

# 地震時における盛土の降伏加速度に関する基礎的研究

秦 吉弥\*・一井康二\*\*・加納誠二\*\*・土田 孝\*\*

## A Fundamental Study on the Threshold Acceleration of Embankments during an Earthquake

Yoshiya HATA, Koji ICHII, Seiji KANO and Takashi TSUCHIDA

At present, the Newmark Sliding Block Method is adopted as a seismic evaluation method of embankments in Japan. The threshold acceleration during shaking is supposed to be a constant in the Newmark Sliding Block Method. However, threshold acceleration can be varied during strong earthquake motions. In this study, several dynamic centrifuge model tests were carried out to investigate the threshold acceleration of embankments during the shaking. The compensation in the Newmark Sliding Block Method was proposed considering variations in threshold acceleration. The test data indicate that the threshold acceleration of the embankments has a tendency to decrease during an earthquake.

**Keywords:** Earthquake, embankment, threshold acceleration, dynamic centrifuge model test

### 1. はじめに

道路や鉄道などに用いられる一般的な盛土では、耐震設計が行われる場合でもレベル1地震動程度を想定した震度法に円弧すべり面法を組み合わせる計算法がほとんどであった<sup>1)</sup>。1995年兵庫県南部地震以降、道路および鉄道などの線状構造物では、1ヶ所の崩壊がシステム全体の機能不全につながるため、盛土といえども従来の設計レベルを超える耐震性を確保する必要があることが指摘された<sup>2)</sup>。しかしながらレベル2地震動に対して震度法による安定計算を行った場合には安定性を確保することには無理が生じる。したがって、安全率によらず直接、盛土の変形・変位量を照査する設計法が求められており<sup>3)</sup>、その評価手法の1つとしてNewmark法<sup>4)</sup>がある。Newmark法は、すべり土塊が剛体であり、すべり面における応力-ひずみ関係を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ものの、結果の解釈が容易なことなどから、設計実務上は有効な方法である。しかしながらNewmark法では、幾つかの問題点を有している。その問題点の1つとして、Newmark法では、すべり土塊が滑動を開始または停止する基準となる加速度、すなわちすべり安全率が1.0となる場合の水平加速度(以下、降伏加速度とよぶ)を地震時において一定と仮定している。しかしながら強震動を受ける盛土は、繰返し載荷に伴う変形の

累積性および軟化性など強い非線形性を示すことなどを勘案すれば、地震時において盛土の降伏加速度は変化しているものと考えられる。そこで本研究では、盛土の動的遠心模型実験を実施し、地震時における盛土の降伏加速度について検討を行った。さらに降伏加速度の変化を考慮した簡易的なNewmark法の提案を行った。

### 2. 動的遠心模型実験

Table 1に実験ケースを示す。実験模型は、盛土高さ10mおよび20m、標準法勾配1:1.8を持つ盛土断面を検討対象とし、半断面に対して縮尺1/25および1/50でモデル化した(Fig. 1, Photo 1参照)。盛土材料は砂質土とし、模型盛土の密度は締固め度90%および100%として設定した。入力地震動としては、1995年兵庫県南部地震で神戸海洋気象台およびポートアイランドにおいて観測された地震波形のNS成分を採用した。そして最大加速度振幅を遠心模型実験の加振装置の能力に合わせて460galに調整した。

Table 1. The test cases.

