超電導磁気浮上式鉄道のガイドウェイ構造

涌 井

—*

概 要 JR 方式超電導磁気浮上式鉄道のガイドウェイ構造において、構造計画・設計・技術開発面でとくに検討を要する事項として、長波長にわたり高い軌道精度を実現するための軌道と土木構造物の構成方式（側壁ビーム方式ガイドウェイ）、超高速に対するけたの動的設計法、車両とガイドウェイの動的相互作用解析による乗り心地・走行安全性評価、長大橋の変位・変形状と採択可能な橋りょう形式、ガイドウェイ構造の低・非磁性化について紹介する。

キーワード：超電導磁気浮上式鉄道（マグレブ）、ガイドウェイ構造、長波長精度、プレキャストコンクリート、動的設計、変位・変形制限、低・非磁性、新素材

1. はじめに

JR 方式超電導磁気浮上式鉄道（マグレブ）は、図-1 に示すように、浮上用コイルが推進用コイルと同じく側壁にマウントされる「側壁浮上方式」を基本システムにして開発が進められている^{1)~3)}。

本方式は、超電導磁石を利用した誘導浮上方式であり、車両とガイドウェイ構造との間隙が約 10 cm と大きくとれることが特徴である。ただし、浮上するためには、補助車輪による助走（約 100 km/h 程度まで）が必要である。

案内も浮上と同様な方式で行い、左右方向にも 10 cm 程度の間隙が確保される。

推進にはリニアシンクロナスモーターを使用しており、地上側のコイルに電力を供給する地上 1 次方式である。

ガイドウェイ構造において、従来の鉄道の軌道および土木構造物と比較して、構造計画・設計・技術開発面でとくに検討を要する事項としては、以下の点があげられ

る。

- 1) 超高速にともない、従来よりも長波長（50~150 m）にわたり高い軌道精度が必要となる。
そのため、軌道と土木構造物の構成方式について、建設と保守の両面から、さらに明確なコンセプトが必要となる。
- 2) 超高速に対して、構造物の動的設計を厳密に行わなければならない。
- 3) 乗り心地・走行安全性評価の面から、車両とガイドウェイの動的相互作用について、高度な解析による検討を要する。
- 4) 長大橋等において変位・変形制限が厳しくなる。
- 5) ガイドウェイ構造の低・非磁性化について検討する必要がある。

2. 軌道と土木構造物の構成方式

2.1 軌道として具備すべき要件と方策

従来の鉄道では、車両と軌道との接点は長尺で丈夫なレールのみであり、土木構造物の上に軌道を敷設するだけという、きわめて単純なコンセプトですんでいた。

これに対してマグレブは、次の点において厳しい条件にある。

- 1) 支持・案内・推進のためにガイドウェイ側に設置される機能部品が従来のレールよりもはるかに高度なものとなり、かつ部品点数も多くなる。
- 2) 航空機に匹敵する良好な乗り心地を得るためには、超高速車両の動揺を引き起こす長波長の狂い（車両が通常もつ 1~2 Hz の固有振動数との関係から、0.5~1 秒間の走行距離に相当する波長の狂いが問題）をミニマムにしなければならない。

JR 方式マグレブにおいては、地上コイルの狂いを 50~150 m 波長の範囲で上下・左右 ±5 mm 程

図-1 側壁浮上方式

*わくい・はじめ/（財）鉄道総合技術研究所 涌井研究室（コンクリート構造担当）室長

度に抑えることが望ましいとされている²⁾。ちなみに新幹線では、40 m 波長までの範囲において ± 10 mm 程度でレールの狂いを管理している。

3) これらの技術的要件を満たしたうえで、経済的な要請にもこたえなければならない。

以上の要件から、ガイドウェイ構造における軌道と土木構造物の構成方式については、従来の鉄道よりも進んだ明確なコンセプトをもつことが不可欠となる。

構成のポイントは次のとおりである。

- 1) 機能部品を組み込む軌道部分を小単位のモジュール構造として分離する。
- 2) モジュール構造は、高精度のプレキャストコンクリート製品とする。
- 3) モジュール構造と土木構造物との接点で集中的に狂いを調整できる構造とし、これにより長波長精度を確保・維持する。
- 4) 省力化施工、機械化施工、急速施工が可能な構成方式とする。
- 5) 土木・軌道・電気という、隣接または異業種間の連携がとりやすい構成方式とする。

