

## 自走式コンクリート締固めロボットの開発

谷 雄 一 田 坂 哲 美  
吉 田 成 男 伊 藤 功  
松 岡 義 治 \* 吉 野 正 純

### 要 旨

技術研究所では建築施工に有効な施工ロボットの開発を進めてきたが、本報は過年、開発課題「コンクリート先端作業ロボットの開発」の中にて開発を実施した、「コンクリート締固めロボット」について、現場との関係により新たに機能を見直し、試作機を製作した上、現場施工に適用した内容を報告するものである。

本ロボットはコンクリート打設工事における苦渋作業の軽減を通して施工品質の確保および省人化等をねらったものであり、自走台車とこれに搭載された棒状バイブレータを把持するアームおよびこれらに付随するインバータ等の機器類により構成される。

現場施工においては、RC地下躯体の外壁および柱のコンクリート締固め作業に本ロボットを適用し施工に対する有効性を検証した。

また今後の課題として、ロボットの小型・軽量化や、さらに汎用性の高い鉄筋上走行機構の開発の必要性が抽出された。

### 1. まえがき

建築施工におけるロボット化は、これまで建設業界全般にわたり種々の取組がなされてきたにも係わらず、いまだ十分な成果を得ているとはいえない。

当社においても、将来予想される労務環境の変化（熟練者不足および高齢化）を背景とし、ここ数年来施工ロボットの開発に取り組んできた。

本報にて述べる「コンクリート締固めロボット」は、1991年より検討を進めて来た機種であり、94年度現場適用の機会を得、現場と密接に係した開発検討を経て試作機を製作し、施工への適用を実現した。

### 2. 開発の概要

#### 2. 1 開発の目的

コンクリート工事は打設から仕上げにかけ、建築工事の数有る工種の中でも極めて苦渋性の高い作業である。

この中で、コンクリート締固めを施工ロボットの対象作業とした理由はおもに次の2点である。

- ① コンクリートの締固めは、RC造の躯体の品質確保に重要性が高いが、苦渋性も高い作業である。
- ② コンクリート関連施工ロボットはこれまで他社が手掛けてきているが、締固め作業は未着手である。

特に本ロボットを適用した現場は、地下工事において大量のコンクリート打設があるとともに、地下の用途が駐車場であり、打ち放しの壁面であるため、品質的にも外観上もレベルの高い仕上がりが必要とされた。

#### 2. 2 ロボットの概要

ロボットは、遠隔操作で自走可能な走行台車、これに搭載され棒状バイブレータを把持するアーム、およびこれらに付随するインバータ、ケーブルリール等の機器類により構成される。写真-1にロボットの外観、図-1に概念図を示す。

本ロボットは、走行装置は遠隔にて操作し、アームは作業者が直接操作する、マン・マシン協調作業形ロボットであり、ねらいは次に示す2点に置いた。

- ① バイブレータの重量をロボットのアームが負担する為、作業者の疲労および苦渋性を軽減し、長時間にわたるコンクリート打設作業においても、最後ま

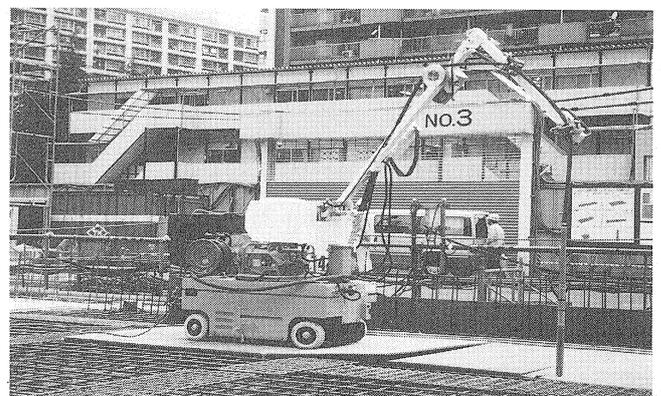


写真-1 締固めロボット

\* 東京支店 建築事業部 大森建築工事事務所 工事主任

的確に締固め作業ができ、コンクリート品質を向上することができる。

- ② バイブレータおよびインバータ等、作業に必要な機器類を走行台車に一括して搭載するため、煩雑なケーブル等の引き回しが無く、これらに必要なであった作業者の省人化がはかれる。