	Wave form	Height (m)	Compaction degree (%)
Case 1	Kobe JMA	20	90
Case 2	Port Island	20	90
Case 3	Kobe JMA	10	90
Case 4	Kobe JMA	20	100

\* 日本工営株式会社 中央研究所 地盤耐震グループ

\*\* 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻

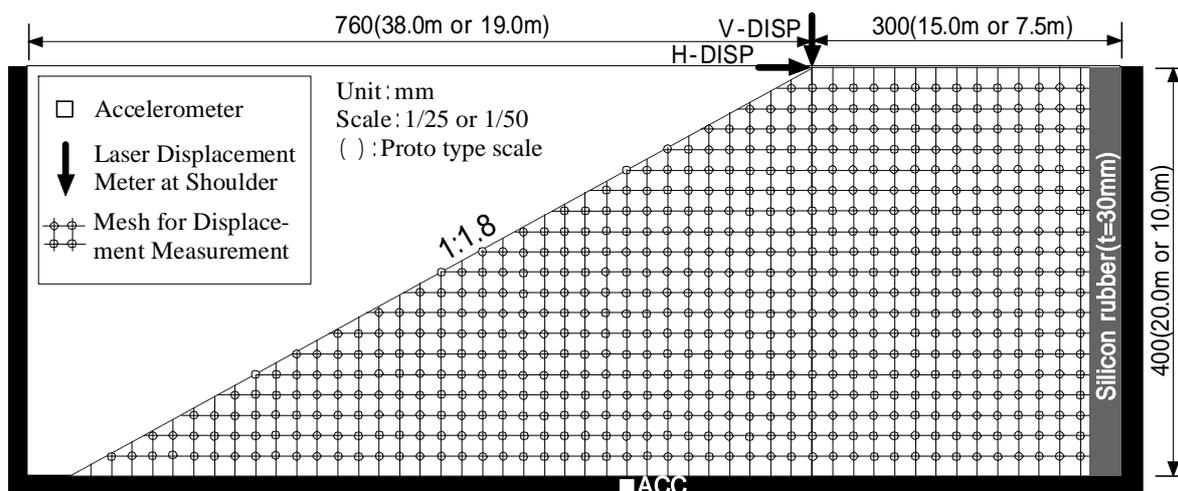


Figure 1. The condition of the experiment model and measurement arrangements.

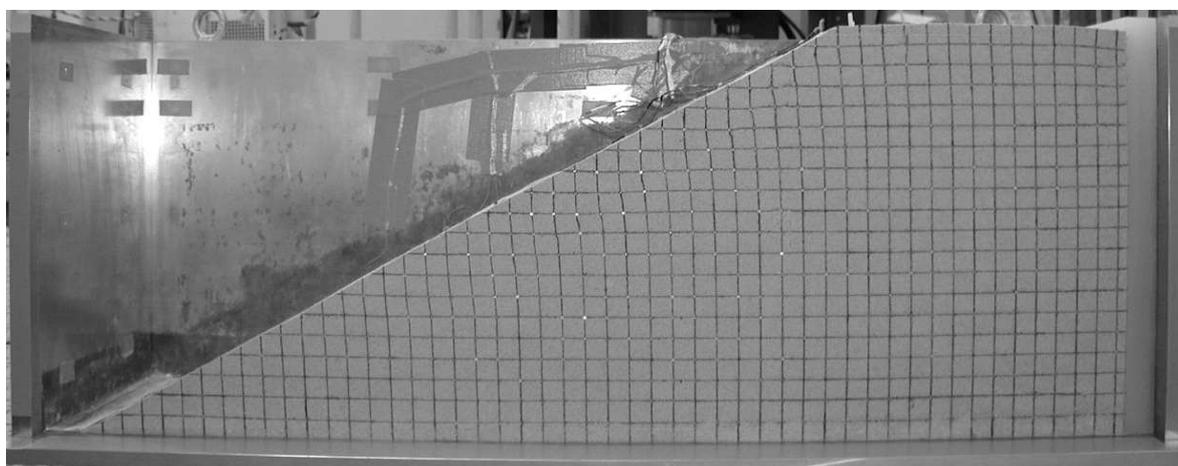


Photo 1. Residual deformation after shaking.

