

論文 まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する弾性まくらぎ直結軌道の構造に関する基礎的検討

谷川 光^{*1}・高橋 貴蔵^{*2}・椿 龍哉^{*3}・朝野 茜^{*4}

要旨：本研究では、施工性の向上と構造のスリム化による低コスト化を図るため、まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する弾性まくらぎ直結軌道の構造に関して基礎的な検討を行った。まくらぎ側面の突起の荷重伝達部の角度をパラメータとした2次元FEM解析の結果、終局時の最大荷重は突起の角度が大きいほど大きくなる傾向となった。また突起周辺を模擬した供試体および実物大軌道供試体に対する載荷試験を行い、水平方向の耐荷性能を確認した。その結果、まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する構造の弾性まくらぎ直結軌道が、現行の設計時の作用に対しても性能を満足することを確認した。

キーワード：弾性まくらぎ直結軌道、まくらぎ、コンクリート道床、横圧、せん断キ-

1. はじめに

軌道保守の省力化を目的として、スラブ軌道や弾性まくらぎ直結軌道といった道床にバラストを使用しない直結系軌道の適用が増加している。この内、弾性まくらぎ直結軌道（以下、弾直軌道）は図-1に示すようにまくらぎを弾性材を介してコンクリート道床で支持する構造となっている。コンクリート道床は、まくらぎから伝わる鉛直方向の作用である輪重を負担する他、横圧と呼ばれる水平方向の荷重を負担する部材となっている。横圧に対する設計時の作用は、現行ではスラブ軌道の設計法に準じた考え方による作用が用いられているが¹⁾、営業線での測定により実際に発生する荷重は設計に用いられる作用に比べて十分小さいことがわかっている²⁾。

弾直軌道の例としては、D型弾性まくらぎ直結軌道³⁾が挙げられ、騒音や振動を低く抑えられることから都市部の高架橋上を中心に敷設されている。都市部の高架橋上での施工の際には、資材の搬入場所の制約や狭隘な作業空間での施工が求められ、また鉄筋コンクリート製のコンクリート道床の過密な配筋や型枠の寸法管理(図-2a))に多くの時間を要している状況にある。

こうした課題に取り組んだ例として、合成繊維を用いた短繊維補強コンクリートをコンクリート道床に適用し配筋を必要としない構造が開発されている⁴⁾。しかしながらコンクリート道床は従来と同じ形状であることから型枠の構築方法は変わらず、またスラブ軌道の設計法に準じた考え方によって算出した作用(必要な耐力)によって設計された構造であるため、合成繊維の混入量からベースコンクリートに高流動コンクリートを用いており流動性の管理が必要であった。

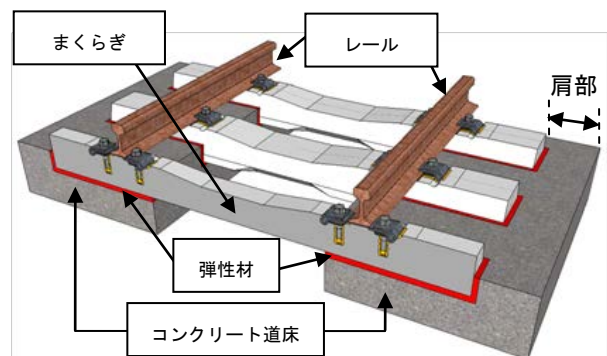


図-1 弾性まくらぎ直結軌道の構造例

さらなる低コスト化を図るためには、コンクリート道床の構造をスリム化し、合成繊維の混入量を減じてベースコンクリートに普通コンクリートを採用した短繊維補強コンクリートを使用する方法が考えられる。

具体的には、コンクリート道床の構造をスリム化するため、まくらぎ側面に突起を設けて横圧に抵抗する構造とすることができれば、コンクリート道床の肩部がない形状とし、配筋を必要とせず打込み量の削減も期待できる(図-2b))。型枠構築時に突起を利用すれば型枠の位置調整も簡略化でき、型枠の施工性も改善可能と考えられる。まくらぎ側面に突起を設けて横圧に抵抗する構造とした場合、コンクリート道床は普通コンクリートでも耐荷性能を満足できる可能性が考えられるが、鉄筋のない構造であるため、剥落対策として短繊維補強コンクリートを用いることとした。合成繊維の混入量は、ベースコンクリートに普通コンクリートを採用できる程度まで減じるため、打込み時のコンクリートの管理も容易になると考えられる。

