



兵庫県におけるため池を取り巻く状況とベントナイトシート工法の設計手法に関する研究

小田, 哲也

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2024-03-05

(Date of Publication)

2025-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3440号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490196>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



兵庫県におけるため池を取り巻く状況と
ベントナイトシート工法の設計手法
に関する研究

2024 年 1 月

小田 哲也

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 ため池に関する既往の研究	4
1.3 研究の目的	8
1.4 本論文の構成	8
第 1 章参考文献	10
第 2 章 兵庫県におけるため池を取り巻く状況	13
2.1 はじめに	13
2.2 ため池の歴史的背景	16
2.3 ため池をとりまく現状	18
2.4 ため池の適正管理と多面的機能の発揮の促進	21
2.5 まとめ	22
第 2 章参考文献	23
第 3 章 既往の豪雨・地震によるため池被害分析	24
3.1 近年のため池被害概説	24
3.2 兵庫県におけるため池豪雨被災調査と事例分析	26
3.3 兵庫県におけるため池地震被災調査と事例分析	35
3.4 兵庫県におけるため池整備計画	38
3.5 まとめ	40
第 3 章参考文献	41
第 4 章 ベントナイトシートがため池堤体地震時挙動におよぼす影響	42
4.1 ため池堤体改修の概説	42
4.2 実験概要	46
4.3 実験結果と考察	55
4.4 まとめ	62
第 4 章参考文献	63

第 5 章	ため池ベントナイトシート工法の設計施工標準化	64
5.1	概説	64
5.2	既往研究のまとめ	65
5.3	ため池堤体上流側覆土の安定計算に関する検討	71
5.4	ため池ベントナイトシートマニュアルの策定	84
5.5	まとめ	93
第 5 章	参考文献	95
第 6 章	結論	97
6.1	本論文のまとめ	97
6.2	今後の展望	99
謝辞		101
本研究に関する公表論文		104

図一覧

図 1-1	インドにおける灌漑の地域特性	2
図 1-2	日本の都道府県別ため池数	4
図 1-3	日本のため池の築造年代	4
図 1-4	1939 年時点における日本のため池分布	5
図 1-5	本論文の構成	9
図 2-1	日本のため池分布（2002 時点）	13
図 2-2(a)	兵庫県におけるため池の堤高頻度分布	14
図 2-2(b)	兵庫県におけるため池の堤長頻度分布	14
図 2-3	兵庫県のため池の分布と平均年間降水量分布	15
図 2-4	兵庫県東播磨地方の地形図	15
図 2-5	ため池と淡山疏水の位置図	17
図 2-6	東播磨地域のため池群	17
図 2-7	全国と兵庫県の農業用水源比較	18
図 2-8	ため池改修における堤体標準図	19
図 2-9	洪水調節機能を備えた洪水吐の施工例	20
図 3-1	近年における全国のため池被害	24
図 3-2	近年における兵庫県の主要なため池被害	25
図 3-3	最大 24 時間雨量の等雨量線図	28
図 3-4	最大 1 時間雨量の等雨量線図	28
図 3-5	丹波市内で観測されたハイエトグラフ	29
図 3-6	市島町前山地区の被害状況	30
図 3-7	水上大池の被災後堤頂部	33
図 3-8	土砂で埋没した小倉池	33
図 3-9	木古庵池の被災状況（上流側から見た堤体内）	34
図 3-10	地震により法面が滑落したため池被災	36
図 3-11	レベル 1 耐震調査結果（安全率分布）	37
図 4-1	遮水シート工法の断面模式図と現場施工状況	45
図 4-2	試験体断面模式図	46
図 4-3	ベントナイト系遮水シートの断面模式図	46
図 4-4	計測機器の配置図	47
図 4-5	堤体材料の粒径加積曲線	49
図 4-6	堤体材料の締固め曲線（A-b 法）	49
図 4-7	堤体の締固め度（Dc 値）	51

図 4-8	堤体の含水比	51
図 4-9(a)	基盤土における間隙水圧の経時変化	52
図 4-9(b)	基盤土+60cmにおける間隙水圧の経時変化	52
図 4-10	築堤完了後の注水状況	53
図 4-11	加振前の堤体の想定浸潤線（加振直前の堤体内水位）	53
図 4-12	震動台の加速度（加振方向）	54
図 4-13	堤体天端センターラインの沈下量	55
図 4-14	レベル 1 地震動加震後の堤体天端状況	55
図 4-15	レベル 2 地震動加震後の堤体天端状況	56
図 4-16	堤体表面破壊状況（平面図）	57
図 4-17	発生クラックの掘削調査状況	57
図 4-18	堤体クラック発生状況（断面図）	57
図 4-19	堤軸（A-03, A-23, A-34）の鉛直方向応答加速度	58
図 4-20	遮水シート周辺土の応答加速度（11 秒～14 秒）	60
図 4-21	振動特性の異なる領域	62
図 4-22	遮水シート周辺土の応答加速度（14 秒～17 秒）	61
図 5-1	実験ケースの横断図	66
図 5-2	実大規模ため池加振実験の結果	67
図 5-3	GCL を加味した堤体安定計算の模式図	68
図 5-4	仮想傾斜コアの模式図	69
図 5-5	等価透水係数の模式図	69
図 5-6	既往実験によるシート上流側覆土の潜在すべり面	70
図 5-7	シート上流側の覆土の直線状潜在すべり面	72
図 5-8	円形すべり面上のスライスに作用する力（貯水なし）	75
図 5-9	円形すべり面上のスライスに作用する力	76
図 5-10	円弧すべりのネバーカットライン	78
図 5-11	安定計算を適応するベントナイトシート工法の堤体断面	78
図 5-12	ベントナイトシート工法のため池堤体横断図例	84
図 5-13	ベントナイト補強型材料の断面	86
図 5-14	仮想傾斜コアの模式図	88
図 5-15	仮想傾斜コアの厚みの考え方	88
図 5-16	ベントナイトシート工法の安定計算フロー	89
図 5-17	円弧が通らないような条件とした断面模式図	89
図 5-18	シート面に沿った安定計算の断面模式図	90

表一覧

表 2-1	淡河川用水事業と山田川用水事業の概要	16
表 2-2	東播磨地域のため池と疏水に対する社会的評価	21
表 3-1	兵庫県におけるため池決壊数	25
表 3-2	現地調査を行ったため池の諸元	31
表 3-3	洪水吐の諸元	31
表 4-1	堤体改修型式の比較	43
表 5-1	全国の改修・廃止予定ため池数	64
表 5-2	ため池諸元	80
表 5-3	直線すべり安定計算におけるパラメータ	81
表 5-4	F_s の計算結果	82
表 5-5	管理期間の区分とそれに応じた観測頻度	93

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

本研究が対象としているため池は耕地灌漑用の用水貯留池である。ため池は人工的に貯水、利水及び治水を可能とする施設で、我が国の稲作文化と密接な関係にある。

吉川・桜井（1995）によると、世界の稲作文化は大きく分けて灌漑施設等が整った集約的な稲作と畑作等の影響を受けた粗放的な稲作の 2 種類に分類される。日本の稲作形態は集約的な稲作形態で、灌漑に必要な水の確保は稲作を行う上で極めて重要であった。天水田以外に、稲作に伝統的な灌漑方式はため池灌漑、堰灌漑、井戸水灌漑などがある。井戸水灌漑はポンプの使用が必要で、ポンプのない時代にはほぼため池灌漑と堰灌漑のみであった。世界の稲作地帯の中で最もため池灌漑分布が多いのは、南インドのデカン高原と中国の河南省南部等であるとされている。

南埜（2014）はインドのため池について現地調査を行い、その特徴を明らかにしている。南埜によると、「インドの溜池の歴史は古く、4, 5 世紀に築造されたとされる溜池もある。1880 年代にイギリスにより溜池台帳が作成され、そこには溜池が多く存在していることが記録されている。インド全国には約 20 万の溜池があり、南インドのアーンドラ・プラデーシュ州、タミル・ナードゥ州、カルナータカ州の 3 州で全体の 6 割を占めている」状況である。図 1-1 にインドにおける灌漑における地域特性を示す。1970 年代以降注目するとため池灌漑の面積ならびに割合が低下しており、ため池灌漑から井戸水灌漑への移行や溜池管理体制の弱体化等のため、インドの溜池をめぐる状況は衰退する方向に進んでいることを指摘している。

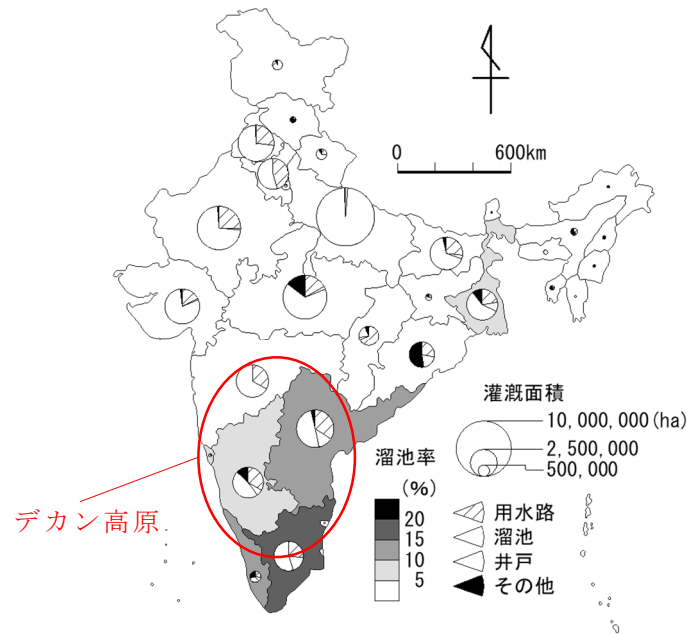


図 1-1 インドにおける灌漑の地域特性（南埜（2014）の図を加筆）

小山田（2021）は日本・韓国・中国にみられる古代ため池の土木技術関連性を解明している．日本最古のアースダム式ため池とされている大阪府の狭山池の築堤技術の特徴は，表土ブロックと枝葉の敷設を併用する補強土工法であり，同様の技術が韓国の忠清北道堤川市の義林池にも見られる．枝葉の年代分析から，義林池は4～5世紀頃の百済により建設された水利施設であると考えられている．このことから，狭山池（大阪府）や満濃池（香川県），岡大池（現天満大池，兵庫県）に代表される古代日本のアースダム式ため池の土木技術は，朝鮮半島の百済と密接な関係があったと推定されている．つまり，社会基盤整備を進めることが課題であった7世紀日本の王権が，友好関係にあった百済に要請し，アースダム式ため池の設計思想・土木技術・運用方式の提供を受けたと解釈されている．義林池は突如として出現した完成度の高いアースダム式ため池であるが，朝鮮半島の中でその土木技術の起源は見当たらないことから，義林池のルーツはため池灌漑が発達していた中国の江南にあると考えられている．百済は江南と，古代日本は百済と友好関係を築いていた．高度な土木技術は，こうした外交関係を通じて中国から韓国を経由してもたらされたと結論付けている．

なお、大阪府狭山池博物館（2023）によると、狭山池では、6世紀から8世紀の堤防に敷葉工法と呼ばれる土木技術が確認されている。この工法は、盛土内に植物の葉、枝、樹皮などを層にして敷設するもので、現代のジオテキスタイル工法と類似している点がある。中世以前から堤体盛土を補強しめ池を整備する発想があったことが示唆される。

上野・吉光（1919）によると、インドや欧米に比べ日本のため池は規模が小さいもののその個所数は世界の中でも最上位に位置づけられると述べている。江戸時代以前は、ため池堤体を築造する統一的な理論的手法は確立しておらず、古来農業者が経済性を考慮せず直営でため池を築造してきたが、明治時代になり、近代灌漑用や上水用の溜池築造が増加し、労力不足に陥った。そこで、上野、吉光は安全で経済的なため池築造方法を研究し統一的な設計手法を示している。

2003年の改訂五版農業土木標準用語事典では、ため池は貯水工に分類され、「灌漑目的のため築造されたアースフィル堰堤による貯水池。わが国の多くのものは西暦700年前後に築造されたものと推定され、その数は約30万個といわれる」とされている。

農林水産省（2023）によると、2023年時点で日本のため池総数は約15万箇所となっている。この数は、平成30年7月豪雨の後、全国で一斉に現地調査が行われた結果を受けたもので、これまで実施されてきた調査と比較して、精度が高い値と考えられる。農業土木標準用語辞典（2003）による全国ため池数約30万箇所に比べ、現在は約半数まで減少した。その原因は、農業用水を必要とする農地の減少のほか、公共施設や宅地の建設に伴うため池埋立やため池管理者の高齢化に伴いため池の維持管理に支障を来し廃止もしくは放棄されたためと推定される。

農林水産省（2023）が取りまとめている日本の都道府県別ため池数、日本のため池の築造年代について、それぞれ図1-2、図1-3に示す。これらため池を保全するため、全国で対策が取られている。

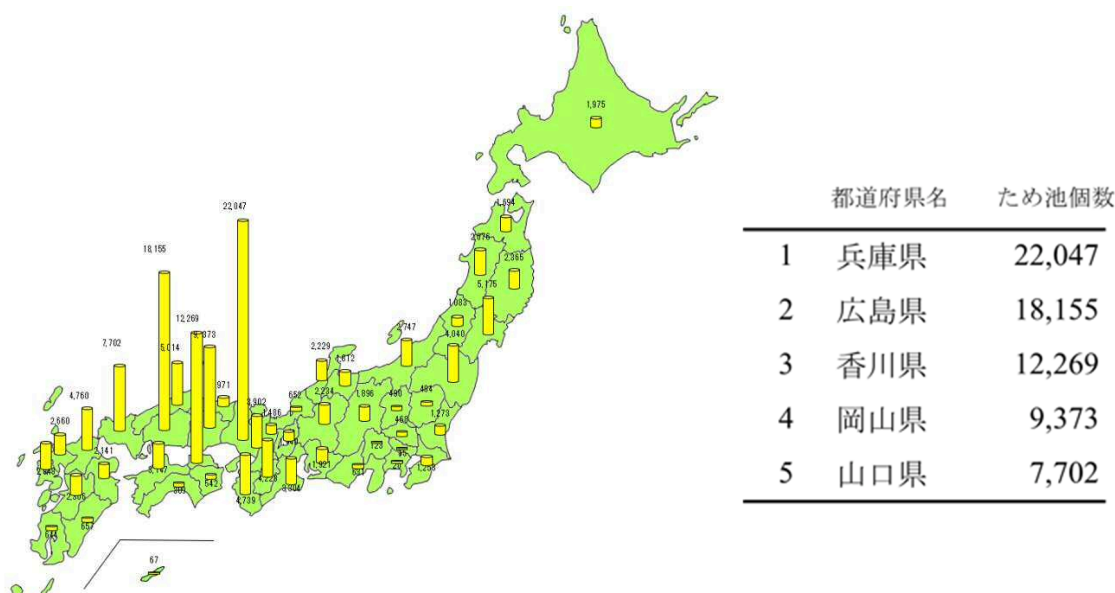


図 1-2 日本の都道府県別ため池数（農林水産省（2023））

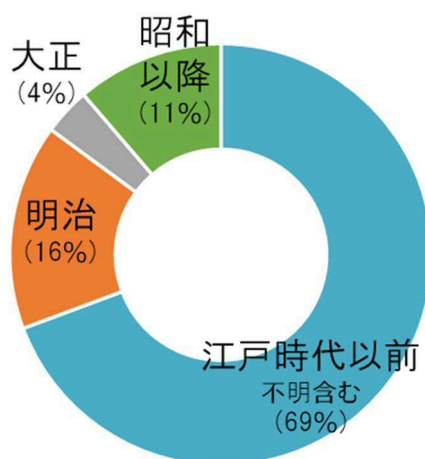


図 1-3 日本のため池の築造年代（農林水産省（2023））

1.2 ため池に関する既往の研究

ため池は、多様な学問分野で研究対象になってきた。農業土木の他に、法学、歴史学、地理学、農業経済学、農村計画学、造園学、土木工学－建築学・都市計画学等の分野で行われてきた。内田（2002a, 2002b）は既往のため池研究成果について学術分野を横断して整理している。

ため池の分布に関する研究は地理学分野において、取り組まれたテーマの1つであり、現在でも研究が行われている。竹内（1939）は日本のため池分布についての総括的研究が行われていないことを指摘し、北海道と琉球諸島を除く内地の分布状態を明らかにした。竹内は、「陸地測量部の5万分の1の地形図」をも

とに，ため池面積に応じた4つの区分ごとに，図上で実際のため池の数を数える作業を行った．その成果を図1-4に示す．規模の大きなため池の分布は示されているが，兵庫県淡路島の小規模ため池等5万分の1の地形図では表現されていないため池は分布上表現できていない．

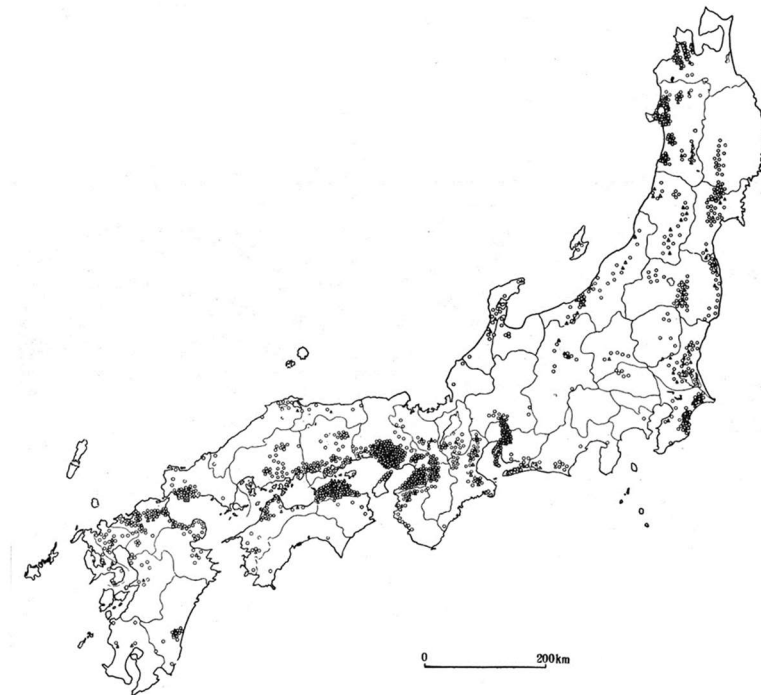


図 1-4 1939 年時点における日本のため池分布（竹内，1939）

以後，全国的なため池の分布や実態について調査，分析したものとしては，農林水産省構造改善局地域計画課（1991）等がある．これらの調査・研究の結果，日本においては瀬戸内地域と近畿地域を中心としてため池が卓越して分布していることが示された．ため池の分布は地域に偏りがあることから，ため池の整備・保全については，都道府県や市町村単位で地方自治体独自の取組として進められた．2019 年に制定された「農業用ため池の管理及び保全に関する法律」により，すべてのため池を把握することとなり，全国統一的なため池保全が進められることとなる．ため池が卓越して分布している香川県では，1968 年から 5 年毎にため池整備計画を策定したため池老朽化対策を実施してきている．

ため池の構造や運用に関する研究は農業土木分野において枚挙にいとまがな

い。これまで、ため池の地震時の被害やため池の決壊による水害、それらの被害の軽減、ため池灌漑地受益農地における干ばつ等に関する研究がなされてきた。ため池の安全性向上技術に関しては西村ら（1996）、浅野ら（1996）等がある。近年では、前田ら（2021）がため池堤体の付帯施設である法面保護工による堤体安定性向上効果などを明らかにしている。

地震によるため池の被害に関する研究では、秋葉ら（1941）が1939年の秋田県男鹿地震におけるため池の被害状況を報告し、谷ら（1985）は1983年の日本海中部地震によるため池被害について、安中ら（1993）が1993年の北海道南西沖地震による農地・農業用施設の被害の中でため池の被害について、それぞれ報告している。

ため池卓越地域で起きた1995年の兵庫県南部地震は、地震によるため池の被害研究が一気に加速した。兵庫県南部地震とため池に関するものは、兵庫県農林水産部農地整備課（1996）等がある。震災による農地、農道、農業施設、土地改良施設の被害と被害の特徴、被災地の水環境の変化、被災村落の被害対応、被災施設の復旧過程などについて事例が報告されている。

また、兵庫県南部地震のため池被害の分析を契機として、全国のため池の防災データベースを構築され、このうちの谷（2005）は整備されたため池データベースにリアルタイム気象情報を結合し、ため池の広域災害を予測するためにシステムを開発している。地震時のため池を含めた農業用フィルダムの挙動、被害や災害対策等に関しては、谷ら（1998）等がある。

毛利ら（2008）は2007年の新潟県中越沖地震によるため池被災状況を調査し、兵庫県南部地震で記録されている地震動と同様に1秒から2秒に卓越周期をもっている地震動であったことに着目し、地域の地盤特性と地震動の特性がため池被災の程度に大きく影響したことを指摘している。

さらに、2011年の東北地方太平洋沖地震でため池の地震対策に係る設計思想が大きく変化した。ため池の地震被害に対応する耐震診断の考え方がレベル1地震動とレベル2地震動に区分され、大規模なため池に対してレベル2地震動に対する安全照査が進んでいる。田中ら（2013）は、東北地方太平洋沖地震による

藤沼湖の決壊原因を調査しており、戦後最大の被災をもたらした藤沼湖堤体破堤のメカニズムを明らかにしている。鈴木（2015）はため池の被災率を定義することで地形・地質、堤軸方向や堤体形状について検証を行い、地震動による段階的な被災リスク構造を被災要因概念図として提案している。

東北地方太平洋沖地震以降では、平成 30 年 7 月豪雨など各地で豪雨によるため池被害が多発し、全国でため池ハザードマップの取組みが広がり、ソフト面を含めた研究成果の社会実装が進んでいる。

地域資源としてのため池の多面的機能に注目した研究としては、現状分析と整備や保全の手法に関して瓜生（1991）や農漁業者の連携によりため池のかいぼりで発生する腐葉土を海の栄養化に活用する手法に関して三輪（2015）等がある。行政による地域資源としての新しいため池の整備事業の紹介については、大阪府農林水産部耕地課（1994）、京都府農林水産部耕地課（1997）、兵庫県農林水産部（1998）等がある。ため池の持つ洪水調節機能について、中谷ら（2016）、田中丸ら（2020）は言及し、貯水と治水の両立を図る取組がなされている。

以上のように、ため池に関する研究の多くは構造物としてのため池やため池の被災分析等自然科学的側面からの多く、人文・社会的側面からの研究は少ない。また、1980 年代以降、人々の水辺や身近な環境への関心が高まり、地域資源としてのため池の活用・保全が注目され、多面的機能の観点からの研究が見られるようになったが、まだ地域資源の観点から重要性を指摘する段階のものが多く、ため池保全のあり方を総合的に分析する研究は少ないと言える。

1.3 研究の目的

本研究の目的は、兵庫県におけるため池の特徴を示すとともに、ため池を取り巻く環境を保全していく上での総合的分析を行う。さらに、兵庫県におけるため池が適正に維持管理され多面的機能が発揮されるよう、貯水機能に最も重要な役割を果たすため池堤体に着目し、持続可能なため池堤体改修工法を提案することである。

1.4 本論文の構成

本論文は図 1-5 に示す 6 章で構成される。

第 1 章は序論で、研究の背景、既往の研究、研究の目的について述べた。

第 2 章では、兵庫県におけるため池をとりまく状況について、東播磨地域を事例に歴史的及び地理的考察を述べ、ため池の適正な管理と多面的機能の発揮の促進について述べる。

第 3 章では、豪雨及び地震によるため池の被災調査結果を示すとともに、兵庫県で実施してきたため池耐震調査結果を示し、ため池整備の推進状況について分析する。

第 4 章では、ため池堤体の実大規模震動実験を行い、近年使用実績が増加しているベントナイトシート工法について、実験結果を示すとともに地震時の挙動を明らかにする。

第 5 章では、第 4 章の実大規模振動実験後に行われた既往の研究について示すとともに、これまで確立していなかったベントナイトシート工法の設計・施工について標準化を提案する。

第 6 章は、研究成果を取りまとめ結論とする。

第1章	序論	研究の背景、既往の研究、本研究の目的を述べる。
本論	第2章	兵庫県におけるため池を取り巻く状況 兵庫県におけるため池の特徴について東播磨地域の事例を抽出し、 社会科学的視点から現状、課題及び対策についてまとめる。
	第3章	既往の豪雨・地震によるため池被害分析 兵庫県におけるため池被災事例調査及び耐震性調査結果を示し、 ため池改修の課題を明らかにする。
	第4章	ベントナイトシートがため池堤体地震時挙動におよぼす影響 実大規模のため池模型による振動台実験を実施し、 ベントナイトシート工法築造されたため池堤体の地震時挙動を明らかにする。
	第5章	ため池ベントナイトシート工法の設計施工標準化 実規模振動台実験後に実施されたいくつかの既往研究をまとめ、 兵庫県におけるため池ベントナイトシート工法の統一した設計施工方法を確立する。
第6章	結論	各章の内容を取りまとめ結論とする。

図 1-5 本論文の構成

第 1 章参考文献

- 秋葉満寿次，仙葉秀：秋田県男鹿地震と溜池被害，農業土木研究，13(1)，pp.31-59，1941.
- 浅野勇，長束勇，毛利栄征：農業用ダムの静的挙動観測による新しい安全管理システム，農業土木学会誌，64-3，1996.
- 兵庫県農林水産部農地整備課：兵庫県南部地震農地農業用施設震災記録誌，1996.
- 兵庫県農林水産部:兵庫県ため池整備構想 新たなため池文化の創造をめざして，1998.
- 京都府農林水産部耕地課:農と水と緑との共生をめざして ため池ルネサンス構想 京都府ため池整備総合基本構想，1997.
- 小山田宏一：土木技術からみた古代日韓溜池の歴史的関係性，奈良大学総合研究所報，31 号，2022.
- 前田真宏，村上章，藤澤和謙：ため池における法面保護工による堤体安定性向上効果，農業農村工学会論文集，No.312 (89-1)， pp. I _149- I _163，2021.
- 南埜猛：インドにおける溜池とその現状，2014 年度日本地理学会春季学術大会発表要旨集，2014，https://doi.org/10.14866/ajg.2014s.0_100145
- 三輪顕：「里」と「海」の協働によるため池の保全と新たな地域づくり-豊かな海の再生プロジェクトを通じて-，農村計画学会誌，33 号，pp.487-490，2015.
- 毛利栄征，谷茂，堀俊和，有吉充，増川晋，田頭秀和，林田洋一：平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震によるため池の被害，農業工学研究所報告，208 号，pp.75-88，2008.
- 中谷毅，木村彰一，横田欣仁，吉田淳，瀧川紀子，田中丸治哉：総合治水手法としてのため池事前放流による雨水貯留の取組み，水土の知 84 (4)，pp.7-10，2016.
- 西村眞一，清水英良，仲野良紀：フィルダム基礎の漏水メカニズムに関する解析的研究—農業用溜池の漏水に関する研究 (Ⅲ)—.農業土木学会論文集 184，pp.563-569，1996.

農林水産省：ため池，https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/index.html（確認日：2023 年 1 月 20 日）。

農林水産省構造改善局地域計画課：ため池台帳（全国集計編），1991。

社団法人農業土木学会：改定 5 版農業土木標準用語集，p.65，2003。

大阪府農林水産部耕地課：ため池オアシス豊かな水辺の環境づくり，1994。

大阪府狭山池博物館：敷葉工法，<https://sayamaikehaku.osakasayama.osaka.jp/?p=4726>（確認日：2023 年 11 月 15 日）。

鈴木尚登：農業用ため池の地震動による被災要因に関する研究—2011 年東北地方太平洋沖地震を例として—，農村工学研究所報告，第 54 号，pp.73-155，2015。

竹内常行：溜池の分布について（1）。地理学評論 15，pp.283-300，1939。

田中忠次，龍岡文夫，毛利栄征：東北地方太平洋沖地震による藤沼湖の決壊原因調査について，ダム工学 23 巻 2 号，pp.99-114，2013。

田中丸治哉，鎗本賢太，多田明夫：ため池事前放流で確保できる雨水貯留容量の推定とその評価，水土の知 88（9），pp.19-22，2020。

谷茂，安中正実，川口徳忠，釜田豊也：日本海中部地震によるため池の災害と土質工学的性質，土と基礎 33-9，1985。

谷茂，堀俊和：日本におけるため池を含めた農業用フィルダムの地震災害に関する研究，農業工学研究所報告，37 号，pp.51-90，1998。

谷茂：ため池リアルタイム防災データベースの開発，農業土木学会誌，73(9)，pp.817-820，2005。

内田和子：ため池に関する研究の成果と課題（Ⅰ），水利科学，45 巻 6 号，pp.91-110，2002a。

内田和子：ため池に関する研究の成果と課題（Ⅱ），水利科学，46 巻 1 号，pp.81-108，2002b。

上野英三郎，吉光平一：溜池築造法，成美堂書店，pp.1-2，1919。

瓜生隆宏：ため池における水辺空間の有効利用方策について—兵庫のため池をめぐって—，応用水文 3，農業土木学会応用水文研究部会，1991。

安中正実，谷茂，毛利栄征：平成 5 年(1993 年)北海道南西沖地震による農地・農

業施設の被害調査報告 農林水産省農業工学研究所研究報告 35, 農林水産省
農業工学研究所, 1993.

