

# 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>

伊藤 浩二 疋田 喜彦

(本社土木本部生産技術本部)

古屋 弘

## Countermeasure to Prevent Road Deformation on Liquefiable Ground: Tough-Road<sup>®</sup>

Koji Ito Yoshihiko Hikita Hiroshi Furuya

### Abstract

This paper describes a countermeasure to prevent the residual deformation of roads on liquefiable ground, namely, Tough-Road. This prevents the large residual deformations of roads, such as the difference in the road level and the gradient, because of earthquake. Tough-Road provides a structural countermeasure to allow ground liquefaction, rather than a ground improvement such as the sand compaction pile method. This process is accompanied with a geo-grid and a lightweight soil composite in the subgrade to decrease the outward initial shear stress in liquefiable ground caused by the weight of the pavement, the course, and the gradient. Numerical analyses and a centrifuge model test were carried out to investigate the effectiveness of Tough-Road, and we confirmed the effectiveness by the residual deformation of a road by an earthquake. We present a simplified design procedure to address two different types of problems as follows: (a) specification of the lightweight soil (density and composite replaced by subgrade); (b) estimation of the residual road deformation by an earthquake, in terms of the seismic performance. The residual road deformation obtained with the new method was acceptable when compared with the predicted and measured residual road deformation, based on numerical analyses and centrifuge model tests.

### 概要

液状化が予想される地盤上の道路では、緊急時の道路機能の維持、路面排水機能の確保のため、一般にサンドコンパクションパイル（SCP）工法等の液状化対策により道路変状（残留沈下、残留傾斜等）を防止する。タフロードは、液状化地盤で生じる初期せん断応力を低減するためのジオグリッドと軽量土を併用した道路変状対策である。タフロードは、液状化の発生を許容するものの道路本体の性能を確保できるため、液状化対策より経済化を図れる。本研究では、液状化地盤の過剰間隙水圧の発生から消散までを考慮した有効応力解析、遠心力模型実験で得られる道路部の残留変位を基に、タフロードの有効性を確認した。タフロードの設計では、軽量土諸元（密度、幅）の設定、対策効果の指標である道路部の残留変位を予測する必要がある、軽量土諸元の簡易設定方法、道路部の残留変位の簡易予測方法を有効応力解析、遠心力模型実験で得られる残留変位を基に検証した。

## 1. はじめに

2007年新潟県中越沖地震では、発電所構内で路面の亀裂、沈下、隆起、路面沈下による地中配管ダクトとの段差等の道路変状のため、地震後の緊急時の道路機能を確保できなくなった<sup>1)</sup>。2011年東北地方太平洋沖地震においても、同様に発電所構内で液状化に伴う路面の沈下、隆起等の道路変状のため残留傾斜が生じ、横断の排水勾配を確保できなくなった等が地震後調査で確認された。

液状化が予想される地盤上の道路では、一般に道路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により液状化の発生を防止する。液状化対策による道路機能の確保では、改良範囲が深度方向に大規模となり高価である。

一方で、これらのような液状化対策と異なり、液状化

の発生を許容するものの道路本体の変状を抑制し道路機能を確保できれば、対策範囲が小規模となり液状化対策と比較して経済化を図れる。例えば、液状化地盤上の堤防の耐震対策においては、堤防底部のジオグリッドの敷設により堤防沈下を低減できることが確認されている<sup>2), 3), 4)</sup>。このような構造的な変状対策では、土構造物の機能維持を図りつつ多少の変状を許容するため、土構造物の性能に応じた設計方法も必要となっている。

本報では、道路本体の性能に応じた変状防止対策であるタフロードを提案し、地震時および地震後の液状化地盤の過剰間隙水圧の発生から消散までを考慮した有効応力解析、遠心力模型実験から得られた残留変位を基に、その有効性を確認した。

タフロードの設計では、軽量土諸元（密度、幅）の設定、道路変状防止効果の指標である道路部の残留変位を予測する必要がある。そこで、軽量土諸元の簡易設定方

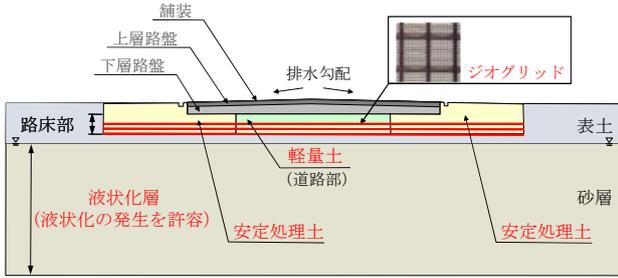


Fig. 1 タフロード Tough-Road

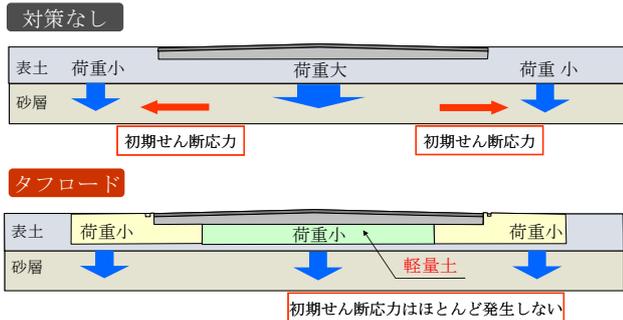


Fig. 2 原理 Principle

法、道路部の地震時残留変位の簡易予測方法を提案し、有効応力解析、遠心力模型実験から得られた残留変位との比較からその妥当性を検証した。

## 2. タフロード

### 2.1 概要

Fig. 1に模式図を示す。タフロードは、液状化地盤上の道路下の路床部に対して、路床底部のジオグリッドの敷設、路床部の埋戻土を軽量土と安定処理土の複合とする構造的な道路変状対策である。

### 2.2 特長

タフロードは、地震時に発生する道路変状(残留沈下、残留傾斜)を抑制し、地震後の道路機能(段差、排水勾配)を確保できる。液状化層では液状化の発生を許容するため、例えば従来の液状化対策(SCP工法)と比較して約50%まで経済化を図れる。道路部の変状対策のため対策深度が浅く、早期対応が可能である。

軽量土の材料では、石炭火力発電所から発生するクリンカアッシュ、製鉄所(高炉)から発生する水砕スラグの利用により経済化を図れる。

### 2.3 原理

Fig. 2に原理を示す。対策なしの道路部では、舗装、路盤の重量、路面の排水勾配により一般部(遠方地盤)と比較して重量があるため荷重差が大きい。その結果、液状化地盤で生じる初期せん断応力が大きいため、地震時において液状化地盤が側方へ広がり大きな残留変位が

