

第41回

PCまくらぎ

はじめに

まくらぎとは、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持つ軌道部材¹⁾です（図1）。まくらぎに使用される材料の違いによって、コンクリートまくらぎ、木まくらぎ、鉄まくらぎ、合成まくらぎなどに分類されます。コンクリートまくらぎについては、さらに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）と鉄筋コンクリートまくらぎ（以下、RCまくらぎという）に分類されます。本稿で対象とする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3,500万本を超えており、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となっています。

なお、近年のPCまくらぎの発展に

おいては、弾性レール締結装置の開発が大きく貢献していますが、本稿ではこれには触れないこととします。

PCまくらぎの構造概要

PCまくらぎは、一般にコンクリートと、PC鋼より線やPC鋼棒などのPC鋼材から構成されています。

レールに列車荷重を載荷すると、PCまくらぎに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（図2）。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（プレストレス）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。PCまくらぎの設計では、設計上

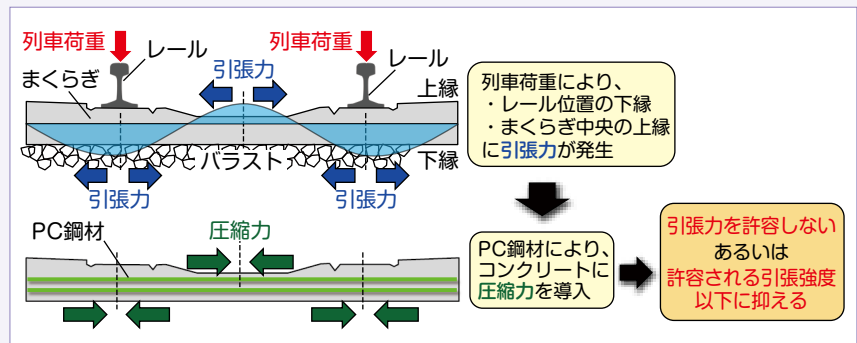


図2 PCまくらぎの特徴

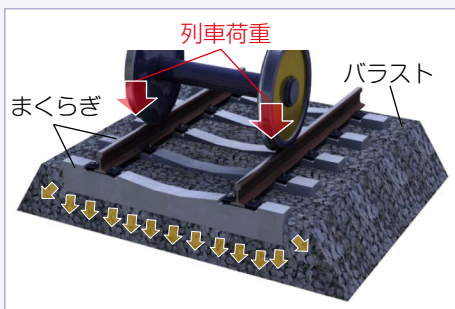


図1 まくらぎの荷重分散機能



図3 PCまくらぎの構造概要

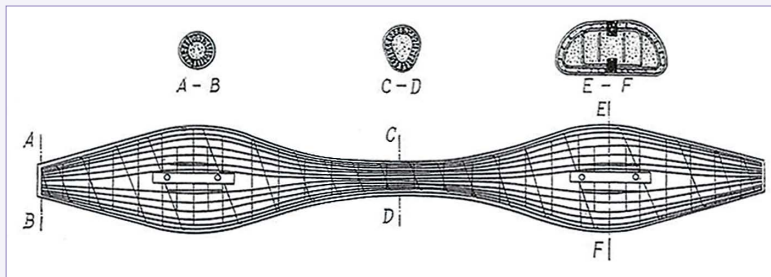


図4 MonierモノブロックRCまくらぎ²⁾

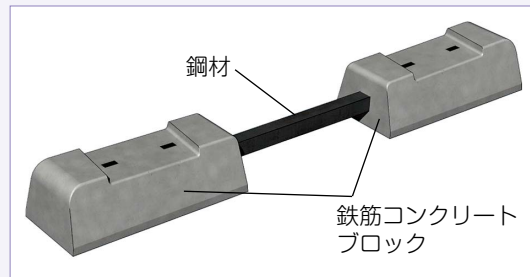


図5 ツーブロックRCまくらぎ

表1 コンクリートまくらぎの主な使用国⁶⁾

まくらぎ形式	発祥国	主な使用国
プレテンション式PCまくらぎ	イギリス	オーストラリア, ベルギー, カナダ, 中国, ハンガリー, インド, ポーランド, スウェーデン, 南アフリカ, アメリカ, イギリス, 日本など
ポストテンション式PCまくらぎ	ドイツ	オーストリア, フィンランド, インド, イタリア, メキシコ, トルコ, ドイツ, 日本など
ツーブロックRCまくらぎ	フランス	ベルギー, ブラジル, デンマーク, フランス, インド, メキシコ, オランダ, ポルトガル, スペインなど

の列車荷重を作用させた場合、まくらぎに発生する引張力が許容される引張強度以下になるように圧縮力が設定されています。日本では後述するJISに規定されるPCまくらぎについては、6号、7号PCまくらぎを除いて、引張力を許容しない条件で設計されています。

