

台車枠設計時の溶接ルート部の強度評価の提案

○ 谷峰 輝彦 [機] 下川 嘉之 (日本製鉄) [機] 山本 三幸 (大阪大学)

[機] 牧野 泰三 (日本製鉄) [機] 近藤 修 (日鉄テクノロジー) [機] 加藤 孝憲 (日本製鉄)

Proposal of strength evaluation method for welded joints with weld roots in Railway bogie frame design

○Teruhiko TANIMINE, Yoshiyuki SHIMOKAWA (Nippon Steel Corporation)

Miyuki YAMAMOTO (Osaka University), Taizo MAKINO (Nippon Steel Corporation)
Osamu KONDO, (Nippon Steel Technology), Takanori KATO (Nippon Steel Corporation)

Many types of loads with various modes and intensities occur in bogie frames under in-service conditions. We proposed a new fatigue strength evaluation method for welded joints with weld roots subjected to complex loads. In this method, stress intensity factors (SIFs) in each loading condition are synthesized for each cracking mode. The mean and amplitude values are obtained from the synthesized SIFs plotted by the polar coordinates centered at the crack tip. Safety factors are calculated from the already proposed endurance limit diagram of applying the above values of synthesized SIFs. This method provides more appropriate results especially in the compressive stress fields than the existing methods.

キーワード：FEM, 溶接ルート部, 応力拡大係数, 安全率, 疲労, 強度評価

Key Words: FEM, weld roots, stress intensity factor, safety factor, fatigue, strength evaluation

1. はじめに

鉄道車両用台車枠は、取付部品が多種多様なため鋼板溶接構造を採用することが多い。そして溶接継手構造の強度評価基準として、外表面についてはJIS規格で定められた耐久限度線に対する安全率評価がなされており、溶接ルート部については未溶着をき裂とみなし、応力拡大係数で評価をしている¹⁾。

過去に、未溶着を有する溶接継手構造の応力拡大係数を指標とした疲労設計基準を定め、FEMを用いた実台車枠の応力拡大係数の演算手法について報告²⁾がなされているが、台車設計に使用するためには、様々な荷重によって生じる応力拡大係数をどのようにして複合化するかが課題であった。ここで評価に用いる複合化した応力拡大係数を複合K値と呼ぶことにする。

以上より現在のK値評価は、設計段階での複合K値の演算方法は定められておらず、台車を製造後、現車走行試験で応力を測定し評価するため、当該台車の設計へ反映できない。設計時に複合K値評価する場合、JIS E4207³⁾に示された外表面応力評価における複合応力演算手法と同様の手法を適用することが考えられる。しかしながら、この方法ではき裂の進展への寄与が小さいと考えられる圧縮応力について適正な評価がなされていないという問題がある。この解決のため、圧縮応力の影響を考慮した新しい複合K値の演算手法を以下に提案する。

2. JIS E4207を参照した複合K値演算手法

本章では、複合K値演算手法として、JIS E4207に示された外表面応力評価における複合応力と同様の手法を適用する場合（以降JIS参照手法と呼ぶ）の手順を示す。

(1) 各き裂モードの応力拡大係数演算

第1図に示すように、FEMによるき裂面の開口変位から、評価する溶接ルート部に垂直断面でのき裂モードⅠおよびモードⅡの応力拡大係数（以降 K_I 、 K_{II} と呼ぶ）を求める。本報では、せん断方向のモードⅢは考慮しない。

(2) 最大接線応力方向応力拡大係数($K_{\theta max}$)の算出

上記に於いて求めた K_I 、 K_{II} より、(1)式に示すErdogan-Sihの混合モードクライテリオン⁴⁾に基づき最大接線応力方向応力拡大係数（以降 $K_{\theta max}$ と呼ぶ）を算出する。ここで、最大主応力方向は(2)式に示す応力拡大係数との関係式より求める。

$$K_{\theta max} = \cos(\theta/2)[K_I \cos^2(\theta/2) - 1.5 K_{II} \sin \theta] \quad (1)$$

$$\theta = \pm \cos^{-1} \frac{3 \times K_{II}^2 + K_I \times \sqrt{8 \times K_{II}^2 + K_I^2}}{9 \times K_{II}^2 + K_I^2} \quad (2)$$

