

平成 31 年 4 月 22 日現在

機関番号：54501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18109

研究課題名(和文) 圧延桁端支点上の腐食過程における残留応力の再配分挙動と残存強度に関する研究

研究課題名(英文) Study on the ultimate strength and re-distribution behavior of residual stress at H-rolled beam end under corrosion process

研究代表者

三好 崇夫 (MIYOSHI, Takao)

明石工業高等専門学校・都市システム工学科・准教授

研究者番号：40379136

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、圧延H形鋼を桁に用いた圧延桁橋の桁端部について、断面欠損過程における残留応力の変化や変形を調べた。また、圧延桁端を模した供試体に導入する断面欠損量を変化させて、圧縮力を加えて破壊させる実験を実施した。

その結果、断面欠損過程では、残留応力による力のつり合いが崩れるため、強度低下の原因となる付加的な変形が生ずることが明らかとなった。また、腐食に伴う断面欠損を持つ桁端部の強度は、道路橋示方書において、桁端部の設計に用いられている有効断面積から断面欠損分を控除し、これに降伏応力と呼ばれる鋼材の材料特性値をかけることで安全側に評価できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧延桁橋は市町村管理の橋にも多用されているが、予算や技術者不足によって十分な維持管理が行われてこなかったものには、腐食に伴う断面欠損の発生事例が報告されており、その補修や架け替えの要否に関する合理的な判断基準が求められている。本研究では、実験を通じて断面欠損を持つ圧延桁端の強度を安全側で予測可能な方法を提案できた。また、断面欠損過程では残留応力の変化や変形が発生することを実験的に明らかにできた。しかし、本研究で対象とした断面欠損量では、断面欠損過程の残留応力の変化や変形が強度に及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This study investigated on re-distribution behavior of residual stress and deformation at H-rolled beam end under volume loss process due to corrosion. Also, collapse test using H-rolled beam end specimens which have different amount of volume loss were carried out by loading compression force on them.

As a result, this study found that additive deformation, which lead to decrease strength of steel structures, occurs because of unbalance of residual stress under volume loss process. Moreover, this study showed strength of H-rolled beam end with volume loss due to corrosion was able to evaluate conservatively using initial yield force, which is multiplication effective cross-sectional area by yield stress. However, effective cross-sectional area is calculated by deduction volume loss area from the cross-sectional area for designing end support portion of the girder specified in Japan Specifications for Highway Bridges. Also, yield stress is one of the material properties of steel.

研究分野：構造工学

キーワード：圧延桁 桁端 腐食 断面欠損 残留応力 初期たわみ 残存強度

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 市町村管理の小規模橋には、経済的側面から圧延桁橋が多用されており、その支点上の腹板や補剛材にも腐食の発生事例が少なからず報告されている。その維持、修繕計画を戦略的に進めるため、合理的な残存強度評価法の確立が求められている。
- (2) 桁端支上部に腐食に伴う断面欠損を持つプレートガーダーの残存強度に関しては、多くの研究成果は報告されているが、プレートガーダーに比べて幅厚比の小さいH形鋼を主桁に用いた圧延桁については、腐食した桁端支上部の残存強度は明確にされていない。
- (3) 鋼構造物の残留応力はその終局強度に大きな影響を及ぼすが、腐食に伴う断面欠損過程において、圧延桁端部の支点上補剛材、腹板内の残留応力の再配分挙動や変形、それらが残存強度に及ぼす影響は明確にされていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、支点上が腐食した圧延桁について、以下を明確にすることである。

- (1) 腐食に伴う断面欠損過程における残留応力の再配分挙動と変形特性
- (2) 支点上の残存強度に及ぼす残留応力再配分挙動の影響
- (3) 支点上の残存強度と設計強度の関係

