

## 都市モノレール小倉線構造物応力試験報告

清 水 孝 一\*  
 熊 谷 泰 彦\*\*  
 森 康 晴\*\*

### 1. ま え が き

北九州市では、都市輸送機関として全国に先がけて都市モノレール小倉線（北九州高速鉄道株式会社）が、昭和60年1月9日から営業を開始した。これは、インフラ補助という新しい制度に基づき導入された、建設延長8.7 km にわたる大型の跨座式モノレールである。建設工事は図-1に示す終点側のまぐりおか企救丘停留場～志井停留場間において、昭和58年10月から始まり、逐次北方の都心部に向かって施工された。本路線は全線にわたって道路中央を走る形式で、線形等の立地条件も厳しいものがあつた<sup>1)</sup>。

本報告の応力測定は、構造物の安全性の確認を目的として、営業に先立ち満員、定員および曲線部の偏心を想定した荷重を実車両に載荷し、昭和59年6月と10月に分けて行ったものである。ここでは主に試験の方法と測定結果について述べ、安全性確認試験の概要を報告する。

### 2. 路線概要

本線は、北九州市小倉北区魚町の小倉停留場を起点とし、小倉南区大字石田の企救丘停留場を終点とする路線で、道路交通混雑の緩和とともに都心と住居地域を結ぶ“市民の足”となる都市交通機関である。

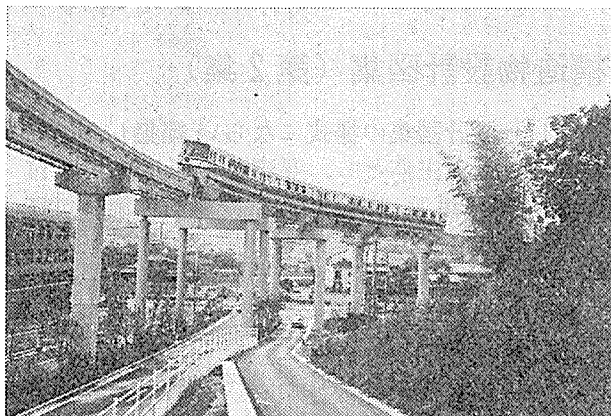


写真-1 載荷試験状況

\* 北九州市都市計画局

\*\* パシフィックコンサルタンツ(株)

路線の経路は、国鉄小倉駅前の西鉄北九州線と平和通りの交差点を起点として徳力嵐山口停留場付近まで約7.1 km 南進する。この間、小倉～片野停留場間約2.3 km は既設道路に、それより南は新設道路（一部国道322号の拡幅）の中央に位置する。徳力嵐山口停留場付近で路線は東進し、国鉄日田彦山線の手前の企救丘停留場に至る。

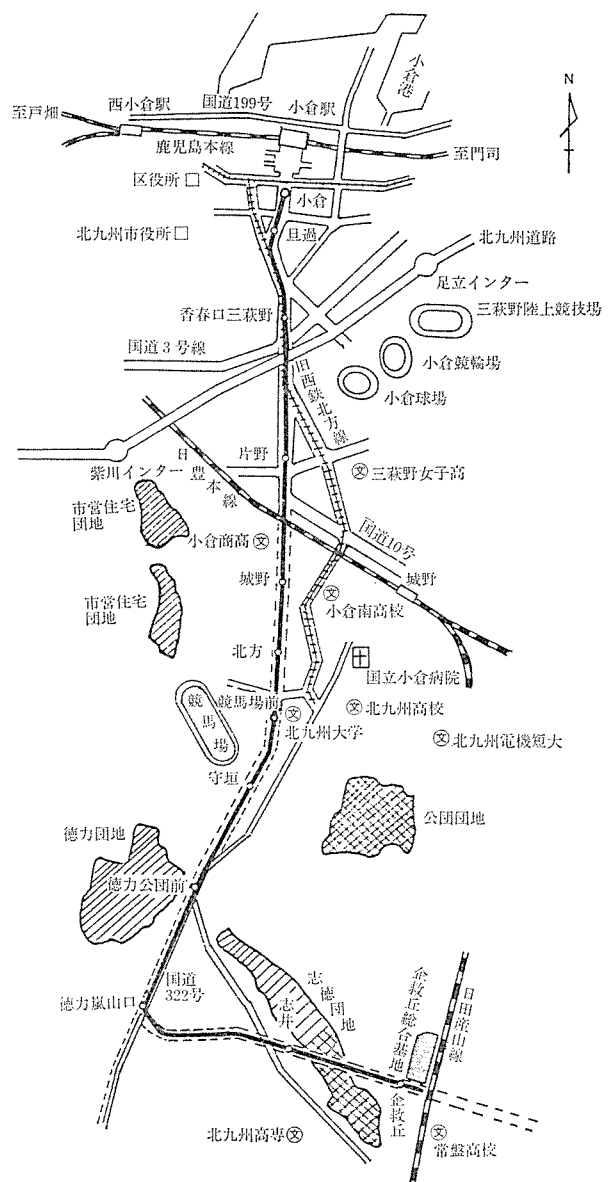


図-1 小倉線路線図

全線には12の駅があり、始終点間の運転時間は18分で志井、徳力の住宅地と都心部を結ぶ。小倉線で採用された跨座式モノレールは、我が国において東京モノレール(羽田)、大阪モノレール(万博記念公園)などで使用されており、その名のとおり車両が軌道を跨いで走行するものである。その構造物は、走行路である軌道と橋梁としての桁が一体となった軌道桁となっており、一般の道路橋や鉄道橋にはない構造形式となっている。

### 3. 試験概要

試験は全線中の主な構造物について行うこととし、大別すると橋梁の上下部構造の安全性に関する試験と軌道上の車両のすべり抵抗試験であった。

ここでは構造物の安全性に限定し、以下上下部構造の部材応力度とたわみについて、設計計算値と実測値の対比を中心に述べる。

#### 3.1 試験対象構造物

構造物は図-2に示すような上部工PC単純桁、下部工RCT型支柱が標準的なタイプである。このほかには、交差物や線形により3径間連続鋼製桁、門型支柱(鋼, RC)、片持式鋼製支柱などがあり、これらの代表的な構造物を線形条件に合わせて試験対象に選定した。

#### 3.2 測定項目

構造物の安全性は荷重試験から得られた測定値と設計値との対比によって評価するため、測定項目を部材のひずみ(応力度)と変位とした。構造物には建設中に鉄筋計が一部の下部工に設けられているほかは、測定機器が設けられていないため、構造物表面ひずみと代表的な位置の変位を求めることとした。応力測定関係の全試験対象と試験項目を表-1に示す。

