

既設部材を利用した制震ブレースの基礎実験

織田博孝¹，宇佐美勉²，青木徹彦³，葛西昭⁴

¹正会員 博(工) 瀧上工業株式会社 技術設計グループ (〒454-8517 名古屋市中川区清川町 2-1)

²フェロー会員 工博,D.Sc. 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市中白区塩釜口 1-501)

³正会員 工博 愛知工業大学教授 都市環境学科土木工学専攻 (〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247)

⁴正会員 博(工) 名古屋大学大学院講師 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市中千種区不老町)

1. まえがき

最近、地震に対して橋梁の損傷を制御する制震ダンパーについて幾つかの形式のものが開発されている¹⁾。これらのダンパーは橋梁の本体構造とは別に組み込んだり、橋梁の一部の部材と置き換えたりして適用している。

この制震ダンパーの1つとして鋼製の履歴型ダンパーがあり、その中には軸力部材の塑性変形で地震エネルギーを吸収する軸降伏型の座屈拘束ブレース（以下、BRB と称する）がある。BRB の適用方法は、対傾構や横構の一部の部材を BRB に置き換えることが多く、既設橋梁の耐震補強法としては既設の対傾構や横構を BRB と交換することになる。

そこで、本研究では耐震補強において既設部材を交換する方法を変え、既設の対傾構や横構に対して座屈拘束材を被覆することで BRB として利用する方法の検討を目的としている。この検討方法は基礎的な実験であり、試験体は H 形鋼を軸力材として溝形鋼を利用した座屈拘束材を被せている。軸力材の

両端には実部材と同等の高力ボルト摩擦継手を設け、さらに両端の一部は軸力材が十分に塑性伸縮できるように座屈拘束材から露出させている。実験では、軸力材の強度、連結部の強度、軸力材露出部の強度に着目し、H 形鋼を座屈拘束ブレースとして利用するために必要となる条件を調べている。

2. 実験計画

(1) 試験体

a) 試験ケース

試験体は図-1 に示す4体とした。No.1 は既設のブレース材を想定した H 形鋼（以下、軸力材と称する）に座屈拘束材（以下、拘束材と称する）を被せたものである。No.2 は、No.1 の軸力材の継手強度が軸力材の引張強度に対して弱いため、継手部を補強したものである。この継手の設計については後述する。No.3 は継手部を No.1 と同じとし、軸力材の強度を低減するために H 形鋼のウェブに孔を明けたものである。No.4 は No.3 と同様に軸力材の強度を低減す

