

# ジオテキスタイルを用いた補強土工法 に関する数値解析

---

前田工織株式会社

辻慎一郎

# 講演内容

1. はじめに
2. 補強土工法の概要
3. 二重壁構造を持つジオテキスタイル補強土壁「アダムウォール」の数値解析
3. 既設盛土の耐震補強工法に関する数値解析
4. おわりに

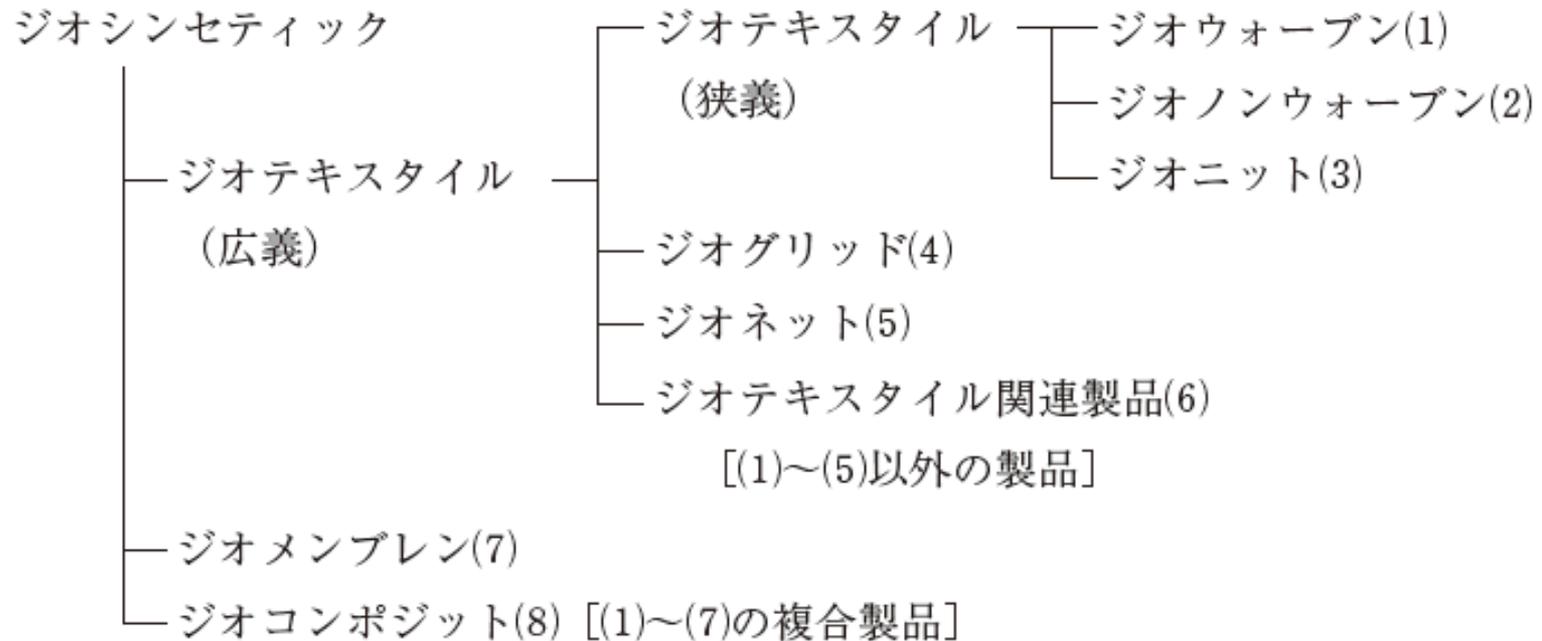
はじめに

---

# はじめに

## ジオテキスタイル

- 面状もしくは帯状で様々な材質からなる人工材料で、補強、分離、ろ過、排水、保護機能と様々な特性を有している。



### ジオシンセティックスの分類

(ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアルより引用)

# ジオテキスタイルの用途の例

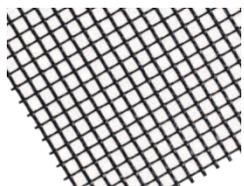
## 盛土補強



## 排水



## 地盤補強



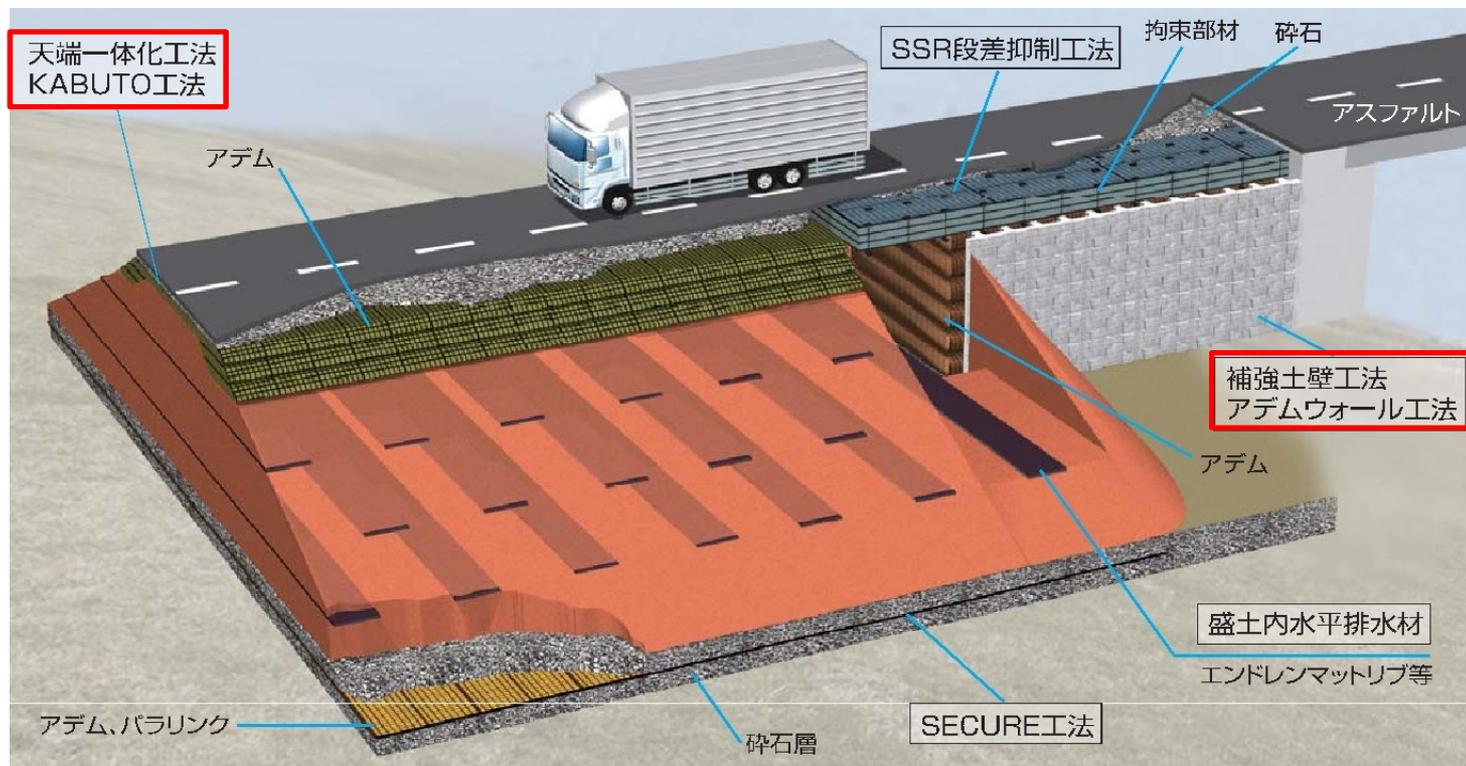
## 分離



# ジオテキスタイル補強土工法を対象とした数値解析

対象とする補強土工法

- ジオテキスタイル補強土壁工法「アダムウォール」
- 盛土の天端一体化工法「KABUTO工法」



# 補強土工法の概要

---

# 補強土工法の種類

## 工種

### 補強土壁工法

(勾配 1:0.6より急)



## 補強土工法

### 補強盛土工法

(勾配 1:0.6~1:1.0,  
1:1.0より緩い)



### 軟弱地盤対策



## 2000年前の補強土壁工法

### 漢代長城

- 所在地: 中国敦煌市
- 補強材: 葦



# 現在の補強土壁工法

ジオテキスタイル



補強土壁工法



# ジオテキスタイルの歴史

- 1967年 軟弱地盤上のシート工法の研究
- 1973年 鉄道盛土のり面のプラスチック補強工法の研究
- 1977年 第1回ジオテキスタイル国際会議
- 1979年 盛土補強用ジオテキスタイルの発明(英国)
- 1984年 国内でジオテキスタイル補強土壁の初施工
- 1986年 第1回ジオテキスタイルシンポジウムの開催(IGS日本支部)
- 1992年 ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアルの発刊
- 2000年 第一回改訂版(土木研究センター)の発刊
- 2014年 第二回改訂版(土木研究センター)の発刊

# 補強土の現場実験(その1)

## □ 逆勾配盛土の構築実験



## 補強土の現場実験(その2)



## 補強土工法の種類

### □ 壁面を緑化させる形式



### □ コンクリートパネル形式

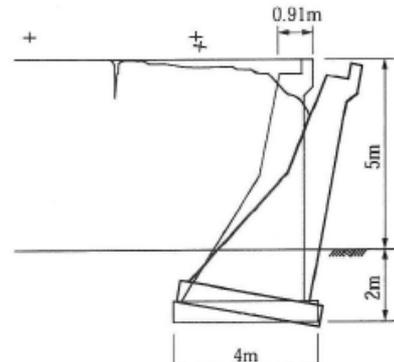


# 補強土の耐震性

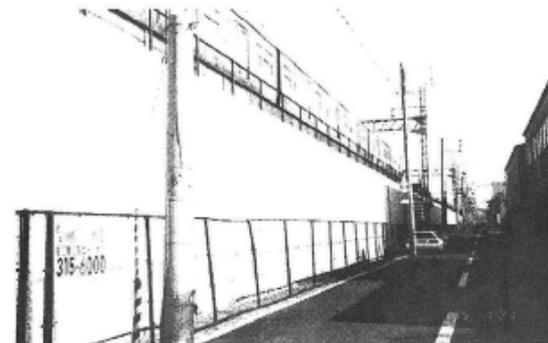
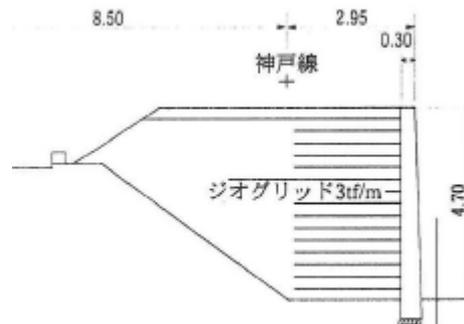
## 既往の研究①

- 舘山勝, 堀井克己, 古関潤一, 龍岡文夫: ジオテキスタイル補強土擁壁の耐震性, ジオシンセティックス論文集, 第14巻, pp.1-18, 1999.
- →兵庫県南部地震で, 従来形式の擁壁(もたれ式擁壁, 重力式擁壁, L型擁壁)の被害は大きかったが, ジオテキスタイル補強土擁壁はほとんど被害がなく, 一部, 激震地に設置されていた補強土壁でも, 目違いなどの軽微な被害でとどまった。

重力式擁壁



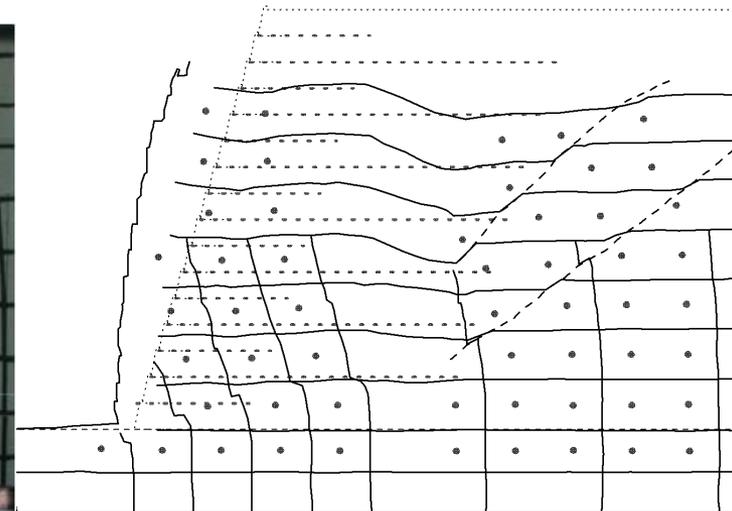
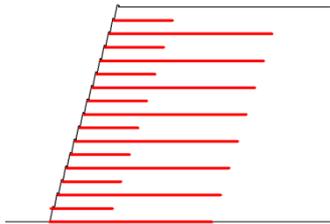
補強土擁壁



# 補強土の耐震性

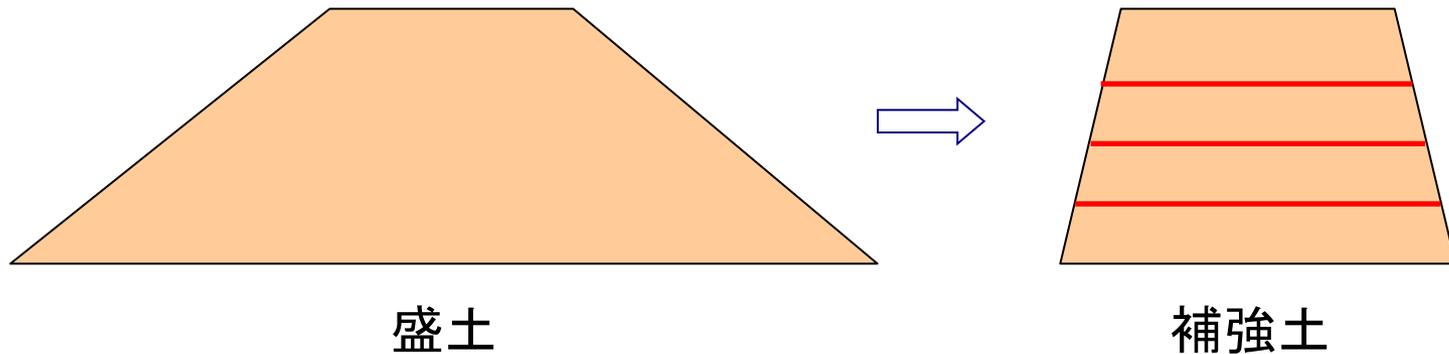
## 既往の研究②

- 竜田尚希, 板垣聡, 間昭徳, 佐々木哲也, 杉田秀樹, 中根淳: ジオテキスタイル補強土壁の地震時挙動—急勾配補強土壁の遠心振動载荷試験—, ジオシンセティックス論文集, 第21巻, pp.183-186, 2006.
- →壁高8mに相当する補強土壁に対して, 動的遠心実験を行った結果, 補強土壁は一体的に挙動し, 安定補助材を配置した試験体では, 正弦波750gal加振後も, 補強領域内にすべり線は達しないことが確認された。



# ジオテキスタイルを用いた補強土工法の特徴

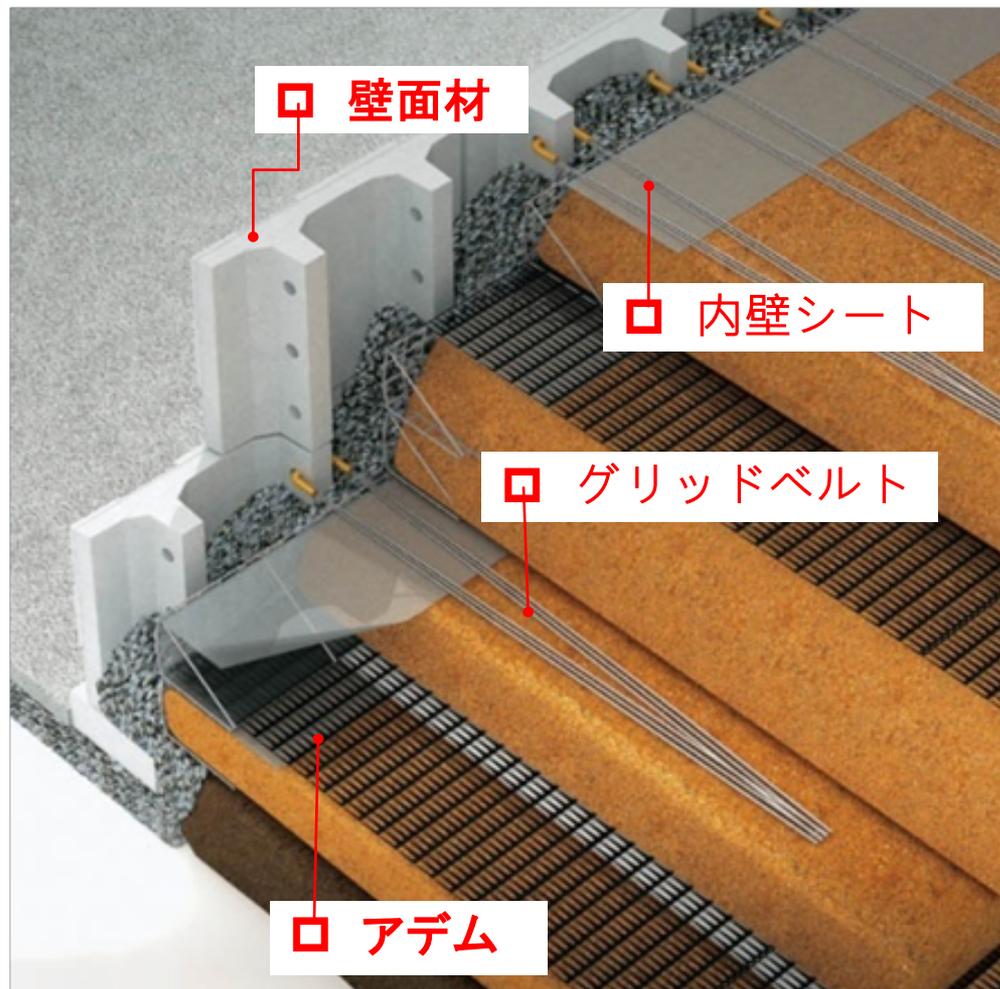
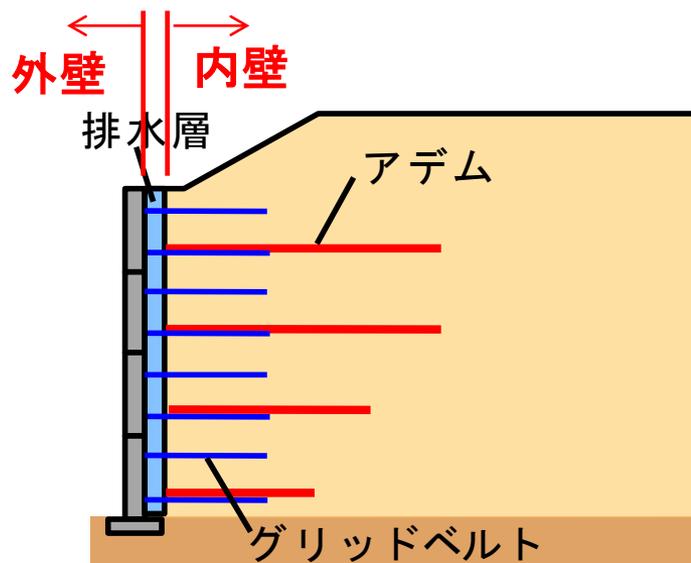
- 土中にジオテキスタイルを敷設して、土とジオテキスタイルの摩擦抵抗による引抜き抵抗によって自立した構造を構築する。
- 建設発生土を含めた広範囲の盛土材料に適用できる。
- 特殊な建設機械を必要とせず、施工が容易である。
- 耐震性に優れている。



