# 論文 合成まくらぎ直結軌道におけるまくらぎ 拘束部材の耐荷性能に関する研究

吉川 秀平1・渕上 翔太2・高橋 貴蔵3・桃谷 尚嗣4・柳谷 勝5

 <sup>1</sup>正会員(公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 (〒185-0034東京都国分寺市光町2-8-38)
 E-mail:kikkawa.shuhei.68@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤(同上) E-mail: fuchigami.shota.84@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤(同上) E-mail: takahashi.takatada.80@rtri.or.jp

<sup>4</sup>正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤(同上) E-mail: momoya.yoshitsugu.29@rtri.or.jp

<sup>5</sup>正会員 西日本旅客鉄道株式会社 新幹線管理本部 姫路新幹線保線区 E-mail: suguru-yanagitani@westjr.co.jp

山陽新幹線の合成まくらぎ直結軌道には、バラスト軌道およびスラブ軌道と同様に地震時に新幹線が脱線した際の逸脱防止対策として逸脱防止ガードの敷設が検討されている.逸脱防止ガードが有効に機能するためには、合成まくらぎの固定方法が地震時に想定される線路直角方向の作用(約200kN)に対して十分な耐力を有している必要がある.本研究では、合成まくらぎの両端部に配置する「まくらぎ拘束部材」の耐荷性能を確認することを目的として、3次元FEM解析および実物大模型供試体の載荷試験によりまくらぎ拘束部材および取付部の変形特性を評価した.まくらぎ拘束部材(M20ボルト4本止め)は200kNの水平荷重に対して約1.6mm、曲線での遠心荷重を考慮した120kNの鉛直荷重の繰返し載荷(200万回)に対して水平変位が約0.2mmと微小な変形量であることを確認した.

Key Words : ballastless track, synthetic sleeper, vehicle guide device, sleeper restraint component

# 1. はじめに

一般に新設される合成まくらぎ直結軌道において、合 成まくらぎはてん充層である合成樹脂の付着とコンクリ ート道床に埋め込む連結ボルトにより固定される.一方、 スラブ軌道の調整量を越える軌道変位や地震等により路 盤変状が局所的に生じた場合の対策として、既設のスラ ブ軌道を合成まくらぎ直結軌道に変更<sup>0</sup>する方法が考え られる.この場合、まくらぎの内部を貫通する連結ボル トの設置にはコンクリート道床の配筋を考慮すると配置 が難しく、高い施工精度が求められるため、合成まくら ぎを外部より拘束する方法が適していると考えられる. 新幹線のバラスト軌道およびスラブ軌道には、地震時に 車両が脱線した際の逸脱防止対策として逸脱防止ガード <sup>3</sup>が敷設されている区間があり、合成まくらぎ直結軌道 にも同様の対策が検討されている.逸脱防止ガードが有効に機能するためには、合成まくらぎに取付ける拘束部材が脱線時に想定される線路直角方向の作用(約200kN)<sup>3</sup>に対して十分な耐力を有している必要がある(図-1参





照).そこで本研究では、合成まくらぎの両端部に設置 する「まくらぎ拘束部材」の耐荷性能を解析的・実験的 に検討した.はじめに、3次元FEM解析によりまくらぎ 拘束部材の基本形状を決定し、その結果をもとに作製し たまくらぎ拘束部材の水平載荷試験によりまくらぎ拘束 部材の変形特性を確認した.また、水平載荷試験で得ら れたまくらぎ拘束部材の荷重一変位関係をもとに、数値 解析により逸脱防止ガードに200kNの荷重が作用した場 合のまくらぎ拘束部材が受ける荷重を検討した.最後に、 現地の状況を想定した合成まくらぎ1本分の実物大軌道 模型供試体の繰返し載荷試験を行い、まくらぎ拘束部材 の耐久性を確認した.

