

構造システム挙動を考慮した腐食損傷を有する

既設鋼鉄桁橋の健全度評価に関する解析的研究

ANALYTICAL STUDY ON SOUNDNESS EVALUATION OF EXISTING STEEL I-GIRDER BRIDGES WITH CORROSION DAMAGES CONSIDERING THE STRUCTURAL SYSTEM BEHAVIOR

橋梁工学分野 舟山 耕平

Bridge Engineering Kohei FUNAYAMA

本研究では桁端部または支間中央部に腐食を有する場合の鋼鉄桁橋の構造システム挙動を考慮した耐荷性能を検討するため、全橋 FEM 解析を実施した。主桁数、腐食位置、荷重配置（曲げおよびせん断）に着目し、設計荷重に対する構造システムの耐荷性能の比率を示した。また、橋梁を構成する構造要素が保持する、構造システムの耐荷性能に与える寄与度を検討し、一部の桁端部が腐食損傷する場合、端対傾構および床版は構造システムとしての耐荷性能にそれぞれ 10%寄与することを明らかにした。

This study performed the full-scale bridge analysis to examine load carrying capacity of steel I-girder bridges with corrosion at the end or span center of the girder considering the structural system behavior. The ratio of load carrying capacity of the structural system to the design load is indicated focusing on the number of girders, corrosion parts and load arrangement. Furthermore, in the case with corrosion at partial girder end, end cross frame and reinforced concrete deck contribute 10 % to the load carrying capacity as a structural system.

1. はじめに

多くの先進国において、既存インフラ構造物の維持管理が喫緊の課題である。我が国においても高度経済成長期に建設された膨大な数の道路橋の老朽化が問題となっている。老朽化した鋼橋における劣化の主な要因は腐食と疲労であり、上部構造の損傷が原因で架け替えられた損傷理由の内、腐食が半数以上を占めていることが報告されている。腐食損傷は、部材の断面欠損を生じ、耐荷力の低下を引き起こすことから、安全な橋梁供用のために、これらの残存耐荷力を適切に評価することは重要な課題である。

腐食した桁端部の残存耐荷力に着目した研究はこれまでも多く行われている。一方で、鋼鉄桁橋を含

む橋梁は、図-1 に示されるように、多数の構造要素より構成され、供用時には、荷重に対して相互に影響し合いながら、一つの構造系を成すように抵抗するが、これら構造システムの挙動は設計などにおいて、一般的に無視されることが多い。しかしながら、維持管理業務における、より合理的な既設橋梁の残存耐荷力や健全度の評価のためには、橋梁全体の挙動および構造システムの残存耐荷力の考慮が望まれる。

本研究では、桁端部および支間中央部に腐食劣化を有する構造システム挙動の解明を目的に、先行研究の四主桁橋梁に加え、三主桁、五主桁橋梁について検討対象を追加し、全橋 FEM 解析を実施した。さらに、橋梁を構成する構造要素が有する構造システムとしての耐荷性能や挙動への寄与度を明らかにする。

