

横ねじれ崩壊した圧延鋼はりの矯正効果

Straightening Effects of Rolled Steel Beams Failed by Lateral Instability

久保全弘*, 西口和宏**, 杉山宜央***

Masahiro KUBO, Kazuhiro NISHIGUCHI and Norihisa SUGIYAMA

* 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

** 名城大学大学院理工学研究科修士課程土木工学専攻 (同上)

*** 修士 (工学) (株) ピー・エス 名古屋支店 (〒460-0002 名古屋市中区丸の内 1-17-19)

Using the rolled steel I-beams failed by lateral torsional-buckling, the straightening effects of press working on the buckling capacities are investigated. Buckling tests were carried out under a central concentrated load at a simply supported beam. In the first loading the beams were deformed until three unloading regions of 97, 80 and 60% of the ultimate load in each beam. The second loading was applied in about one or eight months' time after straightening. The recovery in the load-carrying capacities is examined from the results of both loading cases. The change of material properties due to the press working is also shown.

Key Words: rolled steel beams, lateral buckling, straightening effects, press working, experiment

キーワード: 圧延鋼はり, 横座屈, 矯正効果, プレス加工, 実験

1. 緒言

鋼部材の加工時に発生した変形は、所要の製作精度を確保するためにローラーやプレス加工法およびガス加熱法を用いて矯正される。これらの変形矯正を施すと、鋼の材質の変化と断面に存在する初期応力分布の変化をもたらすことが知られている。そして、既往の柱部材の実験的研究¹⁾から、部材製作時の変形矯正は真直度の改善に加え残留応力の再配分と減少をもたらすため、座屈強度が向上することが実証されている。

本研究は、荷重の作用を受けて横ねじれ座屈損傷したはり部材を対象に、変形矯正後の耐荷力と変形性能の回復度を実験的に調べることを目的としている。先の論文²⁾では、幅厚比が小さいコンパクト断面と比較的大きいノンコンパクト断面の溶接鋼を合計 32 体用いて横ねじれ座屈実験を行い、座屈性能の回復度を検討した。その結果、極限荷重の約 60% 降下域まで荷重したはりであっても、プレス矯正によって曲げ戻せば、初期部材相当の座屈性能が得られることがわかった。変形性能の回復度は耐荷力より悪く、鋼材の延性低下の影響も確認できた。また、断面形による回復度の相違もみられ、桁高の大きいノンコンパクト断面の方がコンパクト断面よりやや劣った。

本論文では、圧延H形鋼を用いて、初期荷重における除荷重レベルと座屈性能の回復度の関係、荷重やプレス矯正による断面応力状態の変化、矯正後の材質の変化およびひずみ時効との因果関係などを調べた結果を報告する。

2. 供試体と実験方法

供試体は、鋼材 SS400 (公称降伏応力 $F_y=245\text{MPa}$) による JIS 規格の圧延H形鋼であり、I-200×100×5.5×8mm の部材 (定尺 12m を 4 本) から実験はり 17 体、引張試験片 16 本および残留応力測定材 3 体を製作した。実測断面寸法の平均値は、I-200.5×101.2×5.09×7.58mm である。そして、幅厚比はフランジ: $b/t_f=6.7$ 、腹板: $h/t_w=36.4$ となり、全塑性モーメント M_p まで十分抵抗できる断面性能を有する断面である。

はりの実験は、先の実験^{3), 4)}と同様にベアリング支承と水平移動型引張ジャッキ (容量 200kN, ストローク 200mm) を使用して、単純ばりのスパン中央に集中荷重を作用させた横ねじれ座屈実験を初期荷重と矯正後に対して行った。はりのスパン長は $L=1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{m}$ の 4 種類に変化させた。初期荷重実験は、各スパン長に対し除荷重レベルを極限荷重の 80% の場合 1 体ずつ、60% の場合 2 体ずつ

表-1 初期状態と矯正後の材料性質

試験片 公称板厚 t (mm)	降伏応力 F_y (MPa)	引張強さ F_u (MPa)	降伏比 $\frac{F_y}{F_u}$	ヤング率 E (GPa)	ポアソン比 ν	伸び $\Delta \ell$ (%)
初期状態 (8本の平均値)						
フランジ 8	324	466	0.695	215	0.300	24
腹板 5.5	324	467	0.694	213	0.286	24
横曲げの圧縮側						
圧縮フランジ 8	377	485	0.777	217	0.278	18
引張フランジ 8	330	464	0.711	216	0.281	25
腹板 5.5 (2本の平均値)	324	462	0.701	215	0.280	28
横曲げの引張側						
圧縮フランジ 8	362	473	0.765	210	0.279	19
引張フランジ 8	325	466	0.697	215	0.283	28
腹板 5.5 (2本の平均値)	327	467	0.700	212	0.282	27

つを行った。さらに、 $L=2.0\text{m}$ では除荷重レベルを97%に選んだ場合1体、および60%の場合4体(履歴載荷用、矯正なし、材料試験用2体)を追加した。変形矯正は、合計16体を初期載荷実験終了後の約半月後にプレス加工により曲げ戻した。矯正後の載荷は、約1ヶ月後に10体、約8ヶ月後に5体(矯正なし1体を含む)をそれぞれ実施した。

