

# 上下動が傾斜基盤を有する盛土の 地震時応答に及ぼす影響

秦吉弥<sup>1</sup>・一井康二<sup>2</sup>・土田孝<sup>3</sup>・李黎明<sup>4</sup>・加納誠二<sup>5</sup>

<sup>1</sup>日本工営(株)中央研究所 地盤耐震グループ 研究員  
(〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail:hata-ys@n-koei.jp

<sup>2</sup>広島大学大学院工学研究科准教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

<sup>3</sup>広島大学大学院工学研究科教授 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:ttuchida@hiroshima-u.ac.jp

<sup>4</sup>日本工営(株)中央研究所地盤材料グループ主任研究員 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)

E-mail:li-lm@n-koei.jp

<sup>5</sup>広島大学大学院工学研究科助教 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:skano@hiroshima-u.ac.jp

傾斜基盤を有する盛土は、既往の地震でしばしば被害を被っており、強震時において水平応答だけでなく上下応答が生じやすいことが報告されている。しかしながら上下動が傾斜基盤上の盛土の耐震性能に及ぼす影響については、これまであまり明らかになっていない。

そこで本研究では、有限要素法を用いた傾斜基盤上の盛土の地震応答解析を行い、上下動が盛土の地震応答特性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、上下動は残留変位量に対して安全側にも危険側にも作用する可能性があり、入力地震動の位相特性に依存していることを示した。さらに水平動と上下動が同じような位相特性を有している場合、残留変位量が増大する可能性があることも示した。

**Key Words** : Embankment, vertical earthquake motion, tilted bedrock, FEM, slope stability

## 1. はじめに

傾斜した基盤面上の盛土については、既往の大地震において宅地造成盛土や道路盛土などの被害として報告されている<sup>1)</sup>。しかしながらこういった傾斜基盤を有する盛土の地震応答特性についてはこれまであまり明らかになっていない<sup>2)</sup>。

著者ら<sup>3)</sup>は、傾斜基盤を有する盛土を対象とした動的遠心模型実験を実施し、傾斜基盤上の盛土は、水平一方向加振の場合においても、地震時における盛土の変形や水平応答が上下応答に励起する現象によって上下方向にも比較的大きな加速度応答を示すことがあり、非常に複雑な地震応答特性を有していることを報告している。また、実際の地震時においては、水平動だけではなく上下動も同時に作用することになり、近年発生した内陸直下型地震においては、非常に大きな加速度レベルの上下動が観測されていることなどを勘案すれば、地震時における傾斜基盤上の盛土は非常に大きな上下応答を示す可能性が高い。しかしながら、この上下応答が盛土の変形に及ぼす影響に関して詳細な検討がなされた例は少

ない<sup>4)</sup>。

沖村ら<sup>5)</sup>は、傾斜した基盤上斜面の地震応答解析を実施し、基盤層上の盛土では、上下方向の応答加速度による慣性力が生じやすく、斜面安定性に大きな影響を及ぼす可能性があることを報告している。

そこで本研究では、二次元FEM逐次非線形解析手法である解析コードFLIP<sup>6)</sup>を用いて傾斜基盤上を有する盛土を対象とした地震応答解析を実施した。具体的には、まず既往の動的遠心模型実験<sup>3)</sup>をシミュレートすることで、傾斜基盤上の盛土に対するFLIPの適用性について検討した。次に、同実験の傾斜基盤上の盛土モデルを対象として、水平動と上下動を同時に地震波入力したケースについて解析を行い、上下動が傾斜基盤を有する盛土の地震時応答に及ぼす影響について検討を行った。そして最後に入力地震動の水平動と上下動の係数に着目したパラメトリックスタディを実施することで、傾斜基盤を有する盛土に対して耐震性能照査を行う場合の留意事項について取り纏めた。

## 2. 実験結果の再現

### (1) 解析手法

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FLIP<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>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。

### (2) 解析パラメータ

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結果<sup>3)</sup>より、解析パラメータを設定した。表-1に使用した解析パラメータの一覧を示す。基盤面は剛土層の物性値を採用しており、動的解析に影響を及ぼさない十分に剛な物性値となっている。また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、同表(d)に示すように動的変形試験結果を踏まえた拘束圧依存性を考慮して次式のように設定した。

$$G_{m0}(\text{kPa}) = 53.94 \times 1000 \times \left( \frac{\sigma_m}{114} \right)^{0.5} \quad (1)$$

表-1(a) 盛土材料の解析パラメータ

湿潤密度	$\rho_t$	t/m <sup>3</sup>	1.741
ポアソン比	$\nu_d$	(-)	0.3
初期間隙比	$e_0$	(-)	0.413
内部摩擦角	$\phi_d$	deg.	34.0
粘着力	$c_d$	kPa	2.26

表-1(b) 緩衝材の解析パラメータ

湿潤密度	$\rho_t$	t/m <sup>3</sup>	1.545
ポアソン比	$\nu_d$	(-)	0.49
弾性係数	$E$	kPa	2235

表-1(c) 傾斜基盤の解析パラメータ

湿潤密度	$\rho_t$	t/m <sup>3</sup>	2.7
ポアソン比	$\nu_d$	(-)	0.34
弾性係数	$E$	kPa	68300000

表-1(d) 盛土材料の材料区分別(拘束圧別)の解析パラメータ

材料区分	初期せん断弾性係数 $G_0$ (kPa)	初期体積弾性係数 $K_0$ (kPa)	初期有効拘束圧 $\sigma_{ma}$ (kPa)	最大減衰定数 $h_{max}$
$\nu < 50\text{kPa}$	25300	67200	25.0	0.301
$50\text{kPa} < \nu < 100\text{kPa}$	43800	116400	75.0	
$100\text{kPa} < \nu < 150\text{kPa}$	56500	150300	125.0	
$150\text{kPa} < \nu < 200\text{kPa}$	66800	177800	175.0	
$200\text{kPa} < \nu < 300\text{kPa}$	79900	212500	250.0	
$300\text{kPa} < \nu < 400\text{kPa}$	94500	251500	350.0	

### (3) 入力地震動

入力地震動としては、動的遠心模型実験の加振台の能力に合わせて神戸海洋気象台のNS成分(最大加速度818gal)の振幅を調整した波形(最大460gal)を用いた。なお、上下動を同時入力する場合には、神戸海洋気象台のUD成分(最大323gal)を耐震性能照査指針<sup>8)</sup>を参考に水平動の最大加速度の半分にあたる230galに振幅を調整した波形を使用することを基本とした。図-1に入力地震動の時刻歴を示す。

