

万博モノレールPC桁の設計・製作および架設について

網 本 克 己* ・ 川 喜 田 効**
山 宮 正 宏*** ・ 福 本 善 一****

1. ま え が き

昭和 45 年 3 月 15 日より東洋ではじめて開催される大阪府千里山の万国博覧会会場設備は、すでに八分ほど工事が進捗し、最後の仕上げが急がれている。

1 日最大約 60 万人と予想される入場者の唯一の場内大量輸送機関として採用された「日本跨座式モノレール」は、昭和 43 年 11 月に着工されたが、すでにほぼ完成し、近く自動運転による総合試運転が行なわれようとしている。

このモノレールは、昭和 39 年世界ではじめての本格的交通機関として羽田一浜松町間に建設された日立一

ルウェーグ式モノレールを、運輸省の指導のもとに「都市交通用の大量輸送機関」として、(株) 日立製作所、東京芝浦電気(株)、日本ロッキードモノレール(株)の跨座式モノレール関係3社により共同開発されたものである。その内容のおもなものは、2軸ボギー台車の開発により従来欠点とされている車両の室内に突出した車輪室をなくし、輸送力を羽田線の1.7倍、すなわち一般の郊外電車なみに増加させたもので、4両編成の列車を6列車運転し、1時間あたり2万5000人の旅客を輸送することができる。

またボギー車の採用により小半径の曲線の通過を可能とし、軌道の走行面の精度の向上とともにゴムタイヤの特性を生かし、非常に快適な乗り心地の改善をはかることができた。旧羽田線モノレールカーと万博モノレールカーを比較すると図-2のとおりである。

路線は図-1に示すごとく、会場内を一周するサークルラインで、延長4.3km、最急勾配55/1000、最小曲線半径60mで、両端を分岐により本線と接続された延長220mの車両検修設備のための側線を有している。

また停車場は7カ所設置され、場内の主要箇所と連絡する装置道路と連絡されている。

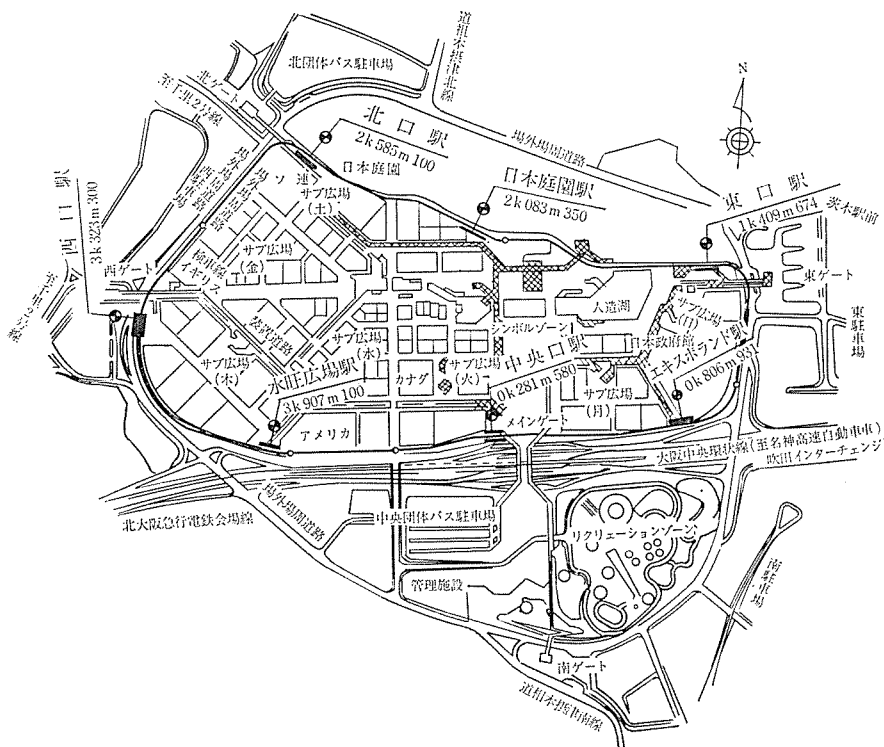
2. 軌道桁の設計

(1) 軌道桁の形状

全延長4.3kmのうち分岐部40mを除きすべてPC桁を採用している。

軌道桁の断面は図-3に示すとおりで、活荷重の軸配置の変更および重心高さの上昇にもかかわらず羽田線とほぼ同じ断面となっている。羽田線との相異点は、ボギー

図-1 万博会場配置平面図



* 株式会社日立製作所交通事業部施設技術部長
** " " 部長代理
*** 株式会社東日交通コンサルタント技術部係長
**** オリエンタルコンクリート株式会社大阪営業所工事部長

