

各種フローティング軌道の高速度鉄道への適用性に関する研究

A Study of Running Safety and Ride Comfort of Tracks reducing Train-induced vibration for High-Speed Train

渡辺勉*, 曾我部正道**, 山崎貴之***, 奥田広之+, 涌井一++

Tsutomu Watanabe, Masamichi Sogabe, Takayuki Yamazaki, Hiroyuki Okuda, Hajime Wakui

* 工修	(財) 鉄道総合技術研究所, 構造力学	(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
** 博(工)	(財) 鉄道総合技術研究所, 構造力学	(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
*** 工修	(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構, 設計技術部	(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)
+ 博(工)	(財) 鉄道総合技術研究所, 構造力学	(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
++ 工博	(財) 鉄道総合技術研究所, 鉄道力学研究部	(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

Many floating tracks have been used for only low-speed trains as vibration reduction system. A study was carried out on dynamic response and running quality, using various floating tracks for high-speed train. A simulation program, DIASTARS was used in this analysis. In this program, the Shinkansen vehicle is three-dimensionally modeled as having a body, two trucks, and four wheelsets connected to each other by spring and dampers. The floating tracks were modeled by three dimensional finite element methods. In this study, the wheel load variations and vehicle body accelerations were investigated by dynamic interaction analysis between vehicle and track. The parameter was the train speed and the stiffness to support track.

Key Words: Running Safety, Ride Comfort, Floating Track, Wheel Load variation, Numerical Analysis

キーワード: 列車走行性, フローティング軌道, 輪重変動, 数値解析

1. はじめに

列車振動に対する環境性能の実現は、高速鉄道に固有の非常に重要な課題となっている。わが国を代表する交通機関である新幹線は、都市圏の住宅地に密接した狭隘な条件の中で運行されている区間も多く、環境との調和を図るために、開業当初から現在に至るまで、車両、軌道、構造物及び地盤等、様々な技術分野において、振動低減対策に関する研究が行われてきた。

このうち軌道による対策としては、近年、在来線において各種フローティング軌道の導入が進められ効果を挙げている^{1),2)}が、新幹線においては導入にまで至っていないのが実情である。この理由としては、軌道支持ばね定数が小さいフローティング軌道では軌道の変形が大きくなることが予想されること、共振の発生が考えられること、このため車両の走行安全性や乗り心地が従来の軌道構造に比べて悪化するのではないかと懸念があることなどが挙げられる。とりわけ走行安全性は、高速鉄道にとって最も重要な要件であり、フローティング軌道の適用性を判断するためには、何よりもまず数値解析による定量的な性状把握が必要不可欠となる。振動や騒音等に対する振動性能

の評価は、現状の技術レベルでは実軌道上での実車走行試験が最も確実でかつ信頼性の高い手法であるといえるが、そのためにも走行安全性の検証が急務となっている。

数値解析により定量的な評価を行うためには、一定区間以上の軌道構造を連続的にモデル化し、振動系としてモデル化した車両をその上で走行させて性能評価を行う必要がある。特に軌道構造による優劣を定量的に検討する場合には、FEM等を用いて離散的なモデル化を行う必要があるが、解析自由度が膨大となること、車両と軌道の相互作用力を考慮しなければならないことなどの理由から、実際には限定的な検討にとどまっていたのが現状である。

そこで本研究では、車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS を用いて、スーパーコンピュータを用いた数値実験を行い、今後、実用化が期待される5種類のフローティング軌道について、新幹線への適用性を検討することとした。具体的には、以下に示す項目について検討を行った。

