

被害リスクを考慮した砂防堰堤の 維持補修戦略に関する一考察

寺西 弘一¹・松島 格也²

¹ 非会員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京極京都大学桂)

E-mail: teranishi-koichi@pref.shiga.lg.jp

² 正会員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京極京都大学桂)

E-mail: matsushima.kakuya.7u@kyoto-u.ac.jp

近年、全国各地で土砂災害が頻発しているが、劣化した堰堤がその機能を十分に発揮できずに保全対象が被災した事例が報告されている。今後、補修や改築等を必要とする堰堤は増加することが見込まれるが、施設管理者の立場では人手不足、財源不足が深刻であるのが実情である。本研究では、効率的かつ効果的な維持補修を実施していくために、堰堤の健全度と保全対象の被害リスクの關係に着目した維持補修戦略を提案する。具体的には、目視点検記録を用いて健全度の推移を予測し、各健全度に応じた保全対象の被害リスクを算定した上で、一定期間における堰堤の補修費用と保全対象の期待被害額の和である総費用を最小化する補修ルールを採用するものである。

キーワード：砂防堰堤，維持補修戦略，機能低下，劣化予測，期待被害額

1. はじめに

平成 31 年 3 月に、国土交通省砂防部保全課より「砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案) (以下、ガイドラインと呼ぶ) が改定された。砂防堰堤についても他の土木構造物と同様に、ライフサイクルコストの縮減および補修等に要する費用の平準化を図る予防保全型の維持補修を計画的に実施していく必要性が示されている¹⁾。今後、補修や改築等を必要とする堰堤は加速度的に増加することが見込まれるが、施設管理者の立場では人手不足、財源不足が深刻であるのが実情である。効率的かつ効果的な維持補修戦略を立案することは施設管理者にとって喫緊の課題である。

砂防堰堤の維持補修に関する研究としては、堰堤の劣化・損傷の調査、堰堤本体の健全度の評価、補修や改築等の対策工の比較検討、堰堤のライフサイクルコストの算定、堰堤の点検の効率化に向けた検討等、幅広く研究が行われているが^{2)~6)}、それらの内容を組み合わせる維持補修戦略を検討した研究は筆者の知る限りない。そこで本研究では、以下の 2 つの視点を重要視したい。

1 つ目は、性能低下が機能に及ぼす影響を考慮する必要性である。劣化・損傷が見られる堰堤であっても機能面で問題ないものは多い。機能の観点から補修等を優先順位を検討していくことが有効で、そのためには性能と

機能の工学的な範囲での相関付けが必要不可欠である。本研究では、代表的な劣化現象に着目し、性能と機能の相関付けを試みる。

2 つ目は、堰堤の機能と保全対象の被害リスクの關係に着目する必要性である。たとえば、堰堤自体に軽微な損傷が見られたとしても、下流の保全対象に幹線道路等の重要施設等が存在すれば、当該堰堤を優先して補修する必要がある。一方で、堰堤自体に激しい損傷が見られる場合にも早急に対策は必要である。このように、堰堤自体の健全度に加えて保全対象の状態をも考慮しながら対策の優先順位を決定することが妥当であると考えられる。堰堤の役割は土石流災害から人命・財産を保護することで、施設管理者には第一義的には保全対象の被害リスクを最小化することが求められている。

上記の 2 つの視点はガイドライン¹⁾の中でも言及されているが、基本的な考え方が示されているのみで、計画策定の具体は施設管理者に委ねられている。そこで、本研究では、ガイドラインの目標や考え方を踏まえた上で、効率的かつ効果的な堰堤の維持補修を実施していくための方法論を検討する。

以下、2. で本研究の基本的な考え方を説明する。3. で機能低下を明示的に考慮した砂防堰堤の安定性評価法を提案した上で、機能低下に伴い変動する保全対象の被害リスクの算定方法について説明する。4. で堰堤の維

持補修戦略を検討するために、堰堤の補修費用と保全対象の期待被害額の和を総コストとして定義し、これを定式化する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既往研究の概要

