

老朽ため池堤体の急速リニューアル工法の開発

ー室内試験によるくし型排水フィルター工法の検証ー

藤山 哲雄・前田 和亨*1・高橋 浩*2・石黒 健・山崎 真司*3・堀 俊和*4

Development of Rapid Renewal of Old Small Dams for Irrigation

ーVerification of Effect of the Dispersive Toe-Drain Method by Laboratory Testsー

Tetsuo FUJIYAMA, Kazuyuki MAEDA, Hiroshi TAKAHASHI, Takeshi ISHIGURO, Shinji YAMAZAKI, Toshikazu HORI

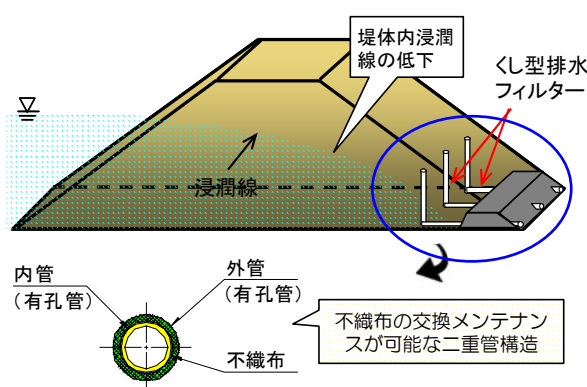


図-1 くし型排水フィルター工法の概要

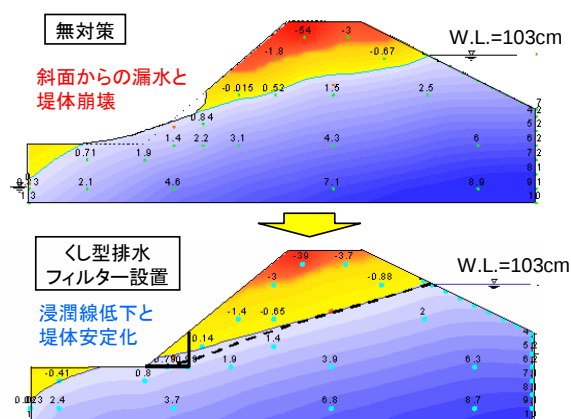


図-2 模型土槽実験によるくし型排水フィルターの効果検証

研究の目的

老朽化により改修が必要とされているため池は、全国に約2万箇所あるといわれる。老朽化したため池堤体は、豪雨時に決壊する恐れもあるため、早期の改修が急務となっている。現在、ため池の改修工法としては、堤体を大きく掘削して遮水材料を設置する前刃金工法などが一般的であるが、コストが高く受益者の負担が大きいこと、また長い工期を要するために農作物の作付けに影響を与えるといった問題もあるため、改修を断念している場合も多く見られる。そこで本研究では、堤体の大規模な掘削をとまなうことなく、低コスト・短工期にため池堤体をリニューアルできる工法の開発を行った。

技術の説明

本研究では、老朽ため池堤体の損傷要因に応じた3つの工法（①上流斜面の波浪侵食や越流時の下流斜面侵食などを抑制する「表層フィルター工法」、②堤体内浸潤線を低下してすべり安定性を向上させる「くし型排水フィルター工法」、③底樋周りに止水壁を造成してパイピングを防止する「底樋注入工法」）からなる、低コストなりニューアル工法の開発を進めている。

本報ではこのうち、「くし形排水フィルター工法」について述べている。本工法は、軽量かつ高透水性の人工フィルター材を堤体法先に離散的に配置することにより、堤体内浸潤線を低下してすべり安定性の向上を図るものであり、堤体掘削量を最小限にとどめることで大型の運搬車両や重機を不要とし、工期短縮・低コスト化を実現するとともに、これまで改修が困難であった山間部の小規模ため池に対しても適用可能な工法としたものである。また、フィルターの交換・洗浄などのメンテナンスが可能な二重管構造のフィルター材を採用することにより、目詰まり等に対して長期的な排水効果の持続を可能としている。

主な結論

室内試験や浸透流 FEM 解析等によりくし型排水フィルターの効果検証を行った結果、本工法は堤体内浸潤線を低下させ、堤体安定性を向上できること、および三次元浸透流 FEM 解析によってその効果を定量的に評価できることを確認した。また、長期目詰まり試験によって、フィルターの適切なメンテナンス頻度を把握した。

*1 関東支店 東電常陸那珂作業所

*2 本店 土木部

*3 三井化学産資(株) (現土浦市役所)

*4 農村工学研究所

老朽ため池堤体の急速リニューアル工法の開発 ー室内試験によるくし型排水フィルター工法の検証ー

藤 山 哲 雄

前 田 和 亨^{*1}高 橋 浩^{*2}

石 黒 健

山 崎 真 司^{*3}堀 俊 和^{*4}

要 旨

本研究では、ため池堤体の大規模な掘削等をともなうことなく、簡易に補修が行える低コストかつ短工期なため池堤体のリニューアル工法として、①堤体斜面に人工フィルター材を敷設し、上流斜面における波浪侵食等の防止や下流斜面における豪雨時の越流侵食等を抑制する「表層フィルター工法」、②堤体下流法先に人工排水フィルターを設置して堤体内浸潤線を低下させ、斜面安定性を維持する「くし型排水フィルター工法」、③底樋周りに軟質注入材を堤体外部から注入して底樋沿いのパイピングを抑制する「底樋注入工法」をそれぞれ開発している。本報ではこのうち、「くし型排水フィルター工法」について、室内試験や浸透流FEM解析等により対策効果の検証を行っている。この結果、くし型排水フィルターは堤体内浸潤線を低下させ、堤体安定性を向上できること、および三次元浸透流FEM解析によってその効果を定量的に評価できることを確認した。また、目詰まりに対するフィルターの定期的なメンテナンスが可能な二重管構造を採用し、長期目詰まり試験によって適切なメンテナンス頻度を把握した。

キーワード 老朽ため池／リニューアル／低コスト／工期短縮／排水フィルター／安定性向上

目 次

- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1. はじめに | 4. くし型排水フィルターのメンテナンス方法に関する検討 |
| 2. ため池堤体の被災メカニズムと開発工法の対策原理 | 5. おわりに |
| 3. くし型排水フィルターの効果検証 | |

DEVELOPMENT OF RAPID RENEWAL METHOD OF OLD SMALL DAMS FOR IRRIGATION - VERIFICATION OF EFFECT OF THE DISPERSIVE TOE-DRAIN METHOD BY LABORATRY TESTS -

Tetsuo FUJIYAMA

Kazuyuki MAEDA

Hiroshi TAKAHASHI

Takeshi ISHIGURO

Shinji YAMAZAKI

Toshikazu HORI

Synopsis:

A low-cost and rapid renewal method of old small dams for irrigation is suggested. The renewal method is consisted from three techniques. The first is surface cover method that prevents against wave erosion or over-flow erosion, the second is dispersive toe-drain method that lowers inner water-level and improves stability of dams, and the third is chemical injection to an outlet pipe of dams for preventing from piping along the outlet pipe. In this paper, a verification of effect of the dispersive toe-drain method is reported. Some laboratory model tests reveal that the dispersive toe-drain lowers inner water-level and improves the stability of dams. A three-dimensional flow analysis with FEM can estimate the effect accurately. Double tube drain is used for the toe-drain to facilitate the maintenance against clogging and an adequate frequency of the maintenance is judged from long-term clogging tests with filter materials.

*1 関東支店 東電常陸那珂(作) *2 土木部設計グループ *3 三井化学産資(株) (現土浦市役所) *4 農村工学研究所

1. はじめに

1.1 研究の背景

ため池は、全国で約 21 万箇所存在すると言われるが、その大部分は江戸時代以前に築造された経過 100 年以上の古いものであり¹⁾、老朽化による堤体安定性の低下が懸念されているものが少なくない。

平成 9 年度の農林水産省「長期要防災事業量調査」¹⁾によると、整備の必要な老朽ため池は全国で約 2 万箇所と発表されている。このうち、緊急の整備が必要とされた約 1,200 箇所については、平成 12～15 年度にかけて改修・整備が行われた。しかし、豪雨や地震などによる老朽ため池の被災事例はその後毎年のように報告されており、例えば 10 回の台風上陸および新潟県中越地震に見舞われた平成 16 年度は、この年だけで全国で 4,573 箇所のため池が被災し、被害額は 255 億円に上っている¹⁾（豪雨によるため池の決壊事例を写真-1.1 に示す²⁾）。

この甚大な被災を鑑み、翌 17 年度には受益面積 2.0ha 以上のため池約 5 万箇所を対象として「農業用ため池緊急点検」が全国的に実施され、この結果、表-1.1 に示すように約 7,700 箇所のため池が「早急な対応が必要」または「何らかの対応が望まれる」と新たに判定された³⁾。これらの改修・整備は現在も進められているが、未だ完了には至っていない。さらに、上記緊急点検の対象外である受益面積 2.0ha 未満の規模の小さなため池については、全国 21 万個のため池の約 7 割を占めるにもかかわらず、予算制約上の問題等から、点検・対策が後回しになっているのが現状である。

