

鉛直地震動が盛土のすべり変位量 に及ぼす影響に関する一考察

秦吉弥¹・山下典彦²

¹日本工営（株）中央研究所 研究員 （〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304）

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

²神戸市立工業高等専門学校都市工学科 助教授 （〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3）

E-mail:yamasita@kobe-kosen.ac.jp

1995年兵庫県南部地震ならびに2004年新潟県中越地震の特徴の1つとして上下動が大きかったことが挙げられる。この上下動が盛土の破壊に与える影響に関する検討はあまり行われていないのが現状であり、盛土の耐震設計指針等においても鉛直地震動を考慮した耐震設計は含まれていない。そこで本研究では水平動だけでなく上下動を同時に考慮することができる修正Newmark法を用い、地震時における盛土の破壊をすべり変位量によって評価した。そして数多くの強震動を入力地震動として採用することによりパラメトリックスタディを実施し、上下動が盛土の破壊に及ぼす影響に関して検討を行った。その結果、震央距離が比較的短い内陸直下型の地震においては、上下動は盛土の破壊に対し危険側に作用する可能性が高いことがわかった。

Key Words : Embankment, Slope stability, Vertical seismic motion, Modified Newmark method

1. まえがき

地震時における盛土の変形量を詳細に算定するためには弾塑性FEM解析¹⁾が用いられることが多い。しかし設計実務においてこのような詳細な方法を採用することが必ずしも合理的であるとは限らない。

澤田ら²⁾は盛土の地震応答特性と同じ増幅特性を持つ1自由度振動モデルの上に、完全弾塑性である1自由度系のすべり土塊が載っているモデルを構築し、片側にしか変位が生じない履歴則を用いた必要強度スペクトルを作成した。そしてこれを用いて盛土のすべり変位量を算定する方法を提案している。この方法では盛土の周期特性や減衰特性といった動的特性を容易に取り入れることが可能である。

一方でNewmark法³⁾は、すべり土塊が剛体であり、すべり面における応力-ひずみ関係が剛塑性と仮定して地震時におけるすべり土塊の滑動変位量を計算する方法であり、厳密な方法ではないが、結果の解釈が容易なことなどから設計実務上は有効な手法である。しかしNewmark法では増幅効果ならびに減衰効果といった盛土の振動性状が考慮されていない。そこで盛土を1自由度系の振動モデルでモデル化することにより、その振動性状を考慮した修正Newmark法⁴⁾が提案されている。

1995年兵庫県南部地震ならびに2004年新潟県中越

地震の特徴として上下動が大きかったことが挙げられる。最大加速度に着目すると、特に2004年新潟県中越地震における山古志村竹沢(気象庁)では水平動(721.8gal)を上回る上下動(1059.1gal)が観測されており、山古志村では甚大な地盤災害が発生したことは周知のとおりである。

しかし盛土の耐震設計指針等⁵⁾においても鉛直地震動を考慮した耐震設計は含まれておらず、また上下動が盛土の破壊に与える影響についての検討はあまり行われていないのが現状である。

古賀ら⁶⁾は砂を材料とする大型模型盛土の鉛直振動台実験を行い、鉛直振動(545gal)のみでは法面が滑動することはなかったことを報告している。この理由として鉛直振動により、滑動力と抵抗力が共に増減し、安定性への影響としては相殺されているためであるとしている。

田村ら⁷⁾は小名浜砂を用いたフィルダム模型の振動破壊実験結果に基づいて、水平ならびに鉛直2方向から同時に加振した場合の法面安定の評価方法を提案している。これによると、法面の滑動破壊に関して、鉛直加速度は水平加速度の約半分程度の影響を及ぼすことを示唆している。

平田⁸⁾は渡辺・馬場の方法⁹⁾を用い地震動の上下成分(日本海中部地震・深浦ならびに宮城県沖地震・開北橋)が盛土のすべり変位量に与える影響に

関する検討を行っている．これによると上下動入力
が盛土のすべり変位量に与える影響としては励起さ
れる水平動によるところが大きく，その影響は小さ
いと結論付けている．

安田ら¹⁰⁾は上下動が盛土法面の安定性に与える影
響に関して検討を行うため振動台模型実験を行い，
水平動だけでなく上下動も加わると，その値に応じ
て破壊が生じる水平動の大きさも小さくなっている
ことから，地震時における盛土の安定性に上下動が
与える影響を設計に考慮する必要があるとしている．

鳥居ら¹¹⁾は弾完全塑性地震応答解析を行い，水平
動と上下動を同時に入力したモデルにおいては，水
平動のみを入力したモデルとは異なる周期において，
盛土斜面において堤頂全体の隆起を伴う変位を示す
場合があることから，水平動のみを入力地震動とし
ては地震時における盛土のすべり変位量を適切
に評価できないことを示唆している．

そこで本研究では，地震時における盛土のすべり
変位量算定手法として，著者¹²⁾が開発した上下動を
考慮することが可能な修正Newmark法を採用する．
Newmark法に鉛直慣性力を追加することは著者の新
規業績ではないと思われるが，ここでは非常に数多
くの入力地震動を用いることによりパラメトリック
スタディを実施し，上下動が盛土の破壊，すなわち
すべり変位量に及ぼす影響に関して検討を行った．

2. 数値解析手法

本研究では地震時における盛土のすべり変位量算
定手法として，著者¹²⁾が提案する水平動だけでなく
上下動を同時に考慮することができる修正Newmark
法を採用する．図-1に解析フロー，図-2に鉛直地震



図-1 提案する解析フロー

動を考慮した盛土のすべり変位量算定の概念図をそ
れぞれ示す．以下，解析手法をレビューする．

(1) 盛土のモデル化

まず，盛土を構成するデータ(天端幅 B ，盛土高
さ H ，法勾配 $1:s$ ，単位体積重量 γ ，粘着力 c ，内部
摩擦角 ϕ ，せん断波速度 V_s)をそれぞれ入力し，盛土
本体の固有周波数を中村の式¹³⁾により算定する．

$$f_0 = 0.28(B/H)^{0.84} \cdot B^{-0.97} \cdot V_s \quad (1)$$

次に，盛土本体を地震動の水平成分に加え，鉛直
成分を同時に考慮することができる図-2に示すよう
な等価1自由度系でモデル化する．便宜上，図-2に
おいて盛土構造物が回転バネの位置を中心として回
転運動をすると仮定すると，その位置におけるモー
メントの釣り合いより，次の運動方程式が成立する．

$$\ddot{\omega} + 4\pi\zeta f_0 \dot{\omega} + 4\pi^2 f_0^2 \omega = -\frac{\ddot{X}}{H_E} + \frac{g + \ddot{Y}}{H_E} \omega \quad (2)$$

