

(14) 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

鈴木 紗苗¹・宮森 保紀²・齊藤 剛彦³・山崎 智之⁴・ムンフジャルガル
ダンビーバルジル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 准教授 (〒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 助教 (〒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、構造物の画像から 3 次元モデルの作成が可能になったが、構造物の実応力状態などを直接評価することはできない。本研究では、デジタル画像から FEM モデル構築の自動化手法について基礎的な検討を行った。まず、T 形梁を対象として画像撮影を行い 3 次元点群モデルを作成した。点群の座標データを 3 次元格子中で平均化することで FEM の節点にするとともに、部材軸方向に断面ごとで 2 次元デローニー分割を行った。デローニー分割で作成した面と隣接面の節点を組み合わせて 3 次元ソリッド要素を作る処理を行った。このような手法で作成したモデルに対して線形静的解析を行った結果、実測値や従来の方法による FEM と比較して応力値は高くなったものの、応力分布はおおむね一致し、モデル構築手法の改良は必要なものの、基本的な適用性が確認できた。

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

1. はじめに

近年、構造物を撮影した画像から 3 次元点群モデルを作成して、点検や維持管理業務に役立てる取り組みが進められている¹⁾。橋梁分野でもすでに構造部材の一般図レベルの寸法を点群モデルから求め、構造解析可能な 3 次元データを作成する方法が検討されている²⁾。将来はドローン、ロボットや撮影機材の高性能化により、構造部材の詳細な寸法測定にも応用できることが期待できる。一方、3 次元点群モデルでは構造物の形状や表面の状態を把握することはできるが、それだけでは構造物の耐荷性能や内部の応力状態を定量的に評価する構造解析にそのまま適用することはできない。3 次元点群モデルを有効に活用するためには、点群データを構造解析モデルに変換する手法が必要である。

著者らはこれまで、画像から構築した 3 次元モデルを構造解析に活用する手法について検討を行ってきた³⁾。これまでの、鋼部材の点群データを FEM で構造解析するために、代表断面を抽出して部材軸方向に押し出す方法でモデルを構築していたが、軸方向の形状変化を反映

することができず、また変換作業に膨大な手作業を要することが課題であった。そこで、本研究では鋼構造部材を撮影して作成した点群データを FEM モデルへ自動変換する手法について検討した。具体的には点群の座標データを 3 次元格子の中で平均化し FEM の節点へ変換した。さらに断面ごとに行った 2 次元デローニー分割と隣接断面との間での近傍点探索を組み合わせて FEM のソリッド要素を作成した。このように構築した FEM モデルに対して、従来手法で作成した FEM モデルと、静的載荷実験の結果から本手法の課題について検討した。

2. 実験概要

(1) 対象実験供試体

本研究では、橋梁の構造部材を想定した T 形梁を対象供試体とした(図-1)。材質は SS400、全長 2090mm、高さ 410mm、幅 360mm、部材厚は上フランジ 20mm、ウェブ 13mm である。図-2 にこの供試体の一般図を示す。対象供試体は、実験室のフレームに取り付けたブラケットに

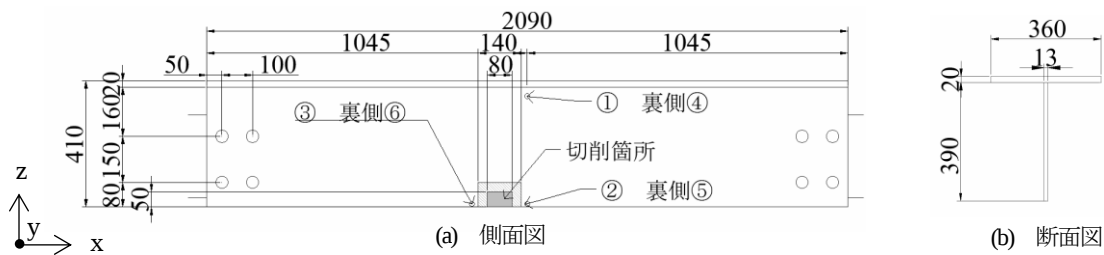


図-2 T形梁供試体一般図(単位：mm)

