連続繊維補強土に混合した添加材がもたらす植生への影響と補強効果

石垣幸整 ^{*1)}・堀江直樹 ¹⁾・大嶺 聖 ²⁾

1) 日特建設株式会社

2) 長崎大学 大学院工学研究科

摘要：連続繊維補強土は砂質土にポリエステル繊維を均質に混合した補強土である。繊維の混合により、セメントを用いずに擬似的な粘着力が付与されるため、法面保護工として広く適用されている。連続繊維補強土の安定性向上のため、石灰系添加材を混合すると低い垂直応力下でせん断強度が増強され、粘着力が増加することが明らかになっている³⁾。本試験では、石灰系添加材を混合した連続繊維補強土の生育基盤としての適用性を確認した。さらに、石灰系添加材の補強効果について、一面せん断試験を実施し、セメントと比較した。試験の結果、石灰系添加材はセメントよりも植生への影響が軽微でありながら、その補強効果は同程度であることがわかった。

キーワード：連続繊維補強土、法面保護工、土壌硬度、土壌 pH

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う異常気象が数多く発生しており、1 時間あたり 50 mm 以上となるゲリラ豪雨の発生件数は年々増加している⁴⁾。そのような中で、法面保護工は、さらなる機能向上が求められるとともに、環境負荷の低減をより一層進めていく必要がある。

図-1 に従来工法と連続繊維補強土工（ジオファイバー工法）との概略図を示す。連続繊維補強土はポリエステル繊維と砂質土を均質に混合した補強土である。繊維の混合により、せん断強度が増加することに伴う擬似的な粘着力が付与されることから、法面保護工として広く適用されている。植物の生育基盤としても有用な補強土を全面に築造することから、全面緑化が可能となり景観面でも優れた工法である。さらに、補強土の厚さは 20 cm 以上となることから、植物の生育に有利な条件となり植栽基盤としても有効である。また、補強土の築造時にセメントを混合する必要が無いことから、従来技術である吹付法砕工よりも CO₂ 発生量の約 35 %が削減可能となり、環境負荷の低減可能な優れた工法である（図-2）。

本試験では、連続繊維補強土のさらなる安定性向上のため、添加材を混合し、その生育基盤としての適用性と補強効果を

確認した。添加材を混合することで、せん断強度の増加、耐侵食性の向上等の安定性向上を期待している。これまでも、河川護岸等の水辺環境で連続繊維補強土工を適用する際に、耐侵食性向上のため、セメントが使用されてきたが、高アルカリや土壌硬度の上昇による植生への影響が指摘されている²⁾ことから、本試験では低アルカリの石灰系添加材の使用を検討した。また、1～2 %の石灰系添加材を混合すると、低い垂直応力下で、せん断強度が増加することがこれまでの検討で明らかになっている³⁾。本試験ではセメントを比較対象とし、生育基盤としての適用性を判断するために、植物の生育性評価、土壌硬度、土壌 pH を測定した。また、添加材による補強効果を確認するため、一面せん断試験、一軸圧縮強度試験を実施した。

図-1 従来工法と連続繊維補強土工

図-2 吹付法砕工を1とした場合の連続繊維補強土工の CO₂ 排出量（法面緑化工の LCI 分析⁶⁾を参考に算出）

* 連絡先著者：E-mail : yukito.ishigaki@nittoc.co.jp 〒104-0044 東京都中央区明石町 13-18

2. 試験方法

2.1 試験概要

試験は、植物の生育性評価をおこなうためのポット試験（CASE-1）と、添加材による補強効果を確認するための一面せん断試験、一軸圧縮強度試験（CASE-2）をおこなった。なお、生育基盤としての適用性を確認するため、土壌硬度、土壌 pH を両方の試験 CASE で測定した。

2.2 CASE-1 の試験方法

添加材を混合しない無添加区を比較対照区とし、セメント、石灰系添加材が植物の生育性に与える影響を生育試験で確認した。表-1 に試験条件、表-2 に測定項目を示す。生育基盤は、可能な限り連続繊維補強土と同様の生育条件を再現するため、ポットに 15 cm の砂を敷き詰め、その上に植生基材吹付工と同様の配合で植生基盤材を 3 cm 厚さに敷き詰めた。添加材は 1 ポット毎に砂に人力で混合した。また、試験水準毎に同様の配合の供試体を 3 個作製した。試験場所は降雨の当たらないビニールハウス内とし、撒水は適宜おこなった。なお、土壌硬度、土壌 pH は、それぞれ測定用に植生基材を敷き詰めない供試体を設け、その表面を測定した。