#### 3.3 試験荷重

構造物の安全性を評価するためには、断面などを決定した荷重状態で測定値を求めることが望ましいが、その条件を再現することは極めて困難である。ここでは再現できる荷重状態での測定値とその計算値を対比することによって、構造物の安全性を評価する方法を用いた。これにより所定の値が得られれば構造物は安全であると推察できる。

想定する車両の荷重状態は、①乗務員

のみの空車荷重、②定員(380人)乗車の定員荷重、③物理的に乗車可能な満員(1070人)荷重である。これ以外に曲線半径の小さな所での車両の傾斜による④定員乗車の偏心荷重がある。これらの荷重が上、下部工に与える影響を勘案して上下線載荷の組合せを決定した。これにより荷重条件は、

- ① 単線(満車)載荷
- ② 複線(満車+空車)載荷
- ③ 単線(偏心)載荷→ $R=80\text{ m}$ の曲線部のみとした。載荷状態の例を図-3に示す。

荷重を上部荷重の組合せとして、車両停止時の静的および走行速度を数段階に変化させる動的状態で試験を行

表-1 試験対象と試験項目

試験対象物名	測定項目	静的試験			動的試験			
		単線	複線	偏心	単線	複線	偏心	速度 km
PC軌道桁	4003 PC 軌道桁	ひずみ 変位	○		○		○	20 30 40
	4047 標準軌道桁	ひずみ 変位	○			○		20 40 60
鋼単純軌道桁	3B95 鋼単純軌道桁	ひずみ 変位	○	○	○	○	○	20 30 40
	4B53 鋼単純軌道桁	ひずみ 変位	○			○	○	20 30 40
鋼軌三径間連続桁	1P18~1P21	ひずみ	○	○	○	○	○	20 30 40
	3P25~3P28	ひずみ 変位	○	○		○	○	20 40 60
RC支柱	4P4 特殊 RC 支柱	ひずみ 振動加速度	○	○	○	○	○	20 30 40
	4P47 標準 RC 支柱	ひずみ 振動加速度	○			○		20 40 60
	4P70 標準 RC 支柱	ひずみ	○			○		10 20 25
鋼支柱	3P26 特殊鋼支柱	ひずみ 変位 振動加速度	○	○		○	○	20 40 60
	3P27 特殊鋼支柱	ひずみ 変位	○	○		○	○	20 40 60
	3P95 特殊鋼支柱	ひずみ 変位 振動加速度	○	○	○	○	○	20 30 40
	4P53 特殊鋼支柱	ひずみ 変位 振動加速度	○			○		20 30 40
鋳鋼製支承	4002 鋳鋼製支承	ひずみ	○		○	○	○	20 30 40
	4047 標準鋳鋼製支承	ひずみ	○			○		20 40 60

