

防撓箱形断面梁構造の繰り返し曲げ崩壊実験について

大阪府立大学大学院 正岡 孝治, ○長尾 誠
柴原 正和, 坪郷 尚

Experimental study on collapse behavior of a stiffened box-section girder under cyclic loading

by Koji MASAOKA, Makoto NAGAO, Masakazu SHIBAHARA and Takashi TSUBOGO

1. 緒言

防撓薄板構造に許容力を超える過大な力が繰り返し作用すると、塑性、座屈、き裂の影響により構造体の耐力は徐々に低下する。本研究では溶接により構成された防撓箱形断面梁構造に過大な繰り返し曲げが作用する場合を対象とし実験を行った。

実験を容易にするために構造モデルはなるべく小さくすることが望ましい。しかし、寸法を小さくしすぎると工作時の溶接が不可能になったり、実際の構造体ではありえない大きな初期不整が生じてしまうため、試験体の工作方法は矢尾らの実験¹⁾、西原の実験²⁻³⁾を参考に決定した。

作製した試験体の初期たわみ、残留応力を計測した後、4点曲げ試験機を用いて繰り返し曲げ試験を行い、試験体の弾性変形挙動、最終強度、最終強度後の挙動を確認した。最終強度後の挙動を確認した後、48回の繰り返し曲げ崩壊実験を行い、崩壊に至る過程を観察した。また、塑性関節線の形成、き裂の進展による構造の耐力低下についても整理した。

本論文では、以上のような防撓箱形断面梁構造の繰り返し曲げ試験結果を報告するとともに、非線形有限要素解析を実施し、初期たわみを考慮することにより、試験結果が精度よく再現できることを示す。

2. 試験体と試験装置

2.1 試験体概要

2.1.1 使用材料

試験体には通常冷延である SPCC 鋼を使用した。今回使用した試験体の材料の化学的成分を Table 1 に示す。また、ヤング率、降伏応力、引張強度を Table 2 に示す。この材料には明確な降伏点は見られず、0.2%耐力を降伏応力とした。

2.1.2 試験体の形状と寸法

Fig. 1 に試験体を示し、Fig. 2 に試験体を構成する防撓板と試験体の形状と寸法を示す。試験体は板厚が $t=2\text{mm}$ 、ステ

Table 1 Chemical composition of material

C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
0.02	-	0.11	0.007	0.007

Table 2 Mechanical properties of material

E(MPa)	Yield stress(MPa)	Tensile stress(MPa)
196000	201	317



Fig. 1 Tested structure

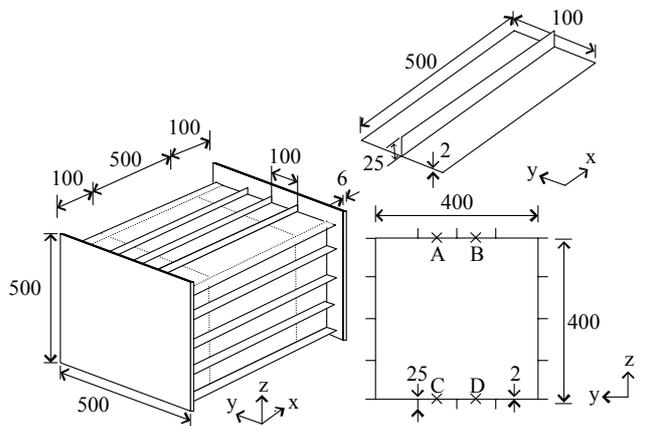


Fig. 2 Dimensions of tested structure (mm)

イフナ高さは25mmであり、試験体長さは700mm、内500mmが試験体部のフレームスペースとなっている。また、断面は一辺が400mmの正方形断面となっている。Table 3に以上をまとめたものと、細長比等のパラメータを示す。 $\alpha(=a/b)$ はパネルの縦横比であり、 a は試験体部分のフレームスペースである。 b はスティフナ間隔であり、本試験体では $b=100$ mmである。 β は防撓板間パネルの細長比である。 λ は防撓板の細長比を示す。ここで、 r は防撓板の断面2次半径である。Table 4に幾何学的非線形性を考慮しない場合の試験体の中央断面における初期降伏時および全断面塑性時の曲げモーメント M_0 、 M_Y (kN-m)、初期降伏荷重および全塑性荷重 P_0 、 P_Y (kN)、形状係数 M_Y/M_0 を示す。

2. 2 初期不整の計測

2. 2. 1 初期たわみの計測

崩壊試験を行う前に、工作時の溶接によって生じた初期たわみをダイヤルゲージを用いて0.01 mmの精度まで計測した。

Fig. 3に初期たわみの計測位置を示す。図中の・が測定点を示している。Fig. 3(a)に示すように、上面及び下面ではパネル縦方向に50mm間隔で13点、パネル横方向で9点、合計117点測定点を設けている。Fig. 3(b)に示すように、側面も上面と同様に117点の測定点を設けている。初期たわみは絶対量を計測するのが困難なために試験体以外の水平な面(定盤)を基準面とし、各パネルにおける凹凸をダイヤルゲージで計測することで、パネル内の相対的な初期たわみとしている。