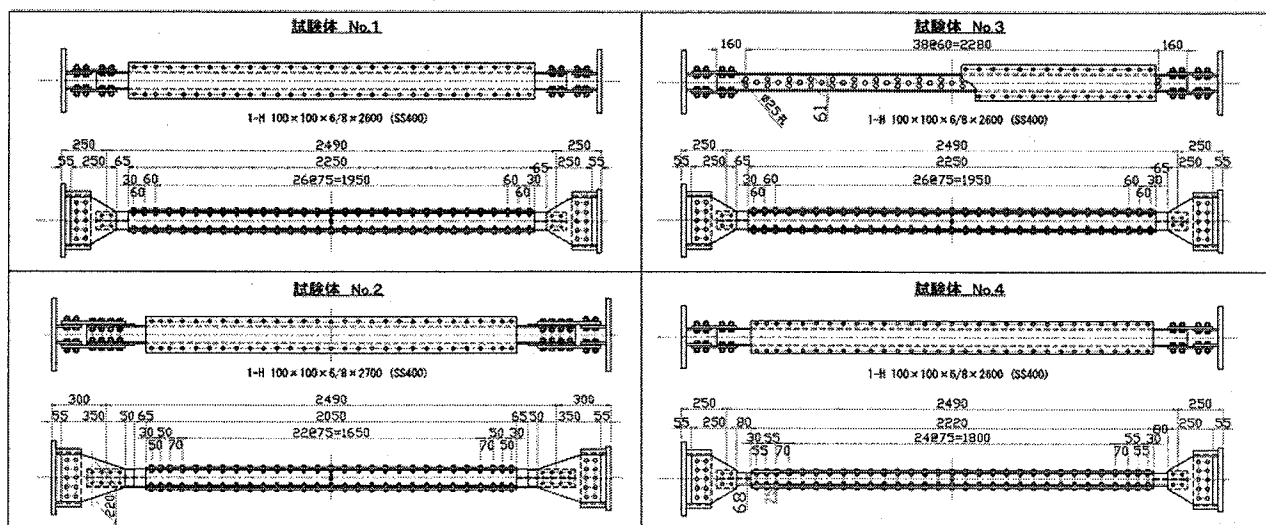


図-1 試験体

るために、H 形鋼のフランジ幅を切断により小さくしたものである。

b) 軸力材(ブレース材)の設計

橋梁の対傾構や横構は主に地震や風などの横荷重に対して抵抗するように設計され、使用箇所や解析の方法によって主要部材とするか二次部材とするかの扱いが異なってくる。使用箇所に関しては支点上対傾構を主要部材とすることが多く、解析方法に関しては対傾構や横構を含んだ立体モデルで解析する場合には主要部材とすることがある。

主要部材と二次部材の設計上の違いは、細長比の制限と圧縮と引張の作用力への抵抗の考え方にある。細長比の制限は道路橋示方書・鋼橋編²⁾(以下、道示と称する)によれば、主要部材では 120、二次部材では 150 である。作用力への抵抗の考え方は、主要部材は圧縮と引張の両方に抵抗するように設計され、二次部材では一対のブレース材の内、引張側の部材のみが作用力に抵抗するとして設計されることが多い。

そこで、本研究における試験体 No.1 の軸力材(ブレース材)は主要部材を想定して、表-1 に示す諸元とした。ここで、許容圧縮・引張力は道示に従って求めている。なお、連結部断面における許容引張力は H 形鋼のフランジ($t=8\text{mm}$)にボルト孔($\phi=19\text{mm}$)を 4 個明けたものとして求めている。また、試験体では連結部のボルト群の中心間を部材長 $L=2,490\text{mm}$ としている。

表-1 軸力材の設計

断面および鋼種	H-100×100×8×6 (SS400)		
幅厚比パラメータ	フランジ $R_f = 0.32$, ウェブ $R_w = 0.25$		
細長比 L/r	100	断面 2 次半径 r (mm)	24.9
断面積 A (mm ²)	2,159	部材長 L (mm)	2,490
許容圧縮力 P_{ca}	$\sigma_{cog} = \frac{1,200,000}{6,700 + (L/r)^2} = 71.9 \text{ N/mm}^2$ $P_{ca} = 71.9 \times 2,159 = 155.2 \times 10^3 \text{ N}$		
許容引張力 P_{ta}	$P_{ta} = 140 \times 2,159 = 302.3 \times 10^3 \text{ N}$ 連結部断面 $A_{net} = 2,159 - 4 \times 19 \times 8 = 1,551 \text{ mm}^2$ $P_{ta} = 140 \times 1,551 = 217.1 \times 10^3 \text{ N}$		

道示に従えば、継手は部材への作用力と部材の全強の 75% の大きい方の力に対して設計する必要がある。しかし、今回の試験体では特定の構造物を想定しておらず、作用力を求めることができないため、作用力は全強に等しいものとして設定する。ここで、軸力材は圧縮と引張の双方に抵抗する主要部材を想定したことから、全強 (= 作用力) の設定としては

小さい方の許容圧縮力を取れば十分である。したがって、連結は許容圧縮力に対して設計し、その結果を表-2 に示す。なお、ガセットプレート(連結板)の設計には色々な考え方があるが、ここでは軸力材のフランジ幅 100mm と等しい幅の板が 2 枚で、軸力材の全断面積を確保する考え方とした。

表-2 連結部の設計

使用ボルト	M16 (F10T) 摩擦接合
許容ボルト力 ρ_a	$\rho_a = 25 \times 10^3 \text{ N}$ (ボルト 1 本当たり)
使用ボルト本数	$n = \frac{P_{ca}}{\rho_a} = \frac{155.2 \times 10^3}{25 \times 10^3} = 6.2 \rightarrow 8 \text{ 本}$
ガセットプレート板厚(連結板)	$t = \frac{2,159}{2 \times 100} = 10.8 \rightarrow 11 \text{ mm}$

