材齢 6 ヶ月までの改良土の力学特性に及ぼす物理, 化学的性質の影響†

宮下千花* 大田孝* Sanjeevani Dayani** 山崎秀策*** 根岸敦規****

Effect of Physical and Chemical Characteristics on Mechanical Property of Improved Soils until 6 Months

by

Yukika MIYASHITA*, Takashi OTA*, Dayani SANJEEWANI**, Shusaku YAMAZAKI*** and Atsunori NEGISHI****

In this study, the effect of physical and chemical properties on the long term mechanical property of surplus soils improved by lime and cement was investigated by conducting unconfined compression and needle penetration tests on the specimens cured under different conditions. The conditions of curing were set as sealed with plastic wrapping and soaked under pure and acidic water, respectively. As the result of the experiments after about 6 months (168 days) from specimen preparation, effect of soaking on the strengths appeared obviously in the cement treated soil. The unconfined compressive strengths of the soaked specimens were found to be the smallest, while those of the sealed specimens were the largest. It was suggested by the needle penetration resistance that local deterioration progressed gradually from the surface of the soaked specimens. It was inferred that these differences in the strengths between sealed and soaked curing were caused by the changes in physical properties such as degree of saturation, and chemical properties due possibly to the leaching of hydration products during soaked curing.

Key words:

Long term mechanical property, Improved soil, Quick lime, Cement-based product, Unconfined compression test, Needle penetration test, Degree of saturation, Leaching of Ca and SO₄

1 はじめに

建設リサイクルの推進を背景に建設発生土の更なる有効利用が求められている。安定処理等で改良, 利用してきた第 4 種発生土や泥土に分類されるような低品質な発生土も今後更に積極的に利用する必要がある。このような改良土が道路盛土に用いられる場合, 道路盛土の長期的な耐久性や安定性は改良土の長期的な力学特性の変化の影響を受ける。道路盛土に用いられる改良土は深層混合改良等と比較すると石灰, セメント等の混合率が低く, 供用期間中に雨水や地下水などの水の浸透作用を受けやすいものと考えられる。混合率の高い改良土の長期的な力学特性への周辺(暴露)環境の影響については, 特に海水環境下での挙動などを中心に検討が進められている^{1) 2)}が, 水の浸透作用を受ける混合率の低い改良土の長期的な力学特性についてはあまり検討されていない。

本研究では, コーン指数が 400 kN/m²に満たない低品質な発生土を固化改良して築造した盛土の, 長期的な耐久性や安定性について基礎的な検討を行うことを目的とした長期暴露実験を行っている。低品質な砂質土からなる石灰, セメント改良土の供試体をそれぞれ 3 種類の混合

率で作製し, 封緘, 水浸の条件で養生しながら, 材齢 7, 28, 168 日で力学試験に供した。本論文では, 封緘, 水浸養生した改良土供試体の物理, 化学的性質の変化と, これらの変化が一軸圧縮強さ, 針貫入抵抗, および針貫入試験により評価した劣化深度の経時変化などに与える影響について, 材齢約 6 ヶ月(168 日)までの結果に基づいて報告する。

2 実験方法

2・1 実験に用いた地盤材料と改良土供試体の作製方法

実験には茨城県で採取した低品質な砂質土(美浦砂)を用いた。美浦砂の基本物性と粒度分布を Table 1, Fig. 1 にそれぞれ示す。現地採取した美浦砂に加水して泥状とし, 4.75 mm ふるいを通過させた後, 自然乾燥させて求めた物性値である。美浦砂の改良には生石灰(以下, 石灰という)とセメント系固化材(以下, セメントという)の 2 種類を用いた。基準ケースの石灰, セメントの混合率(試料の乾燥質量に対する石灰, セメントの質量比)は, 材齢 7 日の一軸圧縮強さ(以下, q_u という)が 100 kN/m²程度となるように設定した。基準ケースの混合率は石灰で 2.5 %, セメントで 3.5 %となった。長期強度特性への

† 原稿受理 令和元年 6 月 10 日 Received June 10, 2019 ©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 国立研究開発法人土木研究所つくば中央研究所 〒305-8516 つくば市南原
Public Works Research Institute, Minamihara, Tsukuba 305-8516.