模型は、内寸法：幅 1060mm × 高さ 400mm × 奥行 295mm のアルミ合金製の剛土層（ただし片側の側面はガラス張り）に、縦方向の仕上がり層厚が 4cm 毎に密度管理しながら、締め固めて作成した。

模型底面の水平基盤面は、剛土層底面に固定し、表面にはサンドペーパーを貼付することで粗な基盤面条件とした。盛土中央側の土槽との境界面では、剛土槽壁面の影響を抑えるため、緩衝材として厚さ 30mm のシリコンゴムを挿入した。

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混合物を最適含水比で加水調整したものの（乾燥重量比 9 : 1）を用いた。

Table 2 に、模型盛土材料の基本物性値を示す。Fig. 2 には、締め固め度 90% および 100% とした場合の三軸 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。試験は加振の有無の条件下において、拘束圧を 3 つ変化させて実施している。1 つは、加振を考慮しない通常の条件

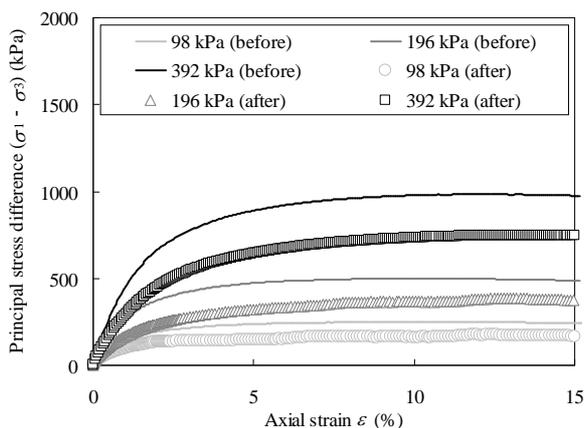
下（単調載荷）での三軸 CD 試験である。もう一方は、正弦波（固有振動数 10Hz ・ 20 波）での繰返し載荷（繰返し載荷応力比は 0.2）を実施し、その後単調載荷による三軸 CD 試験を実施するものである。Fig. 2 よれば、繰返し載荷の影響によりせん断強度が低下しており、特に内部摩擦角  $\phi$  の低下が顕著で表れていることが読み取れる。

実験方法として、まず、模型を 25G（Case 3）もしくは 50G（Case 1, 2, 4）の遠心場に置き、自重圧密させることで地震前の静的状態を再現した。次に、各入力地震動（神戸海洋気象台波もしくはポートアイランド波・最大加速度はともに 460gal）による加振を行った。計測は、剛土層底面における加速度のほか、盛土法肩における水平および鉛直方向の変位をレーザー変位計により計測した。最後に、メッシュ上の標点により盛土の残留変形の計測を加振終了後に、遠心装置を停止させた 1G 重力場において行った。

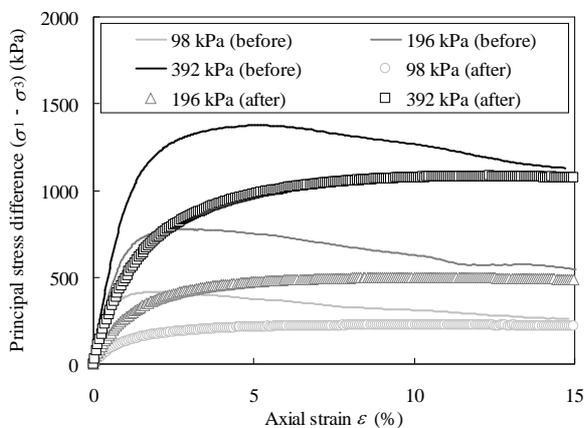
Table 2. The list of properties of soil material.