ここに， ω は応答回転角， m_D は盛土の質量， g は
重力加速度， $\ddot{X}, \ddot{Y}$ は水平および鉛直方向の入力加
速度， ζ は減衰定数(=5%)， H_E は盛土の有効高さお
よび f_0 は(1)式から求まる盛土の固有周波数である．
上下動を考慮しない場合($\ddot{Y}=g=0$)，盛土本体をモ
デル化した1自由度系の運動方程式は，(2)式より次
のようになる．

$$\ddot{\omega} + 4\pi\zeta f_0 \dot{\omega} + 4\pi^2 f_0^2 \omega = -\frac{\ddot{X}}{H_E} \quad (3)$$

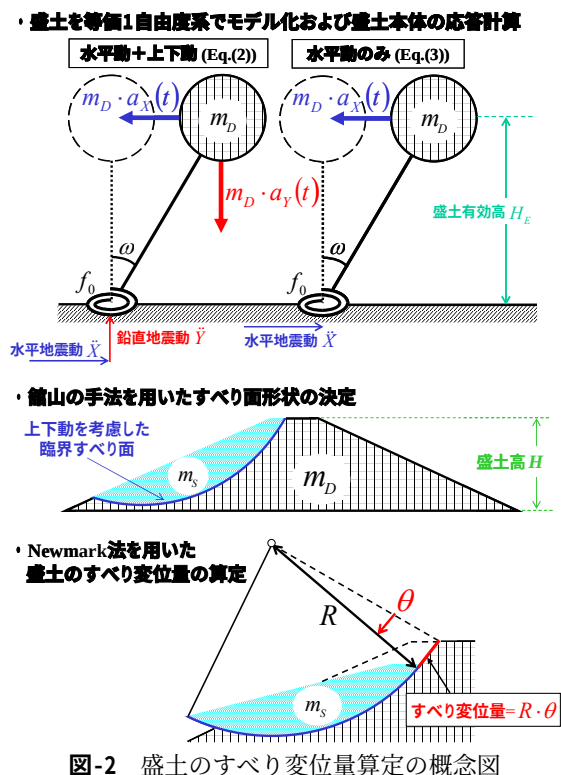


図-2 盛土のすべり変位量算定の概念図

った場合にすべり変位が発生する.

$$\ddot{\theta} = 0 \quad \text{when} \quad |M_D| \leq |M_R| \quad (8)$$

本研究では、盛土を図-2に示すようにすべり土塊部分とすべらない盛土本体とに分割²⁾²¹⁾する。盛土の地震時応答としては、本来せん断変形が卓越すると仮定するのが妥当な考え方ではあるが、盛土本体の水平ならびに上下方向の動的応答計算を簡便に考慮可能にすべく、便宜上、盛土の地震時応答を回転運動で表現した1自由度系にモデル化して動的解析を行う。すなわち、図-2に示すように盛土本体の固有周波数 f_0 (1式)と同じ固有周波数を持つ1自由度系の入力地震動に対する回転応答($\dot{\omega}, \ddot{\omega}$)を計算し、(5)式および(6)式を用いて図-4に示すすべり土塊に作用する水平ならびに鉛直方向の応答加速度をそれぞれ算定した。そして、これらの加速度をすべり土塊部分の運動をモデル化した(7式)に代入し、盛土のすべり角加速度 $\ddot{\theta}$ を計算する。そして線形加速度法により数値積分を行い盛土のすべり角 θ を求め、図-2に示すようにNewmark法を用いて地震時におけるすべり変位量($R \cdot \theta$)を算定した。なお、ここで算定した盛土の水平応答加速度は、盛土本体をせん断1自由度系でモデル化したRazaghiら¹⁸⁾²⁰⁾における水平応答加速度と等価の関係にある¹⁵⁾。

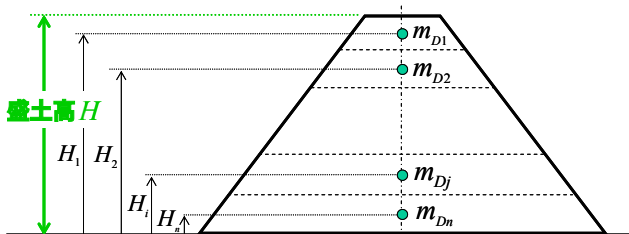


図-3 盛土の有効高さ H_E の算定

(2) 上下動を考慮した修正Newmark法

本研究では、館山¹⁶⁾の提案手法を用いてすべり面形状の決定を行った。この手法は上下動の影響が考慮できるように、現行の設計計算式¹⁷⁾を拡張したもので、地震時におけるすべり安全率 F_s の算定式は次のように与えられる。

$$F_s = \left[\frac{\sum c \cdot l + W(1 - k_v(t) \cos \beta - k_h(t) \sin \beta) \tan \phi}{\sum W \{ (1 - k_v(t)) \sin \beta + k_h(t) \cdot (h/R) \}} \right]_{MIN} \quad (6)$$

ここに、 R はすべり円の半径、 c は粘着力、 l は分割片で切られたすべり面の弧長、 W は分割片の重量、 β は各分割片で切られたすべり面の中点とすべり円の中心を結ぶ直線と鉛直線のなす角度、 φ は内部摩擦角、 h は各分割片の重心とすべり円の中心との鉛直距離および $k_{H}(t)$ 、 $k_V(t)$ は水平・鉛直震度である。

図-4に示されるすべり面におけるモーメントの釣り合いから、すべり土塊部分の滑動モーメント M_D および抵抗モーメント M_R の釣り合いを考えると次のような運動方程式が得られる¹⁸⁾¹⁹⁾。

$$R_{cg}^2 m_S \ddot{\theta} = M_D - M_R \quad (7)$$

ここに、 R_{cg} はすべり円弧の中心からすべり土塊の重心までの距離、 m_s はすべり土塊部分の質量、 $\ddot{\theta}$ はすべり土塊の角加速度および M_D 、 M_R は滑動・抵抗モーメント²⁰⁾である。(8)式において滑動モーメントの絶対値 $|M_D|$ が抵抗モーメントの絶対値 $|M_R|$ を上回

