一般財団法人新潟県建設技術センター

平成28年度研究助成報告書

# 橋梁定期点検を活用した劣化鋼橋の 構造性能評価に関する事業

平成 29 年 3 月

研究代表者

長岡技術科学大学 宮下 剛

# 1. はじめに

近年,鋼I桁橋の桁端部の下端部(以下,桁端下端部と略す)に著しい腐食損傷が発生した例が多く報告されている<sup>1),2)</sup>.この腐食損傷によって耐力が低下する傾向が,実験や解析により検討が進められ,徐々に解明されてきている<sup>3)-20)</sup>.さらに,検討結果を利用して,腐食損傷を有する桁端部の終局耐力を評価する式についての研究<sup>3),4),6),7),11),12),20)もある. これまで明らかとなった腐食損傷を有する桁端部の耐力の特徴として,腐食損傷することで健全時から耐力低下は発生するが,欠損位置や範囲の大きさによっては,終局耐力が大きく低下しない場合があるという点が挙げられる.</sup>

しかしながら、点検や補修設計に携わる技術者は、腐食による桁端部の断面欠損時の終局 耐力を把握しなくても、これまでの実績をもとに定性的に対策の必要性の有無を判断して いることが多い.また、軽微な板厚の減少や腐食の範囲が狭い場合でも、予防保全の観点か ら対策を施している場合がある.

そこで、本研究では、これまで得られた腐食損傷を有する鋼I桁端部の耐力に関する検討 成果を活用して、現場の情報や構造諸元から対策の要否を判断できる資料を作成するため に、これまでに実施されている腐食によって断面欠損が生じた桁端部の解析・実験データを 整理し、荷重載荷条件ごとに腐食による桁端部の終局耐力への影響図(以下、腐食影響図と する)を作成する.

#### 2. 腐食影響図

#### (1)研究成果の整理方法

腐食影響図を作成するにあたって用いた既往研究の実験や解析では,桁端部の腐食損傷 を設定して終局耐力すなわち最大荷重を求めている.ここで示す終局耐力は,支点部耐力と せん断耐力を考えており,支点部耐力は支点上補剛材とウェブの十字柱の耐力とし,せん断 耐力は主として支点上補剛材に隣接している支間中央側のウェブの耐力としている.

ここでは、損傷時の終局耐力  $P_u$ と損傷時の降伏耐力  $P_y$ (有効断面積を基に計算した設計 基準耐力)の関係および残存板厚 t との関係を検討する.対象とする研究成果では、現場の 腐食形態を踏まえた代表的な腐食損傷モデル、個々の実際の腐食桁を基に設定した腐食損 傷モデル、最も大きい腐食損傷モデルなどが設定されている.そこで、腐食影響図の作成で は、解析や実験から得られた損傷時の終局耐力、損傷時の降伏耐力および残存板厚について は、同一モデルで比較し、それぞれの健全時の値( $P_{Hu}, P_{Hy}, t_0$ )に対する百分率で無次元化 して示す.この  $P_{Hu}$ は解析や実験から得られた最大荷重を示す.

腐食影響図では,終局耐力を縦軸にとり,降伏耐力,残存板厚を横軸にとる.このため, 右に行くほど,腐食による断面減少が大きい図となる.また,損傷モデルの欠損高さ,欠損 幅,腐食形態についても検討できるように,欠損高さ率(h<sub>D</sub>:欠損高/H:桁高),欠損幅率 (w<sub>D</sub>:欠損幅/W:パネル幅),腐食形態で損傷モデルを分類し,欠損高さ率については色で, 欠損幅率は記号の大きさ,腐食形態は記号の種類で識別した記号をプロットして各試験結 果を影響図にまとめて示す.

用いた研究成果の載荷方法については、中央径間載荷と支点直上載荷の二種類があり、前 者は桁の支点部の耐力、後者は支点部の柱としての耐力である.両者の意味合いは異なるこ とから、それぞれ別の腐食影響図を作成する.以下に、各パラメータの詳細な説明を示す.

## a) 降伏耐力の低下率

*P*, は残存断面積と材料の降伏点を掛け合わせることで、構造諸元から設定できる降伏耐力である. *P*,/*P*<sub>H</sub>, は健全時に対する損傷時の降伏耐力の低下率を示す. 損傷時の降伏耐力は, 損傷を考慮した有効断面積(残存断面積)を用いて算出式(1)を用いて算出する.