次に、試験体 No.2~No.4 の軸力材の設計について説明する。軸力材が座屈拘束材によって被覆されると、軸力材の強度は圧縮力による座屈で決まらず、引張力による降伏で決まる可能性が十分にある。この場合、許容圧縮力で設計された連結部から破壊する可能性があるため、試験体 No.2 は連結部を許容引張力に対して抵抗できるように補強したものである。一方、試験体 No.3,4 は連結部を変えずに軸力材の強度を低減したものである。No.3 は H 形鋼のウェブの断面積欠損をできるだけ大きくするという方針で、良く使われるサイズのキリで孔の配置を決めた。No.4 は連結部のボルト孔径に相当する幅(ボルト直径)で H 形鋼のフランジ幅を切断した。以上の考え方で設計した結果を表-3 に示す。

表-3 試験体 No. 2~No. 4 の設計

No.2	使用ボルト本数	$n = \frac{P_{ta}}{\rho_a} = \frac{302.3 \times 10^3}{25 \times 10^3} = 12.1 \rightarrow 16 \text{ 本}$
	補強カバプレート厚 ^{注1)}	カバプレート 2-PL 90×10 $A_{net} = 2,159 + 2 \times 90 \times 10$ $- 4 \times 19 \times (8 + 10) = 2,591 \text{ mm}^2 > 2,159$
	ガセットプレート厚 ^{注1)}	$t=15\text{mm}$, ボルト第 4 列目の幅 220mm (図-1 参照) $A_{net} = (220 - 2 \times 19) \times 15$ $= 2,730 \text{ mm}^2 > 2,159 \text{ mm}^2$
No.3	許容引張力 P_{ta} ^{注2)}	$A_{net} = 2,159 - 61 \times 6 = 1,793 \text{ mm}^2$ $P_{ta} = 140 \times 1,793 = 251.0 \times 10^3 \text{ N}$
No.4	許容引張力 P_{ta} ^{注3)}	$A_{net} = 2,159 - 4 \times 16 \times 8 = 1,647 \text{ mm}^2$ $P_{ta} = 140 \times 1,647 = 230.1 \times 10^3 \text{ N}$

注1) ボルト孔を控除した純断面積が軸力材の総断面積以上。

注2) ウェブ ($t=6$) の欠損幅は 61mm

注3) 4 辺のフランジ ($t=8$) 突出部の切断幅は 16mm

c) 拘束材の設計

拘束材は溝形鋼と平板で構成し、図-2 に示すような形状として軸力材である H 形鋼に被せ、サイズ M10 の高強度ボルトで固定した。H 形鋼のフランジ

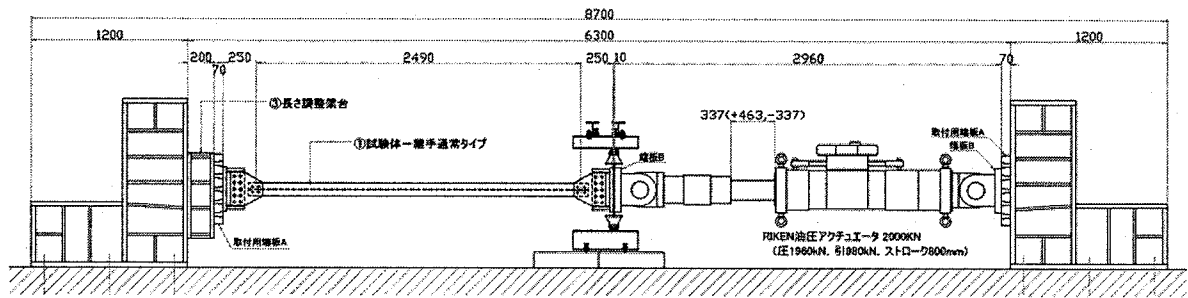


図-3 実験装置

とそのコバ面にはアンボンド材(1mm厚)を貼付け、H形鋼の伸縮を拘束しないようにした。H形鋼のフランジのコバ面と拘束材の間には隙間があり、その大きさは試験体No.1～No.3ではフィラープレートの厚さにより2.3mm、試験体No.4では切断したH形鋼のフランジ幅と溝形鋼のサイズの関係から3.5mmとした。また、軸力材の伸縮のため、その両端は拘束材から図-1に示すように65mmずつ露出させた。

