

研究成果報告書

研究開発課題名	ベントナイト系土質材料を用いた遮水層によるため池堤体改修工法の開発
研究総括者	株式会社 ホーゲン
研究開発組合	株式会社ホーゲン 家島建設株式会社
試験研究機関	国立大学法人 島根大学 国立大学法人 高知大学 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

平成 29 年に公表された、「ため池一斉点検を踏まえた詳細調査等の実施状況」では、調査を実施したため池の約 55%で耐震不足が確認され、約 38%で豪雨対策が必要とされた。特に、近年全国的に実施されている農業用ダム安全性評価において、漏水対策としてフィルダムの遮水ゾーンがグラウチングにより改修されている事例が見られ、フィルダムの耐震性上、非常に大きな課題となっている。これは、比較的大きな地震動を受けると、グラウチングラインで堤体が上下流に割れる現象が発生するからである。遮水ゾーンへのグラウチングは、その改修工法に大きな問題があると指摘された平成元年以前においては、ため池の漏水対策として一般的な工法であったため、それまでにグラウチングによる改修が実施された多くのため池では、極めて危険な潜在的な課題を抱えている。

農業用水の安定供給と安全な農村環境の構築に向け、これらため池の迅速な改修は喫緊の課題である。ため池の改修方法には、現在では前刃金工法が一般的に用いられる。この工法は、遮水性を有する刃金土を堤体上流部に設置し、漏水の防止と浸潤線の低下による堤体の安定性向上を図るものである。前刃金工法の実施には、良質な刃金土が不可欠である。しかしながら、近年ため池付近で刃金土を確保することが困難になっている。

刃金土の不足を解消する手段として、ベントナイトの利用が挙げられる。ベントナイトは、天然の粘土鉱物であり、吸水により膨潤する性質を有する。この膨潤性によって高い遮水性や自己修復性（損傷などの理由によって低下した遮水性が、徐々に回復する性質）の発揮が期待できる。ベントナイトをシート状に加工した製品は、既にため池の遮水材料として施工実績がある。しかしながら、土地改良事業設計指針「ため池整備」では、せん断応力が働く場合の強度が期待できないとの理由から、鉛直荷重のみが作用する場所に使用するなどの配慮が必要とされている。

ベントナイトをため池の遮水性材料として利用する他の手法として、ベントナイト混合土がある。ベントナイト混合土は、母材となる砂質系土砂にベントナイトを一定量混合して得られる材料である。ベントナイトの膨潤性により、母材の遮水性の改善が可能である。ベントナイト混合土は、廃棄物処分場の底部ライナーや自然由来の重金属汚染土の封じ込めなどの用途で多数の施工実績がある。しかしながら、これら施設は基本的に地下水以浅へ建設されるため、供用条件がため池と大きく異なる。

ベントナイト混合土の刃金土への適用を考えた場合、その大部分は浸潤線以深に位置し、浸透流

の影響下に置かれる。また、ため池の多くは冬季に落水するため、ベントナイト混合土は供用期間中に飽和・不飽和状態を繰り返すことになる。このような、ため池特有の供用条件下でのベントナイト混合土の性能や耐久性は未だ明確になっていない。また、地震時におけるベントナイト混合土の動的特性については検討事例がほとんど存在しないため、現状ではベントナイト混合土を用いたため池堤体の耐震性の検証は困難である。さらに、膨潤性を有する材料を盛土構造物であるため池堤体へ適用した際の影響は、全く明らかになっていない。現在、数件ながら存在するため池堤体へのベントナイト混合土の適用事例では、ベントナイト混合土の材料特性を考慮せず、通常の土質材料を対象にした設計・施工手法をそのまま流用するに留まっており、その安全性の照査手法が確立された状況とは言い難い。

一方、ベントナイト系土質材料の近年の利用状況を見ると、放射性廃棄物の最終処分や産業廃棄物処分場においてベントナイト碎石を利用した遮水工法が採用されている。これは、ベントナイト原鉱の含水比や粒度を調整したものをそのまま締め固める工法であり、現場にて母材との混合作業が不要であるため、作業性の面でメリットが大きい。ベントナイト碎石は、ため池における使用実績はなく、厚みのある遮水層にはコスト高になるが、薄層化することによりコスト的にも使用可能になる可能性がある。

