

研究成果報告書

研究開発課題名	袋型根固め材等による押さえ盛土を用いたため池耐震対策技術の開発
研究総括者	関谷 勇太
研究開発組合	ナカダ産業株式会社 NTCコンサルタンツ株式会社
試験研究機関	三重大学大学院 生物資源研究科

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

ため池は全国に約 15 万箇所存在する農業用水確保設備である。そのうち約 7 割が江戸時代以前に築造されており、耐震性能が現行の設計基準に満たないケースも多い。近年、自然災害による被災が確認されており、農林水産省の調査結果では地震原因が約 20% (H23 年～R2 年の 10 年間) である。また、今後 30 年間に発生する確率が約 70%とされている南海トラフ地震や日本海溝・千島海溝周辺の海溝型地震なども懸念される現状では、迅速な耐震対策が求められている。

ため池の耐震対策として一般的な堤体押さえ盛土工法は、耐荷重性・耐水性確保のため十分な締固めが必要であり、通常はため池内の貯水を全て落水させたドライ施工が行われる。しかし、堤体へのアクセス路にかかる仮設費の高騰・施工期間の長期化、水替・貯水期間中の受益者の負担、生態環境への負荷などの理由から必ずしもドライ施工が最適とは限らない。

本事業では、押さえ盛土工法に利用する土を袋型根固め材で代用し、堤体の耐震対策とする工法（以降、本工法と記載する）を提案する（図 1）。

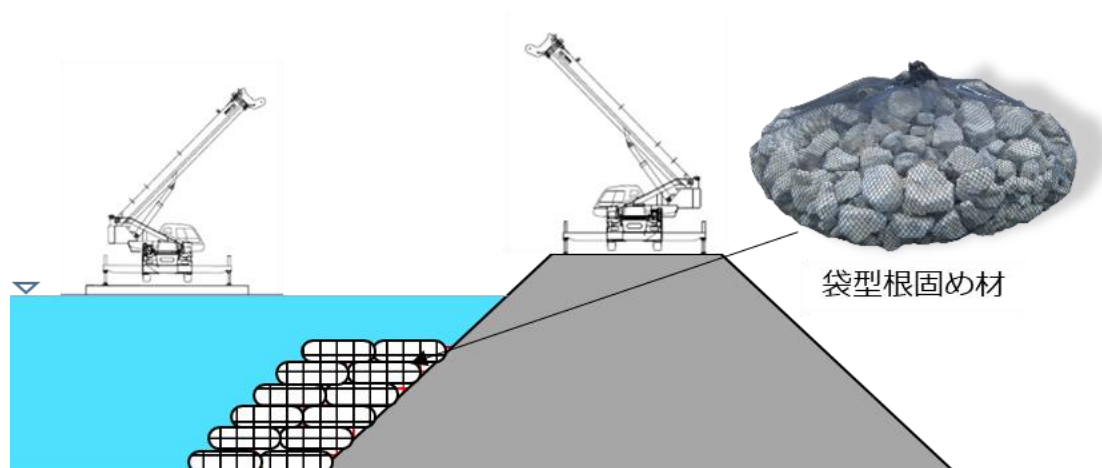


図 1 本工法の施工イメージ

袋型根固め材とは石材を合成繊維ネットに充填してユニット化したフレキシブルな資材であり、河川護岸や橋脚の根固めとして技術開発が進められ、実用化されている技術であ

る。従来の押さえ盛土工法と同様に袋型根固め材の自重とせん断強度により堤体の安定性に寄与するものであるが、施工時に締固め作業を必要とせず、湛水状態のため池に対して袋型根固め材を水上または堤体上からクレーン等で吊り下げて施工できる点が最大の特徴である。仮設費不要による経済性の向上、迅速な水供給の再開、自然空間への負荷抑制などの効果が得られる。また、施工時には視認性の悪い水中の設置目標へクレーンを誘導し、玉外しをすることになるが、ICT 技術を活用することで省力化、経済性向上、施工精度向上が見込まれる。実際に 2019 年には埼玉県の間良田湖にて、本工法による耐震補強工事が実施されている。

本事業では、湛水状態のため池への本工法の ICT 施工を新技術として確立するために、以下 3 つの項目について評価・検証を行うことを目的とする。

- (1) 最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発
- (2) 地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発
- (3) ICT 施工における作業性、施工精度の実証試験

袋型根固め材はネット材と石材からなる複合材料であり、相似則を適用した小縮尺実験では凹凸や噛み合わせ、空隙率、材料強度などを厳密に評価することは難しい。幅広い施工現場に適用可能な信頼性の高い評価・検証を行うためにも、可能な限り実物に近づけた実験を取り入れながら事業を遂行することが重要である。

1. 2 事業の内容及び実施方法

本事業の目的として掲げた 3 項目は、それぞれ次の技術的課題から成り立っている。

- (1) 最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発

本工法の設計においては捨石工の設計パラメータを準用する方法もある。ただし、袋型根固め材に充填する石材は一般的に 50mm～人頭大の粒径であり、捨石工で想定する石材よりも小さい上に、合成繊維ネットによる石材の拘束効果も反映されない。そのため、合成繊維ネットと石材の複合材料として正確な設計パラメータを見いだすことが重要である。

- (2) 地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発

袋型根固め材に充填する石材は局所的に鋭利な断面を有しており、合成繊維にとって損傷しやすい形状である。もし、地震時に合成繊維ネットに破れが生じた場合、石材の流失により機能を失う。通常、袋型根固め材は繊維軸に対して水平方向の引張強さで性能規定されるが、石材が接する部分には垂直方向の荷重が付与されたため、引張強さとは異なる観点で評価を行うことが重要である。

- (3) 施工時の課題

袋型根固め材は、作業ヤード内に建設重機と作業員を配置して合成繊維ネットの中に石材を充填し、その後クレーン等により目標位置へ吊上げ施工される。しかし、湛水状態のため池のように、視認性の悪い設置目標へ ICT 技術を活用して施工する場合の施工の効率性や施工の精度は定量的に評価されていない。

上記より、本事業における技術課題解決の流れは図 2 のようになる。

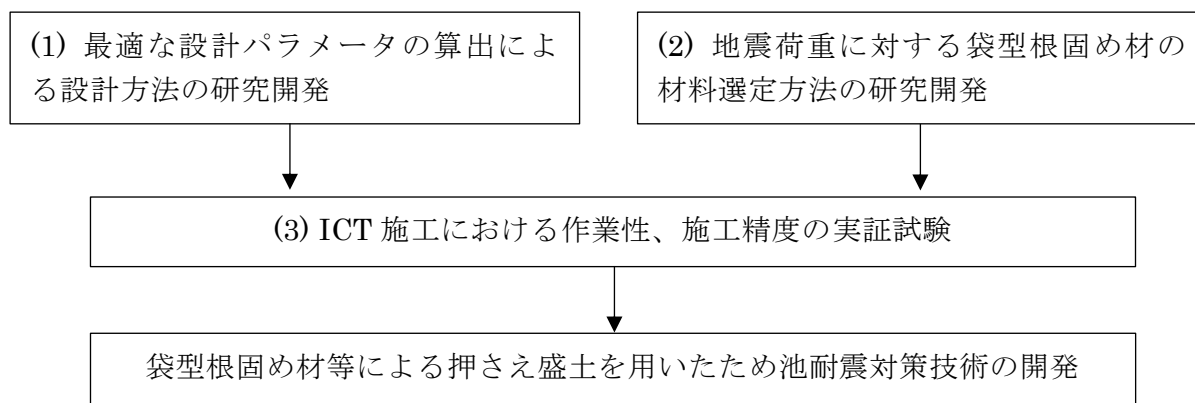


図 2 本事業の内容（技術課題の解決）と流れ

（１）最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発

本工法の設計パラメータを精度よく算出するために内部摩擦角 ϕ および単位体積重量 γ を室内試験および実規模実験を実施した。

石材等の内部摩擦角は、石材間の摩擦や噛み合わせ抵抗を角度で表したものであり、一般的にせん断試験機を用いたせん断試験により算出できる。①室内試験では、中型一面せん断試験器を用いて、一定荷重下における袋型袋型根固め材同士の境界面における内部摩擦角を算出した。押さえ盛土の内層における袋型根固め材のせん断強度および石材を袋型根固め材で拘束することによる影響を評価した。また、実物規模におけるせん断強度を検証するために大縮尺の袋型根固め材模型を積層し、その境界面における滑動角度を算出した（②1/3 縮尺模型実験）。これは押さえ盛土表層における滑動を模擬しており、地震時に被災しやすい部位の評価である。

単位体積重量 γ は実物の袋型根固め材を用いて、所要体積に対する重量から精度よく定量的に算出した（③1/1 縮尺実証実験）。石材のみ、単体の袋型根固め材、群体の袋型根固め材の 3 ケースを比較検討し、袋型根固め材で拘束することによる単位体積重量への影響を検証した。

（２）地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発

ネット材の地震荷重に対する耐久性を評価するために、鋭利断面を想定した治具による押抜き試験を実施した。ネット材が破断した時の荷重と地震動発生時に石材がネット材に負荷する水平荷重とを比較検討した。

（３）ICT 施工における作業性、施工精度の実証試験

ICT 技術を活用した上で本工法の陸上施工を行い、本工法の出来形精度・施工時間を検証した。また、視認性が悪い水中を模擬するために、クレーンオペレータの視界を一部制限した上で実証試験を実施した。ICT 技術として GNSS を活用したマシンガイダンスシステムとリモコンで遠隔操作可能な磁石式オートリリースフックを活用し、原理的にはクレーンオペレータ 1 名で袋型根固め材の玉掛け→吊上げ→目標移動→吊下げ→玉外しができるシステムを提案した。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
(1) 最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発	中型一面せん断試験機、1/3 縮尺模型実験を通じて袋型根固め材のせん断強度を高精度かつ定量的に評価した。 1/1 縮尺実証実験により単位体積重量、空隙率も高精度かつ定量的に評価した。
(2) 地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発	押抜き試験により、鋭利な石材が与えるストレスに対するネット材の耐久性を L1 地震、L2 地震時に想定される荷重と比較検討し、定量的に評価した。
(3) ICT 施工における作業性、施工精度の実証試験	実証実験により、陸上かつ視界制限下における ICT 施工の作業時間および出来形精度を定量的に評価した。