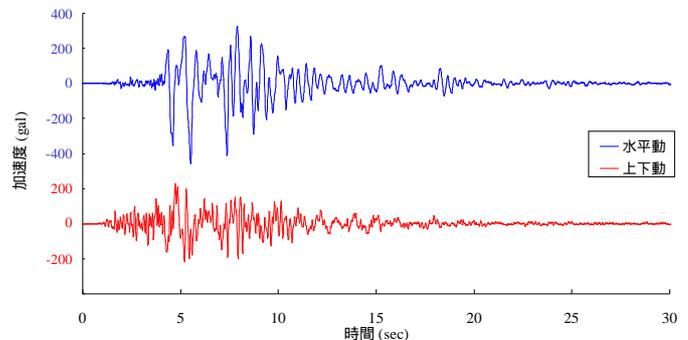


図-1 入力地震動の加速度時刻歴(基本ケース)

### (4) 解析モデル

図-2に解析モデルを示す。基盤角度10度および20度のケースとも同様のメッシュ構成となっており、水平方向は約1.8m毎、鉛直方向は約1.0m毎のメッシュ構成となっている。動的遠心模型実験の状態を模擬することで、傾斜基盤底面は剛基盤として水平ならびに鉛直方向とも固定、側方については水平方向は固定、鉛直方向は自由とした。

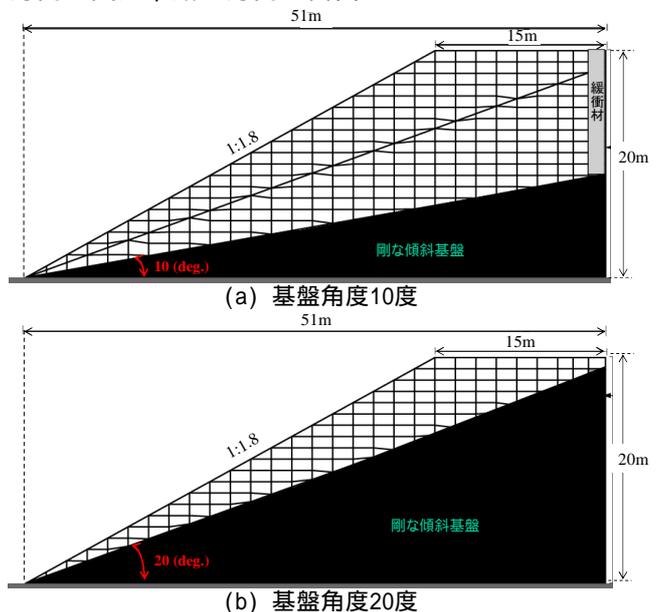
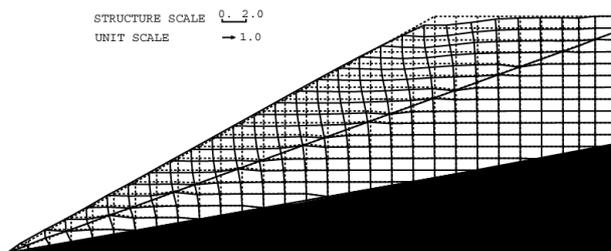


図-2 解析モデル図

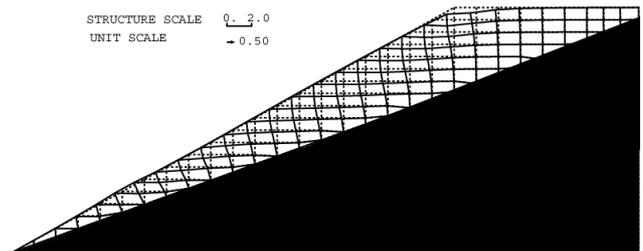
(5) 実験結果との比較

図-3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、図-4に遠心模型実験による残留変形図を示す。これらの図より、基盤の角度に関わらず、天端付近では両者の残留変形モードが比較的良好に一致している。図-5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。これより基盤角度20度のケースでは、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。これに対して基盤角度10度のケースでは、法肩からの水平距離が5m以遠では、両者の残留変形量は一致する傾向にあるが、法肩からの水平距離が5m以近では、FLIPを用いた解析では、残留変形量が急激に大きくなっており、実験値との間に開きが見られ、法肩位置において両者の差は最大となる。図-6には法肩における変位の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、基盤角度20度のケースにおいては、実験と解析で変位の時刻歴が一致しているに関わらず、基盤角度10度のケースでは、両者の時刻歴の形状は比較的良好に似ているものの、上述したように残留変位量では解析のほうが大きくなっており、水平方向のほうが両者の差は大きい。傾斜基盤角度が大きいほうが小さな残留変位と

なっているが、盛土の層厚の違いによる固有周波数と入力地震動との関係によるものと考えられる。この関係は図-7は法肩下の位置(ACC5:図-8で後述)における実験と解析の水平・上下方向の加速度時刻歴を比較したもので、基盤の角度に関わらず両者はよく一致している。また水平一方向加振(図-1の水平動)であるに関わらず、上下方向の応答加速度が発生しているがこれも良好に再現できている。図-8は水平方向と上下方向の応答加速度に対する粒子軌跡を実験と解析で比較したものである。この図によれば、水平一方向加振であるため、ACC13では上下方向の振動はなく、全体ではACC4のように上下方向の応答は小さい。しかしACC6,7,10のように上下方向の応答が卓越している(水平と上下方向の応答に位相差が生じている)のは興味深い。また基盤角度に関わらず、実験と解析で傾向は一致しており、一部の観測点を除けば両者の粒子軌跡の形状も一致している。これらの結果を踏まえれば、局所的に見れば、基盤角度10度のケースにおいて法肩において両者の変形量に比較的良好な差が生じたなどの違いはあるが、両者のモデル全体の地震時応答や変形の傾向は非常によく似ている。よってFLIPによる解析を行うことで、傾斜基盤上の盛土の地震時応答や変形をそれなりの精度で再現できるものと考えられる。