写真-1 車内状況

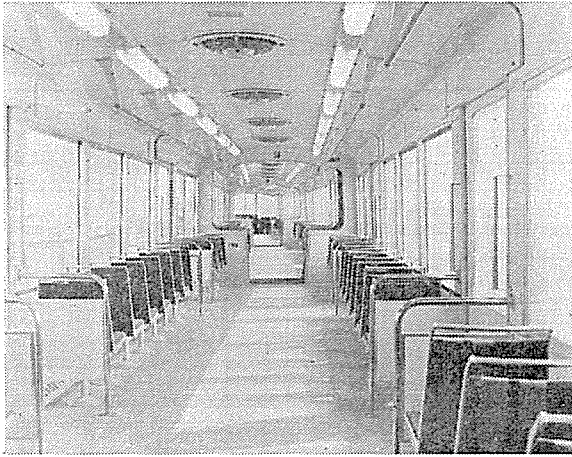
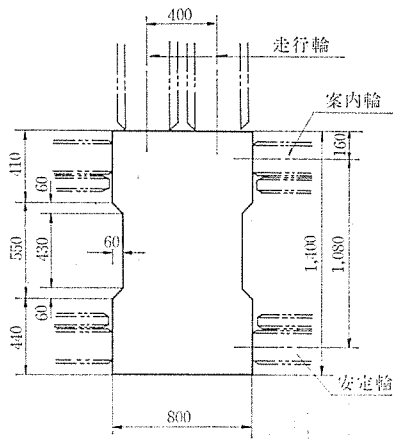


図-3 軌道桁断面図



一車の動揺にともない案内、安定面の幅を大きくしたこと、および側面の凹部の深さを 20 mm 浅くしたことである。この凹部は、改良されたアルミと銅の合成になる剛体架線が波形に配置できる寸法となっている。

標準設計における軌道桁の長さは 21.6 m, 20 m, 15 m の 3 種類とし、曲線との組合せによる標準設計の種類は表-1 に示すとおりである。表-1 に示す以外の曲線部では、その曲線半径が最も近く、その曲線半径より小な

表-1 標準設計の種類

桁 長 (L)	曲線半径 (R)
L=21.6 m	R=∞
L=20.0 m	R=∞
〃	R=300 m
〃	R=200 m
〃	R=120 m
〃	R=100 m
L=15.0 m	R= 80 m

る標準桁を適用した。なお、横断道路などのために生ずる半端桁に対しても同様、応力的に安全側の標準設計を適用し、応力の照査を行なった。

曲線部における軌道桁のカントは、羽田線の経験を基に、車体の傾きが旅客に与える心理的影響を考慮して、

カント不足の最大値を 0.05 とし、設定カントの最大値を $\tan \theta = 0.1$ (θ : 桁の上面が水平となす傾斜角) と設定した。カントは走行面の中心を軸として設定され、緩和曲線の全長にわたって逓減している。緩和曲線はクロソイド曲線を採用し、その緩和曲線の必要最小長は、遠心加速度の変化率を毎秒 0.3 m/sec^2 とし、その曲線を通過する列車の速度に応じて計算され、次式によって表わされる。

$$L = V^3 / 14 R$$

ただし L: 緩和曲線長 (m)

V: 列車の速度 (km/h)

R: 曲線半径 (m)

勾配の変更点には縦曲線をそう入し、その曲線半径はすべて 1000 m とした。

(2) 設計荷重

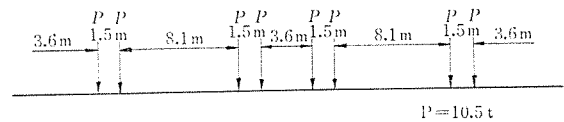
a) 荷重の種類と大きさ

1) 死荷重: (桁自重) 2.5 t/m^3

(給電軌条その他付加荷重) 60 kg/m

2) 活荷重: (列車荷重) 10.5 t/軸 (図-4)

図-4 活荷重 (列車荷重)



