

第43回

ロングレール

レール継目の問題

ガタン、ゴトンというレール継目を車輪が通過する音と振動は、ローカル線の旅に深い旅情を与えてくれます。しかしながら、レール継目は車輪通過時の衝撃が大きいため騒音や振動の発生源となる上に、軌道部材やバラストへの負担も大きいため軌道保守上の弱点箇所となります。そのため、レールの継目をなくそうという試みは古くから行われてきました。

左右レールの継目位置をずらす相互式継目や、斜め継目、大型まくらぎの採用、継目支持方式や継目板の形状改良など、レール継目部を強化したり、車輪との衝撃を低減させるさまざまな工夫が先人たちの手によって試みられましたが、いずれも根本的な解決には至りませんでした。過去に検討されたレール継目構造の例を図1に示します。

いずれも、大断面の継目板を使用して、継目全体の曲げ剛性を増加させる意図がありますが、実際にはレールを含めた各部材には公差（製作上の寸法の許容差）があり、レールと継目板の間どうしてもわずかな隙間が生じてしまいます。このため、せっかくの大断面が有効とならず、コストの割に効果が少ないため、世界的に次第にとう汰されていきました。

これらの経験から、レール継目問題を根本的に解決するには、継目を溶接して継目のないロングレールにするより勝る方法はないとの結論に至っています。特に、新幹線をはじめとする高速鉄道は、レール継目部の衝撃・振動が甚大となるため、ロングレールなしではとても成立しません。

しかし、ロングレールの実現には、鉄でできたレールの温度変化による伸び縮みに伴う問題を克服しなければな

りません。例えば、夏場などにレール温度が上昇すると、レールは伸びようとしませんが、この伸びを締結装置やまくらぎで拘束しているため、ロングレールの端部付近以外ではレールの内部に圧縮力が発生します。この力をレール軸力と呼んでいます。まくらぎを拘束しているバラスト道床の抵抗（道床横抵抗力）が充分でないと、レール軸力に負けて、レールがまくらぎと図2のように線路直角方向に張り出す、「軌道座屈」という現象が生じてしまいます。この軌道座屈が生じた箇所を万一列車が通過すると、最悪の場合、脱線の危険があります。

一方、冬場などにレールの温度が低下すると、レール全体は縮もうとしてレールに引張力が働きます。レールには、この引張力に耐える十分な強度が必要なのはもちろんですが、何らかの理由でレールが折れた場合、引張力が

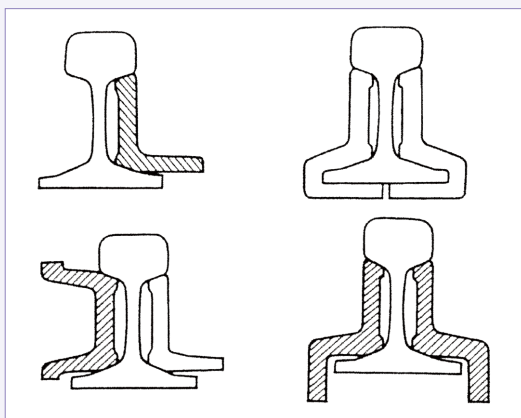


図1 複雑な継目構造の例

出典：佐藤吉彦，新軌道力学，鉄道現業社，P.307，1997



図2 軌道座屈の例（試験軌道による実験結果）

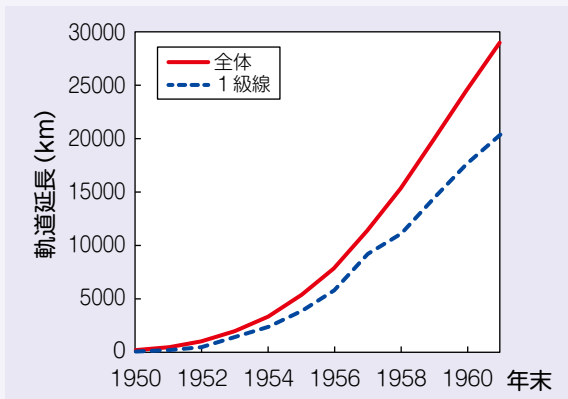


図3 ドイツにおけるロングレール軌道延長²⁾
出典：鉄道線路, Vol.11, No.4, 1963(一部抜粋)

