

本設利用工事桁用レール締結装置の開発

弟子丸 将* 西原 敬人** 飯田 政巳* 玉川 新悟*

Rail Fastening System in Consideration of the Change in Track Structure

Tadashi DESHIMARU Takato NISHIHARA Masami IIDA Shingo TAMAGAWA

Some construction methods under which temporary girders are used as a component of permanent structures without dismantlement are proposed and in practical use in railway structures. In case where these construction methods are adopted, the track structure changes in a period of construction and the rail fastening system is required to be installed with enough adjustability both in the vertical and horizontal directions. In this study, a new-type fastening system with the properties was developed based on the existing fastening system for bridge sleepers. Furthermore, the performance verification of the system and its evaluation of applicability to service lines were carried out.

キーワード：レール締結装置，工事桁，本設利用工事桁，調整量，合成まくらぎ，埋込栓

1. はじめに

現在、線路下の横断構造物の新設など、鉄道工事において既存の線路直下の開削工事等を行う際、軌道を仮受けする方法として工事桁工法が多く用いられている。工事桁は仮設構造物であるため既設の軌道を撤去した後に敷設し、構造物の新設後に軌道を復旧する際に撤去するなど、多くの費用と工期を要するという問題があった。これに対し、工事桁を架設し構造物を新設した後、工事桁自体を本設の構造物の一部としてそのまま利用する本設利用工事桁の検討がなされ、コストダウンおよび工期短縮に寄与することからこれまでに多くの方式が提案、実用化されている。

このうち「まくらぎ抱き込み式」は、図1に示すように工事桁への荷重軽減や施工上の制約を考慮し、主桁に合成まくらぎを設置した横桁を取り付け工事桁とし本設化する本設利用工事桁の方式である¹⁾。

まくらぎ抱き込み式の本設利用工事桁については、図2に示すように工事期間中に工事桁として供用している期間は橋まくらぎ構造、本設化後はコンクリート道床直結構造と軌道構造が変化するため、いずれの構造にも対応可能なレール締結構造の開発が求められている。ここでは、工事桁から本設構造物に移行する際に締結装置でレール位置を大きく調整することができる機能を有していることが重要であった。しかし、現用のレール締結装置ではこの調整量に対応できないことからレール位置の調整量を拡大したレール締結装置を開発する必要があっ

* 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 九州旅客鉄道株式会社）

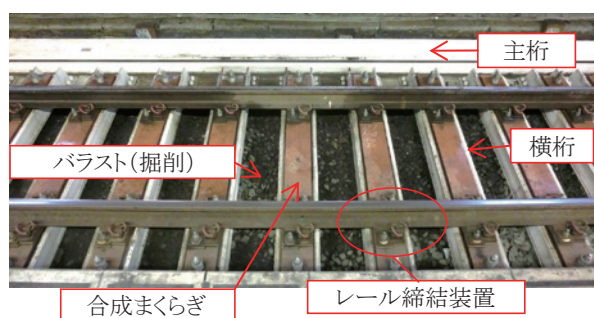
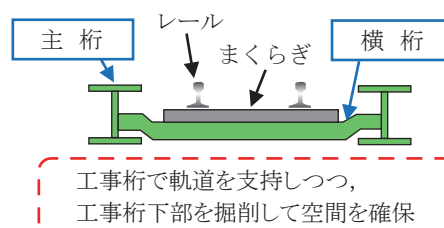
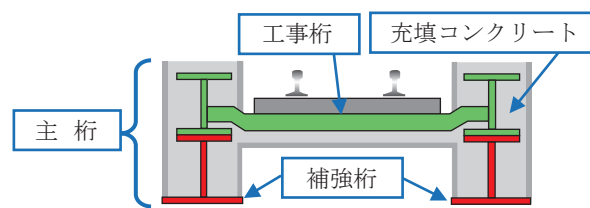


