

まくらぎ直結軌道用伸縮継目の弾性支持構造の提案

清水 紗希* 及川 祐也* 弟子丸 将*
 本村 裕基** 佐藤 慎司***

Proposal of Elastic Support Structure of Expansion Joint Laid on Composite Sleeper on Direct Fixation

Saki SHIMIZU Yuya OIKAWA Tadashi DESHIMARU
 Yuki MOTOMURA Shinji SATO

The expansion joint laid on composite sleeper on direct fixation of the Shinkansen is supported more rigidly than those laid on the ballasted track. On the other hand, a high-elasticity rail fastening is used in the slab track of the Shinkansen, so there is a big difference of strengths of track support elasticity, between the composite sleepers on direct fixation where expansion joints are used, and the adjacent normal slab tracks. To solve this problem, we have developed an elastic support structure for expansion joints. In the structure developed, an elastic pad is placed under a baseplate, and the baseplate is fastened to a track bed with a plate spring. It is compatible with and replaceable with conventional rail fastenings.

キーワード：伸縮継目，弾性支持，まくらぎ直結軌道

1. はじめに

まくらぎ直結軌道用伸縮継目(以下、「直結 EJ」という)は、新幹線のスラブ軌道区間におけるロングレール端で使用されており、図1のように、まくらぎをコンクリート道床で直接支持する構造となっている。基本的な構造はバラスト軌道用のものと同様で、レールの温度変化に伴う伸縮を吸収する機能を有している。

まくらぎ直結軌道は、バラスト軌道より剛に支持され

ている一方で、図2に示すように、新幹線のスラブ軌道区間では低弾性のレール締結装置が採用されていることから、弾性締結していない直結 EJ は前後の一般区間と軌道の支持ばねに大きな差が生じている。このため、直結 EJ では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、剛に支持されていることに起因して、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、これらの衝撃を低減するため、直結 EJ に適用できる弾性支持構造を開発した。



図1 まくらぎ直結軌道 (直結 EJ 区間)

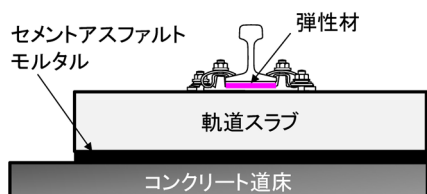


図2 スラブ軌道 (一般区間)

2. 弾性支持構造の開発

2.1 現行の直結 EJ

直結 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3に示すように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。

2.2 構造設計

弾性支持構造を有する直結 EJ(以下、「弾性 EJ」という)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。
- ・ 2重タイプレート方式が持つ上下・左右の調整機能を

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室
 ** 軌道技術研究部 軌道構造研究室 (現 東海旅客鉄道株式会社)
 *** 軌道技術研究部 軌道構造研究室 (現 株式会社スミハツ)

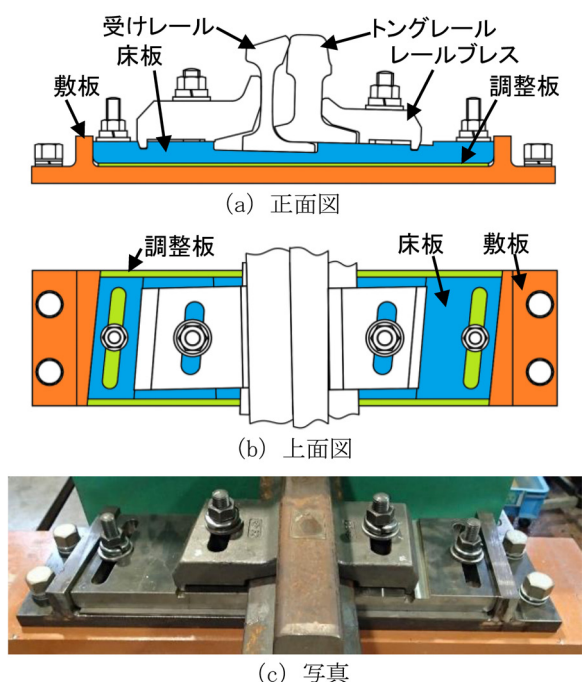


図3 現行の直結 EJ

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，試作した弾性 EJ を図 4 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。
- ・現行の直結 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。
- ・図 5 のように床板をレール長手方向に移動して左右方向の調整を行う際，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を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。