本事業では、ため池特有の供用条件を想定した各種性能評価試験を実施することにより、ベントナイト系土質材料の基本性能、動的特性、耐久性を解明し、刃金土へ適用する際の留意点を取りまとめることで、ベントナイト系土質材料を用いた遮水層によるため池堤体改修工法を開発し、遮水層の設計・施工手法にベントナイト系土質材料の特性を反映することにより、ため池改修の合理化および低コスト化を図ることで刃金土不足の課題解消へ貢献することを目的とした。

1. 2 事業の内容及び実施方法

(1) 刃金土に要求される遮水性や強度の性能を満たすベントナイト系土質材料の仕様の明確化

- ・ベントナイト混合土の配合設計試験

(2) ため池特有の供用条件を想定した性能確認試験による長期的な耐久性および膨潤性の解明

- ・ベントナイト混合土の膨潤量試験
- ・ベントナイト系土質材料の膨潤圧試験
- ・ベントナイト混合土の圧密非排水三軸圧縮試験
- ・ベントナイト混合土の非排水繰り返し三軸圧縮試験
- ・遠心力載荷装置による振動実験
- ・ベントナイト系土質材料の長期耐久性および膨潤性評価

(3) 遮水性を高めることで可能となる遮水層の薄層化に関する検討と施工方法の開発

- ・遮水層の薄層化を適用したため池堤体の安定性について実験的検討
- ・実証試験により施工性や施工コストの削減効果の確認

(4) ベントナイト系土質材料の材料特性を考慮した設計・施工手法の開発

- ・設計、施工で考慮すべきベントナイト系土質材料の材料特性を整理

(5) 実証試験

- ・高知大学構内 灌漑用ため池建設工事

(6) 機能監視

- ・竣工後の水位および浸潤線測定

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

表-1 に事業着手時に想定した技術的課題とその対応を示す。

表-1 事業着手時に想定した技術的問題と対応

技術的問題点	対応
ため池特有の共有条件によるベントナイト混合土の性能，耐久性評価がなされていなかった．	室内試験 ・飽和度の異なるベントナイト混合土の透水試験の実施 ・添加率の異なるベントナイト混合土の膨潤特性の把握 ・圧密非排水三軸圧縮試験 ・非排水繰り返し三軸圧縮試験 ・遠心力载荷試験
地震時におけるベントナイト混合土の動的特性の検討事例がほとんど存在しない	室内試験 ・ベントナイト混合土の膨潤圧試験 ・振動台実験
ベントナイト混合土の鉛直打設による連続性の確保	試験施工 ・真砂土による函体打設実験

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

本事業における研究開発組合内の役割分担は，(株)ホーチュンが供試体作製，試験用材料提供，試験体試験・実証試験実施，設計・施工手法の開発を，家島建設(株)が試験体試験実施，実証試験実施，設計・施工手法の開発を担った。

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

本事業における試験研究機関の役割分担は，島根大学，高知大学が試験体試験・実証試験実施，設計・施工手法の開発を，農研機構が試験体試験を担った．研究開発組合の役割分担は上述のとおりである．表-2 に本事業の実施体制と役割分担を示す。

表-2 本事業の実施体制と役割分担

研究開発の項目	事業実施主体 (新技術研究開発組合)		試験研究機関		
	(株)ホーチュン	家島建設(株)	島根大学	高知大学	農研機構
試験体作製	◎	—	—	—	—
試験用材料提供	◎	—	—	—	—
試験体試験実施	◎	○	◎	◎	◎
実証試験実施	○	◎	◎	◎	—
設計・施工手法の開発	◎	◎	◎	◎	—

1. 5 事業の年度計画と実績

表-3 に本事業の年度計画と実績を示す。

表-3 本事業の年度計画と実績

研究開発の項目	平成30年度		令和元年度		令和2年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
刃金土の要求性能を満たすベントナイト系土質材料の仕様の明確化						
ため池特有の供用条件を想定した性能確認試験による長期的な耐久性および膨潤性の解明						
ベントナイト系土質材料の遮水性向上による遮水層の薄層化に関する検討						
ベントナイト系土質材料の材料特性を考慮した設計・施工手法の開発						

注) — は計画, — は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 刃金土に要求される遮水性や強度の性能を満たすベントナイト系土質材料の仕様の明確化

