

地震動のような繰返し载荷履歴を受けた火山灰盛土の耐波性能評価

川村 志麻¹・土田 雄貴²

¹正会員 室蘭工業大学大学院 工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

skawamur@mmm.muroran-it.ac.jp

²非会員 室蘭工業大学大学院 工学研究科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

16041047@mmm.muroran-it.ac.jp

本研究は、地震動と波の相互作用を受ける盛土構造物の力学挙動に着目し、盛土の不安定化機構とその耐波性能を明らかにすることを目的とする。近年の甚大な災害被害を考えると、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と、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と言える。ここでは、二次元平面ひずみ模型土槽内に繰返し载荷履歴を与えることが可能な装置を開発し、地震動のような繰返し载荷を与えた条件下で造波模型実験を実施した。得られた結果から、盛土構造物の締固め条件ならびに波の作用条件の違いがその安定性に及ぼす影響を定量化し、盛土構造物の耐波・耐震に対する評価法の検討を行った。

Key Words : seismic loading, wave, embankment, slope stability, model test, volcanic soil

1. まえがき

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、土木工学に対しても多くの問題を提起した。一方、仙台東部道路(図-1参照)が地震津波の被害を低減させた事実は、土構造物の有用性や重要性を確認できた事例として、その教訓がその後の防災避難施設建設に生かされている。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、地震や波などの自然外力が複合的に作用する場合の地盤・斜面の不安定化については、現象の複雑性、現象の把握の困難さから、研究事例は限られている。例えば、津波による海岸洗掘現象¹⁾、津波斜面遡上による堆積砂形成機構²⁾、津波浸透による支持地盤の不安定化³⁾や越流による盛土の崩壊現象^{4),5)}、斜面崩壊誘発型津波のシミュレーション⁶⁾及び波の侵食に起因する斜面崩壊機構⁷⁾などを対象にした研究はあるものの、地震動履歴が土構造物の安定性にどの程度影響を及ぼすのかを明らかにした研究は少ない。

本研究では、地震動のような繰返し荷重が作用した後の盛土構造物の耐波性能を評価するための基礎資料を収集するため、盛土の締固め条件(締固め度、初期含水比の違い)が地震動履歴後の耐波性能に及ぼす影響を定量化し、次いで、それを考慮した性能評価法を検討した。

2. 模型実験の相似則と模型実験法

ここでは、地震動後の盛土構造物の波の作用に起因する崩壊機構を明らかにするために、Wave-marker theory⁸⁾にもとづいて製作されたFlap式造波装置を有する二次元平面ひずみ模型土槽⁷⁾と、それに一次元振動载荷装置を付設したシステムを開発した。この装置を駆使した1G場模型実験では、地震動のような繰返し载荷によって発生する土構造物のせん断ひずみ量が、その後の波の作用によって発生する斜面崩壊に及ぼす影響を調査している。そのため、地震動と波浪条件は現地の条件を忠実に再現



図-1 仙台東部道路の津波の状況
(NEXCO 総合技術研究所より提供)

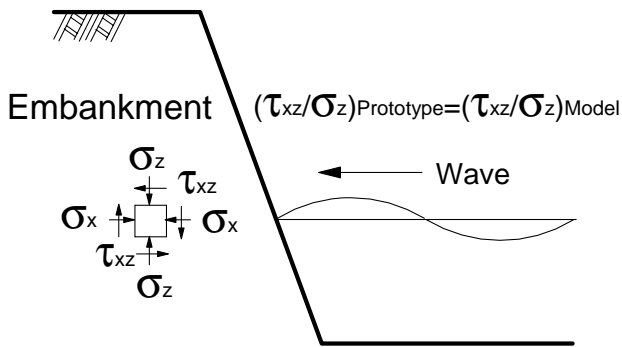


図-2 1G 場模型実験の要素としての考え方

表-1 1G 場模型実験の相似則

	Scale (Model/Prototype)
Length	1/N
Stress ratio in element of embankment	1
Pore water pressure ratio	1
Strain in element of embankment	1
Deformation	1/N
Time	1/N ^{0.5}

