幅方向テーパー鋼板を腹板に用いた鋼丨桁の曲げおよびせん断挙動

Bending and shear behavior of a steel I-shaped girder with a transversely profiled steel web plate

橋本国太郎*,山口隆司**,大塚浩介***,杉浦邦征****,鈴木康夫*****,熊野拓志***** Kunitaro Hashimoto, Takashi Yamaguchi, Kosuke Otuka, Kunitomo Sugiura, Yasuo Suzuki, Takuji Kumano

*博士(工学),京都大学大学院助教,工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) **博士(工学),大阪市立大学大学院准教授,工学研究科都市系専攻(〒558-8585大阪市住吉区杉本 3-3-138) ***京都大学大学院,工学研究科社会基盤工学専攻修士課程1回生(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) ****Ph.D,京都大学大学院教授,工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) *****博士(工学),宇都宮大学大学院助教,工学研究科循環生産研究部門(〒321-8585宇都宮市陽東 7-1-2) ******博士(工学),JFEエンジニアリング株式会社,鋼構造事業部(〒230-8611横浜市鶴見区末広町 2-1)

Steel plates with varied thickness have a potential for rationalization of steel bridge design. For example, longitudinally profiled steel plates already have been adapted to flanges of an I-shaped girder / a box girder to reduce the weight of the bridge and the process of bridge construction. Recently, the analytical study on the mechanical behavior of steel girders with a transversely profiled web plate has been carried out, and it has been concluded that there exists the preferable cross sectional shape of steel plate from the viewpoint of the load carrying capacity and ductility. In this paper, the static loading tests for I-shaped girders with a profiled web plate in thickness are carried out. It is found that the web plate whose thickness is larger at the middle height of the girder has superiority for shear buckling strength; on the other hand, that the web plate whose thickness is larger plate has superiority for bending strength.

Key Words: transversely profiled steel plate, I-shaped steel girder, bending strength, shear strength キーワード: 幅方向テーパー鋼板, 鋼I 桁, 曲げ耐力, せん断耐力

1. はじめに

現在,鋼製橋梁の分野では,コスト縮減を目的として 様々な合理化構造が提案され実用化されている.例えば, 合理化2 主桁橋,開断面箱桁橋,合成細幅箱桁橋やLP 鋼板を用いた鋼 I 桁橋¹⁾などが挙げられる.LP

(Longitudinally profiled) 鋼板とは、図-1(a)に示すように、 部材軸方向に板厚を変化させた鋼板であり、断面力の変 化に応じて板厚を変化させることで、鋼重を減らし、建 設コストの低減を図ることができる.実際に、鋼 I 桁の フランジに適用された事例³⁾がある.著者らはこれまでに、図-1(b)、 (c)に示すような幅方向にテーパー形状を有する TP

(Transversely profiled) 鋼板を用いた周辺単純支持板や自 由突出板の圧縮強度⁴⁺⁶,さらには.TP 鋼板を鋼H形断 面のフランジや腹板に適用した場合の曲げ耐力に関す る解析的な検討^のを行い, TP 鋼板の力学性能を普通鋼板 と比較し,明らかにしている.一方,奈良らは,鋼 I 桁 の腹板において,圧縮側の板厚が大きく引張側の板厚が 小さくなるテーパー鋼板を適用した場合の解析的検討⁷⁾ や圧縮フランジにテーパー鋼板を適用した場合の耐荷 力の検討を実験的に行っている⁸.

本研究は、著者らが文献 6) に示した数値解析による 研究成果を踏まえ、幅方向テーパー鋼板を腹板に適用し た鋼 I 桁の曲げ挙動およびせん断挙動を実験および数値 解析により明らかにするものである. I 桁に曲げモーメ ントが作用した場合、図-2(a)の(i)に示すように、腹板に 発生する応力はフランジに近いほど応力が大きくなる が、(ii)のように、この応力変化に合わせて板厚を変化さ せることで、応力の低減を図ることができる.また、せ ん断力が作用した場合、図-2(b)の(i)に示すように、I 桁の せん断応力分布は腹板中央部で大きくなり、(ii)のように、



これに合わせて板厚を変化させることで応力の低減が 可能である.このように、幅方向テーパー鋼板の鋼 I 桁 への適用は、弾性域での応力値の低減に伴い、弾性座屈 が発生する荷重レベルを向上させることができ、さらに は降伏耐力、最大耐力の向上の可能性があると考えられ る.

