

セメント改良粒調碎石盛土中のジオグリッド補強材の引抜き試験

内村太郎¹、龍岡文夫¹、青木一二三²、米澤豊司²、北野陽堂²

舘山 勝³、渡辺健治³、田村幸彦⁴、舩尾孝之⁵

良質な盛土材である粒度調整碎石をセメント混合により改良した盛土中に敷設された補強材の引き抜き試験を行った。同じ荷重レベルでの引き抜け量は、剛性の高いグリッドの方がかなり小さく、また、土被りが約2倍異なっても、拘束圧による引き抜け量の差は小さかった。また最大で約15mm～30mmの引き抜け変位が生じたが、荷重を除荷するとそのうち1/3程度が復元した。クリープ変位量も大きかった。また、同じジオグリッドの引張試験結果を別途行い、現場の引き抜け試験結果を比較する解析を行った。これらの結果から、柔らかい高分子補強材が、ジオグリッドが比較的固いセメント改良盛土材の中で引き抜かれる場合、張力の影響範囲が載荷とともに深い部分に拡大していき、セメント改良土と補強材のすべり特性だけでなく、補強材の引張変形特性が強く反映されていることが考えられる。

キーワード：ジオグリッド、引き抜き試験、セメント改良土、現場試験

1. はじめに

粒度調整碎石などの良質な盛土材をセメント混合により改良することで、高品質の土構造物を構築することができる。さらに、盛土内に補強材を敷設することで、安定性がより向上する可能性がある。その場合、比較的固いセメント改良盛土材の中で、柔らかい高分子補強材がどのように振舞うか、検討する必要がある。セメント改良とジオグリッドによる補強を併用した粒度調整碎石盛土で建設された新幹線橋梁の橋台部¹⁾（図1）において、セメント改良土盛土中のジオグリッドの引き抜き試験を行った。

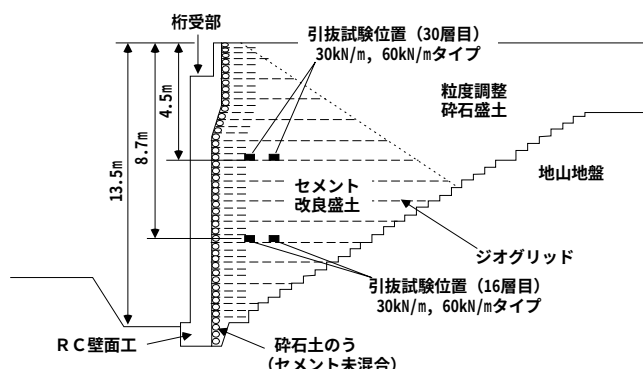


図1 補強セメント改良土橋台の概略図

2. 盛土の概要と試験方法

2. 1 盛土と試験片の概要¹⁾

橋台は、堀削した岩盤地山上に直接基礎で構築された。橋台盛土の前面、両側面とも、垂直な剛壁面補強土壁である。前面の三角形の盛土部分が、ジオグリッドで補強されたセメント改良粒度調整碎石 ($D_{max}=37.5\text{mm}$, $D_{50}=5.0$, $U_c=32.3$, $\gamma_d=2.60\text{g/cm}^3$, $w_{opt}=4.4\%$, セメント量=4%) である。また盛土補強に使われたグリッドは、ビニロン製で公称引張強度 30 kN/m、60 kN/m の2種類を組み合わせ、鉛直間隔 30 cm で敷設した（表1、図2）。

引き抜き試験用のグリッドは、30 kN/m、60 kN/m の2種類で、幅 139 mm（7ストランド）、長さ 70 cm（つかみ部を除く）の試験片を用意し、30 cm 間隔の補強材の中央高さに埋込んだ。さらに、2通りの高さ（下から16層目：土被り 8.7m、32層目：土被り 4.5m）に埋込み、合計4カ所で試験を行った。図3、図4に示すように、それぞれの試験片の端をチャック（鉄板で挟み、ねじで締付ける）でつかみ、引張ロッドと計測ロッドを接続して盛土外部まで引き出した。

1 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）

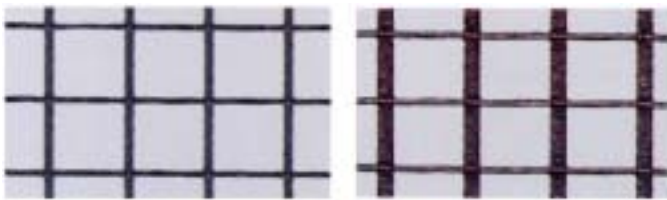
2 日本鉄道建設公団 3 財団法人鉄道総合技術研究所 4 株式会社複合技術研究所 5 太陽工業株式会社

表-1 ジオテキスタイルの諸元

試料区分	試料-A (30kN/m タイプ)	試料-B (60kN/m タイプ)
主材料	ビニロン繊維	
被覆材料	ポリ塩化ビニル	
単位面積質量(g/m ²)	200	320
公称目合(mm×mm)	20×20	
設計基準破断強度(kN/m)	38	74
製品保証値(kN/m)	31	59

