

鉄道車両用台車枠の溶接継手を含めた一体 FE 解析

亀甲 智* 岡本 和典 下川 嘉之 三平 剛 加藤 孝憲 (日本製鉄)
近藤 修 (日鉄テクノロジー) 山崎 陽介 牧野 泰三 (日本製鉄)

Finite element analysis including welded joints of bogie frame for railway vehicle

Satoshi Kikko*, Kazunori Okamoto, Yoshiyuki Shimokawa, Goh Mitsuhira, Takanori Katoh, (NIPPON STEEL CORPORATION)

Osamu Kondou, (NIPPON STEEL TECHNOLOGY) Yosuke Yamazaki, Taizo Makino, (NIPPON STEEL CORPORATION)

Welded joints in bogie frames have toe radii from less than 1 to 20 mm. The finite element model constructed considering the toe radius has a small mesh size, and its application to the entire bogie frame requires considerable computational resources. Therefore, we examined modeling of welded joints from the viewpoint of stretch design to determine the appropriate mesh size that can be used to model the entire bogie frame. We found that modeling with a mesh size of 16 mm and using a chamfer is appropriate for understanding the stress state of the entire integrated bogie frame.

キーワード：鉄道車両用台車枠，溶接継手，FE 解析，止端半径，モデル化，計算リソース，
(Bogie frame for railway vehicle, Welded joints, Finite element analysis, Toe radius, Modeling, Computational resource)

1. はじめに

鉄道車両用台車枠について、JIS E 4207⁽¹⁾および、JIS E 4208-1⁽²⁾に示す方法を用いて、静荷重試験にて強度を評価する。その予測ために FE 解析が用いられる。

鉄道車両用台車枠の FE 解析については、引用文献(3)に記載があるほか、著者らは引用文献(4)~(5)を報告している。また、安全運輸委員会発行の引用文献(6)~(7)にも FE 解析について述べられている。

本報では下記視点より FE 解析の現状を整理する。FE 解析にあたり、形状や治具の再現、拘束条件などの不確定要素が存在する。その不確定要素の 1 つである溶接形状の実状を把握し、メッシュサイズの細分化を検討する。メッシュサイズを細分化すると計算リソースが増大するため、鉄道車両用台車枠の全体設計に妥当なメッシュサイズを提案する。

2. 実台車枠の溶接止端半径

(2-1) 評価対象 弊社で製造する新幹線および民鉄向けの 4 台車枠を対象とする。溶接形状のうち、応力集中しやすい溶接非仕上げ部位 (以下 As-weld 部) を測定対象とする。

(2-2) 測定結果 1565 断面の溶接止端半径の頻度分図を図 1 に示す。このデータの溶接施工はロボットおよびハンド溶接を含めている。図 1 より、溶接止端半径の頻度が高いのは、1.0~1.1mm の区間である。

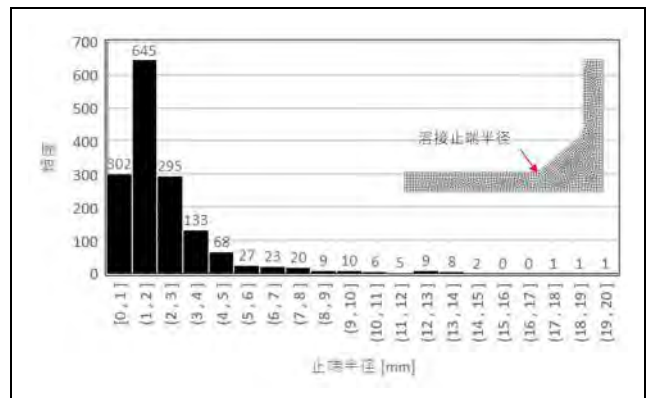


図 1 台車枠 As-weld 部の溶接止端半径の頻度分布

Fig. 1. Frequency distribution of toe radii of as-welded bogies.