2. 桁端部に腐食劣化を有する場合の全橋 FEM 解析

2.1 対象橋梁および解析ケース

文献 3)では、鋼四主単純非合成 I 桁橋（図-2）を対象に、桁端部に腐食劣化を有する場合の橋梁システムの耐荷性能について検討されている。本研究では、橋



図-1 複数の構造部材で構成される鋼鉄桁橋

梁の幾何学形状の一つの主桁数に着目した。三主桁橋梁および五主桁橋梁の構造諸元は、四主桁橋梁を基本とし、モデリングを行うものとした。

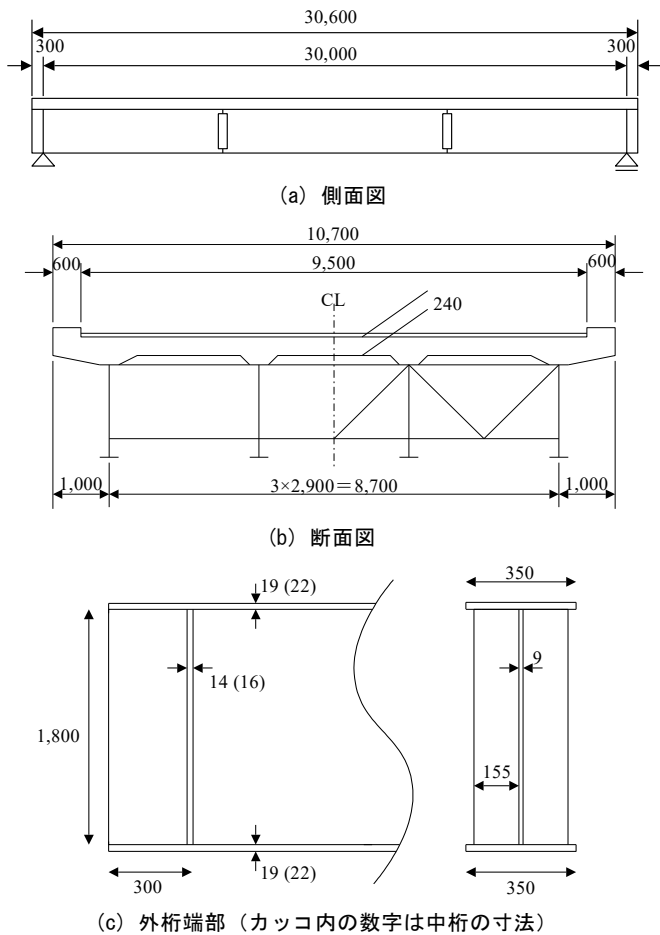


図-2 対象橋梁の一般図 (単位: mm)

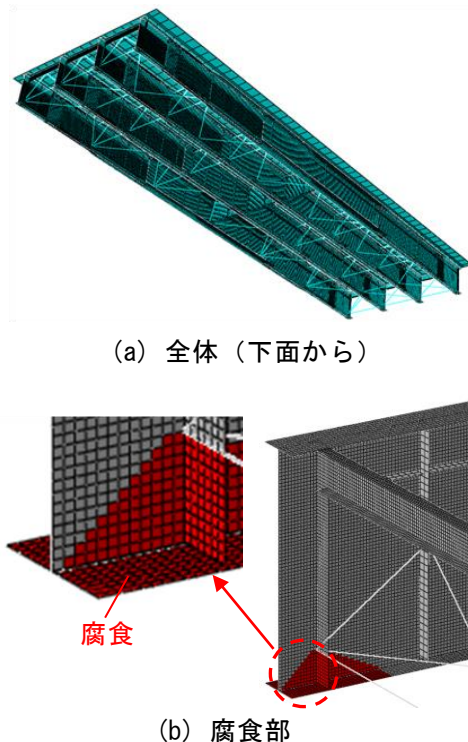


図-3 解析モデル例 四主桁橋梁

解析には、Abaqus/Standard ver2016⁴⁾を使用し、FEM解析を用いた、構造システムの耐荷性能に関する既往研究を参考に、床版および主桁、横桁、補剛材、端対傾構上弦材は4節点低減積分シェル要素で、対傾構および横構は梁要素で、ソールプレートは8節点ソリッド要素でそれぞれモデル化している。用いた材料構成則を表-1に示す。

支承条件は、健全状態では可動および固定とするが、桁端部に腐食が見られる橋梁では支承部でも腐食が見られ、ほとんどの場合において支承の機能が失われていることから、腐食状態では固定(並進および回転を固定)とした。支承条件は、ソールプレート下面に線状に与えた。想定する荷重は死荷重およびB活荷重(L荷重)であり、死荷重は上部構造の全重量を床版全面に等分荷重で、活荷重は各桁端に対して最も厳しくなるよう積重分配係数を算出し決定した。解析では、対象橋梁が設計荷重(死荷重+活荷重)に対して何倍程度の耐荷性能を有しているか調べるため、設計死活荷重を増分させる。このとき、設計荷重の増加量は荷重倍率 α を用いて表す。すなわち、死荷重を D 、活荷重を L とすると、載荷荷重は $\alpha(D+L)$ で表されることになる。

桁端部の腐食形状は、文献3)と同様に、下フランジおよび支点上補剛材は四角形分布を、ウェブは三角形分布(図-3(b))とし、減肉量は50%を本検討においても採用した。

また、本検討においては、初期たわみや残留応力等の初期不整は考慮しないものとして、主桁数が構造システム挙動に与える影響について基礎的な検討を行った。

解析ケースの一覧表を表-2に示す。解析ケース名のはじめは、主桁数を表記しており、次の健全時と損傷時をそれぞれI、Dと表記している。腐食損傷のケースでは、ケース名では腐食している桁端をDの後に○で表記している。例えば、G1桁端が腐食している場合はD-G1、G1桁端とG2桁端の両方が腐食している場合はD-G1G2と表記している。また、全桁端が腐食している場合はD-Allと表記している。活荷重の配置はIまたはD-○の後に_L-G1(G1桁端着目の場合)、_L-G2(G2桁端着目の場合)、_L-G3(G3桁端着目の場合)でそれぞれ表記している。