このように、改修の必要な老朽ため池の数は数千～万単位で残されていると想定されるが、予算の制約等からすぐには手が付けられない状況にある。したがって、これらの改修・整備を着実に進めていくためには、改修コストの低減が必須である。従来、ため池堤体の改修工法としては、堤体内に低透水性の粘性土（刃金土）を堤体上流側に配置して遮水性能を向上させる前刃金土工法が一般的である（図-1.1(a)）。しかし、本工法では既設堤体を大きく掘削・除去して再築堤する必要があるため、一般にコストが高く、工期が長い。特に、小規模な老朽た



写真-1.1 豪雨によるため池の決壊事例²⁾

表-1.1 平成 17 年度ため池緊急点検の結果³⁾

点検数	総合判定結果		
	早急な対応が必要	何らかの対応が望まれる	対応の必要性は低い
51,255	2,247	5,450	43,528

注1) 緊急点検は受益面積2.0ha以上のため池を対象

注2) 過去10年間に改修されたため池及び平成16年度に被災したため池は点検対象に含まない。

め池は山間地等に立地しているケースが多く、大型の重機や資材運搬車両のアクセスが困難な場合も多い。

一方、ため池の維持管理は受益者である地元農家が個人や共同で自ら担っている場合がほとんどであり、大規模なため池改修工事については国・自治体から補助金が拠出されるものの、受益者も相応の費用負担が求められる。したがって、従来工法による高コストなため池改修では、受益者である農家にとって費用面で大きな負担であるとともに、工期が長い場合はその期間作付けを断念せざるを得ないといった収益上の問題も生じることから、実際にはため池の改修工事になかなか踏み切れないのが現実である。

1.2 研究の目的

以上のような背景を踏まえ、本研究では、農家が現実的に負担できるレベルで、低コスト・短工期にため池堤

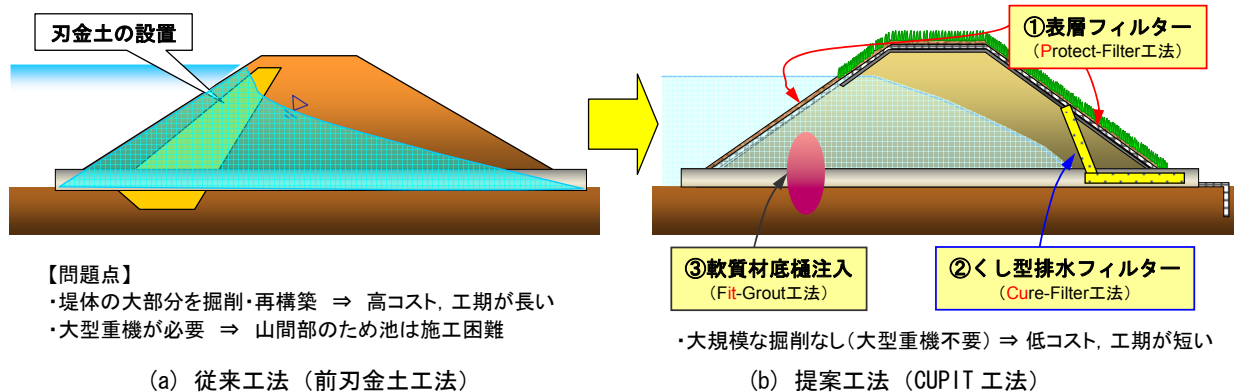


図-1.1 ため池堤体の改修工法の概念図（従来工法と提案工法）

体をリニューアルできる工法の開発を目的として、堤体の大規模な掘削をとまなうことなく、人工フィルター材等を用いて堤体外部から簡易に改修・補強するため池リニュアル工法（CUPIT 工法）の開発を行った。具体的には、図-2.1 (b)に示すように、

- (1) ため池堤体の上下流斜面を保護し、波浪浸食等にもなう上流断面欠損、または豪雨時の越流による下流斜面洗掘等を防ぐ表層フィルター
- (2) 堤体内浸潤線を低下させ、堤体のすべり安定性を向上させるくし型排水フィルター
- (3) 底樋沿いに形成された水みちを修復し、底樋沿いのパイピング発生等を防ぐ軟質注入材

を用いることによって、安定性の低下した老朽ため池堤体のリニュアルを図るものである。

本開発は、農林水産省の平成 17～20 年度官民連携新技術研究開発事業の認定を受け、前田建設工業㈱、前田工業㈱、三井化学産資㈱、日新特殊建設㈱からなる新技術研究開発組合（代表者：前田建設工業㈱）と、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所との共同研究として実施した。本論文はこのうち、前田建設が主に開発を担当した「(2)くし型排水フィルター」を中心に、工法概要ならびに室内試験等による検証結果について報告を行うものである。

2. ため池堤体の被災メカニズムと開発工法の対策原理

2.1 ため池堤体の被災メカニズム

ため池被害のほとんどは豪雨時と地震時において発生しており、特に豪雨によるものが全体の約 90%を占めるとされる²⁾。堀⁴⁾は、既往の被災事例の調査・分析から、豪雨によるため池の被災形態とそのメカニズムを大きく以下の3つに分類している。

(1) 浸透破壊

堤体のハイドロリックフラクチャリング（堤体内に生じた潜在的な亀裂や低応力ゾーンに、水圧が作用して亀裂が発生または進展する現象。土中の間隙水圧が全土圧を上回った際に発生する）や、パイピングなどによる水理的破壊現象によるものであり、堤体の破壊要因として最も多い。具体的には、次の2つのケースがある。

a) 上流斜面弱部をきっかけとした浸透破壊

貯水位の変動による乾湿の繰り返しや土粒子の吸出し、あるいは植物根や動物の巣穴などにより、長年にわたって上流斜面に“弱部”が形成され、豪雨時の急激な水圧上昇により、ここをきっかけとしてハイドロリックフラクチャリングやパイピングが堤体内で繰り返し進行し、最終的には堤体下流までパイピングが貫通して全体的な浸透破壊に至る現象（図-2.1(a)）。

b) 底樋沿いの浸透破壊

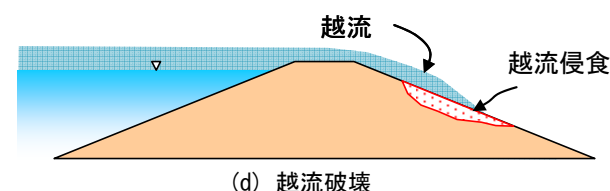
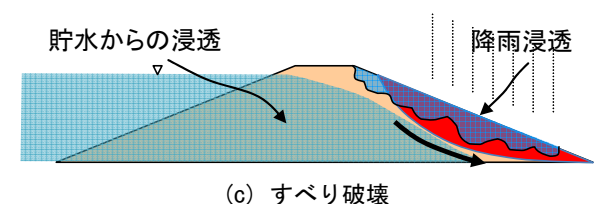
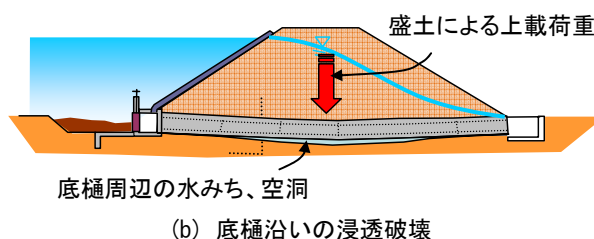
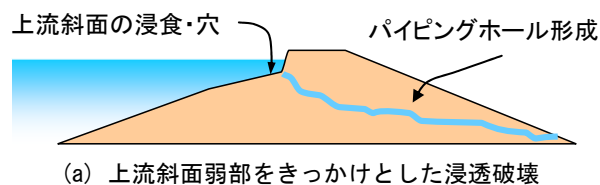


図-2.1 ため池堤体の被災メカニズム

底樋周りの地盤の不等沈下、あるいは底樋と堤体土の剛性の違いに起因するアーチング作用により底樋にかかる堤体土の土圧が低下し、ハイドロリックフラクチャリングが誘発され、これにより底樋沿いに水みちが形成されて最終的に浸透破壊に至る現象（図-2.1(b)）。

(2) すべり破壊

豪雨時の貯水位上昇、あるいは堤体内への降雨浸透により堤体内浸潤線が上昇し、下流斜面の有効応力の低下、ならびに下流堤体材料のサクション消失によるせん断強度の低下がもたらされ、すべり破壊が生じる現象である（図-2.1(c)）。築堤年代の古いため池は、現代のように重機による十分な締固め、あるいは厳密な品質管理に基づく築堤材料の選択・調整などが行われていないため、元々すべり安定性が高くない。さらに、長年の間に堤体材料の細粒分が下流側に移動することによって、堤体内の浸潤線が下流法面近くまで上昇している場合がある。したがって、豪雨時などにおいて急激に堤体浸潤線が上昇した場合、すべり破壊が生じる危険性が高い。

