

## 第3章 標準型パネルの載荷実験と耐力評価

### 3.1 序

2章で述べたように、パネルの挙動は鋼構造骨組全体の弾性剛性・保有水平耐力に少なからず影響を与える。鋼構造骨組の地震応答性状を把握し、パネルが骨組に与える影響を設計に反映させるためにはパネルの剛性・耐力などの履歴特性を適切に把握する必要がある。

これまでもパネルの剛性・耐力や変形性能に関して多くの実験が行われている<sup>3-1)~3-4)</sup>。本章では、角形鋼管柱・H形断面梁接合部パネル、円形鋼管柱・H形断面梁接合部パネルを対象とし、その剛性・耐力を含む履歴挙動を把握することを目的とした実験について述べる。角形鋼管・円形鋼管パネルについては田淵らが多くの実験<sup>3-5)~3-9)</sup>を行い、パネルの挙動・鋼管の製法<sup>3-6)</sup>や鋼管隅角部の影響<sup>3-7),3-8)</sup>を明らかにしている。本実験では主な実験パラメータとして軸力比と角形鋼管パネルの載荷方向を取り上げている。軸力比をパラメータとした研究は数多くあるものの、ほとんどの軸力比は最大0.3程度であり、0.5を越えるもの<sup>3-10)</sup>は数少ない。本実験では高軸力に対するパネルの挙動を把握するため、軸力比に最大0.6を採用している。また、角形鋼管パネルの載荷方向には図3.1に示す構面方向にせん断力が作用する場合（以下では角形鋼管0°方向と呼ぶ）と、2構面方向より同時に載荷した場合を考慮した45°方向からの載荷（以下では、角形鋼管45°方向と呼ぶ）を考える。45°方向からのせん断載荷に対するパネルの挙動に関する研究は、わずかに実験<sup>3-11)</sup>・FEM解析<sup>3-12)</sup>があるだけでほとんどなされていない。実験は通しダイアフラム形式のパネルを対象としたパネル部分せん断載荷実験と十字形骨組載荷実験の2種類である。

本論6章で示すパネルの影響を考慮した鋼構造骨組の耐震設計を行うためには以下に示すパネルに関する3つの値が必要である。

- 1) 骨組の変形を算定するためのパネルの弾性剛性
- 2) 許容応力度設計を行うためのパネルの降伏せん断耐力
- 3) 保有水平耐力算定のためのパネルの全塑性せん断耐力

本章では、実験結果から種々のパラメータがパネルの耐力に与える影響について検討し、3)のパネルの全塑性せん断耐力に関する評価式を提案し、実験結果と比較・検討する。さらに1)から3)の値に関する既往の評価式と実験結果の比較・検討もあわせて行う。

### 3.2 パネル部分せん断載荷実験

#### 3.2.1 試験体および実験方法

図3.1に試験体形状を示す。試験体はパネル部分に相当する角形鋼管  $-200 \times 200 \times 9$ ・円形鋼管  $\phi 216.3 \times 8.2$ の両端にエンドプレートを溶接したものである。これに所定の一定軸力を載荷した後、繰返しせん断力を作用させる（図3.2参照）。試験体一覧を表3.1に示す。実験パラメータは鋼管形状・鋼管種（製造方法・鋼種）・軸力比・アスペクト比である。角形鋼管の鋼管種は溶接4面組立鋼管（以下Weldと表す）とロール成形角形鋼管（以下Rollと表す）・プレス成形角形鋼管（以下Pressと表す）の計3種類である。円形鋼管の鋼管種はSTK400・STK490・STK490を応力除去した鋼管（以下STK490SRと表す）の計3種である。軸力比は0.0, 0.3, 0.6の3種類である。パネルせい  $h$  は200, 300mmであり、それぞれアスペクト比  $h/D$  がほぼ1.0, 1.5になる。角形鋼管のせん断力の載荷方向

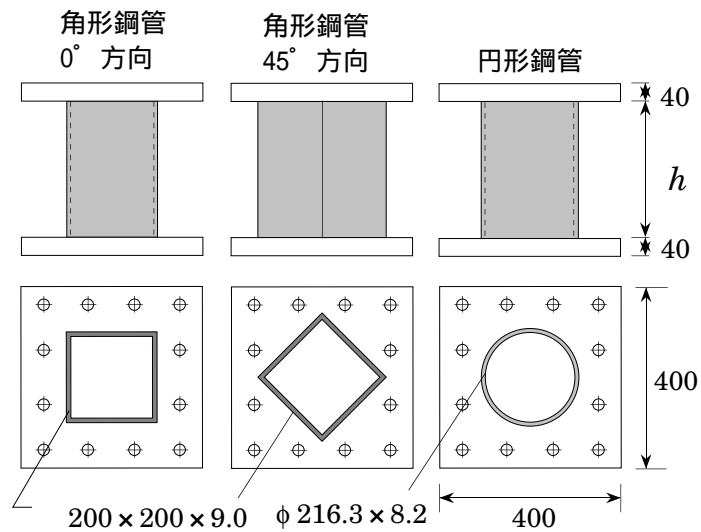


図 3.1 パネル部分試験体

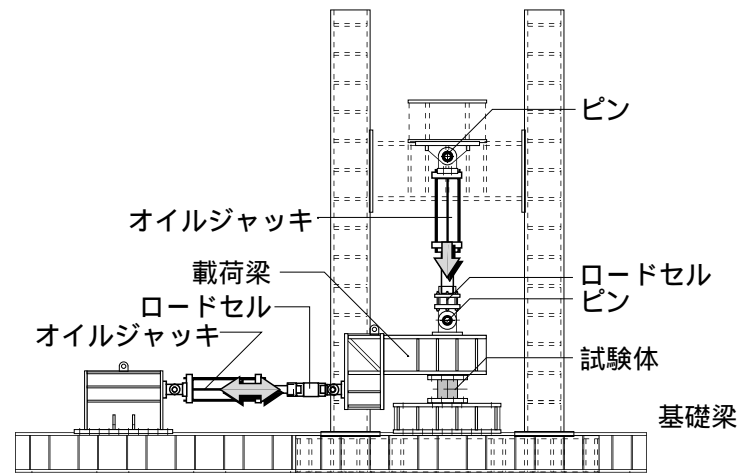


図 3.2 パネル部分せん断载荷装置

は  $0^\circ$  方向および  $45^\circ$  方向の 2 種類である。溶接組立鋼管の製作およびエンドプレートの溶接には、裏当金を使わずに裏波溶接を用いる。また、溶接組立鋼管の溶接ビードおよび冷間成形鋼管の溶接シームはフランジ側に配置している。試験体は基礎梁と載荷梁の間に高力ボルトで固定する。

素材の機械的性質を表 3.2 に示す。角形鋼管の結果は平板部より切り出した JIS 1 号試験片，円形鋼管の結果は JIS14B 号試験片による単調引張試験から得られたものである。ただし，Roll, STK400, STK490 の降伏応力度  $\sigma_y$  は 0.2% offset 値である。Weld, Press, STK490SR では応力度 - 歪度関係に降伏棚が現れたが，それ以外の鋼管では Round-house 型の応力度 - 歪度関係を呈した。一軸繰返し素材試験より得られた応力度 - 歪度関係を図 3.3 に示す。いずれも安定した紡錘形の履歴性状となった。角形鋼管の場合，Weld・Press と比較して Roll では繰返しに伴う耐力上昇が小さく移動硬化的な性状を示した。また円形鋼管の場合，STK400, STK490, STK490SR の履歴性状には大きな相違は見受けられない。

試験体の測定位置を図 3.4 に示す。測定箇所はパネル部分の対角方向の変形  $d_1, d_2$ ，および軸方向

表 3.1 パネル部分試験体一覧および実験結果一覧

No.	試験体名	鋼管種別	h (mm)	n	載荷方向	$\frac{D}{t}$	$\frac{h}{D}$	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$K_e$ (t/rad)	$K_s$ (t/rad)	$\frac{K_e}{K_s}$	$Q_{1/3}$ (ton)	$Q_{pe}$ (ton)	$Q_y$ (ton)	$Q_p$ (ton)	$Q_T$ (ton)	$Q_I$ (ton)				
1	BW100	Weld	200	0.0	0°	22	1.0	3.22	23200	21200	1.09	49.1	58.1	53.2	59.8	59.8	59.8				
2	BW106			0.6				3.09	22700	22300	1.02	46.8	55.9	43.2	59.5	45.8	52.0				
3	BW150		300	0.0				3.22	19800	19100	1.04	50.3	55.0	53.2	59.8	59.8	59.8				
4	BW153			0.3				3.22	19600	19100	1.03	50.3	52.6	50.7	59.8	54.3	56.5				
5	BW156			0.6				3.22	19800	19100	1.04	43.8	49.3	42.6	58.6	38.0	47.3				
6	BR100	Roll	200	0.0			45°	22	1.0	4.01	21300	20600	1.03	68.1	75.9	65.6	73.8	73.8	73.8		
7	BR106			0.6						4.01	20800	20600	1.01	60.2	68.2	52.5	72.4	57.8	63.3		
8	BR150		300	0.0						4.01	16900	18500	0.91	59.6	67.8	65.6	73.8	73.8	73.8		
9	BR153			0.3						4.01	18700	18500	1.01	54.7	65.8	62.6	73.8	67.6	69.7		
10	BR156			0.6						4.01	17500	18500	0.95	50.0	60.3	52.5	72.4	48.9	58.4		
11	BP100	Press	200	0.0	-	26			1.0	2.80	21000	21200	0.99	40.7	51.1	47.2	53.1	53.1	53.1		
12	BP106			0.6						2.80	21400	21200	1.01	41.9	50.3	37.8	52.0	41.5	45.5		
13	BP150		300	0.0						2.80	17600	19000	0.93	39.6	47.9	47.2	53.1	53.1	53.1		
14	BP156			0.6						2.80	19000	19000	1.00	37.6	47.3	37.8	52.0	35.2	42.0		
15	BW100d			Weld						200	0.0	-	26	1.0	3.22	22000	22300	0.99	64.1	72.7	56.4
16	BW106d	0.6	3.22				23300	22300	1.04		49.4				59.6	45.1	67.7		54.3		
17	BW150d	300	0.0				3.22	19400	20100	0.97	57.6				66.9	56.4	84.6		62.5		
18	BW156d		0.6				3.22	20200	20100	1.00	44.2				54.6	45.1	67.7		47.0		
19	BR100d		Roll				200	0.0	-	26	1.0				4.01	20100	21400	0.94	76.0	92.7	66.8
20	BR106d	0.6		4.01				20800						21400	0.97	60.2	71.3	53.4	80.1		67.0
21	BR150d	300		0.0	4.01	17800	19100	0.93						68.6	82.6	66.8	100.1		77.2		
22	BR156d			0.6	4.01	18600	19100	0.97						48.6	62.0	53.4	80.1		58.0		
23	BP150d			300	0.0	2.80	17100	19700						0.87	51.7	61.4	48.0	72.0		55.5	
24	BP156d	0.6	2.80		19100	19700	0.97	42.3			50.7			38.4	57.6		41.7				
25	C0100	STK400	200	0.0	-	26	0.9	3.42			19200	18700	1.03	56.6	62.0	51.4	65.3	64.6	61.0		
26	C0106			0.6				3.42			18900	18700	1.01	45.5	54.0	44.7	56.7	43.0	44.7		
27	C0150		300	0.0				3.42			16700	16500	1.01	53.8	59.0	49.6	62.9	57.4	56.9		
28	C0153			0.3				3.42			17200	16500	1.04	55.0	59.5	48.8	61.9	53.3	52.7		
29	C0156			0.6				3.42	17600	16500	1.07	45.0	48.5	41.4	52.6	35.5	40.0				
30	C9100	STK490	200	0.0			-	26	0.9	4.07	19300	18500	1.04	69.0	76.5	62.1	78.8	89.4	71.5		
31	C9106			0.6						4.07	18800	18700	1.01	55.5	61.5	51.7	65.6	51.7	53.3		
32	C9150		300	0.0						4.07	16300	16300	1.00	65.8	69.8	57.2	72.6	67.7	66.7		
33	C9153			0.3						4.07	16400	16300	1.01	61.0	67.5	55.1	70.0	63.1	62.1		
34	C9156			0.6						4.07	17200	16300	1.06	52.4	57.0	48.0	61.0	42.9	47.8		
35	CS100	STK490 SR	200	0.0	-	26			0.9	4.29	19100	18500	1.03	69.5	72.5	59.9	76.0	80.2	75.5		
36	CS106			0.6						4.29	19300	18500	1.04	57.0	59.6	49.4	62.8	52.4	54.5		
37	CS150		300	0.0						4.29	15800	16300	0.97	69.8	70.5	58.3	74.0	71.2	70.4		
38	CS153			0.3						4.29	16800	16300	1.03	67.0	69.3	56.4	71.6	65.9	65.1		
39	CS156			0.6						4.29	17000	16300	1.04	53.5	55.2	46.1	58.5	43.2	48.7		

