

急曲線部における線ばね形レール締結装置の適用区分の提案

弟子丸 将* 本野 貴志* 片岡 宏夫* 若月 修**

Laying Standards of Wire Spring Clip Fastening System in the Curved Section

Tadashi DESHIMARU Takashi MOTONO Hiroo KATAOKA Osamu WAKATSUKI

Breakages of wire spring clips applied to operating lines have been reported in recent years in Japan, and it has become clear by observation of fracture face of clips that breakage in front-arch part of clip is fatigue fracture caused by an increase of lateral force from vehicle wheel in the curved section. In this study, the authors proposed the laying standards of wire spring clip fastening system in the curved section based on the results of several laboratory tests for evaluation of specification of rail fastening system and the field test in operating lines where one type of spring clip was applied on trial.

キーワード：線ばね形レール締結装置，線ばねクリップ，損傷，平均応力，変動応力，適用区分

1. はじめに

現在、軌道保守の省力化の観点から、国内の多くの鉄道事業者において各種の線ばね形レール締結装置（図1に例を示す）が使用されている。しかし近年、線ばね形レール締結装置に使用される線ばねクリップ（以下、「クリップ」という）の折損事例が報告されている。このうち、クリップのフロントアーチ部で発生した折損については、主に曲線部における車輪横圧（以下、「横圧」という）の作用による疲労破壊であることが明らかとなっている。また、クリップのリアアーチ部での損傷については、主に腐食環境下に敷設され、かつ継続して高応力状態であることに起因する応力腐食割れ（急進破壊）が原因であることが明らかとなっている¹⁾。前者のクリップのフロントアーチ部で生じる疲労破壊については、折損



図1 線ばねクリップの例（SST形）

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室
 ** 軌道技術研究部 軌道構造研究室(現 日本軌道工業株式会社)

抑制の観点からレール締結装置の適正な適用区分を明らかにすることが必要である。

一方、近年鉄道事業者では、まくらぎ配置間隔の拡大のニーズが高まっている。しかし、まくらぎ配置間隔が拡大するとレール横圧力が増加し、疲労に対して不利となる。そこで、線ばね形レール締結装置の適用区分を検討するために実施した各種の検討結果およびこれらに基づき提案した適用区分について報告する。

2. 曲線部における線ばねクリップ折損のメカニズム

図2にクリップに発生する応力の概念を示す。なお、これ以降単に「応力」と示した場合は、フロントアーチ部で生じた応力のことを指すこととする。一般に、クリップにはショルダーへの締結により締結時応力が生じる。また、列車が走行すると応力が変化するが、その応力の最大値と最小値の差を変動応力、締結前の発生応力と変

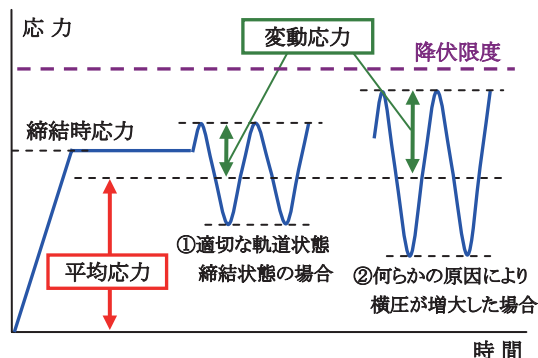


図2 クリップ発生応力の概念

特集：軌道技術

動応力の平均値との差を平均応力と称す。

クリップの変動応力は、列車走行時にレールに作用する横圧が大きくなるとレールの小返りと共に増加する傾向がある。

図3に一般にレール締結装置の締結ばねの応力照査に用いるばね鋼の耐久限度線図^{2), 3)}を示す。ここで、

第1破壊限度：ばね鋼材の耐久限度線

第2破壊限度：ばね鋼材の 10^5 回の繰返し疲れ限度線

第1へたり限度：ばね鋼材の繰返し荷重による疲れへたり限度線（弾性限度）

第2へたり限度：ばね鋼材の少数繰返し荷重による疲れへたり限度線（降伏限度）

である。なお、第1および第2破壊限度は同じ材質でもショットピーニング等の表面処理に伴い異なる数値となる。

レール締結装置の安全性の性能項目である疲労破壊については、締結ばねに生じる発生応力より得られる変動応力および平均応力を耐久限度線図に適用して疲労強度を照査する。変動応力は曲線半径が小さく、作用する横圧が大きい状況で顕著に増加し、第2破壊限度を超過する可能性がある。