図1 まくらぎ抱き込み式本設利用工事桁の例



(a) 工事桁供用中



(b) 本設構造物化後

図2 本設利用工事桁の施工手順

た。そこで、橋まくらぎ調整形レール締結装置といった鉄道総研が過去に開発した直結系軌道に関する研究成果や知見を基に、まくらぎ抱き込み式の本設利用工事桁に適用するレール締結構造を開発した。さらに、鉄道構造物等設計標準 軌道構造（以下、「軌道標準」という。）

特集：軌道技術

に準拠した性能照査およびレール締結装置の機能に係わる検討を実施し、実軌道への適用性を評価した。

なお、本稿では埋込栓やタイプレートなどのレールを締結するための部材を「レール締結装置」、レール締結装置にまくらぎを含めたものを「レール締結構造」と定義する。

2. レール締結構造の設計条件

1章に示した背景を踏まえて整理したレール締結構造の開発にあたり、主な前提条件を以下のとおりとした。

- ① 工事桁と本設化後の両方の軌道構造に対応する。
- ② 合成まくらぎを使用し、可能な限り寸法を小さくする。
- ③ 板ばね・線ばねの両方の締結方法に対応する。
- ④ タイプレート方式とし、施工性を考慮してまくらぎの埋込栓とボルトによる締着方式とする。
- ⑤ レールの左右調整量は標準締結状態から軌間内外ともに20mm以上、上下調整量は20mm以上を確保する。
- ⑥ レール締結間隔は走行安全性を確保できる範囲内で可能な限り拡大する。

これらの前提条件に基づきレール締結構造の仕様を検討した結果、①と②に対しては、横桁内において本設利用工事桁の構造がレール支承体を弾性材で支持する構造であることを踏まえて適用できるレール締結装置の形状・寸法を検討した。

④と⑤に対しては、鉄道総研で過去に開発した「橋まくらぎ調整形レール締結装置」^{2) 3)}が十分な敷設・使用実績があることから、これを基本として検討を行った。なお、タイプレートの締着方法は、前述のレール締結装置ではねじくぎ部でまくらぎと締着する方式のスタッドボルト締結であったのに対し、工場内製作による寸法精度の向上および敷設現場での施工性向上を目的として、合成まくらぎに予め埋込栓を設置しフランジ付きの両ねじボルト（以下、「両ねじボルト」という）で締着する方式とした。また、⑥については、現用の工事桁で使用しているレール締結装置の締結間隔の最大値である

600mmよりも拡大し、一般部については750mmとした。

表1にレール締結構造の設計条件を示す。なお、本研究では検討対象となるレール締結装置の種別が多岐に及ぶ点を考慮し、レール締結装置を構成する部材のうちタイプレート部とその締着方法のみ新規設計とし、その他の構成部材については極力既存のレール締結装置で十分な使用実績のある部材を用い、その組合せにより成立する構造を検討した。

3. 開発したレール締結装置の概要

2章に示した設計条件を踏まえて開発した、本設利用工事桁用レール締結装置の概要を以下に示す。

3.1 タイプレートの締着方法

本レール締結構造では、構成部材の共通化を図ることを目的として、締結構造の分類によらずタイプレートの締着方法を合成まくらぎに設置した埋込栓と正六角形のフランジが付いた両ねじボルトによる方式に統一し（図3）、かつ埋込栓の配置について適用区分やレール種別、締結方法によらず統一を図った。スラブ軌道に適用するレール締結装置のようにレール支承体とタイプレートを締結して生じる摩擦力によって横圧に対する強度を確保できない本方式では、埋込栓に十分な引抜強度を、両ねじボルトに十分なせん断強度をもたせる必要がある。このため、スラブ軌道用レール転倒防止装置⁴⁾に用いられ実績のある埋込栓（鋼管インサート、M24）を採用し、対応する両ねじボルトと組合せることとした。

また、調整座金は両ねじボルトとナットにより締結する構造とし、両ねじボルト上部に生じる軸力がフランジより下部に及ばない構成とした。合成まくらぎの最小厚さは、埋込栓の寸法と安全余裕を考慮して140mmとした。幅および長さは、一般部用は最小化を図り、幅200mm、長さ2000mmとし、継目部用ではタイプレート寸法に合わせて幅を300mmとした。

