

腐食を模擬した模型桁のせん断耐力に関する実験および解析

Experimental and Analytical Study on Shear Capacity of Artificially Corroded Steel Girders

ボー タン フン*, 佐々木 栄一**, 市川 篤司***, 三木 千壽****

Vo Thanh Hung, Eiichi Sasaki, Atsushi Ichikawa, Chitoshi Miki

*東京工業大学院生, 理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 工修 東京工業大学助手, 大学院理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

***工博 (財)鉄道総合技術研究所 研究開発推進室(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

**** 工博 東京工業大学教授, 大学院理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

It has been a considerable practice to replace corroded steel-bridges even though they might still available to be used. There is a need to establish an effective and accurate method for estimating the remaining capacity of corroded steel bridges. In this research, the effect of corrosion on shear capacity of the steel bridges was studied. The experiments and finite element analyses on steel girders were carried out. As a result, the shear and shear-buckling capacities decreased as the rate of thickness reduction increased. Especially, the shear-buckling capacities were significantly decreased due to the effect of localized reduction of thickness. Good relation between the analytical and experimental results verified that the finite element analysis could be used as a reliable tool for estimating the remaining shear capacity of steel girders.

Key Words: steel bridges, corrosion, shear capacity, shear-buckling experiment

キーワード: 鋼橋, 腐食, せん断耐力, せん断座屈実験

1. はじめに

近年, 社会資本である土木構造物の蓄積は膨大になり, また戦後の高度成長期に作られた構造物の多くが建設後 30~40 年経過し, 老朽化が進んでいる. 一方で, 自動車の大型化, 交通量の増大などの社会環境の変化が進み, それに伴って維持管理問題の重要性が高まってきている.

鋼橋に関して言えば, 腐食が耐久性を左右する大きな問題になっている. 腐食については, 腐食状況の調査などの基礎的資料は蓄積されてきてはいるものの, その腐食損傷の程度に対する適切な評価と対処法は, 現時点では十分に確立されているとはいえない. そのため, これまでは腐食損傷がそれ程進んでいない鋼橋に対しても取り替えが行われていることが多いようである. 道路および鉄道における鋼橋の取り替え原因を分析すると, 以下に示すような特徴がある^{1), 2)}.

- ① 道路橋も鉄道橋も, 損傷など橋自身に問題があつて取り替えられたものは, 支間の拡張などの改良工事, 機能上の問題等他の要因によって取り替えられたものに比べて少ない.
- ② しかし, 損傷の面からは, 橋梁本体に問題があつて取り替えられた道路橋のうちの 26%が, 腐食が原因で取り替えられている. また, 鉄道橋では, 全体の約 25%が腐

食が原因で取り替えられている.

鋼橋が腐食損傷を受けると, 各部材の断面積が低下し耐荷機能が妨げられることにより橋の残存耐力が減少する. 腐食が進んだ場合, 道路橋では, 単に腐食減厚時の断面積を用いた応力評価により取替えるかどうかの判断を行っている. しかし, このような判定手法では, 十分に橋としての機能を保有している橋梁であっても, 少しでも腐食損傷を受けた橋梁は応力計算により, 架け替えと判定されてしまう恐れがある. 一方, 鉄道橋²⁾では, 応力計算上問題があると判定された橋梁に対して, 現有応力比率(許容応力度/実際に走行する最大の列車による計算応力度)を考慮した応力評価が行われている. しかしながら, その場合でも鋼橋の健全度を必ずしも適切に評価しているとはいえないと考えられる.

そこで本研究では, 腐食が腹板のせん断座屈耐力に及ぼす影響を把握するため, 実橋において比較的腐食し易い支点部近傍の腹板に着目し²⁾, そのせん断耐力について, 腹板の下側 1/3 を切削することによって腐食を模擬した模型桁を製作し, その載荷実験を行った. また, 弾塑性有限変位解析を行い, 実験結果との検証を行った.

2. 実験

2.1 目的

本研究の目的は、桁の腹板のせん断耐力に関して、腐食がせん断座屈にどのような影響を与えるかを検討することである。すなわち、腐食が進んだ場合に、板厚減少および不均等に減少をしたことによる偏心がどのような影響を与えるかを検討する。鋼橋における腐食の調査^{1), 2)}によると、鋼橋の腐食は支点部付近で著しく、また腹板の腐食は一般に下フランジ側ほど進行する(図-1 は鉄道橋の腐食例)。そこで本研究では、腐食の調査を参考して腐食を模擬した供試体を用いて実験を行った。