表-1 材料構成則

部材	材質	ヤング係数 E (Gpa)	降伏点 σ_y (MPa)	ひずみ硬化係数 E' (MPa)
主桁ウェブおよび上下フランジ	SM490Y	200	355	$E/100$
ソールプレート	SS400	200		弾性体
その他の鋼部材	SS400	200	235	$E/100$
RC床版	コンクリート	25		弾性体

表-2 解析ケース一覧 桁端部着目

解析ケース	腐食損傷	腐食桁	活荷重	荷重配置	載荷方法
3G_I_L-G1/G2	Initial	-	B活荷重	G1 or G2	$\alpha(D+L)$
3G_D-G1_L-G1/G2	50%	G1 End			
3G_D-G2_L-G1/G2		G2 End			
3G_D-G1G2_L-G1/G2		G1G2 End			
3G_D-ALL_L-G1/G2		ALL Girder End			
4G_I_L-G1/G2		Initial			
4G_D-G1_L-G1/G2	50%	G1 End			
4G_D-G2_L-G1/G2		G2 End			
4G_D-G1G2_L-G1/G2		G1G2 End			
4G_D-ALL_L-G1/G2		ALL Girder End			
5G_I_L-G1/G2/G3		Initial			
5G_D-G1_L-G1/G2/G3	50%	G1 End			
5G_D-G2_L-G1/G2/G3		G2 End			
5G_D-G3_L-G1/G2/G3		G3 End			
5G_D-G1G2_L-G1/G2/G3		G1G2 End			
5G_D-G2G3_L-G1/G2/G3		G2G3 End			
5G_D-G1G2G3_L-G1/G2/G3		G1G2G3 End			
5G_D-ALL_L-G1/G2/G3		ALL Girder End			

2.2 解析結果

各解析ケースの最大荷重倍率 α_{max} および $\alpha_{max}/\gamma(1.7)$ の値を図-4 に示す。なお、 α_{max}/γ が 1.0 を下回る場合、グラフは赤塗りに、上回る場合は灰色としている。健全時 (I) のケースに着目すると、主桁数および活荷重配置による有意な差はなく、それぞれの設計死活荷重に対して3倍以上の耐荷性能を保持していることが確認された。一方で、活荷重配置および腐食位置が外桁である場合に着目すると、健全時の最大耐力に対する割合は、三主桁：53.3%、四主桁橋梁：57.1%、五主桁橋梁：57.5%であり、主桁数の増加に伴い比率も高くなる傾向が確認された。また、活荷重配置および腐食位置が中桁のある場合は、三主桁：47.3%、五主桁：67.6%であり、同様の傾向が確認された。この時の三主桁橋梁の α_{max}/γ 値は 1.0 を下回り、外桁が損傷する場合においてもその値は、1.0 から 1.1 の範囲であり、耐荷性能が大きく低下することが確認された。

図-5 には、荷重配置および腐食位置が外桁 (G1 桁) である場合における三、五主桁橋梁の最大荷重倍率時

のミーゼス応力コンターを、図-6 に固定側の各支点反力/設計耐力と桁端部の鉛直変位関係を示す。G1, G2 桁は、双方で有意な差異は確認されないものの、G3 桁では、五主桁橋梁の場合の方が桁端部の降伏領域や支点反力は大きく、三主桁橋梁のそれと比較して構造システムとして有効に機能しているものと考えられる。

