

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基本性能

前田 昌克^{*1}・可知 隆^{*2}・趙 唯堅^{*3}・関 雅樹^{*4}

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。この枠型まくらぎの形状・仕様をFEM解析により検討し、並びに曲げ強度等の性能試験を実施した結果、UFCを使用することで枠型まくらぎの大幅な軽量化が可能であること、および曲げ強度等はJIS規格を満足していることが確認された。

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、曲げ強度

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採用できない。

本研究では、枠型の形状のまくらぎ(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レールの沈下抑制、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。

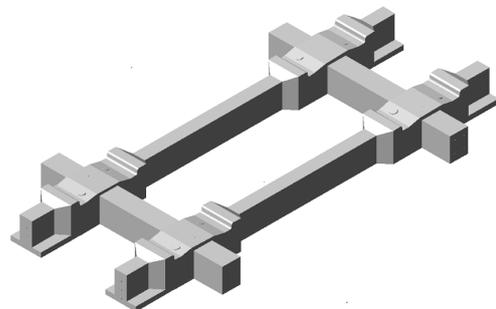


図-1 枠型まくらぎ

本研究では、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。施工性の面から、現行の保線作業に使用されている汎用機械類を適用することから、UFC素材を使用して枠型まくらぎ(以後新型まくらぎと称す)の質量は、約400kgを目標とした。

*1 東海旅客鉄道(株) 技術開発部 主幹研究員 工修 (正会員)

*2 東海旅客鉄道(株) 技術開発部 グループリーダー 工修

*3 大成建設(株) 土木技術開発部 工博 (正会員)

*4 東海旅客鉄道(株) 技術開発部 次長 工博 (正会員)

2. 枠型まくらぎの設計

2.1 検討方法

新型まくらぎの形状・仕様決定のため、FEM 解析による設計を行った。既設 PC まくらぎは、設計荷重作用下でのフルプレストレス構造として許容応力度設計法により設計を行っている。すなわち、まくらぎ単体をはりとしてモデル化し、荷重分散係数と道床反力分布形状を仮定してまくらぎに発生する断面力を求める。次に全断面有効として各断面の発生応力を算出し、それが許容応力度以内にあるかどうかを判定する⁵⁾。

新型まくらぎの設計では、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バネ要素でモデル化し、全体系の 3 次元 FEM 解析により発生する応力度を直接求めることにした。

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。使用するレールは質量 60 kg/m、軌間 1435 mm、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 50 MN/m とした。道床バラストの鉛直ばね定数は、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。解析に用いたばねおよび材料物性値を表-1 に示す。設計荷重として現状の新幹線重量から輪重 120 kN、横圧 60 kN とした。

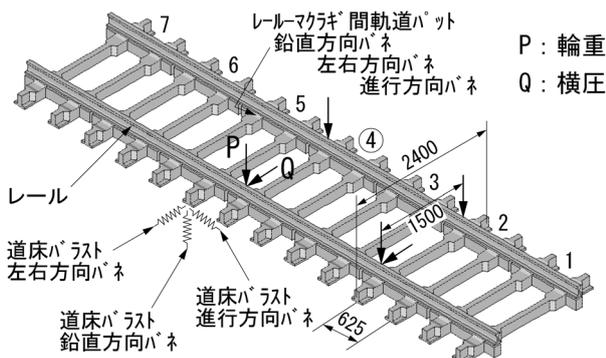


図-2 解析モデル

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 ⁸⁾
鉛直方向：555MN/m/基	ヤング率：50,000N/mm ²
左右方向：95MN/m/基	単位質量：25.5kN/m ³
進行方向：81MN/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を表-2、荷重作用位置を表-3 に示す。一般のまくらぎの設計に使用される場合と、軌道の陥没等異常時の使用性能から枠型特有の状態を考慮した 4 設定状態としている。

表-2 まくらぎの支持状態

(1)	全面的に均一な正常ばね支持の状態
(2)	レール内側の範囲で鉛直ばね定数が 1/2 の状態 (中すかし)
(3)	片側 1/2 の範囲で鉛直ばね定数が 1/2 の状態
(4)	1/4 の範囲で鉛直ばね定数が 1/2 の状態

表-3 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+横圧	締結部直上載荷
d	輪重+横圧	締結間載荷

2.4 まくらぎ形状・寸法の検討

UFC を素材としても、まくらぎの形状を枠型にすることで現行の 4T まくらぎ⁹⁾ と比較して質量増となる。軽量化のため、UFC の特徴を活かして形状寸法を変更した。レール方向のはりは、設置面積と道床横抵抗力を確保する観点から幅 120 mm×高さ 160 mm の矩形断面とした。レール直角方向のはりについては、軌間内の道床バラ

