

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560597

研究課題名(和文)地震動及び波の複合作用を受けた盛土構造物の危険度評価法の確立

研究課題名(英文)Wave-induced failure of embankments subjected to cyclic loadings and its evaluation

研究代表者

川村 志麻(KAWAMURA, Shima)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90258707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、地震および波の相互作用に対する盛土構造物の安定性に着目して、繰返し載荷および波の侵食作用を受けた複合型の崩壊メカニズムの解明とその危険度評価を行うことを目的としている。近年の地盤災害を考えると、地震動と他の外的要因の影響を複合的に考慮する必要がある、より高度でかつ信頼性の高い評価法を提案することが急務である。ここでは、現有している二次元平面ひずみ模型土槽内に一次元(1自由度)の繰返し振動載荷履歴を与えることが可能な装置を付設し、地震動と波の載荷履歴を与えた模型実験を実施し、実務に適用可能な盛土構造物の耐震・耐波に対する評価手法の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：This study aims at clarifying wave erosion mechanism and failure of volcanic embankments subjected to cyclic loadings. A series of model tests was performed on volcanic embankments using a wave paddle system; especially the effects of initial water content and compaction condition of the embankments on wave erosion mechanisms were described. Based on the test results, the development process of erosion and the evaluation of slope stability of volcanic embankment due to wave erosion were discussed. The main conclusions are as follows; (1) Mechanical behavior of model embankments is changed depending on slope conditions; especially slope failure of volcanic embankments varies with the difference in the initial water content. (2) Volcanic embankments having more than the degree of compaction $D_c=90\%$ have a resistance on slope failure due to wave erosion. (3) Estimation of shear strain after cyclic loadings such as seismic loadings is important for stability of volcanic embankments.

研究分野：地盤工学

キーワード：盛土 地震動 波の侵食 模型実験 斜面安定

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の巨大地震では、人的被害をはじめ、我が国のインフラに未曾有の被害を与え、地盤工学に対しても多くの問題を提起した。今後は、復興に対する迅速な対応が急務であり、国力を挙げて邁進する必要がある。この震災被害を通して、特に東北自動車道が地震津波の被害を低減させた事実(写真-1)は、一方で、土構造物の有用性や重要性を再確認できた事例として高く評価される。今後は、このような自然災害に強い土構造物の必要性が迫られてくると言えよう。しかしながら、地震動も含め、波などの自然外力との複合的な要因に起因する斜面崩壊機構については、多数の影響因子が複雑に絡み合うため、その力学挙動を把握することは極めて難しく、どのような形で崩壊に影響を及ぼしているかを詳細に調べた総合的な研究は立遅れていた。

2. 研究の目的

本研究は、地震および波の相互作用に対する盛土構造物の安定性に着目して、繰返し載荷履歴を受けた盛土構造物の崩壊のメカニズムの解明とその危険度評価法を提案することを目的とする。過去の一連の研究(例えば、基盤研究C, No.21560515)では、波の侵食作用による斜面の崩壊現象が明らかにされ、簡易斜面危険度評価法が提案されている。しかしながら、近年の地盤災害を考えると、地震動と他の外的要因の影響を複合的に考慮する必要があり、より高度かつ信頼性の高い評価法を提案することが急務であると言える。ここでは、現有している二次元平面ひずみ模型土槽内に一次元(1自由度)の繰返し振動載荷履歴を与えることが可能な装置を付設し、地震動と波の載荷履歴を与えた模型実験を実施し、実務に適用可能な盛土構造物の耐震・耐波に対する評価手法の検討を行った。

3. 研究の方法

本研究では上記の目的を達成するため、以下の項目に検討を加えて、研究を遂行した。
 (1)新たに二次元平面ひずみ模型土槽用一次元振動載荷装置を試作し、実物大盛土の土質条件(雑誌論文(1))を基本とした模型斜面において振動載荷実験を行い、耐震性能を把握した。用いた試料は、実物大盛土で使用した北海道火山灰質粗粒土の代表的な試料である、支笏軽石流堆積物(駒岡火山灰土)である。
 (2)現有の造波装置を用いた波浪載荷実験を実施し、同一盛土条件下の耐波性能と波の侵食に起因する崩壊現象を把握した。
 (3)地震動のような繰返し載荷を受けた後に、波荷重を与え、振動履歴後の波の侵食崩壊の特徴を把握した。
 得られた結果を総合し、盛土構造物の耐震・耐波性能評価ならびに安定性評価法を提案した。



