

無線式多点温度計測システムによる 高圧噴射攪拌工法の造成出来形の見える化

水野 健太¹

¹若築建設株式会社 技術研究所 土質・地盤改良グループ

高圧噴射攪拌工法における造成出来形の確認を行うモニタリング技術として、セメントミルク噴流による地中の瞬間的な温度変化とセメント固化に伴う水和反応熱の検知に着目した「無線式多点同時温度計測システム」を開発した。本システムは、熱電対を深度方向に複数箇所設置し、地中の温度変化を遠隔操作で連続的にモニタリングするものである。本稿では、開発した計測システムの概要、計測結果の評価手法および現場適用結果について述べる。

キーワード：高圧噴射攪拌工法，熱電対，測定管，セメント水和反応，無線通信

1. はじめに

近年、港湾岸壁、河川護岸、防潮堤等の耐震強化を目的として、狭隘な条件でも施工可能な高圧噴射攪拌工法によるセメント固化改良工事が増えている。従来の高圧噴射攪拌工法は、JSG 工法（二重管工法）やコラムジェットグラウト工法（三重管工法）と呼ばれる造成径φ2.0m程度までのジェットグラウト工法が一般工法であったが、最近では経済性や施工効率性を追求した大口径の高圧噴射攪拌工法が数多く開発・実用化されている。一方、耐震強化や液状化対策に代表される本設工事では、造成したセメント固化改良体に対する品質や出来形確認に対する要求水準は高くなっており、深度方向に造成径が連続的に確保されていることを求められる事例が多くなっている。

高圧噴射攪拌工法の造成径を確認する技術としては、熱電対¹⁾、光ファイバー^{2) 3)}、振動センサー⁴⁾、マイクロフォン⁵⁾等の各種センサーを何らかの手段で地中にあらかじめ埋設し、セメントミルクの噴射到達を検知するモニタリング技術が数多く開発されている。今回、著者は、セメントミルク噴流の到達による地中の瞬間的な温度変化とセメント固化に伴う水和反応熱の検知に着目した「無線式多点同時温度計測システム」を開発した。本稿では、開発した計測システムの特徴、計測結果の評価手法および現場適用結果について述べる。

2. 開発技術の概要

(1) 開発要件

地中温度計測に基づく高圧噴射攪拌工法の改良出来形（造成径）の可視化は、外縁部（設計改良径の端部）へのセメントミルク噴射の到達確認およびその後のセメン

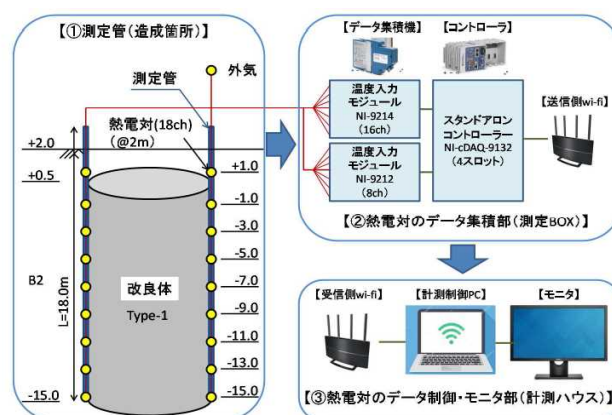


図-1 「無線式多点温度計測システム」の概要図

ト水和反応による温度上昇の確認の2つのフェーズに分けて考える必要がある。このため、改良端部に設置する温度センサーは、深度方向に出来るだけ密に設置し、これをリアルタイムかつ数日間モニタリングする必要がある。そこで、温度センサー（T型熱電対）は深度方向に2mピッチ程度で配置し、測定管2本を対角に設置して同時計測する仕様とした。また、20箇所/1測定箇所程度のサンプリングデータを遠隔モニタリングできるように、データ伝送は無線LAN（Wi-Fi）方式を採用した。

(2) システム構成

「無線式多点同時温度計測システム」の概要図を図-1、システム一式の外観を写真-1、モニタ画面の例を写真-2にそれぞれ示す。

システムのコア機器であるサンプリングデータの制御・伝送を担うコントローラーには、4セットの温度入力モジュールを接続することができ、現状では32CH（16CH×2）を実装しており、最大64CHへの拡張が可能である。高圧噴射攪拌工法の造成箇所は、造成機近くの

