

滝沢ダムにおける打設設備の自動化

—コンクリート打設自動運転システムの概要—

太田 裕士

本コンクリート打設自動運転システムはコンクリートダム建設において打設に係わる各種のコンクリート運搬設備を連携して自動制御するシステムである。

埼玉県滝沢ダムでは、2台のミキサを持つコンクリート製造設備からコンクリートを5台のレール走行式循環バケットと3系統の自動運転ケーブルクレーンにより堤体ホッパまで運搬、その後3台のダンプトラックで打設箇所まで運搬している。

このように、他に例を見ない複雑に関連する打設設備間において、XML^{*1}等のインターネット技術の利用により人間の思考を模倣する形で最適な運搬経路を瞬時に決定、各設備の最大能力を発揮させることに成功した。以下にその概要を報告する。

キーワード：情報化施工、最適化制御、ケーブルクレーン自動運転、XML、PDA^{*2}、コンクリートダム、ダム工事

1. はじめに

コンクリートダムの建設工事において打設用仮設備に求められるものは、コンクリート製造設備で製造したコンクリートを早く、確実に打設場所へ運搬することである。このため、従来よりトランスファーカやケーブルクレーンなど各種のコンクリート運搬設備が単独で自動化され実績を上げてきている。

滝沢ダム本体建設工事においても、後述するケーブルクレーンの自動運転システムなどを使用して輸送設備の能力を限界まで引出すべく努力しているが、ある程度の稼働状態に達すると、個々の自動化では連続的に限界能力を発揮できなくなる。これは建設現場という非常に外乱が大きく、また設備の能力、特性も一様でない環境でのひとつの限界点でもある。

一方、滝沢ダム建設工事においてはレール走行式循環バケット（以下、循環バケット）という国内初の設備がコンクリート運搬設備として設置され、この設備

に限界能力を発揮させることが強く求められていた。

これらの状況下において、コンクリートを最大効率で運搬するためには、コンクリート製造設備から打設現場に至るコンクリート運搬設備のすべてを把握した総合的な自動化が必須であると考え、「コンクリート打設自動運転システム」を開発、実用化したものである。

2002年12月現在、本体コンクリートの打設は、約730,000 m³（約45%）を超え、ほぼ全量を本システムで運搬、良好な結果を得ており、ここにその概要を報告する。

2. 開発の目的

滝沢ダムの諸元を表一に示す。

表一 滝沢ダム本体建設工事工事諸元

工事名	滝沢ダム本体建設二期工事	
発注者	水資源開発公団荒川ダム総合事業所	
所在地	埼玉県秩父郡大滝村大字大滝字廿六木	
ダム諸元	形式	重力式コンクリートダム
	堤高	140 m
	堤頂長	424 m
	堤体積	180 万 m ³
施工	鹿島・熊谷・錢高特定建設工事共同企業体	

本ダムのコンクリート打設能力を検討する際、最大の問題となるのは非常に複雑なコンクリート運搬設備

*1 XML (Extensible Markup Language)：拡張マークアップ言語。構造化されたデータ記述形式を提供する標準化されたテキストフォーマット。正確な表現と複数のシステム環境間でのデータ交換を実現する。インターネットのWEB記述で使用されるHTMLの上位互換性を有する。

*2 PDA (Personal Digital Assistants/Personal Data Assistants)：携帯情報端末。スケジュール帳やアドレス帳など、従来は手帳で管理していた個人情報を効率的に管理できるようにした小型の情報端末。電子メールの送受信、メール管理機能、Webアクセス機能なども含まれる。

