

技術論文

鉄まくらぎの歴史と最新の技術開発

History of the Steel Sleepers and the Latest Development

山 田 祐 輝*
Hiroki YAMADA大 場 耕 司
Koji Ooba富 永 知 徳
Tomonori TOMINAGA上 田 宏
Hiroshi UEDA川 端 慧
Kei KAWABATA野 口 信 人
Nobuhito NOGUCHI坂 田 哲 郎
Tetsuro SAKATA薄 秀 俊
Hidetoshi SUSUKI

抄 録

新日鐵住金(株)、日鉄住金テックスエンジ(株)で製造、販売している鉄まくらぎは、1982年に海外鉱山鉄道向けの外販用として開発に着手した。欧米の鉄まくらぎ形状、設計法を参考にしながら、独自に鉄まくらぎ軌道の安全性や長寿命化効果を定量的に評価し、更に製品の安価化と高機能化に向けた締結装置の改良を行い、現在の形状に至っている。本稿では、鉄まくらぎ開発の歴史を振り返ると共に、近年実施している製鉄所構内重軸重用鉄まくらぎの最適仕様開発の内容について述べた。

Abstract

The development of steel railway sleepers, which are manufactured and marketed by Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation and Nippon Steel & Sumikin Texeng Co., Ltd., started in 1982 as export products for foreign mining railways. The shape of present sleepers is basically designed based on the shape and design method of steel sleepers in Europe and America, but it has been improved based on the quantitative research on safety and long service-life performance. Also, development on fastening devices has been given for improved usability and cost efficiency. This report reviews the history of developments in steel sleepers and introduces the recent optimization of heavy-weight heavy-duty steel sleepers applied in steel making plant railways.

1. はじめに

鉄まくらぎは、ヨーロッパやアフリカ、アジア諸国などでは古くから使われており、我が国においても製鉄所構内に使用されているほか、貨物ヤードを中心に一部 JR の本線やアプト式区間などにも使用されている。鉄まくらぎの特徴としては以下が挙げられる。

- (1) 100%リサイクルが可能で、環境に優しい材料である。
- (2) 鋼製であるためプレス製造による加工自由度が高く、多様なサイズ及び形状への対応が容易である。
- (3) 大きな道床横抵抗力を有し、軌道狂いの抑制効果が高い。
- (4) 荷重分散効果が高く、道床厚を薄くできる。
- (5) 重量は木まくらぎ同等であり、運搬、施工が容易である。

この特徴を生かし、新日鐵住金(株)、日鉄住金テックスエンジ(株)は製鉄所構内及び鉄鋼他社、民間鉄道への外販用として鉄まくらぎの製造、販売を行っている(写真1)。本報では、新日鐵住金が鉄まくらぎの開発に着手した背景



写真1 鉄まくらぎ
Steel sleeper

から今日までの技術開発の歴史を振り返ると共に、最新の利用技術向上に向けた取組みを紹介する。

2. 鉄まくらぎの開発

NSC(Nippon Steel Corporation)式鉄まくらぎの開発は、海外の鉱山鉄道向け輸出用まくらぎとして、1982年に検討着手したことに始まる。その後1984年1月に軽軸重用(軸重 $P=18\sim 25t$)鉄まくらぎの圧延開始を経て、1985年7月には旧設備技術本部土木建築技術室開発グループの線路開発チーム発足による“長寿命軌道構造研究”をスター

* 設備・保全技術センター 土木建築技術部 土木技術室 主幹 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

トさせ、本格的な利用技術研究を推進し、3年の取組期間を経て1988年に活動を完了した。

その後も締結装置の改良や、1992年以降のJR各社及び民間企業への拡販に向けて、様々な工夫改善を経て現在に至っている。

2.1 鉄まくらぎの断面形状決定根拠

2.1.1 重分岐器構造改良開発委員会の発足と開発成果

前述のNSC式鉄まくらぎの開発背景は、1979年7月に発足した“重分岐器・下部構造改良開発研究委員会”まで遡る。本委員会は、海外諸国からの我が国への鉄道建設・改良に関する技術援助及び協力の求めに応じ、鉄鋼・分岐器工業界においてもこの種の技術ノウハウを掌握する必要性から、重軸重車両分岐器及び一般軌道への鉄まくらぎ使用を目的に進められた。委員会は、(社)日本鉄道技術協会を事務局とし、日本国有鉄道(以下JNRと略す)・新日本製鐵(株)・日本鋼管(株)・川崎製鐵(株)及び鉄道分岐器工業協会で組織され、国内外の鉄まくらぎ使用状況や敷設状況調査並びに敷設区間の現状調査による分析結果を踏まえて研究、開発を進め、“重分岐器下部構造改良開発研究報告書：1983年3月”¹⁾にてその成果をまとめた。以下にその概要を紹介する。

2.1.2 設計条件と許容応力の考え方

鉄まくらぎの設計条件や許容応力は、以下の考え方を基本に進められた。

(1) 設計荷重

軽軸重用及び重軸重用の2ケースとし、軽軸重用はJNRのPCまくらぎ設計軸重($P=16t$ /新幹線・在来線用)、重軸重用はアメリカ鉄道技術協会(AREA)が橋梁設計に用いている標準軸重E80($P=36t$ /鋼製構造物用)を採用した。