ピットに排出される排泥や洗浄水が飛散する劣悪な施工環境である。また、港湾工事では、越波、潮風、飛砂等の影響も強く受ける。このため、計測制御およびモニタリングは、造成箇所近くに設置する計測ハウスや現場に設営される仮設事務所で行うことが多い。そこで、複数の熱電対を造成箇所近くにいったん集積し、これを計測制御パソコンまで無線 LAN 方式 (Wi-Fi) で伝送する方式を採用した。こうすることで、造成箇所と計測ハウスが離れている場合においても、長い熱電対ケーブルを敷設する必要がなくなり、コスト低減が図られるだけでなく、ケーブルの断線等による計測不能のリスクを回避できる。なお、データ集積装置や無線 LAN のアクセスポイントは屋外向けの長距離・耐環境仕様ものを選定し、かつ堅牢なハウジング BOX に収納している。

写真-2 のモニタ画面例に示すように、計測中は、各測定ポイントの温度変化を数値表示、バー表示、グラフ表示でリアルタイムにモニタリングできる。バー表示は、初期値からの温度上昇量に応じて3段階に色分け表示でき、施工の進捗状況と対比できる画面構成としている。

(3) 測定管

高圧噴射攪拌工法で地中温度計測を実施する場合、造成中に熱電対が損傷しないように、堅牢な測定管を設置することが最も重要である。本システムでは、あらかじめ測定管 (硬質塩ビ管) に熱電対先端部を外側に貼り付け、測定管 (L=2m) をソケットで現場継ぎする構造としている。また、下部から順次造成する高圧噴射攪拌工法では、測定深度におけるセメントミルクの噴射到達を的確に捉えるために、造成中のセメントミルクが測定管に沿って逸走する現象をできる限り防止することが重要である。そこで、熱電対先端部 (測定箇所) の上下に吸水性膨張ゴムを取り付けている。この吸水性膨張ゴムは、地下水と接触することで5倍程度に膨張する特徴を持ち、測定管と孔壁の間の隙間を塞ぐパッカーの役割を果たし、セメントミルクの逸走を抑制することができる。測定管の製作状況を写真-2に示す。

3. 計測結果の評価方法

水和反応によるセメント固化処理土の温度上昇は、対象土の土質、固化材や練り混ぜ水の種類、混練後セメントミルクの液温 (施工時期の影響)、初期地温や地下水の流況によって変化すると思われる。故に、地中温度計測に基づく造成径の確認は、判定が難しいとの指摘もある³⁾。このような指摘はある側面では正しいと思うが、堅牢に作り込んだ測定管を、精度よく地盤中に建て込むことを前提として、地中温度計測を事前、造成中、造成後と段階的に行い、各段階における計測目的を明確にして計測値を適切に評価すれば、出来形判定に十分に適用できるモニタリング技術であると筆者は考える。ここで

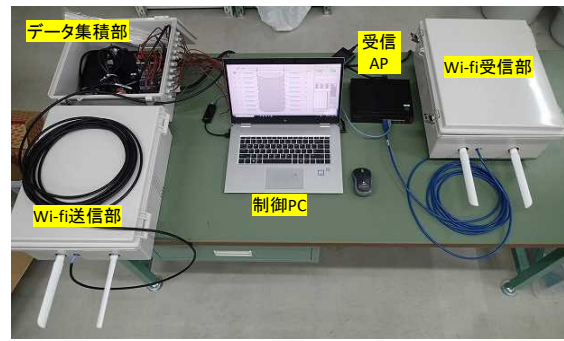
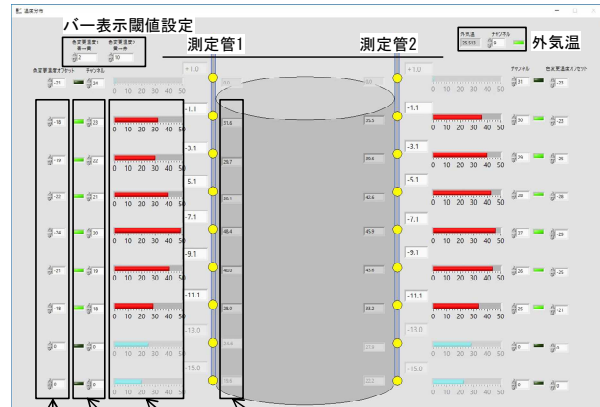


