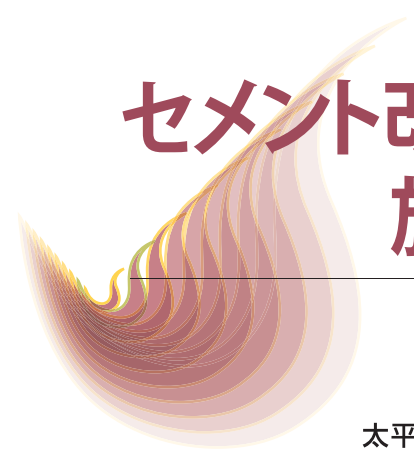




セメント改良土の養生温度を考慮した 施工管理方法の検討

伊藤忠TC建機株式会社 エンジニアリング事業部特命担当部長 藤井 二三夫
伊藤忠TC建機株式会社 エンジニアリング事業部長補佐 堀 常男
伊藤忠TC建機株式会社 エンジニアリング事業部環境土木部長 佐藤 直樹
太平洋セメント株式会社 セメント事業本部営業部固化材営業グループ 藤江 佑大
太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所固化・不溶化技術グループ 森 喜彦
太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所固化・不溶化技術グループ 早川 飛翼
太平洋セメント株式会社 研究開発本部（国立研究開発法人土木研究所出向） 七尾 舞

1. はじめに

浚渫工事で発生する高含水比の泥土を再利用する方法として、セメント系固化材等を用いて改良・養生後に掘削搬出し盛土材として再利用するケース等がある。掘削搬出の場合、利用先の重機のトラフィカビリティや土質区分基準¹⁾等によりコーン指数を用いて品質管理を行うことが多いため、強度が得られるまでは現場内のピットで養生保管する必要があり、施工期間を管理する上で制約となっている。また、固化材種や添加量は室内配合試験にて選定されるが、実際の現場と室内配合試験では環境温度や断熱条件が異なるため、温度履歴に乖離が生じ、強度発現性が異なる事例も多い。そのため、より合理的に施工管理を行うには、温度履歴の反映により現場の強度を精度よく推定することが重要である。一般的にセメント改良土の強度は積算温度によって推定できることが知られている²⁾が、主

に冬期を想定した低温環境を対象としており、高温環境に着目した知見は少ない。そこで、本報告では、セメント改良土の養生温度と材齢を変化させ積算温度とコーン指数との関係を整理し、養生温度が強度発現性に与える影響について検討した。また、積算温度によるコーン指数の強度推定の可能性を実施工にて検証したので併せて紹介する。

2. 養生温度がセメント改良土の強度発現性に及ぼす影響(コーン指数)

普通ポルトランドセメントを用いた改良土の養生温度と材齢を水準に条件を変えて積算温度とコーン指数との関係について検討した。

2-1 ラボ試験における試料調整方法および試験方法

試験に用いた試料土は、沖縄県N港より採取した泥土を9.5mmふるいに通過させ、施工条件を想定して容積比で海水

を25%加水したものとした。試料土の物性を表-1に、XRF分析に基づく化学組成を表-2に示す。試料土には海水の影響と考えられるCl、Na₂O、K₂Oが多く確認された。試験条件を表-3に示す。固化材には普通ポルトランドセメントを使用し、添加形態を粉体添加とし、混合時間は5分とした。混合後の改良土を1Lの鋼製モールドに充填し供試体を成型した。供試体の養生は、温度を2水準(20、30℃)とし、材齢を3水準(1、3、7日)とした。所定の養生を終えた供試体を用いJIS A 1228に準じてコーン指数試験を行った。

