

ダム用ゲート等の機械設備における戦略的な維持管理について

柴澤 一嘉¹・堀内 崇志¹・齋藤 真²・池 伸明²

¹北陸地方整備局 企画部 施工企画課 (〒950-8801 新潟市中央区美咲町1-1-1)

²前) 北陸地方整備局 企画部 施工企画課 (〒950-8801 新潟市中央区美咲町1-1-1)

劣化特性が異なる鋼構造・機械・電気の各機器により構成されるダム用ゲートにおいて、客観的・技術的合理性のある健全度評価手法を作成し、その定量的な評価機能を機械設備維持管理システムに追加した。

これにより、老朽化した既存ストックが急増する状況にあつて、機能の信頼性を現状水準に確保しつつ、長寿命化やライフサイクルコストの縮減等を図るというトレードオフ問題の解決を目指す。従来の時間計画保全による画一的更新を廃し、状態監視保全や時間計画保全、事後保全を組み合わせメリハリのある修繕・更新を行う戦略的な維持管理に資するものである。

キーワード ダム用ゲート、老朽化、健全度評価、機械設備維持管理システム、長寿命化

1. はじめに

ダム用ゲートは、ダム貯留水の取水・放流、流量調節等の治水・利水機能により、国民の生命・財産を守り、快適な生活を享受する上で欠かせない機械設備である。

既存ストックの多くは、高度経済成長期以降に整備され、その更新時期を迎えており、鋼構造・機械・電気機器からなる複合構造物であることから、それぞれの機器特性に応じた老朽化対策が求められる。これに伴い、機械設備の修繕・更新費の急増が見込まれている。このため、厳しい財政状況を踏まえ、的確な点検・診断と相まって、機能の信頼性を確保しつつ、効率的・効果的な修繕・更新を実施することが喫緊の課題である(図-1)。

このような現状を受け、国土交通省では、「ダム用ゲート設備等点検・整備・更新検討マニュアル(案)平成23年4月」(以下「検討マニュアル」という。)が策定され、従来の定期更新による時間計画保全の考え方を転換して状態を監視しながら長寿命化を図る、状態監視保全へと移行する方向性が打ち出された。¹⁾

しかしながら、検討マニュアルでは、設備の劣化状況を判断し、その修繕・更新の優先度を検討するための具体的な手法が示されていない。

そこで本稿では、ダム用ゲート等の機械設備における戦略的な維持管理の一環として、客観的で技術的合理性のある健全度評価手法を検討する。並びに、その定量的な評価機能を機械設備維持管理システム(以下「維持管理システム」という。)へ追加したので紹介する。

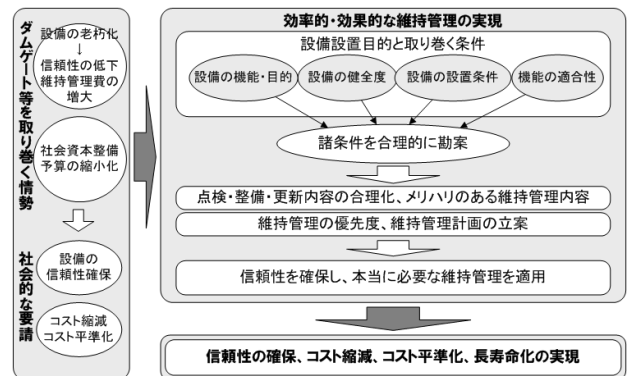
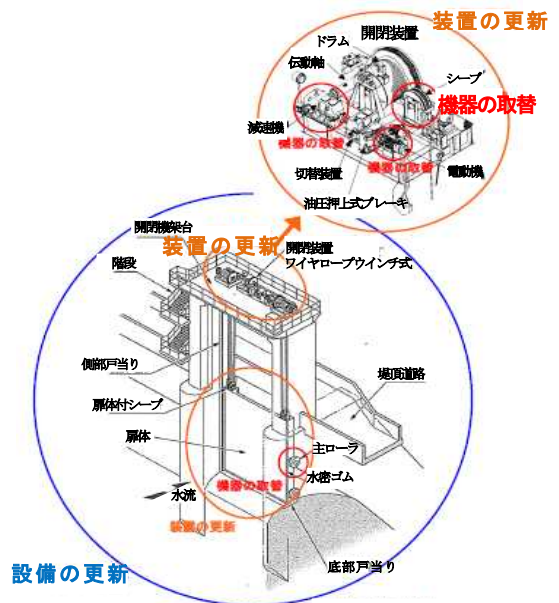