写真-1 システム一式の外観



初期値 表示CH バー表示 数値表示

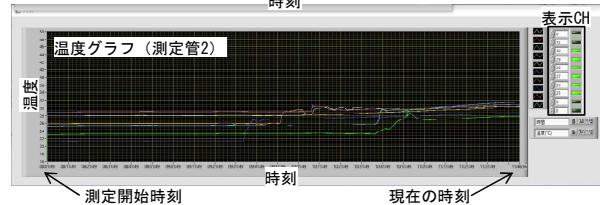
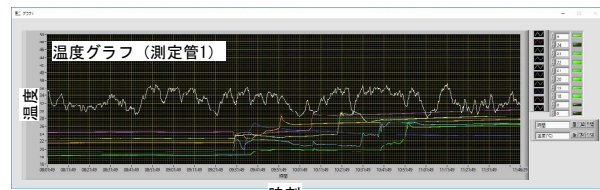


写真-2 モニタ画面例



写真-3 測定管の製作状況 (2m×9本=18m)

は、著者が考案した「3ステージ計測」について述べる。

(1) 造成前初期値計測

耐震強化工事で対象となる深度までの地中温度は、一般的に15℃～20℃程度と考えられるが、地盤の形成履歴や地下水、先行工事の影響を受けていることもあるため、

造成前の地中温度（初期地温）を深度毎に計測することは極めて重要である。

(2) 造成中計測

造成中のセメント水と反応による温度上昇量はわずかである。しかし、噴射されたセメントミルクが測定管の位置まで到達しているかどうかは、造成前の地中温度とセメントミルクの液温の差が大きいほど明確に判断できる。これが造成中計測の目的である。重要なのは、前述した初期地温を詳細に把握しておくことと、プラントで混練されたセメントミルクの液温を事前に計測しておくことである。例えば、夏季施工の場合、液温は初期地温よりも一般的に高いため、計測温度の跳ね上がりで噴射到達を判断できる。冬季施工の場合や、先行工区の影響で初期地温がセメントミルク液温よりも高い場合は、計測温度の瞬間的な低下で同様の判断ができる。ここでは、瞬間的な温度変化を捉える必要があるため、サンプリングピッチは1Hz程度（1秒に1回）を標準としている。なお、瞬間的な温度変化と高圧噴射攪拌工法の造成深度が一致しない（多くは噴射口位置よりも早く温度変化が見られる）場合は、測定管に沿ってセメントミルクが逸走しているものと考えられる。

(3) 造成後計測

セメント固化改良土では、水和反応熱によって固相体内部ほど温度が徐々に上昇する。これまでの実績では、施工後おおむね24時間かけて地中温度は緩やかに上昇し、その上昇量は10～20℃程度である。したがって、造成日を含めて2日間の計測を行えば、出来形の判定を行うことができる。なお、サンプリングピッチは、1分に1回程度で十分である。

(4) 判定

噴射到達時の瞬間的な温度変化（上昇もあれば低下もある）、その後の一定の温度上昇量が認められれば、測定管の設置位置まで固化改良体は造成されていると判断する。

4. 現場適用

(1) 工事概要

ここで紹介する適用事例は、岸壁の耐震強化を目的としたものである。本工事では、地盤改良工として、機械攪拌式深層混合処理工法（CI-CMC 工法）と高圧噴射攪拌工法（FTJ-NA 工法）が採用されている。事業概要、工法の選定、施工手順、先行工事における改良仕様の決定過程については、参考文献⁹を参照されたい。本工事は、地盤改良工の最終段階を実施するもので、控え杭部の改良、既設改良体に挟まれた部分の改良、取付部の改良があり、広範囲かつ各種改良仕様となっていた。そこ