# 二重壁構造を持つジオテキスタイル補強土壁 「アダムウォール」の数値解析

---

# アダムウォール



## 二重壁構造の特徴

### □ 施工時

コンクリートパネルによる壁面材と、ジオテキスタイルによる補強盛土体に空間を設けて、施工時の盛土の変形を壁面材に作用させずに、**壁面近傍まで盛土材料を十分に締固めることができる。**

### □ 完成時

内壁と外壁はグリッドベルトで連結され、内壁構築後に砕石が投入されて排水層としての役割を持たせている。



# 平成24年2月 建設技術審査証明(建技審証 第1103号)

## 二重壁構造を持つジオテキスタイル補強土壁「アデムウォール」

### □ 審査機関

財団法人 土木研究センター

委員長：桑野 二郎(埼玉大学)

委員：宮田 喜壽(防衛大学校)

若井 明彦(群馬大学)

足立 賢一(国土交通省関東地方整備局)

小橋 秀俊(土木研究所)

佐々木 哲也(土木研究所)

守屋 進(土木研究所)

苗村 正三(土木研究センター)

### □ 審査項目

主要材料の強度特性

アデムウォールの安定性

アデムウォールの施工性

アデムウォールの維持管理性

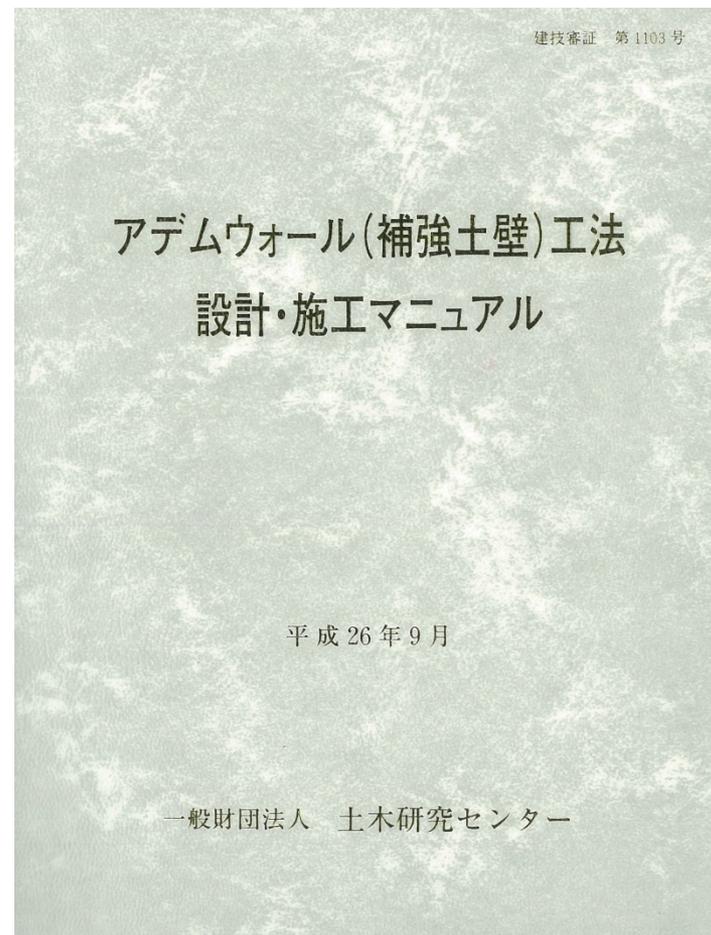


# アダムウォール(補強土壁)設計・施工マニュアル

## アダムウォール設計・施工マニュアル技術委員会

一般財団法人 土木研究センター  
委員長：桑野 二郎(埼玉大学)  
委員：宮田 喜壽(防衛大学校)  
若井 明彦(群馬大学)  
藤岡 一頼(高速道路総合技術研究所)  
三木 博史(土木研究センター)  
苗村 正三(土木研究センター)  
事務局：了戒 公利(土木研究センター)  
中根 淳(土木研究センター)

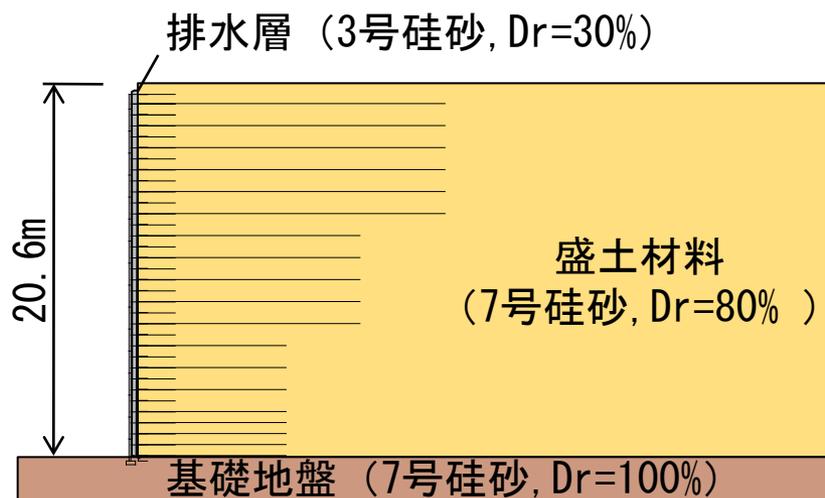
(平成26年3月)



# アダムウォールの耐震性の検証

## 遠心力載荷振動試験

- 遠心加速度50G場で、壁高20.6mに相当するアダムウォールの試験体を構築
- 実験には、大型動的遠心力載荷試験装置(土木研究所)を使用



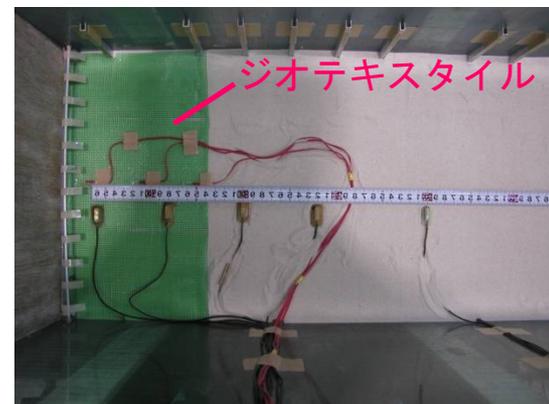
# 動的遠心模型実験

## 試験体の構築1

### □ 基礎地盤の作成



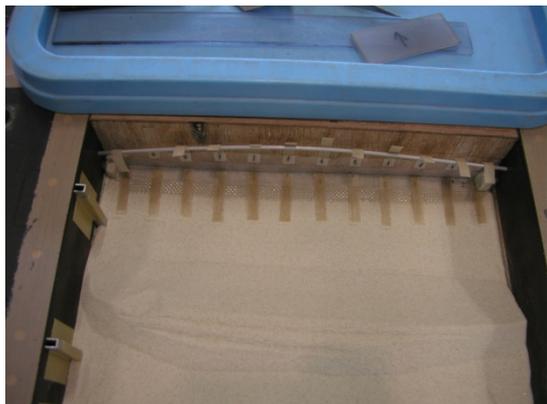
### □ 壁面材, 鋼製枠の設置, ジオテキスタイルの敷設



# 動的遠心模型実験

## 試験体の構築2

- 盛土材料の投入，締固め，壁面材の設置，補強材敷設の繰り返し



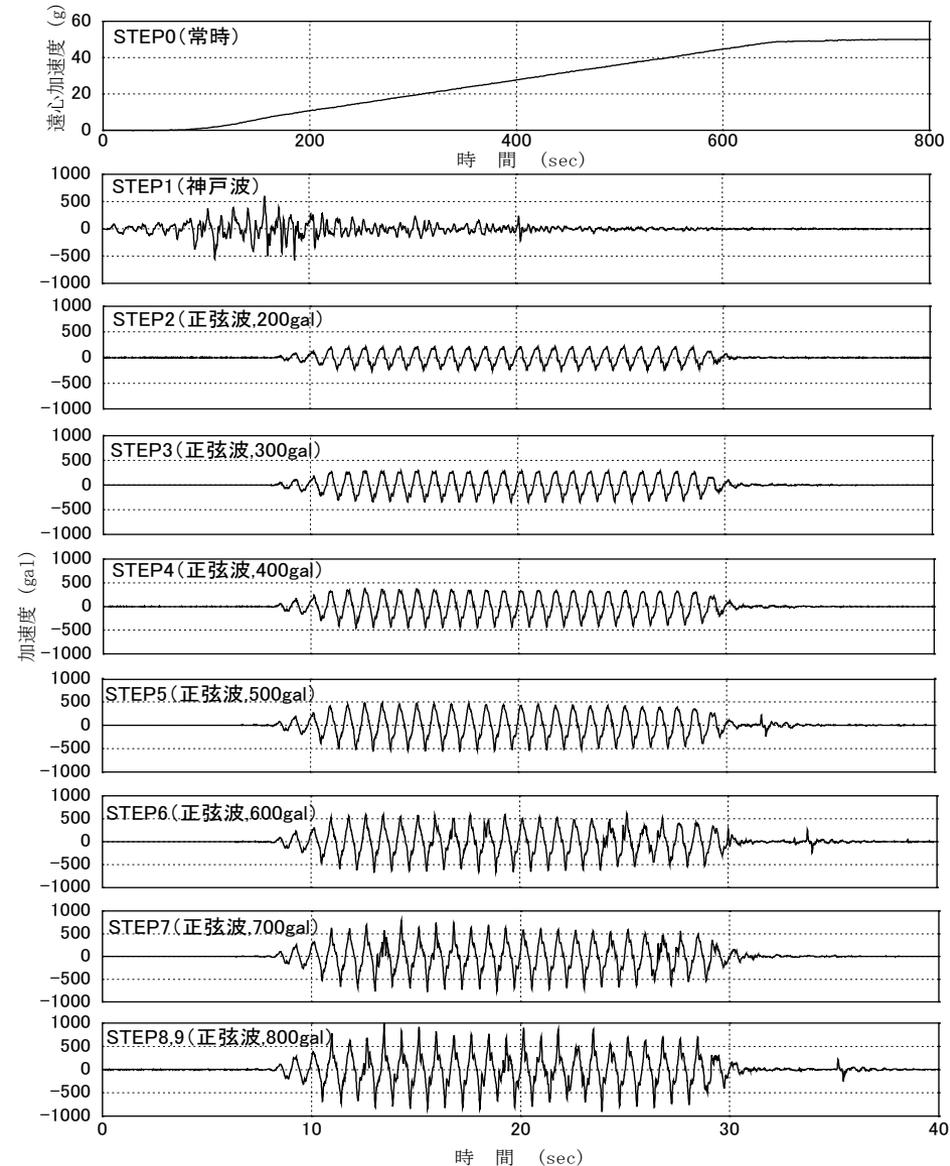
- 排水層への碎石の投入→完成



# 動的遠心模型実験

## 実験条件

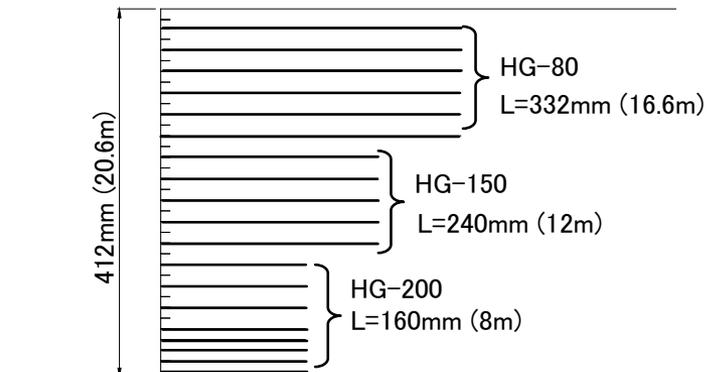
- STEP0 : 50Gの遠心加速度
- ↓
- STEP1 : 最大加速度を600galに調整した神戸海洋気象台N-S成分(神戸波)
- ↓
- STEP2~9 : 最大加速度200gal~800galの正弦波を30波



# 動的遠心模型実験

## 実験ケース

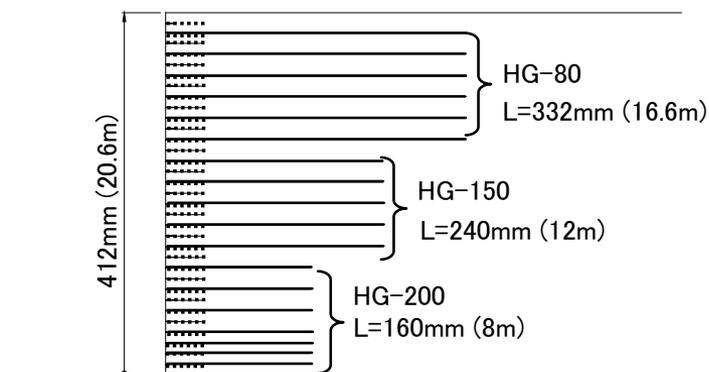
CASE1 : 壁面材なし, ベルトなし, 補強材不等長



基礎地盤

L: 敷設長, ( )内の値は実際のスケールに換算した値

CASE2 : 壁面材なし, ベルトあり, 補強材不等長

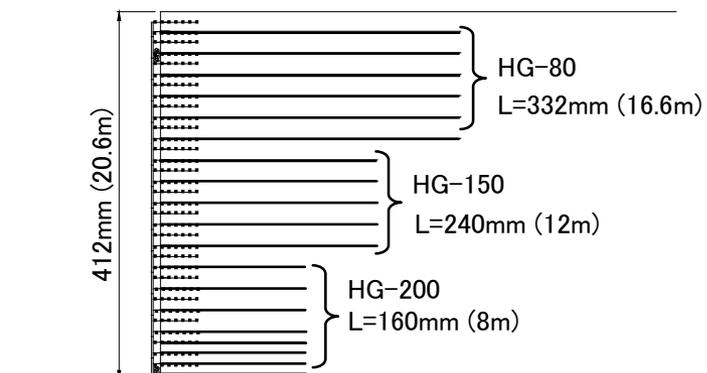


基礎地盤

— 補強材 ..... グリッドベルト (L=2m)

L: 敷設長, ( )内の値は実際のスケールに換算した値

CASE3 : 壁面材あり, ベルトあり, 補強材不等長

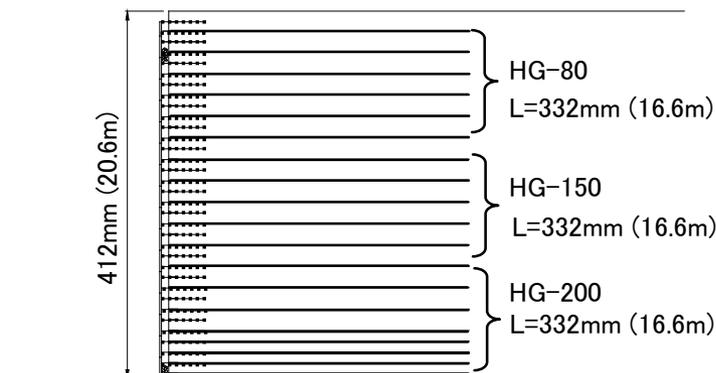


基礎地盤

— 補強材 ..... グリッドベルト (L=2m)

L: 敷設長, ( )内の値は実際のスケールに換算した値

CASE4 : 壁面材あり, ベルトあり, 補強材等長



基礎地盤

— 補強材 ..... グリッドベルト (L=2m)

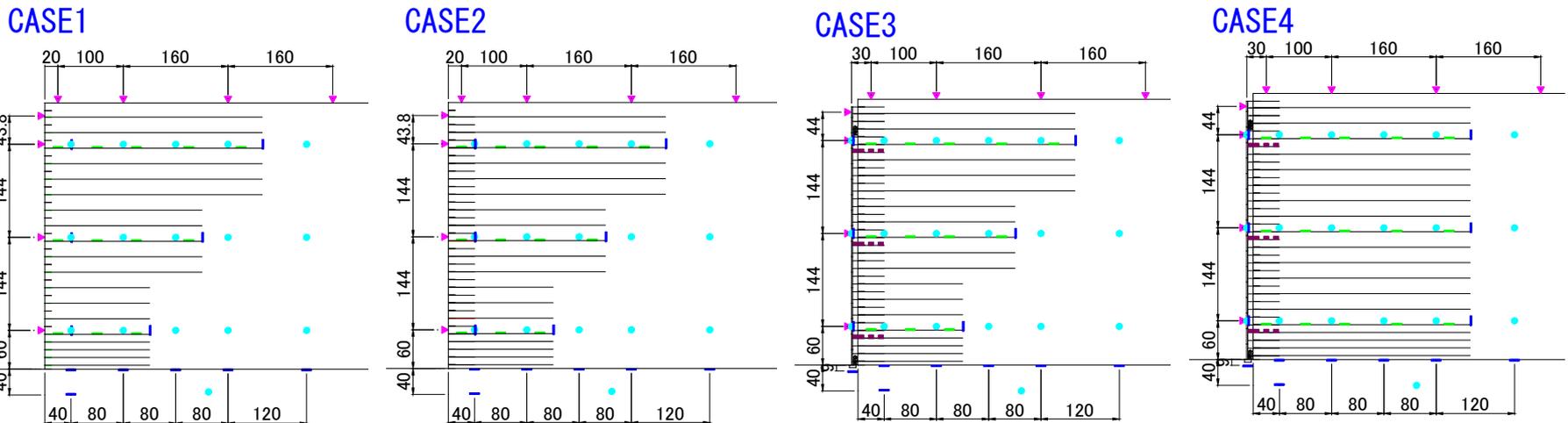
L: 敷設長, ( )内の値は実際のスケールに換算した値

# 動的遠心模型実験

## 計測項目

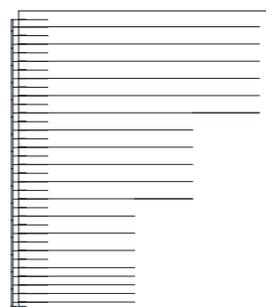
- 試験体の変形, 壁面変位
- 補強材とベルト状補強材のひずみ
- 壁面材に作用する土圧
- 試験体底面に作用する鉛直土圧(地盤反力)
- 補強領域背面に作用する土圧
- 盛土内の加速度

