

# 超電導磁気浮上式鉄道ガイドウェイ (ビーム方式) の施工精度

古川 敦<sup>1</sup>・山住克巳<sup>2</sup>・橋本渉一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修(財)鉄道総合技術研究所 軌道技術開発推進部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>2</sup>正会員 (財)鉄道総合技術研究所 山梨実験センター (〒402-0006 山梨県都留市小形山291-2)

<sup>3</sup>正会員 工博(財)鉄道総合技術研究所 基礎研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

浮上式鉄道のガイドウェイには、地上1次リニアモーターの電機子としての機能および鉄車輪／レール系軌道のレールに相当する機能を満たすため、従来の構造物と比較して高い施工精度が要求されている。本論文は、浮上式鉄道山梨実験線に導入されているガイドウェイ構造のうちビーム方式ガイドウェイについてその施工方法および施工結果を述べたものである。施工の結果側壁ビームの製作精度、支承部の製作精度およびビームの架設精度とも所定の要求精度を満足するものであった。これによる当該区間の車両の乗り心地は新幹線と同程度と推定される。

**Key Words:** MAGLEV guideway, side wall beam, construction accuracy, riding quality

## 1. はじめに

リニアモーター駆動の磁気浮上式鉄道は、実用型の車両を有する実験線として、日本のJR、HSS、Tおよびドイツのトランスラピッドの3方式が、それぞれ独自の方式にて開発を進めている。JR方式の磁気浮上式鉄道は、回転型シンクロサモーターの界磁(永久磁石)に相当する磁石として車両に搭載された超電導磁石を適用し、電機子に相当する巻線部として地上に敷設された推進コイルを用いている。この推進コイルへ供給する電流の向きを周期的に変化させることにより移動磁界が発生し、この移動磁界と車載の超電導磁石との吸引、反発力により車両が推進する<sup>1)</sup>。また車両の支持、案内は地上に敷設された浮上案内コイルのそばを車載の超電導磁石が通過する際に浮上案内コイルに発生する誘導電流が発生する磁界と、超電導磁石との間の吸引、反発力によってなされる<sup>1)</sup>。これらの推進コイル、浮上案内コイル(総称して地上コイルと呼ぶ)は、ガイドウェイ側壁部に取り付けられている(図-1)。

このようにガイドウェイ側壁は地上1次リニアモーターの電機子としての機能ならびに車両から地上へ作用する3次元方向の荷重を支持しているという意味において、鉄車輪／レール系鉄道のレールに相

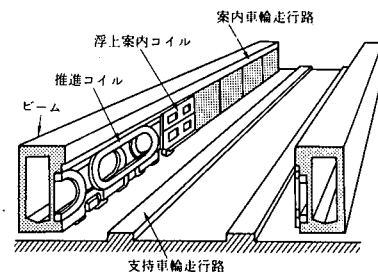


図-1 ガイドウェイの構造(ビーム方式)

当する機能を有しているといえる。地上1次リニアモーターの電機子の機能としては、車載の超電導磁石との位置関係を一定のものとし、両者の間に作用する電磁力を一定に保つことが要求される。それとともに側壁面に地上コイルを取り付けることから、地上コイルに面外方向の曲げ応力が作用しないよう側壁面の面精度を確保する必要がある。またレールとしての性能については、鉄車輪／レール系鉄道の軌道管理の観点と同様、列車の乗り心地および走行安全性の面から軌道狂い(以下ガイドウェイ狂いと呼ぶ)の大きさがある一定値以下とする必要がある。浮上式鉄道の場合脱線の恐れは無いので、ガイドウェイ狂いの管理値を規定するのは主として乗り心地ということになる。また車両が車輪支持にて走行するときの走行性から側壁目地部の目違いおよび遊間

も許容誤差が規定されている。通常の鉄車輪／レール系鉄道の軌道では、車両の走行とともに軌道狂いが進行し、これがある許容値を越えた際に軌道狂いの修正作業を行う。しかしながらガイドウェイ側壁はコンクリート構造物であり、供用後の変位・変形の修正は非常に困難である。このため製作時に寸法精度を厳しく管理することが必要である。このように軌道管理の観点から製作にあたって高い寸法精度が要求されるコンクリート構造物として跨座式モノレール<sup>2)</sup>やH S S T方式<sup>3)</sup>磁気浮上式鉄道の軌道桁があるが、J R方式の場合主として超高速で走行するという理由により上記の軌道桁より要求される製作精度はより高いものがある。これに対し本報告は、浮上式鉄道山梨実験線におけるビーム方式ガイドウェイの施工精度結果について述べるものである。

## 2. ガイドウェイの要求精度

前章で述べたとおり浮上式鉄道のガイドウェイには

- (1) 電機子としての精度
- (2) レールとしての精度

が要求される。山梨実験線建設時における具体的な要求精度について以下に述べる。

### (1) 電機子としての精度

電機子としての精度については、前述のとおり界磁との間隔を一定にすること、推進コイル取り付けのための側壁面の精度が要求される。このうち前者については従来内方のみ規定されている建築限界を外方に対しても規定することとしている。すなわち建築限界としてガイドウェイ中心線からガイドウェイ側壁までの距離の誤差を±5mm以内とすることで、車両から推進コイルまでの距離の変動を小さくしている。

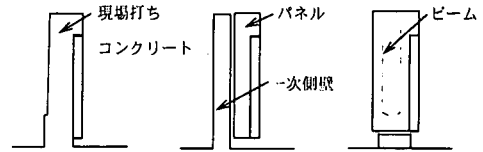
また、ガイドウェイ側壁面に不陸があると、推進コイルを取り付ける際にコイルに面外曲げが作用する。このため側壁面の1コイルあたりの面精度を2mmと規定している。側壁面には推進コイル1基あたり8本の取付用インサートを埋め込むが、推進コイル取り付けにあたっては、このうち3つのインサート位置により基準面を形成し、この基準面に対する距離で面精度を評価する。またインサートの間隔の許容誤差は±1mmである。

