

透水性改良体によるため池の安定化工法の開発 —新たな地盤材料を用いたため池堤体の浸透および地震に対する安定化工法—

西尾竜文^{*1}・足立有史^{*1}・泉 明良^{*2}

近年、豪雨や地震などの自然災害の頻発化、大規模化により、ため池の被害が頻発しており、豪雨・地震の両者に対するため池の安定化対策が求められている。このような背景から、優れた透水性とせん断強度を有する新たな地盤材料である透水性改良体を用いた、ため池の安定化工法を開発した。本工法の施工性および適用効果の検証を目的として、実大のため池を対象とした試験施工およびその前後における湛水試験を実施した。その結果、施工性および品質について、止水性改良体および透水性改良体の目標品質を概ね満足できたが、透水性改良体の製造・運搬、および法面整形における施工の合理化が課題であることが確認できた。適用効果について、対策工により無対策に対して堤体内水位を約90%低下させることで堤体の安定性が向上することが確認できた。

キーワード：ため池、安定化工法、豪雨、地震、地盤改良

1. はじめに

ため池は全国に約15万箇所存在し、そのうち約70%は江戸時代以前に経験的な技術によって築造され、老朽化により改修を必要としているものも多い¹⁾。また、近年豪雨や地震などの自然災害の頻発化、大規模化によりため池の被害が頻発しており、特に平成23年東北地方太平洋沖地震や平成30年7月豪雨では、多くのため池が被害を受けている^{2),3)}。このような背景から、優れた透水性とせん断強度を有する新たな地盤材料である透水性改良体を用いた、ため池の安定化工法を開発している。本報では、本工法の施工性および適用効果の検証を目的として実施した実大ため池での試験施工およびその前後で実施した湛水試験について報告する。

2. 工法概要

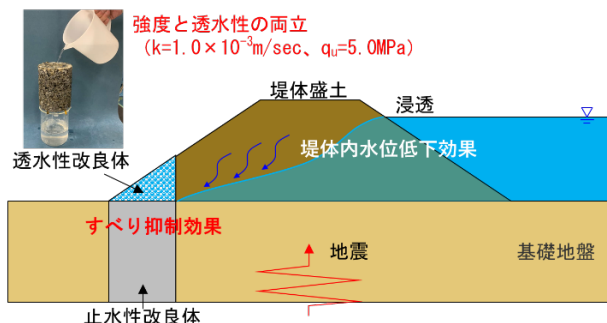


図 2.1 安定化工法の概要図

図 2.1 に安定化工法の概要図を示す。本工法は、堤体盛土の下流側法尻部に止水性改良体と透水性改良体を配

置するものである。止水性改良体は、一般的な現地攪拌方式の地盤改良体であり、原地盤にセメントスラリーを混合して構築する。一方、透水性改良体は、透水性の高い碎石や砂などに少量のセメントスラリーと混和材を混合し、空隙を確保した状態で固化した改良体であり、優れた透水性とせん断強度を有している。本工法は、常時の湛水や降雨による堤体内の浸透水を透水性改良体により効率的に排水することで、堤体内の水位を低下させるとともに、法面部における漏水を抑制し、浸透に対する堤体盛土の安定性を向上させることができる。さらに、地震時には、透水性および止水性改良体により、液状化等による堤体および基礎地盤の変形を抑制することで、すべり破壊を防止することができる。本報で示す安定化工法は、これらの堤体内水位低下およびすべり抑制効果により、浸透および地震の両者に対する安定性を向上させる技術である。

3. 試験ため池

3.1 試験ため池の概要

本工法の施工性および適用効果の検証を目的として、農研機構保有の試験ため池において試験施工を行った。写真 3.1、3.2 に試験ため池の全景写真と試験施工対象の法面を示す。試験ため池は周囲に堤を築いた皿池であり、ため池の平面寸法は縦 26m、横 38m である。本ため池は、給水槽と給排水設備を備えており、湛水することができる。試験ため池のうち、図中に青枠で示す延長 26m の堤体を対象に試験施工を実施した。図 3.1 に試験対象箇所のため池断面図を示す。試験対象の堤体は、堤

*1 地盤・基礎研究部 *2 農研機構農村工学研究部門

高 3.44m, 法面勾配 1:1.5 である。試験ため池には, 堤体縦断方向に 3 列, 横断方向に 5 列, 合計 15 か所の観測井が設けられており, 堤体内の地下水位を観測することができる。

