

塑性域を考慮した線ばね形 レール締結装置の疲労耐久性の評価方法

玉川 新悟* 弟子丸 将* 片岡 宏夫*

Fatigue Limit Diagram for Rail Clips Subject to Plastic Deformation

Shingo TAMAGAWA Tadashi DESHIMARU Hiroo KATAOKA

The purpose of this study is to develop a fatigue design method for rail clips subject to plastic deformation. Firstly, a new fatigue limit diagram was formularized based on the mechanical properties of material and its fatigue limit under repeated load. The diagram is represented by the relationship between the mean strain and the oscillating strain amplitude. Secondly, the material of the clip was tested to obtain the accurate values of the fundamental properties necessary for establishing the diagram. Thirdly, fatigue tests were carried out and the fatigue limit diagram was compared with the test results in order to check the validity of the diagram. Finally as a case, a fatigue design of the rail clips subject to plastic deformation was performed by use of the diagram.

キーワード：線ばね形レール締結装置，疲労，塑性変形，耐久限度線図

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破壊に関する安全性の照査において、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る。従来から、ばね鋼の耐久限度線図には、図1に示す応力表記の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。

2. 耐久限度線図の提案

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

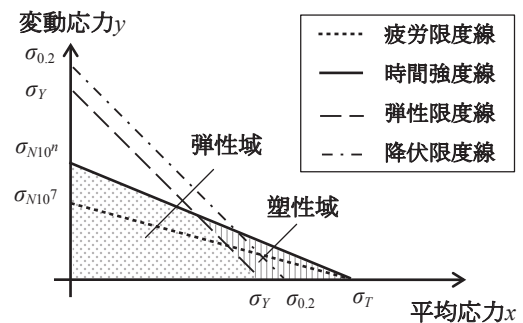


図1 応力表記の耐久限度線図

時間強度」と表し、両者を併せて「疲労強度」と表す。

$$\text{疲労限度線：} \quad y = \sigma_{N10^7} - \frac{\sigma_{N10^7}}{\sigma_T} x \quad (1)$$

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

$$\text{弾性限度線：} \quad y = \sigma_Y - x \quad (3)$$

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

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場合の疲労限度は、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) 4)}から読み取れる。一方で、塑性域での応力はひずみゲージを用いて容易には測定できな

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

特集：軌道技術

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を提案する。以下では、任意の締結ばねについて上記の疲労限度および時間強度が既知であることを前提とし、耐久限度線図を導出する。

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、真破断強度、弾性限度、0.2%耐力などの材料特性値と次式に示す応力-ひずみ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 ：機械的性質を表す材料特性値

本材料が塑性域で载荷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、载荷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。すなわち、繰返し载荷時の最大荷重(最大ひずみ)によって降伏した場合、式(6)に従い塑性変形が生じ、除荷時や最大荷重(最大ひずみ)を超えない载荷時では、式(7)に従い弾性変形が生じることを表している。

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-ひずみ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(8)は、ばね鋼のように降伏棚を示さずに加工硬化

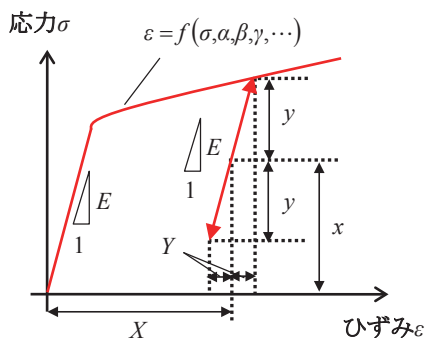


図2 応力-ひずみ関係(繰返し荷重下)

する鋼材の応力-ひずみ曲線のモデル化に多用される Ramberg-Osgood 曲線^{5) 6)}を基にしている。式(8)の m は、塑性域の加工硬化を特徴づける硬化係数である。ここでは、式(8)が引張強度(σ_B, ε_B)を通ることを条件として硬化係数 m を決定することとする。この場合、式(8)は引張強度以降の局所的なくびれが生じるひずみ領域において引張試験結果を精度よく再現しない。ただし、過去の知見から締結ばねに発生するひずみは、最大で $10000 \sim 15000 \times 10^{-6}$ 程度であるため引張強度までのひずみ領域で十分であると考えられる。