多くの土木施設が建設後から半世紀を超え、経年劣化や損傷が顕在化している中で、それら施設の性能・機能を長寿命化させるための予防保全型の維持補修戦略が重要となっている。その中で、劣化予測は中心的な要素技術となるが、これについては力学的メカニズムにもとづいて予測する方法と点検記録等を用いて統計的に予測する方法に大別される。目的に応じて両者は使い分けられるが、本研究のように施設全体の維持補修戦略を検討するには、統計的な劣化予測が有効である。これまで統計的な劣化予測モデルは数多く開発されている。その中でも、目視点検記録から得られる施設の健全度情報にもとづき、マルコフ推移確率を推計する方法論については研究の蓄積がある⁷⁾⁸⁾。ある時点での健全度は過去の履歴に依存しないというマルコフ性を前提として、健全度の時間的な推移過程を確率的に推計する。本研究でも、津田ら⁷⁾が開発した、健全度が多段階のマルコフ劣化ハザードモデルを用いる。同モデルは、施設ごとの異質性を考慮するために、構造特性や使用環境を説明変数として内在している。

維持管理戦略の研究については、劣化予測にもとづいて施設のライフサイクルコストあるいは年平均費用等を定式化し、補修間隔や補修内容等を最適化するための方法論が複数提案されている。本研究では、上記のことを踏まえて、砂防堰堤の維持補修戦略を検討する際に、以下のことについて考慮する。砂防堰堤では、平時の流水や突発的な出水が劣化・損傷の主原因であるため、当該流域の降雨特性に着目する。また、堰堤の健全度と下流の保全対象に被害が発生する確率は連動すると考えて、この関係付けを試みる。このように、流域特性・施設の健全度・保全対象の相互関係を明確にし、維持補修戦略を検討する。

(2) 現行ガイドラインの主旨

砂防堰堤の長寿命化計画の目的は、長期にわたり堰堤の機能及び性能を維持・確保することである。ガイドラインには、定期的な目視点検を通じて得られる健全度評価及び劣化予測の結果を踏まえて、対策の要否、実施時期、優先順位を検討し、ライフサイクルコストの縮減と補修費用の平準化を図りながら年次計画を策定するという方針が示されている⁹⁾。目視点検は、砂防関係施設点検要領⁹⁾に基づいて行われる。堰堤の部位ごとに変状レ

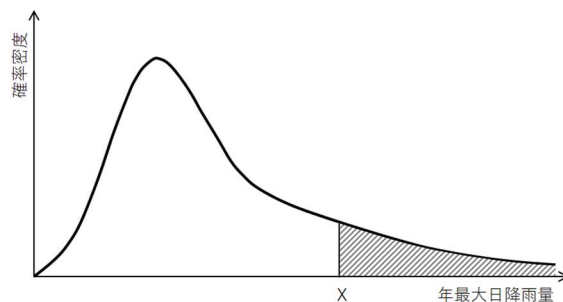


図-1 堰堤が不安定状態となる確率の概念
(斜線部の面積が不安定となる確率)

ベルを評価した上で、機能及び性能の観点から対策方針を検討する目的で当該堰堤の健全度が評価される。健全度は3段階に区分されている。健全度Aは損傷等が無いあるいは軽微な損傷があるが機能及び性能低下が認められず対策は不要である状態である。健全度Bは損傷等があるが機能・性能低下は生じていないが、予防保全の観点から経過観察をする状態、健全度Cは損傷等が発生し機能・性能低下が懸念されており、対策が必要である状態である。その上で、健全度、流域の後輩状況、堰堤と保全対象の位置関係、堰堤の重要度、過去の災害履歴、対策工法、ライフサイクルコストを考慮し、対策の優先順位を検討し、年次計画を策定する。

健全度の評価結果は点検者の知識や経験等に少なからず依存するが、現行の区分が3段階であるため、点検者の評価結果のばらつきは少ないと考えられる。しかしながら、年次計画の策定に当たっては、同じ健全度であっても上記のとおり流域特性や周辺施設の状況等、様々な事柄を考慮する必要がある、それらをどのように取り扱うかは計画策定者の主観に依存するところが少なくない。効率的かつ効果的な年次計画を策定するためには、合理的な意思決定の方法論が必要である。また、事業関係者への説明責任という観点からも計画策定者の恣意性を排除することが望ましい。

