



# 不飽和土の力学によるジオテキスタイル補強効果の検討

藤原, 鉄也  
飯塚, 敦  
河井, 克之

---

## (Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 16:45-53

## (Issue Date)

2012-03

## (Resource Type)

departmental bulletin paper

## (Version)

Version of Record

## (JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011372>

## (URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011372>



# 不飽和土の力学による ジオテキスタイル補強効果の検討

## Analysis of the effect of geotextile reinforcement with unsaturated soil mechanics

藤原 鉄也<sup>1)</sup>

Tetsuya Fujiwara

飯塚 敦<sup>2)</sup>

Atsushi Iizuka

河井 克之<sup>3)</sup>

Katsuyuki kawai

概要：ジオテキスタイル補強盛土工法は、一般的な設計方法として、ジオテキスタイルの引張強度によるせん断抵抗力を土本来の強度に付加する、極限つり合い法による安定解析による安定計算法に基づいている。しかし、ジオテキスタイルは変形が生じて初めてその効果が発揮されるが、極限つり合い法では変形を考慮することができない。ジオテキスタイル補強工法を評価するには、有限要素法を用いた初期値・境界値問題として扱う必要がある。本研究では、土/水/空気連成有限要素解析プログラム（DACSAR-MP）を用いて、ジオテキスタイル補強を行った締固め土のせん断シミュレーションを行い、不飽和土に対するジオテキスタイル補強の効果の発現に関しての検証を行った。

キーワード：ジオテキスタイル, 不飽和土, 有限要素解析

### 1. はじめに

道路等の施工において、盛土は橋梁、高架橋等と比較して一般に初期建設費が安価な構造物である。特に近年では、現地発生土を有効に利用することが重要となり、さらに用地縮小化のために盛土法面の急勾配化が要求され、大規模な高盛土の築造が望まれるようになっている。そのような中で、ジオテキスタイルを用いた補強盛土工法は新しい盛土工法の一つとして、盛土斜面の急勾配化による土地の有効利用、施工の容易さ、経済性、設計・施工マニュアルの整備などにより急速に普及し、多数の重要構造物にも使用されている。ジオテキスタイル補強の設計方法は、極限つり合い法による安定解析による安定計算法に基づいている。しかし、ジオテキスタイル補強工法を正確に評価するには、構造物の変形を考慮する必要がある。有限要素法を用いた初期値・境界値問題として扱う必要がある。そこで、本研究では土/水/空気連成有限要素解析プログラム（DACSAR-MP）を用いて、ジオテキスタイル補強を行った締固め土のせん断シミュレーションを行い、不飽和土に対するジオテキスタイル補強の効果の発現に関しての検証を行った。

## 2. 解析に用いる不飽和土弾塑性構成モデル

本研究に用いる不飽和土の構成モデルとして、有効飽和度を状態量として採用することで水分特性曲線ヒステリシスを考慮したモデル（Se-Hardning モデル<sup>1)</sup>）を用いた。不飽和土の有効応力は、次のように与える。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (1)$$

ただし、

$$\boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1} \quad (2)$$

$$p_s = S_e s, \quad s = p_a - p_w, \quad S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (3)$$

であり、 $\boldsymbol{\sigma}'$ ：不飽和土の有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^{net}$ ：ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$ ：2 階の単位テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$ ：全応力テンソル、 $s$ ：サクション、 $p_s$ ：サクション応力、 $p_a$ ：間隙空気圧、 $p_w$ ：間隙水圧、 $S_r$ ：飽和度、 $S_e$ ：有効飽和度、 $S_{rc}$ ：吸着水が占める飽和度である。

ここで、不飽和土の体積変化を  $e - \ln p'$  関係から

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} \quad (4)$$

ただし、 $e$ ：間隙比、 $e_0$ ：降伏時の間隙比、 $\lambda$ ：圧縮係数、 $p'$ ：平均有効応力、 $\xi$ ：飽和土の圧密降伏応力  $p'_{sat}$  に対する不飽和土の圧密降伏応力の割合を与える関数である。間隙比を体積ひずみ  $\varepsilon_v$  で置き換えると、

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} \quad (5)$$

となる。また、弾性体積ひずみ  $\varepsilon_v^e$  は、

$$\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} \quad \kappa : \text{膨潤指数} \quad (6)$$