- | 土圧計
- 加速度計
- ▶ 変位計
- ひずみゲージ
- ひずみゲージ

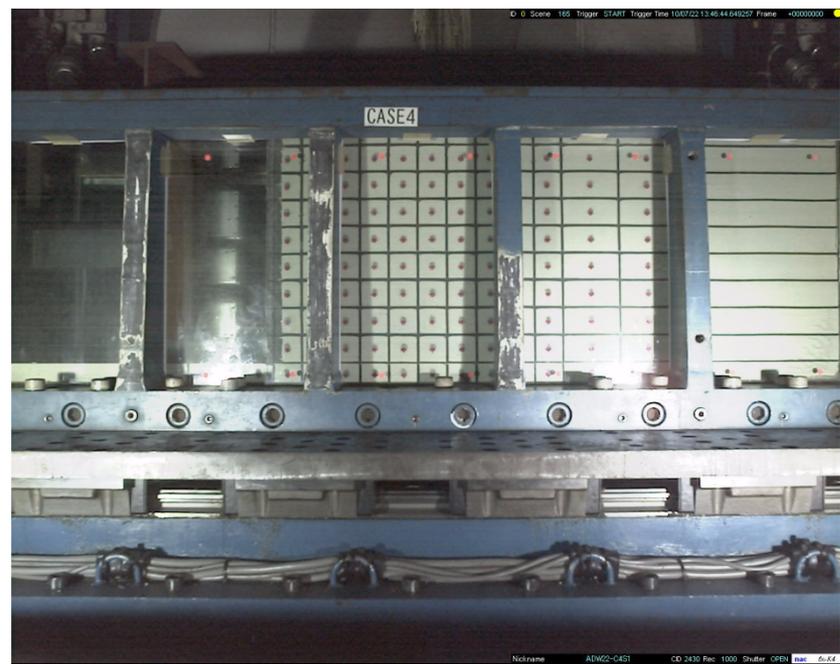
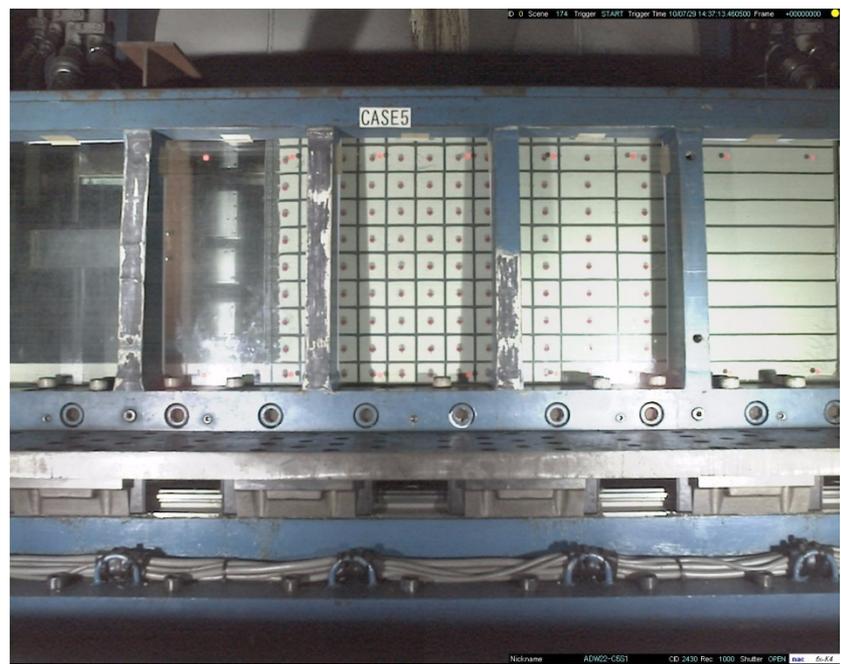
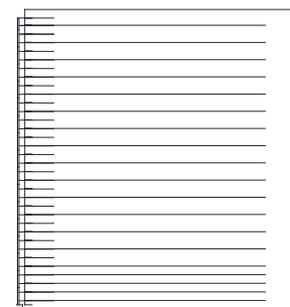


# 実験状況

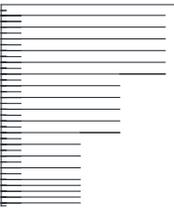
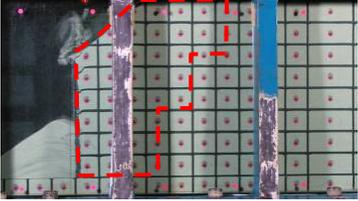
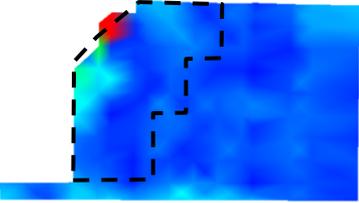
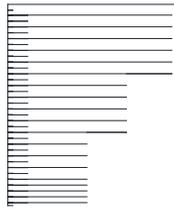
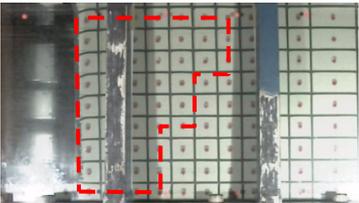
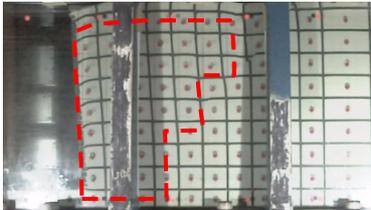
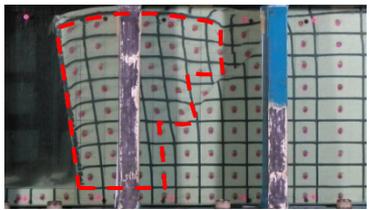
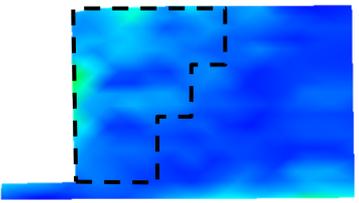
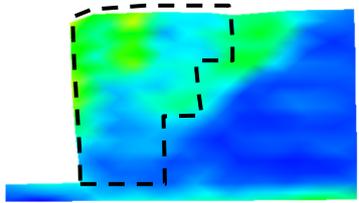
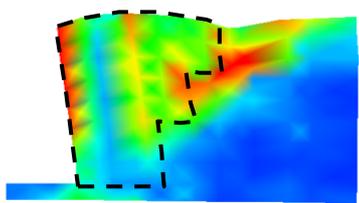
CASE3



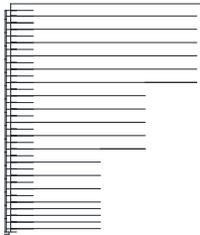
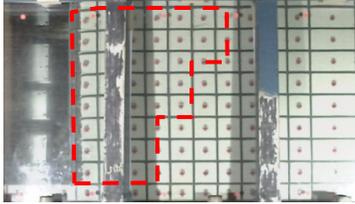
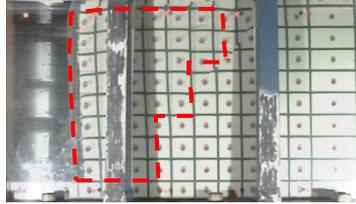
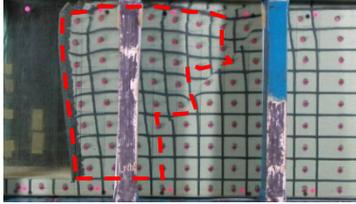
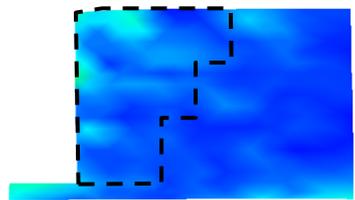
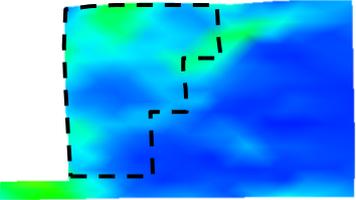
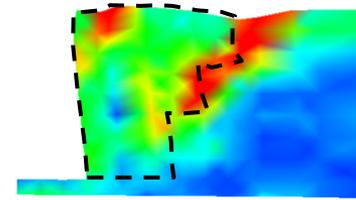
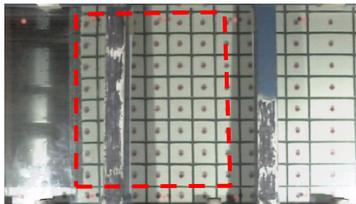
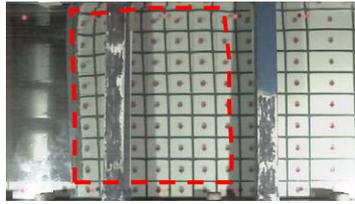
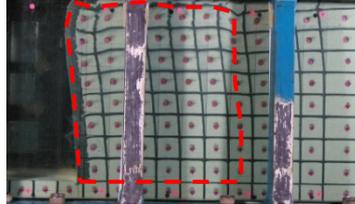
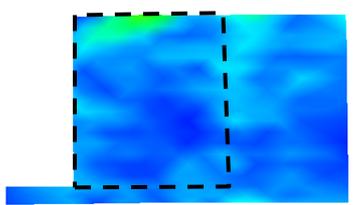
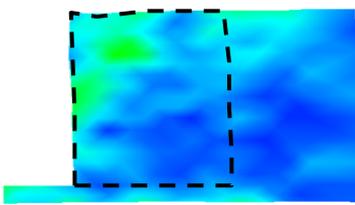
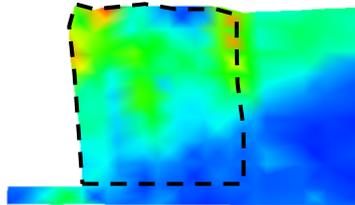
CASE4



# 加振後の変形

ケース	項目	50G遠心载荷時	—	—
CASE1 	変形		—	—
	せん断ひずみ		—	—
ケース	項目	STEP1 (神戸波)	STEP4 (400gal)	STEP8 (800gal)
CASE2 	変形			
	せん断ひずみ			

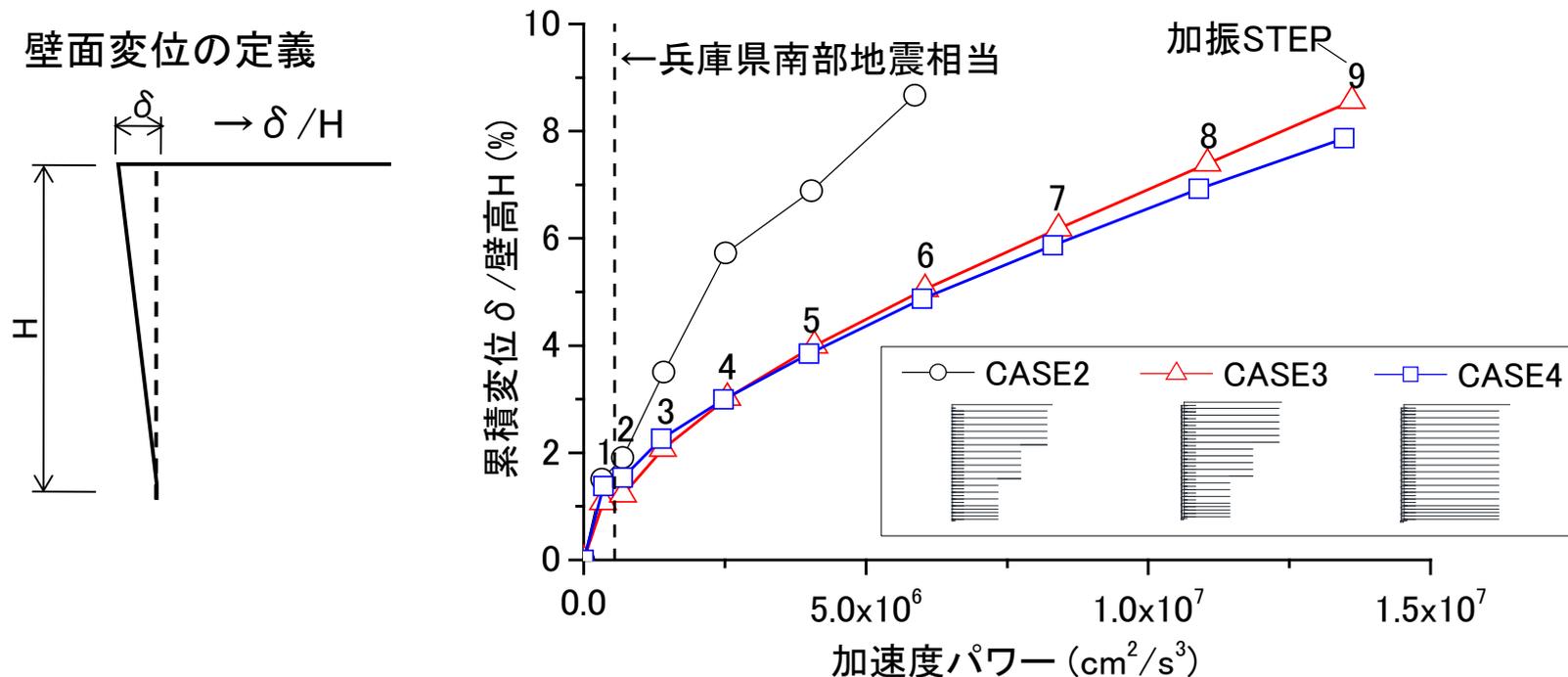
# 加振後の変形

ケース	項目	STEP1 (神戸波)	STEP4 (400gal)	STEP8 (800gal)
CASE3 	変形			
	せん断ひずみ			
ケース	項目	STEP1 (神戸波)	STEP4 (400gal)	STEP8 (800gal)
CASE4 	変形			
	せん断ひずみ			

# アダムウォールの耐震性能

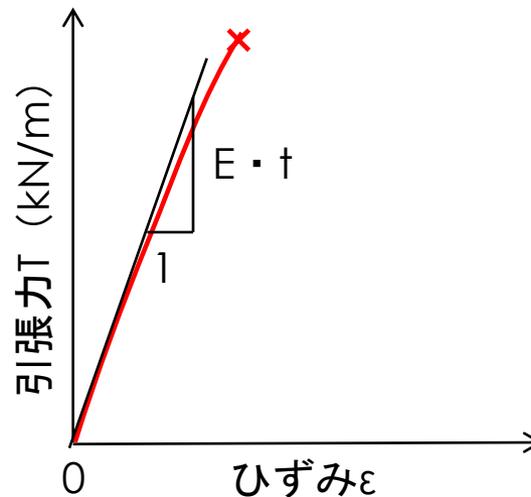
## 加速度パワーと壁面変位(累積)の関係

- **加速度パワー**：地震動の大きさと継続時間を表す指標  $I_E = \int_0^t a^2 dt$
- **壁面変位**：加振による累積水平変位 $\delta$ を壁高 $H$ で除した $\delta / H$ で表す
- 補強材を不等長としたCASE3と等長としたCASE4の壁面変位は同程度。  
→補強材を不等長としても、等長とした場合と同等な耐震性能を持つ。



# 数値解析

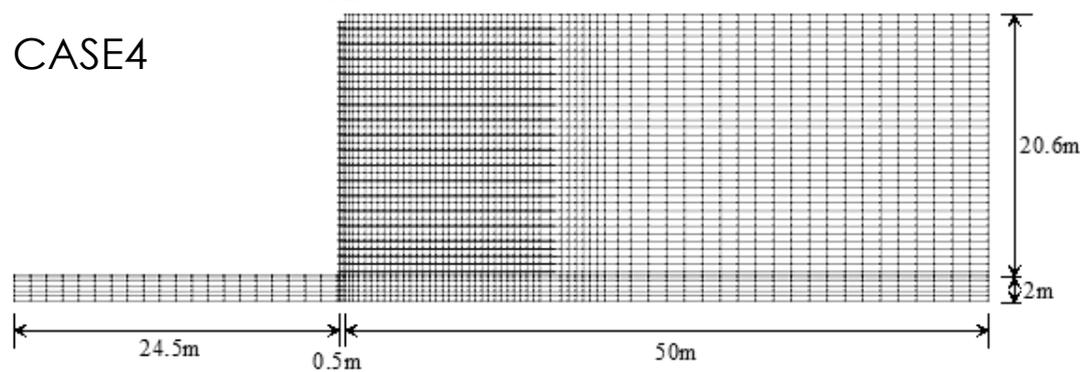
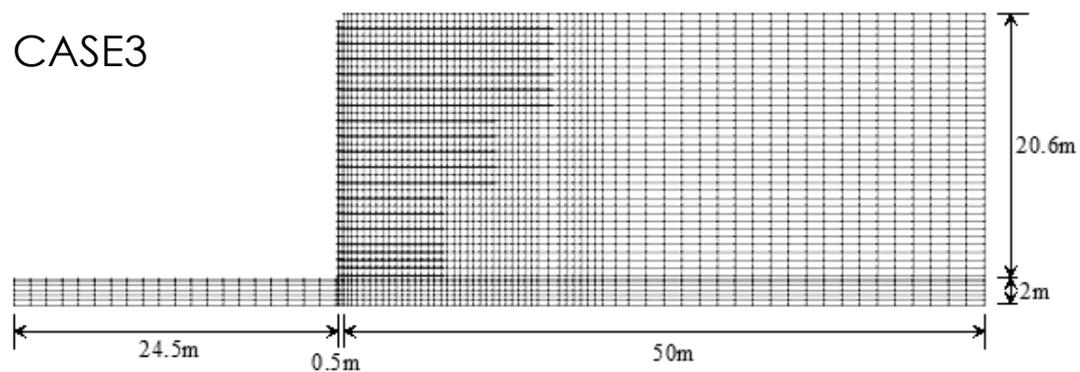
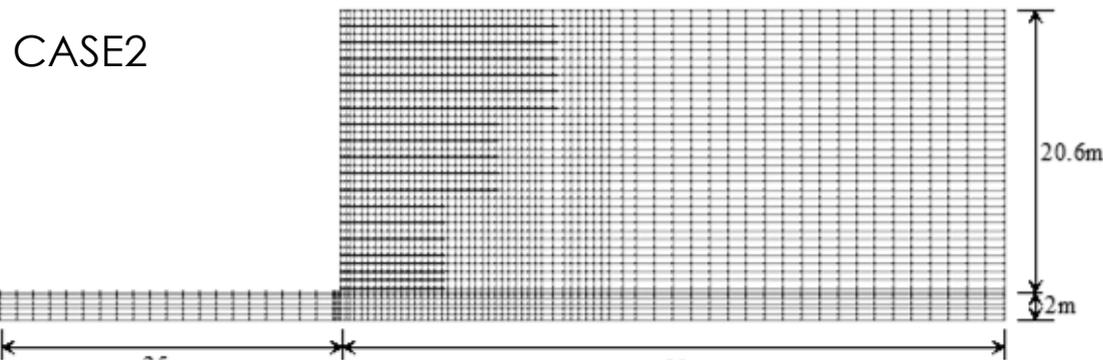
- 解析プログラム：UWLC
- ジオテキスタイル  
→ はり要素でモデル化・・・引張剛性 $E \cdot t$ を与える( $E$ :弾性係数,  $t$ :厚み)



引張剛性

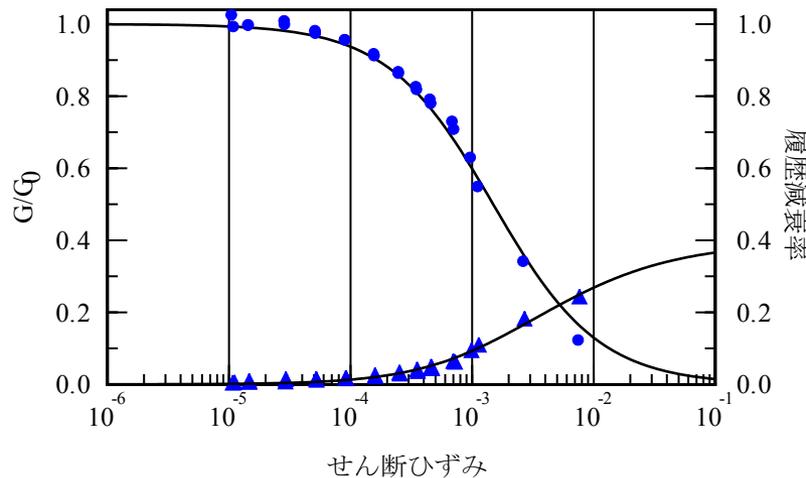
$$E \cdot t = \frac{T}{\epsilon} \quad (\text{kN/m})$$

# 有限要素分割図

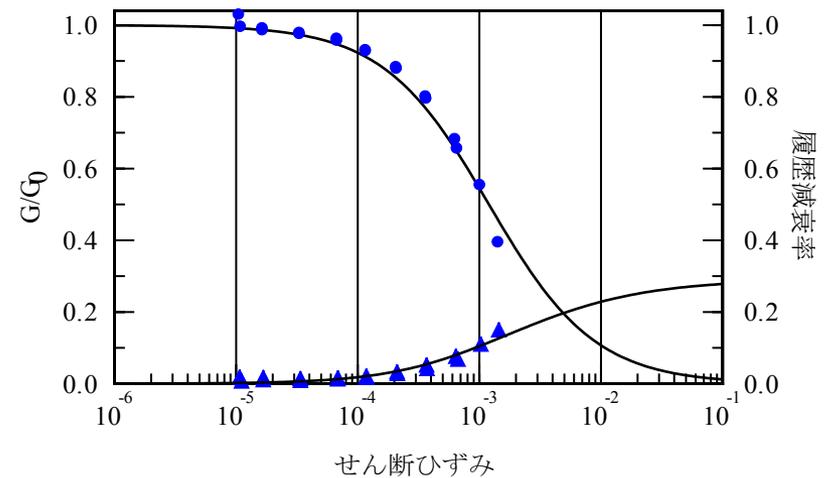


# 土質材料(盛土材料)

- 構成式：HDモデル
- ヒステレシス：UW-clayモデル
- それぞれの砂におけるせん断剛性および減衰定数－せん断ひずみ関係の実験結果に基づいて、最適化手法により同定