# 2. まくらぎ拘束部材の3次元FEM解析

まくらぎ拘束部材は、溶接加工した鋼材を合成まくら ぎ両端部に設置し、線路直角方向に対する合成まくらぎ の水平変位を拘束するものである. 同部材はコンクリー ト道床にボルト締結するものとし、締結用のアンカーボ ルトはセメント系てん充材等によりコンクリート道床に 固定する. ここでは、まくらぎ拘束部材の基本形状を検 討することを目的として 3 次元 FEM 解析を実施した. 図-2に解析モデルを示す.まくらぎ拘束部材の寸法は同 図に示すとおりである. なお、本検討では締結部 (アン カーボルト,コンクリート道床)についてはモデル化を 省略し、まくらぎ拘束部材の底面の全自由度を拘束する こととした. 鋼材(材質 SS400)の物性値については, 弾性係数 210kN/mm<sup>2</sup>, ポアソン比 0.3 とした. 荷重条件 として、線路直角方向に 200kN、線路長手方向に 3.4kN の静的荷重をまくらぎの接触面に対して(2方向)同時 に作用させた. ここで、線路長手方向の荷重は「鉄道構 造物等設計標準・同解説 軌道構造」4より、ロングレ ール縦荷重 5kN/m に作用係数 1.1 およびまくらぎ間隔 622.8mm を乗じて算出した. 図-3 に解析結果を示す. 図 -3(a)より、ミーゼス応力の最大値は198.9N/mm<sup>2</sup>となり、 鋼材 (SS400) の降伏応力 235N/mm<sup>2</sup>以下であった.また, 図-3(b)(c)より、線路直角方向の最大変位は0.2mm程度、 レール長手方向の最大変位は 0.06mm 程度と十分小さい 値であることを確認した.以上より,まくらぎ拘束部材 自体は想定される荷重に対して弾性変形範囲内の挙動を 示すことを確認した.

# 3. まくらぎ拘束部材の水平載荷試験

## (1) 供試体の概要

まくらぎ拘束部材をコンクリート道床に固定するアン カーボルトの本数を決定することを目的として,まくら



図-2 まくらぎ拘束部材の解析モデル



ぎ拘束部材の水平載荷試験を行った.図-4にコンクリー ト水平載荷試験用供試体の概要を示す.同図に示すよう に,既設のコンクリート版上にコンクリート道床および 反力壁を構築した後に,コンクリート道床上にまくらぎ 拘束部材を4基設置した.まくらぎ拘束部材の寸法は, CASE1が図-2の解析モデルと同様の寸法とした.一方,

CASE2, 3, 4 は CASE1 の寸法のうち線路直角方向のみ 860mm に変更し, アンカーボルトの最大本数である 10 本止めができるものとした. コンクリート道床について は,現地に敷設されているコンクリート道床と同じ配筋

(D10(SD295A), 200mm 間隔) とし, 既設コンクリート 版には、ずれ止め筋 (D13(SD345)) を設置した. コンク リート道床および反力壁のコンクリートの呼び強度は 21N/mm<sup>2</sup>とした. また, まくらぎ拘束部材のアンカーボ ルト (M20, 材質 S45C) の埋込み長は 160mm (内径 25mm)とし、アンカーボルトの固定には無機系注入式 アンカーを用いた. 無機系注入式アンカーの注入後, 3 日目以降に締結トルク 350N·m でアンカーボルトを締結 した. なお,アンカーボルトの引抜耐力については,文献 5より同種のアンカーボルトおよび無機系注入式アンカ ーを用いた引抜試験(コンクリートの圧縮強度28N/mm<sup>2</sup>, 無機系注入式アンカーの材齢 12 日)の結果から,埋込み 深さ 90mm の場合の引抜耐力は,117kN となることが報告 されている.また、まくらぎ拘束部材とコンクリート道 床との接地面は注入型接着剤を用いて不陸整正を行った. ここで、本試験におけるまくらぎ拘束部材の水平耐力の 評価として、注入型接着剤による付着力を除外するため、 まくらぎ拘束部材の底面にプラスチック樹脂(厚さ: 0.2mm)をグリスで貼付け、摩擦を除去させた.