◎今回の試験片の実測

引張試験の破断強度(kN/m)	54	87
ストランド間隔	51 本/m	47 本/m



30kN/m タイプ

60kN/m タイプ

図2 ジオテキスタイルの外観

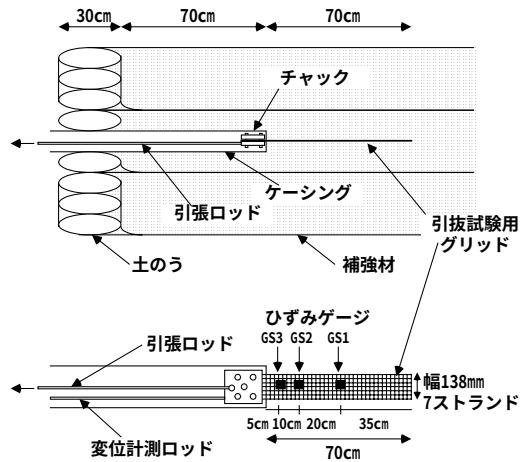


図3 グリッド引き抜き試験の概略図

a)



b)



c)



図4 引き抜き試験片の設置状況 a) 敷設状況 b) つかみ部 (破断後) c) つかみ部 (分解時)

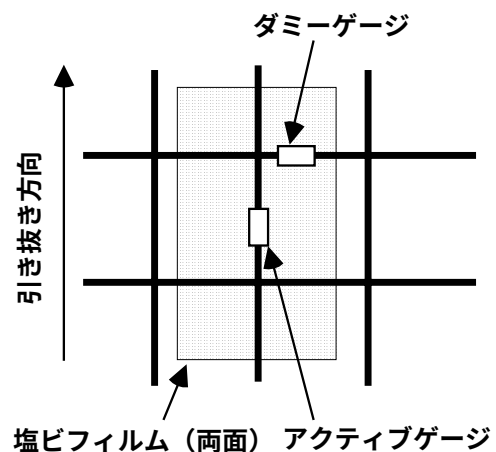


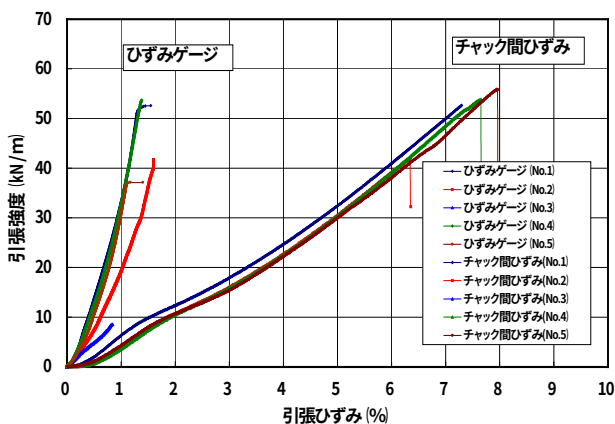
図5 ひずみゲージの取付け概要図

試験片には、図3に示す位置にひずみゲージを貼り、グリッドの伸びひずみの分布を測った。面状補強材を構成するストランド（繊維糸）に直接ひずみゲージを取り付けることは、繊維の幅や形状（丸み）の影響等で困難であることから、あらかじめ補強材の両面に、塩ビフィルム（厚さ $t=1\text{ mm}$ ）を熱風溶着機で補強材の被覆材を溶かしながら貼り付け一体化させ、その表面の、ストランド上（接点と接点の中間）にひずみゲージを貼った。また、ダミーゲージは横軸上に貼った（図5）。ゲージは裏表両面に貼ることで、曲げをキャンセルした。塩ビフィルムは補強材より柔らかく、補強材の伸びにほぼ追従すると思われるが、その影響を小さくするために、フィルムの大きさは、ひずみゲージ取り付けポイントを中心にした格子内に収まるようにした。ひずみゲージ取付け後、防水性を考慮し塩ビフィルムで防水加工を施し、さらに保護のために、ストランド2本分の幅のアルミシールを貼り付けた。同じようにひずみゲージを貼り付けた試験片で、引張試験を行った結果を図6に示す。張力と引張ひずみの関係には、若干の非線形性があり、またチャック間の距離で測ったひずみ（ ε_c ）とひずみゲージの出力（ ε_g ）にはかなりの差があった。直線近似により、次の補正式を求めた。

$$30\text{ kN/m タイプ} : \varepsilon_c = 5.36 \times \varepsilon_g$$

$$60\text{ kN/m タイプ} : \varepsilon_c = 7.56 \times \varepsilon_g$$

a)



b)

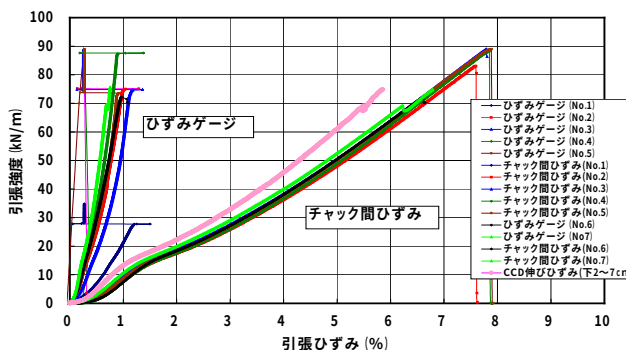


図6 a) 30kN/m タイプ と b) 60kN/m タイプ の引張試験結果とひずみゲージ出力、チャック間ひずみの比較

2. 2 引き抜き試験の載荷方法

図7はそれぞれのグリッドに加えた引張り荷重の時刻歴である。段階的に荷重レベルを変えながら、繰返し載荷とクリープ載荷を組み合わせた。グリッドの破断強度に応じた最大荷重を決めて、この最大荷重を8分割した各荷重段階で、繰返し載荷、荷重保持（60分および120分）、除荷時の荷重保持（5分および30分）を行った。除荷時は完全に除荷するのではなく、0.3kNの荷重を保ち、ジャッキや計測系のゆるみを防いだ。また、試験箇所の高さによって載荷パターンを2通りに変えた。