3. 研究の方法

- (1) 図1と表1に示すように、圧延H形鋼の一端に支点上補剛材を溶接した供試体 Sp.1、後続研究において3点曲げ载荷実験を予定して、载荷点補剛材も溶接した供試体 Sp.2 を製作し、腹板、支点上補剛材の初期たわみと桁高方向の残留応力を計測した。初期たわみは本校所有の定盤を用いて計測した。また、供試体の製作に用いた鋼板の材料特性値を把握するため、引張試験を実施し、その後、本校所有のワイヤ放電加工機を用いて、切断法により残留応力を計測した。
- (2) (1)で製作した供試体 Sp.2 の桁端側腹板下部にフライス盤を用いて段階的に断面欠損を導入し、その過程の腹板と支点上補剛材の面外変位と残留応力を計測した。計測方法は(1)と同様である。
- (3) (1)で述べた供試体 Sp.2 の残留応力計測結果から、供試体の桁端から概ね300mm程度離れたと、溶接残留応力の影響がみられなくなることと、フライス盤を用いた断面欠損の導入が困難であったことから、図2のように桁軸方向の長さを短縮した供試体 Sp.3 を製作し、片側支点上補剛材下部に断面欠損を導入する過程の腹板と支点上補剛材の面外変位と残留応力を計測し

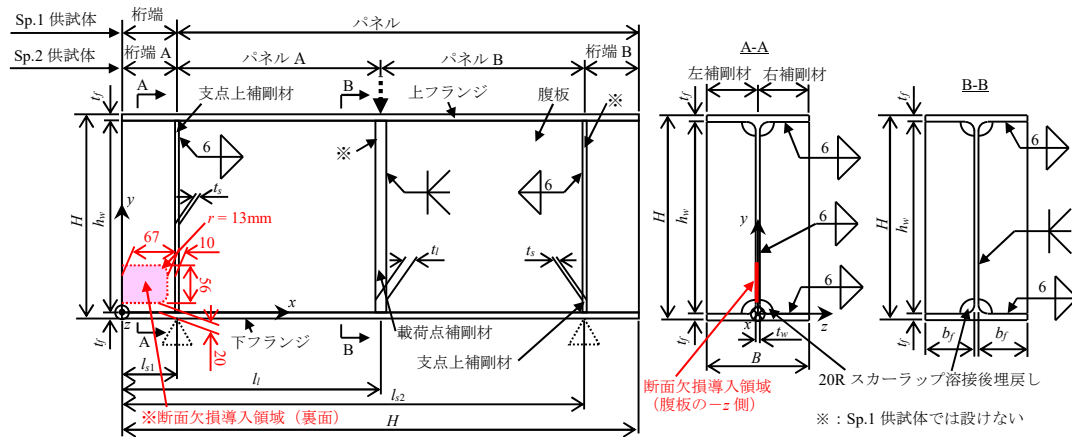


図1 供試体 Sp.1 と 2 の概略図

表1 供試体 Sp.1 と Sp.2 の寸法

供試体名	sp.1	sp.2	供試体名	sp.1	sp.2
B (mm)	149	149	t_s (mm)	5.87	5.79
H (mm)	299	298	l_s (mm)	78	—
L (mm)	760	758	l_{s1} (mm)	—	80
t_w (mm)	6.07	6.08	l_{s2} (mm)	—	679
h_w (mm)	282	281	t_f (mm)	—	15.69
t_f (mm)	8.45	8.46	l_f (mm)	—	380
b_f (mm)	71	71			