表1 レール締結構造の設計条件

項目	詳細	
レール	50kgNレール, 60kgレール	
線形	曲線半径300m以上 (本線上の最急曲線を考慮)	
設計静止軸重	150kN (在来線, 機関車含む)	
まくらぎ	種別	合成まくらぎ
	寸法	厚さ・長さ・幅を極力小さく
レール締結装置	レール支持	タイプレート式・埋込栓で定着
	締結ばね	板ばね・線ばねの両締結方式
	上下調整量	+ 20mm ^{※1}
	左右調整量	± 20mm ^{※2}
締結間隔	750mm (現用直結系軌道同等)	

※1: 軌道面に対して鉛直上向きを正 (+) として表記
 ※2: 軌間内側を負 (-), 軌間外側を正 (+) として表記

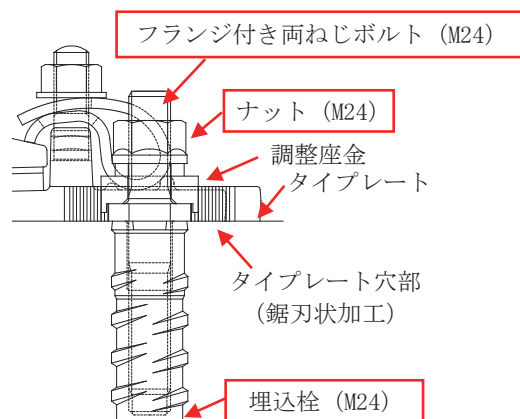


図3 タイプレートの締着方法

3.2 レール位置の調整機構

レールの左右位置調整は、少ない部品数で複数の調整量に対応できる点と、調整作業時の施工性向上を考慮し、タイププレートと調整座金の双方に設けた鋸刃状の加工（図4、山と山のピッチ：4mm）の組合せによるラック式の調整機構を採用し、調整座金を反転することで2mm刻み、標準締結位置から軌間内外にそれぞれ最大20mmの調整量を実現した（図5（a））。調整座金の下面には十二角状の凹形状の加工を施し、両ねじボルトのフランジ部と調整座金が密着し両ねじボルトの緩みを防止する構造とした。レールの上下位置調整に関しては、板ばね・線ばね締結ともにレール・タイププレート間に設置する可変パッドもしくは調整板で標準締結位置から10mm、タイププレートと合成まくらぎ間に挿入する調整用鋼板（厚さ10mm）および調整座金下部に挿入する扛上用座金を併用して10mm、合計で最大20mmまで調整可能な構成とした（図5（b））。

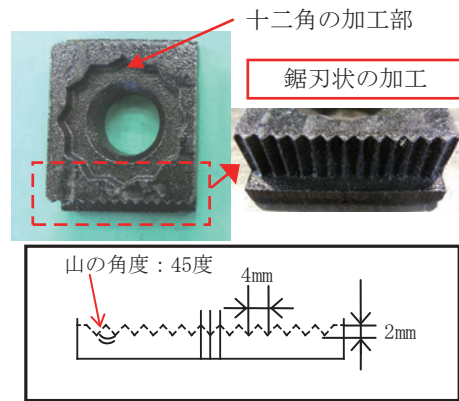
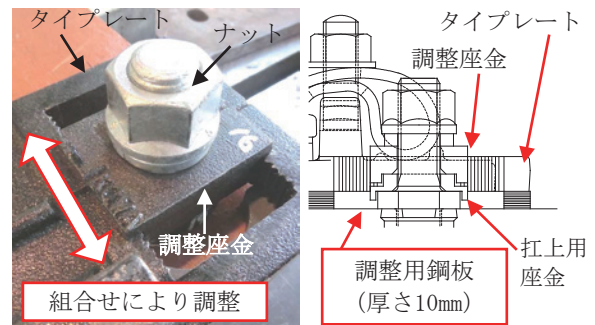


