

論文 古紙を混和したジオポリマーモルタルの諸性質に関する基礎的研究

平城 有梨*1・富山 潤*2・原田 耕司*3・駒津 慎*4

要旨：日本の古紙回収率は、1970年当初40%弱から2020年時点で84.9%と大幅に向上しており、世界でも上位の回収率である。また、利用率については、1970年当初34%程度から2020年時点で67.2%と年々高まっているが、32%程度の余剰分があり、その有効利用拡大が望まれている。そこで本研究では、古紙を混和したジオポリマーモルタルを対象に、強度特性、流動性・粘着性、吸水性、長さ変化に関する基礎的検討を行った。その結果、通常のジオポリマーモルタルと同等の性能を有していることを確認した。

キーワード：古紙, ジオポリマー, 圧縮強度, 流動性, 粘着性

1. はじめに

日本の古紙回収率は、1970年当初40%弱から2020年時点で84.9%と大幅に向上しており、世界でも上位の回収率である。また、利用率については、1970年当初34%程度から2020年時点で67.2%と年々高まっているが、32%程度の余剰分がある。紙の原料は木材（パルプ用材）であり、不要になった紙のリサイクルは、貴重な森林資源の浪費を抑えることと、製紙原料の安定確保のために必要である。したがって、古紙のリサイクル・再資源化の拡大が望まれている。一方で、脱炭素社会の構築に向け、建設業界においてもCO₂削減、環境負荷低減は必須の課題である。このような背景の中、CO₂発生量の削減、産業副産物の有効利用、重金属等の固定などを可能とすることから、環境問題解決の有力な手段のひとつとして期待されているジオポリマーコンクリートの研究が盛んに行われている²⁾。

そこで本研究では、古紙の有効利用拡大かつ環境負荷低減が可能な建設材料の開発を目指し、古紙を混和したジオポリマーモルタルを対象に、強度特性、流動性・粘着性、吸水性、長さ変化に関する基礎的検討を行い、古紙の建設材料への適用可能性について検討した。

2. 使用材料

2.1 古紙(新聞紙)

古紙には、一般に新聞、段ボール、雑誌、雑紙、飲料用パックがある。古紙はその品質や特徴に応じてそれぞれ異なる紙の原料になるため、分別して回収される。参考に、前述した古紙回収率と古紙利用率を図-1に示す。

本研究で使用した古紙は、新聞紙を破碎したもので、概ね幅1cm、長さは1cm~3cm程度である。写真-1に使用した破碎新聞紙を示す。また、古紙(新聞紙)の成分分析の結果を図-2(a)に示す。参考のため、雑誌の成

分分析の結果も図-2(b)に合わせて示す。

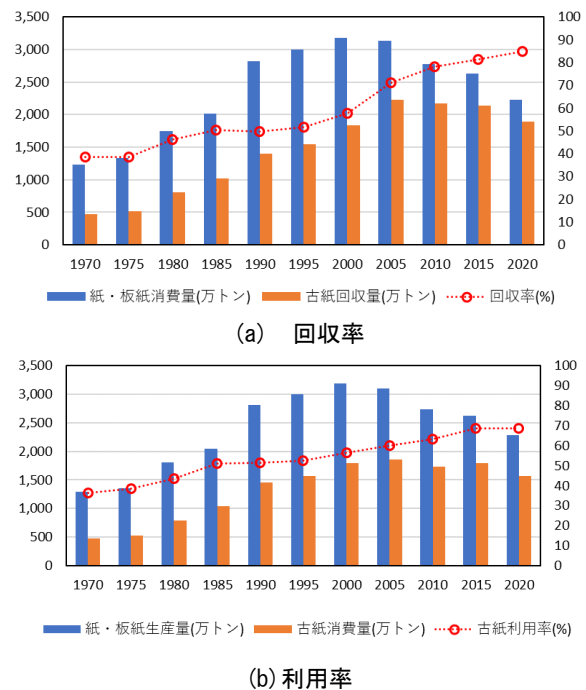


図-1 古紙の回収率および利用率



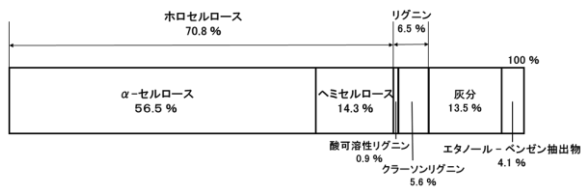
写真-1 破碎した古紙(新聞紙)