試験体名称の記号

BW156d d : 45° 方向載荷  
 無 : 0° 方向載荷  
 軸力比 × 10  
 アスペクト比 × 10  
 W : Weld, R : Roll, P : Press  
 0 : STK400, 9 : STK490,  
 S : STR490SR  
 B : 角形断面  
 C : 円形断面

h : パネルせい (mm)  
 n : 軸力比  
 $\sigma_y$  : 降伏応力度 (t/cm<sup>2</sup>)  
 $K_e$  : 実験より得られた弾性剛性  
 $K_s$  : 計算より得られた弾性剛性  
 $Q_{1/3}$  : 剛性が初期剛性の 1/3 の時のせん断力  
 $Q_{pe}$  : =  $Q_{0.35\%}$  (0° 方向) : 0.35%offset耐力  
 =  $Q_{0.5\%}$  (45° 方向) : 0.5%offset耐力  
 $Q_y$  : パネルの降伏せん断耐力の計算値 (3.7 節で説明)  
 $Q_p$  : パネル内に一様な平面応力場を仮定して得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)  
 $Q_T$  : 鋼構造塑性設計指針より得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)  
 $Q_I$  : 伊藤の提案式より得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)

表 3.2 素材の機械的性質

鋼管種別	grade	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (t/cm <sup>2</sup> )	伸び (%)
Weld	SS400	3.22	4.65	31.4
Weld <sup>(注1)</sup>	SS400	3.09	4.70	27.2
Roll	STKR400	4.01	4.71	25.3
Press	STKR400	2.80	4.36	31.6
STK400	STK400	3.42	4.21	41.1
STK490	STK490	4.07	5.02	35.2
STK490SR	STK490 <sup>(注2)</sup>	4.29	5.09	32.5

(注1) Weld の試験体の中でBW106 試験体のみがこの素材を使用

(注2) 応力除去した素材

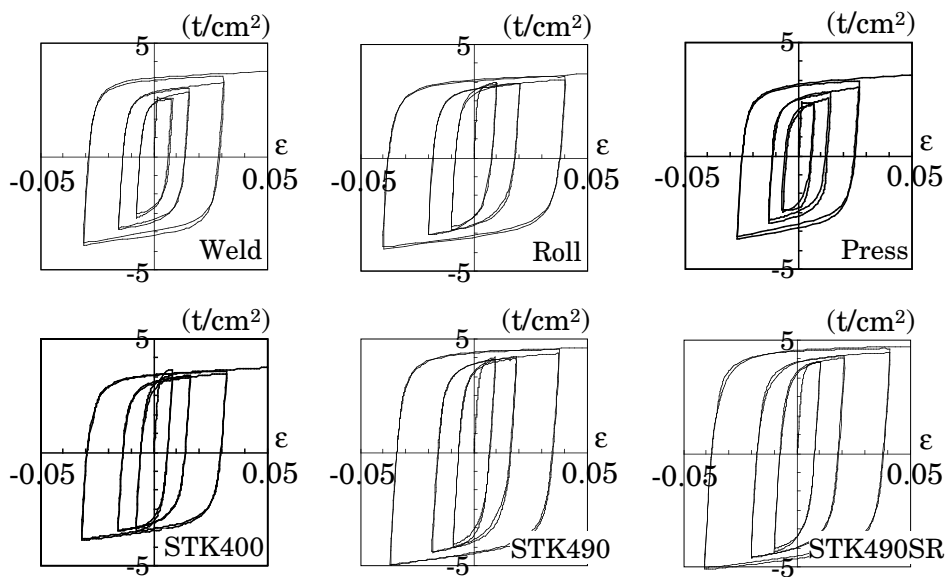


図 3.3 繰返し素材試験結果

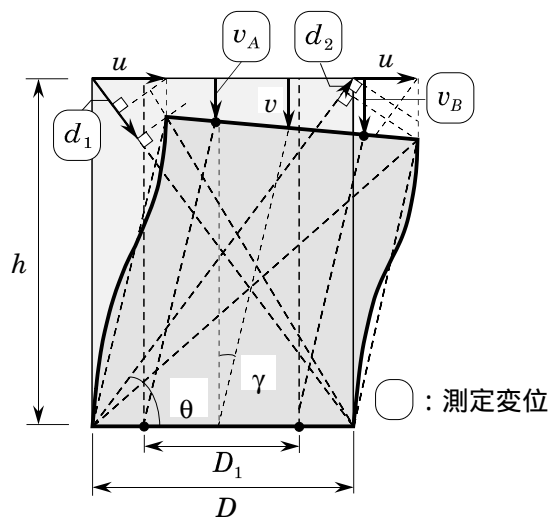


図 3.4 パネル変形測定位置

変形  $v_A, v_B$  である。試験体のパネル両側面で測定するため、測定点は計 8 点となる。パネルの軸方向変形  $v$  およびせん断変形角  $\gamma$  は次式で得られる。

$$v = \frac{v_A + v_B}{2} \quad (3.1)$$

$$\gamma = \frac{u}{h} = \frac{1}{2h \cos \theta} \left\{ d_1 + d_2 - \frac{D}{D_1} (v_A - v_B) \sin \theta \right\} \quad (3.2)$$

载荷は (3.2) 式のせん断変形角  $\gamma$  で制御される。制御変形角は、3.6 節で述べるパネル内に一様な平面応力場を仮定して得られたせん断耐力  $Q_p$  を予備载荷で得られた初期剛性  $K_e$  で除して求めた変形角  $\gamma_p$  の 2, 4, 6, 8, 10 倍である。それぞれ 2 サイクルずつ载荷し、その後は単調に载荷した。

### 3.2.2 実験結果および考察

実験結果一覧を表 3.1 に示す。表中で用いられている記号の定義は以下の通りであり、いずれも実験より得られたパネルのせん断力-せん断変形角関係の骨格曲線より算定される。ただし、骨格曲線とは実験より得られた履歴曲線から図 3.5 に示す方法で作られる曲線である。

- $K_e$  : パネルのせん断力 - せん断変形角関係における  $Q_{pe} / 3$  時の割線剛性
- $Q_{pe}$  :  $Q_{0.35\%}$  (角形鋼管  $0^\circ$  方向・円形鋼管) ,  $Q_{0.5\%}$  (角形鋼管  $45^\circ$  方向)
- $Q_{0.35\%}$  : パネルせん断力 - せん断変形角関係における 0.35 % offset 耐力 (角形鋼管  $0^\circ$  方向・円形鋼管)
- $Q_{0.5\%}$  : パネルせん断力 - せん断変形角関係における 0.5 % offset 耐力 (角形鋼管  $45^\circ$  方向)

ここでは、 $Q_{pe}$  を実験から得られる全塑性せん断耐力と定義する。 $Q_{pe}$  は曲げモーメントを受ける柱・梁の全塑性モーメントに対応する指標である。角形鋼管  $0^\circ$  方向・円形鋼管の  $Q_{pe}$  に 0.35% offset 耐力  $Q_{0.35\%}$  , 角形鋼管  $45^\circ$  方向の  $Q_{pe}$  に 0.5% offset 耐力  $Q_{0.5\%}$  を採用したのは以下の理由による。引張素材試験結果から鋼材の降伏応力度を決定するために 0.2% offset 耐力が良く用いられる。ここではパネルに純せん断応力状態を仮定し、1 軸引張応力状態の引張素材試験と同じ相当塑性歪 (0.2%) に達した時のせん断力をパネルの全塑性せん断耐力と設定する。純せん断応力状態で相当塑性歪が 0.2% になるのは、塑性せん断歪度が 0.35% ( $\cong 0.2 \sqrt{3}$ ) の時である。また角形鋼管  $45^\circ$  方向では载荷方向に対してパネル面が  $45^\circ$  傾いて配置されているので、 $\gamma = 0.35 \times \sqrt{2} \cong 0.5\%$  から 0.5% offset 耐力を全塑性せん断耐力と設定する。

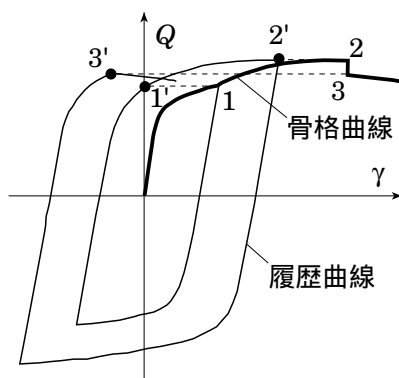


図 3.5 骨格曲線の作成方法

また，表 3.1 に計算結果の一覧を付記する．表中の  $K_s$  はせん断変形のみを考慮して得られたパネルの弾性剛性であり，パネルに作用するせん断力  $Q$  とせん断変形角  $\gamma$  の関係は次式で表される<sup>3-2),3-3)</sup>．

$$Q = K_s \cdot \gamma \quad (3.3)$$

$$K_s = G A_p \quad , \quad A_p = A / 2 \quad (3.4)$$

ただし， $A$  は角形鋼管・円形鋼管パネルの断面積であり，断面積の算定には公称径，実測板厚を用いる．上記の  $K_s$  は，角形鋼管  $0^\circ$  方向の場合にはせん断力をウェブで均等に負担する時のせん断変形角，角形鋼管  $45^\circ$  方向の場合には全断面積  $A$  でせん断力を均等に負担したときのせん断変形角，円形鋼管の場合には断面内に平面保持の仮定に基づくせん断応力場を仮定した時の最大せん断応力度から得られるせん断変形角から導くことができる<sup>3-3)</sup>．また，その他の  $Q_y, Q_p, Q_p, Q_T$  については 3.6, 3.7 章で述べる．

### 初期剛性

パネルは逆対称曲げモーメントとせん断力を受け，曲げによる変形角とせん断変形角を生じる．しかしながら，パネルの曲げによる変形角はせん断変形による変形角の 1 割未満であること，パネルの周辺枠組み（ダイアフラム・パネルフランジ・梁ウェブなど）による曲げ変形の拘束を考慮して，ここではパネルの弾性剛性をせん断変形のみを考慮して算定する  $K_s$  と実験結果より得られた弾性剛性  $K_e$  の比較を図 3.6 に示す．左図が角形鋼管，右図が円形鋼管である．角形鋼管の実験剛性  $K_e$  では計算剛性  $K_s$  に対して 1 割前後の差違がみられるものの，2 章で示したようにパネルの弾性変形が骨組の弾性変形に占める割合が 1 ~ 2 割であることを考慮すれば，鋼管種・軸力比・アスペクト比によらずパネルの弾性剛性を  $K_s$  とすれば，骨組の弾性剛性を推定できることがわかる．

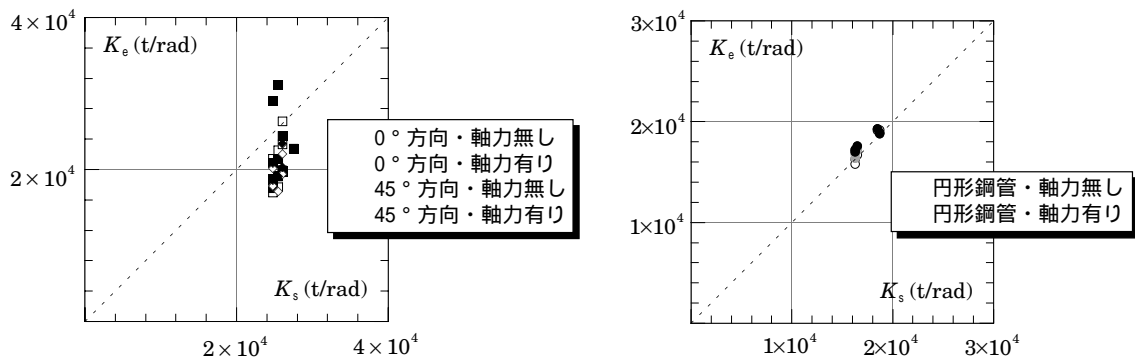


図 3.6 計算剛性  $K_s$  と実験剛性  $K_e$  の比較

### 鋼管種（製造方法・鋼種）による影響

図 3.7 にアスペクト比 1.5，軸力比 0 の試験体のせん断力  $Q$  - せん断変形角  $\gamma$  関係を示す．いずれの  $Q$  -  $\gamma$  関係も安定した紡錘形の履歴性状を示す．図中の円形鋼管試験体の耐力低下はパネル上下端フランジ側に生じた局部座屈が原因である．また，繰返し载荷による耐力上昇の特徴は，図 3.3 に示す鋼管種毎の繰返し素材試験結果の特徴とほぼ一致する．

