

砂防設備等における除石や延命化を考慮した ライフサイクルコスト縮減に関する一考察

MAINTENANCE MANAGEMENT PLAN OF LIFE CYCLE COSTS CONSIDERING FUNCTIONAL EVALUATION AND LIFE EXTENSION FOR SABO FACILITIES

原田 紹臣¹・里深 好文²・水山 高久³

Norio HARADA, Yoshifumi SATOFUKA and Takahisa MIZUYAMA

¹ 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: harada3@kais.kyoto-u.ac.jp

² 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: satofuka@se.ritsumei.ac.jp

³ 京都大学名誉教授 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: mizuyama@kais.kyoto-u.ac.jp

Key Words: deterioration prediction, life cycle costs, quantitative evaluation, SABO facility, soundness

1. はじめに

砂防関係施設の長寿命化計画策定に関する考え方が見直され、これまでの事後保全型の維持管理から予防保全型の維持管理の考え方が導入された^{1),2)}。なお、長寿命化計画策定に際して(図-1)、施設管理者は点検等により各施設の部位における変状レベル(表-1)を把握し、それらの変状レベルや施設周辺の状況等を総合的に評価して、対象施設等の健全度(表-2)や修繕等の対策優先順位について検討する。

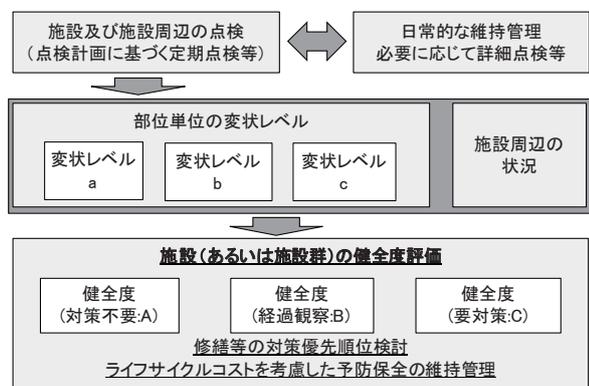


図-1 砂防関係施設における健全度評価等検討の流れ^{2)に加筆}

筆者らは、これまで、老朽化した施設の健全度(表-3)に対する定量的な評価手法³⁾やライフサイクルコスト縮減に関する検討手法⁴⁾について提案している。しかしながら、新たに示された除石の優先順位の評価手法²⁾については議論できていない。また、一般的な予防保全や事後保全に対する検討のみで、延命化(長寿命化)に関する更なる検討が望まれる。

表-1 部位あるいは部位グループの変状レベル評価¹⁾

変状レベル	損傷等の程度
a	当該部位に損傷等は発生していない、もしくは軽微な損傷が発生しているものの、損傷等に伴う当該部位の性能の低下が認められず、対策の必要がない状態
b	当該部位に損傷等が発生しているが問題となる性能の低下が生じていない。現状では早急に対策を講じる必要はないが、今後の損傷等の進行を確認するため、定期巡視点検や臨時点検等により、経過を観察する必要がある状態
c	当該部位に損傷等が発生しており、損傷等に伴い、当該部位の性能上の安定性や強度の低下が懸念される状態

表-2 砂防関係施設において有すべき健全度の定義²⁾

用語	用語の解説
健全度	有すべき機能及び性能に対して、当該砂防関係施設が有している程度
機能	砂防関係施設が土砂災害防止のために、有すべき施設の働き
性能	当該砂防関係施設が機能を発揮するために必要となる構造上保持すべき強度、安定性等

表-3 砂防関係施設における健全度評価の表記²⁾

健全度	損傷等の程度
対策不要 (A)	当該施設に損傷等は発生していないか、軽微な損傷が発生しているものの、損傷等に伴う当該施設の機能及び性能の低下が認められず、対策の必要がない状態
経過観察 (B)	当該施設に損傷等が発生しているが問題となる機能及び性能の低下が生じていない。現状では早急に対策を講じる必要はないが、将来対策を必要とするおそれがあるので、定期点検や臨時点検等により経過を観察する、または、予防保全の観点より対策が必要である状態
要対策 (C)	当該施設に損傷等が発生しており、損傷等に伴い、当該施設の機能低下が生じている、あるいは当該施設の性能上の安定性や強度の低下が懸念される状態