2.3 弾性材のばね定数の検討

前節で設計した弾性 EJ の弾性材のばね定数は，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 形レール締結装置のスラブ軌道区間を想定した。

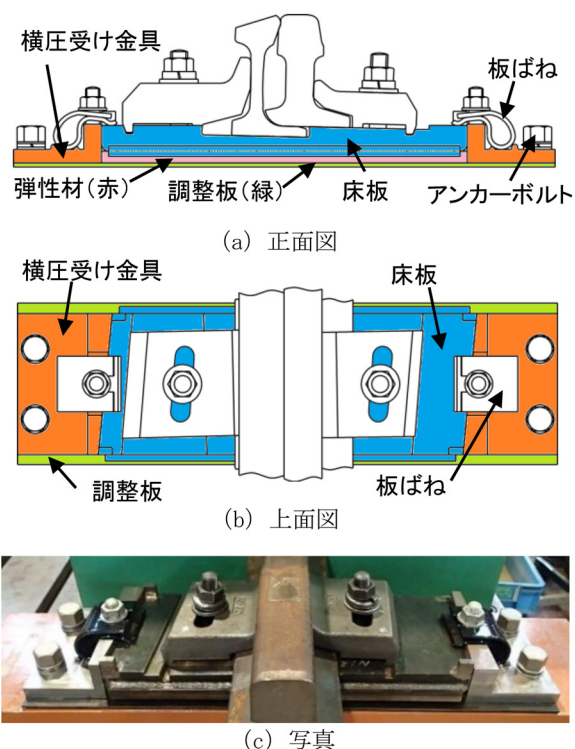


図4 開発した弾性 EJ

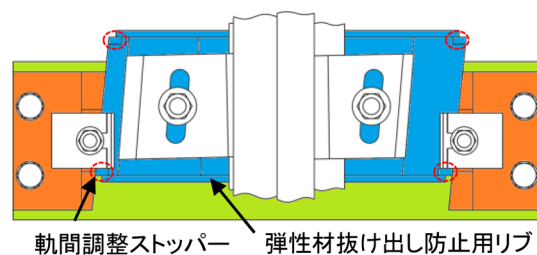


図5 左右調整のため床板を移動した場合

2.3.1 ばね定数の設定

レールの上下変位は弾性床土の梁理論¹⁾から算出した。算出に使用した一般区間の軌道条件を表 1 に示す。また，算出に使用する弾性 EJ のレール断面は，図 6 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の 2 種類とした。それぞれの軌道条件を表 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。

輪重として新幹線の標準の設計軸重の半分である 85kN を載荷した場合の，弾性材のばね係数とレールの上下変位の関係を図 7 に示す。一般区間と同程度の上下変位となる弾性 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。