応力集中を求める場合、半径÷10 程度のメッシュサイズで FE モデル化することが妥当と言われている。台車枠の場合、強度評価には 5mm のひずみゲージを用いて応力を評価する。FE モデルのメッシュサイズを細分化しても、5mm 長さのひずみの平均値が静荷重試験結果の応力に相当する (引用文献(8)参照)。溶接止端半径に寄らず、静荷重試験を再現できるメッシュ分割について次章以降で検討する。

3. 部分 FE モデルによる静荷重試験との比較

〈3-1〉 FE モデル FE 解析のメッシュサイズによる静荷重試験との差異を、台車枠の 1/4 のみの側ばり単体のモデルで評価する。側ばりとばね帽とのグラインダ仕上げ溶接(Gr 部)接続部についてひずみゲージと同じ位置で応力を評価する(図 2 参照)。ここでは、前述の As-weld 部ではなく、溶接部をカウンターゲージで測定し、実形状をモデル化した Gr 部での評価とした。モデルの形状は一定して、メッシュサイズおよび一部の細分化を区分として表 1 に示す。出力結果として「ゲージ応力」と、FE 出力で一般的な「最大・最小主応力」とする。荷重条件としては上下方向の荷重のみを付与する。FE 解析には汎用ソフト NX-Nastran を用い、四面体 2 次要素とした。

〈3-2〉 静荷重試験との比較 メッシュ分割の区分 1 ①と静荷重試験とのゲージ応力を図 3 に比較する。このとき、静荷重のひずみゲージ(ロゼットゲージは 3 方向を単軸ゲージ相当とする)の長さと同じ向きに合わせ、FE モデルの節点を調整した(図 2 参照)。図 3 より静荷重試験結果と FE 結果は±20MPa 以内で良く一致した。

〈3-3〉 メッシュ分割による影響 区分 1-①のメッシュ

表 1 部分モデルでの FE 解析区分

Table 1. FE analysis parameters for the partial model.

区分	グローバルメッシュサイズ	側ばりとばね帽との接続部
1-①	12mm	2.5mm で細分化
1-②	12 mm	5.0mm で細分化
1-③	12 mm	6.0mm で細分化
1-④	12 mm	細分化なし
1-⑤	16 mm	細分化なし

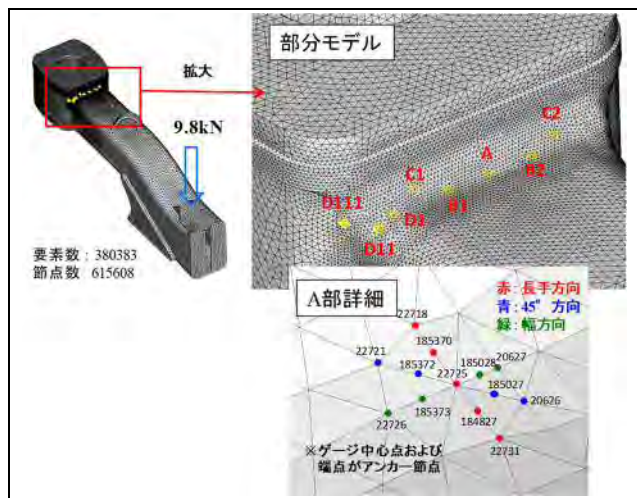


図 2 部分モデルと応力評価部位

Fig. 2. Partial model and stress evaluation part.

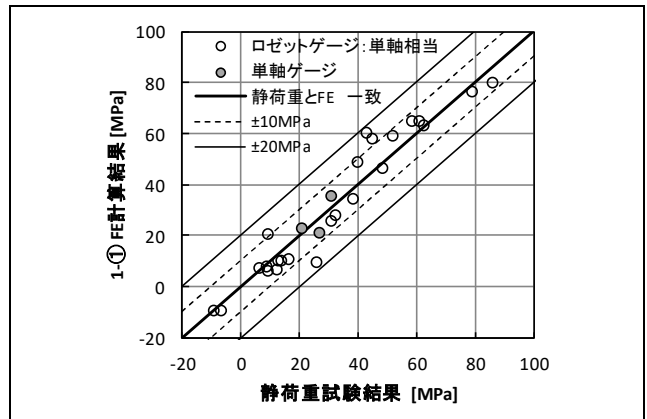


図 3 部分モデルでの静荷重試験と FE 解析結果比較

Fig. 3. Comparison of static load test and FE analysis results for the partial model.