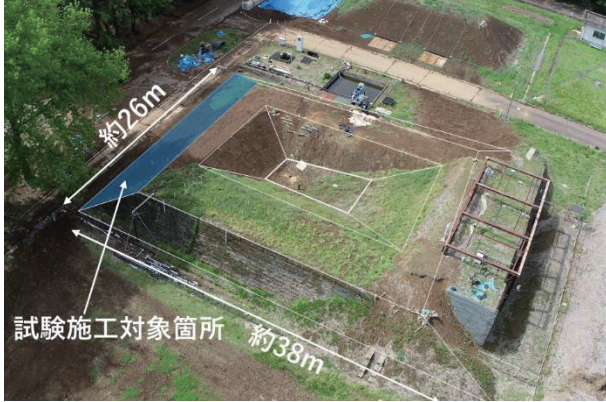


写真 3.1 試験ため池の全景写真



写真 3.2 試験施工対象法面

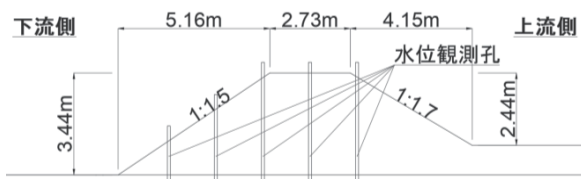


図 3.1 試験ため池断面図 (試験施工対象箇所)

3.2 試験ため池の地盤構成

試験施工に先立ち, 堤体盛土および基礎地盤の地盤構成を確認することを目的として地盤調査を行った。表 3.1, 3.2 に試験ため池の基礎地盤および堤体盛土の地盤調査結果を示す。基礎地盤を対象に標準貫入試験およびボーリング調査を行った。ボーリング調査は, 試験施工対象法面の中央断面のうち, 下流側法尻から 0.5m 離隔を確保した基礎地盤の GL-0.0m ~ GL-3.3m を対象とした。堤体盛土を対象に, 試料をサンプリングし, 所定の密度に締め固めた供試体を用いてコーン貫入試験を

行った。堤体盛土の N 値は式 (1), (2) より算定した⁴⁾。

$$q_c = 5q_u \quad (1)$$

$$q_u = 12.5N \quad (2)$$

ここに, q_c : コーン指数 (kN/m^2)

q_u : 一軸圧縮強さ (kN/m^2)

N: N 値 (回)

図 3.2 に地盤調査結果に基づく土層断面図を示す。試験ため池の堤体は N 値が 10 程度の盛土であり, その下部の GL-0.0 ~ 2.4m に火山灰質粘性土の埋土が分布している。埋土の N 値は 4 ~ 6 であり, その下部の GL-2.4m 以深は N 値が 12 の粘性土であった。また, 地下水位は地盤調査を行った GL-3.3m までの区間で観測されなかった。

表 3.1 基礎地盤の地盤調査結果

標尺 m	層厚 m	土質区分	色調	記事	N 値
1	2.40	埋土	暗褐 ~ 茶褐	火山灰質粘性土 表層~1.0m付近まで植物根を含む 礫は含まない 含水比74% 粘性は中位~やや大きい	6
2					4
3	0.90	粘性土	乳黄灰	腐食した木片を含む 粘性大きい 地下水位確認できず	12

表 3.2 堤体盛土の物性試験結果

対象土	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	含水比 w_n (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	コーン指数 q_c (kN/m^2)	N 値
堤体	1.42	60.0	0.89	617.2	10