載荷中のはり断面の変形およびひずみを測定するほか、プレス矯正によるひずみの変化も調べた。

3. 実験結果

(1) 載荷前と矯正後の材料性質

表-1に、初期状態(載荷前)と矯正後における圧延部材のフランジと腹板から切り出した鋼板の材料性質を示す。JIS規格1号試験片による引張試験から得られた降伏応力 F_y 、引張強さ F_u 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν および伸び $\Delta \ell$ の結果が与えてある。初期状態は8本の試験片による平均値であり、フランジと腹板の材料性質の差も小さい。矯正後の材料性質は、スパン長 $L=2\text{m}$ で極限荷重の約60%降下域まで載荷したはり2体(DR2-60-m1,m2)をプレス矯正した後、スパン中央断面からフランジと腹板各2本の試験片をそれぞれ採取して調べた。フランジの試験片は、座屈変形による横曲げの圧縮側と引張側から採取した。

図-1に初期状態、座屈による横曲げの圧縮側および引張側から採取した圧縮フランジの応力-ひずみ曲線を示す。初期載荷とプレス加工によって大きな塑性ひずみを受けた圧縮フランジは、初期状態に比べ材料強度が上昇し、塑性流動域が短くなっていることが認められる。横曲げの圧縮側で降伏応力が16%、引張強さ4%および横曲げの引張側で降伏応力が12%、引張強さ2%それぞれ増加した。伸びは、圧縮側で25%、引張側で21%低下した。一方、圧縮フランジに比べ大きな塑性ひずみを受けていない

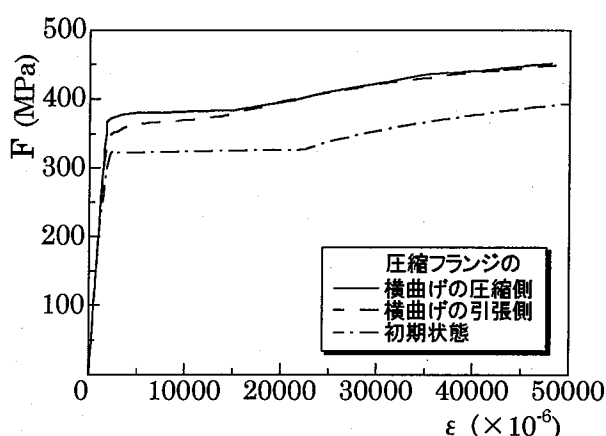


図-1 プレス矯正後の応力-ひずみ曲線

引張フランジと腹板は、伸びが少し増加しているが、ほとんど材料性質が変化していないことがわかる。

(2) 初期変形と残留変形

実験はりの載荷前の初期変形、初期載荷の除荷後およびプレス矯正後の残留変形をフランジの曲がり(強軸および弱軸まわりのたわみ v_0, u_0)および腹板の平面度(面外たわみ w_0)について測定し、各部材の最大値による平均値 m (変動係数 ω)を用いて部材長 L と腹板高 h の比で表すと、表-2のようになる。初期載荷による残留変形量は、除荷重レベルが約60%の方が約80%に比べ、フランジの強軸まわりの曲がり度で約2倍、弱軸まわりの曲がり度で約4~5倍、腹板の平面度で1.8倍それぞれ大きい。また、極限荷重直後に除荷した(極限荷重の97%の降下域まで載荷した)はりには、ほぼ真っ直ぐな状態である。このように除荷重レベルによって相違するが、プレス加工を施すことにより、道路橋示方書による部材製作精度の許容誤差内⁹⁾に矯正することができた。

表-2 初期変形と残留変形

測定段階	圧縮フランジの曲がり		引張フランジの曲がり		腹板の平面度 h/w_0
	強軸まわり L/v_0	弱軸まわり L/u_0	強軸まわり L/v_0	弱軸まわり L/u_0	
(1) 初期状態 (17体)	3719($\omega=0.31$)	4703($\omega=0.63$)	5134($\omega=0.51$)	4307($\omega=0.54$)	898($\omega=0.41$)
(2) 除荷後 ($P_{n1}/P_{u1}=0.6$, 12体) ($P_{n1}/P_{u1}=0.8$, 4体) ($P_{n1}/P_{u1}=0.97$, 1体)	635($\omega=0.38$)	99($\omega=0.26$)	847($\omega=0.48$)	453($\omega=0.61$)	156($\omega=0.41$)
	1331($\omega=0.60$)	429($\omega=0.54$)	1753($\omega=0.53$)	2170($\omega=0.77$)	285($\omega=0.43$)
	4348	3077	2667	2632	1243
(3) 矯正後 (14体)	3264($\omega=0.55$)	3518($\omega=0.47$)	2962($\omega=0.52$)	2826($\omega=0.46$)	1009($\omega=0.58$)
許容値	1000				250

注) (1) 実験前の初期変形 ; (2) 初期荷重による除荷後の残留変形 ; (3) 矯正後の残留変形
 P_{n1}/P_{u1} : 初期荷重時の除荷重と極限荷重の比