この残存断面積は,現場で計測した残存板厚と残存幅を用いて算出する.便宜上,残存板 厚や残存幅は,安全側の最小値を適用するが,局部的に完全欠損している場合は,その範囲 を計測した結果の断面積を用いる.

$$P_{y} = \sigma_{yw} A_{ew} + \sigma_{ys} A_{es} \tag{1}$$

*P*<sub>y</sub> 構造諸元から設定する降伏耐力

*σ<sub>yw</sub>* ウェブの降伏点の公称値 (N/mm<sup>2</sup>)

σ<sub>vs</sub> 支点上補剛材の降伏点の公称値(N/mm<sup>2</sup>)

*A*<sub>ew</sub> ウェブの有効断面積(mm<sup>2</sup>) ※有効幅は 24*t*<sub>w</sub>(*t*<sub>w</sub>: ウェブ板厚)

Aes 支点上補剛材の有効断面積 (mm<sup>2</sup>)

ウェブと支点上補剛材から成る十字柱断面における各々の突出板は,文献 21)では,その 鋼種に応じた応力-変位で挙動していることが示されている.また,文献 14)でも同様のこ とが示されている.これらの結果より,降伏耐力の算出式は,十字柱におけるウェブの有効 断面積と降伏応力の積と支点上補剛材の有効断面積と降伏応力の積を足し合わせた累加強 度で算出することにした.

腐食損傷を伴う対象部の終局耐力は降伏域の広がり,局部座屈,柱の座屈,ウェブのせん 断座屈など複数の要因が関係して決定される.ここで用いる基準耐荷力式は柱としてモデ ル化して用いられる有効断面積を用いられている.しかしながら,支点上補剛材は降伏点ま で局部座屈を発生させないように,幅厚比(b/t)が決められることを考えると,ほぼソール プレート内にある対象断面の各部材の全降伏耐力を足しあわせて累加強度で局部座屈の影 響も概略は把握できると考えた.式(1)を用いた有効断面積の計算は,道路橋示方書<sup>22)</sup>の荷 重集中点の補剛材の考え方に準拠し,支点上補剛材については全断面積とした上で,ウェブ は有効幅を支点上補剛材取付部からウェブ板厚 tw の 24 倍とする.

# b)残存板厚率

健全時の板厚に対する欠損の割合を残存板厚率とする(図-1). Khurram らは,損傷跡の 違いによる影響<sup>11)</sup>(図-1(a))と減肉方法の違いによる影響<sup>20)</sup>(図-1(b))を検討した.図-1の□で囲んだケースが異なる2ケースと比較して終局耐力の低下率は最大2.2%程度大き くなる傾向があったため,損傷跡の違いや減肉方法の違いは区別せずに同じ残存板厚率と して取り扱うこととした.残存板厚は現場計測し,便宜上,安全側の最小板厚を適用する. また,ウェブと支点上補剛材で残存板厚率が異なる場合は,残存板厚率が小さい方を採用し た.



c) 欠損高さ率

損高さ率は,桁高に対する損傷高の割合を示す.本研究で提案する腐食影響図では,割合の程度は,図-2に示す算出例のように色で表現する.5%未満を●,5%~10%未満を●,10% ~20%未満を●,20%~40%未満を●,40%以上を●で表す.

欠損高の分類では、実際に現場で多く見受けられる微小なケースとして 5 %未満を設定 し、まれに見受けられる 100 mm 以下の欠損高を対象に 5 % ~ 10 % 未満とした. さらに、文 献 13)では、10 %、20 %、40 % の解析検討をしていることから、その分類を利用して、10 % ~ 20 % 未満、20 % ~ 40 % 未満、40 % 以上と設定した.



図-2 欠損高さ率の算出例

# d) 欠損幅率

欠損幅率は、1パネルの幅に対する、欠損幅の割合を示す.このパネルは、支点上補剛材 がウェブに取付く交差部から1パネル目を示す.割合の程度は、図-3をもとに形状の大きさ で表現する.30%未満を4pt(例:o),30%~50%未満を6pt(例:o),50%~100%未満を 8pt(例:o),100%を10pt(例:o)とした. 欠損幅率の分類では、ウェブに着目し、主としてソールプレート内側相当の欠損幅を想定して 30%未満とし、ソールプレート外側まで広がった欠損幅を 30%~50%未満とした. さらに、全て欠損した場合を 100%とし、それ以外の欠損幅を 50%~100%未満とした.