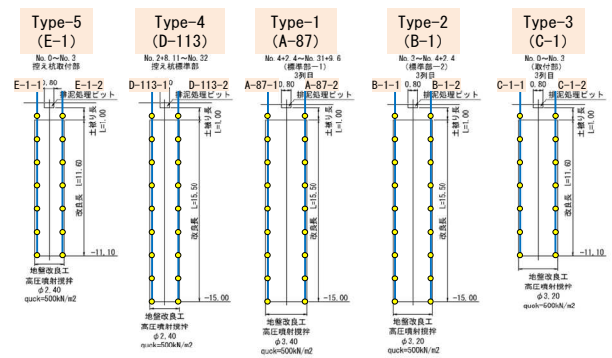


図-2 測定断面図

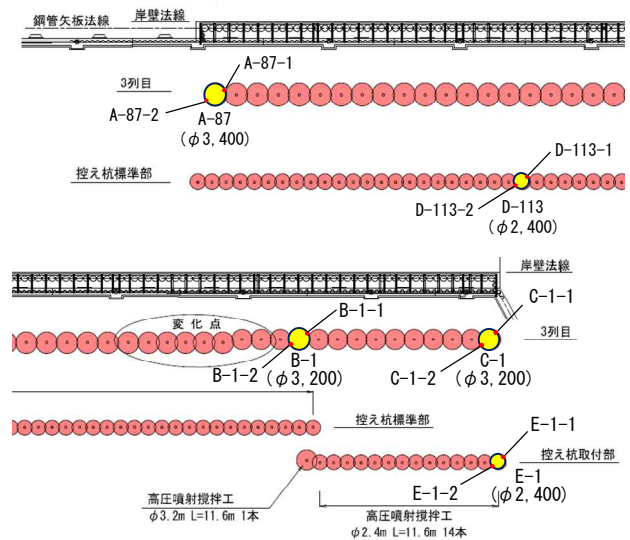


図-3 測定平面図

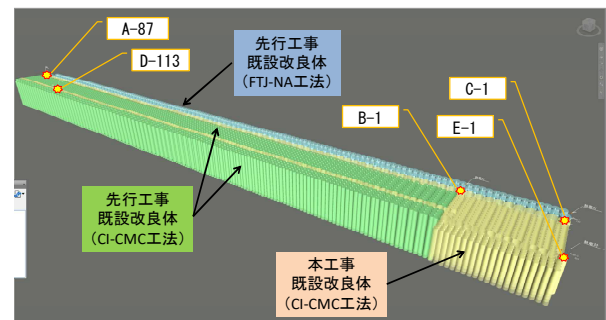


図-4 地盤改良工法の三次元鳥瞰図

表-1 試験杭の仕様

タイプ	改良径 (m)	深度 DL(m)	試験杭 杭番号	本数 (本)	熱電対数 (個/本)	測定管 延長(m)
Type-1	φ 3.4	-15.0	A-87	2	9	18.0
Type-2	φ 3.2	-15.0	B-1	2	9	18.0
Type-3	φ 3.2	-11.1	C-1	2	7	14.0
Type-4	φ 2.4	-15.0	D-113	2	9	18.0
Type-5	φ 2.4	-11.1	E-1	2	7	14.0
合計				10	84	82.0

で、FTJ-NA 工法の各種改良仕様の最初の 1 本目の造成を試験杭と位置づけ、本開発システムを運用した。測定断面図を図-2、測定平面図を図-3、三次元鳥瞰図を図-4、

試験杭の仕様を表-1に示す。対象とした固化改良体は5体、測定管は1体あたり2本の計10本を設置した。なお、測定管の設置はボーリング作業により行った。測定管の建て込み状況を写真-4に示す。

(2) 計測仕様

造成時のシステム運用状況を写真-5に示す。温度計測の期間、測定ピッチを表-2に示す。計測結果は、制御PCに記録（CSV形式）するとともにリアルタイムでモニタ表示した。モニタリングは、A-87およびD-113については現場事務所、その他（取付部）については施工箇所から離れた計測ハウスにて実施した。Wi-Fi送信アンテナから現場事務所の受信アンテナまでの距離は100m程度であったが、データの送受信に問題はなかった。