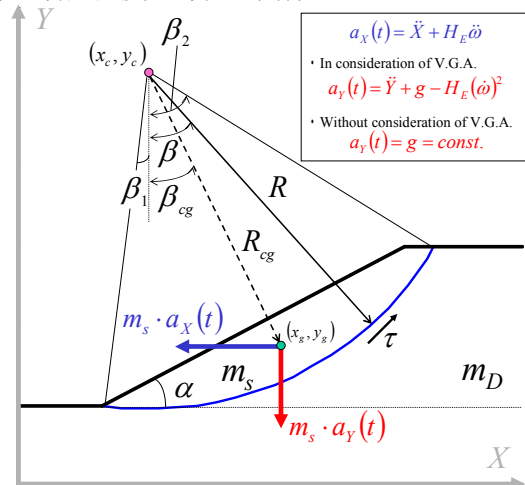


図-4 すべり面におけるモーメントの釣り合い

3. 検討条件

(1) 解析モデル

表-1に本研究で用いた解析モデルのパラメータの一覧を示す。岡本²²⁾は盛土の横断面方向における固有周波数は2.0~4.3(Hz)の範囲内にあるとしている。したがって本解析では、盛土の固有周波数として2.0(Hz)ならびに4.3(Hz)を採用し、せん断波速度を $V_s=100\text{m/sec}$ および天端幅 B を8(m)として(1)式を用いて盛土高さ H を逆算した。法勾配 s 、単位体積重量 γ 、粘着力 c および内部摩擦角 ϕ についてはそれぞれ一定値とした。また(2),(3)式における減衰定数 ξ についてはRazaghi²³⁾を参考に5%を採用した。

表-1 解析モデルのパラメータ

	Model 1	Model 2
天端幅 B (m)	8	8
盛土高 H (m)	16.8	7.1
B/H (-)	0.476	1.127
法勾配 (-)	1:1.80	1:1.80
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18	18
粘着力 c (kPa)	40	40
内部摩擦角 ϕ (deg)	30	30
せん断波速度 Vs (m/sec)	100	100
盛土有効高 H_E (m)	6.186	2.73
減衰定数 ξ (%)	5.0	5.0
固有周波数 f_0 (Hz)	2.0	4.3

(2) 入力地震動

本研究では、1995年兵庫県南部地震以降の主な被害地震におけるK-net（防災科研）を中心とした最大水平加速度200gal以上の計110個の強震動（NSおよびEWのうち最大加速度が大きい方向）の水平動ならびに上下動を入力地震動としてそれぞれ採用した。表-2に入力地震動の観測点ならびにその観測機関を示す。1995年兵庫県南部地震における関西地震観測研究協議会の観測波形は速度波形であるため、加速度波形に変換している。数値解析(Newmark- β 法²⁴⁾)における微小時間は一律 $\Delta t=1/1000$ (sec)とした。

表-2 入力地震動一覧

地震名	観測点名			観測機関
1995年 兵庫県南部地震	神戸大学	神戸本山	尼崎竹谷	関震協
	福島	森河内	忠岡	
	阿倍野	豊中		
	神戸海洋気象台			気象庁
	新神戸変電所			関西電力
1997年 鹿児島県北西部地震	出水	宮之城	大口	防災科研
	阿久根	川内	横川	
2000年 鳥取県西部地震	新見	江府	日南	防災科研
	油木	横田	東城	
	高野	米子	落合	
	赤崎	西城	広瀬	
	美保関	邑智		
2001年 芸予地震	湯来	三原	東予	防災科研
	大野	呉	北条	
	因島	美川	本川	
	長浜	松山	世羅	
	向原	岩国	広田	
	東広島	豊平	油木	
	広島	伊予	防府	
	吾川	柳井	美川	
	東和	新居浜		
2003年 宮城県北部地震	築館	牡鹿	歌津	防災科研
	石巻	古川	大和	
2003年 十勝沖地震	広尾	直別	池田	防災科研
	浜中	標津	本別海	
	本別	納沙布	釧路	
	塘路	厚床	浦幌	
	弟子屈	大樹	別海	
	阿寒	中標津	上西春別	
	落石	根室	新得	
	白糠	足寄	二股	
	浦河	厚岸	様似	
	日置	中札内		
2004年 新潟県中越地震	十日町	小千谷	長岡支所	防災科研
	小出	長岡	津南	
	沼田	塩沢	水上	
	鹿瀬	安塚	松枝岐	
	直江津			
	山古志村	小千谷市	小国町	気象庁
	川西町	川口町	長岡市	

(3) 検討指標

これまでに多数の地震観測波を用いて、地震時における盛土のすべり変位量を算定し、地震動特性の各指標とすべり変位量の相関について報告がなされている。鵜田ら²⁵⁾は、Newmark法を用いて盛土のすべり変位量を算定し、すべり変位量はPGAと対数軸上で線形の関係となり、震源からの距離に最も大きく影響されるとしている。室野ら²⁶⁾はNewmark法を用いて盛土のすべり変位量を算定し、加速度パワー I_E および継続時間がすべり変位量に大きく寄与していることを報告している。沖村ら²⁷⁾は動的弾完全塑性FEMを用いて算定した盛土のすべり変位量が加速度応答スペクトル強度 SI' ²⁸⁾との相関が高いことから、 SI' を用いることで容易に盛土のすべり変位量を評価できることを報告している。

これらの既往の研究を参考に、本研究では以下に示す6つの指標に着目して、上下動が地震時における盛土のすべり変位量に及ぼす影響について検討を進めていく。

- ① 震央距離
- ② PGAの比率（上下動／水平動）
- ③ PGVの比率（上下動／水平動）
- ④ SI 値²⁹⁾の比率（上下動／水平動）
- ⑤ 加速度パワー I_E の比率（上下動／水平動）
- ⑥ 加速度応答スペクトル強度 SI' ²⁸⁾の比率（上下動／水平動）

