

論 説

ライフサイクルコストを用いたため池の豪雨対策の選定手法

Selection Method of the Optimum Countermeasure Using Life Cycle Cost for Small Earth Dams

堀 俊 和 (ほり としかず)

㈱農研機構農村工学研究所 統括上席研究員

松 島 健 一 (まつしま けんいち)

㈱農研機構農村工学研究所 主任研究員

毛 利 栄 征 (もうり よしゆき)

㈱農研機構農村工学研究所 施設工学研究領域長

有 吉 充 (ありよし みつる)

㈱農研機構農村工学研究所 研究員

1. はじめに

近年、ゲリラ豪雨等の集中豪雨が多発しており、老朽ため池の被害が多数報告されている。自然災害によるため池の災害は1995年兵庫県南部地震や2004年新潟県中越地震、また2011年東北地方太平洋地震を除くと、ほとんどが豪雨によるものであり、豪雨時のため池下流域の安全性向上が重要な課題となっている。緊急に改修を要するため池は2,247個といわれており、前刃工法等の全面改修を基本とした対策方法では、対策を完了するまでに多大な時間とコストを要する。更に、近年、国や地方公共団体の財政状況が逼迫しており、事業実施量が低減しているのが現状である。このような背景から、ため池の決壊による下流域の二次被害を最小限にするためには、従来の工法にとらわれず、低コストで簡便なハード対策やソフト対策を積極的に導入することが重要である。また、それらの対策法から最適な減災対策方法を適切に選定する必要がある。

最適な対策方法を選定するための手法として、地震や豪雨のリスクを評価して構造物のライフサイクルコスト(以下、LCC)を求め、LCCが最小となる対策方法を選定するという手法がある。地震の場合には、ため池等の貯水構造物を対象に、西村・松浦¹⁾、谷・堀²⁾がそれぞれ安定解析、動的解析により無対策と耐震対策後のLCCを比較して、耐震対策効果を評価している。小林ら³⁾は、2004年の台風23号による被害事例を基に、天端幅や堤高などのデータの判別分析により、豪雨時のため池の決壊確率を求め、LCCを算定することによって、複数のため池の中から改修の優先順位を決定する手法を提案している。

豪雨時のため池の決壊メカニズムは、越流破壊、すべり破壊、パイピングの3パターンがあり(堀ら⁴⁾)、その発生割合は2004年台風23号の事例では、それぞれ55%, 16%, 29%になっている。対策方法に応じたLCCを算定するためには、これらの破壊メカニズムを考慮する必要がある。ただし、パイピングについては、適切で簡便な評価手法がないため、今後の課題とし、本研究ではすべり破壊および越流破壊を考慮して、豪雨時のため池のリスク評価を行う手法を提案する。また、減災対策として種々のハード対策・ソフト対策を施した場合につい

て、下流域の安全性を考慮したため池のLCCを算定し、最適な豪雨対策を選定する手法を提案する。

2. 豪雨リスクを考慮したLCCの算定方法

本章では、豪雨リスクを考慮したLCCを算定する手法を提案する。LCC算出のフローを図-1に示す。以下では、2004年台風23号で決壊したため池をモデルとしてLCCの算定例を示す。表-1に対象としたため池の諸元とパラメータを示す。

2.1 豪雨ハザードの算定

始めに、LCC算定を行うため池の地域において、過去の雨量データ等を基に確率雨量を求める。次に、過去に災害をもたらした降雨波形を基に、10~200年確率のハイエトグラフを作成する。2004年台風23号の豪雨で