したがって、本研究では、図-2 に示すように、曲げに 対しては凹型、せん断に対しては凸型の板厚形状を腹板 に適用した鋼 I 桁の曲げ挙動およびせん断挙動を載荷実 験と数値解析の結果をもとに議論する.

2. 静的載荷実験

2.1 実験供試体および載荷方法

実験供試体の概要および載荷方法を図-3に示す.実験

供試体は曲げ耐力を検討するための曲げ供試体(Aシリ ーズ)およびせん断耐力を検討するためのせん断供試体 (Bシリーズ)を用意し,さらにそれぞれのシリーズに 対して比較のため,板厚変化のない等厚鋼板を用いた実 験供試体も用意した.用意した供試体の総数は4体であ る.なお,テーパー鋼板は,図-3中のハッチング部分(試 験区間)のみに適用し,その他の腹板およびフランジは等 厚である.

実験に使用した鋼材の引張試験結果および実験供試体の主な構造緒元(実測値)を表-1 および表-2 に示す. 表-1 および表-2 には、参考のため、テーパー率 TPR および幅厚比パラメータ R も同時に示している.テーパー率 TPR および幅厚比パラメータ R は以下に示す式で算定した.

表-1 鋼材の材料試験	結果(平均値)
-------------	---------

Materials	Nominal	Coupon	Yeild	Tensile	Young's	Poisson's	Yeilding	Strain-	Prosting
	thickness	thickness	strength	strength	modulus	rotio	strain	hardening	alongation
	t	t	σ_y	σ_{u}	Е	1410	ε	strain ϵ_{sh}	
	(mm)	(mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	v	(10E-6)	(10E-6)	$\Delta \mathbf{L} / \mathbf{L}$
A: SM 400	6	5.8	297.0	432.1	194.4	0.30	1537	24751	47%
B: SM 400	9	8.8	302.5	429.1	198.6	0.30	1642	24140	45%
C: SM 400	12	11.6	289.1	431.0	208.3	0.29	1579	21412	48%

表-2 実験供試体の構造緒元(実測値)

⁽a) 曲げ供試体

	Span	Web										Flange				
Specimen	L	do	D_w	t _{wav}	t _{w1}	t _{w2}	Plate Taper Ratio	P	Matariala	Maximum initial	b	t _f	R.	Motoriala		
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(TPR)	\mathbf{R}_{W}	Wraterrais	deflection (mm)	(mm)	(mm)	ĸ	Materials		
A-1	1659.5	960.0	958.7	5.79	5.79	5.79	0.00000	1.39	А	1.42	309.5	11.7	0.76	С		
A-2	1659.9	960.6	958.6	5.97	8.35	3.59	0.00992	1.35	В	2.56	309.2	11.7	0.75	С		

	Specimen	L	do	D_w	t _{wav}	t_{w1}	t_{w2}	Plate Taper Ratio	R	Materials	Maximum initial	b	t _f	Re	Materials
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(TPR)		Materials	deflection (mm)	(mm)	(mm)	1	materials
	B-1	1060.9	957.7	959.3	5.84	5.84	5.84	0.00000	1.68	А	0.80	309.7	11.7	0.76	С
	B-2	1059.9	958.4	959.7	5.87	5.03	6.80	0.00369	1.67	В	1.37	310.0	11.7	0.76	С
1.0 0.8 0.6 WW 0.4 0.2 0.0		B-1 ▲ Critic: △ Ultim 2 0.4	al ate	B Crii Ulti	-2 tical imate	1.0	480 480						<i>Q</i>	■ : Un ● : Tri ① : Dis (In × : Dis 2000	iaxial Gauge axial Gauge .placement Transdu .Plain) placement Transdu

(a) 曲げ供試体

(b) せん断供試体 Web

図-4 せん断供試体の載荷経路(設計値)

Span

$$TPR = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{b/2} \tag{1}$$

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-v^2)}{\pi^2 k} \cdot \frac{\sigma_y}{E}}$$
(2)

ここに、 t_{max} :最大板厚、 t_{min} :最小板厚、b:板幅(= D_w : 腹板高)、t:板厚(テーパー鋼板では平均板厚)、k:座 屈係数、 σ_y :降伏点、E:弾性係数、v:ポアソン比で ある.

