# 論文 ガラス繊維補強ジオポリマーモルタルに関する基礎的研究

後藤 壮\*1・犬飼 利嗣\*2・前川 明弘\*3・廣瀬 貴\*4

要旨:本研究では、ガラス繊維補強ジオポリマーモルタルの圧縮および曲げ強度について実験的に検討した。 その結果、ジオポリマーモルタルの圧縮強度はアルカリ溶液フライアッシュ比に関わらず、凝結遅延剤の外 割添加率が増加するほど低下する傾向にはあるが、流動性は凝結遅延剤を1.0%以上添加することで改善され ることが分かった。また、ガラス繊維補強ジオポリマーモルタルは普通ポルトランドセメントやGRCセメン トを使用したガラス繊維補強モルタルと比較して曲げ強度は小さい値を示したが、材齢28日の段階ではアル カリによる耐アルカリ性ガラス繊維の劣化はみられないことを確認した。

キーワード:ジオポリマー,ガラス繊維,フライアッシュ,無水クエン酸,圧縮強度,曲げ強度

#### 1. はじめに

建築外装用材料は、耐震性や防火性能に優れ、かつ軽 量で高断熱であることが求められており、その一つとし て建築市場では耐アルカリ性ガラス繊維(以下、ARG)を 用いたガラス繊維補強モルタル(以下、GRM)が広く普及 している。GRMは不燃材料で構成されており、かつ曲げ 強度も大きいので薄肉断面の設計により部材の軽量化が 図られている。しかし、GRMは、セメントなどの強アル カリ環境下ではガラス繊維の劣化が進行するので、材齢 にともなって曲げ強度が低下することが知られている<sup>11</sup>。 これは、セメントの水和反応により生成されるCa(OH)2 によるもので、ARGであっても強アルカリによる劣化の 進行は避けられない。したがって、GRMには水和・硬化 過程においてCa(OH)2を生成しない、GRM専用の特殊セ メントであるGRCセメントが一般的に使用されている<sup>11</sup>。

筆者らは、これまでセメントを結合材としないジオポ リマー(以下、GP)に関する研究に取り組んできた<sup>2,3)</sup>。 GPは石炭火力発電所から発生する飛灰であるフライア ッシュ(以下、FA)を活性フィラーとして用いることがで きるので、CO2排出量の削減や産業副産物の有効利用を 拡大できる。また、GPはアルミナシリカ粉末(活性フィ ラー)とアルカリ溶液との縮重合反応により硬化体を得 るもので、セメントの水和反応とは異なり反応過程で Ca(OH)2を生成することはない<sup>4)</sup>。したがって、GRMを GPモルタルとすれば、ARGの劣化の進行を抑制すること ができると考えられる。

GPに関する研究は多岐にわたっており、その中にはガ ラス繊維補強ジオポリマーモルタル(以下、GRGP)に関 する研究成果もいくつか報告<sup>5,6)</sup>されている。しかし、 ARGの劣化に着目した研究は数少なく<sup>6)</sup>、高濃度のアル カリ溶液を用いるGRGPを建築外装用材料とするには, 初期材齢からARGの劣化を踏まえて耐久性を検証する 必要がある。また,GRC板の材料規格<sup>71</sup>に示されるように 曲げ強度の値を10N/mm<sup>2</sup>以上にする必要がある。

そこで本研究では、GRGPの耐久性(ARGの劣化抑制) を向上することを目的として、GRGPの圧縮および曲げ 強度について検討した。まず実験1として、GRGPの配合 を決定するために、ARG無混入GPモルタルのアルカリ溶 液フライアッシュ比(以下、AW/F)および凝結遅延剤(以 下、ST)の外割添加率が圧縮強度とフロー値の経時変化 に及ぼす影響について検討した。つぎに実験2および実験 3として、ARGの混入がGRGPの圧縮および曲げ強度に及 ぼす影響について検討した。