ストの支持効果が小さいことから、4T まくらぎの底部幅の 300 mm から 80 mm に縮小し、まくらぎ質量低減を図った。また、まくらぎ底面の接地面積を確保するためレール直角方向の外側にはフランジ付きの逆 T 断面とした。なお、締結部は、4T まくらぎの座面を確保できるようにしている。新型まくらぎの道床横抵抗力は下記の理論式¹⁰⁾で算定すると既設の 4T まくらぎの 1.5 倍となる。

$$F = aW + brG_e + crG_s$$

F：道床横抵抗力 (kN)

a, b, c：道床種別による係数

W：まくらぎ軌きょう重量 (kN)

G_e, G_s ：まくらぎの側面，端面の上辺周りの断面 1 次モーメント (m³)

r：道床単位重量 (kN/m³)

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の結果をもとに FEM 応力解析を行った。新型まくらぎに発生する最大応力は、設定状態は表-2の(3)、表-3のcで最大主応力が 7.0 N/mm²、レール直角方向応力が 6.9 N/mm²、レール方向応力が 3.2 N/mm²であり、UFC のひび割れ発生限界 (8 N/mm²) 以下であった。最大主応力のコンターを図-3に示す。

新型まくらぎに生じる最大変位は、表-2の(3)、表-3のcの場合であり、その大きさは、レール直角方向変位が 0.62 mm、鉛直方向変位(沈下量)が 1.0 mm であった。

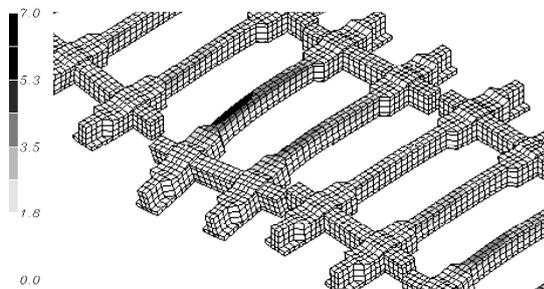


図-3 最大主応力コンター図 (状態(3)-c)

上述の結果によれば、質量 370 kg の新型まくらぎに PC 鋼材によるプレストレスの導入は不要となる。しかしながら、超高強度コンクリート

材料をまくらぎに使用する実績がないため、長期耐久性をより確保するという観点から、巨大輪重によるひび割れを発生させないこととした。この目的によりレール直角方向にはプレストレスの導入を採用した。なお、レール方向は曲げ破壊耐力対応のため RC 構造とした。

以上の検討結果から、新型まくらぎの基本形状を図-4の通り定めた。レール直角方向は PC 構造、レール方向は RC 構造としたことにより、工場製品過程での省力化が図れた。質量は 370 kg となり、当初の目標質量以下の枠型まくらぎ構造を構築できた。

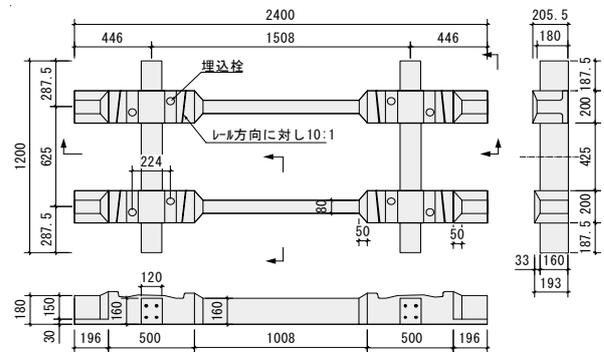


図-4 新型まくらぎの形状寸法

3. 新型まくらぎの基本性能確認試験

新たに設計した新型まくらぎの強度特性と数値解析結果とを比較・確認するため、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

新型まくらぎの体積は約 0.15 m³、UFC の示方配合を表-4、硬化後の強度試験結果の平均値を表-5に示す。

表-4 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-5 UFC 硬化後の強度特性 (N/mm²)

圧縮強度	割裂引張強度	曲げ強度	弾性係数
Φ100×200	Φ100×200	100×100×400	Φ100×200
200	10.1	32.6	54300

3.2 まくらぎの製作基本手順

新型まくらぎはプレテンション方式により製作した。製作基本手順を図-5に示す。レール直角方向のPC鋼材の設計緊張力は128 kN/本とし、プレストレス導入時のコンクリート強度の実測値は約 60 N/mm²であった。また、完成時のコンクリートの有効応力は約 16 N/mm²であった。

