

論文 超高強度繊維補強コンクリートを使用した新型まくらぎの性能確認試験

前田 昌克*1・趙 唯堅*2・関 雅樹*3

要旨：バラスト軌道新幹線では、将来既設まくらぎの更替が予測される。基本性能の向上と更替時の施工性向上を図るために、素材に超高強度繊維補強コンクリート(UFC)を使用し、形状は2本一組の枠型とした。この枠型まくらぎを線路に敷設時の効果を考慮して形状・仕様を検討し、FEM解析により応力照査した。また、試験体を製作し、枠型まくらぎの曲げ強度試験、電気絶縁抵抗試験、軌道敷設の耐久性試験を行い、枠型まくらぎの有効性を確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、枠型まくらぎ、軌道沈下、曲げ強度、絶縁抵抗

1. はじめに

保守省力化の観点から、新幹線軌道にはプレキャストコンクリートスラブを路盤上に据付けたスラブ軌道が最近採用されている。一方、バラスト区間の既設新幹線ではPCまくらぎが使われており、将来経年劣化による更替が予想される。この場合、スラブ軌道と比較しても利点のある高性能な新規まくらぎの導入が望まれた。

バラスト区間での省力化を目的とした軌道構造は国内外で開発されている。例えば、オーストリアの枠型まくらぎ軌道¹⁾やドイツのRheda軌道²⁾、国内ではラダーまくらぎ軌道³⁾があげられる。しかしながら、これらの軌道構造は、質量の面で更替作業が困難であること、また更替作業後にマルチプルタイタンパー(MTT)による道床のつき固め作業ができないため、新幹線の徐行が必要となることから、既設新幹線の更替用まくらぎに向いていない。

本研究では、枠型の形状を有するまくらぎ(図-1)を基本仕様とすることから開発に着手した。

枠型まくらぎの利点は、レール直下の縦剛性向上による軌道の沈下抑制、列車振動の発生低減、道床横抵抗力の増大、並びにマルチプルタイタンパー(MTT)による道床のつき固め作業が可能であることにより更替作業後の無徐行が可能であることがあげられる。しかし、素材を通常のコンクリートで製作すると、まくらぎ更替作業が困難な重量物となる。

一方、最近のコンクリート材料分野において、超高強度繊維補強コンクリート(以下UFCと称す)が開発されている⁴⁾。UFCは、優れた強度特性と耐久性のみでなく、容積比で2%の特殊鋼繊維が配合されているため、高い

ひび割れ抵抗性と曲げ靱性を有し、原則として補強鉄筋を必要としない。

このUFC新素材を使用して、枠型まくらぎの構造の優位性を保持したまま枠型まくらぎの軽量化を図ることとした。断面を縮小した枠型まくらぎ(質量370kg)が従来の4Tまくらぎの耐力のJIS規格を満足していることは確認されている⁵⁾。しかし、まくらぎの性能であるレールから伝達される列車荷重の分散機能について検討されていない。本研究では、列車の輪重荷重による軌道の変位が、従来の4Tまくらぎ以下となる枠型まくらぎ(以後新型まくらぎと称す)の形状検討および性能確認試験を行った。

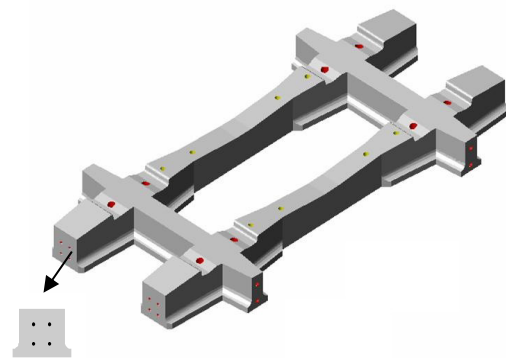


図-1 枠型まくらぎ

2. 枠型まくらぎの設計

2.1 検討方法

設計では、輪重荷重による軌道の変位が、従来の4Tまくらぎ以下となる枠型まくらぎの形状検討を行った。軌道の変位が小さくなれば、線路のメンテナンスに有効となる。検討で

*1 東海旅客鉄道(株) 技術開発部 主幹研究員 工修(正会員)

*2 大成建設(株) 土木技術開発部 課長 工博(正会員)

*3 東海旅客鉄道(株) 技術開発部長 工博(正会員)

