

Ⅲ-3 液状化地盤上の道路盛土の耐震対策技術に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 14～平 17

担当チーム：振動チーム

研究担当者：杉田 秀樹、佐々木哲也

石原 雅規

【要旨】

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。このため本研究では、液状化地盤上の道路盛土の被害に及ぼす要因を明らかにするとともに、盛土の液状化対策工の適用性を検討し、盛土本体および盛土直下基礎地盤の耐震対策の組み合わせによる耐震対策工の提案を行うことを目的に実施した。その結果、入力波の最大加速度、平均盛土荷重および液状化層厚等を用いた盛土沈下量の簡易予測法を提案するとともに、対策工ごとの盛土変形抑制効果および異なる対策工の組み合わせ効果を明らかにし、対策工の設計法を提案した。

キーワード：道路盛土、地震、液状化、液状化対策、遠心模型実験

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の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¹⁾。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、本研究課題では、液状化地盤上の道路盛土を対象として、動的遠心荷重模型実験による検討を行い、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った。

2. 液状化地盤上の道路盛土の変形メカニズムの解明

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、動的遠心力荷重試験装置を用い、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。表-1 に実験条件を、図-1 に無対策盛土の実験模型 (実験ケース 1-1) をそれぞれ示す。ここでは、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。ケース 1-1 を基本ケースとして、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) を実験パラメータとした計 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。

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 _L (mm)	盛土高 H _B (mm)	盛土幅 W _E (mm)	地下水位 H _w (mm)	液状化層		入力波(図-2参照)	
					材料	相対密度 D _r (%)	波形	最大加速度 A _{max} (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	150							
1-5	50							
1-1A								
1-6								
1-7	500							
1-8	125							
1-1B								
1-9								
1-10								
1-11								
1-12								
1-13	150							
1-14	50							

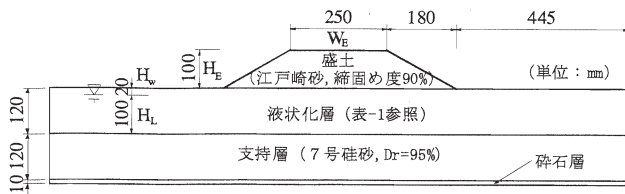


図-1 無対策盛土の実験模型 (ケース 1-1)

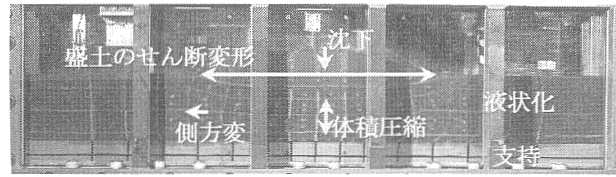


写真-1 遠心模型実験結果の例

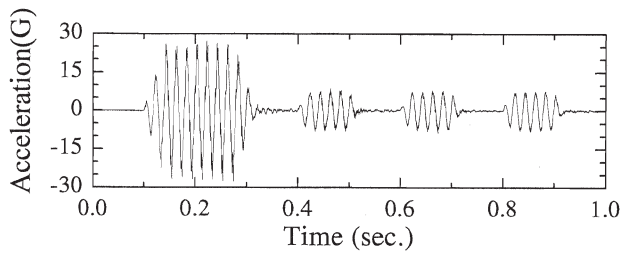


図-2 実験に用いた入力波 (最大加速度 25G)

