

河川ポンプ設備の経済性と信頼性を考慮したマネジメント手法

田中義光* 山元 弘**

1. はじめに

河川改修事業においては、昭和40年代以降排水ポンプ設備を急速に整備してきたが、近年では老朽化した設備も多くなっており、今後修繕及び更新件数は増大していくものと予想される。しかし、低成長社会における公共予算はとも厳しく、維持管理に係る全体予算の増大は期待できないのが実情である。

現在、河川ポンプ設備は内水排除・浄化・利水など非常に重要な使命を有していることから、信頼性を確保するため一部に「画一的な水準」での維持管理が行われてきた。このような背景から、国土交通省は平成20年4月に「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」(以下「マニュアル(案)」という。)によって、個々の設備に合わせた効率的な維持管理の考え方を示した。

マニュアル(案)の運用では、点検、修繕、更新に係る判断ルーチンがあり、円滑に実施するためのサポートツールが必要である。

本報告は、河川ポンプ設備を対象とし当チームがとりまとめた経済性と信頼性考慮したマネジメント手法について概説するものである。

2. 研究の方法

2.1 研究の流れ

当チームでは、昭和59年度から機械設備の維持管理に信頼性工学を導入する研究に着手し、定量的に信頼性評価を行う手法を開発した。故障率の解析、機器の寿命の評価、点検整備サイクルの評価といった研究成果は、設備の計画・設計、維持管理に関する技術基準やマニュアル類の整備に活かされてきた。

本研究では、信頼性評価手法を固有設備のマネジメントに活用できるよう発展させるため、

- ①維持管理によって得られる信頼性を把握し、
- ②それに要する費用の相関を評価、③設備の弱点把握・改善検討を行う方法の構築を目指した。

手法の素案をまとめた段階で、実際の現場における維持管理データを用いて有用性を検証した。

2.2 信頼性評価手法

土木研究所では、平成元年度にFMEA(Failure Mode and Effects Analysis)及びFTA(Fault Tree Analysis)による信頼性評価手法を発表した。

従来の手法を継承し、FMEAによって河川ポンプ設備を構成機器に分解して故障モードを抽出し、機器の機能及びシステムへの影響を評価した。また、多数のポンプ設備を対象とした横断的な故障データ解析により、「排水機能低下」を頂上事象としたリスク(以下「アンアベイラビリティ」という)をFTAにより求めるものとした。

また、実際の維持管理データを用いて、各設備の「くせ」を把握するとともに、点検整備の効果の評価するため、各現場の点検整備時に発見した故障に基づく故障確率を求めアンアベイラビリティとの比較を行った。

より多くの固有設備に対応するため、解析の基本となるFMEAシート及びFT図を、9形式のポンプ設備(主機と減速機の形式)に分けて整備した。

表-1 ポンプ設備の形式

形式区分	主機と減速機の形式
①	水冷ディーゼル機関(二次冷却) + 水冷減速機(二次冷却)
②	水冷ディーゼル機関(二次冷却) + 水冷減速機(一次冷却)
③	水冷ディーゼル機関(一次冷却) + 水冷減速機(一次冷却)
④	水冷ディーゼル機関(管内又は水槽内クーラ) + 水冷減速機(管内又は水槽内クーラ)
⑤	水冷ディーゼル機関(ラジエータ) + 空冷減速機
⑥	空冷ディーゼル機関 + 空冷減速機
⑦	水中モータ
⑧	ガスタービン(横軸)
⑨	ガスタービン(縦軸)

Reserch of management methods of river pumping systems that consider the reliability and economic properties

表-2 主ポンプ設備のFMEAシート事例（ケース1）

設備区分 主ポンプ設備

機器区分	部品区分	故障	故障モード	原因	検出方法	影響			故障発生頻度 ($\times 10^{-6}$ 件数/供用時間hr)	故障等級 (致命度) ($\times 10^{-6}$ 件数/供用時間hr) (システム別)	対策		備考
						機器	システム	社会的影響			復旧までの所要時間	内容	
羽根車	羽根車	作動しない	腐食	異物付着	目視	4	4		0.1580	0.6320	5ヶ月	取替	性能試験含む
		途中で停止	磨耗	キャビ・異物衝突	目視	4	4		0.1580	0.6320	5ヶ月	取替	
			変形	異物衝突	目視	4	4		0.1580	0.6320	5ヶ月	取替	
	羽根車ナット	作動しない	腐食	異物付着	目視	4	4		0.0226	0.0904	1ヶ月	取替	
		途中で停止	変形	異物衝突	目視	4	4		0.0226	0.0904	1ヶ月	取替	
			磨耗	異物衝突	目視	4	4		0.0226	0.0904	1ヶ月	取替	
	キー	作動しない	腐食	異物付着	目視	4	4		0.0226	0.0904	2週間	取替	
		途中で停止											