(2) 設計方法

JNRのPCまくらぎとドイツ連邦鉄道(以下D.Bと略す)の鉄まくらぎ設計手法を踏襲し、母材の許容応力は、D.Bで採用している考え方に依っている。

2.1.3 形状寸法と重量の考え方

鉄まくらぎ断面形状と寸法は、ヨーロッパ諸外国で使用されている既存鉄まくらぎの形状(腕を伏せた形状)を参考に、軽軸重用4種類及び重軸重用3種類の検討断面の設計を実施した。鉄まくらぎ端部形状と寸法は、道床横抵抗試験を実施し、PCまくらぎ、木まくらぎの試験値との相対比較により、絞り高さ、曲げ半径、曲げ勾配を設定し、まくらぎ重量は、JNRが使用している木まくらぎの重量($60kg$ /本)を目安に、腐食代 $1mm$ を考慮して設定した。

以上の検討条件により、軽軸重用は板厚 $8mm$ 、重軸重用は板厚 $11mm$ にて設計を実施し、これによる各種試験結果及び製造上の制限と出荷時の荷姿(積重ね)等を考慮し、

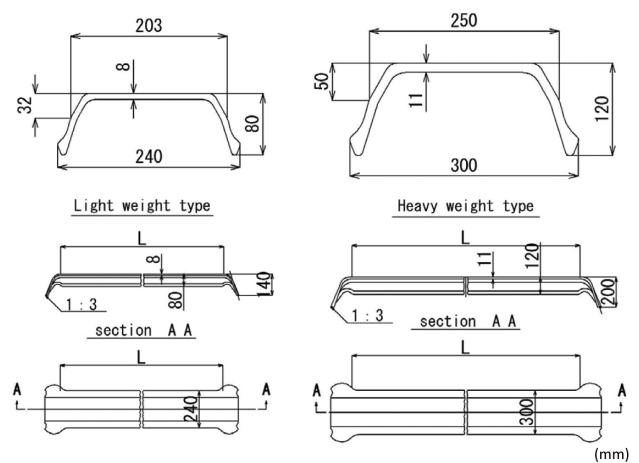


図1 採用形状寸法図(軽軸重用、重軸重用)
Figure of form measure (light axleload, heavy axleload)

各々1種類の形状を採用している。図1に軽軸重用及び重軸重用の形状寸法及び性能諸元を示す。これが現在の我が国で使用している腕型鉄まくらぎの歴史において最初に決定した形状となる。

2.2 NSC式鉄まくらぎの開発

前述の委員会と並行して、NSC式鉄まくらぎの開発は、1982年のブラジル連邦リオデジャネイロ山鉄道(以下C.V.R.Dと略す)及びカナダ・ブリティッシュコロンビア山鉄道(以下B.C.Rと略す)からの引合いを受け、旧設備技術本部土木建築技術室(以下PET-Bと略す)・八幡製鉄所条鋼技術部(以下八幡条鋼と略す)・中央研究本部八幡技術研究部(以下八幡技研と略す)の3部門による共同開発体制にて開始された。開発は、引合い時に提示された設計条件(表1)に対し、JNR及びD.Bの既往研究を参考に使用鋼材の許容応力度を設定し、まくらぎの所要断面性能の検討を実施した。

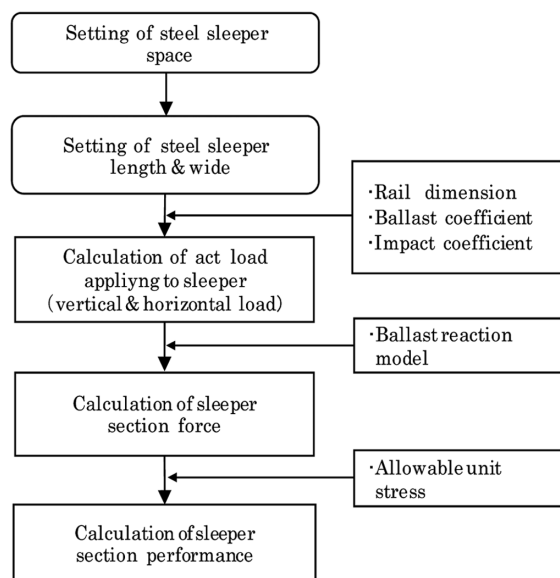
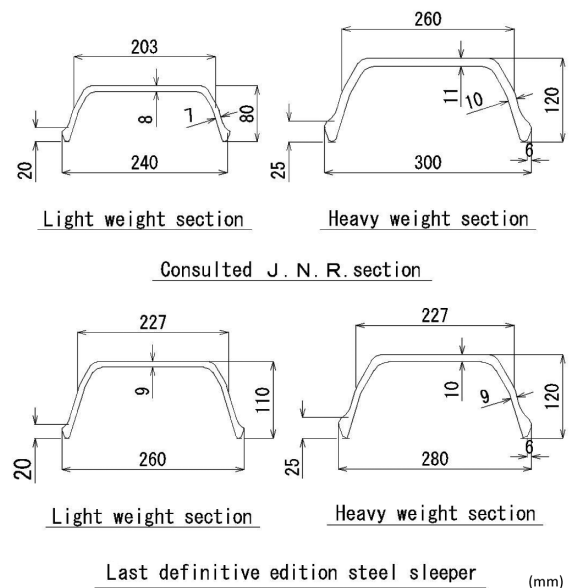
2.2.1 設計許容応力度の設定

JNR及びD.Bの既往研究結果を参考に、鉄まくらぎ鋼材の許容応力度(曲げ、引張、圧縮)の設定は日本建築学会“鋼構造設計基準”を、疲労に関する許容応力度はDIN(Deutsches-Industrie-Norm)に基づくD.Bの考え方に依った²⁾。以下に設定した条件を記す。