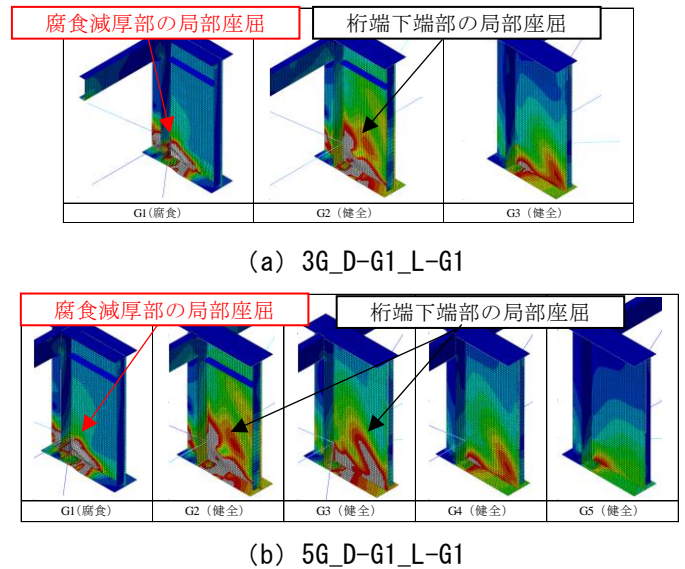
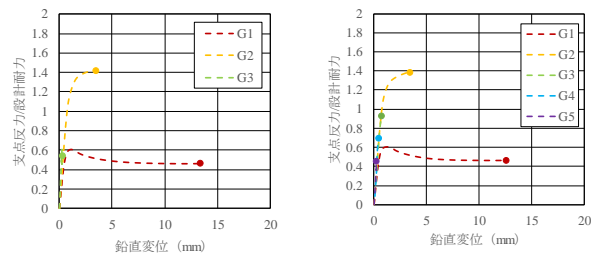


図-5 最大荷重倍率時のミーゼス応力コンター



(a) 3G_D-G1_L-G1

(b) 5G_D-G1_L-G1

図-6 支点反力/設計耐力-鉛直変位関係

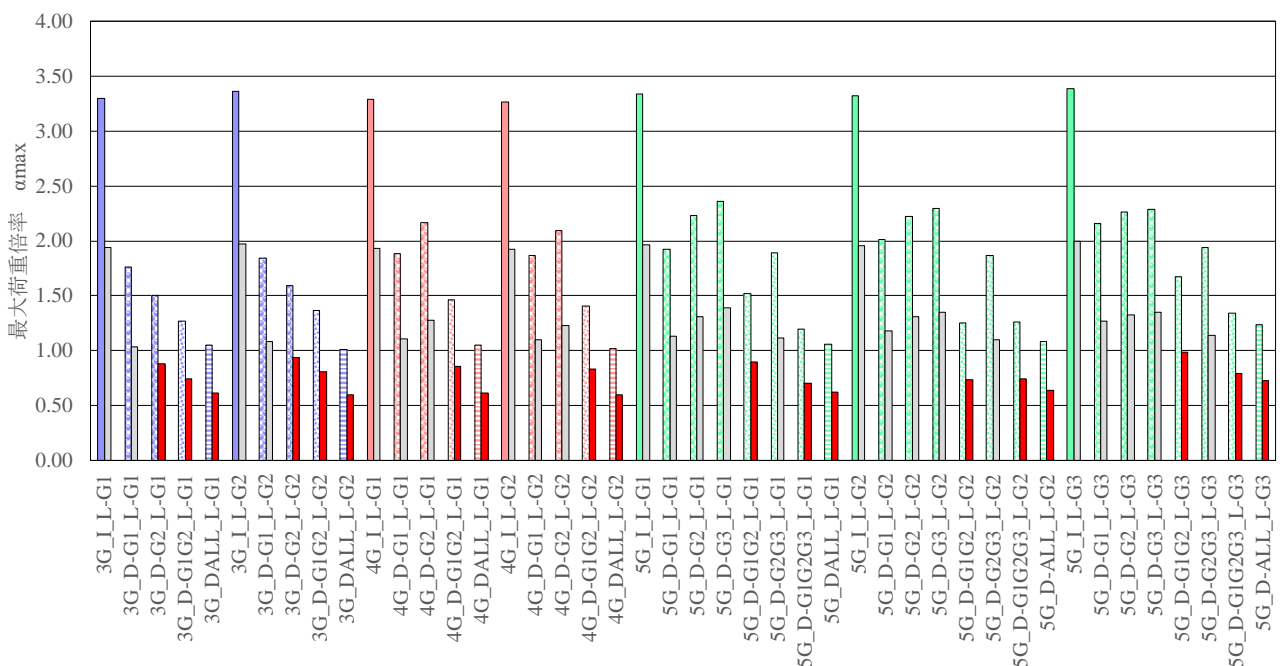


図-4 最大荷重倍率一覧 α_{max} および α_{max}/γ 桁端部着目

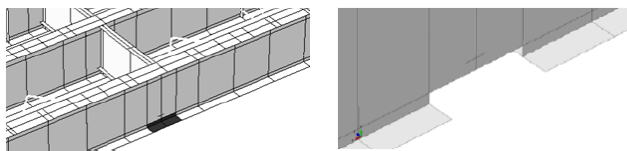
3. 支間中央部に腐食劣化を有する場合の全橋 FEM 解析

3.1 解析モデルおよび解析ケース

鋼 I 桁橋の支間部に発生する腐食は、桁端部の腐食に比べて発生する割合は少ないものの、桁橋の主たる抵抗機構である曲げ強度に大きく影響を及ぼすことから、橋梁システムとしての耐荷性能に与える影響は大きく、無視できない損傷のひとつである。そこで、主桁の支間中央部の下フランジに腐食が生じた場合の橋梁システムとしての鉛直方向荷重作用時の耐荷性能について、全橋 FEM モデルを用いて検討した。

