腐食劣化した鋼桁端部の座屈プロセスと使用限界評価に関する解析的研究

設計工学講座　　有馬　安倫

1. はじめに

我が国の鋼橋の多くは高度経済成長期に建設され，その大半が供用から約50年以上経過しており，近年、腐食による経年劣化が問題視されている．特に図-1に示す桁端部は伸縮装置の漏水などによって，他の部位に比べて腐食進行しやすい環境にある．そのため腐食した桁端部に対するせん断座屈特性に関する研究や，支点部の圧縮座屈特性に関する研究が数多く行われている．しかしながら，実橋の桁端部では，支点部の圧縮座屈と腹板のせん断座屈が連成して起きる可能性があり，橋梁の安全性を確実に診断するためには，2つの座屈特性を勘案した評価手法が求められる．

以上のように，腐食した鋼橋桁端部の診断手法は未確立であるため，腐食後の残存耐荷力があるにも関わらず，安全側の判断により通行止めが行われている．その通行止めの鋼橋の数は2700橋を超えており，診断手法の確立は急務である．

そこで本研究では，様々な腐食パターンを有する鋼桁端部の支点部圧縮座屈と腹板せん断座屈の両方を評価可能な弾塑性FEM解析モデルを構築し，腐食した桁端部の座屈プロセスを特定し，鋼橋の使用限界に関する評価法を検討することを目的とする．

2. 解析手法と評価方法

本章では鋼桁端部の座屈特性を評価可能な弾塑性解析モデルの構築を行い，実橋で発生している様々な腐食をパターンを対象に解析を行った．汎用有限要素解析ソフトAbaqus/Standard 2017を用いた．

(1) 解析モデル

鋼桁端部のモデル化に際し，構造諸元は実橋の設計図及び文献1)を参考にして，図-2に示す解析モデルを作成した．適用要素は，主桁をshell要素，荷重載荷位置の上フランジと支点部のソールプレートをsolid要素で作成した．また，図-2に示す評価対象の桁端部の要素サイズを20mmとし，その他を50mmとした．鋼材のヤング率，ポアソン比，降伏応力はそれぞれ2.0×10^5 N/mm^2，0.3， 245 N/mm^{2}とし，初期不整は，事前に固有値解析を行い，径間側腹板に1次モードの最大値を6.7mmとして与えた．また，最大値は水平補剛材下の腹板の高さを150で割ったものである．

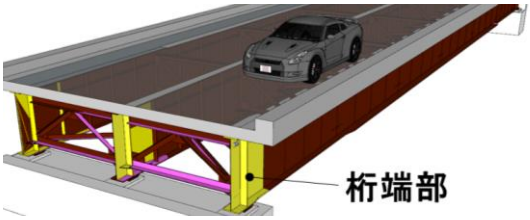


図-1　橋梁全体図

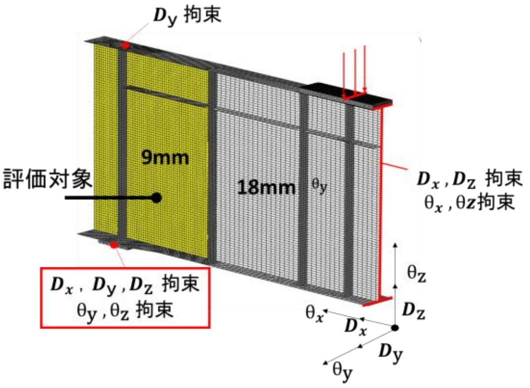


図-2　解析モデル

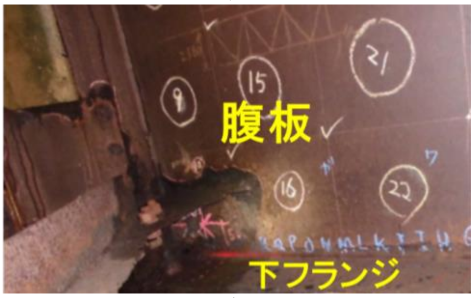
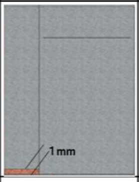
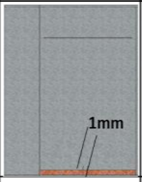
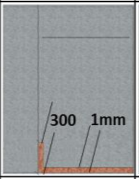
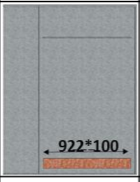
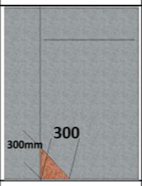
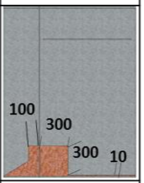


図-3　実橋梁の腐食例(パターン8)