3) 衝撃荷重: 活荷重に次式の衝撃係数 i を乗じたものとする。

$$i = 10 / 25 + l \quad \text{ただし } l: \text{支間 (m)}$$

4) 横荷重: 1 軸重の 20% の集中移動荷重が車両の重心位置 (桁走行面上 1.3 m) に水平に、桁縦軸に直角に作用するものとする。

5) 遠心荷重: 下記の式で示される遠心力 (F_c) が各軸に車両重心位置に水平に作用するものとする。

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

ただし V: 列車速度 (km/h)

R: 曲線半径 (m)

P: 1 軸重 (10.5 t)

6) 風荷重:

① 活荷重無荷時; 桁下面より列車最上面までの高さ 5.1 m の投影面積に 80 kg/m^2 , すなわち、各軸 1.5 t が桁走行面上 1.85 m に水平に作用するものとする。

② 活荷重無荷時、桁の鉛直面に 300 kg/m^2 が作用するものとする。

b) 荷重の組合せ

1) 常時荷重時

- ① 死荷重+活荷重+衝撃荷重+遠心荷重
- ② 死荷重+活荷重+衝撃荷重+横荷重（または遠心荷重）+風荷重
- ③ 死荷重+風荷重

2) 破壊荷重時：(死荷重)×1.3+(活荷重)×2.5

(3) 材料の強度

- 1) コンクリート： $\sigma_{ck}=450 \text{ kg/cm}^2$
- 2) PC鋼線 ($\phi 8 \text{ mm}$)： $\sigma_{pu}=155 \text{ kg/mm}^2$
 $\sigma_{fy}=135 \text{ kg/mm}^2$

3) 鉄筋：

- $\phi 13 \text{ mm}$ 以下 SR 24 $\sigma_{sa}=1400 \text{ kg/cm}^2$
- $\phi 16 \text{ mm}$ 以上 SD 30 $\sigma_{sa}=1600 \text{ kg/cm}^2$

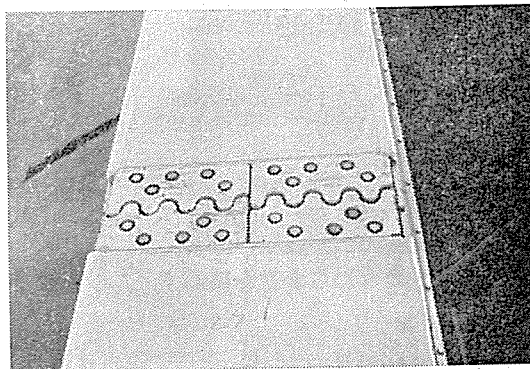
(4) 設計計算

軌道桁の設計計算については、羽田線その他においてすでに記述したのでここでは省略するが、万博モノレールにおいては、運輸省および学識経験者によって作成された「モノレール設計基準」により、パーシャルプレストレスで設計されている。ただし荷重の組合せが常時荷重時の①に対しては、コンクリート下縁に引張りを生じないように考慮した。詳細設計の一例を図-5に示す。

なお、軌道桁の付属品のうち特にフィンガープレート

は、車両の乗心地に対する影響が大きく、軌道桁の継目部における乗心地は、フィンガープレート相互の間隔をできるだけ小さくすることにある。万博モノレールにおいてはこの継目間隔を $15 \pm 10 \sim 5 \text{ mm}$ (羽田線においては $40 \pm 30 \text{ mm}$) とし、フィンガープレート取付座およびフィンガープレートの形状寸法を改良した。なお、急勾配中および急曲線中のフィンガープレートには、すべり

