

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420475

研究課題名(和文) 繊維材混合流動化処理土の埋戻し材としての実用化に関する研究

研究課題名(英文) Study on the practicality for applying Liquefied Stabilized Soil mixed with fiber to backfill material

研究代表者

木幡 行宏 (KOHATA, Yukihiro)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：90215301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、繊維材を混合した流動化処理土を実務で埋戻し材として用いるには、どのような課題があるのかを検討するという着想のもと、現場養生供試体と室内養生供試体に対して圧密非排水三軸圧縮試験を行い、強度・変形断特性に及ぼす養生日数、養生環境、および泥水密度の影響について比較、検討を行った。また、モデル地盤において小型FWD試験を実施し、地盤の非一様性の程度を検討するとともに、繊維材混合流動化処理土を原地盤へ適用するための実用化について検討した。その結果、埋戻し材として繊維材混合流動化処理土を適用することは、流動化処理土の適用に比べ高品質な埋戻し地盤が造成できることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, effects of curing days, curing environment and slurry density on strength and deformation property of Liquefied Stabilized Soil (LSS) reinforced with fiber are discussed. A series of consolidated undrained triaxial compression test was performed on the specimens cured in laboratory and the specimens taken by block sampling at model ground constructed in the field. At the model ground, a series of portable Falling Weight Deflectometer (FWD) tests was carried out at curing days of 28, 56, 84 and 120 days, respectively. The validity to estimate the stiffness of LSS ground by using of a portable FWD is discussed. Based on the test results, the relationship between the EP.FWD and Etan was discussed. It is considered that the KP.FWD-value is able to estimate the stiffness of backfill ground constructed by LSS reinforced with fiber. And more, it is found that the high-quality backfill ground can be constructed by using of LSS reinforced with fiber compared to LSS.

研究分野：工学

キーワード：地盤防災 流動化処理土 埋戻し材 繊維材補強 養生日数 養生環境 泥水密度 せん断特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 都市域における掘削工事後の埋戻しには、一般に、山砂を用いて、水締め・振動締固め、あるいは水締め・転圧による場合が多いが、地下鉄工事などの開削トンネルによる大規模な掘削・埋戻しに山砂・水締めを用いた場合には、供用後 10 年を経ると、躯体と躯体側部の境界部分が陥没するケースが多く、また、地震時においても躯体上部の埋戻し箇所で液状化や側方流動などが生じることにより大きく陥没するケースがある。一方、近年、経済の成長に伴い、掘削発生土を含む産業廃棄物の発生量は増大するとともに質的にも複雑化してきている。このような背景のなかで、環境問題が深刻化し、各種廃棄物・副産物の排出量を減らすためにリサイクル法の制定と廃棄物処理法の改正が行われるなど、社会的にもこれらの再資源化、リサイクルが大きな時流になり、循環型社会の構築が提唱されてきている。

(2) 地盤工学の分野においては多様な産業廃棄物に対して様々な有効利用手法が模索されており、固化による廃棄物の建設材料への再利用が盛んに研究されている。都市域においては、残土処分地の確保や埋戻し用山砂の入手など、制約条件が厳しいことから、建設現場で発生した土砂にセメント等の固化材を混合して再び埋戻し材として利用する等の流動化処理工法が広く取り入れられるようになってきている。最近では、地下鉄開削部での埋戻しは、締固めを伴う山砂・水締めという従来の埋戻し工法に代わるものとして採用される場合が多い。しかし、流動化処理土には、セメント系安定処理土と同様に強度が増加するのに伴って脆性的な挙動を示し耐震性能の低下が生じる恐れがあること、固化材による強度の増加は再掘削が必要な箇所への適用を困難にする恐れがあること等の指摘がなされている。特に、東日本大震災以降、液状化が想定される地盤に埋戻し材として流動化処理土を用いる場合には、その脆性的な力学挙動を改善し、耐震性を向上させた流動化処理土を用いることにより地盤を耐震補強することは重要な課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、都市域の掘削地盤における埋戻し材として、地盤の耐震補強が期待できる繊維材混合流動化処理土を用いた場合、どの程度の補強効果が期待できるものかを実際のモデル地盤において検討するという着想のもと、繊維材添加量(P_c)を 0, 10, 20 kg/m^3 (以下、それぞれ P_{c-0} , P_{c-10} , P_{c-20} とする)とした繊維材混合流動化処理土を大学構内に作製したピットに埋戻し、そこからサンプリングされた供試体と現場打設試料と同じバッチで室内養生された供試体に対し、養生日数を 28, 90, 120, 150 日として、98 kPa

