

## 地震時および地震後の液状化対策地盤の変状評価

伊藤 浩二 江尻 謙嗣

## Evaluation of Residual Deformation for Countermeasures against Ground Liquefaction During and Post Earthquake

Koji Ito Joji Ejiri

## Abstract

This paper describes the subloading surface model, which determines the seismic performance of soil based on the effective stress method and a cyclic elastoplastic constitutive model. The model focuses on residual deformation caused by settlement and sliding as an index of countermeasures against ground liquefaction during and after an earthquake. The material constants of the subloading surface model can be consistently determined based on the cyclic plasticity characteristics of clay, sand and intermediate soil. In this study, the residual deformation characteristics of ground subjected to countermeasures such as soil desaturation by air injection were derived and the requirements for countermeasures were considered. The subloading surface model was used to evaluate the effectiveness of countermeasure to prevent road deformations from ground liquefaction, namely Tough-Road.

## 概要

地盤の液状化対策、土構造物の変状対策では、地震時だけでなく地震後の地盤変状（残留沈下、残留傾斜等）を把握し、対策効果を評価する必要がある。そこで、土の繰返し塑性を合理的に表現できる弾塑性構成式として下負荷面モデルを大林組開発の有効応力解析プログラムに組み込んだ。まず下負荷面モデルを粘性土、砂質土および中間土の繰返し塑性へ適用するにあたり、材料定数の設定方法を検討した。次に、空気注入不飽和化工法の液状化対策、液状化地盤上の道路変状防止対策「タフロード<sup>®</sup>」の有効応力解析を行い、不飽和液状化対策が成立するための条件や地震時および地震後の残留沈下特性、タフロードの地震時および地震後の変状防止効果を示した。

## 1. はじめに

液状化が予想される地盤では、構造物の機能を確保するために、サンドコンパクションパイル（SCP）に代表される密度増大工法や深層混合処理、浸透注入固化等の固結工法により液状化発生を防止する液状化対策が行われることが多い。一方で、液状化地盤上の堤防等では、液状化の発生を許容するものの堤防底部に敷設したジオテキスタイルやジオグリッドにより堤防沈下を抑制する構造的な変状対策もある<sup>1), 2)</sup>。

このような構造物の機能維持を図りつつ多少の地盤変状（残留沈下、残留傾斜等）を許容する設計においては、対策効果の指標である地震時（地震入力の開始から終了時）および地震後（地震入力終了後、発生過剰間隙水圧の消散完了時）の変状予測が重要である。

本報では、土の繰返し塑性を合理的に表現できる弾塑性構成式である下負荷面モデルを地盤変状予測に適用するにあたり、粘性土、砂質土および中間土の材料定数の設定方法を検討した。

次に、空気注入不飽和化工法による液状化対策<sup>3)</sup>および液状化地盤上の道路変状防止対策「タフロード<sup>®</sup>」<sup>4)</sup>に関して、有効応力法に基づく地盤変状を算定し、不飽和

液状化対策が成立するための条件や残留沈下特性、ならびにタフロードの変状防止効果を示した。

## 2. 下負荷面モデル

Hashiguchi, K. et al.は、繰返し負荷に対する材料の繰返し弾塑性構成式として、下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式を提案した<sup>5)</sup>。Fig. 1に  $p$  -  $q$  面（ $p$ ：平均有効応力、 $q$ ：軸差応力）における下負荷面モデルの正規降伏面と下負荷面の関係を示す。ここで、下負荷面は、相似中心  $s$  に対して、現応力点  $\sigma$  を通って正規降伏面と相似形を有し、正規降伏比  $R$ （正規降伏面に対する下負荷面の大きさの比）を用いて表現される。詳細は文献5)を参照されたい。

本報の下負荷面モデルでは、相似中心を原点で固定とし、塑性ひずみ増分を規定する正規降伏比  $R$  の発展則では、(1)式により累積塑性偏差ひずみ  $\varepsilon^{p*}$  を考慮した<sup>6)</sup>。

$$\dot{R} = U \|\dot{\varepsilon}^p\|, \quad \dot{\varepsilon}^p = D^p \quad (1)$$

$$U = -\frac{u}{\exp(\zeta \cdot \varepsilon^{p*})} \ln R, \quad \varepsilon^{p*} = \int \|D^{p*}\| dt$$

ここで、 $D^p$ は塑性ひずみ増分、 $D^{p*}$ は塑性偏差ひずみ

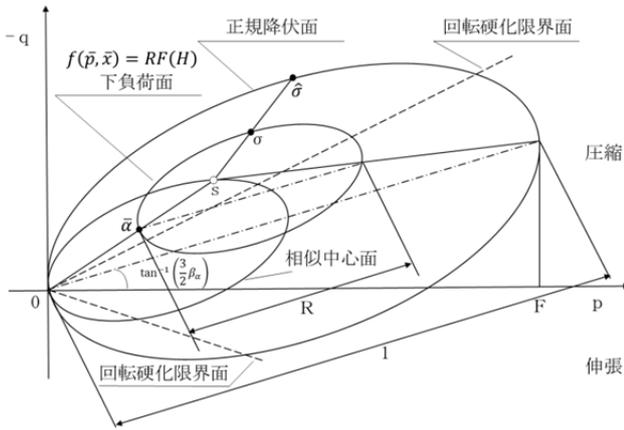


Fig. 1 p - q 面における正規降伏面と下負荷面 (Hashiguchi, K. et al.<sup>5)</sup> に加筆)

