

◆ 流域管理特集 ◆

河川管理設備の集中管理システムの信頼性について

服部達也* 江本 平** 村松敏光*** 持丸修一**** 森下博之*****

1. はじめに

近年、我が国では、河川氾濫想定区域内の人口・資産の集中が著しく、排水ポンプ設備・水門設備を中心とした河川管理設備は益々その重要性が増加しつつある。しかし、河川管理施設数が増大する一方で管理・操作要員の確保難等の傾向が顕著となり出水時の管理体制の確保が課題となってきた。

出水時に迅速かつ合理的な管理体制を可能とする方法として、一定地域の施設に光ネットワークを利用して集中的に監視・制御するシステムの採用が検討されている。しかしこれは、施設の機能を發揮させるための機器点数が増え、システムが複雑となるばかりでなく、運転操作の機能を一部に集中させることになるため、一ヶ所の故障がシステム全体に影響を及ぼす可能性も内包している。そのため、システムの信頼性面からの検討が不可欠である。

本稿は、河川管理設備を集中管理することによる有効性を検証し、集中管理設備の定性的・定量的な信頼性や保全計画の検討を行い、現行基準への追加・改定案をとりまとめたものである。

2. 検討方法

本研究では、図-1に示すようにまず、集中管理の導入効果を整理した。その上で、既存システムをも

とに、モデルシステムを設定し、ケーススタディとして定性的な信頼性解析手法である FMEA (Failure Mode and Effects Analysis : 故障モード影響解析)、定量的な信頼性解析手法である FTA (Fault Tree Analysis : 故障木解析)、保全計画の検討 (RCM) を実施する。

図-1 検討フロー

集中管理効果の検討

モデルシステムの設定

定性的な信頼性検討 (FMEA)

定量的な信頼性検討 (FTA)

保全計画の検討 (RCM)

全体とりまとめ

Study of the Reliability of a Centralized Control System for River Management Machinery and Facilities

RCM (Reliability Centered Maintenance : 信頼性向上保全計画)を行った。最後に、検討結果を実業務へ反映させるための現行基準への追加・改定案を策定し今後の課題を整理した。

3. 集中管理効果の検討

集中管理システムには、機場で操作を行い遠隔から監視のみを行う“遠隔監視”と遠隔から監視及び制御を行う“遠隔操作”的2種類がある。そこで、既設の機場を遠隔化する場合や、新設で遠隔化する場合のシステム構成を整理し、その場合の排水機能に対する信頼性評価を定性的に行った。

その結果を表-1に示す。設備面から見ると、遠隔監視の場合は、従来通りの機場操作となるため信頼性は変わらない。遠隔操作の場合は、遠隔・機場の両方から操作できるため信頼性はやや向上する。また、運用面から見ると、遠隔監視の場合は、異常兆候の早期発見・故障原因判断により、遠隔操作の場合は、水系全体の状況に基づいて運転が行えるため信頼性が向上する。

4. モデルシステムの作成

実稼働している集中管理システムには、荒川第一調節池管理設備(関東地方建設局荒川上流工事事務所)がある。同設備は調節池の治水及び利水運用を行うことを目的として調節池内に広域に点在するポンプ、ゲート、水質保全などの各設備

表-1 遠隔監視・遠隔操作による排水機能への信頼性の評価

	設備面	運用面
遠隔監視	信頼性は変わらない	信頼性は向上する
	遠隔監視を行うための機器の故障は、設備の運転に影響を及ぼさないため。	機器のオンライン傾向管理による異常兆候の早期発見、情報ネットワークを活用したメンテナンス部門への自動通報、遠隔モニタリングによる故障原因把握により復旧時間の短縮が期待できるため。
遠隔操作	信頼性はやや向上する	信頼性は向上する
	遠隔操作機器の追加により、全体の故障率は増加する。しかし、切替装置が正常であれば、機場の監視操作設備、管理所の遠隔操作設備の一方が故障しても操作が行えるため。	水系全体の状況に基づき複数の施設を遠隔から連携して操作することにより、各機場での個別操作に比べて迅速かつ的確な運用が可能となるため、運転開始の判断ミスを防止できるため。

