

「T-eCon®/地盤改良材」を用いた改良地盤の品質調査

技術センター木造人道橋への適用

大塚 修平^{*1}・渡邊 徹^{*1}・濱 健太郎^{*1}・松井 秀岳^{*2}・
池上 浩樹^{*2}・一色 裕二^{*3}・岩田 曉洋^{*4}

Keywords : T-eConcrete, ground improvement, field execution, shallow mixing method, unconfined compression strength

T-eConcrete, 地盤改良, 現場施工, 浅層混合処理工法, 一軸圧縮強さ

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現に向け、地盤固化改良分野においても低炭素化の取り組みが活発となっている（例えば^{1), 2)}。当社は、セメントを使用しない低炭素型の地盤固化改良材「T-eCon/地盤改良材」に関して、室内配合試験による検討から、従来のセメント系固化材と同レベルの強度特性を有することを確認している³⁾。今回、T-eCon/地盤改良材を実工事における地盤改良に初適用した。本報では、本適用における一連の施工および各種品質調査の結果について報告する。

2. 地盤改良の概要

2.1 T-eCon/地盤改良材

T-eCon/地盤改良材は、当社開発の「T-eConcrete®/セメント・ゼロ型」の結合材を地盤固化改良材として応用したものである。構成材料は、質量比約80%の高炉スラグ微粉末を主体とする粉体と高炉スラグ微粉末の硬化を促進する刺激材であり、ポルトランドセメントの使用量をゼロとすることでCO₂排出量を大幅に削減できる⁴⁾。

2.2 地盤改良計画

今回、写真-1に示す技術センター木造人道橋（以降、人道橋と呼称）の橋台直下で地盤改良を行った。橋台は鉄筋コンクリート基礎で設計されており、設計用の長期荷重度は橋台の平面位置によって150 kN/m²又は200 kN/m²と異なる値となっている。

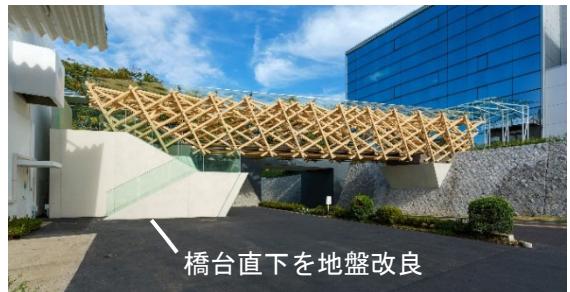


写真-1 技術センター木造人道橋の全景
Photo.1 View of timber pedestrian bridge

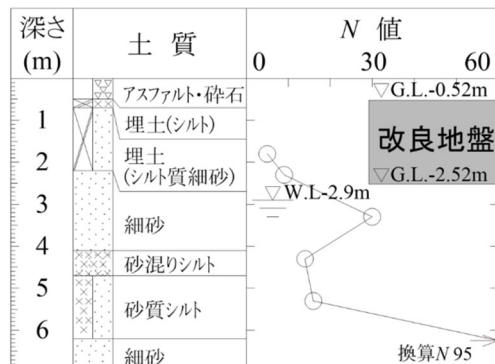


図-1 地盤状況と改良地盤
Fig.1 Soil profile and improved ground

図-1に橋台直下の地盤状況を示す。図中には、改良地盤の深度も併記した。GL-2.2mまでN値が10以下の埋土層が分布し、それ以深に洪積シルト質砂層、一軸圧縮強さが650 kN/m²の洪積砂質シルト層、N値60以上の洪積細砂層と硬質な地層が続いている。

設計荷重、地層構成、地盤強度および橋台直下の既存共同溝の位置（図-4に後述）を考慮して、GL-0.5~2.5mの範囲を地盤改良する計画とした。図-2に改良対象土（埋土層）の基本物性として、事前室内配合試験用（3章参

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室

* 2 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

* 3 設計本部 構造設計第二部

* 4 建築本部 技術部

照)に9.5 mmのふるいを用いて粗粒分を取り除いた粒度分布を示す。粒度分布からは、細砂が主体であること、約40%の細粒分を含むことなどが確認できる。

3. 室内配合試験

3.1 室内目標強度の設定

改良対象土への固化材配合量を、文献⁵⁾に従い決定するため、事前の室内配合試験を実施した。

橋台の支持地盤の長期許容支持力度(200 kN/m²)を基に改良地盤の設計基準強度 F_c は600 kN/m²と設定した。配合強度 X_f は、式(1)で求められる。

$$X_f = F_c \times a_t = 600 \times 1.918 = 1,151 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (1)$$

