

腐食損傷を有する組立柱の弱軸まわりの曲げ座屈強度

上月 凜* 中来田 宰** 三好 崇夫*

Weak axis flexural buckling strength of the built-up column with corrosion damage

Rin KOZUKI*, Tsukasa NAKAKITA** and Takao MIYOSHI*

ABSTRACT

Recently, an occurrence of plate thinning and vanishment due to corrosion is found in some built-up members. The authors investigated the weak axis flexural buckling strength of the built-up column with corrosion damage by using finite element analysis. We looked at the vanishment of lacing bars and end tie plates and partial loss of channel-shaped steel. As a result, the weak axis flexural buckling strength of all built-up columns did not reach its yield strength, whereas the strength of the columns without some lacing bars and end tie plates exceeded the design ultimate strength based on the ultimate strength curve specified in Japan Specifications for Highway Bridges. In addition, the built-up column with a web and a flange partial loss of the channel-shaped steel showed lower buckling strength than the built-up columns with vanished lacing bars and end tie plates. In particular, the built-up column with the partial loss of flange and the web at the span center shows significantly low buckling strength. Furthermore, partial loss of the compressive flange lowers buckling strength prominently.

KEY WORDS : built-up column, corrosion, weak-axis, buckling strength

1. はじめに

1960年代頃までに建設された鋼橋の組立材には、写真1に示すように、エンドタイププレート（以下では、E.T.P.と称する）、溝形鋼の腐食減肉、レーシングバー（以下では、L.B.と称する）の腐食による消失等が認められている。この種の組立材の座屈・耐荷力特性を明確にするため、著者らはこれまでに、実橋から撤去された組立材から試験片を採取し、各種材料試験¹⁾や残留応力計測²⁾を実施した。また、圧縮力を受ける組立材（本研究では、組立柱と称する）の耐荷性状として、腐食に伴うL.B.の消失が確認された上路式鋼アーチ橋の鉛直材を対象に、強軸まわり（主構面外方向）

の曲げ座屈強度について解析的に検討した^{2),3)}。しかし、組立柱の弱軸まわり（主構面内方向）の曲げ座屈強度特性については明確にされていない。

本研究の目的は、腐食によるL.B.の消失が確認された上路式鋼アーチ橋の鉛直材を対象として、弱軸まわり（主構面内方向）の曲げ座屈強度特性について、解析的に明らかにすることである。



(a) E. T. P.

(b) 溝形鋼

(c) L. B.

