

羽田線延伸工事 モノレール軌道桁の製作について

川喜田 効*
堀 慎 治**
秋山 清 志***

1. はじめに

東京モノレール羽田線は、モノレール浜松町駅から羽田駅までの全長 13.1 km である。

延伸路線は、現羽田整備場駅の羽田空港寄り 132 m を工事始点とし、羽田空港沖合展開計画による新旅客ターミナル地区まで、複線で延伸するものである(図-1)。

延伸工事区間は約 6.3 km あり、航空制限内は地下構造(4.4 km)、残りは高架構造(1.9 km)である。道路横断面等の特殊部を除いた約 5 km に、在来線と同様プレストレストコンクリート軌道桁を採用した。以下延伸路線のモノレール PC 軌道桁の製作について述べる。

2. 設計の概要

東京モノレール(株)の基準は、『構造物設計指針(案)』・『構造基準(案)』などがあり、実施設計にあつ

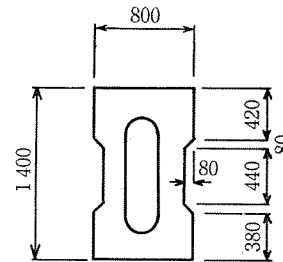


図-2 桁断面図

ては、さらに細部の基準、『PC 軌道桁設計条件』・『PC 軌道桁施工管理基準』を作成して行った。

なお各基準は、「中量軌道輸送システムおよびモノレール設計基準」(昭和 60 年 3 月運輸省)に準拠したものであり、昭和 58 年 3 月に改訂された「国鉄建造物設計標準」に基づく修正も行っている。

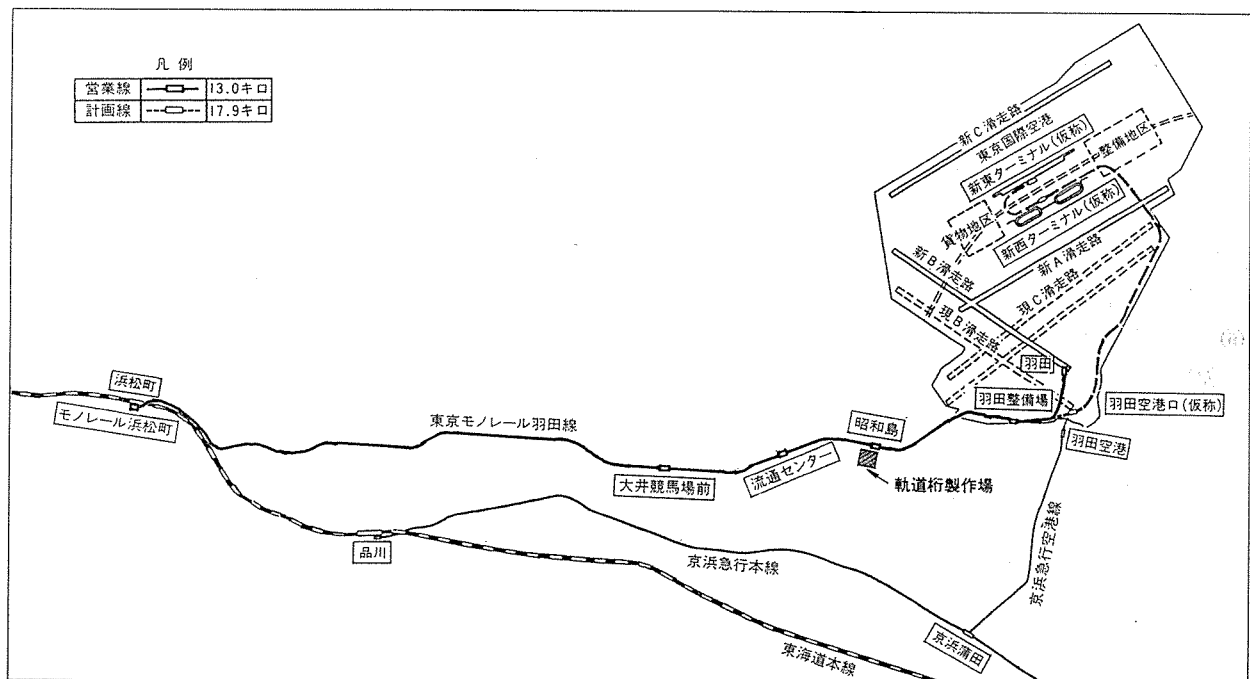


図-1 東京モノレール羽田線延伸線計画概要図

* Isao KAWAKITA : モノレールエンジニアリング(株)代表取締役
** Shinzi HORI : オリエンタル建設(株)東京支店工務部(作業所長)
*** Kiyoshi AKIYAMA : オリエンタル建設(株)東京支店工務部

◇工事報告◇

2.1 設計条件および材料

PC 軌道桁は在来線と同様、標準支間 $l=20\text{ m}$ の単純支持の中空箱形断面である(図-2)。なお延伸路線は空港の外周部に計画されているので、塩害対策を行った。