*1 琉球大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 社会基盤デザインプログラム 学士(工学)(学生会員)

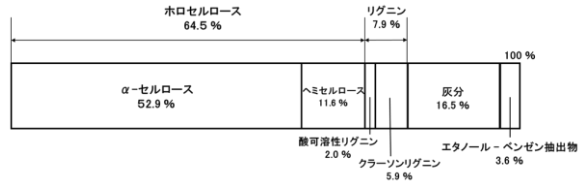
*2 琉球大学 工学部工学科 社会基盤デザインコース 教授 博士(工学)(正会員)

*3 西松建設株式会社 技術研究所 主席研究員 博士(工学)(正会員)

*4 明和製紙原料株式会社 代表取締役



(a) 古紙 (新聞紙)



(b) 雑誌

図-2 古紙の成分分析結果 (wt%)

2.2 その他の使用材料

本研究で検討したジオポリマーモルタルの基本材料は、活性フィラー、アルカリ溶液、細骨材である。本検討では、活性フィラーとして、フライアッシュ(電源開発(株)産、JIS II種灰)を基本とし、初期強度発現性を考慮³⁾し、高炉スラグ微粉末(石膏なし、ブレン値 4,090cm²/g)を用い、フライアッシュの一部置換した配(調)合を用いた。アルカリ溶液として、市販の GP-1 溶液(東曹産業(株))を用いた。また、細骨材には、セメント強度試験用標準砂(以下、標準砂)を用いた。使用した材料とその密度を表-1に示す。

表-1 使用材料および密度

使用材料	密度(g/cm ³)
フライアッシュ(FA)	2.32
高炉スラグ微粉末(BS)	2.91
GP-1 溶液(GPW)	1.35
標準砂(S)	2.64
古紙 (新聞紙)	0.3

3. ベース配(調)合の検討

3.1 試験体概要

古紙活用のベース配(調)合を決定するために、本研究では、材齢 1 日の圧縮強度 24N/mm² を目標強度と定め、活性フィラーとして、フライアッシュを基本に、高炉スラグ微粉末をフライアッシュの 0%, 5%, 10%, 20%, 30%容積置換した 5 ケースの配(調)合について検討を行った。表-2 に検討配(調)合を示す。また、練り混ぜには、容量 4.0L のホバートミキサーを使用した。練り混ぜ方法はフライアッシュ、高炉スラグ微粉末、標準砂の空練りを 30 秒、GP-1 溶液を 30 秒かけて加えていき、練り混ぜを 30 秒、かき落としを 1 分 30 秒、練り混ぜを 1 分の順序で、合計 4 分で行った。試験体は、セメント

の強さ試験(JIS R5201)用角柱型枠 (4cm×4cm×16cm) を用い、60℃で 6 時間の高温養生を行った。図-3 に高温養生の温度履歴を示す。養生開始から 24 時間後まで封かん養生とした。

表-2 ベースモルタルの検討配(調)合

ケース名	BS 置換率(%)	GPW FA BS S			
		(kg/m ³)			
#1	0	339	599	0	1243
#2	5	339	568	38	1243
#3	10	339	538	76	1243
#4	20	339	478	151	1243
#5	30	339	420	224	1243

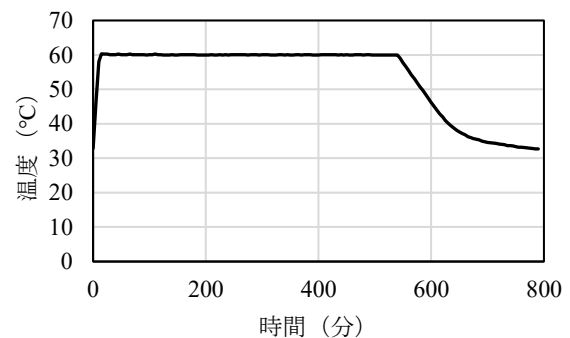


図-3 高温養生の温度履歴

3.2 実験結果および考察

図-4 に材齢 1 日の圧縮強度試験の結果を示す。図から高炉スラグ微粉末の置換率が高くなるにつれ強度が増し、置換率 10%以上では目標強度を上回った。そこで、目標強度を十分に上回る高炉スラグ微粉末置換率 10%の配(調)合をベースモルタル (ベース配(調)合) とした。