解析モデルは、2 章に示す全橋 FEM モデルを用いた。支間中央部の腐食のモデル化は、図-7 に示すように 50%の減厚と 100%の減厚（完全欠損）の 2 パターンとした。腐食範囲は、橋軸方向に 1,000mm、高さ方向に 100mm とし、腐食損傷部材は、主桁下フランジおよびウェブである。また、腐食損傷を想定する桁は、比較的発生する割合の高い外桁一つとした。

解析ケース一覧を表-3 に示す。主桁の曲げ挙動は、床版と鋼桁の合成条件によって、その抵抗機構が異なる。また、スラブアンカーで結合した RC 床版を有する非合成桁橋では、床版と鋼桁の合成挙動を示すことが知られており、この合成効果の影響を検討するため、床版と鋼桁の結合条件は、完全合成 (Rigid-Composite)、



(a) 腐食位置 (b) 100%欠損
図-7 腐食部のモデル化

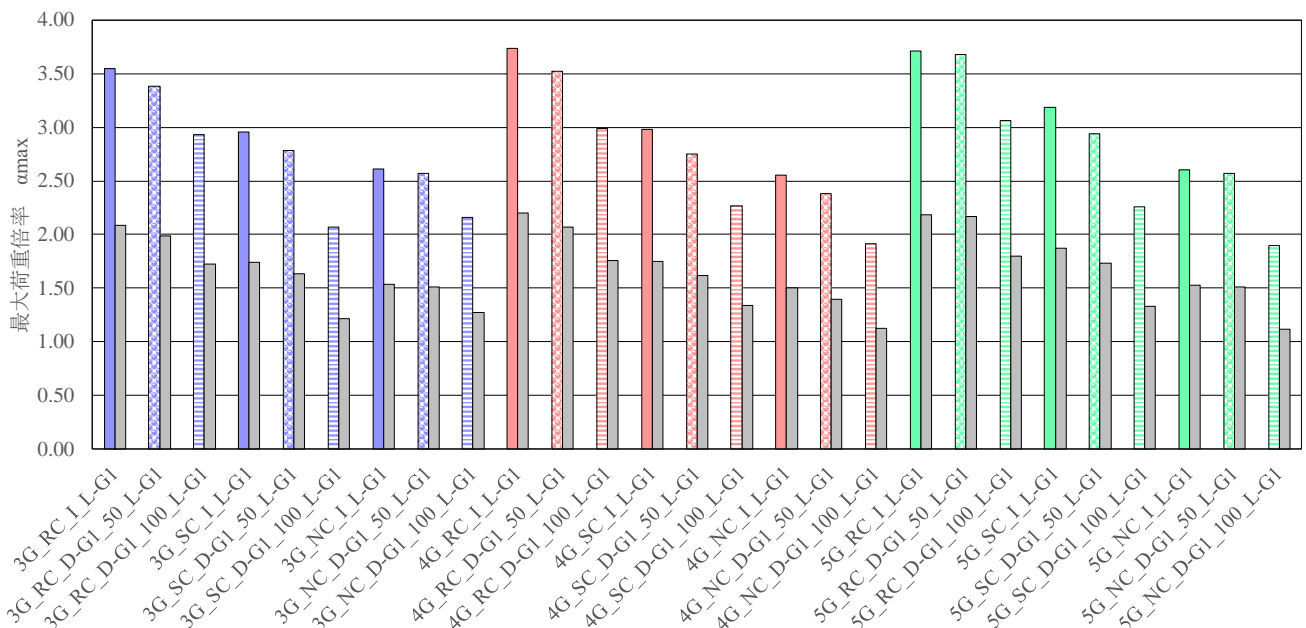


図-8 最大荷重倍率一覧 α_{max} および α_{max}/γ 支間中央部着目

表-3 解析ケース一覧 支間中央部着目

解析ケース	腐食損傷	腐食桁	損傷度	合成条件	荷重配置	載荷方法
3G_RC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC	G1 Center	$\alpha(D+L)$
3G_RC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
3G_RC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
3G_SC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
3G_SC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
3G_SC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
3G_NC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
3G_NC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
3G_NC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
4G_RC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
4G_RC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
4G_RC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
4G_SC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
4G_SC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
4G_SC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
4G_NC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
4G_NC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
4G_NC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
5G_RC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
5G_RC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