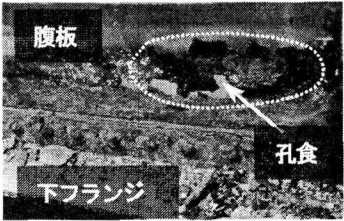


図-1 鉄道橋の腐食例

2.2 試験体概要

実験に用いた供試体の形状および寸法を図-2 および表-1 に示す。なお、試験パネルの幅厚比 h/t_w は $800/6 = 133.3$ である。供試体は、せん断座屈を発生させるために、文献 3) を参考にして供試体の設計を行った。供試体は 2 体で、このうち供試体 No. 2 は、実橋における腐食形態、すなわち腹板の下フランジ付近の激しい腐食状態を再現するために、腹板下面から 3 分の 1 の範囲を下フランジに向かって板厚を減らすように、また橋軸方向には形状が一樣になるように切削した。図-3 は供試体 No. 2 の試験パネルの板厚分布を示す。このとき、腹板の初期不整形において凸となっている側を凹となっている側より 1mm ほど深く削って腐食による偏心が大きくなるようにした(図-4)。

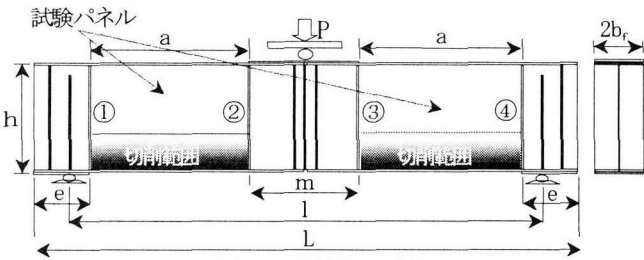


図-2 供試体の寸法

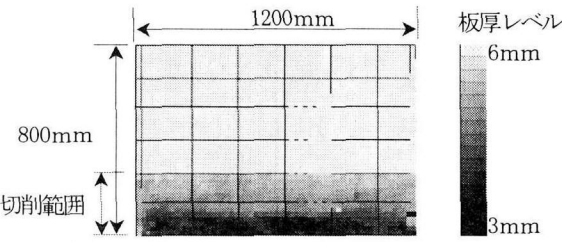


図-3 供試体 No. 2 の試験パネルの板厚分布

表-1 供試体の諸元

Test panel a	End panel e	Loading panel m	Span length l	Girder length L	Depth h	Rib hrxbrxtr
1200	550	1100	3900	4600	800	75 x 14 x 12
Flanges $2b_f \times t_f$	Web $h \times t_w$	T. stiffeners ② -④ $2b_{t,s} \times t_{t,s}$	T. stiffener distances a	Load & support stiffeners (black)		
300 x 12	800 x 6	100 x 9	1200	150 x 9		

単位: mm

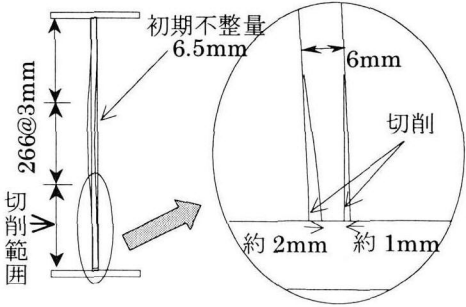


図-4 供試体の作製(供試体 No. 2)

2.3 実験概要

载荷に先立ち、供試体の試験パネルの初期不整、中心軸および板厚データを測定した。板厚測定には、超音波式板厚測定器を利用した。試験パネルの初期不整については、直線定規およびテーパゲージで測定した。図-5 および図-6 は、腹板が上フランジと交差する点を結んだ直線からの初期不整の値を示す。ただし、供試体 No. 2 は切削前のものを示す。供試体 No. 1 では、試験パネル中央付近で最大約 5mm、供試体 No. 2 では、下フランジからウェブ高さ方向に約 270mm 付近で最大約 6mm で、その量は両供試体でほぼ同様であった。

図-7 および表-2 には、引張試験により得られた鋼材の機械的性質を示す。腹板・補剛材の強度に比べてフランジの強度が小さいが、フランジが降伏する前にせん断座屈が生じることから実験結果に及ぼす影響は小さいと考えている。

実験では、供試体両端の 2 点を単純支持し、中央部の 1 点で载荷する方法によって行った(図-8)。図-8 に示すように 5880 kN 試験機の油圧ジャッキを用い、破壊に至るまで 24.5 kN 間隔で载荷し、変位・ひずみなどを計測した。なお、桁が横ねじれ変形するのを防止するために、载荷ばりおよび支点到座屈防止用治具を取り付けた。

変位は、桁の中央たわみを、ジャッキおよび桁の中央下縁に 2 箇所、上フランジから下フランジまでの面外変位とウェブの横変形を、両側の試験パネルの中央においてそれぞれ 7 箇所、計測した。また、試験パネルのせん断変形を計測するため、それぞれのパネルの上フランジと下フランジに変位計を 8 箇所設置した。その他、横ねじれを管理するため上フランジの中央部に変位計を 1 個設置した(図-9)。