写真-2 走行面のフィンガープレート



止め処理を施し、継目部における車両振動の防止をはかった。

この結果はきわめて良好で、一部試運転により継目部

図-5 軌道桁詳細図

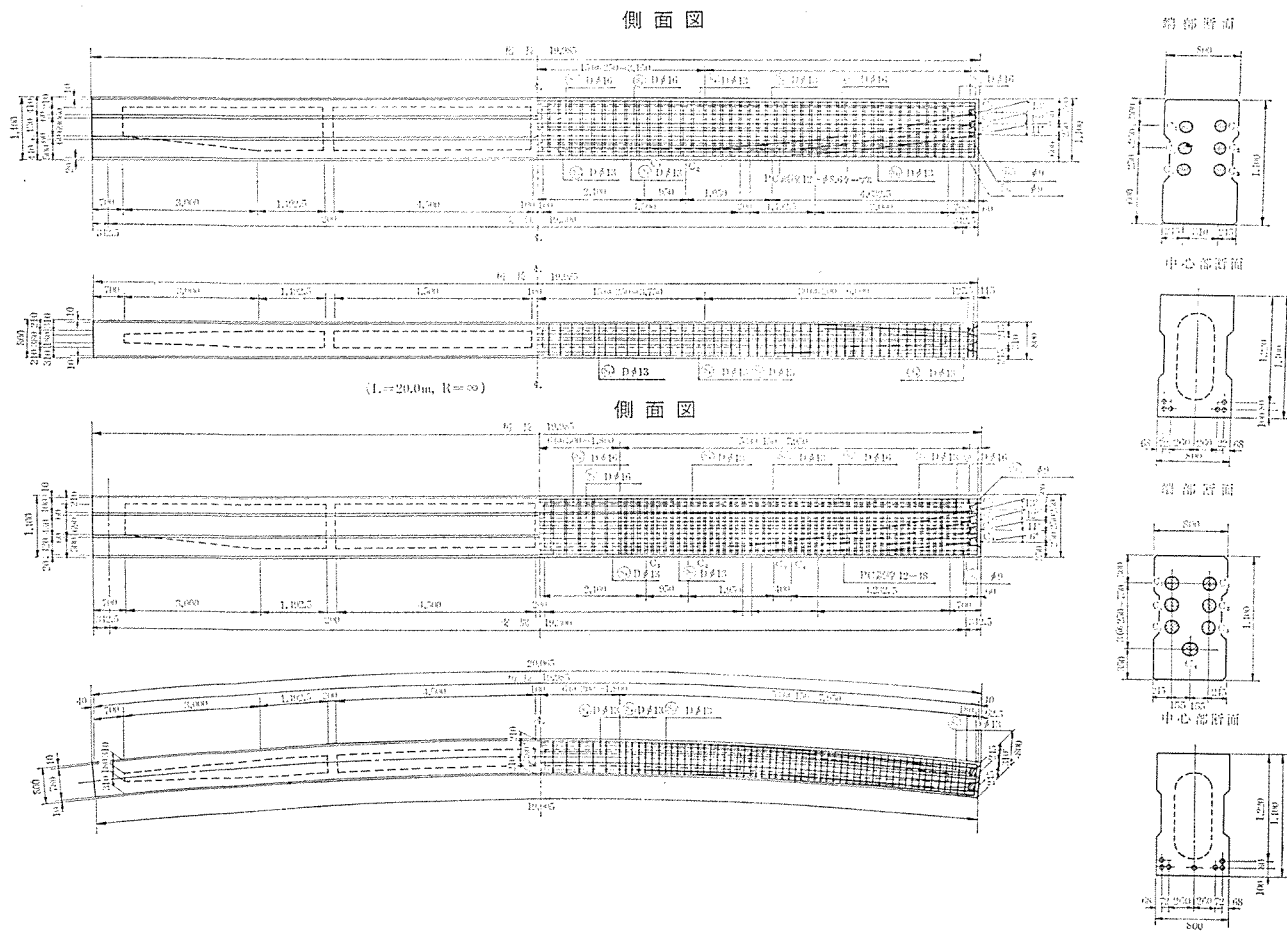
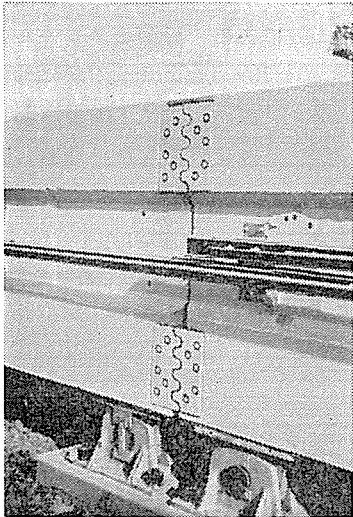