ここで、 a_t は改良地盤の強度のばらつきを考慮した割り増し係数で、想定する変動係数が大きく品質検査における抜き取り箇所数が少ないほど大きな値となる。今回、施工後の改良地盤におけるコア強度の合格確率 $L_{(p)}$ を80%、想定する変動係数 V_d を採用工法の施工実績から25%⁶⁾、想定するコアの抜き取り箇所数を安全側の判断より、実際のコア抜き本数より少ない2とし、 a_t を1.918と設定した。室内目標強度 X_f は、現場／室内強度比 a_{fl} を考慮して式(2)で求められる。

$$X_{fl} = X_f / a_{fl} = 1151 / 0.6 = 1,919 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (2)$$

ここで、 a_{fl} は採用工法の技術資料⁶⁾を参照し0.6とした。

3.2 配合試験

人道橋施工前の地盤(GL-1.0~1.5m程度)から採取した土と固化材スラリーを混合して作成した直径50mm×高さ100mmの供試体に対し、一軸圧縮試験を実施した。固化材スラリーは固化材と水で構成され、水固化材比W/Bを100%とした。固化材は、T-eCon/地盤改良材と、比較検討用に普通ポルトランドセメントを70%程度含有する従来のセメント系固化材(以降、従来型固化材と呼称)を用いた。配合試験のケースを表-1に示す。土1m³当たりの固化材配合量(外割)は、T-eCon/地盤改良材が150~550kg/m³の範囲で5種類、従来型固化材が150,250,350kg/m³の3種類とした。供試体は20°C湿空養生を基本としたが、T-eCon/地盤改良材に関しては低温下における強度発現特性を確認するため、5°C湿空養生条件でも検討した。試験材齢はT-eCon/地盤改良材で3,7,14,28日、従来型固化材で7,28日とした。

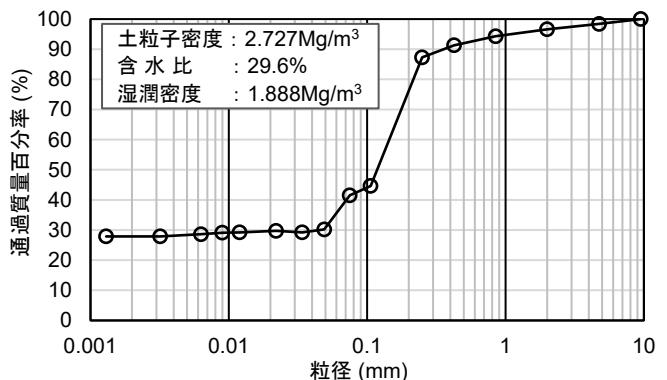
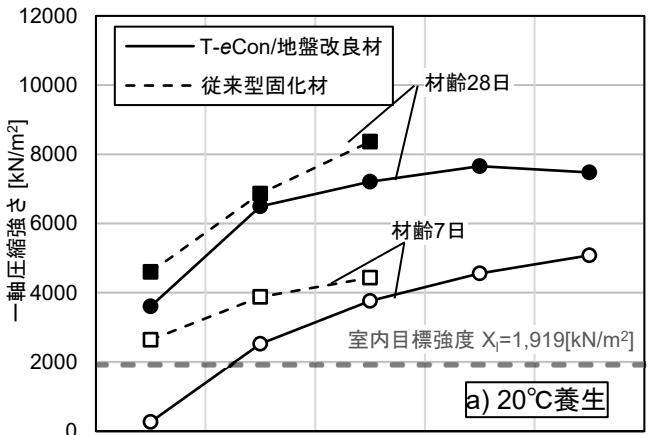


図-2 改良対象土(埋土)の粒度分布
Fig.2 Grain size distribution of soil

表-1 配合試験ケース

Table 1 Case of mix proportion test

固化材種類	W/B [%]	固化材配合量 [kg/m ³ , 外割]	養生温度 [°C]	試験材齢 [日]
T-e Con/ 地盤改良材	100	150		
		250		
		350	20,5	3,7,14,28
		450		
		550		
セメント系 (従来型)	100	150		
		250	20	7,28
		350		