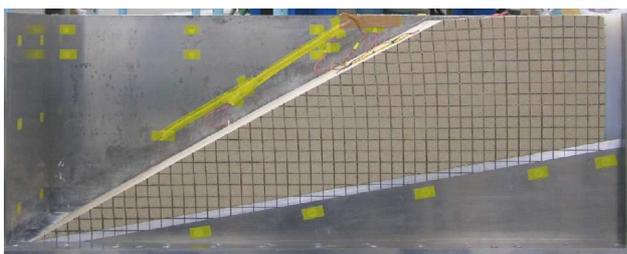


(a) 基盤角度 10 度



(b) 基盤角度 20 度

図-3 残留変形図【FLIP 解析】

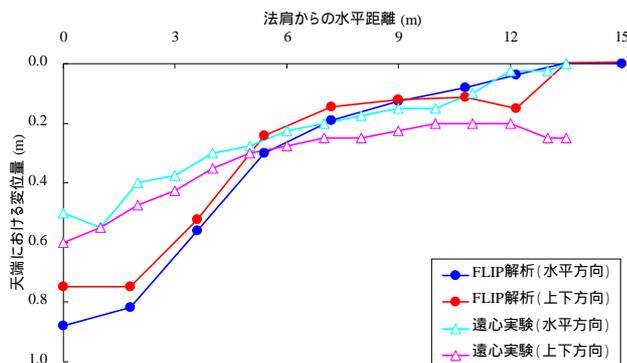


(a) 基盤角度 10 度

