

既設鋼I桁橋桁端部における地震水平力作用時の 損傷挙動に関する解析的検討

片山 智貴¹・村越 潤²・野上 邦栄³・岸 祐介⁴

¹学生会員 東京都立大学大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 博士（工学） 東京都立大学大学院都市環境科学研究科 都市基盤環境学域教授
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³フェロー会員 博士（工学） 東京都立大学大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域 客員教授
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴正会員 博士（工学） 東京都立大学大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域 助教
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

1. はじめに

鋼道路橋の上部構造の設計では、立体的機能を確保するために、耐荷性能の確保だけでなく、上部構造全体としての剛性の確保や横荷重の支承部への円滑な伝達を図ること等が求められている¹⁾。また、上部構造と支承部との接合部である桁端部においては、力が集中する部位であることから、構造細目として地震力に対して主桁ウェブ等の局部変形を防ぐための補剛材の設置や横部材等による補強が必要とされている²⁾。一方、近年の地震では、鋼I桁橋の桁端部において、支承直上の主桁ウェブ・フランジ及び支点上補剛材や、端対傾構等の横部材に局所的に座屈や変形といった損傷が報告されている^{3)~5)}。それら事例のほとんどは上部構造の耐荷力喪失に至るような損傷でないが、路面の段差等により地震後の車両通行に支障を来す事例が見られている。特に古い年代の既設鋼I桁橋では、レベル1地震動相当の地

震力に対して平面骨組モデルによる強度照査と構造細目により行われているが、実際の損傷状況を踏まえた上で桁端部の合理的な構造詳細の可能性や耐荷性能の照査法等について検討していく余地があると考えられる。こうした桁端部の被災事例を背景に、地震に対する鋼I桁橋桁端部の挙動や耐荷性能に関して、構造細目や横部材の構造条件等に着目した実験的・解析的な検討^{例えば、6)~10)}も行われてきているが、上部構造全体系の立体的挙動に着目した検討例は依然として少ない。

また、桁端部は、狭隘で閉鎖的な空間であり乾燥しにくく、かつ伸縮装置からの凍結防止剤を含む漏水等により湿潤状態となりやすく、相対的に厳しい腐食環境に置かれている。これまでも定期点検において局部腐食事例が多数報告されている¹¹⁾。これに対して、地震時水平力を受けた場合の腐食影響に関する解析的検討^{例えば6)、12)~14)}も行われてきているが、桁端部の地震時挙動も踏まえた合理的な耐荷力評

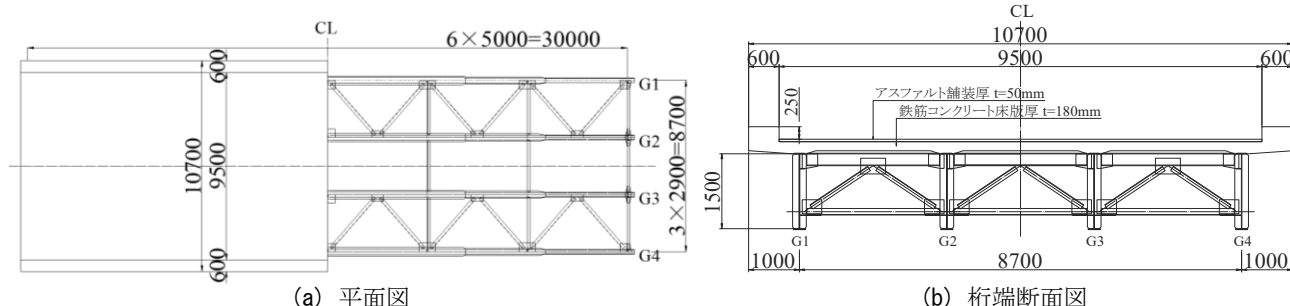


図-1 解析対象橋梁の概要

表-1 桁端部の主な
構造諸元(単位:mm)

主桁端部	上フランジ	200×11
	ウェブ	1500×9
	下フランジ	240×19
支点上補剛材		130×20
端対傾構	上弦材	□ - 250×90×9×13
	斜材	L - 100×100×10
	下弦材	L - 130×130×9
横構		L - 150×150×12

表-2 各部材の材料特性と構成則

	部材	質量密度 (kN/m ³)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	降伏点 (N/mm ²)	構成則
コンクリート部材	RC床版	24	2.65×10^4	0.2	-	弾性体
	主桁フランジ・ウェブ	77	2.00×10^5	0.3	315	バイリニア
鋼部材	補剛材・横部材等	77	2.00×10^5	0.3	235	バイリニア

