

東京モノレール㈱	室井 和
同 上	柏木 一夫
勸鉄道総合技術研究所	宮本 征夫
同 上	○山住 克巳
オリエンタル建設㈱	佐久間 実

東京モノレール羽田線（昭和39年 9月開業）において供用後26年間を経過したP C軌道桁について、外観調査、コンクリートおよびP C鋼棒の品質調査並びに静的載荷試験を行って、使用材料および耐荷性能の両面から健全度を調査した結果について報告する。なお、この調査試験は、東京モノレール羽田線の25年総点検の一環として、平成2年12月～平成3年1月に実施したものである。

今回調査した２連のＰＣ軌道桁は、羽田起点 9km 691m 付近（線形が直線で勾配はレベル、海岸からの距離が約３００m の高架区間）の上り線および下り線に26年間供用されていたものであり、給電設備の改修に伴う架換えのため平成 2年10月に撤去されたものである。この桁は、品川埠頭地内に設けられた桁製作ヤードにおいて製作されたもので、型わくは特殊なモールド装置を用いて精密に管理され、蒸気養生が行われている¹⁾。桁の形状寸法を図－１に、構造および使用材料を表－１に示す。

構造形式 PC工法 桁 長 支 間 製作断面 設計断面	ポストテンション単純桁（中空） ディビダーク工法 19.96 m 19.30 m 幅 0.80 m, 高さ 1.40 m 幅 0.79 m, 高さ 1.39 m （車輪走行によるすりへりを考慮）
コンクリート PC鋼棒 鉄 筋	$\sigma_{ck} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ SBPC 80/105, $\phi 27$ SSD 49, SS 41

Technical drawing of a rectangular plate with a central oval hole. The drawing shows top and side views with dimensions in millimeters.

Top View Dimensions:

- Total width: 800
- Distance from left edge to centerline: 35
- Distance from centerline to right edge: 35
- Distance from left edge to inner vertical line: 730
- Distance from inner vertical line to right edge: 730
- Distance from left edge to outer vertical line: 230
- Distance from outer vertical line to right edge: 230
- Distance from left edge to centerline: 970
- Distance from centerline to right edge: 970
- Distance from left edge to bottom edge: 200
- Distance from bottom edge to right edge: 200

Side View Dimensions:

- Total thickness: 1,400
- Distance from top edge to centerline: 55
- Distance from centerline to bottom edge: 365
- Distance from top edge to inner horizontal line: 440
- Distance from inner horizontal line to bottom edge: 440
- Distance from top edge to outer horizontal line: 80
- Distance from outer horizontal line to bottom edge: 80
- Distance from top edge to centerline: 380
- Distance from centerline to bottom edge: 380

Bottom View Dimensions:

- Distance from left edge to centerline: 80
- Distance from centerline to right edge: 80
- Distance from left edge to inner vertical line: 150
- Distance from inner vertical line to right edge: 150
- Distance from left edge to outer vertical line: 340
- Distance from outer vertical line to right edge: 340
- Distance from left edge to centerline: 150
- Distance from centerline to right edge: 150
- Distance from left edge to bottom edge: 80
- Distance from bottom edge to right edge: 80

• P.C. 鋼板

[illegible]

図-1 PC軌道桁の形状寸法

表-2 調査試験の項目および調査方法

調査試験の項目		調査方法	上り	下り
桁の外観調査		目視による調査	○	○
桁の形状寸法(表面のすりへりを含む)		スケールによる測定	○	○
コンクリート	▪ 単位体積重量及び吸水率	JIS A 1110に準拠	○	—
	▪ 圧縮強度試験	JIS A 1108による	○	—
	▪ 静弾性係数	ASTM C 469に準拠	○	—
	▪ 引張強度試験	JIS A 1113による	○	—
	▪ 塩分含有量の分析	日本コンクリート工学協会法	○	—
	▪ 配合推定	セメント協会コンクリート専門委員会法	○	—
	▪ 中性化深さの測定	フェノールフタレイン法	○	○
グラウトの調査		充填状況を目視により調査	—	○
P C 鋼 棒	▪ 配置位置(含鉄筋、シース)	スケールによる測定	—	○
	▪ 発錆状況(同上)	目視による調査	—	○
	▪ 引張試験	JIS Z 2241に準拠	—	○
	▪ 緊張力の測定	PC鋼棒切断時のひずみ測定	—	○
桁の静的載荷試験	▪ PC鋼棒切断前	たわみ、コンクリートのひずみ、ひびわれの調査	—	○
	▪ PC鋼棒切断後		—	○