は、一時的に仮決めした枠型まくらぎをソリッド要素、バラスト支持を分布ばね要素で図-2 のとおりモデル化し、全体系の3次元FEM解析により発生するレール変位、まくらぎ接地圧を直接求めることにした。そして、3パターンの新型まくらぎの形状でFEM解析を実施して、従来の4Tまくらぎと軌道変位およびまくらぎの底面接地圧の比較を行なった。

2.2 解析モデル

弾性FEM解析では、レールも取り入れた7基の枠型まくらぎによる7連モデル(図-2)とした⁵⁾。使用するレールは質量60kg/m、軌間1435mm、輪重はレールの頂部に作用させた。また、レール締結装置は102形(2重ばね形式)⁶⁾を用いることとし、レール下に敷く合成ゴム製軌道パッドの鉛直ばね定数は50MN/mとした。道床バラストの鉛直、左右および進行方向のばね定数は、有道床設計標準⁷⁾を参考に定めた。なお、弾性解析では重ね合せの原理が適用可能なため、まくらぎに導入されるプレストレスを省略した。解析に用いたばね定数および材料物性値を表-1に示す。載荷荷重は輪重160kNを車軸間隔で載荷している。

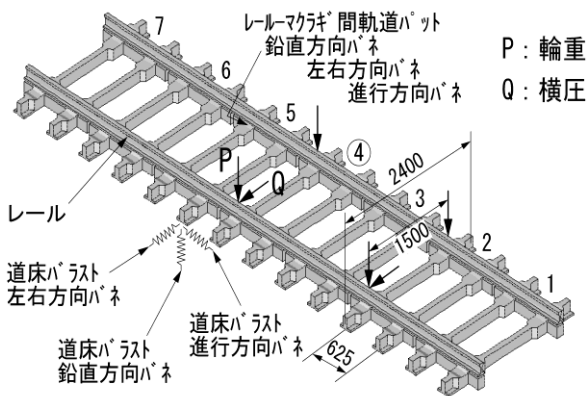


図-2 解析モデル

表-1 弾性FEM解析に使用した物性値

ばね定数	材料物性
軌道パッド	レール
鉛直方向：50MN/m/枚	ヤング率：200,000N/mm ²
左右方向：40MN/m/枚	単位質量：78.5kN/m ³
進行方向：7MN/m/枚	ポアソン比：0.3
道床バラスト	UFC ⁴⁾
鉛直方向：124.4MN/m/基	ヤング率：50,000N/mm ²
左右方向：107.8MN/m/基	単位質量：25.5kN/m ³
進行方向：93.4N/m/基	ポアソン比：0.2

2.3 支持状態と荷重作用位置

まくらぎの支持状態は図-3 のとおり、まくらぎ中央部の道床は中すかしされているものと仮定して、まくらぎ中央部の支持ばね定数1/2の状態にしている。荷重作

用位置は表-2 に示す3パターンで解析を行った。

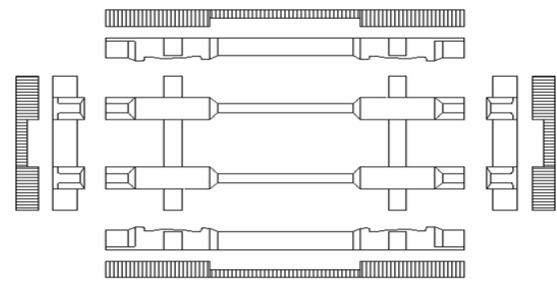


図-3 まくらぎの支持状態

表-2 まくらぎの荷重作用位置

条件	荷重	作用位置
a	輪重のみ	締結部直上載荷
b	輪重のみ	締結間載荷
c	輪重のみ	締結間まくらぎ間載荷

2.4 まくらぎ形状・寸法の検討

解析に使用するまくらぎケースを表-3 に示す。まくらぎ底面の接地圧を低減するには、まくらぎの道床接地面積の増加が必要となる。しかし、まくらぎ更换の施工性では軽量の方が有効である。図-1 に示すとおりまくらぎの質量を大きく増加させないため、UFC の長所を活かしてまくらぎの下部に側方に向かって張り出す断面形状としている。

