

# 地震時における盛土の挙動に関する 遠心模型実験と解析

飛田哲男<sup>1</sup>・井合進<sup>2</sup>・上田恭平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 京都大学 防災研究所助手 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: tobita@geotech.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 京都大学 防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: iai@geotech.dpri.kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>京都大学大学院社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: ueda@geotech.dpri.kyoto-u.ac.jp

原地盤を飽和砂質地盤とする盛土に関して動的遠心模型実験、および有効応力解析プログラム(FLIP)による数値解析を実施した。実験および解析においては、原地盤の相対密度と入力波の加速度振幅に対する盛土および周辺地盤の変形形態と天端沈下量に着目した。本研究により明らかになったことは以下のとおりである。(1)入力加速度振幅にほぼ比例して、盛土天端の沈下量が増大した。(2)液状化地盤では自重による沈下が卓越し、非液状化地盤では慣性力による変形が卓越する。(3)飽和緩詰め地盤上の盛土沈下は、原地盤要素が地震時のせん断力により鉛直方向に収縮、水平方向に伸張することで生じる。

**Key Words :** Embankment, Centrifuge, Numerical analysis, liquefaction, dissipated energy

## 1. はじめに

大地震のたびに河川堤防や宅地盛土が崩壊する事例が数多く報告されている。例えば、1995年の兵庫県南部地震の際には、淀川などの河川堤防の総延長約9.3kmに堤体が崩壊するなどの被害が発生した<sup>1)</sup>。また、2003年十勝沖地震では、十勝川水系の66ヶ所の堤防が、総延長約26.5kmにわたり被害を受けた<sup>2)</sup>。また2004年新潟県中越地震では、宅地建設のため、谷を埋めた盛土地盤が流出した<sup>3)</sup>。このような被害は、堤内への浸水を引き起こしたり、盛土上に建設された構造物や建築物の被害を併発するなど二次的な災害発生につながる危険性を有している。

近年、性能設計の観点から、土構造物の地震時安定性のみならず、その変形量に着目した設計法の確立が望まれている。設計段階において盛土の沈下量を正確に予測し、被害を最小限に食い止めるためには、まず盛土の動的変形メカニズムを詳細に知る必要がある。その上で、盛土天端の沈下量と入力レベルとの関係が与えられれば、現在、急務となっている総延長の長い河川堤防盛土の合理的な耐震診断法に役立てることができる。

現在、盛土や斜面の安定問題は、円弧すべりや直線すべりを仮定する静的な方法、加速度時刻歴を用いたNewmark法などにより検討されている。し

かし、すべり破壊に対する地震力の効果には未知の部分が多いため、1G場あるいは遠心場での模型振動実験を行い、変形量を適切に評価するための研究が盛んに行われている<sup>4)7)</sup>。風間ら<sup>8)</sup>は、飽和砂地盤上の盛土の地震時安定性に関して、同一規模の盛土を想定し、1:37.5と1:50の二つの模型縮尺について遠心模型実験を行った。その結果、相似則の妥当性を確認した上で、飽和砂地盤上の斜面の破壊面が円形すべり的ではあったが、円弧で囲まれた土塊が回転するのではなく、上方ほど大きくすべる流動的な変形であったことを報告している。この他にも多くの実験、研究がなされているが、実験条件あるいは対象とする変形量によって破壊形態はさまざまである。

本研究では、比較的小規模の河川堤防の横断面について、地震時における天端沈下量と入力加速度レベルの関係を明らかにすることを目的とし、遠心模型実験および多重せん断モデルに基づく有効応力解析<sup>9)</sup>を実施した。

