

信頼性及び社会的影響度を考慮した 土木機械設備の維持管理計画の立案手法

伊藤 圭・梶田洋規・上野仁士

1. はじめに

河川用ポンプ設備や河川用ゲート設備等の土木機械設備は、近年老朽化の時期を迎えるとともに設備数が増大しており、今後更新費や維持管理費の増大が予想されている。一方で社会情勢から限られた予算のなかで管理せざるを得ない状況となっており、一層の維持管理コストの削減のため、個々の管理についてはライフサイクルマネジメントの導入が進められているところである。

これら土木機械設備は、常時頻繁に運転しなくても必要とされる時には必ず機能することが求められるため、信頼性評価に基づく経済的かつ合理的な維持管理が重要となる。

しかしながら、財政的・体制的な制約等より、全ての土木機械設備を画一的な管理水準で維持管理することが困難であることから、従来型の個々単位で管理する維持管理手法からの転換が必要となる。このため、複数施設を対象とした社会的影響度評価に基づく機能保全対策を通じて、既存施設（ストック）の有効活用や長寿命化を図り、もってライフサイクルコストを低減する、いわゆる「ストックマネジメント」の導入が必要である。

本稿では、このストックマネジメントを効果的に実施するための要素技術として信頼性評価及び社会的影響度評価、さらにこれらを含めた要素を総合評価し効果的に更新や整備を行っていく維持管理計画の立案手法の提案について概説する。

2. 維持管理におけるP D C Aサイクル

土木機械設備の維持管理を経済的かつ効果的に実施していくためには、各々の機械設備の状況・状態を適切に評価し、それを維持管理の方法や内容に生かしていくことが重要となってくる。このため、図-1のような「P D C Aサイクル」により維持管理を実施することが必要となる。

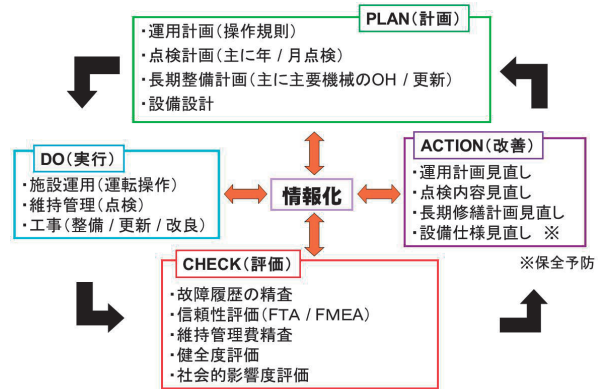


図-1 土木機械設備の維持管理P D C Aサイクル

このP D C Aサイクルを計画的に実施するにあたっては、機械設備の故障・整備履歴のデータベースを基とした信頼性評価における故障分析・故障率、部品の更新年数を把握する必要がある。また複数設備を計画的に整備する優先度決定を図るため、近隣他設備による補完性を考慮した社会影響度を求める必要がある。

3. 信頼性評価

土木機械設備の信頼性を評価する手法として、FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) 及びFTA(Fault Tree Analysis)が有効であるが、これらを実施するためには過去の運転・故障・更新・修繕・整備の維持管理情報より具体的な故障内容や構成機器の故障率、更新年数などの実態を的確に抽出し解析する必要がある。

以下に中規模排水機場で類似モデルが多いと考えられる表-1に示すK排水機場をモデルケースとして検討した例を示す。

表-1 K排水機場基本仕様

ポンプ基数	2基
ポンプ形式	立軸斜流ポンプ
吐出量(m ³ /s)	7.5
口径(mm)	1,800
主原動機形式	ディーゼル機関
主原動機出力(kw)	530
(PS)	(720)

