

砂防堰堤の補修ルールの意味決定に関する 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: k.teranishi0624@gmail.com

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、想定外の頻度や規模の降雨が激甚的な土砂災害をもたらしている。土砂災害の被害を軽減するためには、砂防堰堤の効率的かつ効果的な維持管理計画を立案することが急務である。筆者らは、砂防堰堤の健全度だけでなく保全対象である人家や公共施設の被害規模を考慮した維持管理戦略を検討するための枠組みを提案している。具体的には、計画期間における施設補修費と保全対象の被害リスクの総和が最小となる補修ルールを意思決定するというものである。本論文では、その適用事例として、地方自治体の土木事務所が管理する砂防堰堤を対象とし、予算制約等の諸条件が補修ルールの意味決定に及ぼす影響を分析している。

キーワード：砂防堰堤、アセットマネジメント、維持管理、補修ルール

1. はじめに

近年、全国各地で土砂災害が多発しており人命・財産を保全する重要性がますます高まっているが、今後、様々な防災施設の老朽化が原因となり施設機能が十分に発揮されずに人的・物的被害が生じる恐れがある。施設管理者にとっては、施設機能を維持あるいは回復していくことが急務であるが、財源・人員不足が深刻であるのが実情である。

管理者が施設を管理する際には、ライフサイクルコストの最小化・費用の平準化といったコストの視点のみならず、保全対象の被害リスクの視点が必要となる。保全対象の被害リスクを適切に評価することで、限られた資源（予算・人員）を効率的かつ効果的に配分していくことが可能となる。保全対象の被害リスクをコストとして捉えれば、補修費を投じて施設機能を回復し、保全対象の被害リスク（コスト）を低下させるということは、補修費と被害リスクの最適バランス問題に帰着する。

本稿では、砂防堰堤の劣化過程・機能・保全対象の被害リスクの相互を関係付けた上で、実証分析を通じて予算制約等の諸条件が補修ルールの意味決定に及ぼす影響を分析している。

以下、2.で本研究の基本的な考え方、3.で砂防施設の劣化に伴う不安定化、4.で補修ルールに基づく総コスト

の計算、5.で実証分析について説明する。

2. 本研究の基本的な考え方

本研究では、以下の3つの内容が中心となって、前述の最適バランス問題を構成している。まずは砂防堰堤の劣化過程の予測で、多段階の健全度の推移確率を推計するところからはじまる。次に、健全度ごとに砂防堰堤が不安定状態となる降雨量（限界降雨量）を計算する。砂防堰堤は劣化が進行するとより少ない降雨量で不安定状態となる。限界降雨量を上回る降雨量が発生した時点で保全対象に被害が生じると考える。最後に、選択した補修ルールに従って計画期間における全施設の補修費と保全対象の被害リスクの総和を計算する。

(1) 既往研究

土木施設のアセットマネジメントについてはこれまで多くの研究が行われており、劣化予測モデルの開発や、維持管理費を最小化するような維持補修戦略を立案する方法論の提案などがある。砂防施設については、施設の劣化・損傷調査、補修等の対策工の比較検討、点検方法について研究¹⁾が行われているが、本研究で提案するように、劣化予測にもとづき被害リスクを評価し、最適な

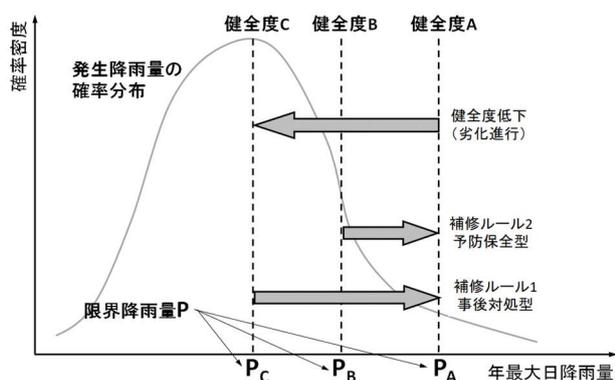


図-1 健全度と限界降雨量の関係（個々の施設で各健全度*i*に相当する限界降雨量 P_i ($i = A, B, C$)および補修費は異なる)