### (2) レールとしての精度

ガイドウェイ狂いの建設・整備目標は、新幹線と

表-1 ガイドウェイの施工の許容誤差

項目	許容誤差	備考
基差点測量	±2mm	150m波長に対する値
通り狂い	±4mm	浮上コイル中段における片側側壁の値
高低狂い	±4mm	同上
軌間狂い	±6mm	通り狂いの左右側壁の和
水準狂い	±6mm	高低狂いの左右側壁の差
側壁の水平位	±5mm	基差点に対する値
側壁の傾き	±6mm	浮上コイル上縁と下縁の差
案内路の目違	±6mm	
側壁の隙間	±10mm	設計値に対する値



(1)直付方式 (2)パネル方式 (3)ビーム方式

図-2 ガイドウェイ3方式の断面図

同程度の乗り心地を確保することとしている。新幹線においては最高営業速度の向上とともに管理する軌道狂いの波長が長くなってきており現在40m弦長に対するレール位置の離れにより軌道狂いが管理されている。浮上式鉄道の場合、最高速度が500km/h(≒140m/s)であるため最長150m(約1Hzの振動に相当する)の波長までのガイドウェイ狂いを管理する必要がある。また振幅については上記の新幹線と同程度の乗り心地の確保のため波長150mの狂いに対し最大6mmとしている。ただし波長と振幅の関係を与えるだけでは実際の路線測量、側壁施工等ではできないため、施工開始に先立ち各施工段階における施工誤差(標準偏差)と乗り心地との関係をシミュレーション<sup>4)</sup>により求め、標準偏差の3倍を許容誤差としている。また推進コイルと同様、浮上案内コイルについても面精度、インサート間隔の誤差を規定している。

表-1にガイドウェイ施工の許容誤差を示す。

## 3. ビーム方式ガイドウェイの概要

山梨実験線においては、ガイドウェイ側壁の構造として直付方式、パネル方式、ビーム方式の3方式が導入されている<sup>1)</sup>(図-2)。直付方式は現場打設のコンクリート側壁に現場で直接地上コイルを取り付ける方式である。パネル方式のガイドウェイでは、ガイドウェイ側壁は沿線ヤードで製作したコンクリートパネルであり、これにヤード内で地上コイルを取り付けた後現場へ運搬し、現場であらかじめ製作された側壁(これを1次側壁と呼ぶ)面に取り付けるものである。ビーム方式<sup>5)</sup>のガイドウェイでは、ガイドウェイ側壁は沿線ヤードで製作したコン

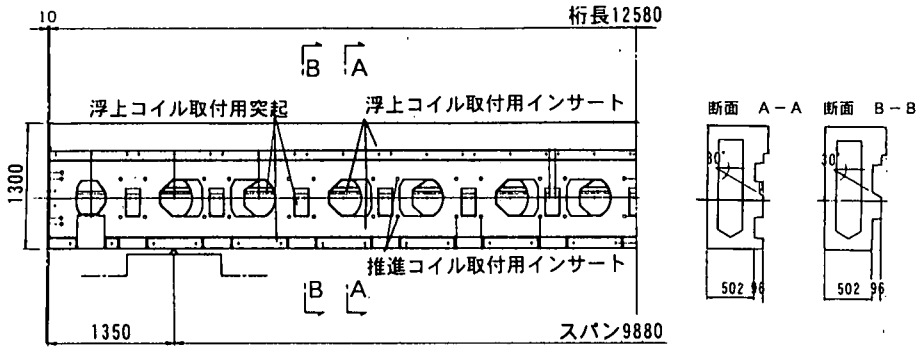


図-3 側壁ビーム一般図

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	プレストレス導入時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	最大水セメント比 (%)
49	34.3	早強ポルトランド	20 or 25	12±2.5	3.0±1	40

クリート単純桁（これを側壁ビームと呼ぶ）であり、このビームにヤード内で地上コイルを取り付けた後、現場で製作した支承上に架設する。ビーム方式ガイドウェイの施工にあたっては、ビームの製作、支承の製作および側壁ビームの架設の3段階で厳しい施工精度が要求されている。

側壁ビームは、構造上はプレテンション方式のプレストレストコンクリート単純桁である。標準桁長は12.58m、支間9.58m、単体の質量は約17tである。なお一部区間には桁長8.98m、支間6.28mの短尺ビームも用いられている。また上縁の幅は65cm、下縁の幅は50cmで、重量軽減のため中空構造となっている。ガイドウェイ内面側の側面には、地上コイル取付・支持のための複雑な形状をした突起が設けられている。プレストレス力はSWPR7B-12.7のPC鋼線15本により1ビームあたり2000kNが与えられている。PC鋼線以外の鉄筋は磁気抗力低減のため全て高マンガン鋼による低磁性鉄筋とし、さらに結束線はビニル被覆鉄線として鉄筋網によるループ電流の発生を低減した。突起部の補強筋は非磁性化および組立加工の容易さからCFRPによる成型品とした。側壁ビームの一般図を図-3に、またコンクリートの配合を表-2に示す。

支承は現場打設のコンクリートで、コンクリート台座、高さ調整用シムプレートおよびゴムシューにより構成される。シムプレートと台座の間は無収縮モルタルにより充填される。またゴムシューは鉛プラグにより制振性能を向上させたもの<sup>9)</sup>を用いている。支承部において側壁ビームは1支承あたり2本のPC鋼棒にて鉛直方向に締結される。この締結力

表-3 ビーム方式ガイドウェイの許容誤差

項目	許容誤差	備考
桁長	±1/250	材令を考慮する。
断面寸法	±5mm	
水平そり	±2mm	支承を結ぶ線を基準
上下そり	±2mm	同上
コイル面精度	2mm	1コイルあたり
インサート間	±1mm	
底面の鉛直度	±3/1300	
支承高さ	±2mm	C基準点に対する値
支承勾配	1/500	設計勾配に対する値