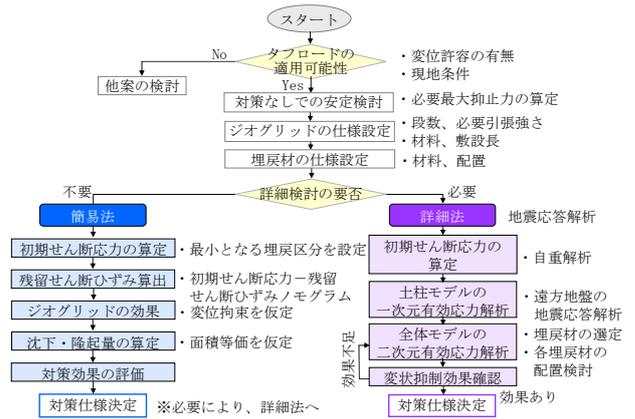


Fig. 3 設計方法 Design Procedure

生じ易い。一方で、タフロードでは、路床部を軽量土と安定処理土の複合とするため道路部と一般部との荷重差を小さくできる。その結果、液状化地盤で生じる初期せん断応力が小さいため、液状化地盤の地震時の残留変位を抑制できる。

路床底部のジオグリッドは、路床部における引張補強材の効果、軽量土と同様に液状化地盤で生じる初期せん断応力を小さくする効果のために敷設する。

以下の3、4章では、タフロードの地震時道路変状防止対策としての有効性を述べる。

## 2.4 設計方法

Fig. 3に設計方法を示す。ジオグリッドの仕様は、円弧すべりを用いた地震時安定解析より得られる必要最大抑止力に対して設定するものとした。埋戻材の仕様は、舗装、路盤等の自重により生じる液状化地盤の初期せん断応力、道路下の平均有効土被り圧を基に設定するものとした。

道路変状防止効果の指標である道路部の残留変位では、震度法を援用した簡易法、および有効応力解析に基づく詳細法により推定するものとした。ここで、詳細検討の要否は、対象の地盤条件が複雑な場合、高精度の道路変状防止効果の必要性を基に判断するものとした。

以下の5、6章では、タフロードの設計方法として必要である軽量土諸元の設定方法、道路部の地震時残留変位の予測方法を述べる。

## 3. 有効応力解析に基づく道路変状防止効果

### 3.1 目的

タフロードでは、道路部の残留変位が変状防止効果の指標であるため、地震時の残留変位に基づく対策効果を確認する必要がある。そこで、液状化地盤で生じる初期せん断応力を規定する路床部の埋戻土(軽量土、安定処理土の配置)を変数とする地震時有効応力解析(地震時

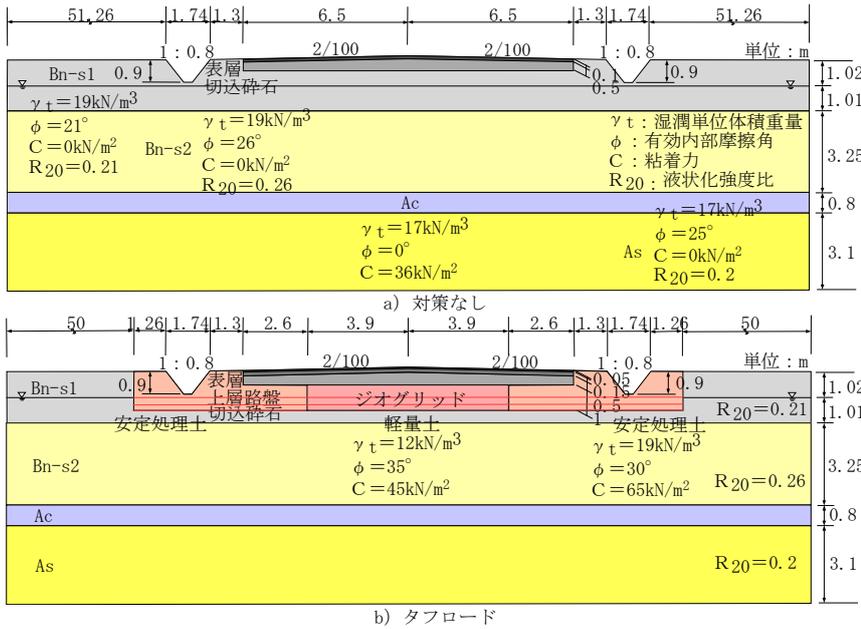


Fig. 4 断面と地盤定数  
Cross Section and Soil Properties

の過剰間隙水圧の発生までを考慮)を行い、道路部の地震時残留変位に基づく対策効果を検討する。

タフロードでは、地震時と同様に、地震後の残留変位に基づく対策効果も確認する必要がある。そこで、地震後有効応力解析(地震時の過剰間隙水圧の発生から地震後の過剰間隙水圧の消散までを考慮)を行い、道路部の地震後残留変位に基づく対策効果を検討する。ここで、解析プログラムは大林組で開発したEFECT<sup>5)</sup>である。

### 3.2 方法

Fig. 4に断面と主な地盤定数を示す。ジオグリッドの諸元は、地震時安定解析(等分布荷重 $q=10\text{kN/m}^2$ 、水平震度 $k_h=0.35$ )より得られる不足する抑止力を3段のジオグリッド(設計引張強さ $T_A=44\text{kN/m}$ 、敷設長 $21.6\text{m}$ )で分担した。埋戻土の諸元は軽量土をクリンカアッシュ、安定処理土をクリンカアッシュより重量のある現地発生土とした。タフロードでは、軽量土幅を道路部と遠方地盤の有効土被り圧が概ね等価となる $7.8\text{m}$ とした。

地震時有効応力解析では、対策なし、埋戻土を軽量土で一樣としたジオグリッド+軽量土、埋戻土を安定処理土で一樣としたジオグリッド+安定処理土、タフロードの4ケースを検討した。

解析ではジオグリッドをはり要素、ジオグリッドと埋戻土との境界をジョイント要素、左右境界、底面境界を粘性要素とし、①自重解析、②土柱モデルの有効応力解析、③全体モデルの有効応力解析の手順とした。地震波では、海溝型地震を想定して、建設省告示スペクトルの極めて稀に発生する地震動に適合する模擬地震動の内、乱数位相、継続時間が長いFig. 5のKOKURN2Hを用いた。

地震後有効応力解析では、地震後残留変位に及ぼす過剰間隙水圧の消散による影響を簡便に得るために、Fig.