## (2) 試験条件

図-5にまくらぎ拘束部材の水平載荷試験の状況を示す. 本試験では、鋼板を介して設置した合成まくらぎを手動



図-5 水平載荷試験の状況



図-6 変位計の設置位置

油圧ジャッキを用いて水平方向に載荷した. 載荷速度は IkN/s を目安とし、25kN ごとに段階的に荷重を増加させ、 一旦荷重を除荷した後に残留変位を確認した. 本試験は コンクリート道床等の材齢9日以降に実施し、材齢9日 におけるコンクリートの圧縮強度は約27N/mm<sup>2</sup>であった. また、試験ケースは全4ケースとし、アンカーボルトの 本数をパラメータとした(CASE1:4本、CASE2:6本、 CASE3:8本、CASE4:10本). 測定項目として、載荷 荷重、まくらぎ拘束部材のひずみ、まくらぎ拘束部材お よびコンクリート道床の水平変位を測定した(図-6 参 照).

#### (3) 試験結果

図-7、図-8に試験結果を示す.なお、本試験を進める にあたり、載荷時にコンクリート道床にひび割れが生じ て他の試験ケースへ影響することが懸念されたため, CASE1, 3, 4についてはひび割れの進展状況を確認しな がら載荷荷重を調整した.一方, CASE2 はコンクリー ト道床が破壊するまで載荷を行い、破壊形態および終局 耐力を確認した.水平載荷試験の結果,200kN 載荷時に おけるまくらぎ拘束部材の水平変位は CASE1 が 1.56mm, CASE2 が 0.70mm, CASE3 が 0.45mm, CASE4 が 0.50mm となり、アンカーボルトの本数が増加するとまくらぎ拘 束部材の変位量は小さくなる傾向となった. これは、ア ンカーボルトの本数の増加に伴い、1本あたりの荷重分 担率が小さくなったためと考えられる. また, それぞれ の条件における最大荷重作用時のまくらぎ拘束部材の水 平変位については、CASE1 が 5.40mm(荷重 292kN), CASE2 が 3.40mm(荷重 358kN), CASE3 が 1.71mm(荷 重 401kN), CASE4 が 1.87mm(荷重 393kN)であった. まくらぎ拘束部材のひずみについては、200kN 載荷時に おいて 500µ程度であり、鋼材(材質 SS400)の降伏応力

に相当するひずみ量 1175μ(「降伏応力 235N/mm<sup>2</sup>」/ 「ヤング係数 2.00×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>」)以下であることから, まくらぎ拘束部材は弾性変形の範囲内であったと考えら れる.図-9にコンクリート道床のひび割れ発生状況を示









 (3) CASE3
 (4) CASE4

 図-9
 コンクリート道床のひび割れ状況

す. CASE1 および CASE2 については反力壁側に近いア ンカーボルト位置から,ひび割れが載荷方向に対して直 角方向に進展する傾向がみられた.なお,CASE1 にお けるひび割れ発生荷重は約 70kN であった.次に, CASE3 および CASE4 については,反力壁との境界付近

(載荷方向に対して鉄筋が不連続な箇所(図-4参照)) にひび割れが生じていた.両ケースについては,200kN 載荷時におけるまくらぎ拘束部材の水平変位に大きな差 が見られなかったが,このコンクリート道床の破壊形態 が影響しているものと考えられる.荷重が低下するまで 載荷を行った CASE2 については,最終的に反力壁側の アンカーボルトが抜け上がるような破壊形態となった.

以上より、まくらぎ拘束部材を M20 のアンカーボル ト4本で固定した場合でも、載荷荷重 200kN に対してコ ンクリート道床にひび割れは生じるが終局破壊には至ら ないことを確認した.

