

令和5年度「技術（シーズ）マッチング」中間報告会

取組1：

インフラ分野の脱炭素化に寄与する技術研究

テーマ：

副産物・廃棄物のみを主原料とする  
持続可能なジオポリマーコンクリートによる  
建設分野の脱炭素への取組

横浜国立大学大学院  
東京工業大学環境・社会理工学院

○藤山 知加子  
千々和 伸浩

# 研究の背景

## 1. 学術的背景 ジオポリマーコンクリートとは何か

ジオポリマー (GP) : 1970年代にJoseph Davidovits氏が提唱した材料 (約50年の歴史)

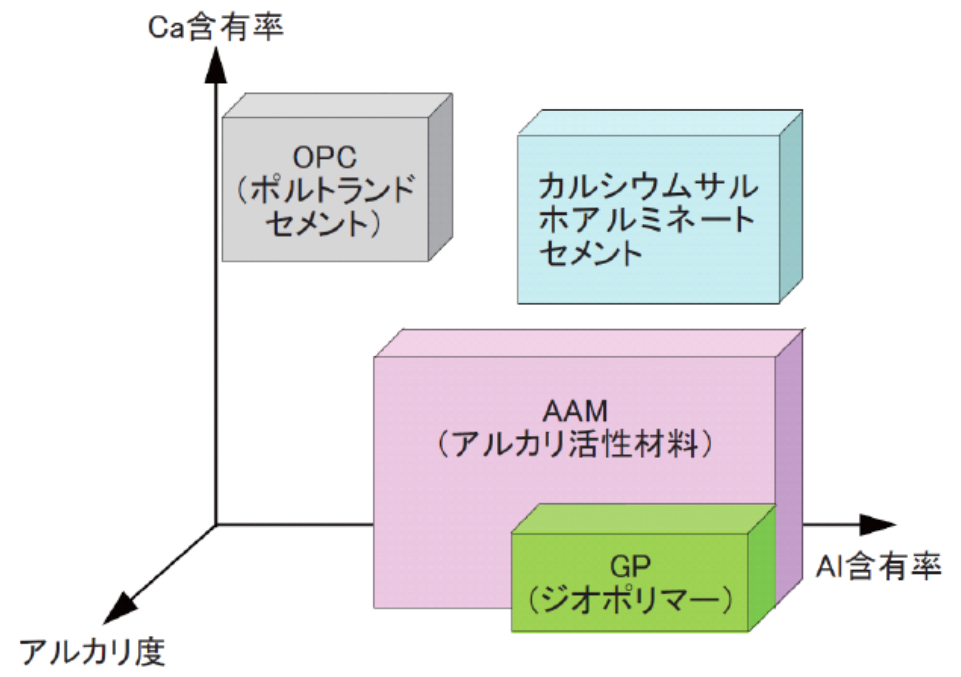


図 2.1.2 各種バインダーの Ca 含有率, Al 含有率, アルカリ度による分類 <sup>1) 2)</sup>

表 2.1.1 GP とセメントの硬化初期の状態の比較 <sup>1) 2)</sup>

GP	セメント
<ul style="list-style-type: none"> <li>・粒子を無機質の不定形ゲルで固めた構造</li> <li>・水の蒸発</li> <li>・主としてAlの溶出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・マジックファスナーのように粒子同士が絡み合った集合体</li> <li>・水の吸収</li> <li>・Caの溶出</li> </ul>

1) 土木学会2021年度重点研究課題「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究」報告書(2022.5) ISBN 978-4-8106-1081-9  
 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, Apr., pp.18-23, 2021

## 研究の背景

### 1. 学術的背景 ジオポリマーコンクリートとは何か

長所：

- 主材料（活性フィラーの粉体）は産業副産物を利用できる（**=低炭素**）
  - ・ **フライアッシュ（石炭灰）**
  - ・ 高炉スラグ微粉末 等
- 放射性廃棄物等の有害物質固定
- 優れた耐酸性
- 高い耐高温性
- 高いASR抵抗性 ※一部の報告
- 高い塩分浸透抵抗性 ※一部の報告

課題：

- コスト（アルカリ溶液等薬品類，給熱養生）
- 安全性（高濃度アルカリ溶液を使用）
- **フレッシュ性状（一般に高粘性）**
  - ↑ **施工技術開発**
- 材料の品質，設計・施工の規定やガイドライン類の整備不足
- **新しい材料であるため，長期耐久性の検討が十分でないという懸念**
  - ↑ **長期性能解明**

1) 土木学会2021年度重点研究課題「新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究」報告書(2022.5) ISBN 978-4-8106-1081-9

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, Apr., pp.18-23, 2021

様々な優れた特性を有するとされているが実用化への課題は多数

## 研究の概要

**A** 高吸水性粉体のジオポリマー固化技術の開発： **持続可能なジオポリマーコンクリート**

高吸水粉体として汚泥焼却灰を用いたジオポリマー製造に適した配合および養生条件を、実験により決定する。期間内に、目標圧縮強度30MPaを達成することを目標とする。

**B** プレパックド方式ジオポリマーコンクリートの開発： **施工技術開発** **施工技術検証**

粗骨材の実積率と、モルタルの流動性を確保し、プレパックド方式で十分な充填性を実現可能な配合を実験にて確定する。目標実積率は40%以上、モルタルフローは300mmとする。