ケイ砂7号



ケイ砂3号

# 解析パラメータ

## □ 土質材料

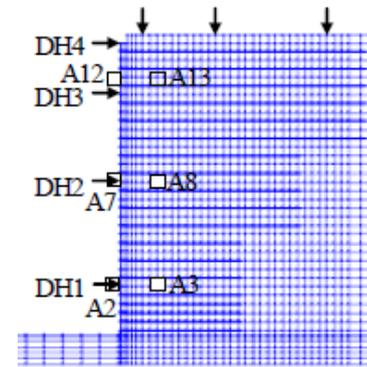
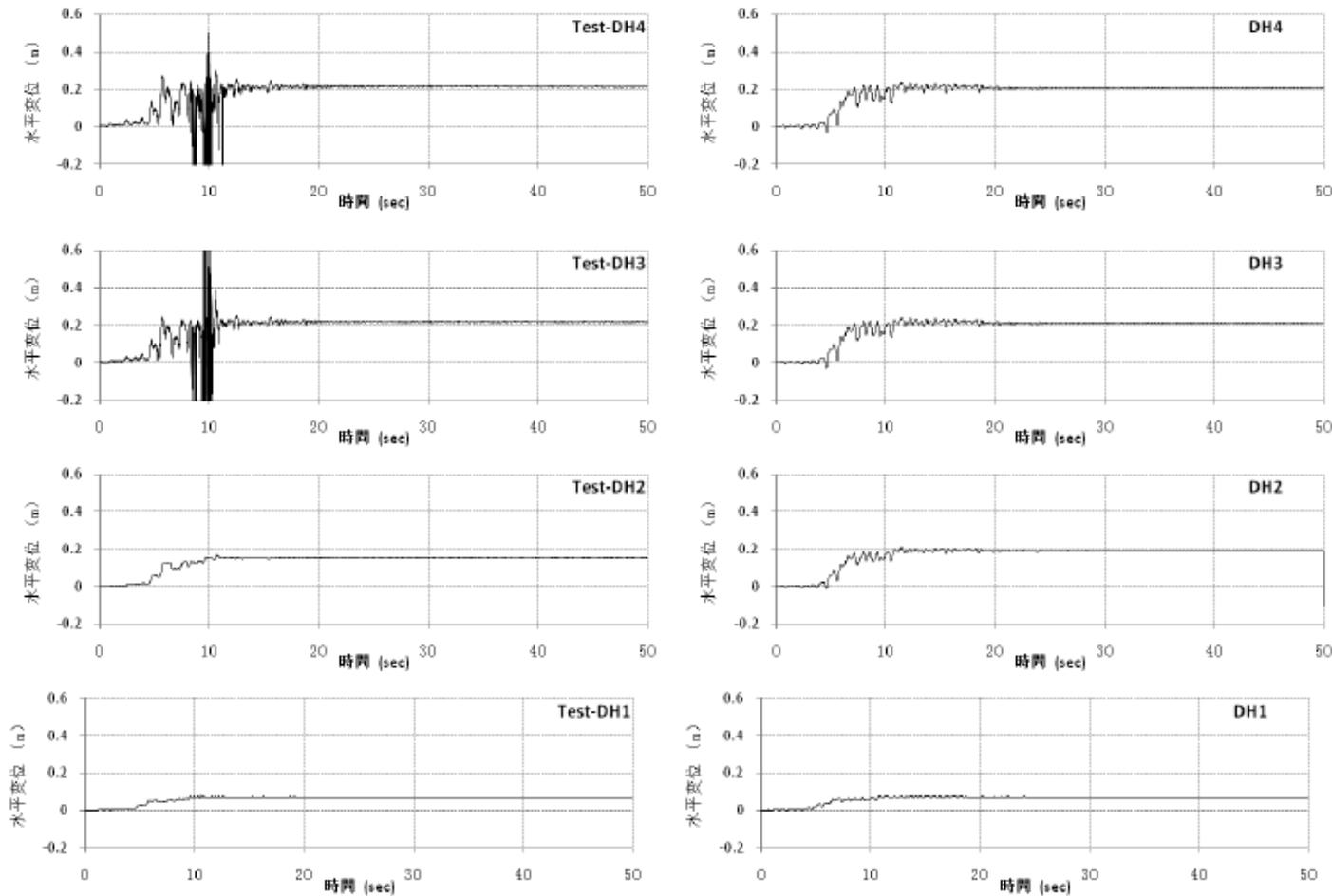
砂	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$ -	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$R_f$ -	$n$ -	$b$ -
硅砂7号( $D_r=80\%$ )	14.8	87000	0.3	19.7	40.6	2.064	1.128	533.1
硅砂7号( $D_r=100\%$ )	15.6	99700	0.3	19.7	44.6	2.064	1.128	533.1
硅砂3号( $D_r=30\%$ )	13.0	58000	0.3	9.2	36.5	1.870	1.802	1007.0

## □ ジオテキスタイル

材料	$E_p \cdot t_p$ (原型)	$E_m \cdot t_m$ (模型)
補強材 A	4400 kN/m	88.0 kN/m
補強材 B	3300 kN/m	64.0 kN/m
補強材 C	1800 kN/m	36.0 kN/m
ベルト	-	0.34 kN/本

# 解析結果 (CASE3)

## □ 壁面の水平変位の時刻歴

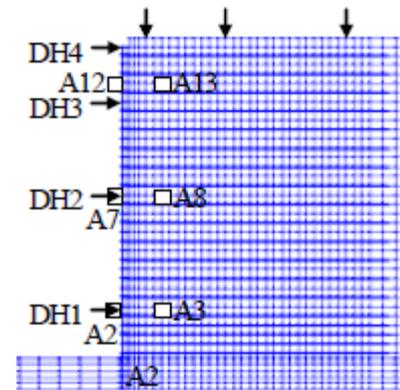
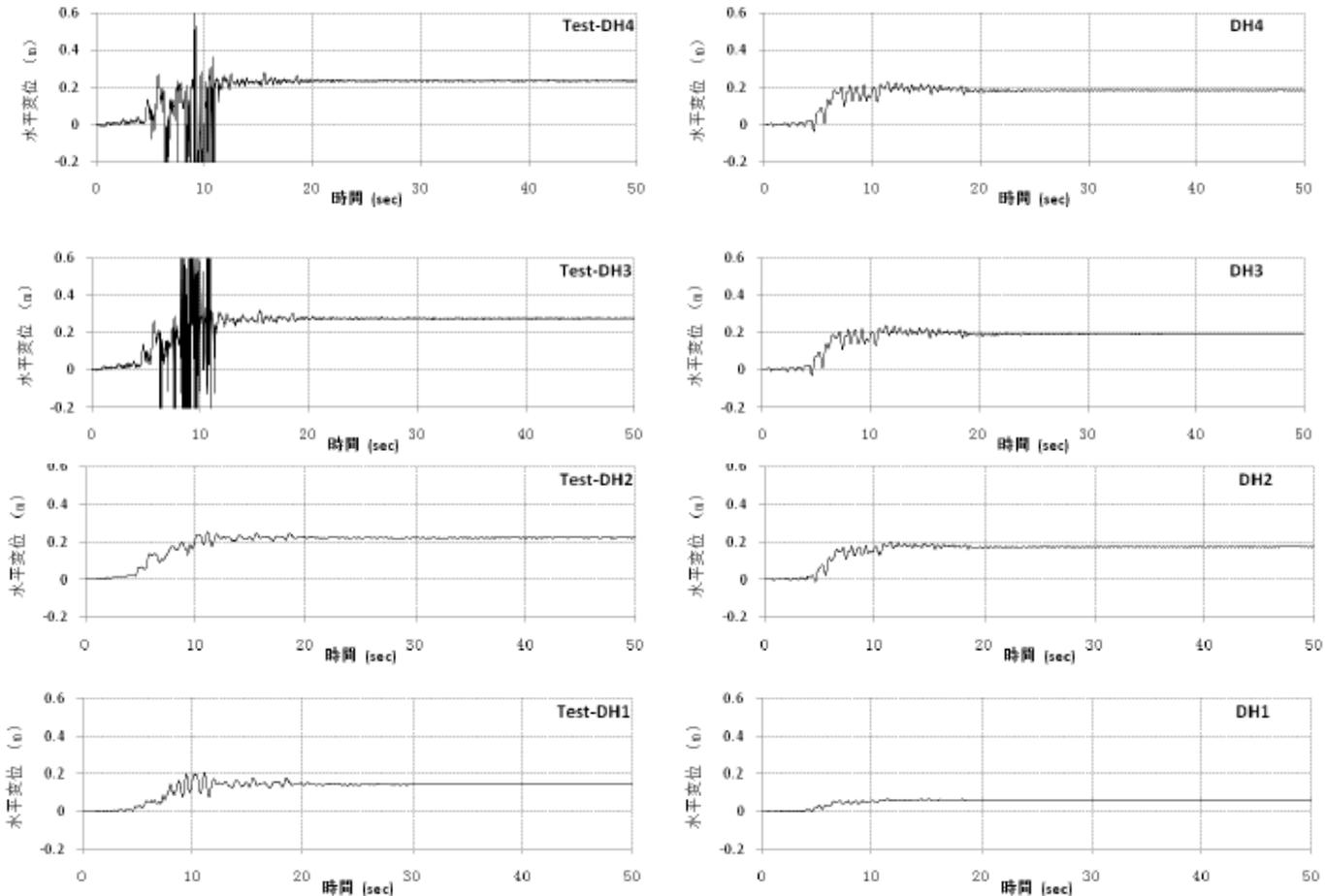


実験結果

解析結果

# 解析結果 (CASE4)

## □ 壁面の水平変位の時刻歴

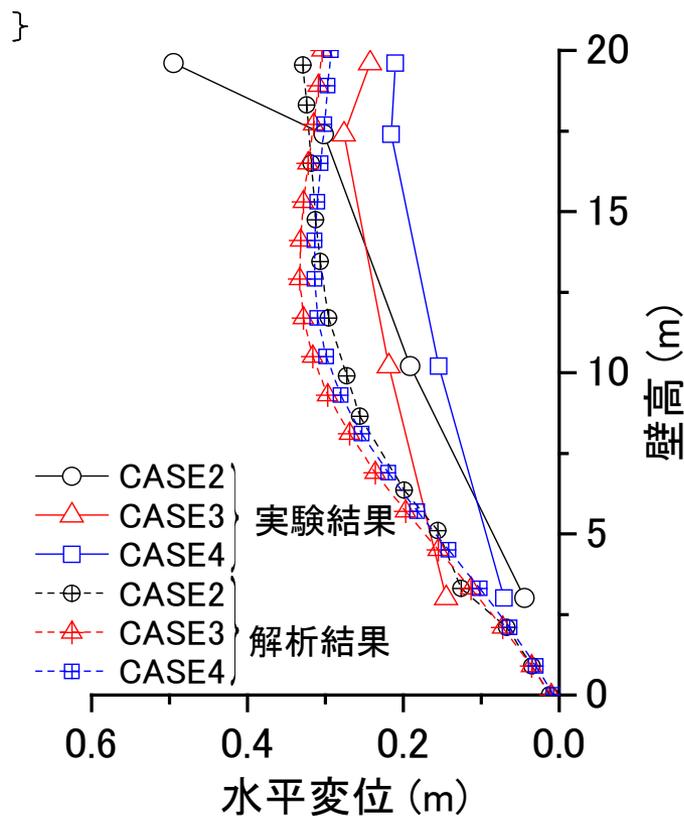


実験結果

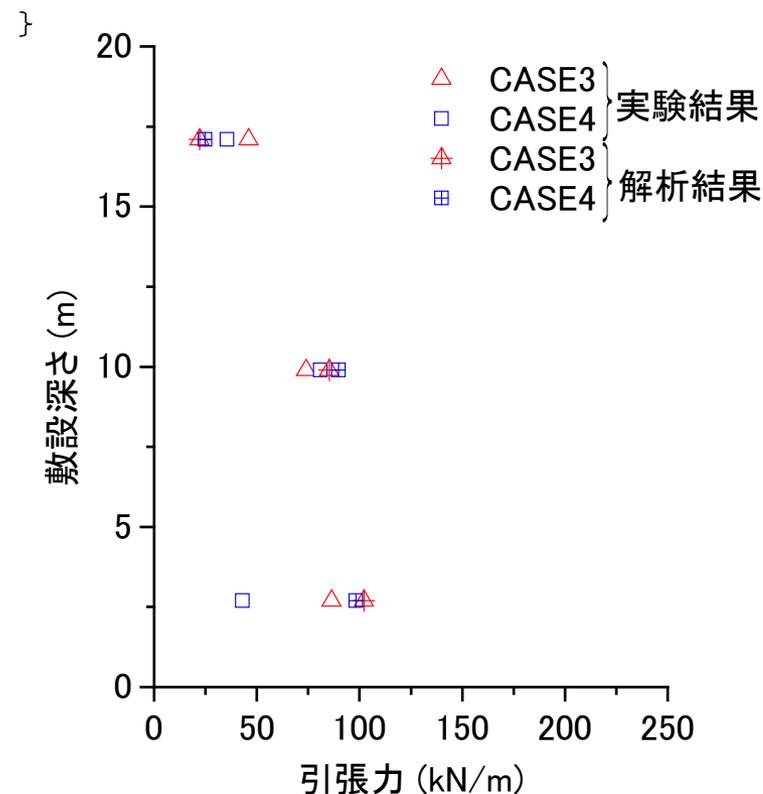
解析結果

# 解析結果

## 壁面変位(残留変位)



## ジオテキスタイルの最大引張力



# 実際の地震動を受けたアダムウォール

- 大規模地震動を受けた補強土壁の調査を行ったが、安定性に問題となるような変状は確認されていない

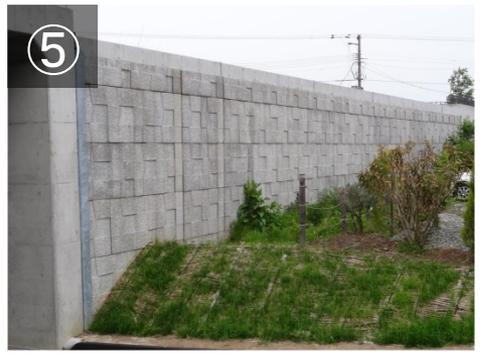
2007年新潟県中越沖地震後



2007年能登半島地震後



# 東日本大震災後の調査結果



➡ 壁面や路面の変状なし

## まとめ

- アダムウォールは高い耐震性能を持つ。
- UWLCによる数値解析で、アダムウォールの地震時の挙動を概ね再現できる。
  - ジオテキスタイル補強土壁の挙動予測に利用できる。

# 既設盛土の耐震補強工法に関する数値解析

---

# 盛土の補強技術

## すべり破壊に対する対策

- 天端補強, のり面補強, のり尻補強, 人工基盤, 遮断構造

## 排水対策

- 盛土内の地下水位の低下

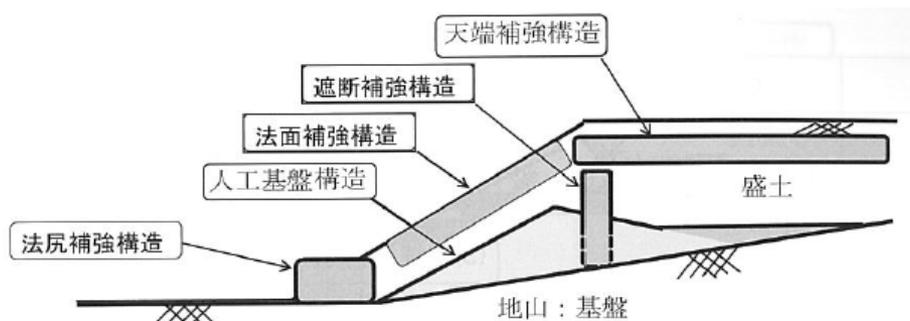


図-7.4 すべり破壊の対策に関する設計概念

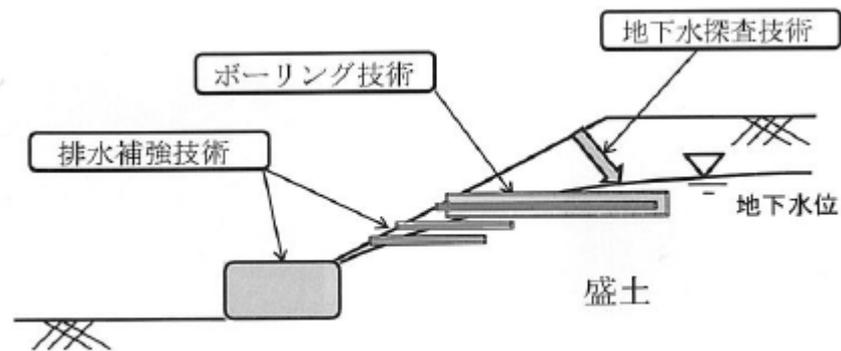
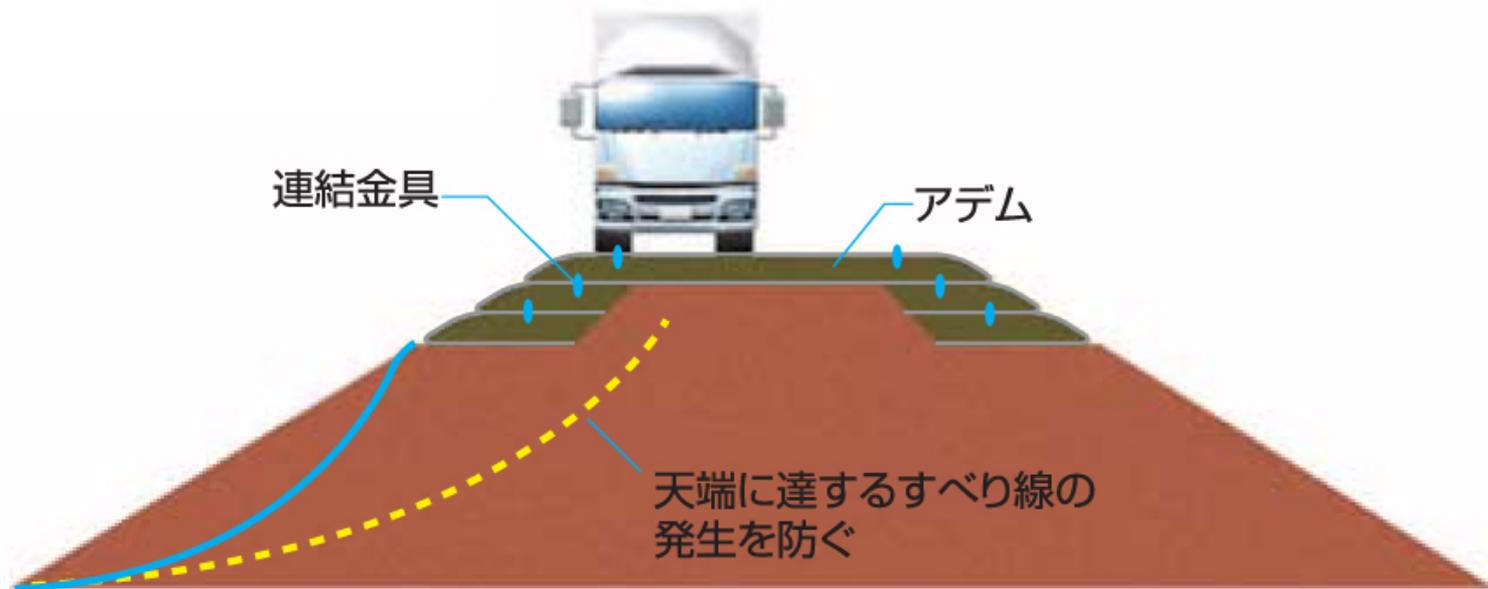