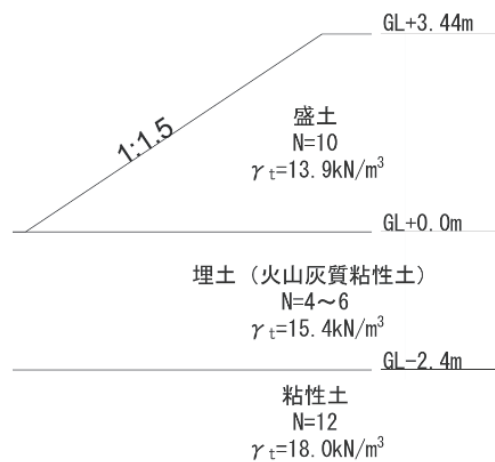


図 3.2 土層断面図

4. 試験施工の概要

4.1 地盤改良範囲

図 4.1 に試験施工の断面図を示す。地盤改良体は上部が透水性、下部が止水性の 2 層構造である。前述した地盤調査の結果から、GL-2.4m 以深の粘性土層を支持層と想定し、止水性改良の改良深度を GL-2.4m までとした。透水性改良体の背面と堤体盛土の境界部分には、透水性改良体の目詰まりと堤体土の流失の防止を目的として、フィルター材を配置した。改良幅は既往の遠心実験⁵⁾における水位低下効果を参考に設定し、模型実験と同様に堤高に対して 0.6 倍程度の 2.5m とした。施工延長は 12m とし、2 ブロックに分割して 6m ずつ施工を行った。

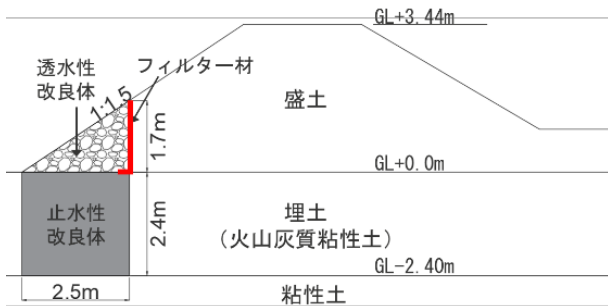


図 4.1 試験施工断面図

4.2 地盤改良仕様

図 4.2, 表 4.1 に止水性改良体の配合試験結果と改良仕様を示す。止水性改良の固化材添加量を決定するため、基礎地盤のボーリング調査により採取した試料を用いて配合試験を行った。設計基準強度を 0.5MPa, 現場室内強度比を 1:3 とし、3 水準の配合試験を行った。配合試験の結果、室内目標強度を満足する固化材添加量として、207kg/m³ とした。表 4.2, 4.3 に透水性改良体の基本性能と配合表を示す。透水性改良体の母材である 1505 砕石に対して、基本性能である空隙率 25% を満足するようにセメント量と混和材量を設定した。

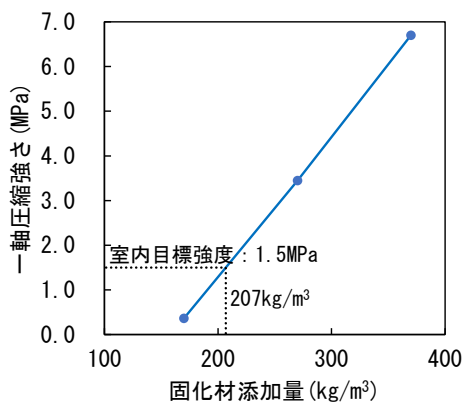


図 4.2 止水性改良体配合試験結果

表 4.1 止水性改良体の施工仕様

W/C (%)	単位量		
	固化材量 (kg/m ³)	水量 (kg/m ³)	スラリー量 (L/m ³)
70	207	145	230

表 4.2 透水性改良体の標準性能

空隙率 (%)	一軸圧縮強さ (MPa)	透水係数 (m/sec)
25.0	5.0	1.0×10 ⁻³

表 4.3 透水性改良体の配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	セメント	水	1505 砕石	高性能 AE 減水剤	水中不分離材
30	361	108	1413	2.527	1.444