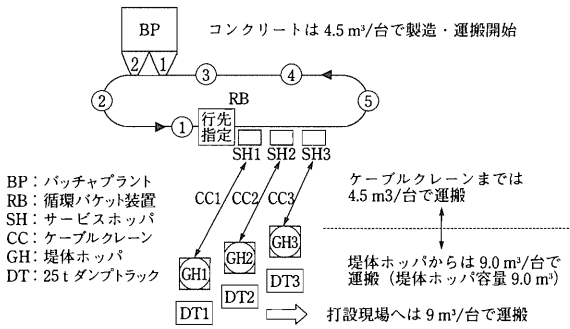


図-1 コンクリート運搬設備

を使用していることである。

本ダムのコンクリート運搬設備を図-1 に示し、その特徴を以下で説明する。

① 運搬経路が複雑 (2 台→5 台→3 台)

- コンクリート製造設備は 2 台のミキサから交互にコンクリートを出荷する (4.5 m³/台)。
- 2 台のミキサから 5 台の循環バケットへコンクリートが積込まれる (4.5 m³/台)。
- 5 台の循環バケットから 3 台のサービスホッパへ積込まれる (4.5 m³/台)。
- 3 台のサービスホッパから 3 台のケーブルクレーンへ積込まれる (4.5 m³/台)。
- 3 台のケーブルクレーンから 3 台の堤体ホッパへ 2 バッチずつ積載する (9.0 m³/台)。
- 3 台の堤体ホッパから 3 台の 25 t ダンプトラックへ積載する (9.0 m³/台)。

② 1 台あたり輸送量が途中で変化する (4.5 m³/台→9.0 m³/台)。

- 4.5 m³/台ではダンプトラックでの運搬能力が低下する。
- 9.0 m³/台では堤体ホッパ部でのコンクリート混載の恐れがある。
- 2 台ずつを同系統で運搬すると、混載の恐れはなくなるが輸送能力が大幅に低下する。

③ ケーブルクレーンの能力・特性が揃っていない。

- モータ構成、製造メーカーや機械配置も異なるため、実輸送能力や特性に差がある。

④ 打設場所、標高により輸送能力が毎日変化する。

- 堤体ホッパが毎日堤体内を移動し、各ケーブルクレーンのサイクルタイムが日々変化する
- 打設標高が上がるに従い、ケーブルクレーンのサイクルタイムが短縮される。

⑤ 運搬中バッチ数が多く、内容が把握できない。

- 循環バケットから打設現場の間において、最大 22 バッチが運搬状態となり、コンクリート種類の把握が困難である。

• このため現場の打設担当者が運搬状況の把握が困難となり、コンクリート出荷速度が低下しやすい。

①～⑤の非常に変動要素の多い特徴を持つ本ダムのコンクリート運搬設備において、各設備が独立で自動化されている。これにより設備全体の運転時には、設備間の連携性不足と、能力変動に対する柔軟性不足による設備能力低下の発生が予測された。

このため、コンクリート運搬設備全体の連携した動作と能力変動への柔軟な追従性を実現し、コンクリート製造から打設まで全体での能力向上を実現するために本システムを開発した。

3. システムの概要と効果

コンクリート打設自動運転システムの全体構成を図-2 に示す。本システムは滝沢ダムのコンクリート製造から打設現場までの運搬設備全体を監視し、コンクリートを最大効率で運搬することを目的としている。