2.3 試験 CASE-2 の試験方法

一面せん断試験の試験条件を表-3、試験装置概略を図-3 に示す。供試体は実機（湿式吹付機）にて作製し、8 現場から採取した（表-4）。試験は 1 現場（埼玉）でセメントと石灰系添加材の補強効果の比較をおこない、他の 7 現場では石灰系添加材の補強効果の確認をおこなった。

表-1 CASE-1 の試験条件

試験場所	日特建設株式会社緑化試験場（埼玉県）
試験期間	2011年10月～12月（3ヶ月）
使用ポット	1/5,000aワグネルポット
供試植物	コマツナ（ <i>Brassica campestris</i> var. <i>peruviridis</i> ）
添加材	セメント：普通ポルトランドセメント 石灰系添加材：ジオアップ
添加材の混合量（砂乾燥重量に対する割合）	セメント：1％ 石灰系添加材：1％，2％
使用砂	川砂（均等係数：3.8，FM値：2.4）
植生基盤材の配合（1m ³ 当たり）	パーク堆肥（ファイバースイールW）：2000 L 接合剤（クリコートCP750）：1 kg 緩効性肥料（ハイコントロール085）：3 kg 高度化成肥料（オール15）：3 kg

表-2 CASE-1 の測定項目

測定項目	方法
土壌硬度	山中式土壌硬度計
土壌pH（H ₂ O）	ガラス電極式（（株）堀場製作所製 AS-211）
生育高	播種後9日目に間引きをおこない3本/ポットに揃えたものを測定
地上部重量	播種後51日の堀取り時に測定（湿潤重量）
根系伸長深	播種後51日の堀取り時に測定

供試体は所定の角度に傾けた（ $\alpha=30^\circ$ ）傾斜台にモールドを設置し採取した（図-4）。一面せん断試験は「ジオファイバー工法」設計・施工マニュアルの試験方法¹⁾に準じておこなった。なお、添加材の効果は低い垂直応力下で現れる³⁾ことから、垂直応力は標準の垂直応力（100～200 kN/m²）よりも低い値を用いた。また、一軸圧縮強度は繊維を混合せずに供試体を採取した（モールドの寸法： $\phi 100\times 200$ ）。土壌硬度、土壌 pH は試験 CASE-1 と同様の方法で測定し、一面せん断試験用の供試体表面を測定した。

表-3 CASE-2 の試験条件

供試体の寸法	300×300×300 mm
せん断変位速度	1 mm/min
試験条件	圧密定圧条件
最大せん断変位量	40 mm
添加剤の種類	セメント：普通ポルトランドセメント 石灰系添加材：ジオアップ
添加材の混合量（砂乾燥重量に対する割合）	セメント：1％ 石灰系添加材：1％，2％
材齢	28日

表-4 使用した砂の種類（CASE-2）

供試体採取地	砂の種類		
	種類	均等係数	FM値（粗粒率）
埼玉	川砂	3.8	2.4
栃木	砕砂	6.8	3.0
長野①	山砂	5.3	2.7
長野②	山砂	4.3	2.3
岐阜	山砂	5.8	3.0
大阪	海砂	4.7	3.0
奈良	砕砂	6.6	2.5
大分	砕砂	7.6	3.1

図-3 一面せん断試験装置概略

図-4 供試体採取方法

3. 試験結果・考察

CASE-1 の試験結果を表-5, 写真-1, CASE-2 の試験結果を表-6, 表-7, 図-5 に示す。

3.1 添加材の混合が土壌硬度に及ぼす影響

CASE-1 では、セメント混合区の土壌硬度が 28 mm と突出した値を示し、根系の伸長がほとんど不可能となる 30 mm⁵⁾に近い値を示した。一方、石灰系添加材混合区の土壌硬度は、無添加区よりも大きな値を示したが、植物の生育上問題となるような値を示していない。

CASE-2 でも同様の傾向がみられ、石灰系添加材混合区の土壌硬度はセメントよりも高い値を示していない。このことから、1～2 %の石灰系添加材は 1 %添加のセメントよりも植生への影響が軽微になると思われる。ただし、石灰系添加材混合区の土壌硬度は CASE-1 よりも大きな値を示し、現場によっては 2 %添加した場合、30 mm を超える値を示した。これは供試体作製方法の違いや、砂の種類に起因するものと思われ、今後の検討が必要だと思われる。