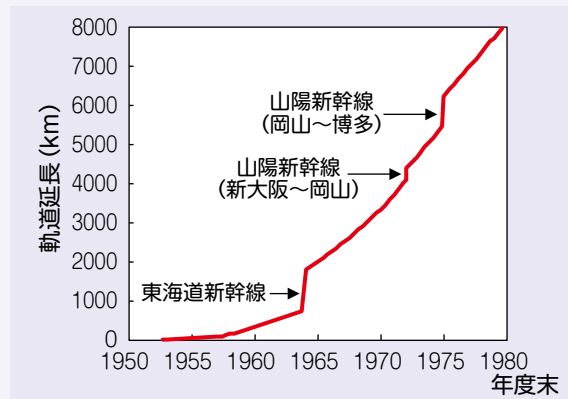


図4 日本におけるロングレール軌道延長
出典：磯浦克敏, ロングレールの話(1), 鉄道線路, Vol.19, No.2, 1971(一部抜粋)

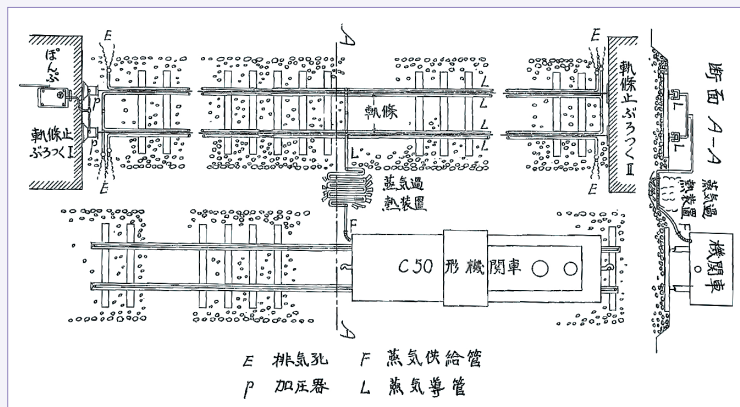


図5 堀越らの軌道座屈実験³⁾

開放されて破断箇所には大きな隙間が開いてしまいます。この隙間を破断時開口量といい、開口量が大きい個所を万一列車が通過すると、やはり安全性に問題があります。したがって、ロングレール軌道の実現にあたっては、軌道座屈を防止するとともに、破断時開口量を一定値以下にする必要があります。

そのため、高品質なレール溶接技術の開発、PCまくらぎや伸縮継目、接着絶縁レールなどの部材の開発、さらに、軌道の座屈に対する安定性を評価する理論の構築など、ロングレール軌道の実現のためにさまざまな技術開発が行われてきました。

ここではロングレールに関するさまざまな技術開発の中で、最大の問題である、軌道座屈防止に対する技術発展について主に紹介します。

ロングレールれい明期

記録されている最も古いロングレールの敷設は1924年のドイツで、320mのレールが試験敷設されています。さらに1933年、アメリカにおいて910mの敷設の記録があります¹⁾。軌道座屈に対する理論については、1929年頃からドイツを始めとするヨーロッパにおいて各種理論式が提案され、試験軌道での実験による検証が行われています¹⁾。

各国による理論研究や試験敷設の後、世界で最も早期にロングレール化が進んだのはドイツでした。図3にれい明期におけるドイツのロングレール軌道延長の推移を示します。1961年末で既に3万kmがロングレール化されていますが、日本では1961年3月で450kmに留まっています(図4)。さらに、ドイツでは、分岐器を含めて一体溶接す