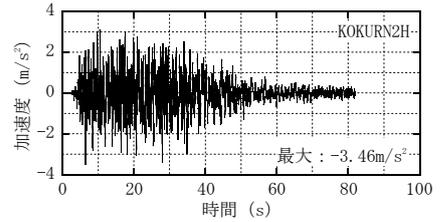


Fig. 5 入力波  
Time History of Input Motion

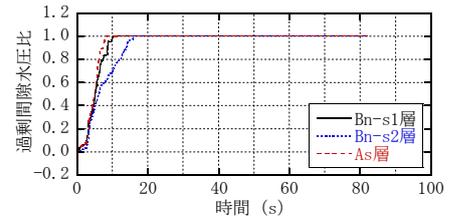


Fig. 6 時刻歴 (地震時有効応力解析)  
Time History (Effective Stress Analysis)

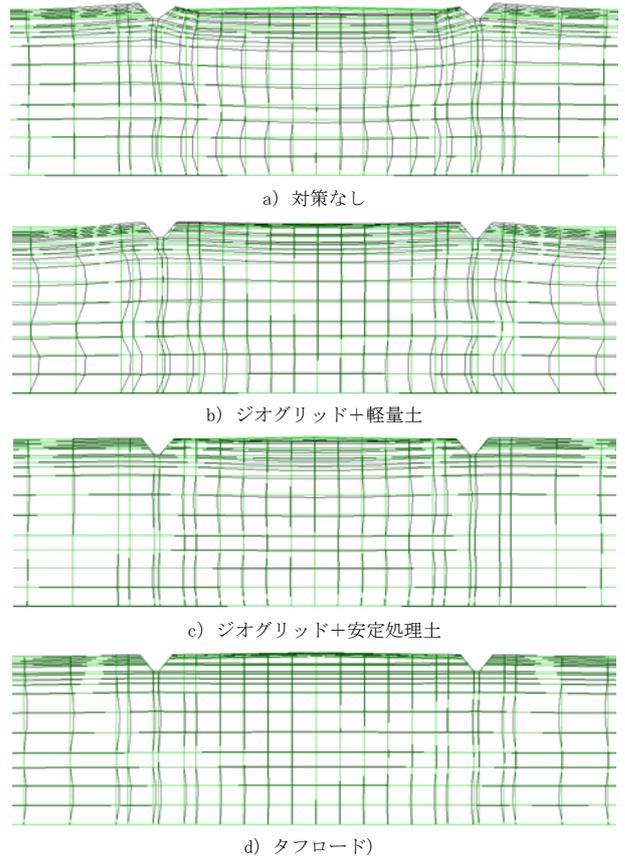


Fig. 7 残留変形 (地震時有効応力解析, 変位倍率: 等倍)  
Residual Deformation  
(Effective Stress Analysis, Displacement Scale : 1.0)

4の非液状化層のAc層をBn-s2層とした断面で対策なし、タフロードの2ケースを検討した。

### 3.3 結果

Fig. 6に地震時有効応力解析の土柱モデルで得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。地震時では地下水以深のBn-s1層, Bn-s2層, As層で一様に液状化が生じている。

Fig. 7に全体モデルで得られた地震終了時 (t=81.92 s) の残留変形, Fig. 8に地震終了時 (t=81.92s) の路面の残留変位の比較を示す。対策なしでは, 路肩部直下の液状化した地盤が左右に広がると伴に隆起し, 路面の残留沈下, 路面の残留傾斜 (負勾配) が生じている。

ジオグリッド+軽量土では, クリムカッシュが軽量であるため液状化した地盤が道路部に入り込むと伴に路肩部が隆起し, 路面の残留傾斜 (負勾配) が生じている。

ジオグリッド+安定処理土では, 路肩部直下の液状化した地盤の変状が小さいものの左右に広がるため, 路面の残留沈下, 路面の残留傾斜 (負勾配) が生じている。

タフロードでは, 路肩部直下の液状化した地盤の道路部への入り込みが小さくなり路肩部の隆起, 路面の残留沈下が小さく抑えられ, 路面の残留傾斜は当初路面の排水勾配を概ね維持している。

Fig. 9に地震後有効応力解析の土柱モデルで得られた過剰間隙水圧比と鉛直変位の時刻歴を示す。地震後では, 液状化層となる地下水以深のBn-s1層, Bn-s2層, As層で過剰間隙水圧が約6000sで消散し, 地震後の地表沈下は約0.07mとなった。

Fig. 10に対策なし, タフロードの全体モデルで得られた地震時 (t=81.92s), 地震後 (t=10081.92s) の路面の残留変位を示す。地震後の残留変位は, 対策なし, タフロードで同様に, 地震時の残留変位に過剰間隙水圧の消散による沈下を一緒に重合した形状となり, 地震時の残留変形が概ね維持される。タフロードでは, 地震時と同様に地震後においても有効な道路変状防止対策である。

#### 4. 模型実験に基づく道路変状防止効果

##### 4.1 目的

3章で設定した有効応力解析の条件をできるだけ反映し, かつ単純化した条件でのタフロードの遠心模型実験を行い, 道路部の残留変位に基づく対策効果を検討する。

##### 4.2 方法

Fig. 11に対策なし, タフロードの模型断面と主な計器, Table 1に材料と定数を示す。実験では模型縮尺を1/20とし, アルミ製剛土槽 (2000×700×650, 側面: アクリル) に仕切り板を設け, 対策なしとタフロードを同時に加振した。土槽側壁では色砂を格子状に設置した。

タフロードの諸元, 入力波は3章と同様とし, 計測は地震時の過剰間隙水圧の発生から地震後の過剰間隙水圧の消散までを対象とした。ここで, 以下の力学量は, 相似則に基づき実物換算している。

##### 4.3 結果

Fig. 12に実験で得られた地震時の時刻歴を示す。過剰

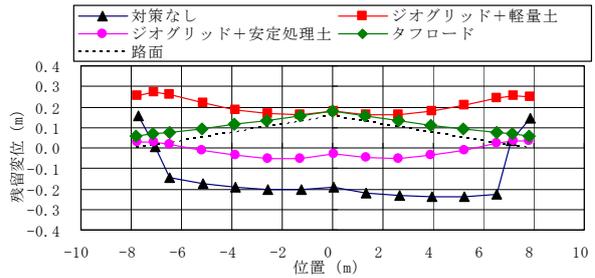


Fig. 8 残留変位 (地震時有効応力解析)  
Residual Displacement (Post-Effective Stress Analysis)

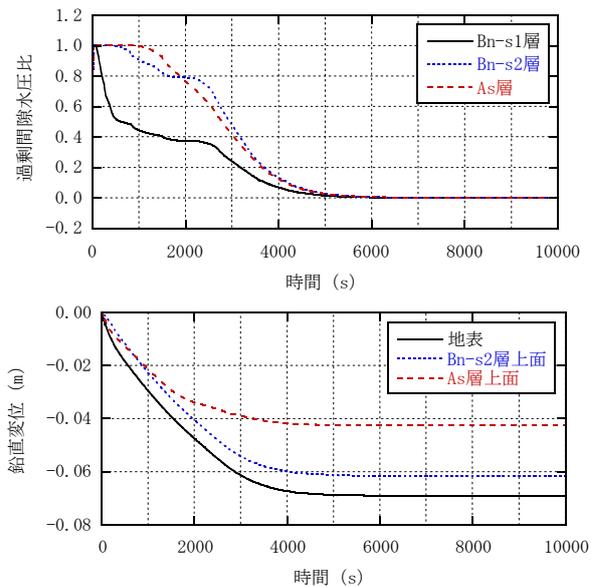


Fig. 9 時刻歴 (地震後有効応力解析)  
Time Histories (Post-Effective Stress Analysis)

