

# 老朽化ポニーラス橋の腐食損傷調査と復元設計に基づく主構部材の応力評価

東海旅客鉄道株式会社 非会員 作本 英梨  
宇部興産機械株式会社 正会員 小山 諒子

徳山工業高等専門学校 正会員 ○海田 辰将  
周南市道路課 非会員 今井 努

## 1. はじめに

現在、橋梁の老朽化問題が全国的に取り上げられており、我が国の鋼橋でも著しい腐食や損傷による部材の破断や落橋等の重大な事故が報告されるようになった。特に、過疎化や少子高齢化が加速している中山間地域では、市街地・都市部などの橋梁と比較すると一日当たりの交通量は少ないものの地域住民にとっては生活するうえで欠かせない存在となっている例も多い。この種の橋梁を合理的に維持管理するためには、損傷の現状を把握して耐荷力を推定し、実情に見合った形で延命化の可否を見極め、ポイントを抑えた対策を考える必要がある。

そこで、本研究では現存する老朽化ポニーラス橋を対象とし、復元設計に基づいて腐食による部材断面の減肉や断面欠損を考慮した許容応力度法による応力照査を行い、本橋に対する実際の交通状況や通行ニーズに対する安全性を検討した。

## 2. 対象橋梁について

本研究で対象とする橋梁の主構は、上弦材が両支承間で弓状に曲弦を形成するボウストリング形式となっており、ポニーラスであることが構造上の特徴である。支間長は29.3m、有効幅員は4.5mである。

本橋については、近隣住民による交通状況および通行ニーズに関するアンケート調査<sup>1)</sup>が実施されており、その結果から本橋において日常的に要求される最大の活荷重としては概ね3~4t車と推定されている。

## 3. 腐食損傷調査および3次元腐食マップ

### 3.1 調査概要

本研究では、本橋の腐食損傷調査および寸法調査を実施した。調査では塗装塗り替えの足場を利用して、主構および2次部材に発生している腐食の最大腐食深、面積、発生箇所を計測し野帳に記入した。

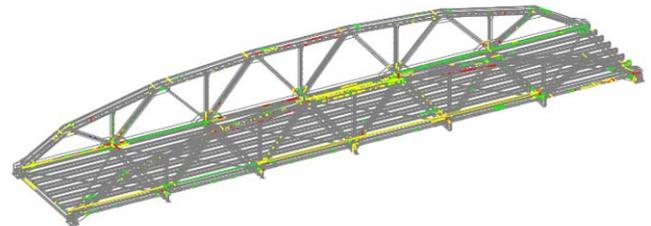


図-1 3次元腐食マップ

表-1 損傷度の判断基準

腐食ランク	色区分	腐食劣化の内容	板厚残存率
I	■	表面的な錆であり、顕著な減肉は無い。損傷状態は小さく局所的。	90~99%
II	■	表面的な初期の層状錆であり進展する恐れがある。広がりのある初錆状態。	51~89%
III	■	広い範囲で層状錆による明らかな板厚の膨張、または著しい減肉がある。	1~50%
IV	■	腐食による貫通孔や断面欠損がある。	0%

### 3.2 3次元腐食マップ

図-1に本橋の3次元腐食マップを示す。腐食損傷は、表-1に示す判断基準<sup>2)</sup>に従って腐食ランクI~IVに区分されている。表中の板厚残存率とは、腐食損傷を客観的に区分するため、(健全時の板厚-最大腐食深)/健全時の板厚×100%として計算した。

図-1より、ランクIII~IVの厳しい腐食が発生している箇所は、上弦材スパン中央や端縦桁など、部材が水平に取り付けられており、かつ塗装の劣化が著しい部材や床版からの漏水箇所、タイプレート境界などに集中していることが分かる。また、上弦材上面の接合部や格点部では遮水による溝状腐食が多く発生している。一方、レーシングバーや弦材のリベット周辺で局所的に孔食が発生している。以上のことから、雨水の遮水・滞水、床版からの漏水、塗装機能の劣化などが主な腐食原因と推察される。

## 4. 復元設計に基づく主構部材の応力評価

### 4.1 設計条件と応力の計算方法

#### 4.1.1 設計条件

本橋の復元設計における荷重強度に適用した技術基準は主として大正8年の道路構造令<sup>3)</sup>である。しかし、この時代の我が国の鋼橋は、米英国の設計基準に基づい