PCまくらぎは、PC鋼材の緊張の仕方によって、プレテンション式PCまくらぎとポストテンション式PCまくらぎに分類されます(図3)。ポストテンション式には緊張時の反力を取るための支圧板が配置されています。

海外のPCまくらぎの歴史^{2),3),4),5)}

1884年にフランスの園芸家Monier氏が鉄筋コンクリート(以下、RC)構造としてのまくらぎを考案して特許を取得しました(図4)。これが、モノブロックRCまくらぎの始まりとされています。それ以降、欧州諸国において様々なモノブロックRCまくらぎが試作および敷設されましたが、以下のような理由から実用化には至りませんでした。その理由としては、①モノブロックRCまくらぎは列車荷重によってひび割れが発生し、それに伴い鉄筋

腐食も発生することによって十分な寿命が得られなかったこと、②締結方式が木栓と犬ぎであり、締結力が不十分であったこと、③モノブロックRCまくらぎは経済性で木まくらぎに劣っていたこと、などが挙げられています。

以上のような経験と、第2次世界大戦からの鉄道の復興、木材資源の枯渇などにより、木まくらぎからコンクリートまくらぎへの転換の必要性が強く認識されるようになり、PCまくらぎの実用化に向けた技術開発が各国において盛んに行われました。また、これらに並行してプレストレストコンクリート技術が発達したこともあり、①ひび割れが発生しにくいコンクリートまくらぎを製造できたこと、②プレストレストコンクリートはひび割れが発生したとしても、除荷すればひび割れは再び閉じること、さらに、③レールとまくらぎの間にゴムパッドを挿入した弾性レール締結装置が開発されたことなどがあり、PCまくらぎはモノブロックRCまくらぎが抱えていた技術的課題を克服することができるようになりました。

これらの結果、1942年にイギリスでプレテンション式DOW MAC型PCまくらぎの開発に世界で初めて成功しま

した。このまくらぎには、直径5mmの異形PC鋼線が16本配置されています。現在もこの形式を元に改良が加えられたPCまくらぎが使用されています。また、1943年頃からドイツでもプレテンション式のPCまくらぎが製作されました。このまくらぎには、直径2.5mmの2本よりPC鋼線が28本配置されています。ドイツでは1953年に直径18.6mmのPC鋼棒を2本使用したポストテンション式PCまくらぎが開発されており、以降はポストテンション式が主流となっています。なお、ドイツのポストテンション方式では、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。

一方、RCまくらぎについても、2つのRCブロックとそれらをつなぐ鋼材からなるツーブロックRCまくらぎがフランス国鉄で実用化され、現在でも大量に使用されています(図5)。

このように、世界のコンクリートまくらぎは、イギリスで開発されたプレテンション式PCまくらぎ、ドイツで開発されたポストテンション式PCまくらぎ、フランスで開発されたツーブロックRCまくらぎの3つのタイプに大きく分類することができます(表1)。

日本のPCまくらぎの歴史^{2),3),4),5)}

日本のPCまくらぎの歴史は、在来線のPCまくらぎの開発から始まります。

1951年に鉄道総研の前身である鉄道技術研究所により開発された鉄研式

PCまくらぎ(図6)が東海道本線(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まくらぎの実施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本配置された前述のドイツの方式に近いプレテンション式PCまくらぎです。現在でも広く普及している5形の弾性レール締結装置が開発されると、1961年に国鉄2号型PCまくらぎの形状が若干変更され、国鉄3号PCまくらぎとして日本国有鉄道規格(以下、JRSという)に登録されました。なお、国

鉄2号型PCまくらぎで使用されていた直径2.9mmの2本より線は、鋼線表面を強制的に錆びさせ、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、国鉄3号PCまくらぎでは、1968年頃から、鋼線の表面に一定間隔のくぼみを付けたいわゆるインデント加工が施された3本よりのPC鋼線12本が用いられるようになり、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。

以上のような在来線用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の決定、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高速走行試験が行われました。本試験で用いられたプレテンション式PCまくらぎ3T(直径2.9mmの異形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JRS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。なお、ポストテンション式の4Tは前述のドイツ方式と異なり、PC鋼棒表面にアスファルトなどのアンボンド材を塗布した後にコンクリートを打込むアンボンド工法となっています。

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(図7)。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、自動化が進められるなど、PCまくらぎ生産工場の近代化が推し進められました。

