プレローディッド・プレストレスト補強土の 現場計測結果と設計法・施工法の提案

東京大学工学部 内村太郎・龍岡文夫
鉄道総合技術研究所 舘山 勝

東京大学生産技術研究所 古関潤一
九州旅客鉄道株式会社 古賀徹志

プレローディッド・プレストレスト (P L ・ P S) 補強土工法は、プレロードとプレストレスによって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) にも応用できるようにする工法である。この工法の初の実施工例として、鉄道橋の橋脚が建設された。その長期計測と列車通過時の計測結果から、P L ・ P S 補強盛土の長期耐久性・短期の変形特性を検討した。その結果、P L ・ P S 橋脚は、死荷重によるクリープ圧縮速度、列車荷重の繰返し載荷による残留圧縮速度、補強材の伸びひずみ速度は、いずれも実用上十分小さかった。また、列車通過時の一時的な圧縮量も、十分小さかった。さらに、P L ・ P S 補強盛土の剛性を長期にわたって確実に維持する方法と、施工性の改善の観点から、設計・施工上工夫すべき点を考察した。

Full-scale Behaviour of Prototype Preloaded and Prestressed Geosynthetic Reinforced Soil Structure and Some Proposals to its Design and Construction Method.

T.Uchimura and F.Tatsuoka : Department of Civil Engineering, University of Tokyo

J.Koseki : Institute of Industrial Science, University of Tokyo

M.Tateyama : Railway Technical Research Institute of Japan Railways Group

T.Koga : Kyushu Railway Company

The preloaded and prestressed (PLPS) reinforced soil method aims at substantially increasing the stiffness of a geosynthetic-reinforced soil embankment by vertical preloading and prestressing. The first prototype PLPS reinforced soil pier for a railway was constructed, and preloaded and prestressed, which has been opened to service for more than 1 year. Long-term measurements for more than 2 years are described. The PLPS pier showed very small amount of instantaneous and creep compression by dead load and live train load. In addition, some new design and construction methods are proposed which can keep high stiffness for a long time and can improve its constructibility.

プレローディッド・プレストレスト補強土の 現場計測結果と設計法・施工法の提案

東京大学工学部 内村太郎・龍岡文夫
鉄道総合技術研究所 館山 勝

東京大学生産技術研究所 古関潤一
九州旅客鉄道株式会社 古賀徹志

1. 工法の概要とメカニズム

プレローディッド・プレストレスト（PL・PS）補強土工法は、プレロードとプレストレスによって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）にも応用できるようにする工法である。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安価になる。また土は延性的なので、基礎地盤の変形にも致命的な破壊をせず柔軟に追従する¹⁾。

図1にPL・PS補強土工法の概念図を示す。補強盛土に4本以上のタイロッド（PC鋼棒など）を鉛直に挿入して、下端は盛土底部の反力板（RCブロックなど）に締結しておく。タイロッド上端に、上部反力板を反力にしてジャッキを設置し、タイロッドを十分強い力で引張ることで、盛土を鉛直方向にプレロードする。盛土はジオテキスタイルで補強されているので、高い鉛直プレロードに耐える強度が十分にある。次に張力を緩めてプレロードを半分程度除荷する。最後にタイロッドと反力板をナットなどの締結具で固定し、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。

図1 プレローディッド・プレストレスト補強盛土の概念図

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は、次の4つである。

- ①プレロードの効果：プレロードの載荷・除荷で、土は弾性化し大きな剛性を示す。
- ②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。
- ③補強材のプレストレス効果：土の塑性のため、プレロードの載荷・除荷時に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。
- ④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が縮んで張力が減少するから、その分だけ土にかかる荷重増分が軽減する。

