

論文 チクソトロピー性グラウト材の先流れ性状と耐久性に関する研究

伊藤 拓^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・棚田 尚宏^{*3}・向井 裕哉^{*4}

要旨：本稿はチクソトロピー性を有するグラウト材に関し、先流れ性について実際の先流れ試験と材料性状確認の2面から検証したものと、塩化物イオンの拡散係数試験により耐久性に関し検証したものである。先流れ性については、実際の先流れ試験結果と回転型レオメーターによる性状確認により、先流れの有無に関する境界と簡易的確認手法を提案している。塩化物イオンの拡散係数試験では市販中の高粘性や超低粘性材料も同時に実施して比較し、チクソトロピー性グラウト材が他の材料より拡散係数が小さいことが確認され、耐久性が向上する材料であることが確認できた。

キーワード：チクソトロピー性、グラウト、先流れ、塩化物イオン、拡散係数

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造におけるPCグラウトの目的は、PC鋼材とコンクリート部材の一体化とPC鋼材の腐食抑制である¹⁾。そのため、使用するPCグラウト材には、①腐食性物質を含まないこと②PC鋼材の素線間まで充填される適度な粘性を有すること③材料分離によるブリーディングが生じないこと④硬化中に収縮によるひび割れが生じないこと⑤硬化後に所定の圧縮強度を有することが要求される²⁾。さらに、グラウト注入時にはシース内に空気を残留させず充填することが求められる³⁾。

現在一般的に使用されているPCグラウト材は、粘性により高粘性型と低粘性型に大別される。高粘性型は、空隙なくシース内部を充填できるが、注入延長が長い場合には圧送ポンプの圧力が上昇し、注入ポンプの圧送性能を超えてしまうことがある。また、低粘性型は、注入延長が長い場合でも注入ポンプの圧力上昇が少なく、シース全体を一度に注入できるが、シースの下り勾配部では先流れが生じ、シース内部に空気が残留する原因となってしまう。

チクソトロピー性グラウト材は、加圧時と通常時に粘性が変化するチクソトロピー性を有し、高粘性型の圧送時圧力上昇と低粘性型の先流れによる残留空気の発生に対する課題を解決する材料として開発され、これまで実物大の注入試験や性状確認を繰り返し²⁾³⁾⁴⁾しており、実用化に至っている⁵⁾。性状確認の中には、材料分離抵抗性試験の器具を用いた先流れ試験も実施⁴⁾しており、圧送ポンプを用いた一定の圧力状態において水粉体比を変化させ、先流れする境界を確認している。

ここでは、先流れ試験により確認された水粉体比の境

界における性状を定量的に評価することを目的として実施した確認内容を報告するとともに、チクソトロピー性グラウト材の塩化物イオン浸透性に関し高粘性型や低粘性型との比較により確認した試験内容について報告する。

2. チクソトロピー性グラウト材の先流れ試験

2.1 目的

表-1にチクソトロピー性グラウト材の材料諸元を示す。

本試験は、チクソトロピー性グラウト材の実用化にあたり、ポンプ圧送により施工する下り勾配の鋼材配置部において、先流れしない限界の水粉体比を確認することと、施工管理上における水粉体比の制限値を決定することを目的として実施した。また、本試験時には、先流れしない水粉体比において材料分離抵抗性試験も実施しており、ブリーディング水の滞留が確認されず材料分離しないことを確認している。

表-1 チクソトロピー性グラウト材の材料諸元

混和タイプ	プレミックス
ベースセメント	普通ポルトランドセメント
粉体密度	2.95 g/cm ³
フレッシュ性状	フロー試験(φ50×H51) 規格値：60～90mm

2.2 試験概要

図-1に試験体の形状図を示す。写真-1に試験体の設置状況を示す。

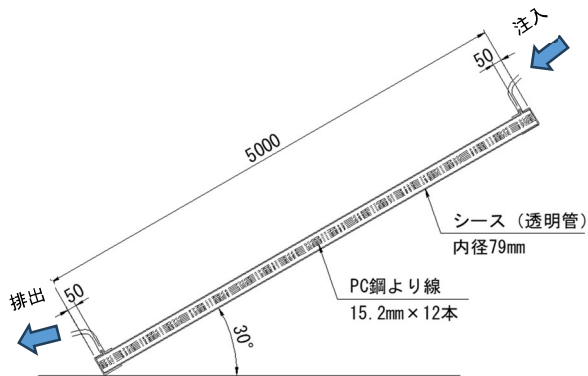
先流れ試験は、材料分離抵抗性試験の試験器具を使用し実施した。ダクト内部には、材料分離抵抗性試験と同

