

## 曲線部における線ばね形レール締結装置の適用区分

軌道技術研究部 軌道構造研究室  
副主任研究員 弟子丸 将

### 1. はじめに

現在、軌道保守の省力化の観点から、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（例えば図1）が普及している。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」とする）の折損事例が報告されており、クリップのフロントアーチ部で発生する損傷については主に急曲線区間での車輪横圧の作用による疲労破壊、クリップのリアアーチ部での損傷については腐食環境下で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になっている<sup>1)</sup>。



図1 線ばねクリップの例

このうち、クリップのフロントアーチ部に生じる疲労破壊については、折損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。本件では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言した適用区分について報告する。また、近年取り組んでいるクリップ発生応力の解析的検討の現状を併せて紹介する。

### 2. 急曲線部における線ばねクリップ折損のメカニズム

図2にクリップの発生応力の概念を示す。なお、これ以降「応力」と示した場合はフロントアーチ部に生じた応力のことを指す。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、平均応力と最大・最小値との幅（変動幅）を変動応力、締結前の応力と変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にある。

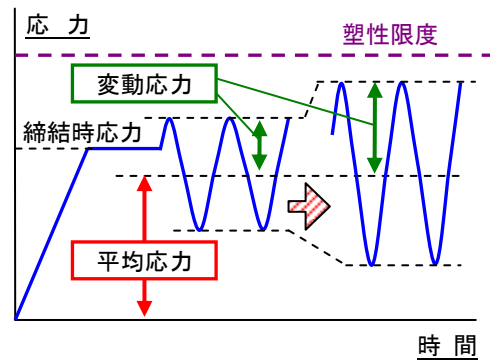


図2 クリップ発生応力の概念

図3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を示す。レール締結装置の走行安全性は、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領域に達して疲労強度を満足しない可能性がある。

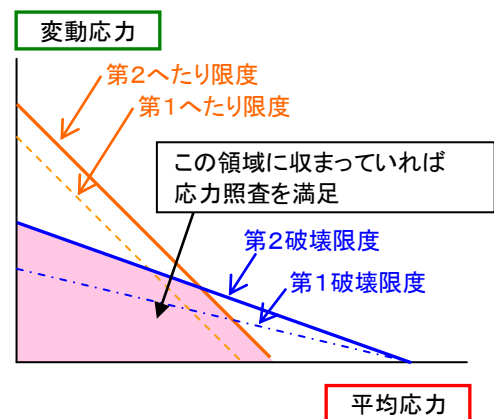


図3 ばね鋼の耐久限度線図による応力照査のイメージ

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（＝レール横圧力）が増加し、レールの小返り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小のレール締結間隔を明らかにする必要がある。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、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、発生応力がばね鋼の塑性限度（耐久限度線図における「第2へたり限度」に相当）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。

### 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の抑制に効果的であることが明らかであり、その抑制策として具体的には次に示す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に着目した折損抑制策の提案

本報告において、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適用可能性を検討した。

#### 3.1 室内試験によるレール締結間隔の検討およびパッド厚さの影響評価

表1に実施した室内試験条件を示す。クリップ種別は国内の鉄道事業者で広く使用されているe2009形とSST形、および比較的low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あたりの最低必要まくらぎ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、①組立試験、②各種ばね定数試験（先端・鉛直・横方向）、③斜角載荷試験（静的載荷）および④2軸疲労試験（動的載荷）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（図4）、また項目④において構成部材の耐久性の検討を実施した。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測定を実施した。

表1 性能確認試験条件と試験結果

項目	単位	条件						
		A	B	C	D	E	F	G
設計軸重	kN	150（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			SST		PR447A	
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	mm	10		8		10		10
締結ばね	押さえ点間隔	115						
	レール押さえ力	11.5		9.3		9.7		7.2
	先端ばね定数	1.0			1.0		0.5	

過去の知見に基づき選定した。試験項目は、①組立試験、②各種ばね定数試験（先端・鉛直・横方向）、③斜角載荷試験（静的載荷）および④2軸疲労試験（動的載荷）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（図4）、また項目④において構成部材の耐久性の検討を実施した。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測定を実施した。