図-3 欠損幅率の算出例 ( \_\_\_ は1パネルを示す)



表-1 腐食形態の設定(※印は実験)

# e)腐食形態

腐食形態は,実験・解析で実施された表-1 に示す支点上補剛材およびウェブが腐食した 全パターン(10パターン)を設定し,腐食形態を表内に示す記号で表現する.ここで,複数 の部材が欠損している場合は塗りつぶした記号を,一部材が欠損している場合は塗りつぶ さない記号を用いた.

## (2) 腐食影響図の適用範囲 (データの収集条件)

腐食影響図の適用範囲が判断できるように,データ収集ならびに整理の考え方を以下に 述べる.

# a) 下フランジの腐食損傷

文献 10)では,下フランジの残存板厚率を 60 %程度減少させて解析した結果,最大荷重の 低下率は最大でも 7%程度の低下率に留まっていた.これらの結果を踏まえて,下フランジ の損傷は,一部の孔食による局部腐食,または,30%以下の残存板厚率の全面腐食に留まっ ている程度を対象とする.

# b) 径間側ウェブの腐食形態が三角形の場合

径間側ウェブの腐食形態が三角形をモデルとした文献 13)では,その欠損幅を2倍に拡大 させて解析した結果,最大荷重の低下率は最大でも5%程度の低下率に留まっていた.また, 文献 17)では,径間側ウェブの腐食形態が三角形で,せん断耐力に着目して解析した結果, 健全時の最大荷重からほとんど低下していなかった.これらの結果より,径間側ウェブの腐 食形態は,形態を多少変更しても評価に与える影響は小さいと考えた.以上より,三角形の 腐食形態を便宜上,図-4 に示すような三角形の各頂点を最大値とする長方形の形状□とし て,欠損高と欠損幅を設定する.



#### c)腐食影響図に用いたデータの対象モデルの条件

極力多くのデータを収集するとともに、特殊な条件あるいは材料の違いなどで終局耐力 と腐食損傷との関係を把握できないと考えられるため、この二つの視点から以下の条件で データを収集した.

- ・原則として軟鋼で構成された構造を対象とする.
- ・載荷荷重は鉛直荷重を対象とする.
- ・実験と解析の双方の研究を対象とする.
- ・全体モデルと部分モデルの双方を対象とする.
- ・モデルはシェル要素でもソリッドでも収集する.
- ・付加曲げモーメントを考慮している場合も収集する.
- ・初期たわみ、残留応力の有無に関係なく収集する.

- ・支承モデルは、線支承、BP支承、ゴム支承など全てを対象とする.
- ・補強条件:当て板補強を取り付けることで終局耐力が増大するため,補強がない場合を想 定する.
- ・支承部の補剛材は支点上補剛材1本の構造を対象とする.

## (3) 腐食影響図の作成

文献 6)~20)にある実験結果と解析結果の終局耐力を用いて、腐食損傷をした場合の終局 耐力と基本耐力との関係を図-5に、終局耐力と残存板厚との関係を図-6に示す.図-5、図 -6 とも、(a)には中央径間載荷のデータを用いた図を、(b)には支点上載荷のデータを用い た図を示す.

これらの図中には、様々なモデルが混在しているが、欠損ケース毎に分析してそれぞれの 傾向を示すとともに、適用できる範囲を示すことで、腐食影響図に示される下限値や低下率 を示すことが可能と考えた、欠損ケースごとに耐力低下率の下限値のラインを示す.この下 限値は、収集データの下限値を示す.支点部耐力については青線で、せん断耐力については 赤色で示す.

図-5(a)と図-5(b)では,終局耐力の低下率に対して降伏耐力の低下率が大きいケースを 抽出し,低下率が大きい点と健全時の終局耐力の点を直線で結んでいる.文献 8),11),14), 20)の解析結果では,欠損ケースの終局耐力時には,支点上補剛材などの支点部の部材が座 屈していた.支点部の部材が大きく変形した時の耐力が支点部耐力と考えられることから, 桁端部の終局耐力と支点部の降伏耐力とは関係性がある.以上より,構造諸元から算出され る降伏耐力の低下率をパラメータとする腐食影響図においても,下限値ラインを直線で表 現する.

