

# 地震時の不整形地盤・盛土の連成系の数値解析的検討

東海旅客鉄道（株） 正会員 阪本 泰士

名古屋大学 国際会員 田代 むつみ，中井 健太郎，野田 利弘，中野 正樹

## 1.はじめに

過去の地震による盛土構造物の被災事例より，地形・地質的に不整形な地盤ほど大きな被害が発生していることが指摘されている<sup>1)</sup>．たとえば図-1のとおり，2004年新潟県中越地震では，鉄道盛土や道路盛土において基盤や地表面が傾斜した地盤上の盛土の被災が目立った<sup>2),3)</sup>．山岳地や丘陵地が国土の3/4を占める地震国日本においては，傾斜地盤など不整形地盤の地震時の影響や被害の大きくなる要因を適切に評価把握することは避けられない課題である．

一方，著者ら<sup>4),5)</sup>は地震による過去の被災事例から，傾斜角度が10度以上となると被害が発生しやすいと報告しているが，これは，盛土・支持地盤の土質や物性，盛土高，地震動，飽和度などの各因子の程度が被災事例毎に異なる中で，傾斜角度という一つの因子で整理分類したものである．このため，傾斜角度を含めた各因子が被害に対し，どれくらい影響を与えるかについては不明であり，これまでこの種の研究事例は少ない．そこで，本稿では，基盤や地表面が傾斜した不整形地盤と盛土の連成系を対象に，地盤の不整形の程度や表層地盤の種類が，地震時の地盤・盛土の変形や加速度応答に及ぼす影響を，数値解析により検討した．解析には，土の構成式に骨格構造の動きを記述するSYSカムクレイモデル<sup>6)</sup>を搭載した，動的/静的水～土連成有限変形解析プログラム**GEOASIA** (All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration)<sup>7),8)</sup>を用いた．地盤や土構造物の解析では，本来，静的・動的など外力形態を問わないこと，変形も破壊も対象にできること，搭載された土の構成式が砂から中間土，粘土までの広範な土を対象にでき，その土の広範な状態の応答を記述できること，などが要求される．地盤に何が起こるか，たとえば，圧密か締固めか液状化か破壊か等は解析の結果判明することが望ましいものであり，まさに**GEOASIA**はこれらの検討が可能なプログラムと言える．

本稿では，不整形地盤の解析を行うにあたり，次の3つのステップを踏むこととする．第一に，成層地盤・盛土系の遠心模型実験を解析プログラム**GEOASIA**で再現し，実験結果と解析結果との比較から，解析で設定する地盤・盛土の材料定数と初期状態および各種境界条件の妥当性を確認する．

第二に，基盤や地表面が傾斜した「不整形地盤」上の盛土をモデル化し，表層材料，地盤の不整形の程度が，地震時の盛土の変形や加速度応答特性にどのような影響を与えるのかを数値解析により調べることである．本稿ではまず，遠心模型実験の再現により妥当性が確認された各種解析条件をそのまま継承し，地盤の不整形の



JR 上越線における盛土の被災事例<sup>2)</sup>



関越自動車道における盛土の被災事例<sup>3)</sup>

図-1 傾斜地盤上盛土の被災事例（2004年新潟県中越地震）

程度を系統的に変化させて，その影響を検討する．鉄道や道路などの盛土については，その対象が膨大であるため，個別の盛土ごとに耐震評価を行うことは膨大な時間，労力，コストがかかるため現実的ではない．したがって，ある定量的，統一的な耐震評価の指標が得られることが望ましい．

第三に，実在する不整形地盤・盛土の連成系をモデル化し，室内試験結果を元に各種パラメータを決定した上で，地震時・地震後の変形特性を調べる．特に得られた沈下量について，筆者らが過去に同箇所を成層地盤として算出した沈下量との比較を行う．

## 2. 成層地盤における遠心模型実験結果の**GEOASIA**による再現

### 2.1 はじめに

A numerical analysis on seismic behavior of irregular ground-embankment systems:  
Sakamoto, Y. (Central Japan Railway Company, E-mail: [sakamoto@jr-central.co.jp](mailto:sakamoto@jr-central.co.jp)),  
Tashiro, M., Nakai, K., Noda, T. and Nakano, M. (Nagoya University)

本章では、遠心場で実施された成層地盤・盛土の連成系の模型実験を、**GEOASIA** で再現し、実験結果と解析結果との比較・検証を行った。解析に用いた各種パラメータは、実際の実験で用いた土材料の室内試験結果を、SYS カムクレイモデルの応答により再現することで決定した。そして、解析で設定した地盤・盛土の材料定数と初期状態、および各種境界条件、および解析プログラムの妥当性を検討した。

## 2.2 遠心模型実験の概要

40g ( $1g=9.8m/s^2$ )の遠心重力で、原型の1/40の縮尺模型により実験が実施された<sup>9),10)</sup>。砕石からなる支持層の上に、表層として表-1に示す計4種類の地盤が作製された。盛土は、砂と粘土の混合試料である中間土から成り、締固め度90%で作成された。水位は地表面に等しくなるように調整され、盛土部分は不飽和状態である。なお、流体は水を使用したため、透水時の透水係数の相似則は満たしていない。

実験の手順については、粘土は、40g場で一次元圧密して地盤を作製、1g場にて地盤の上に盛土を作製、60g場で圧密放置、1g場で盛土天端に軌道荷重を載荷、40g場で圧密放置、そして、40g場で図-2に示す地震動の入力を行った。砂は、1g場で地盤を作製、1g場で地盤の上に盛土を作製、1g場で盛土天端に軌道荷重を載荷、40g場で圧密放置、そして40g場で図-2の地震動の入力を行った。