5G_RC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
5G_SC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
5G_SC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
5G_SC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		
5G_NC_I_L-G1	Intact	-	0%	RC		
5G_NC_D-G1_50_L-G1	50%	G1 Center	50%	SC		
5G_NC_D-G1_100_L-G1	100%	G1 Center	100%	NC		

不完全合成 (Semi-Composite)、非合成 (Non-Composite) の 3 ケースについて検討を行う。

荷重は、活荷重を外桁支間中央に最も厳しくなるように配置し、設計死活荷重を増加する解析を行った。

3.2 解析結果

曲げが卓越する支間中央部に腐食を有する場合の構造システムの α_{max} および $\alpha_{max}/\gamma(1.7)$ の値を図-8 に示す。図に示すように、腐食のない健全時における支間中央部着目載荷時の構造システムの最大耐力は設計死活荷重(D+L)に対して、床版と鋼桁の結合条件が完全合成の場合で、3.5 倍、不完全合成の場合で、3 倍、非合成の場合で 2.5 倍程度であることが明らかになり、主桁数による有意な差は確認されなかった。

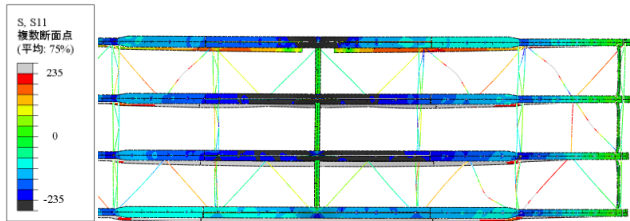


図-9 最大荷重倍率時の横構の変形状態 倍率 10 倍
軸方向応力コンター (4G_SC_D-G1_100_L-G1)

また、床版と鋼桁の結合条件において、構造システムの最大耐力は、完全合成→不完全合成→非合成の順となることが確認された。また完全合成と非合成に着目すると、それらの構造システムの最大耐力比（非合成/完全合成）は、50%減厚時：約 0.7，100%減厚（欠損）時：約 0.6 であり、床版が構造システムの耐荷性能に有効に機能していることが明らかになった。図-9 に 4 主桁橋梁の最大荷重倍率時の軸方向応力コンターを示しているが、減厚率 100%時では、最大荷重倍率時に横構の座屈の発生が確認されるケースもあり、主桁に断面欠損を伴うような深刻な腐食劣化が生じた場合、横構の耐荷力が構造システムの最大耐力を決定する要因の一つとなる可能性があることが分かった。

4. 橋梁を構成する構造要素の構造システムの耐荷性能への寄与度

4.1 着目部材および解析ケース

2, 3 章より、ある部位に腐食損傷を有する場合、荷重漸増の過程でそれに伴う早期の降伏が生じ、その部位での剛性低下や荷重分担率の低下が見られるが、荷重分担率の推移より、隣接する桁が補完するように、荷重に抵抗する構造システムとしての挙動が確認された。本章では、これらの構造システムに寄与すると考えられる構造要素を、全橋 FEM モデルから除去したモデルを用いて、耐荷性能への検討を行う。

本節では、せん断が卓越する領域での各構造要素の影響を検討する。解析ケースを表-4 に示す。桁端部における着目部材は、床版 (SL) および端対傾構 (ECF) とした。端対傾構着目時は、図-10 (a) に示す固定側支点部の端対傾構を 2 章で用いた全橋モデルより、除去し、その影響を検討した。床版については、図-10 (b) に示すように、主桁間隔の中央位置で、1.0mm 幅の切込みを入れて、床版の橋軸直角方向への荷重分配を期待できないようにしている。

また、本章では、構造要素が有する耐荷性能への寄与度を明らかにすることを目的としており、材料構成則は、降伏後の二次勾配の影響を除くために、鋼材については、完全弾塑性体としてモデル化を行った。