Soil particle density (Specific gravity)		$G_s$	-	2.647
Gradation characteristics	Sand comp.	%		90.0
	Silt comp.	%		4.0
	Clay comp.	%		6.0
	Maximum grain size	mm		0.425
Compaction characteristics	Maximum dry density	$\rho_{d\max}$	t/m <sup>3</sup>	1.73
	Optimum moisture content	$w_{opt}$	%	11.8
Compaction degree $D_c=90\%$	Wet density	$\rho_t$	t/m <sup>3</sup>	1.741
	Cohesion	$c_d$	kPa	1.39
	Internal friction angle	$\phi_d$	deg.	33.8
	Cohesion	$c_{d,eye}$	kPa	1.88
	Internal friction angle	$\phi_{d,eye}$	deg.	29.1
	Shear modulus*	$G_0$	kPa	$16,695+327.63\sigma'_c$
	Damping coefficient*	$h$	%	$31.75+0.0202\sigma'_c$
	Wet density	$\rho_t$	t/m <sup>3</sup>	1.934
	Cohesion	$c_d$	kPa	16.91
	Internal friction angle	$\phi_d$	deg.	38.9
Compaction degree $D_c=100\%$	Cohesion	$c_{d,eye}$	kPa	11.04
	Internal friction angle	$\phi_{d,eye}$	deg.	36.8
	Shear modulus*	$G_0$	kPa	$20,035+428.97\sigma'_c$
	Damping coefficient*	$h$	%	$33.40+0.0001\sigma'_c$

\*The approximation curve was calculated based on the results of dynamic deformation test



(a) Compaction degree: 90%



(b) Compaction degree: 100%

Figure 2. The relationship between axial strain and principal stress difference in CD tests.

### 3. 降伏加速度の推定

#### 3.1 推定方法

Newmark法では、加振中において降伏加速度は一定であると仮定している。すなわち滑動変位が発生している時間断面における入力地震加速度の最小値が降伏加速度となる。Fig. 3はCase 1における法肩の鉛直変位の増加に対応する時間の加速度をプロットしたものである。この図より、定義した加速度が負の値を示しているなど、降

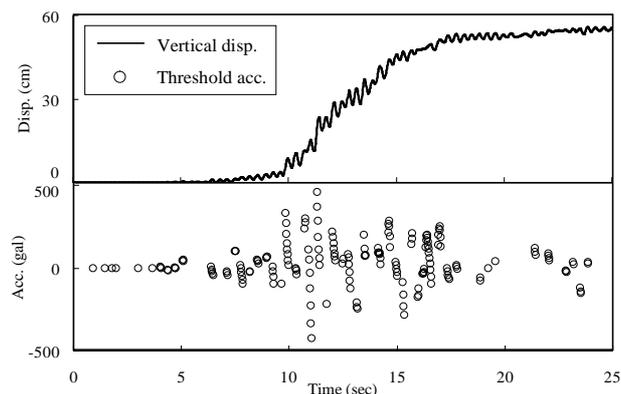


Figure 3. The pick-upped threshold acceleration corresponding to the displacement.

