

現場打ちジオポリマーのポンプによる施工事例

太田 健司*1・南 浩輔*2・梶田 秀幸*1・舟橋 政司*1

Applying Pump Construction to In-Situ Geopolymer

Kenji OHTA, Kousuke MINAMI, Hideyuki KAJITA, Masashi FUNAHASHI

表-1 フレッシュ試験結果

配合種別	計測条件	スランプフロー試験				空気量 (%)	ジオポリマー温度 (°C)	外気温 (°C)
		50cm 到達時間 (s)	停止時間 (s)	180秒経過後のフロー値 (cm)	平均 (cm)			
Na型ジオポリマー	練上がり直後	2.4	180over	87.6 × 84.9	86.3	3.9	40.9	29.9
	筒先	4.2	180over	84.6 × 82.9	83.8	4.1	38.9	30.3
K型ジオポリマー	練上がり直後	4.8	180over	81.8 × 81.7	81.8	5.9	42.7	31.8

表-2 圧縮強度試験結果

配合種別	試料採取条件	圧縮強度 (N/mm ²)	
		材齢7日	材齢28日
Na型ジオポリマー	練上がり直後	17.9	51.9
	筒先	19.3	51.9
K型ジオポリマー	練上がり直後	29.5	55.7



写真-1 ジオポリマー施工状況（左から、スランプフロー状況、打込み状況、押さえ状況、打込み完了状況）

研究の目的

ジオポリマーは適切な配合設計を行わないと、フレッシュ性状の調整が困難であることや可使時間が非常に短くなりハンドリングが悪くなるなどの課題が挙げられる。このようにジオポリマーは、施工性への影響が懸念されるため、プレキャスト製品を中心とした検討は数多く報告されているが、現場打ちによるジオポリマーの施工事例や検討事例は少なく、著者らの知る限り国内でポンプ施工した事例は報告されていない。そこで、本報告では、国内で初めてジオポリマーを圧送して現場打ちで施工を実施した。

技術の説明

ジオポリマーの実施工は、茨城県取手市に建設中の当社新技術研究所「ICI ラボ」の機械架台の一部に適用した。今回施工した機械架台は、実験棟から排出されるアルカリ水の pH 調整用の薬品タンクおよびタンクから送薬するポンプ架台であり、耐薬品性が要求される構造物となる。そのため、機械架台の基礎部を通常のコンクリート（設計基準強度 24N/mm²）で施工し、耐薬品性に優れるジオポリマーを用いて薬品タンクおよびポンプを設置する部分の表層 10cm 程度を増し厚施工することにより、コンクリート表面を薬品から保護するような設計とした。ケイ酸アルカリ溶液の配合が異なる 2 種類のジオポリマー（Na 型および K 型）を現場内の簡易製造プラントにより製造し、製造プラントからポンプのホッパに直接排出し、圧送により打込みを行った。

主な結論

- ・ジオポリマーの施工に際して、国内で初めて圧送による施工を実現させた。
- ・施工に適したスランプフローや可使時間を設定して、ジオポリマーの配合設計を行い、フレッシュ性状を適切に管理することで、ポンプによる施工が可能である。
- ・今回圧送した範囲では、圧送前後でのスランプフローの変化は小さく、圧送後も良好な性状を示した。
- ・施工後の圧縮強度について、所要の強度を満足しており、ポンプ施工による不具合等は発生しなかった。
- ・ポンプ吐出圧力は高い値を示し、ポンプ施工においては施工計画が重要になると考えられる。

*1 本店 技術研究所

*2 本店 成長戦略室

現場打ちジオポリマーのポンプによる施工事例

太 田 健 司*¹ 南 浩 輔*²
梶 田 秀 幸*¹ 舟 橋 政 司*¹

要 旨

ジオポリマーは、通常のコンクリートと比較するとフレッシュ状態において粘性が高いことや可使時間が短いことなどから、そのハンドリングの良し悪しが施工性へ影響を及ぼすことが懸念されている。そのため、プレキャスト製品を中心とした検討は数多く報告されている一方で、現場打ちによるジオポリマーの施工事例や検討事例は少なく、中でもポンプ施工については非常に困難とされている。著者らは、従来から困難とされてきたジオポリマーのポンプ施工について検討し、ICIラボ（新技術研究所）の機械架台の一部にポンプ施工を適用した。その結果、施工に適したスランプフローや可使時間を設定してジオポリマーの配合設計を行い、フレッシュ性状を適切に管理することでポンプ施工が可能であることが確認された。