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。

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

$$\begin{aligned} 10^n \text{ 回時間強度線：} \quad X &= \frac{\sigma_T}{E} - \frac{\sigma_T}{\sigma_{N10^n}} Y \\ (n < 7) \quad &+ 0.002 \left[\left\{ \sigma_T + \left(1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_{N10^n}} \right) EY \right\} / \sigma_{0.2} \right]^m \quad (10) \end{aligned}$$

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

$$\text{降伏限度線：} \quad X = \frac{\sigma_{0.2}}{E} + 0.002 - Y \quad (12)$$

以上で示した耐久限度線図は、引張試験で得られる機械的性質および弾性域の完全両振り疲労強度のみで構成されるため、比較的容易に各限度線を決定することが可能となる。

3. 要素試験と材料特性値

材料特性値の取得方法の一例として、図3に示す線ばね形レール締結装置について要素試験を実施した。なお、本締結ばねの使用時において塑性変形の発生を確認している。

3.1 引張試験と機械的性質

当該締結ばねで使用される鋼材の機械的性質を把握することを目的とし、JISに基づく引張試験を実施した。2体の締結ばねの両端から2体ずつ線材を切り出し、図4に示す丸棒引張試験片を製作して試験に用いた。

表1に引張試験で得られた機械的性質(4体の平均)を示す。なお、硬化係数 m については、試験結果を基に式(8)が引張強度(σ_B, ε_B)を通ることを条件として決定した。

3.2 疲労試験と弾性域の疲労強度

当該締結ばねの弾性域における完全両振り疲労強度を得ることを目的とし、14S-N 試験法⁷⁾に基づく疲労試験を実施した。

図5に示すように、レールの底部形状を模擬した载荷治具を疲労試験機に取り付け、試験用タイプレートに締結した締結ばねに鉛直方向の繰り返し荷重を载荷した。

本試験では、予め3軸ひずみゲージを用いて測定したひずみを基に、締結ばねの主応力を算出した。ひずみの測定位置は、過去の知見から発生ひずみが大きく疲労き裂の起点になることが予想される位置としており、当該箇所付近で疲労き裂の発生を確認している(図6)。载荷条件は平均荷重 4.0kN の片振りとし、荷重振幅を変化させることで変動応力と破断までの繰返し回数を整理

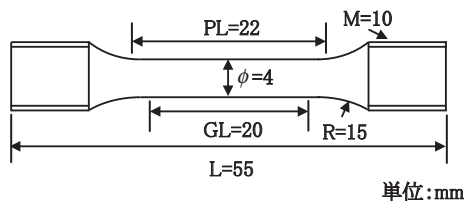
した。完全両振り载荷とせずに片振り载荷とした理由は、試験機および载荷治具の制約を受けたためである。また平均荷重を 4.0kN とした理由は、繰返し数 $10^5 \sim 10^7$ 回の広範囲で疲労強度を把握するためである。なお、本試験における当該締結ばねの発生応力は、全て弾性限度以内であることを確認している。

図7に試験結果を示す。図中には 14S-N 試験法およびステアケース法で求めた破壊確率 10, 50, 90% の S-N 曲線を併記した。表2に平均荷重 4.0kN の片振り疲労強度を示す。次に、式(1)と式(2)が引張試験で得られた真破断強度と表2の片振り疲労強度を通ることを条件とし、完全両振り疲労強度を決定した。表3に得られた完全両振り疲労強度を示す。



(a) 締結ばね (b) 組立状態

図3 線ばね形レール締結装置



単位:mm

図4 引張試験片

表1 引張試験で得られた機械的性質

	ヤング率 E (kN/mm ²)	0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	引張強度 σ_B (N/mm ²)	真破断強度 σ_T (N/mm ²)	0.2% 耐力時 ひずみ $\epsilon_{0.2}$ (%)	引張強度時 ひずみ ϵ_B (%)	硬化 係数 m
試験平均	191.2	1377	1505	1906	0.92	5.72	35.9

