

腐食した鋼鉄道リベット桁支点部の載荷試験および解析

首都大学東京

学生会員

○中田祐利花

(株) 東京鐵骨橋梁

正会員

細見直史

首都大学東京

フェロー会員

野上邦栄

(株) 東京鐵骨橋梁

正会員

入部孝夫

首都大学東京

学生会員

松本祥吾

首都大学東京

正会員

岸祐介

1. 目的

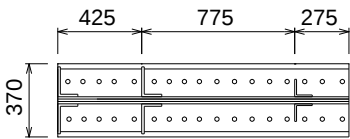
我が国には約 10 万の鉄道橋が存在する．これらの建設時期は戦前（～1941 年）と高度経済成長期（1955～1973 年）の 2 期間に集中しており，戦前に建設されたものに関しては経年が 70～100 年を超え¹⁾，老朽化する橋梁の維持管理が現在大きな課題となっている．鋼橋の耐荷力に影響する劣化損傷の一つとして腐食が挙げられるが，腐食状況は各橋梁の使用環境によって様々である上に，腐食した実橋梁に対する耐荷力試験の実績も少ない．そのため現時点で腐食が耐荷力に与える影響を定量的に評価する手法は確立していない．本研究は，鉄道橋の代表的橋梁である上路プレートガーダー橋を対象として，その桁端支点部の腐食状況を計測するとともに，圧縮耐荷力試験を実施することで桁端部の柱としての腐食と耐荷力の関係性を評価する上で重要なデータの蓄積とその分析を行うものである²⁾．

2. 試験体

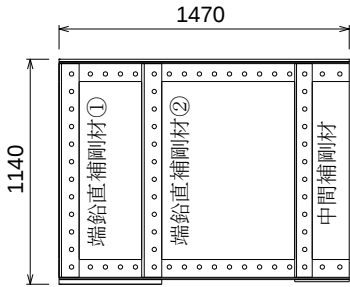
本研究は，路線変更のために架け替えとなった図-1 の上路式プレートガーダー橋の桁端部を試験体とし，柱としての圧縮耐荷力を評価する．試験体の概要および断面寸法を各々表-1 および図-2 に示す．特徴としては，鋼鉄道橋であること，リベット接合であること，さらに使用鋼材がドイツ製であることが挙げられる．材料特性を明らかとするために引張試験とスパーク放電発光分光分析法による化学成分分析を行ったところ，SM400 材相当の強度を持つ材料であることが分かった．



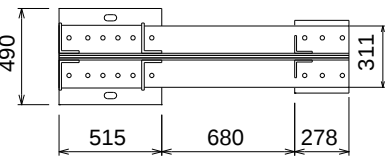
図-1 試験体撤去時



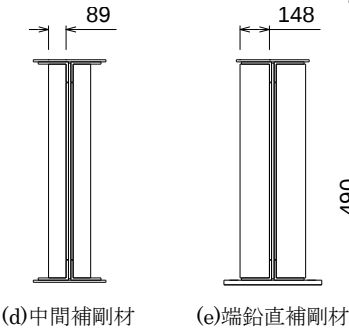
(a)上フランジ



(b)ウェブ



(c)下フランジ



(d)中間補剛材

(e)端鉛直補剛材

図-2 試験体寸法

表-1 試験体概要

橋梁名	金杉橋
橋種	鉄道橋
所在地	JR 東海道線浜松町駅から南へ 200m
形式	2主桁上路式プレートガーダー橋
橋長(支間長)	10.1m(8.7m)
竣工年	大正 10 年頃
設計荷重	Cooper's E 45
接合方法	リベット接合
鋼材	ドイツ輸入鋼材 (SM400 材相当)

表-2 設計板厚

部材名	板厚[mm]
垂直補剛材	12.70
フランジ(アングル材)	11.11
フランジ(カバープレート)	11.11
ソールプレート	23.81
ウェブ	12.70

3. 腐食計測

3.1 計測装置（タワー型 3D 腐食表面形状計測装置）

腐食形状の計測には，首都大学東京で開発した図-3 に示すタワー型 3D 腐食表面形状計測装置を用いた．架台上へ試験体を固定し，計測装置のレーザー照射口から試験体表面までの距離を計測する．図-4 に示すようにレーザーヘッドは 360° 回転し，レーザーの照射方向を鉛直上向き・下向きに変更が可能である．さらに，レ