繰返し載荷を行ったのは、この橋台の耐震性を検討するためである。この橋台では、RC壁面頂部に橋桁が固定されており、地震時の橋桁の慣性力は壁面を介してグリッドの引き抜き力として盛土に伝えられる。従って、グリッドには繰返し荷重がかかることが想定され、そのときの挙動を検討しておく必要がある。

最大荷重としては、図6の引張試験で得られた破断強度を用いたが、最初に行った 30kN/m タイプ、30層目の試験で、これより低い荷重で破断したため、他の3つの試験では図6の破断強度0.75倍を最大荷重とした。図4b,cの写真で、その破断状況を確認できる。7本のストランドのうち、両側の合計5本がつかみ部で破断しており、中央の2本はより深いところで切れている。写真に見えるように、中央のストランドにはひずみゲージを保護するためのアルミシールが貼ってあるが、これが、中央2本のセメント改良盛土材との付着を弱めたため、両側の5本が主に引張荷重を受けて先に破断し、次に中央の2本に荷重が集中して、アルミシールより深いところで切れたものと想像される。実際にこれらの引き抜き試験で破断した荷重は、室内の引張試験の結果から推定される、ストランド5本分の破断強度に近い。しかし、破断前の状態では、後に述べる中央のストランドのひずみゲージの出力もものびひずみを示しており、中央の2本が全く効かなかったとも考えられない。

いずれにしても、グリッドのつかみ部での破断が生じており、セメント改良盛土中の盛土材とグリッドの付着強度は十分高いといえる。

図8、図9に、各グリッドの載荷端（つかみ具）の引き抜き変位の時刻歴と引張り荷重との関係を示す。同じ荷重レベルでの引き抜け量は、剛性の高い 60 kN/m タイプのグリッドの方が 30 kN/m タイプよりも、かなり小さい。また高さ 16 層目と 30 層目では土被りが約 2 倍異なるが、拘束圧による引き抜け量の差は小さい。載荷後の荷重保持時は、時間とともに引き抜けが増加している（図中A）。それぞれ最大で約 15mm～30mm の引き抜け変位が生じているが、荷重を除荷するとそのうち 1/3 程度が復元し、その後の低荷重保持時も、弾性余効で載荷端が盛土内に引き込まれている（図中B）。セメントで固化した粒度調整碎石の盛土材がこれほどの弾性を示すとは考えにくい。またクリープ変位量も大きく、補強材の変形特性が強く反映されていることが考えられる。

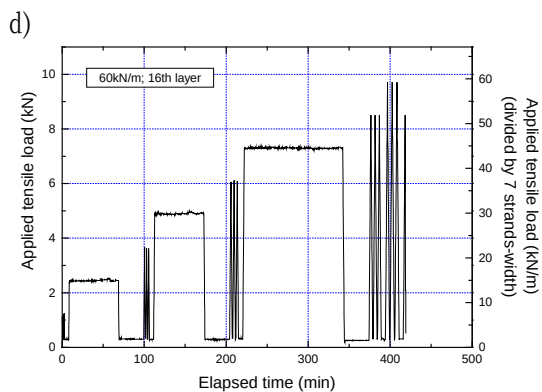
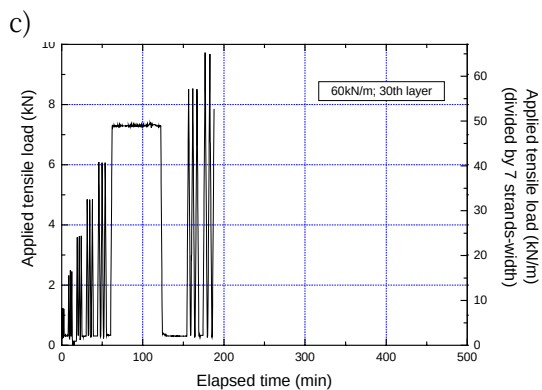
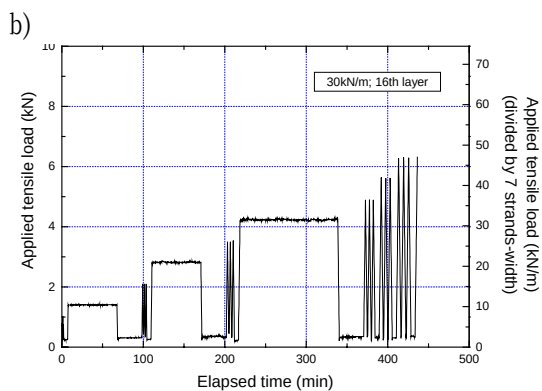
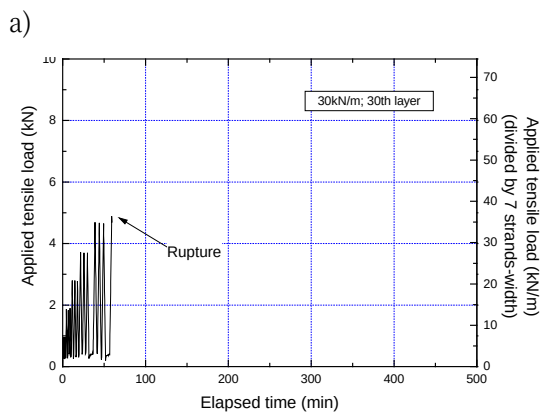


