

塑性域を考慮したレール締結ばねの疲労耐久性の評価

軌道技術研究部 軌道構造研究室
副主任研究員 玉川 新悟

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・軌道構造¹⁾では、レール締結装置の疲労設計において、耐久限度線図を用いてレール締結ばね（以下、「締結ばね」という）の発生応力を照査することとしている。耐久限度線図とは、平均応力と変動応力を組み合わせて示した鋼材の疲労限度または時間強度を表す限度線であり、鋼種に応じて決定される。従来、ばね鋼の耐久限度線図には、**図1**に示す限度線が用いられている。本線図による照査は、締結ばねの発生応力が弾性限度線もしくは降伏限度線以内であること、すなわち締結ばねが弾性域で使用されることを前提としている。一方、近年国内で使用が増加している線ばね形レール締結装置の締結ばねは、使用時に塑性変形が生じることが報告されている²⁾。塑性変形した締結ばねは、即座にその疲労耐久性を失うわけではないと考えられるものの、従来の耐久限度線図を直接適用することができないため、その耐久性を十分に評価できない。

本研究では、塑性域で使用する線ばね形レール締結装置の締結ばねに適用可能な耐久限度線図の考え方を提案し、その妥当性を検証した。

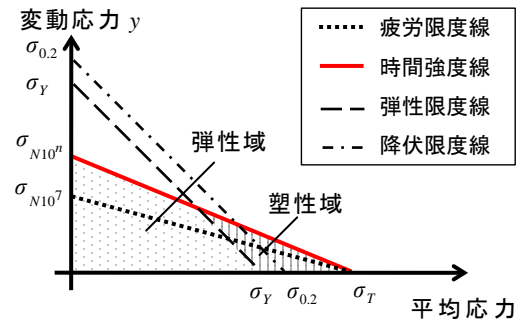


図1 従来の耐久限度線図

2. 耐久限度線図の提案と妥当性の検証

(1) 耐久限度線図の導出

図1に示した各限度線は、以下の式で表される。なお、本稿では 10^7 回および 10^n 回 ($n < 7$) の繰返し回数に耐える変動応力をそれぞれ「疲労限度」および「 10^n 回時間強度」と表し、両者を併せて「疲労強度」と表す。

$$\text{疲労限度線: } y = \sigma_{N10^7} - \frac{\sigma_{N10^7}}{\sigma_T} x \quad (1) \quad 10^n\text{回時間強度線: } y = \sigma_{N10^n} - \frac{\sigma_{N10^n}}{\sigma_T} x \quad (2)$$

$$\text{弾性限度線: } y = \sigma_Y - x \quad (3) \quad \text{降伏限度線: } y = \sigma_{0.2} - x \quad (4)$$

ここに、 x : 平均応力, y : 変動応力, σ_T : 真破断強度, σ_Y : 弾性限度, $\sigma_{0.2}$: 0.2%耐力,

σ_{N10^7} : 疲労限度 (完全両振り), σ_{N10^n} : 10^n 回時間強度 (完全両振り, $n < 7$)

弾性限度を超過した際の疲労限度は、概ね上記の疲労限度線に従い、平均応力の増加に伴って低下することが過去の試験結果³⁾から読み取れる。一方で、塑性域の応力はひずみゲージでは容易に算定できないため、塑性変形したばね鋼を応力表記の耐久限度線図で直接評価することは困難である。そこで本研究では、簡易かつ実用的な耐久限度線図を構築するため、引張試験結果を基に上記の耐久限度線図をひずみ表記に置きかえることとした。

