

令和 4 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：2019～2021

課題番号：19K04590

研究課題名(和文) 繊維材で補強された流動化処理土の地盤防災対策への適用に関する研究

研究課題名(英文) Study on the application of Liquefied Stabilized Soil reinforced with fiber material for ground disaster prevention

研究代表者

木幡 行宏 (Kohata, Yukihiro)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90215301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：流動化処理土は固化材添加量を増やし、強度を増加させると脆性的な挙動を示し耐震性の低下が懸念され、繊維材を混合させることでピーク後の脆性的性質が改善されることが報告されている。本研究では、原位置・室内養生供試体に対して三軸圧縮試験を実施し、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と養生日数の影響についての比較・検討を行った。その結果、流動化処理土の強度は養生日数の増加とともに増加傾向を示し、その影響は繊維材の混合により、大きくなることが明らかとなった。また、養生日数の影響は、繊維材を混合した場合に顕著であり、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ことが明らかにされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地盤防災対策の一つとして、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、かつ耐震性を向上させた流動化処理土を用いることにより、耐震性のある地盤を構築することが重要な課題となっている。本研究によって、流動化処理土を地盤防災対策に適用する際には、配合設計基準図で得られる泥水密度範囲においては、より大きな泥水密度を選択すること、繊維材で補強すると初期剛性が大きくなることなどが明らかにされ、繊維材で補強された流動化処理土を地盤防災対策として適用することは、粘り強い地盤を造成するという観点から、大変有用な手法であることが明らかとなり、社会的意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：It has been reported that increasing the amount of solidifier added to a Liquefied Stabilized Soil increases its strength and causes brittle behavior, which may reduce its seismic resistance, and that mixing fiber material improves the brittle properties after the peak. In this study, triaxial compression tests were conducted on in-situ and laboratory cured specimens to compare and investigate the effects of slurry density and curing time on the strength and deformation properties of fluidized treated soil mixed with fiber material. The results showed that the strength of the Liquefied Stabilized Soil tended to increase with the number of curing days, and the effect of the number of curing days increased with the mixing of the fiber material. The effect of curing time was more pronounced in the case of mixing fiber material, and the degree of damage tended to decrease as the curing time increased.

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 泥水密度 養生日数 変形特性 強度特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 一般に、都市域における掘削工事後の埋戻しには、山砂を用いて水締め・振動締め、あるいは水締め・転圧による場合が多いが、開削トンネルによる地下鉄工事などの大規模な掘削・埋戻しでは、供用後 10 年を経ると、躯体と躯体側部の境界部分で陥没が生じることや、地震時には躯体上部の埋戻し箇所が生じる液状化や側方流動などにより大きく陥没する場合がある。

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。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。そこで、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土工法が広く取り入れられるようになってきている。

(2) 最近では、地下鉄開削部での埋戻しは、締めを伴う山砂・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、地盤防災対策の一つとして、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、かつ耐震性を向上させた流動化処理土を用いることにより、耐震性のある地盤を構築することが重要な課題となっている。また、最近の気象変動に伴うスーパー台風の発生やゲリラ豪雨により、未曾有の降水量による河川増水によって橋台背面が洗掘・浸食され、崩壊に到り、河川氾濫が生じる事例が多くみられることから、橋台背面の地盤防災対策や復旧対策を講じることは喫緊の課題となっていることなど、いかに効率よく地盤防災対策に資する地盤を構築するかが課題となっている。

2. 研究の目的

表-1 NSF-CLAY の物理的性質

土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.762
液性限界	W_L (%)	60.15
塑性限界	W_p (%)	35.69
塑性指数	I_p	24.46

