

縦断線形円滑化の視点による 道路盛土・横断構造物の段差対策の実験的検証

常田賢一¹・鍋島康之²・吉野智紀³・石澤佑介⁴

¹大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²明石工業高等専門学校 助教授 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡679-3)

E-mail: nabesima@akashi.ac.jp

³大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tyosino@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: yisizawa@civil.eng.osaka-u.ac.jp

2004年新潟県中越地震では、道路盛土の横断構造物あるいは橋梁の取付け盛土といった異種構造の境界部において沈下や段差が多数発生し、交通止め等による交通阻害の要因となった。このような盛土の縦断方向の段差対策の取組みの姿勢として、本研究では「縦断線形円滑化」の視点による対策工法の設計概念を提示している。

本研究では道路盛土の横断構造物(ボックスカルバート)における段差対策としての縦断線形円滑化工法の研究開発の第1段階として、3種類の既存工法について模型振動実験を行った。そして、実験結果に基づいて、縦断線形円滑化の視点から各工法の比較、検証を行い、3工法の差異および適用性を明らかにした。

Key Words : Road Embankment, Box culvert, Shaking table test, Longitudinal vertical alignment, Countermeasures

1. はじめに

2004年10月の新潟県中越地震ではボックスカルバートの端部や橋梁の取付け盛土など、盛土と異種構造物との境界部において段差が多数発生し、車両が通行できずに交通障害となった¹⁾。段差は盛土のすべり破壊のような大規模な被害ではないが、車両の走行性能を超える段差は交通の阻害要因となり、道路機能が著しく低下あるいは停止する原因となる。

ここで、段差被害による交通阻害について、車両の走行性といった道路機能に着目すると、盛土がある程度沈下したとしても、段差のように縦断線形が不連続にならずに、連続的、円滑に沈下すれば、車両の走行速度は或る程度は抑制されるものの、通行止めになるような致命的な状態には至らない点である。

この点に着目して、本研究では盛土の縦断方向の段差対策の取組みの姿勢として、「縦断線形円滑化」の視点による対策工法の設計概念を提示している。これは、仮に盛土が沈下しても段差のように縦断線形が明確に不連

続にならないように連続的、円滑に沈下させることにより、車両の走行性を確保しようという概念である。

この縦断線形円滑化工法に関連する既存工法としては、橋梁の取付け盛土における踏掛版あるいは地盤改良等がある²⁾。本研究では、道路盛土の横断構造物(ボックスカルバート)における段差対策に関する縦断線形円滑化工法の研究開発の第1段階として、橋台背面の盛土の段差対策として使用されている踏掛版を基本として、これとジオテキスタイルおよび地盤改良の既存工法との組み合わせあるいは単独の使用について模型振動実験を行った。

そして、実験結果に基づいて、縦断線形円滑化の視点から各工法の比較、検証を行い、3工法の差異および適用性を明らかにした。

2. 設計概念：縦断線形円滑化

道路盛土における縦断方向の段差被害に対する対策の基本姿勢として、本研究では「縦断線形円滑化」の設計概念を提示する。この概念の背景と主旨は以下による。

写真-1は、2004年新潟県中越地震における国道17号の沢部を横断する盛土における段差被害の事例³⁾である。同一箇所での段差規模の差異が比較できる被害事例であり、同写真の左側の車線では約50cmの段差が発生しているが、右側の車線における段差は僅かであることが分かる。前者は言わば「致命的な被害」の規模であり、後者は「軽微な被害」の規模であると言え、この軽微な被害程度であれば、地震直後においてもとりあえず補修はしなくとも、走行速度は落ちるが通行が不可能ということはない。つまり、両者の被害規模とその影響を比較すると、段差被害の発生について、致命的な段差は発生しないようにし、仮に段差が発生したとしても、軽微な被害に止まる水準で対策を講じておけばよい・・・と考えることができる。これは、性能規定型の設計の概念と考えることができるが、本研究ではこの設計概念を「縦断線形円滑化(工法)」と呼ぶことにした。

道路盛土における縦断方向に段差が発生する部位としては、沢の横断部、切土と盛土の境界といった地形あるいは地盤条件の変化部あるいは橋梁の取付け盛土、横断構造物の境界といった構造変化部があるが、地盤条件変化部、橋梁の取付け盛土および横断構造物の境界における縦断線形円滑化の対策工法の概念は、それぞれ図-1、図-2および図-3のように例示できる。各図ともに、境界部分に何らかの対策を施すことにより、段差の発生を抑制、防止して、円滑な縦断線形による沈下を促すことを目指している。

