## 鋼構造部材の点群モデルから変換したFEMモデルの精度に関する一検討

A consideration on a precision of an automated transferred FE model from a point cloud model of a steel structural member

北見工業大学大学院	学生会員	鈴木紗苗 (Sanae Suzuki)
北見工業大学	○正会員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学	正会員	齊藤剛彦 (Takehiko Saito)
北見工業大学	正会員	山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
北見工業大学	正会員	三上修一(Shuichi Mikami)
北見工業大学工学部	学生会員	ムンフジャルガルダンビーバルジル(Dambiibaljir Munkhjargal)

## 1. はじめに

CIM の施行により3次元モデルを構造物の維持管理に 役立てようという取り組みの研究が進んでいる.構造物 の3次元点群モデルを保有性能の定量的な評価に有効に 活用するためには、点群モデルを FEM などの構造解析 可能なモデルへ変換する必要がある.既往の研究では、 構造全体系のモデル化として BIM を発展させて FEM を 構築した Banfi et.al.<sup>10</sup>や、歩道橋全体を対象とした Conde-Carnero et.al.<sup>20</sup>の研究がある.これらの FEM モデ ル作成の工程では3次元 CAD を経由していたり、点群 からメッシュを作成する際スムージングを行っていたり しているので、損傷や腐食などの情報が失われてしまう 可能性がある.

そこで、これまで著者らは鋼構造部材を対象として損 傷などの情報を欠落させずに写真から作成した点群デー タを直接 FEM モデルに変換する手法について検討して きた<sup>34)</sup>.本研究では鋼構造部材の部分的な腐食を想定 し、部材の一部を2段階で減肉させた供試体2種類を対 象として、点群モデルから自動的に FEM データに変換 する方法について検討し、点群データから構築した FEM モデルの精度が FEM の応力結果にどのような影響 を及ぼすのかについて検討した.

# 実験供試体の静的載荷実験と比較 FEM モデル 1 対象供試体

図-1に示すような設計図面の鋼製のT形梁を対象供試体とした.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.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ウェブの両端を4本のボルトで固定した.

また,段階的な腐食の進行を模擬するため,供試体一部分を2段階で切削した.まず,供試体支間中央から-x 方向に70mm離れた位置でウェブの板厚が約半分の7mm と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.この供試体を減肉供試体と称する.次に,最初 に切削した箇所を全て切削した.この供試体を全切削供 試体と称する.応力集中が起こりにくいように切削部の 周辺にはテーパーをつけている.

#### 2.2 静的載荷実験

本研究では、実験供試体に対して静的載荷を行ってひ ずみを測定し、FEM 解析結果と比較してモデルの妥当 性を検証する.載荷実験は油圧方式の静的100kN載荷試 験機を用い,支間中央に90kN載荷した.また,図-2の ようにウェブの両面計12箇所に3軸ひずみゲージを貼 り付け,載荷時に測定した.

#### 2.3 比較 FEM モデル

点群から作成した FEM モデルの応力状態と比較する ために、寸法の実測値に基づき FEM ソフトウェア上で モデルを作成した.使用したソフトウェアは midas Civil 2010である.ソリッド要素を用い、節点座標を xyz 各方 向で約 10mm ごとに設定した.材料は SS400 材で弾性係 数は E=200,000(N/mm<sup>2</sup>)とした.ウェブの切削状況に合 わせて2種類のモデルを作成し、それぞれ減肉比較 FEM モデル、全切削比較 FEM モデルと称する.支点条件は、 実験と同様となるようボルト位置において節点を並進方 向固定とした.また、載荷条件は鉛直方向下向きの荷重 90kN を支間中央のフランジ上面の 138 節点に分散して 与えた.

#### 2.4 比較 FEM の妥当性の検討

載荷実験のひずみから部材軸方向に対する垂直応力度 を算出し,比較 FEM モデルの解析結果と比較した(図-3). 比較 FEM については各ひずみゲージと同じ位置の1ソ リッド要素を構成している各節点の応力の平均値を算出 している.軸方向の応力に着目した理由として,実験と 比較 FEM モデルの結果ではそれ以外の方向の垂直応力 度は非常に小さかったためである.

