

斜面上の道路擁壁の地震対策に関する試験調査

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 19～平 20

担当チーム：土質・振動チーム

研究担当者：杉田秀樹、佐々木哲也、榎本忠夫、
中島進

【要旨】 支持地盤の傾斜の影響を考慮しない擁壁の安定照査法では、地盤の傾斜に伴う支持力の減少を考慮していないために、支持地盤の置き換えや段切りが適切に行われていない場合には、擁壁の安定性を過大に評価することになる。2004 年の新潟県中越地震や 2008 年の岩手・宮城内陸地震では、平地部の擁壁に比べて斜面上擁壁は比較的大きな被害を受けており、地震後に山岳部の道路機能を確保するためには、斜面上擁壁の耐震性を向上させる必要がある。本研究では斜面上擁壁に着目し、斜面上擁壁の耐震性照査手法および耐震診断法の提案を目的に、事例分析、斜面上擁壁の被災モードに関する解析、および動的遠心模型実験を行った。その結果、斜面上擁壁の地震時安定性は、平地の場合に比べ著しく低下し、斜面角度が約 15 度～30 度を超えるとかなり不安定になることを示した。また、擁壁支持地盤の傾斜を考慮した支持力式により支持力の照査を行うことで斜面上擁壁の耐震性を評価できることを示した。

キーワード：斜面上擁壁、地震、遠心模型実験

1. はじめに

1999 年に台湾の集集(Chi-Chi)を震源として発生した集集大地震では、震央である集集と本地震断層の東部が山岳部であったため、山岳道路の被害が顕著だった¹⁾。特に、山岳道路の盛土を支持する擁壁は斜面上に直接建設されていたため、多数の重力式擁壁、もたれ式擁壁が大きな被害を受けた。また、2004 年の新潟県中越地震^{2),5)}や 2008 年の岩手・宮城内陸地震³⁾でも斜面上の擁壁は比較的大きな被害を受けており、地震後に山岳部の道路機能を確保するためには、斜面上擁壁の耐震性の向上を図る必要がある。

道路土工擁壁工指針⁴⁾では、基礎地盤の適切な置き換えを前提として、支持地盤の傾斜による支持力の低減を考慮していないが、被災事例を分析すると、実際には置き換えが十分でない場合も多い。そうした場合には擁壁支持地盤の傾斜に伴う耐震性の低下を適切に評価した手法で擁壁を設計する必要があるが、こうした手法は十分に整備されていない。

以上を背景として、本研究では、斜面上擁壁の耐震性照査手法および耐震診断法の提案を目的に、被災事例の分析、斜面上擁壁の被災モードに関する解析、および動的遠心模型実験を行った。

2. 斜面上擁壁における耐震診断法の検討

2. 1 斜面上擁壁の地震被害事例分析

新潟県中越地震では、切土および盛土によって山肌に建設された山間部の道路の多くが甚大な被害を受けた^{2),5)}。

本研究では、山岳道路擁壁の被災要因を明らかにするとともに耐震診断法における 1 次スクリーニング手法の提案を目的に、新潟県中越地震により被災した擁壁に関する事例の分析を文献 6 のデータを基に行った。文献 6 による擁壁の被災調査対象範囲は、国道 17 号の魚沼市(旧堀之内町) 田戸付近から国道 8 号と合流する長岡市川崎町付近までの約 34 km 区間である。道路施設台帳が現存している擁壁数は対象範囲内に 397 施設あるが、本研究では、これらの調査で得られた事例の中から下記の擁壁被災事例を抽出し分析した。なお、文献 6 では、擁壁の被災度を表-2.1 に示すように「大、中、小、なし」の 4 種類に分割しており、被災度判定は主に災害査定資料や現地写真に基づき行っている。

