

4. 土質力学**■** 2026年8月25日(火) 9:00～10:40 | **■** 第5会場(404教室)**[5-1] 土質力学①：ため池の補強技術**

座長:太田 遥子(山口大学工学部)

9:00～9:15

[5-1] リグニンを利用した土の安定化処理方法の検討田中 さくら¹、*金山 素平² (1. 鹿島建設（株）、2. 九州大学大学院農学研究科)

9:15～9:30

[5-2] PS灰系改質土を遮水材料に用いるため池堤体の耐震性に関する実験的検討*蓮尾 佑帆¹、橋岡 奈月²、泉 明良³、柳橋 寛一⁴、古賀 大三郎⁵、鈴木 麻里子¹、園田 悠介¹、澤田 豊¹ (1. 神戸大学大学院農学研究科、2. 神戸大学農学部、3. 農研機構、4. 五洋建設、5. ジャイワット)

9:30～9:45

[5-3] PS灰系改質材により改質するため池堤体土および底泥土の一軸圧縮試験松本 萌乃果¹、蓮尾 佑帆²、*百北 航大¹、鈴木 麻里子²、泉 明良³、柳橋 寛一⁴、古賀 大三郎⁵、園田 悠介²、澤田 豊² (1. 神戸大学農学部、2. 神戸大学大学院農学研究科、3. 農研機構、4. 五洋建設、5. ジャイワット)

9:45～10:00

[5-4] 鋼矢板で補強したため池堤体における鋼矢板下端の開口幅と浸透流の関係*山崎 弘芳¹、原 忠²、泉 明良³、棚谷 南海彦⁴ (1. 日本製鉄株式会社、2. 高知大学、3. 農研機構、4. 株式会社エイト日本技術開発)

10:00～10:15

[5-5] ガビオンマットレスを用いたため池越水保護工の地震時の構造安定性小林 秀一¹、*小林 龍平¹、板垣 知也¹、高橋 直哉²、森井 俊廣³ (1. (株) 水倉組、2. 東網工業（株）、3. 新潟大学名誉教授)

10:15～10:30

[5-6] 天端を固化改良するため池堤体の越流時における侵食特性と改良形状に関する実験的検討*北川 賛¹、大山 峻一²、眞木 陸²、泉 明良²、竹川 尚希³、園田 悠介¹、澤田 豊¹ (1. 神戸大学大学院農学研究科、2. 農研機構農村工学研究部門、3. 産業技術総合研究所計量標準総合センター)

10:30～10:40

セッション総括

リグニンを利用した土の安定化処理方法の検討

Examination of Soil Stabilization Methods Using Lignin

田中さくら* ○金山素平**

Tanaka S.* and ○Kanayama M.**

1. はじめに

近年、地盤改良分野では、セメント系固化材の使用に伴う二酸化炭素排出量の増加や、改良土の高アルカリ化による環境影響が問題視されている。このため、環境負荷の小さい地盤改良材料の開発が強く求められている。一方、製紙産業やバイオマス利用の過程では、副産物としてリグニンが大量に発生しているが、有効利用は限定的であり、新たな活用方法の検討が課題となっている。リグニンは植物細胞壁の主要構成成分であり、疎水性や結合性を有することから、土粒子間の結合を促進し、土の力学特性を改善する可能性があると考えられる。本研究では、未利用バイオマス資源であるリグニンに着目し、リグニン添加が土の力学特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、室内試験による基礎的検討を行った。

2. 試料と試験方法

本研究では、佐賀県東松浦半島上場地域に分布するおんじやく土を対象試料として用いた。改良材にはアルカリ性リグニンを使用し、3%のリグニンをおんじやく土に混合することでリグニン混合土を作製した。比較のため、おんじやく土単体についても同様に試験を行った。試験項目として、まず締固め試験を実施し、おんじやく土単体およびリグニン混合土の乾燥密度と含水比の関係を把握した。次に、一軸圧縮試験を行い、リグニン添加が強度特性および応力-ひずみ挙動に及ぼす影響について検討した。さらに、一度試験に供したリグニン混合土を自然乾燥させ、再度供試体を作製した再利用試料についても一軸圧縮試験を行い、改良効果の持続性について評価した。

3. 試験結果と考察

Fig.1 の締固め曲線より、リグニン添加土は土単体に比べて最大乾燥密度が低下し、最適含水比が増加することが確認された。土単体の最大乾燥密度は 1.461 g/cm^3 、最適含水比 30.2%であったのに対し、リグニン添加土では最大乾燥密度が 1.443 g/cm^3 、最適含水比が 31.3%となった。これは、比重の小さいリグニンの混合、親水性による保水効果の増大のためと考えられる。

また、最大乾燥密度の低下は材料の軽量化を意味し、材料使用量の比は 0.9877 と算定された。土単体を 1000 kg 使用する条件では、リグニン添加により約 12.3 kg の材料削減が可能である。以上より、リグニン添加は締固め特性を変化させるとともに、材料削減や経済性向上の観点から有効であることが示唆された。