# 逸脱防止ガードを有する合成まくらぎ直結軌 道の3次元FEM解析

## (1) 解析条件

逸脱防止ガードに水平力 200kN が作用する場合のまく らぎ拘束部材の荷重分担率およびまくらぎ変位を評価す るために、3 次元 FEM 解析を実施した. 図-10 に解析モ デルの概要を示す. 解析モデルの全長は25mとし、合成 まくらぎ 40 本分をモデル化した. 本解析では、地震時 に脱線した車輪がレール締結装置を破壊して走行した場 合を想定し、レールおよびレール締結装置はモデル化し ないこととした. よって、逸脱防止ガードに作用する荷 重は合成まくらぎとの固定点を介して合成まくらぎに伝 わり、レールによる分散効果を受けずにまくらぎ拘束部 材に伝達される. なお、合成まくらぎ直結軌道用の逸脱 防止ガードは開発段階であるため、文献6に示すスラブ 軌道用の逸脱防止ガードをモデル化した. 図-11 に解析 モデル、表-1 に各軌道部材の物性値を示す. 合成まくら



**図-10** 解析モデルの概要

ぎ直結軌道の各部材は 3 次元 FEM によりモデル化し, 合成まくらぎはソリッド要素,逸脱防止ガードは板要素, 合成樹脂およびまくらぎ拘束部材はばね要素,コンクリ ート道床は剛体要素とした.ここで,まくらぎ拘束部材 の物性値(ばね定数)については,前章に示したまくら ぎ拘束部材の水平載荷試験における荷重-変位関係から 図-12 に示す方法で補正値を求め,物性値とした.まず, 既設の軌道から合成まくらぎ直結軌道への変更が予定さ れている現地のコンクリート道床の圧縮強度は 21N/mm<sup>2</sup> であるため,水平載荷試験におけるコンクリート道床の 圧縮強度 27N/mm<sup>2</sup>の比(21/27=0.778 倍)を載荷荷重に 乗じることにより,まくらぎ拘束部材の荷重-変位曲線 (ばね定数)を補正した.次に,補正した荷重-変位曲 線上において,想定されるひび割れ発生荷重と 200kNの



軌道部材	項目	物性値
合成まくらぎ	ヤング率	8,000N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.3
逸脱防止ガード	ヤング率	210,000N/mm <sup>2</sup>
	ポアソン比	0.3
合成樹脂 (鉛直方向)	ばね定数	550MN/m
まくらぎ拘束部材	ばね定数	<b>図-12</b> 参照

表-1	解析に用いた物性値	
-----	-----------	--





間を直線で結び、バイリニア型の非線形ばねとしてまく らぎ拘束部材のばね定数を定義した、よって、まくらぎ 拘束部材のモデル化の条件としては、載荷試験よりも水 平方向の支持ばね剛性が小さく,線路直角方向の変位量 が大きくなるため安全側の評価となるようにした.図-13 に各解析ケースの条件を示す. 同図には 1 ユニット (5m,合成まくらぎ8本)のモデルを示す. 解析ケース は全4ケースとし、逸脱防止ガードの固定位置をパラメ ータとした. CASE1 はまくらぎ1および8本目, CASE2 はすべてのまくらぎ, CASE3 はまくらぎ2および7本目 (スラブ軌道用と同様の固定位置), CASE4 はまくら ぎ1,3,6および8本目を固定位置とした.載荷点は逸 脱防止ガードの固定位置(解析モデルの3ユニット部) とした.また、まくらぎ拘束部材の荷重分担率として、 逸脱防止ガードを固定した各まくらぎの水平方向の反力 を抽出した.

#### (2) 解析結果

図-14 に解析結果を示す.荷重載荷位置のまくらぎ反 力はCASE1で約134kN(荷重分担率67%), CASE2で約 97kN(荷重分担率49%), CASE3で約153kN(荷重分担 率76.5%), CASE4で約114kN(荷重分担率57%)とな った.また,同位置のまくらぎ変位はCASE1で1.6mm, CASE2で0.8mm, CASE3で2.0mm, CASE4で1.2mmとな った.以上より,逸脱防止ガードの固定位置がまくらぎ 2 および7本目の場合(CASE3)に荷重載荷位置におけ るまくらぎ反力およびまくらぎ水平変位が最大となった が、その変位量は2.0mm以下と十分小さい値であること を確認した.