により側壁ビームに作用する横方向の荷重に対しても抵抗する。

製作された側壁ビームにはヤード内で約4週間の養生の後、地上コイルを取り付ける。その後専用の運搬架設システムにより運搬・架設される。

前章に記したとおり、ガイドウェイ内空寸法および側壁コイル面寸法は、リニアモーターの電機子およびレールとしての機能確保の観点から許容値が規定される。このうち側壁ビームの製作の際には側壁コイル面寸法および高低、通り狂いに、支承部製作時には高低狂いに、側壁ビーム架設時には通り狂いに留意して施工を行う必要がある。ビーム方式ガイドウェイの施工許容誤差を表-3示す。

#### 4. 側壁ビームの製作

##### (1) 側壁ビームの製作方法<sup>6)</sup>

側壁ビームの製作にあたっては、後述する型枠脱着装置が必要であること、またビーム製作後の地上コイル取付および架設の便を考慮し、通常の2次製品の工場ではなく、路線沿線に専用の製作ヤードを

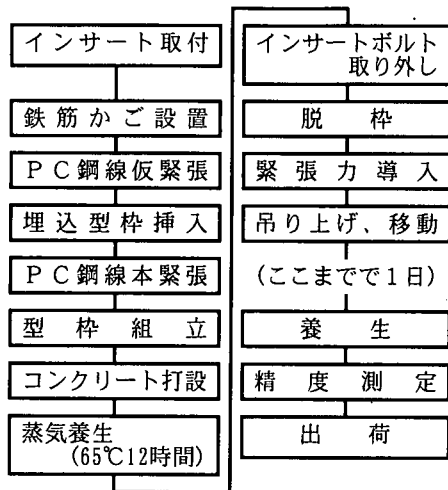


図-4 側壁ビームの製作手順

設けた。山梨実験線の場合、初狩トンネルと高川トンネルの間の明かり区間の本線南側に約1万㎡の土地を造成して、側壁ビーム4本を同時緊張可能な製作ライン2ラインを主設備とする製作ヤードを設けた。これにより1日最大8本の側壁ビームの製作が可能となる。またヤード内には鉄筋加工場、蒸気養生設備、16.0本分の仮置き場および地上コイル取付場等を設備している。側壁ビーム製作の手順は図-4に示すとおりである。

## (2) 側壁ビーム製作上の留意点

表-3に示すとおり、側壁ビームの製作には高い精度が要求される。この精度を満たすため、側壁ビームの設計・製作にあたって以下の点に留意した。

### a) P C 鋼線の配置

側壁ビームはP C桁であるため、プレストレス力による変形が生じる。また材令の進行に伴いクリープ、乾燥収縮による変形も生じる。特に偏心圧縮力による桁のそりは高低、通り狂いの原因となるので極力小さくすることが望ましい。このため側壁ビームの設計においては断面図心とプレストレス力の作用点が極力同じとなるようP C鋼線を配置した。

### b) 型枠の製作

側壁ビームの製作精度を確保するための方策はいくつか考えられるが、特にコイル取付面精度のように局部的な寸法精度については型枠の製作精度がそのまま製品の製作精度に直結することになる。側壁ビームの型枠の製作にあたっては加工方法、補強方法等精度確保のために以下の点に留意した。

①プレストレス力による弾性短縮量およびクリープ、乾燥収縮を考慮して型枠を9mm長く製作した(桁長

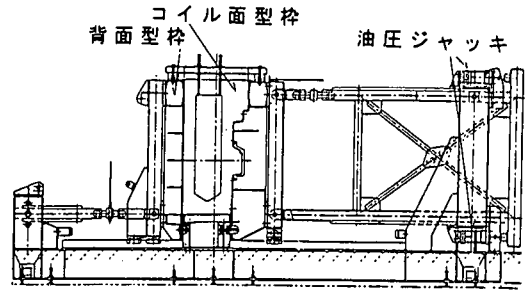


図-5 型枠脱着装置

12.6mの場合)。なお短縮量の計算に用いたコンクリートの諸元は弾性係数が $3.3 \times 10^4 \text{ kN/cm}^2$  (ただし材令によって変化させる。) 乾燥収縮はコンクリート示方書(平成3年版)式(解3.2.3)クリープ係数は同・式(解3.2.6)によった。

②地上コイル取付用インサートピッチの精度確保のため、コイル面の型枠は鋼板を溶接した一枚構造とした。インサート穴加工はこの一枚の鋼板に対する大型NC旋盤によるレーザー加工とした。またインサート取付ボルト径に対するインサート穴の余裕は0.2mmとした。

③浮上案内コイル取付用突起部は鍛造または鋳造品とし、これを機械加工することで、寸法誤差のばらつきを小さくした。また脱枠時に突起部に欠けを生じないようにコイル取付精度に影響しない範囲にウレタンまたはテフロンを貼り付けた。剥離剤は、市販のもののうち地上コイル取付用インサート内に流入したときの取付トルクへの影響が小さいものを選択して使用した。

④コイル面型枠はH鋼2本で補強し、コンクリート打設等による型枠の変形を小さくした。またコイル面の鋼板は剛性およびレーザーによる加工性を加味の上厚さ9mmとした。

⑤背面側型枠とコイル面型枠の幅を規定する幅決め材を45cm間隔で配置し、型枠の変形を防止すると共に水平方向のそりを小さくした。

### c) 型枠脱着装置の開発

側壁ビームのコイル面には浮上案内コイル取付のための突起が多数ある(図-3)。これらの突起に欠けを生ずることなく脱枠するためには、型枠を水平に移動させる必要がある。また型枠の組立精度が悪いとビームの製作精度に影響するが、型枠組立毎に組立精度を測定することは施工サイクルに影響する。このため、型枠を水平に着脱することが可能で、また組立時に組立精度を確保できるような型枠脱着装置を開発した。脱着装置を図-5に示す。

