

プレローデッド・プレストレスト補強土工法の 原理と実物大模型実験計画

Working Principles of Preloaded and Prestressed Reinforced Soil Retaining Walls
and Their Full-Scale Model Test Program

内 村 太 郎*・龍 岡 文 夫*・佐 藤 剛 司*・館 山 勝**

Taro UCHIMURA, Fumio TATSUOKA, Takeshi SATO and Masaru TATEYAMA

1. は じ め に

鉄道・道路の高架構造物や橋台など、変形に対して厳しい基準の設けられている構造物には、ほとんどの場合土構造物ではなく RC 構造物が採用される。これは、土構造物は強度が低い、剛性が低い、地震時にゆり込み沈下をおこすなどの弱点をもつからである。しかし、杭基礎を省略できたり現場発生土を利用できると、RC の構造物に比べてかなり安価になる。また延性的であるため、基礎地盤の変形にも致命的な破壊にいたらず柔軟に対応できるという利点がある。補強土は、両者の長所を生かし欠点を補うことができる。今回の阪神・淡路大震災でも、その耐震性が高いことが示された¹⁾。

この度、ジオテキスタイル補強土擁壁およびその応用である橋台の強度、剛性、耐震性を飛躍的に高めるために、補強された裏込土にあらかじめ鉛直方向に圧縮プレロードを加え、使用時にも圧縮応力（プレストレス）をかけておくプレローデッド・プレストレスト補強土工法を提案した（図 1）。この工法の効果を確認するために、1995 年 2 月から盛土の実物大模型を建設し、それによる実験を行っている。本報では、本工法の原理と、模型実験の概要を述べる。次報では、模型実験の詳細を報告する。

2. 工 法 の 概 要

裏込盛土内に鉛直方向に数本の張力材（アンカー鋼棒等）を挿入して張力を加え、両端の反力板を介して土に圧縮力をかける（図 1）。水平方向にはジオテキスタイルを配置してあるので、裏込盛土はプレロードに耐える圧縮強度が十分にある。一度高い応力で土の先行圧縮を行ったのち、その応力の一部を除荷して張力材と反力板とを固定す

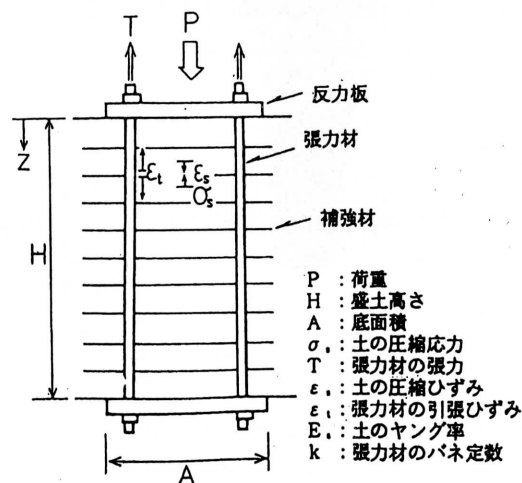


図 1 プレローデッド・プレストレスト補強盛土工法

る。

3. メ カ ニ ズ ム

3.1 補強材による土の拘束圧の発生

図 2 は、 ε_3 方向に様々な補強材を入れた豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験の結果である²⁾。GM と GC が不織布を入れたもの、△が無補強のものである。剛性の低い不織布を挿入した場合でも圧縮強度が増加する。不織布は土よりもポアソン比が小さいため（ほとんど 0）、軸圧縮に伴って生ずる砂の水平伸びひずみのために不織布の面内水平方向に張力が生じて、砂が横方向に拘束されるからである。他の補強材（粗な銅板 BR、なめらかな銅板 B、ウレタン U、ネオプレン N、ラテックス L）では、ヤング率に応じて補強効果が変化している。補強盛土にプレストレスが加えてあると、同様に補強材に張力が入り、土を拘束して剛性と強度が向上する。

