

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 平川 大貴

高分子材料ジオテキスタイル（建設用繊維材）の補強材を盛土内に水平に敷設して盛土を引張り補強することにより鉛直壁面を持つ擁壁を建設する工法は、その経済性と高い安定性から最近では標準的な擁壁工法として広く採用されている。しかし、許容変位量が小さく高い耐震性が要求される橋台・橋脚や重量建築物の基礎構造物等の永久重要構造物への適用は限定されている。その理由は、盛土構造物に対する一般的な低い信頼感に加えて、鉄筋コンクリート構造物と比較して盛土荷重や外部死荷重によるクリープ変形や交通荷重等による即時及び残留変形が許容値以下である保証が確認できていないからである。その理由の一つは、持続荷重によるクリープ変形と交通荷重のような比較的小振幅の繰返し载荷によって盛土材料・ジオテキスタイル補強材・ジオテキスタイル補強盛土のそれぞれに生じる残留変形のメカニズムとそれらの相互関係が不明確であり、そのために予測方法が確立されていないからである。

本研究はこのような背景の下で行われたものであり、盛土材料・ジオテキスタイル補強材を用いた様々な荷重履歴を与えた材料実験とジオテキスタイル補強盛土模型を用いて同じく様々な荷重履歴を与えた模型実験を実施するとともに、構成モデルを参照しながら両者の関係を考察することによって、この課題を解明しようとしたものである。

第1章は序論であり、高分子ジオテキスタイル補強材を用いた補強盛土構造物の現行の設計法における変形問題の取り扱い方における問題点を指摘している。まず現行の設計法では、力の極限釣合い法により安定性を検討するが、構造物の変形を直接予測する代わりに、補強材のクリープ破断を防ぐために構造物の耐用年数の増加に応じて補強材の設計強度を低下させていることを指摘している。しかしこのクリープ補正係数を用いる方法は、盛土内の補強材に作用する引張り荷重が常に一定であることを前提にしている上に、各種の補正係数を採用することによって実際の引張り強度よりも大幅に低い設計引張り強度を設定している。その一方で、通常は耐震設計を実施していることから常時の破断に対する安全率は著しく高い状態にある。これらの理由のため、実際にはクリープ破断することは殆どない可能性があること、またこのクリープ補正係数を用いる方法は、クリープ現象によって同一のひずみ速度など同一の载荷条件の下での破断強度が時間経過とともに減少すると言う誤解を招いていることを指摘している。

以上のことから、本研究の目的は 1)クリープ载荷等の各種の载荷履歴が同一の载荷条件の下での補強材の変形強度特性に与える影響の評価、2)補強土構造物内の補強材がクリープ破断する可能性の検討、3)荷重保持载荷と小ひずみ振幅鉛直繰返し载荷による補強土構造物に生じる残留変形特性の予測法の検討、であることを示している。

第2章では、盛土材料の砂と礫の荷重保持载荷と繰返し载荷によって生じる残留変形とその相互関係を明らかにするために行った系統的な単調载荷および繰返し载荷三軸

圧縮試験の試験法とその結果をまとめている。実験結果を非線形三要素モデルの枠組みで解析して、実験に用いた砂と礫の粘性特性を定量的に示している。このモデルでは、ひずみ増分は弾性成分と非弾性（非可逆）成分の和であり、応力は粘性応力と非粘性応力の和である。また、荷重保持実験と繰返し載荷実験に生じる残留変形を比較することにより、繰返し載荷時に生じる残留変形の要因には 1)材料粘性と 2)非粘性の繰返し載荷効果の二つがあり、繰返し載荷振幅が小さい間は前者の要因が卓越するが、繰返し載荷振幅が大きくなるほど後者の要因が大きくなることを見出している。このようにして定量化された盛土材料の粘性特性と繰返し載荷効果による残留変形特性は、ジオテキスタイルで補強された盛土構造物の模型実験で観察された模型の変形特性の解析の基礎となっている。

第3章では、高分子ジオテキスタイル補強材の変形強度特性とそれに対する材料粘性と繰返し載荷効果が与える影響を評価するために6種類のジオグリッドを用いて行った一連の引張り試験の方法と結果をまとめている。この試験では、異なるひずみ速度での単調載荷試験と単調載荷試験の途中でのひずみ速度の急変・荷重保持実験（クリープ載荷実験）・繰返し載荷試験を行っている。その結果、引張り破断強度は載荷途中での異なる載荷履歴の影響を全く受けずに破断時のひずみ速度だけの影響を受けることを示し、クリープ変形は材料劣化現象ではないことを確認している。従って、時間経過と共にクリープ破断が生じる可能性と材料劣化する可能性がない場合は、構造物の耐用年数に応じて設計引張り強度を低下させる必要がないと結論している。また、8年間実際のジオテキスタイル補強土構造物内に設置されていた高分子ジオテキスタイル補強材の材料実験を系統的に行い、新品と比較して全く材料劣化しておらず粘性を含めて変形特性も変化していないことを示した。