となり、 $\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p$  より、塑性体積ひずみ  $\varepsilon_v^p$  は、

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} \quad (7)$$

と表される。大野らは、不飽和土の剛性に関する状態量を有効飽和度にとり、以下の条件を満たすように、

$$\begin{aligned} \xi &= \xi(S_e) \\ \xi &= 1 \text{ when } S_e = 1 \\ \xi &= a \text{ when } S_e = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$\xi$  の具体式を以下のように与えた。

$$\xi = \exp \left[ (1 - S_e)^n \ln a \right] \quad (9)$$

ここで、 $a$ ：飽和土の圧密降伏応力に対して最も不飽和化の影響が最大になる場合の  $\xi$ 、 $n$ ：フィッティングパラメータである。また、オリジナル Cam-Clay モデルの降伏関数に適用し、次式で表す降伏関数を定義した。

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (10)$$

ここで、 $M$ ：限界応力比  $p'/q$ 、 $D$ ：柴田のダイレタンシー係数、 $q$  は、

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}, \quad s = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} \quad (11)$$

で表されるせん断応力である．式(10)に式(9)を適用すると，

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{p'_{sat} [(1 - S_e)^n \ln a]} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (12)$$

不飽和土の降伏関数が得られる．ここで  $\xi = 1$  のとき，式(12)はオリジナル Cam-Clay モデルの降伏関数に帰着する．図-1 は不飽和土の降伏曲面の概念図である．

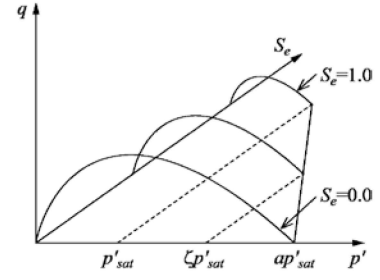


図-1 不飽和土の降伏曲面の概念図

しかし，前述までの不飽和土構成モデルでは，降伏の際に微分可能な特異点に至る場合がある．そこで，本論文ではさらに，降伏曲面の形状を変化させ数値計算上特異点に移行することを回避できる EC モデル<sup>2)</sup>を適用した．柴田ら<sup>3)</sup>(1963)はダイレタンシーによる土の間隙比変化は，応力比に対して直線的であると仮定し，関口・大田モデル<sup>4)</sup>ではこの過程を用いている．しかし，平均有効応力一定排水せん断試験の結果，間隙比変化と応力比の関係が直線的になるとは限らない．そこで，大野らは実験値を忠実に再現するため，土のダイレタンシー応答を表現する関数を指数関数によって表すことを提案している．EC モデルの降伏関数は以下のように示される．

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (13)$$

ここで， $n_E$  は EC モデルにおいてダイレタンシー応答を実験結果にフィッティングさせるためのパラメータである．ここで， $n_E = 1.0$  のときオリジナル Cam-Clay モデルに帰着する．

さらに，式(10)と同様に，不飽和土の降伏応力を導入すると以下ようになる．

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (14)$$

本論文では不飽和土構成モデルよして式(14)を用いた．

### 3. ジオテキスタイル補強を表現した締固め土のせん断シミュレーション

本研究では前述の不飽和土構成モデルを組み込んだ土/水/空気連成有限要素解析プログラム DACSAR-MP を用いて，ジオテキスタイル補強を表現した締固め土のせん断シミュレーションを行うことで，ジオテキスタイル補強メカニズムの検討を行う．

#### 3. 1 解析条件

解析領域は図-4.1 に示すような高さ 10cm×幅 10cm，1 要素の供試体を想定し，解析領域下端は変位を水平，鉛直方向ともに固定，左端・右端は水平方向のみを固定とした．水理境界として，全面を非排水境界とする．さらに，左右面と下面を非排水境界とし，上面のみに排気境界を設定した．また図-3 のように上端に等分布荷重を 800kPa まで載荷し，その後に除荷を行う．載荷，除荷に要する時間を共に 1 分とする．初期含水比を  $w = 10\% \sim 28\%$  (2% 間隔) の 10 ケースに分ける．初期飽和度は含水比と間隙比から求め，さらにその飽和度での主吸水曲線上のサクシオンを初期サクシオンとした．次に図-4 に示すように，

