

〈一般研究課題〉 腐食した対傾構ブレース材の計測点群データを用いた解析モデル生成手法の開発
助成研究者 名古屋工業大学 日高 菜緒



腐食した対傾構ブレース材の計測点群データを用いた解析モデル生成手法の開発

日高 菜緒
(名古屋工業大学)

Development a Method to Construct FE Model of Corroded Steel Brace from Point Cloud

Nao Hidaka
(Nagoya Institute of Technology)

Abstract :

For the efficient maintenance of aging bridges, structural analysis using a finite element (FE) model is one of the effective methods. Particularly, accurate representation of damage such as corrosion is crucial for the FE model. In the case of a steel bridge affected by corrosion, it is practical to define the FE model as a fiber-based model converted into a shell model for corroded sections since there is a possibility that local buckling becomes dominant in the corroded sections. While utilizing point cloud data seems beneficial for constructing an FE model efficiently, detecting corroded sections from point clouds poses challenges. Due to the discrete nature of point clouds, identifying subtle changes in plate thickness borders is difficult. Therefore, photogrammetry is employed for this purpose. Because the appearance of the corroded section differs from the intact part, there is a prospect that detecting the corrosion location from photographs using image processing would be feasible. If the detected corrosion location is projected to the point cloud generated by photogrammetry, it is effective to reflect corrosion location in the point cloud. In this research, the method is developed to automatically construct an FE model of a steel bridge affected by corrosion by using photogrammetry. The case study is the H-shaped steel beam with corrosion in the central part, resulting in a reduction in plate thickness. Moreover, bending experiments were conducted and the experimental behavior was compared with the analytical results. Thereby, the effectiveness of this method is verified.

1. はじめに

我が国では、戦後の高度成長期に建造した膨大な数の橋梁が近い将来更新時期を迎える。逼迫した財政状況から、更新時期を迎える橋梁すべてを建て替えることは現実的でないため、維持補修の優先順位付けや壊れる前の予防保全等、既設橋梁の長寿命化による戦略的な更新が求められる。鋼橋の長寿命化の手段として、FEM(Finite Element Method)モデルを用いた定量的な耐荷性能解析がある。文献1)等により具体的な解析手法やモデルが提示され、現在も研究が精力的に進められている^{2)~6)}。FEMモデルは図1に示すように、骨組み構造を反映した梁モデル、梁モデルの要素に断面形状の情報を当てはめることで合理的な構造計算を可能にするファイバーモデル、厚さを有する面で構成することで局部座屈を考慮できるシェルモデル、3次元の形状を再現したソリッドモデルがある。構造物の耐荷力解析において合理的なモデルはファイバーモデルであり、局部座屈が支配的な場合はシェルモデルが併用される。更に、既設鋼橋の場合は耐荷力に影響する座屈や腐食などの劣化損傷もFEMモデルに適用する必要がある。モデルの構成(部材における節点、要素の定義、部材同士の接合、境界条件、材料条件など)の妥当性について、構造実験をとおして検証され続けている⁷⁾。特に大規模橋梁においては、健全部も含めてすべてシェルモデル化すると節点数が増大して計算量が膨大になるため、基本的にはファイバーモデルで、損傷箇所のみシェルモデル化したFEMモデル構成が望ましい。

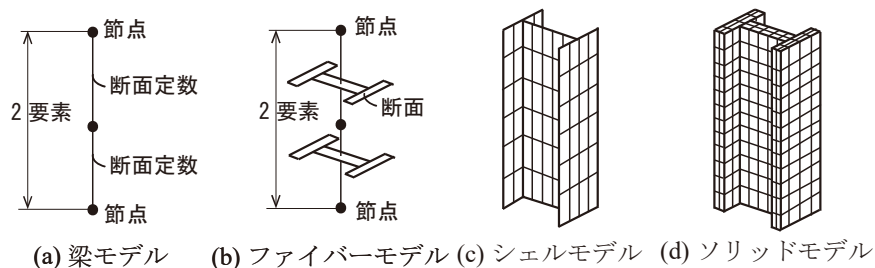


図1 FEMモデルの種類

近年、FEMモデルの生成方法として、図面から必要な情報を読み取り手作業で作成する方法に代わって、対象物の3次元形状を効率的に取得できる点群データから解析モデルを効率よく構築する方法が注目され始めた。点群データから解析モデルを生成する手法はさまざまなモデル形式に基づいて提案されている^{8)~11)}。しかし、点群データは離散的な点の集合のため、シェルモデル化したほうが望ましい対象構造物の劣化損傷箇所の検出に長けていない。例えば、幾何学的なアルゴリズムに基づいて、橋梁全体の点群データから腐食によるわずかな板厚減少箇所を特定することは容易でない。