2. 実施工の PL・PS 補強土橋台の計測

1996年夏に、JR九州篠栗線馬出橋梁（福岡市：図2a）で、初の実施工の PL・PS 補強土橋脚として橋脚 P1 が建設された（図2b）²⁾³⁾。盛土材は粒度調整碎石、補強材はポリマーグリッドであり、16.5 m の桁を2連支持している。上部反力板として RC 小橋台（厚さ80cm）を兼用し、タイロッドには直径 35mm の PC 鋼棒を4本用いた。基礎地盤は厚さ 11m の軟弱粘土層だったため、セメント混合で改良した。さらに、地表面から深さ 1 m までは、地盤改良杭を密に打設して、これを下部反力板として代用した。タイロッドの下端は、改良杭に約 4 m 挿入し定着した。補強土部分は、4 辺にレキの入った土のうを積み上げてグリッドで巻き込みながら構築した。グリッドは、向かい合う 2 壁面ごとに 30cm 間隔で敷設したため、全体で 15cm となっている。盛土構築後、4 壁面に厚さ 30cm の RC 剛壁面を打設した。橋脚の設計桁荷重は $197\text{kN} = 20.1\text{tf}$ 、設計列車荷重は衝撃荷重を含めて $1330\text{kN} = 136\text{tf}$ である。仮設構造物として、5 年間程度使用する予定である。

一方、この橋梁の橋台 A2（図2c）は、剛な壁面工を持つ補強土擁壁であるが、プレロード・プレストレスはかけていない。RC 壁面工は前面にだけ施工され、側面は植生した法面である。

図3は、橋脚の、油圧ジャッキで加えたプレロード荷重（タイロッドの張力に等しい）と鉛直圧縮量との関係である。初日はプレロード荷重を 196kN ずつ増やしながら、30分または60分ずつクリープさせた（図3A）。その後は、日中は一定のプレロード荷重を加え、夜間と休日は現場の要請でタイロッドを反力板に締結して放置した（プレロード載荷時間は、合計で正味約72時間である）。途中で大振幅の繰返し荷重を数回かけた。最終的に $2350\text{kN} = 240\text{tf}$ のプレロードをかけ、13日目にタイロッドの張力を $950\text{kN} = 97\text{tf}$ に除荷して、タイロッドと反力板とを固定した。プレロード時の盛土の鉛直圧縮量は最大 8 mm であり、また $1080 \sim 2350\text{kN}$ で除荷・再載荷した時の弾性的変形は 0.5 mm（図3B）で、非常に剛性が高かった。以降、プレストレスされた状態で約2年間計測を続けた（図3C）。

図4は、プレロード後、約2年間のタイロッド張力（プレストレス）、PL・PS 橋脚の圧縮量、PL・PS をかけてない補強土橋台の圧縮量である。それぞれ、およそ1年周期のわずかな変動を含んでいるが、これは温度変化による盛土変形か、もしくは計測装置への温度の影響と思われる。外気温と橋脚内部の各点の地中温度を、熱電対で計測した（図5）。地中温度の日変化は、外気温よりはるかに小さい。しかし、1年周期の変化を見ると、盛土内部の温度はほぼ一様で外気温に等しいと言える。その温度が極小・極大となる時と、タイロッド張力や盛土の圧縮量が極小・極大となる時とが一致している（図中○印）。このことから、上述の年変化は温度による変動だと判断した。

そこで、図4ではこれらの計測値の極大・極小点を直線でつなぐことで、長期的な変動速度を読みとった。25日目に桁を架設した後、PL・PS 橋脚は 0.25 mm/年 の速さで圧縮し、タイロッドの張力は 51kN/年 で減少している。300日目付近で供用開始し、それ以降 $392\text{kN}(40\text{tf})$ 程度の列車荷重が1日に125回以上かかるようになったが、盛土の圧縮速度、タイロッド張力の減少速度に顕著な変化は見られない。盛土の圧縮速度とタイロッド張力の減少速度の比をとると、 204kN/mm となり、これがタイロッドのバネ定数に相当する。一方、バネ定数を材料定数（鉄のヤング率 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ 、断面積 $956.6\text{mm}^2 \times 4$ 本、長さ 320mm ）から計算すると、 233kN/mm となる。従って、実測のバネ定数の方が若干小さくなっているが、理由として、タイロッド上下端の定着部にわずかな緩みがあり得ることが考えられる。