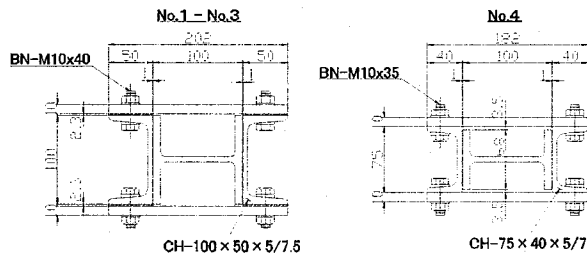


図-2 拘束材断面形状

次に、BRBの全体座屈を防止するための拘束材の設計について示す。文献3)では次式(1)の照査式が与えられ、全体座屈の抑止条件として安全係数 $\nu_F > 3$ が推奨されている。

$$\nu_F \equiv \frac{P_{max}}{P_Y} = \frac{1}{\frac{P_Y}{P_E^R} + \left(\frac{P_Y L}{M_Y^R} \right) \cdot \frac{a+d+e}{L}} \quad (1)$$

ここに、 P_{max} =軸力材に作用する最大圧縮力、 P_Y =軸力材の降伏軸力、 P_E^R =拘束材のオイラー座屈荷重、 L =軸力材の長さ、 M_Y^R =拘束材の降伏曲げモーメント、 a =拘束材中央の初期たわみ、 d =軸力材と拘束材の隙間量、 e =軸圧縮力の偏心量である。

表-4 拘束材の設計

試験体	座屈方向	$\nu_F > 3$
No.1,2	H形鋼・弱軸方向	7.6
	強軸方向	7.5
No.3	弱軸方向	9.1
	強軸方向	9.1
No.4	弱軸方向	4.8
	強軸方向	7.1

本研究の試験体について求めた安全係数を表-4に示す。この計算では、拘束材の鋼種は軸力材と同様にSS400とし公称降伏点を用いている。また、軸圧縮力の偏心 e は零とするが、拘束材の初期たわみ a については軸力材の長さ L の1/1000に自重によるたわみを加えた。

(2) 実験装置

実験は愛知工業大学耐震実験センター（略称SEIREX）にて実施した。ここで使用した実験装置を図-3に示す。試験体と2000kN油圧アクチュエーターは水平に設置し、アクチュエーター頭部の可動部分には横方向の変位を拘束するガイドローラーを設けた。アクチュエーター頭部と底部はヒンジになっており、試験体の境界条件としては軸方向変位固定側が回転固定、軸方向変位可動側が回転ヒンジになっている。

(3) 荷重方法

荷重は圧縮力と引張力を静的に繰り返す方法とした。荷重パターンは図-4に示すように、軸力材の降伏変位 δ_y を基準として最初に $0.5\delta_y$ から始め、次からは $1.0\delta_y$ ずつ変位を増分して、各振幅で圧縮引張両側に1回の繰り返し漸増荷重とした。

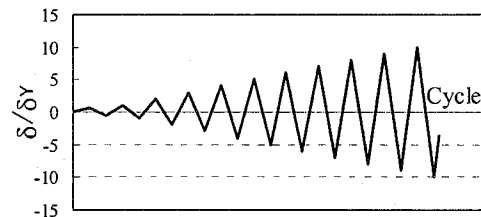


図-4 荷重パターン

3. 実験結果

(1) 荷重-変位挙動

まず、H形鋼の引張試験結果を表-5に示し、フランジとウェブの断面積により平均して求めた軸力材の降伏軸力と降伏変位の算定結果を表-6に示す。

表-5 軸力材 (H 形鋼) の引張試験

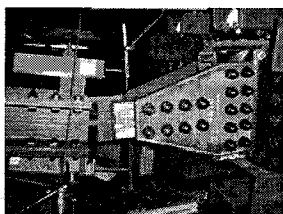
箇所	降伏応力 $\sigma_Y(N/mm^2)$	弾性係数 $E(N/mm^2)$
フランジ	338.0	0.191×10^6
ウェブ	353.8	0.197×10^6

表-6 軸力材の降伏軸力・降伏変位

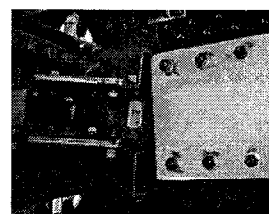
試験体	降伏軸力 $P_Y(kN)$	降伏変位 $\delta_Y(mm)$
No.1,2	739	4.42
No.3	606	4.40
No.4	566	4.43