ている事例も多いことから、等分布活荷重強度および死荷重強度の算定には、米国橋梁会社標準設計の第 34 表に記載されている傾斜弦を有する低リベットラス橋の主構諸元と設計荷重強度の関係についても参考に<sup>4)</sup>した。その結果、設計当時の鋼重による死荷重強度を  $1.5\text{kN/m}^2$ 、等分布活荷重強度（群集荷重）を  $4.0\text{kN/m}^2$ 、自動車荷重を  $63.8\text{kN}$  とした。車両の前輪と後輪の軸重配分は T-6 活荷重に準じて推定し、前輪  $16.0\text{kN}$ 、後輪  $47.8\text{kN}$  とした。また、車両荷重には T-4 (4t 相当)、T-6 (6t 相当)、T-9 (9t 相当)、T-14 (14t 相当) 活荷重をそれぞれ 1 台ずつ載荷した。衝撃係数  $i$  は標準橋梁仕様書<sup>7)</sup> (大正 3 年) に基づき  $i=1.25$  を活荷重強度に乗じた。なお、構造条件としては、有効幅員は  $4.45\text{m}$ 、RC 床板の厚さは寸法調査に基づき  $0.22\text{m}$  を仮定した。部材の軸応力は、主構を単純支持された 2 次元平面のピントラス橋として計算する。

#### 4.1.2 計算方法

まず、前項で推定した主荷重を橋面上に載荷し、橋軸方向に載荷する等分布荷重強度 $[\text{kN/m}]$ を計算した。死荷重および群集荷重については幅員全体に外力として載荷し、両主構の断面中心間をスパンとする反力の影響線を用いて計算した。地覆やガードレールは橋軸方向への線荷重として扱っている。また、車両荷重については橋面上に載荷される集中荷重として取り扱い、影響値から主構に生じる反力を求めた。

次に、主構を単純支持された 2 次元平面のピントラスとして各部材の軸力の影響線を描き、橋軸方向の等分布荷重強度は橋全体に、車両荷重は部材の影響線の縦距が最大の場所に後輪を載荷し、荷重強度に影響面積を乗じて軸力を計算した。この軸力を断面積で除して部材の応力を求めた。

#### 4.2 新設時の応力評価

ここでは、腐食の無い状態（新設時）における主構部材の応力評価を行う。設計当時の許容応力度については、大正3年の標準橋梁仕様書<sup>9)</sup>を参考に推定し、許容引張応力度 $\sigma_{ta}=109\text{N/mm}^2$ 、許容圧縮応力度 $\sigma_{ca}=109-0.478 \times (\text{部材の長さ/断面二次半径})\text{N/mm}^2$ をそれぞれの部材に対して適用し、復元設計から求めた作用応力と比較した。