図3 プレロード（タイロッド張力）と、盛土の圧縮量の関係

図4 タイロッド張力および橋脚・橋台の圧縮量の経時変化

図5 盛土内部の地中温度と、外気温の経時変化

PL・PS橋脚の圧縮率は十分小さく、5年程度の仮設供用期間では問題にならないだろう。また、タイロッドの張力は初期値 950kN に対して約 5%/年で減少しているが、これも 5 年程度なら問題にならないだろう。但し、タイロッド張力が減少すると、盛土の剛性が低下し⁴⁾⁵⁾、列車荷重の繰返し載荷による残留沈下が大きく生じるようになり、このためにタイロッド張力が減少するという悪循環に陥る可能性がある。さらに長期間供用するためにはタイロッド張力を維持する工夫が必要である。具体的にはタイロッドの締結部にバネを挟んで、タイロッドのバネ定数を下げることが効果的だろう。

一方、PL・PSをかけていない補強土橋台は、桁を仮設したあとの圧縮量しか計測していないが、供用開始までの約 9 ヶ月間に 3mm 圧縮し、さらに供用開始後は急激に圧縮して、約 2 年間の総圧縮量は 12mm に達している。現在も圧縮が進んでいる。

図 6 は、盛土底面で測定した鉛直土圧で、P01は盛土中央部、P02は盛土端部のタイロッド付近で計測したものである。これらの値も、温度変化による年周期変動が、顕著に現れている。深さ 1 m の地盤改良された領域を作って下部反力板に替わりとしているので、これが十分な剛性を持っていることが重要である。プレロード時の土圧の増加量は盛土の中央部もタイロッド付近も、ほぼ同じであるので、地盤改良領域が下部反力板として十分な剛性を持つと判断できる。ただし、長期変動を、温度変化による変動を除いて読みとると、中央部が 8.4kPa/年で減少しているのに対して、タイロッド付近は 4.0kPa/年しか減少していない。従って長期的にはタイロッド付近に応力集中している。これは、地盤改良された領域がクリープ変形して、中央部が下にたわんでいるか、あるいは RC 剛壁面に応力が集中している可能性がある。

図 7 は、補強材の伸びひずみの変化を、補強材に貼ったひずみゲージで計測したものである。このひずみゲージは、線路方向（橋脚の短辺方向）と線路直交方向（長辺方向）の伸びひずみを別々に測るために、温度補償のとれない方法で貼られている。すなわち、ブリッジを構成する 4 枚のゲージのうち、アクティブゲージ 2 枚を伸びひずみを測る方向のストランド上に貼り、ダミーゲージ 2 枚はひずまないように剛性の高い銅板に貼りつけて埋め込んだ。従って、2 方向のひずみを別々に測ることができるが、グリッドと銅板との熱膨張係数の差により、温度の影響が出ている。

各方向に 16 点ずつ、合計 32 点にゲージを貼って計測した。図 7 に、各方向ごとの伸びひずみの平均を示す。長期変動を、温度変化による変動を除いて読みとると、線路方向（盛土の短辺方向）にはほとんど伸びていないのに対して、線路直交方向（長辺方向）には 0.0157%/年 で補強材が伸びている。この程度のひずみ速度であれば、5 年程度の供用期間中には問題にならない。盛土の圧縮速度をひずみで表すと 0.0104%/年であり、補強材の伸びひずみ速度と同じオーダーである。補強材が橋脚の長辺方向により大きく伸びている理由は分からない。

図 8 は、営業運転開始日の始発列車通過時の橋脚のタイロッド張力、橋脚・橋台の圧縮量である。橋脚は約 0.02mm 圧縮し、それに伴ってタイロッド張力も約 7kN 減少しているが、ほぼ弾性的にもとの値に回復している。これに比べて、橋台はおよそ 10 倍の 0.2mm 圧縮し、図 4 のように列車荷重の繰返し載荷によって大きな残留圧縮が起きている。これらの圧縮量をひずみに直すと、橋脚が 0.0008% で、土が塑性ひずみを起こさない限界とされる 10^{-5} ひずみ⁶⁾以下なのに対して、橋台が 0.008% 程度で、 10^{-5} を越えている。この違いが、列車荷重の繰返し載荷による残留圧縮量の劇的な差の原因だろう。