3.1 FMEAによる信頼性評価

FMEAは、構成機器の故障が全体システムへ与える影響を定量的に評価する手法である。

本FMEAでは、機器・部品毎の故障要因を整理し、「システムへの影響度」、「発見の難易度」、「故障発生頻度」について、評価者による差異が生じにくい4段階評価を行い、次式により「故障等級（致命度）」を求め評価する。

$$\text{故障等級} = 3\sqrt{\text{影響度} \times \text{難易度} \times \text{頻度}}$$

表-2及び図-2にFMEAの実施例を示す。

表-2 FMEA実施結果例（抜粋）

機器区分	部品名	故障	故障モード	原因	検出方法	システムへの影響度	故障モード発見の難易度	故障発生頻度	故障等級（致命度）	
ベルマウス	吸込口（ベルマウス）	吸込性能低下	±径増大	流入±径増大	目視	4	3	1	2.3	
			変形・欠陥	吸込水筒形状	吐出圧測定					
本体	ベンド（ケーシング）	漏水（漏れ）	破損	異物混入	流量測定	4	1	1	1.6	
			破損	異物混入	流量測定					
			破損	異物混入	流量測定					
			破損	異物混入	流量測定					
			破損	異物混入	流量測定					
	継手部	支持力低下	ボルト位置のずれ	緩み	緩み	目視	3	1	1	1.4
				緩み	緩み	目視				
				緩み	緩み	目視				
	駆動部（モータ）	固定能力の低下	固定能力の低下	破損	破損	目視	3	2	1	1.8
				破損	破損	目視				

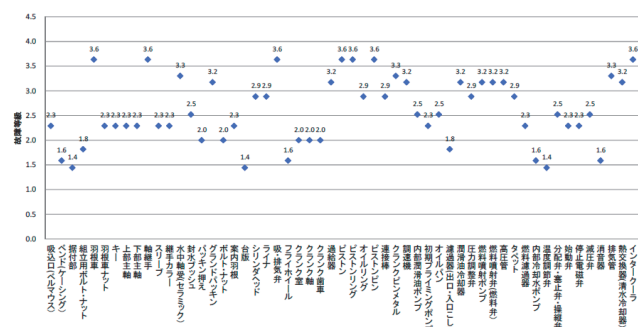


図-2 故障等級分布図（抜粋）

ポンプ設備は、ポンプ本体、ディーゼル機関、減速機など点検時に内部監視ができない機器が有することから、故障モード発見の難易度は高い値となる。特にディーゼル機関等の原動機について、システムの影響度、故障モード発見の難易度、故障発生頻度はどれも高い値である機器が多く、故障等級が全体的に高いことから、原動機はポンプ設備の中でも重視すべきものと評価される。

3.2 FTAによる信頼性評価

FTAは、システムに発生することが望ましくない事象を「トップ事象」として設定し、「FT図（故障木）」を用い、その発生要因となる個々の「基本事象」を求める手法であり、構成機器・部品の故障率を基に算出されたトップ事象の発生確率（以下「アンアベイラビリティ」という。）を信頼性の指標とするものである。

図-3に作成したFT図（抜粋）を示す。

本FTAでは、トップ事象を「排水機能の低下」に設定し、アンアベイラビリティを求めると $2.44275 \times 10^{-5} (1/h)$ 、発生間隔はこの逆数となる

4.7年となった。トップ事象に繋がる故障率が高い機器を追うとポンプ設備の主エンジン機能損失が一番寄与している。主原動機は、機器部品の故障率が高いこともあるが、機器部品数も多く、冷却系等の系統機器設備の故障による故障も考えられることから、高い値になっている。

トップ事象を発生させる基本事象の最小の組合せであるミニマルカットセットは、主原動機エンジンの始動空気系統の塞止弁となった。塞止弁は、主原動機の起動に必要な部品であることから重要な部品と評価でき、ミニマルカットセットを把握することにより対策を講じるべき機器・部品が見えてくる。

