

東京湾連絡橋工事における情報化施工

— その1 車 輛 運 行 管 理 シ ス テ ム —

首都高速道路公団	小島雄治	三井・五洋・白石JV	矢野正和
三井建設㈱	中川良文	三井建設㈱	林 寿夫
三井建設㈱	桜井 浩		

1. はじめに

東京湾連絡橋は、首都高速12号線のうち、港区芝浦埠頭と第6台場間の東京湾第1航路を横断する中央径間 570m、側径間 114mの吊橋である。吊橋は2層構造で、上層は首都高速12号線、下層には臨港道路および新交通システムが計画されている。現在、昭和67年の竣工を目指して基礎構造部分を建設中である。

この橋の基礎構造部分はニューマチックケーソンで施工され、その大きさは幅45m、奥行70m、高さ51m（アンカレイジ部分）と世界最大級である。さらに、支持層は土丹と呼ばれる軟岩であり、軟岩上の吊橋としては国内はもちろん諸外国でもほとんど例を見ない規模となっている。加えて台場側（1222工区）はすべて海上施工となるため、その施工に当たってはきめ細かな安全管理・品質管理が強く求められており、最新の情報化施工技術が数多く導入されている。

本稿はこれらの中から、コンクリート打設を対象とした車輛運行管理システムについてまとめたものである。なお、これ以外のシステムについても順次発表していきたいと考えている。

2. システムの概要

本ケーソンは、造船所ドッグ内で製作された後、海上を曳航されて所定の位置に係留し、コンクリートを打設することによって海底に着底される。打設作業は、ミキサー車にて陸上側から仮設棧橋をわたって運ばれてきたコンクリートを、ケーソン周囲に複数台設置されたポンプ車によって函内に打設することで行われる。ただし、ケーソン自体が大規模かつ海上に浮かんだ状態であること、仮設桟台上での作業となるため作業エリアが必要最小限に限られること、様々な作業が復層して行われており作業員も多いこと、1回当りの打設量が多い時で6000m³程度（ミキサー車にして1000台近く）になることなどから、打設作業に際して管理者は次のような点に細心の注意を図る必要がある（図-1）。すなわち、

- 浮遊状態にあるケーソンにバランスよく打設することにより、傾斜による桟台への衝突、軋体への大きな応力発生等を生じさせないこと。
- 限られた作業構内において、次々と入構してくる車輛を安全かつ整然と必要箇所に配車させること。
- 打設作業を、他の作業の妨げにならず円滑に、しかも効率良く行うこと。

本システムはこのような背景のもと、安全かつ円滑にしかも効率的にコンクリート打設を行うために、必要な情報をリアルタイムに提供することによって打設管理者を支援するよう開発されたシステムである。

システムの開発に先だって以下の条件を設定した。

- ①打設管理者に対して、必要な情報を迅速かつ分かりやすい表現で提供する。
- ②最終的な配車指示は打設管理者が判断するものとし、



図-1 現場状況

システムはあくまで支援システムとして考える。

③配車指示事項は管理者とミキサー運転手のみならず、該当ポンプ者オペレーターをはじめ、打設工事関係者に広く伝達できる機構とする。

④システムダウンした際にも打設作業に混乱を生じさせない機構とする。

具体的には、

①ミキサー車の構内入場状況や各ポンプ車に対する入車／空車状況、打設実績等の配車情報と、ケーソンの傾斜・沈下等に関する姿勢情報を、管理者がすばやく判断できるように数値データのみならず、図形データに加工・処理してモニタ表示する。

②管理者はこれらの情報をもとに、最も適切と思われる配車先を検討しシステムに対して行き先を指示する。これを受けてシステムは指示の妥当性（無理な配車、偏った配車等）を検討し、必要があれば再度指示を仰ぐ。これにより、より適切な配車が行えるよう管理者をサポートする。

③決定された行き先指示は、大型表示盤に表示されるとともに音声応答装置により音声として出力される。これにより、指示を待つミキサー運転手をはじめ工事関係者に広く配車指示を伝えることができる。同時に、配車先のポンプ者のオペレーターに対しても表示灯が点灯し、ミキサー車が配車されたことを告げる機構となっている。