(1) 流動化処理土の力学特性は、セメント改良土と同様に、固化材添加量を増やして強度を増加させると、脆性的な挙動を示し耐震性の低下が懸念される。また、最近では、流動化処理土による土被り圧の軽減を目的として、強度低下を考慮しつつ、適切な泥水密度を用いずに低い泥水密度で作製した流動化処理土が利用されることが想定されている。著者らは、これまで、流動化処理土の脆性的な性質を改善することを目的として、繊維材として綿状にした古紙を混合させた繊維材混合流動化処理土に対する一連の研究を実施してきた。その結果、繊維材を混合すると、その補強効果によりピーク後の脆性的性質が改善されることを明らかにしている。しかし、土被り圧軽減のために泥水密度を低減させた流動化処理土については未解明な部分が多く、また、これまでの研究で用いてきた試料は、室内作製試料であるため、実際の屋外で打設された場合や、養生日数による影響についても未解明な部分が多い。

(2) 本研究では、泥水密度 1.280 g/cm³ を 100 % とした場合と、この泥水密度より 5 % 増減させ 105 %、95 % とした場合の 3 種類の泥水を用いて、繊維材をそれぞれ、0、10 kg/m³ で添加した繊維材混合流動化処理土を養生日数 42 日、56 日、80 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 (CUB 試験) を行い、繊維材混合流動化処理土の原位置・室内作製供試体の三軸せん断特性に及ぼす泥水密度と養生日数の影響について比較、検討を行った。

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 を母材として用いた。その物理的性質を表-1 に示す。固化材には特殊土用セメント系固化材を用い、繊維材には新聞紙をフードプロセッサによって綿状に粉砕して加工したものを使用した。

(2) 泥水密度の影響を検討するために、本研究では、(実際の泥水密度) / (基本泥水密度) × 100 = 泥水密度増加率 D_{p_f} (%) を定義して、泥水密度 $\rho_f = 1.216$ g/cm³ ($D_{p_f} = 95$ %), 1.280 g/cm³ ($D_{p_f} = 100$ %, 基本泥水密度), 1.344 g/cm³ ($D_{p_f} = 105$ %), 繊維材添加量を 0, 10 kg/m³ (以下、 $P_c=0$, $P_c=10$ と呼ぶ) とした。

(3) 流動化処理土は、各々の目標泥水密度で泥水を作製した後、 100 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($P_c=0$: Paper Content = 0 kg/m^3)。一方、繊維材混合流動化処理土は、固化材混合後に 10 kg/m^3 (1 供試体当たり 1.963 g) で繊維材を添加し、ハンドミキサーによってよく攪拌して作製した($P_c=10$: Paper Content = 10 kg/m^3)。

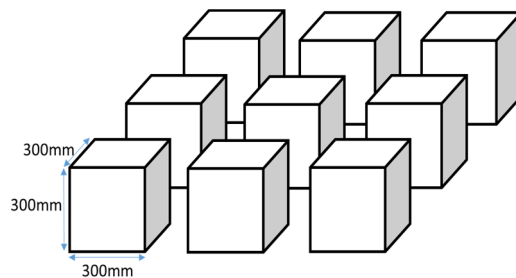


図-1 ピット概略図

(4) 原位置養生供試体は大学構内に作製したピットに処理土を流し込み、所定の日数まで養生した。ピットの概略を図-1 に示す。なお、埋戻し時には、サンプリングの乱れを考慮して厚さ 5 mm のベニヤ板にて型枠を設置し流動化処理土を流し込み 3 日後に型枠を外し、図-1 に示すブロックを掘り出し、実験室にてトリマーとストレートエッジによって円柱供試体に成形した。その後、マイターボックスで上下端面を成形した。

(5) 室内養生供試体は流動化処理土の作製時にハンドミキサーによる混練で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、その後、直径 50 mm 、高さ 100 mm の市販のプラスチック製モールドに、余盛り用としてモールド上部に布ガムテープによるカラーを取り付け、処理土を充填した後、上端面を高分子フィルムで被膜した。充填 3 時間後に余盛り部分を切り取り、上端面を平坦に成形した後、再び高分子フィルムで被膜し濡れタオルを被せて $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ のもとで湿潤気中養生を行った。

