

上下動が盛土の地震時変形に及ぼす影響に関する一考察

A Study of the Effect of Vertical Earthquake Motion on Seismic Residual Displacement of Embankments

秦 吉弥	Yoshiya HATA	(日本工営 (株) 中央研究所)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究科)
加納誠二	Seiji KANO	(広島大学大学院工学研究科)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究科)
山下典彦	Norihiko YAMASHITA	(神戸市立工業高等専門学校)

わが国では近年、大地震が頻発しており、非常に大きな上下動が観測されており、甚大な地盤災害が発生している。しかしながら上下動が盛土の地震時安定性に及ぼす影響に関する既往の研究は少なく、盛土の耐震設計指針においても上下動の影響は考慮されていない。そこで本研究では、動的遠心模型実験ならびに Newmark 法や FEM による解析を実施し、上下動が盛土の地震後の残留変位量に及ぼす影響について検討を行った。その結果、同じような位相特性を持つ水平動と上下動が同時に盛土に作用した場合には、上下動は残留変位量に対して危険側に作用することを確認し、解析結果を踏まえた新たな提案を行った。

キーワード：地震，盛土，残留変形量，有限要素法，Newmark 法 (IGC : D07, E08, H04)

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震など近年発生した大地震では、非常に大きな加速度を有する強震動が観測されており、甚大な地盤災害が報告されている¹⁾。図-1は1995年兵庫県南部地震から2007年能登半島地震までの主な被害地震において地表面で観測された水平方向(最大加速度が大きいほうの成分)と上下方向の最大加速度の関係を示したものである。この図より多少のばらつきは見られるものの、上下最大加速度は水平最大加速度の半分程度であることが読み取れる。

一部の耐震設計指針^{2),3)}では、水平動の半分の加速度を上下方向に作用させることで、上下動の影響が既に考慮されているが、上下動の周波数特性や位相特性については言及されていない。また盛土の耐震設計指針⁴⁾においては上下動を考慮した耐震設計は含まれていない。さらに上下動が盛土の地震時安定性に及ぼす影響に関する既往の研究は数少なく、先駆的研究として Idriss & Seed の研究⁵⁾があるが、上下動が盛土の地震時安定性に悪影響を及ぼすとする研究成果^{6),7)}と殆ど影響を及ぼさないとする研究成果^{8),9)}が存在し、結論は得られていない。

そこで本研究では、まず、盛土材料として砂質土を使用した水平一方向加振による盛土の動的遠心模型実験を実施した。そしてクロススプリング・モデル¹⁰⁾による質点系解析を利用した Newmark 法^{11),12)}や FLIP¹³⁾を用いた FEM 逐次非線形解析によるシミュレートを行い、両解析の適用

性について検討を行った。比較検討対象とした応答は、水平方向の応答と、水平一方向加振にも関わらず盛土の変形や水平応答が上下応答に励起する現象(パラメタ励振)の影響によって発生した上下応答である。次に、遠心実験結果の再現に用いたモデルを使用し、両解析手法による数多くの観測波を入力地震動としたパラメトリックスタディを実施し、鉛直地震動が盛土の地震時変形に及ぼす影響について検討を行った。最後に、上下動の位相特性に着目して再度解析を実施し、盛土の耐震性能照査設計において鉛直地震動の影響を考慮するための新たな提案を行った。

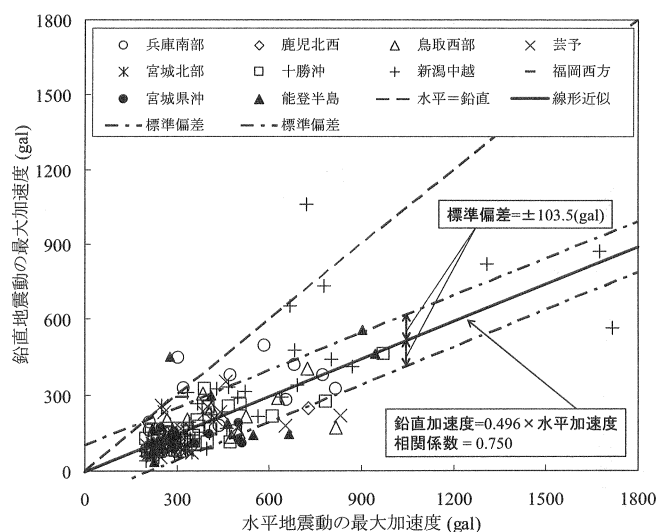


図-1 水平最大加速度と鉛直最大加速度の関係

2. 解析手法の適用性

2.1 動的遠心模型実験の概要

図-2 に実験模型と計測機器配置の概略図を示す。実験模型は2次元平面ひずみ条件とし、盛土高 20m、法勾配 1:1.8 を持つ盛土断面を対象実物として、半断面に対して縮尺 1/50 でモデル化を行った。

表-1 に模型盛土材料の物性値一覧を示す。図-3 には三軸 CD 試験から得られた模型盛土材料の応力-ひずみ関係を示す。模型材料は砂質土を対象とし、模型盛土の密度は締固め度 $D_c=90\%$ を基準として設定した。模型は、内寸法で幅 1060mm×高さ 400mm×奥行 295mm のアルミ合金製の剛土槽(ただし前面側はガラス貼り)に、縦方向に一層当たりの仕上がり層厚が 4cm になるように密度管理による締固めで作成した。模型盛土材料は、材料物性の再現性を考慮して、豊浦砂とカオリン粘土の乾燥重量比が 9:1 となるよう混合したものを最適含水比で加水調整したものを用いた。盛土中央側と模型土槽の境界面では、剛土槽壁面の影響を極力抑えるため緩衝材としてシリコンゴムを挿入し、土槽底面にはサンドペーパーを貼付した。

実験方法としては、まず、盛土模型を 50G の遠心力場に置くことで自重による応力状態を再現した後に、模型盛土の固有周波数を推定することを目的としたホワイトノイズ波による水平方向の微小振幅加振を行った。土槽の中心で模型盛土内の平均的な拘束圧が作用すると考えられる図-2 の ACC8 の位置における加速度波形のフーリエスペクトルから模型盛土の固有周波数を推定した。算定された模型盛土の固有周波数は、それぞれ水平方向で 2.4Hz および上下方向で 3.3Hz である。

次に、入力地震動による水平一方向加振を行った。加振に用いた入力波形は、1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波の NS 成分(最大加速度 818gal)であり、本実

験における加振装置の能力に合わせて最大加速度を 460gal に振幅調整して入力した。計測は図-2 に示すとおり盛土内における水平および上下方向の応答加速度(計 13 観測点)と法肩における水平および鉛直方向の変位を計測した。またメッシュ上の標点により盛土の残留変位の計測を加振終了後に、遠心装置を停止させた 1 G 重力場において行った。

表-1 模型盛土材料の物性値

土粒子密度 ρ_s		t/m ³	2.647
粒度特性	砂分	%	90
	シルト分	%	4
	粘土分	%	6
	最大粒径	mm	0.425
締固め特性	ρ_{dmax}	t/m ³	1.73
	w_{opt}	%	11.8
D _c =90%時の強度特性と変形特性	ρ_t	t/m ³	1.741
	c_d	kPa	1.39
	ϕ_d	deg.	33.8