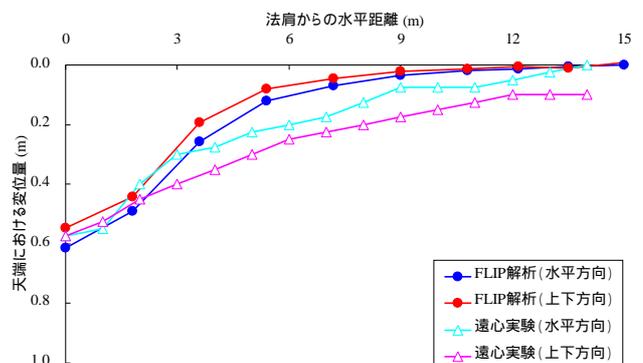


(b) 基盤角度 20 度

図-4 残留変形図【遠心実験】



(a) 基盤角度 10 度



(b) 基盤角度 20 度

図-5 天端における残留変位量の分布

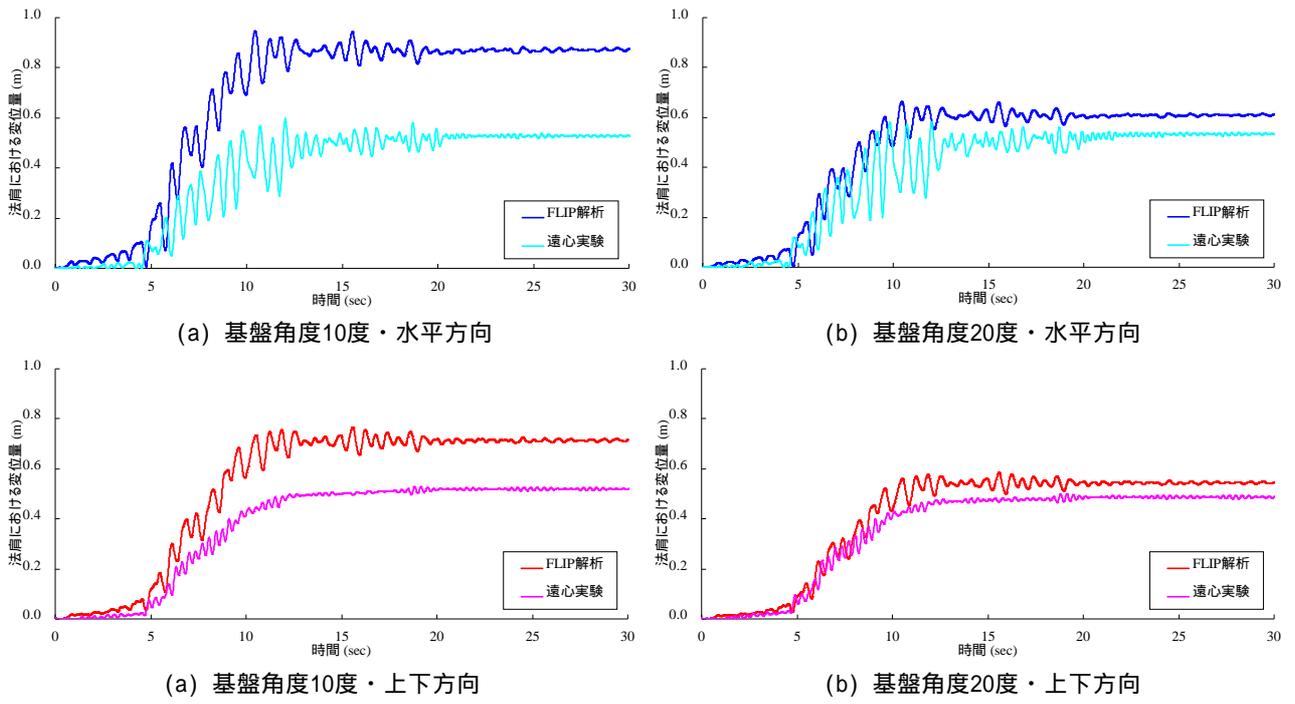


