溶液/粉体比0.6、粉体のBFS置換率が20%、水ガラス1号とNaOHの割合2:1としたNo.6供試体の配合が可使用時間2時間以上で、4週強度17.5N/mm²が得られたので、これを引抜き試験体の配合に採用することにした。

表-1 粉体の成分比較

種類		高炉スラグ BFS	フライアッシュ FA	混合ガラス GLP	透明ガラス CGP	セメント OPC
化学 成分 (%)	Na ₂ O	0.2	1.1	5.4	5.6	-
	MgO	5.8	1.1	-	-	1.1
	Al ₂ O ₃	15.3	23.9	3.7	5.3	4.9
	SiO ₂	34.5	59.1	70.3	70.5	20.9
	SO ₃	0.6	0.5	0.1	0.2	2.0
	K ₂ O	0.3	1.7	1.7	1.8	-
	CaO	42.5	3.8	17.9	16.2	64.3
	Fe ₂ O ₃	0.3	7.4	0.5	0.1	3.1

表-2 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 AF	ガラス粉体	GLP	2.41
		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
		普通ポルトランドセメント	OPC	3.15
セメントコ ンクリート OPC		水	W	1.00
		砕砂	S	2.64
		砕石	G	2.72
		高性能AE減水剤	AE	-

表-3 ガラス粉体 GPC 試作の配合条件と実験結果

供試 体の 記号	配合条件				実験結果		
	溶液/ 粉体比	粉体の BFS置換率 (%)	WG :NaOH	ケイ素/アル カリ(モ ル比) Si/A	単位体積 重量 (g/cm ³)	圧縮 強度 (N/mm ²)	可使 時間 (分)
1	0.70	30	4:1	0.806	2.20	18.4	30
2	0.50	0			2.05	5.67	-
3	0.50	30			2.21	29.4	25
4	0.70	30	2:1	0.646	2.21	17.5	40
5	0.50	30			2.27	34.3	15
6	0.60	20			2.21	17.5	145
7	0.60	10			2.18	9.5	180

3. 引抜き試験

3.1 使用材料

(1) コンクリート

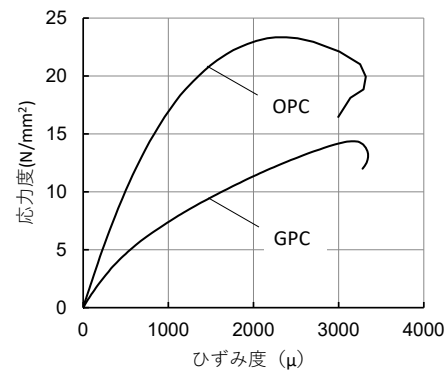
GPCは、2章の試作をもとに使用材料と配合を決定した。溶液/粉体比0.6とし、粉体は全体の20%をBFSで置換した。アルカリ溶液は、水ガラス1号と10mol NaOH溶液を2:1で混合し、さらに加水をして粘度を調整した。

表－４ コンクリートの配合

種類	単位量 (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－５ 強度特性（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



図－１ コンクリートのσ-ε関係の代表例

表－６ 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

ペーストと骨材の割合は 3:7 とし、細骨材率を約 40% で砂と碎石の割合を決定した。配合表を表－４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 OPC でも試験体を作製した。GPC の試作では、4 週強度が 17.5N/mm² だったので、OPC の設計基準強度も Fc18 程度となるように、水セメント比 67% で表－４に示す配合とした。

図－１に、GPC と OPC の圧縮における応力-ひずみ関係の代表例を、表－５に、硬化性状とフレッシュ性状の結果を示す。GPC は試作に対して強度が少し低くなり、OPC は Fc18 で配合したがやや高めの強度が出たため、圧縮強度は約 1.5 倍の開きとなった。また、ヤング係数は GPC が OPC の半分以下であった。

(2) ロッド

表－６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。アラミドロッドはアラミド繊維を組紐として組み、エポキシ樹脂を含浸させている。アラミドロッドの砂付きタイプは、コンクリートとの付着を向上させるため、樹脂成型の際、表面に珪砂が付けてある。ガラスロッドは繊維にビニルエステル樹脂を含浸させ、付着を高めるためにらせん状に型押しして成型している。カーボンロッドは炭素繊維をエポキシ樹脂で固めた素線を 7 本束ねてより合わせている。また、SUS 鋼と SD 鋼は、型押しによりリブと節がある異形鋼である。写真－１にロッドの表面状態を示す。

本実験で使用したロッドは、構造部材の軸方向主筋としての使用を想定しているため、直径約 13mm のものを

選択した。公称径は 13mm 程度であるが、製造方法（表面形状）の違いから、公称断面積は 95～147mm² と大きく開きがある。FRP は、SUS 鋼や SD 鋼に比べ、軽く、剛性は低い、引張強度が高いのが特徴である。

