

ステンレス鋼を用いた I 形断面桁腹板のせん断耐荷力に関する実験的研究

An Experimental Study on Shear Buckling Strength of Stainless Web Plates in I-GIRDERS

松下 裕明*, 矢吹 哲哉**, 有住 康則***, 岩田 節雄****

Hiroaki MATSUSHITA, Tetsuya YABUKI, Yasunori ARIZUMI, Setsuo IWATA

*工修 日立造船(株) 環境・鉄構事業本部 鉄構技術統括本部 設計部 (〒559-8559 大阪市西区江戸堀 2-6-33)

** 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

*** 工博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1)

**** 工博 日立造船(株) 技術本部 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)

In order to decrease the life cost of steel bridges, we proposed to use web plates with stainless steel plates. But material property of stainless steel is different from that of mild structural steel. Then the influence of the difference in the properties on the ultimate strength of I-girders should be clarified at first. Thus, this paper described experimental examinations on the ultimate strength of web plates with stainless steel in I-girders and found that the shear strength of the stainless steel web girder is almost same as that of the mild structural steel girder. In addition, the validation of numerical simulation has been presented by comparing with the experimental results.

Key Words: minimum maintenance bridge, stainless steel, shear buckling, web plate

キーワード: ミニマムメンテナンス橋, ステンレス鋼, せん断座屈, 腹板

1. はじめに

環境への調和やコスト縮減が要請される中, ミニマムメンテナンスを考慮した新しい橋梁として, ステンレス鋼薄板を主部材に用いた「ステンレス橋梁¹⁻⁵⁾」の開発が進められている. 一般に, ステンレス鋼は従来の構造用鋼に比べ格段に優れた耐侯性を有し, 発錆による補修や再塗装等のメンテナンスコスト縮減効果が期待できる. 特に, 腐食環境の厳しい地域では塗膜の経年劣化が進みやすく, ステンレス橋梁の利用価値は高いと考えられる. また, ステンレス鋼は無塗装で使用可能であること, 100%リサイクル可能であること等, 環境への配慮という点でも期待できる.

しかし一方, ステンレス鋼は一般の構造用鋼に比べ比例限が低く, 降伏応力(オフセット耐力)より低い応力レベルから非線形性が現れ, ひずみ硬化が大きく降伏比が低い等の力学的特性を有している. このため, ステンレス鋼を用いた構造部材の強度特性は, 従来の構造用鋼を用いた場合と異なると考えられる. 今後, ステンレス橋梁の実用化を促進するためには一般的で簡便な設計手法の確立が必要であり, そのためにはステンレス鋼を用いた溶接組立部材の強度特性を明らかにしておくことが不可欠である. 特に, 鋼橋に使用される薄肉部材では, 座屈挙動が部材の終局限界状態や使用限界状態の決定要因となる可能性が高く, 座屈挙動を含めた耐荷力特性の解明が重要となる.

従来から, 普通鋼や高張力鋼を用いた構造部材の座

屈挙動については, 解析的・実験的研究が精力的になされている⁶⁾. しかし, ステンレス鋼を用いた溶接組立部材に関しては, 建築用構造部材として主に使用される溶接組立 H 形鋼の研究⁷⁾はあるものの, 橋梁用構造部材として用いる薄肉の箱断面や I 断面部材に関する研究はほとんどなされていない. そこで, 著者らは箱桁のフランジ材として用いるステンレス補剛板に着目し, 文献 1) において代表的な断面諸元を有するステンレス補剛板の軸圧縮耐荷力が, 従来の構造用鋼補剛板と同等以上であることを実験的に明らかにした.

本研究は, ステンレス鋼薄板を構造部材に用いたミニマムメンテナンス橋梁開発の一環として, 文献 1) に引続き, ステンレス鋼腹板のせん断耐荷力特性に関する基礎資料を得ることを目的に, I 形断面供試体のせん断耐荷力実験を行ったものである. 実験では, I 桁腹板にステンレス鋼を用いた供試体および構造用鋼を用いた供試体を作成し, せん断耐荷力特性の比較検討を行った.

さらに, ステンレス鋼腹板のせん断耐荷力特性を精度良く評価できる解析法として, 文献 1) においてステンレス補剛板の軸圧縮耐荷力評価に対し適用性が確認された数値解析法を本研究に適用し, 実験結果との比較により本解析法の妥当性を検討した.

なお, 使用するステンレス鋼は, 耐食性, 加工性, 溶接性に優れ, その降伏応力 (0.1% オフセット耐力) が SM490 のそれと等価であり, 構造材としての有用性が高いということから, SUS304N2A を採用した.

2. せん断耐力実験

2.1 実験供試体

供試体は図-1に示すように、SUS304N2Aを用いた腹板の上下にフランジをすみ肉溶接したI形断面供試体とした。供試体中央には500mmの間隔で垂直補剛材を配置し、垂直補剛材と上下フランジの4辺で囲まれた腹板が着目パネルである。本実験では、着目パネル部の腹板厚が4.5mm(供試体名:SSU45)、および3.2mm(供試体名:SSU32)のステンレス鋼供試体をそれぞれ2体ずつと、比較のため腹板に厚さ4.5mmの構造用鋼(SM400)を用いた構造用鋼供試体(供試体名:SSM45)2体の計6体の供試体を製作し、せん断耐力実験を行った。着目パネルの縦横比 α は、すべての供試体で $\alpha=1$ である。表-1に供試体の名称と着目パネル腹板の断面諸元を示す。なお、表中の幅厚比パラメータ R_τ は次式で表される。

$$R_\tau = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\tau_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ここに、 b は腹板高(=500mm)、 ν はポアソン比(=0.3)、 k は座屈係数(=9.34、 $\alpha=1$ の場合)、 E はヤング係