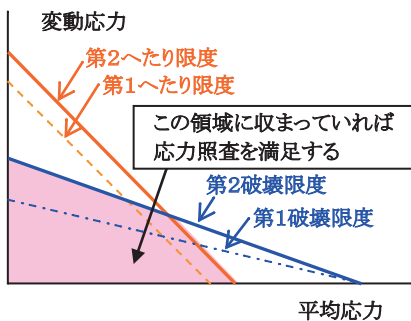


図3 ばね鋼の耐久限度線図による締結ばねの応力照査のイメージ

また、同じ曲線半径であってもレールの締結間隔が拡大するほどレール締結装置一組に作用する荷重の横圧成分であるレール横圧力が増加し、レールの小返り量が増大するのでクリップに発生する変動応力も増加する傾向にあるが、レール締結間隔の拡大は軌道の建設費の低減に直結することから、疲労強度を満足する最大のレール締結間隔を明らかにすることは重要である。一方で、クリップの平均応力はクリップ締結時のレール押さえ力や締結時応力と一定の相関があり、バラスト軌道におけるレール締結装置のふく進抵抗力がまくらぎの道床縦抵抗力を十分に上回るように設計され、その値を満足する範囲内でより低押さえ力であるクリップを採用することで締結時応力や平均応力を低減できる。その結果、耐久限度線図における「第2へたり限度」に相当する発生応力がばね鋼の降伏限度に達するまでの余裕が増加し、クリップ折損の発生確率の低減が期待できる（図4）。

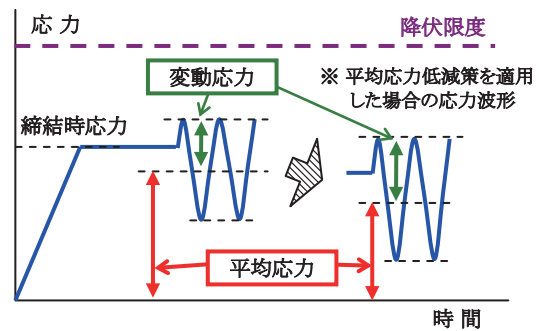


図4 平均応力低減効果の概念

3. 線ばねクリップの折損抑制策と効果の検証

2章に示した理由より、クリップに発生する変動応力および平均応力の低減が疲労破壊によるクリップ折損の抑制に効果的であることは明らかであり、その具体的な対策として次に示す2点が挙げられる。

- ① クリップ種別や軌道構造条件に応じた、レール締結間隔の適用範囲の明確化
- ② クリップの平均応力低減

①については、クリップや軌道構造条件毎に実物による性能確認試験を実施し、クリップ発生応力の疲労強度に関する照査や構成部材を含めた耐久性について検討して適用可能なレール締結間隔を提案した。また、②については現行のクリップと比較してレール押さえ力の低いクリップ、すなわち低押さえ力クリップを選定すると共に、クリップ種別は変更せず軌道パッドの厚さを減じてクリップがレールを締結している位置（押さえ点）の高さを下げ、平均応力の低減を図った場合についてそれらの効果について検討した。

3.1 室内試験によるレール締結間隔の検討および平均応力低減効果の確認

表1に実施した室内性能確認試験の条件を示す。クリップ種別は国内の鉄道事業者で使用実績のあるe2009形とSST形、および比較的低押さえ力であるPR447A形を選定した。レールは50kgNレール、軌道構造はバラスト軌道とし、まくらぎ配置本数は、単位延長である25mあたりの最低必要まくらぎ配置本数を把握する目的で過去の知見に基づき選定した。試験項目は、通常レール締結装置の性能評価試験で実施する内容と同じく、

- ① 組立試験（締結時のクリップ発生応力の確認）
- ② 各種ばね定数試験（レール締結装置の先端・鉛直・横方向のばね定数の確認）
- ③ 斜角载荷試験（静的载荷）
- ④ 2軸疲労試験（動的载荷）

