

端部腐食した鈑桁の補修補強効果と崩壊機構に関する基礎的研究

宇都宮大学 学生会員 ○神山純一
宇都宮大学大学院 正会員 鈴木康夫

1. はじめに

我が国では1960年代の高度経済成長期に橋梁、道路、鉄道、ダム等のインフラが全国で整備されてきた。現在、橋長15m以上の主要な道路橋は150,000橋を超えているが、その多くはこの時期に整備されたものである。特に、この時期に整備された橋梁は、橋梁延長でいえば全体の約5割が鋼橋である。また、建設後50年以上の橋梁は2016年度には20%、2026年度には47%に達するものと予測されており¹⁾、鋼構造の耐久性向上に対する要求が高まる中、老朽化した橋梁が劣化損傷している事例が数多く報告されている。その劣化損傷を鋼橋の箇所別にみると半分以上が桁端部で損傷しており、その劣化損傷のほとんどの原因が腐食によるものである²⁾。

桁端部は一般的に風通しが悪く、閉鎖的な空間のため、メンテナンスもしにくく一度堆積した土砂や滞水した雨水が取り除かれずにそのまま放置されるケースが多い。このように過酷な腐食環境下におかれるため、桁端部における腐食損傷が著しくなっている。これらの腐食損傷に対して、あて板等による補修補強が実施されることが多いが、その設計では主として新設橋梁に対して規定されている道路橋示方書³⁾が準用されることが多く、補修時の検討では極めて安全側の設計となり、過大に補強していることが少なくないと考えらる。そのため、より簡易で合理的な補修補強方法の提案が求められている。

より簡易で合理的な補修補強方法の提案のためには、現在の補修補強の効果を詳しく知る必要があるが、これまで、腐食した鋼桁端部の力学挙動に着目した研究⁴⁾はある程度実施されているものの、補強補修前後の鋼桁の耐力や補修補強の効果を詳細に検討した研究が少ない。

そこで、本研究では、簡易で合理的な補修補強方法を提案するための基礎研究として端部が腐食した鋼桁と補修補強された鋼桁の耐力や崩壊メカニズムをFEM解析で明らかにすることを目的とする。

2. 解析モデル

(1) 解析対象

解析対象は実務設計でも適用されている平成6年度版の標準設計⁵⁾から、主要幹線道路橋に対する単純プレートガーダー橋（設計番号0240）とした。対象橋梁の一般図を図-1に、設計条件を表-1に、支点上補剛材の諸元を表-2にそれぞれ示す。この橋梁に対して腐食のない健全な場合、腐食による断面欠損がある場合、および補修補強がされた場合に対して、汎用有限解析コードABQUS⁶⁾を用いて弾塑性有限解析を行った。

検討対象の支点付近の構造諸元を変えないことを条件に、桁端にせん断力が生じるように、端対傾構から隣接する対傾構間隔を支間とする単純梁としてモデル化した。モデル化に当たっては現行の設計法の考え方により以下のように設定した。

解析対象である桁端支点部は、支点上補剛材と主桁ウェブで構成される十字柱の圧縮部材として設計される。この際、支点部はその軸応力が下端で最大の三角形分布をすることを仮定し、支点部の応力状態を反映している。

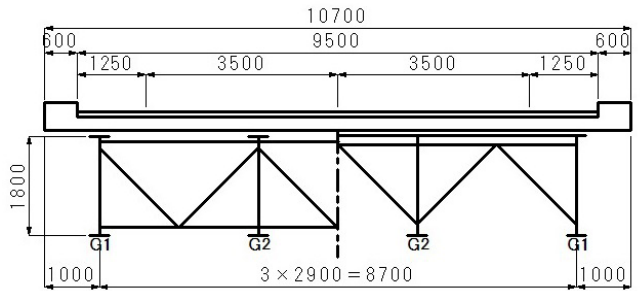


図-1-a 断面図

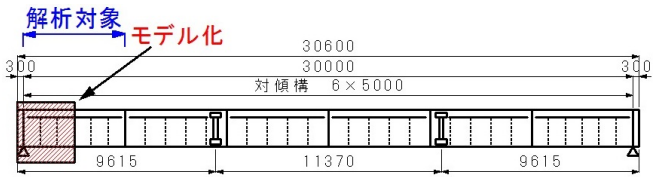


図-1-b 側面図

図-1 対象橋梁の一般図（単位：mm）

表-1 対象橋梁の設計条件

支間（m）	30
幅員（m）	9.5
角度（度）	0
活荷重	B活荷重
雪荷重（kgf/m ² ）	なし
床版厚（mm）	250
舗装厚（mm）	80

表-2 支点補剛材の設計諸元（中桁）

	幅（mm）	厚さ（mm）	材質	降伏応力（N/mm ² ）
支点補剛材	155	14	SS400	245
ウェブ	-	9	SM490Y	365
ソールプレート	270	35	SS400	-
フランジ	350	19	SM490Y	355

