

砂防関係施設の維持管理における既存点検結果を用いた 分析手法に関する提案

三井共同建設コンサルタント株式会社 ○ 原田 紹臣
京都大学大学院農学研究科 中谷 加奈
立命館大学理工学部 里深 好文
政策研究大学院大学 水山 高久

論文要旨

本稿では、自然環境条件等の要因が複雑に施設等の変状に対して影響を与えていると考えられる砂防関係施設を対象に、既往の点検結果を用いて、環境条件や構造部材の違いが管理施設の変状に与える影響について定量的に分析している。なお、分析手法については多変量解析(数量化理論)を用いて分析し、考察している。さらに、今後、効果的かつ計画的に施設を維持管理していくために変状の劣化予測に関しても検討している。

キーワード：統計解析, 維持管理, 砂防関係施設, 多変量解析, 劣化予測

まえがき

近年、水害に対して治水上の安全確保が求められる一方で、厳しい財政状況の下で更なる維持管理に要するコスト削減の取り組みや地域の実情を考慮した効果的な対応が求められており、それらを受けた技術的な基準¹⁾や技術資料²⁾が示されている。今後、河川管理者は計画的な定期点検の実施や点検結果記録の保存や活用等により、更なる適切な河川の維持管理が求められている。一般的に、河川管理施設は広範囲で数種の損傷や変状があるとともに、これらの変状等については様々な要因の影響を受けていると考えられるため、劣化箇所や程度を事前に予測することが難しいと考えられる³⁾。そのため、河川管理者はこれまで点検によって確認された変状を評価しながら事後的に対策を講じてきた。しかしながら、河川管理施設の変状や劣化は直接的に災害発生に影響を与えることが懸念されるため、予防保全的な対策の実施が望まれる。これらの背景を受け、今後、更なる技術知見の集約やその活用による効率化が重要であると考えられる。これまで、筆者ら⁴⁾は河川管理施設について、海外の橋梁における考え方を参考に定量的な健全度評価手法を提案している。しかしながら、確認された変状とそれらの要因との関係性等については議論できていない。そこで、本研究ではこれまでに調査された数多くの点検結果等を有効に活用し、河川管理施設に対する維持管理における基礎資料の検討手法や新たな技術知見について効果的に検討することを目的としている。

本報では、複数の自然環境条件等の要因が複雑に河川管理施設等の変状に対して影響を与えていると考えられる山地

河川を対象に、これまで実施された点検や観測結果を用いて、環境条件や構造部材の違いが管理施設の変状に与える影響について定量的に分析および考察した事例を報告する。なお、分析手法に関して、これまで一般的に単純集計やクロス集計等によって変状要因について考察されてきたが、複数の要因については分析が困難であるため⁵⁾、本研究では確率統計解析手法の一つである多変量解析を用いてこれらの関係性について分析し、考察するものとする。さらに、今後、効果的かつ計画的に施設を維持管理していくために変状の劣化予測に関しても検討している。

1. 環境条件の違いが山地河川施設に与える影響

環境条件の違いが山地河川における管理施設の変状や劣化に与える影響について把握するため、これまでの点検結果を有効に活用して、多変量解析によって分析する。なお、分析に際しては、山地河川の土砂災害防止においてに重要であると考えられる主要な砂防堰堤を対象とし、劣化機構が異なる代表的な部材(コンクリートおよび鋼製材料)毎に、それぞれ検討するものとする。

1.1 コンクリート製の砂防堰堤における変状等の分析

山地河川におけるコンクリート部材を用いた従来の不透過型砂防堰堤(有効施設数:246)を対象に、環境条件の違いと施設の変状等との関係性について分析する。その際、対象とする環境条件については、標準的な維持管理において把

握されている点検項目の中から、一般的に変状等に影響を与えると考えられる要素として、溪流内における常時流水の有無、砂防堰堤の堆積(満砂)状況および対象地域における優勢な地質に着眼する。