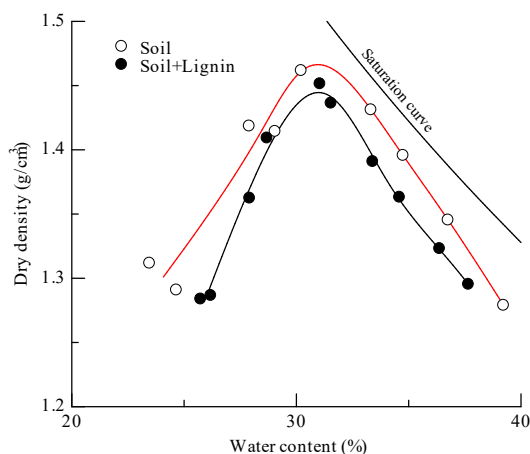


Fig. 1 Soil compaction curves

*鹿島建設㈱, **九州大学大学院農学研究院

* Kajima Corporation, **Faculty of Agriculture, Kyushu University

キーワード：おんじやく、リグニン、締固め試験、一軸圧縮試験

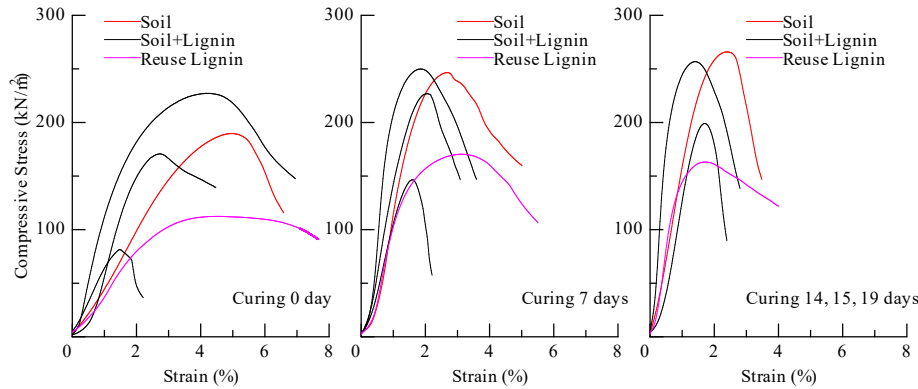


Fig. 2 Stress strain curves

次に、Fig.2 は、養生 0, 7, 14, 15, 19 日における土単体、リグニン添加土、再利用リグニン添加土の一軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線を示したものである。養生 0, 7, 14, 15, 19 日のいずれにおいても、1 回目に作製したリグニン添加土供試体は、土単体と同様、もしくはそれ以上の最大圧縮応力を示した。一方、同一配合条件で作製した 2 回目および 3 回目のリグニン添加土供試体では、最大圧縮応力が土単体および 1 回目の供試体より低い値を示しており、リグニン添加土供試体間で強度にばらつきが確認された。このばらつきは、供試体作製時における混合状態や成形精度の違い、成形過程で生じたひび割れ等により、土粒子間の結合状態が供試体ごとに異なったことが影響した可能性がある。また、再利用リグニン添加土は、土単体と比較して最大圧縮応力が低い値を示した。再利用リグニン添加土の応力ひずみ挙動は、土単体およびリグニン添加土とは異なっており、再成形を行うことで力学特性が変化していることが確認された。さらに、リグニン添加土と再利用リグニン添加土のいずれにおいても、土単体と比較すると、破壊ひずみが低下していることが確認された。これは、リグニンの添加により土粒子間に結合が生じ、粒子の再配列や塑性的な変形が十分に進行する前に破壊に至ったことを示すものである。

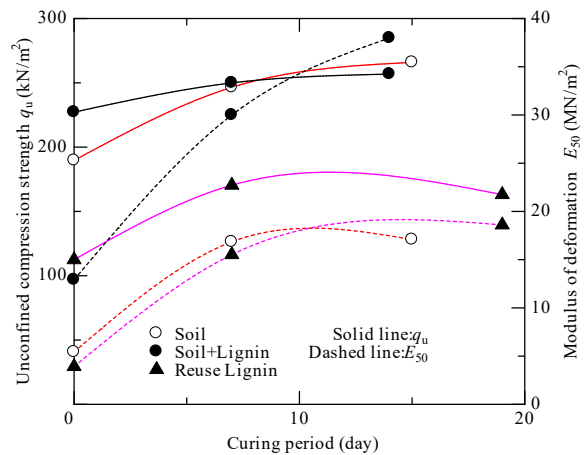


Fig. 3 Relationship between unconfined compressive strength, modulus of deformation, and curing Time

Fig.3 より、同一養生日数で比較すると、リグニン添加土は土単体よりも高い剛性を示し、剛性および最大圧縮応力はいずれの試料においても養生日数の増加に伴い増大する傾向が認められた。また、リグニン添加土は土単体よりも高い最大圧縮応力を示した。

4. まとめ

本研究では、環境負荷低減型地盤改良材料としてリグニンに着目し、おんじやく土にリグニンを混合した際の締固め特性および力学的特性を一軸圧縮試験により検討した。その結果、リグニン添加により最大乾燥密度は低下し最適含水比は増加した。一軸圧縮試験では、リグニン添加土はピーク後の応力低下が抑制され、延性的で安定した挙動を示した。一方、供試体作製条件により強度にばらつきが生じることも確認され、施工・管理条件の重要性が示された。

PS 灰系改質土を遮水材料に用いるため池堤体の耐震性に関する実験的検討 Experimental Investigation on Seismic Resistance of Small Earth Dam Embankments with a low-permeability core of PSAS-stabilized soil

○蓮尾佑帆* 橋岡奈月** 泉 明良*** 柳橋寛一**** 古賀大三郎*****

鈴木麻里子* 園田悠介* 澤田 豊*

Yuho HASUO, Nazuki HASHIOKA, Akira IZUMI, Tomokazu YANAGIBASHI, Daisaburo KOGA,
Mariko SUZUKI, Yusuke SONODA, Yutaka SAWADA

1. はじめに 前刃金工法とは、堤体上流側に低透水性の土質材料(刃金土)で遮水部を設ける工法であり、近年、刃金土として用いる良質な粘性土の枯渇が課題となっている。そこで、従来の粘性土の代わりに、ため池底泥土と PS 灰系改質材(ペーパースラッジ灰という産業廃棄物を原料とする土質改良材)を混合した改質土の適用が注目されている。本工法には、現地発生土や PS 灰の有効活用により処分費用削減・環境負荷低減のメリットがあるが、耐震性の検証が不十分である課題を有する。そこで本研究では、遮水材として PS 灰系改質土を用いた堤体と従来の粘性土を用いた堤体を対象に動的遠心模型実験を実施し、1)堤体の耐震性、2)加振後の貯水機能、の2点を比較・検討した。

2. 実験概要 本実験では、堤高 10 m のため池を想定して 1/50 スケールで堤体模型を作製した(Fig. 1)。実験ケースは、遮水材に従来の粘性土を用いた Case1 と、PS 灰系改質土を用いた Case2 の計 2 ケースである。基盤・堤体は銚田砂を用いて締固め度 90%で作製した。遮水部は 2 ケース間で同程度の遮水性能となるように、Case1 では、粒径 0.085mm 以下に調整した笠間土を用いて締固め度 115%で、Case2 では PS 灰系改質土を用いて締固め度 95%で作製した(Table 1)。PS 灰系改質土は、青粘土に対して乾燥質量比で水 40.7%¹⁾(液性限界)と PS 灰系改質材 15%を練り混ぜ、24 時間密閉養生したのち解きほぐして作製した。その後打設して 7 日間養生後に加振した。加振については、

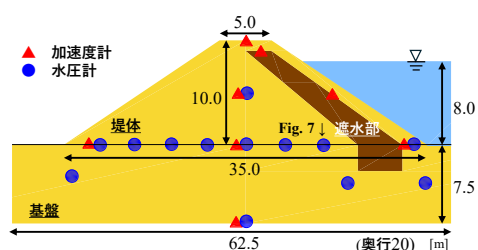


Fig. 1 堤体模型断面図 (実規模換算値)
Cross-section of the model embankment

Table 1 模型作製の諸元
Specifications for model construction

	基盤・堤体	遮水部	
	Case1, 2	Case1	Case2
土粒子密度	2.662 g/cm ³	2.645 g/cm ³	-
最大乾燥密度	1.658 g/cm ³	1.235 g/cm ³	1.370 g/cm ³
最適含水比	16.0%	33.1%	29.4%
一軸圧縮強度	-	169.5 kN/m ²	357.1 kN/m ²
締固め度	90%	115%	95%

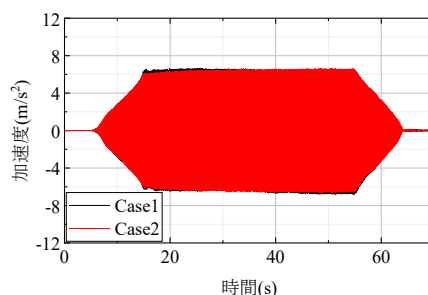


Fig. 2 加振の入力波形
Recorded accelerations at the bottom of the container

*神戸大学大学院農学研究科 Graduate School of Agricultural Science, Kobe University **神戸大学農学部 Faculty of Agriculture, Kobe University***農研機構 Institute for Rural Engineering, NARO****五洋建設 PENTA-OCEAN CONSTRUCTION Co., Ltd. *****ジャイワット Jaiwat Co., Ltd.
キーワード：ため池，PS 灰系改質土，遠心模型実験

50 G の遠心力を載荷させ、基盤面から 8.0 m (模型スケール: 16 cm)まで湛水した後、周波数 5 Hz, 最大振幅 6 m/s^2 の sin 波を 60 秒間加えた (模型スケール: 250 Hz, 300 m/s^2 , 1.2 秒間) (Fig. 2).