表1 一般区間の軌道条件

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

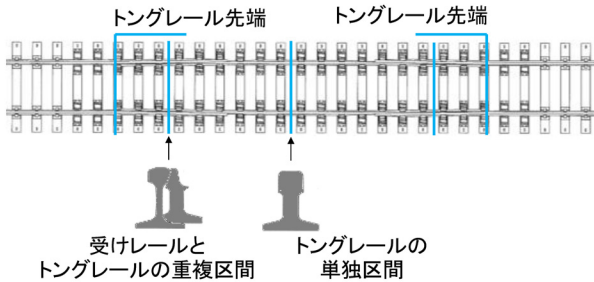


図6 使用した弾性EJのレール断面

表2 受けレールとトングレールの重複区間の軌道条件

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
まくらぎ間隔	mm	550

表3 トングレールの単独区間の軌道条件

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
まくらぎ間隔	mm	550

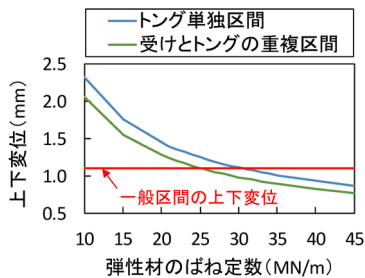


図7 弾性材のばね定数とレールの上下変位の関係

2.3.2 荷重試験

前項で検討した弾性材を試作し、弾性EJの鉛直ばね定数を確認するため、トングレールの単独区間向けの締結構造1組を対象に荷重試験を実施した。荷重速度は1kN/sで、表4の要領で荷重した。弾性EJの締結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を荷重した際の荷重と変位の関係を用いた。

表4 鉛直ばね定数試験の荷重要領

荷重サイクル	鉛直荷重 (kN)	荷重速度
第1～3回目	0.0 → 100.0 → 0.0	1 kN/s

表5 鉛直ばね定数の試験結果

回数	荷重 (kN)	変位 (mm)	ばね定数 (MN/m)
1回目	10.0	0.43	19.2
	49.8	2.50	
2回目	10.2	0.79	20.1
	49.7	2.76	
3回目	10.2	0.82	19.9
	49.8	2.80	
2, 3回目平均			20.0

荷重試験から得られた弾性EJの締結構造の鉛直ばね定数は20MN/mであり、弾性材のばね定数である25MN/mよりやや小さい結果となった。これは、前項で検討した際には、輪重が作用した場合、弾性材全体に一樣に荷重が分布するものと仮定したが、実際は床板がたわむことによりレール直下に荷重が集中した可能性が考えられる。図7から、目標とする弾性材のばね定数25MN/mと、試験から得られた弾性材のばね定数20MN/mの上下変位の差は0.2mm程度と小さいことから、今回試作した25MN/mを採用することとした。なお、後述する走行解析には、この試験結果を用いている。

2.4 性能照査²⁾

開発した弾性EJを含むレール締結構造について、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」³⁾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受けレールとトングレールの重複区間に用いられる締結構造の2種類とした。

このうち、トングレールの単独区間向けの構造については締結構造1組、受けレールとトングレールの重複区間向けの構造についてはレール断面変化を伴う区間であることから、5締結分のレール締結構造から成る試験軌道を対象として静的および動的荷重試験を実施した。

照査に用いたレール締結装置の設計作用は、表6に示すように設計軸重を新幹線の標準である170kNとし、新幹線に該当する変動係数を選定して算定を行った。

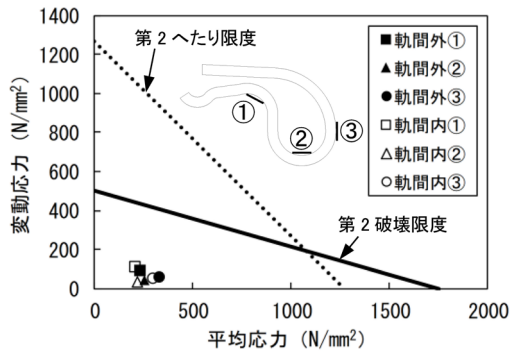
表6 レール締結装置の設計作用

荷重種別	直線・曲線種別	A 荷重	B 荷重
輪重	直線および曲線	111 kN	98 kN
横圧	直線および曲線	68 kN	34 kN

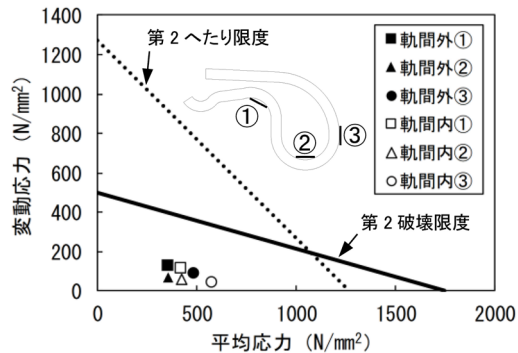
2.4.1 静的载荷試験

静的载荷試験を実施し、設計応答値と設計限界値の比較により性能照査を実施した。耐久限度線図による締結ばねの発生応力の照査結果を図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た。