### 3. 試作機の製作

施工に適用し、実用性を検証するため、試作機を製作した。仕様決定に向けた検討内容を以下に述べる。

#### 3.1 基本仕様の設定

締固め作業に際しての、ロボット作業条件および現場からの要求機能をまとめると以下のとおりである。これらをロボット計画の基本仕様と設定した。

- ① スラブ鉄筋の上を移動出来ること
- ② ロボットの中は900 mm以内であること
- ③ アームの作業半径は2.5 mとすること
- ④ バイブレータは、床レベルより-4 mまで降ろせること

#### 3.2 作業装置の検討

作業装置とは、バイブレータ、アーム、バイブレータ繰出・引込装置、およびインバータ等の機器を指す。

##### (1) アーム

アームの目的はバイブレータの重量を保持し、必要な作業半径を確保することである。本ロボットのアームは作業者がアーム自体を直接手で把握し、先端を所定の位置へ動かすマン・マシン協調作業形のものを計画した。

要求機能から作業半径を2.5 mとしたため、既存のエアバランサー等では適当な機種が無く、またロボット重量軽減のため、アームは単純かつ軽量である必要があり、アームを新規に検討した。この結果、ガススプリングによるバランス機構を採用した。この機構は、作業者が必要な位置へアーム先端を動かした後、手を放してもアームはその位置を保持する機能を持つ。

##### (2) バイブレータ

締固め作業は、柱、壁および梁をおもな対象としたため、アーム自体の起伏で1 mの上下動を可能とした上、さらに繰出・引込装置にて、バイブレータを床レベルから4 m下まで下げることができるように計画した。

また、型枠内でのコンクリートの流動による、鉄筋等へのバイブレータの引掛かり防止のため、マルチバイブレータと称する先端の棒状部が長いものを選定した。

一箇所のコンクリート打設作業に対し、ロボット1台にて締固め作業ができるように、バイブレータはアーム装着のものとは別に、普通のタイプのものをロボットに1本搭載した。また、コンセントが3口のインバータを搭載し、さらに必要に応じもう1本使用可能とした。図-2に作業装置の作業範囲を示す。