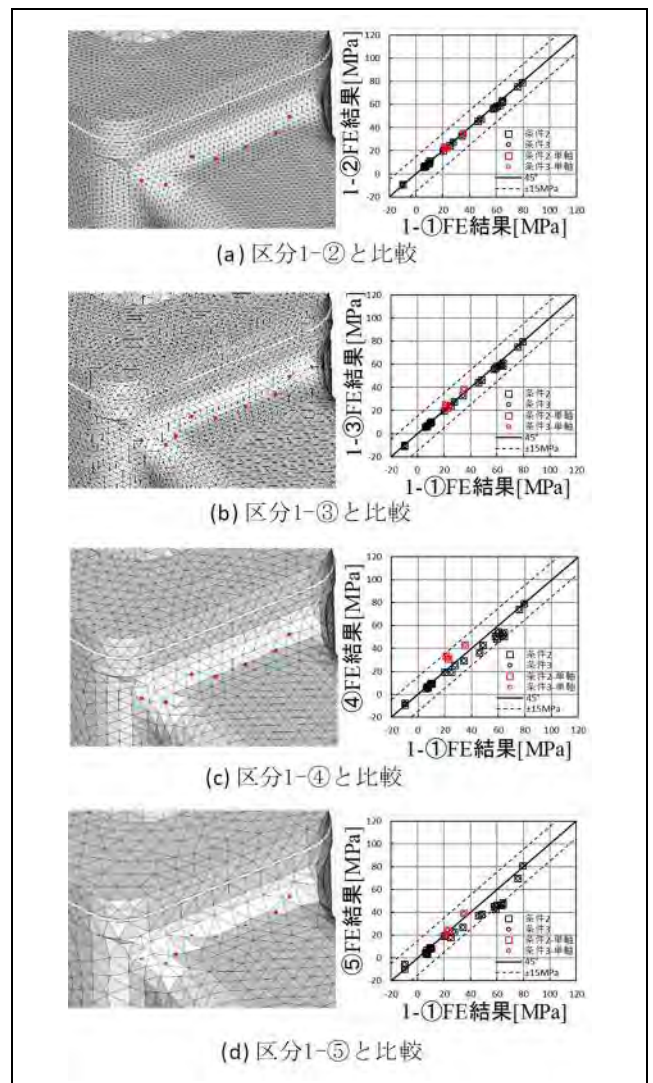


図 4 メッシュサイズの違いによる応力比較

Fig. 4. Comparison of stress at different mesh sizes.