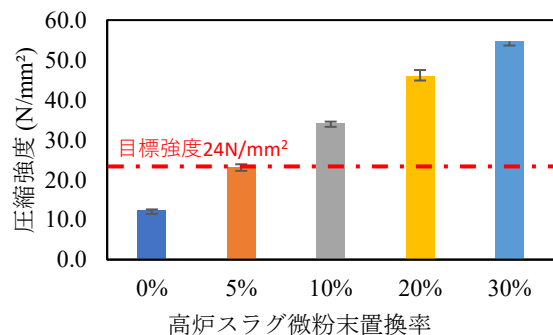


図-4 材齢 1 日の圧縮強度試験の結果

4. 古紙を混和したジオポリマーモルタルの検討

4.1 検討配(調)合

古紙混和の影響を検討するためベース配(調)合に対し、古紙を標準砂の 0%, 1%, 2%, 4%, 6%容積置換した 5 配(調)合の検討を行った。なお、古紙を細骨材置換する

理由は天然資源である骨材の使用量を削減でき、骨材面からも環境負荷の低減を目指したためである。

表-3 に示す 5 つの検討配(調)合に対し、圧縮強度試験、フロー試験(JIS-R5201)を行い、その結果から適切な古紙混和(置換率)の配(調)合を決定した。練り混ぜ方法について、3.1 節に示した通りであるが、古紙は、はじめに GP-1 溶液にガラス棒で攪拌させ、その後、ミキサーへ投入した。古紙は水では分散しなかったが GP-1 溶液では分散した。投入前の古紙入り GP-1 溶液の様子を写真-2 に示す。

表-3 検討配(調)合

ケース名	古紙置換率(%)	GPW	FA	BS	S	古紙
		(kg/m ³)				
#1	0	339	538	76	1243	0
#2	1	339	538	76	1230	2
#3	2	339	538	76	1220	3
#4	4	339	538	76	1193	6
#5	6	339	538	76	1170	8



写真-2 古紙入り GP-1 溶液の様子

4.2 実験結果および考察

圧縮強度試験、フロー試験の結果を図-5、図-6 にそれぞれ示す。図-5 より、材齢 1 日の圧縮強度については、今回検討した古紙を混和した 4 配(調)合ともベース配(調)合同等の強度が得られた。また、圧縮強度のばらつきに関しても差は見られなかった。これは 4.1 節で述べたように、GP-1 溶液に古紙が均一に分散され、偏りが出なかったためすべての試験体でこのような結果になったと考えられる。また、図-6 から、フロー値については、古紙置換率が増えるに従い小さくなり、流動性が悪くなる傾向を示していることがわかる。以上の結果より、本研究の範囲では流動性および強度発現性を総合的に勘案し、古紙混和は細骨材 2%置換を最適とした。なお、図-6 の前平均と後平均とは、フロー試験の打撃前(コーン引き上げ直後から 1 分経過後)と打撃後(規定の 15 回打撃後、1 分経過後)の平均を意味する。写

真-3 にベースモルタルと古紙 2%置換ジオポリマーモルタルのフロー試験の写真を示す。写真-3 から古紙 2%置換ジオポリマーモルタルは、ベースモルタルに比較して広がりが小さい。しかし、ベースモルタルは粘着性が高く、フローコーンや突き棒に付着する量が多い性状であった。

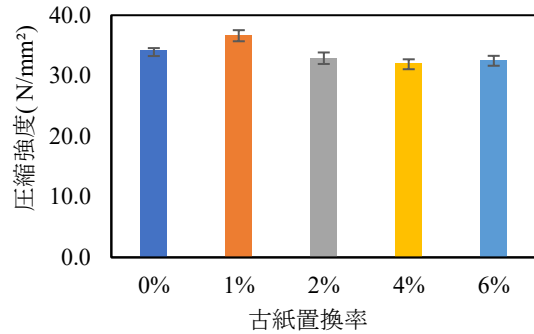


図-5 圧縮強度試験結果

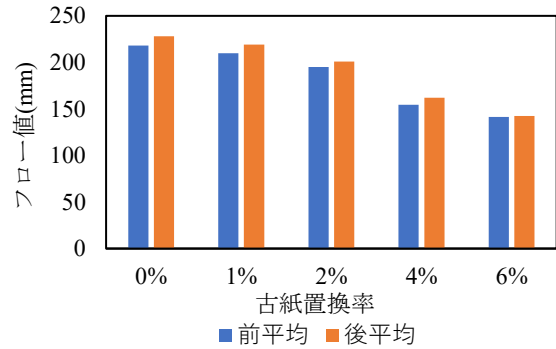


図-6 フロー試験結果



打撃前

打撃後

(a) ベースモルタル



打撃前

打撃後

(b) 古紙 2%置換ジオポリマーモルタル(#3)

