

FEM を用いた全視野安全率計算による台車枠強度評価手法

○ [機] 亀甲 智 岡本 和典 [機] 下川 嘉之 [機] 牧野 泰三

[機] 加藤 孝憲 (日本製鉄) [機] 近藤 修 (日鉄テクノロジー)

Development of full-field safety factor calculation method for bogie frames using FEM

○Satoshi KIKKO , Kazunori OKAMOTO , Yoshiyuki SHIMOKAWA , Taizo MAKINO
and Takanori KATO (Nippon Steel Corporation)
Osamu KONDO, (Nippon Steel Technology Co., Ltd.)

The finite element method (FEM) is a useful technique for estimating stresses on bogie frames during the design process. We developed a new full-field safety factor calculation method based on FEM. In this method, material and finish treatment information are assigned to all the nodes of the FEM model. Safety factors in each node of the entire bogie frame are calculated based on the stress limit diagram and displayed in the entire field of view of the bogie frame. This method will provide more reliability in the design of bogie frames and more efficiency in maintenance through nondestructive inspection based on the safety factor.

キーワード : FEM, 全視野評価, 安全率, 疲労, メンテナンス, 設計強度

Key Words : FEM, full field evaluation , factor of safety, fatigue, maintenance, design strength

1. はじめに

FEM は、設計時点での台車枠応力把握に有効である。
材料および仕上げ区分・強度区分を FEM の全節点にあらかじめ付与することにより、台車枠全体について、応力限界図に応じた安全率を算出し、全視野表示する手法を開発した。この手法により、台車枠メンテナンス時の非破壊検査の深度化、効率化が達成できる可能性がある。

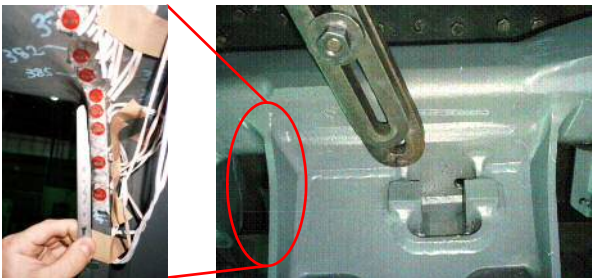


図 1 ひずみゲージ貼り付け状態

2. FEM による応力評価

2.1 FE の応力予測精度

静荷重試験と FEM の応力比較を行った。台車枠強度評価の重要部位である台車枠溶接部の応力評価を行うため、図面に基づき 3D-CAD で溶接形状をモデル化し、ソリッド要素を用いて要素分割を行った。表 1 に FE 条件を示す。なお FE モデルでは、台車枠の変形を拘束する剛体要素や拘束条件は使用していない。また静荷重試験に用いる治具は、台車枠としてモデル化した。

静荷重試験では、FEM と応力比較する、溶接ライン

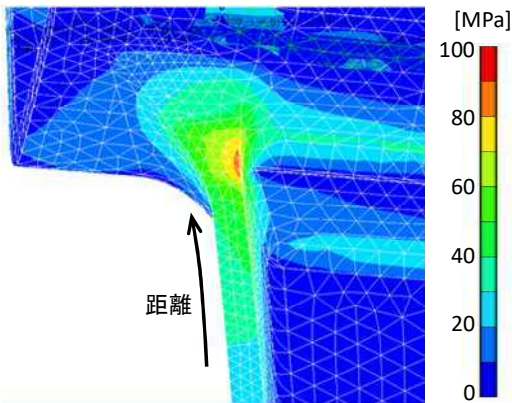


図 2 最大主応力コンタ図

表 1 FE モデル

使用したソルバー	I-DEAS MasterSeries7
要素の種類	2 次 テトラ要素
グローバルメッシュサイズ	16 mm
要素数	43 万
節点数	79 万

ダ仕上げの部位に 3 軸ゲージを貼り、最大主応力を用いて比較した。図 1 に 3 軸ゲージ貼り付け写真を、図 2 に FE 最大主応力コンタ図、図 3 に静荷重試験ひずみゲージ測定

と FE の比較結果を示す。図 3 より FEM で実台車枠応力を正確に予測できていることがわかる。また FEM は、ひずみゲージが貼られていない最大応力発生部位をとらえており、局所的に最大応力が発生する部位の見落とし防止に有効である。