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 研究員 工修 (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 副主任研究員 工修 (正会員)

*3 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 Ph.D. (正会員)

*4 元 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 都市地域社会専攻 工修

以上を踏まえると、検討する新しい構造は短繊維補強コンクリート製のコンクリート道床を有し、従来のコンクリート道床の肩部がなく、まくらぎ側面の突起でせん断キーの効果により横圧に抵抗する構造となる。

本研究では、本構造に関して基礎的な検討を行った。はじめに、まくらぎ側面の突起に関して横圧を伝達可能な形状を検討するため、突起周辺のみをモデル化した 2 次元 FEM 解析および突起周辺を模擬した供試体に対する載荷試験を行い、形状およびその耐荷力の傾向を得た。その後、実物大軌道供試体に対する載荷試験を実施し、水平方向の耐荷性能について結果を整理した。

まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する構造とした場合に想定される破壊モードは、図-3 に示すように A:まくらぎ側面の突起の破壊、B:突起部からコンクリート道床に斜めひび割れが発生・進展して押抜きせん断破壊、C:まくらぎ端面隅角部からコンクリート道床に斜めひび割れが発生・進展して転倒するせん断破壊が考えられる。本研究では、突起周辺のみをモデル化した 2 次元 FEM 解析により A および B に対する検討を行い、突起周辺を模擬した供試体および実物大軌道供試体での検討により A ～C の破壊モードに対する検討を行った。

なお本研究におけるコンクリート道床のレール長手方向の最小寸法は 150mm としている（図-3 参照）。これは下部構造物の構造境界部分でコンクリート道床の目地を設ける関係で定まる寸法である。

2. まくらぎ側面の突起の形状に関する検討

横圧を伝達可能なまくらぎ側面の突起の形状を検討するため、突起周辺のみをモデル化した 2 次元 FEM 解析を行った。その後、まくらぎ側面の突起周辺を模擬した供試体を作製し、突起の耐荷力を評価した。

2.1 2 次元 FEM 解析

(1) 解析概要

解析モデルの形状を図-4 に、各要素の代表的な物性値を表-1 に示す。解析モデルは載荷用の鋼材、まくらぎ、まくらぎ側面の弾性材、コンクリート道床および下部構造物と軌道を接続するためのずれ止め筋（鉄筋種別：D13-SD345。位置は図-4 参照）で構成されている。解析モデルの形状は、目地を設ける関係でコンクリート道床のレール長手方向（図-4 の水平方向）の寸法が 150mm となる部分を想定して設定した。また要素の厚さ（図-4 における厚さ）は、まくらぎ下の厚さが最小（100mm）となる場合を想定して設定した。解析には汎用有限要素プログラム ATENA 2D⁵⁾を用いた。

まくらぎは 1/2 形状とし、突起の荷重伝達部は幅を 30mm に固定し、角度を $8^{\circ} \sim 45^{\circ}$ （まくらぎ長手方向の長さを 220～30mm）の範囲で 5 段階に変化させ、荷重伝