- (1) まくらぎ下端部の応力状態が、曲げ降伏に対する許容応力度を満足する。
- (2) 引張許容応力度は、降伏強度に対し、1.7～1.8倍の安全率を確保した値とする。
- (3) 圧縮許容応力度は、最大圧縮応力度がまくらぎ中央下端部に発生するが、降伏強度以下では座屈は生じないことを考慮し、許容応力度は降伏強度に押さえる。
- (4) 疲労許容応力度は、DIN5018に基づくD.Bの考え方に従う。

表1 鉄まくらぎ設計条件¹⁾
Steel sleeper plan condition

		C.V.R.D	B.C.R
Condition	Rolling stock load	Locomotive: 10.2 t/wheel Freightcar: 11.25 t/wheel	Cooper E-80 ($\div 36$ t/shaft)
	Operation speed	Low ground 60 km/h High ground 40 km/h	40 mile/h ($\div 65$ km/h)
	Minimum curve speed	143.24 m	12° (R=1 746.38/12° =145.5 m)
	Track gage	1 000 mm	1 435 mm
	Rail	136 lb	115 lb
	Annual transport volume	7 000 ten thousand t/year	1.2–1.5×1 000 ten thousand t/year
Existing	Existing sleeper plane measure layout	Wood: 240×2 300 @500 PC: @645	Wood: 9"×8" ($\div 230$ ×2 400) @20" ($\div 51$ cm)
Plan	Sleeper plane measure	260×(2 000–2 300 mm)	280×(2 300–2 600 mm)
	Sleeper layout space	650 mm	650 mm

図2 鉄まくらぎ所要断面性能検討フロー²⁾
Calculation flow for the section design of steel sleepers図3 鉄まくらぎ決定断面²⁾
Selected section of steel sleeper

2.2.2 所要断面性能の検討

鉄まくらぎに必要とされる所要断面性能を、図2のフローに従い算定し、既存鉄まくらぎの断面諸元及び断面性能と比較し最適断面形状を設定した。

2.2.3 最終断面決定根拠

鉄まくらぎ断面は、各種許容応力度の設定及び所要断面性能の検討をもとに決定された。基本形状は、JNR 検討断面を基礎に所要断面係数を確保する断面形状の中で、断面係数÷重量が最大となるように最終決定された。また、端部曲げ形状は、1983年から1984年にかけて、3部門協働による各種室内試験を経て、PC3号まくらぎと同等の横抵抗力を有する折り曲げ高さを、210mm及び170mmに設定した。

断面決定は以下の事項を根拠とした。

(1) ウエップ幅：JNR 検討軽軸重用断面採用

(2) 球根形状：JNR 検討軽軸重用・重軸重用採用

(3) フランジ勾配：上段 40/30 $\div 1.33$, JNR/ $\div 1.78$, $\div 1.56$
下段 JNR 検討勾配採用

(4) 隅角部 R：JNR 検討断面採用

(5) まくらぎ長：引合い条件 2000mm～2600mm で設定

(6) 断面板厚・高さ：所要断面係数算定より腐食代 1mm(表裏)を確保し、且つ、断面係数／重量が最大となるものを選定。ウエップ板厚は、雨雪等による腐食を考慮し、フランジ板厚より厚く設定した。図3に決定断面を示す。

以後、鉄まくらぎの断面は、今日に至るまで基本形状を変えていないが、重軸重用鉄まくらぎ断面は、その後製鉄所構内投入に際し、板厚等に改良を加え現在の形状に至っている(フランジ板厚 10mm より 11mm へ、単位質量 33.17kg/m より 35.36kg/m へ改良)。

2.2.4 冷間一体プレス成形

鉄まくらぎの成形は、最終決定された断面寸法（図3）及び端部形状をもとに、八幡条鋼が製鉄所構内にて整備作業に従事する各協力会社に対し、コンペティション形式にて成形工法の提案を募集した。その結果、当時はその複雑な形状と高い加工精度から、プレスによる加工成形が困難を極め、最終的には唯一1社より成形工法案が提示されたのみであった。

しかし、当案は、その複雑且つ高い加工精度の要求により、3プレス工程（カント勾配：1回、端部成形：2回）を必要としていたため、1984年1月の鉄まくらぎ素材圧延開始以後、量産体制に入ったが、出荷量及び経済性に多くの課題を抱えていた。この問題を解決すべく、1985年7月より、“まくらぎ一体プレス冷間成形工法”の開発に着手し、翌1986年7月に開発が完了した。これにより、これまで3プレス工程にて製造していた製品を、僅か1回のプレス工程にて行うことが可能となった。

(1) プレス金型の開発

鉄まくらぎは、両端部に道床横抵抗力を得るための“しほり”とまくらぎ長手方向に1:40のテーパ（カント）を施す設計形状を持つ。これを1回の冷間プレスでの成形にて実現するための上下金型の開発に取組み、1986年に“有爪鋼製まくらぎの製造方法”で特許出願、1988年に金型及び成形動作を含めて認可された。

その特徴として、プレス作業時はずれ止め・位置決め用の案内金物を介し、鉄まくらぎ素材が仰向け姿勢の状態で開催される。また、上型ポンチ金物は、プレス加工機の上部圧下シリンドに繋いでおり、昇降動作を自在にしている。