(3) 荷重前の残留応力分布

荷重前の部材に存在する残留応力を調べるために、長さ 1m の測定材の中央断面で機械的断面分割法によりひずみ測定を行った。フランジ 14 箇所と腹板 5 箇所に測点を設け、その表裏にひずみゲージを貼付した。

図-2 は、3 体の残留応力測定材から得られた材長方向の残留ひずみ ε_r の各測点での平均値をもとに描いた残留応力分布 ($F_r = E\varepsilon_r \leq F_y$) である。材料の降伏応力 F_y と比較すると、フランジ中央で $0.22F_y$ の引張応力、フランジ先端で $0.02F_y$ および腹板中央で $0.44F_y$ の圧縮応力が存在し、緩やかな曲線分布をしている。そして、フランジでは引張応力の領域が大きく、腹板では圧縮応力の領域が大きい分布形である。

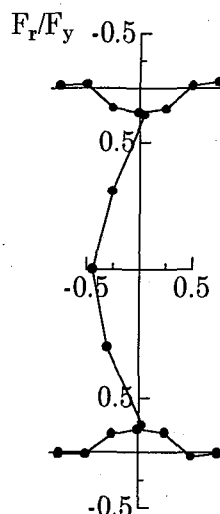


図-2 残留応力分布

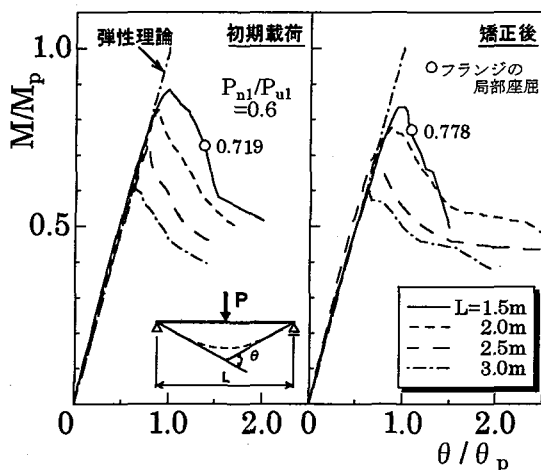


図-3(a) 曲げモーメント-回転角曲線 ($P_{n1}/P_{u1}=0.6$)

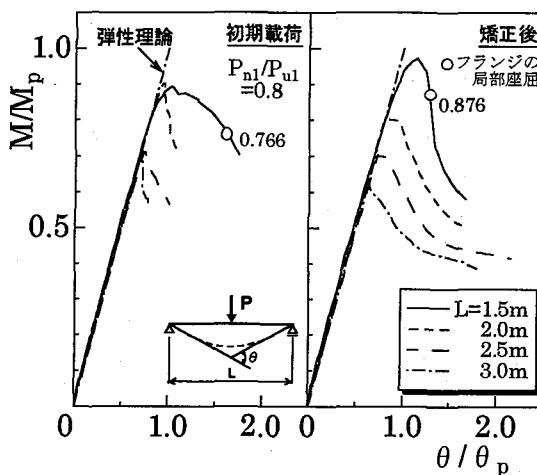


図-3(b) 曲げモーメント-回転角曲線 ($P_{n1}/P_{u1}=0.8$)

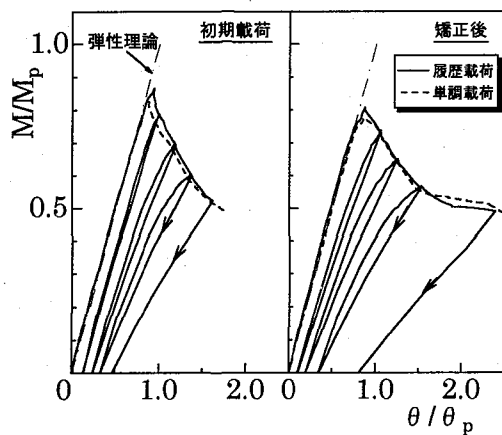


図-4 曲げモーメント-回転角曲線
(単調載荷と履歴載荷との比較)

(4) 荷重-変形挙動

図-3 (a) は極限荷重の約 60% 降下域まで初期載荷した場合、図-3 (b) は極限荷重の約 80% 降下域まで初期載荷した場合の曲げモーメント-回転角曲線を、4 種類のスパン長のほりを比較したものである。縦軸は曲げモーメント ($M=PL/4$) と全塑性モーメントの比 M/M_p をとり、横軸は回転角 θ を両支点のたわみ角の和で表し、全塑性モーメント M_p に対応する回転角 $\theta_p = M_p L / (2EI_y)$ の比 θ / θ_p で与えてある。ここに、 I_y は強軸まわりの断面 2 次モーメントである。矯正後も弾性理論値に沿って挙動しているが、極限荷重後の変形性状はスパン長によって多少異なる。とくに、スパン長 $L=1.5\text{m}$ の短いほりでは極限荷重後に載荷点での圧縮フランジの局部座屈変形が生じたため急激な降下曲線を示している。