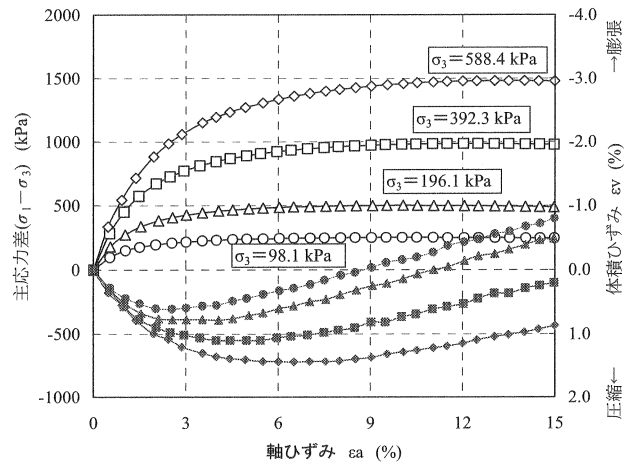


図-3 模型盛土材料の応力～ひずみ関係

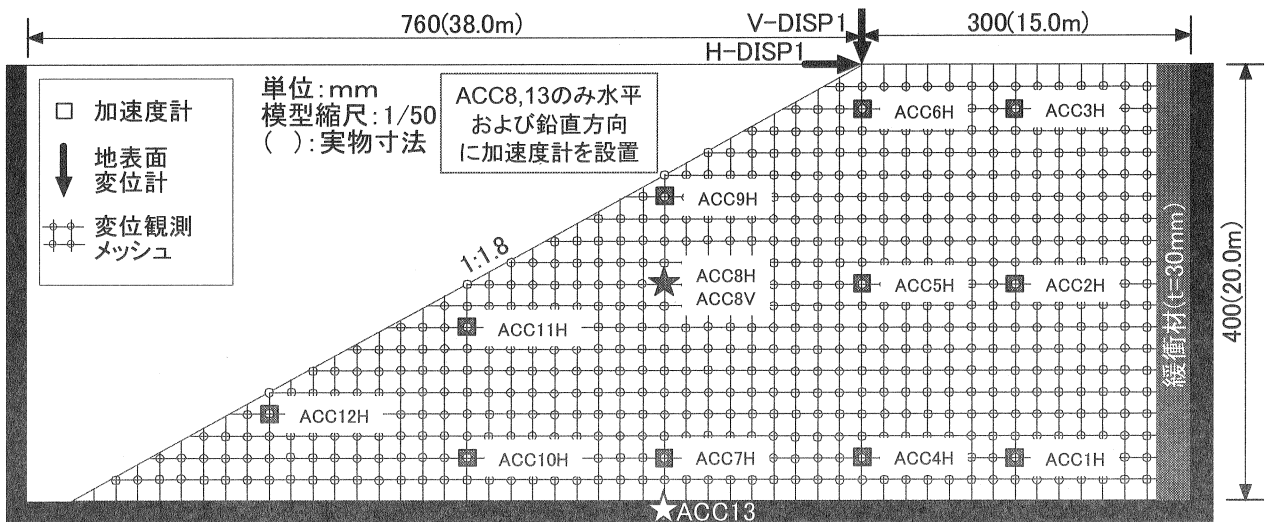


図-2 実験模型と計器配置

2.2 解析条件の設定

(1) FEM 解析

本検討では、二次元 FEM 逐次非線形解析手法として、解析コード FLIP¹³⁾を用いた。この解析手法は、運動方程式の復元力項に非線形履歴モデルを適用し、直接積分法による時刻歴応答解析により非線形解析を行うものである。FLIP は、土のせん断応力-せん断ひずみモデルとして、多数の仮想的な双曲線型バネで構成されているマルチスプリング・モデル¹⁴⁾を履歴減衰の大きさを任意に調節可能なように拡張している。これにより、せん断面の双曲線型非線形のモデル化が可能となる。

解析パラメータについては、盛土材料の物理試験、三軸圧縮試験、中空ねじりせん断試験の結果より設定した。表-2 に使用した解析パラメータの一覧を示す。緩衝材はシリコンゴムの物性値を採用した。なお、盛土材料のせん断弾性係数については、動的変形試験結果を踏まえ拘束圧 σ_m に応じて次式のように設定した。

$$G_{m0}(kPa) = 53.94 \cdot 1000 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_m}{114}} \quad (1)$$

図-4 に解析モデルを示す。水平方向は約 1.8m 毎のメッシュ構成、鉛直方向は約 1.0m 毎のメッシュ構成となっており、動的遠心模型実験の状態を模擬することで、基盤底面は剛基盤として水平ならびに鉛直方向ともに固定、側方については、鉛直ローラーすなわち水平方向は固定、鉛直方向は自由とした。

表-2 解析パラメータ一覧

盛土材料	湿潤密度	ρ_t	t/m ³	1.741
	ポアソン比	ν_d	(-)	0.3
	間隙率	n_e	(-)	0.413
	内部摩擦角	ϕ_d	deg.	33.8
	粘着力	c_d	kPa	1.39
	最大減衰定数	h_{max}	(-)	0.324
緩衝材	湿潤密度	ρ_t	t/m ³	1.545
	ポアソン比	ν_d	(-)	0.49
	弾性係数	E	kPa	2235

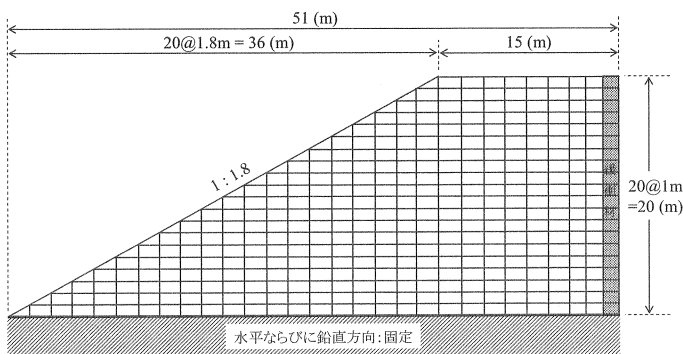


図-4 FEM 解析モデル

(2) 盛土の応答特性を考慮した Newmark 法

従来の Newmark 法の問題点の 1 つとして加速度時刻歴において盛土の地震時応答が考慮されていないことが挙げられる。そこで本研究では、図-5 に示すように、まず盛土を質点系でモデル化したクロススプリング・モデル¹⁰⁾を用いて盛土の水平および上下方向の地震応答を計算(弾性論)し、次にこれらの地震応答を入力地震動として、Newmark 法¹¹⁾を用いたすべり変位量 δ の算定(塑性論)を行った¹²⁾。クロススプリング・モデルとは地震時における盛土の水平変位と上下変位が相互に影響し合う 1 質点系振動モデルであり、その運動方程式は水平方向ならびに上下方向についてそれぞれ次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\ddot{x} + 4\pi\xi_H f_H \dot{x} + 4\pi^2 f_H^2 x = -\ddot{X} - 4\pi^2 f_H^2 \alpha \quad (2)$$

$$\ddot{y} + 4\pi\xi_V f_V \dot{y} + 4\pi^2 f_V^2 y = -\ddot{Y} - 4\pi^2 f_V^2 \beta \quad (3)$$

ここに、 x, y は水平・上下方向の変位、 ξ_H, ξ_V は水平・上下方向の減衰定数(=5%), f_H, f_V は水平・上下方向の盛土の固有周波数(上述したとおり $\xi_H=2.4\text{Hz}, \xi_V=3.3\text{Hz}$)、 \ddot{X}, \ddot{Y} は水平・上下方向の入力加速度である。 α, β は従来の 1 質点系の運動方程式にはない変数であり、水平ならびに上下方向の地震応答の相互作用(パラメタ励振¹⁵⁾)としての特性を表しており、それぞれ次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{x}{H_E} \left(y + \frac{x^2}{2H_E} \right) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{y^2}{2H_E} \quad (5)$$

ここに、 H_E は盛土模型の等価高さ¹⁶⁾であり、図-2 の加速度計測点 ACC8 の高さに近い 9.2m と計算される。土層の中心 ($H=10\text{m}$) で考えれば、(1)式のせん断弾性係数 G_m から推定される ACC8 のせん断波速度 V_s は 195(m/sec)となる。

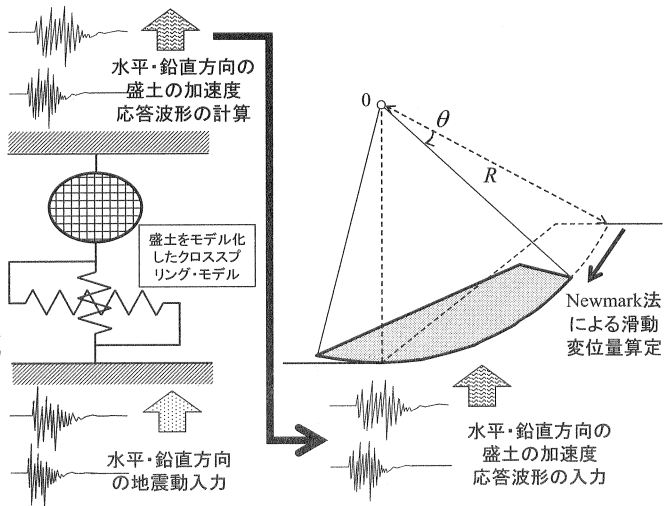


図-5 盛土の応答特性を考慮した Newmark 法 の概念

2.3 実験結果と解析結果の比較

(1) 入力地震動

遠心実験における入力地震動については、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台観測波のNS成分(最大加速度818gal)であり、本実験における加振装置の能力に合わせて最大加速度を460galに振幅調整して水平一方向加振した。解析における入力地震動については図-6に示す剛土槽の底面(図-2におけるACC13参照)において計測された加速度波形を用いた。このとき水平一方向加振であるものの、上下方向において微小な加速度(最大加速度1.1gal)が計測されていることから、FLIPによる解析およびクロススプリング・モデルによる計算の入力地震動としては、厳密に水平ならびに上下方向の二方向とした。

(2) 応答加速度

遠心実験の模型盛土内の計測点の中で水平ならびに上下方向に加速度計が設置されている観測点ACC8における加速度時刻歴と両手法による解析結果を比較したものを図-7に示す。同図(a)および(c)より、水平方向に関しては、FLIPおよびクロススプリング・モデルともに比較的良好に実験結果を再現できている。しかしながら、クロススプリング・モデルによる計算結果では、9sec付近の時間領域において、周波数特性の再現は良好であるものの、振幅特性が実験値に比べ非常に小さくなっており、再現性が低いことが読み取れる。一方で、同図(b)および(d)によれば、遠心実験において水平一方向加振にも関わらず、水平応答が上下応答に寄与することによって発生したと思われる最大加速度20gal程度の上下応答が計測されている。上下方向に関しても同様に、FLIPおよびクロススプリング・モデルともに比較的良好に実験結果を再現できている。しかしながら、クロススプリング・モデルによる計算結果では、水平方向と同様に9sec付近の時間領域において、再現性が低いことが読み取れる。

よってクロススプリング・モデルでは、水平ならびに上下方向の盛土の地震時応答(盛土の水平応答と上下応答間の動的相互作用に起因する振動を考慮)の再現性はFLIPによる解析結果に比べて劣る。しかしながら簡便な等価1質点系の振動モデルでありながら、マクロ的に見れば本モデルの再現性と適用性を確認することができる。