図4 調整座金の加工部

3.3 適用区分と締結方式

表2に開発したレール締結装置の適用区分を示す。継目部を除く一般部用のうち板ばね締結方式については、既にスラブ軌道で十分な実績を有する直結8形レール締結装置（一般形）を、線ばね締結方式については、過去に実用化されている直結系軌道用の線ばね形レール締結装置^{5) 6)}を基本とした（図6）。

板ばね締結方式では、タイププレート上に台形状の切欠きを加工したショルダー部を設け、既存の直結8形レール締結装置用の締結ボルト・ナットおよび締結ばねの適用を可能にした。また、線ばね締結ではタイププレート上にレールの上下調整機能を備えた種別の線ばねクリップ



(a) 左右調整 (b) 上下調整

図5 レール位置の調整機構

表2 開発したレール締結装置の分類

適用区分	レール種別	締結方式
一般部用	50kgN レール用	板ばね・線ばね
	60kg レール用	板ばね・線ばね
継目部用	50kgN レール用	板ばね
	60kg レール用	板ばね

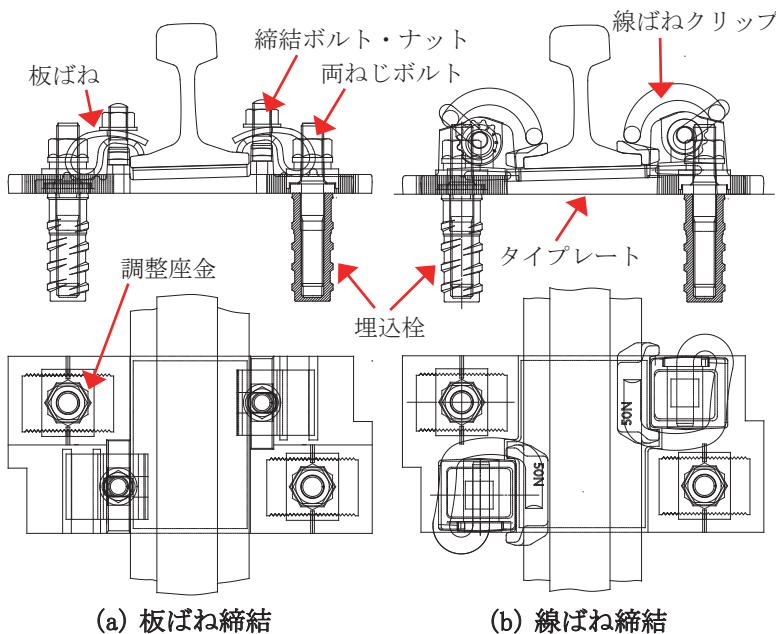


図6 レール締結装置（一般部用）の例（50kgN レール用）

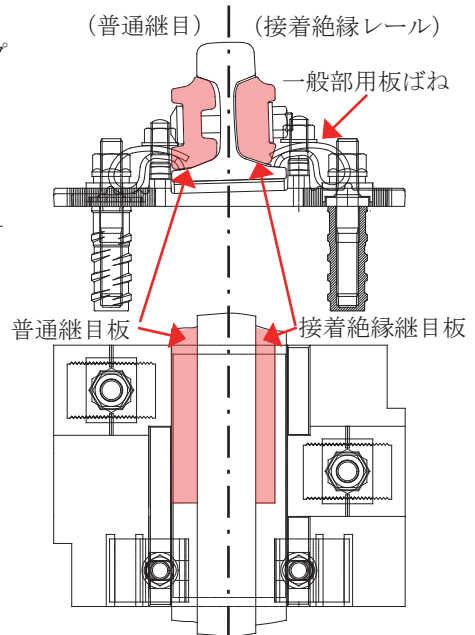


図7 レール締結装置（継目部用）の例（50kgN レール用）

特集：軌道技術

締結用のショルダーを設けた。継目部用については、支持構造をかけ継ぎとし、普通継目と接着絶縁レールを適用する際の板ばね・線ばね締結の2種類について検討を行った。その結果、線ばね締結方式は既存の部材の組合せでは継目板と線ばねの干渉により幾何的に成立せず、また干渉する部材を改良する場合は締結ばね等の部材の新規設計・性能照査が必要となるケースがあることが明らかとなり、実現可能性が高いと判断した板ばね締結方式の設計を行った(図7)。