図-2に、新設時を想定した主構部材の応力評価結果を示す。図の3次元モデルは、作用応力が許容応力度を超過した主構部材に色付けされており、表-2に示すよ

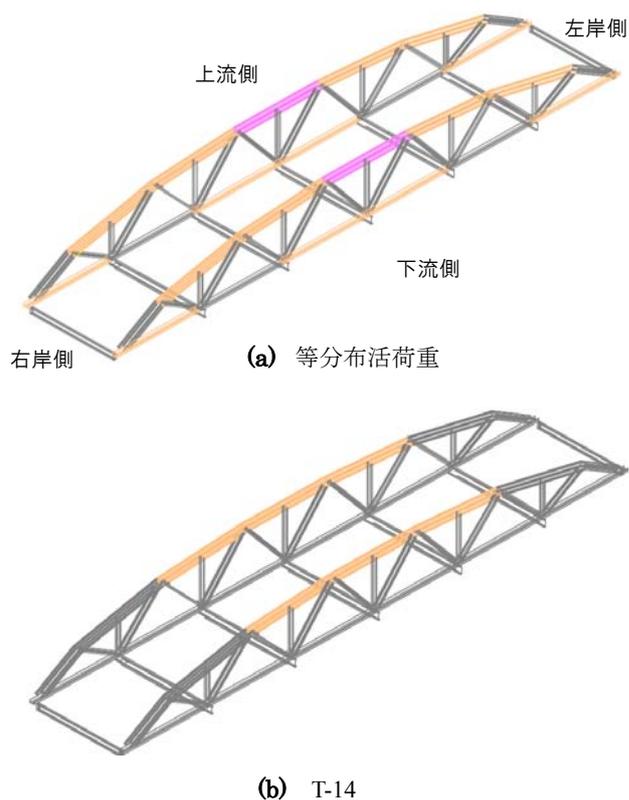


図-2 軸応力評価（設計当時）

表-2 部材の色分け区分

色区分	区分内容
■ (orange)	作用応力の超過が許容応力度の20%未満
■ (purple)	作用応力の超過が許容応力度の20%以上

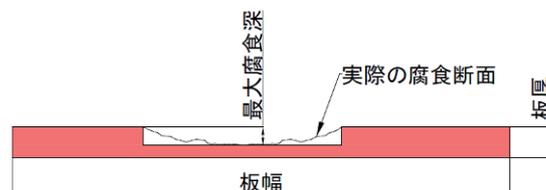


図-3 腐食減肉のモデル化

うに超過分が20%未満の場合には橙色で、20%以上の場合には紫色で表示した。なお、車両荷重については片方の主構側に偏載荷された場合を想定した結果を、図中にまとめて示している。図-2(a)より、橋面上に等分布活荷重 $4.0\text{kN/m}^2$ を載荷した場合には、多くの上下弦材において設計当時の許容応力度を越える結果となった。その超過分は上弦材スパン中央で23%、下弦材スパン中央で12%であった。これは、設計当時の許容応力度 ( $109\text{N/mm}^2$ ) は、実鋼材の降伏応力度に対してかなり大きめの安全率が見込まれていたことによると推察される。また、本研究では新設当時最大であったと考えられる自動車荷重 $63.8\text{kN}$ 、また車両荷重として、T-4、

T-6, T-9, T-14を想定して同様の計算を行っているが、新設時の状態では唯一T-14荷重を載荷した場合に、**図-2(b)**に示すように上弦材スパン中央において作用応力が許容応力度を最大4%ほど超過する結果が得られた。

以上の結果から、本橋の新設時には、橋面全体に群集荷重が載荷されると許容応力度を20%以上超過するが、1台分の車両荷重を想定した場合には、最大14t程度の車両を通行させることが可能であったと推定される。

### 4.3 腐食を考慮した部材の応力評価

#### 4.3.1 腐食のモデル化と許容応力度

本研究では腐食損傷を**図-3**に示すようにモデル化した。腐食損傷調査では、腐食部の平面寸法と最小板厚（最大腐食深）を測定している。腐食部の単純化と安全側の評価を行う観点から、計算に用いる断面積は、部材に生じている腐食部の中で、最も小さな断面積を用いて計算し、板厚には腐食部の最小板厚を適用した。

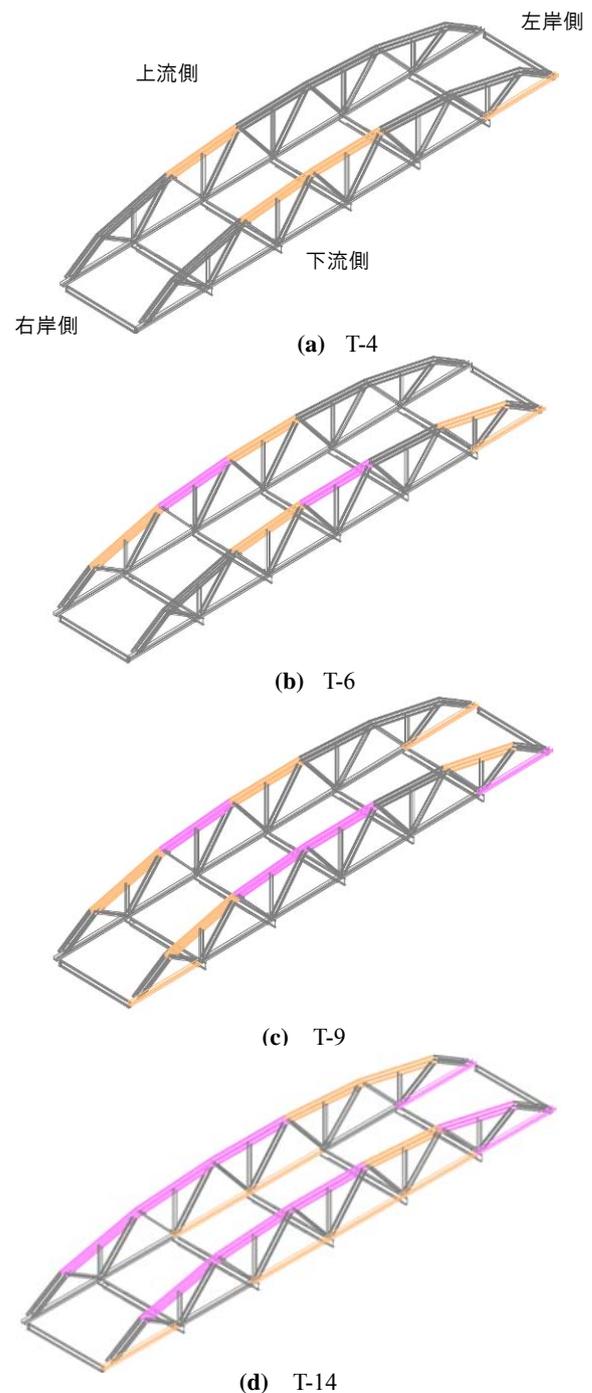
また、ここでは許容応力度の例として①設計当時の基準に基づく許容応力度<sup>5)</sup>、②平成24年の道路橋示方書に基づく許容応力度<sup>6)</sup>、③実際の材料強度<sup>7)</sup>に基づく許容応力度の3ケースを用いて応力評価を行った。

