

◆ 報 文 ◆

# 液状化地盤上の道路盛土の耐震対策工法に関する実験

豊田耕一\* 杉田秀樹\*\* 佐々木哲也\*\*\* 石原雅規\*\*\*\*

## 1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として、橋梁等の重要構造物と同様に盛土等の土構造物についても耐震性の確保が求められてきている。しかし、膨大な延長を有する土構造物では耐震対策には多大な費用が必要なことから、より経済的な耐震対策法が求められている。このためには、盛土等の土構造物について構造系全体で耐震性を向上させる耐震対策技術とともに、道路の機能が低下、あるいは損失する程度に基づいて道路性能を評価する限界状態設計法の導入が必要となる。

平地部における道路盛土の被害は、主として基礎地盤が液状化することにより生じており、その形態は沈下、亀裂、すべりがある<sup>1)</sup>。これらの被害と地震時において道路に要求される機能を考慮すると、道路盛土の限界状態は、路面の沈下やすべり、亀裂等の盛土の変形量により定義するのが合理的である。このため、盛土の耐震性の評価および耐震対策工の設計において、盛土の変形状態を精度良く予測することが重要となる。

このような背景から、液状化地盤上の道路盛土を対象として、合理的かつ経済的な耐震対策工法およびその設計法の提案を行うことを目的として、動的遠心載荷模型実験による検討を行った。

本報では、検討結果から明らかになった基礎地盤の液状化による盛土の変形メカニズム、ならびに基礎地盤および盛土の耐震対策の効果について報告する。

## 2. 動的遠心載荷模型実験の概要

### 2.1 無対策盛土の遠心模型実験

基礎地盤の液状化による盛土の変形メカニズムを把握するため、無対策盛土の動的遠心模型実験を行った。実験は、動的遠心力載荷試験装置を用い、振動台に幅150cm、高さ50cm、奥行き30cmの剛土槽を設置し、50G (Gは重力

加速度)の遠心場で実施した。図-1に無対策盛土の実験模型(実験ケース1-1)を示す。本報では、実験の模型寸法、条件、結果等をすべて模型スケールで示す。これを基本ケースとして、表-1に示す液状化層厚、盛土高、盛土幅、地下水位、液状化層相対密度、入力地震動(最大加速度)を実験パラメータにした16ケースを実施した。なお、実験の実施時期により、砂材料や模型作成方法が若干異なることから、その影響を把握するため、基本ケース1-1A、1-1Bを追加実施した。

図-2に実験に用いた入力波を示す。入力波は、周波数50Hz、最大加速度25Gの正弦波11波からなる主要動と約10Gの後続波からなる波とした。計測の配置例(実験ケース1-1)を図-3に示す。計測器による計測は、盛土天端、盛土底面および地盤表面の鉛直変位、盛土および地盤内の加速度、地盤内の間隙水圧について行った。

### 2.2 対策盛土の遠心模型実験

基礎地盤および盛土への耐震対策工の効果把

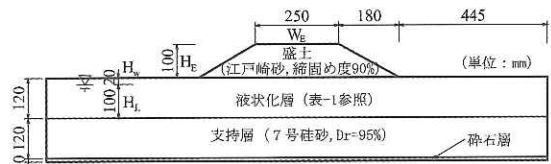


図-1 無対策盛土の実験模型(ケース1-1)

表-1 無対策盛土の実験ケース一覧

実験ケース	液状化層厚 H <sub>l</sub> (mm)	盛土高 H <sub>E</sub> (mm)	盛土幅 W <sub>E</sub> (mm)	地下水位 H <sub>w</sub> (mm)	液状化層		入力波(図-2参照)		
					材料	相対密度 D <sub>r</sub> (%)	波形	最大加速度 A <sub>max</sub> (G)	
1-1	100	100	250	20	江戸崎砂	50	50Hz 正弦波	25.0	
1-2	160								
1-3	40								
1-4	100	150	500	80	7号珪砂	65	50Hz 正弦波	12.5	
1-5		50							125
1-1A		100	100	250	20	7号珪砂	50	50Hz 正弦波	25.0
1-6									
1-7		125	20						
1-8		0	0						
1-1B		150	20						
1-9		50	20						
1-10		150	20						
1-11		150	20						
1-12		150	20						
1-13		150	20						
1-14		50	20						