なお、合成まくらぎの埋込栓の位置やタイププレートの締着位置は一般部用と継目部用で共通とした。これにより、継目部では将来的に溶接シロングレール化の際、横桁に固定された合成まくらぎを交換することなくタイププレートを継目部用から一般部用に置き換えることが可能である。また、軌道パッドは直結系軌道への適用を考慮してばね定数を60MN/mとし、上面に厚さ3mmのEB材(硬質ゴム)を一体化した厚さ13mmのものとした。

4. 開発したレール締結装置の性能照査

開発したレール締結装置を対象に軌道標準に基づく性能照査を実施し、実軌道への適用性を評価した。

4.1 要求性能と性能項目

表3にレール締結装置の要求性能と性能項目を示す。要求性能のうち安全性の照査は疲労破壊について実施する。また、使用性に関する照査は電気絶縁性について実施する。

4.2 照査方法

図8に照査の流れを示す。安全性と使用性のいずれについても、照査指標別に算定した設計応答値と設定された設計限界値を用いて照査式により要求性能を満足するか判定する。ここで、レール締結装置の性能照査では安全性と使用性の両方の照査で、作用係数 γ_f 、構造解析係数 γ_a 、材料係数 γ_m 、軌道部材係数 γ_b および軌道構造係数 γ_i のいずれも1.0とする。

4.2.1 疲労破壊に関する安全性の照査

疲労破壊に関する安全性の照査の照査指標である応答値 I_R は、輪重および横圧の特性値 F_k と作用係数 γ_f の積である設計作用 F_d に対して算定されるレール締結装置のレール変位および締結ばねの応力とし、応答値に構造解析係数 γ_a を乗じて設計応答値 I_{Rd} を算定する。ここで、輪重および横圧の特性値は、静止輪重75kNに在来線の半径600m未満の曲線に適用されるレール締結装置のA荷重(極まれに発生する著大荷重)およびB荷重(しばしば発生する最大荷重)相当の変動輪重係数 γ_{vw} および変動横圧係数 γ_{vl} を乗じて算定した。表4に変動輪重・横圧係数の一覧を示す。

表3 レール締結装置の要求性能と性能項目

要求性能	性能項目	照査指標	作用
安全性	破壊	力	輪重 横圧
	疲労破壊	応力	
使用性	電気絶縁性	電気抵抗	環境からの諸作用

* 電気絶縁性に関する使用性の照査は、必要により実施する

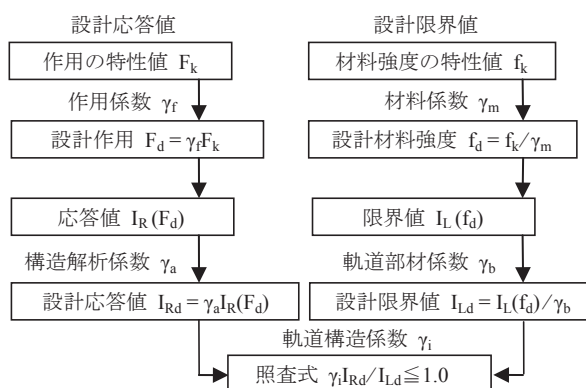


図8 性能照査の流れ(軌道標準より引用)

表4 変動輪重・横圧係数

線別	荷重種別	直・曲線別*	A荷重	B荷重
在来線	輪重	直・曲線	1.3	1.15
		直・R ≥ 800m	0.4	0.2
	横圧	800m > R ≥ 600m	0.6	0.3
600m > R		0.8	0.4	