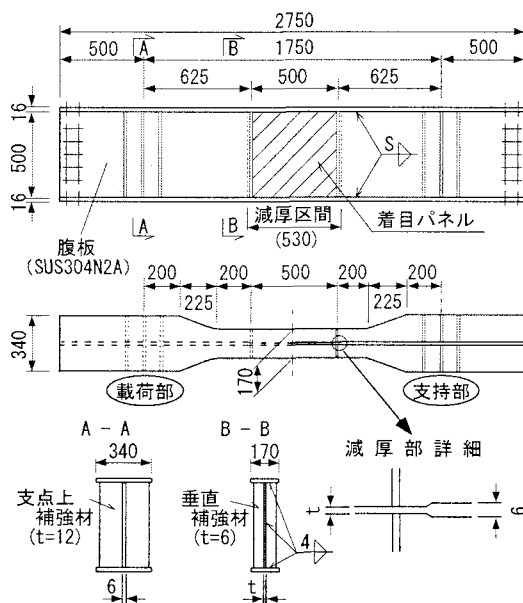


図-1 供試体

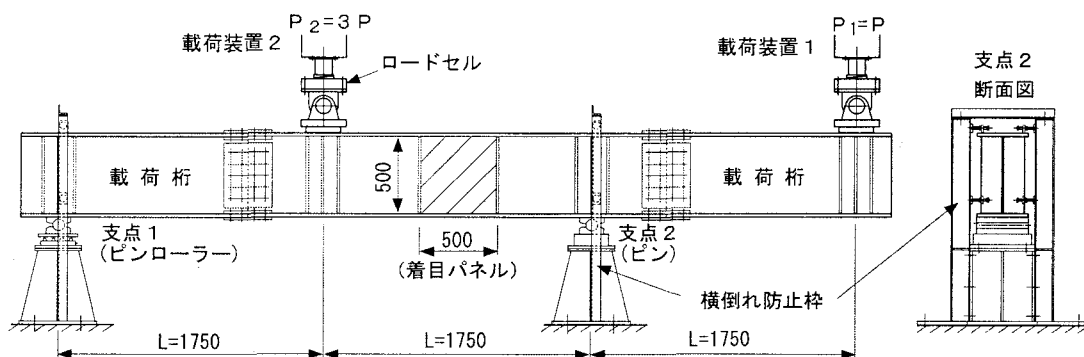


図-2 載荷状況

数である。なお、せん断降伏応力度 τ_y は、材料引張試験から得られた降伏応力度 σ_y (SUS304N2Aでは0.1%オフセット耐力)を用いて最大せん断ひずみエネルギー説より次式で求められる。

$$\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3} \quad (2)$$

フランジの材質は、構造用鋼供試体(SSM45)にSM400、その他にSM490を用い、幅および厚さは支点部に作用する最大曲げモーメントから決定した。なお、着目パネル部のフランジ幅は、鋼道路橋設計で標準化されているフランジ幅の最大値⁸⁾とした。垂直補剛材は道路橋示方書⁹⁾の必要剛度を満足した上で、フランジとの構造的な取合いを考慮し、80×6mmのSM400を全供試体に用いた。なお、荷重載荷部および支持部には支点上補強材を取り付けている。

2.2 実験装置および計測方法

実験供試体および実験装置の設置状況を図-2および写真-1に示す。本実験では、供試体の両側に載荷桁を高力ボルト接合し、荷重 $P_1:P_2$ の比を1:3として2点載荷・2点支持することにより着目パネルにせん断力を与えた。この載荷方法は、着目パネル内のせん断力が一定で、かつ着目パネル中心で曲げモーメントが0となり、さらに通常の単純載荷桁より作用モーメントが小さくなる特長を持つ。支点は、桁面内の曲げに対して単純支持できるピン構造を採用し、支点1には橋軸方向に移動可能なローラーを設置した。また、供試体の横倒れ変形を防止するため、各支点上に横倒れ防止枠を設置した。荷重は、載荷装置1および2の2台のサーボ油圧ジャッキ(最大載荷荷重1000kN/台)

表-1 供試体諸元

供試体 名称	腹 板		幅厚比 (腹板高/t)	幅厚比パ ラメータ R_τ
	使用材質	板厚 t (mm)		
SSM45-1 SSM45-2	SM400	4.5	111	1.076
SSU45-1 SSU45-2	SUS304N2A	4.5	111	1.327
SSU32-1 SSU32-2		3.2	156	1.857

を用いてコンピュータ自動制御により $P_1 : P_2 = 1 : 3$ を保つように与えた。荷重は、コンピュータのディスプレイ上にリアルタイム表示された荷重荷重－変位応答を確認しながら、 $P_1 : P_2 = \Delta 2 \text{ kN} : \Delta 6 \text{ kN}$ の増分で増加させた。なお、極限強度付近において変位が急増する場合には、荷重のバランスを確認しながら変位制御を行った。なお、荷重の大きさは、サーボ油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより検出した。

計測は、ひずみおよび変位について、それぞれひずみゲージおよび変位計を用いて行った。

ひずみは、上下フランジおよび垂直補剛材の直ひずみを計測するために1軸ゲージを、腹板の直ひずみ、せん断ひずみ、主ひずみおよびその方向を計測するために3軸ゲージ(ロゼットゲージ)を使用した。なお、3軸ゲージは腹板片面には着目パネル全体を均等に、その裏面は中央面のみに貼付した。図-3に着目パネル部のひずみゲージおよび変位計の設置位置を示す。

変位は、鉛直変位として荷重装置直下の2点の他に図-3に示す垂直補剛材および着目パネル中心直下の3点について、桁下に変位計を設置して計測した。また、水平変位は、図-3に示すように、着目パネル中心点および上下フランジの計3点で計測した。上下のフランジの水平変位は、桁の横倒れ変位が発生していないことを確認するために設置したものである。また、着目パネルの対角方向の変位についても、変位計を用いて計測した。写真-2に、計測装置設置後の着目パネル部の状況を示す。

2.3 材料試験と溶接初期不整

(1) 使用鋼材の機械的性質

着目パネル部に使用した鋼材に対し、腹板に用いた鋼材について圧延および圧延直角方向それぞれ3体ずつ計6体、フランジに用いた鋼材 ($t=16\text{mm}$) について圧延方向に3体のJIS試験片を製作し、材料試験を行った。各鋼材の材料試験結果について、その平均値

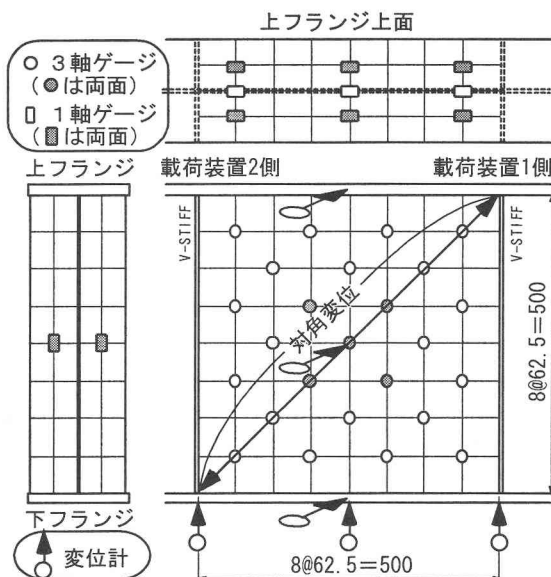


図-3 ひずみゲージ及び変位計設置位置

表-2 各鋼材の材料試験結果(平均)

鋼種	板厚 mm	降伏応力度 σ_y N/mm ²	引張強度 σ_u N/mm ²	降伏比 σ_y/σ_u	初期ヤング 係数 E_0 N/mm ²
SM400	4.5	293	425	0.69	213000
SUS304 N2A	3.2	399	782	0.51	193000
	4.5	405	783	0.52	194000
SM400	16.0	309	451	0.69	210000
SM490	16.0	389	533	0.73	212000