ここで、

θ : 最大主応力方向

K_I : モードⅠ応力拡大係数[MPa $\sqrt{m}$]

K_{II} : モードⅡ応力拡大係数[MPa $\sqrt{m}$]

(3) 荷重毎に求めた応力拡大係数の複合演算

上記より求めた各荷重の $K_{\theta \max}$ を合成し、複合 K 値の平均・変動値を算出する。応力拡大係数の合成については、これまで明確な手法は定められていないため、JIS E4207 に示された複合荷重による応力合成と同様に、(3)式、(4)式に示すように、平均成分は静荷重の種類ごとに算出される応力拡大係数と、片振りの動荷重による応力拡大係数の $1/2$ との代数和とし、変動成分は動荷重による応力拡大係数の合成により求める。

$$K_{\theta m} = K_{\theta \max,1} + K_{\theta \max,2} + \dots + K_{\theta \max,p} + K_{\theta \max,i}/2 \quad (3)$$

$$K_{\theta a} = [K_{\theta \max,1}^2 + K_{\theta \max,2}^2 + \dots + K_{\theta \max,q}^2 + (K_{\theta \max,i}/2)^2]^{1/2} \quad (4)$$

ここで、

$K_{\theta m}$: 平均複合 K 値[MPa $\sqrt{m}$]

$K_{\theta a}$: 変動複合 K 値[MPa $\sqrt{m}$]

$K_{\theta \max,1}, K_{\theta \max,2}, \dots, K_{\theta \max,p}$: 静荷重条件の $K_{\theta \max}$ [MPa $\sqrt{m}$]

$K_{\theta \max,1}, K_{\theta \max,2}, \dots, K_{\theta \max,q}$: 動荷重条件の $K_{\theta \max}$ [MPa $\sqrt{m}$]

$K_{\theta \max,i}$: 片振りとなる動荷重条件の $K_{\theta \max}$ [MPa $\sqrt{m}$]

(4) 応力拡大係数で評価した耐久限度

過去に検討²⁾がなされた応力拡大係数による耐久限度について、破壊確率 2.3%の場合を(5)式、破壊確率 50%の場合を(6)式に示す。また耐久限度線を第2図に示す。

$$\begin{aligned} \Delta K_{th,al} &= 4.45 - 1.49R \\ &= 4.45 - 1.49(K_{\theta m} - K_{\theta a,al}) / (K_{\theta m} + K_{\theta a,al}) \\ &= 2K_{\theta a,al} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta K_{th,al} = 6.52 - 3.3R \quad (6)$$

ここで、

R : 荷重比

$\Delta K_{th,al}$: 許容応力拡大係数範囲[MPa $\sqrt{m}$]

$K_{\theta a,al}$: 変動応力拡大係数の許容値[MPa $\sqrt{m}$]

(5) 耐久限度線との比較

(3)式、(4)式より求めた複合 K 値の平均・変動値を耐久限度線と比較し、溶接ルート部の強度を評価する。

3. JIS 参照手法における課題

第2章に示す手法では、評価断面における、各荷重条件の $K_{\theta \max}$ を合成して複合 K 値を算出する。このとき $K_{\theta \max}$ 方向の θ は(2)式より求まるため、第3図に示す荷重条件と $K_{\theta \max}$ 方向の関係例からも分かるように、同一部位においても荷重条件によって $K_{\theta \max}$ 方向が異なる。一方、(5)、(6)式による応力拡大係数を用いた強度評価基準値は、単一荷重の K 値に対して適用されるものである。したがって、様々な荷重による K 値に対して基準値を適用する場合、