写真-3 フロー試験

5. 古紙2%置換ジオポリマーモルタルの基本性状

ここでは、3章で決定した古紙を細骨材の2%置換したジオポリマーモルタル（以降、古紙2%置換モルタルと称す）について、強度特性、流動性・粘着性、吸水性、長さ変化に着目し、ベースモルタルと比較検討を行った。

5.1 強度特性

古紙2%置換モルタルの強度特性の検討として、材齢1日、3日、7日、28日の圧縮強度試験を行った。その結果を図-7に示す。この結果から材齢3日目までは古紙2%置換モルタルの圧縮強度は、ベースモルタルと比較し低い値を示しているが、材齢7日および28日では同等な強度を示した。ただし、ベースモルタルに対し低い強度ではあるが、材齢1日の目標強度(24N/mm²)は満足している。この理由については不明であるため、今後の課題とする。

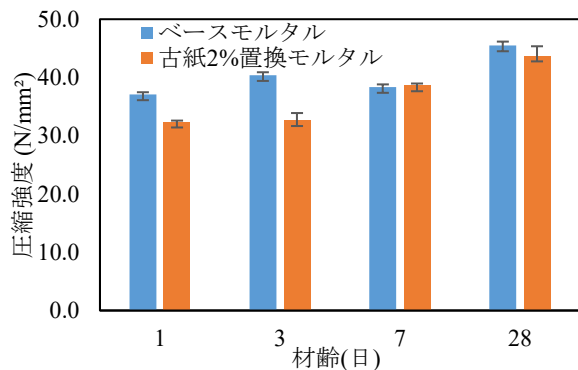


図-7 圧縮強度試験結果

5.2 流動性・施工性

(1) フロー値の経時変化

ベースモルタルと古紙2%置換モルタルの流動性の検討として、フロー値の経時変化試験を行った。本試験では4章の試験のように打撃は行わず、フローコーンを引き上げた後、1分後にフロー値を測定した。測定後、すぐに材料を容器に戻し練り混ぜ、再度フローコーンに詰め、フロー試験を行った。材料の練り混ぜ開始から10分後に1回目の計測を行い、これを10分間隔で合計6回行った。

図-8にフロー値の経時変化を示す。その結果、4章同様、古紙2%置換モルタルのフロー値はベースモルタルに比較し小さな値を示している。しかし、古紙2%モルタルのフローロス率は6%、ベースモルタルのフローロス率は10%と、わずかではあるが古紙2%置換モルタルの方がフローロスは小さく50分経過後もほぼ同じフロー値であった。このことからジオポリマーコンクリートとした場合においても、古紙を混和することで経時的な作業性の低下を低減できる可能性が示唆される。

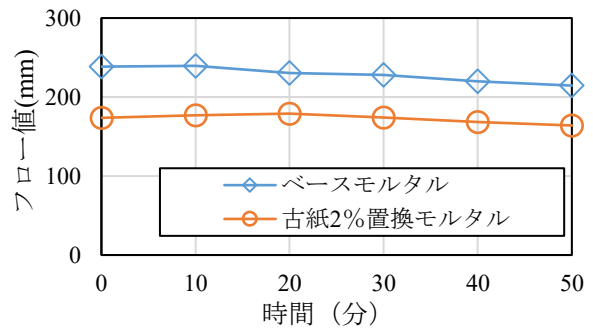
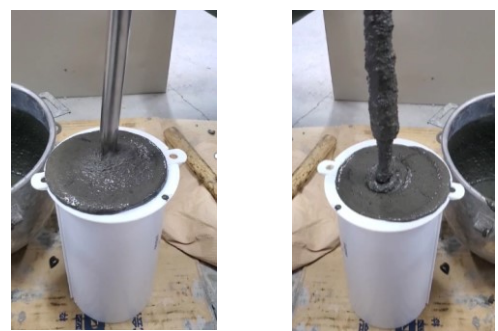