図-2.1 は、擁壁支持地盤の傾斜角度と被災程度との関係である。ここで対象としている擁壁は、擁壁支持地盤の傾斜角度が判別でき、かつ、上載盛土が無い盛土側の擁壁である。これに該当する擁壁は、石積み、重力式、片持ち梁形式擁壁の 13 擁壁であつ

た。同図では、擁壁支持地盤の傾斜角度と被災度の間に良い相関が得られており、一般的に、斜面勾配が急な場合ほど被災度が大きいことが分かる。特に、擁壁支持地盤の傾斜角度が20度～30度を超えると、擁壁の被災度が大きくなる傾向が得られた。

表-2.1 被災度の定義

被災度	状況
大	○変状量（滑動・沈下・はらみだし）が50 cm 以上の場合 ○擁壁が転倒または倒壊した場合
中	○変状量（滑動・沈下・はらみだし）が10 cm 以上50 cm 未満の場合 ○変状量は小さいが、擁壁が完全にせん断されている場合
小	○変状量（滑動・沈下・はらみだし）が10 cm 未満の場合 ○擁壁に軽微な亀裂や目地の開口が見られる場合
なし	○上記以外の場合

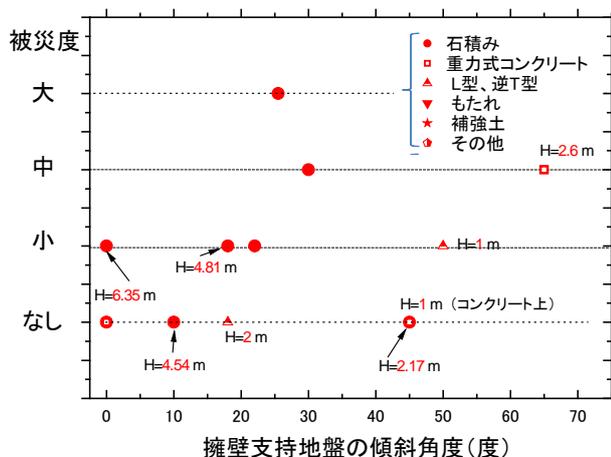


図-2.1 擁壁支持地盤の傾斜角度と被災度の関係

2.2 まとめ

新潟県中越地震により被災した国道17号沿いの擁壁被災事例を基に、擁壁支持地盤の傾斜角度と被災度との関係をまとめた。その結果、擁壁支持地盤の傾斜の増加に伴い擁壁の耐震性が低下し、特に傾斜角度が20度～30度を超えると、擁壁の被災度が深刻になる傾向が得られた。道路防災総点検要領⁷⁾では、擁壁支持地盤の軟弱度合いについては判定することになっているものの、擁壁支持地盤の傾斜角度は点検項目に挙がっていない。本検討の結果、擁

壁支持地盤の傾斜角度は、擁壁の耐震診断法において重要なスクリーニング項目であることが示された。特に、傾斜角度が20度～30度以上である場合には、支持地盤の支持力の評価も含めた詳細な地盤調査が必要である。

3. 斜面上擁壁の耐震上クリティカルになる被災モードに関する検討

3.1 はじめに

前述した被災事例から、擁壁支持地盤の傾斜角度の増大に伴って擁壁の被災度が大きくなる傾向が得られた。このため、より詳細な検討を行う場合や、新規に擁壁を設計する場合には、支持地盤の傾斜に伴う耐震性の低下を適切に考慮した耐震性能照査法が必要となる。しかし、前述の通り現行の擁壁工指針では基礎地盤の適切な置き換えを前提として、擁壁支持地盤の傾斜による支持力の低減を考慮していないため、支持地盤の傾斜の影響を考慮した耐震性照査法を整備する必要がある。

斜面上擁壁の耐震性は、支持地盤の傾斜に伴う支持力の減少によって顕著に低下する事が既往の模型実験から明らかになっている⁸⁾。この事から、斜面上擁壁の場合、支持力破壊が耐震性照査上最もクリティカルになる事を想定して、支持地盤の傾斜に応じて支持力を低下させる手法が耐震性を照査する上で適切であると考えられる。

