

現場加温養生を施したジオポリマーモルタルの実物大施工実験に関する報告

吉丸 将司*1・南 浩輔*2・梶田 秀幸*3

Report on experiment of actual size of geopolymer mortar subjected to heating curing in site

Masashi YOSHIMARU, Kousuke MINAMI, Hideyuki KAJITA

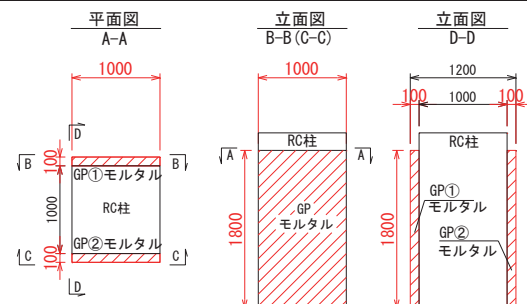


図-1 GP 試験体

表-1 試験に使用した GP 供試体

供試体名	作製・採取場所	養生場所	養生方法	本数
現場コア	現場	現場	加温養生	4本×3列=12本※
現場加温			加温養生	
現場常温			常温養生	
室内加温	室内	室内	加温養生	4本

※コアは上部、中部、下部でそれぞれ4本ずつ採取した。

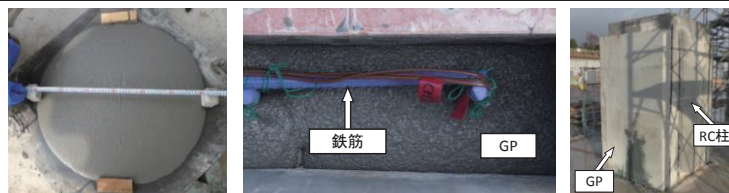


写真-1 施工実験状況

(左からスランプフロー試験、打込み時の流動状況、脱型後状況)

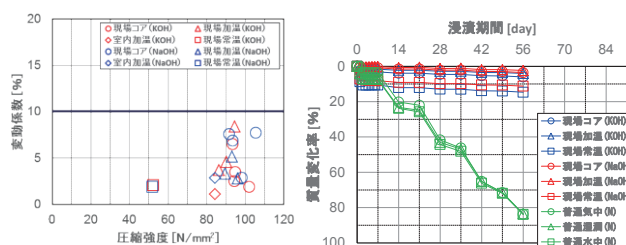


図-2 圧縮強度試験および塩酸浸漬試験結果

研究の目的

ジオポリマー（GP）硬化体はフライアッシュや高炉スラグ微粉末等の鉱物質微粉末とケイ酸アルカリ溶液を混合することで製造できる。近年、GP の基礎理論や実用化に向けた研究が行われている。しかし、実現場での施工性（配合の検討ならびに製造、打込み、養生、脱型）や現場加温養生を施した GP の品質の確認などの現場施工を想定した研究は少ない。そこで、それらを確認するため、施工実験を実施した。

技術の説明

施工実験は、RC 柱(W:D:H=1.0m:1.0m:2.0m)に GP モルタルを増打ちし、現場加温養生を施すことで GP 試験体(W:D:H=1.0m:0.1m:1.8m)を作製するものである(図-1)。現場打設するにあたり、配合の検討を行い、開発した GP のハンドリング性能向上を目的とした混和剤を適用した。現場で製造した GP モルタルの流動性はスランプフロー試験(管理値:65cm±5cm)により管理した。GP 試験体の厚さが薄いためパイプレータによる締固めは困難と判断し、自己充填により打込みを行った。現場加温養生はケーブル状電気ヒーターおよび断熱材を用いて実施した。脱型性は GP 専用離型剤とビニール性フィルムを用いて確認した。現場加温養生を施した GP 試験体の品質は強度発現性(圧縮強度)および品質安定性(変動係数)ならびに耐久性(耐薬品性)を確認した。

主な結論

- ・流動性を保持した自己充填による打込みが可能である。(写真-1 中央)
- ・室内養生と同程度の熱量を現場加温養生により付与することができる。
- ・適切な型枠離型剤を用いることで脱型性の確保が可能である。(写真-1 右)
- ・現場加温養生を施したコア供試体は室内試験と同等の圧縮強度が得られる。(図-2 左図)
- ・現場加温養生を施したコア供試体は室内試験と同等の耐薬品性が得られ、かつ GP 供試体は加温養生を施すことで耐薬品性が向上する。(図-2 右図)