2.2 構成例

側壁浮上方式用のガイドウェイ構造としてはいくつかの構成方式が提案されているが、このうち筆者らが提案した側壁ビーム方式ガイドウェイ⁴⁾を図-2に示す。

側壁ビーム方式ガイドウェイは、軌道としての側壁ビームと、それを支持する土木構造物から構成される。前提条件および構成のポイントは次のとおりである。

- 1) 推進用コイルは2層配置となり、その上に浮上・案内コイルがかぶさること、さらにコイル上部には補助車輪案内路も必要であることから、側壁表面の構造は複雑な形態になる。
- 2) コイル取付け部では、軌道としての調整代はほと

んど期待できない。想定している取付け方法と実作業の面からみても、コイルを個々に調整することは

図-2 側壁ビーム方式ガイドウェイ

Guideway Structures for Superconductive Magnetic Levitated Railway System

By Hajime Wakui

Concrete Journal, Vol. 28, No. 12, pp. 4~13, Dec. 1990

Synopsis This paper presents an introduction of some demanding topics of study for the planning, design and technical development of the guideway structures for JR's superconductive magnetic levitated railway system. These include the method of combining track and infra-structures to maintain the position of the elements to minimize long-wave track irregularity (beam-type guideway system for side-wall levitation), the dynamic design of structures for ultrahigh-speed vehicles, the evaluation of riding comfort and running stability through dynamic interaction analysis between vehicle and structure, the study of the deformation and deflection of long-span bridges to select adequate types, and low or non-magnetic guideway structures.

Keywords : superconductive magnetic levitated train system (MAGLEV), guideway structure, long-wave track irregularity maintenance, precast concrete, dynamic design, deflection and deformation limit, low or non-magnetism, advanced composite materials

実現可能な方策とは考えがたい。

- 3) 上記にともない、側壁部をプレキャストコンクリート製のビームとして、できるだけ高精度で製作し、それにコイルを精度よく取り付けたものをメンテナンスフリーのモジュール構造とする。
- 4) 側壁ビームを土木構造物上に両端支持のはりとして設置する。支承部は微調整可能な構造とし、これにより長波長精度の確保・維持を容易にする。
- 5) 土木構造物の形式は問わない。ただし、側壁ビームの支承部座面は精度よく施工する。

マクロにみると、側壁ビームはコンクリート製のレールであり、2本のレールで支持・案内・推進を行うという点では、従来の鉄道とまったく同じコンセプトであるということもできる。

3. 超高速に対するけたの設計

3.1 列車荷重

JR 方式マグレブの列車荷重（定員乗客重量を含む）を図-3に示す。車内磁界対策の関係から、超電導磁石を車端に置く集中配置方式を採用しているため、間欠分布荷重となる。

新幹線荷重（定員外乗車の乗客重量を含む）と比較すると、約1/3の大きさである。

3.2 列車荷重による動的応答

JR 方式マグレブの列車荷重が各種スパンの単純げた上の走行した場合のけたの応答（スパン中央のたわみまたは曲げモーメント）と速度の関係の例を図-4に示す。

ここで、

速度パラメータ $\alpha = V / (2f_1 \cdot L_b)$

ただし、 V ：走行速度（m/s）

f_1 ：けたの基本固有振動数（Hz）

L_b ：けたのスパン（m）

応答倍率 $1+i$ =（動的最大値）/（静的最大値）

間欠分布荷重は、規則的な周期でけたを加振するため、図-4に示すように、ある速度で共振状態に達する。共振点については、次の法則性^{5)~7)}がある。

- 1) 応答倍率が最大となる1次共振点の速度は、速度

JR マグレブ

図-3 JR方式マグレブの列車荷重

図-4 単純げたの動的応答と速度の関係

14両編成

図-5 共振点の応答倍率

パラメータ α の値として、理論的に $L_v/(2L_b)$ により与えられる。ここで、 L_v は間欠分布荷重の間隔であり、車両長(中間車両)に相当する。

2) 1次共振点の1/2, 1/3の速度でも、高次の共振により応答倍率のピークを生ずる。

3) 共振点における応答倍率は、 L_b/L_v 、 L_f/L_v (L_f は分布荷重の作用長)、分布荷重の個数 N およびけたの減衰定数 h により理論的に与えられる。