図6 PL・PS橋脚の盛土底部の土圧の経時変化

図7 PL・PS橋脚の補強材伸びひずみの経時変化

図8 列車通過時のタイロッド張力および橋脚・橋台の圧縮量の変化

以上、長期および列車走行時の計測結果から考察した結論をまとめると、以下のようになる。

- ・ P L ・ P S 橋脚は、死荷重によるクリープ圧縮速度、列車荷重の繰返し載荷による残留圧縮速度とも、実用上十分小さい。また、補強材の伸びひずみ速度も、十分に小さい。
- ・ 列車通過時、P L ・ P S 橋脚の圧縮量は十分小さく 10^{-5} ひずみを越えず、弾性的に挙動した。
- ・ 一方、P L ・ P S をかけない橋台は、列車通過時に 10^{-4} 程度圧縮し、急激に残留圧縮が累積した。
- ・ タイロッド張力は、ゆっくりと減少しているが、5 年程度では問題ないと思われる。
- ・ 基礎地盤を地盤改良して形成した下部反力板は、十分な剛性を持ち、反力板として機能している。

3. P L ・ P S 補強盛土の設計・施工上の工夫

上述の P L ・ P S 補強盛土の実施工や、筆者らが過去に行ってきた実物大模型の実験から、P L ・ P S 補強土工法の設計・施工上、工夫すべき点として、次のことが考えられる。

3. 1 P L ・ P S 補強盛土の圧縮性

本工法の第一の目的は、補強盛土の鉛直方向の圧縮を抑制することである。圧縮の要因は、①供用荷重の繰返し載荷による残留圧縮、②供用荷重による一時的な圧縮、③自重や静的荷重による長期的なクリープ圧縮である。このうち、繰返し荷重による残留圧縮については、上述の実施工の橋脚と橋台の比較から、供用荷重載荷時の一時的な圧縮ひずみを 10^{-5} 以下に抑えればよい。また、これを満たせば、一時的な圧縮の最大許容値も、自動的に満たせるだろう。従って、定量的な締固め管理と、プレロード荷重・プレストレス荷重の適切な選定によって、一時的な圧縮ひずみを抑制する必要がある。特に盛土の剛性を支配するのは、プレストレス荷重であるから¹⁾⁵⁾、これと、平板載荷試験などによって得られる盛土の初期の剛性から、盛土の一時的な圧縮ひずみを予測することになるだろう。

3. 2 プレロードの載荷方法

また、上記③の、長期的なクリープ圧縮については、盛土材の要素試験から、プレロードを十分にかけてから除荷する事によって、効果的に抑制されることが分かっている¹⁾⁵⁾。プレロードを一時的にかけてすぐに除荷するのではなくて、一定のプレロード荷重を長期間かけ続けるか、または大振幅の繰返し荷重をかけることで、盛土を十分に圧縮することが効果的である。特に繰返し荷重によるプレロードは、半日程度の非常に短い時間でも、盛土を十分に圧縮することができ、工期の短縮がはかれる。

盛土の剛性は、プレストレス荷重が強いほど高くなる。しかし、プレストレス荷重とプレロード荷重との差が小さすぎると、供用荷重の載荷時の土の応力がプレロードに近づきあるいは越えて、塑性変形を起こす。また、プレロード荷重に近い、強いプレストレス荷重が常時かかっていると、クリープ圧縮も生じる。従って、プレロード荷重はプレストレス荷重よりさらに十分高く設定すべきである。