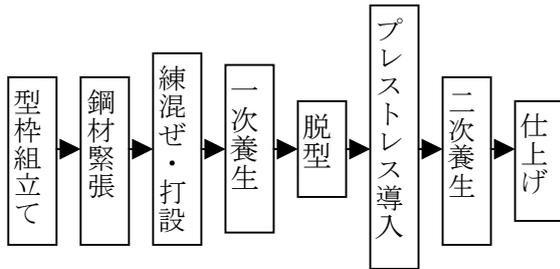


図-5 まくらぎ製作手順

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-6、表-6に示す。

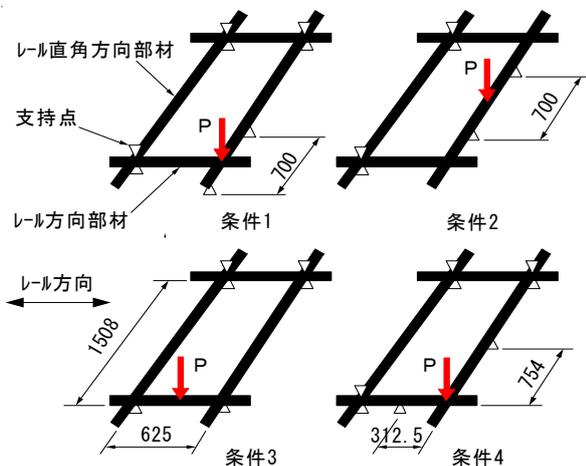


図-6 曲げ強度試験条件

表-6 曲げ試験の載荷点および曲げ方向

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

載荷試験の評価基準として、条件1, 2は原則的に「JIS E 1201 プレテンション式 PC まくらぎ」の載荷条件に準じ、条件3はRC構造部材の耐力の確認のため実施した。条件4のねじり試験については明白な基準はないが、部分的なバラスト陥没が発生した場合を想定した最も厳しい条件である。

3.4 試験方法

各試験項目の支持位置は、条件1と条件2のスパンを700 mm、条件3のスパンを縮結間距離の625 mmとした。また、条件4のねじり試験では、レール方向はりとレール直角方向はりの中間点に支持点を設け、載荷点以外の交点（縮結部）を上から押さえた。

載荷方法は基本的に単調漸増載荷とした。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。写真-1に条件1の試験状況を示す。

計測項目は荷重、載荷点と支点変位、支間中央300 mm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。



写真-1 強度確認試験の状況（条件1）

3.5 試験結果

表-7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-8に条件1~4の破壊荷重の試験結果を示す。試験結果の例として条件1と条件2の荷重-変位曲線を図-7に示す。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 1.88~3.29 倍の強度を有していることを確認した。条件 3 では、ひび割れ発生荷重は条件 1, 2 の約半分であったが、2.6 節で記述したとおり、発生応力はレール直角方向の半分以下であるため、ひび割れ抵抗性はレール直角方向と同等以上であると判断している。条件 4 の結果については 4.3 節で記述する。

表-7 ひび割れ発生荷重の試験結果 (kN)

		4T 規格値 (Po)	試験結果 (Pn)	Pn/Po
条件 1	レール直角	92	235	2.55
条件 2	方向	74	190	2.56
条件 3	レール方向	—	116	—
条件 4	2 方向	—	60	—

表-8 破壊荷重の試験結果 (kN)

		4T 規格値 (Po)	試験結果 (Pn)	Pn/Po
条件 1	レール直角	173	570	3.29
条件 2	方向	154	290	1.88
条件 3	レール方向	127	336	2.66
条件 4	2 方向	—	216	—

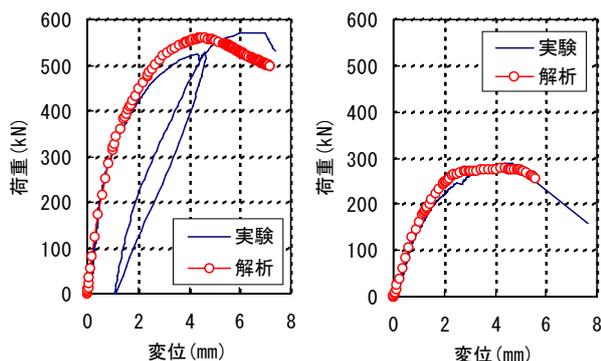


図-7 試験結果の例 (条件 1, 条件 2)

4. 実験シミュレーション解析

4.1 解析モデル

載荷条件 1~4 について、非線形 FEM による実験シミュレーション解析を実施した。解析では、まくらぎ供試体全体をソリッド要素でモデル化し、境界条件 (支持条件) を実験に合わせてモ