注) SUS304N2Aの σ_y は0.1%オフセット耐力を示す。

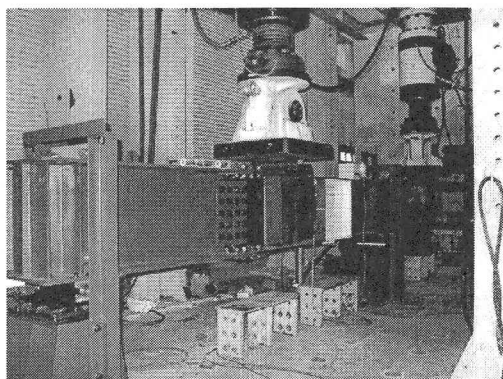


写真-1 荷重状況

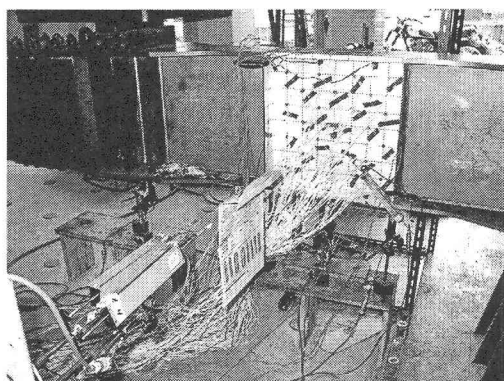


写真-2 計測装置の設置状況

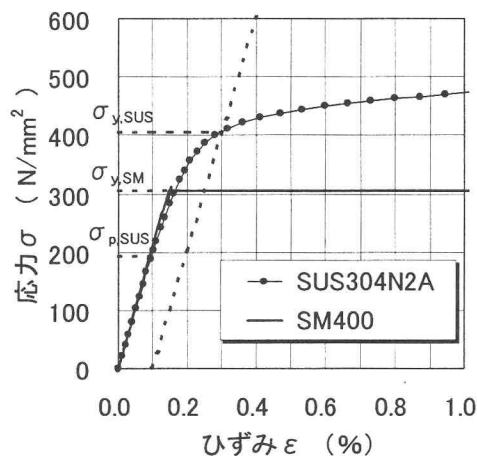


図-4 応力－ひずみ曲線

表-3 溶接施工条件

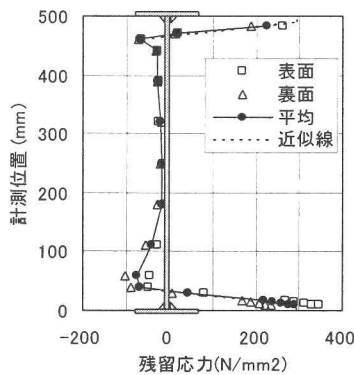
供試体名	脚長 S mm	電流 A	電圧 V	溶接速度 mm/min	入熱量 J/mm
SSM45-1,2	5.0	220	25	400	825
SSU45-1,2	5.0	220	25	389	848
SSU32-1,2	4.0	150	21	323	585

表-4 残留応力計測結果

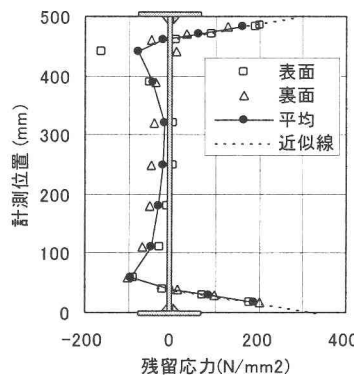
供試体種類	σ_{rc}/σ_y	σ_{rt}/σ_y
SSM45-1	-0.14	1.00
SSU45-1	-0.12	0.82
SSU32-1	-0.11	0.84

表-5 初期たわみの最大値

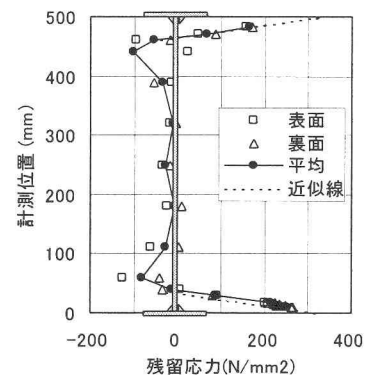
	基準面からのたわみ(mm)		差 (mm)
	正方向	負方向	
SSM45-1	1.6	0.0	1.6
SSM45-2	1.1	-0.2	1.3
SSU45-1	0.6	-1.6	2.2
SSU45-2	1.1	-0.3	1.4
SSU32-1	0.9	-0.6	1.5
SSU32-2	0.9	-0.9	1.8



(a) 構造用鋼供試体 (t=4.5mm)



(b) ステンレス鋼供試体 (t=4.5mm)



(c) ステンレス鋼供試体 (t=3.2mm)

図-5 残留応力度分布

を表-2 に示す。また、材料試験から得られたステンレス鋼および構造用鋼の応力-ひずみ関係について、その一例 (t=4.5mm, 圧延方向) を図-4 に示す。図中、 $\sigma_{p.sus}$ はステンレス鋼の比例限を示す。

(2) 残留応力度

供試体 SSM45-1, SSU45-1 および SSU32-1 と同一条件で、着目パネル部のみの残留応力計測用供試体を各1体ずつ製作し、上下フランジと腹板のすみ肉溶接による腹板の残留応力度を計測した。溶接は両側からのすみ肉溶接とし、その溶接施工条件は表-3 に示すとおりである。なお、SUS304N2A と SM490 の異材溶接である SSU シリーズには、異材専用の溶接材料である GFW309L を用いた¹⁰⁾。

残留応力の測定方法は機械的分割法による応力開放方式とした。図-5 に各供試体腹板の残留応力度分布図を、表-4 に圧縮残留応力度の平均値 σ_{rc} 、および引張残留応力度の最大値 σ_{rt} を示す。ここに、 σ_{rt} は、引張域の残留応力度計測結果から算出した近似直線を用いて求めた。なお、 σ_y は表-2 に示した各鋼材の降伏応力度である。

(3) 初期たわみ

本実験では、写真-3 に示すように、橋軸方向および鉛直方向のレールを介して、腹板と平行な面内を自由に移動できるレーザー変位計を設置し、着目パネル



写真-3 初期たわみの計測

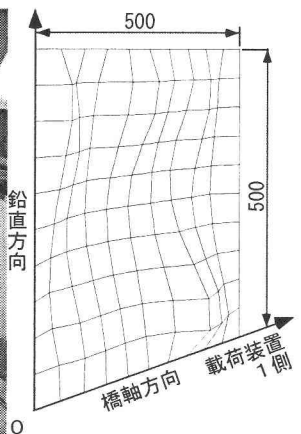


図-6 初期たわみ計測結果 (SSM45-1)

腹板の初期たわみを計測した。計測は、着目パネル内を橋軸方向に10等分し、それぞれ鉛直方向に変位計をスライドさせて行った。各供試体の初期たわみ計測結果について、基準面からの正方向・負方向の最大たわみ量とその差を表-5 に示す。例えば、道路橋示方書における部材精度の許容値を本供試体に適用した場合、その許容値は $500/250=2\text{mm}$ となり、各供試体の初期たわみ量は許容値と同程度かそれ以下であることが分かる。図-6 に、SSM45-1 の初期たわみ分布について、初期たわみ量を50倍に拡大して示す。

2.4 実験結果と考察

(1) 荷重－変位関係

実験から得られた荷重－対角変位関係を、供試体の種類別に図－7 に示す。図中縦軸は、載荷荷重から求めた着目パネルの作用せん断力 S を降伏せん断力 S_y で除して無次元化した。なお、降伏せん断力 S_y は式(2)の降伏せん断応力度に腹板断面積を乗じて求めた。また、図中横軸は対角方向の縮み量 ΔL を供試体の対角長 L_0 で除して無次元化した。