本実験で用いた供試体のテーパー率は、曲げ供試体で 0.01(設計値)、せん断供試体で0.004(設計値)である. なお、テーパー鋼板の製作にあたっては、等厚板から機 械加工によって削り出しており、その製作性も考慮して テーパー率を決定した.

載荷は、曲げ供試体に関しては試験区間に等曲げモー

メントが作用するよう.載荷梁の中心に 5,000kN 油圧ジ ャッキで圧縮力を載荷する4点曲げ載荷試験とした.せ ん断供試体に関しては,試験区間に,曲げモーメントに 比べせん断力がより大きく作用するように,試験体中央 に 5,000kN 油圧ジャッキによって圧縮力を載荷した.せ ん断供試体の曲げモーメントとせん断力との載荷経路 (設計値)を図-4に示す.図中の凡例 Critical はせん断弾 性座屈強度(降伏せん断力 V_yで無次元化)とその時の曲 げモーメント(降伏曲げモーメント M_yで無次元化),ま た,凡例 Ultimate は,最大せん断力とその時の曲げモー メントとの関係である.図-4 より,曲げ耐力とせん断耐 力との比率はおよそ 0.75 となっている.

(b) せん断供試体

図-5 計測位置(単位:mm)

Flange

2.2 計測項目

本実験で主に計測した項目を以下に示す.また,計測 位置を図-5に示す.



図-7 解析で用いた応力--ひずみ曲線

図-8 初期たわみ形状(実測形状(-)および解析導入形状(-))

(a) 載荷点

を貼付した.

FEM 解析モデル

3.

- 荷重:ジャッキに設置したロードセルから計測した.
- ② 鉛直変位:桁中央のたわみを変位計により計測した.曲げ供試体では、試験区間の回転角を測定するために図-5(a)に示す位置にも変位計を設置した.
- ③ 面外変位:曲げ供試体およびせん断供試体ともに, 腹板パネルの面外方向の変形性状を測定するため 変位計を設置した.
- ④ 腹板のひずみ:腹板内の主ひずみ分布を測定するため、3軸ひずみゲージを貼付した.なお、曲げ供試体では、曲げひずみ分布がわかるように貼付し、せん断供試体では、せん断ひずみ分布ならびに座屈後のひずみ分布がわかるように貼付した.また、表裏のひずみ量の比較、および座屈の判定のために、反対の面にもひずみゲージを貼付している.
- ⑤ フランジのひずみ:フランジの軸方向ひずみを測定 するため1軸ひずみゲージを貼付した.なお,曲げ 供試体では、フランジが座屈した時のひずみ変化が わかるようにフランジの中央に3箇所ひずみゲー ジを貼付している.また、せん断供試体では、塑性 ヒンジができると予想される位置にひずみゲージ

載荷実験結果を補完し、力学的挙動を詳細に検討する ため、実験供試体を対象とした FEM 解析を実施した. FEM 解析には、汎用の有限要素解析コード ABAQUS⁹ を用いた.

図-9 支点および載荷点のモデル化

(b) 支点

解析モデルの概要および要素分割の状況を図-6 に示 す.曲げ供試体の解析モデルは、構造の対称性を考慮し、 1/2 モデルとした.境界条件については、支持点をフラ ンジ全幅にわたって単純支持し、中央部には対称条件を 設定した.一方、せん断供試体の解析モデルは全体モデ ルとしている.テストパネルの分割数は、曲げ供試体で 32×16、せん断供試体で 32×32 である.

載荷は、いずれのケースにおいても所定の位置に線荷

表-3 解析ケースの内訳

Analysis case	Loading case	Taper	Support condition
A-1a	Moment	Non	Boundary condition
A-2a	Moment	Tapered	Boundary condition
A-1af	Moment	Non	Solid element & Friction
A-2af	Moment	Tapered	Solid element & Friction
B-1a	Shear	Non	Boundary condition
B-2a	Shear	Tapered	Boundary condition
B-1af	Shear	Non	Solid element & Friction
B-2af	Shear	Tapered	Solid element & Friction



図-10 曲げモーメントー回転角関係

重として強制変位を与えている.なお,実験と同様に載 荷点には載荷板の板厚を付加し,載荷点で応力が集中し ないよう配慮している.