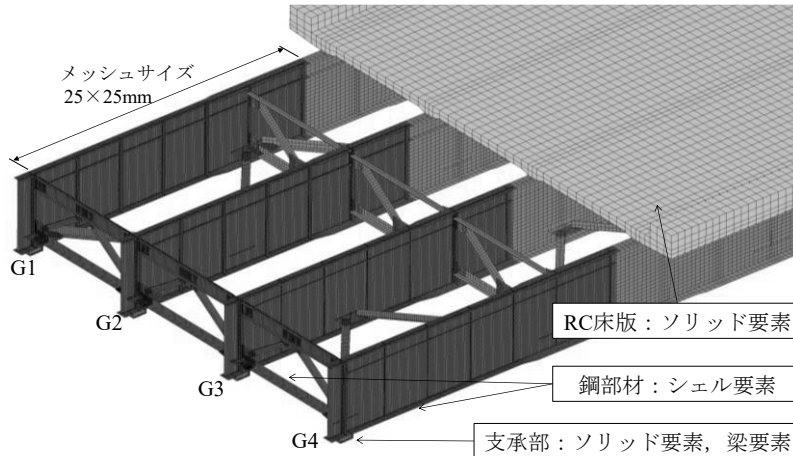


図-2 解析モデルの概要

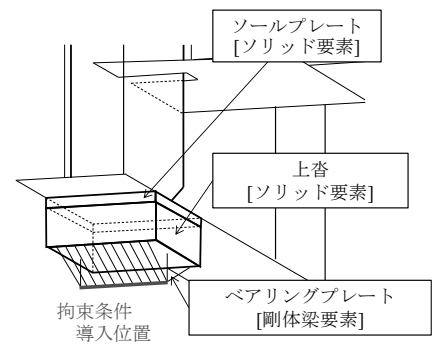


図-3 支承部のモデル化

価・対策方法の検討が必要と考えられる。

以上のような背景を踏まえ、本検討では、既設鋼 I 桁橋を対象として、地震時水平力作用時の桁端部の損傷挙動を明らかにするとともに、耐荷性能に影響を与える構造パラメータ等に関する知見の蓄積を目的として、上部構造全体系の弾塑性有限変位解析を行った。本文では、桁端部の構成部材・部位の塑性化、変形の進行過程に着目した検討結果を報告する。

2. 解析方法

(1) 対象橋梁

図-1(a)に解析の対象とした橋梁の平面図を、図-1(b)に桁端部の断面図、表-1に対象橋梁の桁端部における主な断面諸元を示す。既設橋を対象とし、昭和 39 年の道示¹⁵⁾に基づく、標準的な支間 30m、本線幅 9.5m、全幅 10.7m の単純合成鋼 I 桁橋を選定した。鋼道路橋に関しては、昭和 32 年に「溶接鋼道路橋示方書 解説」¹⁶⁾が出版され、溶接に関する規定が初めて設けられている。これにより道路橋に溶接構造が本格的に導入され始めており、数量的にも多い同示方書による橋梁を対象とした。

使用鋼材は SM50（降伏強度 $\sigma_y=315\text{N/mm}^2$ ）及び、SS41（降伏強度 $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ ）である。主桁と鉄筋コンクリート(RC)床版は当時の設計基準や設計の考

え方を踏まえて再現設計を行い、水平力に抵抗する対傾構や横構などの横部材の断面諸元は旧建設省標準図^{17)~19)}を参考に設定した。桁端部の構造としては、逆 V 型の対傾構タイプであり、横構ガセットプレートと主桁下フランジのあきは 270mm である。床版は端対傾構上弦材に打ち下ろされていない。

また、当時の鋼道路橋では、支承部上のウェブに補強リブは設けられていないが、解析では補強リブの有無の耐荷性能への影響についての検討も行った。補強リブについて、橋軸方向の慣性力と支承の高さに起因する偶力により主桁フランジやウェブに生じる局部座屈を防止することを目的²⁾に、平成2年の道示 V 編で支承部のウェブを垂直補剛材で補強するのが良いとされ、平成8年道示以降、設置することが規定されている。ここでは、局部腐食に対する桁端部の補強時を想定し、補強リブが耐荷性能に及ぼす影響を評価するため、文献^{20),21)}を参考に補強リブ設置の解析も実施した。

(2) 解析モデル

図-2に解析モデルの概要を、図-3に支承部のモデル化の概要を、表-2に各部材の材料特性と材料構成則を示す。解析には汎用有限要素解析ソフトウェア MSC.Marc.2020²²⁾を使用した。

