

# 腐食した鋼ポニーラス橋の残存耐荷力に関する解析的研究

宇部興産機械株式会社 正会員 ○小山 諒子  
 愛媛大学大学院 学生会員 山根 達郎

周南市建設部道路課 非会員 今井 努  
 徳山工業高等専門学校 正会員 海田 辰将

## 1. はじめに

橋梁の老朽化が問題視される中で、中山間地域や過疎地域では、交通量は少ないものの地域住民の生活・防災基盤となっている橋梁も多く、用途変更や撤去等の判断の慎重にならざるを得ない現状がある。

この種の老朽化橋梁の維持管理方針を決定する上では、交通実情や生活・防災上の通行ニーズ<sup>1)</sup>を把握した上で最低限要求される活荷重を想定し、残存耐荷力およびその余裕分をできるだけ正確に推定することが非常に重要である。

一方、地域の老朽化鋼橋には腐食損傷が多く発生していることが確認されており<sup>2)</sup>、正確な残存耐荷力評価には、腐食損傷をできるだけ詳細に考慮することが望ましい。また、部材ごとに評価された応力と橋梁全体で評価した場合の実応力は異なることが予想される<sup>3)</sup>ため、腐食を考慮した橋全体の耐荷力評価が求められる。しかし、腐食損傷が橋梁全体の耐荷力に与える影響に着目した全橋解析例は乏しい。なお、建設当時の設計資料が残っていない橋梁については、当時の設計基準や時代背景などに基づいた復元設計が新設時と同様の方法によって行われ、安全性の検討や補修設計の基礎資料となる。

そこで、本研究では現存する鋼ポニーラス橋を対象に、シェル要素を用いた全橋解析モデルを構築し、腐食損傷を考慮した複合非線形有限要素解析を実施する。また、地域の交通実情および通行ニーズを踏まえ

た車両荷重を活荷重として想定し、解析結果から得られる作用応力、変形状態に基づく本橋の安全性と車両荷重の大きさの関係について考察する。さらに、主構に生じる部材力について復元設計と本解析モデルによる推定結果を比較し、両者の違いについて考察する。

## 2. 対象橋梁の概要

本解析対象である橋梁は、周南市須金地区に現存する周南市最古の鋼橋であり、主径間は下路単純曲弦ワーレントラスである。1920年(大正9年)の建設以来、原位置にて98年間供用されてきた。本研究では、本橋の主径間上部工のトラス部分(支間長29.3m、有効幅員4.5m)を解析対象とする。本橋の主構は、ボウストリング形式であること、ポニーラスであることが構造上の特徴である。そのため、主構の高さが最大でも2.9mと低く抑えられている。また、各部材は数種類の形鋼をリベット接合することで組み立てられており、主構はレーシングバーによる組合せ部材である。

## 3. 全橋解析モデルと荷重条件

本研究では、汎用有限要素解析ソフト ABAQUS を用いて図-1に示す全橋解析モデルを構築し、死荷重のほか、建設時に用いられたと推定される等分布荷重、地域のニーズを考慮した車両荷重を載荷し、弾塑性非線形解析を行った。以下に荷重条件と解析モデルの概要、および解析条件を示す。