軌道：方式	跨座型モノレール
設計速度	$V=80\text{ km/h}$
縦断勾配	最大 $\frac{60}{1000}$
縦断曲線	最小 1000 m
カント	最大 0.12
曲線半径	最小 120 m
緩和曲線	クロノイド曲線
PC 桁：形式	ポストテンション単純桁(中空)
PC 工法	フレシネー工法
材料	コンクリート $\sigma_{ck}=400\text{ kgf/cm}^2$
	PC 鋼材 $12-\phi 7$
	鉄筋 SD 35
支 承：形式	ピン固定式, ローラー可動式
材 質	主要部 SCW 49
伸縮継手：形式	フィンガージョイント
材 質	主要部 SS 41

2.2 設計荷重

- ① 死荷重：桁自重 2.5 tf/m^3
給電軌条その他 120 kgf/m
- ② 活荷重：活荷重は 図-3 に示すような軸配置および軸重 $P_l=9.2\text{ tf}$ による連行荷重とし、部材に不利な応力となるよう載荷する。
- ③ 衝撃荷重：活荷重に次の係数を乗じる。

$$\text{衝撃係数 } i = \frac{20}{50+l}$$

ただし l ：支間 (m)

- ④ 車両横荷重：一軸集中移動荷重として一軸重の 20% を、走行面の高さにおいて軌道軸に直角かつ水平に作用させる。
- ⑤ 遠心荷重：車両重心位置(走行面上 1.110 m)で軌道軸に直角かつ水平に作用させる。

$$F_c = \frac{V^2}{127 \cdot R} \cdot P$$

ただし、 V ：速度 (km/h)
 R ：曲線半径 (m)
 P ：軸重 (tf)

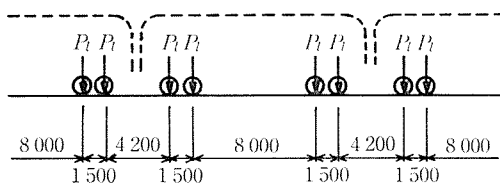


図-3 軸配置

- ⑥ 風荷重：桁および車両の垂直投影面積に対して次の荷重を載荷した。ただし地下部では風荷重を考慮しない。

風上側 活荷重載荷時： 100 kgf/m^2
" 活荷重無載荷時： 300 kgf/m^2

- ⑦ 水平震度：高架部 $K_h=0.22$
地下部 $K_h=0.20$

PC 軌道桁の設計は、自重・活荷重等の鉛直荷重のほかに、カント・車両横荷重・遠心荷重・風荷重を考慮して、最も不利な条件の組合せで絶対最大モーメントを求めて行う。通常の橋梁の場合は鉛直荷重に対してのみ検討するが、モノレール軌道桁の場合、桁の傾きや横方向荷重による影響が大きいため、両方向の応力を重ね合わせて応力度を計算した。計算の詳細については省略する。

3. 線形計算

PC 軌道桁は水平な台車上(モールド台車)を型枠の底板として製作することから、線路完成時の軌道線形を製作時の線形形状に変換して製作する。また与えられた線形諸元は主要な点のみであり、桁長単位の細部形状については別途線形計算の必要がある。

- ① モノレールの橋脚の方向は、平面曲線が挿入される場合、法線方向に設置するのを基本とする。
- ② 曲線部では、曲線半径に応じて複線軌道中心間隔(標準部は 3.7 m)を拡幅させる。
- ③ 縦断勾配がある場合、一般の橋梁の桁端は鉛直に製作するが、モノレール桁の場合フィンガージョイントが3面に(走行面、案内安定面)取り付けられるため、走行面に対して直角に製作する。この倒れ量の計算方法は、橋脚上の左右の支承上の計画高の差より勾配を求め、実際の桁端の倒れ量(δ)を求める(図-4)。

$$\delta = (i \times 1.400) / 100$$

$$\text{ただし、 } i = \frac{P_{H1} - P_{H2}}{0.800}$$

①, ②, ③ を考慮して平面、縦断および横断要素を入力して線形計算を行う。また実際の桁端間(GE 1*~GE 2*の弦)の1/2点を特殊型枠装置であるモールド装置の中心(ジャッキ7)にして、各ジャッキ位置の座標計算を行う。ラインデータは軌道桁の内軌、外軌、軌道中心、中心ラインの弦および測量中心ラインについて求める。

