

(54) 鋼部材の点群データから FEM データへの変換における部材隅角部の要素生成に関する検討

吉田 明燐¹・宮森 保紀²・齊藤 剛彦³・門田 峰典⁴・小原 萌絵香⁵

1 学生会員 北見工業大学 大学院博士前期課程 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

2 正会員 北見工業大学 工学部 教授 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

E-mail: miyamoya@mail.kitami-it.ac.jp

3 正会員 北見工業大学 工学部 准教授 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

4 正会員 北見工業大学 工学部 助教 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

5 非会員 北見工業大学 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

近年、構造物の維持管理を効率化するため、画像データから点群データを取得する事例が増えている。一方、点群データは構造物の実応力状態などを直接評価することはできず、構造物の維持管理の高度化のためにはさらなる技術開発が求められる。本研究では、点群データから FEM データに変換する手法について、著者らがこれまで開発した手法を改良し、隅角部のリブ状の要素を解消した。開発した手法を I 形桁の桁端部の健全時と、腐食損傷時を模した供試体に適用した。手法としては、まず、部材を材片ごとに分割し、隅角部がない直方体で点群データから FEM データへの変換を行った後、分離した材片を連結させる処理を行った。改良した手法で構築したモデルに対して線形静的解析を行い、図面寸法から構築した FEM モデルの解析結果と応力を比較した。

Key Words: SfM, point cloud, FE model, steel structure

1. はじめに

近年、SfM(Structure from Motion)技術などの発展により、構造物の維持管理に点群データを活用することが増えている。著者らはこれまで、鋼製の構造部材を対象に画像データから 3 次元点群モデルを構築し、構造解析が可能な FEM モデル(以下、点群 FEM モデルと称す)を構築する手法を検討してきた¹⁾³⁾。これまでは、点群データを FEM モデルに変換する際、部材の隅角部にリブ状の要素が生成され、FEM 解析で応力値が低下する課題があった。

そこで本研究では、リブ状の要素を解消するため、点群データから FEM モデルの要素データへ自動変換するアルゴリズムを改良した。具体的には、点群から部材の輪郭を生成する際、材片ごとに部材を分割することとした。改良した手法を用いて構築した点群 FEM モデルに対して、既往研究³⁾で構築したモ

デルと比較し、さらに線形静的解析により応力状態を把握した。本稿では、その結果について報告する。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

図-1 に実験供試体の一般図を示す。供試体は、橋桁の健全状態と腐食状態を模したもの 2 つを使用し、健全状態を健全モデル、腐食状態を腐食モデルと称する。両供試体とも、実橋梁の主桁の一部を切り出し、ソールプレートと支点上補剛材を溶接して桁端部を模している。供試体長は 750mm、桁高 410mm、フランジ幅 152mm となる I 断面である。部材厚は、上下フランジともに 21.5mm、ウェブは 14mm、支点上補剛材は 6mm であり、材質は SS400 相当である。また、腐食モデルでは、桁端部に生じる断面欠損を

