

講演概要 継目板の曲げ応力に関する解析的検討 および疲労限界値に関する基礎的検討

栗原 巧¹・神津 大輔²・久保 崇紀³

¹正会員 研究員 JR東日本研究開発センター（〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町2-479）
E-mail: takumi-kurihara@jreast.co.jp

²正会員 主幹研究員 JR東日本研究開発センター（〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町2-479）
E-mail: koudu@jreast.co.jp

³正会員 上席研究員 JR東日本研究開発センター（〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町2-479）
E-mail: t-kubo@jreast.co.jp

本研究では50kgNレール用普通継目板の底部側面部の断面を見直した継目板（以下、「I形改良型継目板」という）を対象にレール継目部の力学的解析法であるZimmermannの理論式および有限要素解析モデルによる静的解析を行い継目板の曲げ応力に関する基礎的検討を行った。

その結果、I形改良型継目板の疲労破壊に対する安全性を確認し、実軌道へ敷設しても問題ないことを確認した。また、静的解析の結果、I形改良型継目板は、普通継目板に対して、継目板底部に発生する曲げ応力が1.18倍程度となった。

本研究ではJISで規定されている2種継目板の材質(S45C相当)を見直すことで、底部曲げ応力が1.18倍程度となるが普通継目板と同等の性能を確保させることを目的とした疲労限度値の基礎検討を行った。

Key Words :toeless joint bar, Zimmermann's theoretical formula, fatigue limit

1. はじめに

レールを接続するレール継目部には、普通継目板をはじめ各種継目板が使用されている。50kgNレール区間の継目部に線ばね式レール締結装置を締結する場合、普通継目板では、50kgNレールの底側部との離隔から締結することができない。そのため、50kgNレール用普通継目板の底部側面部の断面を見直した継目板（以下、「I形改良型継目板」という）が敷設されているが、これまで疲労限界状態における性能照査は実施されていなかった。

本研究ではI形改良型継目板を対象にレール継目部の力学的解析法であるZimmermannの理論式¹⁾および有限要素解析モデルによる静的解析を行い、継目板の曲げ応力に関する基礎的検討を行うことを目的とする。なお、疲労破壊に対する安全性を照査することにより、I形改良型継目板の実軌道へ敷設の可否について確認する。さらに、静的解析におけるI形改良型継目板および普通継目板の継目板底部に発生する曲げ応力より、JISで規定されている2種継目板の材質(S45C相当)を見直すことで、I形改良型継目板を普通継目板と同等の性能を確保させるための疲労限度値の基礎検討を行った。

2. 疲労限界状態の性能照査

継目板は底部から破壊に至ることがあり、継目板底部の曲げ応力に対する照査を行うこととされているため、鉄道構造物等設計標準 軌道構造²⁾（以下、「軌道構造標準」という）に準拠してI形改良型継目板の疲労限界状態の性能照査を実施した。

(1) 設計条件

対象とした設計条件は、列車荷重：輪重170kN、軌道構造 レール種別：50kgNレール、バラスト軌道、まくらぎ配置本数：29本/25mとする。

(2) 作用

静止輪重85kNに対して、輪重変動係数2.0とする。

(3) 応答値の算出

I形改良型継目板の応答値は、レール継目部の力学的解析法として知られているZimmermannの理論式¹⁾および有限要素解析モデルを用いて継目板底部の曲げ応力を算出した。まくらぎ間隔は表-1,図-1の通りである。