# 5. 実物大軌道模型供試体の繰返し載荷試験





(約200kN)に対するまくらぎ拘束部材の耐力について 検討を行った.本章では,常時における列車荷重の繰返 し作用を受ける場合のまくらぎ拘束部材の変形特性等に ついて検討を行うこととした.

# (1) 試験条件

本構造の適用箇所として新幹線の曲線区間を想定し, 合成まくらぎ1本分の実物大軌道模型供試体(以下,実 物大供試体)の繰返し載荷試験を実施した.載荷荷重の 設定にあたり,別途合成まくらぎ直結軌道の3次元FEM 解析を行った結果,輪軸(軸重:160kN)の載荷点直下 におけるまくらぎの荷重分担率は約50%であった.よっ て,輪重変動係数を考慮し,載荷荷重を120kNとした (軸重160kN×輪重変動係数1.45×分担率0.5=116kN≒ 120kN).また,曲線通過時に外軌側に作用する遠心横 圧は次式により算出される(図-15参照)<sup>7</sup>.

$$Q = \frac{W_0 v^2}{gR} \tag{1}$$

ここで、V=300km/h, R=7783m, W=120kNとすると, 遠心横EQは10.9kNとなる.本試験では、合成まくらぎ1 本分の実物大供試体に前述した軸重および遠心横圧を作 用させるため、現地に敷設予定の台形形状の合成まくら ぎを用いるとともに、コンクリート道床に傾斜角度を設 けることで遠心横圧の影響を再現した.

図-16に実物大供試体の繰返し載荷試験の状況,表-2 に試験条件を示す.本供試体は,幅3.5m,奥行き7m, 深さ2.5mの土槽内の土路盤(K<sub>30</sub>:140MN/m<sup>3</sup>)上に構築 した.実物大供試体の傾斜角度の設定方法として,まず, 実カント80mmの傾斜については合成まくらぎ(台形形 状)上面の傾斜角度を3°とすることで設定した.

さらに、カント不足量分に相当する角度2.3°について は、軌道面(載荷フレーム)を傾斜させることで設定し た.よって、コンクリート道床は土槽表面に対して5.3° 傾斜させて作製した(図-17参照).コンクリート道床 (圧縮強度:21N/mm<sup>2</sup>)上に合成まくらぎと合成樹脂 (厚さ:25mm,ばね定数:196MN/m)を設置した後、3 章と同様の方法でまくらぎ拘束部材を設置した.なお、



合成まくらぎとまくらぎ拘束部材の間には可変パッドを 挿入した.測定項目として,東側のまくらぎ拘束部材の ひずみ,まくらぎ拘束部材の鉛直・水平変位および西側 のコンクリート道床鉛直変位を測定した.

## (3) 試験結果

図-18 にまくらぎ拘束部材の水平変位と載荷回数の関係およびまくらぎ拘束部材の鉛直変位と載荷回数との関係を示す.繰返し載荷によるまくらぎ拘束部材水平変位は0.2mm以下と微小であり、変位の進展はほとんど見られなかった.繰返し載荷によるまくらぎ拘束部材鉛直変位が0.5mm程度生じていた.これは、コンクリート道床の沈下は測定位置(西側)では見られなかったが、土路盤上にコンクリート道床を設置したために東側ではコンクリート道床が僅かに沈下したことが影響した可能性があると考えられる.まくらぎ拘束部材のひずみ量の最大値は24µ程度と、鋼材(SS400)の降伏強度に相当するひずみ量1175µ(「降伏強度235N/mm<sup>2</sup>」/「ヤング係数2.00×10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup>」)を大きく下回っていた.また、3章の



図-16 繰返し載荷試験の状況

表-2	試験条件

項目	試験条件	
載荷荷重	5~125kN(荷重振幅:120kN)	
載荷周波数	10Hz(サイン波)	
載荷回数	200 万回	



(a)可変パッドの状況 図-19 繰返し載荷試験終了後の実物大供試体の状況

CASE1 におけるまくらぎ拘束部材の荷重とひずみの関係からまくらぎ拘束部材に作用した荷重を推定すると 9kN 程度であった.よって,設定した遠心横圧(10.9kN) と同等の荷重がまくらぎ拘束部材に作用したものと考え られる.図-19 に繰返し載荷試験終了後の実物大供試体 の状況を示す.合成まくらぎの端部の状況を確認したと ころ,可変パッドの抜け出しやアンカーボルトの緩み, 合成まくらぎの端面および側面におけるまくらぎ拘束部 材との摩耗による接触痕等は確認されなかった.