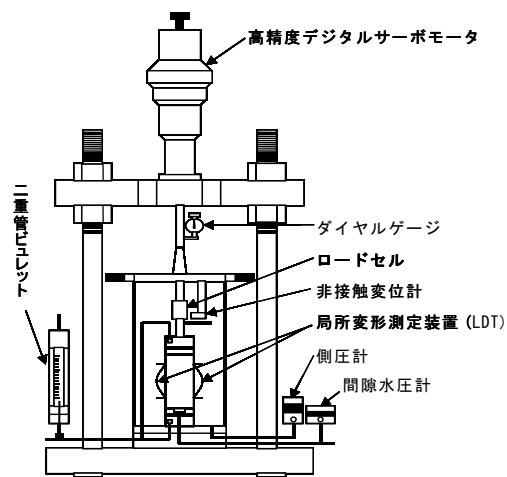


図-2 試験装置概略図

(6) 強度・変形特性の検討では、供試体上下端面のゆるみ層やろ紙の圧縮に起因するベティングエラーを含まず、微小ひずみレベルからの軸変位量が測定可能な局所変形測定装置(Local Deformation Transducer : LDT)を供試体側面に設置した三軸試験装置を用いて、圧密非排水三軸圧縮試験 (CUB 試験) を実施した。図-2 に三軸試験装置の概略図を示す。なお、実験は原位置及び室内で養生した供試体に対して養生日数を 42, 56, 80, 126 日として拘束圧 98 kPa 、背圧 196 kPa で 15 時間等方圧密後、非排水三軸せん断を行った。軸ひずみ速度は $0.054 \text{ \%}/\text{min}$ として、せん断中の損傷程度を調べる目的で単調载荷中に微小な除荷・再载荷を行った。

4. 研究成果

(1) 図-3 は $D_{p_f} = 95, 100, 105 \text{ \%}$ で作製した原位置養生における $P_c=0, 10$ で養生日数 42 日に対する CUB 試験の軸差応力 $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ と軸ひずみ ϵ_a の関係を、 $\epsilon_a = 0 \sim 3.5 \text{ \%}$ の範囲で示したものである。 $D_{p_f} = 95, 100 \text{ \%}$ の q_{max} は $D_{p_f} = 105 \text{ \%}$ の q_{max} に比べて小さく、 $D_{p_f} = 105 \text{ \%}$ の q_{max} は $D_{p_f} = 100 \text{ \%}$ の q_{max} に比べ約 2 倍の値を示している。また、繊維材を添加した場合は添加しない場合に比べて、概ねピーク後の軸差応力の減少が緩やかになっていることが分かる。一方、原位置養生供試体において $D_{p_f} = 95 \text{ \%}$ では軸差応力が小さくなる傾向にあり、 $D_{p_f} = 105 \text{ \%}$ では軸差応力が顕著に増加する傾向にあることから、強度に及ぼす泥水密度の影響は極めて大きいと言える。

(2) 図-4 は図-3 に示した $q \sim \epsilon_a$ 関係を $\epsilon_a = 0 \sim 0.01 \text{ \%}$ の範囲で示したものである。室内養生供試体では $D_{p_f} = 105 \text{ \%}$ を除き、繊維材を添加することにより僅かに剛性が増加する傾向があると言える。原位置養生でもわずかに剛性が高くなってはいるが、室内養生と比べて顕著な特徴は見られない。

(3) 図-5 は泥水密度増加率 D_{p_f} と図-3 に示した $q \sim \epsilon_a$ 関係から得られた最大軸差応力 q_{max} の関係である。原位置及び室内養生供試体の q_{max} は、 $D_{p_f} = 100 \text{ \%}$ とした基本泥水密度より泥水密度を 5 \% 減少させると、繊維材混合の有無に関わらず、平均で約 22 \% 減少するのに対して、泥水密度を 5 \% 増加させると、平均で約 40 \% 増加している。