4.3 施工手順

図 4.3, 写真 4.1 に施工フロー図と試験施工の状況写真を示す。以下フローに沿って詳細を説明する。

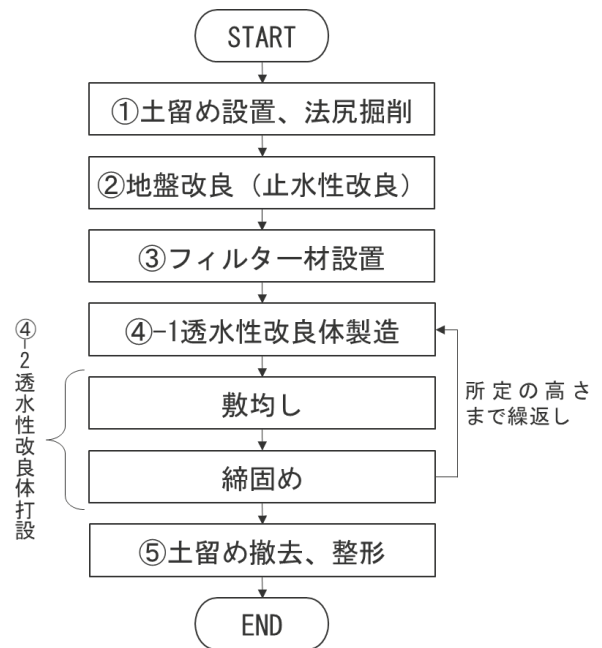


図 4.3 施工フロー図

(1) 土留め設置, 法尻掘削

法尻部に配置する透水性改良体は、原地盤に対する置換え材料である。そのため改良に先立ち、改良範囲の堤体土を掘削する。その際、安衛則の掘削勾配の基準に則り、オープンカットで施工を行うが、本試験施工では、堤体土の安定性が低い条件や湛水位がある条件での施工など、より厳しい施工条件を想定して土留め工を設置した。

土留め工は、地盤調査結果に基づく根入れ長の検討を行い、鋼矢板 (L=4.0m) を採用した。土留め工の設置は、



写真 4.1 試験施工の状況写真

ため池周辺の狭隘な施工条件を想定し、バックホウにパイプロハンマーを搭載したLHV工法を採用した。

(2) 地盤改良（止水性改良）

掘削完了後、先行して止水性改良体の造成を行った。本試験施工では、ため池周辺の多様な地盤条件や狭隘かつアクセスの悪い箇所での施工を想定して、バックホウをベースマシンとし、幅広い土質に適用可能なWILL工法を採用した。WILL工法は、砂質土ではN値40未満、粘性土ではN値15未満の地盤まで施工可能であり、比較的硬質な地盤にも適用が可能な工法である。表4.4にWILL工法の仕様を示す。

表 4.4 WILL工法の仕様

項目		仕様
攪拌方法		スラリー揺動攪拌工法
適用N値	砂質土	<40
	粘性土	<15
最大改良深度		13m

(3) フィルター材設置

透水性改良体の目詰まりの防止を目的として、フィルター材を設置した。フィルター材はドレーン工設計マニュアル⁶⁾に則り、堤体土の粒度分布に適用できる不織布製の吸出し防止材を採用した。試験施工では、土留め工として設置した鋼夾板に沿わせてフィルター材を設置し、土留め工撤去時に残置することで、堤体盛土と透水性改良体の境界部に設置した。

(4) 透水性改良体の製造・打設

透水性改良体は、原位置で連続的に材料混合が可能な小型の移動式ミキサーを用いて製造した。本試験施工では、試験ため池に隣接してプラントヤードを設けることができたため、製造した材料は鋼製容器に投入し、ラフタークレーンにより改良箇所へ運搬した。透水性改良体の打設は、バックホウを用いて1層当りの層厚が0.3mとなるように敷均しおよび、バケットでの締固めを行い、所定の高さまで打設完了後、法面の仮整形を行った。締固め管理として工法規定方式を採用し、事前に小規模な打設を行って施工法を検討した。その結果、バックホウにより0.3m程度で敷均し後、法面バケットを用いて静的に締固めを行うことで、概ね目標の空隙率を満足することが確認できたため、これに基づいて施工を行った。試験施工では、透水性改良体の製造・運搬において、ミキサーによる透水性改良体の製造能力に比べて、クレーンによる運搬能力が小さかったため、材料投入時や透水性改良体の運搬時に一旦、ミキサーの運転を中断せざるを得ない状況が発生し、施工性の低下が確認された。このため、ミキサーの製造能力を最大限発揮できる材料供給や改良体運搬などのプラント運用方法の改善が課題であると認識した。また、法面整形において、透水性改良体は、一般的な盛土材と異なり、砕石主体のセメント改良体であることに加え、適切な空隙率を確保して整形する必要があるため、盛土法面整形と比べて2倍程度の時間を要する結果となった。このため、設計寸法に確実に整形できるMCやMGのバックホウを採用する等、情報化施工の導入による施工のさらなる合理化が課題であると認識した。