※ 4003等の番号は構造物の固有番号。  
○印は試験実施を示す。

◇報告(投稿)◇

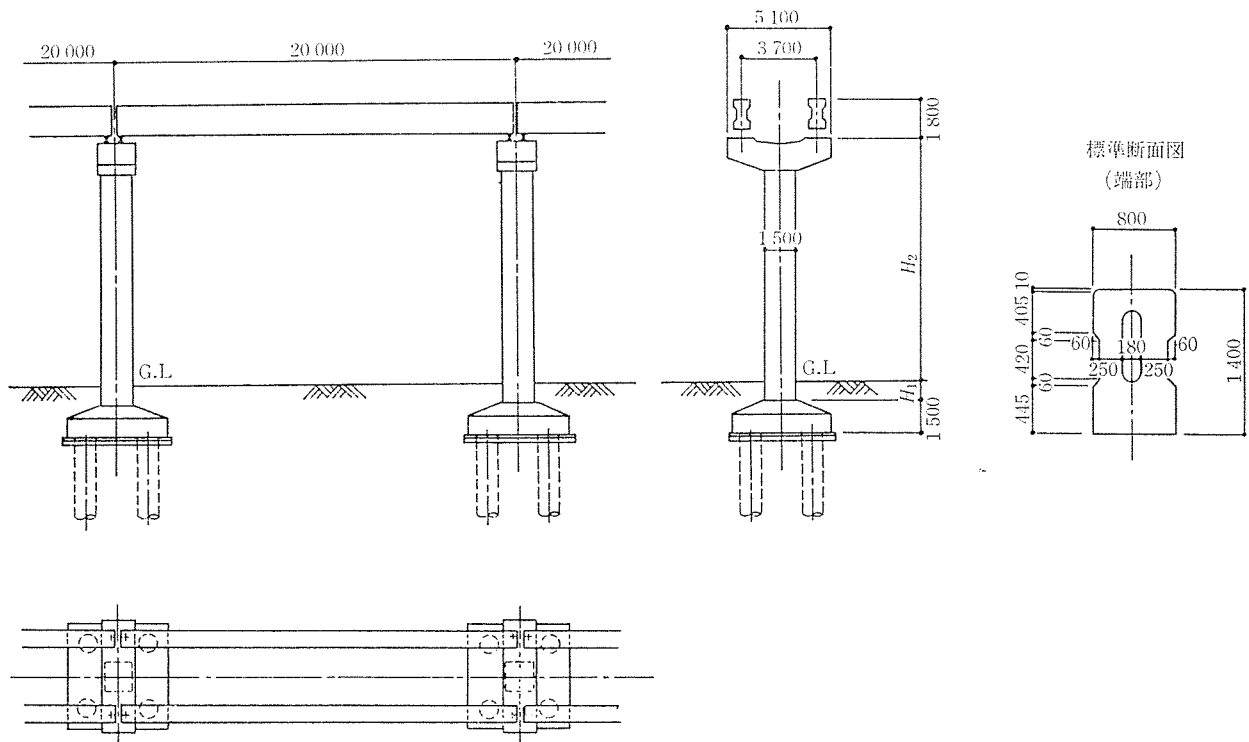


図-2 標準構造図

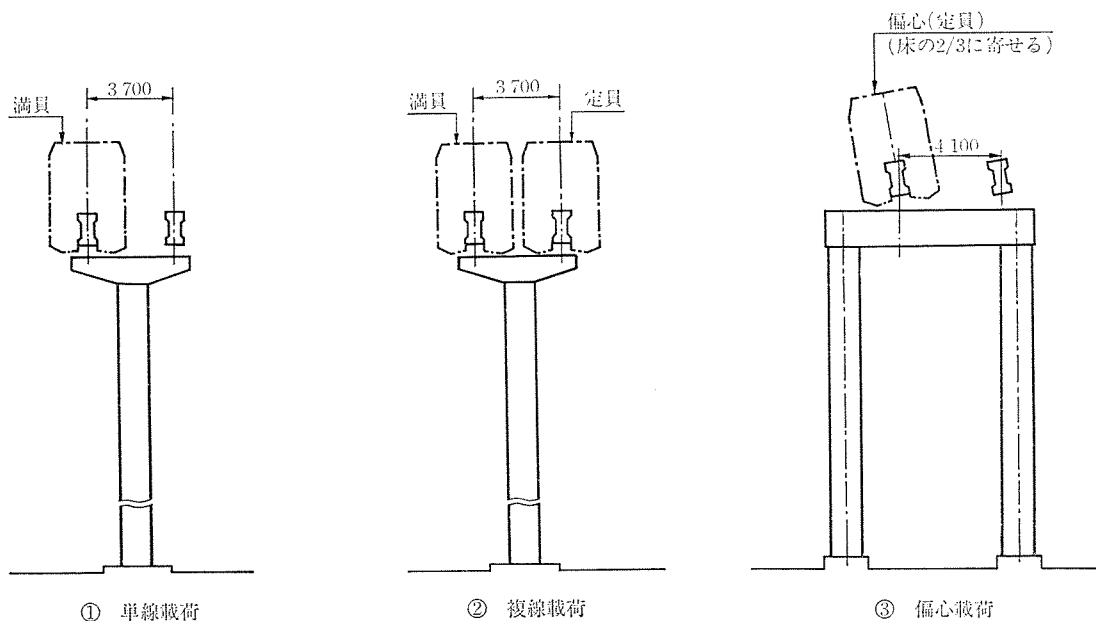


図-3 載荷状態図

った。静的試験は荷重を静止という安定した状態に置くため、測定値も安定しており、測定値の信頼性向上のためにも行っておく必要がある。動的試験は荷重が実際の状態に想定できることから、衝撃、遠心力等を加味した測定値が求められる。この場合、走行速度を数段階に変化させて、速度による影響を測定することとした。図-4、表-2、3 に車両諸元と試験荷重を示す。

### 3.4 試験方法

静的、動的試験はともに前項3 載荷状態で所定の測定

項目について行った。一部の支柱は鉄筋計を用い、その他はひずみゲージを用いてひずみを測定し応力を求めた。変位は変位計を用いて測定し、鉛直変位および水平変位を求めた。また、振動加速度計を用いて加速度を測定し、これにより卓越振動数を求めた。試験回数はそれぞれの条件について静的試験3回、動的試験4回行った。荷重は各荷重条件に相当するインゴットを4両1編成の列車の床に載せ、偏心荷重では定員に相当するインゴットを床面積の2/3に等分に載荷させた。静的試験

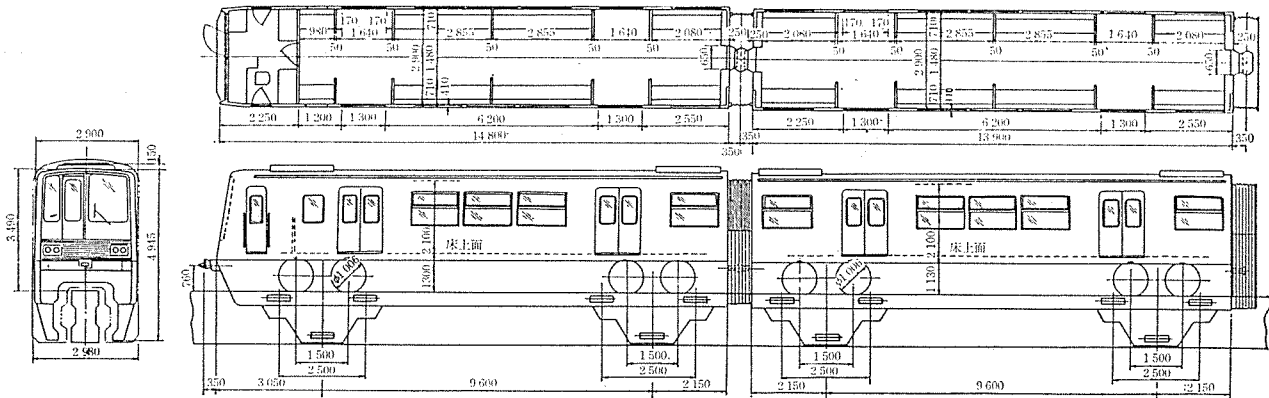


図-4 大型モノレール車両形式図

表-2 跨座型モノレール車両仕様  
(1列車4両編成の場合)

形式	大型(北九州モノレール)	標準型	備考
編成車両数	4(MC1・M2・M1・MC2)		
定員	座席	148人	148人
	立席	232人	208人
	合計	380人	356人
満員	1,070人 (座席前面控除 100mm)	878人	0.35m <sup>2</sup> /人
全長	全長	60.2m	56.2m
	全幅	2.98m	2.98m
	全高	3.64m	3.61m
	軸重	11t	10t
自重	108t/編成	104t/編成	60.2m <sup>2</sup> /人
軌道桁寸法	850mm × 1500mm × 20m	800mm × 1400mm × 20m	W×H×L
	80km/h		連結面間
最高速度	3.5km/h/sec		最大幅
直線加速度	4.0km/h/sec		軌道面上
減速度	常用	4.5km/h/sec	
	非常		

表-3 試験荷重 単位:t

	MC1	M2	M1	MC2	計
空車	27.6	25.4	26.0	27.0	106.0
満車	44.0	44.0	44.0	44.0	176.0
偏心	36.0	36.0	36.0	36.0	144.0

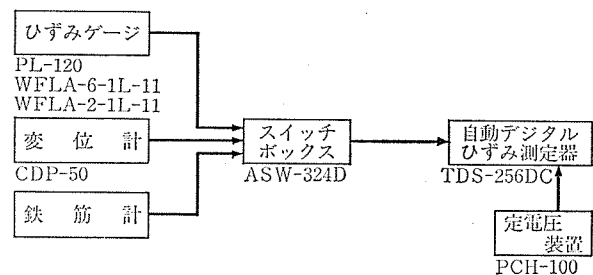
なお、偏心は、定員荷重を床面積の2/3に等分となるように載荷している。

では、停止位置を試験対象物の応力および変位がほぼ最大値の生ずる荷重配置とし、各車両および試験対象物には、あらかじめ停止位置確認用の色テープでマーキングした。図-5に測定システムを示す。

測定値は、所定回数の繰返し試験からその測定の信頼性を確認して、そのうちの最大値を採用した。また、動的試験では走行速度を変化させているが、速度にかかわらず、そのうちの最大値を採用した。