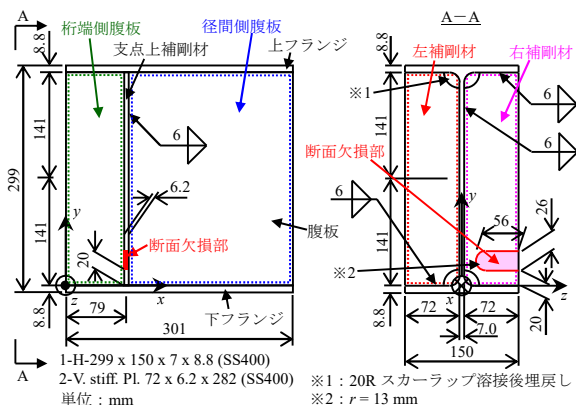


図2 供試体 Sp.3 の概略図

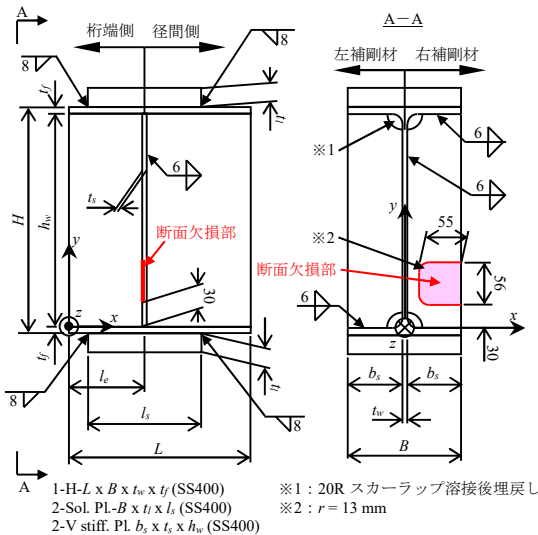


図3 供試体 N, ES50, ES100 の概略図

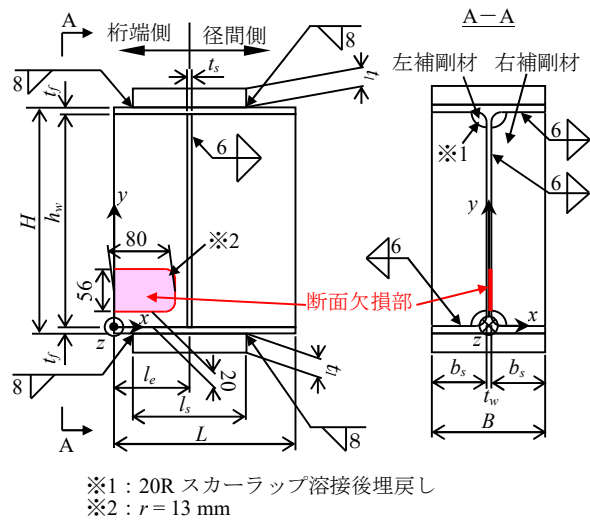


図4 供試体 RS, GE50, GE100 の概略図

表2 供試体 N, ES50, ES100, RS, GE50, GE100 の寸法

供試体名	N	ES50	ES100	RS	GE50	GE100
B (mm)	149	149	150	150	149	149
H (mm)	300	299	300	299	300	300
L (mm)	239	238	240	240	240	240
t _w (mm)	6.6	6.5	6.8	6.3	6.4	6.4
h _w (mm)	283	282	282	282	283	283
t _f (mm)	8.6	8.6	8.6	8.5	8.5	8.5
b _f (mm)	71	71	71	72	72	72
t _s (mm)	6.0	6.0	6.3	6.0	6.0	6.0
l _e (mm)	100	99	100	100	100	100
t _f (mm)	23.8	23.6	24.0	24.4	24.3	24.1
l _s (mm)	150	150	149	150	150	150