解析に用いた要素は4節点低減積分シェル要素(S4R) である.応カーひずみ曲線は、図-7に示すトリリニア型 と仮定した.なお、降伏点、引張強度、弾性係数および ポアソン比などの材料特性値には、引張試験で得られた 値を、板厚や桁高などの形状寸法値には実測値を用いて いる.また、初期不整として、図-8に示す腹板の初期た わみを考慮した.図-8には実測した初期たわみ形状およ び解析で考慮した初期たわみ形状を示している.解析で は、sine 波形を導入おり、図-8から、実測値も sine 半波 もしくは一波に近い分布をしていることがわかる.なお、 図中の計測値は、テーパー形状による板厚の変化の影響 を差し引いた値である.初期不整としてはこの初期たわ みのみを考慮し、残留応力は考慮していない.

実験では、実験供試体を図-3 に示す支点に直接、置いたため、摩擦により、回転および水平方向に若干の拘束があったと考えられる.そのため、本解析では、図-9 に示すように、載荷点および支点をソリッド要素(C3D8R)とし、実験の支持条件を忠実に再現したモデルでも解析を行い、モデル化の違いについても検討した.この載荷点および支点を詳細にモデル化したモデル(以下、支点詳細モデル(ケース名:A-1af, A-2af)という.)では、支点(載荷点) –載荷板間に接触接線方向の摩擦係数を

表-4 実験結果および解析結果(曲げ供試体)のまとめ

	Specimens	<i>M</i> _u kN∙m	M_y kN•m	<i>M_p</i> kN∙m	M_u/M_y
Experiment	A-1	1363.5	1251.5	1408.3	1.089
	A-2	1467.8	1309.6	1482.1	1.121
Analysis	A-1a	1259.6	1251.5	1408.3	1.006
	A-2a	1328.2	1309.6	1482.1	1.014
	A-1af	1447.2	1251.5	1408.3	1.156
	A-2af	1522.0	1309.6	1482.1	1.162

 M_u : Ultimate moment M_y : Yield moment M_p : Full plastic momen



図-11 面外変形量の推移

0.2, 接触鉛直方向は離間を許す接触条件を導入している. なお, 鋼材の摩擦係数は, 表面処理によって 0.2~ 0.8 程度^{10,11)}と大きくばらつくが,本実験の摩擦面は供 試体側では黒皮を残した状態で,載荷点側ではグライン ダーをかけた程度の表面処理状態としており,摩擦係数 値として小さい側の値 0.2 を用いた.

解析ケースの内訳を表-3に示す.

結果および考察

4.1 曲げ挙動

4.1.1 曲げモーメントー回転角関係

曲げ供試体に対する実験結果および解析結果のまと めを表4に、曲げモーメントー回転角関係を図-10にそ れぞれ示す.表中の降伏曲げモーメント M_y および全塑 性モーメント M_p は、材料試験結果をもとに平面保持の 仮定に基づいて算出した値である.また、表中の M_u は 実験もしくは解析で得られた最大曲げモーメントであ る.図の縦軸および横軸は、設計降伏曲げモーメント M_y およびその時の回転角 θ_y によって無次元化している. なお、回転角は、腹板の中央の鉛直変位量と両端の変位 量の平均値との差をそれら変位計間の距離で除した値 としている.また、図中には、以下の式(3)および(4)によ って求まる腹板の弾性曲げ座屈強度 σ_b および梁理論か



ら求められる理論値も示している¹²⁾.

$$\sigma_b = k_b \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \tag{3}$$

$$k_b = 15.87 + 1.87 / \alpha^2 + 8.6\alpha^2 \quad (\alpha \le 0.66)$$

= 23.9 (\alpha > 0.66) (4)

ここで, k_b:曲げに対する座屈係数, E:弾性係数, v: ポアソン比, t:腹板厚(テーパー鋼板の場合, 平均板厚), $b: 腹板高, \alpha: アスペクト比である.$

図-10 より、弾性範囲内において、実験および解析の 剛性は、理論値の剛性よりも若干大きいことがわかる. これは、実験および解析では垂直補剛材を設置している が、それにより剛性が大きくなったと考えられる.表-4 および図-10 より、支点条件によって、曲げ剛性および 最大曲げモーメントの値が異なり,支点詳細モデルの方 が実験結果に近いことがわかる. このことから、載荷実 験では、摩擦による軸方向の拘束があり、 支点部におい て、軸方向の移動が十分でなかったと推定される.