3. 実験結果

1) 堤体の耐震性 堤体の耐震性能照査において、天端の許容沈下量を 1 m とする考え方がある²⁾。Fig. 3 に、天端沈下量の時刻歴を示す。両ケースとも許容値内に収まるが、特に Case2 の沈下量は許容値の約半分に抑えられ、PS 灰系改質土を用いた堤体は十分な耐震性を満たすことが示された。

また、上流法面・天端・下流法面の 3 区分に分けて断面変形率³⁾を算定した結果を Fig. 4 に示す。全区分において Case2 の変形率の方が小さく、堤体全体で変形抑制効果が確認された。Table 1 に示す通り PS 灰改質土は一軸圧縮強度が高いことから変形しにくく、結果として天端沈下量や堤体変形量の抑制につながったと推察される。

2) 加振後の貯水機能の維持 実験後の遮水部の状況を Fig. 5 に示す。両ケースともクラックや水みちは確認されなかった。水压を水頭に換算して求めた加振前後の浸潤線を Fig. 6 に示す。水みちが発生しなかったことから、実験後も遮水部を経て浸潤線が低下し、下流法面からの浸出も見られないため、貯水機能を維持していると評価できる。また遮水部付近 (Fig. 1 中の点) の過剰間隙水压比を Fig. 7 に示す。両ケースとも過剰間隙水压比は完全液状化を示す 1 と比較して 0.4 程度と小さいことから、遮水部は損傷されず貯水機能が維持されたと考えられる。

4. まとめ 動的遠心模型実験の結果、PS 灰系改質土を遮水材に用いた堤体は 1) 沈下や変形が抑えられ、2) 加振後も漏水や液状化は発生せず遮水機能を維持できることが明らかとなった。すなわち、PS 灰系改質土を用いた堤体では、改質土の配合と締固めの適切な管理により、従来の前刃金工法に比べて同等以上の耐震性を有することが示された。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP24H00533 の助成を受けたものです。

参考文献：1) Tabassum et al. (2022) : Effects of primary curing conditions and subsequent crumbling on properties of compacted soils treated with paper sludge ash-based stabilizers, *Soils and Foundations*, 62(5): 101183. 2) 農林水産省(2015) : 土地改良事業設計指針「ため池整備」 3) 泉ら(2024) : ため池堤体の変形挙動に関する動的遠心載荷模型実験, 第73回農業農村工学会大会講演会講演要旨集

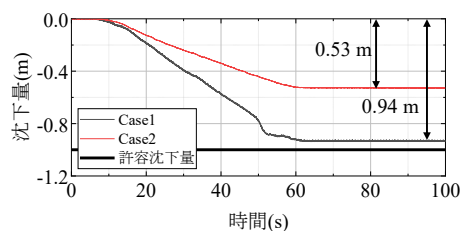


Fig. 3 天端沈下量の時刻歴
Settlement of the crest during shaking

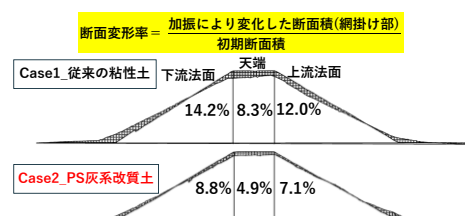


Fig. 4 断面変形率
Calculation of cross-sectional deformation rate

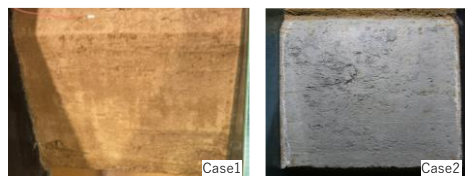


Fig. 5 実験後の遮水部
Low-permeability cores after the tests

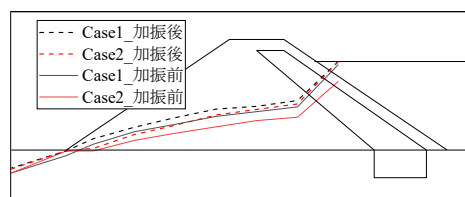


Fig. 6 加振前後の浸潤線
Phreatic line after the tests

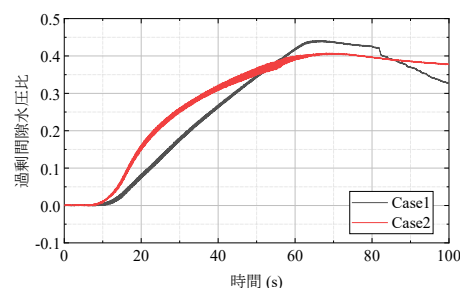


Fig. 7 遮水部周辺の過剰間隙水压比
Excess pore water pressure ratio around a low-permeability core

PS 灰系改質材により改質するため池堤体土および底泥土の一軸圧縮試験 Unconfined Compression Tests for Dam Embankment Material and Bottom Muddy Soil Improved with Paper Sludge Ash

松本 萌乃果* 蓮尾 佑帆** ○百北 航大* 鈴木 麻里子** 泉 明良***
MATUMOTO Honoka HASUO Yuhu MOMOKITA Kodai SUZUKI Mariko IZUMI Akira
柳橋 寛一**** 古賀 大三郎***** 園田 悠介** 澤田 豊**
YANAGIBASHI Tomokazu KOGA Daisaburo SONODA Yusuke SAWADA Yutaka

Table 1 試験(養生温度 20 °C)

Test Condition(Curing temperature in 20 °C)

Case	母材	添加材	添加量(kg/m ³)	養生日数(日)
0	真砂土	なし	0	0
1	真砂土	PS灰	50	7
2		セメント		14
3	真砂土 +青粘土	PS灰	100	28
4		セメント	150	91

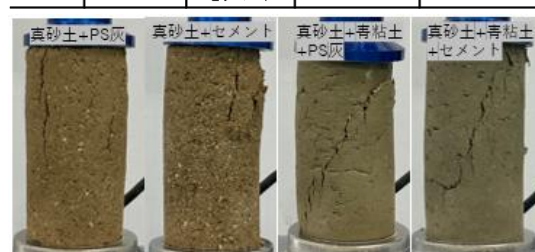


Fig.1 試験後の供試体(養生 7 日 50kPa/m³)

1. はじめに

ため池堤体の改修工事において、底泥土等にペーパースラッジ(PS)灰系改質材を添加させた改質土を用いて補強する工法利用がある¹⁾。しかし砂質土を母材とする PS 灰改質土の力学特性やため池堤体への適用性は未解明である。本研究では、PS 灰改質土の一軸圧縮強度に関する変形特性を解明するために、一軸圧縮試験を実施した。