## 2. 遠心模型実験の方法

遠心模型実験は京都大学防災研究所の遠心力載荷装置（半径2.5m）を用い、50Gの遠心力場で実施し

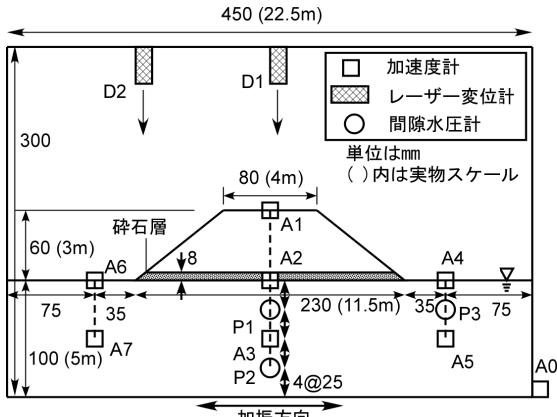


図-1 実験断面

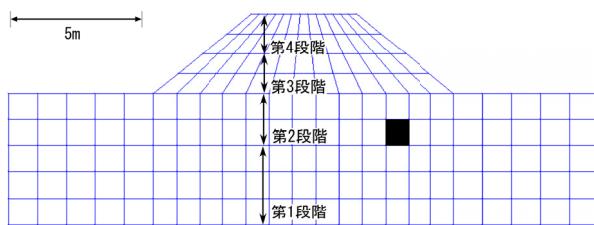


図-2 解析メッシュ

た。実験模型の断面図を図-1に示す。使用した土槽は剛土槽(内寸450x150x300mm)である。盛土下部の原地盤と堤体の作成にはともに相馬砂5号(表-1)を用い、原地盤を緩詰め飽和砂、密詰め飽和砂の2種類とした。堤体はいずれの場合も乾燥砂で作成し、原地盤からの吸水を防ぐため盛土下部に厚さ約8mmの碎石層を設けた。原地盤は、粘性を水の50倍に調整したメトローズ溶液を用い水中落下法により作成した。密詰めの場合には、所定の相対密度となるよう締固めを同時に行った。原地盤の相対密度は、緩詰めで約30%、密詰めで約70%であった(表-2)。盛土部は、図-1に示す寸法となるように乾燥砂を用いて作成した。また深さ方向の地盤変位を観察するため、予め着色したそばを土槽内側面の透明アクリル板に付着させた。

実験はそれぞれの地盤条件において入力波の振幅を変化させて3ケースずつ、延べ6ケース実施した(表-2)。入力波は実物換算で1Hz、20波の正弦波で振幅のみを変化させた。以下で用いる数値は、特に断りがない限り実物スケールとする。

### 3. 多重せん断モデルによる盛土の変形挙動の数値解析

地震時の盛土の変形挙動解析を、多重せん断モデルに基づく有効応力解析プログラムであるFLIP (Finite element analysis of LIquefaction Program)<sup>9)</sup>を用いて行った。

解析の手順は、まず図-2に示す解析メッシュに対して、完全排水条件下で自重解析として4段階の築堤解析を行い、その後遠心模型実験で得られた入力加速度波形を実物スケールに換算したものを入力し、

表-1 相馬砂5号

最大間隙比	$e_{max}$	1.11
最小間隙比	$e_{min}$	0.69
平均粒径	$D_{50}$ (mm)	0.38
均等係数	$U_c$	1.5

表-2 実験ケース

Case	地盤	Dr (%)	最大入力加速度振幅(Gal)	沈下量(m)
1	緩	27	81	0.01
2	緩	30	179	1.00
3	緩	30	313	1.40
4	密	69	79	0.00
5	密	71	169	0.01
6	密	67	574	0.09

非排水条件下で地震応答解析を行った。境界条件として底面は固定、側面は側方のみ固定条件とした。解析寸法は遠心模型実験で対象とした実大モデルと同一とした。地盤モデルのパラメータは、緩詰め地盤の場合には等価N値5を基本に等価N値3と等価N値6の3パターン、密詰め地盤の場合には等価N値40を基本に等価N値30と等価N値50の3パターンとし、それぞれに対して標準的に得られる値を用いた。表-3と表-4に等価N値が5と40の場合の地盤パラメータと液状化パラメータを示す。

### 4. 実験および解析による盛土の変形挙動

#### (1) 原地盤の相違による変形形態

加振前後の盛土の変形形状について、図-3にCase 2とCase 5の加振前(点線)と加振後(実線)の実験(上段)および解析(中段)による断面の変形形状、センサー設置位置の加速度応答の最大値(下段)を示す。なお同図上段に示す実験断面は、土槽の側方から撮影した写真を元に変形形状をトレースしたものであり、実験土槽側面の透明アクリル板の寸法上の制約から原地盤の深さ2.5m以浅を示す。また、図-4にCase 2とCase 5の各ケースにおける(a) 間隙水圧、(b) 天端沈下量、(c) 天端加速度、(d) 入力加速度の時刻歴を示す。