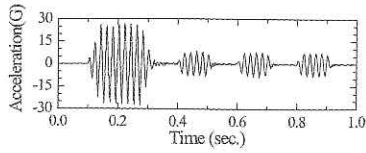


図-2 実験に用いた入力波  
(最大加速度25G)

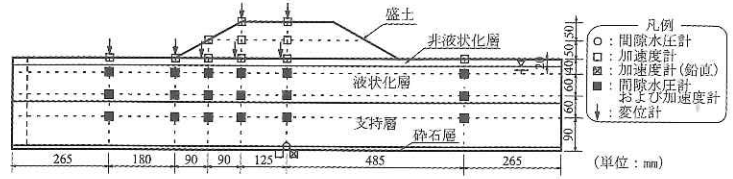


図-3 実験ケース1-1の計測器配置

握するため、対策盛土の動的遠心模型実験を行った。対策盛土の実験モデルおよび実験ケースを図-4および表-2に示す。実験ケースは、無対策盛土の実験ケース1-1を基本として、盛土直下の基礎地盤の対策、盛土の対策および両者の併用を考えた13ケースとした。基礎地盤の対策工法には、締

固め工法、固結工法および矢板締切り工法を選定した。盛土の対策工法には、ジオテキスタイル工法およびアンカー工法<sup>2)</sup>を選定した。締固め層は、実験ケースにより相対密度が90~120%となるように締固めた。固化体はアクリル製であり、液化化層の飽和単位体積重量と等しくなるように調整した。矢板模型はアルミ製であり、土槽底面に剛結し、頭部を鋼製のタイロッドにより接合した。ジオテキスタイル模型は、板厚0.5mmのポリカーボネイト板を加工して作成した<sup>3)</sup>。アンカー模型は直径8mm、長さ80mmのアルミ棒であり、盛土両法面に60mmピッチの千鳥状に打設した<sup>4)</sup>。

表-2 対策盛土の実験ケース一覧

実験ケース	基礎地盤の改良			盛土の改良		比較実験ケース	
	工法	改良幅(mm)	改良深さ(mm)	改良程度Dr(%)	工法		改良範囲
2-1	締固め	610	120	90	—	1-1	
2-1A		610	120	120			
2-2		730	120	100			
3-1	固結	610	120	—	—	—	
3-2		610	80	—			
4-1	—	—	—	—	ジオテキスタイル	盛土底面1段 盛土上部1段 盛土全体5段	
4-2		—	—	—			1-1B
4-3		—	—	—			
5-1	締固め	610	120	100	ジオテキスタイル	盛土底面1段 盛土全体5段	
5-2		610	120	100			1-1
6-1	矢板締切り タイロッド付	610	120	—	—	1-1A	
7-1	—	—	—	—	アンカー	法面	
8-1	—	—	—	—	ジオテキスタイル	盛土上部1段	
					アンカー	法面	