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

下表に研究開発組合と試験研究機関の役割分担を示す。

研究開発の項目	研究開発組合		試験研究機関
	ナカダ産業(株)	NTC コンサルタンツ(株)	三重大学
(1) 最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発 ①内部摩擦角測定試験（室内試験）	○	○	◎
②滑動角度測定試験（1/3 縮尺模型実験）	◎	◎	○
③単位体積重量と空隙率の定量化(1/1 縮尺実証実験)	◎	◎	○
(2) 地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発 ④ネット材の押抜き試験（室内試験）	◎	○	○
(3)ICT 施工における作業性、施工精度の実証試験	◎	○	○

(注) ◎は主担当、○は担当

1. 5 事業の年度計画と実績

下表に事業の年度計画と実績を示す。

項 目	令和 4 年度		令和 5 年度		令和 6 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
(1) 最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発 ① 内部摩擦角測定試験（室						

内試験)						
② 滑動角度測定試験 (1/3 縮尺実験)		 				
③ 単位体積重量と空隙率の定量化 (1/1 縮尺実証実験)						
(2) 地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発 ④ 押抜き試験		 				
(3) ICT 施工における作業性、施工精度の実証試験				 		

注)  は計画、 は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発

1) 内部摩擦角測定試験（室内試験）

袋型根固め材間のせん断強度 ϕ を求めるために中型一面せん断試験器を用いて一面せん断試験を行った。中型一面せん断試験器の上箱と下箱の境目に袋型根固め材同士の接触面が来るように設置した（図 3）。実験に用いた袋型根固め材用ネットは目合い 5mm で、縦 0.3m 横 0.3m 高さ 0.07m とし、ネットにふるい分けた 10~15mm 川砂利、碎石を 11 kg 詰めることで試験体を作成した。また、袋型根固め材間のせん断強度 ϕ との比較するため、中詰め材のみの試験も行った。

せん断箱の上面と側面にダイヤルゲージを設置し、鉛直変位 Δh とせん断変位 δ を、中型一面せん断試験器に設置された力計でせん断応力 τ をそれぞれ計測した。

本試験によって得られた「中詰め材のみ」および「袋型根固め材同士の境界」のせん断強度を表 1 に示す。中詰め材のみでの内部摩擦角が川砂利で 34.8° 、碎石で 37.4° であったのに対して、袋型根固め材間の内部摩擦角は中詰め材を川砂利にした場合 38.3° 、中詰め材を碎石にした場合 40.3° となった。従って、袋型根固め材同士の境界では、少なくとも $\phi = 35^\circ$ 以上を示すことを確認された。また、中詰め材のみと袋型根固め材同士の境界のせん断強度を比較すると、川砂利は約 10%、碎石は約 8% の内部摩擦角が上昇した。袋型根固め材に梱包することで中詰め材が拘束され、せん断過程で中詰め材同士の拘束圧が上昇したと考えられる。

【参考実験】

袋型根固め材と地盤土壌の内部摩擦角を測定するために、中型一面せん断試験器の下箱に地盤土壌を想定して乾燥した豊浦砂、上箱に袋型根固め材を入れ、上箱と下箱の境目に接触面が来るように設置した。実験は目合い 25 mm の実物を約 1/3 縮尺とした目合い 8 mm のネット（縦 0.3m 横 0.3m 高さ 0.07m）を用いた袋型根固め材で行った。袋型根固め材の中に中詰め材（川砂利、碎石）をそれぞれ 9 kg 詰め、試験体を作成した。豊浦砂も密詰めになるように締固めて試験器内に設置した。また、ネットの影響を比較するため上箱に中詰め材のみ、下箱に豊浦砂を詰めた試験も行った。

せん断変位 σ —せん断応力 τ のグラフからせん断応力 τ のピークの値を取り、定圧せん断強さ τ_c とした。求めた定圧せん断強さ τ_c を垂直応力 σ 上にプロットして直線近似を行い、直線の傾きから ϕ を求めた。また、切片である粘着力 c は 0 に設定した（図 4）。

参考実験の結果を表 2 に示す。豊浦砂のみの内部摩擦角 ϕ は 26.1° であった。本来、豊浦砂の内部摩擦角は約 35° と報告されるが、岸（1984）は砂のように粒径が小さくなると中型一面せん断試験機では ϕ が小さくなる傾向があることを報告している。この現象を考慮すると、豊浦砂と袋型根固め材との内部摩擦角は豊浦砂のみと比較して約 5° の低下、中詰め材のみと豊浦砂の内部摩擦角は約 10° の低下であった。袋型根固め材が中詰め材を拘束することで、中詰め材のせん断抵抗が上昇し、より大きな応力が豊浦砂に伝えられたことが考えられる。

上記の現象を踏まえて、層ごとに黒い豊浦砂を敷き詰めた試験を行い、試験終了後に切り出した断面を確認した。一面せん断試験では境界面よりも深いところでせん断帯が発達することが報告されているが、（野々山ら，2009）本試験では境界面以

外でのせん断帯の発達は見られなかった。これは同試料ではせん断領域が境界面よりも深くなるのに対し、異なる粒径をもつ異種試料の砂利と豊浦砂では境界面のみでせん断が行われ、内部摩擦角が低下した可能性を示唆している。

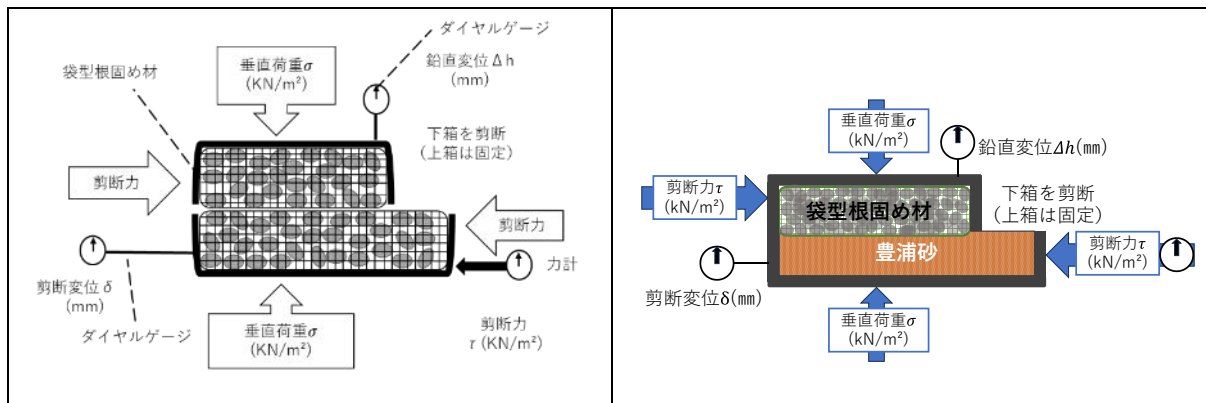


図 3 一面せん断試験機の模式図

(左：袋型根固め材間のせん断強度 右：袋型根固め材と地盤土壌の内部摩擦角（参考実験）)

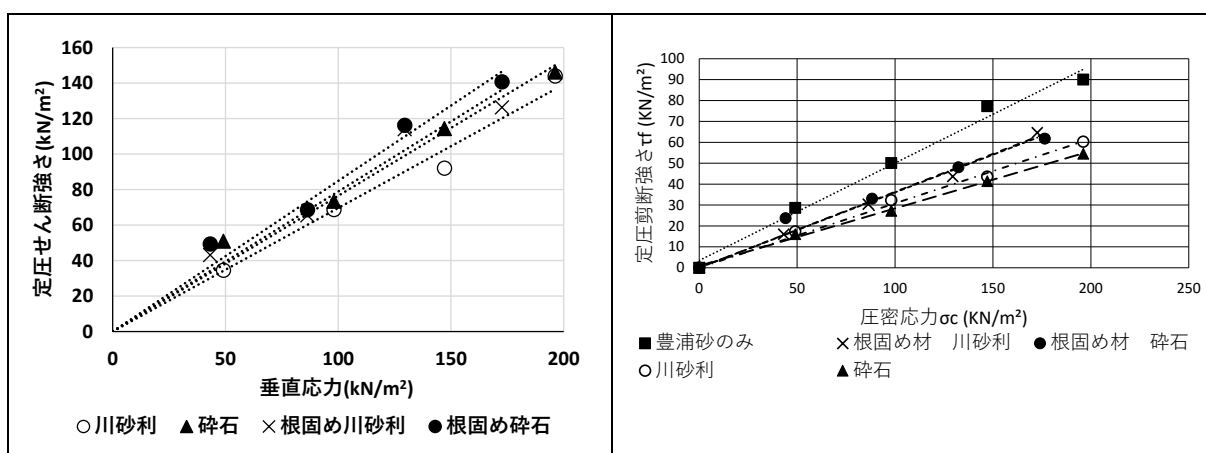


図 4 圧密応力 σ_c とせん断強さ τ の関係

(左：袋型根固め材間のせん断強度 右：袋型根固め材と地盤土壌の内部摩擦角（参考実験）)

表 1 せん断強度の試験結果

材料	せん断強度 ϕ (°)	
中詰め材種類	川砂利	碎石
中詰め材のみ	34.8	37.4
袋型根固め材間 (仕切りなし)	38.3	40.3

表 2 内部摩擦角の試験結果（参考実験）

材料	内部摩擦角 ϕ (°)	
豊浦砂のみ	26.1	
中詰め材種類	川砂利	碎石
袋型根固め材 －豊浦砂	19.8	20.8
中詰め材のみ －豊浦砂	17.1	15.7

2) 滑動角度測定試験 (1/3 縮尺実験)

10t ダンプトラックの荷台に袋型根固め材を用いた押さえ盛土工の 1/3 縮尺模型を作製し、ダンプアップにより滑動角度を測定した。本実験は地震作用時に最も滑動しやすい押さえ盛土表層部に着目している。

ダンプトラックの荷台上にパレットおよび発泡スチロール板を設置して高さを調整し、その上部に摩擦抵抗用の角材を張り付けたコンパネ板を設置して土台とした。この土台の上に袋型根固め材の 1/3 縮尺模型を 2 段積みで配置した (図 5)。