補修ルールを意思決定するといった総合的な方法論についての研究は過去に行われていない。

(2) 施設点検と補修の優先順位

現行の砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン(案)³⁾(以下、ガイドラインとよぶ)によれば、定期的な目視点検を通じて機能・性能低下を把握し、施設の健全度が評価される。その上で、個々の施設の重要度、保全対象との位置関係、災害履歴等の防災上の観点と補修の経済性を勘案して補修の優先順位が決定される。しかし、そうした意思決定の場面では、計画者の経験や主観に大きく依存し、事業関係者への説明責任という観点からも恣意性をできる限り排除することが望ましく、合理的に補修の優先順位を決定する方法論が必要である。

(3) 補修と被害リスクの関係付け

ガイドラインでは施設の健全度と保全対象の状態の両面を考慮して補修の優先順位を決定するものとされており、健全度等が同じランクであれば同一なものとして扱われており、基本的にはランクの順位で補修の優先度を決定している。これに対して本研究では、健全度等のランクが同じであっても施設ごとの安定性や保全対象の重要度は異なるものと考え、健全度が低下した場合に、保全対象にどの程度の被害が見込まれるかということを定量的に評価している。

図-1に健全度と限界降雨量の関係を示す。限界降雨量は健全度の低下に伴い減少し、これと同時に保全対象に被害が発生する確率(P_i ($i = A, B, C$))から ∞ まで発生

降雨量の確率密度関数を積分した値)は段階的に増加する。ここで、健全度BあるいはCの施設に補修を実施すると、健全度はAに回復し、被害が発生する確率を低減できる。本稿では、2つの補修ルール(予防保全型ルール、事後対処型ルール)に従って、各施設の健全度の推定結果にもとづき各年の被害額と補修費を計算し、計画期間における全施設での総和である総コストを計算する。

本研究では、多くの既往研究でも同じ考えが示されているが、複数ある劣化現象の中でも、砂防堰堤の全体安定性に対して最も致命的な基礎部の洗堀に着目し、洗堀が生じている施設の安定性を評価する。

3. 砂防施設の劣化に伴う不安定化

(1) 劣化過程モデル

砂防施設の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで表現する⁴⁾。砂防施設の健全度($i = 1, 2, 3: A, B, C$)は3段階($I = 3$)で、状態1(健全度A)は損傷が生じていない状態で、状態3(健全度C)は損傷が生じて機能が低下している状態で、状態2(健全度B)はそれらの中間状態である。前提として、必ず状態1から状態2、状態2から状態3へと順に変化し、補修を行わない限り状態は自然に回復しない(不可逆である)とする。

各施設 k ($k = 1, \dots, K$)の健全度*i*における指数ハザード関数を適用し、2時点間の点検間隔 Z とすると、 I 段階の健全度の推移確率行列 $\Pi(Z)$ の要素 $\pi_{i,j}(Z)$ は以下のとおりである。

$$\pi_{i,j}(Z) = \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_s} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_s} \exp(-\theta_s Z) \quad (1)$$

$$(i = 1, \dots, I-1)(j = i, \dots, I-1)$$

$$\pi_{i,I}(Z) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{i,j}(Z) \quad (i = 1, \dots, I-1) \quad (2)$$

$$\pi_{I,I}(Z) = 1 \quad (3)$$

$$\pi_{i,j}(Z) = 0 \quad (j < i) \quad (4)$$

各サンプル k の健全度*i*における指数ハザード関数は

$$\theta_i = \exp(x\beta'_i) \quad (5)$$

$$(i = 0, 1, \dots, N)$$

とする。 $x = (x_0, \dots, x_N)$ は説明変数ベクトル、 $\beta_i = (\beta_{i,0}, \dots, \beta_{i,N})$ は未知パラメータベクトルである。ここで、記号 $'$ 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5.(1)で詳細を説明するが、 t 検定を実施し、