図7 引き抜き試験の荷重パターン

- a) 30kN/m タイプ, 30 層目(土被り 4.5m)
- b) 30kN/m タイプ, 16 層目(土被り 8.7m)
- c) 60kN/m タイプ, 30 層目(土被り 4.5m)
- d) 60kN/m タイプ, 16 層目(土被り 8.7m)

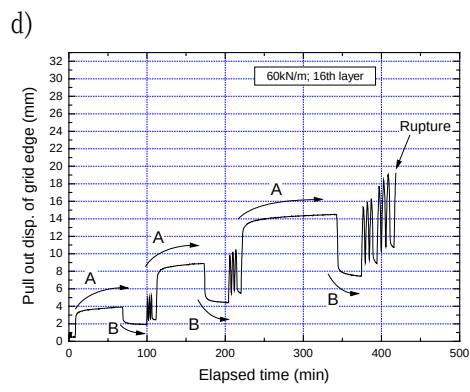
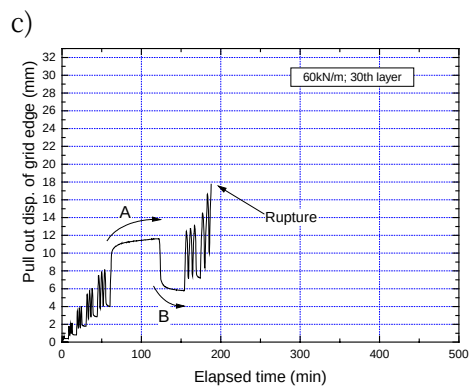
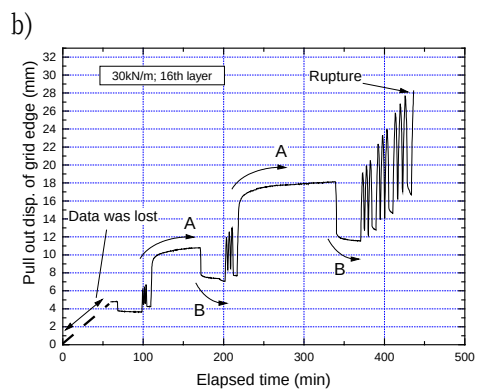
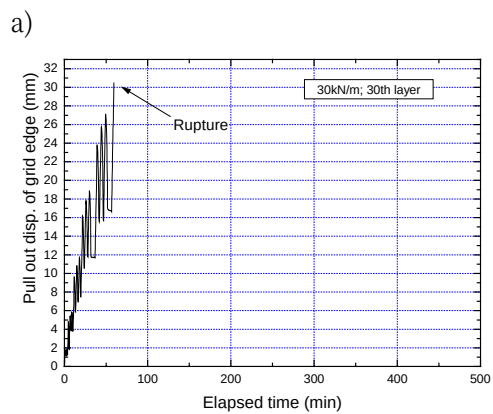


図8 つかみ部の引き抜け変位の時刻歴

- a) 30kN/m タイプ, 30 層目(土被り 4.5m)
- b) 30kN/m タイプ, 16 層目(土被り 8.7m)
- c) 60kN/m タイプ, 30 層目(土被り 4.5m)
- d) 60kN/m タイプ, 16 層目(土被り 8.7m)