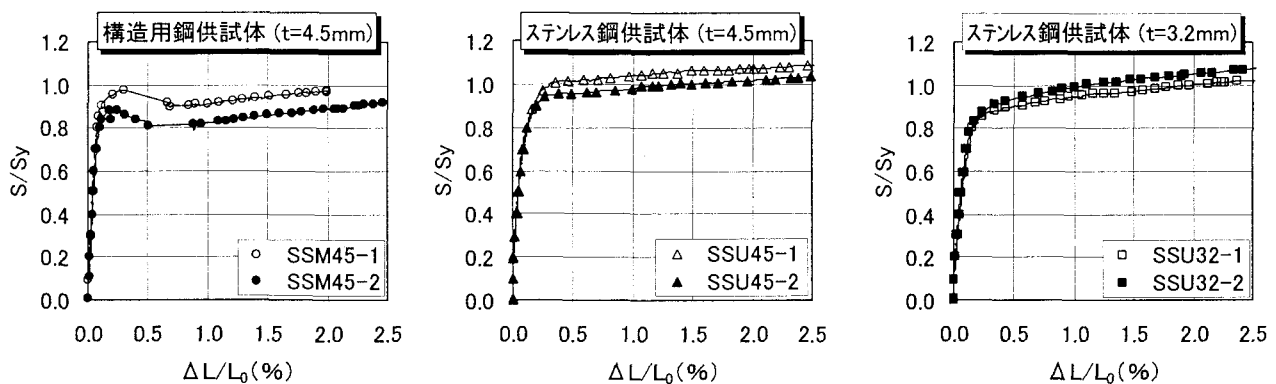
図－7 に示すように、構造用鋼供試体(SSM45-1, 2)では、約 $0.8S_y$ まで線形を保った後、剛性が急激に低下した。一方、同じ腹板厚のステンレス鋼供試体(SSU45-1, 2)では、比較的低い荷重から若干の剛性低下が始まる。これは、図－4 に示すようにステンレス鋼の低い比例限の影響と考えられる。しかし、剛性は急変せず、急激な剛性低下は構造用鋼と同様に約 $0.8S_y$ を越えて生じた。また、その後ステンレス鋼供試体では荷重が緩やかに増加を続けたのに対し、構造用鋼供試体では変位の急増に伴って荷重が低下したことが分かる。ただし、構造用鋼供試体においても1%を超える大きな変位が生じた後、荷重が緩やかな増加に転じた。なお、腹板厚 $t=3.2\text{mm}$ のステンレス鋼供試体(SSU32-1, 2)においても、 $t=4.5\text{mm}$ のステンレス鋼供試体に比べ急激な剛性低下が生じる荷重は低かったものの荷重の低下は見られなかった。

次に、荷重－面外変位関係について図－8 に示す。

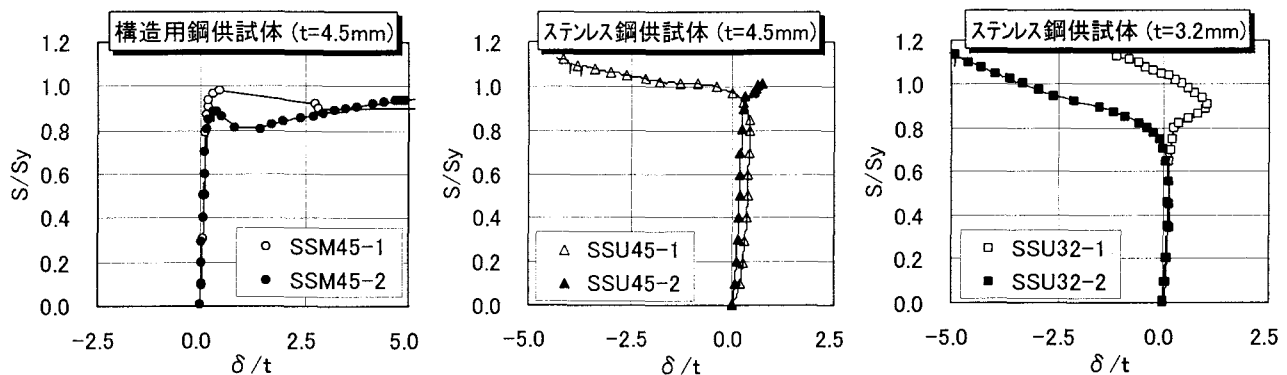
図中縦軸は図－7 と同様であり、横軸は着目パネル腹板中央点の面外変位 δ をその腹板厚 t で除して無次元化している。図－7 との比較から明らかなように、供試体の種類に関わらず面外変位の急増する荷重は、荷重－対角変位関係で得られた急激な剛性低下の生じる荷重とほぼ等しいか、あるいは若干下回っていることが分かる。このことから、着目パネル腹板の面外変位の増加に伴って対角変位、すなわちせん断変形が急増したと考えられる。なお、荷重－面外変位関係において同種の供試体で履歴に差がみられるのは、初期不整等の影響により変形モードの腹や節の位置にズレが生じたためと考えられる。

(2) 荷重－ひずみ関係

代表的な計測点における荷重－最小主ひずみ関係について、構造用鋼供試体(SSM45-2)およびステンレス鋼供試体(SSU45-2)の計測結果を図－9 に示す。着目した計測点は最小主ひずみが生じる方向、すなわち着目パネルの対角線上の計測点とした。なお、図中横軸は主ひずみ ε を降伏ひずみ ε_y で除して無次元化し、圧縮主ひずみを正としている。図より、構造用鋼供試体では、降伏ひずみに達する以前にほとんどの計測点で同時に線形性を失い、ひずみの乱れ、あるいは急増が確認できる。一方、ステンレス鋼供試体においても、降伏ひずみに達する以前に一部の計測点でひずみの増加方向が引張側に転ずるなど、ひずみに乱れが生じていることが確認できる。このような降伏ひずみに達す



図－7 荷重－対角変位関係



図－8 荷重－面外変位関係

る以前のひずみの乱れは、供試体の種類に関わらず全ての供試体で確認できた。また、いずれの供試体においてもひずみの乱れる荷重が面外変形の急増する荷重に近いことから、このひずみの乱れは座屈による面外変形に伴う付加曲げ応力により生じたものと考えられる。なお、図-9 に示すように、ステンレス鋼供試体のひずみの乱れは構造用鋼供試体のように急激でなく、なめらかに移行することが分かる。