$K_{\theta \max}$ 方向の影響を考慮した等価な複合 K 値を演算する必要がある。

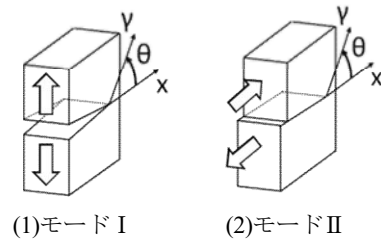


図1 き裂の変形モード

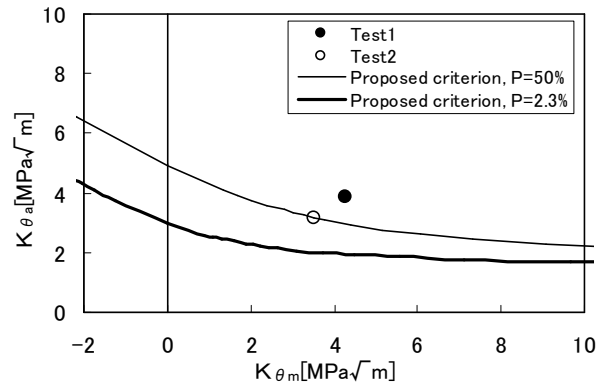


図2 応力拡大係数で評価した耐久限度線²⁾

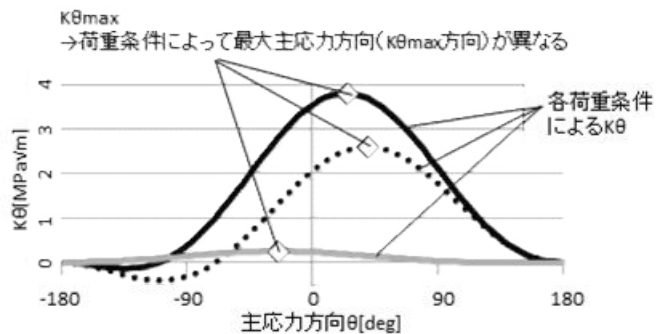


図3 荷重条件と $K_{\theta \max}$ 方向との関係例

4. 新しい複合 K 値演算手法の提案

上述の課題を解決するため、各荷重条件の $K_{\theta \max}$ 方向を考慮した複合 K 値の演算手法を提案する。

4.1 き裂モードごとの応力拡大係数合成

JIS 参照手法では、各荷重条件の $K_{\theta \max}$ を用いて合成するのに対し、提案手法では各荷重条件の K_I 、 K_{II} でそれぞれ合成し、平均・変動複合 K 値を算出する。なお合成手法はJIS 参照手法と同様に平均成分は単純和とし、変動成分は2乗和の平方根とした。例として、き裂モードIの平均複合 K 値を(7)式、変動複合 K 値を(8)式に示す。

$$K_{Im} = K_{I,1} + K_{I,2} + \dots + K_{I,p} + K_{I,i}/2 \quad (7)$$

$$K_{Ia} = [K_{I,1}^2 + K_{I,2}^2 + \dots + K_{I,q}^2 + (K_{I,i}/2)^2]^{1/2} \quad (8)$$

ここで、

$K_{I,m}$: モード I 平均複合 K 値[MPa $\sqrt{m}$]

$K_{I,a}$: モード I 変動複合 K 値[MPa $\sqrt{m}$]

$K_{I,p}, K_{I,q}, K_{I,i}$: 各荷重条件の K 値[MPa $\sqrt{m}$]

4.2 平均・変動複合 K_θ の算出

き裂モード I およびモード II の平均・変動複合 K 値より、(9)式に示すように複合 K_θ を求める。

複合 K_θ の演算においては、特定の荷重における応力拡大係数が圧縮側である場合でも、他の荷重により引張側になる可能性がある。そこで、応力拡大係数の引張・圧縮側両方の影響を考慮するため、複合 K_θ の変動成分が最大となる平均・変動複合 K 値の組合せを検討する。

