

## 26年供用した東京モノレールPC軌道桁の健全度調査

宮本 征夫\*1・山住 克巳\*2・室井 和\*3・柏木 一夫\*4・佐久間 実\*5

### 1. まえがき

昭和39年9月に開業した東京モノレール羽田線の25年総点検の一環として、26年間供用したPC軌道桁について、外観調査、コンクリートおよびPC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。

### 2. 調査したPC軌道桁の概要

羽田線の軌道方式は跨座式モノレールであり、モノレール車両を1本の軌道桁で直接に支持する構造となっている。

今回調査した2連のPC軌道桁（以下、桁という）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。

桁の構造形式はポストテンション方式の単純PC桁（中空）で、今回調査した桁ではディビダーク工法が用いられている。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。

この桁は、参考文献<sup>1)</sup>に基づいて設計されており、品

表-1 PC軌道桁の構造および使用材料

構造形式	ポストテンション単純桁（中空）
PC工法	ディビダーク工法
桁長	19.96 m
支間	19.30 m
製作断面	幅0.80 m、高さ1.40 m
設計断面	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	$\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$
PC鋼棒	SBPC 80/105、 $\phi 27$
鉄筋	SSD 49、SS 41

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、型枠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<sup>2)</sup>。

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。

### 3. 調査項目および調査方法

調査試験は、室内試験を除きすべて昭和島車両基地に隣接した桁製作場（工事中の延伸線用）内にて実施した。調査試験の項目および調査方法を表-2に示す。

### 4. 外観および使用材料等の調査

#### 4.1 桁の外観調査

今回調査した桁のうち、上り線桁の外観を写真-1に示す。

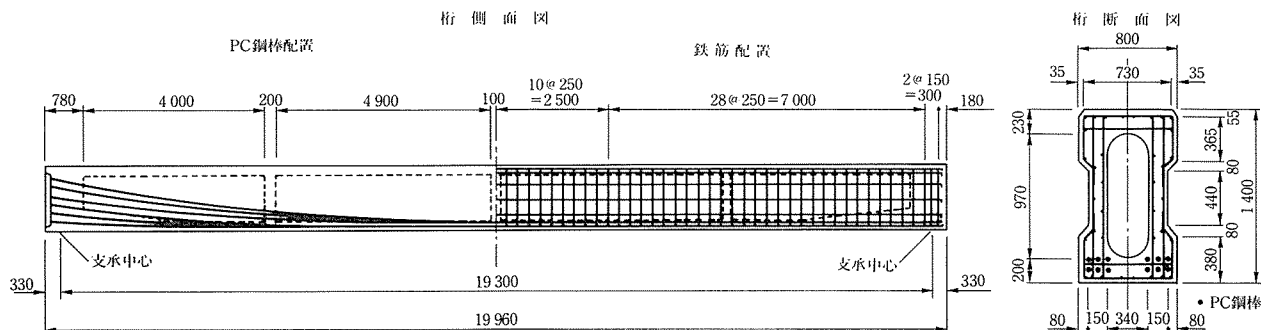


図-1 PC軌道桁の一般図

\*1 Yukio MIYAMOTO : (財) 鉄道総合技術研究所技術基準事業推進部

\*2 Katumi YAMAZUMI : (財) 鉄道総合技術研究所コンクリート構造担当研究室

\*3 Yawara MURUI : 東京モノレール (株) 工務部

\*4 Kazuo KASHIWAGI : 東京モノレール (株) 工務部

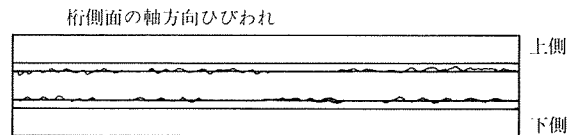
\*5 Minoru SAKUMA : オリエンタル建設 (株) 東京支店 工務部

◇報告◇

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	-	○
PC 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		たわみ, コンクリートのひずみ, ひびわれの調査	-	○

パターン 1:



パターン 2:

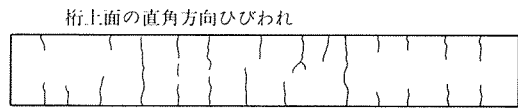


図-2 桁のひびわれパターン

上下線桁とも桁側面の腹部とハンチの境目付近に軸方向のひびわれ(パターン1)がみられ、長さは上り線桁では1 m 程度以下と短く、下り線桁では8.5 m 程度のものであるが、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0.1~0.2 mm 程度以下であった。