写真-1 2011年東北地方太平洋沖地震の津波被害の状況 (NEXCO 総研提供)

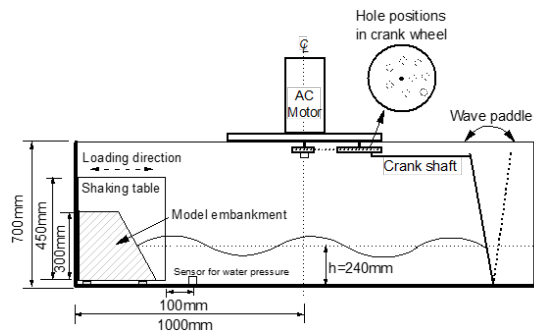


図-1 二次元平面ひずみ模型土槽装置の概略

4. 研究成果

はじめに、行った実験の概要を示す。試験装置の全体図を図-1に示す(雑誌論文(2)-(5))。用いた二次元平面ひずみ模型土槽の内寸法は、幅2000mm、高さ700mm、奥行き600mmであり、これに試作した一次元振動載荷装置(振動台の大きさ:長さ400mm、高さ450mm、奥行き580mm)を付設した。前面には厚さ20mmの強化ガラスが設置され、斜面の変形挙動が観察できるようになっている。振動載荷は油圧シリンダーを用いたコンピュータ制御により、最大荷重150kg、最大振幅±50mm、周波数0.05Hz~5.0Hzの規則波(正弦波)を与えることが可能になっている。なお、詳細は雑誌論文(2),(3)に詳しい。一方、造波装置ではACモーターの回転数とクランクシャフトの長さを制御・調整することにより、任意の波の周期と波高が設定できるようになっている。造波可能な波の周波数は0.05Hz~1.0Hzである(雑誌論文(5))。

本研究では斜面高と水深の比が一連の研究結果(雑誌論文(5))と同程度になるように水深をh=240mm、波浪周波数を0.32Hzとして与えている。用いた試料は、駒岡火山灰土($\rho_s=2.47\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.120\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=0.759\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.27\text{mm}$, $U_c=46$, $F_c=35.2\sim 42.6\%$)である。ここでは、盛土の締固め度Dc=85%を基準とし、Dcが90%と80%になるように模型斜面を作製した(図-2参照、なお、乾燥密度の変動は5%以内である)。また、初期含水比は最適含水比を境界とし、それよりも低

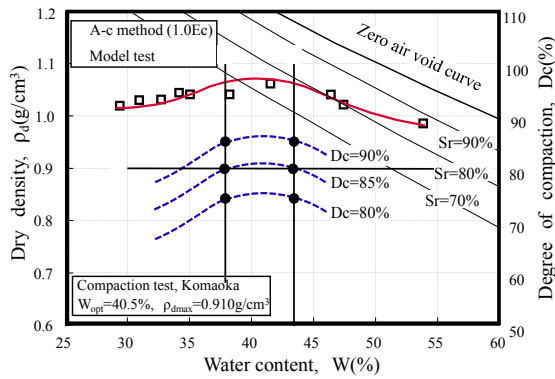


図-2 締めめ曲線と試験ケース

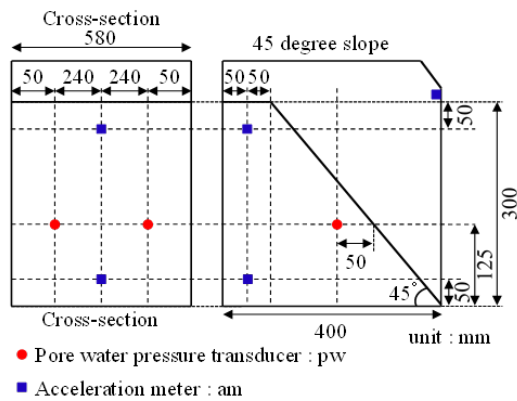


図-3 模型実験の計器配置図

い含水比と高い含水比の2種類の含水比を対象にした。試験ケースを図-2中の ~ に示す。実験では、加速度計(3個)、間隙水圧計(2個)を設置し(図-3参照)、加速度応答、間隙水圧挙動を把握している。また、本研究では斜面作製時に挿入した6本の風糸の変位から算出したせん断ひずみ γ の平均が4~6%になった時点をも斜面崩壊と定義した。なお、模型と実物のスケール比は1/5としている。