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

** 鉄道総合技術研究所

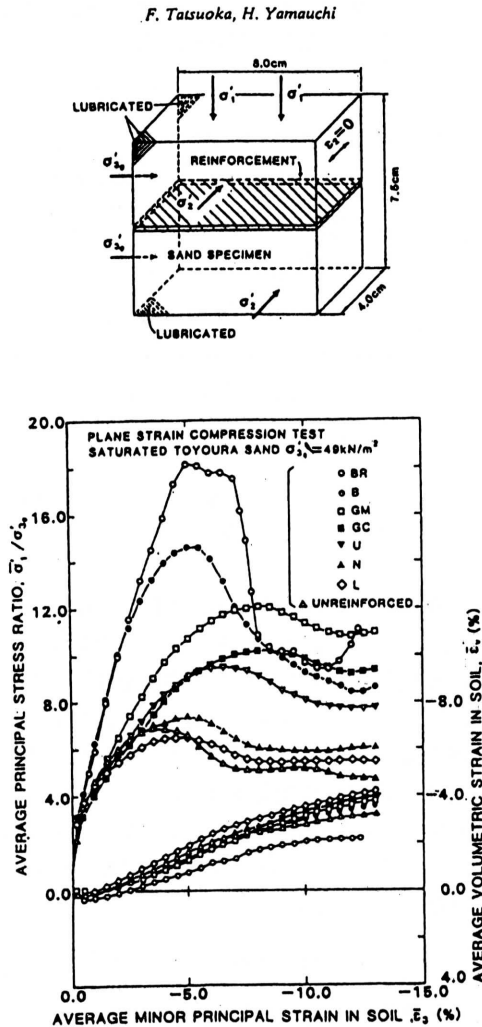


図2 補強した豊浦砂の平面ひずみ試験結果

3.2 塑性変形が生じないこと

図3は、非常に密な ($\gamma_d = 2.20 \sim 2.25 \text{ kgf/cm}^3$) 良配合のレキ (採石砂岩) の三軸圧縮試験で、圧縮の途中で微小な除荷・再載荷を行った結果である²⁾。弾性ひずみと塑性ひずみの両方が含まれている初期載荷での変形に対する接線変形係数 E_{tan} に比べて、弾性変形のみが生じている除荷・再載荷時の変形係数 E_{eq} の方が、はるかに大きい。

先行圧縮後に除荷すれば、供用開始後に圧縮荷重が再びかかると、土は弾性状態で再載荷を受ける。従って、初期載荷の場合よりも、はるかに高い剛性が得られる。

3.3 圧縮力による土の剛性の増加

図4は、図3に示す試験および同様な試験で得られた三軸圧縮中の軸応力 σ_a と弾性ヤング率 E_{eq} の関係である⁴⁾。 E_{eq} は、ほぼ σ_a のみの関数であることが分かっており、

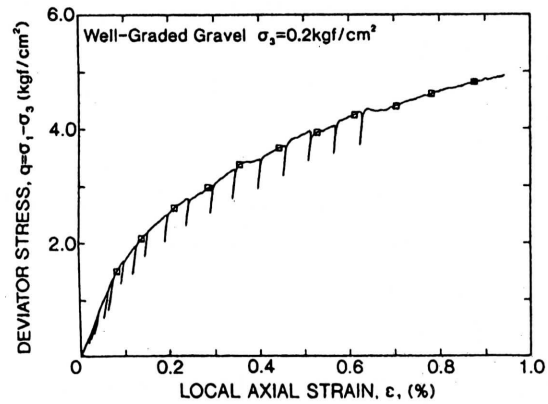


図3 締固めレキの三軸繰返し載荷試験結果 (応力-ひずみの関係)

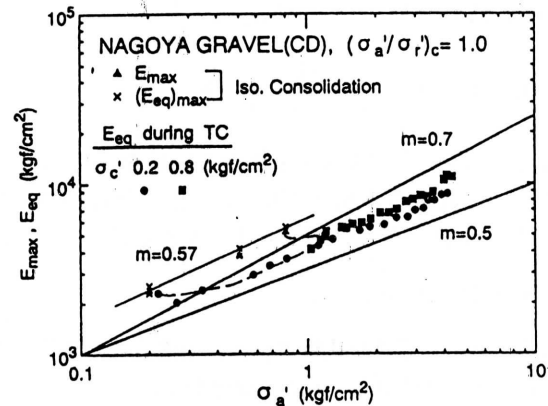


図4 締固めレキの三軸繰返し載荷試験結果 (軸応力-ヤング率の関係)

$$E_{eq} = E_0 \cdot (\sigma_a / \sigma_0)^m \quad \text{ただし } \sigma_0 = 1 \text{ kgf/cm}^2 \quad (1)$$

の関係でモデル化できる。図4の例の場合、 $m = 0.57$ である。盛土は、プレストレスによって圧縮応力 σ_a を受けており、それに応じて弾性ヤング率 E_{eq} が増加する。同時に、土のせん断剛性も増加するので、裏込盛土のせん断変形による補強土擁壁の前倒れが抑制され、耐震性が向上する。

3.4 張力材の剛性

一般には、鋼棒のような細長い部材は、座屈するために高い圧縮荷重を受け持つことはできない。しかし、本工法では張力材に張力が入っていて、土の圧縮力とつりあっているため、圧縮力を受けたとき、張力が緩和することによって圧縮荷重の一部を受け持つことができる。