Fig. 4に計測された中央断面における初期たわみの形状を示す。Fig. 4(a)は中央断面での上、下面のパネル横方向のたわみを示し、Fig. 4(b)は中央断面の側面パネル横方向のたわみを示す。共に横軸は横方向の計測位置を示し、縦軸は計測したたわみの値を示している。Fig. 4(a)ではパネル横方向の防撓板全体にわたるたわみが見られ、最大たわみと最小たわみ部の差は約2 mm程度である。また、スティフナに対してプレートが持ち上がる痩せ馬モードが見られ、その大きさは1 mm以内である。Fig. 4(b)から、上、下面と同様に側面にも痩せ馬モードが見られ、最大たわみと最小たわみの差は約2mm程度であった。

Fig. 5に上、下面のパネル縦方向の初期たわみ計測結果を示す。Fig. 5(a)は下面のパネル縦方向のたわみを示し、Fig. 5(b)は上面のパネル縦方向の初期たわみを示し、Fig. 5(c)、Fig. 5(d)共に側面のパネル縦方向の初期たわみを示している。それぞれ、横軸はパネル縦方向の試験体位置を示し、縦軸は計測したたわみの値を示している。

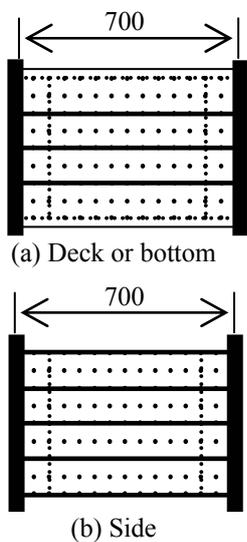


Fig. 3 Measured points

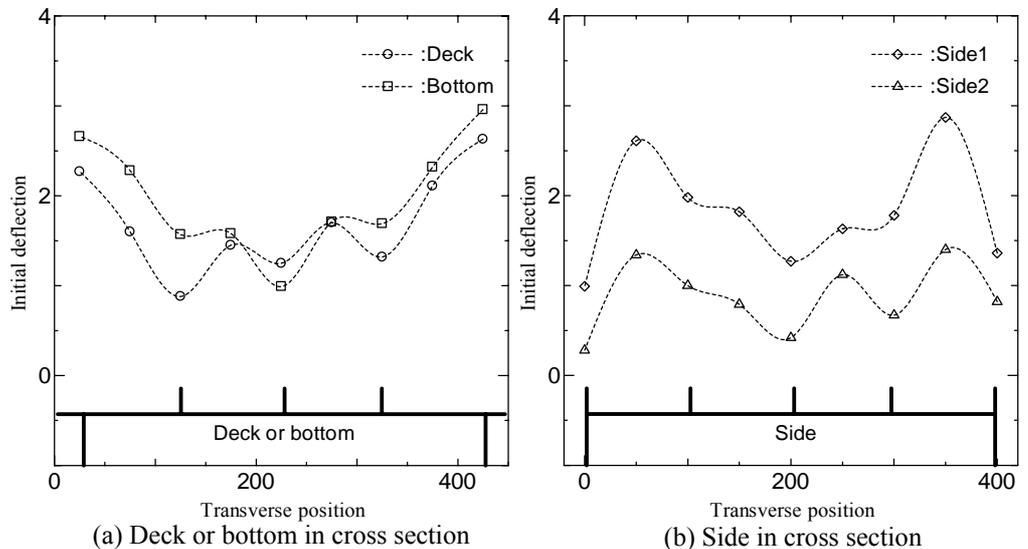


Fig. 4 Initial deflection in Transverse position

Table 3 Dimensions of stiffened panel

Frame space	$a=500(\text{mm})$
Stiffener space	$b=100(\text{mm})$
Stiffener height	$h=25(\text{mm})$
Thickness	$t=2.0(\text{mm})$
Aspect ratio of unstiffened plates	$\alpha=5.0$
Slenderness ratio of unstiffened plates	$\beta=1.6(=b/t\sqrt{\sigma_y/E})$
Slenderness ratio of stiffened plates	$\lambda=0.808(=a/\pi\sqrt{\sigma_y/E})$

Table 4 Longitudinal strength of tested structure

Initial yield moment	$M_0=97.3(\text{kNm})$
Initial yield load	$P_0=48.6(\text{kN})$
Full plastic moment	$M_Y=122(\text{kNm})$
Full plastic load	$P_Y=60.9(\text{kN})$
Shape factor	$M_Y/M_0=1.25$