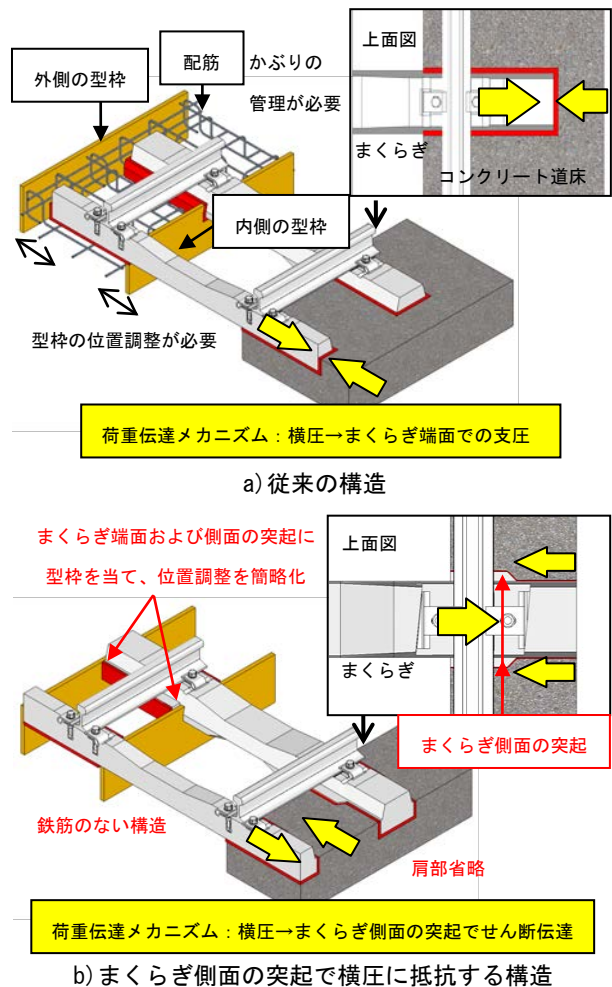


図-2 コンクリート道床の構造と荷重伝達メカニズム

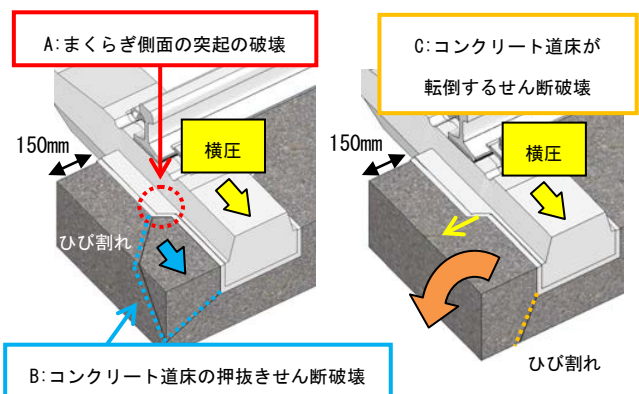


図-3 想定されるコンクリート道床の破壊モード

達部の形状変化点は、レールをまくらぎに固定する締結装置の位置を考慮し図-4 に示す位置から角度を設けた。

まくらぎとコンクリート道床の要素の物性値は、コンクリート標準示方書⁶⁾に従って設定し、まくらぎの圧縮強度は JIS 規格⁷⁾を参考に設定した。コンクリート道床は、ベースコンクリートを普通コンクリートとした短繊維補強コンクリートと想定し、圧縮強度を 27MPa とした。

合成繊維は、土木分野で広く使用されているポリプロ

ピレン繊維（断面 7100dt, 長さ 30mm, アスペクト比 38。以下, PP 繊維）およびポリビニルアルコール繊維（直径 0.66mm, 長さ 30mm, アスペクト比 45。以下, PVA 繊維）のいずれかを想定した。混入量は繊維混入によるフレッシュ性状の変動が小さく、繊維種別によらず曲げ性能のうち曲げタフネスの向上効果が同等となるような混入量を想定した。既往の検討結果⁸⁾よりフレッシュ性状が大きく変動しない混入量の関係から、まず PP 繊維の混入量を 0.5vol.% と設定した。PVA 繊維は、PP 繊維と曲げタフネスの向上効果が同等となるように 0.375vol.% とした。ここで PVA 繊維を混入してフレッシュ性状が大きく変動するのは 0.5vol.% 以上であるため、PVA 繊維においてもフレッシュ性状は大きく変動しない混入量となる。FEM 解析では短繊維補強コンクリートを表現するために、破壊エネルギーを入力することから、JCI 規準^{9)・10)}を参考にベースコンクリートにレディーミクストコンクリート（以下、レミコン。普通-27-18-20N）を使用して試験を行い、PP 繊維で 131.3N/m, PVA 繊維で 133.3N/m となり同等であったことから破壊エネルギーを 131N/m とし解析を行った。

解析モデル（要素数：約 400）は、鉄筋を離散型棒要素とし、鉄筋以外は平面要素とした。まくらぎおよびコンクリート道床は、粗骨材の寸法を考慮して要素 1 辺の基本長さを 20mm と設定した。コンクリートの引張軟化モデルは、まくらぎは破壊エネルギーに基づく指数型（Exponential type⁵⁾）とし、コンクリート道床は短繊維補強コンクリートであることを考慮して破壊エネルギーに基づく直線型（SFRC type⁵⁾）とした。まくらぎ側面の弾性材とコンクリート道床の要素間には引張力を伝達しない接合要素を設け、載荷した際の滑りを考慮した。まくらぎへの載荷は、図-4 に示す位置で鋼材に対して強制変位を 0.1mm ずつ与え載荷した。

