

本コーナーでは、PC構造物やその技術に関して会員の知見をより広げるために、社会インフラとして幅広く利用されているさまざまなPC技術を紹介します。

PCまくらぎ

渡辺 勉*¹・箕浦 慎太郎*²

1. はじめに

まくらぎとは、図-1に示すように、レールを支持し、左右2本のレールの間隔（以下、軌間という）を保持するとともに、レールから伝達される列車荷重をバラストなどに分散させる機能をもつ軌道部材です。まくらぎの種類には、本稿で紹介するプレストレストコンクリートまくらぎ（以下、PCまくらぎという）のほかに、鉄筋コンクリートまくらぎ（以下、RCまくらぎ）、木まくらぎ、鉄まくらぎ、合成まくらぎなどがあります。

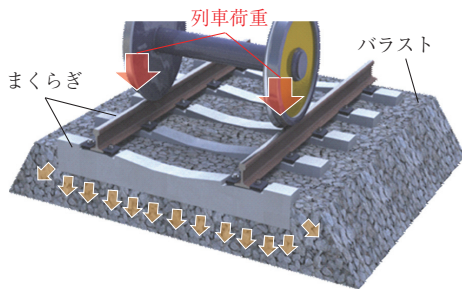


図-1 PCまくらぎの荷重分散機能

PCまくらぎは、日本においては1951年に試験敷設されて以降、現在までの累計敷設本数は、国鉄、JRだけでも3500万本を超えています。PCまくらぎは、木まくらぎに比べて曲げ耐力や耐久性に優れ、重量があり、道床横抵抗力（バラストなどの道床がまくらぎ長手方向への移動に抵抗する力）も大きいのでロングレールの敷設に適しているとともに、鉄まくらぎに比べて、電気絶縁性が高いなどの利点もっています。そのため、列車通過トン数の多い区間や高速走行区間では、PCまくらぎが広く用いられています。また、上記の利点から、木まくらぎからPCまくらぎへの置き換えも継続的に進められており、PCまくらぎは輸送の高速化や快適化に欠かすことのできない近代軌道の重要な構成要素の1つといえます。

本稿では、PCまくらぎの構造、歴史、設計および日本における規格について、それぞれの概要を紹介합니다。

2. PCまくらぎの構造

列車荷重がレールに載荷されると、図-2に示すよう

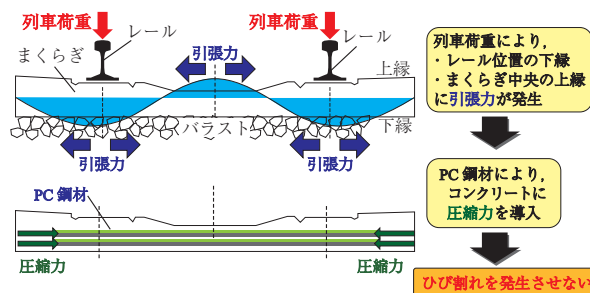


図-2 PCまくらぎの応力状態

に、PCまくらぎには曲げモーメントが作用し、レール位置断面の下縁およびまくらぎ中央断面の上縁に引張力が発生します。コンクリートは、圧縮力には強いですが、引張力には弱い材料で、引張強度は圧縮強度の1/10程度です。コンクリートに発生する引張力が引張強度を超えると、コンクリートにひび割れが発生したり、まくらぎ自体が折損する危険性が生じるなど、まくらぎの本来の機能を十分に果たせなくなる可能性があります。このためPCまくらぎでは、このコンクリートの弱点を補うために、PC鋼より線やPC鋼棒などのPC鋼材を用いてあらかじめコンクリートに圧縮力を与えておきます。これにより、列車荷重が作用しても、まくらぎに引張力が発生しにくくすることができます。