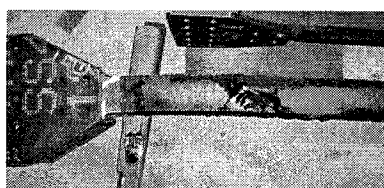
(a) 試験体 No. 1 (ボルト孔で破断)



(b) 試験体 No. 2
(露出部で弱軸方向に座屈)



(c) 試験体 No. 3
(露出部で強軸方向に座屈)



(d) 試験体 No. 4 (露出部で弱軸方向に座屈)

写真-1 破壊状況

次に、4 体の試験体の荷重と BRB の伸縮の履歴曲線を図-5 に示す。実線は、ガセットプレートの前縁間で測った軸力材の伸縮であり、破線はアクチュエーターからの変位出力で、連結部の変形を含んだ端板間の伸縮である。

試験体 No.1 は引張側の $+0.5\delta_Y$ から载荷し、途中 $280kN(=0.38P_Y)$ 程度で連結部の摩擦接合ボルトの最初の滑り音が発生した。その後、滑り音は荷重がある程度大きくなるまで何度が発生したが、滑り音が無くなった段階で全てのボルトの軸部とボルト孔の縁が接触して支圧接合状態に移行したと思われた。荷重は圧縮側 $-0.5\delta_Y$ へ反転し、 $+1\delta_Y$ から $-1\delta_Y$ へ向かったが、荷重が増加しなくなったため $-0.5\delta_Y$ 程度で方向を反転した。その後、引張側 $2\delta_Y$ への载荷途中で軸力材の連結部に変形が集中して破断した。こ

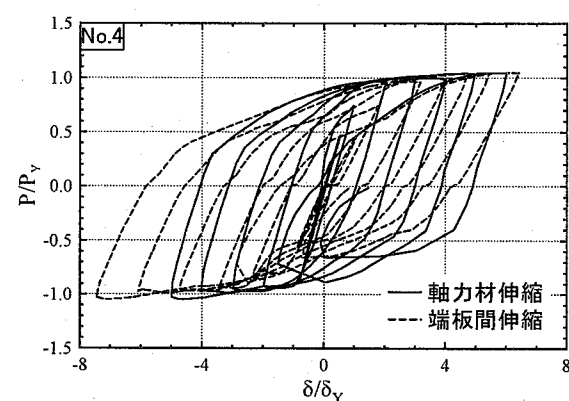
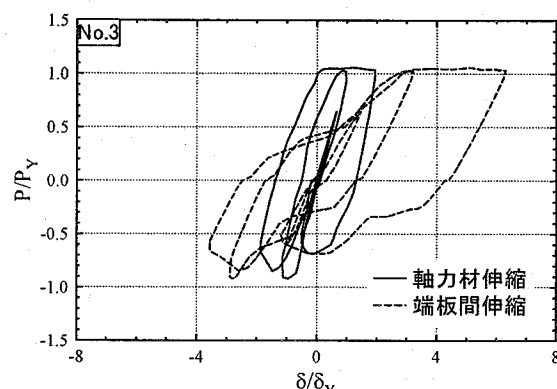
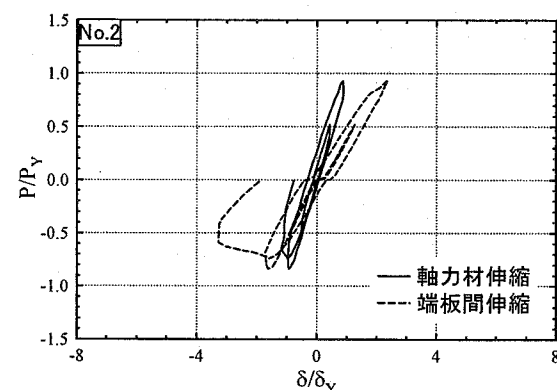
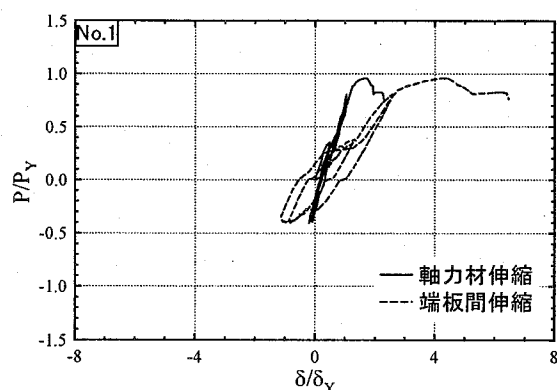