3. 外観および使用材料の調査試験結果

今回実施した調査試験の項目および調査方法は表-2に示すとおりである。

なお、この2連の桁は、本調査終了後に車両基地留置線に転用することが予定されている。

(1) 桁の外観調査

(a) 桁表面の状態

桁表面の状態は、上下線の桁ともほぼ同様の状態であり、桁上面および両側面の表面は、風雨に曝されているためセメント分が洗い流されて砂や小さな粗骨材が露出し、ざらついている状態であった。桁下面については、風雨の影響が少ないため表面は滑らかであったが、黒色に変色した部分が見られた。供用位置付近は道路に沿っていることから、この変色は排気ガス等の影響等によるものと考えられる。

(b) ひびわれの状態

桁表面で観察された顕著なひびわれの形状パターンを図-2に示す。

- ① 桁側面の軸方向ひびわれ(パターン1): このひびわれは、桁側面の腹部とハッチの境目付近にみられ、長さは上り線桁では1m程度以下と短く、下り線桁では8.5m程度のものもあるが、いずれのひびわれも軸方向に連続しておらず、ほとんどのものは幅が0.1~0.2mm程度以下であった。
- ② 桁上面の直角方向のひびわれ(パターン2): このひびわれは、下り線桁に顕著に見られたもので、上面を横断して連続しているものは少なく、幅は最大0.2mm程度であった。ひびわれは、桁支点付近を含む全長にわたり一様に発生しており、発生間隔はほぼスターラップ間隔と一致していた。

これらのひびわれは、桁製作時

のコンクリート打込み時にコンクリートや粗骨材の沈みが鉄筋により妨げられたことにより生じたものと推定される。

パターン1:

パターン2:

桁側面の軸方向ひびわれ

桁上面の直角方向ひびわれ

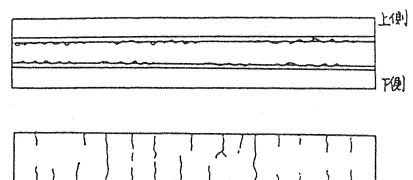


図-2 桁のひびわれパターン

なお、今回調査した桁では、桁

下面には目立ったひびわれは生じておらず、また、その他の変状も見られなかった。

(2) 桁の形状寸法

スチール尺により測定した結果、上下線桁とも、桁高は製作寸法に対して概ね+2~9mm程度の範囲にありやや大きめであったが、桁長および桁幅は、製作寸法に対して-2~+3mm程度の範囲であり、良好な精度で製作されたことが推察される。また、桁上面の走行車輪踏面のすりへりは最大1.5mm程度であった。

設計断面は車輪走行によるすりへりを考慮して桁高および桁幅をそれぞれ製作断面よりも10mm小さくした断面としているが、今回の調査ではすりへり分を差し引いても設計断面を十分に満足していた。

(3) コンクリートの品質調査試験

(a) 採取コアを用いた力学的特性試験

上り線桁の上フランジ部から採取したコア(φ10×20cm)を用いて行った試験の結果を表-3に示す。表に示した値はいずれも3個のコアの平均値を示している。

圧縮強度の平均は549kgf/cm²であり設計基準強度($\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$)を十分に満足していた。製作時に桁と同一条件で養生した管理用円柱供試体559個の試験結果²⁾では、材令28日における圧縮強度の平均が474kgf/cm²、標準偏差が25kgf/cm²であり、供用26年後においても圧縮強度の低下はないといえる。

静弾性係数は 3.38×10^5 kgf/cm²であり、圧縮強度に対してはやや小さいようであるが、ほぼ設計に用いた値(3.50×10^5 kgf/cm²)に近い値であった。

引張強度は37.2kgf/cm²で、この値は圧縮強度の1/15程度であり比較的高強度のコンクリートとしては妥当であると考えられる。

(b) コンクリート中の含有塩分量

上り線桁の上フランジ側面(今回調査した桁では最も海に近い面)から水平方向に採取したコアを用いてコンクリート中の含有塩分量(全塩分量)の分析を行った。分析用の試料は、コアを深さ方向に1cmの厚さに切断したものである。

塩化物イオン重量の深さ方向の分布を図-3に示す。塩化物イオン重量は、最も表面に近い部分で0.25kg/m²であった。表面に近いほど塩分量が多く表面から25mm程度より内部ではほぼ一定の値となっていることから、海からの距離が300m程度の位置にあっても、潮風による飛来塩分の影響を受けているものと考えられる。