分析手法に関して、点検結果が定性的なサンプルデータであるが、分析については説明責任の観点より定量化が一般的に望まれるため、多変量解析である数量化理論Ⅱ類⁵⁾を用いて分析するものとする。数量化理論Ⅱ類は、ダミー変数で表現された質的データに対して、正準判別により分析するものである。ここで、ダミー変数を下記のとおりに定義すると、

$$\delta_{ij}(j, k) \quad (1)$$

と表される。ここに、 i 番目の標本が j 番目の説明変数に対して k 番目の選択肢を選択した場合には 1 とし、それ以外の場合は 0 としして解を得るものとする。また、 λ については、対象標本に関して、目的変数に対応する選択肢 λ を選択したことを表している。次に、個体 i のサンプルスコアを定義すると、

$$Y_{i\lambda} = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} a(j, k) \cdot \delta_{ij}(j, k) \quad (2)$$

と表される。ここに、 R は説明変数の個数、 C_j は j 番目の説明変数における選択肢の個数である。また、ダミー変数に係る係数 $a(j, k)$ は、カテゴリースコアとして定義するものとする。なお、カテゴリースコア $a(j, k)$ は、 λ に対応するサンプルスコア $Y_{i\lambda}$ におけるグループ間の変動と全変動との比率(相関比)を最大化するように決められる。つまり、全変動とはグループ間における変動とグループ内における変動の合計とすることから、グループ内における変動(グループ内における要素間の差異)を最小にし、さらにグループ間における変動(グループ外の要素との差異)を最大にすることによって、最も効率的なグループ分けのための判別式を推計するということになる。ここで、相関比を η^2 と定義した場合、カテゴリースコア $a(j, k)$ の二次式の比となり、最大化の一階条件は仮定された固有値問題に帰着する。最終的に、最大固有根を η^2 の推計値とし、対応するベクトルを $a(j, k)$ の推計値とするものとする。その他の数量化理論Ⅱ類に関する詳細な内容や適応時の妥当性等に関しては、既往文献⁵⁾⁶⁾を参照されたい。

不透過型砂防堰堤を対象に数量化理論Ⅱ類を用いて分析した結果に関して、代表的な変状(図-1、図-3、図-5および図-7)毎に、図-2、図-4、図-6および図-8にそれぞれ示す。なお、分析結果において、各因子(環境条件)と対象変状の発生有無との関係性(影響の程度)については、棒長と向き(±)によって表現されている。

砂防堰堤の天端における摩耗(図-1)の発生有無に関し



図-1 コンクリート砂防堰堤における天端摩耗の変状事例

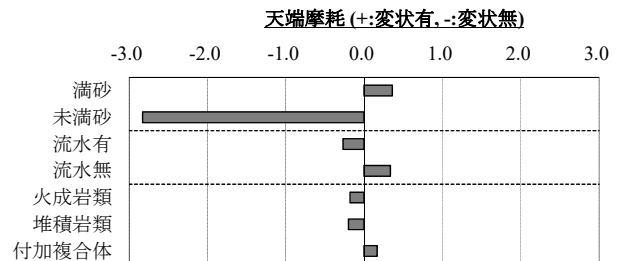


図-2 環境条件の違いが砂防堰堤の天端摩耗に与える影響



図-3 コンクリート砂防堰堤におけるひび割れの変状事例

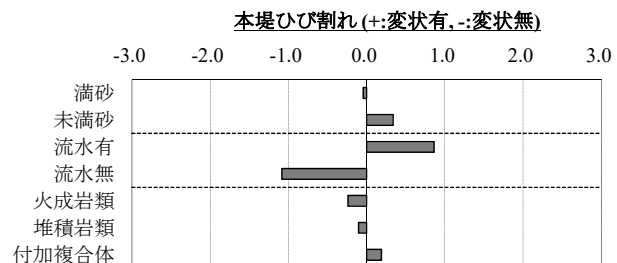


図-4 環境条件の違いが砂防堰堤のひび割れに与える影響



図-5 コンクリート砂防堰堤における剥離欠損の変状事例

て、堆砂状況の違いが顕著に影響を与えていることが示されている(図-2)。これは、未満砂の場合においては、当然ながら水通し等の天端を砂礫や礫が越流しないことによるものと考えられる。一方、その他の因子の違いと変状の間には殆ど関係性が見られなかった。