図-1 効率的・効果的な維持管理の実現イメージ図

2. 現状の損傷度判定と故障発生の特徴

(1) 現状の損傷度判定

ダム用ゲート設備等については、「ゲート点検・整備要領(案)」(以下「点検要領」という。)に従い、定期点検により専門技術者が部位・機器毎の損傷度を判定している。²⁾ これにより処置の緊急度を評価・判定し、その結果に応じて修繕・更新を行う(表-1)。ここで処置の緊急度ランクA~Cは、次のとおりである。

- A：早急な処置を検討する
- B：なるべく早い処置(2~3年以内)を検討する
- C：状況の推移を観察し処置を検討する

表-1 損傷度の判定・評価

評価	評価内容	判定	判定内容
A	緊急に対策を講じないとゲート等の安全性、機能が確保できないもの等	1	更新が必要である
		2	整備が必要である
B	数年の内にゲート等の安全性や機能に支障が生じる恐れのあるもの等	1	調整が必要である
		2	給油が必要である
		3	塗装が必要である
		4	場合によっては更新が必要である
		5	場合によっては整備が必要である
C	将来、ゲート等の安全性や機能に直接的または間接的に影響を及ぼすもの等	1	整備が望ましい
		2	清掃することが望ましい

(2) 故障発生の特徴

設備の故障発生の特徴については、鋼構造(扉体)・機械(開閉装置)・電気(機側操作盤)の各機器により故障の起こり方が異なるとともに、その構造特性や使用・環境条件等によって劣化特性が変化する(表-2)。

表-2 ダム用ゲートの故障発生機器・部品

設備形式	故障実績が多い機器・部品
①ローラーゲート扉体	主ローラ、補助ローラ、水密ゴム
②ラジアルゲート扉体	補助ローラ、水密ゴム
③小容量放流ゲート扉体	シールリング、充水弁
④選択取水ゲート扉体	主ローラ、補助ローラ、シーブ、水密ゴム
⑤ワイヤロープウインチ式開閉装置	ワイヤロープ、電動機、リミットスイッチ、開度計
⑥油圧シリンダ式開閉装置	油圧シリンダ、シグナルバルブ、油圧エレクト
⑦機側操作盤	機側操作盤一式

故障の起こり方については、時間・使用頻度により劣化する「経時劣化タイプ」、ある時点から急激に劣化する「脆化タイプ」、予兆のない「突発タイプ」に分類される。このうち、経時劣化・脆化タイプは鋼構造・機械機器にみられ、突発タイプは電気機器に当てはまる。

全国ダムの機器別故障状況については、ダム用ゲート設備の維持管理実態調査(平成21年3月)によれば、保

護・検出装置(15.9%)、電気部品(10.6%)、機側操作盤(8.4%)と電気機器に集中している。次いで水密部(7.4%)、油圧部品(5.2%)の順となっている(図-2)。

鋼構造機器の劣化については、その取替が水密ゴムに集中し、全体の半数を占める。この原因は、水密ゴムが消耗品であることや、流下物の衝突で損傷が生じることにある。次いで主・補助ローラに取替が多く、回転・摺動に伴う摩耗劣化に起因する(図-3)。

機械・電気機器の劣化については、ワイヤロープや機側操作盤等に取替更新が多い。特に接水・非接水を繰り返す過酷な条件下にあるワイヤロープが全体の15.3%を示す。ただし、ワイヤロープを除けば電気機器に集中し、機械機器の更新は少ない(図-4)。