図-4 は、スパン長 $L=2.0\text{m}$ で極限荷重の約 60% 降下域まで単調載荷したほり (DR2-60-1) と履歴載荷したほり (DR2-60-1c) を比較したものである。履歴載荷したほりは、塑性変形量が大きくなると除荷時および再載荷時の傾きが徐々に小さくなっているが、降下域での包絡線は単調載荷の挙動と大差がないことがわかる。そして、降下域の $M/M_p=0.5$ では初期載荷より矯正後の方が約 1.3 倍大きい回転容量を示している。

次に、矯正後の放置期間を約 1 ヶ月と、8 ヶ月後に変化させた場合の曲げモーメント-回転角曲線を示すと、図-5 のようになる。約 8 ヶ月後に再載荷したほりの方がやや大きい極限荷重を示しているが、降下曲線はほとんど同じ軌道を描いている。図-6 は、スパン長 $L=2.0\text{m}$ で極限荷重の約 60% 降下域で除荷し、矯正なしで約 8 ヶ月後に再載荷した場合の挙動である。初期の除荷重は $P_{n1}=66.51\text{kN}$ ($M/M_p=0.559$) に対し、再載荷の極限荷重は $P_{u2}=68.38\text{kN}$ ($M/M_p=0.575$) であり 3% の上昇がみられた。以上

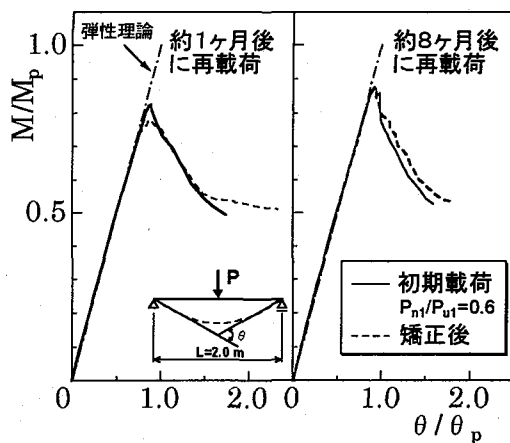


図-5 曲げモーメント-回転角曲線
(矯正後の放置期間を変化させた場合)

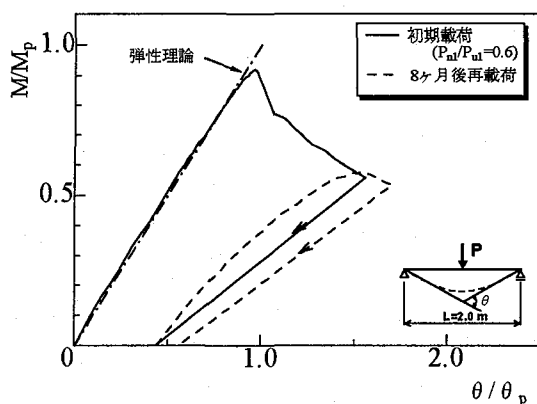


図-6 曲げモーメント-回転角曲線
(矯正せずに 8 ヶ月後に再載荷した場合)

の結果から長期間放置しても大差がないことから、ひずみ時効の部材耐荷力への影響はほとんど期待できないと思われる。

(5) 荷重-ひずみ挙動

本実験では、初期載荷、プレス加工時および矯正後の再載荷に至るまでのひずみの変化を連続して測定した。図-7 (a) に $L=2.0\text{m}$ で除荷重レベル $P_{n1}/P_{u1}=0.6$ の場合に対し、スパン中央の載荷点から圧縮フランジの半幅 ($b_f/2$) 離れた断面の圧縮フランジ先端における初期載荷と矯正後のひずみの変化を、縦軸に曲げモーメントと降伏モーメントの比 M/M_y を用いて示す。小さい荷重では面内曲げによる圧縮ひずみが増加するが、ほりの横ねじれ変形が生じる極限荷重近傍から、横曲げのの圧縮側は圧縮ひずみが増加し、逆に引張側は圧縮から引張ひずみに転ずる。

初期載荷において除荷開始時のひずみ ϵ_{n1} は、横曲げの圧縮側で $\epsilon_{n1}/\epsilon_{st}=0.84$ 、引張側で $\epsilon_{n1}/\epsilon_{st}=0.85$ であり、ひずみ硬化域に達していない。プレス矯正後も横曲げの圧縮側では残留圧縮ひずみが除

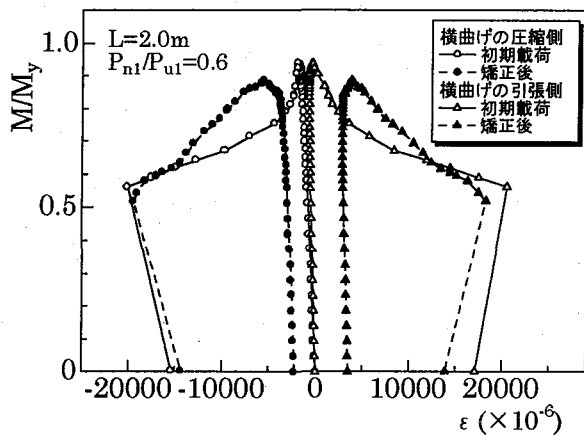


図-7(a) 圧縮フランジのひずみの変化 ($P_{n1}/P_{u1}=0.6$)