*1 本店 土木事業本部 土木設計部
*3 本店 技術研究所 材料研究室

*2 本店 成長戦略室

現場加温養生を施したジオポリマーモルタルの 実物大施工実験に関する報告

吉 丸 将 司 *¹ 南 浩 輔 *²梶 田 秀 幸 *³

要 旨

ジオポリマー法による硬化体は、石炭灰や高炉スラグなど産業副産物を活性フィラーとして大量に使用でき、かつ一般的なコンクリートと比較して80%もの二酸化炭素発生量の削減が可能である。近年、基礎理論や実用化に向けた研究が行われているが、実物大規模のジオポリマーの施工性（配合検討ならびに製造、打込み、養生、脱型）や現場加温養生による品質の確認など、現場施工を想定した報告は極めて少ない。そこで、これらの確認を目的とした施工実験を実施した。その結果、①流動性を保持した自己充填による打込みが可能である、②室内養生と同程度の熱量を現場加温養生により付与することができる、③適切な型枠離型剤を用いることで脱型性の確保が可能である、④現場加温養生を施したコア供試体は室内試験と同等の圧縮強度が得られる。また、追加実施した塩酸浸漬試験結果より、⑤コア供試体は室内試験と同等程度の耐薬品性が得られ、かつジオポリマー供試体は加温養生を施すことで耐薬品性が向上することを確認した。

キーワード ジオポリマー／加温養生／現場打ち／実物大／高強度／耐薬品性

目 次

- | | |
|-----------|-----------|
| 1. はじめに | 4. 施工実験結果 |
| 2. GPの概要 | 5. まとめ |
| 3. 施工実験概要 | |

REPORT ON EXPERIMENT OF ACTUAL SIZE OF GEOPOLYMER MORTAR SUBJECTED TO HEATING CURING IN SITE

Masashi YOSHIMARU
Hideyuki KAJITA

Kosuke MINAMI

Synopsis:

Hardened by the geopolymer method can use industrial by products in large quantities, such as coal ash (fly ash) and blast furnace slag, and compared with ordinary concrete, it is possible to reduce 80% of carbon dioxide generation. Recently, research on basic theory and practical application has been conducted. But, there are very few reports of the constructability and checking of the quality by heating curing in site. Then, the construction experiment aiming at checking these was conducted. At the result, ①self-filling placing with fluidity is possible, ②heating curing in site can give the same quantity of heat as laboratory. ③Using an appropriate mold release agent can releasability. ④the compressive strength of the core which conducted heating curing in site had discovered intensity comparable as laboratory. Moreover, by the conducted hydrochloric acid immersing test results, ⑤the core which conducted heating curing had gain the chemical resistance comparable as laboratory and conformed they are improved in chemical resistance by heating curing.

* 1 本店 土木事業本部 土木設計部

* 2 本店 成長戦略室

* 3 本店 技術研究所 材料研究室

1. はじめに

資源の乏しい我が国において、電力の安定供給として石炭火力発電は重要な役割を占めている。石炭火力発電所から排出される石炭灰の量は年々増加傾向にあり、埋立て処分場の受入れ容量の確保が困難となってきた¹⁾。そのため、火力発電所の継続的な運転には、石炭灰の有効利用用途の多様化が求められている。

近年、新たな石炭灰の有効利用方法としてジオポリマー（以下、GP と略す）が注目されている。GP は、フライアッシュ（以下、FA と略す）や高炉スラグ微粉末（以下、BS と略す）などの鉱物質微粉末（以下、活性フィラーと略す）とケイ酸アルカリ溶液を混合することにより硬化する現象を利用した硬化体である。製造にセメントを使用しないため、製造時における CO₂ 排出量は 80%低減でき²⁾、かつ石炭火力発電所で排出される FA や、銑鉄の際に発生する BS などの産業副産物を大量に使用できる³⁾。そのため、GP は、CO₂ 排出量の低減による低炭素社会の推進および産業副産物の再生利用・再利用による環境負荷の低減など社会貢献度が高い技術と考えられる。

GP は、配合により強度や耐久性を調整することが可能であるが、加温養生を施すことでより短い時間で高い強度が得られ、耐久性が向上する。また、セメント系材料と比較すると、耐薬品性に優れるといった性質を有している⁴⁾。これらの性質を活かし、まくら木や酸性土壌における道路境界ブロックなど、プレキャスト製品を中心とした適用性の検討が進められている⁵⁾。⁶⁾。このような中、試験体を用いた GP の物性や材料特性に関する研究は数多く報告されているが、現場における施工性や現地での加温養生が GP の品質に与える影響に関する研究は極めて少ない。

本報告では、主に以下の 2 点に着目し、GP モルタルを用いた実物大規模の施工実験を実施した。

- 1) 施工性（配合検討、製造～打込み～養生～脱型）
 - 2) 現場加温養生を施した GP 試験体の品質（強度発現性および安定性ならびに耐久性）
- 以下、得られた結果を報告する。

2. GP の概要

GP の硬化概念図を図-1 に示す。GP は 1970 年～1980 年代にフランスの Davidvits により提唱された無機ポリマーである。GP 硬化体は、活性フィラーと水ガラスおよび水酸化カリウム（以下、KOH と略す）、あるいはシリカフュームおよび水酸化ナトリウム（以下、NaOH と略す）を用いたケイ酸アルカリ溶液を混合し、活性フィラーから溶出した金属イオンがケイ酸モノマーと縮重合化（ポリマー化）することにより得られることから、セメントと水の水和反応とは異なる硬化過程を有している⁷⁾。