本稿では、筆者らの既往研究成果^{3),4)}を基に、砂防設備における除石（堆砂状況）に関する評価手法²⁾や、その他施設の改築等による更なる延命（長寿命）化を考慮した劣化予測やライフサイクルコスト等の具体的な検討手法の提案や考察を目的としている。

2. 健全度評価の検討手法に関する提案

健全度評価手法に関して、既往研究成果³⁾の内容を示すとともに、砂防設備における堆砂状況（健全度）や除石の優先順位の評価手法²⁾について提案し、除石に対する評価の傾向について考察する。

(1) 健全度評価の検討概要

これまで、筆者らは、欧州の橋梁を対象にした維持管理マネジメント⁵⁾において提案されている手法等を参考に、部位単位における変状レベル（a, b, c：表-1）等の変状特性を考慮した施設の健全度評価（健全度 A, B, C：表-3）に関する定量的な手法を提案している³⁾。なお、先行研究³⁾において実施した流れを図-2に示す。図-2に示すとおり、老朽化した施設

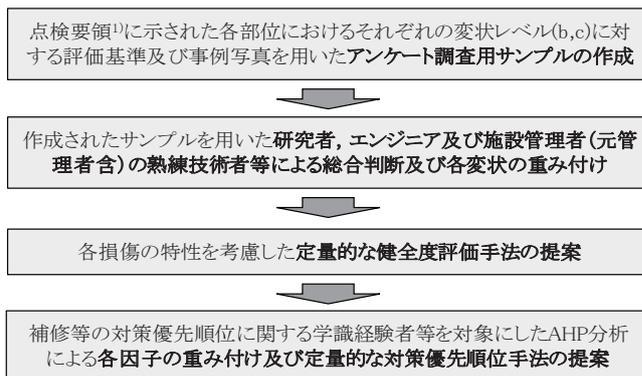


図-2 既往研究における検討手法の概要とその流れ³⁾

表-4 主な変状に関する分析結果の一例(砂防堰堤)³⁾

部位 ¹⁾	変状レベル(概要) ¹⁾	健全度指数 V_d
本堤	天端 鉛直方向の摩耗(深さ:1リフト程度未満): b	32
	摩耗 鉛直方向の摩耗(深さ:1リフト程度以上): c	49
副堤	ひび 水平方向のひび割れ(ブロック幅の1/2未満): b	50
	割れ 水平方向のひび割れ(ブロック幅の1/2以上): c	83
床固工 垂直壁	洗掘 基礎部の洗掘(堰堤基礎面に未到達): b	54
	洗掘 基礎部の洗掘(堰堤基礎面に到達): c	89
	漏水 部分的な漏水: b	50
	漏水 本体の広範囲にわたる漏水等: c	84

の健全度や対策優先度に対する意思決定における指標として、複数の研究者、エンジニア及び施設管理者ら熟練技術者を対象に、アンケート調査（ヒアリング）を実施した。そして、そのヒアリングによって得られた総合的な判断結果を用いて、健全度評価に必要なそれぞれの部位における変状レベルに対する重み係数（健全度指数 V_d ：評価者が各変状¹⁾に対して評価する際の深刻度を数値化し、各変状間の深刻度の相対評価が可能）や、対策優先順位検討に必要な外的基準（変状レベルや施設の重要度等を総合的に考慮する基準）を提案している。変状レベルに対する重み係数（健全度指数： V_d ）について平均して補正した値の一例を表-4に示す。表-4に示すとおり、各部位におけるそれぞれの変状種や変状レベル（b, c）に応じた健全度指数（重み；対策緊急度）が得られている。なお、先行研究³⁾で実施したヒアリングは、点検要領¹⁾で示されている砂防関係施設における115種の変状（ただし、b, c）を対象に、点検要領¹⁾で示されている説明概要図や事例写真を用いて、該当する健全度レベルとして0から100までの値（ V_d' 、ただし、0：対策不要、50：経過観察、100：緊急要対策までを指標とした間隔尺度法による分析）についてそれぞれヒアリングしている。

さらに、得られた各部位における変状レベルの評価値と表-5に示す健全度指数 V_d と施設の健全度(表-3)との関係(閾値の補正: 50→61³⁾)を参考に、定量的に評価することが可能である。