実験に用いた袋型根固め材模型の諸元を表 3 に示す。質量 1t 規格品を 1/3 に縮小した模型である。慣性と重力の比を表すフルード数が等しくなるように網目寸法、網糸径、出来形形状、中詰め材粒径、模型質量を設定した。また、中詰め材に使用した 2 号砕石は、後述する中詰め材料の室内土質試験により内部摩擦角 $=34.5^{\circ}$ が得られている。

計測器の設置位置を図 5、図 6 に示す。ダンプトラックの荷台側面に無線電波式角度計を取り付け、手元のスマートフォンでリアルタイムに角度データを取得しながらダンプアップを実施した。また、荷台側面側および上面側からビデオ撮影を行い、試験の状況を記録するとともに、側面側の画像から算出したリフトアップ角度と計測値との整合性も確認した。

滑動角度の測定結果を図 7 に示す。ダンプアップ角度 $=38^{\circ}$ 付近において袋型根固め材の中詰め材の局所的な移動 (1~2 個) が確認されたが、ダンプアップ角度 $=40^{\circ}$ でも袋型根固め材同士は安定していた。 42° 超過時にコンパネ板と袋型根固め材間で発生した。これは角材の定着部における強度不足が原因であり、袋型根固め材本来のせん断抵抗特性はさらに高い値を有することが推察される。



図 5 実験の実施状況

表 3 袋型根固め材模型の諸元

項 目	実物	模型 (1/3 縮尺)	備考
質量	1.0 t	37 kg	
出来形幅	1,600 mm	530 mm	
出来形高さ	500 mm	160 mm	
中詰め材粒径	50 mm~人頭大	40~80 mm	2 号砕石を利用

網目の大きさ	25 mm	8 mm	
網糸径	約 2.5 mm	約 0.8 mm	

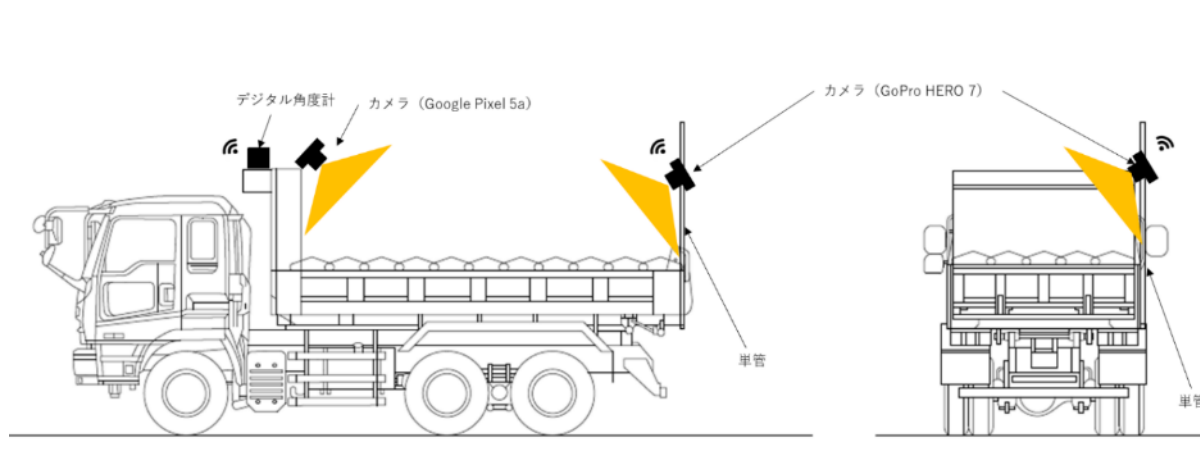


図 6 計測器の設置状況

	側面写真／角度測定	上面写真
初期状態		
最大傾斜角		



図 7 側面写真によるせん断角度の測定結果

3) 単位体積重量と空隙率の定量化 (1/1 縮尺実証実験)

袋型根固め材の単位体積重量は、単体と群体の場合の 2 ケースで測定を実施した。単体の単位体積重量は、敷鉄板とワイヤレスロードセルを組合せた台量による重量測定と、3D-Scanner による体積測定によりリアルタイムかつ高精度で測定した (図 8)。群体の単位体積重量は、コンパネ板と単管パイプで 4.0 m 四方の型枠を作成して測定した (図 9)。型枠の内部に事前に重量を計測した袋型根固め材を設置し、その天端高をレベル測量することで体積を測定し、単位体積重量を算出した。測定精度の向上を目的として、3 パターンの配置で実験を実施した。

単体の単位体積重量の測定結果を表 4 に示す。3D-メッシュデータは、局所的に実物との誤差が認められるものの、全体形状は良好な整合性を示している。得られた単位体積重量は 1.43 t/m^3 であった。後述する中詰め材料の室内土質試験において、相対密度 $D_r=0\%$ 時の最小乾燥密度 $\rho_{dmin}=1.494 \text{ t/m}^3$ が得られており、両者は近似した値を示している。

群体の単位体積重量の測定結果を表 5 に示す。袋型根固め材の配置は千鳥 A、直積み、千鳥 B の 3 ケースで実施した。群体の単位体積重量は概ね $1.2 \sim 1.3 \text{ t/m}^3$ であり、単体の単位体積重量と比較して約 90 % の値であった。約 10% の低減は、袋詰め根固め材同士の空隙率によるものと考えられる。

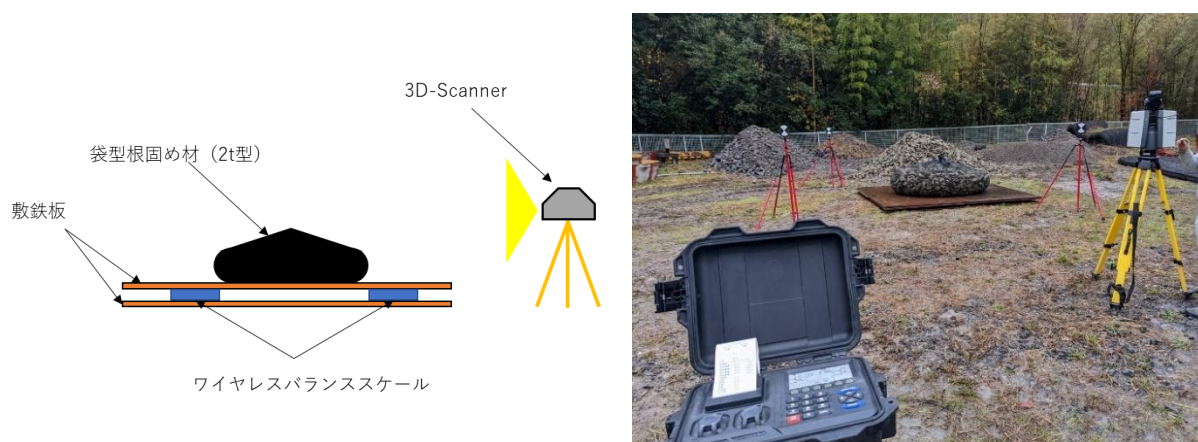


図 8 単位体積重量 (単体) の測定方法

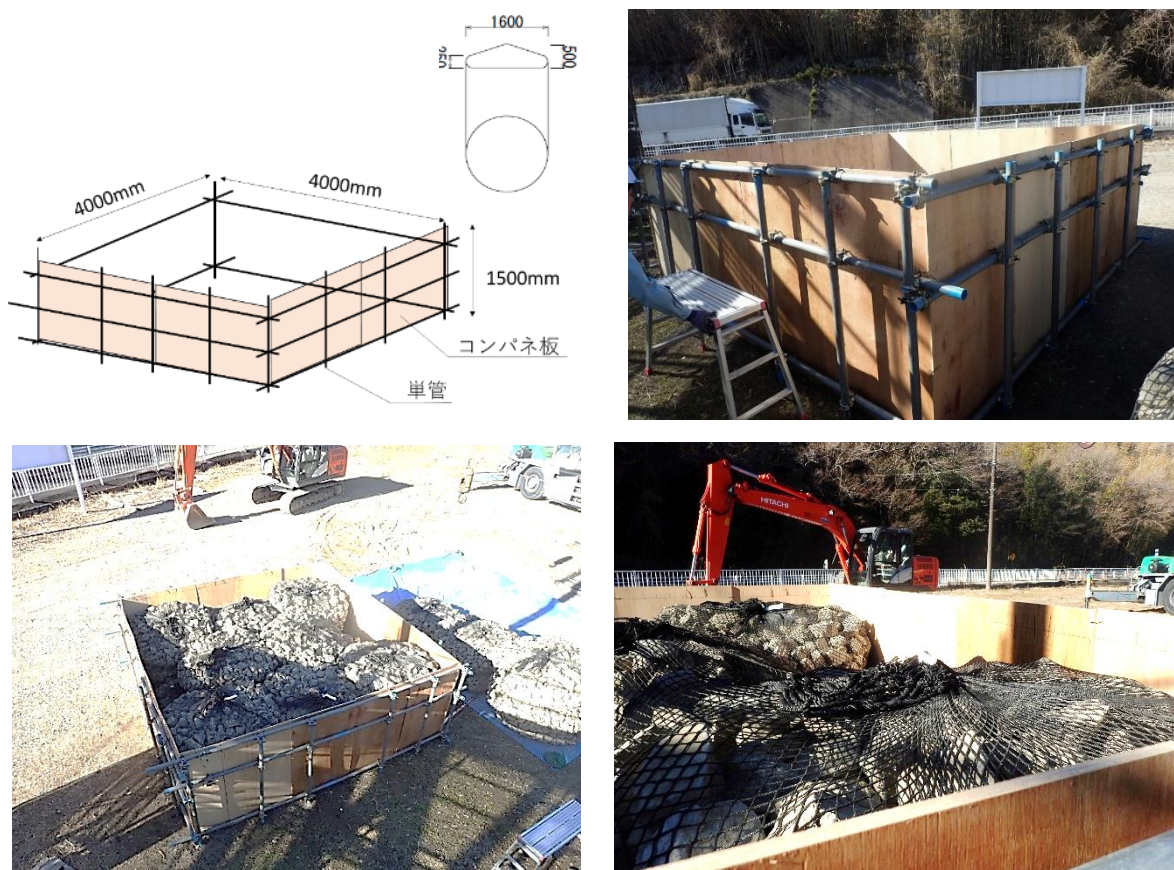


図 9 単位体積重量（群体）の測定方法

表 4 単位体積重量（単体）の測定結果

点群データ	
3D メッシュデータ	
体積	1.50 m ³
重量	2.15 t

単位体積重量（単体）	1.43 t/m ³
------------	-----------------------

表 5 単位体積重量（群体）の測定結果

項 目	群体・千鳥 A	群体・直積み	群体・千鳥 B
投入総重量	25.205 t	23.420 t	23.170 t
算出体積	19.504 m ³	18.465 m ³	18.137 m ³
単位体積重量	1.292 t/m ³	1.268 t/m ³	1.277 t/m ³

