

(7) 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研究

鈴木 紗苗¹・宮森 保紀²・齊藤 剛彦³

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)
E-mail: m1852200126@mail.kitami-it.ac.jp

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)
E-mail: saitota@mail.kitami-it.ac.jp

近年では、構造物を撮影した映像や画像から 3 次元モデルを作成する研究が盛んになっているが、これらのモデルでは形状の情報が主体でこのモデルから構造物の実応力状態などを検討することはできない。本研究ではデジタルカメラによる撮影画像から構造解析可能な FEM モデルの構築について基礎的な検討を行った。まず、画像から 3 次元点群モデルを構築し寸法精度を検討したところ、鋼部材の寸法や変形を高精度に測定できた。この点群モデルから FEM モデルを構築するには、複数の処理を組み合わせる必要があるが、構築した FEM モデルについて静的載荷実験を再現した数値解析を行ったところ応力の分布はおおむね一致しており、実構造物の応力状態を把握できる可能性があることが分かった。

Key Words: SfM, point cloud, FE model

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⁾。橋梁分野でも構造部材やひび割れなどの情報を機器により取得して3次元データを作成し、点検や維持管理業務に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を土工や測量などに用いる例³⁾が報告されているが、ロボットの高性能化や撮影機材の高解像度化により、橋梁の構造部材の詳細測定にも応用することが将来は期待できる。このような技術によって3次元モデルが一般的に用いることができるようになると、3次元モデルが従来の点検調書を代替することが期待される。一方、構造物の補修・補強設計においては、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必要がある。現状では点検結果から詳細な構造解析モデルを構築して数値解析的な検討を行うことはまれで、簡単な力学モデルでの検討に留まることが多く、3次元モデルが活用できる状況に至っていない。

そこで本研究では、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

た。具体的にはデジタルカメラによる撮影画像から3次元点群モデルを構築する。3次元点群モデルの寸法精度を確かめるために、実験供試体を載荷実験前後で撮影し、それぞれ3次元点群モデルを作成し変状や寸法を計測した。さらに、載荷実験前の点群モデルからFEMモデルを構築し線形静的解析を行った。この結果に対して、従来と同様に構築したFEMモデルによる解析結果と比較し本手法の課題について検討した。

2. 対象実験供試体

本研究では小規模橋梁の桁端部を模した実験供試体を対象とした。SS400材相当の鋼材で製作されたI形鋼を用いた鋼鉄道橋の主桁を75mmに切断し、SM400A材の垂直補剛材とソールプレートを溶接して製作したものである。主桁は高さ400mm、幅150mmである。図-1のように実験供試体は2種類用意した。供試体Aは基本形であり、供試体Bは損傷を仮定し補剛材下端を切断し、腹板を短径50mmの楕円形に切り抜いた。腹板欠損部の側面図を図-2に示す。

3. 変状測定実験

(1) 撮影方法と3次元点群モデル作成方法

本研究ではまず点群モデルの精度を確認するため、欠損部を有する供試体Bに対して载荷実験前後の点群モデルを作成して変状の測定を行った。使用したデジタルカメラはニコン社製のE8800である。記録画素数は3264×2448px、焦点距離は600-630mmとした。画像間のオーバーラップを60%以上としながらできるだけ多方向から供試体を撮影し、载荷実験前後でそれぞれ100枚程度の画像を取得した。

次にAgisoft社のPhotoScanを用いて撮影画像から点群を生成した。作成した点群モデル上に3点以上の座標を設定し、実寸法とモデルを整合させた。座標値は実際の寸法を与えるためノギスで測定した。ノギスは0.02mmまで計測可能なものを使用した。

载荷実験⁴⁾では、供試体に鉛直载荷を行い最大500kNの動的载荷試験機により10kNずつ荷重を増加させて载荷した。いずれの供試体も最大荷重まで破壊しなかったため、実験後に最大1000kNの万能試験機で同様の载荷試験により塑性変形を与えた。実験後に上述の方法で3次元点群モデルを载荷実験前後でそれぞれ作成した。PhotoScan上で表示される誤差は表-1のようであった。

(2) 測定結果と考察

変状測定における着目箇所は図-3に示す楕円形欠損部の短径とした。点群モデル上と実物で短径の測定を20回繰り返しその結果を表-2にまとめた。载荷による変形は約2mmとわずかであるが、点群モデルにおいても変形を測定できることが分かる。またこの程度の変状は近接目視点検でも認識しづらいため、画像解析による計測の有効性が確認できた。十分な測定精度を確保するには、座標設定を精度よく行うとともに、撮影枚数と撮影時に十分な照度を確保することが必要である。

4. 点群FEMモデルの構築と線形静的解析

(1) 点群FEMモデル構築方法

供試体Aの3次元点群モデル(図-4)をFEMモデルに変換する。以下この点群モデルから作成するFEMモデルを点群FEMモデルと称する。本研究ではいくつかのソフトウェアを組み合わせた。手順は以下のとおりである。()内に使用したソフトウェアを示す。

