

交差する部材を有する桁供試体の 点群データから FEM データへの変換に関する検討

A conversion method of point cloud data to FEM data of girder specimens with intersecting members.

北見工業大学	大学院博士前期課程	○学生会員	吉田明燐 (Meiyo Yoshida)
北海道大学	大学院工学研究院	正会員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学	工学部	正会員	齊藤剛彦 (Takehiko Saito)
北見工業大学	工学部	正会員	門田峰典 (Takanori Kadota)

1. はじめに

近年、少子高齢化により技術者が減少し、社会資本施設の老朽化も進んでいる。このため、社会基盤を維持するには効率的で適切な維持管理が必要で、新技術の導入を積極的に進めるべきである。

このうち構造物の 3 次元データ化については、SfM(Structure from Motion)による 3 次元点群データの活用が注目され、構造物の外面の変状を確認する研究が多くある(例えば¹⁾。一方、点群データを用いて、構造物の変位や応力状態を確認できる有限要素モデルを作成した研究は少ない(例えば²⁾。今後、点群データを計算モデルに適用し、部材の健全性を定量的に把握できれば、効果的かつ効率的な維持管理が展開できると考える。

著者らはこれまで、部材軸方向が異なる T 形梁や橋梁の主桁を想定した I 形鋼部材を対象に画像データから 3 次元点群モデルを構築し、構造解析が可能な FEM モデル(以下、点群 FEM モデルと称す)を構築する手法を検討してきた^{3,4)}。しがしながら、実橋梁では、主桁のように軸方向部材のみでなく、横桁や対傾構などのように桁と交差する部材も含まれる。そこで、本研究では、部材が交差する供試体を用いて、点群データを FEM データに変換し、線形静的解析により、応力状態を把握した。本論文では、その結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本研究では、橋の主桁に横桁が接合されたような供試体を木材で製作した。具体的には、合板や角材で上下フランジ、ウェブ、横桁の 4 つの材片を作成し、釘で接合した。主桁長は 500mm、桁高は 323mm、上フランジは 112mm×11mm、下フランジは 87mm×12mm。横桁は 38mm×40mm で長さは 300mm である。なお、横桁は主桁ウェブの中央に接合した。

2.2 SfM による点群モデルの構築

本研究では SfM を用いて、点群モデルを構築する。画像の取得は、デジタルカメラ SONYα6500 を用いた。jpg 形式で記録画像数は 4240 × 2832pixel である。撮影モードはシャッタースピード優先で 1/20s とし、絞り値(3.5～5.0)を自動調整した。画像のノイズを低減するため ISO 感度を 100 に設定し、ピントを合わせやすくするために焦



図-1 実験供試体の点群モデル

点距離を 18mm に設定した。

供試体の全体を撮影するために、高さ 1000mm の台に設置し、オーバーラップ率 80%を確保して、供試体を囲むように撮影を行った。また、材片の連結部の点群密度を確保するために、カメラを連結部に近づけ撮影をした。合計で 293 枚の画像を取得し、Agisoft 社の Metashape(ver1.6.5.11249)を用いて点群モデルを構築した。

図-1 に実験供試体の点群モデルを示す。点群モデル全体では、供試体の形状を再現できた。材片の連結部も欠損なく構築できたと考えられる。

表-1 に供試体寸法と点群モデル、後述する点群 FEM モデルの板厚の比較を示す。板厚の比較は、図-1 におけるモデルの左端、中央、右端の 3 断面で行った。なお、本節では供試体寸法と点群モデルを比較する。点群モデルの寸法は、ウェブではいずれの断面でも実物とほぼ同一となった。一方、フランジはばらつきが大きく点群モデルの方が大きくなった。これは、点群モデルの表面やエッジ部に背景の点群と思われるノイズが付着したためと考えられる。点群 FEM モデルの応力解析では、元となる点群モデルの精度が影響するため、ノイズの除去方法を検討する必要がある⁴⁾。

3. 点群 FEM モデルの構築.