④さらに、システムダウンした際の対策として、マニュアル操作にて必要最小限の機能を稼働できるよう配慮されている。

3. システムの構成と機能

本システムの構成を図-2に示す。システムは大きく中央制御部（ホストコンピュータ＝パソコン）、車輛入構検出部、車輛入車検出部、ケーソン姿勢計測システム、管理情報表示部、行き先指示部、行き先表示応答部、およびその他周辺設備から構成される。

(1)中央制御部

汎用パーソナルコンピュータによって本システム全体の制御を行っている。具体的には、常時、車輛の動向に従って割り込み入力してくる車輛情報を更新し、即座に管理者にとって分かりやすいかたち加工・処理して情報表示部に渡すとともに、決定された行き先指示を行き先指示応答部に伝える働きをもつ。

さらに最も特徴のある働きは、指示車を介して伝えられる管理者の行き先指示の意向について、その妥当性を評価し、場合によっては再度指示を仰ぐという機能である。すなわち、長時間にわたって絶え間なく入構してくるミキサー車について、的確に指示を行うことは精神的にかなりの負荷であり、配車ミスも起こしかねない。今回対象としているような作業環境では1台の配車ミスが後続の車輛の運行、しいては工程に与える影響が大きくなりやすい。そこでシステムは、効率的に打設作業がおこなえるよう一旦入力された配車指示について次のような条件にてその妥当性を検討し、問題がある場合には管理者に再度確認を促すようなチェック機能をもっている。

- ・すでに満車あるいは配車禁止のゾーンについて配車していないか

- ・指示ゾーンが偏向していないか

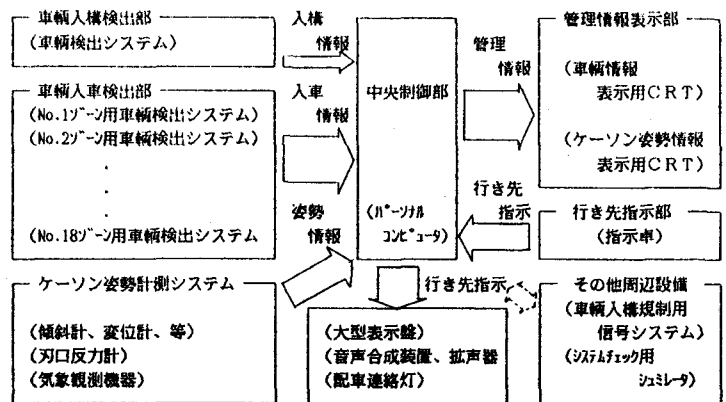


図-2 システム構成

(前回、前々回の指示ゾーンと重複しないか)

の各チェックをおこなっている。

この機能については、現段階では上記の条件からわかるとおり極めて低度のレベルではあるが、今後はより実際の配車パターンに即した管理者の知識・経験（ノウハウ）を入れ込むことにより知能化（いわゆるエキスパートシステムの的な機能の導入）を図っていきたいと考えている。

(2) 車輛入構検出部

作業構内への入口ゲート付近に設置され、車輛（ミキサー車）の進入があったことを検出し中央制御部に知らせる働きを担う。具体的には、後述する車輛入車検出部と同様に、車輛検知センサと識別回路から構成される車輛検出システムを用いており、ゲートを通過する大型車輛（この場合はミキサー車）のみを検知するようあらかじめレベル等が調整されている。なお車輛検出システムについては4章にて詳述する。

(3) 車輛入車検出部

この検出部は、各ポンプ車毎にミキサー車の配車位置付近に設置され、ミキサー車が入車しているのか、あるいは空車なのかの配車状態を識別して中央制御部に伝える働きを担う（図－3）。車輛入構検出部と同様に、車輛検出システムを利用して、停車中の大型車輛のみを検知するよう調整されている。

