

[100] 都市モノレール小倉線PC軌道桁合成載荷実験

正会員 佐伯 彰 一 (建設省土木研究所)
 正会員 松下 博 通 (九州大学)
 木 藪 幸 一 (北九州市)
 正会員 ○久野 公 徳 (モノレール共同企業体)

1. まえがき

近年、大都市における自動車交通量の増大により、交通渋滞が、大きな原因となっている現状である。その解決策として、一方では、地下鉄および高速道路の建設が進められている。他方では、建設工期の短縮、土地占有面積が少なく経済的で、従来の鉄道と比較して車輪にゴムタイヤを使用する事から騒音の大幅な改善が可能で、近代的都市交通機関として必要条件を十分に満たしているため、最近、モノレールが脚光をあびて来ている。この様な情勢のなかで、北九州市では、本格的な公共都市交通輸送機関として、跨座形式の都市モノレール小倉線の建設を現在進めている。モノレール用プレストレストコンクリート軌道桁(以下、PC軌道桁)は、これまでの一般橋梁用PC桁と非常に異なっており、車輛通過時に鉛直、水平および振り荷重が作用し、二方向の曲げモーメントと振りモーメントを同時に受ける。それ故に、PC軌道桁は、これらの荷重作用により複雑な挙動を示すと考えられる。そこで、本実験では、PC軌道桁の製作に先立って、これら複合荷重を受ける場合のPC軌道桁および支承の安全性について検討するものである。

2. 設計概要

PC軌道桁は、自重、活荷重等の垂直荷重、カントによる横荷重、風荷重、遠心力荷重のうち設計で考えられる最も不利な状態の荷重の組合せを考慮し、設計荷重に対する絶対最大曲げモーメント(表-1)を設計曲げモーメントとしている。PC軌道桁の構造形式は、フレシネ工法ポストテンションングPC単純桁であり、設計条件は、次の通りである。

2-1. 設計条件

橋長: 200.00m、桁長: $L = 19.97\text{m}$ 、支間: $\ell = 19.3\text{m}$ 、衝撃係数: $i = 20 / (50 + \ell)$

活荷重: 軸重 $P_L = 11.0\text{t}$ (但し、活荷重は、図-1の連行移動荷重である。)

また、破壊安全度は、以下の荷重組合せで検討を行なっている。

- (i) 1.3 (死荷重) + 2.5 (活荷重 + 衝撃 + 横荷重 + 遠心力)
- (ii) 1.7 (死荷重 + 活荷重 + 衝撃 + 横荷重 + 遠心力)
- (iii) 1.3 (死荷重 + 活荷重 + 地震荷重)
- (iv) 1.3 (死荷重 + 活荷重 + 風荷重)

次に、支承(図-2)は、固定沓をピン、可動沓をローラ構造と

し、一般橋梁の支承と比較して、大きな横荷重が作用し、支承自身にも転倒モーメントが働き、アンカーボルトに大きな引張力が生ずる事からアンカーボルトが上揚力

に抵抗できると共に、せん断は、ベースプレートに溶接されたせん断ダボで抵抗できる様に設計上考慮されている。なお、沓に作用する荷重は図-3に示す通りである。

3. 実験概要

PC軌道桁は、モノレールの軌道レールであって、非常に精度を要するものである。その形状も軌条路線に従って、直線、円曲線、緩和曲線があり、その上、縦断曲線まで組合わさっている。この様に、いろいろな線形が

表-1 設計荷重による最大曲げモーメント

鉛直方向の曲げモーメント	水平方向荷重による曲げモーメント	振りモーメント	
桁自重	100.722 $\frac{\text{t}\cdot\text{m}}$	横荷重 $\pm 13.269 \frac{\text{t}\cdot\text{m}}$	$\pm 5.796 \text{t}\cdot\text{m}$
添加物	6.058 $\frac{\text{t}\cdot\text{m}}$	風荷重 $\pm 20.952 \frac{\text{t}\cdot\text{m}}$	
活荷重	162.525 $\frac{\text{t}\cdot\text{m}}$	風荷重 (載荷時) $\pm 27.315 \frac{\text{t}\cdot\text{m}}$	
衝撃	46.970 $\frac{\text{t}\cdot\text{m}}$		