(4) 原位置・室内作製供試体ともに、配合設計基準図で得られた適切な泥水密度 (基本泥水密度) から、わずかに泥水密度を増加させると q_{max} は顕著に増加することから、繊維材で補強された流動化処理土を地盤防災対策として適用する際には、配合設計基準図で得られる泥水密度範囲においては、より大きな泥水密度を選択することが重要であり、安全側の強度を持つ流動化処理土となることが明らかになった。

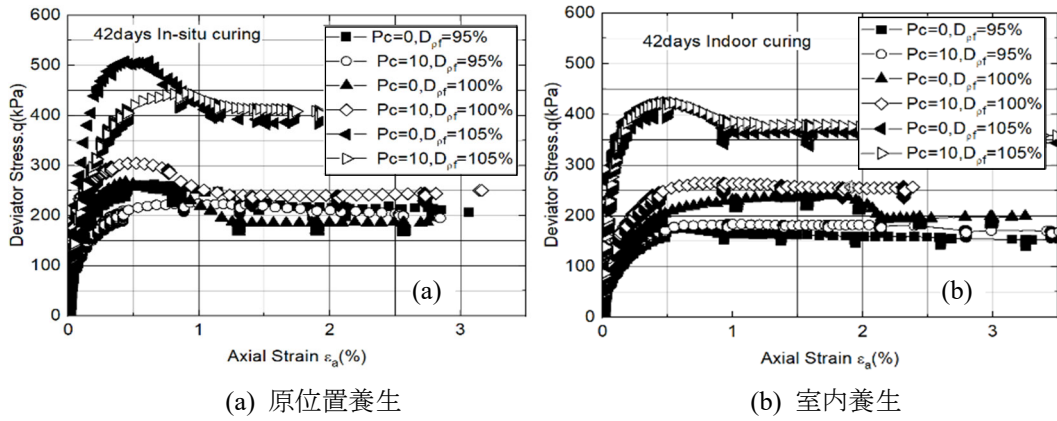


図-3 $q \sim \varepsilon_a$ 関係 : $\varepsilon_a = 0 \sim 3.5\%$, 養生日数 42 日

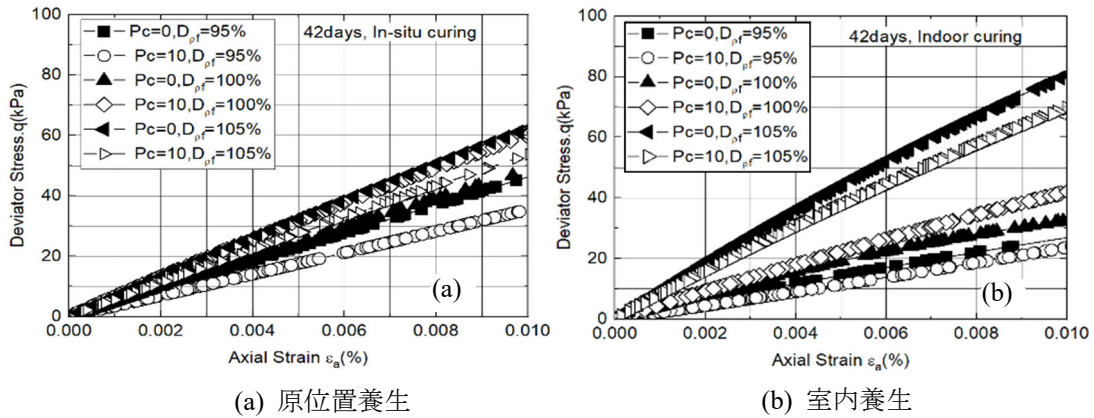


図-4 $q \sim \varepsilon_a$ 関係 : $\varepsilon_a = 0 \sim 0.01\%$, 養生日数 42 日

(5) 本研究では、 $\varepsilon_a = 0.002\%$ 以下の微小ひずみレベルにおける $q \sim \varepsilon_a$ 関係の勾配を初期変形係数 E_0 と定義した。また、接線変形係数 E_{tan} は $q \sim \varepsilon_a$ 関係における接線勾配で定義される変形係数であり、等価変形係数 E_{cq} は単調荷重中の微小な除荷・再載荷から得られる変形係数である。