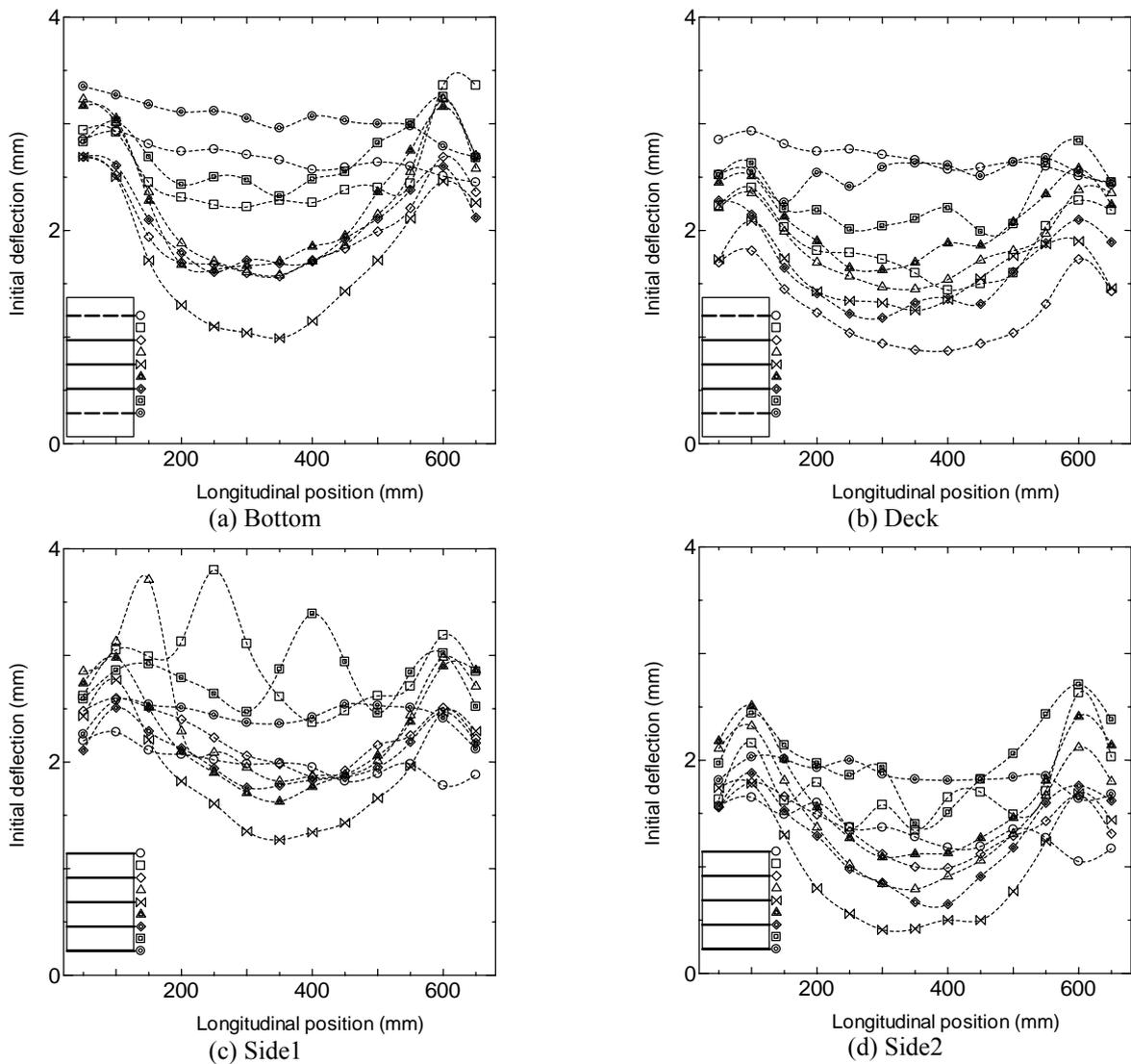


Fig. 5 Initial deflection in longitudinal position

下面の初期たわみを示す Fig. 5(a)を見ると、パネル中央部測定点(×印)では縦方向の最大たわみと最小たわみの差は最大で 1.5mm 程度であり、試験体中央部分でおよそ最大になっていた。また、端部測定点(○印, □印)では縦方向の最大たわみと最小たわみの差は 0.5mm 程度であった。これは中央部分に近づくに従いたわみが大きくなる傾向があり、初期たわみは中央部分付近で最大になっていることを示している。Fig. 5(b)から、上面の初期たわみにも同様の傾向が見られる。側面での初期たわみを示す Fig. 5(c)(d)をみると、局所的な大きな初期たわみは存在するものの、上下面と同じように端部から中央部分にむけて全体的に 1 半波でたわむ形状となっていることがわかる。

以上から、試験体の初期たわみ形状は横方向にはやせ馬モードとパネル全体がたわむモードとが重なり合った形状となっており、パネル縦方向にはパネルが全体として 1 半波でたわむモードが見られることがわかる。

2. 2. 2 残留応力の計測

工作時の溶接によって生じた残留応力はひずみ解放法により解放されたひずみを計測し応力に換算して求めた。残留応力の曲げ成分を除くためプレートおよびスティフナの両面を計測し、平均値を軸方向の残留応力とした。防撓板における軸方向の残留応力を Fig. 6 に示す。

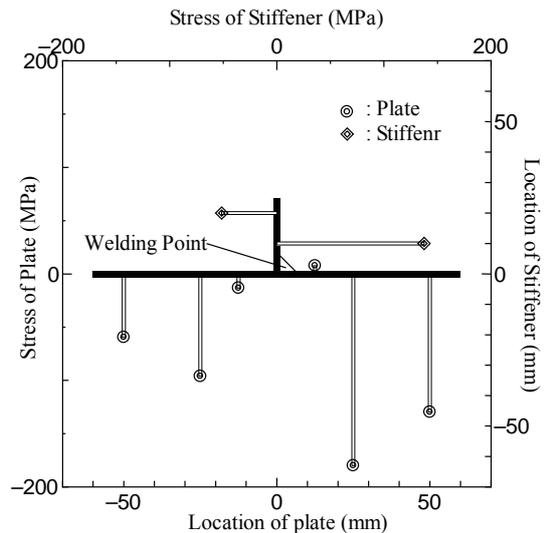


Fig. 6 Welding residual stress of stiffened plate (+ : Tension, - : Compression)