したがって、桁端部の耐力を評価する際に载荷位置を支点直上とするのではなく支点中央に設定した。また、支間の設定については支間中央集中荷重を载荷した場合、支点上のせん断力は支間長が変化しても変わらず、曲げモーメントも0で一定であることから支間長が対象部の耐力に与える影響は少ないものと考え、最小限の支間長と考えられる対傾構間隔を支間とした。なお、本研究では桁端部自体の耐力を把握するために、対傾構等を除き、垂直補剛材、水平補剛材およびソールプレートを残したモデルとしている。

(2) 境界条件と载荷方法

図-2のように解析対象をハーフモデルとしてモデル化し、対傾構間隔を支間長とした単純梁の中央面（図-2の赤線部分）に対称条件を与えた。また、対傾構の影響を考慮して横倒れしないように、桁端部の上フランジ部分（図-2の青線部分）を橋軸直角方向に固定した。载荷位置はスパン中央付近の垂直補剛材の直上とし、フランジ幅にわたって载荷板を介して線荷重として強制変位を与えた（図-2の赤矢印部分）。支承は線支承を想定し、支点上補剛材の直下にソールプレート幅にわたって回転端の境界条件を与えた（図-2の紫部分）。

(3) 要素分割と断面欠損のモデル化

ソールプレートと载荷板はソリッド要素で、それ以外の部分はシェル要素でモデル化した。なお、ソリッド要素としたソールプレートと载荷板は弾性体、シェル要素は完全弾塑性体とした。シェル要素で分割した材料の降伏応力は表-2に示している。

要素分割については1要素あたりの長さを10mm程度とし、支点上補剛材は幅方向15分割、高さ方向に173分割、ウェブパネル（支点上補剛材に一番近い部分）は幅方向80分割、高さ方向177分割、上下フランジは長さ方向270分割、幅方向36分割とした。また、全要素数は10213個である。腐食による断面欠損は、板厚方向に完全に欠損（板厚0と仮定）した場合を想定し、要素を設定しないことでモデル化した。

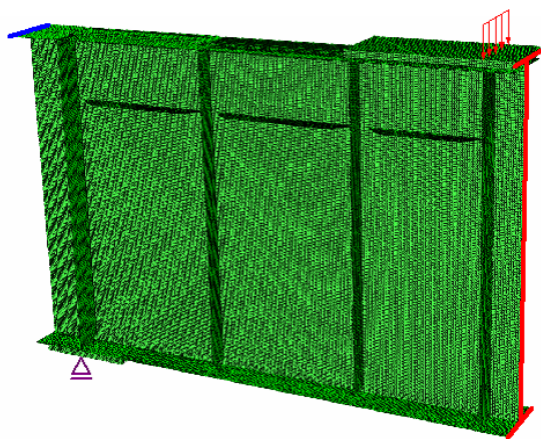


図-2 解析モデルの全体図および境界条件

(4) 解析ケース

本研究では、基準のケースとして腐食による断面欠損がない健全な基本モデル、桁端側が腐食し断面欠損した桁端欠損モデル、および桁端欠損モデルに対して補修補強を行ったモデル3ケースの計5ケースに対して解析を行った。各解析モデルの支点上端部の概要図を図-3に示す。なお図中の赤色部分は断面欠損位置を示している。