の等方応力条件下で圧密非排水三軸圧縮試験を行い、繊維材混合流動化処理土の室内・原位置作製供試体の三軸せん断特性に及ぼす養生日数、養生環境、および泥水密度の影響について比較、検討を行った。また、モデル地盤において小型 FWD 試験を実施することによって、地盤の非一様性の程度を詳細に検討するとともに、埋戻し地盤の耐震補強工法として考えられる繊維材混合流動化処理土の原地盤への適用性について検討することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、母材の均質性を考慮して、物理的性質が明らかになっている市販の粘性土である NSF-CLAY を母材として用い、固化材には特殊土用セメント系固化材(太平洋セメント, ジオセメント 200)を用いた。また、繊維材には、入手が容易な新聞紙をフードプロセッサにより綿状に加工したものを使用した。

(2) 流動化処理土の混合方法は、作製過程が簡便でパラメータを少なくすることができる泥水式を採用し、配合設計基準図に基づいて、目標泥水密度 $\rho_f = 1.280 \text{ g/cm}^3$ に密度を調整した泥水に 80 kg/m^3 の固化材を加え、ハンドミキサーにより混練して作製した。なお、作製過程では所定の密度となるように、AE モルタル容器と呼ばれる内容量 400 cm^3 のステンレス製の容器に処理土を充填し、余盛り部分をガラス板ですり切り、その質量を計測する方法で密度試験を行った。繊維材を添加する場合は、固化材混合後に添加し、ハンドミキサーによってよく攪拌した。処理土作製後、流動性を検討するためにフロー試験(旧日本道路公団規格「エアモルタル及びエアミルクの試験方法, 1.2 シリンダー法」, JHS A 313)を行った。なお、本研究の配合条件ではブリージングはほとんど生じなかった。作製した流動化処理土は大学構内に作製したピットに流し込み、ブルーシートを被せ養生した。なお、埋戻し時には、原地盤に流動化処理土が浸透しないように、原地盤と流動化処理土の間にジオテキスタイルを敷設した後、ピット内に流動化処理土を流し込んだ。また、室内養生供試体は、直径 50 mm、高さ 100 mm の市販のプラスチック製モールドに余盛り用のカラーを取り付け、処理土を充填し上端面を高分子フィルムで被膜した。3 時間後に余盛り部分を切り取り、上端面を平坦に整形した後、再び高分子フィルムで被膜し濡れタオルを被せて 20 ± 3 のもとの湿潤気中養生を行った。これまでの研究では、流動化処理土の作製時にハンドミキサーによる混練のため、試料内に気泡が発生・混入することからモールド充填前に試料を負圧により脱気していたが、本研究では、試料を大量に作製するため、脱気しなかった。

(3) 養生日数の影響の検討では、ブロックサ

ンプリングした流動化処理土をトリミングして作製した供試体と室内養生した供試体に対して、養生日数を 28, 90, 120, 150 日として、拘束圧 98 kPa, 背圧 196 kPa で 12 時間等方圧密後、非排水三軸圧縮試験を行った。

(4) 養生環境の影響の検討では、ブロックサンプリングした流動化処理土をトリミングして作製した供試体と室内養生した供試体に対して養生日数を 28, 56 日として、拘束圧 98 kPa, 背圧 196 kPa で 12 時間等方圧密後、非排水三軸圧縮試験を行った。なお、埋戻し時には、現場養生時における地盤内の温度を測定するために、1 時間おきに -40 ~ 60 の範囲で土壌内の温度を測定することができる温度センサー(5TM Moisture/ Temp)を掘削ピット内の埋戻し地盤面から約 15cm 程度の深さの側面に 1 個、計 2 個設置した後、覆土した。