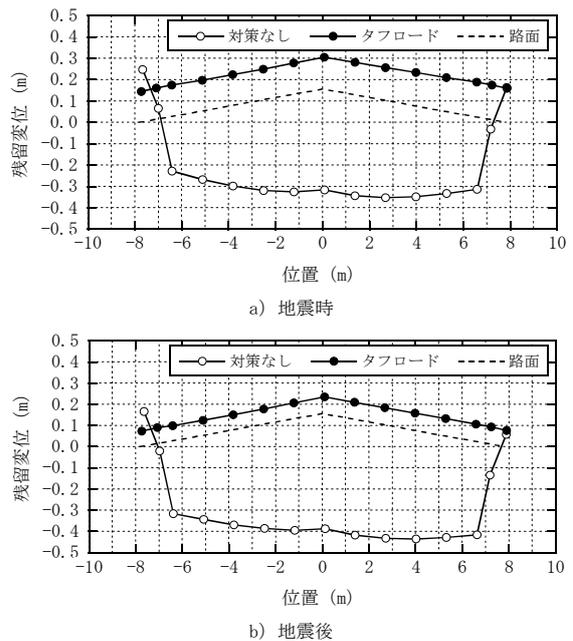


Fig. 10 残留変位 (地震後有効応力解析)  
Residual Displacement (Post-Effective Stress Analysis)

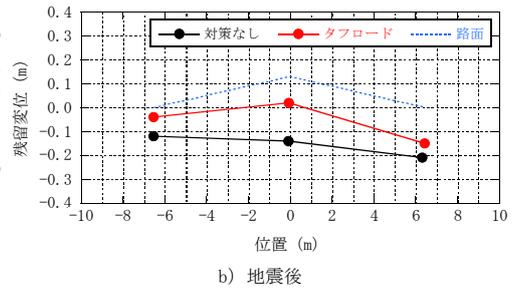
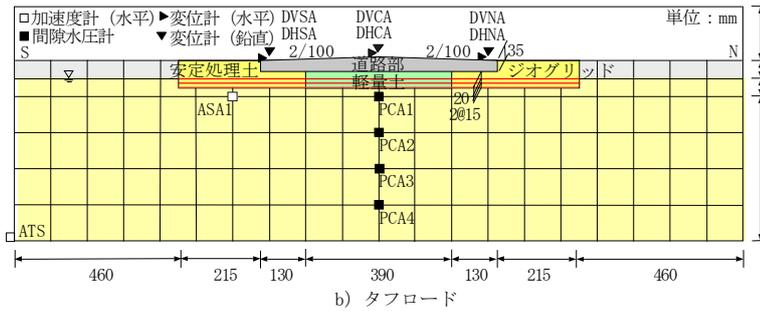
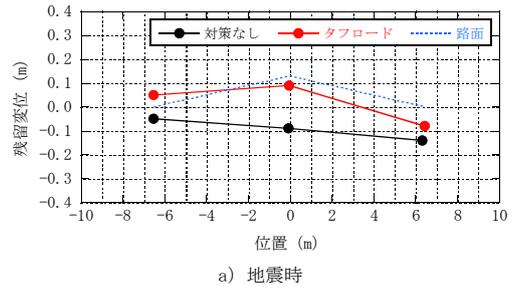
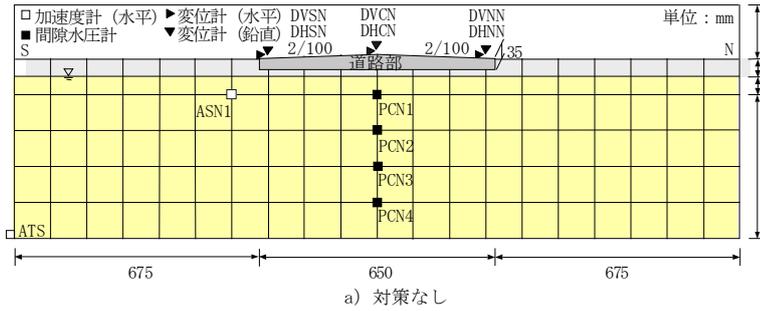


Fig. 11 断面と計器  
Cross Section and Transducers

Fig. 13 残留変位 (遠心模型実験)  
Residual Displacement  
(Centrifuge model Test)

間隙水圧比では、対策なしで地下水近傍から深部まで一様に液状化が生じた。タフロードでは、軽量土で用いた細礫による排水性、転圧による高密度化の影響も考えられるが、道路部直下の過剰間隙水圧の上昇が抑制された。

水平変位では、対策なし、タフロードともに道路部でS側へ移動したが、タフロードでは移動が抑制された。加速度では、対策なしで中立軸の移動が大きいタフロードで小さくなっており、タフロードでは液状化地盤で生じる残留水平変位が低減されたと考えられる。

鉛直変位では、対策なしの道路部中央で端部と比較して大きな残留沈下が生じるが、タフロードでは、対策なしと比較して道路部中央の残留沈下が小さく抑えられた。

Fig. 13に実験で得られた地震時、地震後の道路部の残留変位、Photo 1に色砂による地震後の残留変形を示す。

地震時、地震後では、対策なしの道路部で大きな残留沈下が生じ、路面の横断方向の排水勾配を確保できない。タフロードでは、道路部の移動はあるものの残留沈下は小さく、路面の排水勾配を概ね維持している。地震後では、対策なしの液状化地盤でS側側方への樽型の大きな残留変位が生じるがタフロードで残留変位が抑制された。

以上の実験で得られた地震時、地震後のタフロードによる変状防止効果の傾向は、地震時、地震後有効応力解析で得られた変状防止効果の傾向と概ね整合する。

## 5. 軽量土諸元の設定方法

### 5.1 目的

タフロードでは、液状化地盤で生じる初期せん断応力を遠方地盤とできるだけ等価になるようにジオグリッドと軽量土を併用する道路変状対策であるため、適切な軽

Table 1 材料と定数  
Materials and Properties

部位	材料	定数
地盤	砂砂7号 (D <sub>1</sub> =60%)	水位上: $\rho_t = 1.48 \text{ t/m}^3$ 水位下: $\rho_{sat} = 1.89 \text{ t/m}^3$
安定処理土	砂砂7号 セメント (添加率: 3.0%)	$\rho_t = 1.55 \text{ t/m}^3$
軽量土	軽量盛土材 (細礫) セメント (添加率: 5.6%)	$\rho_t = 1.19 \text{ t/m}^3$
道路部	粒調碎石	$\rho_t = 2.0 \text{ t/m}^3$
ジオグリッド	延伸ネット	引張強度: $T_{max} = 75 \text{ kN/m}$
間隙水	シリコンオイル	20cSt