本事業に使用するベントナイト混合土の配合設計を行った。本事業では遮水性の向上による遮水層の薄層化を目的としていることから、ベントナイト混合土の要求性能は透水係数 $k=1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ と定めた。これは通常のため池の遮水ゾーンに要求される透水係数 $k=1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ に比べ、10 倍の遮水性能を有することとなる。配合設計のフローを図-1 に示す。配合試験の結果から本事業では香川県産の真砂土を、ベントナイトは㈱ホーゲン製の「アースフレンド」を採用した。ベントナイトの添加率は、母材の乾燥重量比で締固め度 90% 時に 13%，締固め度 95% 時に 10%，実証実験におけるベントナイト混合土の締固め密度は、締固め度 90% 時に 1.605 g/cm^3 ，締固め度 95% 時に 1.721 g/cm^3 と定めた。図-2 に各締固め度における添加率と透水係数の関係を示す。

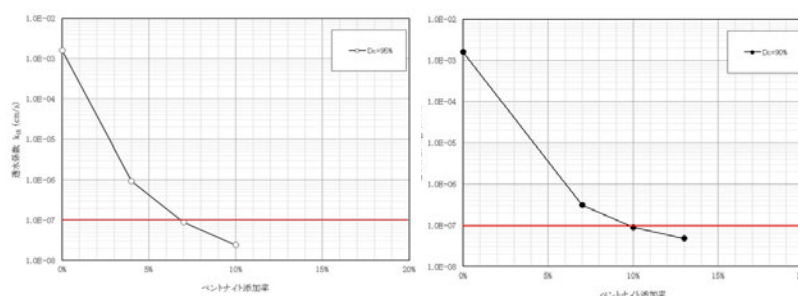


図-2 各締固め度における添加率と透水係数の関係

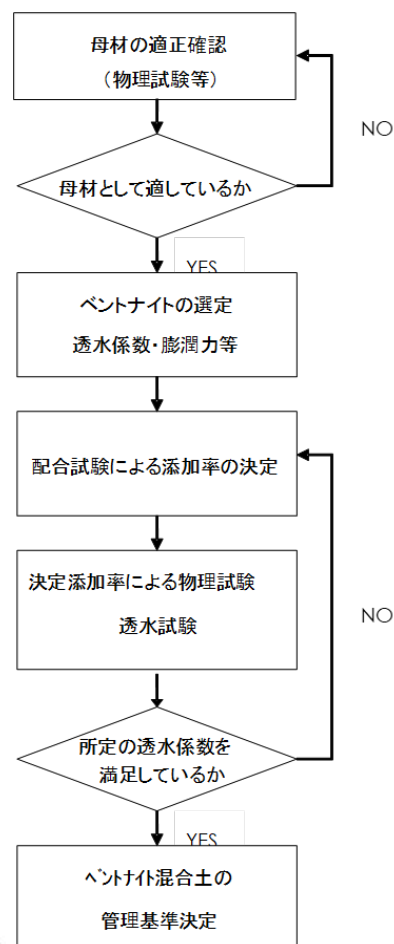


図-1 配合設計試験フロー

(2) ため池特有の供用条件を想定した性能確認試験による長期的な耐久性および膨潤性の解明

(2-1) 平成 30 年度に実施した研究開発の結果

本事業では、初年度にベントナイトの混合が強度特性に与える影響を把握するため、非排水三軸圧縮試験を、ベントナイトの混合が強度変化特性に与える影響を把握するため、非排水三軸圧縮試験および非排水繰返し三軸試験、ベントナイト混合土の膨潤圧試験を実施した。図-3 から図-6 に当該年度に実施した試験結果を示す。

試験結果より以下の知見を得た。

- ・ベントナイト混合土はその拘束圧の分布により、吸水による膨張、収縮の挙動が異なる。
- ・ベントナイト混合土の添加率が多くなるほど体積膨張を示す領域が増える。
- ・本事業で実施した範囲では発生した膨潤ひずみは最大で 0.11% であった。
- ・ベントナイト混合土の排水せん断強度はベントナイトの混合による影響をさほど受けない。
- ・ベントナイト混合土の非排水せん断強度はベントナイトの混合により低下する傾向を示した。
- ・ベントナイト混合土の膨潤圧はベントナイトの添加量の増加と共に大きくなり、本事業における添加率である 添加率 13% (Dc=90%) 時に 27.2kN/m^2 、添加率 10% (Dc=95%) 時に 20.9kN/m^2 の値を示した。