解析モデルは主桁、補剛材及び横部材（ガセットプレートを含む）等の鋼部材を4節点シェル要素、

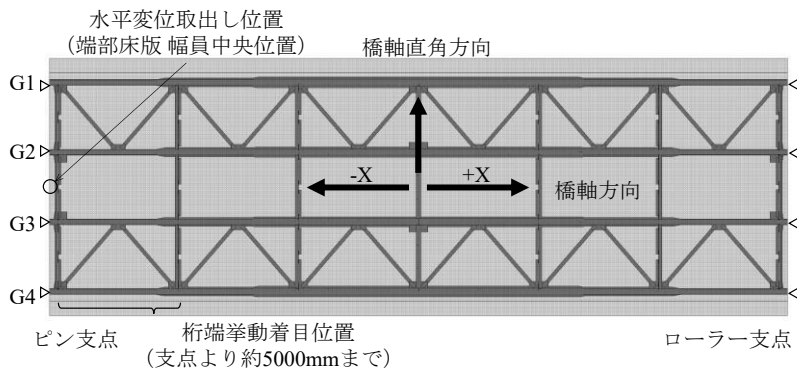


図-4 解析ケースの概要

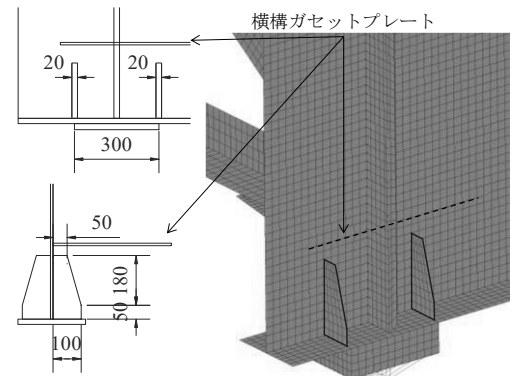


図-5 補強リブのモデル化概要

RC床版を8節点ソリッド要素により作成した。要素サイズは、挙動着目側の桁端部（桁端に隣接する中間対傾構の位置、支点から6000mmまで）では25mm×25mm、その他の部位では100mm×100mmを基本とした。材料構成則は、鋼部材では $E/100$ の二次勾配（ E ：弾性係数）を有するバイリニア型モデルとし、床版は弾性体と仮定した。材料特性に関して、鋼材は、弾性係数 $2.00 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比0.3とした。床版コンクリートは設計基準強度 28N/mm^2 とし、道示²³⁾を参考に弾性係数 $2.65 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、ポアソン比0.2とした。RC床版と主桁上フランジはスタッド位置でリンク要素により剛結(変位を伝達)した。支承部は当時の標準設計¹⁹⁾に基づき、解析モデルの設計反力値に対応する高力黄銅支承板支承（以下、BP・A支承）とし、ピン支持及びローラー支持とした。BP・A支承は当時の支承便覧²⁴⁾と標準設計図面²⁵⁾を参考にし、ベアリングプレートと上沓の厚さ寸法のみ考慮してそれぞれ剛な梁要素、ソリッド要素でモデル化した。ソールプレートは当時の標準図を参考に板厚22mmのソリッド要素でモデル化した。支点の回転中心について、図-3のようにソールプレートと上沓が一体となり挙動するようモデル化し、ベアリングプレートの下面位置に拘束条件を導入することで表現した。なお、本検討では橋全体系としての基本的な挙動を把握することを目的とし、実橋で想定される残留応力や変形は考慮しないこととした。

(3) 解析ケースと荷重方法

図-4に解析ケースの概要を示す。荷重方向は橋軸方向（ピン支点側からローラー支点側：+X方向、ローラー支点側からピン支点側：-X方向）及び橋軸直角方向（G4桁側からG1桁側）の2方向とした。水平荷重は上部構造の質量分布に応じた慣性力として全要素に導入し、水平加速度を一方向に漸増させ解析を行った。荷重には非線形の増分制御方法として

弧長増分法を適用した。死荷重には地覆を含むRC床版、主桁及び2次部材（単位体積重量：鋼部材 77kN/m^3 、RC床版 24kN/m^3 ）を考慮しており、全死荷重は 2152kN であった。

解析結果に関して、支点部に作用する水平反力の合計値（以下、水平荷重）と桁端の水平変位の関係を基に、各荷重ステップでの構成部材の状態を分析した。また、耐荷力の評価に際して、水平荷重を全死荷重で除し抵抗可能な水平震度（以下、 k と表記）に換算し、設計地震荷重との相対比較を行った。

図-5に補強リブのモデル化の詳細を示す。補強リブは文献^{20),21)}を参考に構造細目を設定した。補強リブの材料特性はSS41と同一とし、モデル化は前項2(2)によった。

3. 解析結果と考察

(1) 橋軸方向荷重時の挙動

図-6に水平荷重-水平変位関係を、図-7、図-8にそれぞれG4桁端部、橋全体系のミーゼス応力分布と変形図を示す。なお、側面図はG4桁に着目した。

a) 損傷の進展過程

橋軸+X方向荷重では、ソールプレート直上の主桁ウェブで初期降伏が発生した（図-6,7中のStep1）。ここでいう初期降伏とはミーゼス応力が鋼材の降伏点に到達した状態を指す。この時点での水平荷重は約 3000kN （ $k \approx 1.5$ ）であった。続いて、支点上補剛材から桁端側のウェブ（以下、桁端ウェブパネル）の自由端で降伏が発生した（図-6,7中のStep2）。この時点の水平荷重は約 5600kN （ $k \approx 2.6$ ）であった。さらに支点近傍のウェブで降伏域が進展し、主桁下フランジのソールプレート前面位置が降伏した（図-6,7中のStep3）。それ以降も荷重は漸増し、図-6に示す水平変位の範囲においては、耐荷力の急激な低下は見られなかった。