2-2 ラボ試験結果

材齢とコーン指数との関係を図-2に示す。いずれの添加量においても養生温度が高い条件で強度が高くなることが確認された。

上述の結果より、コーン指数には材齢と養生温度が大きく影響していると考えられる。そこで、積算温度とコーン指数の関係について、以下の式(1)³⁾より積算温度を算出し、検討した。

$$M = \sum (t + 10) \times T \quad (1)$$

ここに M: 積算温度(℃・hr)
t: 養生温度(℃)
T: 材齢(hr)を示す。

積算温度とコーン指数との関係を図-3に示す。セメント添加量ごとで積算温度とコーン指数との相関係数R0.98以上と高い相関性があり、セメント添加

表-1 試料土の物性

試料土	泥土
採取地	沖縄県
湿潤密度 ρ (Mg/m ³)	1.38
自然含水比Wn (%)	130.9

表-2 試料土の化学組成

化学組成 (%)											
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₃	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₃
2.97	2.90	17.31	50.87	0.26	2.07	2.73	3.21	9.98	6.59	0.06	0.84

量が多くなることで近似式の傾きが大きくなることを確認した。

図-3から得られた近似式より、材齢3日における養生温度20、30、40℃の場合のコーン指数を算出し、養生温度20℃の場合との強度比を確認した。材齢3日における養生温度20℃に対する強度比を図-4に示す。材齢3日において養生温度が20℃高くなると添加量にかかわらず約20%の強度増加が見込めることが確認できた。

上述の結果、積算温度とコーン指数との関係には高い相関性があり、養生温度が高いほど改良土のコーン指数は大きくなる傾向であった。また、養生温度と強度増加率には添加量に関わらず、高い相関性が認められた。

表-3 試験条件

固化材	普通ポルトランドセメント
固化材添加量 (kg/m ³)	70、110、150
添加形態	粉体添加
養生温度 (℃)	20、30
材齢 (日)	1、3、7

3. 養生温度がセメント改良土の強度発現性に及ぼす影響(水和生成物)

積算温度とコーン指数との関係には高い相関性が認められたことから、養生温度20～60℃でのセメント改良土の水和生成物を同一積算温度で比較し、養生温度が強度発現性に与える影響について考察した。

3-1 試料作製方法および試験項目

試験に用いた試料土は、採取時期が異なるものの、2章で述べた同様の場所(沖縄県N港)で採取した泥土(1.40Mg/m³、自然含水比120.3%)を用いた。固化材は普通ポルトランドセメントを使用した。固化材添加量は150kg/m³とし、添加形態を粉体添加とした。供試体作製時における混合時間は5分とした。混合を終えた試料土を塩ビモールドに充填し、養生した。養生時の温度は20、30、40、60℃

表-4 試験項目・方法

試験項目	試験方法・規格
一軸圧縮強さ	JIS A 1216 (供試体寸法: $\phi 50 \times H100$ mm)
鉱物組成	粉末X線回折装置(XRD)

とした。各養生温度条件において積算温度が1,680℃・hrとなる材齢を設定した。積算温度は(1)式より算出した。養生後、直径50mm、高さ100mmに整形したものを供試体とした。表-4に試験項目を示す。一軸圧縮強さ試験はJIS A 1216に準じて実施した。セメント改良土中の水和生成物の確認は粉末X線回折装置(以下、XRD)を用いた。XRDの分析試料には、一軸圧縮強さ試験後の試験体より分取し、40℃環境で24時間乾燥させたものを用いた。さらに、XRDの分析試料には内部標準試料としてコランダム粉末(α -Al₂O₃)を10%混合した。

3-2 試験結果

(1) 一軸圧縮強さ

一軸圧縮強さ試験の結果を図-5に示す。養生温度20、30、40℃の一軸圧縮強さは同程度である一方、養生温度60℃は同じ積算温度であるにもかかわらず強度は高くなった。