3. 3 タイロッド張力の維持

タイロッド張力（プレストレス荷重）は、盛土の剛性に大きな影響を及ぼす。特にプレストレス荷重が 0 に近づくと、盛土の剛性は急激に低下する¹⁾⁵⁾。すると、供用荷重載荷時の圧縮量が大きくなり、残留圧縮が生じるようになり、さらにタイロッド張力が低下するという悪循環に入りうる。従って、タイロッド荷重を維持することが重要である。そのためには、タイロッドの締結部にバネを挟んで、

図9 皿バネを用いたタイロッド締結部

図10 盛土構築後にタイロッドを挿入・定着する施工法

タイロッドのバネ定数を下げることが効果的だろう。筆者らは、皿バネを用いたタイロッド締結部を試作している（図9）。タイロッド一本につき、直径16cmの皿バネを26枚を用い、30tfの張力を支える。上述の実施工のPL・PS橋脚にこれを用いれば、タイロッドのバネ定数が約1/10になり、張力の減少速度を1/10に減らせる。

3.4 タイロッドの設置方法

上述の実施工PL・PS橋脚では、初めにタイロッドを設置してから盛土を構築したので、タイロッドの間を縫うように作業することになり、施工性が悪かった。改善案として、基礎地盤を地盤改良することで下部反力板を作り、タイロッドを設置せずに盛土を構築し、最後に天端から改良した基礎地盤まで削孔してタイロッドを挿入して定着する方法が考えられる（図10）。タイロッドの挿入と定着は、技術的にはグラウンドアンカーなどですでに行われている。また、上述の橋脚の事例から、地盤改良によって形成した下部反力板でも、十分な剛性を持つことが確かめられている。

4. まとめ

実施工の P L ・ P S 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、P L ・ P S 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。また、P L ・ P S 補強盛土の剛性を長期にわたって維持することと、施工性の改善の観点から、設計・施工上工夫すべき点を考察した。

5. 謝辞

実施工の P L ・ P S 補強土橋脚の構築・計測にあたり、鉄道総合技術研究所の小島謙一氏、木村英樹氏、九州旅客鉄道株式会社の前田崇氏、鶴英樹氏、高山智宏氏、東京大学生産技術研究所の佐藤剛司氏、東京大学学生丸山大介君、篠田昌弘君、杉村佳寿君、石原雅規君、日本大学学生の中村宏之君に、多大な協力を戴きました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Uchimura, T., Tatsuoka, F., Sato, T., Tateyama, M. and Tamura, Y. 1996. Performance of preloaded and prestressed geosynthetic-reinforced soil, Proc. Int. Symp. on Earth Reinforcement, Fukuoka, Balkema (Ochiai et al., eds), Vol. 1, pp.537-542.
- 2) 内村太郎・龍岡文夫・館山勝・古関潤一・前田崇・鶴英樹(1996): プレローデッド・プレストレスト補強盛土のメカニズム・原理実験・実大模型実験・実施工, 第11回ジオセンセティックスシンポジウム発表論文集, 国際ジオセンセティックス学会日本支部, pp.72-81
- 3) Uchimura, T., Tatsuoka, F., Tateyama, M., Koga, T. 1998: Preloaded-Prestressed Geogrid-reinforced Soil Bridge Pier, Proc. the 6th Int. Conf. on Geosynthetics, Atlanta, Vol.2, pp.565-572.
- 4) 龍岡文夫・内村太郎・志田芳樹・柳澤秀樹(1997): プレローデッド・プレストレスト補強土工法におけるプレストレスの効果, 第32回地盤工学研究発表会発表講演集, pp2475-2476
- 5) 篠田昌弘・丸山直樹・内村太郎・龍岡文夫(1998): プレローデッド・プレストレスト補強土模型の室内繰返し載荷実験, 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp2405-2406
- 6) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Dong, J., Teachavorasinskun, S. and Mizumoto, K. (1994), "Stress states affecting elastic deformation moduli of geomaterials," Proc. of Int. Symp. on Pre-Failure Deformation of Geomaterials (Shibuya et al., eds.), Balkema, Vol.1, pp.3-9