図-5 軸力-軸方向変位履歴

のときの破断状況を写真-1(a)に示している。

図-5 の履歴曲線において実線で示される軸力材の伸縮と端板間の伸縮の傾きが異なっている。端板間の伸縮が大きいのは、連結部の変形およびボルトの滑りの他、端板固定部の変形、反力架台の変形を

含んでいるためである。载荷途中で履歴曲線に段が生じているのはボルトの滑りのためである。このボルトの滑りをクリップ型変位計で計測したが、その結果は後述する。

試験体 No.2 は $-0.5\delta_y$ から $+0.5\delta_y$ へ载荷した。圧縮側から始めた理由は、引張ではボルトが滑った場合に連結部の変形集中の影響が大きいと思われたことである。しかし、試験体 No.2 ではボルトの滑り音は発生しなかった。その後、载荷は $-1\delta_y$ へ向かったが、到達直前で荷重が低下し座屈が確認された。座屈は拘束材を含めた BRB の全体ではなく、軸力材の両端で拘束材から露出している部分で、H 形鋼の弱軸方向の座屈であった。次に $+1\delta_y$ から $-2\delta_y$ へ向かう途中で荷重が大きく低下したため、载荷を終了した。最終の破壊状況を写真-1(b)に示している。座屈変形は両端に見られたが、回転ヒンジとなっている可動端の方が大きかった。

試験体 No.3 も圧縮側から载荷し、 $300\text{kN}(=0.5P_y)$ 程度で最初のボルト滑り音が発生した。繰り返し载荷の中では、 $-1\delta_y$ の直前で若干の荷重低下があり、 $-2\delta_y$ へ向かう途中の $-1.8\delta_y$ 付近で座屈変形が目視され荷重が大きく低下した。その後 $+2\delta_y$ から折り返し、 $-0.5\delta_y$ 程度が再び荷重低下が起こり、座屈変形も大きくなったので载荷を終了した。この座屈変形は写真-1(c)に示すように、軸力材の露出部における H 形鋼の強軸方向の座屈であった。写真-1(c)は連結部を上から見たもので、2枚のガセットプレートと拘束材の方向が折れ曲がっていることが分かる。ウェブの孔は露出部にもあり、座屈の形状は曲げよりもせん断変形の影響が大きいと思われた。

試験体 No.4 では $340\text{kN}(=0.6P_y)$ 程度で、最初のボルト滑り音が発生した。繰り返し载荷では $-3\delta_y$ の到達時に若干の荷重低下があり、軸力材の座屈が目視された。座屈形状は No.2 と同様に露出部で H 形鋼の弱軸方向の座屈であり、両端で上下が逆方向の変位であった。その後 $\pm 5\delta_y$ まで繰り返し、 $-6\delta_y$ への途中 $-1.5\delta_y$ 付近で荷重低下が大きく载荷できなくなったため $+6\delta_y$ へ折り返した。再度、圧縮側へ载荷したが $-0.5\delta_y$ 付近で荷重が増加しえなくなったため、試験を終了した。終了後、拘束材をはずして調べた変形状態を写真-1(d)に示す。部材の両端では曲げ変形の方法が逆になっており、柱の2次の座屈モードに似ている。試験体 No.4 の軸力材と拘束材の隙間が 3.5mm で、他の試験体の隙間 2.3mm よりも大きいので、曲げが起こりやすかったと思われる。