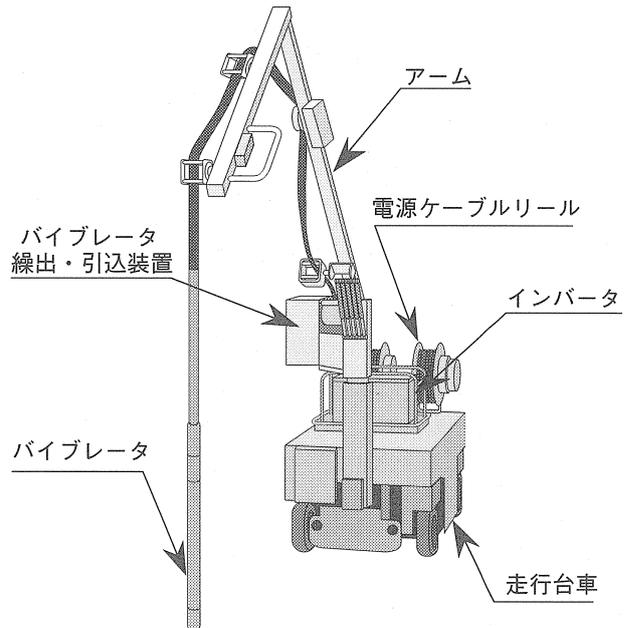


図-1 締固めロボット概念図

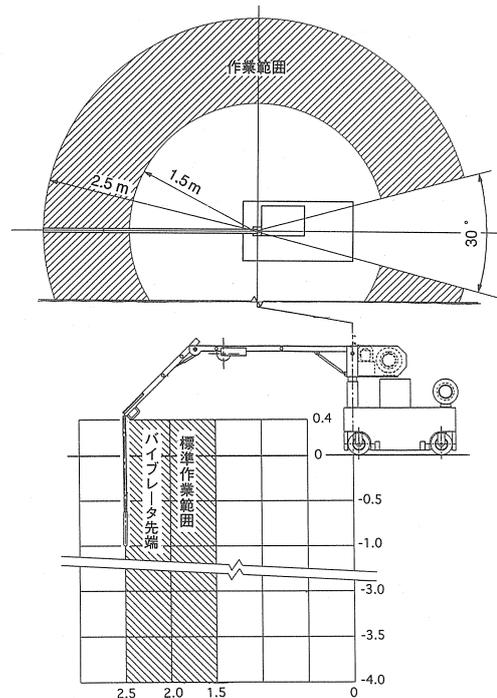


図-2 作業範囲

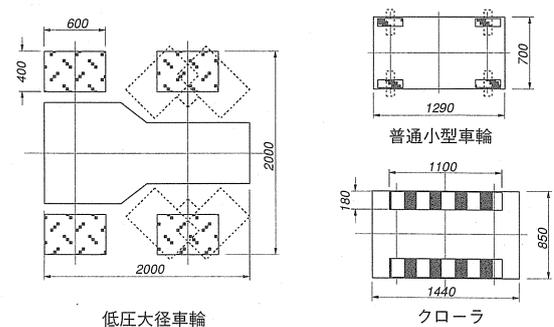


図-3 走行方式の概要

3.3 走行装置の検討

走行装置は次の3点を選定の主眼とした。

- ① 鉄筋に対する影響が小さい  
(乱し、塑性変形)
- ② 小型軽量であり、走行機能が高い
- ③ 遠隔操作が容易である

(1) 走行方式の比較検討

格子状のスラブ配筋の上を直接走行する場合、走行機構は限定され特殊なものになる。1例として鉄筋の格子を充分カバーする大径低圧タイヤの走行装置を検討したが、外形寸法が作業条件に適合しない結果となった。

また、あらたな鉄筋上走行機構の検討も考えたが、ロボットの製作期間に対する制約から、断念せざるを得なかった。このため、鉄筋上にコンパネを敷き、走行養生した上を、比較的短期に入手可能な既存の装置で走行することを前提に検討をおこなった。

図-3に各走行方式の概要を示す。ここに示す走行方式は、低圧大径車輪は独自想定したもの、クローラは市販のエンジン式搬送台車、普通小径車輪は高所作業車の走行部を想定したものである。

検討の結果、コンパネ養生上を普通小径車輪で走行する方式を第一候補、同じくクローラを第二候補として選定した。表-1に検討結果を示す。

(2) 走行実験

この結果を基に、選定方式の有効性と走行養生の方法を確認するため、スラブ配筋のモデルを作成し、選定した2候補の走行実験を実施した。走行条件として、バーサポートのピッチおよびコンパネの敷き方を2種類、さらにスラブ鉄筋上の通路としてよく使われる、メッシュロードを敷設したケースも実験した。走行実験の要領を図-4、実験結果を表-2に示す。

実験の結果、走行方式については小型で既存機種が多く、横走行・その場旋回ができるなど機動性の高い、小径車輪方式を選定した。クローラ方式は、特に旋回時コ

表-1 走行方式比較の結果

走行方式	一次評価				絞込	二次評価 (走行機動性)				総合評価
	直進走行性	曲進走行性	車体寸法	車体重量		その場旋回	横走行	段差乗越	遠隔操縦	
低圧大径車輪	○	○	× 2.0m ×2.0m	△ 500kg (想定)						
コンパネ上	○	○	× 同上	○ 同上						
普通小径車輪	× 脱輪走行不能	× 同左	○ 1.3m ×0.7m	× 650kg						
コンパネ上	○	○	○ 同上	△ スペース追加必要	→	○	○	△	○	○ 既存ベースマシン有り
クローラ	○	× 配筋乱し	○ 1.4m ×0.8m	△ 450kg						
コンパネ上	○	△ コンパネ乱し	○ 同上	○ 同上	→	△	×	○	△	△ 既存ベースマシン有り