したものではない。

(1) 本模型実験における相似則の考え方

一般に、流体・地盤の相互作用を対象とした模型実験ではスケール効果や粒子径効果によって、完全に実物を再現することは不可能である。筆者ら^{例えば 7)}は、従来より 1G 場模型実験における試験法を検討し、1 つの考え方を提案してきた。すなわち、1G 場の模型実験では、地盤の強度（せん断応力、 τ_c ）は拘束圧（有効土被り圧、 σ_c ）によって正規化することにより、ほぼ比例的に変化するという実験的事実を適用できるものとし、原理的に要素試験と同様の考え方を取り入れている（図-2 参照）。これにもとづけば、外力の大きさおよびその加わり方、そして斜面の形状と大きさが相似関係にあり、模型と実物で同じ試料でかつ線形弾性体として考えた場合では、両者の同一要素で算出される応力比は一致する。すなわち、着目要素点の応力比が一致すれば、他の要素点の応力比も一致することになる。なお、何らかの方法で、実地盤と模型斜面の応力比を求めることができ、かつ実物の応力比が模型地盤内の同一要素でそれと一致するように、外力を決定すれば、線形弾性体の仮定も必要とせず、模型実験による再現は原理的に可能となる。そのため、着目要素の間隙水圧は、要素試験と同様、要素内に生じた間隙水圧を示すことになる。

また、波の再現に関しては、斜面内の要素の力学挙動の一致を図っているため、別途、他の考え方を導入している。一般に、重力効果が支配的である場合では、フルード相似則が採用されていることから、本研究においてもフルード相似則を採用している。

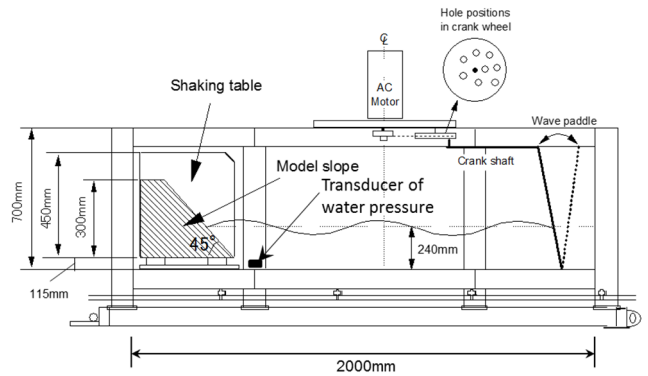


図-3 1G 場模型実験装置の概要

このように 1G 場の模型試験を行う上では、相似則による解釈、または本試験のように要素としての試験法を拡張した解釈は原理的に可能となるが、いずれにしても、その適用に当たっては模型と実物の物理現象が同じメカニズムのもとに起こるという前提が必要となると言える。本試験で用いた相似則を表-1 に示す。

(2) 1G 場模型実験の方法

本研究で用いた試験装置の全体図を図-3 に示す。二次元平面ひずみ模型土槽の内寸法は長さ 2000 mm、高さ 700 mm、奥行き 600 mm であり、これに 1 次元振動載荷装置（振動台の大きさ：長さ 400 mm、高さ 450 mm、奥行き 580 mm）を付設した。繰返し荷重は振動台が土槽床との空間(115 mm)に設置された 2 つのレール上を移動することによって与えられている。この装置で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 150 kg、最大振幅 ± 50 mm、周波数 0.05 Hz ~ 5.0 Hz の規則波（正弦波）が載荷可能である。土槽前面には厚さ 20 mm の強化ガラスが設置され、変形挙動が観察できるようになっている。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 0.05 Hz ~ 1.0 Hz である。

用いた試料は、北海道の支笏を噴出源とする駒岡火山灰質土（土粒子の密度 $\rho_s = 2.47$ g/cm³、平均粒径 $D_{50} = 0.27$ mm、均等係数 $U_c = 46$ 、細粒分含有率 $F_c = 26.0 \sim 42.6\%$ ）である。この試料は実務でも多用されている土質材料である。また、1968 年と 2003 年十勝沖地震において液状化被害のあった同種の材料でもある。