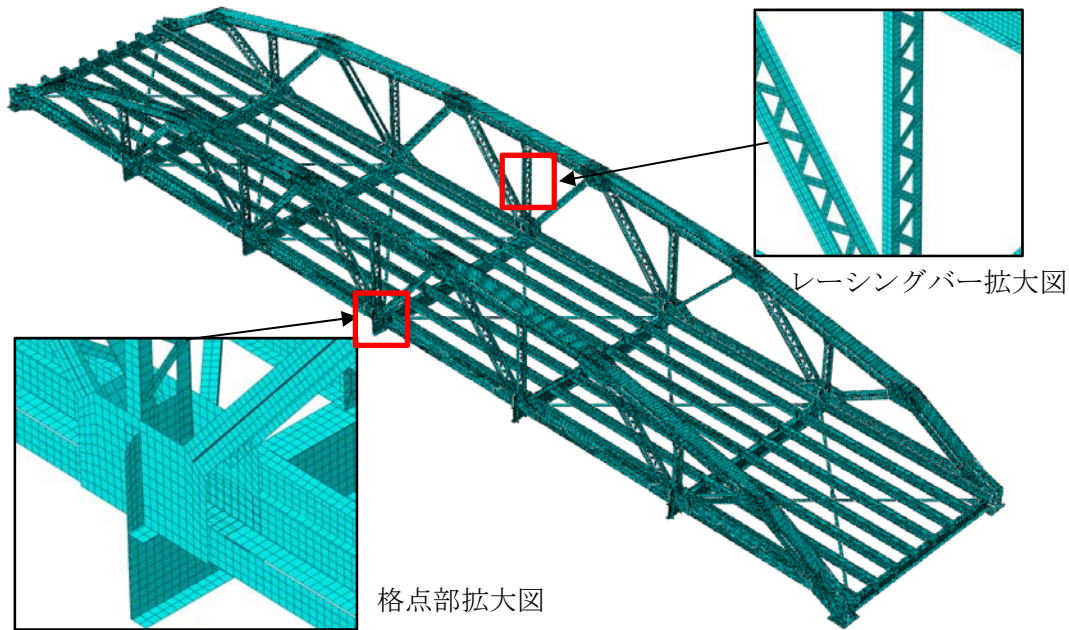


図-1 解析モデルの全体像

キーワード ポニーラス, 腐食, 耐荷力, FEM, 座屈  
 連絡先 〒745-8585 山口県周南市学園台 徳山高専土木建築工学科 TEL 0834-29-6331

### 3.1 解析モデルの構築と考え方

#### (1) 解析モデル概要

本解析モデルでは、4 節点シェル要素を用いており、腐食を考慮するため、要素分割は概ね 40mm×40mm とした。鋼材の材料特性は、本橋の鋼材の引張試験結果<sup>1)</sup>の値を用いており、弾性係数  $E=203.5[\text{GPa}]$ 、降伏応力  $\sigma_y=312.3[\text{MPa}]$ 、ポアソン比  $\nu=0.274$  とし、応力-ひずみ関係は完全弾塑性とした。境界条件は、本橋の支承がアンカーボルトによって固定されていることから、固定支持とし、部材同士の接合は、部材同士の接合箇所に対しメッシュ結合拘束を適用した。これは、リベット 1 つ 1 つを表現することが困難であるためである。

また、本解析モデルでは RC 床版のモデル化はしていない。これは、RC 床版が主構造部材ではないことに加え、材料特性や縦桁との合成効果など不明な点が多いことによる。

#### (2) 腐食損傷のモデル化

現地調査から、本橋には様々な形態を有する腐食損傷が橋梁全体に発生していることが確認されている。しかし、全ての腐食を解析モデルに考慮することは困難であり、多少の腐食減肉が橋梁全体の耐荷力や変形性状に大きな影響を与えるとも考えにくいいため、本研究では板厚が半分以上減肉している腐食のみをモデル化の対象とした。

一方、実際の腐食損傷は図-2(a)に示すように腐食領域内での板厚・平面形状が複雑であり、これを全橋解析モデルで細かに表現することは困難である。そのため、本解析モデルでは現地調査によって明らかになった最大腐食深と腐食領域の概形の情報を基に、各腐食損傷を図-2(b)に示すように、矩形領域で表現し、腐食領域内の板厚には最小板厚を仮定した。

減肉は、腐食領域内の要素の板厚を減らすことで表現しているが、図-2(b)のような片面腐食の場合には、圧縮力作用下で板に発生する偏心曲げが大きくなるため、板厚を減らすだけでなく、減肉に伴う板中央面の変化量を節点のオフセットとして考慮した。

### 3.2 荷重条件

#### (1) 死荷重

鋼材の死荷重は単位体積重量から物体力として解析モデル全体に作用させた。RC 床版についてはモデル化していないため、その死荷重は縦桁の反力の影響線を用いて荷重強度を計算し、外力として作用させた。