写真1 組立材の腐食

*都市システム工学科

**建築・都市システム工学専攻

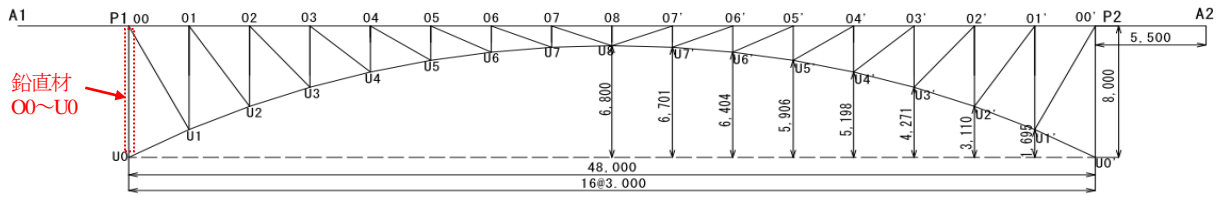


図 1 調査対象とした上路式鋼アーチ橋の側面図

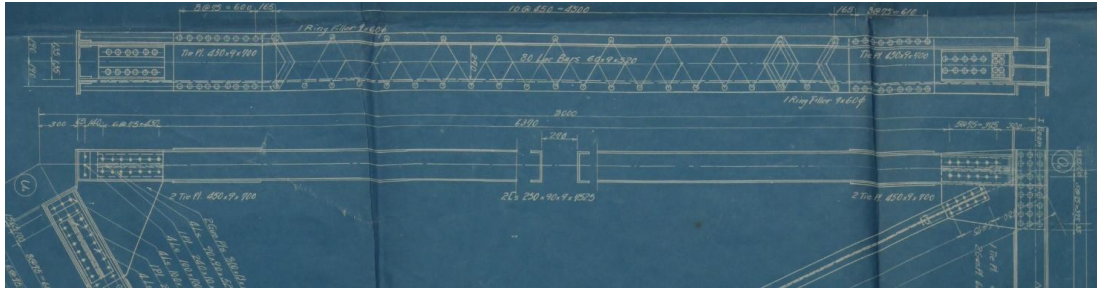


写真 2 対象とする鉛直材の製作図面

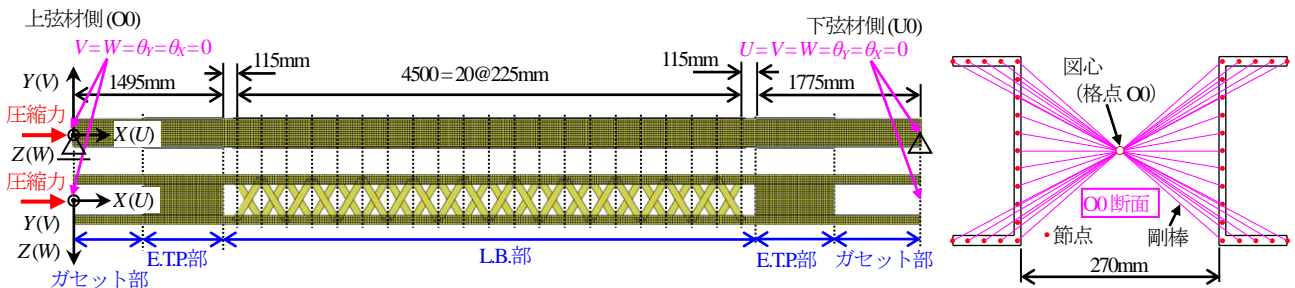


図 2 有限要素モデル

2. 対象部材と解析モデル

本研究で対象とした組立柱は、図 1 に側面図を示すように、1933 年に竣工した A 橋 (2 ヒンジスパンドレルブレースドリブアーチ橋) の鉛直材 O0~U0 である。同部材の製作図面を写真 2 に示すが、同部材は溝形鋼 (250×90×9×7525) 2 本, LB. (60×9×520) 40 枚, および E.T.P. (450×9×700) 4 枚から構成されており、部材両端は上弦材 (格点 O0), 下弦材 (格点 U0) にガセットプレートを介して連結されている。A 橋の設計計算書によれば、同鉛直材は死荷重と活荷重による圧縮力 435.8 kN に対して設計されており、写真 1(c) に示すように、腐食に伴い LB. が消失している。

鉛直材 O0~U0 に対する弱軸まわりの曲げ座屈強度特性を調べるため、先行研究^{4),5)}に基づいて、図 2 に示すような有限要素モデルを設定した。有限要素法解析には汎用コード Marc を用い、溝形鋼と E.T.P. は 4 節点シェル要素、LB. は 2 節点トラス要素でモデル化した。E.T.P. と溝形鋼間には Marc の接着接触機能を用いて接続し、LB. と溝形鋼を接続するリベットのモデル化は省略した。部材端の図心に節点を定義し、同節点と部材端の溝形鋼の節点間を剛棒で接続した。

ガセットにより連結された主構腹材の面外方向の有効座屈長は、連結高力ボルト群の重心間距離をとり、骨組長の 0.8 倍を下回ってはならないとされている⁹⁾。しかし、複雑に鋼材を重ねて構成される組立材ガセット部の重心位置を算定するのは容易でないため、本研究では、安全側を見て骨組長を有効座屈長とみなして、格点間を対象にモデル化した。

溝形鋼、E.T.P. と LB. の材質は SS400 相当とみなして、弾性係数は 200 kN/mm²、Poisson 比は 0.3、降伏応力は 235 N/mm²、弾性係数の 1/100 倍の二次勾配を持つバイリニア型構成式を仮定した。部材端ガセット部のモデル化については議論の余地は残されているが、既往の剛体要素を使用した片持柱の有限要素法による弾性有限変位解析⁷⁾を参考に、その他の部分の 10³ 倍の弾性係数を持つ線形弾性体とした。

3. 初期不整

計測結果²⁾によれば、組立材を構成する溝形鋼の部材軸方向の残留応力は、溶接製作部材に比べて小さいため無視した。初期たわみに関しては、図 3 に示すように、+Y 軸側が凸となる形状を基本として、溝形鋼フランジ側の消失や欠損に対する曲げ圧縮・引張を考

慮するため、 $-Y$ 軸側が凸となる形状も仮定した。初期たわみの最大値 V_{0max} の大きさは、道路橋示方書⁹⁾の柱部材の製作精度を準用して次式で与えた。

$$V_{0max} = \frac{L}{1000} \quad (1)$$

ここに、 L ：部材長である。

図-3(a), (b)の初期たわみ形状はそれぞれ式(2), (3)で表される。

$$V_0 = V_{0max} \sin\left(\frac{\pi}{L} X\right) \quad (2)$$

$$V_0 = -V_{0max} \sin\left(\frac{\pi}{L} X\right) \quad (3)$$

4. 解析ケース

組立柱の構成要素である LB., E.TPや形鋼の腐食形態は様々であり、部分的な欠損や減肉を生じているケースも見られるが、欠損の発生位置も種々雑多である。そこで、本研究では、既往の研究⁸⁾と同様に、LB.とE.TPの腐食については、各々の消失とみなしてモデル化し、溝形鋼については、その腹板、フランジの全幅にわたって、部材軸方向には部分的な欠損としてモデル化した。組立柱は X, Y 軸方向には概ね対称構造を持つため、健全状態の解析ケース H, 先行研究³⁾を参考に、LB.が消失した解析ケース、E.TPが消失した解析ケース、溝形鋼の支間中央と E.TP直近のフランジや腹板が消失した解析ケースについて設定した。

4・1 LB.の腐食消失ケース

対象とする組立柱には複数の LB.が存在し、消失させる LB.の組み合わせも無数にあるため、 $+Y$ 軸方向に初期たわみを持つ図 2 の有限要素モデルに、設計圧縮力 $P = 952 \text{ kN}$ を作用させる線形弾性解析を実施した。その結果得られた図 4 に示す LB.の軸力分布に基づいて、消失させる LB.を選定した。

図 4 より、組立柱が $+Y$ 軸方向への初期たわみを持つため、同方向に圧縮力の偏心に伴う曲げ変形を生じており、Poisson 効果により $+Y$ 軸側は 2本の溝形鋼の間隔が狭まるように、 $-Y$ 軸側は 2本の溝形鋼の間隔が広がるように変形している。溝形鋼間の変形に対する拘束効果が急変する E.TP.近傍を除いては、Poisson 効果によって、 $+Y$ 軸側の LB.の殆どには圧縮力が、 $-Y$ 軸側の LB.の殆どには引張力が生じている。軸力の絶対最大値は上弦材側から 19 連目の $+Y$ 軸側に 0.24 kN が、 Y 軸方向にペアをなす LB.の軸力の絶対値の和の最大値 0.38 kN も 19 連目に生じている。