表-1　腐食モデルと解析

	1	2	3	4	5	6	7	8
腐食率 (%)								
50	腐食1-50	腐食2-50	腐食3-50	腐食4-50	腐食5-50	腐食6-50	腐食7-50	腐食8-50
75	腐食1-75	腐食2-75	腐食3-75	腐食4-75	腐食5-75	腐食6-75	腐食7-75	腐食8-75
90								腐食8-100
100		腐食2-100	腐食3-100	腐食4-100	腐食5-100	腐食6-100	腐食7-100	

(2)境界条件

桁上部に床版があることを勘案して，赤ラインと上フランジ上部に D_y を拘束．支点部は線支承で固定支承とした．また，赤ラインに対象となる境界条件を与えた．桁端部にせん断力が卓越するような載荷位置を支間中央とした．

(3)　解析パラメーター

本解析の腐食パラメータを表−1に示す．腹板の腐食を文献2)を参考に，腐食パターン1から腐食パターン4を設定した．また，沖縄地域の実橋での腐食調査結果を基に，腐食パターン5から腐食パターン8の腐食モデルを作成した．腐食事例の写真を図−3に示す．また，各腐食パターンに対する腐食率（健全板厚に対する板厚減少の割合）は50%(1/2に減厚)，75%(1/4に減厚)，90%もしくは100%(欠損)とした．

(4)　座屈の判定

せん断座屈の判定は、既往研究[2]を参考に腹板表裏の最小主ひずみ分岐挙動と腹板面外変形の2乗の変化挙動の両方で判定した．ここで，面外変位の2乗 δ^2 の変化の判定は荷重Vと面外変位の2乗 δ^2 の増分量 $\angle V$ と $\angle\delta^2$ の傾き角度 $\{\tan^{-1}(\angle V/\angle\delta^2)\}$ を用いてせん断座屈の判定を行った．また，圧縮座屈は面外方向変位の増加，支点近傍の挙動を1stepごとに確認を行い判定を行った．

(5)　健全時における座屈プロセス

各腐食パラメータの解析結果より，支点部の圧縮座屈腹板のせん断座屈，それらの連成座屈を特定した．

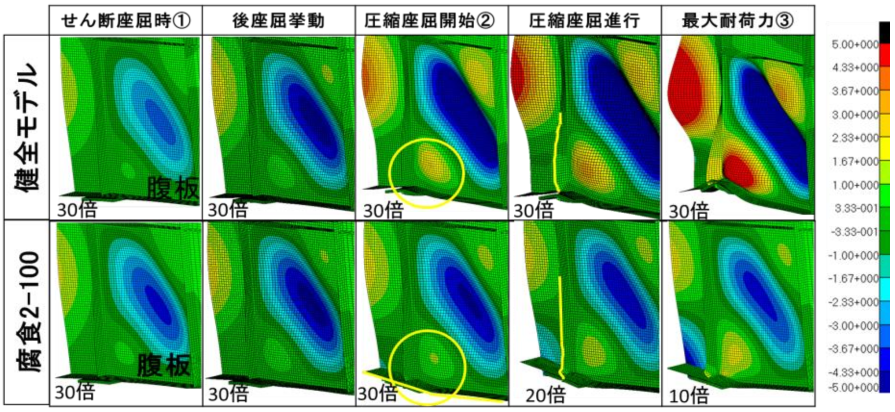
図−4に解析で得られた健全時の座屈プロセスを示す．先ず，腹板にせん断座屈が発生し，せん断座屈進行後に斜め張力場の形成による後座屈挙動に移行する．次に，支点部における圧縮力の増加により，支点近傍の腹板に局部圧縮座屈が発生する．その後，垂直補剛材下部に圧縮座屈が発生する．図−5に荷重と載荷位置鉛直変位の関係を示す．図-5より，せん断座屈から最大耐荷力までの残存耐荷力が54%（925kN）であり，十分な残存耐荷力を有している．その理由として，腹板のせん断座屈は，座屈後の形成される斜め張力場による後座屈挙動の効果である．それに対して，圧縮座屈から最大耐荷力までの残存耐荷力は11%（194kN）と僅かであった．

3.　腐食モデル

(1)腐食モデルにおける座屈プロセス.