#### (2) 活荷重

本解析では、解析目的に応じて a)~b)に示す 2 種類の活荷重を想定し、各々に衝撃係数を考慮している。

##### a) 推定活荷重

本橋の新設設計時に考慮されたと推定される  $4\text{kN/m}^2$  を橋面全体に載荷した。これは、建設当時の最も近い設計基準<sup>4)5)</sup>に基づき、本橋の復元設計<sup>6)7)</sup>にも用いられている。この荷重を用いた解析では、縦桁の反力の影響線を用いて縦桁上に外力として作用させた。

##### b) 車両荷重

本橋に最低限要求される車両荷重は 4t 車と推定される<sup>1)</sup>。実際の車両通行による作用応力を明らかにする

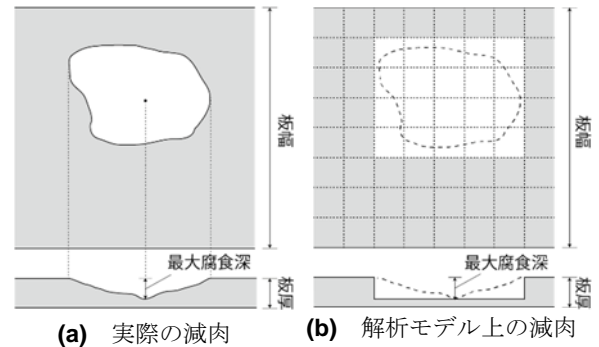


図-2 腐食損傷のモデル化イメージ

ため、本解析では車両荷重の大きさに着目し、T-4、T-6、T-9、T-14 荷重を 1 台ずつ載荷する。これらの車両荷重は、前輪と後輪の軸重をそれぞれ 1 組の集中荷重として扱い、片側の主構に偏載荷するとともに主構の軸力の影響線を用いることで着目部材にとって最も厳しい載荷状態を想定する。

### 4. 解析結果と考察

#### 4.1 復元設計の結果との比較

腐食を考慮していないモデルに、 $4\text{kN/m}^2$ 、T-4、T-6 を載荷した解析結果と復元設計<sup>6)</sup>によって求めた各部材の軸力の一覧を表-1 に示す。表には、両者の差 (%) も併せて記載している。まず、推定活荷重 ( $4\text{kN/m}^2$ ) を用いた解析結果に着目すると、上弦材の軸力については 2 次元平面のピントラスとして求めた復元設計と 3 次元 FEM の差は最大でも 5% 程度であり、軸力の符号も一致している。ところが、下弦材では両者の差はかなり大きく、L1 については符号も違い部材の応力状態までも異なっている。これは、本研究で構築した解析モデルでは、両支点を固定支持としているのに対し、復元設計では単純支持として軸力の影響線を求めているため、影響線が大きく異なっていることに起因する。図-3 に境界条件の異なる場合の下弦材の影響線図を示す。図から、単純支持の場合には影響線は全スパンで正值 (引張) となるが、両端固定支持では L1 の影響線について、圧縮側の影響面積が大きいことがわかる。L2、L3 についても同様に、影響線に正負の領域が現れるため、復元設計による軸力の算定結果と大きな差が現れたと判断される。

一方、斜材 D1~D5 では、D1、D3、D5 については復元設計と 3 次元 FEM 解析の結果は 4~12% の差 (表-1) に留まっているものの、D2 と D4 については 30~35% とかなり大きな差が生じていることがわかる。

上記の傾向は、活荷重として車両荷重 T-4、T-9 を載荷した解析結果でも同様であることが表-1 から確認できる。このことから、腐食の無い状態で復元設計と本 FEM 解析の結果を軸力 (作用応力) で比較した場合、境界条件といった解析モデルを FEM で忠実に再現する上での仮定の違いが、部材ごとの軸力に大きく影響することがわかった。