成形時のプレス動作及び成形状況を以下に記す（図4）。

- ①上型ポンチ金物（upper die punch）の圧下より、素材両端部は外開き扁平形となり、折曲げポンチと接した部分より曲がる。
- ②上型ポンチ金物の型曲げポンチ（bend punch）を型曲げダイス（bend die dice）に接するまで圧下すると、まくらぎ長手方向型曲げ（カント）と両端部折曲げが並行して完了する。

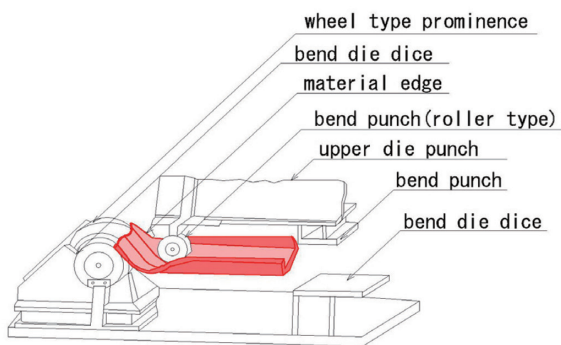


図4 鉄まくらぎ一体成形
Steel sleeper one piece forming

③金型の特徴として、上型折曲げポンチがローラー型（bend punch (roller type)）、下型折曲げダイス（bend die dice）はローラー中央にタイヤ型の突起（wheel type prominence）を有し、端部折曲げ部に強制的に凹部を形成し且つ、無用な幅方向の広がりを防ぐ。

(2) 連続製造

鉄まくらぎ一体プレス成形の実現により、極めて生産性が高く経済的な製造方法が確立され、加工（寸法）精度他の品質も飛躍的に向上した。その後、これら機能に加え、締結装置部の孔開けやプレスアップ成形作業を連続して行う設備も順次整えることとなる。

3. 鉄まくらぎ用締結装置の開発

鉄まくらぎの拡販においては、母材はもとより、レールと母材を固定する締結装置についても耐久性やコスト競争力が求められる。

当初、海外輸出向け製品として開発が進められた鉄まくらぎは、1984年から1985年にかけて、軽軸重用及び重軸重用の2種類の圧延製造を開始したが、1985年のプラザ合意によってその輸出力に大きな影響を受けた。プラザ合意とは、レーガノミクスの中で発生したアメリカの国際収支赤字とドル独歩高修正を目的に、各国同調のもと為替レートの調整を行ったもので、それまで250円を中心とした値動きを見せていたレートが、僅か1年程で3割以上の円高ドル安となり、一時期150円まで上昇した。この急激な円高が、輸出産業を直撃し日本経済は深刻な円高不況に陥る。鉄まくらぎも例に漏れずその競争力を鈍化させ、輸出引合いの逸注が顕著となる中、事業の方向転換を迫られ国内市場への拡販を図るべく、鋼製短まくらぎや鋼製踏切等の新製品開発と並行して、製品の安価化（低廉化）を目的とする締結装置の開発が進められた。図5に各締結装置の開発経緯を示すと共に、以下に具体的な取組みについて説明する。

3.1 ボルト締結 Bolt fastening

鉄まくらぎの締結方法は、1984年のボルト締結方式採用にて、各製鉄所構内の実軌道での実用性評価を開始した。これは、国内で幅広く使用されているレール締結方式で、製鉄所構内線路特性である重荷重を考慮したものである。

3.1.1 NSC 型軌条締結装置：剛締結

1984年製 Direct fastening

PET-Bにて設計し、締結装置メーカーにて製作を実施したもので、まくらぎにボルト固定座盤を溶接し、T型締結ボルトをセットしてレールクリップにてレールを締付け固定し、背面に設置するゲージ調整板にて軌間寸法を調整する形式である。曲線部ではレール小返り防止として、チョック用レールクリップを使用するもので、軽軸重用と重軸重

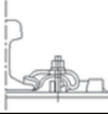
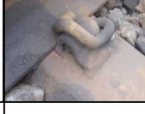
		NSSMC	JR etc.	Drawing	1984	1986	1987	1997	2001	2016
Bolt fastening	Direct fastening	○								
	Elastic fastening	○	○					 ×		
Line spring fastening	Forging fixed seat		○				 ×			
	Hot-extruded fixed seat	○								
	Futck in fixed seat		○					 ×		
	One piece fixed seat		○							

図5 締結装置開発経緯
History of fastener development details

用の2種類があり、1984年より供用開始した。

3.1.2 NSC 型軌条締結装置：弾性締結

1987 年製 Elastic fastening

1985年7月にスタートした“長寿命軌道構造の研究”は、鉄まくらぎ軌条締結部の信頼性における残された研究課題として、“NSC 型弾性締結装置の開発”を挙げた。NSC 型鉄まくらぎの適用範囲を、製鉄所構内軌道に限らず一般軌道までに拡大していくためには、高速、軽荷重である国内一般鉄道では主流となっている板ばね締結装置の開発が必要不可欠との判断から、(財)鉄道総合技術研究所の指導のもと、設計、試作並びに使用性能評価試験を経て、1987年に開発を完了した³⁾。その後、拡販営業活動において、実路での試験敷設を実施したが、製品コストが折り合わず断念するに至った。

ボルト締結は、現在では絶縁区間ではTH形式、非絶縁区間ではTW形式という形で残存する。座盤の溶接接合を伴うため、溶接部の疲労き裂管理及びボルトの締結トルクや緩みに対する管理が整備作業上求められる。