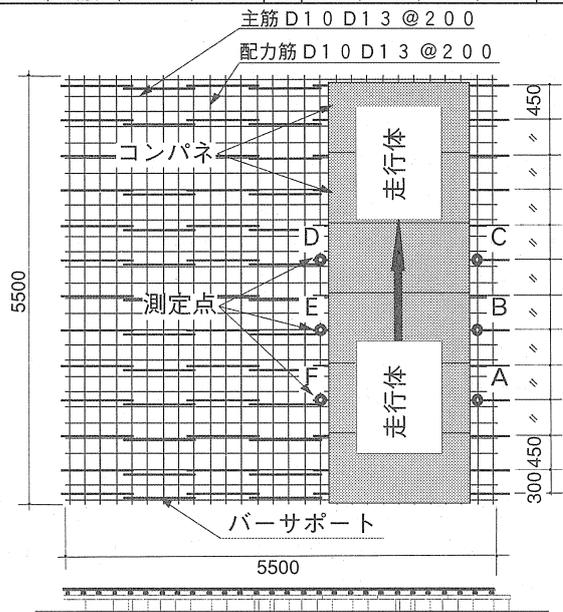


図-4 鉄筋上走行実験要領

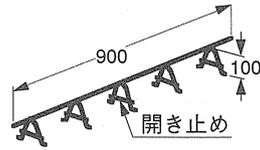
ンパネを乱し、また市販のほとんどのものがエンジン式であるなど、遠隔操作がしにくいことから不適とした。

また、バーサポートのピッチを450 mm、コンパネを1枚敷いたケースまでは、走行時に鉄筋の変位が全く無く、バーサポートのピッチを900 mmにしたケースから鉄筋のたわみが発生したため、走行養生は経済性も勘案

表-2 鉄筋上走行実験結果

No	バーサポートピッチ(mm)	走行養生	走行装置		鉄筋変位 計測結果						備考	
			種類	重量(kg)	状態	A	B	C	D	E		F
1	450	コンパネ2枚敷	クローラ	625	走行中	0	0	0	0	0	0	旋回時コンパネずれ発生
					走行後	0	0	0	0	0	0	
2	450	コンパネ2枚敷	普通小径車輪	710	走行中	0	0	0	0	0	0	コンパネ乱れ
					走行後	0	0	0	0	0	0	
3	450	コンパネ1枚敷	クローラ	625	走行中	0	0	0	0	0	0	旋回時コンパネずれ発生
					走行後	0	0	0	0	0	0	
4	450	コンパネ1枚敷	普通小径車輪	710	走行中	0	0	0	0	0	0	コンパネ乗越え時、多少バクつき
					走行後	0	0	0	0	0	0	
5	900	コンパネ1枚敷	クローラ	625	走行中	-5	0	0	0	0	0	旋回時コンパネずれ発生
					走行後	0	0	0	0	0	0	
6	900	コンパネ1枚敷	普通小径車輪	710	走行中	バーサポート座屈						
					走行後	-						
7	900	メッシュロード敷	クローラ	625	走行中	旋回時バーサポート座屈						
					走行後	-						
8	900	メッシュロード敷	普通小径車輪	710	走行中	-12	-12	-	-	-19	-11	
					走行後	バーサポート曲損						