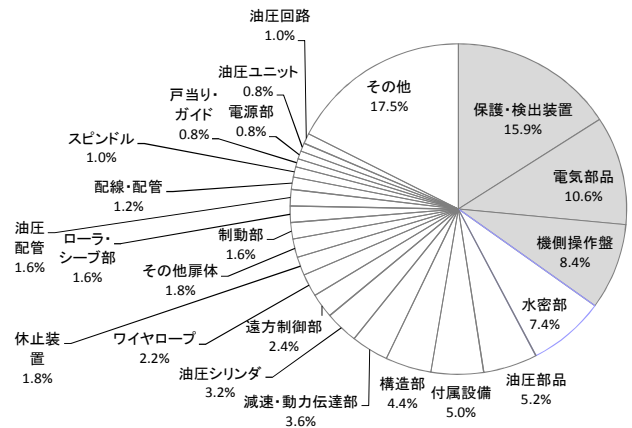


図-2 機器別故障状況 (総データ数 498 件)

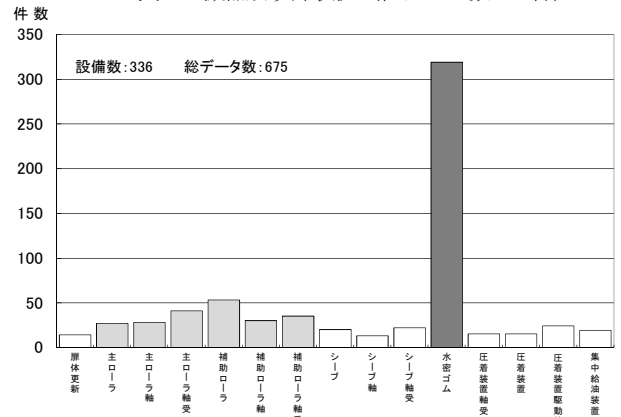


図-3 鋼構造機器・扉体(ローラーゲート)の取替更新

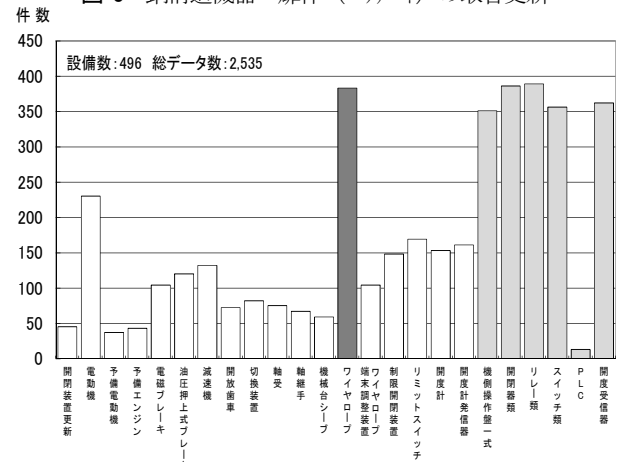


図-4 機械/電気機器・開閉装置(ワイヤロープウインチ)の取替更新

3.健全度評価を実施する上での課題

設備の健全度とは、稼働及び経年に伴う材料の物理的劣化や部位・機器の性能低下、故障率の増加等が発生した状態と、正常な状態を比較して表すものである。この健全度評価を行うことで機械設備の状態を適切に把握し、維持管理の内容と時期を適切に設定することが可能となる。具体的には、点検等の結果により、健全度を評価し問題点が確認された場合、その内容や程度によって、修繕・更新等を実施する。

そこで、2. に示した現状の損傷度判定や故障発生の特徴を踏まえて、健全度評価を実施する上での課題としては、次のようなものが挙げられる。

①より客観的な健全度評価

現状では、点検要領により専門技術者が目視、触診、聴診等を実施し損傷度判定を行っているが、より客観的な健全度の評価が必要である。問題点としては、点検要領では、A評価（早急な処置を検討する）、B評価（なるべく早い処置を検討する）、C評価（状況の推移を観察し処置を検討する）という定性的な評価基準となっていることにある。このため、専門技術者が自らの経験や主観に依って劣化度合いを判定することになりやすい。

②劣化特性の異なる各機器の健全度評価

鋼構造・機械・電気の各機器等を対象として、それぞれ最適な健全度評価を実施する必要がある。問題点としては、これらの構成要素は、相互に協調して所要の性能を発揮するプラント的システムであるが、故障の起こり方や劣化特性が異なることにある。

③健全度評価と機器特性を考慮した総合評価

修繕・更新にあたっては、検討マニュアルを踏まえ、健全度判定結果のほか、設備の目的や部位・機器の致命度、使用・環境条件、経過年数等を考慮して、部位・機器の優先度を総合的に評価する必要がある。問題点としては、総合評価にあたって、これらの評価要素の軽重を合理的に評価する手法が未確立となっていることにある。