ることが推進され、1961年までに全体の40%の分岐器が溶接されている記録が残っています²⁾。このドイツと日本の圧倒的なロングレールの普及率の違いには、狭軌と標準軌の違いが少なからず関係していると考えられます。ドイツと日本の軌道を比べた場合、レール断面積は同程度ですが、大部分が狭軌線である日本では、標準軌に比べてまくらぎが小さいために道床横抵抗力が小さく、座屈に対して不利な条件であることは否めません。この悪条件の中でロングレールを成立させるために、日本でも戦前からロングレールに関する研究開発が行われてきました。

日本におけるロングレール

日本におけるロングレールの研究は、1930年頃からは行われ、軌道座屈強さの理論式の提案と模型および実物軌道による座屈試験が行われています。ロングレールの座屈理論の基礎となる研究として、1934年、堀越らは大宮駅構内において延長48mの試験軌道を設置し、油圧ジャッキによるレール加圧による座屈試験、および蒸気機関車の蒸気によってレールを加熱する座屈試験を行っています³⁾(図5)。しかし、蒸気によるレール加熱に苦慮した記録が残っており、大半は油圧ジャッキでレール端部を加圧する試験となったよ

うです。加熱ではなくジャッキによる加圧の場合、載荷部付近の道床バラストが乱れたり、加圧時の偏心などによりレール軸力が不均一になってしまうなど、精度に問題がありました。この様に軌道座屈実験の最大の課題は、レールを均一に加熱してレールの軸力を精度よくコントロールする方法であり、現在までに電気ヒーター、ガスバーナーなどによる加熱の他、レールに大電流を流して発熱させる方法が用いられてきました。

同時期、星野により、伸縮理論の提案⁴⁾と、新鶴見操車場構内において約200mのロングレール敷設試験が1939年に行われ、伸縮量に関する知見を得ており、ロングレールの実現可能性が示されています⁵⁾。この試験敷設が日本で初めて明かり区間（屋外）に敷設されたロングレールとされています¹⁾。なお、レール温度変化が少ないトンネル区間では、これより先行して1937年に仙山線仙山ずい道において4.2kmのロングレールが敷設されています¹⁾。さらに、大学や鉄道技術研究所にて軌道座屈に関する研究が進められたものの、第二次世界大戦のため中断されてしまいました。

戦後、本格的にロングレールが普及し始めたのは、ロングレール端部のレールの伸び縮みを逃がす伸縮継目が実用化され、軌道座屈の特性が明らかになってきた1957年以降でした。

1957年、沼田によってエネルギー法による軌道座屈理論式⁶⁾が提案され、模型実験と実物実験によって妥当性が確認されています。模型実験は1/10スケールの軌道7.5mを用い、レールに大電流を流して発熱させて座屈させるものでした（図6）。1/10スケールの模型実験では模型の製作精度も1/10としなければならず、実物大ですらミリ単位で管理される軌道の変位を再現するのは困難が伴います。そこで、多数の実験を行い統計分析することで誤差をカバーする方策がとられました。試験回数は直線240回、曲線160回、総計400回におよび、統計的に軌道座屈強さが得られた貴重な実験でした。さらに、同年吹田操車場にて実物の曲線軌道による座屈実験が行われました⁷⁾。実験は曲線半径600m、延長320mの軌道で行われ、ロングレール両端には、レールふく進（図参照）防止のためD52型蒸気機関車3両、ふ

く進防止くい（松丸太）240本を配置した記録があります（図7）。レールの加熱は腹部に添わせた機関車用小煙管にD52型蒸気機関車の暖房用蒸気を通して行われました。配置図と写真を見ただけでも実験の大変さが分かり、ロングレールの実用化に向けた諸先輩方の苦心と努力は相当のものであったと思います。これらの大規模な試験結果に裏付けされた理論式により、曲線半径毎の座屈強さを見積もることが可能となったため、日本におけるロングレール延長が増加していきました。

そして、1964年4月、東海道新幹線のロングレール構造を検証するべく、鴨宮モデル線の新幹線実物軌道において軌道座屈実験⁸⁾が行われ、新幹線軌道における安全性が検証されています。その結果、東海道新幹線の開業時には、軌道延長1030kmのうち973.5kmがロングレール化されました。この事実上の全線ロングレール化の達成の裏には、前述した、1930年代から始められた理論や実験および試験敷設によるデータ蓄積など、約30年に渡る技術開発があったわけです。