(1) フローティング軌道は一般に軌道支持ばね定数が小さく、固有振動数も低いため共振速度が低下する。このため、軌道の共振有無について明らかにする。

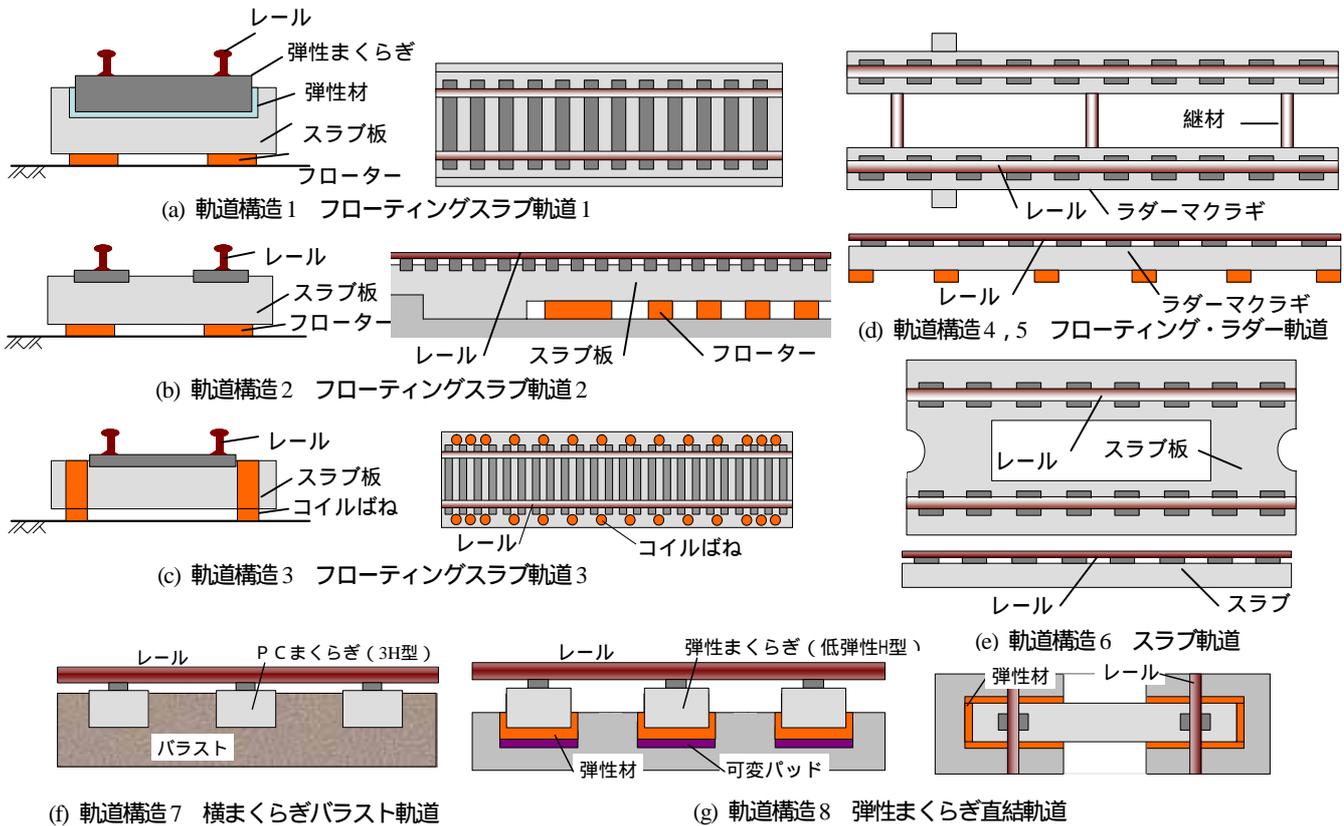


図-1 解析対象軌道の概要

- (2) フローティング軌道は一般に軌道支持ばね定数が小さく、列車荷重に対する軌道変形が大きくなるため、車両の走行安全性の低下が懸念される。走行安全性に対する列車速度、軌道支持ばね定数、隣接軌道構造との境界部、ユニット継目(以下、製造、施工単位をユニットという)の影響等を定量的に明らかにする。
- (3) フローティング軌道上における車両の乗り心地について、上記(2)と同様の観点から検討を行う。

2. 解析対象軌道

図-1、表-1に解析対象軌道を示す。フローティング軌道5種類、その比較検討用として横まくらぎバラスト軌道、スラブ軌道、弾性まくらぎ直結軌道の3種類、合計で8種類を検討対象とした。

図-2にフローティング軌道のユニット概念図を示す。車両の走行安全性は、一般的に軌道や構造物の局所的な変位に支配されることが知られているが³⁾、このため軌道支持ばね定数とともに、隣接軌道構造との境界部、軌道中間部におけるユニット単位やユニット境界の処理が重要となってくる。このような観点から、以下、図-1をベースに各軌道構造の特徴について概説する。

軌道構造1は、1984年に建設された東北新幹線の低速区間(最高時速110km/h)である赤羽台トンネルで用いられているフローティングスラブ軌道である。スラブ断面は3.2m×0.52mで1ユニット長が30mである。フローターの間隔は3mピッチで配

表-1 解析対象軌道

軌道構造	構造形式	備考
1	フローティング スラブ1	赤羽台トンネルで使用 質量が大きい
2	フローティング スラブ2	ドイツICEで使用 連続スラブ構造
3	フローティング スラブ3	コイルばね防振軌道 システム
4	フローティング ラダー1	質量が小さい ラダーマクラギ端部も支持
5	フローティング ラダー2	同上
6	横まくらぎ バラスト	高速区間既設タイプ 3H型
7	スラブ	高速区間既設タイプ 枠型スラブ
8	弾性まくらぎ直結	高速区間既設タイプ 低弾性H型

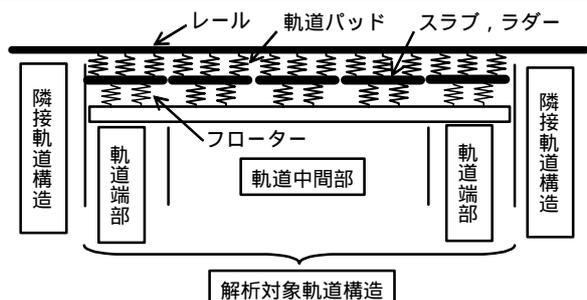


図-2 フローティング軌道のユニット概念図

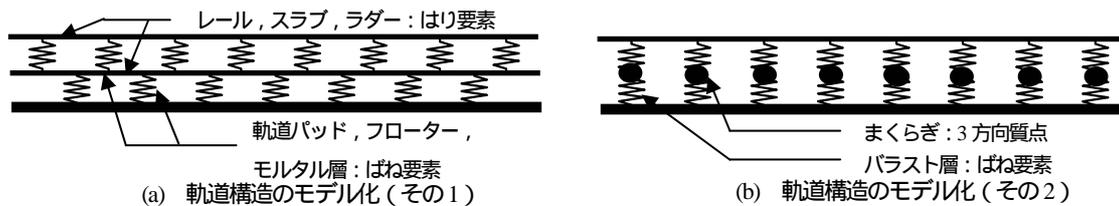


図 - 3 解析対象軌道のモデル化の概念図

(b) レールおよび軌道パッドの入力諸元

ヤング係数 (kN/m ²)	断面積 (m ²)	単位重量 (kN/m ³)	単位質量 (kN/m ³ /g)	ポアソン比	ねじり定数 (m ⁴)	断面 2 次 Iy (m ⁴)	ばね定数 (1 締結) (MN/m)
21000000	0.00775	7.850	0.801	0.3	2.35×10^7	3.09×10^5	鉛直 60 水平 20

表 - 2 入力諸元一覧

(a) 各軌道構造の入力諸元

要素	はり要素		ばね要素	ばね要素	質点	その他の要素
	断面積 (m ²)	断面 2 次モーメント (m ⁴)	フローター (MN/m)	弾性材 (MN/m)	まくらぎ重量 (kN)	
1	1.857	0.05117	182	120	-	-
2	1.400	0.02916	14	-	-	-
3	1.346	0.02536	12	-	-	-
4	0.170	0.0004854	10	-	-	-
5	0.170	0.0004854	30	-	-	-
6	-	-	-	-	3.19	200(MPa):バラスト変形係数
7	0.227	0.0004847	-	-	-	3500(N/mm ²):CA モルタル
8	-	-	-	30	2.60	-

置されている⁴⁾。

軌道構造 2 は、ドイツの ICE(InterCityExpress)が走行する高速区間(最高時速 250km/h)で用いられているフローティングスラブ軌道である。スラブ断面は 2.8m×0.5m である。このフローティングスラブ軌道の特徴は、連続スラブ構造をしておりユニット毎の継目がないことである。また、フローティング区間入口から段階的に変化させて、軌道支持ばね定数をスムーズに変化させている⁵⁾。