水平変位の測定方法は、水平方向から約45度下方にピアノ線を張り、これを水平方向の変位量に変換する方

静的載荷試験



動的載荷試験

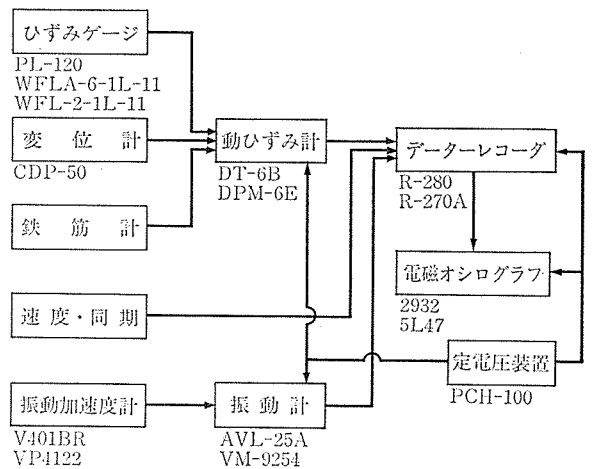


図-5 測定システム

法とした。図-6に変位計の取付け方法を示す。構造物の強度および弾性係数は材令を考慮して<sup>2),3)</sup>求めた。

4. 応力測定

4.1 桁の応力測定

4.1.1 PC桁

PC桁の測定は R=80m の曲線部と直線部の単純桁について行った。

(1) 曲線桁 (R=80m)

◇報告(投稿)◇

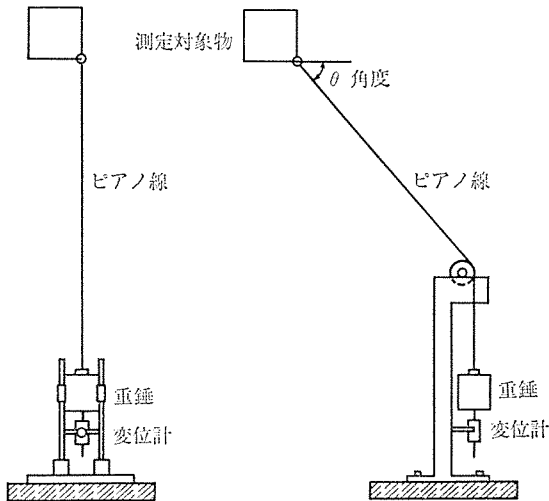


図-6 変位計取付け要領

桁構造図と測定箇所を 図-7 に示す。測定位置はスパン中央断面とし、上縁1点、下縁2点のひずみゲージ、鉛直変位2点、水平変位1点とした。この桁は  $R=80\text{ m}$  とかなり曲率が大きく、振りの影響を受ける。したがって、この影響を調べるにはさらに多くの断面での測定が望ましいが、最大曲げ応力度が発生すると思われるスパン中央で求めることとした。

载荷に先立ち、測定機器の安定性を確認した。ひずみの測定値には一般に  $\pm 5 \times 10^{-6}$  スtrenほどの変動があり、測定するひずみ量が小さい場合は誤差として大きな影響を受けるので、安定性は特に重要である。

測定結果は次のとおりである。図-8 の応力度分布を見ると、単線満車载荷（以下単線载荷）では、桁下縁で静的の場合コンクリートの応力度が計算値と比べて 73~80%，動的で 57~76% の値を示した。上、下縁での応力度分布を見ると、静的ではかなり計算値に近似するが動的では 60% 程度の値となっている。

単線偏心载荷（以下偏心载荷）においては、桁下縁で静的 73~76%，動的で 52~74% の値を示した。上下縁間の分布では、静的 73~81%，動的で 52~61% となった。曲線桁の内側傾斜による影響を桁下縁の左右で見ると、静的では単線、偏心载荷ともかなり設計値に追随している。動的では曲線内側（図-8 では測点2）の値が計算値と比べ約 1/2 程度となっている。

変位は計算値と比べて、静的では鉛直方向で 38~65%，水平方向で 58% の値を示した。動的では鉛直方向で横荷重を考慮しないで 67~68%，水平方向で横荷重を考慮して 75% の値を示した。

以上のことから、静的試験では応力度で計算値にほぼ近似できる測定値が得られていることがわかる。動的試験では衝撃、遠心力、横荷重の計算上の設定と、実際の荷重状態とに差があったことなどが想定される。次に動的試験での走行速度別の応力度、変位量を 図-9 に示す。図-9 の桁下縁の左右の値は、速度が速くなるにつれて曲線内側の値が小さくなり外側の値が大きくなっている。これは遠心力の増加につれて外側に振りの力が働いたものと思われる。

変位は一般に応力度よりも計算値に追従できる場合が多いが、今回は応力度より低い比率となった。これは測定値に下部工の変形分が加わっており、計算値の仮定と異なるためと考えられる。鉛直変位は速度の増加に伴い外側に振れるような動きとなっており、水平変位も同様の傾向を示している。

(2) 直線桁

直線桁も曲線桁と同様の測定を行ったが、直線区間のため偏心载荷試験は実施していない。図-10 の測定結果をみると、桁下縁のコンクリート応力度は静的で 65~67%，動的で 51~52% の値を示した。また、下縁左右の応力度はほぼ同じで均等に荷重が載っていることを示している。桁上下縁の応力度は静的で 65~78%，動的で 51~58% の値を得た。以上の結果から曲線桁と同

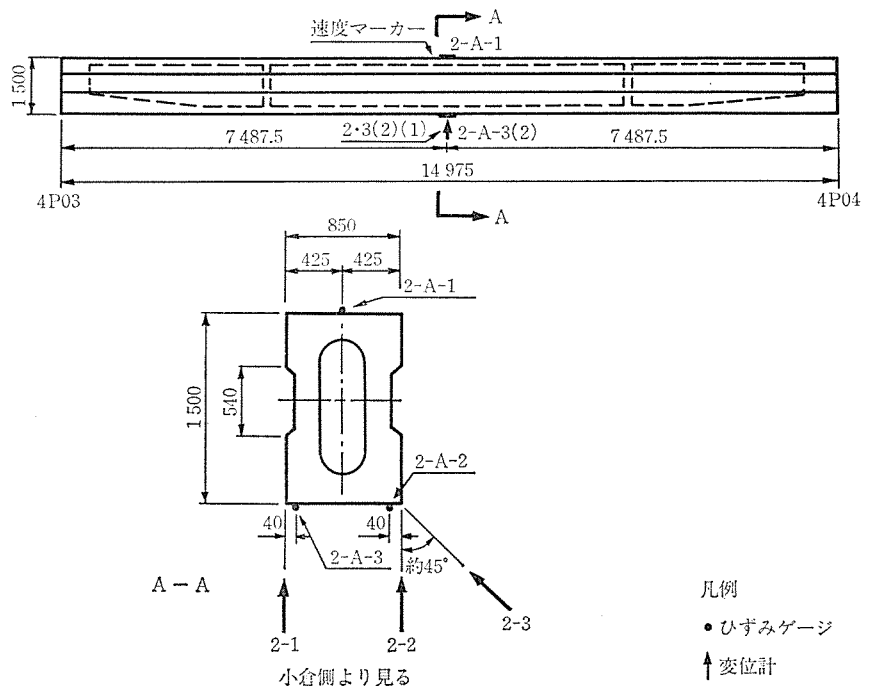


図-7 4003 PC 桁測定位置図 ( $R=80\text{ m}$ )