**C** クリープ試験，疲労試験： **長期性能解明**

上記A,Bにて得られた材料に対し、含水比と応力比をパラメータとして、クリープ試験および疲労試験を実施する。クリープ試験は本研究期間終了後も5年以上継続する。

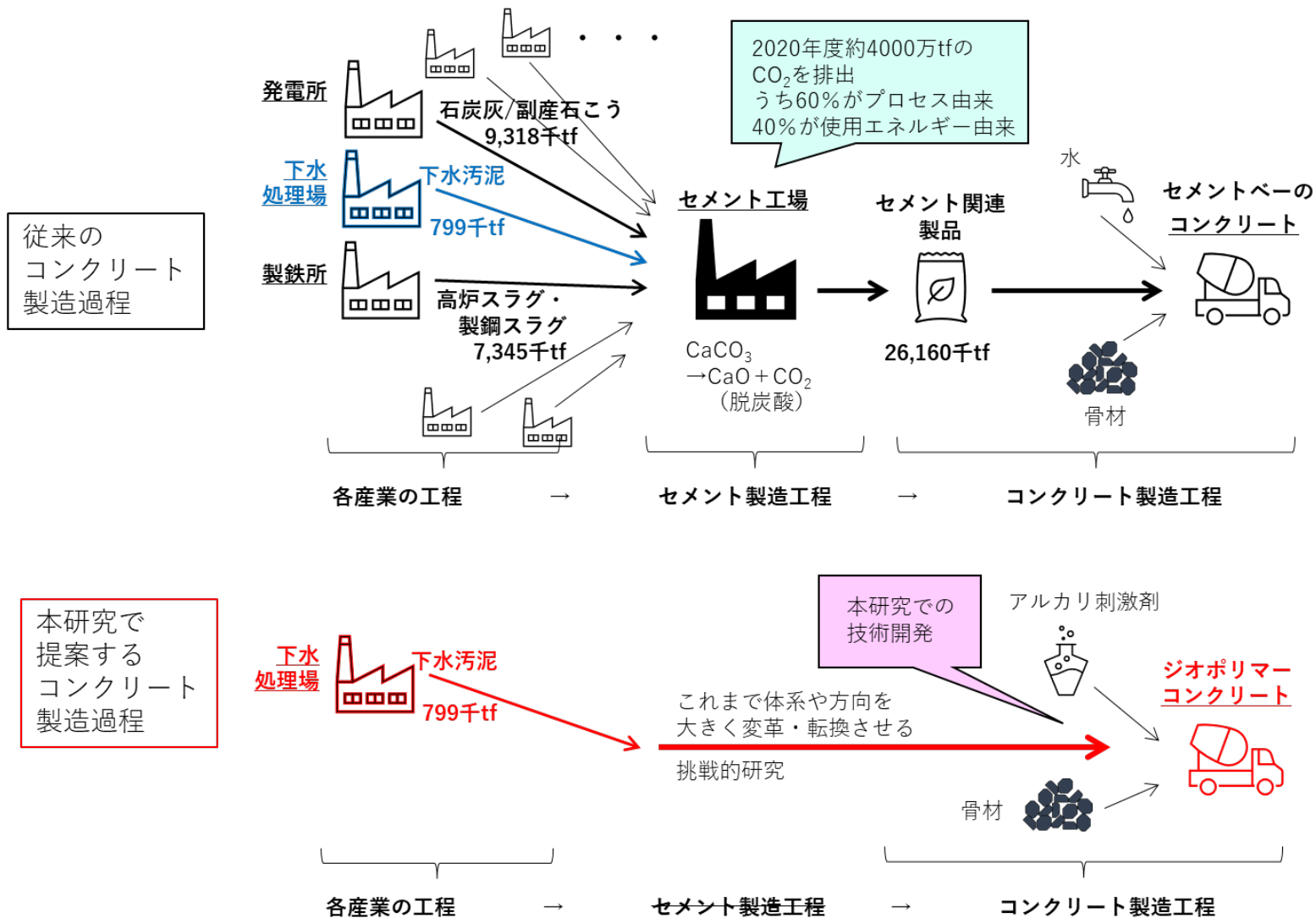
**D** 実環境における部材の長期計測およびシミュレーション： **長期性能解明**

実構造物スケールを想定した支間3m程度のジオポリマーコンクリート梁を作成し、負荷を与えた状態で屋外での温度湿度とともに長期の変形計測を行う。計測は本研究期間終了後も5年以上継続する。Cの室内試験結果およびシミュレーションとあわせて、ジオポリマーコンクリートのクリープ算出式を提案する。

## A 高吸水性粉体のジオポリマー固化技術の開発

# 1-1 高吸水性粉体のジオポリマー固化技術の開発

## A 高吸水性粉体のジオポリマー固化技術の開発：



[1] 野畑 健志, 高炉セメントのCO<sub>2</sub>削減効果について, コンクリート工学, 2010, 48 巻, 9 号, p. 9\_58-9\_61

キーワード：ジオポリマーコンクリート, フライアッシュ, 汚泥焼却灰

A 高吸水性粉体のジオポリマー固化技術の開発： 持続可能なジオポリマーコンクリート

高吸水粉体として汚泥焼却灰を用いたジオポリマー製造に適した配合および養生条件を，実験により決定する。期間内に，目標圧縮強度30MPaを達成することを目標とする。

1) 石炭灰（フライアッシュ）：FA

2) 汚泥焼却灰：SA

3) シリカフェーム：SF

4) 鋳物砂：SC

5) 珪砂：SSn

6) 天然砂：NS



図2-1 本検討で用いた焼却灰の外観

表 2-3 汚泥焼却灰の化学組成の一例

Constituents	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
%	1.3	4.1	15.3	19.8	32.0	3.2	14.9	1.4	7.5

キーワード：ジオポリマーコンクリート，フライアッシュ，汚泥焼却灰

# 1-1 高吸水性粉体のジオポリマー固化技術の開発

モルタル：S1, S2

表 2-8 シリーズ 1 および 2 配合

MIX ID	Fly Ash	Sewage Ash	Natural Sand	NaOH	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Extra Water	AA/FA
	kg	kg	kg	M	kg	kg	kg	-----
S1-1	400	-----	800	8	574	143	-----	0.5
S1-2	-----	400	800	8	574	143	-----	0.5
S2	-----	400	800	8	574	143	200	0.5

持続可能なジオポリマーコンクリート



(a) S1-1



(b) S1-2

ペースト：S4 ~ S6

表 2-8 シリーズ 4~6 配合

MIX ID	Sewage Ash	NaOH	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Extra Water	Superplasticizer	AA/FA
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
S4	1000	8	286	714	350	-----	1
S5	1000	16	286	714	400	-----	1
S6-1	1000	16	286	714	400	-----	1
S6-2	1000	16	286	714	350	10	1



(a) 練混水無



(b) 追加練混水有

焼却灰が高吸水粉体であるため、多くの追加練り混ぜ水を必要とする。



モルタル : S1, S2



持続可能なジオポリマーコンクリート

脱型中に破壊.