2. 実験方法

(1) 実験ケース

新潟県中越地震における現地調査、関係各所から収集したデータから盛土の被害形態を分類した結果、ボックスカルバートでの段差被害は平坦地盤上の両盛土に被害が集中している²⁾。そこで、アルミ製の箱型土槽（幅72cm×奥行き72cm×高さ35cm）内に、平坦な基礎

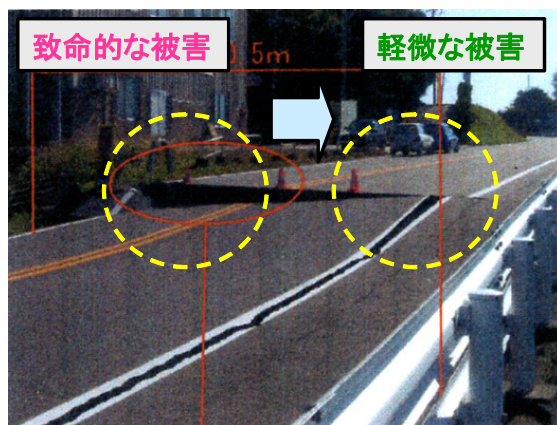


写真-1 致命的な段差と軽微な段差の比較例³⁾

地盤上に木製のカルバート模型と近接する盛土を作成した。実験ケースは表-1に示す通りであり、無補強の基本ケースに対して、踏掛版単体および踏掛版と組み合わせる形で面状補強(ジオテキスタイルを想定)、盛土底部の地盤改良を行ったケースを設定した。図-4に模型盛土の平面図、図-5および図-6にケース3およびケース4の断面図を示す。