以上を背景として、支持地盤の傾斜の影響を考慮した支持力評価式⁹⁾を用いた擁壁の耐震性照査法を提案する事を目的とした解析を行った。

3.2 検討方法及び結果

(1) 検討方法

擁壁工指針における耐震設計法に、文献9における支持力評価式を導入し、試解析を実施する事で支持地盤の傾斜に伴う耐震性の低下を考慮する手法の適用性を検証した。

高さ3m～8mの標準断面擁壁¹⁰⁾を想定し、支持地盤の傾斜角度を変化させた試算を実施した。試算では支持力、滑動、転倒、全体安定に関する照査を行い、滑動、転倒、全体安定に関しては擁壁工指針に準じて照査を行った。一方で、支持力に関しては、文献9による支持地盤の傾斜を考慮した支持力評価式（地盤の傾斜角度≠0度の場合）および文献11による擁壁支持地盤の傾斜を考慮していない支

持力評価式（地盤の傾斜角度=0 度の場合）を用いて極限支持力による照査を行った。逆 T 型擁壁に関する照査の模式図を図-3.1 にまとめた。

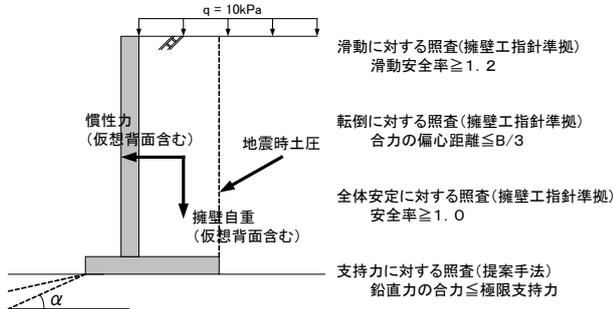


図-3.1 照査法の模式図

(2) 検討結果

図-3.2 に解析結果の一例を示す。図は高さ 5m の逆 T 型擁壁に関する解析結果で、支持・背面地盤の強度定数として内部摩擦角 $\phi=40$ 度を与えた場合の解析結果を示している。図中の縦軸は限界水平震度で、各照査項目において安全率が図-3.1 に示す所定の値となった時点の水平震度である。現行の設計法では、全体安定の限界震度のみが傾斜角度の増大に伴い減少しており、その変化も比較的緩やかである。一方で、提案手法では傾斜角度の増大に伴い支持力の限界震度が顕著に減少し、支持力の照査が最もクリティカルとなった。特に、限界震度の低下は地盤の傾斜角度が 15 度から 30 度に至る段階で顕著になった。これは、過去の模型実験結果において、支持力破壊が発端となって擁壁の変位が顕著に増大し、やがて倒壊に至った事と定性的に対応する結果である。なお、重力式擁壁やもたれ式擁壁など他形式の擁壁も図-3.2 に示した逆 T 型擁壁と同様の傾向を示した。

図-3.2 提案手法による解析結果 (高さ 5m の逆 T 型擁壁)



3. 3 被災事例の解析

上記と同様の手法を用いて斜面上擁壁の被災事例解析を行った。図-3.3 に解析対象とした被災擁壁の一例を示す。解析対象は新潟県中越地震で被災したプレキャスト L 型擁壁で、擁壁前面の地盤に局所的な支持力破壊が発生し、擁壁に沈下、傾斜が発生した事が地震後の調査で判明している。解析に用いた地盤の強度定数は現地調査結果を反映して、支持地盤を $\phi=42$ 度、裏込め地盤を $\phi=35$ 度（礫質土、残留強度相当）に設定した。