2. 実験概要

母材には、既設堤体土(砂質土)を模擬した真砂土、底泥を模擬した青粘土を使用した。真砂土のみ、または真砂土と青粘土を体積比 1:1 で混合したものを母材とした。添加材は PS 灰系改質材とセメントとし、添加量を 50, 100, 150 kg/m³、養生日数を 7, 14, 28, 91 日とし、各ケース(Table1)で 5 本ずつ(Case 0 は 2 本)供試体を作製し、一軸圧縮試験(JISA 1216)を行った。養生日数 7 日、添加量 50 kg/m³の試験後の供試体の様子を Fig.1 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 応力-ひずみ曲線 養生日数を 7 日、添加量 50kg/m³の一軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線をピーク強度 q_u 、変形係数 E_{50} とともに Fig.2 に示す。Fig.2 より、PS 灰系改質材よりセメントを

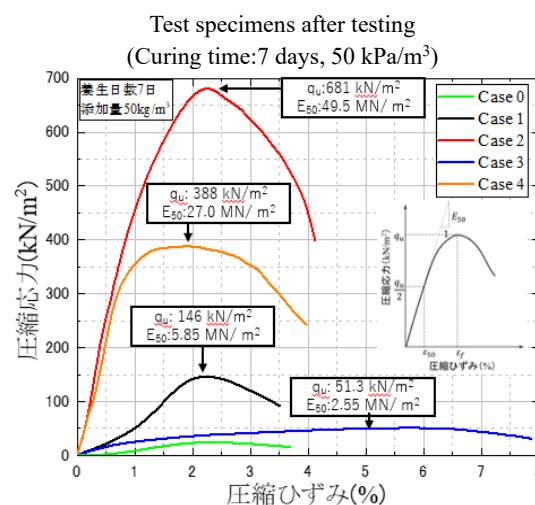


Fig.2 応力-ひずみ曲線
Stress-strain curve

添加したほうがピーク強度は大きかった。真砂土と青粘土を含んだ母材に PS 灰系改質材を添加するとセメント添加より破壊ひずみが大いことが確認された。

3.2 ピーク強度、変形係数 添加量とピーク強度の関係を Fig.3 に示す。目標強度は、堤体改修に用いられたセメント改良土の一軸圧縮強度として、100~300 kg/m³とした²⁾。添加量、養生日数が増加するほどピーク強度は大きくなる傾向があった。母材や添加量が

*神戸大学農学部 (Faculty of Agriculture, Kobe University) **神戸大学大学院農学研究科 (Graduate School of Agricultural Science, Kobe University) ***農研機構 (Institute for Rural Engineering, NARO) ****五洋建設 PENTA-OCEAN CONSTRUCTION Co., Ltd. *****ジャイワット Jaiwat Co., Ltd.
キーワード ため池 底泥土 PS 灰

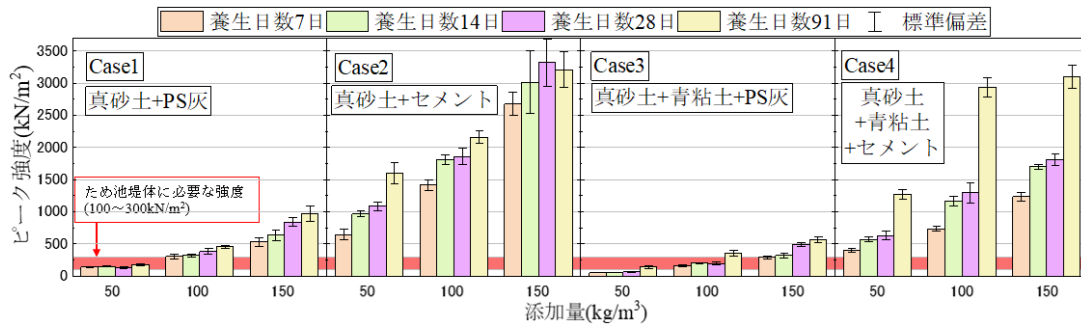


Fig.3 添加量とピーク強度の関係

Relationships between additive amount and peak strength

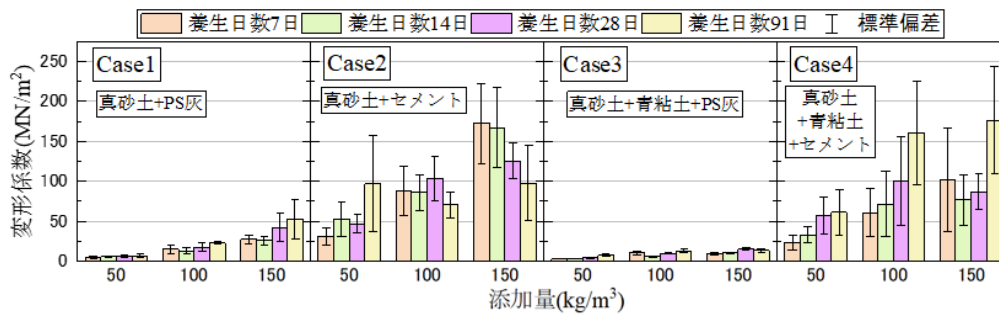


Fig.4 添加量と変形係数の関係

Relationships between additive amount and deformation modulus

同じ場合、PS 灰系改質材添加よりセメント添加のほうがピーク強度は大きかった。PS 灰系改質材添加において、母材が真砂土のみの場合は 50 kg/m^3 以上の添加で目標一軸圧縮強度を満たした。添加量と変形係数の関係を Fig.4 に、 300 kN/m^2 以下におけるピーク強度と変形係数の関係を Fig.5 に示す。Fig.4 より、母材が同じときセメント添加より PS 灰系改質材添加のほうが変形係数は小さかった。Fig.5 より、 $100 \sim 200 \text{ kN/m}^2$ の範囲で Case1 と 3 を比較すると、同程度のピーク強度において青粘土を含む Case3 の方が変形係数はやや大きかった。母材に青粘土を含む場合でも、ピーク強度を増加させるために PS 灰系改質材を多く添加することで変形し難くなったと考えられる。

4. まとめ

本研究では、砂質系ため池堤体土や底泥土を用いた PS 灰改質土を対象に一軸圧縮試験を行い、その変形特性について検討した。その結果、砂質土のみで構成された堤体土の場合 50 kg/m^3 、砂質土と底泥の混合土の場合 100 kg/m^3 の PS 灰系改質材添加で目標一軸圧縮強度を得られた。

謝辞：本研究の一部は JSPS 科研費 JP24H00533 の助成を受けた。

参考文献：1) 伊藤ら (2024)：ため池刃金土としてペーパースラッジ灰系改質土の締固め・透水・強度・変形特性に関する基礎的検討，無機・有機系改質材による発生土の改質とその利活用の普及・高度化の取り組みに関するシンポジウム・講演論文集，pp.88-92；2) 大山峻一ら(2025)セメント改良されたため池の経時変化に関する現地調査，農業農村工学会誌，93(4)，pp.29-33