1～3次の共振点の応答倍率と L_b/L_v との関係を図-5に示す。

3.3 共振に対する設計方法

共振点を支配するパラメータ L_b/L_v の代表的ポイントについて、図-4の具体例をもとに、設計における対応法を述べる。

ただし、同図において550 km/h(目標最高速度)のポジションは、新幹線用のコンクリートげたがもつ通常の基本固有振動数(スパンにより異なる)を用いて、当該スパンに対して実際にとり得る速度パラメータの最大値を目安として示したものである。

(1) L_b/L_v が0.6の場合(図-4(a)参照)

1次共振点は550 km/hよりもかなり高速側にあるため、その共振からは逃れることができる。

2次共振点が約400 km/hのところであり、その応答倍率により終局限界状態の設計衝撃係数が定まる。

(2) L_b/L_v が1.0の場合(図-4(b)参照)

1次共振点がちょうど550 km/hのところにある。けたの基本固有振動数を高くすればこの共振から逃れることができ、そうすることが、もっとも安全で確実な対処法である⁹⁾。そのためには、剛性が大きく、かつ軽量のけた構造について検討する必要がある。

一方、1次共振点でけたを設計することも可能である。JR方式マグレブの列車荷重は新幹線の約1/3の大きさであるが、新幹線でも約1.4倍($L_b \approx 20$ m)の動的応答を考慮して設計することを加味すると、応答倍率が約4倍になって初めて新幹線の設計列車荷重に達する。

それゆえ、新幹線げたの設計諸元を原点にすると、お

おむね4倍以上の応答倍率となる場合に対して、限界状態設計法により次の検討を行えばよい。

- 1) 1次共振点の応答に対して、終局・疲労限界状態を満足するように、鉄筋量を増加させる。
- 2) 1次共振点の応答に対して、たわみ制限の検討を行う。
- 3) ひびわれの検討を主に永久荷重時において行う。スパンが長いためにひびわれ幅の制限値を超える場合には、プレストレスにより制御する。この場合、疲労に対して有利なことから、アウトサイドケーブル工法についても検討する価値がある。
- 4) 共振点で発生する負の曲げモーメントや負の支点反力等に対して、けた上縁の補強や支承部へのプレストレスの導入等について検討する。

(3) L_b/L_v が1.5の場合(図-4(c)参照)

速度パラメータ α が1/3の場合は、残留振動がゼロとなる理論的な特異点となる。それゆえ、共振速度 $L_v/(2L_b)$ が1/3に一致すると、荷重列による繰返し効果なくなるために共振状態は消滅し、2次以上の小さなピークだけとなる。

図-5において、 L_b/L_v が1.5の場合に1次の応答倍率が極小となっているのは、このためである。

JR方式マグレブの場合、図-4(c)に示すように、スパン32.4 mがこれに該当し、このスパンを選択すれば、設計列車荷重としてはもっとも小さい荷重で設計することができる⁷⁾。

なお、 L_b/L_v が2.5, 3.5の場合も同様な特異点となる。

(4) L_b/L_v が2.0の場合(図-4(d)参照)

1次共振点の速度は550 km/hよりもはるか下方に位置するが、終局限界状態の検討においては、1次共振点の応答倍率をもとに設計衝撃係数を定める必要がある。

しかし、架設地点の常用速度が共振点の速度と離れている場合は、使用・疲労限界状態の設計衝撃係数は、常用速度に対する応答倍率をもとに定めることもできる。

(5) L_b/L_v が5.0の場合(図-4(e)参照)

共振の影響はきわめて小さく、応答倍率は速度効果だけによるものと同等となる。この場合には、スパンが大きいこともあって、列車荷重に対するたわみ制限が設計の決定要因となり得る。

3.4 減衰定数の変動可能性

共振点の応答倍率に支配的な影響を及ぼす減衰定数 h の値については、十分なデータが得られていない。

従来は5%程度としてきたが、宮崎実験線の低剛性げた(PRC構造・付帯構造なし)⁹⁾に対する高速載荷試験の結果によれば0.93%という小さな値も得られている。

3.2～3.3では従来よりも安全側の判断として2%に設定したが、共振点で設計する場合には、減衰定数がさらに小さくなるおそれがあることに対して配慮しておくことが望ましい。