まず、緩詰め飽和砂地盤、入力加速度振幅179Galのケース(Case 2)について、図-3(a)より実験、解析とともに盛土周辺の原地盤が横方向に広がると同時に隆起していることがわかる。原地盤が一様であること、入力波が正弦波に近いことから、盛土中心線を対称に左右に地盤の変形が生じており、振動による一方への変位は見られない。天端沈下量については、同図(a)中段の解析結果と比較すると、実験では1mであるのに対し、解析ではその約3分の1の0.35mとなった。同図(a)中段に示す解析結果では、盛土直下の原地盤内部の変形形態はよく再現されているものの、盛土側方地盤の隆起量が過小評価されている。また、図-4(a)に示す過剰間隙水圧は実験

表-3 解析に用いた地盤パラメータ

土層名	等価 N値 ( $N_{65}$ )	質量密度	間隙率	変形特性							
				初期 せん断 剛性	体積 弾性 係数	平均 有効 拘束圧	ボ'アン 比	拘束圧 依存 係数	内部 摩擦角	粘着力	履歴 減衰 上限値
		$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	n	$G_r$ (kPa)	$K_r$ (kPa)	$p_r$ (kPa)	$\nu$	m	$\phi_f$ (°)	c (kPa)	$h_{max}$
緩詰め地盤	5	$1.34 \times 10^3$	0.496	$4.839 \times 10^4$	$1.262 \times 10^5$	98.0	0.33	0.50	38.16	0.0	0.24
密詰め地盤	40	$1.45 \times 10^3$	0.451	$1.885 \times 10^5$	$4.916 \times 10^5$	98.0	0.33	0.50	43.27	0.0	0.24
盛土	40	$1.45 \times 10^3$	0.450	$1.885 \times 10^5$	$4.916 \times 10^5$	98.0	0.33	0.50	43.27	0.0	0.24

表-4 解析に用いた液状化パラメータ

土層名	等価 N値 ( $N_{65}$ )	液状化特性					
		変相角 $\phi_p$ (°)	液状化パラメータ				
			$w_1$	$p_1$	$p_2$	$c_1$	$s_1$
緩詰め地盤	5	28.0	4.634	0.50	1.037	1.548	0.005
密詰め地盤	40	28.0	21.40	0.50	0.407	13.26	0.005

では加振と共に緩やかに上昇しているが、解析では加振開始後急速に上昇していることがわかる。

密詰め飽和砂地盤で、入力加速度振幅が169Galのケース(Case 5)では、図-3(b)に示すように、盛土法肩と端部がやや丸くなっているものの、沈下は極めて小さい。

## (2) 最大応答加速度振幅の深さ方向分布

実験および解析各ケースの最大応答加速度振幅の深さ方向分布を図-3(下段)に示す。同図において白抜きで示す実験結果より、原地盤が緩い場合(Case 2)では、盛土の右側以外の応答値において、天端、地表面、盛土-原地盤の境界、および地中の加速度振幅が入力加速度と比較して減衰している。このこ

とから、堤体に作用する慣性力が小さくなっているものと推測される。盛土の右側の応答値が大きくなっているのは、液状化に伴い加速度計が過度に傾斜したためである。観測記録より液状化前の最大値を読み取ると、地表面(A4)、地中(A5)ともに約1.5m/s<sup>2</sup>であり、液状化後の振幅は小さくなっている。一方、原地盤が密詰めの場合(Case 4-6)には、最大加速度は底部から盛土天端にかけて増幅傾向にあり、堤体に大きな慣性力が作用しているものと思われる。ただし、液状化に至らなかったCase 1と4では、結果に大きな差異は見られなかった。解析における最大応答加速度振幅の深さ方向分布は、原地盤が液状化に至らなかったケース(Case 1, Case 4から6)では実験とほぼ同様の傾向を示したが、原地盤が液状化したCase 2, Case 3では、実験結果とは異なり、やや増幅傾向となっている。これは、図-4(b) : Case 2に示すように加振開始直後の加速度振幅を過大評価しているためである。すなわち、図-4(a) : Case 2の約3秒付近に見られる過剰間隙水圧の減少に伴うせん断剛性の増加により、応答値が過大評価されたものと考えられる。