** 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 目黒区駒場
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo 153-8505.

*** 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 〒062-8602 札幌市豊平区平岸
Civil Engineering Research Institute for Cold Region, Toyohira-ku, Sapporo 062-8602.

**** (株)安藤・間 技術研究所 〒305-0822 つくば市荻間
Hazama Ando Corporation, Karima, Tsukuba 305-0822.

混合率の影響を調べるため、基準より混合率の高いケース（石灰で3.8%, セメントで5.3%）と低いケース（石灰で1.2%, セメントで1.7%）をそれぞれ設けた。

美浦砂の含水比を31%に調整し、石灰またはセメントをミキサーにより混合した。1分間混合する毎にボウル内側面に付着した試料をこそぎ落とし、色ムラがなくなるまで計5分間混合した。直径50 mm、高さ100 mmの円柱供試体を、地盤工学会基準「安定処理土の静的締固めによる供試体作製方法（JGS0812-2009）」に準拠して作製した。供試体の乾燥密度は実施工機械を用いて実施した締固め実験³⁾の結果を参考に 1.4 g/cm^3 とした。

2・2 改良土供試体の養生方法

作製した供試体は、Fig. 2の下部に示すような封緘と水浸の2通りの環境で恒温（ 20 ± 3 度）条件を保ちながら養生した。これは例えばFig. 2の上部に示すような供用期間中の道路盛土内の条件を簡易に模擬したものであり、封緘養生は外的作用の影響を受けにくい部分（①）、水浸養生は水の浸透の影響を受ける部分（②）をそれぞれ想定している。水浸養生では、硫酸、硝酸、塩酸を5:2:3の割合で混合し、純水を加えてpHを4.5に調整して作製した模擬酸性雨と、純水の2種類の養生水を用いた。1供試体当たりの養生水量を1リットルとし、材齢4日から水浸養生を開始した。材齢28日目までは7日、168日目までは14日、それ以降は28日ごとに養生水を交換した。

2・3 力学試験方法

封緘、水浸養生した供試体は、材齢7, 28, 168日で一軸圧縮試験（JIS A 1216）と針貫入試験（JGS3431）にそれぞれ供した。ただし、試験装置の制約と荷重変位データ計測の精度を考慮して、針の貫入速度は 11 mm/min とした。Fig. 3に示す模式図の通り供試体を横向きに寝かせて設置し、中央高さにおいて3方向から針を貫入させた。封緘養生の供試体は、不飽和条件と試験の前日に飽和させた条件の2通りの条件で試験を実施し、飽和度が改良土の強度に及ぼす影響を調べた。

2・4 養生水と改良土の化学分析方法

交換時に排出した養生水を回収し、pH, Ca濃度, SO_4 濃度を測定した。pH, Ca濃度の測定にはコンパクトメータ（堀場 LAQUAtwin B-712, B-751）、 SO_4 濃度はイオンクロマトグラフ（JIS K 0102 41.3）によりそれぞれ測定した。

エネルギー分散型蛍光X線分析（以下、XRFという）および湿式分析（JIS R 5202）により得られた美浦砂、生石灰、セメント系固材材の化学組成をTable 2に示す。

針貫入試験を行った供試体を乾燥させて樹脂を浸透させ、中央高さ付近の横断面が観察できる試料に切断、研

磨した。試料調整の簡素化のため、切断と研磨には水を用いた。炭素を蒸着させた横断面観察試料に対してEPMA分析を行い、供試体横断面での主要元素の分布状況を確認した。

Table 1 Physical and mechanical properties of Miho sand.

Soil type	Sand with fines
Specific gravity, ρ_s	2.693
Plasticity index, I_p	25.4
Optimum water content, w_{opt} (%)	21.6
Maximum dry density, ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.624
Cone index, q_c (kN/m^2) (with water content of 31 %)	68

Fig. 1 Grain size distribution of Miho sand.

Fig. 2 Schematic figures of environmental exposure conditions in road embankment and curing conditions in laboratory.

Fig. 3 Test condition of needle penetration.

Table 2 Chemical component of Miho sand, quick lime and cement.