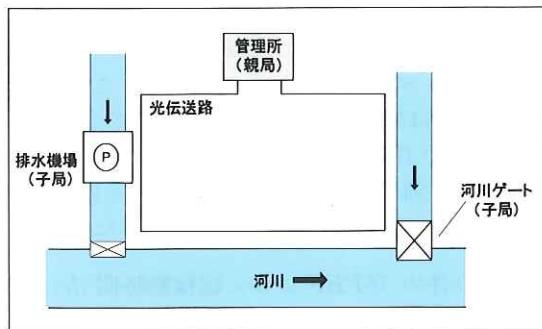


図-2 モデルシステム概要図

を光ネットワークを介して管理所より遠方集中管理するものである。同設備は1ヶ所の管理施設(親局)から5ヶ所の河川管理施設(子局)(ポンプ場×2+ゲート設備×3)を管理している。

そこで、解析対象モデルシステムは、荒川第一調節池管理設備を参考に設定し図-2に示すように1ヶ所の親局により排水機場と河川ゲートの2ヶ所の子局を監視するシステムとした。システム構成は、実際のシステムと同一条件とした。モデルシステムのシステム構成図を図-3に示す。

表-2 故障によるシステムへの影響評価

故障等級		影響評価
I 致命的	治水機能に関する集中監視制御機能の喪失	
II 重大	短時間あるいは条件付きで運転可能	
III 軽微	継続運転可能	
IV 微少	当面の運転に支障なし	

表-3 冗長性レベルの分類

冗長性レベル	内 容
0	冗長化されていない
1	部分的に冗長化されている
2	完全に冗長化されている

5. 定性的な信頼性検討

5.1 弱点機器の抽出

FMEAでは、各サブシステムを取替可能な構成機器レベルまで分類し、その構成機器が故障した場合に及ぼす影響を調べた。システム全体の故障は、治水機能に関わる集中管理機能が維持できるかで判断を行った。設定した故障等級を表-2に、冗長性レベル(故障発生による機能の低下しにくさ)を表-3に示す。これらの指標を用いて行った、モデルシステムに対するFMEAワークシートの例を表-4に示す。FMEAワークシートから、故障等級がIの機器を表-5として抽出した。本ケーススタディにおいては、冗長性レベルが0の弱点機器が、親局側に3点、子局側に合計5点得られた。特に、情報伝送制御装置、入出力盤は、管理所内外を流れる入出力データの各種変換を行う装置であり、非常に重要な役割を担っているにもかかわらず冗長性が無く最大の弱点である。よって、

表-4 FMEA ワークシート

サブシステム	系統・構成機器	冗長性レベル	故障の影響※1		故障等級
			全体会	装置内	
管理所	1. 運用監視系統	1	△	—	II
	1.1 運用制御演算装置	—	△	△	II
	(1) システムコンソール	—	○	○	III
	(2) HDD #1	—	○	○	III※2
	(3) HDD #2	—	○	○	III※2
	(4) CPU本体	—	△	△	II
	1.2 運用制御プリンタ	—	○	○	III
	1.3 運用表示端末	—	△	△	III
	2. 管理制御系統	0	×	—	I
	2.1 情報伝送制御装置	—	×	×	I