a)座屈プロセス1

本座屈プロセスは，健全モデルの座屈プロセス同様に，せん断座屈→腹板の局部圧縮座屈→支点部の圧縮座屈のプロセスとなり，せん断座屈と圧縮座屈が連成して起こる．以上に該当する腐食モデルの結果を示す．図−4に健全モデルと腐食2-100モデルにおける座屈プロセスの比較を示す．図より，腐食2-100モデルは健全モデルと同様に，先ず，せん断座屈が発生し，後座屈挙動後，支点近傍の腹板に圧縮座屈が発生する．腐食2-100モデルは桁端部側の腹板下部が欠損しているため，下フランジが面外方向に変形するとともに，垂直補剛材下部での変形が増大し，最終的に腹板のせん断座屈より垂直補剛



図−4　座屈プロセス(面外変位)

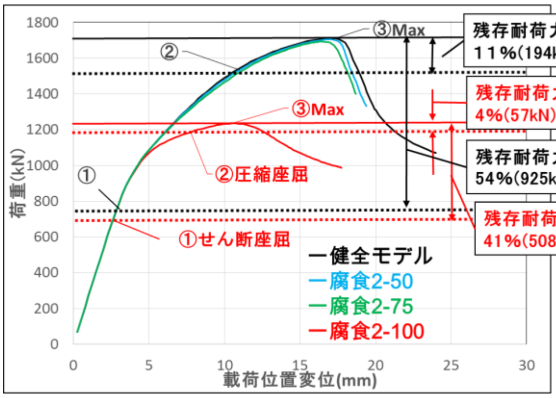


図-5　健全と腐食2の残存耐荷力

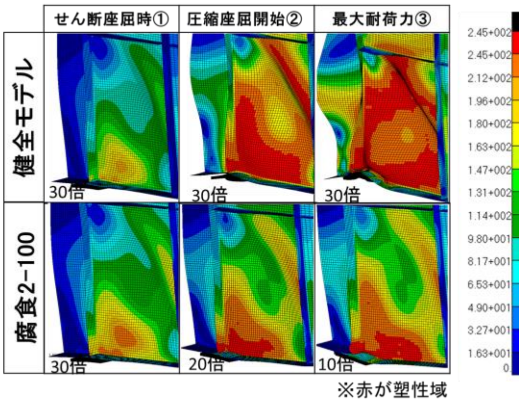


図-6　Von mises応力のコンター図

材下部の圧縮座屈が顕著となっていることがわかる．また， 図-6 の塑性域のコンターからわかるように支点近傍に塑性域が集中していることが分かる．

図-5 に荷重と載荷位置鉛直変位の関係を示す．桁端部側の腹板が欠損することで最大耐荷力が，健全時より大きく低下していることが分かる．また，せん断座屈時の残存耐荷力は概ね同じであるが，圧縮座屈から最大耐荷力までの残存耐荷力は，健全時で 11%（194kN）に対して， 腐食 2-100 モデルでは 5%（57kN）と残存耐荷力が大きく減少していることが分かる．

b)座屈プロセス２

本座屈プロセスは，圧縮座屈のみの発生であり，せん断座屈が発生しない．以下に該当する腐食モデルでの結果を示す．

図-7 に腐食 4-100 の座屈プロセスを示す．腐食 4-100 はせん断座屈は発生せず圧縮座屈のみであった．せん断座屈が発生しない理由として，腹板の支持条件にあり，健全時の 4 辺支持から 3 辺支持 1 辺自由に変わった影響が考えられる．また，斜め張力場のアンカー位置に断面欠損が生じていることの影響もある．そのため垂直補剛材における荷重負担が集中したため，圧縮座屈が先行して生じたと考えられる．図-7 からわかるように腹板の面外変形より，垂直補剛材の変形が著しいことが分かる．

図-8 に荷重と載荷位置鉛直変位の関係を示す．径間側の腹板が欠損することで最大耐荷力が，健全時より大きく低下したことが分かる．また，圧縮座屈から最大耐荷力までの残存耐荷力は，健全時 11%（194kN）に対して， 腐食 4-100 は 3%（33kN）と残存耐荷力が減少していることが分かる．

c)座屈プロセス３

本座屈プロセスは，せん断座屈が支配的である．以下に該当する腐食モデルの結果を示す．

図-9 に腐食 5-50 の座屈プロセスを示す．健全時と同様にせん断座屈は発生する．しかしながら後座屈挙動時に腐食部における面外変位が増大する特徴を有する．また，最大耐力時の支点近傍において，圧縮座屈が発生していないことがわかる．

図-10 に荷重と載荷位置鉛直変位の関係を示す．径間側側の腹板中上部が腐食することことによって最大耐荷力が，健全時より低下していることが分かる．せん断座屈開始時から最大耐荷力までの残存耐荷力も健全時は 54%（925kN）に対して，腐食 5-50 では 41%（797kN）と残存耐荷力が減少していることが分かる．