軌道構造 3 は、コイルばね防振軌道システムを利用したフローティング軌道である。同軌道は、在来線のトンネルの振動対策として導入実績がある。スラブ断面は 2.83m×0.47m で 1 ユニットが 20m である。フローターの間隔は端部で 0.625m ピッチ、中央部で 1.25m である²⁾。

軌道構造 4 は、フローティング・ラダー軌道であり、断面は 0.46m×0.185m×2 本である。1 ユニット長は 6.15m でフローターの間隔は 1.25m である¹⁾。

軌道構造 5 は軌道構造 4 と同じラダー軌道であるが、フローターの剛性が軌道構造 4 に比べて 3 倍になっている。

軌道構造 6 は、枠型スラブ軌道で、スラブ断面はスラブ中央で 0.71m×0.16m×2 である。スラブ下に CA モルタルが充填されており、全面で剛に支持されている。

軌道構造 7 は、新幹線で一般的に用いられている 3 号 PC まくらぎの横まくらぎバラスト軌道である。

軌道構造 8 は、新幹線のトンネル区間における振動対策に用いられた低弾性 H 型の弾性まくらぎ直結軌道であり、まくらぎ下面に防振ばねが貼り付けられ支持される構造となっている。

3. 解析方法

解析には車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS (Dynamic Interaction Analysis for Shinkansen Train And Railway Structure) を用いた。DIASTARS は、鉄道総合技術研究所で開発された鉄車輪/レール系車両と線路構造物の動的相互作用現象を解析するための汎用プログラムである^{3), 6)}。以下に、DIASTARS に用いた解析手法を示す。

3.1 軌道構造モデル

図 - 3 に軌道構造モデルを示す。図 - 3 に示すように、レール、スラブおよびラダーマクラギははり要素で、軌道パッド、フローター、モルタル層およびバラスト層をばね要素で、横まくらぎ弾性まくらぎは 3 方向に自由度を持つ質点でモデル化した。新設の新幹線では、高架橋やトンネル区間等の剛なコンクリート路盤上への適用が対象となるため路盤以下はモデル化せず剛

とした。軌道中間部の列車走行性を表現するため解析対象軌道の解析モデル延長は100mとした。また、それぞれの軌道構造の前後にはレールを剛なはりでモデル化したプレ・ポストラン区間を設け、列車はプレラン区間からポストラン区間まで走行するものとした。本研究では、軌道狂いは考慮せず、直線走行として線路直角方向への自由度は拘束した。解析モデルの節点数は5000節点程度となっている。

表-2に軌道構造モデルの入力諸元を示す。軌道構造の入力諸元は、それぞれ文献等^{1),2),4),5),7),8)}を参考に一般的な値を用いた。なお、レールと軌道パッドについては、すべての軌道で共通の物性値を用いた。

軌道構造モデルの運動方程式は、各要素の剛性マトリックスを重ね合わせ、全体座標系において、式(1)のように表せる。

$$M^B \ddot{X}^B + C^B \dot{X}^B + K^B X^B = F_L^B + F_I^B(X^V, X^B) + F_N^B(X^B) \quad (1)$$

ここで、 X^B は軌道構造の変位ベクトル、 M^B, C^B, K^B は、それぞれ軌道構造の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。また、 F_L^B は軌道構造に働く荷重ベクトル、 $F_I^B(X^V, X^B)$ はレール面での車両との相互作用力で、式(1)の符号を逆にしたものを全体座標系に変換し、これを近傍節点に分配した節点荷重ベクトル、 $F_N^B(X^B)$ は外力扱いとした軌道構造モデル内の非線形バネ力の荷重ベクトルである。ただし、本研究のような常時の列車走行性の問題では、ばねはすべて線形範囲で挙動をしている。

3.2 車両モデル

車両モデルには、完全1車両の三次元モデル(31自由度)を用いた。図-4に車両モデルを示す。車両の力学モデルでは、車体・台車・輪軸を剛体質点と仮定した。各車体は、重心位置で水平(y)、鉛直(z)、ローリング(γ)、ピッチング(β)、ヨーイング(ϕ)の5自由度を持つ。また、各台車も、それぞれ重心位置で水平(y_T)、鉛直(z_T)、ローリング(γ_T)、ピッチング(β_T)、ヨーイング(ϕ_T)の5自由度を持つ。輪軸は、水平(y_W)、鉛直(z_W)、ローリング(γ_W)、ヨーイング(ϕ_W)の4自由度を持つ。ただし、本解析では直線走行であるため、線路直角方向、ローリングおよびヨーイングの自由度は拘束した。

これら剛体質点でモデル化した車体・台車・輪軸の各要素を、バネ・ダンパで結合し、車両モデルを構成した。実車では、各構成要素間に、著大な相対変位を抑制できるストッパが設けられている。これを考慮できるように、バネの一部には、パイリニア形非線形バネを用いた。

具体的な車両諸元は、近年の高速新幹線車両を参考に仮定した。軌道の変形は、輪軸の載荷数により大きく変動する。このため、車両モデルを6両連結して列車を構成することとした。

車両系の運動方程式は、車両座標系において、車体と台車間

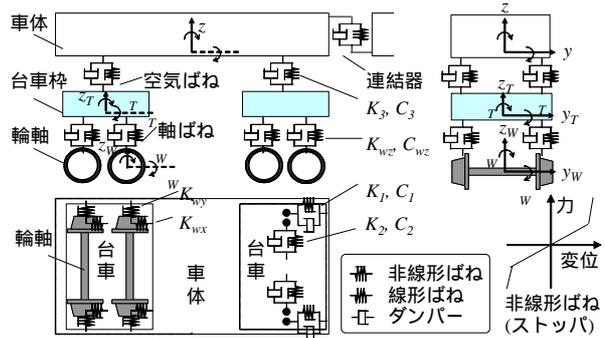


図-4 車両モデル

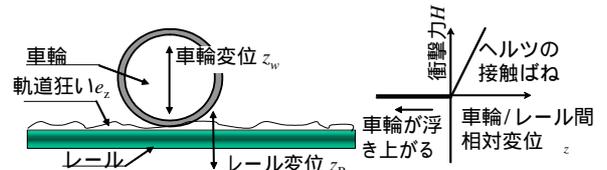


図-5 車輪レール間の鉛直方向の力学モデル

の非線形バネ項を右辺に移項し、式(2)のように表せる。

$$M^V \ddot{X}^V + C^V \dot{X}^V + K^V X^V = F_L^V + F_I^V(X^V, X^B) + F_N^V(X^V) \quad (2)$$