(3) 越流破壊

豪雨時に貯水位が天端を超えて越流し、下流斜面を大きく浸食して最終的に全体破壊に至る現象である（図-

2.1(d))。築堤年代の古いため池では、洪水吐の放水能力が十分でない場合が多いため、豪雨時に貯水位が堤体天端を越流してしまう危険性が高い。

豪雨時におけるため池の破壊要因としては以上の3つが主なものであるが、実際にはこれらを明確に区分できるわけではなく、上記3つの破壊現象が複合的に重なって被災につながっている場合が多い。

2.2 対策工法の概要と特徴

本研究で開発した CUPIT 工法 (図-1.1(b)) は、上記のため池の被災メカニズムを考慮し、以下の3つの対策工法からなるものである。

(1) 表層フィルター工法 (Protect-Filter 工法)

堤体斜面に立体的な絡み合い構造を有する人工フィルター (侵食防止マット) を設置することにより、以下の効果を期待するものである^{5,6)} (図-2.2(a))。

a) 上流側斜面の波浪侵食・吸出し防止

上流側斜面については、侵食防止マットと吸出し防止材を組み合わせることにより、波浪による侵食や貯水位変動による堤体土の吸い出しを防止する。これにより、上流斜面欠損に起因するパイピングホール形成 (図-2.1(a)) を防止する。

b) 下流側斜面の堤体降雨浸透・越流浸食抑制

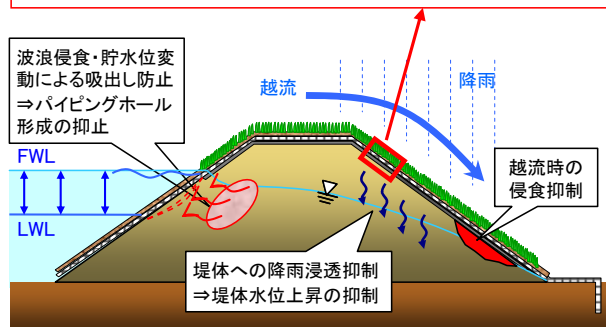
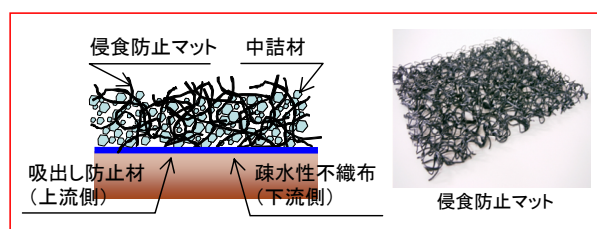
下流側斜面については、豪雨時における堤体への降雨浸透や、越流時の洗掘を抑制する。これにより、豪雨時の堤体内浸潤線の上昇によるすべり破壊 (図-2.1(c))、および越流破壊 (図-2.1(d)) を防止する。

ため池堤体の上流斜面を同様に保護する既存工法として「ブロック張り工」があるが、コンクリートブロックが重量物であるため、設置にはクレーン等の重機が必要となる。これに対し、提案工法は人力でも運搬・敷設が可能な軽量の人工フィルター材を用いるため、施工性やコスト面でブロック張り工より優位と考えられる。

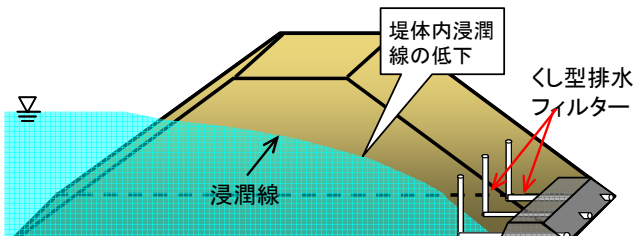
また、下流斜面の侵食保護を目的とした一般的な既存工法は存在しない。近年、越流時の堤体保護を目的として、土のうとジオシンセティックスを組み合わせた補強材料で既設堤体の法面を置き換える「越流許容型ため池堤体」が提案されてはいるが⁶⁾、本工法は今回の提案工法のような降雨による堤体内浸潤線の上昇抑制を同時に期待するものではない。

(2) くし型排水フィルター工法 (Cure-Filter 工法)

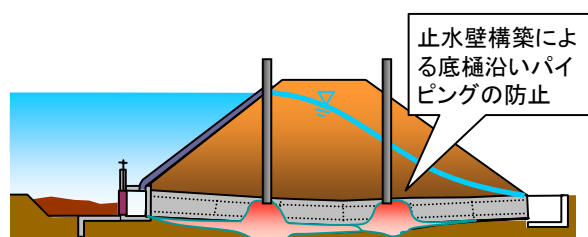
図-2.2(b)に示すように、堤体の下流法先に、人工的な排水フィルター材を離散的に設置することによって堤体内浸潤線を低下させ、すべり破壊 (図-2.1(c)) に対する安定性の向上を期待するものである。堤体の掘削範囲は法先部分のわずかであるため、掘削・埋戻しに大型重機は不要である。なお、本工法は排水フィルター材を“櫛



(a) 表層フィルター工法



(b) くし型排水フィルター工法



(c) 底樋注入工法

図-2.2 提案対策工法の概要

（くし）状”に離散的に配置することから、ここでは「くし型排水フィルター」と称することとする。

下流法先を排水性の高い材料で置換し、堤体内浸潤線の低下を図る既存工法としては「蛇かご（ふとんかご）」などが一般的であるが、これらは盛土延長に沿って法先全周に配置する必要があるとともに、鉄製かごへの割栗石の詰め込み作業などに相当の手間がかかる。これに対し、提案工法は排水性の高いフィルター材を離散的に配置することで材料費を抑え、かつ人力で迅速かつ簡易にフィルター材を設置することができるため、施工性やコスト面で既存工法より優位と考えられる。さらに、目詰まり等によるフィルター材の機能低下を定期的にメンテナンスし、長期にわたって排水機能を維持できる仕組みを導入している点も本工法の大きな特徴である（詳細は次章にて後述）。

表-2.1 対策工法と既存工法の比較

工 法 名			対策効果				主な既存工法	主な新規性
			(1)浸透破壊		(2)すべり破壊	(3)越流破壊		
			a)上流斜面 弱部起因	b)底樋沿い				
(1)	表層フィルター 工法	a)上流側	○	－	－	－	ブロック張, 石積	・大型重機を用いずに施工可能
		b)下流側	－	－	○ (堤体への降雨浸透抑制)	○	なし	・降雨浸透抑制, 越流抵抗性の確保のための既存工法は存在しない
(2)	くし型排水フィルター 工法		－	－	○ (堤体浸潤線低下)	－	前刃土工, ふとんかご	・大型重機を用いずに施工可能 ・フィルターのメンテナンスが可能のため長期的に性能を保持可能
(3)	底樋注入工法		－	○	－	－	開削による底樋再構築	・大型重機を用いずに施工可能 ・非開削で底樋周辺の止水を補修する概念がこれまでなかった

(3) 底樋注入工法 (Fit-Grout 工法)

図-2.2(c)に示すように、堤体外部から底樋周りに軟質な固化材を注入することによって底樋周りに止水壁を構築し、底樋沿いのパイピング発生（図-2.1(b)）を抑制するものである^{7),8)}。従来、底樋の改修は堤体をV字状に大きく開削し、底樋管を再構築することが一般的だが、提案工法は堤体掘削をとまなうことなく、貯水位を下げずに施工が可能であるため、施工性やコスト面で既存工法より優位と考えられる。

軟質注入材は、コンクリート目地の止水に用いられるアクリル系注入材を用いる。アクリル系注入材は、セメント系注入材に比べて材料コストは高いが、一般に地盤への浸透性が高く、コンクリートへの付着性も高い。また注入機械については、狹隘なため池天端でも据え置き・施工が可能な小型なタイプを用いる。

以上の3つの工法について、2.1で述べたため池被災メカニズムとの対応、および既存工法に対する比較をまとめたものを表-2.1に示す。提案するリニューアル工法（CUPIT 工法）は、老朽ため池の損傷要因に対応した複数の対策工法から成るため、当該ため池堤体の損傷状況に応じて、任意に選択を行うことが可能である。

「表層フィルター工法」および「底樋注入工法」に関する報告については別報^{5)~8)}に譲り、本報では「くし型排水フィルター」について、工法概要ならびに室内試験等による検証結果について述べる。