3.2 練り混ぜ方法

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た。2 種類の粉体と砂を投入し 60 秒間空練り後、アルカリ溶液を投入し 60 秒間練り混ぜた。その後、粗骨材を投入し 180 秒間練り混ぜた。練上がり直後にフロー試験と空気量を測定し、ロッドを水平に設置した引抜き試験用型枠に横打ちで打設した。

打設後、表面をコテ仕上げして静置した。材齢 7 日目に脱型し、室温 10℃、湿度 55% 程度の実験室内で実験材齢まで気中養生した。また、強度管理用に $\phi 100 \times 200$ mm のテストピースを複数本作製し、引抜き試験体と同時に脱型、養生した。

3.3 引抜き試験体

試験体は、コンクリートブロックを一边 150mm の立方体とし、その中心軸にロッドを配置した。コンクリートの割裂防止のため、 $\phi 4$ mm 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体で付着長さは 120mm とした。試験体は 3 体ずつ作製したが、一部の試験体は作製や実験に失敗したものがあつたので 2 体になったものがある。

3.4 加力方法及び計測方法

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-2 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は球座を配置した。

計測については、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。

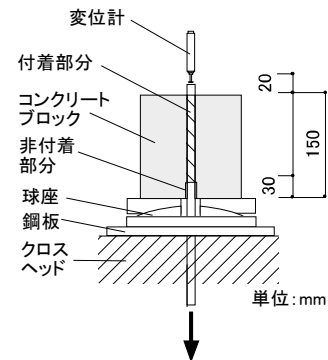


図-2 引抜き試験の荷重方法

4. 実験結果および考察

4.1 付着応力度-自由端すべり曲線

本実験で得られた各試験体の付着応力度-自由端すべり曲線を図-3 に示す。ロッドの材質ごとにまとめ、OPC を実線で、GPC を点線で描く。

CFRP、SUS、SD の 3 種類については、OPC と GPC の違いは見られず、最大付着応力度、そのときのすべり量、最大付着応力度後の推移など大きな違いはないことがわ

