

短繊維を低混合し安定処理した 火山灰質粘性土の力学特性

Properties of Strength in Short Fiber Low Mixture Stabilized Soil of Volcanic Cohesive Soil

工藤宗治 Muneharu KUDO (大分工業高等専門学校)
安福規之 Noriyuki YASUFUKU (九州大学)

火山灰質粘性土である黒ぼくは高含水比で、攪乱すると容易に軟弱化する。そのため土工材料として使用する場合は安定処理を行うが、強度がうまく発現しないことがあり、多量の安定処理材を投入せざるを得ない場合がある。これまで筆者らは、黒ぼくの安定処理土に短繊維を混合し、強度特性の改善を試みている。本研究は短繊維低混合率下での一軸圧縮試験を行い、強度特性を調べた。短繊維の混合率について、短繊維混合の効果が発現する混合率の目安が示された。

キーワード：短繊維，低混合，火山灰質粘性土，安定処理，低添加
(IGC : D-06, K-06)

1. はじめに

短繊維混合補強土は、土または安定処理土に長さ数十～数百 mm、直径数十～数百 μm のポリエステルやポリプロピレンなどの短繊維を 0.1～数%混合する事によって、土粒子と短繊維、短繊維と短繊維を絡み合わせて強度や靱性などの力学的特性や降雨・流水などに対する耐侵食性が向上する効果を有している。また、植物根の引き抜き抵抗などが向上することから安定した植生が可能になるなどさまざまな特性が付与される¹⁾。そのため安定処理土に短繊維を混合させると強度増加や残留強度が期待できる。この効果を生かして火山灰質粘性土の安定処理土に短繊維を混合する事を試みた。火山灰質粘性土である黒ぼくは高含水比で、攪乱・練り返しを受けると強度が著しく低下し、トラフィカビリティーの確保が難しくなる²⁾。そのため通常土工材料として使用する場合は石灰やセメントなどの安定処理材を添加し化学的安定処理工法を行っているが、上記のような特殊な特性を有しているため、十分満足な強度を得ることが難しい。その結果として、多量の安定処理材を投入せざるを得ない場合がある。そのため安定処理土の高アルカリ化などの環境負荷が増大するなど地盤環境問題が発生し、安定処理材をできるだけ低添加で所定の強度を発生させる必要がある。筆者らは火山灰質粘性土である黒ぼくの安定処理土に短繊維を混合し、力学特性の改善効果を調べている³⁾。これまでは短繊維の混合率は 0.25%を下限として行っていたが、実際の土工を想定した場合、0.25%では短繊維の総量が多くなり、土工作业等に支障をきたす場合が想定できる。本研究は短繊維混合率を既往の条件よ

り低下させた状態で黒ぼくの安定処理土と混合し、一軸圧縮試験を行い、黒ぼくの安定処理土の短繊維低混合による力学特性を調べた。

2. 既往の研究

これまで行った短繊維を混合し安定処理した火山灰質粘性土に関する研究では、黒ぼくの石灰安定処理土に 0.5%、0.25%と比較的高い混合割合で短繊維を混合し一軸圧縮試験を行った⁴⁾。その結果、図-1 から短繊維を混合することによって強度が無改良土よりも増加し、破壊ひずみも増大し、ひずみが進行していても残留強度を有していることを明らかにしている。図-2、図-3 から安定処理材の有無、種類、添加量の変化等にあまり差異はなく、短繊維量が大きくなるにつれて強度は増加する。従来の安定処理材のみの安定処理とほぼ同じ程度の強度を、それよりも少ない量の安定処理材と短繊維の組み合わせで発現可能であることも結果として示している。また図-4 から短繊維混合時間が変化してもあまり応力-ひずみ関係には明確な差異は見られなかった。図-5 から短繊維混合時間の増加につれ強度変化率が増加している。図-6 から短繊維混合時間に関わらず分散係数は約 0.8 以上を示し、短繊維の分散状態は良好だった。等の知見が得られている。ここで、強度変化率および分散係数については、第 4 章および第 6 章で説明する。

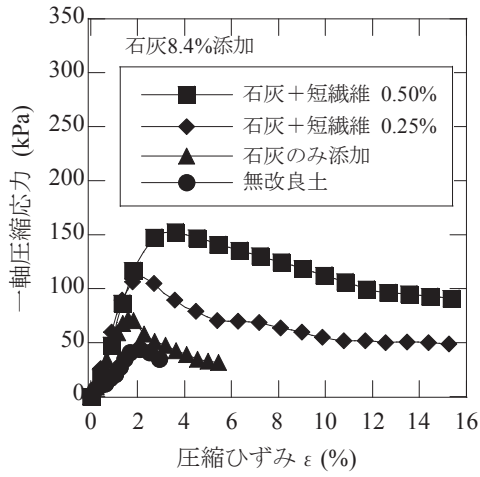


図-1 応力-ひずみ曲線 ((文献4) から加筆修正)

