Special edition paper

Development of "Rail Pitatto"

Naoya KONDO*1, Keisuke WATANABE*2

*1 Researcher, Frontier Service Development Laboratory of Research and Development Center of JR East Group *2 Assistant Chief Researcher, Frontier Service Development Laboratory of Research and Development Center of JR East Group

Abstract

Knee braces have long been used in seismic retrofit construction for station platform roofs where the structure consists of recycled rails. Currently, the knee brace joint still uses steel plates, bolts and mortar. However, this type of joint is labor-intensive, time-consuming, and expensive. To remedy this, we have developed a knee brace joint using spheroidal graphite cast iron. This paper provides an outline of this joint, cyclic loading tests, and design guidelines.

•Keywords: Station platform roof, Rail, Seimic retrofit, Knee brace, Spheroidal graphite cast iron, Cyclic loading test

*JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 研究員 *JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 副主幹研究員



軌道に用いたレールを構造躯体に転用した旅客上家(以下、レール造上家)の方杖耐震補強では、図1に示す鋼板、通しボルト、 およびモルタルを利用した湿式工法が用いられてきた。しかしながら、レール形状に沿ったモルタル受け型枠の製作やモルタル充填 といった施工手間によるコスト増、工期の長期化が課題となっていた。

そこで筆者らは、弊社で散見される37kg、30kgレールを用いたレール造上家を対象として、形状自由度の高い鋳鉄を用いた無 溶接かつ乾式の方杖取付金物(以下、レールピタット)を開発した。本報では、レールピタットを用いた方杖補強工法(以下、 レールピタット工法)、交番載荷実験、および設計概要を報告する。



2. レールピタット工法

2・1 概要

レールピタット工法の概要を図2に示す。レールピタット工法の方杖端接合部は、レールピタット、接合ボルト1・2(M16の高力ボルト) および接合プレート(以下、接合PL)で構成される。レールピタットはレールの弱軸側、強軸側の双方に取り付けることができる。なお、 レールピタットにはFCD500-7をベースとした球状黒鉛鋳鉄を採用している。

2・2 応力伝達機構

弱軸タイプの応力伝達機構を図3(1)に示す。方杖軸力Nのcosθ成分(X方向成分)は、レールピタットとレールの接触部(以下、 支圧部)の支圧力と摩擦抵抗力によりレールに伝達させる。一方、sinθ成分(Z方向成分)は、支圧部の摩擦抵抗力により レールに伝達させる。強軸タイプの応力伝達機構を図3 (2) に示す。軸力Nのsin θ成分 (Y方向成分) は、支圧部の支圧力により レールに伝達させる。一方、cosθ成分 (Z方向成分)は、支圧部の摩擦抵抗力によりレールに伝達させる。

特

|集

論

 \mathbf{X} Special edition paper



交番載荷実験

3・1 実験の目的

レール材軸に対して直交する方向(弱軸タイプ:X方向、強軸タイプ:Y方向)については、接合ボルト2により緊結されるレール ピタットとレールは一体的に挙動すると考えられる。一方で、レール材軸方向(弱軸タイプ・強軸タイプ:Z方向)については、レール ピタットとレールにすべりが生じるおそれがある。また、レールピタットの球状黒鉛鋳鉄は一定の伸びを確保したものであるが、弾性 範囲での使用が望ましい。そこで、レールピタット工法を対象とした交番載荷実験を行い、履歴挙動を把握するとともに、目標荷重 に対して「レールピタットとレールがすべらないか(支圧部がすべらないか)」、「レールピタットが弾性範囲であるか」の2点を確認す る。なお、目標荷重は、既往の耐震診断結果から想定される方杖軸力を上回るように±50kN (引張・圧縮) に設定した。

3·2 実験計画

3·2·1 試験体概要

試験体は原寸とし、レールピタット、レールおよび接合ボルト1・2で構成される。試験体一覧を表1に、試験体形状の一例として 試験体37WUの詳細を図4に示す。試験体は、レール種別、接合部仕様、載荷位置およびレール塗装の組合せにより計9体とした。 塗装付き古レールを用いた試験体30WU-Oについては、支圧部近傍の塗装がつぶれるため、接合ボルト2のボルト張力が低下する。 そこで、本実験では、塗装がレールピタットーレール間のすべりに及ぼす影響に焦点を絞り、載荷前に本締め相当のトルク値にて増 締めを行った。