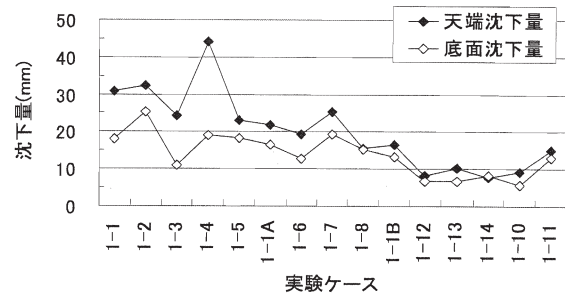


図-5 盛土の沈下量

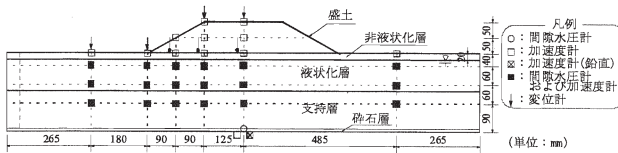


図-3 実験ケース 1-1 の計測器配置

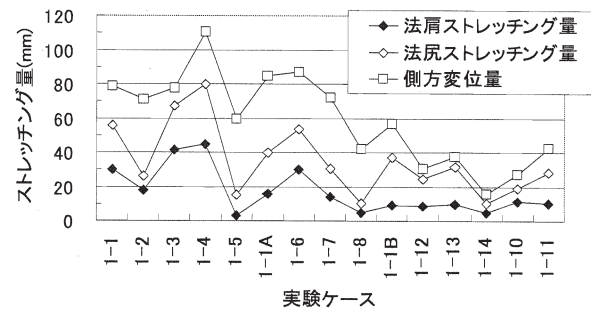


図-6 盛土のストレッチング量と液状化層の側方変位量

2.2 無対策盛土の遠心模型実験の結果

2.2.1 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²⁾。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-4 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-5 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-6 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-7 に示す。液状化層の体積圧縮による沈下量 (S_1)、液状化層の側方変形による沈下量 (S_2)、盛土の体積圧縮による沈下量 (S_3)、盛土ストレッチングによる沈下量 (S_4) は、各実験ケースの加振前後の写真から、図-4 に示した盛土の天端沈下量 S_E 、底面沈下量 S_F 、盛土および盛土直下の液状化層の面積変化分 A_E 、 A_F を求め、以下の式により算出した。

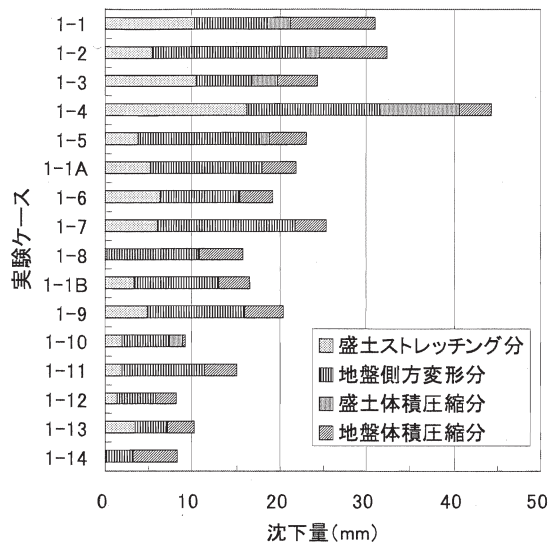


図-7 無対策盛土の天端沈下量中における各変形成分の寄与分

$$S_1=A_F/W, S_2=S_F-S_1, S_3=A_B/W, S_4=S_B-S_F-S_3$$

ここに、 W は盛土底面幅である。図-7より、盛土沈下の主な要因は液状化層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。

2.2.2 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間関係を図-8に示す。

(1) 液状化層厚

図-8(1)において、側方変位量は、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、盛土のストレッチングは小さく、盛土は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-8(2)において、入力加速度が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。この傾向は入力加速度が12.5Gの場合でも同様である。