(2) 堆砂状況や除石優先順位に対する評価手法

近年、砂防設備における除石に関する実施方針が示され、長寿命化計画策定において、除石の優先順位を評価するための考え方や管理の目標等を設定することとなった²⁾。そこで、既往研究³⁾における前述までの評価手法を補完するために、これまでと同様の方法(図-2)により、新たに、除石に対する健全度指数 V_d を提案する。その際、他の変状項目における変状程度(例えば、集水管の閉塞物付着)¹⁾を参考にした除石の変状レベル(堆砂状況)を図-3に提案する。そして、この変状レベルに対して、25名の学識経験者や管理者、エンジニアからのヒアリングにより得られた健全度指数 V_d を表-6に示す。なお、ヒアリングや分析方法については、既往研究³⁾と同様としている。表-6に示される傾向より、計画捕捉量(必要ポケット量:機能)に対して、概ね40から50%程度の堆砂時に、除石の実施が望まれると考察される。今後、今回得られた健全度指数 V_d (表-6)より、堆砂状況に関する定量的な健全性の評価や除石の優先順位検討³⁾、更に劣化予測評価(後述)に対しても有効に活用できると考えられる。

表-5 提案する健全度指数 V_d と施設の健全度との関係³⁾

施設の健全度	変状レベルの健全度指数 V_d
対策不要 (A)	$V_d = 0$
経過観察 (B)	$0 < V_d \leq 61$
要対策 (C)	$61 < V_d$

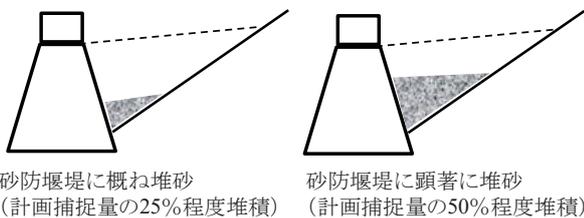


図-3 不透過型砂防堰堤の堆砂に関する分析の概要図

表-6 不透過型砂防堰堤の堆砂(機能不足)に関する分析結果

施設等	変状レベル(概要)	健全度指数 V_d
不透過型砂防堰堤: 除石管理型	砂防堰堤に概ね堆砂(計画捕捉量の25%程度堆積): b	35
	砂防堰堤に顕著に堆砂(計画捕捉量の50%程度堆積): c	75

3. ライフサイクルコスト等の検討手法に関する提案

既往研究^{3), 4)}における砂防関係施設の対策優先順位やライフサイクルコストに関する具体的な検討時の留意点について考察し、その対応を提案する。

(1) 長寿命化計画策定(年次計画)策定までの流れ

砂防関係施設の長寿命化計画策定における考え方が見直され²⁾、劣化予測に基づいてライフサイクルコストを削減させることとなった。そこで、健全度に関して、前述までの変状レベルの健全度指数 V_d (例えば、表-4や表-6)を用いる手法を提案している⁴⁾。ここに、一般的な劣化予測に対応させるため、健全度 HI (Health Index)^(例えば6)として表す。

$$HI = V_{d_max} - V_d \quad (1)$$

ここで、 V_{d_max} は健全度指数 V_d における最大値(=100)である。なお、環境条件の異なる施設毎に点検結果(変状履歴や進行度)に基づいた劣化予測により、