図-8 フロー値の経時変化

(2) 粘着性

一般にジオポリマーコンクリート・モルタルのフレッシュ性状として、粘着性が高く、施工性が悪いことが知られている⁴⁾。そこで本研究では、古紙を混和することで、その性質が変化するか定性的な評価を行った。評価方法としては、ベースモルタルと古紙2%置換モルタルをφ10cm×20cmの円柱供試体に詰め、突き棒で突いて引き抜いた際の突き棒への粘着性を目視観察した。その結果を写真-4に示す。この結果から、ベースモルタルは、突き棒を引き抜いた際、かなりの量のモルタルが突き棒に付着し、粘りのある挙動を示しているのが確認できる。それに対して古紙2%置換ジオポリマーモルタルは、突き棒にほとんど付着せず、粘着性が改善されているのがわかる。これは古紙の繊維効果や古紙の成分であるセルロースやリグニンが影響していると考えられるが、詳細については今後の検討課題である。



突き棒を突いた状態 突き棒を抜いた状態
(a) ベースモルタル



突き棒を突いた状態 突き棒を抜いた状態
(b) 古紙2%置換ジオポリマーモルタル(#3)

写真-4 粘着性の定性評価

5.3 吸水試験

本試験では、供試体寸法 φ100mm×H100mm の円柱とした。高温養生終了後脱枠をし、材齢 14 日まで 20℃ の環境下で封かん養生した後、シリコン系シーリング材を用いて供試体上面に吸水試験器（最小目盛 0.1mL、呼び容量 20mL、内径 75mm、断面積 4417.86mm²）を取り付けた（写真-5 参照）。

吸水試験器の上部から注水を開始し、注水完了時の目盛の読みを測定し、その後 5 分まで 1 分毎、20 分後まで 5 分毎、30 分後、60 分後から 60 分毎に 3 時間後まで水面の目盛の読みを測定した。累積吸水量 $W(\text{ml}/\text{cm}^2)$ は式(1)を用いて算出した。

$$W = \frac{L_0 - L_t}{A} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 L_0 は、注水完了時の目盛の読み(ml)、 L_t は t 分後の目盛の読み(ml)、 A : 吸水面積(cm^2)である。

一般的にジオポリマーコンクリートは、吸水性が普通コンクリートと比較し高いことが知られている⁵⁾ため、ここでは、28 日強度が同等なセメントモルタルとの比較も併せて示す。セメントモルタルの配(調)合を表-4 に示す。

図-9 に吸水試験の結果として累積吸水量の経時変化を示す(3 試験の平均値)。この図から、セメントモルタルに比較し、両ジオポリマーモルタルの吸水性が高いのがわかる。さらに、古紙 2%置換したジオポリマーモルタルは、ベースモルタルに比較し、吸水速度が速く、吸水量もベースモルタルに比べ、約 2 割程度大きくなることを確認できる。このことから古紙を混和したジオポリマーモルタルは、通常のジオポリマーモルタルやセメントモルタルに対して保水性があり、放射熱が低減できる可能性が示唆される。

表-4 セメントモルタルの配(調)合

W/C (%)	W	C	S
		(kg/m ³)	
60	251	418	1573
W/C:水セメント比, W:水, C:セメント, S:標準砂			



写真-5 吸水試験

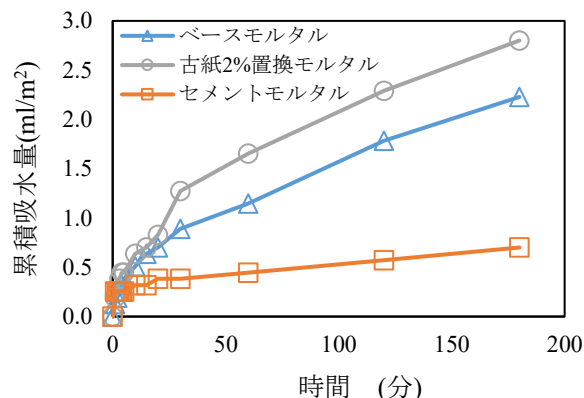


図-9 吸水試験結果

5.4 長さ変化試験

写真-5 に長さ変化試験に用いた試験体を示す。試験体は強度試験と同じ 4×4×16cm の試験体である。両側面に基長幅 10cm にゲージプラグを貼り付け、コンタクトゲージにて計測を行った。試験体はベースモルタル、古紙 2%置換モルタル、それぞれ 3 体製作し、2 側面にゲージプラグを貼り付け、配(調)合ごとの平均値とした。