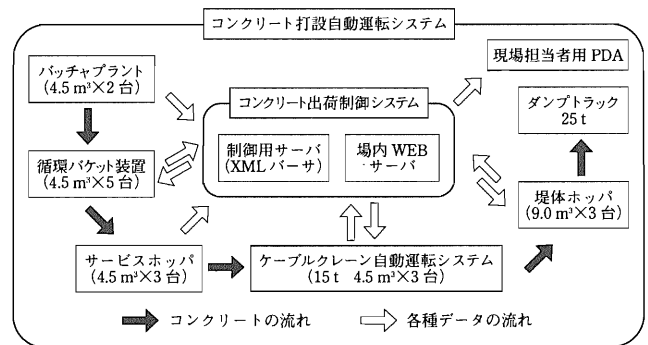


図-2 コンクリート打設自動制御システム全体構成

システムは、次の 2 つの主要部分に分かれている。

① コンクリート出荷制御システム

本システムの中心となる部分であり、各運搬設備の監視、制御を行っている。

② ケーブルクレーン自動運転システム

本ダムで使用している 3 台のケーブルクレーン全てに設置している自動運転システムである。本システムの設置により、運搬設備全体の自動化が実現する。

次にそれぞれのシステムについて概要・効果を説明する。

(1) コンクリート出荷制御システム

コンクリート出荷制御システムは、コンクリート製造設備からケーブルクレーンを経てダンプトラックに積載されるまでのコンクリート運搬設備全体を常時監視し、コンクリート 1 バッチ毎に最適輸送ルート の決定と循環バケット装置への行先指令を発するシステム