スティフナは片側溶接のために残留応力分布は、プレートで左右非対称となった。プレート部スティフナ部ともに大きな残留応力が観察された。

2. 3 試験装置

本実験を行うために、実験装置を設計・製作した。試験装置は梁の繰り返し4点曲げを行うことができるものであり、その概要を Fig. 7 に示す。試験機のアーム部分(Arm in Fig. 7)は各支持点、荷重点でピン接合されている。左右のアームの外側には梁の転倒防止のための部材を取り付けている。繰り返し曲げ崩壊現象を再現するために、荷重点は大きな変位(300mm)が可能となっている。試験体部分(Tested structure in Fig. 7)は取替え可能となっている。対称な4点曲げを行うことにより試験体の中央部は純曲げ状態となる。

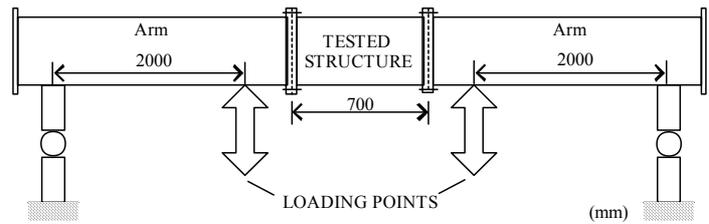


Fig. 7 Test set-up

実験装置の支持点間間は5124mmであり、実験装置の両端支持点から荷重点までの距離は2000mmである。アーム部分は試験体の断面形状と比較して試験体よりも剛性・強度が大きくなるようなI型鋼を用いている。従って、実験時にはアーム部分の変形は試験体の変形に比べて小さく、崩壊は試験体部分で起こる。載荷装置は油圧ポンプと複動シリンダを用いて押し引きの両方が可能であり、試験体に繰り返し曲げをかけることができる。

3. 繰り返し曲げ試験

3. 1 試験方法

2章で述べた試験装置を用いて、基準点(水平位置)から試験体に上向きの荷重を作用させる。試験体が最終強度をこえた後、除荷し、基準点まで下がったところから再び上向きの荷重をかける。この操作を5サイクル繰り返した後、荷重点変位が0mmから150mmまで荷重点変位を48サイクル与え、繰り返し曲げを受けた試験体の崩壊挙動を観察する。

3. 2 ひずみ、変位および荷重の計測

崩壊挙動のメカニズムを観察するために、ひずみ、荷重、荷重点での変位を計測した。ひずみゲージの貼付位置は Fig. 2 に A~D で示すように試験体中央部上下面スティフナ間パネル4箇所である。この場所は、事前の非線形有限要素法による解析結果においても圧縮側(C, D)が座屈により最も変形が大きくなったところである。変位、荷重はそれぞれ荷重点に設置した変位計とロードセルにより測定した。

3. 3 試験結果

3. 3. 1 予備実験

まず、予備実験として、弾性範囲内で繰り返し4点曲げ実験を行った。Fig. 8 に弾性範囲内の荷重-曲げ応力関係を示す。横軸に荷重を示し、縦軸は曲げ応力の値を示す。各 A~D のひずみゲージの値から応力に換算した値を曲げ応力としている。このグラフから実験値と梁理論から得られた理論値はよい一致を示している。

3. 3. 2 1~5サイクル

Fig. 9 に、5サイクル目までの荷重-変位関係を示す。横軸は荷重点での変位であり、縦軸は荷重の値である。1サイクル目では最終強度の確認のため、試験体に最終強度まで負荷を与え、その後除荷を行っている。この1サイクル目の載荷で、圧縮側プレートの座屈による剛性