表-1 実験ケース

Case		1	2	3	4
盛土		中間土 (締固め度 90%)			
地盤	表層	粘土 (N値=2)	粘土 (N値=6)	砂 (N値=15)	砂 (N値=25)
	支持層	砕石			

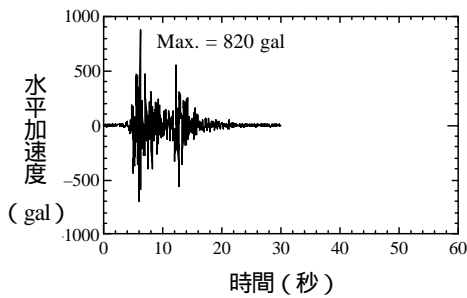


図-2 入力地震波 (1g 場換算値)

## 2.3 材料定数、初期状態、境界条件の設定

本節では、前節の実験結果を**GEOASIA**で再現するために必要な成層地盤・盛土の連成系の各種パラメータを設定した。始めに、実験に用いた土材料に対する室内試験結果を、SYS カムクレイモデルの応答で再現することにより、材料定数を決定した。続いて、当再現結果と遠心模型実験結果を元に、地盤および盛土の初期状態を決定した。また、有限要素メッシュおよび境界条件の設定を行った。以下に順に詳細を示す。

## (1)室内力学試験

実験に用いた土材料の力学特性を把握し、数値解析に用いる材料定数を同定するために、1g 場において室内力学試験が実施された。図-3～図-5の灰色太線に各室内試験の概要を示す。ただし、表層下部にある基盤層の砕石については、試験を実施していない。

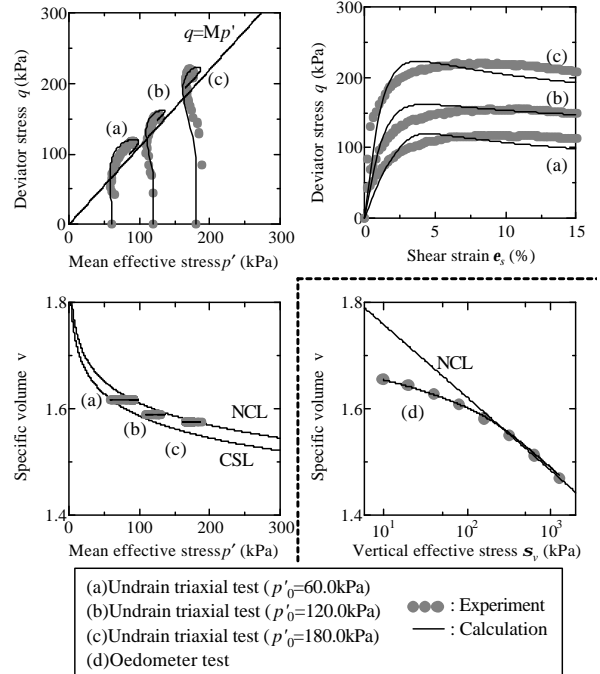


図-3 実験結果と再現結果 (粘土)

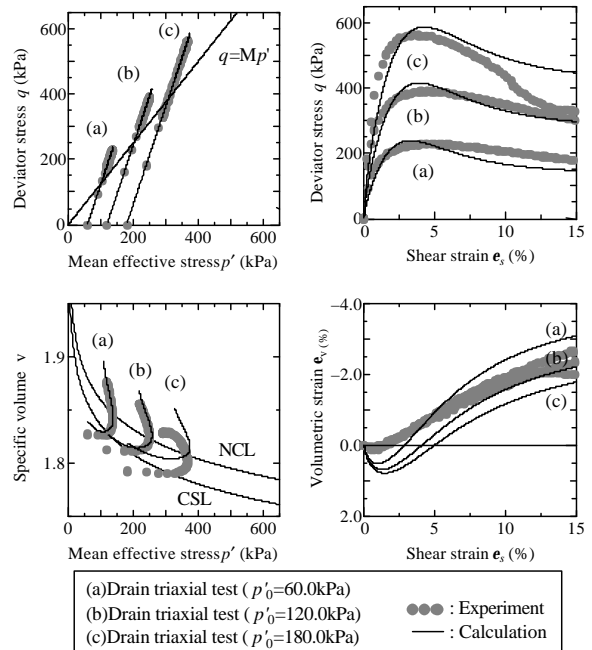


図-4 実験結果と再現結果 (砂, Case-3)

