

(42) 跨座型モノレール用合成軌道桁

株式会社日立製作所 石川 正和
日本鋼管株式会社 田中 征登
○ 同上 植村 俊郎

1 まえがき

跨座型モノレールの軌道桁構造は、支間約20mのPC軌道桁を標準としているが、地盤条件、支間長、曲線半径等の制約を受ける区間に対しては、鋼軌道桁が用いられる。これら軌道桁の構造形式は東京モノレール羽田線、北九州モノレール小倉線等に見ることができる。

近年、跨座型モノレールの建設、計画が進められているが、その際建設費の低廉化および都市環境との調和がこれまで以上に重要視されるようになり、鋼軌道桁に対してもその要求が高まっている。これらの要請に応えるため、関係官庁、各種研究機関、初日本モノレール協会などで技術開発を進めている。

本文では、鋼軌道桁に関しこれらのニーズに対応するものとして、合成軌道桁を紹介するとともに、その構造、設計、施工、特徴等の概要を報告するものである。

2 従来形式の鋼軌道桁

従来形式の鋼軌道桁の全体構造を図1に、軌道桁断面を図2(a)に示す。構造および設計上の主な特徴は以下のとおりである。

- 1) 橋軸方向に約5m間隔に配置された横桁と横構により、2つの軌道桁を結合し、全体として複線構造となっている。
- 2) 走行面となる軌道桁上フランジは、ゴムタイヤの輪荷重を直接受けるため、鋼床版としての取り扱いをする。
- 3) 縦断勾配がきついなど走行面に比較的大きな摩擦係数を必要とする場合は、上フランジに溝付鋼板を使用する、粘着材を貼付けるなどで必要摩擦係数を確保する。

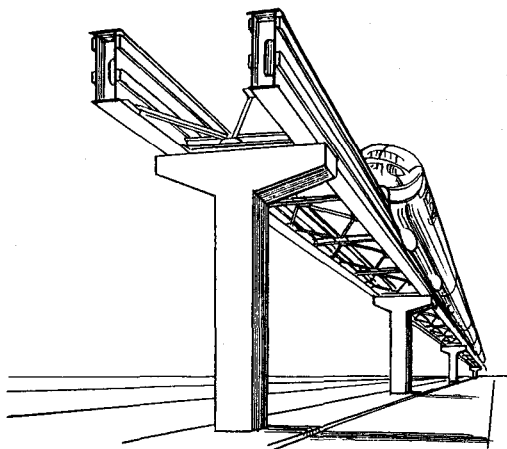
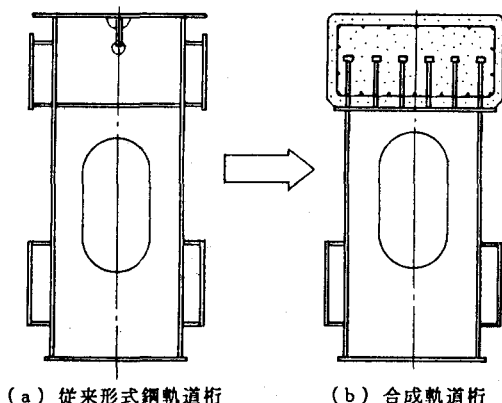


図1 従来形式鋼軌道桁

3 合成軌道桁の構造、設計法、特徴

3.1 構造の概要

合成軌道桁の断面を図2(b)に示す。その構造は、走行面から案内面下端まで(幅約800mm、厚さ約420mm)を鉄筋コンクリート製とすることを特徴としており、これと鋼桁をずれ止めより力学的に結合した合成桁である。案内面下端までを鉄筋コンクリートとしたことは、輪荷重を直接受けるスラブとして十分な厚さを有すること、これ以上スラブを厚くすると合成断面としての中立軸がコンクリート断面内に入り自重も大きくなること、案内面下端は丁度建築限界に位置すること、などの点が