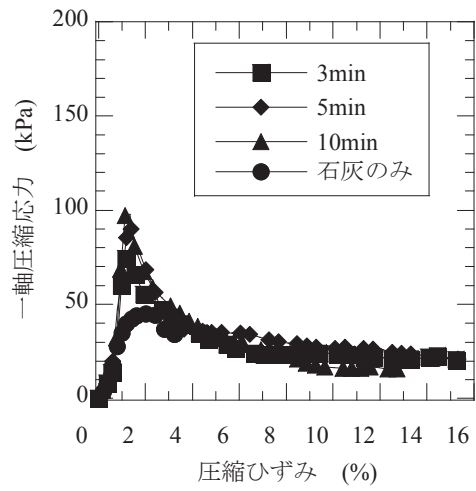


図-4 応力-ひずみ曲線 ((文献4) から加筆修正)

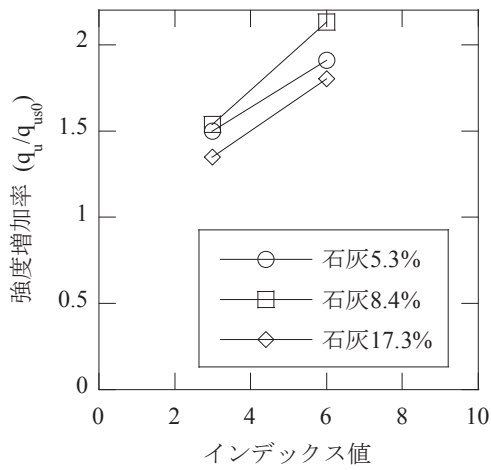


図-2 強度増加率 ((文献4) から加筆修正)

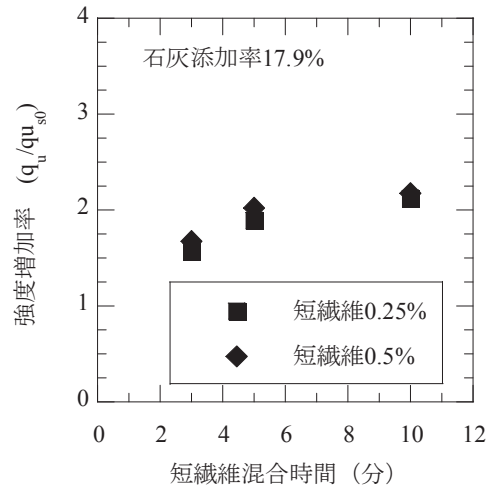


図-5 混合時間と強度増加率 ((文献4) から加筆修正)

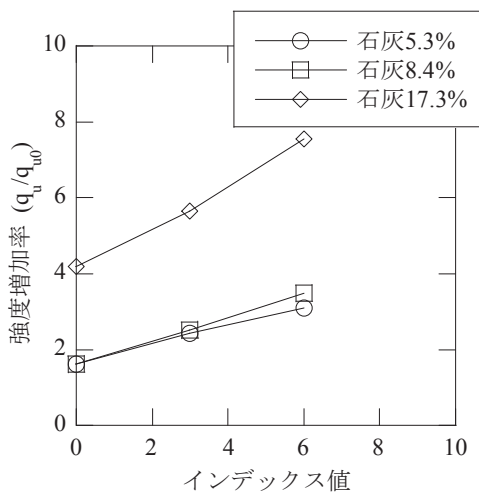


図-3 強度増加率 ((文献4) から加筆修正)

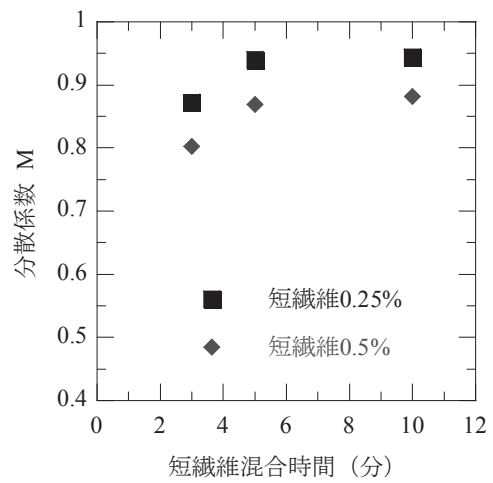


図-6 短繊維混合時間と分散係数 ((文献4) から加筆修正)

3. 試料と実験方法

3.1 使用試料

3.1.1 試料土

試料土は火山灰質粘性土である黒ぼくで大分県竹田産である。試料土は乱した状態で採取し、4.75mmふるいを通したものを使用したもので、自然含水比は約196%である。試料土の締め固め特性を図-7、物理的性質を表-1に示す。

3.1.2 使用材料

短繊維は太さ 6.7dtex (直径 25 μ m) のポリエステル繊維を使用した。安定処理材として石灰系安定処理材 (以下生石灰) を使用した。

3.2 供試体作製方法

供試体作製は、安定処理土の静的締め固めによる供試体作成方法 (JGS T 812-1990) に準じて、自然含水比状態の黒ぼくと所定量の生石灰を混合し安定処理土を作製し、安定処理土と手でほぐした所定量の短繊維が均等に混ざるように所定の混合時間で、手で混合し作製した。生石灰の添加率は、50kg/m³に相当する添加率に対応し、土の乾燥重量に対し 12.1%とした。短繊維の混合率は、土の乾燥重量に対し 0.25%、0.1%、0.05%、0.025%とし、短繊維の長さは 50mm とした。供試体作成条件を表-2に示す。供試体締め固めの度合いは、その乾燥密度が自然含水比での乾燥密度の 90%以上になることを目標とした。標準供試体寸法は直径 5cm、高さ 10cm とし、モールドは塩化ビニール製の三つ割りモールドを使用し、7日間湿潤養生した。短繊維 0.1%混合状況を写真-1、比較として短繊維混合率 0.5%を写真-2、供試体作成モールドを写真-3に示す。