- 1) 点群モデルについて、部材軸方向で代表的な断面の長さ7mmを抽出し、I型断面の外形部分のみの点群を作成。(図-5, PhotoScan)
- 2) 1)の点群データに対して最外縁となる点のみを残し、



(a) 供試体A (FEMモデル用) (b) 供試体B (変状測定実験用)

図-1 実験供試体

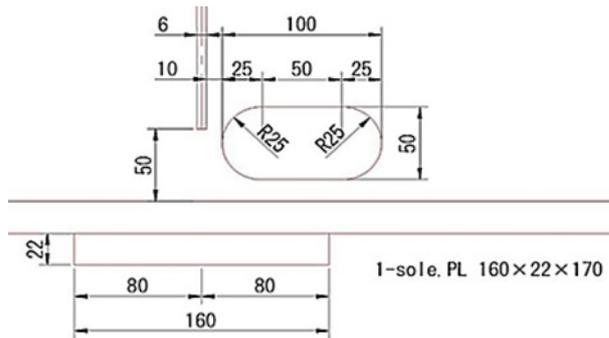
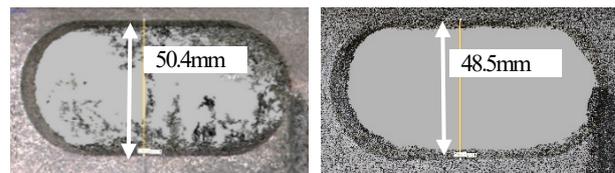


図-2 腹板の欠損箇所 (供試体B)

表-1 载荷実験前後の誤差

	誤差 ($\times 10^3$ m)	誤差 (px)
载荷前	0.940	1.216
载荷後	0.379	4.417



(a) 载荷前 (b) 载荷後

図-3 载荷実験前後の測定値の例

表-2 変状測定実験結果

		载荷前 (mm)	载荷後 (mm)	载荷前後の差 (mm)
実測値	最大値	50.0 (製作時)	48.60	1.45 (平均値の差)
	最小値		48.40	
	平均値		48.55	
点群 モデル	最大値	51.0	49.2	1.97 (平均値の差)
	最小値	49.9	48.0	
	平均値	50.3	48.3	

メッシュを作成。(図-6, MeshLab)

- 3) FEM ソフトウェアで取り扱いが可能な形式とするため、CADソフト上で再変換。(AutoCAD)
- 4) メッシュの欠損箇所を修正するとともに断面を長さ方向に押し出しソリッド要素を作成。(図-7, midas Civil)
- 5) ソリッド要素を長さ方向に約 12mm ずつ分割し、材料物性(SS400)や境界条件などを設定。(midas Civil)



図-4 3次元点群モデル(供試体A)

(2) 解析条件

上記の方法で作成した点群 FEM モデルに対して、載荷実験と同様の荷重条件を与える。すなわち、フランジ上面を節点バネ支持として、ソールプレートの底面に合計 300kN となる圧力荷重を加えた。また、通常の FEM 解析と比較するため、実測値に基づいてソリッド要素からなる FEM モデル(以下、比較 FEM モデル)を midas NFX で作成して、同様に静的解析を行った。なお、点群 FEM モデルの材料物性は線形であり、比較 FEM モデルについては非線形で設定している。また、この比較 FEM モデルの解析結果については、文献4)で載荷実験とおおむね整合していることを確認している。

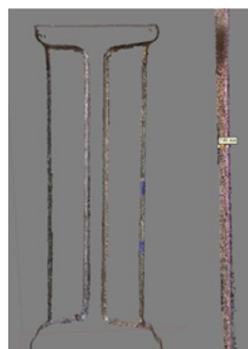


図-5 PhotoScan 処理

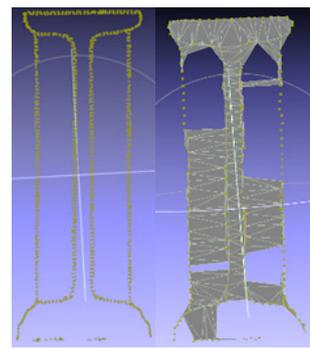


図-6 メッシュ

(3) 解析結果

解析結果として図-8(a)に点群 FEM モデルの鉛直方向変位を、図-8(b)に比較 FEM モデルの変位を示す。また、両モデルの腹板の有効応力を図-9(a) (b)に示す。

図-8(a)では、点群 FEM モデルは面外変形が発生したが、載荷実験の供試体 A にも同様の変形が起こっていた。また、載荷実験の最小主ひずみの測定結果でも腹板の両面でひずみ値が異なっていた。このことは供試体に初期不整があったことを示しているため、点群 FEM モデルは初期不整を含めたモデル化が可能であることを示唆している。一方、変位の値そのものは解析モデルにより異なり検討の必要がある。

応力については、図-9(b)の比較 FEM モデルは、載荷位置であるソールプレート直上の腹板下端および垂直補剛材の上下端で応力が大きく、腹板面内ではソールプレート直上から右上側の桁端部にかけて比較的大きな応力が分布している。図-9(a)の点群 FEM モデルでも全体の傾向は同様だが、点群 FEM モデルでは左側の桁端部にかけて筋状に応力が大きな部分がある。点群 FEM モデルの表面の凸凹がメッシュとして長さ方向に押し出されることで、腹板面全体に不陸が広がり応力の計算結果に影響を与えたためと考えられる。