(3) 初期値計測結果

造成前の地中温度計測結果（深度分布図）を図-5に示す。試験杭造成位置における初期地温は、以下の傾向であることを確認した。

- いずれの地点も地中温度の深度分布は放物線状に分布していることがわかった。すなわち、改良中央部でピーク値を示し、改良下端で20°C~25°C、改良上端は地表温度（外気温）に近い値を示した。
- 特に、施工エリアの端部ではないD-113は、標高-7m~9mの位置で40°Cを示す高温状態にあった。
- このような地中温度分布を示している要因は、本工事の施工エリアが先行工事および本工事による既設改良体に囲まれていたためと考えられる。先に造成された固化改良体のセメント水和反応により、地盤全体が温められており、改良中央部の深度ほど未だに放熱が進行していないと推察される。

(4) 造成中および造成後計測結果

試験杭施工日およびシステム運用期間を表-3に示す。最初に実施したA-87では測定管を撤去せず、造成後約2ヶ月間の長期的なデータを取得した。また、最後に実施したE-1（午前中造成）とC-1（午後造成）は、32CHをフルに活用し、計測システムの2箇所同時運用を行った。本稿では、紙幅の都合上、標準部で実施したA-87について計測結果を示す。

A-87 造成中の温度変化（A-87-1）を図-6、A-87 造成後から2日間の温度変化（A-87-1）を図-7、計測結果の整理表を表-4に示す。整理表には、初期地温、2日間における最高温度、上昇温度（最高温度-初期温度）、噴射の到達検知が可能であったかどうかをまとめている。ここで、噴射到達の判断は、瞬間的な温度変化を捉えた場合を「○」、明確には捉えられなかった場合を「△」、熱電対の損傷等による測定エラーを「-」と表記した。

- A-87の計測結果をまとめると、
- セメントミルク到達後は、緩やかな温度上昇を示し、造成開始から1日後には最高値に達し、造成開始から



写真-4 測定管の建て込み状況 (A-87)

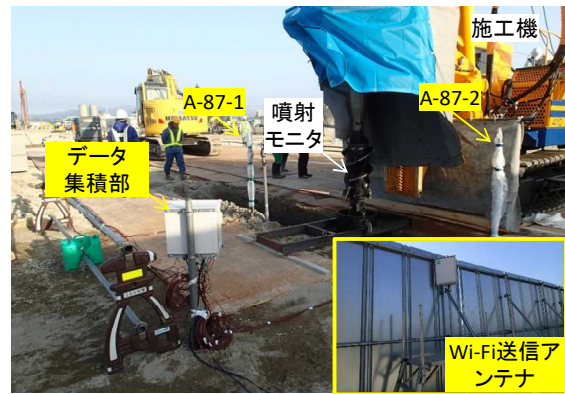


写真-5 造成時のシステム運用状況 (A-87)

表-2 計測仕様

ステージ	目的	期間	測定ピッチ
造成前	地中温度初期値	造成前1日	1回/1分
造成中	噴射到達の検出	造成日	1回/1秒
造成後	セメント水和反応	造成後2日	1回/1分

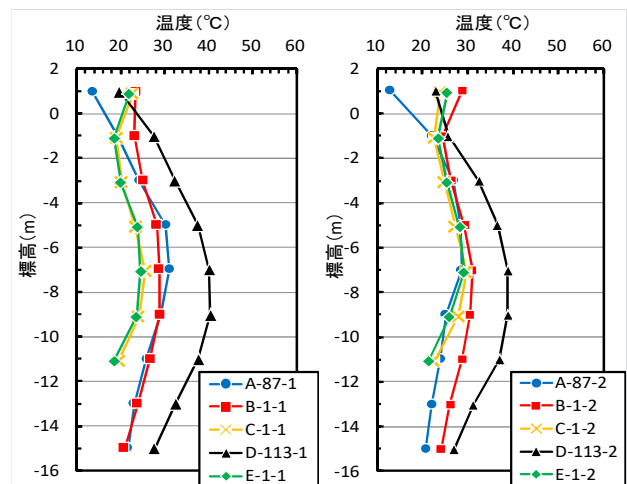


図-5 初期地温の深度分布 (左: 海側, 右: 陸側)