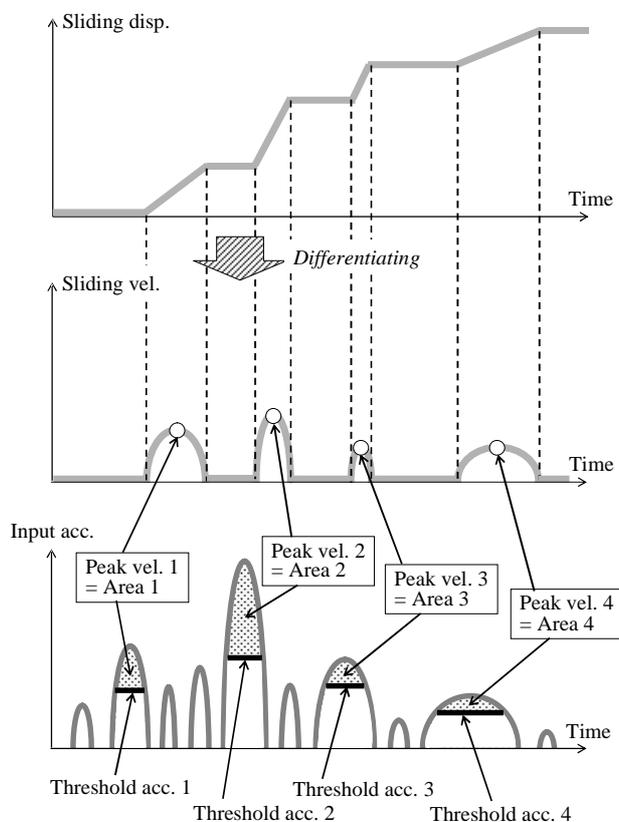


Figure 4. The concept of the proposed method for computation of the threshold acceleration.

伏加速度を推定するのは非常に困難であることがわかる。

そこで本研究では、動的遠心模型実験結果より降伏加速度を推定する新たな方法を提案する。Fig. 4に提案する降伏加速度の推定方法の概念を示す。

まず、法肩における鉛直変位の時刻歴を滑動変位の時刻歴と定義する。そして滑動変位の時刻歴を4mm以上の単純増加のみを考慮した滑動変位の時刻歴に補正する。ここで4mmとは、加振前の静的状態におけるノイズレベルの最大値である。

次に、補正滑動変位の時刻歴を微分することによって、滑動速度の時刻歴を計算する。ここに微分間隔は実験計測条件と合わせて0.02secとした。そしてそれぞれの滑動速度波に対応する入力加速度波を設定する。

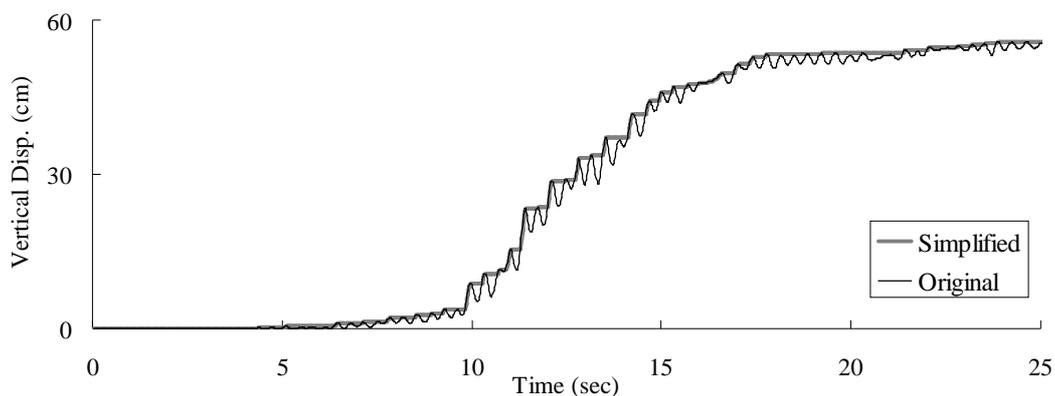
最後に、各滑動速度波のピーク値と等しくなるように、対応する入力加速度波による面積を調整計算したときの下限加速度を降伏加速度と定義する。