(6) 図-6 は、各試験の $q \sim \varepsilon_a$ 関係における E_{tan} を E_0 で正規化した E_{tan}/E_0 と q を q_{max} で正規化した q/q_{max} の関係を示している。 $E_{tan}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係は、 $q \sim \varepsilon_a$ 曲線の非線形性の程度を表すものである。原位置養生では、 $Pc=0$ の場合、せん断に伴う E_{tan}/E_0 の減少率は、 $q/q_{max} = 0.4$ 程度まで泥水密度に関わらず同程度であるが、 E_{tan}/E_0 の減少傾向は $D_{pf} = 100\%$ で最も大きい。一方、 $Pc=10$ の場合、 $E_{tan}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係に及ぼす影響は見られず、ほぼ一致した曲線となっている。室内養生では、 $D_{pf} = 105\%$ の場合に繊維材混合の有無に関わらず、せん断に伴う E_{tan}/E_0 の減少率が $D_{pf} = 95\%$, 100% に比べ顕著に小さくなっている。また、 $q/q_{max} = 0.4$ 以上で $D_{pf} = 95\%$ の E_{tan}/E_0 の減少傾向が増加している。これは原位置養生

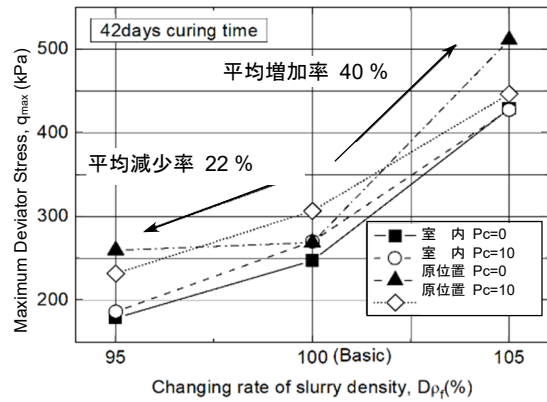


図-5 $q_{max} \sim D_{pf}$ 関係

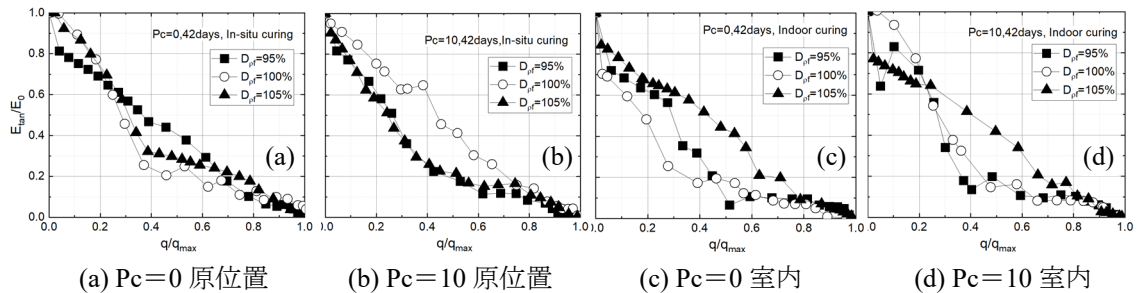


図-6 $E_{tan}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係

生では、養生温度や湿度などの要因により、室内養生に比べ強度発現が遅くなると考えられ、繊維材混合の有無や泥水密度の増減による影響が42日では顕著に現れなかったと推察される。一方、室内養生では養生環境がコントロールされているため $E_{tan}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係に及ぼす泥水密度の影響が養生日数42日で、 $D_{pf}=105\%$ の場合に顕著に現れたものと考えられる。