試験体に用いた球状黒鉛鋳鉄の材料試験結果を表2に示す。一般的に、球状黒鉛鋳鉄の材料試験は「別鋳込みの供試体」 にて保証される。一方で、球状黒鉛鋳鉄は鋳込み後の冷却速度により機械的性質に差が出る。すなわち、板厚の大小が機械的 性質に影響を及ぼす。そのため、「別鋳込みの供試体」に加えて、試験体から採取した「実体の供試体」も用意した。

3・2・2 載荷装置・載荷計画・計測項目

試験体の設置状況を図5に示す。載荷装置の載荷方向に合わせるため、試験体は地盤面に対して45°方向に傾斜させ、反力 治具に設置した。レール端部は固定せず、単純支持とした。

載荷は、レールピタットに取り付けた接合PL(治具)を介して、鉛直方向に加力する計画とした。載荷パターンは、「±50kN、

±100kNの繰返し載荷(2サイクル)後、単調引張」を基本としたが、試験体37WUと37WDは±100kNの繰返し載荷を実施してい ない。これは、先行して載荷を行った両試験体の実験結果を分析し、レールピタットが±100kNの載荷にも耐え得ると判断し、途中 から載荷パターンを変更したことによる。なお、本実験での主な計測項目は、載荷荷重、載荷方向変位、レールピタットーレール間 のすべり量、およびレールピタットのひずみとした。

試験体	レール 種別	接合部仕様	載荷 位置	レール 塗装	概要図等
37WU (30WU)	37kg (30kg)	弱軸	上フランジ	なし	載荷方向 款荷 方向 大向 大向 大向
37WD (30WD)	37kg (30kg)	弱軸	下フランジ	なし	載荷方向 載荷 方向 → → →
37SU (30SU)	37kg (30kg)	強軸	上フランジ	なし	載荷 方向 ひ 方向
37SD (30SD)	37kg (30kg)	強軸	下フランジ	なし	載荷 方向 20 20 50 50
30WU-O	30kg	弱軸	上フランジ	あり	試験体30WUのレールを塗装付 き古レール(平均膜厚800μm程 度)に変更したもの

表1 試験体一覧

表2	球状黒鉛鋳鉄の材料試験結果

試験体	引張強さ [N/mm ²]	降伏点※ [N/mm ²]	破断伸び [%]
37kgレール用 別鋳込み	601	375	15.4
37kgレール用 実体	505	330	18.0
30kgレール用 別鋳込み	604	376	15.1
30kgレール用 実体	483	318	20.3
※ 0.2%オフセット耐力			



特

集

論

又

Special edition paper

2

図5 試験体の設置状況(試験体37WU)

3·3 実験結果

3・3・1 弱軸タイプ

(1) 実験経過と履歴挙動

弱軸タイプの試験体について、荷重Nと載荷方向変位δ_Bの関係を図6に示す。また、初期剛性、レールピタット-接合PL間のす べり時、レールピタット-レール間のすべり時、および最大荷重時における荷重と変位を表3に示す。初期剛性は、原点と+50kN (1サイクル目)時の点を結ぶ直線の傾きから算出した。レールピタット-接合PL間とレールピタット-レール間のすべり荷重は、「鋼構 造接合部設計指針¹⁾」に基づき、すべり量0.2mmまでに明瞭な主すべりが生じた場合はその主すべり荷重、明瞭な主すべりが生 じない場合はすべり量0.2mmに対応する荷重と定義した。以下に、各試験体の実験経過と履歴挙動を述べる。

