論文 新幹線用伸縮継目の弾性支持構造の開発

清水 紗希1・及川 祐也1・本村 裕基1

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 (〒185-0034 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: shimizu.saki.69@rtri.or.jp, oikawa.yuya.41@rtri.or.jp, motomura.yuki.32@rtri.or.jp

新幹線のまくらぎ直結軌道に敷設された伸縮継目は弾性支持されておらず、剛に支持されている.その ため、弾性支持されている前後の一般区間との軌道支持ばねの差により衝撃が生じたり、乗り移り等によ り生じた衝撃が低減されにくいものと考えられる.そこで、前後の一般区間と同程度の軌道支持ばねを有 する新幹線用伸縮継目の弾性支持構造を開発した.

開発品は弾性材を床板の下に配置し、さらに板ばねで床板を締結することで2重弾性構造とした.また、 従来の締結装置と互換性があり、置き換えが可能である.弾性支持化の効果を検証するため、車両走行解 析を実施した結果、弾性支持化により衝撃を緩和できることを確認した.さらに、新幹線車両が低速で通 過する簡易伸縮継目を対象として、開発品の試験敷設を実施し、施工性に問題が無いことを確認した.

Key Words : elastic support stracture, expansion joints, vehicle dynamic simulation

1. はじめに

新幹線の伸縮継目(以下,「EJ」という.)において は、バラスト軌道に敷設されたもの、スラブ軌道に敷設 されたもの、まくらぎ直結軌道に敷設されたものがある. このうち、まくらぎ直結軌道に敷設されたものの一部で は、新幹線の開業後間もなくトングレールにきしみ割れ が発生しており、その対策に苦慮している.きしみ割れ は図-1に示すとおり、車輪の乗り移り区間のトングレー ルに発生している.

バラスト軌道に敷設されたものは、バラストが緩衝材 となっており、一方、スラブ軌道に敷設されたものは、 床板の下に弾性材を配置し、床板をコイルばねで押さえ る2重弾性構造になっている.しかしながら、まくらぎ 直結軌道に敷設されたものは、それらのような弾性支持 はされておらず剛に支持されている.そのため、弾性支 持されている前後の一般区間との軌道支持ばねの差によ り衝撃が生じたり、乗り移り等により生じた衝撃が低減 されにくいものと考えられる.

そこで本研究では、まくらぎ直結軌道に敷設されたEJ に作用する荷重の低減を目指し、まくらぎ直結軌道用EJ の弾性支持構造について検討することとした.



図-1 きしみ割れの発生状況

2. 弾性支持構造の開発

(1) 現行のEJ

まくらぎ直結軌道に敷設されたEJは、基本的な構造は バラスト軌道用のものと同じであるが、まくらぎが固定 されていることから、上下・左右の調整を可能とするた め図-2に示すような2重タイプレート方式を採用してい る.床板の下に勾配をもったショルダー付きの敷板を設 け、敷板を移動することなく、床板をレール長手方向へ 移動させることにより左右方向の調整が可能となってい る.さらに敷板と床板の間に調整板を設置することで、 上下方向の調整も可能となっている.

(2) 構造設計

弾性支持構造を有するEIについて、下記に示す条件に基づき設計を行った.

・現行からの置き換えを可能とする.



(a) 正面図







(c) 写真図-2 現行のまくらぎ直結軌道用 EJ

- ・2重タイプレート方式が持つ上下・左右の調整機能は 損なわない.
- ・床板から上部は現行のままとする.

上記の設計条件を元に設計,試作したEJの弾性支持構造を図-3に示す.その概要は以下の通りである.

- ・弾性材を床板の下に配置し、直結8形レール締結装置 と同じ板ばねで床板を締結することで2重弾性構造と した.
- ・現行のEJとレールの高さを合わせるため、床板の下に 配置されていた敷板に変えて2つの横圧受け金具を用 いることとした.
- ・調整板で上下方向の調整を行った場合でも板ばねの姿勢が変わらないように,調整板は床板の下だけに配置 していたものを構造全体の下に配置した.
- ・左右方向の調整を行うため、図-4のように床板をレー ル長手方向に移動させる場合、床板の可動範囲を明確 にするため、床板に突起を取り付けてストッパーとし た.また、弾性材が床板の下から抜け出さないよう、 リブを床板の側面に取り付けた.

・現行からの置き換えの際には、まくらぎは変更せず、 アンカーボルトとその埋込栓は現行のまま利用できる. アンカーボルトではなくねじくぎの場合は、まくらぎの 穴の補修が必要である.