### 軸力による影響

図 3.8 にせん断力  $Q$  - せん断変形角  $\gamma$  関係から作成した骨格曲線を示す．図はアスペクト比 1.5 の

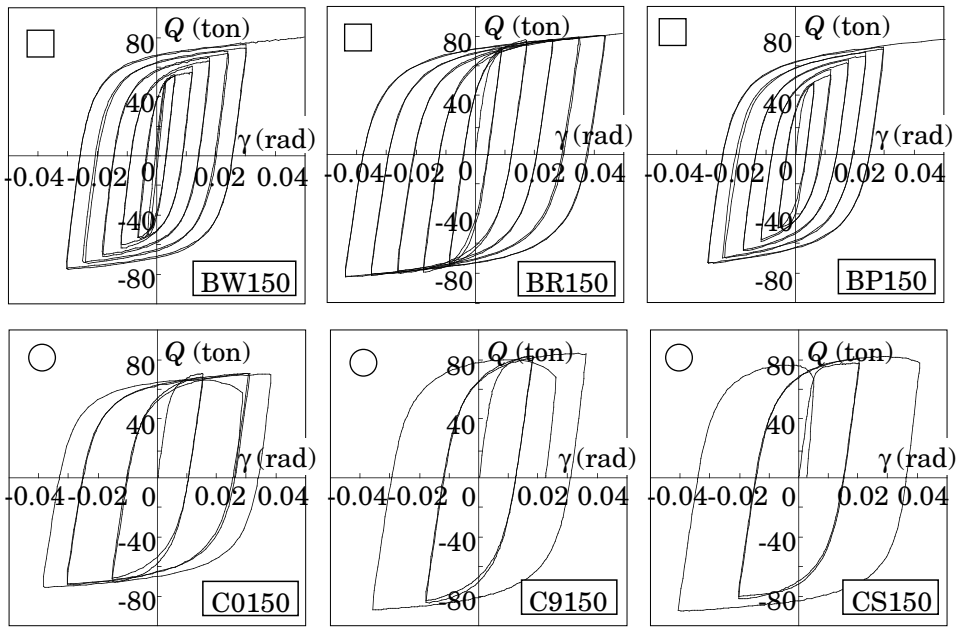


図 3.7 せん断力 - せん断変形角関係 (アスペクト比 1.5, 軸力比 0)

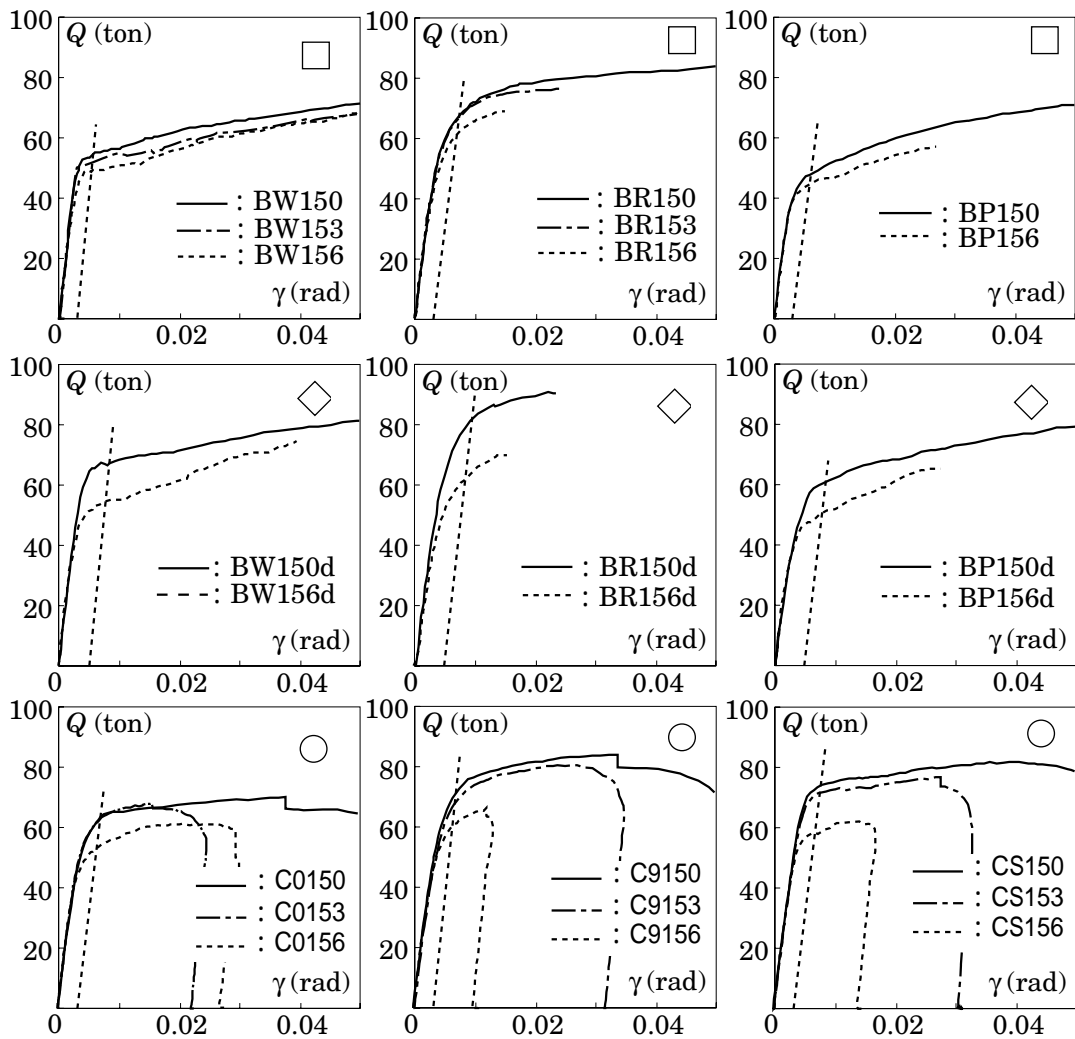


図 3.8 骨格曲線 (アスペクト比 1.5)

試験体を軸力比ごとにまとめたものである。実線が軸力比 0，一点鎖線が 0.3，破線が 0.6 である。軸力が大きくなるにつれ，パネルのせん断耐力は小さくなる。円形鋼管と角形鋼管 45° 方向と比較して，角形鋼管 0° 方向では軸力の増大によるせん断耐力の低下は角形鋼管 45°・円形鋼管と比較して小さい。図 3.9 に鋼管種・载荷方向・アスペクト比が同じである軸力比 0 の試験体のせん断耐力  $Q_{pe}$  で無次元化したせん断耐力  $Q_{pe}$  を示す。また図中の破線は，軸力によるせん断降伏応力度の低減を表す項  $\sqrt{1-n^2}$  の値を示す。軸力比 0 に対するせん断耐力の低減は角形鋼管 45° 方向・円形鋼管の試験体では  $\sqrt{1-n^2}$  と良く対応している。図 3.10 にフランジ中央に添付した歪ゲージより得られた軸方向歪度  $\epsilon_v$  とせん断変形角  $\gamma$  の関係の一例を示す。軸力の作用する試験体では，せん断繰返し载荷が進行するとともにフランジの軸方向歪が増大する。これは，軸力とせん断力が同時に作用するウェブがフランジより先に降伏し，軸方向剛性が低下するため，塑性化の進展に伴ってウェブからフランジに軸力が再配分されていることを表している。角形鋼管 0° 方向の場合，軸力を負担するフランジと主にせん断力を負担するウェブが明確に別れているため，角形鋼管 45° 方向・円形鋼管の試験体と比較して軸力によるせん断耐力の低下が小さくなっているものと考えられる。図 3.8 に示すように軸力の作用する角形鋼管 45° 方向・円形鋼管試験体は軸力なしの試験体の場合より早期に剛性が低下するもの，徐々にせん断耐力が上昇するようなせん断力 - せん断変形角関係を示すのもこのためである。

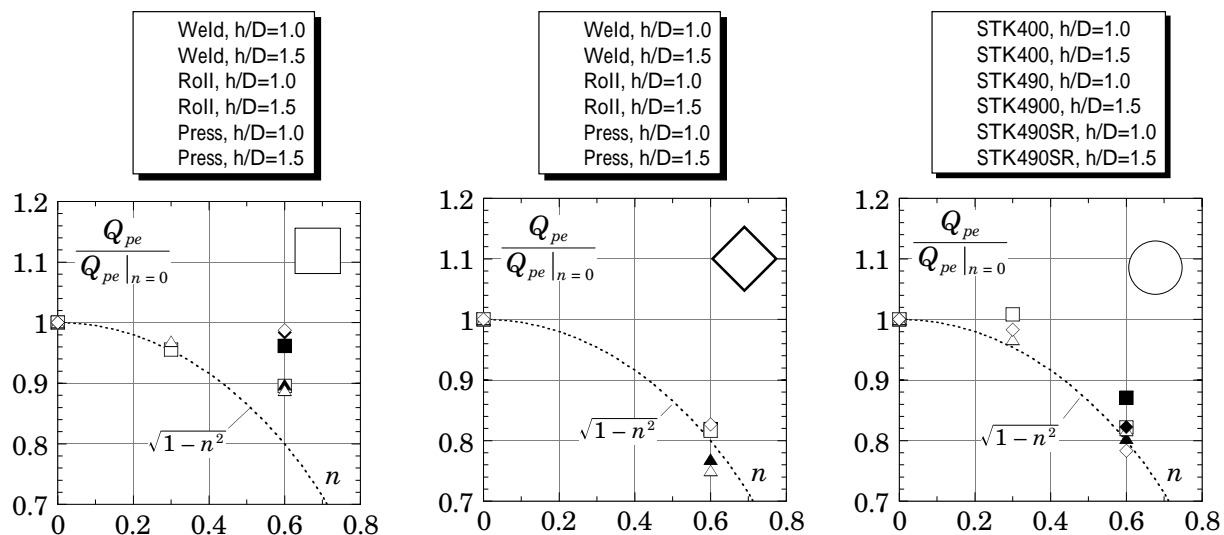


図 3.9 せん断耐力に及ぼす軸力の影響

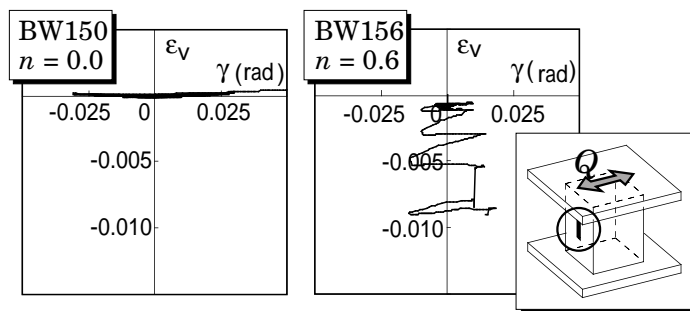


図 3.10 フランジ中心位置での軸方向歪度



### アスペクト比の影響

図 3.11 に鋼管種・載荷方向・軸力比が等しいアスペクト比 1.0 の試験体のせん断耐力  $Q_{pe}$  で無次元化した、アスペクト比 1.5 の試験体のせん断耐力  $Q_{pe}$  を示す。アスペクト比 1.0 の試験体よりも 1.5 の試験体のせん断耐力が 1 割程度小さくなる。これはパネルせいの増大に伴い、パネル端部に作用するモーメントが増大するためである。定量的な考察は 3.6 節で行う。

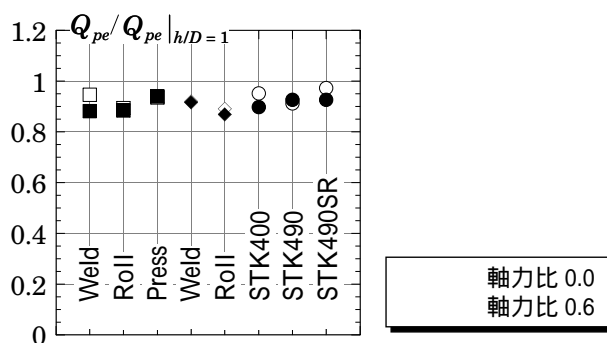


図 3.11 アスペクト比の影響

### 載荷方向の影響

図 3.12 に鋼管種・アスペクト比・軸力比が同じである角形  $0^\circ$  方向試験体のせん断耐力  $Q_{pe}$  で無次元化した角形  $45^\circ$  方向試験体のせん断耐力  $Q_{pe}$  を示す。軸力比が 0 の場合、 $0^\circ$  方向試験体の場合と比較して  $45^\circ$  方向試験体のせん断耐力は 2 ~ 3 割程度上昇する。一方、軸力比が 0.6 の場合は 1 割弱しか上昇しない。これは、軸力の影響の項で述べたように、 $0^\circ$  方向試験体では軸力によるせん断耐力の低下が数%に留まるのに対し、 $45^\circ$  方向試験体では 2 割程度低下するためである。