砂防堰堤の本堤におけるひび割れ(図-3)の発生有無に

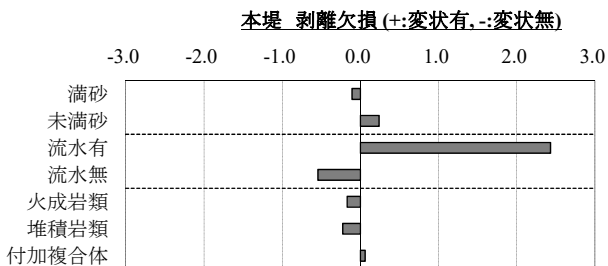


図-6 環境条件の違いが砂防堰堤の剥離欠損に与える影響



図-7 コンクリート砂防堰堤における洗掘(基礎)の変状事例

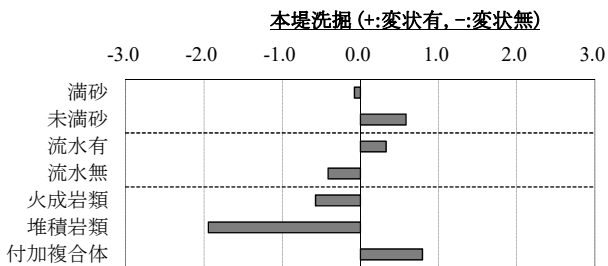


図-8 環境条件の違いが砂防堰堤の洗掘(基礎)に与える影響

に関して、常時における流水有無の違いが変状の発生に影響を与えていることが示されている(図-4)。一方、堆砂状況の違いについても一部で関係性が示されているが、その影響度は小さい結果であった。また、砂防堰堤の本堤における剥離欠損(図-5)の発生有無に関しても、常時における流水有無の違いが、他の要因と比べて、顕著に変状の発生に影響を与えていることが示されている(図-6)。ここで、常時における流水が存在する場合や未満砂の場合にひび割れの変状が発生する理由としては、本堤背面からの流砂や礫の衝撃等の影響を受けたことによるものと考えられる。

最後に、砂防堰堤の本堤前庭部における基礎洗掘(図-7)の発生有無に関して、地質の違いが変状発生の有無に顕著に影響を与えていることが示されている(図-8)。ここで、付加複合体が洗掘の変状に与える要因に関して、付加複合体は過去に二次的な変化(せん断力)を受けたことに伴って亀裂等が多く、他の地質と比べて比較的岩盤の風化が進行していることによるものと考えられる。一方、未満砂の場合においても洗掘の傾向が示されている。これは、未満砂の場合、砂防堰堤上流背面から基礎部を介して地下水が浸透しやすいことによるものと考えられるが、更なる検討が望まれる。

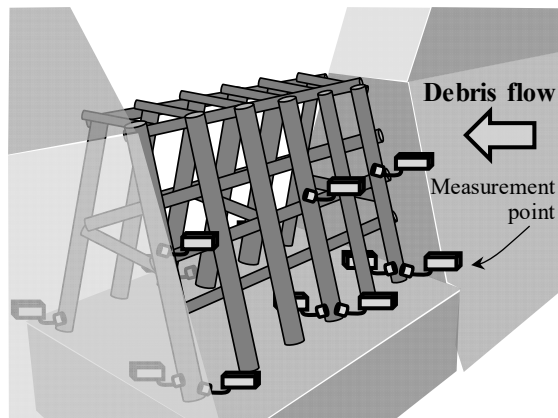


図-9 鋼製部材の腐食状況調査位置の概要

なお、今後において、詳細な地質年代や他の地質等について詳細に分析し、劣化機構に関する更なる考察が望まれる。

1. 2 鋼製部材を用いた砂防堰堤における変状等の分析

近年、従来のコンクリートを主体とする不透過型砂防堰堤における流木捕捉に対する機能不足⁷⁾や土砂捕捉効果の優位性より、鋼製部材を活用した透過型砂防堰堤が多く設置されるようになってきた。鋼製部材はコンクリート部材と異なり、一般的に部材自体の経年的な腐食が懸念される。ただし、透過型砂防堰堤は橋梁等と比べて設置からの経過年数が短く、これまで自然環境条件の違いが山地河川における鋼製部材の腐食速度に与える影響については更なる議論が望まれる⁸⁾。