3.1 概要

点群データを FEM データに変換するために、点群の座標値をテキストファイルに書き出し、点群データから節点を作成し、節点で部材断面の輪郭を作成してから、

表-1 板厚の比較

a) 左端(X=55mm)

	A 供試体寸法 (mm)	B 点群モデル (mm)	C 点群 FEM モデル (mm)	差(A-B) (mm)	差(B-C) (mm)	差(A-C) (mm)
上フランジ	11.0	13.3	14.0	-2.3	-0.7	-3.0
ウェブ	17.5	17.5	17.6	0.0	-0.1	-0.1
下フランジ	12.0	11.8	13.6	0.2	-1.8	-1.6

b) 中央(X=230mm)

	A 供試体寸法 (mm)	B 点群モデル (mm)	C 点群 FEM モデル (mm)	差(A-B) (mm)	差(B-C) (mm)	差(A-C) (mm)
上フランジ	11.0	15.3	11.9	-4.3	3.4	-0.9
ウェブ	17.5	17.5	17.6	0.0	-0.1	-0.1
下フランジ	12.0	12.7	13.8	-0.7	-1.1	-1.8
横桁	38.0	38.4	38.0	-0.4	0.4	0.0

c) 右端(X=435mm)

	A 供試体寸法 (mm)	B 点群モデル (mm)	C 点群 FEM モデル (mm)	差(A-B) (mm)	差(B-C) (mm)	差(A-C) (mm)
上フランジ	11.0	11.6	11.3	-0.6	0.3	-0.3
ウェブ	17.5	17.4	17.5	0.1	-0.1	0.0
下フランジ	12.0	14.2	13.2	-2.2	1.0	1.2

ソリッド要素を生成する処理を行う。この処理は独自で開発したプログラムを用いて、MATLABで行った。ここでは、手法について説明する。本研究では、全体座標系は図-1に示すXYZ方向、部材座標系はxyzで表われ、部材軸方向をx、軸直角方向をy、鉛直方向をzとしている。

3.2 節点の作成方法

図-3に主桁のyz平面1断面分の点群のイメージを示す。図のように膨大な点群データのすべての点をFEMモデルの節点に変換するのは困難である。そのために、yz空間内に格子を設定し、図-4のように格子内の点に対してグリッド平均ダウンサンプリング法で平均点を計算し、各格子内に1つの節点を生成した。なお、格子の間隔はメッシュサイズに相当する。本研究では、主桁については、横桁と交差する周辺では形状を精度よく表現するため5mmとして、その他範囲では10mmのメッシュサイズとした。横桁については、10mmを採用した。

3.3 断面の輪郭の作成方法

図-5に作成した断面の輪郭のイメージを示す。図のように、断面の輪郭は最外縁の節点を連続することによって形成した。輪郭の作成には、MATLABのboundaryを用いた。これはアルファ形状によって、断面の凹部も含んだ境界を検出する。この時、境界のコンパクトさ、すなわち境界で囲まれる範囲の面積の小ささは、縮小係数で制御される。縮小係数1.0が最もコンパクトであるが、断面の内側に輪郭が入り込む場合もある。このために、縮小係数は後述する材片ごとに試行錯誤的に決定した。

また、部材の隅角部に実際よりも大きなリブ状の要素が生成されないように座標の範囲を指定し、部材を材片に分割し、その範囲内の点で輪郭を作成した⁴⁾。図-6に分割する範囲を示す。本研究では、部材を6つの材片(A~F)に分割した。具体的には、上フランジ $305\text{mm} \leq Z < 330\text{mm}$ 、下フランジ $-10\text{mm} \leq Z < 29\text{mm}$ の範囲とした。また、横桁とウェブの接合部にリブ状の要素が生成されな