脱着装置はコイル面1面あたり10基の油圧ジャッキを持ち、この油圧ジャッキを連動させることにより水平に脱枠をすることができる。また型枠の高

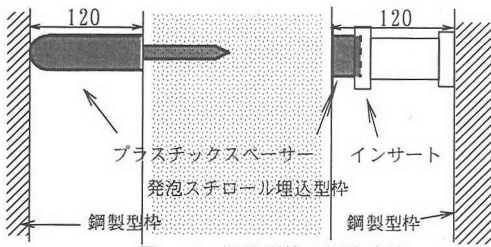


図-6 埋込型枠の固定方法

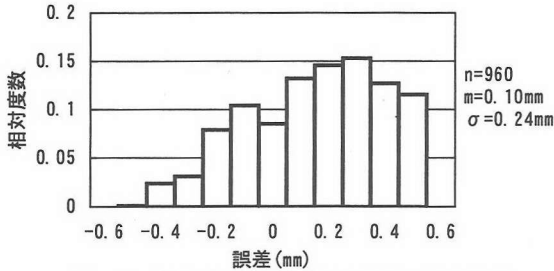


図-7 型枠インサート穴間隔誤差の発生確率

さはレール部に0.1mm単位で高さ調整シートを挿入することで精度を確保した。通り方向については調整ジャッキにより精度を確保した。

#### d) 埋込型枠の固定

側壁ビームの中空部分は発泡スチロール製の埋込型枠を使用している。中空部分の両側のウェブは厚さ120mmと薄く、埋込型枠の位置がコンクリート打設時にずれるとウェブ厚が変わり断面図心に変化してプレストレス力によるそりが生じる。このため、型枠およびコイル取付用インサートに反力をとる専用スペーサーを用いて埋込型枠の移動を防止した(図-6)。また発泡スチロールは厚さ12mmのベニヤ合板で補強し、変形を防止した。

#### e) コンクリート締め固め

コンクリートの締め固めに際しては、振動により地上コイル取付用インサートが脱落しないよう、背面側の型枠振動器を使用した。地上コイル取付面側については径30mmの棒パイププレートを使用した。

### 5. 側壁ビームの製作精度

#### (1) 型枠の製作精度

図-7, 8にそれぞれ12.6m ビーム用型枠8基のインサート穴間隔誤差および浮上コイル取付用突起高さ(設計値98mm)を示す。型枠の段階では双方とも目標誤差を最大0.5mmとしたが、いずれも目標値を満足する結果となった。図-7で平均値が大きめとなったのは削孔時の切りしろの影響と思われる。

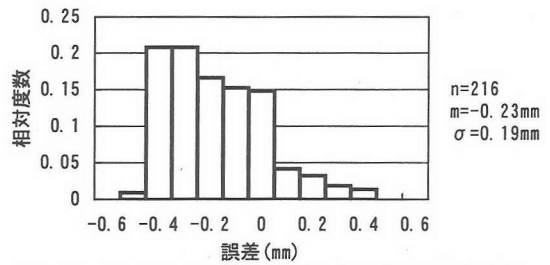
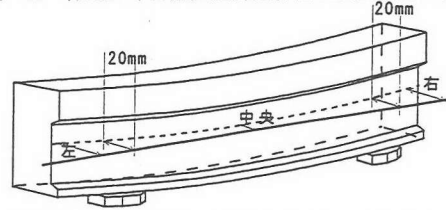


図-8 浮上コイル用突起部型枠高さ誤差の発生確率



支点部にてコンクリート面より20mmあがりの位置に弦を張り、側壁ビーム両端およびスパン中央にて離れを測定する。

図-9 水平そりの測定方法

#### (2) 側壁ビームの製作精度

側壁ビームの製作精度結果を表-4に示す。母数は鉄道総研において製作した標準長ビーム356本である。各値の測定方法は表中および図-9に示すとおりである。測定は日照、風向等の影響を受けないように移動式のテントによりビームを覆って行った。また同表には型枠別による製作精度の差を確認するために、型枠を因子として行ったF検定の結果を示している。これらの結果から得られた考察を以下に述べる。

##### a) 桁長

誤差の平均値は+3.57mmであった。側壁ビームの型枠はプレストレス力による弾性短縮、クリープ等を考慮して9mm長く製作してある。桁長の測定は材令4週を基本としており、このときの弾性短縮等を考慮した設計長は+5.2mmであることから、平均値は設計値に対して1.6mmほど短いことになる。これは製作が10月~1月の秋冬期であり、外気温が標準気温(15度)より低めであったためと考えられる。また桁長については型枠の違いによる差は見られなかった。

##### b) 桁幅, 桁高

桁幅, 桁高とも設計値よりわずかに大きい傾向にあった。桁幅についてはF値が6.85と大きく型枠の違いによる差が見られた。このことから桁幅が広めであったのはコンクリート打設時のコンクリート圧により型枠間隔が幅決め材のアソビ分だけ広がる傾向にあったためと考えられる。桁高が大きめであ

表-4 側壁ビームの製作寸法精度結果

	測定位置	設計値	平均(mm)	標準偏差(mm)	F値	符号	測定方法
桁長	4箇所の平均	12,580mm	3.57	0.83	0.73	長い方が正	スチールテープ
桁幅	6箇所の平均	650mm	0.85	0.33	6.85	広い方が正	鋼尺
桁高	6箇所の平均	1,300mm	0.98	0.47	2.45	高い方が正	鋼尺
水平そり	案内路左		-0.19	0.76	33.07	背面側が正	図-9
	案内路中央	0.02	0.06	0.65	20.27	"	"
	案内路右		0.10	0.75	21.62	"	"
	コイル中段左		0.46	0.59	23.17	"	"
	コイル中段中	0.02	0.16	0.57	30.04	"	"
	コイル中段右		0.42	0.69	56.12	"	"
	コイル下段左		0.89	0.62	9.29	"	"
	コイル下段中	0.02	0.08	0.58	18.98	"	"
	コイル下段右		0.95	0.64	19.17	"	"
	上下そり	コイル中段左		0.03	0.39	8.25	上そり正
コイル中段中		0.25	0.24	0.54	5.98	"	"
コイル中段右			-0.05	0.36	3.16	"	"