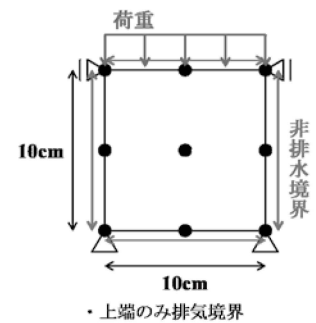


図-2 締固め曲線

得られた締固め土を、要素の外周に、ジオテキスタイルを表現するトラス部材を加え、変位境界を変更し水平方向に強制変位を与えることでせん断解析を行う。水理境界、排気境界は締固めシミュレーションと変更はなく、全面非排水・上面排気境界とする。変位境界は、解析領域下端は水平・鉛直方向共に固定。解析領域左端・右端は水平方向には強制変位を与え、鉛直方向の変位を自由とすることで体積変化を可能としている。上面に与える変位量は、締固める前の供試体高さ 10cm に対してせん断ひずみが 15%になるように、せん断時における上面の最大水平変位量は 1.5cm とする。また、上面の変位速度は 0.05mm/min (0.05%/min) とする。解析に用いる締固め土の材料定数を表-1、ジオテキスタイルの材料定数を表-2 に示す。締固め土は市販のカタルポクレー<sup>5)</sup>の物性値を、ジオテキスタイルは伸び率 4.5% で幅 1m 当たりの引張強度が 200kN とするよう設定している。水分特性曲線は図-5 のものを使用する。また、締固めシミュレーションによって得られた締固めエネルギー 800kPa における締固め曲線を図-6 に示す。

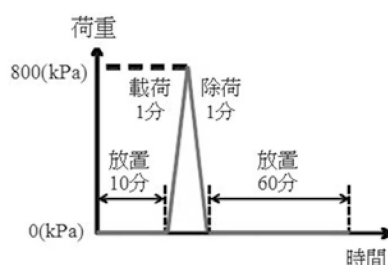


図-3 荷重・除荷条件

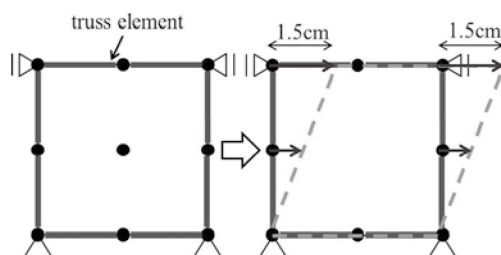


図-4 補強表現・せん断方法

表-1 締固め土材料定数及び初期条件

| $\lambda$ | $\kappa$ | $M$              | $\nu$ | $m$      | $k_w$ (m/day) |
|-----------|----------|------------------|-------|----------|---------------|
| 0.1074    | 0.0107   | 1.344            | 0.33  | 0.8      | 0.01          |
| $a$       | $n$      | $p'_{sat}$ (kPa) | $n_E$ | $e_0$    | $k_a$ (m/day) |
| 30        | 1.0      | 73.5             | 1.3   | 0.85     | 1.00          |
| $A^D$     | $B^D$    | $A^W$            | $B^W$ | $S_{re}$ |               |
| -34.7     | 5.9      | -24.0            | 4.6   | 0.15     |               |

表-2 ジオテキスタイル材料定数

|            |                                         |
|------------|-----------------------------------------|
| 弾性係数 $E_0$ | $8.46 \times 10^6$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
| 断面積 $A$    | $5.25 \times 10^{-4}$ (m <sup>2</sup> ) |