Fig. 5には、Case 1における法肩における鉛直変位の時刻歴より補正した滑動速度を計算した例を示す。

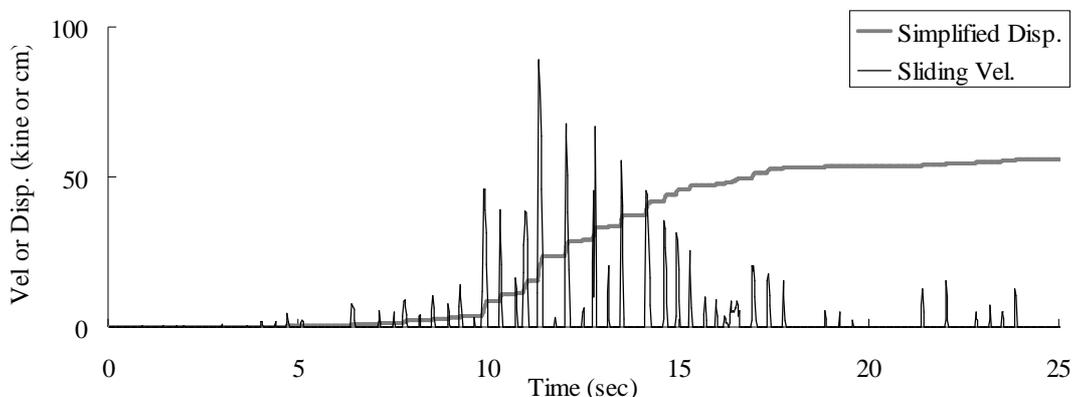
### 3.2 推定結果

提案手法を用いて推定した降伏加速度の分布をFig. 6に示す。同図中における等価降伏加速度とは、推定した降伏加速度を超過する面積の総和が等値であり、なおかつ時間断面で不変とした場合の等価加速度である。この図によれば、推定した降伏加速度は、マクロ的に見れば、入力地震動による加振に伴って低下する傾向にあることがわかる。この傾向は、既往の研究成果<sup>5), 6), 7)</sup>の傾向とも概ね一致することを確認している。

また降伏加速度低下の傾向は、土質材料の締固め度 $D_c$ を高くしたCase 4 ( $D_c=100\%$ )においてより顕著に表れていることから、締固め度が比較的高い土を材料とする盛土の地震時変形量をNewmark法を用いて計算する場合には、降伏加速度の低下の影響を考慮することの必要性を示唆している。一方で、Case 4では、等価降伏加速度や残留降伏加速度は、他のケースと比べて比較的大きくなっており、締固め度を高めることが盛土の耐震性が向上することを裏付ける結果となっている。



(a) Original and simplified sliding displacements



(b) Sliding velocity & Sliding displacement

Figure 5. Calculation process for estimation of the threshold acceleration.