以上より、LB.の欠損を対象とする解析ケースとし

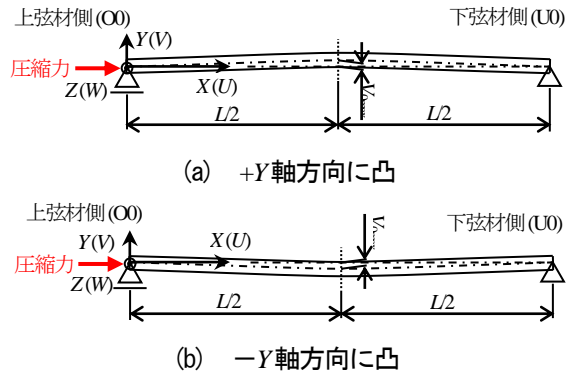


図 3 初期たわみ形状

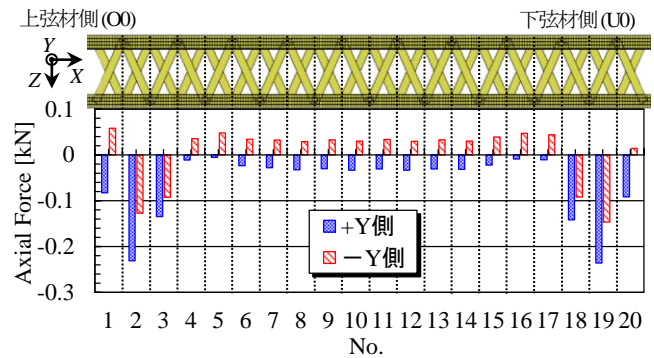


図 4 線形弾性解析による LB.の軸力分布

て、19 連目の $+Y$ 軸側の LB.が消失した解析ケース 1LBP, 19 連目の LB.のペアが消失した解析ケース 2LBP, 実橋の現地調査によって消失の認められた 9 連目の $+Y$ 軸側の LB.が消失した解析ケース 9PLBP, 比較のため全ての LB.が消失する解析ケース ALBP を設定した。なお、LB.を消失させる解析ケースについては、別途実施した検討より、初期たわみの向きの影響は認められなかったため、 $+Y$ 軸方向の初期たわみを有するケースのみを設定した。消失や欠損させる部材名称とその位置を図 5 に、解析ケース名と欠損箇所について表 1 にまとめて示す。

4・2 E.TP.の腐食消失ケース

対象とする組立柱は、厳密には部材軸方向に非対称であり、消失する E.TP.が曲げ圧縮側、引張側のいずれに位置するかに応じて耐荷性状が変化すると考えられるため、 $+Y$ 軸側に凸な初期たわみを持つ場合について、上、下弦材側の $+Y$ 側 E.TP.がそれぞれ消失した解析ケース UETP, LETP, いずれも消失した解析ケース 2ETP, $-Y$ 軸側に凸な初期たわみを持つ場合について、上、下弦材側の $+Y$ 側 E.TP.がそれぞれ消失した解析ケース UETN, LETN, いずれも消失した解析ケース 2ETN を設定した。