であり、項目③、および項目④において疲労強度に関するクリップ発生応力の照査を、また項目④において構成

表1 性能確認試験の条件

項目	単位	条件						
		A	B	C	D	E	F	G
設計軸重	kN	150kN (在来線を想定)						
レール種別	—	50kgN レール						
レール支承体	—	PC まくらぎ (座面式)						
クリップ種別	—	e2009 形			SST 形		PR447A 形	
線形	—	曲線半径 600m 以下						
まくらぎ配置本数	本/25m	34	31	34	31	34	31	31
レール締結間隔	mm	735	806	735	806	735	806	806
軌道パッドばね定数	MN/m	110						
軌道パッド厚さ	mm	10		8		10		10
締結ばね	レール押え力	kN/個		11.5		9.3		9.7
	先端ばね定数	MN/m		1.0		1.0		0.5

部材の耐久性の検討を実施した。図5に試験状況を示す。なお、過去の知見に基づきクリップの引張の主応力が最大となる位置にひずみゲージを貼付して応力を測定した。

表2に試験結果を示す。e2009形とSST形のいずれについても、半径600m以下の曲線部を想定した試験条件で、軌道パッド厚さが現行の10mmの場合、まくらぎ配置本数34本/25m以上であれば適用可能であることが明らかとなった。一方、曲線半径の条件は変えずにクリップ種別をe2009形およびSST形から低押さえ力クリップであるPR447A形に変更した場合、およびクリップ種別をe2009形のままとしながら軌道パッド厚さを現行の10mmから2mm低減して8mmと薄くした場合のいずれについても、まくらぎ配置本数が31本/25m以上で適用可能であることが明らかとなり、e2009形もしくはSST形クリップで厚さ10mmのパッドを使用した場合と比較してレール締結間隔の拡大が可能であることを確認した。

また、図6に斜角載荷試験時に測定した平均応力と変動応力の関係を示す。提案した平均応力低減策については、いずれも効果が確認された⁴⁾。

3.2 営業線での測定結果およびその分析

3.1節に示した室内試験の結果の妥当性を確認するため、営業線での測定を実施しその結果について分析を行った。測定は、図7に示すようにSST形クリップが敷設された営業線の半径350mの曲線部でまくらぎ配置本数34本/25m (締結間隔735mm)で敷設した区間にA1測定断面、まくらぎ配置本数31本/25m (締結間隔806mm)で敷設した区間にA2測定断面を設けて実施し、それぞれの測定断面でクリップの発生応力を測定した。測定対象は特急列車(最大静止軸重120kN, 最高走行速度81.3km/h)および普通列車(最大静止軸重92kN, 最高走行速度79.1km/h)の2種類であった。

クリップの主応力変動の測定最大値を用いて耐久限度

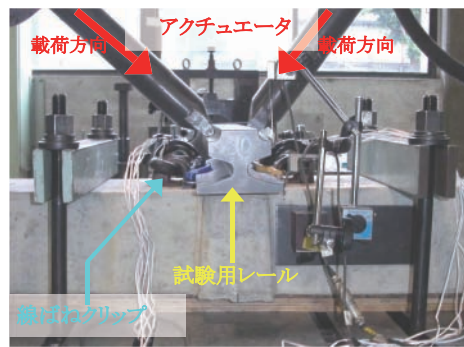


図5 試験状況(斜角載荷試験時)

表2 性能確認試験の結果

項目	条件						
	A	B	C	D	E	F	G
応力照査(静的)	○	○	○	○	○	○	○
耐久性(動的)	○	×	○	○	○	×	○

※ 凡例 : ○—照査を満足, ×—照査を満足しない。

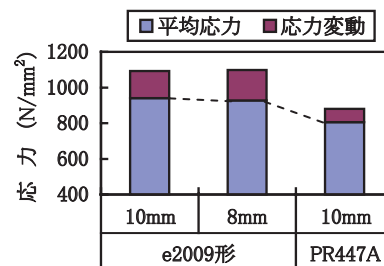


図6 斜角載荷試験時の応力の例

線図により照査した結果、図8(a)に示すように全ての測点において第2破壊限度および第2へたり限度以下であった。一方、各測定断面の軌間外側・内側別に特急列車の輪重、横圧、クリップ発生応力の全軸データによる重回帰分析を実施し、(1)式で表されるようなクリップ発生応力に関する回帰式を得た。