(3)座屈プロセスの整理

以上のことより，座屈プロセスは 3 パターンで整理できる．表―2 に各腐食パターンおよび減肉率と 3 つの座屈パターンに対するまとめを示す．

A)　座屈プロセス１（せん断座屈と圧縮座屈の連成座屈）

腹板に断面欠損が生じない場合に主にみられる．

B)　座屈プロセス２（圧縮座屈のみ）

主に支点範囲近傍で断面欠損が生じた場合にみられる．

C)　座屈プロセス３（せん断座屈のみ）

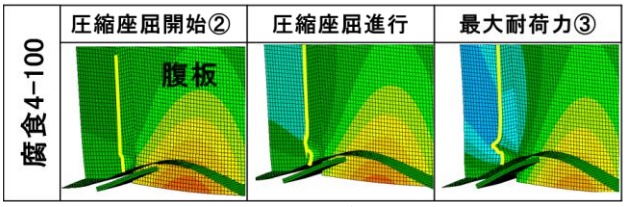


図-7　座屈プロセス(変形倍率 15 倍)

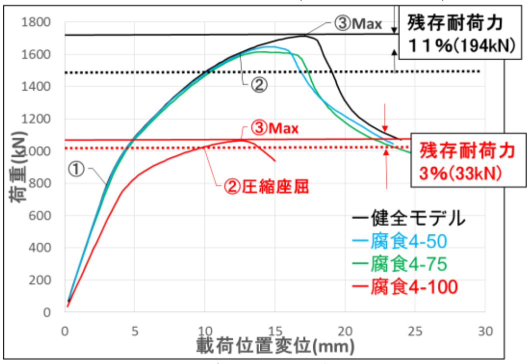


図-8　腐食 4 の残存耐荷力

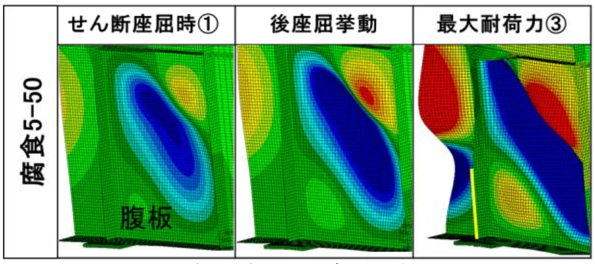


図-9　座屈プロセス(変形倍率 15 倍)

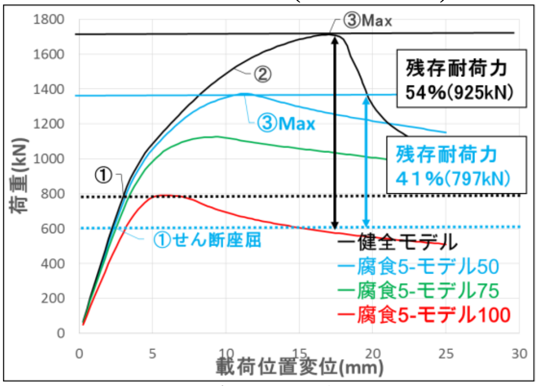


図-10　腐食 5 の残存耐荷力

表-2　座屈プロセスの整理

A 連成座屈	B 圧縮座屈	C せん断座屈
健全 腐食 2-50,75100 腐食 3-50,75 腐食 4-50, 75 腐食 6-50 腐食 7-50,75	腐食 3-100 腐食 4-100 腐食 6-75,100 腐食 7-100 腐食 8-all	腐食 1-50,75 腐食 5-50,75,100
モニタリング	通行止め	通行止め

主に径間側の腹板中上部，全面均一に腐食が生じた場合にみられる．

以上にように，腐食位置，腐食率によって座屈プロセスが変わることが分かる．

4. 使用限界評価

使用限界評価としては，3 章で分析した残存耐荷力を考慮して，表−2 に示すように座屈後の残存耐荷力が低い座屈プロセス 2，3 の腐食モデルは通行止めの交通規制と判断できる．よって，本章では座屈後の残存耐荷力に十分な余裕がある座屈プロセス 1 の使用限界評価を検討した．以下にその検討結果を示す．

(1)評価方法

図−11 に解析結果を踏まえた評価ポイントを示す．そのポイントは，せん断座屈後の後座屈強度を持続している間，次の座屈現象である圧縮座屈の予兆を捉えることが可能なポイントである．まず，せん断座屈の判定を行うために，腹板中央部に白色のポイントでの面外変位を計測する．次に圧縮座屈の予兆を捉えるために，垂直補剛材と腹板で形成される柱の腹板側に pointA の z 方向ひずみを計測する．これらの計測データを基に，腐食した鋼橋の挙動を監視し，圧縮座屈の予兆があった場合は通行規制を実施するシナリオである．