なお As-weld 溶接部のひずみゲージ測定と FE は、ゲージ端を溶接止端部に合わせる方式（以降、ゲージ端式と呼ぶ）で貼った場合のひずみ測定結果と一致¹⁾する。

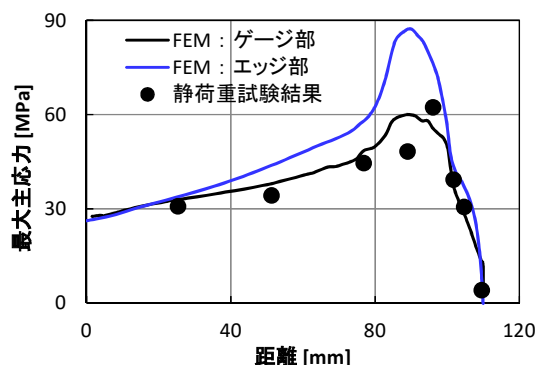


図 3 静荷重試験と FEM で求められる応力比較

2.2 静荷重試験に用いる応力と FEM の応力

(1) 静荷重試験の単軸ゲージで得られる応力

静荷重試験では、5mm の単軸ゲージを用いてひずみを測定し、ヤング率を乗じて‘応力’と呼ぶ。ひずみとヤング率の積で求める応力を、本報ではその他の応力と区別するため、‘ゲージ応力’とするが、物理的意味としてはひずみである。

$$\text{ゲージ応力 [MPa]} = \text{ひずみ} \times \text{ヤング率 [MPa]} \dots\dots\dots (1)$$

(2) FEM および 3 軸ゲージを用いた場合の静荷重試験での応力

FEM および 3 軸ゲージを用いた静荷重測定では、全方向の応力とひずみを求めることができる。ここでの応力は、‘ゲージ応力’とは異なることから、弾性力学用語の‘垂直応力’と呼ぶ。

FEM では台車枠全体の垂直応力場を表示することが可能で、荷重毎に、垂直応力の最大値である最大主応力、または最小値となる最少主応力を、コンタ表示することが多い。

特定の評価位置における、垂直応力と最大最小主応力の関係について、FEM または 3 軸ゲージを用いた静荷重試験で得られる、評価方向を変化させたときの垂直応力と最大最小主応力の関係を示す例を図 4 に示す。また図 4 の垂直応力分布を、ゲージ応力に換算した結果を図 5 に示す。図 4 と図 5 から、ゲージ応力と垂直応力は、ポアソン比の影響により、一致しない。

また図 5 には、0、45、90 度方向に 3 軸ゲージを貼り、単軸ゲージとして評価した場合の、変動ゲージ応力と、平均ゲージ応力を△で示す。単軸ゲージでは、一般化されたフックの法則で必要となる 3 成分を測定していないため、