量土諸元 (密度, 幅) を設定する必要がある。そこで、地震時に生じる道路変状 (液状化地盤の残留せん断ひずみに影響がある液状化地盤の初期せん断応力に着目して、軽量土諸元 (密度, 幅) の設定方法を検討する。

### 5.2 方法

Fig. 14に対象とする対策なし、タフロードの断面を示す。タフロードでは、ジオグリッド諸元 (材料, 敷設長) を地震時安定解析により不足する抑止力をジオグリッドで分担させて別途設定するものとした。

軽量土諸元 (密度, 幅) では、ジオグリッドによる引張補強材の効果は考慮せず、道路変状を防止するために、道路部重量、路面勾配により生じる液状化地盤の初期せん断応力を低減し、残留沈下、残留傾斜を抑制する条件で設定するものとした。

Table 2に定数を示す。ここでは、軽量土密度を固定と仮定し、軽量土幅を変数とした。平均有効土被り圧は、評価深度 (軽量土下面: G.L. -1.7m) の道路幅15.6mにお

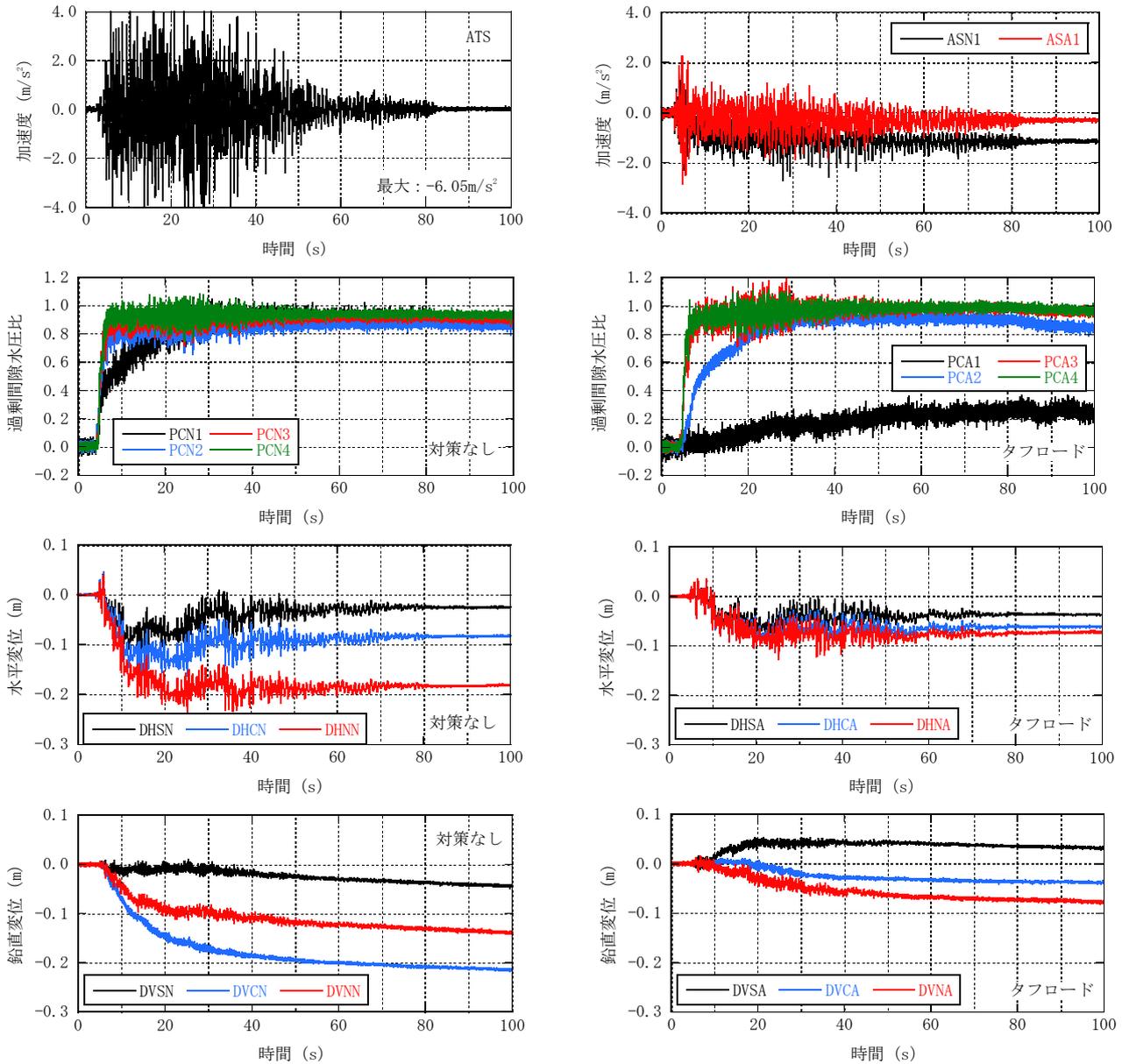


Fig. 12 時刻歴 (水平変位：N側を正，鉛直変位：沈下を負)  
Time Histories (Horizontal Displacement Positive to N, Vertical Displacement Negative for Settlement)

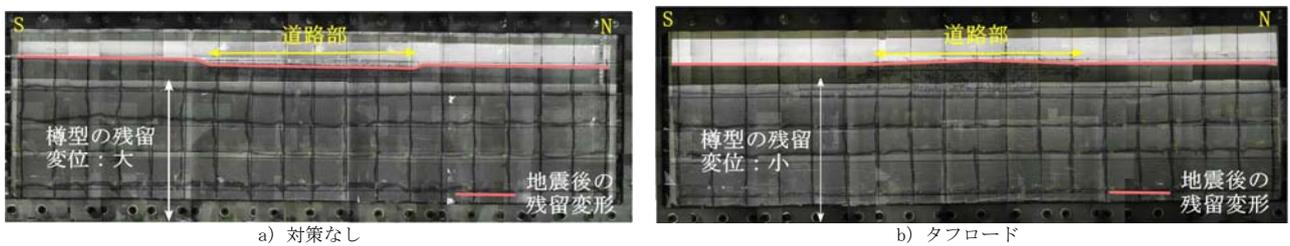


Photo 1 色砂に基づく残留変形 (地震後)  
Residual Deformation Based on Color Sand (Post Earthquake)

ける平均である。

Fig. 15に荷重分布を示す。液状化地盤の初期せん断応力では、路面勾配の影響を考慮するために、Fig. 16により、道路幅の分割幅 (=1.3m) 毎に評価深度の有効土被

り圧と遠方地盤の有効土被り圧との差 $\Delta q$ を算定し、それぞれの分割幅毎の帯荷重によるせん断応力の総和で評価した<sup>6)</sup>。したがって、Table 2の軽量土幅に応じて、任意位置の液状化地盤の初期せん断応力が算定され、符号、