3.3 実験方法

一軸圧縮試験は、「土の一軸圧縮試験方法」(JGS

0511-2000) に準じて、ひずみ速度 1%/min の荷重速度で行った。

表-1 試料土の物理的性質

自然含水比 (%)	196.37
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.32
液性限界 (%)	212.66
塑性限界 (%)	165.28
塑性指数	47.38
最大乾燥密度 (g/cm ³)	0.412

表-2 供試体作製条件

試料	黒ぼく (大分県竹田市産)
安定処理材	石灰
添加率	12.1% (50kg/m ³ に相当)
繊維	ポリエステル製
太さ(直径)	6.7dtex (直径25 μ m)
繊維長	50mm
混合率	土の乾燥重量に対して 0.25%, 0.1%, 0.05%, 0.025%
混合時間	10分
締め固め方法	静的締め固め法に準拠
標準緒元	直径5cm、高さ10cm
養生方法	湿潤養生
養生日数	7日

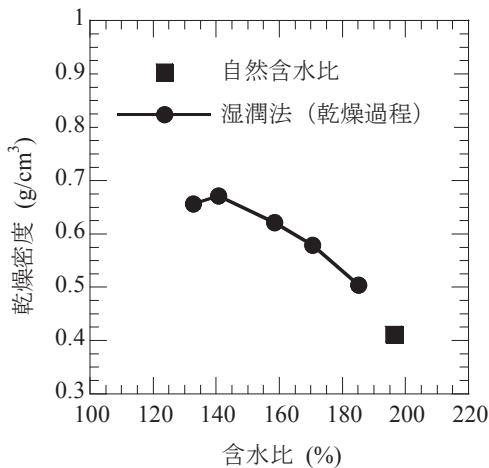


図-7 試料土の締め固め特性

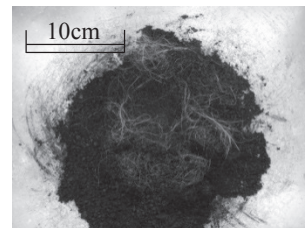


写真-1 短繊維 0.1%混合状況

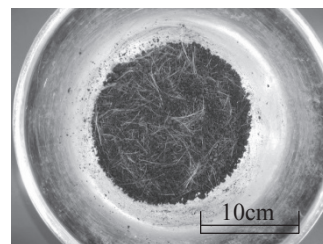


写真-2 短繊維 0.5%混合状況

4. 短繊維混合による一軸圧縮強度改善

図-8 に代表的な応力-ひずみ曲線を示す。黒ぼくの無改良土および石灰のみ添加土は、ピーク強度発現後急激に強度を失う脆性破壊をおこなっている。石灰を添加すると強度は増加するが黒ぼく無改良同様にピーク強度発現後急激に強度を失う脆性破壊をおこなっている。それに対し、短繊維を混合することによって強度が石灰添加土よりも増加し、ひずみが進行していても残留強度を有している。大ひずみになるにつれて短繊維混合による効果が発揮されていることがわかる。既往の研究では短繊維混合率の下限を0.25%にしていたが、それよりも低混合にした場合でも残留強度が期待できることが分かった。

短繊維低混合の状況では、ピーク強度発現後の強度低下割合が短繊維混合率によって変化していくこと見受けられる。

短繊維混合の影響を求める為、石灰無添加状態での応力-ひずみ曲線を図-9 に示す。短繊維を混合することによって無改良土よりも強度は増加し破壊ひずみが増大している。残留強度は短繊維混合率が0.1%程度までは期待できるが、短繊維混合率が0.1%程度を下回ると大ひずみでの短繊維混合の効果が得られにくい。

図-10、図-11 に安定処理土と短繊維混合安定処理土のピーク強度の関係を示す。図-10 の縦軸は短繊維混合安定処理土のピーク強度 q_u を各安定処理土のピーク強度 q_{u0} で除した値 (q_u/q_{u0})、横軸は式 (1) で求められるインデックス値である。インデックス値とは、ハイグレードソイル研究会で用いられており、混合する繊維の長さ、太さや混入量の違いによる補強効果を定量的に判断する指標である¹⁾。図-11 の縦軸は短繊維混合安定処理土のピーク強度 q_u を無改良土のピーク強度 q_{u0} で除した値 (q_u/q_{u0}) である。

$$\text{インデックス値} = \frac{L}{D} \times n \quad (1)$$

- L: 短繊維長(mm)
- D: 短繊維径(μm)
- n: 短繊維混合率(%)

図-10 より安定処理材添加量の変化等にあまり差異はなく、インデックス値が大きくなるにつれて強度増加率は概ね1.5~2.5倍に増加している。今回の実験で、石灰添加率と強度変化率が既往の研究の結果と逆転しているのは、今回の実験の安定処理土(繊維無混合)のピーク強度 q_{u0} が比較的小さい値だったためだと考えられる。