3. くし型排水フィルターの効果検証

3.1 模型堤体浸透実験および浸透流 FEM によるくし型排水フィルター効果の検証

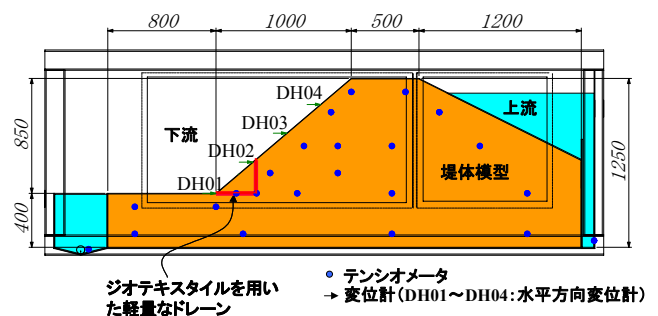
くし型排水フィルターは、「蛇かご」のように堤体延長方向に沿って連続的に設置する一般的な法先ドレーン工法と異なり、人工排水フィルターを堤体延長方向に離散的に配置することで、材料コストの低減をねらってい

る。そこで、人工排水フィルターの離散配置における堤体内浸潤線の低下効果を把握するため、ため池堤体を模擬した土槽実験を行った。また、浸透流 FEM によってその低下効果を定量的に評価できるかを検証した。

(1) 模型堤体の浸透実験概要⁹⁾

模型堤体は、図-3.1に示すように基盤部厚さ 40cm、堤体高さ 85cm、奥行き 200cm のスケールにて、霞ヶ浦砂を相対密度 $Dr=50\%$ になるように締固めて作成した。霞ヶ浦砂の粒度・物理特性を図-3.2に示す。排水フィルターは、図-3.1に示すように法先から 30cm まで L 字型に敷設しており、水平部は $\phi 10\text{mm}$ の樹脂性排水パイプ（前田工織製モノドレン S）、鉛直部は地盤の変形を妨げないよう厚さ約 1mm の柔らかい不織布（前田工織製ジオフリース S100）を $\phi 10\text{mm}$ の筒状にして用いた。試験ケースは、くし型排水フィルターを模擬したケース（奥行き方向に 20cm 間隔でフィルター設置）のほか、比較のために無対策のケースを実施した（表-3.1）。なお、模型堤体内には図-3.1に示す位置にテンシオメータを配置し、貯水にとまなう堤体内間隙水圧を計測するとともに、堤体下流部に排出される浸透水量をあわせて計測する。

貯水位は 25cm ずつ、間隙水圧が定常値となることを確認しながら、H.W.L=122cm（天端高さから 3cm 下）まで上昇させた。

図-3.1 模型堤体浸透実験の概要⁹⁾

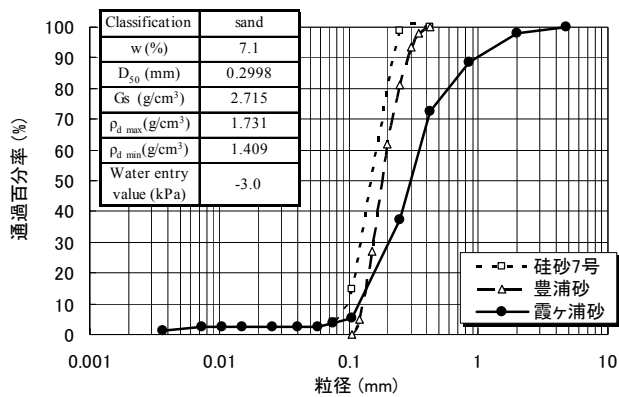


図-3.2 模型堤体浸透実験の概要

表-3.1 模型堤体浸透実験のケース一覧

CASE	内容	排水フィルター材の仕様		
1	無対策	なし		
2	フィルター 離散配置	水平部	モノドレンS (φ10mm×長さ 300mm)	奥行き 200mmピッチ
		鉛直部	ジオフリースS100 (φ10mm×長さ 300mm)	

(2) 模型堤体のFEM解析条件

模型堤体内の間隙水圧に対する解析による再現精度の把握を目的として、浸透流 FEM 解析を実施した。解析メッシュおよび境界条件を図-3.3 に示す。CASE1（無対策）については二次元解析（平面ひずみ条件）にて、またフィルターが離散配置となる CASE2 については、堤体とフィルターの透水係数を奥行き方向の面積比で合成した“等価な透水係数”を用いた二次元解析（平面ひずみ条件）、および堤体とフィルターを忠実にモデル化した三次元解析の2通りを行った。三次元解析は、図-3.4 に示すように模型堤体中央のくし型排水フィルター1 スパン分の堤体部を取り出したモデルを作成した。なお、実験で用いた排水フィルターは円筒状、一方三次元解析メッシュは格子状であるため、くし型フィルター部の要素は、フィルターの周長が実験と解析で同一になる大きさのメッシュでモデル化した。

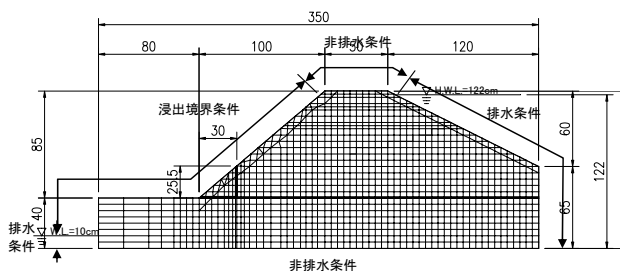


図-3.3 模型堤体浸透実験の二次元 FEM 解析モデル

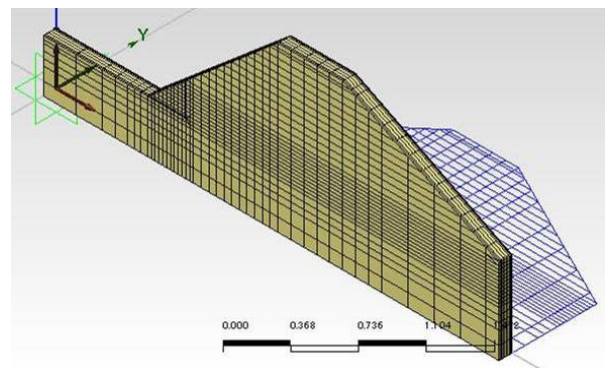
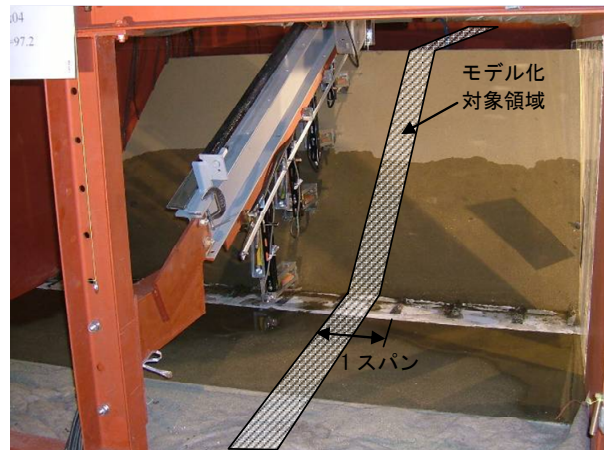


図-3.4 模型堤体浸透実験の三次元 FEM 解析モデル

表-3.2 浸透流 FEM における解析物性値

部位	材料名	透水係数k (cm/sec)
基盤, 堤体	霞ヶ浦砂	1.2×10^{-2}
離散配置 フィルター	水平部	モノドレンS 1.0×10^2
	鉛直部	ジオフリースS100 2.5×10^{-1}

解析に用いた物性値を表-3.2 に示す。堤体・基盤の透水係数は別途実施した堤体材料の透水試験結果から、またフィルターの透水係数はメーカーのカタログ値を参照して設定した。

(3) 実験および浸透流 FEM 解析結果

a) CASE1（無対策）

CASE1（無対策）について、堤体の間隙水圧から推定した堤体内浸潤線に関する実験・解析結果を図-3.5 に示す。無対策では、貯水位を W.L.=92cm まで上昇させた時点で浸透流が下流法面より侵出し、侵出点付近から堤体崩壊が生じ始めた。さらに貯水位の上昇にともなって崩壊が進行し、W.L.=112cm で完全崩壊に至った。