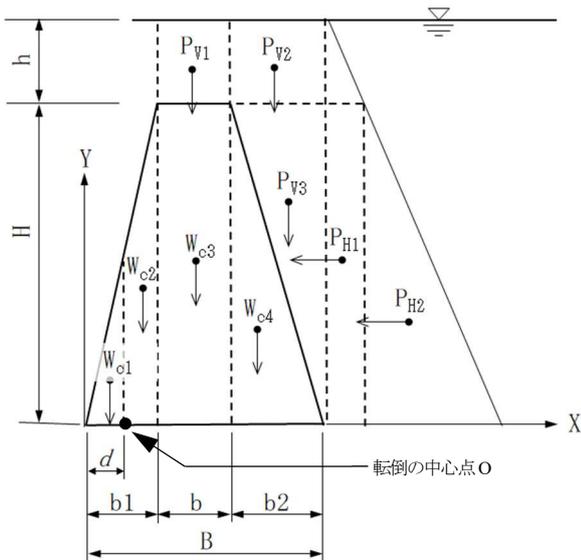


図-2 荷重モデル図（洗堀 d が増加するにつれて転倒の中心点 O が右方向に移動し、安定条件を満足する水深 h が減少する）

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。

本研究では施設ごとに検査間隔が異なるが、マルコフ推移確率は検査間隔 Z が異なる場合であっても、以下の式のとおり時間的整合性が理論的に証明されている⁴⁾。

$$\Pi(nZ) = \{\Pi(Z)\}^n \quad (6)$$

(2) 施設の不安定化の評価

筆者らは、砂防堰堤の設計基準の考え方にもとづいて、基礎部の洗堀が進行することで施設の安定性が低下することを明示的に考慮し、施設の安定性を評価する方法を提案している。具体的には、洗堀が進行すると安定条件を満足する計画降雨量が減少し、保全対象に生じる被害発生確率が高まるということを関係付けることで、補修の優先順位を検討する際にその被害リスクを定量的に考慮することが可能となる。

施設 k ($k = 1, \dots, K$) が健全度 $h = i$ ($i = 1, 2, 3: A, B, C$) の場合、図-2 に示すように洗堀幅 d ($= 0, a, b: A, B, C$) が生じているとすると、式(7)~(13)に示す安定条件式（転倒に対する安全率 F_s が許容安全率 F_{sa} ($= 1.5$) と等しくなる）、合理式およびせきの公式を連立させて、施設 k の限界降雨量 $P_{c,i}^k$ が計算される。

$$F_s = \frac{M_R'}{M_D} \quad (7)$$

$$M_R' = \sum_i W_{ci} \cdot (x - d) + P_{Vi} \cdot (x - d) \quad (8)$$

$$M_D = \sum_i P_{Hi} \cdot y \quad (9)$$

$$h_{c,i}^k = \arg_h(F_{sa}) \quad (10)$$

$$Q^k = 1.5 \times \frac{1}{3.6} \cdot K_{f1} \cdot P_{e,i}^k \cdot A^k \quad (11)$$

$$Q^k = \frac{2}{15} C \sqrt{2g} (3B_1^k + 2B_2^k) h_{c,i}^k \frac{3}{2} \quad (12)$$

$$P_{e,i}^k = \left(\frac{P_{c,i}^k}{24} \right)^{1.21} \times \left(\frac{24 \cdot K_{f1}^2}{120/60 \cdot A^k 0.22} \right)^{0.606} \quad (13)$$

M_R' : 洗堀発生時の抵抗モーメント ($kN \cdot m/m$)

M_D : 転倒モーメント ($kN \cdot m/m$)

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)

P_V : 鉛直方向の水圧 (kN/m)

P_H : 水平方向の静水圧 (kN/m)

y : 下流端から作用線までの鉛直距離 (m)

Q^k : 洪水流量 (m^3/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 (km^2)

C : 係数

B_1^k : 水通し幅 (m)

B_2^k : 越流水面幅 (m)

$P_{c,i}^k$: 限界降雨強度 (mm/day)

ここで、洗堀幅に関して、健全度 A では洗堀は生じていない、健全度 C では洗堀幅 b が生じている、健全度 B は両者の中間値で洗堀幅 a ($= b/2$) が生じていると設定する。健全度が推移するにつれて限界降雨量は減少し ($P_{c,1} > P_{c,2} > P_{c,3}$)、保全対象に被害が生じる確率が高くなる。