キーワード 腐食，リベット桁，残存耐荷力

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL. 042-677-2782 内線(4564) Email:nakata-yurika@ed.tmu.ac.jp

レーザーの取付位置を変更することによって左右方向に関してもレーザーを照射することができる。本装置の計測範囲は、表-3 のように X,Y 軸面内に 2000×2000mm である。以上の方法で web, フランジ, 鉛直補剛材の計測を行った。なお、計測ピッチは腐食の少ない箇所が 5mm, 激しい腐食領域は 1mm ピッチで設定した。

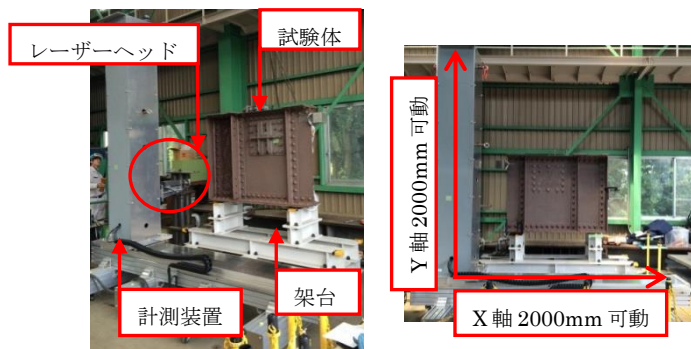


図-3 計測装置

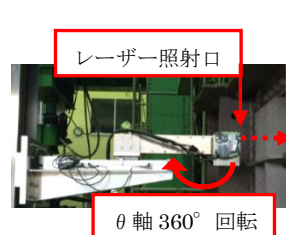


図-4 レーザーヘッド部

表-3 レーザー変位計の諸元

可動域	X 軸	2000mm
	Y 軸	2000mm
	Z 軸	200mm
	θ 軸	360°
直線性		±0.04mm

3.2 計測結果

腐食量計測の結果、以下のような傾向がみられた。

- (1) ウェブ・端鉛直補剛材と下フランジとの角部にみられる腐食が、上フランジとのそれに比べて顕著である。図-2の端鉛直補剛材②は腐食により断面が欠損し、下フランジと不連続な状態であった。
- (2) 下フランジ下面において、ソールプレートと下フランジの境界部に孔食を含む激しい腐食がみられる。ソールプレートとカバープレートを除く領域において最大腐食量は 10.15mm(孔食は除く), 平均腐食量は 1.22mm である。
- (3) 上フランジは枕木が設置されていたため、上面が全体的に腐食している。最大腐食量は 9.05mm, 平均腐食量は 2.79mm である。
- (4) 端鉛直補剛材①についても下フランジ近傍の腐食が激しい。また、リベット接合による組立式の桁であるため、フランジ・補剛材間に隙間がみられる。(図-5)
- (5) ウェブに関して激しい腐食はみられないが、部材の初期たわみがみられる。
- (6) 全体として桁の内側の腐食が桁の外側の面よりも激しい。³⁾

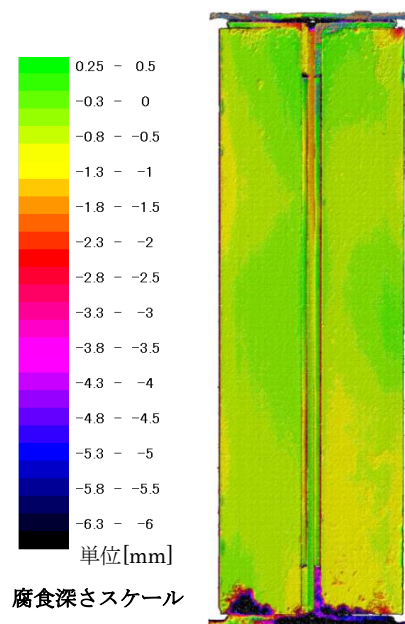


図-5 端鉛直補剛材①腐食分布図

4. 圧縮耐荷力試験

4.1 試験概要

最大荷重 5000kN の油圧式万能試験機を用いて桁端部に圧縮力を加えた。荷重方法はジャッキストローク量を利用した変位制御法である。

桁端部の柱としての圧縮耐荷力を評価するために境界条件は、図-6に示すように上下ピン支持とした。また、荷重パネルに対して一回り大きな荷重板を用いることで、荷重板を介して端鉛直補剛材①②に一樣な圧縮力を加えるため、板厚 90mm の荷重板を使用し、その変形をも防いだ。荷重板の使用鋼材は SM520C である。