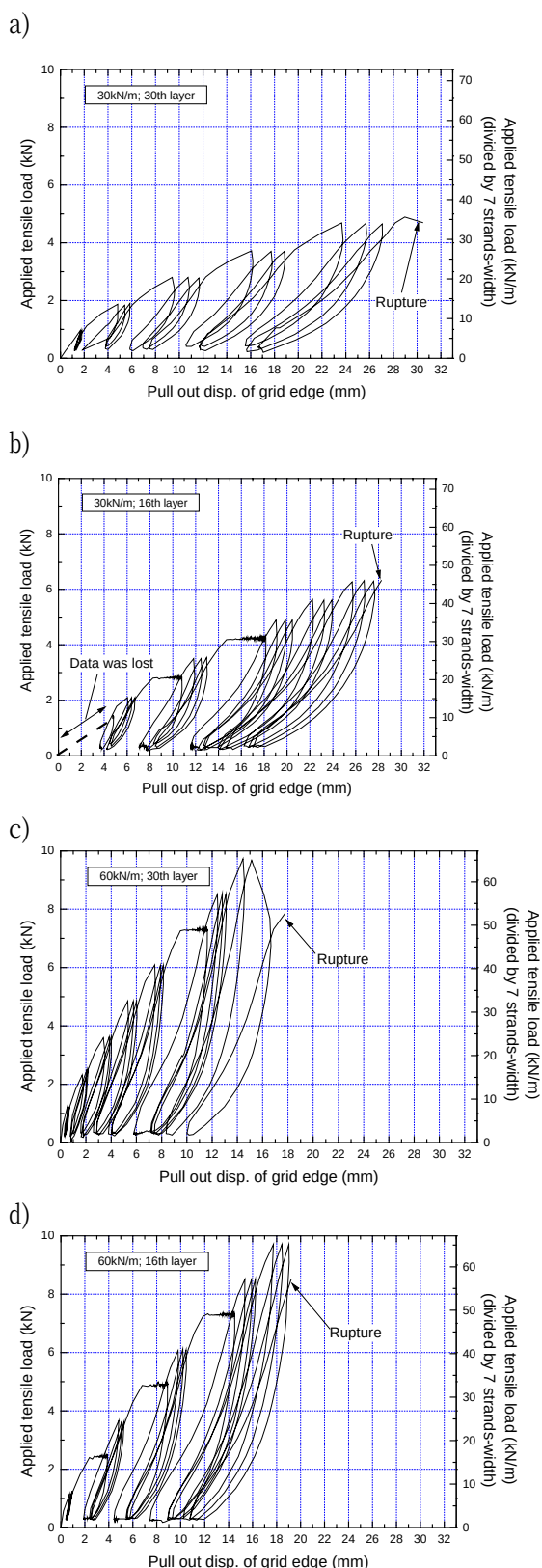


図9 引き抜き荷重とつかみ部の引き抜け変位の関係

- a) 30kN/m タイプ, 30 層目(土被り 4.5m)
- b) 30kN/m タイプ, 16 層目(土被り 8.7m)
- c) 60kN/m タイプ, 30 層目(土被り 4.5m)
- d) 60kN/m タイプ, 16 層目(土被り 8.7m)

3. グリッドの室内引張試験からの考察

3. 1 室内引張試験²⁾

現場の引き抜き試験に用いられたものと同じタイプのグリッド (60 kN/m タイプ) について、室内で引張試験を行った。現場でかけたのと同じ荷重パターンを用いて、現場での引き抜け挙動と比較した。

荷重装置は応力制御で、試験片は3ストランド (巾 149mm) である。両端は巻き込み式のつかみ具で引張り、中央の 60mm の部分がゲージ長となるようにレーザー変位計を付けて、局所ひずみを計測した (詳細は文献 2)。

図 10a が、荷重パターンである。前述のとおり、現場の引き抜き試験で7本のストランドが等しく効いていないと思われるため、室内引張試験での引張り応力をいくらにすればよいか判断が難しいが、室内引張試験での破断荷重を最大荷重とした。また、現場では数秒間で荷重を1段階増やして、約10秒かけて計測するという手順を原則としたが、室内引張試験では荷重速度を一律 30 kN/min とし、1秒ごとに計測を行った。

図 10b, c が、引張りひずみの時刻歴および引張り応力との関係である。

対応する現場の引き抜き試験結果 (図 8d) と比較すると、室内の引張試験の方が、全体ののびひずみに対する荷重保持時のクリープの割合が少なく、また引張試験では荷重時の全体の応力ひずみ関係が下に凸 (高荷重ほど固くなる) なのに対して、現場の引き抜き試験の方は上に凸になっている。

3. 2 グリッド張力の到達範囲の推定

この比較をより定量的にするために、互いに対応する荷重段階ごとに、現場の引き抜き試験での引き抜け量と、室内引張試験の引張ひずみとの比を求めた (図 11)。これは、室内引張試験での引張ひずみで、現場の引き抜け量が得られるためには、どのくらいのグリッドの自由長が必要かを表している。

本来は、グリッドの応力は、盛土材との摩擦力に応じて深いところほど小さくなり、一様ではないはずであるが、手前からある距離までのグリッドが盛土材との付着を完全に失って、応力が一様であると仮定している。

また、実際には、早くから盛土材との付着を失った手前の部分より、あとから付着を失って張力がかかり始めた深い部分の方が、ひずみが小さいはずであるが、この計算では、応力が一様であればひずみも一様であることが仮定されている。

このように、グリッドの引き抜け量を空中での室内引張試験時のひずみでそのまま割り算することは、必ずしも正確ではない。後述のとおり、グリッドに貼ったひずみの出力は、深い部分ほど小さくなる傾向があり、またある程度深い部分でも、荷重初期からのびひずみを示している。これは、グリッドの張力がどのくらいの深さまで伝わっているかを表す指標と考えればよいだろう。

