

点群データから構造解析モデルへの変換の自動化に関する検討

Basic investigation on conversion of high-density point cloud data to structural analysis model

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)

1. はじめに

2012年に国土交通省がCIMの試行業務を開始し、3次元モデルに関する研究開発がより盛んになった¹⁾。道路構造物においても、構造部材やひび割れなどの情報を機器から取得して3次元データを作成し、点検や維持管理業務で役立てることが想定されている²⁾。実務においては、ドローンなどで撮影したデータから3次元モデルを作成し、土工や測量などに用いる例³⁾が報告されている。さらにロボットの高性能化や撮影機材の高解像度化により、3次元モデルの活用が注目されているが、構造物の現状の耐荷力や応力状態を推定し、補修・補強によってどの程度それが改善するかを定量的に評価するようなことはまだ難しい。

著者らはこれまで、画像データから構築された3次元モデルを構造解析でも活用するための基礎的検討を行っている⁴⁾。デジタルカメラで供試体を撮影し、取得した画像データから3次元点群モデルを作成した。そして、3次元点群モデルの点群データからFEMモデルを構築する手法の検討を行った。点群から作成したFEMモデルの応力状態については比較対象のFEMモデル⁵⁾とおおむね一致していたが、作業工程が煩雑であり、多大な労力を要した。

そこで本検討では、供試体を撮影した複数の画像から3次元点群モデルを作成し、そのデータを使用してFEMモデルを構成する節点を自動的に作成する手法を検討した。

具体的には、3次元点群モデルの座標データを含む空間を小さな3次元格子で分割して、座標値を格子内で平均化し、各節点を作成する手法であり、これによる作業時間や工数の削減効果やFEMモデルの節点配置の妥当性について検討した。

2. 点群データ作成

2.1 実験供試体と撮影方法

本研究では、小規模橋梁の桁端部を模した鋼製の供試体を用いて屋内で撮影実験を行った。図-1にこの実験供試体を示す。この供試体は、SS400材相当の鋼材からなるI形鋼を用いた鋼鉄道橋の主桁を750mmに切断し、SM400A材の垂直補剛材とソールプレートとを溶接して製作したものである。図-2に示すように桁高は400mm、

フランジ幅は150mmである。

供試体は両端部をコンクリートブロック上に設置した。これは、供試体の下フランジの底部を斜め下から撮影可能にするためである。撮影に使用したデジタルカメラはニコン社製のE8800であり、撮影画像はjpeg形式で保存し、記録画素数は3264×2448pxに設定した。

設置した供試体に対してカメラと供試体の距離を600-630mmに保ちながら、60%以上のオーバーラップ率で多方向から撮影を行った。この供試体については391枚の画像を取得した。

2.2 3次元点群モデル作成と座標設定

Agisoft社のPhotoScan Proを用いて撮影画像から点群を作成する作業を行った⁶⁾。画像は391枚撮影したうちの、389枚を用いた。作成した点群モデルを図-3に示す。点群モデル上には3点の基準点を設定するが、基準点は複数の画像に含まれるように撮影している。この点については、前もって実験供試体の腹板端部に貼り付けて端に配置した。点と点の間の寸法を計測することによって、3次元点群モデルの3点の基準点に座標を設定した。これによって、実寸法と点群モデルの寸法を整合させた。

作成した3次元点群モデルの点群数は支持台のコンクリートブロックを含めて11,816,122点であった。また、基準点の座標設定には0.02mmまで計測可能なノギスで測定した結果を使用した。



図-1 実験供試体

2.3 3次元データの精度検証

設定した3点の基準点のうち2点を検証点として、モデルの精度を確かめた。検証結果を表-1に示す。表-1の検証点の誤差について、実測値から配置した3次元座標値を正值としPhotoScanが推定した3次元座標との差分を表したものである。座標系はxを供試体の軸方向、yは軸直角水平方向、zは鉛直方向である。いずれの方向においても1mm以下の誤差となっている。しかし、今回の基準点と検証点はともに桁の端部に位置しており供試体全体の点群モデルの精度を表していない。したがって、点群モデルの精度向上のために基準点の設置位置は今後検討が必要である。

3. 点群FEMモデルへの変換

3.1 手動による変換手法

3次元点群モデルからFEMモデルを構築する場合には供試体の形状を表す情報をできるだけ正確に移行すべきであると考えられる。例えば、鋼部材の腐食やコンクリート部材の凍害やすり減りによる断面欠損の情報を含んだFEMモデルを構築できれば、それに応じた耐荷性能の評価が可能になる。一方で、点群モデルの点群数や分布は通常のFEMモデルの節点数と比較すると膨大であり、またその分布は表面のみである。このため、点群モデルからFEMモデルへの変換は、点群の座標からFEMモデルの節点へどのように変換するかが問題となる。しかし、この手法は確立されておらず、対応するソフトウェアもない。