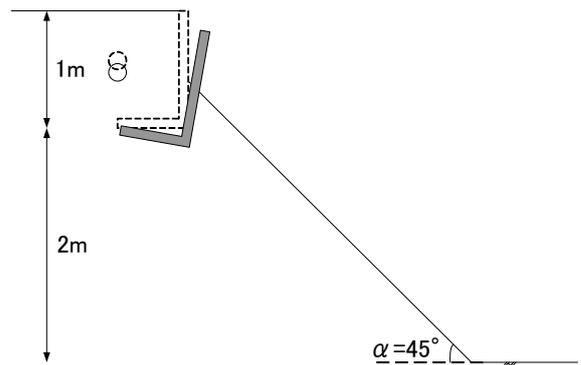


図-3.3 L 型擁壁の被災事例 (新潟県中越地震、一般国道 17 号 魚沼市)

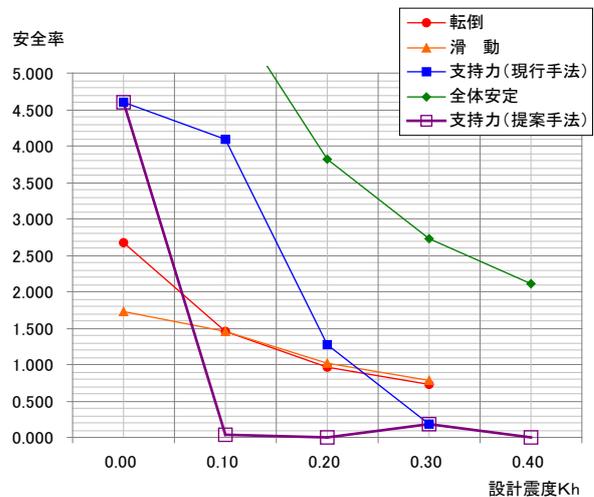


図-3.4 被災事例の解析結果

図-3.4 に解析結果を示す。図中には、擁壁支持地盤の傾斜の影響を考慮しない場合の解析結果も併せて図示した。支持地盤傾斜の影響を考慮しない場合には、滑動、転倒が被災形態として卓越する結果となっており、局所的な支持力破壊によって擁壁に傾斜、沈下が生じていた被災形態と整合しない。一方で地盤の傾斜を考慮した場合には、支持力破壊が最もクリティカルな被災形態となっており、実際の被

災事例と定性的に整合する解析結果となった。この事例では地盤傾斜の影響を考慮した場合に極端に限界震度が低く算出されたが、これは擁壁の根入れを考慮していない点や、裏込め土の強度定数として、残留強度相当の強度設定をしているためだと考えられる。

3. 4 まとめ

標準断面擁壁に対して、擁壁支持地盤の傾斜の影響を考慮した支持力照査法を適用した解析の結果、地盤の傾斜に伴い擁壁の耐震性が著しく低下する傾向を確認した。特に傾斜角度が15度～30度を越えた段階で、限界震度の顕著な低下が見られ、その点では2.1で述べた被災事例の分析結果とも概ね一致する結果だった。また、新潟県中越地震で被災したプレキャストL型擁壁を対象に行った解析の結果、擁壁支持地盤の傾斜を考慮した場合には支持力破壊が最もクリティカルな被災形態となり、実際の被災事例と定性的に整合した。以上の事から、擁壁支持地盤の傾斜を考慮した支持力評価式を擁壁の支持力照査に用いる事で、斜面上擁壁における耐震性の低下を評価できる事が分かった。

4. 斜面上擁壁の地震時安定性検討

4. 1 模型実験の概要

前述の被災事例分析および被災モードに関する解析によれば、斜面角度が15度～30度を越えると比較的顕著に耐震性の低下が生じたが、擁壁の地震時挙動との対応を検証するために、斜面上の逆T型擁壁に関する遠心模型実験を実施した。その結果を基に、擁壁支持地盤の傾斜の影響を考慮した擁壁の安定性評価手法における適用性の検討を行った。