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。

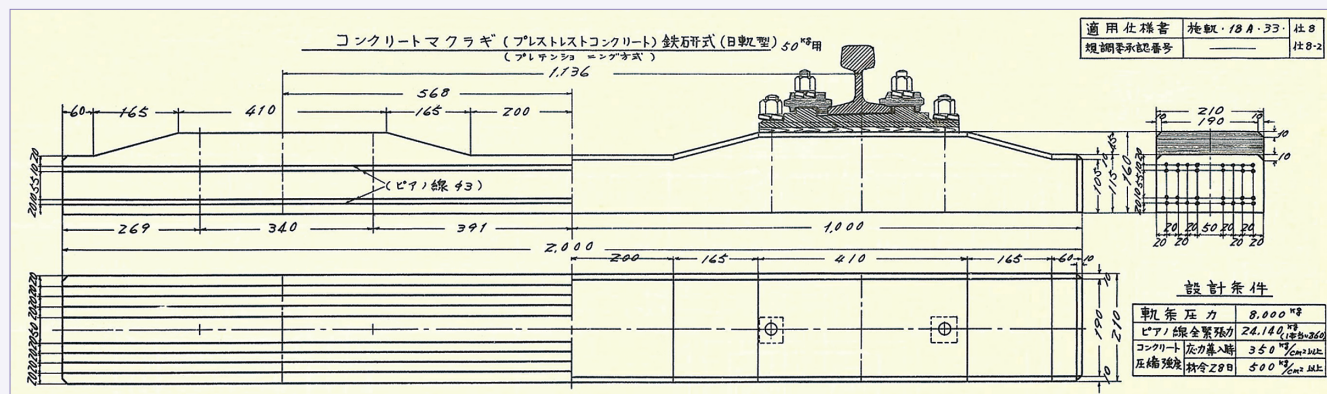


図6 1951年に初めて試験敷設された鉄研式PCまくらぎ⁷⁾

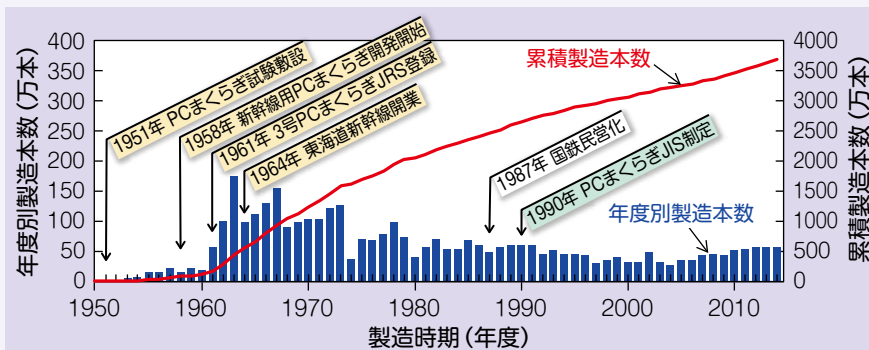


図7 日本のPCまくらぎの年度別製造本数と累積製造本数(民鉄を除く)

表2 JISに規定されるPCまくらぎ¹⁾

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 2.9mm 異形3本より線 12本
	3PO				φ 10mm 鋼棒 4本
6号	6PR	240	200	・曲線 (R240~R800)	φ 2.9mm 異形3本より線 12本
	6PO				φ 10mm 鋼棒 4本
7号	7PR	220	189	・中下級線	φ 2.9mm 異形3本より線 8本
	7PO				φ 8.35mm 鋼棒 4本
ケーブル 防護用	CPR	300	225	・ケーブル横断 防護	φ 2.9mm 異形3本より線 14本
	CPO				φ 11mm 鋼棒 4本
特殊区間用	SPR	300	225	・曲線 (R200~R240)	φ 2.9mm 異形3本より線 16本
	SPO				φ 11mm 鋼棒 4本
継目用	JPR	300	225	・継目部	φ 2.9mm 異形3本より線 16本
	JPO				φ 11mm 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 11mm 鋼棒 4本
3T	3T	300	219	・新幹線	φ 2.9mm 異形3本より線 16本
3H	3H	300	218		φ 2.9mm 異形3本より線 20本
4T	4T	300	255		φ 11mm 鋼棒 4本
4H	4H	330	255		φ 13mm 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

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、1967年に155万本、1973年に129万本となっていますが、1980年代以降は年間50万本前後で推移しています(図7)。近年では、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なく、経年PCまくらぎの交換比率も増加しつつあります。

日本におけるPCまくらぎの規格

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1990年に制定されたJIS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(表2)。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言われています。

今後の展望

PCまくらぎの導入から50年以上が経過し、凍害やアル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ています。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荷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、数値解析によって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。

(渡辺勉/鉄道力学研究部
構造力学研究室)

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) 三浦一郎：プレストレストコンクリートまくら木的设计および製作方法、鉄道技術研究報告、No.307、1962
- 3) 渡辺啓年：第7回UICメーターゲージ会議発表論文から(2)、鉄道線路、No.31、Vol.2、pp.31-37、1983
- 4) 涌井一：PCマクラギ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.35-54、1997.2
- 5) 涌井一：コンクリートマクラギの限界状態設計法に関する研究、東京工業大学、1997、博士論文
- 6) FIP Commission on Prefabrication：FIP State of the Art Report (Concrete Railway Sleepers), Thomas Telford Ltd., 1987
- 7) 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