【試験体37WU・37WD】

図6(1)、表3に示すように、試験体37WDのすべり荷重が小さいものの、両試験体は±50kNの範囲で概ね線形挙動を示した。 その後、レールピタット-接合PL間、レールピタット-レール間の順に緩やかにすべりが生じ、剛性が低下した。最終的に、単調引 張載荷にてレールピタット-接合PL間がすべりきり、両者を接合する接合ボルト1のせん断抵抗に移行した。載荷は、接合ボルト1の 最大せん断耐力240kN (M16・2本)付近で終了した。

【試験体30WU・30WD】

図6 (2)、表3に示すように、両試験体は±50kNの範囲で概ね線形挙動を示した。その後、+100kNの1サイクルの途中でレール ピタット-接合PL間、レールピタット-レール間の順に、緩やかにすべりが生じ、剛性が低下した。なお、±100kNの範囲では、 レールピタット-接合PL間のすべりの影響により、履歴曲線は紡錘形に近い形状を描いた。最終的に、単調引張載荷にてレールピタッ ト-接合PL間がすべりきり、両者を接合する接合ボルト1のせん断抵抗に移行した。載荷は、接合ボルト1の最大せん断耐力240kN (M16・2本)付近で終了した。なお、両試験体の初期剛性には、2倍程度の差が見られた。試験体30WDの初期剛性が低下し た理由は、図7に示す「レールと反力治具」、「レールとレール囲いプレート」の隙間の影響と考えられる。この隙間により、載荷と ともに試験体がY・Z方向に移動し、さらにZ軸周りにレールが回転したと考えられる。

【試験体30WU-O】

図6(3)、表3に示すように、塗装付き古レールを用いた試験体30WU-Oは、試験体30WUと同様の履歴挙動を示した。一方で、 両試験体の初期剛性には、2倍程度の差が見られた。試験体30WU-Oの初期剛性が低下した理由は、前述と同様の影響と考え られる。

特

集

論

X

Special edition paper

2



表3 実験結果一覧 (弱軸タイプ)



(2) レールピタットーレール間 (支圧部) のすべり

弱軸タイプの試験体について、荷重Nとレールピタット-レール間のすべり量δ,の関係を図8に示す。なお、図8には目標荷重 ±50kNと表3に示すすべり荷重を併記している。

【試験体37WU・37WD・30WU・30WD】

図8(1)、(2)、表3に示すように、すべての試験体について、すべり荷重は目標荷重±50kNを上回る結果となった。一方で、試験体37WUと37WDのすべり荷重には差が見られた。これはレールピタットの表面粗さのばらつきが大きいことに加え、図9に示すレールピタットとレールの接触角により垂直抗力の大きさが異なるためと考えられる。



【試験体30WU-O】

図8 (3)、表3に示すように、試験体30WU-Oのすべり荷重は、目標荷重±50kN、並びに試験体30WUの69.8kNを超える結果と なった。したがって、接合ボルト2の増締めを実施すれば、塗装がレールピタット-レール間のすべりに及ぼす影響は小さいと考えら れる。

特

|集

論

 \mathbf{X} Special edition paper

(3) レールピタットの応力状態

荷重Nとミーゼス応力σωの関係と3軸ひずみゲージの貼付位置を図10に示す。3軸ひずみゲージは、事前解析で最も応力度が大 きかった部位の近傍に貼付した。ミーゼス応力はロゼット解析により求めた主応力を用いて算出した。なお、図10には表2の材料 試験結果における降伏点の最小値 (37kgレール用: 330N/mm²、30kgレール用: 318N/mm²)を併記している。すべての試験体 について、目標荷重±50kNにおけるミーゼス応力の値は、降伏点に比べて十分小さく、いずれの試験体も弾性範囲であると言える。



図10 荷重Nとミーゼス応力 ogの関係(弱軸タイプ)

3・3・2 強軸タイプ

(1)実験経過と履歴挙動

強軸タイプの試験体について、荷重Nと載荷方向変位δ₈の関係を図11に示す。また、初期剛性、レールピタット-接合PL間の すべり時、レールピタット-レール間のすべり時、および最大荷重時における荷重と変位を表4に示す。初期剛性、およびすべり荷 重の定義は、弱軸タイプと同様である。以下に、各試験体の実験経過と履歴挙動を述べる。