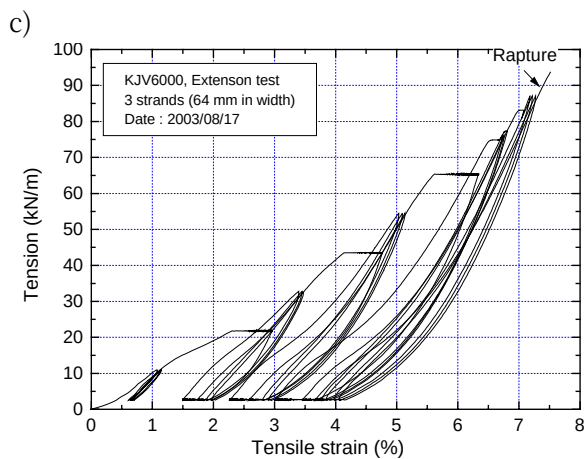
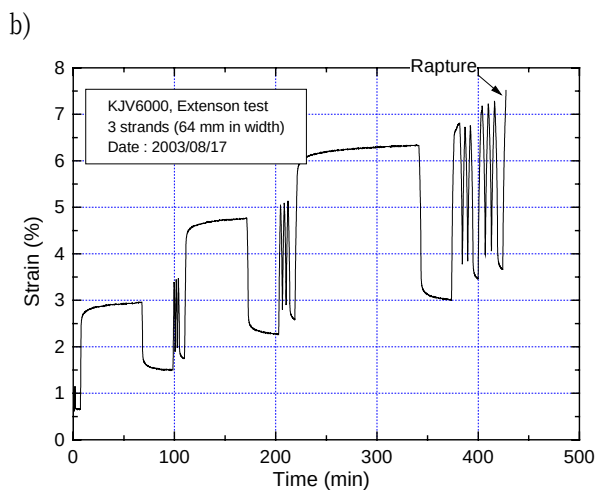
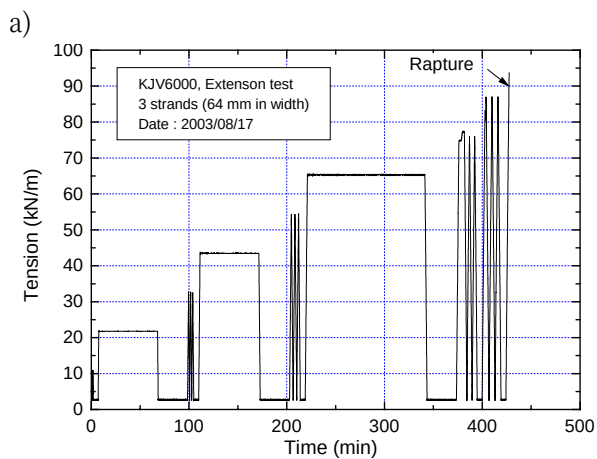


図10 ジオグリッド(60kN/m タイプ)の引張試験結果
a) 応力履歴 b) ひずみ履歴 c) 応力ひずみ関係

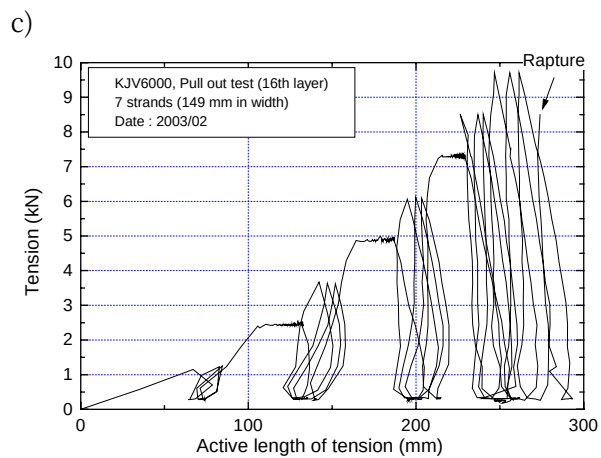
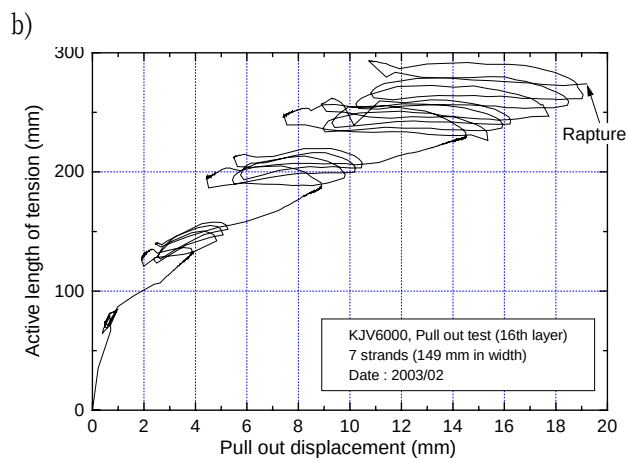
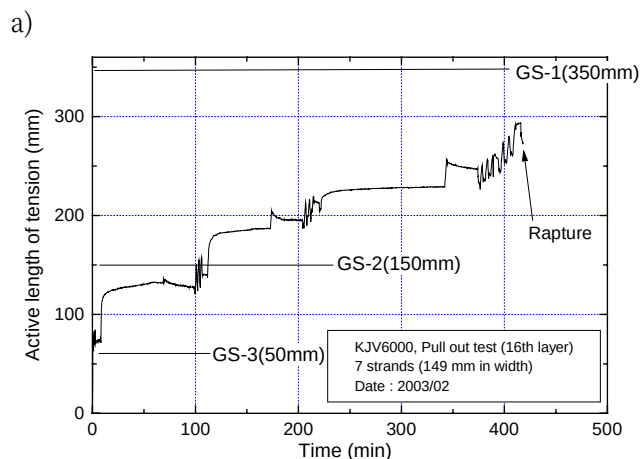