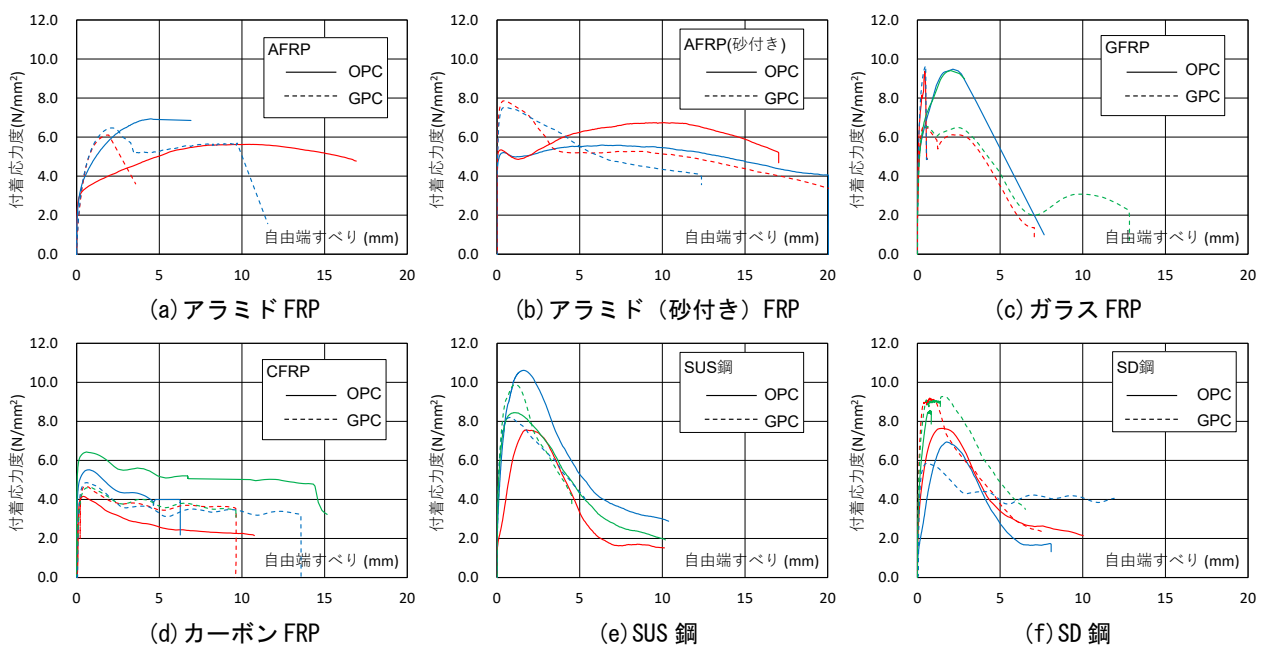


図-3 付着応力度-自由端すべり関係

かる。ただし、SD 鋼試験体の 3 体は降伏点に達しており、最大付着応力度が得られなかった。

AFRP は、OPC の場合、最大付着応力度時のすべり量が 8mm 前後と大きかった。一方、GPC の場合は、他の材質のロッドと同程度のすべり量 2mm 付近で最大となり、その後は一気にすべり抜けている。GFRP は、OPC と GPC のそれぞれ 1 体が、コンクリートブロックで割裂した。割裂した 2 体は、すべり量 0.4mm 程度まで力が上がり続けた。GFRP は補強材表面にらせん状に溝が付いており、型押し成型のため表面凹凸が大きいのが特徴である。そのため、大きな付着応力度が得られコンクリートを割り裂いたと思われる。

4.2 付着性状

図-4 (OPC) と図-5 (GPC) に、図-3 の試験結果から、すべり量が 0.002D mm (D は主筋の公称径) と 0.1mm における付着応力度と最大付着応力度を読み取ってまとめる¹³⁾。また、試験体数の平均値を表-7 と表-8 にまとめる。付着応力度 τ (N/mm²) は、式(1)で表すように、引抜き荷重 P 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。

$$\tau = P / (\phi \times l) \quad (1)$$

ここに、 P : 引抜き荷重 (N)、 ϕ : 主筋の周長 (mm) (表-6 の公称径より算出)、 l : 付着長さ (=120mm)。

まず、すべり量が小さい $\delta=0.002D$ 時における付着応力度は、コンクリート種類にかかわらず、AFRP, CFRP, SUS, SD で小さな値となっており、A(S)FRP と GFRP は大きな値が得られている。A(S)FRP は表面に砂がついているのですべり抵抗が大きく、また GFRP は 4.1 で述べたように表面の凹凸が大きく機械的引っ掛かり作用が大きいと思われ、初期応力度が大きくなったと考えられる。

次に、各すべり量の応力度を OPC と GPC 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、GPC のヤング係数は OPC の半分以下と剛性が低いことが原因と考えられ、コンクリートの違いが応力度に少なからず影響を受けていることが伺える。一方、最大付着応力度 $\tau_{\max}$ は、顕著な違いは現れていない。図-6 に、GPC と OPC の $\tau_{\max}$ 値の相関関係を示すが、同一ロッドで近い値になっていることがわかる。GPC は OPC に比べコンクリート強度が 65% と低いにもかかわらず $\tau_{\max}$ 値に大きな差が無かったことから、 $\tau_{\max}$ 値はコンクリート強度には依存しないと言える。

最後に、最大付着応力度時のすべり量 $\delta_{\max}$ を比較すると、OPC の方が、GPC に比べ大きくなっている。アラミドとガラスの FRP でその差が顕著だが、図-3 のグラフからも、2 種類のコンクリートですべり抜けの性状が異

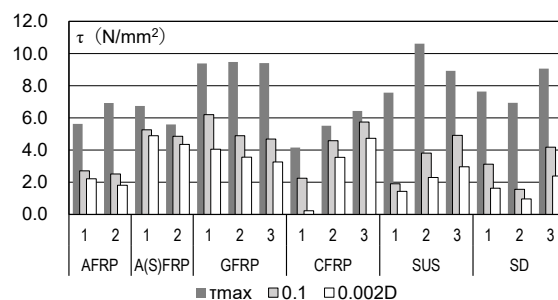


図-4 引抜き試験結果 (OPC)

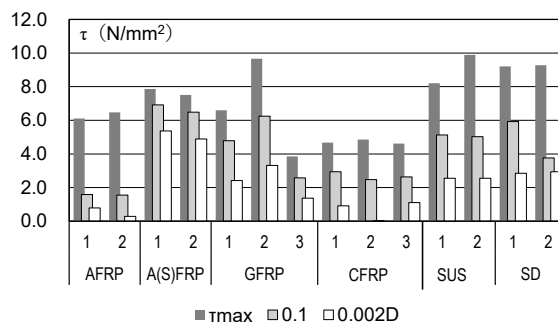


図-5 引抜き試験結果 (GPC)

表-7 引抜き試験結果 (OPC)