a) 20°C養生

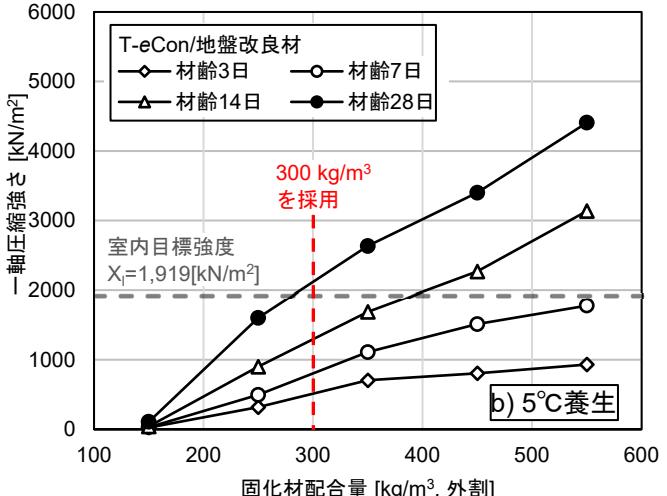


図-3 固化材配合量と一軸圧縮強さの関係
Fig.3 Relationship between unconfined compression strength

and amount of stabilizer content

図-3に固化材配合量と一軸圧縮強さの関係を示す。養生温度20°Cでは、T-eCon/地盤改良材の一軸圧縮強さは、材齢7日において従来型固化材のそれに比べ小さいものの、材齢28日ではほぼ同等な値となった。一方、養生温度5°CにおけるT-eCon/地盤改良材の一軸圧縮強さは、養生温度20°Cに比べ小さく、固化材配合量250kg/m³以下では X_{fl} を下回った。これは、T-eCon/地盤改良材の構成材料である高炉スラグ微粉末の水和反応が温度の影響を受けやすいことが要因として挙げられる。人道橋での地盤改良工事は当初3月を予定しており、低外気温下における施工の可能性があった。よって、養生温度5°Cの結果を線形補間し、改良地盤への固化材配合量を300kg/m³とした。

4. 改良地盤に対する品質調査

T-eCon/地盤改良材を用いた改良地盤の各種データの取得を目的とし、表-2に示す(1)基本物性、(2)強度・変形特性、(3)混ざり具合、(4)環境影響、(5)温度に関する調査を行った。

(1)～(4)の調査は、鉛直コア試料および未固結試料を用いて行った。鉛直コア試料は、施工25日後に図-4に示す位置で、ボーリングマシンを用いてロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプラーにより採取したものである。未固結試料は、改良地盤の施工直後に表層部から未固結状態の改良土を採取し、直径9.5mm以上の礫分を除いてモールドに充填したものである。いずれも試料採取後は、20°C湿空状態で養生した。

強度・変形特性の調査では、鉛直コア試料は直径約65mm×高さ約130mmに、未固結試料は直径50mm×高さ約100mmに成形して供試体を作製し、弾性波速度を計測した後、同じ供試体で一軸圧縮試験を行った。なお、コア供試体については、ボーリングコアによるサンプリング時に生じた亀裂や断面欠損などが確認されたものを除いている。

固化材と現地土の混ざり具合は、鉛直コア試料によるコア採取率調査に加え、混合攪拌終了後に採取した未固結試料のふるい分け試験で確認した。また、強度・変形特性調査に用いた供試体に対し、X線CTにより礫分や土塊の混入状況の分析を行った。

施工後の改良地盤の温度変化を把握するため、改良地盤2か所(図-4参照)の温度、および比較検討用に改良地盤から3m以上離れた現地盤の温度(以降、周辺地盤温度)を1か所、外気温を1か所、それぞれ計測した。計測深さは、改良地盤が天端から-0.25, -0.75, -1.25, -

表-2 品質調査一覧
Table 2 List of quality investigation

分類	調査項目	調査対象	備考
(1) 基本物性	密度測定	鉛直コア試料	乾燥・湿潤密度
	一軸圧縮試験	鉛直コア試料	材齢: 28, 56, 182日
	未固結試料	未固結試料	材齢: 7, 28, 56, 182日
(2) 強度・変形特性	弾性波速度	鉛直コア試料	材齢: 28, 56, 182日
	未固結試料	未固結試料	材齢: 7, 28, 56, 182日
	圧密試験	鉛直コア試料	
(3) 混ざり具合	コア採取率	鉛直コア試料	目視確認
	ふるい分け試験	未固結試料	混合攪拌終了後に採取
	X線CT	鉛直コア試料	
(4) 環境影響	溶出量・含有量	鉛直コア試料	
	改良地盤内温度	改良地盤	2箇所, 4深度, 56日間
	地中温度	(周辺)現地盤	1箇所, 4深度, 56日間
(5) 温度	外気温	気中	1箇所, 1点, 56日間