※1: 故障の影響 ○: 総合自動運転可 △: 手動・個別運転可

×: 集中管理機能喪失

※2: HDD #1, #2ともに故障の場合 II

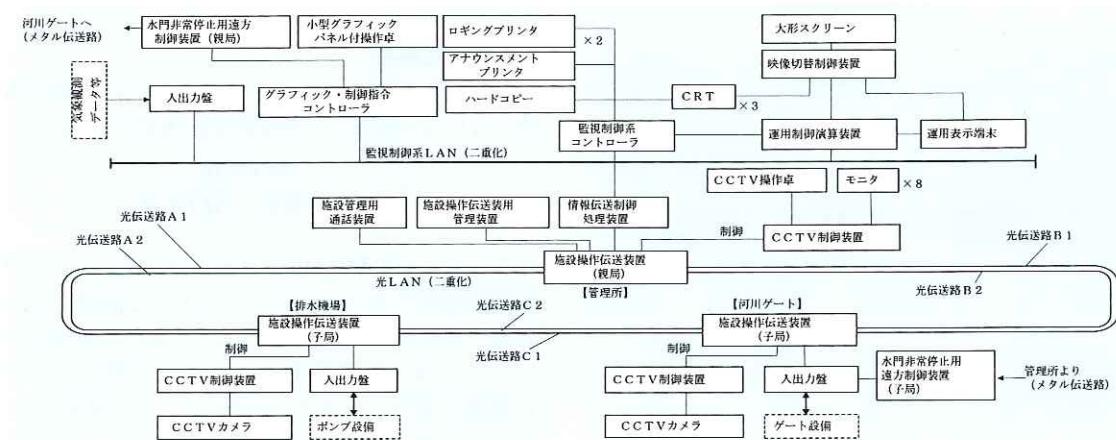


図-3 モデルシステム構成図

表-5 故障等級 I の機器一覧

設置場所	機器名	冗長性レベル	弱点機器
管理所 (親局)	情報伝送制御処理装置	0	○
	施設操作伝送装置	I	—
	無停電電源装置	0	○
	制御電源分電盤	0	○
排水機場 (子局)	施設操作伝送装置	1	—
	出入力盤	0	○
	無停電電源装置	0	○
河川ゲート (子局)	施設操作伝送装置	1	—
	出入力盤	0	○
	無停電電源装置	0	○
	受配電設備	0	○

故障発生時には瞬時に切替を行うホットスタンバイ方式の二重化を行うことが必要である。

6. 定量的な信頼性解析

6.1 FT 解析の準備

5. のモデルシステムを対象に、トップ事象を「洪水時の集中管理機能喪失」とし、末端のレベルを故障発生時の交換部品となる各構成機器までとした図-4 のような FT 図(故障木)を作成した。その上で、各構成機器の MTBF (Mean Time Between Failure : 平均故障間隔) を信頼性フィールドデータ、国内電機メーカーへの機器毎の MTBF 調査およびインターネット上で得られる国内外のメーカー カタログからの MTBF 調査の 3 種類の調査を行った。フィールドデータについては、既存の集中管理システム、運転システム、遠方監視操作制御システム等の使用機器について、機器種類別に総稼動時間と故障件数を調査集計し MTBF を次式により算出した。

$$MTBF = \frac{\text{総稼働時間}}{\text{故障件数}} (h) \quad (1)$$

(=1/平均故障率)

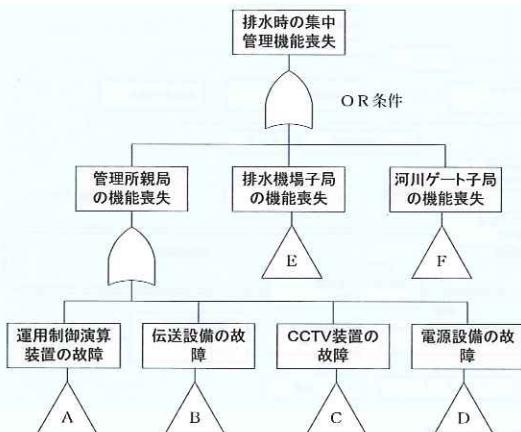


図-4 集中管理機能の FT 図(部分)

なお、本調査では、システムを構成する各機器を一般の電気品と同様に故障発生時期が指数分布となるランダム故障と仮定している。このため、MTBF 値は故障率の逆数として算出できる。また、故障 0 件の機器については、真の故障率の 60% 信頼度推定区間の上端値に相当する値を採用する方式¹⁾に従い、次式により算出した。

$$\text{故障 0 件の } MTBF = 3 \times \text{総稼働時間} (h) \quad (2)$$

また、出水期のみ通電する機器については、MTBF 算出時の総稼働時間を暦時間の 1/2 とした。この結果フィールドデータの得られている機器の稼働時間は、最短でも 5 年(4 万時間)以上であり、機器の信頼性を評価する上で十分な期間を経過しているデータであると考えられる。