(c) 写真





図-4 左右調整のため床板を移動した場合

(3) 弾性材のばね定数の検討

前項で設計した弾性支持構造の弾性材のばね定数は, まくらぎ中間のレールの上下変位が一般区間と同等とな るように設定する.ここで一般区間とは,30MN/mの軌 道パッドを使用した直結8型レール締結装置のスラブ軌 道区間を想定した.

a) 検討

レールの上下変位は弾性床上の梁理論¹から算出する. 輪重を91kNとした場合、一般区間のレールの上下変位 は1.18mmであった.算出に使用した軌道条件とレール の上下変位を表-1に示す.なお,輪重91kNは伸縮継目 前後の一般区間の輪重を測定した際の最大値である.

この上下変位と同程度となるように、EJの弾性材のば ね定数を設定する.ここで、レールの上下変位の算出に

表-1 一般区間の軌道条件とレールの上下変位

項目	単位	値
レールの断面係数	mm ³	3.972×10 ⁵
レールの断面2次モーメント (水平軸回り)	mm ⁴	3.090×10 ⁷
軌道パッドのばね定数	MN/m	30
まくらぎ間隔	mm	625
レールの上下変位	mm	1.18



表-2 受けレールとトングレールの重複区間の軌道条件と レールの上下変位

項目	単位	値
レールの断面係数	mm ³	5.772×10 ⁵
レールの断面2次モーメント (水平軸回り)	mm ⁴	4.439×10 ⁷
弾性材のばね定数	MN/m	25
まくらぎ間隔	mm	550
レールの上下変位	mm	1.18

表-3 トングレールの単独区間の軌道条件とレールの上下変位

項目	単位	値
レールの断面係数	mm ³	3.870×10 ⁵
レールの断面2次モーメント (水平軸回り)	mm ⁴	2.704×10 ⁷
弾性材のばね定数	MN/m	31
まくらぎ間隔	mm	550
レールの上下変位	mm	1.18



図-6 鉛直載荷試験の状況

表-4 鉛直ばね定数試験の載荷要領

載荷サイクル	鉛直荷重(kN)
第1~3回目	$0.0 \rightarrow 100.0 \rightarrow 0.0$

表-5 鉛直ばね定数の試験結果

同卷	荷重	変位	ばね定数	
回奴	(kN)	(mm)	(MN/m)	
	10.0	0.43	10.2	
	49.8	2.50	19.2	
200	10.2	0.79	20.1	
2回日	49.7	2.76	10.0	
	10.2	0.82		
3回日	49.8	2.80	19.9	
	2、3回目平均		20.0	

使用するEJのレール断面は、図-5に示すように受けレー ルとトングレールの重複区間と、トングレールの単独区 間とした.それぞれの軌道条件、弾性材のばね定数およ びレールの上下変位を表-2および表-3に示す.なお、受 けレールとトングレールの重複区間の断面剛性は、受け レールとトングレールを合わせて一断面として算出した ものである。

一般区間と同程度の上下変位となるEJの弾性材のばね 定数は、受けレールとトングレールの重複区間では 25MN/m、トングレールの単独区間では31MN/mとなった. 両区間のばね定数の値の差は小さいため、一律に 25MN/mのばね定数の弾性材を用いることとした.

b) 載荷試験

前項で検討した弾性材を試作し、弾性支持構造の鉛直ば ね定数を確認するため、図-6に示すようにトングレー ルの単独区間の1締結を対象に載荷試験を実施した.載 荷速度は1N/sで、表-4の要領で載荷した。弾性支持構造 の鉛直ばね定数の試験結果を表-5に示す.なお、ばね定 数の算出には、10kNと50kNを載荷した際の荷重と変位 の関係を用いた.載荷試験から得られた弾性支持構造の 鉛直ばね定数は20MN/mであり、検討したばね定数であ る25MN/mよりやや小さいものの、概ね同程度となった.

(4) 性能照查

開発した弾性支持構造について,鉄道構造物等設計標 準軌道構造(以下,「設計標準」という.)の「5.5 レ ール締結装置」²に準拠して疲労破壊に関する安全性の 照査を実施した.照査の対象は、トングレールの単独区 間およびトングレールと受けレールの重複区間の2種類 であり、方法は斜角載荷試験および2軸疲労試験である. なお、これらの試験はトングレールの単独区間について は1締結にて、受けレールとトングレールの重複区間に ついては5締結の軌きょうを構成して実施した.

a) 斜角載荷試験

本試験は、疲労破壊に関する安全性の照査のうち、板 ばねの応力の照査およびレールの頭部左右変位量の照査 を目的としている.