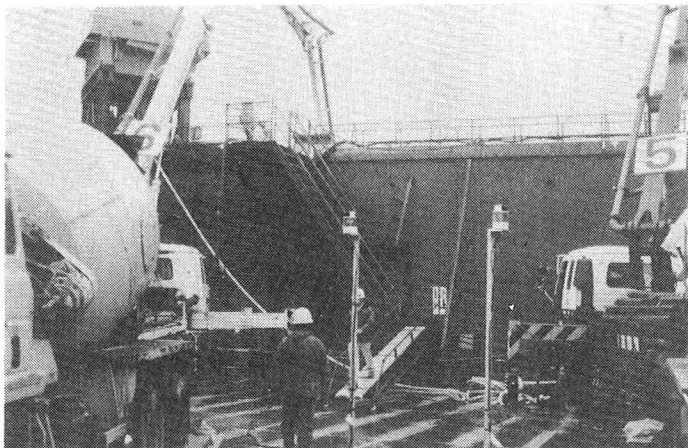
(4) ケーソン姿勢計測システム

ケーソン計測工システムのうち、ケーソン躯体の傾斜、鉛直・水平変位等の姿勢情報に係わる計測システムである。本運行管理システムでは、これらの情報に加えて、ケーソンの着底を確認するための刃口反力情報、風や潮汐に係わる気象情報についても計測システムより提供を受けている。

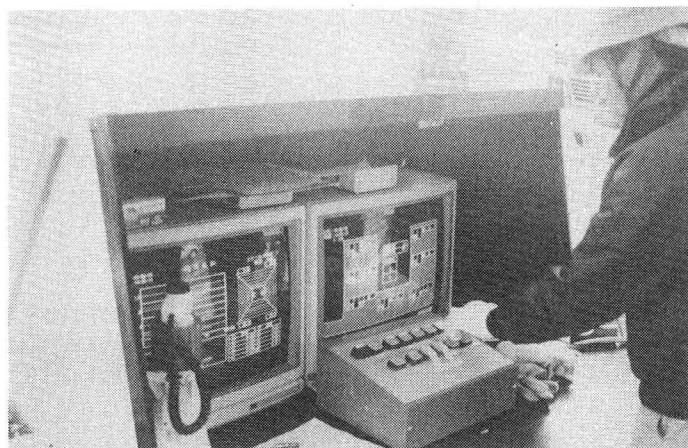
このうちケーソンの傾斜については、天井スラブ上2隅角部に設置された設置型傾斜計により把握している。また、ケーソンの鉛直変位については、外周栈台上に設けた大容量変位計とケーソン側面に設けた計測用ワイヤーにより計測している。さらに水平変位については、ケーソンの外周栈台との間に設置された4台の大容量変位計により、変位の水平成分と回転成分を求めることで把握している。

刃口反力については、ケーソンの刃口について合わせて12点に設置された刃口荷重計により計測している。また、デジタル風向・風速計および潮位計により、風向・風速、潮位の各気象情報を収集している。

なお、ケーソン計測工システムの詳細に関しては、次回以降当シンポジウ



図－3 車輛入車検出部（図中央）



図－4 管理情報表示部（手前は行き先指示卓）

ムにて説明していきたいと考えている。

(5)管理情報表示部

大型のカラーモニタスクリーン2台から構成され、配車指揮所に設置される。それぞれのスクリーンには、入構車輛の有無やゾーン毎の入庫／配車の状態、打設台数の実績等の車輛運行情報と、ケーソンの傾斜や沈下状態に係わるケーソン姿勢情報とが表示される(図-4)。

打設責任者はこれらの情報をもとに、つぎに打つべき最適な打設ゾーン(ポンプ車)を検討し指示することになる。一方、ミキサー車の配車状況やケーソンの姿勢はリアルタイムで変化している。したがって、これらの情報表示はグラフィック機能を十分に使用することにより、刻々と変化する打設状況に対して責任者が的確かつ即座に判断できるよう工夫されている。

なお、表示情報の詳細な内容については5章にて述べる。

(6)行き先指示部

各ポンプ車に応じた行き先指示キーと幾つかのコマンドキーで構成される指示卓である。打設責任者は管理情報をもとに配車先を決定し、この指示卓を用いて極めて簡単な操作にて行き先指示を与えることができる。また、システムのリセット／クリア等の本システムを運行する上で必要な操作はすべてこの部分に集中させ、管理の一元化を図っている。