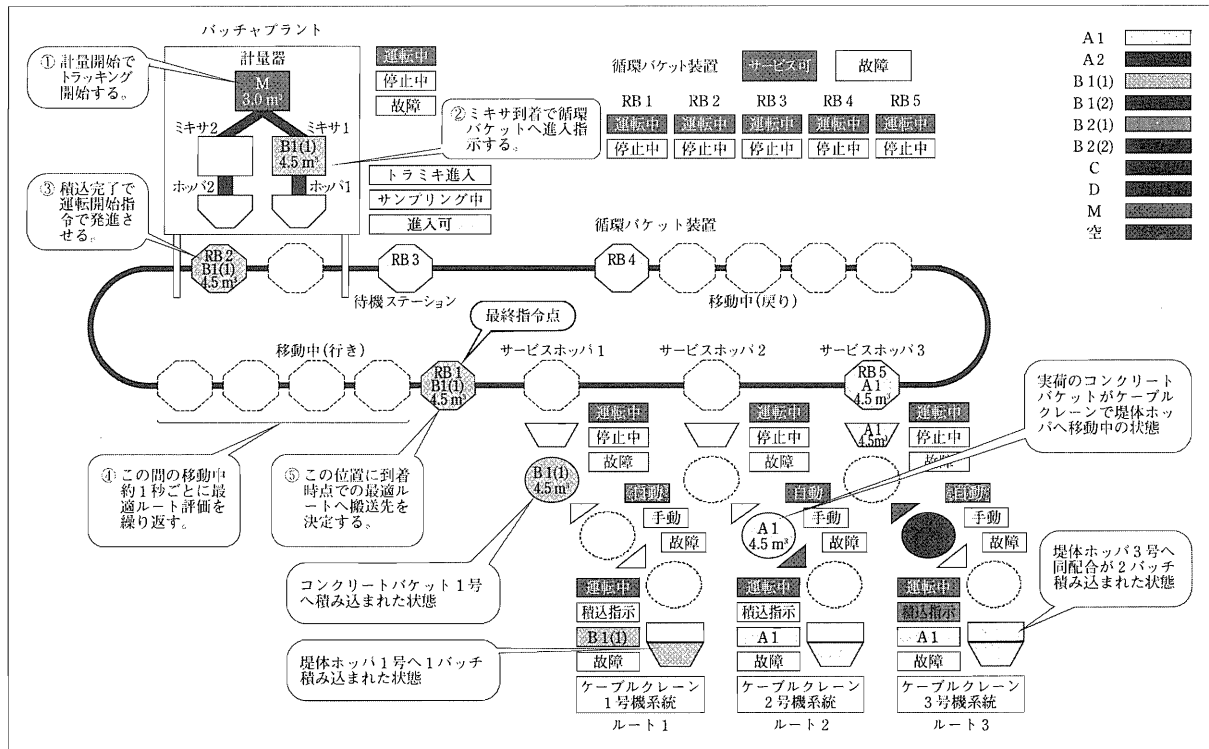


図-3 コンクリート出荷制御システム

である。

またコンクリートの輸送状況はシステムが常時把握し、コンクリート製造設備のオペレータに表示することで、コンクリート製造支援も行っている。

(a) 出荷制御システムの基本動作

まず、出荷制御システムの基本的な動作について、**図-3**のコンクリートの流れに従って説明する。

- ① コンクリート製造設備において骨材、セメントなどのコンクリート材料が計量される。この時からシステムはコンクリートの追跡（トラッキング）を開始する。
- ② 2台あるミキサの片方にコンクリート材料が投入されると、システムは循環バケット装置に進入を指示する（先読みによる時間短縮）。
- ③ コンクリートの循環バケットへの積み込み完了により発進させる。
- ④ 循環バケットがサービスホッパ1~3へ走行する間、システムは約1秒ごとに3系統ある輸送系統の稼働状態（故障有無、各部コンクリート積載状態、ケーブルクレーン自動運転の動作状態など）を比較、最適ルートの決定を常に行う。
- ⑤ サービスホッパ1号機の手前にある最終指令点において最適ルートを確定させ、コンクリートを最適なルートのサービスホッパに投入させる。
- ⑥ コンクリートはケーブルクレーン自動運転システムに引渡され、引続き運搬状態を監視する。ま

た、循環バケットは待機ステーションに復帰する。この一連の動作を1バッチ/分（270 m³/h）で繰返すことが出荷制御システムの基本動作である。

(b) XMLを用いた最適ルート判定

出荷制御システムにおける最も重要な点は最適ルートの決定である。

最適ルートの判定には多くの条件について、各ルートの最新状態を比較して判定することが必要である。

① 絶対条件群

- ・ルートが正常に動作している（故障がない）。
 - ・ルートが自動運転である（手動運転でない）。
- など。

② 比較条件群

- ・他のルートよりも高速に運搬できる。
 - ・ルートを先行するコンクリートの種類が同じである。
 - ・後続のコンクリートを渋滞させない。
- など。

たとえば、**図-3**で最終指令点に達しているコンクリート（B-1配合）が選択すべきルートを検討してみる（単純化のため、ごく簡単な条件のみ説明する）。

- ① まず3本のルートの絶対条件である故障有無と自動運転状態を確認、いずれも正常かつ自動運転であることが判定される。
- ② 次に各ルートの状態を順次比較する。
 - ・ルート1はサービスホッパ1が「空」であり、コンクリートを受入れられる。

- ・ルート2もサービスホッパ2が「空」であり、コンクリートを受入れられる。
- ・ルート3はサービスホッパ3が「満」であり、コンクリートを受入れられない。
このため、この時点でのルート3は他のルートに比べて不適當である。

③ 次にルート1, 2のコンクリート状況を比較する。

- ・ルート1はB1配合をコンクリートバケットに積込んだところであり、堤体ホッパには先行して同配合のコンクリートが存在する（つまり混載の問題はない）。
 - ・ルート2はA1配合をケーブルクレーンで輸送中であり、堤体ホッパには先行して同配合のコンクリートが存在する（つまり混載の問題はない）。
- この判定ではルート1, 2に評価の差はない。

④ 次にルート1, 2のケーブルクレーンの状況を比較する。

- ・ルート1はまだ出発していない状態である。
 - ・ルート2は既に出発している。
- このため「ルート2のほうが、より早くコンクリートを堤体ホッパまで運搬できる」と判定できる。