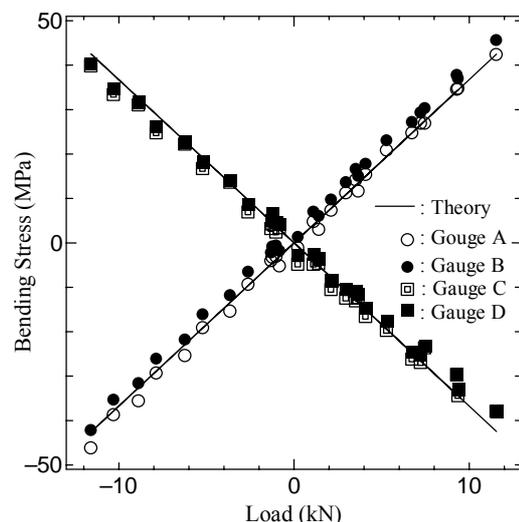


Fig. 8 Load-Bending Stress curve

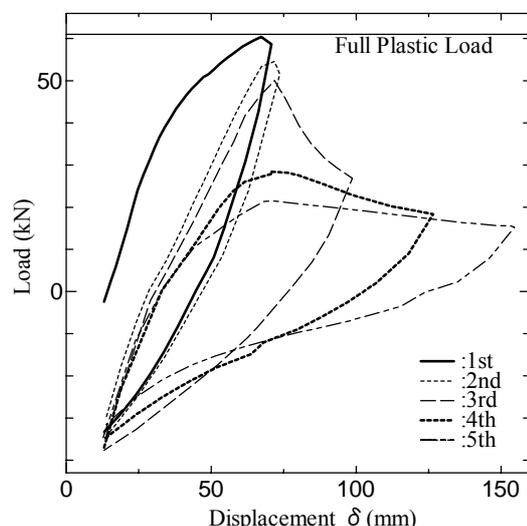


Fig. 9 Load-Displacement curve under cyclic loading

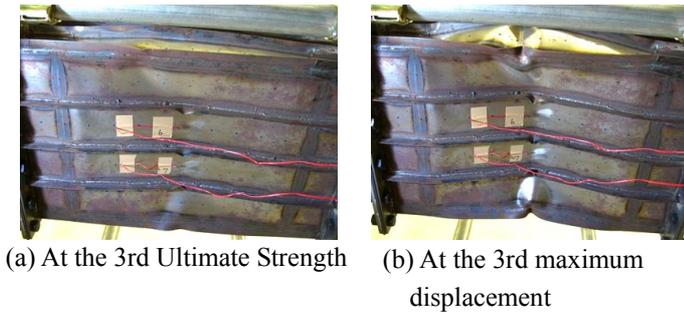


Fig. 10 Deflection of the bottom plate

低下が見られた後、試験体は最終強度をむかえた。最終強度時には、下面に全体座屈が、側面下部圧縮部には3半波の局部座屈が確認できた。2サイクル目も1サイクル目と同様に、最終強度まで試験体に負荷を与え、その後除荷を行った。このとき試験体の座屈変形はさらに大きくなり、残存最終強度が低下した。3サイクル目は最終強度後まで試験体に負荷を与え続け、その挙動を確認した。最終強度後の負荷により試験体には下面に大きな全体座屈が見られるようになり、下面と側面の接合部分が直線を保つことができなくなり、側面にも全体座屈がみられるようになった。その結果、試験体下面、側面双方に塑性関節線の形成が確認され、試験体の曲げ耐力は大幅に低下した。Fig. 10(a)に3サイクル目の最終強度時の試験体の下面の様子を示し、Fig. 10(b)に最終強度後の試験体の下面の様子を示す。

Fig. 11に試験体に貼付したひずみゲージにより得られたひずみの値と、荷重点の変位の関係を示す。Fig. 11(a)は引張面での関係であり、Fig. 11(b)は圧縮面での関係である。双方とも、横軸は荷重点での変位、縦軸はひずみの値を示している。引張面と圧縮面のひずみの変化を比較してみると、曲げを受けた試験体の変形は、引張面での変形に比べて、圧縮面の座屈による変形が顕著に見られることがわかる。最終強度後まで試験体に負荷を与えた3サイクル目には、最終強度後圧縮面にひずみの急激な増加が見られた。これは、Fig. 10(a)示す最終強度時の試験体には大きな座屈変形が見られないものの、Fig. 10(b)に示す最終強度後の試験体には顕著な全体座屈波形が見られるようになったことを示している。

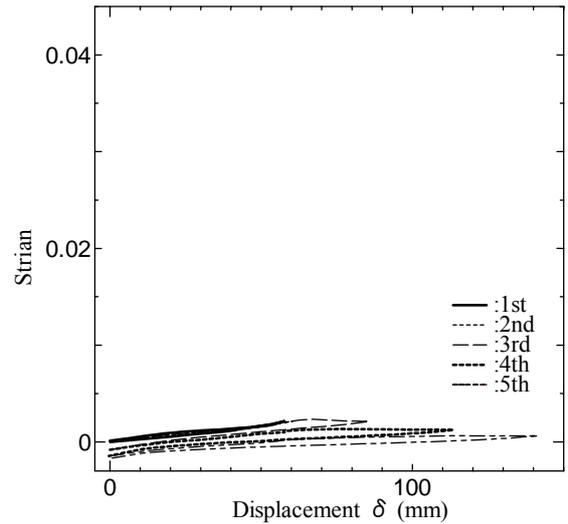


(a) Displacement $\delta = 0\text{mm}$

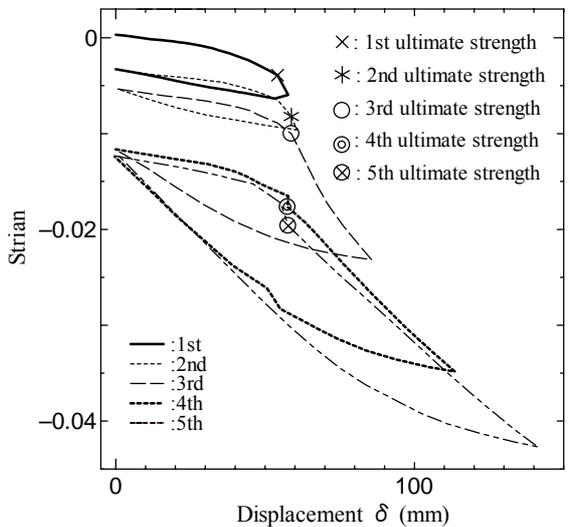


(b) Displacement $\delta = 150\text{mm}$

4サイクル目、5サイクル目も同様に各サイクルの最終強度をこえると、座屈によるひずみの増加が顕著になっている。そして、4サイクル目除荷過程において、試験体下面と側面の接合部分にき裂が発生した。