*1 ドーピー建設工業（株） 開発部（学生会員）

*2 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科

*3 ドーピー建設工業（株） 開発部

*4 ドーピー建設工業（株） 生産統括部 幌別工場



図－１ 試験体の形状図



写真－１ 先流れ試験 試験体設置状況

様に 1S 15.2 の PC 鋼材を 12 本配置し、試験器具の上端から圧送ポンプによりグラウト材を注入して下り勾配部の先流れ状態を目視確認した。また、各水粉体比での圧縮強度も確認した。

2.3 配合および性状

先流れ試験では、チクソトロピー性グラウト材の基本水粉体比である 40% を基準として、5% ずつ比率を増加させ先流れした時点で終了とした。本試験では W/B が 50% の試験において先流れを示したため、40%、45%、50% の 3 ケースとなった。

なお、全ケースでブリーディングは確認されなかった。

表－２にフレッシュ性状のフロー試験結果を示す。

チクソトロピー性グラウト材は非加圧状態では粘性が高く、JP 漏斗による流下試験では閉塞してしまい流下時間の計測が行えない。よって、「セルフレベリング材の品質基準」(JASS 15M-103)に則り $\phi 50 \times H51$ の円筒容器

表－２ フロー試験結果

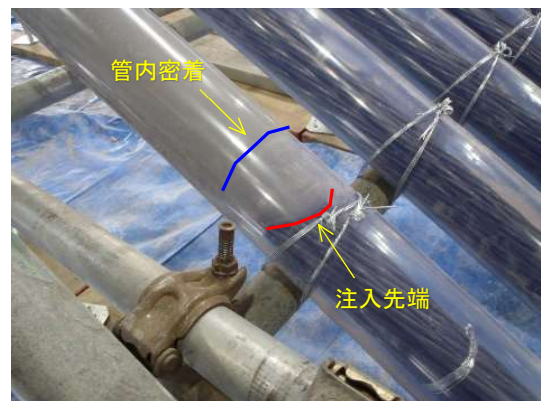
	W/B (%)	練上り温度 (°C)	フロー値(mm)	
			試験値	規格値
Case-1	40	21.5	69	60～90
Case-2	45	22.0	94	
Case-3	50	22.1	108	

を用いたフロー試験によりフレッシュ性状を確認した。試料の練り混ぜ時は、温度による影響を少なくするため、練上り温度 20℃を目安に水の温度を調整した。

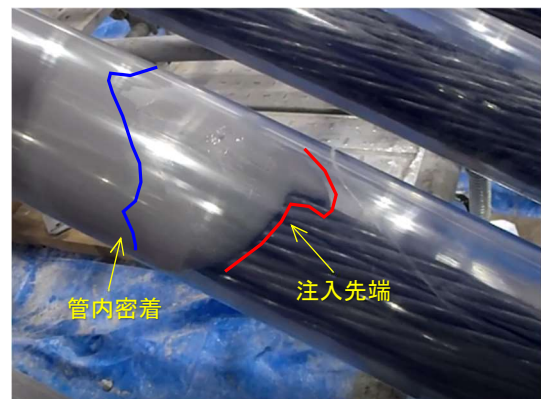
2.4 試験状況

写真－２～４に各水粉体比の注入状況を示す。

水粉体比 40% では、シース断面中央部にて若干試料が先行して注入されている状況が確認されたが、シース内縁部の試料充填に対し大きく先行することなく、注入されていた。水粉体比 45% でも、シース断面中央部の試料が若干先行注入されている様子が確認されたが、シース内縁部の試料充填部との先行度合いは水粉体比 40% 時の



写真－２ 先流れ試験状況 (W/B=40%)



写真－３ 先流れ試験状況 (W/B=45%)



写真－４ 先流れ試験状況 (W/B=50%)