ウェブの両端を4本のボルトで固定した。ウェブが腐食して減肉したことを模擬し、ウェブの一部を板厚が約半分の7mmになるようにグラインダーとやすりによって片側から切削した。応力集中が起こりにくいように周辺部にはテーパをつけている。

(2) 撮影方法と点群データ生成

撮影に使用したデジタルカメラはソニー製のα6500である。jpeg形式で記録画素数は6000×4000pixel、F値は8.9、ISO感度は400に設定した⁹⁾。供試体を多方向からオーバーラップ60%以上で、550枚の写真を撮影した。

次にAgisoft社のPhotoScanを用いて、点群モデルを生成した(図-3)。撮影に際して基準点を供試体と設置フレーム上に18箇所設置した。基準点の座標は定規と水準器を用いて計測した。18点の基準点のうち3点を検証点とした。基準点は供試体の外側に、供試体上に検証点を設置した。作成した3次元点群モデルと基準点と検証点の位置を図-3に示す。図-3に表されているようにマーカーは丸く全て異なる模様をしており、点を配置する中央部は直径2mmの円となっている。

PhotoScanによる点群モデルの精度検証結果を表-1に示す。設置した基準点全体の誤差は3.755mmで、供試体の長さに対して約1.8%である。検証点では、上フランジよりもウェブの誤差が大きい、ウェブの実際の板厚13mmに対して、モデル上での寸法計測では8mmであった。供試体をフレームに設置したため断面側からの写真を撮影できず、板厚の誤差が大きくなったと考えられる。切削箇所については、モデル上では板厚が3mmと小さかったが、テーパのある減肉を表現できた。

(3) 荷重方法とひずみ計測

本研究では、実験供試体に対して静的荷重を行ってひずみを測定し、FEM解析結果と比較して妥当性の検証を行う。荷重実験は油圧方式の静的100kN荷重試験機を用い、支間中央に90kN荷重した。ひずみ測定は主応力が大きくなると予想される支間中央で上部と下部、そして切削部付近に着目し、図-2(a)に示す位置の裏表で計6箇所計測した。

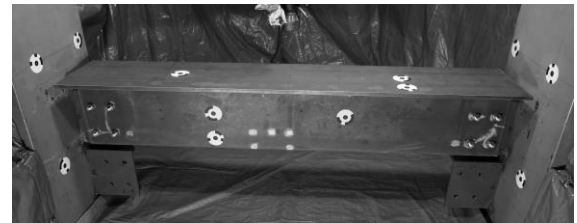


図-1 対象供試体のT形梁

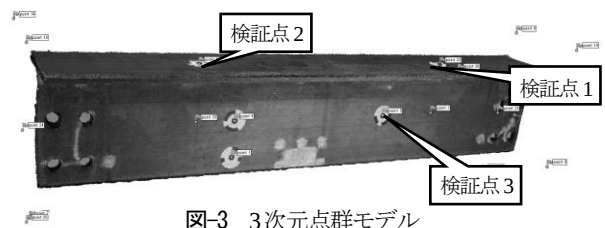


図-3 3次元点群モデル

表-1 点群モデルの精度(単位：mm)

検証点	x方向	y方向	z方向	3方向
1	1.899	0.291	2.541	3.186
2	0.081	3.154	1.969	2.391
3	0.788	1.982	3.181	3.830
基準点	2.011	1.874	2.559	3.755

3. 点群モデルからFEMモデルの構築手法

点群モデルの座標値をFEMモデルへ変換する。具体的にはPhotoScanで作成した点群の座標値をテキストファイルに書き出し、汎用数値解析ソフトMATLABで作成したプログラムに読み込み、処理を行った⁹⁾。