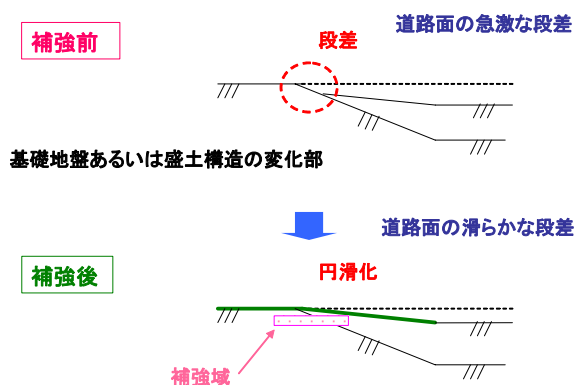


図-1 地盤条件変化部における縦断線形円滑化の概念例

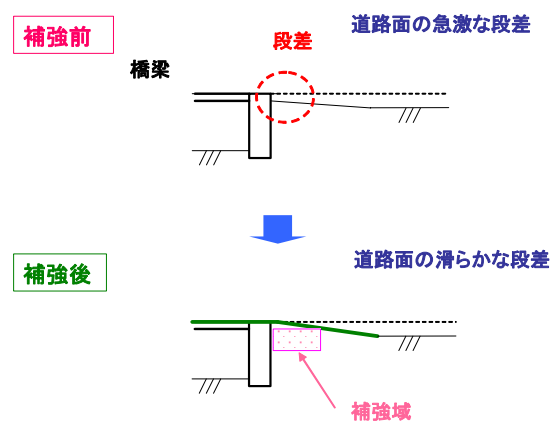


図-2 橋梁の取付け盛土における縦断線形円滑化の概念例

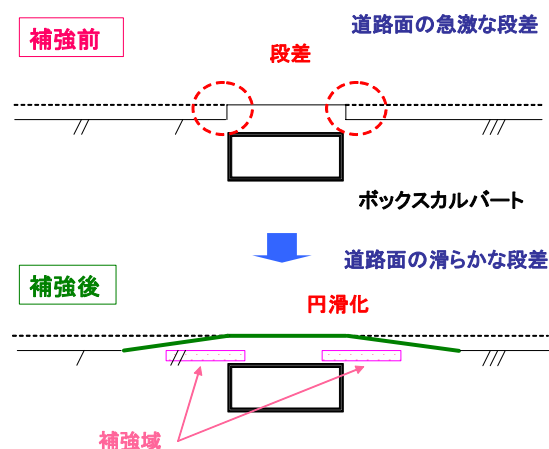


図-3 横断構造物における縦断線形円滑化の概念例

表-1 実験ケース一覧

	補強方法	備考
Case1	基本ケース	無補強
Case2-1	踏掛版の敷設	剛性大, 敷設長150mm
Case2-2	〃	剛性大, 敷設長100mm
Case2-3	〃	剛性中, 敷設長150mm
Case2-4	〃	剛性小, 敷設長150mm
Case3	ジオテキスタイル+ ケース2-3	ジオテキスタイル敷設長(盛土天 端150mm, 120, 90, 60, 盛土底面 30mm)
Case4	地盤改良+ケース2-3	改良域(幅100×高さ30mm)

(2) 模型盛土の作成方法

模型盛土は基礎地盤部と盛土部からなる。基礎地盤は乾燥豊浦砂を相対密度15%で厚さ3cmに作成した。盛土は含水比5%の豊浦砂を湿潤密度 $1.150\text{g}/\text{cm}^3$ になるように一層3cmとして層ごとに密度管理を行いながら5層まで締固めて、高さ15cmの盛土を作成した。その後、盛土法面の勾配が1:1になるように整形した。なお、カルバート上の土かぶりの厚さは3cmである。また、カルバートと土槽壁面は完全に接着し、水平方向、鉛直方向ともにカルバートの移動を拘束した。新潟県中越地震においてはカルバート自体の沈下も生じているが、この実験では補強による縦断線形円滑化効果に着目するため、カルバート自体の移動は許さない構造としている。

(3) 補強方法

ケース2-1～2-4は踏掛版をカルバート上に敷設するケースである。踏掛版の剛性の違いが縦断線形へ与える影響に着目し、相対的な条件の差異として、ケース2-1およびケース2-2は3mm厚の亚克力版(剛性: 大)、ケース2-3では3mm厚の発泡ポリプロピレン製シート(剛性

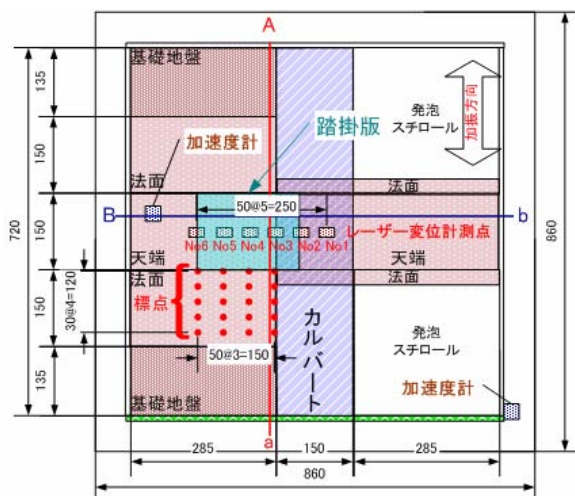
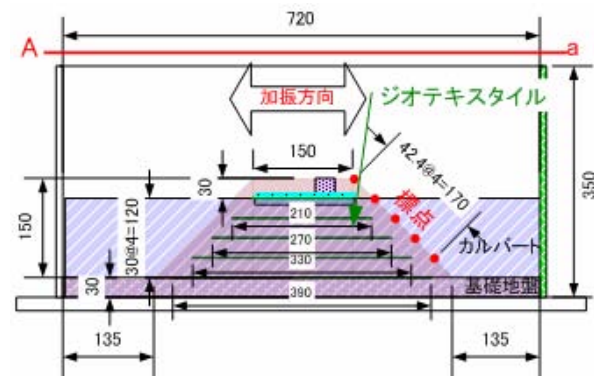
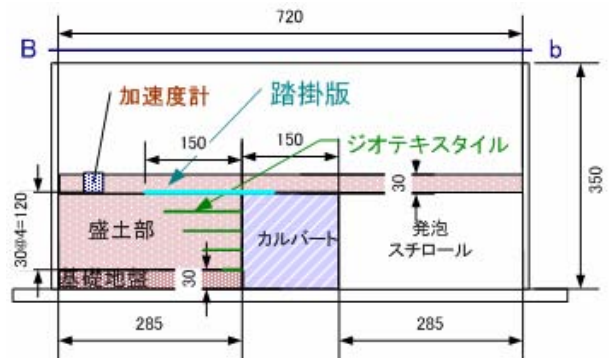