桁端欠損モデルは、既往の研究⁷⁾を参考に、ウェブの下端部から10mmの部分が支点上補剛材から桁端側にわたって全欠損した場合とした。事例モデルは、実際に行われた補修を参考に再現した。事例モデルの補修部材はアングル材と支圧板で構成されており、アングル材はウェブおよび支点上補剛材と協働して支点反力に抵抗する目的で、支圧板は下フランジの不陸調整およびアングル材の応力をソールプレートへ伝達させる目的で設置されている。アングル材の長さは、死荷重反力を摩擦接合用高力ボルト1本あたりの許容すべり耐力で除して得られた必要ボルト本数を設置できる長さとして決定し、断面寸法はボルトが設置できる形状として決定されている。支圧板のフランジ側の長さはボルトがソールプレートの邪魔にならない長さとし、補剛材側の長さは、ボルトが設置できる最小長さとして決定されている。アングル材とウェブ、支圧板と補剛材およびフランジはそれぞれボルト接合されている。また、アングル材と支圧板はメタルタッチである。

本解析では、アングル材および支圧板をソリッド要素でモデル化し、これらの部材とウェブ、下フランジ、および支点上補剛材との接触面では、すべりや離間を考慮しない結合条件とした。なお、アングル材の下端面と支圧板上表面には接触条件を与え、メタルタッチを再現した。

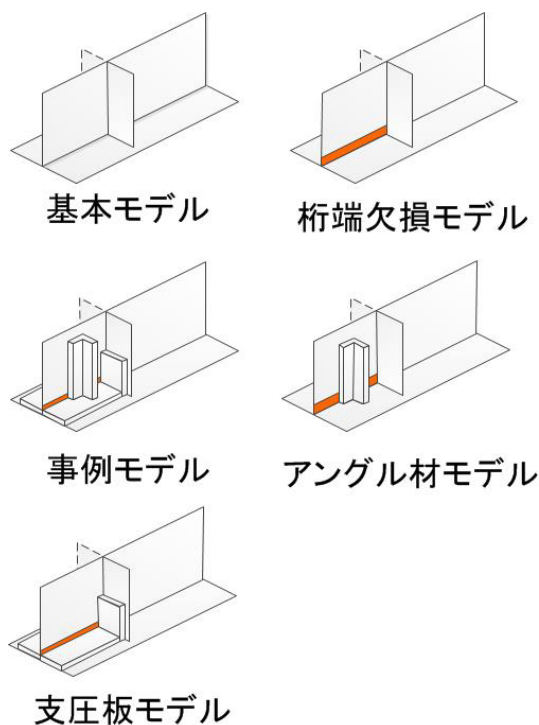


図-3 解析モデルの概要図

事例モデルは、アングル材と支圧板の2つの部材で補修されているため、それぞれの部材による補強効果を確認するために事例モデルの補修補強部材をそれぞれ単独で組み込んだモデルとして、アングル材モデルと支圧板モデルの解析も実施した。

3. 解析結果

各モデルの荷重－変位関係を図-4に示す。また、各モデルの荷重と桁端部および支点部の上下フランジ間の縮み量の関係を図-5に示す。図-6は基本モデル、桁端欠損モデル、および事例モデルの最大荷重時における橋軸直角方向の面外変形のコンター図であり、黒や灰色の部分が大きな面外変形を表している。

(1) 基本モデルと桁端欠損モデル

図-4より基本モデルと桁端欠損モデルの最大耐力を比較すると、桁端欠損モデル（最大耐力 1512kN）は基本モデル（最大耐力 2554kN）の約 0.6 倍となっていることがわかる。