### パネルの軸縮み

図 3.13 に BW150 と BW156 のせん断力 - 軸方向変形関係を示す。横軸の軸方向変形量は縮む方向を正とする。図より軸力の作用する試験体では、繰返し載荷する度に軸方向変形が増加することがわかる。以上の傾向は鋼管種・載荷方向に関係なく共通してみられた。

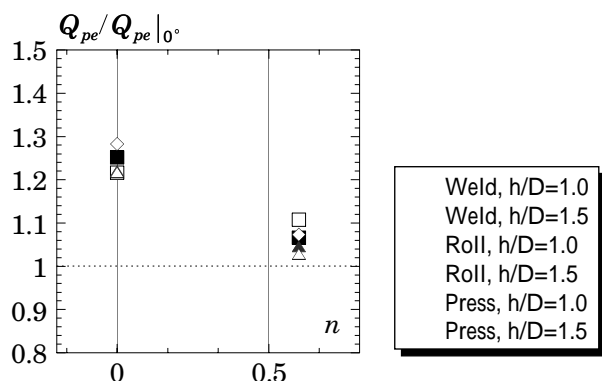


図 3.12 載荷方向の影響

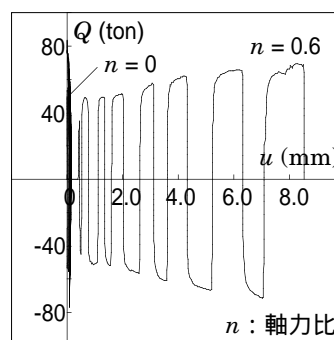


図 3.13 せん断力 - 軸方向変形関係 (BW15 series)

### 3.3 パネル部分試験比較のための十字形骨組実験

#### 3.3.1 試験体および実験方法

試験体形状を図3.14に、試験体一覧を表3.3に示す。試験体は、角形鋼管  $-200 \times 200 \times 9$ ・円形鋼管  $\phi 216.3 \times 8.2$  の柱と溶接組立 H 形断面梁で構成される通しダイアフラム形式の十字形骨組である。実験パラメータは鋼管柱の鋼管種(製造方法・鋼種)と軸力比であり、試験体は計 10 体である。試験体の形状は以下の三点を満足するように決定する。

- (1) パネルのアスペクト比を 3.2 節の試験体のものと同程度にする。
- (2) 柱と梁の全塑性モーメントが概ね一致する。
- (3) パネルの断面は柱の断面と同一である。

CBW 試験体の溶接 4 面組立鋼管柱は裏当金を使わずに裏波溶接を用いて製作する。また、すべての試験体の柱と通しダイアフラムの溶接にも裏波溶接を用いる。溶接組立鋼管の溶接ビードおよび冷間成形鋼管の溶接シームはフランジ側に配置した。梁と柱の接合にはノンスカラップ工法を用いる。柱はパネル部分試験体と同じ鋼管を用いている(表3.2参照)。表3.4に梁フランジ・梁ウェブの機械的性質を示す。

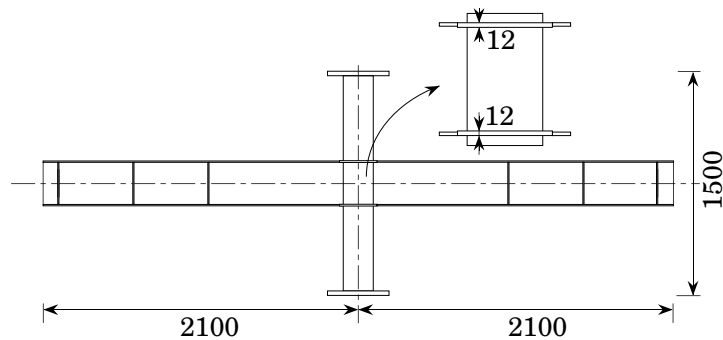


図 3.14 十字形骨組試験体

表 3.3 十字形骨組試験体一覧

試験体名	鋼管種別	$h/D$	$n$	柱	梁	
CBW150	Weld	1.5	0.0	$-200 \times 200 \times 9.0$	BH-300 $\times$ 150 $\times$ 6 $\times$ 9	
CBR150	Roll					
CBP150	Press					
CBW106	Weld	1.0	0.6		$\phi 216.3 \times 8.2$	BH-200 $\times$ 100 $\times$ 6 $\times$ 9
CBR106	Roll					
CBP106	Press					
CC0150	STK400	1.5	0.0	$\phi 216.3 \times 8.2$		BH-318 $\times$ 130 $\times$ 6 $\times$ 9
CC9150	STK490					
CC0106	STK400	1.0	0.6			$\phi 216.3 \times 8.2$
CC9106	STK490					

表 3.4 十字形骨組試験体梁素材の機械的性質

試験体	部材	部位	grade	$\sigma_y$ ( $t/cm^2$ )	$\sigma_b$ ( $t/cm^2$ )	伸び %
角形断面柱 十字形骨組	梁	フランジ	SS400	3.09	4.60	27
		ウェブ	SS400	3.06	4.49	29
円形断面柱 十字形骨組	梁	フランジ	SS400	3.05	4.58	31
		ウェブ	SS400	3.31	4.44	26

図 3.15 に荷重架構を、図 3.16 に十字形骨組の荷重方法を示す。柱の上下端のエンドプレートを高力ボルトでピン治具に接合する。上端はピン支持されていて回転自由、下端はローラー支持で鉛直方向に移動可能となっている。柱に所定の一定軸力を導入した後、両側の梁の回転角が常に等しくなるように変形制御しつつ、梁両端のオイルジャッキによって繰返しせん断力を作用させる。

梁・柱の回転角および層間変形角  $R$  を測定する。パネル部分の測定箇所は図 3.4 に示すパネル部分試験体と同様に対角方向の変形と軸方向変形であり、この測定値から (3.1), (3.2) 式によりパネルのせん断変形角  $\gamma$  および軸方向変形  $v$  を得る。また、パネルに作用するせん断力  $Q$  は次式で得られる。

$$Q = \left\{ \frac{L-D}{h} - \frac{L}{H} \right\} \frac{P_L + P_R}{2} \quad (3.5)$$

ただし、 $P_L, P_R$  は左右の梁に作用する荷重である。パネルに  $Q_p$  作用時の骨組の層間変形角  $R_p$  を基準として、各ステップの変位振幅を設定する。 $2R_p, 4R_p, 6R_p$  の振幅をそれぞれ 2 回ずつ正負に繰返し、その後、一方向に荷重して実験を終了する。

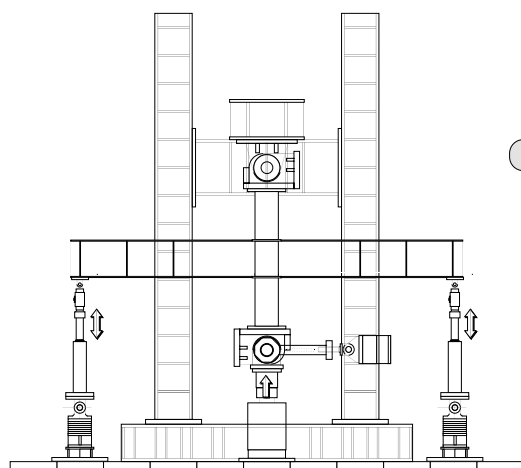


図 3.15 十字形骨組荷重架構

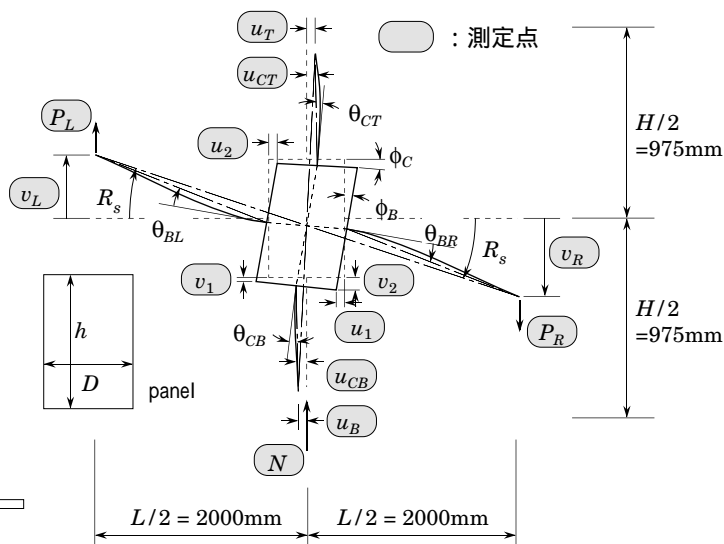


図 3.16 十字形骨組荷重方法および測定位置

### 3.3.2 実験結果および考察

図 3.17 に十字形骨組試験体の荷重  $P$  - 層間変形角  $R$  関係を示す．図の縦軸  $P$  は梁両端に加えた荷重の平均値である．また，パネル・柱・梁の変形による層間変形角成分  $R_{pn}$ ,  $R_{co}$ ,  $R_{bm}$  と荷重  $P$  との関係も同図中に示す．ここでは，ロール成形角形鋼管と STK400 の円形鋼管の試験体の結果を示したが，その他の角形鋼管柱・円形鋼管柱試験体の実験からも以下に示す結果と同様な傾向が得られた．軸力比 0.0 の試験体 (CBR150, CC0150 試験体) では変形のほとんどがパネルに集中している．つまり，3.3.1 項で述べた条件を満たすように設計した柱梁接合部は，パネル耐力が柱・梁の耐力と比較して小さくなる弱パネル型となる．一方，軸力比 0.6 の試験体ではパネルとともに梁にも大きな塑性変形が生じている．円形鋼管・軸力比 0.6 の試験体 (図 3.17 では CC0106 試験体) を除き，いずれも安定した紡錘形の履歴性状を示した．円形鋼管・軸力比 0.6 の試験体では耐力が低下しているが，これは柱端部の局部座屈によるものであり，パネルにはさらに大きな変形性能を期待できる．

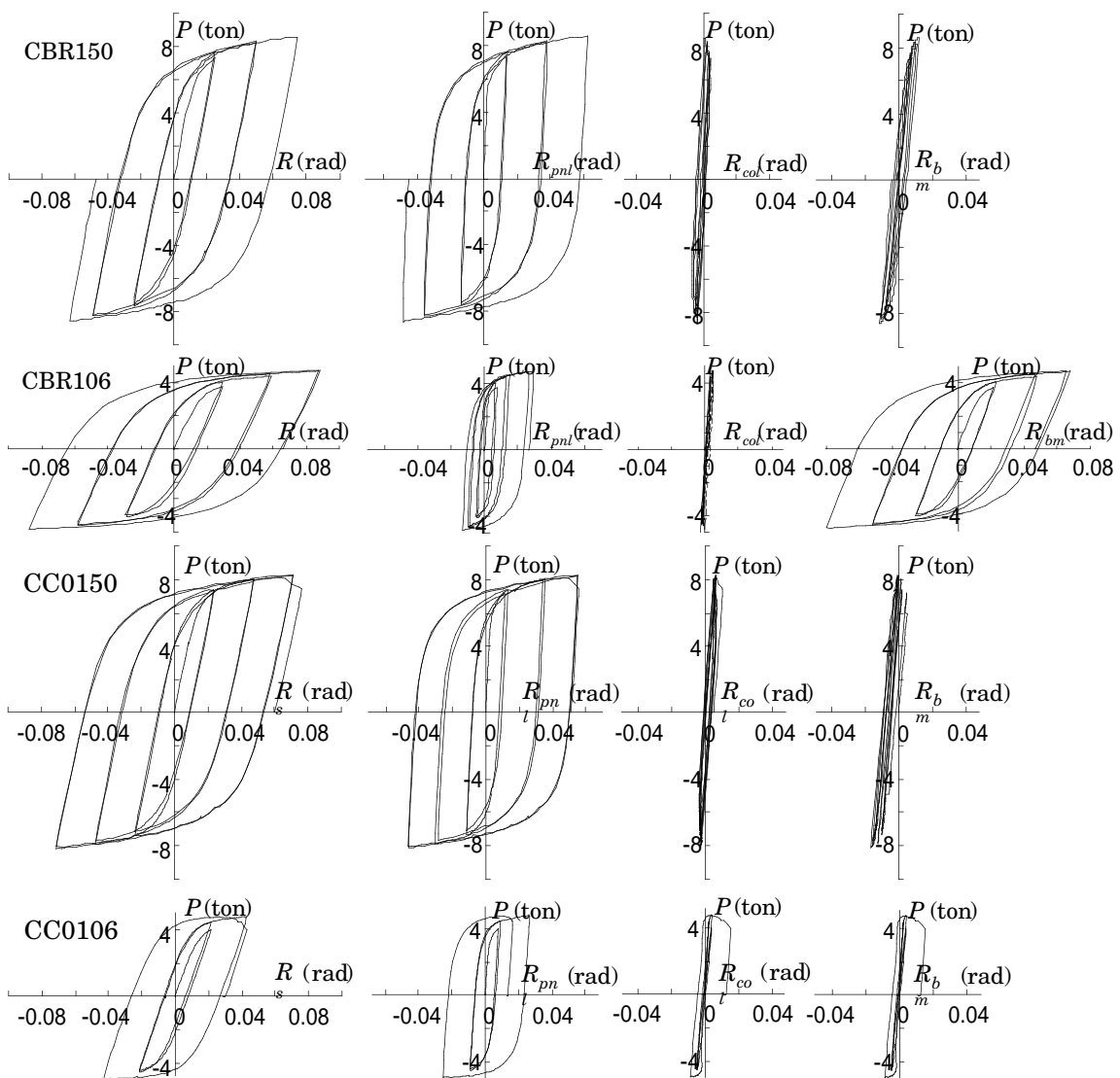


図 3.17 十字形架構の荷重 - 層間変形角関係 (パネル・柱・梁の各層間変形角成分)