の上、バーサポートピッチを450 mm、コンパネ1枚敷を現場施工時の標準として選定した。



また、バーサポートは、図-5 バーサポート (例) 図-5 に示すような、脚部に開き止めの付いたタイプを使用することとした。

### 3. 4 試作機の仕様

以上の検討および実験結果を基に、ロボットの仕様を表-3 に示すように決定した。

バイブレータは一般的な40mm φのものを、アーム付きと補助用の2本を装備し、動力源はAC200 Vを電源とする通常のインバータと、バイブレータ用高周波発電機の2種類を現場状況に応じて選択できる様に考慮した。

また走行用の動力源はバッテリーとし、8時間以上の作業を実施するために十分な容量を持たせた。

アームはガススプリングによるバランス機構により作業者が直接操作することとし、先端部にバイブレータの入切および繰出・引込を行なうスイッチを設けた。

ロボットの走行は、アームを操作する作業者がリモコンボックスを肩あるいは腰バンドにて体に装着し、有線により遠隔操作する。図-6 にロボット外形図を示す。

### 4. 施工への適用

ロボット試作機を大森ベルポートA3工区の地下RC躯体工事に適用した。対象部位はおもに地下外壁および外周部の柱であり、一部内部の柱・梁も対象とした。

#### 4. 1 予備施工試験

ロボット試作機の完成後、工場にて施工パターンの試

表-3 ロボット仕様

主要諸元 (アーム格納時)	長さ×巾×高さ 重量	2,540mm×720mm×1,260mm 660 kgf
アーム付 バイブレータ	径 作業範囲	40 mm φ 半径 1.5m ~ 2.5m 上下 +0.4m ~ -4.0m
補助 バイブレータ	径 ケーブル長	40 mm φ 15 m
走行台車	走行機能 走行速度	前後, 左右, 右折, 左折, その場旋回 max. 1.5 km/h
動力	バイブレータ用 走行用	3口インバータ (AC200V) 又は高周波発電機 (2.5KVA) バッテリー (12V 100AH×2)
操作	アーム バイブレータ 走行	直接操作 入切, 繰出・引込は遠隔操作 有線遠隔操作

験を実施した。目的は、締固めロボットの施工能力が実際のコンクリート打設作業に見合ったものであるか否かを判断するものであり、ロボット移動と締固め作業の組み合わせを数種のパターンにて試験し、サイクルタイムの比較により最適なパターンを抽出した。

この結果、ロボットを一箇所に固定し、アームの作業範囲をフルに使い、作業するというパターンより、アームの作業範囲をある程度限定し、ロボットを頻繁に移動させるパターンの方が、サイクルタイム上わずかながら能率が高く、作業としても楽であることがわかった。

#### 4. 2 実施工における鉄筋への影響

3. 3 (2) にて実施した走行実験の際、鉄筋はコンクリート地盤上に組んだが、実際のスラブでは型枠上に鉄筋を組む。施工適用に先立ち、実際のスラブ鉄筋上におけるロボット走行による鉄筋の変位を計測するため、