※そりの設計値は材令30日におけるプレストレス力による桁中央のそり。

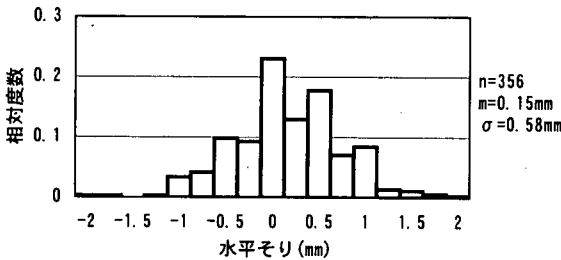


図-10 側壁ビーム水平そりの発生確率

(浮上案内コイル中段のスパンセンターにおける値)

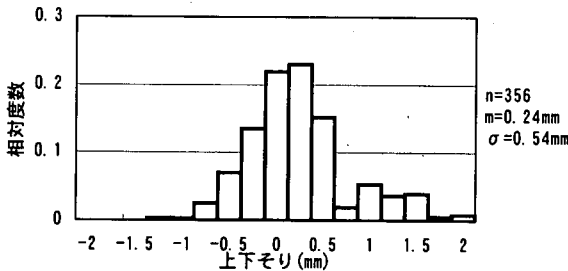


図-11 側壁ビーム上下そりの発生確率

(浮上案内コイル中段のスパンセンターにおける値)

たのは人力によるならしの影響と思われる。

c) 水平そり

水平そりはF値が大きいものでは56に達し型枠の違いによる差が顕著に見られた。このことから水平そりの第1の要因はそりの測定位置におけるコイル取付用突起の高さの個体差にあることになる。なお、表-3に示す許容誤差については概ねこれを満足する結果が得られた。桁スパン中央のコイル中段における水平そりの発生確率を図-10に示す。

d) 上下そり

上下そりについては水平そりほどではないが型枠の違いによる差がみられた。またスパン中央におけるプレストレス力によるそりはほぼ設計値とおりであった。上下そりの誤差発生確率を図-11に示す。

以上得られた結果より、側壁ビームの製作精度は所定の目標値を満足したものとなった。これにより

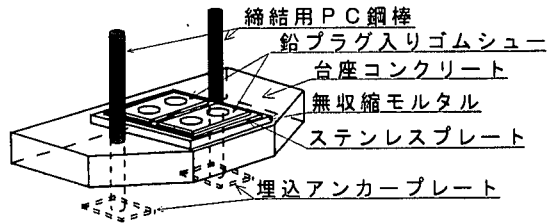


図-12 側壁ビーム支承部概念図

前節で述べた側壁ビーム製作上の留意点はほぼ所定の目的を達したと考えている。この中でも特に型枠の製作精度が製品の製作精度に大きな影響を与えることがわかった。

6. 支承部の施工

(1) 支承部の施工方法<sup>9)</sup>

側壁ビームの支承部を図-12に示す。側壁ビームは1台座あたり2本のPC鋼棒で締結される。このPC鋼棒は台座コンクリート内に埋め込まれた部分とそれより上に分割されており両者は側壁ビーム架設時にカップラーで接続する。またビーム側にはPC鋼棒径に対し±25mmの余裕をもったシース穴が設けられている。

ゴムシューには、超高速で走行する列車から作用する動的荷重に対し系の水平方向の固有振動数を高くするため、鉛プラグ入りゴムシューを採用している。また、将来の構造物の沈下等に対し高低方向のガイドウェイ狂いの修正のためのステンレスプレート(以下シムプレートと呼ぶ)をゴムシューの下に挿入している。シムプレートと台座コンクリートの間は無収縮モルタルで充填している。

(2) 支承部の精度管理

支承高さの製作精度は高低方向のガイドウェイ狂いに影響を与える。また支承の傾きの誤差が大きいと側壁ビーム架設後、天端にて隣接するビーム間に

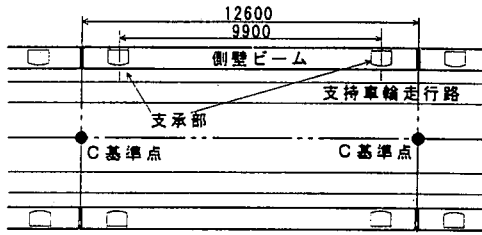


図-1 3 C基準点とガイドウェイ各部の位置関係

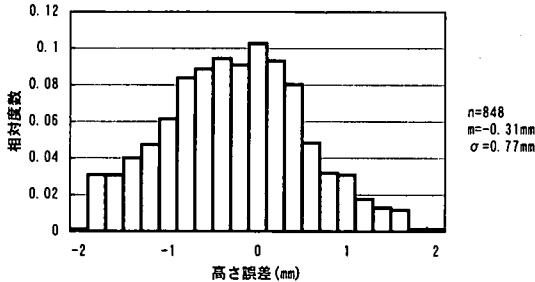


図-1 4 支承高さ誤差の発生確率

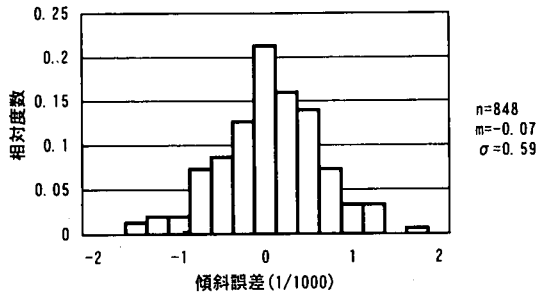


図-1 5 シムプレート横断勾配誤差の発生確率

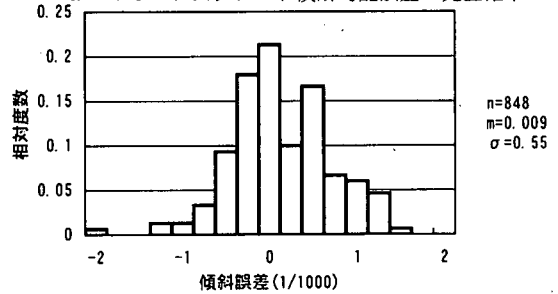


図-1 6 シムプレート縦断勾配誤差の発生確率

目違いが生じる。また同様に締結用P C鋼棒の傾斜の誤差が大きいとビーム天端における鋼棒の変位が大きくなり、架設・締結時に不具合を生じる。なお山梨実験線においては長波長のガイドウェイ狂いを小さくするために、ガイドウェイ中心に側壁の標準長(12.6m)と同間隔に測量基準点(C基準点)を設けている。支承部の精度管理は全てこのC基準点を基に行われる(図-1 3)。これらの精度を達成するための支承部の施工方法を以下に述べる。