この例では、約4段階の状態の比較判定によりルート2で運搬するのが最適であると判定された。

実際の最適ルート判定においては、非常に多数の条件を瞬時に判定することが要求され、判定ミスは輸送能力の低下や混載による廃棄コンクリートの発生に直結する。

このため人間による最適ルート判断は非常に困難である。

一方、判定例で示したように、

「最適ルート判断の内容は非常に人間の思考に近い判定の積重ねである」。

つまり、

「人間の思考に近い判定をシステム内部に実現し、容易に変更、改善可能とする」

ために、また

「システム内部データをそのまま場内Webに展開する」

ことを目的として、本システムではXMLを用いたルールベース方式を採用した。

また、個々のルールごとに各輸送ルートの状況による点数判定を行うことで人間の思考に近い形での最適ルート判断を実現している。

XMLの説明は非常に広範囲に及ぶため他に譲るが、ここではルールの一例を図-4に示す。

```
<?xml version="1.0" encoding="shift_JIS" ?>
<!DOCTYPE RULE(View Source for full doctype...)>
<!--LEVEL 1 MAIN-->
<RULE>
  <!-- 搬送経路によるルール -->
  <IF COND="autROUTE1!=ROUTE_NG">
    <VAL1>1</VAL1>
  </IF>
  <IF COND="autROUTE2!=ROUTE_NG">
    <VAL2>2</VAL2>
  </IF>
  <IF COND="autROUTE3!=ROUTE_NG">
    <VAL3>3</VAL3>
  </IF>
</RULE>
```

図-4 XMLによるルールベースのサンプル

ここに示した例は、実際のシステムにおける各ルートごとの故障有無判定部分である。現在の輸送設備に故障がない場合、ルート1, 2, 3にそれぞれ1点, 2点, 3点の点数を与えている。

実際には、多数のルール（ルールベース）において判定を実施、各ルートごとに点数を累計し、最終的に最も点数の高いルートを最適ルートとして選択している。

判定に用いるルールは、先に示した4段階の判定例など、人間の思考をそのままXMLで表現した物である。

これらはオペレータの経験などをそのまま蓄積することができ、本システムに限らず汎用的に利用可能な自動化手法である。

このように、出荷制御システムは周辺各設備から稼働状態などのデータを入力し、オペレータの思考をXML+ルールベースでシステム上に再現し、最適ルート判断を実現しているシステムである。

(c) PDAによる現場担当者支援

最初に示したが、本現場の輸送設備は非常に複雑で、



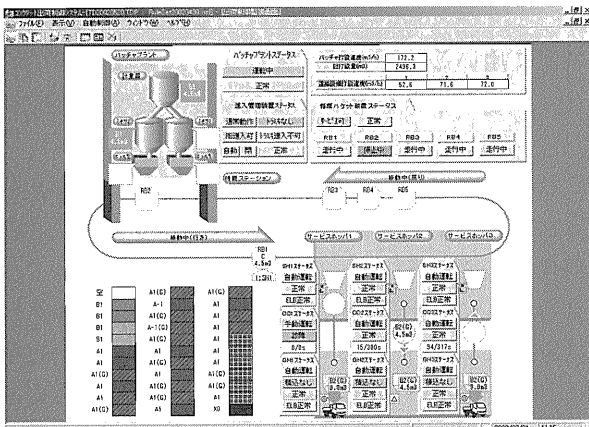
写真-1 PDA表示状態

運搬途中に最大で 22 バッチのコンクリートが存在する。この運搬状況（コンクリート種類や量）は出荷制御システムでは把握しているが、打設現場の工事担当者は知る方法がなく、コンクリートの注文を行うのに障害となっていた。

このため、出荷制御システムのデータを PDA 画面用に Web 化し、現場内に無線イントラネット環境を構築、現場担当者支援を行っている（写真—1、図—5、図—6）。

◆コンクリート出荷状況		BP1	BP2
No			
計量器		B2(G)	空
ホッパ		空	B2(G)
RB1	RB2	RB3	RB4
空	空	空	空
空	待機	既入	既入
空			行き
No	1	2	3
SH	空	空	空
GC	C	01	
GH(1)	空	01	空
GH(2)	空	空	空
総打設量 (m3)		打設速度 (m3/h)	
2469.3		183.7	

図—5 PDA 画面表示 (例)



図—6 出荷制御システム画面表示 (例)