	SiO_2 (wt%)	TiO_2 (wt%)	Al_2O_3 (wt%)	Fe_2O_3 (wt%)	MnO_2 (wt%)	MgO (wt%)	CaO (wt%)	Na_2O (wt%)	K_2O (wt%)	P_2O_5 (wt%)	S_{total} (wt%)	SO_3 (wt%)
Miho sand	61.7	0.73	19.9	6.86	0.11	1.29	1.48	1.18	1.54	0.10	0.03	-
Quick lime	not measured						94.9	not measured			<0.02	-
Cement	not measured						56.4	not measured			3.13	6.08

3 一軸圧縮試験結果

3.1 改良土の一軸圧縮強さに及ぼす物理的性質の影響

封緘、水浸養生した石灰、セメント改良土の q_u 値と材齢との関係を Figs. 4, 5 にそれぞれ示す. L1.2, C1.7 % の結果はそれぞれ Fig. 4 b), Fig. 5 b) に別表記した. L3.8, C5.3 および C3.5 % の各養生条件と L2.5 % の封緘 (不飽和) 養生において、日数の経過に伴う強度増加が確認された. L1.2, C1.7 % の各養生条件と L2.5 % の封緘 (飽和), 水浸養生では 168 日までの q_u 値が 7 日の値からほとんど変化しなかった. 168 日までは、水浸養生の q_u 値に純水、模擬酸性雨の違いの影響は表れなかった. 材齢ごとに比較すると、いずれの混合条件においても封緘 (不飽和) 養生で最も高い q_u 値が得られた. 石灰改良土は材齢 168 日まで封緘 (飽和) と水浸養生の q_u 値が概ね同程度であった. セメント改良土は C1.7 % で 7 日, C3.5 % で 28 日から水浸養生の q_u 値が封緘 (飽和) 養生の q_u 値を下回り、C5.3 % も 168 日では水浸養生の q_u 値が最も小さくなった.

Fig. 4 Relationships between unconfined compressive strength of lime treated soils and curing period.

Fig. 5 Relationships between unconfined compressive strength of cement treated soils and curing period.

Fig. 6 Relationships between strength ratio, dry density and degree of saturation of lime treated soils.

Fig. 7 Relationships between strength ratio, dry density and degree of saturation of cement treated soils.

石灰、セメント改良土の封緘 (飽和) 養生に対する封緘 (不飽和), 水浸養生の q_u 値の比 (強さ比) と乾燥密度、飽和度との関係を Figs. 6, 7 にそれぞれ示す. 強さ比は、各養生条件での q_u 値の平均を封緘 (飽和) 養生の q_u 値の平均 ($(q_u)_{\text{封緘 (飽和)}}$) で除した値である. Fig. 6 より、石灰改良土の封緘 (不飽和) 養生の強さ比は L3.8 % で 1 より大きく、L2.5, 1.2 % で 1.8 以上であった. 各養生条件の供試体の乾燥密度に有意な差は見られなかった一方で、封緘 (不飽和) 養生の供試体の飽和度 (含水比) は封緘 (飽和) 養生よりも低かった. 材齢 28 日の L2.5 % において多少のばらつきが見られるが、水浸養生の強さ比は

概ね 1.0 程度であり, 封緘 (飽和) と水浸養生の供試体の乾燥密度と飽和度は同程度であった。封緘 (飽和) と水浸養生では, 供試体の飽和度の増加に伴うサクシヨンの低下により q_u 値が低下したと考えられる。

Fig. 7 によると, セメント改良土の封緘 (不飽和) 養生の強さ比は C5.3 % で 1 より大きく, C3.5, 1.7 % では 1.5 ~ 1.6 程度であった。封緘 (飽和) 養生との強度の差は, 石灰改良土と同様に飽和度の違いによるものであると考えられる。C3.5, 1.7 % では 28 日から, C5.3 % においても 168 日から, 水浸養生の強さ比はいずれも 1 より小さい値であった。封緘 (飽和) と水浸養生の供試体の乾燥密度, 飽和度は概ね同じ範囲にあり, セメント改良土の封緘 (飽和) 養生と水浸養生の q_u 値の違いは物理的性質のみでは説明できなかった。