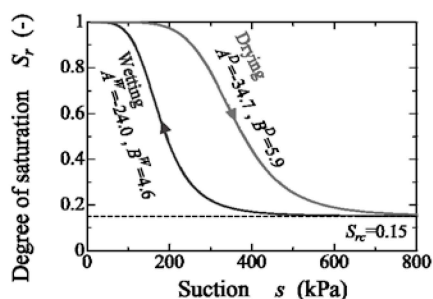


図-5 水分特性曲線

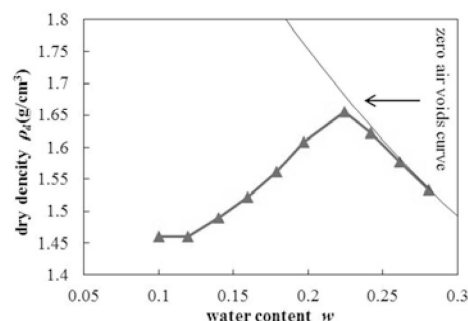


図-6 締固め曲線

### 3. 2 解析結果

ジオテキスタイル補強効果は、生じる変形に対して引張力を発揮することによって変形を抑制することと、ジオテキスタイルの発揮する軸力によって締固め土の拘束圧を増加させるものが挙げられている。これらのジオテ

キスタイルの補強効果を前述の条件下で表現できているかの検討を以下に示す。

### (1) 平均有効応力-せん断応力関係

締固め前の初期含水比が  $w=14\%, 18\%, 22\%, 26\%$  の締固め土のせん断シミュレーションによって得られた平均有効応力-せん断応力関係を図-7 に示す。図中の、実線はジオテキスタイルで補強した締固め土のせん断結果、破線は無補強の締固め土せん断結果、点線は各応力でのせん断前の状態における降伏曲面である。

無補強の締固め土でせん断を行ったものでは、せん断が進むと平均有効応力が減少していく。一方で、ジオテキスタイル補強を行ったものは平均有効応力が増加する傾向がみられる。このことから、ジオテキスタイルの引張力による締固め土の拘束圧の増加が表現できていると考えられる。また、ジオテキスタイル補強効果は締固め土が高含水比の状態となると低下し、応力経路が無補強の場合に近づいていくことがわかる。