### 3. 実験結果

#### 3.1 無対策盛土の遠心模型実験の結果

##### 3.1.1 変形メカニズムの分析

ここでは、無対策盛土の実験結果に基づき、盛土の変形メカニズムの把握、ならびに変形の要因分析を行う。実験結果の一例として、実験ケース1-2の加振後

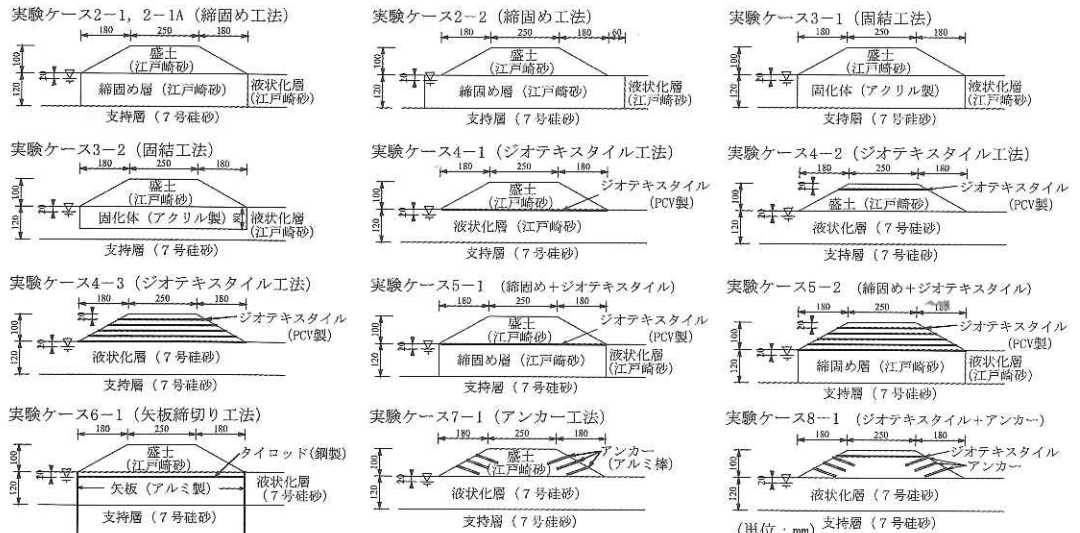


図-4 対策盛土の実験模型

の変形状況を写真-1に示す。実験模型の変形状況の観察により、実験模型では(1)液状化層体積圧縮、(2)液状化層側方変形、(3)盛土体積圧縮、(4)盛土ストレッチングが生じていると考えられる<sup>5)</sup>。これらの変形成分の模式図を図-5に示す。ここで、盛土のストレッチング量とは盛土のせん断変形に伴う盛土の水平方向拡幅量を言う。液状化層の側方変位量は、盛土直下領域の側方変形の最大値とした。図-5に示した変形量について、各実験ケースの結果を以下に示す。

各実験ケースの盛土天端および底面の沈下量を図-6に示す。いずれの実験ケースにおいても、盛土の天端沈下量は底面沈下量よりも大きいことが分かる。同様に、盛土の法肩と法尻のストレッチング量および液状化層の側方変位量を図-7に示す。同図では、伸長方向を正としている。いずれの実験ケースにおいても、法肩と法尻のストレッチング量および側方変位量は伸長方向に発生している。液状化層の盛土直下領域および盛土の体積圧縮量は、実験前後の写真から読み取った。その結果、液状化層には主に地震後の過剰間隙水圧消散によると考えられる体積圧縮がすべての実験ケースにおいて見られた。なお、盛土の体積圧縮は非常に小さかった。

次に、盛土被害の主な指標である盛土天端沈下量における各変形要因の寄与分を図-8に示す。液状化層の体積圧縮による沈下量(S<sub>1</sub>)、液状化層の側方変形による沈下量(S<sub>2</sub>)、盛土の体積圧縮による沈下量(S<sub>3</sub>)、盛土ストレッチングによる沈下量(S<sub>4</sub>)は、各実験ケースの加振前後の写真から、図-5に示した盛土の天端沈下量S<sub>E</sub>、底面沈下量S<sub>F</sub>、盛土および盛土直下の液状化層の面積変化分A<sub>E</sub>、A<sub>F</sub>を求め、以下の式により算出した。

$$S_1 = 2A_F / (W_E + W_F), S_2 = S_F - S_1,$$

$$S_3 = 2A_E / (W_E + W_F), S_4 = S_E - S_F - S_3$$

ここに、W<sub>E</sub>は盛土の天端幅、W<sub>F</sub>は底面幅である。図-8より、盛土沈下の主な要因は液状化層

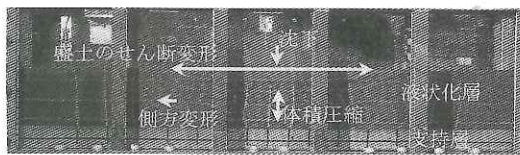


写真-1 遠心模型実験結果の例



図-5 液状化地盤上の盛土の変形

の側方変形と盛土のストレッチングであり、この2つで全体の50~80%を占めている。したがって、盛土の沈下抑制には液状化層側方変位と盛土ストレッチングを抑制する対策工法が有効と考えられる。