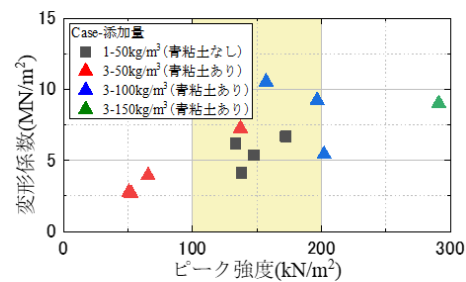


Fig.5 ピーク強度と変形係数の関係
Relationship between peak strength and deformation modulus

鋼矢板で補強したため池堤体における鋼矢板下端の開口幅と浸透流の関係 Relationship between Opening Width around the Lower End of the Steel Sheet Pile Wall and Seepage Flow in an Earth-Fill Dam Reinforced with Steel Sheet Piles

○山崎弘芳* 原 忠** 泉 明良*** 棚谷南海彦****

Hiroyoshi YAMAZAKI, Tadashi HARA, Akira IZUMI, Namihiko TANAYA

1.はじめに ため池堤体の補強工事を対象に、筆者らは落水せず省スペースで施工可能な鋼矢板工法に着目し、レベル2地震動対策が主の鋼矢板二重式工法(図1)を開発し、マニュアル発刊¹⁾や実用化に至っている²⁾³⁾。さらに、要求性能をレベル1地震動・豪雨対策に絞った鋼矢板一列式工法(図2)の開発を進めている⁴⁾。

鋼矢板工法は、根入長や施工条件によって図3に示すような開口が生じる可能性がある一方、既往の浸透模型実験⁵⁾により多少の開口を有する場合でも鋼矢板下端近傍の地盤に顕著な破壊は確認されず、土堤のみと比べて遮水効果が発揮されることを確認している。一方、開口幅の違いが遮水効果(浸潤線)や地盤の安定性に与える影響は未解明であった。そこで開口幅をパラメータとした浸透流解析により、浸潤線や鋼矢板下端近傍の地盤の局所動水勾配や有効応力に着目して、安定性を検討した。

2.解析概要 浸透流解析には、汎用FEMソフトウェアであるPLAXIS2D⁶⁾を使用した。解析モデルを図4に示す。堤体モデルは、既往の実験条件⁵⁾と同様に、実大規模で堤高5.0m、天端幅2.5m、斜面勾配1:1.5の堤体を対象に1/12.5スケールでモデル化した。本解析では、地盤は三角形平面ひずみ要素、鋼矢板は一次元構造部材として梁要素によりモデル化した。地盤物性値を表1に示す。開口部以外の寸法や各種物性値は既往の模型実験の条件と同一であり、均一地盤とした。地盤境界面、鋼矢板の鉛直・水平方向の変位を拘束し、排水条件は地盤底面と鋼矢板は非排水条件、その他境界面は排水条件とした。表2に解析ケースを示す。開口幅 B は、既往実験で設定した35mm(実大スケール約435mm)前後の値を設定した。貯水位は常時満水位相当の320mmの水頭を上流側法面に作用させ、定常浸透流解析を行った。

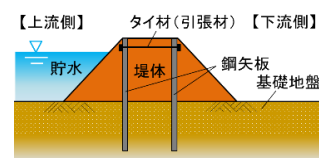


図1 鋼矢板二重式工法

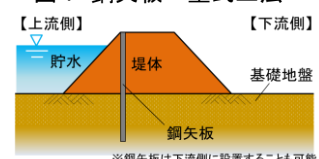


図2 鋼矢板一列式工法



図3 鋼矢板壁下端部周辺に生じる開口のイメージ

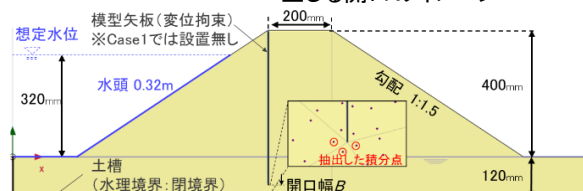


図4 浸透流解析モデル

表1 解析に用いた地盤物性値

項目	値
単位体積密度 γ_t [Mg/m ³]	1.77
間隙比 e_{init}	0.50
内部摩擦角 ϕ [°]	38.50
粘着力 c [kPa]	1.40
透水係数 [m/s]	2.20×10^{-4}

表2 解析ケース

ケース	鋼矢板有無	開口幅 B [mm]
Case1	無	—
Case2	有	8.75
Case3	有	17.5
Case4	有	35
Case5	有	52.5

表2に解析ケースを示す。開口幅 B は、既往実験で設定した35mm(実大スケール約435mm)前後の値を設定した。貯水位は常時満水位相当の320mmの水頭を上流側法面に作用させ、定常浸透流解析を行った。

*日本製鉄株式会社 Nippon Steel Corporation

**高知大学 Kochi University

***農研機構 National Agriculture and Food Research Organization

****株式会社エイト日本技術開発 Eight-Japan Engineering Consultants Inc.

キーワード:ため池、鋼矢板、遮水

3. 浸透流解析結果 本解析から得られた浸潤線を図 5 に示す。ケース 1 では下流側の浸潤線が高い位置まで達するのに対し、鋼矢板を設置した各ケースは下流側の浸潤線が 100 mm 程度低下していたが、その差は 30mm 程度と小さく、ケース 1 と比較した時の浸潤線の低減がより顕著であった。したがって、本検討範囲では開口幅の違いが堤体全体の浸潤線の形状に与える影響は小さいと考えられる。

次に、図 6 に鋼矢板下端近傍の局所動水勾配、間隙水圧、鉛直および水平方向の有効応力の値と開口

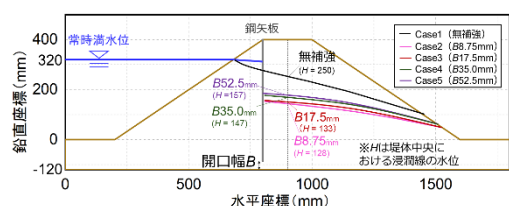


図 5 各ケースの浸潤線

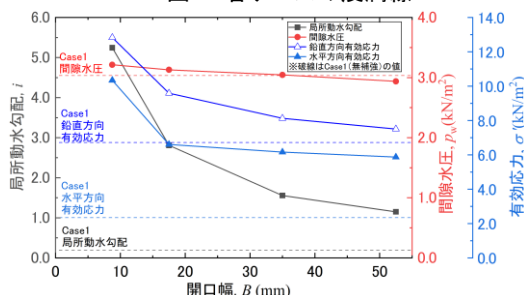


図 6 開口幅と下端近傍地盤の各値の関係

幅の関係を示す。各プロットは図 4 中に赤丸で囲った、局所動水勾配が周辺に比べて相対的に大きい鋼矢板下端近傍の三カ所（鋼矢板前後と鋼矢板下）の積分点の値を平均化した代表値である。局所動水勾配は積分点周辺の水頭分布の空間微分値であり、間隙水圧は、静的成分と浸透による増減分を分離していない。図 6 より、鋼矢板設置ケースでは、開口幅が小さいほど局所動水勾配が大きくなった一方、間隙水圧は顕著な差は認められなかった。また、鋼矢板設置ケースの鉛直および水平方向の有効応力は、全体として開口幅の増加に伴い低下する傾向を示したものの、いずれもケース 1 の値を上回っていた。鋼矢板を設置したケースにおける鋼矢板下端付近の地盤状態について、上流側では、開口幅が小さくなるほど開口部に流れが集中し、局所的な動水勾配が大きくなる。その結果、浸透水圧に起因する側方圧が増加する。一方、下流側では、無対策の場合と比較して浸潤線が低下し、有効応力が増加する。すなわち、上流側および下流側の両側から拘束力が高まることで全応力が増加し、地盤の有効応力も高まる。そのため、地盤が引張応力状態となるような局所破壊は発生せず、安定した応力状態が維持されていると考えられる。以上の結果より、既往の浸透実験⁵⁾において鋼矢板下端近傍で局所破壊が観察されなかったのは、鋼矢板下端近傍地盤において局所動水勾配が高まったとしても、正の有効応力が維持されていたからと考えられる。