表-1 まくらぎ間隔

形式	配置本数 割合(本)	まくらぎ配置間隔(mm)		
		A	B	C
かけ継ぎ	29本	380	678	895
支え継ぎ	29本	503	638	909

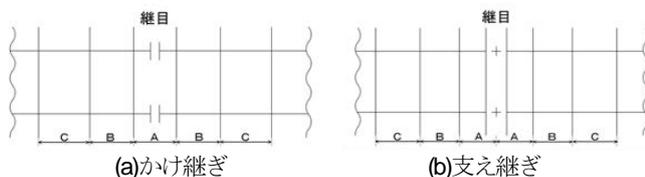


図-1 まくらぎ間隔

a) Zimmermannの理論式の解析モデル

図-2にZimmermannの理論式¹⁾の解析モデルを示す。Zimmermannの理論式¹⁾の解析モデルにおいて、輪重よりかけ継の支持条件での継目板に作用する継目板圧力Rが算出される。なお、断面2次モーメントは、I形改良型継目板は $0.25 \times 10^7 \text{ mm}^4$ 、普通継目板は $0.30 \times 10^7 \text{ mm}^4$ とした。

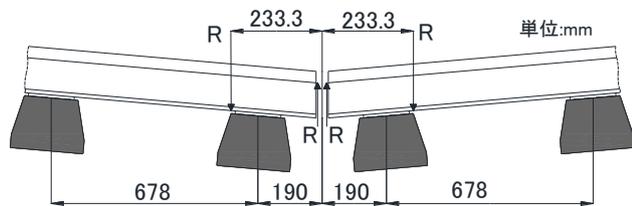


図-2 Zimmermannの理論式の解析モデル

図-2のモデルを用いて、I形改良型継目板に継目圧力Rが作用した場合の最大曲げモーメントおよび最大曲げ応力を求めた。継目板圧力モデルは、普通継目板の曲げ応力に関する解析的検討²⁾において静的載荷試験との整合性が確認されている圧力分布モデルとした(図-3)。この継目板圧力モデルは、継目板圧力が継目板の上面の中央に全長の1/2と下面の両端部に全長の1/4の長さで三角形の分布荷重が作用する場合で三角形の分布荷重を図心位置で集中荷重に換算したものである³⁾。

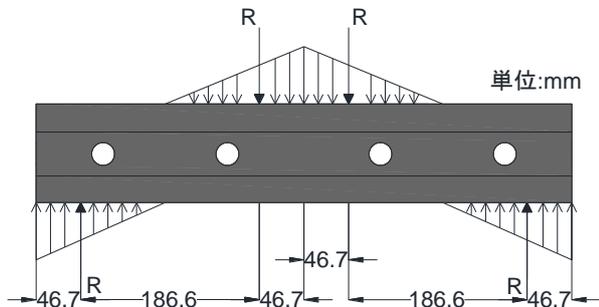


図-3 継目板圧力モデル

I形改良型継目板のZimmermannの理論式¹⁾による解析結果を表-2に示す。なお、比較のために同条件で解析した普通継目板の結果も併せて示す。

表-2のZimmermannの理論式¹⁾による底部曲げ応力の解析結果と有限要素解析モデルの結果を比較することで有限要素解析モデルの妥当性を確認することとする。

表-2 Zimmermannの理論式の解析結果

項目	単位	解析ケース	
		(a) I型改良型	(b) 普通
継目板圧力	kN	115.7	120.8
曲げモーメント	kN・m	21.6	22.5
継目板底部の曲げ応力	N/mm ²	221.9	187.8

b) 有限要素解析モデル

有限要素解析に用いた材料定数を表-3に示す。この解析モデルは左右対称モデルで片側レール分とし、レールと継目板の間に接触要素を用いている。まくらぎ支持はレールから下の軌道パッド等を鉛直ばね要素を用いて固定点に連結し、まくらぎ配置本数29本/25mの軌道を模擬した。なお、解析では継目板ボルト締結時を想定し、トルク250N・m相当における軸力を換算して締結ボルトに軸力として69.8kNを与えた。

表-3 有限要素解析に用いた材料定数

部品	物性	単位	物性値
レール, 継目板	ヤング率	N/mm ²	2.1×10^5
継目板ボルト	ポアソン比	—	0.3
軌道パッド	鉛直ばね定数	MN/m	110
まくらぎ下支持ばね	鉛直ばね定数	MN/m	30