以上のことから,以下の曲げ供試体の解析結果に関す

図-14 せん断力-変位関係

る考察では、支点詳細モデルの結果を用いる.

テーパーの有無で比較すると、降伏曲げモーメント M, で無次元化した値では実験で 2.9%, 解析で 0.5%の上 昇である.曲げ耐力という点では、テーパーを有するこ とによる効果がほとんどないと言える. なお, 実験の A-1 供試体では初期剛性が線形となっていない. これは、載 荷点付近の鉛直変位計の値から、載荷初期の段階で載荷 梁が片押し状態となっており,載荷点の片方の変位量が 大きくなっていたためと考えられる.

4.1.2 曲げ変形性状

腹板の面外変形の推移を図-11 に、載荷実験とFEM 解 析で得られた載荷終了後の変形状態を図-12 にそれぞれ 示す. 図-12の解析による変形図は、実験終了時(除荷前) の荷重と同程度の荷重時の変形状態としている.

図-11 より、実験および解析において、初期の荷重段 階(M/Mu=0.5程度)までは、等厚腹板では、腹板圧縮 側の上から 2/5 あたりで最大値となるような変形が起き ているのに対し、テーパー腹板では、中央付近で最大値 となるような変形となっており, 面外変形の形状に違い がある.これは、テーパー腹板では、腹板の中心部の板



図-15 せん断力ー腹板のひずみ関係

	Specimens	V _{cr} (kN)	V _{cr_pre.} (kN)	V _{cr} / V _{cr_pre.}	V _u (kN)	V _y (kN)	V_u/V_y	$\delta_{95}\!/\delta_{ m y}$
Experiment	B-1	313.1	366.5	0.85	719.8	960.6	0.749	1.14
	B-2	334.0	379.9	0.88	741.5	983.9	0.754	1.17
Analysis	B-1a	369.3	366.5	1.01	700.1	960.6	0.729	1.42
	B-2a	371.9	379.9	0.98	720.5	983.9	0.732	1.13
	B-1af	351.9	366.5	0.96	694.3	960.6	0.723	1.52
	B-2af	380.1	379.9	1.00	713.9	983.9	0.726	1.21

表-5 実験結果および解析結果のまとめ(せん断供試体)

V_{cr}: shear-buckling resistence (Experiment or Analysis)

 V_y : yielding shear force

 V_{cr_pre} : shear-buckling resistence

 V_u : ultimate shear strength

厚が薄いため、その中心付近でも大きく変形したと考え られる.また、実験結果と解析結果との比較では、実験 結果に比べ、解析結果の方がたわみの絶対量が小さい値 となっている、これは、最大荷重時の変形量が実験と解 析では異なっており、図-10からもわかるように実験時 の方が、最大荷重時の回転角量が大きく、解析では小さい ・面外変形も同様に、実験の最大荷重時では、解析の 最大荷重時に比べ、変形が進行した状態であったためこ のような差異が生じたと考えられる.この変形量の差異 は、解析において、フランジの初期たわみを考慮してい ないこと、応力---ひずみ関係を単純なモデルとしたこと、 および残留応力を考慮していないことが原因として考 えられる.

図-12 より,実験および解析結果ともに,圧縮側フランジの局部座屈および腹板の曲げ座屈の両方が生じていることがわかる.座屈発生の順序については,解析結果より,腹板で座屈がまず発生し,腹板の座屈の進展につれて,フランジの局部座屈が発生したということがわかった.

4.1.3 腹板のひずみ分布

実験および解析で得られた腹板のひずみ分布(試験区間の中央断面)を図-13に示す.