④実効性のある機械設備維持管理計画

機械設備維持管理計画（以下「維持管理計画」という。）の計画と実施での乖離を最小限とし、実効性のある維持管理計画を策定する必要がある。問題点としては、現状では、時間計画保全により中長期保全計画や年度保全計画等を作成しており、修繕・更新の実態に合わなくなることが挙げられる。

4.健全度評価手法の策定

(1)代表設備形式の設定

2.(2)で示した維持管理実態調査は、国土交通省並びに独立行政法人水資源機構所管の全ダムを対象としている。これにより主な設備形式を把握し、新たな健全度評価手法の検討にあたって、ダム用ゲートの代表設備形式を設定した（図-5、表-3）。

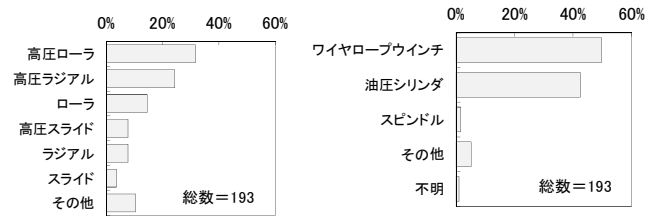


図-5 ゲート形式及び開閉装置形式（全国 110 ダム）

表-3 ダム用ゲートの代表設備形式

設備形式	ゲート形式
非常用洪水吐設備	クレストローラゲート（ワイヤロープウインチ）
常用洪水吐	高圧ラジアルゲート（油圧シリンダ）
小容量放流設備	ジェットフローゲート（スピンドル）

(2)健全度評価要素の設定

健全度評価要素は、年点検結果と点検時計測データを基本とする。このことは、前項の実態調査結果において、専門技術者が年点検の9割を実施していることによる。さらに、ダム用ゲートは、待機系設備が主であり動作確認が必須であるが、管理運転点検が年点検の9割で実施されていることも理由に挙げられる。

また、その他の評価要素としては、経過年数、故障頻度、部品供給可能性を考慮する。

(3)健全度指標の算定

健全度評価手法は、「河川用ゲート設備健全度評価マニュアル」との整合を図り、点検結果や計測データ、経過年数、故障頻度、部品供給可能性に関する1~4の各評価点と各寄与率の係数からなる基本式により、部位・機器毎に健全度指標を算定するものとした（図-6）³⁾

なお、各寄与率の係数は、部位・機器特性に応じて評価点の重みを表す係数とし、その合計は1.0とする。

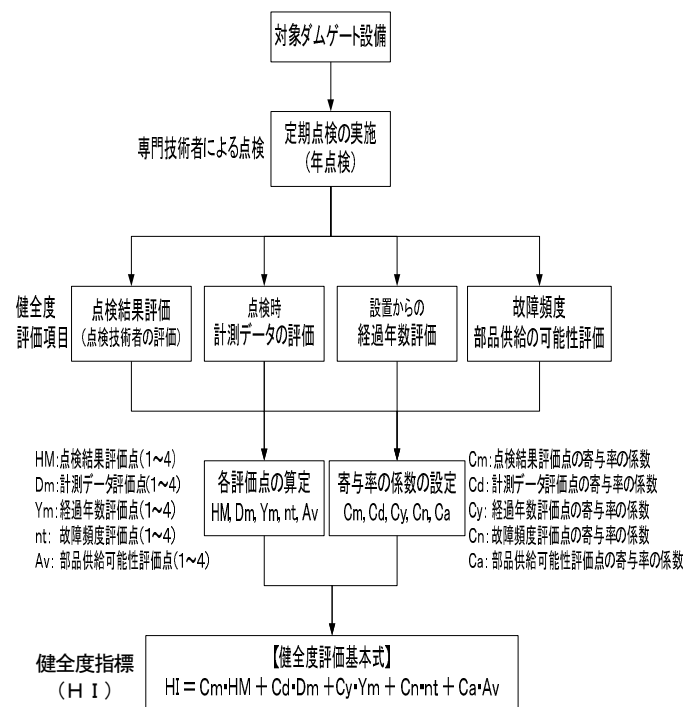


図-6 健全度指標（HI）の算定

①点検結果評価パラメータ【HM】

点検結果評価については、現状の点検要領を考慮しつつ、より客観的な健全度評価がなされるよう具体的な判定基準により評価点を部位・機器毎に設定した(表-4)。これにより、職員及び専門技術者の経験や主観に伴う健全度評価のばらつきを極力排除する。