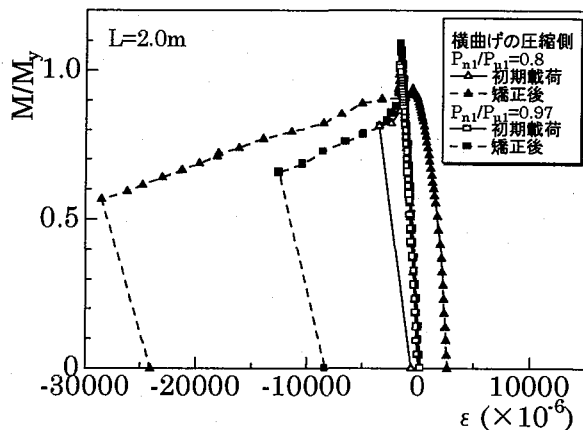


図-7(b) 除荷重レベルを変化させた場合の圧縮フランジのひずみ

荷後の 14%だけ残存し、再載荷においても横曲げの圧縮側に移行している。同様に、反対側の引張側では残留引張ひずみが除荷後の 20%だけ残存し、再載荷においても横曲げの引張側に移行している。極限荷重後の降下ひずみ曲線は、矯正後の方が急である。

横曲げの圧縮側における圧縮フランジ先端のひずみ変化を、スパン長 $l=2.0\text{m}$ で初期載荷の除荷重レベルを 80, 97%の 2 種類に変化させた場合について図-7 (b)に示す。除荷重を変化させると、表-2 のように除荷後の残留変形量に違いが生ずると同様に除荷後の残留ひずみ量 ε_{n0} にも違いがみられる。矯正後の荷重-ひずみ挙動は、除荷重レベルによって相違がみられ、初期載荷において極限荷重の約 80% 降下域まで載荷したはりの方が、約 60%降下域まで載荷したはりよりも極限荷重後の降下曲線が緩やかで、かつ大きなひずみに抵抗している。スパン長 $l=2.5, 3.0\text{m}$ においても同様な傾向がみられた。

(6) 断面のひずみ分布

図-8 (a), (b)は、スパン長 $l=2.0\text{m}$ のはりのフランジと腹板の両面で実測したひずみの平均を用いて、初期載荷 (極限荷重 P_{u1} 、除荷時 P_{n1} 、除荷後 P_{n0})、プレス矯正後 (P_{st}) および再載荷 (極限荷重 P_{u2} 、除荷時 P_{n2}) 過程の断面ひずみ分布が描いてある。極限荷重の約 60%降下域まで初期載荷したはりでは、除荷後においても圧縮フランジに横曲げによる大きな塑性ひずみが残存しており、プレス矯正後も大きな曲げひずみ分布を示す。引張フランジのひずみ分布は矯正後も著しく変化しない。また、腹板は除荷重レベルに関係なく、プレス矯正によって小さいひずみに戻っている。

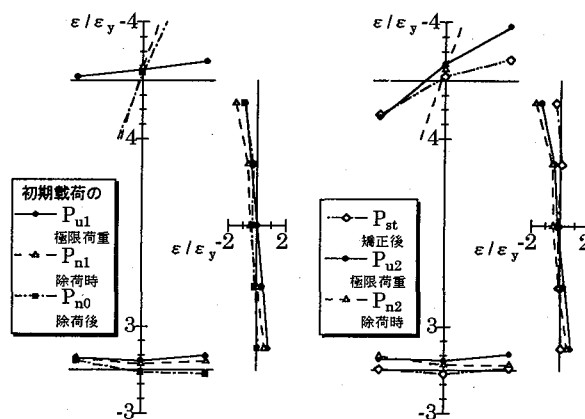


図-8(a) 断面のひずみ分布 ($P_{n1}/P_{u1}=0.6$)

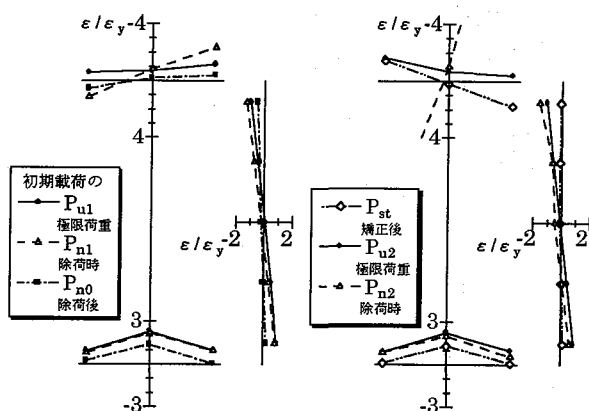


図-8(b) 断面のひずみ分布 ($P_{n1}/P_{u1}=0.8$)