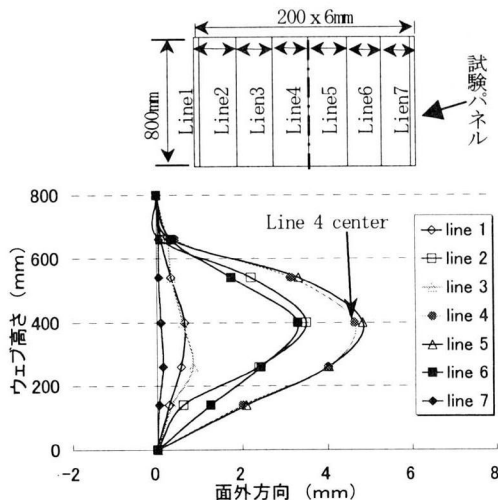


図-5 試験パネルの初期不整(供試体 No. 1)

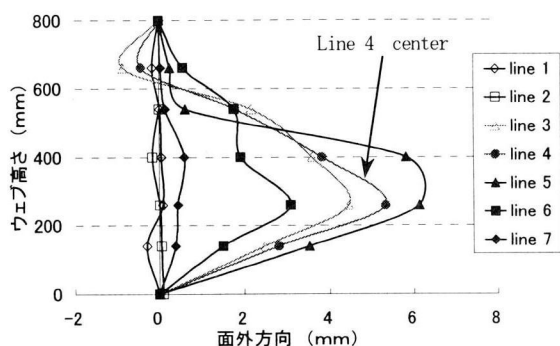


図-6 試験パネルの切削前の初期不整(供試体 No. 2)

表-2 引張試験の結果

各部材	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)
フランジ	293	445
腹板・補剛材	411	534

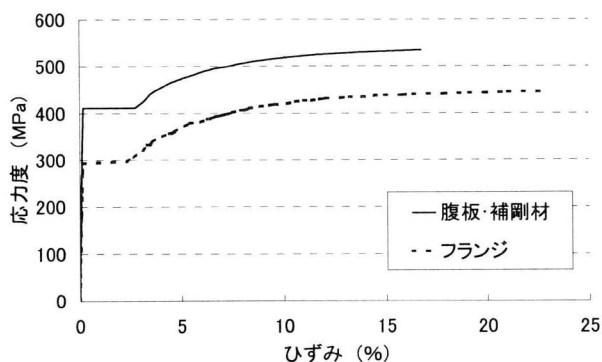


図-7 引張試験の応力-ひずみ関係

ひずみゲージは、単軸ひずみゲージを試験パネルの垂直補剛材と上下フランジの中央に貼付した。これは、試験パネルの境界にある上下フランジと補剛材が降伏するかどうか確認するためである。また、図-10に示すように三軸ひずみゲージおよび単軸ひずみゲージを貼付した。