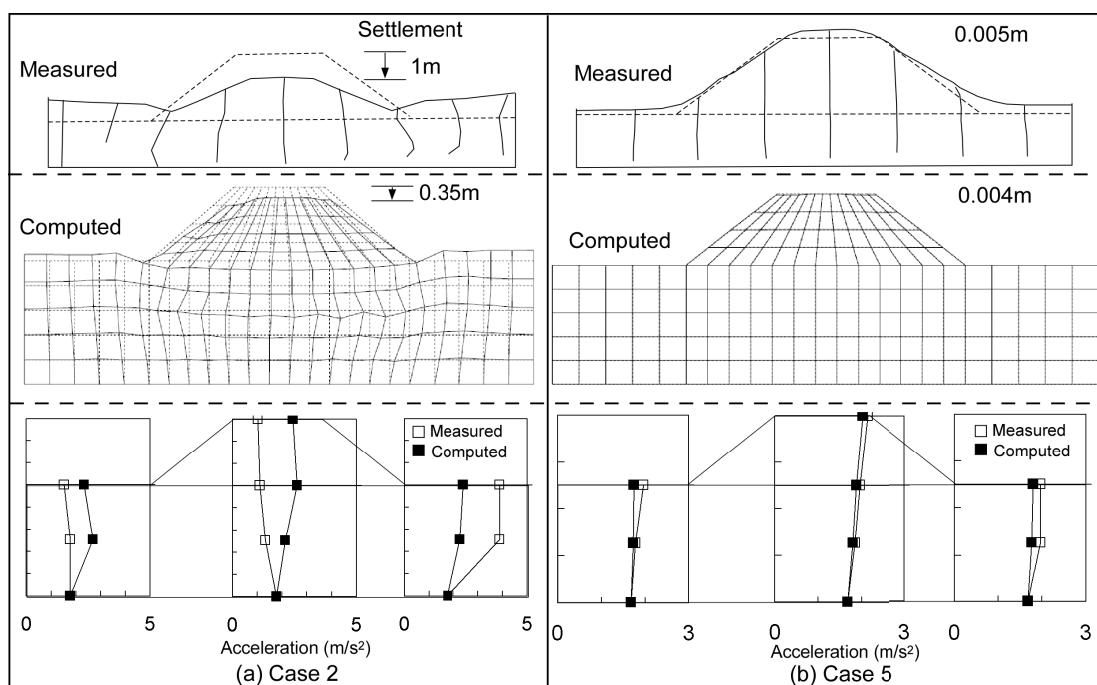


図-3 加振後の盛土および原地盤の変形形状（上段：実験、中段：解析、下段：最大加速度応答値）

### (3) 最大入力加速度と天端沈下量

図-5(a)に下部地盤が緩詰めの場合のCase 1からCase 3における最大入力加速度振幅と盛土天端沈下量との関係を示す。同様に、図-5(b)にCase 4からCase 6の結果を示す。図-5(a)および(b)に示す曲線の形状に関して、緩詰め地盤の場合には、曲線が上に凸であり、盛土高の約50%で頭打ちになる傾向があるように見える。しかし、解析における沈下量は、入力加速度振幅の増加に伴い、単調に増加する傾向にある。一方、同図(b)に示す密詰め地盤の場合には、実験、解析いずれの場合も同様に単調増加の傾向にある。

原地盤が密詰めの場合(図-5(b))には、入力加速度が600Galと大きな場合でも、沈下量は盛土高さの3%程度となった。また、この場合の沈下量は、緩詰めの場合の0.5~6.5%程度であることから、地震時の沈下対策として原地盤の液状化対策が有効であることが確認された。

次に、解析による最大入力加速度と盛土天端沈下量との関係について考察する。図-5(a)に示す原地

盤が緩詰めの場合について、先に示したように解析における等価N値が5の場合には、天端沈下量はCase 2, 3で、実験値の約30%, 65%と過小評価となっている。試みに等価N値を3にした場合には、Case 3の場合にはほぼ等しい沈下量が得られた。