SI 値²⁹⁾ならびに加速度パワー I_E は次式を用いてそれぞれ算定した。

$$SI = \int_{0.1}^{2.5} S_V(T, \xi = 0.20) dT \quad (9)$$

$$I_E = \int_0^L acc.(t)^2 dt \quad (10)$$

ここに、 S_V は減衰定数 $\xi=20\%$ の速度応答スペクトルおよび L は入力地震動の記録長である。加速度応答スペクトル強度 SI' ²⁸⁾は次のように表される。

$$SI' = \frac{f_0}{(\beta - \alpha)} \int_{T_D}^{T_U} S_A(T, \xi = 0.05) dT \quad (11)$$

ここに、 S_A は減衰定数 $\xi=5\%$ の加速度応答スペクトル、 f_0 は盛土の固有周波数、 T_D および T_U は積分区間の下限および上限にあたる周期であり、次のように表される。

$$T_D = \alpha / f_0 \quad (12)$$

$$T_U = \beta / f_0 \quad (13)$$

ここに、(11)式から(13)式における α および β はそれぞれ0.4および1.5と与えられる²⁸⁾。

4. 数値解析結果

(1) 新神戸変電所および山古志村のケース

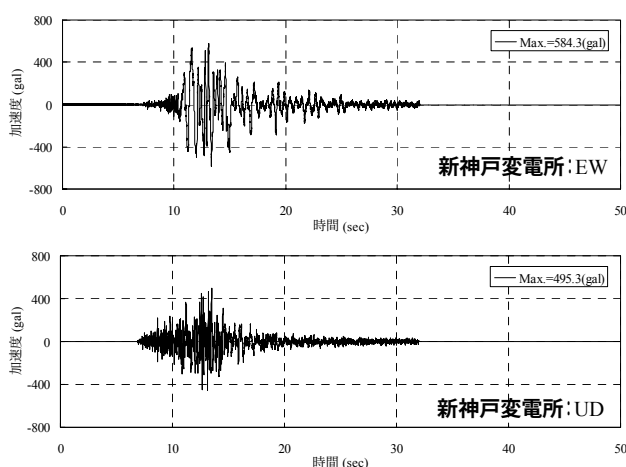
ここでは、1995年兵庫県南部地震の新神戸変電所および2004年新潟県中越地震の山古志村の波形を入力地震動とするケースにおける数値解析結果（Modell）を示す。新神戸変電所の波形はマルチプル・ショックの影響によりS波主要動部の箇所において上下動が大きな値を示していることがわかっている³⁰⁾。図-5(a)に入力地震動の時刻歴を示す。

図-5(b)は上下動を考慮したケースならびに考慮しないケースにおけるすべり面形状を重ね合わせたものである。これより入力地震動に関わらず上下動を考慮したケースのほうが、すべり土塊量が小さくなっていることがわかる。

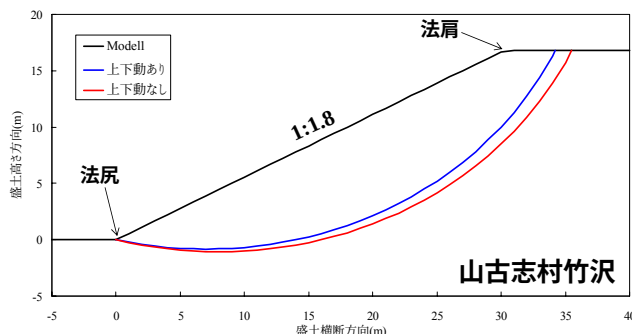
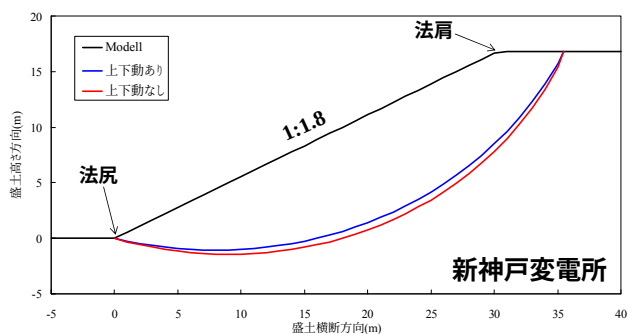
図-5(c)は上下動を考慮したケースならびに考慮しないケースにおけるすべり変位量の時刻歴を重ね

合わせたものである。これより新神戸変電所のケースでは、すべり変位量が上下動を考慮した場合1.213(m)、考慮しない場合1.016(m)となっており、すべり変位量差が0.197(m)およびすべり変位量の比率が1.194となる。一方、山古志村のケースでは、すべり変位量が上下動を考慮した場合2.569(m)、考慮しない場合2.156(m)となっており、すべり変位量差が0.413(m)およびすべり変位量の比率が1.192となる。いずれも上下動を考慮したケースのほうが、残留変位量が大きく算定される結果となった。

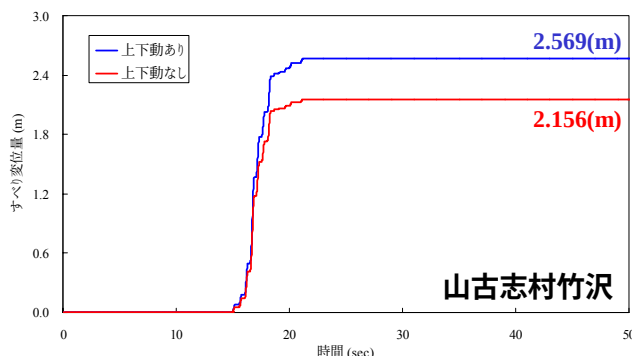
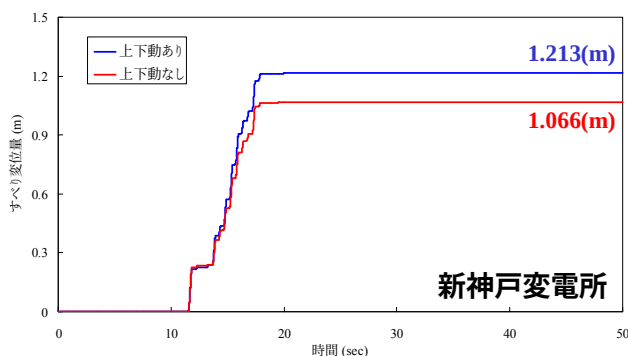
図-5(d)は上下動を考慮することに伴うすべり変位量差の時刻歴に鉛直方向における盛土の応答加速度のエンベロップ³¹⁾を重ね合わせたものである。この図より新神戸変電所および山古志村ともに鉛直方向の応答加速度が大きい時間領域においてすべり変位量差も大きくなっていることがわかる。