これらの計算は計算センターのプログラム(LINER)を利用して行った。

以上の線形計算の後、『製作指示書』作成プログラムを使い、次の座標計算を行う。

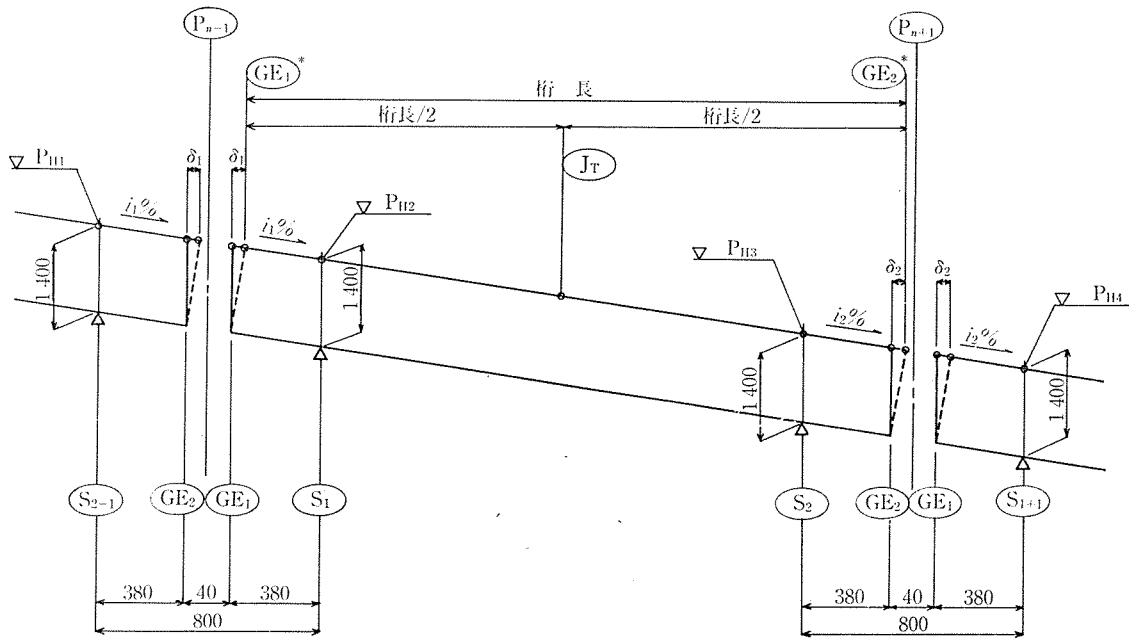


図-4 桁端倒れ図

- ④ 大座標より小座標に変換。
- ⑤ 実桁長を求めるための座標変換。
- ⑥ カントの影響を求めるための座標変換。

4. パソコンの利用

モノレール軌道桁の製作に欠かせない『製作指示書』と、PC 桁で重要な『緊張管理』について、パーソナルコンピュータの利用をした。機種は、当初 16 ビット機であったが、製作指示書と緊張管理だけでなく出来形検側簿・事務書類作成などの業務も行いたく、処理速度の速い 32 ビット機を新たに 1 組用意した(写真-1)。

また最近では、小型のノートタイプが発売されたので、これを緊張作業に利用している。

4.1 製作指示書

製作指示書は、座標変換、キャンバー量および伸縮量の計算、各点のモールドジャッキの押し量などを求め

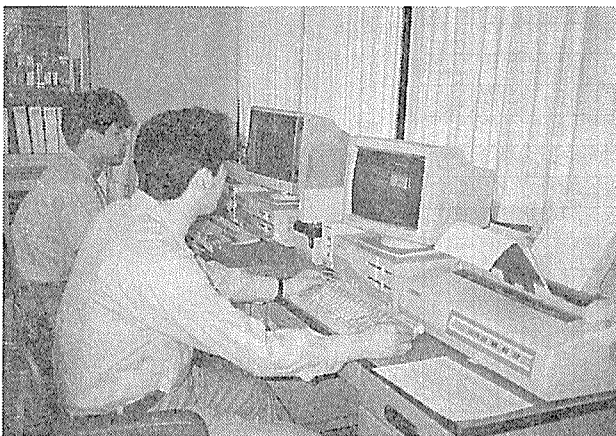


写真-1 製作指示書の作成

『軌道桁製作指示書』を作成する。次の 3 つのプログラムで構成されている。

- ① 桁製作時の座標変換をする。
- ② 伸縮量の計算は、温度変化・コンクリートの乾燥収縮・クリープ・プレストレスによる弾性短縮・各種荷重の「そり」によるものを考慮する。

キャンバー量の計算は、死荷重(桁自重・添加物)・プレストレス・活荷重の 1/3 による弾性変形量およびクリープによる変形を考慮する。

- ③ 『軌道桁製作指示書』は、線形計算の結果を座標変換させ、予め計算した伸縮量およびキャンバー量をデータとして与え、指示書プログラムを使い作成する。出力例を図-5 に示す。

4.2 緊張管理

今まで手作業で進められてきた緊張管理をパソコンを使い、緊張計算および緊張管理後のデータ整理を行うプログラムである。

プログラム試験緊張、緊張計算、本緊張、グループ管理などから構成されており、MENU プログラム中から選択できるようになっている。緊張管理に関する計算方法は JR 方式を用いた。

一般的な緊張管理の手順は、次のとおりである。

- ① 試験緊張を行う(伸び・圧力計の関係を図化)。
- ② 試験緊張結果を元に、見かけの摩擦係数(μ)と見かけのヤング係数(E_p)を算出する。
- ③ μ , E_p を用いてケーブルごとに引止め線を算出する。
- ④ 本緊張を行う(伸び・圧力計の関係を図化し、引止め線まで緊張)。

軌道製作指示書

日付	平成 年 月 日
桁番	
設計番号	

1. 設計条件 (mm)

橋長 (mm)	平面線形			横断勾配 (%)			縦断勾配 (%)
	起点	中央点	終点	起点	中央点	終点	(%)
19,682	加付	加付	加付	-7.588	-8.335	-9.093	-5.042

2. ジャッキの押差 (mm)

起 点	ジャッキ	押し差 + 引き差 -													終 点
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
海側	上	-168	-111	-54	9	56	90	102	93	62	15	-49	-109	-167	
	下	-178	-120	-61	4	52	88	102	95	66	21	-42	-100	-157	
山側	上	186	111	54	-9	-56	-90	-102	-93	-62	-16	48	107	165	固 定
	下	178	120	61	-3	-52	-88	-102	-95	-66	-22	40	89	155	