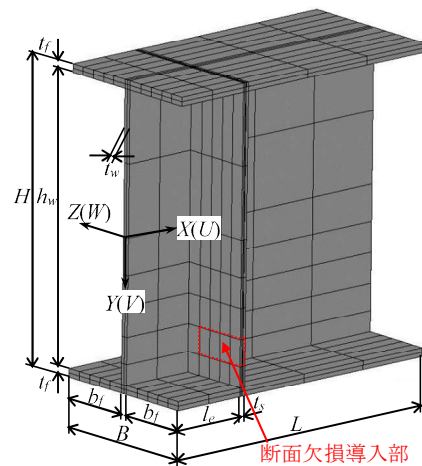


図5 有限要素モデル

た。計測方法は(1)と同様である。

(4) 本研究では、フライス盤を用いた支点上補剛材下部への断面欠損の導入が困難であったことと、支点上に荷重が載る場合には安全側の強度評価につながるものと考え、桁端支上部に着目して桁の長さ方向を短縮し、図3、4と表2に示すように、H形鋼に支点上補剛材と載荷用のソールプレートを溶接した供試体6体を製作し、まず各供試体の支点上補剛材と腹板の初期たわみを計測した。うち1体(RS)は(1)と同様の方法により、支点上補剛材と腹板の残留応力を計測した。うち2体(ES50, ES100)には片側支点上補剛材の下部に、板厚減少量と当初の板厚との比として定義する板厚欠損率 β が概ね 50, 100%となるように断面欠損を導入した。さらに2体(GE50, GE100)には桁端側腹板下部に同様に断面欠損を導入し、残る1体(N)は断面欠損前の強度を把握するためそのまま実験に供した。RSを除く5つの供試体については、本校所有の2MN万能試験機を用いて、支点上に支反力に見立てた圧縮力を載荷して桁高方向変位、面外変位と桁高方向ひずみを計測した。断面欠損量やその導入範囲については、桁端部の腐食に関する既往の調査結果^①をもとに決定した。

(5) Sp.3 供試体を対象に、図5に示すようなソリッド要素を用いた有限要素モデルを構築し、断面欠損過程を要素の消去で考慮する弾性有限変位解析を実施した。

4. 研究成果

(1) 断面欠損過程における残留応力再配分と変形挙動

供試体 Sp.2 を用いて計測された断面欠損過程における腹板の面外変位 w (腹板厚 t_w で無次元化、 $\beta = 0\%$ は初期たわみに一致) の推移を図6に、桁高方向中央で計測した鋼板表裏の平均値としての残留応力 σ_r (降伏応力 σ_y で無次元化) の推移を図7に、同図中に示すA~D点の鋼板表裏の残留応力 σ_r/σ_y と板厚欠損率 β の関係を図8に示す。

図6, 7より、供試体 Sp.2 では面外変位、残留応力とも、断面欠損を導入した桁端側の腹板で顕著に変化していることがわかる。この要因として、図8(a)のA点で示されているように、桁端側腹板には当初から残留応力の板曲げ成分が生じており、断面欠損の進行過程でそれが解放されることによって板曲げ変形が生じたことが考えられる。また、図7(b)に示すように、断