次に、原地盤における一要素(図-2の黒塗り要素)を取り出し、その軸差ひずみ増分を、盛土天端沈下量と最大入力加速度との関係に重ねて図-6に示す。同図より原地盤が緩詰め飽和砂の場合、盛土天端沈下量は、原地盤の軸差ひずみ量と強い相関があることがわかる。一方、原地盤が密詰め飽和砂の場合には、原地盤の変形が小さいため緩詰め地盤でみられるような強い相関は見られない

## 6. まとめ

地震時の盛土の動的挙動について考察するため、飽和砂地盤上の盛土について遠心模型実験を実施した。飽和砂地盤の相対密度と入力加速度を変化させた合計6ケースについて実験を行い、その結果を数

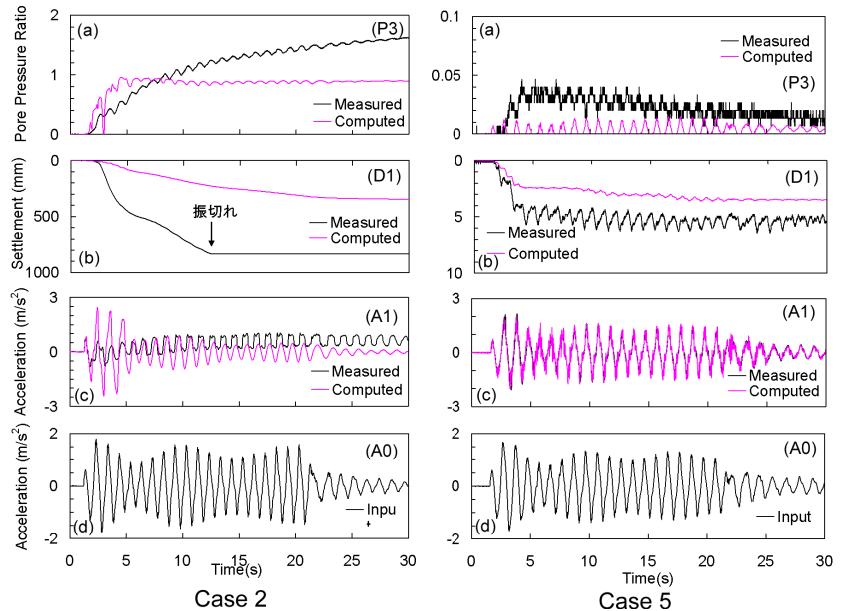


図-4 実験および解析による時刻歴の比較(Case 2 と Case 5)：(a)過剰間隙水圧(P3), (b)天端沈下量(D1), (c)天端水平加速度(A1), (d)入力加速度(A0)

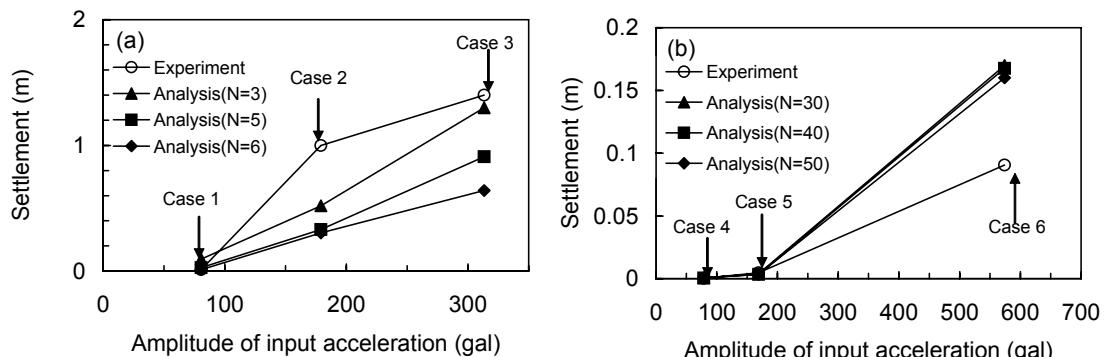


図-5 実験および解析における最大加速度と盛土天端沈下量の関係：(a)飽和緩詰め地盤(Case 1 から 3) (b)飽和密詰め地盤(Case 4 から 6)