図-11 から、黒ぼくに短繊維を混合する事で石灰安定処理土と同等の強度が発現している。これは図-3 でも同様な現象が確認されており、従来の安定処理材のみによ

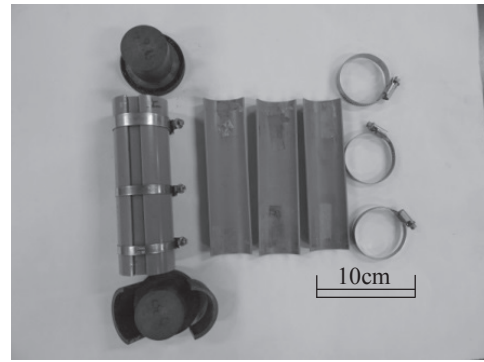


写真-3 供試体作製モールド

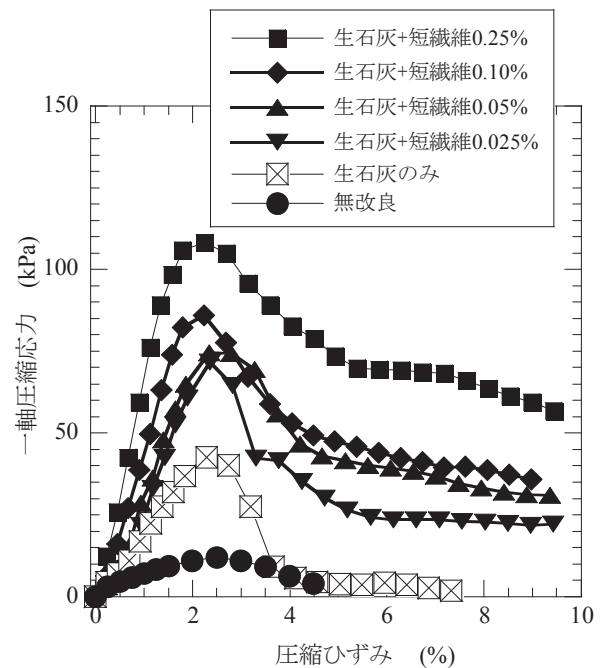


図-8 応力-ひずみ曲線 (生石灰添加)

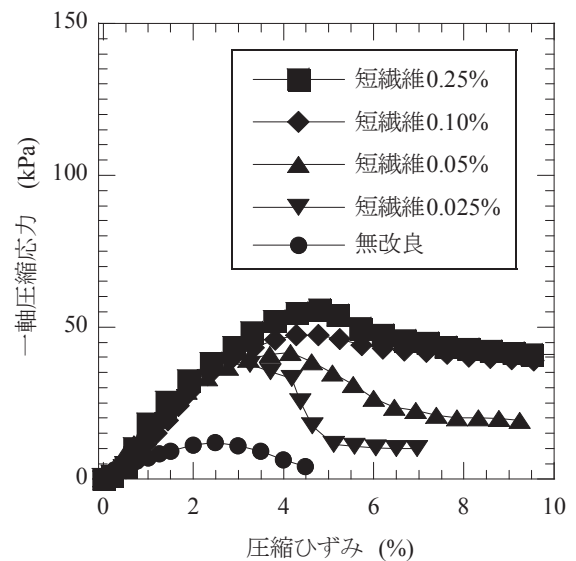


図-9 応力-ひずみ曲線 (生石灰無添加)

る安定処理とほぼ同じ程度の強度を、それよりも少ない量の安定処理材と短繊維の組み合わせで発現できることを示している。

5. 強度低下率とひずみの関係

短繊維混合補強土の特性として前章に示しているように、ひずみが進展しても残留強度を得られる靱性を持つ。

図-12、図-13 に強度残留率の関係を表す。図-12、図-13 の横軸はピーク強度発生時の圧縮ひずみからの進展ひずみ量を示している。縦軸は進展ひずみ量での一軸圧縮強度 q_u' をピーク強度 q_u で除した値を示している。図-12 は生石灰添加、図-13 は生石灰無添加を表している。無改良土ではピーク強度発現後 2%ひずみが進展すると強度が 40%程度になり、それ以降は強度が得られなくなり、ピーク強度発現後一気に強度が低下する脆性破壊を生じている。生石灰添加した場合は生石灰によって固化された影響で無改良土よりも強度低下の割合が高い。短繊維を混合した場合、ピーク強度発現後 2%ひずみが進展すると、短繊維混合率が 0.25%では強度が概ね 80%になり、0.1~0.05%では強度が 60%程度になるが、その後ひずみが進展しても急激な強度低下はせず、ひずみが 5%程度進展しても 0.25%では強度が概ね 70%になり、0.1~0.05%では強度が 50%程度になる。しかし、短繊維混合率が 0.05%より少なくなると、残留強度が概ね 50%を下回るようになっていく。