4. 補修ルールに基づく総コストの計算

(1) 補修ルール

二種類の補修ルールに従い計画期間 T 年間の総コスト TC を計算する。補修ルール1では健全度が C 、補修ルール2では健全度が B と判定された施設を対象とし、費用対効果 ($= \Delta B^q / C^k$) の高い施設から順に予算内で補修

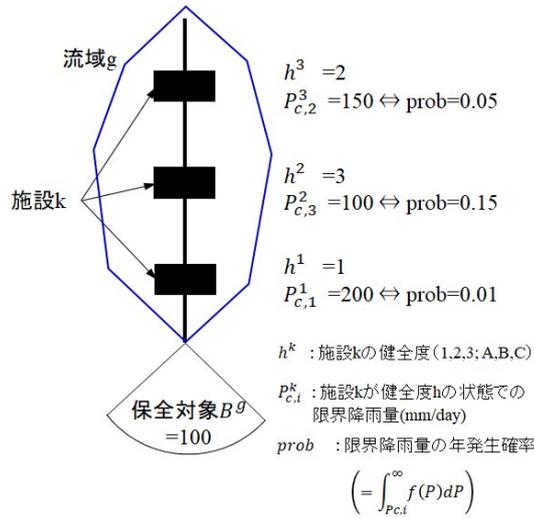


図3 効果算定の概念図（個々の施設で各健全度に相当する限界降雨量・補修費・効果は異なる）

を実施することとする。ここで、費用は補修費 C^k で、個々の施設の規模に比例し、効果 ΔB^g は施設 k を補修することでその流域において軽減される被害額に相当し、流域内の施設ごとの被害発生確率および保全対象の被害額から決まる。例えば、図-3 に示すケースを考えた場合、流域内で最小の限界降雨量(= 100)である施設($k = 2$)とその次に小さい限界降雨量(= 150)である施設($k = 3$)の被害発生確率の差 $\Delta \text{prob} (= 0.15 - 0.05 = 0.10)$ に保全対象の被害額 $B^g (= 100)$ を乗じて効果 $\Delta B^g (= 10)$ が計算される。

計画 $t (t = 1, \dots, T)$ 年目の総補修費が予算を下回る場合は、その残額を翌年に繰り越し、補修予算に充当する。年間補修可能件数に制約はないものとする。補修ルール 2 では、初期状態あるいは計画期間中に予算不足等の理由によって健全度 C の施設が存在する可能性があるが、そうした場合であっても健全度 B と合わせて $\Delta B/C$ の高い順に補修施設を決定することとする。

(2) 総コストの計算

ルール 1 は健全度 C に到達してから補修するので、被害が起こる確率が高いために被害額が高い。ルール 2 は健全度 B の時点で補修するので補修件数が多いために補修費が高い。両者は被害額と補修費がトレードオフの関係で、予算制約等の条件ごとに有利な補修ルールが存在する。

t 年目に施設 $k (k = 1, \dots, K)$ が健全度 $i (i = 1, 2, 3)$ の場合、保全対象に被害額 $r_t^g (g = 1, \dots, G)$ が発生する確率

$p_{i,t}^k$ 、堰堤 $k (k = 1, \dots, K)$ の補修費 $c_{i,t}^k (i = 1, 2, 3; t = 1, \dots, T)$ とすると、計画期間における全施設の補修費と全流域の被害額を積み上げた総コスト TC は以下の式で計算される。

$$TC = \sum_t \sum_k (c_{i,t}^k + p_{i,t}^k \cdot r_t^g) \quad (14)$$

(3) 問題の定式化

時点 t_r および $t_{r+1} (= t_r + Z)$ において点検が実施されたとして (Z は検査間隔)、施設の劣化による状態間のマルコフ推移確率行列は

$$\Pi(Z) = \begin{pmatrix} \pi_{11}(Z) & \cdots & \pi_{1I}(Z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{II}(Z) \end{pmatrix} \quad (15)$$