著者らは、PhotoScanで生成した3次元点群モデルの点群データを複数のソフトウェアを介して、FEMモデルに手動で変換することを検討した⁴⁾。

手動での処理方法は、PhotoScanで作成した3次元点群モデルで代表断面について断面の輪郭を点群モデルから抽出した。例えば4断面を用いる場合、供試体両側の桁端($x=0, 750\text{mm}$)と垂直補剛材($197\text{mm} \leq x \leq 203\text{mm}$)、そして端部から垂直補剛材までの中間($x=475\text{mm}$)である。PhotoScan上で断面抽出位置付近以外の点群を消去したのち、点群処理ソフトウェア(MeshLab)にデータを移行し、抽出位置の断面の厚さが3mmになるようにした。そして、MeshLab上で点群を均等にサンプリングし全体の5%の点群のみを残し断面の点群数を減らした。そのあと、x座標をそれぞれ抽出断面位置に固定する作業を行った。その座標データを構造解析ソフトウェアであるmidas Civilへ移行し、内部に点を手動で設け、断面ごとに点と点を結びつけることで板要素を作成した。そして板要素を橋軸方向(x方向)へ押し出すことによってソリッド要素を作成した。図-4に断面を4つ使用した場合の解析モデルの全体を示す。ここで、点群から作成したFEMモデルを点群FEMモデルと称する。

しかし、上記の工程は煩雑でありこの方法で4つの代表断面を増やしFEMモデルを構築するのは困難であると考えられる。

3.2 応力算出結果

構造解析を行うために、文献5)の実験に対応させた材料物性と境界条件を設定し、線形静的解析を行った。

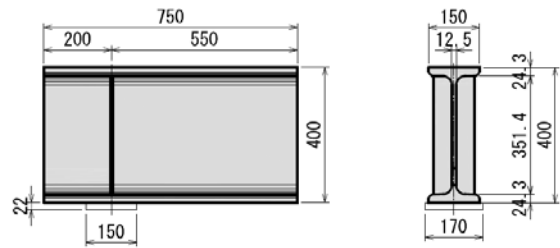


図-2 実験供試体の一般図



図-3 3次元点群モデル

表-1 3次元点群データの精度検証結果

誤差(mm)	x 方向	y 方向	z 方向	3 方向
検証点 1	0.000	0.685	0.295	0.470
検証点 2	0.000	0.214	0.309	0.376

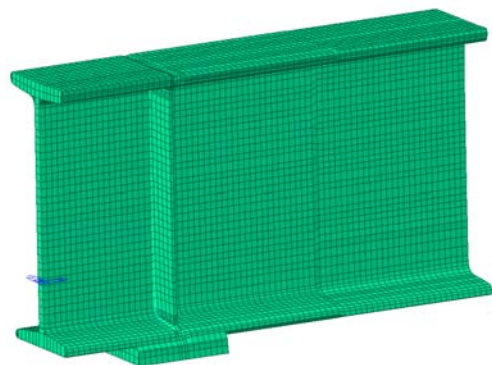


図-4 点群FEMモデル

表-2 点群FEMモデルと比較FEMモデルの解析条件

	点群FEMモデル ⁴⁾	比較FEMモデル ⁵⁾
材料物性	SS400	
境界条件	上フランジ上面	
	節点バネ要素	ゴム板を模したソリッド要素
荷重	ソールプレートに鉛直方向上向き	
	圧力荷重：300kN	

また、比較対象となる FEM モデルを設計図面から通常の方法で作成した⁵⁾。両モデルの解析条件を表-2 に示す。この比較対象の FEM モデルについては、供試体の載荷実験を行った際にひずみが実験と解析でおおむね一致していることを確認している。比較対象の FEM モデルを作成した構造解析ソフトウェアは midas NFX である。

点群 FEM モデルと比較 FEM モデルの有効応力の分布を図-5 の(a), (b)にそれぞれ示す。どちらのモデルもソールプレート直上から $x=0\text{mm}$ 側の桁端部にかけて比較的大きな応力が分布していた。両方でコンターの刻みが異なるものの、応力の値はほぼ同じレベルであり、着目点の応力状態は点群 FEM モデルでも十分に評価可能である。なお、点群 FEM モデルは $x=750\text{mm}$ 付近の腹板上部で応力がやや大きくなっていた。この理由は、供試体の初期不整や、基準点位置による 3 次元点群モデルの歪み、点群から節点に変換する際のノイズの影響などが考えられる。今後さらに点群モデルそのものの作成方法は改善が必要である。