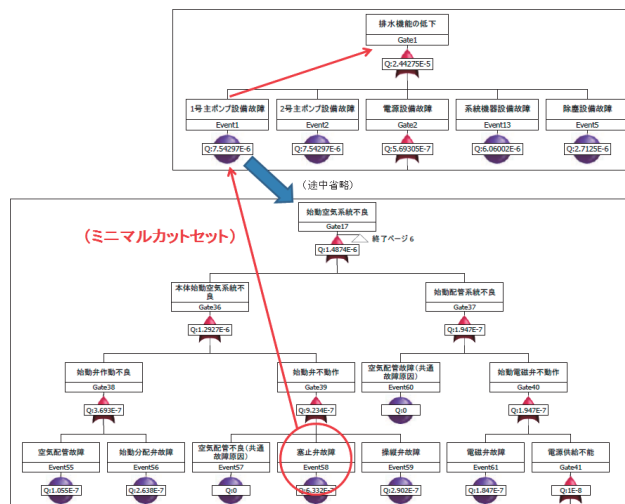


図-3 FT図（抜粋）

3.3 信頼性評価を用いた整備・更新の最適化

設備をより効果的に維持管理を図っていくうえで、設備の信頼性の確保・向上を考慮しながら、経済的な予防保全や技術改善、冗長化を検討する必要がある。そこで、前述の信頼性評価を活用し、整備・更新時において信頼性向上を図った場合における経済性を評価した。

構成される機器・部品の評価は、FMEA・FTAを用い、機能不全に対する寄与度が大きい機器を抽出し、以下に分類した。なお、分類上併用可能な機器・部品については、限られた予算の中での対策であり併用するとコストアップとなることから、併用とはせず上位区分での設定とした。

- (ア) 予防保全対象機器：時間管理又は状態管理に基づき予防保全を行うことにより、信頼性が向上する機器
- (イ) 技術改善対象機器：技術改善を行うことにより、上記（ア）より信頼性が向上する機器

(ウ) 安全管理対象機器：二重化、保護装置の追加又は予備品の設置により、上記 (イ) より信頼性が向上する機器

機能不全に対する寄与度が大きい機器の抽出は、FMEAにおける故障等級の重み付けによるものとし、「システムへの影響度」、「故障モード発見の難易度」、「故障発生頻度」より算出される故障等級が2.5以上の機器を機能不全に対する寄与度が大きい機器として抽出、表-3に示す判別方法・故障率の設定により整理した。

表-3 判別方法及び故障率の設定

分類	判別方法	故障率の設定(仮定)
(ア)予防保全対象機器 時間管理又は状態管理に基づき予防保全を行うことにより、信頼性が向上する機器	河川用ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル(案)(H27.3)により「予防保全機器」と「事後保全機器」の区分けにより判別	従前故障率と同 【故障率の大きな向上は見込まれないため】
(イ)技術改善対象機器 技術改善を行うことにより、上記(ア)より信頼性が向上する機器	材質変更や他方式への変更の余地がある機器部品を判別	従前故障率×3/4 【(ア)との中間値】
(ウ)安全管理対象機器 二重化、保護装置の追加又は予備品の設置により、上記(イ)より信頼性が向上する機器	二重化や予備品の対象となり得る機器部品を判別	従前故障率×1/2 【二重化等のため従前故障率の半分と仮定】

これらの検討結果を基に、抽出した機能不全に対する寄与度が大きい機器に対して、信頼性向上対策を図った場合のアンアベイラビリティをFTAにより求め比較した。表-4に示すとおりアンアベイラビリティは約 0.5×10^{-5} 減少(20%)し、発生間隔としては、1.2年延長される結果を得た。

表-4 アンアベイラビリティ比較

施設名	区分	アンアベイラビリティ(1/h)	発生間隔(年)
K排水機場	信頼性向上前	2.44275×10^{-5}	4.7
	信頼性向上後	1.93507×10^{-5}	5.9

経済性評価として、これらの結果を基に信頼性高・低それぞれの中長期保全計画(資金計画)を設定し、コスト比較による経済性評価モデルを図-4のとおり作成した。取替・更新年数は、「河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル(案)

1)」に準ずるものとしている。

信頼性高の場合では、初期投資、更新金額は大きい50年間のライフサイクルコストを比較すると、信頼性向上前に比べ約800百万円削減する結果となった。ただし、設定した取替・更新年数は期待値として設定したものであるため、今後精度の確認が必要といえる。