そこで、これまで設置されてきた透過型砂防堰(18施設)を対象に、1施設あたりに複数箇所における鋼製部材の腐食状態(鋼材厚)と周辺的环境条件について調査し、分析するものとする。その際、腐食(鋼材厚)について調査する箇所位置については、流水の影響や日照の影響等の違いが腐食速度に与える影響について着眼するため、流水方向に対する部材の上下流および鉛直方向に対する上下部の位置における現状の鋼材厚を対象とし、想定される当初部材厚との差異および経過時期を用いて腐食速度を推定するものとする。測定した部材位置を図-9に示す(有効分析対象箇所計:165箇所)。一方、対象とする環境条件については、一般的に鋼材の腐食に影響を与えると考えられる常時における流水の状況(有無、酸性度:pH⁹⁾、土壌比抵抗値⁹⁾に加えて、地質および日照(施設が設置されている方位)を対象とする。また、分析手法については、前述と同様に、多変量解析である数量化理論Ⅱ類を用いて分析するものとする。

環境条件の違いが鋼製部材(図-9)の腐食速度に与える影響に関して、数量化理論Ⅱ類を用いて分析した結果を図-10に示す。図-10に示されるとおり、供用年数(経過年数)や常時における流水有無の違いが、腐食速度に影響を与えることが確認される。さらに、流水中の酸性度(pH)の違

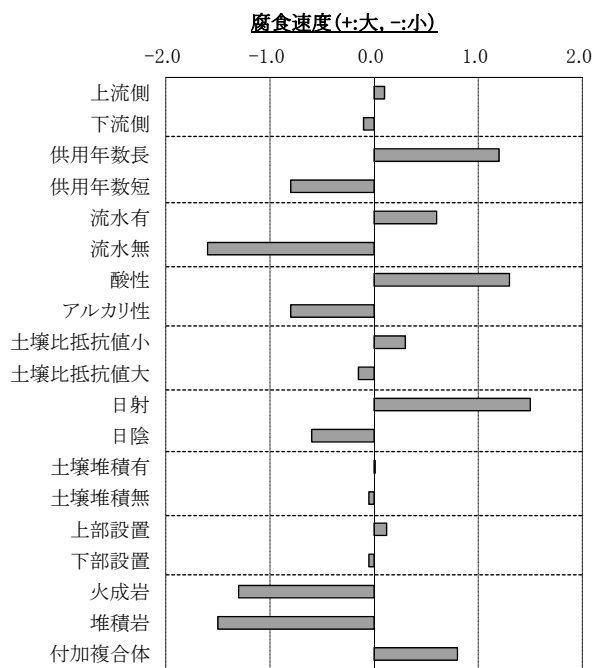


図-1 10 環境条件の違いが鋼製部材の腐食速度に与える影響

いが顕著に影響を与えていることが確認され、既往の文献⁸⁾によって提案されている内容と一致している。しかしながら、既往の文献⁹⁾において同様に提案されている土壌の比抵抗値(土中における電気抵抗の大きさ;比抵抗が小さいと電気を通しやすく、一般的に腐食の進行が早いと考えられる)については、明確な影響度が確認されなかった。さらに、地質の違いが腐食速度に影響を与えることが確認された。この要因として、酸性度(pH)と地質の違いについて同様に分析した結果を図-1 11に示す。図-1 11に示されるとおり、地質の違いと酸性度との間に関係性が見られる。ただし、一般的に称されている塩基(アルカリ)性岩や酸性岩は、化学分野で分類されている塩基性や酸性とは意味が異なることが知られており、今後、更なる検証による考察が望まれる。一方、部材位置の上下流や上下部の違いについては、腐食速度に与える影響は殆ど確認されなかった。

本稿で示した数量化理論Ⅱ類を用いて得られた結果により、山地河川における鋼製部材の腐食速度に影響を与える環境条件との関係性について示唆された。ただし、鋼製部材については経過年数が短いとともにサンプル数が少なく、錆の進行があまり確認されなかったため、継続的な調査が望まれる。また、各詳細な形状や製品等の違いと腐食速度との関係性が不明瞭であり、今後、更なる他地域における調査結果も含めた分析が望まれる。