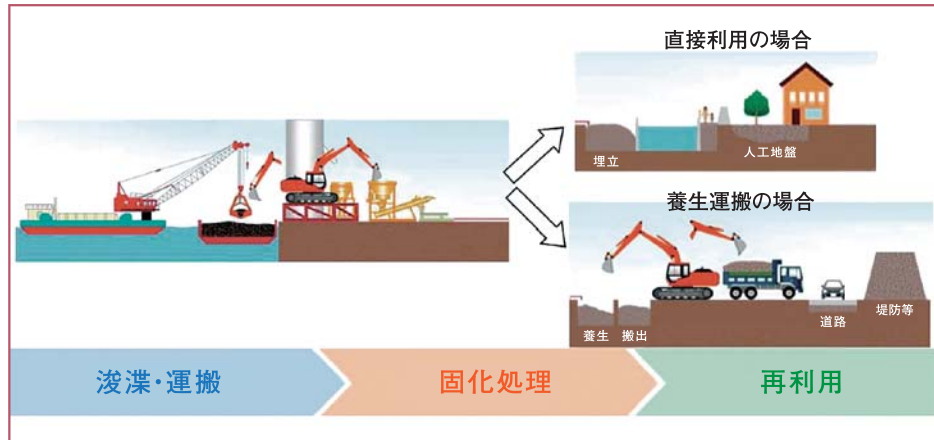


図-1 泥土処理のフロー(泥土処理研究会HPより引用)

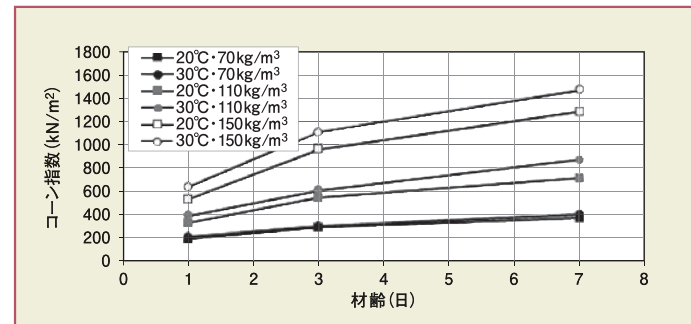


図-2 材齢とコーン指数との関係

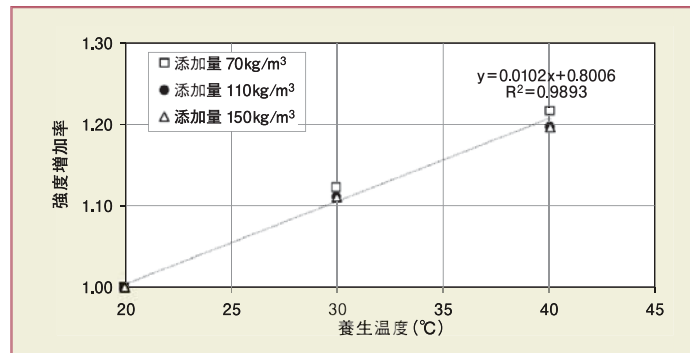


図-3 積算温度とコーン指数との関係

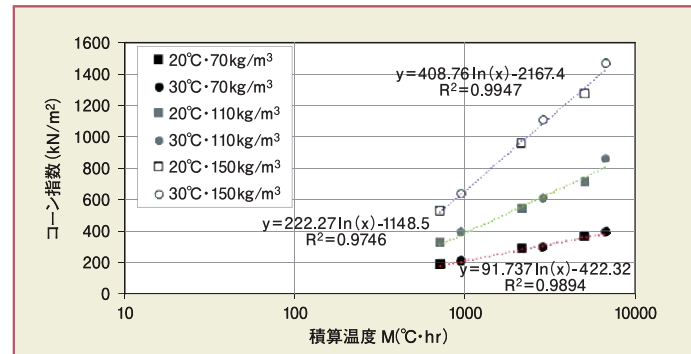


図-4 材齢3日における養生温度20℃に対する強度比

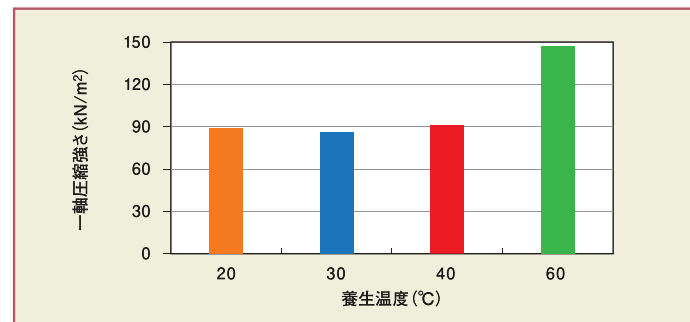


図-5 セメント改良土の一軸圧縮強さ(1680℃・hr)