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以下の急曲線区間を想定した試験条件で、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クリップ種別を e2009 形および SST 形から低押さえ力の PR447A 形クリップに変更した場合、および e2009 形クリップで軌道パッド厚さを 10mm から 2mm 低減して 8mm と薄くした場合のいずれの場合も、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 形クリップで厚さ 10mm のパッドを使用した場合と比較して締結間隔の拡大が可能であることを確認するとともに、クリップ平均応力低減の効果を確認した。

### 3.2 営業線での測定結果およびその分析

営業線の曲線（半径 350m）に SST 形クリップを締結した PC まくらぎを配置間隔 34 本/25m（締結間隔 735mm）で敷設した区間に A1 測定断面、配置間隔 31 本/25m（締結間隔 806mm）で敷設した区間に A2 測定断面を設け、それぞれの測定断面でクリップの発生応力を測定した（図 5）。測定対象は特急列車および普通列車の 2 種類である。

クリップの主応力変動の最大値を用いて耐久限度線図により照査した結果、全ての測点において第 2 破壊限度以下であった。一方、全列車の全軸データによる重回帰分析を実施し、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すると、A2 断面の内軌レール・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（図 6）。内軌については A 荷重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 以下の曲線区間における SST 形クリップの適用区分は 34 本/25m 以上とするのが妥当と考えられる。

### 3.3 線ばね形レール締結装置の適用区分の提案

以上の結果を踏まえ、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 以下の曲線ではまくらぎ本数が 34 本/25m 以上となり、現行の PC まくらぎ用の板ばねを適用した場合と同等の取扱となることが明らかとなった。また、パッド厚さや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することができる可能性を確認した。

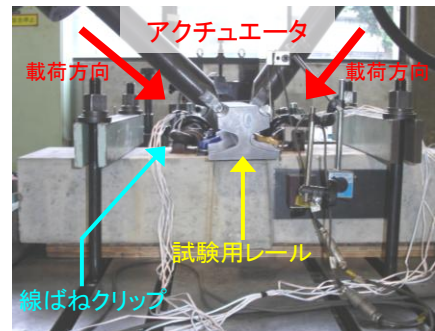


図 4 試験状況（斜角载荷試験）

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(静的载荷)	○	○	○	○	○	○	○
耐久性(動的载荷)	○	×	○	○	○	×	○

※ 凡例：○→照査を満足，×→照査を満足しない。



図 5 現地試験の実施概況

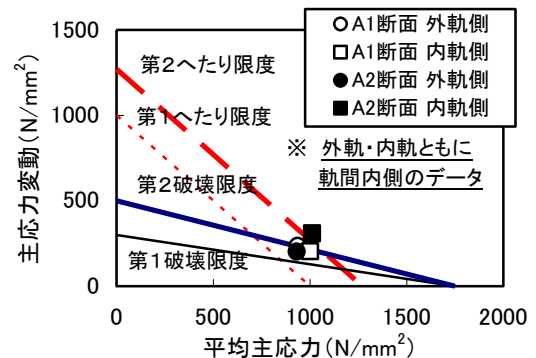


図 6 設計 A 荷重適用時のばね鋼の耐久限度線図による照査結果

表 3 半径 600m 以下の曲線における適用区分

クリップ種別	パッド厚さ	適用区分
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

#### 4. 線ばね形レール締結装置の発生応力に関する解析的検討

線ばね形レール締結装置に用いられるクリップは、締結過程で大きなひずみを生じることが過去の知見より明らかになっている<sup>2)</sup>。しかし、複雑な形状を有しているために実験で得られるひずみの値は限られ、生じるひずみと応力の分布は必ずしも明確ではない。そこで、これらのひずみを把握する目的で、線ばね形レール締結装置を有限要素で詳細にモデル化し、非線形弾塑性解析を実施した。図7に解析モデルの一例を示す。対象としたクリップは、e2009形、PR447A形、PR113A形であり、各部品と締結工具を個別にソリッド要素でモデル化した。クリップとショルダーは非接触三次元計測を行って形状を精度良くモデル化した。また、締結過程を模擬するため締結工具、ショルダーおよび軌道パッドに拘束条件を設定し、部品間には接触と摩擦を定義した。クリップは弾塑性体とし、