と表される。ここで、推移確率行列の各要素は式(1)~(4)で計算される。時点 t_r における状態の確率分布を状態ベクトル $s(t_r) = (s_1(t_r), \dots, s_I(t_r))$ と表すと、時点 t_{r+1} における状態ベクトルは

$$s(t_{r+1}) = s(t_r)\Pi(Z) \quad (16)$$

と表される。

時点 t_r において補修ルールにもとづき状態 I で補修を実施する場合、補修ベクトルを

$$\eta = (\eta(1), \dots, \eta(I)) \quad (17)$$

と定義する。ここで、補修ルール 1 では健全度 C であり $I = 3$ 、補修ルール 2 では健全度 B であり $I = 2$ となる。補修による状態間の推移確率行列は

$$Q(\eta) = \begin{pmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1I} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{I1} & \cdots & q_{II} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 & \eta(i) = j \\ 0 & \eta(i) \neq j \end{cases}$$

と表される。時点 t_r の点検後に補修を実施する場合、補修後の状態ベクトル $s(\tilde{t}_r)$ は

$$s(\tilde{t}_r) = s(t_r)Q(\eta) \quad (19)$$

以上を整理すると、時点 t_r での状態ベクトルは、補修をしない場合は

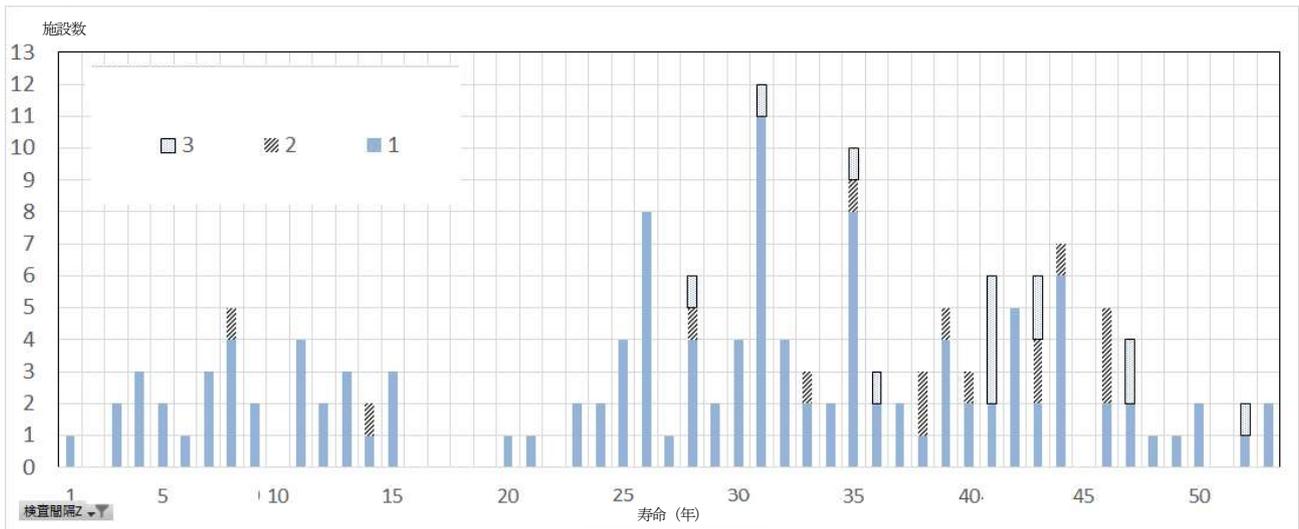


図4 施設の寿命分布（平成 25 年時点での分布で補修が行われているものは補修時点を 1 年目に更新する）

$$s(t_r) = s(t_{r-1})\{\Pi(Z)Q(\eta)\}^{r-1} \quad (20)$$

と表され、補修を実施する場合は

$$s(\tilde{t}_r) = s(t_{r-1})\{\Pi(Z)Q(\eta)\}^r \quad (21)$$

と表される。

5. 実証分析

(1) 劣化モデル推定

パラメータの推計には、A 県 B 土木事務所が管理する施設を対象とする。管内には 207 基の施設が存在するが、その内 150 基のコンクリート造不透過型堰堤を対象とする。図-4 に対象施設の寿命分布を示す。供用後から現在に至るまでにほぼ全ての施設で補修は行われていない。本検討では、平成 25 年から平成 29 年に実施された点検と令和元年に実施された点検の 2 時点で得られた健全度の推移結果（表-1）および施設諸元等のデータを用いて劣化モデルを推定する。目視点検では、施設自体の変状レベル、常時流水の有無や堆砂状況といった流域特性が調査される。施設諸元、供用年、補修履歴のデータは施設台帳を参照する。