	鉛直荷重 (kN)	水平荷重 (kN)	試験荷重 [※] (kN)	角度(゜)
P _{1MAX}	32.7	32.8	46.3	θ ₁ =44.9
P _{2MAX}	29.0	16.4	33.3	θ_{2} =60.5

※鉛直荷重と水平荷重の合力

図-7 トングレールの単独区間の鉛直荷重と水平荷重

表-6	受けレールとトングレールの重複区間の
	鉛直荷重と水平荷重

	鉛直荷重 (kN)	水平荷重 (kN)	試験荷重 [※] (kN)	角度(゜)
P _{1MAX}	110.5	68.0	124.4	θ ₁ =54.6
P _{2MAX}	97.8	34.0	98.0	heta 2=66.1

※鉛直荷重と水平荷重の合力

載荷サイクル	試験荷重(kN)
予備載荷	$\begin{array}{c} P_1: 0.0 \rightarrow 10.0\\ P_2: 0.0 \rightarrow 10.0 \end{array}$
第1~3回目	P ₁ :10.0 → P _{1MAX} → 10.0 P ₂ :10.0 (一定)
第4~6回目	P ₁ : 10.0 (一定) P ₂ : 10.0 → P _{2MAX} → 10.0

表-7 斜角載荷試験の載荷要領

トングレールの単独区間については,設計作用に対す る弾性支持構造の応答値を算定するにあたり,設計標準 に記載された「レール締結装置1組に対する静的載荷試 験による方法」を選定した.構造解析モデルを用いたレ ール応答計算³により算定した弾性支持構造1組に作用さ せる荷重を図-7に示す.なお,試験の際は鉛直荷重と水 平荷重の合力を載荷する。またP_{IMAX}、P_{2MAX}はそれぞれ P₁、P₂の最大値である。ここで,本来ならば弾性支持構 造1組に作用させる小返りモーメントも考慮し,試験用 レールを使用して載荷点を低く調整する必要があるが, 80Sレールに対応した試験用レールがないことから,本 試験では80Sレールに直接載荷することとした.これに より,小返りモーメントを考慮し,載荷点を低くした場



合より厳しい条件となり、本試験結果は小返りモーメン トを考慮した場合を包含すると考えられる.

受けレールとトングレール重複区間については,設計 作用に対するレール締結装置の応答値を算定するにあた り、設計標準に記載された「実軌道を模擬した試験軌道 に対する静的載荷試験による方法」を選定した。算定し た弾性支持構造1組に作用させる荷重を表-6に示す.な お、荷重やその角度の記号は図-7と同様である。

算定した荷重を元に表-7の要領で斜角載荷試験を実施 し、板ばねの発生応力を耐久限度線図により照査した結 果を図-8に示す.いずれの測点とも第2破壊限度および 第2へたり限度以内に収まっていた.

またトングレールの単独区間およびトングレールと受 けレールの重複区間のレールの頭部左右変位量は、それ ぞれ最大0.92mmおよび2.50mmであり、どちらも新幹線 軌道におけるレールの頭部左右変位量の設計限界値 5.2mm以下であった.

b) 2軸疲労試験

本試験は、疲労破壊に関する安全性の照査のうち、レ ール締結装置全体の耐久性の照査を目的としている.

図-9に示すように、表-8の要領で2軸疲労試験を実施 した.その結果、どちらの弾性支持構造もレール左右変 位、上下変位、小返り角、ボルト軸力および板ばね応力 のいずれについても顕著な変動は認められなかった.ま た、板ばね、締結ボルトおよび弾性材等の部材について、

表-8 2 軸疲労試験の載荷要領

J	項目	単位	載荷条件
広 舌	軌間内側	kN	P ₁ :10.0~P _{1MAX} (角度: θ ₁)
何里	軌間外側	kN	P ₂ :10.0~P _{2MAX} (角度: θ ₂)
繰返	し周波数	皮数 Hz 5.5	
目標繰返し回数回		回	1 × 10 ⁶



(a) トングレール単独区間



(b) 受けレール・トングレール重複区間

図-9 2軸疲労試験の状況

100万回載荷後にき裂や顕著な摩耗等の変状は認められなかった.

c) 照查結果

以上より、トングレールの単独区間およびトングレー ルと受けレールの重複区間ともにレール締結装置の要求 性能である疲労破壊に関する安全性の照査を満足するこ とを確認した.