絶対量に基づく変状防止効果の評価が可能となる。

### 5.3 結果

Fig. 17に対策なし、軽量土幅7.8m、軽量土幅13.0mで得られた道路部直下（道路中心からの距離 $x=0.65\sim 7.15\text{m}$ ）の初期せん断応力、道路端部（道路中心からの距離 $x=7.15\text{m}$ ）で得られた初期せん断応力の比較を示す。

対策なしでは初期せん断応力の符号が正であり、地震時において道路部の液状化した地盤が側方へはらみだす可能性が高い。軽量土幅13.0mでは初期せん断応力の符号が概ね負であり、地震時において周辺の液状化した地盤が道路部へ入り込む可能性が高い。

軽量土幅7.8m(タフロード)では、初期せん断応力の符号が概ね負であるが、道路端部近傍での絶対量が小さいことから、地震時において周辺の液状化した地盤の道路部への入り込みが小さく抑えられる可能性が高いと考えられる。

道路端部における初期せん断応力では、軽量土幅が広がるに伴い符号が概ね正から負へ移動し、軽量土幅5.2mで絶対量が最小である。一方で、軽量土幅7.8mでは、初期せん断応力の絶対量は軽量土幅5.2mより大きいものの符号が概ね負であり、道路部の液状化した地盤の側方へのはらみだしを抑えられる可能性が高いと考えられる。

前述したFig. 7は、Fig. 14と概ね同じ条件での地震時有効応力解析で得られた残留変形である。対策なしでは、道路部の液状化した地盤が側方へ大きくはらみだし、Fig. 17の対策なしの初期せん断応力の符号、絶対量の傾向と整合する。

ジオグリッド+軽量土では、周辺の液状化した地盤が道路部へ大きく入り込み、Fig. 17の軽量土幅13.0mの初期せん断応力の符号、絶対量の傾向と整合する。

タフロードでは、周辺の液状化した地盤の道路部への入り込みが小さく抑えられ、Fig. 17の軽量土幅7.8mの初期せん断応力の符号、絶対量の傾向と整合する。

## 6. 地震時残留変位の予測方法

### 6.1 目的

タフロードでは、道路部の地震時残留変位が対策効果の指標であるため、有効応力解析による詳細予測方法と

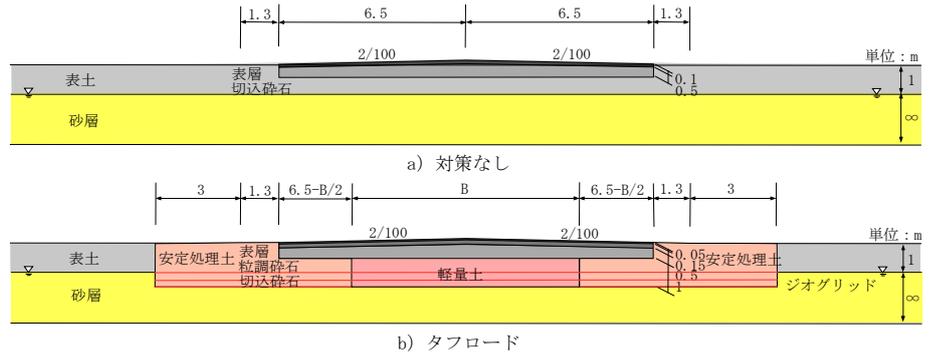


Fig. 14 対象断面  
Cross Section

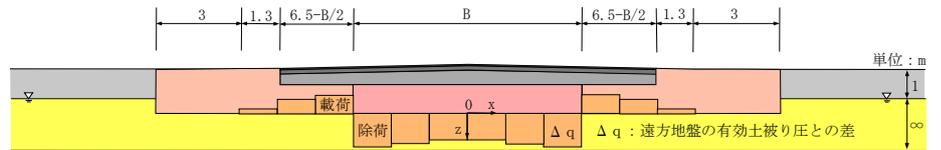
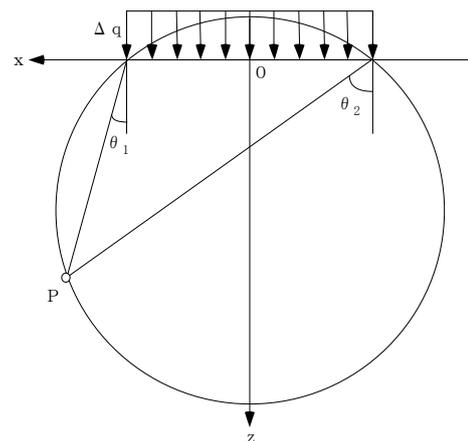


Fig. 15 荷重分布  
Distribution of Load

Table 2 定数  
Physical Properties

対策工	対策なし	タフロード						遠方地盤	
		0.0	2.6	5.2	7.8	10.4	13.0		
軽量土幅B	m	—	0.0	2.6	5.2	7.8	10.4	13.0	—
表層 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	22.5	22.5						—
粒調砕石 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	—	20.0						—
切込砕石 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	20.0	20.0						—
表土 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	19.0	—						19.0
砂層 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	19.0	—						19.0
安定処理土 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	—	19.0						—
軽量土 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	—	12.0						—
平均有効土被り圧	kN/m <sup>2</sup>	27.4	27.4	26.0	24.6	23.2	21.8	20.4	25.4



$$\tau_{zx} = \sum_1^n \frac{\Delta q_n}{\pi} \sin \theta_0 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\theta_0 = \theta_2 - \theta_1$$

