

機械学習による腐食鋼板の残存強度評価手法の提案

愛媛大学大学院 学生会員 ○秋山大誠 愛媛大学大学院 学生会員 真鍋佑輔
愛媛大学 正会員 大賀水田生 愛媛大学 正会員 全邦釘

1. 序論

近年、老朽化した鋼橋の増加が問題となっている。鋼橋劣化の1つとして鋼部材における腐食減肉が挙げられるが、それが鋼部材の力学的特性に与える影響について未解明な部分が多い。そのため、鋼部材の性能評価は現状として目視や打音検査などの定性的な方法により行われている。しかし、これでは点検者間の個人差や見落としが生じ、重大な事故につながる危険性がある。このような問題を解決するためにも、腐食鋼板の残存強度を定量的に評価する手法の確立が求められている。そこで、本研究では機械学習を用いて腐食鋼板の残存強度評価手法の提案を行う。

2. 腐食鋼板の引張および座屈試験

まず、腐食鋼板の力学的特性の把握および次に行う数値解析の妥当性を検証するため、引張および座屈試験を行った。引張試験では供試体両端を試験機に取り付けて引張荷重を与え、座屈試験は2辺単純支持、2辺固定支持、3辺単純支持の3種の境界条件で行った。また、試験に用いる供試体は実際に供用された後撤去された橋梁から切り出した腐食鋼板である。

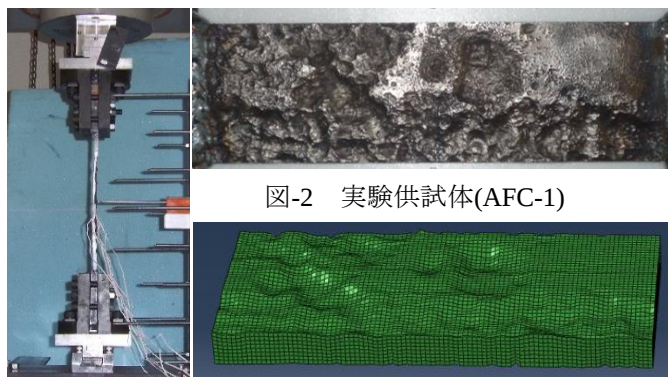


図-2 実験供試体(AFC-1)

図-3 FEM モデル(AFC-1)

引張試験より、引張を受ける腐食鋼板は最小断面もしくは最小板厚部から降伏しており、既往の研究で言われているように最小平均板厚および最小板厚が残存引張強度に強く影響していることが確認できた。また、座屈試験（図-1）より得られた荷重－ひずみ関係から、圧縮を受ける腐食鋼板は载荷を始めてから最大荷重に至るまで供試体全体に圧縮応力が作用し、最大荷重に至ると腐食減肉の激しい部分が降伏して座屈

することがわかった。この挙動は3種すべての境界条件において確認できた。また荷重－変位関係から、2辺単純支持の場合载荷直後から面外変位が生じているが、2辺固定支持および3辺単純支持の場合最大荷重に至るまで面外変位はほとんど生じていないことがわかった。この挙動は腐食減肉による荷重軸の偏心の影響と考えられ、2辺単純支持の場合偏心の影響が顕著に現れると推察される。

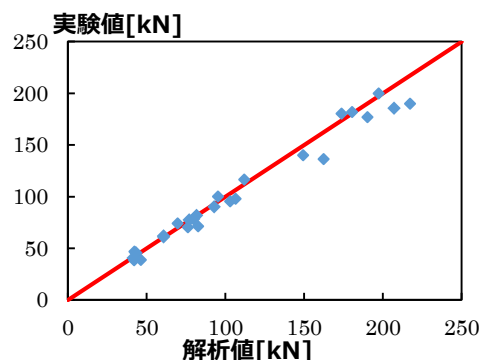


図-4 最大荷重の比較

3. 腐食鋼板モデルに対する有限要素解析

機械学習に用いる腐食鋼板の残存強度データを蓄積するため、腐食鋼板モデルに対して有限要素解析を行った。まず、本解析モデルが実際の腐食鋼板の挙動を再現できているか確認するため、実験結果と実験供試体（図-2）に対して表面形状測定を行い再現したFEMモデル（図-3）の解析結果を比較し妥当性の検証を行った。その結果、荷重－変位関係、応力分布および最大荷重はどれもよく一致しており、本解析モデルは腐食鋼板の残存強度評価に対して十分な精度を有しているといえる。図-4 に実験と解析の最大荷重を比較したものを示す。