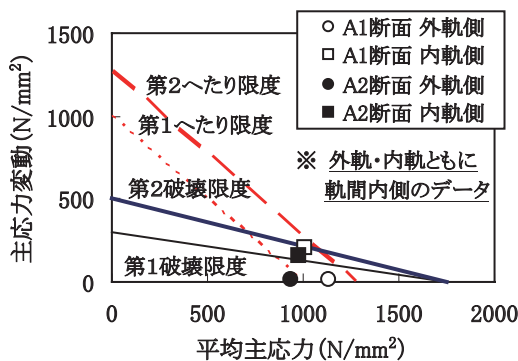
$$y = ax_1 + bx_2 + c \quad (1)$$

特集：軌道技術

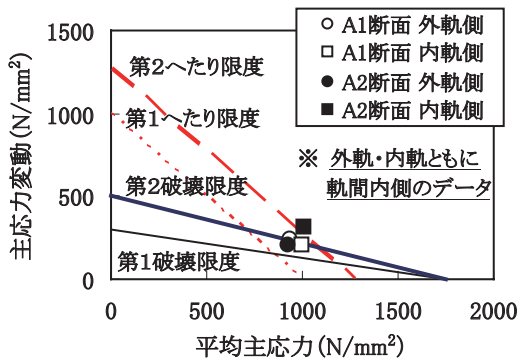
ここで、 y ：クリップ発生応力、 a ：輪重 x_1 の回帰係数、 b ：横圧 x_2 の回帰係数、 c ：定数項である。この回帰式に曲線半径600m未満の場合のレール締結装置の設計A荷重（輪重98kN、横圧60kN）を適用して得られるクリップの最大主応力変動の推定値と平均主応力を用いてばね鋼の耐久限度線図で照査した結果、図8 (b) に示すようにまくらぎ配置本数31本/25mのA2断面の内軌・軌間内側のクリップにおいて第2破壊限度および第2へたり限度を超過していた。曲線内軌についてはレール締結装置の設計A荷重相当の横圧が発生する確率は低いが、これらの測定結果からも半径600m以下の曲線部におけるSST形クリップの適用区分はまくらぎ配置本数34本/25m以上とするのが妥当と考えられる。



図7 現地試験の実施概況 (A1断面)



(a) 観測最大値に対する照査



(b) 回帰式に設計A荷重を適用した場合の照査

図8 耐久限度線図による照査結果

4. 線ばね形レール締結装置の適用区分の提案

以上に示した結果を踏まえ、半径600m以下の急曲線部における線ばね形レール締結装置の適用区分を提案した。表3に提案した適用区分の例を示す。e2009形・SST形ともに半径600m以下の曲線部ではまくらぎ配置本数が34本/25m以上が適用可能な条件となり、現行のPCまくらぎ用の板ばねを適用した場合と同等のレール締結間隔とすればよい。また、軌道パッド厚さを減じる、あるいは低押さえ力のクリップを使用することによる平均応力の低減効果によって、クリップの適用区分をまくらぎ本数が少なくなる方へ更に緩和できる可能性がある。

なお、これらのまくらぎ配置本数・間隔に関する検討は、表1に示したように軌道パッドのばね定数110MN/mを前提としていることに注意する必要がある。

表3 半径600m以下の曲線部における適用区分

クリップ種別	軌道パッド厚さ	提案した適用区分 (まくらぎ配置本数)
e2009形	10mm	34本/25m以上
	8mm	31本/25m以上
SST形	10mm	34本/25m以上
PR447A形	10mm	31本/25m以上

5. おわりに

本報告では、急曲線部における線ばね形レール締結装置の適用区分について検討し、その提案を行った。

なお、提案した適用区分については軌道状態が良好に保たれていることを前提として適用されるものであり、実軌道での使用にあたっては、保守管理上、使用に伴うインシュレーターの摩耗、クリップの締結方法の影響といった点に留意する必要がある。

謝辞

営業線での現地測定試験の実施にあたっては、九州旅客鉄道株式会社に多大なご協力を頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

文献

- 1) 野本耕一他：急曲線部における線ばね形レール締結装置の適用について、土木学会第65回年次学術講演会概要集，2010年9月
- 2) 日本材料学会編：疲労設計便覧，養賢堂，1995年1月
- 3) 新版軌道材料編集委員会編：新版 軌道材料，2011年5月
- 4) 弟子丸将他：線ばねクリップの発生応力の低減方法に関する一考察，土木学会第66回年次学術講演会概要集，2011年9月