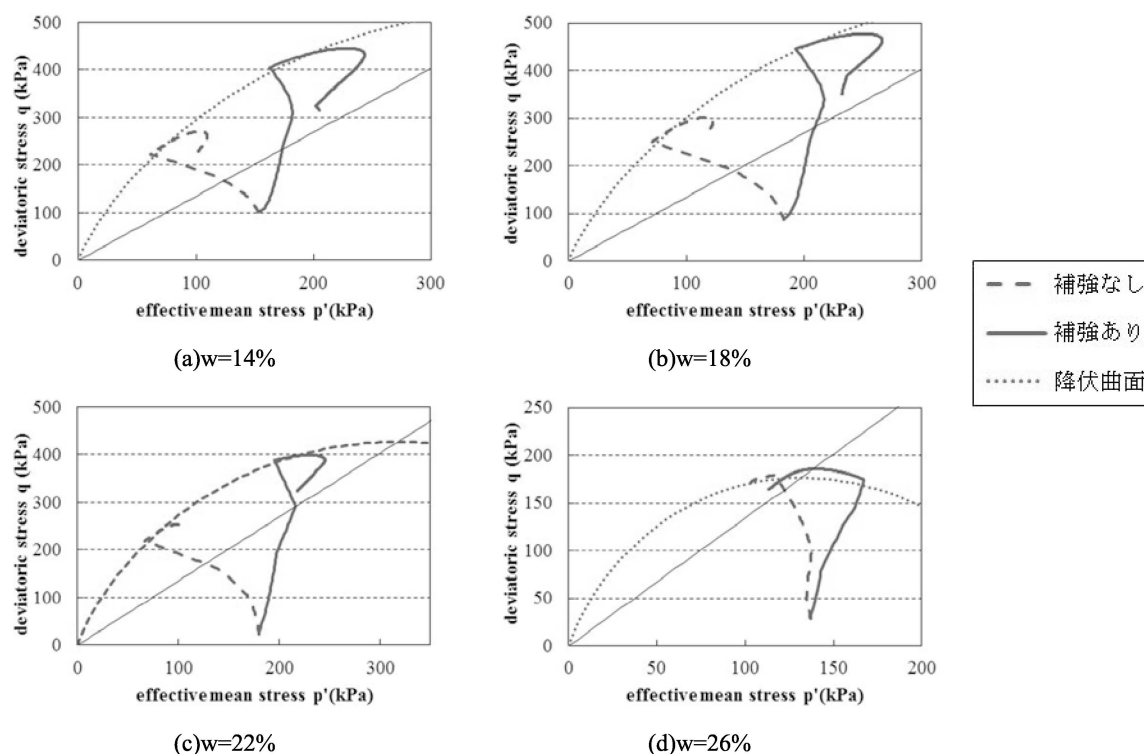


図-7 せん断中の応力経路

### (2) せん断ひずみ-体積ひずみ関係

次に、せん断ひずみ-体積ひずみ関係の解析結果についての検討を行う。初期含水比  $w=14\% \sim 26\%$  におけるせん断ひずみ-体積ひずみ関係の解析結果を図-8 に示す。体積ひずみの値は、締固め終了時の体積を基準として、膨張側を正として表示している。実線がジオテキスタイル補強の締固め土、破線が、無補強の締固め土の解析結果である。

過圧密土のせん断であるため、正のダイレイタンスにより体積が膨張し、締固めエネルギーが大きいほど、膨張量も大きいことがわかる。ジオテキスタイル補強と無補強を比較すると、ジオテキスタイル補強のほうが体積膨張の量が小さく、変形が抑制されていることがわかる。ジオテキスタイル補強はせん断開始初期において、体積の縮小が無補強と比較して大きくみられる。これは、ジオテキスタイルの軸力は締固め土に対して圧縮側に作用するため、体積膨張が発生するまでは、締固め土が圧縮され、体積が縮小しているものと考えられる。

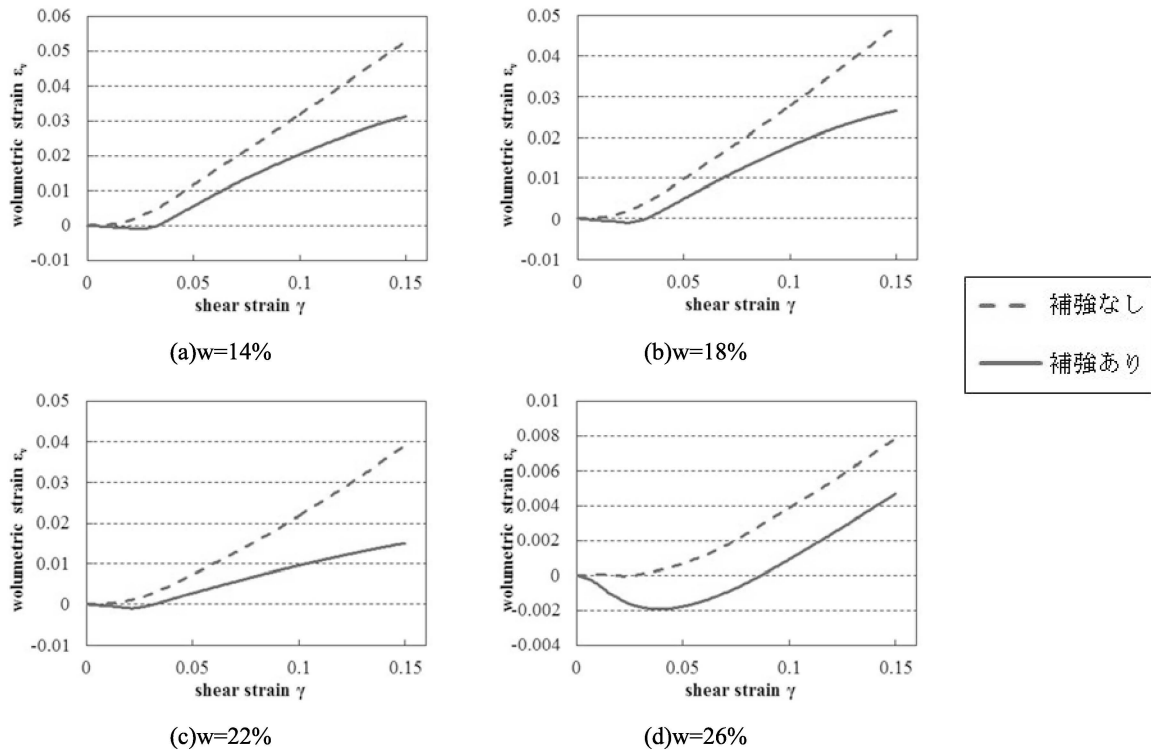


図-7 セン断中の応力経路

### (3) セン断ひずみ-ジオテキスタイル軸力関係

次に、ジオテキスタイル補強を行った締固め土の、せん断時に発生する、ジオテキスタイルの軸力の解析結果について検討を行う。ジオテキスタイルの軸力は、下端の2つの要素は、水平・鉛直方向共に固定条件の節点間にあるため、軸力は発生しない状態となっている。よって、用いる軸力は、他の6要素の平均値としている。初期含水比  $w=14\% \sim 26\%$  におけるせん断ひずみ-ジオテキスタイル軸力関係を図-8に示す。