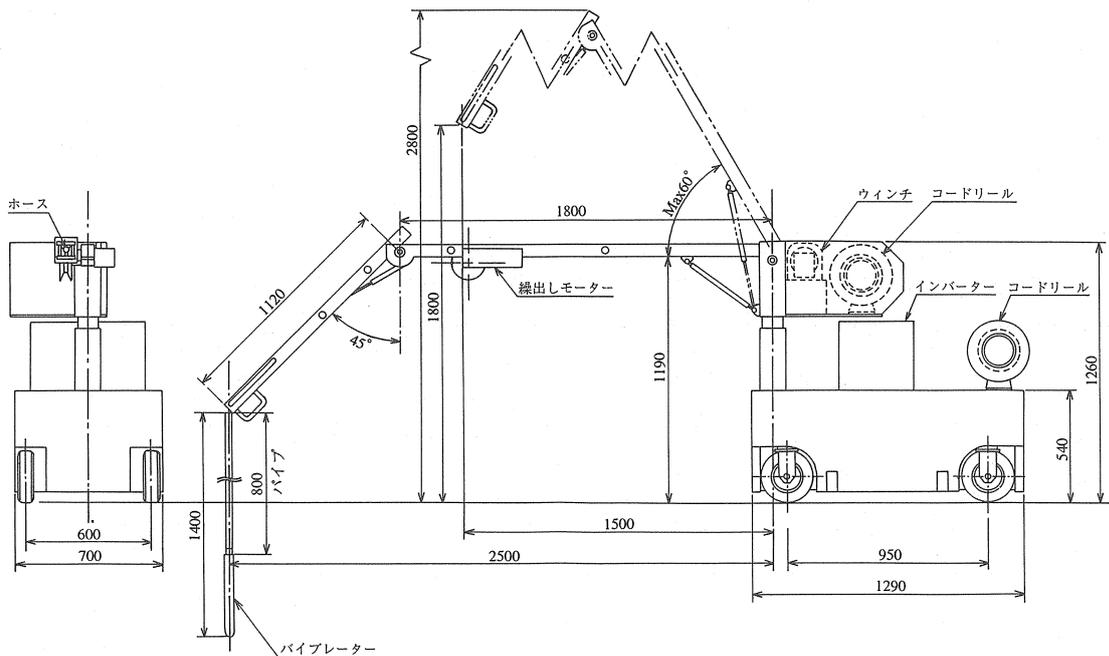
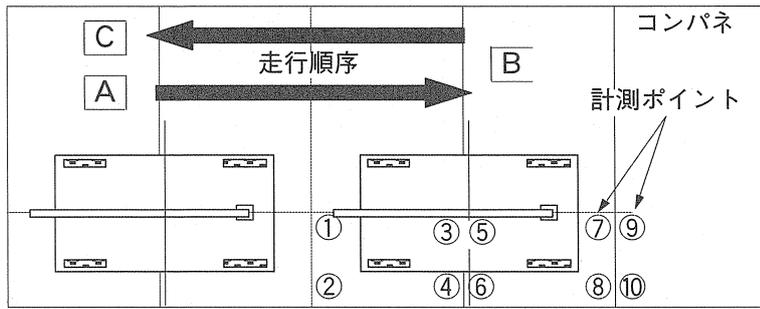


図-6 ロボット外形図



配筋状態：主筋D13@200  
：配力筋D10D13@200

図-7 レベル計測要領

走行実験を実施した。図-7にレベル計測要領を示す。

表-4の結果に示す様に、ロボット通過中の変位は、5~7mmであるが、通過後はすべて±1mm以内に復帰している。通過中の変位が大きいのは、鉄筋だけでなく、型枠全体が変位したためと考えられる。また、通過後は、ほぼ元のレベルまで復帰しているため、スラブコンクリートの打設前にロボットを撤去すれば、スラブのコンクリートに対する影響は無いと判断した。なお、表中のレベル計測不能はコンパネの反り返りによる。

4.3 施工適用の状況

本ロボットの施工への適用は、94年11月より開始し、内部の壁の差筋や構台の関係で、施工可能なエリアは限定されたが、3月までに数回の施工を行なった。各施工毎にロボットの問題点を抽出し、改良を行なった。写真-2に施工状況、図-8に施工状況の配置を示す。

コンパネは事前にロボットの作業領域に敷設をしておき、スラブコンクリートの打設までに、順次撤去した。

なお、本現場では近隣に対する騒音の影響を避ける為バイブレータの動力源は、AC200Vで供給する通常のインバータをロボットに搭載した。

表-4 レベル計測結果  
単位 mm

計測位置	変位置		
	A	B	C
①	0	計測不能	1
②	0	計測不能	0
③	0	-7	0
④	0	-5	0
⑤	0	計測不能	0
⑥	0	計測不能	1
⑦	0	-7	0
⑧	0	-6	-1
⑨	0	計測不能	1
⑩	0	計測不能	-1