### 3.1.2 実験パラメータと変形量の関係

ここでは、無対策盛土の変形特性を把握するために、実験パラメータが各変形量に及ぼす影響を分析する。各実験パラメータと各変形量の関係を図-9に示す。

(1) 液状化層厚 図-9(1)において、側方変

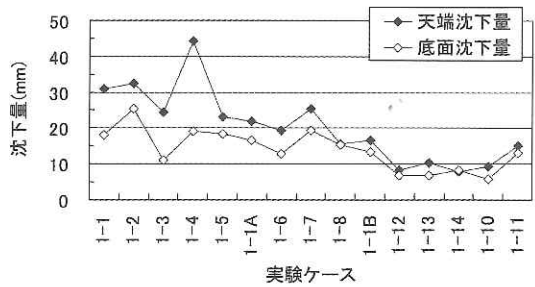


図-6 盛土の沈下量

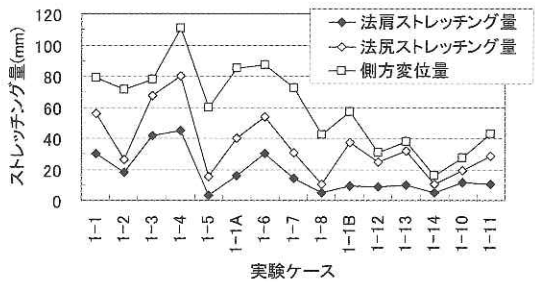


図-7 盛土のストレッチング量と液状化層の側方変位量

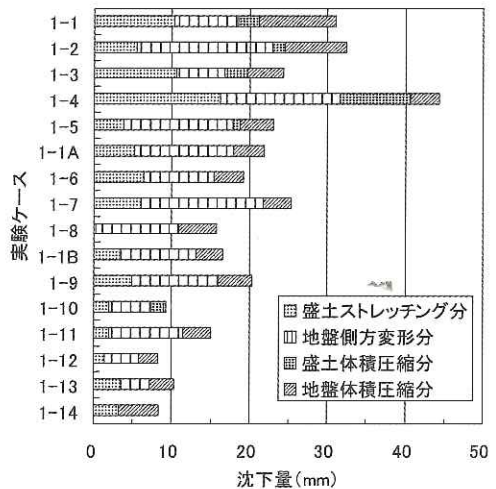


図-8 無対策盛土の天端沈下量中における各変形成分の寄与分

量は、液状化層厚に依らずほぼ同じである。法肩および法尻のストレッチング量は、液状化層が厚いほど小さくなり、両者の差も小さくなる。盛土沈下量は、液状化層が厚いほど天端および底面ともに大きくなるが、ここでも両者の差は小さくなる。これらにより、液状化層が厚くなるほど、盛土はストレッチングせずに、元の形状を保ちつつ沈下すると考えられる。

(2) 盛土高さ 図-9 (2) において、入力地震動が25Gの場合を見ると、盛土が高くなると、側方変位量、法肩および法尻のストレッチング量、盛土天端沈下量は線形的に大きくなる。ただし、底面沈下量はほぼ一定となっている。この傾向は入力地震動が12.5Gの場合でも同様である。

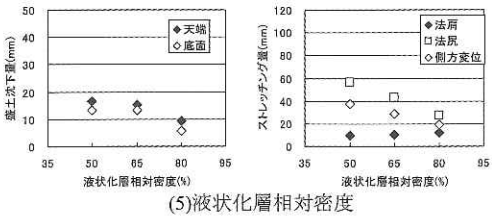
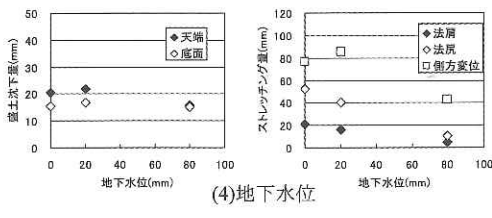
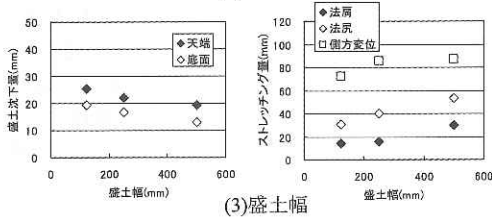
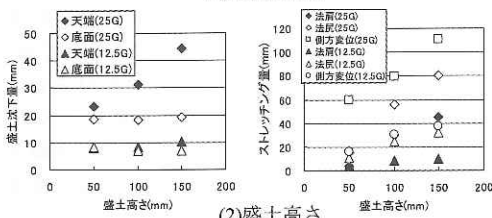
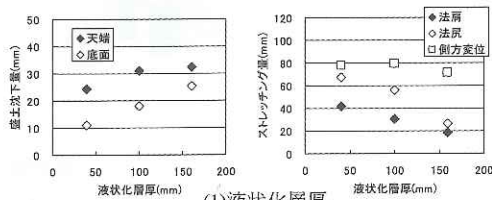