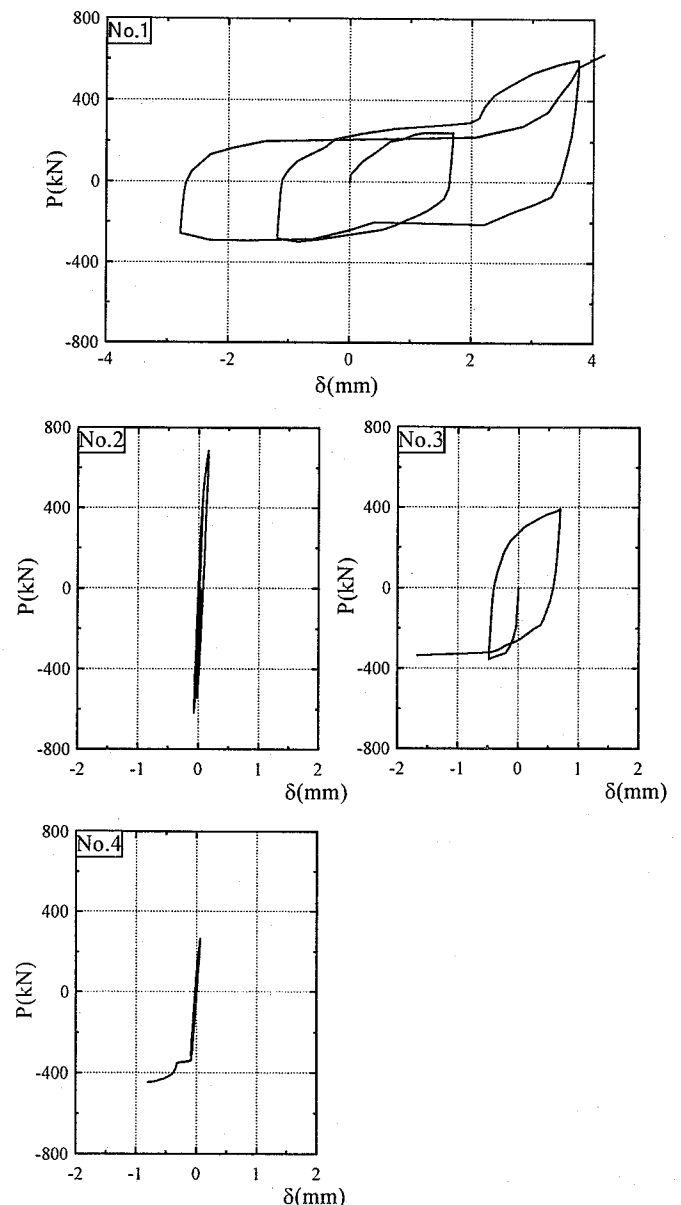


図-6 軸力-滑り変位履歴

(2) 連結部挙動

ボルトの滑り状況を調べるために、軸力材とガセットプレートの間にクリップ型変位計を設置して計測した。ここでは、その結果を示す。

まず、サイズ M16 の高力ボルトを使用した継手の滑り耐力は、許容ボルト力 ρ_a から次のように推定される。試験体 No.1,3,4 では $P = \nu \cdot n \cdot \rho_a = 1.7 \times 8 \times 25 = 340\text{kN}$ 、試験体 No.2 では $P = 1.7 \times 16 \times 25 = 680\text{kN}$ である。ここで、摩擦のためのボルト導入軸力は道示により決め、滑り係数は 0.4 を仮定している。ボルト締め付けはトルクを管理して実施した。

次に、図-6 は荷重とクリップ型変位計で測ったボルトの滑りの履歴曲線を示している。連結部が破断した試験体 No.1 は、他の試験体よりも早く滑りが生じ大きく変位していることが分かる。このように連

結部を含んだ BRB は構造要素が直列に配置されているため、劣化による剛性低下があっても荷重の再配分が行われず劣化箇所に変形が集中すると考えられる。試験体 No.1 の滑り荷重は約 280kN で予測値 340kN よりも小さいが、その原因は本試験の前の予備載荷で小さい滑りが生じていたことかもしれない。

一方、試験体 No.2 では最後まで滑りは生じなかった。試験体 No.3,4 では、ほぼ想定された荷重で滑りが生じた。試験体 No.3,4 の図で履歴曲線の終端は、変位の増加および滑ったときの衝撃でクリップ型変位計がはずれたことによるもので、载荷の終了点ではない。試験体 No.1 から No.4 のすべてでボルトが滑ったことによる変位の増加はあるが、そのときに荷重の低下は生じなかった。