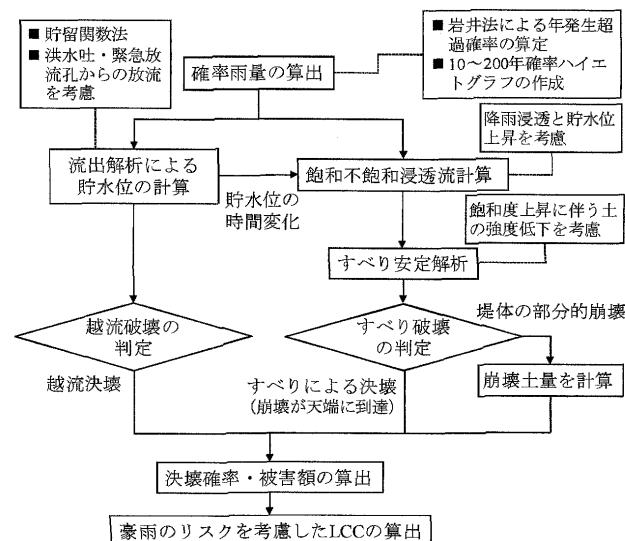


図-1 豪雨リスクを考慮したため池のLCC算定方法

表-1 対象としたため池諸元、解析パラメータ

ため池諸元			洪水吐諸元	
堤高 9.9m	堤頂長 100m	集水面積 0.04km ²	満水面積 1,300m ²	幅 3.5m
流出解析(貯留閑数法)			流量係数 1.80m ³ /s	
一次流出率 0.6	K 12	P 0.6	c' 4.0kPa	φ' 30°
緊急放流孔 流量係数 0.62m ³ /s			透水係数k 2.0×10 ⁻⁴ cm/s	
決壊時の被害額 1.0億円			単位崩壊土量当り 10億円	
堤体 30cm			被害額 1万円	

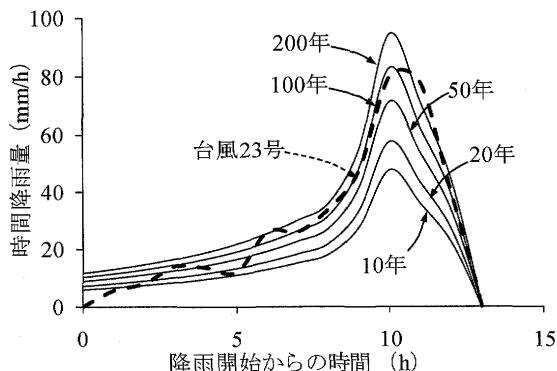


図-2 10~200年確率のハイエトグラフ(兵庫県洲本市)

大きな被害が発生した兵庫県洲本市の確率降雨を岩井法により求め、10～200年確率のハイエトグラフを求めた結果を図-2に示す。

2.2 決壊確率の算定方法

(1) 貯水位の計算と越流破壊の判定

図-2 のハイエトグラフを入力値として、貯留関数法による流出解析を行い、洪水吐や斜槽、緊急放流孔などからの放流を考慮して、ため池の貯水位の時間変化を算定する。貯留関数法の基礎式は次の式で表される。

$$\frac{dS}{dt} = r_e - q_{in}, \quad S = K q_{in}^P \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 S は見かけの貯留高、 r_e は有効雨量強度、 q_{in} は直接流出高を q_d とすると、 $q_{in}(t) = q_d(t + T_1)$ の関係がある。 T_1 は遅れ時間である（永井ら⁵⁾）。 P, K は集水域の特性を表すパラメータであり、雨量と貯水位の実測結果から求めることができる。洪水吐または堤体越流によって発生する貯水池外への放流量 q_{sp} は次式で表される。

ここで、 B は洪水吐幅または堤体越流幅、 C_{sp} は流量係数、 H_{sp} は越流水深である。また、斜樋、緊急放流孔からの放流量 q_{oi} は以下のとおりである。