(5) 強度・変形特性に及ぼす泥水密度の影響の検討では、泥水密度として、配合設計基準図に基づいて決定した泥水密度 $\rho_f = 1.280 \text{ g/cm}^3$ と、これを基準泥水密度として基準泥水密度から 5 % 低減させた泥水密度 $\rho_f = 1.216 \text{ g/cm}^3$ として作製した室内養生供試体に対して、養生日数を 28 日として、拘束圧 98 kPa, 背圧 196 kPa で 12 時間等方圧密後、非排水三軸圧縮試験を行った。

(6) 圧密非排水三軸圧縮試験での軸ひずみ速度は、0.054 %/min とし、せん断中の損傷程度を検討するために単調載荷中に微小な除荷・再載荷を行った。また、軸変位量は、ベタニングエラーの影響を避けるため、局所変形測定装置(LDT)を供試体側面に配置して測定した。

(7) モデル地盤においては、室内三軸試験用の供試体を採取する前に、小型 FWD 試験を実施し、モデル地盤の K 値(剛性)を求めた。

4. 研究成果

(1) 図 - 1(a), (b)は、それぞれ現場養生供試体、室内養生供試体の軸差応力 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ と軸ひずみ ε_a の関係から得られた最大軸差応力 q_{\max} と養生日数の関係を示したものである。図より、繊維材混合流動化処理土の q_{\max} は、室内養生供試体に比べ現場養生供試体のほうが、概ね、大きくなる傾向にあること、また、現場養生供試体においても、繊維材を混合するとピーク後の脆性的性質が改善されることが分かった。

(2) 図 - 2(a), (b)は、それぞれ現場養生供試体、室内養生供試体の $q \sim \varepsilon_a$ 関係から求められる $\varepsilon_a = 0.002 \%$ 以下の微小ひずみで定義される初期変形係数 E_0 と養生日数の関係を示したものである。 E_0 は、室内・現場養生供試体ともに、概ね、養生日数 120 日まで増加傾

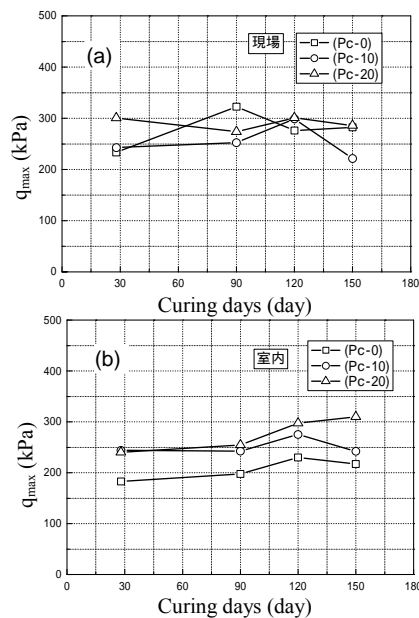


図-1 q_{\max} と養生日数の関係

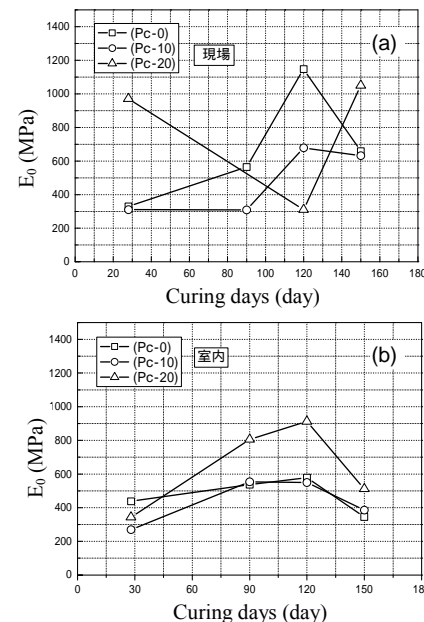


図-2 E_0 と養生日数の関係

向を示すが、その後減少傾向を示した。これは、養生環境による含水比低下の影響に起因すると考えられる。

(3) 繊維材混合流動化処理土のせん断に伴う損傷程度は、養生環境やサンプリング時あるいは脱型時の乱れの影響に依存すると考えられるが、概ね、養生日数の増加とともに、損傷程度は小さくなる傾向にあると考えられる。