図-4 実験模型の平面図および計測条件

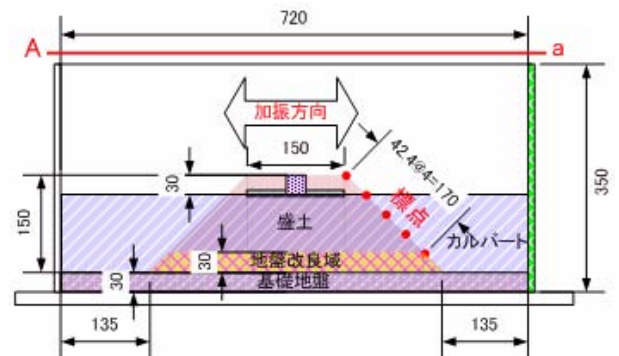


(a) 横断面図 (A-a 断面)

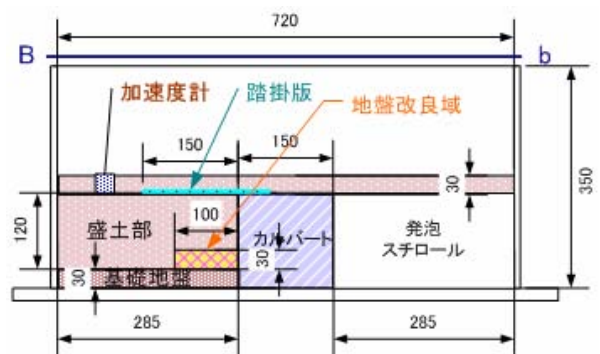


(b) 横断面図 (B-b 断面)

図-5 実験ケース 3



(a) 横断面図 (A-a 断面)



(b) 横断面図 (B-b 断面)

図-6 実験ケース 4

：中)，ケース2-4では10mm厚のウレタンフォーム（剛性：小）を踏掛版模型として使用している．踏掛版は幅150mm(天端長)，敷設長150mm(ケース2-2は100mm)であり，天端下3cmの位置のカルバート上にネジ止めしている．

ケース3は踏掛版とジオテキスタイルを組み合わせるケースである．ジオテキスタイル模型として高密度ポリエチレン製の3mmメッシュ状ネットを使用し，図-5に示すように盛土の層間に5層の敷設を行う．

ケース4は踏掛版と盛土底部の地盤改良を組み合わせるケースである．図-6に示すように，カルバート左側の基礎地盤上の盛土底面部を地盤改良領域として設定し，含水比5%の豊浦砂を湿潤密度 1.365 g/cm^3 で締固め，通常の盛土部より高い密度として作成した．

(4) 加振方法

予備実験を行い，模型盛土に沈下性状が発現するように入力レベルを設定した．本実験では模型盛土の横断方向に，周波数8Hzの正弦波を用いて加速度レベルを段階的に増加させる段階加振を2度行う．

表-2に示すように加速度は第一加振で400，500および630(gal)，第二加振で500，630および710(gal)である．それぞれの加速度において約10秒間加振し，一回の段階加振で約30秒間の加振を行っている．

(5) 計測方法

図-4に示したケース4の模型盛土の平面図を基に計測器の配置を説明する．計測項目は土槽への入力加速度と盛土天端の応答加速度，レーザー変位計による盛土天端の鉛直変位計測，法面に設置した20の標点による斜面の変状計測（水平，鉛直変位）である．レーザー変位計は土槽上部に渡した梁に固定し，模型盛土の天端を50mm間隔で縦断方向に6点（No.1～No.6）の鉛直変位を計測する．なお，測定番号No.3がカルバート端部上になるよう設置位置を調整している．

3. 実験結果の整理方法

(1) 法面変状履歴の観察

模型盛土に対する加振後に法面の標点位置を計測し，その水平変位と鉛直変位より法面の変形状況をコンターマップとして図示する．この図から盛土の圧縮沈下や法面のはらみ出しなどの変形傾向を調べ，補強のメカニズムについて考察を行う．

(2) 加速度応答倍率

図-7に示すように，第一加振で計測された天端の最大応答加速度を，土槽壁面(Base)で計測した最大入力加速度で除することで加速度の応答倍率を求める．

表-2 入力条件

	入力波形（正弦波）			
	加振方向	入力加速度（gal）	周波数	加振時間
第一加振	盛土横断方向	段階加振 400→500→630	8Hz	各10s
第二加振		段階加振 500→630→710		各10s