断面は粉っぽく、固化反応があったとは考えにくい

ペースト : S4 ~ S6



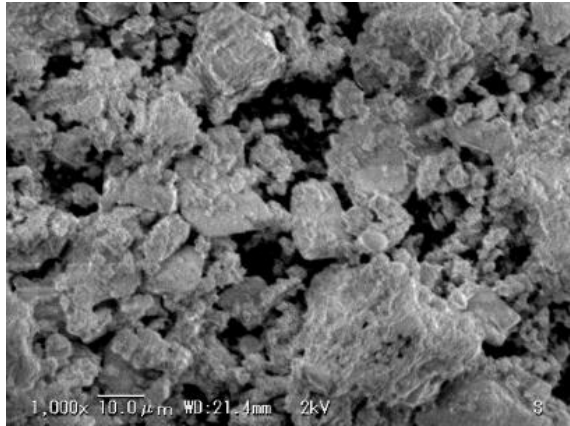
表面研磨中に破壊.

固化反応があったとは考えにくい

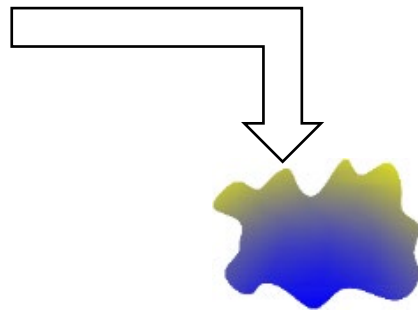
汚泥焼却灰単独ではジオポリマーのバインダーとはなり得ない (反応性・吸水性)

## シリカフェュームの混合

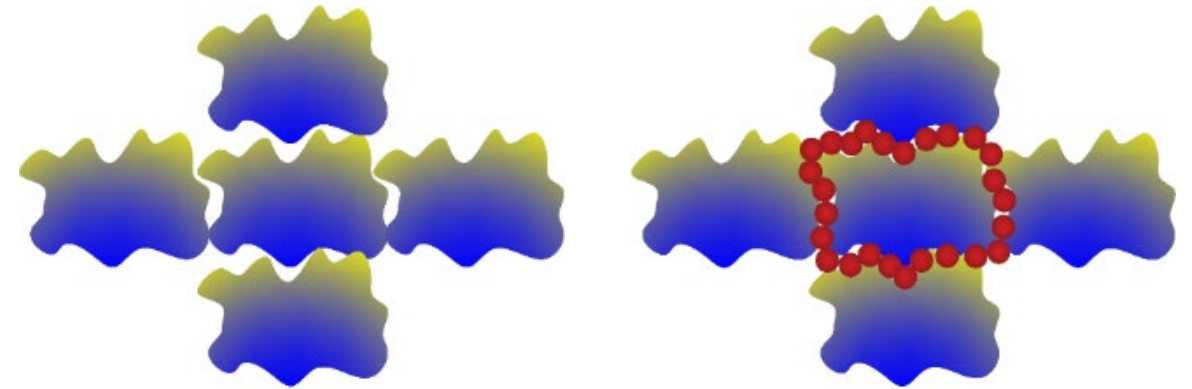
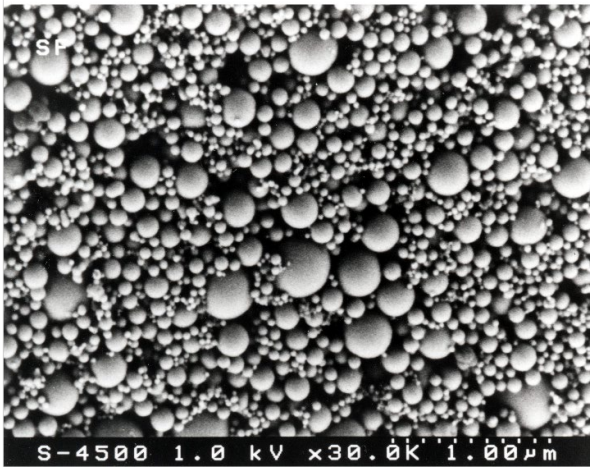
持続可能なジオポリマーコンクリート



汚泥焼却灰



シリカフェューム



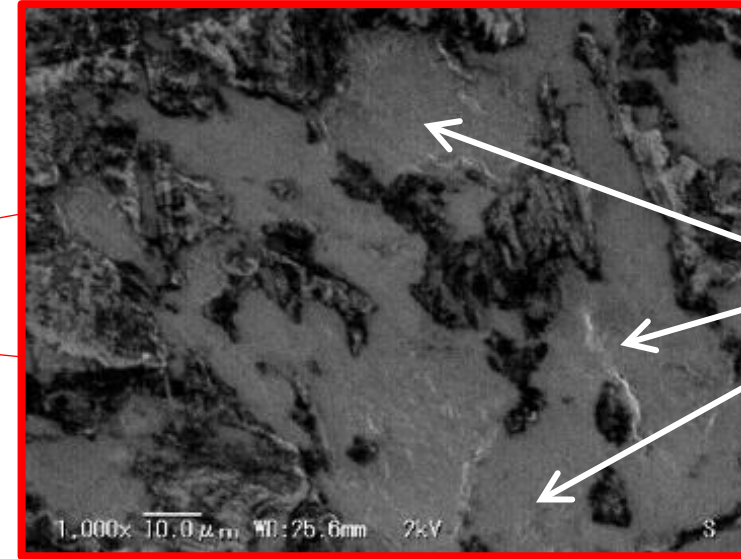
- 汚泥焼却灰の吸水抑制
- シリカ成分の供給

[https://www.jci-net.or.jp/photo/archive/detail\\_db.php?id=226&page=1](https://www.jci-net.or.jp/photo/archive/detail_db.php?id=226&page=1)