一方、解析結果を見ると、崩壊が始まる W.L.=92cm までは、実測の堤体内浸潤線を比較的良好に再現できていることがわかる。

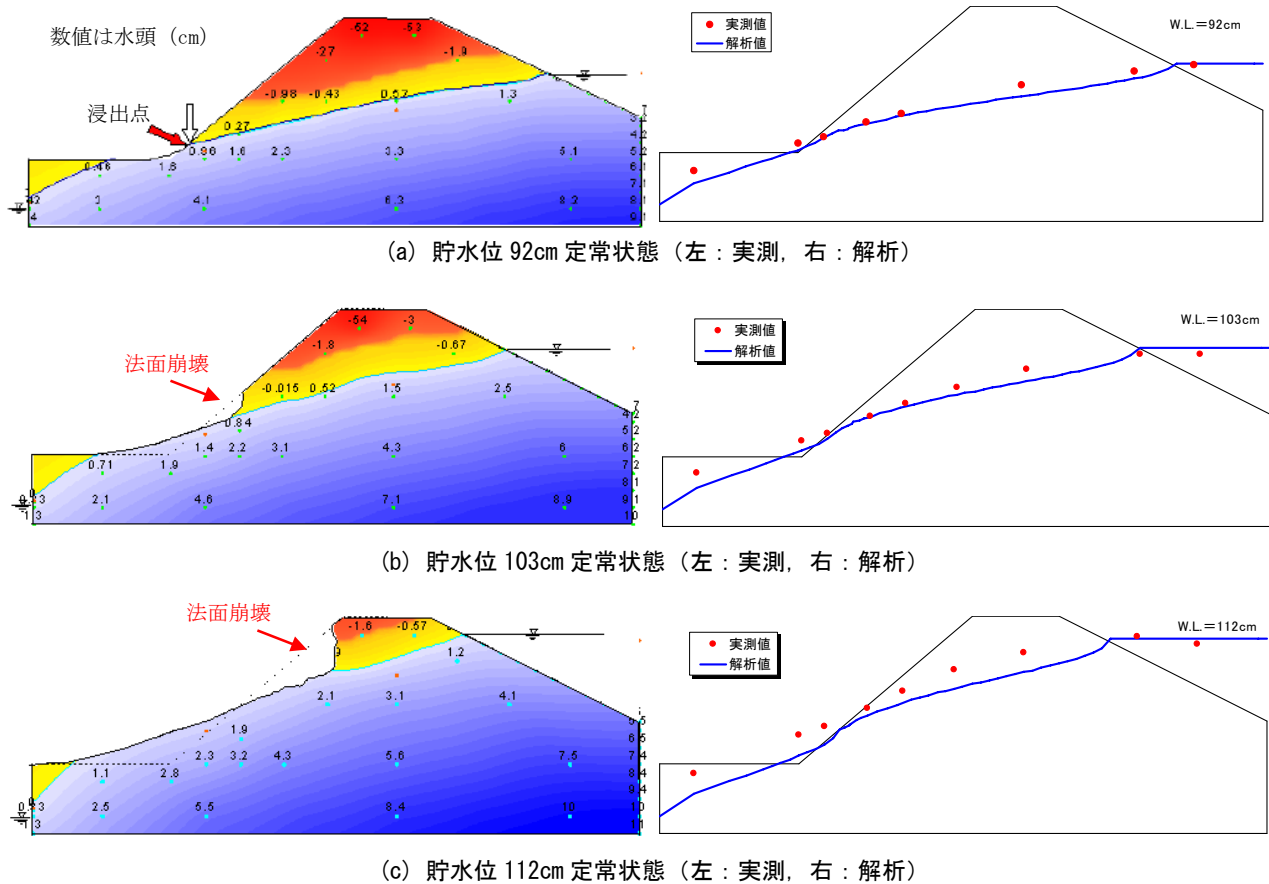


図-3.5 浸透模型実験 CASE1 (無対策) における堤体内浸潤線の実験・解析結果

b) CASE2 (フィルター離散配置)

CASE2 (フィルター離散配置) について、間隙水圧から推定した堤体内浸潤線に関する実験結果を図-3.6 に示す。フィルター離散配置では、貯水位が H.W.L.=122cm に達しても堤体の崩壊は見られず、CASE1 (無対策) に比較して浸透に対する安定性が向上していることが確認された。しかし、H.W.L.にて間隙水圧が定常状態に達してもなく、急激な決壊が生じた。

一方、貯水位が H.W.L.=122cm の場合の堤体内浸潤線の解析結果を図-3.7 に示すが、等価透水係数を用いた二次元解析では堤体内水圧を過小評価 (すなわち危険側に評価) する一方、三次元解析では実測の水圧値を良好に再現できていることがわかる。フィルター離散配置の場合、堤体内浸潤線の低下効果を精度良く評価するには、排水特性を忠実にモデル化できる三次元解析の必要性が示唆される。

模型堤体からの浸透水量について、実験結果と三次元解析による結果を比較したものを図-3.8 に示す。解析値は H.W.L.時 (W.L.=122cm) の 1 点のみの結果しかないが、浸透水量についても実験結果を良好に表現できていることがわかる。

以上をまとめると、

- ① 離散配置のくし形排水フィルターの適用により、浸

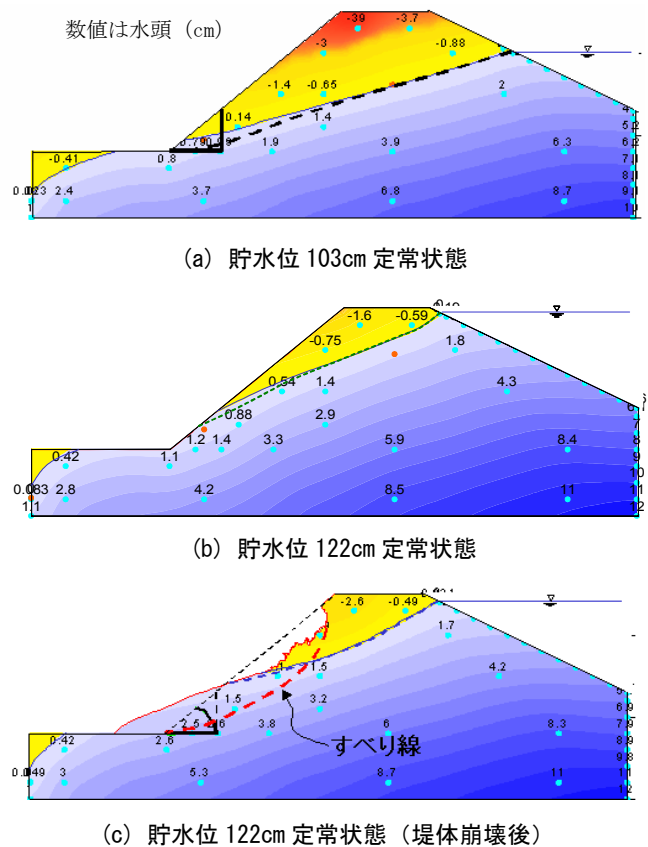


図-3.6 浸透模型実験 CASE2 (離散フィルター) における堤体内浸潤線の実験結果

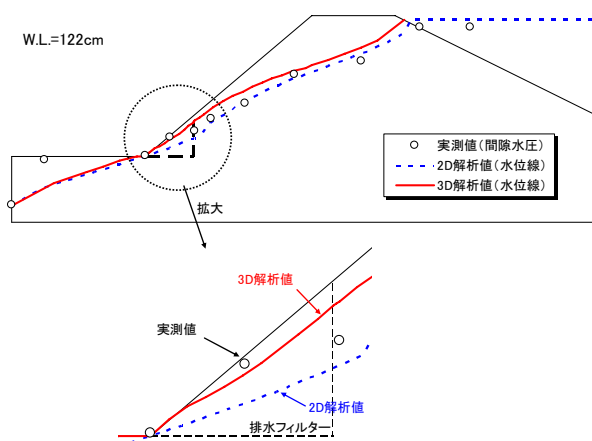


図-3.7 浸透模型実験 CASE2（分散フィルター）における堤体内浸潤線の解析結果（貯水位 122cm）

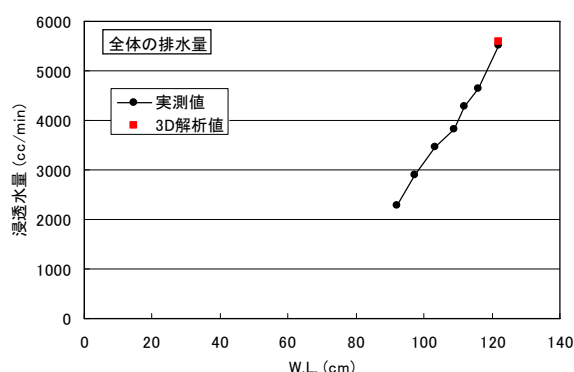


図-3.8 浸透模型実験 CASE2（分散フィルター）における浸透流量の実測と解析比較

透に対する堤体安全性が向上する。

- ② 排水フィルターの配置が平面ひずみ条件（無対策）であれば、二次元浸透流 FEM 解析により堤体内浸潤線や堤体からの排水量を定量的に評価可能である。
- ③ 排水フィルターが分散配置の場合、二次元浸透流 FEM 解析では、堤体法先の浸潤線低下効果を過大評価する可能性があるが、三次元によって堤体内浸潤線や堤体からの排水量を定量的に評価可能であることがわかった。

3.2 実規模ため池を想定したくし型排水フィルター効果の検討

前節で述べた模型堤体実験によって、くし型排水フィルターを導入することで堤体内浸潤線が低下し、堤体安定性が向上することがわかった。ここでは、実際の堤体においてこの浸潤線低下効果がどの程度期待できるかを解析により検討する。