2日後にはほぼ平衡状態となった。

- 計測点によるバラツキがあるものの、温度上昇量は+6°C~+38°Cであった。

表-3 試験杭造成日とシステム運用期間

試験杭	造成日	運用期間	備考
A-87	2019.5.7	2019.5.6~5.17	10日間計測
B-1	2019.6.27	2019.6.26~6.29	
C-1	2019.7.2(PM)	2019.7.1~7.4	E-1と同時計測
D-113	2019.5.28	2019.5.27~6.6	
E-1	2019.7.2(AM)	2019.7.1~7.4	C-1と同時計測

表-4 温度計測結果の総括表

測定管 No.	標高 (m)	初期温度 (°C)	最高温度 (°C)	上昇温度 (°C)	到達検知
スラリー液温		17.5	—	—	—
A-87-1	-1.0	19.2	45.9	26.7	○
	-3.0	24.3	50.4	26.1	△
	-5.0	30.3	46.8	16.5	○
	-7.0	31.1	47.3	16.2	○
	-9.0	29.2	46.6	17.4	○
	-11.0	25.9	31.6	5.7	△
	-13.0	23.0	46.8	23.8	○
A-87-2	-1.0	22.1	41.7	19.6	○
	-3.0	26.9	51.4	24.5	○
	-5.0	28.3	52.7	24.4	○
	-7.0	28.6	56.5	27.9	○
	-9.0	25.2	50.1	24.9	○
	-11.0	24.0	47.0	23.0	○
	-13.0	22.1	60.5	38.4	○
-15.0	20.8	41.9	21.1	△	
判定				OK	OK
				φ3,400を確保	

- ・最高値は、初期値 22.1°Cに対して最高温度 60.5°C（上昇温度 38.4°C）であった。
 - ・造成時のセメントミルク液温は 20°C前後（計測値：17.5°C）であったため、造成前の地中温度（初期値）が高い計測点（25°C～30°C）では、噴射到達時に瞬間的に低い温度を示す応答となった。このことから確実に噴射が届いていることを判断できた。
 - ・これとは逆に、初期値が 20°C前後の計測点では、セメントミルクとの温度差が小さかったため、噴射到達を明確に判別できなかったが、瞬間的に 1°C～3°C温度上昇を示しており、このことから噴射が届いていると判断した。
- 以上より、Type-1（φ3,400）は所定の改良径で造成されていると評価した。

(5) 考察

セメント水和反応による固化土の温度上昇の全体傾向を確認することを目的に、全計測データのうち有意なデータを図-8および図-9にプロットした。

図-8より、すべての測定ポイントで造成後の最高温度は初期温度より5°C以上となっており、初期温度+15°Cを中心に+5°C～+25°Cの間に分布していることがわかる。図-9よりCI-CMC工法による既設改良体に囲まれ、