3・2 改良土の一軸圧縮強さに及ぼす化学的性質の影響

石灰, セメント改良土の材齢 280 日までの養生水の a) pH の経時変化, b) Ca イオンの累積溶脱量, c) SO_4 イオンの累積溶脱量をそれぞれ Figs. 8, 9 に示す。初期材齢で約 11~12 だった石灰改良土養生水の交換時の pH は, 168 日で約 9.5~11 まで低下した。セメント改良土養生水の初期材齢での pH は石灰改良土よりもやや低い約 10.5~11.5 で, 168 日で約 9~10.5 まで低下した。混合率の低い改良土の養生水ほど pH の低下が初期から著しかった。

Fig. 8, 9 の Ca, SO_4 イオンの累積溶脱量は 1 供試体あたりの両イオンの溶脱量に相当する。図中に材齢 28, 168 日における累積溶脱率を表示する。累積溶脱率は石灰, セメントの Table 2 の化学組成と混合率に基づいて Ca, S 量の改良による増分を求め, Ca, SO_4 の累積溶脱量を除して求めた値である。ただし, 石灰改良土からの SO_4 イオンの溶脱は美浦砂の成分に起因するものと考えられるため, 溶脱率は計算しない。石灰改良土の材齢 168 日の Ca 溶脱率は混合率によらず概ね 30 % 弱であった。セメント改良土は混合率が小さいほど Ca, SO_4 の溶脱率が大きかった。 SO_4 の溶脱率は Ca の溶脱率よりも高く, 特に C1.7, 3.5 % では初期材齢における溶脱の進行が顕著であった。材齢 280 日までは養生水の水質による pH と Ca 溶脱量の顕著な差は認められなかった。C3.5 % の SO_4 溶脱量は模擬酸性雨養生でわずかに大きかった。

セメント改良土の水浸養生による pH の低下, Ca イオンの溶脱と, これら化学的性質の変化に伴う改良土の劣化 (強度の低下) は多くの既往研究で報告されてきた。例えば土田ら¹⁾は, 海水環境下で供試体表面からエトリンガイトの消失を示唆する X 線回折分析 (以下, XRD という) 結果が得られたことを報告している。本研究の模擬酸性雨と純水による養生環境下でも, Ca, SO_4 イオンが溶脱して強度に寄与する水和物が消失, または生成阻害されたことが一因となり, 封緘 (飽和) 養生と比較して水浸養生の q_u 値が小さくなった可能性が考えられる。

養生水の分析結果からは石灰改良土においても Ca の溶脱が認められたが, Figs. 4, 6 によると, Ca の溶脱は材

齢 168 日までは一軸圧縮強さに影響を与えていなかった。水浸養生は, ポズラン反応などによる強度増加が本格的に進行する前の材齢 4 日から開始した。材齢 168 日までは, 強度に寄与せず溶脱しやすい Ca 成分などが主に供試体の外に排出される段階であった可能性が考えられる。

本研究においても改良土の粉末試料に XRD, 示差熱重量分析を適用したが, 石灰, セメント改良土の化学的性質の変化と一軸圧縮強さの関係を定量的に説明可能な分析結果は現段階で認められていない。分析試料の準備方法の改善と分析条件の精査を行い, 引き続き検討する。

Fig. 8 Changes in a) pH value, accumulated amounts of b) Ca and c) SO_4 in water after soaking of lime treated specimens.

Fig. 9 Changes in a) pH value, accumulated amounts of b) Ca and c) SO_4 in water after soaking of cement treated specimens.

4 針貫入試験結果

4・1 供試体水平方向の局所的な針貫入抵抗比の評価

基準ケース (L2.5, C3.5 %) の石灰, セメント改良土供試体で実施した針貫入試験結果として, 針の貫入深さと貫入抵抗の関係を Figs. 10, 11 にそれぞれ示す. 材齢ごとに封緘 (飽和), 水浸養生の代表的な計測結果を比較した. 石灰改良土 (L2.5 %) では材齢が大きくなっても各養生条件の貫入抵抗の最大値に有意な変化は認められなかった. また, 各材齢において任意の深さでの貫入抵抗の大小関係には明瞭な傾向がなく, 封緘 (飽和) 養生が水浸養生を下回る場合もあった. セメント改良土 (C3.5 %) ではいずれの養生条件においても針貫入抵抗の最大値が日数の経過と共に大きくなった. 材齢 28, 168 日では, 任意の深さでの水浸供試体の貫入抵抗が封緘 (飽和) 供試体の貫入抵抗よりも小さかった. 特に 168 日では, 水浸供試体の深さ 5 mm 以下の貫入抵抗が極めて小さかった.