そこで、点群データを取得する手段の1つにあたる写真測量を活用する。写真測量は一般的にレーザー計測より計測精度が低くなる傾向にあるが、画像処理が併用できる利点がある。腐食箇所は健全部と見た目が異なることから、写真から画像処理を用いることで容易に腐食箇所を検出できる。それを写真測量で生成した点群データに投影すれば、点群データから腐食箇所を効率的に検出でき、合理的な構成のFEMモデルを構築できる見込みがある。

以上より、本研究では、写真測量を活用することで腐食が含まれる鋼橋のFEMモデルを自動生成する手法を開発する。ケーススタディは中心部に腐食、すなわち板厚減少を施したH断面の梁で

ある。曲げ試験の再現解析を実施することで、本手法の有効性を検証する。

2. ケーススタディ

ケーススタディは図2に示す1本もののH型断面の鋼梁供試体である。グラインダーを用いて上下フランジの中心部30mm区間に3mmの板厚減少とその前後135mmにテーパーを意図的に与えた。そのため、対象箇所は黒皮がはがれ光沢が見られる。本研究ではこの箇所を「腐食箇所」と定義する。この供試体を対象に、2通りの手段で点群データを取得する。

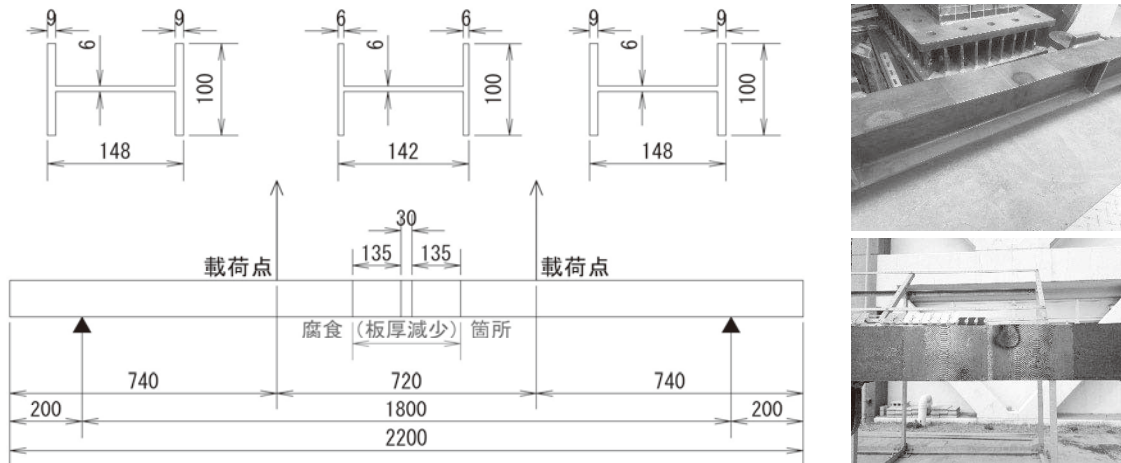


図2 H型断面の鋼梁供試体の形状寸法と写真

2.1 写真測量

写真測量では撮影写真から同一特徴点を対応付けることで撮影位置を推定するStructure from Motion (SfM) と多視点写真からの同一点の3次元座標を得るMulti View Stereo (MVS) で3次元形状を復元して点群データを生成する¹²⁾。一般的なスマートフォンMOTOROLA moto g13で複数位置、方向角から供試体の写真を248枚撮影し、専用のソフトウェアMetashape Proを用いて点群データを生成する。SfMの精度向上のため、RTK-GNSS受信機器Drogger DG-PRO1RWSをスマートフォンに取りつけRTK測位が可能な屋外で撮影することで、高精度(±2cm程度)の撮影位置情報を得られるようにした。撮影機器の写真を図3に、得られた点群データを図4に示す。



図3 撮影機器

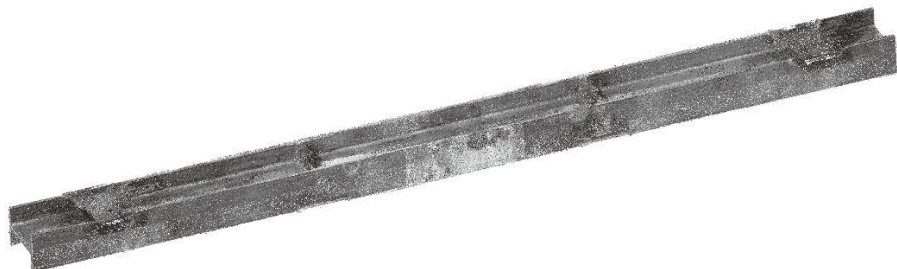


図4 写真測量で得られた点群データ(5,000,000点)