* 表中のRは曲線半径を示す

また、応答値の算定は、一般部用についてはレール締結装置一組に対する静的載荷試験による方法を、継目部用については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採用した。なお、継目部用については設計A荷重相当の設計作用の算定にあたり、継目部で発生する衝撃荷重の影響を考慮した(速度に応じた速度衝撃率)/(A荷重の変動輪重係数1.3)の割り増しを行った。速度衝撃率は次式で表される。

$$i = 1 + \frac{0.5V}{100}$$

ここで、 i :速度衝撃率、 V :速度(km/h)であり、速度は想定される最高速度の95km/hとする。

一方、限界値 I_L のうちレール変位については、在来線に適用されるレール頭部左右変位の7.0mmとし、締結ばねの応力については、ばね鋼材に生じる平均応力と変動応力を組み合わせて示した疲労限度または時間限度を表す耐久限度線図⁷⁾中の第2破壊限度および第2へたり限度の包絡線を材料係数 γ_m で除した値に設定した。ここで、耐久限度線図は使用する材料によって定まり、板ばね締結についてはばね鋼SUP9⁸⁾⁹⁾の耐久限度線図を、線ばね締結については線ばねクリップに使用されている

材質¹⁰⁾の耐久限度線図を用いる。更に、これらの限界値を軌道部材係数 γ_b で除した値を設計限界値 I_{Ld} とする。

また、動的載荷試験については静的載荷試験と同一の載荷条件として100万回の繰り返し載荷を実施し、試験中の各部の応答値の推移と共に、試験終了後に締結ばねをはじめとするレール締結装置の構成部材に異常がないか外観観察を行うものとした。

4.2.2 電気絶縁性に関する使用性の照査

電気絶縁性に関する使用性の照査では、図9に示す電気絶縁抵抗試験により応答値 I_R を算定する。試験では、レールおよび合成まくらぎ・支承体間に設置した銅板に接続した端子間に交流電流（周波数:0.52kHz, 1.02kHz, 2.02kHzの3種類、電圧:10V）を印加し、乾燥状態および湿潤状態における電極間の電流を測定し絶縁抵抗を求める。このうち、湿潤状態については散水量を時雨量100mm相当となるように調整した上で試験を実施し、ほぼ測定値が変化しなくなる時点（飽和状態）での抵抗値と散水中止後1分間経過した時点での抵抗値をそれぞれ測定する。この値を応答値とし、構造解析係数 γ_a を乗じて設計応答値 I_{Rd} を算定する。また、散水には通常の降雨状態を想定した水道水の他、レール締結装置が汚損した状態を想定して0.1%食塩水を用いる。

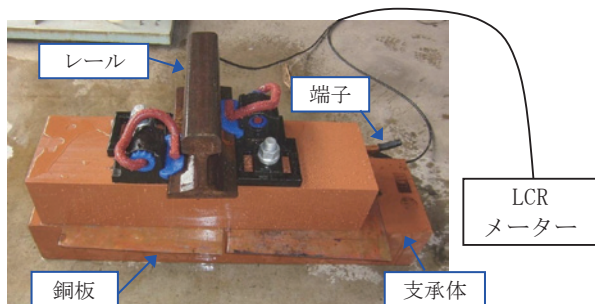


図9 電気絶縁抵抗試験

一方、限界値 I_L はレール締結装置一組に要求される絶縁抵抗値の目標値より設定する。軌道回路の電気絶縁抵抗値の目標値は、在来線の場合2.0Ω/km以上である。また、締結間隔750mmに対してレール締結装置数は1kmあたり片側レールで1333組となる。したがって、レール締結装置1組あたりの左右レール間の目標絶縁抵抗値は2.7kΩ以上となり、レール締結装置1組の絶縁抵抗値はレール間の絶縁抵抗の半分の1.35kΩ以上であるから限界値を1.35kΩと設定し、この値を軌道部材係数 γ_b で除した値を設計限界値 I_{Ld} とする。