【試験体37SU・37SD】

図11(1)、表4に示すように、両試験体は、±100kNの範囲で概ね線形挙動を示した。その後、単調引張載荷にてレール ピタットー接合PL間ですべりが生じ、剛性が低下した。最終的に、レールピタットー接合PL間がすべりきり、両者を接合する接合 ボルト1のせん断抵抗に移行した。載荷は、載荷装置の限界荷重300kN手前で終了した。なお、両試験体の初期剛性には、2倍 程度の差が見られた。試験体37SDの初期剛性が低下した理由は、弱軸タイプと同様、「レールと反力治具」、「レールとレール囲 いプレート」の隙間の影響と考えられる。この隙間により、載荷とともに試験体がY・Z方向に移動したと考えられる。

【試験体30SU・30SD】

図11 (2)、表4に示すように、両試験体は±65kNの範囲で概ね線形挙動を示した。その後、レールピタット-接合PL間で緩やか にすべりが生じ、剛性が低下した。最終的に、単調引張載荷においてレールピタット-接合PL間がすべりきり、両者を接合する接 合ボルト1のせん断抵抗に移行した。載荷は、載荷装置の限界荷重300kN手前で終了した。なお、両試験体の初期剛性は同程 度であった。

(2) レールピタットーレール間(支圧部)のすべり

強軸タイプの試験体について、荷重Nとレールピタット-レール間のすべり量δ,の関係を図12に示す。なお、図12には目標荷重 ±50kNを併記している。図12(1)、(2)に示すように、すべての試験体について、載荷装置の限界荷重300kN手前まで載荷したが、

レールピタットーレール間のすべり量る_rは0.1mm程度と弱軸タイプより小さい値となった。この理由は、図13に示すように、弱軸タイプ では、主に方杖側の2ヶ所の支圧部で方杖荷重に抵抗するが、強軸タイプでは4ヶ所の支圧部で方杖荷重に抵抗することができる ためと考えられる。本実験では、レールピタットーレール間のすべり荷重を定義できないが、すべての試験体で目標荷重±50kNを上 回るすべり耐力があると言える。



表4 実験結果一覧(強軸タイプ)

特

集

論

又

Special edition paper

2

試験体	初期剛性		レールピ タット - 接 合PL間のす べり		レールピ タット - レール間の すべり		最大荷重時 (除荷前)		
	荷重	変位	初期 剛性	荷重	変位	荷重	変位	荷重	変位
	[kN]	[mm]	[kN/mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]
37SU	50.0	0.20	255.1	142.3	1.05	すべり)なし	264.9	5.17
37SD	50.0	0.38	132.3	159.2	2.27	すべり)なし	250.1	6.20
30SU	50.0	0.33	153.4	107.3	1.52	すべり)なし	267.7	5.41
30SD	50.0	0.38	132.3	69.6	0.54	すべり)なし	266.0	5.65



図13 摩擦抵抗に寄与する支圧部

(3) レールピタットの応力状態

荷重Nとミーゼス応力σ_mの関係と3軸ひずみゲージの貼付位置を図14に示す。3軸ひずみゲージは、事前解析で最も応力度が大 きかった部位の近傍に貼付した。ミーゼス応力はロゼット解析から求めた主応力を用いて算出した。なお、図示したミーゼス応力は、 レールウェブを挟んで左右対称に貼付した3軸ひずみゲージから求めたミーゼス応力の平均値である。また、図14には表2の材料 試験結果における降伏点の最小値(37kgレール用:330N/mm²、30kgレール用:318N/mm²)を併記している。図14に示すように、 すべての試験体について、目標荷重±50kNにおけるミーゼス応力の値は、降伏点に比べて十分小さく、いずれの試験体も弾性 範囲であると言える。





4. 設計概要

「3. 交番載荷実験」の結果を踏まえて作成したレールピタット工法の設計概要を以下に述べる。

4・1 適用範囲

技術資料は、37kg、30kgレールを構造躯体に用いたレール造上家の方杖端接合部の設計に適用する。ただし、図15に示すように、30kgレールについては、第1種(61_{1/2}ポンドレール)、第2種(ポンドレール)、および第3種(米国ASCE仕様)で断面形状が異なることから、現地調査の上、適用可否を判断する。