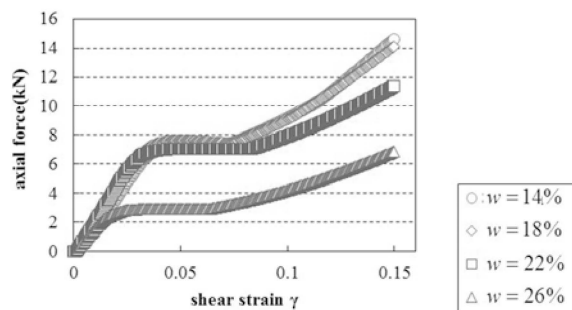


図-8 セン断ひずみ-軸力

初期含水比  $w$  が 14%, 18%, 22% で締固め、せん断を行った場合の結果は近い挙動を示すが、含水比 26% になると発揮される軸力が大きく低下することがわかる。図-6 に示したように締固めエネルギー 800kPa では、最適含水比が 20%~22% の値にあることがわかる。このことから、ジオテキスタイルの発揮する軸力は、最適含水比まではほぼ同じ軸力を発揮し、最適含水比を超えると、発揮する軸力が急激に低下することがわかる。

### (4) 各応力変化

次に、せん断中における締固め土の各応力成分の変化について検討を行う。初期含水比 18% で締固め、せん断を行ったときの、せん断中の平均有効応力  $p'$ 、サクション応力  $p_s$ 、平均有効基底応力  $p_{net}$  の値を図-9 に示す。実線がジオテキスタイル補強、破線が無補強のものである。

図-7 に示したように、ジオテキスタイル補強を行ったものは無補強のものと比較して、平均有効応力が増加する傾向を示す。サクション応力の値は、ジオテキスタイル補強のほうが小さい値となっているがあまり大きな差は見られない。しかし、平均有効基底応力は無補強のものの減少するのに対して、ジオテキスタイル補強は増加し