Schematic of Subloading Surface Model in p-q Plane

増分, UはR=0でU=+∞, R=1でU=0を満たす単調減少関数, uは塑性ひずみ増分を規定する材料定数, ζは塑性偏差ひずみの影響を規定する材料定数である。

本報では, 大林組で開発した有効応力解析プログラム「O-EFFECT」<sup>7)</sup>, 大規模高速化非線形FEM解析プログラム「FINAL-GEO」<sup>8)</sup>に下負荷面モデルを新たに組み込むことにより, 地震時から地震後までの過剰間隙水圧の発生・消散過程を考慮して地盤・構造物の応答を算定するものとした。したがって, 液状化対策地盤においても,

(1) 式を考慮した下負荷面モデルを用いることにより, 液状化対策, 地盤変状対策による地震時および地震後の地盤変状(残留沈下, 残留傾斜等)を評価できる。

### 3. 下負荷面モデルの材料定数

#### 3.1 粘性土, 砂質土

Table 1に下負荷面モデルの材料定数を示す。下負荷面モデルでは, 正規降伏面で修正カムクレイモデルを適用することから, 下負荷面モデル特有の材料定数は, 回転硬化限界面の定数φ<sub>b</sub>, 回転硬化発展則の定数b<sub>r</sub>, 正規降伏比Rの発展則で用いるu, ζである。

Fig. 2にTable 1の材料定数で得られた土圧係数K<sub>0</sub>=1.0, 初期平均有効応力σ'<sub>0</sub>=100kN/m<sup>2</sup>の非排水繰返し単純せん断条件(せん断応力比0.2)の計算結果を示す。(1)式で累積塑性偏差ひずみを考慮することにより, 砂質土で見られる破壊近傍での繰返し塑性を概ね表現できる。

本報の下負荷面モデルでは, 粘性土でζ=0, 砂質土でζ>0を設定し, 正規降伏面の初期値F<sub>0</sub>により粘性土における過圧密特性, 砂質土における密度特性を表現するものである。

#### 3.2 中間土

安定処理土, 事前混合処理土のように, 内部摩擦角φ<sub>r</sub>と粘着力Cを有する中間土で用いる下負荷面モデルの材料定数を検討する。

Fig. 3にTable 2の材料定数で得られた初期平均有効応

Table 1 下負荷面モデルの材料定数(粘性土, 砂質土)  
Material Properties of Subloading Surface Model(Clay, Sand)

圧縮指数	$\lambda / (1 + e_0)$	0.003
膨潤指数	$\kappa / (1 + e_0)$	0.001
内部摩擦角	$\phi_r$	33°
正規降伏面の初期値	$F_0$	100kN/m <sup>2</sup>
ポアソン比	$\nu$	0.33
回転硬化限界面	$\phi_b$	33°
回転硬化発展則	$b_r$	1000
正規降伏比Rの発展則	$u$	2000
	$\zeta$	0 (粘性土)
		1000 (砂質土)
規準平均有効応力	$\sigma'_{m,ref}$	100kN/m <sup>2</sup>

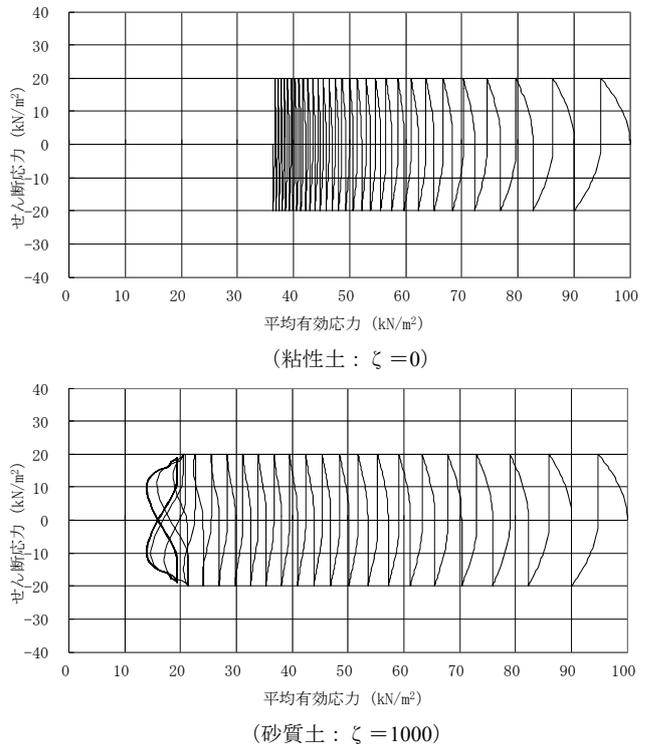


Fig. 2 非排水繰返し単純せん断条件の有効応力経路  
Effective Stress Path  
under Undrained Cyclic Simple Shear Condition

Table 2 下負荷面モデルの材料定数(砂質土)  
Material Properties of Subloading Surface Model(Sand)

圧縮指数	$\lambda / (1 + e_0)$	0.0020
膨潤指数	$\kappa / (1 + e_0)$	0.0007
内部摩擦角	$\phi_r$	33°
正規降伏面の初期値	$F_0$	100, 1000 2000, 3000kN/m <sup>2</sup>
ポアソン比	$\nu$	0.33
回転硬化限界面	$\phi_b$	33°
回転硬化発展則	$b_r$	1000
正規降伏比Rの発展則	$u$	15000
	$\zeta$	1000
規準平均有効応力	$\sigma'_{m,ref}$	100kN/m <sup>2</sup>