模型試験では、(1)振動载荷実験、(2)波の繰返し载荷実験、あらかじめ20回の繰返し振動载荷履歴を与え、間隙水圧の消散が確認された後に造波試験を開始した、(3)振動-波の繰返し载荷実験の3種類を実施した。(3)の実験では、振動载荷履歴の影響が模型斜面に与える影響を定量的に評価するために、せん断ひずみが $\gamma=1, 2, 3, 4\sim 6\%$ になる入力加速度を予め把握し、その入力加速度を与えた実験を実施している。

上記の一連の研究において得られた結論を総括すると、次のようになる。

(1) 振動载荷実験による結果と考察

図-4は、締めめ度 $D_c=85\%$ の盛土における振動载荷試験の応答加速度(赤:天端部(A点), 緑:斜面底部(B点), 青:振動台(C点))を示したものである。図中には応答加速度の最大値を実線で示している。図より、各地点の位相差は確認されないが、応答加速

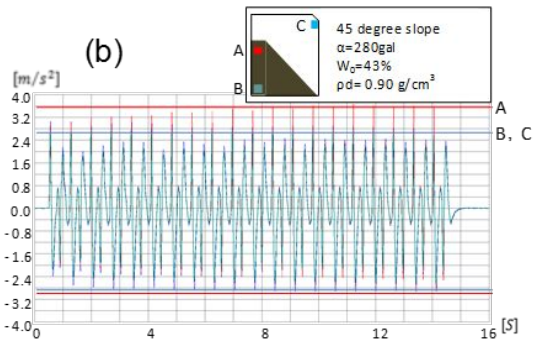
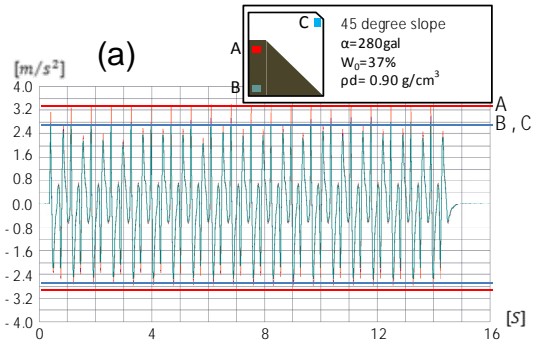


図-4 $D_c=85\%$ の盛土の加速度応答(280galのケース): (a) $w_0=37\%$, (b) $w_0=43\%$

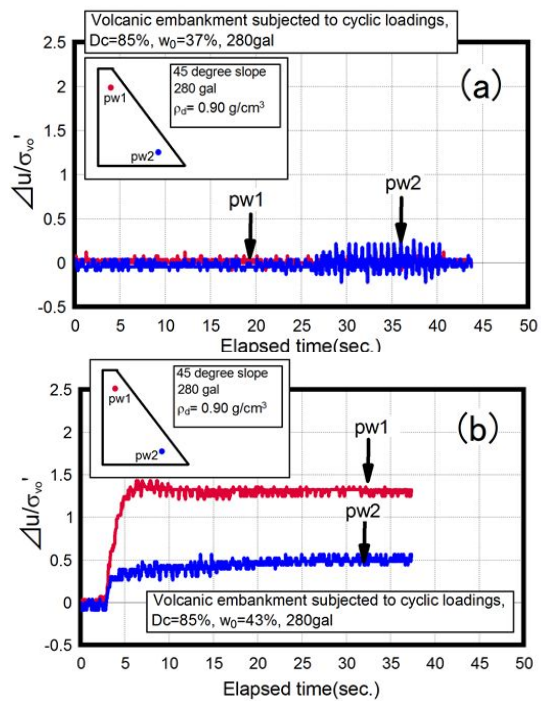


図-5 過剰間隙水圧挙動(280galのケース): (a) $w_0=37\%$, (b) $w_0=43\%$

度値に大きな変化が現れていることがわかる。特に天端部が顕著である。他の試験ケースにおいても、入力加速度の増加に伴い天端部の応答加速度が増加する現象が確認されている。この理由として、後述する過剰間隙水圧の増加に伴う天端部の軟化が原因と考えられる(図-5参照)。実際に、入力加速度