図-13より解析のひずみ分布では、A-1およびA-2のそ

れぞれの場合において、中央付近のひずみ、および中央 から±240mm付近のひずみが小さくなり、平面保持の仮 定が成立していないことがわかる.この原因を検討する ため、初期たわみを導入しないモデルで解析した結果を 図-13 中の凡例 ana-n に示す.初期たわみを導入しない場 合、線形的なひずみ分布をしていることがわかる.この ことから、導入した初期たわみの最大となる部分では、 変形が進行しにくく、このようなひずみ分布となったと 考えられる.

次に、テーパーの有無について比較すると、*M/M_u*が 0.2~0.6 付近の弾性範囲内および座屈発生後において、 発生ひずみの大きさにはほとんど差異がないことがわ かる.

4.2 せん断挙動

4.2.1 せん断カー変位関係

せん断供試体によるせん断力-変位関係およびせん 断力-腹板のひずみ関係を図-14および図-15に示す.図 -14において、テーパー有りの腹板と等厚の腹板では、 材質が違うため、せん断力は降伏せん断力 V_y 、変位は降 伏変位 δ_y で無次元化している.図-14中には、せん断変 形を考慮した梁理論から求められる理論値も同時に示 している.また、実験および解析結果のまとめを表-5に



図-17 面外変形量の推移(せん断供試体)

示す. 表-5 には、実験および解析で得られたせん断座屈 荷重 V_{cr}, せん断耐力 V_u, また, 比較のため, せん断座 屈荷重の理論値(せん断弾性座屈強度ταに腹板断面積 をかけた値) V_{cr_pre},および降伏せん断耐力の設計値 V_v を示している. さらに、降伏せん断力の95%に低下した 時の変位を降伏せん断力時の変位で無次元化した値も 示している. ここで, せん断座屈荷重 V_aは, 実験では, 腹板に貼付した3軸ひずみゲージから算定した最大せん 断応力がせん断弾性座屈強度 τ α に達した時と定義した. 一方、解析では、腹板の中央断面におけるいずれかの要 素の最大せん断応力がせん断弾性座屈強度ταに達した ときの荷重をせん断座屈荷重と定義した. なお, せん断 弾性座屈強度 τ α は,以下の式(5)および(6)で求められる ものとした 12).

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$
(5)

$$k_{\tau} = 4.00 + 5.34/\alpha^2 \quad (\alpha \le 1)$$

= 5.34 + 4.00/\alpha^2 \quad (\alpha > 1) (6)

ここで, k_r: せん断座屈係数, E: 弾性係数, v: ポアソ ン比, t:腹板厚(テーパー鋼板の場合,平均板厚), b: 腹板高, α:アスペクト比である.

図-14より、弾性範囲内で、実験および解析の剛性は、 理論値の剛性より若干大きい値となっている. これも, 曲げ試験と同様に垂直補剛材の影響と考えられる.表-5 および図-14 より、最大せん断力に関して解析結果を比 較すると、通常の支点条件としたモデルと支点詳細モデ ルでは、ほぼ同じ荷重レベルである.また、せん断座屈 荷重に関しても同様のことが言える. このことから、曲 げモデルと同じ条件にするということで, 以降の考察で は支点詳細モデルを用いて議論する.

表-5 のせん断座屈荷重は式(5), (6)から算定した弾性せ ん断座屈応力をもとに求めているが、図-15 よりこの荷 重付近で、腹板の表裏のひずみが大きく変化しているこ とがわかる.これより、せん断座屈荷重を、上記のよう な定義で求めることが十分可能と考えられる.

表-5 および図-14 より, テーパーの有無による比較で は、テーパー有りの方が、設計のせん断座屈荷重 Vcr pre で無次元化した場合,実験では2.9%,解析では4.2%の 向上となっている. これは、テーパーをつけることで、 弾性時の応力が低減され、せん断座屈応力に達する荷重 が、等厚腹板に比べ大きくなると考えられる.



図-19 腹板の最大せん断応力分布

せん断座屈荷重に関しては、解析と実験との間に差が 見られる.これは、実験では解析のように板厚が均一と なっていないこと、また、解析では実験供試体の初期た わみ波形を忠実に再現していないことなどがその要因 として考えられる.