(2) 解析結果

荷重と荷重伝達部の角度の関係を図-5 に、破壊性状を図-6 に示す。図-5 より、角度によらずコンクリート道床のひび割れ発生荷重は概ね同等（10~15kN 程度）であった。最大荷重について見ると、角度が大きいほど終局時の最大荷重も大きくなる傾向となることがわかった。破壊性状は、角度が大きい場合、コンクリート道床に斜めひび割れがずれ止め筋要素に向かって発生・進展し、図-3 の B のような押抜きせん断破壊の破壊形式となった（図-6）。角度が小さい場合は解析モデルの水平方向にひび割れが発生進展した。図-3 の A のようにまくらぎ側面の突起によって破壊に至ったケースはなかった。

ここで営業線で測定された横圧によるまくらぎ端部の最大荷重は約 9kN であった³⁾ことから、本解析のいずれの角度でもまくらぎ側面の片側の突起で横圧に抵抗す

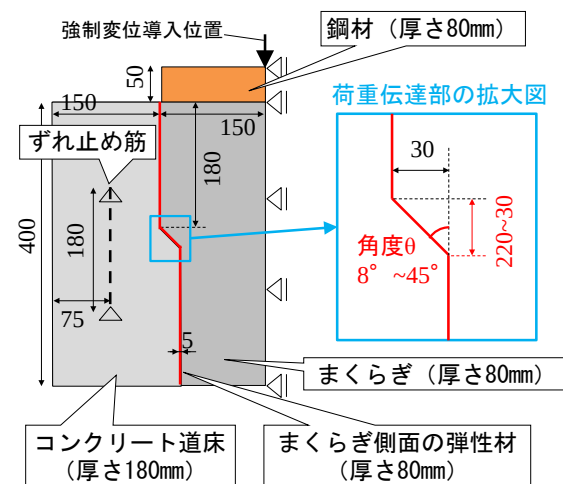


図-4 FEM解析におけるモデル形状（単位：mm）

表-1 各要素の代表的な物性値

要素種類	圧縮強度	弾性係数	備考
まくらぎ	50MPa	33000MPa	破壊エネルギー100N/m
まくらぎ側面の弾性材	-	64MPa	ポアソン比0.49
コンクリート道床	27MPa	26500MPa	破壊エネルギー131N/m
ずれ止め筋および鋼材	-	200GPa	ずれ止め筋fy345MPa

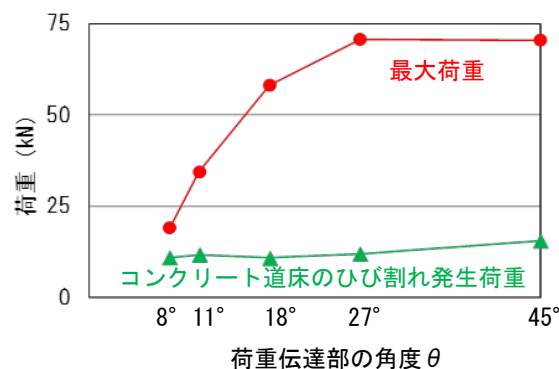


図-5 荷重と荷重伝達部の角度の関係

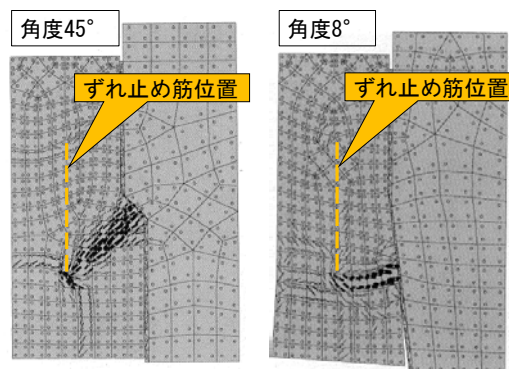


図-6 破壊性状（ひび割れ分布）

ることができると考えられる。また、まくらぎ間隔 700 mm として横圧に対する現行の設計時の作用（必要な耐力）を設計標準²⁾に従って算出すると、48.6kN（機関車 E-17 荷重、定尺レール区間）、53.2kN（機関車 E-17 荷重、ロングレール区間）となり、角度が 18° 以上の場合、まくらぎ側面の片側の突起で満足する結果となった。