表-3 解析に使用するまくらぎの大きさ

ケース	まくらぎ	接地面積	質量
1	新型まくらぎ	1.089m ²	400kg
2	新型まくらぎ	1.200m ²	450kg
3	新型まくらぎ	1.400m ²	460kg
4	4Tまくらぎ(2本)	1.240m ²	512kg

2.5 解析結果および考察

前記の解析条件およびまくらぎの形状寸法設定をもとにFEM応力解析を行った。代表例で軌道の変位が1番大きい表-2のaの場合を掲載する。解析によるケース別の軌道の最大変位を表-4に示す。軌道変位では4Tまくらぎと較べて、ケース1はレールおよびまくらぎの軌道変位が大きくなっているが、ケース2,3は小さくなっている。図-4に4Tまくらぎとケース別の新型まくらぎの底面接地圧のコンターを示す。4Tまくらぎでは載荷位置で高い接地圧を示しているが、新型まくらぎの各ケースでは接地面積が大きくなるほど接地圧が低減されていることが確認できる。新型まくらぎではケース2で接地面積は1.200m²と4Tまくらぎの接地面積以下であるが、枠型の縦梁部に荷重が分散されることにより軌道沈下が抑制されると考えられる。まくらぎは、軽量の方がま

くらぎ更換に支障が少ないことを考慮して、以後ケース 2 の新型まくらぎ（以後左記のまくらぎを新型まくらぎと称す）を基本形状とした。50N 級コンクリートで枠型まくらぎを製作すると質量は 732kg で新型まくらぎは 39%の質量減となる。この新型まくらぎは文献 5) で製作した質量 370kg の枠型まくらぎと比較してまくらぎ断面が大きいいため強度上問題ないが、文献 5) と同様の FEM 解析により発生応力は許容値以内であることを確認している。

表-4 FEM 解析によるまくらぎの別の軌道最大変位 (mm)

ケース	まくらぎ	レール変位	まくらぎ変位
1	新型まくらぎ	2.5	1.9
2	新型まくらぎ	2.4	1.6
3	新型まくらぎ	2.1	1.5
4	4Tまくらぎ	2.5	1.7

接地圧 (N/mm²)

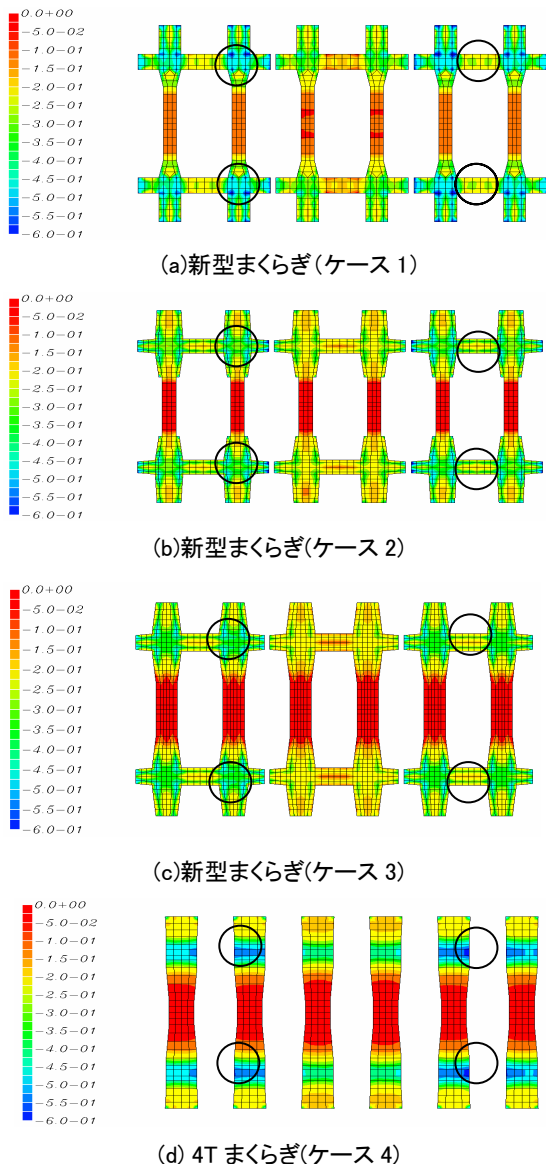


図-4 まくらぎ接地圧コンター図 (○は載荷位置)