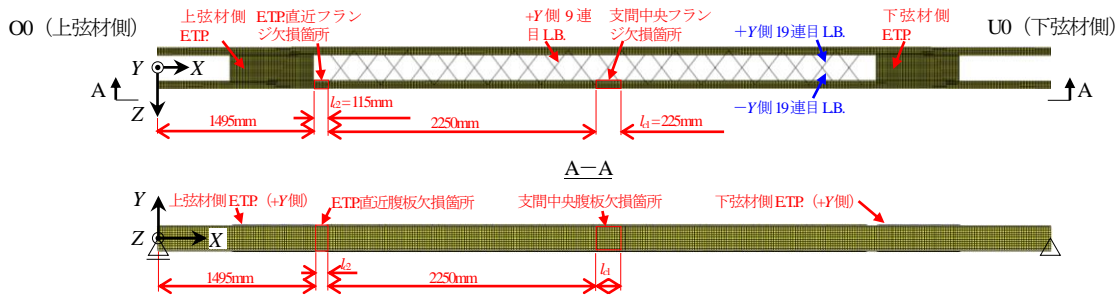


図 5 組立柱の部材名称, 欠損箇所

表 1 解析ケース一覧表

解析ケース名	腐食欠損の有無と箇所	初期たわみ	摘要
H (GIP)	なし	+Y側に凸	健全状態を想定, -Y側に凸な初期たわみを持つ場合はGIN
ALBP	全てのLB.	+Y側に凸	
1LBP	軸力が絶対最大の上弦材側から19連目の+Y軸側LB.	+Y側に凸	消失LB.が曲げ引張側
9PLBP	上弦材側から9連目の+Y軸側LB.	+Y側に凸	現地調査で消失が確認されたLB.が曲げ引張側
2LBP	軸力の絶対値の和が最大である, 上弦材側から19連目のLB.のペア	+Y側に凸	
UETP	上弦材側, +Y軸側のETP.	+Y側に凸	消失ETP.は曲げ引張側
UETN	同上	-Y側に凸	消失ETP.は曲げ圧縮側
2ETP	+Y軸側のETP.2枚	+Y側に凸	消失ETP.は曲げ引張側
2ETN	+Y軸側のETP.2枚	-Y側に凸	消失ETP.は曲げ圧縮側
1LETN	下弦材側, +Y軸側のETP.	+Y側に凸	消失ETP.は曲げ引張側
1LETN	同上	-Y側に凸	消失ETP.は曲げ圧縮側
CW1P	+Z軸側溝形鋼, 支間中央部の腹板	+Y側に凸	腹板全幅欠損
CW2P	+Z軸側溝形鋼, ETP直近の腹板	+Y側に凸	腹板全幅欠損
CF1P	+Z軸側溝形鋼, 支間中央部の+Y軸側フランジ	+Y側に凸	フランジ全幅欠損, 欠損部は曲げ引張側
CF1N	+Z軸側溝形鋼, 支間中央部の+Y軸側フランジ	-Y側に凸	フランジ全幅欠損, 欠損部は曲げ圧縮側
CF2P	+Z軸側溝形鋼, ETP直近の+Y軸側フランジ	+Y側に凸	フランジ全幅欠損, 欠損部は曲げ引張側
CF2N	+Z軸側溝形鋼, ETP直近の+Y軸側フランジ	-Y側に凸	フランジ全幅欠損, 欠損部は曲げ圧縮側

4・3 溝形鋼の腐食欠損ケース

本研究では, 腐食欠損が組立柱の耐荷性状に及ぼす影響を広く検討するため, 圧縮力による曲げモーメントが大きい部材中央付近と, せん断力が大きい ETP直近の+Z 側溝形鋼の+Y 側フランジと腹板の欠損を想定した. +Y 軸側に凸な初期たわみを持ち, 部材中央のフランジ, 腹板が欠損している解析ケースを CF1P, CW1P, ETP直近のフランジ, 腹板に欠損を有する解析ケースを CF2P, CW2P と称する. また, 部材中央と ETP直近のフランジが欠損し, -Y 軸側に凸な初期たわみをもつケースをそれぞれ CF1N, CF2N と称する.

図 5 に示すように, 腐食欠損の大きさは, 幅方向にはそれぞれフランジと腹板の全幅, 部材軸方向には, 解析ケース CF1P, CF1N, CW1P については上弦材側端部から 1495 mm のエンドタイプレート端から第 1 リベットまでの長さ 115 mm, 解析ケース CF2P, CF2N, CW2P については上弦材側端部から 3860 mm の第 11 から 12 リベットまでの長さ 225 mm とした.

5. 解析結果

5・1 荷重-変位関係

解析結果として, LB.が欠損したケース, ETP.が欠

損したケース, 溝形鋼が欠損したケースの別に, 圧縮力 P と載荷点の圧縮 (X) 軸方向変位 U の関係を図 6 に示す. ただし, P は図 2 に定義する組立柱の LB.部の降伏軸力 P_Y で, U は同部が降伏軸力に到達するときの変位 U_Y で無次元化した. また, 損傷のない初期状態における組立柱の P と U の関係の線形理論値 (L.S.), 2 本の溝形鋼を有効断面, 有効座屈長を部材長とみなして道路橋示方書⁹⁾に基づいて算定される終局荷重 P_U を P_Y で無次元化したパラメータ (UL) も併せて同図中に示す.

図 6 より, 健全ケースも含めて最大荷重は降伏軸力には到達せず, LB.や ETP.が消失しても最大荷重は設計上の終局荷重を上回ることが分かる.

図 6(a) より, LB.が 1~2 本消失する程度では最大荷重の低下や終局状態までの剛性の低下もほとんど認められない. 同図 (b) より, ETP.の消失は LB.の消失に比べて, 最大荷重までの剛性の低下や最大荷重の変動がやや目立つ.

表 2 は, 健全ケースと ETP.が消失したケースについて, +Y 軸側の ETP.の有無, 初期たわみを持つ組立柱への圧縮力の荷重による, +Y 軸側の ETP.の曲げ変形状態 (曲げ圧縮, 曲げ引張) と, 降伏軸力で無次元化した最大荷重 P_U/P_Y とその健全状態に対する強度比

を示している。これより、曲げ引張側の E.T.P.が消失している解析ケース UETP, LETP と 2ETP については、健全状態である解析ケース H よりも高い最大荷重を示している。

図 6(c) より、溝形鋼が欠損すると健全状態に比べていずれも最大荷重は低下することが分かる。表 3 は、溝形鋼が欠損したケースについて、各々の部材軸方向と断面内の欠損位置、初期たわみの凸方向と共に降伏

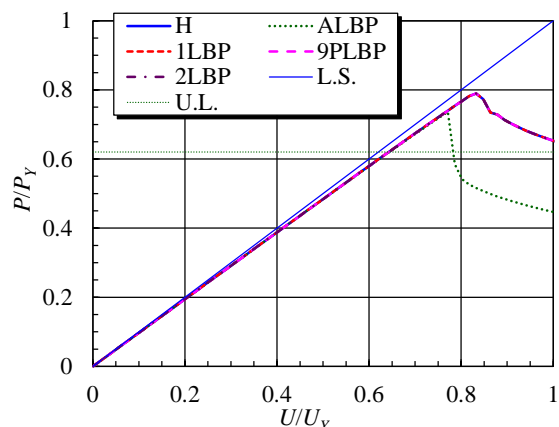
軸力で無次元化した最大荷重 P_u/P_Y を示している。

表 3 より、欠損部の部材方向の位置が支間中央であるほど、断面内の位置が腹板であるほど最大荷重が低下することが分かる。さらに、フランジに欠損が生じている場合については、それが曲げ圧縮側であると、かなりの最大荷重の低下を生ずることが分かる。

