

論文内容の要旨

論文題目：プレローディッド・プレストレスト補強土工法の原理と応用

氏名：内村 太郎

本研究では、補強盛土の剛性を飛躍的に高め、より大きな荷重を受ける構造物（橋台、橋脚、重要構造物の基礎など）を、補強土構造物で建設できるようにする工法として、プレローディッド・プレストレスト（PL・PS）補強土工法を提案した。その基本原理を実験的、理論的に検討するとともに、実物大模型の構築、および実施工への適用を通して、その実用性と効果を検証した。

PL・PS補強土工法は、補強盛土に鉛直方向のプレロードとプレストレスを加えることで、鉛直荷重に対する剛性を飛躍的に高め、長期間の荷重によるクリープ変形、および供用荷重の繰り返し載荷による残留変形を、きわめて効果的に抑制する。従来の鉄筋コンクリート（RC）構造に比べ、杭基礎を省略できたり現場発生土を利用できる場合にはかなり低コストになる。また土は基本的に延性的なので、基礎地盤の変形にも致命的な破壊をせず柔軟に追従できるという利点もある。

図1にPL・PS補強土工法の概念図を示す。補強盛土に数本のタイロッド（PC鋼棒など）を鉛直に挿入して張力を加え、両端で連結した反力板（RCブロックなど）を介して盛土を圧縮する。盛土はジオテキスタイルで補強されているので、大きなプレロードに耐える強度がある。次にジャッキを緩めてプレロードを半分程度除荷する。最後にナットでタイロッド上端を上部反力板に固定し、ジャッキを外す。タイロッドには引張、盛土には圧縮のプレストレスが残る。

本研究により、補強盛土の鉛直荷重に対する剛性が向上するメカニズムとして、次の4つが明らかになった。

① (締固め効果と引張り補強効果)

補強されていることにより、盛土を効率的に締固めることができる。また、大きなプレロードをかけても盛土が破壊しない。

② (プレロードの効果)

プレロードの荷重・除荷によって、土は弾性化し大きな剛性を示す。

③ (プレストレスの効果)

土の圧縮プレストレスにより土の弾性ヤング率が増加する。実際に本研究で用いた盛土材 (粒度調整砕石) の三軸圧縮試験では、軸応力 σ_a と軸方向の弾性ヤング率 $E_{e,q}$ の関係として、次式が得られた。

$$E_{e,q} = E_0 \cdot (\sigma_a / \sigma_0)^m \quad \text{ただし } \sigma_0 = 98\text{kPa}, m = 0.63 \text{ 程度} \quad (\text{式1})$$

④ (補強材のプレストレス効果)

盛土の塑性的な性質のため、プレロードの荷重・除荷に伴い、土に水平の伸びひずみ残り、補強材にも引張りひずみ (プレストレス) が残る。補強材が縮もうとする力が摩擦力を介して土を水平に拘束し変形を抑制する。一般に、補強土が変形して補強材に張力が入らなければ、補強材の効果は発揮されないため、補強材に引張りプレストレスが作用していることは有効である。

⑤ (タイロッドの剛性)

タイロッドは張力がかかり、補強土の圧縮力 (プレストレス) と釣り合っている。供用時に圧縮荷重を受けると、補強土の圧縮に伴ってタイロッドも縮むが、タイロッドはあらかじめ張力がかかっているから弾性変形する。すなわち、圧縮荷重に対しては2つの弾性バネ (補強土とタイロッド) が並列になって抵抗し、構造物全体の剛性は、補強土とタイロッドの剛性の和となる。(同様に、供用時に引っ張り荷重を受けても、補強土の圧縮応力が0になるまでは補強土は弾性バネとして働き、全体の剛性は補強土とタイロッドの剛性の和になる。)

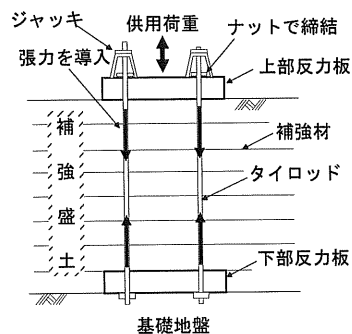


図1 PL・PS補強盛土の概念図

PL・PS補強土工法の実用性と効果を実証するために、7年間にわたって、粒度調整砕石とジオグリッドを用いた実物大模型5体と、実施工の補強土橋脚1体を構築し、建設から供用までの長期計測、および載荷実験を行った。