ここで、添え字 V, B はそれぞれ車両、構造物を表す。 X^V は車両の変位ベクトル、 M^V, C^V, K^V は、それぞれ車両の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックス、また、 F_L^V は主として風荷重などの車両への荷重ベクトル、 $F_I^V(X^V, X^B)$ は構造物との相互作用力、 $F_N^V(X^V)$ は外力扱いとした車両モデル内の非線形バネ力の荷重ベクトルである。

3.3 車輪とレール間のモデル

本研究では、鉛直方向の挙動の検討が主となるため、図-5に車輪レール間の鉛直方向の力学モデルを示す。輪軸の剛性は十分であると仮定すると、車輪とレール間の鉛直方向相対変位は、各車輪に対して式(3)のように表すことができる。

$$z = z_R - z_W + e_z \quad (3)$$

ここに、 z_R と z_W はそれぞれレールと車輪の接触点における鉛直変位、 e_z は図-5に示すレール上に存在する鉛直方向の軌道狂いである。それぞれ鉛直上向きを正とする。ただし、本研究では軌道狂いは考慮していない。 e_z が正か0の場合、車輪はレール上で接触していると見なす。 e_z が負の場合、車輪はレール上でジャンプしていると考えられる。

車輪がレール上を接触して走行する場合、(4)式に示すような衝撃力 H が車輪とレールに生じる。

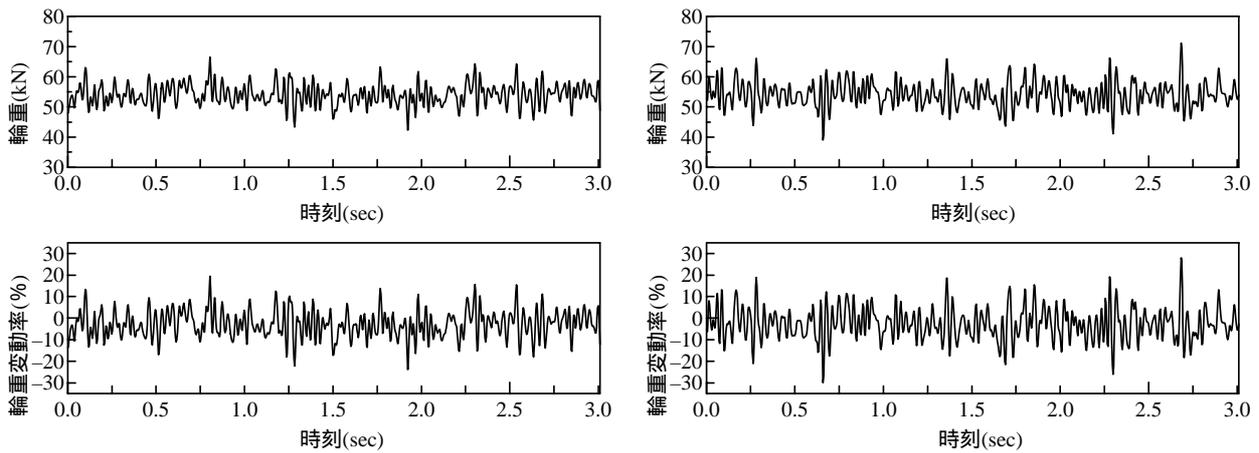


図 - 6 輪重の実測値と輪重変動率の時刻歴波形

$$H = H(z) \quad (4)$$

車輪とレールがそれぞれ二次曲面から構成されている場合、と衝撃力 H との関係はヘルツの接触パネにより記述することができる。

3.4 数値解析法

式(1)および式(2)で示した、車両及び構造物に関する運動方程式を連立して解く。車両と軌道構造との相互作用力には、前述のように、鉛直方向については接触力を考慮する。

効率的な数値解析を行うために、車両及び構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両及び構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmark の平均加速度法により時間増分 t 単位に解いていく。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで t 内において反復計算を行う。この際、数値解析速度を向上させるために、時間増分 t 内における収束回数をモニターし、 t の大きさをプログラム内で自動的に調整する手法を用いた。解析に用いた t は、0.0005 秒を標準とした。

3.5 解析結果の評価方法

数値解析は、解析対象軌道8種類と列車速度5種類(100, 200, 260, 300, 360km/h)をパラメータとして解析を行った。

列車走行性は、走行安全性と乗り心地により評価される。構造物の走行安全性の照査は、すべての車輪に対して、脱線係数および輪重減少率の応答値が設計限界値を下回ることを確認することにより行われる⁹⁾。軌道狂いや曲線の影響を除く、橋梁等の構造物の変形に対する輪重減少率の設計限界値としては、37%が提案されているが、これを連続する新設の軌道構造に対して適用するのは不適切であると考えられる。このように、新設される軌道構造の優劣を議論するための適切な評価手法は提案されていないため、本研究では、輪重変動の実測値を参考値として走行安全性の評価の目安を定めることとした。