# 配合設計条件がGPモルタルの圧縮強度とフロー値の経時変化に及ぼす影響(実験1)

#### 2.1 実験概要

(1) 実験要因

表-1に、実験要因を示す。実験要因は、AW/FとST の外割添加率とした。

#### (2) 使用材料および配合

表-2に使用材料を,表-3にJISII種FA(以下,FAII) を7000cm<sup>2</sup>/g程度に微粉砕したFA(以下,FAII7)のX線 による分析結果を示す。なお,使用材料の化学組成は 蛍光X線分析装置により測定した。また,FAのガラス 相量は,粉末X線回折装置を用いて作成した検量線か ら結晶鉱物(石英およびムライト)を定量し,残分を非

表-1	実験要因(実験1)	

因子	水準		
AW/F (%)	42, 46, 50		
STの外割添加率(%)	0, 1.0, 2.0, 3.0		

\*1 岐阜工業高等専門学校 専攻科先端融合開発専攻 (学生会員) \*2 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員) \*3 三重県工業研究所 総括研究員 博士(工学) (正会員) \*4 株式会社丸治コンクリート工業所 取締役研究開発部長

材料名	記号	品種	備考
フライアッシュ	F	A発電所 振動ミルによる JISⅡ種 微粉砕あり	比表面積(cm²/g):7822, 密度(g/cm³):2.45
ا ، او ط	OPC	普通ポルトランドセメント	比表面積(cm²/g):3480, 密度(g/cm³):3.16
セメント	GRC	GRCセメント	比表面積(cm²/g):4690, 密度(g/cm³):2.97
細骨材	S	乾燥珪砂7号	絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ):2.68
水	W	上水道水	-
アルカリ添加剤	NS	メタけい酸ナトリウム	密度(g/cm³):2.61
凝結遅延剤	ST	無水クエン酸	密度(g/cm³):1.66
耐アルカリ性ガラス繊維	ARG	エーップドフレニンド	ストランド:18μmのフィラメントを約100本集束
		テョッファストフノト	繊維長(mm):19, 25
混和剤	AD	高性能AE減水剤標準形I種	主成分∶ポリカルボン酸コポリマー
		高性能減水剤I種	主成分:アルキルアリルスルホン酸塩高縮合物

表-2 使用材料(実験1~3)



因一1 1 807 和皮力和人关款14

#### 晶質相として算出した。

図-1に、FAII7の粒度分布を示す。なお図には、比較用にFAIIの粒度分布も示している。図から分かるように、FAII7の粒子は、FAIIの粒子と比較して相対粒子量の分布幅は小さく粒子径も小さくなっている。

表-4に、GPモルタルの配合を示す。表-4のAWはW+NSを表記しており、設計空気量は2%としている。 なお、NSの添加量は既報<sup>2)</sup>において最も大きい圧縮強 度を示した配合を参考にし、NS水溶液の濃度に換算 して3.0mol/Lとした。

# (3) 練混ぜおよびフロー試験

練混ぜは既報<sup>3)</sup>の実験結果を参考にし,図-2に示す 方法で行った。なお,AW/Fが42%の配合では,図に示 した練混ぜ時間では練混ぜが不可能であったので,所 定の練混ぜ時間終了後,低速で60秒間,高速で120秒 間練混ぜを延長した。

フロー試験は, JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じて行った。また,経時によるフロー値は, 測定を開始する直前に試料をさじで30秒間練り返し てから測定した。なお,フロー値の減少率は,式(1) により算出した。

$$FLd = (FLs - FLt) / FLs \times 100 \tag{1}$$

# 表-3 X線によるFAⅡ7の分析結果(実験1~3) (%)

FAの		ガニフ 扣号					
品種	SiO <sub>2</sub>	$AI_2O_3$	$Fe_2O_3$	Ca0	MgO	Ig.loss	カノヘ伯里
FAII7	64.8	20.7	4.2	2.2	1.2	3.3	59.7



表-4 GPモルタルの配合(実験1)

\*)NS水溶液の濃度(mo1/L)に換算

# (4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1142「有機不純物を含む細 骨材のモルタルの圧縮強度による試験方法」に準じて 行った。なお、供試体の寸法はφ50×100mmとし、試 料を2層に分け、テーブルバイブレータで各層を30秒 間締め固めた。また、供試体は上面をラップした型枠 内で、材齢28日まで20℃の封緘養生をした。