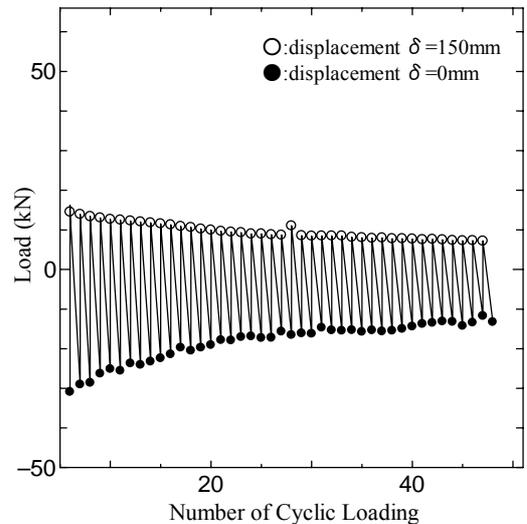


(a) Strain at tension side (Gauge A)



(b) Strain at compression side (Gauge C)

Fig. 11 Strains under cyclic loading



(c) Loads at $\delta = 0$ and 150 mm

Fig. 12 Load carrying capacity under cyclic loading

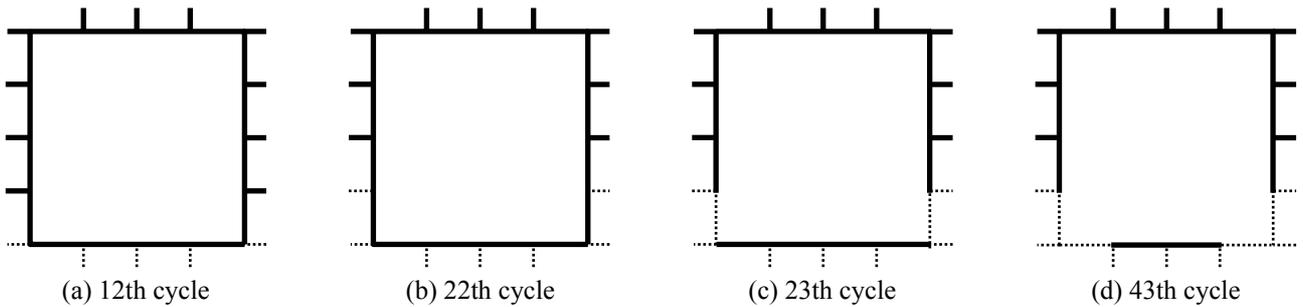


Fig. 13 Effective cross section under cyclic loading

3. 3. 3 繰り返し曲げ

Fig. 12は6サイクル目から繰り返し曲げを加えたときの荷重-曲げ回数関係である。Fig. 12(c)の縦軸は荷重であり、横軸は繰り返し曲げ回数であり、●は荷重点変位が0mm時(Fig. 12(a))の荷重であり、○は荷重点変位が150mm時(Fig. 12(b))の荷重である。試験体に繰り返し曲げ荷重が作用すると



(a) 6th cycle (b) 48th cycle

Fig. 14 Growth of crack

0mm時、150mm時の荷重の絶対値が低下していき、荷重保持能力は徐々に低下していく。

Fig. 13は今回の試験で見られたき裂の進展による断面の減少をまとめたものである。それぞれ各サイクル毎の試験体中央断面図を示しており、破線が破断した部分を示す。き裂の成長により、12サイクル目には下面すべてのスティフナが破断した。破断は、圧縮により座屈し塑性関節を形成した場所が逆曲げ時に引っ張られたために生じた。この後、更に圧縮面でき裂が発生し、22サイクルには側面の圧縮側のスティフナが破断した。そして、側面のスティフナが破断した次の23サイクルには側面圧縮側のパネルが破断した。この後き裂は圧縮面全体に進展していき、43サイクル目には、圧縮面において、更にき裂が進展していた。

Fig. 14にき裂の進展の様子を示す。Fig. 14(a)に6サイクル目の試験体のき裂の様子を示し、Fig. 14(b)に48サイクル目のき裂の様子を示す。き裂の発生した4サイクル目では米粒大の大きさであったき裂は、繰り返し曲げが作用することにより、6サイクル目では十円大(コイン大)の大きさに成長した。さらに繰り返し曲げを作用させると、Fig. 13(a)~(d)に示すような経緯をたどり、Fig. 14(b)のような状態となった。

4. 非線形有限要素法による解析

4. 1 解析モデル

今回の繰り返し曲げ実験のモデルを非線形有限要素法により解析を行った。Fig. 15に試験体、試験体断面の解析モデルを示す。今回の解析モデルは $L=500\text{mm}$ 部分が試験体部分であり、要素分割はパネル部分を8分割、スティフナ部分を4分割し、長手方向に40分割している。モデル化に際しては荷重作用場所の平面を保つために、試験体部分両端部に非常に剛性の大きい要素を用いた。有限要素法のモデル化に際しては4節