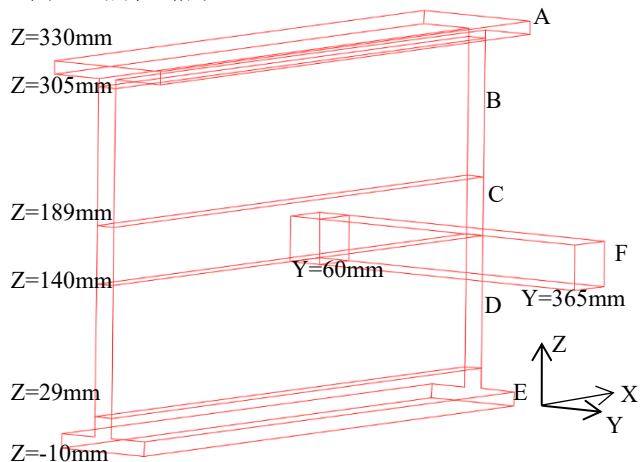
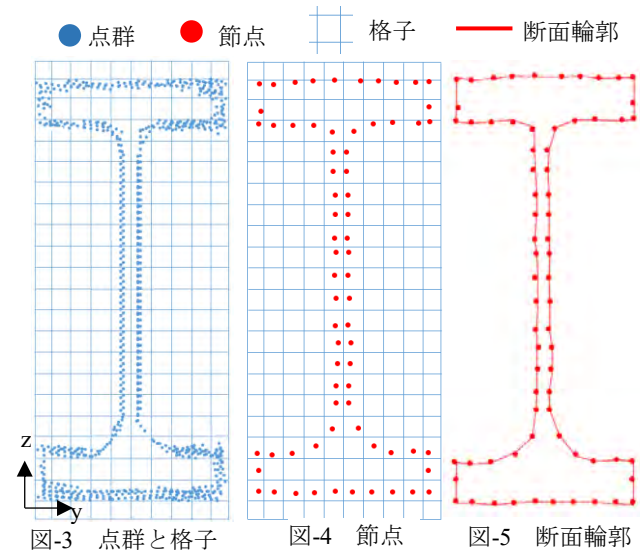


図-6 材片分割

いように、ウェブを $189\text{mm} \leq Z < 335\text{mm}$ 、 $140\text{mm} \leq Z < 189\text{mm}$ 、 $29\text{mm} \leq Z < 140\text{mm}$ の3つに分割した。さらに、本研究で用いる変換アルゴリズムで部材軸方向に処理を行っているため、 $60\text{mm} \leq Y < 365\text{mm}$ の範囲を横桁として分割をしてから、Z軸方向に90度回転させ、材片のyz断面で輪郭を作成した。各材片の縮小係数は、Aは0.85、

Bは0.95, Cは0.80, Dは0.95, Eは0.83, Fは0.70とした。

図-7に例としてある断面の輪郭を示す。まず、図-7(a)の主桁については、ウェブ中央の輪郭が面外に僅かに凸形となっているが、これは、3.5節で説明するウェブと横桁の連結のため、横桁の端部をウェブ面に残して分割したためである。また、下フランジ下面にも凸形の輪郭が生じているが、これは、下フランジ下面のノイズの影響と考えられる。図-7(b)の横桁については、長方形断面を概ね再現できた。

3.4 ソリッド要素の作成方法

分割した材片ごとに、節点と断面輪郭を作成する。節点と断面輪郭の作成は供試体長をメッシュサイズによって分割したすべての断面で行う。そして、すべての断面輪郭について、ソリッド要素を生成するために、2次元デローニー分割を行う。図-8に2次元デローニー分割とソリッド要素を生成する方法のイメージを示す。2次元デローニー分割をすることで断面が三角形要素に分割される。ソリッド要素は2つの断面S断面とS+1断面間で生成する。図のように、S断面で分割された三角形要素の各節点N1, N2, N3と、S+1断面で最も近接する節点N4, N5, N6を検索し、ソリッド要素を生成した。S断面の3節点がそれぞれ異なる最近傍点を有する場合は6節点要素、2節点と同じ最近傍点を有する場合は5節点要素、3節点とも同じ最近傍点を有する場合は4節点要素となる。なお、5節点要素は、本研究で用いた汎用構造解析プログラムでは扱えないので、2つの4節点要素に分けてソリッド要素を作成した。