地震時における盛土の降伏加速度に関する基礎的研究

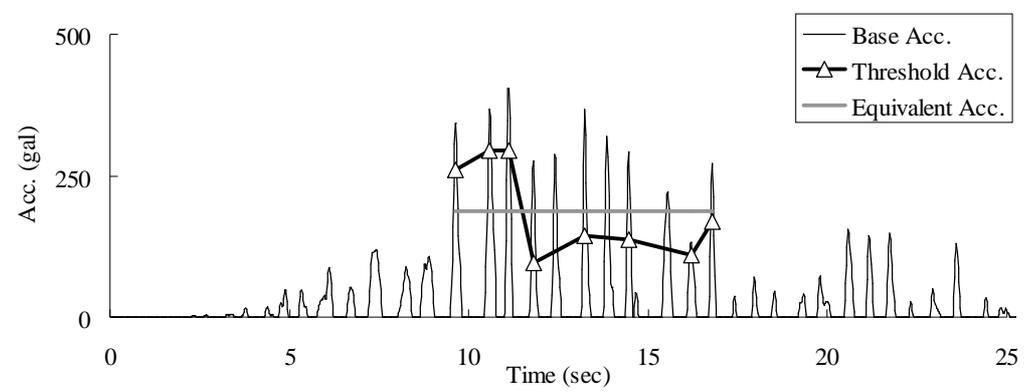
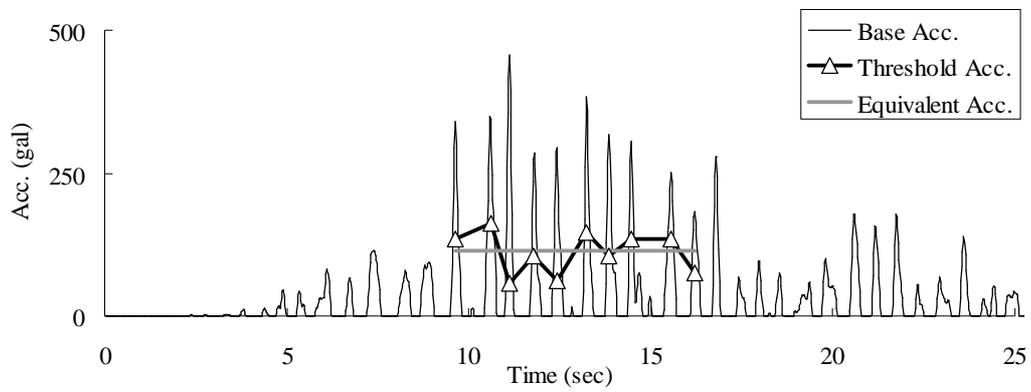
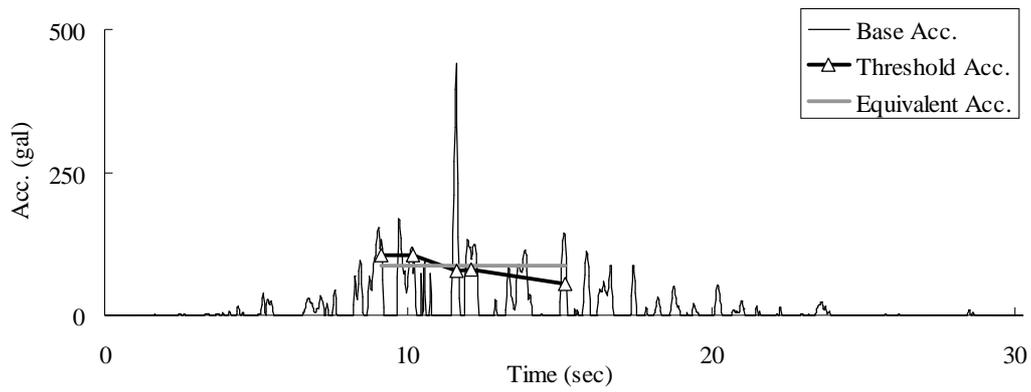
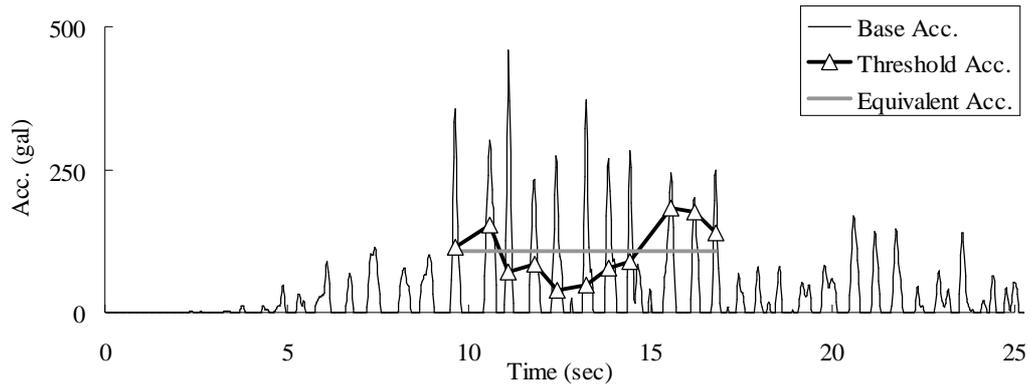


Figure 6. The result of the estimated threshold acceleration using the proposed method.