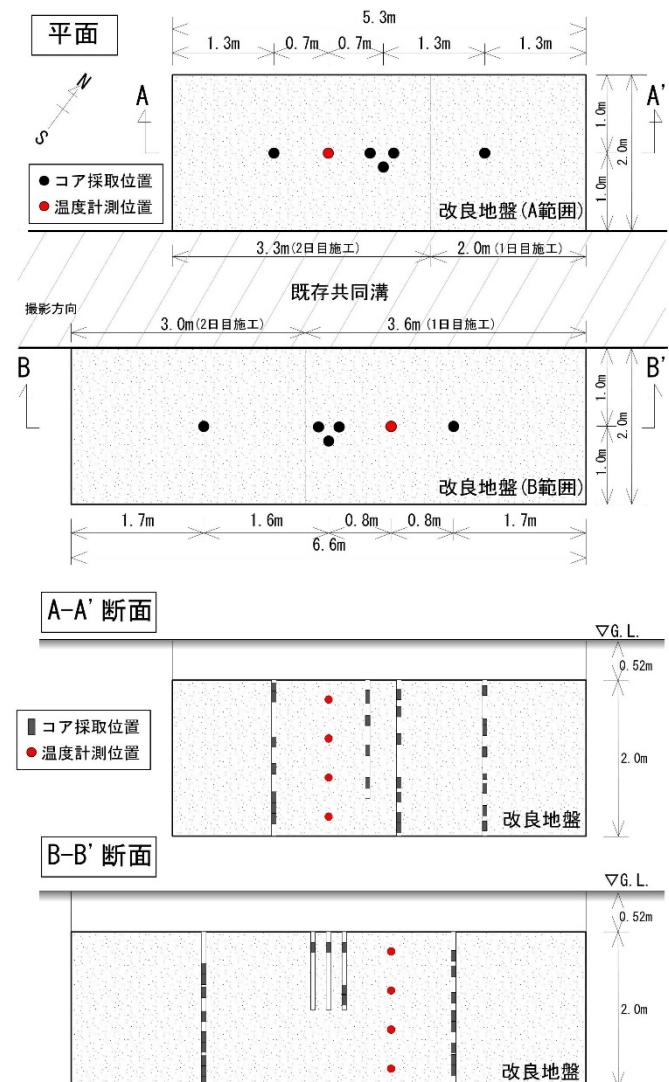


図-4 改良地盤範囲と各種調査位置
Fig.4 Area of ground improvement and location of investigation

1.75m(図-4 参照), 周辺地盤が地表面から-0.5, -1.0, -2.0, -3.0m, 外気温が地表面+1.5mとした。改良地盤内に設置した温度センサー(熱電対)は, 棒状の治具に固定し, 施工完了の約3時間後に建込み自立させた。計測期間は施工完了日から56日間とした。

5. 改良地盤の施工

5.1 施工方法と事前準備

改良地盤の施工は, 浅層混合処理工法に分類されるエスマックスラリー工法^⑥(以降, 本工法)で実施した。本工法では, 写真-2に示す専用バケットをバックホーに装着し, そのバケット先端から固化材スラリーを吐出しながら地盤を混合攪拌することで, ブロック状の地盤改良体を造成する。なお, T-eCon/地盤改良材の利用による施工方法・設備の変更はしていない。

施工に先立ち, 攪拌バケットの幅およびバックホーのアーム高さの確認, 攪拌バケットの上下動・深度を検知する管理システムおよび固化材スラリーの圧送量を計測する流量計のキャリブレーションを行った。

5.2 施工状況

改良地盤は図-4に示す区割りにより2日間で施工した。施工は, 現地のプラントで混練した固化材スラリーを断続的に攪拌バケット先端から吐出し, 改良土1m³当たり11回^⑥以上の攪拌動作を行ながら, 所定量(改良土1m³当たり407L)の固化材スラリーを地盤へ混合した。施工状況を写真-3に, 施工完了状況を写真-4に示す。施工完了直後の改良地盤に対しふるい分け試験を実施した。ふるい分け試験では, 改良体天端付近の数か所から採取した未固結の試料に対して, 呼び寸法#40のふるい(目開き37.5mm)を通し, その通過率を確認した。本改良地盤において通過率はいずれも100%であり, 十分な混合攪拌が確認された。また, 施工の結果, T-eCon/地盤改良材を用いた現場混練や攪拌作業の手間・効率は, 従来型固化材の場合と同程度であった。

6. 改良地盤に対する品質調査

6.1 改良地盤の混合攪拌状況

改良地盤の深度方向における混合攪拌状況を把握するため, 目視によるコア採取率調査を行った。コア採取率は, サンプラーの掘進長に対する採取されたコアの固化部分の割合と定義される。図-5に本施工における代表的なコア採取率調査の結果を示す。コア採取率の最小値は1m区間に對し94%(合格判定値は90%以上

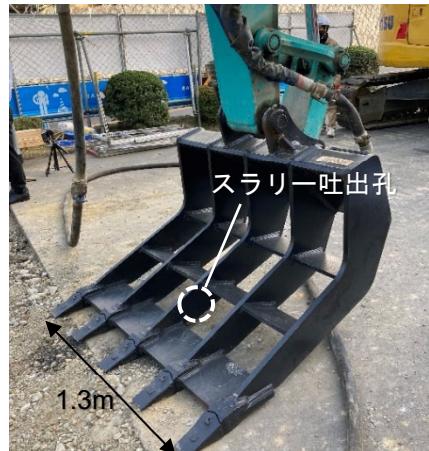


写真-2 専用バケット
Photo.2 Specialized bucket



写真-3 施工状況
Photo.3 State of execution



写真-4 施工完了状況
Photo.4 Completed improved ground

深度 GL-	試料長さ [cm]										採取長 [m]	採取率 [%]
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
0~1	0.94	94										
1~2	0.98	98										