	$\delta=0.002D$ mm 時応力度 (N/mm ²)	$\delta=0.1$ mm 時応力度 (N/mm ²)	$\tau_{\max}$ (N/mm ²)	$\delta_{\max}$ (mm)
AFRP	2.01	2.61	6.28	7.45
A(S)FRP	4.62	5.06	6.17	8.23
GFRP	3.62	5.26	9.42	1.54
CFRP	2.83	4.19	5.36	0.61
SUS	2.23	3.54	9.03	1.47
SD	1.66	2.95	7.88	1.30

表-8 引抜き試験 (GPC)

	$\delta=0.002D$ mm 時応力度 (N/mm ²)	$\delta=0.1$ mm 時応力度 (N/mm ²)	$\tau_{\max}$ (N/mm ²)	$\delta_{\max}$ (mm)
AFRP	0.54	1.57	6.29	1.98
A(S)FRP	5.13	6.70	7.69	0.46
GFRP	2.37	4.54	6.71	0.50
CFRP	0.68	2.69	4.72	0.65
SUS	1.90	3.66	6.80	1.32
SD	1.94	4.75	8.11	0.95

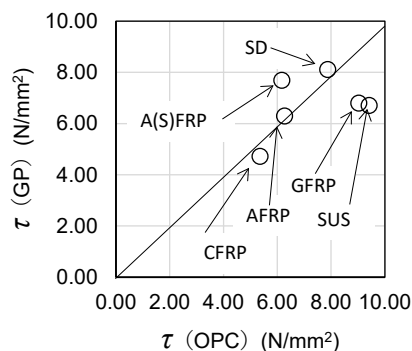


図-6 最大付着応力度の比較

なっているためと考えられる。

以上より、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。

5. まとめ

本研究では、GPC を構造物で利用するにあたり、コンクリートと各種ロッドとの付着特性を調べるためロッドの引抜き試験を行った。

始めに、ガラスの有効利用として、本研究では活性フィラーにガラス粉体を利用した GPC を試作した。溶液粉体比、アルカリ溶液、BFS 混合割合をパラメータに 7 種類の供試体を作製した結果、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、4 週強度 17.5N/mm² が得られたので、これを本試験の配合に採用することにした。

次に、引抜き試験では、FRP や SUS 鋼など耐食性の高いロッドを対象に、ロッドの表面形状や材質の違いによる検討のほか、従来の普通ポルトランドセメントコンクリートと比較した。その結果、以下のことが確認された。

- 1) CFRP, SUS, SD のロッドは、OPC と GPC で付着性に違いは見られず、最大付着応力度、そのときのすべり量、最大付着応力度以降の推移などに大きな違いはない。
- 2) 初期すべり時の付着応力度は、A(S)FRP ロッドは表面に砂がついているのですべり抵抗が大きく、また GFRP ロッドは表面の凹凸が大きく機械的引っ掛かり作用が大きいため、初期の応力度が大きくなったと考えられる。
- 3) 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 σ_{max} 値に大きな差が無かったことから、 σ_{max} 値はコンクリート強度には依存しないと言える。
- 4) 付着応力度は、コンクリートの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。

謝辞

本実験で使用した高炉スラグ微粉末は日鉄高炉セメント株式会社より、またガラス粉体は株式会社こっこーより提供していただいた。本研究は、公益財団法人前田記念工学振興財団の研究助成（令和 4 年度）によった。付記して謝意を表する。

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) 公益財団法人日本容器包装リサイクル協会 HP より <https://www.jcpra.or.jp/recycle/recycling/tabid/420/index.php>（閲覧日：2023 年 1 月 6 日）
- 3) 永井伴英，李柱国，高垣内仁志，岡田朋久：ジオポリマーコンクリートの乾燥収縮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.2301-2306，2016
- 4) 丸田誠，永井覚，高稲宜和，山元雄亮：ステンレス鉄筋を用いた RC 部材の構造性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1627-1623，2009
- 5) 山本俊彦，山川正克：ステンレス鉄筋の重ね継手性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.895-900，2003
- 6) 山北礼子，ほか 6 名：FRP 補強コンクリート部材の実験的研究 その 1 FRP ロッドの付着性状，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.70，pp.65-68，1997
- 7) 丸山武彦，伊東幸雄，西山啓伸：異形加工した FRP ロッドの付着特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.11，No.1，pp.777-782，1989
- 8) 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
- 9) Sanjay PAREEK，鹿島大雄，丸山一平，荒木慶一：各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタル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.40，No.1，pp.1839-1844，2018
- 10) 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.
- 11) 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
- 12) 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.
- 13) 十河茂幸，河井徹，牛島栄：コールドジョイントの発生条件と防止対策，コンクリート工学，Vol.39，No.2，pp.3-7，2001
- 14) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技法堂出版，1991