図-6(a)と図-6(b)では,残存板厚率が0%の完全欠損時の点と健全時の終局耐力の点を直線で結んでいる.なお,残存板厚率が0%のケースがない場合には,終局耐力の低下率に対して残存板厚率が大きいケースを抽出し,残存板厚率が大きい点と健全時の終局耐力の点を直線で結んでいる.

健全な部材は軸方向圧縮応力が下フランジに作用することから、欠損ケースによっては 降伏耐力がゼロにならない場合がある.そこで、下限値ラインの終局耐力の最小値を以下の ように設定した.なお、下限値ラインの終局耐力の最小値は標準設計の範囲での最小値であ る.

まず, 表-2 に示すように, 文献 23)の平成 6 年度の標準設計の全構造諸元(206 ケース) および文献 24)の昭和 53 年度の標準設計の全構造諸元(281 ケース)を用いて, 欠損ケース ごとの降伏耐力の低下率 *P<sub>y</sub>* / *P<sub>Hy</sub>* の最大値と最小値を示し,構造諸元の違いによる降伏耐力 の低下率のばらつきを分析した.なお,平成 6 年度の標準設計は,合成げたから非合成げた への主桁構造の変更および設計自動車荷重の引き上げなどの設計基準の改訂に伴い,昭和



図-5 腐食影響図(その1)降伏耐力の低下率



図-6 腐食影響図(その2)残存板厚率

53 年度の標準設計より改定されたものであり、平成 6 年度の標準設計での支点上補剛材の 断面積が占める割合は柱としての全有効断面積に対して大きい傾向にある.この降伏耐力 の低下率は健全時の降伏耐力  $P_{Hy}$ に対する損傷時の降伏耐力  $P_y$ の割合を表す. **表**-2 の降伏 耐力の低下率  $P_y/P_{Hy}$ の最大値と最小値を比較すると、ウェブまたは支点上補剛材の板厚の 違いより、最大 25 %程度の差が現れていた.この**表**-2 の降伏耐力の低下率  $P_y/P_{Hy}$ の最小 値をもとに、各欠損ケースにおける降伏耐力の低下率の下限値を設定した.次に、降伏耐力 の低下率と終局耐力が比例関係にあると仮定し、**表**-2 の降伏耐力の低下率  $P_y/P_{Hy}$ の最小値 および載荷条件の違いも含めて最も終局耐力が低いケースをもとに、各欠損ケースの耐力 低下率の下限値ラインの終局耐力の最小値を設定した.さらに、降伏耐力の低下率に対して 終局耐力の低下率が大きい欠損ケースでは、下限値ラインの終局耐力の最小値を**表**-2 の降 伏耐力の最小値として補完した.腐食影響図の作成で用いたデータ数は、中央径間載荷では 404 個(残存板厚率をパラメータとする場合 319 個)、支点直上載荷では 110 個であり、支 点直上載荷の方が比較的欠損高が高いデータが集まっている.

表-2 損傷タイプ毎の降伏耐力低下率の分布

欠損ケース		$P_y \swarrow P_{Hy}$				
		最小	平均	分散		
(a)補剛材片側欠損(Δ)	0.76	0.67	0.70	0.02		
(b)補剛材両側欠損(◇, *)	0.52	0.33	0.40	0.04		
(c)ウェブ径間側欠損(○, □)	0.02	0.74	0.90	0.02		
(d)ウェブ桁端側欠損(□)	0.85	0.74	0.80	0.02		
(e)ウェブ両側欠損( 🖵 ,×)	0.67	0.48	0.60	0.04		
(f)ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損(▲)	0.50	0.50	0.50	0.00		
(g)ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損(▲)	0.33	0.24	0.30	0.02		
(h)ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損(◆)						
(i)ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損(●,	0.26	0.17	0.20	0.02		
+)						
(j)ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損(■)	0.00	0.00	0.00	0.00		

(a) 平成6年度 標準設計(各206 欠損ケース)