なお、はつり調査の結果コンクリート中の鉄筋に錆は認められなかった。

(c) 中性化深さ

桁のはつり面および採取コア側面で測定した中性化深さは、上下線桁ともに平均1mm程度であった。

(4) PC鋼棒の緊張力測定

下フランジ部の側面上側に配置されているPC鋼棒2本を露出させて(片側各1本、支間中央から両側に各5mの範囲)表面にひずみゲージを貼付し(各々5m間に3点)、PC鋼棒を支間中央で切断したときに測定されるひずみの値からPC鋼棒の緊張力を求めた。

表-3 コンクリートの品質試験結果

単位体積重量 (kg/m ³)	絶乾	2312
	表乾	2415
吸水率 (%)		4.44
圧縮強度 (kgf/cm ²)		549
静弾性係数(kgf/cm ²)		3.38×10^5
引張強度 (kgf/cm ²)		37.2

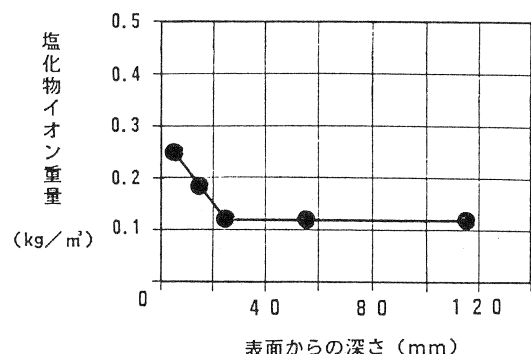


図-3 塩化物イオン重量の深さ方向分布

測定結果を表-4に示す。ひずみの測定値はややばらついたが、これはひずみゲージの貼付け精度(P C鋼棒の軸線方向との微小なずれ)等の影響によるものと考えられることから、表に示したひずみは測定値のうちの最大値を用いたものである。

これによれば、2本のP C鋼棒の緊張力の平均値は設計値の97%程度であり、ほぼ設計を満足していることが確認された。

表-4 P C鋼棒の緊張力測定結果

	ϵ ($\times 10^{-6}$)	E_p (kgf/mm ²)	σ_{pe} (kgf/mm ²)	σ_{pe} (設計) (kgf/mm ²)
山側	2098	2.07×10^4	43.4	46.2
海側	2216		45.9	

ϵ : 測定ひずみ σ_{pe} : P C鋼棒の緊張力(応力度)

E_p : P C鋼棒のヤング係数(試験値、表-5)

(5) P C鋼棒の発錆状況他

緊張力測定のため露出させた部分のP C鋼棒を、1本当たり5mに切断して4本取り出し表面を目視で観察した。また、露出部分の鉄筋やシースの状態、グラウトの状態も併せて観察した。

調査の結果、P C鋼棒の表面にはほぼ全面に軽微な錆が見られたが、局所的な腐食等は認められなかった。

グラウトの注入状況は、曲上げ部付近の一部でP C鋼棒上面がシースと密着して、グラウトで包まれていない部分もみられたが、大部分は良好な注入状態であった。また、スターラップやシースには錆は見られなかった。

このことから、P C鋼棒の錆は施工前に発生していたものと思われ、その後の錆の進行はなかったものと考えられる。

表-5 P C鋼棒の引張試験の結果

項 目	規格値	試験値
直 径 (mm)	26.2±0.5	26.31
降伏点 (N/mm ²)	785 以上	848
引張強さ (N/mm ²)	1030 以上	1047
伸 び (%)	7 %以上	11.0
絞 り (%)	—	27.3
ヤング係数 (N/mm ²)	—	203000

(6) P C鋼棒の引張試験

取り出したP C鋼棒のうちの1本から切断採取した3ヶの試験片について引張試験を行った。

試験の結果を表-5に示す。P C鋼棒の断面や力学的性能は、S B P C 80/105の規格値²⁾を満足しており、供用26年後においても材質の低下はなく健全な状態が保たれていることが確認された。