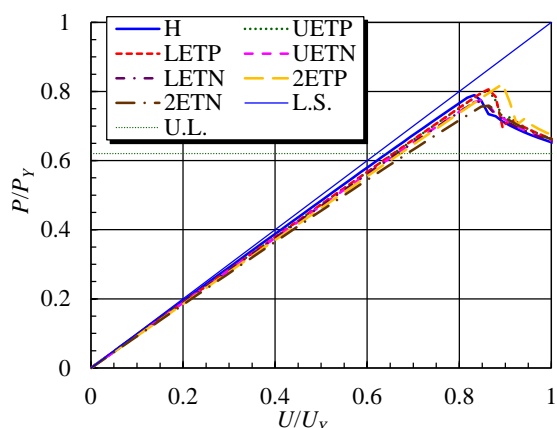
5・2 最大荷重時のたわみ分布

図 7 は、健全ケースと E.T.P.が消失している解析ケースについて、溝形鋼の高さ方向中央位置における最大荷重時のたわみ (Y 軸方向の変位 V) の X 軸方向に沿った分布を示している。ただし、健全ケースについては、初期たわみの凸方向が +Y 軸方向のケース GIP と、-Y 軸方向のケース GIN を設定した。

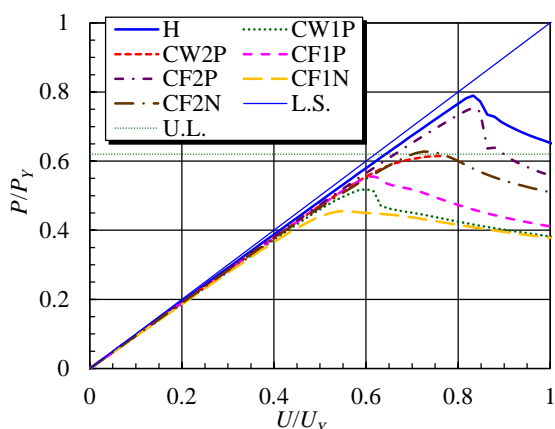
図 7(a) より、-Y 軸方向に初期たわみをもつケースについては、解析ケース GIN を除いては、消失した E.T.P.が曲げ圧縮側に位置しており、健全状態の解析ケース GIN に比べて、消失枚数の多いほどたわみが増大することが分かる。一方、同図 (b) より、+Y 軸方向に初期たわみをもつケースについては、解析ケース GIP を除いては、消失した E.T.P.が曲げ引張側に位置しており、健全状態の解析ケース GIP に比べて、消失枚数の多いほどたわみが低下しており、しかも E.T.P.の消失箇所では、-Y 軸方向に凸なたわみを生じることが分かる。



(a) L.B.の消失ケース



(b) E.T.P.の消失ケース



(c) 溝形鋼の欠損ケース

図 6 荷重-変位関係

表 2 E.T.P.が消失したケースの最大荷重

解析ケース	+Y 軸側 E.T.P.の有無		+Y 軸側 E.T.P.の変形	最大荷重 P_u/P_Y	強度比
	上弦材側	下弦材側			
H	あり	あり	曲げ引張	0.7896	1.00
UETP	なし	あり	曲げ引張	0.8030	1.02
LETP	あり	なし	曲げ引張	0.8064	1.02
UETN	なし	あり	曲げ圧縮	0.7750	0.98
LETN	あり	なし	曲げ圧縮	0.7709	0.98
2ETP	なし	なし	曲げ引張	0.8218	1.04
2ETN	なし	なし	曲げ圧縮	0.7588	0.96

表 3 溝形鋼が欠損したケースの最大荷重

解析ケース	欠損位置		初期たわみ方向	最大荷重 P_u/P_Y
	軸方向	断面内		
H	-	-	+Y 軸方向	0.7896
CW1P	支間中央	腹板	+Y 軸方向	0.5187
CW2P	E.T.P.直近	腹板	+Y 軸方向	0.6147
CF1P	支間中央	+Y 軸側フランジ	+Y 軸方向	0.5554
CF2P	E.T.P.直近	+Y 軸側フランジ	+Y 軸方向	0.7549
CF1N	支間中央	+Y 軸側フランジ	-Y 軸方向	0.4555
CF2N	E.T.P.直近	+Y 軸側フランジ	-Y 軸方向	0.6239

