粘性土を用いた短繊維混合補強土の 強度変形特性に及ぼす繊維特性の影響

山中光一¹・峯岸邦夫²

補強土工法で用いられる短繊維混合補強土は、地盤材料に混入させることにより力学的性質を向上させることができるが、主に砂質土に用いられることが多く、粘性土に混入させた研究例は少ない。筆者らの既往研究では、母材である粘性土を最適含水比で締め固めることにより、短繊維による補強効果が顕著に現れることを示した。このような母材に着目した研究例は存在するが、短繊維の特性に着目した研究例は少ない。

本研究では、短繊維混合補強土に混入させる短繊維の特性（目合いおよび剛性）が強度変形特性に及ぼす影響を把握することを目的に、目合いと剛性が異なる3種類の短繊維を用いた短繊維混合補強土に対して一軸圧縮試験を行い試験結果の考察を行った。

キーワード：短繊維混合補強土、粘性土、強度変形特性、繊維特性

1. はじめに

平成24年に国交省より策定された「建設リサイクル推進計画2014」¹⁾では、建設発生土は、場外搬出量が土砂利用量を定常的に上回っていることから、更なる建設発生土の有効利用策を講ずる必要があると示されている。特に、高含水比火山灰質粘性土である関東ロームについては、一度乱してしまうと強度低下を起こすことから、何かしらの対策を行う必要がある。有効利用の際に、石灰やセメント系固化材を用いた方法が挙げられるが、強度発現までの養生日数が必要になることに加え、材料によっては緑化等に不向きな場合がある。そのような中で、土を補強する技術の一つに、地盤材料に短繊維を混入させることにより、混入させた土と短繊維、短繊維同士の絡み合わせにより土を補強する短繊維混合補強土が挙げられる。

この短繊維混合補強土は、既往研究により、路盤材へ用いた際の繰返し载荷による鉛直ひずみの抑制²⁾、残留強度の発現およびせん断強度の増加等³⁾の効果が明らかとなっている。関東ロームは、乱すことにより強度低下を起こすため、短繊維を混入させることにより強度低下の抑制および強度発現が可能となれば関東ロームの有効活用につながる。しかし、砂質土等を対象とした研究は存在するが、粘性土を対象とした研究例は少ないのが現状である。火山灰質粘性土を用いた工藤ら⁴⁾の研究では、安定処理した火山灰質粘性土に対して短繊維を混入させると、コーン指数が増加しトラフィカビリティーが改善される等の結果が示されている。また、筆者らの研究⁵⁾では、最適含水比に調整した関東ロームに短繊維を

混入することにより顕著な補強効果が現れることを示した。この様に、粘性土を用いた短繊維混合補強土自体の改善効果や母材に着目した研究例は存在するが、短繊維自体が有している特性が力学特性に及ぼす影響には未解明な部分が存在する。短繊維の形状については、既往研究⁶⁾より3種類の形状（棒状、枝付き、格子状）の短繊維を用いて力学試験を行った結果、格子状の形状が最も繊維同士および土と繊維が絡まりやすいため補強効果が現れることが示された。しかし、短繊維の有している剛性や格子状の目合いの大きさにより、繊維同士の絡まり具合は異なると考えられる。

そこで本研究では、繊維同士の絡まり具合に影響を及ぼすと考えられる短繊維の剛性および目合いの大きさが、短繊維混合補強土の強度変形特性に及ぼす影響を明らかにさせることを目的に、3種類の短繊維を混合させた短繊維混合補強土に対して一軸圧縮試験を行い試験結果の考察を行った。

2. 本研究で用いた試料および供試体作製方法

(1) 試料土

本研究では、母材に千葉県船橋市内より採取した火山灰質粘性土である関東ローム（ $w_L=103\%$ 、 $\rho_s=2.798\text{ g/cm}^3$ 、 $w_L=128.0\%$ 、 $I_p=28.7$ ）を用いた。採取した関東ロームは、含水比が80%程度になるまで室内乾燥させ、2mmふるいにかけたものを用いた。本研究で用いた関東ロームは、採取した状態（自然含水比）でJIS A 1210のA-c法による締め固め試験を行っても締め固め曲線に明確なピーク値が得ら

¹個人会員，日本大学理工学部交通システム工学科，助教（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1）

²個人会員，日本大学理工学部交通システム工学科，教授（同上）

図-1 本研究で用いた関東ロームの縮固め曲線

図-2 本研究で用いた短繊維

れなかった。そのため、最適含水比を算出するために含水比を80%程度まで低下させた。図-1に用いた関東ロームの縮固め曲線を示す。本研究では、図より得られた最適含水比 ($w_{opt}=88.7\%$) に加水調整を行った後に用いた。