一方、電気メーカから得られた MTBF 値には、MIL 規格等にもとづいて算出した理論値による小さい値のもの、そこへ過去に納入した類似設備のフィールドデータ値を加味した大きい値のものがあった。また、インターネットカタログ値の調査では、製品のバラツキや保証等の要因を考慮し、安全サイドに設定しているメーカが多く、小さい値のものが多かった。

3 種類の調査結果を総合的に検討した結果、MTBF 値の決定には、フィールドデータを採用することが適当であると判断した。ただしフィールドデータが得られていない機器については、電気メーカあるいはカタログ調査の大きいほうの MTBF 値を採用した。なおフィールドデータには、設置機器数・故障件数が少ない機器もあることから、今後もデータを蓄積し MTBF・故障率の精度を高めていく必要があると考える。調査結果を表-6 に示す。

6.2 信頼性解析

各構成機器のアンアベイラビリティ \bar{a} (機能を維持していない確率) を本研究では次式で定義した。

$$\bar{a} = \frac{MTTR}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

ここで、MTTR(Mean Time To Repair) は平均修復時間であり、モデルシステムと同様の既存設備の実績値を参考に決定した。また、修復時間については、故障発生のため機能が停止してから機能が復旧するまでの時間とし、①現地派遣、②原因究明、③対応検討、④顧客説明、⑤復旧処理及び確認試験の各作業に関わる時間の合計と定義した。なお、交換品が製作メーカに保管され

表-6 調査結果(部分)

機器名称	MTBFの調査(h)			採用値	
	フィールドデータ	電気メーカ	メーカカタログ	MTBF(h)	故障率(1/h)
【計算機システム】					
ミニコン・EWS (HDD除く)	1.4×10^6	2.2×10^5	—	1.4×10^6	7.2×10^{-7}
FAパソコン(HDD除く)	2.7×10^5	3.5×10^6	8.2×10^4	2.7×10^5	3.7×10^{-6}
OAパソコン(HDD除く)	4.8×10^5	—	4.0×10^4	4.8×10^5	2.1×10^{-6}
CRT	3.7×10^5	1.1×10^5	8.2×10^4	3.7×10^5	2.7×10^{-6}
プラズマディスプレイ	7.4×10^4	—	—	7.4×10^4	1.3×10^{-5}
HDD	1.1×10^5	1.7×10^6	5.4×10^5	1.1×10^5	9.1×10^{-6}
ラムディスク	4.4×10^4	—	—	4.4×10^4	2.3×10^{-5}
MOディスク	8.8×10^4	—	1.0×10^6	8.8×10^4	1.1×10^{-5}
TAPE DRIVE	—	—	8.4×10^4	8.4×10^4	1.2×10^{-5}
FLOPPY DRIVE	—	—	3.0×10^4	3.0×10^4	3.3×10^{-5}
CD ROM	—	—	9.0×10^4	9.0×10^4	1.1×10^{-5}

表-7 モデルシステムにおいて寄与率の高い機器(故障等級I、II)

順位	機器名	寄与率(%)	累積(%)	故障等級	備考
1	AIカード：機場子局/伝送設備/入出力盤/AI入力部	18.4	18.4	I	50枚or
2	画像伝送装置：親局/CCTV設備/CCTV制御装置	11.8	53.8	II	—
2	画像伝送装置：機場子局/C-CTV設備/CCTV制御装置	11.8		II	—
2	画像伝送装置：ゲート子局/CCTV設備/CCTV制御装置	11.8		II	—
5	FAパソコン：親局/伝送設備/施設操作伝送装置用管理装置	9.1	72.0	II	—
5	FAパソコン：親局/CCTV設備/CCTV操作卓/制御部	9.1		II	—
7	ミニコン・EWS：親局/運用監視制御設備/運用制御演算装置/CPU	4.4	76.4	II	—
8	AIカード：ゲート子局/伝送設備/入出力盤/AI入力部	3.7	80.1	I	10枚or
9	CRT：親局/監視制御系統/CRT系統/CRT	3.3	83.4	II	3台or
10	AIカード：親局/運用監視制御設備/入出力盤/AI入力部	2.9	86.3	II	8枚or
11	ミニコン・EWS：親局/運用監視制御設備/運用表示端末	2.7	89.0	II	—
12	DIカード：機場子局/伝送設備/入出力盤/DI入力部	2.1	91.1	I	—
13	UPS：親局/電源設備/無停電電源装置	1.3	95.0	I	—
13	UPS：機場子局/電源設備/無停電電源装置	1.3		I	—
13	UPS：ゲート子局/電源設備/無停電電源装置	1.3		I	—

