

腐食したレール締結装置のアンカーボルトの安全性の検証

(公財) 鉄道総合技術研究所	正会員	○玉川 新悟
〃	非会員	永井 明則
〃	正会員	弟子丸 将
〃	正会員	片岡 宏夫

1. はじめに

近年、敷設から 10 年程度が経過した直結 8 形レール締結装置のアンカーボルト (図 1) について、断面減少を伴う腐食の発生が報告されている。アンカーボルトは、当該締結装置を軌道スラブに締結し、軌間を保持するための部材である。このため、腐食によってボルトに破断や軸力低下が生じた場合、軌間拡大につながるものが懸念される。

本稿では、ボルトの腐食量と強度低下の関係に着目し、腐食したアンカーボルトの安全性を検証した。

2. アンカーボルトの腐食性状

アンカーボルトの腐食性状を把握するため、営業線内の異なる 4 地点から 4 体ずつ経年ボルトを回収し、新品ボルト 2 体を含む計 18 体について、外観観察と質量測定および 3D スキャンによる断面測定を実施した。図 2 に質量と各部の残存断面積の測定結果を示す。断面積の減少は、円筒部から不完全ねじ部にかけて顕著であり、質量と各部の断面積の間には高い相関が確認された。円筒部の断面減少率は、標準断面積 314mm^2 に対して最大 21% 程度であり、不完全ねじ部の断面減少率は、おねじの有効径から計算した断面積 265mm^2 に対して最大 18% 程度であった。

3. 引張強度に関する検討

引張強度に関する安全性を検証するため、前章で断面積を測定したボルトの引張試験を実施し、腐食量と破断荷重の関係を把握した。図 3 に腐食量と破断荷重の関係を示す。破断荷重は、経年ボルトで 267~279kN、新品ボルトで 281~290kN であり、質量や各部の残存断面積との間に高い相関が認められた。ここで、旧 JRS を参考にした場合、製造時における当該ボルトの保証強度は 265kN 以上となる。また、当該ボルトの締結時に発生するボルト軸力は 70~90kN 程度である。このため、本試験で使用したボルトは、いずれも上記の保証強度を上回り、発生軸力に対して十分な強度を有している。

以上より、現状の腐食量に対しては、引張強度の観点から問題の無いことを確認した。また、現状から腐食が進行したボルトの破断荷重を推定するにあたり、質量や断面積の測定が有効であることを確認した。

4. 疲労強度に関する検討

疲労破壊に関する安全性を検証するため、当該締結装置を組み立てた状態で載荷試験を実施した。まず、ひずみゲージを埋設した新品ボルトを用いて締結装置を組み立て、レールに設計荷重を静的載荷した際のボルト軸力を測定した。図 4 に試験状況を示す。設計荷重下におけるボルトの平均軸力および軸力振幅は最大で 77.6kN および 1.2kN 程度であった。これらの軸力値を



(a) 締結装置全体

(b) アンカーボルト
(敷設後 10 年程度)

図 1 直結 8 形レール締結装置のアンカーボルト

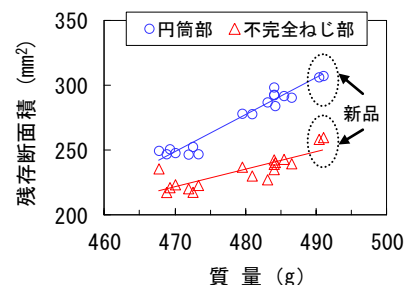
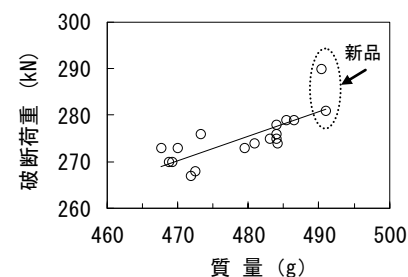
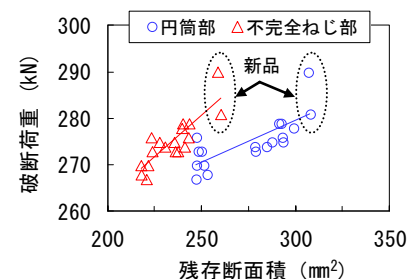


図 2 質量と残存断面積



(a) 質量と破断荷重



(b) 残存断面積と破断荷重

図 3 腐食量と破断荷重

残存断面積で除すことで腐食したボルトの平均応力と応力振幅を推定した。本推定は、2章の結果を踏まえ、断面減少率 20%に対して行った。一方で、腐食による疲労強度低下の影響を切欠き係数 β で仮定した耐久限度線図を作成し、上記で推定した応力値をプロットした(図5)。なお、一般的に腐食環境下では明確な疲労限は見られないものの、ここでは切欠き係数を用いて平滑材の疲労限を低下させたものを腐食したボルトの限度の目安として仮定した。切欠き係数 β は、当該ボルトの材料および寸法の場合、切欠き形状を過度に想定した場合でも 5.0 以内に収束することを踏まえ、 $\beta=5.0$ としている。図5より、断面減少率 20%を想定したボルトの推定応力は、 $\beta=5.0$ の疲労限度線と比較して十分な余裕がある。このため、推定応力および限度線の妥当性やばらつきを考慮しても、現状の腐食ボルトの発生応力は疲労破壊に対して十分な余裕があると考えられる。次に、現場から回収した経年ボルトについて、図4に示す状態で設計荷重を 100 万回繰返し载荷する疲労試験を実施した。結果として、载荷中のレールは安定した挙動を示し、疲労試験後のボルトにき裂等の変状は認められなかった。