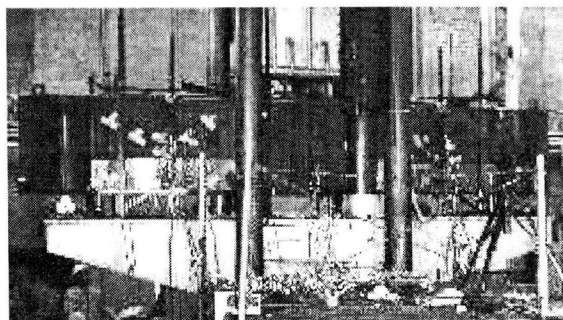


図-8 荷重試験のセットアップ

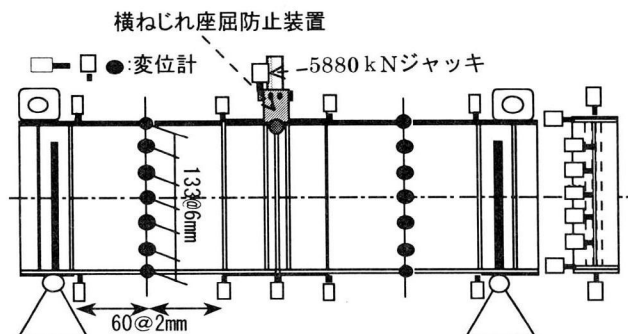


図-9 変位計位置

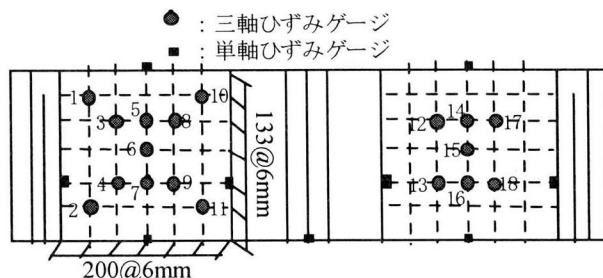


図-10 ひずみゲージの貼付位置

2.4 実験結果の比較および考察

実験時の観察によると、供試体 No. 1 では、荷重の増加と共に試験パネルの初期不整が大きくなるモードで面外方向の変形が進行していき、735 kN を超えた付近からせん断座屈形状の面外方向の変形が進行し、約 1156.4 kN で最終荷重に到達した。図 11 (a) に載荷終了後の状態を示す。一方、供試体 No. 2 では、荷重の増加と共に、切削を行った両試験パネルの腹板下面 (図-11b の①の記号) に乱れたはらみが見られ、荷重の増加と共にそれが次第に進行したが、その上部 (②の部分) にも変形が発生し、約 627 kN に達した時点で急激に両試験パネルにせん断座屈に伴う変形が発生した。その後荷重は増加していき、約 1058 kN で最大荷重に到達した。図-11 (b) に載荷終了後の状態を示す。

図-12 は、試験パネル中央断面での荷重と面外変形との関係を示したものである。変形は、これらの図からわかるように、初期不整の最も大きいパネル中央付近で最も進行した。なお、供試体 No. 1 と供試体 No. 2 で変形モードが異なるが、両者とも初期不整と同様な形状で進んでいることから、主に初期不整の影響と考えられる。

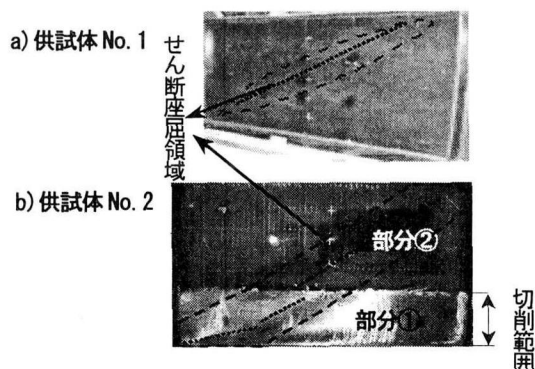


図-11 供試体の座屈状態

図-13 に、荷重と供試体中央の変位との関係を示す。腐食を模擬した供試体 No. 2 の最大荷重(1056.4 kN)は、供試体 No. 1 の最大荷重(1156.4 kN)に比べ、100 kN 程度低下した。また、図中のせん断座屈荷重のうち、変形が徐々に進行した供試体 No. 1 については、文献4) に示す方法により求めた。すなわち、“荷重-試験パネル中央部の面外変位の2乗”との関係で、変位が急変する点をせん断座屈荷重とした⁴⁾。その結果、供試体 No. 2 の座屈荷重は、削っていない供試体 No. 1 に比べて 150 kN 程度低下した。以上のように、腐食に起因する局所的板厚減少によって最大荷重および座屈荷重が低下した。

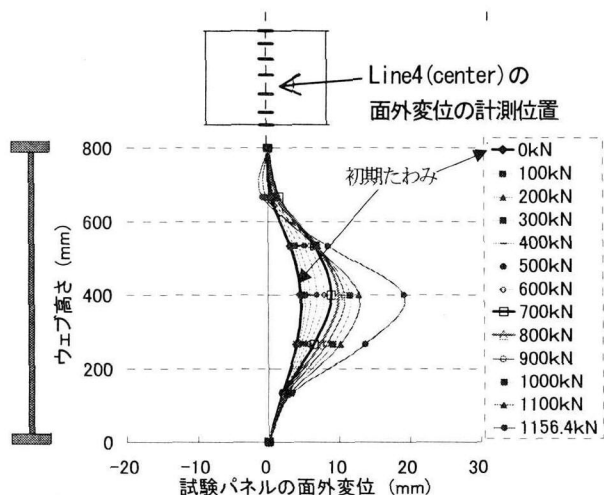


図-12a ウェブ高 - 面外変位関係(供試体 No. 1)

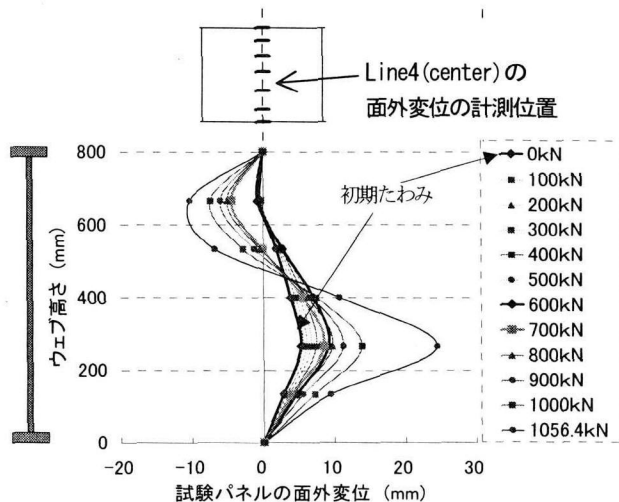


図-12b ウェブ高 - 面外変位関係(供試体 No. 2)