2. 山地河川施設における変状等の経年変化

一般的に、山地河川における砂防堰堤については橋梁や水

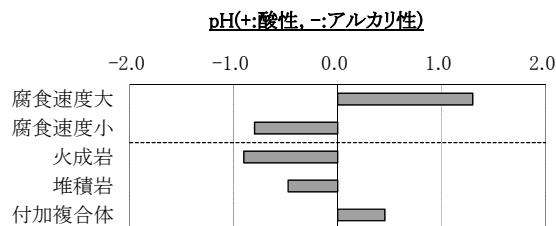


図-1 11 地質条件の違いが流水中における酸性度(pH)に与える影響

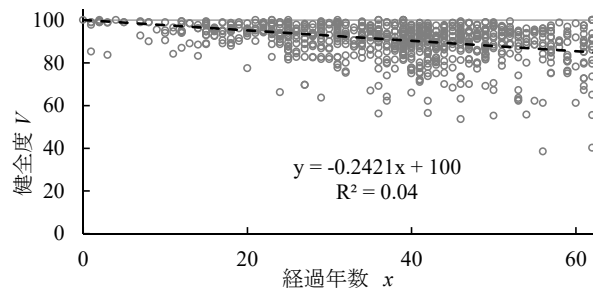


図-1 12 健全度評価値と経過年数との関係(全施設対象)

門等の重要構造物と比較して十分に定期的な点検が実施されてきていなかったため、維持管理に関する技術知見が十分でないと考えられる。また、砂防堰堤等の供用年数についても、これまで十分に議論されていない⁹⁾。そこで、山地河川の砂防関係施設(1,200施設)における変状や劣化の時間的な変化について把握し、今後の維持管理における有益な基礎資料とするため、既往の点検結果を活用して、劣化予測モデルを構築するものとする。

最初に、施設の健全度について評価するために点検時に定量化された評価値(提案値⁴⁾の逆数)を用いて、その評価値の時間的な変化について整理するものとする(図-1 12)。図-1 12に示されるとおり、経過年数毎における健全度の評価値は散在しており、明確な相関関係は得られなかった(近似式の決定係数:0.04<0.7:一般的な閾値)。これは、環境条件等の違いにより、各施設の変状や劣化の発生に関して顕著な差が表れており、経過年数が長いにもかかわらず、全く健全な状態である施設も多く存在していたことによるものである。ここで、参考として、経過年数毎において最も健全度が低評価値であった施設と経過年数との関係を図-1 13に示す。図-1 13に示されるとおり、最も条件等が良くないと考えられる場所において設置されてきた健全度と経過年数との間には明確な相関性が確認された(決定係数:0.71)。ただし、本近似式をそのまま活用して、全ての施設について議論した場合、過大な評価となることが懸念されるため、更なる検討が望まれる。そこで、土木分野においても近年に一部で利用されている単純マルコフ理論(Simple Markov Theory)の遷移

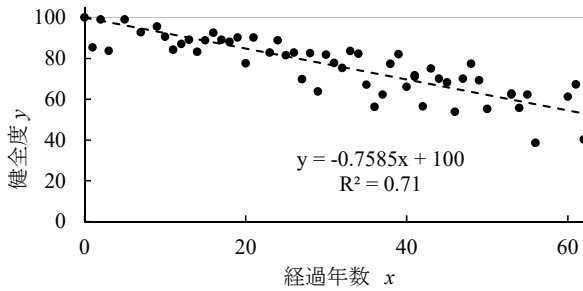


図-1-13 健全度評価値と経過年数との関係
(各経過年数における最低評価値のみ対象)