この試料を用いて、模型斜面を次のように作製している。図-4 は、地盤工学会基準の A-c 法⁹⁾による締固め曲線を実線に、模型実験における締固め曲線を点線に比較して示したものである。図より明らかなように、最適含水比は作製方法の違いにかかわらず、 $w_{opt} = 40.5\%$ であった。この土試料を、最適含水比($w_{opt} = 40.5\%$)を境に乾燥側の含水比 $w_0 = 37\%$ と湿潤側の含水比 $w_0 = 43\%$ で、締固め度 D_c が 80, 85, 90 % になるように締固め（図中の印）、高さ 300 mm、勾配 45 度の模型盛土を作製した。なお、試験結果に影響を及ぼさないように、乾燥密度の

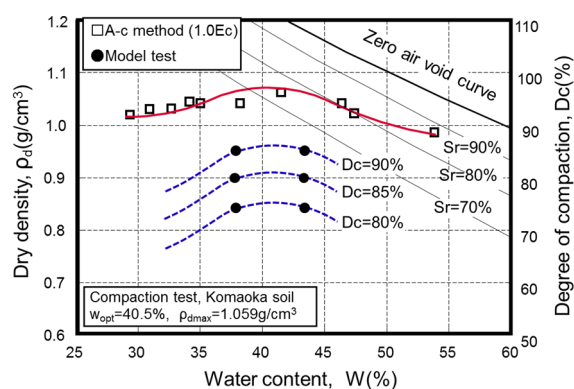


図-4 用いた試料の締固め曲線

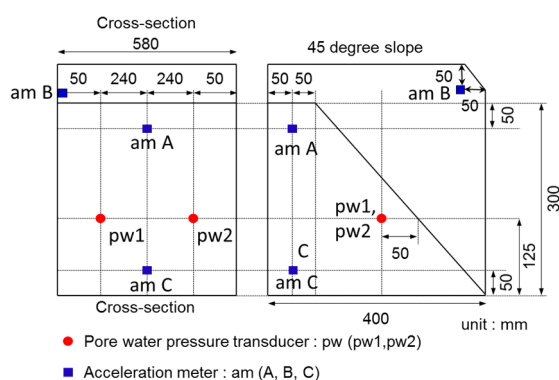


図-5 計測機器の配置図

表-2 本試験で行った試験条件

Sample name	Komaoka volcanic soil
Angle of inclination, $\alpha(^{\circ})$	45
Initial water content (%)	37, 43
Dry density, ρ_d (g/cm³)	0.85, 0.90, 0.95
Wave height (m)	0.024, 0.012, 0.010
Acceleration, (gal)	150, 200, 250, 280, 550
Shear strain (%)	0, 1, 2, 3, 4, 6
Water depth (m)	0.24 (0.125*)
Wave frequency (Hz)	0.32

* 盛土底部からの水深

変動は5%以内に抑えている。

模型斜面を作製後、あらかじめ20回の地震動のような繰返し载荷履歴(150, 200, 250, 280, 550 gal)を与え、強制的に盛土内にせん断ひずみを1~6%発生させた条件下で、間隙水圧の消散を確認後、一連の造波実験を行った。なお、せん断ひずみは模型斜面作製時に挿入した風系の変位から算出している。

造波実験では、波の作用による影響を定量的に評価するために、斜面高に対する水深の比は既往の研究と同程度⁷⁾になるように0.42と設定し、水深を $h=240$ mm(盛土底部より125mm)とした。なお、模型のスケールは試験装置の制約上1/5と設定している(盛土高を実規模換算すると1.5mになる)。本研究では、規則波の条件の下で波高を0.024m, 0.012m, 0.010mの3ケースに、波浪周波数を0.32Hzに設定した。なお、これらの値を実規模換算すると、周期は7s, 波高は0.05~0.12mになる。