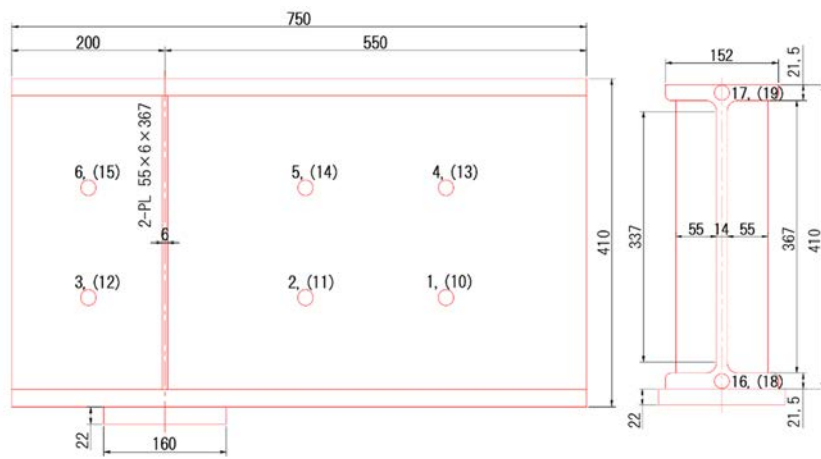


図-1 実験供試体一般図（腐食モデルは開孔部を有す）

模するため、支点上補剛材の下端近傍でウェブに、長さ 100mm、高さ 50mm の長円形の開孔を設けた。

(2) 撮影方法と点群モデル

画像の取得は、デジタルカメラ SONYα6500 を用いた。jpg 形式で記録画像数は 4240×2832pixel である。撮影モードはシャッタースピード優先で、絞り値 (3.5~5.0) を自動調整した。ISO 感度は 100、焦点距離は 18mm とした。

供試体はチェンブロックで吊り下げ、ソールプレートに載せた。この供試体に対して、カメラの対物距離を 500mm、400mm、350mm の 3 段階に変化させ、多方向から撮影を行った²⁾。具体的には、床面に 30 箇所の撮影位置を設定し、ラップ率を鉛直方向 80%、水平方向 60% となるよう撮影した。撮影枚数は、健全モデルでは 268 枚、腐食モデルでは 186 枚となった。腐食モデルの画像が少ない理由は、供試体上下面の画像と特徴点が検出されなかった側面の画像を減らしたためである。

撮影した画像から、Agisoft 社の Metashape(ver1.6.5.11249)を用いて点群モデルを構築した。図-2 に点群モデルを示す。点群モデルの寸法誤差は、全体では約 1mm~2mm 程度であったが、供試体高と補剛材幅の誤差は 4mm と大きい結果となった。この理由として、供試体高については、鉛直方向の画像枚数が少なかったと考えられる。また、補剛材幅については、撮影角度によって、補剛材とウェブの溶接部で光が反射し、点群密度が低下したと考えられる。

3. 点群 FEM モデルの構築手法

(1) 既往の手法

まず、点群データから要素データを生成するアルゴリズムについて説明する。最初に、空間内に一定

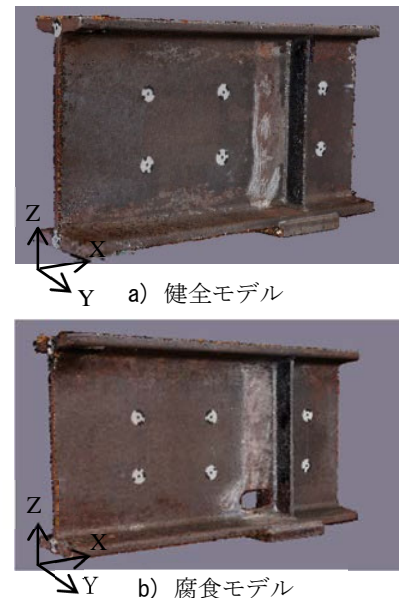


図-2 点群モデル

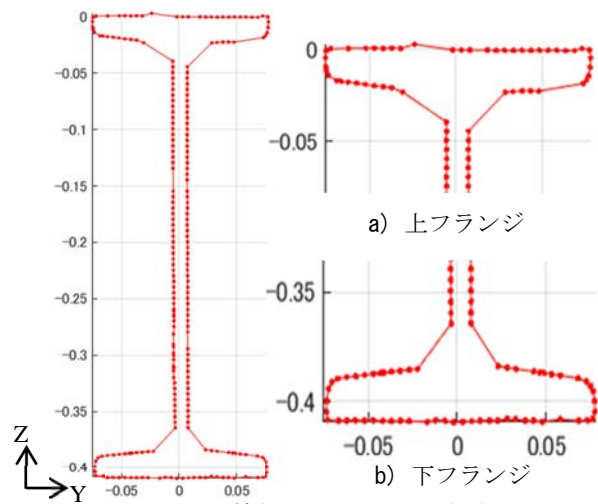


図-3 断面輪郭

(既往研究, x=0.25m)