2.3 経済性評価手法

信頼性評価を行った機場について、建設時から現在に至るまでに要した点検費、修繕費、改造費を集計し、年平均値に換算すると共に、建設費に対する比率でその割合を示すものとした。

各年度費用についてはデフレーターを考慮するとともに、経費情報が欠落している点検整備・修繕事案については、内容から類推して数値を補完した。また、現状の点検整備内容をもとに経費と得られた信頼性の関係を明確にした。

3. 成果概要

3.1 FMEAの実施

FMEAはシステムを機器レベルに分解し、個々の故障頻度やシステムへの影響度を解析する作業である。河川ポンプ設備を構成する「設備」「機器」「部品」を、「揚排水ポンプ設備設計指針（案）同解説（（社）河川ポンプ施設技術協会編）を基に分類した。

従前の点検データでは、故障モードの定義が曖昧で、現場における情報の誤記入の要因となっていたため、「故障の要因となる物理・化学的な変化」と簡明に定義し、情報を再整理した。

一般的なFMEAでは、発生頻度などの各評価は、10点法や4点法等の定性的な方法で行うことが多い。本研究では、これまで蓄積したデータを有効に活用するため、構成機器の故障発生頻度については、平成13年に解析した全国平均の故障率を準用する。

各部品レベルの故障モードが、当該部品を含む設備区分に与える影響とシステム全体に与える影響を評価した。システム影響度は4点法を採用し、故障頻度と乗じたものを「故障等級」と定義した。

FMEAに用いる表は、2.2項に示す9形式について整備した。表-2にシートの一部を示す。

3.2 FT図の作成

FMEAと同様に、9形式のFT図を作成した。河川ポンプ設備は機器点数が多いため、従来のFTAでは1設備当たりの作業量が膨大になってしまふことから、FMEAによってシステムの信頼性に影響が大きい機器を把握しておき、統計処理により故障率を解析する機器群を効果的に仕分けした。図-1にFT図事例を示す。

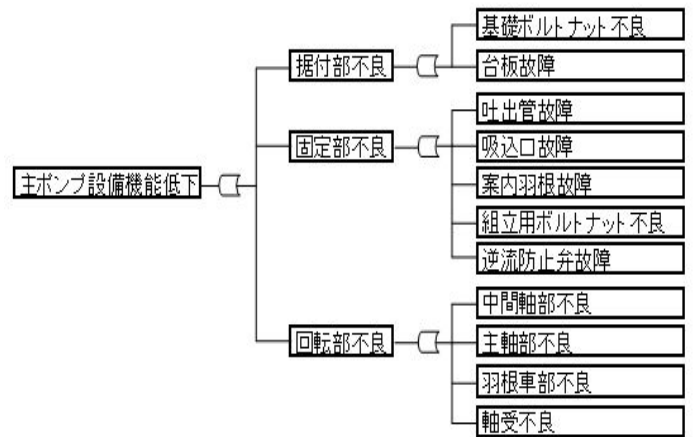


図-1 FT図（主ポンプ設備の例）

3.3 信頼性評価

3.3.1 点検整備効果

今回、評価を行った機場におけるポンプ設備の機器構成形式を表-3に示す。

表-3におけるA及びB機場は、 $5\text{m}^3/\text{s}$ 程度のポンプが2~3台設置されている機場であり、C及びD機場は $50\text{m}^3/\text{s}$ クラスの大型ポンプを有する機場である。また、E機場は、ガスタービンとディーゼル機関を主原動機とするポンプ設備が混在する例である。