(2) 短繊維

短繊維には、ポリプロピレン製のバードネットを図-2に示した形状に裁断したものを用いた。形状については、前述の通り、既往研究⁹⁾により最も補強効果が得られる格子状とした。短繊維①と②は目合いが同じで剛性の異なる繊維で、短繊維①と③は目合いが異なる繊維で

写真-1 作製した供試体
(左：未混入 右：短繊維混合土)

図-3 作製した供試体の湿潤密度

ある。本研究では、短繊維①と③を用いて目合いの違いが強度変形特性に及ぼす影響の把握、短繊維①と②を用いて剛性の比較を行った。なお、本研究で対象としている剛性は、引張試験より得られた引張剛性を対象とした。また、短繊維③については、短繊維①と同様の材質で目合いを変化させた短繊維である。

(3) 配合条件

各短繊維の配合条件は、母材である関東ロームの乾燥質量に対して0%, 0.8%, 1.0%, 1.2%に設定して行った。これは、過度に短繊維を混入させすぎると供試体内に含まれる短繊維同士が重なり合い強度低下を起こすことが考えられるため前述の配合条件に設定した。また、各配合条件の短繊維は、母材の関東ロームを前述の最適含水比まで加水調整した後に配合させた。

(4) 供試体作製方法

一軸圧縮試験で用いた供試体は、前述の試料を十分混合後、2.5kgのランマーと専用モールドを用いて締固めエネルギー $E_c=550\text{kJ/m}^3$ を基に、直径10cm、高さ20cmとな

図-4 応力ひずみ曲線

るよう3層39回で締固めて作製した。また、供試体各層に短繊維が均等に混入するよう、試料の配合の際には供試体各層で所定量の短繊維を十分に混合した後に締固めを行った。作製後の供試体を写真-1に示す。

図-3は、作製した供試体の湿潤密度と短繊維混入率の関係を示したものである。図より、短繊維混入率が増加するにつれ湿潤密度は減少する傾向を示した。しかし、短繊維混入率0.8%では未混入時の湿潤密度より若干ではあるが大きくなる傾向を示した。これは、図-1で示した関東ロームの締固め曲線より得られた最適含水比と最大乾燥密度を算出すると、湿潤密度は $\rho=1.385\text{g/cm}^3$ となるため、作製した供試体が締め固めされておらず所定の湿潤密度に達していなかったため混入率の少ない0.8%では大きくなる傾向を示したと考えられる。これに対して、短繊維混入率1.0%では、未混入時の湿潤密度より小さくなる傾向を示した。これは、短繊維混入率が増加することにより、短繊維同士の重なりが増加して空隙が増加したためと考えられる。

3. 短繊維の目合いが強度変形特性に及ぼす影響

(1) 試験方法

本研究では、混入させる短繊維の目合いが強度変形特性に及ぼす影響を把握するため、前述の目合いの異なる短繊維①と③を用いて作製した供試体に対して一軸圧縮試験を行い、試験結果の比較を行った。

(2) 試験条件

一軸圧縮試験は、JIS A 1216に準じて行った。

(3) 試験結果

図-4は、短繊維①と③を混入させて作製した供試体の応力ひずみ曲線を示したものである。図より、どちらの短繊維とも未混入時に比べ圧縮強度は増加し残留強度も発現しており、軸ひずみ15%に達するまでほとんど強

図-5 一軸圧縮強さと短繊維混入率の関係

図-6 変形係数と短繊維混入率の関係

度低下は見られなかった。以上の結果より、本研究で用いた短繊維は、どちらの目合いでも強度増加および残留強度の発現が期待できることがわかった。

図-5は、短繊維①と③の一軸圧縮強さと短繊維混入率の関係を示したものである。ここで示した一軸圧縮強さ q_u は、図-4で示した応力ひずみ曲線が明確なピーク値を示さない場合、15%変形時の圧縮応力を一軸圧縮強さとして示した。短繊維①に注目すると、混入率1.0%までは短繊維混入率の増加に伴い一軸圧縮強さも増加傾向を示したが、混入率1.2%では混入率0.8%と同様な傾向を示していることがわかる。これに対して、短繊維③では、混入率1.2%になると強度低下の傾向を示しているが、混入率1.2%の一軸圧縮強さは混入率1.0%とほぼ変わらず短繊維①のような強度低下は現れなかった。短繊維混入率増加による強度低下は、供試体内に多量の短繊維が混入することによって締固めの際に短繊維同士が重なった箇所では空隙が発生してしまい強度低下につながっていると考えられる。前述の図-1に注目すると、短繊維混入率が1.0%程度になると各短繊維とも未混入時の湿潤密度より低下する傾向にあることがわかる。ゆえに短繊維混