図 - 6 にスラブ軌道上を走行する新幹線の輪重変動の時刻歴

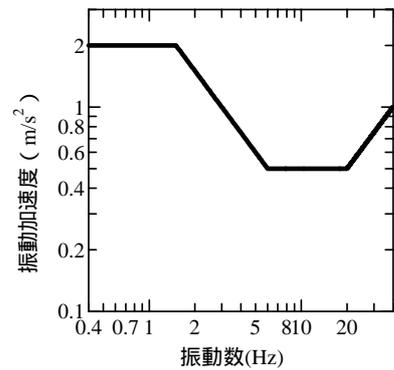


図 - 7 鉛直方向の乗り心地の設計限界値

データを示す。同図は、新幹線が列車速度 250km/h 前後で走行した時のものであり、開業前のレールが平滑な状態で得られたものである。同図に示すように新幹線の輪重変動はレールが平滑な状態でも常時10~20kN程度(輪重変動率10%~25%)生じていることがわかる。これは、レール面の微少な凹凸が存在することに起因する輪重変動と考えられる。今回の解析モデルでは、軌道構造のみをモデル化しているため、上記測定データを踏まえ輪重減少率の目安値を5%とした。輪重変動率は式(5)で表される。

$$\Delta P/P_s = \frac{P_d - P_s}{P_s} \quad (5)$$

ここに、 P_d は動輪重、 P_s は静輪重、 $\Delta P/P_s$ は輪重変動率である。このうち、負側の値を輪重減少率と呼ぶ。

乗り心地の照査は、車体加速度の応答値が設計限界値を超えないことを確認することにより行われる。

図 - 7 に鉛直方向の乗り心地の設計限界値と振動加速度の関係⁹⁾を示す。図から橋梁等の構造物の変形に対する鉛直方向の車体加速度の設計限界値は、 0.5m/s^2 となるが、これらの限界値は単発的な過渡応答に対して定められたもので、輪重減少率の目標値の設定の考え方と同様に、新設の軌道構造に対して適用するのは不適切であると考えられる。本研究では、輪重変動率と同様に、実測等を参考に車体加速度の目安値を 0.2m/s^2 と定めた。

表 - 4 各軌道構造の鉛直方向の固有振動数

軌道構造	鉛直方向の最低次モード振動数(Hz)	実測による鉛直方向の固有振動数(Hz)	1mあたりの支持ばね定数(MN/m/m)	軌道構造	鉛直方向の最低次モード振動数(Hz)	実測による鉛直方向の固有振動数(Hz)	1mあたりの支持ばね定数(MN/m/m)
1	22	-	49	5	46	-	48
2	9	-	14	6	161	168	1013
3	10	-	19	7	188	-	99400
4	28	21	16	8	86	-	96

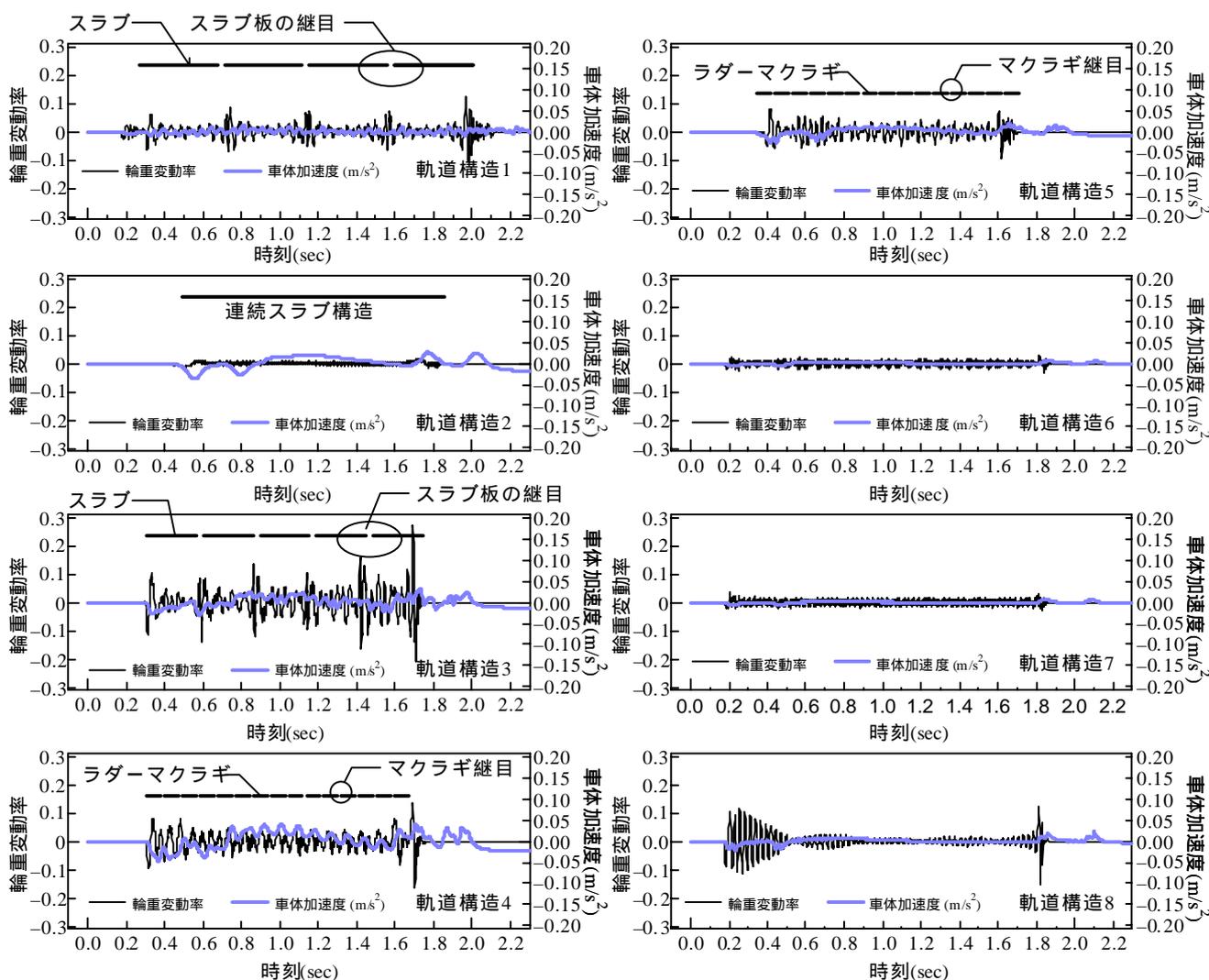


図 - 8 軌道中間部および軌道端部における輪重減少率と車体加速度の時刻歴波形

4. 解析結果

4.1 モード解析結果

表 - 4 にモード解析によって得られた各軌道構造の鉛直方向の最低次モードの固有振動数および 1m あたりの支持ばね定数を示す。また、同表に解析モデルの妥当性を示すために行ったインパルスハンマーによる加振試験によって得られた軌道構造の固有振動数の実測記録を示す。フローティング軌道は鉛直方向の最低次モードの振動数が比較検討用の軌道よりも低く、1m