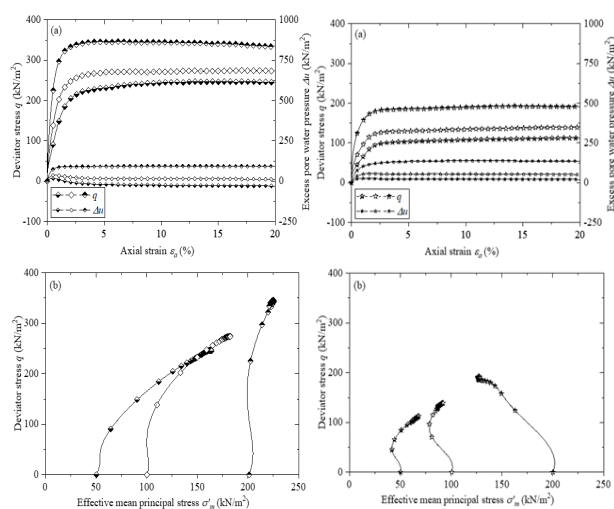


図-3 Dc=90%母材とベントナイト 13%添加混合土の

(a) 主応力差－軸ひずみ関係と過剰間隙水圧－軸ひずみ関係、
(b) 有効応力経路

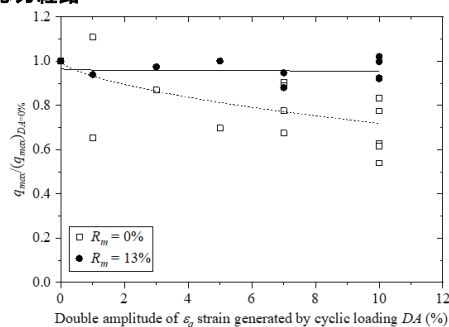


図-5 繰返し載荷過程で生じた両振幅軸ひずみと正規化ピーク強度の関係（強度低下特性）

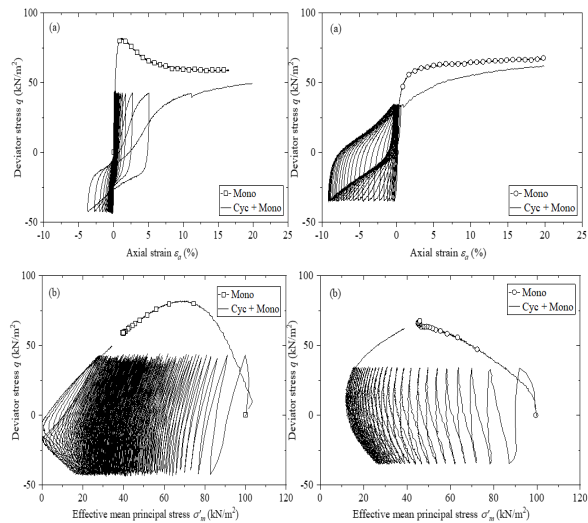


図-4 Dc=90%母材とベントナイト混合土の

(a) 主応力差－軸ひずみ関係、(b) 有効応力経路

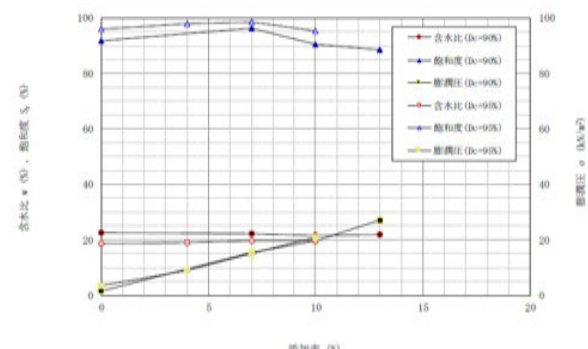


図-6 ベントナイト混合土の添加率と
含水比、飽和度、膨潤圧の関係

(2-2) 令和1年度に実施した研究開発の結果

令和1年度は前年から継続し、強度変化特性の把握を行うとともに、灌水と落水を繰り返すため池堤体で使用されるベントナイト系土質材料の乾湿による自己修復性を評価のため、自己修復試験を、ベントナイト混合土に代わるベントナイト系土質材料であるベントナイト碎石の堤体内での吸水膨潤による影響を検討するため、膨潤圧試験を実施した。