Fig. 16 初期せん断応力の算定

### Determination of Initial Shear Stress

同様に、簡便な設計方法である簡易予測方法も必要である。そこで、道路部の地震時残留変位に関して、軽量土

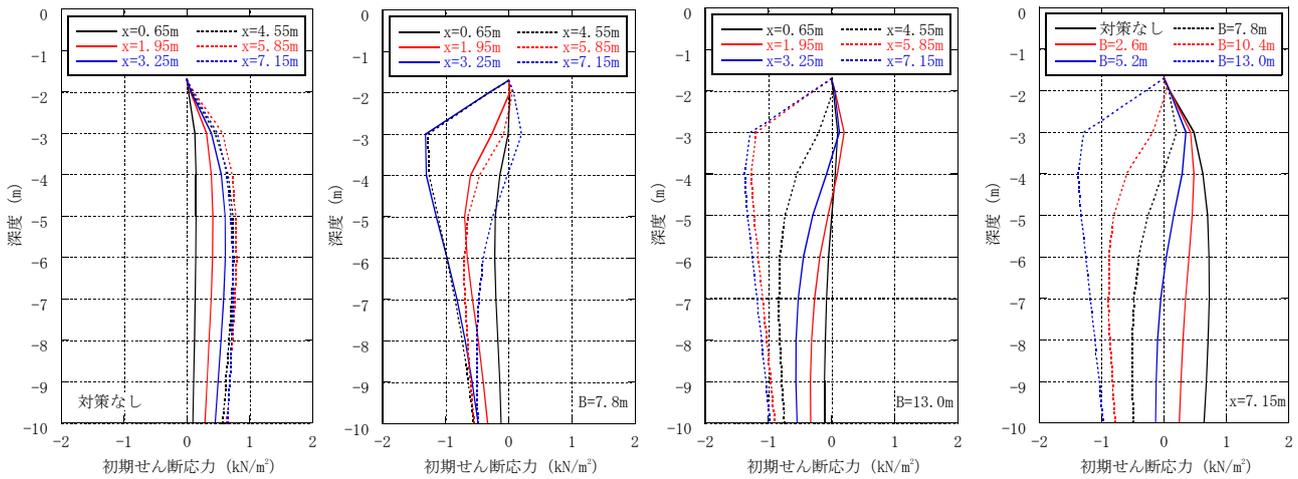


Fig. 17 道路部直下，道路端部の初期せん断応力

Distribution of Initial Shear Stress under Road and Edge of Road

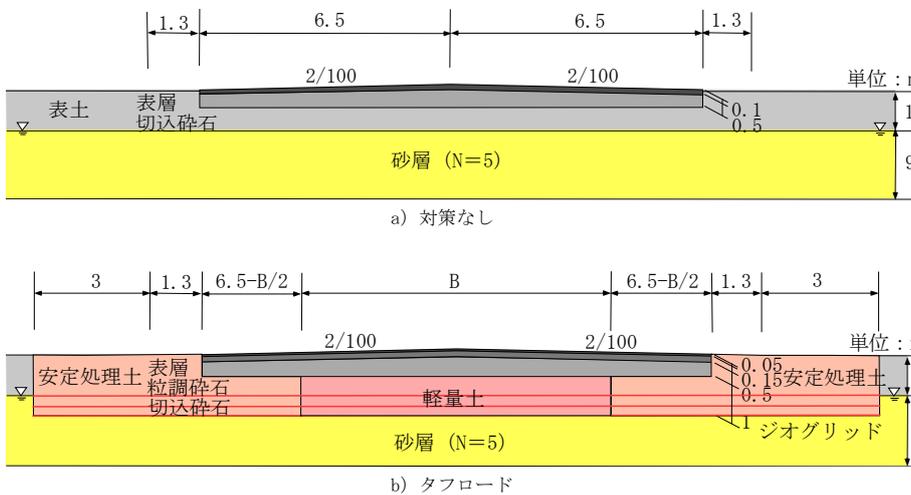


Fig. 18 断面  
Cross Section

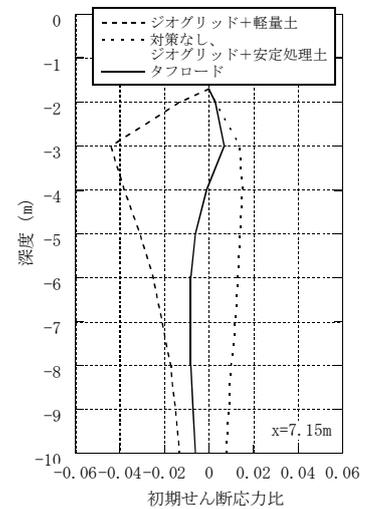


Fig. 20 初期せん断応力比  
Initial Shear Stress Ratio

による液状化地盤の初期せん断応力の低減効果，ジオグリッドによる引張補強材の効果を考慮した簡易予測方法を検討する。

## 6.2 方法

Fig. 18に対象とする対策なしとタフロードの断面を示す。道路部の地震時残留変位は，以下の手順で予測するものとした。

- ①初期せん断応力比：路盤重量，路床重量，路面勾配により生じる道路端部における液状化地盤の初期せん断応力比（初期せん断応力／初期平均有効応力）の深度分布を設定する。軽量土による効果は，初期せん断応力比の低減で反映される。
- ②残留せん断ひずみー初期せん断応力比のノモグラム：地盤条件（N値等），地震動レベルに応じて，液状化地盤の初期せん断応力比を変数とする室内試験，要素解析等に基づきノモグラムを設定する。
- ③残留せん断ひずみ：ノモグラムにより液状化地盤の初

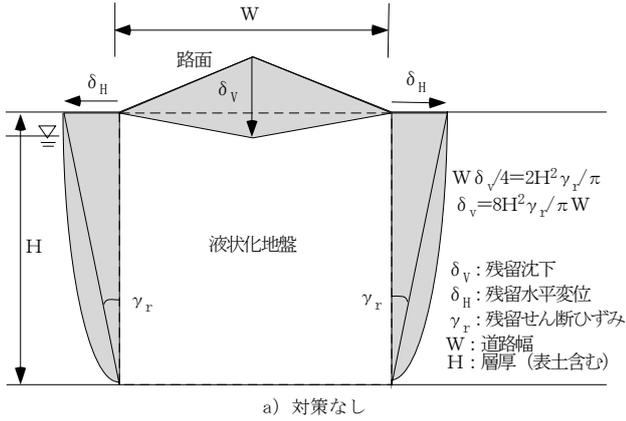
期せん断応力比に応じた残留せん断ひずみを推定する。

④残留変位：液状化地盤の残留せん断ひずみ，液状化層厚，道路幅等を用いて，面積等価の条件を仮定して残留変位を推定する。ジオグリッドによる引張補強材の効果は，残留水平変位の拘束で反映される。

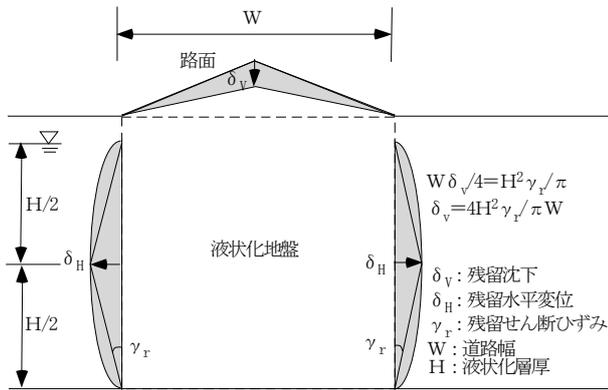
Fig. 19に面積等価の条件を仮定した残留変位の予測方法を示す。対策なしでは，地盤内で側方への余弦型の残留水平変位を仮定して道路中央の残留沈下を推定する。

ジオグリッド+安定処理土では，ジオグリッドによる引張補強材の効果を考慮して液状化地盤で側方への上下余弦型の残留水平変位を仮定して道路中央の残留沈下を推定する。ジオグリッド+軽量土，タフロードでは，同様に液状化地盤で道路部への上下余弦型の残留水平変位を仮定して道路端部の残留沈下（隆起）を推定する。

