

3次元点群データからの薄肉鋼構造部材のFEモデル構築に関する研究

筑波大学大学院 学正会員 ○中溝 智也
筑波大学 正会員 西尾 真由子

1. はじめに

橋梁などのインフラ構造物の定期的な点検や適切な維持管理は、劣化損傷の早期発見につながり安全を確保する上で非常に重要であるが、人材不足、点検作業やコストの増大が問題となっている。そこで、CIM (Construction Information Modeling) の技術により3次元モデルを既存インフラ構造物の維持管理に活用しようという取り組みや研究が進んでいる。3次元モデル作成技術として、既存インフラ構造物では図面が残っていない場合もあるため、カメラやレーザー計測によって得られた点群データの利用が期待される。ただし点群データは、そのままでは構造物の応力状態や耐荷性能を定量的に評価することができない。部材の疲労を解析することによる将来の劣化予測や、通常では作用しない荷重下での応答などの把握を可能にするために、点群データを有限要素モデル (FE モデル) などの構造解析モデルへと変換する必要がある。既往研究では、点群データの誤差による性能解析への影響が見られ、点群データからFEモデルの構築にはソリッド要素を用いて要素分割を行っている研究が主である[1][2]。一般的な鋼橋の性能解析のように、シェル要素やはり要素など多様なFEM要素を部材によって組み合わせてモデリングする必要がある。そこで、本研究では既存鋼構造物の性能解析に向けて、平板で構成される薄肉部材の3次元点群データを作成し点群データからのシェル要素を用いたFEモデルの構築に取り組む。3Dハンディスキャナの技術を用いて3次元点群データを取得し、外れ値除去などの基本的な処理を行ってから、k-means法を用いて各板部材にセグメントした。最小二乗法により各板部材の点群データからそれぞれの中立面を推定し幾何構造の推定を行った。

2. 点群データ取得

実験に用いる供試体は、様々な方向を向いた薄肉構造部材が複雑に組み合わさった実鋼構造物を想定して、

複数の板部材を直角に溶接接合した鋼製 (SS400) の薄肉構造部材を3種類作製した。高さ400mm、幅180mmで、供試体Aは板厚が9mmで板部材を2つL字に溶接組み立てしたもの、供試体Bは板厚が12mmで板部材を2つL字に溶接組み立てしたもの、供試体Cは板厚が9mmで板部材を3つ溶接組み立てし塗装がなされている。厚さの決定については実構造物での適用を念頭に9mmと12mmを用意し、さらに板部材が一枚多いものを用意することでより複雑な形状での適用可能性を検証した。本研究では、点群データの取得にDotProduct社のDPI-8X (SR)を使用した。この装置はハンディタイプの3Dスキャナで、搭載された距離画像センサは、RGBカメラでカラー画像を取得すると同時に、照射された赤外線を深度カメラで受光することで3次元座標を取得できる。この装置で計測可能な対象物までの距離は0.3mから1.9mで、標準精度は0.2%であり、一般的に対象物に近づいて撮影すると精度は向上する。計測により得られた点群データは、全体的に表面に凹凸などのノイズが発生しており、エッジの部分の形状は丸い形状であった。供試体の厚さ部分には欠損が多くみられ、これは、厚さ方向の面の面積がほかの面と比べ相対的にかなり小さく特徴点が少ないためと考えられる。また供試体Cでは、中間に位置する板部材 (中間板) の点群データの数が全体の約0.26%となっているのに加え、上面と下面で点群データの密度に差があった。これは、供試体の下から計測できる十分な空間がないため3Dスキャナの計測可能範囲でのデータ取得、また中間板に正対しての計測が行えなかったためであると考えられる。以上より、面積が小さい箇所や困難な方向からの計測はエラーが多いという結果が得られた。点群計測後、オープンソースの点群処理ができるソフトウェアであるCloudCompareで供試体周りの背景の除去、外れ値除去、法線計算を行った。

キーワード 3次元点群データ, 鋼構造, k-means法, 最小二乗法, FEM, シェル要素

連絡先 〒305-8573 つくば市天王台1-1-1, E-mail: nakamizo.tomoya.sy@alumni.tsukuba.ac.jp)