3.2 線ばね締結 Line spring fastening

線ばね締結は、イギリスで開発された締結方式の一種であり、現在の日本においても標準的に使用されている方式である。専用治具で装脱着が可能で、所定の位置に線ばねを締結するだけで所要締結力が得られ、併せて大きいふく進抵抗力を得られると共に、ボルトを使用しない構造のた

め、トルク管理等の保守作業が不要となり、省力化に最適な締結形式である。製鉄所構内及び鉄道事業者への鉄まくらぎ投入に伴い、安価化及び整備作業の効率化を狙い鉄まくらぎに採用することとした。

3.2.1 鍛造座盤 1986 年製 Forging fixed seat

鉄まくらぎ締結装置への線ばね締結方式採用を目的に、パンドロールクリップ（線ばね）専用座盤を製作した。座盤形状はパンドロール社製の座盤寸法を踏襲し、材質は鉄まくらぎ母材との溶接性を考慮しSM材（溶接構造用圧延鋼材）を採用、鍛造による板曲げタイプの製品を製造した。

座盤の使用に関しては、パンドロールクリップ（線ばね）性能保証（締結力確保）の観点より、パンドロール社の厳しい製品検査要求があり、座盤製造には最新の注意を払った作業となった。また、溶接接合に関して、レール底部からのせん断力に抗するため、板厚全面に渡る完全溶込み溶接確保の観点から開先での裏波溶接を実施した。よって、作業性に関し以下のリスクが発生した。

- (1) 裏波溶接は高度な技術を要するため、加工効率が低下する。
- (2) 開先溶接を下向きで行うため、鉄まくらぎの溶接姿勢毎の傾斜設置が必要であり、加工効率が大幅に低下する。
- (3) 座盤レール側の溶接ビート仕上げにグラインダ作業を要し手間が掛る（レールとビートの干渉）。

以上により、溶接コストの大幅アップを伴った。

3.2.2 熱押し座盤 1987 年製 Hot-extruded fixed seat

板曲げタイプ(鍛造座盤)の溶接作業に伴うリスクを回避するため、品質の確保が容易且つ安価で高機能な座盤形状を検討した結果、光製鉄所ロール材である熱押し座盤を採用した。

溶接仕様の検討ケースは、

- ①レール側を除いた3辺隅肉溶接
- ②全周(4辺)溶接：レール側(1辺開先溶接)それ以外(3辺隅肉溶接)

の2ケースとした。3辺隅肉溶接は、大幅な溶接コスト削減となるが、レール側未溶接辺より座盤底部に雨水が侵入した場合、発錆による座盤剥離の可能性が懸念された。よって、3辺隅肉溶接の座盤底部腐食調査を実施し、剥離現象の発生が無いことを確認できたこと、静的載荷及び動的疲労試験を実施し、列車荷重に対する安全性を確保できることから3辺隅肉溶接を採用することとした⁴⁾。

3.2.3 フックイン座盤 1997 年製 Futch in fixed seat

鉄まくらぎの安価化による販路拡大を目標として、鉄まくらぎ母材に締結座盤固定用の孔(18mm×44mm)を設け、列車荷重(横圧力)を孔面にて支持する機構を考案した⁵⁾。社内にて、静的斜角載荷及び動的斜角疲労試験を実施し、変形及び耐疲労性能を確認すると共に、民間鉄道でも試験敷設を実施する等、採用に向けて検討を実施したが、装着時の安定性に十分な評価が得られず、採用には至らなかった。

3.2.4 一体座盤 2001 年製 One piece fixed seat

線ばね締結鉄まくらぎの低廉化に向けた再開発として、鉄まくらぎ母材より熱間プレスにて座盤形状をプレスアップすることで、締結装置の材料費及び取付費用の削減を目指した一体座盤の開発に着手した。母材の強度及び耐久性は、PC まくらぎと同等若しくはそれ以上であることが既往の研究により明らかであるが、プレス加工にて成形された座盤部に、レール圧力及び横圧力を作用させるため、本部位にも母材と同等の耐久性が求められた。

(1) 座盤部の熱間プレス成形

開発当初、座盤形状は既存線ばね用座盤の形状を模して、線ばね挿入孔は両サイド開孔タイプとした。開発要素として、以下の項目を研究(検証)した。

- ①スリット(溝)位置、形状寸法及び加工方法
- ②加熱温度、加熱範囲及び加熱方法
- ③上下金型形状
- ④プレス回数
- ⑤冷却方法

これら開発課題に対し検討を進め、最終的には線ばね挿入孔を片サイド開孔タイプに改良することで、規定寸法の座盤形状及び板厚(≧7.5mm)を確保した。

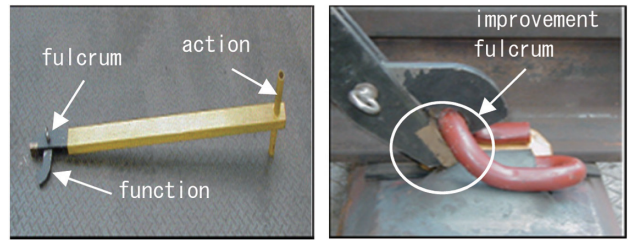


写真2 取付治具
Install tool

(2) 強度(耐久性)

締結座盤部の耐久性は、静的斜角試験及び動的斜角疲労試験により確認した。試験用荷重の設定は、座盤部がまくらぎ母材と同等の耐久性を有することを確認するため、レール締結装置の設計荷重のうち割増係数が最大($m+3\sigma$)のA荷重(輪重9.75t、横圧6.0t)を採用した。レール圧力及びレール横圧力は、連続弾性支床上の梁モデルにて算出し、その合力(8.96t)が垂直軸となす角度を斜角角度(47°)として斜角試験を実施した。