(a) 従来形式鋼軌道桁

(b) 合成軌道桁

図2 従来形式軌道桁と合成軌道桁の断面

ら非常に都合の良い構造となっている。

3.2 設計の概要

設計方法は、道路橋や鉄道橋で多用されている合成桁と基本的に同一であるが、本構造特有の項目を以下に記す。

1) 支間構成

単純桁とする。その理由の第1は、連続桁にした場合中間支点付近においてコンクリート断面に引張応力が生じ、これによりコンクリートにクラックが入るためである。強度的にはそれ程問題とはならないが、走行面のクラックはゴムタイヤの繰り返し通過により拡大し、欠け落ちが生じ、走行性を損なうだけでなく破片の落下は危険である。支点のジャッキアップ、ダウン等によりプレストレスを導入する方法もあるが、施工が煩雑なため必ずしも経済的とならない。第2に、軌道桁は荷重を支える桁であると同時にレールでもある。このため桁架設時や供用後における地盤変状で沈下が生じた場合など、軌道を調整することとなるが、この場合単純桁の方が容易である。

2) 支間長

合成軌道桁のコンクリート断面積は支間長にかかわらず一定であるため、経済的鋼桁断面の寸法範囲においてはコンクリート断面の圧縮応力度の制約を受けることとなる。コンクリートの圧縮強度を 400 kg/cm^2 程度とした場合の試算によると、最大支間長は 40 m 程である。

3) 合成方式

一般に、鋼断面あるいはコンクリート断面の自重を鋼断面に負担させ、合成断面には列車荷重のみを負担させる「死活荷合成」と、自重および列車荷重を合成断面に負担させる「死活荷重合成」の二通りがある。モノレール合成軌道桁の場合は、コンクリートの打設方法や架設方法とも関連するが、走行面コンクリートのヘアークラック防止を配慮して、「死活荷重合成」が良いものと考えられる。

4) ずれ止め

ずれ止めの設計は、道路橋や鉄道橋の合成桁と同一であるが、モノレールの場合は車面横荷重、遠心荷重、地震荷重、風荷重などにより橋軸直角方向水平力が、走行面あるいは案内面に作用し、さらにこの水平力により合成断面にはねじりモーメントが生ずる。これらの外力により、ずれ止めには引き抜き力やせん断力が作用することとなるが、いずれも比較的小さな量であり、曲げモーメントに伴うせん断力によって設計するずれ止めの寸法、配置を大きく支配するものではない。

4 従来形式鋼軌道桁と合成軌道桁の比較

4.1 鋼重の比較

列車荷重として軸重 10 ton 、活荷重鉛直たわみ制限として $L/600$ 、直線桁の条件で概略設計を行ない、鋼重を算出した結果を図3に示す。支間長 30 m 程度で比較してみると、合成軌道桁の鋼重は従来形式より 45% 程低減している。この大幅な鋼重低減を可能とした理由は以下のとおりである。

1) 従来形式の場合、走行面となる上フランジは輪荷重を直接受けるため鋼床版としての設計を行っており、これにより最小フランジ厚が決定される。(ton) これに対し合成軌道桁の場合は、輪荷重をコンクリートで受けることになるため、上フランジは支間長に応じた最適板厚を選定することができる。

2) 従来形式の場合、上フランジの補剛として縦

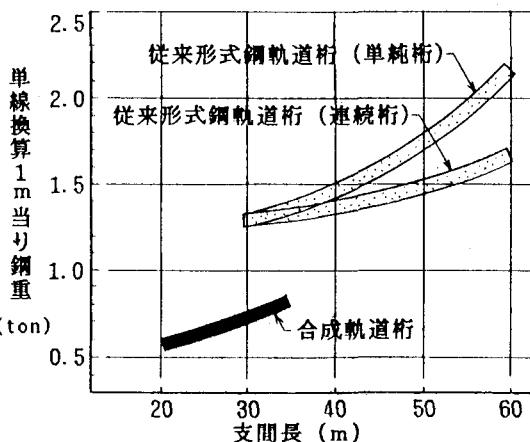


図3 鋼重の比較

リブおよび横リブを配置するが、合成軌道桁ではその必要がない。

3) 従来形式の場合、案内面は鋼製であるが、合成軌道桁ではコンクリート製となっている。

4) 合成軌道桁の場合は、案内面の下端までコンクリートであるため、鋼断面の腹板高さがその分だけ低くなっており、これによる鋼重低減は大きい。

5) 合成軌道桁は上記に伴って箱桁断面寸法が縮小されており、内部の2次部材が低減される。

4.2 合成軌道桁の利点

上記に示した鋼重低減は経済的メリットを生むことはもちろんであるが、これ以外に以下の利点を有す。

1) 走行面の摩擦係数

モノレールの走行面は、ゴムタイヤの車両が走行するための所要の摩擦係数を必要とする。従来形式鋼軌道桁の走行面は、鋼板からなる上フランジ面をタイヤが直接走行するため、縦断勾配が大きい場合などにおいて大きな摩擦係数を必要とするとき、上フランジとして溝付鋼板を用いたりあるいは粘着材を貼り付けるなどの対策が必要となる。一方、合成軌道桁の走行面はコンクリートであるため、摩擦係数が大きく、PC軌道桁と同等の性能が得られ、スリップの問題がない。