図-4 拡大図

(既往研究, x=0.25)

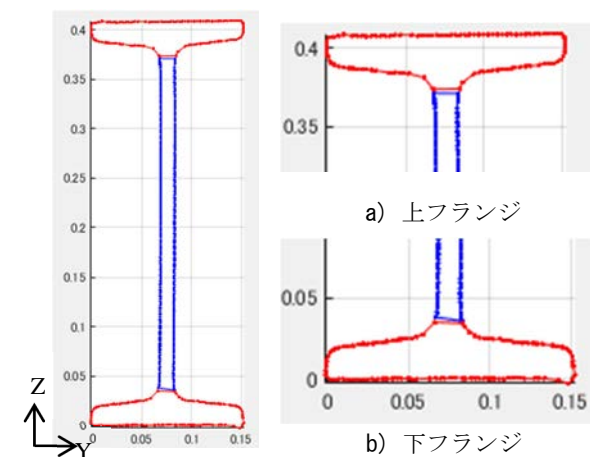


図-5 断面輪郭

(材片分割, x=0.25m)

図-6 拡大図

(材片分割, x=0.25m)

間隔で格子を設定し、格子中に存在する点群の平均座標値を節点とする。FEM では、格子間隔がメッシュサイズに相当する。次に、ある x 座標における yz 平面の断面について、節点の集合の内、最外縁の節

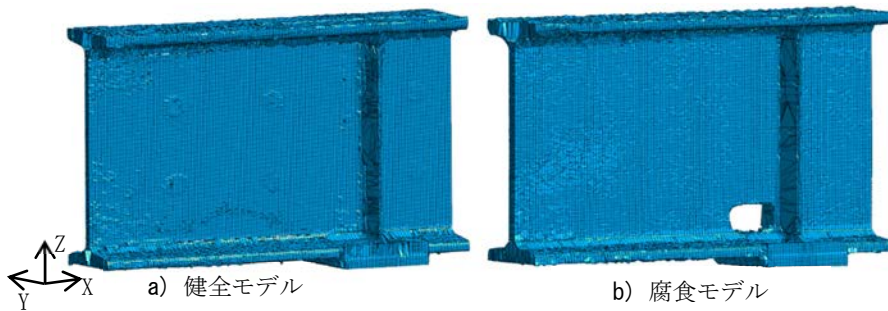


図-7 点群 FEM モデル

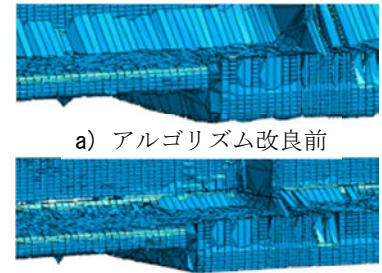


図-8 リブ状要素比較

点によって形成される輪郭を求める。本研究では、Matlab の boundary コマンドを用い、アルファ形状によって、断面の凹部も含んだ境界を検出している。この際、境界のコンパクトさ、すなわち境界内の面積の小ささは、縮小係数で制御される。つづいて、この輪郭で囲まれる断面に対して、2次元デローニー分割を行う。これにより、x 座標ごとに部材断面が三角形要素で分割される。この処理を隣接する断面でも順に行い、隣接する断面の最近傍の点同士を結ぶことでソリッド要素を構築する。

既往研究³⁾では、格子間隔は補剛材厚を再現するため、補剛材部分で 3mm、その他で 6mm としている。また、輪郭の検出は I 断面を一括で行い、その際の縮小係数は、試行錯誤的に 0.9 とした。図-3 に生成された断面の一例を示す。また、図-4 にウェブと上下フランジの隅角部の拡大図を示す。全体として、桁の I 形が再現できているが、隅角部では曲線に沿った輪郭ではなく、外側を結ぶようなリブ状になっている。縮小係数を最もコンパクトな 1.0 としたとしても、隅角部の形状はさほど改善しなかった。以上の課題に対して本研究では次節の手法を用いた。