比較 FEM モデルの応力値は弾性範囲内で全体的に小 さい. 全体の傾向として,各ひずみゲージ位置での応力 の大きさと減肉状態から切削状態への応力の変化がおお むね実験値と整合している.例えば,載荷点直下の①, ②では圧縮応力が作用しており,減肉状態でも切削状態 でも実験結果とほとんど同値である.また,⑤,⑥では 表と裏側で応力の増加や減少が同傾向である.全体的に 実験結果の方が比較 FEM モデルの結果よりも応力値が 大きい結果となった理由としては,比較 FEM モデルで の支点部は並進固定としているが,実際に載荷した際の 状態は複雑であり,それぞれのボルトの拘束具合には差 異があるため全体的に大きい変化として現れたと考えら れる.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-2 3軸ひずみゲージ貼り付け位置

## 3. 点群データの作成と精度検証

## 3.1 撮影と点群データ生成

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 4240×2832pixel, F 値は 8 に設定した. ISO 感度は減肉供試体は 400, 全切削供 試体は100に設定した.鋼材は溶接部や切削部を塗装し ていないため、光の反射が起こりそうな箇所には撮影前 にチョークでなぞることで反射を防いでいる.供試体を 多方向からオーバーラップ 80%以上で撮影し, 減肉供 試体は 550 枚, 全切削供試体は 594 枚の写真を撮影した. 次に Agisoft 社の PhotoScan Pro を用いて、図-4 に示すよ うに点群モデルを生成させた.減肉供試体から作成した 点群モデルを減肉点群モデル、全切削供試体から作成し た点群モデルを全切削点群モデルと称する.本研究で使 用した基準点と検証点は図-4の示すとおりに対象全体を 囲むような位置と供試体上に配置した. 基準点と検証点 の座標は定規と水準器を用いて計測した.基準点は供試 体の外側と供試体上に 15 点設置し、検証点は供試体上 に3点設置した.基準点の場所には直径85mmの紙製で 円形のマーカーを設置した. このマーカーは全て異なる 模様で、基準点または検証点となる中心は直径 2mm の 白い円となっている.

## 3.2 点群精度の検証

PhotoScan による点群モデルの精度検証結果について、 撮影条件は異なるが基準点全体の誤差はそれぞれ減肉点 群モデルでは、3.755mm,全切削点群モデルでは 4.048mmであった.検証点の3方向の誤差はどの箇所も 4mm以下であった.2つの点群モデルでは、ISO感度を 変更して撮影を行っている.一般に、ISO値が高いほど 画像にノイズが発生するとされているが、ISO感度を 400と設定した減肉点群モデルでは PhotoScan 上での板 厚の計測値が均一ではなく、計測箇所によって値に幅が あった.しかし、ISO感度を 100に変更した全切削点群 モデルは板厚が均一になりモデルそのものの形状の歪み は小さくなった.基準点の誤差の原因の一つとして、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 できなかったことやウェブ下のスペースに十分な高さが なく、適度な距離からの写真を撮影できなかったためと



(a) 減肉点群モデル(約139万点)



(b) 全切削点群モデル(約736万点) 図-4 3次元点群モデル

考えられる.モデル全体としての評価は,減肉や切削箇 所について,テーパーのある断面を表現でき,さらに点 群モデルの精度については写真撮影方法や基準点の座標 などを改善することで精度向上が期待できる.

#### 4 点群 FEM モデルの構築<sup>4)</sup>

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るため,本研究では FEM モデルの 節点を構築するため,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.さらに各点の両隣の点との平均距離の標準 偏差以上の点をノイズ点とみなしてノイズ除去を行った. なお,x 方向の座標値については,次に述べるソリッド 要素構築を yz 平面ごとに考えるため,x座標値は格子の 間隔にそって等間隔になるように丸めた.

ソリッド要素の構築方法は、まず x 座標における yz 平面を考え、この平面上の節点の集合に対して輪郭を作 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.この輪郭に対して2次元デローニー分割を行い、 x 座標値ごとに部材断面が三角要素で分割される.この 処理を隣接する各断面で行う.さらに、断面にある三角



図-3 全体座標の軸方向に対する垂直応力度

形要素の各点について,隣接する断面の最近傍の点を探 索し,これらの点を結ぶことでソリッド要素を作成した. このような工程で生成した要素の形状は4節点及び6節 点の2種類のソリッド要素となっている.なお点群FEM モデルでは,支点部付近(x<0.2m, 1.8m<x)を除いてモデ ル化した.