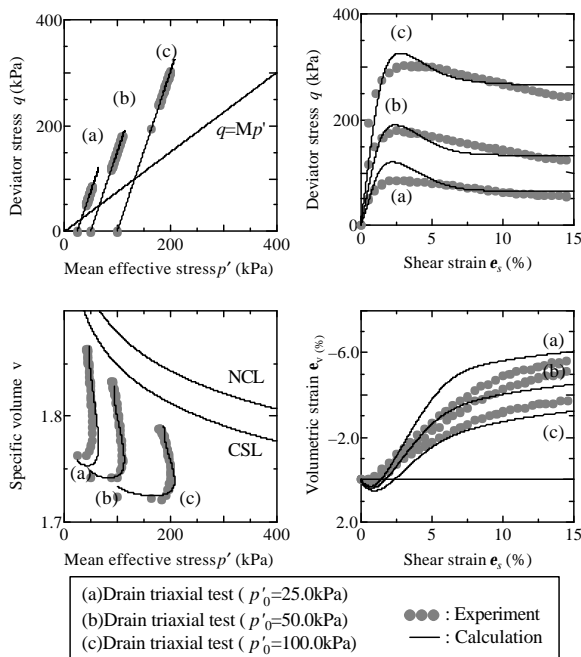


図-5 実験結果と再現結果（盛土）

表-2 解析に用いた盛土・地盤の材料定数と初期値

	盛土	表層 (粘土)	表層 (砂)	基盤 (碎石)
<弾塑性パラメータ>				
圧縮指数 $I$	0.052	0.06	0.04	0.05
膨潤指数 $k$	0.008	0.025	0.006	0.012
限界状態定数 $M$	0.75	1.10	1.25	1.00
NCLの切片 $N$	1.88	1.612	1.86	2.00
ポアソン比 $n$	0.2	0.3	0.1	0.3
<発展則パラメータ>				
正規圧密土化指数 $m$	0.028	1.2	0.02	0.06
構造劣化指数 $a$	0.8	0.66	0.001	2.2
構造劣化指数 $b$	1.0	1.0	1.0	1.0
構造劣化指数 $c_s$	0.65	1.0	1.0	1.0
回転硬化指数 $b_r$	30.0	0.001	1.0	3.5
回転硬化限界定数 $m_b$	0.96	1.0	0.2	0.7
<物性>				
透水係数 $k$ (cm/sec)	$2.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-3}$
土粒子密度 $r_s$ ( $t/m^3$ )	2.30	2.75	2.64	2.60
<初期状態>				
比体積 $v_0 (=1+e_0)$	1.70	1.55	1.827	1.70
応力比 $h$	0.3	0.43	0.43	0.545
異方性 $z_0$	0.3	0.43	0.43	0.545
構造 $1/R'_0$	3.0	2.7	50.0	1.0
過圧密 $1/R''_0$	土被り圧に応じて分布			

## (2) SYS カムクレイモデルの再現計算による材料定数の決定

土材料毎に、複数の試験結果を1組の材料定数を用いたSYSカムクレイモデルの応答で再現することにより、材料定数を決定した。再現結果を図3～図5の黒色細線で、決定した材料定数を表-2に示す。

盛土は、実験では不飽和状態で実施されたが、解析では完全飽和状態を仮定し、飽和度55%の湿潤体積重量と等しくなるように、土粒子密度を換算した。地下水位以深の表層、基盤層については、室内試験結果の土粒子密度をそのまま用いた。粘土の透水係数は、標準圧密試験から得られる値のうち、40g場での中央深度における土被り圧に相当する値を用いた。盛土材・砂の透水係数は、粒径加積曲線と密度を参照して決定した。

なお、碎石については実験結果が無いため、名古屋大学地盤力学研究室で基盤として一般的に使用される材料定数(砂)を使用した。

## (3) 40G場での初期状態の決定

**GEOASIA**による解析は、簡単のため重力加速度は40gで常に一定とし、40G場で別途作製された盛土を、地盤上に1段階ずつ荷重する時点から実施した(解析手順の詳細は次節に示す)。このため、実際の実験には無い「40g場で作成された地盤と盛土」の初期状態を与える必要がある。

本報告ではまず始めに、40g場における「初期比体積」と「初期構造の程度」を以下のように決定した。

### 表層

遠心模型実験において、盛土を構築し40g場で圧密が終了した時点における、盛土から離れた自由地盤での沈下量を元に、40g場での表層地盤の初期比体積を算定した。また、図-3、図-4の室内試験で用いた供試体に比べ、遠心模型実験開始時の地盤は乱れが少なくより構造が高位な状態にあると考えた。

### 盛土

表層のような40g場における密度の情報は無いため、図-5の室内試験結果において、供試体作製時(等方圧密前)の状態を1g場での初期状態とした。この状態から40gまでの重力加速度増加を想定して、構成式応答により鉛直有効応力の40倍まで一次元載荷を行い、40g場における初期比体積、初期構造の程度を求めた。

### 碎石

土質情報が無いため、超密な砂の状態とした。

続いて、初期応力比と初期異方性の程度については、40g場において一次元圧密が十分に進み、応力と異方性の方向が一致した状態にあると仮定した。また、深部の層ほど、より応力比・異方性が発達した状態にあると考えた。

そして、盛土・表層・基盤の各層において、初期比体積・初期応力比・初期構造の程度・初期異方性の程度は深度方向に均一と仮定し、初期過圧密比を土被り圧に応じて分布させた。表-2に、決定した40g場での初期状態を示す。

#### (4)有限要素メッシュおよび境界条件の設定

解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を図-6 に示す。解析領域は、遠心模型実験と同サイズ（縦 20cm×横 200cm）の全断面とし、2次元平面ひずみ条件を仮定した。地盤と盛土の上面は水圧を常にゼロ（大気圧条件）とし、地盤の側面と底面は非排水境界、盛土底面と地盤の境界は排水境界と設定した。本報告の解析では、重力加速度は常に 40g 場で固定とし、以下の手順で解析を行った。

40G 場における初期地盤を作成する。

表層が砂の場合は、実験に合わせてのり尻該当部に土留めとして、1層系弾性体（アルミニウムの材料定数： $E=7.0 \times 10^6 \text{kN/mm}^2$ ,  $\nu=0.33$ ）を設置する。

別途 40g 場で作成した高さ 15cm の盛土（水～土 2 相系の弾塑性の有限要素）を、地盤上に追加載荷し、圧密沈下が収束するまで計算する。

軌道荷重を分布荷重（40g 換算で  $q=147 \text{kN/m}^2$ ）で盛土天端に載荷し、再び圧密沈下が収束するまで計算する。

地震加速度を入力する。地震動は、模型実験において固定土槽を用いているため、地盤側面と底面の全有限要素節点に、図-2 に示す加速度を水平方向に入力した。地盤の変形が収まるまで、圧密放置計算を行う。