先行度合いと大きな差は見られなかった。水粉体比 50%では、注入直後からすぐにシース断面の上縁にグラウトが充填されるよりも早く下縁部のみの試料が先行して流下している様子が確認でき、顕著な先流れ現象が確認された。

2.5 圧縮強度試験

圧縮強度試験は $\phi 50 \times h100$ の供試体により実施した。

表－3 に材齢 28 日の圧縮強度試験結果を示す。

試験実施時が寒冷地の冬期であったことから、供試体を封かんのうえ 5°C 以上で給熱養生を行った。

圧縮強度試験の結果、いずれのケースでも材齢 28 日において 30N/mm^2 以上の圧縮強度¹⁾を示しており、十分な強度であることが確認された。

表－3 圧縮強度試験結果

圧縮強度 $\sigma_{28}(\text{N/mm}^2)$		
Case-1	Case-2	Case-3
68.1	65.6	52.2

3. 先流れ性状とレオロジー性状との関係の検討

3.1 目的

本確認は、チクソトロピー性グラウト材の先流れ試験結果と W/B を変化させた試料のレオロジー性状より関係性を見出し、大規模な実物大試験の実施前でも簡略的に先流れの有無を判断できる指標とすることを目的とした。

3.2 実施概要

写真－5 に試験で使用した回転型レオメーターを示す。

性状の確認には、せん断ひずみ速度やせん断応力および塑性粘度等が検出できる羽根型ジオメトリー(長さ 21mm, 羽根の直径 25mm, Vane 型プレート)を用いた回転型レオメーターを使用した。

チクソトロピー性グラウト材の配合は、先流れ試験で実施した配合と同じ 3 ケースの試料を用いている。

また、確認試験においては比較として高粘性型グラウ



写真－5 回転型レオメーター

表－4 高粘性型グラウト材の材料諸元

混和タイプ	プレミックス
ベースセメント	普通ポルトランドセメント
粉体密度	3.15 g/cm^3
フレッシュ性状	流下試験(JP 漏斗) 規格値: 14~23s

表－5 高粘性型グラウト材 配合および流下時間

	W/B(%)	流下時間(s)
Case-4	40.0	23
Case-5	41.5	15

ト材も実施した。表－4 および表－5 に高粘性型グラウト材の材料諸元と配合を示す。

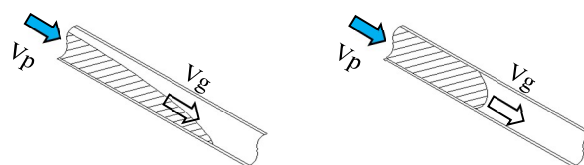
高粘性型では注入条件により先流れしないことも確認されている¹⁾。このことから、JP 漏斗を用いた流動性試験(JSCE-F531)の規格値において上限値と下限値の近傍となる水粉体比により Case-4 と Case-5 の 2 ケースを追加した計 5 ケースにて行った。

3.3 先流れのメカニズム

材料性状と先流れの関係性を確認する前に先流れが生じるメカニズムについて整理する。

図－2 に粘性で分類されるグラウト材の先流れ概要図を示す。

一般的に粘性で分類されるグラウト材では、材料の粘性・密度・管径・傾斜角度等で決まる材料の自然流下速度(V_g)に対し圧送ポンプによる注入速度(V_p)が上回れば先流れを防止できるが、注入速度の増加は圧送圧力の増加となり、高粘性型グラウト材の場合、圧送ポンプの閉塞を招く恐れがある。

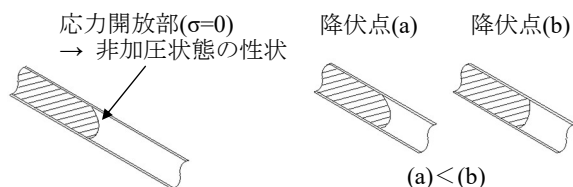


$V_p < V_g \rightarrow$ 先流れ発生 $V_p > V_g \rightarrow$ 先流れ防止

図－2 粘性分類されるグラウト材の先流れ概要図

図－3 にシース内におけるチクソトロピー性グラウト材の先端概要を示す。

チクソトロピー性グラウト材の場合、シース内でのグラウト先端部は圧送ポンプによる注入圧力がおよばないため応力開放部($\sigma=0$)となり、グラウト材は非加圧状態の性状に戻ることから先流れが生じにくくなる。そのため、降伏点となるせん断応力(τ)が大きい材料ほど先流れを防止することが可能となる。また、降伏点の大小に