(5) 土留め撤去、整形

透水性改良体の法面の仮整形後、速やかにLHV工法により鋼矢板を撤去した。鋼矢板撤去後、再度バックホウを用いて法面部の締固めと仕上げ整形を行った。

4.4 品質確認

試験施工における止水性および透水性改良体の品質を確認することを目的として事後ボーリングを実施した。表 4.5、図 4.4 に事後調査の項目とボーリング調査位置を示す。事後調査では、コアサンプリングにより取得した供試体を対象に止水性改良体は一軸圧縮強さ、透水性改良体は一軸圧縮強さに加え、透水係数および供試体の空隙率の計測を行った。

表 4.5 事後調査項目

改良区分	試験項目	調査箇所	調査点数
止水性改良体	一軸圧縮強度試験	No. 3	3 深度
透水性改良体	一軸圧縮強度試験	No. 1 ~ 3	3 深度
	透水試験		3 深度
	空隙率試験		6 深度

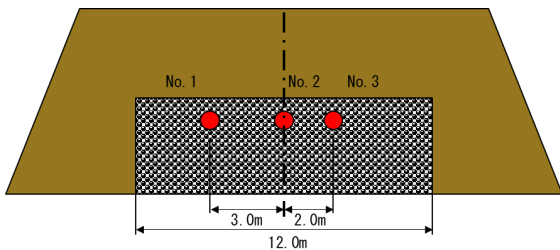


図 4.4 事後調査ボーリング位置平面図

(1) コアサンプリング結果

写真 4.2 にボーリングコアを示す。止水性改良体は、フェノールフタレイン溶液の反応が明確であり、全長において均質な改良体が造成できている。透水性改良体は、一部セメントペーストが集中し、空隙が小さい部分が見られるが、全体としては、多孔質な状態が確保されている。

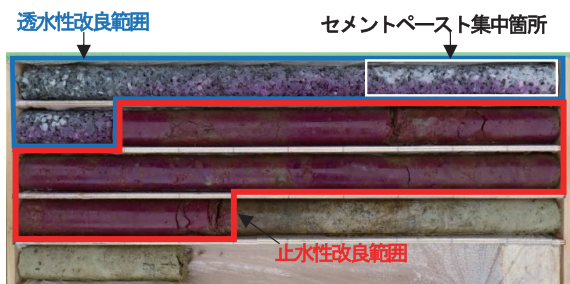


写真 4.2 ボーリングコア

(2) 止水性改良体

図 4.5 に止水性改良体のコアの一軸圧縮強さを示す。ボーリングコアのうち、上段、中段、下段の3深度から供試体を採取し、一軸圧縮試験を行った。その結果、止水性改良体の目標強度 0.5MPa に対して、すべての深度で目標強度を満足することが確認できた。

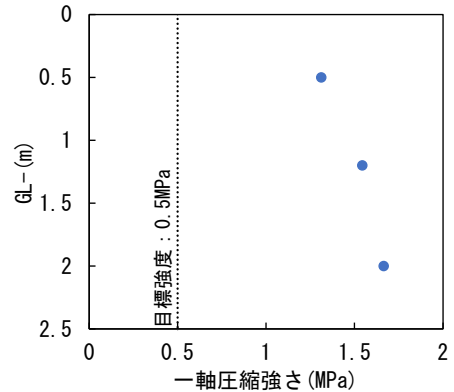


図 4.5 コアの一軸圧縮強さ (止水性改良体)

(3) 透水性改良体

図 4.6, 4.7 に透水性改良体の打設手順図と透水性改良体の空隙率、一軸圧縮強さおよび透水係数の深度分布を示す。打設手順図は改良体部分の拡大図である。空隙率の分布は、設計空隙率 25% に対して、11 ~ 30% の範囲に分布しており、GL+0.6m を境界に上下で異なる傾向を示している。GL+0.0 ~ 0.6m の範囲では、深度方向に空隙率が低下する傾向を示している。一方で、GL+0.6 ~ 1.2m では、空隙率が 10 ~ 20% と全体的にやや低い範囲で分布している。透水性改良体の打設時は、図に示すように 0.3m ごとにバックホウのバケットによる敷均し、締固めを行い、打設完了後に再度バケットにて法面整形、法面部の締固めを行っている。このため、GL+0.6m より下層は、0.3m ごとの 2 層に分けて敷均し・締固めを行っており、打設に伴う上載圧の増加に加えて、上層の締固めエネルギーが下層の空隙率低下に影響していると考えられる。