## 6. まとめ





**(b)**まくらぎ端部の状況 共試体の状況

耐荷性能を確認することを目的として、3次元FEM解析, まくらぎ拘束部材の水平載荷試験および実物大模型供試 体の載荷試験を実施した.本研究により得られた知見を 以下に示す.

- まくらぎ拘束部材単体の3次元FEM解析の結果,脱 線時に想定される線路直角方向の作用(約200kN) に対して弾性変形の範囲内の挙動を示すことを確 認した.
- 2) まくらぎ拘束部材の水平載荷試験の結果,アンカ ーボルト(M20)の本数の増加に伴い,1本あたり の荷重分担率が減少し,まくらぎ拘束部材の変位 量は小さくなった.また,アンカーボルト4本で固 定した場合,200kN載荷時のまくらぎ拘束部材の変 位量は1.6mm程度であり、コンクリート道床にひび 割れは生じるが終局破壊には至らないことを確認 した.
- 3) 逸脱防止ガードを有する合成まくらぎ直結軌道の3 次元FEM解析の結果、レールとレール締結装置を モデル化しない(軌きょうによる剛性を考慮しない)場合、200kN載荷時の載荷点近傍におけるまく らぎ拘束部材(M20ボルト4本止め)の荷重分担率 は約77%であり、まくらぎ変位も2.0mmと十分小さ かった。
- 4) まくらぎ拘束部材 (M20ボルト4本止め) を配置し

た合成まくらぎ1本分の実物大軌道模型に対して, 遠心横圧を考慮した200万回の繰返し載荷試験を行 った結果,まくらぎ拘束部材の水平および鉛直変 位はいずれも微小であった.また,可変パッドの 抜け出しやアンカーボルトの緩み,合成まくらぎ の端面および側面におけるまくらぎ拘束部材との 摩耗による接触痕等は確認されなかった.

# 参考文献

- 渡邊正典:新幹線トンネル内路盤変状に伴う高低変位解 消の取組み,新線路,2016.10
- 河村伸行,柳谷勝:山陽新幹線における地震対策-逸脱
   防止ガードの整備-,新線路,2015.12
- 初川秀明:軌道における地震時の新幹線脱線対策,第210
   回鉄道総研月例発表会講演概要,2008.
- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造,丸善,2012.
- 5) 薮中嘉彦,高橋貴蔵,長沼光:軌道スラブ水平変位拘束 装置の取付構造に関する検討,第67回土木学会年次 学術講演会,2012.9
- 柳谷勝:山陽新幹線における逸脱防止ガードの整備, 新線路,2016.12
- 7) 保線工学(上):保線工学編集委員会,2016 (2017.4.7 受付)

# STUDY ON LOADING CAPACITY OF SLEEPER RESTRAINT COMPONENT OF BALLASTLESS TRACK

# Shuhei KIKKAWA, Shota FUCHIGAMI, Takatada TAKAHASHI Yoshitugu MOMOYA and Suguru YANAGITANI

The vehicle guide device is laid on ballasted or ballastless track at Shinkansen as a measure to prevent deviation when the vehicle derailed during an earthquake. In order for the vehicle guide device to function effectively, it is necessary for the restraint component attached to the synthetic sleeper to have sufficient loading capacity against the lateral force (about 200 kN). In this study, the 3 dimensional finite element method analysis and the loading test for full-scale model were carried out to confirm the loading capacity of sleeper restraint component placed at both ends of synthetic sleeper. Finally, it was clarified that sleeper restraint component (fixed concrete roadbed with 4 bolts) showed sufficient performance against the static load (200kN) and cyclic load (120kN, 2 million times).