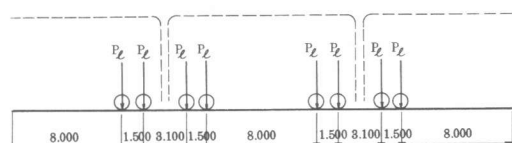


図-1 連行移動荷重

複合しているPC軌道桁では、鉛直、水平および振り荷重が組合わさって作用するのが一般的である。よって、本実験では、まず、単独荷重（鉛直、水平および振り荷重）のみによる載荷実験を行ないPC軌道桁の安全性の確認を行なった。しかし、このような在来の単独荷重のみによる載荷実験では、PC軌道桁の実際に生ずる挙動を的確に再現する事はできない。そこで、できる限り、実際の荷重作用状態に近づけるために、鉛直、水平および振りの各荷重を同時載荷する合成荷重載荷試験を行ない、PC軌道桁の各断面の応力度、変位量および沓のアンカーボルトのひずみを測定し、これらの安全性について検討を加えた。なお、各載荷方法は、実際のモノレールの荷重配置とはやや異なるが図-4に示す方法で行なった。

4. 実験方法

4-1. 実験供試体

載荷試験桁は、図-5に示す様に、実際の中空断面PC軌道桁を用い、12φ8mmのフレッシュケーブル9本を使用してプレストレスングを行なった。プレストレスングに先立って、試験引きを行ない、摩擦係数および見掛けのヤング係数を推定し、導入直後のケーブル1本当りの応力度が $\sigma_{pt} = 90 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ となる様に最終緊張力を決定した。なお、PC軌道桁のコンクリートの配合および材料強度を表-2、表-3にそれぞれ示す。

表-3 材料強度

コンクリート	圧縮強度	設計基準強度	σ_{ck}	450 MPa
	導入時強度	σ_{ci}	385 MPa	
許容曲げ圧縮強度	部材引張線	σ_{ct}	185 MPa	
	部材圧縮線	σ_{cc}	140 MPa	
許容曲げ引張強度	直後	σ_{ct}'	-165 MPa	
	設計荷重時 (風なし)	σ_{ct}''	0 MPa	
コンクリートの平均せん断応力度の最大値 (終局時)	せん断力のみ	τ_{ma}	565 MPa	
	振りモーメント	τ_{ta}	565 MPa	
許容せん断応力度	せん断力及び振りモーメント	τ_{Ia+ma}	645 MPa	
	せん断力及び振りモーメント	τ_a	60 MPa	
許容斜引張応力度 (設計荷重時)	せん断力及び振りモーメント	σ_{Ia}	-110 MPa	
	せん断力及び振りモーメント	σ_{Ia}	-140 MPa	
許容支圧応力度		σ_c	185 MPa	
		σ_c	185 MPa	
PC鋼線12φ	引張強度	σ_{pu}	150 MPa	
	降伏点強度	σ_{py}	130 MPa	
有効引張応力度		σ_{pe}	76.82 MPa	
		σ_{pe}	76.82 MPa	
鉄筋	許容応力度	設計荷重時	σ_{pea}	90 MPa
	許容引張応力度 SD-80	設計荷重時	σ_{pia}	1600 MPa
	終局荷重時	σ_{sa}	3000 MPa	

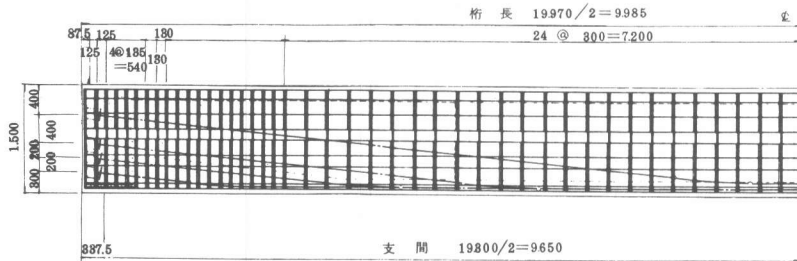


図-5 PC軌道桁配筋図(側面図)

4-2. 載荷荷重および載荷方法

本合成載荷試験方法では、三つの単独荷重（鉛直荷重、水平荷重および振り荷重）を同時に載荷する事が困難である。それ故に、PC軌道桁に作用する合成荷重とは多少異なるが、図-6に示す様な方法で、荷重を載荷した。すなわち、PC軌道桁中央断面の上下フランジ部に穴をあけ、ゲビンデ鋼棒（φ32mm）を挿入し、軌道桁