図-8は主要計測点において観測された加速度時刻歴とFLIPによる解析結果を比較したものである。この図より、遠心実験では、盛土の変形に起因して一方向にドリフトしている現象がみられるが、波形形状等については全体的に両者が一致する傾向にある。図-9では、横軸に遠心実験による加速度時刻歴、縦軸にFLIP解析による加速度時刻

歴をとったもので、両者が一致すれば、ACC13のように斜め45度の直線となる。この図より、法先付近(ACC11, 12)のほうが再現性がよく、すべり変形量が比較的大きい領域にあたるACC6, 9では再現性が若干劣る傾向にあるが、マクロ的にみれば良好に再現できているといえる。

(3) すべり変位

図-10(a)に遠心模型実験による残留変形図を、図-10(b)にFLIPを用いた解析による残留変形図(実変形の2倍のスケール)を示す。これらの図より、両者の残留変形モードが比較的良好に似ていることがわかる。図-11には、天端における水平・上下方向の残留変位の分布を実験と解析で比較したものを示す。これより水平方向に関しては、実験と解析が比較的良好に一致しており、法肩における残留変位量においても両者に有意な差は確認できない。これに対して上下方向に関しては、全体的にFLIPによる解析では、沈下量を過小評価する傾向にあり、法肩から離れるほどその傾向は顕著である。この原因の1つとしてFLIPでは考慮できない揺すり込み沈下の影響が考えられる。図-12には法肩における水平ならびに上下方向の変位時刻歴を実験と解析で比較したものを示す。この図によれば、水平方向では再現性が非常によく、上下方向では15secまでは再現性が高いが、15sec以降は時間の経過とともに再現性が低くなっている。

図-13に遠心実験における法肩の鉛直変位の時刻歴に、Newmark法を用いて推定したすべり変位量の時刻歴を重ね合わせたものを示す。同図には、Newmark法における入力地震動として、剛土層基盤において観測された加速度波形(図-6)、図-2の計測点ACC8において計測された加速度波形(図-7(c), (d)の動的遠心模型実験結果)、そしてこれを再現した加速度波形(図-7(c), (d)のクロススプリング・モデル計算結果)の計3種類の入力加速度波形を採用した場合のNewmark法による盛土の残留変位量推定結果を示している。この図よりここで設定した解析パラメータの場合には、盛土の地震応答特性を考慮したほうが精度良く残留変位量を推定することができている。さらに簡便なクロススプリング・モデルによりシミュレートした加速度波形を入力したケースでも、設計実務のフィールドにおける適用の可能性を示唆する比較的良好な精度で残留変位量を推定できていることが読み取れる。上述した結果によれば、クロススプリング・モデルによる質点系解析を利用したNewmark法やFLIPを用いた二次元FEM逐次非線形解析を用いれば、盛土の地震時安定性指標の一つである残留変位量をシミュレートできる可能性が高いことを示しており、両解析手法の適用性について確認することができた。