(2) ケーブルクレーン自動運転システム

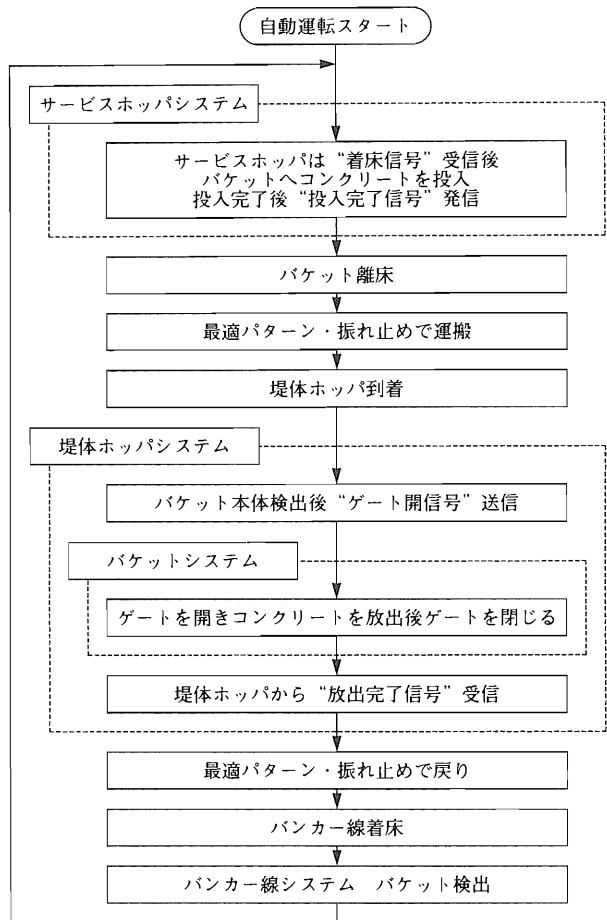
出荷制御システムが、現場全体からみた能力向上を目的とするのに対し、ケーブルクレーン自動運転システムではケーブルクレーン単体の自動化を行っている。これは以下の理由によるものである。

- ① 手動運転ではクレーンのサイクルタイムが安定せず、出荷制御システムで他の設備を最適化しても効果が半減する。また、長時間の連続運転も不可能である。
- ② 能力や特性の異なる 3 台のケーブルクレーンだが、自動運転システムによりクレーン運行ルートを最適化することで、サイクルタイムを概ね揃え

ることができる。

- ③ 本現場では 3 台のケーブルクレーンを使用しているが、自動運転であれば 3 台のクレーンを 1 人のオペレータが監視するだけでよい。このため、運転時のオペレータ人数の削減効果が非常に大きい。

ケーブルクレーン自動運転システムの基本的な動作フローを図—7 に示す。また、設備の全体構成を図—8 に示す。



図—7 自動運転フロー

滝沢ダムにおけるケーブルクレーン自動運転システムの基本動作は、「サービスホッパから堤体ホッパまでの間、バケットへ投入されたコンクリートをケーブルクレーンの最適ルートで振れ止め制御しながら、安全かつ高速に自動運転・運搬する」ことである。

ケーブルクレーン自動運転システムは 1 箇所監視画面および操作ボタン類を 1 箇所にとり、3 台稼働中も 1 人のオペレータで監視可能としている。

また、出荷制御システムと連携することでコンクリート製造以降、オペレータは一切の操作をすることなくコンクリートを打設現場のダンプトラックまで運搬することを実現している（写真—2、写真—3）。

