

## 論文の内容の要旨

論文題目 ジオシンセティックス補強土構造物の残留変形特性に関する研究  
(Study on Residual Deformation Characteristics of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures)

平川大貴

今日までの補強土構造物を含む土構造物の有用性評価は、通常「極限釣合安定計算による破壊に対する全体安全率」で判断されてきた。補強土構造物において、ジオシンセティックスを用いた引張り補強の基本メカニズムは土の変形を拘束することによって対象土構造物と地盤が安定化することにあるが、このメカニズムと地盤の変形を考慮せずに力の釣合条件から安全率を求める現行の安定解析法との間の整合性は十分に取れていない。

また、実際に重要構造物に対しては、安定問題だけではなくその供用時における変形問題が重要となる。供用時に生じる変形量、特に上部構造物によるクリープ変形量と交通荷重等の繰返し载荷による残留変形量の程度とその予測が重要である。しかし、補強土構造物に限らず、土構造物の変形を予測する手法は未だ十分に解明されていない。現状では「より安定な構造物はより変形が小さい」との想定して、極限釣合法による安定解析で十分大きな安全率を用いることで変形問題に対応してきた。しかし、大きな安全率でも変形が大きすぎる場合もありうるし、逆に構造物の過剰設計の可能性も含んでいる。また、安定問題についても、「擁壁にかかる土圧と補強材張力の釣合」という単純なモデルでの解析が合理的であるかということについての検討も十分ではない。

本研究では上記の研究背景に対応して、材料物性と境界条件に基づいてジオテキスタイルで補強された土構造物の機能の合理的な評価法について考察している。土構造物の合理的な評価法の提案を行うために、その構成材である裏込材と高分子補強材の変形強度特性を把握し、複雑な境界場を持つ補強土構造物の変形強度特性が構成材の固有物性に基づく挙動と、境界条件に起因する力学挙動かと区分して安定問題を議論する必要がある。本研究では、まず基本構成材である粒状裏込材と高分子補強材の非線形変形強度特性を実験的に調べた。また、ジオテキスタイル補強土構造物（補強土橋脚と補強土橋台・擁壁）の模型载荷実験を実施し、それぞれの境界条件におけるマスとしての変形強度特性を調べた。補強土構造物の強度問題としては、1) クリープ低減係数の必要性、2) 延性・非延性補強材の区分の妥当性について検討を行った。さらに、変形問題としては、1) 要素問題と境界値問題における粘性的変形強度特性の相関、2) クリープ载荷と繰返し载荷の残留変形特性における境界条件の影響を考察し、鉛直方向の変形強度特性を表現できる構成モデルについて検討した。

粒状盛土材の非線形応力ひずみ関係を明確にするため、実構造物の応力状態を想定して一次元圧縮試験と角柱三軸圧縮試験を実施した。本研究において、裏込材には補強土構造物への適用実績のある硬質砂岩の粒子調整碎石(千葉礫)と、豊浦標準砂を使用した。裏込材の変形強度特性における材料粘性効果と、クリープ载荷と繰返し载荷によって生じる残留変形特性について実験的に調べた。また、拘束条件に違いによる材料粘性効果の差異について検討した。以下に粒状盛土材の非線形応力ひずみ関係について得られた重要な知見を示す。

- ① 豊浦砂・粒調碎石の軸方向変形強度特性において、ともにひずみ速度を急変させると応力～ひずみ関係の接線勾配が急変するという载荷速度依存性がある。この現象は拘束圧一定の三軸試験と、側方向の変形が拘束されている一次元圧縮試験とで共通した現象である。より詳細には、ひずみ速度変化の影響を一時的に受ける材料(豊浦砂; TESRA 特性)と、全く受けない材料(粒調碎石; Isotach 特性)に区分される。
- ② 一方、豊浦砂・粒調碎石ともに、軸応力～軸ひずみ関係に明確な非線形挙動が生じるようなひずみレベルにおいても、微小なひずみレベルでの载荷に対して弾性領域の推移が確認された。
- ③ 粘性係数を算出し、拘束条件が与える影響を比較すると、大きな差がなかった。しかし、より厳密に比較すると角柱三軸圧縮試験で得られる粘性係数よりも、一次元圧縮試験で得られる粘性係数の方が大きくなる傾向にある。
- ④ 角柱三軸圧縮試験により、軸方向変形におけるクリープ载荷と繰返し载荷による残留変形の関係を調べた。この結果、繰返し载荷によって生じる残留変形は、時間依存変形(クリープ変形)による要因と、繰返し载荷そのものによって引き起こされる土粒子再配列による非時間依存変形による要因の2種類あることが分かった。繰返しせん断応力の振幅が小さいほど、前者の要因が卓越する。また、これらの要因は互いに独立ではなく、どちらか他方が卓越するともう他方が生じにくくなるとう相互作用がある。これら両者の関係を定量化することによって、交通荷重のような長期繰返し载荷による残留変形を簡易的に予測できる可能性がある。
- ⑤ クリープ载荷と繰返し载荷を受けることにより、連続単調载荷の時よりも体積変形特性がより収縮的になった。繰返し载荷時とクリープ载荷時の体積収縮率( $\Delta \varepsilon_{vol} / \Delta \gamma$ )は類似であるが、前者の時の方がやや大きい傾向にある。この挙動は豊浦砂・粒調碎石ともに確認された。