4. まとめ 鋼矢板で補強したため池堤体を対象とした浸透流解析を通じ、鋼矢板下端の開口幅が遮水性と地盤の安定性に与える以下の傾向を把握した。鋼矢板設置により下流側堤体の浸潤線は低下し、ある一定の開口幅以下であれば浸潤線に与える影響は限定的となる。鋼矢板下端近傍地盤において、開口幅が小さくなるほど局所動水勾配は高まるものの、地盤の正の有効応力が維持され局所破壊に至らない。

参考文献 1) 農研機構ら：鋼材によるため池堤体補強工法設計・施工マニュアル，農研機構，2025. 2) 井上隆司：二重鋼矢板工法を用いた六丁池改修工事，水土の知，Vol.88，No.10，pp.846-847，2020. 3) 木村洋介：二重式鋼矢板工法によるため池耐震対策工法の検討，水土の知，Vol.89，No.11，pp.880-881，2021. 4) 泉明良ら：鋼矢板一列式工法で補強したため池堤体の動的遠心荷重模型実験，地盤工学会四国支部令和 7 年度技術研究発表会，pp.25-26，2025. 5) 山崎弘芳ら：鋼矢板壁で補強したため池堤体における鋼矢板下端周辺の隙間が遮水性に与える影響，第 61 回地盤工学研究発表会，（投稿中），2026. 6) Bentley: PLAXIS2D，入手先 <https://bentleysystems.servicenow.com/community?id=kb_category&kb_id=7e008d1a1b054a50f3fc5287624bcbda&kb_category=7853acb787285a105bea87380cbb3528>

ガビオンマットレスを用いたため池越水保護工の地震時の構造安定性 Seismic Resistance of Embankment Overtopping Protection Using Gabion Mattresses

小林秀一*・○小林龍平*・板垣知也*・高橋直哉**・森井俊廣***

KOBAYASHI S., KOBAYASHI R., ITAGAKI T., TAKAHASHI N. and MORII T.

1. はじめに

ため池の豪雨耐性の強化に向け、ガビオンマットレスを用いた越水保護工の技術開発を進めている。ガビオンマットレスは、直方体状の鉄線かご枠（JISA 5513 の角形じゃかご）に 100~200mm 径の玉石を詰めた構造体で、これを連結して、堤頂から下流斜面にかけ平張り状に被覆敷設する。2022 年 10~11 月に、運用中のため池（ND 堤，新潟県長岡市）において試験施工を実施し、図 1 のガビオン越水保護工を敷設した¹⁾。その後 2024 年 1 月に能登半島地震が発生し、周辺で震度 5 強の強震が観測されたが、越水保護工に構造変状はほとんど生じていない（図 2）²⁾。本文では、このような強震を経験したにもかかわらず、何ら損傷変状は生じず構造安定性を保ちえた事実から、逆算的に、強震時において発揮されたであろうガビオン越水保護工の安定性メカニズムを推察する。

2. ND 堤サイトに到来した地震動の推定

2.1 サイトの卓越周期 ND 堤の近傍，北北西 5.2 km にある見附市昭和町観測点（震源より東方向 145.1 km 位置）における強震観測データ³⁾の加速度応答スペクトルを、図 3 に示す。同図には、深さ 10 m までの 1 次元地盤に正弦波を入力して地震応答解析（弾性解析）⁴⁾により得た ND 堤サイトの共振曲線を併記する。観測点と ND 堤の両サイトの卓越周期はおおむね対応しており、観測点における地震波を ND 堤サイトに適用しても支障はないと判断される。

2.2 ND 堤における最大応答加速度の推定 観測点の加速度波形から計測震度 I を算定すると 5.0 となり、前節の判断に基づき、この運動エネルギーが ND 堤サイトにも到来したと考える。既往の 215 例の地震記録の分析から正弦波を前提に $I = \log_{10}(a_m^2 T / 4\pi) + 1.72$ の関係が明らかにされており⁵⁾、固有周期 T は図 3 より 0.5 s あたりなので、ND 堤サイトで生じた最大加速度 a_m は 220 gal 程度（震度係数 $K_h = 0.22$ 相当）と推察される。一方、観測点の加速度記録を入力波とした前述の地震応答解析（弾塑性解析）によると、堤体中央断面において、図 4 に示す最大応答加速度（基盤をゼロとした相対値で表示）が得られる。高さ方向の分布に対して台形状の堤体断面積を考慮して重み付き平均をとると、 $a_m = 3.7 \text{ m/s}^2$ ($K_h = 0.38$ 相当) が得られる。

3. ガビオン越水保護工の地震時安定性

3.1 堤体のすべり安定性 前章で推定した K_h をもとに、円形すべり面スライス法により堤体のすべり安全率 F_s を調べると、図 5(a) となる。大きな K_h の発生が想定されたが、堤体自体は十分に安定していたと推察

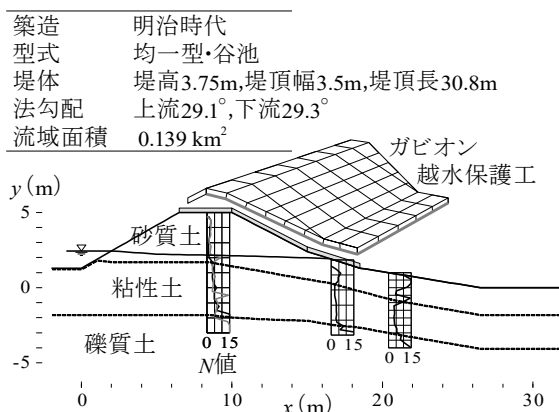


図 1 試験施工により敷設したガビオン越水保護工

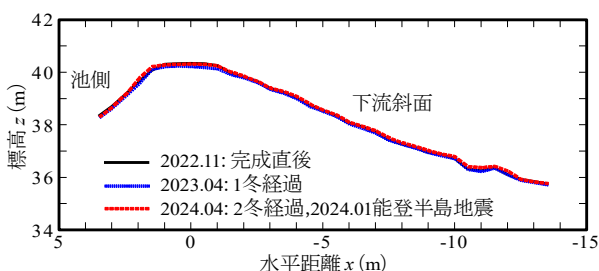


図 2 TLS 測量による下流斜面の変位

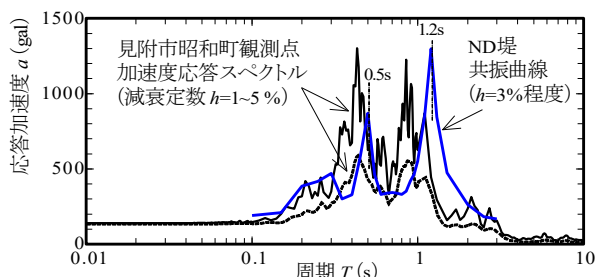


図 3 観測波の加速度応答スペクトルと ND 堤サイトの共振曲線

* (株) 水倉組 Mizukura-gumi Co. Ltd., ** 東網工業 (株) Tomo-kogyo Co. Ltd., *** 新潟大学名誉教授 Prof. Emeritus, Niigata University