表 3.5 に実験結果一覧を示す。表中の記号は表 3.1 と同じものである。図 3.18 にパネル部分せん断荷重実験と十字形骨組実験から得られたパネルのせん断力 - せん断変形角関係を示す。これらの曲線は繰返しせん断力 - 変形角関係から得られる骨格曲線である。角形鋼管柱試験体の場合、変形角が 0.02rad 以上の範囲ではパネル部分試験体の耐力が若干下回るものの、それ以下の範囲では両曲線はほぼ一致している。パネル部分試験体の耐力が下回る一因には、梁によるパネル周辺枠組み効果が十字形骨組と比較して小さくなることが考えられる。一方、角形鋼管試験体と比較して円形鋼管柱試験体では、パネル部分試験体の耐力は十字形骨組試験体より早期に小さくなる。これは、パネル部分試験体ではパネル上下端部フランジ側に局部座屈を生じて耐力低下したのに対し、十字形骨組試験体では梁ウェブの拘束により局部座屈を生じなかったことに起因すると思われる。しかしながら、変形角が 0.01rad 以下の範囲では両者は良く対応している。また両者の  $Q_{pe}$  はほぼ一致していることがわかる。したがって本実験のパラメータの範囲では、角形鋼管 0° 方向・円形鋼管パネル部分試験体より得られた  $Q_{pe}$  は十字形骨組試験体のそれとほぼ同等であるといえる。角形鋼管 45° 方向の十字形骨組実験<sup>3-14)</sup>は伊藤らによって行われており、当方で行った実験と比較する形で次節で紹介する。

表 3.5 実験結果一覧

試験体名	$K_e$ (t/rad)	$K_s$ (t/rad)	$\frac{K_e}{K_s}$	$Q_{1/3}$ (ton)	$Q_{pe}$ (ton)	$Q_y$ (ton)	$Q_p$ (ton)	$Q_T$ (ton)	$Q_I$ (ton)
CWB150	26312	26073	1.01	43.4	53.5	53.2	59.8	59.8	59.8
CRB150	21086	24774	0.85	55.4	68.4	65.6	73.8	73.8	73.8
CPB150	22539	25520	0.88	41.3	49.3	47.2	53.1	53.1	53.1
CWB106	24433	26073	0.94	39.6	49.6	42.6	58.7	47.6	52.3
CRB106	29049	24774	1.17	52.8	63.6	52.5	72.4	60.6	64.5
CPB106	31143	25520	1.22	37.9	43.2	37.8	52.1	43.5	46.4
CC0150	19237	22567	0.85	51.1	64.1	51.9	65.0	57.4	56.9
CC9150	23637	22567	1.05	59.5	74.6	61.1	76.5	67.7	66.7
CC0106	21611	22567	0.96	47.6	58.6	41.9	52.5	43.0	44.7
CC9106	28088	22567	1.24	53.1	66.9	49.9	62.6	51.7	53.3

$K_e$  : 実験より得られた弾性剛性

$K_s$  : 計算より得られた弾性剛性

$Q_{1/3}$  : 剛性が初期剛性の 1/3 の時のせん断力

$Q_{pe}$  :  $= Q_{0.35\%}$  (0° 方向) : 0.35%offset耐力

$= Q_{0.5\%}$  (45° 方向) : 0.5%offset耐力

$Q_y$  : パネルの降伏せん断耐力の計算値 (3.7 節で説明)

$Q_p$  : パネル内に一様な平面応力場を仮定して得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)

$Q_T$  : 鋼構造塑性設計指針より得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)

$Q_I$  : 伊藤の提案式より得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)

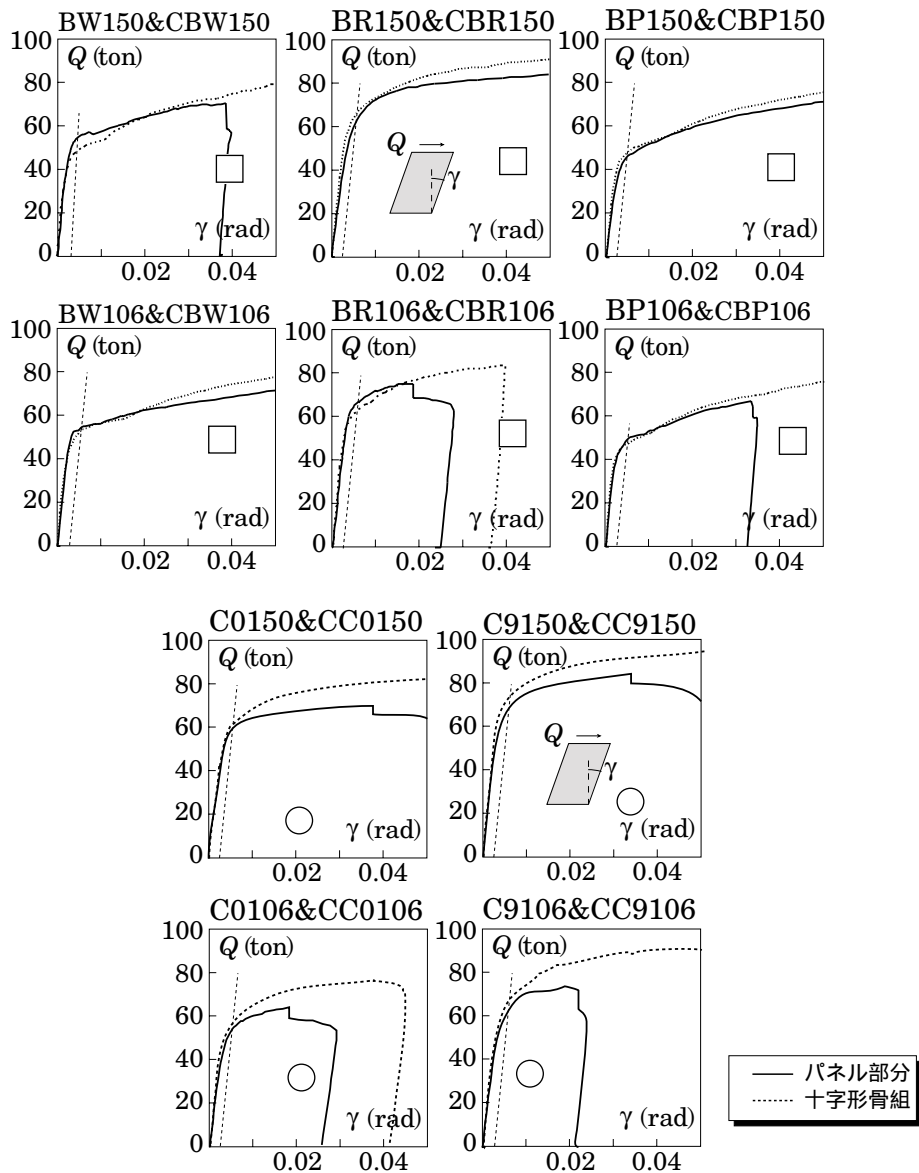


図 3.18 パネル部分試験体と十字形骨組パネル部分の骨格曲線の比較

### 3.4 幅厚比と載荷方向を主パラメータとした十字形骨組実験

#### 3.4.1 試験体と実験方法

本節ではパネルの幅厚比を主パラメータとした十字形骨組について述べる。また、伊藤らが行った同じ鋼材・パラメータで行われた角形鋼管 45° 方向十字形骨組実験<sup>3-14)</sup>についてもふれ、十字形骨組での角形鋼管パネルの載荷方向による影響についても言及する。

表 3.6 に試験体一覧を示す。No.1 ~ 6 までが著者らが実験を行った試験体であり、No.7 ~ 15 が伊藤らが行った試験体<sup>3-14)</sup>である。No.1 ~ 6 までの角形鋼管 0° 方向の載荷では前節の十字形骨組試験体と同様の載荷・測定方法を用いている。No.7 ~ 15 の角形鋼管 45° 方向載荷試験体は、柱に 4 本の梁を取り付け、隣り合う 2 本ずつの梁に同方向の載荷を行い、パネルに 45° 方向のせん断力を載荷する(図 3.19 参照)。なお、制御変位はパネルのせん断変形角  $\gamma$  であり、4 面のパネル各面に設置された変位計より得られるせん断変形角を  $\gamma_1 \sim \gamma_4$  とすると次式で得られる。

$$\gamma = \frac{\sqrt{2}}{4} (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4) \quad (3.6)$$

表 3.6 試験体一覧

No.	試験体名	$\frac{D}{t}$	$\frac{h}{D}$	$n$	柱	梁	パネル	柱・パネルの材料	備考
1	B4216-0R	42	1.6	0.00	-250 × 250 × 9	BH-400 × 200 × 6 × 12	-250 × 250 × 6	BCR295	構面方向
2	B4216-5R	42	1.6	0.50			-250 × 250 × 12		
3	B2816-0R	28	1.6	0.00	-250 × 250 × 12		-250 × 250 × 9		
4	B2816-5R	28	1.6	0.50	-250 × 250 × 16		-250 × 250 × 12		
5	B2116-0R	21	1.6	0.00					
6	B2116-5R	21	1.6	0.50					
7	D4216-0R	42	1.6	0.00	-250 × 250 × 9	BH-400 × 200 × 6 × 12	-250 × 250 × 6	BCR295	45° 方向
8	D4216-5R	42	1.6	0.47	-250 × 250 × 12	BH-400 × 200 × 6 × 12	-250 × 250 × 9		
9	D2816-0R	28	1.6	0.00	-250 × 250 × 12	BH-400 × 200 × 6 × 12	-250 × 250 × 9		
10	D2816-5R	28	1.6	0.51	-250 × 250 × 16	BH-300 × 200 × 6 × 12	-250 × 250 × 12		
11	D2112-0R	21	1.2	0.00	-250 × 250 × 16	BH-400 × 200 × 6 × 12	-250 × 250 × 12		
12	D2112-5R	21	1.2	0.46					
13	D2116-0R	21	1.6	0.00					
14	D2116-3R	21	1.6	0.22	-250 × 250 × 16	BH-400 × 200 × 6 × 12	-250 × 250 × 12		
15	D2116-5R	21	1.6	0.46					

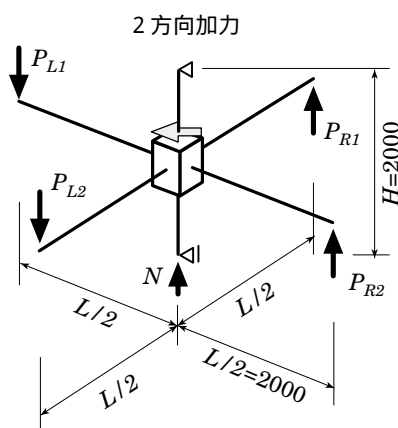


図 3.19 試験体模式図と荷重方法

荷重プログラムはパネルのせん断耐力  $Q_p$  時の弾性変形角に対し、4, 8, 12 倍のループをそれぞれ 2 回ずつ、あとは荷重装置の許す限り一定方向に荷重する。