#### a) 埋込アンカーカブラーの建込

埋込アンカーカブラーは、隣接する台座と併せて4本のアンカーカブラーを1本の保持枠で支持し、台座コンクリート用鋼製型枠にてこの保持枠を保持している。この方法のメリットは、2台座分のアンカーを同時に保持するためコンクリート打設前の安定性が良いこと、また直線区間、曲線区間とも同一の施工方法で実施できることである(浮上式鉄道の場合在来鉄道のように曲線区間でスラックを設ける必要が無いので、ガイドウェイの断面形状は直線、曲線とも同一である)。また保持枠の位置出しは、C基準点から専用の治具にて行う。

#### b) シムプレートの設置

支承部の施工精度は最終的にはシムプレートの高さ、傾斜にて左右される。このためシムプレートの設置に際してはピンポイント方式と呼ばれる施工方法を開発した。

ピンポイントとは従来の軌道スラブ用基準器を改造したもので3次元方向に調整可能な軸にパチンコ玉大のピンポイントを取り付けたものである。シムプレートには裏面にピンポイント受け用の切り込み

が設けてある。ピンポイントは予め施工された台座上のおおよその位置に設置しておき、その後専用治具でC基準点からの正確な位置に調整する。これでシムプレートの高さは正確に決定される。その後、ピンポイント上にシムプレートを設置し20秒読みの傾斜計で傾斜を調整する。こうしてシムプレートの3次元位置を正確に決定した後、台座コンクリートとシムプレートの間は無収縮モルタルを注入する。なお事前に施工試験を行い、無収縮モルタル注入時のシムプレートの移動量は無視出来る程度であることを確認している。

#### (3) 支承部の製作精度結果

図-1 4は支承高さの誤差の発生確率である。母数は鉄道総研施工の848支承である。平均値は-0.31mm、標準偏差は0.77mmである。また図-1 5、16はそれぞれシムプレートの横断勾配、縦断勾配方向の誤差の発生確率である。いずれの場合も許容誤差をほぼ満足するものとなっている。また、特に縦断勾配誤差で、頻度のピークが2つ見られるが、これは工程の都合上施工時期が2期に分かれたための影響であると考えられる。

### 7. 側壁ビームの架設

#### (1) 側壁ビーム運搬架設システム<sup>9)</sup>

側壁ビームの運搬架設にあたっては、以下の5つの項目を基本要求事項としたシステムを検討した。

1) 側壁ビームのガイドウェイ内所定位置への運搬お

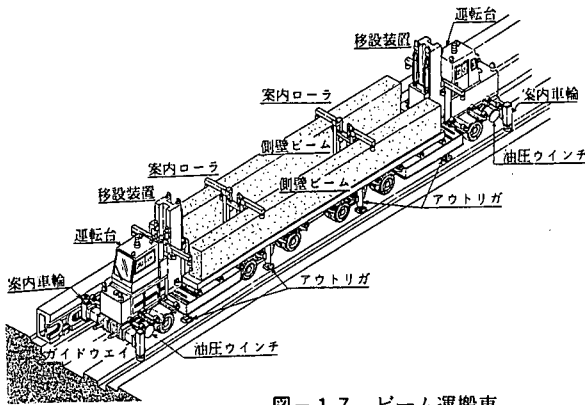


図-17 ビーム運搬車

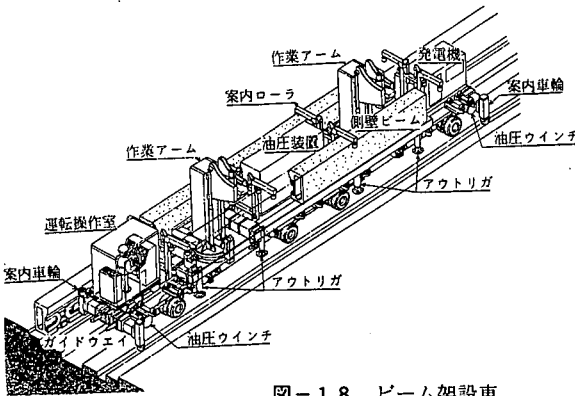


図-18 ビーム架設車

よび架設が安全に所定の精度で行われること。

- 2) 明かり区間およびトンネル区間で同一のシステムで運搬架設が可能であること。
- 3) 運搬から架設までの作業のサイクルタイムを極力短縮し、急速施工が可能であること。
- 4) 建設労働者の不足、建設の機械化といった情勢および作業の効率性を考慮し、極力自動化されたシステムとすること。
- 5) 供用後の側壁ビームの交換作業にも適用可能なシステムであること。

以上、5つの項目を満たすシステムとしてビーム運搬車(図-17)、ビーム架設車(図-18)からなる運搬架設システムを開発した。ビーム運搬車は側壁ビーム2本を搭載し製作ヤードから架設位置へ運搬する。架設位置においてビーム運搬車からビーム架設車へ側壁ビームを縦取りする。ビーム架設車は側壁ビームを所定の位置へ架設する。システムの開発にあたって最も留意したのは側壁ビームの架設精度である。本システムではビーム架設車はCCDカメラを内蔵し、C基準点および縦取りされた側壁ビームの位置を読みとり、架設車自身の姿勢をフィードバックしながら側壁ビームを吊り上げている上部クランプ、および側壁ビームに横断勾配をつける下部クランプの油圧シリンダのストロークを制御