橋軸-X方向荷重については、初期降伏荷重が約

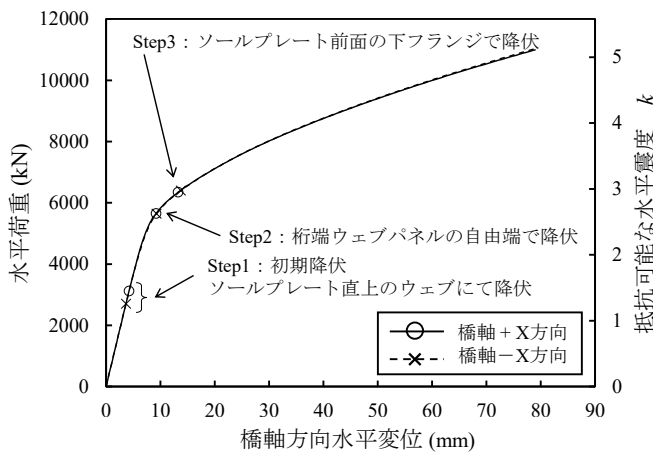


図-6 水平荷重-水平変位関係（橋軸方向）

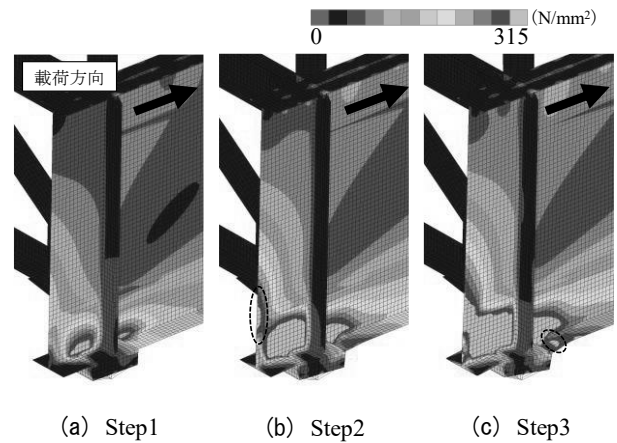
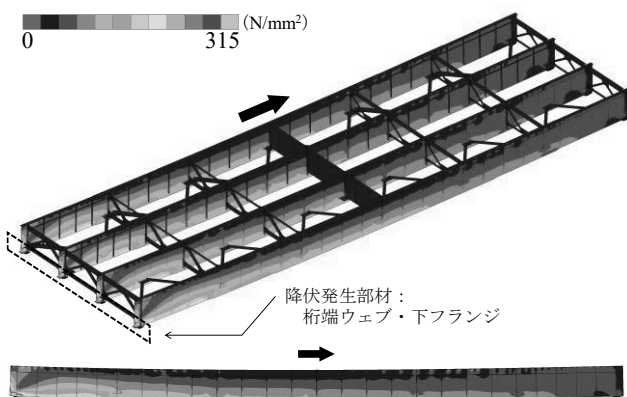
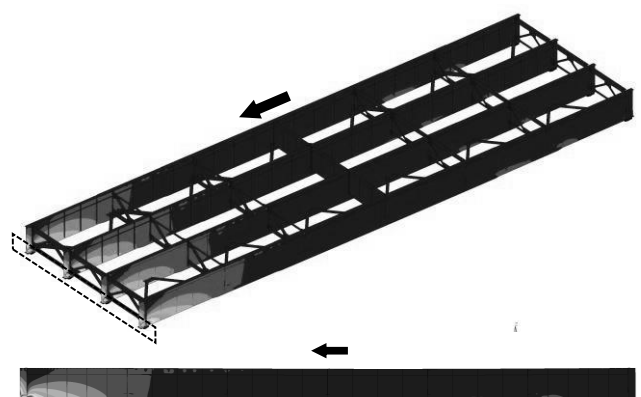


図-7 G4桁端の各荷重レベルでのミーゼス応力分布と変形図（変形倍率5倍）



(a) 橋軸+X方向



(b) 橋軸-X方向

図-8 橋全体のミーゼス応力分布と変形図（図-6, 7のStep2時点, 変形倍率5倍）

2700kN ($k \approx 1.3$) と橋軸+X方向に対して若干低い結果となったが、初期降伏発生位置は+X方向荷重と同様、ソールプレート直上の主桁ウェブで発生した。その後の挙動及び荷重変位関係は、橋軸+X方向とおおむね一致している。