凡例  
 ● ひずみゲージ  
 ↑ 変位計

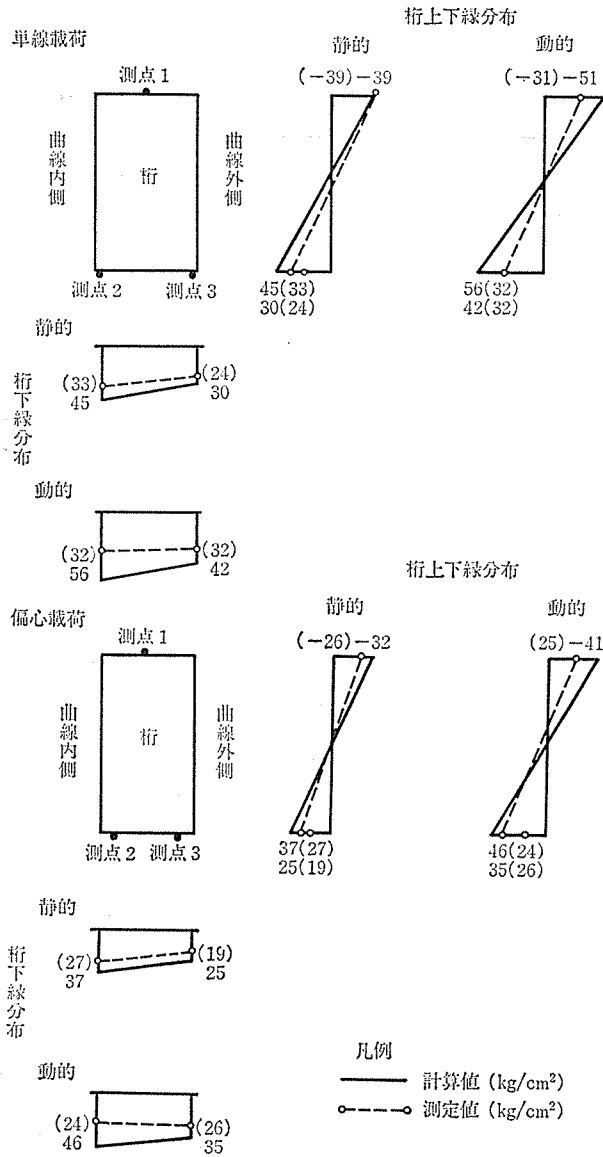


図-8 4003 PC 桁の応力度分布図

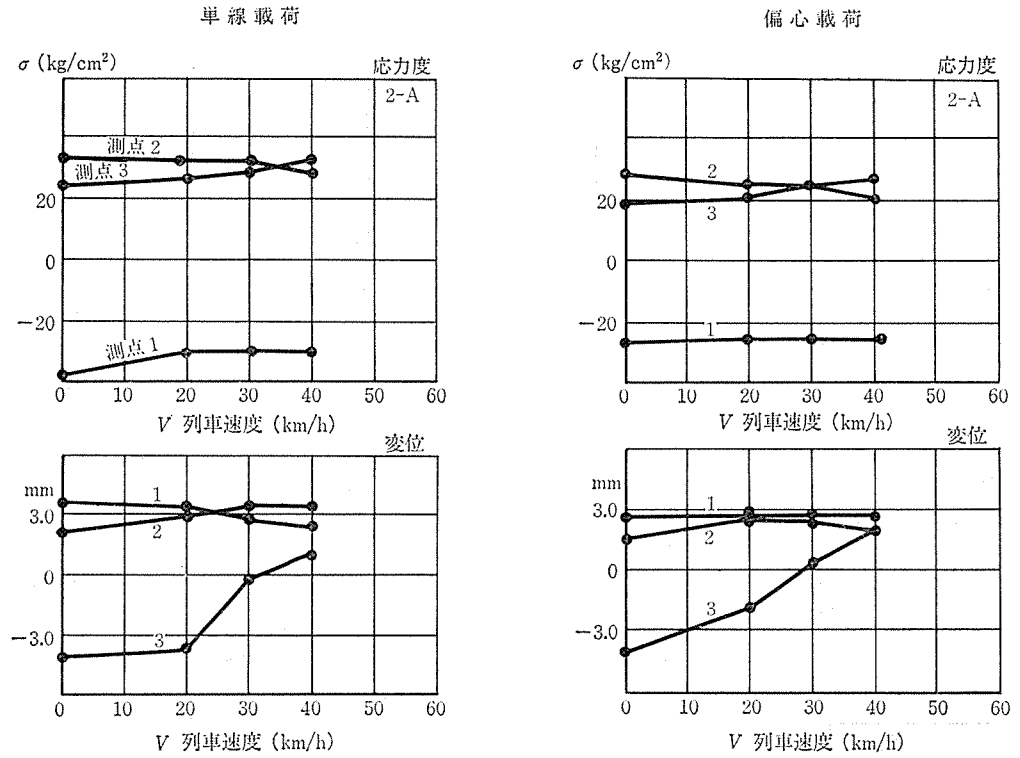


図-9 4003 PC 桁における列車速度と測定値との関係

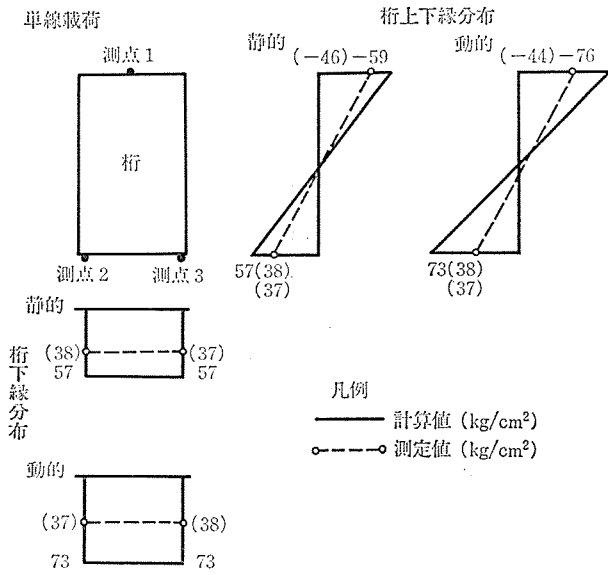


図-10 4047 PC 桁の応力分布図

様に静的試験は動的試験より計算値に近い測定値を示している。動的試験における走行速度別の測定値(図-11)をみると、応力度、変位とも速度の影響はほぼ認められない。直線部で静的試験においても水平変位が生じるのは、単線載荷で下部工の片持梁のたわみによるものである。これは鉛直変位の左右の値に違いが生じることからも明らかである。