解析対象としたのは、堤体断面形状や物性等が既往文献¹⁰⁾に記載されている、実際に漏水が観測されている老朽ため池堤体である。堤体断面図を図-3.9 に示す（堤高約 8m、堤長約 120 m）。本堤体断面では、ほぼ年間を通

じて下流法先から漏水が発生している。

堤体材料および基礎地盤の透水係数を現場透水試験や地質調査結果をもとに設定し、二次元浸透流 FEM により堤体の間隙水圧を計算した結果を図-3.10(a)に示す。これを見ると、堤体内浸潤線は下流法面に浸出しており、解析上も下流から漏水が発生することがわかる。これに対し、透水係数 1×10^2 cm/sec のくし型排水フィルターを下流法先に L 字型に設置したと仮定した場合の解析結果を図-3.10(b)に示す。これを見ると、堤体内浸潤線は大きく低下して下流法面に浸出しておらず、解析上は漏水が抑制される結果となった。ただし、本解析はくし型排水フィルターと堤体の面積比に応じた等価透水係数を設定した二次元平面ひずみ条件で計算しており（ここでは予察的解析として三次元解析までは実施しなかった）、前節 3.1 の模型堤体解析で述べた通り、等価透水係数ではくし型排水フィルターによる堤体水圧の低下度合いを過大評価する可能性がある。したがって、実際にはもう少し堤体内浸潤線は高くなる可能性があるが、図-3.10 の結果から、少なくとも実堤体規模においても、くし型排水フィルターによって堤体内浸潤線を十分低下できる可能性が高いと言える。

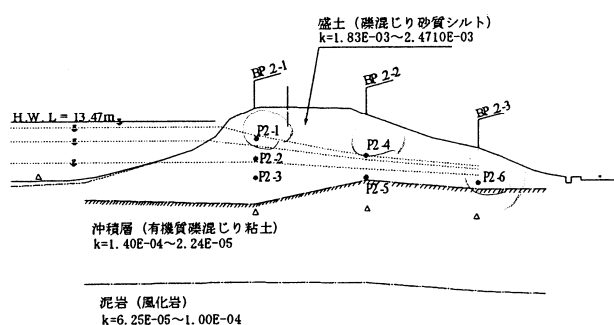


図-3.9 解析対象とした実ため池堤体の断面図¹⁰⁾

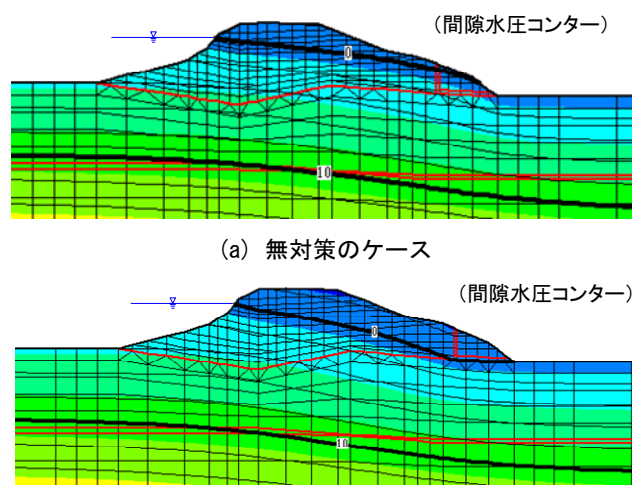


図-3.10 実ため池堤体の二次元浸透流 FEM 試験解析結果

4. くし型排水フィルターのメンテナンス方法に関する検討

4.1 くし型排水フィルター材料と構造の選定

くし型排水フィルターには、次のような品質が求められる。

- ① 通水性能が大きい。
- ② 長期的に目詰まりを生じない。
- ③ 堤体の細粒分を流出させない。
- ④ 堤体土被りに対して十分な剛性と強度を有するとともに、堤体変形に追従できる柔軟性を有する。
- ⑤ 堤体との密着性を高めるため表面に凹凸構造を有している。

以上の条件を鑑み、くし型排水フィルターは、道路の埋設管等実績を有する高強度の有孔管（φ100mm程度）＋不織布の組合せを選定した。ただし、不織布は経年使用によって細粒分の目詰まりが生じ、透水性が低下することが懸念される。そこで、くし型排水フィルターは図-4.1に示すような二重管構造とすることで、不織布を巻き付けた内管を定期的に取り出して、目詰まりの洗浄や劣化した不織布の交換といったメンテナンスが可能な構造とした。

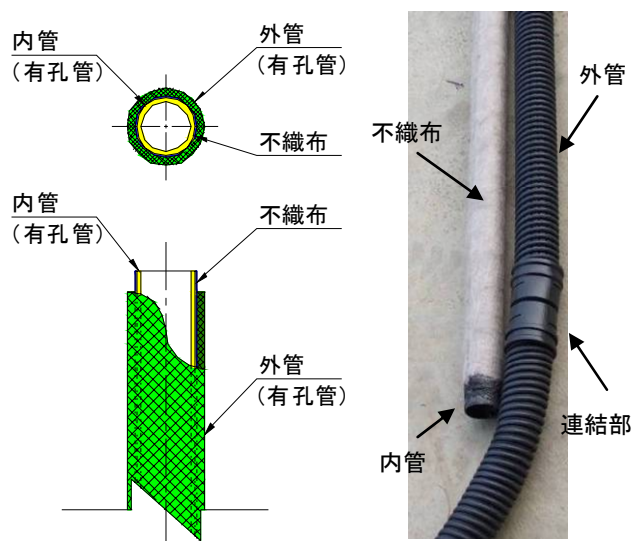


図-4.1 くし型排水フィルター材料の構造

4.2 長期目詰まり試験による不織布の目詰まり特性とメンテナンス頻度の検討

くし型排水フィルターに用いる不織布の目詰まり特性を把握し、材料選定やメンテナンス頻度（洗浄頻度）検討の基礎資料とするため、室内小型土槽による長期目詰まり試験を実施した。

図-4.2に示すように塩ビ製モールド（φ=14.6cm, H=20cm）の底にガラス球を敷き詰め、目の粗いメッシュ材を接着した上に不織布を敷設し、試験材料を締め固め

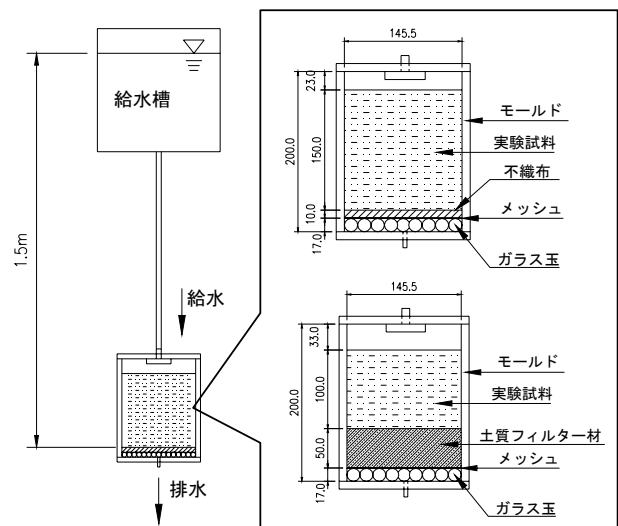


図-4.2 長期目詰まり試験の概要

表-4.1 長期目詰まり試験に用いた不織布

材料名	面外透水係数 (cm/sec):カタログ値
ミラクルグリーン(MGC-10)	1.0×10^{-2} 程度(推測値)
ボトルフリース(FBO-10)	3.0×10^{-1} 以上
サンドフ(S-10G)	2.0以上
ジオフリースS100	2.50×10^{-1}
ザバーン	5.0×10^{-2} 以上
ジオフリースAE-80	2.27×10^{-1}

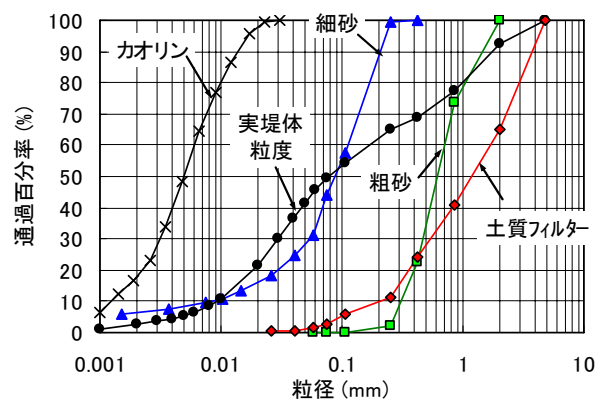
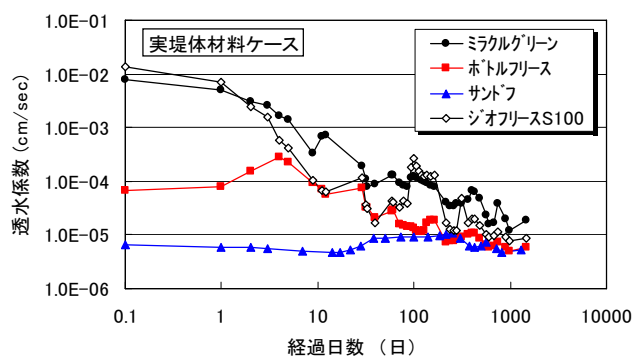