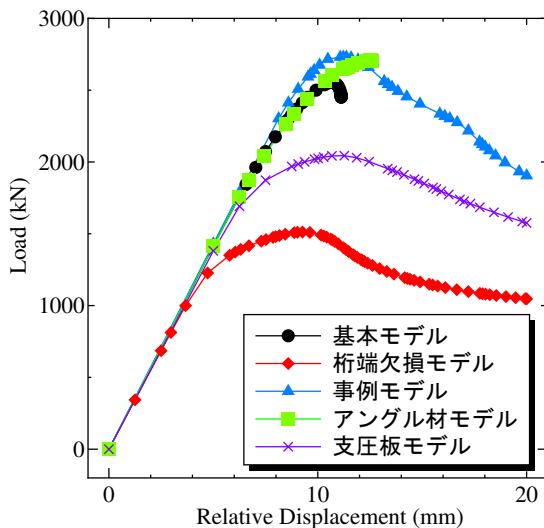


図-4 各モデルの荷重－変位関係

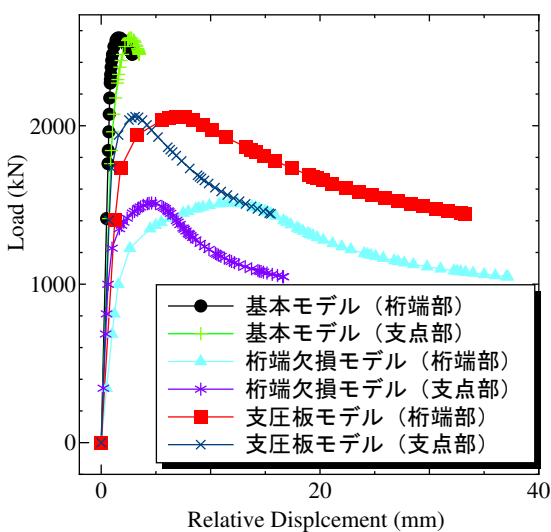


図-5 各モデルにおける桁端部と支点部の上下フランジ間の縮み量の関係

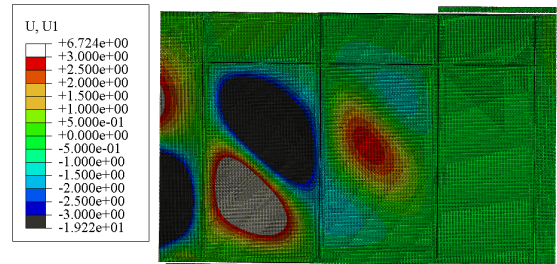


図-6-a 基本モデル

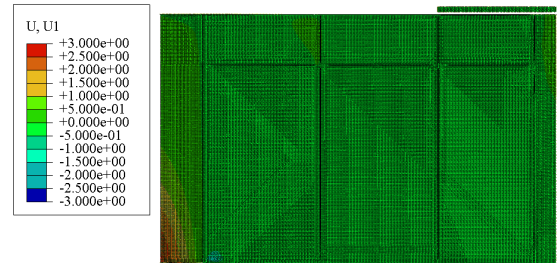


図-6-b 桁端欠損モデル

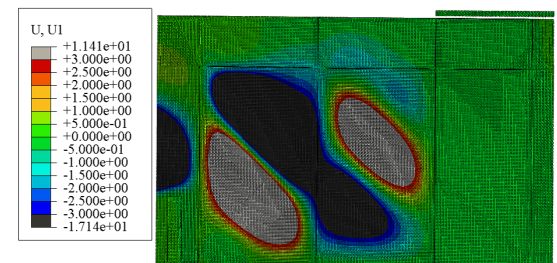


図-6-c 事例モデル

図-6 最大荷重時における面外変形コンター図

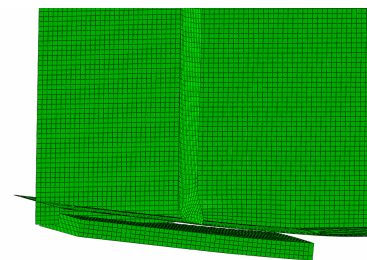


図-7 桁端欠損モデルの補剛材下端部の局部座屈の様子（最大荷重時、変形倍率 5 倍）

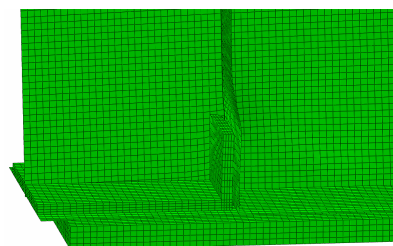


図-8 支圧板モデルによる補剛材下端部の局部座屈の様子（最大荷重時）

この原因として基本モデルでは図-6-aのように径間側ウェブでせん断座屈が発生しているが、桁端欠損モデルでは図-6-bのようにせん断座屈が発生していないことが挙げられる。せん断座屈の有無が斜張力場の形成の有無につながり、最大耐力に大きな差がついたと考えられる。桁端欠損モデルが径間側ウェブでせん断座屈しなかった原因は、ウェブがせん断座屈する前に補剛材下端部が局部座屈したことが挙げられる。

図-5より、基本モデルは桁端部より支点部の縮み量が大きいのに対し、欠損モデルは逆に支点部より桁端部の縮み量が大きくなっていることがわかる。これは、基本モデルでは桁端部のウェブがフランジと接しているため下フランジの回転量が小さいことを表しており、欠損モデルでは桁端部がウェブと接していないため下フランジの回転量が大きいことを表している。そのため、欠損モデルでは、せん断座屈する前に図-7のように、下フランジの回転変形に伴って補剛材下端部にも面外変形が生じ、補剛材が早期に局部座屈したと考えられる。