(3) 堰堤の機能と保全対象の被害リスク

砂防堰堤には下流への土砂流出を防止し、人命・財産を保護する役割があり、当初計画で想定した規模の洪水等に対して安定性を有していることが機能として求められる。しかしながら、劣化・損傷が発生して進行すると、堰堤の安定性は低下し、当初計画で期待していた規模の洪水等に耐えられなくなると考えられる。図-1は、年最大日降雨量の確率分布を示している。当初は、計画規模の降雨量Xを設定し、安定であるように設計が行われるため、X以下の降雨量に対しても堰堤は安定な状態にあり、Xよりも大きい降雨量に対しては不安定な状態にある。同図中の斜線部の面積が不安定な状態となる

確率を表している。損傷等が進行すると X の値は減少し、不安定な状態である確率は増加する。

本研究では、堰堤の健全度と保全対象の被害リスクの關係に着目する。各健全度に相当する降雨量 X を評価し、不安定な状態となる確率を算定する。そして、その確率で下流の保全対象に被害が発生すると仮定する。現行ガイドラインでは、堰堤の健全度に着目し、堰堤が健全度 C と評価されると直ちに対策が必要で、健全度 B ならば将来対策が必要となる見込みとして、対策の要否が検討される。このとき、保全対象の状態は一定考慮されているものの、保全対象に被害が発生する確率という概念は存在しない。ガイドラインでは、同じ健全度であれば被害規模が大きい方の堰堤が優先的に補修される。しかし、同じ健全度であっても堰堤の諸元、堰堤の所在地における降雨特性は異なるため、堰堤の安定性評価、および被害の発生確率は異なる。なお、本研究では、健全度 A であっても当初計画において想定した規模以上の洪水等が発生すれば被害は起こり、被害が発生する確率は少なからずあると考える。

上記の問題意識の下で、健全度と保全対象の被害発生確率の關係付けを試みる。現行の設計基準の考え方を踏襲し、堰堤に生じる機能低下を明示的に考慮した安定性評価法を提案する。劣化・損傷の事象として、堰堤の全体安定性に重大な影響を及ぼす基礎部の洗堀に着目する。洗堀は、流水や石礫が水叩きに落下することで生じ、進行すると堰堤底面と基礎地盤との接地面が減少し、転倒等に対する安定性が著しく低下する。所与の安定条件を満たさない場合に、堰堤は不安定な状態である仮定する。保全対象の被害規模は、社会変化に伴い変動するとともに、近年の異常気象に見られるような降雨特性の変化等に影響を受ける。そうしたことから、堰堤の機能と保全対象の被害リスクを中心として関連する事象を総合的に考慮することが望ましいと考えられる。

3. 堰堤の安定性評価と保全対象の被害リスク

本研究では、堰堤基礎部に洗堀が生じると堰堤の全体安定性が低下し、その結果、保全対象に生じる被害の発生確率が増加すると考える。そこで、図-2 に沿って、健全度 i 、洗堀幅 d 、設計水深 h_c 、および降雨量 P の相互の關係付けを試みる。

(1) 洗堀幅 d と限界水深 h_c の關係

堰堤は異なる諸元を有するため、健全度が同じでも洗堀幅は堰堤ごとに異なると考えられる。健全度を状態変数 i ($i = 1, 2, 3: A, B, C$) として定義する。ある堰堤 k が健全度 i と評価された場合、その時の洗堀幅 d_i を以下のよう設定する。健全度 A と判定された堰堤は洗堀が生じ