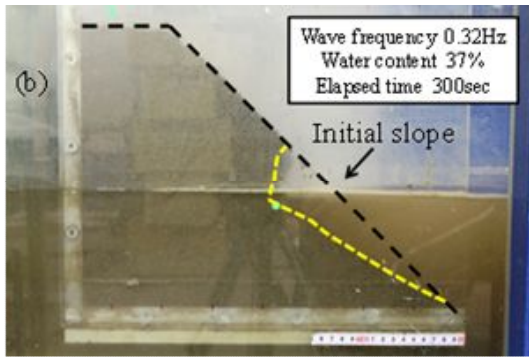
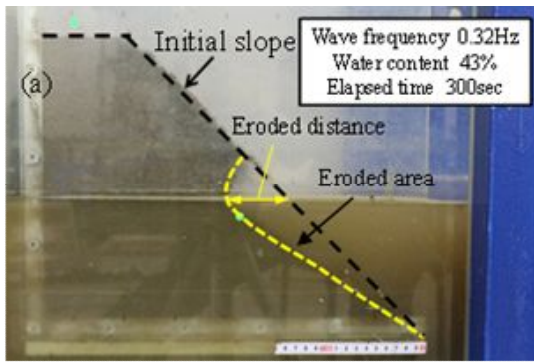


写真-2 Dc=85%の盛土における波の侵食状況：(a) $w_0=43\%$, (b) $w_0=37\%$

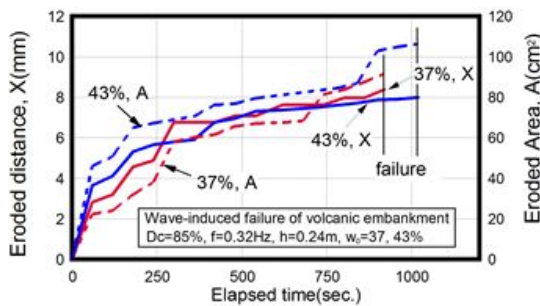


図-6 侵食距離 X, 侵食面積 A と経過時間の関係

280gal ではせん断ひずみ $\gamma=1.6\%$, 鉛直ひずみ $\epsilon_v=0.4\%$ が発生し, 斜面底部から若干の水の浸出しが確認された(雑誌論文(3))。

図-5 にその時の間隙水圧挙動を示す。間隙水圧は初期有効土被り圧 σ_{v0}' で正規化して示している。図より, 振動载荷にともない, 間隙水圧が上昇し, 特に天端部の pw1 が大きな値を示していることがわかる。過剰間隙水圧比が 1 を超えても崩壊に至らない理由としては, このときの盛土斜面がサイクリックモビリティに移行しているためと考えられる。一方, $w_0=37\%$ においては入力加速度の違いによってその応答加速度の変動は異なるものの, 振動载荷中に間隙水圧は蓄積されなかった。いずれにしても, 振動载荷を受ける場合には含水状態の違いによって崩壊形態が変化する可能性があることが示された。

(2) 波の繰返し载荷実験による結果と考察

写真-2 は Dc=85% の $w_0=43\%$ と $w_0=37\%$ の試

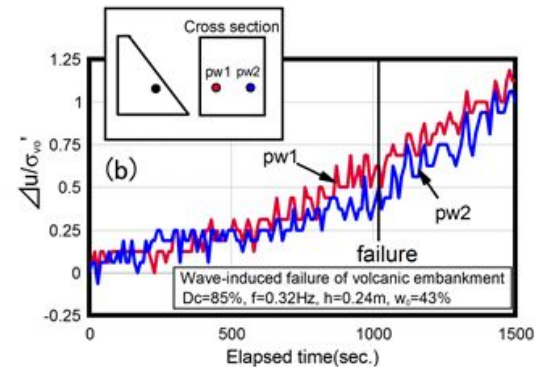
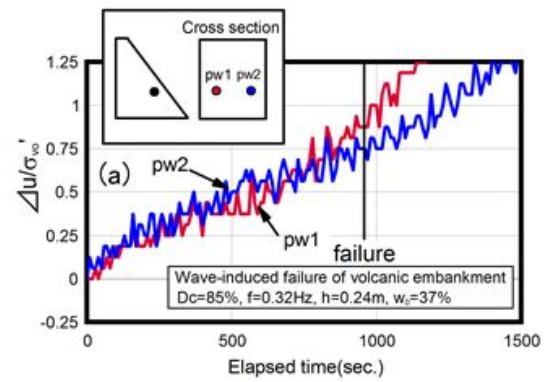