図-3にPCまくらぎの構造概要を示します。プレテンション式PCまくらぎにおいては、一般にPC鋼より線が使用されます。この鋼より線には、鋼線の表面に一定間隔のくぼみをつけたを付けたインデント加工が施されており、PC鋼より線とコンクリートの付着性の向上が図られています。製造方法は、日本ではロングライン方式が採用されています。一方、ポストテンション式PCまくらぎに

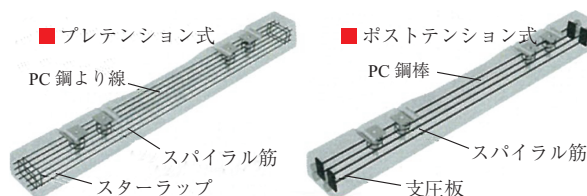


図-3 PCまくらぎの構造概要

*¹ Tsutomu WATANABE：(公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学

*² Shintaro MINOURA：(公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学

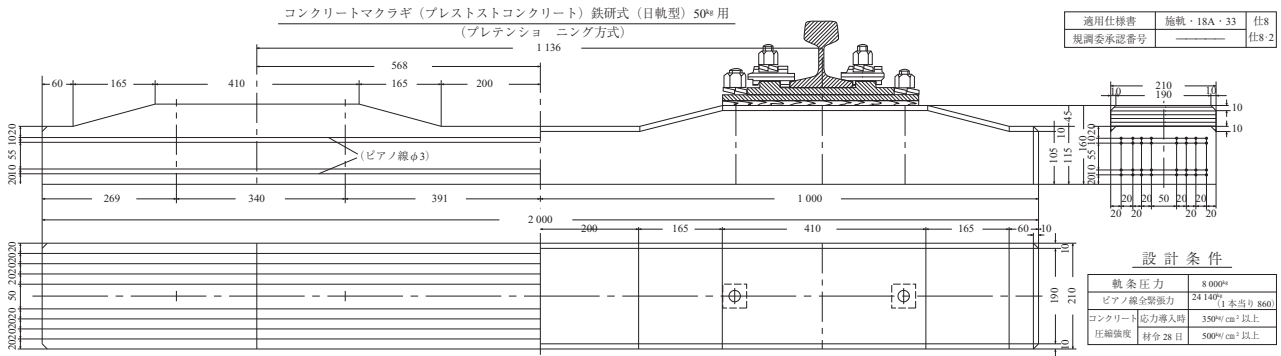


図 - 4 1951年に日本で初めて試験敷設された鉄研式PCまくらぎ²⁾

においては、開発当初はボンド工法が使われていましたが、セメントグラウト注入に対する品質管理の問題、工期短縮などの観点から、現在ではアンボンド工法となっています。アンボンド工法は日本独自の工法であり、ドイツなどでは、PC鋼棒緊張後にセメントグラウトを注入するボンド工法が採用されています。製造方法は、東海道新幹線建設当時は、非常に硬練りのコンクリートを用いて打込み直後に脱型する即時脱型方式が採用されていましたが、現在では打込み後、プレストレス導入に必要な強度に達した後に脱型する硬化後脱型方式が一般的です。

3. PCまくらぎの歴史

3.1 在来線用PCまくらぎの開発

世界で初めてPCまくらぎの開発に成功したのは、1942年のイギリスでした。日本のPCまくらぎの歴史は、在来線用のPCまくらぎの開発から始まります。

図 - 4に1951年に日本で初めて試験敷設された鉄研式PCまくらぎを示します²⁾。これは、現在の鉄道総合技術研究所の前身である鉄道技術研究所により開発されたPCまくらぎであり、東海道本線(大森-蒲田間)に試験敷設されました。開発当時は、海外においてもPCまくらぎの実施例が少なかったこと、敷設後の経過年数が短かったこと、そもそも日本の狭軌(軌間1067mm、海外で一般的な標準軌の軌間は1435mm)用のPCまくらぎの敷設例がなかったことなどから、狭軌用のPCまくらぎに関する十分な技術資料は存在しませんでした。