表-4 点検結果評価パラメータ (HM) 扉体水密部

評価点	判定基準
1	漏水が無く、水密ゴムに変形・損傷・材料劣化がない
2	軽微な漏水もしくは水密ゴムに損傷・変形・材料劣化がみられるもの、水密機能上支障がない
3	漏水もしくは水密ゴムに損傷・変形・材料劣化がみられ、水密機能上支障が生じる可能性がある
4	水密ゴムの変形・損傷・材料劣化等により、多量の漏水が発生しており、水密機能に支障が生じている

②計測データ評価パラメータ【Dm】

計測データ評価については、注意値、判定基準値を傾向管理しきい値として部位・機器毎に設定する(表-5)。

なお、判定基準値については、要領・指針・マニュアル類における数値を用いた健全度の評価基準を適用する(表-6)。

表-5 計測データ評価パラメータ (Dm)

評価点	判定基準
1	計測値が注意値を超えていない
2	計測値が注意値を超過しているが、値の変化は微小
3	計測値が注意値を超過しており、上昇傾向にある
4	計測値が判定基準値を超過している

表-6 計測データの判定基準値 開閉装置

区分	項目	内容	判定基準値
ワイヤロープ 開閉装置	電動機	電 流 値	定格値以下
		表 面 温 度	1往復運転し温度上昇が40℃以下
		絶 縁 抵 抗	1MΩ以上
	制 動 機	ライニングすきま	左右均等のすきまがあれば良い
		ライニング摩擦厚	設計厚の70%以上の厚みがあること
		絶 縁 抵 抗	1MΩ以上
	減 速 機	表 面 温 度	1往復運転し温度上昇が50℃以下
	切 換 装 置	表 面 温 度	1往復運転し温度上昇が50℃以下
	歯 車	歯 面 の 損 傷	異常な損傷がないこと(基準値なし)
		歯 当 り	PCD付近で歯筋方向に70%以上の当り
バックラッシュ		JIS4級の範囲か、歯厚の20%以下 最小値がモジュールの4%以上	
軸 受	表 面 温 度	1往復運転し温度上昇が40℃以下	
ワイヤロープ	ワイヤロープ径	公称径の0~7%以内の細り	
	素 線 切 れ	10%以上の素線切れがないこと	

③経過年数評価パラメータ【Ym】

経過年数評価については、検討マニュアルに示された部位・機器毎の標準的な取替・更新年数である「信頼性による取替・更新年数」及び「平均取替・更新年数」と、それらの年数の考え方を踏まえて判定する(表-7)。

なお、取替・更新年数の定義については、過去の取替・更新実施の分布を正規分布と仮定した場合に、実施率が当初稼働していた数の10%を超えた年数を「信頼性による取替・更新年数」とし、50%を超えた年数を「平均取替・更新年数」としている。

表-7 経過年数評価パラメータ (Ym)

評価点	判定基準
1	・設置からの経過年数が信頼性による取替・更新年数に達しない。塗装・油圧作動油については、前回の塗替・取替履歴から起算し平均実施周期に達しない
2	・設置からの経過年数が信頼性による取替・更新年数に達するが、分解整備もしくは詳細点検の実績がある ・設置からの経過年数が信頼性による取替・更新年数を超過するが、設置からの経過年数が主たる管理年数を超過しない ・塗装については、前回の塗替履歴から起算して平均実施周期に達するが、タッチアップを実施している
3	・設置からの経過年数が信頼性による取替・更新年数に達し、かつ分解整備もしくは詳細点検の実績がない ・塗装については、前回の塗替履歴から起算して、平均実施周期に達し、かつ補修塗装を実施していない ・油圧作動油については、前回の取替履歴から起算して、平均実施周期に達する
4	・設置からの経過年数が平均取替・更新年数に達する ・塗装・油圧作動油については、前回の塗替・取替履歴から起算して、平均実施周期を大幅に超過する