4. 考察

まず引張強度について、軸力材の降伏強度と軸力材の連結部でボルト孔を控除した純断面の降伏強度を表-7 に比較する。試験体 No.1 は連結部の降伏強度が低いので、連結部で破断したと考えられる。試験体 No.3,4 も連結部の降伏強度が低い、軸力材の降伏との差が No.1 より小さいため、ひずみ硬化による強度上昇の効果があり、今回の载荷の範囲では破断しなかったと思われる。ただし、既に述べたように軸力材の露出部の座屈で実験が終わっており、この座屈が生じなかった場合には連結部で破断する可能性もある。

表-7 軸力材と連結部の降伏軸力

試験体	軸力材降伏 (kN)	連結部降伏 (kN)
No.1	739	533
No.2	739	868
No.3	606	533
No.4	566	533

次に圧縮力に対して、軸力材露出部の座屈強度を簡単な方法で検討してみる。この方法は実験の観察から、軸力材が拘束材とのわずかな隙間の中で座屈した後、露出部に作用する偏心曲げモーメントを求めるものである。付録に示すように幾何学的な関係から偏心曲げモーメントは次式で求められる。

$$M_e = 13P \cdot e \cdot \left(\frac{\ell_1}{\ell_0} \right) \quad (2)$$

試験体 No.2 で P を降伏軸力 739kN、隙間 $e=4.6\text{mm}$ 、 $\ell_0=2050\text{mm}$ 、 $\ell_1=115\text{mm}$ とすると $M_e = 2,479\text{kN}\cdot\text{mm}$ で、軸力材露出部の曲げ応力は $\sigma = 93\text{N/mm}^2$ となる。この式の適用性はまだ検討する必要があるが、露出部が座屈しないためには軸力に対して降伏しないことが一つの条件と思われる。

5. まとめ

本研究では、既設部材を想定して H 形鋼を使用した軸力材（ブレース材）に座屈を拘束する部材を被せて、座屈拘束ブレースとしての適用を検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 座屈に対する安全率が大きかったが、文献 3)の方法で設計した拘束材で、H 形鋼を使用した軸力材（ブレース材）の全体座屈を防止できた。
- ・ 軸力材の拘束材に被覆された部分と拘束材から露出した部分の強度が同じであると、露出長さによっては露出部で座屈する可能性がある。
- ・ 軸力材の露出部が座屈しない条件としては、露出部を軸力に対して降伏させないことが一つの条件と考えられる。
- ・ 連結部の強度が軸力材よりも明らかに小さい場合は、連結部に変形が集中して破断する可能性がある。

なお、今回の実験で得られた知見を元に改良した試験体による実験を計画していることを付記する。

付録 軸力材露出部の偏心曲げモーメント

実験の観察から、露出部の座屈変形は逆対称で拘束材には変形が見られなかったことから、下図の形状を考える。

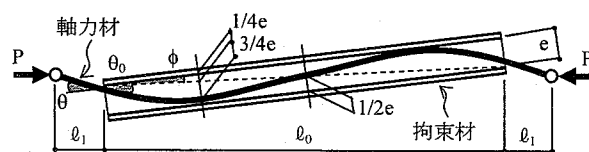


図-A.1 座屈形状の仮定

円弧を仮定して曲率半径 R は、

$$R = \frac{(\ell_0/2)^2}{8(3e/4)} = \frac{\ell_0^2}{24e} \therefore \theta_0 = \frac{(\ell_0/2)}{R} = \frac{12e}{\ell_0} \quad (\text{A.1,2})$$

$$\phi = \frac{e/2}{\ell_0/2} = \frac{e}{\ell_0} \quad (\text{A.3})$$

$$\theta = \theta_0 + \phi = \frac{13e}{\ell_0} \quad (\text{A.4})$$

$$\therefore M_e = P \cdot \ell_1 \cdot \theta = 13P \cdot e \cdot \left(\frac{\ell_1}{\ell_0} \right) \quad (\text{A.5})$$

参考文献

- 1) 宇佐美勉編著，日本鋼構造協会編：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，技報堂出版，2007年9月。
- 2) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，平成14年3月。
- 3) 宇佐美勉，渡辺直起，川村洋行，葛西昭，織田博孝：制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの全体座屈，構造工学論文集，Vol.52A，pp.37-48，2006年3月。