黒ぼくの安定処理土に短繊維を混合する場合は、短繊維混合による強度増加と残留強度の観点から短繊維混合率の下限が決められる。

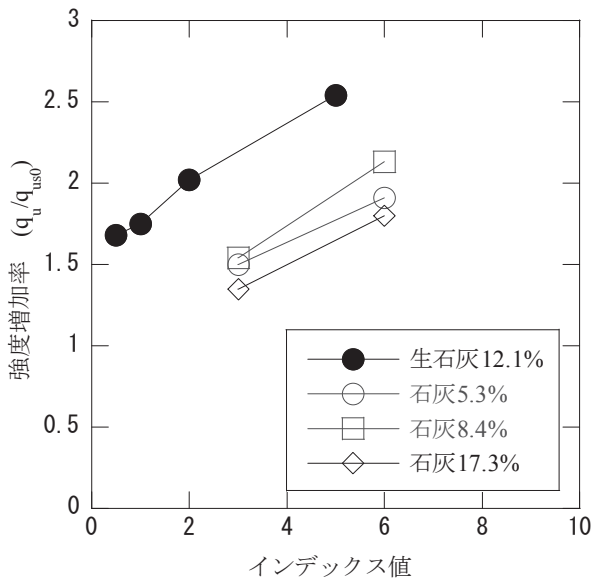


図-10 強度増加率 (図-2 に加筆修正)

6. 短繊維の偏在が強度に及ぼす影響

実際の現場で問題となるのは、安定処理した火山灰質粘性土に、均一に短繊維を十分に混合する時間が取れず、短繊維の偏在が生じ、十分に短繊維補強の効果が得られない場合がある。短繊維の偏在は短繊維の混合時間の長短によって発生すると考え、安定処理した火山灰質粘性土に対して短繊維の混合時間を変化させ、短繊維の偏在を発生させた供試体に対して一軸圧縮試験を行い、短繊維の偏在による強度への影響を調べた。

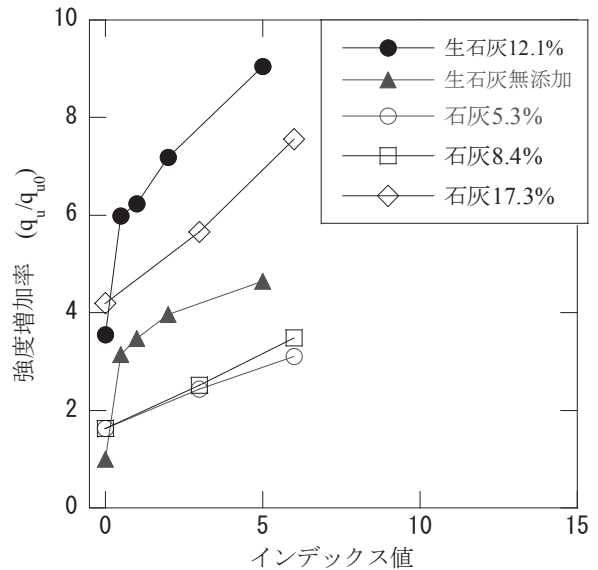


図-11 強度増加率 (図-3 に加筆修正)

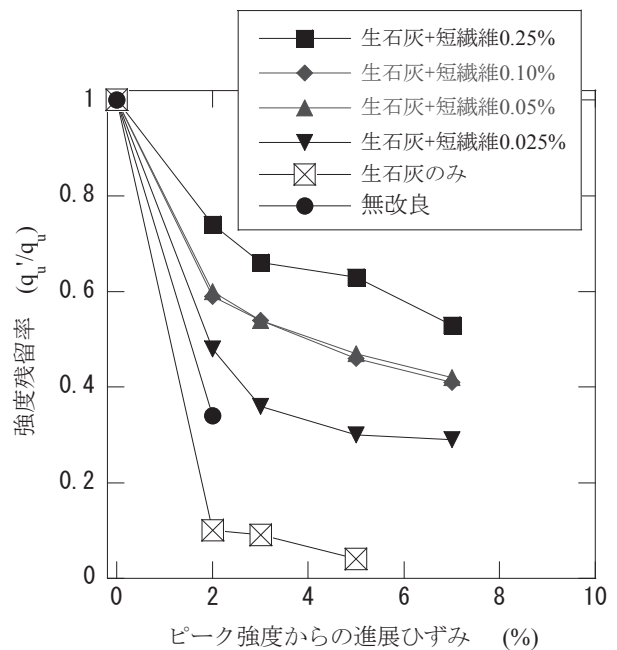


図-12 強度低下率 (石灰添加)

供試体作製方法は、3章と同様だが、短繊維の偏在を発生させるために、短繊維の混合時間を3分で行った。

図-14、図-15に代表的な応力-ひずみ曲線を示す。既往の研究によると、生石灰添加に短繊維0.5%混合では、短繊維の混合時間によって応力-ひずみ曲線に大きな変化は見られないとされているが、図-8および図-14から短繊維低混合では、短繊維の混合時間が短くなると強度は減少する。また変形係数も混合時間が10分では、繊維が3分混合よりも大きく出ている、混合時間が長くなると短繊維が全体的に混合され、短繊維による土粒子の拘束効果が出現されている。3分混合では供試体全体に混合されにくく、部分的に短繊維の偏在が生じていると思われる。図-9および図-15から生石灰無添加では10分混合と3分混合に大きな変化は無い。