④故障頻度評価パラメータ【nt】

故障頻度評価については、故障を誘発する使用・環境条件や設計・施工の不具合等が部位・機器に内在している場合に設定する(表-8)。

なお、特別な条件が明確でない場合については、故障発生頻度が健全度に直結するとは限らないことから、本パラメータを適用しない。

表-8 故障頻度評価パラメータ (nt)

評価点	判定基準
1	故障実績なし
2	故障実績1回
3	故障実績2回
4	故障実績3回以上

⑤部品供給可能性評価パラメータ【Av】

部品供給可能性評価については、対象部位・機器に含まれる部品で、スペアパーツの供給可能性の有無、並びにその供給に必要な時間及びコスト、分解整備への対応等により判定する(表-9)。

表-9 部品供給可能性評価パラメータ (Av)

評価点	判定基準
1	・機器・スペアパーツが供給され、短時間の復旧が可能である ・当該メーカーが分解整備に対応している
—	—
3	・機器・スペアパーツ供給は可能だが、納入に数ヶ月を要する
4	・機器・スペアパーツの供給が既に停止している ・機器・スペアパーツが供給されているものの、供給に非常に時間がかかる、もしくは多大なコストを要する ・当該メーカーが分解整備に対応していない

⑥寄与率の設定項目

健全度評価基本式については、点検結果評価や計測データ評価のほか、経過年数評価、故障頻度評価、部品供給可能性評価の5つの評価パラメータの重みとして、これらの寄与率の係数を設定している(図-6)。この設定理由は、部位・機器毎にその劣化特性や点検内容等に相違があり、支配的なパラメータが異なることによる。

例えば、扉体(鋼構造機器)については、防食が堅固であれば40年以下の経過年数は問題になり難しく、「点検結果」の評価となる。ただし、扉体塗装については、塗膜の経年劣化を考慮して「点検結果」と「経過年数」を

設定する（表-10）．ローラーの回転・摺動部，水密ゴム等については，損傷・変形，作動状況等により定性評価されており，「点検結果」が健全度の目安となる．

開閉装置（機械機器）については，振動や絶縁抵抗値，温度上昇値，摩耗量，すきま量等の「計測データ」による定量評価や，「点検結果」による定性評価のほか，「経過年数」による評価を行うものがある．

機側操作盤（電気機器）については，目視による劣化の把握が困難で突発的な故障が発生することや，取替機器が供給停止している可能性もある．そのため，「経過年数」や「部品供給可能性」による評価要素を「点検結果」「計測データ」に加えて評価する．特に，点検で目視ができず，状態監視保全も困難な機器は，時間計画保全を適用して「経過年数」の割合を大きくする．

表-10 寄与率の設定項目 扉体塗装

寄与率の項目	寄与率の設定項目の考え方
点検結果(Cm)	点検結果評価点が得られることから設定
計測データ(Cd)	点検時に計測データが得られないことから設定しない
経過年数(Cy)	経過年数により塗膜劣化が進むことから設定
故障頻度(Cn)	特別な条件がないことから設定しない
部品供給可能性(Ca)	特殊な塗装仕様ではないことから設定しない

⑦寄与率の設定値

寄与率の設定値については，設定項目の各係数の重みを等分する考え方と，各係数の重みを部位・機器の劣化特性や点検内容等に応じて配分する方法がある．ここでは後者の手法として，階層化分析法（以下「AHP法」という．）により寄与率の係数を算定した．

AHP法は，人間の主観的判断とシステムアプローチと

表-11 寄与率の設定値 参考値（サブ数：7）

装置	部位・機器	Cm 点検	Cd 計測	Cy 経年	Cn 故障	Ca 部品
扉体	塗装・清掃状態	0.62	—	0.38	—	—
	構造部（扉体）	1.0	—	—	—	—
	支承部	1.0	—	—	—	—
	シーブ部	1.0	—	—	—	—
	水密部	1.0	—	—	—	—
	給油装置	1.0	—	—	—	—
ワイヤロープ 開閉 装置	塗装・清掃状態	0.64	—	0.36	—	—
	構造体	1.0	—	—	—	—
	動力部	0.35	0.54	0.11	—	—
	制動部	0.44	0.43	0.13	—	—
	減速装置	0.47	0.40	0.13	—	—
	動力伝達部	0.48	0.38	0.14	—	—
	扉体駆動部	1.0	—	—	—	—
	ワイヤロープ	0.30	0.54	0.16	—	—
	保護装置	0.72	—	0.28	—	—
	休止装置	1.0	—	—	—	—
	開度計	0.65	—	0.35	—	—
給油装置	1.0	—	—	—	—	
制御機器	機側操作盤	0.24	0.23	0.15	—	0.38