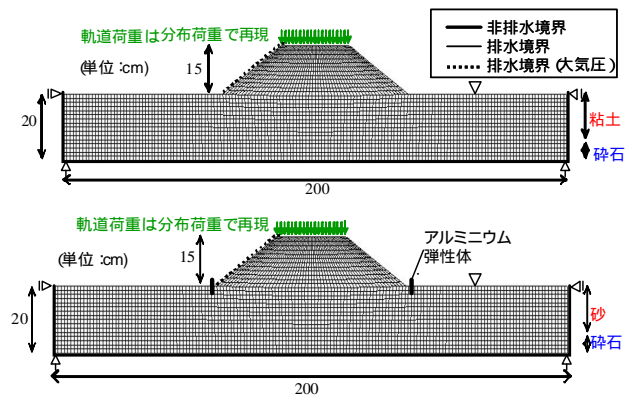


図-6 有限要素メッシュと境界条件（上図：粘土，下図：砂）

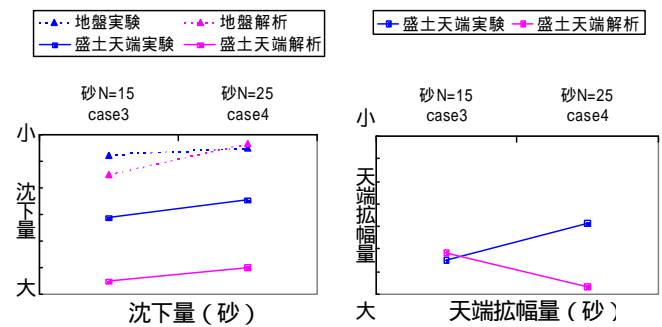
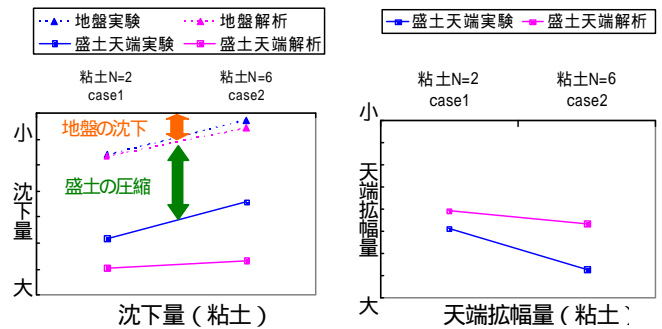


図-7 実験結果と解析結果の比較

#### 2.4 解析結果と実験結果の比較

図-7 に、Case1～4 の各ケースにおいて、沈下量と天端拡幅量の、実験値と解析値の比較を示す。すべて、1g 場での換算値とする。なお、今回実験、解析ともに境界が剛土層であるため、実地盤に対し、波が増幅され、変位量が大きめにしている可能性がある。

図-7 より、地盤の沈下量については、実験と解析で比較的近い値が得られた。またケース間の定量的な傾向も、実験と解析で整合性が取れている。

一方、盛土の沈下量や天端拡幅量の実験と解析の差異は、地盤に比べ大きい。これは、実験では盛土は不飽和であるのに対し解析では飽和材料として扱っていること、また解析では 1g から 40g への重力加速度の変化を再現していないことなどが原因として考えられる。

図-8 に、Case1～4 の各ケースにおける、圧密終了後のせん断ひずみ分布図（解析結果）を示す。表層地盤が軟弱な（粘土 N 値=2）場合、盛土と地盤の境界部にせん断ひずみが発達し、のり尻の伸張が見られる。逆に、表層地盤がやや軟弱な（粘土 N 値=6）場合には、盛土内部でせん断ひずみが発達し、堤体内円弧すべりが見られる。この傾向は実験でも確認されており、表層地盤が軟弱な場合は、たとえば、シートパイル締切工などの地盤への対策、表層地盤がやや軟弱な場合は、盛土への対策を実施することが有効であるといえることができる。

以上、本解析により遠心模型実験を定性的に再現できたことから、表-2 に示す材料定数、初期状態、境界条件により、本稿の主眼である不整形地盤・盛土の連成系の解析を実施することとした。

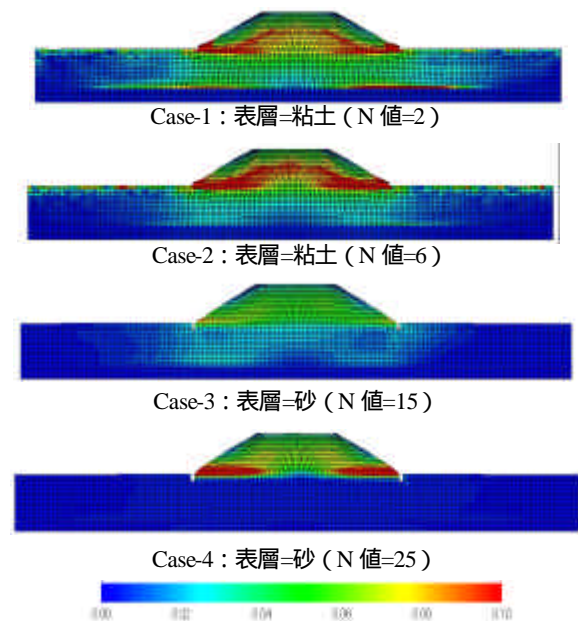


図-8 圧密終了時のせん断ひずみ分布

### 3.不整形地盤・盛土の連成系の解析（ケーススタディ）

11),12)

#### 3.1 解析条件

40g場での遠心模型実験を想定し、図-9に示す実物の1/40の縮尺の盛土-不整形地盤連成系を、有限要素でモデル化した。基盤傾斜角は0, 10, 20, 30度、地表面傾斜角は0, 5, 10, 15度を与え、全解析ケースにおいて、水平方向の解析領域、盛土の天端幅、中央における盛土高、法面勾配、および盛土中央直下における表層と基盤の層厚は同条件とした。そして、傾斜角度が大きい場合にも基盤が露呈（表層の消失）しないように、基盤や地表面の傾斜範囲は盛土直下を含む地盤中央部のみとした。地盤と盛土の上面は水圧を常にゼロ（大気圧条件）とし、盛土底面と地盤の境界は排水境界と設定した。また、模型実験における剛土槽を想定して、地盤の側面と底面は非排水境界とした。表層地盤は粘土はN値=6、砂はN値=15の場合で検討した。