図－3 チクソトロピー性グラウト材の先端概要

よりグラウト先端部の形状が変化し、降伏点が多い場合グラウト先端部はシースに対しほぼ垂直に近い形を示す。これらは、先流れ試験において水粉体比の増加により先流れすることが確認されたことと関係性があるものと想定され、先流れが生じると想定される見掛けの降伏点の目安指標を示すことが可能と考えられる。

3.4 性状確認

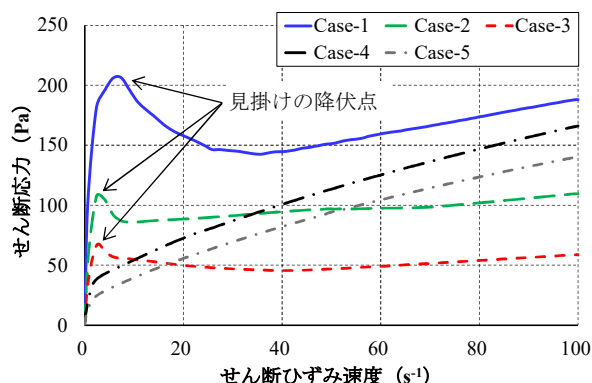
せん断ひずみ速度に対するせん断応力の関係から5ケースを比較した。

図－4に比較グラフを示す。

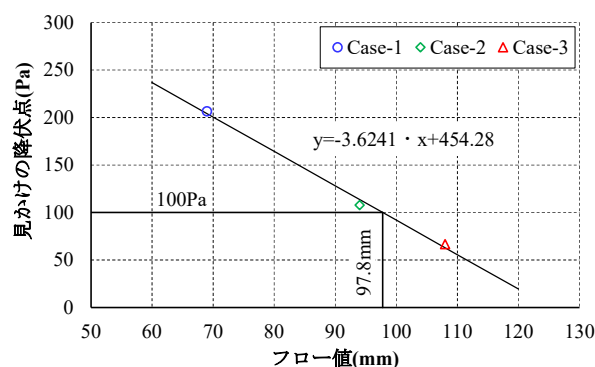
このグラフより、チクソトロピー性グラウト材であるCase-1～3と高粘性型グラウト材であるCase-4, 5で大きくグラフの形が異なることがわかる。Case-4, 5では一般的な擬塑性流体のような性状を示しているが、Case-1～3では、チクソトロピー性グラウト材の特徴である、初期で一時的に大きなせん断応力が生じ、直後の低下と停滞が確認された。このことから、チクソトロピー性グラウト材は高粘性型グラウト材と大きく異なる性状であることが確認できた。また、前述した先流れのメカニズムも踏まえ考えると、チクソトロピー性グラウト材は高粘性型グラウト材と性状が異なるため、先流れ評価は高粘性型グラウト材のような性状を示す材料と分けて考えることが妥当であると考えられる。

Case-1～3における初期の頂点を見掛けの降伏点とする。各ケースの見掛けの降伏点は、Case-1: 206.3Pa, Case-2: 107.8Pa, Case-3: 66.6Paであり、先流れ試験において先流れが生じなかったCase-2と先流れが生じたCase-3では、降伏点の差が40Pa程度ある。よって、先流れの有無を分ける境界はせん断応力(τ)の70～100Pa間にあると考えられ、100Pa以上の見掛けの降伏点を示す材料であれば先流れが生じないと言える。また、先流れのみで考えれば、Case-1の降伏点は200Pa以上と大きく、過大であると言える。

図－5にCase-1～Case-3のフロー値と見掛けの降伏点の関係を示す。前述の先流れの有無を分ける境界を100Paとした時、見掛けの降伏点が100Paとなるフロー値は97.8mmとなる。そのため、フレッシュ性状の確認で実施するフロー試験の試験値目安を98mmとすることで、フロー試験により簡易的に先流れの有無を判断できると考えられる。



図－4 せん断ひずみ速度 (s^{-1})－せん断応力 (Pa)