最大せん断耐力の比較では、降伏せん断力 V,で無次元 化した値で比較すると、いずれもテーパーをつけること でその耐力上昇は 1%未満である.95%耐力時の変位 δ 95 を降伏時の変位 δ,で無次元化した δ 95/δ,で比較する と、実験ではテーパー有りの供試体の方が大きいのに対 し、解析では逆の傾向が見られる.また、変形量そのも のも解析値と実験値に大きな差が見られ、解析結果の方 がテーパーの有無に関わらず、大きな値を示している. これらの差異は、塑性域における応力—ひずみ関係を解 析では簡易にモデル化していることが原因と考えられ る.

4.2.2 せん断変形性状

せん断供試体の載荷終了時の変形状態を図-16に示す. 比較のため解析における変形状態(応力コンター変形 図)も併せて示す.また,腹板の面外変形の推移を図-17 に,解析で得られた面外変形コンターを図-18 にそれぞ れ示す.図-17 の実験による変形量は,中央断面に設置 した変位計による値である.

図-16 より実験,解析ともに,腹板にせん断座屈が生じ,徐々に進展しながら,解析では,最終的に,圧縮フランジに塑性ヒンジが形成され終局状態に至っていることがわかった.なお,塑性ヒンジの形成は,図-16 に示すように解析において,圧縮フランジの面外変形が顕著になっている位置が降伏したときと定義した.

図-17より, テーパーの有無で比較すると, 解析では, VV_u=1.0の時の面外変形量に差異がみられるが, 実験で は, あまり差が出ていない.このことから, 形状的な変 化(凸型テーパー)を導入することで面外変形量が減少 することがわかったが、実際には、テーパーをつけるこ とでフランジとの溶接部の板厚が小さくなり、その溶接 の残留応力の影響が等厚板に比べ大きいため、面外変形 量が解析に比べ大きくなったと考えられる.また、 *VV*_u=0.5の荷重状態までは、B-1供試体では、中央付近 を節とする 2 次モードの変形をしているのに対し、B-2 供試体では、中央から+120mm付近が最大値となる1次 モードの変形をしている.これは、初期たわみ形状がB-1 供試体では 2 次モード、B-2 供試体では 1 次モードで生 じていたことによるものと考えられる.しかし、最終的 な変形状態はほとんど同じ形状となっている.

図-16, 18 より, テーパーの有無による比較では, 斜 張力場の形成の状態や最終的なせん断座屈形状, 塑性ヒ ンジの形成位置にはほとんど差異がないと言える. 解析 結果より, 上フランジ側の塑性ヒンジの形成位置は, テ ーパー有無共に, 支点から 428mm の位置であった.

以上のことから、せん断変形性状はテーパーの有無に よってほとんど変化しないと判断できる.

4.2.3 腹板の最大せん断応力分布

腹板の中央断面に貼付した3軸ゲージのひずみ値から 算出した実験による最大せん断応力分布,および解析で 得られた最大せん断応力分布を図-19に示す.

図より、テーパーの有無によってせん断応力分布形状 に違いがあることがわかる.等厚の腹板では、中央にい くほど応力が大きくなり、図-2(b)の理論値と同様の分布 形状をしている.また、せん断座屈の生じる前の荷重レ ベルにおいて、荷重が大きくなるにつれ、中央部の応力 が大きくなっている.一方、テーパー有りの腹板では、 中央の応力値が低減されており、特に、荷重が大きくな っても、両端の応力は大きくなるが、中央の応力は小さ くとどまっている.

解析と実験とを比較すると、*VV*_y=0.6 までは、応力値 が概ね一致している.しかし、解析では、荷重が大きく なるにつれ、複雑な応力状態となり、実験値と合わない 部分も見られる.

5. まとめ

本研究では、幅方向テーパー鋼板を鋼 I 桁の腹板に適 用した場合の、鋼桁の曲げならびにせん断挙動を明らか にするために静的載荷実験および FEM 解析を行った. 本研究で得られた結果を以下にまとめる.