以上の支点近傍の主桁ウェブの損傷挙動について、図-9に橋軸方向慣性力の作用によるピン支点周辺部の挙動のイメージを示す。道示V編12.5.2解説⁹⁾に示されるように、ソールプレートを介して上査に接続された主桁の下フランジに慣性力と支承高さに起因する偶力により上下方向の力が生じる。これによりStep1でウェブに初期降伏が発生している。さらに荷重が増加すると、初期降伏位置からの塑性域の拡大及び桁端ウェブ自由端も含む面外変形に伴い、Step2の前後で荷重-変位関係において水平変位が急増した。

b) 桁端以外の損傷状況

Step2における主桁の損傷範囲に関しては（図-8参照）、±方向で応力分布は異なるが、両方向ともに支点と桁端に隣接する中間対傾構により構成され

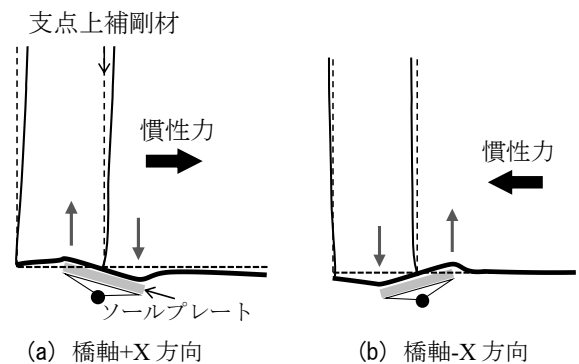


図-9 ピン支点周辺部の挙動

る区間で応力が相対的に高い傾向がある。ただし、支点直上付近の塑性化箇所を除き、当該区間に生じている応力は主桁鋼材の降伏点の50%程度であり、損傷は概ねピン支点側の支承直上付近に限定されるものと考えられる。

c) 補強リブの影響

+X方向荷重時を例に、図-10に補強リブ設置の有無による水平荷重-水平変位関係を、図-11に補強リブを設置していない場合の初期降伏時点（水平荷重3000kN）でのミーゼス応力分布と変形図を比較して

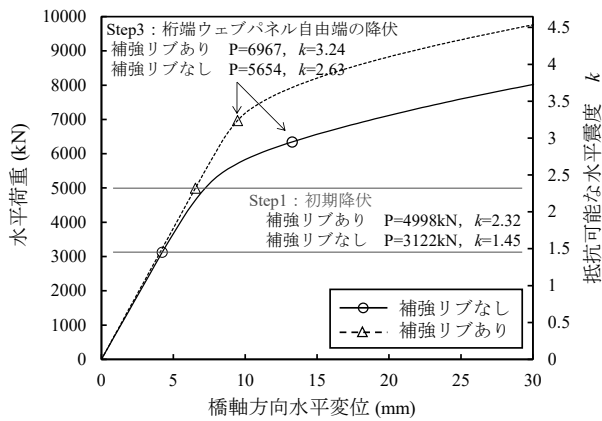


図-10 補強リブ設置時の水平荷重-水平変位関係と主な荷重レベル（橋軸+X方向）

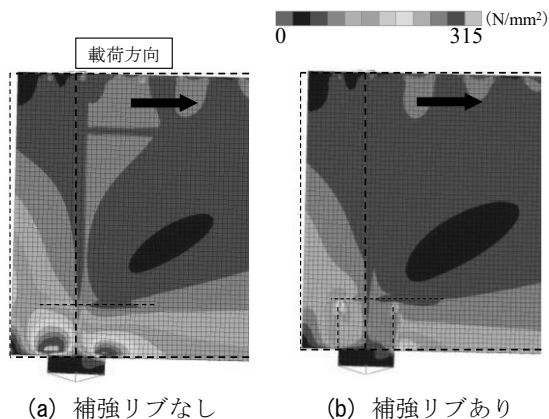


図-11 水平荷重 3000kN 時点でのミーゼス応力分布と変形図（橋軸+X方向、変形倍率 5 倍）

示す。補強リブを設置することで、初期降伏荷重は 1.6 倍大きくなった。また、ソールプレート直上での応力集中が軽減されていることが確認できる。

(2) 橋軸直角方向載荷時の挙動

図-12 に水平荷重-水平変位関係を、図-13、図-14 にそれぞれ G3-G4 桁間の端対傾構及び G3、G4 桁支点部、橋全体系におけるミーゼス応力分布と変形図を示す。

a) 損傷の進展過程

橋軸直角方向載荷では、水平荷重で約 1640kN ($k \approx 0.8$) の時に、支点上垂直補剛材の下端で初期降伏が発生した（図-12, 13 中の Step1）続いて、端対傾構の斜材においてガセットプレートとの接合部付近から降伏し、軸力と曲げが作用し面外方向へ変形が生じた。（図-12, 13 中の Step2）。その後、端対傾構斜材の降伏域が部材全面に拡大し、直後に外桁の支点上補剛材の外縁側（対傾構ガセット付近）が局部的に降伏した（図-12, 13 中の Step3）。補剛材外縁の降伏時での水平荷重は約 3090kN ($k \approx 1.4$) であった。さらに、水平荷重が漸増する中で、桁端部の