(1) 節点

3次元点群モデルの点群数はFEMモデルの節点数と比較すると膨大であり、点群モデルのすべての点をFEMモデルの節点に変換することは適切ではない。このため、本研究ではFEMモデルの節点を構築するため、図-4の模式図で示すように、空間に一定間隔の格子を設定して、格子内の点の平均座標値により1つの節点を生成させるようにした。具体的には部材の軸方向(x方向)は10mmの等間隔で区切りながら、yz平面では5mm間隔の格子を設定して節点座標を求めた。なお、ノイズの影響を避けるために格子内に20点以上の点群がある場合に節点とすることとした。この手法では、図-4のように点群モデルの表面部のみに節点が生成されるが、本研究

では部材厚の薄い鋼構造を対象としているため、内部に節点を設けないこととした。

(2) ソリッド要素

FEM では、構造物の応力とひずみの関係を計算するために要素分割が必要である。本研究ではソリッド要素を用いることとし、以下の手順で作成した。

まず、図-5 のようにある x 座標における yz 平面 S_n を考える。この平面上の節点の集合に対して図-5 の太線のような輪郭を作成する。輪郭を求める際の縮小係数は試行錯誤的に 0.9 とした。この縮小係数の設定や節点の間隔によって、フランジとウェブの接合部など形状がやや複雑な箇所、一部の節点が輪郭の内部に入り込むことがある（図-5 の太点線内）。今回はこのような場合も自動処理を継続させることとし、輪郭を構成する節点だけを FEM の節点とすることとした。この輪郭に対して 2 次元デローニー分割を行うと、図-5 の細実線のように x 座標値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 S_{n+1} 断面など各断面で行う。

次に、 S_n 断面にある三角形要素の各点について、隣接する S_{n+1} 断面の最近傍の点を探し、これらの点を結ぶことでソリッド要素を作成する（図-5 の細破線）。三角形要素の 3 点それぞれが異なる最近傍点を有すれば 6 節点要素となるが、最近傍点が重複して 4 節点または 5 節点となった場合には、4 節点要素とする。この操作を梁の一端から他端まで繰り返すことで、供試体全体の要素分割が行われる。

(3) その他の FEM データと FEM ソフトでの読み込み

節点と要素に加えて、材料物性や単位系など解析に必要な情報も、FEM ソフトウェアで外部からのインポート可能なテキスト形式で書き出す。本研究では、汎用 FEM ソフトの *midas Civil 2010* に対応した *mct* ファイルを作成した。なお、境界条件と荷重については、GUI 上で節点を選択する方が容易なため FEM ソフトで設定する。

FEM ソフトウェアでデータファイルを読み込み、モデルを確認する。節点数は 29,644 点、要素数は当初 29,198 要素だったが、ソフトウェアへの読み込み時に要素の形状が不適とされたものが 2372 要素あり、これらはデータから削除して 26,826 要素となった。このようにして点群モデルから構築した FEM モデル（以下点群 FEM モデルと呼ぶ）を図-6 に示す。図-6 では上フランジとウェブの接合部の一部に実際にはないリブ状の要素が作成されている。これは、輪郭作成時に接合部の隅角部が十分に認識できなかったためである。また、ウェブ下端の板厚減少部については、一部に要素の欠損があるものの、板厚が部分的に減少している様子が点群 FEM モデルでも表現できている。点群 FEM モデルの解析精

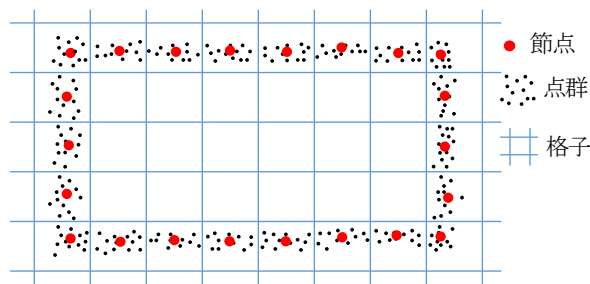


図-4 点群と節点 (yz 平面)