(a) 入力地震動の時刻歴

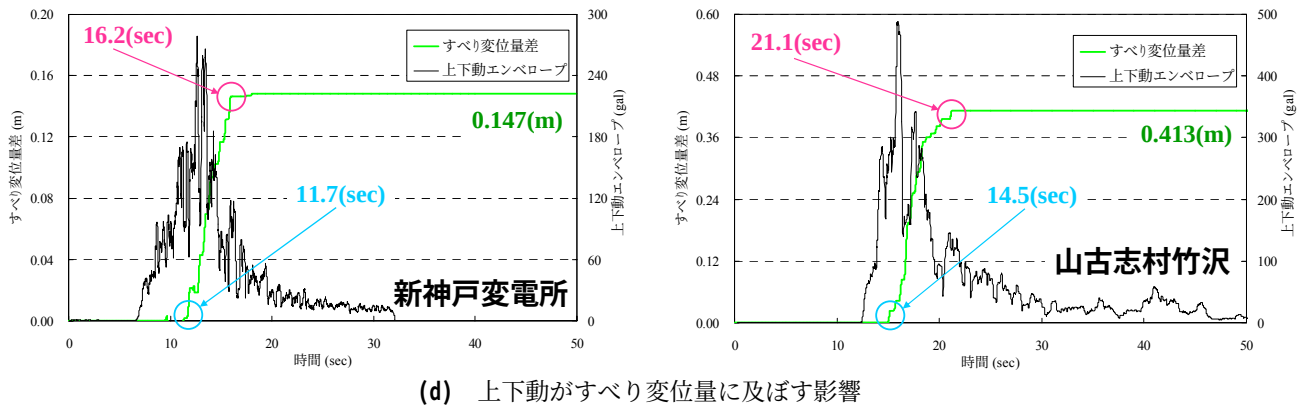


(b) すべり面形状



(c) すべり変位量の時刻歴

図-5 新神戸変電所および山古志村における上下動を考慮したすべり変位量算定



(d) 上下動がすべり変位量に及ぼす影響
図-5 新神戸変電所および山古志村における上下動を考慮したすべり変位量算定

この理由として、盛土の水平応答加速度が比較的大きく、かつ鉛直応答加速度すなわち鉛直上向きに働く慣性力も比較的大きい瞬間において、土の摩擦抵抗ここでは(7)式における抵抗モーメント M_R が小さくなったことが挙げられる。なお、本解析モデルの場合、すべり変位量差が発生する時間帯における鉛直応答加速度にはModel1で120(gal)程度およびModel2で180(gal)程度のいわゆる閾値が存在していたことを付記しておく。これまで著者¹⁹⁾はすべり面形状の決定が盛土のすべり変位量に影響を及ぼすことを確認しており、本解析条件のもとでは上下動を考慮することに伴い、すべり土塊量が小さくなる傾向がある(図-5(b))ことから、ここでは(7)式におけるすべり土塊部分の質量 m_s が小さくなったことにも起因しているものと考えられる。

(2) 検討指標に対するすべり変位量の比率

ここでは、3.3節で示した各検討指標に対するすべり変位量の比率(上下動考慮/上下動なし)の関係について考察を行う。図-6は検討指標とすべり変位量の比率の関係であり、すべり変位量が0.1(m)を超えるケースについてプロットしたものである。

図-6(a)は震央距離とすべり変位量の関係である。これよりModel1およびModel2ともに震央距離とすべり変位量の比率との間には負の相関があり、すべり変位量の比率は最大で1.3程度であることが読み取れる。また震央距離が長い2003年十勝沖地震のケースではすべり変位量の比率が非常に小さくなっていることから、図-5(d)の結果と照らし合わせると、震央距離が比較的小さい、つまり水平動ならびに上下動の主要動部分がほぼ一致する地震動においては、上下動に起因するすべり変位量の増加が発生するものと考えられる。

図-6(b)はPGAの比率とすべり変位量の比率との関係である。この図よりModel2では正の相関があるように思われるものの、Model1ではPGAとの間には相関が見出せない。特に尼崎竹谷のケースでは、PGAの比率が大きい(=1.02)ものの、すべり変位量の比率は1.03と上下動に伴うすべり変位量の増加がほとんどみられない。図-6(c)はPGVの比率とすべり変位量の比率との関係である。これよりModel1お

よびModel2ともにPGVとの間には相関がみられない。川口町および長岡市のケースではPGVの比率がともに大きく、すべり変位量の比率もともに1.2~1.3と大きく算定されていることが読み取れる。図-6(d)はSI値の比率とすべり変位量の比率との関係である。これよりModel2では長岡支所および小出の2ケースを除けば、SI値との間に正の相関があるように思われる。しかしModel1ではSI値の比率との間には相関が読み取れない。図-6(e)は加速度パワー I_E の比率とすべり変位量の比率との関係である。この図よりModel1およびModel2ともに加速度パワー I_E の比率の増加に伴ってすべり変位量の比率も増加する傾向にあることがわかる。また東予および北条のケースでは加速度パワー I_E の比率が比較的大きいものの、すべり変位量の比率は1.05程度と大きくないことがわかる。

図-6(f)は加速度応答スペクトル強度 SI' の比率とすべり変位量の比率との関係である。この図より、Model1およびModel2ともに加速度応答スペクトル強度 SI' の比率との間には正の相関があるように思われる。また他の検討指標(図-6(a)~(e))と比較しても相関が高いことがわかる。この結果は、加速度応答スペクトル強度 SI' は上下動に起因する盛土のすべり変位量の割増の評価指標としても有用である可能性を指し示すものである。