写真-2 供試体破壊状況

図-7 荷重と伸び率の関係

入率1.0%程度で強度低下の傾向が現れたと考えられる。しかし、短繊維③については目合いが小さく柔軟な繊維であるため、供試体に多量の繊維を混入しても締固めの障害にならないことに加え、繊維同士が絡まりやすく強度低下は小さくなったのではないかと考えられる。

図-6は、短繊維①と③の変形係数と短繊維混入率の関係を示したものである。図より、短繊維①と③では大きな変化は見られないことがわかる。これは、 ∞ 程度のひずみレベルでは供試体内に含まれる短繊維の違いによる影響が現れないためこのような結果になったと考えられる。図-4に示した応力ひずみ曲線の結果より、短繊維の目合いによる影響は、 ∞ より大きいひずみレベルで発揮されるものと考えられる。これに対して、短繊維混入率0.8%では未混入と比較して大きな差異は見られないが、混入率1.0%以上では変形係数が大きくなっていることがわかる。以上の結果より、混入率が増加すれば、小さいひずみレベルで短繊維による変形の拘束効果が現れると考えられる。

写真-2は、短繊維混入率1.2%における短繊維①と③の供試体破壊状況（15%変形時）を示したものである。写真より、短繊維①を混入させた場合の破壊状況は、供

表-1 各短繊維の変形係数

	短繊維①	短繊維②
変形係数 (kN/m)	9.3	11.9

試体に明確なせん断面が現れていることがわかる。これは、目合いの大きい繊維では供試体内で繊維が絡み合い圧縮に対する変形を拘束するが、目合いが大きい場合は繊維の絡まっていない箇所が存在するため、そこからせん断面が発生し、明確なせん断面が現れたのではないかと考えられる。これに対して目合いの小さい短繊維③を混入させた場合の破壊状況は、供試体がたる状に変形し、明確なせん断面がほとんど見られず、供試体の継ぎ目から破壊していくような形態を示した。これは、目合いの小さい繊維が多数混入しているため、供試体内で繊維同士の絡み合いにより供試体に変形しにくく、供試体弱部である継ぎ目から破壊が生じたためと考えられる。

4. 短繊維の剛性が強度変形特性に及ぼす影響

(1) 試験方法

本研究では、混入させる短繊維の剛性が強度変形特性に及ぼす影響を把握するため、前述の目合いが同じで剛性の異なる短繊維①と②を用いて作製した供試体に対して一軸圧縮試験を行い、試験結果の比較を行った。

(2) 試験条件

一軸圧縮試験は、目合いの比較と同様にJIS A 1216に準じて行った。

(3) 短繊維の剛性評価

本研究では、短繊維の剛性を評価するためにJIS L 1908に準じて引張試験を行い、引張試験から得られた荷重伸長曲線より短繊維剛性を評価した。図-7に短繊維の引張試験時の荷重と伸び率の関係を示す。図より、短繊維②の方が引張強さは大きいことがわかる。本研究では、図の伸び率2%時の変形係数を式(1)により算出して剛性の評価を行い、剛性の違いが強度変形特性に及ぼす影響について考察を行った。

$$E = \frac{F \times c \times 100}{\varepsilon} \quad (1)$$

ここで、 E ：変形係数(kN/m)、

F ：伸び率での引張抵抗力(kN)、

ε ：伸び率(2%)、

c ：1/Bより算出(B：試料幅)

上記の式より得られた2%変形時の変形係数を表-1に示す。本研究では上記の方法で剛性を評価した。その結果、短繊維①より短繊維②の方が大きい剛性を示した。

(4) 試験結果

図-8は、短繊維①と②を用いて作製した供試体の応

図-8 応力ひずみ曲線

写真-3 破壊面の短繊維の状況

力ひずみ曲線を示したものである。図より、短繊維①と②を比較すると、全混入率において剛性の大きい短繊維②の方が強度は増加する傾向を示したが、その差は微少であった。これは、本研究で用いた短繊維①と②の剛性の差が微少であるためと考えられる。そのため、本研究で用いた剛性の範囲内では、短繊維の剛性が強度変形特性に及ぼす影響はないものと考えられる。しかし、短繊維の剛性が大きい場合は、混合のしやすさに影響を及ぼすと考えられ、混合が不十分であると前述したように供試体内の空隙が生じやすくなると考えられる。今後はさらに幅広い変形係数の短繊維を用いて検討する必要がある。