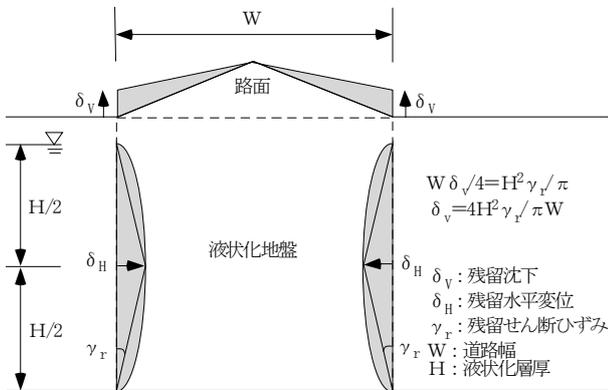
Table 3にケースと定数を示す。残留変位の予測は，対策なし，ジオグリッド+軽量土（軽量土幅21.6m），ジオグリッド+安定処理土（軽量土幅0m），タフロード（軽量土幅7.8m）の4ケースとした。ここで，有効土被り圧は，



a) 対策なし



b) ジオグリッド+安定処理土)



c) ジオグリッド+軽量土, タフロード

Fig. 19 残留変位の予測方法  
Prediction Method of Residual Displacement

軽量土下端 (G.L. -1.7m) の道路幅15.6mの平均である。

### 6.3 結果

Fig. 20に各ケースの道路端部 (道路中心からの距離x=7.15m) で得られた初期せん断応力比の比較を示す。タフロードでは、他のケースと比較して初期せん断応力比の絶対量が小さく符号が概ね負であり、道路部の液状化地盤の側方への移動が抑えられる。

Fig. 21にN=5, 10, 20相当の液状化地盤, レベル2タイプI地震動 (k<sub>h</sub>=0.35, 波数20) を想定した非排水単

Table 3 ケースと定数  
Cases and Physical Properties

対策工	対策なし	タフロード			遠方地盤	
軽量土幅B	m	—	21.6	0	7.8	
安定処理土幅	m	—	0	21.6	13.8	
表層 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	22.5	22.5			
粒調碎石 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	—	20.0			
切込碎石 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	20.0	20.0			
表土 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	19.0	—			
砂層 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	19.0	—			
安定処理土 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	—	19.0			
軽量土 $\gamma_t$	kN/m <sup>3</sup>	—	12.0			
有効土被り圧	kN/m <sup>2</sup>	27.4	20.4	27.4	23.2	25.4

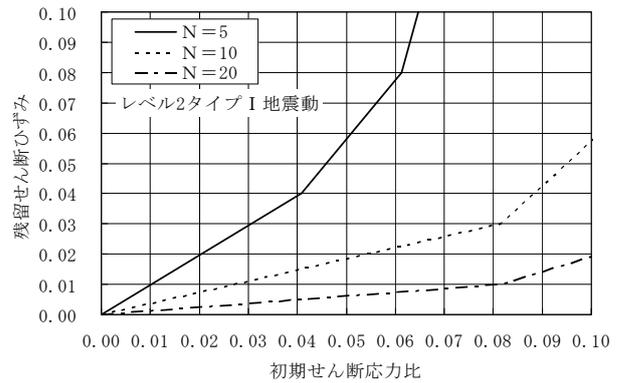


Fig. 21 残留せん断ひずみのノモグラム  
Nomogram of Residual Shear Strain

Table 4 残留沈下 (沈下: -, 隆起: +)  
Residual Settlement

(Settlement is negative and Swelling is Positive)

対策工	単位	対策なし	軽量土	安定処理土	タフロード
軽量土幅B	m	—	21.6	0	7.8
安定処理土幅	m	—	0	21.6	13.8
初期せん断応力比	—	0.015	-0.044	0.015	-0.008
残留せん断ひずみ	—	0.015	-0.044	0.015	-0.008
残留沈下	m	-0.294	0.349	-0.119	0.063
備考	層厚H=10m, 液状化層厚H=9m, 道路幅W=13m				

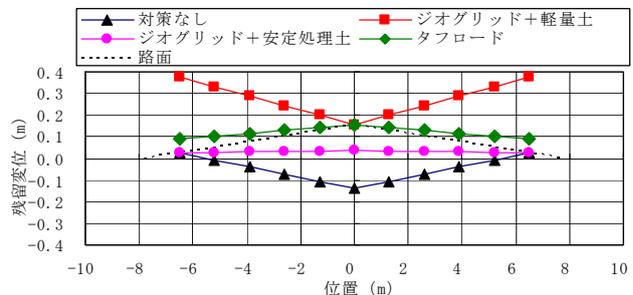


Fig. 22 残留変位 (地震時)  
Residual Displacement (During Earthquake)

純せん断条件の要素解析で得られた残留せん断ひずみ-初期せん断応力比の関係を示す。液状化地盤の残留せん断ひずみは、初期せん断応力比の増加に伴い漸増する傾向である。

Table 4にFig. 20より設定した各ケースの初期せん断応力比, Fig. 21より設定した残留せん断ひずみ, Fig. 19より算定した道路部の地震時残留変位を示す。タフロードでは, 対策なしと比較して残留沈下(隆起)が約1/5に抑制された。

Fig. 22に簡易予測方法で得られた残留変位を示す。Fig. 8の地震時有効応力解析で得られた残留変位, Fig. 13の遠心力実験で得られた地震時残留変位と比較すると, 簡易予測方法で得られる道路変状(残留沈下, 残留傾斜)は, 詳細予測方法, 遠心模型実験と概ね整合する。

## 7. まとめ

ジオグリッドと軽量土を併用した液状化地盤上の道路変状対策であるタフロードに関して, その有効性と設計方法を検討した。

1) タフロードでは, 液状化地盤で生じる初期せん断応力を遠方地盤のようにできる限り低減することにより, 地震時の液状化に伴う道路変状(残留沈下, 残留傾斜)の防止が可能である。

2) タフロードでは, 液状化地盤で生じる初期せん断応力をできるだけ低減し残留沈下, 残留傾斜を小さくするという条件により最適な軽量土諸元(密度, 幅)を設

定できる。

3) タフロードでは, 軽量土の効果, ジオグリッドの効果を検討した簡易予測方法により, 地震時の道路変状を予測できる。

## 参考文献

- 1) 原子力土木委員会:新潟県中越沖地震被害の緊急報告会, 土木学会URL, (2007)
- 2) 金山義延, 他:ジオテキスタイルによる堤防耐震対策とその効果確認計測 技術・研究ノート, Vol.15, No.1, pp.47-52, (1997)
- 3) 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, ジオシンセティックス論文集, 第16巻, pp.119-125, (2001)
- 4) 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, ジオシンセティックス論文集, 第17巻, pp.207-214, (2002)
- 5) 伊藤浩二:動的有効応力解析プログラム「EFFECT」(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)
- 6) 山口柏樹:改定増補土質力学, 技報堂, pp.143-145, (1995)