表-3 耐荷力と回転容量の実験結果

実験はり	(1) 初期載荷			(2) 矯正後		$\delta_p = \frac{P_{u2}}{P_{u1}}$	$\delta_\theta = \frac{\theta_2}{\theta_1}$	M_p (kNm)	$\frac{L}{r_z}$	$\bar{\lambda}_b = \sqrt{\frac{M_p}{M_e}}$
	P_{u1} (kN)	$\frac{\theta_1}{\theta_p}$	$\frac{P_{n1}}{P_{u1}}$	P_{u2} (kN)	$\frac{\theta_2}{\theta_p}$					
DR1-60-1	140.97	0.993	0.59	133.42	1.011	0.946	1.018	59.89	64.96	0.785
DR1-80-1	143.42	1.031	0.79	156.18	1.146	1.089	1.112	60.13	65.05	0.790
DR1-60-8	142.93	1.044	0.60	140.13	0.930	0.980	0.891	59.63	64.97	0.786
DR2-60-1	99.08	0.883	0.60	93.49	0.883	0.944	1.000	59.99	86.83	0.988
DR2-80-1	108.50	0.955	0.80	99.67	0.839	0.919	0.879	60.15	86.94	0.994
DR2-60-8	104.67	0.921	0.60	104.14	0.934	0.995	1.014	59.63	86.91	0.990
DR2-97-1	106.63	0.940	0.97	114.09	1.003	1.070	1.067	59.27	86.62	0.989
DR2-60-1c	102.91	0.944	0.60	96.14	0.875	0.934	0.927	59.39	86.78	0.989
DR2-60-n8	109.28	0.965	0.61	—	—	—	—	59.46	87.01	0.990
DR2-60-m1	108.79	0.937	0.60	—	—	—	—	59.75	86.87	0.987
DR2-60-m2	101.14	0.871	0.61	—	—	—	—	59.41	86.88	0.989
DR3-60-1	70.53	0.783	0.60	67.20	0.689	0.953	0.880	59.92	108.93	1.161
DR3-80-1	68.57	0.738	0.80	67.79	0.723	0.989	0.980	60.27	108.95	1.167
DR3-60-8	73.67	0.775	0.60	66.58	0.701	0.904	0.905	59.72	108.69	1.163
DR4-60-1	52.48	0.640	0.60	49.15	0.635	0.936	0.992	59.57	130.55	1.310
DR4-80-1	57.39	0.718	0.79	51.11	0.631	0.891	0.879	59.99	130.53	1.315
DR4-60-8	50.23	0.650	0.60	50.11	0.643	0.998	0.989	59.65	130.37	1.311

注) P_{u1} , P_{u2} : 極限荷重; P_{n1} : 除荷開始荷重; θ_1/θ_p , θ_2/θ_p : 極限荷重時の回転容量

<実験はりの名称> DR1,2,3,4:L=1.5,2,2.5,3m;60,80,97:除荷重レベル P_{n1}/P_{u1} ;1,8:矯正後の放置月数

DR2-60-1c:履歴載荷, n8: 矯正無しで約8ヶ月後に再載荷, m1, m2: 矯正後の材料試験用.

(7) 耐荷力と回転容量

表-3には、初期載荷と矯正後におけるはりの極限荷重 P_u および回転容量 θ/θ_p の実験結果がまとめてある。また、初期載荷における除荷開始時の荷重と極限荷重の比 P_{n1}/P_{u1} 、全塑性モーメント M_p 、および弱軸まわりの細長比 L/r_z 、横ねじれ座屈の修正細長比 $\bar{\lambda}_b = \sqrt{M_p/M_e}$ が与えてある。

4. 矯正効果に対する考察

(1) 横ねじれ座屈耐荷力

初期載荷から得られた圧延はりの曲げ耐荷力 M_u/M_p と Perry-Robertson 式による圧延はりの設計強度曲線⁶⁾ (平均値相当曲線 $\alpha=0.15$; 下限値相当曲線 $\alpha=0.3$) との比較を図-9に示す。図中には、本実験と同一断面と荷重条件のもとで行われた既往の実験^{7),8)}による圧延H形鋼はりの実験強度の統計データ (m =平均値, s =標準偏差) も記入してある。この図のから、初期載荷の結果は既往の実験データと同様な強度変動を示していることがわかる。

図-10は、矯正後と初期載荷の極限荷重の比 $\delta_p = P_{u2}/P_{u1}$ を縦軸にとり、矯正後の耐荷力の回復度を調べたものである。矯正後約1ヶ月後に載荷したはりの回復度は、除荷重レベル $P_{n1}/P_{u1}=0.6$ の場合平均値 $m=0.943$ (変動係数 $\omega=0.008$)、 $P_{n1}/P_{u1}=0.80$