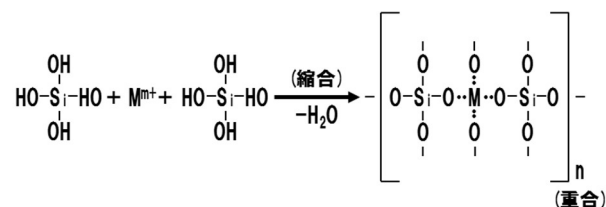


図-1 GP 硬化概念図

3. 施工実験概要

3.1 GP 試験体諸元

本実験では、RC 柱（W:D:H = 1.0m : 1.0m : 2.0m）に GP モルタルを柱 2 面に増打ちし、打込み完了後の GP 試験体（W:D:H = 1.0m : 0.1m : 1.8m）に鉛直型枠表面から加温養生を施した。本実験における GP 試験体を図-2 に示す。各面に打設した GP モルタルはケイ酸アルカリ溶液の種類が異なる GP①（KOH 配合：KOH＋水ガラス）、GP②（NaOH 配合：NaOH＋シリカフューム）を用いた。

また、GP モルタルの打込み面には、鉄筋（D13、SD345）を一段配筋した。概略配筋図を図-3 に示す。

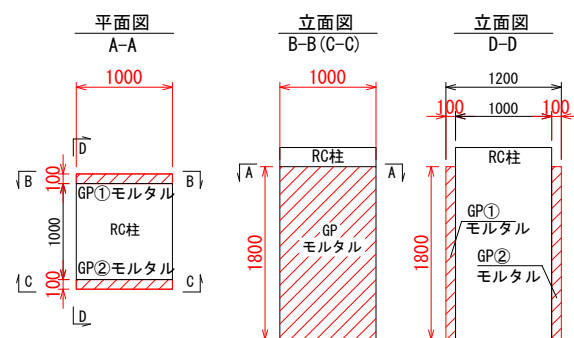


図-2 GP 試験体

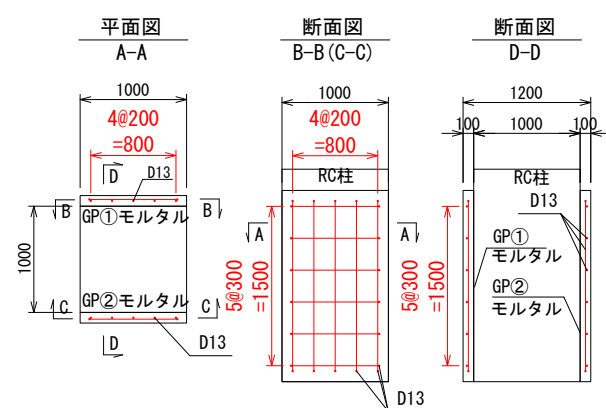


図-3 概略配筋図

3.2 GP モルタルの施工性

(1) 配合

本実験に用いた使用材料を表-1 に、配合表を表-2 に示す。GP は凝結が速いことから⁸⁾、施工性を確保する

ための配合検討と共に、ハンドリング性能の向上を目的とした GP 専用の混和剤を開発し、本実験で初適用した。また、本実験では GP 試験体の厚さが 10cm と薄く、鉄筋も配置されているため、パイプレータによる締固めは困難と判断し、充填性を確保するために自己充填性の高い配合を選定した。

GP モルタルの流動性は 1 バッチ毎にスランプフロー試験 (JIS A 1150) により管理した。管理値はスランプコーンの引き上げ後 2 分経過した時点の測定結果が $65 \pm 5\text{cm}$ の範囲内に収まるように管理した。また、参考値として、50cm フロー到達時間の測定ならびに空気量試験 (JIS A 1128) を実施した。

表-1 使用材料

種別	材料	物性値
活性フィラー	FA I 種	密度: 2.40g/cm^3 比表面積: $5470\text{cm}^2/\text{g}$
	BS (石膏添加: 無)	密度: 2.91g/cm^3 比表面積: $4160\text{cm}^2/\text{g}$
ケイ酸アルカリ溶液	KOH+水ガラスもしくは NaOH+シリカフュームの混合液	密度: $1.32\sim 1.44\text{g/cm}^3$
細骨材	静岡県産珪砂	絶乾密度: 2.63g/cm^3 粗粒率: 2.55