図-7 から図-10 に当該年度に実施した試験結果を、写真-1 に自己修復試験の状況を示す。



写真-1 自己修復試験実施状況写真

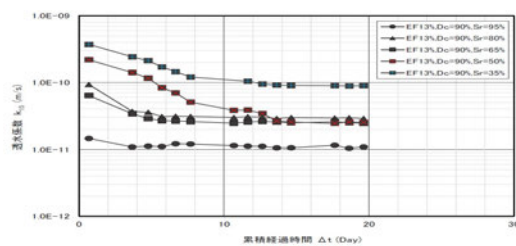


図-7 各飽和度のベントナイト混合土の透水係数と経時の関係

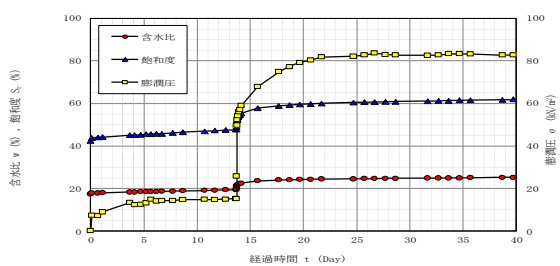
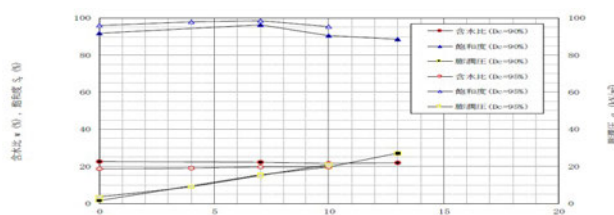
図-8 \$D_c=95\%\$ ベントナイト混合土の
含水比、飽和度、膨潤圧と経時の関係

図-9 ベントナイト碎石の含水比、飽和度、膨潤圧の関係

自己修復試験にて導入した程度の損傷において、施工後の灌水、満水における飽和度の違いがあっても遮水性は 1×10^{-7} cm/s 以下を満足する事が確認された。

非排水繰り返し三軸圧縮試験の結果から、本事業に使用する添加率のベントナイト混合土では地震時におけるピーク強度の低下を大きく抑制することが確認された。

膨潤圧試験より、ベントナイト碎石はベントナイト混合土に比べ膨潤圧が高く、給水時の体積膨潤が大きくなることから、本事業での遮水層はベントナイト混合土で構築する事とした。

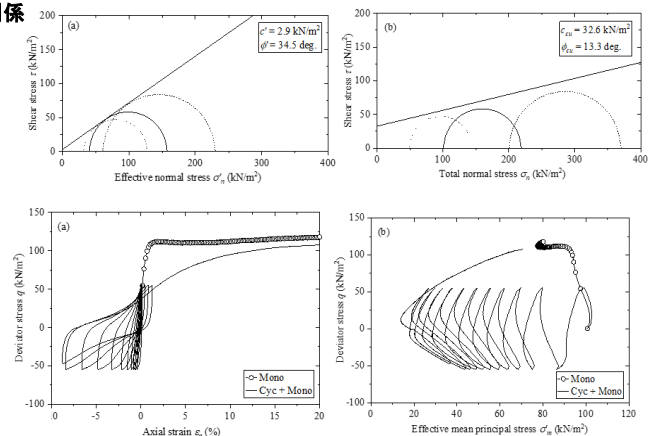
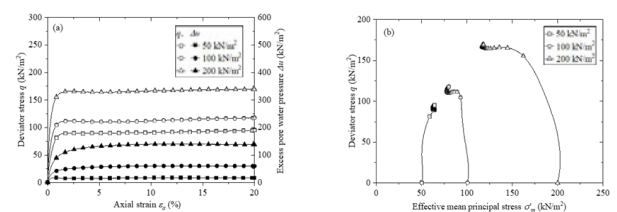


図-10 \$D_c=95\%\$ ベントナイト混合土の非排水繰返し三軸試験

(2-3)

最終年度にはベントナイト混合土と従来の工法で使用されてきた刃金土の比較のため非排水三軸圧縮試験を、水分量履歴がベントナイト混合土のせん断強度に与える影響の確認の把握のため、一面せん断試験（定体積試験）を実施した。また、実際のため池堤体の応力条件下でのベントナイト混合土の膨潤挙動を把握するため遠心力载荷実験を行い、振動台による加振を行うことで地震時の安定性の評価を実施した。図-11 から図-18 に当該年度に実施した各試験結果を、写真-2 に遠心载荷試験前後の堤体模型の状況を示す。