(9) 式を定数項と三角関数項に分けると、以下のように表すことができる。

$$K_\theta = \cos(\theta/2)[K_I' \cos^2(\theta/2) - 1.5K_{II}' \sin \theta] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= \cos(\theta/2)^2 [\sqrt{(A^2 + B^2)} \times \sin(\theta/2 + \varphi)] \\ &= \sqrt{(A^2 + B^2)} \times f(\theta) \end{aligned} \quad (10)$$

$$A = -3 K_{II}' \quad (11)$$

$$B = K_I' \quad (12)$$

$$\varphi = a \sin \sqrt{B/(A^2 + B^2)} \quad \text{if } A \geq 0$$

$$\pi - a \sin a \sin \sqrt{B/(A^2 + B^2)} \quad \text{if } A < 0 \quad (13)$$

$$f(\theta) = \sin(\theta/2 + \varphi) \cos(\theta/2)^2 \quad (14)$$

ここで、

K_I' : モード I 複合 K 値[MPa $\sqrt{m}$]

K_{II}' : モード II 複合 K 値[MPa $\sqrt{m}$]

K_θ : 複合 K_θ [MPa $\sqrt{m}$]

ここで、(10)式より、複合 K_θ はモード I およびモード II の複合 K 値の 2 乗和の平方根に比例する。よって複合 K_θ の変動成分が最大となる平均・変動複合 K 値の組合せは、各き裂モードの絶対値が最大となるときである。ただし、負のモード I の K 値はき裂進展に影響しない圧縮変形を示すため絶対値評価を適用しない。上記より、複合 K_θ の変動が最大となる平均・変動複合 K 値の組合せを第 2 表に示す。

第 2 表 最大・最小の組合せ

K_θ	K_I'	K_{II}'
最大 ($K_{\theta,t}$)	$K_{I,max} = \max(K_{I,m} + K_{I,a}, K_{I,m} - K_{I,a})$	$K_{II,max} = \max(K_{II,m} + K_{II,a} , K_{II,m} - K_{II,a})$
最小 ($K_{\theta,b}$)	$K_{I,min} = \min(K_{I,m} + K_{I,a}, K_{I,m} - K_{I,a})$	$K_{II,min} = \min(K_{II,m} + K_{II,a} , K_{II,m} - K_{II,a})$

4.3 全周方向における $K_{\theta,max}$ の探索

(15), (16)式に示すように、(9)式および第 2 表より、複合 K_θ の最大・最小値を算出する。ここで評価断面において、 θ をき裂先端中心より全周方向に評価すると、 θ と複合 K_θ との関係は第 4 図のように表される。

得られた複合 K_θ より、(17), (18)式に示すように、角度ごとに平均・変動複合 K_θ を求め、耐久限度線図上に描画すると第 5 図に示すように円状に表される。ここで、耐久限度線との安全率が最小となる点を求め、当該評価部位の探索結果を $K_{\theta,max}$ として採用する。そのため、評価に用いる $K_{\theta,a}$ は、必ずしも最大値とはならない。

$$K_{\theta,t} = \cos(\theta/2)[K_{I,max}' \cos^2(\theta/2) - 1.5K_{II,max}' \sin \theta] \quad (15)$$

$$K_{\theta,b} = \cos(\theta/2)[K_{I,min}' \cos^2(\theta/2) - 1.5K_{II,min}' \sin \theta] \quad (16)$$