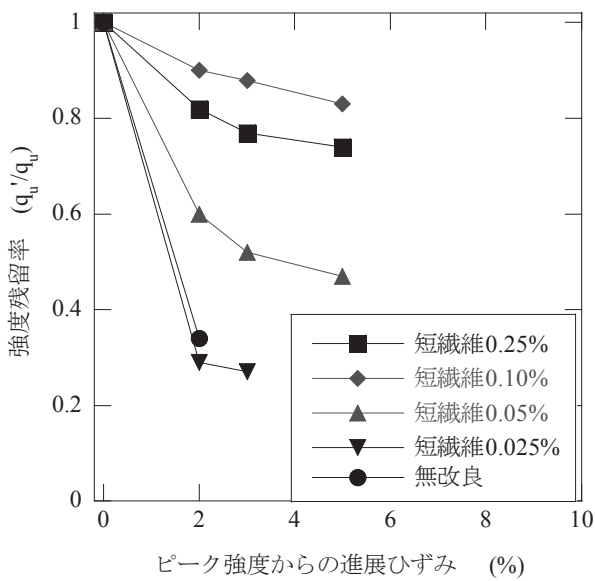


図-13 強度低下率（石灰なし）

図-16、図-17に短繊維混合時間とピーク強度変化率との関係を示す。図-16、図-17の縦軸は、各短繊維混合処理土のピーク強度を安定処理土および無改良土のピーク強度で除した値である。既往の研究では、生石灰安定処理土では短繊維混合時間が長くなると強度増加が見られたが、短繊維低混合でも同様に短繊維混合時間が長くなると強度増加が見られる。一方生石灰添加未処理土では混合時間の変化による強度増加はほとんど見られなかった。

短繊維混合時間と短繊維の分布状況を定量化するために、図-18の様に実験後の供試体を4分割にし、分割した供試体に存在する短繊維の質量を計測し、式(2)から分散係数Mを求めて、分布状況の定量化を試みた。

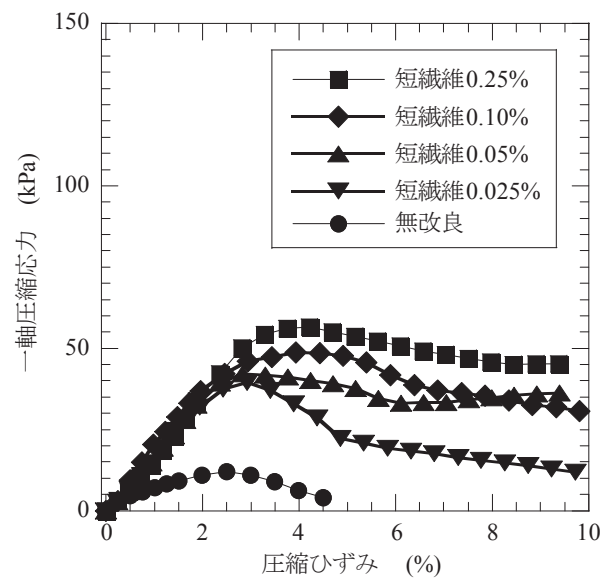


図-15 応力-ひずみ曲線（短繊維3分混合）

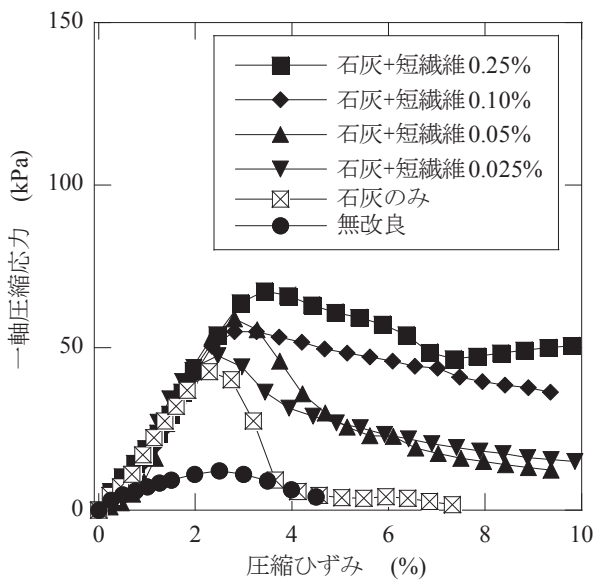


図-14 応力-ひずみ曲線（短繊維3分混合）

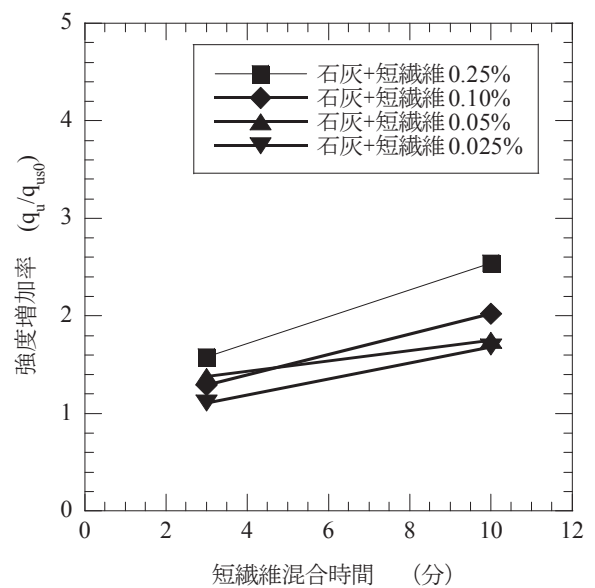


図-16 混合時間と強度増加率の関係（石灰添加）

分散係数 M は $M=1$ は供試体全体に万遍なく分布している状況を表し、 $M=0$ はある 1 箇所集中して分布している状況を表す。なお、 x_i は各分割した供試体に存在した短繊維量、 \bar{x} は平均短繊維量である。

