補強土構造物の定荷重および 繰返し荷重による変形特性

内村太郎¹・柴田芳雄²・平川大貴²・Ko Dong-Hee²・伊藤寛倫²・龍岡文夫¹

ジオテキスタイル補強土構造物の常時の性能として、上部構造物の荷重と自重による定荷重、および交通荷重などによる繰返し荷重に対する変形性が重要である。このような変形を予測するためには、盛土材の定荷重、繰返し荷重に対する変形特性を知る必要がある。これらの性質について、補強土橋脚の小型模型への載荷試験、盛土材の三軸圧縮試験、および実現場の補強土構造物の長期計測・載荷試験の結果から、考察を行う。

キーワード：補強土、変形、繰返し載荷、荷重保持載荷、長期挙動

1. はじめに

盛土構造物の供用荷重に対する強度は、補強土工法を用いることにより飛躍的に高めることが可能であり、その効果についても、設計のための予測手法がいくつか開発されている。しかし、供用荷重による変形量の予測については、補強土構造物に限らず、一般の土構造物でも、定量的な方法は一般化されていない。さらに、長期にわたる変形、特に交通荷重などの長期間の繰返し荷重による残留変形を予測することは、大変難しい。しかし、鉄道橋の橋台や橋脚など、大きな繰返し荷重が多数回かかり、かつ変形の制限が厳しい構造物を補強盛土で作る場合、その変形が許容される範囲に収まるかどうか予測し、判断しなければならない。

このような変形を予測するためには、盛土材の定荷重、繰返し荷重に対する変形特性を知る必要がある。これらの性質について、補強土橋脚の小型模型への載荷試験、盛土材の三軸圧縮試験、および実現場の補強土構造物の長期計測・載荷試験の結果から、考察を行った。

2. 補強土橋脚模型の繰返し載荷試験¹⁾

2. 1 実験方法

載荷装置と模型の概略を図1、2に示す。供試体を作成するために、まず 35 cm x 35 cm のリン青銅補強材の四方に補強材を巻き付けた土のう模型を接着したものを作成し、その中に 7.5 kg の粒度調整碎石 ($D_{max} = 5\text{mm}$, $D_{50} = 2.52\text{mm}$, $U_c = 5.41$, $\gamma_d = 1.79 \text{ g/cm}^3$, $Dr = 90\%$) を投入し、締め固めたものを 12 層積み重ねた。1 層の厚さは 5 cm であり、模型の高さは 60 cm になる(図2)。エアシリンダーで応力制御により載荷した(図1)。

図-1 載荷装置

図-2 補強土模型

1 正会員，東京大学大学院工学研究科（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部一号館）

2 学生会員，東京大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻，土質研究室（〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 工学部一号館）

本報で紹介するのは、以下に示す5つの試験である。いずれも、はじめに 250 kPa まで単調載荷を行った。その後、表 1 に示す荷重をかけた。すなわち、Creep 2 が一定荷重によるクリープ変形をさせているのに対して、Cyclic 1～4 は、それぞれ 250kPa を最大荷重とした振幅 50 kPa, 25 kPa, 75 kPa (以下、振幅は peak to peak の値で表示する)の繰返し載荷試験を行っている。

その後、いずれも 100 kPa まで除荷したのち、100 kPa～150 kPa で 100 回の繰返し載荷を行った。これは、プレローディッド・プレストレスト補強盛土³⁾についてプレロードの載荷・除荷およびそれに続く繰返し載荷を行ったときの変形を調べるためのもので、除荷後の活荷重載荷による残留変形は大幅に少なくなるが、本論文では、単調増加の死荷重と、それに続く活荷重の載荷による変形を扱うため、この部分については詳述しない。

以上の各試験において、載荷と除荷の速さは全て応力の変化速度 0.2 kPa/sec とし、載荷荷重と載荷板の変位を計測することで、平均鉛直応力、平均軸ひずみを算出した。

2. 2 実験結果と考察

各載荷パターンに対する平均鉛直応力-平均軸ひずみ関係を図 3～5 に示す。どの載荷パターンにも共通な、最初の 250 kPa までの単調載荷での変形量にやや違いが出ているが、これは材料が礫であることから、模型地盤の再現性を保つことが難しいためだろう。

単調載荷後の応力レベル 250 kPa において、繰返し載荷、荷重保持載荷が、平均軸ひずみの進行に対して与える影響を比較するため、平均軸ひずみを時間に対してプロットした(図 6～8)。前述した通り、単調載荷時の応力ひずみ関係が試験ごとに異なるため、そのまま単純に比較することができない。そこで、応力 250 kPa に至った時点での平均軸ひずみを基準にとり、その基準からのひずみ増分を時間に対してプロットした。