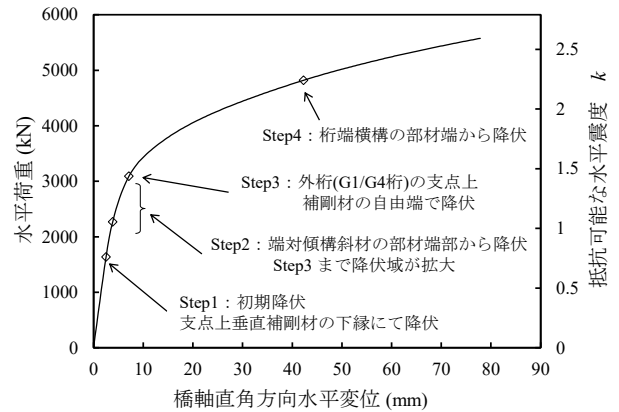


図-12 水平荷重-水平変位関係（橋軸直角方向）

横構（以下、桁端横構）の部材端部で降伏が発生したものの、少なくとも図-12 に示す水平変位の範囲内では耐荷力低下には至らなかった。

以上の橋軸直角方向載荷時の挙動に関して、図-15 に桁端部の変形イメージを示す。床版に作用する慣性力により、支承部と床版との水平変位差が生じ、支点上補剛材には主に面内のせん断変形が生じる。これに伴い図-12 Step1 で支点上補剛材の下端で初期降伏が発生したと想定される。その後、主桁ウェブと支点上補剛材からなる十字柱と端対傾構の斜材が骨組構造として水平力に抵抗する様子がうかがえる。端対傾構斜材が全面で降伏すると、下弦材や桁端横構が斜材の負担が増加し、その接合部である支点上補剛材のガセット部に応力が集中し、図-12 の Step3 で補剛材の外縁側に屈曲・降伏が発生し、変位の増加に至っている。

橋軸直角方向載荷の場合、支点上垂直補剛材、端対傾構の構成部材、その取付け部といった各部の塑性化・変形の進行が段階的にみられており、これらの補強の方法によっては変形進行を制御することで水平耐荷力の向上の可能性が示唆される。

b) 桁端以外の損傷状況

図-14 に示すように、Step3 において降伏応力が生じているのは端対傾構や支点上補剛材に限られている。この時点で降伏応力の 50% 程度の応力が桁端に隣接する横構（以下、桁端横構）に発生している。その後、桁端横構は図-12 中の Step4 で部材端部から降伏する。

c) 補強リブが全体系の荷重変位関係に及ぼす影響

橋軸直角方向に対して、桁端横構部材の下側と主桁下フランジまでのあきの部分の面外変形をある程度抑制できる可能性が考えられることから、(1)c) と同様に、補強リブ設置の効果について検討した。