なお、操作が行い易いようにキーはすべて大型のプッシュスイッチを使用しており、携帯もできるように全体に小型・軽量とすることで機動性をも高めている。

(7)行き先表示応答部

大型の行き先表示盤、音声合成装置および拡声器、ゲート通過許可信号機、さらには各ポンプ車毎に設置された配車連絡灯で構成される。

決定された行き先指示情報を、表示を待つミキサー車の運転手をはじめ関係者に伝達する働きを担う。具体的には、待機中のミキサー車より視認し易いようゲート斜め前方に設置された表示盤に行き先番号が点灯表示されるとともに、音声合成装置により、あらかじめ登録されているアナウンスの中から、行き先に対応した音声は拡声器を通して発せられる仕組みとなっている。これにより、運転手に対して目と耳の両方から指示を与えることができ、指示の受け取り間違いを少なくすることができる。さらには、構内に作業中の関係者に対し次の車輛がどこに配車になるのかを広く伝達することができる。

またポンプ車毎に設置された配車連絡灯は、点灯することにより、ポンプ車オペレータに対して配車中の車輛があることを知らせる機構となっている。これによってポンプ車のオペレーターは受け入れ準備を行うとともに、配車中のミキサー運転手は指示されたポンプ車に間違うことなく到着することができる。

(8)その他周辺設備

i)入構車輛規制用信号システム

作業の進捗にともなって、配車指示を待つ車輛がゲート付近に連なり、安全上からも車輛が通行する上からも好ましくない状態になることも予想される。このような場合、ゲート手前適切な地点に信号機を設けて一旦車両の入構を制限することが必要となる。

本信号システムは、車輛検出システムを用いて配車指示を待つ車輛の並びを監視し、一定長さ以上になれば自動的に信号機を赤にするものである。なお、このシステムはマニュアル操作もでき、管理者が必要と判断すれば手動にて車輛の入構を制限できる。

ii)システムチェック用シュミレータ

限られた作業構内に多種多様の作業が複層しているため、本システムの設置はあくまでも仮設であり、コンクリート打設時毎に設置しセットアップすることになる。したがって、毎回セットアップした際には何らかの方法で各部の動作チェックを行う必要がある。本シュミレータを用いることによって、実際に車輛を配車することなく様々な配車状況をシュミレートでき、容易に各部の動作チェックを行うことができる。

4. 車輌検出システム

ここでは、本システムの根幹をなすサブシステムの1つである車輌検出システムについて詳しく説明する。このシステムは、前述の車輌入構検出部や車輌入車検出部に用いられており、特定の車輌の特定の動作を検出するものである。なお、ここでいう特定の車輌とは、ミキサー車やポンプ車といった個別の車輌を指すのではなく、普通車輌、大型車輌といったレベルでの検出である。ただし、打設作業時には原則としてミキサー車以外の大型車輌は通行を許可されていないため、結果としてミキサー車のみを検出できることになる。

本システムは特定の車輌そのものの存在を検知する車輌検知センサと、その車輌の動作状態（停車中なのか通過中なのか）を識別する状態識別回路から構成される。

4-1. 車輌検知センサ

作業構内を往来する多種多様の車輌の中から特定の車輌（今回の場合は大型車輌）のみを検出するセンサである。一般に、このようなシステムには汎用的なもの（システムとして市販されているもの）はなく、ユーザーはその都度目的に応じてセンサを選定しなければならない。今回はその目的から次のような条件を設定し、センサの選定に当たった。

- ・狭い作業構内に数多くの車輌・重機械が複層している。このような中でミキサー車のみを確実に検知できる能力を有すること。
- ・仮設備であるため、打設前後わずかな時間で設置・撤去ができるよう小型・軽量であること。
- ・屋外・海上といった作業環境から、直射日光や水滴、温・湿度、塩分、ホコリ・油等に対する耐環境性に優れること。
- ・設置箇所が多いため、メンテナンスが容易で経済性に優れること。