下り線桁では、このほか桁上面に直角方向のひびわれ(パターン2)が顕著に見られたが、上面を横断して連続しているものは少なく、幅は最大0.2 mm 程度であった。このひびわれは、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。

なお、桁下面には目立ったひびわれは生じていない。

また、今回調査した桁では、その他の変状は見られなかった。

#### 4.2 桁の形状寸法

桁長、支間および桁断面の形状寸法、桁上面の走行車輪踏面のすりへり深さをスチール尺により測定した。

測定結果によれば、上下線桁とも、桁高は製作寸法に対して概ね+2~9 mm 程度の範囲に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~+3 mm 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1.5 mm 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10 mm 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。

#### 4.3 コンクリートの品質調査試験

##### (1) 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(φ10×20 cm)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549 kgf/cm<sup>2</sup> であり、設計基準強

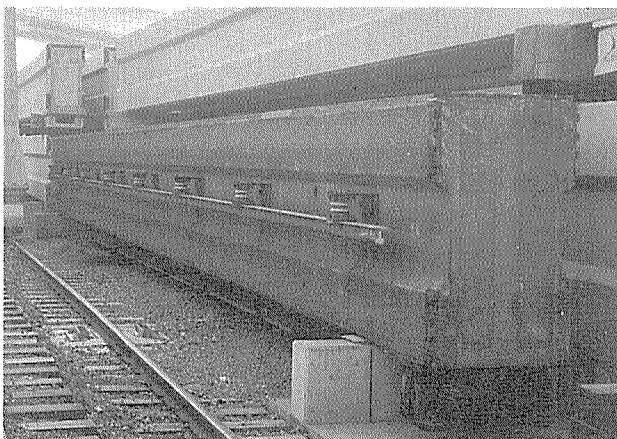


写真-1 桁の外観(上り線桁)

端部の錆はフィンガージョイントの錆。  
側面に添架してあるのは給電レール。  
奥に見えるのは新しく製作された軌道桁。

#### (1) 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。

#### (2) 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。

表-3 採取コアによるコンクリートの品質調査試験結果

単位体積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	絶 乾	2 312
	表 乾	2 415
吸 水 率 (%)		4.44
圧 縮 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		549
静弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )		3.38×10 <sup>5</sup>
引 張 強 度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		37.2

度 ( $\sigma_{ck}=400$  kgf/cm<sup>2</sup>) を十分に満足していた。製作時に桁と同一条件で養生を行った管理用円柱供試体 559 個の試験結果<sup>2)</sup>によれば、材令 28 日における圧縮強度の平均が 474 kgf/cm<sup>2</sup>、標準偏差が 25 kgf/cm<sup>2</sup> 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  $3.38 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup> 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 ( $3.50 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>) に近い値であった。

引張強度は 37.2 kgf/cm<sup>2</sup> 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ほぼ妥当であると考えられる。

### (2) 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 1 cm の厚さに切断したものである。

コンクリート中の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 0.25 kg/m<sup>3</sup> であった。表面に近いほど塩分量が多く表面から 25 mm 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 300 m 程度の位置にあっても、潮風による飛来塩分の影響をう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。

### (3) 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

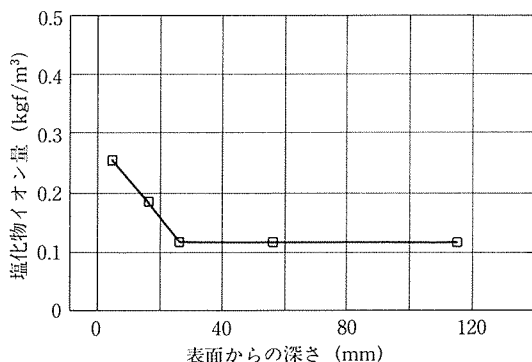


図-3 塩化物イオンの深さ方向分布

さは、上下線桁ともに平均 1 mm 程度であった。

### 4.4 PC 鋼棒の試験

#### (1) PC 鋼棒の緊張力測定

後述する最初の載荷試験を終了してから、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 5 m の範囲）表面にひずみゲージを貼付し（各々 5 m 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。

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（PC 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 PC 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 PC 鋼棒の緊張力測定結果

	$\varepsilon$ ( $\times 10^{-6}$ )	$E_p$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{pc}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{pc}$ (設計) (kgf/mm <sup>2</sup> )
山 側	2 098	2.07×10 <sup>4</sup>	43.4	46.2
海 側	2 216		45.9	

$\varepsilon$ : 測定ひずみ  $\sigma_{pc}$ : PC 鋼棒の緊張力（応力度）  
 $E_p$ : PC 鋼棒のヤング係数（試験値、表-5）