3.2 添加材の混合が土壌 pH に及ぼす影響

CASE-1, CASE-2 共に、セメント混合区の土壌 pH が最も大きな値を示し、その値は概ね pH 11 程度であった。石灰系添加材混合区の土壌 pH は概ね pH 9.0～10.0 程度の値を示している。よって、1～2 %の石灰系添加材を混合した場合、1 %添加のセメントよりも植生への影響を軽微にできることがわかった。

3.3 添加材の混合が植物の生育に及ぼす影響

CASE-1 より、セメント混合区の生育高は 15.4 cm となり、無添加区の 18.3 cm よりも低い値を示している。一方、石灰系添加材混合区は、無添加区と同程度の生育高を示し、混合量の違いによる影響は現れていない。地上部重量に関しても同様の傾向がみられ、セメント混合区が他区と比べ小さな値を示している。また、根系伸長深においては、セメント混合区が 5 cm となり、無添加区の 15 cm と比べ著しく生長が妨げられている。石灰系添加材混合区では、添加量が増加するにつれ根系伸長深が小さな値を示したが、セメント混合区と比べ大きな値を示している。セメント混合区において、根系の伸長が大きく妨げられたのは、高い土壌硬度と高い土壌 pH が原因と思われる。

以上より、セメントを連続繊維補強土に混合するとこれまでの報告²⁾と同様に植物の生育性を妨げることがわかった。また、石灰系添加材は植物の生育性に与える影響がセメントよりも軽微であることが明らかになった。なお、セメント混合区において、根系の伸長が大きく妨げられているにも関わらず、生育高に大きな差が生じていないのは、表面に施した 3 cm の植生基材が大きく寄与したためだと思われる。ただし、根系伸長深の生育が大きく妨げられていることから、法面の様な乾燥条件下においては、地上部に大きな差が現れる可能性は高い。

表-5 CASE-1 の試験結果

	添加材の種類と混合量			
	無添加 0 %	セメント 1 %	石灰系 1 %	石灰系 2 %
生育高 (cm)	18.3	15.4	19.6	18.7
根系伸長深 (cm)	15.0	5.0	13.0	10.0
地上部重量 (g)	176.6	120.2	194.4	168.6
土壌硬度 (mm)	植生基材 18.0	16.0	16.0	18.0
	砂表面 9.7	28.0	11.0	15.7
土壌 pH (H ₂ O)	植生基材 6.7	6.7	6.6	6.8
	砂表面 8.0	11.1	9.6	10.2

※ 測定値は堀取り時に測定 (播種後 51 日)

※ 測定値は全て平均値

写真-1 生育高と根系伸長深の比較 (CASE-1)

※ 各区の平均的な供試体を抽出して撮影

※ 波線は根系伸長深を示す

3.4 石灰系添加材の補強効果

石灰系添加材を 2 %添加すると、全ての現場で無添加区 (0 %) よりも粘着力が増加し、その補強効果が確認された。その増加値は最大で 66.4 kN/m²を示し、粘着力は 54.1～146.6 kN/m²を示した。現場毎に補強効果が異なるのは、砂の種類や繊維の混合量の違いによるものと思われる。また、これまでの報告³⁾と同様に、低い垂直応力になるにつれ、せん断強度増強効果が現れ、粘着力が増加することが確認できた。なお、添加材を 1～2 %混合しても、繊維を混入しないと粘着力は増加しないことが、明らかになった (表-7, 図-5)。これはせん断強度の増強効果は、砂質土が添加材により固化した効果によるものではなく、その固結力により繊維の拘束効果が高まったことに起因しているためだと思われる。

3.5 石灰系添加材とセメントとの補強効果の比較

CASE-2 では、連続繊維補強土に石灰系添加材を 1～2 %添加した粘着力は 130 kN/m²前後を示し、122.3 kN/m²を示したセメント 1 %添加区と同程度の補強効果であると考えられる。