次に、空間的自己相関の考え方をを用いて腐食表面形状を表現したFEMモデル（以下空間的自己相関モデルと称する）を1000本作成し、それらに対して実験と同様の境界条件で解析を行うことでデータを蓄積した。空間的自己相関モデルを用いた理由は、腐食鋼板の表面不整は空間的にランダムではなく、腐食の著しい部分から一定の広がりを持っているとされているためである。

4.機械学習による腐食鋼板の残存強度評価アルゴリズムの構築

空間的自己相関モデルに対する解析結果を用いて機械学習を行い、腐食鋼板の残存強度評価アルゴリズムを構築した。本研究では教師あり学習の1つであるニューラルネットワーク（以下 NN と称する）を用いた。NN とは人間の脳の仕組みを模したモデルであり、教師データとして入力データおよびそれに対応する出力データを用いて機械学習により NN を訓練する。そして、その NN を用いることで未知の入力データから妥当な出力を得ることができる。

ここでは、本研究で行った引張および3種の境界条件における座屈試験それぞれについて NN を訓練し、4つの残存強度評価アルゴリズムを構築した。また教師データとして、入力データに空間的自己相関モデルの板厚や材料定数に関するパラメータを、出力データに空間的自己相関モデルに対する解析より得た最大荷重を用いた。残存引張強度評価アルゴリズムの構築に用いた入力パラメータは最小平均板厚、最小板厚および板厚標準偏差である。最小平均板厚および最小板厚を用いたのは、実験から腐食鋼板の残存強度に影響を与える要因として考えられるためである。また、板厚標準偏差を用いた理由は、既往の研究より腐食鋼板の残存強度に影響を与えるとされているためである。一方で、残存圧縮強度評価アルゴリズムの構築に用いた入力パラメータは、平均板厚、最小平均板厚、最小平均板厚残存率（式-①）、偏心率、板厚標準偏差および細長比である。平均板厚、最小平均板厚、最小平均板厚残存率および偏心率を用いたのは、実験から腐食鋼板の残存強度に影響を与える要因として考えられるためである。

$$\text{最小平均板厚残存率} = \frac{t_{ave_min}}{t_{ave}} \quad \text{①}$$

（ t_{ave_min} :最小平均板厚, t_{ave} :平均板厚）

5.構築した残存強度評価アルゴリズムの精度検証

leave-one-out 交差検証法を用いて構築したアルゴリズムの精度検証を行った。表-1 に各アルゴリズムによる出力値の平均絶対誤差率を、図-5 に有限要素解析による出力データと残存圧縮強度評価アルゴリズムによる出力値の比較を示す。なお、平均絶対誤差率は式②で表される。

$$\text{平均絶対誤差率} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_t - y_p}{y_t} \right| \quad \text{②}$$

（ y_t :FEM による解析結果, y_p :NN による出力結果）

表-1 平均絶対誤差率

境界条件	平均絶対誤差率
引 張	3.7%
2 辺単純支持	9.1%
2 辺固定支持	8.7%
3 辺単純支持	7.7%

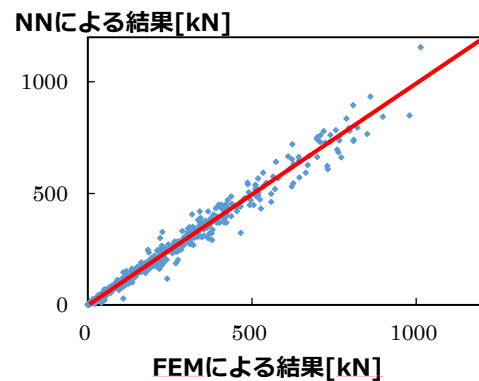


図-5 出力結果の比較（2 辺単純支持）

これらの結果から、どのアルゴリズムにおいても平均絶対誤差率は 10%以下にとどまっており（表-1）、また最大荷重のばらつきも小さいことがわかる（図-5）。よって、本研究で構築した腐食鋼板の残存強度評価アルゴリズムは十分な精度を有しているといえる。

6.結論

- (1)実験と数値解析から、引張および圧縮を受ける腐食鋼板が破断および座屈に至るまでの挙動を確認した。
- (2)空間的自己相関の考え方を用いて腐食鋼板の表面形状を表現した FEM モデルを 1000 本作成、解析しデータを蓄積した。そして、それらを用いて機械学習を行い腐食鋼板の残存強度評価アルゴリズムを構築し、精度の検証を行ったところ精度は十分であった。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室, 既設橋の架替実態に関する調査, 土木技術資料, No.40-4, pp.38-43, 1998.
- 2) 藤井堅, 海田辰将, 平井勝志, 奥村誠, 腐食鋼板表面形状モデル作成における空間的自己相関モデルの適用性, 構造工学論文集, Vol48A, pp.1031-1038, 2002.