3.5 材片連結処理

材片ごとに作成した輪郭についてデローニー分割を行い、隣接断面間でソリッド要素を生成することで、点群FEMモデルが構築される。ただし、部材を材片に分割して処理したため、再度材片を連結させる必要がある。本研究では、ソリッド要素を生成するアルゴリズムを応用して、2つの隣接断面間で最近傍点を検索し、ソリッド要素を生成する手法を用いた。

図-9に材片連結処理のイメージを示す。主桁では、まずはZ軸座標によってxy断面で節点を抽出する。具体的には、材片A, Bを連結する場合は、材片AのZ軸座標が最小となるすべての節点と、材片BのZ軸座標が最大となるすべての節点を抽出した。次に、抽出した節点に対して、断面輪郭を作成し、2次元デローニー分割を行ったA側とB側のそれぞれの断面に対して、最近傍点の節点を検索し、ソリッド要素を生成した。横桁については、図-6の材片CとFを連結した。具体的には部材軸が全体座標系のY軸となるため、材片CのY軸座標が最大となるすべての節点と、材片FのY軸座標が最小となるすべての節点を抽出した。それから、抽出した各断面で輪郭を作成し、2次元デローニー分割を行った後、ソリッド要素を作成した。

3.6 構造解析ソフトウェアへの読み込み

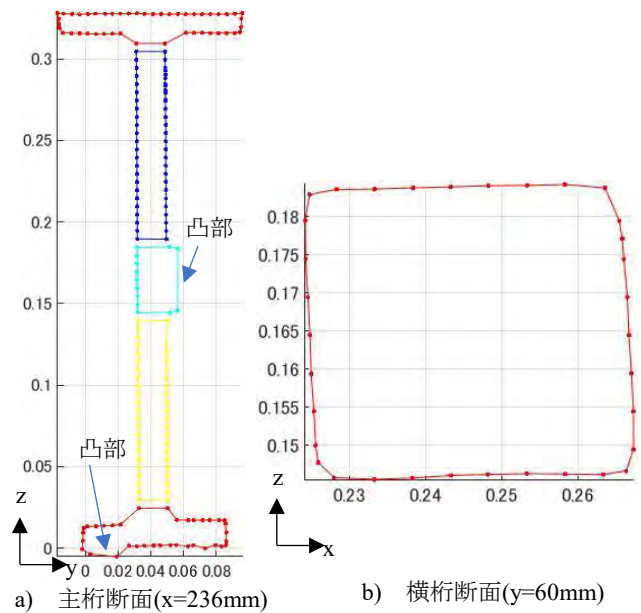


図-7 断面の輪郭

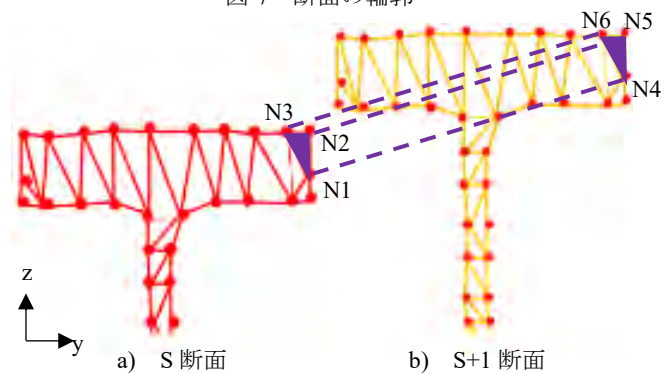


図-8 2次元デローニー分割とソリッド要素生成方法

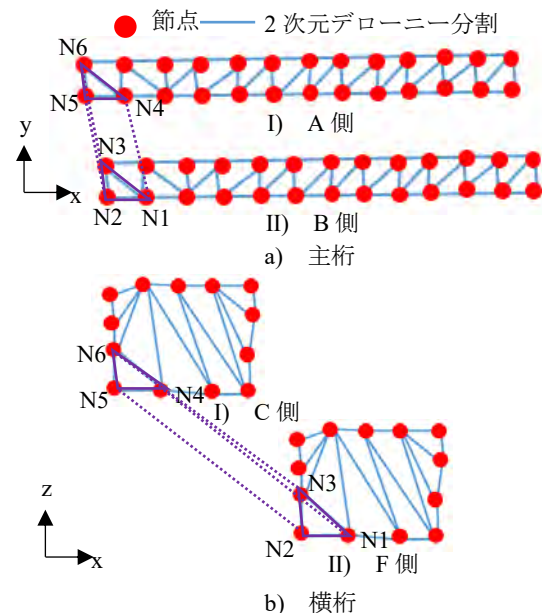