図-6 法肩における変位の時刻歴

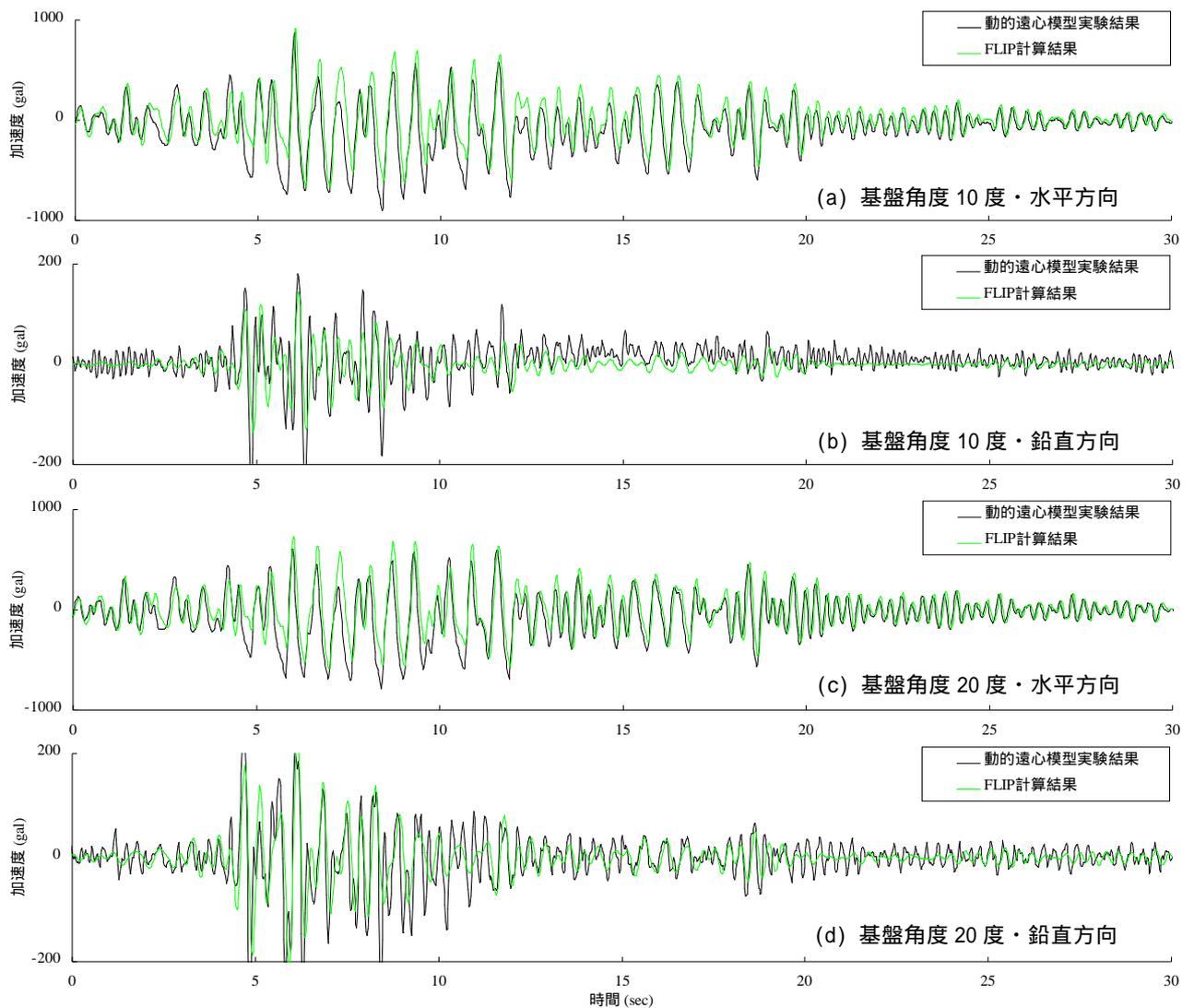
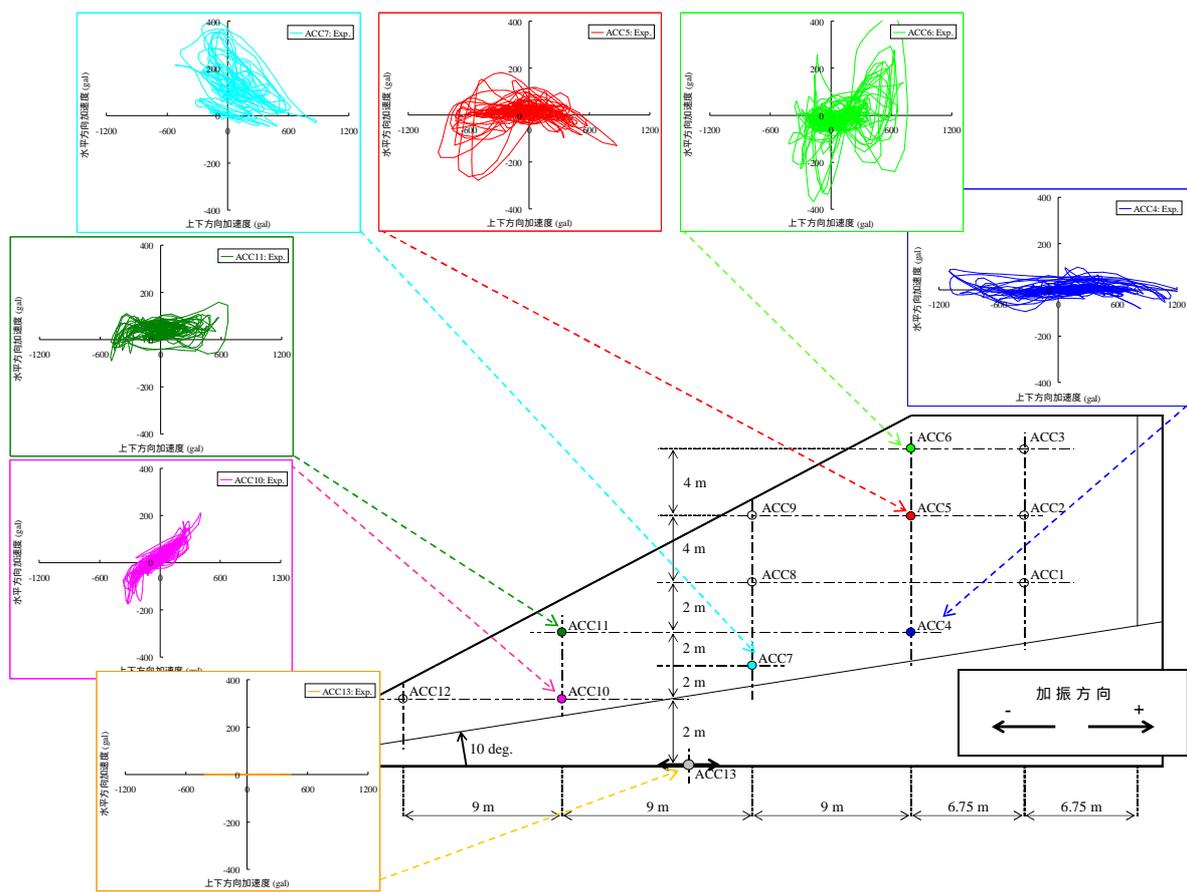
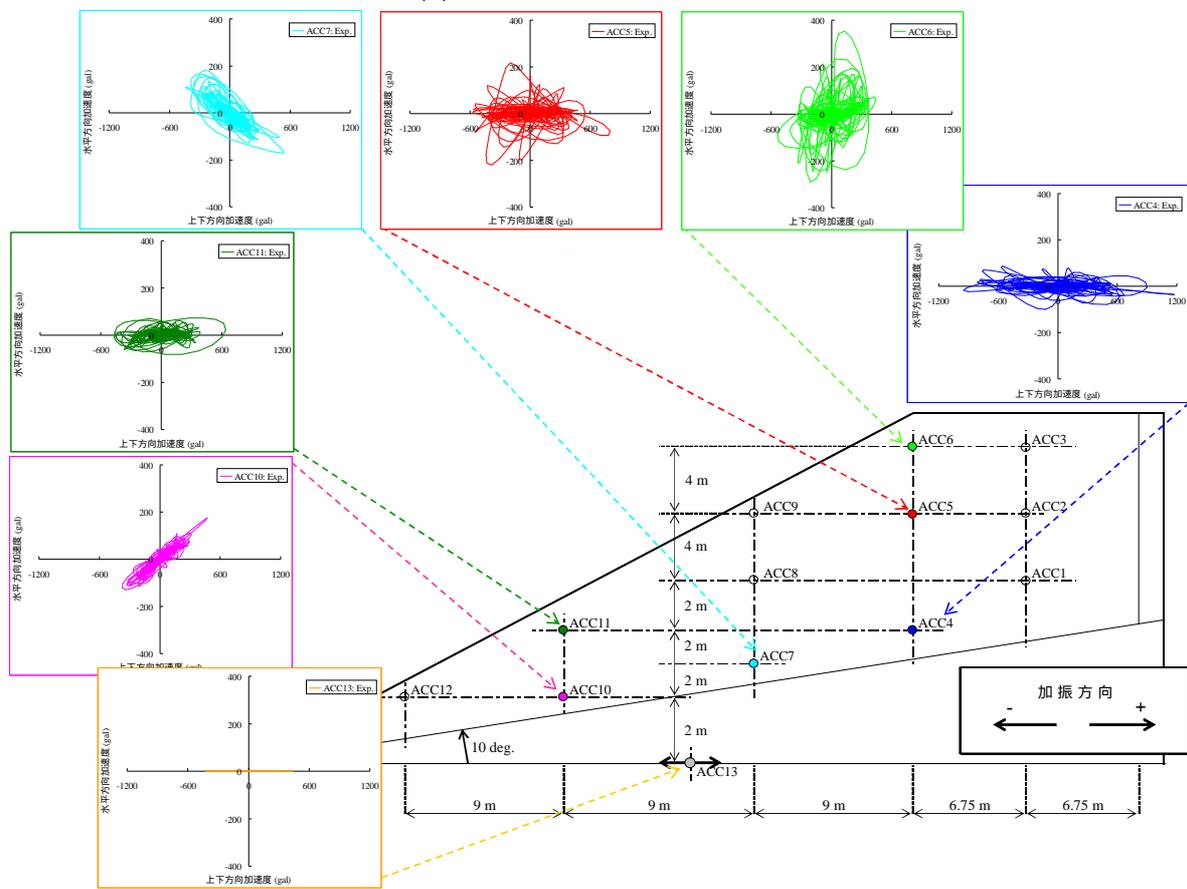