研究速報

図1で、簡単のために線形弾性の材料とし、鉛直力による変形だけを考える。まず、プレストレス T_p (> 0) がかけられている場合、全体のつりあい方程式は

$$P = \sigma_s \cdot A - T_p \quad (2)$$

である。土と張力材の構成式は E_s と k が一定、 $T = T_p$ のとき $\sigma_s = (\sigma_s)_p$ 、 $\varepsilon_s = \varepsilon_t = 0$ とすると

$$\sigma_s - (\sigma_s)_p = E_s \cdot \varepsilon_s \quad (3)$$

$$T - T_p = k \cdot \varepsilon_t \quad (4)$$

である。はじめに $T = T_p$ の状態でつりあわせて固定してあるので、 $(\sigma_s)_p \cdot A = T_p$ であり、また常に

$$\varepsilon_s = -\varepsilon_t \quad (5)$$

である。式(2)~(5)より沈下量 S_p は、

$$S_p = \varepsilon_s \cdot H = \frac{H}{(K + E_s \cdot A)} \cdot P \quad (6)$$

となる。つぎに、プレストレスがない場合 ($T_p = 0$)、外部から圧縮荷重 P が加えられると、張力材は座屈するとすれば、土だけが荷重を受け持ち、変形量は

$$S_n = H \cdot P / (E_s \cdot A) \quad (7)$$

となる。式(2)と式(7)を比較すれば、土構造物の剛性は $1 + k / (E_s \cdot A)$ 倍に増加することが分かる。

4. 1次元圧縮モデルでの試算

上記のメカニズムのうち、剛性に関わる3.2~4を考慮して、簡単な1次元圧縮のモデルでプレストレスの効果を試算した。モデルは3.4の計算と同じである(図1)。鉛直力による圧縮だけを考える。ただし、土の自重も考慮する。 E_s は密度 γ と天端からの距離 z の関数で、式(1)より

$$E_s = E_{eq} = E_0 \cdot \{(\sigma_{s0} + \gamma \cdot z) / \sigma_0\}^m \quad (8)$$

ただし σ_{s0} は $z = 0$ での σ_s

まず、プレロードとプレストレスを行う場合、十分な先行圧縮の後に T_p まで除荷するとし、そのときを土のひずみ量 ε_s の原点とする。式(3)のかわりに式(1)より導いた構成式

$$\varepsilon_s = \int_{T_p/A}^{\sigma_{s0}} \frac{d\sigma}{E_s} \quad (9)$$

を用い、式(5)のかわりに

$$\int_0^H \varepsilon_s \cdot dz = -\varepsilon_{s0} \cdot H \quad (10)$$

を用いる。式(2) ($z = 0$ で成立) と式(4)、(8)、(9)、(10)より、

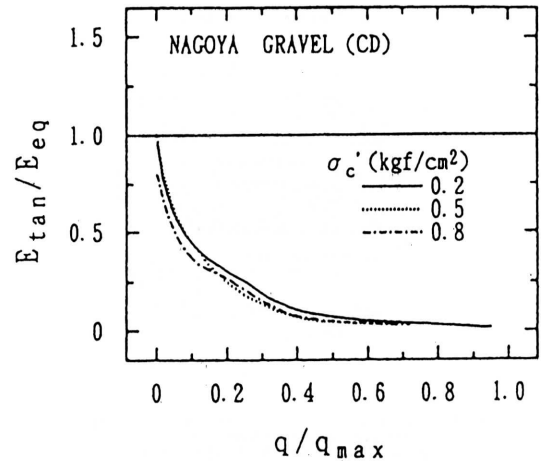


図5 締固めレキの三軸繰返し載荷試験結果 (E_{tan}/E_{eq} と q/q_{max} 関係)

施工後の荷重 P による沈下量 S_p が求められる。

つぎに、プレロードとプレストレスがない場合、式(8)のかわりに塑性変形を考慮した変形係数を使う必要がある。

図5は、図3に示した試験で E_{tan} と E_{eq} の比を荷重 q とピーク強度 q_{max} の比に対してプロットしたもので、拘束圧によらずほぼ一定の関係がある⁵⁾。そこで、 q/q_{max} が常に一定値であると仮定した(土圧係数が一定に保たればこのようになる)。そのときの E_{tan}/E_{eq} 求めるのに図5を用いた。ヤング率は

$$E_s = (E_{tan}/E_{eq}) \cdot E_0 \cdot \{(\sigma_{s0} + \gamma \cdot z) / \sigma_0\}^m \quad (11)$$

となる。初期荷重 P_0 として、その後の荷重 P による沈下を求めるるとすれば、式(9)の積分は P_0/A から $(P_0 + P)/A$ の範囲で行う。ひずみ ε_s を z について0から H まで積分すれば沈下量が求まる。