図-5 代表的なコア採取率調査結果
Fig.5 Typical result of core recovery investigation

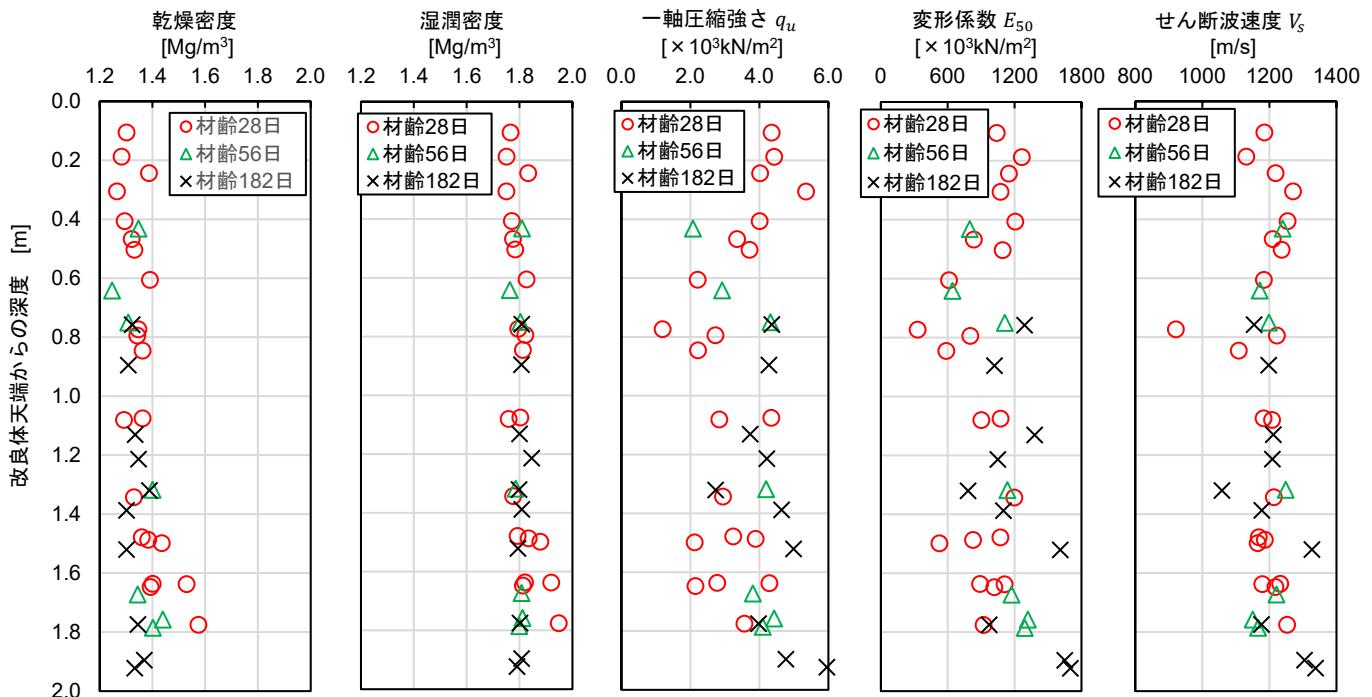
図-6 乾燥密度・湿潤密度・一軸圧縮強さ q_u ・変形係数 E_{50} ・せん断波速度 V_s の深度分布

Fig.6 Relationship between dry density, wet density, unconfined compression strength q_u , deformation modulus E_{50} and shear wave velocity V_s and depth of improved ground

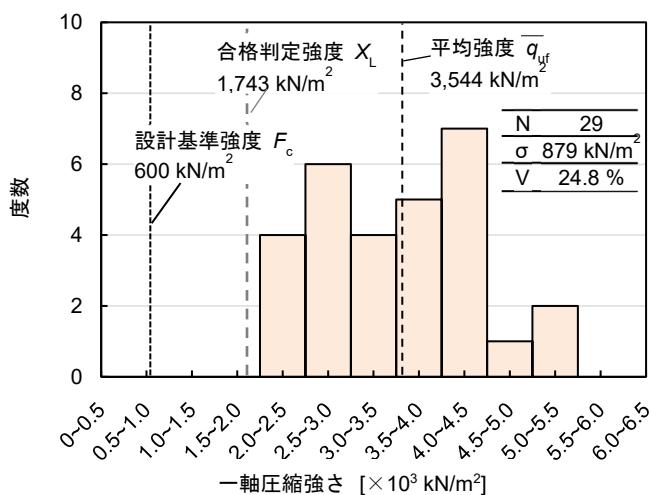
図-7 コア供試体における q_u のヒストグラム

Fig.7 Histogram of q_u for core specimen

5%), 全長に対し 96%(同 95%以上)で、いずれも合格判定値を満足しており、コア採取位置において十分な混合攪拌が行われたことが確認された。

6.2 改良地盤の基本物性と強度・変形特性

図-6 に改良地盤の基本物性として乾燥密度・湿潤密度・一軸圧縮強さ q_u ・変形係数 E_{50} ・せん断波速度 V_s の深度分布を示す。いずれも深度との相関は弱い。これは改良厚さが 2m 程度と小さいこと、改良対象土が埋土層のみであること、比較的均質に混合攪拌が行われたことが理由と思われる。