(2)使用限界評価結果(健全モデル)

図−12 に荷重と z 方向ひずみの関係を示す．ひずみ値が線形から非線形になる変曲点を捉えることができる．また，その時の変形図と荷重と載荷位置の関係を図−13 と図−14 に示す．変曲点時から最大耐荷力までの残存耐荷力が 29%（489kN）と余裕があることが分かる．また，圧縮座屈時よりも余裕がある状態で評価できている．変形からも圧縮座屈発生前に予兆を捉えている．

(3)腐食モデルによる適用性(腐食 2-100 モデル)

腐食 2-100 モデルの荷重-z 方向ひずみの関係を図−15，変形図と荷重と載荷位置の関係を図−16 と図−17 に示す．同様に腐食モデルでも，ひずみの変曲点を捉えることができ，変曲点時から最大耐荷力までの残存耐荷力が 29%で 349kN と耐荷力に余裕がある状態で圧縮座屈発生の予兆を捉えている．

5 結論

本研究の結論を以下に示す．

1）鋼桁端部のせん断座屈，圧縮座屈，その連成座屈を評価可能な弾塑性 FEM 解析モデルを構築した．

2) 座屈プロセスは 3 パターンに整理することができ，腐食部，腐食率によって座屈プロセスが変わる．

3) 使用限界評価を行うにあたって，垂直補剛材下部近傍の径間側腹板の z 方向ひずみから，圧縮座屈の予兆を捉えることができる．

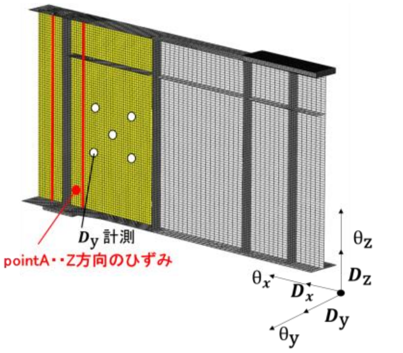


図-11　評価ポイント

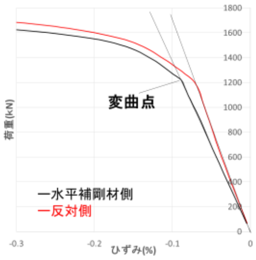


図-12 荷重-ひずみ

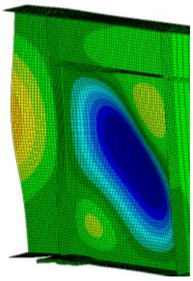


図-13 変曲点時変形図(30 倍)

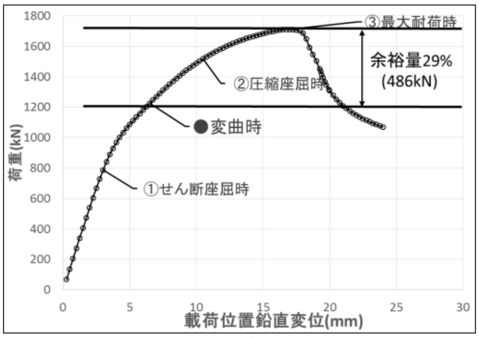


図-14　残存耐荷力

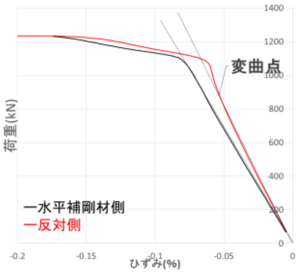


図-15 荷重-ひずみ

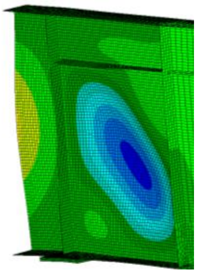


図-16　変曲点時変形図(30 倍)

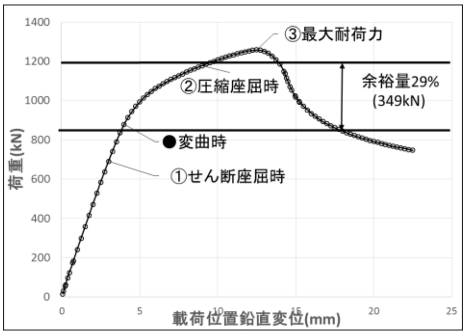


図-17　残存耐荷力

参考文献

1) 臼倉誠ほか: 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 Vol.56A. pp.722-732，2010.3

2) 玉越隆史ほか：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

3) 下里 哲弘ほか：実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断強度特性に関する実験的研究，土木学会論文集 vol,70,No.3,359-376,2014