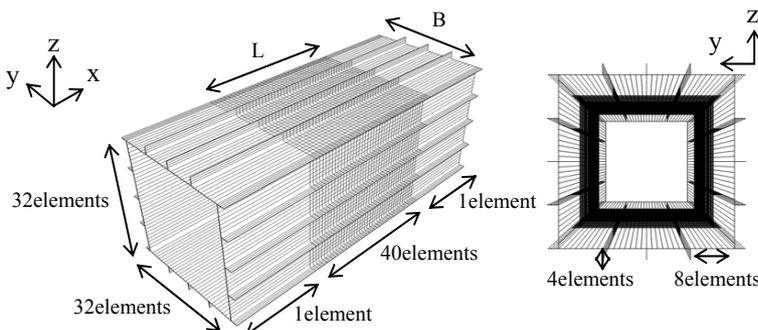


Fig. 15 Finite element model

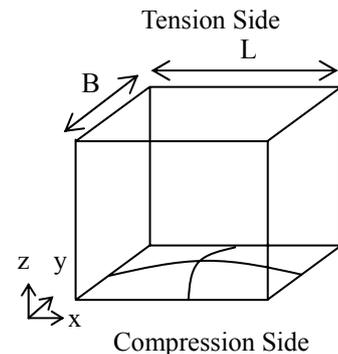


Fig. 16 Initial deflection

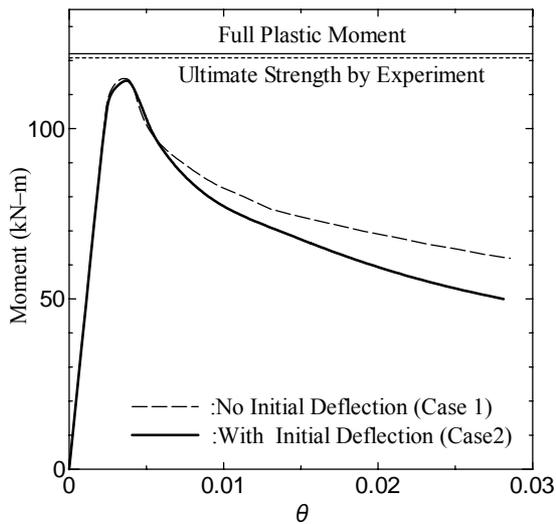
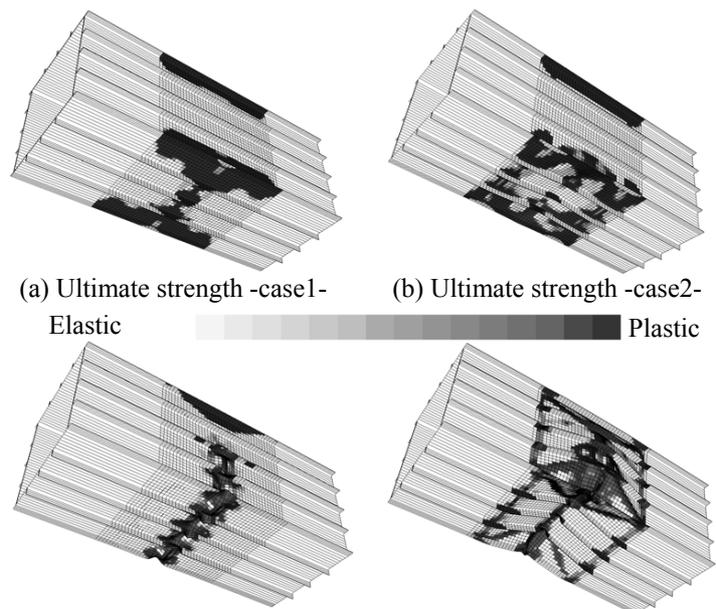


Fig. 17 Bending moment-curvature curve by FEM



(c) After ultimate strength -case1- (d) After ultimate strength -case2-
Fig. 18 Deformation and plasticity distribution

点アイソパラメトリック要素を用い、幾何学的非線形性と材料的非線形性を同時に考慮し問題を解析した。

2. 2. 1で示した初期たわみ形状から、およそ1半波の全体的な初期たわみが支配的であると仮定し、初期たわみによる強度低下の影響が大きい圧縮面に1半波の初期たわみを与えた。今回与えた初期たわみは式(1)であらわすことが出来る。ここで、Lは試験体長さ方向の長さで、Bは試験体横方向の長さである。初期たわみの大きさ w_0 は1.5mmとした。この初期たわみ形状を Fig. 16 に示す。