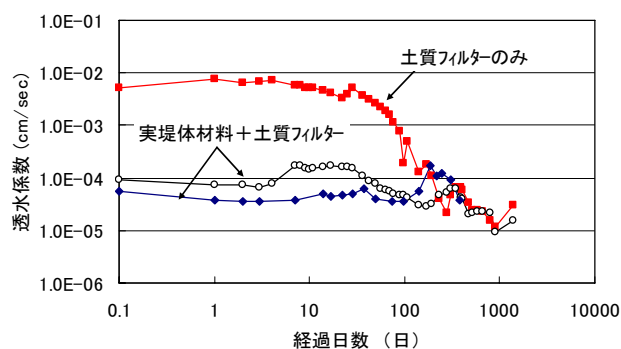
図-4.3 長期目詰まり試験材料の粒度分布

る。このモールドとチューブで接続させた給水槽から水道水を流下させ（動水勾配 $i=10$ ）、モールド下部からの排水量を経時的に測定した。

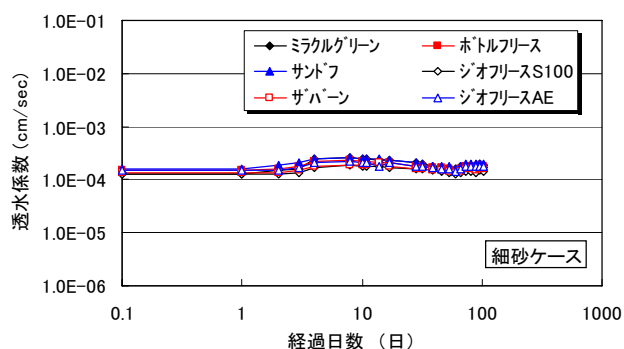
試験に用いた不織布は、排水材として市販されている表-4.1に示す6種類である。この他、不織布の代わりに天然材料である砂を排水材として用いた場合（土質フィルター）についても比較のために行った（図-4.2の右下）。一方試験材料は、図-4.3の粒度分布を有する5種類の土を用いた。このうち1種類は、笠間土を実堤体で測定された粒度分布に合わせたものである。また、土質フィルター自身を試験材料として用いた場合も行った。



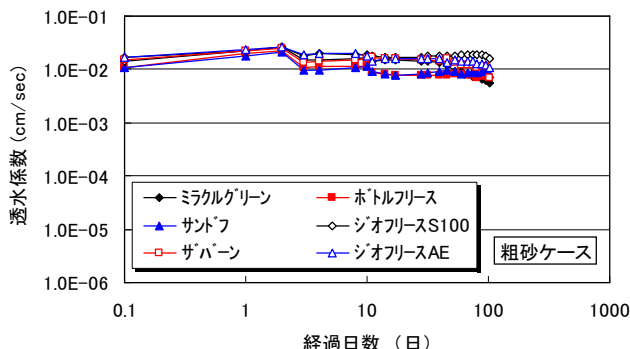
(a) 実堤体材料ケース



(b) 土質フィルターケース



(c) 細砂ケース



(d) 粗砂ケース

図-4.4 長期目詰まり試験による透水係数の経時変化

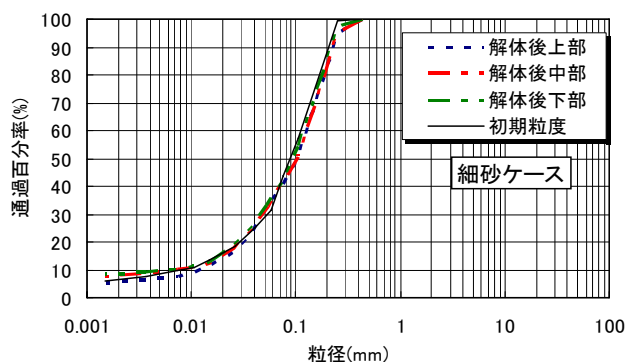
土質フィルターの粒度分布は、砂を主体としつつ、フィルター則¹¹⁾を満足するよう細粒分を加えて粒度調整して作成したものである。

実堤体材料+不織布のケースについて、計測された排水量から透水係数の経時変化を求めた結果を図-4.4(a)に示す。これを見ると、初期の透水係数にバラツキがあるが、経過日数にしたがって透水係数は徐々に低下し、どの不織布を使用した場合も概ね700～1000日で透水係数 1×10^{-5} (cm/sec)程度に収束していることがわかる。また、不織布の代わりに土質フィルターを用いたケース（実堤体材料+土質フィルター）の結果を図-4.4(b)に示すが、土質フィルターを用いた場合も同様に、700日程度で最終

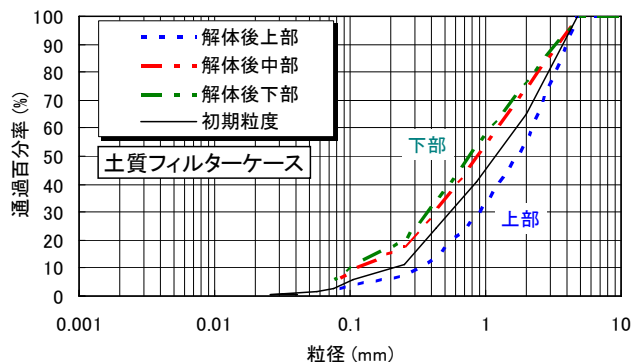
的に透水係数 1×10^{-5} (cm/sec)程度まで低下していることがわかる。図には土質フィルターのみをモールドに詰めたケースも併記しているが、排水材として用いられるはずの土質フィルターでさえ、100日程度で透水係数が2～3オーダー低下していることがわかる。

一方、細砂+不織布および粗砂+不織布のケースをそれぞれ図-4.4(c)(d)に示すが、これらについては透水係数の低下は特に見られなかった。

長期目詰まり試験終了後、供試体の上・中・下に分割して粒度分布を取得し、初期粒度と比較した結果を図-4.5に示す。ここでは代表として、細砂と土質フィルターのケースを示す。これを見ると、透水係数の低下が見ら



(a) 細砂ケース



(b) 土質フィルターケース

図-4.5 長期目詰まり試験後の供試体内の粒度分布

れなかった細砂については、目詰まり試験後の供試体上・中・下の粒度と初期粒度はほとんど変わらない。しかし、土質フィルター材については、供試体上部の細粒分が初期粒度に比べて減少し、供試体中・下部は逆に細粒分が増加していることがわかる。すなわち、土質フィルターの透水係数低下は、細粒分が移動して供試体下部に集まり、難透水ゾーンを形成したためと予想される。一方、粒度が比較的均一な細砂・粗砂については、このような現象が起こらないものと考えられる。

この現象をより詳細に把握するため、供試体内の水頭分布を 1cm ピッチで細かく測定できるように試験装置を改良し、改めて目詰まり試験を実施した。試験材料は、実堤体材料と概ね同等の粒度分布となるよう珪砂を配合して粒度調整を行った砂質材料を用いた。

図-4.6 に通水中の供試体内全水頭分布の測定結果の一例を示す（不織布にサンドフ S-10G を用いたケース）。これを見ると、通水初期は供試体上部から下部にかけてほぼ線形に水頭が分布していたのに対し、通水期間が長くなるにつれて水頭が低下するゾーンが次第に供試体下部に移動し、最終的に供試体下から 1/3 付近の場所で水頭が急激に低下する水頭分布に変化していることがわかる。これは、先ほどの細粒分が通水によって供試体下部に集まってくる状態に符合している。ただし、図-4.6 の水頭分布から、細粒分は不織布の表面付近に集まっているわけではないことがわかる。一般に、不織布の目詰まり現象は、通水により移動した細粒分が不織布表面に捕捉され、難透水ゾーンを形成するために生じる現象と解釈されているが、今回の実験結果からはそのような状態は確認されず、あくまでも供試体内での粒度分布の変化が透水性低下の原因と推察された。このような目詰まりに関するメカニズムについては、現状でも明確にされていないため、今後も検討が必要であろう。

以上の長期目詰まり試験の結果をまとめると、以下のようになる。

- ① 単一粒径の粒度分布を有する材料では、透水性の低下が生じにくい。
- ② フィルターとして人工材料、土質材料のいずれを用いた場合においても、細粒分を適度に含む粒度分布の良い材料では、透水性の低下が引き起こされる可能性がある。
- ③ 一般に排水材として用いられる砂質材料（土質フィルター材）であっても、土質フィルター材自身の目詰まりによって透水性の低下が見られる。
- ④ 不織布を用いた場合に透水性の低下が生じるメカニズムとして、不織布と試料の境界付近における難透水ゾーンの形成が原因と言われることが多いが、本実験ではそれは確認されず、供試体内での粒度変化が透水性の低下の原因と考えられた。