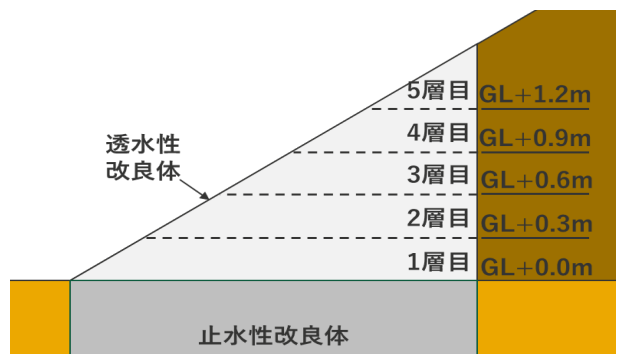


図 4.6 透水性改良体の打設手順図 (改良体部拡大図)

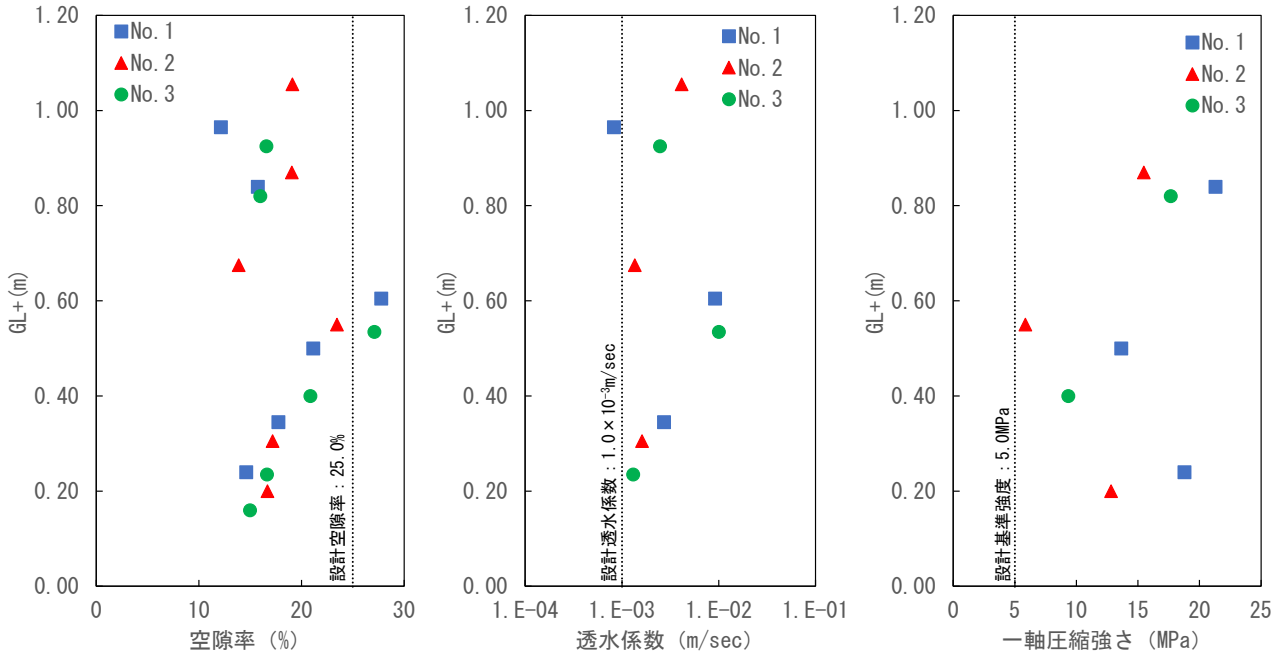


図 4.7 透水性改良体の物性値の深度分布
(左：空隙率，中央：透水係数，右：一軸圧縮強さ)