(4) 図 - 3(a), (b)は、平均地盤内温度、室内養生温度と最大軸差応力 q_{\max} および軸ひずみ 0.002 % 以下で定義される初期変形係数 E_0 の関係である。図 - 3(a)より、現場養生の Pc-0 では、平均地盤内温度が 9 から 7.5 に低下した場合の q_{\max} は、ほぼ一定傾向であると考えられ、Pc-10 では、平均地盤内温度の低下

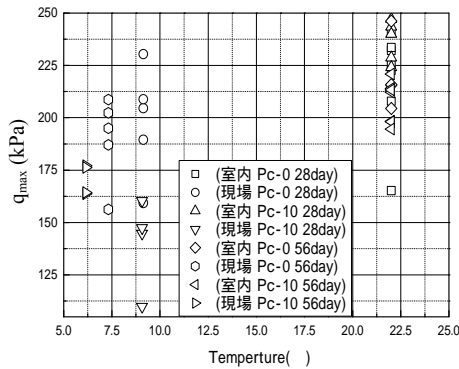


図-3(a) q_{max} と養生温度の関係

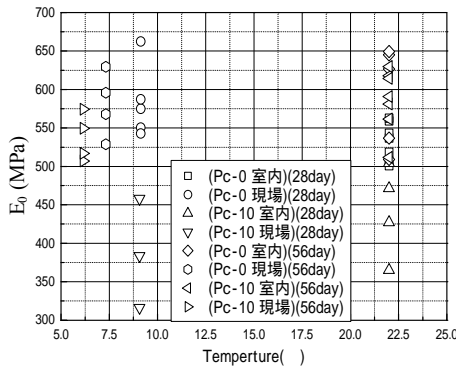


図-3(b) E_0 と養生温度の関係

に伴い、 q_{max} の増加傾向が見られるが、これは養生日数の増加に起因するものと考えられる。また、室内養生供試体では、養生日数の増加に伴う q_{max} の値に顕著な差は見られない。一方、図-3(b)に示す E_0 について見ると、 q_{max} と同様、養生日数に関わらず、ばらつきの範囲内でほぼ同程度の値を示していることから、 E_0 に及ぼす養生温度の影響は小さく、養生日数の影響が大きいと考えられる。

以上より、本研究の範囲内では、繊維材混合流動化処理土の $q \sim \varepsilon_a$ 関係における q_{max} 、 E_0 は、養生初期では養生温度の影響を受ける可能性があるが、養生日数とともに養生温度の影響は受けにくくなると考えられることが明らかとなった。

(5) 繊維材混合流動化処理土による埋戻し地盤の剛性を評価するために、小型 FWD 試験を実施した。図-4(a),(b)に、繊維材添加量 0.10 kg/m^3 で養生日数 28 日と 56 日について、室内三軸試験による $q \sim \varepsilon_a$ 関係から得られた接線変形係数 E_{tan} と軸ひずみ ε_a の関係に小型 FWD 試験で得られた K_{PFWD} 値から算出した E_{PFWD} 値を示した。同じひずみレベルで比較すると、 E_{PFWD} は E_{tan} よりわずかに大きな値を示している。一般に、同じひずみレベルでは平板荷重試験より得られる E_{30} と E_{tan} の値はほぼ等しいが、剛性の大きい地盤では K_{30} 値と K_{PFWD} 値は 1 : 2 の関係にあることが知られている。したがって、これらの関係を考慮すると、同じひずみレベルで E_{tan} 値と E_{PFWD} 値に矛盾はないと考えられ、 K_{PFWD} 値は、繊維材流動化処理土地盤の剛性を妥当に評価していると考えられる。

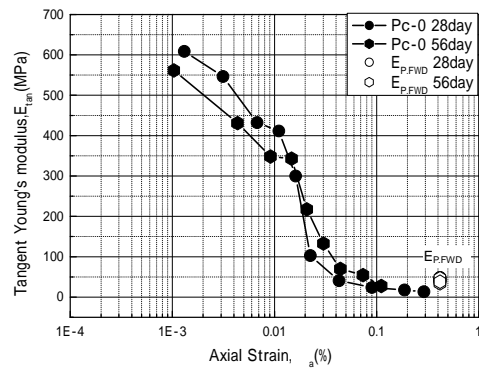


図-4(a) E_{tan} , $E_{PFWD} \sim \varepsilon_a$ 関係(Pc-0)