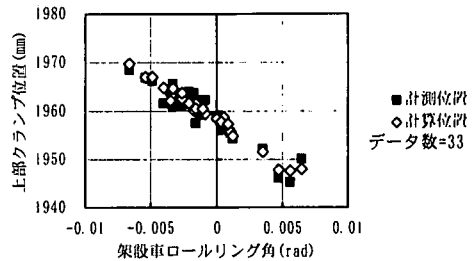


図-19 上部クランプでの架設位置計算値と実測値 (甲府方作業アーム)

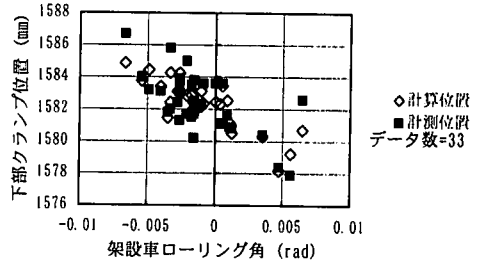


図-20 下部クランプでの架設位置計算値と実測値 (甲府方作業アーム)

し、側壁ビームを所定の位置に架設する。特に架設の線路方向の軸周りの傾斜(ローリング)は側壁ビームの水平方向の架設位置に大きく影響するため、実施工に先立って繰り返し精度の確認試験を行った。

図-19、20に精度確認試験結果の例を示す。同図の■印は実際の架設位置、◇印は架設車のローリング、ピッチング傾斜を加味した計算上の架設目標位置であり、両者の差が架設誤差となる。この架設誤差の標準偏差は1.12mmであり、想定される最大誤差を標準偏差の3倍と想定しても許容誤差は満足することが期待された。

## (2) 側壁ビームの位置調整

上記のとおり架設機械で架設を行ったものの、工事を進めるうちに架設後の側壁ビーム位置調整が必要となった。これは実施工においては、ビーム架設車の実際の架設精度に関する能力が(定置試験と比較すると)外部条件の変化に追従できなかったこと、架設車の走行に伴い車体にねじれ等の残留変形が発生したこと、また側壁ビームや支承の製作誤差が架設精度に影響したことが原因と考えている。特に支承部と側壁ビーム底面の角度に相対差があると、PC鋼棒締結部に側壁ビームの傾斜が変化し、天端で数ミリの移動が発生するため、架設車が所定の精度内にビームを架設しても、締結後に所定の精度を満足しなくなることが発生した。

これに対し、所定の精度を満たさないビームについては位置の調整が必要となる。架設位置の測定お



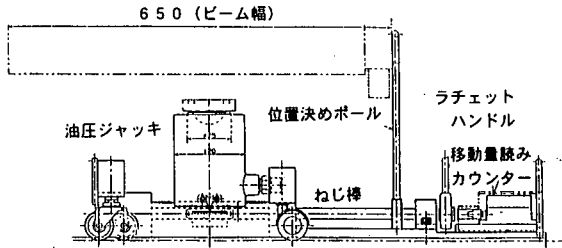


図-21 ビーム位置調整装置

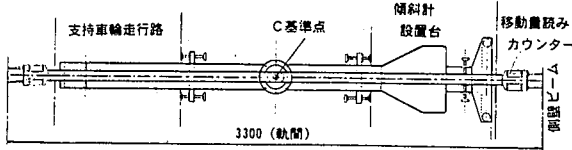


図-22 ビーム離隔測定装置

よび位置の調整を行う時期については以下の4通りの代替案を比較検討した。

- ① 締結部を緊張の上精密測量を行い、許容値を超えたビームについて位置を調整する。
- ② 締結部を緊張の上簡易測量を行い、許容値を超えたビームについて位置を調整する。
- ③ 締結部を緊張せずに精密測量を行い、ある限界値を超えたビームについて位置を調整する。
- ④ 締結部を緊張せずに簡易測量を行い、ある限界値を超えたビームについて位置を調整する。

①、②については締結部の緊張、緩解を複数回行う必要があるため費用の点で問題があるが、調整後の手戻りの可能性は小さい。③、④については締結部の緊張は1回で済むが、前述のとおり締結部緊張時に側壁ビームの姿勢が変化すること等により、調整しなくても良い側壁ビームを調整してしまったり、あるいは調整が必要な側壁ビームを調整しなかったりする可能性があるため、調整限界値は許容値より小さくする必要がある。以上のような得失を検討の上、④の案を採用することとした。図-21にビーム位置調整装置を示す。側壁ビーム位置の簡易計測についてはC基準点から側壁ビーム端部下端までの線路直角方向の離隔を計測する測定器を開発した(図-22)。ビーム位置の調整については、側壁ビームを扛上し、線路直角方向に0.1mm単位で移動可能なジャッキを開発した。また調整工に先立ち既設の側壁ビームの架設結果を検討し、締結部緊張時の姿勢変化等を加味した上で簡易計測による誤差が設計値-1mm、+3mmを超えた場合には位置調整を行うこととした。

図-23に計画調整量と実績移動量の相関を示す。図中の実線は両者を原点を通る直線で回帰したもの

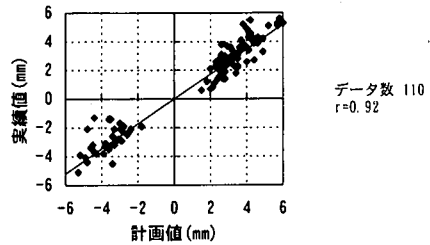


図-23 ビーム位置調整量の計画値と実績値

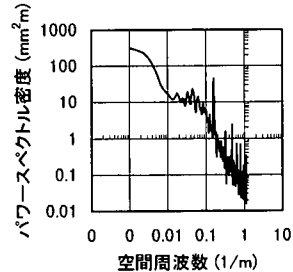


図-24 通り狂いのパワースペクトル密度

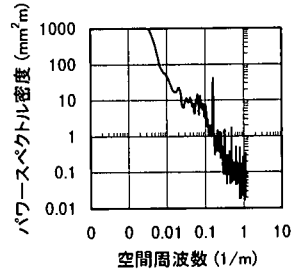


図-25 高低狂いのパワースペクトル密度

である。この直線の傾きは0.86で、実績値は計画値に対しやや小さめの値となっている。しかしながらその相関係数は0.92であり、ビームの位置調整方法としてほぼ目的を達したと考えている。