ここで、 a は斜樋または緊急放流孔の孔断面積、 C_0 は斜樋または緊急放流孔の流量係数、 H_{el} は孔中心から水面までの高さである。また、ため池の貯水量の連続式は次式で表せる。

$$A(H) \cdot \frac{dH}{dt} = q_{\text{in}} - q_{\text{sp}} - q_{\text{ol}} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、 H は貯水位、 $A(H)$ は貯水面積であり、貯水位の関数である。 $A(H)$ は、HQ カーブから算出が可能である。(1)～(4)式より貯水位を求めることが可能である。貯水位上昇の結果、堤体越流が発生し、その越流水深がある限界越流水深を超えると破堤すると判定する。限界越流水深とは、3 時間の越流を受けても堤体に大きな侵食が発生しない越流水深と定義する。越流時間 3 時間とは、2004年の台風23号豪雨でのピーク流量の継続時間が 3 時間以内であり、越流の継続時間は長くても 3 時間以内であると推定できることから設定している。堀ら⁶⁾は地盤模型を用いた越流実験を行い、越流水深や越

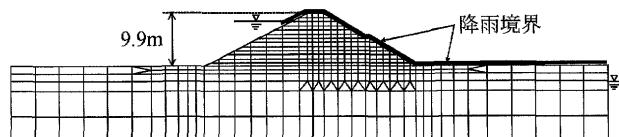


図-3 検討したため池のモデル（2004年台風23号決壊ため池）

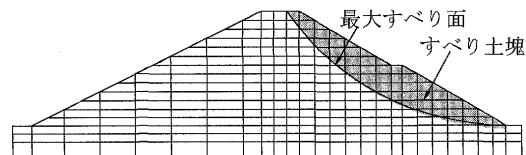


図-4 すべりによる決壊の判定

流時間と侵食量の関係を明らかにしている。越流に対して無対策の堤体では、限界越流水深はほぼ 0 cm である。また、堤体越流に対して斜面に被覆等の侵食補強対策を施した場合には、越流水深が 0 cm 以上となる。

(2) すべり破壊の判定と崩壊土量の計算

上述の流出解析で計算された貯水位とハイエトグラフの時間降雨量を入力値として、FEMにより飽和不飽和浸透流解析を行い、堤体内的間隙水圧と飽和度を求める。解析に用いたメッシュを図-3に示す。図-3は均一型堤体の場合であるが、ゾーン型の場合にも簡単にメッシュを作成することは可能である。地盤表面は降雨境界であり、地盤表面の節点の間隙水圧が負圧の場合は流量境界とし、正圧の場合は間隙水圧ゼロの圧力境界とした。また、豪雨時の飽和度上昇に伴って堤体強度が低下することを考慮した。サクションの変化に応じて、粘着力が変化するとして計算を行った。

すべりによる決壊の有無の判定は以下のように行った。
図-4に解析結果の一例を示す。図中、最大すべり面とは、安全率が1.0以下となるすべり面のうち、すべり土塊（すべり面に囲まれた崩壊土塊）の体積が最大となるすべり面である。最大すべり面が堤体天端に達すると、貯水が維持できなくなり、堤体全体が決壊すると判定する。最小すべり安全率が1.0を下回っても、最大すべり面が天端に達しない場合は、部分的な損傷であると判定した。この場合、最大すべり面から崩壊土量を求め、崩壊土量に応じた堤体被害額を算定した。

(3) 決壊・損傷確率の算定

10～200年確率のハイエトグラフを入力値として、
2.2(1)および(2)で示した流出解析、飽和不飽和浸透流解析、
安定解析を順次行い、確率雨量に対して貯水位、最小安全率、
最大すべり面頭部の高さの関係を求める。その結果から、
越流またはすべりによって決壊が発生する降雨確率のうち、
最小の値がため池堤体の決壊確率と算定される。すべりによって部分的損傷以上の被害（決壊する場合を含む）が発生する年超過確率は、すべり安全率が1.0を下回る最小の降雨確率で与えられる。