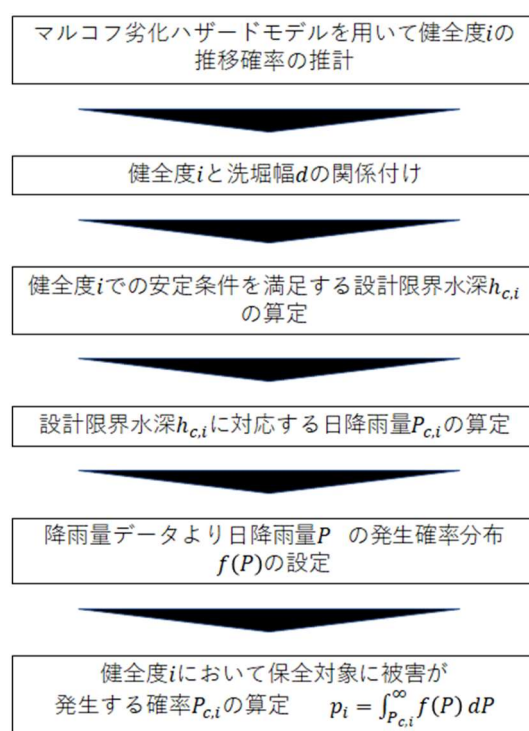


図-2 保全対象の被害確率の算定までの流れ

ていない($d_A = 0$)ものとする。健全度 C と判定された堰堤の洗堀幅 d_c は、設計水深 $h = 0$ の状態で、転倒に対する安全率 F_0 が許容安全率 F_a と等しくなるときの洗堀幅の m 倍 ($0 < m < 1$) とする。健全度 B と判定された堰堤の洗堀幅 d_B は、健全度 A と C の中間値 ($= d_c/2$) として設定する。

劣化・損傷が機能へ及ぼす影響を定量的に評価するためには、現地調査、シミュレーション解析、模型実験等を実施して情報・知見を蓄積していく必要がある。本研究では、上記のとおり仮定する。

(2) 劣化を考慮した安定性評価

堰堤の新設時は、河川砂防技術基準¹⁰⁾に基づき設計が行われる。本研究では、その考え方を踏襲しながら、堰堤基礎部に発生した洗堀が進行することで堰堤全体の安定性が低下することを明示的に考慮した安定性評価法を提案する。

堰堤の設計検討では、自重と水圧を作用させて、静的な力のつり合いから、堰堤の安定性を評価する。同技術基準では、以下の安定条件¹⁰⁾を満足するように断面を決定する。

- ① 合力の作用位置が堰堤中央 1/3 以内にある
- ② 滑動を起こさせない
- ③ 堤体内の応力が材料の許容値以内かつ基礎地盤の許容支持力以内である

上記のうち、事前検討を通じて条件①が断面決定ケー

スとなる傾向を把握している．本研究では条件①が満足されればその他の条件も満足されると仮定する．条件①は(a)式で示される．

$$|X| = \frac{M}{V} = \frac{(M_R - M_D)}{V} \leq \frac{B}{6} \quad \text{—— (a)}$$

$$M_R = \sum_i W_{ci} \cdot x + P_{Vi} \cdot x \quad \text{—— (b)}$$

$$M_D = \sum_i P_{Hi} \cdot y \quad \text{—— (c)}$$

ここに、 X ：合力の作用位置(m)， V ：鉛直方向の合力(kN/m)， M_R ：抵抗モーメント(kN・m/m)， M_D ：転倒モーメント(kN・m/m)， B ：堰堤底幅(m)， W_c ：堰堤自重(kN/m)， P_H ：水平方向の静水圧(kN/m)， P_V ：鉛直方向の静水圧(kN/m)， x ：下流端から作用線までの水平距離(m)， y ：下流端から作用線までの鉛直距離(m)

(a)式に、下流端から洗堀幅 d が生じている状態を反映させる．図-3に、洗堀が生じている場合の荷重モデル図を示す．洗堀が生じている状態では、洗堀幅 d の分だけ回転の中心が上流側へ移動するため、(a)式における抵抗モーメント M_R には(d)式で示される M'_R が代入される．

$$M'_R = \sum_i W_{ci} \cdot (x - d) + P_{Vi} \cdot (x - d) \quad \text{—— (d)}$$

ここに、 M'_R ：洗堀発生時の抵抗モーメント(kN・m/m)， P_V ：鉛直方向の水圧(kN/m)， W_c ：堰堤自重(kN/m)， x ：下流端から作用線までの水平距離(m)， d ：洗堀幅(m)．水平方向の水圧による転倒モーメントは不変である．また、(a)式における堰堤底幅 B には、洗堀幅 d を控除した底幅 $B' (= B - d)$ が代入される．以上のとおり、諸数値を代入すると洗堀が生じている場合の合力の作用位置(X')が照査可能であるが、洗堀が進行すると堰堤底と基礎地盤との接地面積が小さくなり、合力の作用位置(X')がミドルサードを外れる．そうした場合、次式で定義される、転倒に対する安全率 F_s が許容安全率 $F_{sa}(= 1.5)$ を上回る必要がある¹⁾．

$$F_s = \frac{M'_R}{M_D} \quad \text{—— (e)}$$

ここに、 M'_R ：洗堀発生時の抵抗モーメント(kN・m/m)， M_D ：転倒モーメント(kN・m/m)