実構造物の減衰定数について信頼できるデータを蓄積することは、マグレブのガイドウェイの設計条件にとって今後の重要な課題である。

4. 側壁ビーム方式ガイドウェイ

4.1 側壁ビームの設計・試作

側壁ビーム方式軌道の断面諸元を図-6に、試作総合供試体（鉄道総合技術研究所に設置）を写真-1に示す。断面諸元と構造の決定要因は、次のとおりである。

- 1) はり高は、地上コイルとその上部の車輪案内路の寸法から決定した。
- 2) 幅は、水平方向の剛性の確保と独立ビームとしての安定性から決定した。

図-6 側壁ビーム方式軌道の断面諸元

写真-1 試作総合供試体

- 3) 重量を軽減して固有振動数を高くするため、中に空洞を設けて箱形とした。
- 4) 側壁ビームの基本長は、活荷重によるたわみを微小にとどめること、および推進コイルの単位長(1.8m)の倍数との関係から、12.6mとした。
- 5) プレテンション式PC構造を採用し、使用状態においてフルプレストレスの設計とした。

これらの結果、最高速度 550 km/h に対する速度パラメータ α を 0.35 ときわめて小さくすることができ、共振領域から十分に離れた高剛性の設計が可能となった。さらに経済化をはかるために、幅の縮小や基本長の延伸について検討する余地が残されていると考えられる。

試作総合供試体の実績により、モジュール構造として次のように十分な精度をもつことが明らかにされた。

- 1) 鋼製型わくを使用したプレキャスト製品とすることによって、コイル取付け部等の機能面をきわめて高精度に製作することができる。
- 2) クリープ変形については予測可能であり、必要な場合にはプレストレスの調整等により抑制できる。
- 3) 日中の温度差によるそりは非常に小さい。

4.2 側壁ビームの敷設方法

側壁ビームは、両端支持のはりとして左右独立に土木構造物上に設置する。その支承構造を写真-2に示す。技術的ポイントは次のとおりである。

- 1) 主として経済性の面からゴムシューを採用した。
- 2) 列車荷重が偏心して作用する。また、異常時には車輪案内路等に大きい水平力も作用する。これらに対して負の支承反力が生じないように、PC鋼棒によりプレストレスを導入した。PC鋼棒をはり幅中心に配置したのは、疲労の影響を受けにくくするためである。線路方向に2本配置したのは、二重安全系の機能をもたせるためである。
- 3) ゴムシューの中心部に鉛を充填し、所要水平ばね定数を確保するとともに、異常時荷重に対するス

写真-2 側壁ビームの支承構造

図-7 側壁ビームの解析モデルと振動モード

トッパー機能をもたせた。

- 4) 支承部のシム調整により、長波長に対してミリ単位の軌道精度の確保・維持を可能とした。
- 5) 上記のシンプルな支承構造と専用の施工機械の導入により、軌道としてきわめて高い施工速度が期待できる。

4.3 車両との動的相互作用解析

マグレブにおいては、超高速浮上車両の乗り心地と走行安全性、ならびにガイドウェイ構造に対する動的負荷という観点から、車両とガイドウェイの動的相互作用に関して高度な解析による検討が必要となる。

JR 方式における解析のポイントは次のとおりである。

- 1) ビーム側面に偏心して作用する超高速荷重により側壁ビームに生ずる振動および局部的応力の解析(図-7に解析モデルと振動モードの例を示す)
- 2) 側壁ビームの振動性状・敷設精度と乗り心地との関係についての解析
- 3) 橋りょうの変形限度と乗り心地との関係についての解析
- 4) 地震時走行安全性の解析
- 5) 緊急着地等、異常時荷重の解析

これらの解析を行うため、3次元 FEM 解析と浮上列車モデルの結合プログラムを開発した。

これにより、スーパーコンピュータのなかでさまざまなシミュレーション実験が可能になりつつある。

5. 長大橋の設計

5.1 変位・変形に関する制限事項

大都市間長距離システムのルートは、地形の急峻な山

岳地帯なども通らねばならないことから、長大スパンの橋りょうが多くなるものと考えられる。

超高速車両は長波長(50~150 m) 狂いにより動揺しやすい性格をもつので、長大橋上で良好な乗り心地を確保するためには、軌道面の変位に関する以下の制限事項について検討し、適切な構造形式を選択する必要がある。