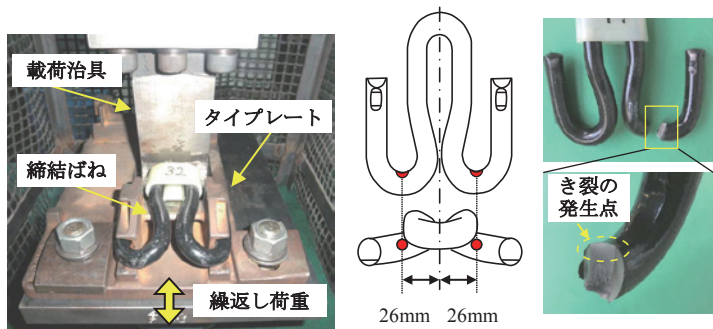


図5 疲労試験の概要

(a) 貼付位置 (b) 破断例

図6 ひずみゲージの貼付位置

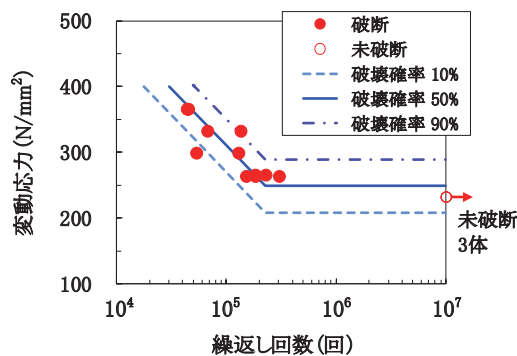


図7 S-N 線図 (片振り: 平均荷重 4.0kN)

表2 片振り疲労強度※ 単位: N/mm²

破壊確率	疲労限度	10 ⁶ 回時間 強度	10 ⁵ 回時間 強度
10%	209	209	270
50%	249	249	310
90%	289	289	350

※平均荷重 4.0kN の片振り

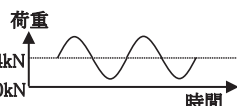


表3 完全両振り疲労強度※ 単位: N/mm²

破壊確率	疲労限度	10 ⁶ 回時間 強度	10 ⁵ 回時間 強度
10%	334	334	432
50%	398	398	497
90%	463	463	561

※平均荷重 0.0kN の完全両振り

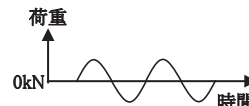


表4 耐久限度線図に用いた材料特性値

σ_T (N/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	σ_y^{*1} (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	m	$\sigma_{N10^7}^{*2}$ (N/mm ²)	$\sigma_{N10^6}^{*2}$ (N/mm ²)	$\sigma_{N10^5}^{*2}$ (N/mm ²)
1906	1377	1250	1505	191.2	35.9	398	398	497

※1 当該ばね鋼で標準的に使用される値, ※2 破壊確率 50% に相当する値 (表3 参照)