図-7 過剰間隙水圧挙動：(a) $w_0=37\%$, (b) $w_0=43\%$

験開始 300 秒後の斜面侵食の様子を表したものである。写真から, $w_0=43\%$ と $w_0=37\%$ の侵食エリアに変化が現れていることが確認される。図-6 は侵食距離 X (斜面表面からの水平距離), 侵食面積 A と試験開始からの経過時間の関係を示したものである。侵食距離 X と経過時間の関係に着目すると, 同経過時間では両初期含水比ともほぼ同等の侵食距離になっていることがわかる。しかしながら, 侵食面積 A と経過時間の関係を見てみると, $w_0=43\%$ の方が $w_0=37\%$ よりも早く侵食エリアが拡大していることがわかる。また $w_0=37\%$ では $w_0=43\%$ と比べ, 侵食面積の急増点(40~380, 700~780 sec.)が存在するようである。なお, 斜面崩壊は試験開始 1020 秒後 ($w_0=43\%$), 試験開始 920 秒後 ($w_0=37\%$) に発生した。

図-7 は同条件における過剰間隙水圧挙動を示したものである。なお, 過剰間隙水圧 Δu を初期有効土被り圧 σ_{v0}' で正規化して示している。図より, $w_0=43\%$ の試験開始直後では過剰間隙水圧の上昇はあまり見られない。一方, $w_0=37\%$ では試験開始直後から徐々に過剰間隙水圧が蓄積している。一般に, 最適含水比を挟み湿潤側 ($w_0=43\%$) では透水係数が最小値を示すことから, 波の浸透の影響が小さく, 層流力によって侵食が進行したのと考えられる。 $w_0=37\%$ ではそれに比べて透水係数が高くなるため, 盛土内に浸透しやすく, その結果として間隙水圧が上昇したものと推測される。上記の侵食面積の急増点が現れた事実は, このことに起因しているようである。

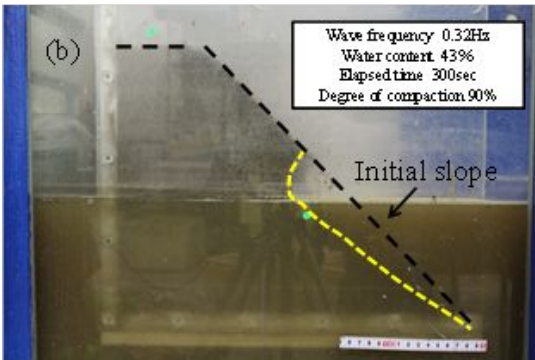
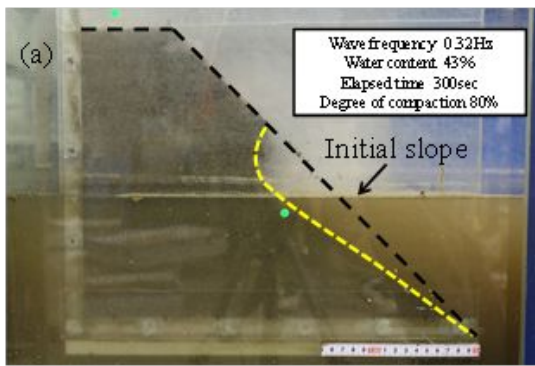


写真-3 $w_0=43\%$ の盛土の侵食状況：(a) $D_c=80\%$, (b) $D_c=90\%$

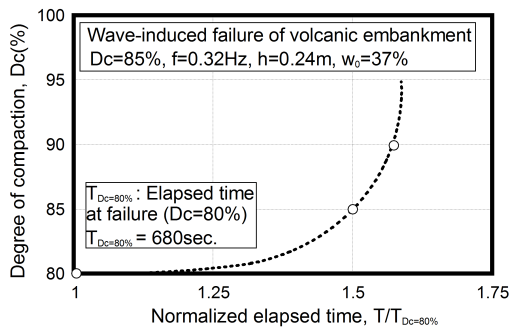


図-8 締固め度と斜面崩壊までの時間の関係

写真-3は、締固め度 $D_c=80\%$ と 90% の試験開始 300 秒後の斜面の侵食の様子を示したものである。写真より、締固め度の違いによって、侵食面積に若干ではあるが、変化が現れていることが確認される ($D_c=90\%$ の侵食面積が小さい)。一連の実験では、同一含水比条件下では締固め度が低くなると、波の作用に伴う過剰間隙水圧の増加が顕著になることが明らかにされている。