図-7 実験結果とFLIPを用いた解析結果による加速度時刻歴の比較

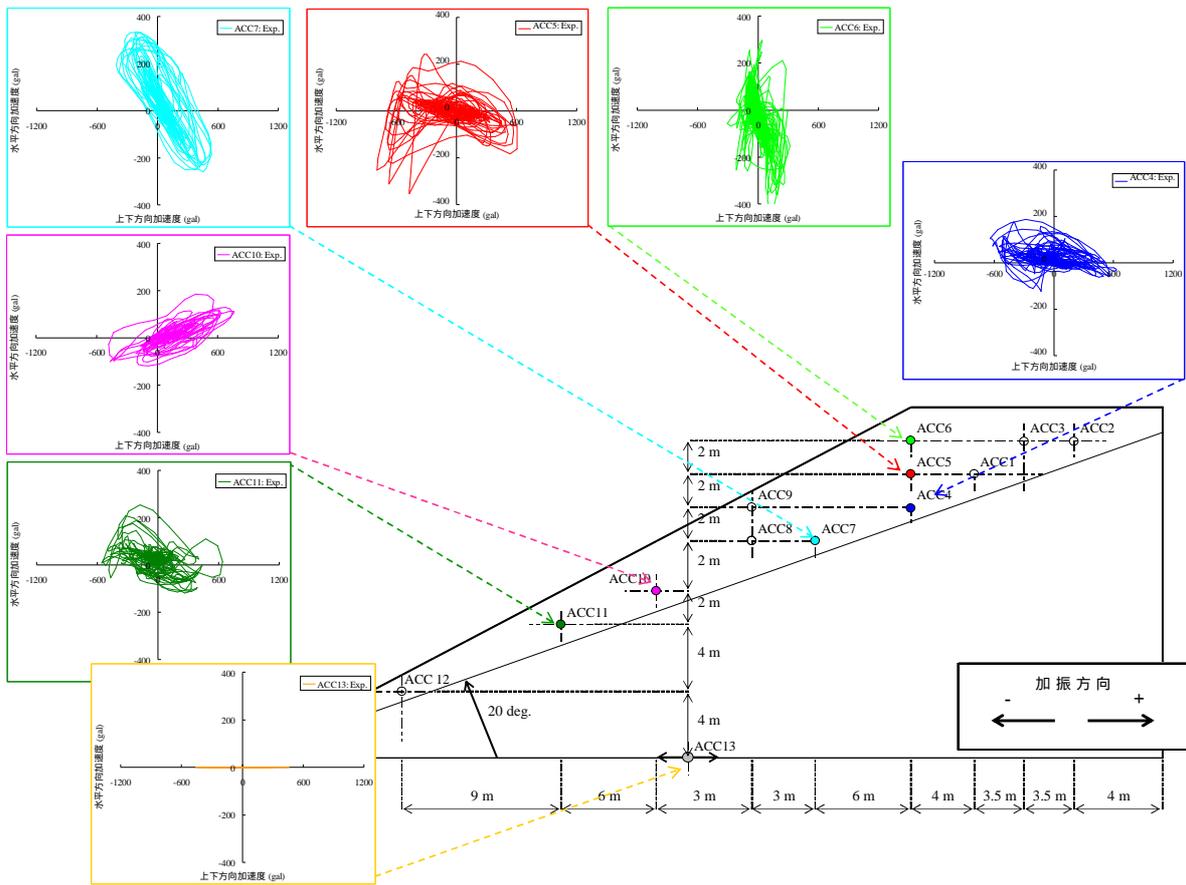


(a) 遠心実験結果・基盤角度10度

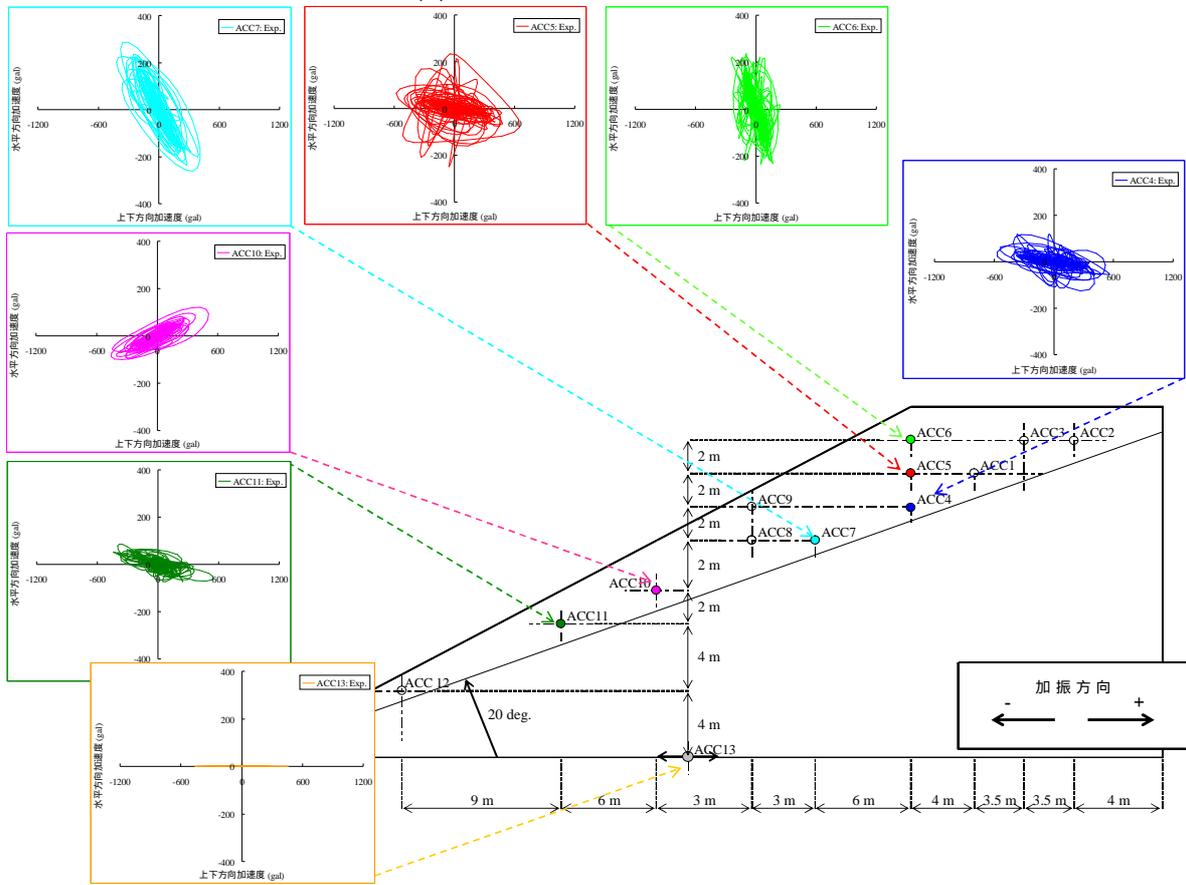


(b) FLIP解析結果・基盤角度10度

図-8 主要位置におけるパーティクルモーションの比較【基盤角度10度】



(a) 遠心実験結果・基盤角度20度



(b) FLIP解析結果・基盤角度20度

図-8 主要位置におけるパーティクルモーションの比較【基盤角度20度】

### 3. 上下動が残留変位量に及ぼす影響

#### (1) 最大加速度に関する検討

上記のFLIPを用いた再現解析では、水平一方向加振による動的遠心模型実験を対象としていた。しかしながら実際の強震時においては、水平動だけでなく上下動も同時に作用することになり、傾斜基盤上の盛土は、さらに大きな上下応答を示す可能性が高い。そこでここでは、前述のように適用性の確認を行ったFLIPを用いて、水平動と上下動を同時に作用させた場合に、上下動が傾斜基盤上の盛土の残留変位量に及ぼす影響に関して検討を行った。

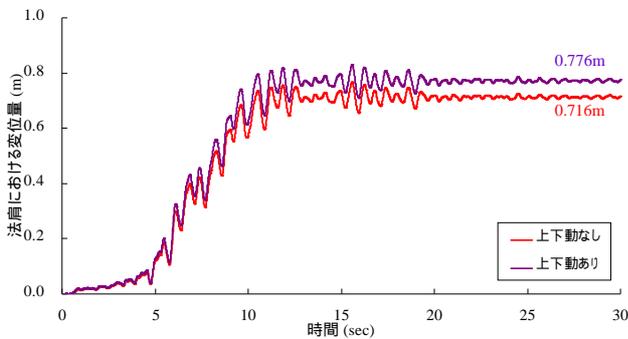
図-9は図-1に示した入力地震動を採用した場合の法肩における上下方向の変位時刻歴であり、水平動のみを入力地震動としたケースおよび水平動+上下動を同時に入力地震動としたケースを比較したものである。これより、基盤の角度に関わらず上下動を入力地震動として考慮したケースのほうが残留変位量が大きくなっている。残留変位量の増加率は、基盤角度10度のケースで約8%、基盤角度20度のケースで約11%となっており、絶対的な残留変位量では基盤角度10度のほうが大きいものの、上下動を考慮することに伴う残留変位量の増加率は基盤角度20度のケースのほうが大きくなっている。

図-10は水平動の入力地震動一定(最大加速度460gal)の条件のもとで、上下動の入力地震動の最大加速度値をそれぞれ変化(最大加速度0~460gal)させた場合の、傾斜基盤上の盛土の耐震設計におい

