

土木機械設備の災害・故障リスクを考慮したマネジメント手法

上野仁士・梶田洋規・伊藤 圭

1. はじめに

河川用ポンプ設備や水門などの土木機械設備は、国民の生命・財産を守るという非常に重要な役割を果たしている社会インフラであり、多くは「非」常用設備と言われる、平時には停止しているが必要時に確実な稼働により機能を発揮することを要求される設備である。これらは、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算という相反する条件下におかれており、費用と信頼性維持を最適化するための、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。

しかし、これまでの手法で適切なマネジメントを実施しているにもかかわらず、実際には設備が故障する事例が散見される。その要因には、設備構造上点検診断が困難な場合があることや、万全な保全を行っても故障発生を完全に0にすることはできないことが考えられるが、故障リスクを限りなく0に近づける検討は必要である。一方で、設備不稼働時（故障を含め、事故・被災等により稼働できない状態を「不稼働」と表現）には早急な機能回復あるいは機能代替手法により、本来の設備の能力・機能を取り戻す必要があるが、現在のところこれらを考慮したマネジメントは体系化されていない。

以上より、これまでの「機械を故障させないための信頼性評価や点検診断技術、マネジメントの向上」とともに、これまでは意識されてこなかった「機械は故障することもあり被災等で不稼働になることもある→不稼働時の機能代替や回復手法を考慮した信頼性評価や設備設計」の両輪による、より実践的な総合マネジメント手法の検討が必要と考える。

そこで、当チームでは「機械設備の不稼働対策・メンテナンス指向への転換（パラダイムシフト）」をコンセプトに標記の研究に着手した。

この研究は開始して間もないため、本報告では、

研究の着目点と現時点での検討内容であるFEMAの手法を活用したリスク回避の定量化手法について概説する。

2. 研究の基本方針

本研究では、土木機械設備の、より効果的・効率的な維持管理を行うための設備設計や信頼性評価手法の提案に資するため、これまでの取り組みや問題点、克服すべき課題を図-1の通り整理し、下記の2点に着目して研究に取り組むこととした。

- (1)災害・故障リスク等を考慮した設備ストックマネジメント手法の検討
- (2)点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築

また、研究成果の普及については基準やマニュアル類への反映が必要であり、その策定や改訂に向けて技術資料をとりまとめ提案することを目標としている。

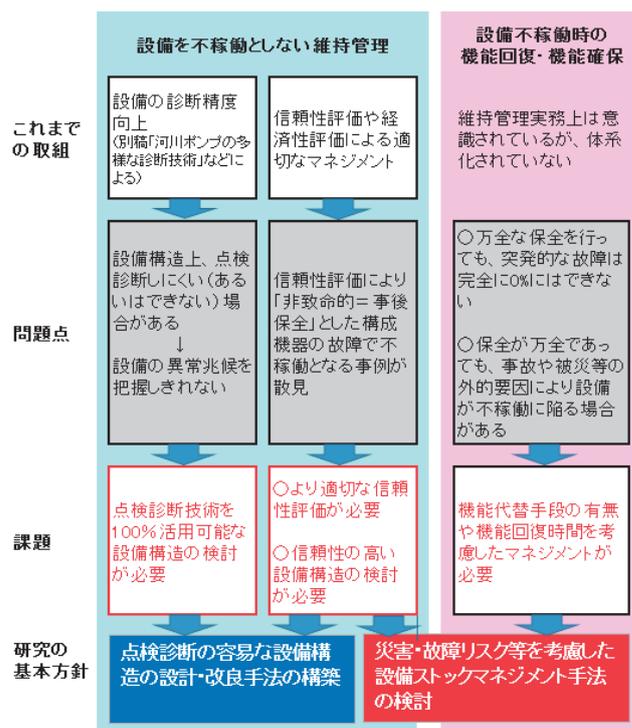


図-1 研究の検討フロー図

2.1 災害・故障リスク等を考慮した設備ストック マネジメント手法の検討

土木機械設備の構成機器・部品の重要度判断や保全方法の選定は、たとえば河川ポンプ設備では、維持管理計画を策定するための技術的評価手法を定めた「河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル」に則り行われる。このマニュアルでは、各々の構成機器の設備機能への影響度により保全方式を選択することとしている。通常操作時においてその機器等が故障した場合に設備としての機能を確保できなくなるものを「致命的機器」、そうではない機器を「非致命的機器」として、前者は予防保全、後者は事後保全とすると定めている。

致命的機器か否かについては、FMEA(Failure Mode and Effects Analysis：故障モード影響解析)という手法により評価している。土木機械設備では「システムへの影響度」「故障モード発見の容易性」「故障発生頻度」の3項目をそれぞれ4段階評価し、そこから故障等級（致命度）を算出して評価されている。