各健全度の指数ハザード関数の候補として、流水の有無、落水高、堆砂状況、施設供用年を取り上げてハザードモデルを推計した結果、流水の有無のみを説明変数と

して取り上げる。パラメータの推定値 $\hat{\beta}$ は表-2 に示すとおりである。

表-1 健全度のクロス集計

前回 \ 今回	健全度 1	健全度 2	健全度 3	計
健全度 1	81	40	0	121
0	53	8	0	61
1	28	32	0	60
健全度 2		8	9	17
0	—	5	0	5
1		3	9	12
健全度 3			12	12
0	—	—	7	7
1			5	5
計	81	48	21	150

上段の数字はサンプル数で、中段および下段の数値はその内訳。中段の 0 は流水なし、下段の 1 は流水ありを意味している。

表-2 マルコフ劣化ハザードモデルの推計結果

健全度 i	定数項 $\hat{\beta}_{i,1}$	流水の有無 $\hat{\beta}_{i,2}$
1	0.0701 (2.83)	0.3044 (4.22)
2	0.1344 (2.94)	-
初期対数尤度	97.553	
対数尤度	86.134	
尤度比	22.838	

() 内は t 値を表す

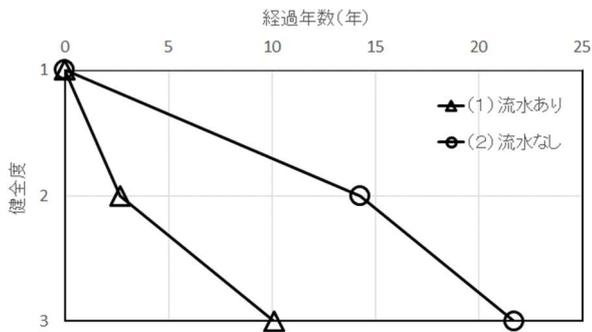


図5 期待劣化曲線（令和元年を経過年数ゼロとした．その時点で施設は供用から1～54年が経過している）

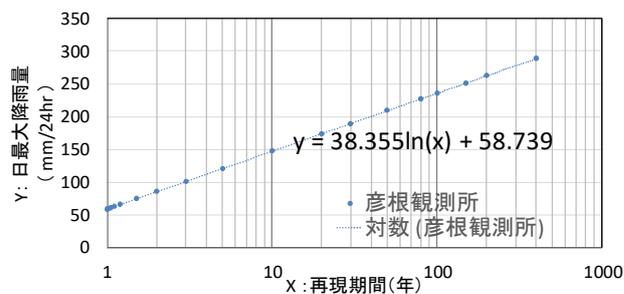


図6 発生降雨確率分布（管内に発生する降雨量は均一として考え、1950年以降の年最大日降雨記録をもとに作成）

(3) 計算条件

健全度の推移確率行列($Z = 1$)は、表-2に示すパラメータから以下のように計算される。健全度1において流水がある場合は式(22)、流水がない場合は式(23)である。

$$P_0 = \begin{pmatrix} 0.6876 & 0.2911 & 0.0213 \\ 0 & 0.8743 & 0.1257 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$P_0 = \begin{pmatrix} 0.9323 & 0.0633 & 0.0044 \\ 0 & 0.8743 & 0.1257 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

(2) シミュレーション分析

以下の手順でシミュレーションを実施し、総コストを計算する。

- 1) 施設 k の $t-1$ 年目の状態から t 年目健全度を推定する
- 2) t 年目において流域ごとに施設 k の限界降雨量が小さいものから順に並べ、4.(1)で説明した手順で $\Delta B/C$ が高いものから順番に予算内で補修する。
- 3) 補修完了後、流域ごとに最小の限界降雨量 $P_{c,min}^g$ を抽出する。
- 4) 図-6に示す確率分布に従って発生降雨量 P を決定する。
- 5) $P_{c,min}^g$ が P より小さい場合に、被害額 r^g を計上する。
- 6) 1)～5)を計画期間 T 年間繰り返し、総コストを計算する。