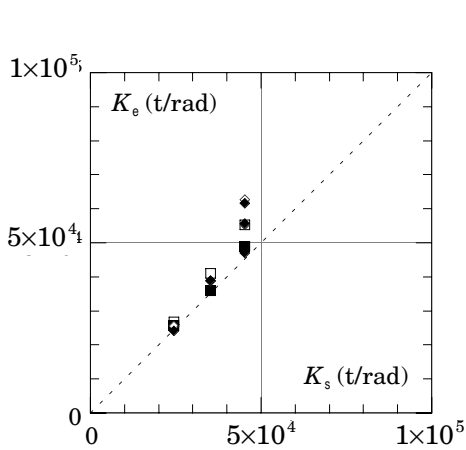
### 3.4.2 実験結果

実験結果を表 3.7 に示す。表中の記号は、表 3.1 で用いたものと同じである。図 3.20 には実験から得られた剛性  $K_e$  と計算から得られた剛性  $K_s$  を図示している。角形鋼管 0° 方向試験体では実験と計算による弾性剛性は良く一致している。一方、角形鋼管 45° 方向試験体の一部では、計算値は実験値を 3 割以上も過小評価している。実験値が大きくなる理由としてパネルに接合した梁の影響が考えられる。0° 方向荷重の場合、パネルのフランジ部分にしか梁が接合されておらず、パネルのせん断変形に伴い梁断面が変形することはないが、45° 方向ではパネルの変形に伴い、梁の上下フランジが横にずれるような変形が生じる。これによるパネルの弾性剛性への影響を定量的に把握するには至っていないが、この影響により計算値は実験値を過小評価する。

図 3.21 には角形鋼管 0° 方向試験体から得られたパネルのせん断力 - せん断変形角関係を示す。ここでは軸力比 0 のものを示す。幅厚比 42 の試験体を除いて安定した紡錘形の履歴性状が得られる。幅

表 3.7 実験結果一覧

No.	試験体名	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$K_e$ (t/rad)	$K_s$ (t/rad)	$\frac{\bar{K}_e}{\bar{K}_s}$	$Q_{1/3}$ (ton)	$Q_{pe}$ (ton)	$Q_y$ (ton)	$Q_p$ (ton)	$Q_T$ (ton)	$Q_I$ (ton)
1	B4216-0R	4.27	26836	24504	1.10	56.0	70.2	67.7	76.2	76.2	76.2
2	B4216-5R		25706	24504	1.05	54.0	63.2	67.7	76.2	56.9	64.9
3	B2816-0R	3.99	40981	35183	1.16	77.8	96.6	91.9	103.3	103.3	103.3
4	B2816-5R		35845	35183	1.02	81.2	95.5	91.9	103.3	77.3	87.8
5	B2116-0R	3.94	55205	45219	1.22	95.0	122.5	118.0	132.7	132.7	132.7
6	B2116-5R		49049	45219	1.08	102.5	121.5	118.0	132.7	99.4	112.4
7	D4216-0R	4.27	26377	24504	1.08	72.1	91.3	69.8	104.7	-	79.2
8	D4216-5R		24452	24504	1.00	66.6	83.3	61.4	92.1	-	67.9
9	D2816-0R	3.99	39303	35183	1.12	108.7	129.9	93.2	139.8	-	106.9
10	D2816-5R		39616	35183	1.13	92.4	120.5	80.4	120.6	-	89.4
11	D2112-0R	3.94	63539	45219	1.41	134.5	175.1	117.8	176.6	-	149.9
12	D2112-5R		62747	45219	1.39	120.8	162.2	104.8	157.1	-	130.5
13	D2116-0R		54421	45219	1.20	129.9	162.2	117.8	176.6	-	136.7
14	D2116-3R		49113	45219	1.09	130.5	162.3	114.8	172.1	-	132.7
15	D2116-5R		56540	45219	1.25	118.6	152.7	104.8	157.2	-	119.0



- $\sigma_y$  : 降伏応力度 (t/cm<sup>2</sup>)
- $K_e$  : 実験より得られた弾性剛性
- $K_s$  : 計算より得られた弾性剛性
- $Q_{1/3}$  : 剛性が初期剛性の 1/3 の時のせん断力
- $Q_{pe}$  :  $= Q_{0.35\%}$  (0° 方向)  
 $= Q_{0.5\%}$  (45° 方向)
- $Q_y$  : パネルの降伏せん断耐力の計算値 (3.7 節で説明)
- $Q_p$  : パネル内に一様な平面応力場を仮定して得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)
- $Q_T$  : 鋼構造塑性設計指針より得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)
- $Q_I$  : 伊藤の提案式より得られた全塑性せん断耐力 (3.6 節で説明)

図 3.20 弾性剛性の比較

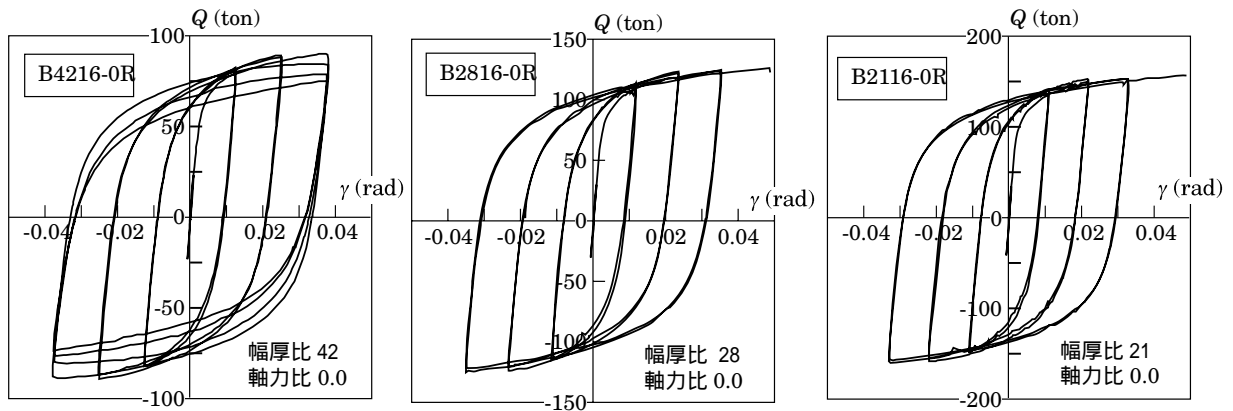


図 3.21 パネルせん断力 - せん断変形角関係 (角形鋼管 0° 方向・軸力比 0)



厚比 42 の試験体では図 3.22 の写真に示すようにパネルに面外変形が生じ、徐々に耐力が低下する履歴となった。軸力比 0.5 の試験体も同様な傾向が見られた。一方、角形鋼管 45° 方向試験体では、4 本の梁がパネルに接合されているため、図 3.22 のようなパネル面の面外変形は生じず、安定した履歴が得られた<sup>3-14)</sup>。



図 3.22 最終状態 (B4216-0R)

(1) 荷重方向の影響

図 3.23 に荷重方向をパラメータとした骨格曲線を示す。縦軸は  $A_p \tau_y$  で無次元化されたパネルせん断力  $Q$  を、横軸は降伏せん断変形角  $\gamma_y$  で無次元化されたせん断変形角を示す。ただし、 $A_p$  は (3.4) 式で示すパネル断面積の 1/2 であり、 $\tau_y$  は降伏せん断応力度である。図 3.24 には荷重方向以外の実験パラメータが同じである角形鋼管 0° 方向試験体のせん断耐力  $Q_{pe}|_{0^\circ}$  で無次元化した角形鋼管 45° 方向試験体のせん断耐力  $Q_{pe}$  を示す。角形鋼管 0° 方向試験体に対する角形鋼管 45° 方向試験体のパネルせん断耐力  $Q_{pe}$  は軸力比が 0 の場合は 130 ~ 134% 程度になる。せん断耐力  $Q_{pe}$  以降の塑性域における角形鋼管 0° 方向試験体と角形鋼管 45° 方向試験体のせん断力の比も、パネルの面外変形による耐力低下以前であれば、大きく変化することはない。3.2 節で述べたパネル部

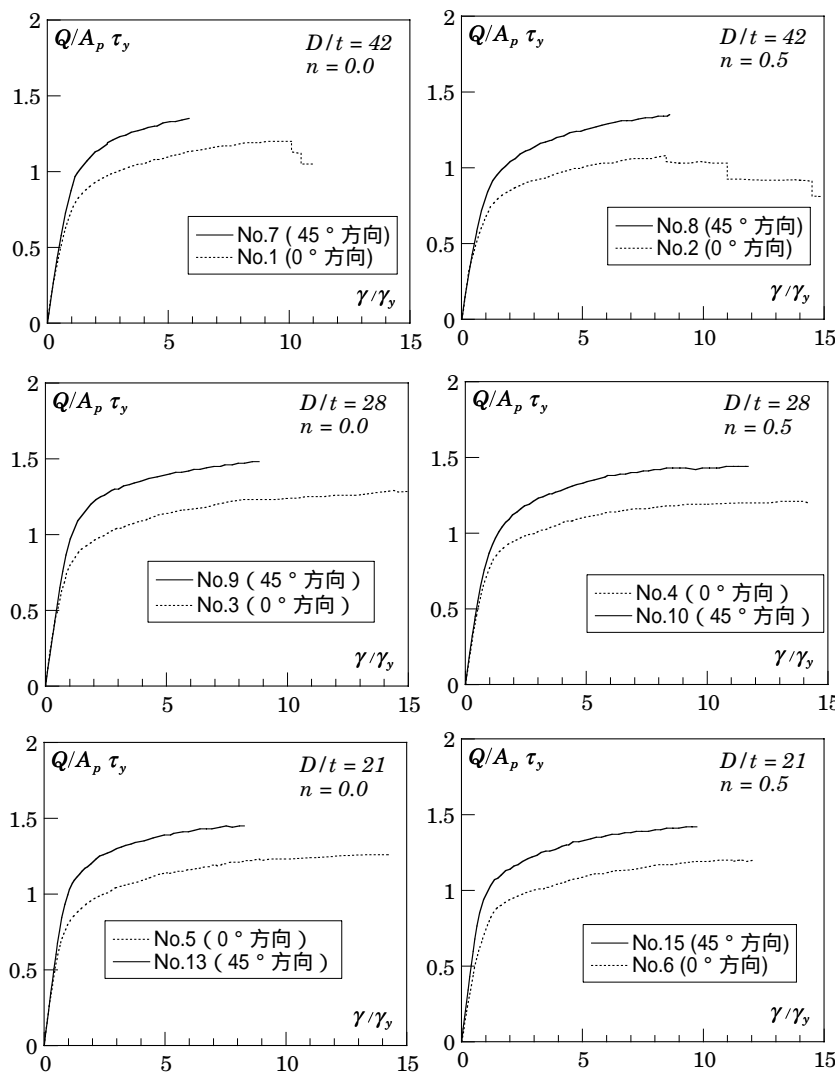


図 3.23 荷重方向の影響 (骨格曲線)

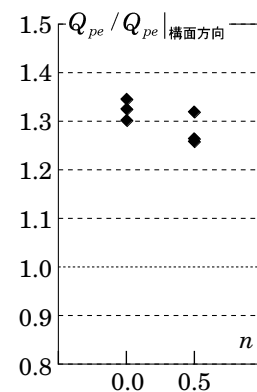


図 3.24 荷重方向の影響

分試験体による実験結果と比較すると十字形骨組試験体では、角形鋼管0°方向試験体に対する角形鋼管45°方向試験体のパネルせん断耐力の比は10～15%程度大きくなっている。これは、パネルに接合された梁の影響であると考えられる。文献3-17)によれば、定量的な把握には至っていないものの梁ウェブがパネルせん断力の一部を負担していることがFEM解析により明らかになっている。

### (2) 幅厚比の影響

図3.25, 3.26にそれぞれ、軸力比ごとにまとめた角形鋼管0°方向・45°方向試験体の骨格曲線を示す。角形鋼管0°方向試験体では、 $D/t = 21, 28$ の骨格曲線はほぼ一致するものの、 $D/t = 42$ の骨格曲線は軸力比0の場合で数%、軸力比0.5の場合で約10%その他の幅厚比の試験体と比較してせん断耐力が小さくなる。45°方向載荷の試験体においても0°方向載荷の場合と同様にせん断耐力 $Q_{pe}$ レベルでは $D/t = 21$ と $D/t = 28$ の間ではほとんど差は見られないが、 $D/t = 42$ の場合は若干せん断耐力がその他の幅厚比のものと比較して小さくなる。