4) 中詰め材料諸元の評価

本事業では静岡県富士宮産の安山岩を使用した。②滑動角度測定試験では 40～80mm（2 号砕石）、③単位体積重量と空隙率の定量化では粒径 50～150mm（割栗石）を使用した。

力学試験に用いる粒度は、粒径加積曲線の両対数グラフ（図 10）より支配的な区間を再現するようにタルボット指数 n を用いた近似曲線を設定し、平行移動して決定した。最大粒径 $D_{\max}=90$ mm かつタルボット指数 $n=1.90$ で近似粒度を作成し、最大粒径 $D_{\max}=63.0$ mm となるように平行移動した。

相対密度 D_r を把握するため、最もルーズな状態($\varepsilon_{\max}$)と最も締まった状態($\varepsilon_{\min}$)を明らかにする目的で締固め試験を行う。図 12 に示す装置で粒度調整した試料をモールドに自然落下させ、試料の最もルーズな状態における密度、すなわち最大空隙比 $\varepsilon_{\max}$ を求めた。粒度調整した試料において、締固めエネルギー E_c を 50、100、150、200、300、400 % の 6 段階で変化させ、締固め密度（空隙比）等の変化を求めた（図 13 参照）。本試験は表 6 に示す仕様にて実施した。

三軸圧縮試験の試験条件は表 7 のとおりである。中詰め材の粒度試験および礫の比重・吸水率試験の結果を表 8 および図 14 に示す。三軸圧縮試験に使用した「割栗石」の D_{50} 粒径は 69.3 mm に対し、せん断強度試験に使用した「2 号砕石」の D_{50} 粒径は 35.2 mm と約 2 倍の違いがある。ただし、三軸圧縮試験粒度の D_{50} 粒径は約 40 mm であることから、大きな差は無い。礫の比重・吸水率については、同程度の結果を示している。

締固め試験結果を図 15 に示す。 $E_c=400$ % 条件における乾燥密度を最大乾燥密度（相対密度 $D_r=100$ %）、 $E_c=0$ % 条件の乾燥密度を最小乾燥密度（相対密度 $D_r=0$ %）とする。相対密度 $D_r=100$ % の時、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}=1.869$ g/cm³、最小空隙比 $\varepsilon_{\min}=0.422$ 、相対密度 $D_r=0$ % の時、最小乾燥密度 $\rho_{d\min}=1.494$ g/cm³、最大空隙比 $\varepsilon_{\max}=0.779$ であった。

三軸圧縮試験の試験結果を図 16 および図 17 に示す。相対密度が小さく、いずれの圧密応力においても明確なピークが表れていない。圧密応力 100 kN/m²、200 kN/m² では試験終了まで単調増加を示し、正のダイレタンシーによる膨張は発現していない。見かけの粘着力 $c_a=68.3$ kN/m²、内部摩擦角 $\phi_a=34.5^\circ$ であった。

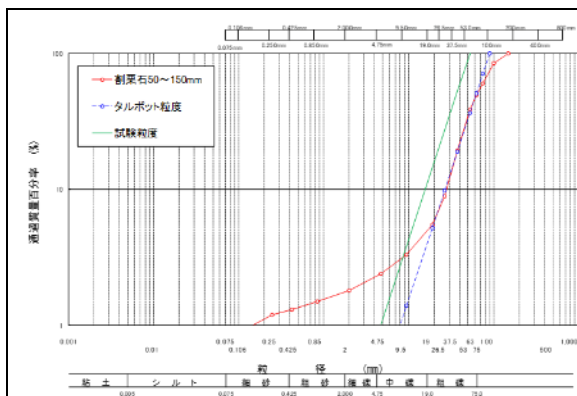


図 10 粒径加積曲線（両対数グラフ）

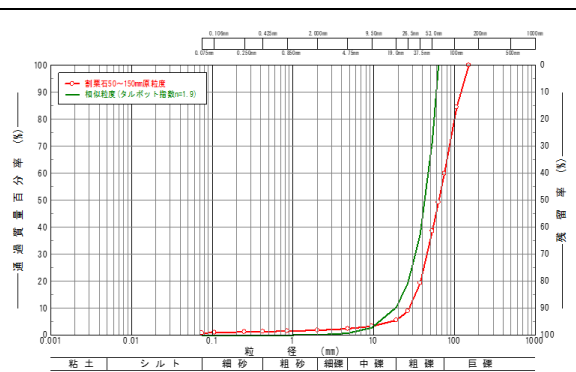


図 11 粒径加積曲線（片対数グラフ）

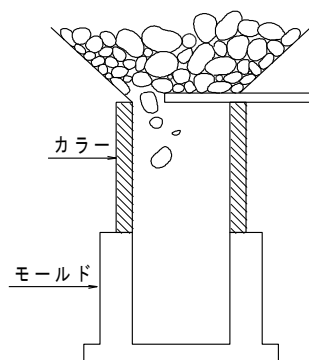


図 12 ダンプドロップ方式の模式図

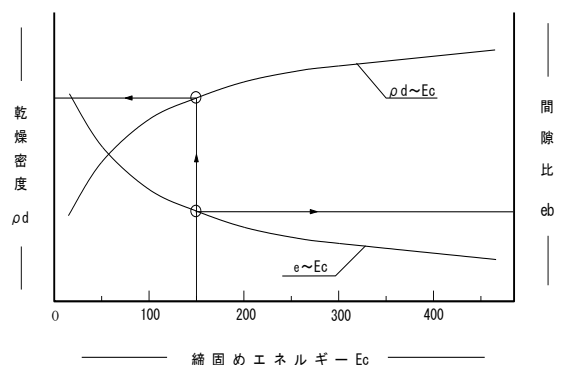


図 13 締固め曲線（エネルギー変化）

表 6 締固め試験仕様

モールド径 ϕ (mm)	モールド高さ H (mm)	モールド体積 V ($\text{mm}^3 \times 10^3$)	ランマー質量 W (kg)	落下高さ H (mm)	締固め層数 N _L (層)	締固め回数 ^{※1} N _B (回/層)
300	225	15,904	10.0	450	3	66

※1；上表内の回数は JIS×100%の値を示す。これをもとに所定の締固めエネルギーとなる回数を求める。

表 7 三軸圧縮試験の試験条件

項目	圧密排水条件	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm^3)	軸ひずみ速度(%/min)	圧密応力 (kN/m^3)
設定条件	圧密排水 (CD)	0.9	1.494	0.5%	50, 100, 200
備考		気乾状態	$E_c=0\%$		

2) 結果

表 8 中詰め材の物理試験結果一覧

試料名	粒度組成									礫の比重・吸水率			備考
	最大 粒径	礫率	石分	礫分	砂分	細粒分	均等 係数	50%粒径	10%粒径	53～37.5mm			
										表乾 比重	絶乾 比重	吸水率	
										D_{max} (mm)	$P_{+4.75mm}$ (%)	G_{+75mm} (%)	
割栗石（50～150mm）	150	97.6	40.1	58.1	1.0	0.8	2.7	63.9	27.5	2.729	2.709	0.7	三軸圧縮試験用試料
2号碎石（40～60mm）	75	99.6	0.0	99.7	0.1	0.2	2.0	35.2	19.9	2.745	2.728	0.7	せん断強度試験用試料