3.6 石灰系添加材の必要添加量

2 %の添加量では土壌硬度が高くなり植物への影響が懸

表-6 CASE-2 の試験結果（石灰系添加材の効果）

現場	粘着力 (kN/m ²)		一軸圧縮強度 (kN/m ²)				土壌硬度 (mm)			土壌 pH (H ₂ O)		
	無添加 0 % 繊維無	無添加 0 % 繊維有	石灰系 1 % 繊維有	石灰系 2 % 繊維有	石灰系 1 % 繊維有	石灰系 2 % 繊維有	無添加 0 % 繊維有	石灰系 1 % 繊維有	石灰系 2 % 繊維有	無添加 0 % 繊維有	石灰系 1 % 繊維有	石灰系 2 % 繊維有
栃木	3.7	49.7	63.8	70.7	65.0	70.7	13.7	19.0	25.4	8.6	9.1	10.3
長野①	14.1	80.2	-	146.6	-	146.6	21.0	-	29.7	-	-	9.4
長野②	50.6	56.3	83.9	87.5	49.0	87.5	17.3	17.1	26.8	7.8	8.0	10.0
岐阜	21.2	56.6	45.5	79.3	43.0	79.3	21.6	27.1	29.7	9.5	9.1	9.6
大阪	17.7	(43.9)	54.1	73.7	84.0	73.7	17.3	27.3	28.0	9.5	10.1	10.1
奈良	42.3	66.0	64.8	119.0	-	119.0	20.7	25.4	30.1	-	-	10.4
大分	38.4	86.2	109.3	124.2	61.0	124.2	17.3	24.7	28.6	9.3	9.5	10.1

※ 太字部は無添加（0 %）と比較し、粘着力が増加した現場
※ （ ） 内の値は 100, 150, 200 kN/m² の垂直応力から算出
※ 「-」はデータ無

表-7 CASE-2 の試験結果（セメントと石灰系添加材との比較）

添加材	繊維	粘着力 (kN/m ²)	一軸圧縮強度 (kN/m ²)	土壌硬度 (mm)	土壌 pH (H ₂ O)
無添加 0%	無	60.3	-	-	8.5
	有	58.3	-	21.4	8.5
セメント 1 %	無	43.3	143.0	27.7	10.7
	有	122.3	-	27.3	10.8
石灰系 1 %	無	31.8	59.6	26.0	9.3
	有	134.2	-	25.5	9.1
石灰系 2 %	無	38.0	72.9	26.6	10.0
	有	129.1	-	25.7	10.1

※ 「-」はデータ無

図-5 最大せん断応力と垂直応力との関係（CASE-2：埼玉）

念されること、1～2 %の添加量で補強効果が現れることを考慮すると、1～2 %の範囲の添加量が望ましいと思われる。

3.7 連続繊維補強土の補強に必要な固結力

CASE-2 の一軸圧縮強度試験（埼玉）では、石灰系添加材は 1 %添加で 59.6 kN/m²、2 %添加で 72.9 kN/m²を示した。セメントは 1 %添加で 143.0 kN/m²と約 2 倍以上の値を示している。一方、粘着力は石灰系添加材、セメント共に、ほぼ同程度の値を示し、補強効果は同等であった。また、他現場では、30～50 kN/m²の一軸圧縮強度で粘着力が増加している（長野①、②）。

以上より、連続繊維補強土の補強効果を増加させるのに必要な固結力（一軸圧縮強度）はそれほど高くはないと考えられる。今後、一軸圧縮強度と連続繊維補強土の補強効果との関係を検討し、補強効果の増加に必要な添加材量を把握できれば、より適切な添加材の混合量を見出せる可能性がある。

4. まとめ

本試験の結果、以下のことが明らかになった。

- ① 石灰系添加材を 1～2 %添加した場合、セメント 1 %添加したものと比較して、植物の生育に対する影響は軽微になる。
- ② 石灰系添加材の配合量は、生育基盤としての適用性と補強効果を考慮すると、1～2 %とすることが望ましい。
- ③ 石灰系添加材を 1～2 %添加した場合、セメント 1 %添加したものと同等の補強効果を発揮する。

今後は、石灰系添加材を実施工へ適用し、生育基盤としての適用性を確認すると共に、耐侵食性の向上等の添加材を混合することによる補強効果について明らかにしていきたい。

引用文献

- 1) 土木研究センター（2008）法面保護用連続繊維補強土「ジオファイバー工法」設計・施工マニュアル, pp. 参-3・(1)・参-3・(2) .
- 2) 堀江 直樹・石垣 幸整・福永 健司（2008）セメントを混合した連続繊維補強土の生育基盤としての適用性, 日本緑化工学会誌, 34（1）：207-210.
- 3) 石垣 幸整・石黒 梓・大嶺 聖（2012）添加材による連続繊維補強土のせん断強度増強効果に関する検討, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 69-70.
- 4) 環境省（2012）平成 25 年度環境白書, pp. 65.
- 5) 日本道路協会（2008）道路土工 切土工・斜面安定工指針, pp. 210.
- 6) 橘 隆一・永岩 隆城・九里 徳泰・後藤 尚弘・藤江 幸一（2009）法面緑化工の LCI 分析, 日本緑化工学会誌, 35（1）：3-8.

（2014. 5. 26 受理）