以上の検討結果から、新型まくらぎの基本形状を図-5 のとおり定めた。工場製品過程での省力化を図るため、文献 5) と同様にレール直角方向は PC 構造、レール方向は RC 構造としている。

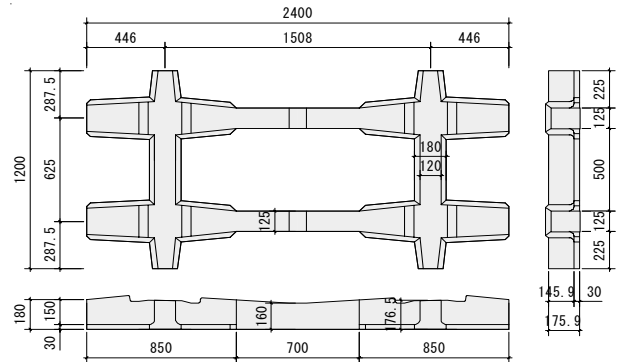


図-5 新型まくらぎの形状寸法

3. 新型まくらぎの曲げ強度試験

新たに設計した新型まくらぎの性能確認のため、実物まくらぎ供試体を試作し、基本性能試験を実施した。

3.1 使用材料

UFC の示方配合を表-5、硬化後の強度試験結果の平均値を表-6 に示す。

表-5 UFC の示方配合 (kg/m³)

水	粉体 (プレミックス)	鋼繊維 (FM)	高性能 減水剤	合計
150	2254	157	30	2591

表-6 UFC 硬化後の強度特性 (N/mm²)

圧縮強度 Φ100×200	割裂引張強度 Φ100×200	曲げ強度 100×100×400	弾性係数 Φ100×200
203	11.2	37.1	52500

3.2 まくらぎの製作基本手順

新型まくらぎは、供試体の制作方法をポストテンション方式とした。製作基本手順を図-6 に示す。レール直角方向の PC 鋼材はアンボンド鋼棒 11mm×4 を使用した。PC 鋼棒の設計緊張力は 135 kN/本とした。また、使用時コンクリートに導入される有効応力は約 15.3N/mm² であった。

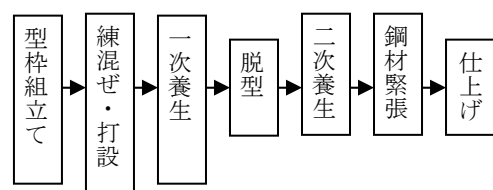


図-6 まくらぎ製作手順

3.3 強度確認試験項目および評価基準

新型まくらぎ強度確認試験の試験項目は、枠型形状の特殊性を考慮して4条件設定して実施した。各条件の載荷点および支点の位置を図-7、表-7に示す。

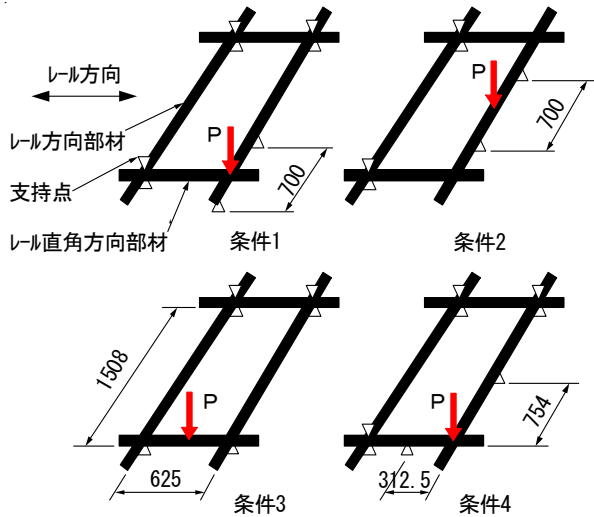


図-7 曲げ強度試験条件

表-7 曲げ試験の載荷点および曲げ方向

条件	載荷点	曲げ方向
条件1	レール直角方向	締結部
条件2		中央断面
条件3	レール方向	中央断面
条件4	4締結のうち1締結範囲が不支持 (1/4透かし)	ねじり