(5) 車両走行シミュレーションによる効果の検証

EJの弾性支持化による効果を検証するため、車両走行 シミュレーションを実施した.

a) 解析モデルの概要

解析モデルの概要を図-10に示す.車両,軌道ともに マルチボディダイナミクスモデルであり,使用した解析 ソフトは汎用のマルチボディダイナミクスツール

「SIMPACK」である.車両は新幹線車両を想定してお り、車両諸元を表-9に示す.また、EJでは図-11のよう にレール長手方向にレール断面形状が変化しており、特 に受けレールからトングレールへ(またはトングレール から受けレールへ)乗り移る際の車輪との接触状態を精 度よく再現するため、50mm間隔でレール断面形状を設



(a) 車両モデル



(b) 軌道モデル

図-10 車両走行シミュレーションのモデル

表-9 車両諸元

軸距(m)	2.5
台車中心間距離(m)	17.5
車輪踏面形状	新幹線用円弧踏面形状
静止輪重(kN)	50

定し, EJの軌道モデルを作成した.

軌道モデルについては、レールは剛体とし、レールの 下はばね(以下、「レール支持ばね」という。)で支持 する質点-ばねモデルである。レールの質量やレール支 持ばねのばね定数については、レールの離散支持による 軌道の剛性や軌道の固有振動を表現出来るように換算し た質量およびばね定数(以下、「換算質量」および「換 算ばね定数」という。)を用いる手法⁴が研究されてお り、本研究ではその手法を用いることとした。

一般区間,現行のEJおよび弾性支持構造を有するEJ (以下,「弾性EJ」という.)における換算質量,換算 ばね定数および軌道条件をそれぞれ,表-10,表-11,表-12に示す.なお,算出に使用した現行のEJおよび弾性EJ のレール断面は,図-5における受けレールとトングレー ルの重複区間の断面とした.

換算ばね定数については、図-12のように一般区間, EJ 区間にそれぞれの換算ばね定数を用いることとする. 換算質量については、解析上、レール長手方向にレール の質量を変えることは困難なため、一般区間も EJ 区間 も一律の値を用いることとする.そのため、レールの換



図-11 解析モデルのレール断面

表-10 一般区間の軌道条件と換算質量と換算ばね定数

	_	
項目	単位	値
レールの断面2次モーメント (水平軸回り)	mm4	3.090×10^{7}
1締結のばね定数	MN/m	30
まくらぎ間隔	mm	625
レールの換算質量	kg	77
換算ばね定数	MN/m	82

表-11 現行のEJの軌道条件と換算質量と換算ばね定数

項目	単位	値
レールの断面2次モーメント (水平軸回り)	mm4	4.439 × 10 ⁷
1締結のばね定数	MN/m	93*
まくらぎ間隔	mm	550
レールの換算質量	kg	61
換算ばね定数	MN/m	230

※1締結の静的載荷試験の結果から算出

表-12 弾性 EJ の軌道条件と換算質量と換算ばね定数

項目	単位	値
レールの断面2次モーメント (水平軸回り)	mm ⁴	4.439 × 10 ⁷
1締結のばね定数	MN/m	20*
まくらぎ間隔	mm	550
レールの換算質量	kg	90
換算ばね定数	MN/m	73

※1締結の静的載荷試験の結果から算出





算質量が本解析の輪重変動に及ぼす影響を確認するため、 レールの換算質量を現行のEJの61kgの場合と弾性EJの 90kgの場合の2通りの解析を実施した.

b) 現行のEJと弾性EJの走行解析

レールの換算質量を61kgとし、走行速度300km/hでEJ を通過した場合の解析を実施した.現行のEJの場合と、 弾性EJの場合の輪重の結果を図-13に示す.図には本解 析モデルの乗り移りの位置も示した.なお、結果には 100Hzのローパス処理を施している.

現行のEJは、EJ進入時にレール支持ばねが急変する箇 所と、乗り移りの箇所で輪重変動が生じていることが確

表-13 乗り移りの箇所の最大輪重

	最大輪重(kN)		
	換算質量		差(%)
	90kg	60kg	
現行のEJ	74.21	74.13	0.1
弾性EJ	62.09	62.46	-0.6

認できる.一方,弾性EJはEJ進入時にレール支持ばねが 急変しないため,ほぼ輪重変動が生じていない.また, 乗り移りの位置では,現行のEJより最大輪重が小さくな り,輪重変動が小さくなることが確認できる.