図-7.6 排水の対策技術

(「盛土の性能評価と強化・補強の実務」より引用)

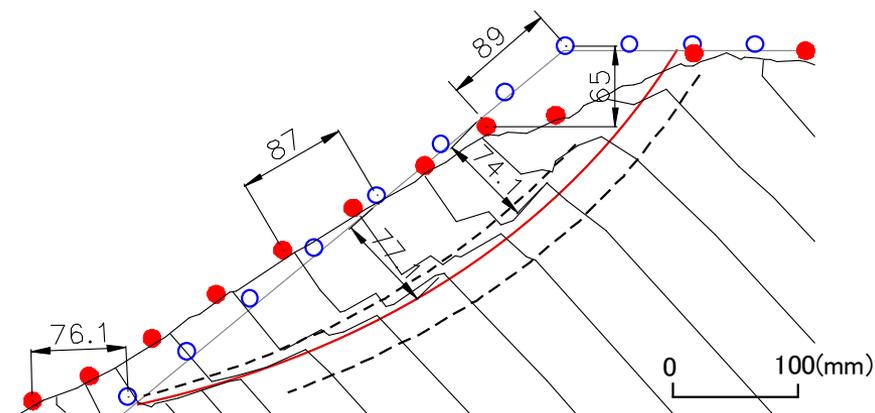
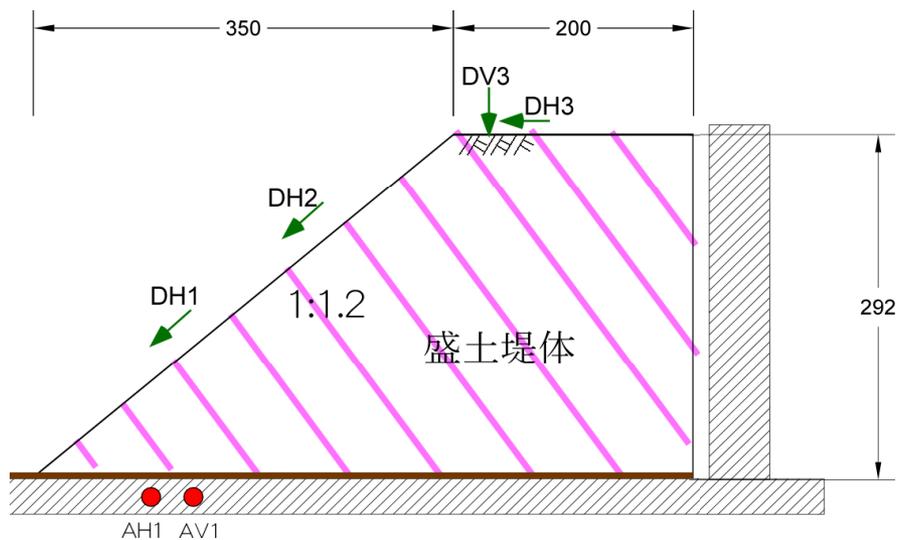
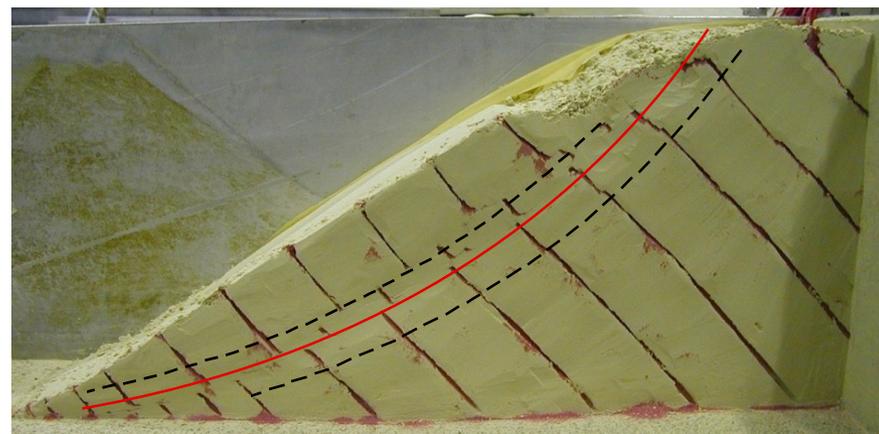
## 盛土の天端一体化工法 KABUTO工法

- 新設および既設の道路盛土に対して、地震時に最も大きな揺れを受ける盛土の天端のみを効率的にジオテキスタイルで補強する。
- 地震時に路面に達するようすべり線の発生を抑制して、道路機能を確保する。



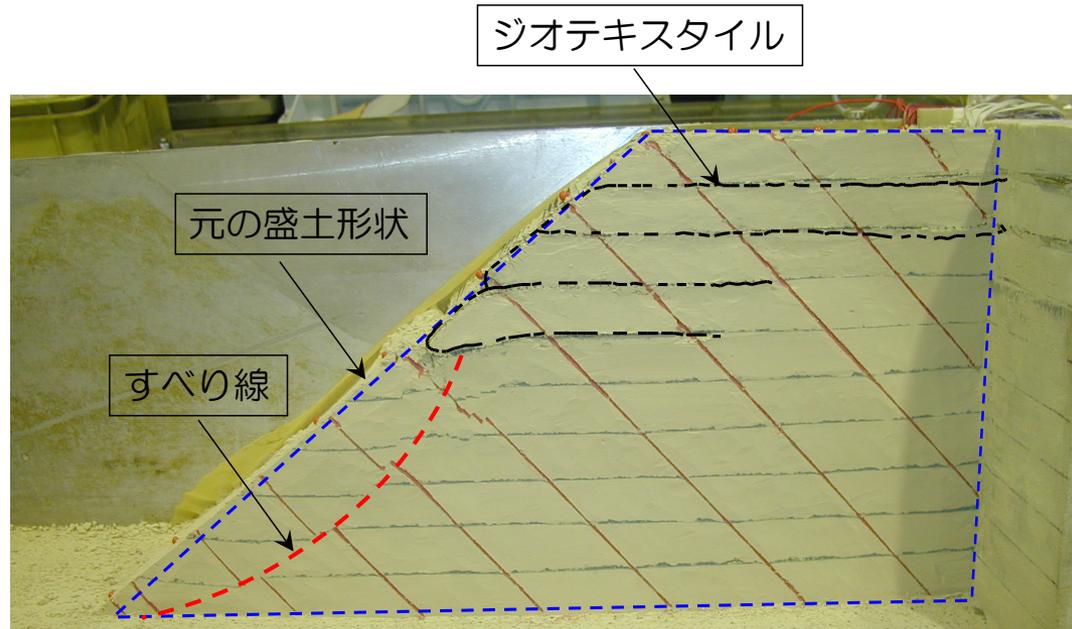
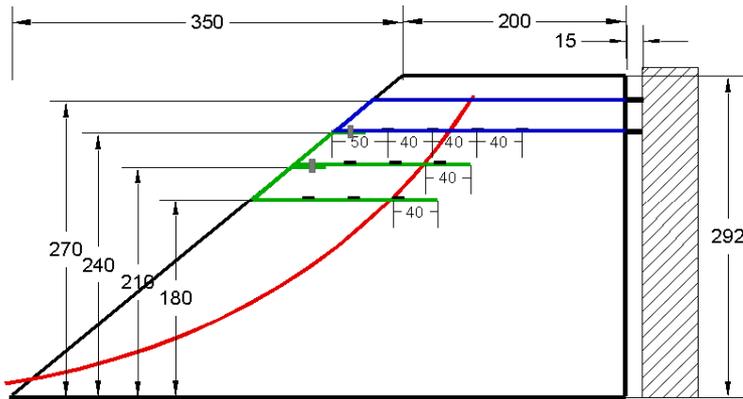
# 耐震性の確認(遠心模型実験)

- 遠心加速度30G
- 高さ8.7m, 勾配1:1.2の盛土
- 正弦波500gal



# 耐震性の確認(遠心模型実験)

## □ KABUTO工法



- すべり線は補強領域の下部にとどまり、路面の変状は無対策に比べて小さくなることを確認。
- →盛土全体の耐震性が向上

# 施工事例

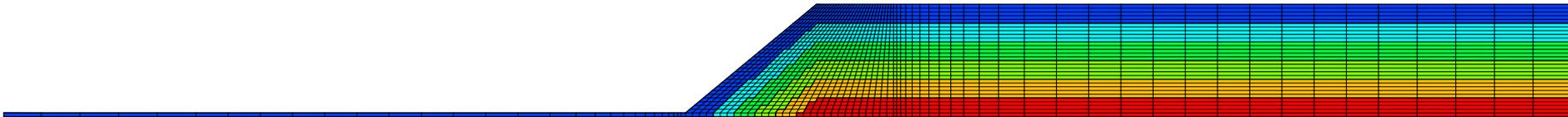
## □ 宮城県(国道6号線)



# 数値解析

解析モデル(無対策)

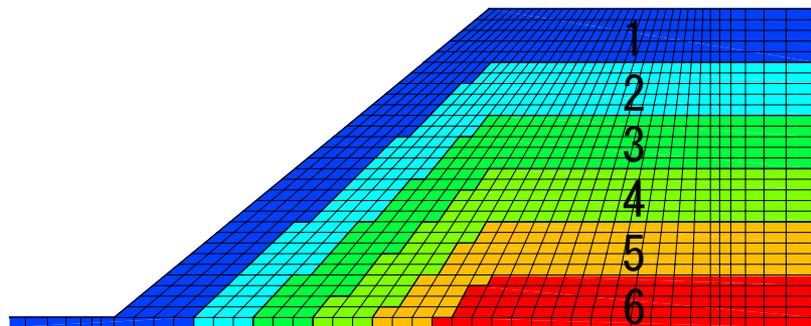
- 要素タイプ: 2次元平面ひずみ要素
- 土質材料: 全応力弾完全塑性モデル  
→ Mohr-CoulombモデルとHDモデルで再現性を確認
- 初期条件: 自重解析により有効拘束圧を算定



# 解析パラメータ

層	$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
1	21814	6669	7.83	0.4	10.0	30.0
2	37783	20115	22.15	0.4	10.0	30.0
3	48777	26367	36.91	0.4	10.0	30.0
4	57714	30485	51.68	0.4	10.0	30.0
5	65442	33561	66.45	0.4	10.0	30.0
6	72348	36017	81.21	0.4	10.0	30.0

↑ ①Vsから推定    ↑ ②E<sub>50</sub>から推定

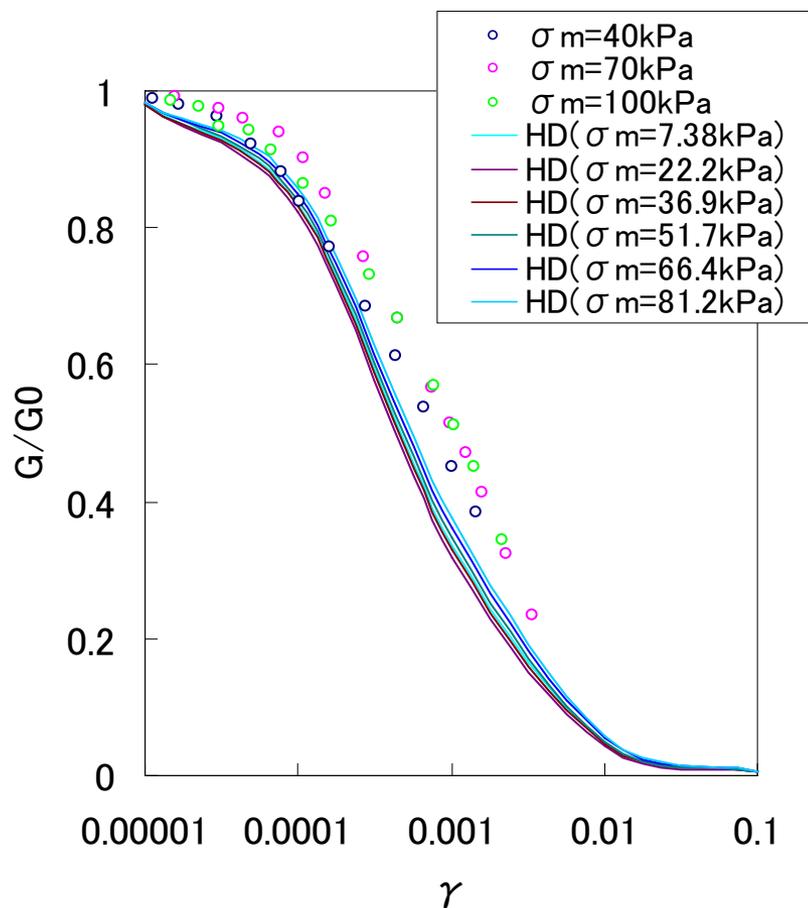


$$\tau = \frac{G_{\max} \cdot \gamma}{1 + \frac{G_{\max} \cdot \gamma}{\tau_f} R_f}$$