選定に際し対象に上がったセンサは、①光学式（透過型、反射型）センサ、②超音波センサ、③赤外線センサ、④マットセンサ、⑤磁気近接センサの5種類である。これらのセンサについて、検出能力（検出距離、検出精度、レベル設定の自由さ）、設置し易さ（軽さ、大きさ）、耐環境性、コスト、メンテナンス、打設作業への影響といった各面から比較・評価を行った（表-1）。なお、実際に対象としたセンサは、先の条件から一般にメーカーより市販されているものを中心とした。ただし、判断規準をあくまでも本システムでの使用にしているため、この評価がすべての場合にそのまま当てはまるものではないことを断わっておく。

(1) 光学式センサ

センサ発光部から光を放射しこれを受光部で受ける機構のもので、この間に何等かの障害物があれば光が遮られることから検出できる。発光部と受光部が別々になっている透過型、いっしょになっている反射型の大きく2種類がある。

コスト面では極めて安価であるが、ホコリ・油等が発光・受光面に付着して誤動作し易い。また、透過型については発光部と受光部の光軸を合わせる必要があるため設置に手間がかかり、透過型については検知距離が極端に短いといった問題がある。

(2) 超音波センサ

超音波を介して障害物を検知するもの。発信器から超音波を発射し、障害物からの反射波を受信器にて受

表-1 センサの比較・評価

項目 センサ	検 出 能 力			設 置 し 易 さ			耐環境	コスト	メンテナス	他の作業への影響
	検出距離	検出精度	レベル変更の自由度	軽 さ	大 き さ	作業の容易さ				
光学式 透過型	◎	○	○	◎	◎	△	△	◎	○	△
センサ 反射型	△	△	○	◎	◎	◎	△	◎	○	△
超音波センサ	○	○	△	○	○	◎	○	○	○	◎
赤外線センサ	○	◎	◎	○	○	◎	○	○	○	◎
マットセンサ	—	△	×	×	×	△	◎	△	△	×
磁気近接センサ	×	△	×	◎	◎	△	◎	◎	○	×

けることにより検知する機構である。

検知距離も長く耐環境性にも優れているため、今回の条件に最も適合するセンサの1つと考えられた。しかし実験の結果、拡散・反射といった超音波自体の特性ゆえ、必要以上に超音波が拡がったり何重にも反射を繰り返すことにより、対象としている車輛以外のまわりの影響をかなり受けることがわかった。このため誤判別も多く、今回の使用には問題が多いと判断された。

(3) 赤外線センサ

赤外線を介して障害物を検知するもので、機構的には超音波センサと同様である。検知距離も長く、小型・軽量でもある。また赤外線は超音波程に拡がらないため、特定の車輛に対して指向を絞り易い。さらに、今回検討の対象に用いたセンサは放射する赤外線のレベルと指向角を可変できるため、より確実に対象に対して的を絞ることができた。すなわち、レベルと指向角を調整することにより精度良く特定車輛を検知できることがわかった。

ただし、赤外線センサは直射日光に対しては誤動作する恐れもあるため、設置にあたってはその位置・角度等に十分配慮する必要がある。

(4) マットセンサ

ゴムマット中に包含されたタッチセンサが踏圧を感知して動作するもの。

耐環境性に優れ、最も直接的に車輛を検知できるが、それゆえ、タイヤの大きさ・位置に応じたマットが必要となる。一般に大型車輛を検知対象とする場合、1台につきかなり大きなマットを複数枚用意することになる。加えて、車輛がマット上に載るためマットを何等かの方法で固定する必要があるが生じる。したがって設置・撤収に大変手がかかる。

さらに、車輛をマット上に誘導する必要があるため、ポンプ車オペレータに与える負担も大きい。

(5) 磁気近接センサ

磁性体(鉄など)の接近に対して反応するセンサである。小型・軽量で一般に安価であり、特に耐環境性では最も優れたセンサの1つといえる。ただし、検知距離が最大レベルのものでも10cm程度と極めて短いため、今回対象としている使われ方には向かない。

以上の比較・評価については、実際に車輛を何度となく往来させて検討したものである。その結果、上記の理由から、車輛検知センサとしては赤外線センサが適当と判断した(図-5)。

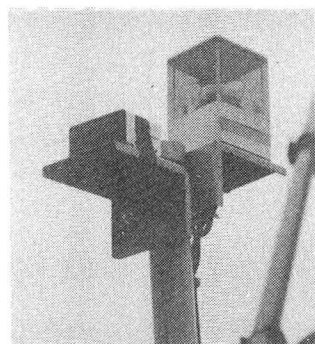


図-5 赤外線センサ(左側)
(右上側は配車連絡灯)