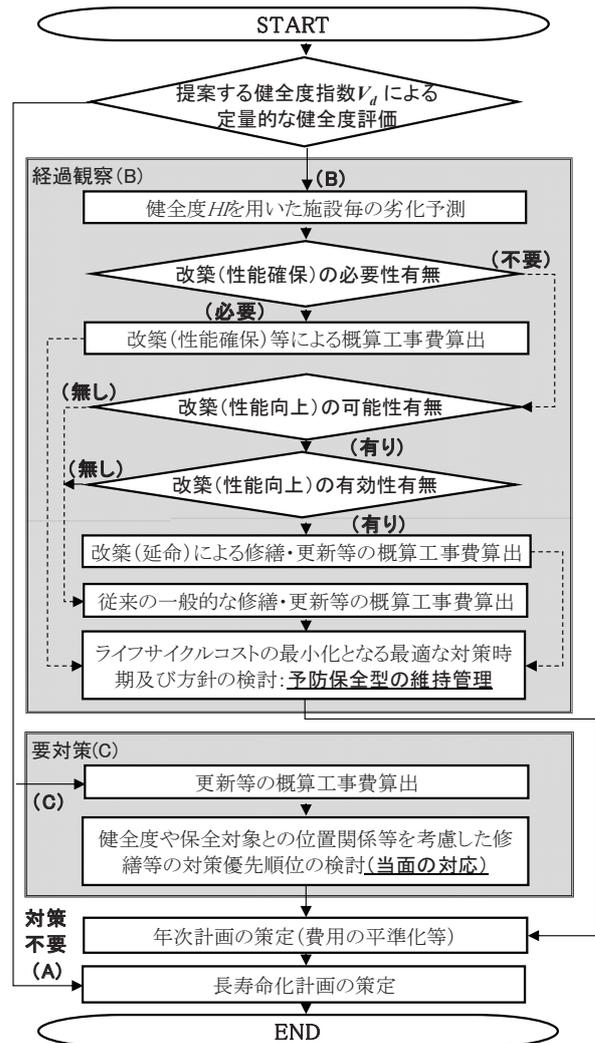


図-4 長寿命化計画の策定に関する検討の流れ⁴⁾に加筆

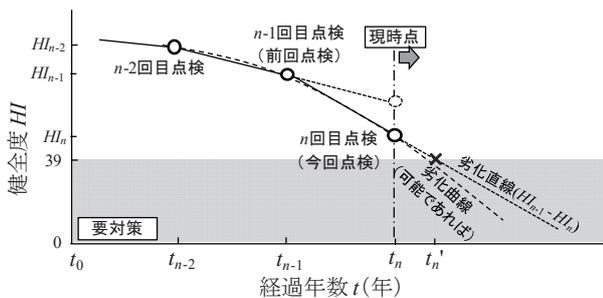


図-5 変状毎における劣化予測手法の概念図⁴⁾

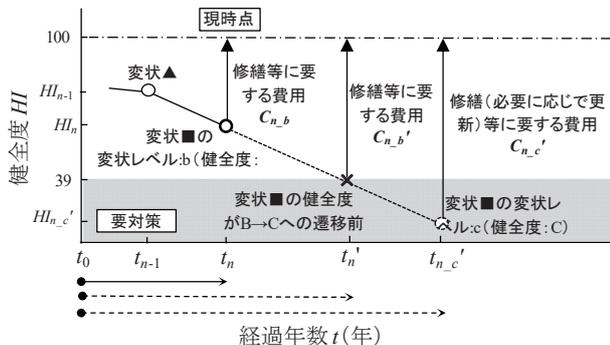


図-6 各評価時における修繕等に要す費用算出の概念図⁴⁾

個別にライフサイクルコスト縮減を図る必要があると考えられる⁴⁾。そこで、砂防関係施設の特長や点検要領¹⁾に示された点検内容(変状区分やレベル)を考慮した長寿命化計画の策定に関する検討の流れを図-4に示す。図-4に示すとおり、ライフサイクルコストを縮減させるため、健全度評価において「経過観察」として評価された施設を対象に、健全度HIを用いた将来における劣化予測を行い、最終的にライフサイクルコストが最小となる最適な対策時期について検討するとして予防保全型の維持管理を基本としている。ただし、これまでの砂防関係施設については、一般的に点検の実施や予防保全措置(例えば、予防対策工事)等が十分でなく、事後保全型の維持管理等に基づいた対策が講じられてきており、「要対策」施設が存在しているため、留意が必要である。そこで、当面の対応として、これらの「要対策」施設については、健全度や保全対象との位置関係等を考慮した対策優先順位³⁾に基づいて早急に対策を講じ、今後、順次に予防保全型に移行していくことが望まれる。なお、対策不要(表-3)の施設については、次回の点検時において変状が確認された際に、劣化予測等の検討対象としている。

(2) ライフサイクルコスト縮減の具体的な検討手法

ライフサイクルコストの基本となる劣化予測手法の概念図を図-5や図-6に示す³⁾。ここで、ガイドライン²⁾にも示されるとおり、「経過観察」施設に要す修繕等の費用と、大規模な更新等が必要となる「要