#### 4.1.2 鋼桁(単純直線桁)

ここで鋼桁を取り上げたのは、コンクリート桁と対比することにより材料特性の測定値の違いをみるためである。鋼桁は上下線の軌道箱桁を横桁で結合した形式で、上下線分離のPC桁より構造的に複雑になっている。測定する場合、部材接合部での応力の流れが複雑になることが多く、一般の設計計算ではこれを表現しないため測点の位置によってはかなりの違いが生じる恐れがある。今回は測定点数が種々の状況から制約されたため、代表的な点で測定することとした(図-12)。

測定結果を図-13, 14に示す。主桁のひずみ測定は桁下フランジ下面のみとした。単線載荷での主桁下フランジ下面の応力度をみると、静的で計算値の83~110%, 動

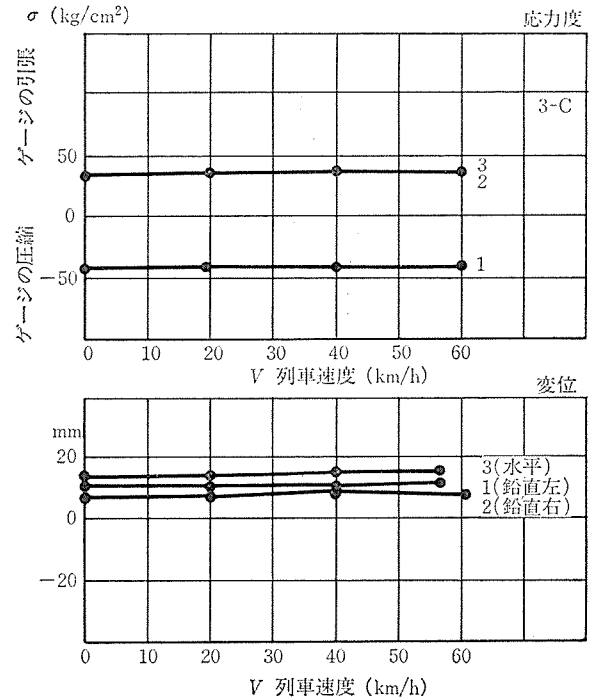


図-11 4047 PC 桁における列車速度と測定値との関係

的で70~90%の値を測定した。複線載荷の動的試験では83~93%の値を示した。PC桁と比較すると静的、

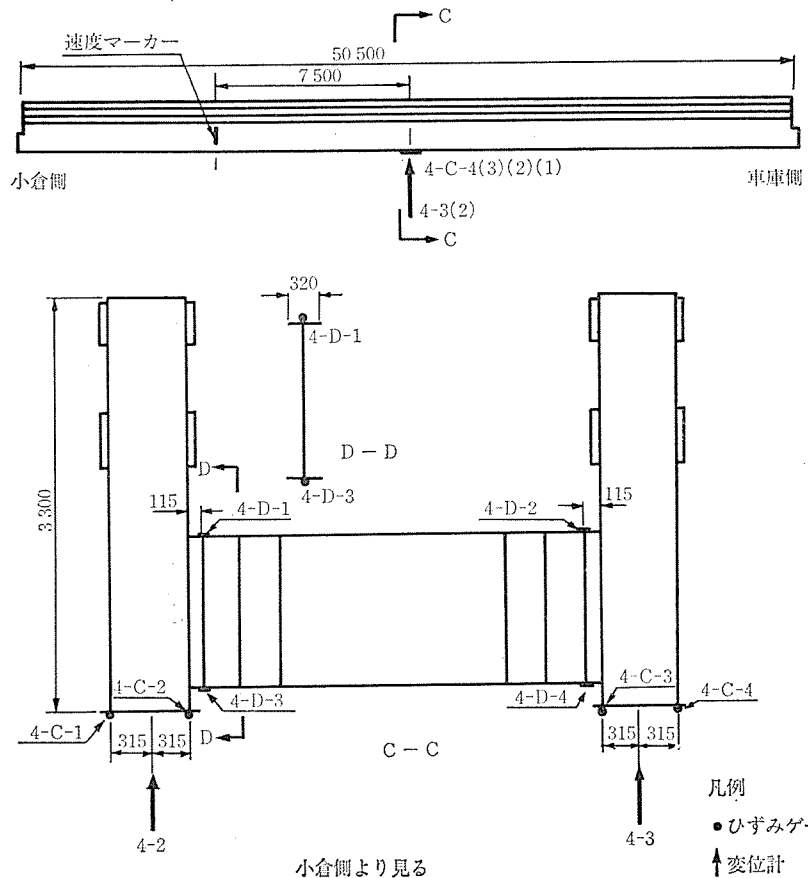


図-12 4B53 測定位置図

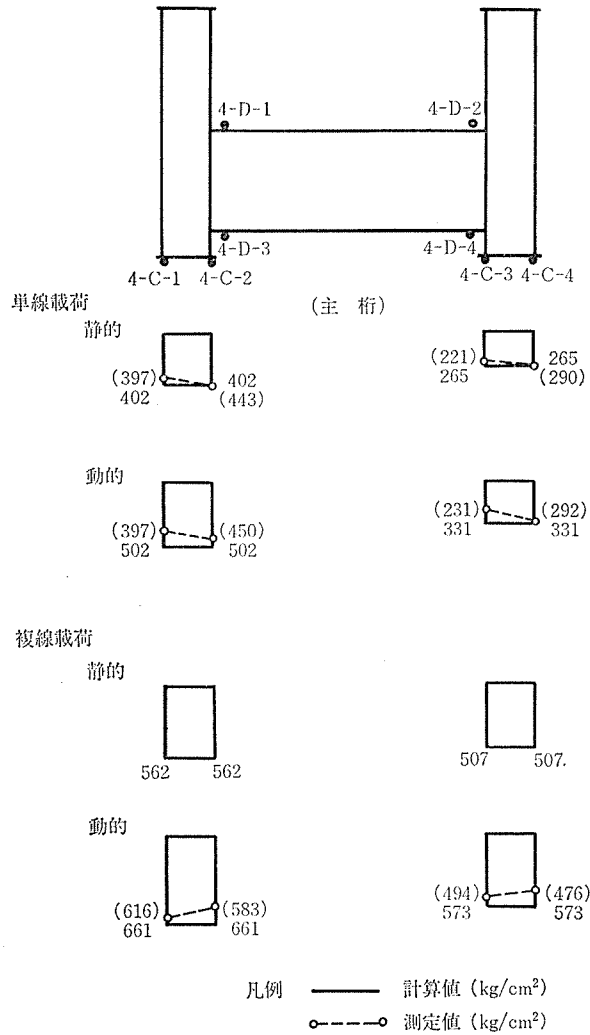


図-13 4B53 鋼桁の応力度分布図