図 4 の垂直応力は、そもそも算出できない。

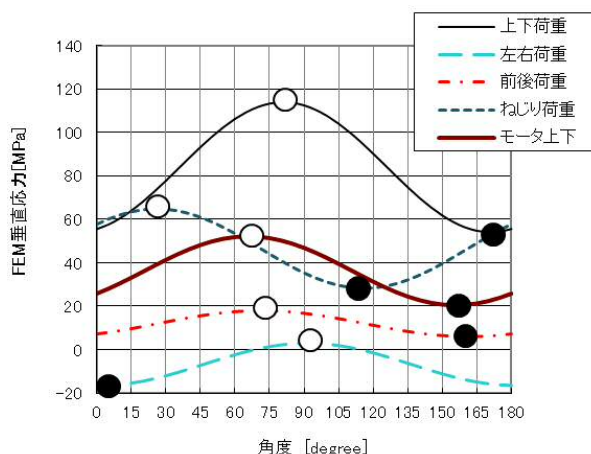


図 4 単荷重毎の評価向きと垂直応力の関係例
および各荷重による最大主応力○、最少主応力●

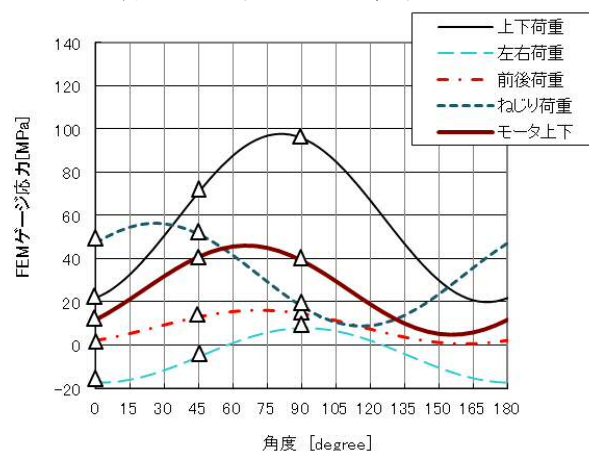


図 5 単荷重毎の評価向きとゲージ応力換算結果
および 3 軸ゲージを単軸ゲージとして評価した場合のゲージ応力△

(3) 複合応力演算

図 4 に示す各荷重の垂直応力から、JIS 複合演算に従って平均と変動の複合応力を演算した¹⁾結果を図 6 に示す。

同様に、図 5 に示す各荷重のゲージ応力から、平均と変動の複合ゲージ応力を算出した結果を図 7 に示す。

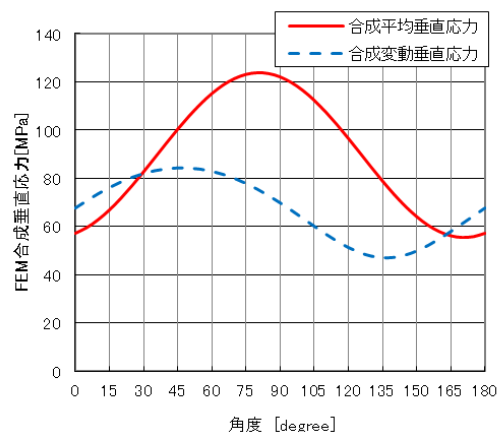


図 6 評価向きを変化させたときの複合平均垂直応力と複合変動垂直応力の関係

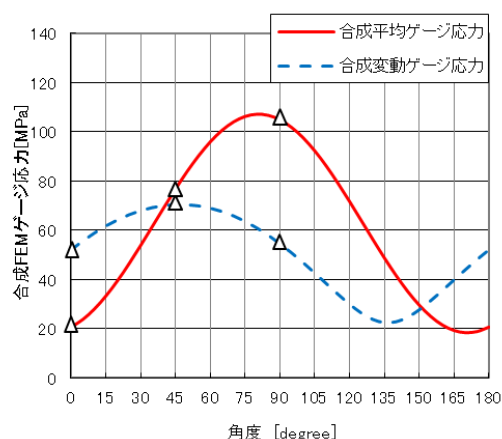


図 7 評価向きを変化させたときの複合平均ゲージ応力と複合変動ゲージ応力の関係

および 3 軸ゲージを単軸ゲージとして評価した場合のゲージ応力△

(4) 応力限界図を用いた強度評価と安全率の定義

図 7 に示す複合ゲージ応力を応力限界図上で評価した結果を図 8 に示す。

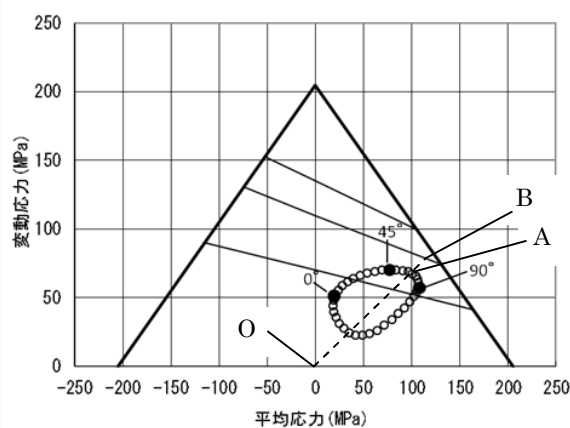
本報では、原点から限度値までの距離の比を安全率とし、安全率が最も小さくなる値を、測定点における安全率と定義する。