上下動が盛土の地震時変形に及ぼす影響に関する一考察

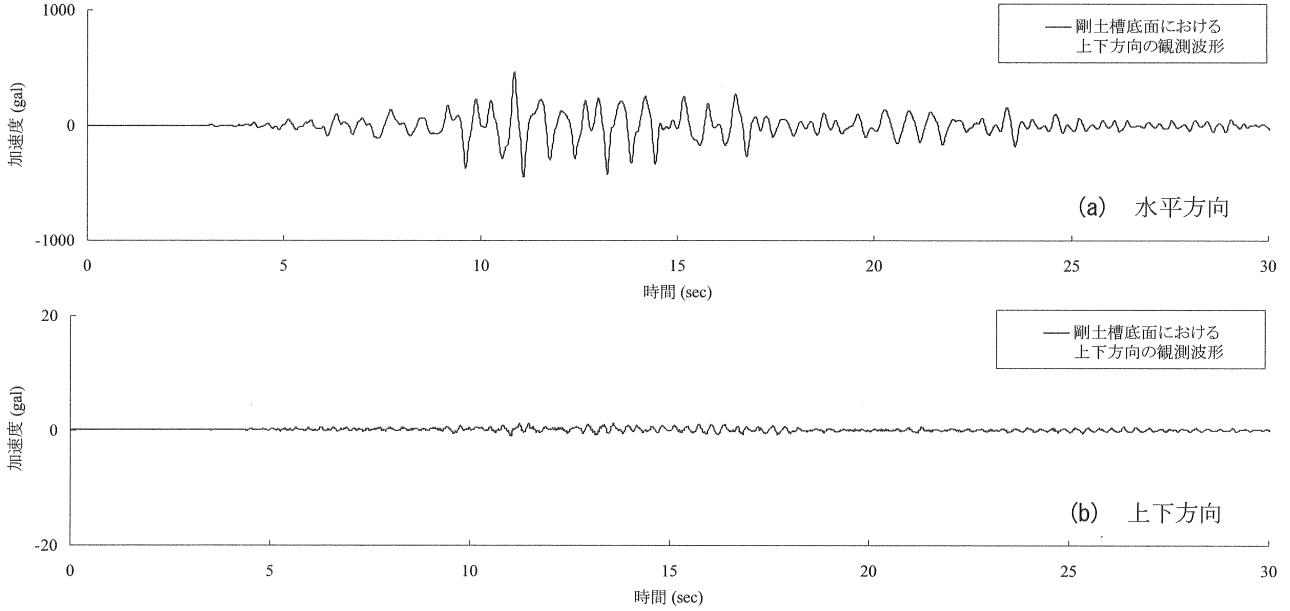


図-6 入力地震動の加速度時刻歴（剛土槽底面における観測波形）

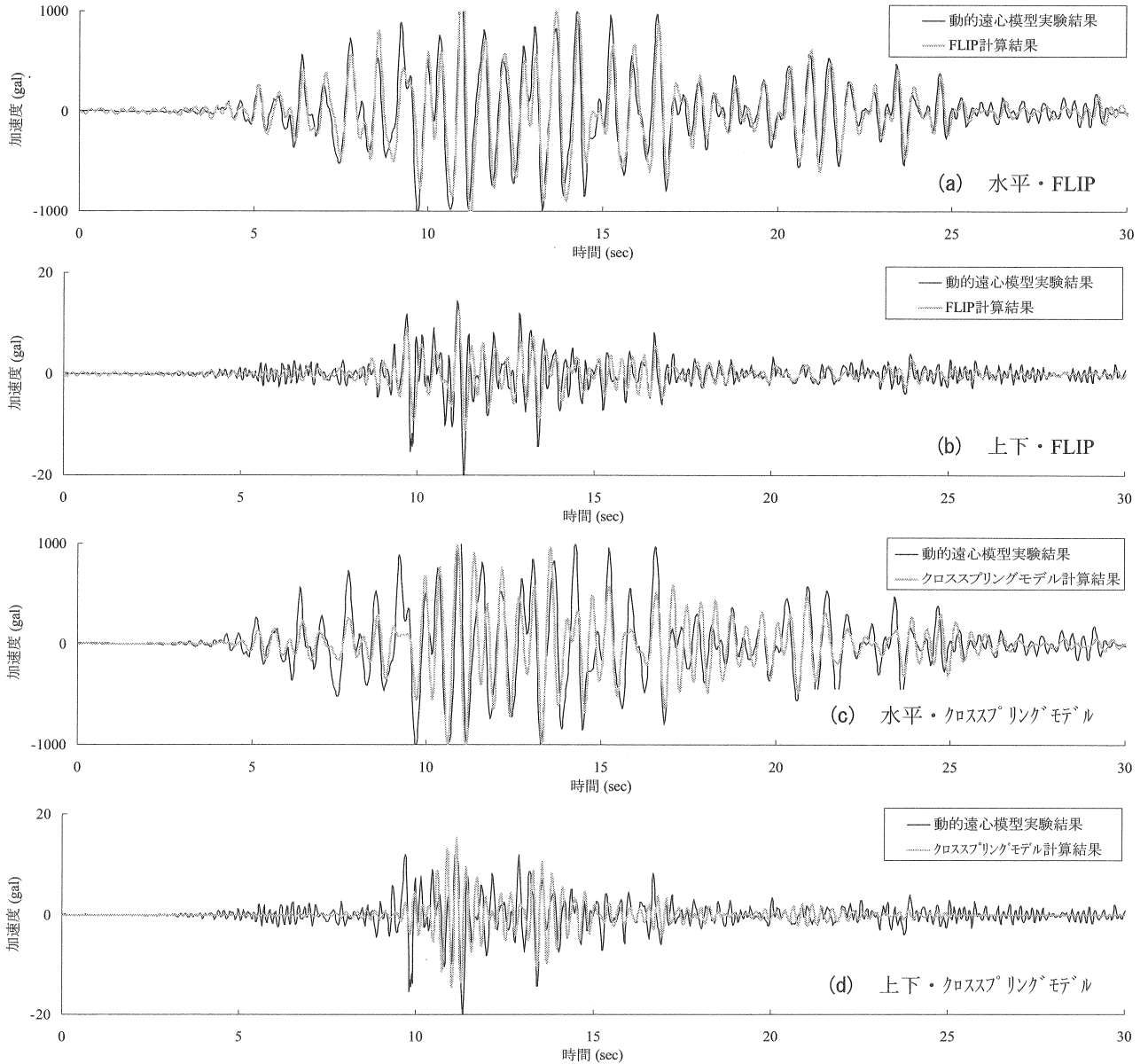
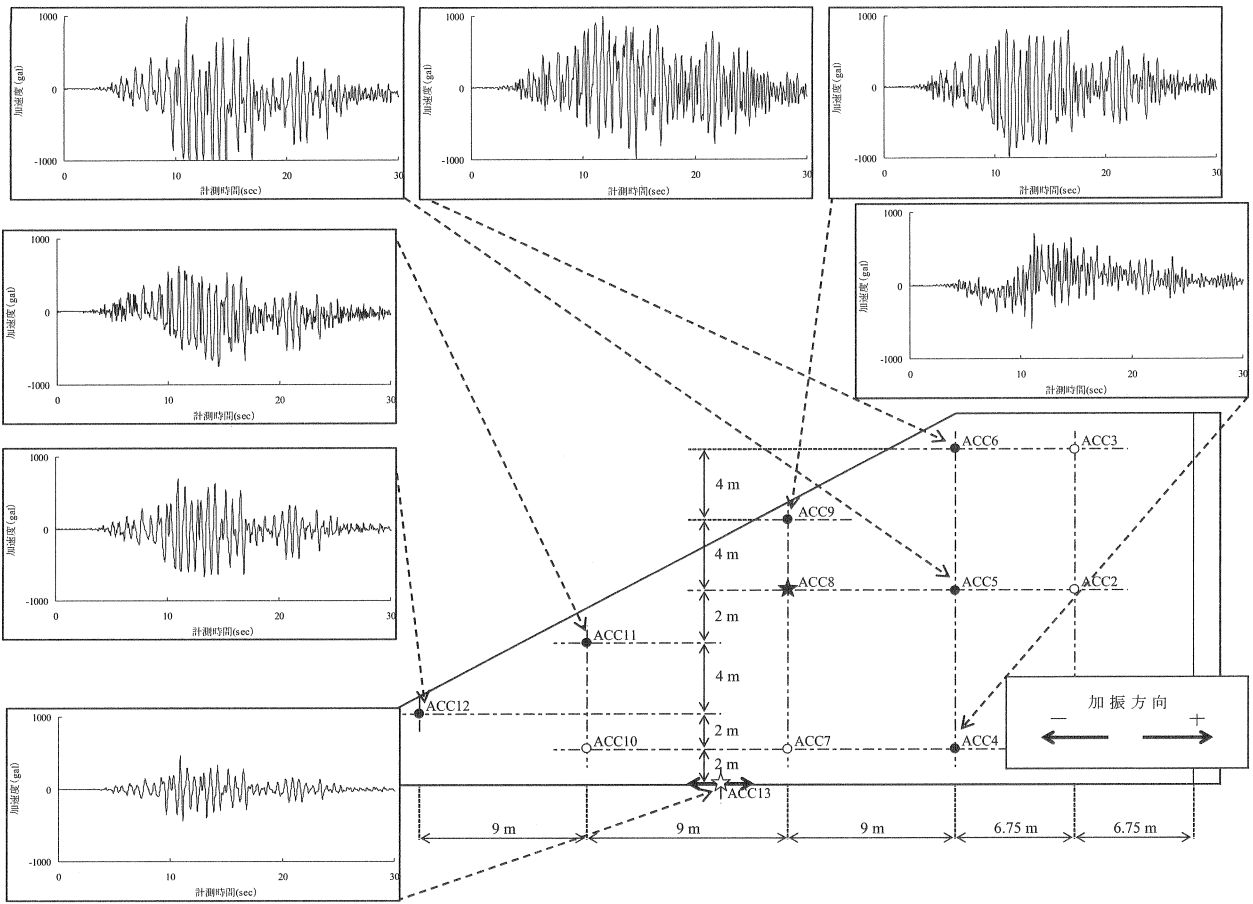
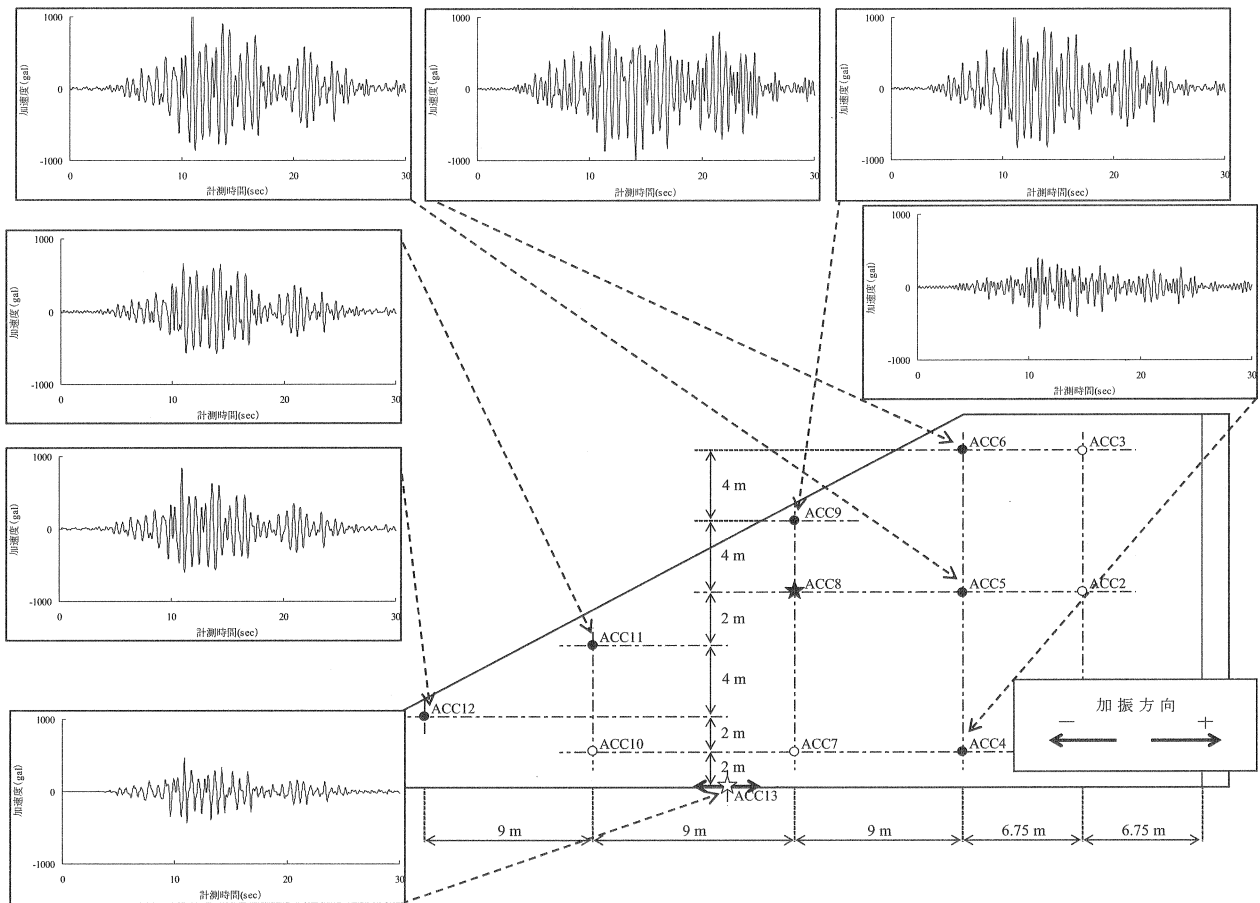


図-7 観測点 ACC8 における加速度時刻歴の比較（クロススプリングモデルによる計算の適用性確認）



(a) 遠心実験結果(ドリフトによる補正なし)



(b) FLIP 解析結果

図-8 主要計測点における加速度時刻歴の比較 (FLIP による計算の適用性確認①)