だが、実際には非致命的機器と評価した機器の故障により、設備が不稼働となる例が散見されている。これは、現在の評価では適切に判断できない場合もあることが示されていると考える。また、算出された致命度が高くても、機能回復が早期に可能である場合、たとえば排水ポンプ車の手配や運用が容易であったり、流域内で複数の排水機場ポンプ設備がある場合で、一方が機能喪失しても他方の稼働により相互補完できる²⁾など機能が代替可能である場合は、保全方法を再考慮することも想定される。

しかし、信頼性評価に関する研究において、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速を盛り込んだ評価手法の確立は行われていない。

そこで、これらの要素を考慮することにより、よりの確な信頼性評価を行うことができると考え以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 機械設備の運用、機能回復期間、整備体制等によるリスク回避の定量化方法検討
- (2) モデルケースによる定量的評価シミュレーションと設備管理実態の比較検討
- (3) 故障リスク等による機能損失を考慮したストックマネジメント手法の検討

2.2 点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築

土木機械設備の状態監視技術については、これまで研究を進めており、国土交通省のガイドラインに知見が反映されるなど一定の成果を上げてきた。しかしながら、既存設備においては、点検用センサが取り付けられないなど設備構造が障害となり、点検診断技術が十分に適用できない事例がある。また、軽微な故障であっても整備の際には周辺機器類の取り外しなど大がかりな作業となる事例もある。これらに対処するために、設備構造（ハードウェア）と状態監視技術を含めた点検手法や整備方法（ソフトウェア）との融和、すなわち点検診断・維持管理の容易な設備構造を目指す必要がある。そのために、以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 設備構造等実態調査ならびに活用すべき点検技術の調査
- (2) 点検・診断しやすい設備構造の検討
- (3) 既存設備の改良手法に関する検討
- (4) 点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築

3. リスク回避の定量化方法の検討

3.1 FMEAを活用した評価方法の検討

前述の研究の基本方針のうち、現時点で着手している、機械設備の運用、機能回復期間、整備体制等によるリスク回避の定量化方法検討について概説する。対象は河川ポンプ設備とし、故障等のリスク、機能回復の遅速に関するデータ収集及び機能回復難易度、機能補完性の検討を行った。

そこで在来のFMEAの評価に加え、新たな追加要素として「機能回復難易度」「機能補完性」を組み入れ「機能回復指標」を算出して評価することを検討した。

3.2 機能回復難易度と機能補完性のレベル分け

国土交通省管理の排水ポンプ設備における、昭和57～平成24年までの故障件数約300事例を収集し、構成機器別に復旧までの所要時間（機能回復難易度）及び機器補完性（代替、予備品による対応性）を分析した。

機能回復難易度は、復旧までの所要時間を構成機器ごとに分析し、4段階にレベル分けした。しきい値の設定は、構成機器部品の相対的な判断も

必要なことから、復旧までの所要時間により図-2に示すとおり順位付けし、300個/4レベル=75データ毎に近似するように設定した（ただし、復旧までの所要時間が3ヶ月の構成機器部品が多いことから、これをレベル2にまとめて設定した）。

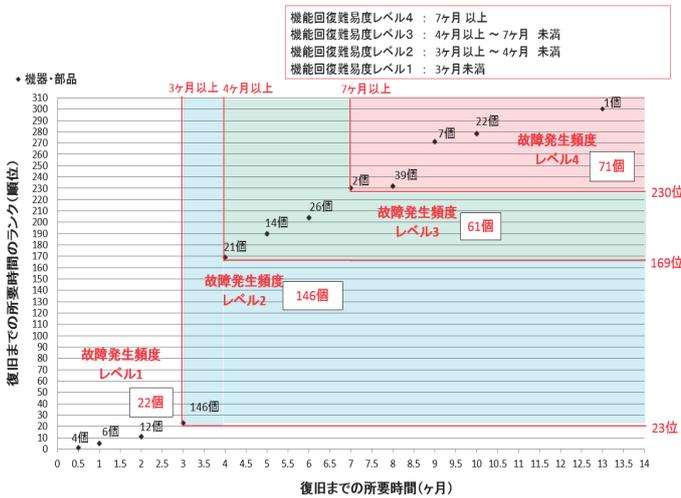


図-2 機能回復難易度レベル区分

また、機器補完性は「河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル（案）平成27年3月」に示されている構成機器・部品別に、故障実績より考えられる補完性及び実際に行った補完を基に、表-1のとおり4段階に設定し整理した。

表-1 機能補完性レベル区分

No.	レベル分け	補完方法	内容
1	レベル1	二重化・代替対応	予備機があるもの、バックアップがあるもの
2	レベル2	予備品による対応(軽)	機械工事共通仕様書(案)に定められた予備品であり予備品への交換が容易であるもの、または応急処置・応急対応が可能なもの
3	レベル3	予備品による対応(重)	一般的に各排水機場に余備品として保管されており、予備品への交換が可能なもの
4	レベル4	なし	予備品がなく、修理に時間を要するもの

表-3 FMEAを活用した機能回復指標の評価例(構成機器300個の一部を抜粋)