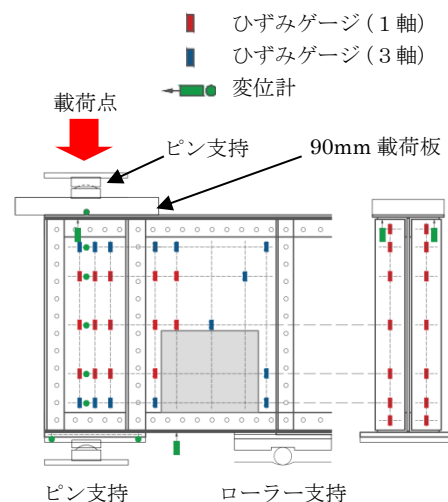


図-6 荷重条件

4.2 試験結果

荷重によって下フランジのソールパネルが変形を開始し、それに伴ってウェブの下フランジ近傍に座屈変形が生じた。荷重の増加と共にローラー支承部が浮き上がりを起こし、支承部は外れたため 3114.9[kN]で荷重を終了した。その荷重 - 変位曲線を図-7 に示す。

荷重終了後試験体の変形状況を確認したところ、ウェブは座屈のため 20mm の水平変位がみられた。端鉛直補剛材に関しては目に見える座屈変形は見られなかったが、端鉛直補剛材①と下フランジ間に隙間が存在し、不連続であるためか、端鉛直補剛材①が桁端方向に飛び出すように変形した。

両端鉛直補剛材の上下フランジ近傍位置およびウェブ中央位置のひずみ分布を図-8 に示す。

(1) 端鉛直補剛材①

鉛直補剛材②よりも全体的にひずみが大きく生じ、桁高中央と下フランジ近傍のひずみが大きくなる傾向にあった。

(2) 端鉛直補剛材②

上フランジ近傍のひずみが大きく、下フランジに近いほどひずみが小さくなる傾向がみられた。

この差は端鉛直補剛材と下フランジの連続性に起因すると考えられる。端鉛直補剛材①は桁が組立式であるため、フランジとの間に約 2mm の空間が存在したが、荷重によってこの隙間は潰されるため、補剛材は圧縮力を伝える柱として機能する。一方端鉛直補剛材②は、腐食によって補剛材と下フランジ間に約 10mm の隙間が生じており(図-9)、下フランジ近傍ではフランジと補剛材が不連続であるため、変形が生じにくく、ひずみも小さくなったと考えられる。降伏ひずみが確認された箇所は、荷重パネルの上下フランジ近傍のウェブで、端鉛直補剛材に関しては降伏ひずみは見られなかった。

5. 弾塑性有限変位解析

5.1 概要

解析ソフト MSC.Marc を用いた弾塑性有限変位解析によって、実験結果の再現性の検証を行った。モデルはシェル要素を用いて作成した。

5.2 解析結果

腐食や部材の初期たわみのない「健全モデル」と、健全モデルに簡易的な腐食量と、端鉛直補剛材①の初期たわみ、実験時のセッティング不整を導入した「簡易腐食導入モデル」の解析結果を図-7 に示す。簡易的な腐食量の例として、下フランジにおける板厚が設計板厚の半分近く減少した激しい腐