3. シェルモデル幾何構造の推定

k-means 法は教師なし学習の一つで、クラスター数 k を指定することで、データの特徴に類似性があるものを同一クラスターとし、違うクラスター同士ではデータの特徴が異なるように分けることができる。アルゴリズムは、同じクラスター内のデータ \mathbf{x}_i 間の平均二乗距離を最小化させている。パラメータとしては、板部材の数 k について、供試体 A, B は $k = 2$ 、供試体 C は $k = 3$ とし、特徴ベクトル \mathbf{x}_i について、各点の座標値と法線ベクトル成分の絶対値を標準化したものを使用した。

$$\mathbf{x}_i = [x_i \ y_i \ z_i \ N_{xi} \ N_{yi} \ N_{zi}]^T \quad (1)$$

座標値のみで k-means 法を使用すると、アルゴリズムの性質上距離計算のみを行うため、クラスターが球状になる傾向がある。異なる板部材の点群データの代表的な法線ベクトルはそれぞれ違う方向を向いていることから、法線ベクトルの各成分値もクラスタリングに有用な情報であると考えたため付け加えた。k-means 法を用いたセグメンテーションの結果、それぞれの供試体について、法線ベクトルを用いたことで各板部材に適切にセグメントできた。

次に、クラスタリングされた各板部材の点群データから中立面を推定する手法として最小二乗法を用いた。均質材料の平板の中立面を推定するため、板部材の両平面で点の数をそろえる前処理を行った。3次元空間における平面の方程式は一般的に次式で表される。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2)$$

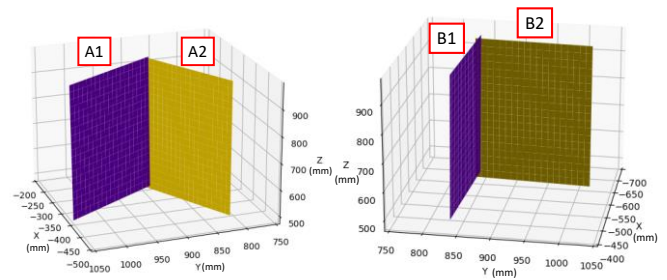
回帰させる線形モデル関数は、式(2)を変形して、

$$z = \alpha_0 x + \alpha_1 y + \alpha_2 \quad (3)$$

$$x = \alpha_0 y + \alpha_1 z + \alpha_2 \quad (4)$$

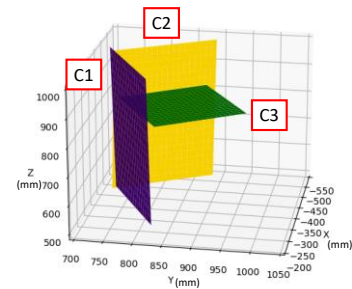
$$y = \alpha_0 x + \alpha_1 z + \alpha_2 \quad (5)$$

のいずれかとし、回帰係数 $\hat{\mathbf{x}} = [\alpha_0 \ \alpha_1 \ \alpha_2]^T$ を求めた。推定面が各軸に平行になる可能性があるため、それぞれ適したモデル関数を決定した。最小二乗法を用いて推定された中立面を図 1 に示す。推定面はいずれも板部材の両表面の点群間に収まっていた。また、中立面の精度検証のため、各中立面の法線ベクトルの内積を計算することで交わる角度を導出した。供試体 A, B のモデルについては2平面のなす角 θ_A, θ_B 、供試体 C のモデルについては3平面のなす角 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ を求めた。その結果、推定された中立面で構成した幾何構造は供試体の設計通りほぼ直交して得られており、特に供試体 C の誤差は小さかった。



(a)供試体 A の中立面

(b)供試体 B の中立面



(c)供試体 C の中立面

図 1 推定された供試体 A, B, C の中立面

表 1 推定した幾何構造の精度

供試体	角度 (degree)	設計値 (90度)との誤差(%)	
A	θ_A	87.42	2.87
B	θ_B	90.82	0.91
C	θ_{12}	90.40	0.44
	θ_{13}	89.81	0.21
	θ_{23}	90.35	0.39

4. 結論

鋼構造部材を想定した厚さや板部材の数が異なる 3 つの供試体を作製し、点群データから k-means 法や最小二乗法を用いて中立面を推定し、シェルモデル幾何構造の構築を行った。点群データから推定された中立面はほぼ直交することが導出され、シェル要素によるモデル化の可能性があることが示された。

謝辞 本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR205T の支援を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 鈴木紗苗, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 山崎智之, & 三上修一. (2019). 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), 75(2), I_141-I_149.
- [2] C. Zhang, J. Shu, K. Yu: Automated nonlinear FE analysis of damaged RC beams based on 3D point clouds, Proceedings of the 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, ABS_497, 2021.