(3) 保全対象に被害が生じる確率

堰堤が安定条件(e)式を満足しないときに、保全対象に被害が生じると仮定する．すなわち、転倒に対する安全率 F_s が許容安全率 F_{sa} を満たさない場合である．

ある諸元を有する堰堤 k が健全度 i の状態であるとすると転倒に対する安全率 F_s^k は設計水深 h と洗堀幅 d の関数で、 $F_s^k = f(h, d)$ となる．ここで、健全度 i に相当する洗堀幅 d_i^k が定まると、安定条件を満足する限界水深

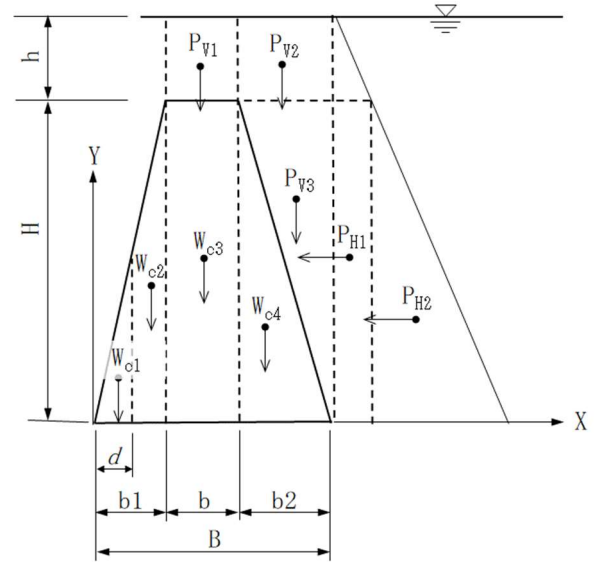


図-3 荷重モデル図

(水通し部；洪水時で堆砂が無い状態)

$h_{c,i}^k$ が求まる．

$$h_{c,i}^k = \arg_h(F_{sa}) \quad \text{—— (f)}$$

限界水深 $h_{c,i}^k$ が求まると、合理式とせきの公式を連立させて諸数値を入力すると、限界水深 $h_{c,i}^k$ に対応する平均降雨強度 $P_{e,i}^k$ が求まる．

$$Q^k = 1.5 \times \frac{1}{3.6} \cdot K_{f1} \cdot P_{e,i}^k \cdot A^k \quad \text{—— (g)}$$

$$Q^k = \frac{2}{15} C \sqrt{2g} (3B_1^k + 2B_2^k) h_{c,i}^k \quad \text{—— (h)}$$

ここに、 Q^k ：洪水流量(m³/s)， K_{f1} ：流出係数， $P_{e,i}^k$ ：平均降雨強度(mm/h)， A^k ：流域面積(km²)， C ：係数， B_1^k ：水通し幅(m)， B_2^k ：越流水面幅(m)

平均降雨強度 $P_{e,i}^k$ と限界日降雨量 $P_{c,i}^k$ には以下の関係式がある．

$$P_{e,i}^k = \left(\frac{P_{c,i}^k}{24} \right)^{1.21} \times \left(\frac{24 \cdot K_{f1}^2}{120/60 \cdot A^{0.22}} \right)^{0.606} \quad \text{—— (i)}$$

ここで、日降雨量の年発生確率分布 $f(T)^k$ が与えられたとすると、ある堰堤 k が健全度 i の状態に1年以内に保全対象に被害が発生する確率は、限界日降雨量 $P_{c,i}^k$ を超過する確率 p_i^k であるとする、 p_i^k は以下のように計算される．

$$p_i^k = \int_{P_{c,i}^k}^{\infty} f(T)^k dT \quad \text{—— (j)}$$

健全度 i が大きいほど、劣化が進展しているほど被害が発生する確率 p_i^k は大きくなる($p_1 < p_2 < p_3$)が、補修費用 c_i^k (健全度 i の状態に必要な補修費用)をあるタイミングで投入すれば健全度は $i = 1$ (健全度A)に回復し、被害が発生する確率 p_i^k を低減させることが可能である．したがって、健全度 i の推移速度にも依存するが、ある