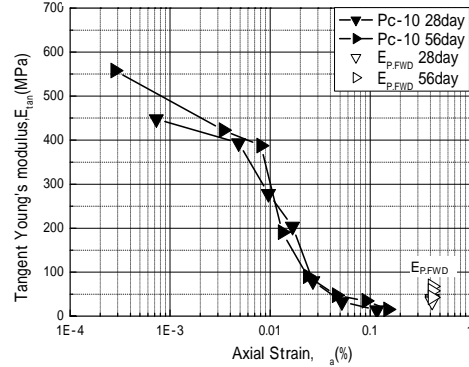


図-4(b) E_{tan} , $E_{PFWD} \sim \varepsilon_a$ 関係(Pc-10)

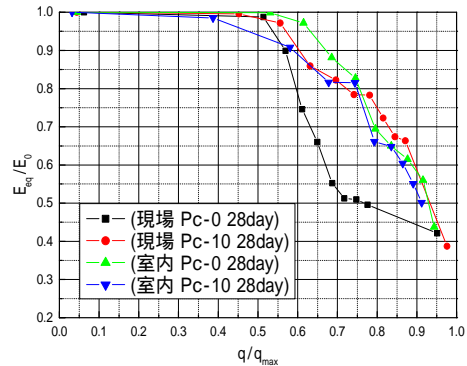


図-5(a) $E_{eq}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係(28 日)

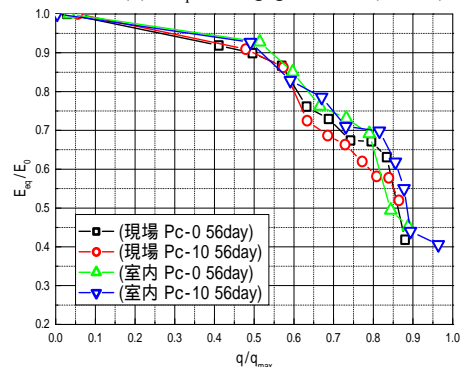


図-5(b) $E_{eq}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係(56 日)

(6) 図-5(a),(b)は、せん断中の微小な除荷・再載荷による $q \sim \varepsilon_a$ 関係から得られる等価変形係数 E_{eq} を初期変形係数 E_0 で正規化した E_{eq}/E_0 と、軸差応力 q を最大軸差応力 q_{max} で正規化した q/q_{max} の関係を示したものであり、(a)は養生日数 28 日、(b)は養生日数 56 日の場合である。図より、現場養生供試体の Pc-0 の養生日数 28 日を除くと、概ね室内養生、

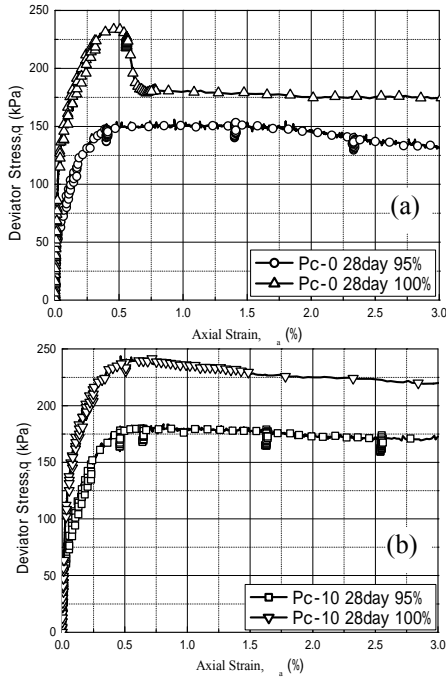


図-6 $q \sim \varepsilon_a$ 関係：(a) Pc-0, (b) Pc-10

現場養生とともにせん断に伴う $E_{eq}/E_0 \sim q/q_{max}$ の関係の減少率に顕著な差は見られないが、養生日数 28 日に比べ 56 日のほうが、減少率は小さい傾向にある。