- 腹板に凹型のテーパー鋼板を適用したI桁の曲げ挙 動に関して、等厚の腹板を有するI桁よりも、曲げ 耐荷力が実験では2.9%、解析では0.5%向上した.
- 2) 曲げによる腹板の面外変形は, *M/M*_y=0.75 程度の荷 重レベルまでは, テーパーのある方が全体的に大き く変形しており, テーパーの有無による違いが出た ものの, 最終的には, ほぼ同じ座屈波形となった.
- 3) 凹型のテーパーをつけても、今回用いたテーパー率 では、曲げによって発生するひずみはほとんど低減 しなかった.
- 4) 腹板に凸型のテーパー鋼板を適用したI桁のせん断 挙動に関して、等厚の腹板を有するI桁よりも、せ ん断座屈強度では実験で2.9%、解析で4.2%向上した。一方、せん断耐力については、実験および解析 ともに両者の差異は見られず、ほとんど同じであった。また、せん断耐力の95%時の変形量について は、実験では、テーパーを有する腹板を用いることで5.5%向上した。
- 5) 凸型のテーパーをつけることで、座屈荷重の前の荷 重レベルでは、中央部に大きく分布していたせん断 応力分布が低減することがわかった.

本研究で対象としたテーパー率やテーパー形状では, 曲げ強度およびせん断強度の大きな上昇が見られなか った. 今後は,作用させる曲げモーメントとせん断力の 比率,テーパー率およびテーパー形状などを変化させた パラメトリック解析により,曲げモーメントおよびせん 断力が同時に作用した場合の最適なテーパー率および テーパー形状について検討する必要がある.

謝辞

本研究の実験を行うにあたって、京都大学技術職員で ある檜垣義雄氏、有馬博人氏には、載荷装置や実験供試 体の取付け・設置作業をお手伝いしていただいたこと、 ここに記して謝意を表します.また、本研究は、科学研 究補助金、基盤研究(B)(課題番号:19360206)の補助により 行われたことを付記し、ここに謝意を表します.

参考文献

- 日本鋼構造協会・合理化桁の設計法研究小委員会:合理化桁に関するデザインマニュアル, pp. 205-260, 2000.
- 2) 例えば、谷 俊寛、西前博一、岡村公司:テーパープ レートをフランジ材に用いた I 桁の施工試験-上信 越自動車道深沢川橋(鋼上部工)工事-,高田機工技 報, No.11, pp. 16-21, 1995.
- 3) 例えば,西東十郎:近畿自動車道「左分利川橋」(鋼 上部工)工事の設計・施工報告,石川島播磨技報,橋 梁特集号 2007, pp.147-151, 2007.4.
- 4) 杉浦邦征,山口隆司,熊野拓志,渡邊英一:板幅方向 にテーパーを有する鋼製周辺単純支持版の圧縮強度 と変形能,土木学会論文集,No.780/I-70, pp. 231-239, 2005.1.
- 5) 熊野拓志,山口隆司,杉浦邦征,鈴木康夫,橋本国太郎:軸方向および幅方向テーパー鋼板の圧縮強度評価 方法の一提案,鋼構造論文集, Vol.15, No.57, pp.87-102, 2008.3.
- 6) 鈴木康夫,山口隆司,熊野拓志,杉浦邦征,渡邊英一: 板幅方向にテーパーを有する自由突出板の圧縮強度 と変形能,土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp. 531-542, 2006.7.
- 7)奈良 敬, 簑島茂樹: 変鋼厚板を腹板に用いた鋼桁断 面の極限曲げ強度, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構 造協会, 第5巻, pp. 255-260, 1997.11.
- 祭良 敬,村上茂之,都竹哲朗,森脇幸次,庄司 眞:
 圧延変厚鋼板をフランジに用いた鋼 I 桁の曲げ載荷 試験,鋼構造年次論文報告集,第10巻,pp.181-188, 2002.11.
- 9) SIMULIA : Abaqus Analysis User's Manual, Vol. I-V, Ver.6.7, 2007.
- 10)日本鋼構造協会・接合小委員会:鋼構造接合資料集 成ーリベット接合・高力ボルト接合-,技報堂出版, pp.380-393, 1977.3.
- 11)土木学会・鋼構造委員会・高力ボルト摩擦接合継手の設計法に関する調査検討小委員会:高力ボルト摩擦 接合継手の設計・施工・維持管理指針(案),2006.12.
- 12)土木学会・座屈設計ガイドライン改訂小委員会:座 屈設計ガイドライン改訂第2版[2005年度版],2005.9. (2008年9月18日受付)