#### 4.2 車両荷重に対する安全性の検討

本節では、本橋を通行する車両荷重 1 台を想定し、

表-1 復元設計との比較

[単位: kN]		上弦材				下弦材			斜材				
		U1	U2	U3	U4	L1	L2	L3	D1	D2	D3	D4	D5
4 kN/m <sup>2</sup>	①復元設計	-648.1	-829.8	-951.4	-1002.2	557.9	825.2	946.1	292.6	-63.2	191.5	-41.3	114.8
	②3次元FEM	-617.1	-808.8	-960.6	-1013.8	-201.2	156.5	247.5	326.7	-101.2	183.6	-59.4	102.4
	(①-②)/②×100%	5.0	2.6	-1.0	-1.1	-	427.2	282.2	-10.4	-37.5	4.3	-30.5	12.1
T-4	①復元設計	-441.6	-565.4	-647.5	-664.7	380.0	556.2	636.5	199.4	-28.9	129.7	-13.3	73.7
	②3次元FEM	-426.6	-558.5	-663.7	-699.4	-126.6	104.9	176.9	225.1	-58.2	124.1	-28.0	63.3
	(①-②)/②×100%	3.5	1.2	-2.4	-5.0	-	430.0	259.8	-11.4	-50.4	4.6	-52.5	16.4
T-9	①復元設計	-511.7	-654.9	-749.3	-750.2	474.1	637.8	728.4	230.9	-46.9	158.9	-33.7	101.3
	②3次元FEM	-489.2	-641.4	-761.8	-801.5	-151.3	136.1	212.4	259.4	-79.0	151.2	-49.7	88.9
	(①-②)/②×100%	4.6	2.1	-1.6	-6.4	-	368.6	243.0	-11.0	-40.7	5.1	-32.2	13.9