(3) 盛土幅

図-8(3)より、盛土幅が広がると、法肩と法尻の

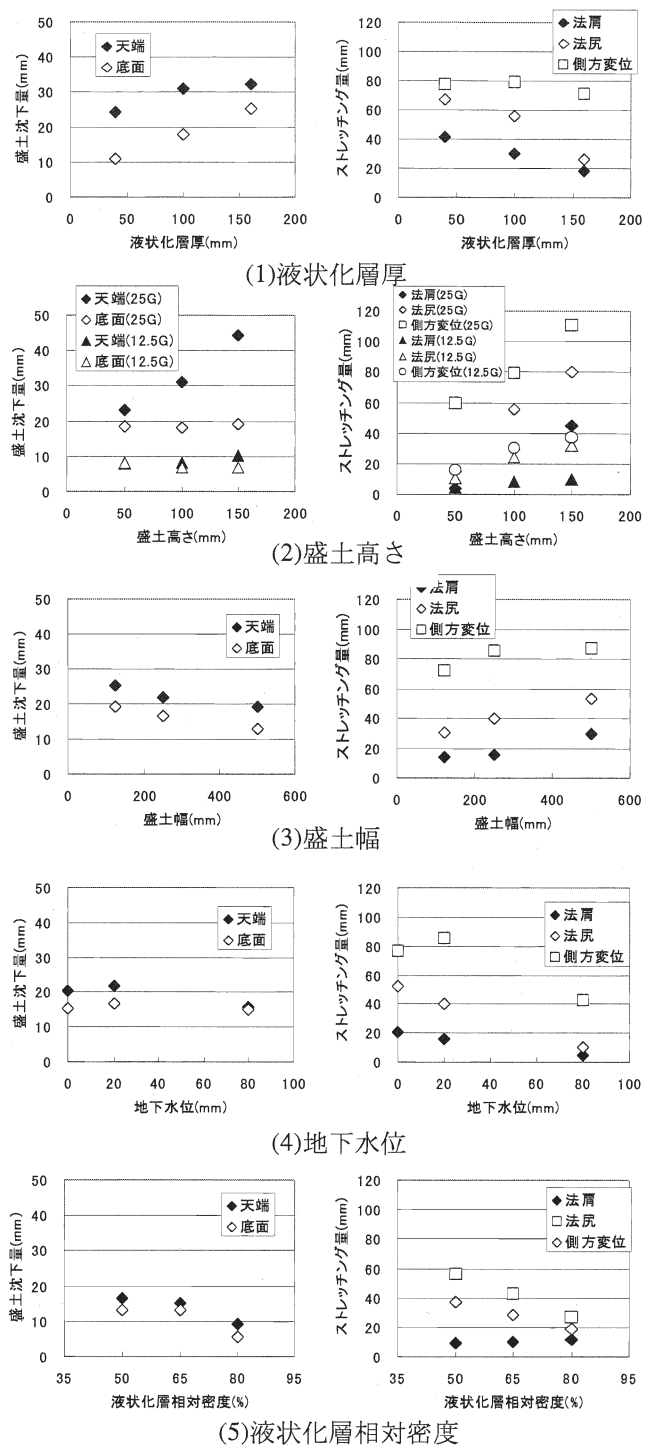


図-8 実験パラメータと変形量の関係

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に近くなるため、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。