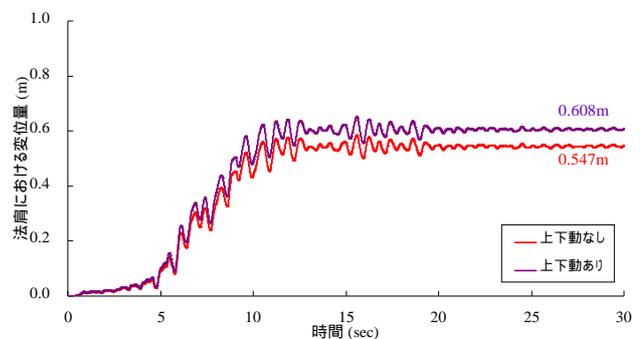
て安全側に評価するための部分係数をイメージした法肩における上下方向の残留変位量の増加率(上下動考慮/上下動なし)をプロットしたものである。なお、解析ケースは表-2に示す入力地震加速度の符号をそのままにしたものと反転させたものを組み合わせた計4ケースである。この図によれば、上下動の入力地震動の最大加速度が大きくなるにつれてCase 1,4では残留変位量の増加率が大きくなっているものの、反対にCase 2,3では残留変位量の増加率が減少している。言い換えれば、上下動の入力地震動は法肩における上下方向の残留変位量に対して、安全側にも危険側にも作用する可能性があることを示している。すなわち表-2に示した各解析ケースの入力地震動の条件の違いは、水平動と上下動の入力地震動に関する相互の位相関係が異なっているだけであり、入力地震動として採用する水平動と上下動の位相特性によって傾斜基盤を有する盛土の耐震性能に関する評価は異なってくるものと考えられる。

表-2 解析ケース

解析ケース	入力地震加速度の符号	
	水平動	上下動
Case 1	そのまま(正転)	そのまま(正転)
Case 2	そのまま(正転)	反転
Case 3	反転	そのまま(正転)
Case 4	反転	反転

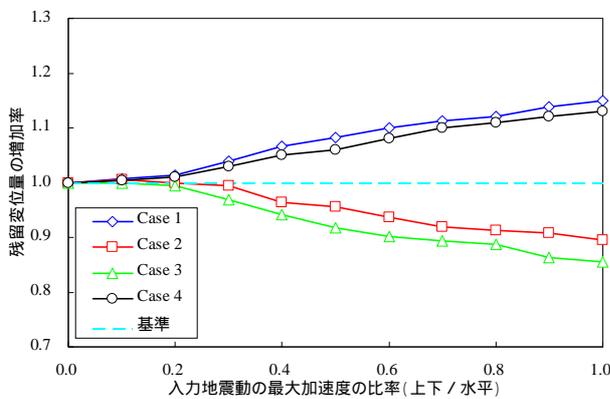


(a) 基盤角度 10 度

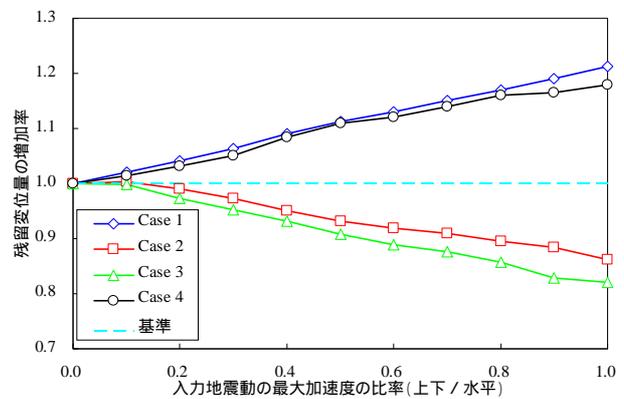


(b) 基盤角度 20 度

図-9 法肩の鉛直変位時刻歴に及ぼす上下動の影響(上下動なしのケースは図-6と同じ)



(a) 基盤角度 10 度



(b) 基盤角度 20 度

図-10 法肩の鉛直方向の残留変位量に及ぼす上下動の影響

(2) 位相に関する検討

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傾斜基盤を有する盛土の耐震性能が異なってくる可能性があることを踏まえ、ここでは図-11に示すような入力地震動を新たに採用した。この入力地震動は水平動は、図-1と全く同じ、すなわち神戸海洋気象台NS成分を最大加速度460galに振幅調整したのとなっている。上下動は、周波数特性に関しては図-1と全く同じ、すなわち神戸海洋気象台UD成分となっているが、位相特性に関しては水平動と同じ位相特性になるよう人工的に作成したものとなっている。検討解析ケースについては、図-11に示す水平動と上下動の位相特性が同じ入力地震動を採用した場合の、表-2に示した入力地震動の符号の組み合わせを変えた計4ケースである。すなわち設定した4解析ケースは、図-12に示すようにCase 1,4に関しては法面に沿うような方向で、Case 2,3に関しては法面に直交するような方向で入力地震動がそれぞれ作用するイメージとなる。

図-13は水平動の入力地震動一定(最大加速度460gal)の条件のもとで、水平動と同じ位相特性を有する上下動の入力地震動の最大加速度値をそれぞれ変化(最大加速度0~460gal)させた場合の、法肩における上下方向の残留変位量の増加率(上下動考慮/上下動なし)をプロットしたものである。この図によれば、基盤の角度に関わらず、上下動の入力地震動の最大加速度が大きくなるにつれて、残留変位量の増加率が増加している。次に、基盤の角度による差に着目すれば、基盤角度20度のほうが残留変位

量の増加率が大きくなっている。よって基盤の勾配が急になるほど、上下動の入力地震動の影響を受けやすいことが読み取れる。ただし、残留変位量の増加率は、上下動の入力地震動のレベルが水平動と同じ場合でも最大で3割程度となっていることから、あくまでも残留変位量は水平動の入力地震動レベルに大きく依存しているといえる。最後に、設定した解析ケースによる差に着目すれば、Case 1,4とCase 2,3がそれぞれ同じような特徴を有しており、Case 1,4とCase 2,3を比較するとCase 2,3のほうが残留変位量の増加率が全体的に大きくなっている。なお、この傾向は基盤の角度には依存していない。言い換えれば、水平動と上下動の位相特性が同じ地震動が傾斜基盤を有する盛土に作用した場合、入力加速度のレベルに関わらず、残留変位量が増加する可能性が非常に高い。その中でも入力地震動が法面に直交するような方向に卓越しているような場合には、残留変位量がさらに増加する可能性がある。