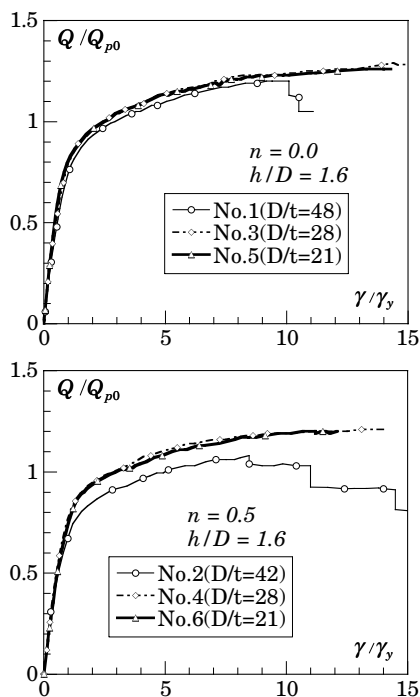


図 3.25 幅厚比の影響 (0°方向)

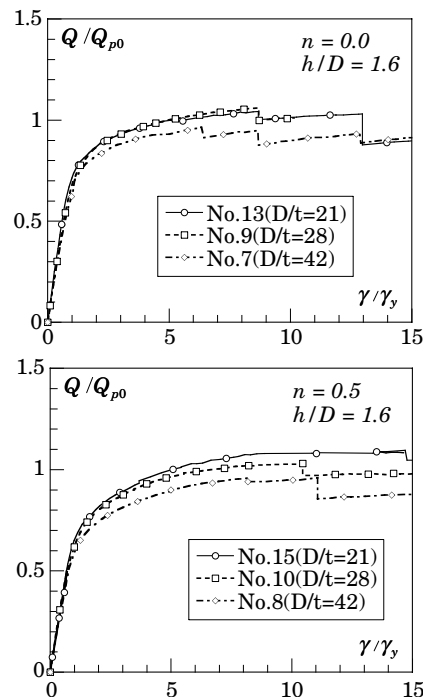


図 3.26 幅厚比の影響 (45°方向)

### (3) 軸力比の影響

図3.27には軸力比以外の実験パラメータが同じである試験体のせん断耐力 $Q_{pe}$ を軸力比0の試験体のせん断耐力 $Q_{pe}|_{n=0}$ で無次元化したもの(軸力比によるせん断耐力低下率)を示す。図中の点線は $Q_{pn}/Q_{pn}|_{n=0} = \sqrt{1-n^2}$ を表す。せん断耐力 $Q_{pe}$ の軸力によるせん断耐力低下率は、軸力比0.5・0°方向載荷の場合、0.90～0.99となる。ただし、パネルに面外変形を生じた幅厚比42のNo.15試験体を除けば、角形鋼管0°方向試験体の耐力低減率は0.99となり、本実験での軸力の範囲では、軸力による耐力低下をほぼ無視できることがわかる。一方、角形鋼管45°方向試験体では、軸力が大きくなるにしたがい耐力が低下し $\sqrt{1-n^2}$ の1割増し程度の値となる。3.2節のパネル部分試験体と比較すると軸力による耐力低下は若干小さくなる。これもパネルに接合されている梁の影響であり、パネルに作用する軸力の一部が梁ウェブを通り伝達されているものと考えられる。

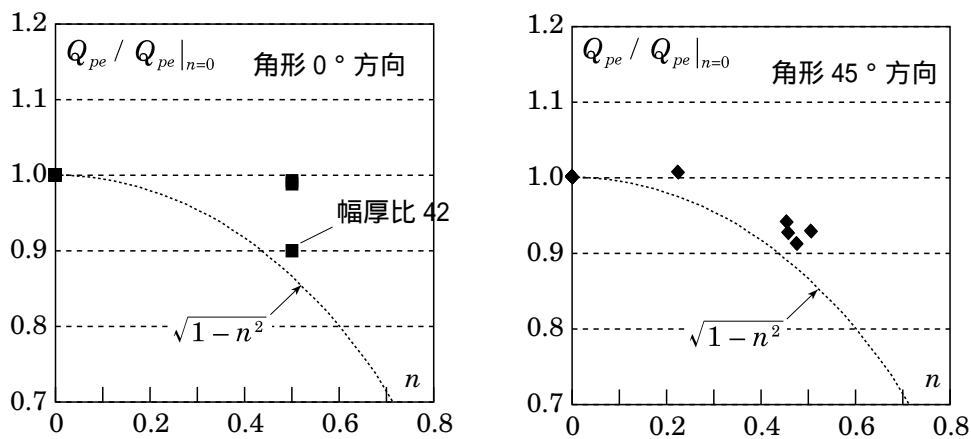


図 3.27 軸力による影響

### 3.5 パネルの弾性剛性

図 3.28 に角形鋼管 0°・45° 方向と円形鋼管の計算剛性  $K_s$  (3.4 式参照) と実験からえられた弾性剛性  $K_e$  の関係をまとめて示す。既に 3.2.2, 3.4.2 項で述べたように、実験剛性  $K_e$  は計算剛性  $K_s$  に対して最大 1 割前後の差違がみられるものの、パネルの断面形(角形 0°・45°・円形)・鋼管種・軸力比・アスペクト比によらず計算剛性  $K_s$  (3.4 式参照) でパネルの実験剛性を概ね評価できることがわかる。2 章で示したようにパネルの弾性変形が骨組の弾性変形に占める割合が 1 ~ 2 割であることを考慮すれば、計算剛性  $K_s$  によるパネルの弾性剛性の評価に含まれる誤差が、骨組の弾性剛性に与える影響は数%程度になることを付記しておく。

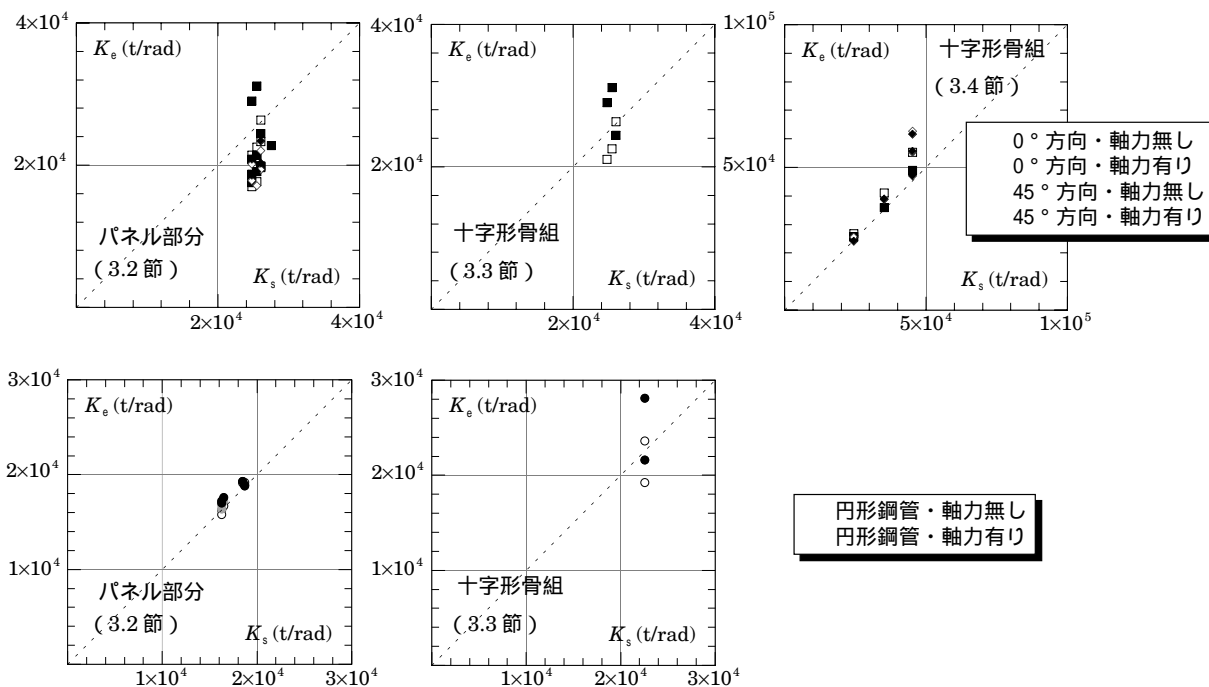


図 3.28 剛性評価式と実験結果の比較

### 3.6 パネルの全塑性せん断耐力

#### 1) 曲げの影響

パネルは逆対称曲げモーメント・せん断力・軸力を受ける部位であり、パネル内部の応力状態は非常に複雑である。曲げを考慮せず、せん断力のみで降伏するものとして得られたパネルの全塑性せん断耐力  $Q_{p0}$  は以下の式で得られる(図 3.29 参照)。ただし、ここでは、軸力による影響は無視して考える。

$$\text{角形鋼管 } 0^\circ \text{ 方向} \cdot \text{円形鋼管} : Q_{p0} = 2 d_c t_p \tau_y \quad (3.7)$$

$$\text{角形鋼管 } 45^\circ \text{ 方向} : Q_{p0} = 2 \{ \sqrt{2} d_c - 2 r_m (\sqrt{2} - 1) \} t_p \tau_y \quad (3.8)$$

(3.8) 式は隅角部にアールを有する角形鋼管を対象としており、溶接組立鋼管では  $r_m = 0$  として考える。一方、曲げを考慮したパネルの全塑性せん断耐力式として、田中らの提案したパネルの全塑性せん断耐力式<sup>3-18</sup>(以下では田中式と呼び、これから得られるパネルの全塑性せん断耐力を  $Q_T$  と表す)と伊藤らの提案したパネルの全塑性せん断耐力式<sup>3-12</sup>(以下では伊藤式、これから得られるパネルの全塑性せん断耐力を  $Q_I$  と表す)が挙げられる。前者の田中式は、曲げ・せん断力・軸力を考慮した塑性解析より得られた結果から提案された設計式であり、鋼構造塑性設計指針<sup>3-19</sup>ではこの式を柱・梁接合部パネルの必要パネル厚の計算式として用いている。鋼構造塑性設計指針では降伏せん断応力度を  $\tau_y = \sigma_y / 1.5$  として計算されているので、ここでは、 $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$  として計算された元の提案式に基づいて評価を行う。ただし、提案されているせん断耐力式は H 形断面・角形鋼管  $0^\circ$  方向・円形鋼管に対してのみであり、角形鋼管  $45^\circ$  方向に対する耐力式は提案されていない。一方、伊藤らは角形鋼管  $45^\circ$  方向に対する耐力式も提案している。伊藤式ではせん断力  $Q$ ・曲げモーメント  $M$ ・軸力  $N$  を考慮し、図 3.30 に示すような断面力分布を仮定する。耐力はパネル中央よりパネルせいの  $1/3$  の高さの断面応力で算定される。パネル断面に曲げモーメントのみを負担する領域を仮定し、残りの部分でせん断力と軸力を均等に負担させ、断面力の釣合条件と Von Mises の降伏条件式によりパネルの全塑性耐力式を導

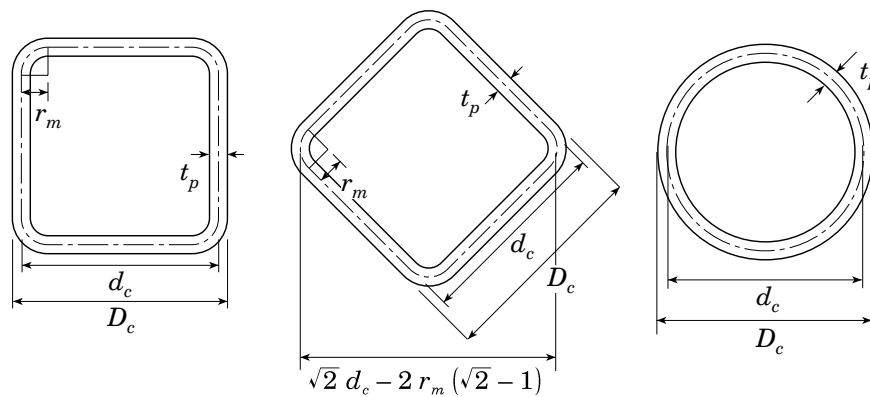


図 3.29 パネルの断面形状

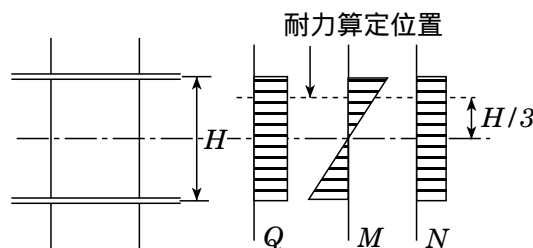


図 3.30 伊藤式における断面力分布

いている。

これらの式で考慮されている曲げによるせん断耐力への影響については、パネルのアスペクト比をパラメータとして文献 3-20) で詳細に検討されている。図 3.31 に田中・伊藤式より得られる耐力を (3.7), (3.8) 式で得られた  $Q_{p0}$  で無次元化したものを、パネルのアスペクト比  $d_b/d_c$  を横軸に取って示している。図より得られた結論は以下の通りである。