2.2 ハンディレーザー計測

筆者らは鋼構造物の耐荷性能解析における写真測量で取得した点群データの計測精度について、健全状態のファイバーモデルに関しては解析で扱える精度を得られたことを確認している¹³⁾。しかしながら、写真測量の計測精度では腐食によるわずかな板厚減少値を取得することが現状容易でないことから、補助的に高精度なレーザー計測を用いて追加で点群データを計測した。使用機種はHandySCAN BLACK™ | Elite(解像度：0.025mm@30cm, 誤差：0.025mm@30cm)である。計測機器の写真を図5に、得られた点群データを図6に示す。



図5 計測機器

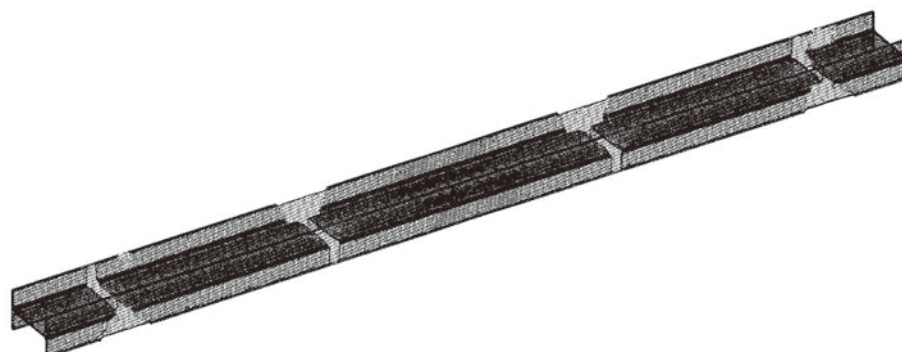


図6 レーザー計測で得られた点群データ(1,641,705点)

3. 点群データと写真から腐食を反映したFEMモデルを生成する手法の開発

生成するFEMモデルの構成は図7に示すとおりである。基本的にはファイバーモデルで、局部座屈が支配的になる可能性がある腐食箇所についてはシェルモデルを構築するPythonプログラムを開発した。また、解析ソフトSeanFEM¹⁴⁾に適合したデータ構造を構築する。

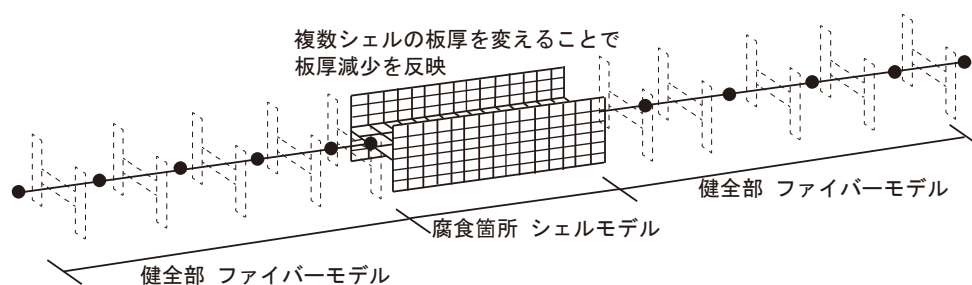


図7 生成するFEMモデルの構成

まず、写真測量で取得した点群データから梁供試体全体のファイバーモデルFを生成する。ファイバーモデルを生成する手法は文献10), 13)に記載がある。

次に、写真測量で用いた写真を用いて腐食箇所を検出し、その3次元位置を得る。写真から腐食位置を検出する既存手法は複数あるが、ここでは深層学習を用いた手法を採用した。学習モデルはU-Net¹⁵⁾で、同一の供試体を屋内・屋外の異なる場所で複数位置・方向角から撮影した写真141枚に対して、腐食箇所のラベルを手動で付与している。事前にSfMで撮影位置と方向角を推定した写真を対象に腐食箇所を検出し、対応するピクセルのRGB値のうちBについて調整を加える。具体的には、対象の写真を0-255のグレースケール化させた際の値をBの値に置き換える。その後MVSで点群データを生成すると、腐食箇所の点はB値が高く出るため、B値の閾値を用いて腐食箇所の点群