(7) 図-7は、载荷中の微小な除荷・再载荷での $q \sim \epsilon_a$ 関係における E_{eq} を E_0 で正規化した E_{eq}/E_0 と q を q_{max} で正規化した q/q_{max} の関係における泥水密度の比較である。 E_{eq} はせん断に伴う損傷程度を表していることから、原位置養生では、せん断に伴う損傷程度に及ぼす繊維材の有無、泥水密度の増減の影響に顕著な差は見られないと考えられる。一方、室内養生では繊維材の有無に依らず、泥水密度によって $E_{eq}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係は異なり、 $D_{pf}=105\%$ の場合に最も損傷程度が小さくなっている。

(8) 図-8は、繊維材添加量 $P_c=0, 10 \text{ kg/m}^3$ 、固化材添加量 100 kg/m^3 で作製された原位置養生及び室内養生供試体に対して、有効拘束圧 $\sigma_c' = 98 \text{ kPa}$ で実施された CUB 試験の $q \sim \epsilon_a$ 関係から得られる q_{max} に及ぼす養生日数の影響を示したものである。養生日数の増加に対する q_{max} を比較すると、全体的には q_{max} は養生日数の増加とともに増加傾向を示しており、 $P_c=0$ に比べ $P_c=10$ の q_{max} の増加傾向が大きい。すなわち、 q_{max} に及ぼす養生日数の影響は繊維材を添加すると大きくなると考えられる。

(9) 図-9は、CUB 試験の $q \sim \epsilon_a$ 関係から得られる初期変形係数 E_{max} に及ぼす養生日数の影響を示している。室内養生の E_{max} の増加傾向は、原位置養生の E_{max} に比べて、養生日数が比較的小さい段階でみられる。すなわち、原位置養生では養生温度や湿度などの要因により、室内養生に比べ初期剛性の発現が遅くなると考えられる。また、繊維材を混合した $P_c=10$ のほうが $P_c=0$ に比べ剛性が大きい。特に、室内養生の場合に、この傾向は顕著であることが明らかにされた。

(10) 本研究によって、流動化処理土を地盤防災対策に適用する際には、配合設計基準図で得られる泥水密度範囲においては、より大きな泥水密度を選択すること、繊維材で補強すると初期剛性が大きくなることなどが明らかにされ、繊維材で補強された流動化処理土を地盤防災対策として適用することは、粘り強い地盤を造成するという観点から、大変有用な手法であることが明らかとなった。