締結ばねから切り出した試験片を用いて引張試験を実施し、次式に示す応力とひずみの関係が得られたとする。

$$\varepsilon = f(\sigma, \alpha, \beta, \gamma, \dots) \quad (5)$$

ここに、 ε : ひずみ, σ : 応力, α, β, γ : 材料特性値

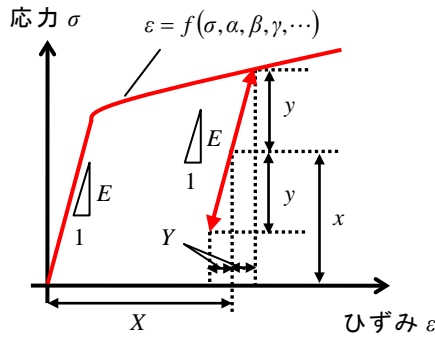


図2 応力とひずみの関係



(a) 締結ばね (FC1503)

(b) 組立状態

図3 線ばね形レール締結装置の例

本材料が塑性域で荷重と除荷の繰返しを受けたときの応力とひずみの挙動を図2および次式で仮定する。

$$X + Y = f(x + y, \alpha, \beta, \gamma, \dots) \quad (6)$$

$$Y = y/E \quad (7)$$

ここに、 x ：平均応力、 y ：変動応力、 X ：平均ひずみ、 Y ：変動ひずみ、 E ：ヤング率
式(6)は、平均ひずみに変動ひずみを加算したひずみが応力-ひずみ曲線上にあることを表している。また式(7)は、荷重と除荷の繰返し時の傾きがヤング率に等しいことを表している。

式(1)～(4)を式(6)と式(7)に代入することにより、応力表記された耐久限度線図をひずみ表記に置きかえる。これにより、各限度線が平均ひずみ X と変動ひずみ Y の関係で表される。

本研究では、引張試験で得られる式(5)の応力とひずみの関係を次式でモデル化した。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^m \quad (8)$$

式(1)～(8)の関係を用いることで、平均ひずみ X と変動ひずみ Y により表記された耐久限度線図が式(9)～(12)で得られる。

$$\text{疲労限度線：} \quad X = \frac{\sigma_T}{E} - \frac{\sigma_T}{\sigma_{N10^7}} Y + 0.002 \left[\left\{ \sigma_T + \left(1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_{N10^7}} \right) EY \right\} / \sigma_{0.2} \right]^m \quad (9)$$

$$10^n \text{回時間強度線：} \quad X = \frac{\sigma_T}{E} - \frac{\sigma_T}{\sigma_{N10^n}} Y + 0.002 \left[\left\{ \sigma_T + \left(1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_{N10^n}} \right) EY \right\} / \sigma_{0.2} \right]^m \quad (10)$$

$$\text{弾性限度線：} \quad X = \frac{\sigma_Y}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma_Y}{\sigma_{0.2}} \right)^m - Y \quad (11) \quad \text{降伏限度線：} \quad X = \frac{\sigma_{0.2}}{E} + 0.002 - Y \quad (12)$$

以下では、過去に塑性変形の発生が報告されている線ばねから任意に一種類のもの(図3)を選別し、提案した考え方に基づき耐久限度線図を決定した。また、塑性域での疲労試験結果と比較することで、提案した考え方の妥当性を検証した。

(2) 材料特性値の取得

引張試験および弾性域の疲労試験を実施し、前節に示した耐久限度線図を決定する上で必要な材料特性値を取得した。

引張試験は、締結ばねから試験片を切り出し、JISに規定された方法に基づき実施した。弾性域での疲労試験は、締結ばね単体に対して14S-N法に準拠して実施した。これらの試験で得られた材料特性値から、当該締結ばねの耐久限度線図を決定した(図4)。

(3) 妥当性の検証

提案した耐久限度線図の妥当性を検証することを目的とし、実物の締結ばねを用いて塑性域での疲労試験を実施した。試験用タイプレートに締結した締結ばねに対し、鉛直方向の繰り返し荷重を载荷した(図5)。载荷回数は100万回(10⁶回)までとした。試験結果を図6に示す。提案した耐久限度線図上に破断-10⁶回未破断の試験結果をプロットし、試験結果と限度線を比較した。