次に、レールの換算質量を90kgとし、同様の走行解析 を実施した結果を図-14に示す.レールの換算質量を 61kgとした場合とほぼ同様の結果となっている.前方 の乗り移りの箇所の最大輪重の値を比較したものを表-13に示す.換算質量による差は1%未満であり、本解析 においては影響が小さい結果となった.

この結果から、EJを弾性支持することにより、EJ進入 時にレール支持ばねが急変する箇所と、乗り移りの箇所 において輪重変動が緩和されると考えられる. なお、本 解析においては、前方の乗り移りの箇所の最大輪重が、 弾性EJの場合は現行のEJの場合より約16%低減される結 果となった.

3. 試験敷設

(1) 目的

施工性を確認するため、新幹線が低速で通過する簡易 伸縮継目を対象として、開発した弾性支持構造の試験敷 設を実施した.本線の高速区間で使用されるEJは1本の トングレールの両端に2本の受けレールがあるのに対し て、簡易伸縮継目はトングレールと受けレールが1本ず つであり、全長はEJの半分程度である.ただし、その他 の構造についてはほぼ同一である.

(2) 敷設工事

既設のトングレール、受けレール、レールブレス、座金 およびボルト類はそのまま利用することとし、現行の床 板、敷板および調整板を撤去し、開発した弾性支持構造 の床板、弾性材、横圧受け金具、板ばね、板ばね締結用 ボルトおよび調整板を設置した.施工範囲はまくらぎ11 本分であり、一晩の作業時間帯で問題なく施工できるこ とを確認した.敷設状況を図-15に示す.



図-15 敷設状況

4. おわりに

新幹線のまくらぎ直結軌道用EIの弾性支持構造の開発 を行った.結果をまとめると以下のとおりである.

- ・伸縮継目の床板の下に弾性材を配置し、さらに板ばね で床板を締結する2重弾性締結方式の弾性支持構造を 開発した.
- ・弾性支持構造を有する伸縮継目について,鉄道構造物 等設計標準に則り性能確認を実施し,疲労破壊に関す る安全性の照査を満足することを確認した.
- ・弾性支持化の効果を確認するため、車両走行シミュレ ーションを実施した結果、軌道支持ばねの急変や乗り 移りに伴う衝撃を緩和できることを確認した.
- ・新幹線が低速で通過する簡易伸縮継目に弾性支持構造
 を試験敷設し、施工性に問題がないことを確認した。
 開発した弾性支持構造の実用化に向けた取り組みとし

て、本結果に基づき、列車が高速で通過する区間への敷 設拡大を図っていく.

参考文献

- 1) 佐藤裕: 軌道力学, pp.10-14, 鉄道現業社, 1964.
- 国土交通省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編:鉄 道構造物等設計標準・同解説 軌道構造,pp.52-60, 丸善出版株式会社,2012.
- 3) 玉川新悟,片岡宏夫,弟子丸将:レールの小返り解 析モデルの提案とレール締結装置の性能評価試験へ の応用,土木学会論文集, Vol. 73, No. 2, 2017.
- 4) 細田充,田中博文,石川達也:鉄道におけるレール 波状摩耗発生・成長機構の検討のための軌道の支持 剛性を考慮したマルチボディダイナミクスによる車 両運動解析,構造工学論文集,vol. 63A, pp.171-181, 2017.

(2019.4.5 受付)

ELASTIC SUPPORT STRUCTURE FOR EXPANSION JOINTS OF SHINKANSEN

Saki SHIMIZU, Yuya OIKAWA and Yuki MOTOMURA

The expansion joints laid on the direct link track for Shinkansen are not elastically supported. As a result, it is considered that impacts are generated due to the difference of the track with the adjacent normal track being elastically supported, and that the impact generated by the wheels transfer from rail to rail is difficult to reduce. Therefore, in order to reduce the impacts, we have developed an elastic support stracture for expansion joints for Shinkansen, which allows tracks for Shinkansen the same vertical displacement of the rail, as that of the adjacent normal track.

In the stracture developed, an elastic pad was placed under the baseplate, and the baseplate was fastened to the track bed with a plate spring. With the conventional support structure, it is compatible and replaceable. As a result of vehicle dynamic simulation for evaluating the effect of elastic support, it was confirmed that the impact caused by sudden change in the track and wheels transfer from rail to rail can be mitigated by the elasticity. Furthermore, the stracture developed was experimentally installed where the Shinkansen vehicle passes at a low speed, and it is confirmed that any problem has not been found in its construction.