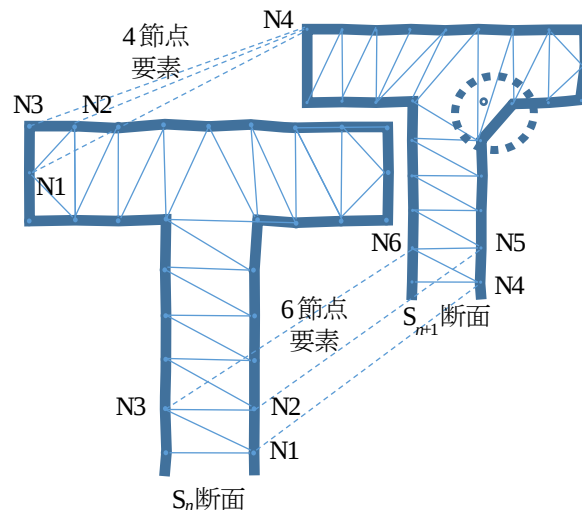


図-5 要素の作成方法

度を検証するため、このような実際とは異なる要素や欠損もそのまま解析を行うこととした。

4. 線形静的解析

(1) 解析条件

上記の方法で作成した *mct* ファイルを FEM ソフトウェアに読み込ませ、図-6 のような FEM モデルとした。このモデルに対して、荷重実験を想定し境界条件と荷重条件を設定した。境界条件はボルト位置で並進方向固定、荷重は支間中央で 90kN を 152 節点で等分割して鉛直方向下向きに与えた。

また、比較対象の FEM モデルも実測した部材寸法から *midas Civil 2010* で作成した（以下比較 FEM モデルと呼ぶ）。支点条件は、点群 FEM モデルと同様にボルト位置で並進方向固定とした。また、荷重条件について、138 節点に同様に荷重を与えた。

(2) 解析結果

まず、比較 FEM モデルの妥当性を検証するために荷重実験のひずみから最大主応力と最小主応力を算出し、比較 FEM モデルの解析結果と比較した（図-7）。応力値は弾性範囲内で全体的に小さい。ゲージ位置 5、6 では実測値が FEM の 2 倍程度となっているが、切削箇所の近

傍であり、誤差が大きくなった。したがって、応力値はおおむね一致しており、比較 FEM モデルによって実際の応力状態を把握できると判断できる。

図-8 に点群 FEM モデルと比較 FEM モデルの有効応力分布を示す。切削箇所や支点付近ではどちらのモデルも応力が高くなっている。このことから、点群 FEM モデルによって損傷を受けた構造物の実応力を把握できるようになる可能性がある。また、支点と支間中央との間で応力が小さくなる箇所など、全体的な応力分布が整合しており、構造全体でモデル化が妥当に行われている。全体的な応力値が点群 FEM の方が高いのは、部材の板厚が点群 FEM の方が薄くなっているためである。また、切削部やボルト支点部の周辺では特に応力値が高く、一部の要素ではコンターの表示範囲を超過した応力となっている。これらの箇所では板厚の精度に加えて、ソリッド要素の形状に問題があることも原因と考えられる。上フランジとウェブの接合部付近では、点群 FEM モデルではリブ状の要素が生成され、応力状態を正しく把握できないため、要素生成アルゴリズムの改良が必要である。

5. まとめと今後の課題

本研究では、断面欠損を有する鋼構造部材の 3 次元点群モデルを構造解析可能な FEM モデルに自動的に変換するための手法について検討した。

- 1) 3 次元点群モデルは、減肉したウェブの断面変化を表現できた。しかしながら、板厚は誤差が大きく精度を向上するためには、マーカーの大きさや撮影方法について改善が必要である。
- 2) 点群データに対して 3 次元格子を設定し、格子中の平均値を 1 つの節点座標へ置き換えることによって大量の座標データを節点へ変換することができた。
- 3) ソリッド要素は、断面ごとの輪郭抽出と 2 次元デローニー分割、隣接断面間の節点の接続により、自動的にモデル化できた。しかしながら、隅角部での輪郭抽出や、不適な形状の要素や要素が生成できない箇所の発生など改善が必要である。
- 4) 点群 FEM モデルの線形静的解析の結果は、全体的な応力分布が把握でき、板厚減少位置における応力増加も把握できるため、将来的には損傷を受けた構造物の応力評価に応用できる可能性がある。