また、試験は、温度約 20℃一定とし、湿度は、養生槽の関係で 70%以上 90%未満の範囲内で行った。

図-10 に長さ試験の結果を示す。この結果から、湿度が高い環境であるため両試験体とも吸水作用により、膨張傾向を示している。また、古紙 2%置換モルタルとベースモルタルを比較すると、古紙 2%置換モルタルの方が、長さ変化率は若干小さい。5.3 の吸水試験の結果は、古紙 2%置換モルタルがベースモルタルより吸水性が高い結果である。以上の結果から、古紙を混和することで、環境に応じた体積変化を小さくすることができ、ひび割れ発生リスクの抑制効果が期待できると考えられる。しかし、乾燥収縮の影響については、未確認のため、今後は乾燥した環境における長さ変化試験を行う予定である。



写真-6 長さ変化試験に用いた試験体

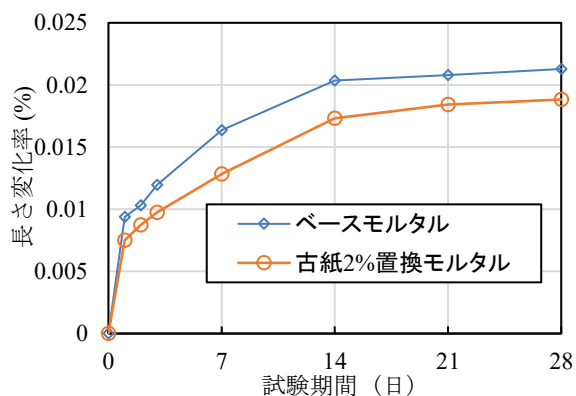


図-10 長さ試験結果

6. まとめ

本研究では、古紙の有効利用拡大かつ環境負荷低減が可能な建設材料の開発を目指し、古紙を混和したジオポリマーモルタルを対象に、強度特性、流動性・粘着性、吸水性、長さ変化に関する基礎的検討を行い、古紙の建設材料への適用可能性について検討した。また、本研究で使用したフライアッシュは沖縄県産であり、それを使用したジオポリマーの研究も初めてであるため、ベースモルタルの検討も併せて行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) ベースモルタルの活性フィラーとして沖縄県産フライアッシュおよびフライアッシュを10%置換した高炉スラグ微粉末を使用することで目標強度である 24N/mm^2 を十分に満足した。
- (2) 古紙は水に分散しづらいが、GP-1溶液中では分散しやすいことが確認できた。
- (3) 強度試験およびフロー試験の結果から、古紙の置換率は細骨材2%程度が最適と考えられた。
- (4) 古紙2%置換ジオポリマーモルタルの強度発現は、ベースモルタルと比較し、1日、3日強度は低いが、7日、28日強度は同等であった。この理由については不明であるため、今後の課題とする。
- (5) フロー値の経時変化について、古紙2%置換ジオポリマーモルタルはベースモルタルと比較し、わずかなではあるがフローロスが小さいことから、古紙を混

和することで経時的な作業性の低下を低減できる可能性が示唆された。

- (6) 古紙を混和したジオポリマーモルタル吸水性はベースモルタルよりも高くなることが確認できた。
- (7) 古紙2%置換ジオポリマーモルタルはベースモルタルに対し、高湿度下における長さ変化率が小さいことから、ひび割れ発生リスクの抑制効果が期待できる。

以上の結果から、古紙は建設材料(ジオポリマー)への適用できる可能性があることが分かった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、琉球セメント(株)にセメントをご提供頂いた。また、吸水試験においては、九州工業大学 合田寛基准教授にご指導頂いた。実験全般にわたり、琉球大学 須田裕哉准教授、当時同研究室4年次大城藤乃さんに協力頂いた。古紙の成分分析は京都府立大学 森林資源循環学研究室にご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 公益財団法人古紙再生促進センター HP : http://www.prpc.or.jp/recycle/waste_paper/ (2021.12.15 閲覧)
- 2) 一宮一夫：低炭素で高機能バインダーとしてのジオポリマー～セメント産業への期待～，セメント・コンクリート，No.890，pp.20-23，2020.4
- 3) 一宮一夫，津郷俊二，原田耕司，池田攻：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，p575-580，2011.
- 4) 一宮一夫：ジオポリマーの研究開発の現状，コンクリート工学，Vol.55，No.2，pp.131-137，2017.2
- 5) 藤原怜司，一宮一夫，佐藤光亮，原田耕司：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用するジオポリマーの吸水膨張性，土木学会西部支部研究発表会，V-037，pp.763-764，2019.3