4 分割した供試体を写真-4 に示す。図-19、図-20 に短繊維混合時間と分散係数の関係を示す。図-19 は生石灰添加、図-20 は生石灰無添加である。図-19、図-20 の縦軸は分散係数 M 、横軸は短繊維混合時間である。図-19、図-20 から短繊維混合時間が短いと分散係数は低下する。

短繊維混合時間が短くなれば、短繊維をほぐしながら分散させ安定処理土と混合させるという一連の作業が十分にできず、短繊維がある所に固まって存在することになるためと思われる。図-6 では分散係数が 0.8 以上と良好な分散状態となっているが、今回は分散係数が 0.5~0.6 と必ずしも良好とはいえない。写真-1 から短繊維量が少なく、供試体作成前の黒ぼくと短繊維を混合する時点で少なからず繊維の偏在が発生している。

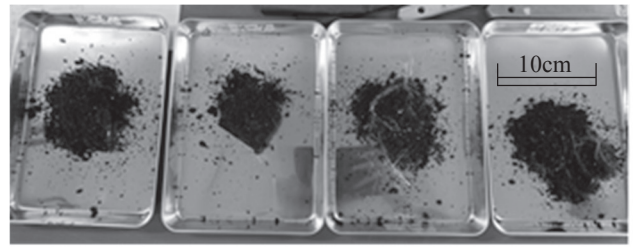


写真-4 4分割した供試体状況

$$M = 1 - \frac{1}{\sqrt{n-1} \bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 \right\}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで

n : 分割数

\bar{X} : 一つの分割に計算上存在する短繊維の質量

X_i : 分割に存在する短繊維の質量

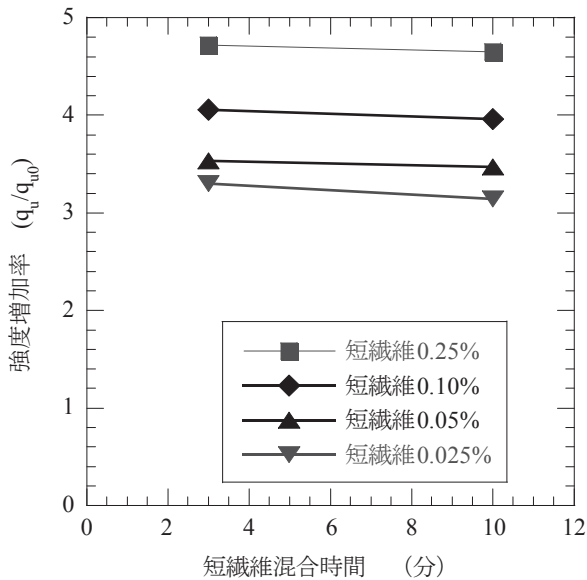


図-17 混合時間と強度増加率の関係 (石灰なし)

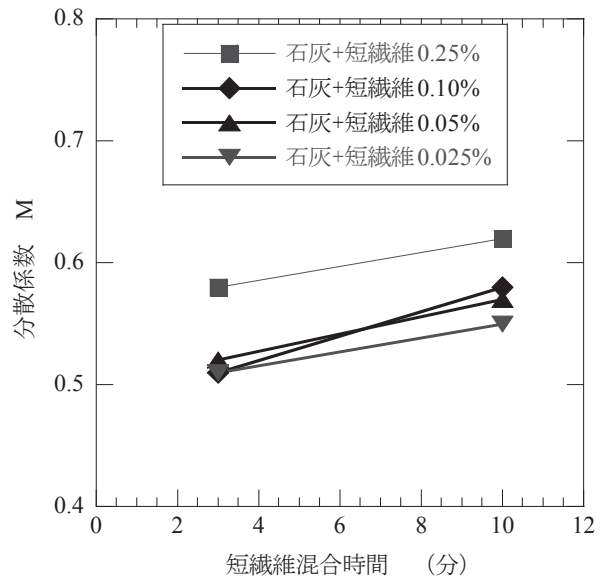


図-19 短繊維混合時間と分散係数

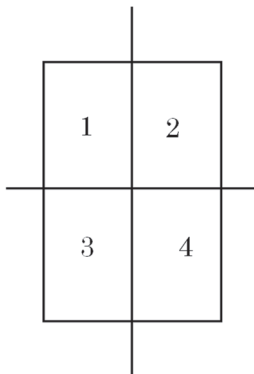


図-18 供試体分割模式図

そのため短繊維混合率が低下する程分散係数が低下している。図-21、図-22 に分散係数と強度増加率の関係を示す。図-21 は生石灰添加、図-22 は生石灰無添加である。図-21、図-22 の縦軸は強度増加率、横軸は分散係数である。図-21、図-22 から分散状態が良くなると強度増加率も増加し、短繊維の分散状態が強度発現に影響を及ぼすといえる。また、分散係数が 0.5 程度でも短繊維混合による強度発現が期待でき、短繊維低混合でも補強効果があるといえる。しかし、ピーク強度後の残留強度などから短繊維低混合率は 0.1% 以上にするのが望ましい。