図-9 実験パラメータと変形量の関係

(3) 盛土幅 図-9 (3) より、盛土幅が広がると、法肩と法尻のストレッチング量、および側方変位量はいずれも大きくなりつつ次第に頭打ちする傾向が見られる。反対に盛土沈下量は、天端、底面ともに小さくなる。盛土幅が十分に広いと水平成層地盤となるため、盛土の沈下量は液状化層の体積圧縮分に収束すると考えられる。

(4) 地下水位 図-9 (4) には、地下水位と各変形量の関係を示す。地下水位0mmのケースは、他ケースに比べて入力地震動が若干小さかったため、参考値として扱う。これを考慮すれば、地下水位が低くなると、いずれの変形量も小さくなる傾向にあると考えられる。

(5) 液状化層相対密度 図-9 (5) において、液状化層の相対密度が大きくなると、側方変位量、法尻ストレッチング量、盛土の天端および底面沈下量は小さくなる。法肩ストレッチング量はわずかな増加傾向にある。

(6) 入力地震動 図-9 (2) において、入力地震動の最大加速度が大きくなると、いずれの変形量も大きくなる。

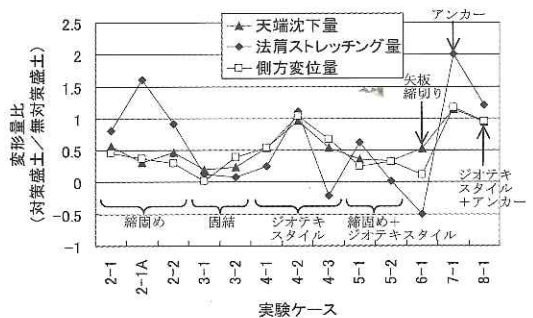
以上のように、無対策盛土の遠心模型実験において、盛土および液状化層の各変形量には、各実験パラメータとの関係性が見られた。

### 3.2 対策盛土の遠心模型実験の結果

対策盛土の実験結果を用いて、各対策の効果を把握する。ここでは、対策効果は無対策ケースに対する変形量の比で評価する。各対策ケースが比較する無対策ケースは、表-2に示している。対策ケースごとの盛土の天端沈下量、法肩ストレッチング量および液状化層の側方変位量の変形量比を図-10に示す。同図では、変形量比が1を下回れば対策効果が認められることとなる。実験前後の写真の標点移動量から算出した各対策ケースの水平ひずみ分布を図-11に示す。同図では、色が濃いほどひずみが大きいことを示す。