実物大模型実験においては、建設時にプレロードを十分に加えて盛土を圧縮変形させてから除荷することで、盛土の時間依存的な変形特性を改善し、供用中にプレストレス荷重を長期間維持できることを確認した。同時に、高いプレストレスを加えることにより盛土の剛性を高められること、逆にプレストレス荷重を完全に除荷してしまうと盛土が膨潤・軟化し、その後の圧縮変形が大きくなることを確認した。また、設計、施工上の注意点として、擁壁のような平面ひずみ条件の2次元問題でなく、長手方向も含めた3次元の変形を考慮して設計しなければならないこと、それぞれの場合に対してプレロード荷重・プレストレス荷重・タイロッドの剛性を適切に選ぶ必要があること、タイロッドを設置する方法に工夫が必要であることが明らかになった。

実施工のPL・PS補強土橋脚の長期挙動と列車走行時の挙動を計測した結果、PL・PS補強盛土は、実用上十分な剛性を持ち、また長期にわたって変形が小さく剛性が維持されることが分かった。特に、同じ橋桁荷重と活荷重を支えるプレロードとプレストレスを加えていない補強土橋台の挙動との比較から、PL・PS補強土工法が、

- ・長期間の一定の荷重によるクリープ変形を抑制すること
- ・列車荷重載荷時の一時的な変形を抑制し、かつ弾性化すること
- ・長期間の非常に多数回の繰り返し載荷による残留変形を抑制すること

という3つの効果が、きわめて有効に発揮されたことを確認した。

PL・PS構造物の長期的な性能は、盛土材や補強材のクリープ・リラクゼーション・繰り返し載荷による変形特性が決定的な要因になると考えられる。それらの挙動を予測するモデルの開発は、PL・PS構造物の設計法を確立するために大きく役立つ。まず、粒度調整砕石の盛土材を用いた室内三軸圧縮試験を行い、盛土材に対するプレロードの載荷・除荷、プレストレスの維持、および長時間のクリープ載荷や繰り返し載荷に対する挙動について、基礎的な変形特性を調べた。

その結果、実物大模型および実施工の補強土橋脚で得られた知見を再確認することができた。すなわち、建設時にプレロードを十分に加えて盛土を圧縮変形させてから除荷することで、盛土の時間依存的な変形特性を改善し、供用中にプレストレス荷重を長期間維持することができること、さらに多数回の繰り返し荷重に対する変形特性も改善されることを確認した。同時に、高いプレストレスにより盛土の剛性を高めることができること、逆にプレストレス荷重を完全に除荷してしまうと盛土が膨潤・軟化し、その後の圧縮変形が大きくなることを確認した。

また、少なくとも単調な載荷過程においては、三要素型のレオロジーモデルの一種である New Isotach モデルが適用できることが分かった。

次に、New Isotach モデルを用いて、P L・P S 橋脚へのプレロード時の荷重・変形特性の解析を試みた。一般に、複雑なモデルほど、個々のパラメータを決定することが困難になるが、本研究では、プレロード時の各荷重レベルでのクリープ載荷時の時間依存変形の実測値から、時間依存性と非時間依存性の非可逆変形に関するパラメータを決定する方法を提案し試みた。その結果、全体として盛土の圧縮量がやや過大に予測された。すなわち、各荷重段階でのクリープ量はほぼ実測と一致しているが、次の荷重段階に進むときの圧縮量がやや過大に見積もられる結果となった。これは、盛土挙動の実測値の時間間隔が、実際の載荷時に荷重が変化する時間より長時間（2分に1回）であり、荷重を増加させる途中のデータが測定されていなかったために生じた誤差である可能性が高い。

このモデルのP L・P S 補強土構造物の変形解析に対する適用性に関しては、

- ・1次元モデルであり、水平ひずみ、特に補強材の時間効果を含む変形特性を考慮していない。
- ・盛土材が、真に New Isotach 則に従うのか、確認が十分でない。
- ・P L・P S 工法では、プレロード後に除荷する事に重要な意味があり、除荷とその後の時間効果を扱えるモデルが必要である。
- ・プレロードに比べて微少ではあるが非常に多数回繰り返される交通荷重の影響を、別途モデル化しなければならぬ。

などの課題が残っていることが明らかになった。

P L・P S 補強土工法は、粒状体である地盤材料が高いプレロード・プレストレス荷重を加えることにより、高い剛性と強度を発揮するという、土質力学の基本原則に根ざしたものであり、様々な応用が期待できる。以上述べたとおり、本研究では、P L・P S 補強土工法の基本原則とその応用性を明らかにすることができ、今後の応用の基礎となる知見が得られた。