(2) 事例モデル

図-4より、事例モデルの最大耐力は2731kNであり、基本モデルの約1.1倍、桁端欠損モデルの約1.8倍の最大耐力を示した。また、図-6-cのように事例モデルでは径間側ウェブでせん断座屈が確認されたことから事例モデルは基本モデルと同様の性状を示していることが確認できる。

(3) アングル材モデルと支圧板モデル

図-4より、アングル材モデルと基本モデルを比較すると、基本モデルより最大耐力が増加していることがわかる。これは、断面欠損した支点上十字柱をアングル材で補修したことで柱としての有効断面積が増加し、最大耐力が基本モデルより高くなったと考えられる。

一方、支圧板モデルをみると不陸調整およびアングル材の応力をソールプレートに伝達させる目的で設置された支圧板だけでも耐力が増加していることがわかる。これは、支圧板が補剛材の局部座屈をある程度抑制することで耐力が増加したと考えられる。図-5より、最大耐力時までの桁端部と支点部の縮み量の差に着目すると、支圧板モデルの縮み量の差の方が欠損モデルのそれより小さいことがわかる。つまり、支圧板モデルは、支圧板が支承部下フランジの回転を抑制し、その結果、補剛材下端部の局部座屈もある程度抑制されたと考えられる。図-8は支圧板モデルの補剛材下端部の局部座屈の様子を表している。図-8より補剛材下端部の局部座屈は支圧板の少し上で発生しており、図-7の桁端欠損モデルより局部座屈の発生位置が上側に移動していることがわかる。

4. まとめ

本研究では、端部腐食した鋼桁と補修補強された鋼桁の耐力や崩壊メカニズムを明らかにすることを目的として、健全時、端部腐食時、および補修補強時の鋼桁の解析を行った。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- ・ 健全時と桁端全欠損時の耐力の差が大きくなった原因は径間側ウェブのせん断座屈による斜張力場の形成の有無であることが考えられる。
- ・ 桁端欠損モデルは桁端部が欠損したことで支点部下フランジの回転量が大きくなり補剛材に面外変形が生じ、補剛材が局部座屈したと考えられる。
- ・ 今回解析した補修部材において、アングル材は直接的に耐力を増加させるが、支圧板も補剛材下端部の局部座屈を抑制することで、ある程度耐力を増加させる効果があることが確認された。
- ・ 本解析では、モデルの単純化のため、補修部材と桁との接触面を完全結合としてモデル化したが、今後は、それらの接触面におけるすべりや離間、さらにはボルト孔による断面欠損も考慮する必要がある。
- ・ 実際の腐食では桁端下端部ウェブが腐食した場合、それに伴い、フランジや補剛材も腐食することも考えられ、今後はそれらの腐食や他の腐食パターンについても検討する必要がある。
- ・ 本解析において、腐食による断面欠損は考慮したが、それに伴う座屈等の変形を考慮していない。したがって、今後は腐食損傷に伴って局部座屈が生じた桁の補修効果についても検討する必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、宇都宮大学大学院の中島章典教授、石川工業高等専門学校の中島幸子教授、大阪市立大学大学院の山口隆司教授、および東京コンサルタンツ(株)の白倉誠氏には貴重なご助言を戴いた。ここに記して深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：平成19年度予算参考資料新規制度等概要，2006。
- 2) 日本橋梁建設協会保全委員会保全技術小委員会：4. 鋼橋の維持管理に配慮した設計・施工の留意点—過去の補修・補強事例からのフィードバック—，2009。
- 3) 日本道路協会：道路示方書・同解説，Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，丸善，2002。
- 4) 例えば、山口栄輝、赤木利彰：腐食した鋼Ⅰ形桁の支点部耐力に関する考察，構造工学論文集，土木学会，Vol.59A，pp80-90，2013。
- 5) 全日本建設技術協会：建設省制定土木構造物標準設計，1994。
- 6) Dassult Systems Simulia：ABQUS 6.7 User's Manual，2008。
- 7) Usukura M, Yamaguchi T, Suzuki Y, Mitsugi Y：STRENGTH EVALUATION FOR A CORRODED DAMAGED STEEL GIRDER END CONSIDERING ITS COLLAPSE MECHANISM, The 13th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Sapporo, Japan, 2013。