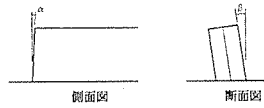
3. ガイドレール キャンバー量 (mm)

ジャッキ	キャンバー量													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
線形	海側	31.5	26.1	20.3	13.6	8.2	3.8	1.0	0.0	0.7	3.1	10.1	19.0	28.8
形	山側	22.8	18.3	13.6	8.5	4.7	2.0	1.0	1.8	4.3	8.2	16.7	26.7	37.4
たわみ	3 クリア	37.8	29.7	21.5	12.5	6.0	1.5	0.0	1.5	6.0	12.5	21.5	29.7	37.8
4 落存重/3		-4.0	-3.2	-2.3	-1.3	-0.6	-0.2	0.0	-0.2	-0.6	-1.3	-2.3	-3.2	-4.0
補正値	海側	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
6 山側		-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
計	海側	64.1	51.6	38.4	23.8	12.8	4.1	0.0	0.3	5.1	13.3	28.2	44.5	61.3
山側		55.3	43.8	31.8	18.7	9.1	2.3	0.0	2.1	8.6	18.4	34.8	52.2	69.9

※ 架設日材量は 360 日とする。

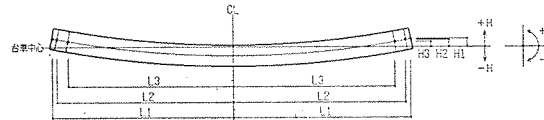
4. 橋型枠の倒れ、カント (シフト)

倒れ (α)		カント (β)	
No 1 ジャッキ側	No 13 ジャッキ側	No 1 ジャッキ側	No 13 ジャッキ側
0.00879	0.00883	-0.00723	0.00776



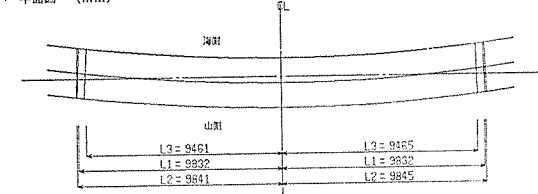
5. 橋型枠、ラーゲル平面位置関係 (mm) (θ……台車中心線から、反時計回りが+)

No 1 ジャッキ側	桁端 上面		桁端 台車面		ラーゲル		桁端 θ (度)	
	L1	H1	L2	H2	L3	H3		
設計値	9828.0	101.9	9828.5	115.1	9446.3	99.4	87.4426	
短縮差	4.5		12.2		12.2			
補正値	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
合計	9832	102	9841	115	9461	99	87.4426	
No 13 ジャッキ側	設計値	9827.6	101.9	9832.5	88.1	9452.4	72.9	-87.8169
短縮差	4.5		12.2		12.2			
補正値	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
合計	9832	102	9845	88	9465	73	-87.8169	

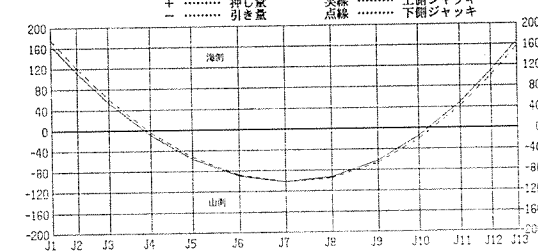


8. 略図

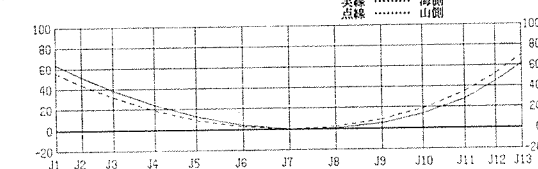
1) 平面図 (mm)



2) ジャッキ押し差 (mm)



3) ガイドレール キャンバー量 (mm)



4) 断面図 (ジャッキ 2 側より、ジャッキ 2 側に向かって見る。矢印は、下り勾配を示す。)

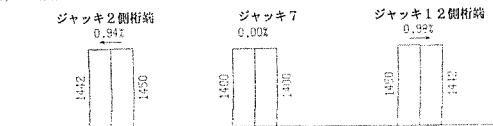


図-5 製作指示書

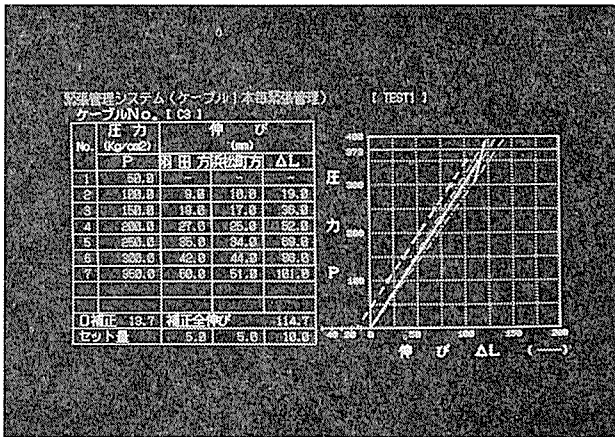


写真-2 緊張管理画面

⑤ 本緊張の結果から、ケーブル1本ごとおよびグループの管理を図化する。

本例では、下線部を対象にパソコンで処理した。

作業はノート型パソコンにケーブル1本ごとの緊張管理データを用意しておき、直接現場に持って行って緊張を行う。緊張作業は、緊張力に対する伸び量をノート型パソコンに入力していき、最終緊張力を計算させて緊張作業を完了させる。全ケーブルの緊張作業が終了したら、このデータをデスクトップタイプのパソコンで処理し、緊張後のデータ整理をする。写真-2に本緊張のケーブル1本ごとの管理グラフの出力例を示す。