代表的な計測点における荷重-最大主ひずみ関係を図-10 に示す。供試体は図-9 と同様、構造用鋼供試体(SSM45-2)およびステンレス鋼供試体(SSU45-2)である。なお、図中の縦軸および横軸は図-9 と同様に無次元化した。ただし、横軸は引張主ひずみが正である。図-10 に示すように、どちらの供試体も計測点の違いによるばらつきが少ないことが分かる。これは、後述する面外変形モードからも明らかのように、最大主ひずみが生じる方向には面外曲げの影響が少ないためと考えられる。また、構造用鋼供試体では降伏ひずみ付近でひずみが急増し、荷重が上昇していないが、ステンレス鋼供試体では降伏ひずみに達した後も荷重が緩やかに増加している。これは、材料の応力-ひずみ特性の影響によるものと考えられる。すなわち、図-4 の応力-ひずみ関係が示すように構造用鋼では降伏ひずみに到達後、降伏棚に移行するが、ステンレス鋼はひずみ硬化により応力度が上昇を続けるためと考えられる。この結果、前述の荷重-対角変位関係にお

いて、構造用鋼供試体は座屈後に荷重が低下するが、ステンレス鋼供試体は座屈後も耐力力を失わず、荷重が上昇したと考えられる。

ステンレス鋼供試体(SSU45-2)について、座屈前後の主ひずみ分布と主ひずみの方向を図-11 に示す。図中、最小(圧縮側)主ひずみは線分で表し、最大(引張側)主ひずみには矢印を付した。線分の長さがひずみ量の大きさを表す。図に示すように、座屈前では、各計測点における主応力は引張、圧縮ともにほぼ均一であった。しかし、座屈後は面外変形の進行に伴って応力の配分が生じ、最終的には図に示すような対角方向に引張主応力が卓越する様子が認められ、張力場が形成されていると考えられる。このような座屈後の主応力分布は全ての供試体で確認された。なお、図-7 に示した構造用鋼供試体の荷重-対角変位関係において、無次元対角変位が約1.0%をこえると荷重が上昇に転じたのは、この張力場により腹板内に形成された降伏帯の引張ひずみが増加し、構造用鋼の応力-ひずみ関係が降伏棚をこえてひずみ硬化域に達したためと考えられる。

(3) 座屈耐力力と変形モード

実験から腹板の座屈荷重を客観的に推定する^{11)~13)}ことは難しく、また、本研究では面外変形の計測点が少ないことを考慮して、腹板の表裏面のひずみ差が急増する荷重を座屈荷重とした。例として、図-12 に構造用鋼供試体(SSM45-2)、およびステンレス鋼供試体

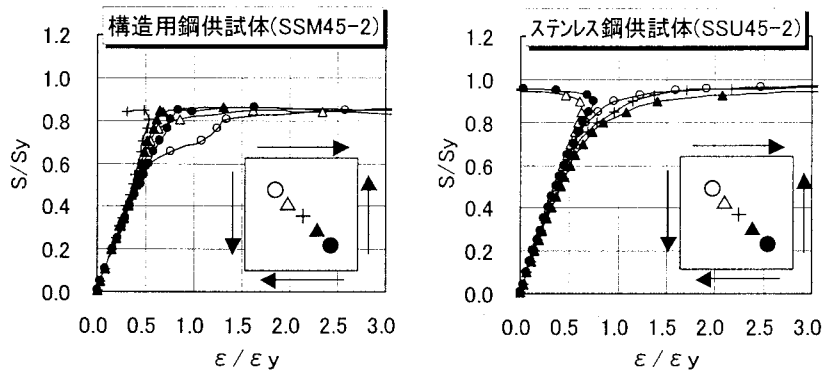


図-9 荷重-最小主ひずみ関係

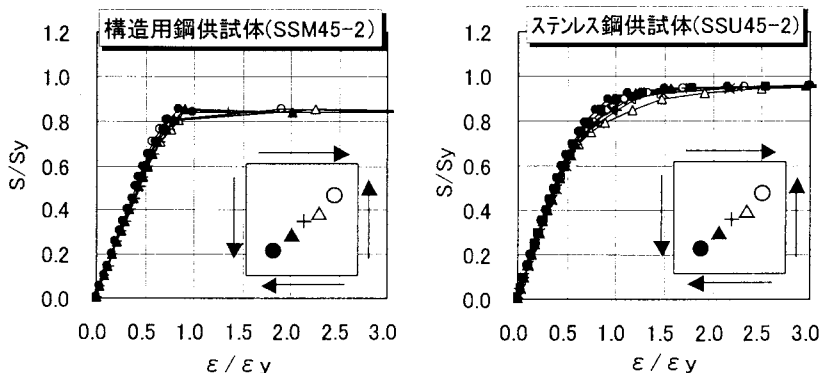
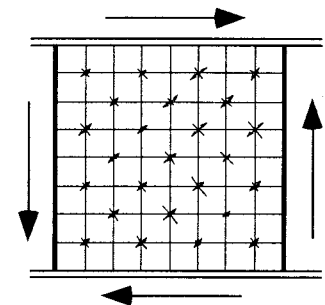
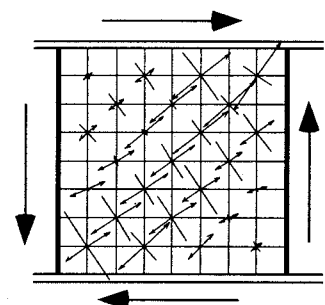


図-10 荷重-最大主ひずみ関係



(a) 座屈前, $S/S_y=0.9$



(b) 座屈後, $S/S_y=1.0$

図-11 主ひずみ分布図
(SSU45-2)