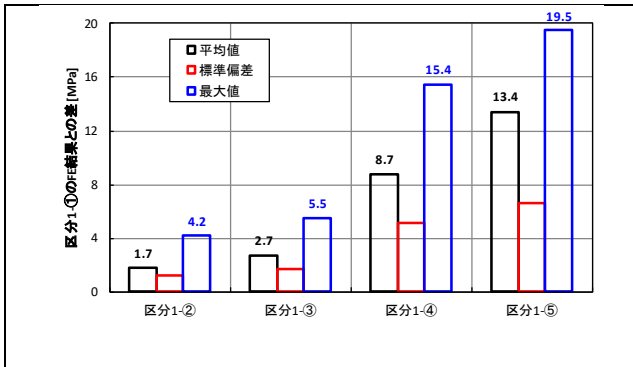


図 5 主応力での評価

Fig. 5. Evaluation under principal stress

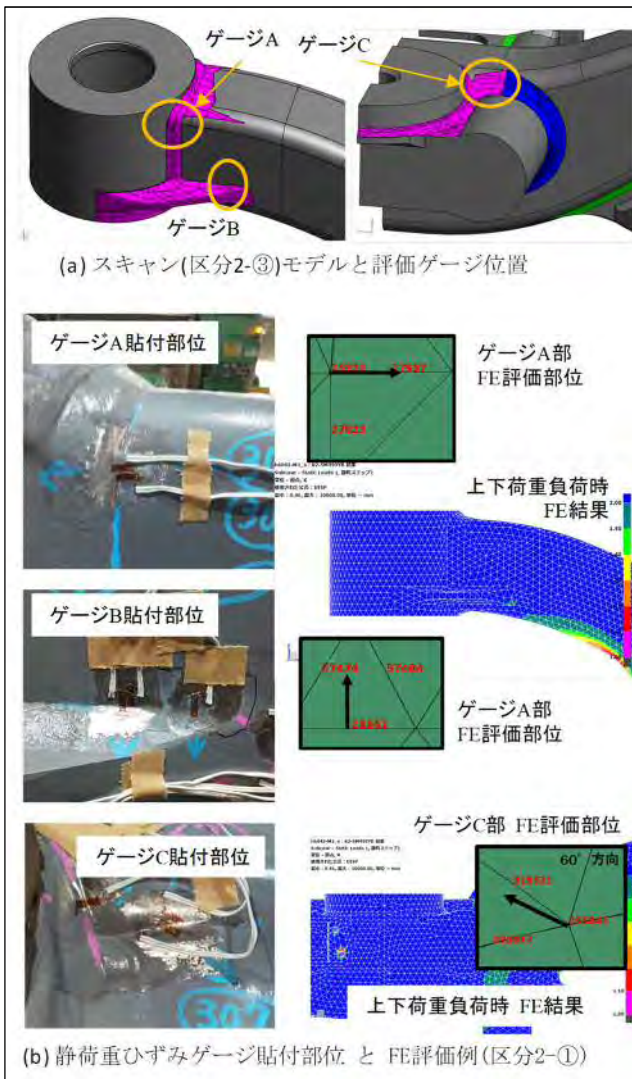


図 6 一体台車枠モデルと応力評価部位

Fig. 6. Integrated bogie frame model and parts for stress evaluation.

分割での FE 解析結果は静荷重試験と良い一致が見られた。しかしながら、静荷重試験の予測段階の FE 解析実施時にゲージの向きなど考慮したメッシュ作成は困難である。そのため、FE 解析ソフトの自動メッシュ機能を活用し、メッシュサイズを粗くした区分 1-2~1-5と 1-1を比較する。

図 4 の横軸を区分 1-1、縦軸に区分 1-2~1-5それぞれの FE からのゲージ応力を比較した。区分 1-5の 16mm メッシュサイズでも、平均 6.1MPa、最大 17.7MPa の差であった。また、図 5 は主応力を示しており、区分 1-5で、平均 13.4MPa、最大 19.5MPa の差を有していた。これは静荷重試験と FE 解析の誤差±20MPa と同程度であり、メッシュサイズを 16mm でもゲージ応力を評価することは可能といえる。

4. 一体台車枠の FE 解析

〈4-1〉 FE モデル 一体台車枠(在来線相当)を対象とした FE 解析を実施する。As-weld 部の形状を再現するために、平面でモデル化する「チャンファー」と実形状を 3D スキャナーでの「スキャン」形状でモデルを作成し、メッシュサイズを 16mm および 10mm とし、四面体 2 次要素とした。ソフトウェアは NX-Nastran、ハードウェアは一般的なワークステーションで計算する。

〈4-2〉 計算リソース 上記 FE モデルでの計算処理内容を表 2 にまとめる。2-1と 2-3を比較するとメッシュサイズは同じであるため、計算リソースに大差はない。2-2については 2-1と比較すると節点数が 3.78 倍、要素数が 4.19 倍と増加し、計算時間も約 10 倍と増加している。このほかにも解析前のメッシュ品質の確認作業や、解析結果出力作業も増加しており、10mm メッシュサイズでの計算が限界である。

〈4-3〉 静荷重試験との比較 区分 2-1~2-3の FE 解析結果と、静荷重試験を比較する。ばね帽と側ばりとの接続部 2 か所と、空気ばね座周辺 1 か所の As-weld 部計 3 か所を評価対象とする。静荷重試験でのゲージの貼付方向は、引用文献(4)で提案した「ゲージ端式」を用いた。合わせて「JIS 式」も貼付し、JIS 式とゲージ端式の応力比率は 1.196

表 2 一体台車枠モデルでの FE 解析

Table 2. FE analysis of the integrated bogie frame model

区分	2-1	2-2	2-3
形状	チャンファー	チャンファー	3D スキャン
メッシュサイズ	16mm	10mm	16mm
節点数(×10³)	714	2 698	716
要素数(×10³)	404	1 692	405
1 荷重計算時間	5.0min	51.0min	5.0min

～1.302 であり、引用文献(4)で示される 1.20 と同程度であった。

横軸に静荷重試験、縦軸に FE 解析から求めたゲージ応力を図 7 に示す。ゲージ A～C の箇所ともに、区分 2-①～2-③のモデルそれぞれの FE 解析と静荷重試験の応力値は±10MPa 以内であり、良い一致が見られた。現物を 3D スキャナーで形状を再現した区分 2-③モデルと、単純なチャンファー形状での区分 2-①モデルの FE 解析結果に差異はなかった。区分 2-②モデルの FE 解析結果は、静荷重試験結果よりゲージ B では高い値になった。ゲージ B は Gr 部との境界部位であり、静荷重試験と FE モデルの差異があり、その結果 10mm チャンファーではメッシュが細分化されてしまい、静荷重試験との差異が大きくなった。