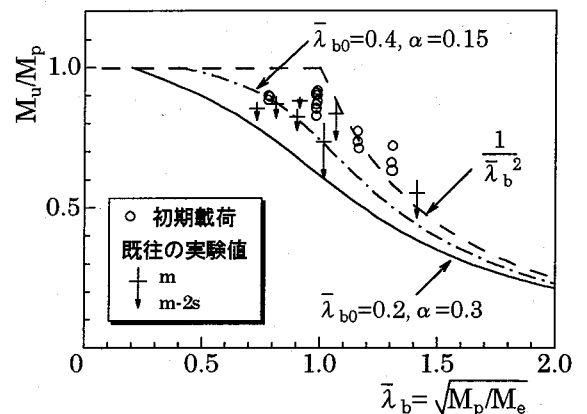


図-9 初期載荷における横ねじれ耐荷力

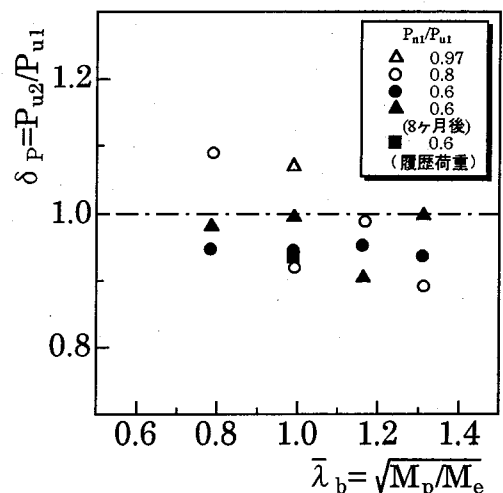


図-10 耐荷力の回復度

の場合 $m=0.970$ ($\omega=0.091$), $P_{n1}/P_{u1}=0.97$ の場合

ル $P_{n1}/P_{u1}=0.6$ の場合平均値 $m=0.963$ (変動係数

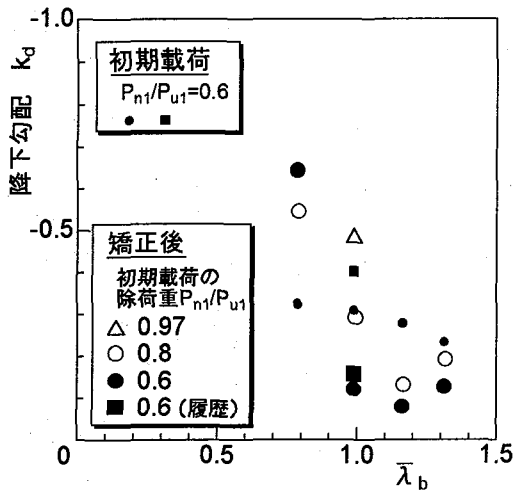


図-11 モーメント-回転角曲線の降下勾配 ($M/M_u=0.8\sim0.6$)

1.070 であり, 除荷重レベルが小さい場合には回復が悪い。また, 矯正後約8ヶ月後に荷重しはりの回復度は, $P_{n1}/P_{u1}=0.6$ の場合 $m=0.970$ ($\omega=0.05$) であり, 8ヶ月後に荷重した方が3%ほど大きい。このように変動があるものの, 耐力力の回復度に及ぼす除荷重レベルとひずみ時効の影響が僅か認められる。

(2) 変形性能

荷重-変形挙動に及ぼす矯正効果を調べるために, モーメント-回転角 ($M/M_p - \theta/\theta_p$) 曲線における極限荷重後の比較的安定した降下領域 ($M/M_p=0.8\sim0.6$) の勾配 k_d および除荷時の弾性勾配 k_e をそれぞれ求めると, 図-11および図-12のようになる。なお, 勾配は無次元曲線における横軸を基底にした $k=\Delta(M/M_p)/\Delta(\theta/\theta_p)$ で表す。図-

11から, 降下勾配 k_d は修正細長比 $\bar{\lambda}_b$ が大きくなるにつれて緩くなっている。そして, 初期荷重の除荷重レベルが小さいほど矯正後の降下勾配は緩い。図-12から, 初期荷重の除荷弾性勾配 k_e は, 除荷重レベルを小さくするほど部材剛性が低下するため, 緩くなることが明瞭に認められる。矯正後の除荷弾性勾配は, すべての荷重で除荷重レベルを約60%に保持してあるが, 初期荷重の除荷重レベルが相違するため変化している。矯正後の勾配は k_d および k_e とも, 極限荷重後に圧縮フランジの局部座屈が生じた短いはり ($\bar{\lambda}_b=0.79$) を除いて初期荷重の値より緩やかである。

図-13は, 表-3に示す最大荷重時の回転容量の比 $\delta_\theta=\theta_2/\theta_1$ をプロットしたものである。矯正後約1ヶ月後に荷重したはりの回復度は, 除荷重レベ