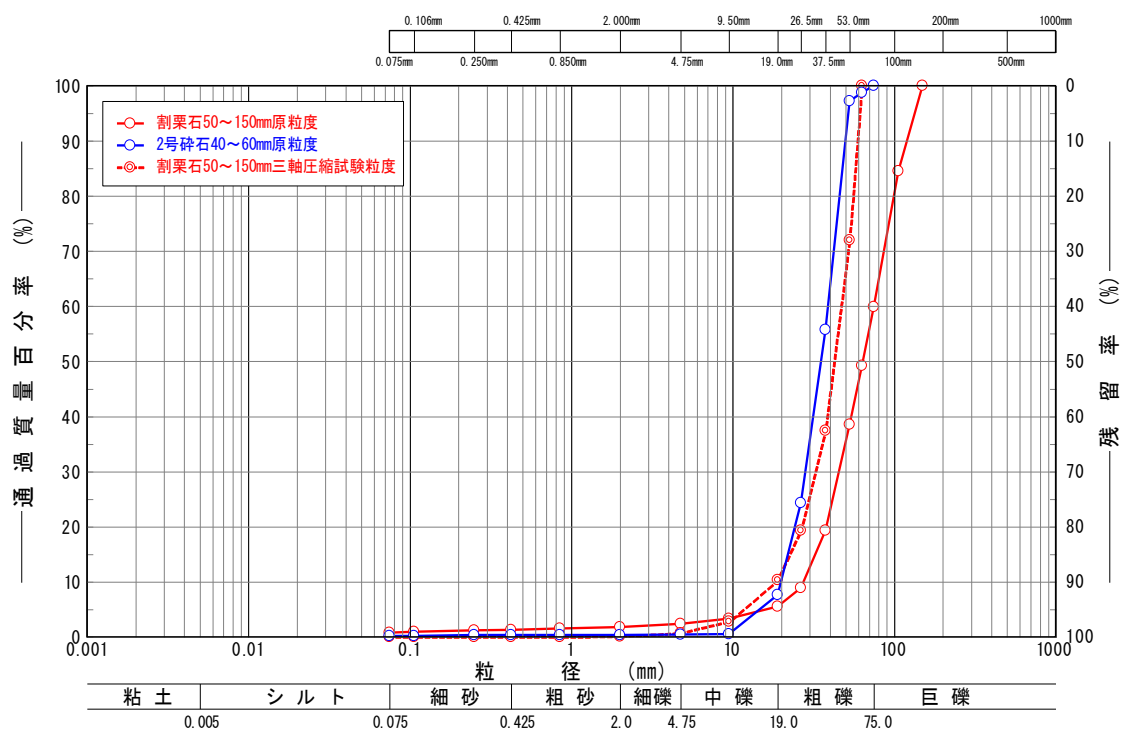


図 14 粒度分布図

【締固め試験結果 ($E_c \sim \rho_d$, $E_c \sim e_s$)】

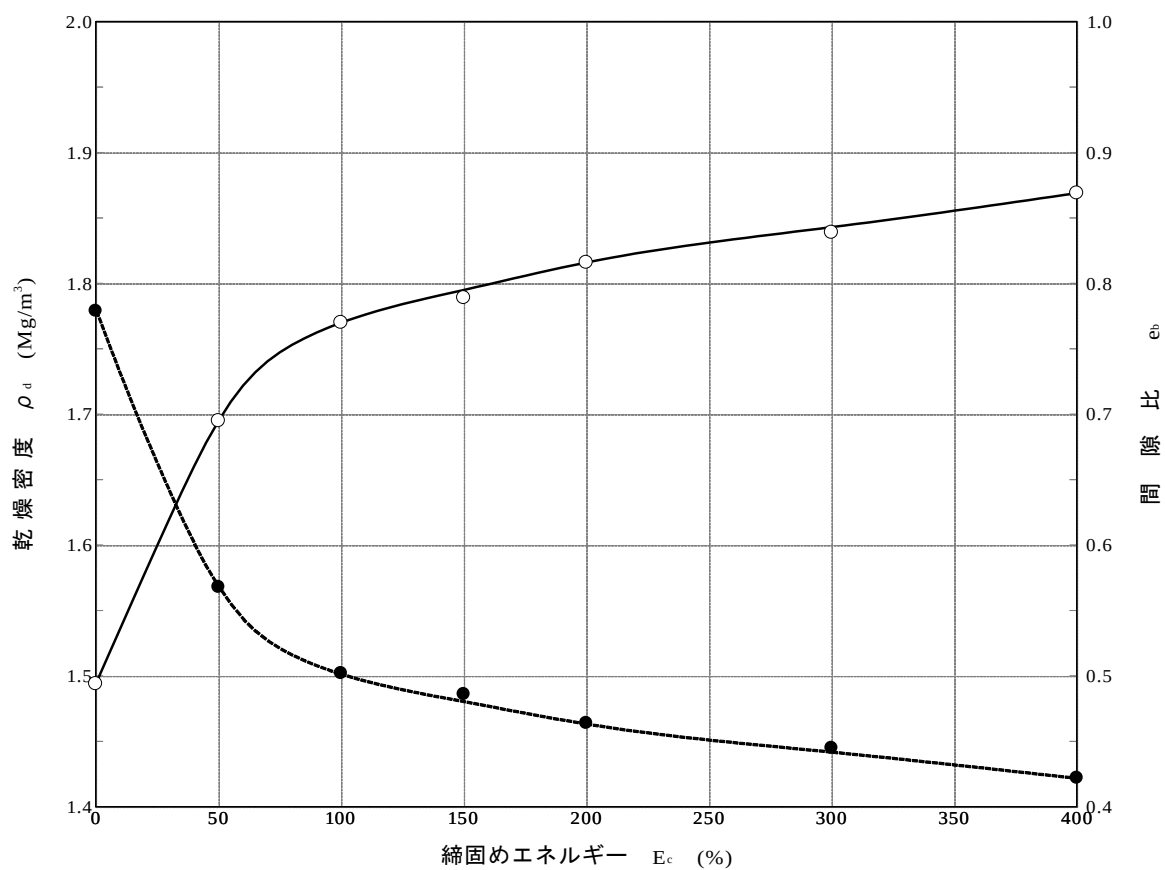


図 15 締固め曲線 (エネルギー変化)

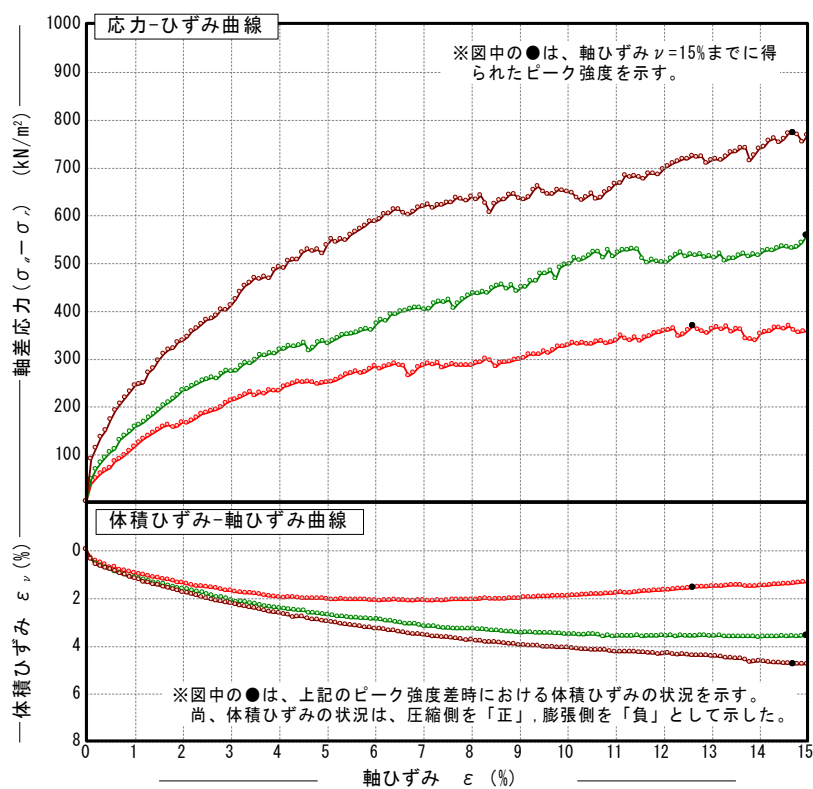


図 16 応力-軸ひずみ曲線、体積ひずみ-軸ひずみ曲線

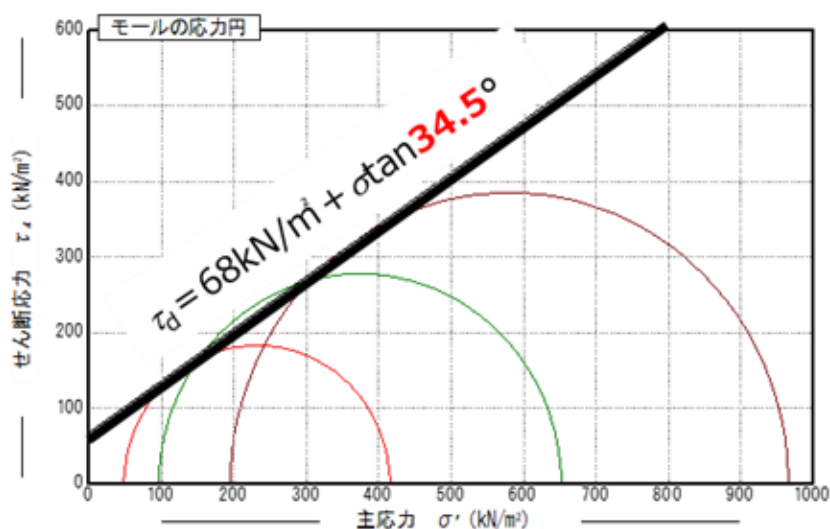


図 17 モールの応力円

(2) 地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発

1) 押抜き試験

鋭利な断面に対するネット材の耐久性を測定するため、押抜き試験を行った(図 18)。専用に作製した鉄製治具(先端角度 30°)を押抜き試験機の先端に取り付けた。山崎ら(2018)は重量 0.2~5.3kg/個の割石(花崗岩)206 個を対象に突起角度を調査し、30° 未満が存在しないことを報告している。従って、自然石において先端角度 30° の鋭利面が生じることは稀であり、本評価は網材料にとって非常に厳しい条件で実施していることに留意が必要である。

ネット材は水平状態で取付け治具に装着し、押抜き治具により破断した時の荷重を測定した。得られた破断時荷重と直線引張強さの相関および地震発生時の水平力に対する安全率を検討した。ネット材には、太さと網目の大きさの異なる 3 種類の試料を用意した(表 9)。一般的な袋型根固め材には試料①が用いられるが、細粒径中詰め材を投入する袋型根固め材には試料②、海岸や港湾などの適用に際して高強度・高耐久が求められる袋型根固め材には試料③が用いられる。

試験結果を表 10 に示す。各試料の破断強度を網糸一本当たりに換算することで、直線引張強さとの直線関係を算出した結果、直線引張強さの 21~28%の荷重で破断に至ることが確認された。図 19 ではネットの押抜き強さをレベル 1 およびレベル 2 地震動作用時にネット材に付与する水平荷重と比較した。試料①でも L1 地震動に対しては約 4 倍の安全率を有することが確認された。ただし、L2 地震動を想定する場合には、試料①では損傷する可能性があるため、適切なネット材の選定が必要である。

また、紫外線劣化による引張強さの低下も懸念されるが、既往研究により 30 年相当の促進暴露試験において 90%以上の引張強さ保持率が確認されている。ため池の水中では紫外線が減衰するため、さらに高い引張強さ保持率を示すことが推定される。