符号：マイナスは沈下を示す

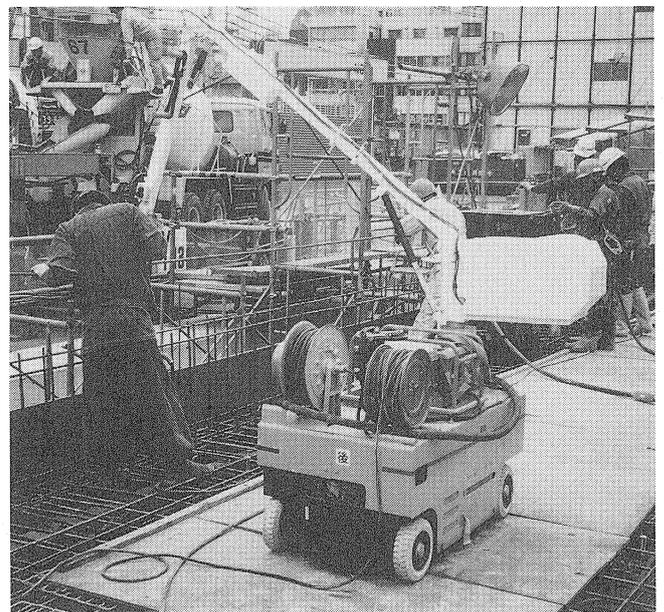


写真-2 ロボット施工状況

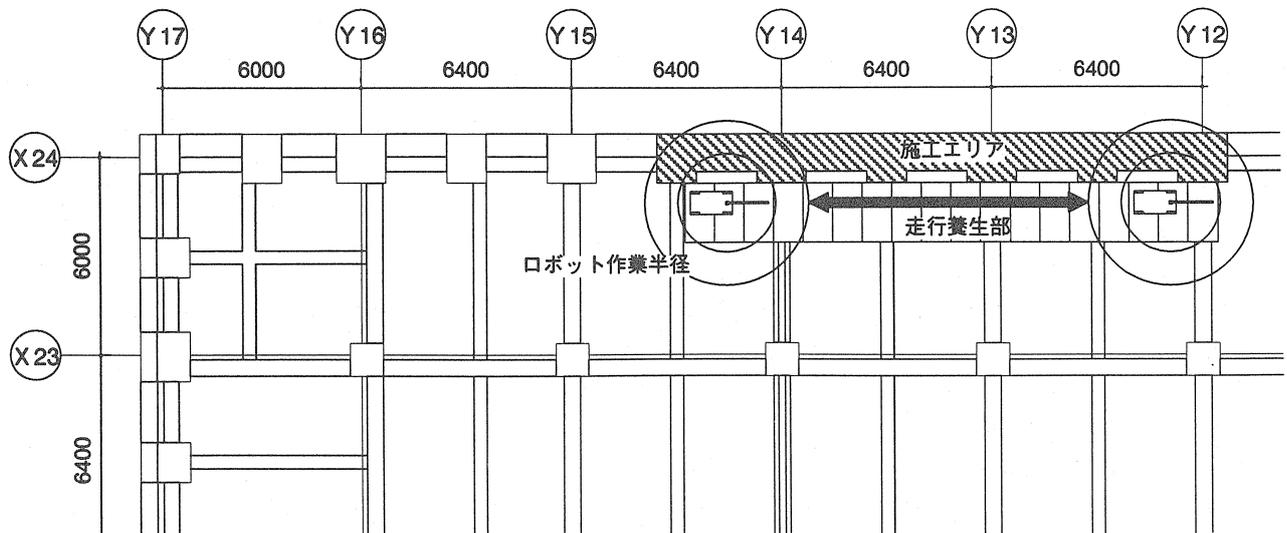


図-8 ロボット施工状況

5. 適用結果のまとめ

5. 1 ロボット適用の効果

(1) 品質確保

施工に適用した結果、当初目的とした苦渋作業の軽減によるコンクリート打設の品質確保の面で、十分な有効性が確認された。脱型後の検査においても品質よく打設できたことが確認された。