力  $\sigma'_0 = 100\text{kN/m}^2$  の排水三軸圧縮条件の計算結果を示す。ここで、正規降伏面の初期値  $F_0$  では、過圧密比  $n$  ( $= F_0 / \sigma'_0$ ) を 1, 10, 20, 30 とした。ピーク時のせん断応力 ( $= q_{\max}/2$ ) は過圧密比が大きくなるに伴い増加するが、残留時のせん断応力 ( $= q_{\text{res}}/2$ ) は一定値に収束する。(2) 式に中間土における粘着力とせん断応力、内部摩擦角との関係を示す<sup>9), 10)</sup>。

$$C = \frac{q_{\max} - q_{\text{res}}}{2} \tan\left(45^\circ - \frac{\phi_f}{2}\right) \quad (2)$$

Fig. 4に、初期平均有効応力  $\sigma'_0 = 50, 100, 200\text{kN/m}^2$  の排水三軸圧縮条件の計算結果を用いて (2) 式で得られる粘着力と過圧密比との関係を示す。例えば粘着力  $C = 200\text{kN/m}^2$  の中間土においては、 $\sigma'_0 = 50\text{kN/m}^2$  で  $n \approx 30$ ,  $\sigma'_0 = 100\text{kN/m}^2$  で  $n \approx 17$ ,  $\sigma'_0 = 200\text{kN/m}^2$  で  $n \approx 11$  となり、初期平均有効応力に依存した正規降伏面の初期値を設定する必要が生じる。

Fig. 5に粘着力と正規降伏面の初期値との関係を示す。例えば粘着力  $C = 200\text{kN/m}^2$  の中間土では、 $\sigma'_0 = 50, 100, 200\text{kN/m}^2$  で  $F_0 = 1500, 1700, 2200\text{kN/m}^2$  であり、初期平均有効応力に対する正規降伏面の初期値の変動が過圧密比の変動と比較して小さく抑えられる。

以上より、中間土における下負荷面モデルの材料定数の設定では、初期平均有効応力に依存した正規降伏面の初期値を用いる砂質土と異なり、Fig. 5の初期平均有効応力に依存しない一定の正規降伏面の初期値を用いることにより、近似的に任意の粘着力を考慮するものとした。

#### 4. 不飽和化液状化対策地盤の解析

##### 4.1 目的

空気注入不飽和化工法は、液状化が発生する可能性がある飽和した砂質土地盤に対して、空気を直接注入して地盤を不飽和化させ、注入終了後に残留する空気による地盤の液状化強度の増加で液状化を抑制する地盤改良工法である。不飽和化液状化対策は、SCPによる密度増大工法、深層混合処理、浸透注入固化等の固結工法の液状化対策と異なり、地震時に液状化の発生を抑制するものの不飽和化に伴う揺すり込み沈下、地震時に発生した過剰間隙水圧の消散に伴う地震後の圧密沈下が予想される。

したがって、不飽和化液状化対策では、地震時の揺すり込み沈下および地震後の圧密沈下を含めた対策効果の指標である地盤変状を評価する必要がある。

本章では、不飽和化液状化対策が成立するための条件や地震時および地震後の残留沈下特性を検討した。

##### 4.2 方法

上載荷重がない場合の不飽和化液状化対策地盤の解析では、Table 1の材料定数（砂質土で  $\zeta = 1000$ ,  $F_0 = \sigma'_0$ ）の一樣飽和地盤（層厚10m, 地下水位：地表, 飽和重量  $\gamma_{\text{sat}} = 18.3\text{kN/m}^3$ , 透水係数  $k = 10^{-5}\text{m/s}$ , 土圧係数

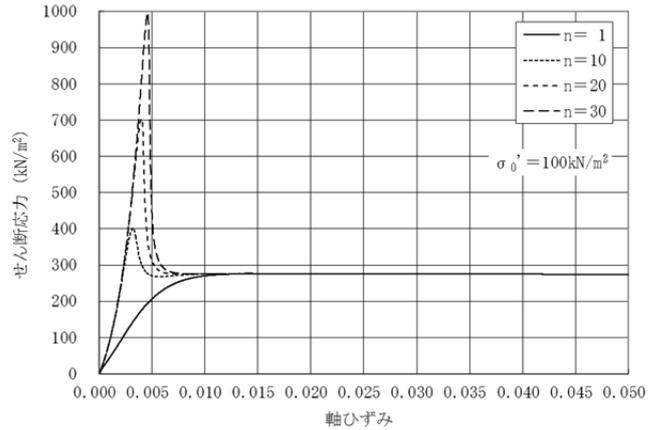


Fig. 3 排水三軸圧縮条件のせん断応力と軸ひずみ Relationship between Shear Stress and Axial Strain under drained Tri-axial Compression Condition