5. 製作指示書の作成

PC 軌道桁は1本ごとに異なった線形形状を持ち、しかもその本数が非常に多く、製作に当たっては『軌道桁製作指示書』を作成して品質管理を行う。製作指示書作成にあたり次のことを確認した。

- ① 路線中心・上下線の軌道中心の最終線形の確認と照査をする。
- ② 通信ケーブルの埋設や添加物等のインサート類の位置の確認をする。
- ③ 軌道桁の形状（線形対応）、適用設計、使用する支承の種類を選定を行い、PC 軌道桁調書を作成する。
- ④ 軌道桁の製作順序は、使用するモールド台車の種別（標準、半端）、ストックヤードにおける仮置き（長さ、曲線）位置、搬出（架設）順序などの諸条件から決めた。

製作指示書は、モールドジャッキの押し量および軌道走行面 設定用 ガイドレールのセット量（桁キャンパー量、走行面の勾配より決める）、支承の位置、縦断勾配による端型枠の倒れなどモールド装置のセットに関するもの（電算およびパソコンで処理）と、PC 鋼線の本数

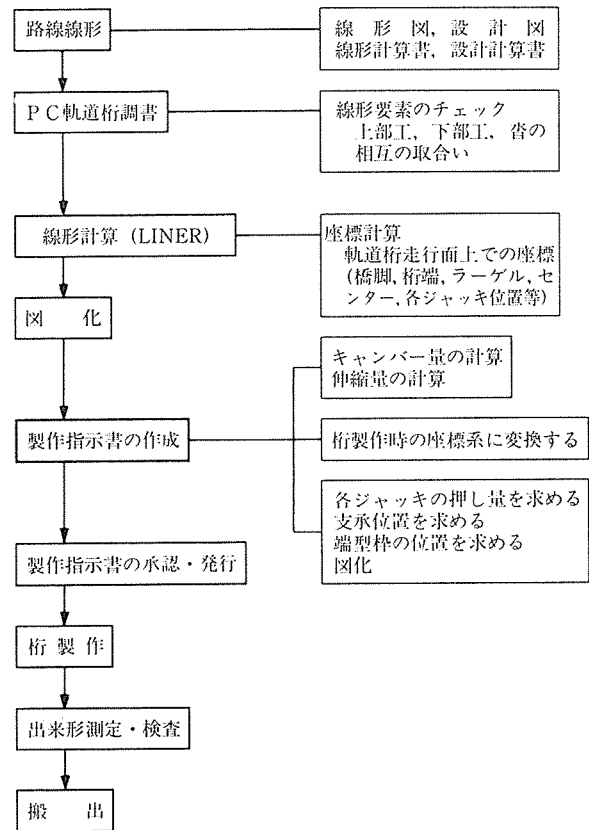


図-6 PC 軌道桁製作指示書に関する作業フロー

および位置・鉄筋の配置・インサート類について、桁1本ごとに作成する。

図-6に『PC 軌道桁製作指示書の作成に関する作業フロー』を示す。

6. 製作

跨座型モノレールの軌道桁は、PC 桁そのものが軌条の役目をもち、その形状は直線・円曲線・緩和曲線・縦曲線・カントなどが重なり合う極めて複雑な線形である。しかも PC 桁そのものが軌道として用いられるため、軌道としての十分な機能を保持するとともに、車両が安全かつ快適に走行できるよう、強度だけでなく従来のコンクリート構造物では考えられない製作精度が要求される。したがって軌道桁の製作方法も、従来の PC 橋梁で用いられている製作方法では精度、経済性などの点で劣る。

それゆえに軌道桁の製作は、高い品質管理と工程管理が必要で、モールド装置と呼ばれる特殊型枠装置を備えた軌道桁製作場で行う。

6.1 PC 軌道桁製作場の設備

PC 軌道桁の製作およびストックヤードは、東京モノレール株式会社昭和島車両基地に、平成元年3月に建設した。そして4月から延伸線の製作に先立って車庫線の線増工事の桁 31 本の製作を行った。その製作工事で諸