機器区分	部品名	信頼性評価(在来のFMEA項目)				機能回復指標(本研究で検討)						
		システムへの影響度	故障モード発見の容易性	故障発生頻度	故障等級(致命度)	復旧までの所要時間	修繕内容	機能回復難易度	補完方法	機能補完性	機能回復指標	
本体	バンド(ケーシング)	4	1	1	1.6	約10ヶ月	取替	4	なし	4	4.0	
インペラ	羽根車	4	3	4	3.6	約10ヶ月	取替	4	なし	4	4.0	
	羽根車ナット	4	3	1	2.3	約5ヶ月	取替	3	なし	4	3.5	
主軸及び軸受	軸継手	4	3	4	3.6	約7ヶ月	取替	4	なし	4	4.0	
	グランドパッキン	4	2	4	3.2	約5ヶ月	取替	3	予備品	2	2.4	

故障等級 = $3\sqrt{\text{システムへの影響度} \times \text{故障モード発見の容易性} \times \text{故障発生頻度}}$
 機能回復指標 = $\sqrt{\text{機能回復難易度} \times \text{機能補完性}}$

3.3 FMEA解析手法を活用した機能回復指標

前述の結果を基に、比較的設置数が多いと考えられる表-2に示す中規模程度の排水機場（構成機器数：300個）をモデルとして、FMEA解析結果を基とした機器構成別の機能回復指標を算出し、設備機能を回復するうえでの弱点の抽出を図った。

表-2 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
	口径	1800mm
	吐出量	7.5m ³ /s
	主原動機形式	ディーゼル機関
	主原動機出力	530kW (720PS)

なお、機能回復指標は下式によるものとした。
 機能回復指標 = $\sqrt{(\text{機能回復難易度} \times \text{機能補完性})} \dots \text{式}(1)$

設備構成機器部品300個について算出した機能回復指標の一部を表-3に示す。なお、数値が大きい方が機能回復または補完しにくいことを示す。

求めた施設全体における機能回復指標の平均は2.9で、弱点と評価する指標を3.0以上とすると構成機器部品300個中120個が弱点に該当することとなった。系統機器設備、操作制御設備、電源設備の指標が低い結果となったが、これは予備機や予備品が多いことが要因と考えられる。逆に部品の中でも予備品にできない大型の機器部品や汎用性が低く複雑なものが、機能回復指標が高い結果となった。機能回復指標が3.5以上と特に高い代表的な構成機器を以下に示す。

- 大型機器部品：主ポンプ（ベルマウス、ケーシング、羽根車、軸継手）エンジン（シリンダヘッド、クランク軸、過給器等）等
- 汎用性が低い機器部品：主ポンプ（水中軸受）、エンジン（ピストン、クランクピンメタル）、減速機（軸受）等

この評価は、経験上設備管理者が暗黙知として認識している機能回復のしにくさと概ね合致している。以上から、今回試行した機能回復指標による評価は、実態を定量的に評価できるものになりうると考えられる。

なお、復旧までの所要時間はモデルとしたポンプ設備メーカーへのヒアリングによるものであるが、調達状況やメーカーの違い、故障状況により復旧時間が異なることもあり得る。また故障データ（約300件）に基づく分析によるものであるが、故障情報が少ないため分類が困難なものもあった。そのため更なる故障情報の積み重ねが重要である。さらに、今回の分析では弱点となった機器部品数が多いものとなったため、実務に適用するには新たな評価項目の追加や評価の細分化（4段階以上）により、弱点の絞り込みが必要と考える。

機能回復指標の設備信頼性評価への活用については、在来のFMEAによる故障等級との合算や乗算、あるいは故障等級と機能回復指標を直交軸としたマトリクス評価が考えられる。先述の弱点の絞り込みを行った後、規模・構造の異なる排水機場ポンプ設備での評価を行い、適切な活用手法について検討する予定である。

4. まとめ

本稿では、リスク低減の必要性やコンセプトと、FMEAを活用した評価手法について概説した。

FMEAを活用した方法では、機能回復難易度・機能補完性より算出される機能回復指標によって個々の機器・部品のリスク評価を図り、弱点機器の抽出を行った。その結果、現状よりも実態に近い評価ができたものとする。

しかしながら、評価精度としては十分とは言えないと考えられるため、故障情報の積み重ねや評価項目の追加、評点の細分化等により精度を高めることにより、弱点機器の絞り込みが可能なものとする必要があると考える。

現在、他の評価手法の検討ならびに点検診断の容易な設備構造の設計・改良種法の構築等についても鋭意研究中であり、成果については随時報告する予定である。

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、2013

上野仁士



土木研究所技術推進本部先端技術チーム 主任研究員
Hitoshi UENO

梶田洋規



土木研究所技術推進本部 上席
主任研究員
Hiroki KAJITA

伊藤 圭



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 国土交通省東北地方整備局企画部施工企画課建設専門官
Kei ITOU