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汎用 FEM ソフト(midas Civil 2010)に対応した
mct ファイルに書き出す.

最終的な節点数は、減肉点群 FEM は 47.391 点、全切 削点群 FEM は 13,438 点になった. また要素数はそれぞ れ40,974 要素,40,380 要素となった.なお,作成した要 素の中には、形状が扁平なものなど FEM 解析では不適 切な要素も含まれる. FEM ソフトウェアではこれらの 要素を除いてデータを読み込んだ. 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 と称する)を図-5に示す.図-5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 ている箇所がある.これは,輪郭作成時の処理で接合部 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った.

## 5. 点群 FEM の妥当性の検討

点群 FEM モデルに対して,載荷実験と同様の境界条件と荷重条件を設定した.点群 FEM モデルは支点付近 を除いたモデルとなっており,端部の節点に並進方向固 定として境界条件を設定した.荷重条件は支間中央で 90kN を減肉点群 FEM モデルには 568 節点,全切削点群 FEM モデルには 534 節点に等分割して鉛直方向下向き に与えた.

まず,図-6(a)(b)にそれぞれ減肉比較 FEM モデルと減 肉点群 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、減肉点群 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.次に、図-7(a)(b)にそ れぞれ全切削比較 FEM モデル,全切削点群 FEM モデル の有効応力の結果を示す.切削部や支間中央と支点の中 央で応力が小さくなる傾向は減肉モデルと同様に応力分 布が整合している.また、載荷直下である支間中央の切 削部近辺では応力が小さくなっている傾向も同じであっ た. どちらの点群 FEM モデルもテーパー部分の応力分 散ができており、応力が概ね徐々に変化していくのを確 認することができた.しかし,減肉や切削部の周辺では 特に応力値が高なっている.これは、板厚が薄くなって いるためと考えられる. 図-8 は x=520mm の断面の板厚 を鉛直方向に対して表している.減肉点群モデルの板厚

が大きく変化している原因としては ISO 感度の設定によ って元の点群が歪んだためである.全切削モデルでは全 体に板厚が薄いが,ひずみはなく接合部付近までほぼ均 等な板厚でモデル化できている.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や要素 欠落があることも原因と考えられる.要素生成アルゴリ ズムの改良が必要である.

#### 6. おわりに

本研究では鋼構造部材の部分的な腐食を想定し,部材 の一部を減肉させた供試体を対象として,デジタルカメ ラを用いて取得した点群データから自動的に構造解析可 能な3次元モデルに変換する方法についてその精度につ いて検討した.

- 鋼製T桁梁供試体の3次元点群モデルを作成し精度 を検証した.検証点の誤差は約4mm程度であった. 減肉したウェブの断面変化や切削箇所を点群モデル に表現できた.さらにISO感度を低く設定すること で精度が向上することを確認した.しかしながら, ウェブの板厚の計測値や基準点の誤差があり撮影す る距離や場所に制限がある場合の撮影方法の確立が 必要である.
- 2) 自動で構築した点群 FEM モデルの線形静的解析を 行った.比較対象として実測寸法から作成した FEM モデルの有効応力との比較を行った.その結 果は、全体的な応力分布が把握でき、板厚減少位置 や切削部における応力増加も把握できたため将来的 には損傷を受けた鋼構造物の部材の応力評価に応用 できる可能性がある.しかしながら、点群 FEM の 応力結果は元の点群の精度に依存するため適切な撮 影条件で点群データを取得することが必須である.

謝辞:本研究は,科学研究費 基盤(C)課題番号 18K04317の助成を受けて実施しました.ここに記して 感謝いたします.

参考文献

- F. Banfi, S. Fai, R. Brumana: BIM AUTOMATION: Advanced Modeling Generative Process for Complex Strucutures, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume IV-2/W2, 2017.
- B. Conde-Carnero, B. Riveiro, P. Arias, J. C. Caamaño: Exploitation of Geometric Data provided by Laser Scan-ning to Create FEM Structural Models of Bridges, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol.30, Issue 3, 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) 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,土木情 報学シンポジウム講演集, Vol.44, pp.53-56, 2019.