キーワード ジオポリマー／耐薬品性／圧送／フライアッシュ／ジオポリマー用混和剤

目 次

- | | |
|---------------|--------------------|
| 1. はじめに | 4. ジオポリマーの圧送による施工性 |
| 2. ジオポリマーについて | 5. 現場打ちジオポリマーの圧縮強度 |
| 3. 施工概要 | 6. まとめ |

APPLYING PUMP CONSTRUCTION TO IN-SITU GEOPOLYMER

Kenji OHTA
Hideyuki KAJITA

Kousuke MINAMI
Masashi FUNAHASHI

Synopsis:

The geopolymer has higher viscosity in the fresh state and shorter usable time compared with ordinary concrete, so it is concerned that good (or bad) handling may affect workability. For that reason, while many studies have been reported mainly on precast products, there are few example of construction or investigation on in-situ geopolymer, and among them, pump construction is considered to be extremely difficult. The authors investigated pump construction of in-situ geopolymer, which has been considered difficult in the past, and applied pump construction to a part of the machine footstool of ICI Laboratory (New Technology Research Institute).

As a result, it was confirmed that pump construction was possible by managing the fresh property appropriately, if the mix design of geopolymer was designed which had the suitable slump flow and usable time for construction.

* 1 本店 技術研究所

* 2 本店 成長戦略室

1. はじめに

近年、石炭火力発電所から排出される石炭灰の埋立て処分場の減少や環境負荷低減対策として、廃棄処分されるフライアッシュの減容化や有効活用に関する様々な取り組みが行われている。こうした動きはフライアッシュのみに限らず、製鉄所などから排出される高炉スラグについても同様である。特に、コンクリートの分野においては、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などをコンクリート用混和材として利用することで、長期的な強度増進や耐久性を向上させる効果などが認められている。また、これら混和材の利用には、硬化物性を向上させる効果だけでなく、産業副産物の有効利用やコンクリート製造時の二酸化炭素排出量の削減につながるなど、環境負荷低減対策としても非常に有効である。このような観点から、セメントの一部あるいは大部分をフライアッシュや高炉スラグ微粉末といった混和材で置き換えた低炭素型のコンクリートの開発^{*1}が行われ、実工事へ適用するための取り組みも進められている^{*2,3}。

低炭素型のコンクリートが注目される一方で、コンクリートに替わる新材料として、セメントを全く使用しない硬化体であるジオポリマーも同様に注目されている。ジオポリマーとは、活性フィラーと呼ばれるフライアッシュや高炉スラグ微粉末などの鉱物質微粉末と、アルカリ刺激剤としてケイ酸アルカリ溶液を混合することにより、天然ゼオライトの構造に近いアルミノケイ酸塩の縮重合体により生成された硬化体である^{*4}。ジオポリマーは原材料にセメントを全く使用しないため、二酸化炭素排出量をおよそ 80%低減することができる^{*5}ことから、混和材を使用したコンクリートと同様に環境負荷の低減につながる。加えて、低炭素型のコンクリートに比べて産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末を大量に消費することができるため、資源の有効活用など循環型社会に貢献できる材料である。

ジオポリマーの特徴は、コンクリートと同様に使用材料（高炉スラグ微粉末の有無やアルカリ溶液の種類）や配合設計手法により、要求性能に応じて硬化体の強度特性や耐久性能を変化させることができる。また、養生方法によっても品質が大きく異なる性質を有しており、加温養生を施すことで常温養生した場合よりも短い養生時間で高い強度や耐久性などを得ることができる^{*6}。一方、ジオポリマーは適切な配合設計を行わないと、フレッシュ性状の調整が困難であることや可使時間が非常に短くなりハンドリングが悪くなるなどの課題が挙げられる。

このようにジオポリマーは、施工性への影響が懸念されるため、プレキャスト製品を中心とした検討は数多く報告されているが、現場打ちによるジオポリマーの施工事例や検討事例は少なく、著者らの知る限り国内でポンプ施工した事例は報告されていない。そこで、本報告では、国内で初めてジオポリマーを圧送して現場打ちで施