2) 上フランジの応力

従来形式鋼軌道桁の上フランジは、輪荷重を直接繰返して受ける鋼床版構造であることから、局部的な応力状態が複雑となり、設計や構造選定に当っては注意を要することとなる。これに対し合成軌道桁は、タイヤの面圧を厚さ約42cmのコンクリートで受けるため、鋼断面上フランジの応力状態は比較的単純となる。

3) 疲労

合成軌道桁は自重がやや大きいことと、コンクリート断面の圧縮抵抗が寄与することにより、疲労が問題になることは主桁断面に関してほとんどない。

4) 走行性、振動、騒音

列車荷重によるたわみは支間長と桁高に依存するが、合成軌道桁はコンクリート断面の存在により剛性が大きく、支間長30mの試算によると $L/1400$ 程度のたわみ量で比較的小さい。このため走行性が良く、また振動、騒音も小さい。

5) 軌道の調整

モノレール軌道桁は列車荷重を支持する桁であると同時にレールでもある。このため架設時あるいは供用後の地盤変状に対して軌道調整が必要となるが、合成軌道桁は単純桁を基本としており、これが容易である。

5 合成軌道桁の施工法

モノレール合成軌道桁の施工法は、架設に関して現地条件に依存することは言うまでもないが、コンクリートの打設(RC工)をどの時点でどの場所でどの範囲まで行なうかにより工法が種々選択されると同時に、設計上合成方式の選択にも関連している。

合成方式としては、軌道桁の支間全長にわたって死活荷重合成(完全死活合成)とする場合、鋼桁に現場継手がありその部分を活荷重合成とし他の部分は死活荷重合成(部分活合成)とする場合、そして支間全長にわたって活荷重合成(完全活合成)とする場合の3通りの考え方がある。

RC工の場所についても3通り考えられる。支間全長にわたって鋼桁の製作工場で打設する場合、鋼桁の現場継手以外の部分を鋼桁工場で打設し継手部だけ現場で打設する場合、すべて現場で打設する場合である。現場で打設する場合においても、現場近くのヤードや高架下で打設する場合と、鋼桁を架設してから高架上で打設する場合が考えられる。

これらに関して幾つかの組合せが成り立つが、表1はこれをまとめたものである。どの工法を選択するかは軌道桁の設計の考え方と構造、鋼桁工場の場所と設備、輸送条件、現地条件に依存することとなる。一般にモノレール軌道桁は、街路上の高架構造であり、また合成軌道桁の標準支間長は30~40mであるから、現場継手部以外を工場打設し、現場で継手部を打設する工法が標準的工法となろう。

表1 合成軌道桁の施工法

RC工の場所	現地作業の流れ	合成方式	現地条件			ベントの使用	作業性
			海岸、大河川沿いか	ヤードがあるか	地組立てできるか		
完全工場	架設	完全死活	○	△	△	×	◎
添接部以外工場 添接部現地	地組-RC工（添接部）-架設	完全死活	×	◎	○	×	◎
	地組-架設-RC工（添接部）	部分活	×	×	○	×	○
	架設-RC工（添接部）	完全死活	×	×	×	○	○
完全現地	地組-RC工-架設	完全死活	×	◎	○	×	◎
	RC工-地組-架設-RC工（添接部）	部分活	×	○	○	×	○
	RC工-架設-RC工（添接部）	完全死活	×	○	×	○	○
	架設-RC工	完全死活	×	×	×	○	×
	地組-架設-RC工	完全活	×	×	○	×	×

6 コンクリート打設施工実験

6.1 実験の目的と着目点

合成軌道桁のコンクリート施工に関し、実際の施工を前提とした工法を選択し、その施工性と品質を確認することを目的として、乾燥収縮によるひび割れ防止や打設施工性を配慮したコンクリートの配合、精度の確保および施工性を配慮した型枠構造の選定、各部の寸法精度確保や走行面の仕上方法に着目した実験を実施した。