#### (2) 発錆状況ほか

緊張力測定のため露出させた部分の PC 鋼棒を、1 本当たり 5 m 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。

写真-2 に示すように、PC 鋼棒の表面にはほぼ全面に軽微な錆が見られたが、局部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 PC 鋼



写真-2 はつり出した PC 鋼棒の状態

中央の光沢のある部分は、ひずみゲージ貼付のためサンダーで磨いたもの。

◇報告◇

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、PC 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。

(3) 引張試験

取り出した PC 鋼棒のうちの 1 本から切断採取した 3 個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。PC 鋼棒の断面や力学的性能は、SBPC 80/105 の規格値<sup>3)</sup>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。

表-5 PC 鋼材の引張試験結果

項目	規格値 <sup>3)</sup>	試験値
直径 (mm)	26.2±0.5	26.31
降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	785 以上	848
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	1 030 以上	1 047
伸び (%)	7 % 以上	11.0
絞り (%)	-	27.3
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	-	203 000

(4) 疲労試験

桁から採取した PC 鋼棒のうちの 3 本の試験片について疲労試験を行った。

試験は、縦型 250 t 油圧サーボ疲労試験機を用い、加振波形を正弦波、加振サイクルを 4 Hz として行った。試験片 (5 m/本) は、両端に非対称ねじを転造し、PC 鋼棒に曲げが生じないように試験機の固定装置を球面球座としてナットにより固定した。

試験荷重の大きさは、下限荷重を PC 鋼棒ねじ部の応力度が 60 kgf/mm<sup>2</sup> (0.75  $\sigma_{py}$ 、ただし、母材部の応力度は 58 kgf/mm<sup>2</sup>) となるように一定とし、上限荷重は 3 本の試験片についてそれぞれ応力振幅が 18 kgf/mm<sup>2</sup>, 12 kgf/mm<sup>2</sup>, 10 kgf/mm<sup>2</sup> となるように設定した。

疲労試験の結果を表-6 に示す。応力振幅の比較的大きい試験片 No. 1 および No. 2 は、それぞれ表に示し

表-6 PC 鋼棒の疲労試験結果

試験片番号	応力度		応力振幅 $\sigma_{pr}$	繰返し載荷回数	破断部位
	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$			
1	60.0	78.0	18.0	187 200 回	ねじ部
2		72.0	12.0	1 136 000 回	ねじ部
3		70.0	10.0	5 000 000 回	破断無し

注) 応力度、応力振幅はねじ部の値 (単位: kgf/mm<sup>2</sup>)

た繰返し回数においてねじ部で破断したが、応力振幅を 10 kgf/mm<sup>2</sup> とした試験片 No. 3 は 500 万回繰返し載荷したが破断に至らなかった。

東京モノレール羽田線の直線部の桁における支間中央断面の PC 鋼棒の応力振幅は、現行の設計活荷重 (衝撃を含む) を用いて計算すると、上段で 2.8 kgf/mm<sup>2</sup>、下段で 3.2 kgf/mm<sup>2</sup> となる。試験体数が 3 本であり、十分とはいえないが、現状の PC 鋼棒の表面状態が保たれ、今後も腐食が進行しないと考えれば、PC 鋼棒の疲労に対しては特に問題を生じることはないものと考えられる。

5. PC 軌道桁の静的載荷試験

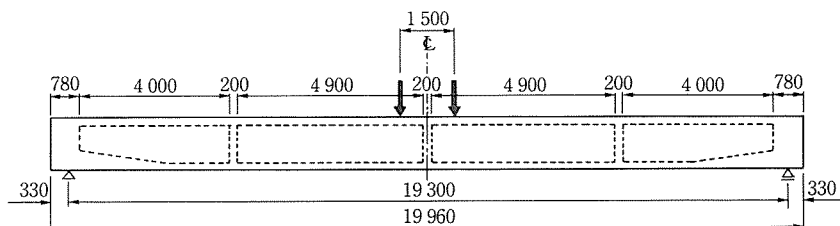
5.1 載荷試験の概要

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 PC 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 PC 軌道桁 4 連 (約 42 tf/連) の自重を反力として、載荷梁を介して油圧ジャッキにより支間中央 (載荷点間隔 1.5 m) に載荷した (図-4)。

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: 各載荷ステップごと (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, 支店付近の 5 断面 (変位計による測定)
- ③ 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



\* 支承はラージェ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 載荷試験の状態

ンクリート用ひずみゲージによる測定)