#### 3.2.1 盛土沈下抑制効果

盛土の沈下抑制効果を把握するため、盛土天端



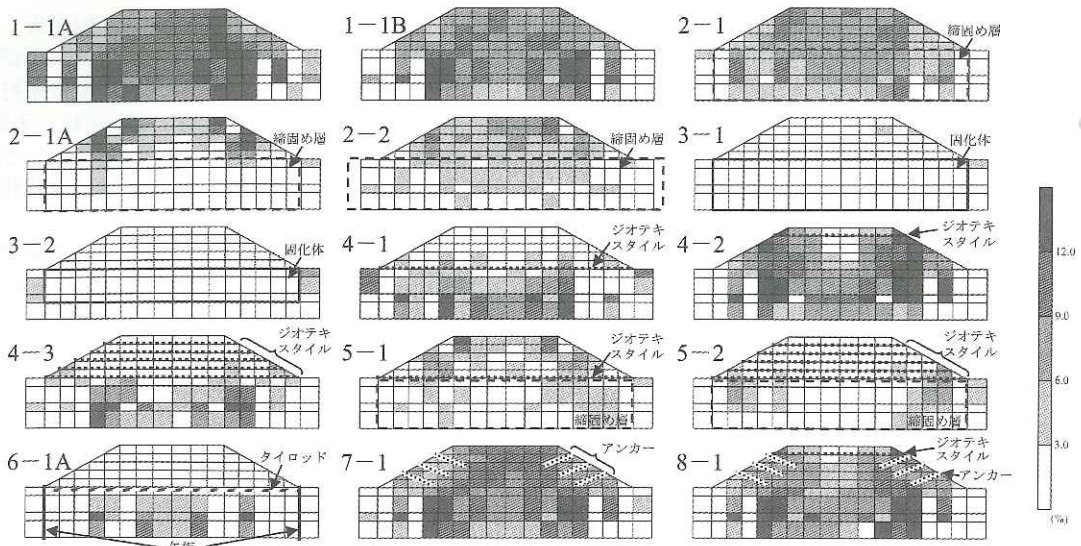


図-11 各対策ケースの水平ひずみ分布

沈下量比に着目する。図-10において、液状化層を対策する締固め工法、固結工法、矢板締切り工法、および固結工法とジオテキスタイル工法を併用した工法では、盛土天端沈下量比が0.2~0.5となっており、盛土沈下の抑制効果が見られる。また、側方変位量比との比較によれば、ほぼ同傾向であることから、盛土天端沈下を抑制するには、側方変形を抑制する対策工法が有効と考えられる。盛土のみの対策工法では、ジオテキスタイルを盛土上面に敷設した4-2、アンカー工法の7-1、これら2つを併用した8-1に盛土沈下の抑制効果は見られないが、ジオテキスタイルを底面もしくは全体に敷設したケース4-1、4-3には盛土沈下の抑制効果が見られる。図-11のひずみ分布において、4-1、4-3は無対策に比べて、盛土のみならず液状化層でもひずみが小さくなっており、結果として盛土の沈下が抑制されることが分かる。

### 3.2.2 盛土の亀裂およびすべりへの対策効果

盛土上方から撮影した様子を写真-2に示す。同写真の盛土天端には、多くのケースに亀裂が見られる。また、一部のケースにはすべりも見られる。そこで、ここでは亀裂やすべりの局所的な変状への対策効果に着目し、その効果が認められる例について考察する。

(1) ケース2-1A、5-2 図-10において、ケース2-1Aは盛土の沈下抑制効果が見られるが、法肩ストレッチングでは見られない。また、図-11では法肩で局所的な大きなひずみが見られ、写真-2ではすべりが生じていることが分かる。これは、液状化層の締固め改良により、盛土直下地盤の液状化による剛性低下がさほど生じないため、盛土

に作用する地震力が減衰せず、盛土の応答が増大したことが原因である<sup>3)</sup>。ケース5-2は、2-1Aに対し盛土全体にジオテキスタイルを敷設したケースであり、図-11ではひずみが小さくなっており、ジオテキスタイルのすべり抑制効果が見られる。

(2) ケース4-2、7-1、8-1 対策ケース4-2、7-1、8-1は、既設盛土への適用を考慮した実験ケースである。ただし、これらのケースでは、盛土の沈下に抑制効果が見られない結果となっている。しかし、写真-2において、8-1は4-2および7-1よりも亀裂発生が軽減されている状況が見られる。図-11のひずみ分布を比較すると、4-2では、ジオテキスタイルが敷設された盛土天端は小さく、法面は大きい。反対に7-1はアンカーの打設領域である法面は小さく、盛土天端は大きい。これらを組み合わせた8-1は、盛土天端および法面ともにある程度小さくなっている。これらから、異なる対策工法の組み合わせにより、盛土の亀裂発生を軽減できることが分かった。