以上より、繊維材混合流動化処理土のせん断に伴う損傷程度は、サンプリング時あるいは脱型時の乱れの影響に依存すると考えられるが、概ね養生日数の増加とともに損傷程度は小さくなる傾向にあると考えられる。

(7) 図-6(a)は、泥水密度増減率=100%と95%で繊維材を添加しない場合(Pc-0)の軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係を $\varepsilon_a = 0 \sim 3.0\%$ の範囲で示したものであり、図-6(b)は、泥水密度増減率 $D\rho_f = 100\%$ と 95% で繊維材を 10 kg/m^3 添加した場合(Pc-10)の軸差応力 q と軸ひずみ ε_a の関係を $\varepsilon_a = 0 \sim 3.0\%$ の範囲で示したものである。図より、Pc-0、Pc-10ともに、最大軸差応力 q_{max} は $D\rho_f = 100\%$ に比較して $D\rho_f = 95\%$ のほうが小さい。基準泥水密度に対して、わずか 5%低減させた $D\rho_f = 95\%$ の q_{max} は、25~35%程度減少しているのが分かる。

以上より、流動化処理土に繊維添加材の有無に関わらず $D\rho_f = 100\%$ と 95% を比較すると $D\rho_f = 95\%$ の方が最大軸差応力は小さくなる傾向にあることが分かる。一般に、砂質土や粘性土の強度は、乾燥密度や含水比に強く影響されることが知られているが、流動化処理土や繊維材混合流動化処理土の強度は、泥水密度に大きく影響されると考えられる。

(8) 図-7(a),(b)は、 $q \sim \varepsilon_a$ 関係のピークまでの接線勾配から得られる接線変形係数 E_{tan} と $\log \varepsilon_a$ の関係を繊維材添加量ごとに泥水密度増減率で比べたものであるが、Pc-0、Pc-10ともに $D\rho_f = 100\%$ に比べて $D\rho_f = 95\%$ のほ

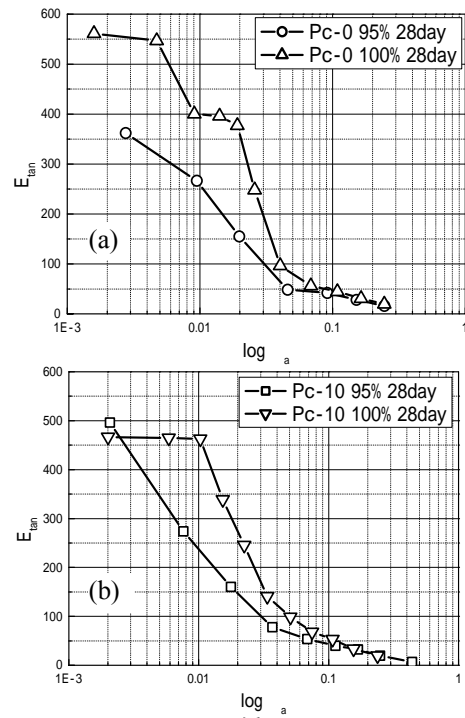


図-7 $E_{tan} \sim \log \varepsilon_a$ 関係：(a) Pc-0, (b) Pc-10

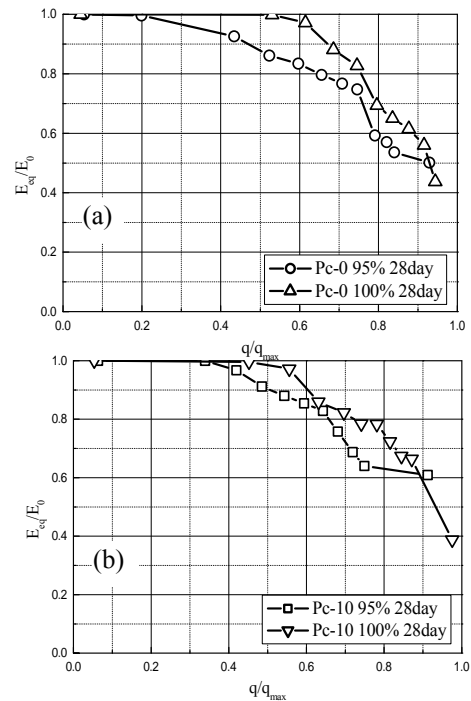


図-8 $E_{eq}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係：(a) Pc-0, (b) Pc-10