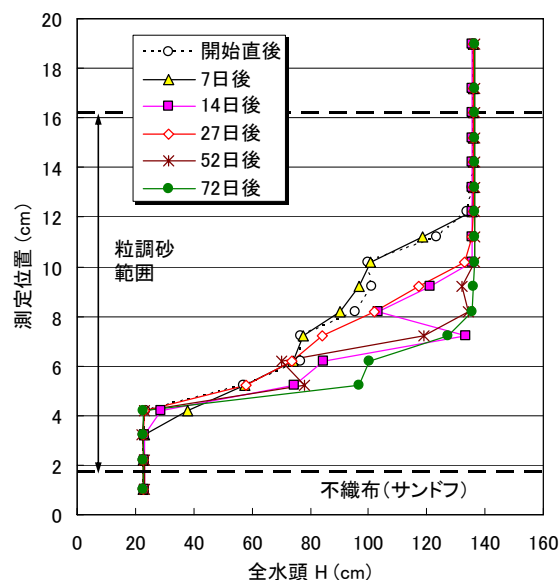


図-4.6 供試体内の水頭分布の変化

このように、不織布を用いた場合の目詰まりのメカニズムは必ずしも明確にならなかったが、実堤体材料を用いた場合、どの不織布を用いても概ね 700～1000 日で透水係数が $1 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$ 程度に収束することがわかった。このことから、不織布のメンテナンス（目詰まり洗浄等）を行う場合、約 2 年毎の実施を一つの目安とすれば良いと言える。

4.3 二重管抜き差し実験

実際のくし型排水フィルターのメンテナンスは、L 字の水平部および鉛直部ごとに、不織布を巻き付けた内管を人力で引抜き、目詰まりの洗浄や破損した不織布の交換等を行った後、外管に再挿入するという手順が想定される。

しかし、くし型排水フィルター設置後の堤体変形などによって、フィルター管がたわんだり、あるいは砂が内管と外管の間に噛み合うなどした場合、内管を引き出せない（あるいは再挿入できない）可能性がある。

そこで、図-4.7 に示すように内管をセットした状態のくし型排水フィルターに強制的にたわみを与え、この状態で内管を引き抜く、もしくは押し込むのに必要な荷重を計測した。この際、内管と外管の間に砂が噛んだ状態を想定し、内管の不織布表面には砂をまぶした状態でも計測を行った。実験に用いたくし型排水フィルターの緒元は表-4.2 に示す通りであり、内管に巻き付けた不織布と外管内径のクリアランスは 1mm である。

図-4.8 に強制付与した「たわみ量」と引き抜き・押し込み荷重の計測結果を示す。この結果、15cm（フィルター長さ 1m あたり 7.5cm）という極端な管の強制変形を与え、かつ砂が噛んだ状態であっても 30kg 程度で引き抜き・押し込みが可能であることがわかった。したがって、

メンテナンスのための内管の抜き差しは、人力で問題なく実施可能であると判断できる。

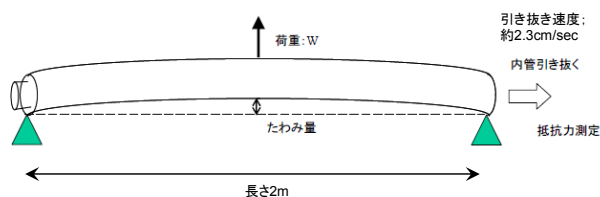


図-4.7 二重管抜き差し実験の概要

表-4.2 抜き差し実験に用いたフィルター緒元

	商品名	外径(mm)	内径(mm)	厚さ(mm)
外管	ネオドレーン125	146	125	
内管	ネオドレーン100	118	100	
不織布	タフネルEX-60			3

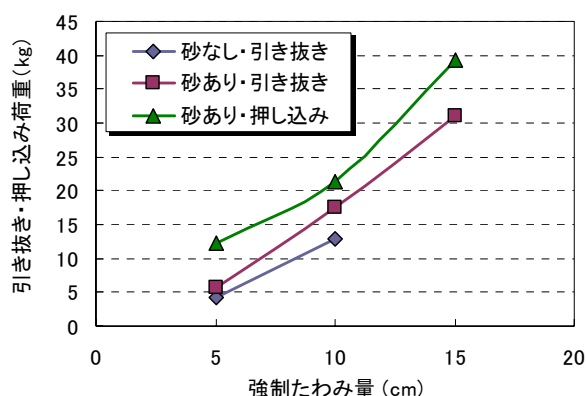


図-4.8 二重管抜き差し実験結果

5. おわりに

ため池堤体の大規模な掘削をとまなうことなく、堤体外部から簡易に、低コスト・短工期で老朽ため池堤体を改修できる工法として、ため池堤体の急速リニューアル工法（CUPIT 工法）を提案し、本報ではこのうち、堤体浸潤線を恒常的に低下させて堤体のすべり安定性を向上させる「くし型排水フィルター工法」を中心に、室内実験や FEM 解析による対策効果の検証結果について述べた。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 堤体法先部に人工排水フィルターを離散配置するくし形フィルターによって、堤体内の浸潤線を低下させることができる。
- ② くし形フィルターの効果は、平面ひずみ条件の二次元浸透流 FEM 解析を用いた場合、堤体浸潤線の低下効果を過大評価する可能性があるが、三次元浸透流 FEM 解析を用いることによって、精度良く評価が可能である。
- ③ くし型排水フィルターを、不織布を巻き付けた内管

と外管からなる二重管構造にすることによって、目詰まりした不織布を容易に取り出し、洗浄や交換等のメンテナンスを行うことができる。これにより、長期にわたってくし型排水フィルターの効果を維持することができる。

- ④ 長期目詰まり実験の結果、不織布を取り出すメンテナンス頻度の目安としては、約2年が適当である。

くし型排水フィルター工法は、大型重機を用いずに低コスト・短工期で施工が可能であること、重機や運搬車両のアクセスが困難な狭隘な山間部のため池にも適用可能であるほか、近年、良質な刃金土が不足している状況を鑑みても、従来の前刃金工法に比べて合理的な対策工法と考えられる。本報では、くし型排水フィルターの室内試験による検証を主に述べたが、実規模のため池試験堤体にくし型フィルターを実際に施工し（表層フィルターも同時に施工）、堤体内浸潤線の低下効果の実証、および三次元浸透流 FEM 解析による実測挙動の再現精度の確認等を別途実施しており、現在、堤体の長期的な経過観察などを行っている。これらの結果については、機会を改めて報告する予定である。

謝辞：農村工学研究所の毛利栄征施設資源部長には、本研究の計画から取りまとめに至る全般において、適切にご指導・アドバイスをいただいた。また、前田工織の土橋和敬氏（主に表層フィルター工法の開発を担当）、日新特殊建設の庭野孝一氏（主に底樋注入工法を担当）には、くし型フィルターの実験実施において、条件設定や材料提供等で多大なご協力を得た。末筆ながら、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産省：第1回ため池緊急点検検討会資料，2005。
- 2) 谷 茂：ため池災害と防災について，国立環境研究所研究報告第183号，国立環境研究所，pp.102-106，2004。
- 3) 農林水産省：第4回ため池緊急点検検討会資料，2005。
- 4) 堀 俊和：農業用ため池の豪雨災害に関する研究，農業工学研究所報告，第44号，pp.139-247，2005。
- 5) 堀 俊和，土橋和敬，毛利栄征，藤山哲雄，高橋 浩，前田和亨：堤体表面被覆工法によるため池の豪雨対策，農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.348-349，2010。
- 6) 土橋和敬，堀 俊和，毛利栄征，藤山哲雄，高橋 浩，前田和亨：堤体表面被覆工法の降雨浸透，越流浸食，波浪浸食の防止効果，農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.350-351，2010。

- 7) 堀 俊和, 毛利栄征, 松島健一, 有吉 充, 庭野孝一: ため池底樋沿いの漏水防止に関する模型実験, 第 42 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1127-1128, 2007.
- 8) 堀 俊和, 毛利栄征, 庭野孝一, 松島健一, 有吉 充: 軟質系注入材を用いたため池底樋周りの止水対策工法, 基礎工 Vol.35, No.5, pp.59-61, 2008.
- 9) 法先ドレーンを設置したため池堤体の浸透時における斜面安定性, 第 41 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2209-2210, 2006.
- 10) 堀 俊和, 毛利栄征, 松島健一: 豪雨時におけるため池堤体の間隙水圧の観測, 農業土木学会大会講演要旨集, pp.496-497, 2003.
- 11) 農林水産省構造改善局建設部設計課監修: 土地改良事業設計指針「ため池整備」, 農業土木学会, p.45, 2000.