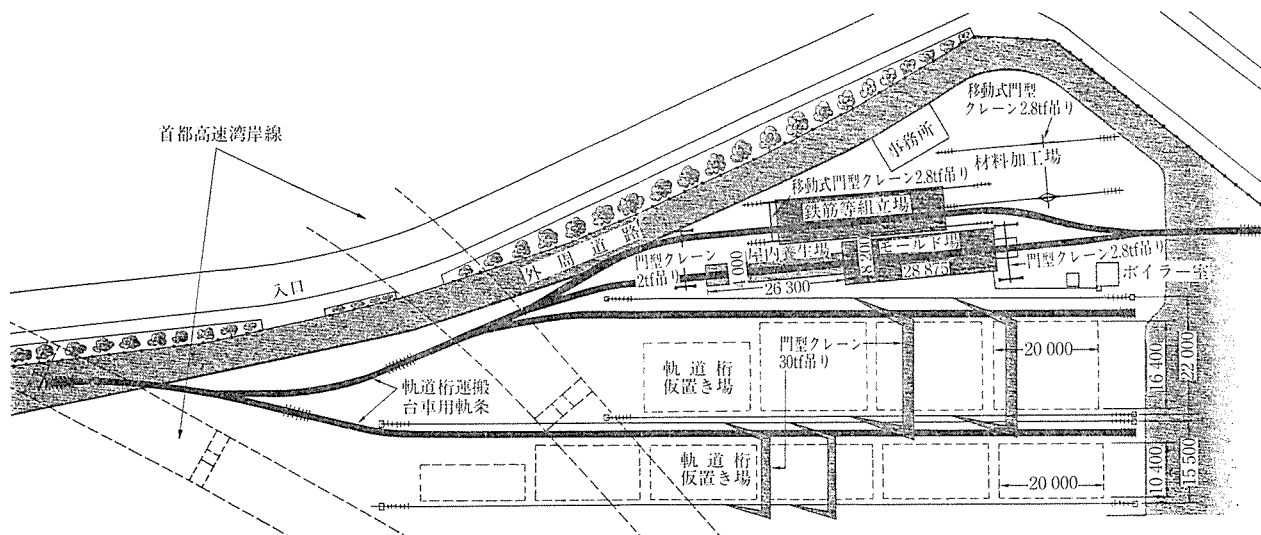


図-7 PC 軌道桁製作場配置図

設備の不具合、工程、品質などの改良を行い延伸線の桁製作に入った。

PC 軌道桁製作場は、鉄筋組立からコンクリート打設、桁仮置きまで行うために必要な設備である。

軌道桁の製作工程が効率よく進行されるよう各設備の配列を図-7 のように定めた。

- ① モールド装置：直線・曲線兼用の汎用型1基とした。モールド装置は、側枠・端型枠・モールドジャッキ・モールドジャッキ固定柱から構成されている(図-8)。

モールドジャッキにはストローク量を示す mm

目盛のゲージがあり、あらかじめ計算された各ジャッキの押し量をゲージにより読み取り操作すれば、両側枠は所定の曲線と傾き(カント)を持った曲面となる。

モールド台車は、モールド装置から分離してあり台車の上面は桁の底板になっている。モールド台車は、標準台車5台、半端台車1台の計6台用意した。

- ② 材料加工：鉄筋加工と中子型枠(木製埋め殺し型枠)の加工は製作場の面積が狭いため、別の場所に集中加工場をつくった。

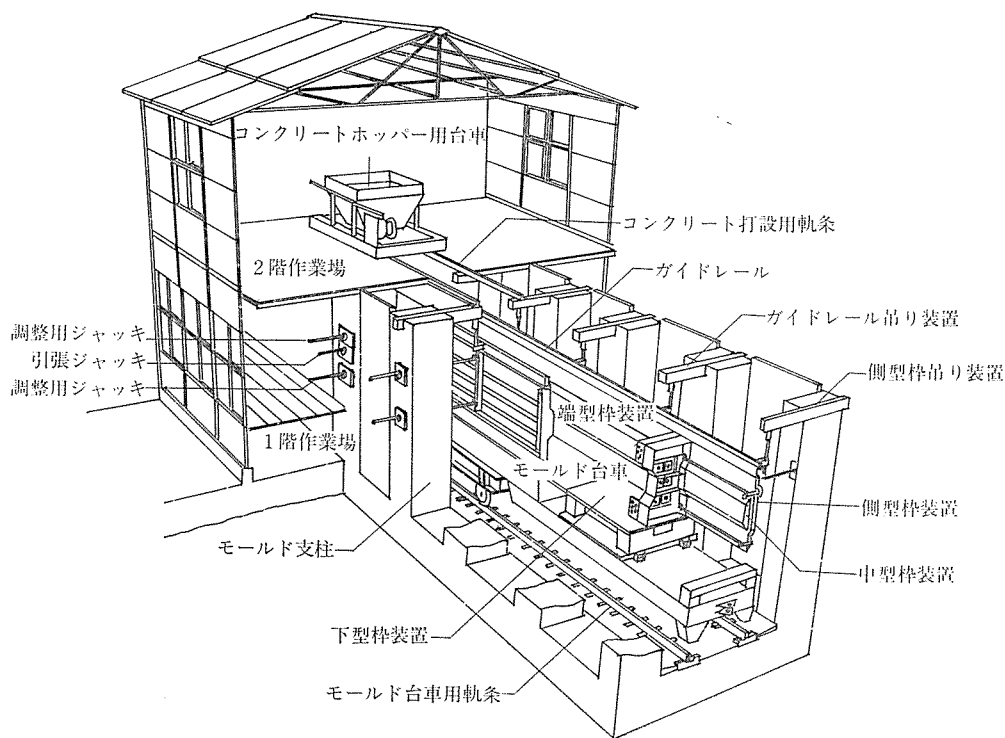


図-8 モールド設備構造図

- ③ コンクリート設備：材料から練混ぜ、運搬、品質管理、用地、経済性などを比較検討して、生コン工場を利用することにした。
- ④ 養生設備：PC 軌道桁は、その表面がそのまま軌道として使用されるため、コンクリートの圧縮強度および緊張による桁のキャンパーの管理が非常に重要である。桁製作は長期間、四季を通じて行われるため、温度変化による品質の不均等を無くし、また養生により早期圧縮強度を確保するために養生設備を設置した。
- 養生はモールド設備を利用してコンクリート打設後翌朝まで行う蒸気養生（自動温度調整付きボイラーによる）、急激な温度変化によるクラックなどの発生を防ぐ目的で行う室内養生、さらに屋外での自然養生の三段階とした。