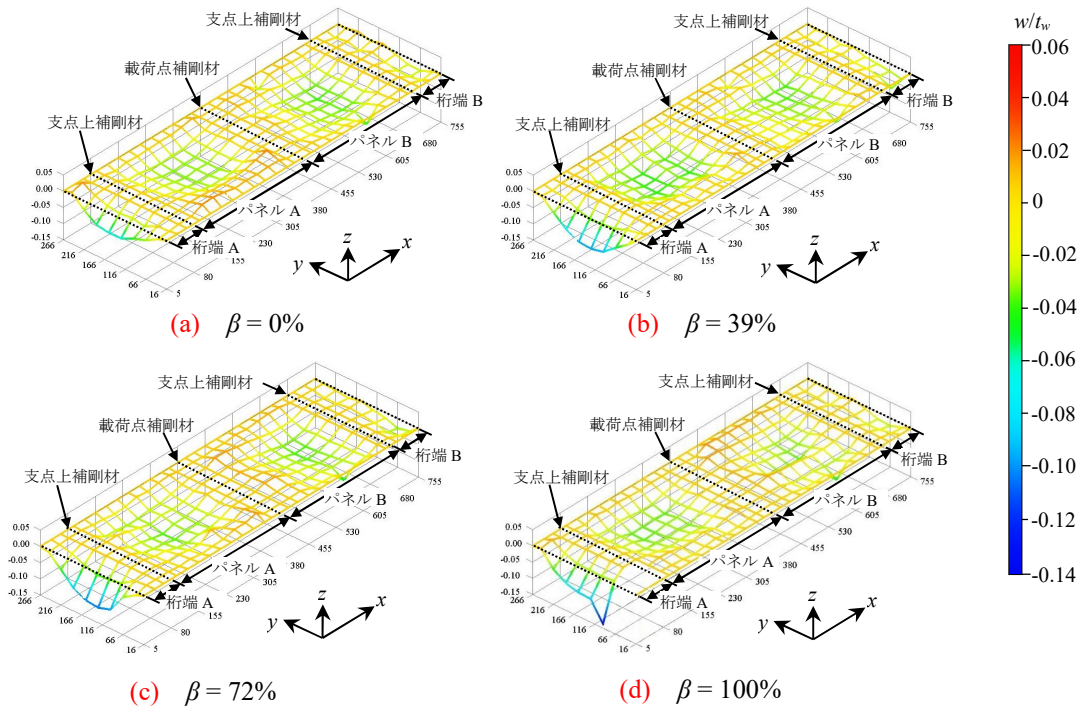


図6 面外変位の推移 (供試体 Sp.2 の腹板)

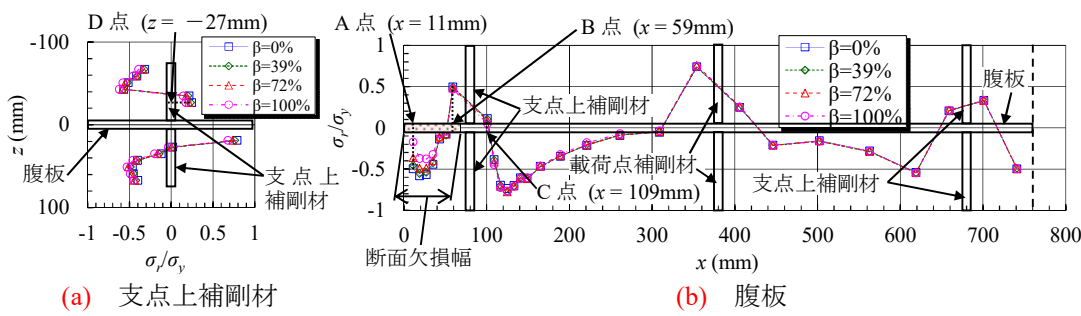


図7 残留応力分布の推移 (供試体 Sp.2)

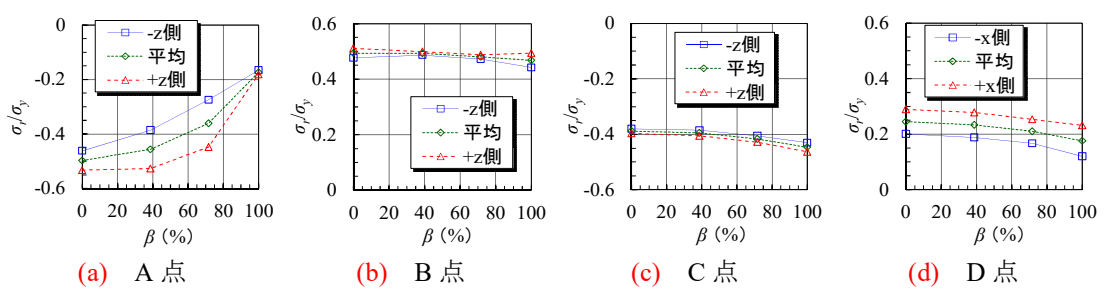


図8 残留応力と板厚欠損率の関係 (供試体 Sp.2 の計測結果)

面欠損を導入した桁端側腹板の残留応力がほぼ圧縮であったため、断面欠損部を押し広げるように桁高方向の力が解放力として作用し、腹板面内には面内モーメントをもたらし、これにより、断面欠損の進行につれて B~D 点の残留応力が全体的に圧縮側に推移したものと考えられる。

図9は図5に示した有限要素モデルを用いた解析から得られた、桁高方向中央における残留応力の桁高方向成分の推移を板厚欠損率 $\beta(\%)$ ごとに示しているが、断面欠損導入前に同部に分布している圧縮残留応力が、断面欠損過程で解放されて引張側に推移する様子が認められる。