封緘 (飽和) 養生と水浸養生の貫入抵抗の違いを定量的に評価する試みの一つとして, 供試体表面からの任意の深さでの針貫入抵抗比を評価した⁴⁾. 深さ $D=2, 5, 10, 20$ mm における水浸供試体の 3 測線での貫入抵抗を, 封緘 (飽和) 供試体の同一深さにおける 3 測線の貫入抵抗の平均値で除した値を, 各深度の針貫入抵抗比 R_p とした. L2.5, C3.5 % の水浸 (酸性雨) 供試体で求めた R_p と材齢との関係を Figs. 12, 13 にそれぞれ示す. L2.5 % では, 最も浅い $D=2$ mm での R_p 値が材齢 168 日のみで 1.0 を明らかに下回ったが, 5 mm 以上の深さでは R_p 値が概ね 1.0 以上であり, 深度方向の応力比に明確な違いはなかった.

Fig. 10 Relationships between needle penetration resistance and depth of lime treated soils.

Fig. 11 Relationships between needle penetration resistance and depth of cement treated soils.

Fig. 12 Relationships between ratio of needle penetration resistance and curing period in lime treated soil.

Fig. 13 Relationships between ratio of needle penetration resistance and curing period in cement treated soil.

一方, C3.5 %では材齢 7 日からすべての深さで R_p 値が 1.0 よりも小さかった. 特に材齢 168 日においては, 貫入深さが浅いほど R_p 値が小さくなっていた.

石灰, セメント改良土の R_p 値の傾向は一軸圧縮強さの傾向と概ね一致した. すなわち, 石灰改良土では水浸供試体の任意の深さでの強度特性が封緘 (飽和) 供試体と概ね同様で, 一軸圧縮強さにも養生条件の差の影響が現れなかった. セメント改良土では水浸供試体の局所的な強度が封緘 (飽和) 供試体の強度よりも小さく, その差は供試体表面に近いほど顕著であった. その結果, 一軸圧縮強さは水浸供試体で最も小さくなったと考えられる.

4・2 劣化深度, 局所的な針貫入抵抗比に及ぼす供試体横断面の化学的性質の変化の影響

EPMA による分析結果として, C3.5 %の材齢 168 日の封緘 (飽和) 供試体 (a), 28 日の水浸 (酸性雨) 供試体 (b), 168 日の水浸 (酸性雨) 供試体 (c) の横断面での Ca, S イオンの分布を Fig. 14 に示す. 封緘 (飽和) と水浸 (酸性雨) の供試体の Ca 分布の差は明瞭であり, 水浸 (酸性雨) 養生では供試体表面から中心に向かう Ca の溶脱が示唆された. 定量値が小さいため分布の差は Ca ほど明瞭でないが, 封緘 (飽和) 供試体と比較すると材齢 168 日の水浸 (酸性雨) 供試体の S 量は断面全体で少なく, 中心部まで溶脱が進行していた可能性が示唆された.

4・1 で試算したセメント改良土の R_p 値と Fig. 14 の各イオン分布との関係を調べる目的で, 図中に示す白枠の範囲 ($5 \times 50 \text{ mm}^2$) を $5 \times 1 \text{ mm}^2$ の区画に分割し, 1 区画ごとの Ca, S 量の平均値の直径方向の変化を各イオン分布の下に表示した. 間隙に充填された樹脂に含まれる炭素の分析結果を利用して, 白枠内に存在する間隙の位置と大きさを推定し, 各区画の Ca, S 量の平均値への間隙の

Fig. 14 Distribution of Ca and S ions in cross section of cement treated specimens by EPMA.