表-2 本実験で用いた GP モルタルの配合※

名称	配合種類	A/B [%]	B/S [%]
GP①	KOH 配合	43.2	78.1
GP②	NaOH 配合	48.0	81.3

※B: 単位粉体量 (FA および BS), S: 細骨材量,
A: ケイ酸アルカリ溶液量

(2) 製造および打込み

GP モルタルの製造には強制 2 軸式ミキサー (容量 100 リットル) を用いて、各配合で 3 バッチ (100 リットル/バッチ) 連続で製造した。練混ぜ方法は、珪砂、FA、BS を投入し空練りした後、ケイ酸アルカリ溶液を投入し本練りを行った。本練り終了後、混和材を投入し、最終練りを行った。

打込みは、型枠天端にシュートを設置し GP モルタルを自由落下させた。また、3.2(1)で述べたように、パイプレータを用いた締固めは困難と判断したため、自己充填による打込みとし、打込み開始時から完了まで流動性の低下がないか、そして脱型後に未充填部分や打込み時間の経過に伴うコールドジョイントの発生がないか確認した。

(3) 現場加温養生

図-4 に GP の圧縮強度と積算温度の関係を示す。図-4 より、GP では圧縮強度と積算温度に相関性が認められないことがわかる。セメント系材料と異なり、GP の加温養生条件はピーク温度と加温時間の両方に注意を払う必要がある。そこで、本実験では既報⁹⁾を参考に、 80°C 、12 時間相当の加温が施せるよう、加温システムは温度調節および長期的な動作が可能な仕様とし、温度制御装置を有するケーブル状電気ヒーターを鋼製型枠に敷設した。また、加温養生中の鋼製型枠面および打込み表面からの放熱対策として、断熱材を設置した。

GP 試験体の加温状況をモニタリングするため、GP 試験体の内部温度を熱電対により計測した。図-5 に内部温度の計測位置を示す。なお、温度管理は試験体中心を用いた。

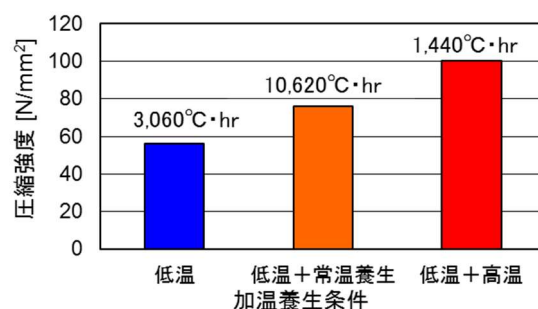


図-4 圧縮強度と積算温度の関係

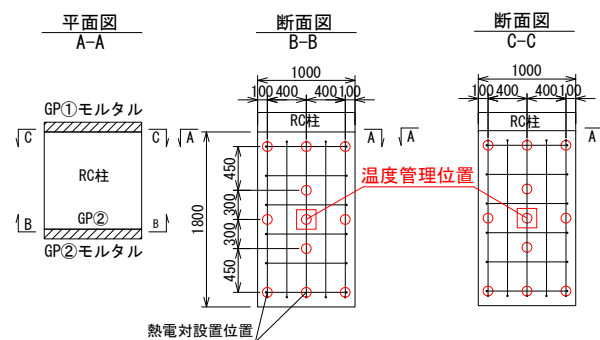


図-5 GP 試験体内部の温度計測位置

(4) 脱型

図-6 に型枠図を示す。既報¹⁰⁾より、GP はセメント系材料に用いられる油性の型枠離型剤では脱型性が不足し、場合によっては欠けが生じるなどの不具合につながる。そのため、本実験ではワックス系の型枠離型剤を使用すると共に、表面の仕上りの向上を目的として、型枠面の一部にビニール性フィルムを適用した。なお、本報告における脱型性とは、脱型のし易さの程度を示すものである。