図-16 に補強リブ設置の有無による水平荷重-水平変位関係を示す。補強リブを設置することで初期降伏荷重に関しては 1.4 倍程度大きくなった。補強リブ

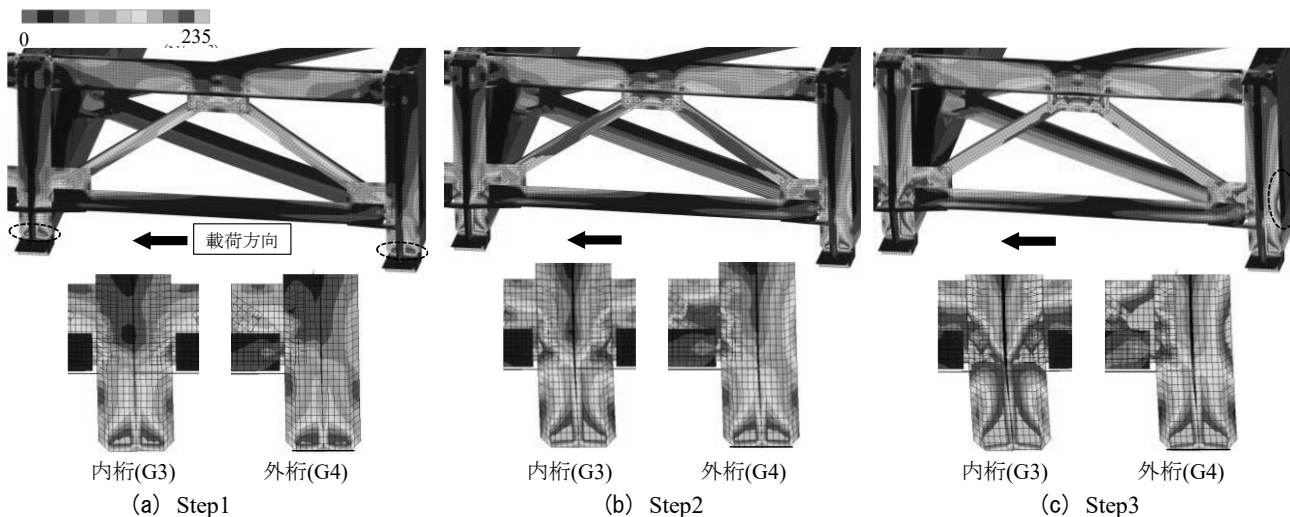


図-13 各荷重レベルでのミーゼス応力分布と変形図（変形倍率 5 倍）

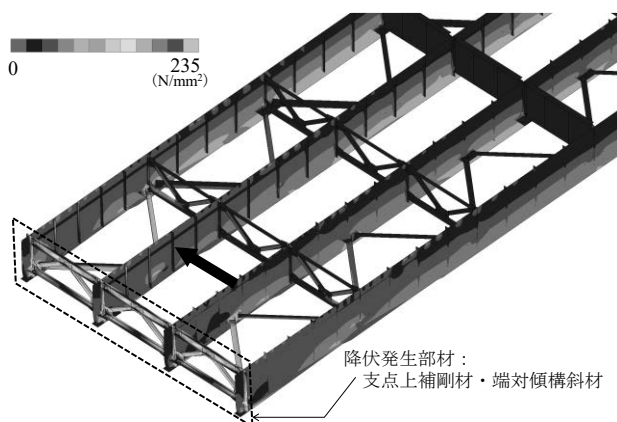


図-14 橋全体のミーゼス応力分布と変形図（図-12, 13 の Step3 時点，変形倍率 5 倍）

ブを設置した場合でも，初期降伏発生位置を含め，荷重の漸増に伴う塑性化・変形挙動は補強リブを設けないモデルと同様であった．このことから，本来橋軸方向地震力に抵抗するように設けられた補強リブが，橋軸直角方向地震力に対しても一定程度耐力向上に寄与する可能性があるといえる．

(3) 荷重方向による耐力力の比較

図-17に橋軸方向・橋軸直角方向荷重に対して，前述の初期降伏荷重時と変位増加時の荷重レベルにおける抵抗可能な水平震度を比較して示す．橋軸方向の水平震度は，初期降伏荷重の低い-X方向で代表して示した．

抵抗可能な水平震度について，橋軸直角方向は橋軸方向に対して，限界状態1に相当すると考えられる初期降伏時では約0.6倍，塑性化の進行する桁端部の部分的な降伏時では約0.5倍と小さい．本検討における範囲では橋軸直角方向が相対的に弱いといえる．また，塑性化部位は，桁端に見られる局部腐

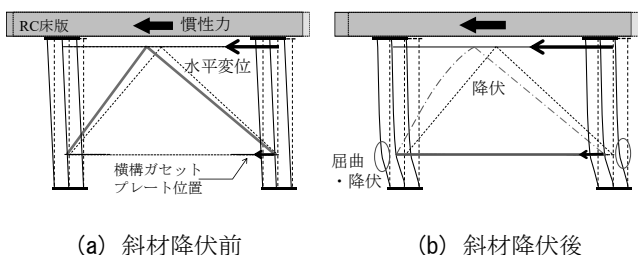


図-15 橋軸直角方向荷重時の桁端部の変形イメージ

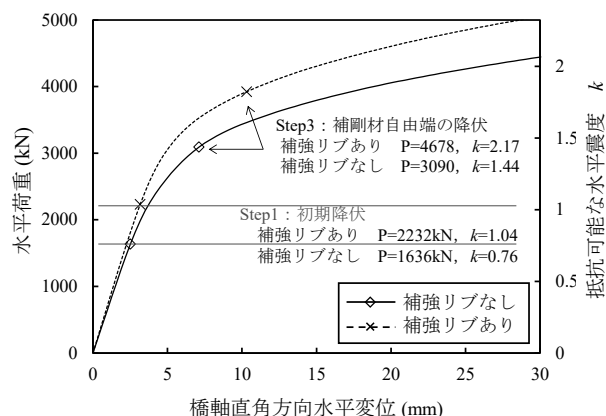


図-16 補強リブ設置時の水平荷重-変位関係と主な荷重レベル（橋軸直角方向）

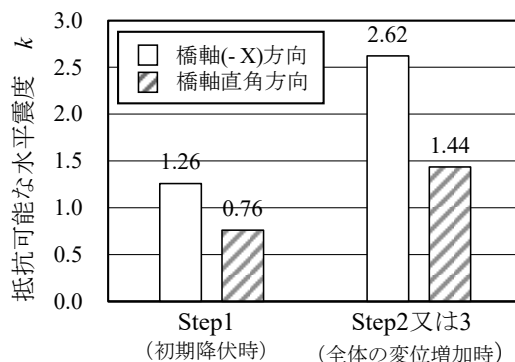


図-17 各荷重方向における初期降伏時と変位急増時の抵抗可能な水平震度の比較

食部位と対応しており、既設橋における腐食減肉による耐荷力低下を想定すると、地震時の耐荷性能の低下に留意すべきと考えられる。

4. まとめ

RC床版を有する既設鋼I桁橋の全体系モデルを対象に、橋軸方向・橋軸直角方向の地震水平力作用に対する弾塑性有限変位解析を行い、主として桁端部の塑性化、変形挙動に着目した分析を行った。主な結果は以下の通りである。