図-8は、締固め度と試験開始から斜面崩壊までの時間の関係を示したものである。試験開始から斜面崩壊までの時間 t を締固め度 $D_c=80\%$ の崩壊時間 $t_{D_c=80\%}$ で正規化して示している。図より、締固め度が上昇するにつれて、斜面崩壊までの時間が増加していることがわかる。例えば、斜面崩壊は、 $D_c=90\%$ では試験開始 1070 秒後、 $D_c=85\%$ では 1020 秒後、 $D_c=80\%$ では 680 秒後に発生した。締固

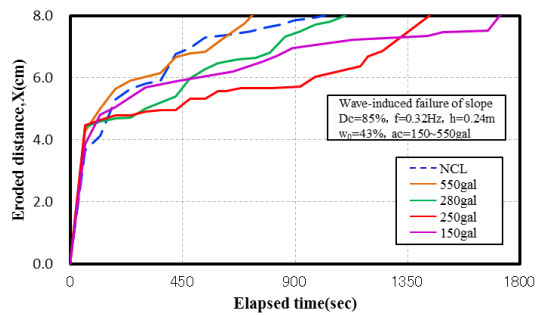


図-9 入力加速度の違いによる侵食距離 X の経時変化

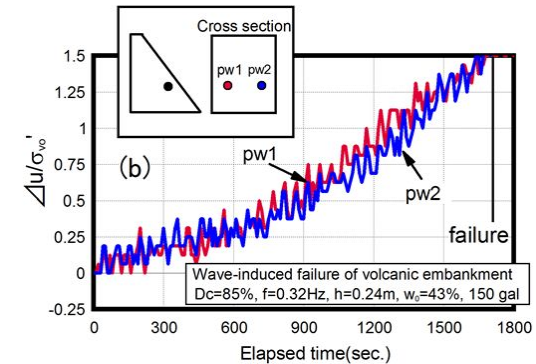
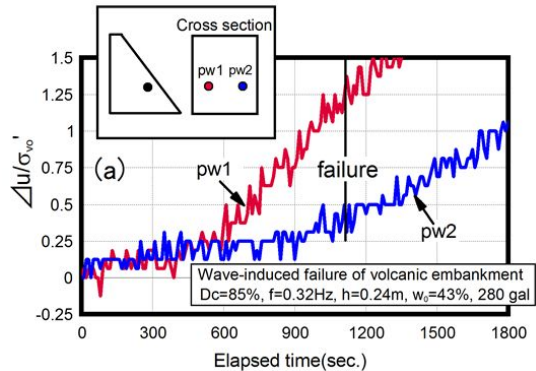


図-10 入力加速度の違いによる間隙水圧挙動: (a)280gal, (b)150gal

め度が 85% を超えた点から勾配が急激に上昇し、 90% 以上では斜面崩壊までの時間にあまり変化がなくなるようである。以上のことから、波の侵食作用を受ける盛土斜面では、初期含水比ならびに締固め密度の違いは斜面の崩壊形状ならびに力学的安定性に影響を及ぼすことが明らかにされた。

(3) 振動-波の繰返し載荷実験の結果と考察ならびに盛土の安定性評価

図-9は振動後に波の繰返し載荷を与えた場合の侵食距離 X (斜面表面からの水平距離) と経過時間の関係を示す。図より、280gal以下であれば入力加速度が減少するにつれて、侵食距離は小さくなっていることがわかる。一方、280galでは入力加速度なし(NCL)と比べて侵食距離は大きい。

図-10は入力加速度 150gal と 280gal にお

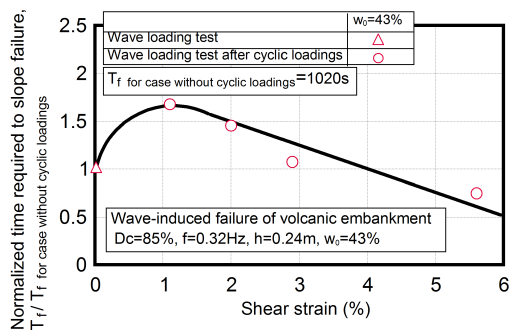


図-11 せん断ひずみ量の違いによる波の侵食崩壊に至るまでの時間の変化

ける造波試験中の間隙水圧挙動を示したものである。入力加速度が大きくなるにしたがい、過剰間隙水圧の上昇率が高い傾向にある。このことは、振動载荷によって発生するせん断ひずみに起因していることが一連の結果より明らかにされている(学会発表(1)~(3))。なお、150galでは $\gamma=1.1\%$ 、280galでは 2.6% のせん断ひずみが発生した。