(2) 改善手法

a) 材片分割と輪郭作成

本研究でも節点の生成手法とメッシュサイズは既往研究³⁾と同様とするが、断面形状をより単純にするため、ウェブとフランジを分割して処理する。部材の分割は、z 座標の範囲をそれぞれ定め、その範囲内の点で輪郭を作成する。具体的には、下フランジを $-0.020 < z < 0.035$ 、ウェブを $0.035 < z < 0.365$ 、上フランジを $0.365 < z < 0.430$ として 3 分割した。縮小係数は材片ごとに独立して設定し、下フランジで 0.85、ウェブで 0.985、上フランジで 0.89 とした。

処理結果の一例として、図-5 にある断面の輪郭を、図-6 にはフランジの拡大をそれぞれ示す。材片を分割し縮小係数を個別に調整することで、隅角部の節点が増え、曲線に近い輪郭が形成された。

b) 材片連結

材片ごとに作成した輪郭についてデローニー分割

を行い、隣接断面間でソリッド要素を生成することで、点群 FEM モデルが構築される。ただし、部材を材片に分割しているため、材片間に空間ができ、一体として構造解析できない。そこで、材片を連結させるため、上フランジの z 軸座標が最小となる 2 節点と、ウェブの z 軸座標が最大となる 2 節点の 4 節点を抽出し、隣接断面も同様な処理を行い、これらの 8 節点で 6 面体要素を生成し上フランジとウェブを連結した。下フランジ側も同様の処理で連結した。

(3) 点群 FEM モデル

図-7 に構築した点群 FEM モデルを、図-8 にアルゴリズム改良前後における下フランジとウェブの隅角部をそれぞれ示す。図-7 および図-8 で示したように、アルゴリズム改良後では、隅角部に生じるリブ状の要素が概ね解消されていることを確認した。ソールプレートの範囲については、リブ状の要素が若干残存しているが、要素高さは縮小できている。

点群 FEM モデルの板厚は、点群モデルと比較して 1mm 以内の誤差だったため、点群モデルを正確に FEM モデルに変換できたと考えられる。

以上より、既往のアルゴリズムに対して、断面を材片ごとに分割し、より単純な形状で輪郭を生成する手法を採用することで、材片の隅角部に生じるリブ状の要素が概ね解消できることを確認した。

以上の節点と要素のほか、材料物性値などの情報を加え、構造解析ソフトウェア midas NFX に対応した nas ファイル形式で出力した。ファイルをソフトウェアに読み込ませ、境界条件や荷重はソフトウェア上で設定し、モデルを構築した。

4. 線形静的解析

(1) 解析条件

点群 FEM モデルの妥当性を確認するため、線形静的解析を行った。比較対象は、FEM ソフトウェア上で部材寸法に基づき作成した FEM モデルの解析結果とした。

解析条件として、まず、ソールプレート下面の全節点の6自由度を固定とした。荷重方法は上フランジ上面の全節点に下向きの集中荷重を与えた。大きさは健全モデルでは合計100kN、腐食モデルでは合計50kNとなるよう、各節点に等分した。この荷重は、両モデルで最大応力が降伏応力の1/3程度になるよう想定したものである。

(2) 解析結果

図-9にモデルごとのミーゼス応力分布を示す。健全モデルの応力分布は、FEMモデルと概ね一致しており、図左側のソールプレート端部直上を最大としてウェブ面内に放射状に分布している。ソールプレート端部直上での応力はFEMモデルでは138N/mm²、点群FEMモデルでは105N/mm²となり、30%程度、点群FEMモデルの応力が小さく評価されている。この理由として、点群FEMモデルと供試体の板厚差や、完全に解消ができなかったソールプレート範囲のリップ状の要素が影響していると考えられる。なお、点群FEMモデルの最大応力は補剛材下端で645N/mm²であった。これは、前述した材片間の連結要素が補剛材部分では一部生成されず隙間が生じたためと考えられる。