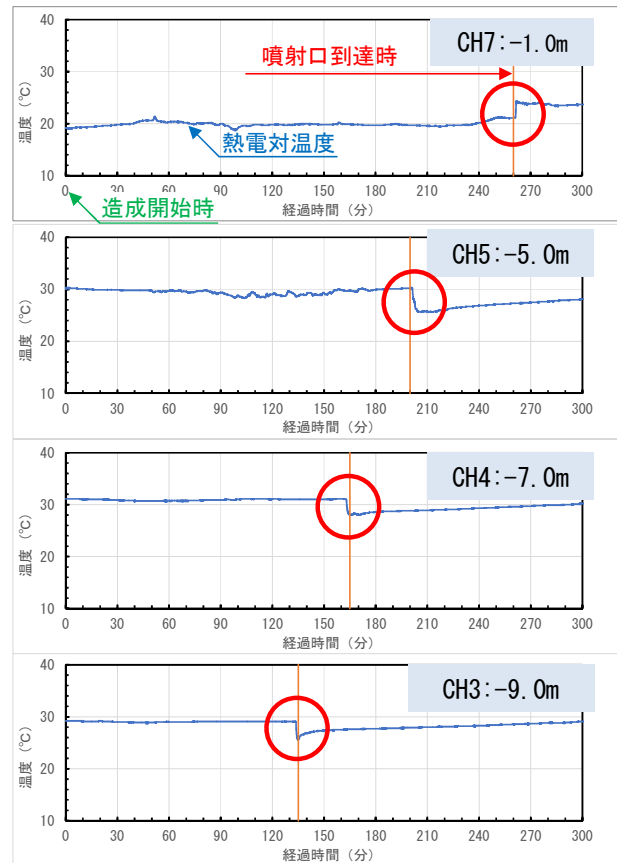


図-6 造成中の温度計測結果

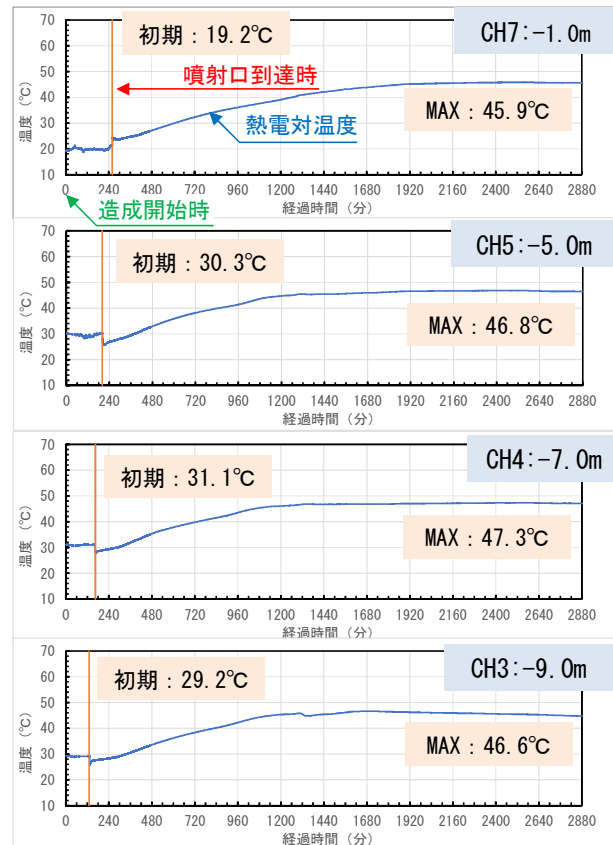


図-7 造成後の温度計測結果

初期温度が最も高かったD-113に関しては、他の箇所よりも上昇温度が10°C程度と小さいことが読み取れる。一方、改良端部であり、計測時期が5月上旬であったA-87に関しては、最高温度や上昇温度が高い値を示していることがわかる。

以上の考察から、夏場の熱い時期よりも春先の涼しい時期のほうが温度変化にメリハリが出て、評価しやすい側面を持っていると考えられる。

5. おわりに

高圧噴射攪拌工法における造成出来形確認のための地中温度計測では、設計改良径の位置までセメントミルクの噴射が届いていなくても、固化改良体のセメント水和熱で周りの地盤が僅かながら温められる可能性も考えられる。このため、確実に噴射が届き、かつ設計改良径が確保されていることを地中温度計測に基づいて証明するためには、1) 改良前の地中温度（初期値）を把握しておくこと、2) 固化材の噴射到達時の温度変化を捉えること（セメントミルク液温の把握を含む）、3) その後の水和反応による温度上昇量を数日間にわたって連続的にモニタリングことが必須条件であり、これら各段階の温度変化を分析・考察することが重要である。

また、測定管はこれまでの現場実績に基づいて様々な改良を加え、設計・製作したものである。その結果、本工事で損傷した温度センサーは 82 箇所中 1 箇所のみであり、全測定箇所（5 箇所 10 本）において、所定の改良径の判断に十分な温度計測データを得ることに成功した。

以上のように緻密な計画に基づく地中温度計測により、数多くの有意な計測結果を取得できた。5箇所全ての試験杭について、造成翌日には所定の改良径で造成されていると判断し、発注者へ速やかに報告することができた。その結果、工程を遅延させることなく本施工へ移行することを実現した。