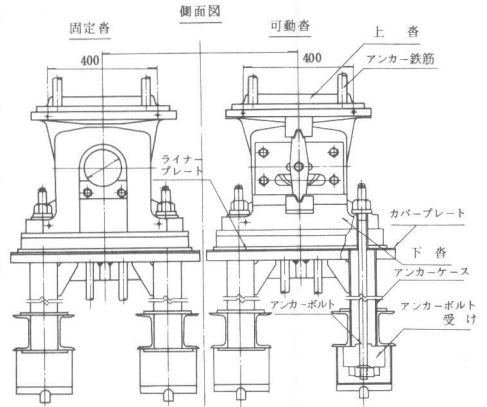
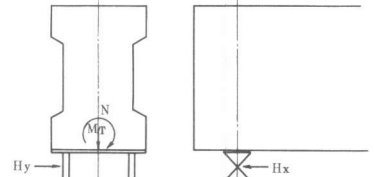


図-2 支承構造図



N: 鉛直荷重 Hy: 横方向水平力
Hx: 進行方向水平力 My: 転倒モーメント

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材最大寸	スラブ厚	空気量	W/C	S/a	単位量				Kg/m ³
					W	C	S	G	
20	75±15	3±1	39.0	38.0	170	435	646	1127	1088

但し、細骨材：福岡県芦屋産 粗骨材：小倉野野産

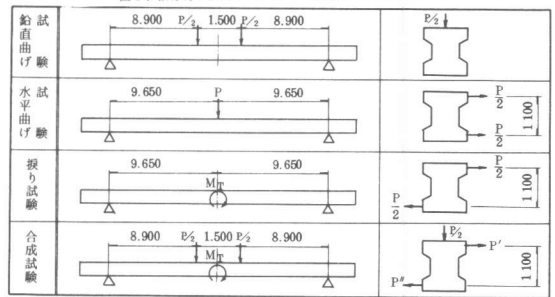
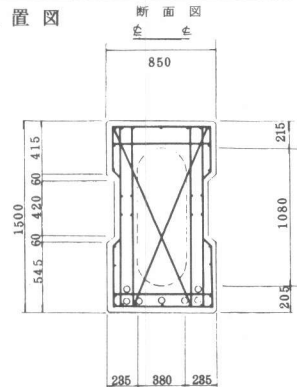


図-4 荷重配置図



側面の反力台を介してセンターホールジャッキにてグビンデ鋼棒を方向反対に緊張し、PC軌道桁に所定の水平荷重と振りモーメントを与え、そのうえ鉛直荷重を所定の荷重段階で載荷する方法を採用した。なお、所定の水平荷重および振りモーメントは、図-7に示す様に、方向反対の水平荷重 P' および P'' の差が設計荷重の水平力 H と振りモーメント M となる様に水平荷重 P' 、 P'' を与えた。なお、鉛直荷重 P 、水平荷重 P' および P'' の各荷重の載荷段階は図-8に示す通りである。

5. 実験結果と考察

5-1. 鉛直曲げ試験

まず、設計該当荷重($P=48.4\text{ t}$)まで載荷し、除荷した。その間、ひび割れ等の変化は認められなかった。次に、ひび割れ荷重まで載荷を行なった結果、 $P_c=116.0\text{ t}$ で、PC軌道桁の桁下縁の支間中央付近にひび割れが認められた。その後、除荷し、ひび割れ再開が目視できるまで載荷したところ $P_c=99.8\text{ t}$ となり、PC軌道桁には、設計計算上考慮しているプレストレス量がおおよそ導入されている事も確認できた。また、ひび割れ時で、コンクリートの引張強度 $\sigma_{ct}=37.5\text{ Kg/cm}^2$ (設計時でのコンクリート圧縮強度 $\sigma_{ck}=450\text{ Kg/cm}^2$ に対して)を用いた時のひび割れ荷重は $P=51.3\text{ t}$ である。それ故に、ひび割れ荷重の安全度は $F=116.0/51.3=2.3$ 倍となる。

5-2. 水平方向曲げ試験

鉛直曲げ試験と同様に、設計該当荷重($P_h=5.7\text{ t}$)で載荷したが、なんと異常は認められなかった。また、ひび割れ荷重の実測値は、 $P_{ch}=19.0\text{ t}$ であり、設計値と比較して安全度は $F=19.0/11.7=1.6$ 倍であった。