図-7 に材齢 28 日コア供試体における q_u のヒストグラムを示す。平均強度 \bar{q}_{uf} は $3,544 \text{ kN/m}^2$ であり、設計基準

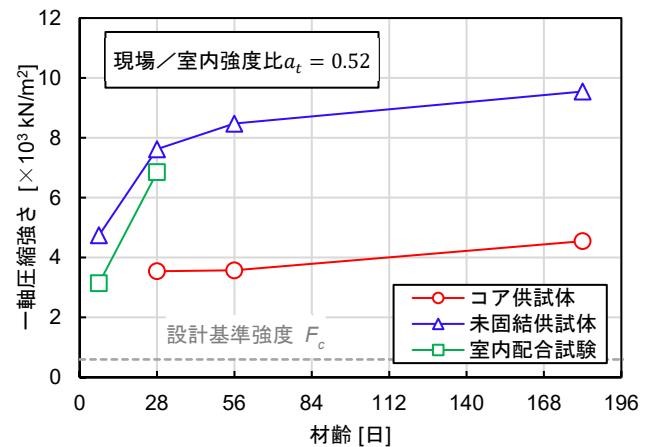


図-8 材齢と q_u の関係
Fig.8 Relationship between material age and q_u

強度 F_c (600 kN/m^2) の 6 倍とやや過剰であった。本改良地盤における合格判定強度 X_L は、 q_u のばらつきを考慮して、 $X_L = F_c + k_b \sigma = 1,743 \text{ kN/m}^2$ で与えられる。ここで、 k_b は合格判定係数(1.3)、 σ は q_u の標準偏差(879 kN/m^2)を示す。 $\bar{q}_{uf} > X_L$ より改良地盤の強度が十分発現していることが確認された。また、 q_u の変動係数 V は 24.8% であった。本工法における変動係数 V は通常 20~30%⁶⁾ であり、T-eCon/地盤改良材による改良地盤の強度のばらつきは、従来型固化材のそれと同程度であることが確認された。

図-8 に室内配合試験、未固結供試体およびコア供試体における一軸圧縮強さ q_u の平均値と材齢の関係を示

す。なお、室内配合試験の q_u は、養生温度 20°Cの室内配合試験における固化材配合量 250kg/m³および 350 kg/m³の結果から、固化材配合量 300kg/m³の値を線形補間したものである。材齢 182 日のコア供試体の q_u は、材齢 28 日のそれより 3 割程度大きく、長期にわたり強度が増加する傾向が認められる。また、材齢 28 日における現場／室内強度比 a_{fl} (コア供試体の q_u ／室内配合試験の q_u)は 0.52 であり、本工法における a_{fl} の設定値 0.6⁹⁾と概ね対応した。なお、未固結供試体の q_u は同材齢のコア供試体の q_u に比して大きい。これは、礫分・土塊混入の少ない改良地盤の天端付近から未固結供試体を採取したため、相対的に固化材の多い供試体となったことが要因として考えられる。写真-5 に両供試体の X 線 CT 画像を示すが、未固結供試体のほうが礫分・土塊混入量が少ない状態が見て取れる。

6.3 一軸圧縮強さとせん断波速度

改良地盤の一軸圧縮強さ q_u とせん断波速度 V_s には相関関係があることが知られており、改良地盤に対する非破壊での品質検査への適用が検討されている。浅香ら⁷⁾は、 q_u と V_s の関係として式(3)を提案している。

$$q_u = a \times \{\exp(b \cdot V_s) - 1\} \quad (3)$$

ここで、 a, b は土質によって定まる定数である。図-9 に本改良地盤における q_u と V_s の関係を示す。図中には、回帰分析で a, b を定めた式(3)を併記した。図-9 から、同じ V_s では未固結供試体よりコア供試体の q_u が小さいこと、同じ V_s に対するコア供試体の q_u のばらつきが大きいことが確認できる。これはコア供試体に含まれる礫分の影響と考えられ、式(3)の適用にあたり留意する必要があるといえる。

6.4 温度計測結果と固化材配合量に関する考察

図-10 に B 範囲(図-4 参照)の温度計測結果を示す。改良地盤の温度は、施工後に最高 38.0°Cまで急激に上昇した後に緩やかに低下し、56 日後には周辺地盤温度と同程度となった。深さ-0.25, -1.75m では他の 2 点に比べて最高温度がやや低く、外気温や周囲の地盤温度の影響を受けているものとみられる。施工日から 28 日後までの期間の周辺地盤温度および外気温はともに平均 18°C前後であり、改良地盤の養生状況としては 20°C養生に近い状態であったと考えられる。6.2 節で示したように、改良体の一軸圧縮強さがやや過剰となつたのは、配合設計の段階では冬期施工を想定し養生温度 5°Cの結果から固化材配合量を 300kg/m³としたものの、実際に工期の遅れに伴い 5 月施工になったため 20°C養生に