4・2 設計方針

「方杖芯線と取付け角度」、「支圧部の耐力」、「レールピタット-接合PL間の耐力」、および「仕様規定」について、その設計 方針を以下に述べる。

(1) 方杖芯線と取付け角度

接合ボルト1、2が負担する方杖軸力を極力均等にするため、図16に示すように、方杖芯線は接合ボルト1、2の芯線の間におさめ、 取付け角度は以下に示す値を原則とする。

【弱軸タイプ】 $0^{\circ} \le \theta \le 55^{\circ}$ 【強軸タイプ】 $25^{\circ} \le \theta \le 90^{\circ}$

(2) 支圧部の耐力

3・3・1(2)より、弱軸タイプの37kg、30kgレールのすべり荷重は、それぞれ90kN、60kN程度と考えられる。一方で、3・3・2(2) より、強軸タイプは載荷終了まですべりは確認されなかった。これらの実験結果より、支圧部の設計では、地震力により生じる方杖 軸力(引張・圧縮)が以下であることを確認する。

【弱軸タイプ】 37kgレール:90kN以下 30kgレール:60kN以下

【強軸タイプ】レールピタットのフランジ部-接合PL間のすべり耐力以下

(3) レールピタットのフランジ部-接合PL間の耐力

地震力により生じる方杖軸力(引張・圧縮)に対して、接合ボルト1が許容応力度以下であることを確認する。レールピタットのフランジ部と接合PLの摩擦面処理は「公共建築工事標準仕様書(建築工事編)²」による。レールピタットのフランジ部の摩擦面処理をしない場合(鋳肌の場合)は、鋳肌とブラスト処理の摩擦面を対象としたすべり係数評価試験より、すべり係数は0.38として良い。なお、防錆処理のため、レールピタットのフランジ部と接合PLの摩擦面に無機ジンクリッチペイントを用いる場合のすべり係数は、「鋼構造接合部設計指針¹」による。



(4) 仕様規定

a) 接合ボルト1・2

接合ボルト1・2には、トルシア形高力ボルト(S10T)、または六角高力ボルト(F10T)のM16を用いる。

b) 方杖端接合部の防錆処理

方杖端接合部の発錆防止のため、支圧部およびレールピタットのフランジ部と接合PLの摩擦面を除き、錆止め塗装などを行う。 なお、無機ジンクリッチペイントを支圧部およびレールピタットのフランジ部と接合PLの摩擦面に用いても良い。無機ジンクリッチペイン トの仕様と施工管理は、「鋼構造接合部設計指針¹⁾」による。

4・3 施工方針

(1) 接合ボルト2の本締め方法

支圧部の塗膜がつぶれると、リラクゼーションにより接合ボルト2の導入ボルト張力が低下する。そのため、レールの塗装を除去せ ずレールピタットをレールに取り付ける場合は、接合ボルト2の本締めは、a)またはb)の方法で行う。

a) ナット回転法

塑性域締付けとなるナット回転法では、設計ボルト張力を超える高いボルト張力を接合ボルト2に導入することができる。 b)トルクコントロール法にて本締めを行い、翌日以降に増締め

トルクコントロール法にて本締めを行い、翌日以降にM16の本締めに相当するトルク値にて、再度増し締めを行う。なお、トルク値の設定は「公共建築工事標準仕様書(建築工事編)²」による。

(2) レールピタットとレールのレベル調整

図17に示すように、強軸タイプにおいて、レールピタットのフランジ部とレールのフランジにレベル差がある場合は、フィラープレート を挿入する。



図17 レベル調整用のフィラープレート

おわりに

本報では、レールピタット工法、交番載荷実験、および設計概要を報告した。設計概要については、今後「鉄道建築物耐震 診断および耐震改修マニュアル」に反映する予定である。

参考文献

1) 日本建築学会、鋼構造接合部設計指針(2021)

2) 公共建築協会、公共建築工事標準仕様書(建築工事編)平成31年版(2021)