計算リソースも踏まえ、16 mm のメッシュサイズで、チャンファーを用いたモデル化でも、一体台車枠全体の応力状態を把握するには妥当である。

5. 結言

(1) 実台車枠の溶接非仕上げ部位を測定し、溶接止端半径の頻度が高いのは、1.0～1.1mm の区間である。溶接止端半径 1.0 mm のゲージ応力の再現に必要なメッシュサイズは 1.0 mm である。

(2) 台車枠の側ばり部分をモデル化し、メッシュサイズ 2.5mm で計算した結果と静荷重試験では、誤差が±20MPa 以内で良く一致した。16mm メッシュサイズで計算した場合、2.5mm メッシュサイズと平均 6.1MPa、最大 17.7MPa の誤差であった。

(3) 台車枠全体をスタンドアロン型ワークステーション機では 10mm メッシュサイズでの計算が限界であった。16mm メッシュサイズでは 3 次元スキャン形状と単純なチャンファーでの差異がなく、10mm メッシュサイズとの差異もなかった。合わせて、静荷重試験結果とも主応力と同じゲージ方向では良い一致を示した。

(4) 計算リソースも踏まえ、16 mm のメッシュサイズで、チャンファーを用いたモデル化でも、一体台車枠全体の応力状態を把握するには妥当である。

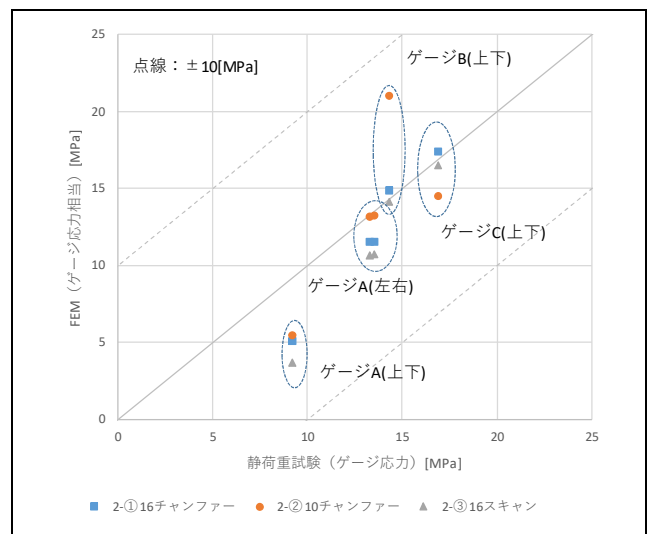


図 7 一体モデルでの静荷重試験と FE 解析結果比較
Fig. 7. Comparison of the static load test and FE analysis results based on an integrated model.

文 献

- (1) 日本産業規格：「JIS E 4207:2019 鉄道車両—台車—台車枠強度設計通則」(平成 31(2019)年 3 月 15 日)
- (2) 日本産業規格：「JIS E 4208-1:2021 鉄道車両—台車—強度試験—第 1 部：静荷重試験方法」(令和 3(2021)年 2 月 19 日)
- (3) (一社)日本鉄道車両機械技術協会：「鉄道電気車両 台車—構造、機能と設計—」, pp.183-185 (平成 29(2017)年 10 月 31 日)
- (4) 加藤他：「鉄道車両用台車枠溶接部の応力評価」, 日本機械学会論文集, Vol.86, 889.号数 (2020 年)
- (5) 亀甲他：「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」, 第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2020)講演論文集, S1-2-4 (2020 年)
- (6) 運輸安全委員会：「西日本旅客鉄道株式会社 東海道新幹線 名古屋駅構内 車両障害」, 鉄道重大インシデント調査報告書, RI2019-1, pp.68-69, 89, 92 (2019(平成 31)年)
- (7) 運輸安全委員会：「京成電鉄株式会社 本線 青砥駅構内 列車脱線事故」, 鉄道事故調査報告書, RA2022-2, pp.29-31, 36-37, 39 (2022(令和 4)年)
- (8) 横関他：「鉄道台車枠等の複雑な溶接鋼構造物の応力評価方法の検討」, 第 29 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2020) 講演論文集, 1303 (2020 年)