期間内で最適な補修間隔を求めるあるいは、どの健全度状態で補修すべきかといった問題に帰着する。

4. 補修費用を含めた期待被害額の定式化

(1) 年期待被害額の算定

本研究では、堰堤の維持補修戦略を検討するために、以下の2つの補修ルールを設定する。補修ルール1は健全度 C となった時点で補修を実施するルールである。健全度 C は堰堤に機能・性能低下がある状態で、事後保全型の維持補修戦略に相当する。一方、補修ルール2は、健全度 B になった時点で補修を実施するルールである。健全度 B は堰堤に損傷が生じているが機能・性能低下はない状態で、現行ガイドラインが目指している予防保全型の維持補修戦略に相当する。各ルールにもとづいて補修を実施した結果、総コストが小さい方のルールを採用することとする。なお、総コストは、堰堤の補修費用と保全対象の期待被害額の和と定義する。

堰堤 k ($k = 1, \dots, K$) について、堰堤の補修費用 $c_{i,t}^k$ ($i = 1, 2, 3$) と保全対象の年期待被害額 $DM D_t^k$ を計画期間 T 年間積み上げた総費用 TC^k を定式化する。なお、定式化に当たっては以下の仮定を設ける。計画期間内に点検を実施せず、直近の点検記録のみをもとに計画期間における総費用を算定することとする。実際には少なくとも10年に1度は点検を行い、健全度の評価を更新することとされている。

まず、計画期間 T に補修を実施しない場合の総費用 TC^k を計算する。ある堰堤 k ($k = 1, \dots, K$) について、直近の t_0 年前に点検が行われ、健全度 $h_{t_0}^k$ ($= 1, 2, 3$) が得られているとする。計画 t 年次 ($t = 1 \sim T$) における健全度 h_t^k は、推移確率行列を用いると

$$h_t^k = h_{t_0}^k \cdot \Pi^{t_0+t} = h_{t_0}^k \cdot \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} \\ 0 & \pi_{21} & \pi_{22} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{t_0+t} \quad \text{—— (k)}$$

で計算される。次に、計画 t 年次における保全対象の被害リスクを計算する。ある堰堤 k が t 年次において健全度 $h_t^k = i$ ($i = 1, 2, 3$) である場合、その堰堤が転倒の許容安全率 F_{sa} を満たさない確率、言い換えると堰堤下流の保全対象に被害が発生する確率は p_i^k 、その時の保全対象の被害額は r_i^k とすると、 t 年次の保全対象の年期待被害額 $DM D_t^k$ は以下の式で計算される。

$$DM D_t^k = h_{t_0}^k \cdot \Pi^{t_0+t} \cdot p_i^k \cdot r_i^k \quad \text{—— (l)}$$

したがって、計画期間 T における年期待被害額 $DM D_t^k$ の総和である総コスト TC^k は以下のように計算される。

$$TC^k = \sum_{t=1}^{T-1} DM D_t^k \quad \text{—— (m)}$$

次に、計画期間内に補修費用 C_i^k を投入して補修を実施する場合を考える。(i)式において S^k 年次に補修費用

を実施するとした場合、計画初年次から S^k 年次までの年期待被害額の総和と補修費用の合計は

$$TC^k = \sum_{t=0}^{S^k-1} DM D_t^k + C_i^k \quad \text{—— (n)}$$

で計算される。この時、補修を実施した堰堤は健全度 A に回復し、以後計画終年次 T までに n 回の補修費用と年期待被害額を積み上げるとすると、計画期間における補修費用と年期待被害額の総和は以下の式で計算される。

$$TC^k = \sum_{t=0}^{S^k-1} DM D_t^k + n \cdot \sum_{u=0}^{\bar{S}_t^k} DM D_u^k + n \cdot C_i^k \quad \text{—— (o)}$$

(k)式で期待年数 $\bar{S}_t^k$ を計算する必要があるが、堰堤 k が推移確率 π_{ij}^k に従い健全度が推移する場合、健全度 i ($i=1,2,3$) から j ($j=2,3$) に推移するまでの期待年数 $S_{i,n}^k$ は N 回の乱数シミュレーションを行うことで以下のように計算される。

$$S_{ij}^k = E[s_{ij}^k] = \frac{\sum_{n=1}^N s_{i,n}^k}{N} \quad \text{—— (p)}$$