非排水三軸圧縮試験の結果から、締固め度 95% のベントナイト混合土の見かけの粘着力と内部摩擦角は、ベントナイト混合率の増加に伴って低下する傾向にあるものの、本研究で採用したベントナイト混合率程度であれば、そのベントナイト混合土は実際のため池の改修に使用された締固め度 95% の刃金土 2 種類よりも同等以上のせん断強度を有することが確認された。

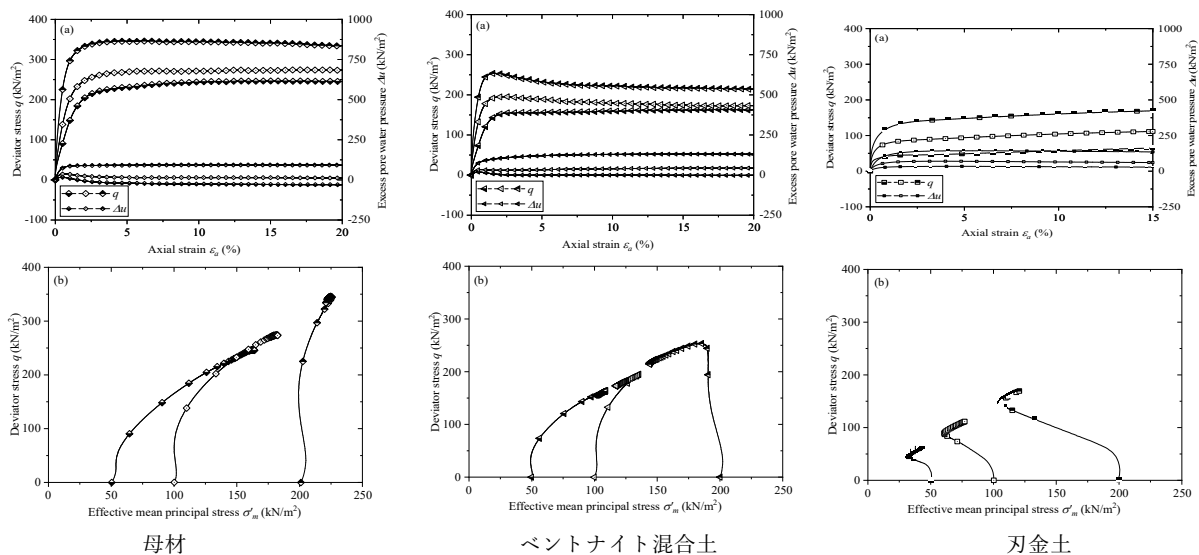


図-11 母材，ベントナイト混合土，刃金土のせん断強度の比較

一面せん断試験の結果から、ベントナイト混合土のせん断強度は、水浸や乾燥の履歴を受けることによって低下することが明らかとなった。しかしながら、せん断強度が高くなる条件で締めを行えば、その後に水浸や乾燥の履歴を受けて低い飽和度を経験し、せん断強度が低下したとしても、その低い飽和度の条件で作製した供試体のせん断強度までは低下しないことが確認された。