ていることを前提とし、製造中止等に起因する停止時間の延長は考慮しないものとした。

その上で、システムの信頼性解析を以下の手順で行った。

①式(3)で求めた各構成機器のアンアベイラビリティを代入して6.1のFT図を解析し、シス

テムのアンアベイラビリティ $\overline{A_1}$ を求める。

②各構成機器のシステム全体のアンアベイラビリティの寄与率を求める。

③寄与率および故障等級の高い構成機器に対して効果的な改善策を立てる。

④これらの改善策に対応してFT図を修正し、再度システムのアンアベイラビリティ $\overline{A_2}$ を計算する。

⑤ $\overline{A_1}$ 、 $\overline{A_2}$ の差をとることにより、信頼性向上策の効果を量化する。

⑥さらに、改善策を実施する際に要するコスト(C)を調査し、信頼性向上策の費用対効果を、 $\Delta A/C$ として求める。

FT解析の結果、現行システムのアンアベイラビリティ $\overline{A_1}$ は 1.95×10^{-3} となった。各構成機器の内、故障等級がI又はIIで、システムへの寄与率の大きいものを表-7に示す。

これらの中で、特に故障等級Iの機器は、集中監視制御機能の信頼性面からみた弱点部分であると判断し、それらの機器の「二重化」を、有効な信頼性向上策として設定した。さらに、信頼性向上策に対する費用対効果を定量的に示したものを表-8に示す。これより、費用対効果の大きい信頼性向上策は、子局入出力盤の二重化であることがわかる。

7. 保全計画の検討

集中管理機能の保全方法を判断するため表-9に示す予防保全作業レベルを定義した。モデルシステムの各装置ごとに図-5に従い故障による影響分析を行い、さらに、図-6の様な予防保全作業の決定トリーを用いて予防保全作業レベルを決め具体的な作業項目を整理した。

保全作業の作業周期の決定は、各装置ごとの故障率に故障影響分析結果に応じた重み付けを行い算出した。算出にあたっては、これまで1年に1回の点検で十分機能している制御盤($MTBF = 2.78 \times 10^7$ 時間: 隠れた安全性への影響[D])を元に次式で計算した。

$$\text{保全周期(年)} = \frac{1}{\text{装置故障率}} \times \frac{\text{重み付け係数}}{\text{制御盤 } MTBF} \quad (4)$$

表-8 システムの信頼性向上策の費用対効果(故障等級 I)

順位	項目	$\overline{A_1}$	$\overline{A_2}$	$\Delta \overline{A_1}$	C	$\frac{\Delta \overline{A_1}}{C}$
1	排水機場子局入出力盤入出力部二重化	1.95 E-3	1.59 E-3	0.36 E-3	39, 700	9.1 E-9
2	河川ゲート子局入出力盤入出力部二重化	1.95 E-3	1.88 E-3	0.07 E-3	13, 100	5.3 E-9
3	管理所無停電電源装置二重化	1.95 E-3	1.93 E-3	0.02 E-3	26, 000	7.7 E-10
3	排水機場子局無停電電源装置二重化	1.95 E-3	1.93 E-3	0.02 E-3	26, 000	7.7 E-10
3	河川ゲート子局無停電電源装置二重化	1.95 E-3	1.93 E-3	0.02 E-3	26, 000	7.7 E-10

(C : 単位千円)