図6より、破断-10⁶回未破断の境界は、平均主ひずみの増加に伴い低下し、耐久限度線図と同様の傾向を示した。弾性域の破断-10⁶回未破断の試験結果は、平均主ひずみの増加とともに顕著に低下し、10⁶回時間強度線と良好に一致している。一方、塑性域の破断-10⁶回未破断の試験結果は、10⁶回時間強度線と比較して最大で変動主ひずみが400μ程度大きい。ただし、両者の挙動は概ね一致しており、試験結果を安全側に評価していることから、本線図の適用について実用上の問題はないと考えられる。

以上より、提案した考え方に基づく耐久限度線図は、試験値と若干の相違はあるものの、平均主ひずみの増加に伴い疲労強度が低下する傾向を捉えており、妥当なものであると考える。なお、ここでは発生ひずみが最大で30000μまでの範囲について耐久限度線図の妥当性を確認した。このため、現時点における本線図の適用は発生ひずみが30000μまでの範囲とするのが妥当である。

3. 照査に用いる限度線と性能照査の一例

(1) 第1破壊限度と第2破壊限度

従来より、耐久限度線図を用いた締結ばねの照査では、10%程度の破壊確率に対する時間強度や疲労限度の値を用いている。

前章での検討より、当該締結ばねの完全両振り疲労限度および10⁵回時間強度は、10%の破壊確率においてそれぞれ334N/mm²および432N/mm²であった。これらの値を安全側に端数処理すると、疲労限度および10⁵回時間強度は300N/mm²および400N/mm²となる。ここでは当該締結ばねについて、疲労限度を300N/mm²として式(9)を計算したものを第1破壊限度、10⁵回時間強度を400N/mm²として式(10)を計算したものを第2破壊限度とするのが妥当である。

(2) レール締結装置の機能に関する限度

レールの小返りにより締結ばねに塑性変形が生じた場合、レール押え力は初期締結時と比較して低下すると考えられる。そこで、当該締結ばねについて別途に実施した先端ばね定数試験の結

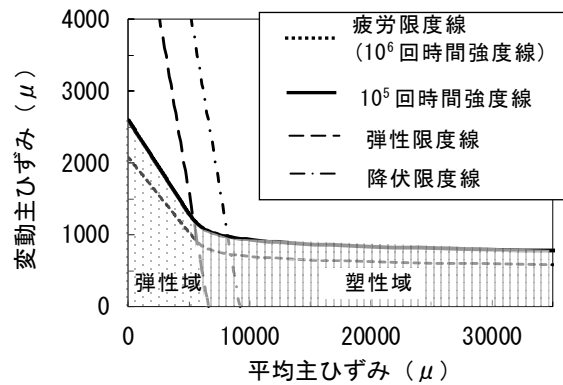


図4 材料特性に基づく耐久限度線図



図5 疲労試験の状況

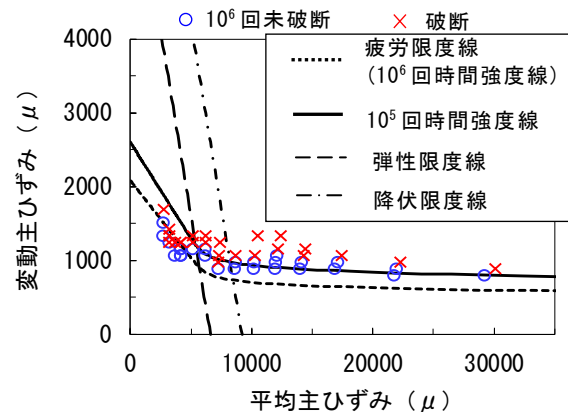


図6 耐久限度線図と疲労試験結果の比較

果を基に最大主ひずみとレール押え力の低下の関係を整理し、次式を用いてレール押え力の低下に関する限度を耐久限度線図上に反映させた。

$$Y = \varepsilon_a - X \quad (13)$$

ここに、 X : 平均ひずみ、 Y : 変動ひずみである。また、 ε_a は低下後のレール押え力に対応した最大主ひずみである。図 7 に初期締結時のレール押え力 10kN からの低下率 10~50% に対応した線を示す。レール押え力の低下に対する限度は、ふく進抵抗力の確保に必要な値および初期締結時からのレール押え力の低下率の観点から決定するのが望ましい。一例として、EN 規格(13481-2)と同様に低下率 20% を限度とした場合、これに対応した最大主ひずみ ε_a は 18800 μ となる。