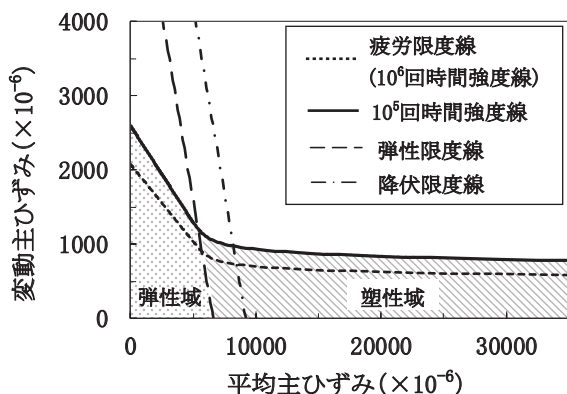


図8 材料特性に基づく耐久限度線図

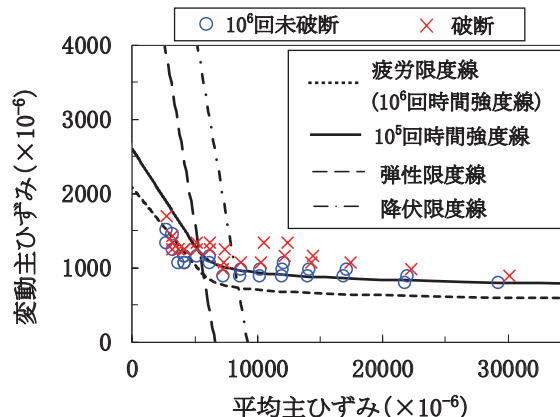


図9 耐久限度線図と疲労試験結果の比較

4. 耐久限度線図の妥当性検証

4.1 各限度線の決定

前章で取得した材料特性値を基に式(9)～(12)を計算し、当該締結ばねの耐久限度線図を決定した。表4に材料特性値を、図8に耐久限度線図を示す。なお、図中の各疲労強度線は破壊確率50%のものである。表4に示すように、疲労限度および10⁶回時間強度の値が一致したため、疲労限度線および10⁶回時間強度線は一致している。

4.2 塑性域の疲労試験と妥当性検証

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、当該締結ばねを用いた疲労試験を実施した。

図5と同様に、試験用タイプ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載荷した。載荷回数は100万回(10⁶回)までとし、締結ばねが途中で破断した場合は破断時の載荷回数を記録した。試験ケースは平均荷重および荷重振幅を変化させた全50ケースとし、弾性域および塑性域における破断・未破断データを取得した。なお本試験では、事前に3軸ひずみゲージを用いて締結ばねのひずみを測定し、主ひずみとして整理した。

試験結果を図9に示す。ここでは、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、試験結果と提案した耐久限度線図を比較した。

図9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

表5 設計作用と第1・第2破壊限度

設計作用		限度	備考
軌間内側	軌間外側		
A 荷重	B 荷重	第2破壊限度	ばね鋼の10 ⁵ 回時間強度線
B 荷重	C 荷重	第1破壊限度	ばね鋼の疲労限度線

変動主ひずみが400×10⁶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、本試験では平均主ひずみが最大で30000×10⁶程度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平均主ひずみが30000×10⁶までの範囲とするのが妥当であり、これを超過する場合については、更なる検証が必要である。

5. 第1・第2破壊限度と機能の確認

5.1 第1・第2破壊限度

従来、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¹⁾。本照査では、表5に示すように、軌道への設計作用をごく稀に発生する最大荷重(A荷重)、しばしば発生する常時最大荷重(B荷重)、および常時平均荷重(C荷重)の3つに分類し、これらの交互作用に対して締結ばねの発生応力が第1もしくは第2破壊限

度以内であることを確認している。

3章の検討より、当該締結ばねで使用されるばね鋼の完全両振り疲労限度および 10^5 回時間強度は、10%の破壊確率において 334N/mm^2 および 432N/mm^2 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 10^5 回時間強度は 300N/mm^2 および 400N/mm^2 となる。上記の考え方に基づき、当該ばね鋼について、疲労限度 σ_{N10^7} を 300N/mm^2 として式(9)を計算したものを第1破壊限度、 10^5 回時間強度 σ_{N10^5} を 400N/mm^2 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。

5.2 レール締結装置の機能の確認

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、塑性変形後のレール押え力 P_0' は初期締結時のレール押え力 P_0 と比較して低下すると考えられる。そこで、当該締結ばねの発生ひずみとレール押え力の関係を試験で把握し、結果を耐久限度線図上に反映させた。

まず、締結ばね単体について、鉛直方向の荷重を載荷し、初期締結時を超過する任意のひずみ ϵ_a を負荷して塑性変形させた後に、初期の締結位置まで除荷し、除荷後におけるレール押え力を測定した。測定結果を基に、負荷するひずみ ϵ_a を変化させた場合について、任意のひずみ ϵ_a とレール押え力の低下率 $(1 - P_0'/P_0)$ の関係を整理した。結果を図10に示す。なお、当該締結ばねの