吉川弘之, 桜井由躬雄: 東京大学公開講座 61 コメ, 東京大学出版会, pp.115-144,
1995.

第2章 兵庫県におけるため池をとりまく状況

2.1 はじめに

稲作が日本に伝来して以降、コメは日本の食文化の基礎となってきた。日本では、19世紀までコメは経済の中心であっただけでなく、現在に至るまで日常の食生活の主食としての役割を果たしてきた。ため池は雨水を一時的に貯めて灌漑する目的で築造され、ため池は米の生産性に重要な役割を果たしている。日本のため池の多くは7世紀初頭以降に築造されたと推定されている。ため池の多くは人力で作られた堤高15m未満のアースダム式堤体と、洪水吐や取水施設が備わっている。

南埜ら（2015）の調査により明らかとなった日本のため池の分布を図2-1に示す。図中の緑の点はため池の位置を表示している。日本で最もため池の数が多いのは兵庫県である。また、瀬戸内地域ではため池が密集して築造されていたことがわかる。この地域の年間降水量は神戸地方気象台（2016）によると、約1,000～1,600 mmとなっている。稲作を安定させ、水田を干ばつの被害から守るために、ため池の築造が必要であった。

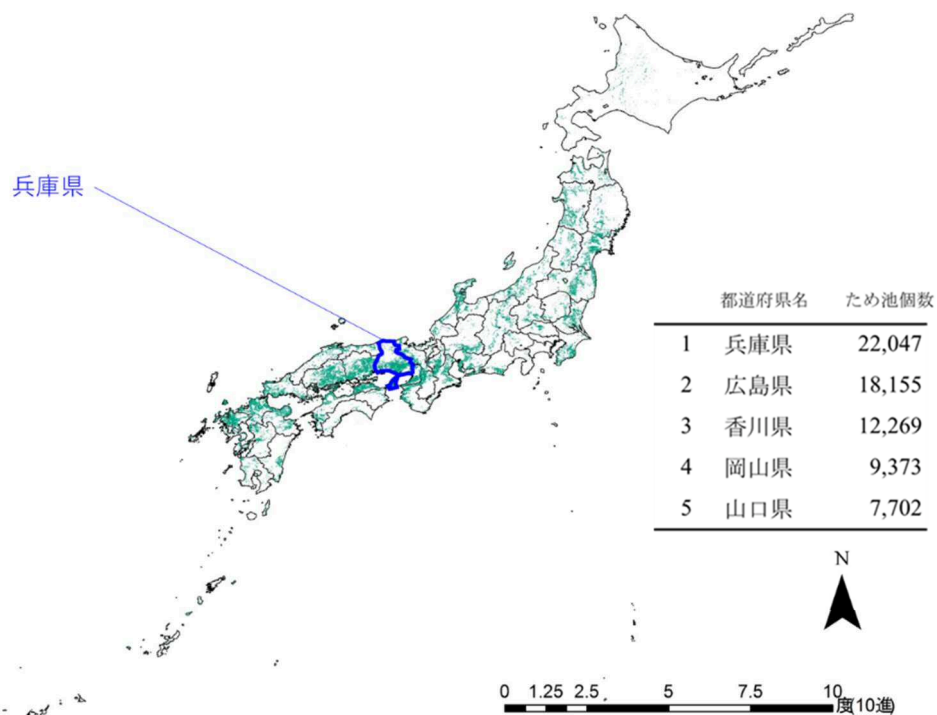


図 2-1 日本のため池分布（南埜ら（2015）に一部加筆）

図 2-2(a),(b)に兵庫県のため池堤高と堤長のヒストグラムを示す．兵庫県では堤高 2.1～3.0m，堤長 20m 以下のため池が多くなっていることが特徴的である．すなわち，ため池は堤高 15m 未満とされる中で，兵庫県においては比較的小規模なため池が多く分布している．

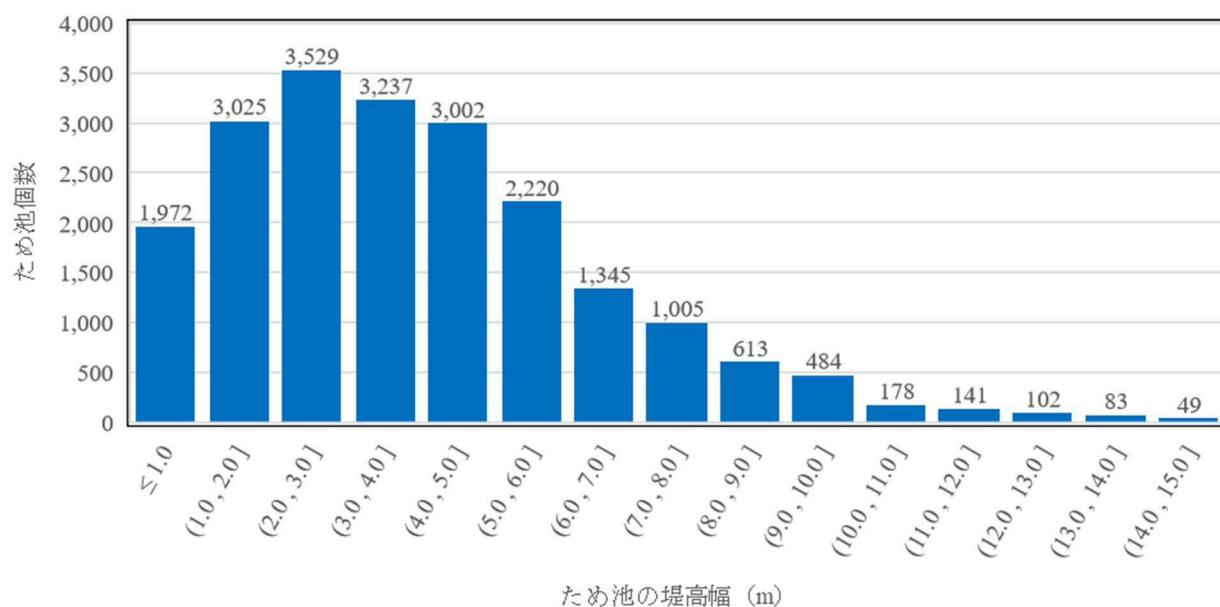


図 2-2(a) 兵庫県におけるため池の堤高頻度分布

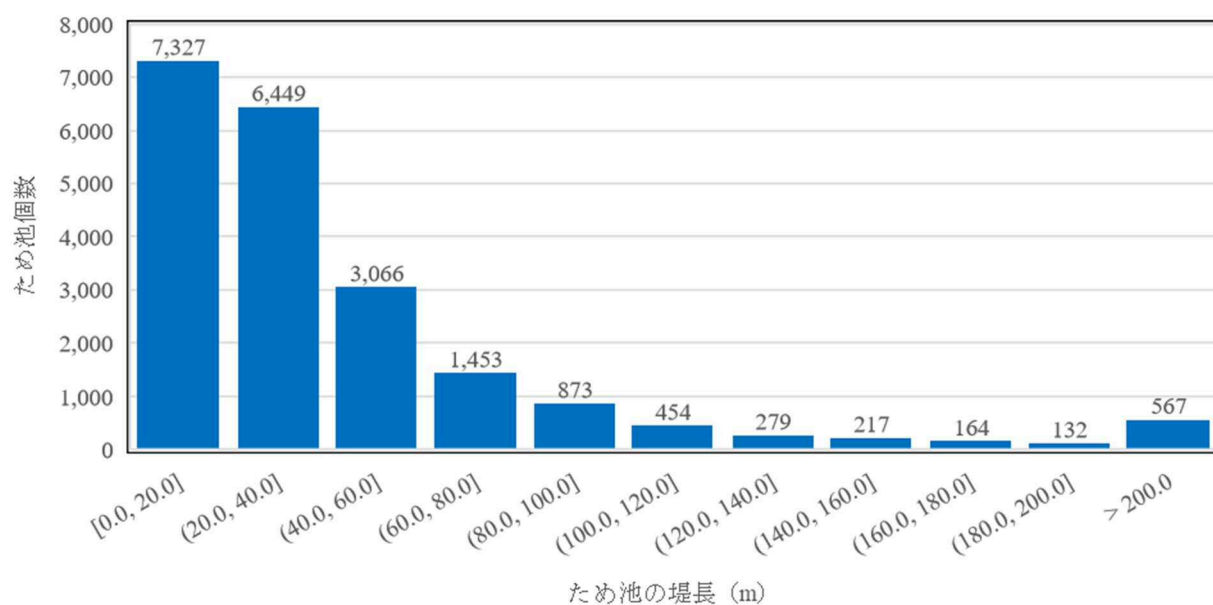


図 2-2(b) 兵庫県におけるため池の堤長頻度分布

図 2-3 に兵庫県のため池の分布と平均年間降水量分布を示す．この図から，ため池密度の点では，兵庫県内の東播磨地域が突出した地域であることがわかる．図 2-4 に兵庫県東播磨地方の地形図を示す．特に印南野台地は，周囲を流れる河川よりも標高で約 50 メートル高い位置にあり，瀬戸内地域の中でも住民にとって川の水を利用することが困難である（田中，1992）．そのため，東播磨地域にはため池が約 600 か所築造された．

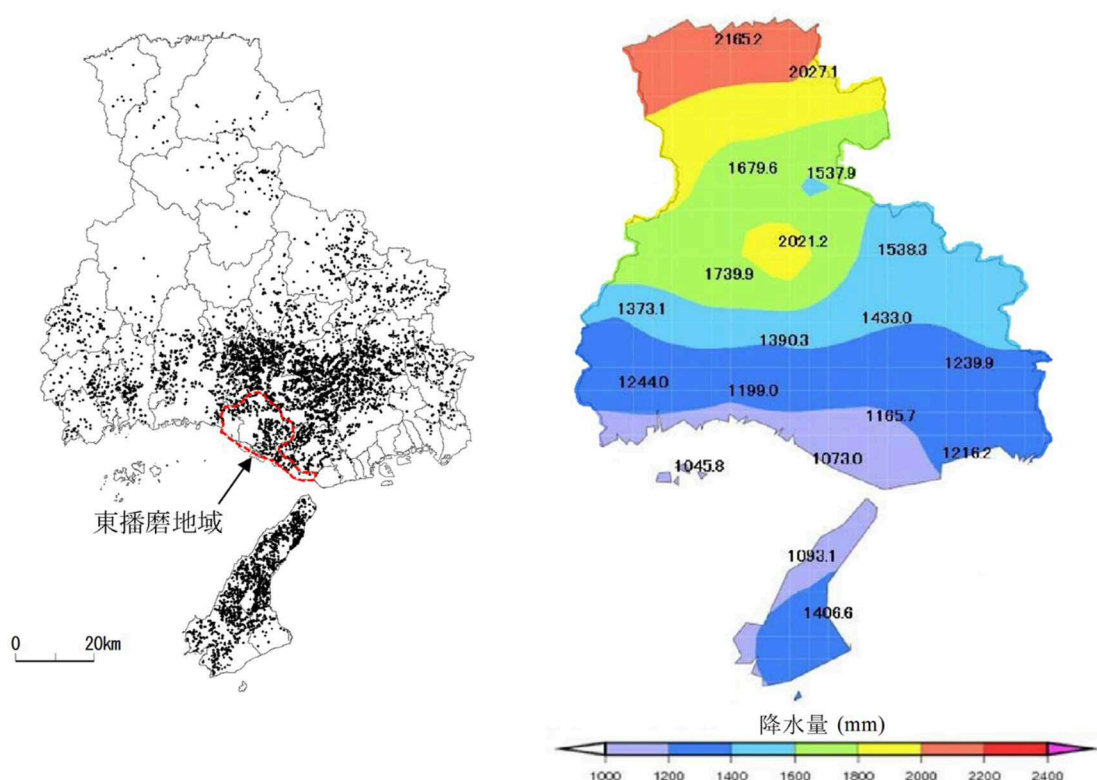


図 2-3 兵庫県のため池の分布と平均年間降水量分布

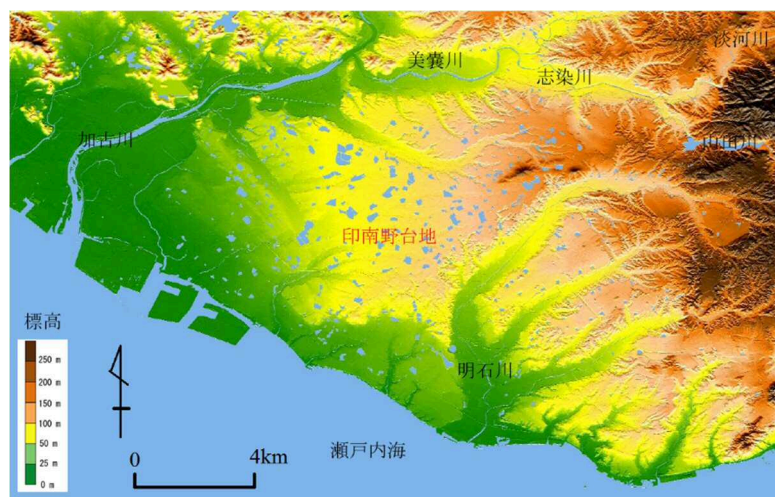


図 2-4 兵庫県東播磨地方の地形図

2.2 ため池の歴史的背景

この地域では、兵庫県の記録上最古のため池が 7 世紀に築造された。さらに、17 世紀から 19 世紀にかけて、江戸時代における新田開発と併せて多数のため池が築造された。以降、地域のため池管理者である農家は 100 年以上にわたってため池を維持管理し、現在も保全し続けている。これらのため池の多くは、水を集めるために上流の水路を介して接続されており、それによって水の貯留が安定するように築造されている。いくつかのため池は川から取水できるように、疏水で結合されている。

そのため、ため池と疏水は一体的に設計・施工され、維持管理されながら利水している。一例として、淡河川山田川疏水（以下「淡山疏水」という。）は兵庫県東播磨地域で最も有名な灌漑システムの 1 つである。淡山疏水は、19 世紀後半から 20 世紀初頭にかけて実施された 2 つの灌漑プロジェクトを通じて形成された（Hatate, 1981）。この 2 つの事業は淡河川用水事業と山田川用水事業であり、その概要を表 2-1 に示す。また、ため池と淡山疏水の位置を図 2-5 に示す。

表 2-1 淡河川用水事業と山田川用水事業の概要

名称	所 在	概 要
淡河川疏水	神戸市北区淡河町木津（淡河頭首工）～神戸市西区神出町（練部屋分水）	起工：1888 年／水源地：淡河川 幹支線水路延長：26.3km／かんがい面積：1,100ha 背景：地租改正による急激な増租，殖産興業の政策，国営葡萄園開設 費用負担：4.5 万円は国庫補助，2.4 万円は地元負担 効果：開田 700ha，ため池築造 27 ヶ所
山田川疏水	神戸市北区山田町（取入堰）～淡河川疏水幹線の宮ヶ谷調整池	起工：1911 年／水源地：山田川 幹支線水路延長：57km／かんがい面積：850ha 背景：淡河川疏水事業への加盟地区の拡大 費用負担：地元負担／効果：開田 850ha，ため池築造 54 ヶ所

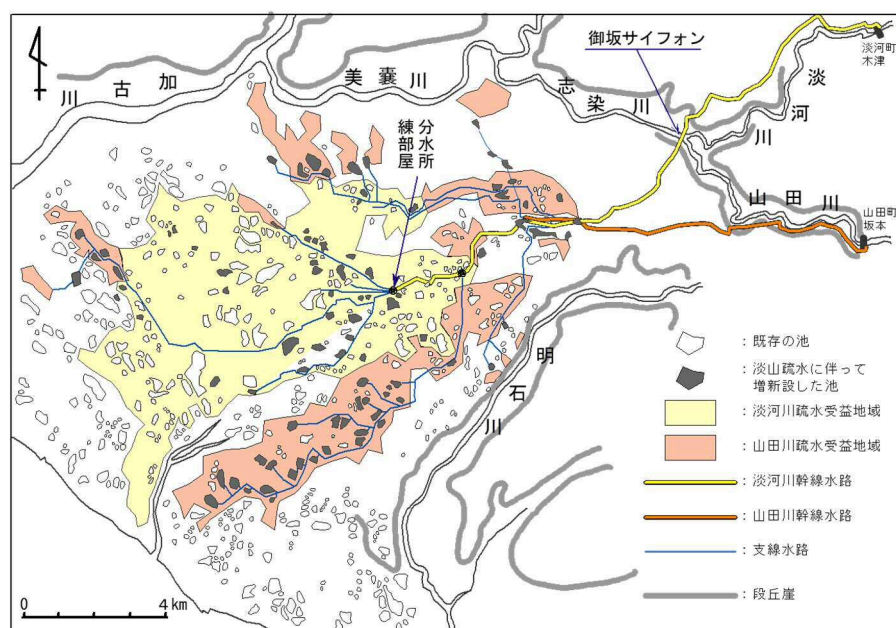


図 2-5 ため池と淡山疏水の位置図（淡河川・山田川疏水記録誌編集部会，2012）

淡山疏水の築造には，地元の人々の労力だけでなく，測量技術や鋼管やレンガの使用など，日本の近代化の一環として導入された西洋の技術も取り入れられた．当時の最先端技術を駆使して修理・改良が行われ，このシステムは現在でも使用されている．この灌漑プロジェクトにより多数のため池が築造された．その結果として生じた疏水やため池などの水のネットワークは，図 2-6 に示すように，東播磨地域のため池を組み込んだ景観は特徴的である．これらの美しい風景は，営農が継続されるによって生み出された．



図 2-6 東播磨地域のため池群（兵庫県撮影）

淡山疏水は、1 年のうちの非灌漑期の限定的な期間でのみ疏水を使った取水が認められていた。限られた期間で所要の用水を確保するため多数のため池が築造された。しかし、淡山疏水築造後もいなみ野台地は干ばつとそれに伴う水不足に悩まされていた。当時の淡山疏水は加古川の支流である志染川のみから取水していたが、この問題を解決するために、さらに上流の篠山川や加古川から取水することを前提とした東播用水事業が実施された（Toban-Yosui Water Resources Development Project Office, 1993）。国営事業として、東条川と篠山川の上流に至る全長 36 キロメートルの水路が築造され、3 つのダムがつながり、4 市 1 町（神戸市、明石市、加古川市、三木市、稲美町）にまたがる総面積 7,404.8 ヘクタールの農地を潤す壮大な水網が形成された。1992 年に東播用水事業が完成し、淡山疏水は現在の形となった。

2.3 ため池をとりまく現状

全国と兵庫県の水田における水源の比較を図 2-7 に示す。ため池を水源とする割合について、全国では 11.4%，兵庫県では 46.0% となっており、兵庫県水田のため池依存度が高い。2022 年時点の兵庫県内農地面積は 72,400 ha となっており、そのうち 92% が水田であることから、ため池が兵庫県農業にとって重要な利水施設であることがわかる。

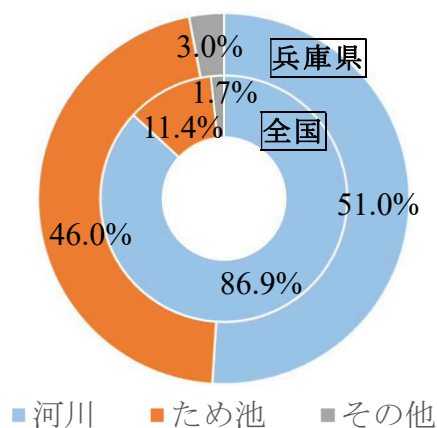


図 2-7 全国と兵庫県の農業用水源比較（兵庫県調べ）

近年，農業従事者の高齢化，農業人口の減少，工業化や都市化等により，ため池の維持管理が困難になっている地域がある．また，築 100 年を超えるため池の老朽化が進んでいることや，近年の豪雨や地震に対する安全性確認の必要性が高まっていることから，ため池の保全・改修の需要が大幅に高まっている．集中豪雨や大地震に備え，兵庫県では専門家によるため池の定期点検や耐震調査を実施しており，2014 年には点検・調査に基づき要改修と判定されるため池の 5 カ年整備計画を策定した．現在はため池防災工事として，10 箇年の計画で整備を進めている．老朽化したため池の改修の標準工法は，図 2-8 に示すように堤体の上流側に傾斜コアゾーンを設け，洪水吐や取水施設を設置している．また，地元農家によるハザードマップ作成や減水管理に取り組んでいる．

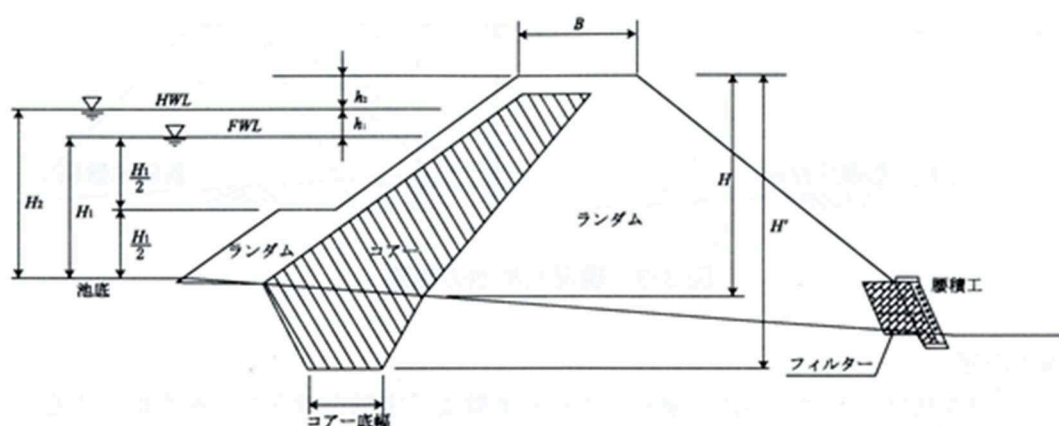


図 2-8 ため池改修における堤体標準図（兵庫県，2020）

現在，生物多様性を育む生態系の維持や洪水の軽減など，ため池が有する多面的な役割についての認識が高まりつつある．ため池は雨水を一時的に貯留する機能があり，急激な雨水の流れを防ぎ，周辺や下流域への浸水被害を防止・軽減することが可能となる．図 2-9 に洪水調節機能を備えた洪水吐の例を示す．ため池の満水位を下げることで貯水容量を確保し，放流量のピークを遅延・減少させるため，ため池改修時に越流堰を切開した．この改良されたため池洪水吐を活用することで，浸水被害を軽減することができる．雨水をため池に一時貯留する機能は，総合治水の一環として関心を集めている．



図 2-9 洪水調節機能を備えた洪水吐の施工例（加古大池，兵庫県撮影）

この地域のため池を適切に維持管理することは，こうした景観の維持・保全につながる．東播磨地域では，長い歴史の中で営まれてきた農業活動により，様々な文化遺産が維持・継承されている．自然の恵みに感謝し，自然災害の防止を祈願するために行われる伝統的な祭事などが実践されている．

東播磨地域のため池と疏水の灌漑施設は，表 2-2 に示すとおり，その歴史的・文化的価値が高く評価されており，2003 年には文化庁が実施した文化的景観調査により重要地域に指定された．2008 年にため池と疏水は経済産業省によって近代化産業遺産として認定され，この灌漑システムが持つ偉大な歴史的および文化的価値に対する認識の高まりを示している．東播磨地域において，いなみ野ため池ミュージアムは，ため池や水路を地域の宝として保存・活用し，次世代に継承するための場であり，ため池管理者や農家や地域住民が中心となって運営されている．

表 2-2 東播磨地域のため池と疏水に対する社会的評価

対 象	年 度	関係省庁等
「文化的景観を対象とした調査」で重要地域に選択	2003	文化庁
「疏水百選」選定	2006	農林水産省
「兵庫県の近代化遺産」特に重要な物件として評価	2006	兵庫県教育委員会
「土木学会選奨土木遺産」に認定	2006	社団法人 土木学会
「近代化産業遺産」に認定	2008	経済産業省
淡山疏水が「世界かんがい施設遺産」に登録決定	2014	国際かんがい排水委員会

2.4 ため池の適正管理と多面的機能の発揮の促進

これらの多面的機能は、ため池が農業の持続的発展の基盤として重要な役割を果たすなど、適切な維持管理を講じることにより、農家をはじめとする地域社会の中で十分に発揮することができる。兵庫県では、ため池の適切な維持管理を促進するとともに、ため池の持つ多面的機能の充実・拡充を図ってきた。

戦後、食料増産が急務となる中、兵庫県では、貯水に要する十分な構造を備えないため池の造成や、能力以上の貯水量を確保するなどの危険行為が見られた。そこで、決壊等による災害の発生を未然に防止することを目的とした「ため池の保全に関する条例」が全国に先駆け 1951 年 3 月に制定された。この条例は、ため池の設置についての許可や禁止行為などを定めたもので、ため池管理者に対し、ため池保全に努めるよう一定の規制をかけるものであった。

近年、農業者の減少や高齢化によって、ため池管理の粗放化が進行している一方、洪水調整や生物多様性の確保など、ため池等の有する多面的機能の発揮が強く求められている。このような社会の変化を受け、1998 年にはため池の保全や整備に関する理念やその実施手法を示す「兵庫県ため池整備構想」が策定された（森脇，2019）。整備構想では、ため池管理者の他、地域住民や学校・企業等、多様な主体で構成されたため池協議会を設立し、ため池保全の取組が継続されるよう体制づくりを行うこととしている。

さらに、2015年に64年ぶりに前述の条例を改正・制定した。改正条例では、従来の規制等に加えて、ため池の点検や管理体制の維持についても明記するなど、ため池の適正管理を徹底することで農業用水の安定供給及び決壊による災害の防止を図ること、さらに多面的機能の発揮の促進を基本理念に掲げている。

条例施行に併せて、ため池の適正な管理，多面的機能の発揮の促進，次世代への継承，の3点からなる中長期的なため池保全管理の推進方針を策定した。また，多面的機能の発揮の促進については，ため池保全を県民運動として展開している。

Park（2021）は兵庫県のため池保全活動と政策を分析することにより，韓国における計画的なため池管理の手がかりを探ろうとするなど，兵庫県の取組を評価する研究が報告されている。

2-5 まとめ

本章では，東播磨地域を事例に兵庫県におけるため池を取り巻く状況を分析するとともに，特に兵庫県南部においては，過去から現在にかけて連綿としてため池が灌漑上，重要な役割を果たしてきたことを述べた。兵庫県ではため池の適正な管理，多面的機能の発揮の促進，次世代への継承によりため池保全の取組を推進していることを指摘した。

また，ため池を構成する最も重要な施設である堤体についての老朽対策や自然災害に対する被災の未然防止は極めて重要である。ため池堤体があつてこそ，貯水が可能となり，ため池の有する多面的機能が発揮されることに留意する必要がある。

第 2 章 参考文献

Hatate, I. : The establishing process of the Ogo and Yamada Canals, Japanese Experience of the UNU Human and Social Development Programme series; 44, [pdf], Available at: < http://d-arch.ide.go.jp/je_archive/pdf/workingpaper/je_unu44.pdf > (Accessed 31 January 2017), 1981.

兵庫県農林水産部：ひょうごの農 2023，pp.3-4，2023.

兵庫県農政環境部農林水産局農地整備課：兵庫県土地改良技術基準，2020.

気象庁神戸地方気象台：兵庫県の気候特性，< <https://www.data.jma.go.jp/kobe-c/climate/kiko/kiko.html> > （確認日：2016 年 6 月 25 日）

南埜猛，本岡良太：日本の溜池分布論再考 第 1 報，地理科学，Vol.70 (2)，p.97，2015.

南埜猛：ため池の存続とその維持管理をめぐる取組み - 兵庫県東播磨地域を事例として - ，経済地理学年報第 57 巻第 1 号，pp.75-89，2011.