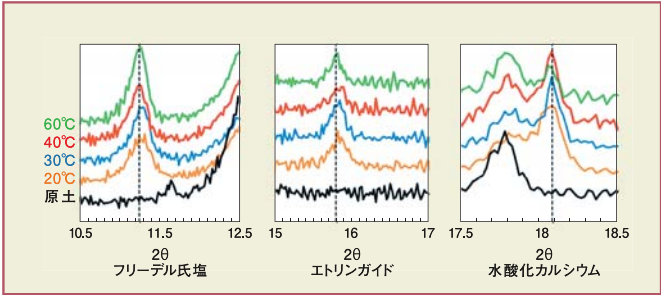


図-6 セメント改良土の回折パターン(1680℃・hr)

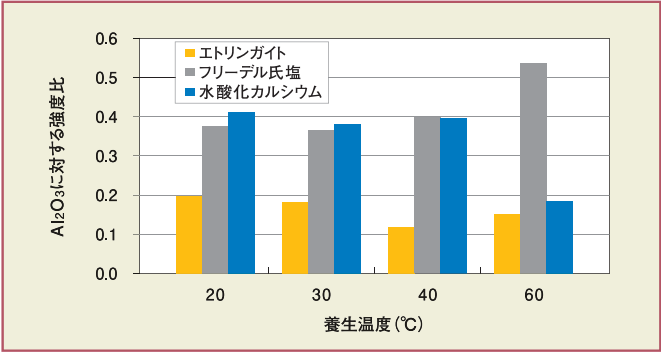


図-7 各水和生成物の内部標準試料に対する強度比

(2) 鉱物組成

XRDによるX線回折結果で確認された水和生成物の特徴的なピーク付近の回折パターンを図-6に示す。セメントの水和に由来する主な生成物として、エトリンガイト($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$)、水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、土壌中の塩化物イオンに起因すると考えられるフリーデル氏塩($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot10\text{H}_2\text{O}$)が確認された。水和生成物量の比較を行うため、各水和生成物のピークと内部標準試料のピークの強度比を算出した。各水和生成物の内部標準試料に対する強度比を図-7に示す。養生温度60℃ではフリーデル氏塩の生成量が多く、水酸化カルシウムは減少した。これは、フリーデル氏塩は高温環境下において生成しやすいためであり、水酸化カルシウムの減少はフリーデル氏塩の生成に当たり消費されたものと考えられる。一般にセメント改良土の強度は、エトリンガイト等の水和物の生成による土粒子の拘束ならびに土中の水分を水和物の結合水として固定化することによる含水比の低下等の影響によって増加することが知られている³⁾。本実験では、エトリンガイトの生成量は養生温度による明確な違いは認められないが、養生温度60℃におい