- ⑤ 桁運搬設備：作業順序に従い機能的に配置された各設備（支承・端型枠据付け場・鉄筋シース・組立場・モールド室・養生室・検測場・緊張場・桁仮置き場）を連結し、モールド台車を安全に運行させるための軌道設備と牽引設備である。牽引設備としては、都市モノレールの実績、および経済性、作業性などより特殊牽引車（アント）を1台設置した。
- ⑥ その他の設備：桁仮置き設備、桁荷揚設備、桁検測設備、電気・水道・排水設備を設置した。

6.2 軌道桁の製作

PC 軌道桁の製作場は、桁製作場と桁仮置き場で構成されており、桁製作場は、材料組立場（鉄筋・PC 鋼線・中子型枠）、端型枠据付け撤去場、モールド場、屋内養生場、屋外養生場に区分されている。

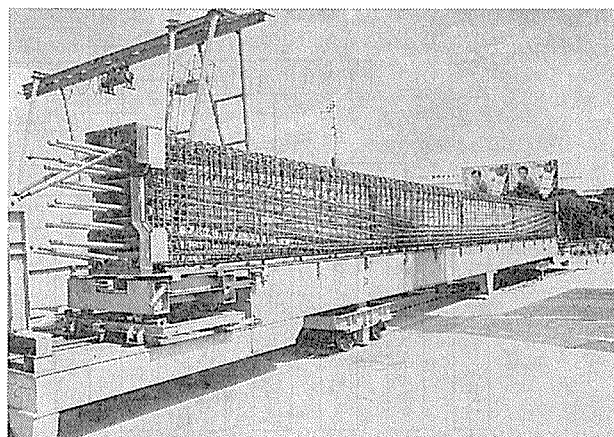
軌道桁の製作は『軌道桁製作指示書』の指示により各作業を確実に行う。

軌道桁の出来形が精度良く製作できるように、モールド装置のゼロ調整を行う。ゼロ調整は 10 本程度に 1 回行い、常にモールド装置を精度良く保つよう管理している。以下に桁製作の手順を述べる。

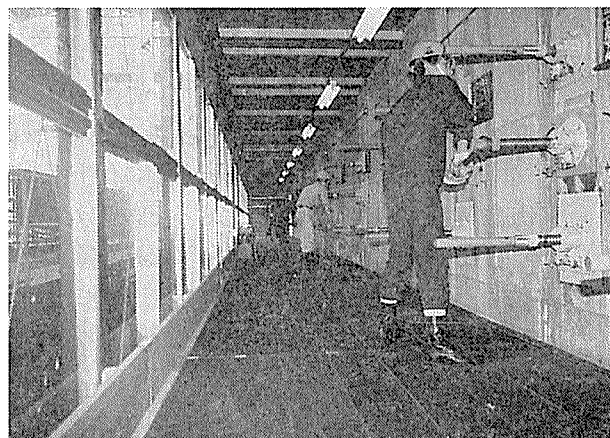
- ① 材料組立場でモールド台車上に、支承（ラゲル）・端型枠の据付け および 鉄筋・シース・中子型枠の組立を行い、シース内に PC 鋼線を挿入する（写真—3）。

端型枠には定着具・伸縮継手受座金物を取り付ける。

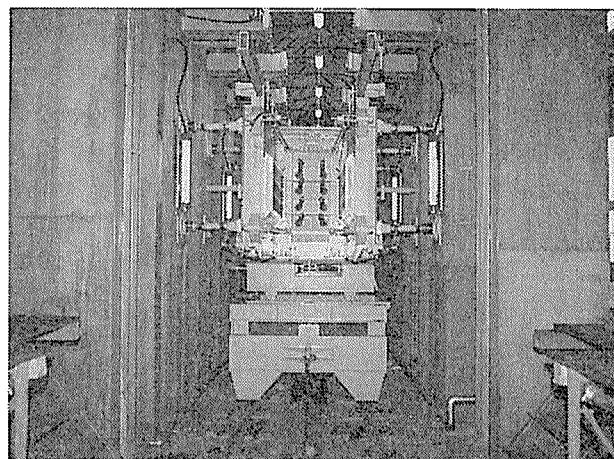
- ② モールド装置の側型枠にインサート類を取り付け、材料組立場において、組立の終わったモールド台車をモールド場内に搬入する。モールド台車を所定の位置に固定後、引張ジャッキ（メインジャッキ）により側型枠の仮セットを行う。製作指示書の