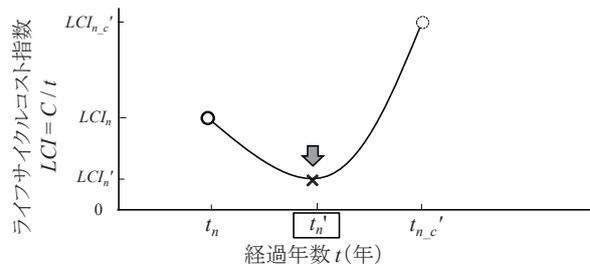


図-7 効率的なライフサイクルコスト時期の概念図⁴⁾

対策」施設に要す費用が大幅に異なる点に留意する必要がある。そこで、現時点で確認されている変状(「経過観察」)が将来に亘って、現時点(t_n)と同じ速度(現時点の健全度 HI_n と前回点検時までの HI_{n-1} 等との関係)で劣化すると仮定し、「要対策」(例えば、変状レベルc)の健全度 $HI_{n,c}$ までの進行に要する期間(時期: $t_{n,c}$)を推定する(図-6)。ここで、点検要領¹⁾に示されている変状毎に、「経過観察」と「要対策」の変状レベル(健全度指数 V_d)との関係性がそれぞれ異なり、更なるライフサイクルコストの縮減を図るため、予測する変状の進行途中において「経過観察」から「要対策」への遷移前までに要する期間(時期: t_n')を推定し、各評価時における修繕等に要する費用をそれぞれ算出する。なお、劣化予測に際して、評価する際に過去における複数年の点検結果が存在する場合は、それらの結果を踏まえた近似曲線による予測が望まれるが、点検結果が十分でない場合は、現時点(t_n)の点検結果(HI_n)と、初期建設時(t_0)や前回(t_{n-1})の点検結果等との関係を用いて予測することも可能である(図-5)。

また、ライフサイクルコストを最小化させるため、ライフサイクルコスト指数LCIを提案している⁴⁾。

$$LCI = C / t \quad (2)$$

ここに、 C は修繕等に要する費用、 t は各評価時までの経過年数(修繕サイクル)であり、このLCIを最小化することで、効率的な対策時期の設定が可能となる(図-7)。なお、これまでの点検結果が十分でない場合は留意する必要がある。一般的に進行しないと考えられる変状(例えば、想定外の突発的な外部からの衝突による変形)については、図-8(下)に示す予測(例えば、変状の進行がないと予測)とし、それ以外の変状については、図-8(上、破線:前回点検結果による劣化傾向、実線:今回点検見直し後の劣化傾向)に示す予測とする対応も考えられる。

一方、ライフサイクルコスト等の検討に際して、一般的に示されている対応方針²⁾(表-7)に整合させる等の留意が必要である。具体的には、これまでの一般的な「予防保全(修繕等)」や「事後保全(更新等)」等との比較によるライフサイクルコストの縮減

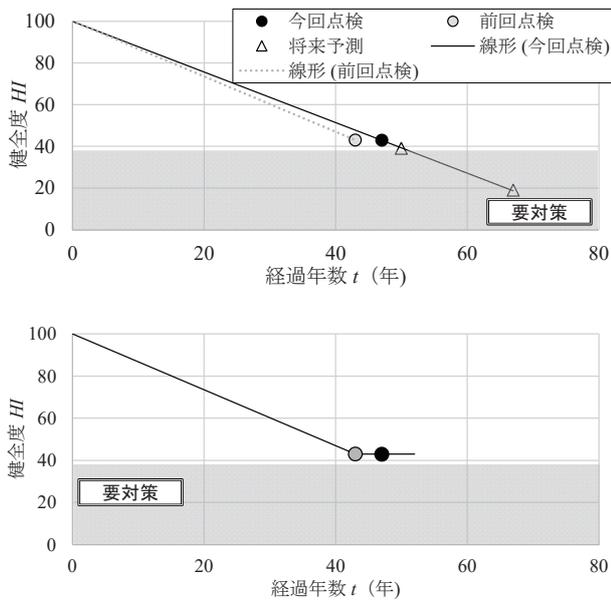


図-8 点検結果が不足する際の劣化予測の基本的な考え方

表-7 老朽化した砂防関係施設における対策方針²⁾

対応方針	内容
維持	砂防関係施設の機能や性能を確保するために、行う軽微な作業のこと
修繕	既存の砂防関係施設の機能や性能を確保、回復するために、損傷または劣化前の状況に補修すること
改築	砂防関係施設の機能や性能を確保、回復すると共に、さらにその向上を図ること
更新	既存の砂防関係施設を用途廃止し、既存施設と同等の機能及び性能を有する施設を、既存施設の代替として新たに整備すること