また、写真-3は、短繊維①を混入させた供試体の試験後の破壊面の写真を示したものである。写真からもわかるように、破壊面の短繊維に注目すると、混入させた短繊維は断裂などの破壊状況は確認できなかった。前述の3.で用いた短繊維も同様に、供試体破壊後の短繊維に注目しても断裂などの短繊維の破壊は確認できず、破壊面周辺では、配置されている短繊維が引き抜けている

ような状況であった。以上の結果より、短繊維混合土の補強効果には、混入させる短繊維と土および短繊維同士の絡み合わせの影響の他にも、混入させる短繊維の引き抜き抵抗性の影響が強度変形特性に及ぼす影響が大きいことがわかる。今後は混入させる短繊維の引き抜き抵抗性についても検討を行う必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究は、粘性土に短繊維を混入させた場合における強度変形特性を把握することを目的に、目合いの異なる短繊維と剛性の異なる短繊維を用いた供試体を作製し、一軸圧縮試験を行った。本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 本研究の範囲内では、湿潤密度が未混入の湿潤密度より低下する場合は、供試体内に空隙が発生しやすくなり多量の短繊維を混入させると強度低下の原因となる場合がある。
- 2) 目合いが大きい短繊維は、混入させることにより強度増加が期待できるが混入率が多くなると空隙が発生しやすくなり強度低下の原因となる。これに対して目合いが小さい短繊維は、混入率が多くても空隙が発生しにくく強度増加が期待できる。
- 3) 短繊維混合補強土は、小さいひずみレベルでは補強効果が現れにくい、大きいひずみレベルでは短繊維の絡み合わせにより補強効果が顕著に現れる。
- 4) 本研究で用いた短繊維の剛性の差では、一軸圧縮強さに及ぼす影響は微少であり剛性の違いによる強度変形特性に差異は見られない。

本研究の範囲内では、破壊状態に達した際にも短繊維の破断等の破壊は確認できず、周辺の母材から引き抜けるような形態を示した。ゆえに、短繊維混合土の補強効果には、混入させる短繊維の引き抜き抵抗性の影響が少なからず考えられるため、短繊維の引き抜き抵抗性と補強効果の関係性は今後検討していく必要がある。また、本研究の範囲内では短繊維の剛性による差は確認できなかったが、混入させる短繊維の剛性が混合のしやすさに影響を及ぼすことが考えられる。ゆえに今後はより幅の広い剛性の短繊維を用いて比較検討する必要がある。

また、本研究では静的荷重下における強度変形特性について考察を行ったが、短繊維を混入させることによる関東ロームの強度低下の抑制効果等についても今後検討が必要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、JX ANCI株式会社より試料の提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：建設リサイクル推進計画2014（本文），pp.18-24, 2014.
- 2) 平川大貴，宮田喜壽：道路路盤へのジオシンセティックス補強土技術の適用性の検討，ジオシンセティックス論文集，Vol.28, pp.311-318, 2013.
- 3) 卷内勝彦，峯岸邦夫，星野郁夫：短枝付き短繊維混合土の力学的補強効果，ジオシンセティックス論文集，Vol.17, pp.191-194, 2002.
- 4) 工藤宗治，落合英俊，安福則之，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，ジオシンセティックス論文集，Vol.22, pp.63-68, 2007.
- 5) 若島久将，峯岸邦夫，山中光一：短繊維を混入した関東ロームの締固めおよび強度特性に及ぼす混入率の影響，第13回地盤工学会関東支部発表会概要集，pp.98-99, 2016.
- 6) 山中光一，峯岸邦夫：粘性土に短繊維を混入させた地盤材料の基本的力学特性，ジオシンセティックス論文集，Vol.29, pp.11-17, 2014.

EFFECTS OF FIBER PROPERTY ON STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTY OF FIBER MIXED REINFORCED SOIL USING COHESIVE SOIL

Kohichi YAMANAKA and Kunio MINEGISHI

Although fiber mixed reinforced soil used for reinforced soil method can enhance mechanical property by mixing into base materials, it is mainly used for sandy soil and there are not many study examples that it is mixed into cohesive soil. The previous study showed that the reinforcing effects by short fiber (SF) appear notably by compacting cohesive soil, which is parent material, at w_{opt} . But those focused on the property of SF exist very a few. Aiming at understanding the effects that the property of SF which is mixed into SF mixed reinforced soil (aperture and rigidity) has on intensity deformation property, this study conducted a uniaxial compression test against SF mixed reinforced soil using 3 types of SF with different aperture and rigidity and examined the results.

KEYWORDS: Reinforced soil, Short fiber, Kanto Loam