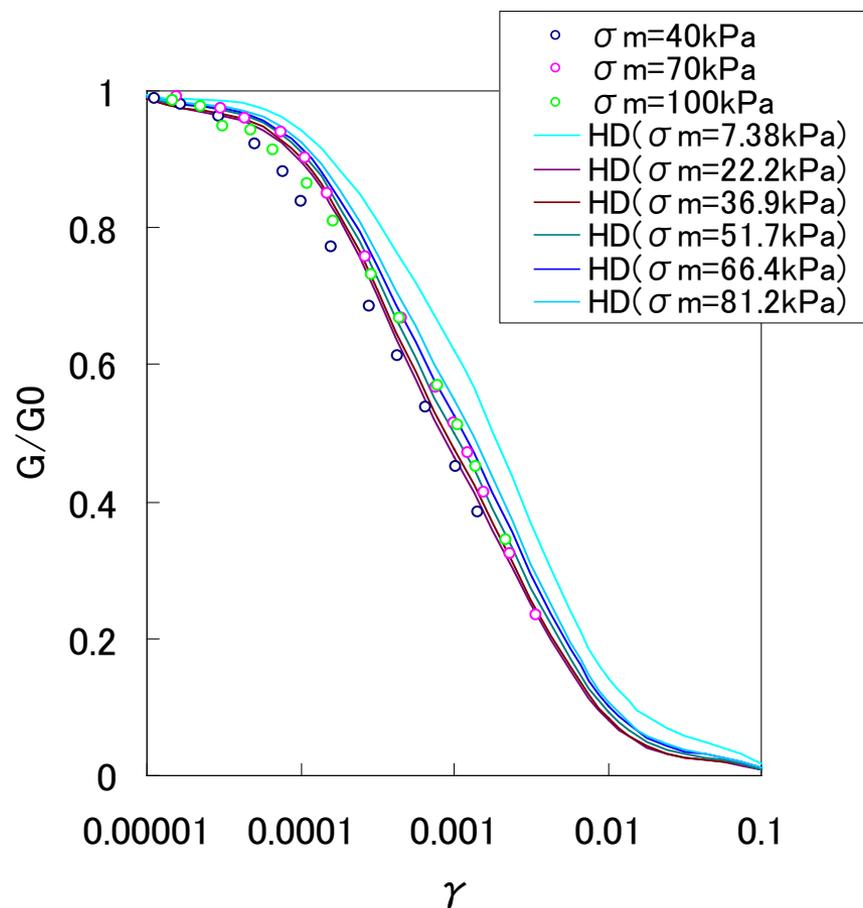
せん断強度を補正するパラメータ  
→のり肩の変位が合うように調整

# 動的変形特性 ( $G/G_0 - \gamma$ 関係)

## ① $V_s$ から推定

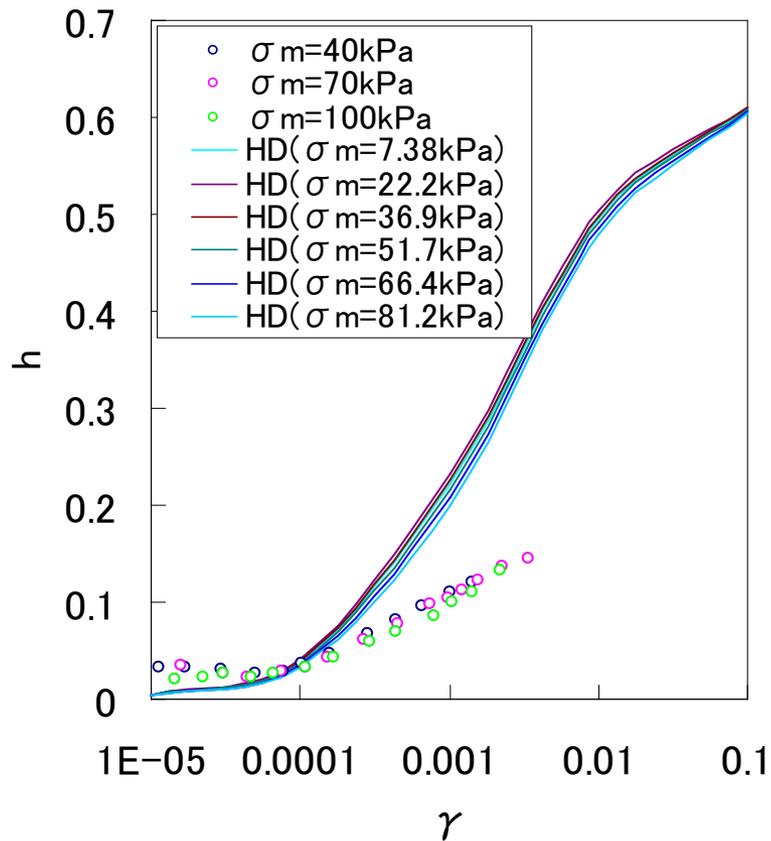


## ② $E_{50}$ から推定

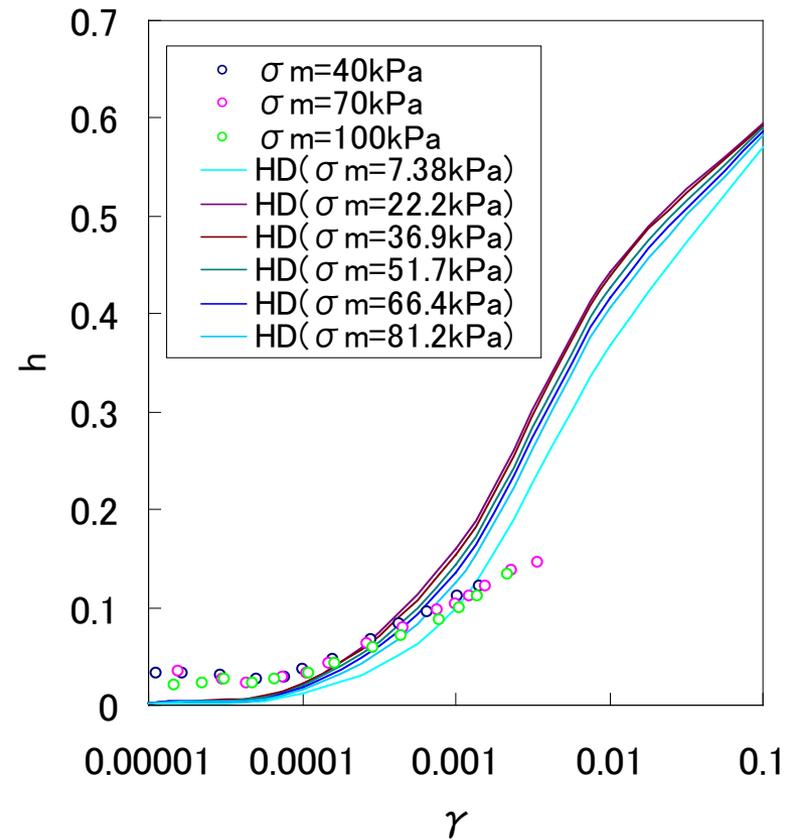


# 動的変形特性 ( $h-\gamma$ 関係)

①  $V_s$ から推定

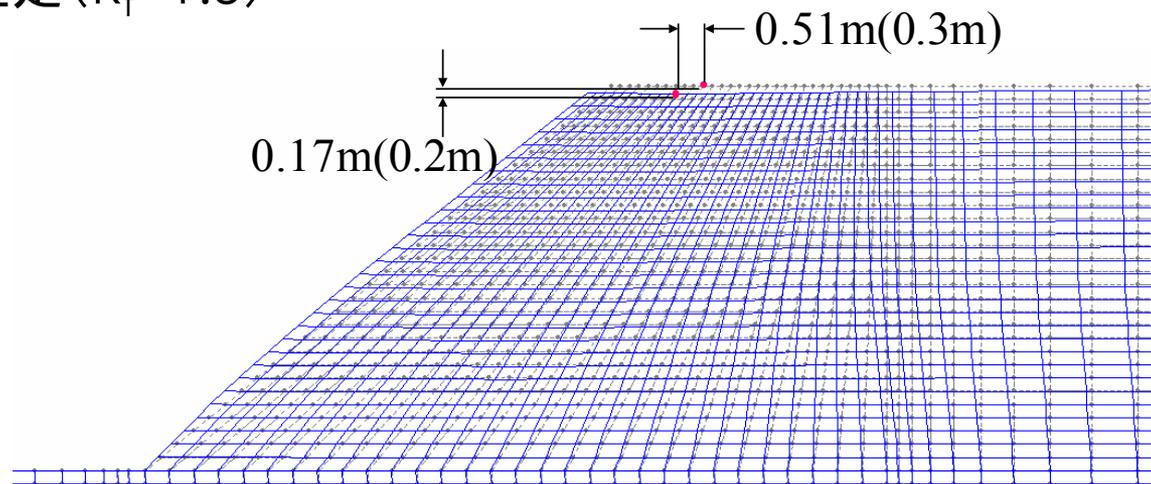


②  $E_{50}$ から推定

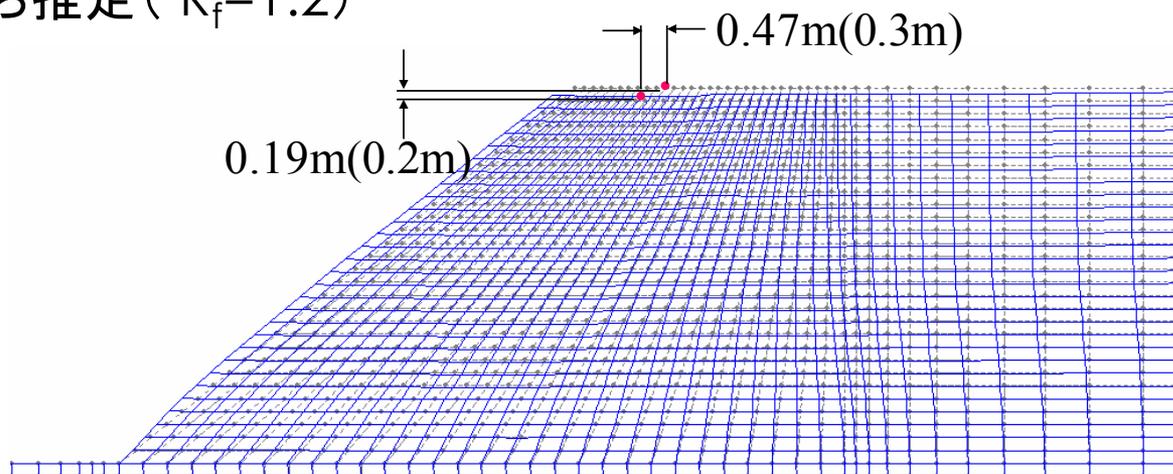


## 解析結果(変形図)

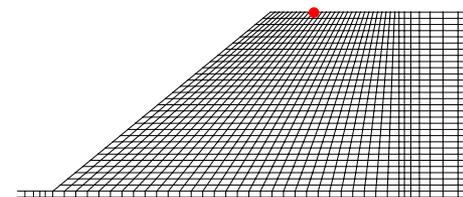
①Vsから推定 ( $R_f=1.3$ )



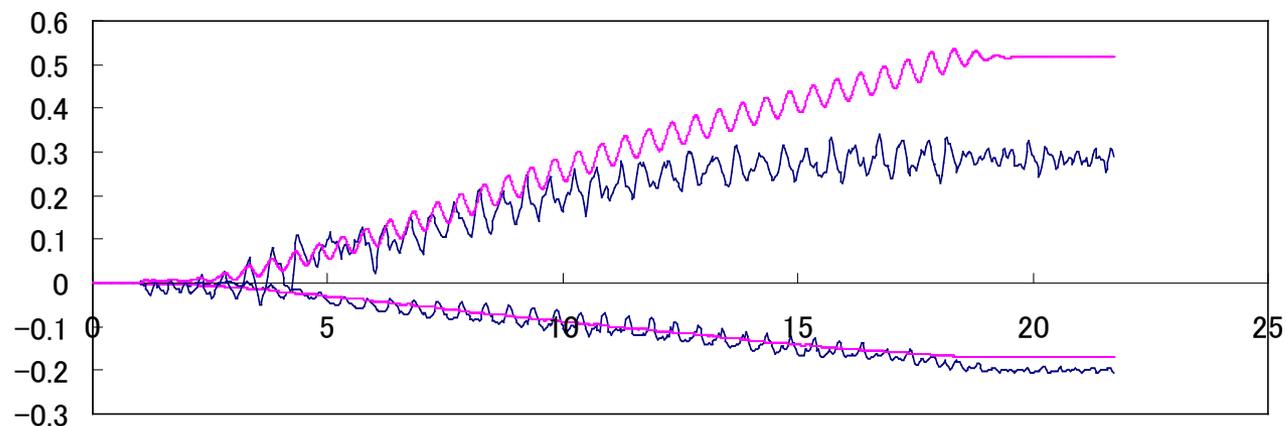
②E50から推定 ( $R_f=1.2$ )



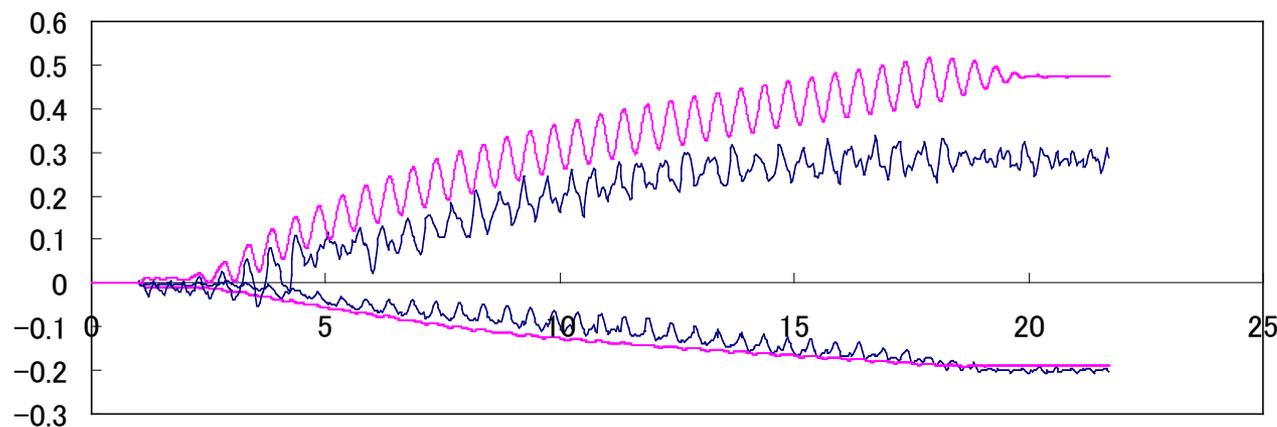
# 盛土の変形の再現性



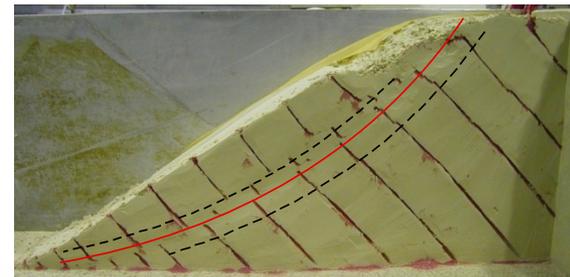
①Vsから推定 ( $R_f=1.3$ )



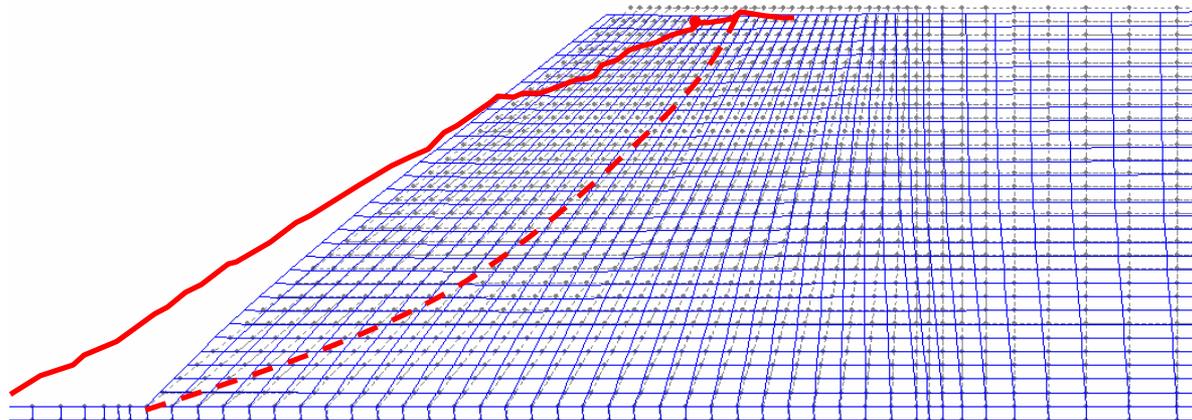
②E50から推定 ( $R_f=1.2$ )



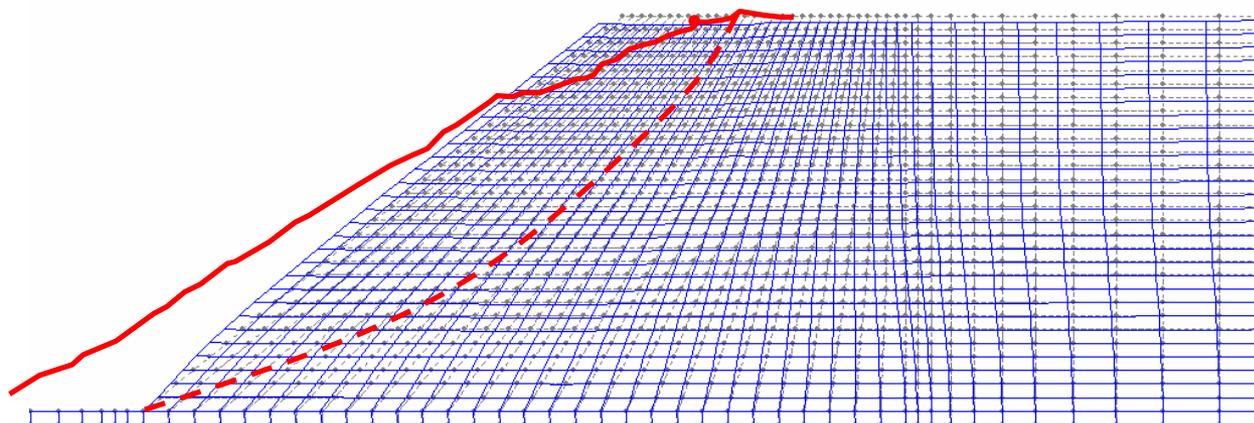
# 盛土の変形



①Vsから推定 ( $R_f=1.3$ )



②E50から推定 ( $R_f=1.2$ )



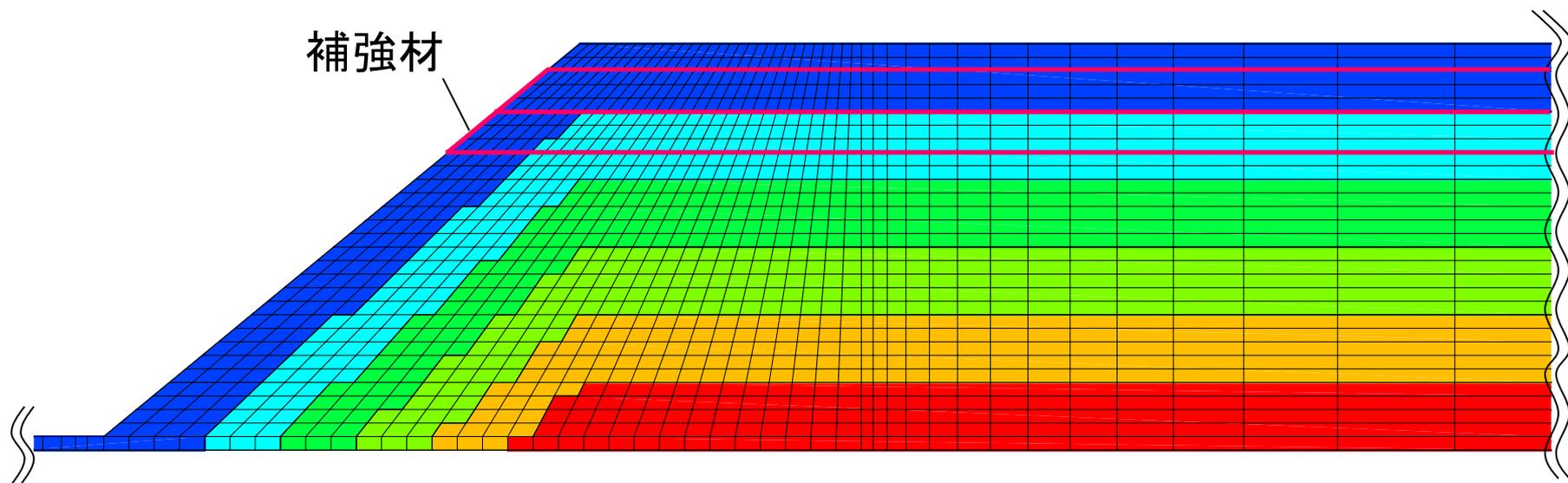
→破壊状態の再現は難しい



# 解析モデル

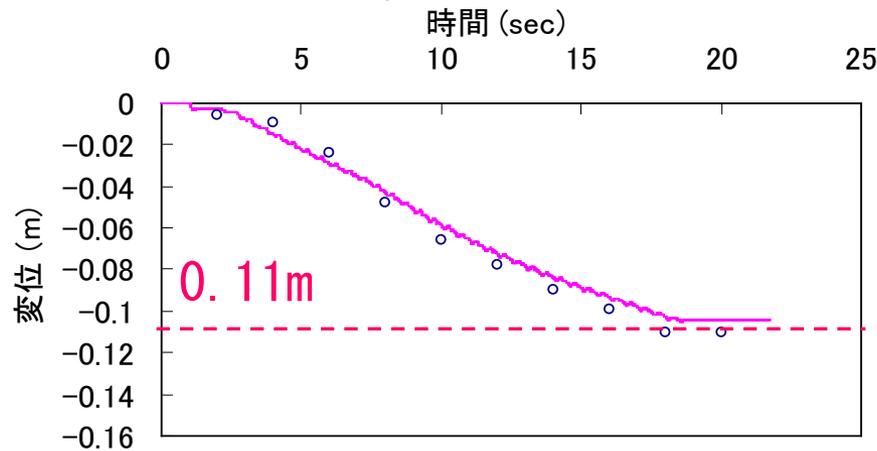
ジオテキスタイルのモデル化

□ ビーム要素 ( $EA=732\text{kN/m}$ )

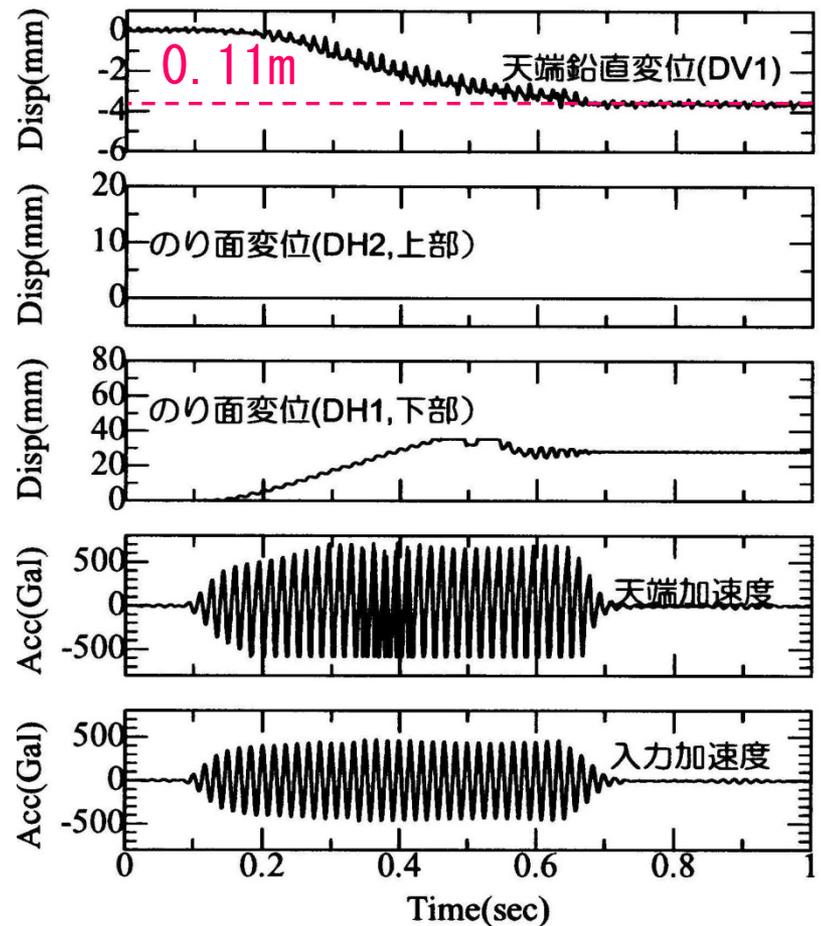
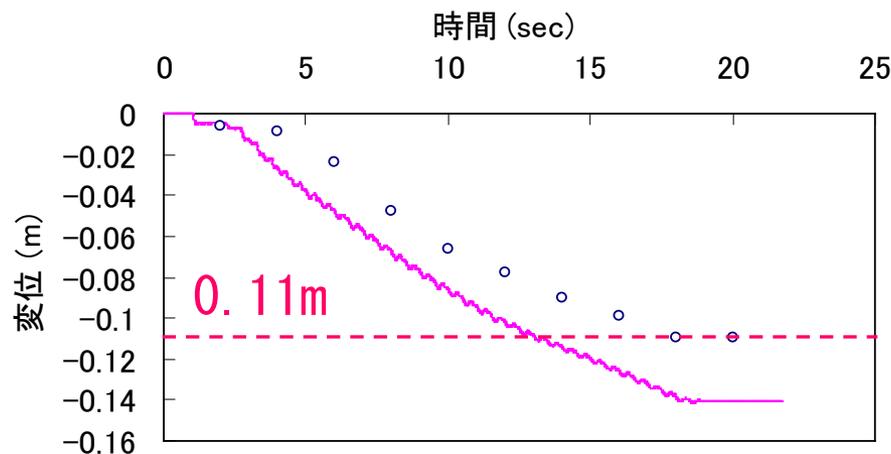