球形・微細シリカフェューム混合→シリカ供給だけでなく吸水抑制と流動性向上を期待

## シリカフュームの混合

持続可能なジオポリマーコンクリート



ジオポリマー  
バインダーで  
満たされている

表 2-9 シリカフュームを用いたシリーズ 7 配合

MIX ID	Sewage Ash	Silica Fume	NaOH	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Extra Water	AA/FA
	kg	kg	M	kg	kg	kg	-----
S7-1	500	500	8	171	429	300	0.6
S7-2	-----	1000	8	171	429	300	0.6

汚泥焼却灰の50%をシリカフュームで置換し固化成功。（ジオポリマー生成と推定）

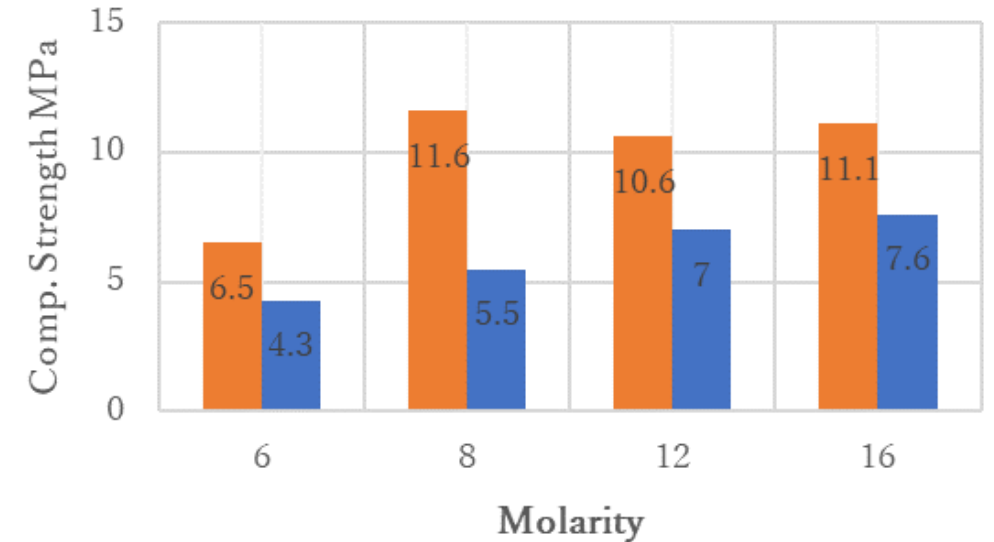
## シリカフェームの混合

- ◆ シリカフェームの置換率や、アルカリ溶液の濃度を変えた様々な配合で汚泥焼却灰入りジオポリマーを試作. . . .



持続可能なジオポリマーコンクリート

7 days comp. test



■ 50% SA+ 50% SF ■ 70% SA+ 30% SF

- ◆ データは順調に集まっているが、未だ目標の圧縮強度30MPaには至らず。

## 乾式混合法適用の試み

汚泥灰と同様に吸水性の高い火山性砂を用いて成功した「乾式混合法」を汚泥灰に適用する試み。



白:メタ, 茶:LU/SI



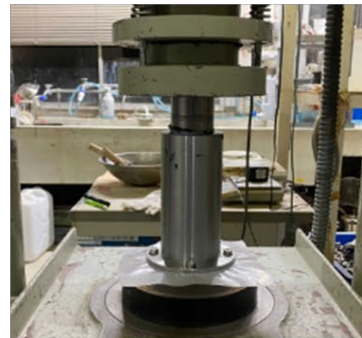
ドライミックス: 5分間



予熱: 50°C以上 (メタケイ酸ナトリウムの融点)



メタケイ酸ナトリウムが融解



型枠に詰め、圧縮



GP化



After 200 min



After 100 min



After 8 hr

C. Fujiyama, D. Kanai, Y. Cui and J. J. Ekaputri : Dry mix geopolymer processing for utilization of Indonesian volcanic mud, コンクリート工学 年次論文集 44 (1) 1090 - 1095 2022年7月 参照

乾式混合ではメタケイ酸ナトリウム (粉体) 溶解後の水分吸収が早く均一な固化が困難

## まとめ

持続可能なジオポリマーコンクリート

- ・ 汚泥焼却灰**単体では**バインダーとしての固化反応を得られない。
- ・ ジオポリマーバインダーとして実績のあるフライアッシュと併用する場合、アルカリ溶液を用いた通常法では、汚泥焼却灰の高吸水性により適切な練り混ぜが困難であった。
- ・ 一方、**シリカフェームとの併用では、縮重合反応によるとみられる固化体を得ることができた。**ただし目標とする圧縮強度30MPaはまだ達成できていない。
- ・ シリカフェームの置換率とアルカリ濃度は固化体の強度に影響を及ぼすが、その影響度は一様ではなく、さらなるメカニズムの分析が必要である。
- ・ 乾式混合法の適用を試みたが、現在までの検討では均一な固化体形成には至っていない。

## 今後の展望

- ①今年度得られた固化体の詳細な分析
- ②汚泥焼却灰に含まれるリン除去の検討

汚泥灰の固化利用の可能性が示唆された。

## B プレパックド方式ジオポリマーコンクリートの開発

**B** プレパックド方式ジオポリマーコンクリートの開発：施工技術開発 施工技術実証  
 粗骨材の実積率と、モルタルの流動性を確保し、プレパックド方式で十分な充填性を実現可能な配合を実験にて確定する。目標実積率は40%以上、モルタルフローは300mmとする。

1) 石炭灰（フライアッシュ）：FA

2) 汚泥焼却灰：SA

3) シリカフェーム：SF

4) 鋳物砂：SC

5) 珪砂：SSn

6) 天然砂：NS

プレパックドコンクリート (PPC)とは  
 最初に砂利をできるだけ多く詰めた型枠に、  
 流動性の高いモルタルを流して一体化させ  
 る手法で作るコンクリート