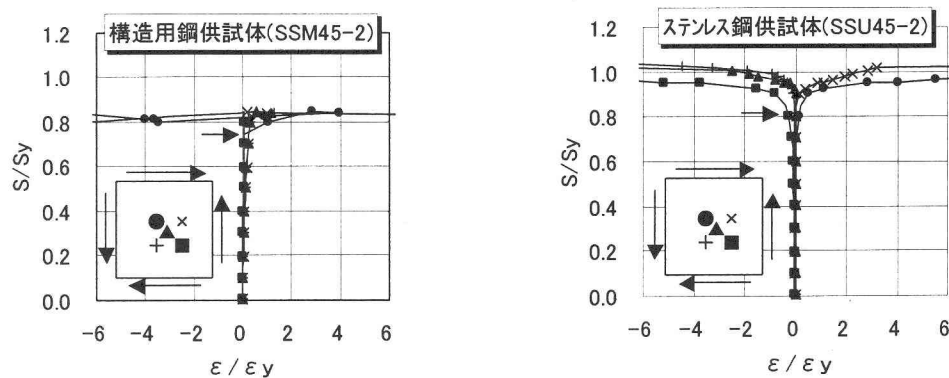


図-12 荷重－最小主ひずみの表裏面差関係

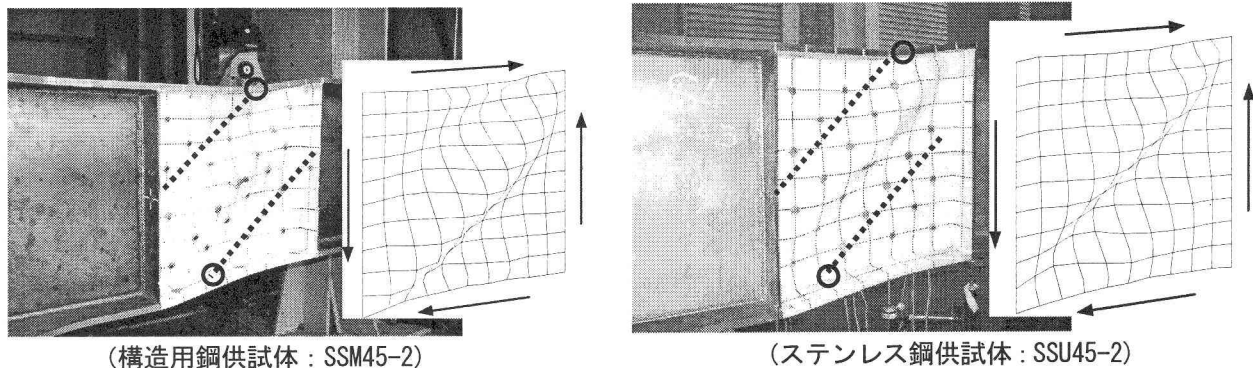


図-13 実験終了後の面外変形モード

(SSU45-2)における着目パネル中央付近の代表的な計測点における荷重－最小主ひずみの表裏面差の関係を示す。なお、図中の縦軸および横軸は図-9と同様である。図より、ひずみの表裏面差から推定した座屈荷重 S_{or} は、SSM45-2において $0.78S_y$ 、SSU45-2において $0.81S_y$ である。同様の方法で推定した全供試体の座屈荷重について表-6に示す。表に示すように、腹板厚4.5mmのステンレス鋼供試体の座屈荷重は同じ腹板厚の構造用鋼供試体と同程度であった。このことから本実験供試体諸元において、ステンレス鋼供試体は構造用鋼供試体と同程度の座屈耐力を有していると考えられる。なお、腹板厚3.2mmのステンレス鋼供試体は、4.5mmの場合に比べ、約10%程度座屈荷重が低下した。

次に、座屈後の面外変形モードについて示す。構造用鋼供試体(SSM45-2)、およびステンレス鋼供試体(SSU45-2)の実験終了後の写真、および計測した変形図による面外変形状況について、図-13に示す。なお、面外変形図は初期たわみの計測と同じ方法で計測した。図に示すように、実験終了後の面外変形モードからも、供試体の種類によらず張力場が形成されていると考えられる。

3. 弾塑性有限変位解析

前節で示した耐力実験の結果、本実験供試体諸元においてステンレス鋼を用いたI桁腹板は、従来の構造用鋼を用いたI桁腹板と同等の座屈強度を有し、ま

表-6 各供試体の座屈耐力

供試体	供試体名称	腹板厚 (mm)	座屈荷重(S_{cr}/S_y)	
			計測結果	平均
構造用鋼 供試体	SSM45-1	4.5	0.85	0.82
	SSM45-2		0.78	
ステンレス鋼 供試体	SSU45-1	4.5	0.85	0.83
	SSU45-2		0.81	
	SSU32-1	3.2	0.78	0.74
	SSU32-2		0.70	

た、座屈後も耐力が緩やかに上昇するなど、優れた耐力特性を有していることが明らかとなった。そこで、文献1)においてステンレス鋼補剛板の軸圧縮耐力特性に対する適用性が確認された弾塑性有限変位理論に基づく数値解析法を用いて、実験結果との比較によりせん断耐力に関する本解析法の適用性を検討した。

3.1 解析モデルおよび解析法

図-14に示すような実験供試体と同一の寸法形状を有する解析モデルを用いて、3種類6体のすべての実験供試体について解析を行った。境界条件は実験と同様、2点荷重2点支持とし、支点上はピンおよびピンローラーである。また、支点上の腹板は面外方向の変位を固定した。荷重は、2つの荷重点に同値の強制変位を与える事により着目パネルにせん断力を導入した。解析では、実験供試体をアイソパラメトリックシ

エル要素でモデル化し、弾塑性有限変位理論に基づいた数値解析を行った。幾何学的非線形挙動は、更新ラグランジェ法による増分理論を用いて評価し、材料非線形挙動は、von-Mises の降伏条件および Prandtl-Reuss の塑性流れ理論に従うものとした。本数値解析では、接線剛性マトリックス等の積分を Gauss の数値積分で行ったが、板厚方向への塑性域の進展を考慮できるよう板厚方向に5層の積分点を設けた。また、ひずみおよび応力度の評価は各 Gauss 数値積分点にて行った。一方、非線形方程式の解は、変位増分法に Newton-Raphson 法を併用した逐次収斂計算によって算出した。なお、本解析法の詳細については文献 14) に述べられている。着目パネルの要素分割は 12×12 分割とし、その他は図-14 に示す要素分割を用いた。また、各鋼材の降伏応力度およびヤング係数は表-2 の材料試験結果を用い、載荷桁の材料については、別途行った材料試験結果およびミルシート値を解析モデルに導入した。なお、ステンレス鋼の応力-ひずみ関係は式(3)に示す構成式で近似した¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} (\sigma/\sigma_p) &= (\varepsilon/\varepsilon_p) & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ (\sigma/\sigma_p) &= a_1 \ln(\varepsilon/\varepsilon_p) + 2a_2 \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_p} \\ &\quad + a_3(\varepsilon/\varepsilon_p) + a_4 & \varepsilon_p \leq \varepsilon \leq 5\varepsilon_p \\ (\sigma/\sigma_p) &= (1/30)(\varepsilon/\varepsilon_p) + a_5 & 5\varepsilon_p \leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 σ_p および ε_p は比例限の応力度およびひずみ、 $a_1 \sim a_5$ は定数であり、それぞれの値は、材料試験結果に基づき、表-7 のように決定した。

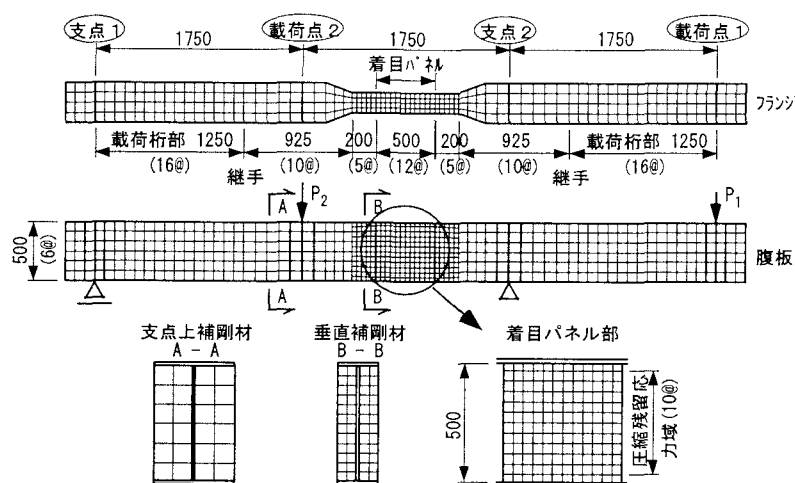


図-14 解析モデル

表-7 σ_p , ε_p , $a_1 \sim a_5$ の値

ε_p	σ_p	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
0.10%	$\varepsilon_p \cdot E_0$	-0.201	2.052	-0.851	-2.253	2.345