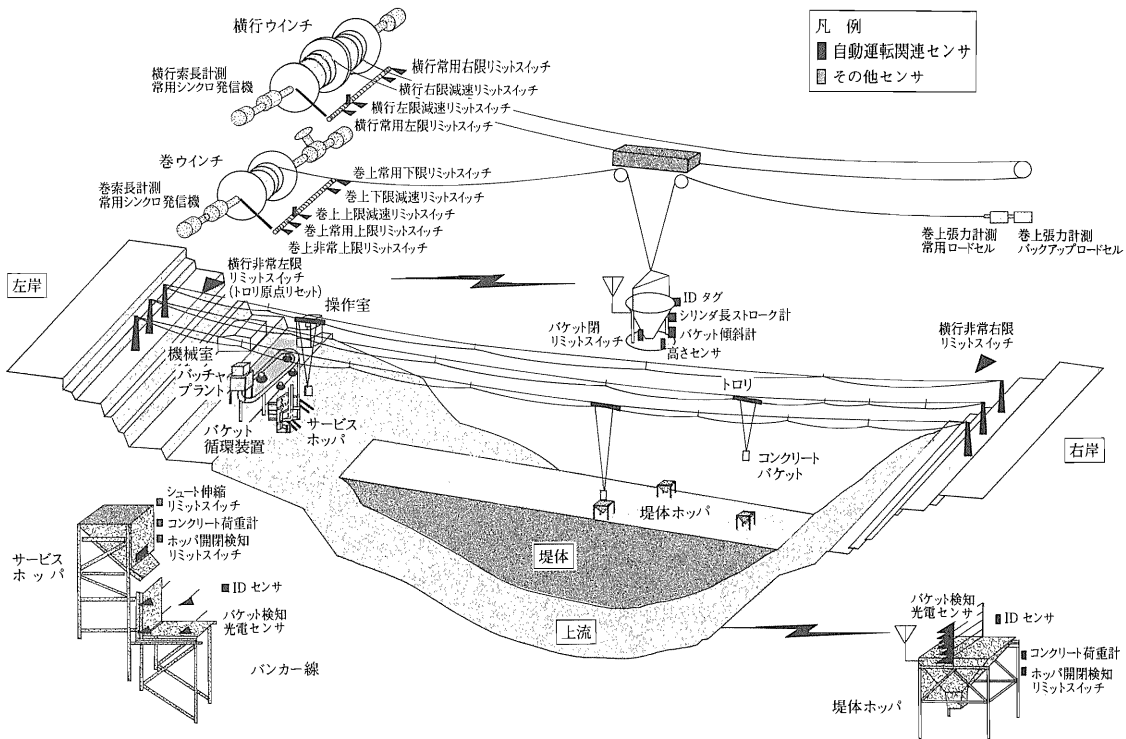


図-8 ケーブルクレーン自動運転システムの全体構成



写真-2 オペレータ1名での監視状況

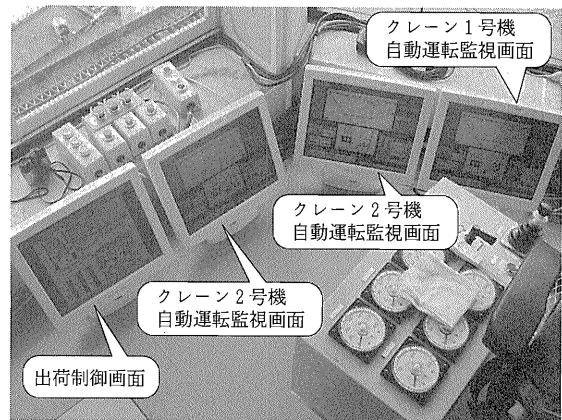


写真-3 オペレータ用監視画面群

4. まとめ

個々の設備が能力向上を目指して単独に自動化されるなかで、担当オペレータは僅か数秒で設備の正確な操作を求められ、ストレスの発生や能力向上の阻害要因にすらなりうる状況である。

本現場では個々に自動化されたコンクリート運搬用仮設備群を、「コンクリート打設自動制御システム」として一体化することで、各設備の能力を限界まで引出すことに成功している。

現在、建設業においては生産性の向上が強く求められている状況である。そのなかで、先行する他産業では常態化している「製造プラント全体の統合的な効率化」を積極的に導入する時期であると考えられる。[JCMIA]



【筆者紹介】
太田 裕士 (おおた ひろし)
鹿島建設株式会社
滝沢ダム本体建設工事事務所
第3工事課
課長