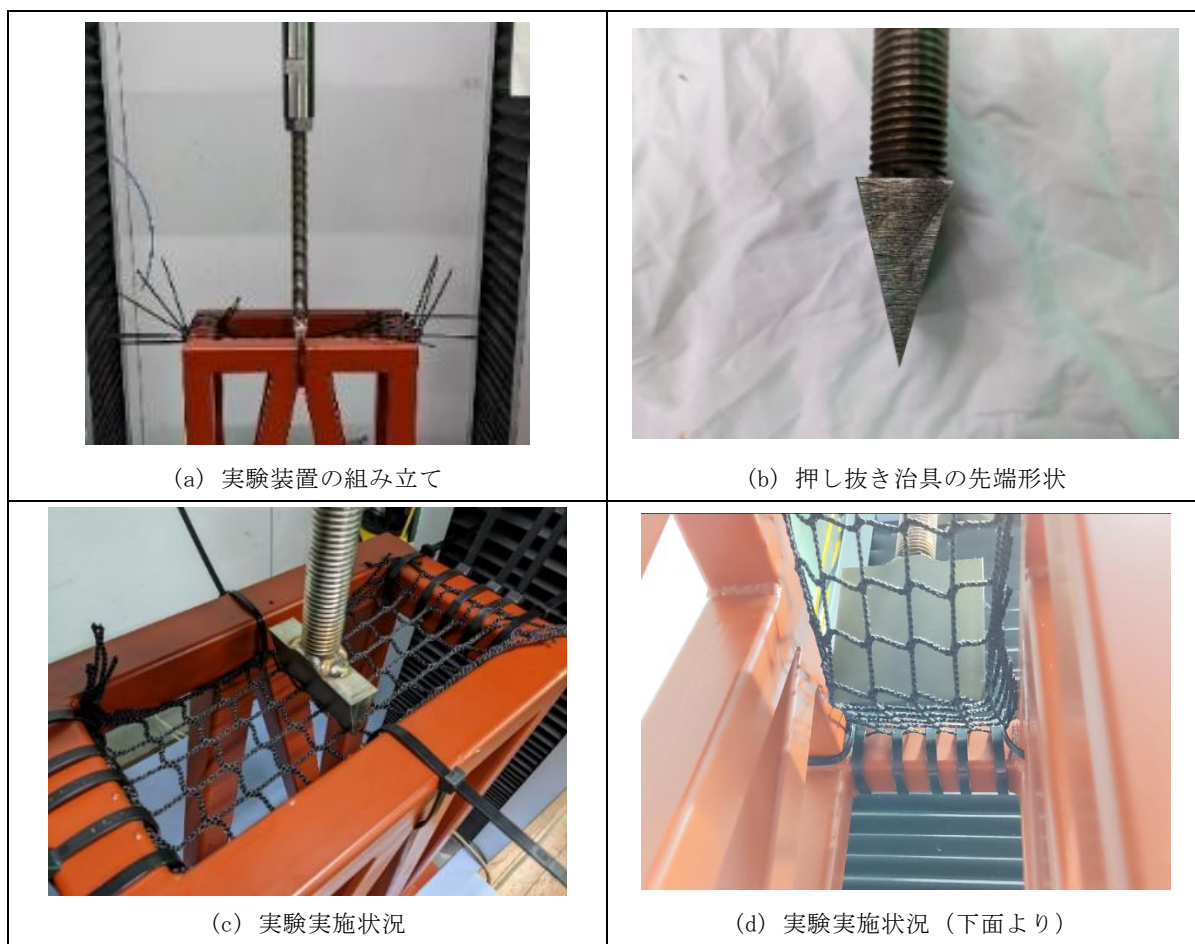


図 18 押抜き試験の実施状況

表 9 押抜き試験の試験体諸元

項 目	試料①	試料②	試料③
網目の大きさ	25 mm	10 mm	50 mm
網糸の繊度	25,000 dtex	16,700 dtex	200,00 dtex
網糸の線径	ϕ 約 2.5 mm	ϕ 約 2.0 mm	ϕ 約 8.0 mm
平均引張強さ	768 N/本	548 N/本	5,130 N/本

表 10 押抜き試験結果一覧

項 目	試料①	試料②	試料③
網糸一本の平均引張強さ (A)	768 N/本	548 N/本	5,130 N/本
押抜き強さ	643 N	934 N	1,442 N
受容本数	4 本	8 本	1 本
網糸一本当たりの押抜き 強度 (B)	161 N/本	117 N/本	1,442 N/本
比率 (B/A)	21.0 %	21.4 %	28.1 %

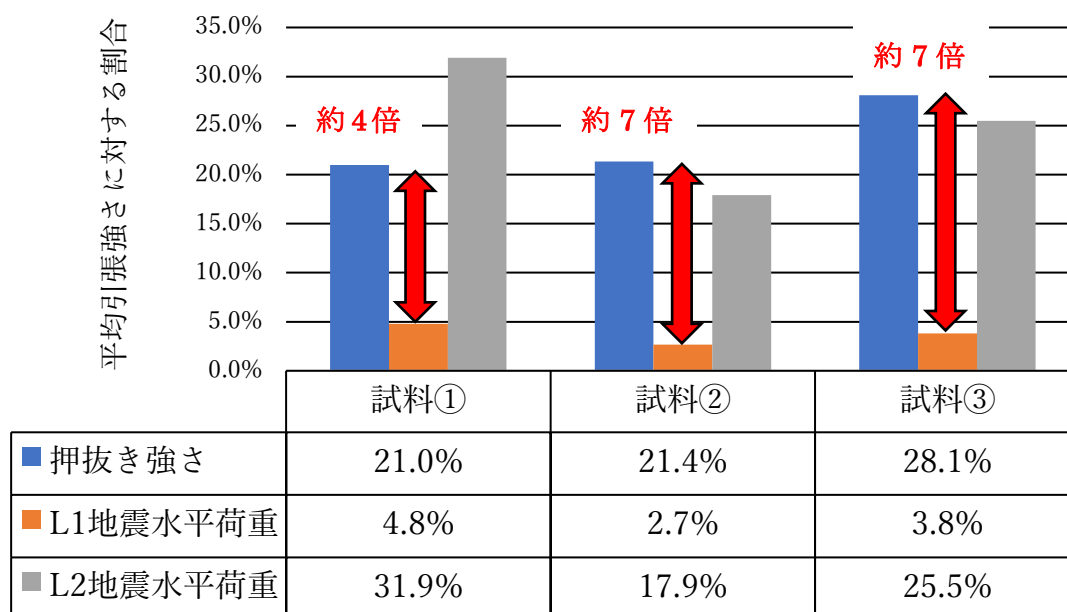


図 19 ネット材の押抜き強度と地震時水平荷重の比較

1. 7 実証試験（現場適用）の概要、結果、課題等

1) 概要

実験ヤードは図 20 に示す配置とした。仮置位置と設置目標は 25t ラフタークレーンの作業半径内とし、1 スイングでの設置を可能とした。仮置位置は陸上、設置目標は水中を想定し、クレーンと設置目標の間に 10t ダンプトラックを配置して、クレーンオペレータが設置目標を目視確認できないような工夫を施した。

堤体断面の断面図を図 21 に示す。法面勾配は一般的なため池堤体を想定して 1:2.0 勾配とした。堤体断面には粒径 50 mm～150 mm 程度の玉石を使用するため、一般的なため池堤体とは材質が異なる。しかし、今回の実証試験の目的を踏まえると、材質の違いによる影響は軽微と判断した。

袋型根固め材は重量規格 1t 型を使用し、幅 3 列×厚さ 1 列×高さ 7 段(合計 21 袋)の積層を計画した。袋型根固め材の吊り上げ部には鉄製吊りリングを装着し、後述する磁石式オートリリースフックを使用できるように工夫した。

袋型根固め材の設置作業は、①玉掛け→②吊上げ→③目標位置まで移動→④吊下げ→⑤玉外しである。①と⑤を省人化するために磁石式オートリリースフックを利用し、③を省人化および高精度化するため GNSS 受信機を用いたマシンガイダンスシステムを採用した。

磁石式オートリリースフック（Elevia 製、4t 用）の機構を図 22 に示す。オートリリースフック下部に磁石が取り付けられており、袋型根固め材の鉄製吊りリングを引き寄せることができる。引き寄せた後、遠隔からのリモコン操作によりフックを閉じて玉掛けが完了する。設置目標に吊下げた後も同様の操作で玉外しが行われる。

GNSS 受信機を用いたマシンガイダンスシステム（株式会社アカサカテック製）の構成を図 23 および図 24 に示す。ラフタークレーンのブームトップに磁石式の台座を介して GNSS 受信機を取り付け、クレーンオペレータの運転席に設置したノート PC にブームトップの位置をリアルタイムに反映させる。PC 画面上には 2D-CAD で

作成した設置目標も表示し、地図座標と関連づけておく。画面上でブームトップを示す青丸印および誘導表示をオペレータが確認しながらクレーンを操作し、指定した設置目標まで移動させる。

同システムを駆使すれば、クレーンオペレータ 1 名で目視不可な設置目標に対する袋型根固め材の設置作業を完遂できることになる。ただし、今回の実験ではフックの開閉作業を行う補助作業員を 1 名配置した。