図-4.1に動的遠心模型実験に使用した模型の概要図を示す。豊浦砂を用いて、厚さ110mmの基礎地盤($D_r=90\%$ 、締固め法)、高さ135mmの盛土($D_r=80\%$ 、空中落下法)を作製した。擁壁としてアルミニウム製の逆T型擁壁を用いた。実験は、基礎地盤・盛土ともに空気乾燥状態で行い、遠心加速度は60Gとした。擁壁の変位は、図-4.1に示すように水平2箇所、鉛直1箇所測定した。

各実験ケースの条件を表-4.1に示す。擁壁支持地盤の傾斜角度のみを変化させた計4ケースの実験を行った。本実験におけるステップ加振条件を表-4.2および図-4.2に示す。

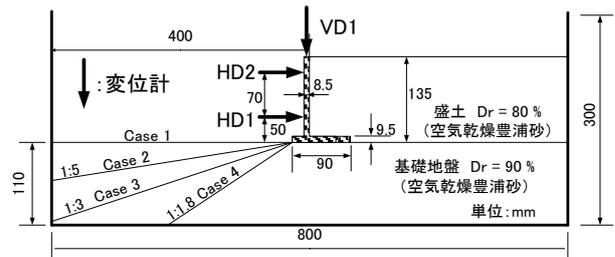


図-4.1 模型の概要

表-4.1 実験条件

Case	相対密度(%)		斜面勾配 (角度°)
	盛土	基礎地盤	
1	80	90	平地
2			1:5 (11.6)
3			1:3 (18.4)
4			1:1.8 (29.1)

表-4.2 加振条件

Step	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
1	不規則波 a ($\alpha_{max}=163gal$)、L1 相当			
2	不規則波 b ($\alpha_{max}=294gal$)			
3	不規則波 b ($\alpha_{max}=490gal$)			
4	不規則波 b ($\alpha_{max}=653gal$)、L2 相当			
5	不規則波 c ($\alpha_{max}=735gal$)、L2 相当			
6	Sin 波 25 波 50Hz ($\alpha_{max}=817gal$)			
7	—	Step 6 に同じ	—	—

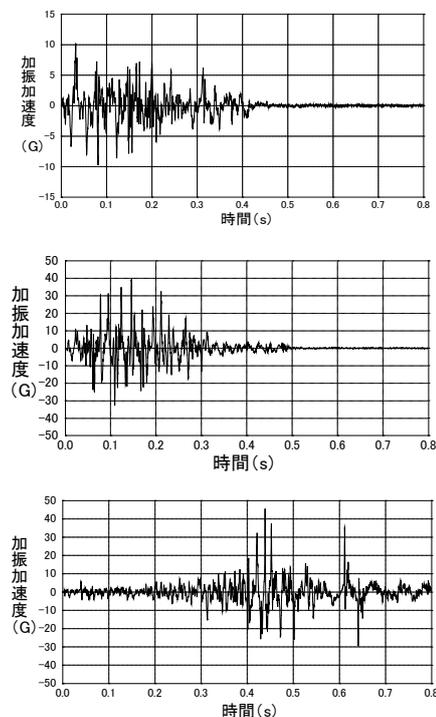


図-4.2 遠心場における不規則波の時刻歴
(上から順に a, b, c)

4. 2 支持力および安全率の算定法

表-4.3 に示した擁壁支持地盤の傾斜角度の影響を考慮した支持力の算定については、文献 9 に示されている斜面上の直接基礎の支持力評価式に準拠した。平地における支持力の算定については、文献 11 に示されている直接基礎の支持力評価式に準拠した。これらの支持力の算定および全体安定に対する常時安全率の算出においては、基礎地盤および盛土材の内部摩擦角を 40 度と仮定した。後述する実験結果の整理で用いた支持力に対する安全率 F_s は、下記の式 (1) より求めた。特に断りがない限り、本論における支持力に対する安全率 F_s は、擁壁支持地盤の傾斜角度の影響を考慮した極限支持力より算出した値である。擁壁の設計上では、常時において支持力に対する安全率 F_s が 3.0 を下回ってはならない⁴⁾。