図-9 材片連結処理

以上の処理で生成した点群FEMモデルの節点と要素に、材料物性値を加え、要素座標系を設定し、構造解析ソフトウェアにインポートが可能なテキストファイル形式nasファイルを作成した。nasファイルは構造解析ソフトウェアNastranに対応しているファイル形式だが、本研究では構造解析ソフトウェアmidas NFXに読み込ませ

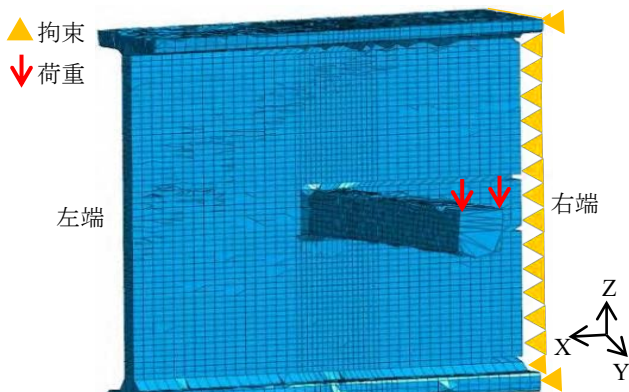


図-10 点群 FEM モデルと解析条件

た。さらに、静的解析に必要な境界条件と荷重条件は midas NFX 上で設定した。

3.7 点群 FEM モデル

図-10 に構築した点群 FEM モデルを示す。点群 FEM モデルについては、モデルの右端で要素が 1 要素分欠損しているが、これは、材片連結部の節点の抽出が不十分なためと考えられる。主桁全体では要素の欠損がほぼなく、横桁も要素の欠損がなかった。板厚については、表-1 で示したように点群 FEM モデルの板厚は点群モデルの板厚と概ね一致し、点群モデルの精度を保ちながら FEM モデルに変換できた。なお、中央の断面では上フランジの板厚が供試体とほぼ同程度になった。これは、点群のダウンサンプリングの過程で、ノイズ量が減少したためと考えられる。

4. 線形静的解析

点群 FEM モデルの応力を確認するため、線形静的解析を行った。拘束条件は、図-10 のモデルの右端で全節点の 6 自由度を完全固定とした。また、荷重条件は、横桁の先端の 2 節点に合計 50kN の集中荷重を与えた。材質は鋼材を想定して SS400 とした。