図10は同解析において、 $\beta = 58\%$ 時の桁高方向応力 σ_y のコンターを变形 (変位を200倍して表示) とともに示しているが、鋼板の片面側から断面欠損を導入すると解放力が偏心するため、支点上補剛材には初期たわみを増大するように、顕著な面外板曲げ変形が生じており、断面欠損後の残存強度解析においてこの影響を無視すると、危険側の強度評価につながる懸念される。

本研究では、同一の供試体を用いて断面欠損過程の残留応力や変形を把握したが、既往の研究ではこのような計測結果は報告されていないため、貴重な成果が得られたと考えている。し

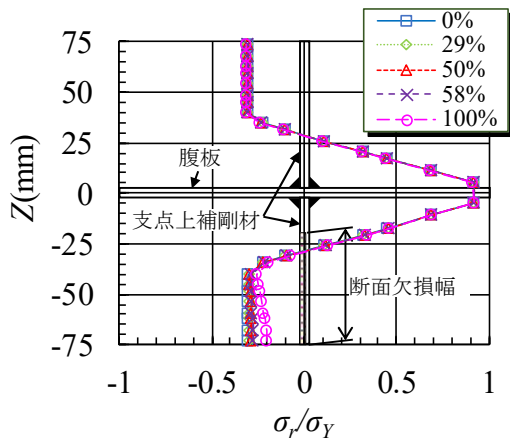


図9 支点上補剛材の残留応力分布の推移 (解析結果)

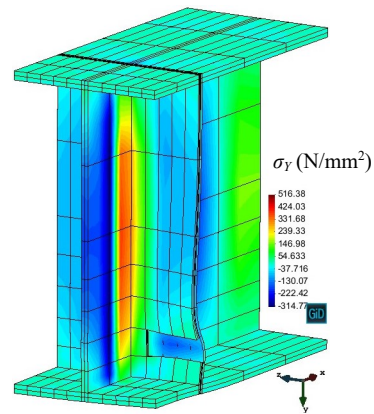


図10 板厚欠損率 $\beta = 58\%$ における桁高方向応力分布と変形 (解析結果)

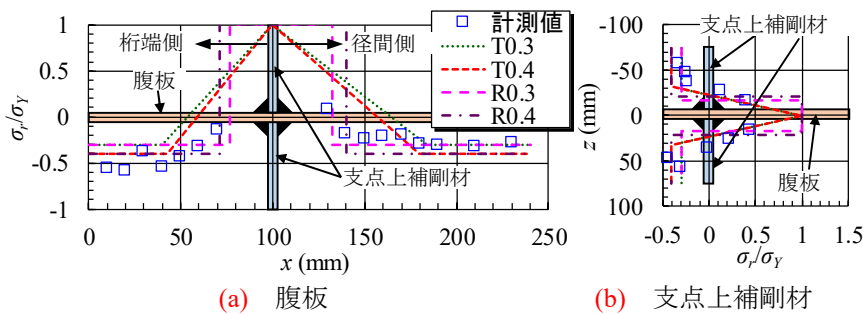


図11 残留応力分布 (供試体 RS の計測結果)