うがひずみレベルで E_{tan} の減少率が大きくなる傾向にあり、 $q \sim \varepsilon_a$ 関係の非線形性が増加傾向にある。

(9) 図-8(a),(b)は、载荷中の微小な除荷・再载荷での $q \sim \varepsilon_a$ 関係の割線勾配から得られる等価変形係数 E_{eq} を初期変形係数 E_0 で正規化した E_{eq}/E_0 と軸差応力 q を最大軸差応力 q_{max} で正規化した q/q_{max} の関係を繊維材添加量ごとに泥水密度増減率で比較したものである。Pc-0、Pc-10ともに、 $E_{eq}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係は、 $D\rho_f = 100\%$ に比べて $D\rho_f = 95\%$ のほうがせん断時の比較的早い段階で減少し始めてい

る。この傾向は P_c-0 で顕著である。一方、 P_c-10 における $D_{pF} = 95\%$ の E_{cq}/E_0 は、 $q/q_{max} = 0.4$ 程度まで減少傾向が見られず、これは繊維材添加による補強効果によるものと考えられる。すなわち、せん断に伴う損傷程度に及ぼす泥水密度の影響は大きい、繊維材の添加によって損傷程度は小さくなる傾向にあることが明らかにされた。

10) 本研究によって、埋戻し材として繊維材混合流動化処理土を適用することは、流動化処理土の適用に比べ高品質な埋戻し地盤が造成できることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

佐々木 将人, 木幡 行宏, 繊維材混合流動化処理土の三軸せん断特性に及ぼす泥水密度の影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 査読無, 第57号, 2017, pp. 83 - 88

H. Q. Duong, Y. Kohata, K. Ozaki and A. Abiru, Evaluation of In-Situ Compressive Stiffness of Liquefied-Stabilized Soil Reinforced with Fiber, Japanese Geotechnical Society Special Publication, 査読有, Vol.2, No.66, 2016, pp. 2258 - 2263

<http://doi.org/10.3208/jgssp.IGS-41>

尾崎 敬太, 木幡 行宏, 繊維材混合流動化処理土の強度・変形特性に及ぼす養生環境の影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 査読無, 第56号, 2016, pp. 143 - 150

尾崎 敬太, 木幡 行宏, ズウオン クワン フン, 原位置で作製された繊維材混合流動化処理土の三軸せん断特性に及ぼす養生日数の影響, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 査読無, 第55号, 2015, pp. 325 - 332

Hung Quang DUONG, Yukihiro KOHATA, Satoshi OMURA and Keita OZAKI, Strength and Deformation Characteristics of Liquefied Stabilized Soil Reinforced by Fiber Material Prepared at Laboratory and Field, ジオシンセティックス論文集, 査読有, 第29巻, 2014, pp. 33 - 40
<http://doi.org/10.5030/jcigsjournal.29.33>

〔学会発表〕(計5件)

佐々木 将人, 繊維材混合流動化処理土の強度・変形特性に及ぼす泥水密度の影響, 第52回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 2017年7月14日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

木幡 行宏, 繊維材混合流動化処理土による埋戻し地盤の強度・変形特性, 第51回地盤工学研究発表会, 地盤工学会,

2016年9月15日, 岡山大学(岡山県岡山市)

H. Q. Duong, Evaluation of In-Situ Compressive Stiffness of Liquefied-Stabilized Soil Reinforced with Fiber, The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 国際地盤工学会, 2015年11月9日, 福岡国際会議場(福岡県福岡市)

Hung Quang DUONG, Evaluation on Mitigation of Train-induced Vibration as Using LSS for Backfilling Ground of Cut and Cover Tunnel by FEM, 第50回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 2015年9月3日, 北海道科学大学(北海道札幌市) 木幡 行宏, 繊維材混合流動化処理土の室内・原位置作製供試体の非排水三軸せん断特性, 第49回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 2014年7月15日, 北九州国際会場(福岡県北九州市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.muroran-it.ac.jp/cea/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木幡 行宏 (KOHATA, Yukihiro)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号: 90215301