に対して、新たに、「改築」による更なるライフサイクルコスト削減が望まれている²⁾。ここで、「改築」に関して、砂防関係施設の特性を考慮した分類を表-8に示す。表-8に示すとおり、具体的に提案されている対策工²⁾を踏まえて、有すべき性能や機能(表-2)の特性に留意して整理している。ただし、機能に向上に関しては、各事業(例えば、7)の運用において対象が異なるため、本稿では取り扱わないものとする(ただし、機能確保は健全度として評価:表-6参照)。ここで、これまでの一般的なライフサイクルコスト削減の概要図²⁾に対して、改築(ただし、性能向上)を考慮した検討のイメージを図-9に示す。なお、LCI(式:2)による検討は、図-9に示される各階段関数を直線近似させた傾きの比較により、ライフサイクルコストを検討するものと同義となっている。ただし、改築による延命化(例えば、ゴム材による摩耗防止)に関して、現時点では限られているため留意

表-8 砂防関係施設の改築における分類案

分類	具体的な対策の一例 ²⁾
改築(性能確保)	・現行基準に整合した砂防堰堤の腹付け
改築(性能向上)	・腐食した集水管を腐食しにくい材質への変更,ゴム材等による摩耗防止
改築(機能確保)	・急傾斜地等における地盤条件変化による災害防止機能不足の対策工事
改築(機能向上)	・砂防堰堤のかさ上げによる機能向上

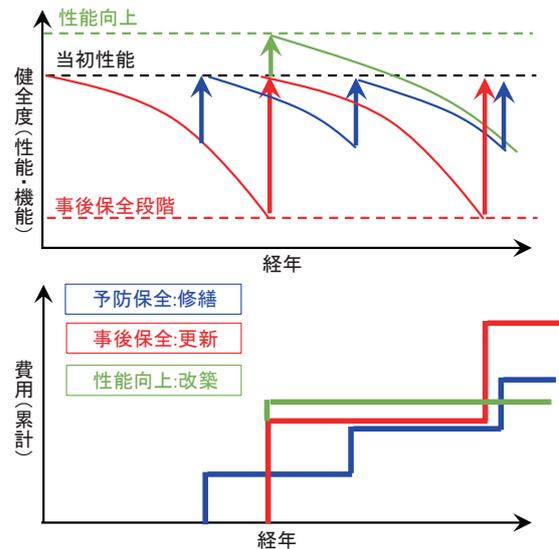


図-9 ライフサイクルコスト削減のイメージ²⁾に加筆

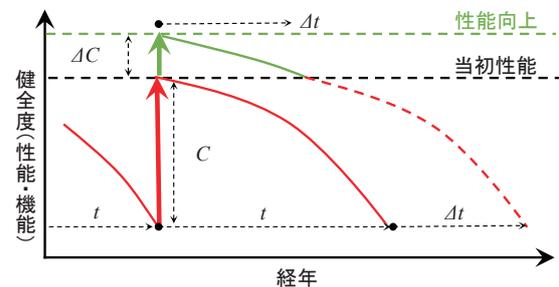


図-10 改築による延命化効果の評価に関する概要図

する必要がある。そこで、検討の合理化を目的に改築による検討の必要性や有効性について検討して、事前に対策方針を決定し、最終的に予防保全(改築,修繕)や事後保全(改築,更新)等を比較する(図-4)。なお、「要対策」施設や改築(性能確保)による対応に際しても、必要に応じて、同様に改築(性能向上)について考慮するものとする。