3.3 節点作成の自動化手法

3.1 節の結果より、3 次元点群データから FEM モデルへ変換することは可能であることが確認できた。そこで本研究では、3 次元点群モデルの座標データを FEM モデルの節点へ可能な限り自動で変換する手法を検討した。

(1) 画像解析ソフト上での前処理

3 次元点群モデルの点群数は非常に量が多く、処理に時間を要することから、処理にかかる時間短縮のために、できるだけ不要な点を PhotoScan 上で手動で削除した。今回のモデルは供試体の下に設置しているコンクリートブロックと床面の点群を消去し、点群数は 11,861,122 点から 6,042,981 点となった。

(2) FEM モデルの節点を抽出する処理

3 次元点群モデルから作成した xyz 座標のデータは、高密度に供試体表面を覆っており、その間隔も等しくない。そのデータをそのまま FEM モデルに移行した場合、点と点の距離が近すぎるため要素を作成することができない。そこで、本検討では点群の密度を下げ間隔を揃える操作を行う。まず、点群モデルを含む空間を 10mm 間隔に格子状に区切る。この仮想的な 3 次元格子の内部にある点について y 座標と z 座標の平均値を決め、これをその格子を代表する座標値とする。x 座標については、FEM モデルの要素配置を容易にするため、格子の端部の値に統一した。すなわち、x 座標の値は厳密に 10mm 間隔となる。このとき、格子内に一定数以上の点がない場合はその格子では座標値を求めない。本検討のモデルではこの点数を 100 点とした。6,042,981 点の点群データは上記の処理後に 11,107 点に置き換えることができた。このデータを FEM モデルの節点として midas Civil へ移行させた。midas Civil 上で表示した節点を図-6 に示す。なお、ここで述べた処理は数値解析ソフト MATLAB でプログラムを作成して実行した。

3.4 節点構築の結果

本研究では、撮影した画像データから 3 次元点群モデルを作成し、FEM モデルの節点へ変換する工程を自動化した。今回使用した規模の供試体で 3 次元点群モデル

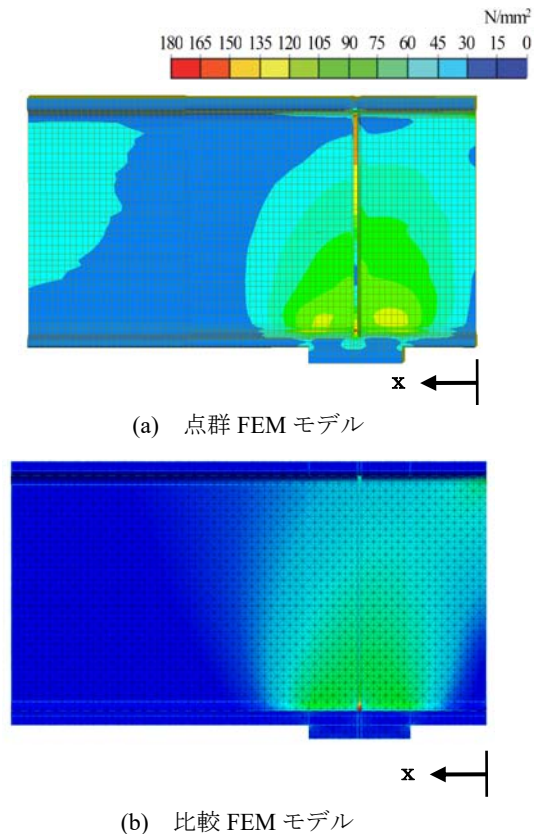


図-5 線形静的解析による有効応力

を作成した場合、600 万点の点群の座標が生成される。その大量のデータの処理を手動で行う場合は多くの手間と時間がかかり、例えば文献 4)では 1 モデルで 3 日要していたが、本研究の手法では数時間となった。しかし、供試体の内側には点群は存在しないため FEM ソフトウェアで手動による節点の作成を行い、点と点をつなぎ合わせて要素を構築しなければならない。したがって、3 次元点群モデルの内部に点を配置しソリッド要素を構築する工程も自動化が必要である。作成した節点は、x 座標ごとに数や間隔が異なる。また、FEM モデル内部に節点が設けられないことに加えて、点群の数が足りない場所は節点が欠損するため、ソリッド要素を構築する場合に空洞になったり、節点が重複してしまったりすることがあり、このような場合には手動で節点を調整する必要がある。