一方で、堤体断面方向の改良幅が小さい改良体上層においては、締固め範囲の減少により、締固め作業が煩雑化することに加えて、法面整形に伴う法面部の締固めの影響が大きくなることで、下層に比べて不均質な締固めとなっている可能性がある。全層において均質な改良体を打設するためには、締固めエネルギーおよび各層の投入量の定量的な管理など、より合理的な締固め管理を行うことが課題であることがわかった。透水係数の分布は空隙率分布と同様にGL+0.6mより下層では、深度方向に低下する傾向を示し、GL+0.6mより上層では、全体的低くなる傾向を示した。設計透水係数 $1.0 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ に対して、一部下回る箇所があったが、平均値は $3.7 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ であり、概ね目標性能を満足する結果であった。一軸圧縮強さの平均値は 14.4MPa であり、すべての深度で設計基準強度 5.0MPa を上回る結果であった。これらの結果から、透水性および強度の目標品質を満足する改良体が造成されていることが確認できた。図 4.8、4.9 に空隙率と透水係数および一軸圧縮強さの関係を示す。グラフより、空隙率と透水性係数および一軸圧縮強さには高い相関があり、空隙率を把握することで透水性および強度を推定でき、施工管理手法への活用が可能であることがわかった。

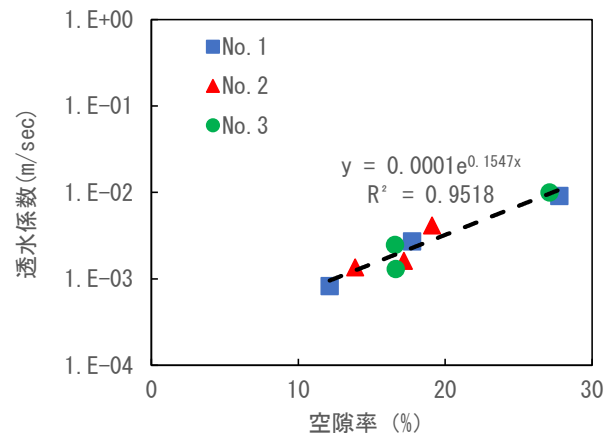


図 4.8 空隙率と透水係数の関係

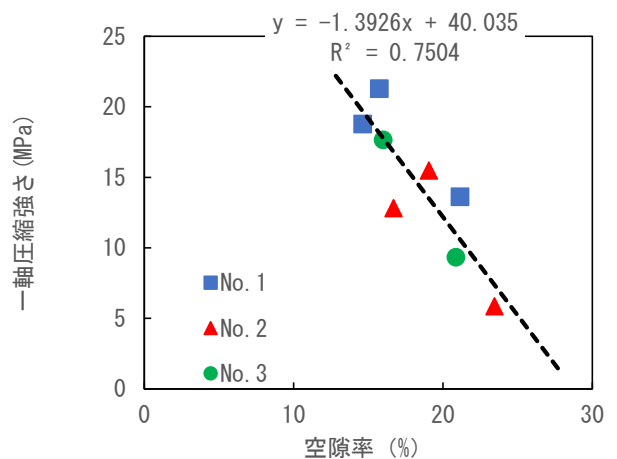


図 4.9 空隙率と一軸圧縮強さの関係

5. 湛水試験

5.1 試験概要

表 5.1, 写真 5.1 に湛水試験の工程表および湛水試験状況を示す。本工法の適用効果検証を目的として, 試験施工の前後で湛水試験を実施した。湛水試験は, 試験施工前の無対策の状態では2週間, 試験施工後の対策有の状態では2回に分けて, 計3か月間行った。堤体盛土および改良体に設置した観測井により湛水試験中, 継続して堤体内水位を観測した。堤体盛土の観測井は, 下端の深度をGL-0.4mとし, VP50を堤体盛土の盛立に併せて設置した。下端から上部1mの区間は有孔管であり, 周囲をフィルター材(単粒碎石)で埋め戻した。改良体の観測井は事後調査のボーリング孔を使用した。

表 5.1 湛水試験の工程表

	8月	1月	2月	3月	4月	5月
湛水試験	無対策	試験施工 対策有		対策有		



写真 5.1 湛水試験状況 (無対策)