## 4. 降伏加速度に関する補正

Table 3に各種手法(Method A, B, C, D)を用いて推定した降伏加速度の一覧を示す。

Method Aは、加振の影響を考慮していないせん断強度(Table 2参照)を用いて通常の斜面安定解析を実施して降伏加速度を推定する方法である。よって土質材料や盛土形状が同じであるCase 1およびCase 2ではMethod Aを用いた降伏加速度は等しくなる。

Method Bは、本研究の提案手法(Fig. 4参照)を用いて等価降伏加速度を推定する方法である。

Method Cは、加振の影響を考慮したせん断強度(Table 2参照)を用いて通常の斜面安定解析を実施して降伏加速度を推定する方法である。よってMethod Aと同様に、土質材料や盛土形状が同じであるCase 1およびCase 2ではMethod Cを用いた降伏加速度は等しくなる。

Method Dは、動的遠心模型実験によって得られた法肩における残留変位量がNewmark法により得られる残留変位量と等しくなるように、試行錯誤の結果、降伏加速度を逆算推定する方法である。

Table 3によれば、Method B, C, Dを用いて推定された降伏加速度は、Method Aによる降伏加速度と比較して小さくなっている。この原因の1つとしてひずみ軟化特性の影響<sup>9)</sup>が考えられる。さらにMethod B, C, Dを用いて推定された降伏加速度は、比較的同程度のレベルとなっている。すなわちこの傾向は、加振の影響を考慮した三軸試験を実施して得られた残留せん断強度を入力定数としてNewmark法に基づいた滑動変形計算を実施すれば、降伏加速度の低下の影響が考慮された残留変位量に比較的近い残留変形量が簡易的に得られる可能性が高いことを示唆している。

Table 3. The estimation results of the threshold acceleration using the various methods.

Estimation method	Method A (gal)	Method B (gal)	Method C (gal)	Method D (gal)
Case 1	238	108	118	115
Case 2	238	96	118	103
Case 3	290	134	149	139
Case 4	283	187	201	201

## 5. まとめ

本研究では、研究では、盛土の動的遠心模型実験を実施し、地震時における盛土の降伏加速度について検討を

行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 盛土の動的遠心模型実験結果に基づいて、地震時における盛土の降伏加速度の変化を推定する方法を提案した。
- 2) 地震時における盛土の降伏加速度は、低下する傾向にある。
- 3) 降伏加速度の低下の影響を考慮した盛土の残留変位量は、加振の影響を考慮した三軸試験による残留せん断強度を採用した Newmark 法に基づく残留変位量算定結果と比較的近い値を示す可能性が高い。

なお、上記で示した結論は、限られたケースの動的遠心模型実験の結果に基づいている。よって今後は、土質材料の影響、傾斜基盤の影響、入力加速度レベルの影響などについて更に詳細な検討が必要である。

## 参考文献

- 1) たとえば佐々木康：土構造物の耐震設計・その2，土木技術資料，No.26-2，pp.33-40，1984.
- 2) (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.
- 3) 日本地震工学会：性能規定型耐震設計法 - 性能目標と限界状態はいかにあるべきか - ，平成16年度報告書，性能規定型耐震設計法に関する研究委員会，pp.101-108，2005.
- 4) Newmark, N. M. : Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Fifth Rankin Lecture, Geotechnique, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 5) 佐藤信光，播田一雄，堀井克己，龍岡文夫，古関潤一：ひずみ軟化と粒径特性を考慮した Newmark 法による土構造物の地震時残留変形解析，第36回地盤工学研究発表会発表講演集，No.679，pp.1337-1338，2001.
- 6) 大窪克己，浜崎智洋，北村佳則，稲垣太浩，佐伯宗大，濱野雅裕，龍岡文夫：高速道路盛土の大規模地震時の耐震性検討(その1)～盛土材のせん断強度の検討～，第39回地盤工学研究発表会発表講演集，No.881，pp.1759-1760，2004.
- 7) 大窪克己，浜崎智洋，北村佳則，稲垣太浩，濱野雅裕，佐伯宗大，龍岡文夫：高速道路盛土の大規模地震時の耐震性検討(その2)～変位量による耐震性能評価法の検討～，第39回地盤工学研究発表会発表講演集，No.882，pp.1761-1762，2004.