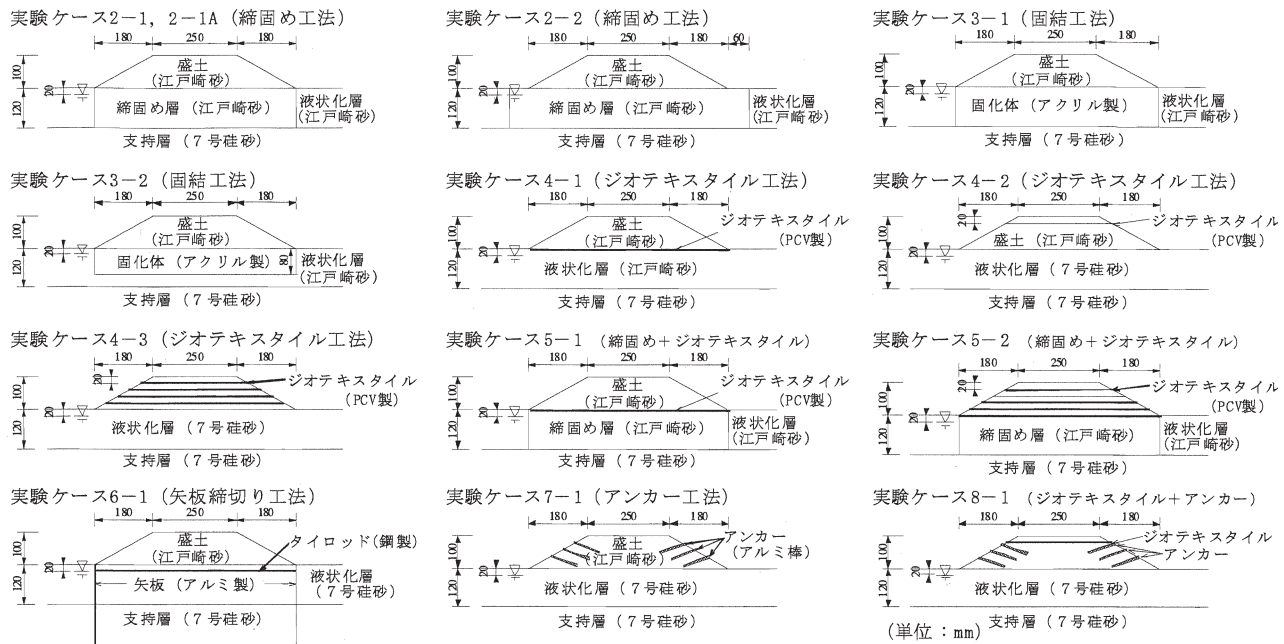


図-9 対策盛土の実験模型

(4) 地下水位

図-8(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) 液状化層の相対密度

図-8(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) 入力加速度

図-8(2)において、入力加速度が大きくなると、いずれの変形量も大きくなる傾向がある。

2.3 まとめ

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。その結果、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、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傾向が見られた。

3. 盛土本体および盛土直下基礎地盤の耐震対策の組み合わせによる耐震対策工の効果に関する検討

3.1 対策盛土の遠心模型実験

基礎地盤および盛土本体への耐震対策工の効果把握

表-2 対策盛土の実験ケース一覧

実験ケース	工法	基礎地盤の改良			盛土の改良		比較実験ケース
		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	1-1B
4-2						盛土上部1段	
4-3						盛土全体5段	
5-1	締固め	610	120	100	ジオテキスタイル	盛土底面1段	1-1
5-2		610	120	100		盛土全体5段	
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	1-1B
8-1	-	-	-	-	ジオテキスタイル	盛土上部1段	
					アンカー	法面	

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-9 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³⁾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、液状化層の飽和単位体積質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