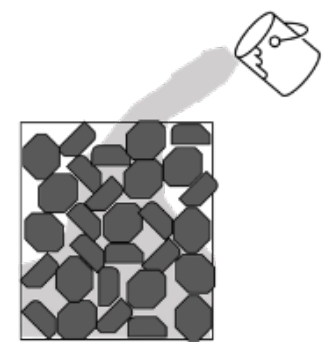


表 2-2 本検討で用いたフライアッシュの化学組成 (XRF)

Constituents	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
%	31.07	57.24	1.86	3.27	0.76	0.27	1.32	0.97	2.04	0.78

表 2-3 汚泥焼却灰の化学組成の一例

Constituents	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
%	1.3	4.1	15.3	19.8	32.0	3.2	14.9	1.4	7.5

キーワード：ジオポリマーコンクリート，プレパックド方式，自己充填



施工技術開発

施工技術実証

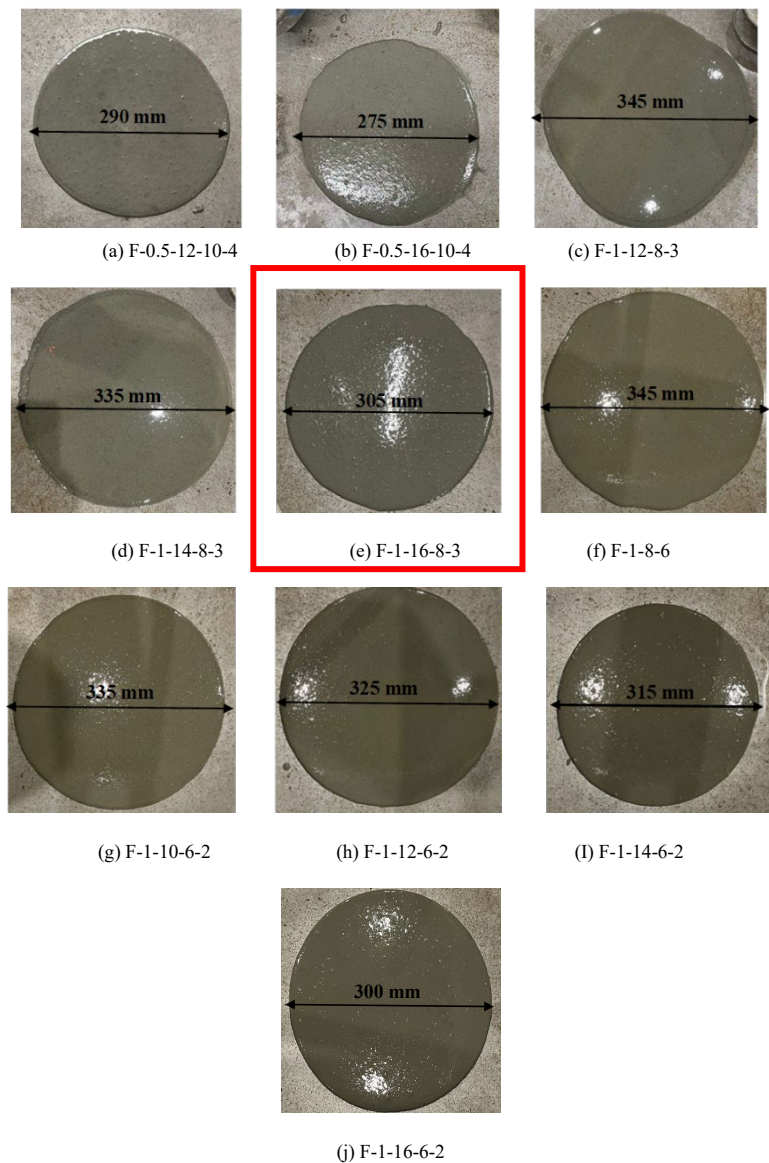


図3-2 モルタルフローの写真一覧

表 3-2 各配合のフレッシュ性状

Mix ID	$V_w/V_p^*$ ratio	$Sp/P^*$ ratio	Fly ash/sand ratio	Flow mm	Relative flow area Gm	Flow Time s	Relative flow speed Rm
F-0.5-12-10-4	1.07	4	0.5	290	7.41	10	1.00
F-0.5-16-10-4	1.04	4	0.5	275	6.56	14	0.71
F-1-12-8-3	1.02	3	1.0	345	10.90	7	1.43
F-1-14-8-3	1.00	3	1.0	335	10.22	8	1.25
F-1-16-8-3	0.99	3	1.0	305	8.30	9	1.11
F-1-8-6-2	1.01	2	1.0	345	10.90	7	1.43
F-1-10-6-2	0.99	2	1.0	335	10.22	8	1.25
F-1-12-6-2	0.98	2	1.0	325	9.56	11	0.91
F-1-14-6-2	0.96	2	1.0	315	8.92	13	0.77
F-1-16-6-2	0.94	2	1.0	300	7.99	15	0.67

\* $V_w/V_p$ =Volume of total water to volume of fly ash; \* $Sp/P$ = Dosage of superplasticizer

流動性が高く、かつブリーディングを生じない良好なジオポリマーモルタルを選定

施工技術開発

施工技術実証



(a) dry mixing



(b) dosage of alkaline



(c) water and superplasticizer

ジオポリマー組成物の製造方法

藤山知加子, 前川宏一, ガフォールムハマドタラ

出願人: 横浜国立大学

出願番号: 特願2021-129754(P2021-129754)

出願日: 2021年8月6日

公開番号: 特開2023-23855 公開日: 2023年2月16日

表 3-2 プレパックド方式ジオポリマーコンクリートの充填試験に用いた配合

Mix ID	Fly ash	Sand	NaOH	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Extra Water	Superplasticizer	W/GPS*	
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	M	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	type	
								Ratio	
F-1-16-8-3	722	722	16	124	310	58	22	PAE	0.342