図－5 フロー値と (mm) と見掛けの降伏点 (Pa)

4. チクソトロピー性グラウト材の塩化物イオン浸透性

4.1 目的

PCグラウトの要求性能には、供用中のPC鋼材を保護することも含まれる。これまで、注入施工における確実な充填と材料分離および体積変化等を確認した^{3),4),5)}が、劣化因子の浸透に関する確認は実施していない。よって、チクソトロピー性グラウト材における塩化物イオン浸透性を確認することで耐久性の定量評価を目的とした。

なお、これまでの実物大注入試験³⁾で用いた実際の現場で使用頻度の高い高粘性型と超低粘性型グラウト材も同時に実施しチクソトロピー性グラウト材と比較した。

4.2 試験概要

耐久性能の評価は、塩化物イオン濃度を測定する「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」(JSCE-G 572-2007)⁶⁾に準拠し、硝酸銀溶液(モル濃度性: 0.005mol/L)を用いた電位差滴定法により塩化物イオンを定量した。塩化物イオンの定量後、見掛けの拡散係数を算出し3材料について比較した。

表－6に各材料の配合・空気量・フレッシュ性状を示す。表－7に超低粘性型グラウト材の材料諸元を示す。

写真－6に試験体の表面被覆状況を示す。

3材料は全てプレミックスタイプであり、練り混ぜは15kgの粉体に対し1300rpmのハンドミキサーで3分間練り混ぜた。試験体は直径100mm、高さ150mmのため、

表－6 各材料の配合・空気量・フレッシュ性状

	W/B (%)	空気量 (%)	フレッシュ性状	
			フロー値 (mm)	流下時間 (s)
チクソ性	40	0.215	78	—
高粘性	40	0.898	—	22
超低粘性	36	0.043	—	5

表－7 超低粘性型グラウト材の材料諸元

混和タイプ	プレミックス
ベースセメント	早強ポルトランドセメント
粉体密度	3.07 g/cm ³
フレッシュ性状	流下試験(JP 漏斗) 規格値：3.5～6s



写真－6 試験体表面被覆状況

高さ 200mm の円柱供試体を製作し、端面から 25mm を切断除去して製作した。本試験を開始する前に前養生として材齢 28 日まで標準水中養生を実施後、20±2℃の 10%塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。なお、浸せき期間は試験法の目安より最大期間である 1 年間とし、試験体は試験法に則り打込み側の円形 1 面のみを残し他の円形の 1 面および円周面をエポキシ樹脂により被覆した。

4.3 塩化物イオン含有量

「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」(JIS A 1154-2020)⁶⁾により、20±2℃の 10%塩化ナトリウム水溶液に 1 年間浸せきした試験体を、硝酸銀溶液を用いて電位差滴定法により塩化物イオンを定量した。

写真－7 に電位差滴定法により試料を電位差滴定装置にセットした塩化物イオンの定量状況を示す。表－8 に各試料の塩化物イオン含有量を示す。

塩化物イオンを抽出する過程において、ろ液を作成する際にろ液および洗液を水で 200mL に定容して試験溶液とし、試験溶液を分取して水で 50mL に薄めたため、塩化物イオン含有量の算出式は式(1)⁶⁾を用いた。

$$C = \frac{V_i f_i}{W} \cdot \frac{200}{X} \cdot 100 \cdot \frac{0.003545}{\alpha} \quad (1)$$

ここに、 C : 試料中の塩化物イオン含有量
(質量分量%)

V_i : 滴定に要した i mol/L 硝酸銀溶液量(mL)

f_i : i mol/L 硝酸銀溶液量のファクター

X : 試験溶液の分取量(mL)

W : はかりとった試料の質量(g)

0.333545 : 0.1mol/L 硝酸銀溶液量 1mL の塩化物イオン相当量(g)

α : 硝酸銀溶液のモル濃度に関する係数
(=20)



写真－7 電位差滴定法実施状況

表－8 各材料の塩化物イオン含有量

表層からの位置	塩化物イオン含有量(質量分量%)		
	チクソ性	高粘性	超低粘性
0～1cm	1.0344	1.5112	1.8240
1～2cm	0.0171	0.4651	0.2428
2～3cm	0.0174	0.0504	0.0462
3～4cm	0.0150	0.0287	0.0286
4～5cm	0.0132	0.0308	0.0079
初期値	0.0120	0.0150	0.0080