$$K_{\theta,m} = (K_{\theta,t} + K_{\theta,b})/2 \quad (17)$$

$$K_{\theta,a} = (K_{\theta,t} - K_{\theta,b})/2 \quad (18)$$

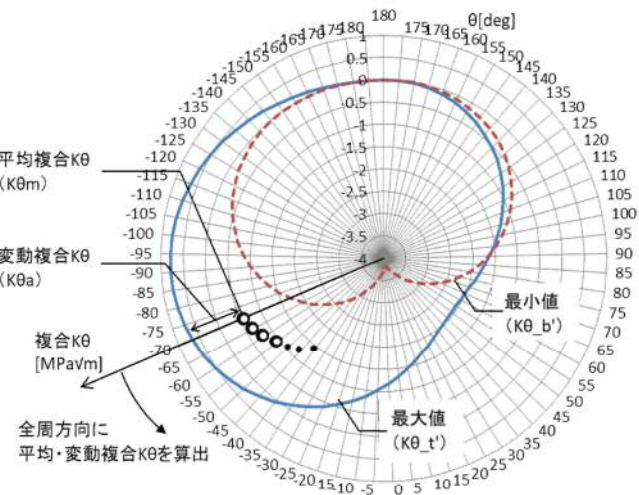


図 4 全周方向における複合 K_θ 演算

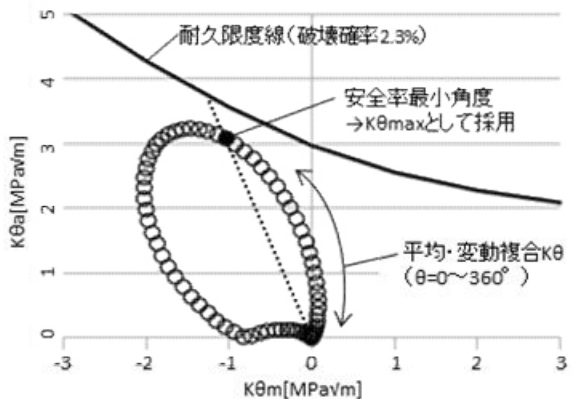


図 5 応力拡大係数で評価した耐久限度線との比較

5. 台車枠モデルへの適用

第 6 図に示す台車枠モデルに一般的な通勤車の荷重条件を用いて、本報にて提案した新手法を適用し、JIS 参照手法との比較評価を行った。なお評価部位は台車枠横ばり天板～横ばり縦板間の溶接ルート部とした。

5.1 平均・変動値の比較

第7, 8図に各評価点における平均・変動複合 K 値の分布を示す。第7図より、平均値については新手法によって圧縮方向の評価がなされている。

また第8図より、一部の断面での変動複合 K 値は、新手法のほうが JIS 参照手法よりも高い値となる。新手法では、平均複合 K 値が負の場合に、変動複合 K 値が大きくなる場合がある。