トングレールの単独区間および受けレールとトングレールの重複区間のレール頭部左右変位量は、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。



(a) トングレールの単独区間用



(b) 受けレールとトングレールの重複区間用

図8 耐久限度線図による締結ばね応力の照査

2.4.2 動的载荷試験

図9に示すように、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について、動的载荷試験を実施した。その結果、どちらの締結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全てについて顕著な変動は認められなかった。また、締結ばね、締結ボルトおよび弾性材等の部材について、100万回载荷後にき裂や顕著な摩耗等の変状は認められなかった。

2.4.3 照査結果

性能照査の結果より、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を満足することを確認した。

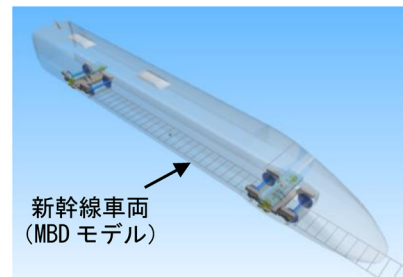


(a) トングレール単独区間用

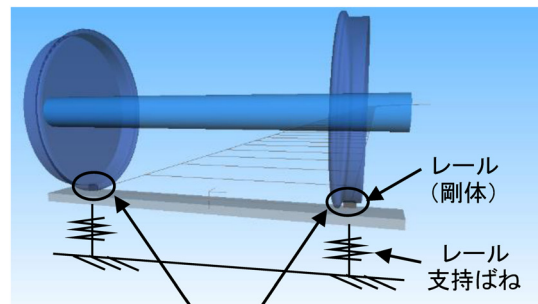


(b) 受けレール・トングレール重複区間用

図9 動的载荷試験の状況



(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

2.5 車両走行シミュレーションによる効果の検証²⁾

直結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。

2.5.1 解析モデルの概要

解析モデルの概要を図10に示す。使用した解析ソ

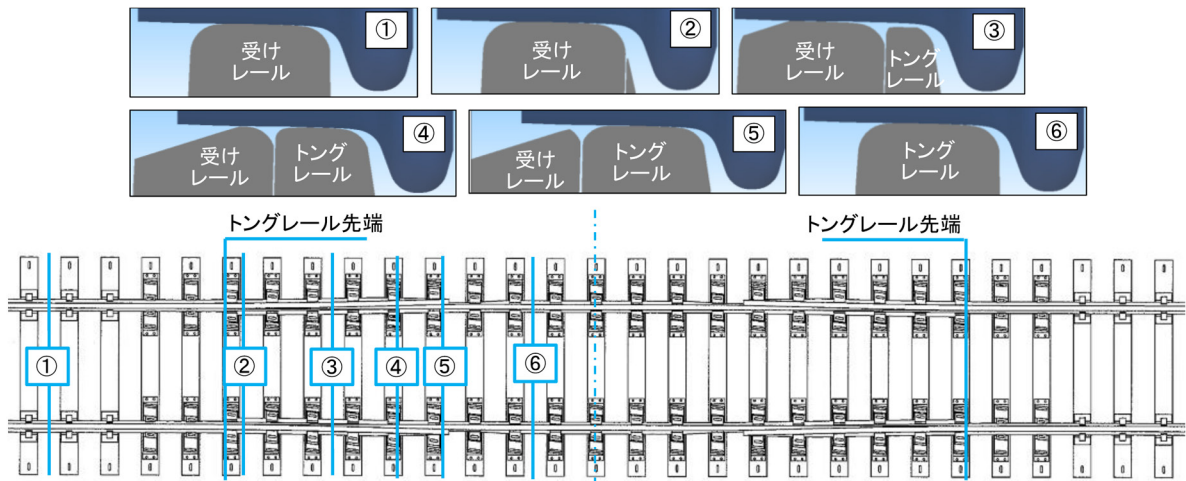


図 11 解析モデルのレール断面

表 7 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

表 8 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)	mm ⁴	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