図-11 にミーゼス応力の分布を示す。図-11(a)は横桁を除いた、主桁のみの応力分布である。横桁が接合されている主桁中央から応力が広がり、横桁からの荷重が伝達されている。これから、主桁と横桁接合部の全節点が結合されていると判断できる。また、モデルの右端では上下フランジ応力が大きく構造の支点部まで荷重が伝達されている。続いて、図-11(b)のモデルの横桁側面の応力分布をみると、ウェブと横桁の接合部に近いほど、応力が大きくなっているが、接合部から離れた場所でも大きな応力が散見される。これは、供試体は木材であるため、表面が平らではないのと、ノイズによってモデルの表面に凹凸が発生し、応力の集中が生じたと考えられる。また、横桁の先端には要素が欠損したような凹みがあった。これは、凹みの周辺にはノイズによって下に凸の要素が生成されたため、要素が欠損したようになった。変形図より、全体的には横桁上面が引張で、下面が圧縮の挙動が見られ、力学的に妥当性があると考えられる。さらに、主桁が横桁側にねじれる挙動も確認できた。以上より、交差する部材を有する実験供試体の点群データを FEM

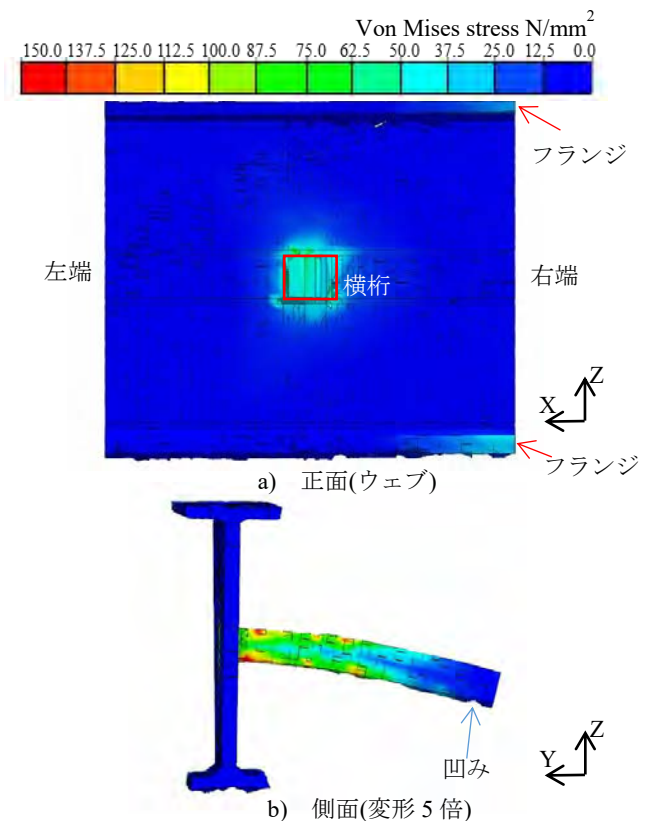


図-11 ミーゼス応力分布と変形図

モデルに変換し、構造解析を行った結果、部材の接合部を含めて、応力の伝達を確認できた。

5. まとめ

本研究では、2 次部材を有する実橋梁を想定し、部材が交差する供試体を用いて点群データを FEM データに変換した。結果としては、部材を分割し、部材ごとの軸方向でのソリッド要素を生成し、再度結合することで、点群モデルを構築できた。また構築した点群 FEM モデルについて線形静的解析を行った結果、応力分布を把握し、外力を受けたときのモデルの挙動も確認できた。

今後の課題としては、ノイズの除去方法と、材片の分割を自動で行う方法を検討し、実構造物へ適用する。

謝辞：本研究は、科学研究費基盤(C)課題番号 21K04230 の助成を受けて実施しました。ここに記し感謝いたします。

参考文献

- 1) 水上ら：UAV による海岸堤防の点検効率化のための変状自動抽出手法，土木学会論文集 B2(海岸工学)，74 巻 2 号，pp. I_1435-I_1440，2018。
- 2) Zhang et al.: 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.
- 3) 鈴木ら：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 巻 2 号，pp. I_141-I_149，2019。
- 4) 吉田ら：鋼部材の点群データから FEM データへの変換における部材隅角部の要素生成に関する検討，土木情報学シンポジウム講演集，I-3，2022。