しかしながら、PCまくらぎは、木まくらぎの代替品としての役割だけではなく、ロングレール化などの軌道の近代化に必要な不可欠な軌道部材と位置づけられ、1951年から試作および試験敷設とその結果に基づく改良が積み重ねられました。現在でも広く用いられている直線用の3号PCまくらぎの原型である国鉄2号型のPCまくらぎが開発された1957年までの間、28種類、累計66万本を超えるPCまくらぎが試作、試験敷設されました。

国鉄2号型のPCまくらぎは、直径2.9mmの2本よりPC鋼線が16本配置されたプレテンション式PCまくらぎです。ここで使用されたPC鋼より線には、前述のインデント加工されたものではなく、鋼線表面を強制的に錆びさせ、鋼線表面を粗くすることにより、コンクリートとの付

着性を向上させるものでした。この錆付け作業の品質管理が困難であったことから、1968年頃からインデント加工された3本よりPC鋼線が用いられています。

3.2 新幹線用PCまくらぎの開発

前述のような在来線用PCまくらぎに対する研究開発の歴史を受け継ぎ、新幹線用PCまくらぎの開発が1958年から開始されました。開発にあたっては、①海外のPCまくらぎに関する技術調査、②PCまくらぎの設計法の確立、③PCまくらぎ量産体制の確立、④試作PCまくらぎの試験敷設などが並行して進められました。

1961年7月に鴨宮モデル線用のPCまくらぎの設計仕様が決定、同年12月にPCまくらぎの生産開始、1962年3月にPCまくらぎ敷設開始、同年10月に200km/h高速走行試験が開始されました。本試験に用いられたプレテンション式PCまくらぎ3T(直径2.9mmの3本より線16本)およびポストテンション式PCまくらぎ4T(直径11mmの鋼棒4本)は1962年9月に日本国有鉄道規格(以下、JRSという)に登録されました。東海道新幹線の開業は1964年10月ですので、在来線用に比べて、開発が急ピッチに進められたことがわかります。

PCまくらぎの製造本数は、東海道新幹線開業を翌年に控えた1963年にピークとなり、新幹線用が110万本、在来線用が65万本と合計175万本ものPCまくらぎが1年間に製造されました³⁾。この時期に、PCまくらぎメーカーの設備の増強や品質管理体制の強化が実施されるとともに、PCまくらぎ製造の機械化、自動化などが進められるなど、PCまくらぎ生産工場の近代化が押し進められました。

以上の経緯を経て、日本国内においてPCまくらぎの基本技術が確立しました。1970年頃からは、それまで主要幹線区間への適用に限定されていた在来線用PCまくらぎを、曲線区間、閑散線区および寒冷地区間などへ適用区間を拡大するために、新たなPCまくらぎの開発が行われました。また、新幹線用についても、列車のさらなる高速化に対応した3Hおよび4Hまくらぎの開発が行われました。

東海道新幹線の建設以降、1970年代中ごろまでは在来線の軌道強化(重軌条化、ロングレール化、PCまくらぎ化など)が集中的に進められました。その影響でPCまくらぎの製造本数は、国鉄だけで1967年に155万本、1973

年に129万本となっていました。1980年代以降は年間50万本前後で推移しています³⁾。近年でもほぼ同様の製造本数で推移していますが、軌道強化に伴う木まくらぎからPCまくらぎへの交換だけではなく、経年PCまくらぎの交換比率も増加しつつあります。

4. PCまくらぎの設計

4.1 基本的な考え方

PCまくらぎの設計においては、列車通過時にPCまくらぎに発生する曲げモーメントや応力度が、ひび割れや破壊などに対する限界値を超えないことが基本となります。具体的には、① 通常の使用状態では、ひび割れを発生させない、② 著大な輪重が作用した場合には、ひび割れは許容するが破壊には至らない、ということです。設計照査においては、図-5に示すように、設計応答値と設計限界値に基づき実施され、発生曲げモーメントの分布形状から、レール位置断面とまくらぎ中央断面を対象として照査されます。現在、PCまくらぎの設計法には、許容応力度法⁴⁾と限界状態設計法⁵⁾などがありますが、PCまくらぎの設計は、許容応力度法により開始されました。具体的には、動的輪重（静的な輪重の2倍程度）と車輪横圧の組み合わせに対して、道床反力状態（荷重作用時にバラストなどの道床からまくらぎが受ける反力）を仮定して断面力を算定し、引張縁のコンクリートが許容応力度以内（0または2 N/mm²）に収まることを確認する手法です。