また、図-6 に示す通り、鋼製型枠のサイズによる脱型性の違いや型枠建込み時の手間などを比較するため、寸法の異なる 2 種類の鋼製型枠を用いた。

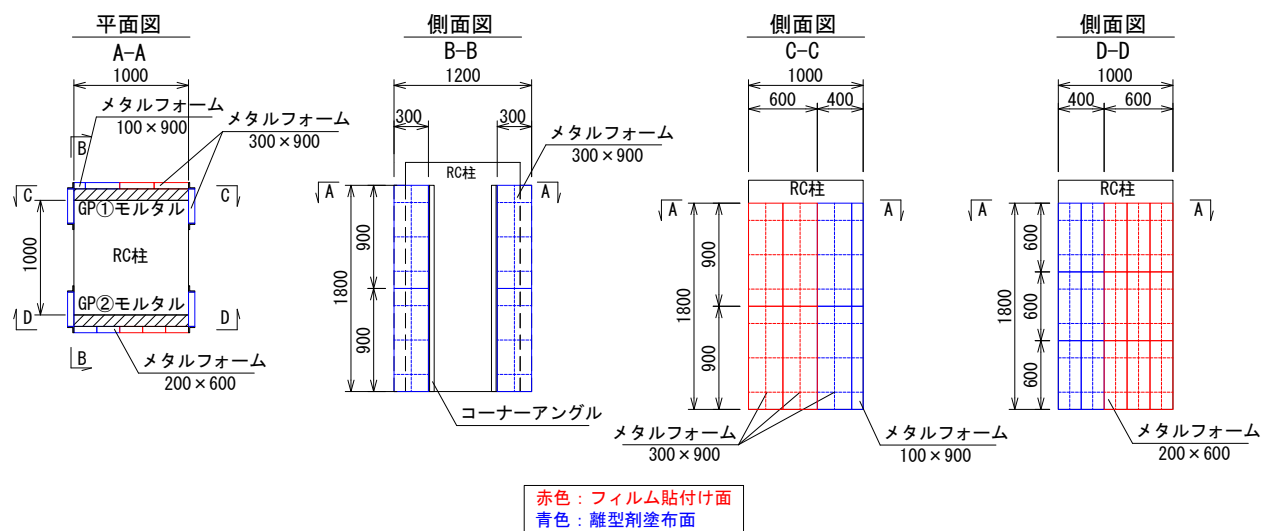


図-6 型枠図

表-3 圧縮強度試験に用いた GP 供試体

供試体名	作製・採取場所	養生方法	養生場所	試験実施時材齢	本数
現場コア	現場	加温養生 (加温システム)	現場	28 日	4×3=12 本※1
				91 日	4 本
現場加温 (供試体)	現場	加温養生 (電気炉)	室内	1 日	4 本
				28 日	4 本
				91 日	4 本
室内加温 (供試体)	室内	加温養生 (恒温恒温槽)	室内	1 日	4 本
現場常温 (供試体)	現場	常温養生 (空調管理:20℃)	室内	28 日	4 本

※1：各採取位置（上部・中部・下部）でグルーピングし、それぞれの平均値を結果として用いた。

3.3 試験体の品質

GP 試験体の強度発現性および耐久性について、圧縮強度試験方法（JSCE-G505）ならびに塩酸浸漬試験方法（ポリマーセメントモルタルの耐薬品性試験方法（案） JCI 規準集 2004）¹²⁾に準拠し、現場コアと各供試体（現場加温、室内加温、現場常温）の比較検討を実施した。なお、使用機器は異なるが、現場・室内のいずれも加温養生条件は 80℃、12 時間相当とし、常温養生は、室温 20℃で空調管理した室内で実施した。

(1) 圧縮強度試験

表-3 に圧縮強度試験に用いた GP 供試体の種類を示す。現場コアは、GP 試験体天端から 300mm（上部）、900mm（中部）、1500mm（下部）の位置でコアボーリングにより採取したものを指す。コアは各箇所から 8 本採取した。現場加温（供試体）は、現場で採取した供試体を電気炉を用いて加温養生したものであり、現場常温（供試体）は、現場で採取した供試体を室内で常温養生したものを指す。また、室内加温（供試体）

は、施工実験に用いた配合と同じ配合を用いて室内試験で採取したものを指す。いずれの供試体も寸法はφ 50×100mm である。

(2) 塩酸浸漬試験

GP 試験体の耐久性の評価においては、力学的な性質を表す圧縮強度に加えて、ポリマー化の程度の評価を目的として、塩酸浸漬試験による耐薬品性について確認した。なお、塩酸浸漬試験では、浸漬 1 週間以降は 2 週間に 1 回の頻度で塩酸溶液を全て交換している。

表-4 に塩酸浸漬試験に用いた供試体の種類を示す。モルタル供試体の作製は、セメントの物理試験方法（JIS R 5201）を参考とし、普通ポルトランドセメントを用いた（以下、普通モルタルと略す）。普通モルタルの養生条件は、気中養生（以下、普通気中と略す）、湿潤養生（以下、普通湿潤と略す）、水中養生（以下、水中養生と略す）とした。なお、製作時期の違いから GP と普通モルタルの塩酸浸漬試験の開始材齢が異なる結果となった。供試体の寸法は全てφ 50×100mm であ

表-4 塩酸浸漬試験に用いた供試体

供試体名	配合種類	養生方法	試験時材齢	本数
現場コア	GP	加温養生	σ69	4 本
現場加温		加温養生		
現場常温		常温養生		
普通気中	N	気中養生	σ33	4 本
普通湿潤		湿潤養生		
普通水中		水中養生		

表-5 フレッシュ試験結果および GP 試験体内部温度

配合	バッチ数	平均スランプ フロー[cm]	50cm フロー 到達時間[sec]	練混ぜ開始～ 打設完了時間[min]	空気量 [%]	温度管理位置における GP 最高温度[°C]
GP① (KOH 配合)	1	60.3	38.4	38	4.6	79.0
	2	63.4	31.9	34	4.5	
	3	61.9	30.3	27	4.6	
GP② (KOH 配合)	1	64.5	22.2	38	1.8	83.5
	2	68.7	12.8	27	2.4	
	3	65.0	17.3	25	2.3	