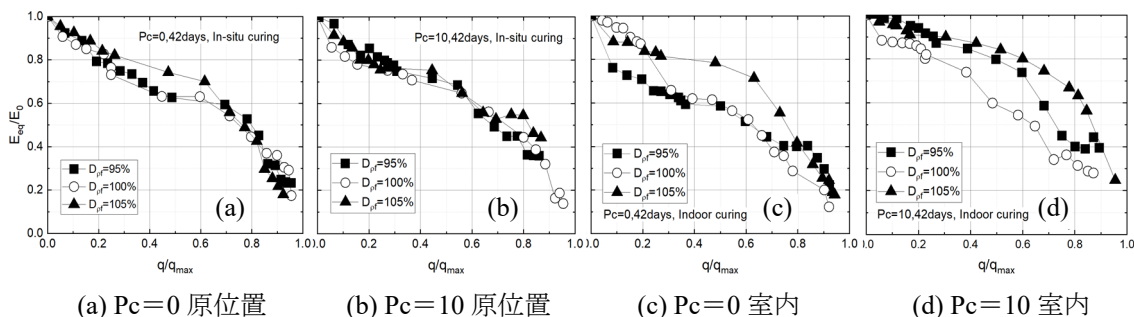


図-7 $E_{eq}/E_0 \sim q/q_{max}$ 関係

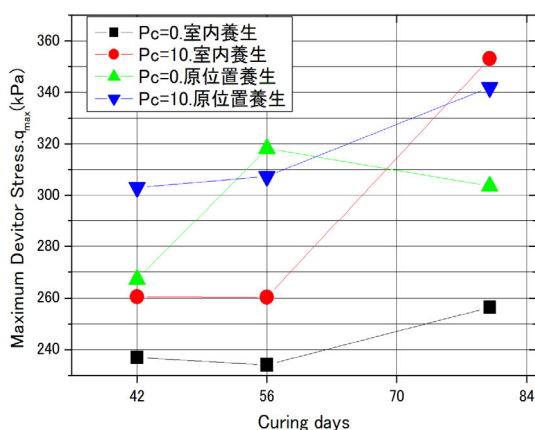


図-8 最大軸差応力と養生日数の関係

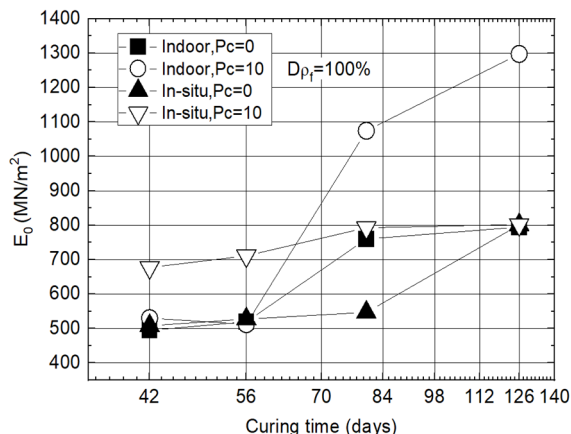


図-9 初期変形係数と養生日数の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Pham Quang Vuong and Yukihiro Kohata	4. 巻 20
2. 論文標題 Effect of Liquefied Stabilized Soil as Backfilling Material on the Building under Seismic Condition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 155-162
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2020.77.80905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yujie Cui, Yukihiro Kohata and Weichen Liu	4. 巻 19
2. 論文標題 Influence of cement solidification agent and slurry density on mechanical property of Liquefied Stabilized Soil	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 177-184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2020.73.13390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yujie CUI, Yukihiro KOHATA	4. 巻 34
2. 論文標題 Effect of Cement Solidification Agent and Slurry Density on Strength and Deformation Property for Liquefied Stabilized Soil Reinforced by Fiber Material	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 123-128
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5030/jcigsjournal.34.123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yujie Cui, Yukihiro Kohata and Weichen Liu	4. 巻 Vol.19, No.73
2. 論文標題 INFLUENCE OF CEMENT SOLIDIFICATION AGENT AND SLURRY DENSITY ON MECHANICAL PROPERTY OF LIQUEFIED STABILIZED SOIL	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 177-184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2020.73.13390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Quang Vuong Pham, Yukihiro Kohata	4. 巻 62
2. 論文標題 Various factors on strength and deformation property of Liquefied Stabilized Soil prepared at field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lecture Notes in Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 767-774
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-2184-3_100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yujie CUI
2. 発表標題 Effect of content of fiber material on triaxial shear property for liquefied stabilized soil with different slurry density
3. 学会等名 The 12th Asian Reagional Conference of IAEG (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Quang Vuong Pham
2. 発表標題 Various factors on strength and deformation property of Liquefied Stabilized Soil prepared at field
3. 学会等名 The International Conference GEOTEC HANOI 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yujie CUI
2. 発表標題 EFFECT OF CONTENT OF FIBER MATERIAL AND SLURRY DENSITY ON TRIAXIAL SHEAR PROPERTY FOR LIQUEFIED STABILIZED SOIL
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------