表-4 構造要素の寄与度に関する解析ケース

解析ケース	主桁数	損傷	荷重配置	着目部材
3G_Full_L-G1_End	3	健全	G1桁端	除去無
3G_SL_L-G1_End				床版
3G_ECF_L-G1_End				端対傾構
3G_Full_L-G2_End			G2桁端	除去無
3G_SL_L-G2_End				床版
3G_ECF_L-G2_End				端対傾構
4G_Full_L-G2_End	4	健全	G2桁端	除去無
4G_SL_L-G2_End				床版
4G_ECF_L-G2_End				対傾構
4G_D-G1_Full_L-G2_End			G1桁端腐食	除去無
4G_D-G1_SL_L-G2_End				床版
4G_D-G1_ECF_L-G2_End				対傾構
5G_Full_L-G1_End	5	健全	G1桁端	除去無
5G_SL_L-G1_End				床版
5G_ECF_L-G1_End				対傾構
5G_Full_L-G3_End			G3桁端	除去無
5G_SL_L-G3_End				床版
5G_ECF_L-G3_End				対傾構

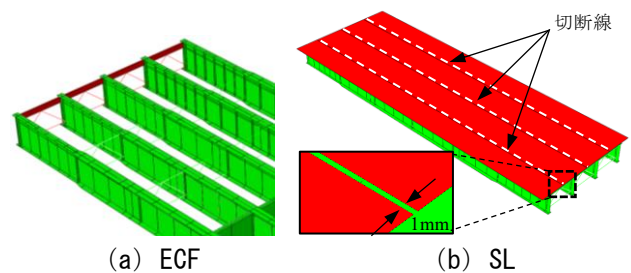


図-10 着目部材

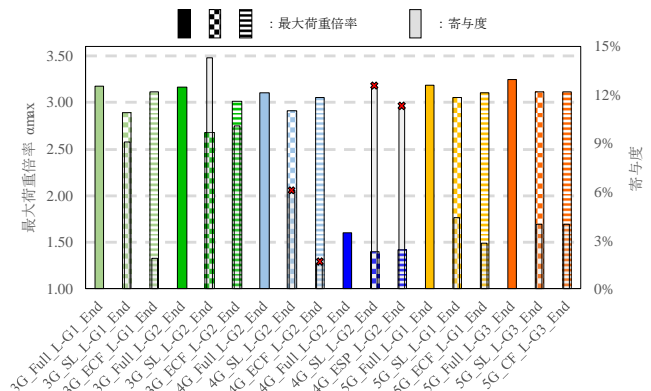


図-11 最大荷重倍率および構造要素の寄与度

4.2 解析結果

図-11 に、各解析ケースの最大荷重倍率および各構造要素の寄与度を示す。寄与度は、構造要素を除去した場合の最大耐力とフルモデルのそれとの差をフルモデルの最大耐力で除し算出した。床版および端対傾構の寄与度は、最大で、三主桁橋梁では、前者で 14%、後方で 10%、四主桁橋梁および五主桁橋梁では、前者で 6%、後方で 4%程度であった。また、四主桁橋梁においてその外桁の桁端部が損傷するときでは、端対傾構および床版の寄与度は双方とも 10%を上回る結果となり、ある一部の桁端部が損傷する場合、構造要素の構造システムの最大耐力への寄与度が増加することが支点反力分担率の推移の変化からも確認された。

5. 構造システム挙動と耐荷性能の回復に関する検討

本章では、構造システム挙動が腐食損傷を有する桁端部の耐荷性能の低下および任意の補修対策による耐荷性能の回復性に与える影響について、桁単体の部分モデルと全橋モデルを用いて比較検討する。部分モデルの桁は、全橋モデルの外桁を抽出し作成した。

補修構造案を図-12に、健全時に対する最大耐力の比を図-13に、支点反力/設計耐力-鉛直変位関係を図-14にそれぞれ示す。損傷時では、健全時に対する最大耐力の低下率は、全橋モデルより、部分モデルのほうが15%大きい。一方で、全面補修時では部分モデルでは、健全時の1.2倍程度まで耐荷性能は向上するのに対して、全橋モデルでは、1.0倍程度にとどまる結果となった。これは、図-14より、構造システムの最大耐力が、補修を施した桁(G1)ではなく、他の隣接する桁端部に局部座屈が生じることで決定されることが確認され、部分モデルにおける補修効果は、構造システムの耐荷性能の回復と一致しない場合があることが明らかになった。