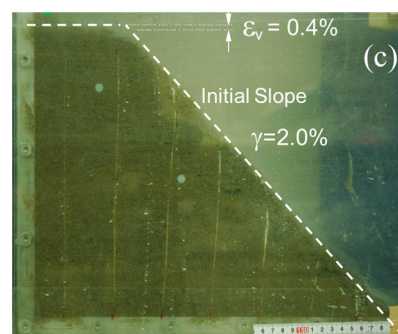
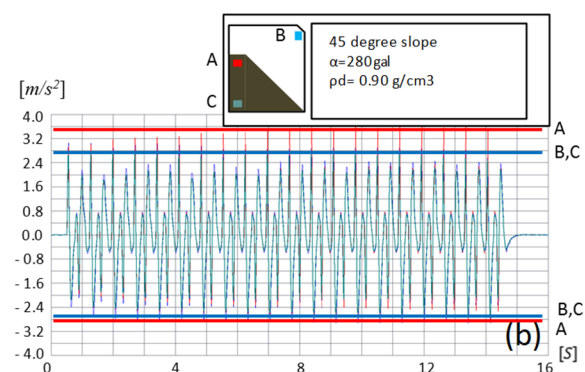
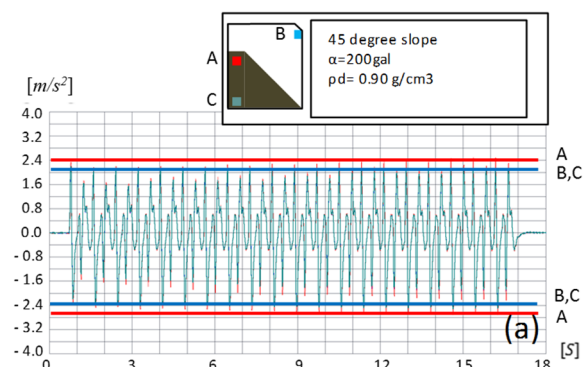


図-6 盛土の振動特性と変形状況：(a) 加速度応答 200 gal ($\gamma=0.9\%$), (b) 加速度応答 280 gal ($\gamma=2.0\%$), (c) 盛土の変形状況 280 gal ($\gamma=2.0\%$)

本研究の目的が盛土の崩壊現象に着目しているため、波浪条件は盛土高に対して崩壊を起す波高と短周期の波を想定した。試験条件を表-2に示す。

試験中、加速度応答、波高と間隙水圧挙動および斜面の変形挙動は、加速度計(3個)、間隙水圧計(2個)、水層底部に設置した水圧計(図-3と図-5参照)およびデジタルカメラを用いて追跡した。

本研究では、極限平衡解析に基づき、侵食距離が80mmに達した時点が安全率 $F_s=1$ を下回ることから、すべり崩壊が起こらないケースにおいてもこの時点を経た波による斜面崩壊と定義した。