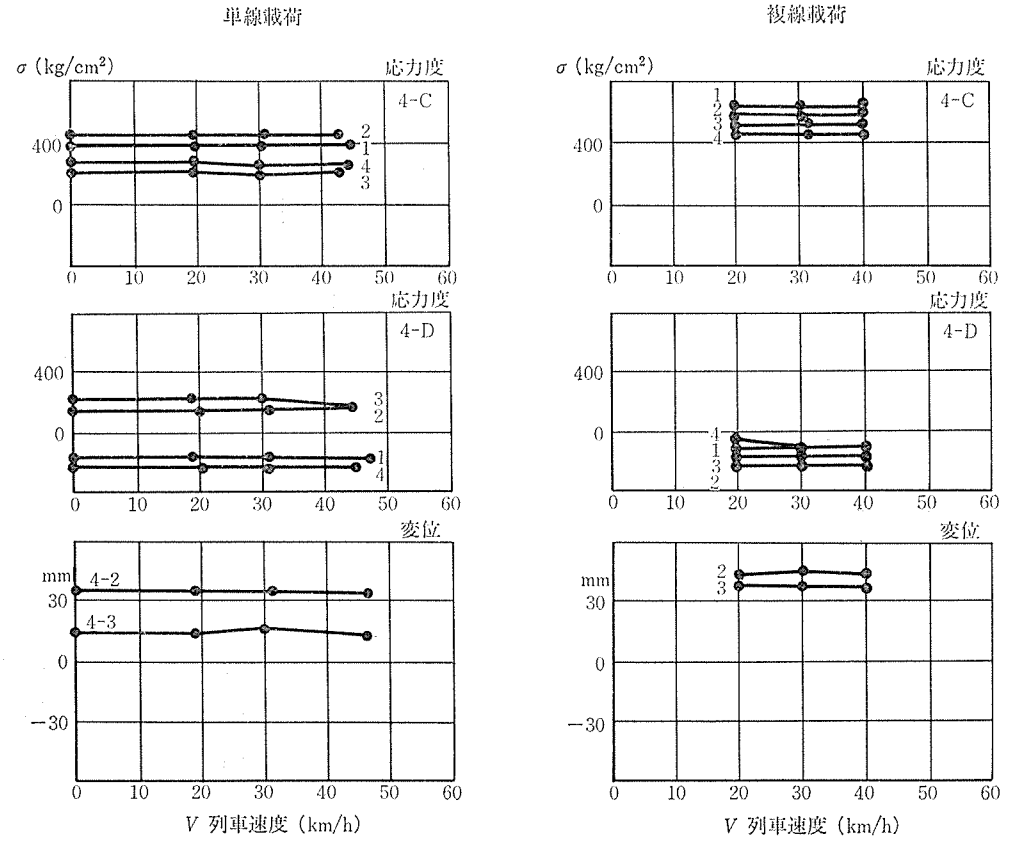


図-14 4B53 鋼桁における列車速度と測定値との関係



◇報告(投稿)◇

動的試験とともに鋼桁が計算値に近い測定値を示した。静的試験において一部計算値をオーバーしている測定値があるが、動的計算値より小さいため、安全は確保されているものとした。

また、今回の測定点がウェブとフランジの交点にあっており、応力の流れや下フランジの応力分布も一様ではない可能性があり、測定位置には十分な配慮が必要であろう。変位測定は計算値と比べて単線載荷の静的で 80~89%、動的で 68~73% の値を示した。複線載荷は動的のみ行ったが 75~79% の値を示した。これも応力度と同じく PC 桁より計算値に近い値となった。

4.2 T形標準支柱

この形式は全線の橋脚の中で最も数が多い。直線部で試験を行った結果を示す。図-15 に支柱構造と測定機器の取付け位置を示す。

試験は上部工が上下線分離の直線 PC 桁のため、これに合わせて単線載荷のみ実施した。測定位置は片持梁支点部と柱下端付近でコンクリート表面の応力度(ひずみ)を求めた。柱部の応力度は図-16 のように計算値と比べて静的で 78~83%、動的で 65~78% の測定値が得られた。梁の応力度は静的で 92%、動的で 75% の