- 1) 列車荷重によるたわみを極力小さくすること。ここでは、想定されている軌道の整備限度から類推して、100 m 前後のスパンに対して暫定的にスパンの 1/20 000 (単線載荷・衝撃を考慮) とした。
- 2) クリープ・乾燥収縮による長期変位を小さくすること。
- 3) 全体的温度変化による年間を通じての変位を小さくすること。
- 4) 日内における部材間の温度差による変位を極力小さくすること。

5.2 橋りょう形式と変位・変形状

長大橋の変位・変形について具体的に検討するため、最大スパン 100 m の橋りょうとして、図-8 に示す 4 つのタイプを採用可能な形式として選択し、概略設計を行った。

図-8 長大橋の形式と諸元

表-1 長大橋における軌道面の鉛直変位量

橋 種	けた高 (m)	支 間 構 成 等 (m)	軌道面の鉛直変位量 (mm)					
			活荷重*	クリープ	乾燥収縮	温度変化・温度差		
						全体±10℃	床板+5℃	斜材+5℃
PC連続箱げた橋	5.5	60+100+60	-5	-14	-5	±3	-3	-
PC斜張橋	PC斜材	同 上	-5	-14	-5	±3	1	-9
	PC斜版	同 上	-5	-20	-4	±2	1	-9
RCアーチ		アーチスパン 100 ライズ 17	-1	-26	-21	±14	1	-

(注) * 単線載荷 (衝撃を考慮)

各要因による軌道面の鉛直変位量を表-1に示す。形式別に特徴を記すと以下のとおりである。

(1) PC連続箱げた橋

- 1) 列車荷重が軽く、このようなスパンでは共振の影響もきわめて小さいことから、けた高 5.5 m 程度で厳しいたわみ制限を満たすことが可能である。ちなみに、同等スパンの新幹線橋りょうのけた高は約 8 m である。
- 2) クリープ変形による長期変位がやや大きい、死荷重作用時に純圧縮状態に近くなるようにプレストレスの分布を調整することにより、曲げによるクリープ変形を小さく抑えることは可能である。
- 3) 全体的温度変化による軌道面の変位は、主として橋脚の温度伸縮によるものであり、値としてはきわめて小さい。

(2) PC斜張橋

- 1) 斜索をPC斜材¹⁰⁾またはPC斜版¹¹⁾とすることにより、けた高 3 m 程度で列車荷重に対する厳しいたわみ制限を満足することが可能である。
- 2) クリープ変形による長期変位については、斜索コンクリートに導入するプレストレスを調整することにより、小さくすることができる。
- 3) 斜索コンクリートとけたとの日内温度差による軌道面の鉛直変位が比較的大きいと予測されるため、断熱対策等、斜索コンクリートの表面処理について検討する必要がある。

(3) RCアーチ橋

- 1) 列車荷重によるたわみはきわめて小さい。
- 2) クリープ・乾燥収縮や全体的温度変化によるアーチリブの伸縮のため、軌道面の鉛直変位が生じやすい。

以上を総合すると次のとおりである。

- 1) PC連続箱げた橋は、変位・変形状においてとくに問題がなく、列車荷重に対する厳しいたわみ制限のもとでも、新幹線橋りょうに比べてかなりスレンダーなものになり得る。

けた高比(けた高/中央スパン長)は中間支点部で 1/18、支間中央で 1/38 と道路橋と同程度であり、最大スパン 200 m 級までこの形式で対応可能である。

今後、詳細設計にあたっては、橋りょう上の乗り心地評価を精密に行うことにより、さらに経済性を追求することができる。

- 2) PC斜材・斜版の斜張橋は、変位・変形状において大きな差はなく、どちらも採用可能であり、けた下空間が制限されるような場合に適した形式である。

さらにけた高を小さくしたい場合には、下路形式についても検討する必要がある。

なお、マルチケーブルタイプの鋼斜索PC斜張橋については、列車荷重に対する厳しいたわみ制限を満足させるには、けた高が約 4.7m も必要となるため、たわみ制限が大幅に緩和されないかぎり、採用するメリットはないものと考えられる。