あたりの支持ばね定数も小さいことがわかる。固有振動数は従来から新幹線で用いられている軌道構造 8 の弾性まくらぎ直結軌道と比較して 1/2 ~ 1/10 程度となっており、1m あたりの支持ばね定数も 1/2 ~ 1/7 となっている。

また、固有振動数を解析値と実測値と比較すると、軌道構造 4 の実測値が解析値を下回っている。この原因としては、実測による加振が微小な変位レベルで行われたため、防振材の荷重変位曲線において勾配が小さい、すなわち、ばね定数が小さい部分であったためと考えられる。軌道構造 6 では実測値が解析値を上回っているが、これは実測による加振が微小な変位レ

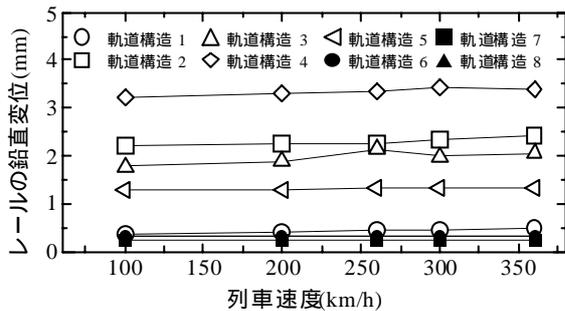


図-9 レール変位の最大値

ルで行われたため、バラストの荷重変位曲線において勾配が大きい、すなわち、ばね定数が大きい部分であったためと考えられる。一方、在来線において列車を静的に载荷した際のラダーマクラギの沈下量は、実測値 1.57mm に対して DIASTARS によって求めた解析値 1.50mm と比較的良好一致を示していた。

4.2 時刻歴波形

図-8 に軌道中央部および軌道端部の各軌道構造における 260km/h 走行時の輪重変動率と車体加速度の時刻歴波形をそれぞれ示す。輪重減少率に着目すると、フローティング軌道(軌道構造 1~5)は、比較検討用の軌道(軌道構造 6~8)と比べて、軌道構造 2 を除き、輪重減少率が大きくなっている。また、軌道構造 1,3,4,5 の時刻歴波形では、一定周期で輪重変動が大きくなっていることがわかる。解析上の各輪軸の走行位置を算定すると、この輪重変動はフローティング軌道のユニット継目に起因するものであることが分った。一方、軌道構造 2 は、継目無しで軌道が連続するため、大きな輪重変動が発生してない。このように、フローティング軌道では、ユニット継目が輪重変動率に及ぼす影響が大きいと考えられる。

また、フローティング軌道では、隣接軌道構造との境界部を想定した軌道端部でも輪重変動が大きくなっている。これらは軌道支持ばね定数の隣接軌道構造との差により生じるものであるが、一般には、軌道支持ばね定数の変化の勾配を工夫するなどにより、改善が図られる。実軌道の施工ではこの点も重要となる。

車体加速度に着目すると、隣接軌道構造との境界部で応答が生じており、軌道中間部での応答は比較的小さいことがわかる。

4.3 軌道の応答

図-9 に列車速度が軌道中間部のレールの最大変位に及ぼす影響を示す。図から各軌道構造ともに列車速度の増加に伴って、最大変位がほとんど変わることが無く、顕著な共振応答は見られなかった。このため、各軌道とも共振に対しては安全であると考えられる。

4.4 走行安全性

(1) 列車速度の影響

図-10、図-11 に列車速度と輪重減少率の関係を示す。軌道中間部と軌道端部では、輪重減少率の発生原因が異なるため、

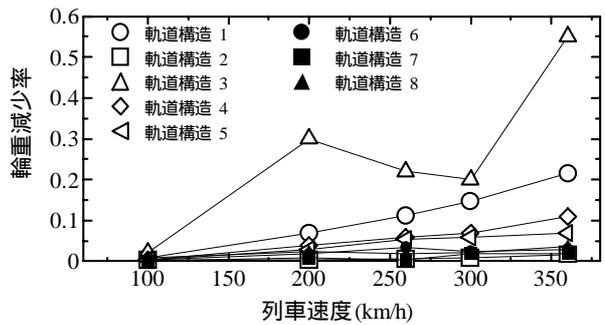


図-10 軌道中央部における輪重減少率

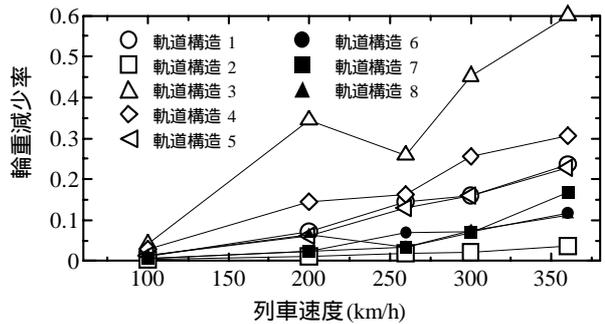


図-11 軌道端部における輪重減少率

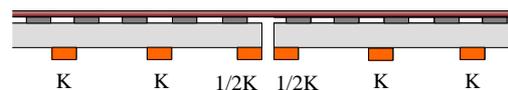


図-12 ユニット継目の支持剛性の概念図

両者を分けて整理した。図から各軌道構造ともに列車速度の増加に伴って、輪重減少率が大きくなっていることがわかる。

ユニット継目の無い軌道構造 2 を除く各種フローティング軌道は、3 種類の比較検討軌道と比べて輪重減少率が大きくなっている。この原因は前述のようにユニット継目と隣接軌道構造との境界である。

隣接軌道構造との境界である軌道端部では、軌道中間部よりも大きな輪重減少率となっているが、これについては、隣接軌道構造との境界部において、その境界前後に適切な緩衝構造を配置し、軌道の支持ばね定数の急激な変動がないようにすれば、輪重変動が減少し、列車走行性を向上できることが明らかになっている¹⁰⁾。