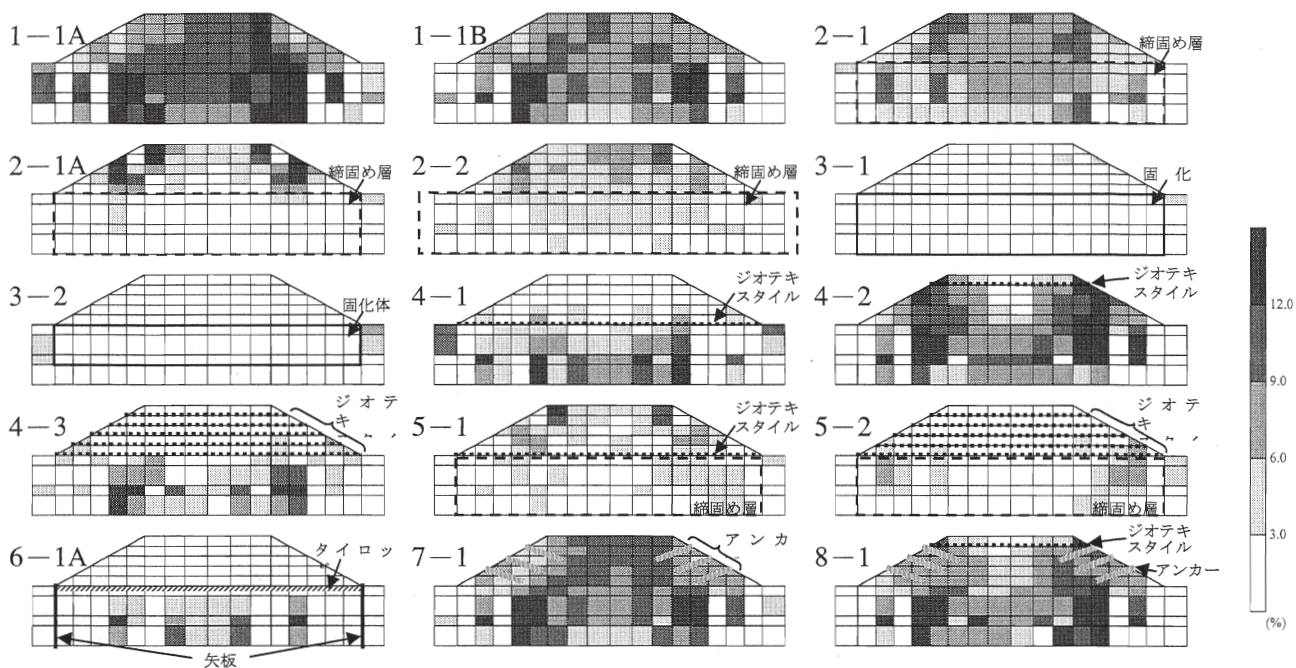


図-11 各対策ケースの水平ひずみ分布

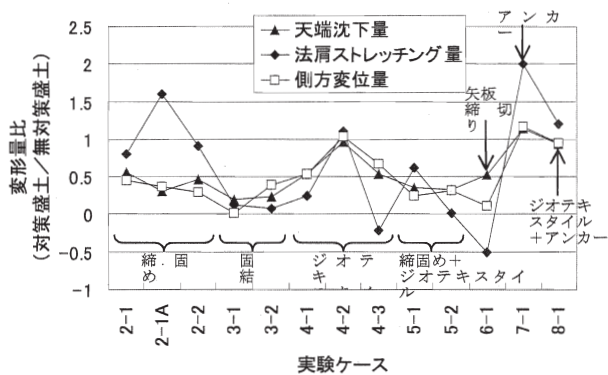


図-10 各対策ケースの変形抑制効果

のポリカーボネイト板を加工して作成した⁴⁾。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⁵⁾。

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。各対策ケースの比較対象とする無対策ケースも、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、盛土天端沈下量比に着目する。図-10において、基礎地盤の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、側方変位量比の比較でも、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は見られるが、法肩ストレッチングの抑制効果は見られない。また、図-11では法肩に局所的な大きなひずみが見られ、写真-2ではのり面にすべりが生じていること