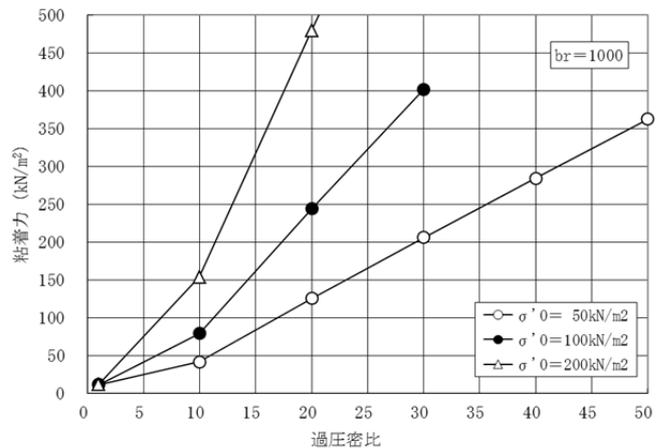


Fig. 4 粘着力と過圧密比 Relationship between Cohesion and Over-consolidation Ratio

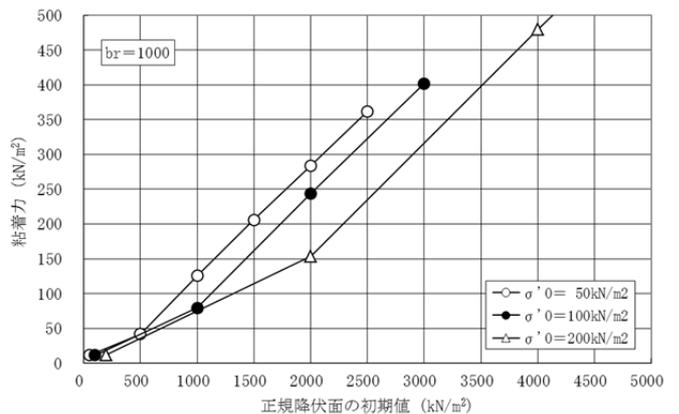


Fig. 5 粘着力と正規降伏面の初期値 Relationship between Cohesion and Initial Value of Normal-yield Surface

$K_0 = 0.5$ ) を対象とし、底面固定の一次元土柱モデルを用いた。

上載荷重がある場合の不飽和化液状化対策地盤の解析では、Table 2の材料定数（砂質土で  $\zeta = 1000$ ,  $F_0 = \sigma'_0$ ）の原地盤（層厚10m, 地下水位：G.L.-1.0m, 液状化強度比  $R_{20} = 0.2$ ,  $\gamma_{\text{sat}} = 19.0\text{kN/m}^3$ , 透水係数  $k = 10^{-5}\text{m/s}$ )

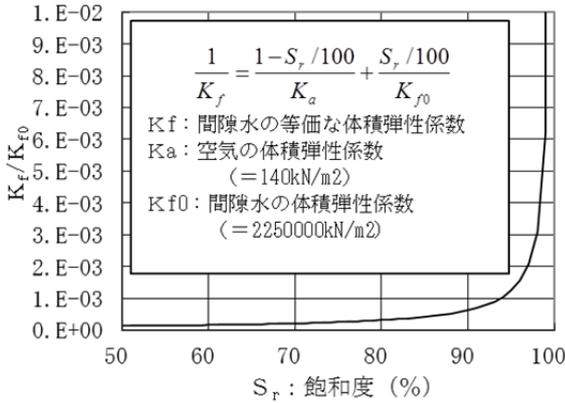


Fig. 6 間隙水の等価な体積弾性係数  
Equivalent Elastic Bulk Modulus of Pore-fluid

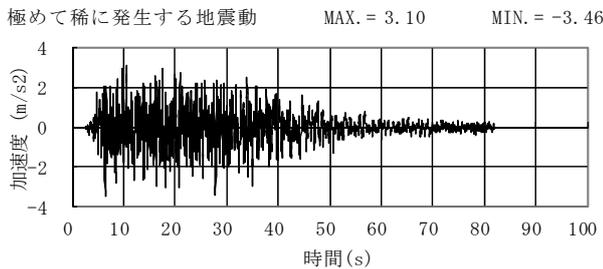


Fig. 7 地震動  
Time History of Earthquake Motion

と盛土（盛土高5.6m, 天端幅10.7m, 勾配1:1.5,  $\gamma_t = 19.0\text{kN/m}^3$ ）, 不飽和化液状化対策の改良範囲を盛土直下（改良幅27.5m, 改良深度10m）とした二次元モデルを用いた。解析は, 左右境界, 底面境界を粘性要素とし, ①自重解析, ②一次元土柱モデルの有効応力解析, ③二次元全体モデルの有効応力解析の手順で行った。

不飽和化の程度は, 有効応力解析で用いるFig. 6の飽和度に応じた間隙水の等価な体積弾性係数を  $K_f/K_0 = 1.0$  (原地盤),  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  に低減した5ケースとした。地震波は, 海溝型地震を想定して, 極めて稀に発生する地震動の国交省告示スペクトルに適合するFig. 7の模擬地震動を用いた。上載荷重がない場合の解析では, 稀に発生する地震動を極めて稀に発生する地震動の最大加速度の1/5とした。

### 4.3 結果

Fig. 8に上載荷重がない場合の不飽和化の程度に応じた得られた最大過剰間隙水圧比の深度分布を示す。 $K_f/K_0 = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ において, 液状化の発生を防止できる間隙水の等価な体積弾性係数の上限が認められる。

不飽和化液状化対策では, 理想的な等価な体積弾性係数が発現されると仮定すれば, Fig. 6より飽和度が90%で  $K_f/K_0 = 6.2 \times 10^{-4}$ である。したがって, 不飽和化液状化対策では, 飽和度を90%程度以下とすることにより, 初期有効土被り圧が小さい浅層を除き液状化の発生を防止できると推察される。