3. 試験結果と考察

(1) 繰返し载荷履歴を受けた盛土斜面の崩壊機構

はじめに、繰返し载荷を与えた盛土構造物の応答特

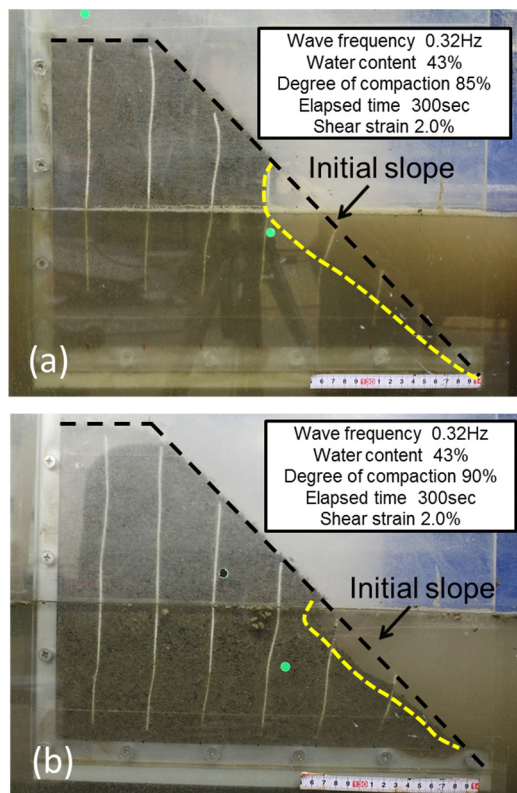


図-7 締固め度の違いによる侵食量の変化：(a) $D_c = 85\%$ ，
(b) $D_c = 90\%$

性を示す．図-6は入力加速度 200 gal ($\gamma = 0.9\%$)と 280 gal ($\gamma = 2.0\%$)の場合の加速度応答を示したものである．試験条件は初期含水比 $w_0 = 43\%$ ， $\rho_l = 0.90 \text{ g/cm}^3$ ($D_c = 85\%$)である．試験開始後，両者に違いはあるものの，ともに天端部（A点）の応答加速度が大きくなっている．特に，入力加速度 280 gal の場合では，盛土底部より水の浸み出しが確認され，斜面に若干のひび割れは発生したものの，すべり崩壊に至らなかった．図示は省略するが，間隙水圧の上昇傾向から，このケースではサイクリックモビリティに移行していたことが確認されている．繰返し载荷後（間隙水圧消散後），280 gal ではせん断ひずみが $\gamma = 2\%$ ，鉛直ひずみ（沈量/斜面初期の高さ）が $\varepsilon_v = 0.4\%$ 発生していた（(c)図参照）．

次に，地震動のような繰返し载荷履歴が，土構造物の安定性にどのような影響を及ぼすかを造波実験を通して明らかにする．

(2) 締固め度の違いが崩壊現象に及ぼす影響

図-7は $w_0 = 43\%$ ，締固め度 D_c が 85%と 90%のせん断ひずみ $\gamma = 2.0\%$ 時の試験ケースを，試験開始 300秒後について示したものである．図より，波の作用によって侵食が進行していることが伺える．同じせん断ひずみ履歴では， $D_c = 85\%$ の侵食速度は 90%のものより早い．

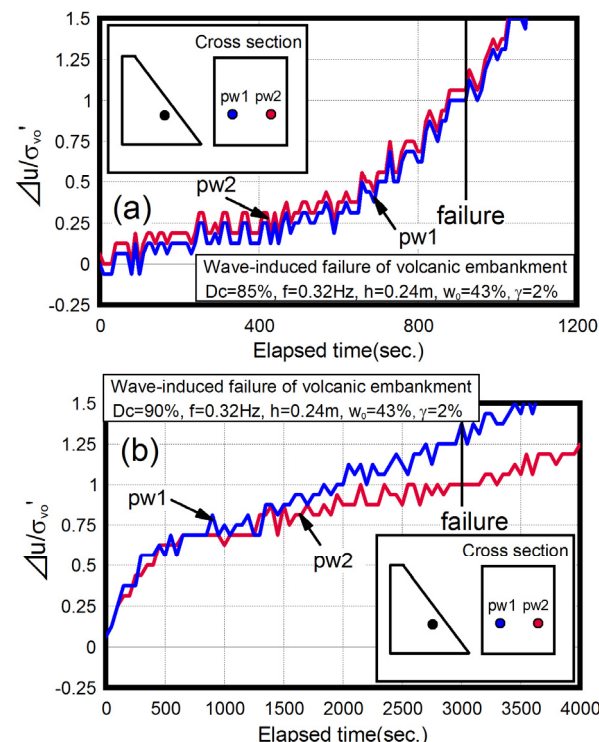


図-8 代表的な過剰間隙水圧挙動：(a) $D_c = 85\%$ ， $\gamma = 2\%$ ，
(b) $D_c = 90\%$ ， $\gamma = 2\%$

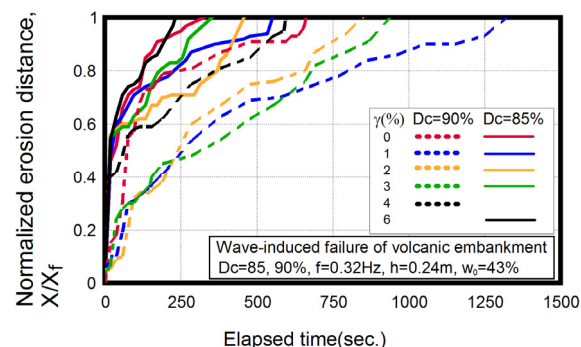


図-9 締固め度 $D_c = 85\%$ ，90%におけるせん断ひずみの違いによる侵食距離 X の変化

図-8は， $D_c = 85\%$ と 90% ($\gamma = 2\%$ 履歴)の過剰間隙水圧挙動を示したものである．過剰間隙水圧値 Δu は初期有効土被り圧 σ_{v0}' によって正規化している．間隙水圧の蓄積傾向に違いはあるものの，両者ともに試験開始後から間隙水圧が上昇し，崩壊に至っている．このことから，盛土の崩壊は間隙水圧の上昇に伴って誘発されることが明らかである．図示は省略するが，他の試験ケースにおいても同様の挙動を示した．