森脇馨：市民協働によるため池保全，農業・農村の資源とマネジメント，神戸大学出版会，pp.155-173，2019.

淡河川・山田川疏水記録誌編集部会：淡河川・山田川疏水記録誌，pp.17-20，2012.

Park Jin-Wook: A Study of Reservoir Management System in Japan - Focus on Hyogo Prefecture - , *Journal Of The Korean Society Of Rural Planning*, Vol.27, No.1, pp.1-8, 2021.

田中眞吾：いなみの台地の地形におけるサイクリック現象とその意味するもの，京都大学防災研究所年報，No.35 B-1，pp.81-93，1992.

Toban-Yosui Water Resources Development Project Office, Kinki Regional Agricultural Administration Office, the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries : Dam Construction and Other Main Bodies of the East Harima Region Comprehensive Water Resources Development, *Journal of Irrigation Engineering and Rural Planning*, Vol. 1993, No.24, pp.91-94, 1993.

第 3 章 既往の豪雨・地震によるため池被害分析

3.1 近年のため池被害概説

農林水産省は、図 3-1 に示すように近年のため池被災状況を取りまとめている。農林水産省によると、「自然災害によるため池の被害は、2004 年の新潟県中越地震と 10 回にわたる台風の上陸や 2011 年の東日本大震災による被害が顕著となっている。直近 10 年間におけるため池の被害は、約 79%が豪雨によるもので約 21%が地震によるもの」となっている。

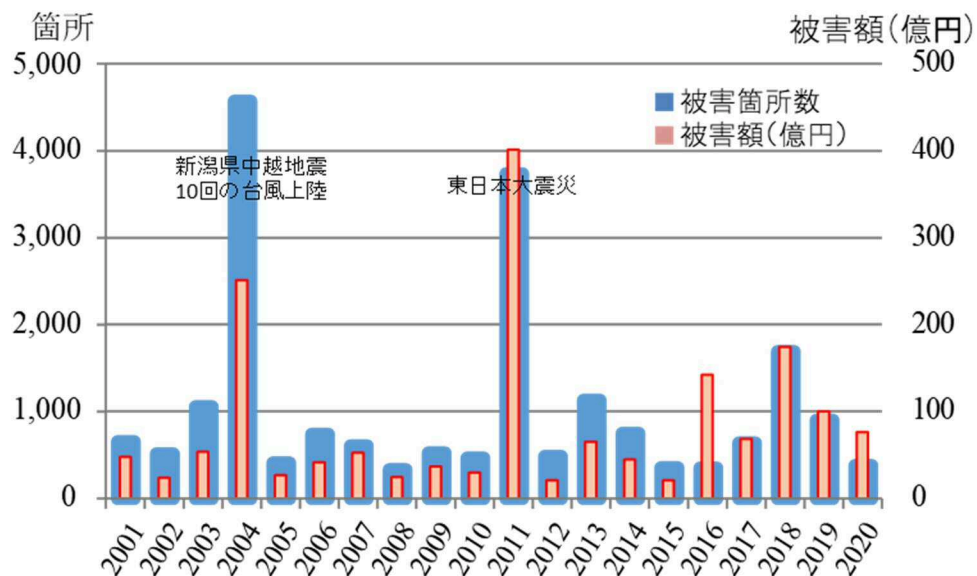


図 3-1 近年における全国のため池被害（農林水産省（2023））

兵庫県では、表 3-1 に示すとおり台風や集中豪雨により 2013 年度までの直近 10 箇年で 251 箇所のため池が決壊している。特に 2004 年の台風 23 号におけるため池被害は甚大で、特に淡路島では 1,299 箇所のため池が被災した（内田，2005）。また、図 3-2 に示すように、1995 年 1 月の兵庫県南部地震においては、決壊による被害が発生したため池はなかったものの、約 1,400 箇所のため池が被災しており、高い発生確率が想定されている南海トラフ沿いの大規模地震等への備えが急務となっている。そこで、堤体の漏水等の現状を把握する定期点検や

貯水量 10 万 m³ 以上で下流に影響が大きい未整備ため池の耐震調査に取り組んでおり、それに基づく計画的な改修を進めている。

本章では、豪雨によるため池の被災の現地調査結果を示すとともに、兵庫県で実施してきたため池耐震調査結果を示し、兵庫県が取り組んでいるため池整備についての述べる。

表 3-1 兵庫県におけるため池決壊数（兵庫県調べ）

年度	2004		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	計
	224	内台風 23号 206													
決壊ため池数	224	206	0	3	1	0	2	0	14	2	5	5	2	0	263

H16年豪雨災害など、台風や集中豪雨による決壊が発生しているが、地震（平成7年兵庫県南部地震・平成25年淡路島地震）において、決壊にまで至ったため池はない。

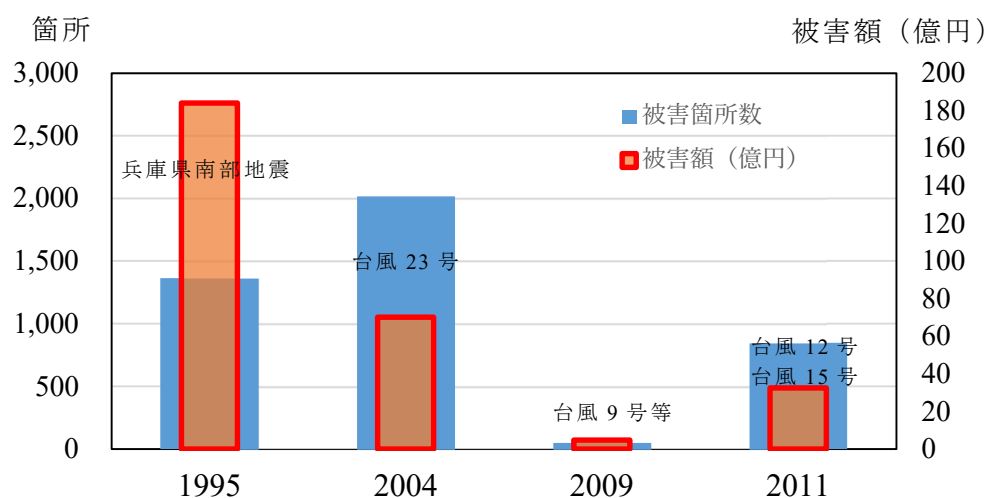


図 3-2 近年における兵庫県の主要なため池被害（兵庫県調べ）

3.2 兵庫県におけるため池豪雨被災調査と事例分析

2014 年 8 月上旬，我が国に接近した台風 12 号，それに続いて四国に上陸し，近畿を通過した台風 11 号に伴う豪雨と，8 月中旬の前線活動に伴う豪雨は，京都府福知山市に浸水被害を，兵庫県丹波市と広島県広島市に土砂災害をもたらし，広範囲に甚大な被害を発生させた．

この平成 26 年 8 月豪雨により，兵庫県では，死者 2 名の人的被害，家屋の全半壊や浸水被害が発生していた他に，農地や農業用施設の被災も多数発生した．ここでは，丹波市のため池の被災状況に関する現地調査を行った結果について報告する．

3.2.1 気象概要

2014 年 8 月 10 日に高知県安芸市に上陸し，四国を通過した後，同日，兵庫県赤穂市に再上陸して日本海に抜けた台風 11 号は，台風進路東側の兵庫県東南部（特に神戸・阪神間）と淡路島に大雨をもたらした．8 月 9～10 日の最大 24 時間雨量（最大 1 時間雨量）は，神戸・阪神間の神戸市有馬川では 296mm（88mm），西宮市船坂では 276mm（87mm）を記録し，淡路島の洲本市洲本では 230mm（50mm）を記録している．

一方，2014 年 8 月 15 日から 18 日にかけて，西日本に停滞する前線上を低気圧が東進し，また南から暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で，前線の活動が活発となり，大気の状態が非常に不安定となった．このため，兵庫県東部を中心に再び大雨となった．

8 月 16～17 日の最大 24 時間雨量（最大 1 時間雨量）は，丹波市市島町の北岡本で 414mm（91mm），同町の森で 392mm（75mm），同町市島で 339mm（43mm）が観測されている．なお，丹波市市島町に位置する大杉ダム（後述）では，8 月 17 日午前 2 時に通信回線が切断されたため，同日 3 時以降のデータが観測されていないが，8 月 17 日午前 2 時までの 24 時間雨量は 342mm で，最大 1 時間雨量は 64mm であった．

図 3-3 に最大 24 時間雨量の等雨量線図を，図 3-4 に最大 1 時間雨量の等雨量線図を示すが，豪雨域が丹波市を中心とした県東部に集中していることが分かる．

8 月 16 日から 17 日にかけて，丹波市内の主要地点で観測されたハイエトグラフを図 3-5 に示す．降雨は 16 日午後から 17 日早朝にかけての 16 時間程度に集中している．8 月上旬の台風 11 号による降雨で土壌水分が多くなっていたところ，さらに 8 月 16 日から時間 90mm，累加雨量 400mm 近くの豪雨が降ったため，土砂災害が発生しやすい状態になったものと考えられる．

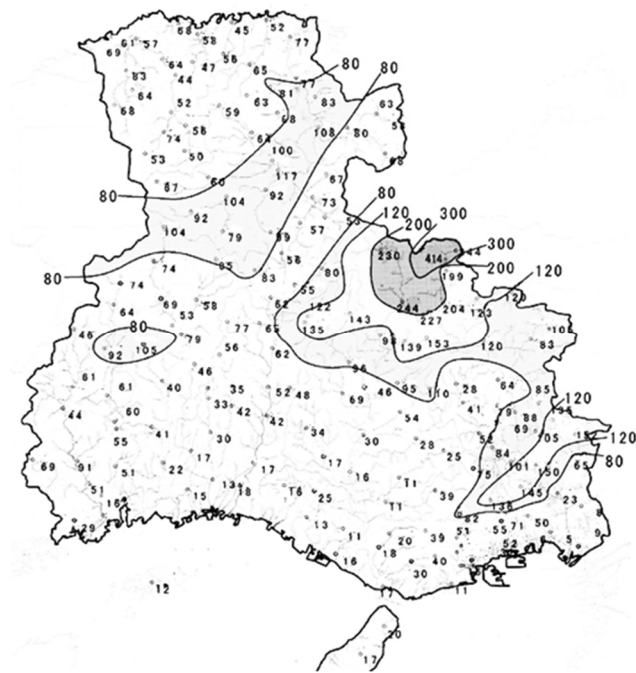


図 3-3 最大 24 時間雨量の等雨量線図 (2014 年 8 月 16~17 日, mm 単位)

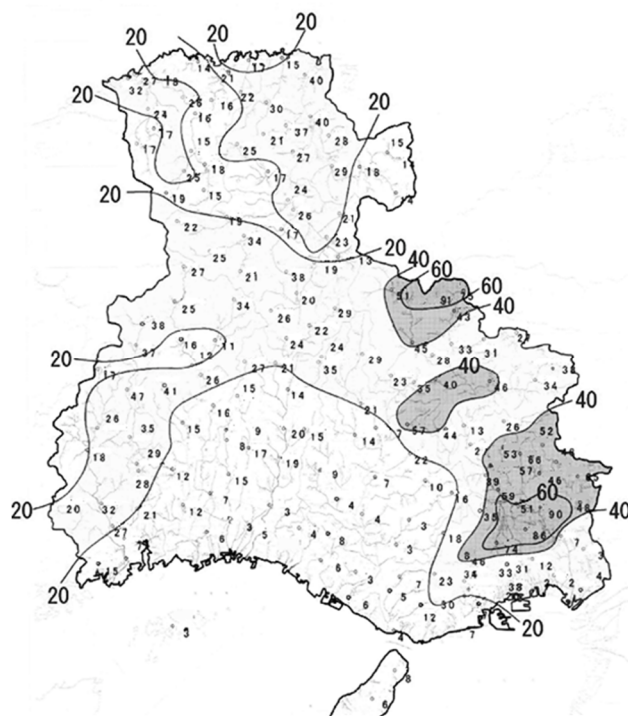


図 3-4 最大 1 時間雨量の等雨量線図 (2014 年 8 月 16~17 日, mm 単位)

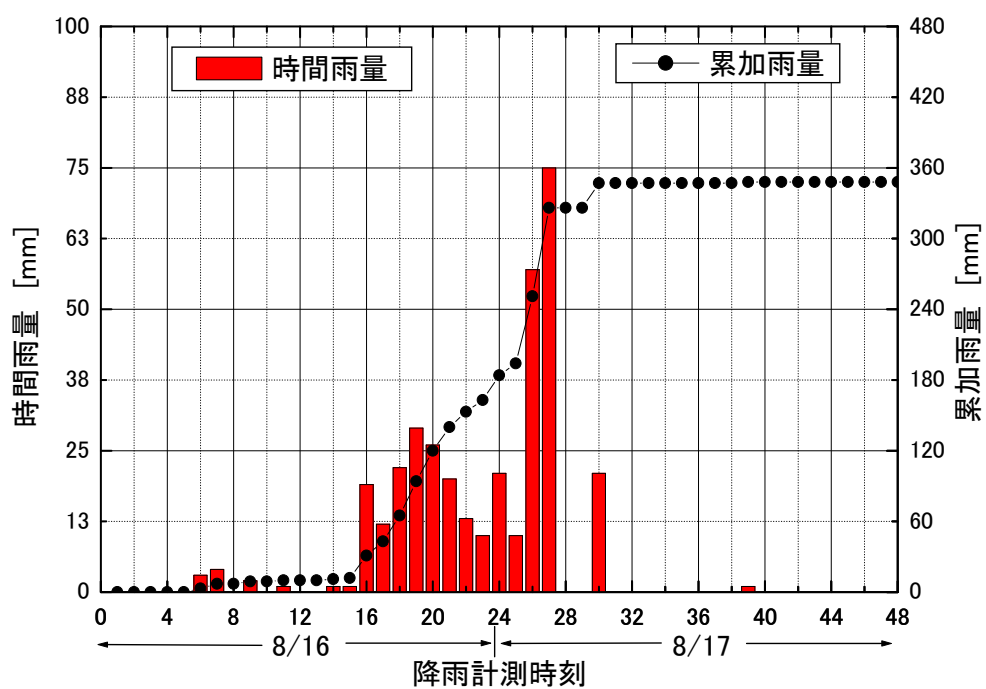
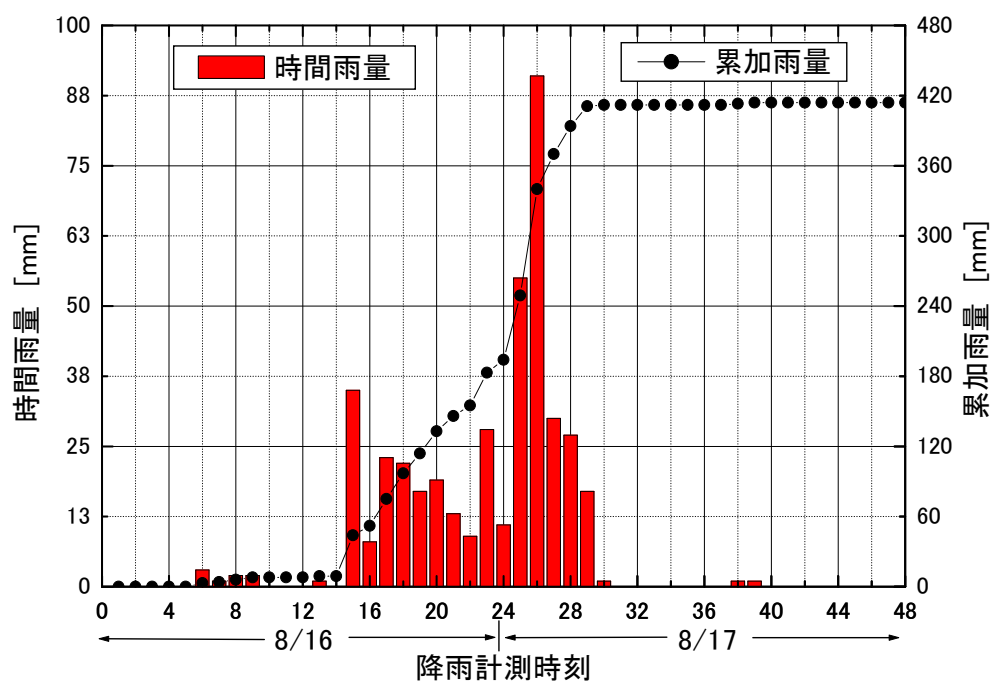


図 3-5 丹波市内で観測されたハイエトグラフ

(上段：市島町北岡本，下段：市島町森)

3.2.2 兵庫県内の被害状況

台風 11 号に伴う 8 月 9～10 日の降雨では，人的被害として軽傷 9 名，住家被害として全壊 2 棟，半壊 1 棟，床上浸水 33 棟，床下浸水 354 棟が発生しており，住家の被災地域は，県南部の神戸市，西宮市，宝塚市，姫路市，明石市等，さらに淡路島の洲本市，南あわじ市等，広範に及んでいる．また，農地の被害（畦畔崩壊等）は 1,172 箇所，ため池，水路等の土地改良施設の被害は 473 箇所であった．

一方，8 月 16～17 日の降雨では，人的被害として死者 2 名（丹波市 1 名，川西市 1 名），重軽傷 4 名（丹波市），住家被害として全壊 17 棟，半壊 47 棟，床上浸水 146 棟，床下浸水 787 棟が発生している．家屋の全半壊のすべてと床上・床下浸水のうち 863 棟が丹波市で発生しており，とくに丹波市市島町に大きな被害が集中している．図 3-6 は，国土地理院が市島町前山地区の被害状況を撮影したものであるが，山腹に幾筋もの土砂崩壊の痕跡が確認できる．この土砂の流出によって山裾の民家が多数被災した．

また，丹波地域における農地の被害（土砂流入等）は 1,610 箇所，ため池・水路等の土地改良施設の被害が 200 箇所となっており，その他，林地の溪流崩壊等が 72 箇所が発生している．



図 3-6 市島町前山地区の被害状況（国土地理院撮影）

3.2.3 現地調査と対象ため池の概要

平成26年8月豪雨のうち、8月16～17日の降雨では、丹波市での記録的な豪雨により山腹の崩落がいたるところで発生し、それにもない、山裾の農地や谷をせき止めて築かれたため池が土砂埋没した事例が多数報告されている。そこで、災害発生から1ヶ月が経過し、本格的な災害復旧体制が整いつつあった9月17日に、被災したため池の現地調査を行った。調査対象のため池の所在地は、いずれも丹波市市島町である。これらため池の諸元を表3-2に、表3-3に洪水吐の諸元を示す。

表 3-2 現地調査を行ったため池の諸元

名称	堤高 (m)	堤長 (m)	貯水量 (m ³)	流域面積 (ha)	受益面積 (ha)
大杉ダム	40.0	196	877,000	160.0	125.2
水上大池	10.0	75	27,500	53.0	19.0
小倉池	9.0	45	8,000	25.0	6.0
木古庵池	4.0	43	2,500	4.0	8.0
安家治池	8.4	88	21,000	20.0	23.2

表 3-3 洪水吐の諸元

名称	洪水吐の形式と大きさ		洪水吐の改修歴
大杉ダム	側水路式	H3.0m×W20.0m	なし（築造は1974年）
水上大池	水路流入式	H1.0m×W5.8m	1987年改修
小倉池	越流堰式	H1.4m×W4.8m	1950年改修
木古庵池	水路流入式	H1.0m×W1.5m	なし（築造年不明）
安家治池	越流堰式	H2.5m×W7.3m	1981年改修

3.2.4 ため池の被災状況

3.2.4.1 大杉ダム

大杉ダムでは、ダム上流側に長さおよそ 400m にわたる土砂崩壊が 2 箇所が発生し、池内に約 15,000m³ の土砂が入り込んだが、堤体本体には被災はなく、土砂流入による水位の急上昇に対しても、流水は安全に洪水吐を流下したと考えられる。

大杉ダムの総貯水量は 87 万 7 千 m³ であるが、豪雨前の貯水率は 65% で、豪雨後には満水となっていることから、およそ 30 万 m³ の流入水を貯留したと考えられる。また、17 日の午前 3 時まではダムからの越水は記録されておらず、最も強い降雨時間帯である 17 日の 2 時までの間は上流域からの流出をダム地点でカットしており、下流域に対して一定の洪水調節の機能を果たしたと考えられる。

3.2.4.2 水上大池

水上大池では、上流側に土砂の堆積が見られたが、池の埋没までには至らず、貯水容量の多くが維持された。図 3-7 に示すように、堤頂部には、流木が散乱しており、後法（下流側法面）には越流水による幾筋もの掘削痕が残っていた。洪水吐には大きな損傷や倒木や土砂による閉塞は見られないが、放水路の下流部分は逸失していた。

水上大池の洪水吐は改修済みではあるが、設計基準が求める断面を満たしていないことが確認されている。このため、土砂の堆積と流水の流入が貯水位を一気に押し上げ、放水能力以上の流入量を放流しきれずに、堤頂を越流したと考えられる。ただし、降雨強度がピークを迎えた後、程なくして降雨が止んだこと、また堤頂を越えた水が 1 箇所に集中せず、幾筋かに分散していたことから、決壊には至らなかったと思われる。



図 3-7 水上大池の被災後堤頂部（神戸大学 田中丸教授撮影）

3.2.4.3 小倉池

小倉池は、満水位まで一様に土砂で充填され、背後の地山から続く河原のようになっている（図 3-8）。写真の手前側にある洪水吐には倒木が 1 本残っているだけで、土砂堆積や流木による閉塞は見られない。左岸の地山取り合い部に流木が集積しており、そこでの越流は生じたものの、洪水吐右岸の堤体には越流の痕跡はなかったことから、約 8 千 m^3 の土砂で完全に埋没しつつも、洪水吐は機能を果たし、決壊に至らなかったものと考えられる。



図 3-8 土砂で埋没した小倉池（神戸大学 田中丸教授撮影）

3.2.4.4 木古庵池（きこあんいけ）

木古庵池は堤体が決壊するとともに、決壊箇所には、土砂と流木が折り重なり、堤体の原形が想像つかないほどである。洪水吐は、流入部が土砂と流木で閉塞し、導流部以降の水路は長い距離に渡って逸失している。図 3-9 に示すように、貯水池内は、満水位付近まで完全に土砂で充填されており、ここが従前ため池であったことが想像できないほどである。

土砂と流木の堆積により、比較的早い段階で洪水吐が閉塞し、堤頂をかなりの勢いで越水し、最終的には左岸の堤頂がやや低い部分に越流水が集中して、後法の崩壊による決壊が生じたものと考えられる。



図 3-9 木古庵池の被災状況（上流側から見た堤体内，兵庫県撮影）

3.2.4.5 安家治池（あなかじいけ）

安家治池では、上流域の山腹崩壊は生じていないが、従前谷筋に堆積していた土砂が流入している。洪水吐は設計基準通りに改修されており、十分な規模を有している（表 3-3）。土砂の侵入と流水の流入が貯水位を一気に押し上げたと思われるが、改修済の洪水吐が十分機能し、堤体越流も発生せず、安全に余水を流下させることができている。

3.2.5 丹波豪雨災害のまとめ

平成 26 年 8 月豪雨で被災した丹波市のため池の現地調査から得られた知見は、以下の通りである。

- ①記録的な豪雨による出水と、ため池上流域からの土砂流入にもかかわらず、洪水吐が機能したため池は堤体の決壊を免れた。水上大池のように堤体越流が生じているケースや小倉池のように完全に土砂で埋没したケースでも持ちこたえている。その一方、洪水吐が土砂と流木で閉塞した木古庵池は決壊に至っている。
- ②小倉池を始めとする複数のため池が流入土砂を貯留したことは、ため池が砂防ダムとしての機能を果たしたともいえる。しかしながら、木古庵池のように土砂で埋没するとともに決壊し、ため池下流に土砂や流木を流下させたため池もあった。すなわち、土砂貯留の機能は、堤体が出水に耐えられる場合に限って期待できる機能であることに注意すべきである。
- ③大杉ダム以外の 4 つのため池は、いずれも築造時期不明の古いため池であるが、洪水吐の改修がなされたことが確認されている 3 つのため池は、いずれも決壊を免れている。このことは、老朽ため池における改修の重要性を示している。

3.3 兵庫県におけるため池地震被災調査と事例分析

ため池が卓越して分布する淡路島付近を震源とする震度 5 強超の地震が 2 度発生した。

1 度目は、1995 年 1 月淡路島北部沖を震源とする最大震度 7 の兵庫県南部地震で、県内 1,362 箇所のため池が被災した（山本，1997）。図 3-10 に示すように、本地震によるため池被害の状況は、堤体におけるクラックや沈下、法面の滑落等が発生したものの、地震発生が近年まれにみる渇水年の冬期であり、貯水位が低かったことにより、決壊による被害は発生しなかった。2 度目は、2013 年 4 月淡路島中部を震源とする最大震度 6 弱の淡路島地震で、島内約 50 箇所のため池が被災したが、幸い決壊による被害は生じなかった。



図 3-10 地震により法面が滑落したため池被災（二六池，兵庫県撮影）

これまでは，ため池の決壊被害が，主に水害によるものであるとの結果から，兵庫県は水害対策（老朽化対策）を重点的に進めてきた（長谷坂，2011）が，現在，水害対策に加えてため池の地震対策を並行して進めているところである．兵庫県では，2013 年度から，ため池のレベル 1・レベル 2 耐震調査を行っている．

レベル 1 耐震調査の対象ため池は，貯水量 10 万 m^3 以上または堤高 10 m 以上の大規模なため池で，決壊すれば下流の人家や公共施設等への影響が大きく，これまで改修実績のない未整備のため池を基本としている．これは，水防計画上震度 5 以上の地震が発生した場合に緊急点検を実施するため池と同様であり，その対象ため池数は 608 箇所である．

照査手法は，現地においてボーリング調査，堤体の横断測量を行う．次に液状化判定（FL 法）を行い，液状化しない場合は，円弧すべり法（Kh 法）で，液状化する場合は簡易液状化安定計算法（ Δu 法）でレベル 1 地震動に対する安定照査を実施する．所定の安全率が得られない場合は，優先順位をつけハード対策ま

たはソフト対策を行う。現時点の調査結果状況を、図 3-11 に示す。約 6 割のため池が上流下流ともに安全率 1.0 未満となった。

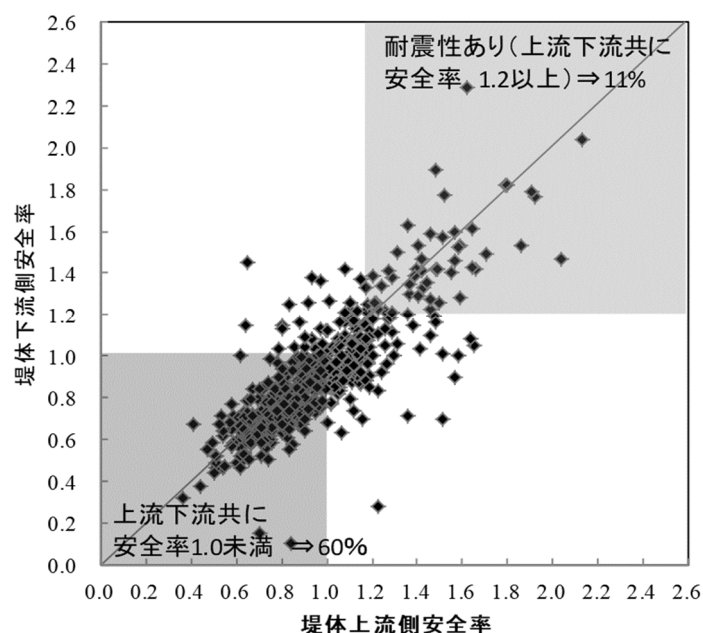


図 3-11 レベル 1 耐震調査結果（安全率分布）

レベル 2 耐震調査については、国のため池整備指針の重要度区分 AA 種を対象とした（野村，2015）。兵庫県では、堤高 15m 以上のフィルダムおよびため池を対象として先行実施しており、その数は、36 箇所で一定の安全性は確認された。

照査手法は、官民連携新技術研究開発事業で、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究部門を中心に開発された耐震性能照査手法「修正ニューマーク-D 法（詳細法）」を用い、土の強度低下モデル」の作成のため、全てのケースにおいて詳細法で実施している。ただし、修正ニューマーク-D 法の簡易法など、簡易で経済的な国から適用の考え方が示されており、新技術の活用を図っている。