以上よりまくらぎ側面の突起の荷重伝達部の角度を 8° ～45° とした要素モデルを用いた 2 次元 FEM 解析の結果、角度によらずコンクリート道床のひび割れ発生荷重は概ね同等であったが、終局時の最大荷重は角度が大きいほど大きくなる傾向となることがわかった。いずれの角度でもまくらぎ側面の突起は破壊しなかった。

2.2 まくらぎ側面の突起周辺を模擬した供試体に対する 載荷試験

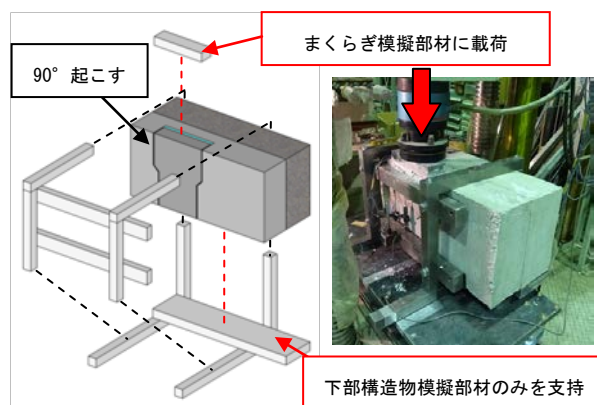
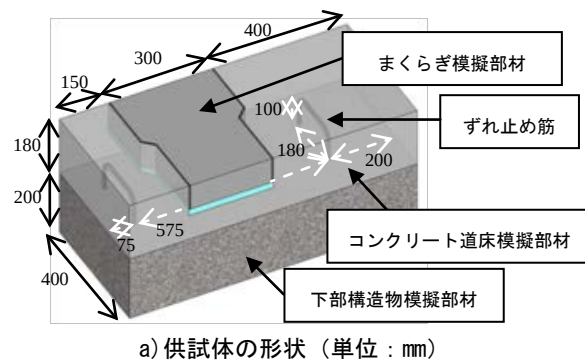
(1) 供試体の概要

図-7 a) にまくらぎ側面の突起周辺を模擬した供試体の形状を示す。前項で検討した形状に関して耐荷力を確認するため、供試体（計 4 体）を作製し材齢 28 日で載荷試験を行った。供試体は、はじめに下部構造物模擬部材を呼び強度 40MPa のレミコンで作製し、下部構造物と軌道を接続するために設置されるずれ止め筋（全高 250 mm、露頭高さ 100mm、鉄筋種別：D13-SD345）を設けた。その後、まくらぎ模擬部材を所定の高さに固定し、コンクリート道床模擬部材の打込みを行った。

まくらぎ模擬部材（厚さ 80mm）は、JIS 規格⁷⁾における 28 日圧縮強度 49.1MPa を参考に呼び強度 50MPa のレミコンを用いて作製した。まくらぎ側面には、前項において角度が 18° 以上であれば、現行の設計時の作用に対してもまくらぎ側面の片側の突起で満足できると考えられたため、18° と耐荷力が最も大きかった 45° の荷重伝達部を設けた。また側面および底面の弾性材を表現するため、側面にスチレンブタジエンゴムシート（厚さ 5mm、デュロメータタイプ A 硬度 60 度）、底面に厚さ 20mm の発泡ポリエチレンフォームを貼付けた。

コンクリート道床模擬部材には、2 種類の短繊維補強コンクリートを使用した。ベースコンクリートにはレミコン（普通-27-18-20N）を使用し、PP 繊維または PVA 繊維をアジテータ車にそれぞれ 0.5vol.%、0.375vol.% で投入し、高速攪拌することで作製した。攪拌後のスランプは 13~16cm となり、種類によらず 4cm 程度スランプが低下した。打込みは通常と同様に打込むことができ、型枠取外し後にもジャンカ等の不良は見られなかった。