#### 4.3.2 評価結果

**図-4**に、設計当時の許容応力度<sup>5)</sup>を基準として作用応力を評価した結果を示す。**図-4(a)**から、T-4荷重を想定した場合、下流側の上弦材スパン中央で最大18%、下弦材スパン端部で10%の応力超過が生じた。上弦材では、**写真-1(a)**のような添接板境界の溝状腐食が部材の最小断面となっており、この部材で最大の応力が発生する。下弦材スパン端部では、**写真-1(b)**のように2本のL型鋼を繋ぐための形状保持材であるタイプレートとの境界で簿材に大きな欠損を生じていた。

**図-4(b)~(d)**に示すように、車両荷重としてT-6~14を載荷した場合には、同上弦材で25~50%、同下弦材で18%~45%の応力超過となった。このことから、設計当時の許容応力度をベースに安全性を議論する場合には、日常的な通行を仮定する車両荷重としてT-4相当あるいは部分的な補修を行った上でのT-6相当が妥当と考えられる。

次に、許容応力度として道路橋示方書（平成24年度）における許容応力度（ $\sigma_{ca}$ =細長比によって異なる、 $\sigma_{ta}=140\text{N/mm}^2$ ）を基準として作用応力を評価した結果を**図-5**に示す。T-4荷重ではいずれの部材も応力超過は認められず、T-6荷重においてわずか1%の超過が唯一、