(2) 省人化・省力化

遠隔操作によるロボットの走行、およびアーム装着のバイブレータによる締固め作業を1人で行なうことができ、補助バイブレータの作業者を合わせても締固め作業は2名で可能であり、ケーブルおよびインバータ移動の人員が削減できることから、省人化の面でも当初のねらいは実現した。表-5に、施工適用結果を踏まえて試算した、ロボット適用と在来作業との比較を示す。

表-5 ロボット適用効果の比較

項目	ロボット適用		在来作業
	高周波発電機	AC200V インバータ	AC200V インバータ
・作業設備			
締め固めロボット	1台	1台	—
バイブレータ (40mmφ)	ロボット搭載2本 アーム付、補助	ロボット搭載2本 アーム付、補助	2本
インバータまたは 高周波発電機	ロボット搭載	ロボット搭載	1台
・作業者			
締め固め作業	2名	2名	2名
ケーブル・インバータ移動	0名	1名	3名
コンパネ、通路の敷設撤去	1名	1名	1名
筒先把持・移動	2名	2名	2名
作業者計	5名	6名	8名

比較において、ロボット適用の場合はバイブレータ駆動源を、高周波発電機とAC200Vのインバータの2例、在来作業はインバータのみの1例とした。また、比較はコンクリートポンプ車1台当りの所要作業人数とした。

表に示す様に、バイブレータの動力源として高周波発電機を使用したロボット適用作業の場合が、所要作業員数が最も少ない結果となった。

また、比較の数字には表れないが、ロボット適用は省力化の面での効果も大きい。在来作業の場合、締固め作業を行なう2名は常時バイブレータの把持・移動を行なう必要があるが、ロボット適用の場合、締固め作業において、作業者はアームから手を放すことが可能であり、アーム装着バイブレータは人による移動の必要が無い。

5. 2 ロボット適用に関する問題点

(1) コンパネによる走行養生

施工適用における1つの問題は、コンパネ敷設および撤去の手間が増加したという点にある。

軽量かつ鉄筋上を自在に走行可能な走行装置を実現することで、これらの問題は解決する。

(2) 動力源

本施工適用では、現場の状況によりバイブレータの駆動源をAC200Vとしたため、ケーブルの引き回し作業が若干ではあるが発生した。

しかし、騒音・排気ガスの影響の少ない現場状況であれば、バイブレータ駆動源を高周波発電機にでき、この問題が無くなるため、さらに省人効果が見込まれる。

(3) 補助バイブレータ

ロボットを2台使用するより、1台にバイブレータ2本を搭載する方が経済的であるため、アーム付きとは別に補助バイブレータをロボットに装備したが、ケーブル処理に手数を要し、今後に課題を残した。

6. まとめ

コンクリート締固め作業を行なうロボットの試作および施工適用を行なった結果、以下の事を確認した。

- ① バーサポートのピッチを細かくし、12mmのコンパネを鉄筋上に敷設することにより、本ロボットの重量程度であれば、鉄筋への影響はほとんど無く、スラブ上を走行可能である。
- ② 締固め作業を行なうロボットはコンクリート打設品質および作業の省人化の面で有効である。
- ③ 軽量かつ鉄筋上を自在に走行可能な走行装置の必要性、動力源、補助バイブレータの改善等、さらなる検討課題も抽出された。

これらの内、鉄筋上を直接自走できる走行装置開発の必要性について補足して述べる。

コンクリート打設時の作業として、締固めの他に、筒先の移動・粗均し・仕上げ等の作業があり、仕上げ以外の作業は鉄筋上を移動する必要がある。大きさ、重量等についてはそれぞれの作業に見合ったものを検討する必要があるが、これらの作業においても鉄筋上走行装置の必要性は高い。今後、建築施工ロボットの開発の中で、この開発課題について検討を進めてゆく所存である。

謝辞

本ロボットの適用にあたり、大森建築工事事務所の皆様に多大な御協力を頂き、深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1)
- 2)
- 3)