シミュレーションに用いる諸数値は以下のとおりである。計画期間(年) $T = 7$ 、総施設数(基) $K = 150$ ($k = 1, \dots, K$)、総流域数 $G = 73$ ($g = 1, \dots, G$)、洗堀幅係数 $a = 1/12 \cdot b = 1/6$ 、年間予算(百万円) $Abud = 20 \sim 200$ 、健全度 B の補修費(百万円) $c_B^k = 4.9 \sim 12.4$ 、健全度 C の補修費(百万円) $c_C^k = 14.7 \sim 37.2$ 、流域ごとの被害額(百万円) $B^g = 20 \sim 80$ 、シミュレーション回数(回) $N = 100$ とする。なお、本稿では施設および流域ごとの補修費および被害額はランダムに設定する。補修費に関して、健全度 C の補修費が上記より半減した場合を併せて計算する(他の条件は同一)。参考として、実証分析で用いた数値をの表-3に示す。同表中 T_i は限界降雨量の超過確率年で、年被害発生確率の逆数($T_i^k = 1/p_i^k$)である。全ての施設は100年超過確率降雨に対して設計されていることから、 $T_A = 100$ 年としている。

(4) 予算別の補修費・被害額の変化

年間予算に応じて補修費・被害額がどのように変化するかを分析した結果を図-7に示す。同図より以下のことが読み取れる。

- ・補修費の比率(= C_c/C_b)が大きい場合はルール2が有利であるが、その比率が減少するほどルール1が有利となる。
- ・現年間予算40百万円に対して、ルール2では300百万円程度あれば、被害をほぼゼロに抑えられる。
- ・両ルールともに補修費と被害額はある値に収束していく。
- ・計画初年次の状態と劣化速度によって有利な補修ルールが決定される。

表-3 施設ごとの限界確率降雨年

施設 k	流域 g	限界降雨年(年)			施設 k	流域 g	限界降雨年(年)			
		T _A	T _B	T _C			T _A	T _B	T _C	
1	1	24	6	140	78	1	78	1	140	
2		38	15	141	15	3	15	3	141	
3		52	29	150	50	26	50	26	150	
4		51	28	151	100	100	100	100	151	
5		40	17	154	38	16	38	16	154	
6		44	20	157	43	19	43	19	157	
7		49	26	158	40	15	40	15	158	
8		51	27	160	46	23	46	23	160	
11		3	45	21	161	40	15	37	15	161
15		4	42	19	166	37	15	37	15	166
17			43	20	167	44	21	44	21	167
18			48	25	168	31	10	31	10	168
19			51	27	169	49	25	49	25	169
20			28	9	171	41	18	41	18	171
21			47	25	174	49	25	49	25	174
22			53	27	175	33	12	33	12	175
24			34	13	177	42	19	42	19	177
23			50	27	178	45	22	45	22	178
26			49	25	179	37	14	37	14	179
30	38		17	181	45	25	45	25	181	
32	48		23	187	42	19	42	19	187	
33	18		4	188	51	27	51	27	188	
34	32		10	189	43	20	43	20	189	
35	42		19	190	47	23	47	23	190	
45	17		3	191	41	18	41	18	191	
46	26		8	192	42	19	42	19	192	
43	50		26	194	51	27	51	27	194	
44	48		24	195	43	20	43	20	195	
49	52	19	198	46	22	46	22	198		
51	51	23	199	41	19	41	19	199		
52	39	15	200	33	12	33	12	200		
53	51	23	201	40	18	40	18	201		
59	147	43	202	58	30	58	30	202		
63	19	7	203	46	23	46	23	203		
65	34	13	208	46	25	46	25	208		
68	36	14	210	33	13	33	13	210		
69	33	11	214	45	21	45	21	214		
71	59	29	218	49	25	49	25	218		
72	49	26	220	31	10	31	10	220		
74	23	6	221	36	14	36	14	221		
75	15	3	223	27	8	27	8	223		
76	43	21	236	29	10	29	10	236		
77	47	24	238	44	20	44	20	238		
78	44	20	250	52	29	52	29	250		
79	333	1	253	45	22	45	22	253		
82	53	27	258	50	27	50	27	258		
83	17	3	259	42	19	42	19	259		
84	19	4	260	46	22	46	22	260		
86	44	21	261	49	25	49	25	261		
87	47	23	262	50	26	50	26	262		
88	47	23	264	55	29	55	29	264		
89	53	28	271	21	5	21	5	271		
90	46	23	272	42	19	42	19	272		
92	38	15	273	30	10	30	10	273		
95	50	26	274	45	21	45	21	274		
97	48	24	277	48	24	48	24	277		
105	41	17	278	48	24	48	24	278		
109	50	26	280	44	21	44	21	280		
117	50	26	282	43	20	43	20	282		
118	51	27	283	51	27	51	27	283		
119	43	20	284	33	12	33	12	284		
123	51	28	285	24	6	24	6	285		
126	51	27	288	28	9	28	9	288		
127	51	27	289	33	12	33	12	289		
129	50	27	290	26	8	26	8	290		
130	51	27	292	35	13	35	13	292		
131	51	27	293	43	19	43	19	293		
132	26	7	294	47	23	47	23	294		
133	51	27	295	51	27	51	27	295		
134	49	26	296	52	29	52	29	296		
135	51	27	300	42	19	42	19	300		
136	29	9	301	36	14	36	14	301		
137	49	25	302	36	14	36	14	302		
138	52	28	303	49	26	49	26	303		
139	47	24	304	41	19	41	19	304		