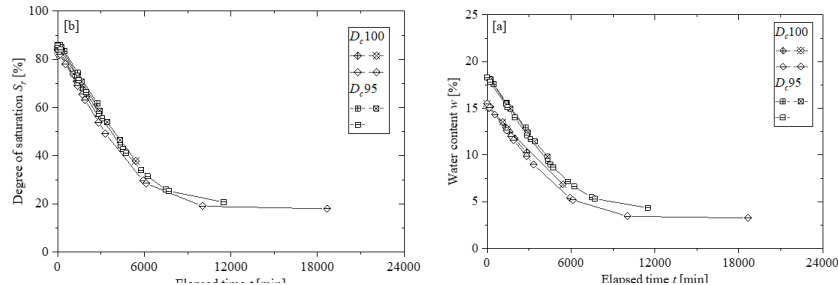


図-12 乾燥過程での水分量の経時変化, [a] 含水比, [b] 飽和度

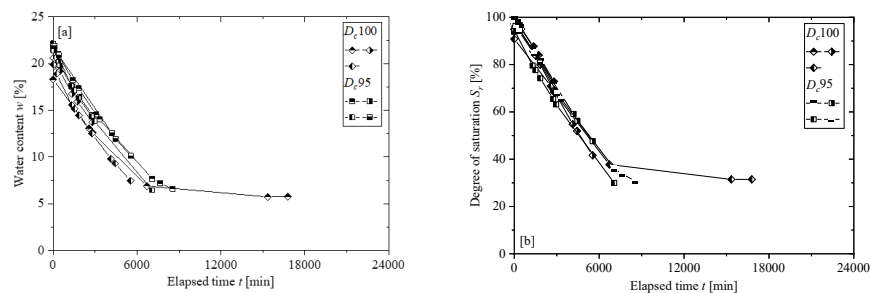


図-13 水浸後の乾燥過程での水分量の経時変化, [a] 含水比, [b] 飽和度

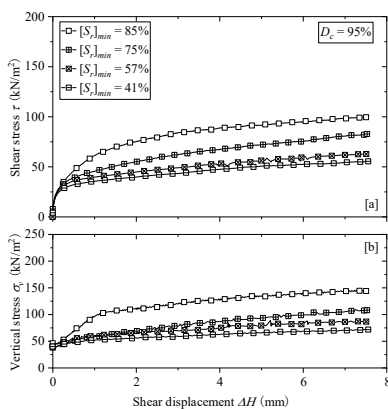


図-14 Dc=95%Bt 混合土の一面せん断試験結果

[a] せん断応力—せん断変位関係,
[b] 垂直応力—せん断変位関係

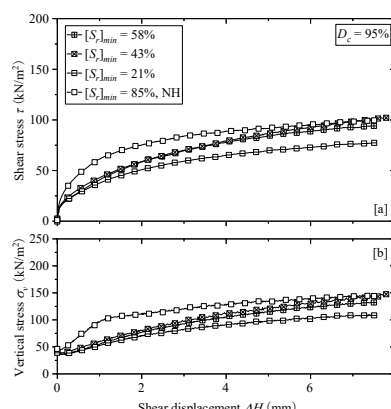


図-15 乾燥履歴を与えた Dc=95%Bt 混合土の

一面せん断試験結果
[a] せん断応力—せん断変位関係,
[b] 垂直応力—せん断変位関係

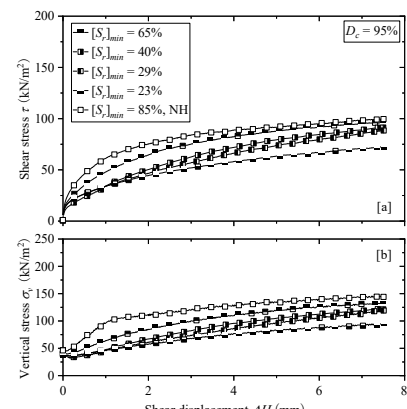


図-16 水浸後に乾燥過程を与えた

Dc=95% Bt 混合土の一面せん断試験結果

[a] せん断応力—せん断変位関係,
[b] 垂直応力—せん断変位関係

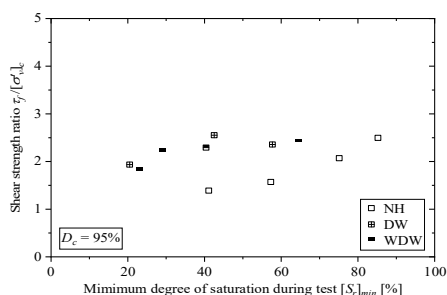


図-17 せん断強度比と最小飽和度の関係 ($D_c = 95\%$)