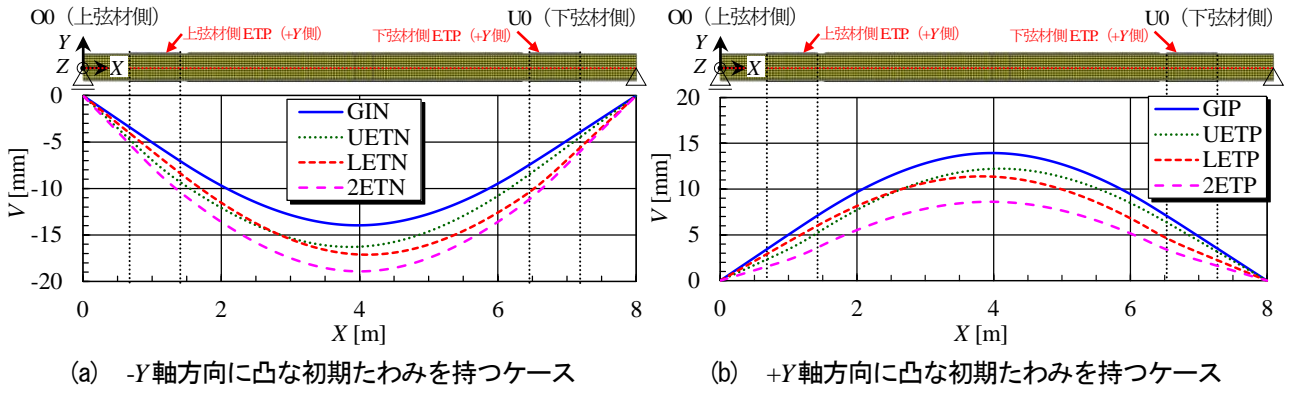


図7 最大荷重時のたわみ分布

5・3 溝形鋼腹板のひずみ分布の推移

図8には、健全ケースと E.T.P.消失ケースのうち、 $+Y$ 軸側に凸な初期たわみをもつものについて、上弦材側、下弦材側 E.T.P.中央部付近の $+Z$ 軸側の溝形鋼腹板 (A, B 断面) の高さ方向に沿った X 軸方向ひずみ ϵ_x の推移を示した。ただし、 ϵ_x は降伏ひずみ ϵ_{Y0} で無次元化し、強制圧縮変位量 U を L.B.部が降伏軸力に到達するときの圧縮変位 U_Y で無次元化した見かけのひずみが $0.15 \sim 0.77$ の5段階における推移を示した。 ϵ_x はシェル要素表裏面の平均値を示した。

図8(b), (c)より、E.T.P.の消失がなければ、圧縮強制変位の増大につれて、曲げ圧縮側である $-Y$ 側の圧縮ひずみが多少偏るものの、ほぼ断面内で一様なひずみ分布を呈することがわかる。見かけのひずみ U/U_Y に比べて ϵ_x/ϵ_{Y0} が小さいのは、E.T.P.の剛性分ひずみが低下したためであると考えられる。一方、同図(d)~(i)より、E.T.P.に欠損を持つケースについては、欠損したE.T.P.部の圧縮ひずみは、初期たわみの向きの $+Y$ 軸側で大きく、 $-Y$ 軸側で小さい。即ち、初期たわみによる曲げひずみとは逆向きの曲げひずみを生じている。これは、E.T.P.の消失によって同部の図心が $-Y$ 軸側へ移動していることによるものである。この結果、E.T.P.部には断面全体の初期たわみによる曲げモーメントを相殺する逆向きの曲げモーメントが生じ、それによって、圧縮力による曲げ変形が抑制され、健全状態と比べて強度が上昇したと考えられる。

5・4 変形状態と相当応力分布

無損傷状態の解析ケース H の最大荷重時における変形図と相当応力 σ_{eq} の分布を図9に示す。これより、支間中央の曲げ圧縮側 ($-Y$ 軸側) フランジは、圧縮力による応力に曲げ圧縮応力も加わるため、応力状態としては厳しく、降伏していることがわかる。1~2本のL.B.が消失した解析ケースについての図は省略するが、

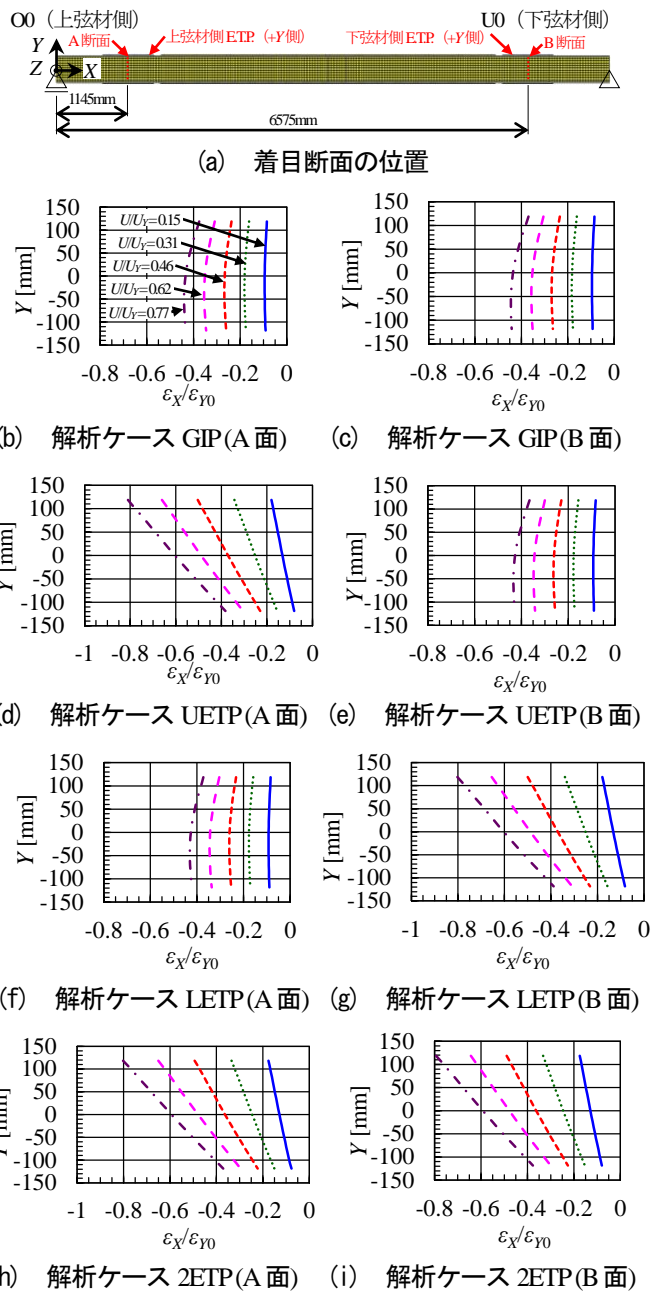


図8 ひずみ分布

消失した L.B.付近の溝形鋼に微妙な相当応力分布の相違は見られたものの、ほぼ解析ケース H と同様であった。

設定した解析ケースのうち、健全状態に比べて著しい最大荷重の低下を生じた、溝形鋼に欠損を有する解析ケースについて、最大荷重時における変形と相当応力分布を図 10 に示す。