上下動が盛土の地震時変形に及ぼす影響に関する一考察

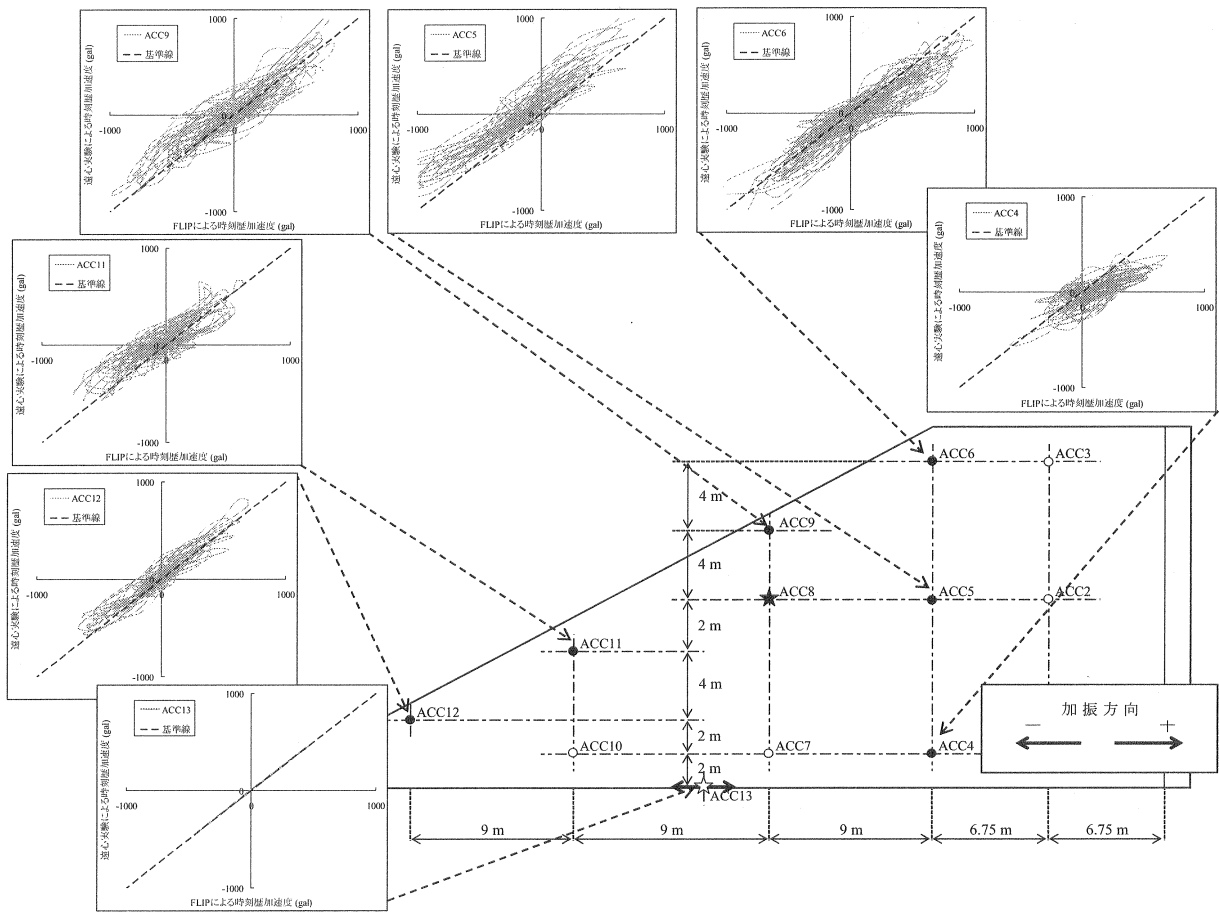


図-9 主要計測点における加速度の再現性 (FLIP による計算の適用性確認②)

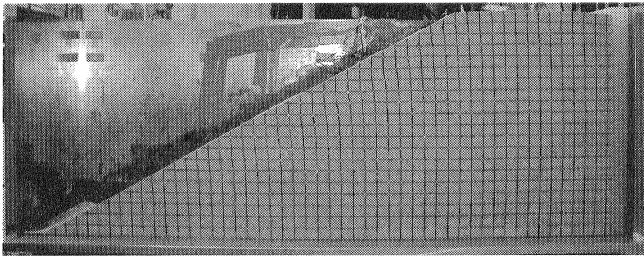


図-10(a) 残留変形図【遠心実験】

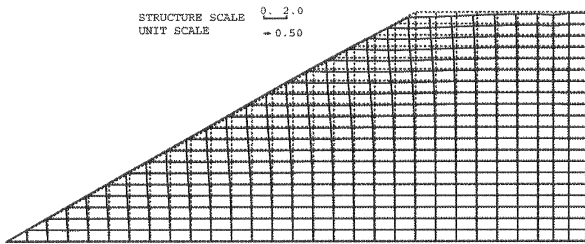


図-10(b) 残留変形図【FLIP 解析】

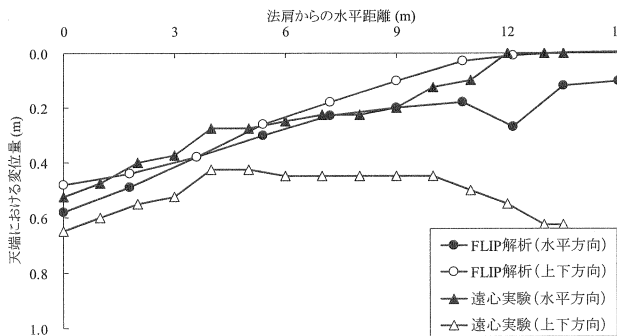


図-11 天端における残留変位量の分布

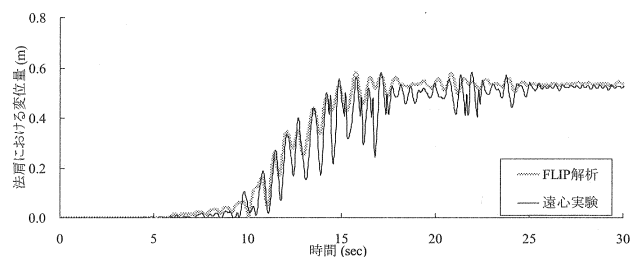


図-12(a) 法肩における変位時刻歴【水平方向】

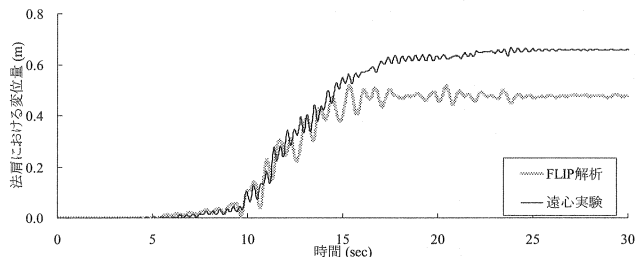


図-12(b) 法肩における変位時刻歴【上下方向】

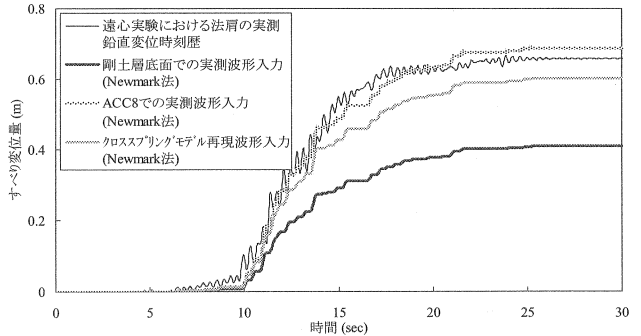


図-13 Newmark 法の適用性 (ここではすべり変位≒鉛直変位)

3. 鉛直地震動が盛土の地震時変形に及ぼす影響

3.1 パラメトリックスタディ

ここでは、適用性を確認した両解析手法による数多くの既往観測波を入力地震動としたパラメトリックスタディを実施し、鉛直地震動が盛土の地震時変形に及ぼす影響について検討を行った。解析モデルとしては、FLIP および Newmark 法ともに上述した動的遠心模型実験と同じものを使用した。盛土構造物のレベル2地震動としては、最大加速度 600gal 以上が目安とされている¹⁷⁾ことから、本研究では表-3 に示す最大水平加速度が 600gal 以上の既往観測地震波、計 26 波をパラメトリックスタディの対象とした。さらに表-4 に示すように解析ケースは、水平および上下方向の入力地震加速度の符号を正転または反転させた計 4 ケースとした。それに加え、入力地震動の最大加速度を水平方向 700gal、上下方向 350gal とした場合についても同様の計算を行った。

表-3 採用した入力地震動一覧

No.	地震名称	略称	観測点名	観測機関	最大加速度(gal)	
					水平	上下
1	兵庫県南部地震	KOB001	神戸海洋気象台	気象庁	818.0	323.0
2		KOB002	神戸本山	関震協	774.9	379.3
3		KOB003	鷹取	鉄道総研	657.0	279.3
4		KOB004	宝塚		683.6	418.2
5	鹿児島県北西部地震	KGS001	出水	防災科研 K-net	727.3	246.0
6	鳥取県西部地震	TTR001	新見		816.6	170.9
7		TTR002	江府		725.4	404.0
8		TTR003	日南		628.5	289.3
9	芸予地震	GIY001	湯来		831.9	217.7
10		GIY002	三原		651.5	177.0
11	2003年十勝沖地震	TKC001	広尾		972.6	461.2
12		TKC002	直別		784.9	271.7
13		TKC003	池田		609.5	215.3
14	新潟県中越地震	NIG001	十日町		気象庁	1715.5
15		NIG002	小千谷	1307.9		820.2
16		NIG003	長岡支所	871.0		412.0
17		NIG004	山吉志村	721.8		1059.1
18		NIG005	小千谷市	779.2		730.8
19		NIG006	小国町	691.8		339.5
20		NIG007	川西町	681.4		477.5
21		NIG008	川口町	1675.8		869.6
22		NIG009	越後川口	667.0		651.1
23		NIG010	新川口	802.2		442.7
24	能登半島地震	NOT001	富来	防災科研 K-net	945.4	462.2
25		NOT002	穴水	902.7	555.7	
26		NOT003	能都	665.8	146.9	

表-4 解析ケース I

解析ケース	入力地震加速度の符号		最大加速度(gal)		水平と上下の位相関係
	水平動	上下動	水平動	上下動	
Case 1	そのまま(正転)	そのまま(正転)	観測値	観測値	異位相
Case 2	そのまま(正転)	反転	観測値	観測値	
Case 3	反転	そのまま(正転)	観測値	観測値	
Case 4	反転	反転	観測値	観測値	
Case 5	そのまま(正転)	そのまま(正転)	700	350	
Case 6	そのまま(正転)	反転	700	350	
Case 7	反転	そのまま(正転)	700	350	
Case 8	反転	反転	700	350	