載荷は、載荷治具（SS400 材）を用いてまくらぎ模擬部材を圧縮容量 2000kN の万能試験機により鉛直方向に圧縮することで載荷した（図-7 b)）。段階的に載荷と除荷を繰り返す、供試体が破壊するまで載荷を行った。載荷治具により、載荷した荷重はまくらぎ模擬部材、コンク



載荷治具の載荷・支持面以外はテフロンシートを設置

b) 載荷時の状況

図-7 要素供試体の概要

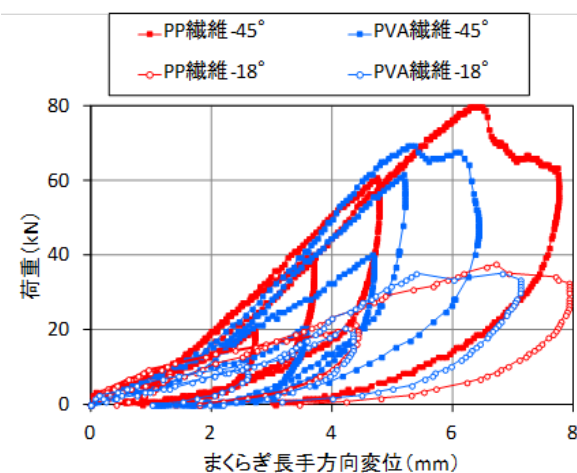


図-8 荷重とまくらぎ長手方向変位の関係

リート道床模擬部材、下部構造物模擬部材の順に伝達することになる。

(2) 試験結果

図-8 に各載荷段階で変位の初期値を 0 とした荷重とまくらぎ長手方向変位の関係を示す。18° のケースでは、合成繊維の種類によらず約 20kN で図-3 の C のようなひび割れがコンクリート道床模擬部材に発生し、最大荷重は 35kN 程度となった。45° のケースでは、約 40kN で図-3 の C のようなひび割れがコンクリート道床模擬部

材に発生し、最大荷重は、PVA 繊維で 70kN、PP 繊維で 80kN となり、18° のケースに比べて最大荷重が大きくなった。

終局時の破壊状況は、図-3 の C のような片側のコンクリート道床模擬部材にひび割れが進展し転倒するモードとなった後、下部構造物模擬部材にそのひび割れが進展し破壊に至った。2 次元 FEM 解析で見られた図-3 の B のような破壊は見られず、C の破壊モードにより破壊した。まくらぎ側面の突起部近傍で計測したコンクリートのひずみも十分に小さく、いずれの供試体においてもひび割れや損傷は観察されなかった。そのため、まくらぎ側面の突起は終局状態まで十分に荷重を伝達する機能を果たしていたと考えられる。横圧に対する抵抗性の観点から見ると、いずれのケースにおいても、営業線で測定されたまくらぎ端部の最大荷重（約 9kN）は満足したが、横圧に対する現行の設計時の作用（48.6kN および 53.2kN）を満足したのは 45° のケースであった。

3. 実物大軌道供試体に対する荷重試験

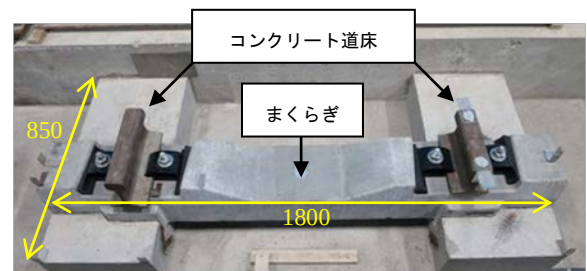
3.1 実物大軌道供試体の概要

図-9 a) に実物大軌道供試体の形状を示す。コンクリート道床の寸法は前章の供試体と同じ寸法となっている。軌道としての水平方向の耐荷性能を確認するため、まくらぎ 1 本分の延長の実物大軌道供試体を作製し水平方向（2 方向）の荷重試験を行った。基礎的な検討として 2 方向それぞれの耐荷性能を確認するため、はじめに横圧を想定してまくらぎ長手方向に荷重し、次にロングレール区間で発生するロングレール縦荷重を想定して荷重対象のコンクリート道床を変えてレール長手方向に対して荷重を行った（図-9 b)）。本試験はレミコンの呼び強度 21MPa、鉄筋比 3% の鉄筋コンクリート版上で実施し、供試体の構築は、はじめに下部構造物と軌道を接続するために設置されるずれ止め筋（全高 250mm、露頭高さ 100mm、鉄筋種別：D13-SD345）を鉄筋コンクリート製の土槽に設け、まくらぎを所定の高さに固定して型枠を構築し、コンクリート道床の打込みを行った。