図 10(a)より、解析ケース CW1P は支間中央の欠損した腹板部の曲げ圧縮側フランジに顕著な面外変形が、同図(b)より、解析ケース CW2P はせん断力の厳しい E.T.P.部で、せん断力の殆どを負担する腹板が欠損しているため、著しいせん断変形を生じて最大荷重に至っている。同図(c)～(f)より、支間中央、E.T.P.直近のフランジに欠損を持つ解析ケースについては、いずれも腹板を迂回して荷重が伝達されるため、腹板に面外変位を生じて最大荷重に至っている。ただし、E.T.P.直近が欠損しているケースでは、健全側溝形鋼フランジに

も塑性化が認められ、連続的に 2 つの溝形鋼をつなぐ E.T.P.を迂回して荷重が伝達されていることによるものと考えられる。

5・5 最大荷重の相対比較

各解析ケースの最大荷重 P_{max} を解析ケース H の最大荷重で P_H で除したパラメータを図 11 に示す。これより、1～2 本の L.B.の消失程度では強度低下は見られず、

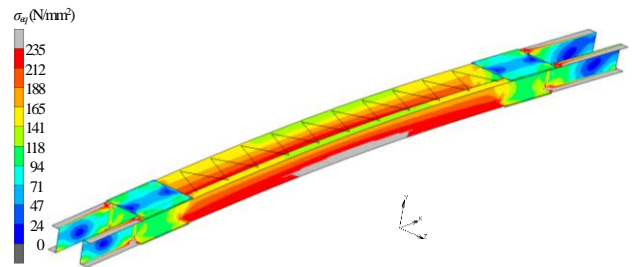


図 9 最大荷重時の変形と相当応力 (解析ケース H)