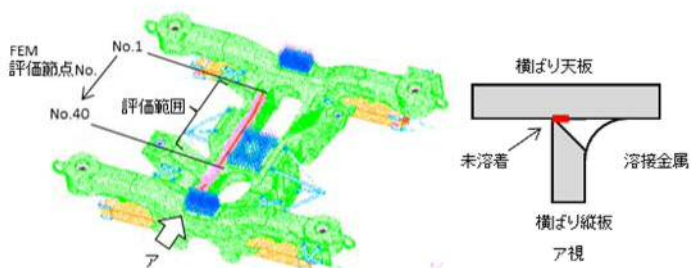


図6 台車枠解析モデル

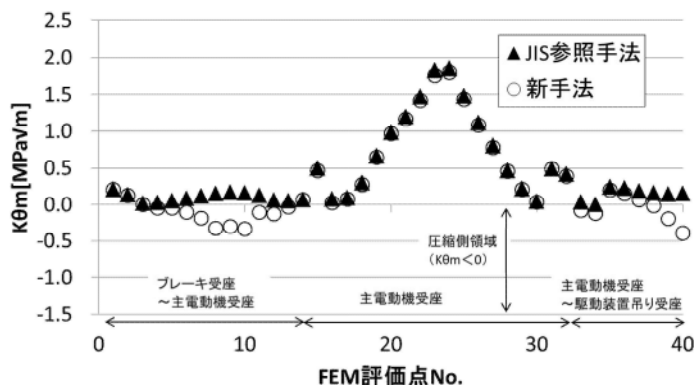


図7 平均複合 K 値の分布

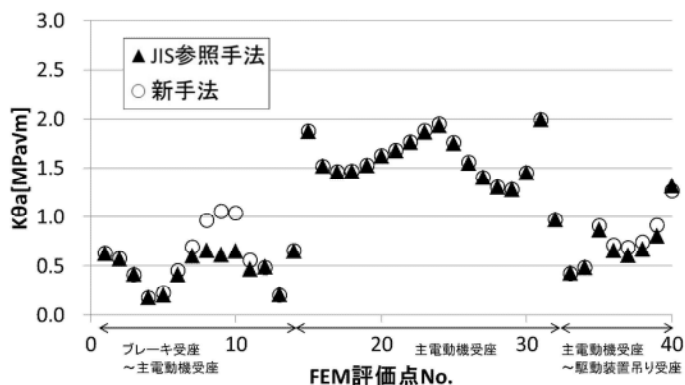


図8 変動複合 K 値の分布

5.2 応力拡大係数で評価した耐久限度線との比較

第9図に、すべての評価点における K_{0max} と応力拡大係数で評価した耐久限度線との比較を示す。第9図より、新手法については圧縮方向の平均値についても評価がなされている。

本結果より、新手法によって圧縮方向の複合 K 値の評価が可能となり、より適正な評価ができた。

本手法により、横ばりをUプレスと天板で溶接する部位だけでなく、片開先隅肉溶接継手を採用している側ばりと

横ばりパイプ貫通部、側ばりとばね帽の溶接部等の、台車枠主構造の溶接ルート部について、複合荷重に対応した強度評価を適切に設計検討できると考える。

一方、本解析は、解析負荷が大きいため、荷重非伝達の開先のない隅肉溶接継手の未溶接部や、入疵事例の少ない片開先隅肉溶接部、荷重非伝達の付加物の全周溶接や栓溶接部等については、設計解析コストと解析の必要性を吟味の上、適用可否を判断する必要がある。

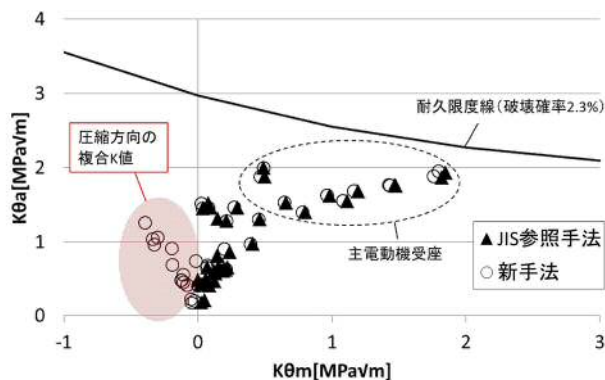


図9 応力拡大係数で評価した耐久限度線との比較

6. まとめ

- ・台車枠の溶接ルート部の強度評価に関して、応力拡大係数の疲労設計基準に対する複合応力拡大係数演算手法を検討した。
- ・JIS 参照手法により算出した複合 K 値は K_{0max} 方向の異なる応力拡大係数を合成して求めた値であり、適正な評価がなされていないため、角度毎に複合 K 値を演算し、安全率が最小となる向きを K_{0max} とする新たな手法を提案した。
- ・各荷重条件の応力拡大係数をき裂モードごとに合成し、き裂を中心に全周方向にわたり複合 K 値の平均・変動値を算出し、耐久限度線との安全率が最小となる点を求める手法を適用した。
- ・新手法を用いた台車枠モデルの複合 K 値評価の結果、圧縮応力場に対して JIS 参照手法よりも適正な評価が可能となった。
- ・今後、台車枠設計時における他部位への適用を検討するとともに、現車評価等により手法妥当性を検証する。

参考文献

- 1) 牧野泰三, 石塚弘道: 疲労の基礎と実機疲労設計の最新動向 5. 鉄道の疲労設計における最近の動向, 材料, vol.59-5, pp.398-405, 2010.
- 2) 近藤修, 牧野泰三, 山本三幸, 仲田摩智, 楠本富佐夫, 佐藤興志, 下川嘉之: 未溶着を有する溶接継手構造の強度評価と台車枠疲労設計基準への適用, 日本材料学会 第10回機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム前刷集, pp.9-12, 2006.
- 3) 日本規格協会: JIS E4207「鉄道車両一台車一台車枠設計通則」, 2019.
- 4) F.Erdogan, G.C.Sih, J.Basic Eng., Trans. of the ASME, pp.519-527, 1963.