写真-1 スランプフロー試験状況

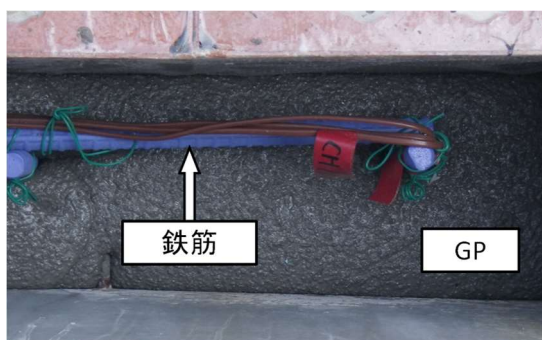


写真-2 GP モルタル打込み時の流動状況

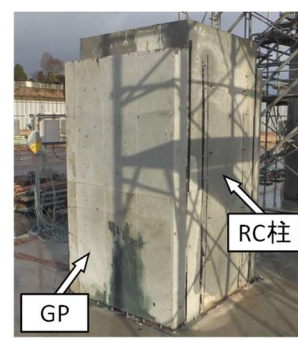


写真-3 脱型後の状況(GP②側)

る。

測定項目は、供試体の質量、直径、高さとした。既報^{13) 14)}では、浸漬後の GP 硬化体内部の健全性は圧縮強度試験により確認されていたが、本検討では現場コアに限りがあり、かつ長期間の試験を想定し、共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数試験方法 (JIS A 1127) を用いた非破壊試験により、供試体の固有振動数から動弾性係数を算定し、内部の健全性を評価した¹⁵⁾。なお、試験法では、縦振動により供試体の固有振動数を測定する場合、断面寸法が直径 100mm 以上とされているため、参考値の扱いとした。

4. 施工実験結果

4.1 施工性

(1) 配合および製造

表-5 にフレッシュ試験の結果を、写真-1 にスランプフロー試験状況 (引き上げ後 2 分経過時) を示す。試験結果から現地で製造した GP モルタルは管理値内に

収まっており、室内配合試験と同等の品質を有していると判断された。

(2) 打込み

写真-2 に GP モルタルの打込み時の流動状況を示す。流動性は打込み開始時から完了まで低下することなく、端部まで自己充填する様子が目視により確認された。また、写真-2 より、鉄筋周辺にも隙間が見られることもなく隅々まで充填されていることが判る。

(3) 現場加温養生

表-5 に現場加温養生中の GP 試験体の中心温度の最高値を示す。試験結果より加温システムを用いることで、室内加温養生と同程度の 80°C、12 時間相当の現場加温が可能であることを確認した。これは後述する強度発現性や耐薬品性からも確認できた。今後、データを拡充すると共に、自動制御や多様な加温条件に対応可能なシステムへ改良を図っていく。



写真-4 コアボーリング後の GP 試験体状況 (GP①側)

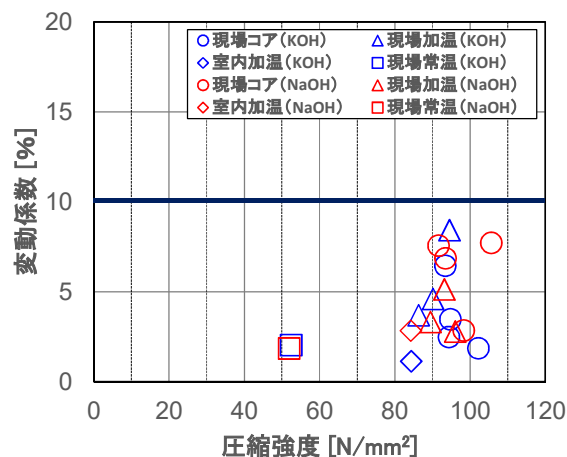


図-7 圧縮強度試験結果

表-6 圧縮強度試験および塩酸浸漬試験結果

配合 種別	圧縮強度 (材齢 28 日)			塩酸浸漬 質量変化率 (56 日目) [%]			塩酸浸漬 径変化率 (56 日目) [%]		
	[N/mm²]								
	現場 加温	現場 コア	現場 常温	現場 加温	現場 コア	現場 常温	現場 加温	現場 コア	現場 常温
GP①	94.6	96.7	52.5	4.0	6.0	14.7	0.2	0.4	3.0
GP②	89.5	96.9	51.9	2.3	3.6	11.2	0.2	0.3	2.3

(4) 充填性および脱型性

写真-3 に脱型後の GP 試験体を示す。GP 試験体の表面を目視で観察したところ、未充填部分や打込み時間の経過におけるコールドジョイントは確認されなかった。このことから、本実験に用いた壁構造の場合、4.1(2)に示した打込み方法により、GP モルタルを隅々まで充填が可能と考えられる。