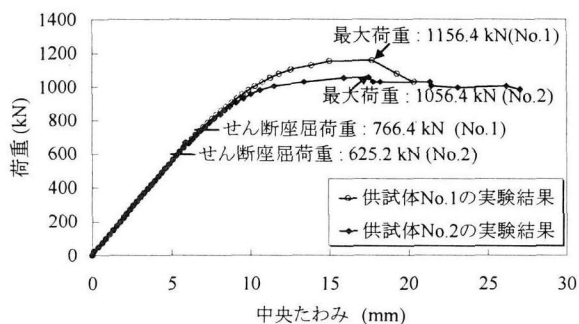


図-13 実験結果(荷重 - 変位の関係)

今回の実験では、試験パネルにせん断座屈が発生した。この場合、試験パネルには、座屈波形の長円方向に引っ張り場が生じる。図-14a および図-14b は、両供試体試験パネル各測点の主ひずみを示したものである。また、図-15a および図-15b はパネルが降伏ひずみに達した位置およびその時の荷重を示す。なお、降伏ひずみは、試験に用いた鋼材の引張試験の結果から 0.1875% であった。供試体 No. 1 の場合、図-15a に示すように、着目点 1 から 11 までのうち、荷重が 955.5 kN のときに、ゲージ 3 が降伏し、ゲージ 6 (980 kN)、ゲージ 1 (1019.2 kN)、ゲージ 11 (1048.6 kN)、ゲージ 9 (1078 kN) と順次降伏が進行していった。