3.4 兵庫県におけるため池整備計画

3.4.1 ため池定期点検制度

2004 年に、台風 23 号をはじめとする記録的な豪雨による災害が発生した。兵庫県では、この年に約 1,500 箇所のため池が被災し、その内 224 箇所で決壊被害が発生した。兵庫県は、この状況を重く受け止め、被災の理由は、異常な降雨に加え、ため池の適正な管理がなされていなかったことが原因と考えた。ため池の管理に着目する「ため池管理等に関する検討会」を組織し、減災につながるため池管理や整備のあり方について検討を行った。その結果、ため池の管理は農業者が行うものであるが、ため池を取り巻く社会的な状況の変化に応じて、また、ため池が有する多面的機能を踏まえ、適正な管理を促すためには、地域の多様な主体の参画とともに公的な関与も必要であると判断された。

そこでため池管理者が日常的に行っている管理や点検を補完し、点検で得られた情報を管理者と行政が共有する「ひょうごのため池安全安心定期点検事業」（以下、定期点検という）を 2012 年度に創設した。この定期点検は、県と市町が連携し、管理者の立会いのもと、専門技術者がため池の防災上の健全度等を評価するものである。その点検の結果、異常箇所を有するため池については、管理者を指導し必要な対応を実施するための「保全計画書」を作成させ、健全度の低下を抑制している。なお、この点検は、かんがい受益面積 0.5ha 以上のものを対象とし、5 年に一度、定期的に実施するものとしている。

ため池の決壊による被害防止を図り、地域の防災安全度を維持するため、最低限度の公的関与が必要であるとの合意を得て現在、市町の協力のもと定期点検を実施している。

なお、定期点検の健全度評価結果は、随時水土里情報システムへ登録し、情報のデータベース化及び市町などの関係者と情報の共有化を図っている。

3.4.2 ため池整備 5 箇年計画

耐震調査の結果により、490 箇所程度のため池が耐震性不備と判定される可能性がある。また、ため池定期点検結果と併せると、約 1,300 箇所のため池が要改

修となる見込みである。改修を要するため池のうち、特に改修の優先度が高い 380 箇所について、5 箇年で事業着手する「ため池整備 5 箇年計画」が 2014 年に策定された。本計画に基づき、水害対策と耐震対策のハード整備を進められた。また、ハード整備の着手まで時間を要することから、当面の減災対策として、兵庫県の総合治水条例に基づく事前放流や、ハザードマップの作成及び防災訓練等ソフト面の対応を実施してきた。ため池の維持管理・更新を効率よく進めていくためには、要因とその度合いに応じた適切なハードとソフト対策が必要である。

兵庫県では、ため池のソフト対策すなわち事前対策である保全管理がきわめて重要であるという認識のもと、ため池の保全管理についても重点的に取り組んでいる。

3.4.3 ため池防災工事等推進計画

平成 30 年 7 月豪雨災害や管理体制の脆弱化を踏まえ、2019 年 7 月に「農業用ため池の管理及び保全に関する法律」及び兵庫県の改正ため池等保全条例が施行され、全てのため池の管理状況等の届出を義務付けるとともに、施設規模にかかわらず、万一決壊した場合に家屋・公共施設・農地・農業用施設等に被害を及ぼすおそれのあるため池約 8,500 箇所を兵庫県が「特定ため池」に指定した。2020 年 10 月には「防災重点農業用ため池に係る防災工事等の推進に関する特別措置法」が施行され、ため池整備を集中的かつ計画的に推進するために、2021 年度から 2030 年度までの 10 箇年の実施計画として「防災工事推進計画」を市町と共同で策定し、期間中に 422 箇所のため池改修整備や廃止工事を推進している。人命に被害を及ぼすおそれのあるため池約 6,000 箇所については「防災重点農業用ため池」に指定し、決壊リスクが高いものから優先的に改修等の整備を進めている。

また、決壊した場合の被害程度も考慮して優先度を定め、本計画期間内に全箇所の実施を目指している。なお、改修整備は整備工事の効率性から全面改修（施

設全体を整備するもの)を基本とするが、急施を要する場合などにあつて部分的な改修が合理的であると判断されるときは部分改修を行うこととしている。

また、改修整備を実施するまでの間は、兵庫県・市町が共同で設置した「ため池保全サポートセンター」によりため池管理者への指導・助言を実施し、点検・補修等の適正管理及び豪雨に備えた低水位管理を促すほか、万一の決壊に備え、迅速な避難行動につながるハザードマップの作成等により、ため池の防災・減災対策を総合的に推進することとしている。

3.5 まとめ

従来は、ため池管理者や市町の要望を受け、順次その整備を進めてきたが、耐震調査や定期点検など行政の公的関与のもと、ため池の保全に取り組むようにシフトしつつある。その基本となる定期点検は、5年毎ではあるものの、今後ため池管理者へ公的支援の一つとして、継続的な実施を図ることが必要である。また、ため池管理者と行政が連携して地域防災や、ハザードマップの作成等を活用した地域全体の安全度向上についても近年進んでいる。

ため池の被災状況を概観すると、堤体が決壊し貯留機能が失われる事態を未然に防止することが最も重要である。ため池現地調査結果より、記録的な豪雨による出水とため池上流域からの土砂流入にもかかわらず、洪水吐が機能したため池は堤体の決壊を免れた。豪雨対策の一つとして、洪水吐の改修の重要性を示している。すなわち、決壊した場合の被害程度も考慮して優先度を定め、ため池改修整備は堤体改修を基本としつつ、豪雨対策として急施を要する場合などにあつて洪水吐の部分的改修が合理的である。

また、地震対策としては、ため池堤体の改修が必須となる。地震耐性評価から改修が必要なため池は兵庫県だけでなく全国的に増大しており、ため池改修に必要な用土不足等が顕在化してきているため、その対策を講じる必要がある。谷(2013)は地盤防災分野において E-ディフェンス活用を提案しており、次章で E-ディフェンスを活用したため池堤体の耐震検証について述べる。

第 3 章 参考文献

- 長谷坂兼司：兵庫県におけるため池の防災・減災対策の実施，水土の知 79(2)，pp. 19～21，2011.
- 兵庫県農林水産部農地整備課：『兵庫県南部地震農地農業用施設震災記録誌』兵庫県農林水産部農地整備課，1996.
- 兵庫県：平成 26 年発生災害気象状況調書，2014.
- 兵庫県：記者発表資料・台風第 11 号による被害等について（8/20 18:00 現在），2014.
- 兵庫県：記者発表資料・8 月 16 日からの大雨による被害等（9/18 15:00 現在），2014.
- 気象庁神戸海洋気象台：気象速報 平成 26 年 8 月 15 日から 18 日にかけての兵庫県の大雨について，2014.
- 毛利栄征：ため池の経年変化と維持管理，水土の知 81(8)，pp. 1～2，2013.
- 野村純数：兵庫県のため池耐震調査と整備について，材料と施工 No.53，pp.19-24，2015.
- 農林水産省：ため池，https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/index.html（確認日：2023/11/20），2023.
- 谷和夫：E-ディフェンスの地盤防災分野への活用の提案，第 58 回地盤工学シンポジウム，pp.199～202，2013.
- 内田一徳：淡路島におけるため池関連の土砂災害，自然災害科学，Vol.24，No.2，pp.149～155，2005.
- 山本谷晶：兵庫県における農地・農業用施設に関する震災後の対策，農業土木学会誌 65(9)，pp.15～22，1997.

第4章 ベントナイトシートがため池堤体地震時挙動におよぼす影響

4.1 たため池堤体改修の概説

農林水産省（2023）によると，全国には約15万箇所の農業用ため池が存在する．老朽化が進み漏水が多くなるなど堤体決壊のリスクが高まっているため池もあり，決壊によるため池下流の被害を未然に防ぐため，老朽ため池の改修が急務となっている．一方で，2011年の東日本大震災によるため池の決壊により人命が失われたこと，また，今後30年以内の発生確率が70%程度と想定されている南海トラフ等の大規模地震への備えが求められていることから，ため池の地震対策も併せて推進されている．

農林水産省（2015）はため池整備指針において，表4-1に示す均一型，ゾーン型（傾斜遮水ゾーン型，中心遮水ゾーン型），表面遮水壁型（遮水シート），堤体グラウト型等に改修型式を分類しており，それらの特徴は次のとおりである．

均一型は現況堤体の土質とほぼ同質の土質材料で改修する型式で，ゾーン型に比して一般に法面勾配が緩くなり堤体積が大きくなるので，堤高が比較的低い場合に適する．江戸時代以前に築造され設計図面等記録が残っていないため池堤体の多くは，ボーリング等の地質調査から均一型に分類されている．

傾斜遮水ゾーン型は現況堤体の上流側に傾斜した遮水性ゾーンを設け遮水する型式で，堤体盛土材料に遮水性材料が得られる場合に用いられる一般的な改修型式である．遮水効果が高く，現況堤体とのなじみもよい．

中心遮水ゾーン型は遮水性ゾーンを中央に設け遮水する型式で，現況堤体を取り除いて盛土することとなり，傾斜遮水ゾーン型と比較して取扱い土量が多くなることが多い．一般に新設を対象とした型式であり，現況堤体を利用する改修型式としての実績は少ない．

表面遮水壁型は遮水性土質材料の入手が困難な場合に適する型式である．表面遮水材料には，合成ゴム系シート，アスファルト等がある．

堤体グラウト型は堤体からの漏水経路が明らかな場合に行われる型式である．

表 4-1 堤体改修型式の比較（農林水産省（2015））

型 式		略 図	定 義
均 一 型			堤体の全断面で遮水する型式又は堤体の最大断面で均一の材料の占める割合が80%以上である型式。
ゾ ー ン 型	傾斜遮水ゾーン型		土質材料が遮水性材料と半透水性又は透水性材料からなる型式で、遮水性ゾーンが上流側へ傾斜したもの。
	中心遮水ゾーン型		土質材料が遮水性材料と半透水性又は透水性材料からなる型式で、遮水性ゾーンを堤体中心に設けるもの。
表 面 遮 水 壁 型	遮水シート		堤体が透水性又は半透水性材料からなり、上流側法面にシートを設け遮水する型式。
	アスファルト舗装		堤体が透水性又は半透水性材料からなり、上流側法面にアスファルト舗装を施工し遮水する型式。
堤体グラウト型			堤体材料が透水性又は半透水性材料からなり、堤体の中心部にグラウト工を施工し遮水する型式。

ため池堤体の盛土材料は、遮水を目的として使用される。盛土材料に望まれる一般的な性質は、①堤体の安定に必要なせん断強度および遮水性を有すること、②堤体の安定に支障を及ぼすような膨張性・収縮性のないこと、③軟泥化しないこと、④有機物を含まずかつ水溶性でないこと等がある。

兵庫県では、透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 以下の難透水性盛土材料で傾斜遮水ゾーンを設ける前刃金（まえはがね）工法を採用することを基本としているが、現場条件等により前刃金工法の採用が困難な場合、代替として遮水シート工法を採用することがある。兵庫県内では、北播磨地域において刃金土は安定的に供給されている状況であるが、北播磨から離れた地域では土運搬のためのコストが嵩むため、代替工法として経済的な表面遮水シート工法が採用される事例も生じている。また、ため池が卓越して分布する淡路島においては、島内で刃金土を確保しているところであるが、複数のため池改修工事に必要な年間土量が用土供給量を上回り、改修工事に支障をきたしたことがある。

従来のため池表面遮水工法においては、ゴム系や塩ビ系のシートが主に採用されてきたが、紫外線の影響等で想定以上に材料劣化が進行し耐用性に問題があることや、ため池での水難事故の際に表面遮水シートは滑りやすく安全性に課題があった。一方、ベントナイトシートにおいては、シートが堤体盛土中に埋設されることや、天然粘土鉱物であるベントナイトがシートのキズや亀裂に対して自己修復性を有することから、長期にわたり耐用しうることが現時点で確認されている。これらの特性をもつベントナイトシートは、表面遮水工法のゴム系や塩ビ系のシートに置き換わり採用が増加傾向にある。兵庫県内のため池における施工実績では、図 4-1 に示すように、ベントナイト系遮水シートを直線状に設置せずに、現況堤体を階段状に整形してシートを設置する工法を採用している施工現場が多い。

本工法は、廃棄物最終処分場の遮水工として実績のあるジオシンセティッククレイライナーを、ため池堤体の遮水材料として応用するものである。小竹ら（2002）や勝見ら（2006）、佐々木ら（2015）の既往研究において、ジオシンセティッククレイライナーのせん断特性や透水性、土とシートの摩擦特性につい

て知見が得られている．しかし，ベントナイト系の遮水シート工法で改修されたため池堤体の耐震性能については，未解明な部分が多い．そこで，本工法により改修されたため池堤体の耐震性を検証することを目的として，Eディフェンスの震動台で実大規模加振実験を実施した．

本章では，澤田ら（2016）が実施した実大規模振動実験において，階段状のベントナイト系遮水シート工法で改修された堤高 3.0m のため池堤体に関する加震後のクラック調査結果や加速度応答について述べる．

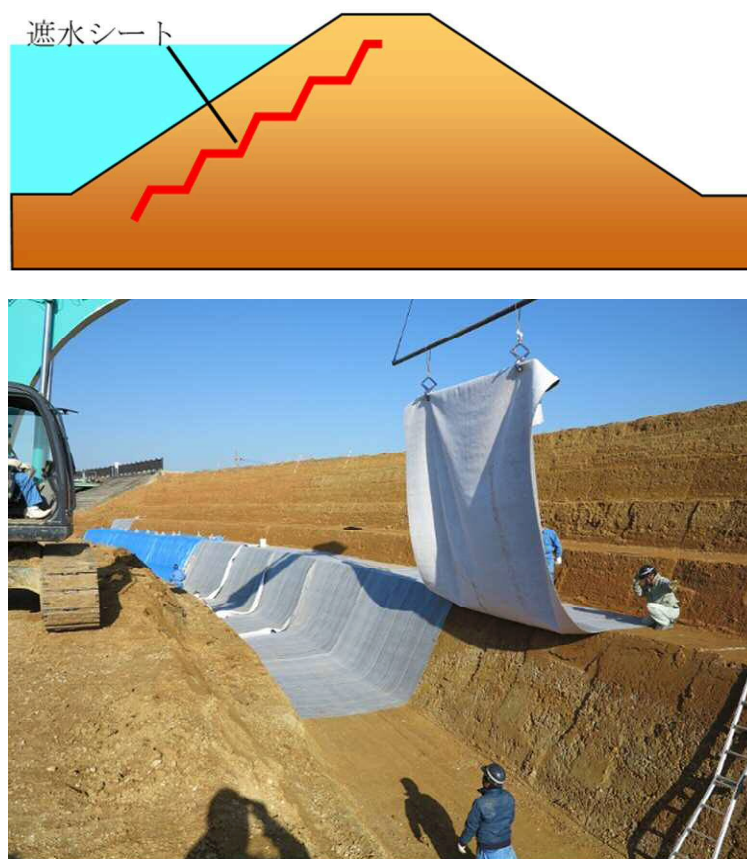


図4-1 遮水シート工法の断面模式図と現場施工状況（兵庫県撮影）

4.2 実験概要

4.2.1 試験堤体

試験体の断面模式図を図4-2に示す. 本実験では, 内寸法が幅12.59m, 高さ3.55m, 奥行き2.50mの鋼製土槽内に, 基盤層0.2m, 堤高3.0m, 天端幅1.5m, 前後の法勾配1:1.5からなるため池堤体を作製した. 堤体の上流側に, 水深2.5mとなるよう貯水した.

実験に使用した遮水シートの断面模式図を図4-3に示す. 粒状のベントナイトを織布と不織布で挟み込み, ニードルパンチで縫い合わせた材料である.

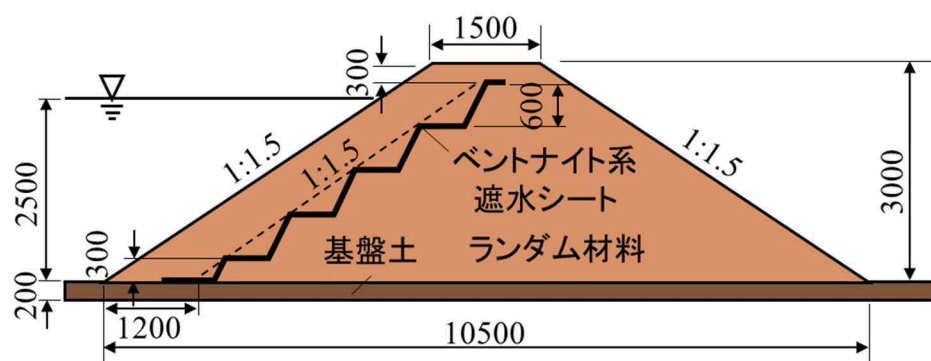


図4-2 試験体断面模式図

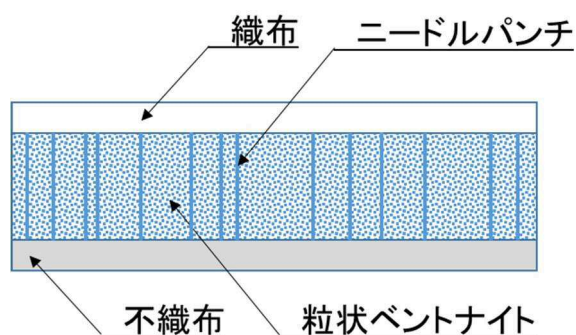
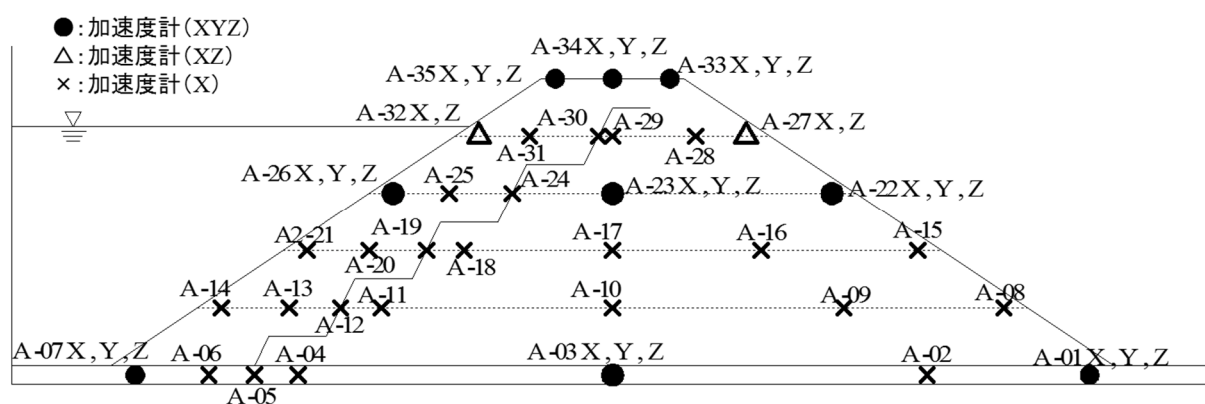


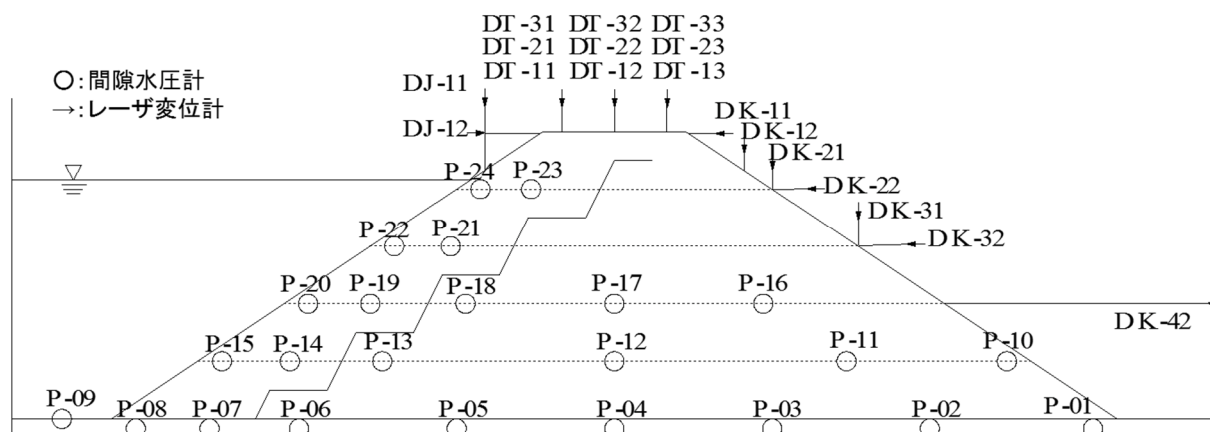
図4-3 ベントナイト系遮水シートの断面模式図

4.2.2 計測

計測機器配置図を図4-4に示す．60cm毎に加速度計（共和電業製ASW-5AM36）および間隙水圧計（共和電業製BPR-A-200KPS）を所定位置に設置した．さらに，天端および法面の変位を計測するため，レーザ変位計（KEYENCE 製LK-500 およびIL-2000）を設置した．加振中は，サンプリング周波数200Hzで計測した．



(a) 加速度計



(b) 間隙水圧計およびレーザ変位計

図 4-4 計測機器の配置図

4.2.3 築堤材料の土質特性

4.2.3.1 基盤土の物理特性および力学特性

本実験では、基盤土として、兵庫県小野市で採取した礫混じりの粘性土を用いた。粒径加積曲線を図4-5、締固め曲線を図4-6に示す。最大粒径19mmに粒度調整した基盤土透水試験の結果、透水係数は $k = 9.42 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ となった。基盤土の三軸試験による強度定数は $c' = 38.4 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi' = 32.2^\circ$ となった。

4.2.3.2 ランダム材料の物理特性および力学特性

本実験では、ランダム材料として、基盤土と砂の混合土を使用した。ランダム材料の透水性を高めるため、基盤土に砂を混合することとした。砂には京都府で採取される掛津珪砂を用いた。また、実験には基盤土と掛津珪砂を体積比で1:1程度となるように混合することとした。最大粒径19mmに粒度調整したランダム材料透水試験の結果、透水係数は $k = 2.39 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ となった。ランダム材料の三軸試験による強度定数は $c' = 6.1 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi' = 35.5^\circ$ となった。ランダム材料の粒径加積曲線を図4-5、締固め曲線を図4-6に示す。

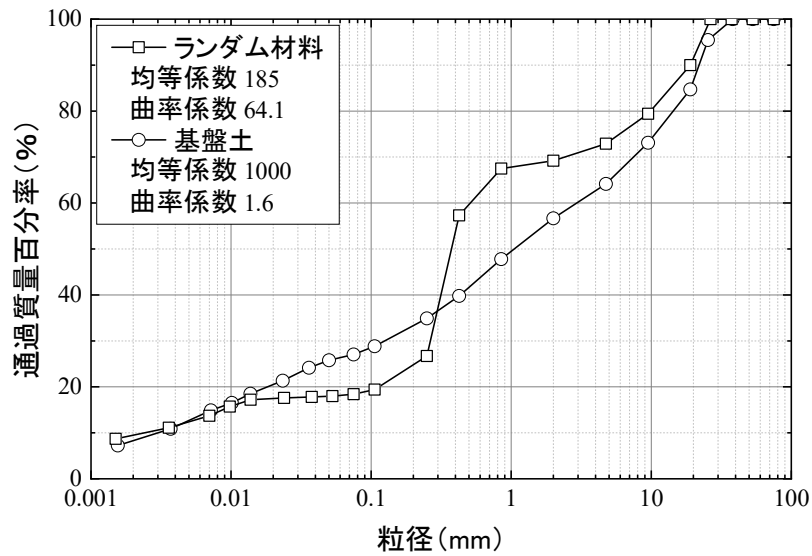


図4-5 堤体材料の粒径加積曲線

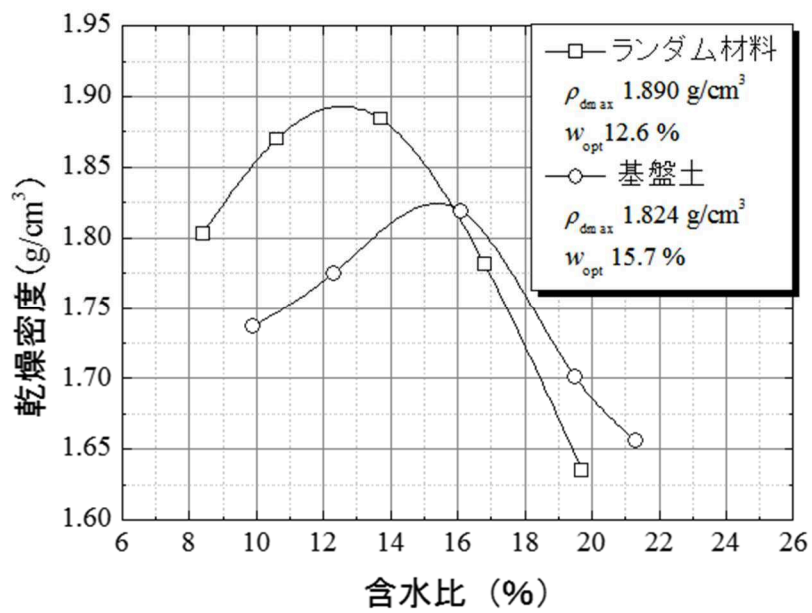


図4-6 堤体材料の締固め曲線（A-b法）

4.2.4 堤体作製

堤体の作製方法について述べる．まず，土槽内に，基盤土を20cm敷均し，締固め度Dc値が90%以上となるよう，ハンドローラーを用いて締め固めた．なお，転圧回数はあらかじめ実施された試験盛土で決定した．堤体盛土は，基盤土同様20cm毎に敷均し，締固めた．水みちを防止するため，堤体側面と土槽の間約10cmには，基盤土を使用した．1層あたり，3地点においてRI計器による土の密度試験（JIS1614）を，1地点において砂置換法による土の密度試験（JIS A 1214）を実施し，締固め度および含水比を測定した．締固め度Dc値の深さ方向の分布を図4-7に，含水比試験結果を図4-8に示す．Dc値は93%以上，含水比は最適含水比より乾燥側での盛土となった．所定の層厚まで堤体盛土完了後，上流側の堤体を段切りして，遮水シートを階段状に設置した．遮水シートの平均勾配は法面勾配と同じ1:1.5とした．また，遮水シート底部は，70cm程度基盤に沿わせて敷設し，基盤との隙間から漏水を防ぐため，粒状ベントナイトを敷き均した．遮水シート設置後，上流側に土を敷均し，プレートにより8回の転圧を行った．

築堤が完了後，上流側に水深が2.5mとなるように注水した．注水時における堤体内の間隙水圧の変化を図4-9(a),(b)に示す．注水完了時点の土槽内の状況を図4-10に示す．P-09は上流側貯水位に相当する静水圧である．注水はおよそ5時間で完了し，P-09の静水圧変化より，注水完了後の水位の変化はほぼ無いと判断できる．P-08は概ねその静水圧付近まで上昇することに対して，P-06は，上昇していない．遮水シートにより，浸透が抑制されていると言える．全ての間隙水圧計の計測値を総合的に判断して，図4-11に示すように浸潤線を求めた．

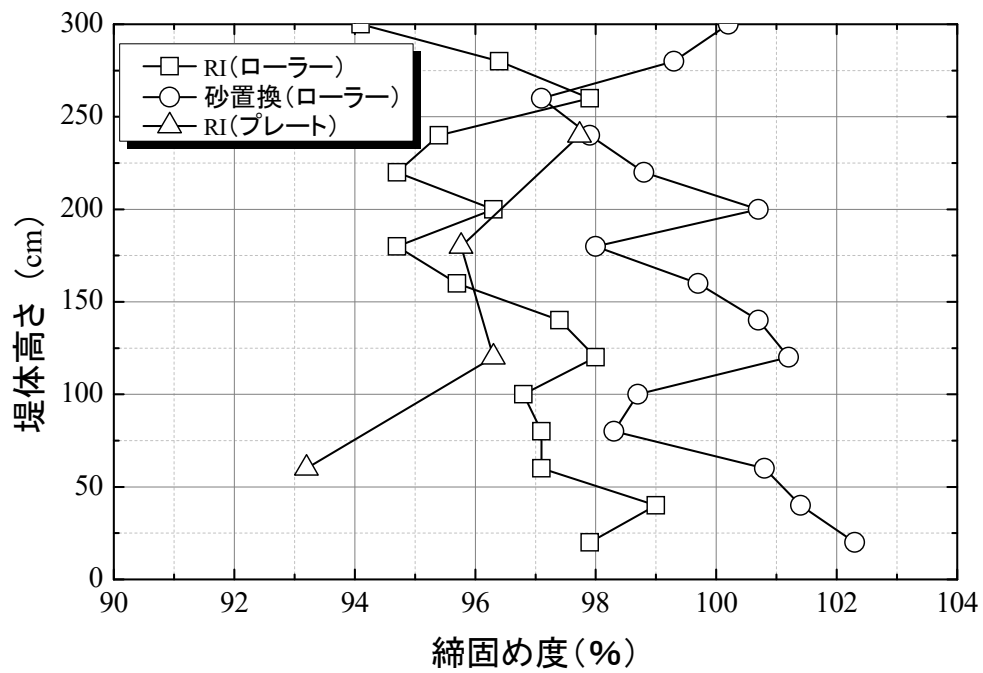


図4-7 堤体の締固め度 (Dc値)