キーワード：ため池堤体，越水保護工，ガビオンマットレス，地震時安定性，円形すべり面法，地震応答解析

される。参考に、地震応答解析により算定された、20秒間の無加震後における下流斜面上下端の残留変形量を同図(b)に示す。材料特性に不確定なところを残すが、大きな変状はなく堤体の安定性を確認できる。

3.2 ガビオン越水保護工の安定性 ガビオン越水保護工は、平常時には、図6(a)に示す自重 W によって生じる滑り抵抗 R と滑動力 S のバランスによって構造安定性を保つ。ここに強震に伴う慣性力 $K_h W$ が作用すると、斜面方向に沿った滑動と直交方向の浮上がりの危険性が増す。単純な力のバランスに基づき、滑動と浮上がりに対する F_s を試算すると図6(b)のようになる。推定した K_h のもとで浮き上がり滑り抵抗機能が消失していた可能性があるが、ガビオン越水保護工では、それに代わって、鉄線かご枠がもつ引張り強度が発揮される。当該越水保護工では、亜鉛メッキ鉄線を用い線径5mm、網目10cmの仕様であるので、かご枠の引張り強度は1m幅当り60kN程度となり、自重の斜面方向成分による引張り力7kN程度（ガビオンの単重16kN/m³）を大きく上回る。したがって、浮き上がった後もガビオンが引張り破断することはなく、地震後には元のように堤体斜面に接地したと想定される。その際にわずかなずれが生じ、図2にみられる数cmの下流側への変位になったと考えられる。

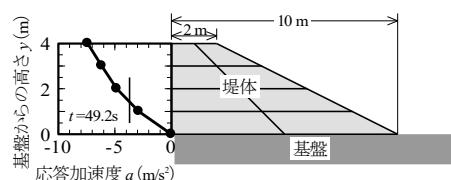
4. まとめ

2024年能登半島地震による強震を経験したにもかかわらず、ため池堤体およびガビオン越水保護工に損傷変状は生じず構造安定性を保ちえた。この事実から、逆算的に、強震時において発揮されたであろう越水保護工の安定性メカニズムを推察した。技術設計に際し当該工に耐震性能は求められていないが、鉄線かご枠が柔軟な引張り強さを有することから、効果的に地震耐性（粘り強さ）を発揮しうると考えられる。

一連の検討にあたり、京都大学名誉教授青山咸康先生ならびにNTC コンサルタンツ(株)坂井孝太郎氏よりご助言をいただいた。記してお礼申し上げます。

参考文献：

- 1) 小林秀一, 他3名: スマートガビオンを用いたため池堤体の越水保護工の開発, 農業農村工学会誌, 92(11), 25-28, 2024.
- 2) 小林龍平, 他5名: ガビオンマットレスを用いたため池越水保護工の安定性モニタリング, 第74回農業農村工学会大会講演会, 440(P), 2025.
- 3) 防災科学技術研究所: 防災科研 K-NET・KiK-net, <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 4) 地盤工学会地盤技術者のためのFEMシリーズ編集委員会: 有限要素法をわかる, 地盤工学会, 2020.
- 5) 菱川三郎, 他2名: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, 1, 51-56, 1991.



(a) 堤体中央断面における最大加速度応答の分布

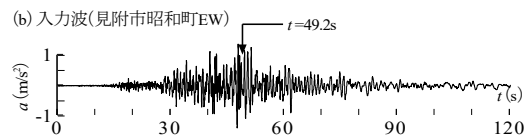
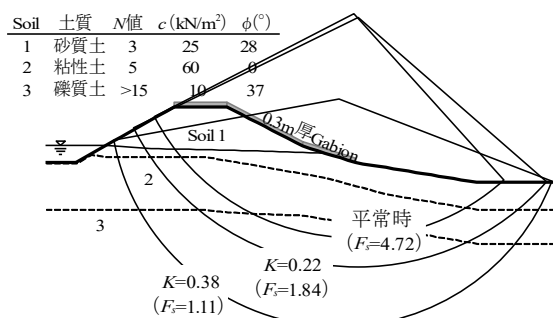
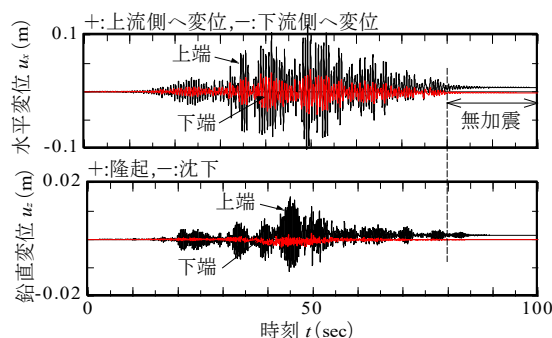


図4 観測波を入力した地震応答解析によるND堤中央断面における応答加速度分布

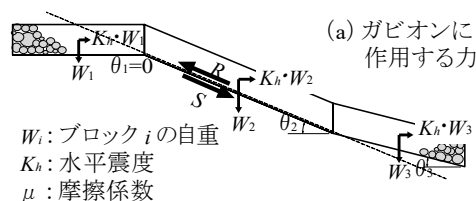


(a) 想定震度係数におけるすべり円弧と安全率



(b) 下流斜面上下端における応答変位および残留変形量

図5 堤体の円形すべり面と地震後の残留変位



(a) ガビオンに作用する力

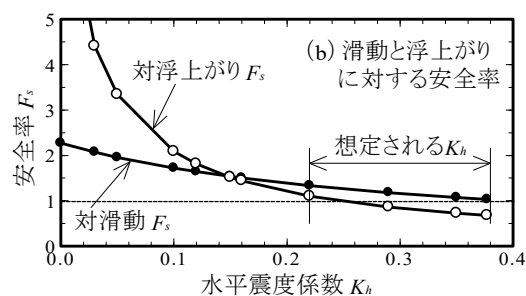


図6 ガビオン越水保護工の地震時における対滑動および対浮上りの安全性

天端を固化改良するため池堤体の越流時における
侵食特性と改良形状に関する実験的検討
Erosion Characteristics and Effects of Crest Improvement Shape
on Small Earth Dams under Overtopping