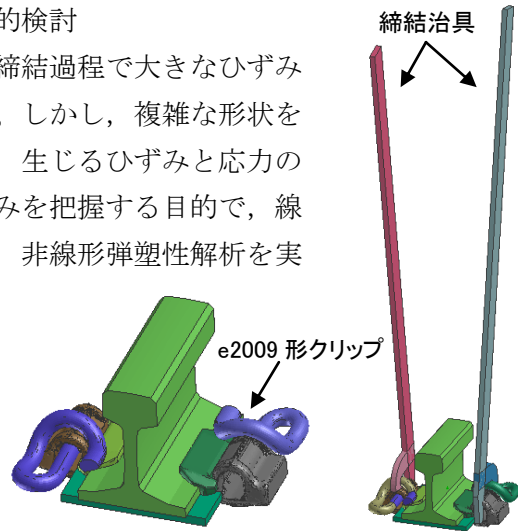
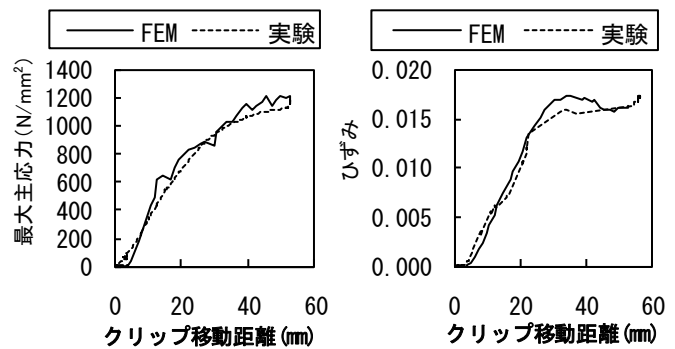


図7 解析モデルの概要 (e2009形)

応力-ひずみ曲線はクリップの一部を切り出した試験片に対して引張試験を実施して設定した。軌道パッドは事前の圧縮試験により得た特性を設定した。

図8に解析と実験で得られたクリップ締結過程における応力とひずみの推移の比較を示す。最大主応力は、フロントアーチ部とリアアーチ部の両方で締結開始から終了まで良好な一致を示しており、この解析手法は締結後のクリップの状態のみならず、締結過程で生じる応力とひずみについても高精度で再現することが可能であることが明らかとなった。



(a) フロントアーチ部 (b) リアアーチ部

図8 e2009形クリップ発生応力の比較

この解析手法は締結後のクリップの状態のみならず、締結過程で生じる応力とひずみについても高精度で再現することが可能であることが明らかとなった。なお、クリップ締結後のひずみや応力、レール押さえ力について解析結果と実験から得られた結果を比較すると、実験値に対して解析値は、フロントアーチの最大主応力で8~10%の差異、レール押さえ力で3~8%の差異であったのに対し、リアアーチの最大主ひずみは16~27%ほどの差異が見られた。解析では締結開始から終了まで工具を連続的に動かして組み立てるが、実物の締結では段階的に工具に荷重をかけて行う必要がある。この違いにより弾性限度を超えるひずみが生じるリアアーチにおいて差異が生じたものと考えられる。

#### 5. まとめ

本報告では 50kgN レール・有道床軌道の急曲線区間を対象とし、線ばね形レール締結装置の適用区分を検討・提案した。本適用区分は一部鉄道事業者で使用されている。また、レール締結装置の性能確認試験のモデルを作成し、組立試験を概ね再現可能であることを確認した。

#### [参考文献]

- 1) 例えば、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) 西宮裕騎他：締結過程を考慮した線ばね形レール締結装置の非線形弾塑性解析，土木学会第64回年次学術講演会概要集，2009年9月