### 4. おわりに

実験結果に基づいた検討により、以下の示す事項が明らかとなった。

(1) 盛土の寸法が大きい場合、液状化層が厚い場合や緩い場合、地下水位が高い場合、地震動が大きい場合には、天端の沈下量は大きくなるため、注意が必要である。

(2) 盛土被害は沈下とストレッチングの両面に着目する必要がある。それらを抑制するには、特に液状化層の側方変形と盛土のストレッチングを抑制する工法が有効である。

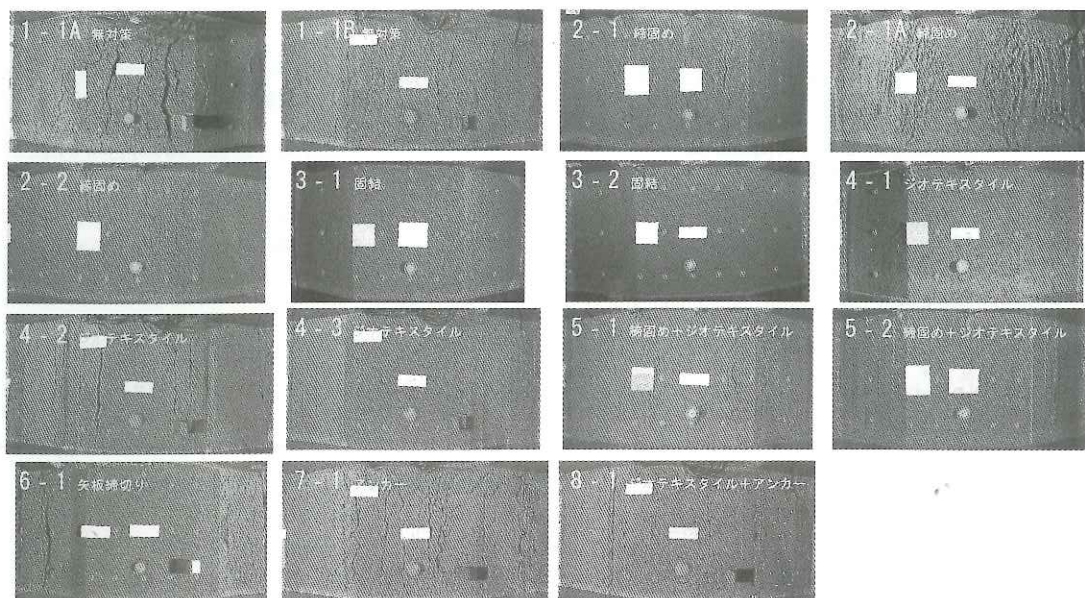


写真-2 各対策ケースの盛土天端における亀裂の発生状況

(3) 盛土の沈下抑制効果は、盛土の対策よりも液状化層の対策の方が大きい。ただし、液状化層の対策のみでは、盛土に亀裂やすべりが生じる場合もあるため、注意が必要である。

(4) ジオテキスタイルを盛土の底面もしくは全体に敷設した対策では、盛土のみの対策でもある程度の盛土の沈下抑制効果が見られた。

(5) 盛土の上面にジオテキスタイル、法面をアンカーで補強した対策では、盛土の沈下抑制効果は期待できないが、亀裂やすべりを抑止する効果は見られた。このような対策は、橋台やカルバートの取付け部以外の沈下をある程度許容でき、大規模な崩壊を防止できれば良い場合等に有効と考えられる。

今後は、基礎地盤と盛土の変形量予測法ならびに耐震対策工の設計法の提案を行う予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧（震災復旧編），pp.53-56、平成14年4月
- 2) 館山 勝、木村英樹、小島謙一、矢崎澄雄、古関潤一、龍岡文夫：大径補強体で補強した既設橋台の模型振動実験、第34回地盤工学研究発表会，pp.1985-1986、平成11年7月
- 3) 黒瀬浩公、田村敬一、佐々木哲也：液状化地盤上の対策盛土の動的遠心模型実験、第58回土木学会年次学術講演会，pp.305-306、平成15年9月
- 4) 豊田耕一、杉田秀樹、石原雅規、佐々木哲也：液状化地盤上の対策盛土の動的遠心模型実験（その2）、第40回地盤工学研究発表会，pp.1401-1402、平成17年7月
- 5) 岡村未対、田本修一、松尾 修：地盤の液状化による盛土沈下対策工（締固め工法）の効果、第36回地盤工学研究発表会，pp.1343-1344、平成13年7月

豊田耕一\*



東電設計株式会社（前 独立行政法人土木研究所耐震グループ振動チーム交流研究員）  
Koichi TOYODA

杉田秀樹\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所耐震グループ振動チーム上席研究員、工博  
Hideki SUGITA

佐々木哲也\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所耐震グループ振動チーム主任研究員  
Tetsuya SASAKI

石原雅規\*\*\*\*



国土交通省四国地方整備局徳島河川国道事務所（前独立行政法人土木研究所耐震グループ振動チーム研究員）  
Masanori ISHIHARA