$$F_s = (\text{極限支持力}) / (\text{地盤反力度の最大値}^4) \quad (1)$$

表-4.3 支持力の算定

Case	極限支持力(kPa)	
	文献 11	文献 9
1	1172	—
2		1057
3		634
4		302

4. 3 安全率と変位の関係

図-4.3 に擁壁の累積沈下量 (VD1) と支持力に対する常時の安全率の関係を示す。両図において、上側の図は Step 1 ~ Step 5 までの関係を、下側の図は Step 6 における関係を示しており、後者には地盤傾斜の影響を考慮せずに常に水平地盤と同等の支持力が確保されると想定した場合の関係も示してある。なお、Case 4 では Step 6 において盛土と基礎地盤を包括する全体的な滑り面が発生し (図-4.6)、変位計がレンジオーバーに至ったため、全実験 Case の Step 6 における変位量・沈下量は、Case 4 で変位計がレンジオーバーする直前の瞬間 (加振開始後 0.2995(s)経過した時) における値である。水平変位量・沈下量ともに、Step 1 ~ Step 5 までは Case 2 と Case 3 の間に優位な差は生じなかった。

各図から分かるように、支持地盤の傾斜の影響を

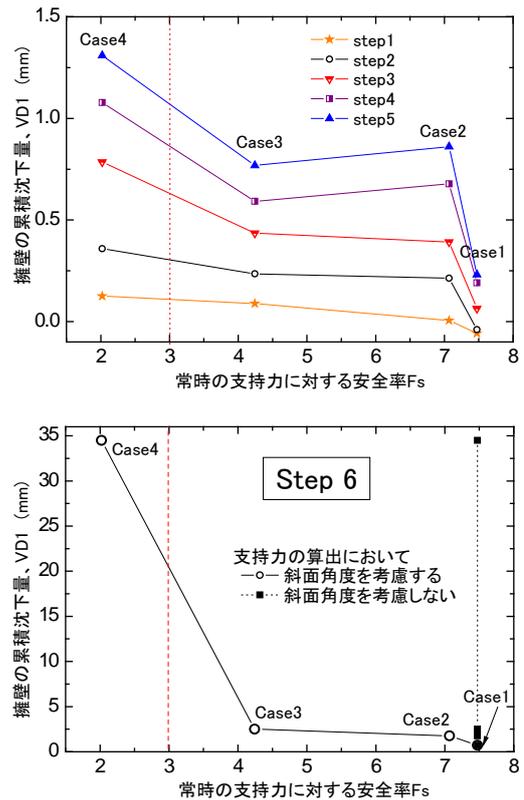


図-4.3 支持力に対する常時の安全率—擁壁の累積沈下量 (VD1) の関係

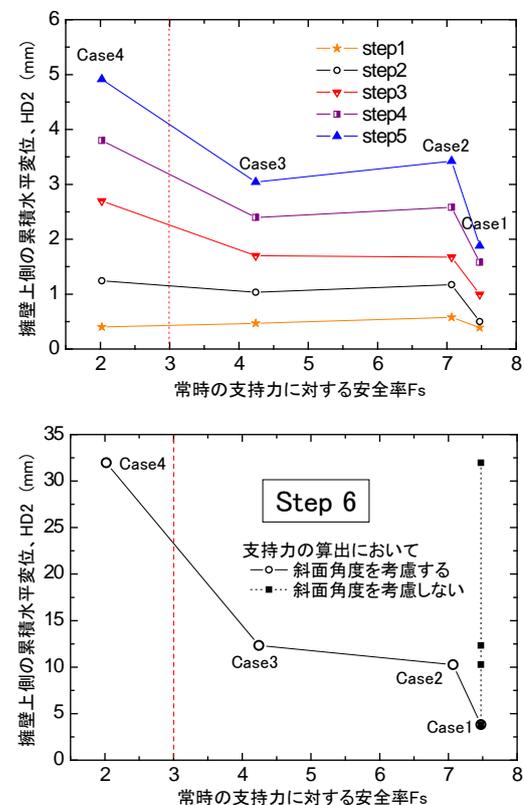