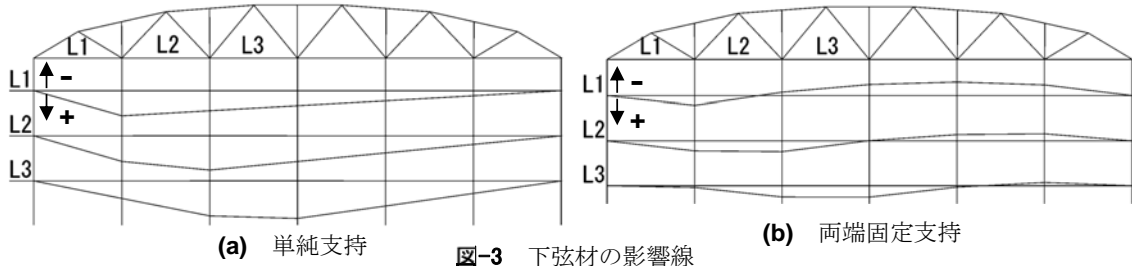


図-3 下弦材の影響線

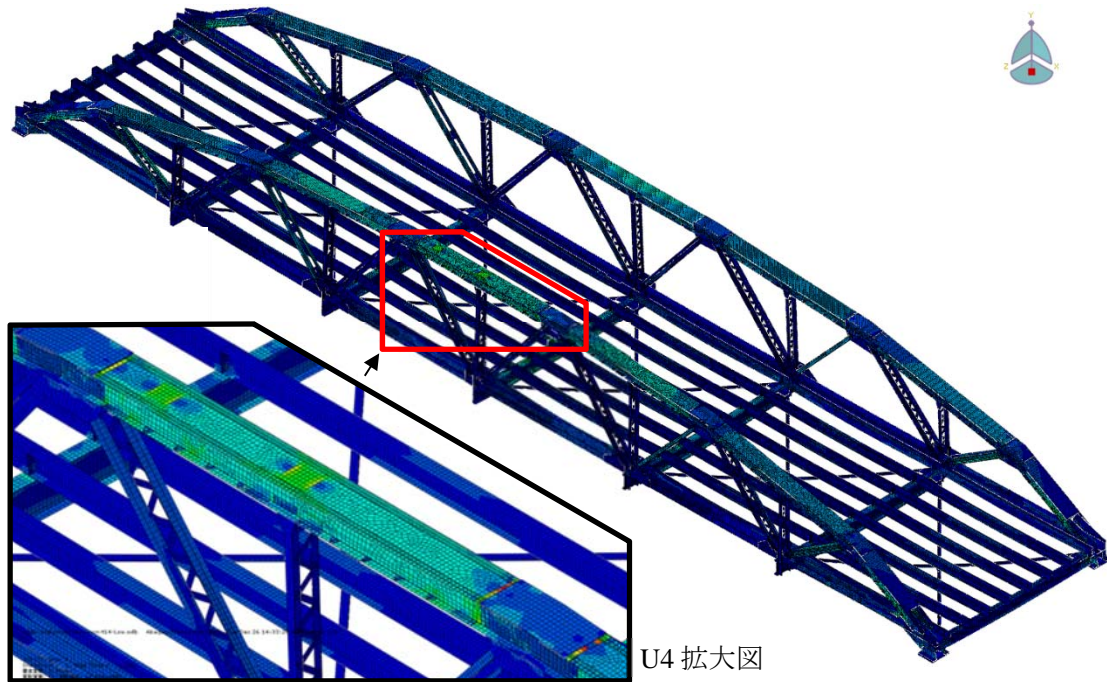


図-4 CASE-C1-T14 の Mises 応力分布

腐食の無い解析モデルと腐食損傷を考慮した解析モデルの結果を比較することにより、車両荷重の大きさと安全性について検討する。腐食を考慮していないモデルに T-14 を載荷した時、最も大きな軸力が発生するスパン中央上弦材 (U4) の中で、発生していた最大 Mises 応力は 171.1MPa であった。どの部材にも座屈等による大きな変形が生じていないことから、本橋は新設時の状態で T-14 荷重を通行させる耐荷力を有していると推定される。この場合、本鋼材の降伏応力と最大 Mises 応力の比から、部材の降伏に対する余裕分 (降伏安全率) は 1.8 である。T-4 を想定した際の U4 の降伏安全率は 2.5 であった。

次に、腐食を考慮したモデルに T-14 を載荷した解析結果から得られた、Mises 応力分布を図-4 に示す。橋

梁全体で見れば大きな応力が発生していないように見えるが、図中の拡大図に示す下流側 U4 付近に着目すると、上弦材継手部における溝状腐食の断面がほぼ降伏しており、上フランジ上の孔食部分にも大きな応力が発生していることが確認できる。このとき、主構全体に目立った面外変形は認められず、橋梁全体としては重度の減肉や断面欠損を有する断面が局所的に降伏する状態であることが理解できる。

上記の結果から、本解析モデルでは上弦材 U4 における継手部の溝状腐食に着目し、T-4~T-14 を載荷した場合の解析結果を図-5 にまとめて示す。図から、車両が大きくなるにつれて溝状腐食の中でも貫通孔周辺の応力が特に大きくなっており、T-14 では 303.3MPa に達していることが分かる。