その後、1970年に沼田が自らの理論を拡張した理論¹⁾を発表し、佐藤らがこの理論を使用してケーススタディーを実施し、座屈状態が存在しないレール軸力である最低座屈強さを簡単に計算可能な略算式⁹⁾を提案しました。この略算式は、保線の教科書に掲載され、ロングレール化工事や軌道保守の現場で広く使用されてきました。

現在のロングレール理論

前項の沼田の理論は、これ以下のレール軸力では座屈状態が存在しない

レールふく進

レールが長手方向に移動すること。



図6 模型軌道座屈試験⁶⁾
出典：鉄道線路, Vol.5, No.12, 1957

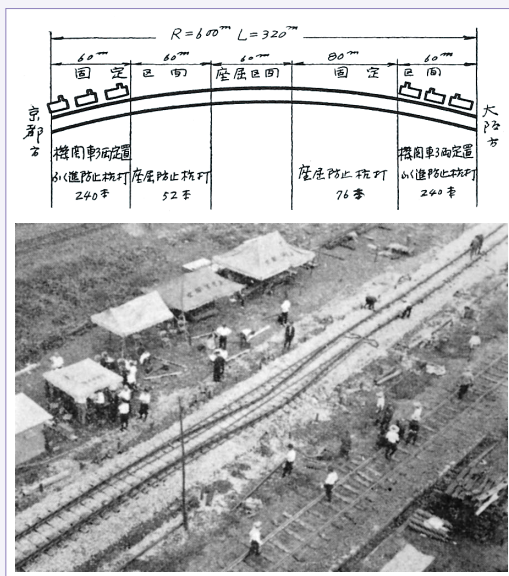


図7 吹田操車場における実物座屈実験⁷⁾

最低座屈強さを求めるものです。しかし、最低座屈強さは実際に座屈する荷重とは異なり、あくまで安全側の限界値という位置づけとなります。そこで、座屈発生荷重と座屈変位を精度良く推定するために、1984年に宮井によって新理論とその数値解析が行われました¹⁰⁾。この理論は、基本原理こそ沼田と同じエネルギー法を用いていますが、軌道の通り変位や道床横抵抗力、レールとまくらぎで構成される軌きょうの曲げ剛性などをより現実に近い形で組み込んでおり、温度上昇に伴うレール横変位の増加から、座屈に至るまでの過程を推測することが可能となりました。この技術的進歩の背景には、計算機の性能が向上し、解析的に解くことが難しい数式の解を、数値的に求めることが可能となったことが挙げられます。この研究によって、最低座屈強さから座屈発生荷重までの余裕度や、軌道条件が座屈発生荷重に与える影響が明らかとなりました。また、同理論によるケーススタディーにより、簡単に最低座屈強さが計算できる新略算式¹¹⁾が提案され、現在の設計に用いられています。

敷設範囲の拡大

ロングレール区間にバラスト道床のない橋りょう（無道床橋りょう）が介在する場合、温度変化による桁の伸び縮みに伴って桁からレールにレール長手方向の力が作用し、レールの軸力に影響します。また、その反力は橋りょうに作用します。このため、無道床橋りょう区間のロングレール化にあたっては、レールと桁の両方の伸び縮みを考慮した検討を行う必要があります。

東海道新幹線開業時の設計では、支承配置を工夫することで付加軸力の増加を抑える理論が採用されました。さらに、1970年代から計算機によるレール

軸力の数値計算手法が開発され、さまざまな桁長・支承条件でのロングレール設計が可能となりました。

分岐器が介在するロングレール化を行う場合、2本の線路が1本に合流する個所付近に付加軸力が発生します。この付加軸力については、1980年代後半に実物分岐器を用いた加熱試験が行われ、分布が明らかとなりました（図8）。この結果を基に、分岐器が介在するロングレールのレール軸力分布を数値計算する手法が開発・検証され、必要な道床横抵抗力を見積もることが可能となり、設計手法が確立されて普及が進んでいます。