写真—3 鉄筋、シース、中子の組立完了



写真—4 モールドジャッキの操作



写真—5 モールド装置セット完了

ジャッキ押し量の値に従い、調整ジャッキの操作により、鋼製側型枠を所定の形状に調整し、軌道桁の案内・安定面を形成する（写真—4）。

次に製作指示書のガイドレールのセット量の値に従い、桁天端の仕上げ面になる面木をセットする。

- ③ モールド装置のセット完了（写真—5）を確認して、移動式コンクリートホッパーを用い、桁端から順にコンクリートを打設する。桁天端は、荒仕上げ

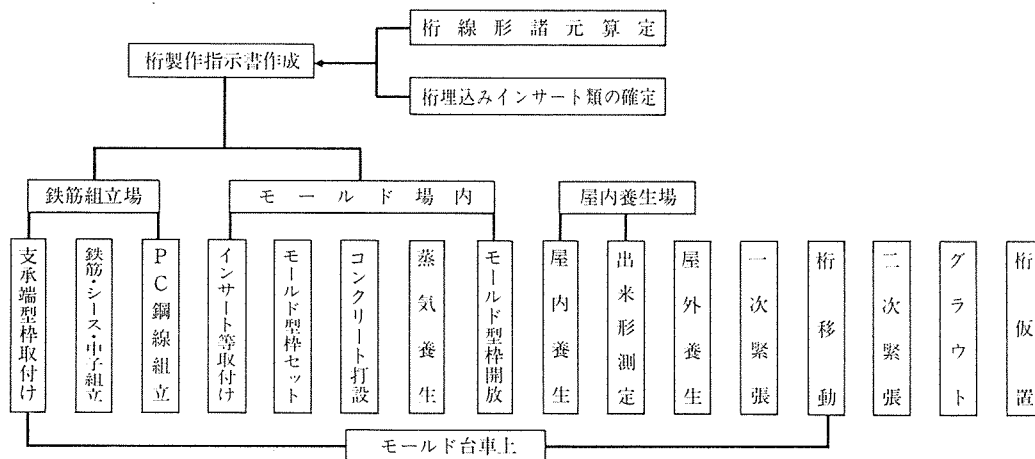


図-9 軌道桁製作工程

をした後、側型枠に取り付けられているガイドレール上をコンクリート表面仕上げ機（特殊フィニッシャー）を走行し、所定の軌道桁走行面に仕上げる。

軌道桁の走行面は、平滑に過ぎるとスリップの原因となりタイヤの摩耗を助長することになるため、適度な粗さが要求される。このためキメ深さを 300 μ を目標に、仕上げは入念に行い最終仕上げは特性ブラシで行っている。

- ④ コンクリートの打設後、前養生時間を含めて 12 時間程度蒸気養生を行った。

蒸気養生した軌道桁は、調整ジャッキおよび引張ジャッキにより側型枠を開放・脱形した後、隣接する屋内養生場へ移動し一昼夜室内養生を行う。

- ⑤ その後、屋外にアント車を使って 1 次緊張場へ移動して、二昼夜自然養生を行った後（材令 3 日）、コンクリート圧縮強度が $\sigma_{ck} = 340 \text{ kgf/cm}^2$ に達したことを確認し、モールド台車にて PC 鋼線の 1 次緊張を行う。

緊張を 2 回に分けて行うのは、たわみの絶対量を抑えることと、モールド台車を早く空けて材料組立場へ回送するためである。

1 次緊張は、桁自重に相当するケーブル本数だけ行い、門型クレーンで軌道桁を所定の仮置き場へ移動する。その後 7 日程度自然養生後（材令 10 日）、残り全ケーブルの緊張（2 次緊張）を行い、グラウト、桁端の後埋めで桁製作を完了し搬出を待つ。

図-9 に軌道桁の製作工程を示す。

6.3 出来形の測定

軌道桁の出来形測定は、品質管理上重要なことで、管理基準（例：桁長 ±10 mm，端部桁幅 ±2 mm）に従って綿密な測定を行い、製作に反映している。

- ① 室内養生室において、桁長・桁高・桁幅・ねじ

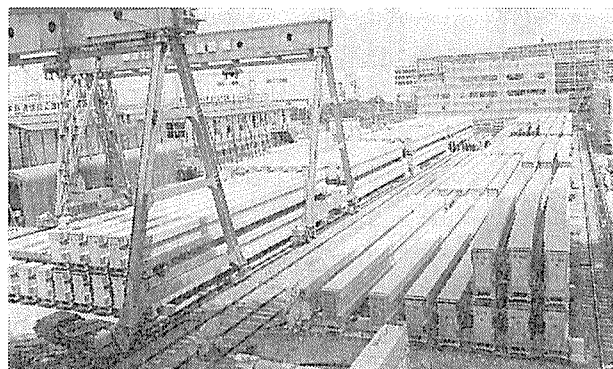


写真-6 ストックヤード全景

れ・走行面と側面の角度・水平，高低狂いなどを測定する。

- ② PC 桁は、クリープ・乾燥収縮などの進行によりキャンバー，支間が時間とともに変化するので，桁仮置き場において定期的な追跡調査を行い，測定値が設計値の許容範囲であるか品質管理を行っている。

7. あとがき

大量のプレキャスト桁を約 14 本/月のペース（年平均に換算して）で、しかも軌道としての精度を損わずに製作するということから、『製作指示書』・『緊張管理』の作成が重要で、パソコンの利用により省力化を図ってみた。軌道桁の製作は総数約 500 本あり、6 月末で 130 本完了（写真-6）し、製作寸法精度においてはすべて基準値を満足し、所期の目標は達成できたが、残りが約 370 本ほどあり今後も製作精度の向上や作業の省力化を図っていきたいと考えている。

軌道桁の設計および製作にあたってご指導，ご援助をいただきました皆様方に謝意を表します。

【1990 年 8 月 1 日受付】