$$\text{安全率} = |\text{OB}| / |\text{OA}| \dots\dots\dots (2)$$

A : 安全率が最小となる向きの平均変動応力

B : 安全率が最小となる向きの許容応力

3 軸ゲージを用いる場合、3 つの単軸ゲージとして評価するのが一般的であり、必ずしも安全率が最小となる方向での評価ではない。



○ : ゲージ応力 ● 3 軸ゲージを単軸ゲージ評価する場合

図 8 応力限界図での評価結果

3. FEM 結果を用いた安全率コンタの作成方法

3.1 演算方法

JIS²⁾に定められる荷重について FEM を行う。全節点に対し、複合応力演算を行い、応力限界図上で最も安全率が小

さくなる値を算出する。得られた全節点での安全率を、コンタ表示する。

なお JIS²⁾に定められる許容応力は、静荷重試験での 5 mm ゲージの出力に対応したものである³⁾。そのため、メッシュが細かい場合、5 mm ゲージ相当のひずみを得られるように、周囲の節点出力を用いて平均化処理を行う³⁾。そして As-weld 溶接部は、ゲージ端式で測定したゲージ応力に相当する¹⁾。

3.2 材料区分

JIS²⁾では、許容応力は、材料毎に定義される。よって FE モデルの全節点について、許容応力を定義する。材料区分の境界部に位置する節点は、許容応力が低い側の材料を定義し、安全側評価をする。図 9 に材料区分定義の例を示す。

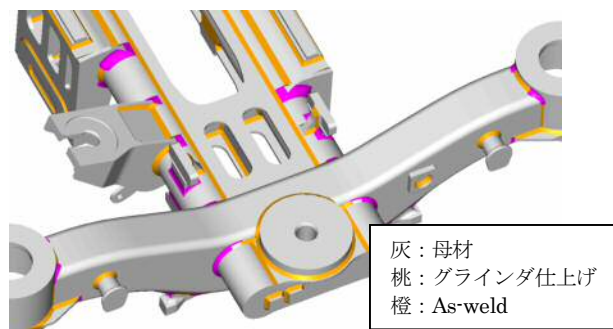


図 9 材料区分定義例

4. 安全率コンタ作成結果

4.1 演算結果例

安全率コンタ表示結果を図 10 に示す。台車枠全体の安全率を全視野表示ができる。

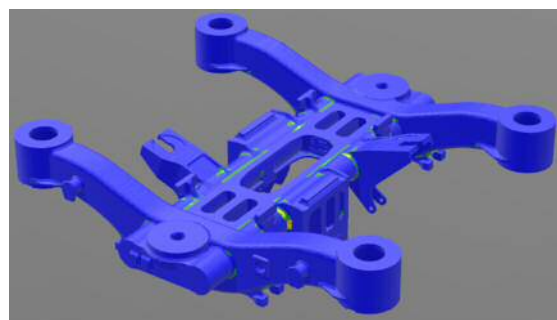


図 10-1 安全率コンタ表示結果例

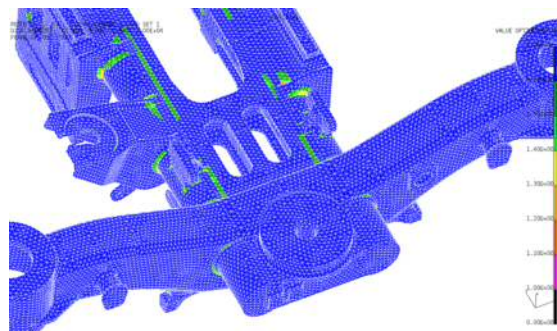


図 10-2 安全率コンタ表示結果例 (拡大)

安全率コンタ図の画像処理や、3D プリンタへの出力、実台車へのプロジェクションマッピング等を組み合わせることで、重要部検査時の非破壊検査の深度化、効率化、検査漏れの防止等への活用が期待できる。