(b)	昭和 53	年度	標進設計	(各 281	欠損ケー	-ス)
· /	· H [ ] · • • •				> > +	

欠損ケース		$P_y \swarrow P_{Hy}$				
		最小	平均	分散		
(a)補剛材片側欠損(Δ)	0.78	0.66	0.72	0.03		
(b)補剛材両側欠損(◇, *)	0.57	0.33	0.45	0.05		
(c)ウェブ径間側欠損(○, □)	0.94	0.72	0.77	0.03		
(d)ウェブ桁端側欠損(□)	0.84					
(e)ウェブ両側欠損( 🗖 ,×)	0.68	0.43	0.55	0.05		
(f)ウェブ片側欠損+補剛材片側欠損(▲)	0.50	0.50	0.50	0.00		
(g)ウェブ両側欠損+補剛材片側欠損(▲)	0.34	0.22	0.28	0.02		
(h)ウェブ径間側欠損+補剛材両側欠損(◆)						
(i)ウェブ桁端側欠損+補剛材両側欠損(●,	0.28	0.16	0.22	0.03		
+)						
(j)ウェブ両側欠損+補剛材両側欠損(■)	0.00	0.00	0.00	0.00		

## 3. 腐食損傷を有する桁端部の終局耐力の分析

#### (1) 終局耐力低下の傾向分析

### a) 降伏耐力の低下率, 中央径間載荷 (図-5 (a))

降伏耐力の低下率に対する終局耐力の低下率が大きい場合は,(c)ウェブ径間側欠損ケース, (d)ウェブ桁端側欠損ケース,(e)ウェブ両側欠損ケースであり,ウェブの欠損幅が有効幅を越え てソールプレート幅よりも大きい場合である.これらのケースは,降伏耐力の低下率が大きいが, 健全時の終局耐力の43%程度で耐力低下は止まる.

その他のケースでは、終局耐力の低下率と降伏耐力の低下率の下限値がほぼ正比例の関係に あった.この下限値は、ウェブと支点上補剛材が複合的に損傷し、かつ、欠損高さ率が高いケー スが該当している.欠損高さ率が5%未満であれば、終局耐力の低下率に対する降伏耐力の低下 率が小さい.一方、せん断耐力は、赤色の下限値ラインが示すように欠損ケースによっては、降 伏耐力の低下率の50%程度となってから耐力が低下する場合がある.

#### b) 降伏耐力の低下率,支点直上載荷(図-5(b))

中央径間載荷よりも支点直上載荷の方が,降伏耐力の低下率に対する終局耐力の低下率が大きい. 欠損することで急激に耐力が低下しているケースは,橙色から赤色に多く分布しており, 欠損高さ率が10%以上欠損しているケースが多い.一方,欠損高さ率が小さい場合やウェブあるいは支点上補剛材などの部材が単独で損傷している場合は,降伏耐力の低下率が大きくても, 健全時の終局局力の45%程度が下限値である.

#### c)残存板厚率,中央径間載荷(図-6(a))

ウェブや支点上補剛材などの部材が単独で損傷している場合は,完全欠損(残存板厚率0%) の場合でも健全時の終局耐力の43%程度はある.ウェブと支点上補剛材が複合的に損傷し,欠 損高が10%未満の場合の下限値は,完全欠損時の終局耐力を0とした比例式に近似している. 完全欠損時でも耐力低下にばらつきが見られる.これは,腐食影響図が損傷の大きい一部材の残 存板厚率を捉えており,損傷が小さい部材の応力の再配分や欠損幅について考慮されていない からである.文献12)では,せん断耐力の低下率を検討しており,残存板厚率が50%以下となっ て初めて耐力が低下している.文献12)では,その理由を塑性拘束による影響であると示されている.

# d)残存板厚率,支点直上載荷(図-6(b))

ウェブの両側と支点上補剛材が複合的に欠損した場合の下限値は,完全欠損時の終局耐 力を0とした比例式に近似している.さらに,ウェブや支点上補剛材など,部材が単独で欠 損し,欠損高が10%以下の場合の下限値は,完全に欠損した場合でも健全時の45%程度の 終局耐力はある.

#### (2) 終局耐力分布の傾向

腐食影響図をもとに終局耐力の分布を分析する。各欠損ケースの終局耐力の低下率にはばら

つきが見られ,終局耐力の低下率が最も大きい下限値ラインは,欠損高さ率が大きいケースが該 当していた.一方で,欠損高さ率が小さい場合や欠損箇所がウェブ欠損のみなど腐食の範囲が狭 い場合には,耐力低下への影響が小さかった.