#### 2.2 実験結果および考察

表-5に、フロー値の測定結果を示す。なお、AW/F が42%、STの外割添加率が0%の供試体は本実験では 練混ぜが不可能であった。表から分かるように、AW/F が大きくなるとフロー値が大きくなる傾向にある。ま た、いずれのAW/Fにおいても、STの外割添加率によ るフロー値の差はみられない。

図-3に、フロー値の減少率と練混ぜ終了後からの 経過時間の関係を示す。なお、流動性が低下しフロー 値の測定が不可能となった場合は、フロー値の減少率 を一律に40%として図中に示した。図から分かるよう に、いずれのAW/Fにおいても、STを添加することで フロー値の減少率は小さくなり、STを添加しない場合 には120分以内に測定が不可能となった。また、フロ ー値の減少率には、STの外割添加率による差はみられ



ず,STを1.0%以上添加することで流動性の低下は改善された。

図-4に、圧縮強度とSTの外割添加率の関係を示す。 図から分かるように、いずれのAW/Fにおいても、ST の外割添加率が増加すると圧縮強度が低下する傾向 にある。これは、既報<sup>3)</sup>と同様の傾向である。また、 AW/Fに着目してみると、AW/Fが小さくなると圧縮強 度は増大する傾向にはある。このような傾向は、水 /GP固形物質量が減少すると圧縮強度が増大する傾 向にあった文献8)と同様の傾向である。

このように、GPモルタルの流動性をある程度保持 し圧縮強度を極力増大させるには、AW/Fを小さくし STを1.0%以上添加する必要がある。したがって、実験 2以降ではAW/Fが42%、STの外割添加率が1.0%の配 合で実験を行うこととした。

# ARGの混入がGRGPの圧縮および曲げ強度に及ぼす 影響(実験2,3)

- 3.1 圧縮強度(実験2)
- 3.1.1 実験概要
  - (1) 実験要因

表-6に、実験要因を示す。実験要因は、ARGの繊維長、材齢、および養生方法とした。なお、実験3で使用したGRCセメントは図-5に示す養生条件を必須としているので、いずれの供試体も加温養生条件は同一とした。供試体は2時間の前養生を行い、加温養生後は所定の材齢まで20℃の封緘養生を行った。また、加温養生は水を注いだコンテナボックス内に試料を詰



めた供試体型枠を配置し、ボックス内が湿潤状態となるようにした。封緘養生は実験1と同様とした。

(2) 使用材料および配合

使用材料は実験1と同様(表-2参照)し,表-7に GRGPの配合を示す。

(3) 練混ぜ

練混ぜは文献7)を参考にし、オムニミキサを用いて 図-6に示す方法で行った。

(4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、実験1と同様とした。

#### 3.1.2 実験結果および考察

図-7に, 圧縮強度とARGの繊維長の関係を示す。 なお, 封緘養生では材齢1日で脱型することができな かったので, 材齢7日と28日の結果のみ示している。 図から分かるように, 加温養生は封緘養生と比較して, 初期強度が大きく, 28日強度は小さくなる傾向にある。 また, 養生方法に関わらず, ARGの繊維長による圧縮 強度の差はみられない。このような傾向はガラス繊維



の混入率が増加すると圧縮強度が増大する傾向にあ った文献5)とは異なる傾向である。しかし,文献9)に は繊維の配向方向が圧縮強度に大きく影響を与える ことが述べられており,繊維と直交する方向に荷重を 加えた場合には圧縮強度が増大し,平行する方向に荷 重を加えた場合には圧縮強度が低下すると報告され ている。本実験では,ARGは供試体中にランダムに配 向されている可能性が十分にあるので,ARGの混入が 圧縮強度に影響を及ぼさなかったと考えられる。