以上のとおり、信頼性評価を活用することにより、より効果的な整備・更新が図られると考える。

4. 社会的影響度評価

河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル(案)等に基づく維持管理では、各施設の構成機器・部品毎の特性(致命・非致命)を踏まえ健全度(物理的耐用限界)を評価し、さらに使用条件・環境条件等の健全度に影響する設置条件の評価を加味し、総合的な整備・更新の優先度の評価を行うことになっている。

しかしながら、今後老朽化施設が増大していくと限られた予算の中での優先度評価が必要になるが、同じ治水機能を有する設備においては、使用条件・環境条件や設備の大小という区分だけでは差別化が難しくなることが予想される。本質的には、個別設備の絶対的評価だけでなく、関連する施設群でその重要度を評価することができれば、さらに優先順位付けの根拠が明確になる。

本研究では、排水機場を中心とした河川の機械設備を関連する流域でグルーピングし、各々の機能の補完性を検討するとともに、機能が喪失した場合に毀損される便益の算定をもって、社会への影響度をある程度定量的に評価する手法を検討・提案した。

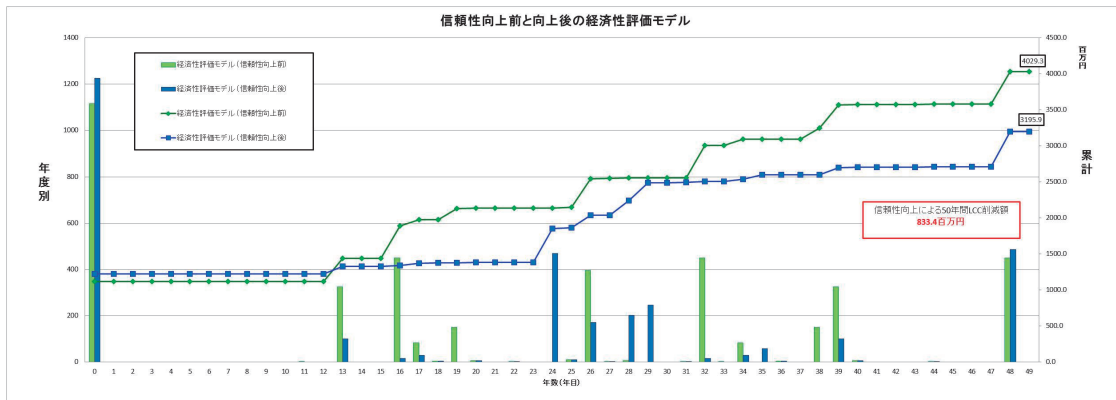


図-4 信頼性向上前と向上後の経済性比較

4.1 河川GISモデル

流域にある排水機場を中心とする施設群の便益を評価するための水文・水理プログラムとして、「河川GISモデル」を構築した。

構築にあたっては、ソフトウェアの改良自由度が高く他の施設群への応用が可能であることからCommonMP (Common Modeling Platform for water-material circulation analysis) を採用した (<http://framework.nilim.go.jp/>)。

この「河川GISモデル」は、表-5に示す機能を有し、各々の施設が機能を失った場合の内水側湛水状況を予測可能なものとしている。あわせて、河川GISに地域の資産情報を重合させて、出水事例毎に施設がカバーした内水側湛水域の被害想定額を積み上げ可能なものとしている。

排水機場の機能補完性は、各々機能を失った場合の内水側湛水状況及び被害想定額をそれぞれ求め比較することにより評価する。これにより、施設群の中における社会的な影響度の評価に資することができる。