表-3 解析対象機場の形式

名称	機器構成形式
A排水機場 (供用34年)	形式④：水冷ディゼール機関（管内ケー） ＋水冷減速機（管内ケー）
B排水機場 (供用21年)	形式①：水冷ディゼール機関（二次冷却） ＋水冷減速機（二次冷却）
C排水機場 (供用29年)	形式①：水冷ディゼール機関（二次冷却） ＋水冷減速機（二次冷却）
D排水機場 (供用26年)	形式④：水冷ディゼール機関（水槽内ケー） ＋水冷減速機（水槽内ケー）
E排水機場(2台) (供用17年)	形式①：水冷ディゼール機関（二次冷却） ＋水冷減速機（二次冷却）
E排水機場(1台) (供用8年)	形式⑧：ガスタービン（横軸）

各機場の機器構成から求めたアンアベイラビリティと、点検データに基づく機場の故障確率を表-4に示す。アンアベイラビリティは、全国平均故障データを基に算定したもので、故障の発生確率とは、5機場で実際に発見した故障履歴から模擬的にFTAで求めた機場レベルの故障発生確率である。アンアベイラビリティを見ると、排水中の機能低下リスクは、供用時間が2～6年に1回程度の割合であることを示す。

表-4 点検整備効果

機場名	アンアベイラビリティ ※	故障の発生確率 ※	摘要
A機場	2.02×10^{-5}	2.28×10^{-4}	
B機場	2.56×10^{-5}	2.42×10^{-4}	
C機場	4.97×10^{-5}	4.70×10^{-4}	大型ポンプ
D機場	2.69×10^{-5}	7.90×10^{-4}	大型ポンプ
E機場	2.36×10^{-5}	4.00×10^{-4}	
E機場	4.44×10^{-6}	2.85×10^{-5}	ガスタービンのみ

※：単位1/hr

一方、固有機場の故障履歴は、点検で機能回復を行わないとすれば2～6ヶ月に1回の割合で排水機能が低下しうることを示しており、アンアベイラビリティと故障の発生確率の差が点検整備効果であるといえる。

また、5機場の故障履歴によると、運転中に排水能力が低下した事例は1件（二次冷却水システムの不具合により冷却水断となった1機場）のみで、4機場には事例がなかったことから、信頼性の面で大きな課題はないといえる。

3.3.2 機場の「くせ」

故障履歴により、どのような部品に故障が発生しているかを集計することで、各機場の「くせ」を把握することができる。

各機場の故障分布を調査したところ、A機場では、主原動機に故障が発生していることがわかった。同じように、河川の水質が悪いB機場

は冷却水系統、C、D及びE機場は主原動機及び各系統機器設備の故障が多く、5機場を合計すると、冷却水系統の故障が最も多かった。このような「くせ」は、設備構成、設置環境、運用状況に影響を受けている。特に湿度・温度等の設置環境が機器に与える影響は大きい。冷却水ポンプでは、設置場所の湿度や、水質等の条件が悪い場合腐食による劣化が早い傾向がある。同様に故障等級が高い機器として、操作制御設備があるが、湿度が高い場所に盤類を設置している事例もある。電動機や電子デバイスは、温度、湿度が高く、通電時間が長いほど寿命が短くなることがわかっており、管理上注意が必要である。

3.4 経済性評価

D機場を例に、メンテナンス費用の推移を推計した。D機場は、総排水量100 m³/sの機場で、3台（50 m³/s × 1台、30 m³/s × 1台、20 m³/s × 1台）の主ポンプが設置されている。

排水ポンプ設備に係る建設費（増設費を含む）は、デフレーターを勘案して総額約75億円（遠方監視操作制御設備を含む）である。維持修理費は点検費、修理費を対象とするが、各機場とも点検は平成元年度以降年点検1回、月点検8回で行われている。維持修理費の推移と建設費に対する維持修理費率（当該年度までの経費を集計し年平均に換算）を図-2に示す。D機場は3台の主ポンプを管理しているが、現状では約0.3%/年となっている。建設省河川砂防技術基準（案）同解説調査編によると、治水事業の経済効果を把握するために計算する年便益本において、年維持修理費は事業費の0.5%としているが、D機場の維持修理費はそれよりも低い。同様に解析すると、大型ポンプを有するC機場は0.4%であったが、小規模なA及びB機場は1%を超過していた。現状の点検作業工数は、規模より設備構成に依存するためであり、特に小規模機場では故障履歴に基づく独自の点検作業構築により、経済性の改善が望まれる。

現状では、この維持修理費率が表-4に示す信頼性を得るための指標となる。このような経費統計は、事業における便益検証にも活用することができ、B・D機場では維持管理費が建設時想定より安価で推移していることを確認した。