写真-3 側面のフィンガープレート
および支承



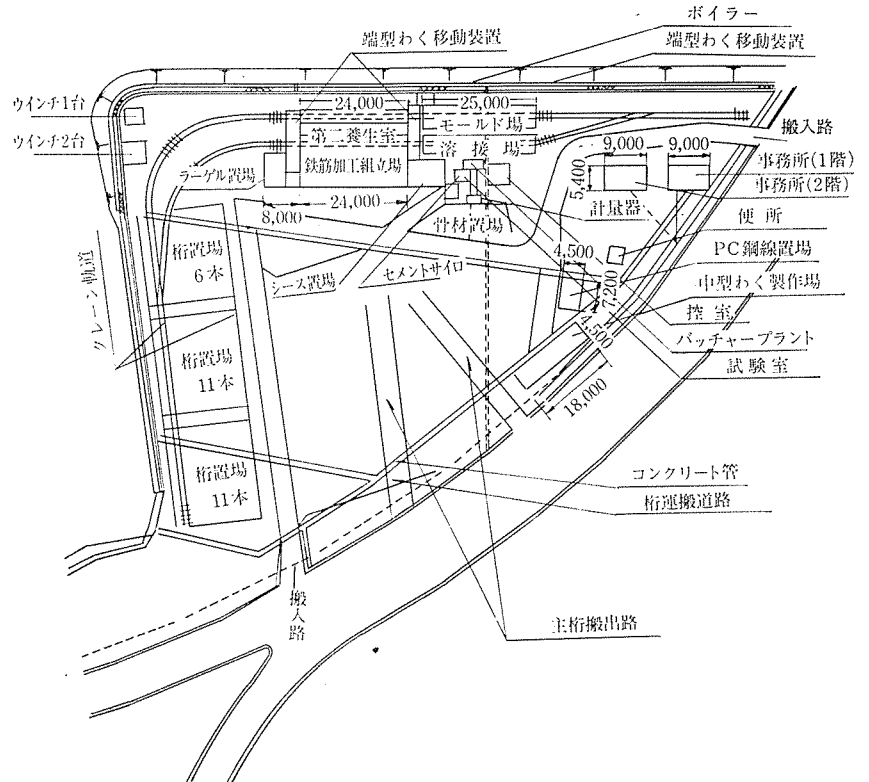
における乗心地のなめらかさを確認することができた。

3. 軌道桁製作設備

車両の快適な乗心地は軌道の寸法精度に左右されるものであり、軌道の精度は桁の寸法精度によって決まる。特にモノレールの桁は、桁自体がレールであり、プレキャストされたコンクリート桁は、その形状寸法を変えることはできない。そこで、この桁の寸法精度を決定づけるモールド装置がモノレールにおいて最も重要なものといえる。

万博モノレールにおいては、特殊モールド装置（特許

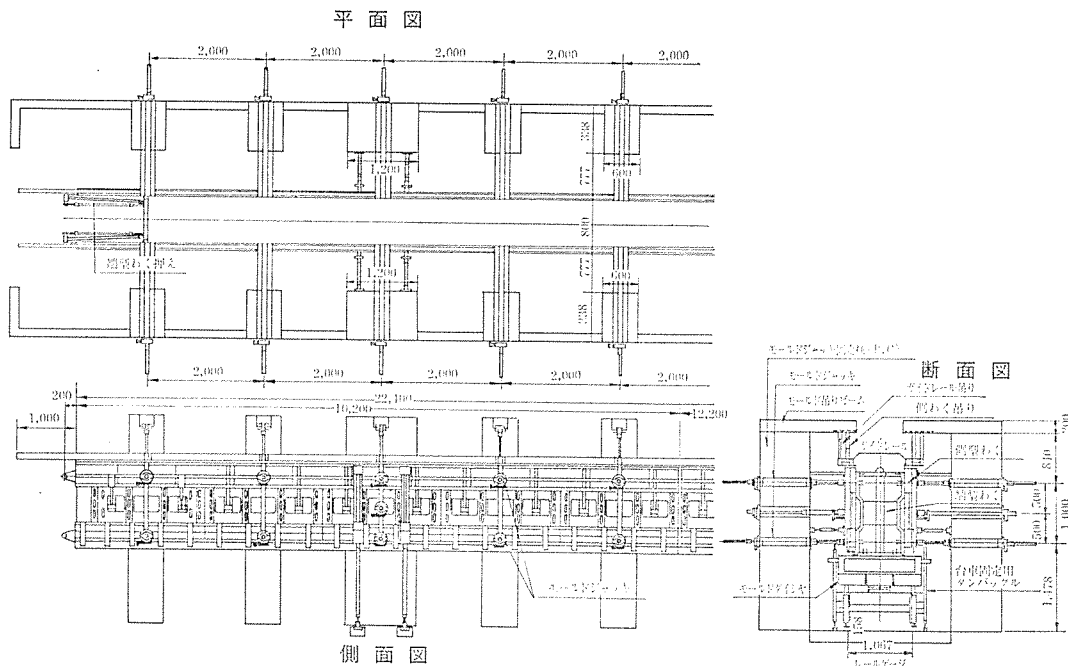
図-6 軌道桁製作場平面図



No. 258094) を羽田線の経験をもとにさらに改良を加え桁表面仕上げ機（特許出願中）を開発し、通り、水準、高低、等いわゆる寸法精度のきわめて高い桁をじん速に製作することができた。