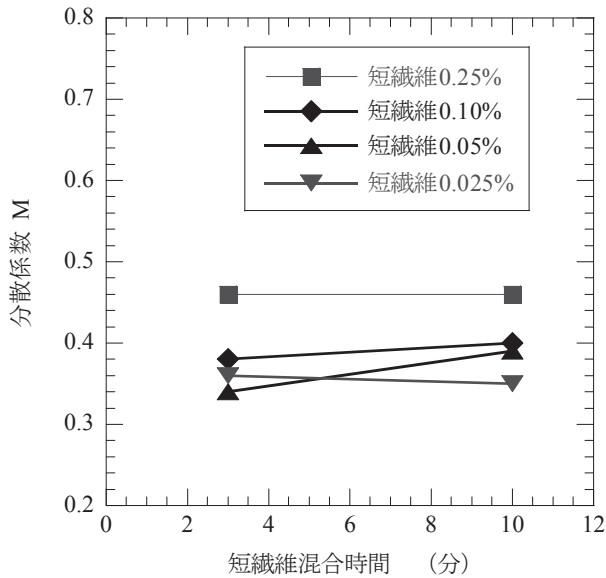


図-20 短繊維混合時間と分散係数

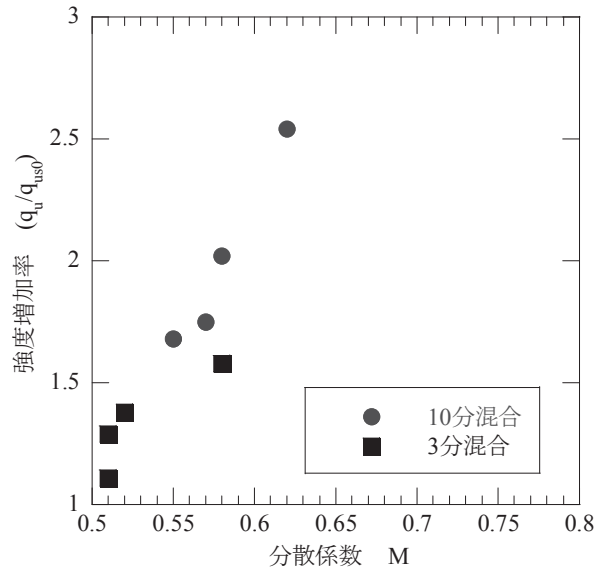


図-22 分散係数と強度増加率 (石灰無添加)

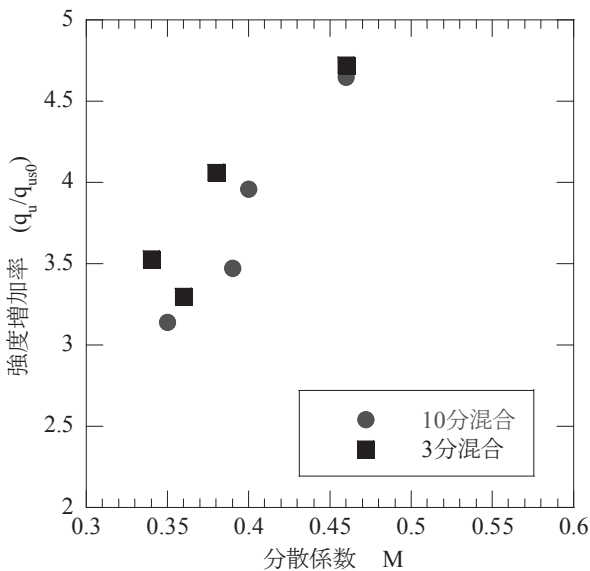


図-21 分散係数と強度増加率 (石灰添加)

7. まとめ

今回の実験で得られた知見を以下に記す。

- (1) 黒ぼくの安定処理土に短繊維を0.1%~0.025%低混合させても一軸圧縮強度は増加し、残留強度も確認でき、脆性の改善が見られる。
- (2) 短繊維低混合状態でも安定処理材の添加量の組み合わせで、短繊維混合割合が比較的高い場合と同様に強度増加が得られる。
- (3) 短繊維の混合時間の変化によって短繊維の分散状況は、変化する。具体的には短繊維混合時間が短いと

短繊維の十分な混合が出来ず、短繊維の偏在を発生させる。

- (4) 分散係数が0.5の中程度であっても、短繊維混合による強度発現が期待できる。
- (5) 大変形時の強度低下率を0.5程度に抑えるためには、生石灰添加率が12%程度の低添加状態であれば短繊維混合率は0.1%以上が必要である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、古手川産業株式会社から試料の提供を、大分工業高等専門学校都市・環境工学科地盤工学研究室の学生諸氏には実験に協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所土質研究室：混合補強土の利用開発に関する共同研究報告書—短繊維混合補強土工法利用技術マニュアル—，66p，1997。
- 2) 土質工学会九州支部編：九州・沖縄の特殊土，(財)九州大学出版会，pp.93-98，1983。
- 3) 工藤宗治，落合英俊，安福規之，大嶺 聖：短繊維混合による安定処理した火山灰質粘性土の力学特性の改善，第22回ジオシンセティックシンポジウム論文集，pp.63-68，2007。
- 4) 工藤宗治，安福規之，石藏良平，大嶺 聖：短繊維を混合し安定処理した火山灰質粘性土の強度改善効果とその評価，第12回環境地盤工学シンポジウム，pp.515-520，2017。

(2019年6月21日 受付)