1990年には、日本工業規格 JIS E 1201「プレテンション式PCまくらぎ」、JIS E 1202「ポストテンション式PCまくらぎ」が定められました（以下 JIS という）。JIS では、許容応力度法の設計手法をベースとして、17種類のPCまくらぎに対して曲げ保証荷重（曲げひび割れ）と曲げ破壊荷重などが規定されています。

1993年には、「在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説」（以下、速度向上マニュアルという）⁶⁾が制定され、営業線において計測される輪重の限界値、すなわち入線可能輪重が提案されました。ここでは工場製品であるPCまくらぎの実態を考慮して、引張縁の許容応力度を3 N/mm²に緩和して入線可能輪重が算定されています。この速度向上マニュアルは、新形式車両の入線、軌道保守などに活用されています。しかしながら、これらの値は2種類のまくらぎのみを対象とした限定的な検討であったため、適用範囲の拡大に関する検討が実施されました⁷⁾。これにより、JISに規定される17種類のPCまくらぎに対して、入線検討が行えるようになりました。

2012年には、「鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造（以下、軌道標準という）」¹⁾が発刊され、軌道構造に関する設計において性能照査型の設計法が導入されました。PCまくらぎの設計法についても、軌道を構成する各部材の形状や材料特性に応じた応答値を算定し、想定する各限界状態に至らないことを照査する方法が導入されました。具体的には、従来の引張縁引張応力度の照査に加え、著大な衝撃輪重（静的な輪重の4倍程度）に対して破壊耐力を担保することが新たに規定されました⁵⁾。また、軌道標準は、適合みなし仕様を別途定めており、敷設や設計条件に応じたPCまくらぎを選定することで照査を省力することができるような体系になっています。なお、適合みなし仕様のPCまくらぎが前述のJISに規定されるPCまくらぎに相当します。

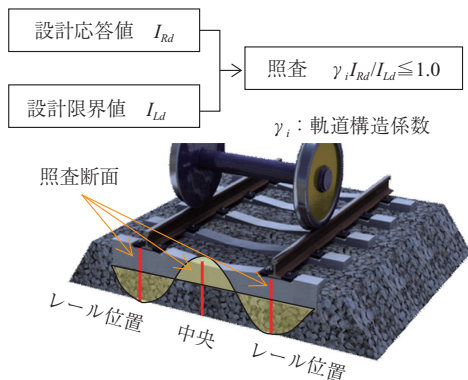


図-5 設計における照査の基本

4.2 設計応答値の算定方法と設計限界値の例

図-6に軌道標準に基づくPCまくらぎの設計応答値の算定方法を、図-7に動的・衝撃応答の概念図を示します。PCまくらぎの設計応答値の算定においては、軌道変位、車輪踏面凹凸およびレール頭頂面凹凸、バラストの支持状態などに起因する動的・衝撃作用の影響を適切に考慮することが重要であり、車両と軌道の動的相互作用解析による方法や輪重変動係数を用いた静的解析による方法などがあります。輪重変動係数の一例としては、ひび割れの照査においては輪重変動係数を2.0、曲げ破壊の照査については4.0などを用いることがあります。また、バラストの