今後の課題としては、測定管建て込み作業の効率化が挙げられる。測定管を確実に建て込むには、地質調査用のロータリー式ボーリングマシンによる泥水掘りが望ましい。測定管の建て込み後は地山と測定管をなじませ、適切な初期値計測を実施する必要がある。また、吸水性膨張ゴムによるパッカー効果を期待するためにも、測定管設置後は1週間程度の養生期間を置くことが理想である。しかし、掘進深度 20m 程度の場合、1日1本設置するのが限界であり、地質調査業者の手配の関係で造成直前に測定管を建て込む事態になることも想定される。したがって、ロータリーパーカッションドリルなど掘進能力の高い削孔機を用い、ケーシング内に確実に測定管を建て込む方法（ケーシング抜管時に共上がりさせないなど）を検討していく必要がある。

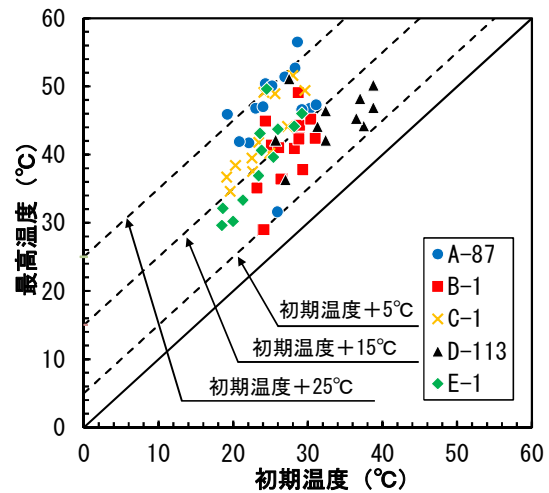


図-8 初期温度と最高温度の関係

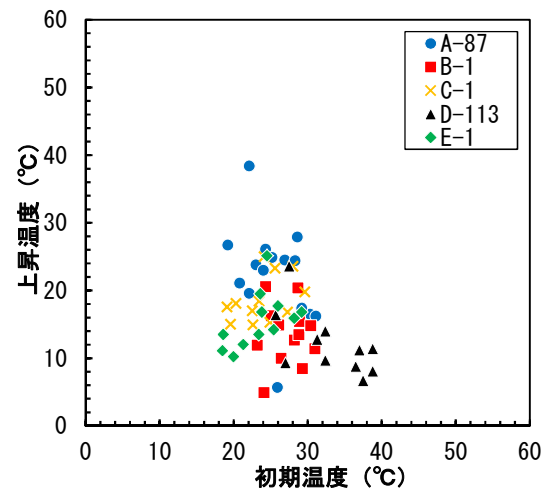


図-9 初期温度と上昇温度の関係

参考文献

- 野澤良一・稲木信之・一坪慎吾：供用中岸壁における高圧噴射攪拌工法による岸壁背面の地盤改良対策例：土木学会第66回年次学術講演会，pp.383-384，2011。
- 手塚広明・山内崇寛・川西敦士：高圧噴射攪拌工法で改良された地盤の品質管理手法，地盤工学ジャーナル，Vol.8，No.2，pp.251-263，2012。
- 両角達雄・中島拓巳・永谷英基・田中恵祐・阿部勇児・上田哲也・山野辺純一・大熊瑞生：光ファイバを用いた地盤改良体の出来形計測技術，土木学会全国大会第76回年次学術講演会，VI-122，2021。
- 矢部浩史・深田久・秋間健・菅章吾：プラスチックボード材を用いた地盤改良施工管理に関する基礎的実験，第53回地盤工学研究発表会（高松），pp.875-876，2018。
- 島野嵐：切削状態モニタリング技術を用いた高圧噴射攪拌工法の高効率施工＝音響解析による改良出来形径の計測＝，建設機械，Vol.50，No.9，pp.69-73，2014。
- 坂上正樹・加藤真朗・美濃太一：金沢港南地区無量寺岸壁再整備事業（地盤改良）について，令和2年度北陸地方整備局事例研究発表会，2020。