5-3. 振り試験

第1回載荷では、 1.0 t 刻みに $P=5.3\text{ t}$ (設計荷重時、振りモーメントにして $M_T=5.796\text{ t}\cdot\text{m}$)まで載荷した。第2回載荷においては、設計荷重時の3倍($P=15.6\text{ t}$ 、 $M_T=17.4\text{ t}\cdot\text{m}$)まで載荷したが、PC軌道桁には異常は認められず、十分安全であった。

5-4. 合成載荷試験

第1回載荷では、鉛直荷重 $P=48.4\text{ t}$ 、水平方向荷重 $H=P'-P''=8.1-2.4=5.7\text{ t}$ および振りモーメント $M_T=P'h_1+P''h_2=8.1\times 0.55+2.4\times 0.55=5.8\text{ t}\cdot\text{m}$ の設計該当荷重まで載荷し、除荷した。この間、PC軌道桁は、ひび割れ等の変化は認められなかった。この時のPC軌道桁の各断面での応力度および変位量は図-9、10に示す通りである。第2回載荷では、これら設計荷重を一定の割合で増加させ、設計荷重の2.25倍(鉛直荷重 $P=108.9\text{ t}$ 、水平方向荷重 $H=12.8\text{ t}$ および振りモーメント $M_T=13.1\text{ t}\cdot\text{m}$)まで載荷した時、PC軌道桁には、二方向の曲げクラックと思われるひび割れが観察できた。また、この時のPC軌道桁の各断面での応力度および変位量を図-11、12に示す。次に、これら合成荷重が作用した時の支承の固定側および可動側アンカーボルトの各載荷段階におけるひずみを測定し、その結果を図-13に示した。

(1) PC軌道桁のひび割れ

合成載荷試験時のひび割れ発生荷重は、鉛直荷重 $P=108.9\text{ t}$ 、水平方向荷重 $H=12.8\text{ t}$ および振りモーメント $M_T=13.1\text{ t}\cdot\text{m}$ であった。これらの値に対して、設計条件で与えられているコンクリートの圧縮強度 $\sigma_{ck}=450\text{ Kg/cm}^2$ 引張強度 $\sigma_{ct}=37.5\text{ Kg/cm}^2$ を用いた時のそれぞれの荷重計算値は、 $P=72.6\text{ t}$ 、 $H=8.6\text{ t}$ 、 $M_T=8.7\text{ t}\cdot\text{m}$ となる。それ故に、載荷試験結果より、計算値と比較して、ひび割れ発生荷重安全度は $F=108.9/72.6=1.5$ となる。

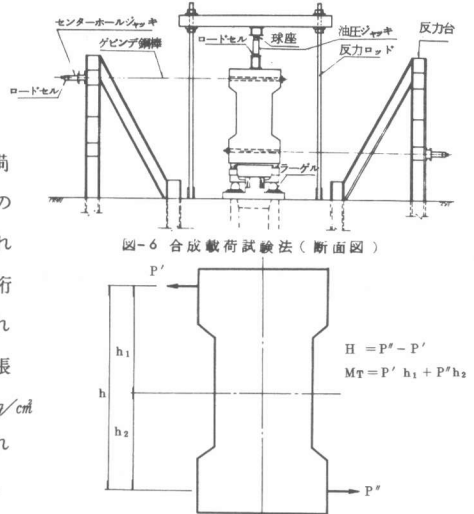


図-7 水平荷重および振りモーメント

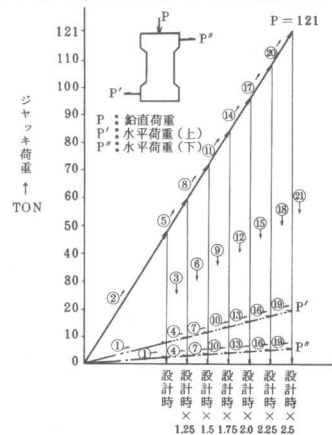


図-8 合成載荷試験による載荷方法

(2) PC 軌道桁の応力度および変位量

設計計算では、設計荷重時の外力による曲げ応力度は桁軸方向 (y 軸)、桁軸直角方向 (x 軸) に分解して計算されており、縁応力度は、y 軸と x 軸方向の曲げ応力度の各々を重畳している。一方、振り荷重によって発生する振りモーメントによるせん断応力度は、これらの曲げ応力度と分離して別途計算している。また、PC 軌道桁に作用する振りモーメントは、鉛直荷重による曲げモーメントと比較して極めて小さい事から、曲げ支配の挙動を示すと考えられる。図-9 および図-10 より判断して、実測値は設計値と比較して小さく安全側となっている。また、ひび割れ発生荷重時における応力度の実測値は、計算値と比較的によく一致している。変位量については、桁中央位置に取りつけた左右の変位計の大きなずれは、水平荷重による横移動と振りによる振り変位によるものと考えられるが、多分に測定誤差による影響が大きいものと思われる。