$$w = w_0 \sin \frac{\pi x}{L} \sin \frac{\pi y}{B}$$

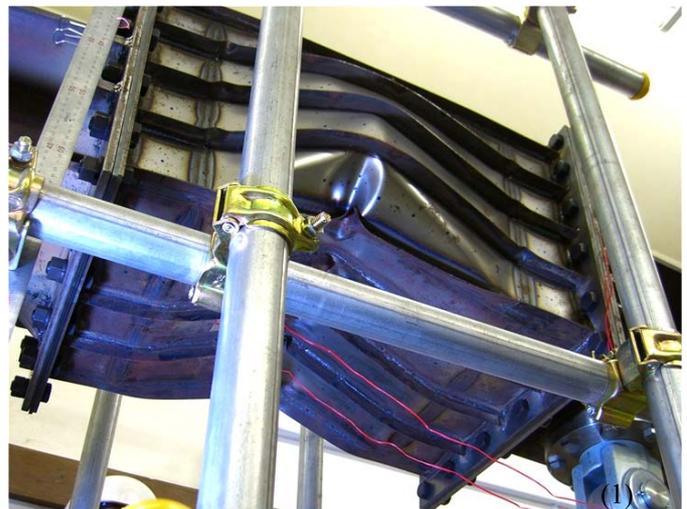


Fig. 19 Collapsed box-section girder

4. 2 解析結果および考察

今回、初期たわみ形状の影響を調べるために、初期たわみを考慮しない場合(Case 1)と初期たわみを考慮する場合(Case 2)を解析した。

Fig. 17 に試験体に純曲げを作用させた時のモーメント-回転角関係を示す。縦軸は曲げモーメントの値を示し、横軸は回転角の値を示している。Case1 は初期たわみを考慮しない時の、Case2 は初期たわみを考慮した時の解析結果である。x 軸に平行な実線は全塑性曲げモーメント、破線は実験による最終強度の値を示している。Fig. 17 から、最終強度までは Case1, Case2 とともにほぼ同じ挙動を見せ、最終強度の値もほぼ実験値と同じ値となっていることがわかる。しかし、最終強度を超えて負荷を続けると、Case2 では耐力低下が顕著になる。

Fig. 18(a), Fig. 18(b)は Case1, Case2 の最終強度時の試験体の塑性分布を示し、Fig. 18(c), Fig. 18(d)は Case1, Case2 の最終強度後最大変形時の塑性分布を示している。Case1 の最終強度時の塑性分布が試験体中央に集中しているのに対し、Case2 の場合は圧縮面全体に塑性分布が広がっている。Fig. 18(c), Fig. 18(d)から、Case1 では中央断面に塑性が集中して崩壊していくのに対し、Case2 では試験体全体に塑性が分布し、下面、側面に全体座屈が見られ、塑性関節線も確認できる。この初期たわみを考慮したモデルの崩壊形態は Fig. 19 に示す実験の際に見られた崩壊形態と同様のものであった。

このことから、防撓箱形断面梁構造の崩壊挙動を数値解析により求める際には、初期たわみ形状の導入が

重要であることがわかる。

5. 結 言

本研究では繰り返し曲げを受ける防撓箱型断面梁構造の崩壊挙動を明らかにするために、小型模型を用いて実験を行い、以下の知見を得た。

1. 薄肉防撓構造の繰り返し曲げ崩壊を観察するための4点曲げ試験機を設計・作成した。本試験機は大きなストロークが可能であり、圧縮・引張の両方の力を繰り返し作用させることができる。
2. 試験体を溶接により製作した。製作後、初期不整の測定を行った。測定結果から、試験体にはパネル横方向の防撓板全体にわたる初期たわみが見られ、最大たわみ量と最小たわみ量の差は約2mm程度であり、スティフナに対してプレートが持ち上がる痩せ馬モードが見られた。また、残留応力分布は、スティフナは片側溶接のために、プレートで左右非対称となっており、プレート部スティフナ部ともに大きな残留応力が観察された。
3. 繰り返し曲げ実験を行い、次の結果が得られた。試験体は圧縮面に全体座屈を、側面に局部座屈を伴い最終強度となった。数回の繰り返し曲げに対しては、側面にも全体座屈をとまなう崩壊形式が形成された。その後、下面と側面の接合部分に逆曲げによる引っ張りが作用した時、試験体にき裂が生じた。繰り返し曲げが作用すると、き裂は圧縮面、側面パネルで成長していった。
4. 非線形有限要素法を用いて、初期たわみを考慮した場合、考慮しない場合の試験体の曲げ解析を行い、次の解析結果が得られた。最終強度の値は双方ともに実験値とほぼ同じ値となっていた。最終強度後は、初期たわみを考慮しない場合、塑性分布は試験体中央部分に集中し、局部的な崩壊が進行した。一方、初期たわみを考慮した場合は、圧縮面全体に塑性が分布し、試験体が二つに折れ曲がるような崩壊形態を見せた。この崩壊形態は実験の際に確認できたものと類似のものであり、塑性関節線も同様のものが見られた。

参考文献

- 1) T.Yao, M.Fujikubo, D.Yanagihara, I.Fuji, R.Matsui, N.Furui, Y.Kuwamura: Buckling Collapse Strength of Chip Carrier under Longitudinal Bending (1st Report) – Collapse test on 1/10-scale hull girder model under pure bending -, 日本造船学会論文集, 第191号(2002), 255-264. (in Japanese)
- 2) S.Nishihara: Analysis of Ultimate Strength of Stiffened Rectangular Plate (3rd Report) – Estimation of Ultimate Strength of Ship Hull Structure -, 日本造船学会論文集, 第152号(1982), 297-306. (in Japanese)
- 3) S.Nishihara: Analysis of Ultimate Strength of Stiffened Rectangular Plate (4th Report) – On the Ultimate Bending Moment of Ship Hull Girder -, 日本造船学会論文集, 第154号(1983), 367-375. (in Japanese)