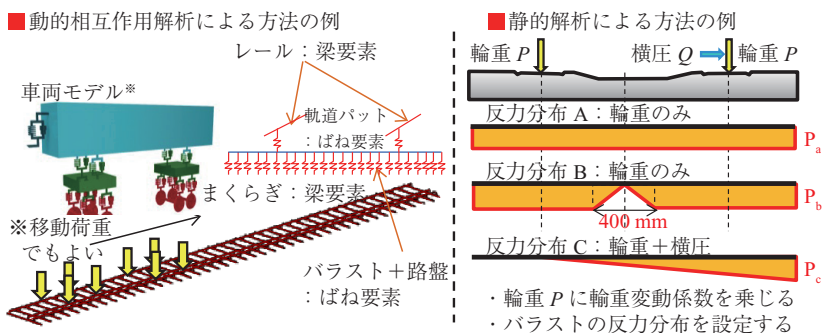


図-6 PCまくらぎの設計応答値の算定方法

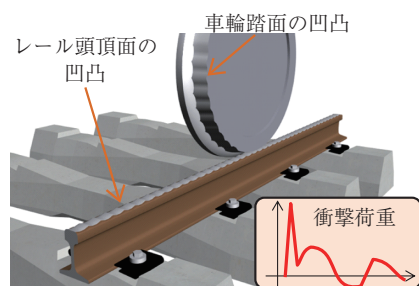


図-7 動的・衝撃応答の概要

支持状態もまくらぎの応答には大きく影響するため、3通り程度（一様支持（反力分布A）、中すかし（反力分布B）、横圧作用時（反力分布C））の支持状態を仮定してそれぞれに対して応答値を算定するのが一般的です。

PCまくらぎの設計限界値は、使用限界状態においては、まくらぎの断面に引張応力を許容しないフルプレストレスとするか、ある程度許容するパーシャルプレストレス（引張縁の応力度を2 N/mm²や3 N/mm²とする場合が多い）とするかによって限界値が異なります。また、終局限界状態においては、PC鋼材の降伏、コンクリートの圧壊などが限界値となります。

5. 日本における現在のPCまくらぎの規格

表-1に、JIS E 1201, 1202に規定されるPCまくらぎを示します。国鉄が制定したJRSは国鉄分割民営化に伴い廃止されたため、PCまくらぎに関するJRSは、前述の通り1990年に制定されたJIS E 1201および1202に引き継がれました。JISに規定されるPCまくらぎは在来線用で13種類、新幹線用で4種類です。なお、日本国内で使用されているPCまくらぎは、JIS以外のものを含めると、数百種類にのぼるといわれています。

表-1 JIS E 1201, 1202に規定されるPCまくらぎ

種類	記号	幅(mm)	端部高さ(mm)	敷設区間	鋼材種別、本数(φは直径)
3号	3PR	240	174	直線 曲線 (R800以上)	φ 2.9 mm 3本より線 12本
	3PO				φ 10 mm 鋼棒 4本
6号***	6PR	240	200	曲線 (R240 ~ R800)	φ 2.9 mm 3本より線 12本
	6PO				φ 10 mm 鋼棒 4本
7号***	7PR	220	189	中下級線	φ 2.9 mm 3本より線 8本
	7PO				φ 8.35 mm 鋼棒 4本
ケーブル 防護用	CPR	300	225	ケーブル横断防護	φ 2.9 mm 3本より線 14本
	CPO				φ 11 mm 鋼棒 4本
特殊 区間用	SPR	300	225	曲線 (R200 ~ R240)	φ 2.9 mm 3本より線 16本
	SPO				φ 11 mm 鋼棒 4本
継目用	JPR	300	225	継目部	φ 2.9 mm 3本より線 16本
	JPO				φ 11 mm 鋼棒 4本
凍上 区間用	1F	220	204	凍上区間の直線 曲線 (R600以上)	φ 11 mm 鋼棒 4本
3T	3T	300	219	新幹線	φ 2.9 mm 3本より線 16本
3H	3H	300	218		φ 2.9 mm 3本より線 20本
4T	4T	300	255		φ 11 mm 鋼棒 4本
4H	4H	330	255		φ 13 mm 鋼棒 4本