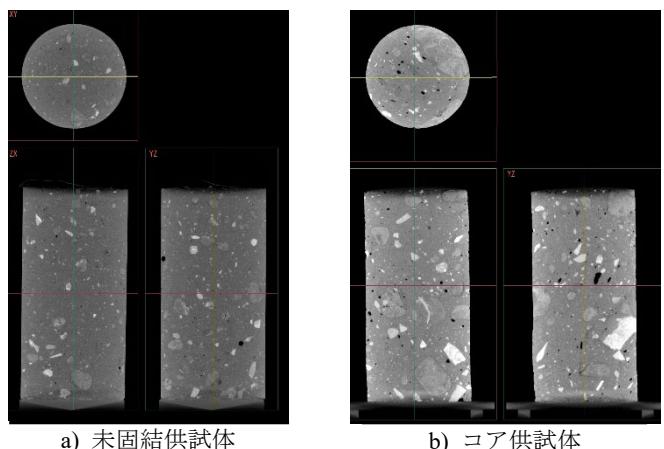
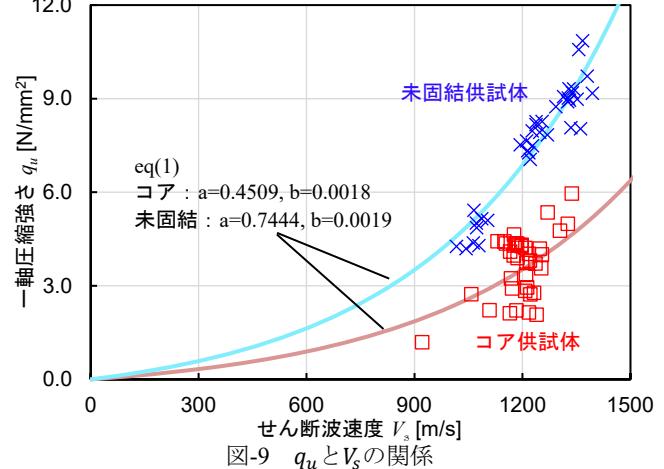
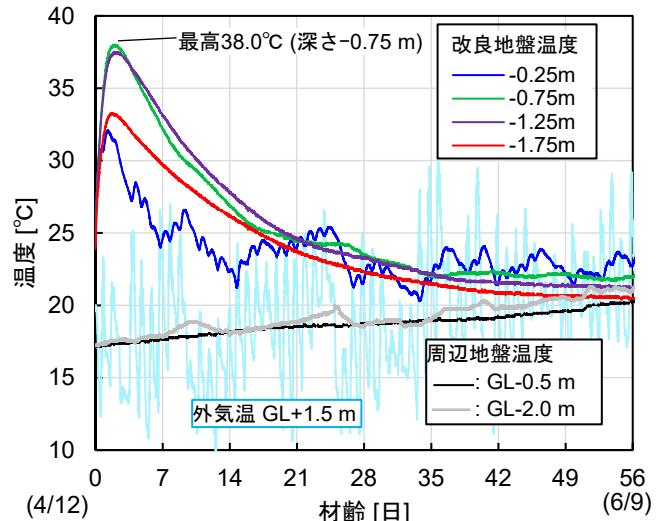
a) 未固結供試体
b) コア供試体

写真-5 供試体の X 線 CT 解析

Photo.5 X-ray CT analysis of specimen

図-9 q_u と V_s の関係
Fig.9 Relationship between q_u and V_s 図-10 B 範囲における温度計測結果
Fig.10 Results of temperature measurement in area B

近かったことが原因と推察される。なお、A 範囲も図 10 と同様の温度傾向であった。

ここで、周辺地盤温度が 20°Cであれば、固化材配合量 150kg/m³の場合でも改良地盤の発現強度が長期許容支持力を満足したのか検討を行う。本調査の結果から $a_{fl} = 0.52$ とすると、固化材配合量 150kg/m³における

\bar{q}_{uf} は $1,875\text{kN/m}^2$ (=養生温度 20°C かつ固化材配合量 150kg/m^3 の $\bar{q}_{ul} \times a_{fl}$)と予想される。また、変動係数 $V=24.8\%$ とすると、 q_u の標準偏差 σ は 465kN/m^2 で、想定される合格判定強度 X_L は $1,205\text{kN/m}^2$ となる。よって、 $\bar{q}_{uf} > X_L$ より、今回の施工では、固化材配合量 150kg/m^3 でも長期許容支持力を満足したものと考えられる。