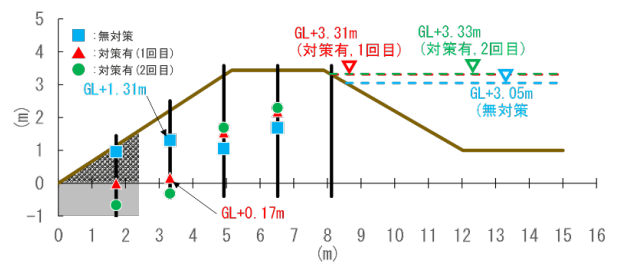


図 5.1 湛水試験時の堤体内水位

5.2 試験結果

図 5.1 に湛水試験時の堤体内水位を示す。上流側法肩に設置した水位計は計測器の不具合により, 正常な計測値が得られなかったため除外している。無対策では, 湛水に伴い, すべての観測井で堤体内水位が上昇し, 最も下流側の観測井では, 法面付近まで堤体内水位が上昇している。これに対して, 対策有は, 最下流の観測井において, 堤体盛土底面付近まで堤体内水位が低下しており, 透水性改良体の排水効果が確認できる。それに伴い, 法面中段の観測井の水位は, 無対策時はGL+1.31mであるのに対して, 対策時はGL+0.17mと対策工により約90%水位が低下している。堤体天端中央および下流側法肩の観測井の堤体内水位は, 無対策に対して対策有が0.5m程度高くなっている。これは, 無対策に対して, 対策有の湛水位が0.3m程度高いことが影響していると推定される。対策有の1回目と2回目の湛水試験結果を比較すると水位低下効果は維持されており, 湛水試験期間における目詰まりは発生していないと考えられる。写真 5.2, 5.3 に湛水試験時の堤体法面の状況を示す。無対策では, 湛水に伴い, 法面中段部から法尻にかけて漏水が発生した。目視観察では, 法面の複数の箇所から湧水が確認され, 堤体盛立時の層境界などで局所的な水みちが発生していると考えられる。これに対して, 対策有では, 法尻部に透水性改良体を配置したことにより水位が低下しており, 漏水等は見られなかった。



写真 5.2 湛水試験時の法面の状況 (無対策)



図 5.3 湛水試験時の法面の状況 (対策有)

6. まとめ

透水性改良体によるため池の安定化工法について施工性および適用効果の検証を目的として、試験施工およびその前後で湛水試験を行った。試験施工の結果、施工性については、当初計画に対して、透水性改良体の製造・運搬および法面整形において施工性の低下が確認され、プラントの運用方法の検討や法面整形への情報化施工の導入など、施工の合理化に向けた課題が確認できた。止水性および透水性改良の目標品質は満足するものの、透水性改良について、より安定した施工品質を確保するため、締固めエネルギーや投入量など、定量的な締固め管理の必要性を確認した。適用性効果については、湛水試験において、対策工により、堤体内水位が約90%低下することを確認した。今後は透水性改良のプラントの運用方法や情報化施工の導入を検討するとともに、今回得られたデータを基に施工管理手法を構築し、さらなる施工の合理化を図る。

参 考 文 献

- 1) 農林水産省：ため池の概要，ため池，
https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_sai-gai/b_tameike/（参照：2023年9月27日）
- 2) 堀俊和，上野和広，松島健一：平成23（2011）東北地方太平洋沖地震による福島県のため池被災の特徴と応急対策，農村工学研究所技報，Vol. 213, pp. 175~199(2012)
- 3) 農研機構ホームページ：平成30年7月豪雨による被災ため池等に関する現地調査報告，
https://www.naro.go.jp/disaster/nishinohon201807/genchi_chousa_houkoku.html（参照：2023年9月27日）
- 4) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説－二分冊の1－，p. 308, p. 342, 平成25年3月
- 5) 西尾竜文，足立有史，泉明良：透水性改良体によるため池の安定化工法に関する遠心模型実験，2023年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp. 333~334
- 6) 国土交通省 水管理・国土保全局治水課：ドレーン工マニュアル，平成25年6月

Development of stabilization method using soil permeability improvement of pond embankment - Method for stabilizing pond embankments against seepage and earthquakes using new materials -

Tatsufumi NISHIO, Yuji ADACHI and Akira IZUMI

In recent years, damage to pond embankments has increased due to the increased frequency and scale of natural disasters such as heavy rains and earthquakes. In particular, several pond embankments were damaged by the 2011 Tohoku Pacific Coast Earthquake and the 2018 west Japan heavy rains, and measures are required to stabilize ponds against both heavy rains and earthquakes. Against this background, we developed a method for stabilizing pond embankments using a new soil permeability improvement material that has high permeability and shear strength. To verify the workability and application effects of this method, construction and flooding tests were conducted on a life-sized pond embankment.