よって、走行安全性を考える上ではユニット継目の処理方法が重要なファクターとなると考えられる。

(2) ユニット継目部の軌道支持ばね定数の影響

ユニット継目部の支持ばね定数が輪重変動に与える影響を明らかにするために、軌道構造 4 のフローティング・ラダー軌道を取り上げ検討を行った。

図-12 ユニット継目の支持剛性の概念図を示す。ユニット継目の支持ばね定数は、軌道の支持長さに併せて静的に負担重量を計算し設定される場合が多い。同図でも端部のフローターの支持ばね定数は中央部の支持ばね定数 K の $1/2$ となっている。ここでは、このユニット継目の軌道支持ばね定数を変化させな

から解析を行った。

図 - 13 にユニット継目の軌道支持ばね定数を変化させたときの輪重減少率を示す。列車速度は260km/hである。軌道支持ばね定数を中央部の0.5あるいは0.6倍程度に設定すると輪重減少率が極小になっていることがわかる。これらの最適ばね定数は軌道の動特性により変化すると考えられる。一方、ユニット継目に対して適切に処理を行わない場合には、応答が大きくなることも推察される。

(3) 軌道支持ばね定数の影響

軌道支持ばね定数が小さいと、ユニット継目間や隣接軌道構造との境界部で変位差が出やすくなる。そこで軌道構造4のフローティング・ラダー軌道を取り上げ、軌道支持ばね定数の影響について検討した。なおユニット継目の軌道支持ばね定数は中央部の支持ばね定数 K の1/2とした。

図 - 14、図 - 15 に軌道支持ばね定数と輪重減少率の関係を示す。軌道中間部と軌道境界部では、輪重減少率の発生原因が異なるため、両者を分けて整理した。ここで、軌道支持ばね定数は10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 MN/mとした。列車速度は100, 200, 260, 300, 360 m/hとした。

軌道中間部と軌道端部を比べると、図 - 10、図 - 11の結果と同様に軌道端部の輪重減少率の最大値の方が軌道中間部よりも大きくなっている。

軌道中間部の輪重減少率は、軌道支持ばね定数や列車速度によらずほぼ5%前後で推移していることがわかった。具体的な軌道の支持ばね定数については、今後、防振性能の観点から更に検討を行っていく必要がある。

一方、隣接軌道構造との境界部では、軌道支持ばね定数や列車速度の影響が大きい。よって、柔らかい軌道支持ばね定数を選択した場合や高速区間では、支持剛性を遷移区間を長くするなどして対策を行う必要があると考えられる。

4.5 乗り心地

(1) 列車速度の影響

図 - 16 図 - 17 に列車速度が車体加速度に及ぼす影響を示す。軌道中間部と軌道境界部では、車体加速度の発生原因が異なるため、両者を分けて整理した。図から各軌道構造ともに列車速度の増加に伴って、車体加速度が大きくなっていることがわかる。

各種フローティング軌道は、3種類の比較検討軌道と比べて輪重減少率が大きくなっているが、これらの値は軌道中間部で最大でも0.1m/s² (0.01g)程度であり、問題のない値であると言える。このため列車走行性の観点からフローティング軌道の適用性を検討する場合には、走行安全性が重要となると考えられる。

(2) 継目部の支持剛性の影響

走行安全性の評価と同様に、ユニット継目部の支持剛性が車体加速度に及ぼす影響を明らかにするために、軌道構造4のフローティング・ラダー軌道を取り上げ検討を行った。

図 - 18 にユニット継目の軌道支持ばね定数を変化させたと

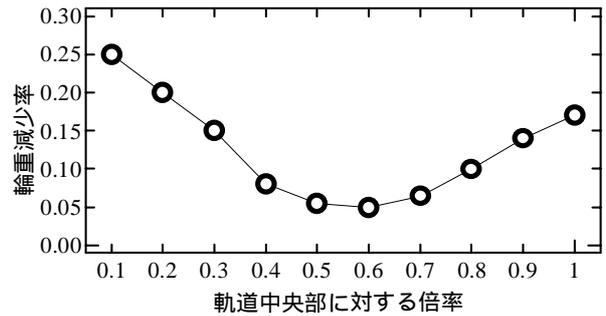


図 - 13 ユニット継目の軌道支持ばね定数が輪重減少率に及ぼす影響 (列車速度260km/h)

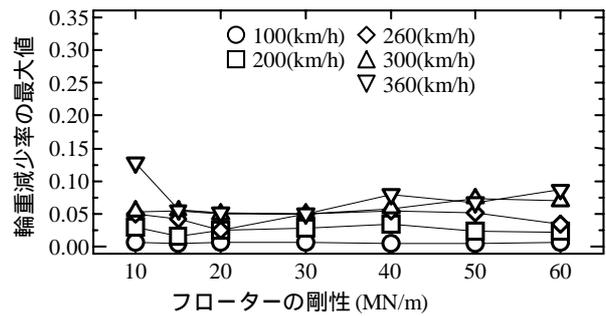


図 - 14 軌道支持ばね定数が及ぼす影響 (軌道中間部、フローティング・ラダー軌道)

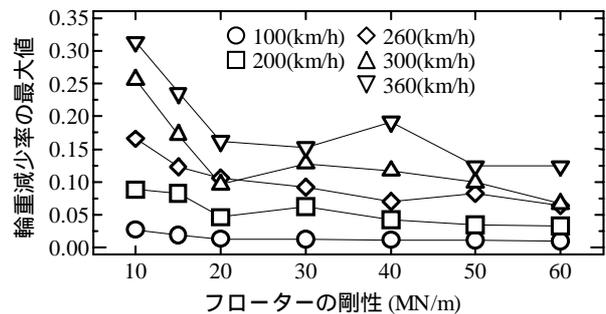


図 - 15 軌道支持ばね定数が及ぼす影響 (軌道端部、フローティング・ラダー軌道)

きの車体加速度を示す。列車速度は260km/hである。輪重減少率と同様に、軌道支持ばね定数を中央部の0.5倍程度に設定すると、車体加速度が極小になっていることがわかる。また、ユニット継目の処理を行わなくても、乗り心地にはほとんど問題がないと推察される。