このモールド装置は図-7に示すごとく、2枚の側型わく、2枚の端型わく、44個のモールドジャッキ、2

図-7 モールド装置



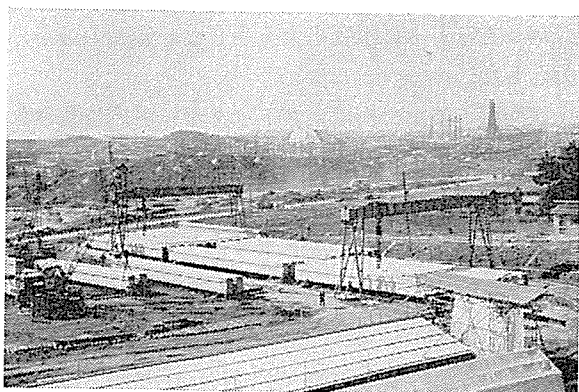
条のガイドレール、22 個の側わくつり、22 個のガイドレールつり、22 本のモールド ジャッキ固定柱とそれらを支える連続基礎、22 個のモールドつりビームおよびモールド台車（通常5台1組）からなっており、直線桁はもちろん、円曲線、緩和曲線、縦曲線を単独に、あるいは、それらが複合するあらゆる種類の曲線を製作できるようになっている。

モールドつりビームよりつり下げられた側型わく（可撓）は、モールド ジャッキ固定柱にすえ付けられたモールドジャッキによりその位置を規制される。このジャッキにはストロークの量を示す mm 目盛りのゲージがあり、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とり操作すれば、桁の両側型わくは所定の曲線および傾き（カント）をもった曲面となる。走行面は側型わく上部に取付けられた桁表面仕上げ機用ガイドレールを 2m 間隔に取付けたタンバクル装置により、それぞれの寸法に調節、所定の曲面を得ることができる。

直線桁はジャッキの押し量は同一でよいが、曲線の少しでも入る桁はその線形計算が相当複雑となり、これらの計算はすべて電子計算機によって計算した。

このモールド装置を含む桁製作場は、万博会場敷地内の東北端の駐車場予定地の約 1 万 m² を利用し、43 年 8 月に着工、同年 10 月に完成した。桁製作設備の配置を 図-6 に示す。

写真-4 桁のストックヤード全景



4. 軌道桁の製作

万博モノレールにおける軌道は、全数量 229 本、その内容を線形によって見ると表-2 に示すごとく、完全なる直線桁は 78 本で、その他はすべて曲線が複合されている。またこれらの桁の曲線半径は、60 m から 1000 m に至る 11 種類となっており、特に緩和曲線については、その全数についておのおの線形が異なる。

これらの桁の製作は、作業員の熟練度およびモールドの性能を考慮して、直線桁より製作し、曲線半径の大きいものから小さいものへの順序で行なった。また継目に

表-2 軌道桁の線形

	直 線	円 曲 線	緩 和 曲 線
直 線	78		
円 曲 線		41	
緩 和 曲 線			67
縦 曲 線	19	11	13
計	97本	52本	80本

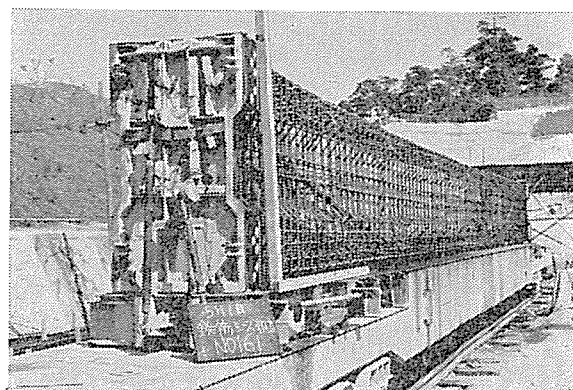
おける遊間は設計上 15 mm と従来のものに比して非常に狭くなっており、測定の誤差等により、桁が架設できなくなることはないように、約 10 連に 1 連程度の調整スパンを設け、支柱完成後の実測値にもとづき、調整スパン桁を製作した。