## 8. ガイドウェイの出来上がり精度

図-24、25に側壁ビーム架設後の架設位置測量結果による通り狂い、高低狂いのパワースペクトル密度(以下PSD)を示す。測定位置はそり計測の時と同様側壁ビーム内で5点(端部2点、支点部2点およびスパンセンター)とし、測定点と測定点の間は直線補間した。測量は市販の光波式3次元測定システムにより、側壁ビーム両端のC基準点を結ぶ直線をx軸とした各測定点の3次元座標を求めた。なお両図に示したPSDは、鉄道総研施工区間の約1.8kmの左右側壁の平均狂いに対するものである。両図より、波長が10m~100mの範囲でPSDはほぼ一定となっている。これは、文献4)で筆者らが予測したとおり、ランダムに発生する施工誤差によるガイドウェイ狂いのPSDは周波数に関わらずほぼ一

定, すなわち白色雑音に近いものとなるためである。在来の鉄車輪/レール系の場合, 軌道狂いのPSDは空間周波数の2~3乗に逆比例するとされており, 空間波長に関わらずPSDがほぼ一定となるのは, 在来の軌道狂いに対するガイドウェイ狂いの特徴となっている。すなわち文献4)での予測結果は, 実際の施工結果により確認されたことになる。

また同区間を500km/hで走行した場合の乗り心地レベルは水平方向で87.8dB, 高低方向で85.2dBであり, 新幹線と同程度の乗り心地が確保できる<sup>10)</sup>。なお実際のガイドウェイ狂いは側壁ビーム架設位置誤差の他にC基準点の測量誤差ならびに浮上コイル単体の製作誤差等が上乗せされるが, これらの誤差が乗り心地に与える影響は側壁ビーム架設位置誤差と比較して小さいことがわかっており, 実際の乗り心地レベルも上記の値とそう大きい差は無いものと考えている。これらについては, 別途開発したガイドウェイ検測車による検測結果ならびにリニア車両の走行試験結果を受けて別途報告したいと考えている。

## 9. まとめ

本論文は, 超電導磁気浮上式鉄道山梨実験線におけるビーム方式ガイドウェイの施工結果を特に施工精度に着目してまとめたものである。本論文より得られた知見を以下に記す。

- (1) ビーム方式ガイドウェイの施工精度は, 側壁ビーム製作精度, 支承部の製作精度とも許容誤差をほぼ満足するものとなった。
- (2) 側壁ビームの製作精度は, 型枠毎に有意差がみられ, 型枠の製作精度が製品の製作精度に影響することがわかった。
- (3) 側壁ビームの架設システムおよび架設位置調整方法により, 側壁ビームの架設精度は許容誤差をほぼ満足するものとなった。
- (4) ビーム方式ガイドウェイ区間の乗り心地レベルは新幹線とほぼ同程度と推定される。

なお, ビーム方式ガイドウェイは全体の約3分の2が日本鉄道建設公団関東支社の施工によるものであり, 本論文で述べた施工方法も公団との共同開発によるものが多い。ここに記して関係各位に深謝する。またビーム方式ガイドウェイの開発, 施工は運輸省の補助金を受けて行われたものである。

## 参考文献

- 1) 宮田尚彦, 松浦章夫, 高木肇: 超電導磁気浮上式鉄道, 土木学会論文集 No. 415, VI-12, pp. 17-25, 1990.
- 2) 小林孝, 大嶋秀夫, 太田喜世治, 斉藤陽二: 高精度モノレール軌道げたの設計・施工, コンクリート工学, vol. 31 No. 2, pp. 27-36, 1993.
- 3) 加藤寿, 高木進, 大野義弘, 鈴木義成: 磁気浮上式鉄道(HSST)における軌道精度管理, コンクリート工学, vol. 31, No. 4, pp. 57-65, 1993.
- 4) 松浦章夫, 橋本涉一, 古川敦: 超電導磁気浮上式鉄道ガイドウェイの施工精度と乗り心地レベル, 土木学会論文集, No. 482, IV-22, pp. 67-76, 1994
- 5) 涌井一: 超電導磁気浮上式鉄道のガイドウェイ構造, コンクリート工学, vol. 28, No. 12, pp. 4-13, 1990.
- 6) 早瀬邦仁, 古川敦: 山梨リニア実験線ガイドウェイ用側壁ビームの製作, 日本鉄道施設協会誌, vol. 33, No. 8, pp. 46-48, 1995.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書平成3年版, pp. 24-29, 1991.
- 8) 狩野弘治, 村上美光, 山住克巳: 山梨リニア実験線ビーム方式ガイドウェイの支承部施工法, 日本鉄道施設協会誌, vol. 33, No. 11, pp. 58-60, 1995.
- 9) 古川敦, 山住克巳, 浦部正男: 浮上式鉄道ガイドウェイビームの運搬機械, ロボティクスメカトロニクス講演会'95講演論文集(Vol. A), pp. 294-297, 日本機械学会, 1995.
- 10) 西澤真人: 乗り心地レベルを考慮した軌道整備: 日本鉄道施設協会誌, vol. 35, No. 1, 1997.

(1997. 7. 22 受付)

## CONSTRUCTION ACCURACY OF BEAM TYPE MAGLEV GUIDEWAY

Atsushi FURUKAWA, Katsumi YAMAZUMI and Shoichi HASHIMOTO

As a parts of long-stator LSM and for good riding quality, it is important to construct MAGLEV guideway to a high accuracy. In case of beam type guideway, we have succeeded in three steps of highly accurate construction which are production of beam in the field factory, production of shoe in-place and erection of beam. In all construction steps, allowable error values are almost satisfied, and the riding quality of MAGLEV vehicle on this section will be equal to Tokaido SHINKANSEN even if the maximum velocity of MAGLEV is as twice as SHINKANSEN.