試みに、以下の数値 (γ , E_0 , m は図5の試験に近い値) で計算した。沈下量は、プレロードとプレストレスがないとき0.81 cmであるのに対し、プレロードとプレストレス T_p があるときは0.10 cmとなった。

$$\begin{aligned} P &= 120 \text{ tf}, A = 6 \text{ m}^2, H = 5 \text{ m}, \gamma = 2.25 \text{ gf/cm}^3 \\ E_0 &= 5000 \text{ kgf/cm}^2, m = 0.57, q/q_{max} = 0.3 \\ E_{tan}/E_{eq} &= 0.195 \text{ (図5より)} \\ k &= 3.3 \cdot 10^5 \text{ kgf/cm}, T_p = 60 \text{ tf}, P_0 = 12 \text{ tf} \end{aligned}$$

5. 予想される問題

5.1 応力緩和によるプレストレスの抜け

この工法ではプレストレスをかけて土と張力材の相対変位を固定するので、施工後の土の応力緩和のために、時間

とともにプレストレスが抜ける可能性がある。ただし、プレロードを強くかけたり何度も繰り返したりしてから除荷して固定すれば、応力緩和の速度はかなり遅くなるのではないかと考えている。また、張力材としてFRPのような剛性の低いものを使うことも有効であろう。

5.2 水浸によるコラプス

プレストレス状態の補強盛土が降水などによって水浸を受けた場合、強い圧縮力を受けている土がコラプスし、プレストレスが抜ける可能性がある。実物大の補強盛土の試験では、降水に伴う変形は1年目の雨でおこり、2年目以降はほとんど変形しない²⁾。プレロードを加えながら水浸による変形を経験させることで対処できるかもしれない。

6. 模型実験の計画

プレローデッド・プレストレス補強土工法の実現可能性を確かめるため、1995年2月から千葉試験所に実物大の模型盛土を建設している。図6は8つある試験断面のうち

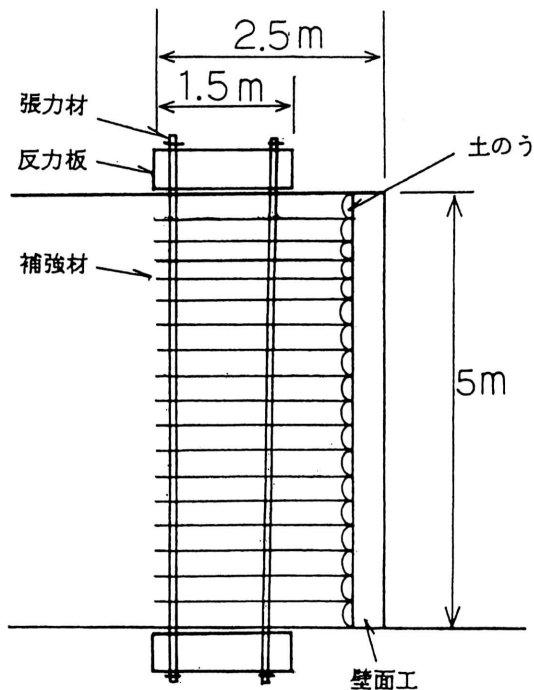


図6 実物大プレローデッド・プレストレス補強盛土の断面図（一例）

の一つである。盛土材料には粒調採石と関東ロームを用い、補強材としてポリマーグリッドまたは織布-不織布複合材、張力材として鋼棒を使っている。高さ5m、奥行き4m、反力板は4m×1.5mで、4本の張力材を挿入した。補強材は30cmの上下間隔で配置した。各試験断面は、側面をコンクリートの隔壁ではさまれており、平面ひずみ状態にある。壁面工は、今後プレストレスをかけてから、若干の鉄筋補強をした一体のコンクリート壁を現場打ちする予定である。

以上の試験盛土の詳細は次報で報告する。

(1995年5月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 龍岡文夫・館山勝・長門範高 (1995) 阪神淡路大震災におけるジオテキスタイル補強土擁壁の挙動, 第30回土質工学研究発表会。
- 2) 龍岡文夫・山内裕元 (1986) A reinforcing method for steep clay slopes using a non-woven geotextile, *Geotextiles and Geomembranes* 4 pp. 241-268.
- 3) 龍岡文夫・董 軍 (1992) Effects of cyclic pretraining on deformation characteristics of gravel in triaxial compression, 土木学会第47回年次学術講演会Ⅲ, pp. 362-363.
- 4) 木幡行宏・龍岡文夫 (1994) 三軸圧縮状態での地盤材料の変形係数に関する考察, 第29回土質工学研究発表会, pp. 695-698.
- 5) 木幡行宏・龍岡文夫・董 軍・Teachavorasinskun, S・水本桂輔 (1994) Stress states affecting deformation moduli of geomaterials, *Proc. Int. Syn. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, vol1 pp. 3-9.