(3) 軌道支持ばね定数の影響

走行安全性の評価と同様に、軌道支持ばね定数の影響について検討した。なお、ユニット継目の軌道支持ばね定数は中央部の支持ばね定数 K の1/2として設定した。

図 - 19 に軌道支持ばね定数が車体加速度に及ぼす影響を示す。これらの値は最大でも0.1m/s² (0.01g)程度であり、問題のない値であると言える。

5. まとめ

車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS を用いて、数値解析を行い、今後、実用化が期待される5種類のフローティング軌道について新幹線への適用性を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) フローティング軌道は一般に軌道支持ばね定数が小さく、固有振動数は、1/2～1/10 となっている。しかしながらレールの最大変位については、顕著な共振が認められず、軌道構造は共振に対して安全であると考えられる。
- (2) フローティング軌道上を走行する車両の走行安全性は、ユニット継目、隣接軌道構造との境界部の影響を受ける。前者については適切にユニット継目の軌道支持ばね定数を設定することにより、列車速度 360m/h 程度までは輪重減少率を5%以内に抑えることが可能であり、平滑な走行を確保できると考えられる。後者については、隣接軌道構造との遷移区間を調整することにより、走行安全性の確保を図っていくのがよいと考える。
- (3) フローティング軌道を走行する車両の車体加速度は、最大でも 0.1m/s^2 (0.01g) 程度と極めて良好である。このためフローティング軌道の適用性を検討する場合には、乗り心地は全く問題にならないと考える。

以上のように本論文では、各種フローティング軌道や支持ばね定数と高速列車走行性の関係について、数値解析により明らかにし、適用可能な構造や範囲を定量的に示した。今後は、実車走行試験や数値解析により、防振性能の観点からも性能評価を行い、環境への調和を目指した軌道構造を開発していきたいと考える。

参考文献

- 1) 奥田広之, 浅沼潔, 松本信之, 涌井一: フローティング・ラダー軌道の耐荷性能と環境性能の評価, 鉄道総研報告, Vol.17, No9, pp9-14, 2003
- 2) 桃谷尚嗣, 鈴木健司, 名村明, 藤井光治郎, 安藤勝敏, 芦谷公稔, 堀池高弘: コイルばね防振軌道の性能と評価, 鉄道総研報告, Vol.15, No4, pp27-32, 2001
- 3) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No724/ -62, pp83-102, 2003.1
- 4) 榊原貞臣, 岡本茂: 東北新幹線・通勤別線の設計・施工計画 - 上野～大宮間 赤羽台トンネル -, トンネルと地下, pp417-421, 1985.5
- 5) Viktor Enoekl and Udo Lenz: First Mass-Spring System in a high-speed railway line, Eisenbahntechnische Rundschau, Vol.9, pp527-538, 2003
- 6) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No513/I-31, 129-138, 1995.4
- 7) 加藤八州夫: レール・Rail, pp58, 1987

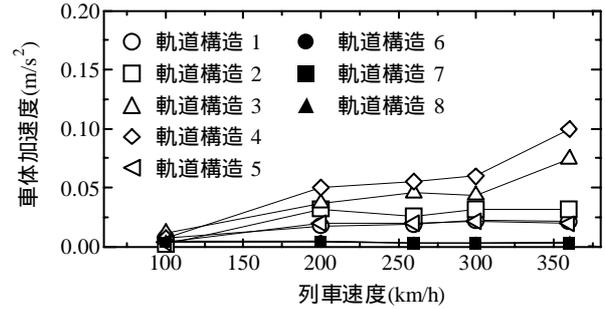


図 - 16 軌道中央部における車体加速度

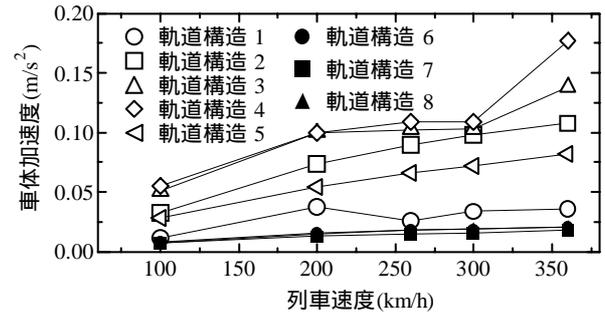


図 - 17 軌道端部における車体加速度

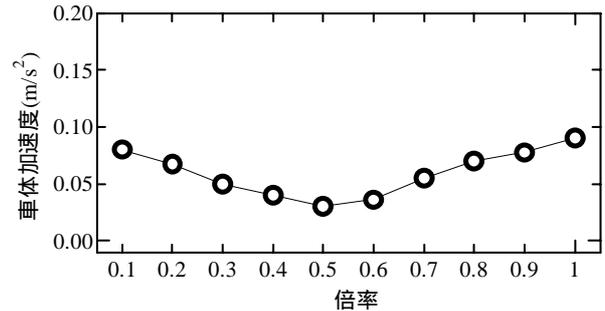


図 - 18 端部フローターの剛性が車体加速度に与える影響(列車速度 260(km/h))

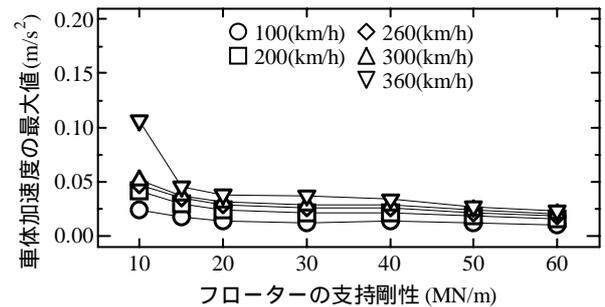


図 - 19 フローターの支持剛性の影響 (軌道中間部, フローティング・ラダー軌道)

- 8) 村本勝己, 関根悦夫, 蔣関魯: 繰返し荷重をうける道床バラストの粒度と強度・変形特性に関する検討, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp1185-1186, 2001.6
- 9) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限) pp55-78, 2006

10) 名村明, 松尾浩一郎, 三浦重: 支持弾性遷移区間の軌道の
挙動解析, 鉄道総研報告, Vol.11, No2, 1997

(2006年9月11日受付)