デル化した。

UFC の材料特性は、UFC 指針⁸⁾ を参考に次のように設定した。圧縮応力-ひずみ関係は、圧縮強度 f'_c まで弾性係数 E_c の傾きで線形に増加し、その後、ひずみ $\epsilon_u (=0.01)$ で応力 $0.2f'_c$ に線形に軟化するものと仮定した。また、引張応力-開口変位関係は、ひびわれ発生後、引張強度 f_t を開口変位 $w_1 (=0.5 \text{ mm})$ まで保持し、その後、開口変位 $w_2 (=4.3 \text{ mm})$ で応力が 0 となる直線と仮定した。図-8 に圧縮および引張域の構成則を示す。なお、異形 PC 鋼棒の応力-ひずみ関係をバイリニアと仮定した。

解析に用いた圧縮強度、引張強度および弾性係数は材料試験値を用いた。

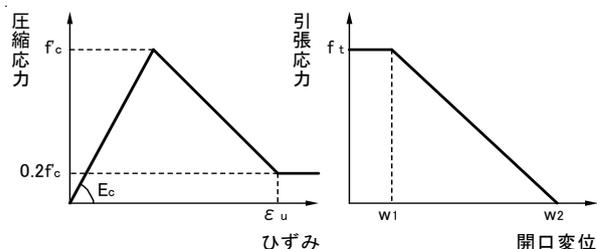


図-8 圧縮および引張域の構成則

4.2 解析結果

1 例として条件 1, 2 の荷重-変位関係の比較結果を図-7 に示す。どのケースも解析のほうはひび割れ発生後の剛性を若干大きく評価しているが、初期勾配、ひび割れ発生荷重および最大荷重は概ね実験結果と一致している。

4.3 ねじり試験と 7 連モデルまくらぎ応力状態の関係

実験のひび割れ発生荷重に関して、表-7 に示すように条件 4 のねじり試験では最も小さかった。これは、条件 4 の支持条件と応力状態は実際のまくらぎのそれと大きく異なるためである。両者を関連付けるために、1/4 範囲の完全不支持を条件として図-2 に示す 7 連モデルによる解析を合わせて実施し、両者のレール方向 (ひび割れが先行発生する方向) のひび割れ発生荷重を比較した。その結果を図-9 に示す。

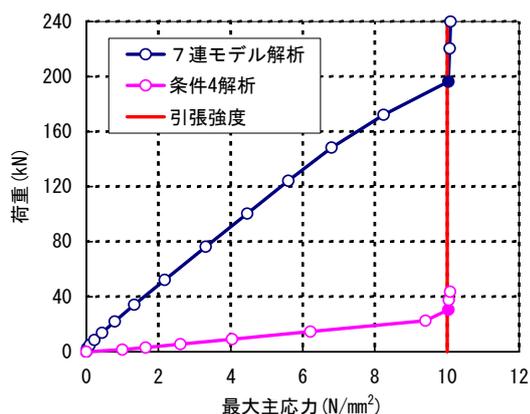


図-9 荷重-最大主応力の関係 (ねじり)

まくらぎに同じ大きさの最大主応力を発生させる場合の必要荷重は、実際の条件を模擬した7連モデルでは、実験の条件4に比べて約10倍大きくなっている。すなわち、実際のバラスト支持条件下では、1/4が不支持でも、ひび割れ発生荷重は実験値の約10倍となる。

5. 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) 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は、既存まくらぎの更替用まくらぎとして必要な軽量化が可能である。具体的には、普通コンクリートで製作した枠型PCまくらぎ質量の約50%、4Tまくらぎ質量(2本分)の約70%の370 kgまで軽量化することができた。
- (2) 今回試作した新型まくらぎの性能の特徴として、道床横抵抗力は理論上4Tまくらぎの1.5倍となる形状のものを提案した。
- (3) 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1.88~3.29倍の強度を有していることを確認した。
- (4) 新型まくらぎのねじり試験のひび割れ荷重は60 kNであったが、ねじり試験の応力状態と7連モデルまくらぎの応力状態を解析的

に関連付けた結果、設計輪重120kNの5倍である600 kNまでの高性能を保有することを明らかにした。

今後は、これまでの検討結果を踏まえ、新型まくらぎの形状をさらに施工性・構造性能の観点から改良していきたい。また、試験軌道に敷設することにより長期間に亘る性能確認試験および保守作業の検証を実施していく予定である。

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: Eisenbahntechnische 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) 宮本俊光: 「線路」, 山海堂, pp. 125~131, 1990年11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, pp. 91, 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) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), 2004年8月
- 9) 関雅樹他: 「軌道構造と材料」, 交通新聞社, pp. 168, 2001年10月
- 10) 佐藤吉彦, 梅原利之: 「線路工学」, 日本鉄道施設協会, pp. 288, 1993年1月