上記の結果を総合すれば、傾斜基盤を有する盛土の耐震性能の指標の1つである残留変位量は、採用する入力地震動の水平動と上下動の位相関係に大きく依存しており、両者が同じような位相特性を有している場合には、増大する可能性もある。したがって傾斜基盤を有する盛土の耐震性能照査を行う場合には、入力地震動として上下動を考慮するだけでなく、入力地震動の位相特性についても留意し、安全側の照査結果となるよう、適切な入力地震動を設定する必要があるものと考えられる。

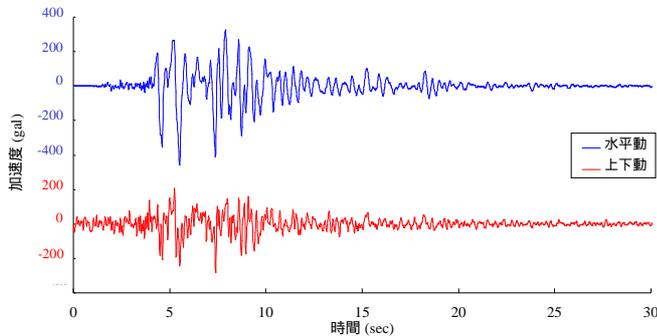


図-11 入力地震動の加速度時刻歴(同位相ケース)

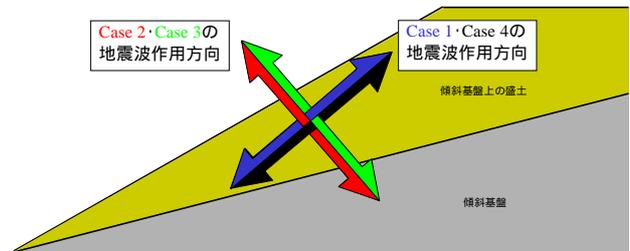
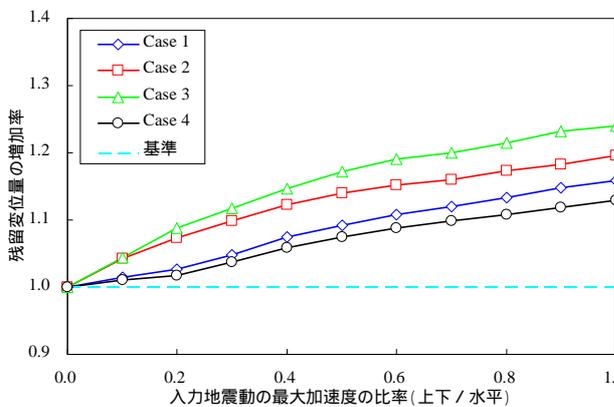
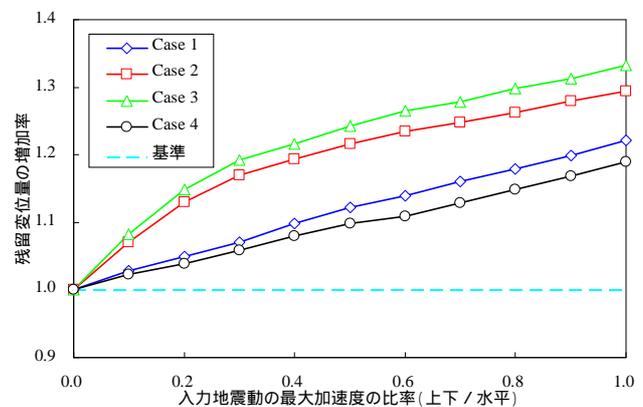


図-12 地震力作用方向の解釈(同位相地震波入力ケース)



(a) 基盤角度 10 度



(b) 基盤角度 20 度

図-13 法肩の鉛直方向の残留変位量に及ぼす上下動の影響(同位相ケース)

#### 4. まとめ

本研究では、FEM解析コードFLIPを用いて傾斜基盤を有する盛土を対象とした地震応答解析を実施することで、上下動が傾斜基盤上の盛土の地震時応答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) FLIPを用いた解析を行うことで、傾斜基盤上の盛土の地震時応答を精度よくシミュレートできることを確認した。
- (2) 上下動は傾斜基盤上の盛土の法肩における上下方向の残留変位量に対して、安全側にも危険側にも作用する可能性があり、これは入力地震動の水平動と上下動の位相関係に起因するものである。
- (3) 採用する入力地震動の水平動と上下動の位相が同じような特性を有している場合には、残留変位量が増大する可能性がある。
- (4) 傾斜基盤を有する盛土の耐震性能照査を行う場合には、入力地震動として上下動を考慮するだけでなく、入力地震動の位相特性についても留意し、安全側の照査結果となるように適切な入力地震動を設定する必要がある。

今後は、水平動と上下動の同時入力加振による遠心模型実験の実施、数多くの入力地震動を採用することによるパラメトリックスタディを実施することでより詳細な検討を行っていく予定である。

謝辞：入力地震動として気象庁の観測波形を使用させていただきました。記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) たとえば國生剛治：新潟県中越地震の地盤被害と対策，土木施工，Vol.46, No.1, pp.84-87, 2005.
- 2) 秦吉弥，加納誠二，多賀正記，一井康二，土田孝，山下典彦：傾斜基盤を有する盛土の水平ならびに上下方向の簡便な固有周波数算定式，土木学会地震工学論文集，Vol.29, 2007.
- 3) 秦吉弥，一井康二，李黎明，土田孝，加納誠二：傾斜基盤を有する盛土の地震応答特性に関する動的遠心模型実験，土木学会地震工学論文集，Vol.29, 2007.
- 4) 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.
- 5) 沖村孝，山本彰，村上考司，鳥井原誠：傾斜基盤上の斜面の地震応答解析，土木学会論文集，No.638 / -49, pp.143-154, 1999.
- 6) 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.
- 7) Towhata, T. 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.
- 8) (社)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.

(2007. 4. 6 受付)

## AN EFFECT OF VERTICAL EARTHQUAKE MOTION ON SEISMIC PERFORMANCE OF EMBANKMENTS ON TILTED BEDROCK

Yoshiya HATA, Koji ICHII, Takashi TSUCHIDA, Liming LI and Seiji KANO

The embankment on tilted bedrock often suffers seismic damage in the previous strong earthquake, and the level of vertical seismic motion by the earthquake in recent years was powerful; however, there is few previous study on the effect of the vertical seismic response of the embankments. Based on the seismic response calculation results using a FEM code 'FLIP', the effect of vertical earthquake motion on seismic performance of embankments with tilted bedrock were examined in this study.

The results indicate that the effects of the phase characteristics of the input earthquake motion in both horizontal and vertical motion are significant.