図-4.4 支持力に対する常時の安全率—擁壁上側の累積水平変位量 (HD2) の関係

考慮しない擁壁の安定性照査法では、支持地盤の傾斜角度に関わらず支持力に対する常時の安全率が一定で、擁壁の安定性を過大に評価している。これに対して、斜面上の直接基礎の支持力評価式⁹⁾に準拠し支持力を算出した場合は、変位—安全率関係において良い相関が得られた。

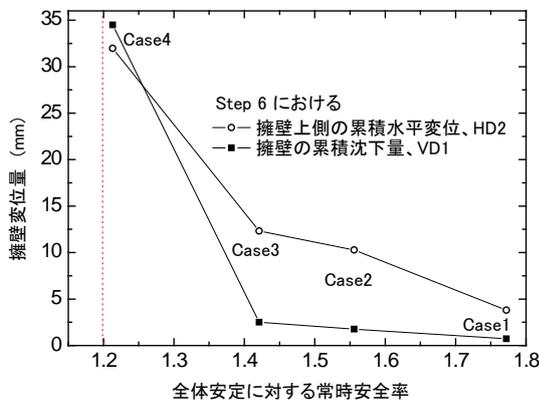


図-4.5 全体安定に対する安全率—擁壁変位の関係

図-4.5 に、Step 6 における擁壁の累積沈下量 (VD1)・擁壁上側の累積水平変位量 (HD2) と全体安定に対する常時の安全率の関係を示す。この関係においても良い相関が得られた。図-4.6 から、斜面角度が急になるにつれて、支持力破壊と同時に円弧すべりによる複合的な破壊が卓越してくる可能性が高いことが読み取れる。

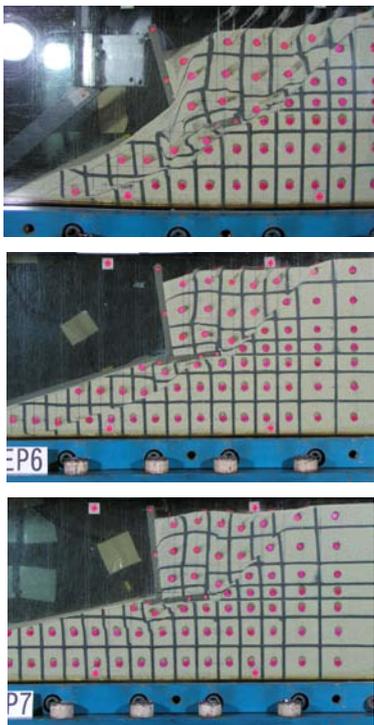


図-4.6 最終加振終了後 (上から、Case 4、3、2)

4. 4 まとめ

斜面上擁壁の地震時安定性は、平地の場合に比べ低下し、擁壁支持地盤の傾斜角度が約 20 度～30 度を超えるとかなり不安定になることが分かった。また、文献 9 による支持地盤の傾斜を考慮した支持力評価式により支持力の照査を行うことで、斜面上擁壁における耐震性の低下を評価できることを示した。

5. まとめ

本研究では斜面上擁壁に着目し、斜面上擁壁の耐震性照査手法および耐震診断法の提案を目的に、事例分析、斜面上擁壁の被災モードに関する解析、および動的遠心模型実験を行った。