表-5 各要素モデルの主な機能

要素モデル名	主な機能
一次元不定流	①河道内の水面形(水位・流量)の追跡 ②複数河川の分派と合流 ③設備要素モデル(水門、排水機場、堰)、越水破堤モデルと接続
Nilim氾濫解析	①氾濫原における浸水深の追跡 ②河道破堤地点と氾濫原の接続関係の指示 ③氾濫原の接続地点の水位出力
越水・破堤	①越水と破堤の選択 ②横越流量及び正面越流時の越流量の算出 ③破堤開始と破堤幅 ④破堤開始水位及び破堤敷高
排水機場	①一定量の排水の設定 ②内水位・外水位によって排水開始と停止制御設定
水門	①水門からの流量算出 ②上流側水位・下流側水位によって水門の開閉制御する設定 ③水門の河床高の設定
河道堰	①越流公式による越流量の算出 ②上流側及び下流側水位によって敷高制御の設定

シミュレーションの対象モデルとした施設群の流域の大半は市街地化されており、表-6に示す4か所の排水機場が設置されている。このモデル施設群の排水系統図を図-5に示す。凡例に示すそれぞれの要素に前述の要素モデルを設定・組合せ、シミュレーションを行えるようにしている。

表-6 排水機場主要諸元

排水機場名		A		B		C		D	
排水ポンプ号機		1, 2	3	1, 2	1, 2	3	1	2, 3	
排水ポンプ	吐出量 (m ³ /秒)	25	50	7.5	2.5	10	8.7	8.7	
	口径 (mm)	3,300	4,600	1,800	1,000	2,000	2,000	2,000	
主原動機	出力 (PS)	2,700	5,600	720	200	1,250	800	800	
	形式	ディーゼル機関				ディーゼル機関 + 電動機		ディーゼル機関	

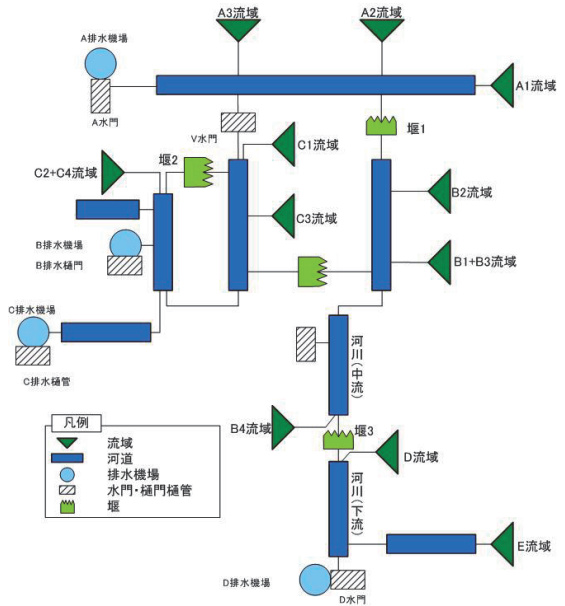


図-5 モデル施設群の排水系統図

4.2 排水機能喪失時のシミュレーション

作成したモデルにより、実際の出水時のデータを用い排水機場の排水機能が喪失した場合の氾濫シミュレーションを行った。例として、A排水機場の3台全ての排水ポンプの排水機能が喪失した場合の氾濫状況を図-6、A排水機場の2号ポンプ(25m³/s) 1台のみ稼動していた場合の氾濫状況を図-7に示す。なお、氾濫シミュレーションは、浸水範囲を50mメッシュ形式として浸水深及び浸水メッシュ数を求めている。