4. P C軌道桁の静的載荷試験

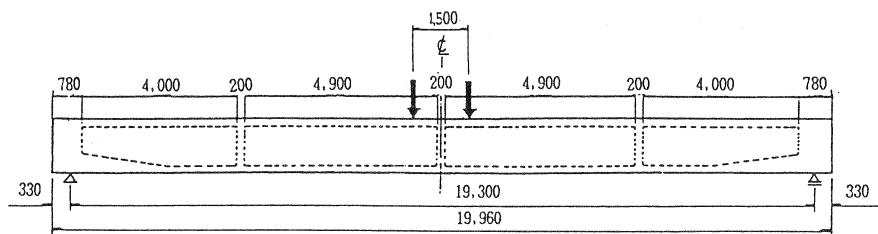
(1) 載荷試験の概要

静的載荷試験は、下り線桁を用いて行った。本桁は試験終了後に車両基地留置線に転用する計画であったことから、載荷荷重の大きさはひびわれ荷重を少し超えるまでの範囲とし、品質試験用のP C鋼棒2本を切断採取する前と後の状態において載荷試験を行った。

試験桁への載荷は、撤去仮置きされていた別のP C軌道桁4連(約42tf/連)の自重を反力として、載荷ばりを介して油圧ジャッキにより支間中央に載荷した(図-4参照)。

載荷試験における測定項目は、次のとおりである。

- ① 載荷荷重: 各載荷ステップ毎(ロードセルによる測定)
- ② 桁のたわみ: 支間中央点、支間1/4点、支点付近の5断面(変位計による測定)
- ③ ひびわれ: 目視による観察



* 支承はラーゲルシューをそのまま用いた。

桁に添架されていた給電レールは取りはずした。

図-4 荷重試験の状態

- ④ コンクリート表面のひずみ：同上の5断面の桁上下縁および断面図心付近（コンクリート用ひずみゲージによる測定）

(2) PC鋼棒切断前の荷重試験

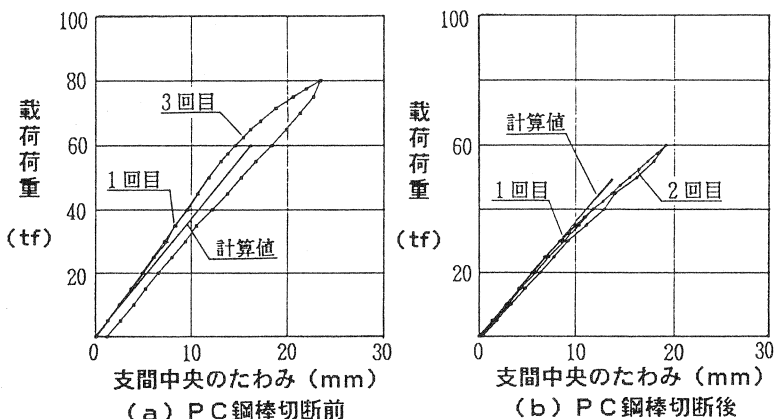
荷重サイクルは、桁下縁の曲げ引張応力度の計算値が許容応力度($20\text{kgf}/\text{cm}^2$)となる荷重50tfまで2回繰返し、3回目にひびわれを発生させて80tfまで荷重した。

支間中央点における荷重-たわみ曲線を図-5(a)に示す。これによれば、荷重荷重55tf程度までは桁は弾性範囲内にあることがわかる。また、同図には、たわみの計算値（製作断面および今回のコア試験によるコンクリートの静弾性係数の値を用いて計算したたわみ）を示した。桁の曲げ剛性は計算値よりも大きく、55tfまでの実測のたわみから求めた桁の平均曲げ剛性(EI)は約 $6.02 \times 10^{12}\text{kgf} \cdot \text{cm}^2$ となり、計算値の約1.1倍程度であった。これは、断面形状が計算より幾分か大きいことや隔壁・端横桁の剛性の影響もあるものと考えられる。

ひびわれは目視では70tf程度まで観察されなかったが、桁下縁のコンクリートのひずみ測定結果から、55~57.5tf付近で発生したものと推定された。このひびわれは支間中央点に1箇所発生し、80tfでは桁下縁から約30cmの位置まで伸長し、幅は0.04mm程度であった。

設計有効プレストレスおよびコア試験によるコンクリートの引張強度を用いて求めたひびわれ荷重は62tf程度であり、試験時のひびわれ発生荷重はこの値より幾分か小さな値であった。なお、設計基準強度 $400\text{kgf}/\text{cm}^2$ から求めたコンクリートの引張強度の特性値³⁾を用いて計算したひびわれ荷重56.5tfとはほぼ等しい値となった。

なお、曲げモーメントが現行の設計活荷重（列車+衝撃、使用車両の変更により設計時とは異なる）作用時と等価になる載荷荷重は36.3tfであり、この時の支間中央の実測たわみは0.86cmとなった。この値と桁自重によるたわみ（計算値）を合わせたたわみ量は支間の1/1280程度で、許容たわみ量を十分に満足するものであった。