(2) 健全度の推移確率の推計

本研究では、津田ら⁷⁾が開発したマルコフ劣化予測モデルを用いて、堰堤の健全度の推移確率を推計する。パラメータの推計には目視点検記録を用いる。建設年次と点検年次の2時点における健全度およびその2時点間の経過年数を用いる。説明変数については、既往の劣化調査等より洗堀の発生・進行については流水の影響が支配的である⁸⁾と考えられるため、当該堰堤が建設後から点検時点の間に受けた「累積降雨量」を用いる。なお、累積降雨量は当該堰堤から最も近い観測所で記録されたデータを利用し、観測値の最大値を1として基準化して用いる。ハザード関数は

$$\lambda_i = \exp(x\beta'_i) \quad \text{—— (q)} \\ (i = 1, 2)$$

とする。 $x = (x_0, x_1)$ は説明変数ベクトル、 $\beta_i = (\beta_{i,0}, \beta_{i,1})$ は未知パラメータベクトルである。ここで、記号 $\wedge$ は転置を表す。説明変数のパラメータの選定にあたっては、 t 検定を実施し、 t 値の絶対値が1.96を上回っていれば説明変数が統計的に有意であると判断し、採用する。

(3) 補修費用と保全対象の被害額

堰堤は異なる寸法形状を有し、その現場条件も様々であるため、たとえ同程度の規模の堰堤であっても、その補修費用は異なることが、劣化が進展するほど補修費用も増加することが一般的である。ある堰堤 k ($k = 1, \dots, K$) が健全度 i ($i = 1, 2, 3$) の状態において必要な補修費用を C_i^k とする。また、保全対象の被害額については、

洪水等の規模や保全対象に含まれる人家数等によって異なるが、堰堤 k の下流にある保全対象の被害額は r_i^k として、堰堤の健全度 i にのみ依存すると考える。

5. おわりに

本研究では、堰堤自体の健全度と保全対象の被害リスクの関係に着目した維持管理戦略を提案した。また、機能低下を明示的に考慮した堰堤の安定性評価および各健全度に相当する被害リスクの算定法を提案し、それらを用いて補修費要と期待被害額の和を総コストとして定式化した。

一方、本研究に関連し、今後に残された課題を以下に述べる。まず、堰堤のデータベースの充実化が挙げられるが、堰堤の劣化予測および総コストの算定の信頼性を高めるためには必要不可欠である。実務面では予算の平準化が目的で、補修費用の実績の整理も重要である。次に、目視点検記録で得られる健全度と性能低下の関係づけである。詳細な点検が実施されて劣化度を定量的に把握できれば、設計水深を含め精度の高い結果が得られる。さらに、性能低下が機能低下に及ぼす影響を定量的に評価する手法の検討である。両者を工学的な範囲での相関付けが可能となれば、効率的・効果的に補修を実施していくことが期待できる。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局砂防部保全課：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン（案），2019年。
- 2) 水山高久：砂防ダムの災害実態調査，新砂防，111，pp.26-30，1979。
- 3) 水山高久，鈴木浩之，矢島重美：砂防ダムの災害実態調査(2)，土木研究所資料第2491号，1987。
- 4) 田中秀樹，細川容宏，小笠原和吉，星野和彦，廣瀬隆浩：砂防堰堤の経年劣化・損傷の傾向に関する考察，砂防学会研究発表概要集，p-B-260-B261，2014
- 5) 小笠原和吉，蒲原潤一：長野県における砂防関係施設の維持補修の最近の取り組みについて，砂防学会誌，Vol.68，No.4，pp.47-51，2015。
- 6) 原田紹臣，野口恵美，森川裕司，西岡恒志，石川芳治：効率のかつ効果的な既設砂防堰堤等の維持管理手法（点検）に関する提案，砂防学会研究発表会概要集，O3-37，2010
- 7) 津田尚胤，貝戸清之，青木和也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.69-82，2005。
- 8) 小濱健吾，岡田貢一，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング，土木学会論文集A，Vol.64，No.4，pp.857-874，2008。
- 9) 国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領，2016。
- 10) 国土交通省：河川砂防技術基準(案)設計編，1997
- 11) 水山高久，松村和樹：砂防ダムの安定性，新砂防，Vol.41，No.2，pp.26-30，1988。