図11 推定された張力到達長さ a) 時間との関係
b) 引き抜き量との関係 c) 引き抜き荷重との関係

図1 1から、荷重が増加するときと、荷重保持によりクリープによる引き抜けが生じているときには、張力の到達距離が深い部分へ広がっていく様子を読みとれる。また、除荷および繰り返し載荷時には、張力の到達距離はほとんど変化しないことが分かる。これより、補強材と盛土材との付着は、それまでの最大荷重がかかったときと、それが保持されるときに、手前から奥に向かって失われていき、除荷時や繰り返し載荷時には余り変化しないことが分かる。

砂礫や粘性土などの通常の盛土材と違って、セメント改良された粒度調整採石の場合、セメントが適切に混合されていれば、グリッドの材質よりもかなり固く、比較的小さなひずみで脆性的にグリッドとの付着が全く失われることが予想され、そのためにこれらの現象が顕著に見られているのかもしれない。

4. グリッドのひずみゲージの出力

図1 2に、現場の引き抜き試験で、グリッドに貼ったひずみゲージの出力から求めたグリッドのひずみを示す。測定点 GS-1, GS-2, GS-3 の位置は、図3に示したとおりである。

どの試験でも、つかみ部に近いほどのびひずみが大きくなっており、グリッドのひずみが一様でないことを示している。特に、16層目（土被りの厚い場所：図1 2 b,d）では、つかみ部から35cmのGS-1ののびひずみは、それより手前の部分に比べてかなり小さく、盛土材とグリッドの付着による張力の減少が大きいことを示している。図1 1aの解析結果にも、ひずみゲージの位置を示してあるが、グリッドの張力の到達範囲は最大でも30cm程度であり、距離35cmのGS-1のひずみが小さいこととも一致する。また、GS-2とGS-3は、ひずみの大きさには差があるが、どちらも載荷初期からひずみが生じているのに対し、解析でも初期からGS-2の近くまで張力が及んでおり、この点も一致する。

30層目（土被りの薄い場所：図1 2 a,c）では、載荷の初期に補強材が破断したり、ひずみゲージが早い時期に測れなくなったりして、十分な検討ができないが、つかみ部に近いほどひずみが大きい傾向は同じである。ただし、図1 1bでは、つかみ部から35cm離れたGS-1も、載荷初期からのびているようである。

つかみ部に近いGS-3でのひずみの最大値は11%以上であり、これは室内の引張試験で得られた最大ひずみを越えている。グリッドにひずみゲージを貼り付けてひずみを測る方法は、定量的な検討に用いるときは注意が必要かもしれない。

また、図1 2b,dのAの部分で顕著に見られるように、載荷後に荷重保持して、クリープによる引き抜けが進行しているとき（図8のA）に、ひずみゲージの示すひずみは、かなり大きな収縮を示している。逆に、除荷後に低い荷重を保持して、グリッドの端が盛土内に引き戻さ

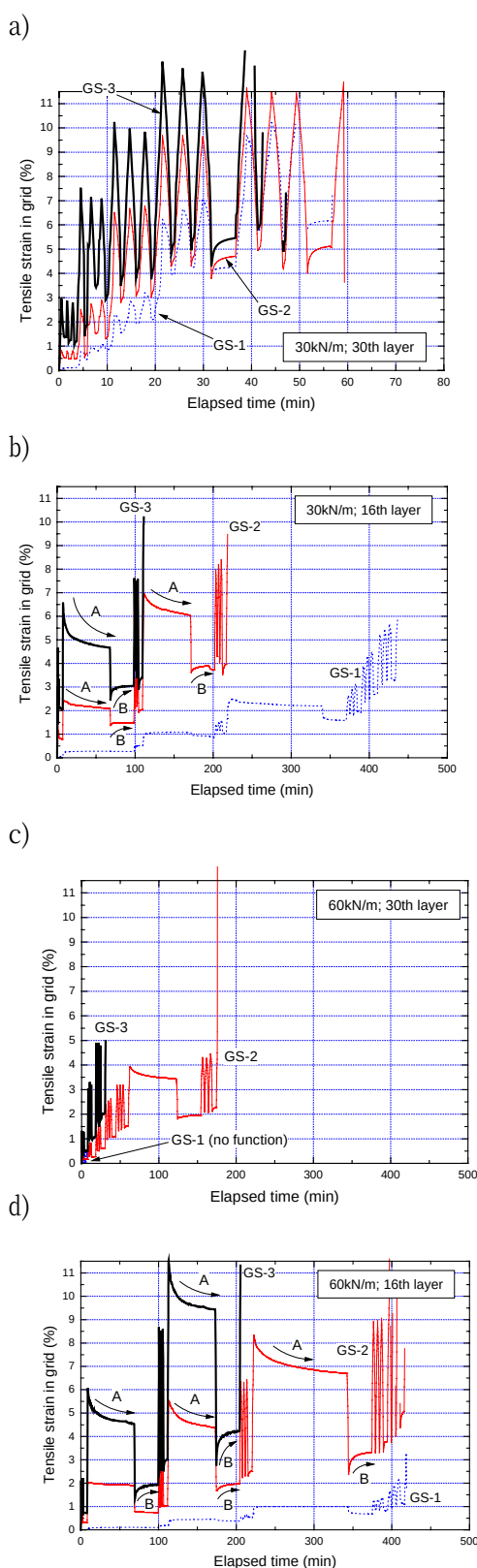


図1 2 ジオグリッド上のひずみゲージの出力
(GS-1～3 はつかみ具からの距離が5cm, 15cm, 35cm)