2.3 LCC の算定

2.2で求めた決壊確率と損傷確率からLCCを算出する。LCCは次式より算定した。

論 説

$$LCC = \text{初期対策費 } C_I + \text{ランニングコスト } C_M + \text{Risk} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{Risk}(N) = \int_0^\infty \frac{dP(r)}{dr} C(r) dr \times N \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで $\text{Risk}(N)$: N 年の供用期間中に発生するリスク (円), r : 24時間雨量に関する確率雨量 (mm), $C(r)$: 24時間雨量に関する被害額 (円) $P(r)$: 決壊または損傷が発生する年超過確率, N : 供用年数 (年) である。 $C(r)$ は、部分的損傷の場合は堤体の崩壊土量に応じた復旧費、決壊した場合は堤体の全面的な復旧費と下流域の二次被害額の合計額となる。計算に用いた被害額を表-1 に示す。また、一度、決壊後は 200 年確率降雨に対しても安定性と洪水吐放流能力が安全率 1.2 を有するように設計・再築堤されたものとした。

3. 決壊確率と LCC の算定結果と対策効果

3.1 検討した対策ケース

表-1 に示した被災ため池を対象に減災対策方法を検討したケースおよびその初期対策費とランニングコストを表-2 に示す。全面改修や洪水吐新設などの従来工法、簡易な法先ドレン (L 型法先ドレン⁷⁾) や堤体に降雨を浸透させないように被覆する工法 (堤体表面被覆工法⁸⁾), ソイルセメントによる簡易洪水吐などの低コストなハード対策、貯水位等をモニタリングし、事前に放流を行って貯水位を低下させるソフト対策 (貯水位管理) について、決壊確率と LCC の算定を行った。また、二つの工法を組み合わせたケース (L 型法先ドレン + ソイルセメント簡易洪水吐) についても検討を行った。

3.2 決壊確率の算定結果と対策効果

2 章で述べた方法によって、降雨中の貯水位と安全率の変化を算定した例 (100 年確率降雨の場合) を図-5 に示す。下段は時間雨量、上段は貯水位の時間変化、中段は最小安全率の時間変化である。貯水位の時間変化から、「無対策」と「堤体表面被覆工法」の場合に堤体越流が発生する。後者は堤体表面が補強されており、限界越流水深が 20 cm であるため、決壊しない。無対策の場合には越流決壊する。また、最小安全率の算定結果から、「無対策」と「洪水吐新設」では最小安全率が 1.0 を下回り、「無対策」の場合はすべり面が天端に到達してすべ

りによる決壊も生じうることが分かる。

算定された年間の決壊確率と損傷確率を図-6 に示す。無対策の決壊確率は 1.26 (80 年確率) であった。ちなみに 2004 年台風 23 号豪雨の 24 時間雨量は 90 年確率である

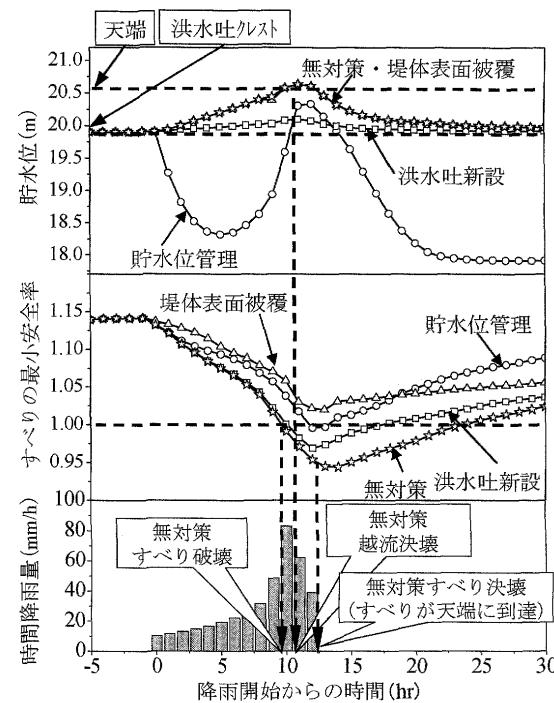


図-5 貯水位と安全率の計算結果 (100年確率降雨)