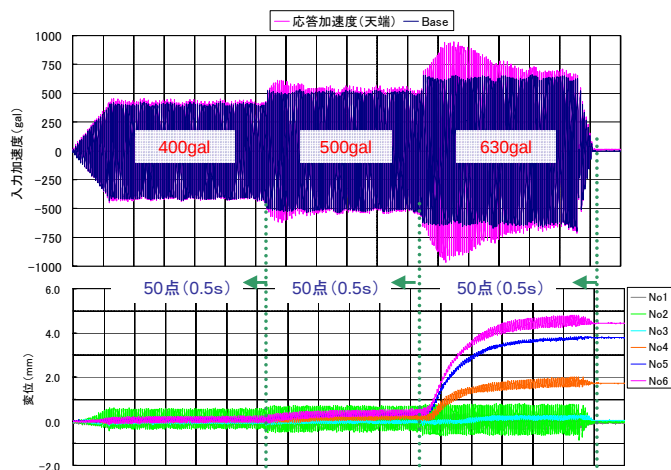


図-7 入力加速度，応答加速度および応答変位の計測例

(3) 各評価指標による整理

図-7に第一加振による加速度と天端における測点No1～6の鉛直変位 B_i の測定結果の例を示す．これは0.01秒刻みで取得したデータを時刻歴で表示した結果であり，この波形データから各加速度の入力後における各測点の鉛直変位量が求まる．実際の実験後の縦断形状は青色の点線（図-8）で示したように凸凹形状になるが，本実験ではそれを簡易的に結果の整理を行うために，橙色の実線（図-9）で示したように測点間を直線で結んだ縦断線形を仮定した．結果を評価する指標として，3つの無次元量の指標，最大縦断線形勾配，相対沈下・盛土高比，縦断沈下面積比を設定した．

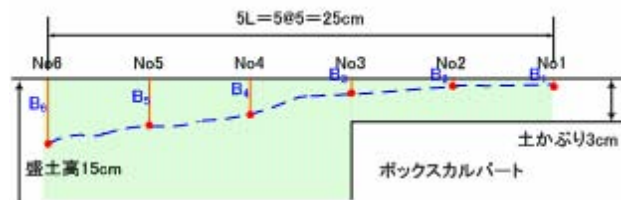


図-8 盛土天端の沈下形状

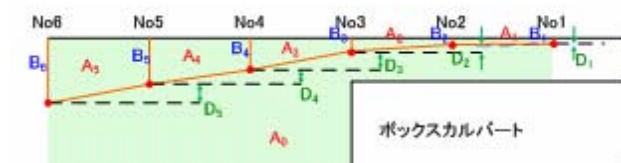


図-9 盛土天端の沈下量のその評価

a) 最大縦断線形勾配

最大縦断線形勾配は、隣り合う測点の加振後の勾配の最大値を用いた無次元量である。図-9 に示すように、隣り合う測点間の鉛直変位差を D_i とし、沈下域長 L を隣り合う測点間の距離として 50mm と定め $D_i/L \sim D_5/L$ を計算し、最も値が大きい場合を最大縦断線形勾配 D/L として定義する。

$$D_i = B_{i+1} - B_i$$

$$D/L = \text{Max}_{i=1,5} (D_i)/L$$

最大縦断線形勾配は地震発生直後の車両の段差走行性能としての供用性を評価する指標である。

b) 相対沈下・盛土高比

相対沈下・盛土高比は、No. 1 から No. 6 の測点における沈下量の最大値と最小値の差である相対沈下 B を、盛土高 H_0 (=15cm) で除することで無次元化した B/H_0 である。

$$B = \text{Max}_{i=1,6} (B_i) - \text{Min}_{i=1,6} (B_i)$$

相対沈下・盛土高比は段差発生状況をマクロに見た場合、縦断線形勾配の D/L であり、縦断線形勾配とも関連するため評価指標としている。

c) 縦断沈下面積比

縦断沈下面積比は、隣り合う測点間（初期位置）と、その測点の沈下位置で囲まれる縦断沈下面積（三角形形状あるいは台形状） $A_1 \sim A_5$ の総和である S_A を、測点（No. 1～No. 6）下の盛土部分の縦断面積 A_0 (=盛土高 15cm×15cm+土かぶり厚 3cm×10cm) で除して無次元化し、縦断沈下面積比として定義する。縦断沈下面積比はカルバート周辺の取付盛土の全体的な沈下量と関連するため、復旧に対する投入資源（すり付けに要する期間・費用）を評価できる指標である。