Fig. 9に上載荷重がない場合の不飽和化の程度に応じ

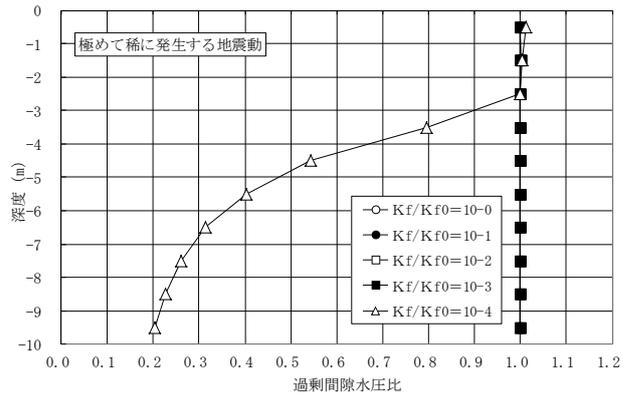
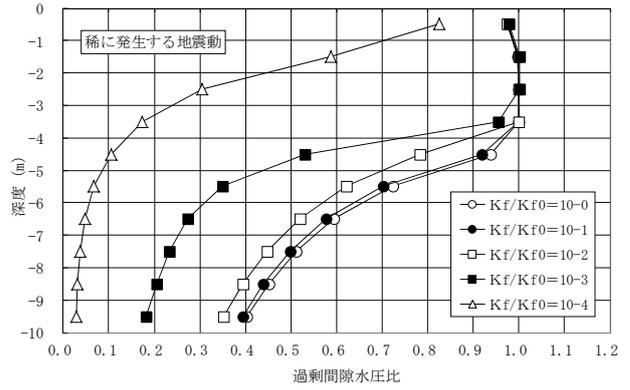


Fig. 8 最大過剰間隙水圧比 (上載荷重がない場合)  
Maximum Excess Pore-water Pressure Ratio

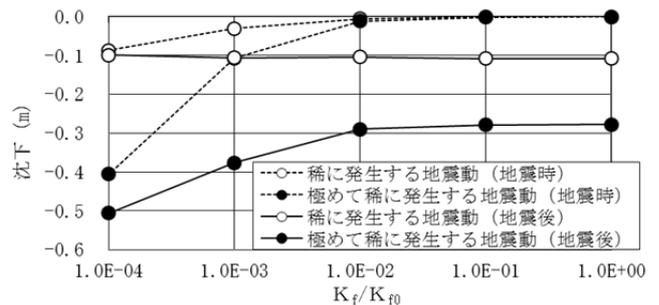
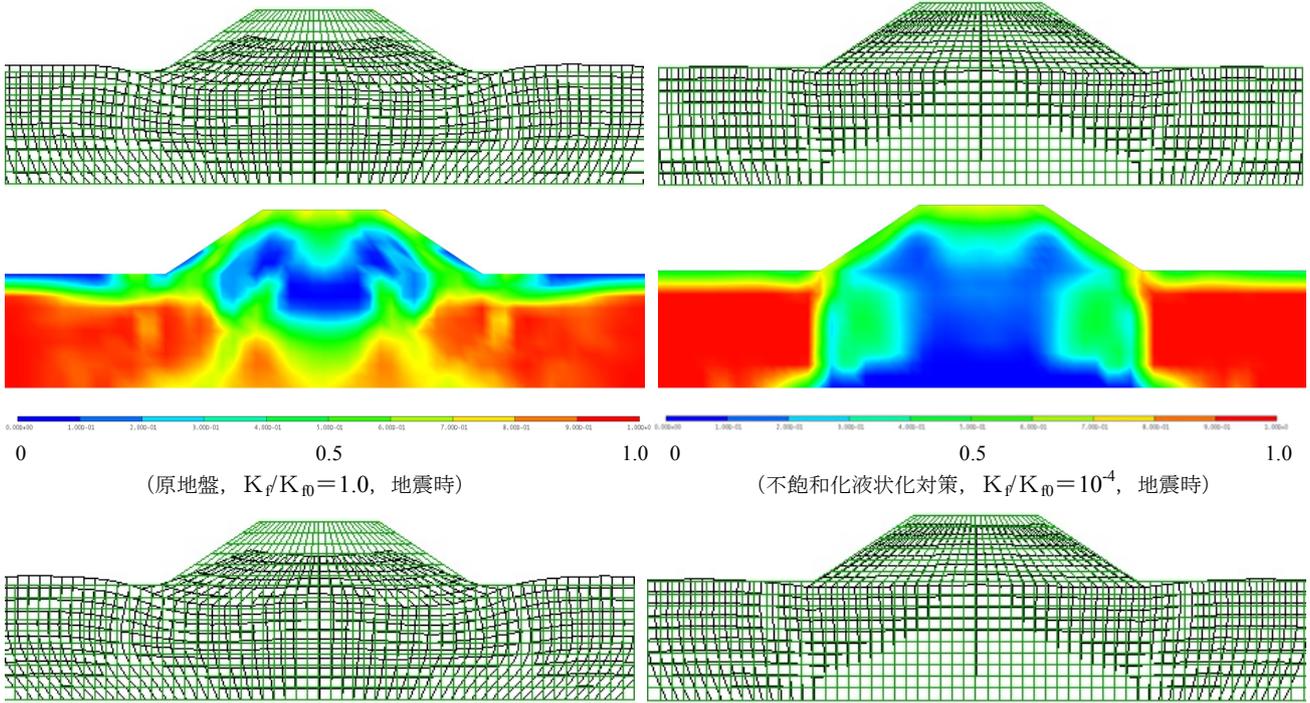


Fig. 9 地震時, 地震後の残留沈下 (上載荷重がない場合)  
Residual Settlement During and Post Earthquake