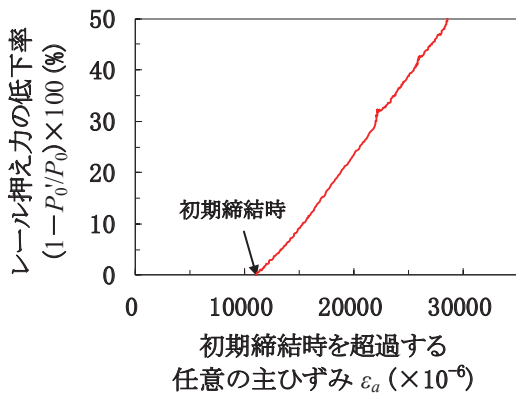


図10 ひずみとレール押え力の低下率の関係

初期締結時のレール押え力は 10kN である。

次に、上記の試験結果を耐久限度線図上に反映させるため、レール押え力の低下を表す線を次式で定義した。

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

ここに、 X : 平均ひずみ、 Y : 変動ひずみ、 ϵ_a : 初期締結時を超過する任意のひずみ(当該ひずみの発生によりレール押え力は P_0' に低下する)

図11に初期締結時のレール押え力からの低下率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⁸⁾と同様に低下率20%を限度とした場合、これに対応したひずみ ϵ_a は 18800×10^{-6} となる。

6. 性能照査の一例

本章では、使用時に塑性変形する締結ばねの性能照査の一例として、提案した耐久限度線図を用いた照査を実施した。

表6に在来線軌道におけるレール締結装置の設計作用を示す。設計作用に対するレール締結装置の設計応答値(ひずみ値)の算定は、鉄道構造物等設計標準・軌道構造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

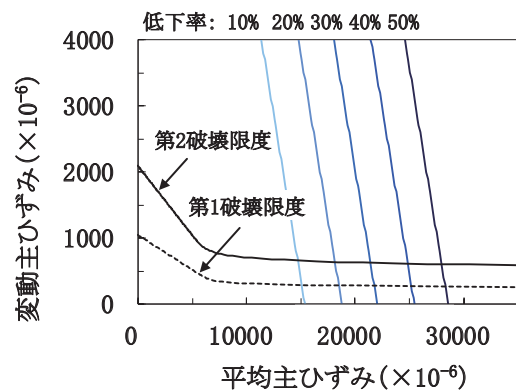


図11 レール押え力の低下を表す線

表6 在来線軌道におけるレール締結装置の設計作用

荷重種別	線形	A 荷重	B 荷重
輪重	直線および曲線	$150\text{kN} \times 1/2 \times 1.3 \approx 98\text{kN}$	$150\text{kN} \times 1/2 \times 1.15 \approx 86\text{kN}$
横圧	曲線 $R < 600\text{m}$	$150\text{kN} \times 1/2 \times 0.8 \approx 60\text{kN}$	$150\text{kN} \times 1/2 \times 0.4 \approx 30\text{kN}$
	曲線 $600\text{m} \leq R < 800\text{m}$	$150\text{kN} \times 1/2 \times 0.6 \approx 45\text{kN}$	$150\text{kN} \times 1/2 \times 0.3 \approx 23\text{kN}$

表7 照査ケースと試験荷重

ケース	線形	締結間隔 (まくらぎ本数)	試験荷重		載荷角度	
			P_A (kN)	P_B (kN)	θ_A (度)	θ_B (度)
ケース1	$600\text{m} \leq R < 800\text{m}$	830mm (31本/25m)	47.3	37.7	52.3	60.8
ケース2	$R < 600\text{m}$	750mm (34本/25m)	49.3	38.3	45.2	54.3
ケース3	$R < 600\text{m}$	830mm (31本/25m)	52.6	40.9	46.2	55.2