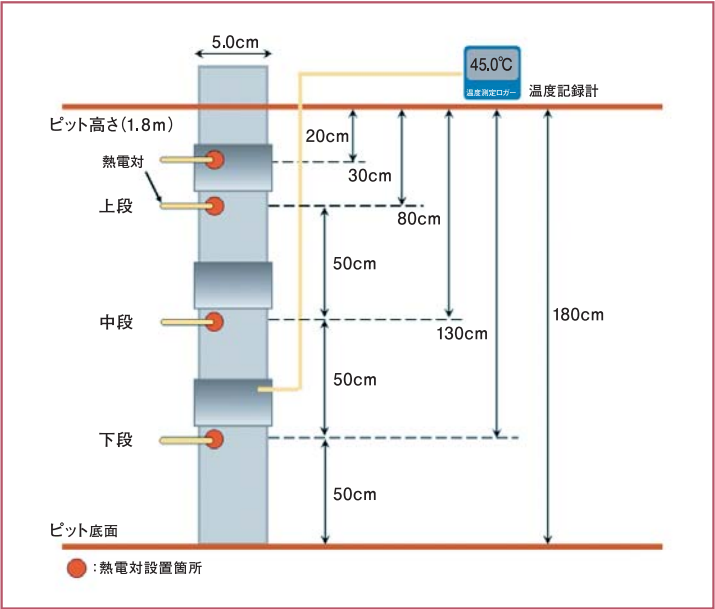


図-8 温度履歴の測定箇所

てフリーデル氏塩の生成量は増加している。このことから、フリーデル氏塩の生成量増加に伴い、土中の水分において、結合水として固定化される量が増加し、強度が増進した可能性がある。

4. 沖縄県N港の浚渫工事での検証

上述の検討内容について、沖縄県N港の現場にて試験施工を行い、温度履歴の評価および積算温度による強度推定を実施した。

4-1 施工の概要

試験施工の概要を表-5に示す。試験施工では沖縄県N港の浚渫工事において、浚渫土へ普通ポルトランドセメントを添加し改良した後、現場内に設けたビット内で標準3日間養生した。なお、セメント添加量は2章での試験結果を基に、現場管理強度に安全率を考慮して146kg/m³に設定した。養生後のセメント改良土は、現場管理強度を満足

表-5 試験施工概要	
工事名	N港湾(元)浚渫工事(その1)
工期	2021年12月～2022年11月
施工規模	約11万m ³
現場管理強度	≧400kN/m ²
固化材	普通ポルトランドセメント
添加形態	粉体
固化材添加量	146kg/m ³

することを確認した上で場外へ搬出し、土地造成材として有効利用した。

4-2 温度履歴の測定状況

本施工での改良土の温度履歴のデータ収集と改良土の強度推定を行う目的で、ビット内の改良土の温度を測定した。試験施工の現場写真を写真-1に、改良土の温度履歴の測定状況を写真-2および図-8に示す。温度測定の箇所は1ビットに2つとし、ビット深さ1.8mに対して、上面から20、30、80、130cmの4点に配置した。また、比較として外気温も計測した。熱電対は図-8に示すように穴をあけた直径5cmの塩ビ管に番線で固定し、打設直後に改良土に塩ビ管を圧入して設置した。

4-3 温度履歴の測定結果

温度履歴の測定結果を図-9に示す。表面付近の温度は35～40℃であったのに対し、中心部の温度(深さ80、130cm)は、打設後3日経過時点でも45℃付近を維持しており、セメント改良土は外気温の