- (1) 擁壁支持地盤の傾斜角度は、擁壁の耐震診断法において重要なスクリーニング項目であり、傾斜角度が 20 度～30 度以上である場合には、支持地盤の支持力の評価も含めた詳細な地盤調査が必要である。
- (2) 基礎地盤の傾斜に伴う擁壁の耐震性低下を考慮した解析の結果、特に傾斜角度が 15 度～30 度を越えた段階で限界震度の顕著な低下が見られ、それは上記 (1) の被災事例分析結果とも概ね一致する結果だった。
- (3) 斜面上の逆 T 型擁壁に関する動的遠心模型実験を実施した結果、斜面上擁壁の地震時安定性は、平地の場合に比べ著しく低下し、特に支持地盤の傾斜角度が約 20 度～30 度を超えるとかなり不安定になることが分かった。
- (4) 以上より、斜面上の擁壁の安定性照査では、地盤の傾斜に伴う支持力の減少を考慮する必要がある。
- (5) 文献 9 による支持地盤の傾斜を考慮した支持力評価式により支持力の評価を行うことで、新潟県中越地震で被災した L 型擁壁の被災事例および動的遠心模型実験結果を表現することができた。すなわち、支持地盤の傾斜を考慮した支持力評価式により支持力の照査を行うことで、斜面上擁壁における耐震性の低下を評価できることを示した。

参考文献

- 1) Huang, C.C. and Chen, Y.H.: “Seismic Stability of Soil Retaining Walls Situated on Slope”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,

Vol.13, No.1, pp.45-57, 2004.

- 2) 重松慎哉、岡村未対：「山岳道路盛土擁壁の支持力破壊に対する簡易な耐震点検法の検討」、第43回地盤工学研究発表会、pp.1925-1926、2008
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独) 土木研究所、(独) 建築研究所：「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震被害調査報告」、2008
- 4) (社) 日本道路協会：「道路土工擁壁工指針」、1999
- 5) 岡村未対：「山岳盛土擁壁の簡易な耐震性点検法に関する研究」、土木学会地震工学論文集 Vol.28 CD-ROM、2005
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独) 土木研究所：「平成16年(2004年)新潟県中越地震土木施設災害調査報告」、2006
- 7) (財) 道路保全技術センター：「平成8年度道路防災総点検要領(地震)」、1996
- 8) Kato, N., Huang, C.C., Tateyama, M., Watanabe, K., Koseki, J. and Tatsuoka, F.: “Seismic stability of several types of retaining wall on sand slope”, Proc. of 7th International Conference on Geosynthetics, Vol.1, pp.237-241, 2002.
- 9) (株) 東日本高速道路：「設計要領 第二集 橋梁建設編」、2007
- 10) (社) 全日本建設技術協会：「国土交通省制定土木構造物標準設計第2巻解説書(擁壁類)」、2000
- 11) (社) 日本道路協会：「道路橋示方書IV編下部構造編」、2002

【英文要旨】

In the design practice of retaining walls for road embankment, the reduction of bearing capacity induced by inclination of subsoil has not been taken into account. For this reason, seismic performance of retaining walls on sloped subsoil may have been over-estimated. The damages to retaining walls on sloped subsoil were comparatively severer than those on horizontal subsoil in the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004 and the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008. The seismic performance of retaining walls on sloped subsoil should be improved in order to maintain the function of road in the mountainside after earthquake. The purpose of this research is to develop the technologies of verification of seismic performance and seismic performance evaluation for retaining walls on sloped subsoil. For this purpose, on the stability of retaining walls on slope, 1) analyses of case histories by the Mid Niigata Prefecture Earthquake; and 2) numerical simulation and centrifuge model tests were conducted in the present study. Consequently, the following findings were obtained. 1) the stability of retaining walls on sloped subsoil is reduced as compared with that on horizontal subsoil, which becomes more remarkable when the slope inclination exceeds 15 ~ 30 degree; and 2) verification of seismic performance of retaining walls on sloped subsoil can be conducted by evaluating bearing capacity while taking into account the effect of inclination of subsoil.