(3) 支承部アンカーボルトのひずみ

支承部アンカーボルトは、PC 軌道桁を実際の脚柱にセットする場合と同様に、アンカーボルト 1 本当たり 7500 Kg cm (引張ひずみで $\epsilon_t = 453 \times 10^{-6}$) のトルクで締付けた。図-13 に示されている様に、固定側、可動側とも実測値に変動があり、しかも各荷重段階で初期引張ひずみは減少している。これは、水平方向荷重およびそれによる振りモーメントは小さく、鉛直荷重による支点変位、支承各部の変位によるものと考えられる。

6. あとがき

この実験結果を要約すると次の様になる。

①同時に、鉛直、水平および振り荷重が作用した(合成荷重)場合のPC 軌道桁に生ずる設計荷重時の応力度は、設計計算で行なっている様に y 軸と x 軸方向の曲げ応力度を重ね合わせても十分安全であると考えられる。

②合成荷重時のひび割れ荷重のクラックは、二方向の曲げ支配と思われるひび割れが観察できた事からも設計では、鉛直および水平荷重の二方向曲げで考えておいても十分であると考えられる。

③支承部アンカーボルトについては、支点変位および支承各部の変位が考えられるが、本実験結果からして、各荷重段階での初期引張ひずみの変動は比較的小さく問題はなく、アンカーボルトの安全性が確認された。最後に、本実験の実施にあたり、御協力

いただいた都市モノレール小倉線PC 軌道桁製作架設工事作業所の小嶺啓蔵、伊沢亮、両氏および共同企業体の方々と北九州市の関係者に対し深く感謝いたします。

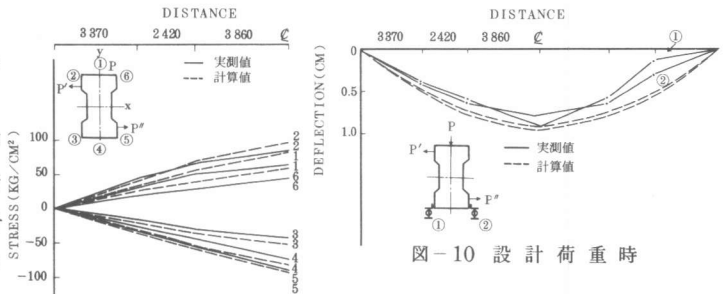


図-9 設計荷重時

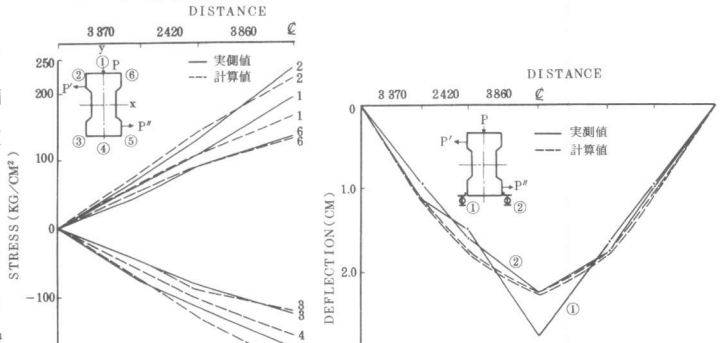


図-10 設計荷重時



図-11 ひび割れ発生荷重時

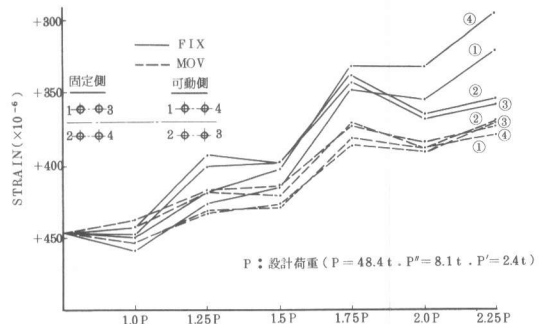


図-13 支承部アンカーボルト荷重ひずみ図