写真-1 試験施工の現場写真

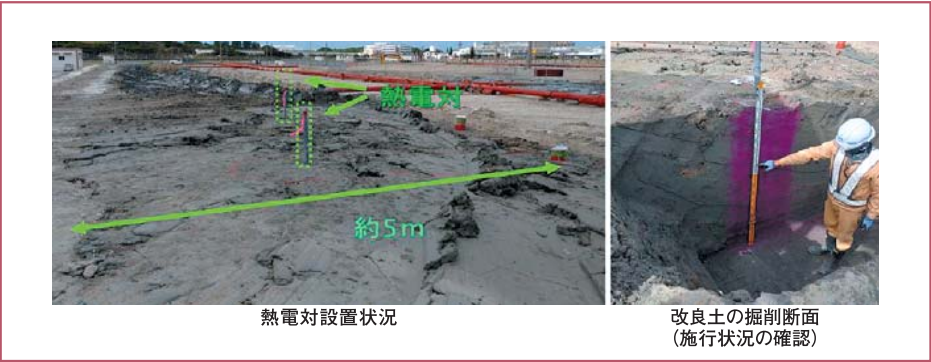


写真-2 温度履歴の測定状況

最高温度より15℃程度高い状態で養生されていることが確認された。

4-4 積算温度による強度推定および実測結果

深さ130cmの箇所では37～45℃程度で推移したことから、積算温度による強度推定が可能と判断し、事前に実施した室内配合試験でのコーン指数および積算温度の相関式より材齢3日(積算温度3,000℃・hr)でのコーン指数の推定値を算出した。また、施工3日後に養生ビットの深さ130cmの箇所より改良土を採取して供試体を作製し、作製直後にコーン指数を評価した。コーン指数の推定結果と現場にて評価したコーン指数の実測値を表-6に示す。なお、表中の積算温度(3,904℃・hr)は現場での温度履歴から算定したものである。推定値が1,213kN/m²に対し実測値は1,119kN/m²(実測/

表-6 コーン指数の推定値と実測値			
測定深さ (cm)	積算温度 (℃・hr)	コーン指数 (kN/m ²)	
		予測強度	実測値
130	3904	1213	1119

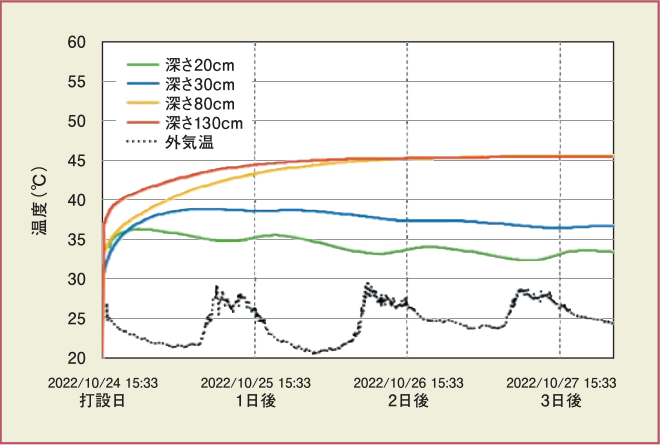


図-9 セメント改良土の温度履歴

5. まとめ

セメント改良土の養生温度と材齢を変化させ積算温度とコーン指数との関係を整理し、養生温度が強度発現性に与える影響について検討するとともに、積算温度によるコーン指数の強度推定の可能性を実施工にて検証した。その結果、養生温度が60℃では強度発現性が異なり、積算温度とコーン指数が乖離したものの、養生温度が20～40℃程度であれば積算温度とコーン指数の関係式が概ね一致した。また、実施工において、ビット内でのセメント改良土の中心部は外気温よりも高い状態で維持しており、温度履歴を把握することで、強精度良い強度推定が可能であることが示唆された。

【参考文献】

- 1) 一般社団法人土木研究センター：建設発生土利用技術マニュアル第4版
- 2) 堀内ほか：低温度化におけるセメント混合土の強度発現性，第19回土質工学研究発表会
- 3) 橋本ほか：異なる養生温度条件下でのセメント改良土の強度発現，寒地土木研究所
- 4) 一般社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第5版



ふじい・ふみお

【著者略歴】
1976年 昭和工業株式会社入社
現在 伊藤忠TC建機株式会社エンジニアリング事業部 特命担当部長



ほり・つねお

【著者略歴】
1991年 パシフィックコンサルタンツ株式会社入社
現在 伊藤忠TC建機株式会社エンジニアリング事業部長補佐



さとう・なおき

【著者略歴】
1998年 住建道路株式会社入社
現在 伊藤忠TC建機株式会社エンジニアリング事業部 環境土木部長



ふじえ・ゆうだい

【著者略歴】
2022年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社セメント事業本部営業部固化材営業グループ



もり・よしひこ

【著者略歴】
2009年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社研究開発本部セメント・コンクリート研究所固化・不溶化技術グループ



はやかわ・つばさ

【著者略歴】
2020年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社研究開発本部セメント・コンクリート研究所固化・不溶化技術グループ



ななお・まい

【著者略歴】
2015年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社研究開発本部(国立研究開発法人土木研究所出向)