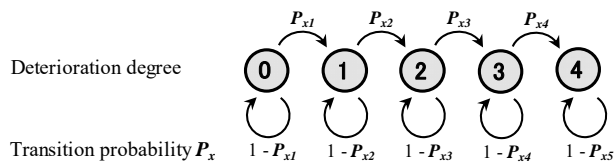


図-1-14 マルコフ連鎖(Markov-chain)を用いた劣化進行モデル

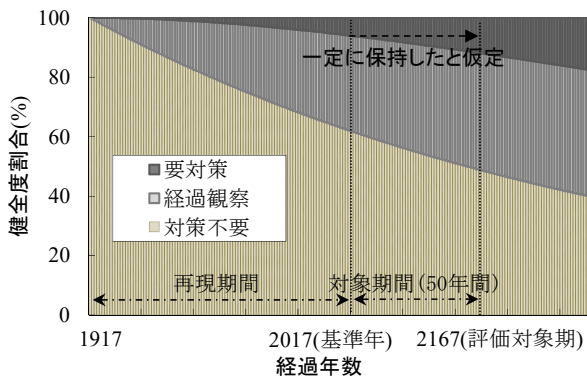


図-1-15 マルコフ連鎖による解析結果(再現計算および将来予測)

確率(図-1-14参照)の応用により算出された劣化過程を用いて、検討するものとする¹⁰⁾。

マルコフ過程とは、一般的にマルコフ性を保有した確率過程を表しており、将来の状態が現時点における状態値だけで決定され、過去の状態と無関係であるという仮定における確率的な遷移過程としている。ここで、マルコフ過程における遷移確立については、

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & \cdots & P_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表される。ここに、 P : 遷移確率、 N : 階層の数である。さらに、状態 π の変化は、

$$\pi(0)P^{(n)} = \pi(0)P^{(n-1)}P = \pi(n-1)P \quad (4)$$

表-1 修繕・補修等の方法における検討条件

シナリオ	概 説
a-1	点検結果より推定された劣化過程により遷移する施設群(図-1-15)を対象に、基準時期(2017年)における要対策評価対象の施設数 n_c を対象期間(2067年までの50年間)において、修繕等によって一定に保持した場合
a-2	施設設群(図-1-15)を対象に、対象期間(50年間)には修繕等を実施せず、評価対象期(2067年)に基準時期(2017年)における要対策評価の対象施設数 n_c と同様の施設数とするまで、一時期に修繕等した場合
a-3	施設設群(図-1-15)を対象に、評価対象期(2067年)に全施設を対策不要とするために、対象期間において基準時期(2017年)から段階的に修繕・補修等を実施した場合(最終的に、要対策、経過観察施設は無し)
b-1	点検結果より推定された遷移確率(図-1-15)の2倍の速さで劣化すると仮定し、基準時期(2017年)における要対策評価の施設数 n_c を対象期間(50年間)において、修繕や補修等によって一定に保持した場合

と表される。ここに、 n : 経過時間(年数)である。なお、本検討では階層が3段階(要対策、経過観察および対策不要)であるため、遷移確率は、

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

と表される。なお、 P_{11} および P_{22} は、それぞれ、

$$P_{11} + P_{12} = P_{22} + P_{23} = 1 \quad (6)$$

であり、これまでにおける点検結果を用いて推定するものとする。なお、その他のマルコフ理論を用いた劣化予測に関する更なる詳細な内容や適用に関しては、既往文献¹⁰⁾を参照されたい。

再現期間における既往点検結果を対象に、マルコフ連鎖による施設の劣化進行を仮定して、砂防関係施設(1,200施設)の健全度に関する各評価区分(要対策、経過観察および対策不要)における施設数割合の時間的な変化について図-1-15に示す。さらに、図-1-15に示す遷移率を用いて、表-1に示されるシナリオにおける対策(修繕・補修)や点検に必要なと考えられる点検費の違いについて、約50年間(対象期間)を対象に試算した結果を図-1-16に示す。ここで、社会的割引率については一般的な4%とし、その他の単価については