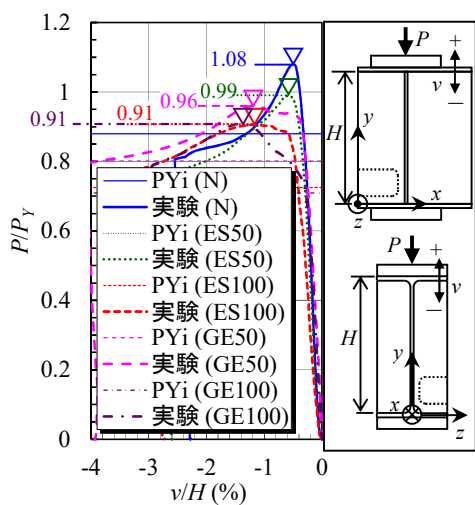


図12 圧縮力と桁高方向変位の関係

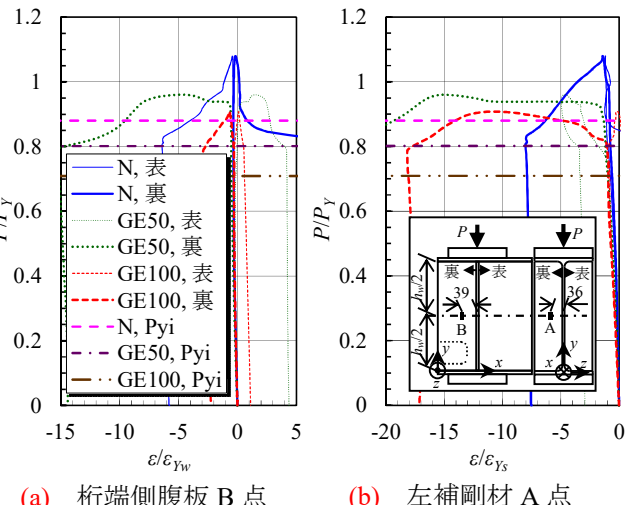


図13 圧縮力と桁高方向のひずみの関係

かし、供試体数が限られており、実験結果の信頼性を高めるためには、この種の実験を増やしてデータを蓄積する必要があると考えている。また、本実験では必ずしも境界条件が明確でなく、実橋では少なくとも死荷重の作用下で断面欠損が進行する点で本実験とは条件が異なるため、これらの影響についても、今後解析等によって明確にする必要があると考える。

(2) 断面欠損を持つ圧延桁端支点部の終局挙動と残存強度

供試体 RS を用いて実施した残留応力計測結果を残留応力分布モデルと比較して図 11 に示す。同図中の残留応力 σ_r は降伏応力 σ_Y で無次元化して表示している。凡例の T0.3, T0.4 は、それぞれ $0.3\sigma_Y$, $0.4\sigma_Y$ の一定圧縮残留応力分布域を設け、支点上補剛材と腹板との溶接部の最大引張残留応力が σ_Y となるように線形変化させた自己平衡型の残留応力分布モデル、R0.3, R0.4 は、それぞれ $0.3\sigma_Y$, $0.4\sigma_Y$ の一定圧縮残留応力分布域、溶接部では σ_Y の一定引張残留応力分布域を設けた自己平衡型の残留応力分布モデルである。これより、腹板と支点上補剛材の交点位置では残留応力が計測出来ていないが、桁端側腹板は R0.4、径間側腹板は R0.3、支点上補剛材は T0.3 と比較的良好に適合しており、载荷実験に用いた供試体の桁高方向にも、一般的な溶接鋼構造物と同様の残留応力が分布していると考えられる。

供試体 N, ES50, ES100, GE50 と GE100 を用いて実施した実験結果として, 累加降伏軸力 P_Y で無次元化した圧縮力 P と桁高 H で無次元化した桁高方向変位 v の関係を 図 12 に示す. 同図において, v は上フランジ下面のソールプレート四隅の位置で計測した平均値であり, P_Y は道路橋示方書^②の支点上補剛材の設計に用いられる腹板の有効断面積にその降伏応力を乗じて得られる降伏軸力と, 支点上補剛材の断面積と降伏応力を乗じて得られる降伏軸力の和である. また, 同図中には, 腹板の有効断面と支点上補剛材の断面からなる十字型断面から断面欠損分を控除した断面積に腹板よりも小さい支点上補剛材の降伏応力を乗じて求められる初期降伏軸力 P_{Yi} を合わせて示した. これより, 最大荷重は板厚欠損率の増加につれて低下し, 最大荷重時の変位も板厚欠損率とともに増加していることがわかる. これは, 断面欠損部近傍で生じた塑性変形の影響によるものと考えられる. しかし, いずれのケースも最大荷重は初期降伏軸力を上回っており, 初期降伏軸力を用いて安全側に強度が評価できる. また, いずれの供試体の変位も初期降伏軸力到達後に急増していることから, 本実験で導入した断面欠損量の範囲では, 残存強度は降伏強度で決まっており, 終局強度に及ぼす残留応力や初期たわみの影響は小さいと考えられる.