○北川 賛* 大山峻一** 眞木 陸** 泉 明良**
竹川尚希*** 園田悠介* 澤田 豊*

Tasuku KITAGAWA, Shunichi OHYAMA, Riku MAKI, Akira IZUMI

Naoki TAKEGAWA, Yusuke SONODA, Yutaka SAWADA

1. はじめに

ため池の耐震対策工として施工性・経済性に優れている固化材を用いて天端を固化改良する事例がある。天端の固化改良によって地震時の堤体内に生じる加速度が低減し、天端沈下量を抑制する効果が報告されている。一方、近年の豪雨災害では流木が洪水吐を閉塞し、堤体越流の発生による破堤の事例がみられる。天端の固化改良や改良形状の違いにより無対策時と侵食形態が異なることが考えられるものの、天端を固化改良したため池堤体の侵食特性を検討した事例はほとんどない。そこで本研究では、天端を固化改良したため池堤体を対象に模型実験を実施し、越流における侵食形態について検討した。

2. 実験概要

Fig. 1 に堤体模型形状および寸法を示す。堤体模型は模型縮尺 1/25 とし、堤高 200 mm、天端幅 120 mm、奥行き 500 mm とした。堤体模型および基盤には銕田砂を用い、相対密度 90%となるように締め固めた。本実験では無対策 1 ケースと天端固化改良を行った 3 ケースの計 4 ケースについて実施した (Fig. 2)。天端固化改良のケースは、天端から高さ 60 mm 改良した基本ケースに加え、斜面を改良したケース (A 型)、改良部底部にくさび形状を設けたケース (T 型) の 3 ケースである。小規模ため池の常時満水位を想定し、堤体模型上流側水位 130 mm で貯水した。堤体内の間隙水圧を定常状態にした後、実験を開始した。気候変動による洪水流量の増加を見込んだ流量 85 L/min の水をポンプで供給し、上流側の水位を上昇させ、越流を発生させた。当該流量の越流水深は 18 mm であった。

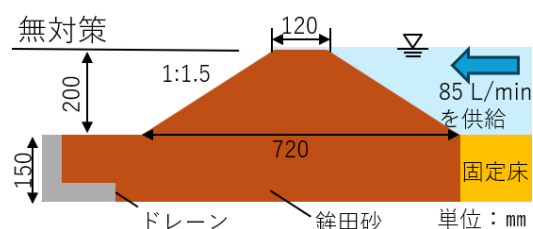


Fig. 1 模型の形状および寸法
Model shape and dimensions

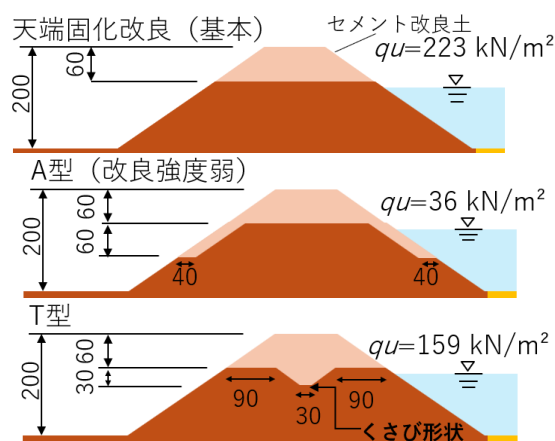


Fig. 2 天端固化改良した実験ケース
Experimental cases

*神戸大学大学院農学研究科 Graduate School of Agricultural Science, Kobe University

**農研機構農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering NARO

***産業技術総合研究所計量標準総合センター National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology キーワード：ため池，越流，侵食，セメント改良

3. 実験結果および考察

Fig. 3 に無対策，天端固化改良（基本）ケースの侵食状況の写真を示す．無対策のケースでは，下流法面側から天端全体へ侵食が急速に進行し，越流開始 20 秒後には堤高を保てなくなった（Fig. 3 (a)）．天端固化改良（基本）ケースでは，未改良部の下流法面が鉛直になるまで侵食された（Fig. 4 (1)）．しかし，その後は改良部がひさしの役割²⁾を發揮し，改良部下部は急速に侵食されることが抑制された（Fig. 3 (b)）．その後，時間経過とともに法尻および基盤部が深く洗掘され（Fig. 4 (2)），洗掘面が自立できず堤体部は斜面崩壊が進行した（Fig. 3 (c) および Fig. 4 (3)）．最終的に，改良部と未改良部の境界部が弱部となり，天端改良部が傾き，パイピングおよび大規模な堤体土の流出が生じた（Fig. 3 (d)）．このように改良部により急速な侵食が抑制されることで天端直下の侵食や崩壊が遅れ，侵食速度の低減につながった．

A 型，T 型のケースの侵食形態は主に基本ケースと同様であったが，A 型のケースでは Fig. 5 に示すように下流斜面改良部もひさしの役割²⁾を發揮し，斜面改良部下部も急速な侵食が抑制された．その結果，A 型の改良によって，斜面改良部が破損するまでの間，最も高い侵食抑制効果が得られた．T 型のケースでは，破堤時の天端の傾きが天端固化改良（基本）ケースの 9° に対して 12° と大きく，より急な傾斜状態においても安定性を維持した．このことから，くさびが転倒および剥離に対する抵抗を高め，堤体の粘り強い挙動に寄与したと考えられる．

4. まとめ

本研究では，セメント改良土を用いて天端を固化改良するため池堤体の越流時における侵食特性を検討するため，堤体模型を対象に越流実験を実施した．その結果，天端を固化改良した堤体では侵食速度が低減する侵食形態となることが明らかとなった．また，固化改良部の形状の違いが侵食プロセスに影響を与えることが示された．

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP24H00533 の助成を受けたものです．

引用文献：1) Ohyama et al. (2025) : Effects of crest improvement on the seismic stability of small earth dams, *Soil Dynam Earthq Eng*, 198 109622. 2) 服部ら(2016) : 越水による決壊までの時間を少しでも引き延ばす河川堤防天端・のり尻の構造上の工夫に関する検討，国土技術総合研究所資料，911.



Fig. 3 越流開始後の侵食状況
Erosion progress after overtopping

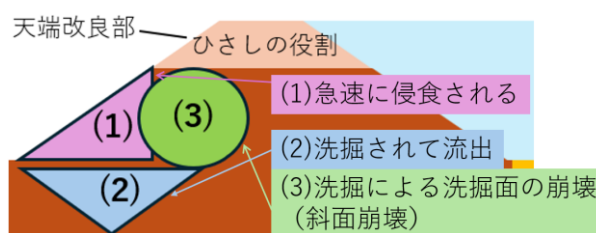


Fig. 4 天端固化改良による侵食形態
Erosion patterns in crest improved embankments

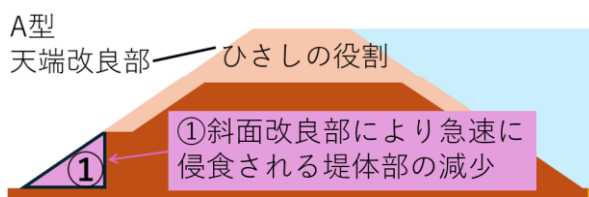


Fig. 5 A 型の改良形状による侵食抑制
Erosion control by A-shape