(3) 上下動によるすべり変位量増加の条件

武村³²⁾および工藤³³⁾の研究より、上下動が卓越する相対的な生起時間と加速度波形の特徴およびその生成要因をまとめると表-3のようになる。

表-3 上下動が卓越する条件³²⁾³³⁾

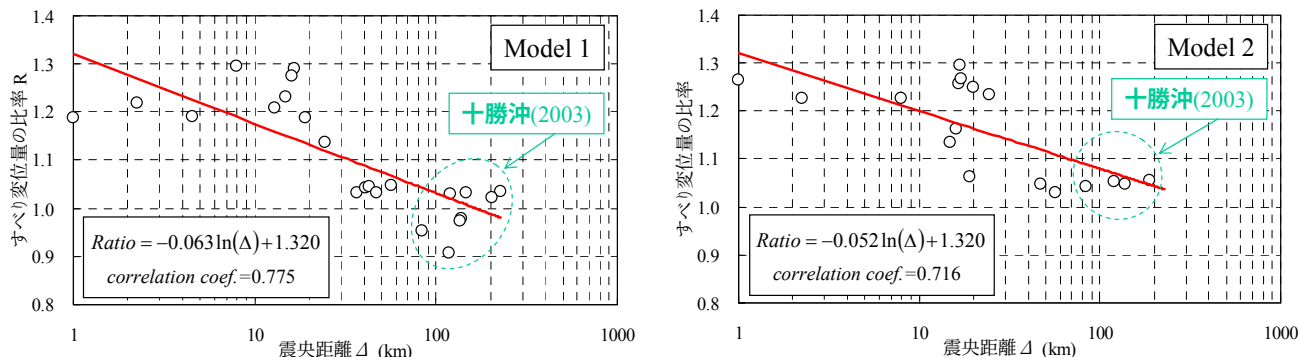
	上下動成分の生起時間	加速度波形に見られる特徴	生成要因
1	S波到達以前	S波より短周期 大きな距離減衰	震源 表層での重複反射
2	S波部分	S波と同等周期	S波の斜め入射
3	S波部分	S波より短周期	S変換P波の 表層での重複反射

図-5および図-6において示した上下動を考慮することによって盛土のすべり変位量が増加する要因を整理すると以下のようなになる。

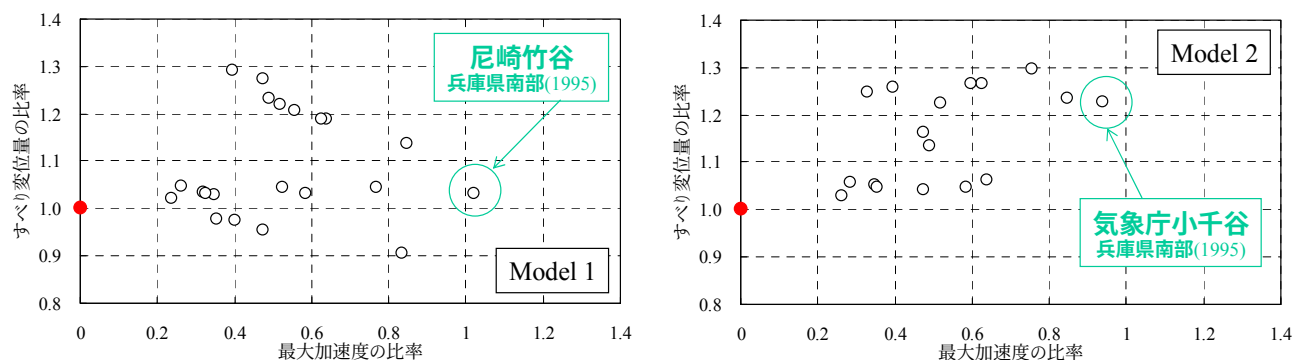
- ① 震央距離が比較的短かく、水平動ならびに上下動の主要動部分がほぼ一致する。
- ② 盛土の固有周波数付近の水平ならびに上下成分の加速度が卓越している。

上記のすべり変位量増加要因と表-3を照らし合わせると、上下動とS波つまり水平動の生起時間がほぼ一致し、かつ上下動とS波つまり水平動の卓越周

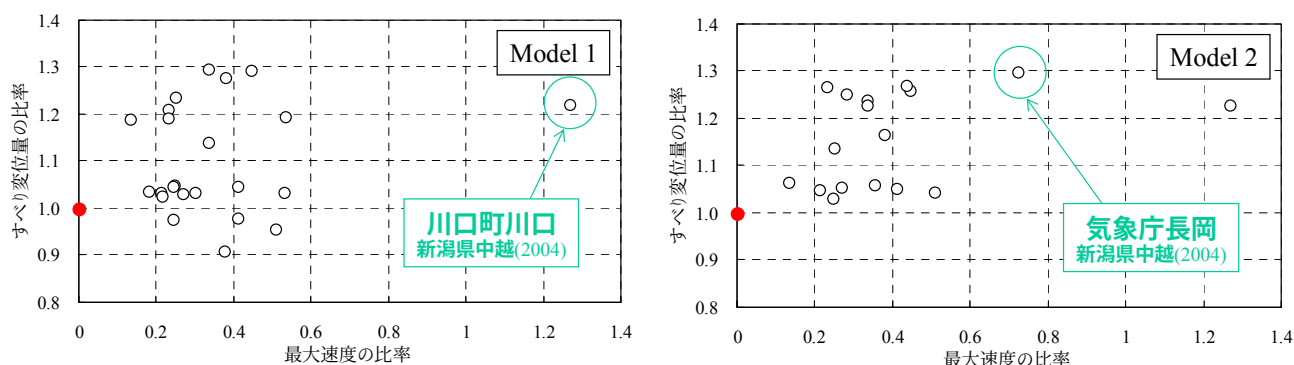
波数が一致する場合において上下動によって盛土のすべり変位量が増加することになる。したがって表-3よりS波の斜め入射の効果が顕著に認められる可能性のあるサイト³⁴⁾³⁵⁾、つまり震源近傍でかつ断層地形で特徴づけられるサイト³⁴⁾³⁵⁾においては、地震時における盛土のすべり変位量を評価する際には、上下動を考慮する必要があるものと考えられる。