一方、温度変化による軌道の横方向への変位の影響が大きいと考えられる急曲線においては、安全を考慮してロングレールの適用が制限されてきました。しかし、十分な道床横抵抗力を確保することで緩曲線と同等の安全率を確保する考え方が提案され¹²⁾、半径600m以下の急曲線へもロングレールの適用が可能となりました。

1990年代以降、有限要素法を始めとする数値計算手法がポピュラーになり、軌道座屈安定性やレール軸力分布の解析においても同手法が使用され始めました。この結果、各種軌道諸元の非線形特性や下部構造との相互作用、列車荷重を考慮したより詳細な評価が可能となりました。

おわりに

欧米に比べて急曲線が多い上に、狭軌が基本でまくらぎが小さいなど、ロングレールに不利な条件を乗り越え、技術開発を進めてきた経緯を紹介しました。

ロングレールは、軌道の保守コスト削減や振動・騒音に対する、一つの究極的な対策法といえます。鉄道総研では、さ

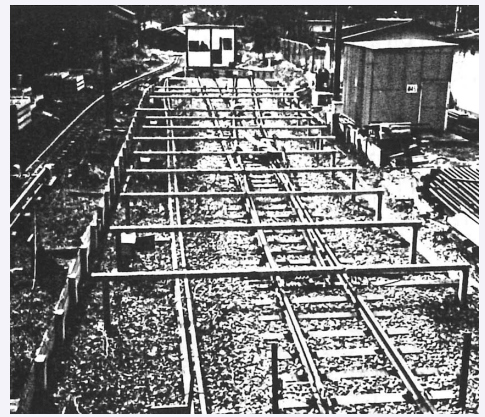


図8 実物分岐器の加熱試験

出典：高谷博文他、分岐器の温度軸力圧力載荷試験、鉄道技術研究所速報、A87-214、1987

らなるロングレールの適用範囲の拡大に向けて技術開発を進めていきます。

（西宮裕騎／軌道技術研究部
軌道構造研究室）

文献

- 1) 沼田実：ロング・レールの座屈強さ，鉄道技術研究報告，日本国有鉄道，No.721，施設編第313号，1970
- 2) 佐藤吉彦：ロングレール軌道に関するドイツ連邦鉄道の12年間の経験，鉄道線路，Vol.11，No.4，pp.5-10，1963
- 3) 堀越一三：軌條ノ挫屈ニ就テ，業務研究資料，鐵道大臣官房研究所，Vol.22，No.18，1934
- 4) 星野陽一：無接目軌條使用の可能性，業務研究資料，鐵道大臣官房研究所，Vol.26，No.4，1938
- 5) 星野陽一：長大レールの温度伸縮，鐵道業務研究資料，鐵道技術研究所，Vol.8，No.2，1951
- 6) 沼田実：軌道の座屈強さについて，鐵道線路，Vol.5，No.12，pp.3-7，1957
- 7) 立花文勝，田中正彦，鈴木秀昭，沼田実：曲線軌道座屈実験，鐵道技術研究資料，Vol.14，No.7，pp.4-19，1957
- 8) 松原健太郎：新幹線の軌道，日本鐵道施設協会，pp.111-112，1964
- 9) 佐藤吉彦：各種レールを用いた軌道の座屈強さと座屈強さ略算式，鐵道線路，Vol.19，No.10，pp.51-54，1971
- 10) 宮井徹：エネルギー法による軌道座屈の数値解析，鐵道技術研究報告，No.1271，施設編第554号，1984
- 11) 柳川秀明，三浦重：軌道の座屈安定性に関する理論とその適用，日本鐵道施設協会誌，Vol.35，No.4，pp.266-269，1997
- 12) 三浦重，柳川秀明：急曲線へのロングレールの適用，鐵道総研報告，Vol.6，No.1，pp.25-32，1992