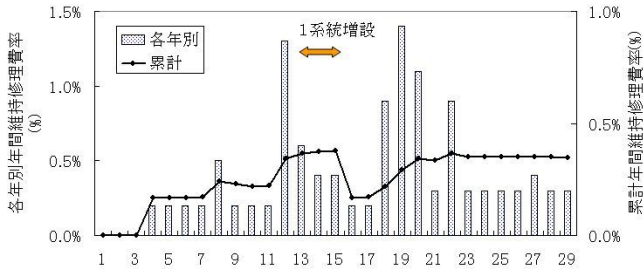


図-2 D機場の点検整備費の推移

3.5 マネジメント手法

3.5.1 整備優先順位の検討

マニュアル(案)では、「社会への影響度」等の管理レベル、点検整備結果等に基づく健全度評価、現況機能の適合性を総合的に評価して優先順位を定め、整備計画を策定することとしている。

複数のポンプ設備を対象とした健全度評価では、アンアベイラビリティの比較が効果的である。大きい数値であればシステム全体のリスクが高い傾向であることを示すので、当該設備の故障履歴から故障発生箇所の有無及びサイクルなどの傾向を把握しておく。次に、マニュアル(案)に示される各構成機器の修繕・取替標準年数と、維持管理データにおける故障率や維持修理費率の推移を総合評価し、機器レベルで整備優先順位を設ける。また、図-2のヒストグラムで突出した箇所は、主ポンプや主原動機の分解整備を示しており、当該サイクルを把握することで複数設備の整備計画立案における予算の平滑化に資することができる。

3.5.2 点検整備内容の合理化

今回解析した5機場のうち、4機場では運転中に故障した記録は無く、信頼性の面で大きな課題はないが、経済面からは点検整備内容について検討の余地がある。そこで、FMEAにより故障等級の高い機器を抽出し、管理運転点検時に並行実施する集中的な点検内容を構築することを提案する。例えば、D機場では故障件数の多い除塵機、主原動機、発電機用原動機の部分的な分解点検などの実施が考えられる。ただし、月点検作業の見直しでは、いくつか目視点検項目を省略せざるを得ないため、省略する機器について変状の見落としによりどのような影響が発生し得るか検討する必要がある。これまでの故障実績とFMEAシートを勘案して、許容できない場合は画一的に簡素化せず、年間を通した点検サイクルで順次カバーするなどの方策を考

えるべきである。

3.5.3 FMEAによる技術改善

FMEAにおいて故障等級が著しく高い機器は、早急な技術改善が必要である。代替技術の選定(場合によっては複数案)が必要になるが、代替技術の故障率を把握できれば、故障等級の改善値をすぐ把握でき、採否の判断を行いやすい。

4. まとめ

成果をまとめると次のとおりである。

- ① 固有機場における信頼性評価にアンアベイラビリティを活用することができる。
- ② 固有機場の故障履歴からシステムの「くせ」を掴むことができる。
- ③ 固有機場の故障履歴を整理することで、点検整備効果と点検サイクルの妥当性を評価することができる。
- ④ 建設費と維持管理費の推移を整理することで、信頼性との関連を把握できる。

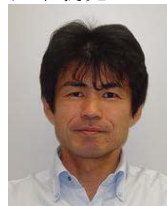
今後は、過去の故障事例から代表的な技術改善事項を選定し、改善策となり得る要素技術の抽出とFMEA手法の事例をとりまとめる予定である。

また、状態監視保全技術に関し、異分野で開発が進んでいる技術の抽出・評価を行い、良好な技術については、最終的な評価手法に採用する予定である。

参考文献

- 1) 長健次、樋下敏雄、村松敏光、多田和弘、大沢昭弘、齊藤英晴「機械設備の信頼性評価に関する調査研究」土木研究所資料pp.11-22、1990
- 2) 国土交通省建設施工企画課、治水課「河川ポンプ設備点検・整備・更新検討マニュアル(案)」2008
- 3) 建設省河川局「建設省河川砂防技術基準(案)同解説調査編」pp546-547、1997

田中義光*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進本部先端技術チーム
主任研究員
Yoshimitsu TANAKA

山元 弘**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推進本部先端技術チーム
主席研究員
Hiroshi YAMAMOTO