図 6 において、Cyclic 1 および 2 の繰返しによる上限のひずみ(すなわち、Creep 2 での定荷重 250 kPa と同じ荷重がかかった瞬間のひずみ)に着目すると、ひずみの時間に対する増加速度は Creep2 とほぼ同じであることが分かった。つまり、同じ応力レベルにおいて同じ時間だけ繰返し載荷と荷重保持載荷を行った場合、ほぼ同じひずみが生じている。

次に、繰返し載荷の荷重振幅の大きさが残留ひずみに与える影響を検討するため、荷重振幅が 25 kPa, 75 kPa である、Cyclic 3 および Cyclic 4 を、Creep2 (残留ひずみは Cyclic1, 2 とほぼ等しい)の挙動を比較した(図 7, 8)。荷重振幅が Cyclic1, 2 より小さい 25 kPa の Cyclic3 の残留ひずみは、Creep2 (および Cyclic1, 2) よりも小さい。一方、荷重振幅が Cyclic1, 2 より大きい 75 kPa の Cyclic4 の残留ひずみは、Creep2 (および Cyclic1, 2) よりも大きい。

一般に、高い一定の圧縮荷重を長期間かけることは、構造物の時間依存的な(すなわち、クリープによる)圧

縮変形を発生させる。また、圧縮荷重下で繰返し荷重を加えて荷重を変化させるということは、土粒子の配列が変化する機会を与え、同じく圧縮変形を発生させる要因である。したがって、総圧縮変形量は、それぞれの要因による変形の和と考えられる。しかし、上記の実験結果からは、一定の荷重による時間依存的変形と、荷重の変化による変形との関係は、単純ではない。

表 1 単調載荷後の載荷パターン

載荷試験名	載荷パターン
Creep 2	250 kPa を 120 時間荷重保持
Cyclic 1	250kPa～200kPa で繰返し載荷 100 回
Cyclic 2	250kPa～200kPa で繰返し載荷 400 回
Cyclic 3	250kPa～225kPa で繰返し載荷 100 回
Cyclic 4	250kPa～175kPa で繰返し載荷 100 回

図-3 荷重・圧縮量関係

図-4 荷重・圧縮量関係

図-5 荷重・圧縮量関係

図-6 250 kPa 載荷以後の変形履歴

図-7 250 kPa 載荷以後の変形履歴

図-8 250 kPa 載荷以後の変形履歴

図-9 繰返し載荷による変形と時間依存変形の関係

一定荷重の載荷を、振幅が 0 kPa の繰返し載荷と考えると、一連の結果を模式的に図 9 の「総ひずみ量」のように整理できる。振幅が 0 であれば常に最大荷重がかかり続けているが（図 9 の A）、振幅が大きくなるほど最大荷重のかかっている時間が短くなり、一定荷重による時間依存的なクリープ圧縮は小さくなる。一方、繰返し載荷による変形は、荷重振幅が大きくなるほど増える。振幅 25 kPa では、繰返しによる変形より一定荷重による変形の減少の方が大きく（B）、振幅 50 kPa ではほぼ均衡し（C）、振幅 75 kPa では繰返し載荷の影響の方が大きくなった（D）と解釈できる。

一般に、一定荷重下で繰返し除荷・再載荷が行われる場合には、繰返し荷重による変形だけでなく、荷重の変化に伴って一定荷重による時間依存的な変形へも影響されることを考慮して、変形を予測する必要がある。

3. 盛土材三軸供試体の繰返し載荷試験²⁾

盛土材の繰返し載荷およびクリープ載荷による残留変形特性を調べるために、三軸圧縮試験を行った。

まず、気乾豊浦砂 ($G_s = 2.65$, $e_{max} = 0.977$, $e_{min} = 0.597$) で、断面 7.85cm x 7.85cm、高さ 20 cm の角柱供試体で試験を行った。豊浦砂のような貧配合の砂は実際の盛土材としては適さないが、粒径の大きなレキは供試体のばらつきが大きくなり、変形の比較が難しくなるため、非粘着性の粒状体材料として豊浦砂を使用した。試料は、4 層の多重ふるい（目の開き 1.0mm）を用いた空中落下により、間隙比 0.636～0.656（相対密度 84.6～89.9%）で作成した。載荷はエアシリンダーを用いた応力制御で、応力の変化速度を PC により制御した。また、ひずみは LDT（局所変位測定装置）で精密に計測した。

供試体は、40 kPa で等方圧縮された後、拘束圧一定で鉛直載荷し、図 10 の応力経路で載荷した。この途中、図 10 に示す a～f の各応力点で、10 分間の応力一定のクリープ載荷、および、10 分間の繰返し載荷（振幅 $\Delta q = 10$ kPa；6 サイクル）を、表 2 のように交互に行った。この間の鉛直応力の変化速度は一定で、12 kPa/min とした。各供試体で、それぞれクリープ載荷と繰返し載荷を交互に行っているのは、供試体のばらつきによる差をなるべく除外して、それぞれの載荷パターンの影響を比較するためである。