- 1) 橋軸方向載荷では、ソールプレート直上付近の主桁ウェブ・フランジにおいて慣性力と支承高さに起因する上下方向の偶力により塑性化が進行していく状況が確認された。まず、初期降伏 ($k \approx 1.5$ (+X方向), 1.3 (-X方向)) が支点直上のウェブで発生し、その後、 $k \approx 2.6$ で桁端ウェブパネルの自由端で降伏が発生し橋全体の水平変位が急増した。
- 2) 橋軸直角方向載荷では、支点上補剛材による柱と端対傾構からなる面的な骨組構造により水平荷重に抵抗しており、各部の塑性化・変形が段階的にみられ、全体系の水平変位が増加していく状況が確認された。まず、支点上補剛材とウェブからなる十字柱に対して、主に補剛材面内のせん断変形により支点上補剛材下端で初期降伏 ($k \approx 0.8$) が発生した。次いで、端対傾構の構成部材の塑性化の進展とともに変位が増加していき、 $k \approx 1.4$ では、外桁の支点上補剛材の外縁側（対傾構ガセット付近）において局所的な降伏と屈曲が発生した。
- 3) 橋軸方向・橋軸直角方向載荷ともに、支点直上付近の主桁ウェブ・フランジと垂直補剛材下端での損傷が顕著であり、当該部が水平耐荷力上、重要な部位であると考えられる。
- 4) 初期降伏時点及び変位が急増し塑性化の進行する時点における水平荷重に着目すると、前者の場合、橋軸方向では $k \approx 1.3 \sim 1.5$ 、橋軸直角方向では $k \approx 0.8$ 、後者の場合、橋軸方向では $k \approx 2.6$ 、橋軸直角方向では $k \approx 1.4$ であり、水平力に対しては橋軸直角方向が相対的に弱いといえる。橋軸直角方向に関しては、2) で述べた損傷過程を踏まえると、各部位の変形の進行を制御することで耐荷力の向上の可能性が示唆される。
- 5) 支点における補強リブの設置により、初期降伏荷重については橋軸方向で1.6倍、橋軸直角方向で1.4倍程度の増加が確認された。補強リブは橋軸直角方向の水平力に対する支点部の補強を意図したものであるが、橋軸直角方向地震力に対しても耐荷

力向上に一定程度寄与するものと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、2020年度に日本鉄鋼連盟からの助成を受けて行ったものである。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編, 2017.11.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, 2017.11.
- 3) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成16年（2004年）新潟県中越沖地震土木施設被害調査報告，国土技術政策研究所研究報告 No.27，土木研究所報告 No.203, 2006.1.
- 4) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料 No.814，土木研究所資料 No.4295, 2014.12.
- 5) 国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成28年（2016）年熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料 No.967，土木研究所資料 No.4359, 2017.3.
- 6) 山口栄輝，辻浩幸：水平荷重を受ける端横桁の変形挙動に及ぼす腐食の影響，構造工学論文集，Vol.60A, pp.105-113, 2014.3.
- 7) 松村政秀，有山大地，山口隆司：水平荷重を受ける鋼I桁橋桁端部の耐荷性能に関する解析的研究，構造工学論文集Vol.63A, pp763-773, 2017.3.
- 8) 玉越隆史，青木康素，原田英明，藤本圭太郎：地震時のダメージコントロールを目的とした鋼橋桁端部の挙動の評価，土木技術資料，Vol.59, No.11, pp.28-31, 2017.11.
- 9) 澤田守，岡田太賀雄，玉越隆史，星隈順一：熊本地震による鋼I桁橋の損傷に基づく鋼桁支点部の構造特性の評価，土木技術資料，Vol.61, No.2, pp.28-31, 2019.2.
- 10) 徳橋亮治，宮田秀太，馬越一也，野中哲也：鋼I桁橋の上部構造に対する耐震設計上の課題とその対応，鋼構造論文集，Vol.27, No.108, pp.105-115, 2020.12.
- 11) 国土技術政策総合研究所：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第 294号，2006.1.
- 12) 村越潤，田中良樹：鋼橋桁端部の腐食に対する補強法に関する研究，土木研究所資料 No.4142, 2010.3.
- 13) 有村健太郎，有山大地，船越博行，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

- る解析的検討，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.73, No.1, pp.232-247, 2017.4.
- 14) 上條崇，小林明史，平野秀一，中溝翔：桁端部が腐食した鋼桁橋の耐荷力に関する解析，土木学会第74回年次学術講演会概要集, I-164, 2019.9.
- 15) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋設計示方書・鋼道路橋製作示方書 解説, 1964.6.
- 16) 社団法人日本道路協会：溶接鋼道路橋示方書 解説, 1957.
- 17) 建設省土木研究所：活荷重合成ゲタ橋標準設計，CPG-27, 1964.
- 18) 建設省：土木構造物標準設計，第23巻，1971.
- 19) 建設省：土木構造物標準設計，第23巻，1978.
- 20) 社団法人日本橋梁建設協会：合成桁の設計例と解説，2018.2.
- 21) 社団法人日本橋梁建設協会：鋼橋構造詳細の手引き（改訂2版），2013.6.
- 22) MSC.Software Corporations：Marc User's Guide, 2020.
- 23) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, pp46, 2017.11.
- 24) 社団法人日本道路協会：道路橋支承便覧, 1973.4.
- 25) 社団法人日本道路協会：道路橋支承標準設計図面集，すべり支承編，鋼橋用，1982.10.