4.3 試験結果と照査の結果

本レール締結装置の性能照査のための各種試験は、一般部用は60kgレール用と比較して応答が大きくなる50kgNレール用を、継目部用は50kgNレール用および60kgレール用の両方を対象に実施した。また、一般部

用と継目部用の両方について、その照査項目において最も厳しい条件となるような上下および左右調整量を設定して照査を行った。

疲労破壊に関する安全性の照査については、図10に例示する締結ばねの応力、表5に示すレール頭部左右変位、および動的載荷試験後の外観の全てにおいて、いずれの分類のレール締結装置も要求性能を満足していることが分かった。また、電気絶縁性に関する使用性の照査についても、表6に示すように汚損状態を模擬した際の飽和時にいずれの分類のレール締結装置についても要求性能を満足していた。以上の結果より、いずれの分類のレール締結装置についても4.2節に示した安全性および使用性の要求性能を全て満足していることが分かった（表7）。

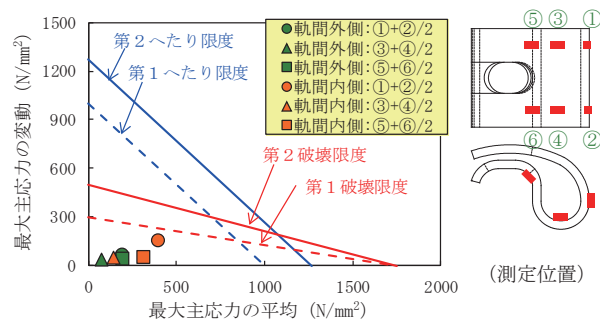


図10 締結ばねの発生応力の照査例
(一般部用、板ばね締結、50kgNレール用)

表5 レール頭部左右変位

適用区分	レール種別	締結方式	レール頭部左右変位	
			応答値	限界値
一般部用	50kgNレール	板ばね	3.8mm	7.0mm
		線ばね	5.6mm	
継目部用	50kgNレール	板ばね	3.1mm	
	60kgレール		3.4mm	

表6 電気絶縁抵抗値

適用区分	レール種別	締結方式	電気絶縁抵抗値	
			応答値	限界値
一般部用	50kgNレール	板ばね	350kΩ	1.35kΩ
		線ばね	155kΩ	
継目部用	50kgNレール	板ばね	180kΩ	
	60kgレール		200kΩ	

※ 本表の応答値は汚損状態を模擬した際の飽和状態で、交流電流の周波数を1.02kHzとした場合の測定値とした。

表7 レール締結装置の性能照査結果

分類	要求性能・性能項目	安全性	
		疲労破壊	使用性
			電気絶縁性
一般部用	板ばね締結	○	○
	線ばね締結	○	○
継目部用	板ばね締結	○	○

[凡例] ○: 要求性能を満足する ×: 要求性能を満足しない

特集：軌道技術

5. レール締結装置の機能に関する検討

レール締結装置には、性能照査を行う項目の他にも適用される軌道の条件により必要となる機能がある。本章では、これらの機能について実施した検討内容と結果を示す。

5.1 レールのふく進抵抗力に関する検討

鉄道構造物は軌道からの作用であるロングレール縦荷重を考慮して設計されており、ロングレール縦荷重の反力であるレールのふく進抵抗力が増加すると軌道の下部構造に伝達する荷重も増加し、構造物の支承部の損傷など構造物に影響を及ぼす可能性がある。したがって、直結系軌道ではふく進抵抗力が制限され、一般に5kN/m/レールとしている。

表8に開発したレール締結装置のふく進抵抗力の測定結果を示す。線ばね締結方式では締結装置一組あたり6.2kN、締結間隔を750mmとして換算すると8.3kN/m/レールとなり、直結系軌道におけるロングレール縦荷重の特性値を超過することが明らかとなった。したがって、線ばね締結方式を採用する場合は構造物側の設計で支承の耐力を向上する等、ロングレール縦荷重の影響を十分考慮する必要がある。なお、板ばね締結方式ではレール締結間隔に応じて締結トルクを調整することで、所定のふく進抵抗力を実現できることを確認した。