4.2 演算結果考察

表2に、本台車における安全率算出結果と、これまでの入疵事例⁴⁾の比較結果を示す。

実形状での安全率の絶対値や信頼性は不明だが、安全率が相対的に低い部位で入疵事例が報告されており、今回解析した事例では、重要な非破壊検査部位をよく予測出来ている。

このことから安全率に応じて、検査部位、検査頻度、検査方法を設定することで、効率的で漏れの少ない検査ができる可能性がある。

表2 入疵部位と安全率

部位名	件数	安全率
側ばり・ばね帽、ばね座溶接部	98	1.4
側ばり溶接部	86	1.2
主電動機、駆動装置取付部	73	1.1
部品取付部	61	1.1
側ばり・横ばり溶接部	36	1.4
穴部（鋳物）	35	1.2
側ばり・軸箱守足溶接部	18	—
側ばり・揺れまくらすり板 つり受け溶接	12	—
横ばり・つなぎはり溶接部	5	1.2
揺れまくら溶接部	5	—
側ばり・まくらばね座溶接部	5	1.4
端ばり溶接部	4	—
軸箱つの案内部	4	—

4.3 安全率の設定

破壊確率に応じた許容応力を使用する事で、破壊確率に応じた強度評価を行うことができる。

JIS²⁾では、応力比 $R=-1$ の許容応力が 3σ 相当で、変動係数が0.06と想定していることから、破壊確率と疲労強度は一義的に算出され、安全率も一義的に決まる。

さらに表3には、As-weld 溶接部を、ゲージ端式で測定した場合の疲労強度と破壊確率⁵⁾を記載する。またゲージ端式の許容応力から、JIS E4208で規定されるゲージ応力へ換算¹⁾した結果を示す。

表3から、安全率コンタ表示結果は、破壊確率表示と同義であることから、安全率に応じた非破壊検査条件を設定することで、破壊確率に応じたメンテナンスができる可能性があり、非破壊検査を効率化できる可能性がある。

5. 今後の課題

安全率コンタの算出は、設計時に用いる設計荷重を使用する。そのため実荷重に対する設計荷重の妥当性の確認が

表3 破壊確率と許容応力[MPa]および安全率

破壊 確率%	JIS E4207			As-weld 疲労試験 ⁵⁾		安全率
	As-weld	グラインダ 仕上げ	SM490	ゲージ端式	JIS 式 ¹⁾	
50	85	134	189	77	92	0.82
16	80	126	178	—	—	0.87
5.0	77	121	170	62	74	0.88
2.3	75	118	166	59	71	0.93
0.1	70	110	155	—	—	1.0
0.003	65	102	144	—	—	1.08
3e-5	60	94	132	—	—	1.17

必要である。

なお複合応力演算は、JIS²⁾による演算式を用いているが、台車枠の実疲労現象をより正確に見積もることで、安全率コンタの実用的な価値の向上が期待できる。例えば許容応力に対する安全率表示に留まらず、疲労損傷度コンタ、寿命コンタ表示技術の開発が望まれる。また疲労試験と実台車との寿命コンタ比較を通して、疲労試験の妥当性確認、台車の寿命推定等への活用が期待される。

今回報告した安全率コンタによる全視野可視化技術では、溶接の内部未溶着のような、直接目視検査できない部位には対応できない。そのため可視化方法のさらなる改善が必要である。

6. まとめ

- ・ 静荷重試験ではひずみゲージを貼った部位のみの評価になるが、FEM は全表面の評価が可能である。また静荷重試験での応力評価と異なり、部位毎の最大応力の見落としを防止できる。
- ・ FEM では、溶接ビードまでモデル化することで、精度の良い応力予測が可能である。
- ・ 設計段階で、FEM で台車枠の安全率コンタを作成し、強度評価を行った。本手法を用いることで、安全率に応じた非破壊検査が可能であり、メンテナンスを効率化できる可能性がある。
- ・ 演算した安全率と入疵事例件数には、相関がある。
- ・ 静荷重試験でのひずみゲージの出力はひずみであり、弾性力学上の垂直応力とは異なる。

参 考 文 献

- 1) 加藤、和田他：鉄道車両用台車枠溶接部の応力評価、日本機械学会、Vol.86,No.889, 2020
- 2) JIS E4207「鉄道車両—台車—台車枠強度設計通則および同解説」、(2019)
- 3) JIS E4208「鉄道車両—台車—荷重試験方法」、(2004)
- 4) 台車枠の検査マニュアル 2019/2/19
- 5) 牧野他：鉄道車両用台車枠溶接部の疲労強度評価と設計基準への適用、日本機械学会、TRANSLOG '05, 2005