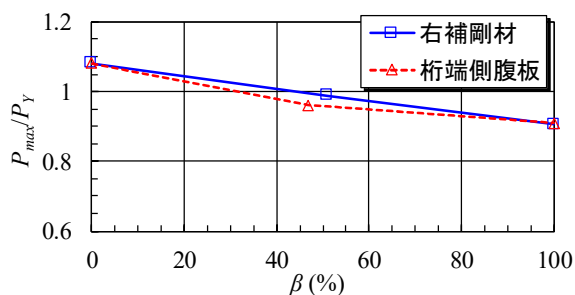


図 14 最大荷重と板厚欠損率の関係

桁端側腹板 B 点と左補剛材 A 点について, 圧縮力 P と桁高方向中央部の桁高方向ひずみ ε の関係を 図 13 に示す. ただし, P は累加降伏軸力 P_Y で, ε はそれぞれ腹板と支点上補剛材の降伏ひずみ ε_{Yw} , ε_{Ys} で無次元化している. これより, 供試体 GE50 の A, B 点, 供試体 GE100 の A 点は, 初期降伏軸力到達後に塑性ひずみが急増して最大荷重に到達している. 前者は桁端側腹板の板厚が概ね 50% に減少しているため, 左補剛材や支点上補剛材の圧縮力の負担が大きくなったことが要因であり, 後者は桁端側腹板の断面積が概ね 0 であるため, 圧縮力は桁端側腹板では殆ど伝達されず, 左補剛材などで分担されていることによるものと考えられる.

図 14 は, 右補剛材下部に断面欠損を有する場合 (供試体 ES50, ES100) と桁端側腹板下部に断面欠損を有する場合 (供試体 GE50, GE100) について, 累加降伏軸力 P_Y で無次元化した最大荷重 P_{max} と板厚欠損率 β の関係を断面欠損のない場合 (供試体 N) と比較して示したものである. これより, β の増加につれて最大荷重は直線的に低下しており, このことから, 本実験で導入した断面欠損量の範囲では, 断面欠損を持つ圧延桁端の残存強度は降伏強度によって支配されると考えられる.

<引用文献>

- ① 玉越隆史, 中洲啓太, 石尾真理, 武田達也, 水津紀陽: 鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.294, 2006.
- ② 一般社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 三好 崇夫, 河上 晃輔, 三木 健弘: 支点上補剛材下部に断面欠損をもつ圧延桁端の圧縮実験, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 26 巻, 2018, pp.478-485
- ② 中谷 佳菜代, 三好 崇夫: 圧延桁支点上補剛材の断面欠損過程における変形と残留応力再配分, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 26 巻, 2018, pp.470-477
- ③ 三好 崇夫, 河島 央樹, 久松 稜弥: 圧延桁端の断面欠損過程における変形と残留応力再分配挙動, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 25 巻, 2017, pp.389-396

[学会発表] (計 3 件)

- ① 中谷 佳菜代, 三好 崇夫: 圧延桁支点上補剛材の断面欠損過程における変形と残留応力再分配挙動, 土木学会全国大会 第 73 回年次学術講演会, I-049, 2018, pp.97-98
- ② 三好 崇夫, 河上 晃輔, 三木 健弘: 支点上補剛材下部に断面欠損をもつ圧延桁端の圧縮強度, 土木学会全国大会 第 73 回年次学術講演会, I-048, 2018, pp.95-96
- ③ 三好 崇夫, 河島 央樹, 久松 稜弥: 圧延桁端の断面欠損過程における変形と残留応力再分配に関する実験的研究, 土木学会全国大会 第 72 回年次学術講演会, I-002, 2017, pp.3-4