4-2 状態識別回路

車輛検知センサから送られてくる情報は特定の車輛の存在を検知したという情報である。その車輛が現在、通過中なのか、停車中なのかについては識別していない。そこでこの回路によって車輛の状態を識別し、その結果を中央制御部であるホストコンピュータに送ることになる。

回路はシーケンス制御されており、検知レベルの大きさと検知継続時間から通過/停車を識別している。レベルと継続時間の設定は検知対象とする車輛ごとに、最も適当と思われる値に自由にセットでき、識別精度を向上させている。

このように、本システムは車輛検知を行う箇所が非常に多く、かつこれらがリアルタイムに独立して作動するため、ホストコンピュータの負担を軽減させる意味から、車輛検知側にて車輛の動作状態まで識別しその結果のみを中央制御部に送るようにしている。

6. 表示情報

管理情報表示部に示される情報は、大きく車輛運行情報とケーソン姿勢情報の2種類である。これらの表

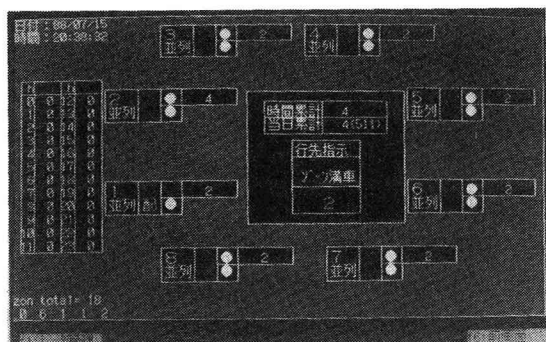


図-6 車輛運行情報の表示画面

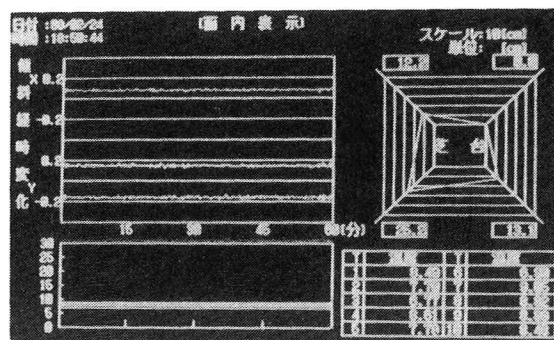


図-7 ケーソン姿勢情報の表示画面

示にあたっては、数値情報のみならず可能なかぎり図形情報として表し、視覚的に把握し易いよう心掛けた。

それぞれの情報の内容については以下のとおり。

6-1 車輛運行情報

表示画面の例を図-6に示す。表示されている項目は、

- ・ミキサー車入構状況
- ・各ポンプ車ゾーン毎の配車状況（空中中／入車中／配車中の別）
- ・各ポンプ車ゾーン毎の配車実績台数
- ・全体配車実績台数（毎時毎、累計）
- ・配車指示ゾーン番号（管理者選択、システム選択）
- ・過去5回の配車指示パターン
- ・各種警告（満車、配車禁止、同一配車パターン等）の各情報である。

6-2 ケーソン姿勢情報

表示画面の例を図-7に示す。表示されている項目は、

- ・ケーソン傾斜量
- ・ケーソン鉛直変位
- ・ケーソン刃口反力
- ・気象情報（風向・風速、潮位）

の各情報である。

7. システム運用実施事例

本システムは、はじめにでも述べたとおり、東京港連絡橋工事における情報化施工の一環として開発されたものであり、現在当工事において運用中である。現在（昭和63年 6月末）までのところ使用回数8回、一回あたり平均打設量3000m³以上、ミキサー車にして 500台以上を管理している（表-2、図-8）