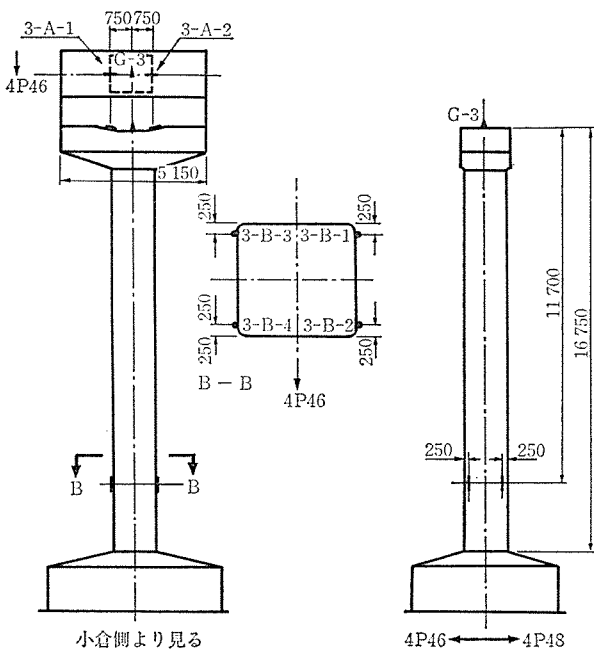


図-15 4P47 測定位置図

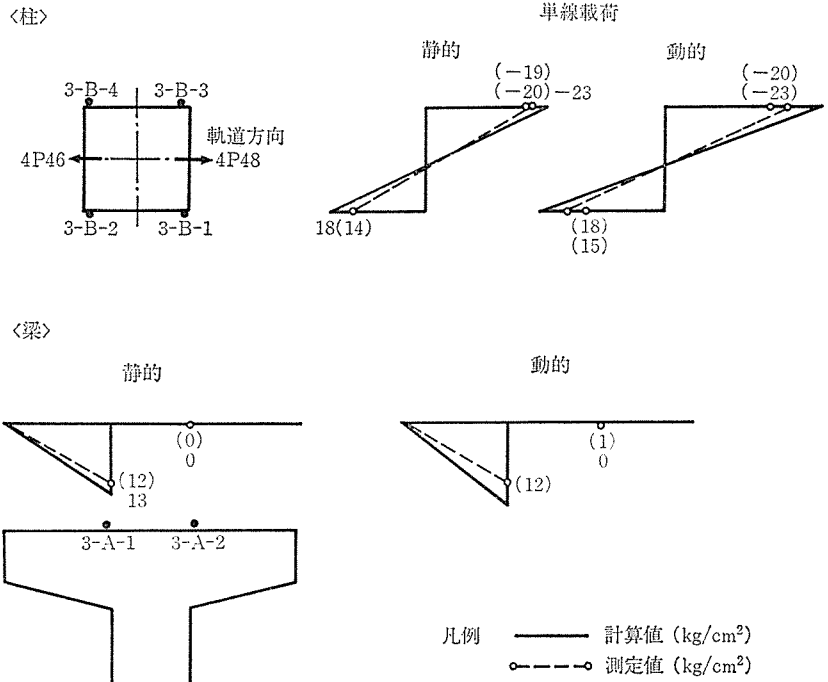
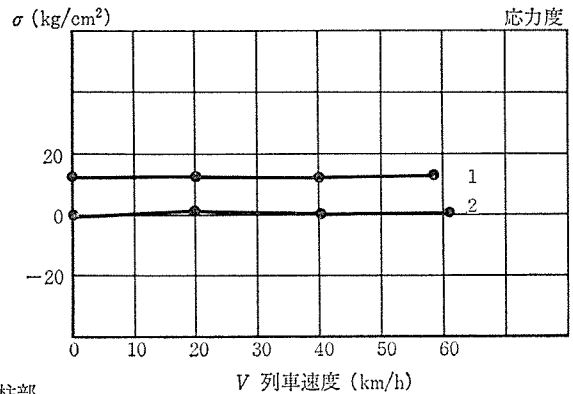


図-16 4P47 支柱の応力分布図

値を得た。動的試験での走行速度別の応力度の変化を図-17 に示す。これによると速度の上昇に伴って柱部で多少の変化が見られるが、ほぼ同じ応力度となっている。速度が 40~60 km/h のときの柱部における応力度の変化は、走行時の列車の横荷重から生じる柱の振りに

梁部



柱部

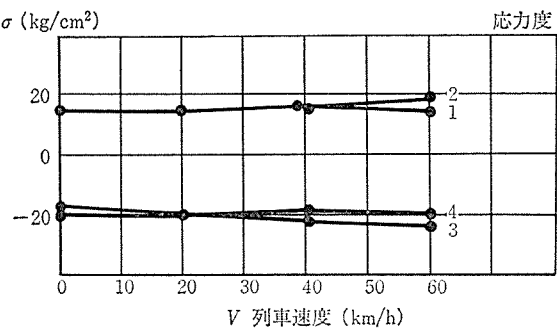


図-17 4P47 支柱における列車速度と測定値との関係

よるものと思われる。

桁の試験では、測定値と計算値の比が静的と動的試験の間で明確な差が生じたが、下部工の試験では静的、動的試験とも計算値とかなり近似している。

## 5. 考 察

以上、载荷試験の代表的な測定結果を述べてきたが、表一1に掲げた他の構造物の結果も含めて次のように考えた。

### 5.1 構造物の安全について

#### (1) PC 軌道桁

- 曲線桁および直線桁とも、測定値は計算値以内にあり、必要な強度を有するものとする。
- 直線桁では、応力度および変位とも列車速度に対する影響はみられないが、曲線桁では列車速度が増大すると遠心力による影響がみられる。

#### (2) 鋼単純軌道桁

- 静的試験において応力度の測定値の一部で計算値をこえているものがある。これは格子桁の荷重分配率が計算仮定と異なることや、測定点がウェブ直下のためにシェアーラグの影響を受けていること等によるものと考えられ、いずれも動的計算値より小さい値であるため、桁の応力度上の安全は確保されているものとする。
- 列車速度に対する影響は前述のPC桁と同様であるが顕著でない。

#### (3) RC 支柱

- RC支柱の応力分布の傾向は測定値と計算値とで一致している。
- 測定値は計算値以内にあり、必要な強度を有するものとする。
- 列車速度による影響は直線にある支柱ではあまり認められないが、曲線部にある支柱では遠心力による影響がみられる。

### 5.2 測定について

本試験は多数の上下部構造について測定を行ったため、細部にわたる測定まで行えず代表的な断面の検証となった。この試験の目的が構造物の機能の安全性の確認であることを考えると、全路線の多数の代表的な構造形式について測定した今回の方法も一つの試験方法であったと思われる。

このようなことを念頭に周知のことではあるが、測定上の留意点を挙げてみると、

- ① 構造物の材料、構造系を考慮して測定断面、測定点を設定する。
  - ② モノレールは軌道桁に電車線が設けられているため、ひずみゲージ等に電流の影響を受けないようにリード線の配置を考慮する（今回は影響を受けなかったと考える）。
  - ③ 測定表面は炎天下で温度の影響を受けるため、ゲージのコーティングには十分留意する。
  - ④ ひずみの測定値には測定計器上の避けられない誤差がある程度あるため、これを前提として予測されるひずみ量を事前に求めておいて、測定誤差が無視できるように計画する。
  - ⑤ 測定時はモニターにより代表的な測定値を検出して計算値とその場で対比し、測定の信頼性を確認する。
  - ⑥ 常時、測定機器の安定性をチェックする。
- 以上が主な点であるが、このような実物载荷試験はやり直しが困難な場合が多く、周到な準備が必要といえよう。

## 6. あとがき

今回の応力測定試験を通して、モノレール構造物は十分な強度を有していると判断した。試験の中で特に注意を払った点は、屋外においても信頼のおける測定値を得ることであった。活荷重は設計上の荷重をほぼ再現させたが、死荷重を含めた全体の荷重に比べて、活荷重によるひずみ量は小さい。このため誤差などを考えると測定技術に負うところが多く、より信頼性の高い測定技術が求められるところである。

本試験の実施にあたっては、運輸省交通安全公害研究所、建設省土木研究所の現地技術指導をいただいた。ここに、試験計画から両研究所を始めとする関係各位に多大な御協力をいただいたことに、謝意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- 1) 清水ほか：北九州都市モノレール小倉線 PC 軌道桁の設計と施工(上)(下)、橋梁、Vol. 18, No. 10, No. 11, 1982
- 2) H. リュッシュ、D. ユンクビルト：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮、鹿島出版会
- 3) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法、共立出版株式会社

【昭和 60 年 12 月 12 日受付】