データ C_p のみ抽出できる。



図8 腐食箇所を反映させた写真の例

最後に、ファイバーモデル F 、写真から得られた腐食箇所の点群データ C_p 、高精度なレーザー計測機器で取得した点群データ C_h の3つを入力して、腐食箇所を反映したFEMモデルを生成する。事前に求めた F の要素軸線に C_p を投影することで、腐食箇所の始点・終点にあたる節点位置を得ることができる。新しい節点間にある要素に対して、 C_h から断面形状を取得して断面形状を更新し、SeanFEM内のシェルモデル変換機能を用いてシェルモデルに変換する。

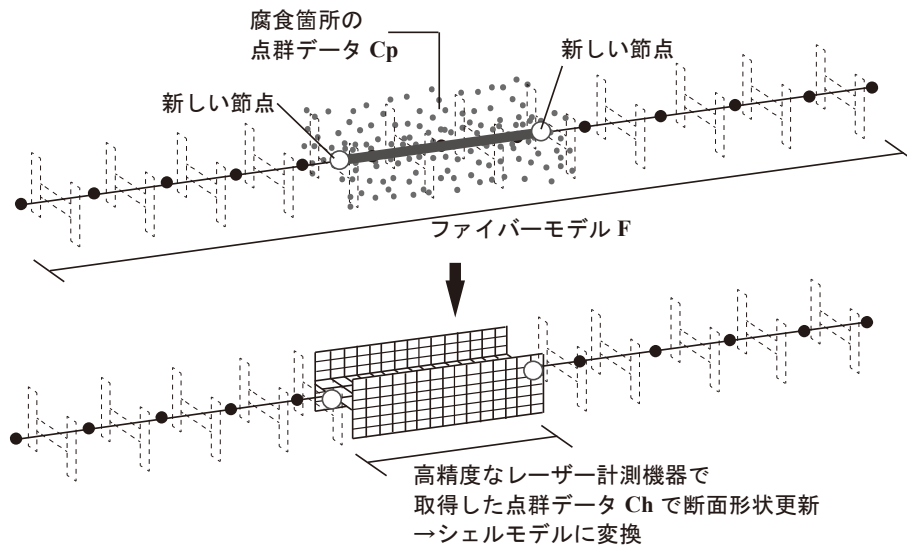
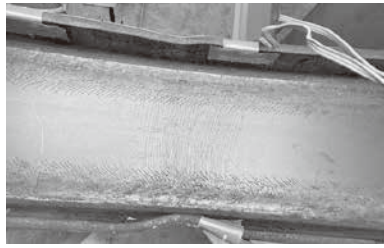


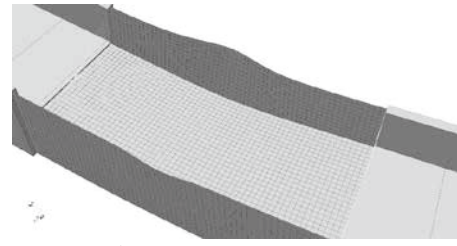
図9 点群データと写真から腐食を反映したFEMモデルを生成する手法の流れ

4. 再現解析結果

梁供試体の曲げ試験では、図2に示す荷重点2点に対して鉛直上側に強制変位を与えたことによって発生する反力荷重や断面力を測定した。この試験の再現解析として、点群データから生成した解析モデルに曲げ試験時と同様の材料条件(バイリニアを適用)、境界条件、荷重条件を与え構造解析し、反力荷重や断面力を計算した。実験と同様、腐食がない健全状態では発生しなかった圧縮方向側のフランジの局部座屈を確認できた。また、荷重変位曲線から、局部座屈によるピーク状態とその後の耐力減少を確認することができた。以上のことより、提案手法で作成した腐食箇所を反映したFEMモデルは、曲げ試験と同様の再現解析結果を得ることができた。

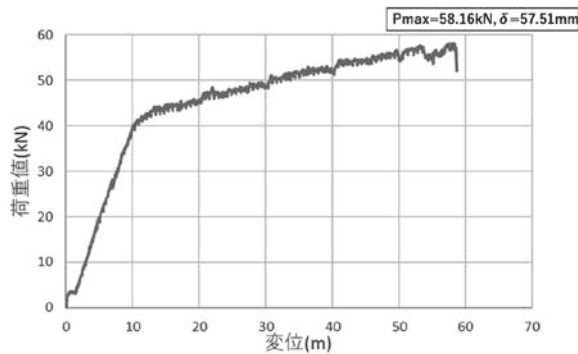


(a) 曲げ試験後の形状

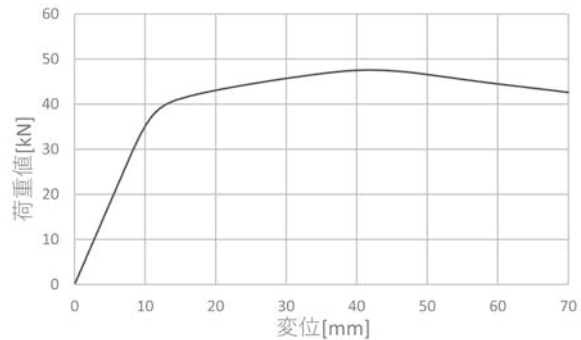


(b) FEM モデルの再現解析結果 (変位 60mm)