開発技術をもとにプレパックドコンクリート用の自己充填モルタルを作成

施工技術開発

施工技術実証



体積率60%近い粗骨材に対し自己充填ジオポリマーモルタルの施工が可能

施工技術開発

施工技術実証

- 令和5年3月6日月曜日13時より
- 試験時外気温は13°C，湿度は40%
- 横浜国立大学構内
- 自己充填ジオポリマーモルタル（SCGM）の材料はすべて3.2の屋内充填試験で使用したのと同じであり，配合も表3-3のとおり
- 材料は施工直前まで温度20°C相対湿度60%の恒温室にて保管
- 練り混ぜは屋外に設置した2軸強制練ミキサにて実施
- 低温による粘性の増加や材料のこわばりはみられず



図 3-4 屋外での練り混ぜの様子

室内試験と同様の流動性の良好な流動性を有するSCGM

施工技術開発

施工技術実証



気温13°C程度の屋外でも自己充填性を確認

施工技術開発

施工技術実証

- ✓ 屋外で練り混ぜをおこなっても、実験室内での練り混ぜ時と同等のフレッシュ性状は得られた。材料を練り混ぜ直前まで適切な温湿度環境で保管することが重要である。
- ✓ 本研究で採用したプレパックド方式で施工するため時間経過に伴う粗骨材の沈み込み（材料分離）の懸念がなく、また開発したSCGMの配合ではブリーディングが生じないため、充填後の表面仕上げは浮いてきたわずかな気泡を除く程度の軽作業で済んだ。コンクリート施工における現場作業の合理化につながると考えられる。
- ✓ フライアッシュベースのジオポリマーの場合、養生温度にムラが生じれば、部位によって硬化程度にもばらつきが出る。施工数量が多くなる場合は、施工予定地の温度、また養生方法において、一層の工夫が必要である。



図 3-5 打ち込みから完成までの工程

試験施工によって本方式の要点と利点を確認し今後の課題を抽出

- ✓ 材料を練り混ぜ直前まで適切な温湿度環境で保管することが重要



冬期の材料加温を実施  
→フレッシュ性状に及ぼす影響を調査



- ✓ フライアッシュベースのジオポリマーの場合、養生温度にムラが生じれば、部位によって硬化程度にもばらつきが出る。



フライアッシュの一部を高炉スラグに置換  
→養生温度の影響を緩和



施工技術開発

施工技術実証

## まとめ

- 項目Bでは、具体的には、石炭灰をベースとした自己充填性を有する（高流動）ジオポリマーモルタル（モルタルフロー300mm以上）を製造し、粗骨材を積み上げた型枠に流し込む、プレパックド方式での充填試験を実施した。
- 当初は碎石骨材の容積比が40%程度以上での充填可能性を目標としていたが、結果として碎石骨材の容積比が60%を超えるよう最大限配置した状態でも、本研究で検討したSCGMが充填可能であることが確認された。
- また、数量を増加して屋外での試験施工も実施し、本方式の要点（材料の保管）、利点（現場作業の軽減）を確認し、今後の課題（養生方法の改善）を抽出した。
- 以上より、本項目では当初の目標を達成できたと言える。

**当初の目標を達成できたと言える。**



**C** クリープ試験, 疲労試験

**D** 実環境における部材の長期計測およびシミュレーション

**C** クリープ試験, 疲労試験: **長期性能解明**

上記A,Bにて得られた材料に対し, 含水比と応力比をパラメータとして, クリープ試験および疲労試験を実施する. クリープ試験は本研究期間終了後も5年以上継続する.

表 4-3 現場配合(表面水率 0.017%)

単位量(kg/m <sup>3</sup> )									
L			P		S	G		Air	
SS	SH	W	FA	BFS		G1	G2		
145	145	7	545	61	7	607	372	0	

ジオポリマーコンクリートの時間依存変形特性に関する基礎的知見を得るため, 標準配合に基づいて作成した円柱試験体に持続載荷を実施.