工した事例について紹介する。

2. ジオポリマーについて

ジオポリマーとは、Davidovits により提唱された用語であり、無機ケイ酸が縮重合（ポリマー化）した状態のものであり、セメントの水和反応とは全く異なる反応過程や性質を示す硬化体である^{*7}。

ジオポリマーは、メタカオリンやフライアッシュなどのケイ酸アルミニウム系の活性フィラーとアルカリ刺激剤のみで構成される場合以外に、初期強度の改善などから高炉スラグ微粉末などを添加する場合もある。この様に、ジオポリマーに使用される材料は求める性能によって多岐にわたる。このことから、国内においてジオポリマーは、「セメントクリンカーを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液の少なくとも 1 種類（アルカリ溶液）を用いて硬化させたもの」と定義されている^{*4}。

3. 施工概要

3.1 適用箇所

ジオポリマーの実施工は、茨城県取手市に建設中の当社 ICI ラボ（新技術研究所）の総合実験棟と構造実験棟の間に位置する機械架台の一部に適用した。ICI ラボのイメージを図-1 に示す。今回施工した機械架台は、実験棟から排出されるアルカリ水の pH 調整用の薬品タンクおよびタンクから送薬するポンプ架台であり、耐薬品性が要求される構造物となる。そのため、機械架台の基礎部を通常のコンクリート（設計基準強度 24N/mm²）で施工し、耐薬品性に優れるジオポリマーを用いて薬品タンクおよびポンプを設置する部分の表層 10cm 程度を増し厚施工することにより、コンクリート表面を薬品から保護するような設計とした。なお、ジオポリマーの管理強度は、コンクリートと同様に 24N/mm² とし、ケイ酸アルカリ溶液の配合が異なる 2 種類のジオポリマー（Na 型および K 型）

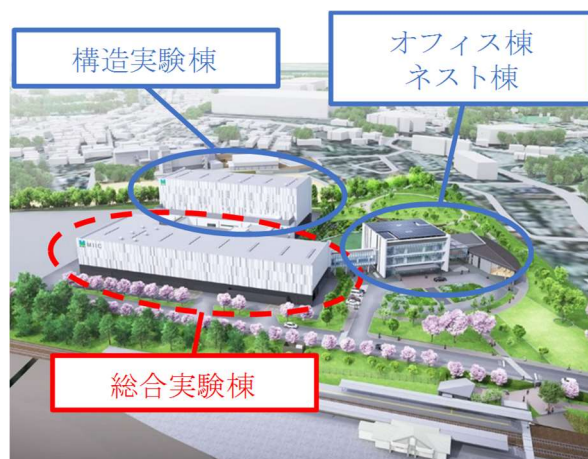


図-1 ICI ラボ イメージ図

を製造し、打込みを行った。なお、打込み時の設計数量は、Na 型が約 0.7m³、K 型が約 0.15m³であった。

3.2 ジオポリマーの配合

施工で使用したジオポリマーの使用材料を表-1 に、配合条件を表-2 に示す。

2 種類のジオポリマーについて、ケイ酸アルカリ溶液が水酸化ナトリウムおよびシリカフェューム（Si）から構成される場合を Na 型、水酸化カリウムおよびケイ酸ソーダ（水ガラス）から構成される場合を K 型とする。

ジオポリマーは、フライアッシュ等の品質の変動によりフレッシュ性状に影響を及ぼすことや粘性が高く流動性が低いこと、可使時間が非常に短いことなどから、ジオポリマーのポンプ施工は非常に困難とされている。

そこで、ジオポリマーの流動性や施工性を十分に確保するため、理論的な配合検討を行い、可使時間の調整やハンドリング性能の向上を目的として、ジオポリマー専用の混和剤を適用した。また、ポンプでの施工性を十分に確保することと、自己充填性を有することを条件として、練上がり直後のスランプフローが 70cm 以上となるような配合の選定を行った。

3.3 ジオポリマーの製造および打込み

ジオポリマーの製造は、ICI ラボの建設現場内に容量 100L の強制二軸ミキサ 2 台を併設したジオポリマー専用の簡易製造プラントを設置し、練混ぜを行った。簡易製造プラントを写真-1 に示す。