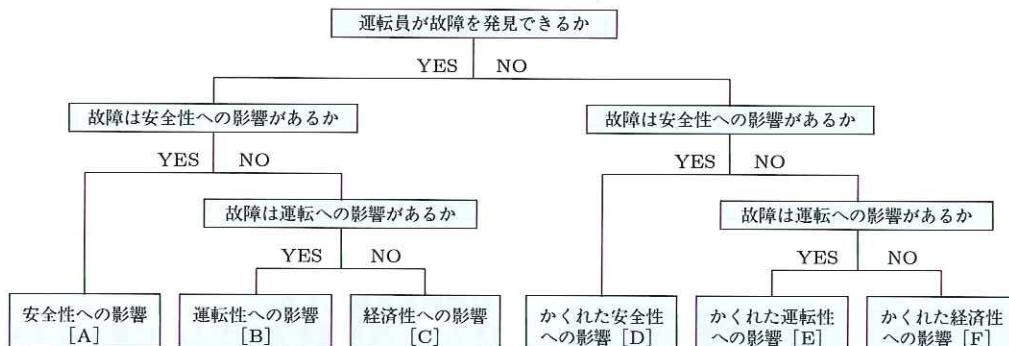


図-5 RCM ロジックトリー (故障による影響分析部分)

重み付け係数は、1~100までの値を入れ、従来の点検周期や経験から試行錯誤を行い、影響分析等級で安全性に影響する[A]、[D]を1、運転性に影響する[B]、[E]を2~5、経済性に影響する[C]、[F]を20~50とした。予防保全周期の算出例を表-10に示す。これにより、設備の信頼性と影響を考慮した点検周期の整理が行えた。

8.まとめ

8.1 基準類へのとりまとめ

技術基準は、遠隔化に向けた目的を「揚排水機場ポンプ設備技術基準(案)同解説」、機能的要件を「揚排水機場ポンプ設備設計指針(案)同解説」、性能表現による要求と「検証方法を設計マニュアル」、適合仕様を「事例集」、「排水機場設備点検・整備指針(案)への改定案」に分けて作成した。

揚排水機場ポンプ設備基準(案)へ盛り込むために利用区分や遠隔監視・遠隔操作における重要度を記した“遠隔化における管理項目”を表-11に示す。このうち、新たな管理項目として加えたものは、主ポンプの満水検知、発電機の排気温度上昇、主原動機の排気温度上昇、冷却水

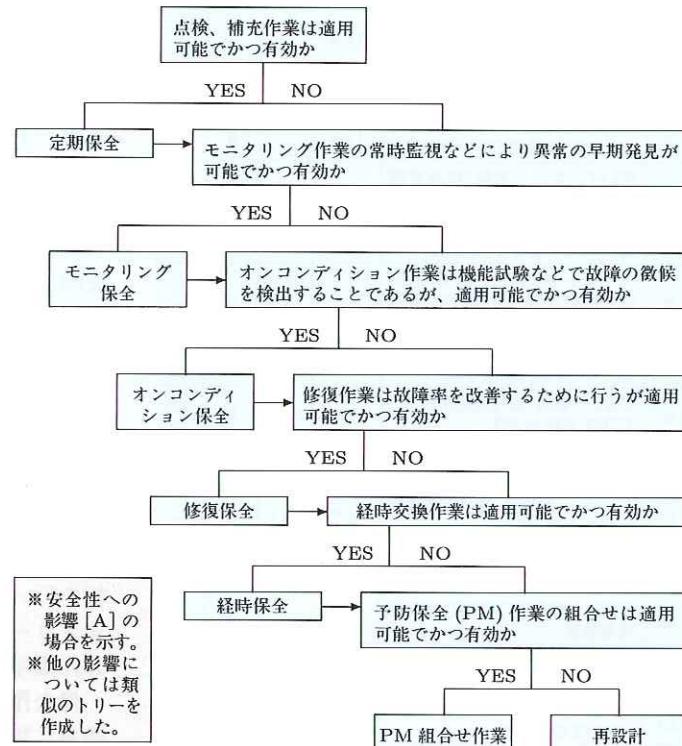


図-6 ロジックトリー (予防保全作業の決定部分)