写真 4-1 ジオポリマー試験体作成状況

**キーワード: ジオポリマーコンクリート, クリープ試験**

長期性能解明

今年度予定より先行して  
装置の確認と計測を開始

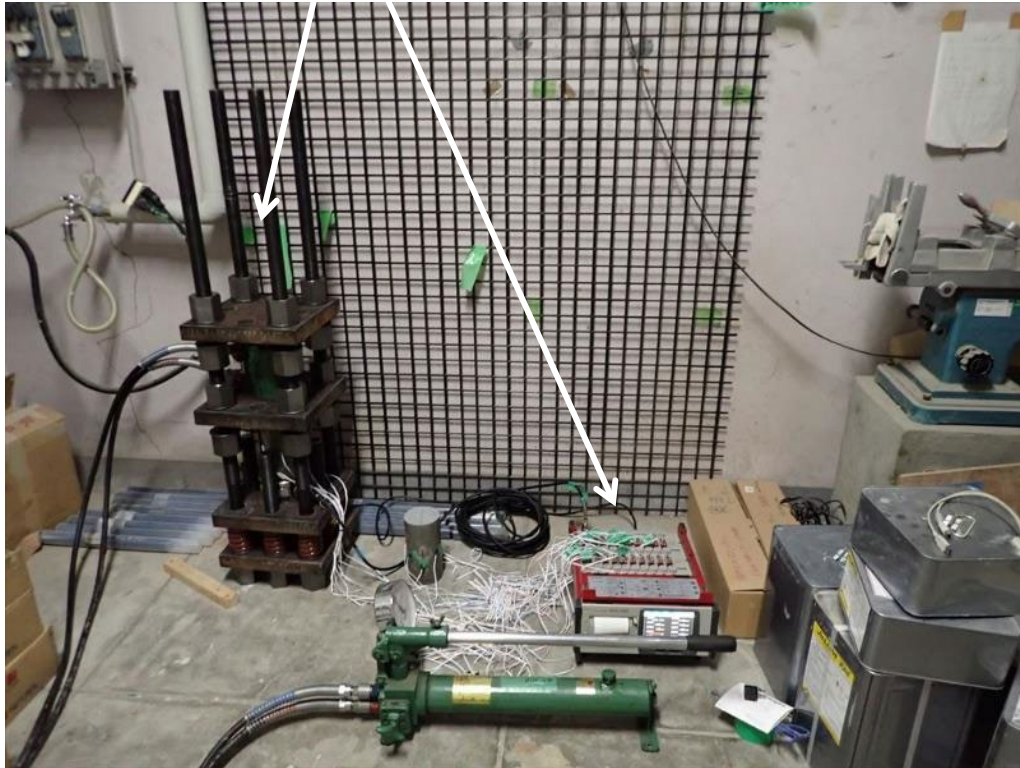


図 4-4 クリープ試験の様子

順調に計測中  
データ分析も開始

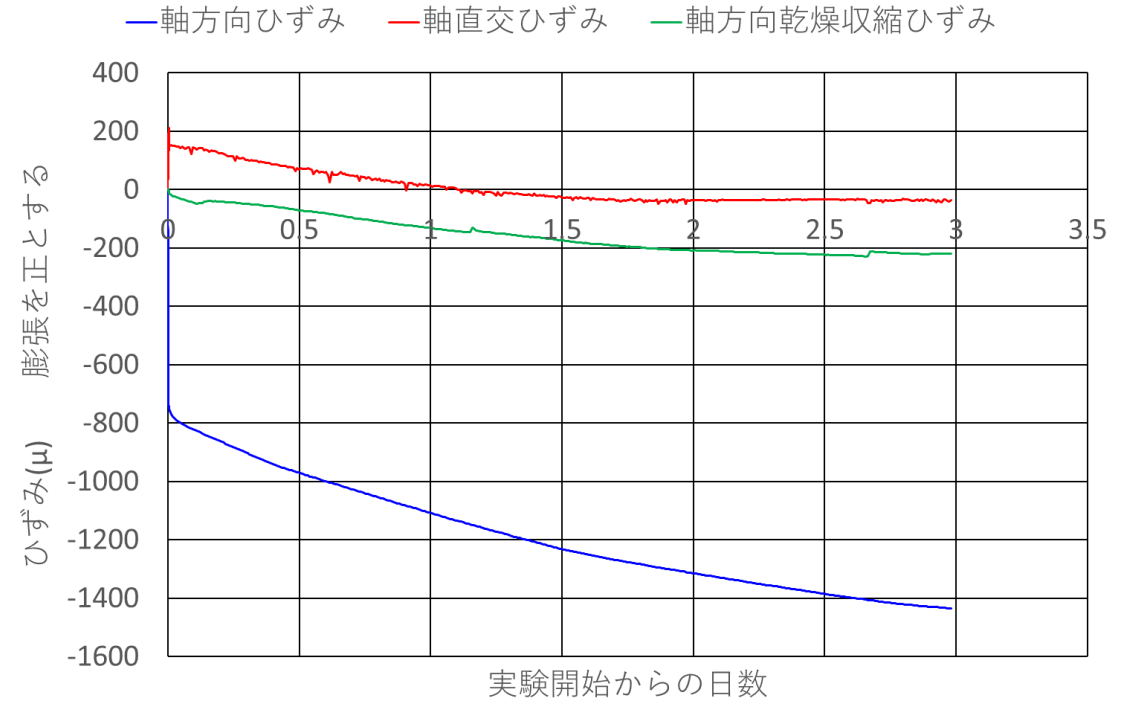
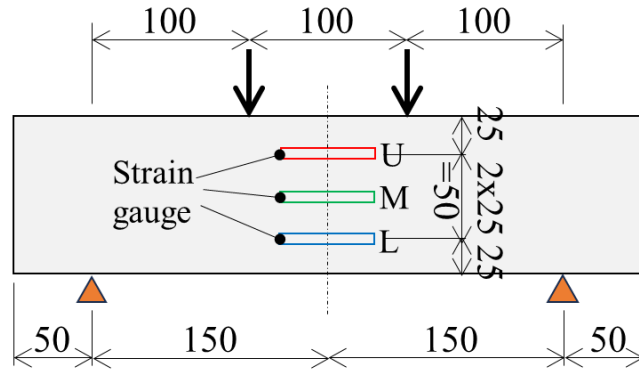