て得られた地震時および地震後の地表の残留沈下を示す。稀に発生する地震動, 極めて稀に発生する地震動の地震時では,  $K_f/K_0 = 1.0 \sim 10^{-2}$ で不飽和化による揺すり込み沈下は小さいが  $K_f/K_0 = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ で顕著となった。

稀に発生する地震動の地震後では,  $K_f/K_0 = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ の残留沈下（地震時の揺すり込み沈下+地震後の圧密沈下）と  $K_f/K_0 = 1.0 \sim 10^{-2}$ の残留沈下（主に地震後の圧密沈下）が同程度となった。一方で, 極めて稀に発生する地震動の地震後では,  $K_f/K_0 = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ の残留沈下が  $K_f/K_0 = 1.0 \sim 10^{-2}$ の残留沈下より大きくなった。

Fig. 10, 11に上載荷重がある場合の原地盤 ( $K_f/K_0 = 1.0$ ), 不飽和化液状化対策 ( $K_f/K_0 = 10^{-4}$ ) で得られた地震時および地震後の残留変形と液状化程度 ( $= 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$ ,  $\sigma'_m$ : 平均有効応力,  $\sigma'_{m0}$ : 初期平均有効応力)を示す。原地盤では, 地震時において盛土直下でも



(原地盤,  $K_f/K_0=1.0$ , 地震後)

Fig. 10 残留変形と液状化程度 (変位倍率: 等倍)  
Residual Deformation and Amount of Liquefaction

(Without Countermeasure, Displacement Magnification : 1.0)

(不飽和化液状化対策,  $K_f/K_0=10^{-4}$ , 地震後)

Fig. 11 残留変形と液状化程度 (変位倍率: 等倍)  
Residual Deformation and Amount of Liquefaction

(With Countermeasure, Displacement Magnification : 1.0)

平均有効応力の減少が顕著となり、液状化による残留変位（側方へのはらみだし）に伴い盛土で大きな残留沈下が生じた。不飽和化液状化対策では、地震時において盛土直下の平均有効応力の減少が小さくなることから、液状化による残留変位（側方へのはらみだし）に伴う盛土の残留沈下が抑制された。地震後の盛土の残留変位では、地震後に生じる圧密沈下が比較的小さいことから、地震時に生じる盛土の残留変位と概ね同様である。

Fig. 12に上載荷重がある場合の不飽和化の程度に応じて得られた地震時および地震後の盛土天端中央の残留沈下を示す。上載荷重がある場合では、Fig. 9の上載荷重がない場合と異なり、盛土の残留沈下は不飽和化の程度に応じて原地盤より小さくなり、地盤変状に基づく対策効果が得られた。

以上より、不飽和化液状化対策地盤では、上載荷重の有無により地盤変状で異なる対策効果の傾向を示すことから、上載荷重の効果（基礎地盤の初期有効拘束圧の増加、初期せん断応力の発生等）を適切に考慮した地震時および地震後の地盤変状の評価が重要である。

## 5. 道路変状防止対策地盤の解析

### 5.1 目的

道路変状防止対策「タフロード<sup>®</sup>」は、液状化地盤上の道路下の路床部に対して、路床底部にジオグリッドを敷設するとともに、路床部の埋戻土を軽量土と安定処理

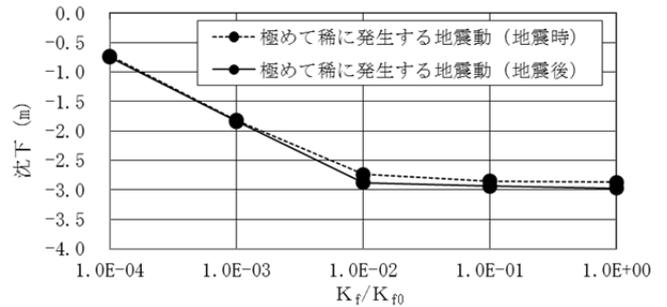


Fig. 12 地震時、地震後の残留沈下 (上載荷重がある場合)  
Residual Settlement During and Post Earthquake

土の複合とする構造的な道路変状対策である。軽量土で道路部と一般部との荷重差を小さくし液状化地盤で生じる初期せん断応力を小さくできるため、地震時に発生する道路変状（残留沈下、残留傾斜）を抑制できる。

タフロードでは、密度増大工法、固結工法等の液状化対策と異なり、液状化の発生を許容するため、地震時および地震後の圧密沈下を含めた対策効果の指標である地盤変状を評価する必要がある。

本章では、タフロードにおける地震時および地震後の道路変状防止効果を検討した。

### 5.2 方法

Fig. 13にタフロードの断面、Table 3に材料の物理定数と強度定数を示す。原地盤（地下水位：G.L.-1.0m、液状化強度比 $R_{20}=0.2$ 、透水係数 $k=10^{-5}m/s$ ）と軽量土では

Table 2の材料定数(砂質土で $\zeta=1000$ ,  $F_0=\sigma'_0$ ), 安定処理土( $C=200\text{kN/m}^2$ )ではTable 2の材料定数(中間土で $\zeta=1000$ , Fig. 5より $F_0=1900\text{kN/m}^2$ )を用いた。

ジオグリッドでは, 円弧すべり法を用いた地震時安定解析(等分布荷重 $q=10\text{kN/m}^2$ , 水平震度 $k_h=0.35$ , 路床厚 $1.0\text{m}$ )より得られた必要最大抑止力を3段のジオグリッド(設計引張強度 $T_A=110\text{kN/m}$ , 敷設長 $12.0\text{m}$ )で分担した。軽量土幅では, 道路下の液状化地盤の初期せん断応力ができるだけ小さくなるように $3\text{m}$ とした。