実際の製造は、2 台の強制二軸ミキサを交互に使用して練混ぜを行い、ポンプへ連続的なジオポリマーの供給を行った。練混ぜ手順は、活性フィラーと細骨材を投入し、空練りを行った後に、ケイ酸アルカリ溶液とジオポリマー専用の混和剤を投入、再度攪拌を行った。

ジオポリマーの打込みは、製造プラントからポンプのホッパに直接排出し、圧送を行った。施工に用いたポンプはスクイズ式の定置ポンプを適用し、配管はポンプ吐出口から径が 1B のフレキシブルホースを用いて水平換算距離でおよそ 30m の圧送距離とした。なお、K 型については、施工数量が少ないことと、事前の検討で可使時間が Na 型と比較して短いことなどから、ポンプ施工は実施しなかった。

3.4 ジオポリマーの品質管理値

ジオポリマーの試験項目および試験方法を表-3 に、品質管理目標値を表-4 に示す。

フレッシュ性状の確認は、各配合における 1 バッチ目のジオポリマーを用いて品質管理試験を実施した。また、硬化後のジオポリマーの品質管理項目としては圧縮強度試験を行い、管理材齢は 28 日とした。

表-1 使用材料

材料種別	記号	構成材料	備考
活性フィラー	FA	フライアッシュ I 種	密度2.42g/cm ³ 比表面積5740cm ² /g
	BFS	高炉スラグ微粉末	密度2.91g/cm ³ 比表面積4240cm ² /g 石こう無添加
ケイ酸アルカリ溶液	AL	NaOHとSi粉の混合液 もしくは KOHと水ガラスの混合液	密度1.33～1.42g/cm ³
細骨材	S	静岡県産珪砂	絶管密度2.63g/cm ³ 粗粒率2.55
混和剤	Ad	ジオポリマー専用混和剤	密度1.08g/cm ³

表-2 配合条件

配合種別	AL/F	F/S
Na型	0.55	0.64
K型	0.45	0.71

AL/F：アルカリ溶液と活性フィラーの質量比

F/S：活性フィラーと細骨材の質量比



写真-1 ジオポリマー簡易製造プラント

表-3 試験項目

試験項目		試験方法
フレッシュ試験	スランプフロー	JIS A 1150
	500mmフロー到達時間	JIS A 1150 附属書JA
	空気量	JIS A 1128
	ジオポリマー温度	JIS A 1156
	外気温	温度計による
	吐出圧力	圧力計による
硬化試験	圧縮強度試験	JSCE-G 505

4. ジオポリマーの圧送および施工性

4.1 圧送によるフレッシュ性状への影響

ジオポリマーのフレッシュ試験結果を表-5 に、スランプフロー状況を写真-2 に示す。

ジオポリマーは、従来からフライアッシュの品質の変動による影響やコンクリートのような配合設計手法が確立されていないことなどから、フレッシュ性状の調整が困難とされてきた。しかしながら、材料に応じた適切な配合条件の設定や理論的な配合設計*8を行うことで、適切な流動性や空気量といったフレッシュ性状を確保することは可能である。

表-5 より、練上がり直後における Na 型と K 型のスランプフローのフロー停止時間は 180 秒以上となった。そのため、スランプフローはスランプコーンの引き上げから 180 秒経過後の値をフロー値として計測した。180 秒経過後のフロー値は Na 型、K 型とも、品質管理目標値の 70cm を大きく超える値（Na 型：86.3cm、K 型：81.8cm）となった。しかし、写真-2 からわかるように、目視確認において材料分離は確認されず、適度な粘性を有しており良好なフレッシュ状態であったことがうかがえる。なお、ジオポリマーは、フローの計測終了後も流動が停止することなく、時間とともに広がり続ける状況であった。一方、空気量についても、管理目標値を満足する結果となっている。

続いて圧送による影響について検討する。ここで、圧送を行った Na 型に着目すると、圧送の前後において 50cm 到達時間と 180 秒経過後のフロー値は、若干低下する傾向を示した。しかし、筒先から採取したジオポリマーの試料においても、依然として高い流動性を示しており（写真-3 参照）、練上がり時のフレッシュ性状を適切に管理することで、ポンプによる施工は十分可能であることがわかった。

また、ポンプによる施工においては、ホッパでの巻き込みなどにより筒先での空気量の増加などが懸念されたが、空気量の増加は極僅かであった。そのため、今回の施工の範囲内では圧送による影響は小さいと考えられる。