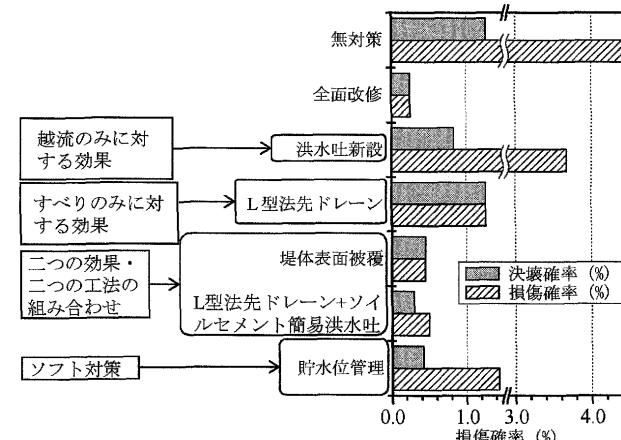


図-6 年間の決壊確率と損傷確率

表-2 検討したため池の豪雨対策

	工法名	内容	効果			初期対策費 (万円)	ランニングコスト (万円/年)
			すべり	パイピング	越流		
従来工法	全面改修	200 年確率の降雨に対して、安全率 1.2 の洪水吐放流能力とすべり安定性を有するとして設計するものとした。	○	○	○	12,000	—
	洪水吐新設	200 年確率の洪水吐のみ新設する	×	×	○	1,000	—
低コストハード対策	L型法先ドレン	L型の人工ドレン材を法先に埋設する工法であり、浸潤線を低下させて、安定性を向上させる工法。ドレン部分を浸出境界として解析した。	○	○	×	557	10
	堤体表面被覆	遮水性を持った侵食防止マットを天端と下流斜面に敷設する工法である。実験結果より、降雨浸透を 50% 抑止して堤体内の間隙水圧上昇を抑えるとともに、限界越流水深は 20 cm であった。降雨浸透量を 50% として浸透解析した。	○	△	○	1,134	10
ソフト対策	ソイルセメントによる簡易洪水吐	ソイルセメントで下流斜面の一部を補強し、洪水吐の放流能力を超える流入水を一時的に放流する工法。	×	×	○	200	10
	貯水位管理	貯水位のモニタリングし、堤体の危険度を判定して、降雨開始と同時に満水位から 2m 下の緊急放流孔から放流し、貯水位の上昇を抑える対策方法。緊急放流孔からの放流量を考慮して貯水位を計算した。	-	-	-	380	30