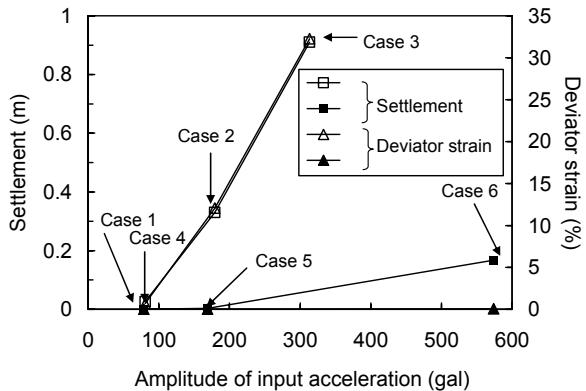


図-6 軸差ひずみ、盛土沈下量と最大加速度との関係

値解析結果と比較し、加振による変形形態、堤体天端の沈下量と入力加速度レベルとの関係、変形のメカニズムについて考察した。

本研究により得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 実験および解析において、原地盤が緩詰め、密詰めに関わらず、入力加速度振幅の増加に伴い、天端沈下量が増加した。しかし、模型実験において、原地盤が緩詰め飽和砂地盤の場合には、沈下量が盛土高の約50%付近で頭打ちになる傾向が見られた。
- 2) 原地盤が緩詰め飽和砂地盤の場合には、液状化により堤体に作用する慣性力が減少し、堤体の自重による沈下が卓越した。一方、液状化が発生しなかった密詰め地盤の場合には、堤体に大きな慣性力が作用し、堤体の法肩部が変形した。
- 3) 液状化が発生した場合の堤体および原地盤の変形形態については、破壊面が明瞭な円弧とはならず、堤体下部の比較的広い範囲の地盤要素が鉛直に圧縮、側方に伸張される形態であった。

#### 謝辞

本研究は、国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所との共同研究の一環として実施したものである。また、五洋建設株式会社の中原知洋氏から模型実験全般に関して有益な助言を頂いた。

ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Matsuo, O.: Damage to river dikes, *Special Issue of Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society*, pp. 235-240, 1996.
- 2) 西本聰: 2. 河川関係施設の被害, 平成15年(2003年)十勝沖地震被害調査報告, 北海道開発土木研究所月報, pp. 7-14, 2003.
- 3) 大塚悟: (2) 盛土崩壊, 平成16年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集, 日本地震工学会他, pp. 47-52, 2004.
- 4) Kokusho, T., Ishizawa, T. and Harada, T.: Energy approach for earthquake induced slope failure evaluation, *The 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering, The 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp. 260-267, 2003.
- 5) 金口義胤、弥勒綾子、大木基裕、澤田亮: 過剰間隙水圧の上昇に伴う盛土挙動に関する実験的検討, 第27回地震工学研究発表会梗概集, pp. 216, 2003.
- 6) Phillips, R. and Byrne, P. M.: CANLEX: Modelling slides due to flow liquefaction, *Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe, and Takemura (eds.)*, pp. 627-632, 1988.
- 7) Koseki, J., Koga, Y. and Takahashi, A.: Liquefaction of sandy ground and settlement of embankments, *Proc. of Centrifuge 94*, pp. 215-220, 1994.
- 8) 風間基樹、稻富隆昌、飯塚栄寿、永吉貴之: 鮫砂地盤上の盛土の地震時安定性に関する遠心模型振動実験, 土木学会論文集, No. 547/III-36, pp. 107-116, 1996.
- 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 1-15, 1992.

(2005.6.16 受付)

## STUDIES ON DYNAMIC BEHAVIOR OF EMBANKMENTS OVER SATURATED SAND DEPOSIT

Tetsuo TOBITA, Susumu IAI, Kyouhei UEDA

Dynamic centrifuge tests under 50 G and effective stress analyses (FLIP) were conducted to study the dynamic behavior of an embankment whose prototype height is 3 m. The embankment made of dry sand was constructed on the saturated sand layer whose relative density was adjusted to either 30% or 70%. Sinusoidal input motions with three different levels of peak acceleration amplitude were given. Objective of the study is to investigate the relationship between the magnitude of settlements and the peak amplitude of input acceleration.