降伏耐力の低下率と終局耐力の低下率の関係について分析する.降伏耐力と終局耐力の低下 率の下限値が同程度となるケースは、中央径間載荷では支点上補剛材が単独に欠損しているケ ース、ウェブと支点上補剛材が複合的に欠損しているケースで見られ、支点直上載荷では補剛材 両側欠損ケースで見られた.これは、各欠損ケースが降伏耐力後から終局耐力に至るまで、軸方 向圧縮応力度が作用するウェブの範囲がほぼ一定の割合で拡大し、降伏耐力と終局耐力の低下 率が同程度だったと考えられる.一方で、終局耐力の低下率に対して降伏耐力の低下率が小さい ケースは、中央径間載荷ではウェブ欠損ケースに見られ、支点直上載荷では多くの欠損ケースで 見られた.この中央径間載荷のウェブ欠損ケースでは、降伏耐力後は板厚が薄いウェブが局部座 屈して、さらに支点上補剛材が座屈したために軸方向圧縮応力度が作用するウェブの範囲が拡 大せず、降伏耐力の低下率に対して終局耐力の低下率が大きい結果になったと考えられる.一方、 支点直上載荷における欠損ケースも降伏耐力後は軸方向圧縮応力度が作用するウェブの範囲が ソールプレート幅程度に限定され、終局耐力の低下率に対して降伏耐力の低下率が小さい結果 になったと考えられる.

残存板厚率と終局耐力の低下率の関係について分析する.中央径間載荷や支点直上載荷のい ずれの条件においても,残存板厚率と終局耐力の低下率の下限値は,概ね同じ程度の割合で減少 する比例関係にあったものの,残存板厚率に対して,終局耐力の低下率が大きいケースが若干見 られた.この残存板厚率に対して終局耐力の低下率が大きいケースは,支点上補剛材の残存板厚 率とウェブの残存板厚率が異なるケースである.

ウェブ桁端側欠損ケースにおいて,桁端側ウェブ部材が全欠損しているケースが,終局耐力の 低下率に対して降伏耐力の低下率が小さいので,桁端側のウェブ部材が完全に欠損することの 影響は大きいと考えられる.

#### 4. まとめ

本論では,既往の研究結果をもとに,終局耐力の低下率に対して構造諸元から設定できる 降伏耐力の低下率,残存板厚率,欠損高さ率,欠損幅率,および腐食形態によるパラメータ を抽出し,載荷条件別に欠損により腐食による桁端部の耐力への腐食影響図を作成し,既往 の研究結果の終局耐力の低下率を整理した.

また,腐食影響図をもとに,腐食形態別に耐力を分析した.その結果,一部材が完全欠損 した場合の終局耐力の下限値は,健全時の終局耐力の43%程度を有した.また,ウェブや支 点上補剛材が複合的に損傷した場合の終局耐力の低下率は,中央径間載荷では降伏耐力低 下率や残存板厚率に対して線形的な関係となった.

腐食影響図は、既往の文献のデータを基に作成しているために、腐食形態によってはデー

タ数が少ない場合や腐食形態がない場合がある.また,外挿によって下限値ラインを推定している欠損ケースや耐力をレベルにして推定している欠損ケースがある.不足していると考えられるデータを補い,下限値の設定を確認し,構造的な検討を行なうことで,より精度が高い腐食影響図に更新することが可能であると考えられる.

腐食の損傷程度によっては,道路橋示方書の許容応力度法による照査で,許容値を満足し ない場合がある.その場合,交通規制や応急補修の必要性を判断する状況があり,桁端部の 残存耐力の有無の検討が必要となる場合がある.損傷時の終局耐力と桁反力(設計反力)の 関係を示すことも一つの判断材料になると考える.そのために,健全時の終局耐力と構造諸 元から算出できる降伏耐力との関係について,より多くのデータを収集し,その関係性をよ り明確にする必要があると考えられる.