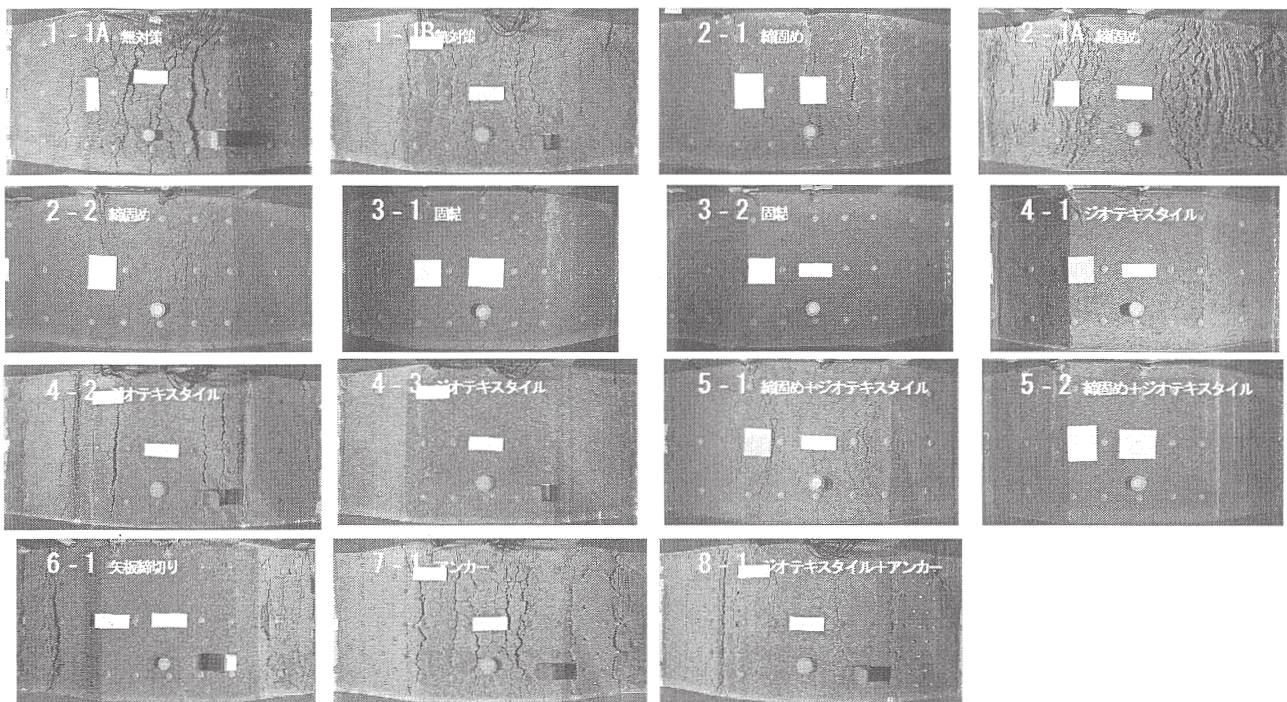


写真-2 各対策ケースの盛土天端における亀裂の発生状況

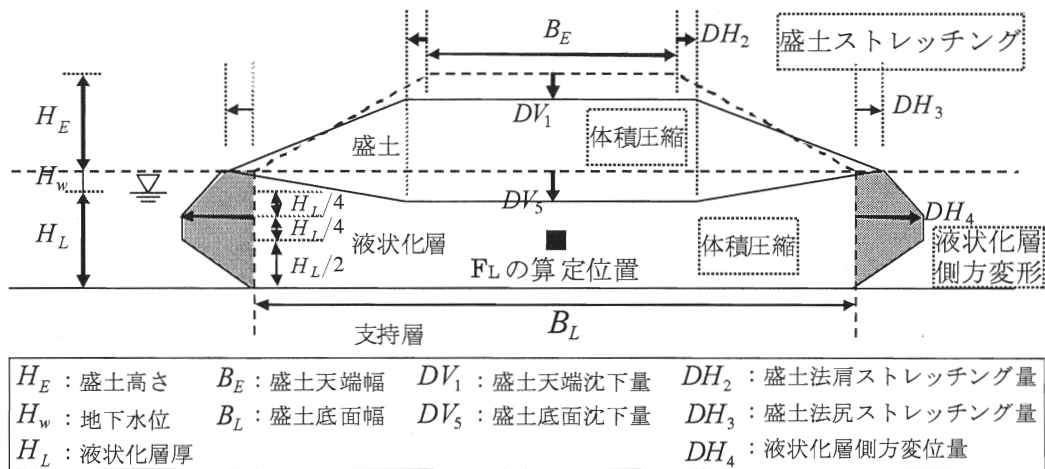


図-12 液状化地盤上の盛土の変形

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、盛土の応答が減衰しないことが原因であると考えられる⁴⁾。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では盛土内のひずみが小さくなっており、ジオテキスタイルののり面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. 盛土沈下予測手法および耐震対策工の設計法

盛土の沈下は、図-4に示したように、(1)基礎地盤体積圧縮、(2)基礎地盤側方変形、(3)盛土ストレッチング、

(4)盛土体積圧縮が要因となって生じる。図-7 に示したように、遠心模型実験における加振前後の変形状況を分析することにより、盛土の主な沈下要因は基礎地盤側方変位と盛土ストレッチングであった。ここでは、遠心模型実験の結果に基づき、盛土天端の簡易沈下予測手法について検討した。

検討にあたり、盛土の変形を表すパラメータを図-12 に示したとおりに定義した。なお、以後の検討においては、実験結果を重力場換算している。液状化地盤上の盛土の沈下量(s)は、盛土の体積圧縮による沈下量は無視できるほど小さいことから、液状化層側方変形、盛土ストレッチングおよび液状化層体積圧縮に起因する沈下量(それぞれ s_1 , s_2 , s_3 とする)の和で表現可能と考えられる。

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (1)$$

ここで、 DH_4 、 DH_3 、 DH_2 に着目する。 DH_4 は、式(2)で定義される平均盛土高さを表すパラメータ q'_E 、図-12 に示した非液状化層が有する液状化層の側方変形に対する変形抑制効果を表す係数 α 、液状化に対する抵抗率 F_L との関係性が見られた。そこで、これらをまとめて $\alpha \cdot q'_E / F_L$ とし、 DH_4 と関係を図-13 に示す。ここで、 α は式(3)により算出した。

$$q'_E = \gamma_{E,t} \cdot A_E / (\gamma_{L,sat} \cdot B_L) \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - \beta \cdot H_w / B_L \quad (3)$$