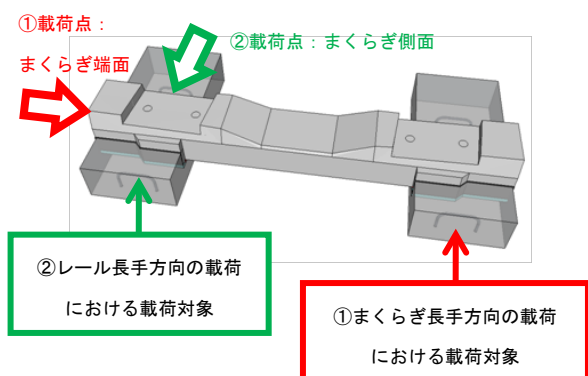
まくらぎは、JIS 規格⁷⁾を満足するように設計し、ポストテンション式 PC まくらぎ（全長 1800mm、最大幅 300mm、最小幅 240mm）を製作した。まくらぎ側面の突起には、前章の結果を参考に最も伝達可能な荷重が大きかった 45° の荷重伝達部を同じ位置に設けた。またまくらぎ側面および底面には前章と同じ材料を貼付けた。コンクリート道床は、前章と同じ材料・方法で短繊維補強コンクリートを製作し打込んだ。なお、合成繊維は PVA 繊維のみを使用した。

荷重は、側壁を反力体として、まくらぎ端面またはまくらぎ側面（レール位置）を油圧ジャッキにより水平方

向に荷重した。段階的に荷重と除荷を繰り返す、まくらぎ長手方向は 60kN まで、レール長手方向では 40kN まで荷重を行った。



a) 実物大軌道供試体の形状（単位：mm）



b) 荷重時の状況

図-9 実物大軌道供試体の概要

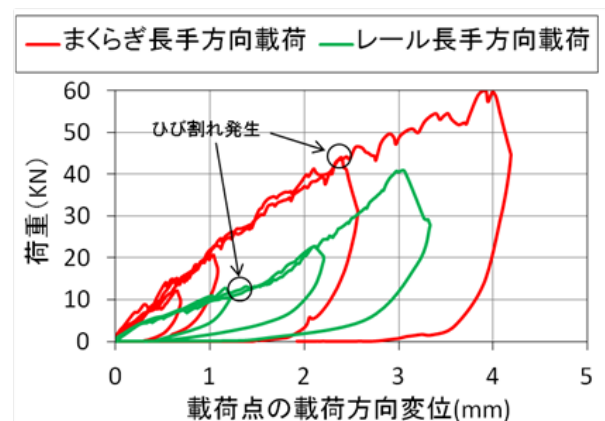


図-10 荷重と荷重点の荷重方向変位の関係

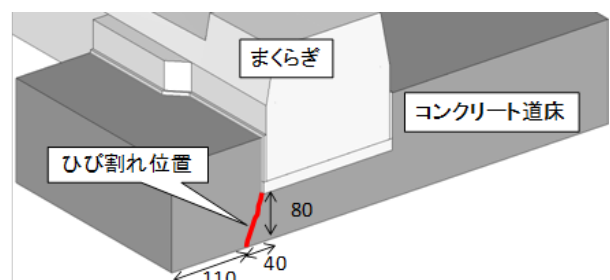


図-11 まくらぎ長手方向の荷重におけるひび割れ状況

3.2 試験結果

荷重と載荷点の載荷方向変位の関係を図-10に、まくらぎ長手方向の載荷におけるひび割れ状況を図-11に示す。まくらぎ長手方向の載荷では、40kN程度で図-3のCのようなレール長手方向の寸法が小さい片側のコンクリート道床にひび割れが発生・進展（図-11）しながら60kNまで耐荷することが確認された。横圧に対する抵抗性の観点から見ると、営業線で測定されたまくらぎ端部の最大荷重（約9kN）や横圧に対する現行の設計時の作用（48.6kNおよび53.2kN）を満足する結果となった。残留変位が生じたが、側面のゴムシートの硬度が小さいことやひび割れの影響によるものと考えられる。