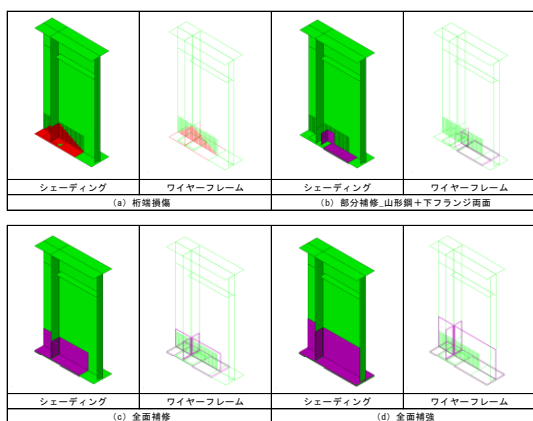


図-12 補修構造案 全橋モデル：G1桁に適用

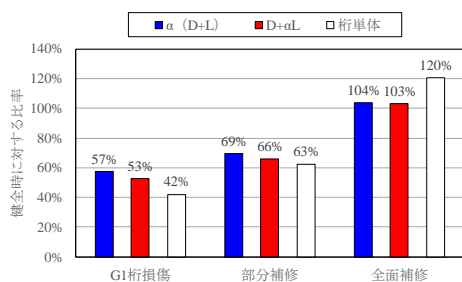
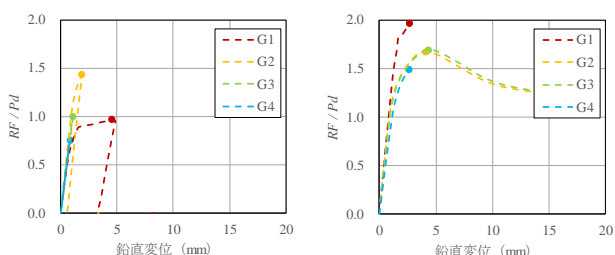


図-13 健全時に対する最大耐力の比率 (1)



(a) 4G_D-G1_PR_L-G2 (b) 4G_D-G1_AR_L-G2

図-14 支点反力/鉛直変位関係 α (D+L)

6. 結論

本研究では、桁端部または支間中央部に腐食を有する場合の鋼桁橋の構造システム挙動を考慮した耐荷性能を明らかにするため、主桁数、腐食位置、荷重配置に着目した全橋 FEM 解析を実施した。得られた結論を以下に示す。

- 従来の部材ベースで設計された鋼桁橋では、主桁数によらず、せん断または曲げが支配的となる双方の荷重配置において、構造システムとして有効に機能することで、設計死活荷重に対して、安全率 1.7 を大きく上回り十分な耐荷性能を有する。
- 外桁の桁端部に腐食を想定する場合、健全時の最大耐力に対する比率は、主桁数が少ないほど低下率は大きくなり、三主桁橋梁で 50%、五主桁橋梁で 55%程度である。同様に中桁の桁端部に腐食を想定する場合の比率は、三主桁で約 45%、五主桁で約 65%であり、同様の傾向が確認され、その差は大きくなる。
- 2)および支点反力分担率の推移より、構造システムとして有効に機能させるためには、着目桁以外の桁の余裕度および荷重直角方向の荷重分配が重要であると考えられる。
- せん断力が支配的となる支点部では、床版および端対傾構が橋軸直角方向の荷重分配に寄与することを支点反力分担率より明らかにした。その構造システムの最大耐力への寄与度は最大で、三主桁橋梁では、床版：14%、端対傾構 10%、四主桁橋梁および五主桁橋梁では、床版：6%、端対傾構：4%程度であった。
- ある一部の桁端部に腐食損傷を有する場合、各構造要素が構造システムの耐荷性能へ与える寄与度は高くなり、四主桁橋梁において、その外桁の桁端部が損傷するときでは、端対傾構および床版の寄与度は双方とも 10%を上回る。
- 腐食部全てを当て板補修する従来の補修法では、隣接する健全な桁端部で構造システムの最大耐力が決定される可能性があり、部材単位での耐力の向上が構造システムの耐力の回復に必ずしも繋がらない。

参考文献

- 社会資本整備審議会 道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.4.
- Ghosn, Michel., Moses, Fred. : Redundancy in Highway Bridge Superstructures , NCHRP Report 406 (National Cooperative Highway Research Program), National Academic Press, Washington, D.C., 1998
- 有村健太郎, 有山大地, 船越博之, 山口隆司：桁端部に腐食劣化の生じた鋼 I 桁橋の耐荷性能評価に関する解析的検討，土木学会論文集 A1, Vol. 73, No.1, pp.232-247, 2017.
- Dassault Systems : Abaqus Online Documentation, 2013.