解析は、重力加速度は常に40g場で固定とし、以下の手順で行った。まず始めに、40g場における初期地盤を作成し、その上に別途40g場で作成した盛土（水～土2相系の弾塑性有限要素）を追加し、沈下が収束するまで圧密放置をした。その後、剛土槽を想定して、地盤側面と底面の全有限要素節点に、図-2の地震動を、水平方向に入力した。地震後は、地盤の変形が収まるまで、圧密放置計算を行った。

#### 3.2 解析結果と考察

解析結果は、図-9のとで示した各点において、地震開始から圧密終了までの沈下量と水平変位を、図-10のように整理した。結果、概して、基盤や地表面の傾斜角度が大きいくほど、地盤の沈下量は大きくなり、盛土は全体に斜面下側に移動することが分かる。

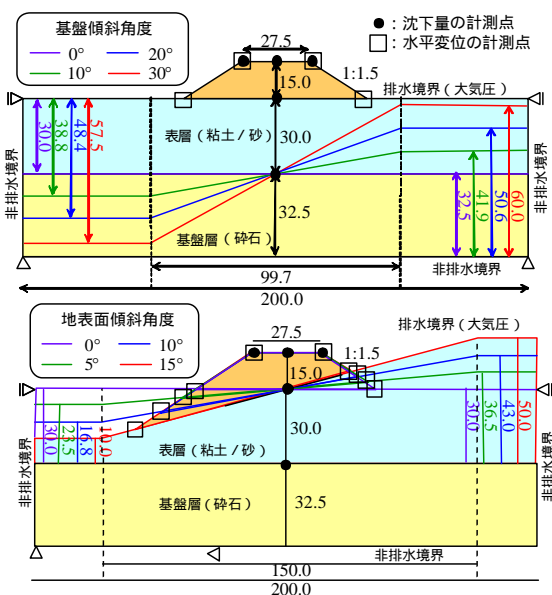
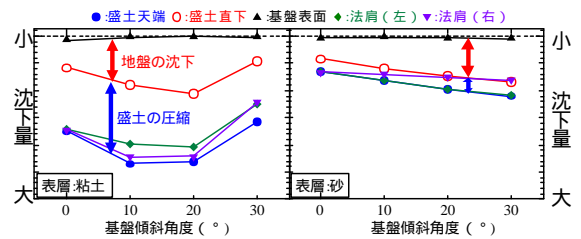
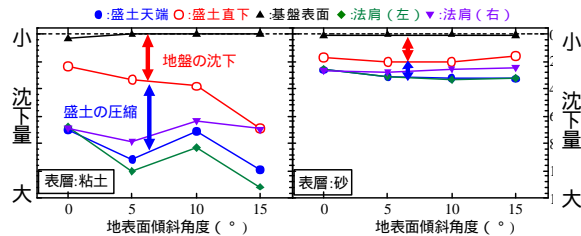


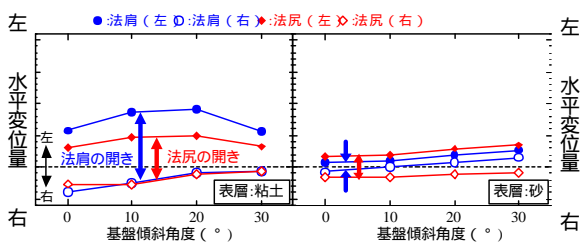
図-9 不整形地盤・盛土の連成解析モデル  
(上図：基盤傾斜，下図：地表面傾斜)



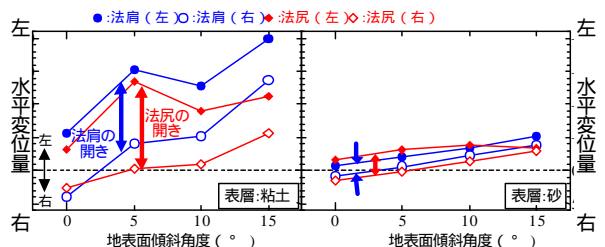
(a) 盛土-地盤の沈下量に及ぼす基盤傾斜角度の影響



(b) 盛土-地盤の沈下量に及ぼす地表面傾斜角度の影響



(c) 盛土の水平変位量に及ぼす基盤傾斜角度の影響



(d) 盛土の水平変位量に及ぼす地表面傾斜角度の影響

図-10 解析結果

しかしながら、図-10(a)(c)の表層が粘土で基盤傾斜の場合には、傾斜角度が20度以上になると、逆に沈下量および水平変位量が小さくなる。また、図-10(b)(d)のように、表層が粘土で地表面傾斜の場合は、傾斜角度が5度、10度、15度と大きくなるにつれ、沈下量および水平変位量が単調に増加せず、波打ちながら増加していることが分かる。これは図-11(b)のせん断ひずみ分布から明らかのように、剛土槽を想定した水平方向固定境界の影響を受けたことが原因として考えられる。本解析では、剛土槽のサイズとして地盤の水平距離を200cmと一律に与えたが、この影響を取り除くには、自由地盤の範囲をもう少し広く設定する必要があったことが分かる。

また、図-10より、表層が砂の場合に比べて粘土の場合は、沈下量、水平変位量ともに大きく、図-11から、盛土・地盤共に広範囲にわたり大きなせん断ひずみが発生する様子が分かる。紙面の都合上応答加速度図は省略するが、地盤内での波の増幅が著しくなっており、地盤だけでなくその上の盛土においても大きな揺すり込み沈下が起きたと考えられる。なお、今回は粘土N値=6、砂N値=15のやや軟弱な地盤を想定した解析であり、より固い地盤の場合には