- 3) RCアーチ橋は、単径間で長スパンを渡る峡谷等の地形において必要な形式である。アーチリブの軸線や形状等についてさらに詳細な検討を行い、全体的温度変化により年間を通じて生ずる軌道面の鉛直変位をできるだけ小さく抑えることができるような構造の開発と設計上の工夫が必要である。

6. 強力な磁界に対する設計

ガイドウェイの補強鋼材として普通鋼の鉄筋や緊張材を車両に近接して用いると、超電導磁石から発する強力な移動磁界により、補強鋼材中に渦電流やループ電流が誘起され、走行抵抗の一部になる(空気抵抗と比べると、はるかに小さい)という磁気抗力の問題が生ずる。

超電導磁石の近傍に位置し、とくに強い磁界にさらされるのは側壁部であり、この部分の低・非磁性化が最優先の課題となる。

以下に、磁気対策の観点からみた側壁ビームの断面設計、ならびに、その低・非磁性化方策として、非磁性補

強鋼材への置換と FRP 補強材導入の可能性について述べる。

6.1 側壁ビームの断面設計

側壁ビームは、剛性を確保するため、使用状態においてひびわれが生じないように PC 構造を採用している。緊張材の配置は図-6 に示したとおりである。

PC 鋼材と FRP 補強材を用いた場合の断面の応力度と耐力を表-2 に示す。ただし、FRP 補強材を用いた場合については後述する。

同表に示すように、緊張材の量は使用時における応力度の制限で定め、終局時の曲げ耐力は十分な安全率をもっている。また、せん断補強筋は構造細目上の最小鉄筋量を配置すればよい。

このように側壁ビームは、PC 構造を採用し、さらに使用状態で設計が定まる部材であるため、補強鋼材量ミニマムの設計であり、素性として低磁性構造と言える。

6.2 高 Mn 非磁性補強鋼材への置換

従来から、非磁性鋼としては Ni-Cr 系オーステナイトステンレス鋼があるが、高価であること、強い冷間加工を受けると磁性を帯びること、鉄筋用としては降伏強度が低いこと等の欠点があった。これらの欠点を解消する非磁性鋼として、15~25% のマンガンを追加した高 Mn 系オーステナイト鋼が開発され、これを基本材料にして非磁性鉄筋や非磁性 PC 鋼材が実用化されつつある。

これらの高 Mn 非磁性補強鋼材は、コンクリート構造用補強鋼材として機械的・物理的性質においてとくに問題がないことから、ほとんどそのまま普通鋼材と置換することができる^{12)~15)}。

6.3 FRP 補強材導入の可能性

(1) FRP 補強材の特性

抜本的に非磁性化をはかる方策としては、FRP (高性能連続繊維 1 方向強化プラスチック) で出来た棒状の材料を PC 鋼材や鉄筋の代替材として用いることを検

写真-3 FRP 棒材の例

図-9 FRP 棒材の応力-ひずみ曲線

表-2 側壁ビームの断面設計

使用緊張材		PC 鋼材	FRP 補強材
緊張材の力学的特性		PC 鋼より線 φ12.4 mm 引張耐力 16.3 tf 伸び 6% 断面積 0.93 cm²	CFRP φ12.5 mm 引張耐力 14.1 tf 伸び 1.33% 断面積 0.76 cm²
導入緊張力 (1 本当たり) P_i (tf)		11.8 (0.85 σ_{pu})	8.5 (0.6 σ_{pu})
有効係数 η		0.81	0.92
使用状態	設計曲げモーメント M_d (tf·m)	60.0	
	上縁応力度 σ_c' (kgf/cm²)	50	51
	下縁応力度 σ_c (kgf/cm²)	16	6
終局状態	圧縮側コンクリートひずみ ϵ_c'	0.0035	0.0014
	緊張材ひずみ ϵ_p	0.015	0.0133
	曲げ耐力 M_u (tf·m)	211.3 ($M_u/M_d=3.5$)	194.0 ($M_u/M_d=3.2$)