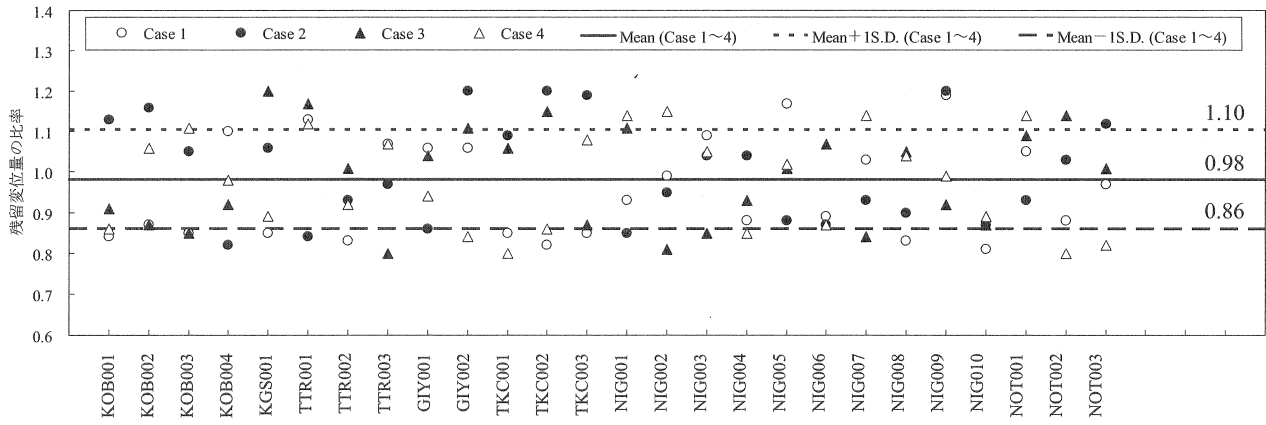
3.2 地震時変形に影響を及ぼす主要因

図-14 は、表-3 に示す入力地震動の略称を横軸に、水平動のみの入力地震動に対する残留変位量と水平動+上下動の入力地震動に対する残留変位量の比率(以下、増減率とよぶ)を縦軸にとったもので、表-4 に示した解析ケースについて示している。まず、この図より、採用する入力地震動によって上下動を考慮することに伴う残留変位量の増減率は大きくばらついており、FLIP と Newmark 法では同図中の傾向が異なっている。さらに同じ入力地震動においても、水平動と上下動の入力地震加速度の符号の組み合わせ(Case 1~4)によっても増減率の差異を確認することができるが、符号の組み合わせの影響について特定の傾向はみられない。よって入力地震動としての上下動は、盛土の地震時安定性の評価指標の1つである残留変位量に対して、危険側にも安全側にも作用する可能性があり、増減率は1割程度である。次に、同図(a)と(b)を比較すると、残留変位量を算定する手法によって、上下動を考慮することに伴う残留変位量の全体的な増減率はどちらも1割程度であり大きな差異は確認できない。しかしながら各入力地震動に対する増減率に着目すると、入力地震動の種類のみならず、入力地震加速度の符号の組み合わせによっても残留変位量の増減率は大きく変動しているのが確認できる。これは、採用する残留変位量算定手法と入力地震動の組み合わせによって、上下動の効果を危険側にも完全側にも評価する可能性があることを示唆している。

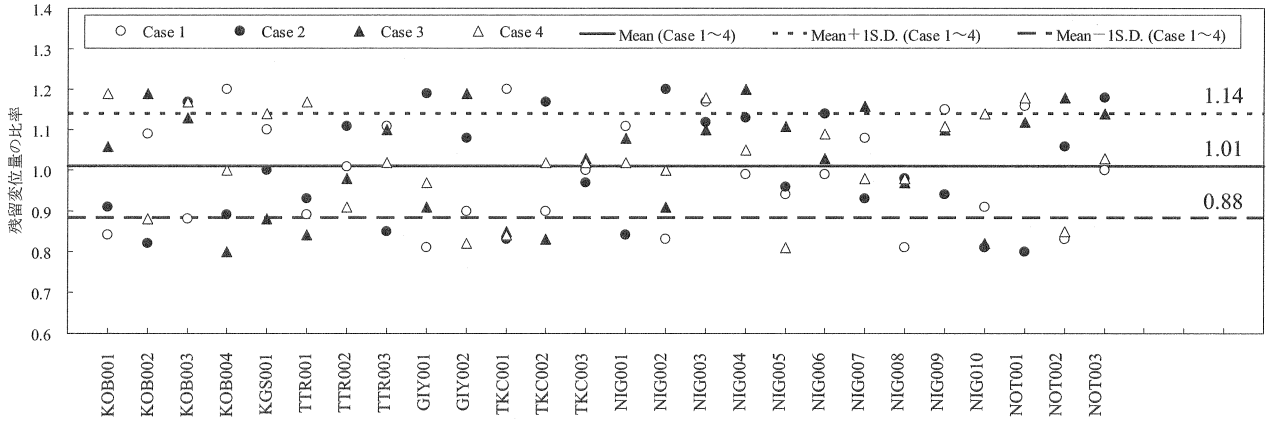
最後に、同図(c), (d)は、表-3 に示す入力地震動の水平方向の最大加速度を 700gal、上下方向の最大加速度を 350gal にそれぞれ振幅調整したものである。ここで、盛土構造物のレベル2地震動(水平動)としては、最大加速度 600~800gal 程度が目安とされている¹⁷⁾ことから、その平均をとって 700gal とし、上下動に関しては図-1 や他の耐震設計指針^{2), 3)}を参考に水平動の半分にあたる 350gal としている。同図(a)と(c)ならびに同図(b)と(d)をそれぞれ比較すると、両手法を用いたケースともに残留変位量の増減率の値は変動しているが相対関係に大きな差異は確認できない。よって水平および上下方向の入力地震動の最大加速度値が、上下動を考慮することに伴う残留変位量の増減率に及ぼす影響は比較的小さいことが確認できる。

上記の結果を総合すると、上下動は盛土の残留変位量に対して、危険側にも完全側にも作用する可能性があり、その増減率は1割程度である。増減率は、計算手法に依存するものの、水平および上下方向の入力地震動の最大加速度値が及ぼす影響は比較的小さい。これらの結果から推察すると、水平方向と上下方向の入力地震動の位相関係が盛土の残留変位量に影響を及ぼしている可能性が高い。