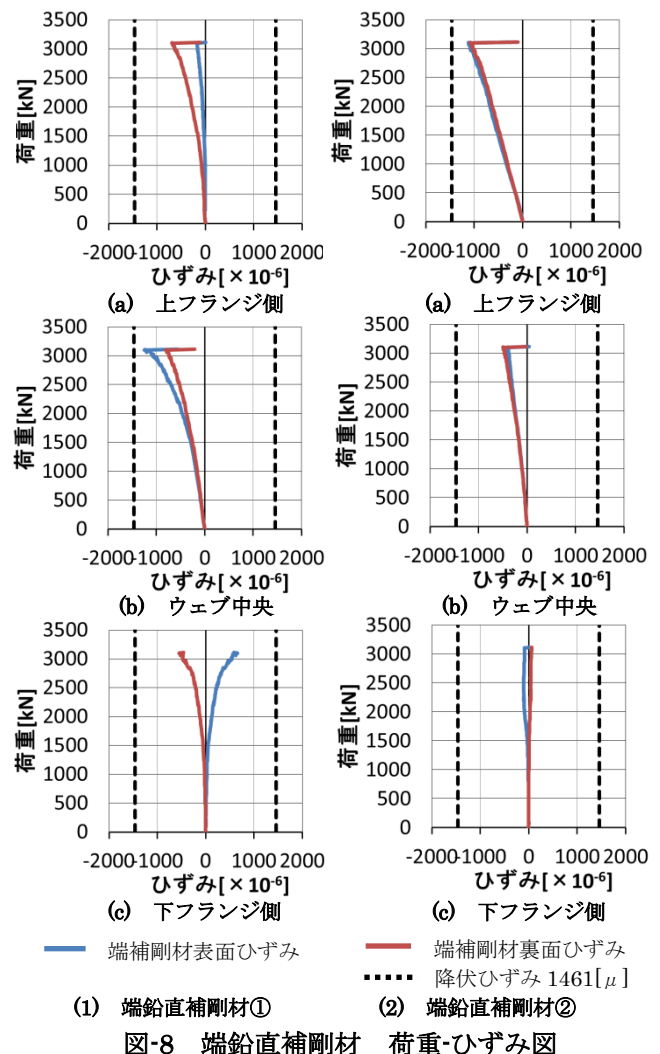
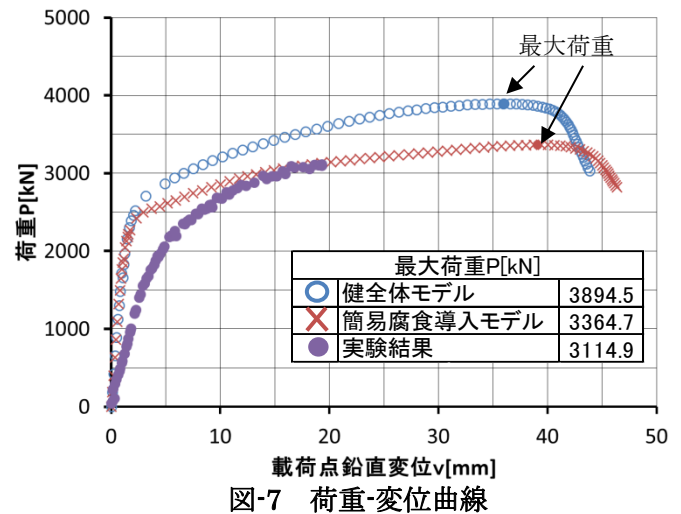


図-9 ウェブ座屈状況

食の導入例を図-10に示す。また、端鉛直補剛材①の初期不整は補剛材淵が支間中央に向けて約 1.7° 傾斜しているため、この形状不整もモデルに導入した。

図-7より実験の荷重-変位曲線に比して解析結果はともに初期剛性が大きく評価される傾向にあった。しかし、実験の最大荷重は、簡易腐食モデルのそれと良い一致を示した。いま、最大荷重である残存耐力と腐食による断面欠損量の関係を図-11に示す⁴⁾⁵⁾。ここでG1A試験体及びG3A試験体の結果は参考文献5)の値である。