討している。

高性能繊維としては、炭素繊維、アラミド繊維、ビロン繊維、ガラス繊維などの素材があり、コンクリート構造の補強材として実用的な形態の製品が続々と開発されつつある。

写真-3 に FRP 棒材の例を、図-9 にそれらの応力-ひずみ関係を示す。

鋼材と比べた特徴は以下のとおりである。

- 1) FRP 棒材のうち高強度のものは、P C 鋼線に匹敵する強度をもつ。
- 2) 弾性係数は $2/3 \sim 1/5$ と小さい。
- 3) 伸び能力も、P C 鋼線が実質 6% 程度であるのに対して 1~4% と小さい。
- 4) 応力-ひずみ関係は、破断に至るまで直線的であり、降伏点がない。

(2) FRP 補強材による側壁ビームの補強形態

写真-4 に、FRP 補強材による側壁ビームの補強形態のコンセプトを示す。曲げに対しては、付着のある緊張材によるプレテンション式 P C 構造としており、せん断に対しては、らせん状に成形した FRP 筋を併用している。

このような利用方法は、FRP 補強材にとって次のメリットがある。

- 1) P C 構造は、FRP 補強材の高強度性を有効に生かせること、低弾性であることがコンクリートの乾燥収縮・クリープによるプレストレスの損失を小さくすることなどから、FRP 補強材の利用方法としては、もっとも望ましい形態である。
- 2) FRP 補強材を緊張材として用いる場合の 1 つの問題点は、1 方向強化材であるがために、定着具の部分で圧縮およびせん断応力により破断しやすいこと、付着定着による場合は定着長が短いと経年的に滑動するおそれがあることがあげられる。側壁ビームはプレテンション方式を採用しており、導入後はコンクリートとの十分な付着定着長がとられるの

写真-4 FRP 棒材による側壁ビームの補強形態

で、このような心配がない。

- 3) らせん状せん断補強筋は、FRP の成形性を生かしており、配筋作業時に鉄筋のスターラップに比べて、かなりの省力化がはかれる。また、コンクリートに対する定着性能にも優れている。

(3) FRP 補強材による側壁ビームの設計

側壁ビームの緊張材を P C 鋼より線とほぼ同径の CFRP 補強材に同一本数で置換すると、断面の応力度と耐力は表-2 に示すとおりとなる。

両者を比較すると次のとおりである。

- 1) FRP は、緊張力が小さくとも有効係数を大きくとれるため、使用状態での応力度の差は小さい。
- 2) 曲げ耐力は FRP のほうがやや小さいが、側壁ビームについては、実用上十分な安全率が確保される。
- 3) P C 鋼材を用いたほうは緊張材の降伏が先行する¹⁶⁾ 韌性に富む破壊であるのに対して、FRP のほうは、緊張材の破断による脆^{せい}性的な破壊となる。

(4) FRP 補強材導入のための課題

側壁ビームは、低・非磁性化のニーズや FRP 補強材向きの設計であることなどから、FRP 補強材にとって有望な用途先と考えられるが、導入にあたっては、次の課題について、さらに検討する必要がある。

- 1) 緊張材として用いる場合、緊張レベルに対する部材の破壊形式と安全度に関し、設計概念を確立する¹⁶⁾。
- 2) せん断補強筋として用いる場合の部材耐力評価式を確立する^{17)~20)}。
- 3) 複合材料として、製品ごとに耐アルカリ性の試験を行う(試験方法の標準化要)。
- 4) 製品のコストダウン、および付加価値の評価を行う。

7. む す び

JR 方式超電導磁気浮上式鉄道のガイドウェイ構造について基本的事項をとりまとめたが、軌道への高精度・大型プレキャスト製品の導入、共振領域におけるけたの設計に対する限界状態設計法の適用、変位・変形の小さい長大橋の開発と設計、低・非磁性化のための FRP 補強材の導入など、新分野のコンクリート技術に幅広く関わっていると言える。

また、ガイドウェイ構造はマグレブシステムの一の方の主役であり、軌道としての精度・剛性・振動特性等の設計条件は車両の乗り心地や走行安全性の面から決定されねばならず、そのためには、車両とガイドウェイの動的相互作用についてスーパーコンピュータを用いたシミュレーション実験を広範に行う必要があることなど、境界