* 計算値：全断面有効として試験値の E_c を用いて計算した値

図-5 荷重-たわみ曲線

(3) P C 鋼棒切断後の載荷試験

前記試験を行った同一の桁で、品質試験のため P C 鋼棒を 2 本切断した後の状態で載荷試験を実施した。載荷サイクルは、1 回目はプレストレスの減少を考慮して求めた桁下縁の曲げ引張応力度が許容応力度になる荷重 40tf まで載荷し、2 回目は 60tf までとした。

支間中央点の荷重-たわみ曲線を図-5(b)に示す。これより、35tf 程度まではたわみは荷重に比例して増加し、それを超えるとたわみの増加量が大きくなるが、載荷荷重 40tf 程度までの範囲では、桁部材の曲げ剛性はほぼ計算値(P C 鋼棒 2 本減、はつりによる断面減少考慮、全断面有効)に近い値となっている。

荷重 35tf 程度までの実測たわみ量から求めた桁の平均曲げ剛性は 5.20×10^{12} kgf・cm² 程度となり、P C 鋼棒切断前と比べて 86.2% 程度であった。P C 鋼棒 2 本およびコンクリートのはつり取りによる断面減少のみを考慮した場合の断面二次モーメントは、切断前と比べて約 94.3% 程度であることから、桁下縁から約 30cm の位置までひびわれが発生したことによる桁の曲げ剛性の低下割合は約 8% 程度と考えられる。

曲げモーメントが留置線の設計活荷重(列車+衝撃)作用時と等価になる載荷荷重は 25.6tf であり、この時のたわみは 0.83cm となり、許容たわみ量を十分満足する。

なお、ひびわれの再開は目視では観察できなかったが、ひずみの測定結果から 37.5tf 程度で再開したものと推定された。したがって、留置線の設計活荷重の載荷範囲ではひびわれの再開はないものと考えられる。

5. 調査結果のまとめ

東京モノレール羽田線で 26 年間供用された P C 軌道桁について行った調査試験の結果をまとめると以下に示すとおりである。

(1) ひびわれは、桁側面の腹部とハンチの境付近の軸方向のひびわれおよび桁上面の直角方向のひびわれが顕著であったが、幅はほとんどのものが 0.2 mm 程度以下であった。これらのひびわれは、桁製作時に発生したものと推定される。

(2) 桁の断面寸法は、桁上面の走行車輪踏面のすりへりを差引いても、製作断面を満足している。

(3) 桁から採取したコアの圧縮強度は平均 549kgf/cm² であり、設計基準強度を十分に満足している。

桁製作時の管理用供試体の強度と比較して、圧縮強度は低下していないといえる。

(4) P C 鋼棒の表面には全面に軽微な錆がみられたが、局所的な腐食は認められなかった。シースやスターラップには錆がみられなかったことから、この錆は製作時に発生していたものと考えられる。

(5) 桁から採取した P C 鋼棒の機械的性質は、S B P C 80/105 の規格値を満足している。

(6) 切断時のひずみ測定結果から求めた P C 鋼棒の緊張力は、おおむね設計値に近い値であった。

(7) 静的載荷試験の結果、ひびわれが発生するまでの桁の曲げ剛性は計算値よりも幾分大きめであり、現行の設計活荷重相当を載荷した場合のたわみ量は許容値を十分満足する。

(8) ひびわれ発生荷重は 55~57.5tf 程度で、設計基準強度から求めた引張強度の特性値を用いて計算した値とほぼ等しい値であり、設計の許容引張応力度の値は安全である。

(9) P C 鋼棒を 2 本切断した状態の桁のたわみ性状は計算値に近い値であった。

これらのことから、コンクリートおよび P C 鋼棒の品質や桁の耐荷性能は設計値を十分満足しており、今回調査を行った P C 軌道桁は、健全な状態を保っていることが明らかとなった。

最後に、P C 鋼棒の試験の一部を実施して頂いた住友電気工業(株)の関係者の皆様に感謝致します。

(参考文献)

- 1) 田巻昌雄、石川博：羽田モノレール線 P C 軌道桁の製作工事、コンクリート・ジャーナル Vol.13, No.5, Sept. 1965
- 2) 土木学会：ディビダーク工法設計施工指針(案)、コンクリート・ライブラリー 第15号、昭和41年7月
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書(設計編)、昭和61年制定