ていることがわかる。このことから、ジオテキスタイルを用いることで、変形が生じる際に締固め土の土被り圧を増加させることがわかる。

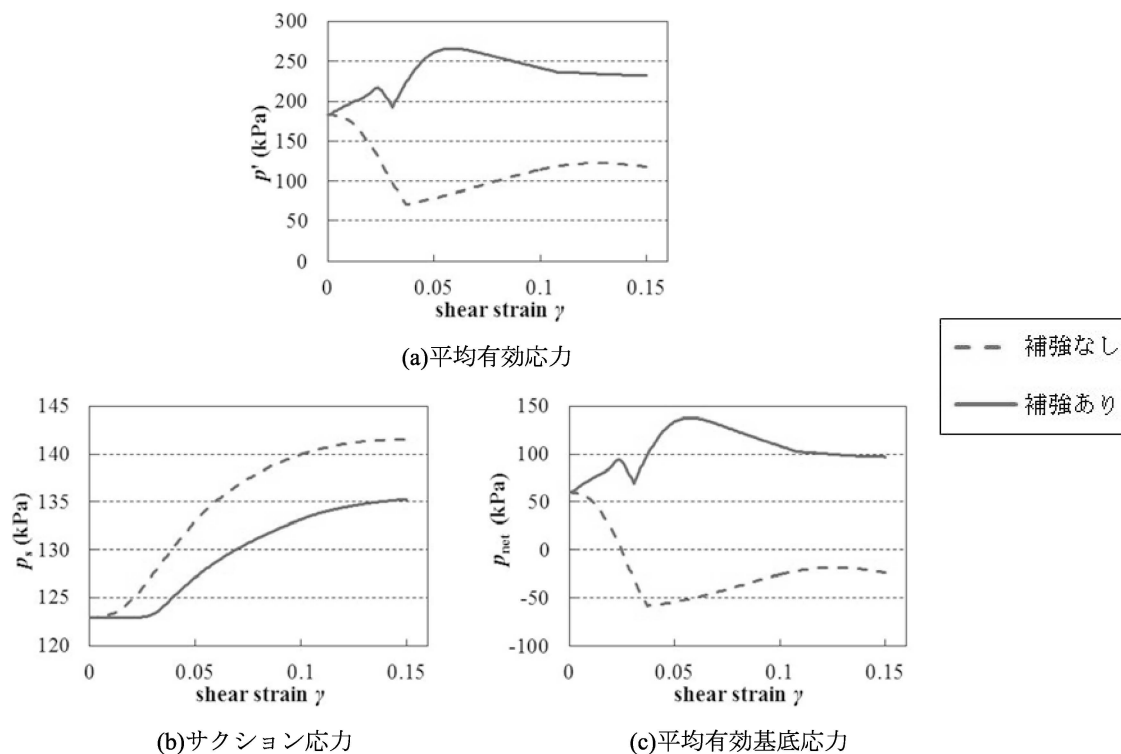


図-9 各応力変化

#### 4. 結論

ジオテキスタイル補強を行った締固め土のせん断シミュレーションを行った。その結果、変形によって生じるジオテキスタイルの軸力により締固め土内の応力は増加していることからジオテキスタイルの引張力による締固め土の拘束圧の増加が表現できていると考えられる。また、せん断時に発生する体積膨張量は無補強の場合と比較して減少しており、ジオテキスタイルが締固め土の変形を抑制していることが表現できていると考えられる。せん断時の締固め土の各応力状態では、ジオテキスタイル補強を行った締固め土のサクション応力は、無補強時の締固め土のせん断結果と比較すると増加量は小さくなっているがその差は小さく、ジオテキスタイル補強を行った場合のサクション応力の影響は小さく、ジオテキスタイル補強を行ったことによる応力増加分は、基底応力の増加として付加されることがわかった。

以上のことから、締固め土に対してジオテキスタイルをトラス部材として発生させることによって、ジオテキスタイル補強法を再現することができていると考えられる。今後、ジオテキスタイル補強時の締固め条件や各材料定数の影響等をより詳しく検証することで、構造物の変形を考慮した、ジオテキスタイル補強の定量的な評価につながると考えられる。

## 参考文献

- (1) 大野進太郎，河井克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，Vol.63，No.4，pp.1132-1141, 2007.
- (2) 大野進太郎，飯塚敦，太田秀樹：非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル，応用力学論文集，pp.407-414，2006.
- (3) 柴田徹：ダイラタンシーについて，京都大学防災研究所年報，第6号，pp128-134，1963.
- (4) Ohta,H. and Sekiguchi,H.：Constitutive equations considering anisotropy and stress reorientation in clay，Proc. 3rd. Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics，Vol. 1，pp.475-484，1979.
- (5) 河井克之，柴田昌輝，金澤伸一，橘伸也，大野進太郎，飯塚敦，本田道識：土/水連成有限要素解析プログラムを用いた静的締固めシミュレーション，応用力学論文集，Vol.12，pp.429-436，2009.

**著者：**1) 藤原鉄也，株式会社奥村組；2) 飯塚敦，都市安全研究センター，教授；3) 河井克之，都市安全研究センター，准教授

# Analysis of the effect of geotextile reinforcement with unsaturated soil mechanics

Tetsuya Fujiwara

Atsushi Iizuka

Katsuyuki kawai

## Abstract

In recent years, it is hoped that steepening foreslope and constructing large-scale high embankment. So, geotextile-reinforced embankment construction method is used for a lot of important structures as one of the new embankment construction methods.

As a general method of geotextile-reinforced embankment constructing, there are constructing methods of having added shear resistance force by tensile strength of geotextile to intensity of soil. But construction's strain isn't assumed in these methods. It is necessary to establish rational constructing method that allows construction's strain to arise.

In this study, shear test of geotextile-reinforced soil are simulated, with soil/water/air coupled finite element analysis. Consequently, some characteristics of geotextile-reinforced soil and geotextile-reinforced construction could be expressed.