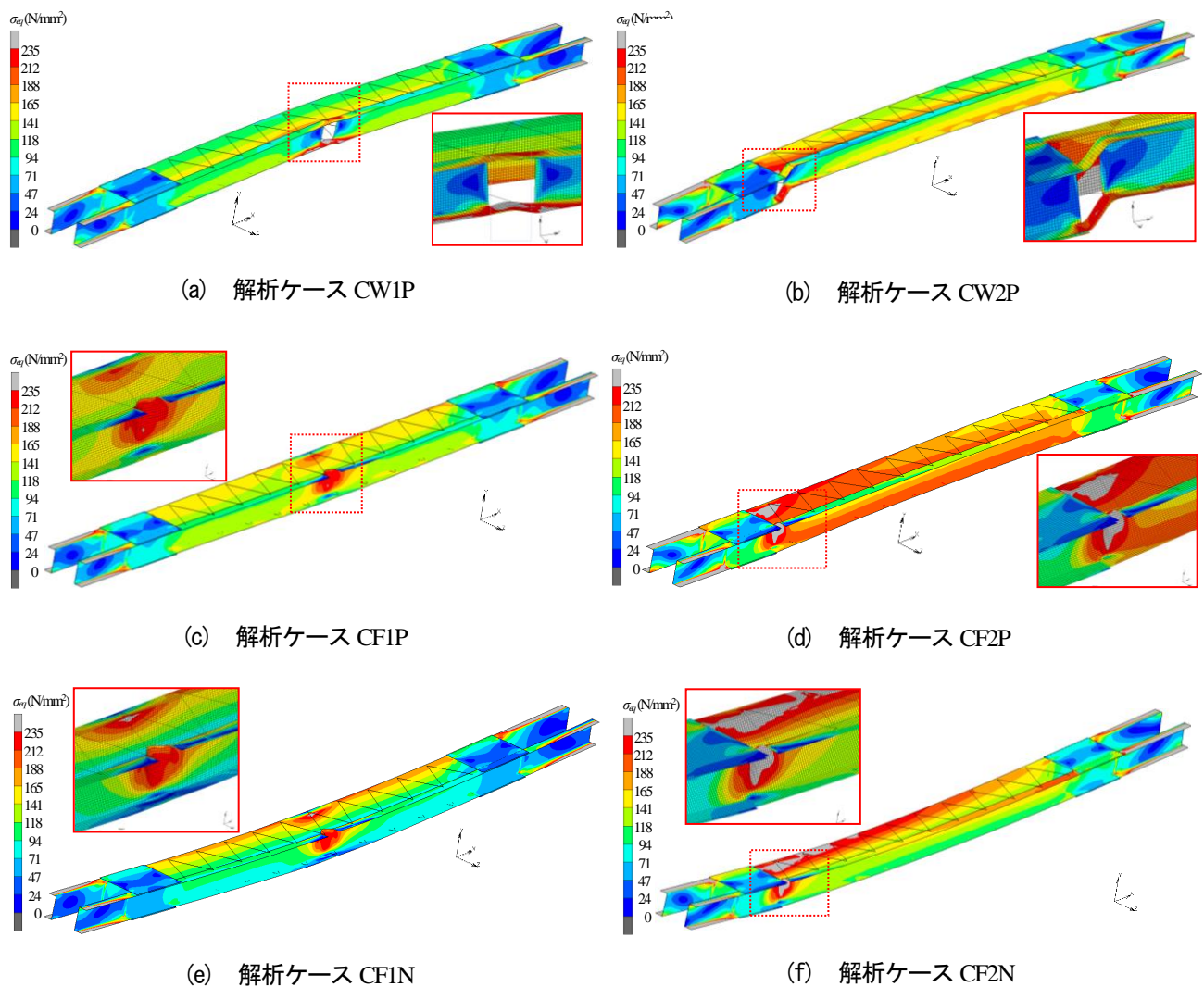


図 10 最大荷重時の変形と相当応力

全ての LB.が消失したとしても健全時に比べて強度低下は 1 割に満たない。ETP.が消失したケースについては、それが曲げ圧縮側か引張側かによって座屈強度に及ぶ影響は異なり、5・3 で述べたように、曲げ引張側の E.TP.が消失すると強度は上昇するが、いずれにせよ健全時と比べた強度の増減は 5%以内である。しかし、溝形鋼が欠損すると著しい強度低下を生じ、溝形鋼が組立柱の荷重伝達の主体であることが改めて確認される。E.TP.直近の腹板、フランジの欠損は最大でも健全状態に比べて 2 割程度の低下を示したが、特に支間中央の曲げ圧縮側フランジが欠損すると、最大荷重は健全時の半分近くまで低下する。

6. まとめ

本研究では、実橋の組立柱を対象に、LB., ETP.と溝形鋼にいくつかの消失や欠損パターンを想定して、弱軸周りの曲げ座屈強度について解析的に検討した。以下に、本研究から得られた知見をまとめる。

- (1) 弱軸周りの曲げ座屈強度は、健全状態にあっても降伏軸力には到達しないが、溝形鋼に欠損がなければ、文献 6)による設計上の強度は上回る。
- (2) 5%以内ではあるが、曲げ引張側の E.TP.の消失は、健全状態よりも曲げ座屈強度の増加をもたらす。曲げ引張側の E.TP.の消失は低下をもたらす。
- (3) (2)において、曲げ座屈強度の増加は、消失した E.TP.部断面の図心の移動に伴う曲げモーメントが、圧縮力による断面全体の曲げモーメントを相殺することによって生ずる。
- (4) 支間中央の溝形鋼腹板が欠損すると、ETP.近傍が欠損するよりも強度低下は大きく、前者は欠損部の圧縮フランジに面外変位、後者は欠損部にせん断変形が生じて最大荷重に至る。
- (5) 溝形鋼フランジは、欠損箇所が支間中央であるほど、曲げ圧縮側であるほど大きな強度低下を示し、欠損部腹板の曲げ圧縮側には、顕著な面外変位が生ずる。

LB.の降伏軸力は 127 kN、LB.を安全側に両端ピン支持された柱部材とみなせば、文献 6)によるその弱軸まわりの終局荷重は 30 kN である。本文では、頁数の制約により省略したが、各解析ケースにおいて LB.の最大引張軸力は降伏軸力の 10%程度、最大圧縮軸力は終局荷重の 50%程度であった。それらの結果の詳細については、機会を改めて報告したい。

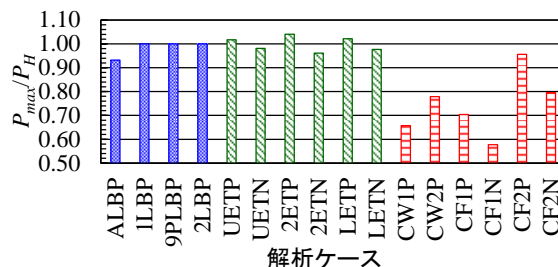


図 11 健全状態に対する強度比の相对比较

謝辞 本調査にあたっては、舞鶴工業高等専門学校建設システム工学科 玉田和也 教授、熊本高等専門学校生産システム工学系 AP グループ 岩坪要 教授、九州工業大学大学院工学研究院 建設社会工学研究系 高井俊和 准教授から貴重なご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 三好崇夫, 岩坪 要, 高井俊和, 玉田和也: 建設から 115 件が経過する鋼橋組立材の材料特性, 鋼構造年次論文報告集, Vol.29, pp.48-57, 2021.
- 2) 中來田宰, 三好崇夫, 岩坪 要, 高井俊和, 玉田和也: 経年溝形鋼の残留応力とレーシングバーが消失した組立柱の圧縮強度, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.112-122, 2022
- 3) 中來田宰, 三好崇夫, 岩坪 要, 高井俊和, 玉田和也: 腐食損傷を有する組立柱の終局挙動, 土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会 講演集, I-182, 2022.
- 4) 岩坪 要, 小田七海, 三好崇夫, 高井俊和, 玉田和也: 溝形鋼を用いた組立圧縮材の耐荷挙動, 鋼構造年次論文報告集, Vol.28, pp.102-108, 2020.
- 5) 小嶋悠太, 高井俊和: 初期不整を考慮した組立柱部材の座屈固有値に関する基礎的検討, 令和 2 年度土木学会西部支部研究発表会 講演概要集, I-26, pp.51-52, 2021.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 7) 中谷佳菜代, 三好崇夫: H ビーム橋主桁端の腐食過程における力学挙動に関する解析的研究, 鋼構造論文集, Vol.28, No.111, pp.63-78, 2021.
- 8) 白倉 誠, 山口隆司, 豊田雄介, 三ツ木幸子, 金銅晃久: 鈹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, Vol.57A, pp.724-734, 2013.