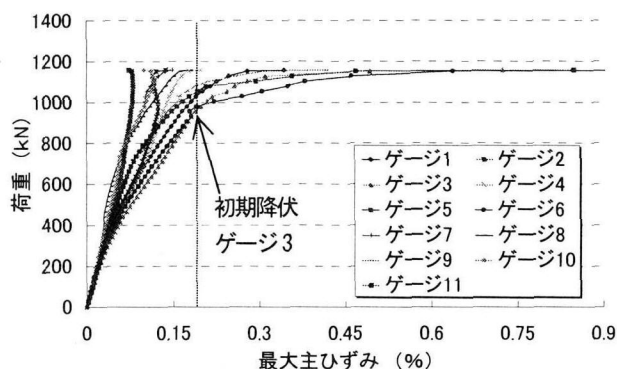


図-14a 供試体 No. 1 の試験パネルにおける荷重-ひずみの関係

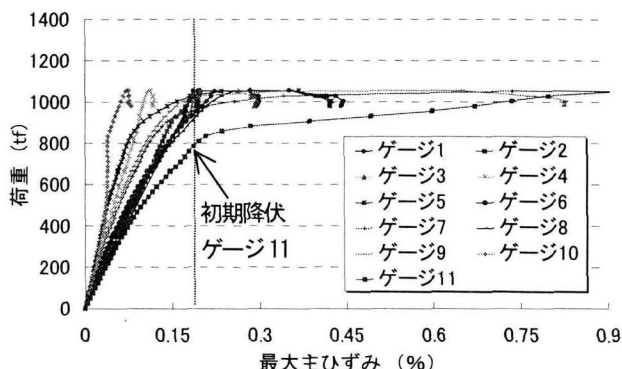


図-14b 供試体 No. 2 の試験パネルにおける荷重-ひずみの関係

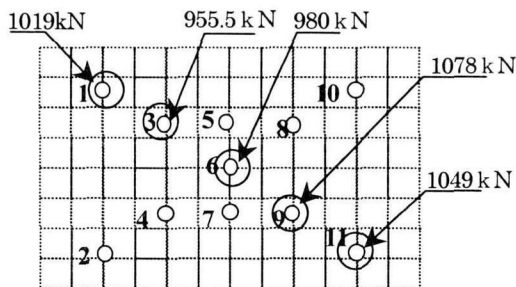


図-15a 供試体 No. 1 の試験パネルにおける
塑性化領域

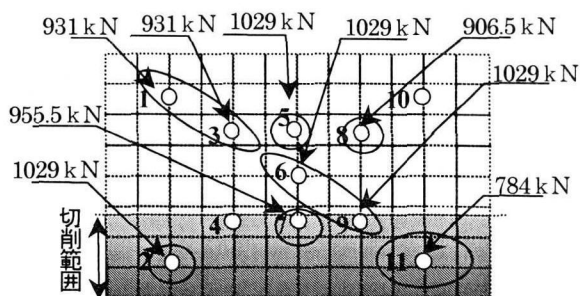


図-15b 供試体 No. 2 の試験パネルにおける
塑性化領域

一方、図-15b に示すように供試体 No. 2 の場合、ゲージ 11 が最初に降伏し(784 kN)、荷重が 122.5 kN の増分した時点でゲージ 8 が降伏した。その後、ゲージ 1 およびゲージ 3 (931 kN) が降伏し、次いでゲージ 7 (955.5 kN) が、さらにゲージ 5・ゲージ 6・ゲージ 8・ゲージ 2 は荷重が 1029 kN のときに降伏状態に達した。すなわち、平板の供試体 No. 1 の場合、試験パネル中央付近が最初に降伏し、比較的小さい荷重増分でパネル全体に広がったのに対して、局部的板厚減少が存在する供試体 No. 2 の場合、最初に板厚の薄い箇所が降伏し、それが板厚減少のない領域にほぼ一気に広がっていったことがわかる。

これから、供試体 No. 1 に比べて供試体 No. 2 の最大荷重が小さいのは、試験パネルの引っ張り場としての耐力が小さいことに起因すると考えられる。この点については、3.1 でも検討する。

3. 解析による検討

ここでは、弾塑性有限解析の適用性について上記実験結果を検証し、それをもとに局部的板厚減少が桁のせん断座屈耐力およびせん断耐力に及ぼす影響について検討した。

3.1 実験との比較解析

(1) 解析概要

本章における解析は、汎用プログラム ABAQUS を使用して供試体の全体モデルを用いて弾塑性有限変位解析を行った。メッシュは shell 要素(シェルの板厚は実測データの値)で、正方形としている。特に、試験パネルにおいてメッシュは細かく 2cm×2cm の正方形とした(図-16)。材料特性は、フランジ、腹板、補剛材それぞれについて引張試験の結果から得られた応力-ひずみ曲線(図-7)を多曲線近似したもの(combined hardening & half-cycle type)を用いた。

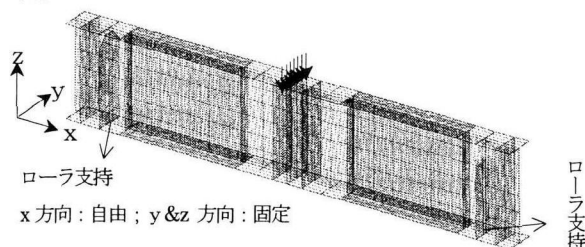


図-16 FEM 解析モデルのメッシュ図

解析では、最初に実験との比較を行うため、供試体 No. 1 と供試体 No. 2 の解析を行った。

ケース 1：腐食していない供試体 No. 1 の解析

ケース 2：腐食を模擬して切削した供試体 No. 2 の解析
なお、これからの解析では、初期不整および板厚減少による偏心の影響を考慮に入れた。ただし、残留応力については考慮していない。

(2) 比較および考察

図-17 に供試体 No. 2 のせん断座屈状況の解析結果を示す。特に試験パネルの座屈形態が実験の座屈形態と同様に部分①のせん断座屈波がやや横にねていることがわかる。図-18 に供試体 No. 1 および供試体 No. 2 の解析と実験の荷重-中央変位の関係を示す。荷重-変位曲線を見ると、解析のほうが実験に比べて最大荷重に達するまでの変位量が小さい。これは、本解析において残留応力の影響を考慮していないこと、解析には shell 要素を用いているが、板の凸凹による応力、ひずみ集中を表現できていないことなどが考えられるが、この点については今後の検討が必要である。