4.4 塩化物イオン量と見掛けの拡散係数

式(1)により算出した各材料の塩化物イオン含有量から、独立行政法人土木研究所が所有するコンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シートを用い、フィックの第 2 法則に基づいた拡散方程式の解を用いて試験体ごとに各深さ位置における全塩化物イオン値を回帰分析し、表面の塩化物イオンや塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。

式(2)⁶⁾に拡散方程式の解を示す。

表－9 に式(2)により算出された各材料の見掛けの拡散係数と表面の塩化物イオン濃度を示す。

$$C_{(x,t)} - C_i = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2 \sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、 x : 暴露面から塩化物イオン濃度測定箇所までの距離(mm)

t : 供用期間(年)

$C_{(x,t)}$: 距離 x (mm), 浸せき期間 t (年)における塩化物イオン(kg/m³)

C_0 : 表面の塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_i : 全塩化物イオン濃度の初期値(kg/m³)

D_{ap} : 見掛けの拡散係数(cm²/年)

erf : 誤差関数

表－9 各材料の拡散係数と表面塩化物イオン濃度

	チクソ性	高粘性	超低粘性
D_{ap} (cm ² /年)	0.119	0.653	0.348
C_0 (kg/m ³)	45.2	31.8	48.2
C_i (kg/m ³)	0.16	0.21	0.12

試験の結果より、見掛けの拡散係数はチクソトロピー性グラウト材が最も低く、チクソトロピー性グラウト材は現在一般的に使用されている高粘性型や超低粘性型グラウト材より塩化物イオンの内部浸透が遅く耐久性が向上すると考えられる。

チクソトロピー性グラウト材の拡散係数が他の2材料に比べ格段に小さかった要因として、チクソトロピー性グラウト材はチクソトロピー性を付与するためにシリカヒュームや高炉スラグ微粉末などの超微粉末材料を混和しており、グラウトが緻密化したことから拡散係数が小さくなったものと考えられる。

5. 結論

先流れ試験の実証結果と性状の確認により、チクソトロピー性グラウト材と粘性で分類されるグラウト材では先流れが生じるメカニズムが異なるため、一様に比較することは困難である。

チクソトロピー性グラウト材では見掛けの降伏点により先流れの有無を判断することが可能であり、その指

標となる値は100Pa以上であると言える。さらに、見掛けの降伏点が100Paとなるフロー値は97.8mmとなることから、フロー試験により簡易的に先流れの有無を判断できると考えられる。

塩化物イオン量の見掛けの拡散係数の算出と市販2材料との比較により、チクソトロピー性グラウト材の見掛けの拡散係数は他の2材料よりも値が1/2以上小さいことが確認された。これは、チクソトロピー性グラウト材はチクソトロピー性を付与するため超微粉末材料を混和しており、緻密化したことが要因として考えられた。これにより、塩化物イオンの内部浸透が他の2材料よりも遅く、PC鋼材まで到達する時間も最も遅くなることから、耐久性が向上する材料であることが確認できた。

参考文献

- 1) PCグラウト&プレグラウト PC鋼材 施工マニュアル 2024改訂版, 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会, 2024.5
- 2) 伊藤 拓, 藤原 浩已, 菅原 章, 後出 寛: チクソトロピー性を有するPCグラウト材の実用確認試験の報告, 第30回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.493-496, 2021.10
- 3) 伊藤 拓, 藤原 浩已, 棚田 尚宏, 向井 裕哉: チクソトロピー性グラウト材の注入試験報告, 第31回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.251-254, 2022.10
- 4) 伊藤 拓, 藤原 浩已, 棚田 尚宏, 向井 裕哉: 実施工を想定したチクソトロピー性グラウト材の圧送性に関する実験研究, 第32回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.81-84, 2023.10
- 5) 伊藤 拓, 藤原 浩已, 棚田 尚宏: チクソトロピー性グラウト材のミキサー攪拌性に関する研究と実用性の検証, 第33回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.591-594, 2024.10
- 6) 2023 制定 コンクリート標準示方書 規準編, 公益社団法人 土木学会, 2023.9