脱型性に関しては、型枠離型剤によるフィルムの有無ならびに型枠のサイズによる脱型時の労力の違いは小さく、どの面においても容易に脱型できることを確認した。このことから、適切な離型剤および型枠のサイズを選択することで、GP モルタルの脱型性の確保および型枠建込の効率化が可能であることがわかった。また、目視観察ではあるが、表面の仕上がりはいずれも良好で、フィルム面は特に光沢が高い結果となった。今後は、脱型性に加え、効率的な表層の仕上げ方法についても検討を進めていく。

4.2 現場加温養生を施した GP 試験体の品質

(1) 強度発現性および安定性

写真-4 にコアボーリング後の GP 試験体 (GP①側) を、圧縮強度試験の結果を図-7、表-6 に示す。試験結果より、現場コアの圧縮強度は 90N/mm² 以上となり、現場常温に比べ 40N/mm² 以上高い値が得られた。また、

室内加温養生を施した現場加温および室内加温と同等以上の強度が得られた。現場コアの圧縮強度の変動係数は全て 10%以内であり、既報⁹⁾より、過去に実施した室内試験における圧縮強度の変動係数 (0.4~11.9%) と比較しても遜色のない結果が得られている。

(2) 耐薬品性

図-8 から図-11 に、浸漬開始から 56 日経過後までの質量、直径、高さ、動弾性係数の変化率の測定結果を、表-6 に浸漬 56 日目の質量、径の変化率を、写真-5 に浸漬期間中の供試体の外観を示す。浸漬 56 日後の各 GP モルタル供試体の質量変化率は、現場加温：2.3~4.0% < 現場コア：3.6~6.0% < 現場常温：11.2~14.7%の順番となり、現場加温と現場コアの質量変化率の差は 1~2%程度であり、かつ現場常温が比較的大きな質量変化率を示す結果となった。このことから、現場加温養生を施した現場コアは、室内加温養生を施した現場加温と同等程度の耐薬品性が得られており、かつ常温養生した現場常温に比べ、耐薬品性に優れていることが確認された。また、普通モルタルは養生条件に関わらず 80%以上の質量変化率を示している。このように、現場においても適切な加温養生を施すことにより、GP モルタルの耐薬品性が向上することがわかった。同様な傾向は、径変化率や高さ変化率、そして写真-5 に示す塩酸浸漬期間中の GP 供試体の外観から