これらの侵食パターンを整理したものを図-9に示す．侵食距離 X (静水面と斜面の交点 (=汀線)からの水平距離)を崩壊時の侵食距離 X_f で正規化した値と経過時間の関係により示している．図より， $D_c = 90\%$ が全体的に $D_c = 85\%$ よりも斜面崩壊に至るまでの時間が長いことがわかる．せん断ひずみが 1.0%～3.0%では履歴無の場合 (γ

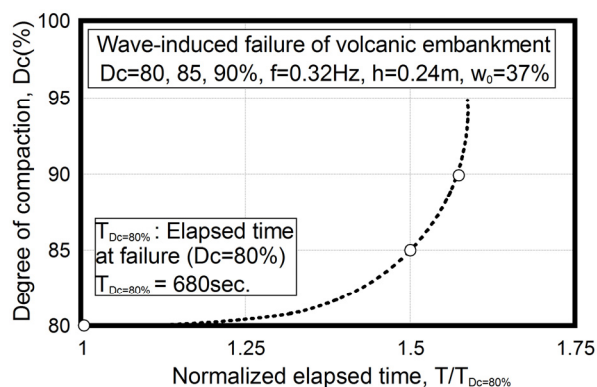


図-10 締固め度と斜面崩壊時間の関係

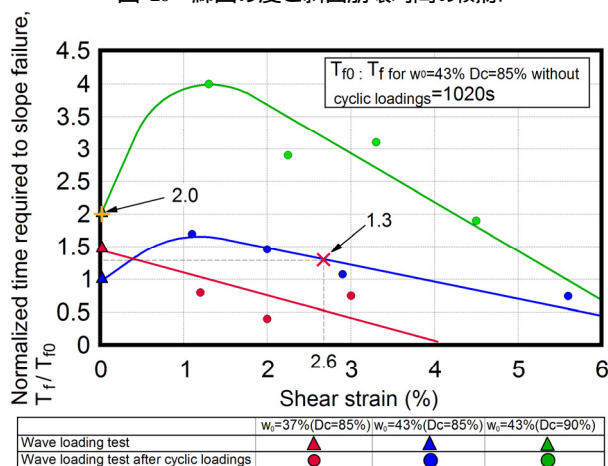


図-11 せん断ひずみ量の違いによる崩壊時間の変化 (含水比, 締固め度の違いによる変化)

＝0%)より崩壊時間が長くなっている．一方，せん断ひずみが 4.0%を超えると繰返し载荷履歴無の場合よりもそれらの時間は同程度が短くなる傾向が見られた．このようにせん断ひずみに依存して耐波性能に変化が現れていることは興味深い．

この締固め度の違いが耐波性能に及ぼす影響を調べてみた(図-10 参照)．ここでは，基本となる繰返し载荷履歴無のケースの締固め度 D_c と正規化崩壊時間 $T/T_{D_c=80\%}$ の関係を示す．試験条件は $w_0=37\%$ であり，各データは $D_c=80\%$ ， $\gamma=0\%$ の崩壊時間 $T_{D_c=80\%}$ で正規化している．図より， D_c の増加によって崩壊時間が増加していることがわかる．特に， $D_c=90\%$ を超えた点から崩壊に至る時間は一定値に漸近し，盛土の耐波性能は急激に上昇傾向にある．これは，締固め効果による土の強度の増加と透水性の低下が反映されたものであろう．なお，このことは， $w_0=43\%$ においても同様である．このことから締固め度の変化は耐波性能に及ぼす影響が大きいことが示された．

同様に，繰返し振動载荷履歴有のケースのせん断ひずみ γ と正規化崩壊時間 T_f/T_{f0} の関係を図-11 に示す． T_{f0} は $w_0=43\%$ ， $D_c=85\%$ ， $\gamma=0\%$ の値を示す． $w_0=43\%$ では D_c に関わらず，耐波性能は $\gamma=1.0\%$ 程度でピークを迎え，その後，低下する．一方， $w_0=37\%$ ではピークは認めら