この中より、第3回を例にとりより詳細に説明する。この回の打設量はおよそ3000m³、ミキサー車にして約 500台余が予定され、ポンプ車はケーソンを取り巻くように9台が設置された。これを受けて本システムは、各ポンプ車ごとに定められたミキサー車入車ゾーンに車輛入車検出部（全16箇所）を、ゲート手前に車輛入構検出部を設置した。これらの情報は、ゲート脇の指揮所に設置された管理情報表示部に、ケーソン姿勢計測システムの情報と併せて表示された。さらに、これらの情報はケーソン函内詰所、陸上側事務所にも同時に表示されるよう機器の設置を行った。また、渡り栈橋部には入構車輛規制用信号機が、ゲート付近の待機車輛の多少に応じて動作するようにして設置された。なお、これらのシステムの設置にかかった時間は実質的には約 1.5時間であり、比較的容易に設置できるといえる。

表-2 システム使用実績

使用回	生コン車 (台)	ポンプ車 (台)	打設量 (m ³)
1	943	9	5657
2	376	6	2255
3	507	9	3042
4	347	6	2084
5	186	4	1110
6	512	8	3072
7	354	5	2124
8	516	8	3096

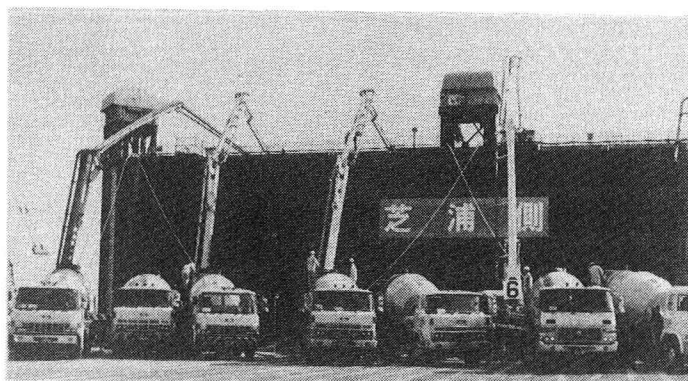


図-8 システム実施事例

本システムを運用させることによって、当日を含め毎回、次々と入構してくる数百台のミキサー車を適切なゾーンに円滑に配車することができ、何等トラブルもなく予定どおり打設作業を終えることができている。

8. まとめと今後への課題

本システムについて、その導入効果をまとめると以下のとおりである。

- 車輛を安全にかつ円滑に配車することができ、また効率的なコンクリート打設を行うことができる。
- 車輛を配車する上での必要情報を一箇所に集中することにより情報の一元管理ができ、誤った情報や不必要な情報による情報の混乱を防ぐことができる。
- 打設管理者から煩雑な作業（配車状態の確認、配車実績台数のカウント等）を取り除くことにより、管理者は配車指示作業にのみ神経を集中すればよく、精神的重労働を軽減できるばかりでなく効率的な配車指示が行い易くなる。
- 配車実績は常にデータ記録されているため、システムの見直しを行う場合の検討データになるばかりでなく、この種（非線形のフロー問題等）の非常に興味深い参考資料の少ないシステム開発にとっての基礎資料となる。

また今後、本システムをさらに機能向上させるには次の事項が課題として考えられる。

- 入車／通過中の車輛状態のみならず、走行中の車輛についてもその位置が把握できるようなハードシステムの開発。
- 打設実績台数の把握から、打設実績コンクリート量の把握に向けての機能向上。
- 配車指示の評価支援機能として、エキスパートシステムやファジィコントロール等のAI技術の導入。

9. おわりに

本システムは、現段階においてはその機能を十分に発揮し、コンクリート打設時においてはなくてはならないシステムとなっている。しかし、この段階に達するまでには様々な苦い失敗を繰り返し、決して一朝一夕にできたものではない。とりわけ初期開発時においては、システム機能を過大評価しすべてをシステムの判断に委ねたことから失敗を犯している。今後、各建設現場において様々な角度から情報化施工が進むであろうが、システムをオールマイティと位置づけることなく、これらシステムからの支援（情報）をもとに最終的には担当技術者が判断を下すべきものであることを改めて肝に命じた次第である。

最後に、本システムの開発、運用に携わった方々にここに深く感謝の意を表します。

《参考文献》

- 梅園輝彦 他：超音波による走行車輛識別方法の基礎的研究、第12回土木学会関東技術発表会講演集
大森豊明 他：センサ実用事典、フジテクノシステム