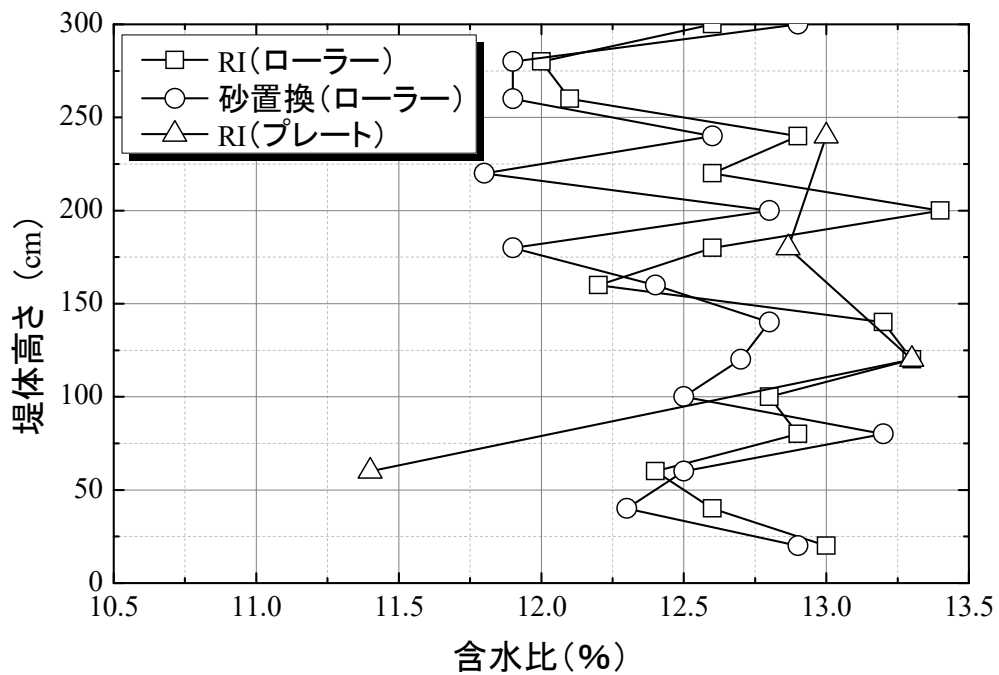


図4-8 堤体の含水比

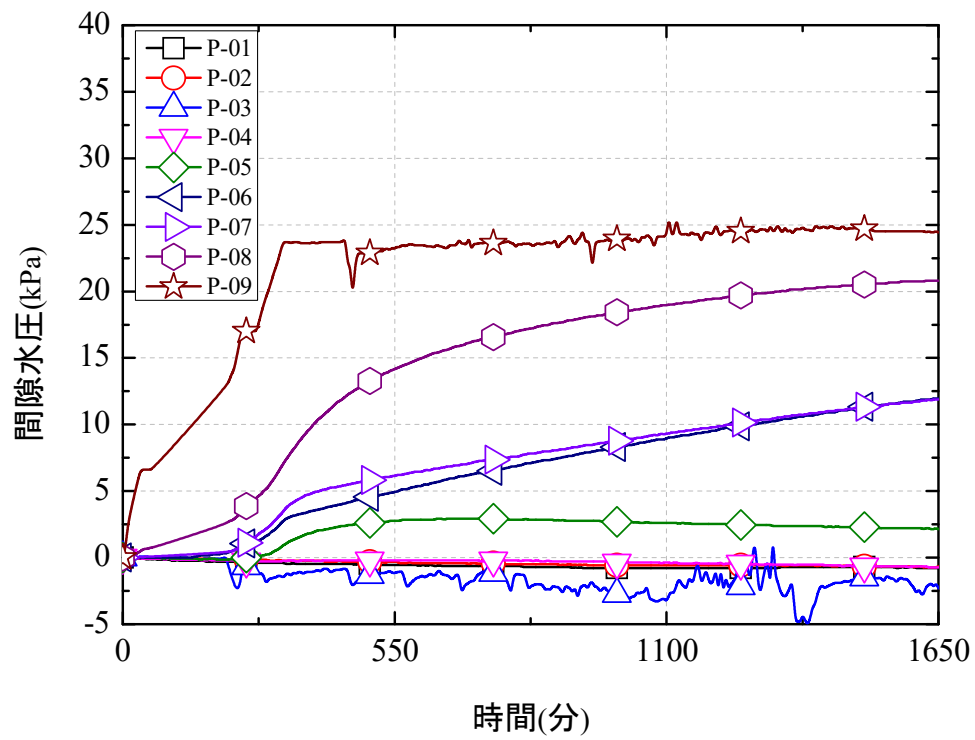


図4-9 (a) 基盤土における間隙水圧の経時変化

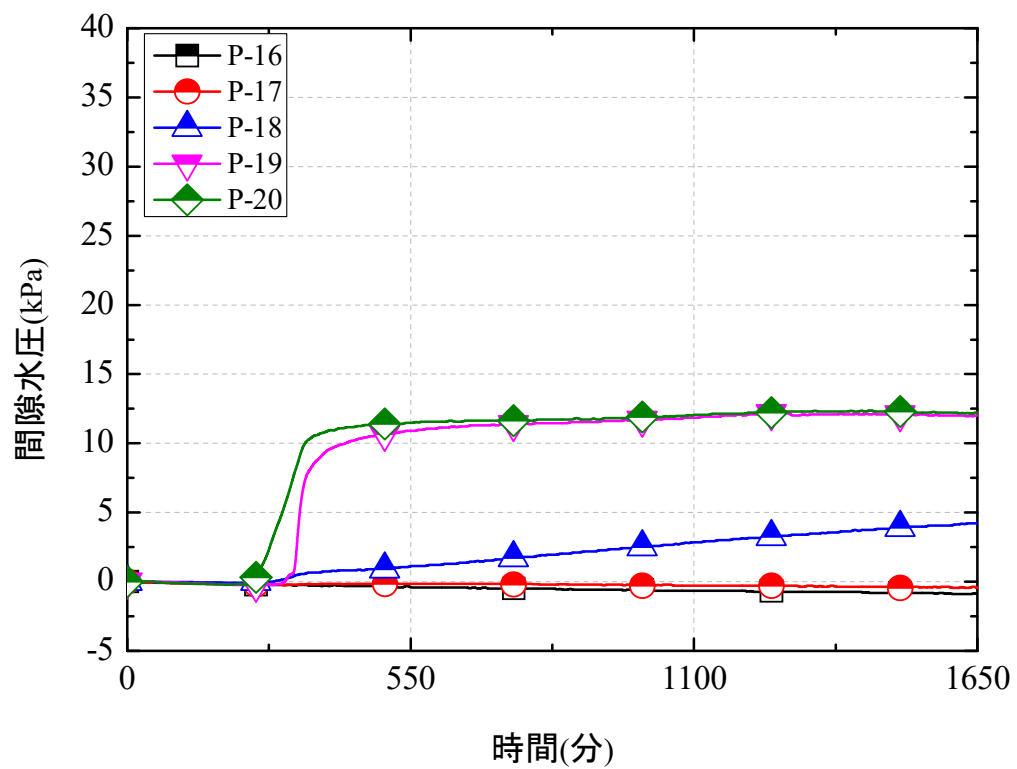


図 4-9 (b) 基盤土+60cm における間隙水圧の経時変化



図 4-10 築堤完了後の注水状況

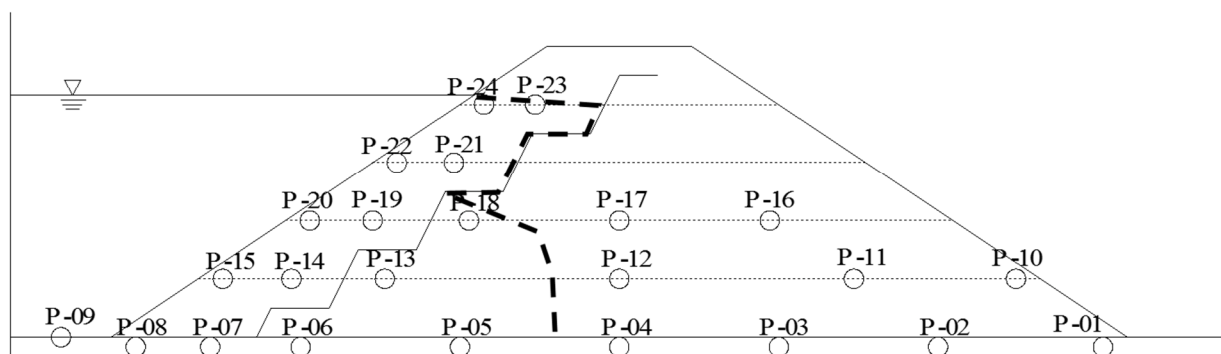


図 4-11 加振前の堤体の想定浸潤線（加振直前の堤体内水位）

4.2.5 加振条件

実験は（国研）防災科学技術研究所所有の実大三次元震動破壊実験施設の震動台で実施した．震動台の最大搭載質量は 1,200t，最大質量搭載時の最大加速度は水平 900cm/s^2 ，鉛直 $1,500\text{cm/s}^2$ ，最大変位は水平 $\pm 100\text{cm}$ ，鉛直 $\pm 50\text{cm}$ であり，実大規模試験体に対する巨大地震時の破壊挙動を再現することができる．

本実験では，シンプルな正弦波を堤軸直角方向にのみ与え，定常部の前後に漸増，漸減部をそれぞれ 2 秒ずつ含む計 12 秒の加振を行った．図 4-12 に震動台の加速度（加振方向）を示す．1 回目は，レベル 1 地震動を想定し，最大 150Gal を目標に加振を行った結果，最大 177Gal の加速度が発生した．2 回目はレベル 2 地震動を想定し，最大 400Gal を目標に加振を行った結果，最大 471Gal の加速度が発生した．

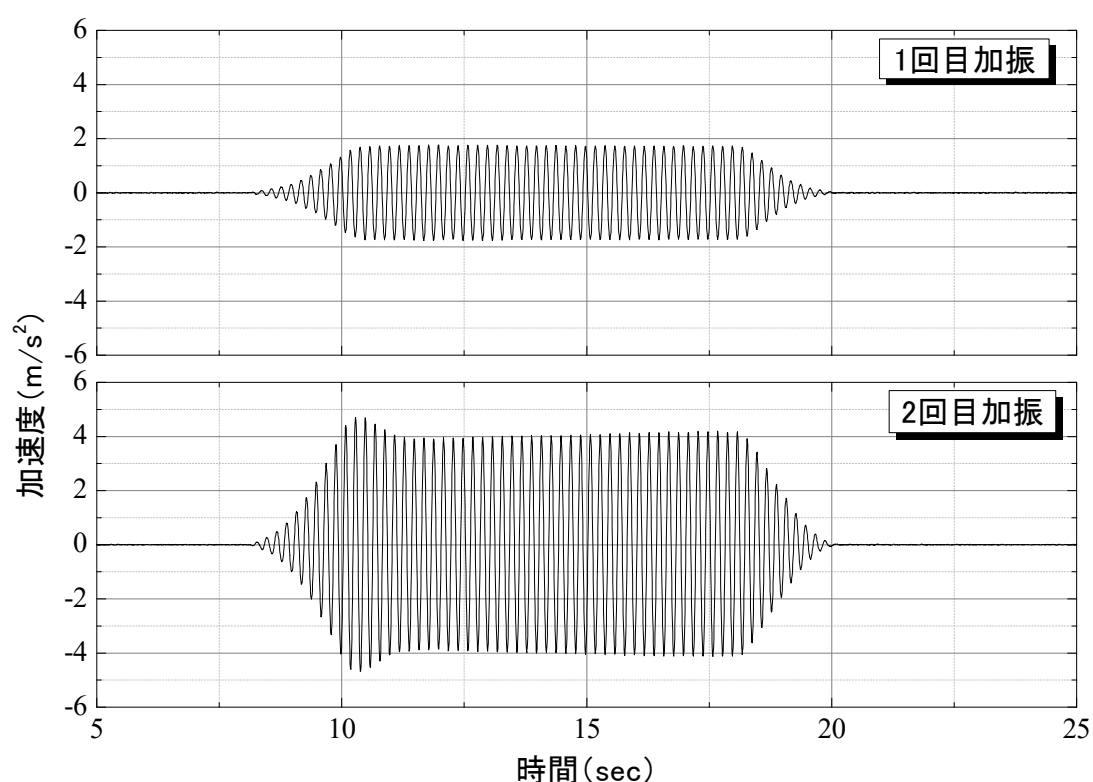


図 4-12 震動台の加速度（加振方向）

4.3 実験結果と考察

4.3.1 レベル1地震動の加振実験結果

レベル1地震動を想定した最大177Galの加振を行った。その結果、漏水は発生しなかった。図4-13(a)に示すとおり、堤体天端センターラインの沈下量は0.5mm程度であった。また、堤体の外観にクラックの発生は認められなかった(図4-14)。加速度計測結果については、震動台の加速度とほとんど位相差が見られなかった。これらの結果から、レベル1の地震動において、堤体はほぼ無被害であったと判断できる。

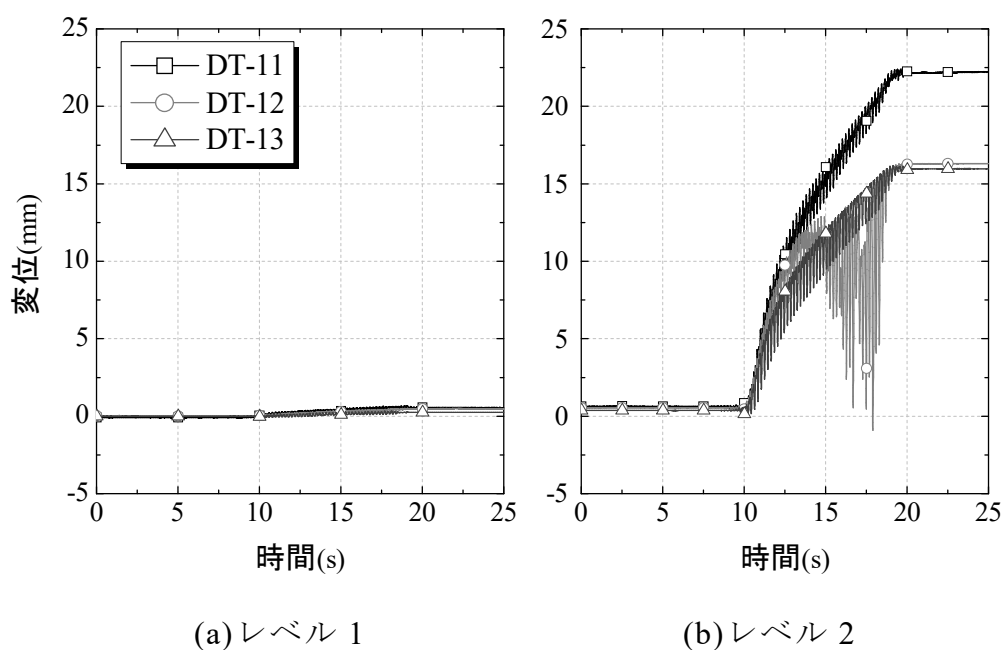


図 4-13 堤体天端センターラインの沈下量

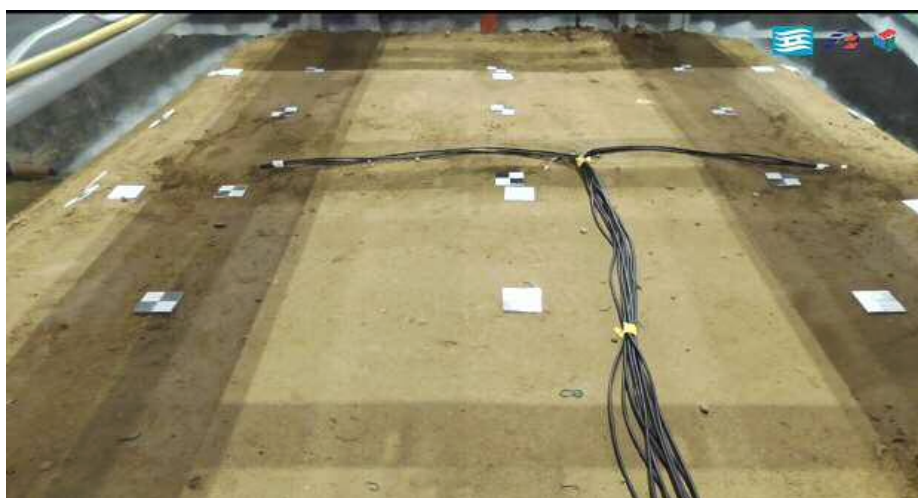


図 4-14 レベル 1 地震動加震後の堤体天端状況

4.3.2 レベル2地震動の加振実験結果

4.3.2.1 堤体外観の損傷

レベル2地震動を想定した最大471Galの加振を与えた結果、図4-15に示すように、堤体天端に幅10mm程度の大きなクラックが堤体軸方向に複数発生したが、漏水については、実験中に確認されなかった。図4-13(b)に示すとおり、堤体天端センターラインの沈下量は最大23mm程度であった。表面の破壊状況を図4-16に示す。堤体天端中央付近のセンターラインの位置と上流側肩付近に比較的大きなクラックが生じていることがわかる。当クラックの深さを調べるために、水で溶いた石灰をクラックに流し込み、慎重に掘削を行った（図4-17）。その結果を図4-18に示す。堤体天端のセンターライン付近に発生したクラックに注ぎ込んだ石灰は、鉛直方向に深さ30cmまで達したのち、遮水シートに沿って付着していることが判明した。すなわち、盛土内に階段状に設置している遮水シートが、実験で発生したクラックの原因であることが明らかになった。また、上流側法肩付近に発生したクラックに注ぎ込んだ石灰は、鉛直方向に45cmまで達しており、それ以上はクラック幅が小さく、石灰が流れ込まなかった。クラック発生状況調査より、二つのクラックは、それぞれ独立して発生していることが確認された。



図4-15 レベル2地震動加震後の堤体天端状況

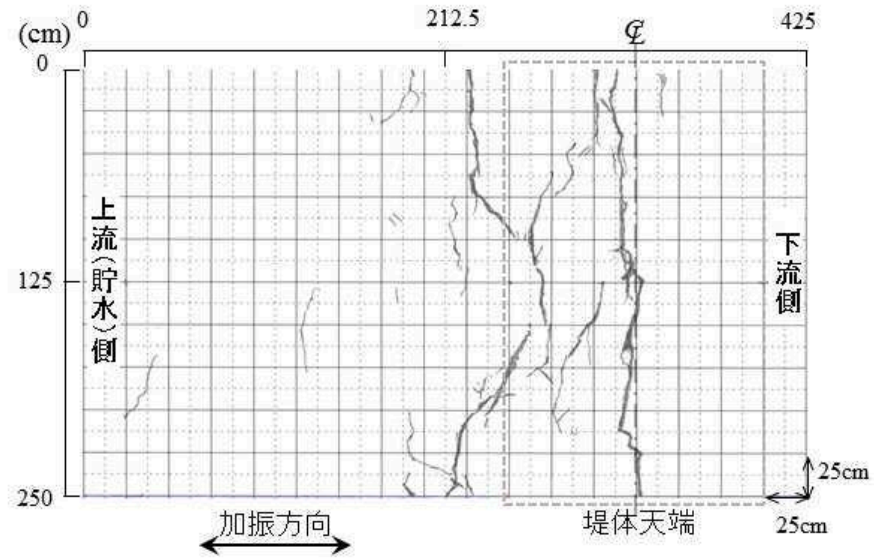


図 4-16 堤体表面破壊状況（平面図）



図 4-17 発生クラックの掘削調査状況

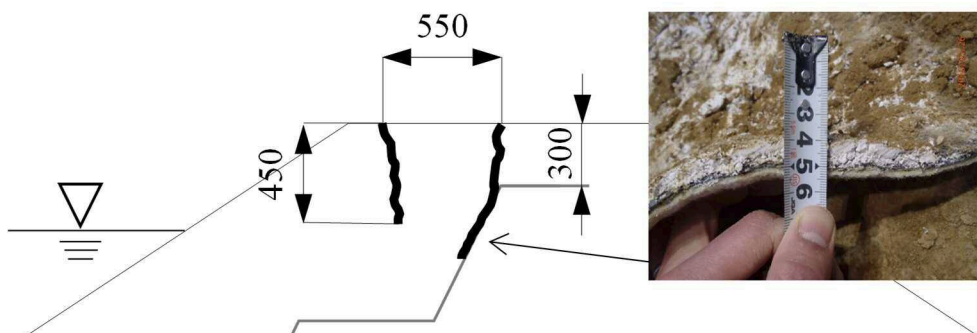


図 4-18 堤体クラック発生状況（断面図）

4.3.2.2 堤体中央部における鉛直方向の応答加速度

図4-19に堤体中央の基盤部（A-03）および基盤+180cm（A-23），基盤+300cmの天端（A-34）における鉛直方向加速度の経時変化を示す．前述したように，今回の実験では水平1方向のみの加振を与えた．A-03では鉛直成分の加速度はほとんど発生していないが，A-23，A-34では鉛直方向の加速度が発生していることがわかる．また，天端のクラックが発生したおよそ13.2秒以降，A-34では，鉛直方向の加速が増大している．これは破壊によって鉛直方向の加速度が局所的に大きくなっていることを示すものと考えられる．

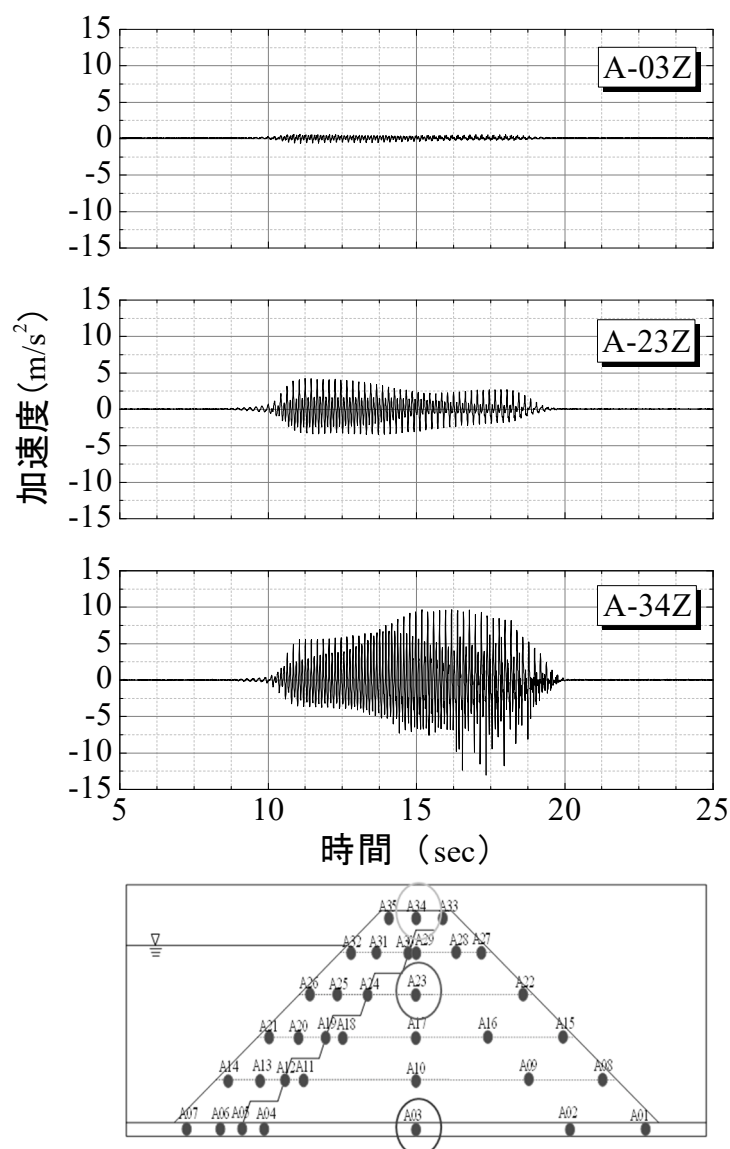


図 4-19 堤軸（A-03，A-23，A-34）の鉛直方向応答加速度

4.3.2.3 遮水シート周辺土の応答加速度

図4-20に遮水シートの上下流側および遮水シート底部の基盤に設置した加速度の応答（11秒～14秒）を示す．基盤部の加速度は，遮水シート上流側と下流側の両者がほぼ一致している．基盤から60cm上がりの加速度は，はじめ両者が一致しているものの11.5秒付近から，遮水シート上流側の加速度応答に遅れが生じ始めていることがわかる．遮水シート下流側の加速度応答（A-11，A-18，A-23，A-29）を比較すると，高さの増加に従い，加速度応答が遅れていることがわかる．これは，一般的な盛土の振動特性と類似している．一方，遮水シート上流部の加速度（A-13，A-20，A-25，A-31）で比較すると，おおむね同位相である．したがって，図4-21に示すように，遮水シートを境に上流側堤体が基盤および下流側堤体と異なる挙動を示していることが示唆される．この要因として，遮水シート上流側の飽和土と下流側の不飽和土の振動特性が異なることや，土と遮水シートの摩擦強度が土のせん断強度よりも低いことに起因するものと考えられる．特に，基盤に沿わせて設置した遮水シート（本実験では70cm）が遮水シート上流部の振動特性におよぼす影響は大きいと考えられる．

図4-22に遮水シートの上下流側および遮水シート底部の基盤に設置した加速度の応答（14秒～17秒）を示す．上述したように，天端にクラックが発生した時間はおよそ13.2秒である．図4-22より，基盤からの高さが120cmと180cmの遮水シート上流側の加速度（A-20，A-25）が正の方向（上流側）に増加していることがわかる．また，遮水シート上流部の加速度応答は，天端にクラックが発生した後も，同位相である．このことは，遮水シート上流部の土塊が上流側に変位することを示唆するものである．クラックが発生した後も，図4-21のとおり，遮水シートを境に異なる振動特性を有することが推察される．