応答加速度の増幅は抑えられる可能性がある。今後表層地盤の硬軟を変化させた解析の検討が必要であろう。

以上の考察より、表層が粘土の場合、注意を要するが、さらに詳細な条件、例えば傾斜角度がいくらの場合に要注意となるかなどの定量的な評価を行うには、表層地盤の硬軟の問題や境界条件の問題等を解決する必要がある。

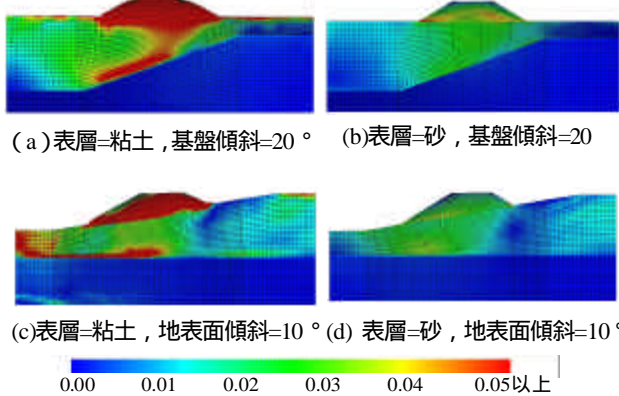


図-11 地震後圧密終了時のせん断ひずみ分布

#### 4. 実在の不整形地盤・盛土の連成系の解析<sup>13)</sup>

##### 4.1 はじめに

前章では、ケーススタディとして、土質の種類、傾斜の種類(基盤、地表面)、傾斜角度を変化させ、それらの影響を40gの遠心模型実験場で検討を行ったが、本章では、実在の1g場での不整形地盤・盛土の連成系の解析を実施し、実地盤ではどの程度の変形や沈下量が生じるかを解析的に調べることにした。

##### 4.2 解析条件

地表面は緩やかな傾斜であるが、基盤は比較的急な角度で傾斜した実在する地盤を、図-12に示すように単純モデル化した。基盤・地表面の傾斜範囲は「盛土中央から左右の法戻までの2倍の距離」であると仮定し、それより外側では水平に堆積した地盤が無限に続く状態を想定した。また、表層・基盤層とも最も薄い箇所でも5m程度の層厚になるように地盤深度を設定した(基盤の露呈や消失を考えない)。

地盤の材料定数・初期状態は、解析対象断面の近傍で行われたボーリング調査結果、およびサンプリング試料による室内力学試験結果をSYSカムクレイモデルに基づき考察し、表-3のように与えた。簡単のため、盛土・表層・基盤はそれぞれ均一な材料であると仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させることで初期状態を決定した。粒度や圧縮性・透水性などより、Asc層は砂と粘土の中間的な材料(平均N値=13)、また泥岩は非常に固い難透水性の材料である。有限要素メッシュは、盛土載荷による影響が無くなる領域ま

で水平方向の幅を十分に確保した。また地震時には地震波の反射を防ぐために、下端の水平方向は粘性境界に、側方には幅の広い要素を設けこの要素の両端を等変位とすることにより、モデル側方での自由地盤的な挙動を模擬した。水理境界は、盛土と地盤は完全飽和であるとし盛土上面と地表面は水圧を常にゼロ(大気圧)に、また盛土底面と地盤の境界は排水境界とした。地盤下端は難透水性の基盤が続くことを想定して非排水境界、地盤左右端も非排水境界とした。入力地震波は図-2のとおりであり、基盤底部から入力し、地震中に発生した過剰水圧が消散して地盤が安定するまで圧密計算を行った。

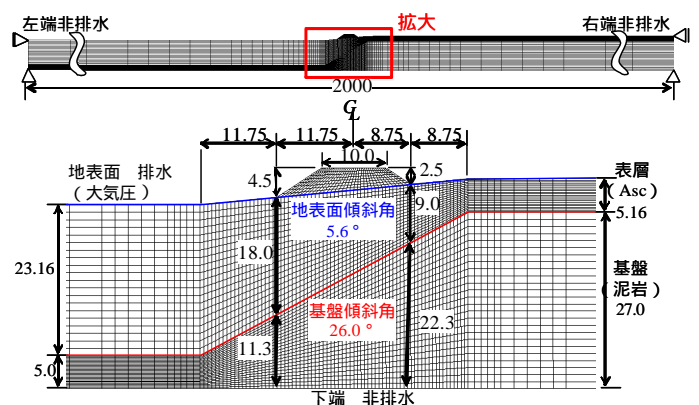


図-12 1g場における実在不整形地盤・盛土の解析モデル

表-3 解析に用いた盛土・地盤の材料定数と初期値

	盛土	Asc層	泥岩
<b>&lt;弾塑性パラメータ&gt;</b>			
圧縮指数 $l$	0.052	0.065	0.084
膨潤指数 $k$	0.008	0.003	0.007
限界状態定数 $M$	0.75	1.30	1.13
NCLの切片 $N$	1.88	1.71	1.52
ポアソン比 $n$	0.2	0.3	0.3
<b>&lt;発展則パラメータ&gt;</b>			
正規圧密土化指数 $m$	0.028	0.8	5.0
構造劣化指数 $a$	0.8	2.0	1.0
構造劣化指数 $b$	1.0	1.0	1.0
構造劣化指数 $c_s$	0.65	0.8	1.0
回転硬化指数 $b_r$	30.0	1.0	0.001
回転硬化限界定数 $m_b$	0.96	0.9	1.0
<b>&lt;物性&gt;</b>			
透水係数 $k(\text{cm/sec})$	$2.0 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^7$
土粒子密度 $\rho_s(\text{t/m}^3)$	2.30	2.64	2.61
<b>&lt;初期値&gt;</b>			
比体積 $v_0 (=1+e_0)$	1.70	1.645	1.14
応力比 $h_b$	0.3	0.375	0.375
異方性 $z_0$	0.3	0.375	0.375
構造 $1/R_0^*$	3.0	1.2	1.0
過圧密 $1/R_0^*$	土被り圧に応じて分布		