検討対象外の施設を除外しているため施設番号に脱落がある

- ・ 両ルールともに補修費と被害額はある値に収束していく。
- ・ 計画初年次の状態と劣化速度によって有利な補修ルールが決定される。

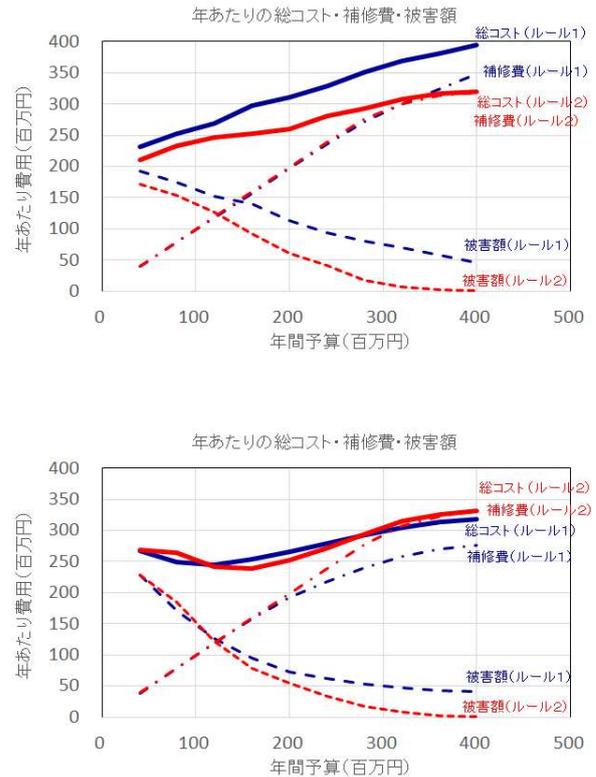


図-7 予算別の年補修費と年被害額（上図は健全度Cの補修費がBの補修費に対して3.0倍の場合で、下図は1.5倍の場合）

6. おわりに

本稿では、補修費と保全対象の被害リスクの最適バランス問題における、予算等の諸条件が2種類の補修ルールの意思決定に及ぼす影響を検討した。劣化予測モデルのパラメータ推計の精度向上、施設の不安定状態の評価の妥当性等については改善の余地があるものの、施設の劣化度と保全対象の被害リスクを関係付けた上で、施設全体の最適な補修施策を意思決定するための分析の枠組みの有用性を示した。

7. 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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。
- 4) 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.