ライフサイクルコスト検討における改築(ただし、性能向上)の有効性を評価する条件式は、

$$f_{LCI} = C / t - (C + \Delta C) / (t + \Delta t) \geq 0 \quad (3)$$

と表す。ここに、 ΔC は改築に要する増額費用、 Δt は性能向上に関する効果年数(例えば、改築補強材料の耐用年数)である(図-10)。なお、 Δt について

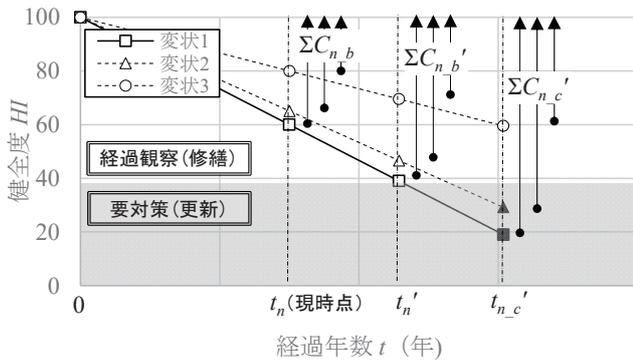


図-11 ライフサイクルコストにおける対策費用算出例

表-9 ライフサイクルコストに関する検討結果事例 その1

施設 A (例えば、地すべり 防止施設)		単 位	現時点 t_n	要対策 遷移前 t_n'	要対策 時期 $t_{n,c'}$
経過年数		年	35	52	70
変状 1	方針	-	修繕	修繕	更新
	費用 $C_{n,b}$	百万円	10	12	50
変状 2	方針	-	修繕	修繕	改築
	費用 $C_{n,b'}$	百万円	20	25	100
変状 3	方針	-	修繕	修繕	修繕
	費用 $C_{n,c'}$	百万円	2	2	10
計		ΣC_n	32	39	160
LCI		百万円/年	0.9	0.8	2.3

表-10 ライフサイクルコストに関する検討結果事例 その2

施設 B (例えば、砂防設 備:腹付け工)		単 位	現時点 t_n	要対策 遷移前 t_n'	要対策 時期 $t_{n,c'}$
経過年数		年	35	52	70
変状 1	方 針	-	改築	改築	改築
	費用 $C_{n,b}$	百万円	50	55	60
変状 2	方 針	-	(同上)	(同上)	(同上)
	費用 $C_{n,b'}$	百万円	(上含)	(上含)	(上含)
計		ΣC_n	50	55	60
LCI		百万円/年	1.4	1.1	0.9

は、使用する材料に関する暴露試験結果や公共事業の財務評価において使用されている耐用年数（減価償却資産の耐用年数等に関する省令別表）等を代替させて、設定することも考えられる。一方、一施設内に複数の変状が存在する場合は、工事の効率化（例えば、工事用道路新設）に留意して、それらの変状の全てを対象に劣化予測し、対策に要す全費用を計上する等が必要である（図-11）。そこで、図-11に示すとおり、ライフサイクルコストを検討する時期（経過年数； $t_n, t_n', t_{n,c'}$ ）については、変状内で最も健全

度の低下が進行している変状（例えば、変状1）を対象に決定する。そして、その時期に全ての変状を修繕等の対策を講じると仮定した際に要す総費用を計上し、それぞれの時期におけるLCIを用いて検討する（例えば、表-9）。なお、表-9に示されるとおり、各変状における対応方針（例えば、修繕、改築）に関して、効率性を考慮して変化させることにより、10年あたりで概ね1,500万円程度のライフサイクルコストの縮減が可能となる。また、複数の変状を一工種の対策工により修繕等可能な場合（例えば、砂防堰堤における下流側の腹付け対策工によるひび割れや基礎洗掘の改善）については、対策費用の二重計上に留意して検討する必要がある（例えば、表-10）。なお、今回提案する手法は、砂防関係施設^{1), 2)}に対して、幅広く適用できると考えられる。その他の検討方法については、既往研究^{3), 4)}を参照されたい。

5. おわりに

本稿では、筆者らの既往研究を基に、新たに検討手法の提案や考察を示している。今後、砂防関係施設の変状機構や詳細な劣化予測に関する知見、機能確保に関する評価値などの更なる高度化が望まれる。

謝辞：本研究において、ご助言やアンケートのご協力を頂いた学識経験者、砂防施設の管理者や民間企業の技術者等の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部：砂防関係施設点検要領（案），2020。
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン（案），2020。
- 3) 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，Vol.21，pp.183-188，2015。
- 4) 原田紹臣・里深好文・水山高久：ライフサイクルコストを考慮した砂防関係施設の長寿命化計画策定に関する提案，砂防学会誌，Vol.73，No.2，2020（掲載決定）。
- 5) Brime: <http://www.trl.co.uk/brime/index> (2020. 6. 1 確認済)
- 6) Shepard, R. W. and Johnson, M. B.: California Bridge Health Index, Technical Report, Caltrans, 1999.
- 7) 国土交通省：砂防関係事業の概要，2019。

(2020. 7. 1 受付)