応力ひずみ曲線を図 11 に示す。両者とも、ほぼ同じ応力ひずみ関係を示しているが、各応力レベルでのクリープ載荷 (creep) 及び繰返し載荷 (cyclic) 中に生じた残留変形量を比較すると、図 12 のようになる。どちらも、常に荷重一定のクリープ載荷による残留変形量の方が、繰返し載荷による残留変形量を上回っている。これは、前節で紹介した補強土橋脚模型の載荷試験で、荷重一定のクリープ載荷をしたとき (Creep 2) より、小振幅の繰返し載荷を行ったとき (Cyclic 3) の方が、残留変形量が小さかったことと一致している。

一定荷重をかけた上での、荷重の繰り返し変動による変形をモデル化する場合、荷重の変動によって変形が進む効果と同時に、荷重が変動することで一定荷重による時間依存的な変形挙動自体も影響を受けることが考慮されなければならない。その影響は、時間に依存する特性であるから、荷重の変動の大きさだけでなく、変動の速度にも依存することも予想される。

図-10 三軸圧縮試験の応力経路

表-2 各応力レベルでの荷重パターン

	a	b	c	d	e	f
TEST1	クリープ	クリープ	繰り返し	クリープ	繰り返し	クリープ
TEST2	クリープ	繰り返し	クリープ	繰り返し	クリープ	クリープ

図-11 三軸圧縮試験結果

図-12 クリープ荷重と繰り返し荷重の比較

次に、同じく図10の各応力点において、応力速度を変えた繰り返し荷重(各10サイクル)を交互に行った(表3、図13)。応力振幅は50 kPaである。各応力レベルでの繰り返し荷重中に生じた残留変形量を比較すると(図14)、常に遅い繰り返し荷重による残留変形量の方が、速い繰り返し荷重による残留変形量より大きい。このことから、同じ応力レベル、応力振幅の繰り返し荷重であっても、遅い荷重の方が、残留ひずみは大きい。

次に、前節の補強土橋脚模型に用いたのと同じ盛土材を用いて、同様の試験を行った。供試体は豊浦砂の試験と同じ寸法で、乾燥した盛土材をモールド内で突き固めることによって乾燥密度 1.96 g/cm³ で作成した。応力経路も豊浦砂と同じく 40 kPa で等方圧密した後に、側方有効圧一定で軸方向に圧縮した。ただし、クリープ荷重(時間10分) および繰り返し荷重(振幅20kPa、ひずみ速度 24 kPa/min、時間10分)は、表4に示す応力点でそれぞれ行った。その結果、図15、16に示すように、盛土材でも、荷重一定のクリープ荷重より、繰り返し荷重の方が、残留変形量が小さく、粒径の比較的大きなレキ材でも、砂と同じ傾向が確認できた。

表-3 各応力レベルでの荷重速度

	a	b	c	d	e	f
TEST3	Slow	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast
TEST4	Fast	Slow	Fast	Slow	Fast	Slow

(Slow : 20kPa/min, Fast : 200 kPa/min)

図-13 三軸圧縮試験結果

図-14 繰り返し荷重速度による比較

表-4 各応力レベルでの載荷パターン

偏差 応力	60 kPa	120 kPa	180 kPa	240 kPa	300 kPa	360 kPa
TEST5	クリ ープ	繰り 返し	クリ ープ	繰り 返し	クリ ープ	繰り 返し
TEST6	繰り 返し	クリ ープ	繰り 返し	クリ ープ	繰り 返し	クリ ープ

図-15 三軸圧縮試験結果

図-16 クリープ載荷と繰り返し載荷の比較

4. 実施工補強土橋脚、橋台の挙動³⁾

4. 1 構造物の概要

1996年夏に、JR九州篠栗線馬出橋梁で、剛壁面補強土壁工法による補強土擁壁橋台が建設された(図17、図18)。盛土材は粒度調整碎石($\gamma_d = 2.1 \text{ g/cm}^3$ 程度、 $D_{\max} = 30 \text{ mm}$, $U_c = 16.5$)、補強材はポリマーグリッドであり、補強材間隔は30cmである。RC小橋台(厚さ80cm)は盛土天端に直接設置されて、16.5mの桁(約20ton)を支持している。盛土は前面に積み上げた土のうを補強材で巻き込みながら構築し、最後に前面に一体型のRC壁面工(厚さ約30cm)を打設した。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。その後、桁を設置し、約1年後に供用開始した。