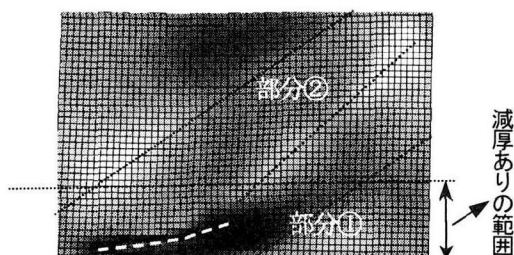


図-17 供試体 No. 2 の解析結果のせん断座屈状況

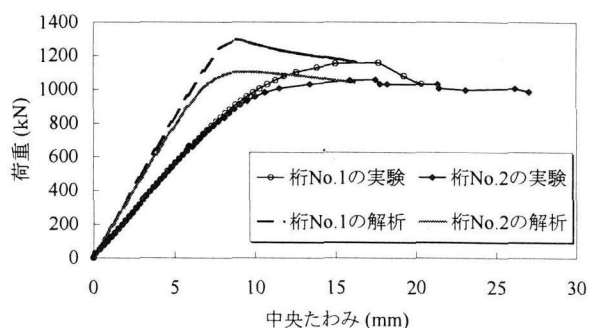


図-18 実験と解析の P-δ 曲線の比較

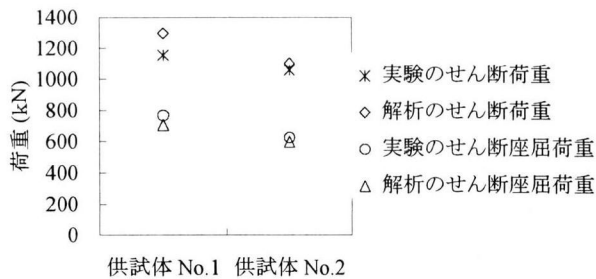


図-19 実験・解析のせん断耐力
およびせん断座屈耐力の比較

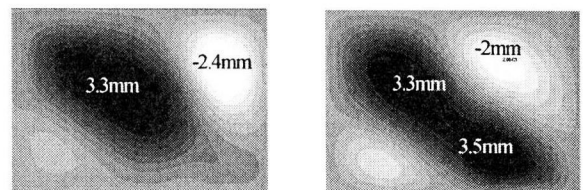
最大荷重に関しては、図-19 より、供試体 No. 1 の解析の値が実験値より 137.2 kN 程度大きく、供試体 No. 2 は多少大きいもののほぼ一致していることがわかる。また、解析結果から、第 2.3 節に述べた方法⁴⁾により求めた座屈荷重は、供試体 No. 1 の場合、解析結果が 58.8 kN 程度小さく、供試体 No. 2 の解析値がほぼ一致している(図-19)。耐力に関して、本解析値は上述したように残留応力の影響を考慮しておらず、また shell 要素を用いているために、応力やひずみの集中の影響を考慮していない。そのため、解析値の方が大きく算出されると考えられるが、座屈荷重が小さいことについてはさらに検討が必要である。以上のように本研究で行った解析は、検討すべき点が残されているものの、座屈荷重および最大荷重を推定することは十分可能であると考えられる。

せん断座屈が生じる板パネルでは、座屈が生じると張力場が形成され、耐力はその張力場に依存すると考えられる。そこで、試験パネルにおけるひずみの進展状況を解析により求めた。表-3 は、それぞれの供試体の試験パネルにおける塑性ひずみの進展状況を示したものである。図から、座屈発生後荷重が増加すると、パネル面では張力場が塑性化するが、供試体 No. 1 と供試体 No. 2 とでは、後者の方が比較的早い荷重段階で塑性化が始まり、パネル全面が塑性化する荷重も小さいことがわかる。また、図-20 に座屈発生時の試験パネルの面外変形量を示す。図から、供試体 No. 1 は、変形量の大きな個所のピークが 1 箇所であるのに対して、供試体 No. 2 は切削した領域とその上部の領域の 2 箇所ピークがあることがわかる。これらから、供試体 No. 1 がパネル面中心付近の初期不整の最も大きな箇所付近が最初に塑性化し、それが順次進行していくのに対し、供試体 No. 2 では、最初に板厚の最も薄い箇所が塑性化し、それがパネル上面に次第に進展する。両供試体の最大荷重の差は、このようなパネル面張力場の性状の差に起因するものと考えられる。また、供試体 No. 2 は、板厚切削箇所に生じる圧縮応力も大きく、板厚が薄い程度座屈し易いことを考慮すると、この部分が起点となって座屈が発生するため、座屈荷重にも差が生じると考えられるが、この点についてはさらに検討が必要である。

このようなことから、今回の実験に用いた腐食を模擬した供試体 No. 2 は、実際の腐食の状態とはかなり異なるものの、本実験に見られたような腐食による断面減少は、座屈耐力および最大耐力に大きな影響を及ぼすものと考え

表-3 塑性ひずみの進展状況

荷重 (kN)	供試体 No. 1 (平板)	供試体 No. 2 (減厚板)
597.8		座屈発生時
705.6	座屈発生時	
1048.6		
1097.6		最大荷重時
1293.6	最大荷重時	なし



a) 供試体 No. 1 (705.6 kN) b) 供試体 No. 2 (597.8 kN)
図-20 解析の座屈時の面外変形形状

られる。

3.2 さらに板厚を減少させた場合の解析

次に、腐食による局所的板厚減少が腹板のせん断耐力に及ぼす影響の検討をするために、供試体 No. 2 において板厚減少率を増加させた状態を想定して解析を行った。それぞれのケースを以下に示す。