以上より、現状の腐食量に対して、疲労破壊の観点から安全上の問題が無いことを確認した。

5. アンカーボルトの交換について

現状よりも腐食が進行した場合、更なる強度低下が予想されるため、計画的なボルトの交換が望まれる。ボルトの交換は、残存強度に対して一定の安全率を確保した上で実施することが望ましい。図6は、断面積の減少率毎に、作用軸力に対する残存強度の比を安全率として試算したものである。図中の安全率は、表1に示す諸量に基づき、安全側を考慮してねじ部の有効断面積に対して算定している。

一例として、引張強度について常に2.0以上の安全率を確保する場合、ボルトの交換目安となる断面減少率は30%程度となる。この場合、疲労強度についても同等以上の安全率を確保できる。ボルトの残存断面積は、定期的に抜き取り調査を実施し、断面測定をすることで確認できる。この際、質量測定や引張試験を併せて実施することで、腐食が更に進行した場合の残存強度をより正確に推測可能になると考えられる。

6. まとめ

腐食したレール締結装置のアンカーボルトについて、現状の腐食量に対しては、引張強度および疲労強度の観点から安全性に問題が無いことを確認した。また、現状よりも腐食が進行した場合について、試算した安全率に基づきボルトの交換目安の一例を示した。



図4 载荷試験の状況

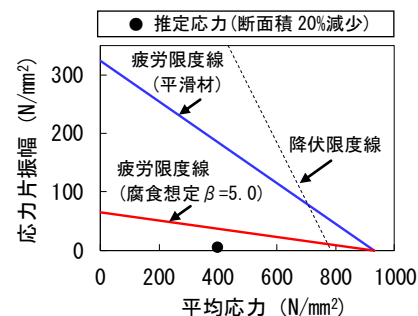


図5 腐食を想定した耐久限度線図と応力の推定値

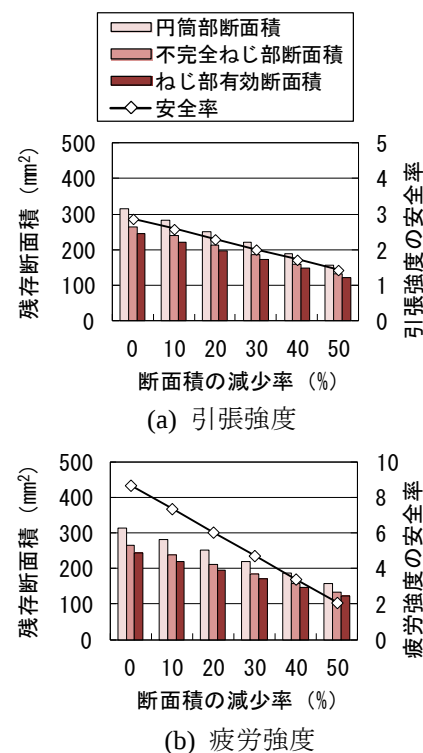


図6 断面積の減少率と安全率の試算結果

表1 安全率の試算に用いた諸量

項目	値
断面積の減少率 100x (%)	x=0~0.5
円筒部断面積 A_1 (mm ²)	$A_1=314 \times (1-x)$
不完全ねじ部断面積 A_2 (mm ²)	$A_2=265 \times (1-x)$
ねじ部有効断面積 A_3 (mm ²)	$A_3=245 \times (1-x)$
引張強さ σ_B (N/mm ²)	$\sigma_B=930$
残存引張強度 F (N)	$F=A_3 \times \sigma_B \times 10^3$
作用軸力 平均 F_m (N)	$F_m=78 \times 10^3$
作用軸力 振幅 F_a (N)	$F_a=1.2 \times 10^3$

項目	値
作用応力 平均 σ_m (N/mm ²)	$\sigma_m=F_m/A_3$
作用応力 振幅 σ_a (N/mm ²)	$\sigma_a=F_a/A_3$
両振り疲労強度 σ_{w0} (N/mm ²)	$\sigma_{w0}=323$
切欠き係数 β	$\beta=5.0$
残存疲労強度 σ_F (N/mm ²)	$\sigma_F=\sigma_{w0}/\beta \times (1-\sigma_m/\sigma_B)$
引張強度の安全率 S_1	$S_1=F/(F_m+F_a)$
疲労強度の安全率 S_2	$S_2=\sigma_F/\sigma_a$