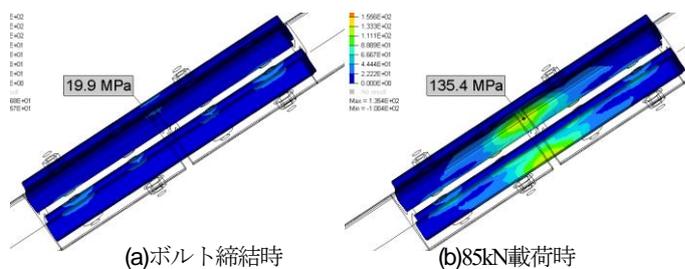


図-4 かけ継ぎの解析結果

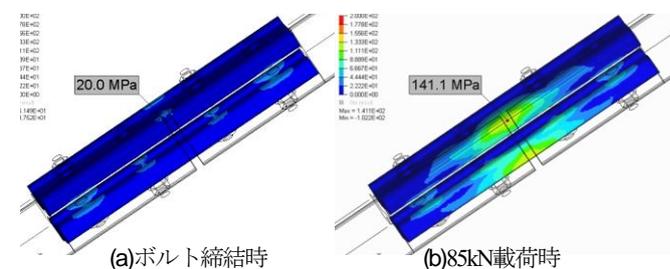


図-5 支え継ぎの解析結果

解析では、図-4.5に示す通り、継目板ボルト締結時の底部の曲げ応力と静止輪重85kNをレール端部へ荷重した時の底部の曲げ応力より応力変動を算出した。

I形改良型継目板および普通継目板における継目板底部に発生する応力変動を図-6へ示す
継目板底部下面の応力変動

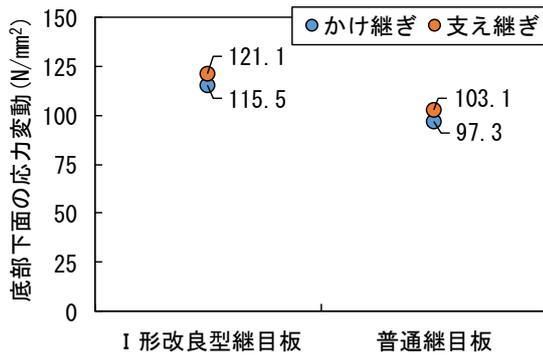


図-6 継目板底部下面の応力変動

図-6の応力変動に変動輪重係数2.0を乗じたものを設計応答値 σ_d とする(表-4)。なお、表-2と表-4のかけ継ぎの支持条件における継目板底部に発生する曲げ応力を比較した結果、ほぼ同等となることから本有限要素解析モデルが妥当性であると判断した。

表-4 有限要素解析モデルによる設計応答値(σ_d)

支持構造	単位	解析ケース	
		(a) I型改良型	(b) 普通
かけ継ぎ	N/mm ²	231.0	194.6
支え継ぎ	N/mm ²	242.2	206.2

(4) 限界値の算出および照査

a) 限界値の算出

I形改良型継目板の設計限界値²⁾は、疲労限度を材料係数で除して、 $\sigma_0=328/1.05=312 \text{ N/mm}^2$ となる。

b) 照査

算出した設計応答値および設計限界値を用いて、I形改良型継目板の疲労限界状態の照査を実施した。

$$\text{かけ継ぎ } \gamma_i \times \sigma_d / (\sigma_0 / \gamma_b) = 0.81 \leq 1 \quad (1a)$$

$$\text{支え継ぎ } \gamma_i \times \sigma_d / (\sigma_0 / \gamma_b) = 0.85 \leq 1 \quad (1b)$$

ここで $\gamma_i:1.1$ 、 $\gamma_b:1.0$ とする。以上より、2章(1)節の設計条件に対してI形改良型継目板は安全性を満足することを確認した。これによりI形改良型継目板を実軌道へ敷設しても問題が無いことを確認した。