まくらぎ側面の突起部近傍で計測したコンクリートのひずみは十分に小さく、全試験終了後にコンクリート道床を撤去してまくらぎ側面の突起の観察を行ったが、ひび割れや破壊は確認されなかった。そのため、実物大軌道供試体での検討においても十分に荷重を伝達する機能を有していることが確認された。

レール長手方向の載荷では、10kN程度でまくらぎ長手方向の載荷時と概ね同じ位置にひび割れが発生し、進展しながらレール長手方向にコンクリート道床が変形し、40kNまで耐荷する結果となった。ここでロングレール区間で発生するロングレール縦荷重は、設計標準²⁾では7kN/まくらぎ1本（まくらぎ間隔700mm）となる。本試験では、片側のコンクリート道床に載荷しているため、設計作用は3.5kNとなりレール長手方向に対しても本構造が性能を満足することが確認された。なお、まくらぎ側面の突起に損傷は見られなかった。実軌道では2方向が同時に作用する状況もあるが、合力として作用した場合については今後検討したい。

4. まとめ

本研究では、施工性の向上と構造のスリム化による低コスト化を図るため、短繊維補強コンクリート製のコンクリート道床を有し、まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する弾直軌道の構造に関して基礎的な検討を行った。本研究の条件で得られた知見を以下に示す。

- (1) まくらぎ側面の突起の荷重伝達部の角度を 8° ～ 45° とした2次元FEM解析の結果、角度によらずコンクリート道床のひび割れ発生荷重は概ね同等であったが、終局時の最大荷重は角度が大きいほど大きくなる傾向となった。いずれの角度においてもまくらぎ側面の突起は破壊しなかった。
- (2) まくらぎ側面の突起の荷重伝達部の角度を 18° または 45° とした供試体に対する載荷試験の結果、角度が大きい 45° のケースで最大荷重が大きくなった。

いずれのケースもコンクリート道床にひび割れが発生・進展し破壊に至ったが、まくらぎ側面の突起に損傷は見られなかった。 45° のケースは、現行の横圧に対する設計時の作用に対しても耐荷性能を満足した。

- (3) まくらぎ側面の突起の荷重伝達部の角度を 45° とした実物大軌道供試体に対する載荷試験の結果、現行の横圧に対する設計時の作用に対しても性能を満足した。またロングレール縦荷重を想定した載荷試験においても、現行の設計時の作用を満足した。まくらぎ側面の突起に損傷は見られず、まくらぎ側面の突起で横圧に抵抗する構造が、現行の設計時の作用に対しても性能を満足することを確認した。

なお本研究は、公益財団法人鉄道総合技術研究所と横浜国立大学が共同研究の一環として実施した。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，丸善，2012.1
- 2) 長沼光，高橋貴蔵，藪中嘉彦，桃谷尚嗣：弾性まくらぎ直結軌道のまくらぎ端部横荷重の測定，鉄道技術連合シンポジウム，S2-3-1，2014.12
- 3) 堀池高広ほか：着脱式弾性まくらぎ直結軌道（D型弾直軌道）の開発，鉄道総研報告，Vol.12，No.6，p. 25-30，1998.6
- 4) 高橋貴蔵，村本勝己：短繊維補強コンクリートを用いたまくらぎ直結軌道の試験施工，日本鉄道施設協会誌，線路部門，pp.26-29，2013.7
- 5) CERVENKA CONSULTING：User's Manual for ATE NA 2D，http://www.cervenka.cz/assets/files/aten-pdf/ATE-Engineering-2D_Tutorial.pdf，Prague，2015.6
- 6) 公益社団法人土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，丸善，2013.3
- 7) 一般財団法人日本規格協会：日本工業規格ポステンション式PCまくらぎ，JIS E 1202，1997
- 8) 川又篤，高橋貴蔵，堀越哲郎，松岡茂：繊維補強セメント系複合材料の基礎性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.389-394，2006.7
- 9) 公益社団法人日本コンクリート工学会：切欠きはりを有した繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法，JCI-S-002-2003，JCI 規準 CD-ROM，2004.4
- 10) 公益社団法人日本コンクリート工学会：附属書（参考）コンクリートの引張軟化曲線の推定方法，JCI-S-001-2003，JCI 規準 CD-ROM，2004.4