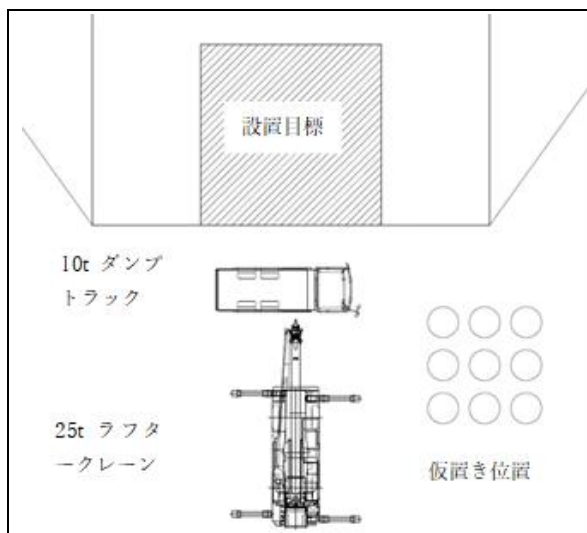


図 20 実証実験ヤード配置図

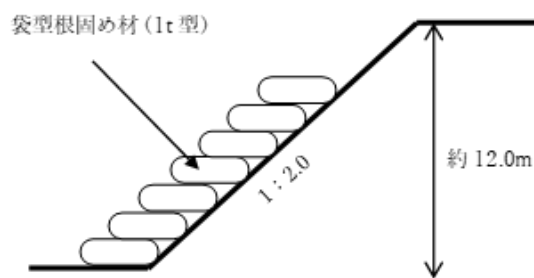


図 21 堤体の断面図

① 磁石で吊り具を引き寄せ…



② フックを引っ掛け…



③ そして、吊り上げ

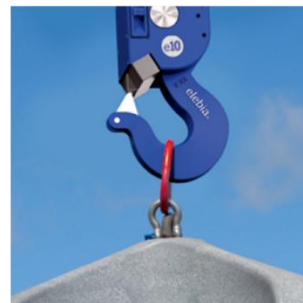


図 22 オートフックの吊り上げ機構¹⁾



図 23 GNSS 受信機取り付け状況

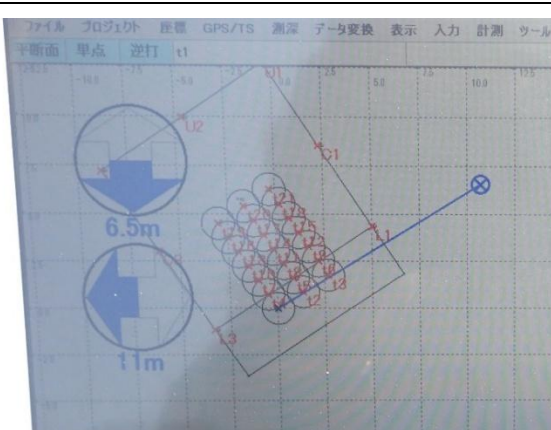


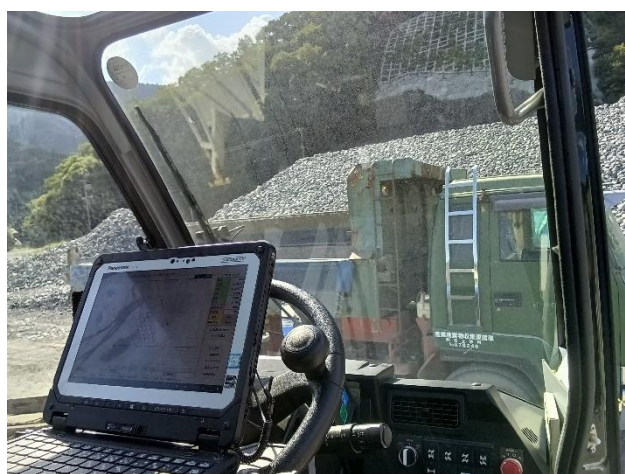
図 24 PC 画面の表示状況



設置前ヤード全体写真



設置状況



クレーン操作からの視野



オートフックによる玉掛け

2) 結果

袋型根固め材 21 袋を仮置き位置から設置目標に積層して設置する時間は 1 時間 44 分であった。1 日の作業時間を 7 時間として換算すると、日当たり施工量の実測値は 85 袋/日になる。袋型根固め材 1t 型の据付作業の日当たり施工量（陸上）は 66 袋/日であるため、約 30%の作業効率向上となった。

施工精度を評価するために袋型根固め材を設置する前後でドローン測量を行い、点群データを取得した（図 25）。点群データから断面図を作成し、各測点の出来形断面を計画断面と比較して出来形精度を評価した（図 26、図 27、図 28）。測点は袋型根固め材の中心とし、図 25 の右側から順に No.1、No.3、No.5 とした。

図 26、図 27、図 28 では計画断面よりも出来形が不足している部分を青色、超過している部分を赤色で表示した。部分的な出来形の過不足が確認できるが、全体出来形は計画出来形+3~11%であった。従って、クレーンオペレータが設置目標を目視できない状況にもかかわらず、高い出来形精度を確認できた。

本実証試験結果に基づき、本工法の設置歩掛は表 11 のように設定した。比較対象として、袋型根固め工（ICT 無し）の設置歩掛を表 12 に示す。また、施工現場毎の違いを考慮した歩掛表の設計値（案）として、各項目の数量を表 12 と同等の 0.152 に設定した袋型根固め工（ICT、設計値案）を表 13 に示す。表 11、表 12、表 13 に基づき直接工事費を算出した結果が図 29 である。なお、算出にあたり ICT 技術（磁石式オートリリースフック、GNSS 受信機を用いたマシンガイダンスシステム）の単価は実証試験で使用したリース費用をリース期間で割り戻して日当たり単価に換算し、労機材は静岡県単価を使用した。図 29 より、袋型根固め工（ICT 無し）と比較して、袋型根固め工（ICT、実測値）は約 32%減、袋型根固め工（ICT、設計案）は約 10%減となった。ただし、施工現場での使用においては、金額が異なる場合があることに留意が必要である。

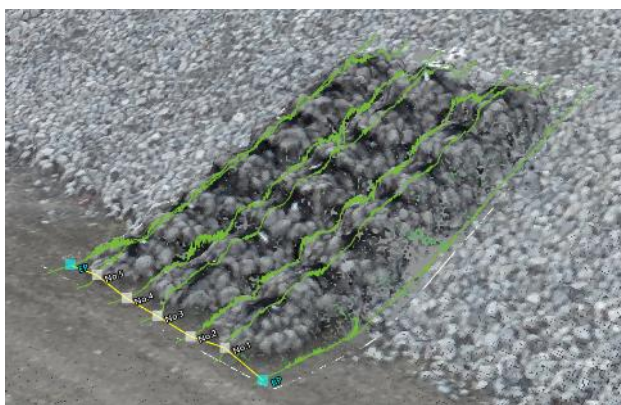


図 25 点群データ

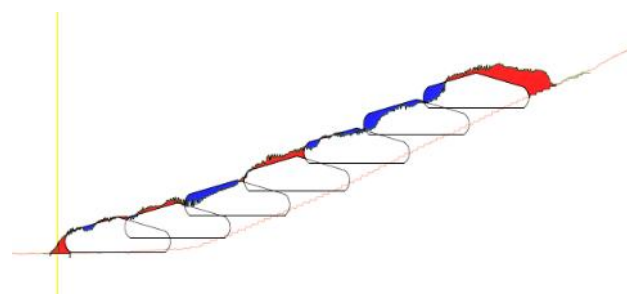


図 26 出来形の差分（断面 No.1）

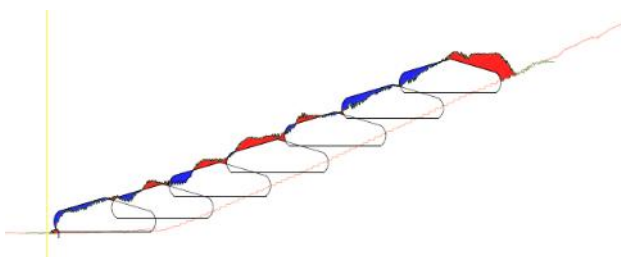


図 27 出来形の差分（断面 No.3）

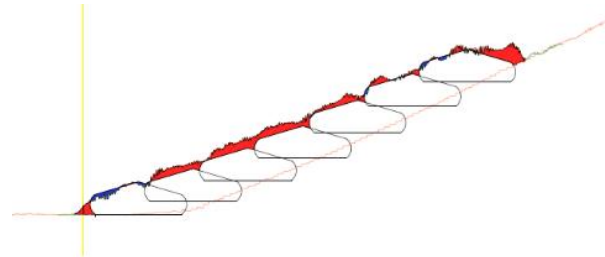


図 28 出来形の差分（断面 No.5）

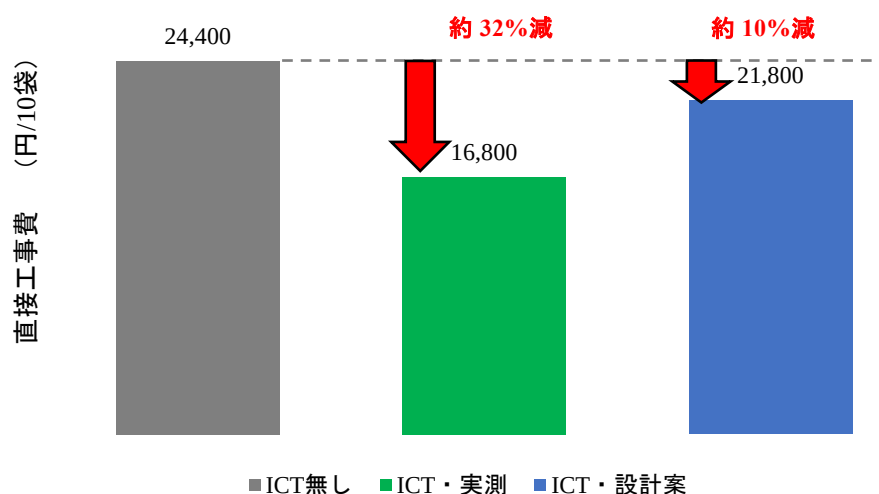


図 29 従来工法と本工法の経済性比較

表 11 ICT 施工の実測値を反映した歩掛表（設置 10 袋当たり単価）

名称	規格	単位	数量(1t 型)	摘要
世話役		人	0.117	
(普通作業員)		人	0.117	
ラフテレンクレーン賃料	排出ガス対策型 油圧伸縮ジブ型 25t 吊	日	0.117	
オートフック	4t 型、リース	日	0.117	
MG システム	リース	日	0.117	
諸雑費		式	1	

表 12 設計施工マニュアルに記載の歩掛表（設置 10 袋当たり単価）

名称	規格	単位	数量(1t 型)	摘要
世話役		人	0.152	
特殊作業員		人	0.152	
普通作業員		人	0.303	
ラフテレンクレーン賃料	排出ガス対策型 油圧伸縮ジブ型 25t 吊	日	0.152	
諸雑費		式	1	

表 13 ICT 施工の設計値（案）（設置 10 袋当たり単価）

名称	規格	単位	数量(1t 型)	摘要
世話役		人	0.152	
(普通作業員)		人	0.152	
ラフテレンクレーン賃料	排出ガス対策型 油圧伸縮ジブ型 25t 吊	日	0.152	
オートフック	4t 型、リース	日	0.152	
MG システム	リース	日	0.152	
諸雑費		式	1	

3) 課題

実証試験において抽出された課題を以下に示す。いずれも作業上の工夫で対処可能なものである。

- ①磁石式オートリリースフックの開閉状況はリモコンでも確認できるが、本機ではフックが開いているにもかかわらずリモコン表示上で半開きのエラーが表示され、玉外しが適切に完了したか確認できない。この場合、リモコン上でいったんフックを閉じ、吊上げて確認することとした。
- ②GNSS 受信機を用いたマシンガイダンスシステムはブームトップ位置のみが PC 画面に表示されるものであったが、ブーム自体も表示されることが望ましい。
- ③本試験で使用したマシンガイダンスシステムは高さ方向の位置情報を取得できないため、クレーンの重量計で荷重がゼロになる高さから 50cm 程度降ろした位置を設置面として玉外し作業を実施した。