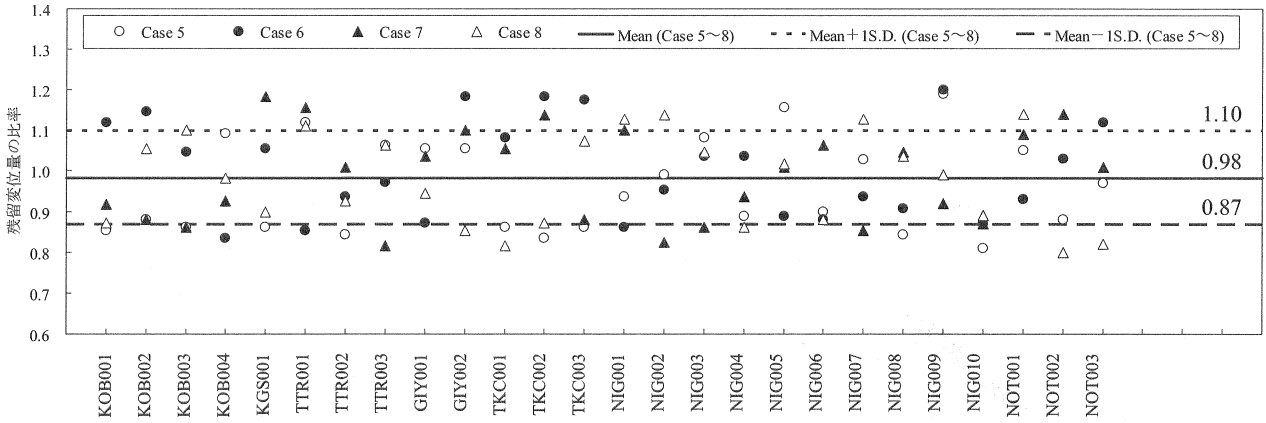
上下動が盛土の地震時変形に及ぼす影響に関する一考察



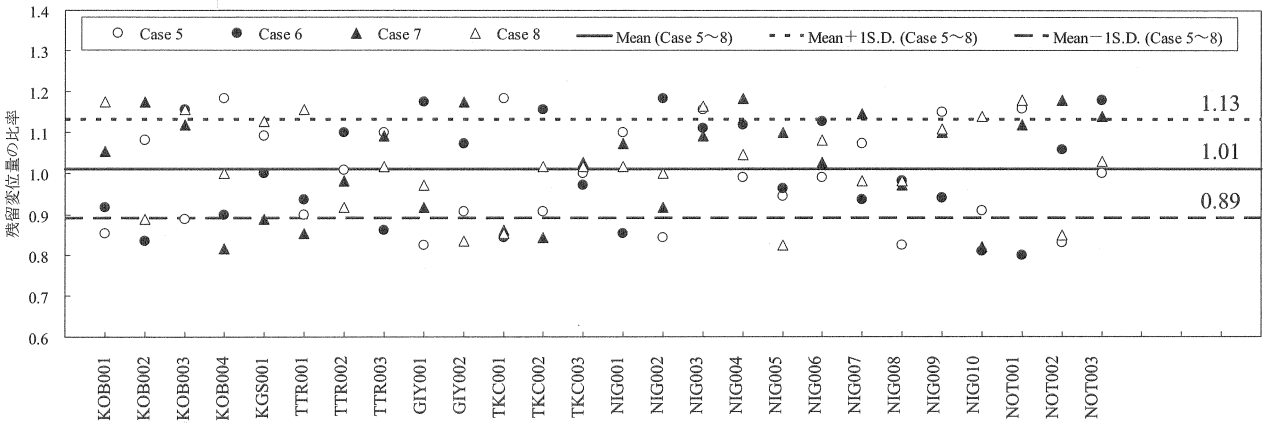
(a) Case 1~4・FLIP



(b) Case 1~4・Newmark法



(c) Case 5~8・FLIP



(d) Case 5~8・Newmark法

図-14 上下動が残留変位量に及ぼす影響

4. 上下動を考慮した盛土の耐震設計に向けた提案

4.1 解析条件の設定

入力地震動としての水平動と上下動の位相特性によって盛土の残留変位量に影響を及ぼしている可能性があることを踏まえ、ここでは図-15に示すような入力地震動(図中は神戸海洋気象台 KOB001 の事例)を新たに採用した。この入力地震動の水平動は、神戸海洋気象台 NS 成分そのものである。一方で上下動は、周波数特性に関しては神戸海洋気象台 UD 成分そのものとなっているが、位相特性に関しては水平動と同じ位相特性になるよう作成した人工波となっている。表-5 に示す解析ケースについては、水平動と上下動の位相特性が同じ入力地震動を採用しているほかは、表-4 で既に表示した解析ケースと同様である。すなわちここで設定した解析ケースは、図-16に示すように Case 9, 12, 13, 16 に関しては法面に沿うような方向で、Case 10, 11, 14, 15 に関しては法面に直交するような方向で入力地震加速度がそれぞれ作用するイメージとなる。

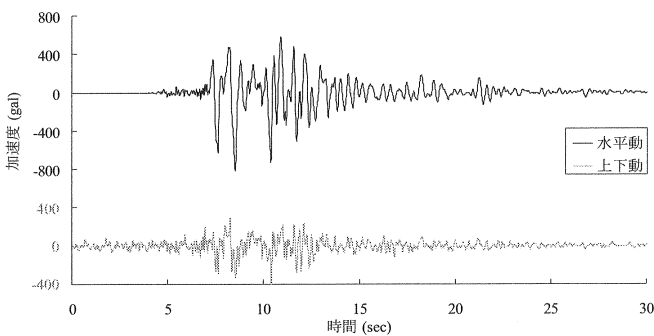


図-15 同位相の入力地震動(神戸海洋気象台の事例)

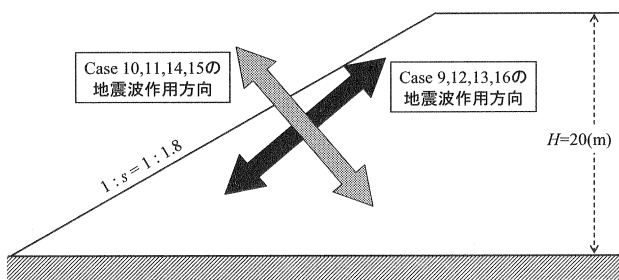


図-16 地震力作用方向の解釈(同位相波形入力ケース)

表-5 解析ケース II

解析ケース	入力地震加速度の符号		最大加速度(gal)		水平と上下の位相関係
	水平動	上下動	水平動	上下動	
Case 9	そのまま(正転)	そのまま(正転)	観測値	観測値	同位相
Case10	そのまま(正転)	反転	観測値	観測値	
Case11	反転	そのまま(正転)	観測値	観測値	
Case12	反転	反転	観測値	観測値	
Case13	そのまま(正転)	そのまま(正転)	700	350	
Case14	そのまま(正転)	反転	700	350	
Case15	反転	そのまま(正転)	700	350	
Case16	反転	反転	700	350	

4.2 検討結果

図-17は図-14と同様に、表-3に示す入力地震動の略称を横軸に、水平動のみの入力地震動に対する残留変位量と増減率を縦軸にとったもので、ここでは水平動と上下動の位相関係を同位相とした表-5に示す解析ケースについて示している。

まず、図-17と図-14を比較すると、同位相の入力地震動を採用することによって増減率はすべて正の値となっている。よって水平動と上下動の位相関係は増減率に及ぼす支配的な要因であり、同じような位相特性を持つ水平動と上下動が盛土に作用した場合には、上下動は盛土の地震時安定性指標の1つである残留変位量に対して危険側に作用する可能性が高い。また図-14と同じく図-17においてもFLIPとNewmark法では同図中の傾向が異なっている。

次に、図-14では設定した各解析ケースによって増減率の変動幅が非常に大きいのが、一方で図-17では変動幅が非常に小さくなっており、Case9, 12, 13, 16の平均値がおおよそ1.2であるのに対して、Case10, 11, 14, 15の平均値はおおよそ1.1であり、解析ケースによる相関を確認できる。これは図-16に示したとおり、水平動と上下動の位相特性が同じ地震動は残留変位量に対して危険側に作用することは変わらないが、法面に直交するような方向で地震力が作用する場合には、より残留変位量が大きくなる可能性を示唆するものである。

最後に、図-17(a)と(b)ならびに図-17(c)と(d)を比較すると、残留変位量を算定する手法による増減率の大きな差異は確認できず、上述した平均値も同程度である。また同図(a)と(c)ならびに同図(b)と(d)をそれぞれ比較すると、残留変位量が増減率の分布形状に大きな差異は確認できない。よって同じような位相特性を持つ水平動と上下動を入力した場合、残留変位量算定手法や入力地震動の最大加速度値が、増減率に及ぼす影響は比較的小さいといえる。

上記の結果を総合すると、同じような位相特性を持つ水平動と上下動が盛土に作用した場合には、上下動は残留変位量に対して危険側に作用し、さらに法面に直交するような方向で地震力が作用した場合には、より残留変位量が大きくなる可能性が高い。水平動と上下動が同じような特性を有する条件として、S波の斜め入射の影響¹⁸⁾が考えられ、本実験・解析条件のような水平基盤上の盛土よりも、さらに傾斜基盤上の盛土においては、上下動の影響を考慮する必要性が高いと考えられる。本解析結果によれば、使用する入力地震動が明白でない場合において、かつ安全側の検討や配慮が必要なのであれば、水平動と同じ位相特性を持つ上下動を入力地震動として採用する若しくは、水平動のみの地震動入力による残留変位量算定結果を2割程度割増することによって、簡易的かつ実用的に上下動を考慮した盛土の耐震性能照査の実施が可能となる。