静的試験は、座盤部で測定された歪値が 350μ であり、応力換算値(72.5MPa)は許容値(323MPa)の22%程度で強度上問題ないことを確認した。疲労試験は、静的試験と同一の試験荷重にて、200万回の繰返し載荷試験(繰返し速度:1Hz)を実施し、き裂等の発生の有無を観察し、耐久性に問題がないことを確認した⁶⁾。

(3) 残留応力試験

座盤部の熱間プレス成形時における、残留応力分布を歪ゲージによる切断法にて測定した。その結果、本部位は圧縮残留応力状態にあり、耐疲労性に対し有利であることが判明した。

(4) 取付治具の製作

本製品の製造・出荷に併せ、新たに一体座盤専用の線ばね取付治具を製作した。これは、既存治具が、てこ支点(爪構造)を締結座盤(両孔)の挿入孔エッジに設置するのに対し、一体座盤は片サイド開孔タイプのため、てこ支点が面接触となり爪が掛らない構造となることへの改良策である。改良治具支点は、線ばね装着時に一体座盤に傷が入らぬよう、爪構造を無くし支点部に金属板を取付けている(写真2)。

2002年、製鉄所構内軌道向けに重軸重用鉄まくらぎとして一体座盤鉄まくらぎの座盤部板厚を厚くして試作し、実路にて試験敷設を実施したが、列車荷重により母材切込み部よりき裂の発生が認められた。そのため、現在は、軽軸重用専用の鉄まくらぎとして外販している。

4. 製鉄所における重軸重用最適仕様開発

製鉄所構内の車両は、トービードカー(以下、TPC)を代表するように約36~50t/軸の重軸重車両が走行する。このため、重軸重による繰返し荷重により、締結装置座盤

溶接部等からの疲労き裂により鉄まくらぎの寿命が決定するケースが多い。つまり、疲労き裂に対する長寿命化ができれば、まくらぎ交換周期を長くでき、メンテナンス費用削減にも寄与できる。そこで2006年から重軸重用鉄まくらぎの長寿命化対策の検討に着手した。

前述したように、鉄まくらぎには種々の締結装置仕様があるが、製鉄所の重軸重車両用は耐久性、点検・施工簡易性及びコストの観点から踏切等の埋没部等の特殊条件を除き、熱押し座盤（線ばね締結）を多く採用している。従って、ここでは熱押し座盤の長寿命化検討について述べる。

4.1 当初締結装置仕様による疲労試験及びFEM解析結果

まずは、熱押し座盤の当初締結装置仕様（座盤幅70mm）の耐疲労性を確認するため、疲労試験及びFEM解析を実施した。

疲労試験方法については、写真3に示す動的斜角疲労試験とし、輪重と横圧が作用した状態を再現した。TPCの実路の鉄まくらぎの状態を再現するため、載荷荷重はレール側の溶接止端部に配置したひずみゲージのひずみが 2200μ （実路試験での最大値）となる条件を静的載荷により決定した。疲労載荷については、試験荷重 $P_{min}=P_{max}/10$ 、載荷速度：3Hzとした。き裂進展調査は、ひずみ振幅が5%低下した時点から、進展量に応じて磁粉探傷法により調査した。結果、き裂は締結装置の溶接止端部から発生（図6）し、



写真3 疲労試験概要
Fatigue test

き裂発生の発見は約54万回、Bき裂（座盤幅長の50%にき裂発生）への到達は約111万回、ABき裂（座盤幅全長に渡りき裂発生）への到達は約149万回であった。

また、レールに作用する試験荷重を水平成分と鉛直成分とに分離し、各々の荷重についてレールとまくらぎ間の力のつり合いから解析荷重を算出し、FEMによる解析を行った。図7に溶接止端部近傍でのまくらぎ短辺・長辺・鉛直方向の発生応力コンター図を示す。解析結果から溶接止端部にはまくらぎ長辺・鉛直方向に引張応力が発生しており、これら引張応力に起因してき裂が発生していると考えられる。

4.2 長寿命化に向けた取組み

当初締結装置仕様を基本ケース（CASE1）に、長寿命化効果があると考えられる下記の対策について同様の疲労試験及びFEM解析を実施した。

- CASE1：基本ケース（座盤幅70mm）
- CASE2：グラインダー処理
- CASE3：残留応力処理
- CASE4：グラインダー+残留応力処理
- CASE5：ビード短縮
- CASE6：ビード短縮+グラインダー処理
- CASE7：座盤拡幅（70mm→120mm）
- CASE8：4辺溶接