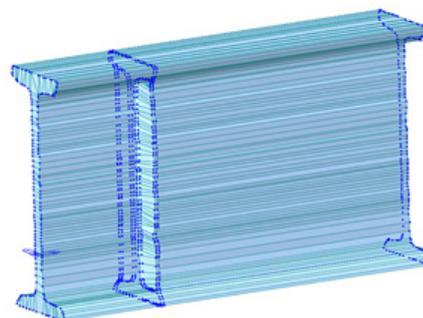
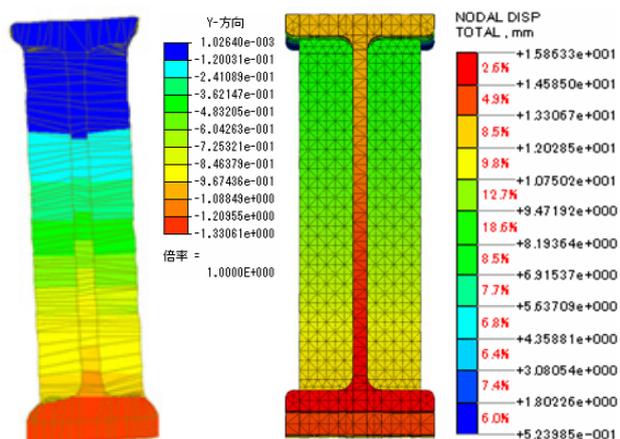


図-7 断面の押し出し



(a) 点群 FEM モデル

(b) 比較 FEM モデル

図-8 FEM モデルの変位

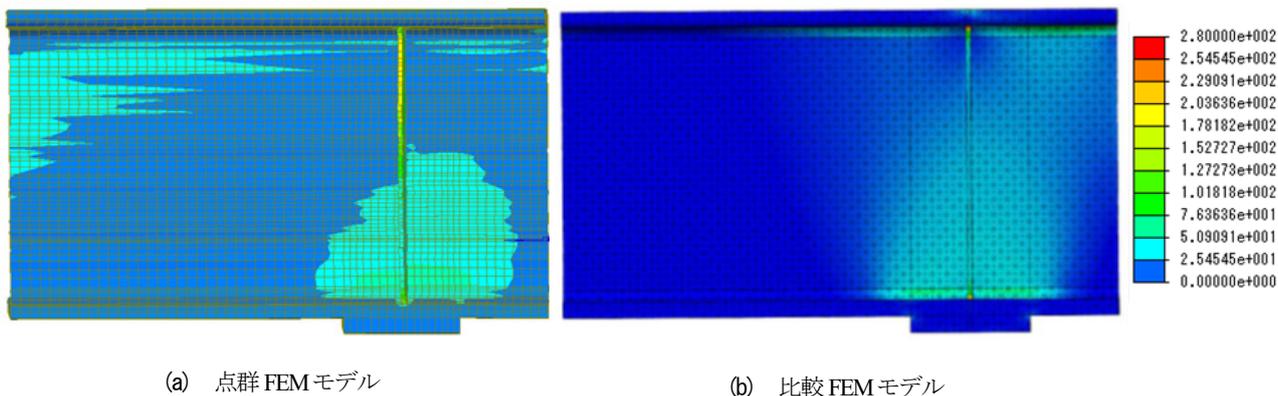


図-9 有効応力(N/mm²)

5. まとめと今後の課題

本研究では、撮影画像から構築した点群モデルを FEM モデルに変換し、構造解析に適用可能か検討した。まず点群モデルに対する変状測定実験として、損傷前後の変化を同定することが可能であるか検証するため、実験室レベルで鋼桁端部の载荷実験を行い、実験の前後での変形を画像計測によって評価できるかを検討した。さらに载荷実験前の実験供試体の点群データから構造解析用 FEM モデルを構築し、载荷実験を模擬した構造解析を行い、従来の方法で構築した FEM モデルで得られた値と比較して、構造解析への適用性について検討した。

- 1) 3次元点群モデルによる計測では、鋼部材の寸法や変形を高精度に測定することができた。
- 2) 画像計測の点群データを点群 FEM モデルへ変換する工程は、現状では煩雑であった。しかしながら、応力の分布はおおむね一致しており、画像計測により実構造物の応力状態を把握できる可能性がある。

今後の課題は、FEM モデルを作成する場合に代表断面を押し出して全体を構築しているため、一様でない形状の構造物に対応することができない。そのためソリッ

ド要素構築方法の改善が必要である。また、これらの処理の自動化も課題である。

謝辞：本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のエネルギー・環境新技術先導プログラムの一環として実施しました。関係者に感謝いたします。

参考文献

- 1) 矢吹信喜：CIM 入門－建設生産システムの変革－，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) 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，第I部門，2018。