このように振動载荷履歴(せん断履歴)の大小によって、崩壊時間に変化が現れたことから、次にせん断ひずみと崩壊時間の関係について整理してみた。図-11は各試験ケースの崩壊時間を初期含水比 $w_0=43\%$ における振動履歴無しの場合の崩壊時間 T_f (1020秒)によって正規化した値とせん断ひずみの関係を示したものである。せん断ひずみが 1% 時にピークを迎え、せん断ひずみが大きくなるほど崩壊までの時間が早くなっている。せん断ひずみが 4% を超えると繰返し振動载荷により斜面崩壊していることから、繰返し振動履歴が無い場合よりも早く崩壊している。このことから、低せん断ひずみでは繰返し振動载荷による締固め効果によって、波の侵食によるすべり抵抗が上昇するが、大きなせん断ひずみ履歴を受けた場合(本研究ではせん断ひずみ約 4% 以上)ではその影響は無視できないことが定量的に示された(学会発表(1)~(3))。

以上のことから、限られた土質条件、幾何学条件ではあるが、盛土の安定性を議論する上では、締固め度が 90% 以上であれば耐波性能に変化は現れないこと、また地震動のような振動载荷を受けたケースでは、発生するせん断ひずみ量の把握は極めて重要になることが定量的に示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) S. Kawamura, S. Miura and S. Matsumura: Stability evaluation of full-scale embankment constructed by volcanic soil in cold regions, Proceedings of 15th Asian regional conference, ISSMGE, 2015. (in press) 査読有
- (2) S. Kawamura and S. Miura: Failure of volcanic slopes in cold regions and its prediction,

Procedia Earth and Planetary Science, Vol.9, pp.143-152. 2014. 査読有

<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeps.2014.06.010>

(3) S. Kawamura and S. Miura: Stability of volcanic slopes in cold regions, Journal of Geography and Geology, Vol.6, No.3, pp.34-54. 2014. 査読有

<http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v6n3p34>

(4) S. Kawamura and S. Miura: Stability evaluation of volcanic slopes with crushable particles subjected to freezing and thawing, Journal of Frontiers in Construction Engineering, Vol.2, Iss.2, pp.43-53, 2013. 査読有

<http://www.academicpub.org/fce/>

(5) 川村志麻 三浦清一: 波の侵食作用による斜面の崩壊とその安定性評価法, 土木学会論文集, No.4/C-68, pp.643-657, 2012. 査読有

<http://dx.doi.org/10.2208/jsedjge.68.643>

〔学会発表〕(計 10 件)

(1) 古舘聖斗: 地震動のような繰返しせん断履歴を受けた火山灰質盛土の耐波性能に関する模型実験, 第50回地盤工学研究発表会, 2015.9, 北海道科学大学(北海道・札幌市)

(2) S. Kawamura: Wave erosion mechanism of volcanic embankment subjected to cyclic loadings, International Workshop on Volcanic Rocks and Soils, 2015. 9, Regina Isabella - Conference Centre (Ischia, Italy)

(3) 古舘聖斗: 繰返しせん断履歴を受けた火山灰質盛土の耐波性能に関する模型実験, 第55回地盤工学会北海道支部年次技術報告会, 2015.1, 室蘭工業大学(北海道・室蘭市)

(4) S. Kawamura: Failures of volcanic slopes in cold regions and its prediction, The Italian Workshop on Landslides, 2013.10, Centro Congressi Federico II (Napoli, Italy)

6. 研究組織

(1)研究代表者

川村 志麻(KAWAMURA, Shima)

室蘭工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 9 0 2 5 8 7 0 7

(2)研究分担者(平成24年度まで)

三浦 清一(MIURA, Seiichi)

北海道大学・工学研究院・名誉教授

研究者番号: 0 0 0 9 1 5 0 4