もう一方の構成材である高分子補強材に関して、荷重履歴の受けていない fresh な状態の高分子補強材(5種類)と、8年間鉄道のジオテキスタイル補強土橋台で使用された Aged 状態の高分子補強材(1種類)の計6種類の材質・製造方法の異なる補強材を用いて、高分子補強材の変形強度特性とその材料粘性効果を実験的に調べた。得られた実験結果に基づいて変形強度特性における材料粘性効果と年代効果、クリープ現象について考察した。また、材質・製造方法の異なる補強材の変形強度特性を統一的に表現する方法について検討を行った。高分子補強材の引張り特性について得られた重要な知見を以下にまとめる。

- ① 高分子補強材の引張り特性においても、盛土粒状体の応力～ひずみ関係と同様に材料粘性の効果による载荷速度依存性がある。この特性は主材料・製造方法に依存しない。より詳細にはひずみ速度変化の影響を一時的に受ける材料(TESRA 特性)と、全く受けない材料(Isotach 特性)に区分される。すなわち、高分子補強材の引張り特性においても、粒状体の材料粘性特性を表現するために提案されているレオロジーモデルで表現可能である。
- ② 高分子補強材の破断強度は、载荷履歴に依存せず、破断時のひずみ速度で決まる。
- ③ 高分子補強材の変形強度特性の粘性には年代効果が生じていなかった。この結果は、現行設計手法での供用時間に応じて設計補強材張力を減少させるという概念に一致しない。高分子補強材のクリープ現象は材料粘性による応答の一つであり、クリープ現象自体が材料劣化現象とは見なせない。

ジオテキスタイルで補強された土構造物の変形強度特性を調べるため、補強土橋脚と補強土橋台・擁壁の模型実験を実施した。以下に重要な試験結果と知見を示す。

- ① 補強材と裏込材で構成された複合構造物である補強土構造物(橋脚)のマスとしての変形強度特性においても、材料粘性による粘性的変形挙動が生じている。この変形強度特性は補強材剛性の影響を受けず、高分子補強材を用いた場合でも金属補強材を用いた場合でも共通して生じる挙動である。
- ② 補強土構造物のマスとしての粘性は、裏込材単体の場合と同じ方法で表現可能である。補強土構造物の粘性は非可逆ひずみ速度のべき乗の関数として表現される。

- ③ 補強材剛性が土構造物の変形強度特性に与える影響を検討したところ、補強土橋台では剛性値が10倍以上異なっても大きな差が見られなかった。軸方向の等価線形剛性を比較しても、載荷過程および除荷過程でもほぼ同等の剛性を発揮している。一方、補強土橋台・擁壁では補強材剛性の影響を受け、基礎(小橋台)の応力～沈下関係の傾きには差が見られた。しかし、この差は補強材剛性ほどの差はない。これらの実験事実は、延性・非延性補強材の区分という従来の概念に反している。

上記に示した実験結果より、マクロ的に見た補強土構造物の変形特性は粒状盛土材や高分子補強材と同じくレオロジーモデルを用いて表現可能であることが分かった。また、高分子補強材を用いた補強土擁壁構造物において土圧分布と補強材張力を計測した結果、以下の知見を得た。

- ① クリープ載荷中において、壁面工背面の接合点に作用する補強材張力及び裏込め地盤内部に敷設された補強材の局所張力ともに減少する。
- ② 繰返し載荷開始直後において、壁面に作用する土圧分布には等分布に近づく力の再分配が確認された。また、壁面工背面の接合点に作用する補強材張力についても同様の傾向が見られる。裏込め地盤内部に敷設された補強材の局所張力においては、繰返し載荷開始直後帯基礎直下の箇所において逆に張力が増加する傾向が見られた。

上記の挙動は、高分子補強材を用いた補強土構造物においてクリープ載荷や繰返し載荷が作用した場合、裏込め地盤内で力の均等化が起こることを示している。これは補強材と裏込め材の相互作用によって生じる現象である。つまり、「擁壁に作用する土圧と補強材の釣合」という単純なモデルで補強土構造物の安定問題を解析すると、過大な安全側の判断に繋がると考えられる。

以上に述べたような裏込め材と高分子補強材の固有な強度変形特性、補強土構造物の変形強度特性と外力条件による土圧～補強材張力の相互関係について多くの重要な事実を明らかにした。これらの知見は、今後のジオテキスタイル補強土構造物の変形強度特性の評価法に貢献できると考えられる。