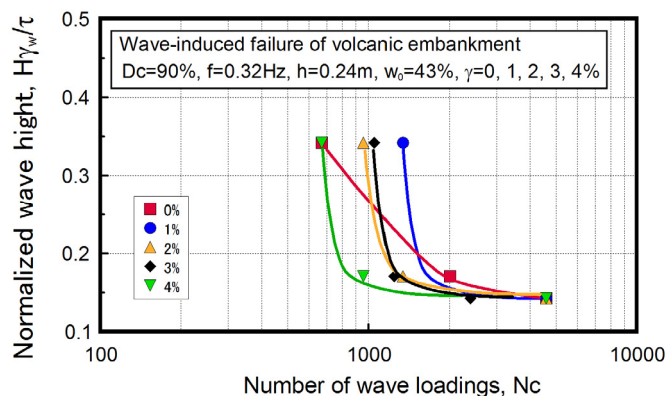


図-12 正規化波高と繰返し回数の関係

れない．これは，前述のように， w_{opt} より湿潤側($w_0=43\%$)では繰返し载荷中にサイクリックモビリティが確認されていることから，締固め効果が発揮されていたものと考えられる．実際，×印では $D_c=23\%$ の増加が確認されている．一方，この時 ($D_c=85\%$ ， $\gamma=2.6\%$ の点) の時間は基準値の 1.3 倍 (×印) であるが， $D_c=90\%$ ， $\gamma=0\%$ の値は 2.0 倍 (+印) となる．これは締固め時の $D_c=5\%$ の増加の方が，繰返し载荷による $D_c=23\%$ の増加よりも耐波性能に対する寄与度が高いことを示す．すなわち，これは繰返し载荷の密度増加よりも締固めによる骨格構造の変化に影響していることを示唆したものであろう．以上のことから，盛土施工時に締固め度を適切に管理することは，盛土の耐波性能，安定性を評価する上で非常に重要であると言える．

次に，波高の違いが盛土構造物の安定性に及ぼす影響を評価するために，正規化波高 H_{γ_w}/τ と繰返し回数 N_c との関係を図-12 に示す． H は波高(m)， γ_w は水の単位体積重量(kN/m^3)， τ は土のせん断応力(kN/m^2)である．せん断応力は静水面上にある盛土内要素の有効応力と駒岡火山灰質土の示標特性($c'=0$ ， $\phi=38\text{ deg.}$)から算出している．図より，得られた曲線は液状化曲線と類似の傾向にあることが明らかである．また，せん断ひずみ量の違いによって繰返し回数に差が現れている．特に，せん断ひずみ 1% のケースでは耐波性能が最も高くなるようである．加えて，繰返しせん断履歴無 (せん断ひずみが 0%) のケースでは，曲線形状が他のケースと比べ緩やかになっており，特に波力が大きい範囲では靱性能が高くなるようである．このように，波力と繰返し载荷回数のような関係を用いることによって，耐波性能の特徴を把握することが可能になることが明らかにされた．

ここでは，図-12 の結果に基づいて，崩壊に至るまでの波浪エネルギー E_f を，1 周期の波浪エネルギー E と波の作用回数 N_c との積として簡易的に算出してみた (図-13 参照)．実験では規則波が作用していることを確認していることから，図中の波浪エネルギー式を用いて算出している．なお，波高 $H=0.010\text{m}$ の履歴無($\gamma=0\%$)のケ