解析は, 対策なしとタフロードの2ケースとした。地震波は, 海溝型地震を想定して, 極めて稀に発生する地震動の国交省告示スペクトルに適合するFig. 7の模擬地震動を用いた。解析はジオグリッドをはり要素, 左右境界, 底面境界を粘性要素とし, ①自重解析, ②一次元土柱モデルの有効応力解析, ③二次元全体モデルの有効応力解析の手順で行った。

### 5.3 結果

Fig. 14に地震前の路面と地震時および地震後の残留変位が生じた路面との比較を示す。地震時では, 対策なしで原地盤の側方へのはらみだしに伴う道路部の沈下が生じる。タフロードでは原地盤の側方へのはらみだしがほとんど生じないため道路部の変状(残留沈下, 残留傾斜)が抑制され, 道路性能を確保できる。

地震後では, 対策なしで道路部と遠方地盤で同程度の残留沈下が生じるが, 道路部脇で側方へのはらみだし・隆起が生じる。タフロードでは遠方地盤で対策なしと同程度の残留沈下が生じるものの道路部の変状が抑制され, 道路性能を確保できる。

Fig. 15, 16に地震時および地震後の残留変形を示す。対策なしでは, 地震時および地震後において道路部直下の原地盤で側方へのはらみだし・隆起が生じる。タフロードでは, 地震時および地震後において道路部周辺地盤が道路部直下へ入り込むことにより道路部の変状が抑制され, 道路性能を確保できる。

以上より, タフロードは, 地震時および地震後においても有効な道路変状防止対策であることが確認された。

## 6. まとめ

1) 土の繰返し塑性を合理的に表現できる弾塑性構成式である下負荷面モデルにおいて, 粘性土, 砂質土および

Table 3 タフロードの物理定数と強度定数  
Physical and Mechanical Properties of Tough-Road

工種	材料	$\gamma_t$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\phi_f$ ( $^\circ$ )	C ( $\text{kN/m}^2$ )
表層	密粒度 アスコン	22.5	—	—
上層路盤	粒調碎石	20.0	35	0
下層路盤	切込碎石	20.0	35	0
原地盤 (液状化地盤)	砂層	19.0	33	0
路床	安定処理土	19.0	33	200
	軽量土	12.0	33	0
ジオグリッド	設計引張強度 $T_A=110\text{kN/m}$			

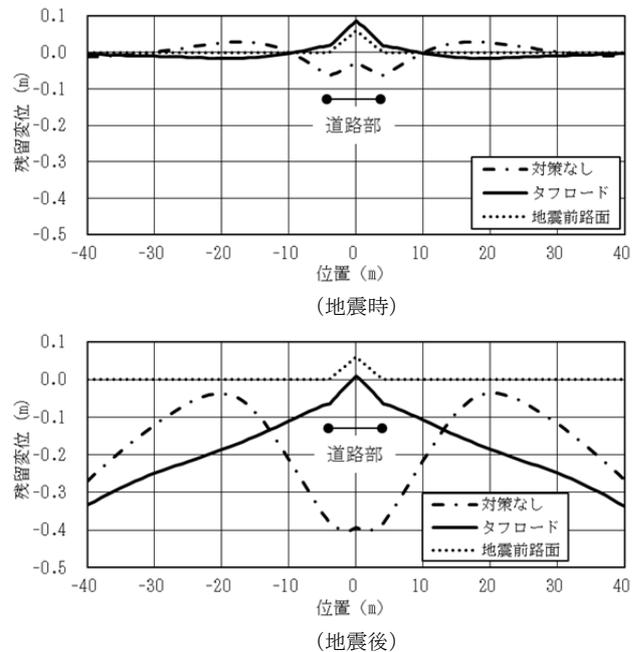


Fig. 14 地震時および地震後の残留変位  
Residual Displacement of Surface Ground  
(During and Post Earthquake)

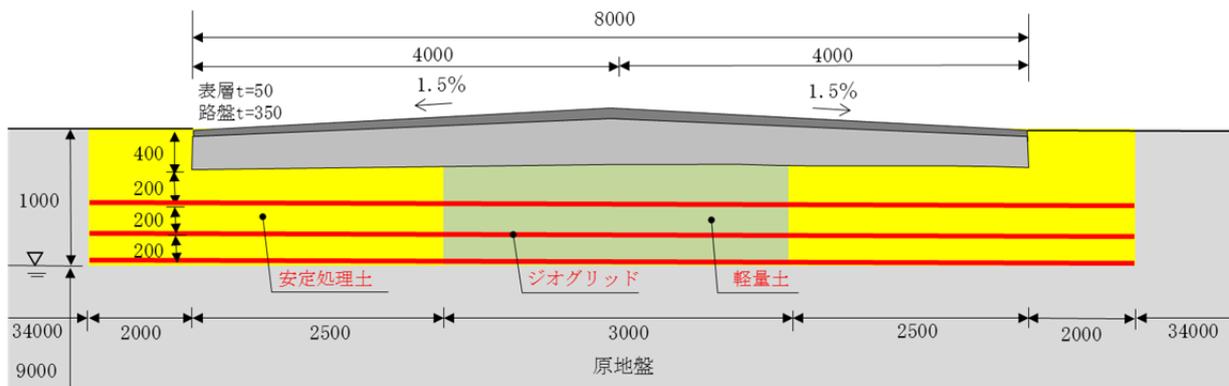


Fig. 13 タフロードの断面  
Cross-section of Countermeasure to Prevent Road Deformation on Liquefiable Ground