段階加振後の基本ケースの各評価指標の値を100%として、これに対する補強ケースの各指標の割合を棒グラフとして図示し、補強ケースごとに改善効果を無次元量の指標を用いて定量的に評価する。

4. 実験結果と考察

(1) 法面変状履歴

第一加振中にケース2-2、第二加振中にケース2-2、2-4で踏掛版の敷設位置と同じ高さにある標点が抜け落ちて欠測する標点があるため、図-10で各実験ケースの第一加振後の法面の変状履歴を示し考察を行う。ケース1は法肩で鉛直変位が卓越しているが、この要因として基礎地盤の沈下と盛土の揺すりこみ沈下の複合によるものと考えられる。また、法尻では水平変位が卓越しており、法面のはらみ出しに伴う変形が見られた。一方、踏掛版を敷設したケース2-1～2-4では踏掛版の端部（図-10内で左端から1マス（ケース2-2は2マス）、上端から1マス）の周辺で鉛直変位が集中する点が生じており、ケース1で法肩全体に鉛直変位が発生する傾向とは異なる。さらに、ケース2-1、2-3、2-4では踏掛版の端部直下で鉛直変位が生じない領域を確認できる。これは踏掛版の敷設によって踏掛版上下に盛土を分割し、踏掛版上部の盛土荷重を一部踏掛版が受け持つために、踏掛版端部直下の鉛直変位を抑制したと考えられる。ケース2-3と組み合わせたケース3、ケース4においても水平変位は抑制されており、鉛直変位も踏掛版のみの敷設で生じた鉛直変位が集中する箇所が消えているのが特徴的である。