3. 継目板の疲労限度値向上

2章の解析結果より、I形改良型継目板の底部に発生する曲げ応力は、普通継目板に対し、かけ継ぎの支持条件で1.18倍、支え継ぎで1.17倍となることが確認された。

I形改良型継目板の性能を普通継目板と同程度とするため、疲労限度値の向上に関する基礎検討を行った。

(1) 引張圧縮耐久限度線図

軌道構造標準²⁾に準拠したJISに規定されている2種の継目板とはほぼ同等の組成、強度であるS45C相当の耐久限度線図を図-7へ示す。図-7へ示す耐久限度線図から、片振り全振幅に換算した値が限界値とされている²⁾。S45C相当の疲労限度としての応力範囲を表-5へ示す。

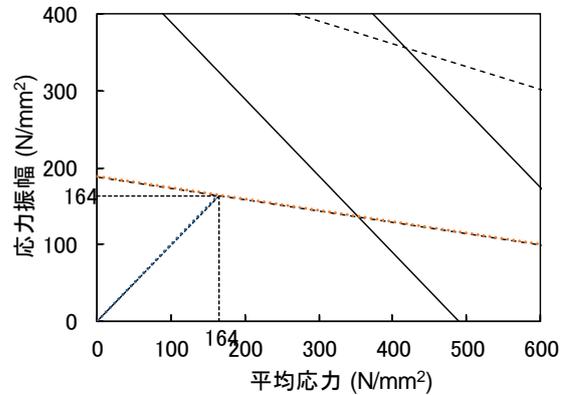


図-7 引張圧縮耐久限度線図(S45C相当)

表-5 疲労限度としての応力範囲(S45C相当)

材質	疲労限度 σ_0
S45C相当	328 N/mm ²

これに対し、I形改良型継目板の疲労限度値を向上させるため検討した耐久限度線図を図-8および図-9へ、疲労限度としての応力範囲を表-6および表-7へ示す。

検討した材質は、機械構造用炭素鋼(JIS G 4501)のS50C相当およびS55C相当とした。各種パラメーターは、金属材料疲労強度データベース(日本材料学会)⁴⁾に準拠した。さらに、軌道構造標準²⁾によるS45C相当の耐久限度線図においては、要素試験により得られている疲労限界の下限值に対し、表面粗さや経年の影響については十分な知見が得られないが、3割の低下を見込んだものとされている²⁾。その為、今回I形改良型継目板の疲労限界値を向上させるため検討したS50C相当およびS55C相当においても同様に疲労限界の下限值に対し、3割の低下を見込むこととした。

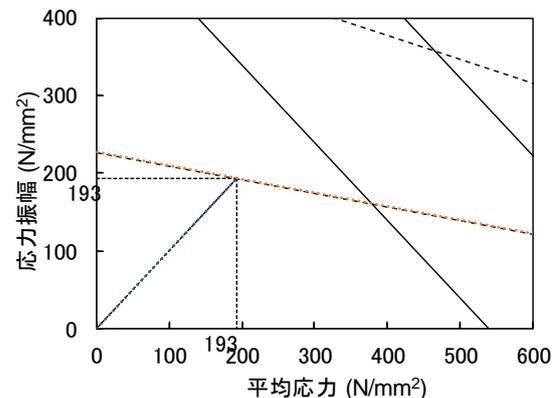


図-8 引張圧縮耐久限度線図(S50C相当)

表-6 疲労限度としての応力範囲(S50C相当)