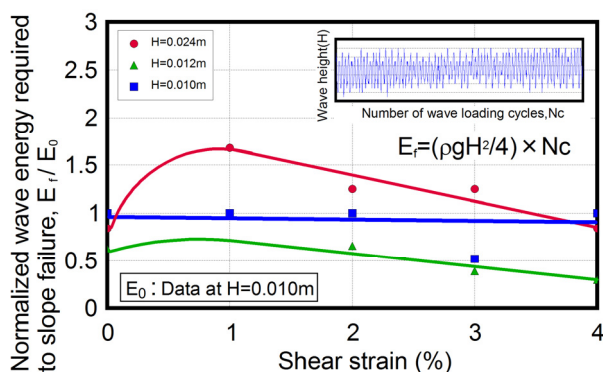


図-13 崩壊時の波浪エネルギーとせん断ひずみの関係

ースのエネルギー E_0 で正規化して示している．図より，波高が大きいケース（破局的な崩壊に至るケース）では，そのエネルギーは一度ピークを迎え，せん断ひずみ量の増加に伴って小さくなっている．その傾向は，図-12の変曲点に近づくにつれて小さくなる．一方，波高が小さいケースではせん断履歴の影響をあまり受けていないようである．このことは，例えば，波力と繰返し载荷回数のような関係から崩壊パターンの特徴を考慮することにより，前述のような波浪エネルギーで耐波性能が評価可能であることを示唆したものであろう．いずれにしても更なる検討は必要である．

4. 結論

一連の模型実験と考察から次のような結論を得た．

- (1) 締固め度の違いによって耐波性能は変化する．特に，締固め度が 90 % 以上になると，その性能は急激に高まる．
- (2) 繰返し载荷に起因する密度増加よりも締固めによる密度増加の方が，盛土の安定化に対する寄与度は高い．
- (3) 波の繰返し回数と波高の関係は，液状化曲線と類似の傾向を示す．本実験では，波の繰返し作用によって過剰間隙水圧が蓄積し，崩壊に至るといいう崩壊パターンが確認された．

- (4) 波浪エネルギーで盛土構造物の耐波性能は評価可能である．

謝辞：本研究を進めるにあたり，科学研究費補助金 基盤研究 C (No.15K06205, 代表 川村志麻) から研究補助が与えられた．末筆ながら記して謝意を表します．

参考文献

- 1) 山本吉道，成吉兼二，ヴタンカ：津波の戻り流れによる海岸洗掘・侵食予測法の改良，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.65，No.1，pp.511-515，2009.
- 2) 原田賢治，今井健太郎，Tran The Anh，藤木悦史：津波斜面遡上による陸域での堆積砂形成に関する水理実験，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67，No.2，pp.251-255，2011.
- 3) 今瀬達也，前田健一，三宅達夫，鶴ヶ崎和博，澤田豊，角田紘子：捨石マウンド - 海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.67，No.2，pp.551-555，2011.
- 4) 藤井裕之，首藤伸夫，堀田新太郎，高木利光：津波越流による沿岸道路の破壊に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.66，No.1，pp.246-250，2010.
- 5) Fujisawa, K., Kobayashi, A. and Aoyama, S.: Theoretical description of embankment erosion owing to overflow, *Geotechnique*, Vol.59, No.8, pp.661-671, 2009.
- 6) 五十里洋行，後藤仁志，吉年英文：斜面崩壊誘発型津波の数値解析のための流体 - 弾塑性体ハイブリッド粒子法の開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.65，No.1，pp.46-50，2009.
- 7) 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.
- 8) Dean, G. D. and R. A. Dalrymple.: *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, *World Scientific*, pp. 170-186, 1991.
- 9) 地盤工学会 (JIS A 1210)：地盤材料試験の方法と解説 (二分冊の1)，pp.373-376，2010.

(2017.3.15 受付)

WAVE-INDUCED FAILURE OF VOLCANIC EMBANKMENTS SUBJECTED TO CYCLIC LOADINGS SUCH AS SEISMIC LOADING AND ITS EVALUATION

Shima KAWAMURA and Yuki TSUCHIDA

In the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, serious damage due to great seismic loadings and subsequent tsunami occurred widely in Japan. It has been also reported that road embankments in Sendai-Tobu expressway play an important role to evacuate from tsunami. After that, evacuation places have been constructed in other expressways in Japan. This paper aims at clarifying wave-induced failure mechanism of volcanic embankments subjected to cyclic loadings such as seismic loadings. A series of model tests was performed on model volcanic embankments by using a cyclic loading and a wave paddle systems; especially the effects of compaction conditions and wave condition on failure of embankments were presented herein. Based on the test results, the development process of wave erosion and the evaluation of the stability of volcanic embankments due to wave loadings were discussed in detail.