フトは汎用のマルチボディダイナミクスツール「SIM-PACK」である。車両は新幹線車両を想定しており、車両諸元を表 7 に示す。また、直結 EJ 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定し、直結 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⁾が提案されており、本研究ではその手法を用いて算出することとした。

一般区間、現行の直結 EJ および弾性 EJ における軌道条件、換算質量および換算ばね定数を、それぞれ表 8、

表 9 現行の直結 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	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 10 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

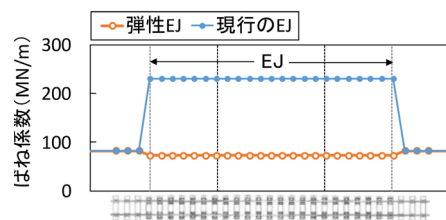


図 12 レール支持ばねのばね定数

表 9、表 10 に示す。なお、算出に使用した現行の直結 EJ および弾性 EJ のレール断面は、図 6 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、直結 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、解析ソフトの制約上、レール

ル長手方向にレールの質量を変えることが困難なため、一般区間も直結 EJ 区間も一律の値として、現行の直結 EJ の 61kg を用いることとする。なお、過去の研究²⁾においてレールの換算質量が本解析の輪重変動に及ぼす影響が小さいことを確認している。

2.5.2 現行の直結 EJ と弾性 EJ における走行解析

走行速度 300km/h で直結 EJ を通過した場合の解析を実施した。現行の直結 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。

現行の直結 EJ は、直結 EJ 区間の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認できる。一方、弾性 EJ は直結 EJ 区間の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、現行の直結 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を確認できる。

この結果から、直結 EJ を弾性支持することにより、直結 EJ 区間の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 の場合は現行の直結 EJ の場合より約 16% 低減される結果となった。

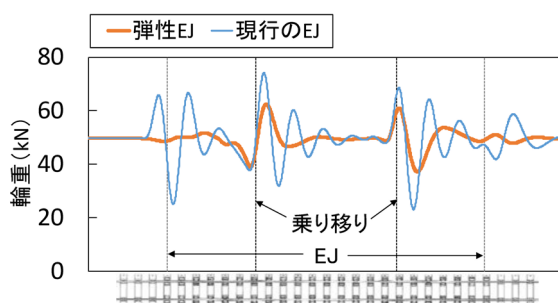


図 13 輪重の走行解析結果

3. 試験敷設

3.1 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直結 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、全長は直結 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。

3.2 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 14 に示す。

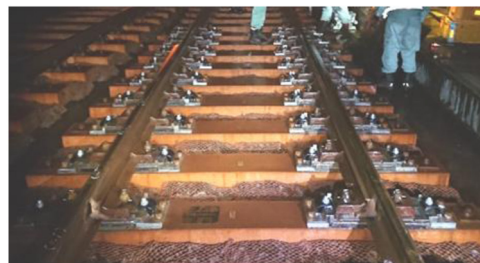


図 14 敷設状況

4. おわりに

新幹線の直結 EJ に適用する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敷設し、その効果を確認することにより、敷設拡大を図っていく。

文 献

- 1) 佐藤裕：軌道力学，鉄道現業社，pp.10-14，1964
- 2) 清水紗希，及川祐也，新村裕基：新幹線用伸縮継目の弾性支持構造の開発，鉄道工学シンポジウム論文集，No.23，pp.63-69，2019
- 3) 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，丸善出版株式会社，pp.52-60，2012
- 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