(1) 桁製作の手順

a) 鉄筋組立場（モールド台車にて作業）

- ① 支承（上）のすえ付け（これにより桁の支持点の位置が決定される）
- ② 鉄筋、中子わくおよびシースの組立て
- ③ 端型わくの組立て

写真-5 モールド台車場に組立て完了した鉄筋



b) モールド場

- ① モールド ジャッキ 0 点調整
- ② 中型わく（凹部）セットおよび電車線取付け用インサート組立
- ③ 側型わくおよび端型わくセット
- ④ 表面仕上げ機用ガイドレールセット
- ⑤ コンクリート打設
- ⑥ 表面仕上げ（表面仕上げ機による）
- ⑦ 蒸気養生

c) 予備養生場

- ① 端型わくの除去および清掃
- ② 検測

d) 緊張場

- ① 1 次緊張（4 日目）
- ② 2 次緊張（10 日目）
- ③ グラウトおよび端面仕上げ

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)	単 位 重 量 (kg/m ³)				使用混和剤
					水 (kg)	セメント	細骨材	粗骨材	
25	7±2	2~3	40	42	180	450	704	998	ポゾリス#5

(2) コンクリート

コンクリートの配合を表-3に示す。桁1連あたりのコンクリートの打設時間は1.5~2時間で、打設完了後1時間以内に走行面の仕上げを行なった。

(3) 養生

桁の走行面仕上げ完了2~3時間後、表面コンクリートのセットの状態を確認のうえ桁上面に水を張り、蒸気を吹き込み、モールド場室温を40~50°Cまで上げ、約6時間同温に保ったのち蒸気を止め翌朝まで放置した。

(4) 品質管理

モールド場において養生の終わった桁は、予備養生場に移され、ここにおいて糸張りによる種々の寸法検査を行

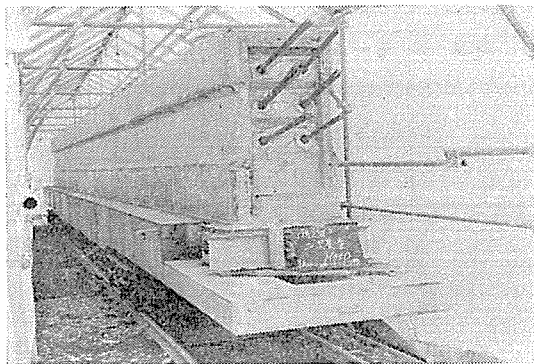
- ③ 局部的凹凸差 2 mm
- ④ 水準(上面および側面) 3/1 000 ラジアン
- ⑤ 直角度(上面と側面) 5/1 000 ラジアン
- ⑥ 桁幅(案内面および安定面) ±4 mm
- ⑦ 桁長 ±5 mm

コンクリートについては、各桁ごとに9個の供試体を採り、破壊試験により、3日、10日、28日における圧縮強度を確認した。圧縮強度試験の結果を表-4に示す。なお、今後のモノレール軌道桁の設計製作において特に必要なコンクリートの弾性係数およびクリープに関する資料は、目下整理中である。

表-4 コンクリートの圧縮強度試験結果

材 令	圧縮強度平均値	標準偏差	変動係数
σ_3	405 kg/cm ²	19.2 kg/cm ²	4.8 %
σ_{10}	510	32.8	6.4
σ_{28}	577	30.7	5.3

写真-6 予備養生場に移された軌道桁

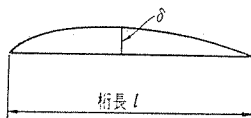


なった。両側面の案内面(上部)および安定面(下部)の通りについては6点、上面のキャンバーについては1mごとに、その他カント、桁幅、直角度については、桁長の1/2点、1/4点および端部の計5点について寸法測定を行なった(写真-6)。