参考文献

- 1) 藤田 陽一，緒方正剛，Wongsakorn CHANSEAWRASSAMEE, 小林 一郎：属性を付与し

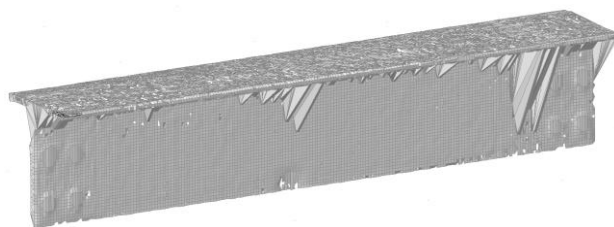


図-6 点群 FEM モデル鳥瞰図

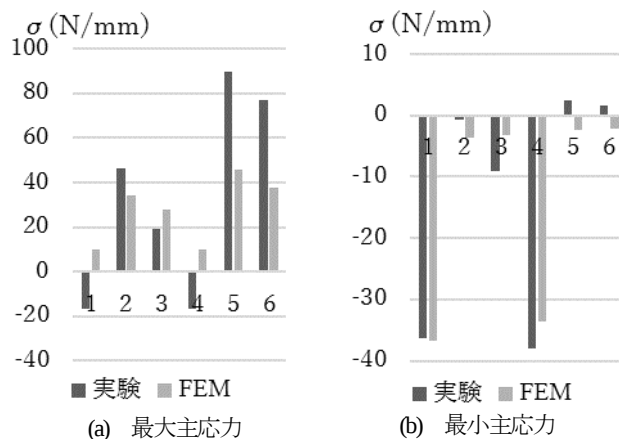
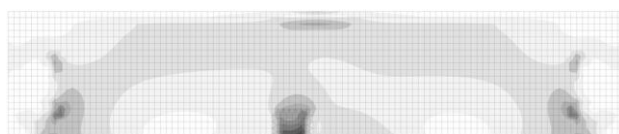
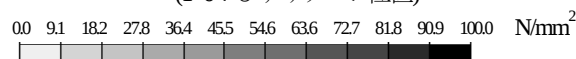
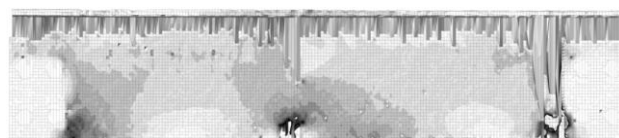


図-7 载荷実験と比較 FEM モデルの主応力

(1~6 : ひずみゲージ位置)



(a) 比較 FEM モデル



(b) 点群 FEM モデル

図-8 有効応力分布の比較

た道路点群データの建設ライフサイクルでの利用，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol. 70, No.2, pp. I_144-I_151, 2014.

- 2) 松田浩，河村太紀，西行健，木本啓介，西川貴：3D 計測と FEM 解析と実振動計測に基づく橋梁振動特性同定，鋼構造年次論文報告集，Vol.24, pp.445-448, 2016.
- 3) 鈴木紗苗，宮森保紀，齊藤剛彦：高密度点群データの構造解析モデルへの変換に関する基礎的検討，土木情報学シンポジウム講演集，Vol.43, pp.25-28, 2018.
- 4) Kuu-satsu.com : Agisoft PhotoScan Professional Edition Version1.3 日本語ユーザーズマニュアル Ver.1.0, クワサツ・ドットコム, 2017.
- 5) Mathworks : MATLAB ドキュメンテーション, <<https://jp.mathworks.com/help/matlab/index.html>>, (入手 2019.6.13) .