**図-4** 腐食を考慮した部材の応力評価  
(当時の許容応力度)



**写真-1** 腐食損傷状況  
(a) 上弦材添接板付近の溝状腐食 (b) 下弦材の断面欠損

**写真-1** 腐食損傷状況

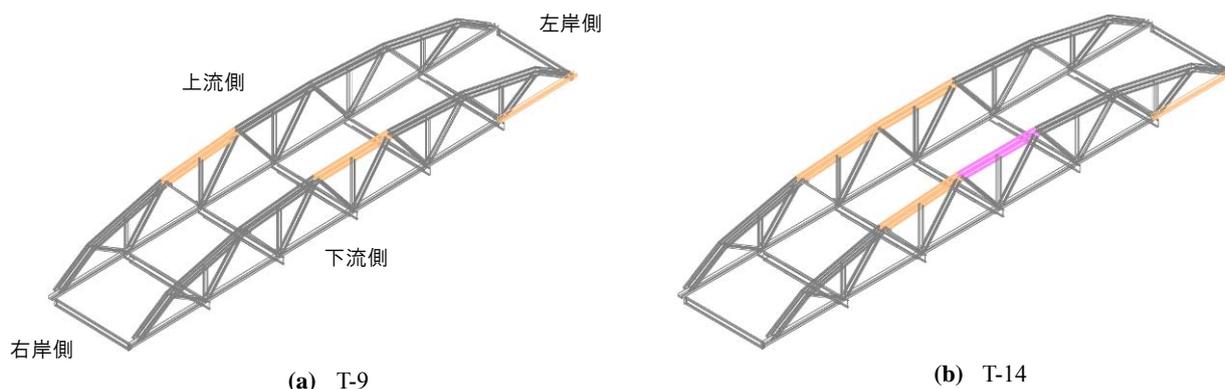


図-5 腐食を考慮した部材の応力評価（道路橋示方書による許容応力度）

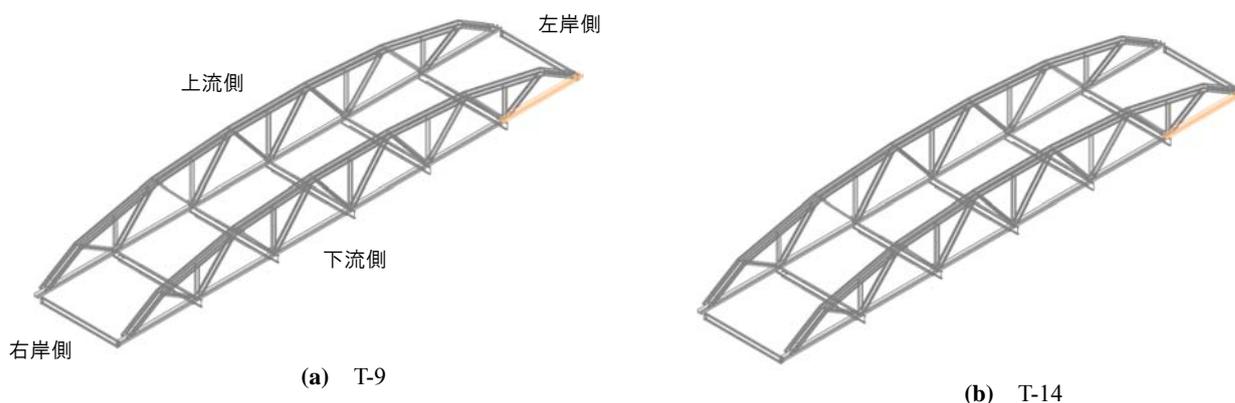


図-6 腐食を考慮した部材の応力評価（材料強度に基づく許容応力度）

下流側の上弦材スパン中央で確認された。T-9荷重でも、超過分は同上弦材で8%，下弦材端部で9%程度であり、T-14荷重で同上弦材の超過分が20%に達した。このことから、道路橋示方書（平成24年度）における許容応力をベースに考えると、日常的な通行を仮定する車両荷重としてT-6~9相当の荷重まで許容できる可能性がある。

図-6は、引張試験結果による本橋鋼材の材料強度<sup>1)</sup>に基づく許容応力度（ $\sigma_{ca}$ =細長比によって異なる、 $\sigma_{ta}=148\text{N/mm}^2$ ）を基準として作用応力を評価した結果である。T-4~6荷重を想定した場合にはいずれの部材も応力超過しないが、T-9~14荷重を想定した場合に下弦材端部で最大7%の応力超過が生じる。

## 5. おわりに

本研究の結果、板厚減少率が50%を超えるような局所的な腐食減肉や断面欠損の多くは、上下弦材に集中して発生していた。それらの主な腐食原因は雨水の遮水・滞水・漏水および塗装機能の劣化と推察される。

本橋新設時には、最大14t車程度の車両を通行させることが可能であったと考えられる。また、腐食を考慮した部材の応力評価では、許容応力度法で設計した場

合に、基準とする許容応力度によって許容できる可能性のある車両荷重は変わってくる。本橋で用いた鋼材の材料特性は、部分的ではあるが実橋から採取した鋼材の引張試験結果に基づいていることも考えると、本橋の日常的な通行を許容できる可能性のある車両荷重としては4~6t車相当が妥当と推定される。

## 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) 藤井堅，中村秀治，山口詩織，海田辰将，須藤仁，服部康男，石川智巳：旧余部橋梁の飛来塩分による腐食実態と腐食影響評価における海塩輸送解析モデルの適用性について，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73，No.1，pp.98-113，2017.2.
- 3) 道路構造令（大正8年12月6日 内務省令第24号），1919.12.
- 4) 佐藤廉平：橋梁工学トラスの設計，淀屋書店出版部，1928.5.
- 5) 関場茂樹：標準橋梁仕様書，pp.56-57，東京丸善株式会社，1914.9.
- 6) 道路橋示方書・同解説，（社）日本道路協会，2012.3.