3.4 試験方法

載荷方法は基本的に単調増載荷とした。まずひび割れる前の弾性域で2回ほど載荷・除荷し、次にひび割れ発生荷重で再度除荷した。その後、実験の最大荷重(供試体耐力)が記録されるまで単調に荷重を増やした。計測項目は荷重、載荷点と支点変位、支間中央300mm範囲の供試体底面のコンクリートひずみ、およびひび割れ幅とした。

3.5 試験結果

表-8に条件1~4の保証荷重(ひび割れ発生荷重)の試験結果を、表-9に条件1~4の破壊荷重の試験結果を示す。ひび割れ発生荷重の実験値は目視でひび割れを確認した時点の荷重である。条件1,2では曲げ強度はJIS E 1202の4Tまくらぎの曲げ保証荷重および曲げ破壊荷重に対して2.35~3.80倍の強度を有していることを確認した。条件3,4も実際のレール分散効果を考えれば問題ないと推察される。

表-8 ひび割れ発生荷重の試験結果 (kN)

条件	方向	4T規格値(Po)	試験結果(Pn)	Pn/Po
条件1	レール直角	92	216	2.35
条件2	方向	74	180	2.43
条件3	レール方向	—	65	—
条件4	2方向	—	55	—

表-9 破壊荷重の試験結果 (kN)

条件	方向	4T規格値(Po)	試験結果(Pn)	Pn/Po
条件1	レール直角	173	590	3.41
条件2	方向	154	461	2.99
条件3	レール方向	127	482	3.80
条件4	2方向	—	216	—

4. まくらぎの電気絶縁抵抗試験

4.1 まくらぎの絶縁性

新型まくらぎの使用材料(UFC)には体積比2%の鋼繊維が配合されている。鉄道には信号回路のため、レールに電流が流れている。鉄道のまくらぎは2つのレール間で絶縁する必要がある。当試験は、鋼繊維の入ったまくらぎの絶縁特性の検証を行なったものである。

4.2 試験方法

試験方法の概略を図-8に示す。絶縁体の上に銅板を敷き、その上に新型まくらぎを載せる。まくらぎはレールを締結装置により締結された状態とする。

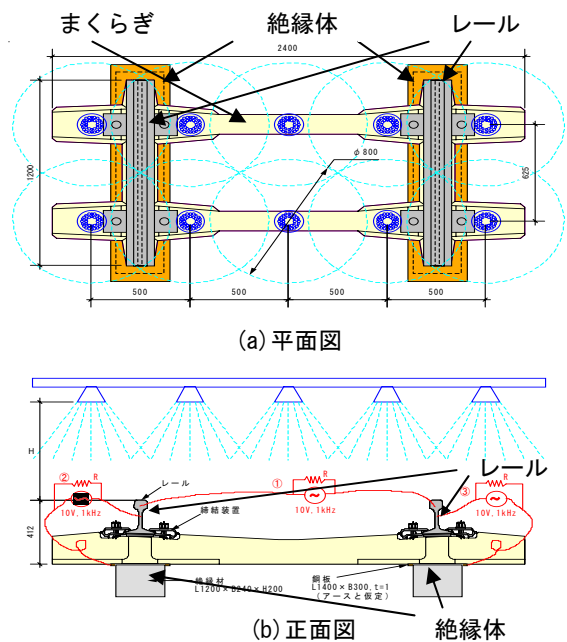


図-8 絶縁抵抗試験の概略図

加印電流は、新幹線の軌道回路を想定して10V(周波

数 100~4000kHz) の交流電流とした。試験の環境条件としては以下の 3 条件を設定した。

- (1) 乾燥状態
- (2) 降雨状態 (時間雨量 100mm 相当)
- (3) 汚損降雨状態 (0.1%の食塩水時間雨量 100mm 相当)

この 3 条件で左右レール間および各レールアース間の絶縁抵抗 (インピーダンス Z) を主に測定した。なお、比較用として従来の 4T まくらぎも同様の試験を実施した。