ケース 3：板厚減少率を 1.2 倍したときの解析

ケース 4：板厚減少率を 1.5 倍したときの解析

ケース 5：板厚減少率を 1.7 倍したときの解析

なお、桁の板厚減少率の α 倍で増加した時の板厚は式(1)で算出した。このとき、全ての板厚測定位置における板厚を α 倍で減少させた。

$$t_{(\alpha)} = t_0 - \alpha(t_0 - t_1) \quad (1)$$

ただし、

$t_{(\alpha)}$: 板厚減少率が α 倍増加した時の板厚(mm)

t_0 : 設計時の板厚(mm)

t_1 : 板厚の測定値(mm)

$t_0 - t_1$: 設計板厚に対する減少量(mm)

また、板厚減少率 α が 1.7 のときに、試験パネルにおいて下フランジの付近に局部的な穴(板厚が 0mm)が発生するが、非常に微小な値を挿入することによって解析を行った。

図-21 にその結果を示す。図から、腐食による局所的板厚減量が大きくなると、せん断座屈荷重および最大荷重は低下することがわかる。また、図より最大荷重はほぼ同じ比率で低下するが、せん断座屈荷重の低下は大きくなる傾向がある。

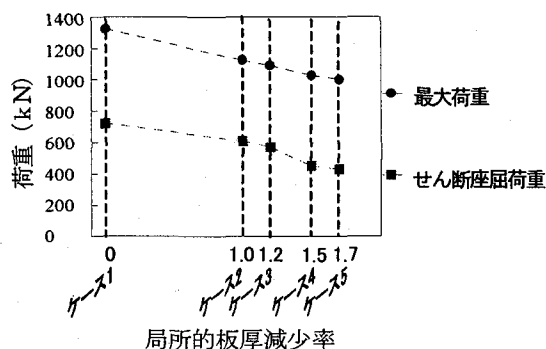


図-21 局所的板厚減少率と最大荷重・せん断座屈荷重の関係

この結果から、局所的板厚減少が最大荷重よりも座屈荷重に大きく影響を与えられと考えられる。

4. まとめ

腐食が原因で板厚減少が存在する供試体のせん断耐力を検討するために、腐食を模擬した供試体を用いてせん断座屈実験および弾塑性有限変位解析による解析的な検討を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- ① 载荷実験の結果、未切削の供試体 No. 1 は、荷重の増加とともに試験パネルの初期不整が大きくなるモード(試験パネル中央部)で面外方向の変形が進行した。一方、腐食を模擬して切削を行った供試体 No. 2 は荷重の増加とともに、切削を行った腹板下面にはらみが見られ、その後パネル中央部付近にも変形が発生・進行

し、急激なせん断座屈に伴う変形が生じた。また、板下面の 1/3 を切削した供試体の座屈荷重および最大荷重は、切削しない供試体に比べて小さかった。

- ② シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析は、荷重-変位関係において、初期勾配および最大荷重に達するまでの変位が小さくなった。しかし、座屈荷重および最大荷重の値はある程度の精度で推定することが可能と考えられる。なお、実験と解析に差があるのは、解析で残留応力の影響を考慮していないこと、shell 要素を用いているために応力やひずみ集中の影響を考慮できていないことなどに起因していることが考えられるが、この点については今後の検討が必要である。
- ③ 実験を行った供試体の解析結果から、腹板を切削した場合、張力場となる領域で、切削しない場合に比べて小さな荷重段階で塑性化が生じる。このことが最大荷重を低下させる要因と考えられる。実際に腐食が発生した場合も同様と考えられるが、今後の検討が必要である。
- ④ 供試体 No. 2 をさらに切削した状態について解析を行った結果、座屈荷重および最大荷重はさらに低下する。このとき、最大荷重がほぼ線形的に低下するが、断面減少が進行することによって座屈荷重の低下率が大きくなる傾向がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、(株)横河プリッジ名取暢氏、東京鐵骨橋梁(株)入部孝夫氏、および東京鐵骨橋梁(株)柳沼安俊氏にご協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 名取暢：鋼橋の腐食事例とその対策，第1回鋼構造の維持管理に関するシンポジウム資料集，1997。
- 2) 市川篤司：鋼鉄道橋の補修・補強の概要，橋梁と基礎，1994。
- 3) 長谷川彰夫，西野文雄，奥村敏恵：水平補剛材を有するプレート・ガーダーのせん断耐荷力，土木学会論文報告集第235号，pp.13-28，1975。
- 4) 中井博，総田完治，阪野雅則：プレート・ガーダー端支点上補剛材の耐荷力の実験と解析，構造工学論文集 Vol.33A，pp.399-410，1986。
- 5) ABAQUS/Standard User's Manual, Ver. 5.8, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1998。

(2001年9月14日受付)