(2) 天端の段差発生状況

写真-2に示すようにケース1はボックスカルバートの端部上で亀裂とともに段差が発生している。一方、踏

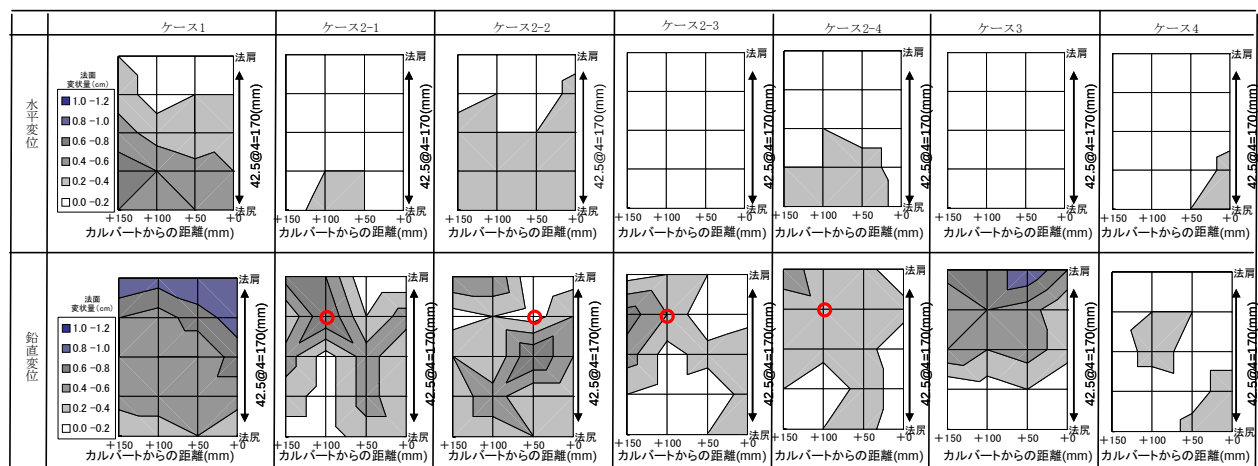


図-10 盛土法面の変形状況（第一加振後）

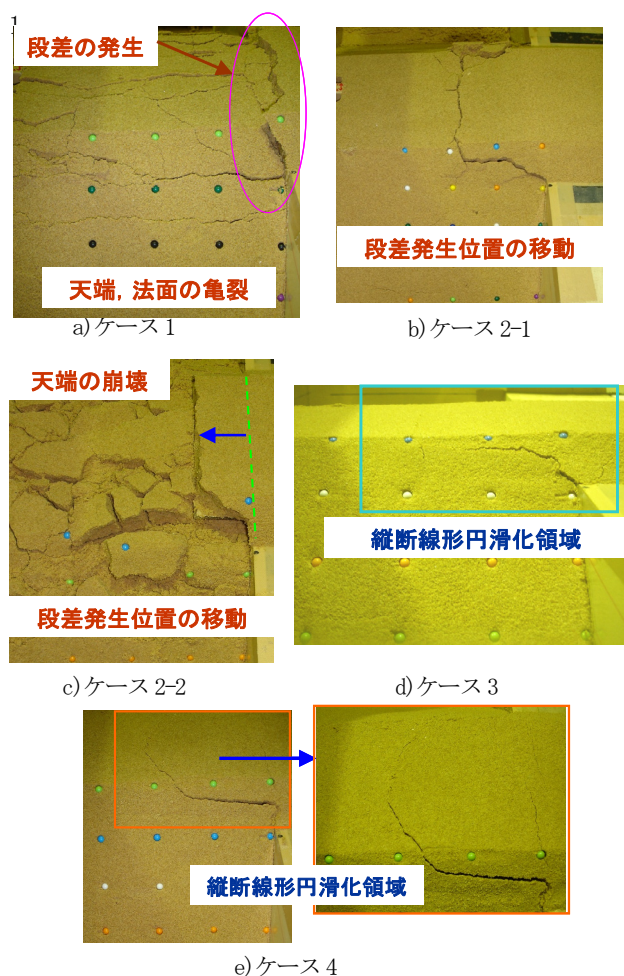


写真-2 段差の発生状況 (第二加振後)

掛版を設置するケース2-1および2-2は、段差の発生位置はカルバート端部から踏掛版端部に移動する。他の補強工法と組み合わせたケース3およびケース4では明確な段差は発生せず、カルバート端部から踏掛版の端部まで滑らかに沈下量が推移する縦断線形の円滑化領域が生じている。

(3) 加速度応答倍率

図-11に第一加振で計測された天端加速度応答倍率を示す。ケース1では1.36倍の応答倍率であったが、補強を行った全てのケースでより低い応答倍率となった。ケース2-1～2-4の踏掛版を敷設しただけでも加速度応答倍率は低減しており、踏掛版の剛性が最も高いケース2-1で応答倍率は最も低い。また剛性が同じケース2-1、2-2ではケース2-2の方が応答倍率は高く、踏掛版の材料が同じ場合、敷設長が短くなると応答倍率は大きくなるのが分かる。また、盛土底面の地盤改良と組み合わせたケース4では、応答加速度の低減の度合いが大きい。これらの加速度応答倍率の低減について、盛

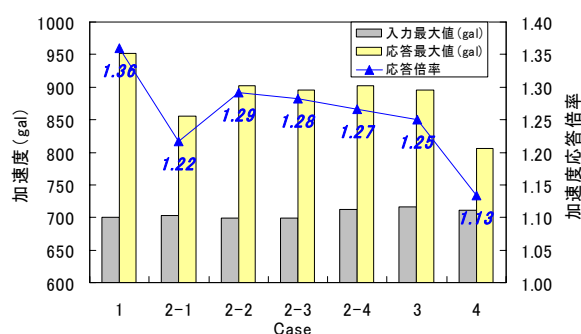
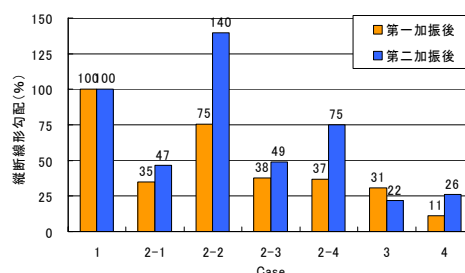
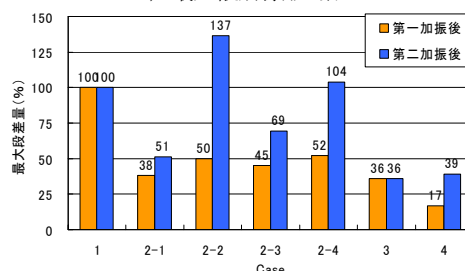