寸法検査の基準は、設計値に対しつぎの公差以内にあることとした。

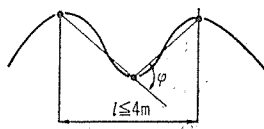
- ① 桁全体の通り、高低

$$\delta = \pm 1/2 500$$



- ② 部分的通り、高低

$$\varphi = \pm 3/1 000 \text{ ラジアン}$$

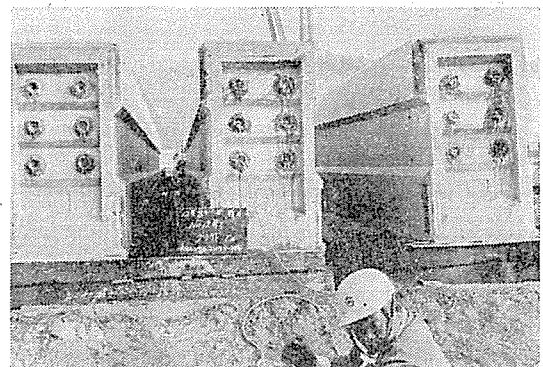


(5) 緊張

寸法検査の終わった桁は、材令4日目に第1次の緊張を行なった。この緊張は、桁自重を支えるに必要なだけのプレストレスで、桁をモールド台車より取りはずしたとき、コンクリートに引張応力を生じない範囲の最小の緊張力とした。

1次緊張の終わった桁は、ストックヤード内に移され、材令10日目において第2次の緊張を行ない、緊張工程を終了、グラウトおよび桁端面の仕上げを行ない、桁製作の全工程を終了するわけである(写真-7)。

写真-7 グラウト完了状況



5. 軌道桁の架設・調整

(1) 架 設

軌道桁の架設は、トラック クレーン4台、トレーラ

2台を1組とし、トラック クレーン4台のうちの2台（つり上げ能力 60t もしくは 100t）を架設に使用し、他の2台（つり上げ能力 35t もしくは 60t）を桁のストック ヤードに配してトレーラへの積込みに使用した。積込、架設とも特殊なつり上げわくを使用し、クレーン2台による相づりとした。

写真-8 軌道桁の架設状況



(2) 調 整

軌道桁単体についての寸法精度はもちろんのことではあるが、これらを組み合わせた、いわゆる軌道としての全体的な精度がよくなければならない。これらが両両相まってはじめて快適な乗心地を得ることができるわけで、モノレールにおける最も重要な作業の一つである。その調整の基準を下記のとおりとした。

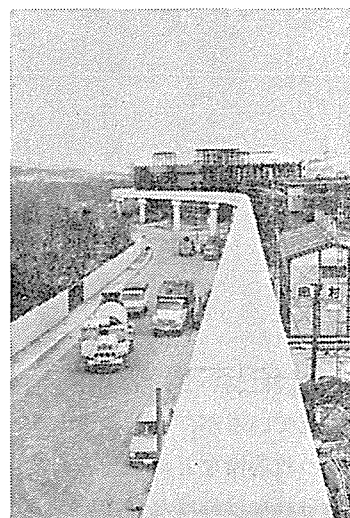
- ① 軌道の全体的通り
 $\delta = \pm l / 2000$ [l: 桁の長さ]
- ② 継目部の部分的通り, 高低
 $\phi = \pm 4 / 1000$ ラジアン
- ③ 継目部の水準 5/1000 ラジアン
- ④ 継目部の段付 2 mm
- ⑤ 遊 間 $15 \pm 10 \sim 5$ mm

上記調整基準にもとづき、下記作業順序で反復調整した。

- ① 遊間の調整
- ② 高低およびカントの調整
- ③ 通りの調整
- ④ 微調整 (①～③の反復調整)

- ⑤ フィンガープレートの取付け
- ⑥ 支承のアンカー ボルトの締付け
- ⑦ 支承のスラスト受け溶接
- ⑧ 支承下のドライパッキング

写真-9 軌道の完成状況



これらの作業のうち ①～⑥ は 44 年 8 月末現在ほぼ完了し一部試運転を開始、⑦、⑧ の作業についても 44 年 10 月中旬には完了の予定である (写真-9)。

6. む す び

モノレールの軌道の良否はなんといってもその主体をなす軌道桁の良否によって決まる。

今回の万博モノレールにおける軌道桁の製作は、いままでの経験をもとに、モールド装置の改良および桁の表面仕上げ機(フィニッシャー)の新機種開発により、従来のものに比して、きわめて精度の高い桁を製作することができた。その結果、軌道の調整作業も比較的容易となり、軌道としての寸法精度を満足させることができた。

軌道桁の設計および製作にあたって種々御指導、御援助をいただきました運輸省および万国博覧会協会の方々に謝意を表する次第であります。

1969.10.20・受付