ここに、 $\gamma_{E,t}$: 盛土の湿潤単位体積重量、 $\gamma_{L,sat}$: 液状化地盤の飽和単位体積重量、 A_E : 盛土断面積である。 F_L は図-12 に示すように、盛土直下の液状化層の中心位置において算出した。その際に用いた繰り返しせん断応力比は、文献6)と同様に、入力加速度が一次元土柱全体に一樣に作用すると仮定し、累積損傷度理論を用いて損傷度係数が20波で等しくなるせん断応力比として求めた。

DH_3 は、図-14 に示すように DH_4 との比で表すと、 $1 - H_L / B_L$, $1 - H_w / B_L$ との相関性が見られた。また、 DH_2 と盛土高さ H_E の比は、 DH_3 に対して図-15 に示す関係が見られた。

図-13、図-14、図-15 のそれぞれについて回帰分析を行い、 DH_4 、 DH_3 、 DH_2 の予測式として式(4)、式(5)、式(6)が得られた。

$$DH_4 = 0.199 \cdot \alpha \cdot q'_E / F_L \quad (4)$$

$$DH_3 / DH_4 = 1.48 \cdot (1 - H_L / B_L)^{3.36} \cdot (1 - H_w / B_L)^{8.51} \quad (5)$$

$$DH_2 / H_E = 0.491 \cdot DH_3 / H_E \quad (6)$$

液状化層の側方変形による沈下量(s_1)は、図-12 に示すような盛土直下の液状化層の変形形状を仮定することにより液状化層の側方変形面積(A_L)を求め、盛土幅 B_L で除すことにより求めた。

$$s_1 = A_L / B_L \quad (7)$$

盛土のストレッチングによる沈下量(s_2)は、盛土本体

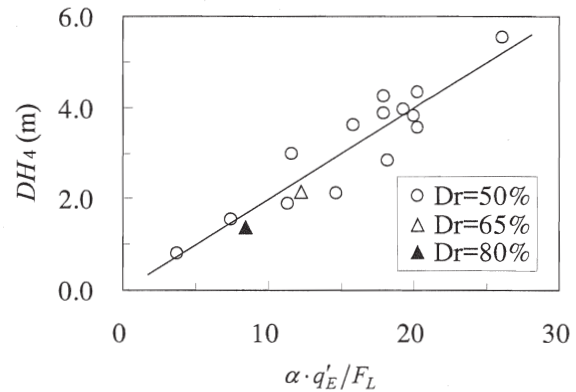


図-13 DH_4 と $\alpha \cdot q'_E / F_L$ の関係

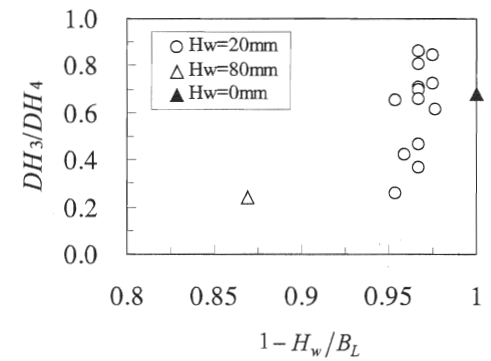
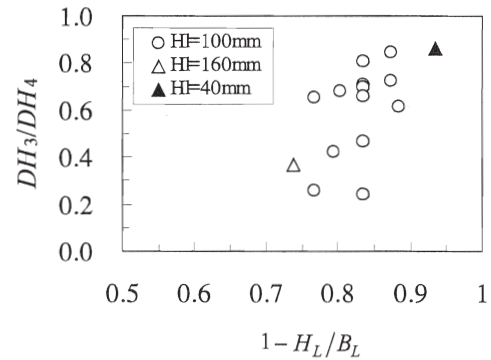