4.3 試験結果

表-10 に絶縁抵抗試験の各試験条件におけるレール間のインピーダンス Z を示す。乾燥状態でインピーダンス Z は、新型まくらぎの 371k Ω に対して、4T まくらぎは 480k Ω で新型まくらぎは、4T まくらぎの約 77%であった。しかし、降雨状態では新型まくらぎ 33.4k Ω に対して 4T まくらぎ 16.8k Ω (2 倍)、汚損降雨状態では新型まくらぎ 13.1k Ω に対して 4T まくらぎ 2.3k Ω (5.7 倍) と新型まくらぎの方が高い抵抗値を示した (周波数は全て 1.0kHz)。試験条件が厳しくなるほど新型まくらぎは、絶縁抵抗が従来の 4T まくらぎより高い絶縁抵抗を有していることを確認した。新型まくらぎは多量の鋼繊維が混入しているにもかかわらず、高い絶縁抵抗を有しているのは、鋼繊維よりも試験体の表面積 (水膜面積) に支配されていると推測した。実証するため、板幅を変えた合板の 0.1%塩水散布時の絶縁抵抗試験を実施した。図-9 に試験結果を示す。乾燥時の絶縁抵抗は同程度である合板で降雨時は板幅に反比例していることが確認される。降雨状態の絶縁抵抗の影響は、鋼繊維の存在よりも試験体表面の水膜に支配されていると考えられる。

表-10 まくらぎの絶縁抵抗

(周波数 1kHz)	乾燥時 (k Ω)	降雨状態 (k Ω)	塩水 0.1% (k Ω)
4T まくらぎ	480	16.8	2.3
新型まくらぎ (3 体の最低値)	371	33.4	13.1

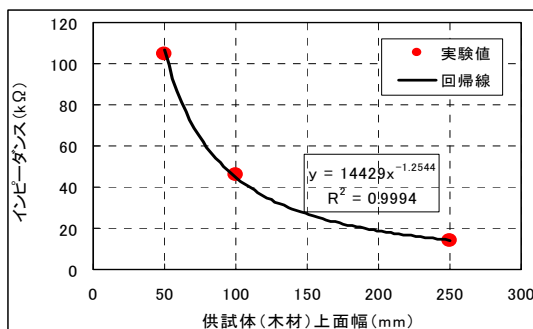


図-9 合板の板幅と絶縁抵抗の関係 (0.1%塩水時)

5. まくらぎ耐久性試験

新型まくらぎの実軌道への敷設における列車通過時の耐久性を検討するため、実際に新型まくらぎで模擬軌道に敷設し、列車通過を想定した繰り返し載荷を行い、軌道の沈下特性および耐久性の検証を行なった。

5.1 試験方法

実際の線路を模擬するため、図-10 に示すように、新型まくらぎ(5 基)、レールおよび締結装置を組んだ軌道を設定した。新型まくらぎの下はバラスト、最下面には土路盤を設定した。載荷方法は、設定した軌道に鉛直方向で 1 点に新幹線の通過を想定した周波数 30Hz、輪重 60 \pm 30 kN で累計 200 万回 \times 3 回の繰り返し載荷を行なった。

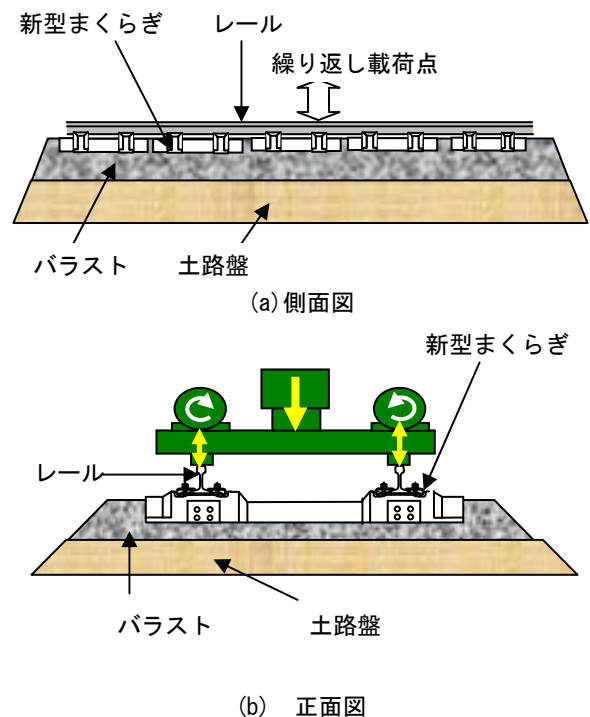


図-10 まくらぎ耐久性試験図

5.2 試験結果

図-11 に繰り返し載荷回数における軌道の最大沈下特性を、写真-1 に載荷状況を示す。測点は最大沈下を記録した載荷直下のまくらぎ沈下 (下方) 変位である。従来の 4T まくらぎと比較して新型まくらぎの沈下量が抑制されていることが確認される。初期沈下を除いたまくらぎ直線的沈下の割合を示した沈下係数 (β)⁸⁾ においても 4T まくらぎが 2.79 (mm/1000 万トン) に対して、新型まくらぎは 1.53 (mm/1000 万トン) と約 46%のまくらぎ沈下の軽減が図れることが確認された。