#### 3.2 曲げ強度(実験3)

#### 3.2.1 実験概要

#### (1) 実験要因

表-8に、実験要因を示す。実験要因は、ガラス繊維の繊維長と材齢とした。なお、曲げ強度を比較するために、OPCとGRCセメントを用いたGRM供試体も作製した。

# (2) 使用材料および配合

使用材料は実験1と同様(**表**-2参照)とし,**表**-9に GRMの配合を示す。なお、GRMの配合は建築外装用 材料として使用することを想定し、W/Cを35%、S/C を0.6とした<sup>10)</sup>。また、GRGPの配合は、実験2と同様と した。

#### (3) 練混ぜおよびフロー試験

GRMの練混ぜは、図-8に示す方法で行った。また、

GRGPの練混ぜは、実験2と同様とした。

フロー試験は文献10)を参考にし、ARGを投入する 前のモルタルフロー値(自然フロー値)と、モルタルに ARGを混入し練り混ぜた後のフロー値(タッピングフ ロー値)を測定した。なお、自然フロー値は自然フロ ーコーン(塩ビ製φ55×50mm)、タッピングフロー値は 実験1と同様のフローコーンを用いて測定した。また、 GRMの目標フロー値は文献10)を参考にし、自然フロ ー値で120~190mmとした。

#### (4) 曲げ強度試験

曲げ強度試験は,JCI-S-002-2003「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験」に 準じ,スパン120mmの3点曲げ載荷とした。なお,供 試体の寸法は40×40×160mmとし,1条件につき3体作 製した。また,養生方法は加温養生のみとした。

## 3.2.2 実験結果および考察

表-10に、フロー値の測定結果を示す。表から分か るように、ARGの繊維長が長くなるとタッピングフロ ー値が小さくなる傾向にある。

図-9に、曲げ強度と材齢の関係を示す。なお、曲 げ強度は、最大荷重時の値とした。図から分かるよう に、ARGの繊維長が長くなると曲げ強度も増大する傾 向にあるが、材齢28日におけるOPCの曲げ強度には ARGの繊維長による差はみられなかった。材齢28日で



曲げ強度が低下した原因は明らかではないが、文献 11)によれば繊維長が19mmと25mmの材齢28日におけ る曲げ強度には差がないことも報告されている。また 曲げ強度は、ARGの繊維長に関わらず、GRC, OPC, GPの順に大きくなっている。GRGPの曲げ強度が最も 小さいのは、減水剤などをOPCのようには適用できず 容易にはAW/Fを小さくできないこと、GPとしては加 温養生の最高温度が低くマトリックスモルタルの強 度が小さくなったことなどが影響していると考えら れる。

図-10に、曲げ強度の増加倍率とARGの繊維長の関 係を示す。なお、曲げ強度の増加倍率は、材齢28日に おけるARGを混入した曲げ強度をARG無混入の曲げ 強度で除した値とした。図から分かるように、ARGの 繊維長が長くなると曲げ強度の増加倍率も増加する 傾向にある。また、曲げ強度の増加倍率は、ARGの繊 維長に関わらず, GRC, OPC, GPの順に大きくなって いる。これには、ARG無混入のGPはGRCやOPCと比較 して、曲げ強度が50~65%程度小さく、繊維との付着 力に差が生じたことが影響していると考えられる。

写真-1に、3000倍で撮影したARG混入ペーストの 走査型電子顕微鏡(以下, SEM)画像を示す。なおARG 混入ペーストは、材齢28日まで曲げ強度供試体と同様 の養生を施している。画像から分かるように、いずれ の供試体においても、ARGの表面には劣化の兆候はみ られない。

写真-2に、光学顕微鏡で撮影した材齢28日におけ る曲げ強度供試体の破断面を示す。写真から分かるよ うに、曲げ強度の大小に関わらずいずれの破断面にも、

4.0 OPC 聖 GRC GP 3.0 曲げ強度の増加倍率 2.0 1.0 0 19 19 19 25 25 25 ARGの繊維長 (mm)

- (mm)

GP

154

147

28

21

図-10 曲げ強度の増加倍率とARGの繊維長の関係(実験3)