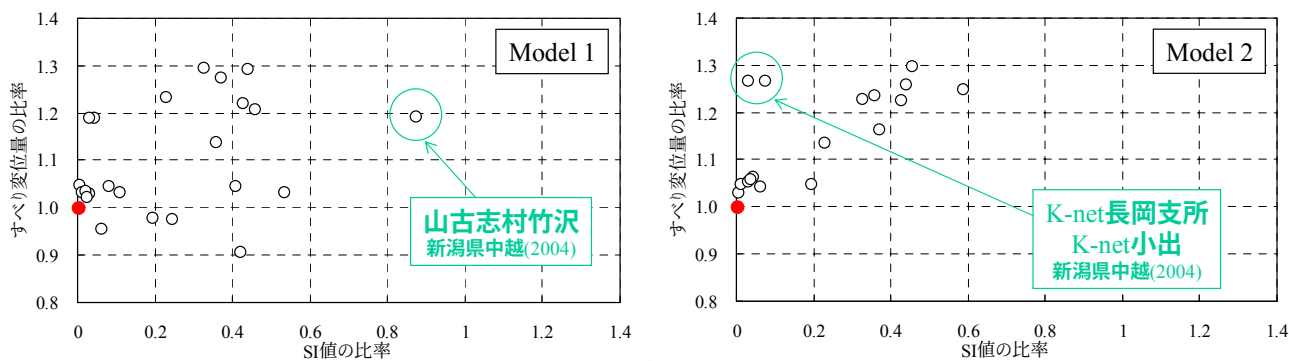
(a) 震央距離 Δ



(b) 最大加速度 PGA の比率



(c) 最大速度 PGV の比率



(d) SI 値の比率

図-6 すべり変位量の比率との関係

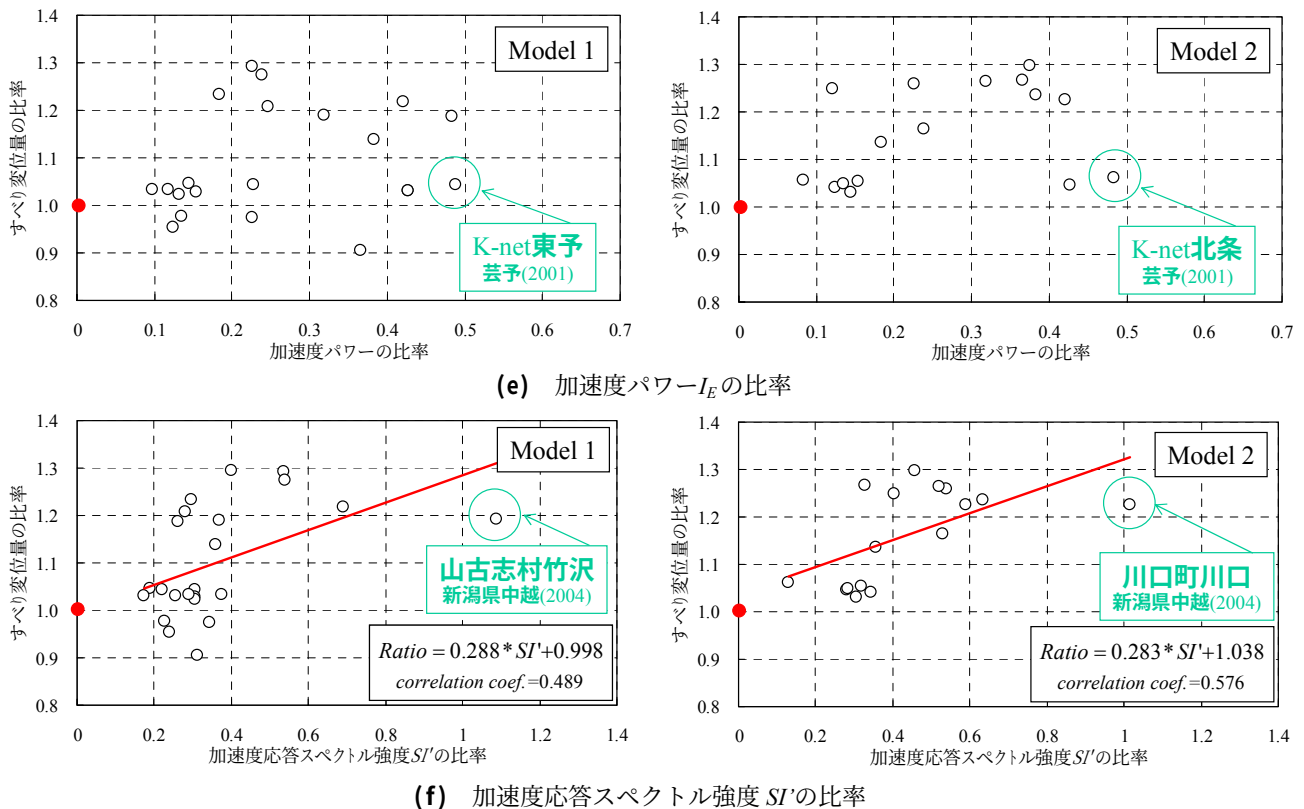


図-6 すべり変位量の比率との関係

5. まとめ

本研究では、水平動だけでなく上下動を同時に考慮することができる修正Newmark法を用いて鉛直地震動が盛土のすべり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) 盛土の固有周波数付近が卓越し、かつ震央距離が比較的短い、つまり水平動ならびに上下動の主要動部分がほぼ一致する強震動を入力地震動とすると、上下動を考慮することによって盛土のすべり変位量が増加する。
- 2) 上下動を考慮することに伴う盛土のすべり変位量の割増の評価指標として、加速度応答スペクトル強度 SI' が有用である可能性が高い。
- 3) 震源近傍でかつ断層地形で特徴づけられるサイトにおいては、地震時における盛土のすべり変位量を評価する際には、水平動だけでなく上下動も考慮する必要がある。

今後は、他の盛土の解析モデルについても検討を行うとともに1995年兵庫県南部地震以前の地震動についても入力地震動として採用するなど、更に詳細な検討を行うことが必要不可欠である。

謝辞：本研究では入力地震動として、防災科学技術研究所(K-net)、関西地震観測研究協議会、気象庁および関西電力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。掲載認可していただいた匿名査読者の意見は非常に有意義なご指摘でありました。今後の研究の参考にしてゆくとともに、記して感謝致します。