の両面から決定する問題解決型的意思決定手法である．

具体的には，点検結果（点検）や計測データ（計測），経過年数（経年）の3項目の重みを算定する場合，点検と計測，点検と経年，計測と経年のすべての組み合わせで一対比較を行う．一対比較では，職員や専門技術者に対してアンケートを実施し，どちらの項目に重みが大きいのかを「同等」「やや重要」「重要」「非常に重要」の各基準により把握している．その結果を幾何平均して寄与率の係数を算定した（表-11）．

(4)健全度の総合評価

健全度の総合評価については，設備区分レベルやFMEA（Failure Mode and Effects Analysis）解析結果における致命度（以下「致命度」という．），健全度レベルを組み合わせ，部位・機器の修繕・更新の優先度を1～4に設定する（表-12，表-13，表-14，図-7，図-8）．さらに，優先度毎に設置条件レベルのa～cを考慮し，部位・機器の優先順位を設定する．

なお，健全度レベルについては，(3)に示す基本式により健全度指標を算定してA～Dを判定する（表-14）．

表-12 設備区分レベルと管理水準

設備区分	対象設備	管理水準
レベルⅠ	治水設備及び治水要素のある利水設備	予防保全
レベルⅡ	利水設備	予防保全
レベルⅢ	付属施設，その他設備	事後保全

表-13 致命度評価基準

致命度	内容	考え方
①	致命的	明らかな機能停止・不全
②	重大	明らかな機能低下，強度低下，運転能力低下
③	軽微	機能低下，強度低下，運転能力低下への影響が軽微
④	微小	直接，設備の機能・強度・運転に影響を与えない

表-14 健全度レベル

健全度指標（HI）	健全度レベル
1.00以上～1.75未満	D 【異常無し】
1.75以上～2.50未満	C 【経過観察】
2.50以上～3.25未満	B 【早期対応】
3.25以上～4.00以下	A 【即時対応】

部位・機器の修繕・更新の優先度については，劣化が著しい健全度レベルAを最優先とする．ただし，致命度の高い部位・機器の場合は健全度レベルBでも優先する．具体的には，健全度レベルAは速やかな処置が必要であり要修繕とした．このうち「致命度①及び②」の場合は優先度1に，「致命度③」の場合は優先度2とし，「致命度④」の場合は優先度4としている．一方，健全度レベルB（付属設備を除く）でも，「致命度①及び②」の場合には優先度3とした（図-8）．