図 4-2 計測されたひずみの経時変化

ジオポリマーコンクリートに適用可能なクリープ試験の手順を確認

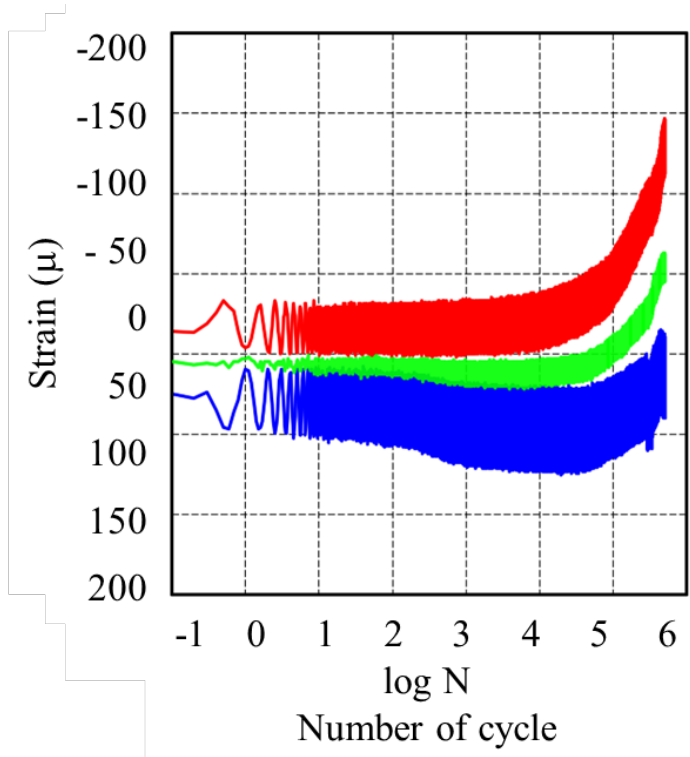
試験体寸法



疲労試験中の  
温湿度調整

長期性能解明

計測データ  
の例



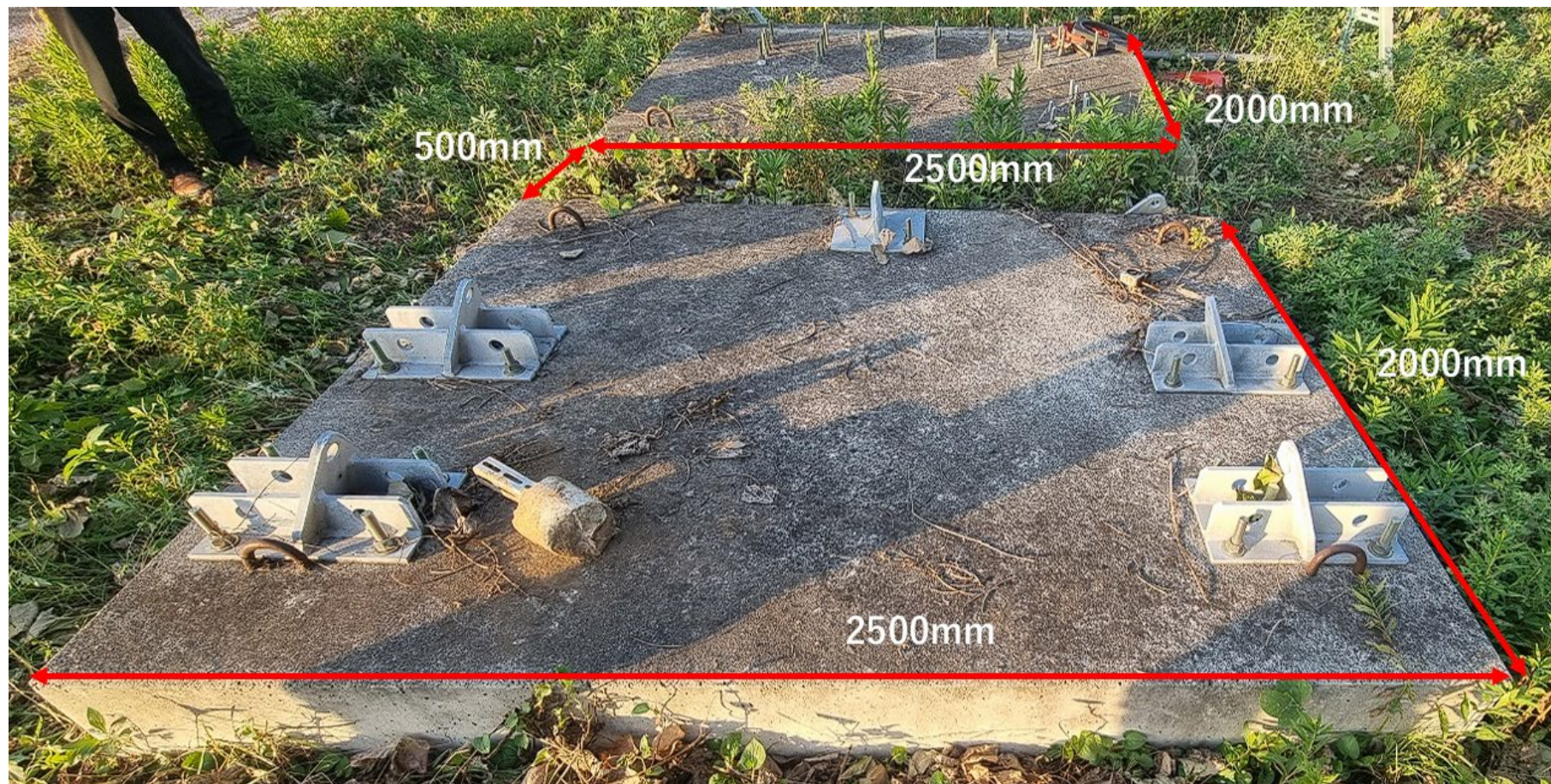
疲労試験の治具, 計測テストは実施済み. 試験体

長期性能解明

2023/09/29 技術事務所内の試験体設置予定場所を下見



実構造物スケールの実験イメージ



現在試験体配合および構造諸元の検討， 治具設計・製作の途上



実施項目	令和4年度	令和5年度	令和6年度
A.高吸水性粉体のジオポリマー固化技術の開発 持続可能なジオポリマーコンクリート	←→	←→	延長継続
B.プレパックド方式ジオポリマーコンクリートの技術開発 施工技術開発    施工技術実証	←→	←→	予定通り達成
C.クリープ試験, 疲労試験    長期性能解明	前倒し	←→	←→
D.実環境における部材の長期計測およびシミュレーション 長期性能検証	スタート	←→	←→

注) 項目A.およびB.の検討は申請者の自主研究として採択前に着手していた。

全体としては概ね順調

## まとめ

- 申請当初に設定した項目A～項目Dについて、概ね予定どおり研究が進んでいる。
- 項目Aでは汚泥焼却灰用いたジオポリマー固化体を得ることができたが、目標強度は達成していないため、研究を継続している。
- 項目Bではプレパックド方式ジオポリマーコンクリートの開発に成功し、目標を達成した。また、屋外試験施工より実用化に向けた課題を抽出し、実用配合も概ねめどがたった。
- 項目Cは当初予定より先行して開始し、通常のコングリートよりもヤング係数が低いとされるジオポリマーコンクリートにも適用可能なクリープ試験法、疲労試験法を確認することができた。
- 項目Dは本助成期間終了後も継続する長期的な研究であるため、慎重に計画を進めている。