図10 梁中心部圧縮方向側のフランジの局部座屈



(a) 曲げ試験後時の計測結果



(b) FEM モデルの再現解析結果

図11 載荷点の荷重変位曲線

5. おわりに

本研究では既設鋼橋の耐荷力に影響する座屈や腐食などの劣化損傷も反映させた解析モデルの生成手法として、写真測量と画像処理を併用させた手法を開発し、曲げ試験の再現解析をとおしてその妥当性を検証した。今後は実験とその再現解析のケースを増やすことで更に多くの挙動に対応させたモデル化手法を検討する。また、本研究での腐食箇所はグラインダーで削り意図的に与えたものなので実際の鋼構造物の腐食と見た目が異なる。そのため、実際に腐食した鋼構造物を対象にしても同等の結果が得られるか否かについても検証を行いたい。

参考文献

- 1) 土木学会：2018年制定 鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編]，丸善，2018.
- 2) 馬越一也，奥村徹，吉野廣一，野中哲也：繰り返し荷重下における鋼橋の2次部材のポストピーク挙動を考慮するモデル化と鋼アーチ橋への適用，構造工学論文集，Vol. 65A，pp. 214-224，2019.
- 3) 奥村徹，馬越一也，野中哲也，吉野廣一：非エネルギー吸収部材の損傷を伴う上路式鋼アーチ橋の構造全体系の地震時終局挙動，構造工学論文集，Vol. 66A，pp. 264-273，2020.
- 4) 山田忠信，野中哲也，馬越一也，吉山純平，鈴木森晶，嶋口儀之：既設上路式鋼アーチ橋のブレース材の終局強度およびガセットプレート補強方法に関する検討，構造工学論文集，Vol. 68A，pp. 69-81，2022.
- 5) 馬越一也，山田忠信，嶋口儀之，鈴木森晶，野中哲也：ブレース材の塑性化を許容した鋼トラス橋の耐震性能照査，第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 221-226，2022.

- 6) 長谷川秀也, 野中哲也, 森下宜明, 吉野廣一, 馬越一也, 岩村真樹: 曲げねじり弾塑性挙動が表現できるファイバーモデルの理論と逆L形橋脚への適用, 第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp. 265-272, 2022.
- 7) 嶋口儀之, 山田忠信, 野中哲也, 馬越一也, 鈴木森晶: 繰り返し荷重を受ける鋼トラス橋のブレース材の終局挙動に関する実験および再現解析, 構造工学論文集, Vol. 68A, pp. 59-68, 2022.
- 8) 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, 三上修一: 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), Vol. 75, No. 2, pp. I_141-I_149, 2019.
- 9) 中溝智也, 西尾真由子: 3次元点群データからの鋼構造薄肉部材のシェル要素FEモデル構築, AI・データサイエンス論文集, Vol. 3, No. J2, pp. 786-794, 2022.
- 10) 日高菜緒, 橋本尚史, 中村真貴, 馬越一也, 野中哲也, 小畑誠: 点群データを活用した鋼橋の解析モデルの構築および精度検証, 構造工学論文集, Vol. 69A, pp. 637-647, 2023.
- 11) 日高菜緒, 橋本尚史, 中村真貴, 馬越一也, 渡邊英, 野中哲也, 小畑誠: 点群データを活用した鋼トラス橋の実務的な解析モデルの構築および精度検証, 構造工学論文集, Vol. 70A, pp. 498-508, 2024.5
- 12) Agarwal, S., Furukawa, Y., Snavely, N., Simon, I., Curless, B., Seitz S. M., and Szeliski, R.: Building Rome in a Day, Communications of the ACM, Vol. 54, No. 10, pp. 105-112, 2011.
- 13) 中川敦貴, 内山大介, 日高菜緒: スマートフォンの画像から作成した鋼材の点群の精度検証, 令和5年度土木学会中部支部研究発表会講演論文集, I-11, 2024.
- 14) 株式会社地震工学研究開発センター: SeanFEM ver.1.2.3 理論マニュアルと検証, 2007.
- 15) Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T.: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation (arXiv:1505.04597). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597>, 2015.