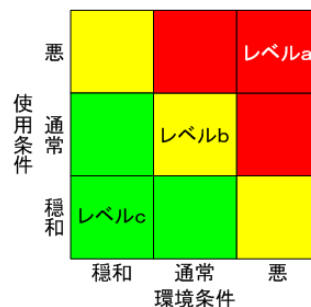


図-7 設置条件レベル

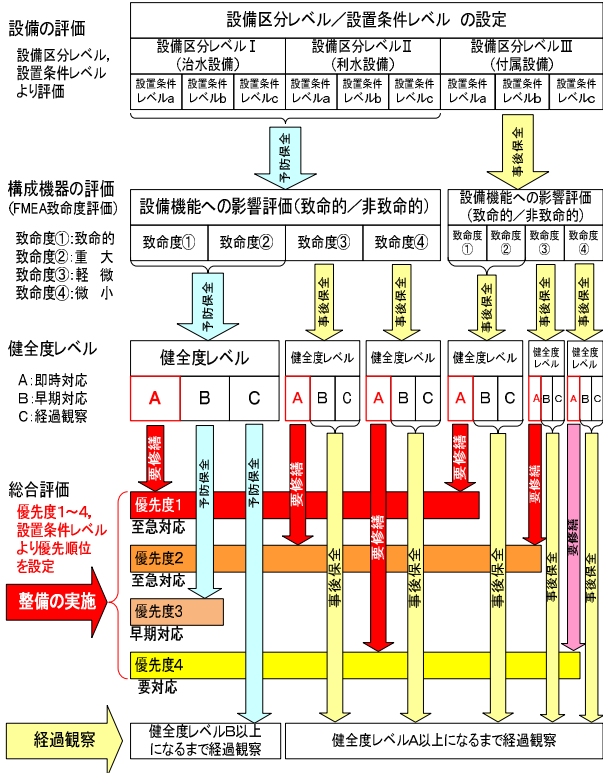


図-8 健全度の総合評価フロー

(5) 維持管理システムの構築

実効性のある維持管理計画の取組では、計画策定や定期的なリバイスと合わせ、健全度評価手法の精度向上が重要である。そのためには、維持管理システムの構築により、設備運転データや故障履歴、点検データ等を蓄積しつつ、健全度評価手法の精度を検証し、改善していく必要がある(図-9, 図-10)。

維持管理システムには、上述の一連の取組を含む広義の概念とツール構築を指す狭義の概念があるが、これらの取組にあたって、全国の担当者からなる検討会を実施した。こうした検討を踏まえ、(1)~(4)で示した健全度評価手法を用いて、部位・機器毎の健全度を点数化する機能ツール上に付加している。



図-9 点検状況 (歯当り測定)



図-10 システム (傾向管理)

5. 期待される効果

これまでダム用機械設備の管理水準は、専門技術者の状態把握と維持修繕を繰り返すなか各ダムで経験的に定められてきたが、これからは健全度評価の実施により、全国同一水準で客観的・技術的合理性のある修繕・更新の推進が期待される。システム化等のプラットフォーム

の整備と相まって、次のような効果が考えられる。

① 修繕・更新の合理化

健全度の総合評価により、優先度を考慮し、部位・機器毎に予防保全や事後保全を適用することで、修繕・更新の合理化を図る。設備の突発的な故障を低減しつつ、長寿命化やライフサイクルコストの縮減等が期待される。

② 維持管理計画の最適化

維持管理システムの活用により、維持管理計画の計画と実施の乖離を最小化する。中長期的な視点をもって、部位・機器毎の更新サイクルと必要費用を検討し、更新需要の見通しを立て平準化に努めることで、財源の裏付けを有する計画的な更新投資が可能となる。

③ 施設健全度の見える化

施設健全度の定量化により、修繕・更新に関して、職員間の情報共有やユーザー説明の質向上が期待される。

④ 寿命予測, 故障傾向の予知

データ蓄積・解析により、同種部位・機器の寿命予測や故障傾向の予知を実施し、将来の更新需要を推定する。

⑤ 技術力の向上

時間計画保全から状態監視保全への転換により、職員の技術的判断能力が向上する。この成果から得られた知見は、技術基準類へのフィードバックも考えられる。

6. 今後の課題

ダム用ゲートの健全度評価の取組は、緒についたばかりの状況にあり、基本式の評価パラメータや寄与率等を検証し、改善していく必要がある。特に、継続的な劣化傾向の測定・記録による傾向管理が重要となる。

しかしながら、劣化傾向の予測については、未だ確固たる技術が確立されていない。また、ダム用のゲート特性における問題点として、高圧負荷が発生すること、待機系設備では劣化傾向が現れにくいこと、点検困難箇所があること等も挙げられる。そのため、当該部位・機器毎に劣化解析手法の有効性を検討して傾向管理に取り組みとともに、状態監視技術に関わる新技術の活用及び高度化、並びに故障事例の蓄積を図る必要がある。

これらを踏まえ、今後は、ダム用ゲートの特性をより反映させる健全度評価手法の確立と相まって、維持管理システムの改良検討に努めて参りたい。

謝辞: 本検討に際してご指導を賜りました京都大学角教授、南山大学 高見教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：ダム用ゲート設備等点検・整備・更新検討マニュアル(案),平成23年4月
- 2) 社団法人 ダム・堰施設技術協会：ゲート点検・整備要領(案),平成17年1月
- 3) 国土交通省：河川用ゲート設備健全度評価マニュアル,平成23年