4.2 ジオポリマーの圧送および施工性について

ジオポリマーの圧送による施工状況を写真-3～6 に示す。また、ジオポリマーの圧送時における吐出口近傍の圧力の波形データの一例を図-2 に示す。

吐出状況（写真-3 参照）および圧送前後におけるフレッシュ性状の変化が小さい（表-5 参照）ことから、ポンプによる圧送がジオポリマーの施工時の品質に及ぼす影

表-4 品質管理目標値

試験項目		管理値
フレッシュ試験	スランプフロー	70cm以上 ※目視確認により分離していないこと
	空気量	5.0±2.0%
硬化試験	圧縮強度試験	24N/mm ² 以上



写真-2 スランプフロー状況



写真-3 ジオポリマー打込み状況

響は顕著ではないといえる。さらに、圧送後のジオポリマーは、打込み箇所から片側 2m 程度の範囲まで振動を与えなくても自重で流動することが確認された。また、配合設計によりジオポリマーの可使時間を調整することで、写真-4 に示すような打込み後の押さえ作業も問題なく行うことが可能であった。仕上げ後の表面状況も

表-5 フレッシュ試験結果

配合種別	計測条件	スランプフロー試験				空気量 (%)	ジオポリマー温度 (°C)	外気温 (°C)
		50cm 到達時間 (s)	停止時間 (s)	180秒経過後のフロー値 (cm)	平均 (cm)			
Na型ジオポリマー	練上がり直後	2.4	180over	87.6 × 84.9	86.3	3.9	40.9	29.9
	筒先	4.2	180over	84.6 × 82.9	83.8	4.1	38.9	30.3
K型ジオポリマー	練上がり直後	4.8	180over	81.8 × 81.7	81.8	5.9	42.7	31.8

写真-5 および写真-6 のように、非常に良好な状態であることが確認された。また事前に実施した施工実験*6においても、既存の柱構造物に対して、厚さ 10cm 程度を増し厚する施工にも関わらず、パイプレーターを使用することなく、端部までしっかりと充填されていた。以上のことから、ジオポリマーはフレッシュ性状を適切に管理することで非常に高い自己充填性を有することがわかった。

一方、圧送については、配管径が 1B ではあるため通常のコンクリートの圧送と単純に比較はできないが水平換算距離が約 30m でも、図-2 に示すようにピーク時のポンプ吐出圧力は 1MPa を超え、圧送速度 0.6m³/h 時の圧力損失は 40kPa/m (0.04MPa/m) を示すことから非常に高い圧力となっていることがわかる。これは、ジオポリマーが非常に高い粘性を有していることに起因していると考えられる。このことから、ジオポリマーを圧送する際は、圧送距離にかかわらず、適切な能力を有したポンプの見極めや配管種類の選定といった施工計画が通常のコンクリートよりもさらに重要になる。

5. 現場打ちジオポリマーの圧縮強度

4 章ではジオポリマーの適切な配合設計などによりフレッシュ性状を制御することで、ポンプ施工が可能であることを示した。ここでは、施工後の品質について、現場で採取した試料の圧縮強度について報告する。材齢 7 日および 28 日における圧縮強度試験結果を表-6 に示す。

表-6 より、Na 型と K 型の両者において材齢 28 日時点の圧縮強度は Na 型で 51.9N/mm²、K 型で 55.7N/mm² を示しており、管理強度の 24N/mm² 以上の強度を満足する結果となった。また、圧送前後の試験体で強度差は確認されず、フレッシュ性状の変化もほとんどないことから、今回施工した範囲においては、圧送が硬化物性へ与える影響は小さいものと考えられる。K 型においては、材齢 7 日時点で 30N/mm² 程度の強度発現を示しており、早期に高い強度が要求される場合に有効であると考えられる。

今回の施工箇所においては、常時薬液などに曝される環境ではないため通常のコンクリートと同様に常温養生を行った。一方で、既往の研究成果*6 から、図-3 や図-4 に示すように、現場加温養生を行うことによる高強度化や、セメントよりも高い耐薬品性能を発揮するだけでなく、加温養生により更なる品質の向上に繋がる。そのため、目的に応じた施工方法を選択することで構造物の高品質化へと繋げられる材料であることがわかる。