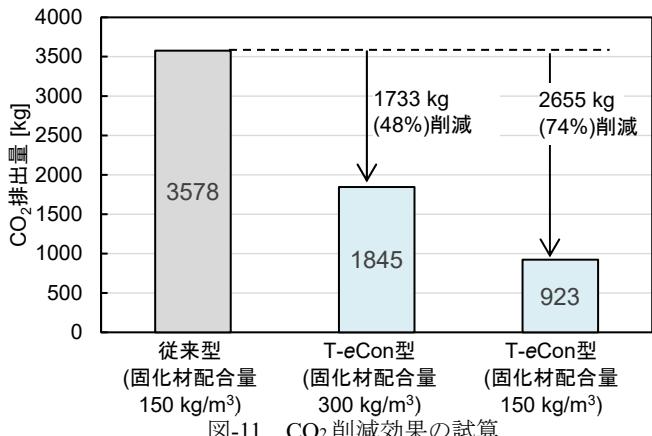
7. CO₂削減効果

図-11に、本工事においてT-eCon/地盤改良材を用いたことによるCO₂削減効果を示す。CO₂排出量は、固化材配合量に本工事における改良土量 45m^3 を乗じて固化材使用量[kg]を算出し、文献⁴⁾の材料組成などから原単位を仮定して求めた。また、本工事の固化材配合量は 300kg/m^3 であるが、前述の通り固化材配合量 150kg/m^3 でも長期許容支持力を満足した可能性が高いため、固化材配合量 150kg/m^3 の場合におけるCO₂削減効果も示す。図-11から、従来型固化材をT-eCon/地盤改良材に置換することによるCO₂削減効果は、固化材配合量 300kg/m^3 で $1,733\text{kg}$ 、 150kg/m^3 で $2,655\text{kg}$ と大きい。この結果から、従来型固化材を用いた地盤改良と比較して、T-eCon/地盤改良材によるそれが、環境配慮の観点で大きな優位性を持つことがわかる。

8. まとめ

セメントを使用しない「T-eCon/地盤改良材」を地盤改良に初適用し、施工された改良地盤に対して各種調査を行った。以下に、得られた知見を述べる。

- 1) 室内配合試験より、養生温度 20°C では、T-eCon/地盤改良材は従来型固化材と同程度の強度が発現した。一方で、養生温度 20°C に比べ養生温度 5°C におけるT-eCon/地盤改良材の強度発現は小さい。
- 2) T-eCon/地盤改良材による地盤改良は、既往の施工方法・設備で実施できるため汎用性が高く、施工性も従来型固化材のそれと同等であった。
- 3) T-eCon/地盤改良材による改良地盤の一軸圧縮強さは設計基準強度の6倍程度と十分大きく、合格判定強度も上回った。
- 4) T-eCon/地盤改良材による改良地盤の一軸圧縮強さの変動係数および現場／室内強度比は、従来型固化材によるそれと同程度であった。
- 5) せん断波速度から一軸圧縮強さを推定する場合、コア供試体に含まれる礫分の影響を十分に留意する必要がある。

Fig.11 Estimation of CO₂ emissions

- 6) 本工事において、従来型固化材からT-eCon/地盤改良材に置換することによるCO₂削減効果は $1,732\text{kg}$ であった。なお、本工事ではT-eCon/地盤改良材の配合量は 150kg/m^3 まで減じることができたと思われ、この条件ではCO₂削減効果は $2,655\text{kg}$ となる。

以上、T-eCon/地盤改良材を用いた地盤改良はCO₂削減効果が大きく、環境配慮の側面で優れていることが確認された。また、既往の施工方法・設備で施工できるため汎用性が高い。さらに、品質・施工性も従来型固化材のそれと同程度であった。なお、本報では割愛したが、溶出量・含有量試験、圧密試験においても所定の性能が確認された。当社は、本検討で得られた知見を活用し、「T-eCon/地盤改良材」のさらなる普及展開を図ることで、脱炭素社会の実現へ貢献したい。

参考文献

- 1) 山内亮太、河野貴穂、青木雅路、永松圭介：高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の特性(その13)，第54回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.509-510，2019.
- 2) 濁川直寛、栗本悠平、浅香美治、依田侑也：セメント系改良地盤への炭素固定の基礎的検討～バイオ炭～，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.347-348，2022.
- 3) 松井秀岳、青木智幸、大脇英司、藤原齊郁、池上浩樹：CO₂排出量を削減する「環境配慮地盤固化技術」の開発，大成建設技術センター報，第55号，8，2022.
- 4) 宮原茂徳、大脇英司、荻野正貴、坂本淳、丸屋剛、真保亨一：高炉スラグ微粉末を使用したセメント“ゼロ”コンクリートの展開・普及に向けて、大成建設技術センター報，第49号，17，2016.
- 5) 日本建築センター、ベターリビング：2018年版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，2018.
- 6) 日本建築センター：建設技術審査証明（建築技術）報告書スラリー添加方式のブロック状混合処理工法「エスマックスラリー工法」，BCJ-審査証明-134，2022.
- 7) 浅香美治、安部透、桂豊、杉本裕志、辰巳佳裕：ベンダーエレメントを用いたせん断波速度測定によるセメント系改良地盤の非破壊検査方法，日本建築学会構造系論文集，No.612，pp.103-110，2007.