影響を低減する補正を施した。封緘供試体の Ca 量, S 量は直径方向に一定であると仮定し, 50 区画の平均値を赤の実線で併記した。数区画の例外を除くと, 水浸供試体の各区画の Ca, S 量は封緘供試体の全区画の平均値よりも小さかったが, 供試体の表面付近と中心部で区画ごとの値に明確な違いは現れなかった。R_p 値によると, 供試体表面の数 mm の範囲で局所的な強度が小さいことが確認されたが, これらの傾向と Ca, S イオンの表面からの溶脱との関係を定量的に説明するのは現段階では難しいようであった。観察断面の研磨では水溶性のイオンが流出ないようにコンクリートの基準 (案)⁵⁾に準拠した有機溶媒による研磨を行う他, 各区画に含まれる土粒子の影響を平均値の計算で補正することを試みるなど, EPMA の分析精度の向上, 評価手法の改良を行い, セメント改良土供試体の局所的な強度特性と局所的な化学的性質との関係を明らかにすることが今後の課題である。

引き続き長期間の暴露実験を継続し, 定期的に力学特性への物理, 化学的性質の影響を検討する予定である。本論文に示した実験, 分析に加えて, 改良土の保水性試験を行い, 飽和度とサクシヨンの関係を明らかにすることで, 物理的性質の影響を定量的に評価することを試みる。さらに, 長期材齢の粉末試料に XRD や示差熱重量分

析などを適用し, 石灰, セメント改良土の力学特性に寄与する化学成分の定量を試みる。

5 結言

生石灰, セメント系固化材を低品質な砂質土に混合して作製した改良土供試体を封緘, 水浸養生し, 力学特性に及ぼす物理, 化学的性質の影響を調べた。

石灰, セメント改良土のすべての混合率において, 封緘 (不飽和) 養生で最も高い q_u 値が得られた。石灰改良土では, 水浸養生と封緘 (飽和) 養生の q_u 値, 針貫入試験結果がほぼ等しく, 材齢 168 日までの水浸養生による封緘 (不飽和) 養生との強度の差は, 飽和度の違いによるものであることが分かった。水浸養生供試体では pH の低下や Ca の溶脱が確認されたが, 材齢 168 日まではこれらの化学的性質の変化は水浸養生供試体の力学特性に影響を与えていなかった。

セメント改良土では, 日数の経過に伴って水浸養生の q_u 値が封緘 (飽和) 養生の強度を下回った。針貫入試験においても, 水浸養生供試体の表面付近の局所的な強度が封緘 (飽和) 養生よりも小さかった。これらの強度の差は, Ca, SO₄ イオンが溶脱して強度に寄与する水和物が消失, または生成阻害されたことによると考えられる。

今後も長期間の暴露実験を継続し, 改良土の力学特性に及ぼす物理, 化学的性質の影響について検討する。

本論文は, 土木研究所と産学計 12 者による共同研究「建設発生土等の長期的な品質管理向上技術に関する共同研究」の成果の一部をとりまとめたものである。論文の作成にあたり, 共同研究参加者から貴重な助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) T. Tsuchida, J. Kasai, J. Mizukami, Y. Yokoyama and K. Tsuchida, "Effect of curing condition on mechanical properties of light-weight soils", Technical Note of the Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, Japan, No. 834 (1996).
- 2) H. Hara, D. Suetsugu and H. Matsuda, "Progress speed of deterioration of cement and lime treated soil immersed in seawater", 9th International Symposium on Lowland Technology, pp. 169-173 (2014).
- 3) T. Ota, Y. Miyashita, T. Hashimoto and H. Nakamura, "Experimental study on compaction of lime and cement treated soils", Proceedings of the 13th National Symposium on Ground Improvement, pp. 277-284 (2018).
- 4) P. Ngoc, B. Turner, J. Huang and R. Kelly, "Experimental study on the durability of soil-cement columns in coastal areas", 19th Southeast Asian Geotechnical Conference & 2nd AGSSEA conference, (2016).
- 5) Sub-Committee on New Standards, Committee on Concrete, JSCE Standards "Area Analysis Method of Elements Distribution in Concrete by Using EPMA", Journal of Japan Society of Civil Engineers, E, Vol. 62, No.1, pp. 246-259 (2006).