上下動が盛土の地震時変形に及ぼす影響に関する一考察

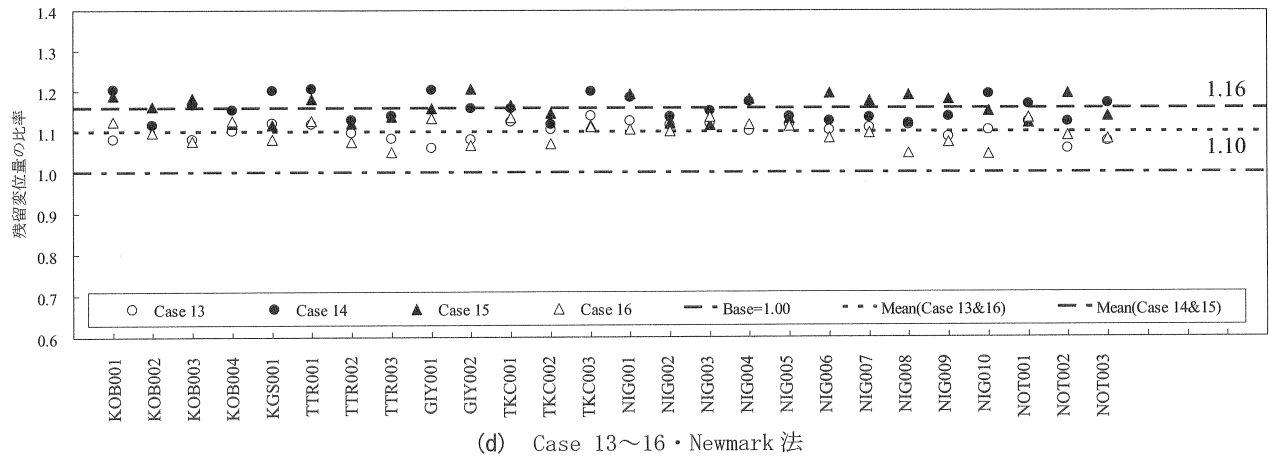
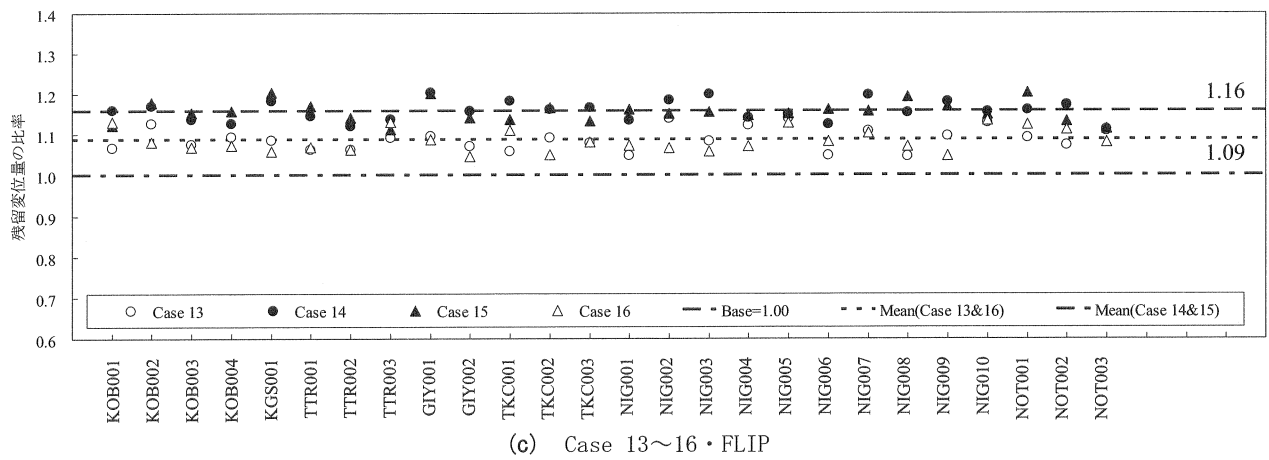
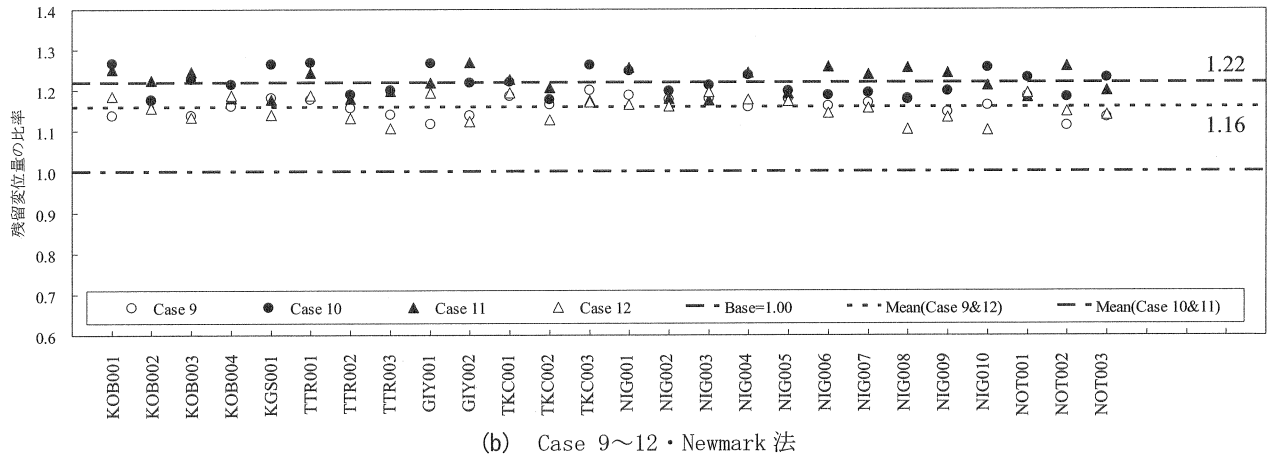
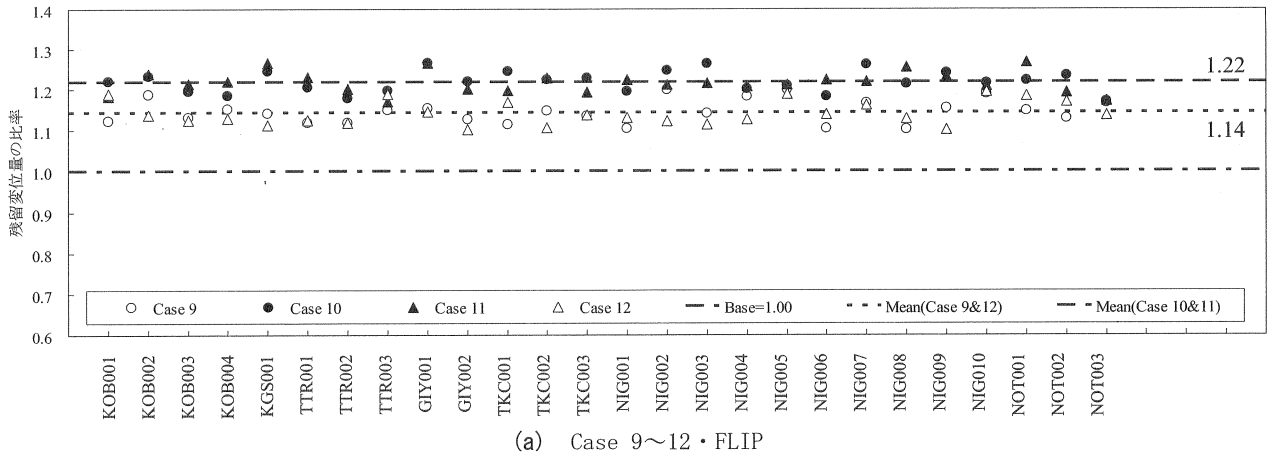


図-17 水平動と上下動の位相特性が残留変位量に及ぼす影響

4. まとめ

本研究では、近年わが国で発生した大地震において非常に大きな上下動が発生していることなどを踏まえ、上下動が盛土の地震時安定性指標の1つである地震後の残留変位量に及ぼす影響について検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- 1) クロススプリング・モデルによる質点系解析を利用した Newmark 法や FLIP を用いた二次元 FEM 逐次非線形解析を用いれば、高精度で盛土の残留変位量を再現できる可能性が高いことを確認した。
- 2) 上下動は盛土の残留変位量を 1 割程度危険側にも安全側にも変化させる可能性が高く、残留変位量の算定手法に依存するものの、水平および上下方向の入力地震動の最大加速度値にはあまり依存しない。
- 3) 同じような位相特性を持つ水平動と上下動が盛土に作用した場合には、上下動は残留変位量を増加させる側に作用する。また法面に直交するような方向で地震力が作用した場合には、より残留変位量が大きくなる可能性が高い。この傾向は残留変位量の算定手法や水平および上下方向の入力地震動の最大加速度値にはあまり依存しない。
- 4) 本解析結果によれば、使用する入力地震動が明白でない場合において、かつ安全側の検討や配慮が必要なのであれば、水平動と同じ位相特性を持つ上下動を入力地震動として採用する若しくは、水平動のみの地震動入力による残留変位量算定結果を 2 割程度割増することによって、簡易的かつ実用的に上下動を考慮した盛土の耐震性能照査の実施が可能となる。

今後は、入力地震動として単純な正弦波を用いた検討や他の解析モデル(傾斜基盤上の盛土等)を採用した検討を行っていく予定である。

謝辞

本研究では入力地震動として、気象庁、(独)防災科学技術研究所強震観測網 K-net、関西地震観測研究協議会、鉄道総合技術研究所(JR 西日本・JR 東日本)および NEXCO 東日本(旧日本道路公団)の観測波形を使用させていただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書，518p.，2007.
- 2) (独)建築研究所：総プロ“新耐震設計法の開発”研究報告，新耐震設計法(案)，建築研究報告，No. 79，1977.
- 3) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針，2005.

- 4) たとえば(財)鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計基準・同解説 耐震設計，丸善，pp. 317-330，1999.
- 5) Idriss, I. M. and Seed, H. B.: Response of earthbanks During Earthquakes, Jour. of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93 No. SM3, pp. 61-82, 1967.
- 6) 田村重四郎，加藤勝行，森田道比呂：水平・鉛直の 2 方向加振した場合のフィルダム模型の振動破壊について，第 18 回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 457-460，1985.
- 7) 安田進，永瀬英生，松尾憲親，石川利明，のり面安定性に与える上下動の影響に関する模型実験，土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集，III-98，pp. 236-237，1992.
- 8) 平田和太：地震動の上下成分が盛土斜面の安定に及ぼす影響，土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集，I-296，pp. 591-592，1985.
- 9) Melo, C. and Sharma, S.: Seismic Coefficients for Pseudostatic Slope Analysis, Proc. of 13th WCE (DVD-ROM), Paper No. 369, Vancouver, 2004.
- 10) Hata, Y., Yamashita, N., Kano, S. and Tsuchida, T.: A Study on Computation of Seismic Permanent Displacement of Embankments considering Horizontal and Vertical Seismic Motion, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (CD-ROM), Paper No. 904, Geneva, 2006.
- 11) Newmark, N. M.: Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Fifth Rankin Lecture, Geotechnique, Vol. 15 No. 2, pp. 139-160, 1965.
- 12) Hata, Y., Yamashita, N., Tsuchida, T. and Kano, S.: A Study on the applicability of the modified Newmark method, Proc. of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No. 1307, Thessaloniki, 2007.
- 13) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 14) Towhata, I. and Ishihara K.: Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, Proc. of 5th International conference on numerical method in geomechanics, Nagoya, pp. 523-530, 1985.
- 15) たとえば徳岡辰雄：ライブラリー工学基礎 3 - 工学基礎振動論一，サイエンス社，pp. 153-158，1990.
- 16) Ghannad, M. A., Fukuwa, N. and Nishizaka, R.: A Study on the Frequency and Damping of Soil-Structure Systems using a Simplified Model, 構造工学論文集，日本建築学会，Vol. 44B, pp. 85-93, 1998.
- 17) (社)土木学会：土木構造物に関する第 3 次提言と解説，第 8 章，土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会，pp. 29-34，2000.
- 18) たとえば若松邦夫：震源域での強震動，第 23 回地盤震動シンポジウム資料集，日本建築学会，pp. 11-16，1995.

(2006 年 6 月 29 日 受付)