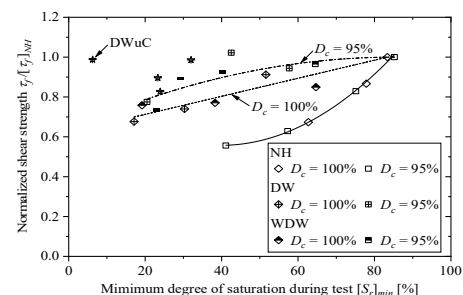


図-18 正規化せん断強度比と最小飽和度の関係

動的遠心力载荷実験では，開発技術におけるため池堤体の耐震性について無対策堤体と粘性土を用いた前刃金土工法を対象に検証を行った．

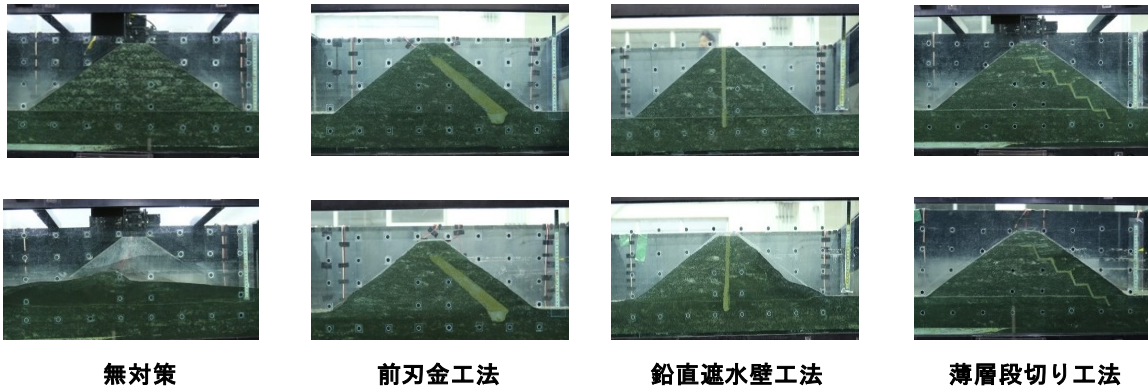


写真-2 遠心载荷試験前後の堤体模型の状況

写真-2 に各試験ケースの試験前後の模型写真を示す．

ベントナイト混合土を用いた薄層段切工法は粘性土を用いた前刃金土工法と同様の遮水効果を有し，加振時の堤体天端沈下量が抑制されるとともに天端および上下流法面に発生するクラックも小さいものであった．このことから，耐震対策工法として広く普及している前刃金土工法と同程度の耐震性を有していることを確認した．

一方，鉛直遮水壁工法は，無対策工法と比較すると堤体内部の浸潤線の位置を低下させ，沈下量も抑制された．ただし，薄層段切工法と比較すると，その沈下量が 55mm に対して鉛直遮水壁工法の沈下量は 321mm であり，耐震性は薄層段切工法の方が優れていることが確認された．

(3) 遮水性を高めることで可能となる遮水層の薄層化に関する検討と施工方法の開発

令和元年度より、遮水層の薄層化に関する検討と施工方法の開発を行った。事前に定めた本事業の要求遮水性能は、従来のため池の遮水ゾーンに求められる透水係数に比べ1オーダー低い値としている。すなわち、ダルシーの法則から、遮水層の厚さは、従来の遮水層に対し、10分の1程度に抑える事が可能となる。当該年度は、次年度に実証試験を実施する高知大学構内のため池建設工事の前造成と共に薄層段切り工法の試験施工を実施した。試験施工後のブロックサンプルによる透水試験結果より、本事業で定めた要求透水係数である $k=1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ よりも低い値を確保し、ため池整備指針に示す遮水ゾーンの締固め度95%を以上の締固め密度である事が確認された。

写真-3 に試験施工の実施状況を、ブロックサンプルによる透水試験結果を表-4 に示す。



床付け完了状況



型枠設置、混合土投入



転圧

写真-3 薄層段切り工法試験施工実施状況

表-4 薄層段切り工法ブロックサンプリングによる透水試験結果

NO	採取日	施工場所	母材	締固め度	方向	透水係数 (cm/sec)
①	2月14日	北側底盤	砕石ダスト		垂直	1.3×10^{-8}
②	2月19日	北側段切り部	真砂土	96	垂直	4.4×10^{-8}
③	2月27日	南側底盤	砕石ダスト	99	垂直	9.3×10^{-9}
④	3月6日	南側段切り部	真砂土	98	垂直	3.2×10^{-8}

(4) ベントナイト系土質材料の材料特性を考慮した設計・施工手法の開発

令和元年度から薄層段切り工法および鉛直遮水壁工法の施工手法について、開発を行った。薄層段切り工法は厚さ 20 cmのベントナイト混合土を撒き出し、転圧する工法とし、製造したベントナイト混合土を鋼製型枠(図-19 参照)へ流し込み、型枠を抜き取った後、転圧締め固める事で 20 cmの層厚のベントナイト混合土層を構築する事とした。

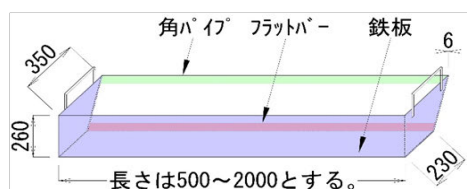


図-19 薄層段切り工法用鋼製型枠概要図

鉛直遮水壁工法はベントナイトの充填、締固めを函体打設工法とすることで、はじめに、