供試体から抜けたARGと破断したARGが混在してい る。しかし、抜けと破断の割合は明瞭ではない。

本実験結果では、GRGPは、OPCやGRCを用いた GRMと比較して最も小さい曲げ強度を示した。しか し、GPでは高アルカリ環境下となる初期材齢におい て、ARGに劣化の兆候はみられなかった。したがって、 長期材齢におけるARGの劣化の進行は確認する必要 はあるが、マトリックスであるGPモルタルの強度を増 大することができれば,建築外装用材料としてGRGP を使用することも可能になると考えられる。

今後は、GPモルタルの高強度化を図り、その供試体を もって評価するとともに, ARGの長期劣化についても詳 細に検討していきたいと考えている。

## 4. まとめ

本実験結果をまとめると、以下のようになる。 1)GPモルタルの圧縮強度は、AW/Fに関わらず、STの外



OPC (a)

(b) GRC

(c) GP

写真-1 3000倍で撮影したARG混入ペーストのSEM画像(実験3)



#### 写真-2 光学顕微鏡で撮影した材齢28日における曲げ供試体の破断面(実験3)

割添加率が増加するほど低下する傾向にはあるが、流 動性はSTを1.0%以上添加することで改善される。

- 2)GRGPの圧縮強度には、ARGの混入による影響はみら れない。
- 3) GRGPの曲げ強度は、OPCやGRCを使用したGRMと比 較して最も小さい値を示した。しかし、材齢28日の段 階では、アルカリによるARGの劣化はみられない。

#### 謝辞

本研究費の一部は、JSPS科研費JP15K06317による助成、 平成29年度小川科学技術財団特定研究助成金,および 2019年度(第50回)大倉和親記念財団研究助成金(いずれ も,研究代表者:犬飼利嗣)によった。ここに記して謝意 を表する。

# 参考文献

- 1)秋浜繁幸, 末永龍夫, 中川裕章, 藤井 洋: GRCセ メントを使用したガラス繊維補強セメントの力学 的特性と耐久性,第8回コンクリート工学年次講演 会論文集, pp. 417-420, 1986
- 2)後藤 壮, 犬飼利嗣, 上原義己, 廣瀬 貴: メタけ い酸ナトリウムの添加方法と凝結遅延剤がジオポ リマーモルタルの圧縮強さ特性とフロー値の経時 変化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1821-1826, 2018
- 3)後藤 壮, 犬飼利嗣, 前川明弘, 廣瀬 貴: ジオポ リマーモルタルの練混ぜ方法と模擬乾燥スラッジ 粉の混入率が圧縮強さに及ぼす影響, コンクリー

ト工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1943-1948, 2019

- 4) Joseph DAVIDOVITS : GEOPOLYMER CHEMISTRY AND APPLICATIONS, Institute GEOPOLYMER, 2011
- 5) Dr. Mrs. S. A. Bhalchandra, Mrs. A. Y. Bhosle : Properties of Glass Fibre Reinforced Geopolymer Concrete, International Journal of Modern Engineering Research, Vol.3, Issue 4, pp.2007-2010, 2013
- 6) K. Korniejenko , J. Mikula , M. Lach : CHARACTERIZATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF SHORT GLASS FIBER-REINFORCED GEOPOLYMER COMPOSITES, 10th International Conference on Composite Science and Technology, 2015
- 7) 日本GRC工業会: GRC工業会規格集, pp.1-8, 55-57, 1998
- 8) D. Hardjito and B. V. Rangan : DEVELOPMENT AND PROPERTIES OF LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE, Research Report GC 1 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia, 2005
- 9)日本GRC工業会:GRCの物性と試験方法, pp.70-74, 1996
- 10)日本電子硝子株式会社:プレミックスGRC技術資料 (基礎編), pp.2-4, 2000
- 11) 堀口邦広, 横田 博, 鈴木忠彦, 若宮 隆: 高流動 プレミックスGRCに関する研究、コンクリート工 学年次論文集, Vol.15, No.1, pp.963-968, 1993