# 参考文献

- 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,国土交通省国土技術政策総合研究所, 2006.
- 王越隆史,横井芳輝,石尾真理:全国規模の鋼道路橋点検データに基づく鋼橋の劣化の 特徴,鋼構造論文集, Vol.21, No.82, 2014.
- 3) 野上邦栄,山沢哲也,小栗友紀,加藤美幸:腐食減厚に伴う合成 I 桁及び I 断面柱の残 存耐力評価に関する一考察,構造工学論文集 A, vol.47A, pp.93-102, 2001.
- V.T.Hung, 永澤洋, 佐々木栄一, 市川篤司, 名取暢: 腐食が原因で取り替えられた実鋼 橋支点部の載荷実験および解析, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.141-151, 2002.
- 5) 中山太士,木村元哉,石川敏之,松井繁之:ウェブ孔食をもつ鋼桁のせん断耐荷力:ウ ェブ孔食をもつ鋼桁のせん断耐荷力,構造工学論文集 A, Vol.52A, pp.49-56, 2006.
- 適田哲,佐々木栄一,狛裕幸,町田恵津子,紀平寛:局部的腐食を模擬した鋼桁端部の 圧縮強度に関する実験,鋼構造年次論文報告集,Vol.17,pp.731-738,2009.
- 7) 臼倉誠,金銅晃久,山口隆司,畠中彬,三ツ木幸子,橋本国太郎,杉浦邦征:鋼道路橋の腐食した桁端の耐力特性とその設計法に関する 2,3 の考察,構造工学論文集 A, Vol.56A, pp.722-732, 2010.
- 8) 臼倉誠,山口隆司,豊田雄介,三ツ木幸子,金銅晃久:鈑桁端部の支点上のウェブと補 剛材の下端腐食範囲の違いがその耐力特性に及ぼす影響,構造工学論文集 A, Vol.57A, pp.724-734, 2011.
- 9) 劉翠平,宮下剛,長井正嗣:端部パネルの局部腐食をもつI形断面桁のせん断耐力に関する考察,構造工学論文集A, Vol.57A, pp.715-723, 2011.
- 10) 東海構造研究グループ: 平成 24 年度活動報告集 第6回定期研究会 WG 成果報告, 2012
- 11) N. Khurram, E. Sasaki, H. Kihira, H. Katsuchi and H. Yamada: Analytical demonstrations to assess residual bearing capacities of steel plate girder ends with stiffeners damaged by corrosion,

Structure and Infrastructure Engineering, Vol.10, No.1, pp.69–79, 2012.

- 12) N. Khurram, E. Sasaki, H. Katsuchi and H. Yamada: Finite Element Investigation of Shear Capacity of Locally Corroded End Panel of Steel Plate Girder, *International Journal of Steel Structures*, Vol.13, No.4, pp.623-633, 2013.
- 山口栄輝,赤木利彰:腐食した鋼 I 桁の支点部耐力に関する考察,構造工学論文集 A, Vol.59A, pp.80-90, 2013.
- M. Usukura, T. Yamagushi, Y. Suzuki and Y. Mitsugi: Proc. of The thirteenth EAST ASIA-Pacific Conference on Structure Engineering and Construction, Sapporo, Japan, 2013.
- I. T. Kim, M. J. Lee, J. H. Ahn, S. Kainuma: Experimental evaluation of shear buckling behaviors and strength of locally corroded web, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.83, pp.75-89, 2013.
- 16) J. H. Ahn, I. T. Kim, S. Kainuma, M. J. Lee: Residual shear strength of steel plate girder due to web local corrosion, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.83, pp.198-212, 2013.
- 17) J. H. Ahn, S. Kainuma, I. T. Kim: Shear failure behaviors of a web panel with local corrosion depending on web boundary conditions, *Thin-Walled Structures*, Vol.73, pp.302-317, 2013.
- 18) 奥山雄介,宮下剛,若林大,小出宣夫,秀熊佑哉,堀本歴,長井正嗣:鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察,構造工学論文集 A, Vol.60A, pp.541-553, 2014.
- 19) 丹波寛夫,橋本国太郎,田中大介,杉浦邦征:腐食した鋼桁端部の当て板補修に関する 実験的検討,構造工学論文集 A, Vol.60A, pp.99-104, 2014.
- 20) N. Khurram, E. Sasaki, H. Katsuchi and H. Yamada: Experimental and Numerical Evaluation of Bearing Capacity of Steel Plate Girder Affected by End Panel Corrosion, *International Journal of Steel Structures*, Vol.14, No.3, pp.659-676, 2014, ERRATUM Vol. 15, No.1, pp.245, 2015.
- 金裕哲,田原英俊,中地映司,堀川浩甫:異種鋼材十字接合柱自由突出板の終局強度, 鋼構造論文集, Vol.8, No.30, pp.15-2, 2001.
- 22) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 2012.
- 23) 全日本建設技術協会:建設省制定 土木構造物標準設計第23巻, 1994.
- 24) 全日本建設技術協会:建設省制定 土木構造物標準設計第23巻, 1979.