それぞれの対策の特徴について以下に述べる。

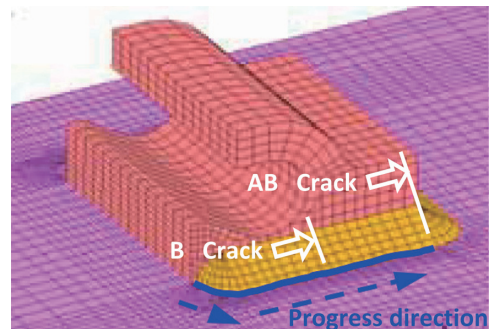


図6 き裂進展モード
Crack progress mode

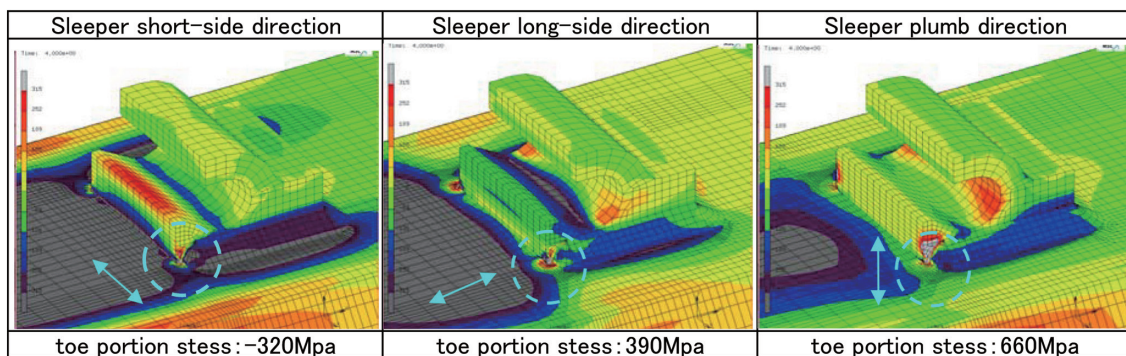


図7 FEM解析結果
Result of finite element method

CASE2, 4, 6 で採用したグラインダー処理はロータリーバー型グラインダーを用い、アンダーカットの除去と溶接止端部の曲率を滑らかにし、更に溶接により発生する残留引張応力を低減することを目的に母材を深さ方向に 0.5mm 程度掘り込むように切削した。処理管理方法は鋼構造物の疲労設計指針・同解析に記載のコインチェック法に準拠した。

CASE3, 4 で採用した残留応力処理は鉄まくらぎ背面側から過載荷した後除去することで、スプリングバックが起り溶接止端部に圧縮残留応力を付与させることを目的とした。事前確認試験の結果、溶接止端部における溶接残留引張応力は平均約 143 MPa であったが、過載荷後は平均 -178 MPa となった。

CASE5, 6 のビード短縮は、溶接止端部に発生する応力は、輪重と横圧によるものが主であり、応力が大きい場所から溶接止端部を遠ざけることで発生応力を低減させることを目的とした。

CASE7 で採用した座盤の拡幅は、基本ケースにおいて溶接止端部からまくらぎ肩に近づくほどひずみが小さくなることに着目して座盤幅を広くした。また、機械による搗き固め作業において、ピーターの爪が線ばねクリップに当たらない限界の幅 120mm に設定した。

CASE8 は基本ケースの 3 辺溶接では板曲げ変形を受けて必然的に溶接止端部に引張応力が発生するため、4 辺溶接に変更することで発生引張応力の低減効果に期待した。

各 CASE の疲労試験結果を図 8 に示す。結果として、CASE6 (ビード短縮+グラインダー処理)、CASE7 (座盤幅 120mm) が FEM 解析を含めて良い結果を示した。

残留応力処理は、そのみ (CASE3) では、アンダーカットの存在が過載荷処理時に悪影響を与えたことも推察され、グラインダー処理を加えた CASE4 を実施したが、期待した程の効果は得られなかった。作用する荷重の大きさにより、改善された圧縮残留応力が再配分されて消失したものと推定される。

CASE8 (4 辺溶接) は、FEM 解析の結果からも溶接止

端部の仕上がりが応力集中を助長する形状となっていることが確認されたが、実際に疲労試験でも初期き裂が早期に発生する結果となった。

また、ビード短縮は長寿命化効果があるものの、当該箇所溶接長は線ばね締結により発生する作用力を負担する箇所であることから、溶接部の静的耐力上で課題がある。

以上の結果から、長寿命化効果が高く且つ、安価で確実なグラインダー処理+座盤幅 120mm を製鉄所構内重軸重用の基本仕様とした。

4.3 ハイブリット型新まくらぎの開発

一方、鹿島製鉄所では 1999 年から写真 4 に示す光亜式鉄まくらぎ (Koa Iron Crosstie) を採用している。これは、鋼矢板の背面にコンクリートを充填した構造であり、疲労耐力上最も弱い締結装置溶接部に発生する応力を小さくでき、耐疲労性向上には有効であると考えられた。

光亜式鉄まくらぎと同様に熱押し座盤鉄まくらぎの背面にコンクリートを充填した鉄まくらぎの双方について疲労試験を実施した結果、両者とも 1000 万回の繰返し荷重においてもき裂は発生しなかった。また、FEM 解析においても溶接止端部に作用する最大主応力は 60 MPa 程度に低減され、長寿命化対策としては非常に効果的であることがわかった。

次に、重量の違いによる施工歩掛を調査するため、製鉄所構内 (軌間 1067mm) にて試験敷設を実施した。対象としたまくらぎは、光亜式鉄まくらぎ (277kg) と熱押し座盤鉄まくらぎ (93kg: コンクリート未充填) である。写真 5 に試験施工状況、図 9 にまくらぎ敷設に対する一連作業の施工歩掛を示す。まくらぎ 1 本当たりで比較すると重量差により施工時間は光亜式鉄まくらぎは不利となるが、鋼矢板の断面剛性が大きいこと、まくらぎ間隔を大きくできるというメリットもあることから、軌道延長で換算すると施工歩掛はほぼ同等であることがわかった。