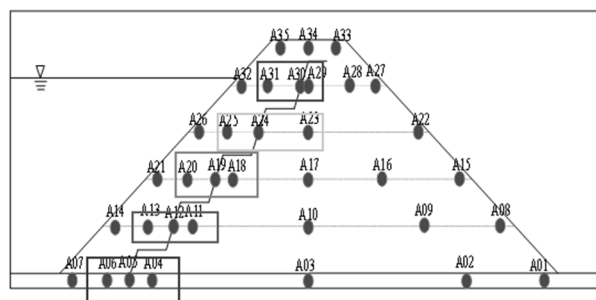
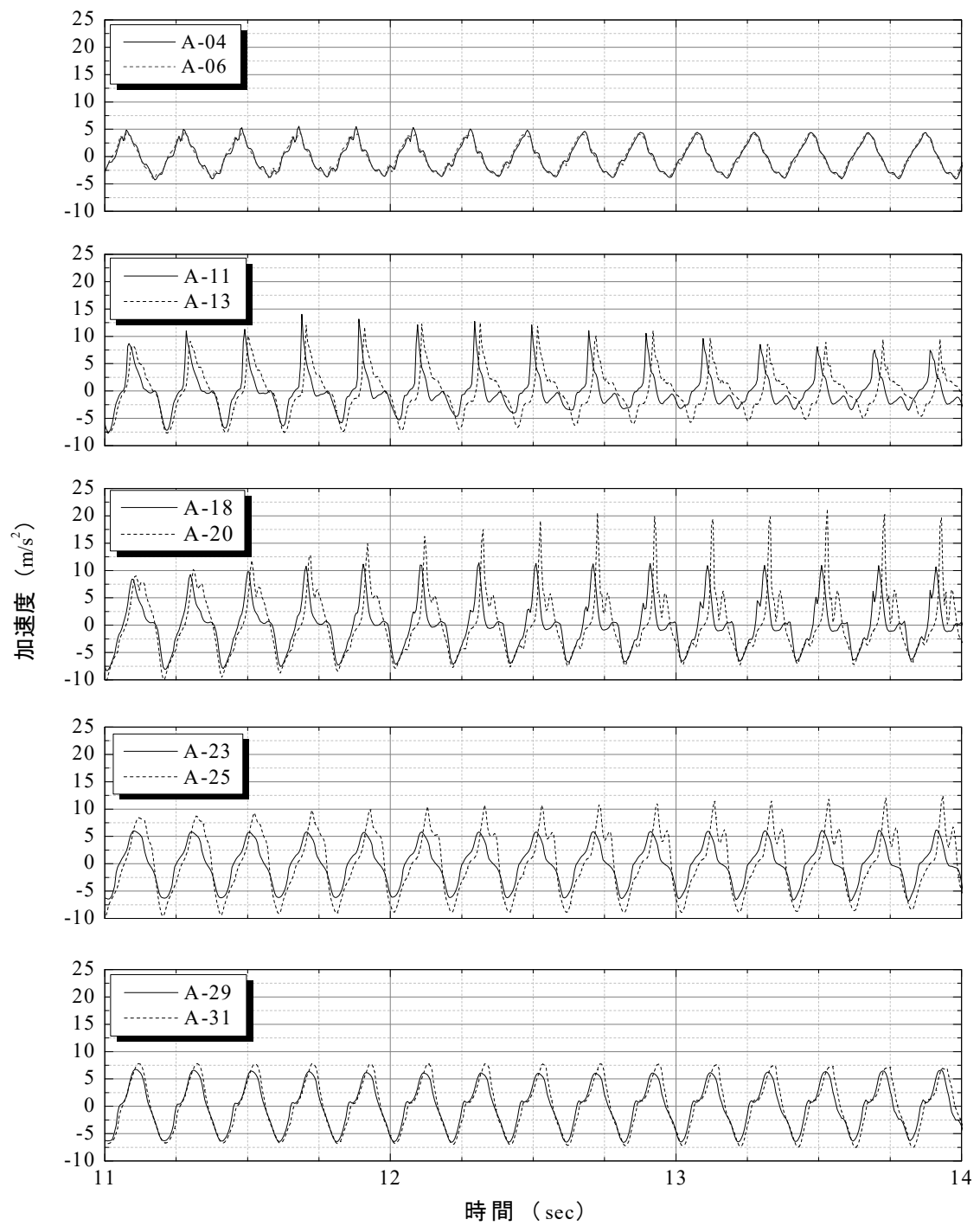


図 4-20 遮水シート周辺土の応答加速度 (11 秒～14 秒)

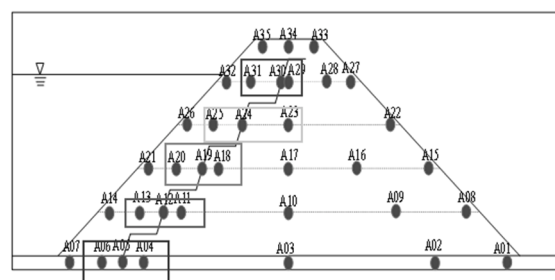
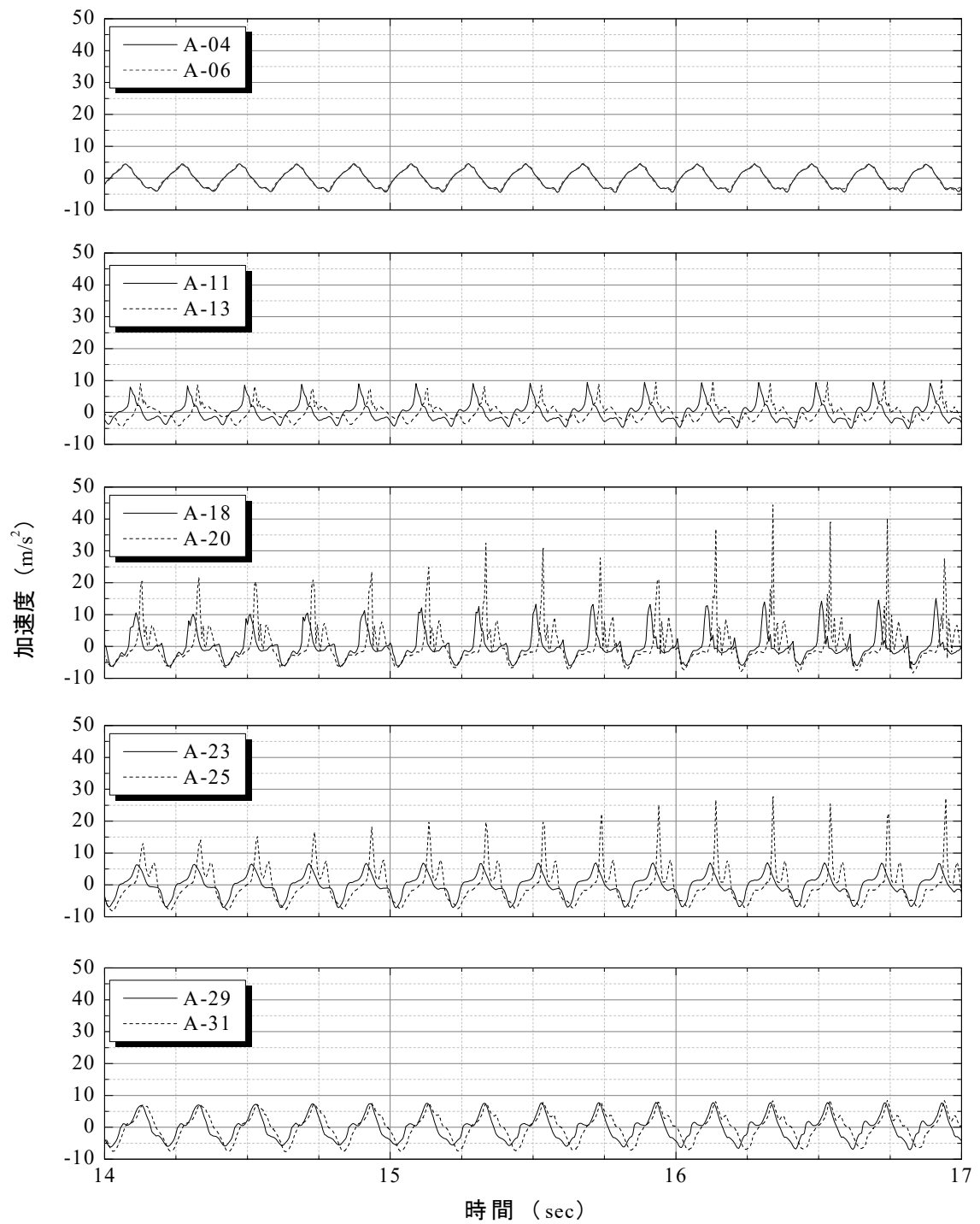


図 4-22 遮水シート周辺土の応答加速度 (14 秒～17 秒)

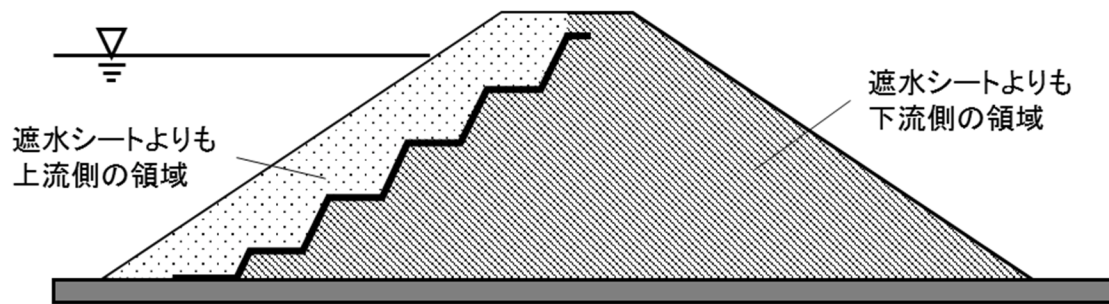


図 4-21 振動特性の異なる領域

4.4 まとめ

ベントナイト系の遮水シート工法により改修されたため池の耐震安全性を検証するため、堤高3mの実大規模ため池堤体を対象に加振実験を実施した。実験で得られた知見をまとめると以下のようになる。

- ① レベル1地震動を想定した最大177Galの加振実験の結果、漏水は生じず、堤体の変形は極めて小さかった。
- ② レベル2地震動を想定した最大471Galの加振実験の結果、決壊や漏水には至らなかったが、天端に比較的大きなクラックが堤体軸方向に発生した。発生クラック深さの調査や加速度応答特性から遮水シートを境界に遮水シートと土の剥離などの破壊現象が発生したことが示唆された。
- ③ クラック発生付近では、鉛直方向成分の加速度が大きくなっていることが確認された。
- ④ 堤体の応答加速度から、遮水シートの上流側と下流側で、位相差が確認されたことから、振動特性が異なることが明らかになった。

当実験により、遮水シートを階段状に設置した場合、設計水平震度を加味する通常の円弧すべり計算では表現できないシート付近を境界とする破壊現象が確認された。遮水シートの影響を考慮した設計手法を構築するために、さらに詳細な変形メカニズムについて、第5章で検討する。

第4章 参考文献

- 勝見武，石森洋行，深川良一：ジオシンセティッククレイライナーの遮水性能に及ぼす諸要因，ジオシンセティックス論文集，21，pp.307-314，2006.
- 小竹望，山崎智弘，北浦良樹，近藤三樹郎：せん断力を受けるジオシンセティックス多層ライナーの荷重伝達特性，ジオシンセティックス論文集，17，pp.79-86，2002.
- 農林水産省農村振興局：土地改良事業設計指針「ため池整備」，農業農村工学会，2015.
- 佐々木貴，川口貴之，川尻俊三，澁谷啓：ベントナイト系遮水シートと土の摩擦特性に関する実験的検討，ジオシンセティックス論文集，30，pp.133-140，2015.
- 澤田豊，中澤博志，片岡沙都紀，小林成太，小田哲也，古林智宏，澁谷啓，山下拓三，谷和夫，梶原浩一，河端俊典：前刃金工法及び遮水シート工法により改修されたため池堤体の実大規模振動実験，ジオシンセティックス論文集，31，pp.167-174，2016.

第5章 ため池ベントナイトシート工法の設計施工標準化

5.1 概説

兵庫県がこれまで実施してきた定期点検や耐震調査により，防災工事等推進計画に基づき 2030 年度までに改修が必要なため池は 314 箇所へのぼり，改修工事が増加する見込みである．また，劣化状況評価及び地震・豪雨耐性評価により，改修が必要な農業用ため池は全国で 4,200 箇所以上にのぼることが明らかとなり，ため池改修工事は増加傾向にある．各都道府県 HP で公開されているため池防災工事等推進計画から集計した改修ため池数を表 5-1 に示す．

ため池改修では，傾斜遮水ゾーン型工法を用いるのが一般的であるが，コア用土（購入土）不足により調達ができず，急遽設計変更を強いられる事例も発生している．今後長期にわたりため池改修工事の継続が見込まれることから，代替工法の確立が喫緊の課題である．

このような中，ため池整備を集中的かつ計画的に進めるために，ベントナイト系遮水シート（以降，ベントナイトシートまたは GCL と記載）を用いた改修工法（以降，ベントナイトシート工法と記載）も選択肢のひとつになる．当工法に用いられるベントナイトシートは，廃棄物最終処分場等において世界的に利用され，日本では 45 年程度，米国では 60 年程度の使用実績がある．

大型ダンプでのコア用土の搬入が困難な現場でもベントナイトシートは，軽量かつ容積が小さく搬入が容易であることから，現場条件に応じて，兵庫県では 2003 年から当工法を採用し，27 のため池で施工実績があるが，統一的な設計・施工は確立されていない．そこで，ため池整備に用いるベントナイトシート工法

表5-1 全国の改修・廃止予定ため池数

	改修工事	廃止工事	合計
兵庫県	314	151	465
全国	4,215	1,564	5,779

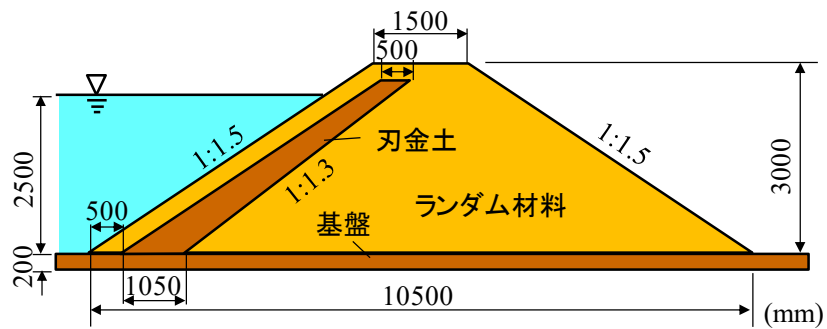
（※HPに非公開県の箇所数除く）

について，安全かつ品質及び耐久性を確保するための設計・施工法を提案する．

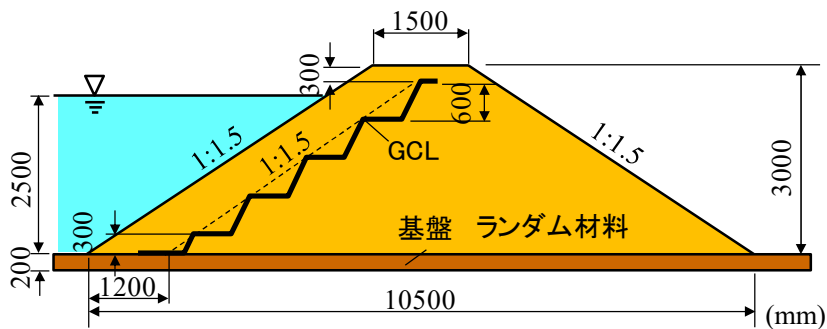
5.2 既往研究のまとめ

5.2.1 実大規模ため池加振実験の概要

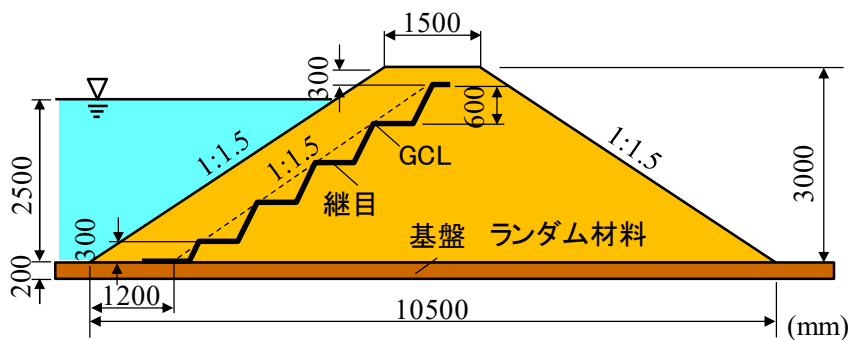
国立研究開発法人防災科学技術研究所と神戸大学，兵庫県は共同で GCL を採用し改修したため池の耐震性能を確認するため，2017 年度に E-ディフェンスにおいて堤高 3m の実大規模ため池堤体を対象に追加の加振実験を実施した．2015 年度に実施したケースも併せて実験模型横断図を図 5-1 に示す．2017 年度は階段状に設置した GCL に継目を設けた模型及び直線状に設置した模型の 2 ケースで追加実験を行った．



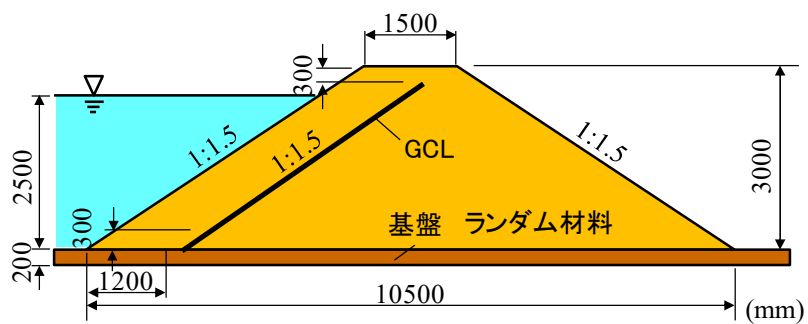
傾斜コア型改修堤体の模型



GCL 改修堤体の模型（階段状配置）（第 4 章で記述）



GCL 改修堤体の模型（階段状配置+継目有）



GCL 改修堤体の模型（直線配置）

図 5-1 実験ケースの横断面図

中澤ら（2020）が報告している実験結果を図 5-2 に示す．レベル 2 地震動を想定した加振実験の結果，GCL 改修堤体のケースはいずれも天端でクラックが堤体軸方向に発生したが，決壊や漏水には至らなかった．実験後の堤体断面の掘削調査と堤体内の加速度計測結果から，GCL は堤体の地震時挙動に影響を与えることがわかった．さらに，堤体の加速度応答の結果から，GCL を境界として上流側堤体と下流側堤体の振動特性が異なることが明らかとなり，直線状よりも階段状に GCL を設置する方が堤体は安定することが確認された．なお，継目の有り無しでは特に優位な差がないことも明らかになった．

また，Sawada et al.（2019a）は実験後のベントナイトシートの損傷を検証し，実験の条件下では，レベル 2 地震動に対してもベントナイトシートの機能が失われていなかったことを報告している．

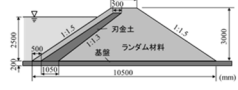
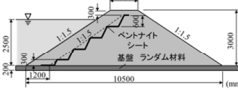
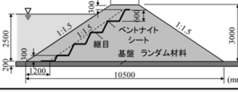
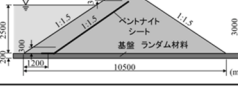
	まとめ	天端の沈下量	天端クラック幅
No.1 前刃金 	レベル 1 想定加振 (168～177gal) →漏水なし ほぼ変形なし (沈下 1 mm 以下) レベル 2 想定加振 (471～531gal) →漏水なし GCLではクラック発生	中央平均 2.15cm	なし
No.2 GCL階段 		中央平均 1.75cm	1cm程度
No.3 GCL階段継目 		中央平均 1.79cm	1cm程度
No.4 GCL直線 		中央平均 4.08cm	4cm程度

図 5-2 実大規模ため池加振実験の結果

実大規模実験より，堤体内の GCL を考慮した安定性検討の必要性が示唆された．図 5-3 に，実験から導き出された堤体安定計算のメカニズムを示す（Sawada et al., 2019b）．GCL が斜面部に設置される上部盛土は主働土塊に，水平部に設置される上部盛土は受働土塊になり，力のつり合いを考慮した安定計算が提案されている．

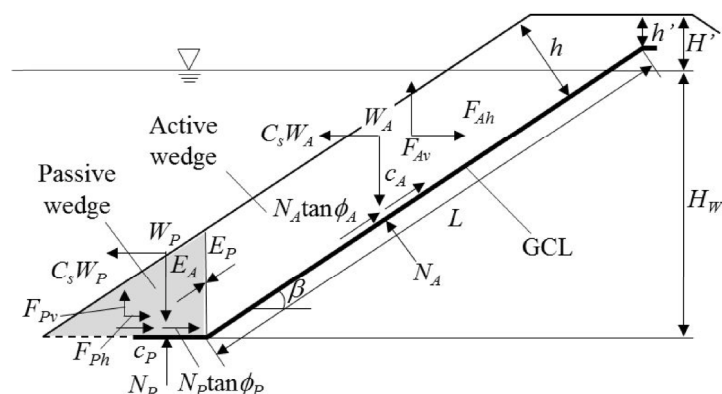


図 5-3 GCL を加味した堤体安定計算の模式図

5.2.2 現場での浸潤線計測

浸潤線の位置は堤体の安定性を検討する上で重要な設計要素である．澤田ら（2019）は GCL により改修された県内のため池を対象にその遮水機能の保持を検証するとともに浸潤線の位置を検討するため，堤体内および池内の水位を約 1 年間現地計測している．また，当現場を対象に，FEM 浸透流解析を実施し，浸潤線の位置推定に関して解析の適用性が検討された．その結果，GCL の遮水機能は保持されていることが明らかとなった．さらに，FEM 解析と現地計測結果は比較的良好な一致を示した．GCL 無しの解析結果との比較からは，GCL による浸潤線低下ならびに漏水量減少が示された．

5.2.3 浸潤線の設定方法

現行ため池指針及び県基準では傾斜コア型の浸潤線計算式は以下のとおり福田の式とカサグランデの方法によるものとされており，シート状の構造物に適用不可能である．

$$Y = \sqrt{2Y_0 \cdot X + Y_0^2}, \quad Y_0 = \frac{q}{k_2} \quad (5.1)$$

$$q = \frac{(H_1 - 0.5h)}{\frac{b + \text{CM}}{2}} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{H_1}{\sin \theta_1} + \frac{h}{\sin \theta_2} \right) \cdot k \quad (5.2)$$

ここで、 H_1 は上流水位、 k は透水係数、その他はコアの形状により決定されるパラメータである。そこで、澤田ら（2021）は、上記 FEM 浸透流解析とカサグランデ法浸潤線位置の比較検討をした結果、GCL に外接する平行四辺形を設定し仮想的に傾斜コアと想定することで、現行の浸潤線算定式を適用可能であることが明らかにした。図 5-4 に仮想傾斜コアの模式図を示す。

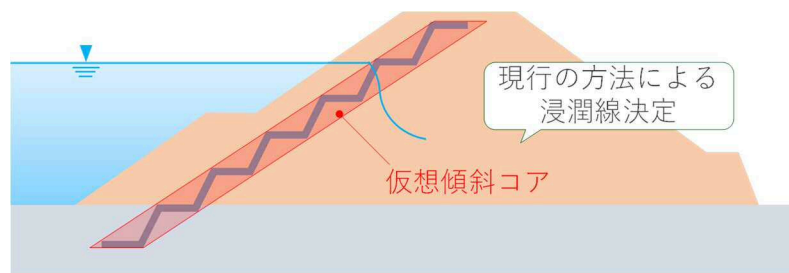


図 5-4 仮想傾斜コアの模式図

また、仮想傾斜コア内について、図 5-5 のように等価透水係数を設定し、現行のため池設計指針および基準に沿って、浸透流計算が可能となる。等価透水係数は以下の式で算出される。

$$k_{vc} = \frac{D_c}{\frac{D_b}{k_b} + \frac{(D_c - D_b)}{k_c}} \quad (5.3)$$

ここで、 k_{vc} は仮想傾斜コアの透水係数、 k_b は GCL の透水係数、 k_c はランダム材の透水係数である。

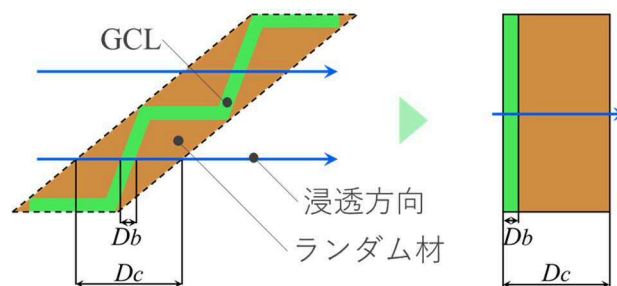


図 5-5 等価透水係数の模式図

以上の既往研究結果をまとめると、次のとおりとなる。

ベントナイトシート工法によるため池堤体の耐震性について、実大三次元震動破壊実験施設（Eーディフェンス）を利用した実証実験を実施してきた。その結果、レベル 1，レベル 2 地震動に対する、堤高 3m のモデルの一定の安全性と地震時挙動が明らかとなった。

堤体の安定計算に関わる内容として、Eーディフェンスでの実験結果に基づき、図 5-6 に示すようなシート上流側覆土の潜在すべり面が提案されるとともに計算結果の妥当性が確認された。また、堤高 10m の堤体を模擬した遠心力模型実験から、図 5-6 の潜在すべり面が視覚的に捉えられるとともに、計算手法の妥当性が検証された。一方、堤体下流側の安定計算に不可欠な浸潤線位置について、実ため池堤体での地下水位の観測や浸透流解析が行われるとともに、シートの設置箇所を仮想の傾斜コアと見立てることで、従来のため池設計に基づく浸潤線の簡易計算方法が提案されている。

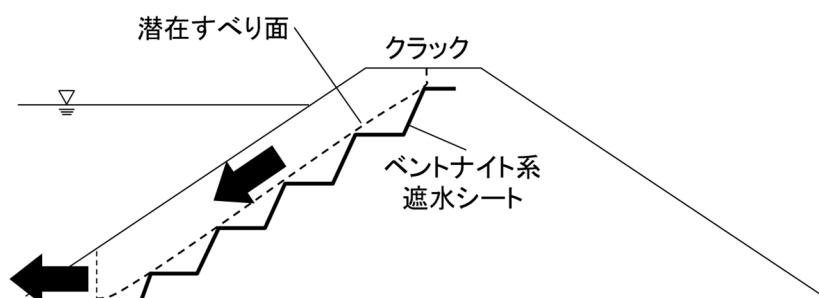


図 5-6 既往実験によるシート上流側覆土の潜在すべり面

5.3 ため池堤体上流側覆土の安定計算に関する検討

5.3.1 ため池上流側覆土の安定計算における課題

既往の研究において、設計に関わる知見が多く得られているものの、ベントナイトシート工法によるため池堤体の設計手法が確立していない現状にある。堤体下流側については、上記の浸潤線設定ならびに従来の円形すべり面スライス法の組み合わせで安定性を検討できるものと考えられる。一方、堤体上流側の検討では、上で述べたとおり、覆土に潜在すべり面が生じることから、覆土部の安定性を別途検討する必要がある。覆土の安定計算の確立には以下の 3 つの課題がある。

- 1) 潜在すべり面が法面に平行でない場合の計算式が示されていないこと、
- 2) 実在するため池を対象とした検証がなされていないこと、
- 3) シート上流側での円形すべりで計算される安全率との関係性が不明であること。

1) について、既往研究では、シートが堤体法面に平行に敷設されており、限定された条件での式が示されているが、より一般的に示す必要がある。2) については、既往研究では、シンプルな堤体形状および一定の水位での検討にとどまっており、実設計で適用する水位条件および小段など複雑な堤体形状について検討しておく必要がある。さらに 3) については、シート上流側での円形すべり面スライス法で計算される安全率が直線状の潜在すべり面よりも小さくなる可能性がある場合、両者の計算を行い小さい方の安全率を採用する必要がある。

そこで、ベントナイトシート工法によるため池の設計手法の確立を目的として、本論文では、兵庫県に実在するため池を対象に、シート上流側覆土の安定計算手法について検討を行った。

5.3.2 シート上流側覆土の力学的安定性の検討

5.3.2.1 シート上流側覆土のシート面に沿ったすべり安定性について

ベントナイトシート上流側の覆土の安定性については、既往研究から、図 5-6 に示すようなシート上流側の覆土部での直線状の潜在すべり面が提案されてい

る．法面と潜在すべり面が平行な限定された条件についての式が示され，実用的ではない．そこで本論文では，より一般的な潜在すべり面に対する計算式を示すこととする．

図5-7の模式図に示すように，天端にクラックが生じ，破線で示すようなシートの覆土部分で潜在的なすべりを想定する．土塊は法先部分の受働土塊と，それより上部にある主働土塊に分けられる．これらの滑ろうとする力と内部摩擦角による抵抗，粘着力による抵抗を考慮し，安全率を定める．なお，段切り上にシートを敷設する場合は，土の内部に潜在すべり面があるため，土の有効応力表示による内部摩擦角 ϕ' をもとに摩擦係数を $\tan \phi'$ で定めるが，シートを直線状に敷設する場合は，佐々木ら（2015）が実施した土と膨潤したシートの境界面でのせん断試験をもとに摩擦係数を求める必要がある．

図 5-7 において，

$$W_A = \gamma_t \times A_{A1} + \gamma' \times A_{A2} \quad (5.4)$$

$$W_P = \gamma' \times A_{AP} \quad (5.5)$$

ここで，

W_A , W_P : 主働土塊，受働土塊の総重量 (kN/m)

A_{A1} , A_{A2} : 主働土塊の水位より上，下の面積 (m²)

A_P : 受働土塊の面積 (m²)