6 まとめ

ジオポリマーの実施工において、従来では困難とされていたポンプによる施工について検討し、著者らの知る限り国内で初めて圧送による施工を実現させた。その結果、施工に適したスランプフローや可使時間を設定して、



写真-4 ジオポリマー押さえ状況



写真-5 ジオポリマー仕上げ完了状況



写真-6 ジオポリマー仕上げ打込み完了後の表面状態

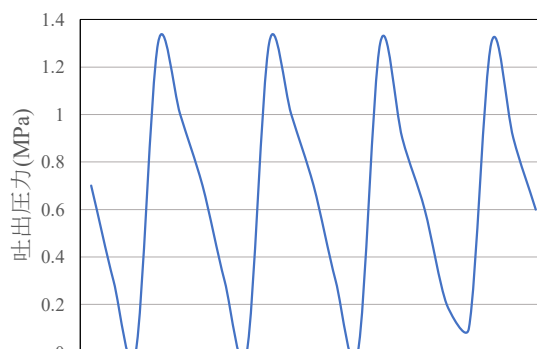


図-2 吐出圧力データ一例

ジオポリマーの配合設計を行い、フレッシュ性状を適切に管理することで、ポンプによる施工が可能であることが確認された。また、今回圧送した水平換算距離約 30m 程度の圧送距離であれば、圧送前後でのスランプフローの変化は小さく、圧送後も良好な性状を示した。一方、施工後の圧縮強度についても、所要の強度を満足しており、ポンプ施工による不具合等は発生することはなかった。しかし、水平換算距離で約 30m 程度の圧送距離でも、ポンプ吐出圧力は高い値を示し、ポンプ施工においてはポンプの選定などの施工計画が重要になると考えられる。

謝辞：ジオポリマーの実施工にあたって、竹本油脂（株）および（株）立花マテリアルの多大なるご協力により実施致しました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所ほか：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（I）－低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）－
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー152，混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案），2018.9
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー151，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針，2018.9
- 4) 日本コンクリート工学会：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，2017.9
- 5) 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
- 6) 吉丸将司，南浩輔，梶田秀幸：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，前田技術研究所報，Vol.58，2017
- 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，Vol114，pp497-500，1998
- 8) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法の諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp1987-1992，2015.7

表-6 圧縮強度試験結果

配合種別	試料採取条件	圧縮強度 (N/mm ²)	
		材齢7日	材齢28日
Na型ジオポリマー	練上がり直後	17.9	51.9
	筒先	19.3	51.9
K型ジオポリマー	練上がり直後	29.5	55.7

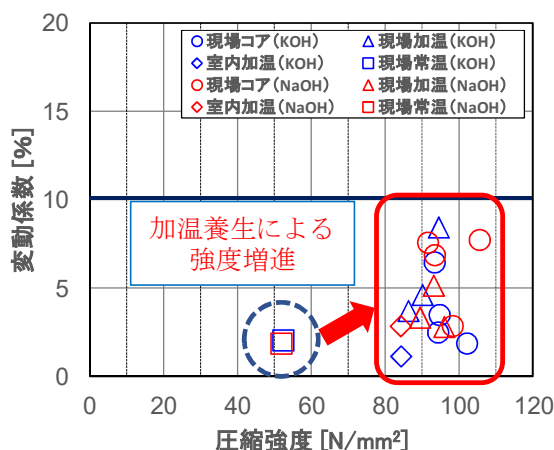


図-3 養生条件による圧縮強度の差

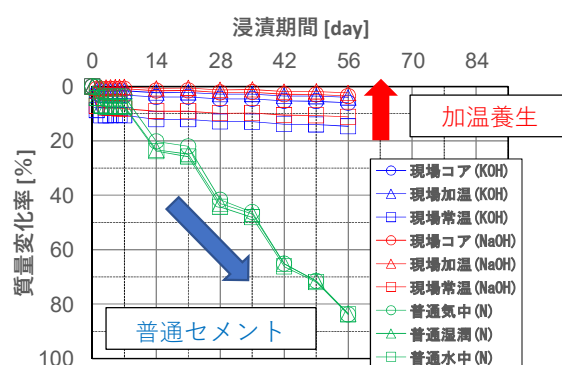


図-4 養生条件による耐薬品性の差（塩酸浸漬試験結果）