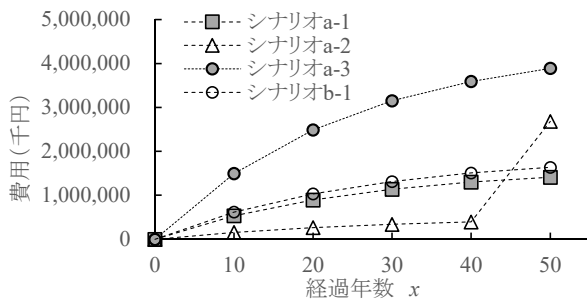


図-16 マルコフ連鎖(Markov-chain)を用いた劣化進行モデル

これまでに得られた経験的な単価を試行的に設定している。

図-16および表-1に示されるとおり、基準年(2017年)における要対策評価の施設数 n を、段階的な修繕や補修等によって一定に対象期間(50年間)において保持した場合(a-1)の方が、単年度(2067年)に一時期で対策を講じた場合(a-2)と比べて、約半分程度の費用となることが分かった。この要因としては、要対策施設と対策不要施設との点検に要する費用(点検精度)の違いや、社会的割引率の影響を受けたものと考えられる。なお、全ての要対策施設および経過観察施設を50年間(対象期間)において対策を講じた場合の費用を参考に示している。最後に、遷移率を2倍の速度で劣化すると仮定した場合(b-1)については、砂防関係施設の遷移率が小さく、結果として殆ど遷移率の違いによる影響を受けなかったことが分かった。これより、健全度に着眼した砂防関係施設の供用年数は、橋梁等の構造物と比べて長期化できることが示唆された。今後、更なる検討が望まれる。

あとがき

本研究では、多数の自然環境条件などの要因が複雑に河川管理施設等の変状に対して影響を与えていると考えられる山地河川を対象に、施設の維持管理を目的に実施された点検や観測結果を用いて、環境条件や構造部材の違いが管理施設の変状に与える影響等について検討した。

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 山地河川におけるコンクリート製の不透過型砂防堰堤を対象に、これまで蓄積された点検結果を有効に活用して、環境条件の違いと施設の変状等との関係性について、多変量解析である数量化理論Ⅱ類を用いて検討した。分析結果によると、変状毎に環境条件(流水有無、堆砂状況、地質)の違いによる影響がそれぞれ異なることが分かった。
- 2) 透過型砂防堰における鋼製部材の腐食速度と周辺の環境条件について調査し、同様に数量化理論Ⅱ類を用いて、これらの関係性について分析した。分析結果によると、

鋼材の腐食については、供用年数、常時における流水状況(有無、酸性度)に加えて、日照条件、地質等の違いに影響を受けることが分かった。一方、従来において知られていた土壌の比抵抗値については、明確な影響度が確認されなかった。

- 3) 山地河川の砂防関係施設を対象に、既往の点検結果を活用した数種の劣化予測モデルを用いて検討し、それらの事例を示した。さらに、マルコフ過程に基づいた理論を用いて、経済的な対策時期等について検討したところ、評価区分毎における点検費の違いや社会的割引率の影響を受けて、段階的に補修等した方が優位であることが分かった。
- 4) 本報では限られた点検結果に基づいた考察であったため、今後、更なる検証が望まれる。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川砂防技術基準 維持管理編(一部改訂)，2015。
- 2) 一般財団法人 河川技術者教育振興機構：平成 27 年度 河川維持管理技術講習会テキスト，2015。
- 3) 小飯塚哲郎・長谷川真英・浅井誠二・富田陽子・斎藤義之・森島成昭・村松広久：蒲田川流域における砂防堰堤の変状・劣化特性，砂防学会研究発表会，2012。
- 4) 原田紹臣・小杉賢一朗・里深好文・水山高久：老朽化した砂防関係施設の健全度及び対策優先度に関する定量的な評価手法の提案，河川技術論文集，第 21 巻，pp.183-188，2015。
- 5) Chikio Hayashi: Multidimensional Quantification II , *Proceeding of the Japan Academy*, Vol. 128, pp.165-169, 1954.
- 6) 大橋健一・青山吉隆：土木計画への数量化理論Ⅱ類適用の信頼度に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.353, VI-2, pp.67-74, 1985。
- 7) 国土交通省 砂防部：土石流対策・流木対策設計技術指針および同解説，2017。
- 8) 砂防・地すべり技術センター：鋼製砂防構造物設計便覧，2009
- 9) 三池力・坂口哲夫・松山洋平・長山孝彦・伊藤元洋：砂防堰堤における損傷劣化度現象の時系列的変化について，平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集，A-20, 2016
- 10) 森村栄典・高橋幸雄：マルコフ解析，日科技連出版社，1979。