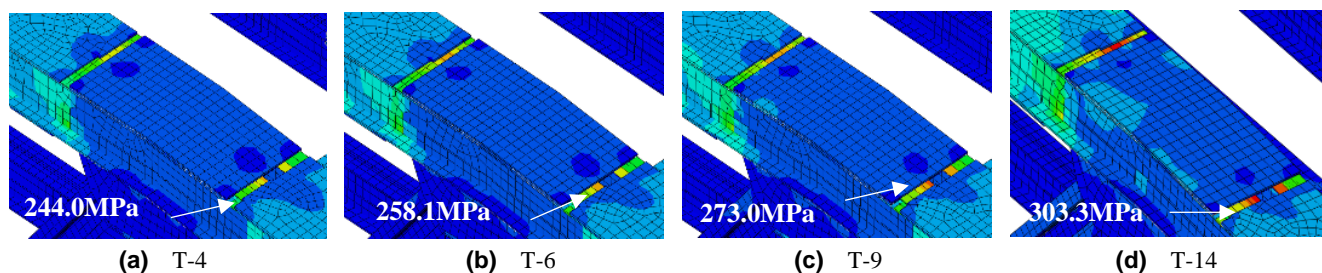


図-5 下流側 U4 の溝状腐食周辺の Mises 応力分布

ここで、本橋の交通状況や通行ニーズの観点から、最低限要求される活荷重の最大限としては 4t 車を想定すべきと考えられるが、本解析モデルにおいて、T-4 が载荷された際に溝状腐食部に発生する最大応力は図-5(a)に示す 244.0MPa であり、その降伏安全率は溝状腐食によって約 1.3 まで低下している。さらに、約 100 年前に製造された鋼材であることから、仮に 15~20% 程度の材料強度のばらつき<sup>8)</sup>を見込んだ場合、T-4 荷重に対する降伏安全率は約 1.0 となる。しかし、本解析モデルでは実際よりも減肉が大きくなるように腐食をモデル化していることや実際の交通状況から 2t 以上の車両の通行頻度は低いと考えられることから、たちまち危険な状態であるとは考えにくいものの、本橋の延命化を考える場合には、荷重制限や上弦材の溝状腐食に対する補修を検討すべきと判断される。

## 5. 本橋の維持管理に関する考察

本研究の成果より、大きな圧縮力を負担する上弦材に生じている溝状腐食に応力が集中しており、車両荷重として T-4 を载荷した場合の降伏安全率は約 1.3 と推定された。本橋の安全性に対しては溝状腐食と孔食に注視する必要がある。抜本的な補修の時期については管理者が策定する修繕計画によるため、それまでの比較的短期間を想定した延命化を考える場合には、現状の使用状況を鑑みた荷重制限や腐食の抑制対策が有効と考えられる。このことから、本橋では、上記の解析結果に基づき、有効幅員の減幅による通行制限措置と水処理に配慮した防食工事が実施された。また、これらの腐食に対しては点検時に再劣化の状況を把握しておく必要がある。また、塗装劣化が確認された場合、簡易的に塗装塗替えをする「繕い塗装」などを実施す

るなど、小まめなメンテナンスが必要と考えられる。

本研究では静的荷重を想定した場合の上弦材の降伏に対する安全率の推定値を求めているが、これは橋梁全体の耐荷力の一側面を捉えたものであり、維持管理の上で考えられる限界性能の設定値とは意味合いが異なる。このことから、実際の通行ニーズを妨げない範囲での通行制限および地域住民との協働による日常的なモニタリング等の柔軟な対応を視野に入れることがこの種の老朽化鋼橋の延命化に有効と考えられる。

## 【参考文献】

- 1) 小山諒子, 海田辰将, 今井努: 周南市最古の鋼橋「松室大橋」における損傷調査と維持管理を意識した住民アンケート, 第 68 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.59-60(I-30), 2016.5.
- 2) 加納匠, 川見周平, 平原義之, 佐竹亮一, 海田辰将, 藤井堅: 広島県内山間部における高齢化した鋼ブラケットトラス橋の損傷調査, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, I-019, pp. 37-38, 2017. 9.
- 3) 佐竹亮一, 井上太郎, 藤井堅: 構造全体からみた鋼橋の保有強度に関する一考察, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, I-615, pp.1229-1230, 2014.6.
- 4) 関場茂樹: 標準橋梁仕様書, 東京丸善株式会社, 1914.9.
- 5) 佐藤廉平: 橋梁工学トラスの設計, 淀屋書店出版部, 1928.5.
- 6) 作本英梨: 老朽化ポニートラス橋の腐食現況調査と部材の応力評価, 2017 年度徳山工業高等専門学校土木建築工学科卒業研究論文集, 2018.3. (掲載予定)
- 7) 周南市建設部道路課: 平成 26 年度松室大橋復元設計 (主径間トラス橋), 2015.3.
- 8) 西岡裕希, 海田辰将, 藤井堅: 旧余部橋梁主桁における腐食状況と鋼材の性質に関する特徴, 第 64 回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, I-10, 2012.6.