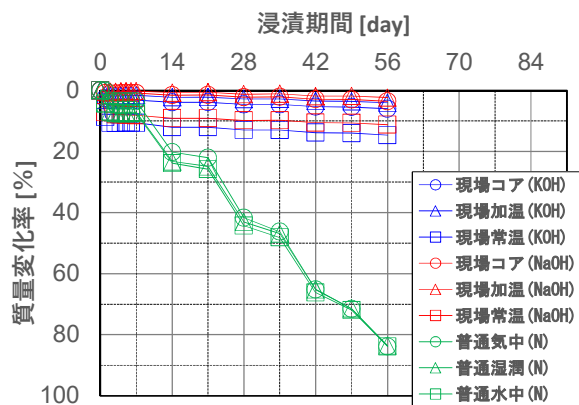


図-8 塩酸浸漬試験による供試体の質量変化率

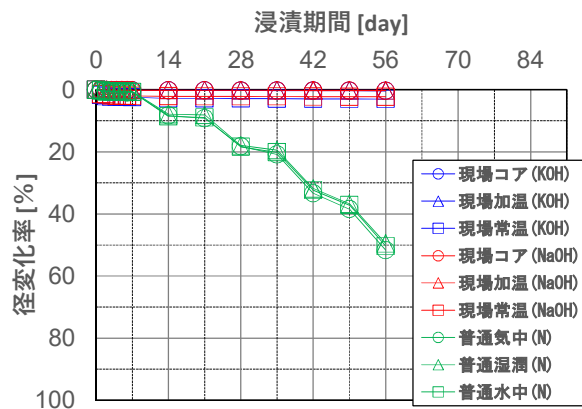


図-9 塩酸浸漬試験による供試体の径変化率

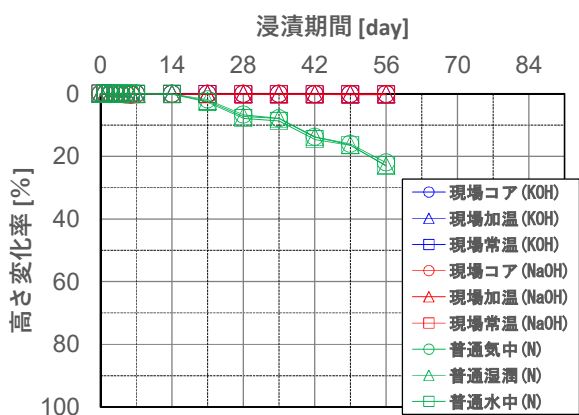


図-10 塩酸浸漬試験による供試体の高さ変化率

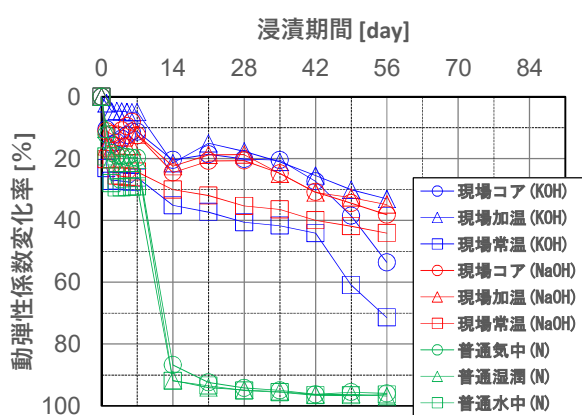


図-11 塩酸浸漬試験による供試体の動弾性係数変化率

供試体種類 浸漬期間	GP①モルタル (KOH 配合)			GP②モルタル (NaOH 配合)			普通モルタル		
	現場コア	現場加温	現場常温	現場コア	現場加温	現場常温	気中	湿潤	水中
0 日									
28 日									
56 日									

写真-5 塩酸浸漬試験中の供試体外観

も確認できる。

5. まとめ

実物大規模のジオポリマーの施工性（配合検討ならびに製造、打込み、養生、脱型）や現場加温養生によ

る品質の確認など、現場施工を想定した施工実験を実施した。以下、得られた結果を示す。

- (1) 現地製造した GP モルタルの流動性は、打込み開始時から完了まで低下することなく、型枠端部まで自己充填する様子が目視により確認された。

- (2) 温度制御装置を有するケーブル状電気ヒーターを用いた加温システムを適用することで、室内加温養生と同程度である 80℃、12 時間相当の現場加温が可能であることを確認した。
- (3) ワックス系型枠離型剤およびビニール性フィルムならびに型枠のサイズによる脱型時の労力の違いは小さく、全ての面で容易に脱型できたことを確認した。適切な離型剤および型枠のサイズを選択することで、GP モルタルの脱型性の確保が可能であることを確認した。
- (4) 現場加温養生を施した現場コアの圧縮強度は 90N/mm² 以上の強度が発現するなど、現場常温に比べて高い強度が得られ、室内加温養生を施した現場加温および室内加温と同等以上の強度を確保することができた。
- (5) GP モルタルの質量変化率は、現場加温：2.3~4.0% < 現場コア：3.6~6.0% < 現場常温：11.2~14.7% の順番となり、現場加温と現場コアの質量変化率の差は 1~2%程度であり、現場常温が比較的大きな質量変化率を示す結果となった。このことから、現場加温養生を施した現場コアは、室内加温養生を施した現場加温と同等程度の耐薬品性が得られており、かつ常温養生した現場常温に比べ、耐薬品性に優れていることが確認された。また、普通モルタル供試体は養生条件に関わらず 80%以上の質量変化率を示している。このように、現場においても適切な加温養生を施すことにより、GP モルタルの強度発現性および耐薬品性が向上することがわかった。
- 4) 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，pp575-580，2011
- 5) 佐藤隆恒，大木信洋，東原実，上原元樹:石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp2023-2028，2013
- 6) 原田耕司:ジオポリマーの特性と施工事例，西松建設技報，Vol.39，No.14，pp1-6，2016
- 7) 池田攻:ジオポリマーバインダーによる鉱物質粉体の常温固化と材料化，資源と素材，Vol.114，pp497-500，1998
- 8) 上原元樹:セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発，第296回鉄道総研月例発表会要旨，pp1-6，2016.1
- 9) 南浩輔，松林卓，舟橋政司:ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp1957-1962，2013
- 10) 上原元樹，佐藤隆恒:ジオポリマー法で環境負荷を低減する，RRR，Vol.68，No.11，pp10-13，2011.11
- 11) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠:「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集，第Ⅱ編，pp93-98，2016.6
- 12) 日本コンクリート工学会:JCI 規準集 2004
- 13) 上原直樹:ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発，鉄道総研報告，Vol.22，No.4，pp41-46，2008
- 14) 山本武志，菊池道生，大塚拓:複数材料を用いたジオポリマー硬化体の物理特性および反応相同定，「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集，第Ⅱ編，pp51-58，2016.6
- 15) 菅原高志，榊田佳寛，中村成春，齊藤直:遠心成形した高強度コンクリートの耐硫酸性に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，2001

参考文献

- 1) 一般財団法人石炭エネルギーセンター:石炭灰全国実態調査報告書，2016
- 2) 相原直樹，辻村太郎，上原直樹，土屋広志:鉄道用材料の LCA による環境評価，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp5-10，2009.6
- 3) 上原直樹，山崎淳司:ジオポリマー硬化体のイオン交換特性，鉄道総研報告，Vol.25，No.10，pp45-50，2011