6.2 実験模型

実験に用いた模型は、走行面から案内面下端までを実寸とした部分模型であり、使用した模型の一部を図4に示す。模型の寸法、形状は実際の軌道桁になるべく近似するように、長さ10m、平面曲線半径300m、カントは0%から3%まで漸変させている。

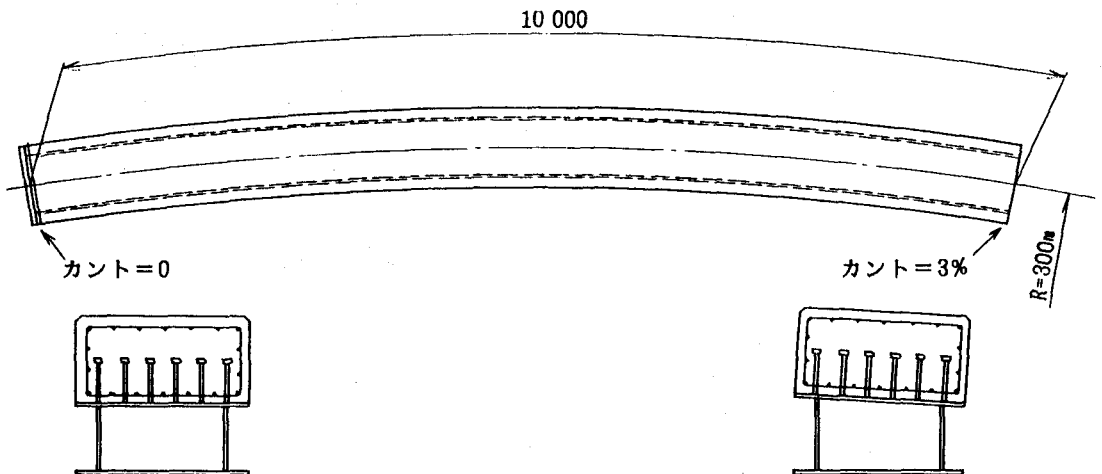


図4 実験模型

6.3 型枠構造

図5に型枠構造を示す。型枠は実工事において使用するものを前提として立案したもので、その構造は以下のとおりである。型枠構造は、鋼桁上フランジに直角に取り付けられる支保材と、これに取り付くボスからなり、鋼桁工場において治具を用いて精度良く取り付けられる。また支保材は軌道方向に関し、曲線の場合は約50cmピッチ、直線の場合は約1mピッチに配置されており、型枠板を鋼桁の平面線形にあわせてなめら

かに変形させる。型枠板は曲線部への使用やハンドリング、転用などを考慮して、厚さ3.2～4.5mmの鋼板製とし、長さ約2～3mを1パネルとしている。組立は、型枠板をセットしあらかじめ型枠固定用支保材に取り付けられたボスにネジ止めする。このネジを調整することにより、走行面との直角度や案内面の平面性などの精度確保を行なう。

6.4 実験結果

(A) コンクリートの配合

合成軌道桁のコンクリート配合は、設計基準強度の確保、耐久性、乾燥収縮の抑制、耐磨耗性、打込み易さ、走行面の仕上易さなどを考慮して決定する必要がある。本実験では数種類の配合を検討した結果、表2に示すようにスランプ5cmのベースコンクリートに流動化剤を加えた流動化コンクリートを用いた結果、上記の条件を満足する良好なコンクリートが得られた。

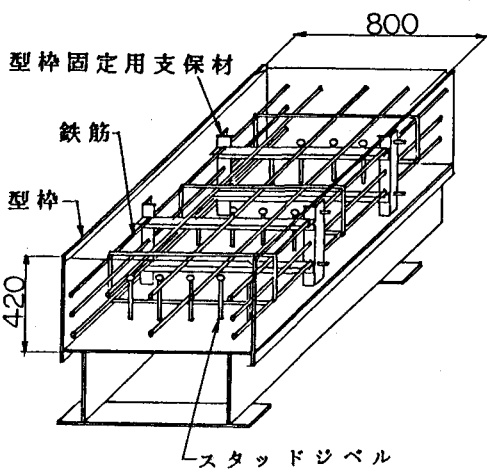


図5 型枠構造

表2 コンクリートの配合

コンクリート種類	ベースコンクリートの配合								流動化剤
	目標 スランプ cm	W/C (%)	S/a (%)	C	W	S	G	ボゾリス NO. 70	
合成軌道桁	5	43	43.2	347	149	791	1061	0.868	C×0.8%
PC桁の例	7	39	38	435	170	646	1127	1.088	—