量、振動、軸受温度、減速機の軸受け温度、燃料貯油槽の油面低下、所内排水槽水位の異常上昇の9項目である。また、点検・整備指針(案)へ集中管理に関する管理所親局などを追加する改訂案を作成した。

表-9 予防保全作業の種類

定期保全	<ul style="list-style-type: none"> 性能を維持するために行う日常的点検等 清掃、ドレン、塗装、燃料補充、潤滑油等
モニタリング保全	<ul style="list-style-type: none"> 使用状態を常時監視または特定のイベント毎に監視して異常を早期発見し処置する保全 異常発見は計器のモニタや人間の五感による
オンコンディション保全	<ul style="list-style-type: none"> 設備を管理運転、模擬運転し、性能低下などを確認して状態が異常の場合に処置する保全
修復保全	<ul style="list-style-type: none"> ある規定以内の故障率にするために、定期的に行う精密点検 修復保全は簡単な修理ではなく、運転し易さを復帰するためのオーバーホール作業を含む
経時保全	<ul style="list-style-type: none"> 使用時間あるいは累積稼働時間が所定の時間に達したときに行う部品や機器交換

表-10 予防保全の出力結果(部分)(単位:年/回)

	A or D		B or E		C or F	
	計算結果	るべき周期	計算結果	るべき周期	計算結果	るべき周期
管理所親局	—	—	—	—	—	—
伝送設備	—	—	—	—	—	—
施設操作伝送装置	—	—	—	—	—	—
伝送部	—	—	—	—	1.80~4.50	3
制御部	0.82	1	—	—	—	—
電源部	1.09	1	—	—	—	—
冷却ファン	—	—	0.86~2.14	1	—	—
施設操作伝送装置用管理装置	—	—	0.02~0.04	0.1*	—	—

* FAパソコン：常時電源が入り、モニタリング保全されていると判断できる。そのため、詳細なチェックは月点検で十分と判断し、0.1年とした。

表-11 遠隔化における管理項目(部分)

分類	項目	区分					信号種類	重要度
		A	B	C	D	E		
	操作場所「管理所」	○					接点	—
	■号自然流下ゲート 全閉	○					接点	◎
	" " 開動作中	○					接点	◎
	" " 全開	○					接点	◎
	" " 閉動作中	○					接点	◎
	" " 停止	○					接点	◎
	吐出ゲート 全閉	○					接点	◎
	" " 開動作中	○					接点	◎
	" " 全開	○					接点	◎
	" " 閉動作中	○					接点	◎
	" " 停止	○					接点	◎
	動力受電 入	○	○				接点	◎
	" " 切	○	○				接点	◎
	照明受電 入	○	○				接点	◎
	" " 切	○	○				接点	◎
	常時動力 入	○	○				接点	◎
	" " 切	○	○				接点	◎
	運転時動力 入	○	○				接点	◎
	" " 切	○	○				接点	◎
	常時照明 入	○	○				接点	◎
	" " 切	○	○				接点	◎
	直流水制御電源主幹 入	○	○				接点	○
	" " 切	○	○				接点	○
	交流制御電源主幹 入	○	○				接点	○
	" " 切	○	○				接点	○
	区分A：遠転前確認項目						区分D：維持管理関連項目	
	区分B：遠転中確認項目						区分E：制御項目	
	区分C：異常時対応関連項目							

服部達也*



建設省土木研究所材料施工部機械研究室
研究员
Tatsuya HATTORI

江本 平**



同 機械研究室長
Taira EMOTO

村松敏光***



(財)先端建設技術センター普及振興部長
(前 機械研究室長)
Toshimitsu
MURAMATSU

持丸修一****



建設省関東地方建設局関東技術事務所機
械課長
(前 機械研究室主任
研究員)
Shuichi MOCHIMARU

森下博之*****



同 東京国道工事事務所環境整備課長
(前 機械研究室研究員)
Hiroyuki MORISHITA