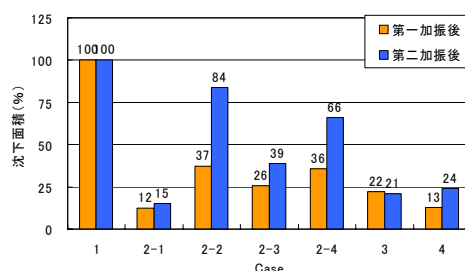
図-11 加速度応答倍率 (第一加振後)



a) 最大縦断線形勾配



b) 相対沈下・盛土高比



c) 縦断沈下面積比

図-12 補強による改善効果

土の固有振動数を計測していないので明言はできないが、対策による盛土の固有振動数の変化が関係していることは考えられるので、今後検討が必要である。

(4) 補強による改善効果

図-12はケース1を基準にして各補強ケースの評価指標の改善割合を示したものである。踏掛版の敷設は全ての評価指標で二回の加振を通じ、ケース2-1、2-3の改善効果が高い。一方、敷設長が短いケース2-2、剛性の小さいケース2-4は改善効果が低く、ケース1よりも

被害が大きくなる可能性を示唆する結果となっている。また、踏掛版と補強を組み合わせたケース3、ケース4では、ジオテキスタイルや地盤改良の効果によって盛土の沈下が抑制されるため、各評価指標で改善効果が見られる。ここで、第一加振および第二加振による差異が小さいケース3およびケース4について、3つの評価指標のいずれにおいても、ケース3では無対策のケース1に対して1/5～1/3のレベルに低減、ケース4では1/10～1/3に低減していることが分かる。

(5) 評価指標の適用性

縦断線形円滑化の効果を定量的に評価するために、最大縦断線形勾配、相対沈下・盛土高比、縦断沈下面積比の3つの無次元量を評価指標として用いたが、図-12の結果によれば、ケース毎の改善効果が各評価指標において類似の傾向を示すことが分かった。これは指標間の差異がなく、どの指標を用いても縦断線形の変化を評価することができること、評価指標としての有効性を示唆していると考えられる。

5. まとめ

道路盛土の地震時の縦断方向の段差対策について、無次元量の評価指標を用いて性能規定の視点に基づく設計概念を提示するとともに、三次元模型振動台実験により3種類の対策工法の補強効果の比較を行った結果、以下の成果が得られた。

1) 無次元量である最大縦断勾配、相対沈下・盛土高比、縦断沈下面積比を用いることにより縦断線形円滑化の効果を定量的に評価できる。

2) 面状補強材の敷設は法面の水平変位を低減するとともに、はらみ出しに伴う沈下を抑制する効果がある。さらに、踏掛版を組み合わせることで縦断線形円滑化効果は向上し、安定した高い改善効果が見込める。

3) 地盤改良を模擬して改良領域を設置するとはらみ出しに伴う沈下や法面の変状を抑制する効果がある。さらに、踏掛版と組み合わせることで縦断線形円滑化効果はさらに高まる。

4) 踏掛版を敷設により天端の加速度応答倍率が変化する。カルバート端部の段差の発生は抑制されるが、踏掛版の端部周辺では段差が生じるようになる。ある程度の剛性と敷設長を有する踏掛版を敷設すると、縦断線形円滑化に大きな効果が得られ、他の補強工法と組み合わせることで、その効果は高まる。

謝辞：本研究は国土交通省道路局新道路技術会議の研究助成「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」により実施されたものである。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 常田賢一・小田和広・鍋島康之・江川裕輔：新潟県中越地震における道路施設の被害水準と道路機能の特性，土木学会第28回地震工学研究発表会，2005.8
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善（株），平成11年10月
- 3) 北陸地方整備局長岡国道事務所の資料

(2007.4.6 受付)

Experimental Study on Seismic Countermeasures for Bumps at Box-culvert of Road Embankment to Smooth Longitudinal Vertical Alignment

Ken-ichi TOKIDA, Yasuyuki NABESHIMA, Tomonori YOSHINO and Yusuke ISHIZAWA

This study proposed reinforcement method to prevent sudden change of road vertical alignment by faulting. It is reasonable to smooth road vertical alignment as the design concept of reinforcement for the road embankment. Based on this design concept, shaking table test of the embankment models carried out to demonstrate smoothing performance of road vertical alignment by some reinforcement methods.

As a result, the embankment model put approach cushion slab on the edge of box culvert showed the high smoothing performance. Moreover, approach cushion slab shows a higher smoothing performance by combining with the geotextile and soil improvement.