※ P_A は A 荷重、 P_B は B 荷重が軌道に作用した際に、レール締結装置1組に作用する荷重

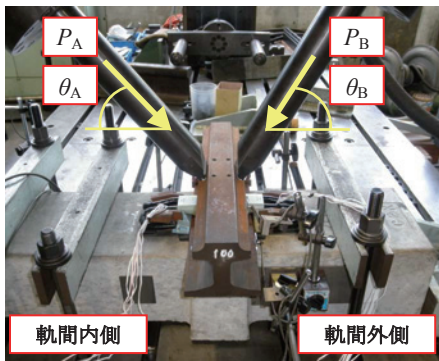


図 12 静的載荷試験の状況

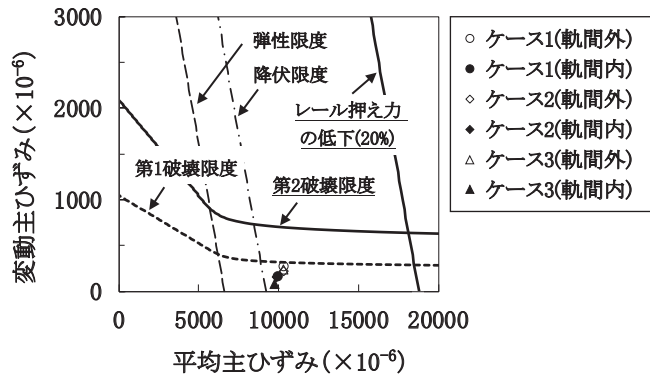


図 13 耐久限度線図によるひずみの照査例

験による方法」を用いた。

ここでは、線形および締結間隔を変化させた3ケースについて照査を実施した。表7に各ケースと試験荷重および載荷角度を示す。試験では、試験用まくらぎを試験機に固定し、当該レール締結装置1組を組み立てた後、試験用レールの頭部側面に軌間内側の θ_A の方向から P_A を、軌間外側の θ_B の方向から P_B を交互に静的載荷した。図12に試験状況を示す。

図13に各ケースにおける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。本試験ではA荷重およびB荷重の交互載荷としたため、耐久限度線図の第2破壊限度を用いた。図13より全てのケースについて、ひずみの測定値は第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、ひずみの測定値は、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。

次に、レール締結装置全体の耐久性の照査の一例として、ケース3の荷重条件で繰返し回数100万回の疲労試験を実施した。結果として、当該レール締結装置は設計作用の繰返しに対して安定した挙動を示し、100万回の繰返しに対して締結ばねは疲労破壊しないことが確認された。

以上、使用時に塑性変形するレール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た性能照査を実施すればよい。

7. まとめ

本研究では、使用時に塑性変形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。主な結果を以下に示す。

- 1) 塑性域で使用する締結ばねに適用可能な耐久限度線図として、弾塑性域の鋼材の機械的性質と弾性域の完全両振り疲労強度で構成されたひずみ表記による耐久限度線図を導出した。

- 2) 選定した締結ばねの要素試験を実施し、提案した耐久限度線図の構築に必要な材料特性値を取得した。
- 3) 弾塑性域における締結ばねの疲労試験を実施し、提案した耐久限度線図と比較した結果、当該線図は、平均主ひずみの増加に伴い疲労強度が低下する試験結果の傾向を捉えており、概ね妥当なものであることを確認した。
- 4) 締結ばねの破壊確率に基づき、第1破壊限度および第2破壊限度を決定した。また、塑性変形に伴うレール押え力の低下を表す線を提案し、耐久限度線図上に反映させた。
- 5) 塑性域で使用する締結ばねの疲労設計の一例として、提案した耐久限度線図を用いた性能照査を示した。

文 献

- 1) 国土交通省監修：鉄道構造物等設計標準・同解説－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
- 4) 西原利夫，櫻井忠一：繰返引張圧縮応力を受ける鋼の強さ，日本機械学会論文集，Vol.5，pp.25-29，1939
- 5) Ramberg, W. and Osgood, W. R. : Determination of Stress-strain Curves by Three Parameters, Technical note No.902, National Advisory Committee on Aeronautics, 1941.
- 6) Kim Rasmussen : Full-range Stress-strain Curves for Strainless Steel Alloys, The Univ. of Sydney Department of Civil Eng. Austlia, Research Report No. R811, 2006.
- 7) (社)日本機械学会：統計的疲労試験方法(改訂版) JSME S 002, 丸善, 1997
- 8) EN 13481-2(2012) : Railway applications Track Performance requirements for fastening systems Part2, 2012.