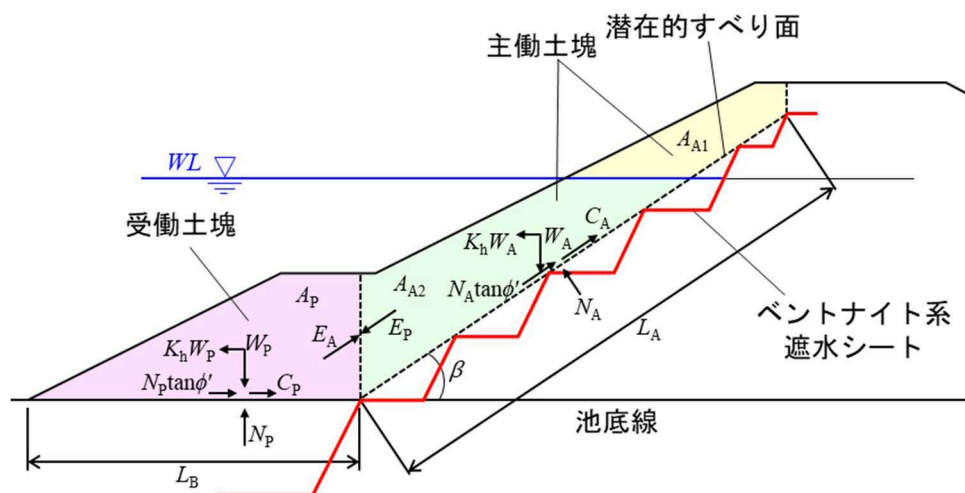


図5-7 シート上流側の覆土の直線状潜在すべり面

γ_t : 土の湿潤単位体積重量 (kN/m³)

γ' : 土の水中単位体積重量 (kN/m³)

N_A, N_P : 主働土塊, 受働土塊での破壊面に対する垂直抗力 (kN/m)

K_h : 設計水平震度

L_A : ベントナイト系遮水シート覆土における潜在的な破壊面の長さ (m)

L_B : 受働土塊の潜在すべり面での粘着力が働く延長 (m)

β : 法面の角度 (°)

ϕ' : 土の有効応力表示による内部摩擦角 (°)

C_A, C_P : 主働土塊, 受働土塊の潜在すべり面での見かけの粘着力の総和 (kN/m)

c' : 潜在すべり面での土の有効応力表示による見かけの粘着力 (kN/m²)

E_A : 受働土塊から主働土塊に作用する内力 (kN/m)

E_P : 主働土塊から受働土塊に作用する内力 (kN/m)

F_S : 潜在すべり面での覆土のすべりに対する安全率

主働土塊に関して

$$N_A = W_A \cos \beta - K_h W_A \sin \beta \quad (5.6)$$

$$C_A = c' L_A \quad (5.7)$$

受働土塊に関して

$$N_P = W_P + E_P \sin \beta \quad (5.8)$$

$$C_P = c' L_B \quad (5.9)$$

主働土塊に関する水平方向の力のつりあい式より,

$$\begin{aligned} E_A \cos \beta + \frac{(N_A \tan \phi' + C_A) \cos \beta}{F_S} &= K_h W_A + N_A \sin \beta \\ \rightarrow E_A &= \frac{F_S (K_h W_A + N_A \sin \beta) - (N_A \tan \phi' + C_A) \cos \beta}{F_S \cos \beta} \end{aligned} \quad (5.10)$$

受働土塊に関する水平方向の力のつりあい式より,

$$\begin{aligned} E_P \cos \beta + K_h W_P &= \frac{C_P + N_P \tan \phi'}{F_S} \\ \rightarrow E_P &= \frac{C_P + W_P \tan \phi' - F_S K_h W_P}{F_S \cos \beta - \sin \beta \tan \phi'} \end{aligned} \quad (5.11)$$

$E_A = E_P$ より, F_S を変数とした恒等式に整理する.

$$a(F_S)^2 + b(F_S) + c = 0 \quad (5.12)$$

ここで,

$$a = (K_h W_A + N_A \sin \beta + K_h W_p) \cos \beta \quad (5.13)$$

$$b = -(K_h W_A + N_A \sin \beta) \sin \beta \tan \phi' \quad (5.14)$$

$$-(N_A \tan \phi' + C_A) \cos^2 \beta$$

$$-(C_p + W_p \tan \phi') \cos \beta$$

$$c = (N_A \tan \phi' + C_A) \cos \beta \sin \beta \tan \phi' \quad (5.15)$$

以上の式を解き, F_S は次のようになる. この F_S が 1.2 以上となることを確認する.

$$F_S = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.16)$$

5.3.2.2 シート上流側の覆土の円形すべり面スライス法による安定性

シート上流側の覆土が円弧状にすべる場合については, 兵庫県 (2020) の「兵庫県土地改良技術基準」(以下「兵庫県基準」という) の円形すべり面スライス法による安定計算を用いる. この方法では, 全応力表示による強度定数を用いる方法や過剰間隙水圧を考慮することができ, 前述のシート面に沿った潜在すべりを仮定する方法よりも実績がある.

この方法は円の中心に関する各スライスのすべり面に作用する滑動モーメントと抵抗モーメントとの総和の比をもって安全率を定義したもので次式によって求める.

全応力表示による強度定数 c , ϕ を用いる場合

$$F_S = \frac{\Sigma \{c \cdot l + (N - N_e) \tan \phi\}}{\Sigma (T + T_e)} \quad (5.17)$$

有効応力表示による強度定数 c' , ϕ' を用いる場合

$$F_s = \frac{\Sigma \{c' \cdot l + (N - U - N_e) \tan \phi'\}}{\Sigma (T + T_e)} \quad (5.18)$$

ここで、

c : 各スライスのすべり面の材料の全応力表示による粘着力 (kN/m^2)

ϕ : 各スライスのすべり面の材料の全応力表示による内部摩擦角 ($^\circ$)

l : スライスのすべり面の長さ $= B / \cos \alpha$

B : 各スライスの幅

N : 各スライスのすべり面上に働く荷重合力の垂直分力

T : 各スライスのすべり面上に働く荷重合力の接線分力

N_e : 各スライスのすべり面上に働く地震荷重の垂直分力

T_e : 各スライスのすべり面上に働く地震荷重の接線分力

U : 各スライスのすべり面上に働く間隙圧 (浸透水の間隙圧及び築堤時に生じた過剰間隙圧の合力)

なお、間隙水圧 U には堤体の浸透水による浸透圧を含めて考えない。

以下の説明は有効応力表示の式を用いることを前提としている。なお、上式中の N , $N - U$, N_e , T_e 等は各スライスの重量から下記のようにして求める。

a) 築堤直後で貯水が行われていないとき (図 5-8)

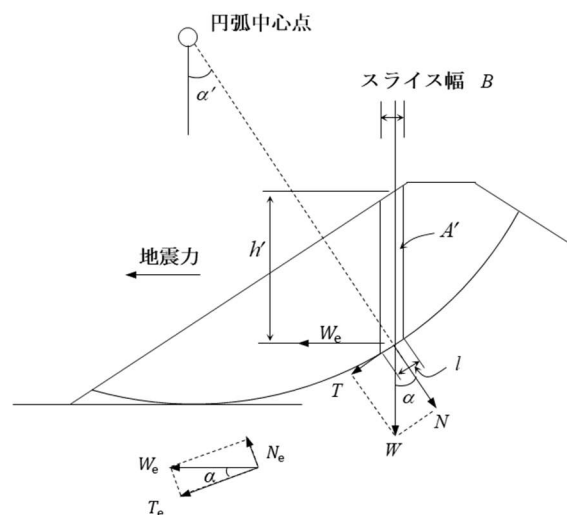


図 5-8 円形すべり面上のスライスに作用する力 (貯水なし)

スライスの全重量を W とすれば

$$W = \gamma_t \cdot A \quad (5.19)$$

A : スライスの面積 $= h' \cdot B$

$$W_e = K_h \cdot W \quad (5.20)$$

$$U = \Delta u \cdot l = \Delta u \cdot \frac{B}{\cos \alpha} \quad (5.21)$$

Δu は築堤時に生じた過剰間隙水圧ですべり面の単位面積当りに作用する圧力．
ため池においては，通常施工中に発生した間隙圧のほとんどが完成後において
消散しているため，通常 $\Delta u = 0$ とする．堤体断面または築堤の状況により過剰間
隙水圧の発生が見込まれる場合は，次の式で考慮する．

過剰間隙圧を土柱重量の $\delta\%$ ととる場合は，

$$N - U = W \left(1 - \frac{\delta}{100} \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha} \right) \cdot \cos \alpha \quad (5.22)$$

b) 経年後の貯水時で定常浸透状態のとき (図 5-9)

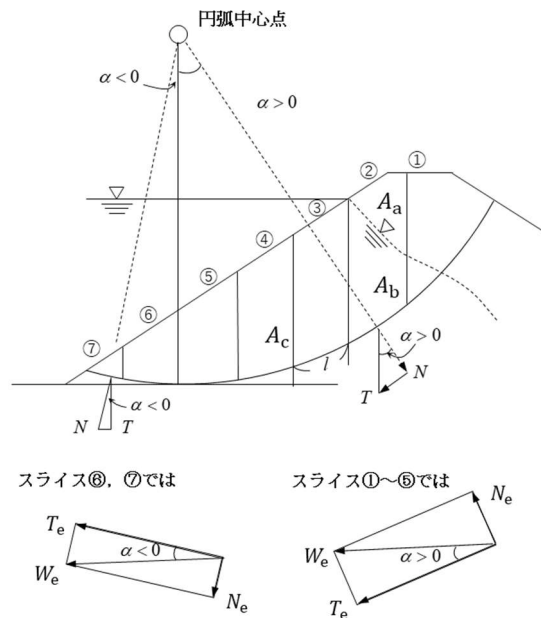


図 5-9 円形すべり面上のスライスに作用する力 (経年後，貯水時)

(i)浸潤面のあるスライス（図 5-9 のスライス①，②）

$$W = W_a + W_b \quad (5.23)$$

$$W_a = \gamma_t \cdot A_a \quad (5.24)$$

$$W_b = \gamma' \cdot A_b \quad (5.25)$$

$$N - U = W \times \cos \alpha = (W_a + W_b) \cos \alpha \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} W_c &= K_h (\gamma_t \cdot A_a + \gamma_{sat} \cdot A_b) \\ &= K_h (W + \gamma_w \cdot A_b) \end{aligned} \quad (5.27)$$

γ_{sat} ：土の飽和単位体積重量（ kN/m^3 ）

A_a ：スライスの浸潤面上の面積（ m^2 ）

A_b ：スライスの浸潤面下の面積（飽和領域ただしこの部分では水中重量）（ m^2 ）

γ_w ：水の単位体積重量（ kN/m^3 ）

(ii)水面下にあるスライス（図 5-9 でスライス③～⑦）

$$W = \gamma' \cdot A_c \quad (5.28)$$

$$N - U = W \cos \alpha = (\gamma' \cdot A_c) \cdot \cos \alpha \quad (5.29)$$

図 5-9 の例ではスライス③④⑤については $\alpha > 0$ ，スライス⑥⑦の範囲では α が負になる．

$$W_c = K_h \cdot \gamma_{sat} \cdot A_c = K_h (W + \gamma_w A_c) \quad (5.30)$$

A_c ：水面下の土の面積

ベントナイト系遮水シートの上流側覆土のすべり安全率を確認するため，シートの段切り形状をモデル化し，段切り形状部及びそこからつながる池底をネバーカットライン（不可切断線：円弧が通らないような条件とした線）として設定（図5-10）し，シートを通るすべりを無視して，シート上流側覆土のみの安全率を計算する．その安全率が1.2を上回る覆土厚を確保する．計算ケースは「兵庫県基準」に準拠し，設計洪水位時（ $K_h=0$ ），常時満水位時（ $K_h=0.15$ ），完成直後（ $K_h=0.075$ ），最大放流時（緊急放流時）（ $K_h=0.075$ ）とする．

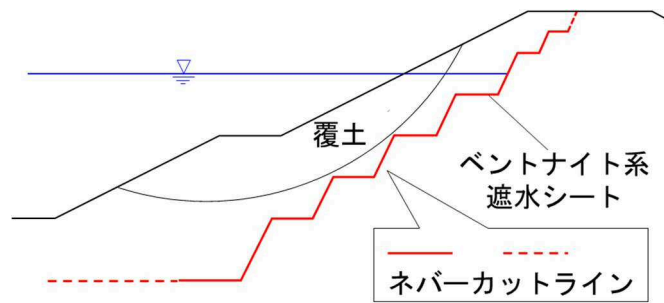


図5-10 円弧すべりのネバーカットライン

5.3.3 実在するため池を対象とした安定計算

5.3.3.1 シート上流側覆土の安定計算の条件

兵庫県に実在するため池で、5.3.2で提案した直線すべりと円形すべりの安定計算を適応した。ベントナイトシート工法のため池堤体断面については、図5-11のとおり「兵庫県技術基準」を基本とし、傾斜遮水ゾーン型工法の断面系に準じるものとする。シートの設置については、兵庫県内のベントナイトシート工法のため池堤体改修実績を基に決定した。ため池の諸元を表5-2に示す。

ベントナイト系遮水シートはシート上流側の覆土部で直線状にすべるものと考え、5.3.2.1の計算式で安全率を計算する。表5-3に計算に使用したパラメータを示す。

円形すべり面スライス法による安定計算は、「兵庫県基準」に準拠し、安全性

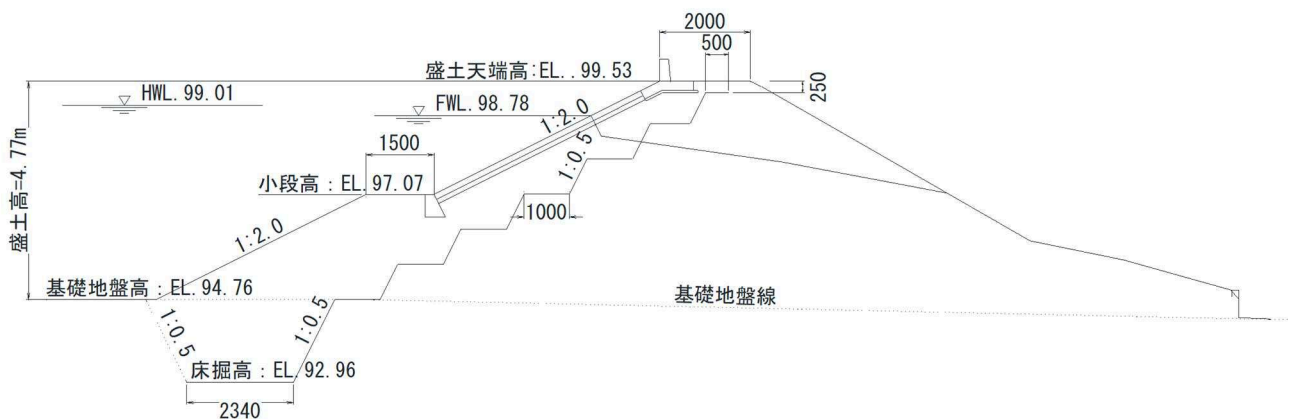


図 5-11 安定計算を適応するベントナイトシート工法の堤体断面

を確認する．また，段切り形状部及びそこからつながる池底をネバーカットラインとして設定し，シートを通るすべりを無視することでシート上流側覆土のみの安全率を計算する．上流側の計算においては，浸潤線より下は γ' で計算する．貯水池内の水と堤体内の水がモーメントについてバランスがとれているものとして，静水圧は考慮しない．安定計算は電算ソフト（「COSTANA ver.20.1」（富士通FIP））で行った．

表5-2 ため池諸元

項目：設計値
常時満水位(FWL)：98.78m
設計洪水位(HWL)：99.01m
基礎地盤標高：94.76m
計画土砂吐敷高：94.76m
堤高(H)：5.25m
堤頂標高：100.01m
盛土高標高：99.53m
盛土高：4.77m
堤頂幅(B)：2.00m
堤体上流側法勾配：1:2.0
堤体下流側法勾配：1:2.0
小段幅：1.5m
小段標高：97.07m
堤頂からシート天端までの距離：0.25m
シート敷設勾配：1:1.8
段切り勾配：1:0.5（切土時）
土被り：0.94m
シート天端水平覆土厚：1.51m
基礎地盤下のシート勾配：1:0.5
シート水平延長：2.34m
シート底高：EL.92.96m

表5-3 直線すべり安定計算におけるパラメータ

計算条件		設計 洪水位	常時 満水位	完成 直後	最大 放流時
主働土塊の水位上の面積	$A_{A1} \text{ (m}^2\text{)}$	0.73	1.10	8.81	1.10
主働土塊の水位下の面積	$A_{A2} \text{ (m}^2\text{)}$	8.08	7.71	0.00	5.37
最大放流時の飽和面積	$A_{A3} \text{ (m}^2\text{)}$	0.00	0.00	0.00	3.83
受働土塊面積	$A_P \text{ (m}^2\text{)}$	3.83	3.83	3.83	3.83
湿潤重量	$\gamma_t \text{ (kN/m}^3\text{)}$	16.7	16.7	16.7	16.7
飽和重量	$\gamma_{sat} \text{ (kN/m}^3\text{)}$	17.7	17.7	17.7	17.7
水中重量	$\gamma' \text{ (kN/m}^3\text{)}$	7.9	7.9	7.9	7.9
水平震度	K_h	0.00	0.15	0.075	0.075
	$L_A \text{ (m)}$	8.79	8.79	8.79	8.79
	$L_B \text{ (m)}$	3.92	3.92	3.92	3.92
	$\beta \text{ (}^\circ\text{)}$	29.1	29.1	29.1	29.1
内部摩擦角	$\phi' \text{ (}^\circ\text{)}$	28.2	28.2	28.2	28.2
粘着力	$c' \text{ (kN/m)}$	9.3	9.3	9.3	9.3
主働土塊の総重量	$W_A \text{ (kN/m)}$	76.02	79.28	147.13	102.21
受働土塊の総重量	$W_P \text{ (kN/m)}$	30.26	30.26	30.26	30.26
主働土塊の垂直抗力	$N_A \text{ (kN/m)}$	66.42	63.49	123.19	85.58
主働土塊の粘着力総和	$C_A \text{ (kN/m)}$	81.75	81.75	81.75	81.75
受働土塊の粘着力総和	$C_P \text{ (kN/m)}$	36.46	36.46	36.46	36.46
	a	28.22	41.34	63.97	45.05
	b	-144.06	-145.59	-177.38	-156.34
	c	26.74	26.38	33.68	29.08

5.3.3.2 計算結果と考察

各安定計算での計算条件に対する安全率を表5-4に示す．シート上流側覆土の安全率は全てのパターンで1.2以上を満足することがわかる．

各計算方法を比較すると，シートに沿った直線すべりに基づく方法では，安全率が設計洪水位，常時満水位，最大放流時，完成直後の順で大きいことに対して，円形すべり面スライス法では，地震を考慮しない設計洪水位が最大であるのは同じであるものの，その後は完成直後，最大放流時，常時満水位の順となっている．シートに沿った直線すべり面を想定した場合の完成直後の F_s が2.568，最大放流時の F_s が3.273と両者には0.7の差がある．このことは水位条件が安全率に大きな影響を及ぼしていると言える．一方，円形すべり面スライス法の設計洪水位の F_s が4.589，常時満水位の F_s が2.597と設計水平震度0.15の適用により安全率が2以上も低下している．これは，設計水平震度が水位条件よりも大きな影響を有することを意味する．すなわち，計算方法によって，水位や設計水平震度が安全率に及ぼす影響が異なることがわかった．

また，両手法の各ケースの安全率を比較すると，設計洪水位，常時満水位，最大放流時のケースでは直線すべりの F_s が円形すべりの F_s より大きくなっているが，完成直後のケースでは，円形すべりの F_s が直線すべりの F_s より大きくなっている．これは，現場条件によっては直線すべりと円形すべりの F_s が逆転することを意味しており，設計で直線すべり及び円形すべりの両方の安定計算を実施する必要があることがわかった．

表5-4 F_s の計算結果

計算条件	設計 水平 震度	水位 (m)	直線 すべり	円形 すべり	判定
			F_s	F_s	
設計洪水位	-	EL. 99.01	4.912	4.589	OK
常時満水位	0.15	EL. 98.78	3.330	2.597	OK
完成直後	0.075	EL. —	2.568	2.813	OK
最大放流時	0.075	EL. 97.44	3.273	2.784	OK

5.3.4 まとめ

ベントナイトシート上流部の覆土について、シートに沿ったすべり及び円形すべりを組み合わせた設計手法を考案し、実在するため池で検証した。本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ①既往研究で提案されているシートが堤体法面に平行に敷設されている場合についての計算式をシートが堤体法面に平行でない場合の一般的な計算式に拡張した。
- ②計算手法によって、水位や水平震度が安全率に及ぼす影響が異なることがわかった。
- ③両計算方法の安全率を比較したところ、条件に応じて、最小安全率を示す計算方法が異なることがわかった。すなわち、両計算方法を組み合わせ、最小安全率を求める必要がある。

また、堤体の力学的安定性の他に施工面や経済性の観点からは、シートの水平幅が狭い場合、小型の機械を使用する必要があるため、シート前面の土の締固めにかかる工事費が高くなる。対策としては、シートをより下流側に設置するために、現況堤体の掘削を深くし、施工幅を広くする方法など、掘削量や盛土費用を考慮して比較検討し、シート設置位置を最終決定する必要がある。

以上より、シート位置の決定には、様々な比較検討を要することが想定されるため、設計事例を蓄積し、より合理的な設計手法の確立をすることが望まれる。

5.4 ため池ベントナイトシートマニュアルの策定

既往の研究成果を基に，ため池ベントナイトシート工法の標準化を検討する．標準化に当たっては，共通編，設計編，施工編及び参考資料に分類し整理した．

共通編では，標準化の趣旨，適用範囲，用語の定義を検討している．設計編では，ベントナイト系遮水シート（以下，「シート」という）に要求される特性・品質，シートの基盤及び基層の支持力・平滑性，シートの設置位置の敷設勾配と段切り及び必要土被り，構造物との接続部及び地山との取付部の設計，止水壁の設置，ため池堤体の浸潤線，堤体の安定計算方法，シート背面の圧力（湧水等）対策について規定を設けている．施工編では，施工手順，基盤整形，湧水対策・排水処理，シート搬入及び運搬・保管方法，シートの敷設方法，底樋等構造物との接続部・端部の処理，覆土の施工，シートの施工状態の確認と補修及び補強方法，ベントナイトシート工法の施工管理基準，施工後の維持管理時の観測項目・頻度について定めている．

以下，標準化にあたり検討した新規事項や特筆項目などを，編ごとに述べる．

5.4.1 共通編

5.4.1.1 ベントナイトシート工法の適用範囲

ベントナイトシート工法とは，ため池堤体改修工法のうち，図 5-12 に示すようにシートにより遮水を行う工法である．

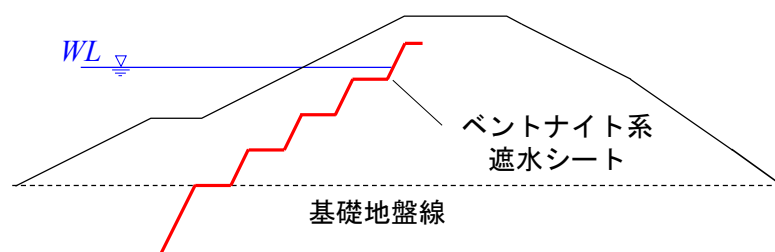


図 5-12 ベントナイトシート工法のため池堤体横断図例

「土地改良事業設計指針「ため池整備」」の適用は、堤高 15m 未満のフィルタタイプのため池とされているが、本県の工事实績として堤高 10m 以上のため池でのベントナイトシート工法の採用事例が少ないこと、耐震性についての一連の実験や検証が 10m 未満のモデルを適用していることから、現時点では堤高 10m 未満のため池に適用するものとしており、レベル 2 地震動の検討方法の規定は行っていない。

5.4.1.2 シートの耐用年数

シートは国外では GCL（ジオシンセティックライナー）と呼ばれているもので、米国では 1984 年に開発され、1986 年から施工実績がある。GCL は米国で一般的に用いられている粘土層の代用としての研究が進み、厚さ 50cm、透水係数 $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下の粘土層と同等以上の遮水性があるものとして米国 EPA（環境保護局）に認められている。

シートは、天然粘土鉱物であるベントナイトにより遮水能力を発揮するもので、長期耐久性に優れている。一方で、ベントナイトの流出などを保護する不織布や織布の耐用年数がシートの耐用年数を左右すると考えられている。そのため、不織布の耐用年数に関する様々な研究が行われているが、水分による耐性、耐化学性、生分解性等を踏まえ、覆土状況下では 200 年程度の耐用年数が期待できるとされている（SI Corporation, 1996）。このため、ため池で用いるベントナイトシート工法の耐用年数は 80 年を十分に有すると考えられる。

5.4.2 設計編

ベントナイトシート工法によるため池改修の設計においては、「ため池整備指針」に基づきため池本来の機能（貯水・取水機能）の確保等の基本的要件を考慮することとしている。

ここでは、シートに要求される特性、ため池堤体の浸潤線、ため池堤体の安定計算方法、止水壁の設置について述べる。

5.4.2.1 シートに要求される特性

シートは様々な種類があり，ベントナイトと不織布等を一体化するために，縦方向にニードルパンチやステッチボンドで加工した補強型タイプと，一体化させずにベントナイトと不織布等を糊付けして接着した非補強型タイプに分類される．シート内のベントナイトにせん断応力が発生する可能性を考慮すると，非補強型タイプは強度が期待できないことから，マニュアルでは図-5-13 に示すベントナイト補強型の材料を採用している．

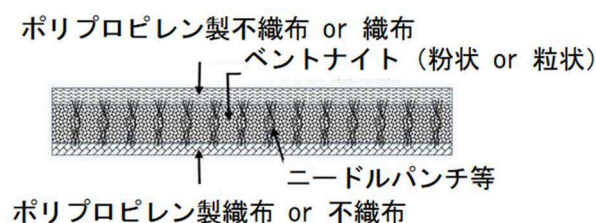


図 5-13 ベントナイト補強型材料の断面

5.4.2.2 ため池堤体の浸潤線

シートを用いたため池堤体の浸潤線は既往研究より，従来の傾斜遮水ゾーン型工法と同様に，福田（1956）が提案した式により求める．ただし，福田の式は，特にベントナイトシートのような遮水材料の透水係数が低い場合，浸潤線が低く出すぎる傾向があり，また，基礎地盤内の浸透流が堤体内浸潤線に及ぼす影響が考慮されていないなどの課題がある．そこで，これらの課題を解決する浸潤線の設定手法が松本ら（2022）提案されており，この手法を採用している．

具体的には，図 5-14 のように，シートを仮想傾斜コアとして見立て，現行の傾斜遮水ゾーンに対する式を適用する．仮想傾斜コアは，基礎地盤より上部のシートに対して，段切り部の幅分の水平厚みを持つゾーンと定義する．仮想傾斜コアの透水係数 k_{vc} は，シートの透水係数 k_g 及びシートの厚さ D_g ，仮想傾斜コアの厚み D_c として次の式により表すものとする．

$$k_{vc} = k_g \times D_c / D_g \quad (5.31)$$

なお、仮想傾斜コアの厚み D_c は図 5-15 により設定する。この k_{vc} を設計透水係数として堤体 1m 当たりの浸透量 q (m^3/s) を算出し、この q を用いて堤体下流側の浸潤線を求める。

シートの透水係数、シートの厚み D_g は各メーカーにより異なるが、安全側に考え、 k_{vc} が大きくなるように設定するものとし、各製品の中の最小シート厚である 6mm を採用する。

仮想傾斜コアの透水係数 k_{vc} とランダムな透水係数 k_r について、 $k_r / k_{vc} < 10$ の場合は、均一型と考えて浸潤線を設定する。均一型として設定する場合は、基礎からの浸透量は見込まず、均一型の浸潤線の計算方法であるカサグランデの方法で設定する。