(3) 性能照査の一例

塑性域で使用するレール締結装置の疲労破壊に関する安全性の照査の一例として、提案した耐久限度線図を用いた性能照査を実施した。照査方法は、鉄道構造物等設計標準¹⁾に記載された「レール締結装置 1 組に対する静的載荷試験による方法」とした。

図 8 に静的載荷試験で得られた締結ばねの発生ひずみを耐久限度線図により照査した結果を示す。図 8 より、締結ばねの発生ひずみは第 2 破壊限度以内に収まっており、締結ばねの疲労破壊に関する安全性を満足している。また、発生ひずみはレール押え力の低下率 20% に対応した線の内側に収まっており、レール押え力に関するレール締結装置の機能に関しても問題はない。

以上、塑性域で使用する締結ばねの疲労破壊に関する安全性の照査は、本例に示したように提案した耐久限度線図を用いて照査を実施すればよい。

4. おわりに

本研究では、塑性域で使用する線ばね形レール締結装置の締結ばねに適用可能な耐久限度線図の考え方を提案し、その妥当性を確認した。なお、本研究で提案した耐久限度線図の考え方は、締結ばねの材料や形状に限定したものではないため、使用時に塑性変形が生じる締結ばね全般に適用できるものであると考える。ただし、塑性域における板ばねの疲労耐久性については十分な知見が得られていないのが現状であるため、本線図の適用は線ばねに限定し、板ばねについては個別に検討する必要がある。また、腐食環境下での発生が懸念される応力腐食割れの影響については、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説一軌道構造，丸善，2012。
- 2) Yuki NISHINOMIYA：A method for simulating stress of round bar rail clips using nonlinear elastic-plastic dynamic explicit FEA，Proc. of the 12th Int. Conf. on Railway Engineering 2013，London，2013。
- 3) 西原利夫，櫻井忠一：鑄鉄の繰返引張圧縮応力に対する強さ，機械学会誌，Vol.41，第 251 号，pp.99-100，1938。

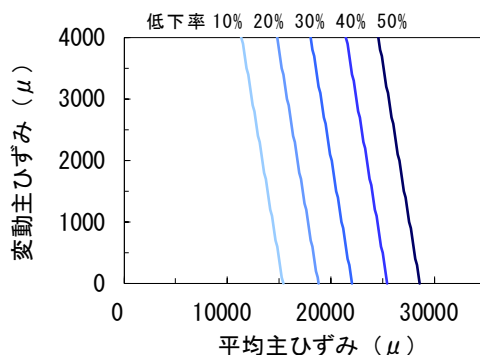


図 7 レール押え力の低下を表す線

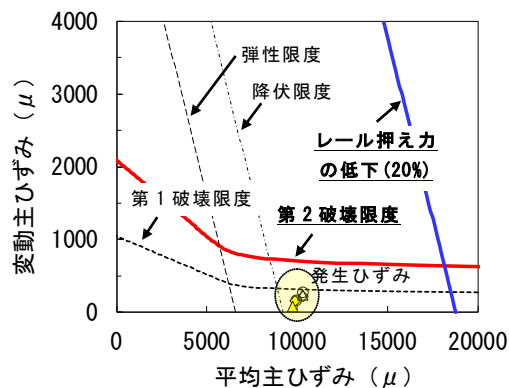


図 8 発生ひずみの照査例