表8 レールふく進抵抗力の測定結果

締結方式	板ばね			線ばね
締結トルク (N・m)	60	70	80	-
ふく進抵抗力 (kN/組)	3.2	3.8	4.7	6.2

5.2 埋込栓の引抜強度に関する検討

合成まくらぎに配置した埋込栓の引抜強度を確認する目的で引抜強度試験を実施した。合成まくらぎの埋込栓に締結した両ねじボルトに静的載荷を実施し、荷重と変位の関係を測定した。供試体は、新品の埋込栓と4.2.1項に示した動的載荷試験終了後（疲労後）の埋込栓をそれぞれ2本ずつとした。

図11に試験結果を示す。引抜強度は、新品の埋込栓で100kN程度、疲労後でも80～90kN程度であった。また、ボルトのねじ部におけるせん断破壊は認められず、いずれの供試体とも埋込栓とまくらぎの接着層で剥離した。ここで、合成まくらぎについてはねじくぎの引抜強度で30kN以上となることが規定されており¹¹⁾、本試験で得られた引抜強度はこの値を大きく上回る。この結果より、埋込栓は実用上十分な引抜強度を有していることが分かった。

6. まとめ

本件では、本設利用工事桁に適用する際の前提条件を

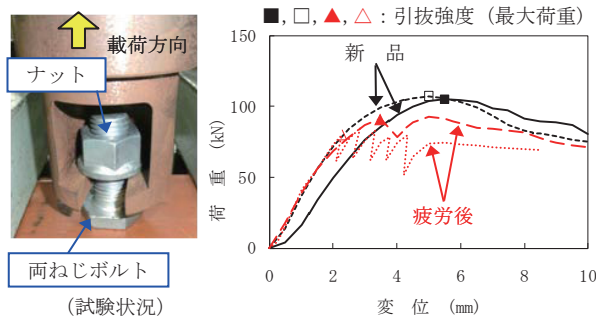


図11 引抜強度試験の結果

満足するレール締結装置を開発し、性能照査およびレール締結装置に必要な機能の検討を実施した。その結果、軌道標準に準拠した性能照査で要求性能を満足し、レール締結装置に求められる機能を満たすことが明らかになった。

7. おわりに

本レール締結装置は本設工事桁用として開発したものであるが、その用途に止まらず、橋まくらぎ上でより大きなレール位置の調整量が必要となる箇所等、今後その適用範囲が広がることが期待される。

文献

- 1) 齊藤聡, 黒崎文雄: 分割架設, 一括架設における枕木抱き込み式工事桁の施工上の問題点及び改善策の検討, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, 2002.9
- 2) 阿部則次, 若月修, 田淵剛: 調整量を拡大した直結軌道用レール締結装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.18, No.3, 2004
- 3) 若月修, 小佐野浩一, 阿部則次: 位置調整可能な橋まくらぎ用レール締結装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.8, 2008
- 4) 若月修, 手代木卓也, 野本耕一, 山根寛史: 新幹線脱線対策用レール転倒防止装置の開発, 土木学会第64回年次学術講演会概要集, 2009.9
- 5) 伊藤長市: スラブ軌道用パンドロール形レール締結装置, 新線路, Vol.49, No.10, 1995.10
- 6) 嶋誠治: JR 東日本における調整型パンドロール締結装置の敷設, 日本鉄道施設協会誌, Vol.36, No.10, 1998.10
- 7) 日本材料学会編: 疲労設計便覧, 普賢堂, 1995
- 8) 日本ばね学会編: ばね, 丸善, 2008
- 9) 日本ばね協会 (現 日本ばね学会) 編: ばねの疲労に関する研究, ばね論文集, Vol.6, 1959
- 10) British Standards Institution: BS EN 10089:2002 Hot rolled steels for quenched and tempered springs. Technical delivery conditions.
- 11) 日本規格協会: JIS E 1203:2007 合成まくらぎ