更に、非線形三要素モデルでこれらの実験結果の全てをシミュレーションして、今回の研究で採用した多様な載荷条件の全てに対してこのモデルは妥当であることを示している。

第4章と5章では、ジオテキスタイル補強土盛土の橋脚と擁壁の変形強度特性と、それに対して盛土材料の材料粘性と繰返し載荷効果と高分子ジオテキスタイル補強材の材料粘性が与える影響を評価するために行った一連の小型模型実験の方法と結果をまとめ、その結果を材料試験の結果に基づいて解析している。まず、独立構造物である橋脚模型と平面ひずみ模型である擁壁の論文提出者自らが行った設計と作製法の詳細を説明している。更に、模型の変形特性に対する材料粘性と繰返し載荷の影響と両者の相互作用を検討するために行った載荷方法、即ち一定のひずみ速度での単調載荷試験と荷重が増加する過程と除荷過程で行った繰返し載荷試験・荷重保持試験の方法を説明している。その結果、模型天端での鉛直荷重と模型圧縮変形の関係は載荷速度が急変すると急変し、無視できないクリープ変形と応力緩和現象、及び繰返し載荷により無視できない残留変形が生じ、これらの残留変形特性には盛土材料の粘性が明確に反映されることを示している。特に、繰返し載荷中に生じる残留変形は、繰返し荷重振幅が小さいほど盛土材料の粘性によって生じることを示している。ただし、盛土天端に剛な基礎模型を設置して鉛直載荷した場合、基礎全体の繰返し荷重の振幅が基礎支持力と比較すると小

さくても、基礎の両端直下の地盤内では繰返し応力振幅の破壊断強度に対する比が容易に大きくなり、このため基礎端部直下の地盤内では非粘性の繰返し載荷効果が卓越して残留変形が生じ、この現象のために繰返し載荷を継続すると基礎端部直下の鉛直荷重が減少して基礎中央部の鉛直荷重が増加する。このため、基礎直下の地盤内の降伏が生じる。このような相互作用のために、繰返し載荷に伴う基礎の沈下は荷重保持実験の場合と比較するとはるかに長期に継続することを明らかにした。

また、構造物が破壊状態から十分に遠い状態で行った荷重保持実験では、補強材張力により盛土材料が水平方向に圧縮クリープ変形することと、ジオテキスタイルのような補強材では応力緩和現象が生じるために、時間経過と共に補強材張力は徐々に低下することを示している。実際構造物でも同様な現象が生じるならば、補強材に著しいクリープ変形が生じることは無くなり、クリープ破断の可能性は低くなることを示している。

更に、除荷状態のプレストレス状態では粘性と繰返し載荷効果による模型の残留変形の時間的進行は極めて小さくなることを示し、プレロード・プレストレス工法が残留変形の抑制に効果的であることを示している。

また、補強材層として剛性が 13 倍異なる模型を用意して載荷実験を行い、補強材層の剛性が補強土構造物の即時及び残留変形特性に与える影響を評価している。盛土材料の剛性は補強材よりも小さく、また盛土材料の変形強度特性にも無視できない粘性と繰返し載荷効果があるために、補強土構造物の変形の差は補強材層の剛性の差よりも遙かに小さいことを示している。

第 6 章では、第 4, 5 章で説明した模型実験で得られた結果を、模型を一要素と見なして非線形三要素モデルによって解析している。模型実験の結果を要素試験の結果の解析と全く同様な方法で解析できることから、非線形三要素モデルを用いて有限要素法等によりジオテキスタイル補強土構造物の残留変形特性の本格的な数値解析ができる展望が得られたとしている。また、模型実験での変形の解析の結果に基づいて、比較的小さな繰返し振幅であるが繰返し載荷回数が非常に多い繰返し載荷履歴により生じるジオテキスタイル補強盛土構造物の残留変形を、荷重保持実験での残留変形と見なして予測できることを示している。

第 7 章は、結論である。

以上要するに、系統的な室内材料実験・模型実験・理論的検討を行い、ジオテキスタイル補強土構造物の自重と外部死荷重によるクリープ変形と交通荷重のような長期小振幅繰返し荷重の繰返し載荷履歴による残留変形とそれらの相互関係を明らかにして、本構造物の残留変形を予測する方法論を示し、今後の本研究分野の発展及び実務設計の改善に寄与する新しい知見を与えている。これらは、土質工学に分野において貢献することが大である。よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。