4. 2 長期クリープおよび交通荷重による変形

橋台A2の、桁載荷後、および供用時の圧縮量の履歴を図19に示す。橋桁架設前の圧縮変形は計測値に含まれていないが、供用開始までに一定荷重(自重および桁荷重)で3mm程度クリープ圧縮し(A)、さらに供用開始後は急速に変形して、3年半の供用期間で12mm程度圧縮した(B)。

列車荷重は、桁長が列車1両程度なので、最大で約200kN程度(1両の重さの約半分)と推定される。また、1回の列車荷重の載荷は5~10秒程度で、その他の時間は、数十分から数時間(夜間)にわたり死荷重だけがかかった(図20)。もし、列車荷重がかからず、この死荷重だけがかかっていたら(図20A)、橋台の変形は図19のAを延長した破線のようなになるだろう。また、列車通過時の最大荷重が恒常的にかかり続けたとしたら(図20C)、図19の破線Cのような変形になったと推測される。実際は、ほとんどの時間は死荷重だけが掛かっており、非常に短時間の列車荷重が多数回かかったことで図19の曲線AとBの差が生じたのだが、これは逆に、常に最大荷重がかかっている状態Cから、本論文で紹介した橋脚模型および三軸供試体の繰り返し載荷試験と同様に、その荷重を上限とした繰り返し載荷とも考えられる。繰り返し載荷によって応力が変化することによってクリープ変形が少なくなる効果と、どちらが大きいかによって残留ひずみが決まる。先に述べた室内要素試験の結果を適用するならば、この場合は死荷重だけが掛かっている時間の方が圧倒的に長いので、後者の効果の方が勝ると考えられ、図18の実測Bは、最大荷重がかかり続けた場合の曲線Cより小さな変形になる。したがって、もし、最大値および最小値の、一定の荷重がかかり続けた場合のクリープ変形をそれぞれ予測できれば、実際の変形量は、その間に入ると推測できる。ただし、要素試験は短時間であるのに対して、実際の橋台の挙動は非常に長期にわたるものであり、要素試験の結論を適用するには、さらに検討が必要である。

図-17 実施工の補強土橋台の側面図

図-18 実施工の補強土橋台の正面図

図-19 補強土橋脚・橋台の長期挙動

図-20 供用時の荷重の模式図

5. 結論

補強土橋脚模型、及び、盛土材の三軸供試体の、繰り返し载荷試験結果から、次のことが分かった。

- ・高い一定の圧縮荷重をかけ続けること、荷重を繰り返し変化させることは、ともに圧縮変形を促進する。
- ・ただし、繰り返し载荷を同時にかけた場合、応力が繰り返し変化することによるひずみの進行のほか、荷重が時間とともに変化する事による、クリープ変形量への影響も現れる。
- ・同じ荷重レベル、振幅での繰り返し载荷では、载荷速度が速いほうが変形が小さい。

これらの性質に基づくならば、供用時にかかる最大および最小の荷重がかかり続けたときのクリープ変形をそれぞれ予測できれば、列車荷重など、実際の繰返し荷重による長期変形量はその間に入ると予想される。ただし、上記の室内要素試験の結果を現現場に適用するにあたっては、さらに検討が必要だと思われる。

謝辞：本報告は運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」による研究の成果である。

参考文献

- 1) 柴田芳雄・平川大貴・篠田昌弘・内村太郎・龍岡文夫 (2001): 補強土橋脚模型の鉛直圧縮特性に及ぼす繰返し・荷重保持・荷重履歴の効果, ジオシンセティックス論文集, vol. 16, IGS日本支部, pp. 155-159.
- 2) Ko DongHee・伊藤寛倫・龍岡文夫 (2002): Development of residual strain in cyclic and creep loading triaxial tests on sand, 第37回地盤工学研究発表会発表講演集, Vol.1, pp.475-476.
- 3) 内村太郎・龍岡文夫・舘山 勝・古賀徹志 (1999): P L・P S 補強盛土の長期挙動, ジオシンセティックス論文集, vol.14, IGS日本支部, pp.155-164.

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF REINFORCED SOIL STRUCTURES UNDER SUSTAINED AND CYCLIC LOADING

Taro UCHIMURA, Yoshio SHIBATA, Daiki HIRAKAWA, Dong-Hee KO, Hironori ITO and Fumio TATSUOKA

Deformation characteristics under constant load by the overburden weights and the self weight, and large number of cycles of cyclic load in service, such as traffic loads, are important as a long-term performance of reinforced soil structure. It is important to know the deformation characteristics of the backfill materials and such structures under constant loads and cyclic loads. Cyclic loading tests on models of a reinforced soil pier, and triaxial specimen of a backfill materials were performed. A long-term measurement results of a prototype reinforced soil bridge abutment were also introduced and its deformation characteristics are discussed.

KEYWORDS: Reinforced soil, Deformation, Cyclic load, Creep load, Long-term deformation