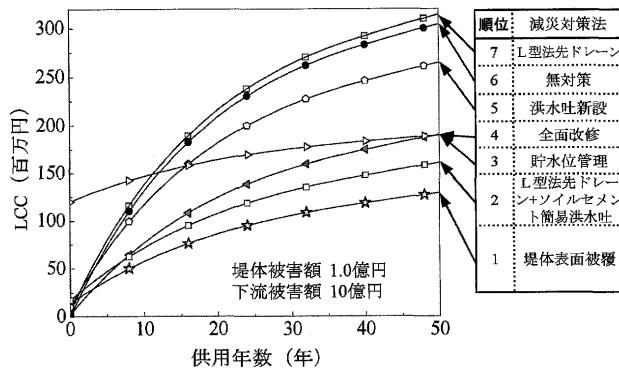


図-7 下流被害がある場合の LCC

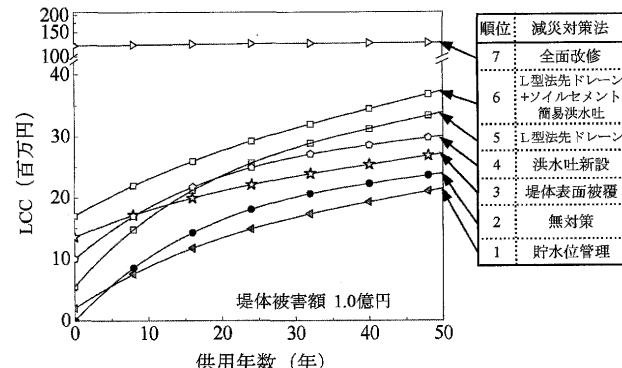


図-8 下流被害がない場合の LCC

ことから、妥当な算定結果であることが分かる。

「洪水吐新設」は越流のみに対する効果、「L型法先ドレーン」はすべりのみに対する効果しかないので、決壊確率はあまり低減しない。これに対し、「堤体表面被覆」や「L型ドレーン+ソイルセメント簡易洪水吐」、「貯水位管理」は、越流とすべりの両方に対して効果を持つため、決壊確率を0.5以下（200年確率）まで低減させることができる。以上のことから、簡単な対策でも、異なる破壊パターンに対してバランスの良い対策を選択、または組み合わせることによって、決壊確率を低減させ、高い効果を発揮できることが分かる。

3.2 LCC の算定

供用年数を50年と仮定し、下流被害がある場合（下流被害額+堤体被害額を考慮）と無い場合（堤体被害額のみを考慮）でLCCを算定した結果を図-7、8に示す。下流域の被害がある場合、LCCが最も大きいのはL型ドレーン工法の場合であり、次に無対策となっている。対策を講じているにもかかわらず、無対策よりもLCCが大きくなっている理由は、この対策が越流破壊に対して効果がなく、初期対策コストの分だけLCCが大きく算定された結果である。LCCが最も小さいのは、堤体表面被覆工法であり、最適な対策方法であると判定できる。下流域被害がない場合は、全面改修でLCCが最も大きい。これは、被害額に対して初期コストが高いことが原因である。貯水位管理を行うソフト対策が、LCCの値が最も小さくなり、最適な対策方法であると判定できる。ただし、本算定結果は、LCCによる評価手法を述べるものであって、対策方法の優劣を一般的に述べるものではないことを付記しておく。

4. おわりに

以上のように、破壊パターンを考慮して決壊確率を求め、下流被害も考慮したLCCを算定することによって、コストを低減させつつ、大きな減災効果がある最適対策方法を選定することが可能である。実際の設計において

は、被害に人災が想定される場合など、コストだけでは割りきれない場合もあるため、LCCの算定結果を基に、ため池受益者、下流住民、行政等が十分な合意形成を行い、対策方法を決定するべきであろう。今後は、本報告で提案した決壊・損傷発生の予測モデルの精度について検証を行う必要がある。具体的には、過去のため池の複数の被災事例の中に対して、提案したモデルを適用し、決壊確率の予測精度を確認するとともに、これから改修・減災対策を行うため池において、対策手法選定における本手法の適用性を確認する予定である。

参 考 文 献

- 1) 西村伸一・松浦 健：ため池のリスク評価と信頼性設計、土構造物の地震における性能設計と変形量予測に関するシンポジウム発表論文集、139, pp. 311~316, 2007.
- 2) 谷 茂・堀 俊和：老朽化フィルダムの地震リスクを考慮した安全性評価法、農村工学研究所技報、210, pp. 145~167, 2010.
- 3) 小林 晃・山本裕介・青山康康：ため池の決壊リスクによるライフサイクルコストの算定法、第43回地盤工学研究発表会講演集、pp. 1123~1124, 2007.
- 4) 堀 俊和・毛利栄征・松島健一・有吉 充：豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法、農土論集、270, pp. 57~67, 2010.
- 5) 永井昭博・田中丸治哉・角屋 晉：ダム管理の水文学—河川流域の洪水予測を中心として—、森北出版、pp. 36~40, 2003.
- 6) 堀 俊和・毛利栄征・松島健一・有吉 充：下流斜面表層を補強したため池堤体の越流実験、平成20年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp. 624~625, 2008.
- 7) 堀 俊和・毛利栄征・石黒 健・高橋 浩・前田和享：法先ドレーンを設置したため池堤体の浸透時の斜面安定性、第41回地盤工学研究発表会講演集、pp. 2209~2210, 2005.
- 8) 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、平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp. 348~349, 2010.

(原稿受理 2011.5.16)