参考文献

- 1) たとえば鶴飼恵三、井田寿朗、若井明彦：大地震における斜面の弾塑性挙動の解析、土構造物の耐震設計に用いるレベル2地震動を考えるシンポジウム論文集、地盤工学会関西支部土構造物への設計入力地震動に関する研究会、pp.95-100, 1998.
- 2) 澤田純男、土岐憲三、村川史朗：片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の耐震設計法、第10回日本地震工学シンポジウム論文集、pp.3033-3038, 1998.
- 3) N. M. Newmark: Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Fifth Rankin Lecture, *Geotechnique*, Vol.15 No.2, pp.139-160, 1965.
- 4) S. L. Kramer, M. W. Smith: Modified Newmark Model for Seismic Displacements of Compliant Slopes, *Jour. of ASCE*, Vol.123, No.7, pp.635-644, 1997.
- 5) たとえば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.
- 6) 古賀泰之、沢田健吉、間三男：盛土の鉛直振動に関する振動実験、第32回土木学会年次学術講演会講演概要集、III-29, pp.54-55, 1977.
- 7) 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.
- 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、第40回土木学会年次学術講演会講演概要集、I-296, pp.591-592, 1985.
- 9) 渡辺啓行、馬場恭平：フィルダムの動的解析に基づくすべり安定評価手法の一考察、大ダム、No.97, pp.25-38, 1981.
- 10) 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、第47回土

- 木学会年次学術講演会講演概要集, III-98, pp.236-237, 1992.
- 11) 鳥居宣之, 沖村孝, 錦健太郎: 地震時における斜面の残留変位量簡易算定手法の適用性について, 第26回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.1269-1272, 2001.
 - 12) 秦吉弥, 山下典彦: 上下動を考慮した盛土の地震時変位量算定に関する研究, 日本地震工学会論文集, 2005. (投稿中).
 - 13) 中村豊, 中野聡: 盛土形状に伴う固有振動数の変化の解析と物性値の推定法, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, I -561, pp.1172-1173, 1988.
 - 14) 石山祐二, 麻里哲広, 井上圭一: 構造特性係数の極値について—P- Δ 効果を考慮した1自由度モデルの解析, 日本建築学会構造系論文集第520号, pp.29-35, 1999.
 - 15) 山下典彦, 原田隆典: P- Δ 効果が1自由度系の非線形応答に与える影響, 土木学会地震工学論文集(CD-ROM), Vol.27, No.151, 2003.
 - 16) 館山勝, 堀井克己, 龍岡文夫, 古関潤一: 鉛直動を加味した土構造物の地震時安定解析手法, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, III-494, pp.988-989, 1995.
 - 17) たとえば(社)日本道路協会: 道路土工・のり面工・斜面安定工指針, pp.164-180, 1999.
 - 18) H. R. Razaghi, E. Yanagisawa, M. Kazama: An Approach to Seismic Permanent Displacement of Slopes, *Jour. of JSCE*, No.659/III-52, pp.1-16, 2000.
 - 19) 山下典彦, 竹内健造, 秦吉弥: 地盤強度の不均質性が地震時における盛土のすべり変位量に与える影響, 地盤工学シンポジウム論文集, Vol.49, No.58, 2004.
 - 20) H. R. Razaghi, E. Yanagisawa, M. Kazama: Permanent Displacement Analysis of Circular Sliding Block during Shaking, *Proc. of IS-Shikoku, Slope Stability*, Vol.1, pp.641-646, 1999.
 - 21) 澤田純男, 土岐憲三, 村川史朗: 片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の限界状態設計法, レベル2地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウム, 地盤工学会, pp.341-346, 2000.
 - 22) S. Okamoto: Introduction to Earthquake Engineering, University of Tokyo Press, pp.427-490, 1973.
 - 23) H. R. Razaghi: Permanent Displacement Analysis of Slopes during Earthquake, Thesis submitted in partial fulfillment for the degree of Ph.D. in Engineering, Tohoku University, 2000.
 - 24) N. M. Newmark: A Method of Computation for Structural Dynamics, *Jour. of ASCE*, Vol.85, No.EM3, pp.67-94, 1959.
 - 25) 鴫田由希, 堀井克己, 室野剛隆, 館山勝: ニューマーク法に基づく盛土変位量と地震動特性の相関, 第36回地盤工学研究発表会講演概要集, No.687, pp.1353-1354, 2001.
 - 26) 室野剛隆, 館山勝: 盛土の耐震検討に用いる地震動波形に関する一考察, 土にかかわる構造物の変形量を考慮した耐震設計法の課題, 東京大学工学部土木教室, pp.7-13, 2002.
 - 27) 沖村孝, 鳥居宣之, 玉田和也: 盛土斜面の地震時残留変位量に影響を及ぼす要因に関する一考察, 建設工学研究所論文報告集, No.45, pp.147-152, 2003.
 - 28) 沖村孝, 鳥居宣之, 玉田和也, 豊福亮: 地震時盛土斜面の残留変位量算定における加速度応答スペクトル強度の適用性, 第39回地盤工学研究発表会講演概要集, No.1001, pp.1999-2000, 2004.
 - 29) G. W. Housner: Behavior of Structures during Earthquakes, *Jour. of ASCE*, No.EM4, 1959.
 - 30) 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講演論文集, 日本建築学会, pp.11-16, 1995.
 - 31) たとえば佐藤春夫: 地震波のエンベロープ解析, 物理探査, 第51巻, pp.453-470, 1998.
 - 32) 武村雅之: 震源近傍観測記録の解釈とその問題点, 第19回地盤震動シンポジウム講演論文集, 日本建築学会, pp.17-30, 1991.
 - 33) 工藤一嘉: 震源近傍での強震観測, 第19回地盤震動シンポジウム講演論文集, 日本建築学会, pp.53-60, 1991.
 - 34) 大町達夫, 飯山かほり: 地震観測に基づく不整形地盤による上下動増幅要因の検討, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.183-194, 2000.
 - 35) 竹宮宏和, アダムマヘール: 兵庫県南部地震における神戸の揺れを不整形地盤震動から捉える, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.151-156, 1996.

(2005. 3. 14 受付)

A STUDY OF THE EFFECT OF VERTICAL SEISMIC MOTION ON PERMANENT DISPLACEMENT OF EMBANKMENTS

Yoshiya HATA, Norihiko YAMASHITA

Because vertical seismic motion of the Hyogoken-nanbu (1995) and Niigataken-chuetsu (2004) earthquake was very powerful, it could be important to estimate the influence of structural damage on the investigated system by vertical seismic motion. However, the effects aren't considered sufficiently into account the design standard of embankments. So, in this study, we proposed the modified Newmark method with consideration of vertical seismic motion and carried out parametric study by adopting a lot of strong horizontal and vertical ground motions.

This paper shows that as for the earthquake whose epicentral distance is comparatively short, seismic permanent displacement of embankments becomes large by taking account of vertical seismic motion.