図-14 DH_3 / DH_4 と $1 - H_L / B_L$, $1 - H_w / B_L$ の関係

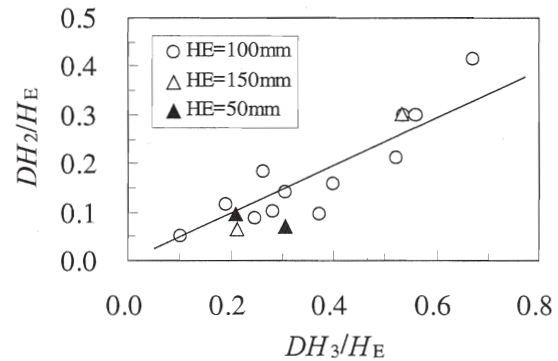


図-15 DH_2 / H_E と DH_3 / H_E の関係

に体積変化が生じることなく図-12 に示すような盛土の変形形状を仮定し、

$$s_2 = H_E \cdot (DH_2 + DH_3) / (B_E + B_L + DH_2 + DH_3) \quad (8)$$

により求めた。

液状化層の体積圧縮による沈下量(s_3)は、図-7 に示した実験結果の平均が 3.8%であることから、いずれのケースにおいても、

$$s_3 = 0.038 \cdot H_L \quad (8)$$

とした。

上記の予測式による盛土天端沈下量の予測値と実験値の比較を図-16 に示す。同図において、予測値は実験値よりも大きめであるものの実験結果の傾向を表していることが分かる。

次に、上記変形予測手法の対策工への適用を検討する。基礎地盤の改良や盛土本体の補強による、側方変位 DH_4 の抑制効果、盛土自体のストレッチング抑制効果を考慮する必要があることから、 DH_4 に対する補正係数 c_4 、 DH_2 に対する補正係数 c_2 を導入すると、式(4)~(6)は次のようになる。

$$DH_4 = 0.199 \cdot c_4 \cdot \alpha \cdot q'_E / F_L \quad (8)$$

$$DH_3 / DH_4 = 1.48 \cdot (1 - H_L / B_L)^{3.36} \cdot (1 - H_w / B_L)^{8.51} \quad (9)$$

$$DH_2 / H_E = 0.491 \cdot c_2 \cdot DH_3 / H_E \quad (10)$$

今回の実験の範囲では、液状化層全てを固化改良した場合は DH_4 を 0 とし、また、矢板締切り工法の場合は液状化層の土圧増分⁷⁾による矢板の水平変位を DH_4 とすればよいと考えられる。また、ジオテキスタイルによる補強の場合、盛土底面のみにジオグリッドを敷設した場合は $c_4=c_2=0.7$ 程度、盛土全体に敷設した場合は $c_1=c_2=0.5$ 程度となった。

以上より、比較的簡便な手法で液状化地盤上の無対策盛土および対策工を施した盛土の沈下量を推定することが可能となるものと考えられる。

5. まとめ

液状化地盤上の道路盛土の被害に及ぼす要因を明らかにするとともに、盛土の液状化対策工の適用性を検討し、盛土本体および盛土直下基礎地盤の耐震対策の組み合わせによる耐震対策工の設計法を検討した。その結果、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傾向がある。
- (2) 盛土被害は道路の交通機能を考慮した場合、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。
- (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

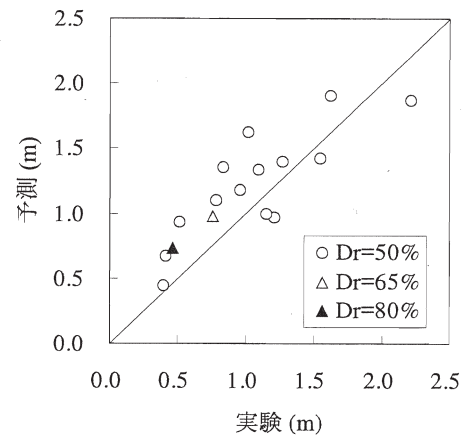


図-16 DV_1 の実験値と予測値の比較

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盛土の亀裂や滑りに対する効果と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さほど期待できないが、盛土天端の亀裂やのり面のすべりを抑止する効果が見られた。このような対策は、橋台やカルバートの取付け部以外のある程度の沈下を許容できる場合には有効な対策であると考えられる。
- (6) 液状化地盤上の道路盛土の動的遠心模型実験の結果をもとに、液状化地盤上の無対策盛土および対策工を施した盛土の簡易沈下予測手法を提案した。

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、2002。
- 2) 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、2001。
- 3) 舘山勝、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、1999。
- 4) 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、2003。
- 5) 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、2005。
- 6) 古賀泰之、松尾修、古関潤一、高橋晃浩、山根行弘: 盛土のある地盤の液状化時の挙動に関する実験的検討、土木研究所資料第3264号、2004。
- 7) 建設省土木研究所他: 液状対策工法設計・施工マニュアル(案)、共同研究報告書第186号、1999。