領域の課題もますます重要となってくる。

超電導磁気浮上式鉄道は、わが国が自ら開発を始めた独創的技術であり、国家プロジェクトとしての取組みを開始したところである。21世紀の実用的交通機関となるためには、今後、多くの技術的課題を乗り越えねばならない。本稿がガイドウェイ構造の面で読者諸賢の英知を結集する契機となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 超電導が鉄道を変える, 清文社
- 2) 時速 500 キロ 21 世紀への助走, 交通新聞社
- 3) 宮田・松浦・高木: 超電導磁気浮上式鉄道, 土木学会論文誌, No. 415/VI-12, 1990.3
- 4) 涌井・鳥取・松本・渡辺: 側壁ビーム方式ガイドウェイと FRP 補強材導入の可能性, JREA, Vol. 33, No. 3, 1990.3
- 5) 松浦: 高速鉄道における橋桁の動的応答に関する研究, 鉄道技術研究報告, No. 1074, 1978.3
- 6) 涌井・小林: 高速鉄道におけるトラス橋部材の衝撃係数に関する理論的研究, 鉄道技術研究報告, No. 1220, 1982.7
- 7) Iguchi, M. and Hara, H.: A Resonance-Eliminated Design of Simply Supported Beam for a Guideway of a High Speed Maglev System, International Conference on Maglev Transport '85, 1985
- 8) 岡田: 橋りょうの動的応答を考慮した新幹線鉄筋コンクリートスラブ橋の合理的断面, 鉄道技術研究報告, No. 853, 1973.7
- 9) 川上・松浦・杉山: 浮上式鉄道用低剛性桁の動的挙動, 鉄道技術研究報告, No. 1327, 1986.8
- 10) 高橋・生馬: 久慈線小本川 PC 斜張橋の設計と施行, 土木施工, Vol. 20, No. 4, 1979.4
- 11) 石橋・大庭・竹内: PC 斜張橋の計画と設計, 橋梁, Vol. 25, No. 7, 1989.7
- 12) 奥田: 非磁性コンクリート補強材の可能生, 鉄道技術研究報告, No. 1135, 1980.2
- 13) 山本・永井: 高 Mn 非磁性鉄筋, コンクリート工学, Vol. 27, No. 10, 1989.10
- 14) 坂村ほか: プレストレストコンクリート用非磁性鋼材, 住友電気, No. 118, 1981.3
- 15) 坪野ほか: 高 Mn 非磁性 PC 鋼棒の諸特性について, プレストレストコンクリート, Vol. 23, No. 3, 1981.5
- 16) 睦好・町田・上原: CFRP で補強したコンクリート部材の力学的性状および設計手法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, 1990.6
- 17) 涌井・鳥取・寺田・原: FRP 棒材を緊張材ならびに螺旋状せん断補強筋として用いたはりのせん断試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, 1989.6
- 18) 寺田・涌井・鳥取: FRP 棒材を緊張材に用いたコンクリートはりのせん断耐力について, 土木学会第44回年次学術講演会, 1989.10
- 19) Miyata, S., Wakui, H., Tottori, S. and Terada, T.: Shear Capacity of PC Beams with Spiral FRP Reinforcement, FIP Congress, Hamburg, 1990.6
- 20) 涌井・鳥取: FRP 棒材をらせん状せん断補強筋として用いた場合のコンクリートはりのせん断補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, 1990.6

国際会議ニュース

地上、海中、空中におけるシェル構造物の座屈に関する国際コロキウム

Int. Colloquium: Buckling of Shell Structures,
on Land, in the Sea, and in the Air

日 時: 1991 年 9 月 17 日～19 日

場 所: Lyon (France)

主 催: European Convention for Constructional Steelwork

内 容: Papers on recent topics in the following areas of Buckling of Shell Structures, on Land, in the Sea and in the Air are invited:

- Reliability methods
- Boundary conditions
- Geometrical imperfections
- Residual stresses and stiffness
- Combined loads
- Inelastic buckling
- Creep buckling
- Buckling under dynamic loads

- Thermal buckling
- Shells of anisotropic materials
- Design problems

Carried out through: experimental methods, theoretical methods, design considerations,.....

論文申込: '91 年 1 月 1 日までに, 1 000 語の英文概要を下記へ送付のこと。

連絡先: Insatech, s.a.r.l.,
Insa-Bat. 303-20,
Avenue Albert Einstein,
69621 Villeurbanne Cedex,
France
Tel. (33) 72 43 82 65
Telex. INSALYN 380 856
Fax. (33) 78 94 24 55