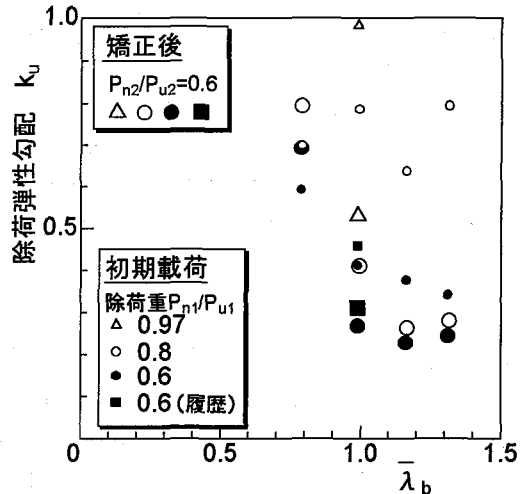


図-12 モーメント-回転角曲線の除荷弾性勾配

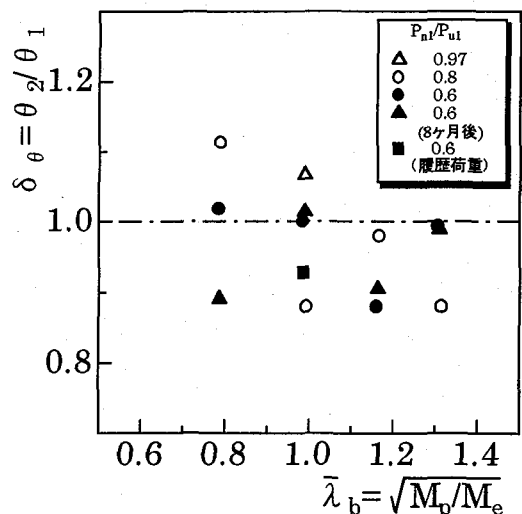


図-13 回転容量の回復度

$\omega=0.060$), $P_{n1}/P_{u1}=0.80$ の場合 $m=0.963$ ($\omega=0.115$), $P_{n1}/P_{u1}=0.97$ の場合 1.067 であり, 除荷重レベルをある程度大きくすると回復が悪くなっている。また, 矯正後約8ヶ月後に荷重したはりの回復度は, $P_{n1}/P_{u1}=0.6$ の場合 $m=0.950$ ($\omega=0.064$) であり, 8ヶ月後に荷重した方が1%ほど小さい。回転容量の回復度は, 図-10に示す耐力力より僅かであるが劣っている。

5. 結論

本論文では、横ねじれ座屈崩壊した圧延鋼はりを部材製作精度の許容誤差内にプレス矯正した場合について、座屈性能の回復度を実験的に調べた。初期载荷によって残留する変形やひずみ量は、最大荷重後の除荷重レベルに左右されるが、プレス矯正を施せば部材製作精度の許容誤差内に曲げ戻すことができる。

プレス加工によって生じるひずみ量は、残留変形量の大きい圧縮フランジで大きく、横曲げひずみが主体であった。横ねじれ座屈およびプレス加工によって大きく損傷を受けるはりのスパン中央断面の材料性質は、圧縮フランジでは大きく変化し、引張フランジと腹板ではほとんど変化しない。圧縮フランジの降伏点応力および引張強さは増加するが延性は低下し、その度合は横曲げの圧縮側の方が引張側より大きい。

矯正後の荷重-変形関係は、最大荷重までは初期载荷と同様に弾性計算値に沿って挙動する。しかし、最大荷重後の変形挙動における降下勾配と除荷弾性勾配は、初期载荷の除荷重レベルの大きさによって多少異なる。

初期载荷による横ねじれ座屈耐荷力は、既往の実験データと類似の強度変動を示した。矯正後の耐荷力と回転容量の回復度は、降下域での除荷重レベルが小さい方が少し劣る傾向を示し、94~107%であった。これは、先の溶接はり実験の回復度（除荷重レベル60%で耐荷力114%、回転容量111%）に比べ悪く、圧延と溶接部材の残留応力の相違が起因しているものと思われる。また、矯正後の再载荷するまでの経過時間（約1~8ヶ月）が部材耐荷力に及ぼす影響は3%程度の上昇であり、ひずみ時効による効果はあまり期待できないようである。

本論文から、横ねじれ座屈崩壊した圧延はりであっても、プレス加工により矯正すれば、初期部材の約90%以上の座屈性能が得られることが実証できた。

参考文献

- 1) Galambos, T. V. (ed.): SSRC Guide to Stability Design Criteria for Metal Structure, 4th-ed., John Wiley & Sons, New York, 1988.
- 2) 久保全弘, 杉山宜央, 北堀裕隆: 横ねじれ変形を矯正した鋼はりの座屈性能, 鋼構造論文集, Vol. 4, No. 16, pp. 113-120, 1997.
- 3) 久保全弘, 北堀裕隆, 八木孝行: コンパクトな一軸対称 I 形はりの横ねじれ座屈, 土木学会論文集, No. 563/I-39, pp. 11-22, 1997.
- 4) 久保全弘, 北堀裕隆, 杉山宜央, 八木孝行: ノンコンパクトな一軸対称 I 形はりの横ねじれ座屈, 土木学会論文集, No. 591/I-43, pp. 175-188, 1998.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 鋼橋編, 丸善, 1996.
- 6) 土木学会 (倉西 茂編): 鋼構造物の終局強度と設計, 技報堂, 1994.
- 7) Fukumoto, Y., Itoh, Y. and Kubo, M.: Strength variation of laterally unsupported beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, No. ST1, pp. 165-181, 1980.
- 8) 久保全弘, 福本秀士: 鋼圧延 I 形はりの横ねじれ座屈強度に及ぼす曲げモーメント分布の影響, 土木学会論文集, No. 368/I-5, pp. 255-263, 1986.

(1999年9月17日受付)