腐食モデルでは、開孔部左側の応力分布はFEMモデルと概ね一致している。この部分での最大応力度に着目すると、FEMモデルでは141N/mm²、点群FEMモデルでは101N/mm²となり、健全モデルと同様、点群FEMモデルの応力が小さい。この理由として、開孔周辺の腹板厚が一樣ではなく、実際よりも最大1.6mm厚くなっている影響と考えられる。一方、開口部右側では、点群FEMモデルでは応力がほとんど発生しておらず、ソールプレート範囲に残存するリップ状の要素の影響により、ウェブに応力が伝達されていないと考えられる。なお、点群FEMモデルでも補剛材下端で要素が一部生成されず最大応力は203N/mm²となった。

以上より、点群データからFEMモデルに変換し、構造解析を行った結果、応力の分布や最大値を一定の精度で把握できた。また、健全モデルと損傷モデルでの応力発生状況の違いも確認できた。補剛材部分における材片間の連結要素の生成方法を改良すれば、応力解析の精度を向上させることが期待できる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、SfMを用いて構築した3次元点群モデルからFEMモデルを生成する際に生じる、フラ

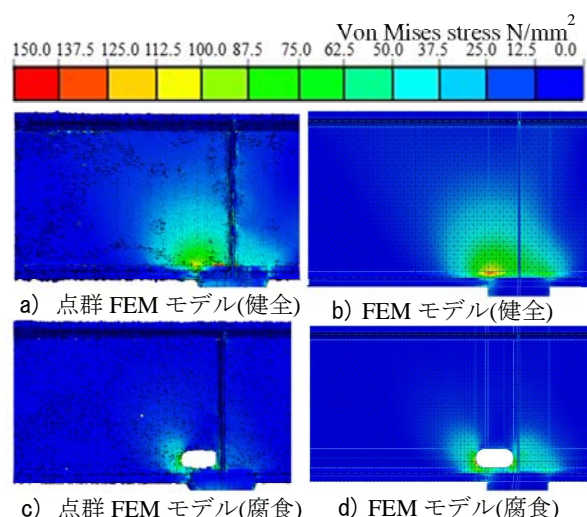


図-9 ミーゼス応力分布

ンジとウェブの隅角部に生じるリップ状の要素を解消するため、要素データの生成アルゴリズムを改良した。本研究の成果を下記に示す。

- 1) I断面を材片ごと分割して輪郭を作成し、材片ごとに縮小係数を設定できるようにした。それにより、隅角部のリップ状の要素は概ね解消できた。
- 2) 健全・腐食モデルとも、3次元点群モデルの板厚を正確に再現することができた。
- 3) 線形静的解析において、構造部材に生じる応力を定量的に把握することができた。

今後の課題としては、点群モデルの精度向上やFEM要素への変換手法をさらに改善させるとともに、実際の応力を構造実験などで測定して点群FEMの応力度と比較する必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤(C)課題番号21K04230の助成を受けて実施しました。ここに記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 鈴木紗苗, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 山崎智之, ムンフジャルガルダンビーバルジル: 鋼構造部材の3次元点群モデル構築とFEMデータへの自動変換に関する検討, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.75, No. 2, p.I_141-I_149, 2019.
- 2) 吉田明輝, 宮森保紀, 齊藤剛彦: 立体的な構造物の3次元点群モデルを構築するための撮影手法に関する基礎的検討, 土木学会北海道支部論文報告書, 第78号, 2022.
- 3) 宮森保紀, 齊藤剛彦, 山崎智之, 佐藤瑛典, 吉田明輝: 鋼I桁供試体の3次元高密度点群モデルからFEMモデルへの自動変換手法の改良, 土木情報学シンポジウム講演集, Vol. 46, pp137-140, 2021.