2 事業の成果

2. 1 成果の内容

湛水状態のため池における耐震補強工法として、袋型根固め材を用いた押さえ盛土工法について、複数の室内実験および実物大実証試験を実施し、設計・ICT 施工方法を確立した。

(1) 最適な設計パラメータの算出による設計方法の研究開発

袋型根固め材の設計パラメータは以下のとおりである。

- せん断強度 $\phi = 35^\circ$
- 単位体積重量 γ = 中詰め材の単位体積重量の 90%の数値

※ただし、中詰め材の物性が地域によって異なるため、施工時の品質管理の中で確認を行うことが必要である。

(2) 地震荷重に対する袋型根固め材の材料選定方法の研究開発

鋭利な断面がネット材に接していても、標準タイプの仕様でレベル 1 地震動発生時の水平震度に対して安全率 4 倍を有することを確認した。一方で、レベル 2 地震動発生を想定する場合には適切な網材料を選定する必要がある。

(3) ICT 施工における作業性、施工精度の実証試験

ICT 技術を活用した本工法の出来形精度および施工時間は以下のとおりである。

- 出来形精度：計画出来形 + 3~11%
- 日当たり施工量：85 袋/日

袋型根固め材（ICT 無し）の標準歩掛と比較して、約 32%の経済性向上、作業委員は半数以下の省力化・省人化が達成された。今後は設計・施工マニュアルを整備していく予定である。

2. 2 目標の達成度

(1) 成果から得られる効果

今後、高確率で発生するとされる南海トラフ地震などの大規模地震に対して、ため池の早急な耐震対策が求められている。しかし、従来の押さえ盛土工法では、堤内の水をすべて抜くドライ施工が必須であり、仮設費・施工期間、再貯水期間中の水供給、生態系の保全の観点から課題があった。

本事業では、袋型根固め材を押さえ盛土工法について、実大規模の実験等による精度の高いデータを取得し、湛水状態のため池に対する耐震補強工法の設計・ICT 施工方法を確立した。

新技術は以下に該当するため池に対して特に効果の高い耐震対策を提供できる。

- 施工規模に対して仮設費の割合が大きくなるため池
- 迅速な施工が求められるため池
- 利水・環境面で水替工に難があるため池

(2) 従来技術との比較

1) 比較する従来技術

従来のため池の押さえ盛土工法には、路体（築堤）盛土工法と捨石工法の 2 種類がある。いずれの工法もドライ施工を実施するために、水替工や仮設道路工が必要である。経済性の観点から一般的には路体（築堤）盛土工法が採用される。

2) 従来技術に対する優位性

①経済性：向上（条件付き）

施工単価のみで比較すると路体（築堤）盛土工法が経済的であるが、仮設工を盛り込むことで本工法の経済的優位性が見込まれる。仮設工費を 1000 万円/式と仮定した場合の損益分岐点（例）を図 30 に示す。押さえ盛土が一定規模以下であれば、経済的になることがわかる。なお、仮設工費の仮定は施工現場の状況に応じて異なることに留意が必要である。

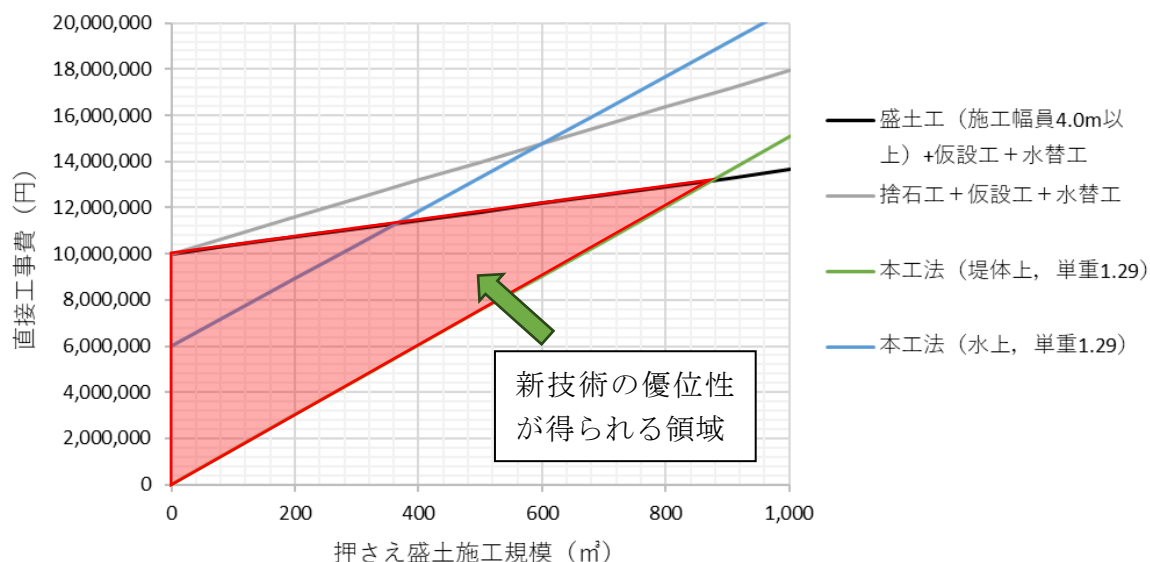


図 30 本工法適用における損益分岐点

②工程：短縮

従来技術と比較して仮設工不要による工期短縮が見込まれる。また、水替・再貯水期間を含めた事業全体の工程短縮も見込まれる。

③品質：向上

従来技術は転圧により十分に締め固める必要がある。本工法は締め固めが不要であり、陸上で検査した袋型根固め材を ICT 施工するため、高精度かつ均一な品質を確保できる。

④安全性：同程度

⑤施工性：向上

従来技術は堤内に建設機械を搬入し、複数の作業員によって施工する必要があるが、本工法では堤体天端または水上への MG 付ラフタークレーン(オペレータ付属)の搬入でよい。搬入作業の短縮および作業員の削減により施工性が向上する。

⑥周辺環境への影響：向上

本工法ではため池内の貯水を落水する必要がないため、工事によるため池内環境・周辺環境の悪化を抑制できる。

2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

(1) 適用範囲

本工法は、以下に該当するため池に対して特に効果の高い耐震対策を提供できる。

- 施工規模に対して仮設費の割合が大きくなるため池
- 短期間での施工が求められるため池
- 利水・環境面で水替工に難があるため池

(2) 留意点

本工法の施工にあたり、以下について確認する必要がある。

- ①クレーンまたはクレーン付台船の搬入可否
- ②台船の組立ヤード、袋型根固め材の製作ヤードの確保

3 普及活動計画

3. 1 想定される利用者

- ・国（農林水産省）、都道府県、市町村、土地改良区等の全国の農業水利施設管理主体
- ・技術提案を行う建設コンサルタントや施工業者

3. 2 利用者への普及啓発等の方法

以下の方法を状況に応じて検討しながら普及啓発を行う。

- ・展示会等での宣伝
- ・農業農村工学会等の関連学会での発表・学会展示会での積極紹介
- ・農業関連の専門誌や農業関連の新聞等への寄稿・掲載
- ・技術情報を整理したカタログの配布
- ・工法の設計・施工方法に関するマニュアルの作成・配布
- ・農業農村整備民間技術情報データベース（NNTD）、新技術情報提供システム（NETIS）等への登録

3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

- ・学会や学会誌への論文投稿を通じて、工法の根拠を整理する
- ・工法の適用方法や判断方法に関するマニュアルの作成・配布する。
- ・ナカダ産業および NTC コンサルタンツを相談窓口とし、設計・施工に関する問合せに対応する。

3. 4 特許・実用新案等の申請予定

(1) 申請者予定者

ナカダ産業株式会社

(2) 申請予定時期

時期は未定

4 研究総括者による自己評価

審査の ポイント	着眼点	申請時計画目標 ^{注1}	自己評価 ^{注2}	自己評価 の理由 ^{注3}
目標の 達成度	・効果 (従来技術に対する優位性)	・湛水状態のため池における耐震補強工法の確立	Ⓐ: 優れている B: 概ね妥当 C: 不十分	・従来技術はドライ施工が必須である
	・信頼性 (品質、精度、安全性、耐久性等)	・精度の良い実験に基づく最適な工法設計・材料設計・施工方法の研究開発	Ⓐ: 優れている B: 概ね妥当 C: 不十分	・実規模大の実験を通じて設計パラメータ、材料設計の方法、ICT 施工の精度・効率性を検証できた
	・適用範囲・適用条件等	・施工規模に対して仮設費の割合が大きくなるため池 ・短期間での施工が求められるため池 ・利水・環境面で水替工に難があるため池	A: 広範囲に適用 Ⓑ: 概ね妥当 C: 限定的	・適用できるため池の条件を整理し、従来工法に対して優位な範囲を明らかにした。

普及の可能性	・ 想定される利用者への普及啓発の方法	・ 学会や学会誌を通じた発表 ・ NETIS、NNTD の登録	A : 十分な利用が見込まれる B : 概ね妥当 C : 限定的	・ 将来想定される大規模地震に対して、早急な耐震対策が望まれている。
	・ 利用者に対するサポート体制 (設計・積算・施工等の参考資料、相談窓口等)	・ 相談窓口を設けて利用者をサポートする ・ 設計マニュアルの作成を検討中	A : 十分に整備されている B : 概ね妥当 C : 改善が必要	・ 今後マニュアルを整備するが、直近の利用者のサポート体制も充実している
総合コメント 注 4	本事業により、湛水状態のため池における耐震補強工法として、袋型根固め材を用いた押え盛土工法の設計方法、材料設計、ICT 施工について研究開発を行い、新工法として確立した。今後は設計マニュアルの整備や施工後の経過観察を通じた継続評価を行っていく予定である。			

注 1) 成果報告書に記載の研究開発目標を記載する。

注 2) 評価結果欄は、A・B・Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入(○付け)する。

注 3) 自己評価の理由を記載する。

注 4) 総合的なコメントを記載する。

5 今後の課題及び改善方針

(1) 設計施工マニュアルの整備

本工法を設計する場合のマニュアルを整備して標準化することで、より多くの設計者が利用しやすくなる。

(2) 施工事例における経過観察

耐震補強工法は実際の地震が作用した後に適切な効果を発揮したか確認することが重要である。施工実績の経過観察を継続的に行っていく必要がある。