シミュレーション結果を比較すると、表-7より床下及び床上を合わせた浸水面積比で約48倍、面積で約199万m²程度の差が生じることが分かる。

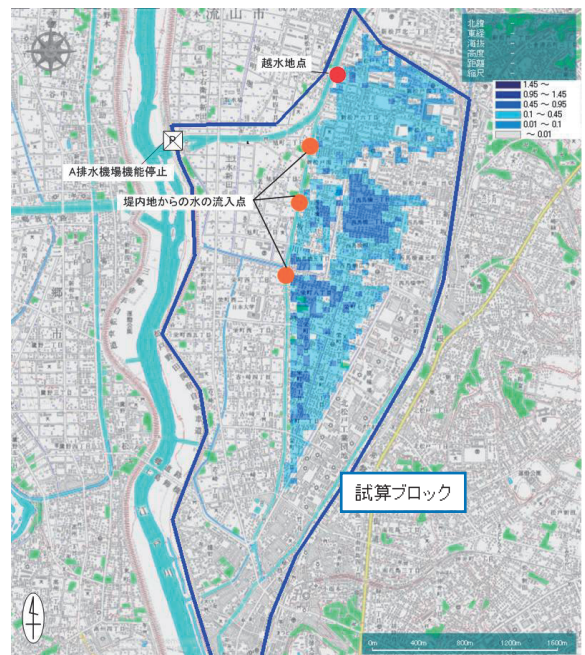


図-6 氾濫計算結果 (A機場：全台喪失の場合) 2)



図-7 氾濫計算結果（A機場：1台稼働の場合）²⁾

表-7 氾濫による浸水メッシュ数の比較²⁾

検討ケース	メッシュ数(個)					比率	
	氾濫無し	床下浸水	床上浸水				浸水計
			50cm以下	50~100cm	100cm以上		
A機場: 全台喪失	39,187	648	165	0	0	813	48
A機場: 1台稼働	39,983	17	0	0	0	17	1

4.3 社会的影響度評価

社会的影響度は、氾濫により生じる被害の算出により評価する。被害算出は、「治水経済調査マニュアル(案)³⁾」に準じて、対象となる資産項目ごとに資産数を調査し、調査対象資産をそれぞれ50mメッシュ形式に整理し、浸水メッシュ数に乗じることにより求めることとした。

表-8 被害算定結果(参考)²⁾

		A機場		比較 (①/②)
		①全台喪失	②1台稼働	
直接被害	一般被害計	14,239.5	69.6	
	農作物被害(水稻)	0.2	0.0	
	農作物被害(畑作)	2.7	0.0	
	公共土木被害	24,121.7	117.8	
間接被害	営業停止損失	824.3	15.0	
	清掃労働単価	683.1	15.3	
	代替活動等の出費	1,291.4	29.4	
	事務所代替活動	411.8	8.0	
合計		41,574.7	255.1	163

前述のシミュレーション結果より被害額を算出すると表-8に示すとおり、約160倍程度の差が生じる結果となった。

以上のように、河川GISモデルを活用することにより、出水現象に近い水位・流量を模擬的に検証することができるため、被害想定額と合わせて

補充機能の大小などの評価から、施設群の中における社会的な影響度の評価に資するものと考えられる。

5. 維持管理計画の立案手法

5.1 維持管理計画立案手法の構成

効果的な維持管理を実現するためには、具体的な管理目標を設定したうえで、維持管理情報に基づく維持管理計画を策定し、この計画に基づく整備・更新を進めるとともに、維持管理計画の評価・見直しを図っていく必要がある。これまで述べてきた信頼性評価や社会的影響度等を勘案し、本研究において提案する総合的な維持管理計画の立案手法における実施フローを図-8示す。

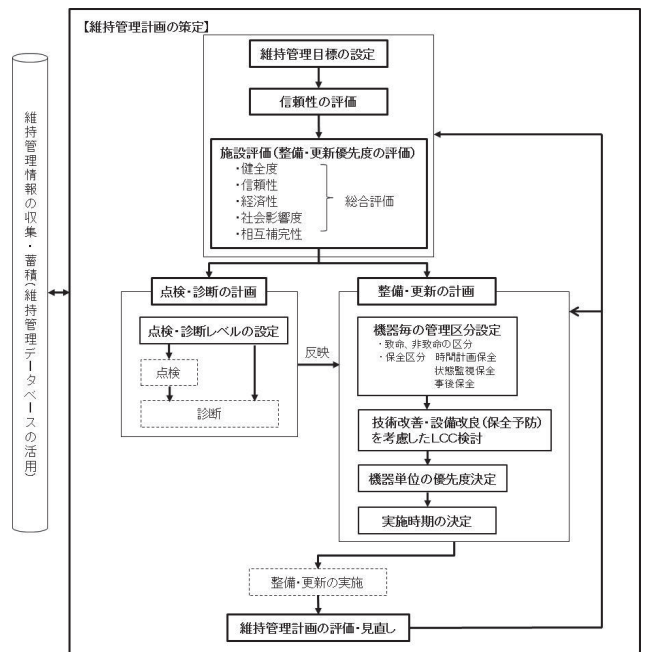


図-8 維持管理計画立案手法の実施フロー(案)