E_0 : 表-2 に示した初期ヤング係数

また、構造用鋼 (SM400) の応力-ひずみ関係は、式(4)に示すように降伏棚を有し、ひずみ硬化域まで考慮した関係式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} (\sigma/\sigma_y) &= (\varepsilon/\varepsilon_y) & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ (\sigma/\sigma_y) &= 1 & \varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_H \\ (\sigma/\sigma_y) &= B(\varepsilon/\varepsilon_y)^n & \varepsilon_H \leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 $B=0.595$, $n=0.219$, $\varepsilon_H=10.71 \varepsilon_y$ である。

図-15 は、腹板に導入した各鋼材の応力-ひずみ関係について、 $\varepsilon < 1.0\%$ の範囲を示したものである。

3.2 残留応力および初期たわみ

着目パネルの腹板に導入する残留応力度分布は、表-4 の実験供試体計測結果、および自己平衡と2軸対称条件より、図-16 に示すように仮定した。また、初期たわみ分布は、実験供試体において図-6 の初期たわみ計測結果に示すように、橋軸方向に10等分された鉛直線上の初期たわみ計測結果が得られていることから、これらを用いて各節点の初期たわみを曲線近似により算出し、解析に導入した。

3.3 解析結果と考察

(1) 荷重-変位関係

図-17 に、荷重-対角変位関係に関する解析結果と実験結果の比較を示す。なお、縦軸および横軸は図-7 の実験結果と同様である。

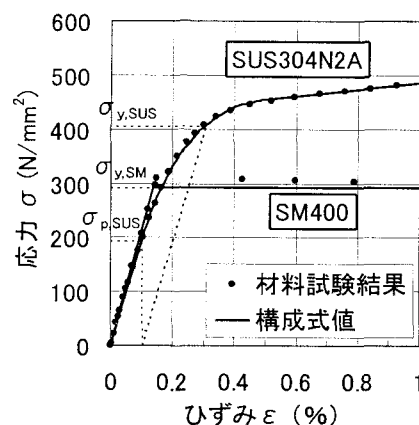


図-15 解析に用いた応力-ひずみ関係

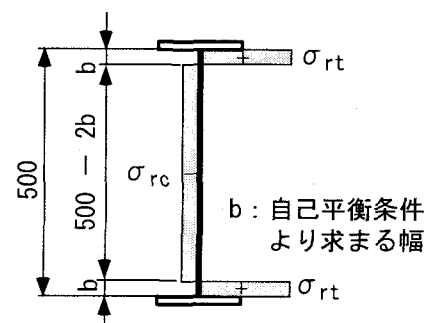


図-16 解析に用いた残留応力分布

図-17 に示すように、構造用鋼供試体に関する解析結果は実験結果と同様、約 $0.8S_y$ を越えるまで線形を保ち、その後、変位が急増した。また、ステンレス鋼供試体についても、実験結果に比べ変位が若干大きく、また、変位の急増する荷重についても若干低い傾向を示すものの、実験で得られた荷重－対角変位関係を比較的精度よく評価していると考えられる。

なお、図-17 において、同種の解析モデル（例えば SSM45-1 と SSM45-2）の荷重－対角変位関係を比較した場合、それらの解析結果が重なって見えるほど一致していることから、本解析モデルに導入した初期たわみ量の範囲においては、初期たわみ分布の差異が荷重－対角変位関係にほとんど影響を与えなかったことが分かる。

(2) 座屈後の変形モード

本解析から得られた座屈後の変形モードについて、構造用鋼供試体（SSM45-2）、およびステンレス鋼供試体（SSU45-2）に対する実験結果との比較を図-18 に示す。

図-18 に示すように、本解析法による座屈後の変形モードは、構造用鋼供試体およびステンレス鋼供試体ともに実験結果とほぼ一致し、張力場状態を示す変形モードが得られたことから、本解析法が座屈後の面外変形モードについても実験結果を比較的精度よく反映できていると考えられる。

以上の結果より、本解析法は荷重－対角変位関係、および座屈後の変形モードについて実験結果を比較的精度よく再現しているものと判断できる。

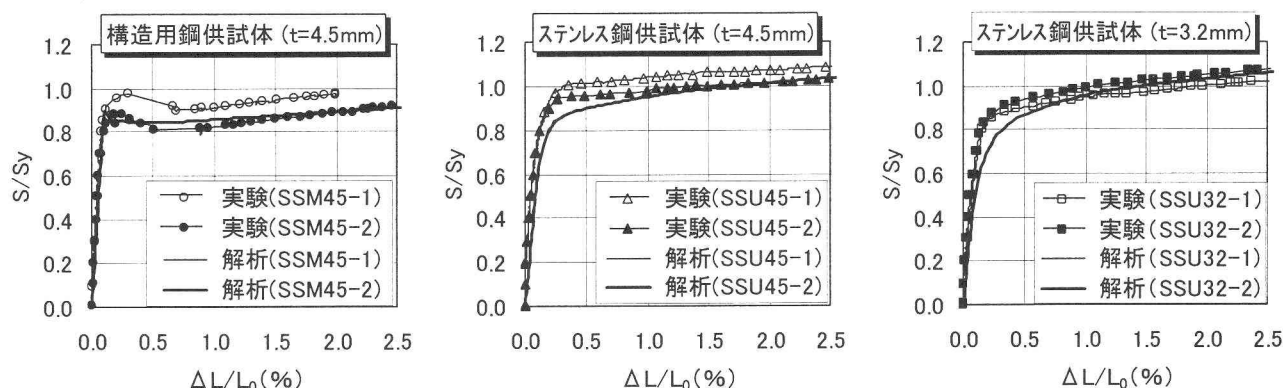
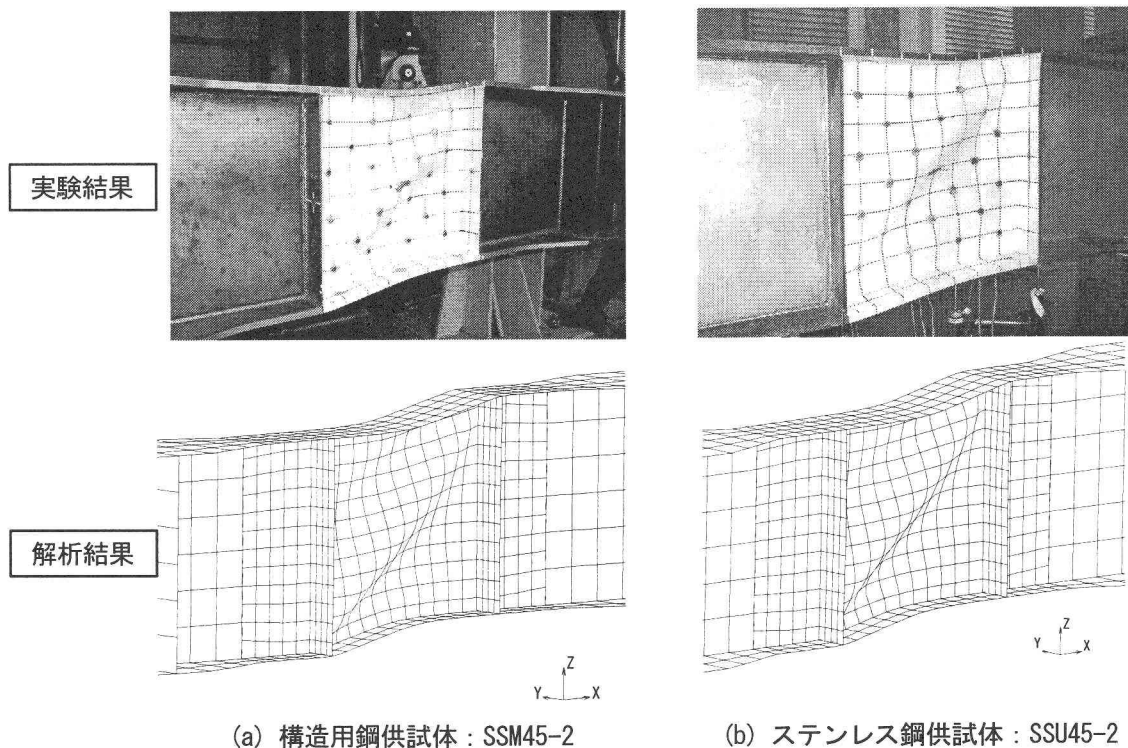