4. まとめと今後の課題

国土交通省が CIM の試行業務を開始したことより橋梁分野でも 3 次元モデルの活用が注目され、モデルの作成手法や適用方法が検討されている。しかしながら、この 3 次元点群モデルから応力状態を把握し今後の補修や補強方法の推定を行う検討はまだ行われていない。

そこで本検討では、撮影した複数の画像から 3 次元点群モデルを作成し、モデルの精度を検証した。次に、作成した 3 次元点群モデルの座標データから FEM モデルを構築するために点群を節点に変換する工程の自動化について検討した。本検討で得られた主な知見と今後の課題は以下の通りである。

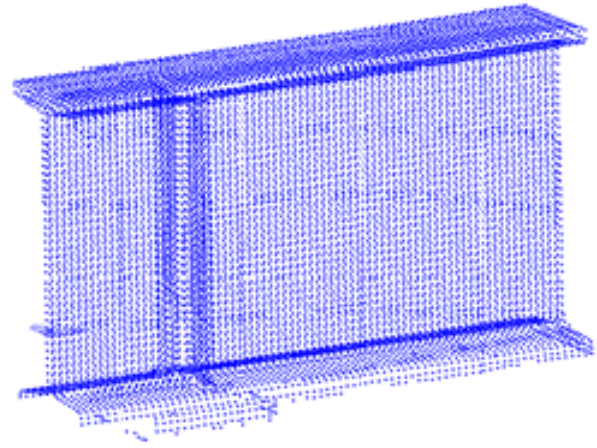
- 1) 撮影により取得した画像データから 3 次元点群モデルを作成し、点群データの座標から FEM モデルを構成する節点データの作成を自動化することができた。
- 2) モデル化の精度を確保するためには、3 次元点群モデルそのものの精度向上が必要で、点群データ作成方法の検討が必要である。
- 3) 点群データは供試体の表面のみに生成されるため、内側に自動で節点を作成すること、また、作成した節点座標からソリッド要素を構築することの 2 つの自動化も検討する必要がある。

謝辞

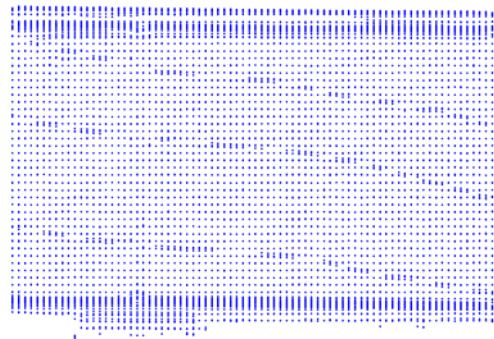
本研究は、科学研究費 基盤(C)課題番号 18K04317 の助成を受けて実施しました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

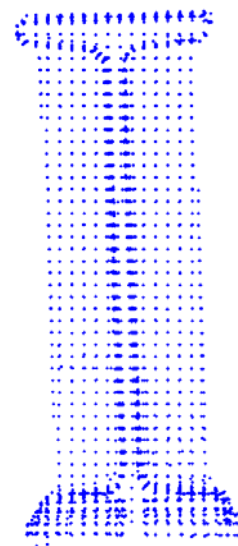
- 1) 矢吹信喜：CIM 入門ー建設生産システムの変革ー，理工図書，2016.
- 2) 松田浩，河村太紀，西行健，木本啓介，西川貴文：3D 計測と FEM 解析と実振動計測に基づく橋梁振動特性同定，鋼構造年次論文報告集，Vol.24，pp.445-448，2016.
- 3) 木村駿：特集 ドローンが現場にやってきた！，日経コンストラクション，2016 年 4 月 25 日号，pp.36-61，2016.
- 4) 鈴木紗苗，宮森保紀，齊藤剛彦：高密度点群データの構造解析モデルへの変換に関する基礎的検討，土木情報学シンポジウム講演集，Vol.43，pp.25-28，2018.
- 5) 岩渕直，宮森保紀，大島俊之，三上修一，中野慎人：形鋼桁の桁端部腐食損傷に対する耐荷性能に関する基礎的実験と解析，土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集，I-544，2018.
- 6) クウサツ・ドットコム：Agisoft PhotoScan Professional Edition Version1.3 日本語ユーザーズマニュアル Ver.1.0，2017.



(a) 鳥瞰図



(b) 側面図



(c) 断面図

図-6 自動処理後の FEM モデルの節点