図中の縦軸は、式(1)のように実験の最大荷重を、健全体モデルの解析による最大荷重で除した圧縮耐力比 R_p である。また、横軸の最大断面欠損率 $\overline{R}_A$ は式(2)のように桁端部の柱としての有効断面積における最大腐食量($A_0 - A_{\min}$)を健全時の有効断面積 A_0 で除した値である。

$$R_p = \frac{P_u}{P_{u(0)}} \quad \text{---(1)} \quad \begin{array}{l} R_p: \text{圧縮耐力比} \\ P_u: \text{腐食状態の最大圧縮耐力} \\ P_{u(0)}: \text{設計時の最大圧縮耐力} \end{array}$$

$$\overline{R}_A = 1 - \frac{A_{\min}}{A_0} \quad \text{---(2)} \quad \begin{array}{l} \overline{R}_A: \text{最大断面欠損率} \\ A_{\min}: \text{腐食状態の最小断面積} \\ A_0: \text{設計時の断面積} \end{array}$$

$$R_p = -0.99\overline{R}_A + 0.99 \quad \text{---(3)}$$

6. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 腐食分布は、①ほこりなどの堆積しやすく、構造が複雑な下フランジとウェブ・補剛材の角部において腐食が進行している。②桁の外側と比較して海から飛来した塩分が雨などにより洗い流されることのない桁の内側の腐食が激しい。

(2) 圧縮耐力試験は、①下フランジの変形に伴って、下フランジ近傍のウェブが座屈を起こし、最大荷重3114.9[kN]で載荷を終了した。②補剛材に目に見える座屈変形は見られなかったが、これは補剛材の腐食により補剛材と下フランジが不連続となり、補剛材に圧縮力が加わりにくい状況であったためと考えられる。

(3) 弾塑性有限変位解析は、①初期剛性が実験値の方が低く出る傾向にあった。これは、リベットによる組立式であることや鉛直補剛材の腐食によって部材間に隙間が存在したために、変位が大きくなったと考えられる。②実験値と解析値(簡易腐食導入モデル)の耐力を比べると、差は7.4%であり、残存耐力と腐食による断面欠損量の間には相関関係がみられる。③点検により、柱としての最大断面欠損率の計測結果と、健全時の最大荷重が求めれば、式(3)を用いて桁端部の柱としての圧縮耐力を評価可能である。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/pdf/021_01_12.pdf
- 2) 松本祥吾, 他: 腐食した上路プレートガーダー橋の桁端支点部の腐食形態と残存耐力評価, 全国大会, 2015
- 3) 道路橋の定期点検に関する参考資料(2013年版)ー橋梁損傷事例写真集ー, 国土技術政策総合研究所資料, 2013年7月, pp. 7, 14, 57
- 4) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)鋼・合成構造物, pp. 139-142, 平成19年
- 5) V. T. Hung, 他: 腐食が原因で取り替えられた実鋼橋支点部の載荷試験及び解析, 土木学会論文集, No. 710, 2002. 7

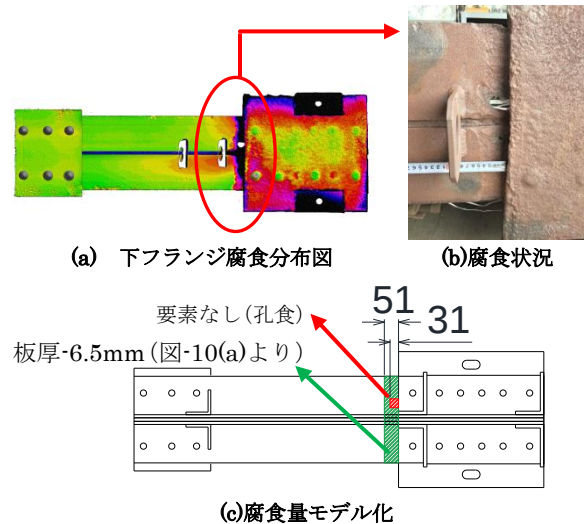


図-10 下フランジ腐食導入例

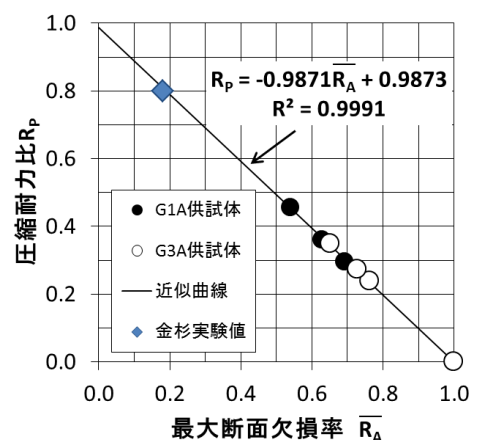


図-11 残存耐力-断面欠損量関係図