図-17 荷重－対角変位関係



(a) 構造用鋼供試体：SSM45-2

(b) ステンレス鋼供試体：SSU45-2

図-18 座屈後の変形モード

4 結論

本研究では、ステンレス鋼薄板を構造部材に用いたミニマムメンテナンス橋梁開発の一環として、I形断面供試体を用いた耐荷力実験によりステンレス鋼腹板のせん断耐荷力特性について検討を行った。さらに、ステンレス鋼腹板のせん断耐荷力特性を精度よく評価できる解析法として、ステンレス補剛板に対し適用性が確認されているアイソパラメトリックシェル要素を用いた弾塑性有限変位理論に基づく数値解析法を本研究に用い、実験結果との比較によりその適用性を検討した。

以下に、本研究により得られたステンレス鋼腹板のせん断耐荷力特性に関する結論をまとめる。

(1) ステンレス鋼腹板を用いた供試体では、座屈荷重に達する以前に若干の剛性低下が認められる。腹板の面外変位が増加していないことから、この剛性低下は降伏応力度(0.1%耐力)より低い応力レベルで材料非線形性が現れるステンレス鋼の力学的特性によるものと考えられる。また、表裏面のひずみ差から推定されたステンレス鋼腹板の座屈荷重は、この剛性低下の影響を受けず、同じ幅厚比の構造用鋼腹板供試体と同程度であった。

(2) 座屈前後の主ひずみ分布、および座屈後の変形モードから、本実験で用いた全ての供試体において、座屈荷重到達後、張力場が形成されたと考えられる。

(3) 本実験供試体諸元において、構造用鋼腹板では座屈荷重到達後、耐荷力が低下した。一方、ステンレス鋼腹板では座屈荷重到達後も耐荷力を失わず、荷重は緩やかに上昇する。これは、荷重-主ひずみ関係が示すように、ステンレス鋼腹板では降伏ひずみ到達後もひずみ硬化の影響で応力が上昇を続けるためと考えられる。なお、構造用鋼腹板においても対角方向の無次元変位が約1.0%をこえると、再び耐荷力が上昇した。これは、張力場により腹板内に形成された降伏帯の引張ひずみが増大した結果、構造用鋼の応力-ひずみ関係が降伏棚をこえてひずみ硬化域に達したためと考えられる。

(4) 本実験では、幅厚比 $B/t=111$ のステンレス鋼腹板および構造用鋼腹板の座屈荷重はともに、降伏せん断荷重の80%程度であった。なお、幅厚比 $B/t=156$ のステンレス鋼腹板では、幅厚比 $B/t=111$ の場合に比べ、10%程度座屈荷重が低下した。

(5) 本実験供試体諸元において、ステンレス鋼腹板は、従来の構造用鋼腹板と同等の座屈耐荷力を有し、座屈後も耐荷力が緩やかに上昇を続けるなど、実用上十分な耐荷力特性および変形能を有していると考えられる。

(6) 本研究で用いた解析法は、荷重-対角変位関係および座屈後の面外変形モードについて、実験結果を精度よく反映できることが確認された。

本研究では、縦横比 $\alpha=1$ で水平補剛材のない最も基本的なモデルに着目した。今後、ステンレス鋼を用

いた腹板の実用化を促進するためには、補剛材の剛度を始め、縦横比や幅厚比パラメータ等の変化に対する耐荷力特性を明らかにし、実構造物に適した設計手法を確立する必要がある。

参考文献

- 1) 松下裕明, 岩田節雄, 有住康則, 矢吹哲哉: ステンレス鋼板を普通鋼で補剛したハイブリッド補剛板の軸圧縮耐荷力特性, 構造工学論文集, Vol.49A, pp. 833~844, 2003.
- 2) 喜納正史, 松下裕明, 矢吹哲哉, 有住康則: ステンレス鋼を用いたI形断面腹板のせん断強度に関する実験, 第58回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2003
- 3) 有住康則, 矢吹哲哉, 松下裕明, 岩田節雄: ステンレス鋼を用いたI形断面腹板のせん断座屈強度に関する解析的研究, 第58回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2003
- 4) 楠和憲, 松下裕明, 矢吹哲哉他: ステンレス橋梁用候補材の耐候性評価暴露試験, 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2002
- 5) 田原潤, 岩田節雄, 安田和宏: 6 Tクラス摩擦接合用ステンレス高力ボルト, 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2002
- 6) 土木学会: 座屈設計ガイドライン(福本編), 技報堂, 1987.10
- 7) 例えば, 建設省建築研究所他: 新ステンレス鋼利用技術指針第6節, 1993.10 など
- 8) 日本道路協会: 鋼道路橋設計便覧, S55.8 改訂版
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2002.3
- 10) 中谷光良, 松下裕明, 矢吹哲哉, 有住康則他: ステンレス鋼溶接における溶接変形推定方法及び残留応力の検討, 溶接構造シンポジウム2002 講演論文集, 2002.11
- 11) 森脇良一, 藤野真之: 初期不整を有するプレートガーダーのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第249号, pp.1~15, 1977.8
- 12) 藤野真之: 初期不整を有するプレートガーダーの純曲げ強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第269号, pp.1~16, 1978.1
- 13) 前川幸次, 伊藤義人, 福本嘸士: プレートガーダーの曲げによるフランジと腹板の連成座屈実験, 土木学会論文集, 第392号, pp.335~343, 1988.4
- 14) Yabuki.T, Arizumi.Y, Yashiro.S.: Ultimate Strength and Its Practical Evaluation of Cylindrical Steel Shell Panels under Various Compressions, Journal of Structural Mech. and Earthquake Eng., JSCE, No.489/I-27, pp.37~47, 1994
- 15) 奈良敬, 出口恭司, 福本嘸士: 純せん断を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究, 土木学会論文集, 第392号, pp.265~271, 1988.4

(2003年9月12日受付)