本フロー案では、設備の信頼性評価から経済性を考慮した保全予防を検討するとともに、社会的影響度評価によるリスク低減を図った総合的な優先度検討を行うものとしている。

①維持管理情報の収集・蓄積

維持管理計画の策定に必要な維持管理情報を収集・整理し、継続的に蓄積・活用していく。

②設備管理目標の設定

長寿命化及びライフサイクルコスト低減を目標とする。

③信頼性の評価

FMEA及びFTAによる信頼性評価の実施により、設備固有の弱点、技術改善要素を把握し、技術改善・設備改良(保全予防)に反映させる。

④施設評価（整備・更新優先度の評価）

複数設備における整備・更新の優先度を評価するため、健全度・信頼性・経済性・社会的影響度・相互補完性について総合評価を行う。

⑤点検・診断の計画

設備毎に各機器の致命度等を勘案し、点検・診断方法及び実施サイクル等を計画する。

⑥整備・更新の計画

機器毎の管理レベル（時間計画保全、状態監視保全、事後保全）を設定し、技術改善・設備改良（保全予防）を考慮したライフサイクルコストの低減策を検討する。

また、機器の健全度・致命度等より整備・更新の優先度を評価し、予算の平準化を考慮した実施時期を検討する。

⑦計画の評価・見直し

維持管理計画に基づいた整備・更新の実施により、得られた実績値と計画値を比較し、乖離が見られた場合は維持管理計画の見直しを図る。

5.2 維持管理に視点を置いた保全予防

保全予防を図るためには、過去の維持管理情報を基に、整備・更新段階で単なる原形復旧を図るのではなく、信頼性、保全性、操作性、安全性を総合的に勘案し基本仕様の変更、新技術の採用、構造や材質の見直しなどを具体的に実施し、信頼性・保全性を向上させていく必要がある。

保全予防を具体的に検討するにあたっては、3.2において述べた信頼性評価を用いた整備・更新の最適化の方法を用いることにより、見込まれる効果（信頼性の向上・ライフサイクルコスト）を推定できるため、効果的であるものとする。

6. まとめ

FMEA及びFTAを用いた土木機械設備の信頼性評価は、各部品・機器ごとの致命度の評価、故障率の算定、時間計画保全の精度向上、保全予防（更新時の仕様改善）に資することができ、維持管理計画を検討するにあたって有効な手段である。また、河川管理用機械設備を対象として構築したCommonMPを活用した河川GISモデルは、社会的影響度を評価するにあたり有効なツールとなり得る。

維持管理計画の立案においては、限られた予算のなかで効率的・効果的なものにする必要があるため、健全度や信頼性、社会的影響度、補完性等を評価し、さらに保全予防を考慮したライフサイクルコスト検討を行い、整備優先度を決定することにより、コスト縮減・長寿命化に寄与できるものと思料する。

謝 辞

本研究の実施にあたって、ご協力いただいた各地方整備局並びに関係各位に、この場をお借りし厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル（案）、2015
- 2) 藤野健一、竹田英之、山尾昭：ネットワーク型GISモデルを用いたシミュレーションによる土木機械設備の社会影響度評価手法の検討、平成25年度建設施工と建設機械シンポジウム、2012
- 3) 国土交通省：治水経済調査マニュアル（案）、2005

伊藤 圭



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主任研究員
Kei ITOU

梶田洋規



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 上席研究員
Hiroki KAJITA

上野仁士



研究当時 土木研究所技術推進本部先端技術チーム主任研究員、現 国土交通省北海道開発局旭川開発建設部上席施設整備専門官
Hitoshi UENO