- a) 30kN/m タイプ, 30層目(土被り4.5m)
- b) 30kN/m タイプ, 16層目(土被り8.7m)
- c) 60kN/m タイプ, 30層目(土被り4.5m)
- d) 60kN/m タイプ, 16層目(土被り8.7m)

れているとき(図8のB)には、ひずみゲージのひずみは伸張を示している。これらが、つかみ部に一番近いGS-3は、つかみ部から5cmしか離れていないにもかかわらず、互いに逆向きの挙動を示している。これが実際に起きている現象だとしたら、非常に不可解である。

一方で、補強土構造物に鉛直方向に荷重を載荷・除荷して荷重保持したときの補強材の挙動については、同様に常識とは逆の伸縮挙動が見られている(文献3など)。すなわち、鉛直圧縮荷重をかけて荷重保持し、盛土が鉛直方向にクリープ圧縮しているときに、補強材も水平方向に収縮し、逆に除荷後に低い荷重を保持して盛土が鉛直方向に膨張しているときには、補強材がのびる挙動が観察されている。

ひずみゲージの貼り方など他の要因による誤測定の可能性もあるが、普遍的な現象である可能性もあり、今後検討する価値がある。

5. まとめ

セメント改良とジオグリッドによる補強を併用した粒度調整碎石盛土で建設された新幹線橋梁の橋台部において、セメント改良土盛土中のジオグリッドの引き抜き試験を行った。グリッドの埋め込み深さは70cmだったが、いずれの試験でも、グリッドがつかみ部のそばで破断し、セメント改良された盛土材との付着は良好であった。

同じ荷重レベルでの引き抜き量は、剛性の高い60 kN/mタイプのグリッドの方が30 kN/mタイプよりも、かなり小さかった。また土被りが約2倍異なっても、拘束圧による引き抜き量の差は見られなかった。載荷後の荷重保持時は、時間とともに引き抜きが増加した。荷重を除荷すると、引き抜き量の1/3程度が復元し、その後の低荷重保持時も、弾性余効で載荷端が盛土内に引き込まれた。セメントで固化した粒度調整碎石の盛土材がこれほどの弾性を示すとは考えにくく、柔らかい高分子補

強材が、ジオグリッドを比較的固いセメント改良盛土材の中で引き抜かれる場合、セメント改良土と補強材のすべり特性だけでなく、補強材の引張変形特性が強く反映される。

同じグリッドの室内引張試験の結果との比較から、引き抜き張力が、グリッドのどの程度深い部分まで伝わっているかを推定した。荷重が増加するとき、荷重保持によりクリープによる引き抜きが生じているときには、張力の到達距離が深い部分へ広がっていく様子が読みとれる。また、除荷および繰り返し載荷時には、張力の到達距離はほとんど変化しないことが分かる。砂礫や粘性土などの通常の盛土材と違って、セメント改良された粒度調整採石の場合、セメントが適切に混合されていれば、グリッドの材質よりもかなり固く、比較的小さなひずみで脆性的にグリッドとの付着が全く失われることが予想され、そのためにこれらの現象が顕著に見られているのかもしれない。

グリッドに貼り付けたひずみゲージの出力からは、グリッドのひずみは一樣でなく、深いところほどひずみが小さいことが確認できた。

参考文献

- 1) 青木一二三ら(2003): ジオテキスタイルを用いたセメント改良補強土橋台の現地載荷試験結果, ジオシンセティックス論文集, vol.18, IGS日本支部.
- 2) 平川大貴・龍岡文夫・内村太郎(2001): ジオグリッドの時間依存変形特性とその構成モデルの検討, ジオシンセティックス論文集, vol.16, IGS日本支部, pp.19-26.
- 3) 内村太郎・舘山勝・田中郁夫・龍岡文夫(2001): P L・P S補強土橋脚の鉛直繰返し・クリープ載荷試験, ジオシンセティックス論文集, vol.16, IGS日本支部, pp.147-154.

PULLOUT TESTS ON GEOGRID IN A CEMENT-MIXED WELL-GRADED GRAVEL

Taro UCHIMURA, Fumio TATSUOKA, Hifumi AOKI, Toyoji YONEZAWA, Yodo KITANO
Masaru TATEYAMA, Kenji WATANABE, Masahiko TAMURA, Takayuki MASUO

Pullout tests on geogrid in a cement-mixed well-graded gravel backfill were performed. The pullout displacements of the geogrid were smaller for a geogrid with a higher stiffness, and were not much different even if the confining pressure on the geogrid were different twice. The pullout displacement was 15 - 30 mm in maximum, and one third of them recovered when the pullout load was released. It also showed large creep increment under constant loading. Extension tests were also performed on the same type of geogrid in a laboratory, and its results were compared with those from the pullout tests. As a conclusion, pullout behaviours of a relatively soft reogrid in a stiff cement-mixed gravel is largely affected by the extension property of the geogrid itself, as well as by the slippage property between the geogrid and the backfill materials.

KEYWORDS: Geogrid, Pullout test, Cement-mixed soil, Field test