### 4.3 解析結果と考察

図-13, 図-14にそれぞれ沈下量, せん断ひずみ分布を示す。基盤下端で入力した波が地盤内部で増幅した結果, 地震発生直後から盛土直下の地盤で非排水的なせん断が始まり, その後は過剰水圧の消散と共に地盤全体が大きく沈下した。また, 密な砂からなる盛土の内部では地震後からせん断に伴い吸水膨張が起こり, 斜面下側に流れるように変形したが, 盛土自体の圧縮量は比較的小さい。

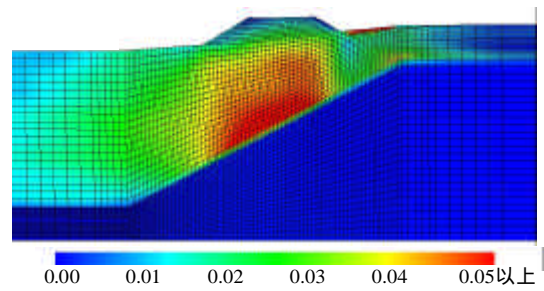


図-14 せん断ひずみ分布

### 4.4 成層地盤での検討との比較

著者らは, 円弧すべり法(基底破壊)による保有耐力と盛土沈下量(基底破壊モデルを用いたニューマーク法による滑動沈下量+支持地盤の揺り込み沈下量から算出(地震波は図-2))との関係より得られる相関式から円弧すべりによる盛土の沈下量を簡易に推定する手法, ならびに,  $P_L$  値(液状化指数)と盛土沈下率(沈下量/盛土高さ(地震波は図-2))から液状化による盛土の沈下量を簡易に推定する手法を提案している<sup>14)</sup>。これらは成層地盤として検討しているが, 本現場において円弧すべりによる沈下量(図-13に「円弧すべりによる沈下量」の表記で結果を記載), ならびに液状化による沈下量(図-13に「液状化による沈下量」の表記で結果を記載)を算出したところ, ともに今回の解析結果に対し, 差異は±20%程度と非常に小さいものであることを確認した。つまり, 実地盤の形状を厳密に不整形として考慮しなくても, 近似的に成層地盤として扱っても問題はなさそうである。ただし, 今回は表層地盤の土質が砂質系であり, 傾斜角度も比較的小さいものであったが, 今回と異なり土質が粘土である場合や傾斜角度がより大きい場合には, 不整形の影響が大きくなる可能性がある。

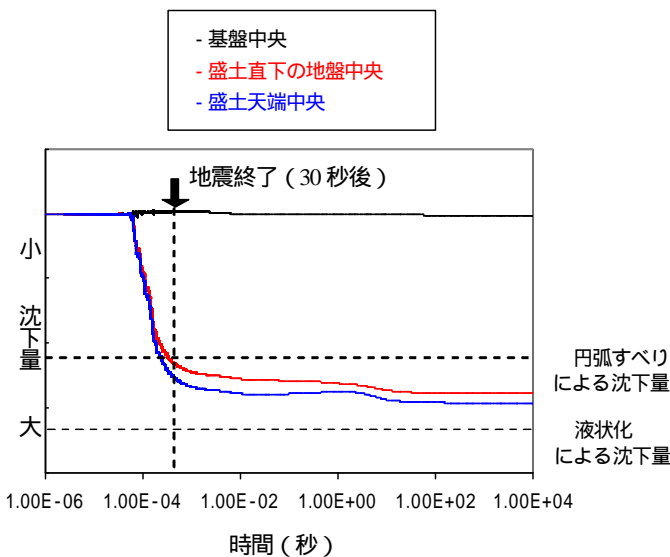


図-13 解析結果(沈下量の推移)

## 5. 結論

本研究により得られた主な知見は以下のとおりである。

(1) 成層地盤における遠心模型実験結果の **GEOASIA** による再現不整形地盤での検討を実施する前段に, 成層地盤・盛土系の遠心模型実験を解析プログラム **GEOASIA** で再現し, 実験結果と解析結果との比較から, 解析で設定する地盤・盛土の材料定数と初期状態および各種境界条件の妥当性を定性的に確認した。定量的には, 実験に比べ解析の方が沈下量が大きくなったが, これは, 実験では盛土は不飽和であるのに対し解析では飽和材料として扱っていること, また解析では  $1g$  から  $40g$  への重力加速度の変化を再現していないことなどが原因として考えられる。表層地盤が軟弱な(粘土  $N$  値=2)場合, 盛土と地盤の境界部にせん断ひずみが発達し, のり尻の伸張が見られる。逆に, 表層地盤がやや軟弱な(粘土  $N$  値=6)場合には, 盛土内部でせん断ひずみが発達し, 堤体内円弧すべりが見られる。この傾向は実験でも確認されており, 表層地盤が軟弱な場合は, たとえば, シートパイル締切工などの地盤への対策, 表層地盤がやや軟弱な場合は, 盛土への対策を実施することが有効であるといえることができる。

(2) 不整形地盤・盛土の連成系の解析(ケーススタディ)