材質	疲労限度 σ_0
S50C相当	386 N/mm ²

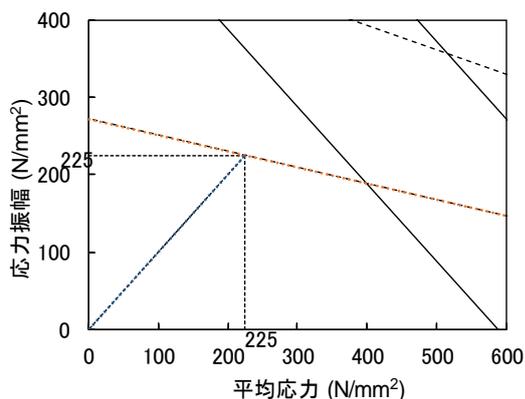


図-9 引張圧縮耐久限度線図(S55C相当)

表-7 疲労限度としての応力範囲(S55C相当)

材質	疲労限度 σ_0
S55C相当	450 N/mm ²

(2) 疲労限度

軌道構造標準²⁾に準拠して、S50C相当およびS55C相当の疲労限度値を算出した。その結果、S50C相当の疲労限度値はS45C相当に対し1.18倍程度、S55C相当の疲労限度値は、S45Cに対し1.37倍程度となることから、I形改良型継目板の材質をS45C相当からS50C相当もしくはS55C相当とすることにより、普通継目板と同程度の性能となると考えられる。

5. まとめ

- (1) Zimmermannの理論式¹⁾による継目板圧力から、かけ継ぎの支持条件におけるI形改良型継目板の底部に発生する曲げ応力、有限要素解析モデルからI形

改良型継目板のかけ継ぎおよび支え継ぎの支持条件における底部に発生する曲げ応力を算出した結果、I形改良型継目板は、照査条件に対して安全性を満足することを確認した。

- (2) I形改良型継目板と普通継目板の底部の曲げ応力を比較した結果、かけ継ぎの支持条件で1.18倍、支え継ぎ支持条件で1.17倍となることを確認した。
- (3) I形改良型継目板の性能を普通継目板と同程度とするため、引張圧縮耐久限度線図から疲労限度値を検討した結果、S50C相当は386MPa、S55C相当は450MPaとなることを確認した。S50C相当の疲労限度値は、S45C相当に対し、1.18倍程度、S55C相当の疲労限度値は、S45C相当に対し、1.37倍程度となることを確認した。
- (5) I形改良型継目板と普通継目板の底部に発生する曲げ応力を比較した結果、1.18倍程度となるが、材質をS45C相当からS50C相当もしくはS55C相当とすることで、普通継目板と同程度の性能となると考えられる。
- (6) 最後に今後、材質をS45C相当からS50C相当もしくはS55C相当としたI形改良型継目板の供試体による疲労試験の実施を検討している。

参考文献

- 1) 佐藤吉彦, 梅原利之: 線路工学, pp410-412, (社) 日本鉄道施設協会, 1987.
- 2) 国土交通省鉄道局 監修: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, pp.45-46, 鉄道総合技術研究所編, 2012.1
- 3) 片岡宏夫, 弟子丸将 他: 普通継目板の曲げ応力に関する解析的検討, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 平成 23 年度
- 4) 日本材料学会: 金属材料疲労強度データベース, pp16-17, 昭和 57 年

(2019.4.5 受付)

Analytical examination on bending stress of joint and basic examination on fatigue limit value

Takumi KURIHARA, Daisuke KOUDU and Takanori KUBO

In this study, the basic analysis of bending stress was conducted on the static joint by the theoretical formula and finite element analysis model of Zimmermann which is a mechanical analysis method of the rail joint for the I-shaped improved joint for 50 kg N rail.

As a result, the safety against fatigue failure of I-type improved joint was confirmed, and it was confirmed that there is no problem in laying on an actual track. In addition, as a result of static analysis, the I-type improved joint has about 1.18 times the bending stress generated below the bottom of the joint with respect to the normal joint plate.

In this research, the lower bending stress is about 1.18 times by reviewing the material (equivalent to S45C) of the 2 types of relay boards specified in JIS, but the fatigue for the purpose of securing the same performance as the ordinary relay boards. We conducted a basic examination of the limit value.