④ ひびわれ：目視による観察

### 5.2 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 ( $20 \text{ kgf/cm}^2$ ) となる荷重 50 tf まで 2 回繰り返し、3 回目にひびわれを発生させて 80 tf 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 55 tf 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、55 tf 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  $6.02 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$  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 70 tf 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、55~57.5 tf 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、80 tf では桁下縁から約 30 cm の位置まで伸長し、幅は 0.04 mm 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 62 tf 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小さな値であった。なお、設計基準強度  $400 \text{ kgf/cm}^2$  から求めたコンクリートの引張強度の特性値<sup>4)</sup>を用いて計算したひびわれ荷重 56.5 tf とはほぼ等しい値であった。

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

等価になる荷重荷重時の支間中央の実測たわみは 0.86 cm 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 1/1 280 程度で、許容たわみ量を十分に満足するものであった。

### 5.3 PC 鋼棒切断後の荷重試験

前記試験を行った同一の桁で、品質試験のため PC 鋼棒を 2 本切断した後の状態で荷重試験を実施した。荷重サイクルは、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 40 tf まで荷重し、2 回目は 60 tf 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、35 tf 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、荷重荷重 40 tf 程度までの範囲では、桁部材の曲げ剛性はほぼ計算値 (PC 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。

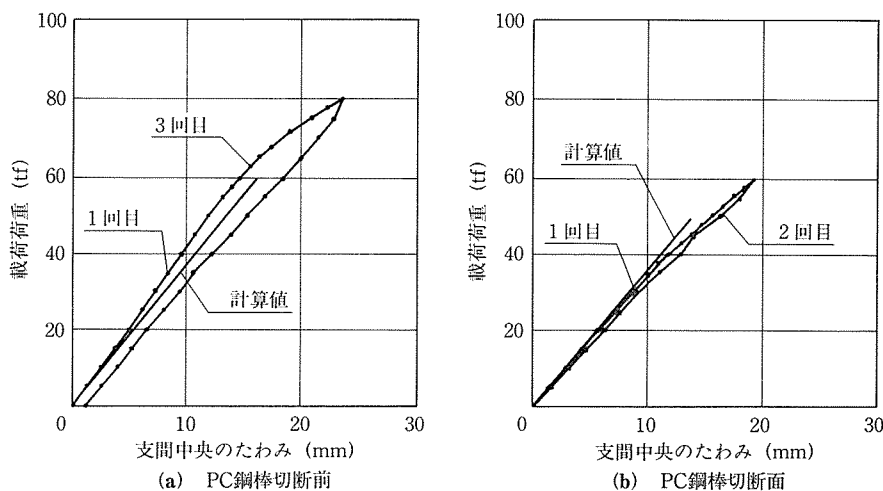
35 tf 程度までの実測たわみ量は、PC 鋼棒切断前と比べて 1.1~1.2 倍程度であった。PC 鋼棒切断前の断面二次モーメントは、PC 鋼棒 2 本およびコンクリートのはつり取りによる断面減少のみを考慮した場合の断面二次モーメントと比べて約 1.06 程度であることから、ひびわれが発生したことによるたわみの増加量は、1.04~1.14 倍程度と考えられる。

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荷重荷重時のたわみは 0.83 cm 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観察できなかったが、ひずみの測定結果から 37.5 tf 程度で再開したものと推定された。

## 6. 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 PC 軌道



\*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

◇報告◇

桁の健全度調査を行った結果、コンクリートおよびPC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、健全な状態を保っていることが明らかとなった。

載荷試験を行った桁は、PC鋼棒を2本切断した状態においても留置線所要の耐荷性能を満足しており、補強を施すことなく留置線へ転用する予定である。

なお、本調査試験結果の一部は、土木学会第46回年次学術講演会（平成3年9月）およびプレストレストコンクリート技術協会第2回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム（平成3年11月）にて発表したものである。

最後に、PC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) 日立製作所：日立アルヴェーグ土木構造物設計指針その3（軌道桁設計要領）1962. 11
- 2) 田巻昌雄，石川博：羽田モノレール線PC軌道桁の製作工事，コンクリート・ジャーナル Vol. 3, No. 5, Sept. 1965
- 3) 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
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），昭和61年制定

【1991年9月24日受付】

---

◀新刊図書案内▶

第 2 回  
プレストレストコンクリートの  
発展に関するシンポジウム  
論 文 集

（平成3年11月）

本書は、平成3年11月に奈良で開催された標記シンポジウムの講演論文集である。

頒布価格：6 000 円（送料 450 円）

体 裁：B 5 判，箱入り

内 容：特別講演 2 編（10 頁），講演論文集 72 編（350 頁）