(B) 寸法精度

本実験の中心テーマであり、表3に示すPC軌道桁の精度基準¹⁾を目標とした。実験の結果、通り狂い±1mm以下、走行面と案内面の直角度(Δh)2mm以下、桁幅±2mm以下など良好な結果が得られ、今回の型枠の使用や施工法により十分な精度が得られることを確認した。

表3 PC軌道桁の精度基準例

項目	通り狂い 高低狂い	水準狂い	走行面と側面の 直角度	桁 幅	桁 長
許 容 値	部分的通り, 高低狂い 3mm/4m 全体的通り, 高低狂い 15mm/20m	3/1000 RAD	4/1000 RAD	+4mm -2mm	±10mm

(C) 走行面の仕上

走行面は平面性と適度な粗さが要求される場所であるが、カントが有る場合打設後早期に仕上げると、その後表面コンクリートが流動するため精度を確保できない。そこで硬化始発時間程度で最終仕上げをしたところ良好な結果を得た。本実験では、コンクリートの混練後ほぼ4時間であった。

(D) シール状況

上フランジと型枠板の間のシール方法は、上フランジ側面に型枠板を直接押し当てる方法と、面取り材を兼ねてゴムシールを用いる方法の2種類試みたが、いずれもセメントミルクなどの流出はほとんどなく、良好な結果であった。

(E) ひび割れの防止

ひび割れを防止する方法は以下のとおりである。第1に、死活合成として設計し、死荷重によるコンクリート断面の圧縮プレストレスを期待する。第2に、コンクリートは単位水量を少なくした配合とし、ワーカ

ビッチーを考慮して流動化コンクリートとする。第3に、養生中のコンクリートの乾燥を防止する。第4に、配筋はコンクリートの打設に支障がない範囲で、小径鉄筋を密に均等に配置し、鉄筋の純かぶりを50mm程度とする。

7 あとがき

本文で紹介したモノレール用合成軌道桁は、

- 1) 走行面のスリップの問題がない。
- 2) 鋼桁上フランジの設計法、応力状態、構造が改善される。
- 3) 疲労がほとんど問題とならない。
- 4) 剛性が比較的大きいため、走行性が良く、振動、騒音も小さい。
- 5) 単純桁を基本としており、軌道の調整が容易である。
- 6) 鋼重が大幅に低減し、建設費の低廉化を実現できる。

などの技術的、経済的利点を有しており、また技術的検討課題に関してもほぼ完了していることから、実用化の段階に入っており、今後実工事に向けての詳細な検討を実施するつもりである。

図6は合成構造の問題とは直接関連しないため紹介だけにとどめるが、単線形式合成軌道桁である。その構造は支点上にだけ横桁を設け、中間部の横桁、横構を排除したことを特徴としており、支間長に応じた最適桁高を選定できる点や、外観はPC軌道桁と同一で開放観があり美観上優れている。技術的検討課題は、軌道桁の横たわみと、横倒れ座屈安全性および支点上横桁の剛性、強度であるが、前者は支間長と曲線半径に制約を設けることで解決され、後者は参考文献²⁾にてその安全性が確認されている。

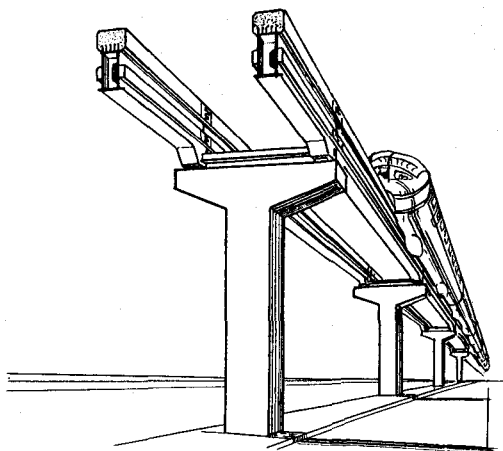


図6 単線形式合成軌道桁

参考文献

- 1) 「北九州都市モノレール小倉線PC軌道桁の設計と施工」 清水、大高、久野、橋梁、1982.11
- 2) 「モノレール用箱桁の強度実験」 伊藤、福本、植村、西田、土木学会中部支部、1986