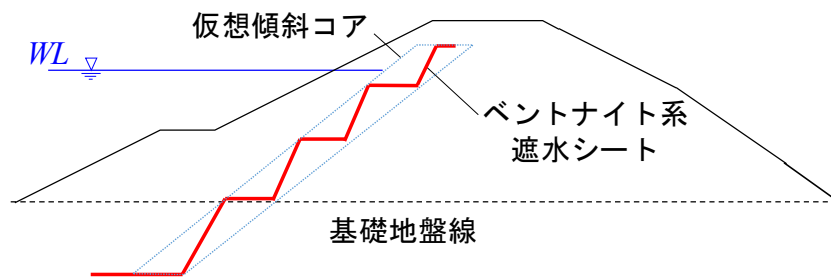


図 5-14 仮想傾斜コアの模式図

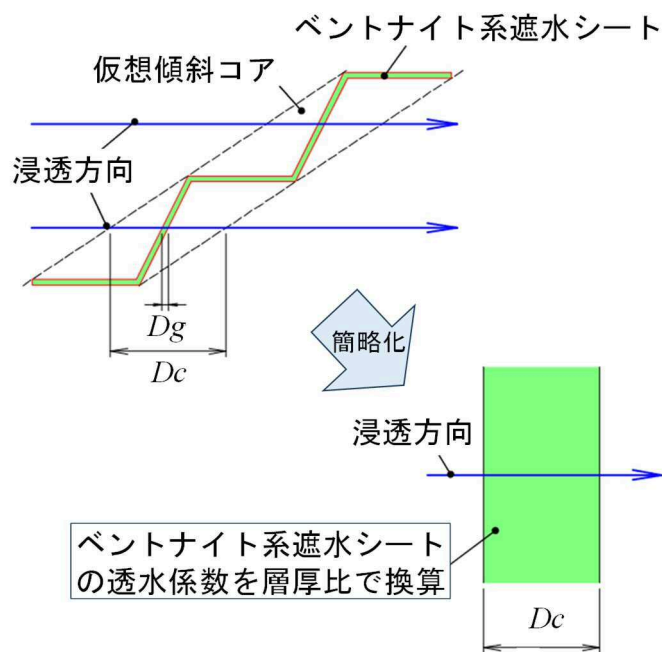


図 5-15 仮想傾斜コアの厚みの考え方

5.4.2.3 たため池堤体の安定計算方法

階段状にシートを設置したため池堤体を実大規模で振動実験を行った結果、シートを境界として上流側堤体と下流側堤体の振動特性が異なることが明らかとなっている。このため、シートの上流側覆土の厚さを決定するに当たって、シート上流側の覆土の安定計算を行う。安定計算は図 5-16 のフローで行う。

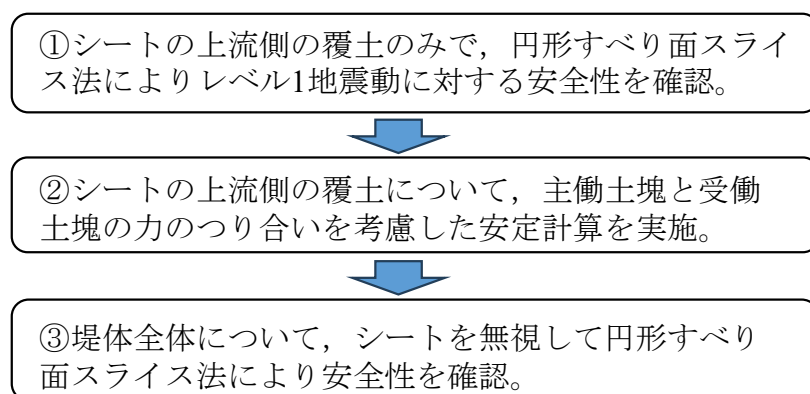


図 5-16 ベントナイトシート工法の安定計算フロー

①シート上流側の覆土のみの円形すべり面スライス法（以下、「円弧すべり法」という）により地震時安定性について安定計算を行う。シートの上流側覆土のすべり安全率を確認するため、図 5-17 に示すとおり、シートの段切り形状をモデル化し、段切り形状部及びそこからつながる池底を不可切断線（円弧が通らないような条件とした線）として設定し、シート上流側覆土のみの安全率を計算する。

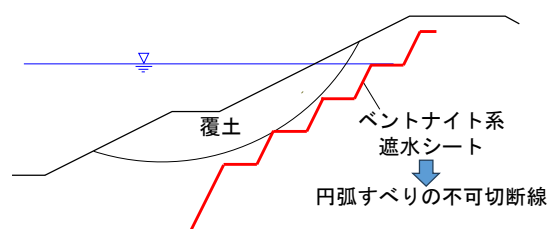
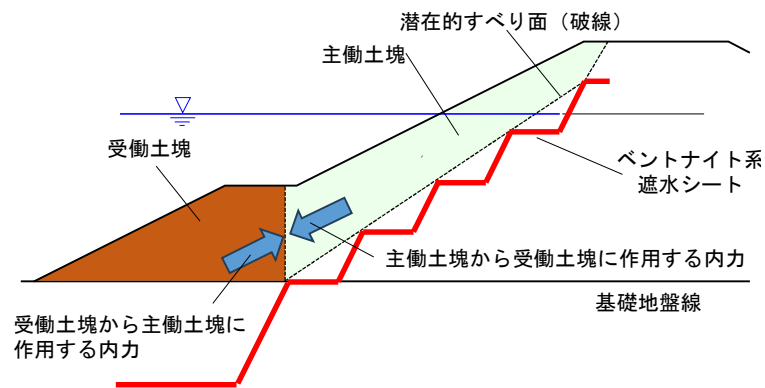


図 5-17 円弧が通らないような条件とした断面模式図

②シート上流側の覆土のシート面に沿ったすべり安定性について, Sawada et al.



③ため池堤体全体の安定計算については、通常のため池と同様に、円弧すべり法で検討する。シートはベントナイトを挟む不織布や織布の強度を有するものの、シートを通るすべり面長は非常に短く、たとえ強度が見込めても安定性への影響は非常に小さいことから、安全側に考えてシートの強度は無視することとしている。

5.4.2.3 止水壁の設置

法のように土とコンクリートの接続面は生じないため、設計上、構造物沿いの浸透は生じないものとする。また、シートとコンクリート製止水壁との接続手間等の施工性や、コンクリート製止水壁と周辺盛土の剛性の違いによる地震時挙動の相違から隙間が発生する可能性を吉武・小林（2018）や Sawada et al.（2021b）が指摘していることから、洪水吐、取水設備いずれもコンクリート製止水壁は設けないものとする。ただし、施工上、シートと構造物との接合部の接着部の部分的な剥がれ等が生じるリスクを完全には排除できないため、「ため池整備指針」に示された粘性土タイプの止水壁を設けることとしている。

5.4.3 施工編

5.4.3.1 施工手順

ベントナイトシート工法の施工は、日本遮水工協会（2019）のマニュアルを参考にして、一般に以下の手順で行う。

- ①床掘面の処理、段切り部の整形
- ②シート敷設土羽法面の養生
- ③シート搬入・運搬
- ④シート敷広げ・シート天端部の固定
- ⑤シート現場接合
- ⑥コンクリート構造物及び地山との接合
- ⑦点検及び補修
- ⑧覆土及び締固め

特にシートの現場接合作業やコンクリート構造物との接合作業、地山との接続部の処理作業等は天候を考慮し適切な時期を選定する。

5.4.3.2 構造物との接続部と覆土の施工

ベントナイトシート工法では、遮水性確保の点で、洪水吐や取水設備等のコンクリート構造物への取付について、特に配慮しなければならない。構造物周辺は締固めを十分に行うが、盛土施工後の構造物周辺部で多少の圧密沈下は避け難

いため、十分な接着幅を設けるものとしている。

シートの上部に行う覆土は、通常の堤体盛土施工方法と同様に行う。シート近接部はシートの破損を防止するため、タンパによる人力施工を行う。なお、覆土材料はため池堤体として適した材料とし、傾斜遮水ゾーン型工法でいうランダム相当の土を使用する。

5.4.3.3 施工後の維持管理

シートは土の中に埋設されるため、シートそのものの目視による維持管理はできないことを踏まえ、農林水産省（2021a, 2021b）を参考にして、施工後の維持管理手法・項目について定める。維持管理時の観測項目は次のとおりとしている。

- ①浸透量（漏水量）
- ②堤体の変状（沈下・ひび割れ）
- ③堤体のすべり
- ④その他附帯施設やため池周辺的环境
- ⑤堤体内浸潤線

一般的に、ため池には沈下量を計測する施設は設置しないが、ダムでは農林水産省（2003）に基づいて沈下量を計測している。ベントナイトシート工法を採用したため池においては、施工後の堤体変状を観測できるよう、観測点を設け、計測が可能なようにする。

また、堤体の浸潤線が設計どおり下がっていることが重要となる。このため、改修工事と合わせて堤体浸潤線が計測できる観測孔を 1 箇所設け、堤体内水位の観測ができるようにする。観測孔は、堤頂部の利用状況を踏まえ、堤頂部の通行や草刈りなどに支障のない下流法肩等の位置に設ける。観測項目について、目視確認が可能な項目①浸透量（漏水量）、②堤体の変状（ひび割れ）、③堤体のすべり、④その他は、ため池管理者が日常管理として行うことを想定している。一方、②堤体の変状（沈下）、⑤堤体内浸潤線は、観測機器が必要なため、専門技術者等が行う必要がある。望ましい観測頻度を表 5-5 に示す。

表 5-5 管理期間の区分とそれに応じた観測頻度

管理期間 の区分	管理区分の定義	観測の頻度の目安		観測者
		沈下	浸潤線	
第 1 期	堤体盛土完了後 試験湛水開始から 制波工施工前	湛水開始前に 1 回、その後 必要に応じて 実施	湛水開始前に 1 回、満水 1 週間後 に 1 回、その他必 要に応じて実施	工事発注者 調査請負業者 工事施工業者等
第 2 期	工事完了後	1～5 年に 1 回	1～5 年に 1 回	定期点検実施者等

5.4.4 その他参考資料

ベントナイトシート工法設計施工の標準化に当たっては、ベントナイトシート工法の施工管理基準、施工時チェックシート、出来形管理基準表（案）、撮影記録による出来形管理表（案）を策定したほか、参考資料として、補強型シートのマニュアル対応製品一覧、シート基盤の平滑性についての事例集、特記仕様書案、施工歩掛等を取りまとめた。

特記仕様書案では、事業完了後の災害発生・更新事業等の際に過去の改修事業の内容等が必要となる場合があるため、工事完了時にベントナイトシート工法で改修した旨を銘板に記し、構造物など目立つところに設置することとしている。

5.5 まとめ

本章では、ベントナイトシート工法の統一的な設計・施工手法を確立するため、既往の実験結果と解析結果を踏まえてため池堤体の安定計算を定式化するなど、設計・施工の実務に適応可能な手法を提案した。従来のため池改修工法に加え、代替工法としてベントナイトシート工法を活用し、ため池整備を推進することが可能となる。今回の標準化により、科学的知見に基づくより合理的なベントナイトシート工法の設計・施工が可能となることから、兵庫県のみならず全国のた

め池整備で役立つことが期待される。

なお、ため池ベントナイトシート工法の設計・施工標準化は現時点においての知見をとりまとめたものであり、今後も設計・施工実績等により随時修正を加えることとしている。例えば、マニュアルの適応範囲を堤高 10m までとしているが、実験や研究結果が蓄積されれば、適用範囲の拡大も見込まれる。また、維持管理についても、将来的にデータがそろえば、これらの管理値を見直していく必要がある。

第 5 章 参考文献

- 福田秀夫：傾斜心壁形フィルタイプダムの浸潤線・透水量に関する研究，鹿島建設技術研究所出版部，1956.
- 兵庫県農政環境部農林水産局農地整備課：兵庫県土地改良技術基準，2020.
- 兵庫県農林水産部農地整備課：ため池ベントナイトシート工法設計・施工マニュアル，<https://web.pref.hyogo.lg.jp/press/documents/tameikemanyuaru.pdf>（参照 2023 年 9 月 15 日），2023.
- 中澤博志，澤田豊，小田哲也，古林智宏，小林成太，河端俊典，澁谷啓，片岡沙都紀，山下拓三：実大規模振動実験におけるため池堤体の残留変形調査，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），73(4)，pp. I_815- I_826，2017.
- 中澤博志，澤田豊，小田哲也，澁谷啓，河端俊典：遮水シートを用いたため池堤体の地震後性能に関する考察，材料 (*Journal of the Society of Materials Science, Japan*)，Vol.69，No.1，pp.21-28，2020.
- 日本遮水工協会：廃棄物最終処分場 遮水工技術・施工管理マニュアル，2019.
- 農林水産省農村振興局：土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」，農業土木学会，2003.
- 農林水産省農村振興局整備部：土地改良事業設計指針「ため池整備」，農業農村工学会，2015.
- 農林水産省農村振興局：地震後の農業用ため池等緊急点検要領，2021a.
- 農林水産省農村振興局：大雨特別警報時の農業用ため池緊急点検等要領，2021b.
- 松本赳，澤田豊，清水正義，河端俊典：ため池設計における堤体内の浸潤線設定方法の改良について，農業農村工学会論文集，315，pp. I_259- I_266，2022.
- 佐々木貴，川口貴之，川尻峻三，澁谷啓：ベントナイト系遮水シートと土の摩擦抵抗に関する実験的検討，ジオシンセティックス論文集，30，pp.133-140，2015.
- 澤田豊，中澤博志，片岡沙都紀，小林成太，小田哲也，古林智宏，澁谷 啓，山下拓三，谷 和夫，梶原浩一，河端俊典：前刃金工法及び遮水シート工法により改修されたため池堤体の実大規模振動実験，ジオシンセティックス論文集，

31, pp.167-174, 2016.

Sawada, Y., Nakazawa, H., Oda, T., Kobayashi, S., Shibuya, S. and Kawabata, T.: Seismic performance of small earth dams with sloping core zones and geosynthetic clay liners using full-scale shaking table tests, *Soils and Foundations*, 58(3), pp.519-533, 2018.

澤田豊, 眞木陸, 神信浩一, 谷本幹夫, 中澤博志, 河端俊典: ジオシンセティッククレイライナーを用いて改修されたため池堤体の現地水位計測, 農業農村工学会論文集, 309, pp. I_357- I_363, 2019.

Sawada, Y., Nakazawa, H., Take, W.A. and Kawabata, T.: Full scale investigation of GCL damage mechanisms in small earth dam retrofit applications under earthquake loading, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4), pp.502-513, 2019a.

Sawada, Y., Nakazawa, H., Take, W.A. and Kawabata, T.: Effect of installation geometry on dynamic stability of small earth dams retrofitted with a geosynthetic clay liner, *Soils and Foundations*, 59(6), pp.1830-1844, 2019b.

澤田豊, 松本赳, 井上和徳, 浦部朋子, 河端俊典: ジオシンセティッククレイライナーが敷設されたため池堤体の浸潤線設定方法の提案, 農業農村工学会論文集, 313, pp. I_363- I_369, 2021.

Sawada, Y., Arita, J., Omori, M. and Kawabata, T.: Damage characteristics of conduits in irrigation earth dams, *Paddy and Water Environment*, 19(1), pp.239-247, 2021.

Sawada, Y., Izumi, A., Hori, T., Abe H., Ikebata R.: Modelling a geosynthetic clay liner in a centrifuge and its application to the dynamic stability of small-sized earth-fill dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 175, 108258, 2023.

SI Corporation : The durability of polypropylene nonwoven geotextiles for waste containment applications, Smart Solutions® Technical Note SM-404, 1996.

地温調査研究会「地下水調査のための観測孔の仕上げ方」検討委員会: 地下水調査のための観測孔の仕上げ方マニュアル (案) Ver.2015.8 月, 2015.

吉武美孝, 小林範之: ため池改修におけるコンクリート構造物と堤体盛土との接合部での漏水問題, 水土の知, 86(8), pp.715-720, 2018.

第 6 章 結論

6.1 本論文のまとめ

本論文では、兵庫県におけるため池の特徴を示すとともに、ため池を取り巻く環境を保全していく上での総合的分析を行い、兵庫県におけるため池が適正に維持管理され多面的機能が発揮されるよう、貯水機能に最も重要な役割を果たすため池堤体に着目し、持続可能なため池堤体改修工法のひとつであるベントナイトシート工法の提案を行った。以下に各章で得られた結論を要約する。

第 2 章では、東播磨地域を事例に兵庫県におけるため池を取り巻く状況を分析するとともに、特に兵庫県南部においては、過去から現在にわたりため池が灌漑上、重要であることを明らかにした。兵庫県ではため池の適正な管理、多面的機能の発揮の促進、次世代への継承によりため池保全の取組を推進しており、ため池を構成する最も重要な施設である堤体についての老朽対策や自然災害に対する被災の未然防止は、重要であることを指摘した。

第 3 章では、豪雨によるため池被災分析として、平成 26 年 8 月豪雨で被災した丹波市のため池現地調査の結果、得られた知見は以下のとおりである。①記録的な豪雨による出水と、ため池上流域からの土砂流入にもかかわらず、洪水吐が機能したため池は堤体の決壊を免れた。堤体越流が生じているケースや完全に土砂でため池が埋没したケースでも持ちこたえている。その一方、洪水吐が土砂と流木で閉塞したため池は決壊に至っている。②複数のため池が流入土砂を貯留したことは、ため池が砂防ダムとしての機能を果たしたともいえる。しかしながら、土砂で埋没するとともに決壊し、ため池下流に土砂や流木を流下させたため池もあった。すなわち、土砂貯留の機能は、堤体が出水に耐えられる場合に限って期待できる機能であることに注意すべきである。③築造時期不明の古いため池でも、洪水吐の改修がなされたことが確認されているため池は、いずれも決壊を免れている。このことは、老朽ため池における洪水吐改修の重要性を示している。

従来は、ため池管理者や市町の要望を受け、順次老朽ため池の整備を進めてきたが、耐震調査や定期点検など行政の公的関与のもと、ため池の保全に取り組むようにシフトしつつある。その基本となる定期点検は、5年毎ではあるものの、今後もため池管理者へ公的支援の一つとして、継続的な実施を図ることが必要である。また、ため池管理者と行政が連携して地域防災や、ハザードマップの作成等を活用した地域全体の安全度向上についても近年進んでいることが明らかにした。

以上豪雨と地震のため池の被災状況を概観すると、堤体が決壊し貯留機能が失われる事態を未然に防止することが極めて重要である。劣化状況評価及び地震・豪雨耐性評価から改修が必要なため池は兵庫県だけでなく全国的に増大しており、ため池改修に必要な用土不足等が顕在化してきているため、その対策を講じる必要がある。

第4章では、ため池のベントナイトシート工法の実大規模実験について述べた。全国の農業用ため池において、老朽化や耐震性不足等により、集中的かつ計画的に整備を進めることが喫緊の課題となっている。ため池堤体改修は遮水性土質材料を用いることが主流であるが、代替としてベントナイト系遮水シートを用いた工法も増加傾向にある。しかし、ベントナイト系遮水シートを用いて改修されるため池の地震時挙動は不明であるため、堤高3mの実大規模ため池堤体を対象に加振実験を実施し、ベントナイトシート工法により改修されたため池の耐震安全性を検証した。実験で得られた知見をまとめると以下のようになる。

①レベル1地震動を想定した最大177Galの加振実験の結果、漏水は生じず、堤体の変形は極めて小さかった。②レベル2地震動を想定した最大471Galの加振実験の結果、決壊や漏水には至らなかったが、天端に比較的大きなクラックが堤体軸方向に発生した。発生クラック深さの調査や加速度応答特性から遮水シートを境界に遮水シートと土の剥離などの破壊現象が発生したことが示唆された。③クラック発生付近では、鉛直方向成分の加速度が大きくなっていることが確認された。④堤体の応答加速度から、遮水シートの上流側と下流側で、位相差が確認されたことから、振動特性が異なることが明らかになった。

第5章では、ベントナイト系遮水シートを用いた工法に関する設計手法が確立されていない課題に対し、ため池堤体の安定性検討手法を確立するため、ベントナイト系遮水シート上流側覆土の安定性について、既往研究で提案された計算方法と従来の方法を組み合わせた手法を提案するとともに、実在ため池を対象に当設計手法を検証した。その結果、計算方法によって水位や水平震度が安全率に及ぼす影響が異なることが明らかとなり、直線すべりと円弧すべりの両方の計算方法を組み合わせることの妥当性が示された。

また、ベントナイトシート工法の統一的な設計・施工手法を検討し、既往の実験結果と解析結果を踏まえてため池堤体の安定計算を定式化するなど、設計・施工の実務に適応可能な手法を提案した。従来のため池改修工法に加え、代替工法としてベントナイトシート工法を活用し、ため池整備を推進することが可能となる。

6.2 今後の展望

今回提案したベントナイトシート工法の設計・施工手法は、実験的・解析的知見に基づく合理的な手法となっていることから、兵庫県のみならず全国のため池整備で役立つことが期待される。ベントナイトシート工法のマニュアルは現時点においての知見をとりまとめたものであり、今後も設計・施工実績等により随時修正を加えることとしている。また、シート位置の決定には、様々な比較検討を要することが想定されるため、設計事例を蓄積し、より合理的な設計手法の確立をすることが望まれる。維持管理についても、将来的にデータがそろえば、これらの管理値を見直していく見当が必要である。

兵庫県ではため池の適正な管理、多面的機能の発揮の促進、次世代への継承によりため池保全の取組を推進しており、引き続き、中長期の視点に立ち、社会科学的側面と自然科学的側面の両面からため池の保全を推進することが望まれる。

全国で最もため池が卓越して分布する兵庫県を対象に、本研究を遂行できたことは有意義で、本研究成果が兵庫県のみならず、全国に波及することを切に願ひ、本論文の結びとする。

謝 辞

各過程ですばらしい方々に助けていただいたおかげで、本研究を遂行することができました。本研究にかかわった皆様の助けがなければ、筆者は本論文をとりまとめられなかったに違いありません。

まず、神戸大学理事・副学長 河端俊典先生に心から深く感謝の意を表します。筆者が 2004 年度に土地環境学研究室の門をたたいて以来、河端先生には様々な勉強をする機会を与えて下さいました。大学院を修了し、兵庫県に入庁して以降も鋭いご指摘と懇切なるご助言をいただきました。さらに、博士課程で学ぶ機会を賜り、ここまで遂行することができました。重ねて御礼申し上げます。

神戸大学大学院農学研究科准教授 澤田豊先生には、懇切丁寧なご指導とご助言を賜りました。また、澤田先生から技術者としての研究に取り組む基本的な姿勢をご教授頂きましたことは、本論文をまとめる上でも物事を考える際の重要な基礎となりました。深甚より感謝いたします。

神戸大学大学院農学研究科教授 田中丸治哉先生には、本論文に対するご指導以外にも、豪雨で被災したため池現地調査ならびに「ため池等の保全に関する条例検討委員会」等の兵庫県ため池行政に対して示唆に富むご助言を賜りました。誠にありがとうございました。

神戸大学大学院農学研究科教授 井上一哉先生には、大変ご多忙にもかかわらず本論文をまとめるに当たり貴重なご助言を頂きました。私が学生として在籍していた時からの的確なご助言をいただきましたこと、心よりお礼申し上げます。

2016 年にはスリランカのコロンボで開催された国際水圏環境工学会 アジア・太平洋地域部会に参加し、アジア太平洋地域の水利施設について討議させていただきました。参加に当たり、当時、兵庫教育大学大学院学校教育研究科教授で

あった故南埜猛先生には南アジアのため池についてご助言賜り，地理学の視座でため池を俯瞰する技術を学びました．また，京都大学防災研究所教授 角哲也先生，大阪府立狭山池博物館館長 小山田宏一先生と出会い，ため池を研究する視野が広がりました．お礼申し上げます．

本研究の基幹部であるＥ－ディフェンスを活用したため池実験においては，静岡理工科大学理工学部教授 中澤博志先生のご協力ご尽力に深く感謝の意を表します．同じく実験にご尽力いただいた，兵庫県危機管理部 古林智宏 防災事業班長，大和ハウス工業株式会社 小林成太氏にも感謝の意を表します．

また，一般財団法人建設工学研究代表理事 澁谷啓博士，東京海洋大学学術研究院海洋資源エネルギー学部門教授 谷和夫先生，北見工業大学工学部助教 片岡沙都紀先生，国立研究開発法人防災科学技術研究所地震減災実験研究部門 梶原浩一博士，同 山下拓三博士，には，大変お世話になりました．ここに記して感謝申し上げます．

Ｅ－ディフェンスを活用した本研究は，防災科学技術研究所と兵庫県の共同研究および兵庫県と神戸大学の協力型共同研究のもとに実施されました．研究計画策定や実験実施にあたり，Ｅ－ディフェンスを活用した減災対策推進委員会（岡田恒男委員長）の助言を受けました．関係者各位に謝意を表します．

さらに，ベントナイトシート工法の設計施工を標準化するに当たって，多大なるご配慮を賜りました国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門農地基盤情報研究領域 堀俊和 領域長，同施設工学研究領域 中嶋勇前領域長，同施設整備グループ 泉明良 主任研究員および内外エンジニアリング株式会社 前田真宏博士に深く感謝の意を表します．とくに堀領域長と泉主任研究員および前田博士には，２年にわたりほぼ毎月協議いただき大変お世話になりました．

ベントナイトシート工法設計・施工の標準化には，ベントナイトシート工法の知見を有する他県のため池担当者および本県のため池改修事業の設計に携われ

ている設計コンサルタントの皆様にご助言いただきました。また、日本遮水工協会 GCL 分科会の関係者の皆様には、透水係数設定手法の解析や施工の標準化にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

兵庫県職員としての 16 年間の中で、素晴らしい先輩や同僚、後輩に出会えました。その中でも、本研究に着手した 2014～2016 年度にかけて筆者が在籍した農村環境室（現農地整備課農地防災班）の皆様には、大変お世話になりました。兵庫県東播磨県民局 森脇馨 参与、西播磨県民局光都土地改良センター 横田欣仁 農政専門員、兵庫県農林水産部 三輪頤 農地整備課長、但馬県民局豊岡土地改良センター 谷垣和彦 所長、兵庫県企画部 野村純数 多自然地域づくり班長、兵庫県農林水産部 谷本幹夫 主査には、まだまだ未熟な筆者をご指導いただき、誠にありがとうございました。また、ベントナイトシート工法の設計施工標準化に取り組むきっかけを与えていただいた、兵庫県農林水産部 伊藤倫之 農地防災班長、中播磨県民局姫路土地改良センター 福永隼也 主任に対しても、感謝の意を表します。さらに、ベントナイトシート工法マニュアルを公表し関係者への報告会実施を主導いただきました兵庫県農林水産部 徳村秀一 主幹をはじめ、兵庫県のため池に関する研究でお世話になった方々は枚挙にいとまがありません。この場を借りてお礼申し上げます。

勤務しながら本論文をまとめ上げるに当たり、筆者を暖かく見守っていただきました現所属の兵庫県農林水産部 兼松伸之助 農業経営課長、同 河野健児 農業経営課副課長、同 山本圭祐 主幹にも感謝いたします。

最後に、本研究に没頭する筆者を辛抱強く支えてくれた妻 幸子、長女 彩恵、長男 郁翔に感謝します。本当にありがとうございました。

2024 年 1 月

小 田 哲 也

本研究に関する公表論文

本論文を構成する主な公表論文は、次のとおりである。印刷公表の方法および時期を併せて以下に示す。

第2章は、次の論文を基にする。

Tetsuya Oda, Kaoru Moriwaki, Kazuhiko Tanigaki, Yoshikazu Nomura, Tetsuya Sumi :

Irrigation ponds in the past, present, and future: A case study of the Higashi Harima Region, Hyogo Prefecture, Japan. *Journal of Hydro-environment Research*, Vol.26, pp.19-24, 2019.

小田哲也, 森脇馨, 谷垣和彦, 野村純数, 澤田豊, 河端俊典：兵庫県におけるため池の耐震調査と保全・管理について, 水土の知(農業農村工学会誌), Vol.83, No.12, pp.7-10, 2015.

第3章は、次の論文を基にする。

小田哲也, 三輪顕, 野村純数, 田中丸治哉：平成26年8月豪雨に伴う兵庫県丹波市の土砂流入ため池被災, 水土の知(農業農村工学会誌), Vol.83, No.08, pp.39-42, 2015.

小田哲也, 森脇馨, 谷垣和彦, 野村純数, 澤田豊, 河端俊典：兵庫県におけるため池の耐震調査と保全・管理について, 水土の知(農業農村工学会誌), Vol.83, No.12, pp.7-10, 2015.

第4章は、次の論文を基にする。

小田哲也, 澤田豊, 中澤博志, 小林成太, 澁谷啓, 河端俊典：階段状に設置したベントナイト系遮水シートがため池堤体の地震時挙動におよぼす影響, ジオシンセティックス論文集, Vol.31, pp.175-182, 2016.

第5章は，次の論文を基にする．

小田哲也，澤田豊，前田真宏，野村純数，福永隼也，泉明良，堀俊和：ベントナイト系遮水シートを用いて改修されるため池堤体上流側覆土の安定計算に関する検討，ジオシンセティックス論文集，Vol.38，pp.56-61，2023．