# 解析結果(天端の鉛直変位)

## ①Vsから推定 ( $R_f=1.3$ )

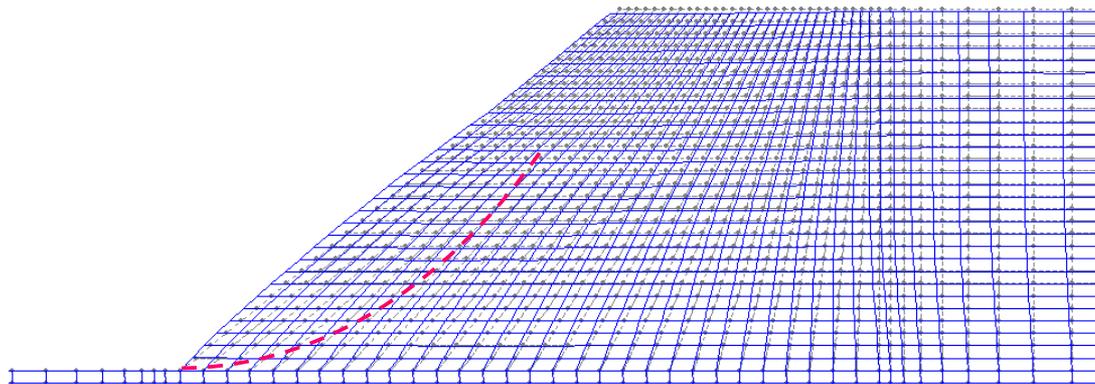
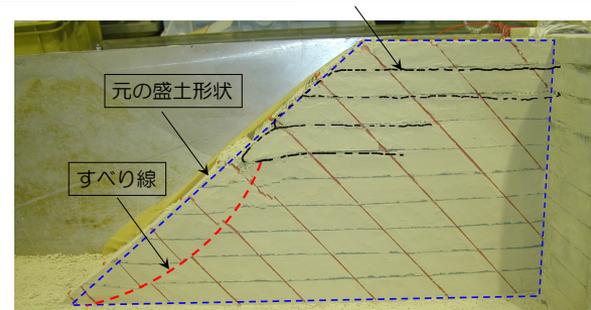


## ②E50から推定 ( $R_f=1.2$ )

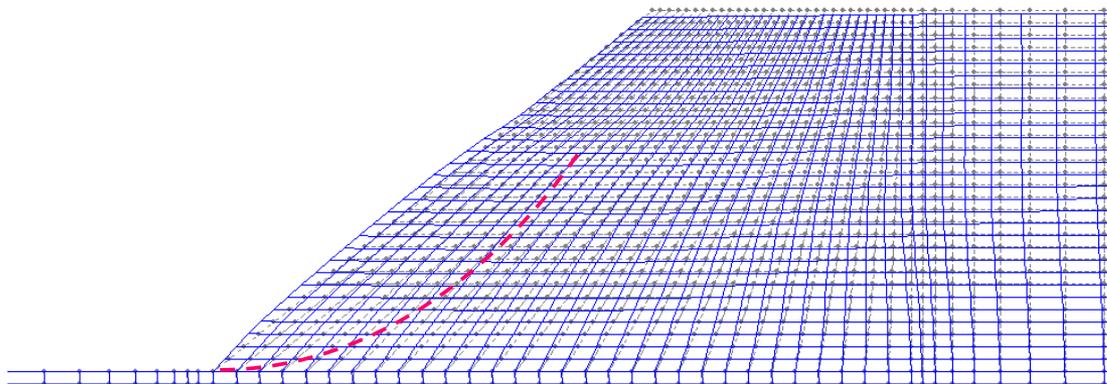


# 盛土の変形

①Vsから推定 ( $R_f=1.3$ )

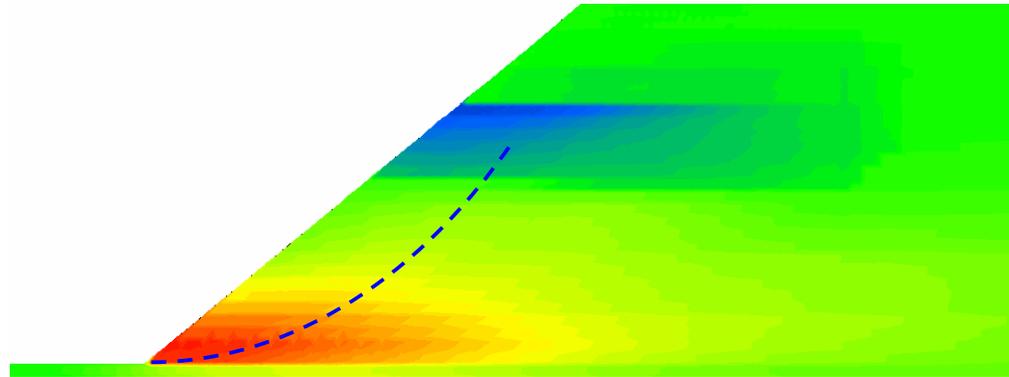


②E50から推定 ( $R_f=1.2$ )

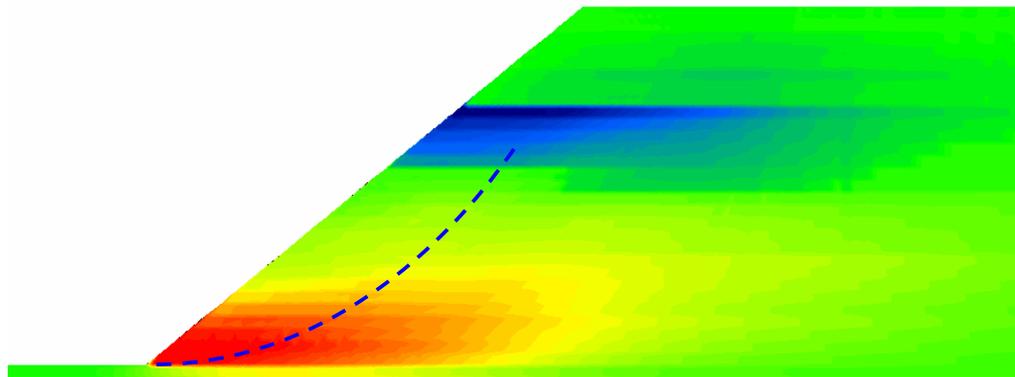


# 盛土内のせん断ひずみ分布

①Vsから推定 ( $R_f=1.3$ )



②E50から推定 ( $R_f=1.2$ )

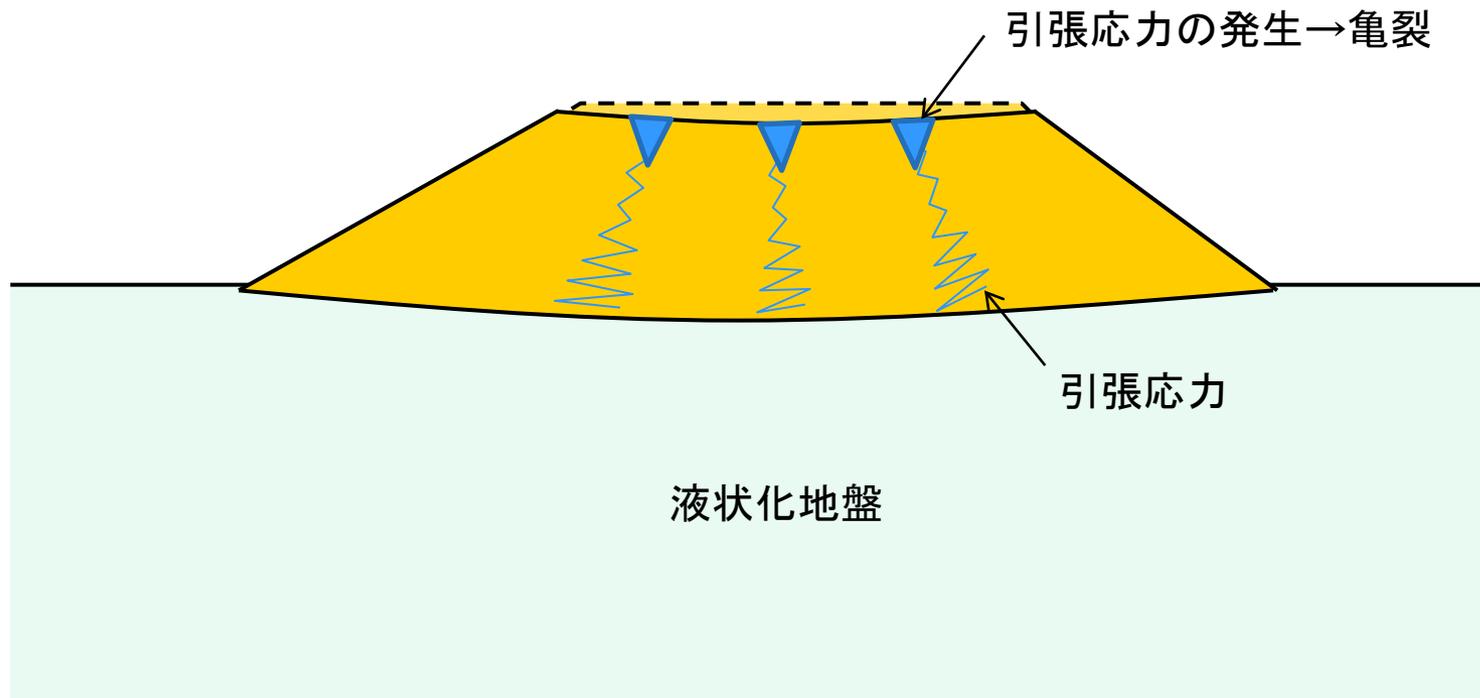


→補強領域内の変形を抑制している効果を概ね再現

# 液状化地盤上への適用に関する検討

## 無対策盛土

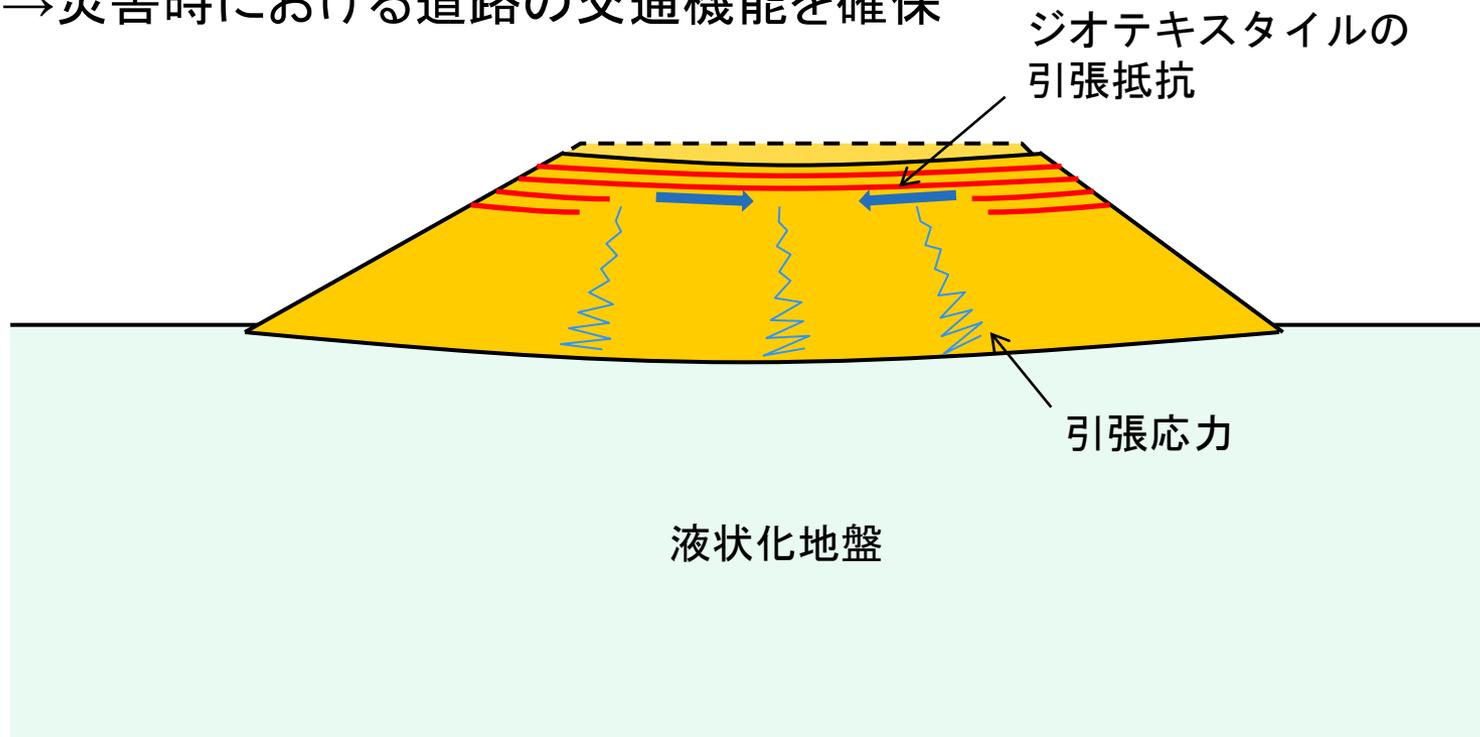
- 液状化地盤上の盛土で予想される挙動
  - 液状化の発生による盛土の変形
  - 盛土内の引張応力の伝達
  - 路面の亀裂や段差の発生



# 液状化地盤上への適用に関する検討

## KABUTO工法による対策盛土

- 液状化地盤上の盛土で期待される効果
  - 盛土の天端に発生する引張応力をジオテキスタイルで抵抗
  - 路面に発生する亀裂, 段差の抑制
  - 災害時における道路の交通機能を確保



# 解析手法

- 全体系の運動方程式

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} - \mathbf{Q}\mathbf{p} = \mathbf{f}^u$$

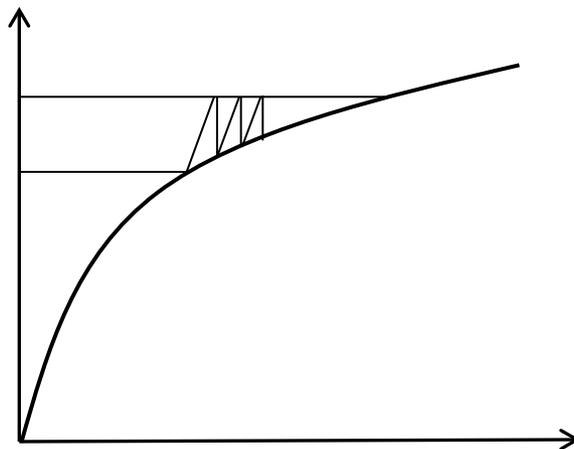
<b>M</b> : 質量マトリックス	<b>u</b> : 変位
<b>K</b> : 剛性マトリックス	<b>p</b> : 間隙水圧
<b>Q</b> : 関連マトリックス	<b>f</b> : 外力
<b>H</b> : 浸透マトリックス	
<b>S</b> : 圧縮マトリックス	

- 間隙水の運動方程式

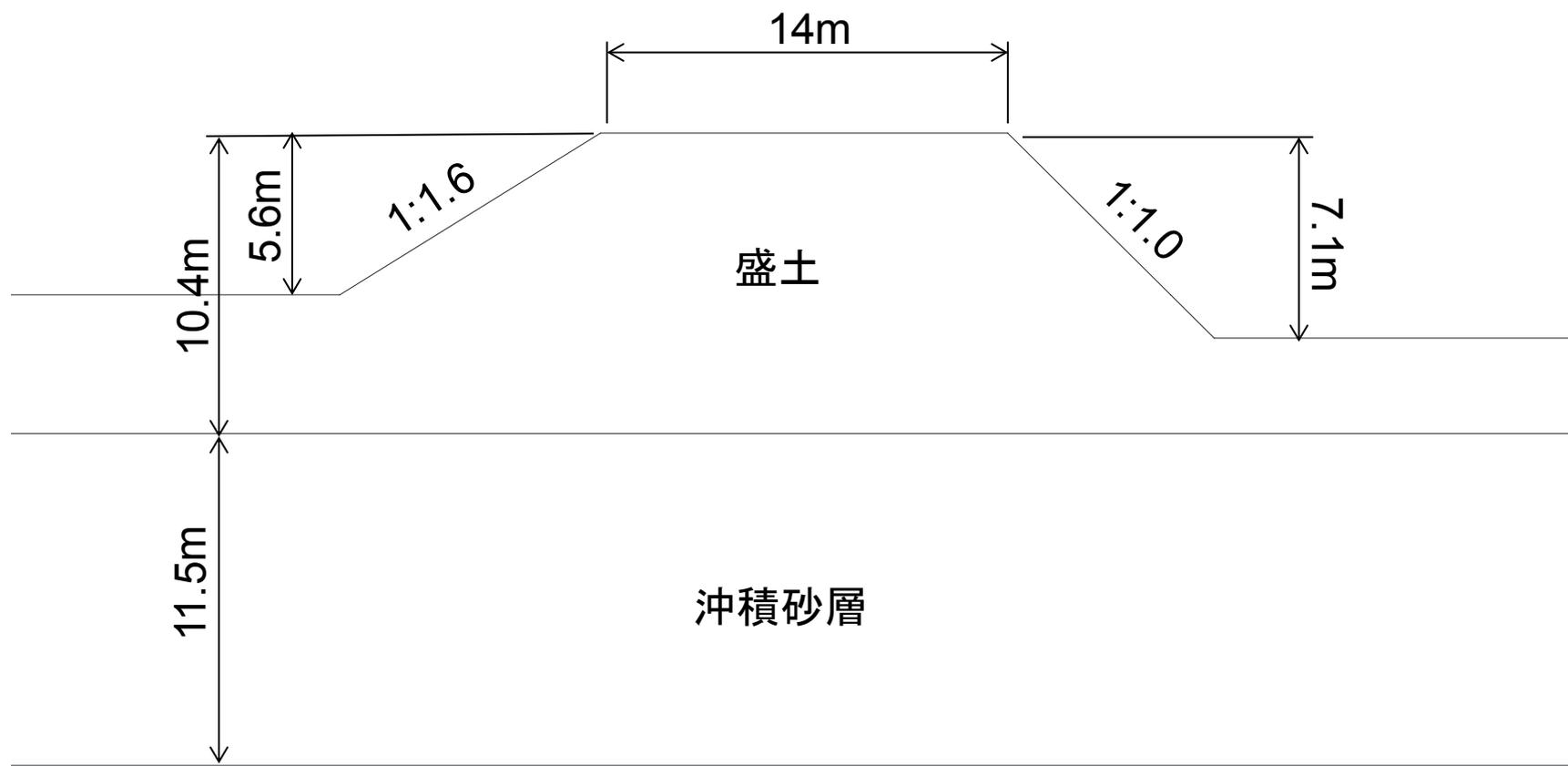
$$\mathbf{Q}^T \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{H}\mathbf{p} + \mathbf{S}\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{f}^p$$