また、今回の 200 万 \times 3 回 = 600 万回の載荷数は、新幹線の約 2 年分の通過に相当する。現段階で目視では、新型まくらぎの損傷は認められていない (写真-2) 今

後も耐久試験は継続して実施していく予定である。

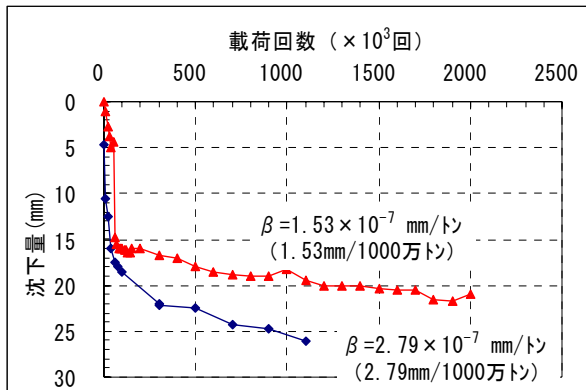


図-11 繰り返し載荷におけるまくらぎの沈下の推移



写真-1 耐久試験状況



写真-2 耐久試験後の新型まくらぎ

6. まとめ

超高強度繊維補強コンクリートを素材とした新型まくらぎの開発について、得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) FEM 解析を行った結果、質量 450kg の枠型まくらぎは接地面積が従来の 4T まくらぎより小さいが、軌道沈下量およびまくらぎ底面の接地圧が 4T まくらぎと比較して低減されることを確認した。
- (2) ポストテンション方式で製作した新型まくらぎの

強度確認試験を実施した結果、曲げ強度は JIS 規格の 4T まくらぎの設計強度(曲げ保証荷重および曲げ破壊荷重)に対して 2.35~3.80 倍の強度を有していることを確認した。

- (3) 電気絶縁抵抗試験を行った結果、降雨状態で従来の 4T まくらぎと比較して 2.0~5.7 倍の絶縁抵抗が確保されることを確認した。
- (4) 軌道敷設の耐久試験を行った結果、新型まくらぎは従来の 4T まくらぎと比較して沈下係数(β)で約 46%のまくらぎ沈下の軽減が図れることが確認された。今後も耐久試験は継続して行なっていく。

今後は、これまでの検討結果を踏まえ、耐久試験を継続していくとともに、新型まくらぎの形状をさらに施工性の観点から改良していきたい。また、新型まくらぎの軌道沈下の低減効果を生かし、実軌道で接着絶縁レール区間などに入れていくことも検討していきたい。

参考文献

- 1) Klaus Riessberger : Frame sleepers adapt ballasted track to modern needs, Railway Gazette International, February 2000
- 2) Hilliges D, Bittner W: Mechanisierte Herstellung der Festen Fahrbahn Bauart Rheda, ETR Eisenbahntechnik -he Rundschau, January 1989
- 3) 涌井一：ラダーマクラギによる線路構造システムの革新と課題，鉄道総研報告，第 10 巻 第 9 号，1996 年 9 月
- 4) 内田祐市，田中良弘，片桐 誠，二羽淳一郎：土木学会「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)」の概要，コンクリート工学，Vol. 43, No. 3, pp. 3~8, 2005 年 3 月
- 5) 前田昌克，可知隆，趙唯堅，関雅樹：超高強度繊維補強コンクリートを使用した新型まくらぎの基本性能，コンクリート工学年次論文集 Vol. 29, 2007 年 7 月
- 6) 田中宏昌，磯浦克敏：「東海道新幹線の保線」，日本鉄道施設協会，pp91, 1998 年 12 月
- 7) 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[有道床軌道] (案)」，pp. 27, 56~58, 1997 年 4 月
- 8) 佐藤吉彦：「新軌道力学」，鉄道現業社，pp. 126~127, 1998 年 7 月