概して, 基盤や地表面の傾斜角度が大きいほど, 地盤の沈下量は大きくなり, 盛土は全体に斜面下側に移動する。しかしながら, 表層が粘土で基盤傾斜の場合には, 傾斜角度が20度以上になると, 逆に沈下量が小さくなる。また, 表層が粘土で地表面傾斜の場合には, 傾斜角度が大きくなるにつれ, 沈下量および水平変位量が波打ちながら増加する。これは, 剛土槽を想定した水平方向固定境界の影響を受けたことが原因として考えられる。本解析では, 剛土槽のサイズとして地盤の水平距離を200cmと一律に与えたが, この影響を取り除くには, 自由地盤の範囲をもう少し広く設定する必要があることが分かる。表層が砂の場合に比べて粘土の場合には, 沈下量, 水平変位量ともに大きく, 盛土・地盤共に広範囲にわたり大きなせん断ひずみが発生する。地盤内での波の増幅が著しくなっており, 地盤だけでなくその上の盛土においても大きな揺すり込み沈下が起きたと考えられる。

### (3) 実在の不整形地盤・盛土の連成系の解析

地表面傾斜角度が5.6度、基盤傾斜角度が26度、表層地盤がAsc層、基盤が泥岩の実在の不整形地盤・盛土での連成系の解析を実施したところ、基盤下端で入力した波が地盤内部で増幅し、地震発生直後から盛土直下の地盤で非排水的なせん断が始まり、その後は過剰水圧の消散と共に地盤全体が大きく沈下した。また、密な砂からなる盛土の内部では地震後からせん断に伴い吸水膨張が起こり、斜面下側に流れるように変形したが、盛土自体の圧縮量は比較的小さい。

本現場において過去に提案した手法により、円弧すべりによる沈下量、ならびに液状化による沈下量を成層地盤と仮定して算出したところ、ともに今回の解析結果に対し、差異は±20%程度と非常に小さいものであることを確認した。つまり、実地盤の形状を厳密に不整形として考慮しなくても、近似的に成層地盤として扱っても問題はなさそうである。ただし、今回は表層地盤の土質が砂質系であり、傾斜角度も比較的小さいものであったが、今回と異なり土質が粘土である場合や傾斜角度がより大きい場合には、不整形の影響が大きくなる可能性がある。

## 6. 今後の課題

不整形地盤・盛土の連成系の解析の深度化を以下の項目について実施する。

今回は表層が粘土N値=6、砂N値=15というやや軟弱な地盤にて解析を実施したが、さらに固い地盤で解析を実施することで、土質の硬軟による変形状態や沈下量等の影響について確認する。境界の影響を受けないよう、水平方向の幅を十分に取った上で解析(ケーススタディ)を実施する。

今回は盛土が飽和しているとみなし解析を行ったが、実際の現場は不飽和であることから、不飽和での解析を実施し、飽和度の影響を確認する。

表層地盤の土質、硬軟、盛土高、傾斜角度を変化させ、不整形地盤上の盛土の耐震性能を把握するとともに、各パラメタから要注意となる条件、閾値を求め、それに従い、要注意箇所を抽出する。傾斜角度の推定については、盛土のり尻の両側地盤における常時微動の卓越周波数を利用して求めることができる。

不整形地盤に対し、シートパイル締切工等の対策工が成層地盤と同様に有効であるかを確認する。

## 参考文献

1) 那須誠:地震時の盛土の変形と地盤条件の関係 - 傾斜地盤の影響 - ,地盤と構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp.181-188, (社)土質工学会, 1989.

2) 谷口善則, 相沢文也, 矢島敦:新潟県中越地震による鉄道盛土の被害および復旧, 第40回地盤工学研究発表会, 1060, 2005.7.

3) 日本道路公団北陸支社, 湯沢管理事務所, 長岡管理事務所, 上越管理事務所:関越自動車道及び北陸自動車道における新潟県中越地震災害応急復旧事業, 月刊建設, vol49, 2005.8.

4) 阪本泰士, 関雅樹: GIS および常時微動を用いた傾斜地盤上の盛土の抽出方法の検討, 土木学会第61回年次学術講演会, -267, 2006.9.

5) 阪本泰士, 関雅樹, 永尾拓洋, 伊藤義人:鉄道盛土の新たな耐震評価方法と耐震補強工法の検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.743-752, 2006.3.

6) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K., Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.

7) Asaoka, A. and Noda, T.: All soils all states all round geo-analysis integration, International Workshop on Constitutive Modelling - Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, pp.11-27, 2007.

8) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, vol.48 No.6, pp.771-790, 2008.

9) 大木基裕, 永尾拓洋, 山本哲也, 関雅樹, 佐藤清:粘性土地盤上の盛土の地震時挙動に関する遠心模型実験, 第42回地盤工学研究発表会, 568, 2007.7.

10) 関雅樹, 大木基裕, 庄司朋宏, 永尾拓洋, 荒鹿忠義:地震時の盛土の破壊と対策工の実験検証, 第21回中部地盤工学シンポジウム, No12, 2009.8 (掲載予定).

11) 田代むつみ, 野田利弘, 浅岡顕:盛土 - 不整形地盤連成系の地震時挙動に関する数値解析的検討, 第44回地盤工学研究発表会, 2009.8 (掲載予定).

12) 田代むつみ, 野田利弘, 浅岡顕:基盤・地表面が傾斜した地盤と盛土の地震時連成挙動, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009.9 (掲載予定).

13) 田代むつみ, 野田利弘, 浅岡顕:不整形地盤上の盛土の地震時挙動に関する水~土連成解析, 第58回理論応用力学講演会論文集, pp.261-262, 2009.6.

14) 阪本泰士, 関雅樹, 永尾拓洋, 伊藤義人:鉄道盛土の耐震補強箇所選定のための情報支援システムの構築とその利用, 構造工学論文集, Vol.51A, , pp.1093-1102, 2005.3.