→未知数：変位 $\mathbf{u}$ と間隙水圧 $\mathbf{p}$ について解く

- 時間積分：Newmarkの $\beta$ 法
- 動的非線形解析法：初期剛性法

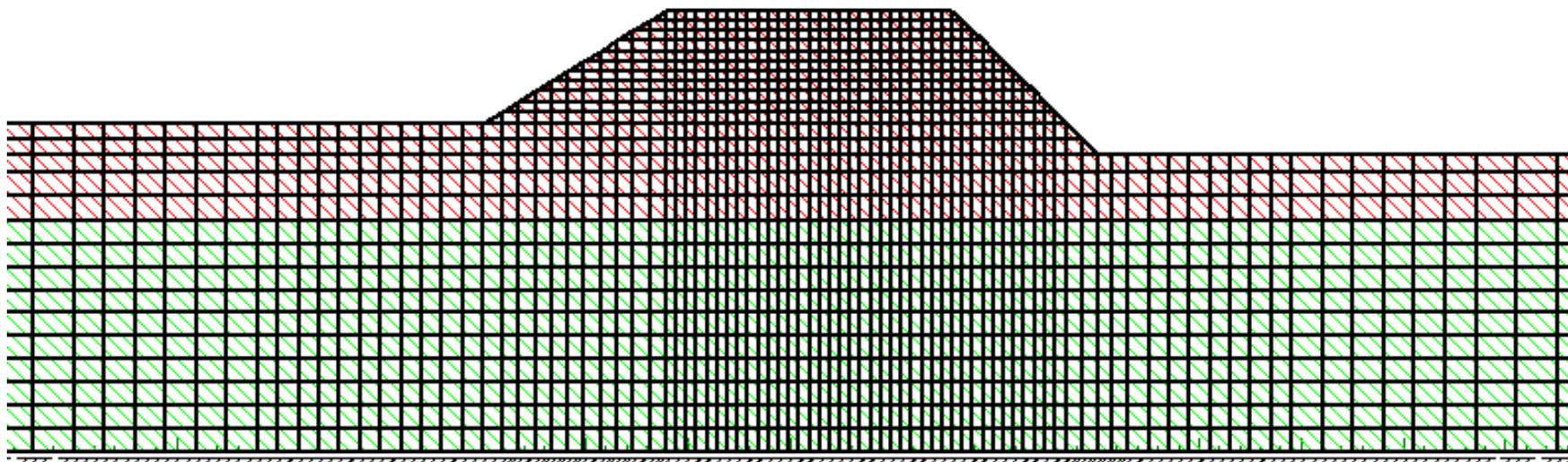


# 解析モデル

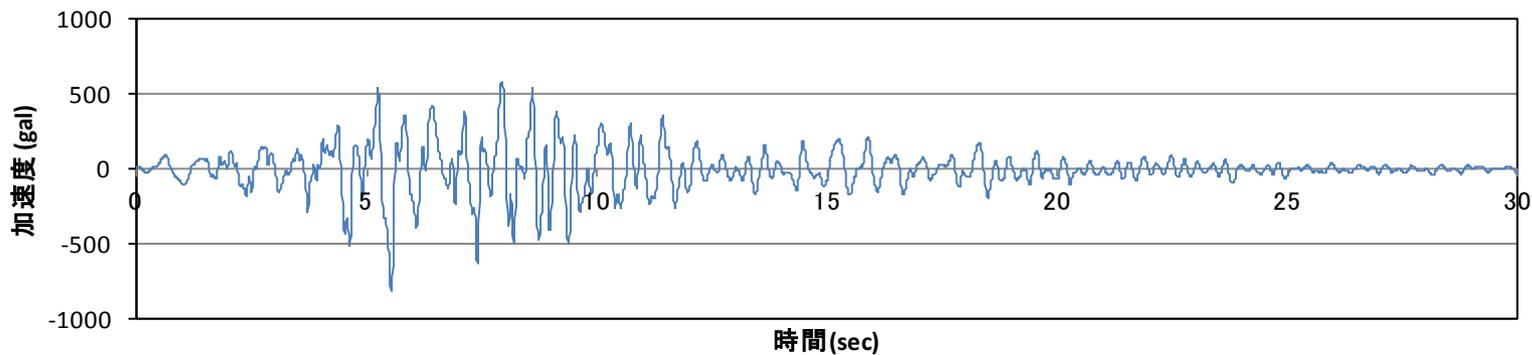


# 解析条件

## 有限要素分割図

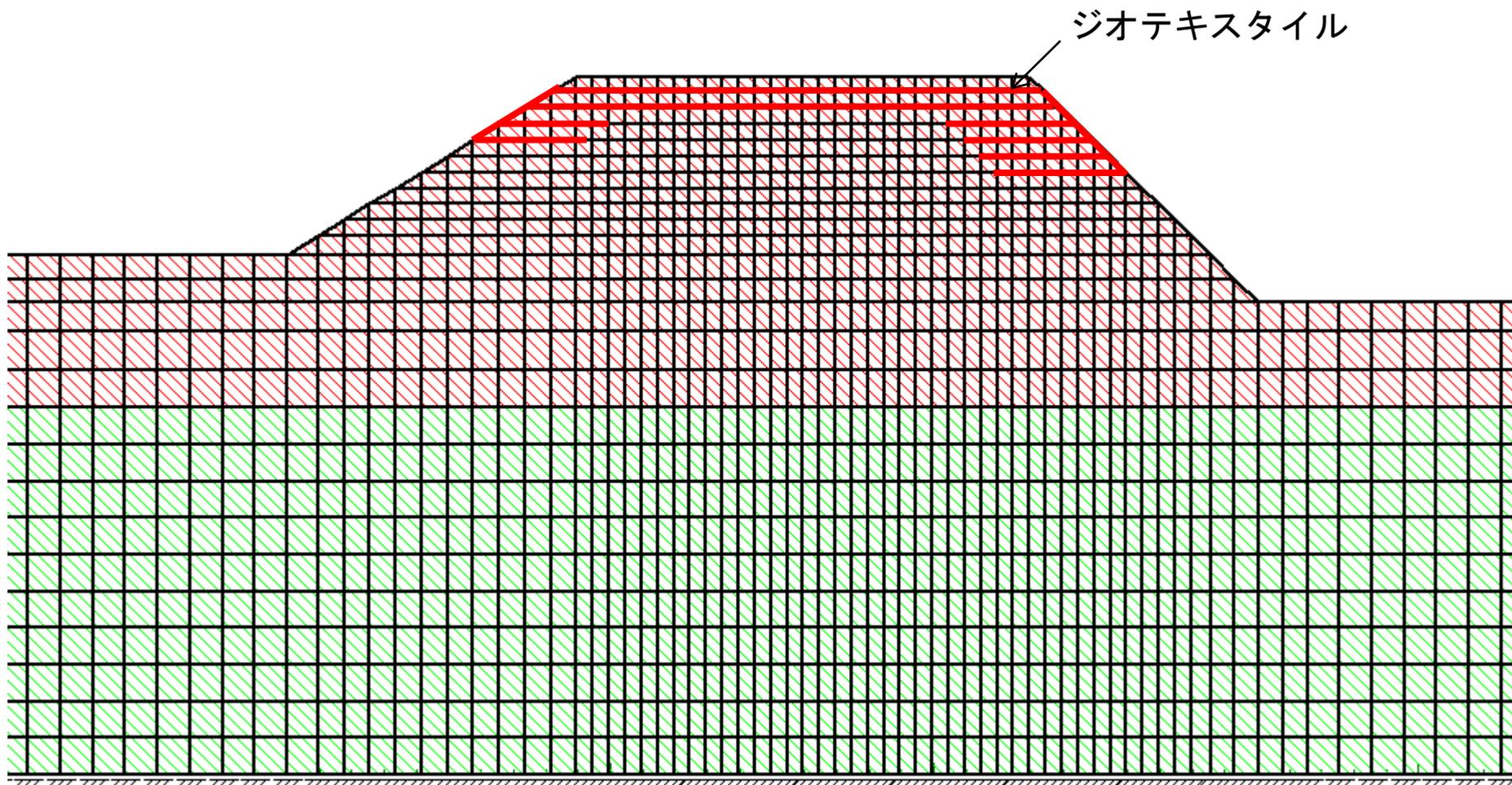


## 入力地震動(神戸海洋気象台 NS成分)



# KABUTO工法を適用した解析モデル

- ジオテキスタイル：ビーム要素



# 解析パラメータ

## □ 液状化層：PZ-Sandモデル

$M_f$	$M_g$	C	$a_f$	$a_g$	$K_{ev0}$	$G_{e0}$	$m_v$	$m_s$
1.0	1.2	0.8	0.45	0.45	500	1000	0.5	0.5
$\beta_0$	$\beta_1$	$H_0$	$H_{u0}$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$\gamma$	$\gamma_u$	$P_0$ ( $\text{kN/m}^2$ )	OCR	k (m/s)
3.0	1.0	600	6000	6.4	4.4	120	1	$1.0 \times 10^{-6}$

## □ 盛土：HDモデル

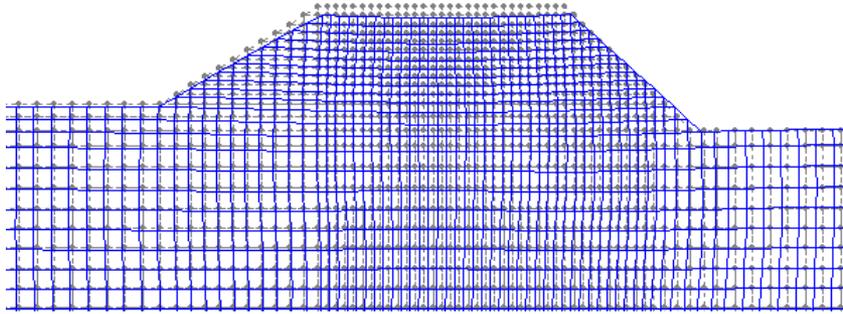
$G_0$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$\nu$	c ( $\text{kN/m}^2$ )	$\phi$ (deg.)	m
$5.8 \times 10^4$	0.3	0.0	30.0	0.5

## □ ジオテキスタイル:ビーム要素(線形弾性)

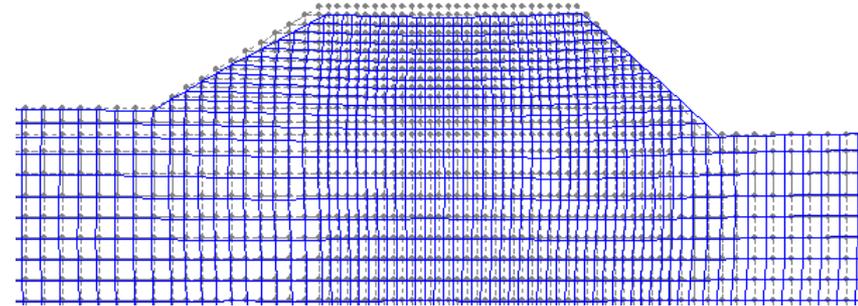
E ( $\text{kN/m}^2$ )	A ( $\text{m}^2$ )	I ( $\text{m}^4$ )
$7.2 \times 10^5$	$5.0 \times 10^{-3}$	$\div 0$

# 盛土の残留変形の解析結果

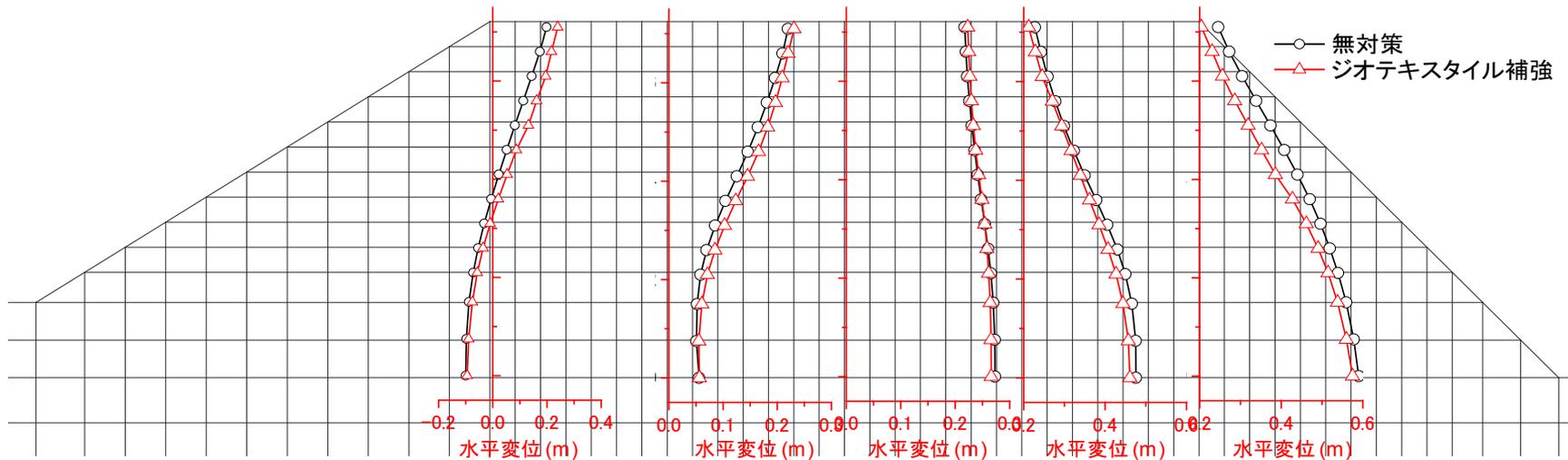
無対策



ジオテキスタイル補強

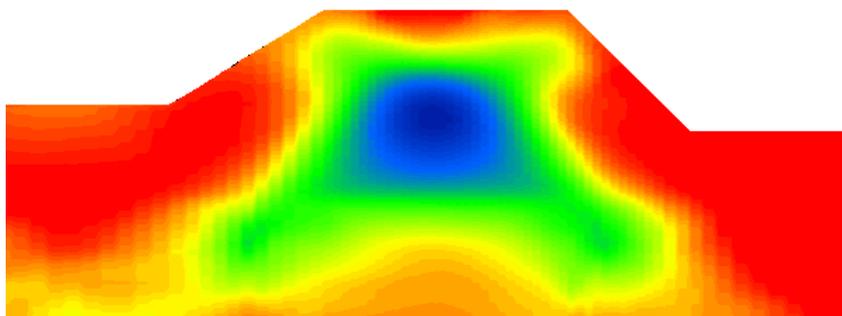


盛土内の水平変位分布



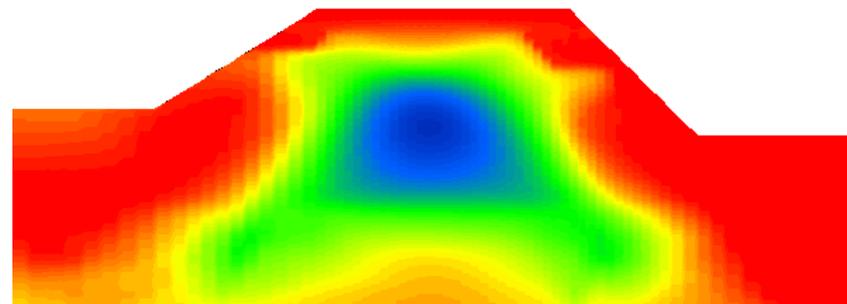
# 盛土内のせん断ひずみ分布

無対策



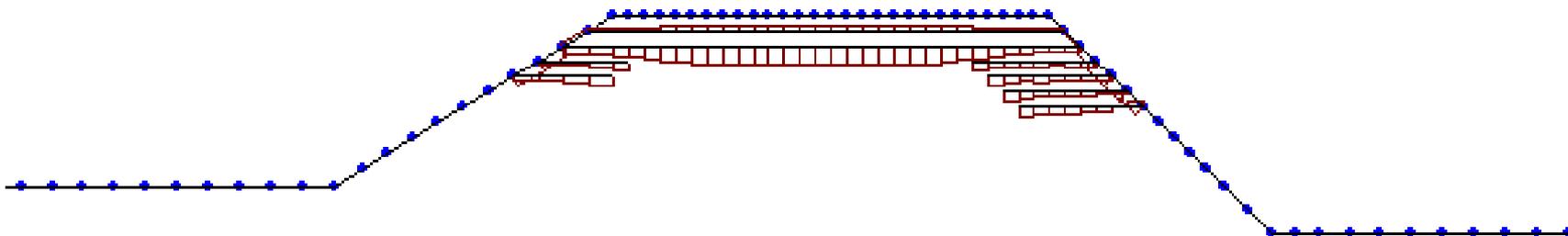
→天端に引張応力が伝達

ジオテキスタイル補強



→天端への引張応力の伝達を抑制

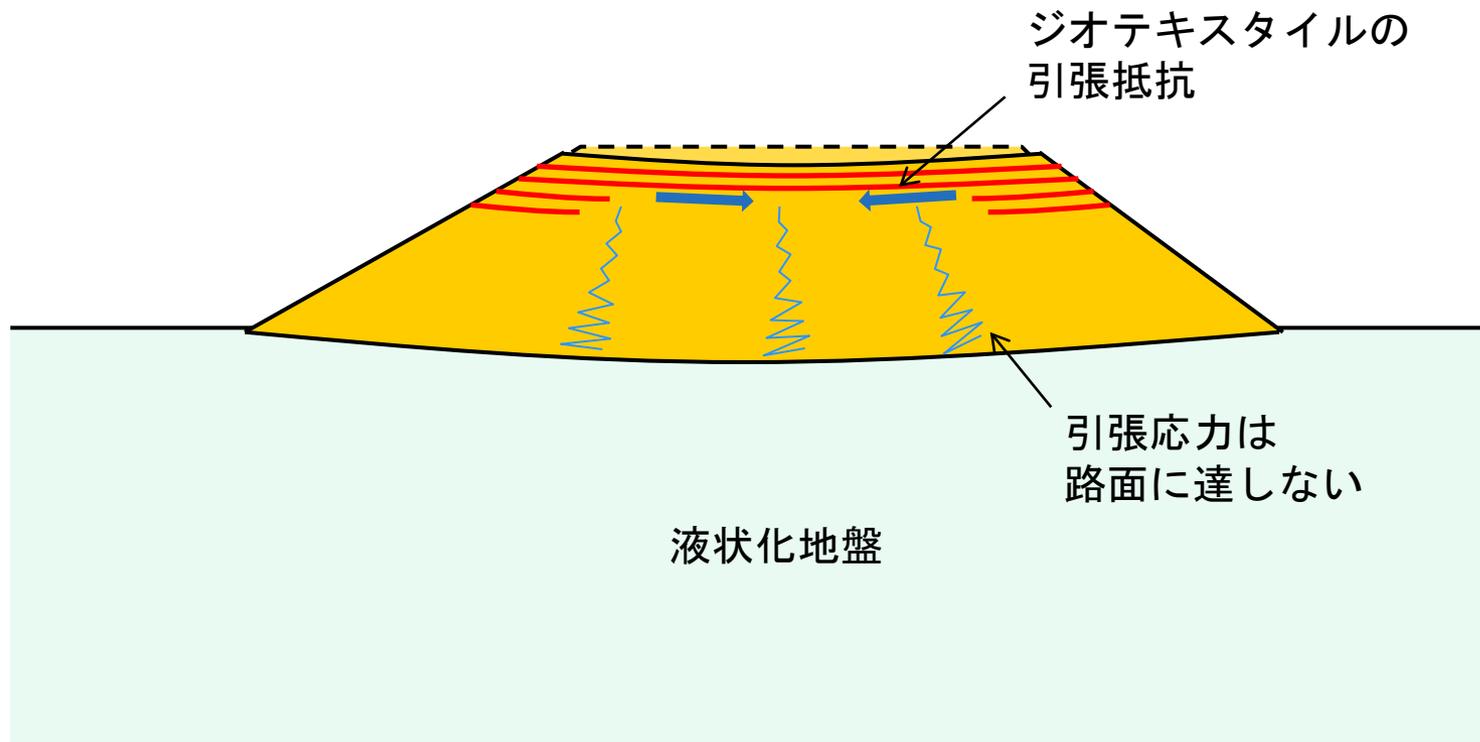
ジオテキスタイルの引張力分布



→盛土の変位を拘束する効果がある

# 液状化地盤上の盛土における天端補強の効果

- ジオテキスタイルが盛土内に発生する引張ひずみに抵抗
  - 盛土内の水平変位を拘束
  - 路面に発生する亀裂, 段差の抑制



## おわりに

### ジオテキスタイル補強土壁「アダムウォール」に対する数値解析

- ジオテキスタイルを用いた補強土壁の地震時の挙動を再現できる。
- 実際に構築された補強土壁に対して、将来予想される地震動による挙動を予測できる。

### 天端一体化工法KABUTO工法に対する数値解析

- ジオテキスタイルによる盛土の天端の補強効果を再現できる。
- 液状化地盤上の盛土におけるKABUTO工法の適用の効果として、液状化発生時に、盛土の天端(路面)に発生する亀裂や段差の発生を抑制できる可能性がある。