以上の結果から、製鉄所構内路線においては、適用環境、走行頻度及び軸重毎にライフサイクルコスト上優位となるまくらぎ種を使い分け、線路新設・補修仕様を決定している。

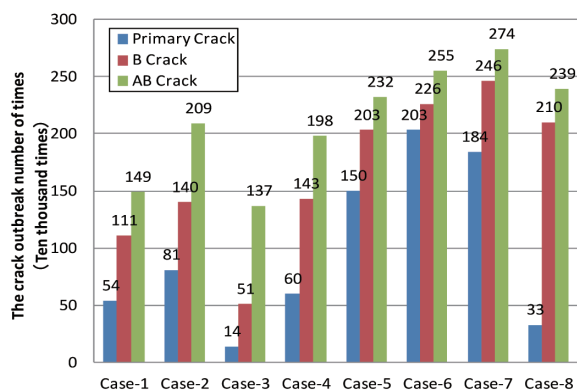


図 8 各 CASE の疲労試験結果
Result of fatigue test

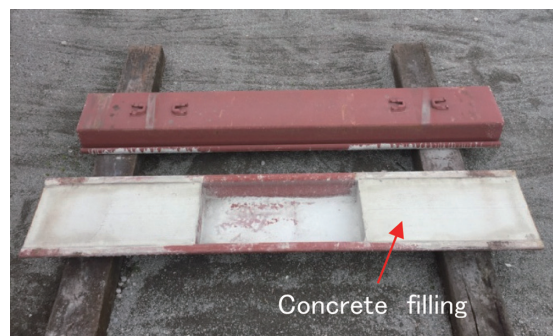


写真 4 光亜式鉄まくらぎ
Koa Iron Crosstie

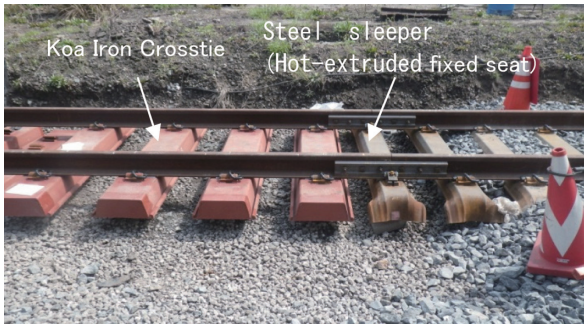


写真5 試験施工状況
Construction tests

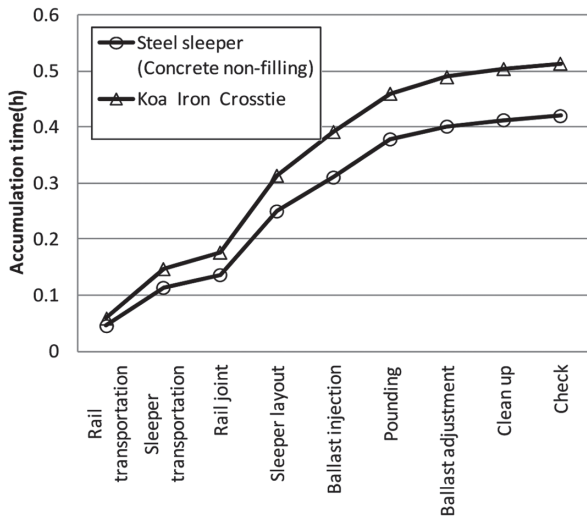


図9 まくらぎ1本当たりの施工時間比較
Comparison of construction time for two sleeper types

5. おわりに

鉄まくらぎは1984年に鉄まくらぎの素材圧延に着手、その後1986年より新日鐵住金及びその他民間企業（資材置場等のヤード用）への出荷を開始し、これまで様々な検討、改善を加え、2015年までの約30年間で累計80万本の出荷を達成し、着実に採用を増やしてきている。しかし、鉄道分野における技術、ニーズも日進月歩であり、施工性、経済性向上に向けた技術開発は今後も継続し、より一層、合理的且つ経済的な鉄まくらぎの提供に努めていく予定である。

参考文献

- 1) (社)日本鉄道技術協会：重分岐器下部構造改良開発研究報告書. 1983.3
- 2) 新日本製鐵(株)：圧延製造による鉄まくらぎの断面設計及び絶縁構造の決定経緯について. 1986.7
- 3) (財)鉄道総合研究所：受託研究等報告書. 鉄まくらぎ用レール締結装置の性能確認試験. 1987.9
- 4) 新日本製鐵(株)：熱間押し座盤（光製鉄所製）の溶接仕様の決定. 1987.5
- 5) 新日本製鐵(株)：鉄まくらぎ用低コスト締結装置の仕様性能評価試験結果. 1990.7.18
- 6) 締結座盤一体鉄まくらぎの斜角疲労試験結果報告. 第58回土木学会学術講演会



山田祐輝 Hiroki YAMADA
設備・保全技術センター
土木建築技術部 土木技術室 主幹
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



大場耕司 Koji Ooba
日鉄住金テックスエンジニア(株)
建設事業部 技術部 チーフマネージャー



富永知徳 Tomonori TOMINAGA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員
博士(工学)



上田 宏 Hiroshi UEDA
鹿島製鉄所 設備部 土建技術室長



川端 慧 Kei KAWABATA
広畑製鉄所 設備部 機械・土建技術室



野口信人 Nobuhito NOGUCHI
光亜建設(株)
代表取締役社長



坂田哲郎 Tetsurou SAKATA
日鉄住金テックスエンジニア(株)
建設事業部 技術部 軌道技術グループ
マネージャー



薄 秀俊 Hidetoshi SUSUKI
日鉄住金環境(株)
建設事業部 君津建設部 整備室長