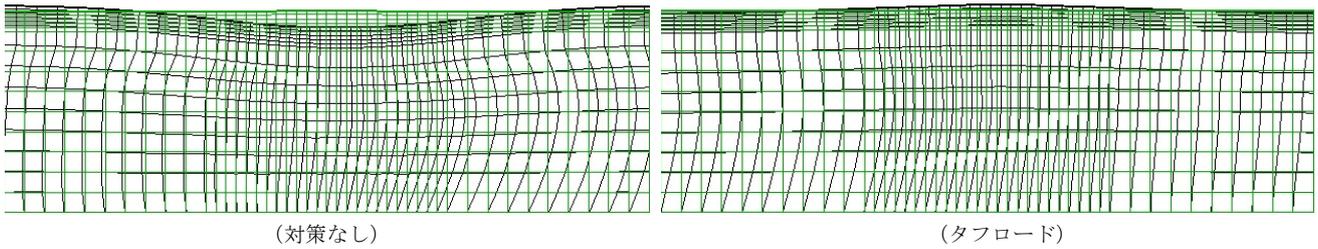


Fig. 15 地震時の残留変形 (変位倍率 : 10倍)  
Residual Deformation of Liquefiable Ground (During Earthquake, Displacement Magnification : 10.0)

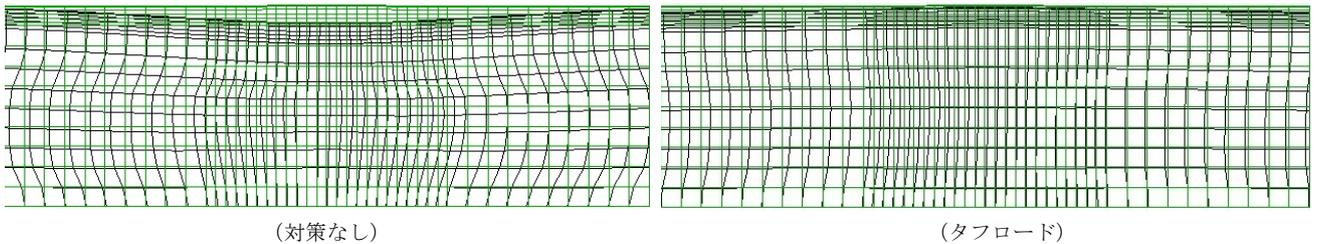


Fig. 16 地震後の残留変形 (変位倍率 : 2倍)  
Residual Deformation of Liquefiable Ground (Post Earthquake, Displacement Magnification : 2.0)

び中間土に対して適用する場合の材料定数の設定方法を示した。今後は、力学試験結果との比較により材料定数の検証を行い、地盤変状の予測精度の向上を図ることが必要である。

2) 不飽和化液状化対策では、90%程度以下の飽和度(間隙水の等価な体積弾性係数で $K_f/K_0=6.2 \times 10^{-4}$ )により液状化の発生を防止できるようなのである。ただし、対策効果の指標である地盤変状では、上載荷重の効果を適切に考慮して、地震時の揺すり込み沈下および地震後の圧密沈下を評価することが重要である。

3) 道路変状防止対策「タフロード<sup>®</sup>」は、地震時および地震後においても、道路部直下、道路部周辺の液状化地盤の変状を制御することにより道路機能を確保する有効な変状防止対策である。

#### 参考文献

- 1) 佐々木康, 他 : 鳥取県西部地震の液状化に対するジオテキスタイル工法の有効性, ジオンセティックス論文集, 第16巻, pp.119-125, 2001.12
- 2) 佐々木康, 他 : 鳥取県西部地震時のジオグリッド敷設堤防の挙動に関する検討, ジオンセティックス論文集, 第17巻, pp.207-214, 2002.12
- 3) Air-des工法研究会 : 空気注入不飽和化工法 (Air-des工法) 技術マニュアル, pp.197-227, 2012.7
- 4) 伊藤浩二, 疋田喜彦, 古屋弘 : 液状化地盤上の地震時道路変状防止対策「タフロード<sup>®</sup>」, 大林組技術研究所報, No.75, 2011.12
- 5) Hashiguchi, K. and Chen, Z. P. : Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol.22, pp.197-227, 1998
- 6) 橋口公一, 間瀬辰也 : 下負荷面モデルによるサイクリックモビリティの物理的解釈と定量的表現, 地盤工学ジャーナル, Vol.6, No.2, pp.225-241, 2010
- 7) 伊藤浩二 : 動的有効応力解析プログラム「EFECT」(その1) - 基礎理論と地盤構成モデル -, 大林組技術研究所報, No.51, pp.7-14, 1995.12
- 8) 米澤健次, 穴吹拓也, 樋口俊一, 伊藤浩二, 堤内隆広, 江尻譲嗣 : 3次元大自由度モデルによる地盤-構造物連成系の地震応答FEM解析, 大林組技術研究所報, No.76, 2012.12
- 9) 財団法人沿岸開発技術研究センター : 事前混合処理工法技術マニュアル, pp.43-45, 1999.4
- 10) 財団法人沿岸技術研究センター : 「エコガイアストーン (固結タイプ)」 「エコガイアストーン (摩擦タイプ)」, 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書, pp.32-36, 2010.12