*長さは在来線は全て2000mm、3T、3H、4Hは2400mm、4Tは2350mm
 **○PR、3T、3Hはプレテンション式、○PO、1F、4T、4Hはポストテンション式
 ***6号と7号のみパーシャルプレストレス、その他はフルプレストレス

JIS E 1201 および 1202 には、コンクリート（圧縮強度 49.1 N/mm²）や鋼材などの使用材料に関する規定だけでなく、図-8に示すように、性能確認試験方法なども規定されており、PCまくらぎ出荷時の製品検査時に試験が実施されています。なお、JISに規定される以外のPCまくらぎについても、一般に本試験方法に準拠した方法が採用されています。

6. おわりに

PCまくらぎの導入から50年以上が経過し、凍害やアル

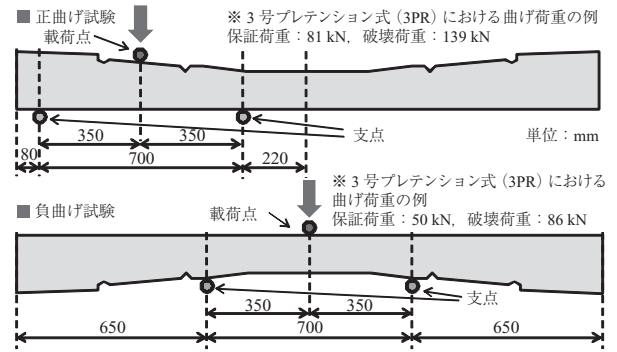


図-8 JIS E 1201, 1202に規定される載荷方法

カリ骨材反応などの材料劣化に起因する損傷以外にも、レール位置断面やまくらぎ中央断面における曲げひび割れや、まくらぎ底面の摩耗などの損傷事例も確認されるようになってきました。これらの損傷は、ただちに列車の安全性を脅かすものではありませんが、今後は経年50年を超えるPCまくらぎの本数はさらに増加していくため、より計画的な維持管理が求められています。

PCまくらぎは、これまで取り換え部材として扱われてきており、損傷や経年に伴う耐力の低下についての定量的な研究は行われていませんでした。今後は、数値解析などを併用し、軌道を構成する各種パラメーターがPCまくらぎの損傷に与える影響検討⁸⁾を行うとともに、経年PCまくらぎの実態調査などを行うことによってデータを蓄積し、PCまくらぎの残存寿命を定量的に評価できるようにしたいと考えています。さらに、PCまくらぎの固有振動数の変化に着目した劣化検知手法や劣化予測手法の検討も進めているところです⁹⁾。

参考文献

- 1) 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、丸善、2012
- 2) 社団法人日本保線協会：日本国有鉄道コンクリートマクラギ設計図集、1957
- 3) 井上寛美、奥田広之：軌道を構成する材料(3) - まくらぎ(その1) -, 日本鉄道施設協会誌, Vol.29, No.11, pp.47-50, 1991
- 4) 宮本俊光、渡辺偕年：線路=軌道の設計・管理-, 山海堂、1980
- 5) 涌井 一、奥田広之：PCまくらぎの限界状態設計法に関する研究、土木学会論文集, No.557/V-34, pp.33-54, 1997
- 6) 鉄道総合技術研究所：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解析、研友社、1993
- 7) 曾我部正道、渡辺 勉、徳永宗正、井上寛美：JIS規格PCまくらぎの入線可能輪重の算定、コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.343-348, 2014
- 8) 箕浦慎太郎、渡辺 勉、鈴木大輔、上半文昭：営業線PCまくらぎの摩耗性状とその耐力力への影響に関する検討、コンクリート工学年次論文集, 2015 (登載決定)
- 9) 松岡弘大、渡辺 勉、徳永宗正、曾我部正道：高次の振動モードに基づくPCまくらぎの損傷検知、土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 70, No.2 (応用力学論文集 Vol.17), I_947-I_957, 2014

[2015年7月15日受付]