- a) 角形鋼管  $0^\circ$  方向では、パネルフランジが曲げを負担する役割を果たす役割を果たすため、一般的なパネルアスペクト比の範囲 (1.0 ~ 2.0) では、曲げがパネルの全塑性せん断耐力に及ぼす影響はほとんどない。曲げの影響により全塑性せん断耐力の低下が始まるのは、田中式ではアスペクト比が  $\sqrt{3} \doteq 1.73$  以上、伊藤式では  $3\sqrt{3}/2 \doteq 2.60$  以上である。
- b) 角形鋼管  $45^\circ$  方向では、曲げによるパネルの全塑性せん断耐力の低下がここで取り上げた 3 つのパネル断面の中で最も顕著に現れる。伊藤式では  $Q_{p0}$  と比較してアスペクト比 1.0 のとき 16%、1.5 のとき 23%、2.0 のとき 30% 小さくなる。
- c) 円形鋼管に対する伊藤式による全塑性せん断耐力は  $Q_{p0}$  と比較してアスペクト比 1.0 のとき 6%、1.5 のとき 13%、2.0 のとき 21% 小さくなる。田中式によるせん断耐力はアスペクト比 1.0 以下では  $\sqrt{3}/2 Q_{p0}$  で一定、1.0 以上では曲げによる影響を考慮し、 $Q_{p0}$  と比較してアスペクト比 1.5 のとき 22%、2.0 のとき 33% 小さくなる。

3.2 ~ 3.4 節で得られた実験結果からパネルの全塑性せん断耐力に及ぼす曲げの影響について検討する。図 3.32 には 3.2 節のパネル部分試験体載荷試験より得られたパネルの全塑性せん断耐力  $Q_{pe}$  を  $Q_{p0}$  で無次元化したものをアスペクト比を横軸にとって示す。ただし、軸力比 0 の試験体のみである。図 3.33 には 3.3, 3.4 節の十字形骨組試験より得られた結果について同様に示している。左から角形鋼管  $0^\circ$  方向、角形鋼管  $45^\circ$  方向、円形鋼管について示す。図より得られる結果を以下に列記する。

- ・ 角形鋼管  $0^\circ$  方向・・・パネル部分試験体ではアスペクト比が 1.0 から 1.5 になると、全塑性せん断耐力が 5 ~ 10% 程度小さくなる。しかしながら  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.90 \sim 1.03$  であり、 $Q_{p0}$  で全塑性せん断耐力を評価できる。アスペクト比 1.5, 1.6 の十字形骨組試験体では  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.89 \sim 0.93$  であり、パネル部分試験体と同様に  $Q_{p0}$  で全塑性せん断耐力を評価できる。
- ・ 角形鋼管  $45^\circ$  方向・・・パネル部分試験体では、アスペクト比 1.0 のとき  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.85 \sim 0.92$ 、アスペクト比 1.5 の時  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.78 \sim 0.85$  であり、角形鋼管  $0^\circ$  方向の場合と比較してアスペクト比の増大に伴う全塑性せん断耐力の低下は大きくなる。一方、十字形骨組試験体では、アスペクト比 1.2 のとき  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.99$ 、アスペクト比 1.6 の時  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.87 \sim 0.94$  であり、角形鋼管  $0^\circ$  方向で得られた値と同程度である。また、パネル部分試験体と比較するとアスペクト比の増大に伴う全塑性せん断耐力の低下が小さくなっている。これは、パネルの

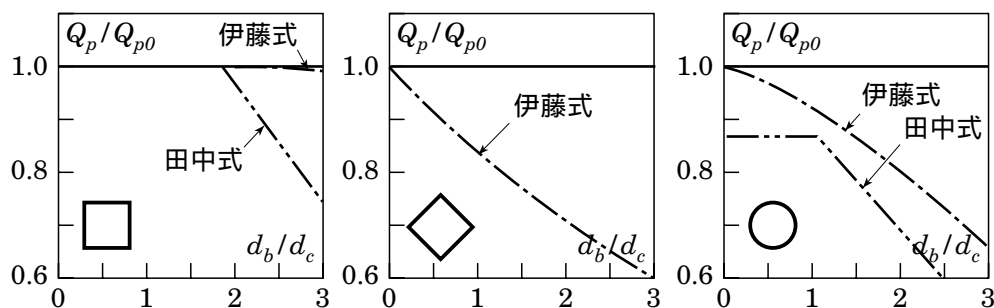


図 3.31 パネルアスペクト比がせん断耐力に与える影響 (文献 3-20)

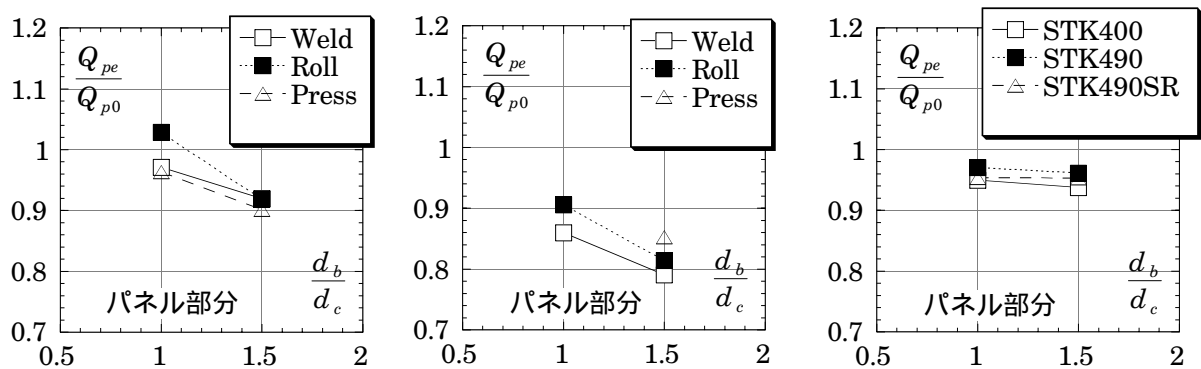


図 3.32 曲げによるパネル全塑性せん断耐力に及ぼす影響 (3.2 節のパネル部分試験体)

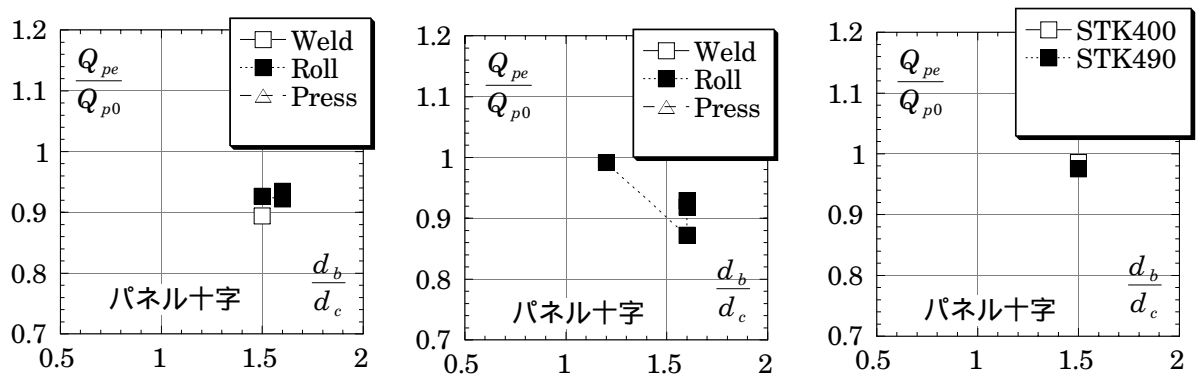


図 3.33 曲げによるパネル全塑性せん断耐力に及ぼす影響 (3.3,3.4 節の十字形骨組試験体)

4方に接合された梁の影響であり、梁が曲げモーメントを負担しているためである。

- ・ 円形鋼管・・・パネル部分試験体では、アスペクト比 1.0 のとき  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.95 \sim 0.97$  , アスペクト比 1.5 の時  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.94 \sim 0.96$  であり、アスペクト比の増大に伴う全塑性せん断耐力の低下は少ない。十字形骨組試験体ではアスペクト比 1.5 の時  $Q_{pe} / Q_{p0} = 0.98 \sim 0.99$  であり、パネル部分試験体と比較すると若干曲げによる耐力の低減は小さくなっている。いずれも伊藤式・田中式から予測されるほどの曲げによる全塑性せん断耐力の低下はみられなかった。
- ・ 鋼管の製法・種別による影響・・・角形鋼管の製法(溶接組立鋼管・ロール成形鋼管・プレス成形鋼管)・円形鋼管の種別(STK400・STK490・STK490を応力除去したもの)による  $Q_{pe} / Q_{p0}$  の差は数%程度であり、耐力評価式を鋼管の製法・鋼管種別により変更する必要は無いものと考えられる。

## 2) 荷重方向による影響

3.2 ~ 3.4 で述べたように、軸力比 0 のパネル部分試験体では荷重方向が 0° 方向から 45° 方向に変わると全塑性せん断耐力は 20 ~ 30 % , 十字形骨組試験体では 30 ~ 34 % 大きくなる。一方 (3.7), (3.8) 式では荷重方向が 0° 方向から 45° 方向に変わると  $Q_{p0}$  は隅角部にアールを有するロール・プレス成形鋼管では 33 ~ 37 % , アールを持たない溶接組立鋼管では 41 % 大きくなり、パネル部分試験体の実験結果と比較すると  $Q_{p0}$  は角形鋼管 45° 方向パネル部分試験体の全塑性せん断耐力を最大 15% の過大評価する。一方、十字形骨組試験体では梁の影響によりパネル部分試験体と比較してパネルの全塑性せん断耐力が大きくなるため、 $Q_{pe}$  は十字形骨組実験より得られるせん断耐力を数% 過大評価するにとど

り，実験結果を  $Q_{p0}$  でほぼ評価できる．

### 3) 軸力比による影響

軸力比がパネルの全塑性せん断耐力に与える影響は 本来その影響を独立に考えられるものではなく，パネルのアスペクト比とも相関関係を有するものである．しかしながら，一般的なパネルアスペクト比 (1.0 ~ 2.0) の場合，アスペクト比が全塑性せん断耐力に及ぼす影響は小さく，パネルに一樣な平面応力場を仮定した  $Q_{p0}$  でパネルの全塑性せん断耐力をほぼ評価することができる．したがって，ここでは軸力による全塑性せん断耐力への影響をアスペクト比とは独立に考えることができるものと仮定して，評価を試みる．

パネルに一樣に軸力が作用すると考えると 軸力による降伏せん断応力度の低下は  $\sqrt{1-n^2}$  で表される．ただし， $n$  は軸力比である．図 3.8, 3.22 より，角形鋼管 45° 方向・円形鋼管については軸力による全塑性せん断耐力の低下をこの  $\sqrt{1-n^2}$  でほぼ表現でき，以下の式でせん断耐力  $Q_p$  を表す．

$$\text{角形鋼管 } 45^\circ \text{ 方向} \cdot \text{円形鋼管} : Q_p = \sqrt{1-n^2} Q_{p0} \quad (3.9)$$

角形鋼管 0° 方向についてはパネルフランジに軸力が再配分されるため，パネルウェブ面への軸力が小さくなり， $\sqrt{1-n^2}$  ほど全塑性せん断耐力が低下しないことがわかった．したがって，角形鋼管 0° 方向では，フランジで軸力を負担できる軸力比  $n$  が 0.5 までの範囲では，軸力によるパネルの全塑性せん断耐力の低下はないものとする． $n > 0.5$  の範囲ではフランジで負担できなかった残りの軸力により全塑性せん断耐力が小さくなるものとする．すなわち次式で  $Q_p$  を表す．

$$\text{角形鋼管 } 0^\circ \text{ 方向} : Q_p = \sqrt{1 - \{2(n-0.5)\}^2} Q_{p0} = 2\sqrt{n(1-n)} Q_{p0} \quad (3.10)$$

図 3.34, 3.35 には角形鋼管 0° 方向のパネル部分試験体，十字形骨組試験体から得られる全塑性せん断耐力  $Q_{pe}$  を軸力比  $n=0$  の時の全塑性せん断耐力で除した値を示している．また，同図中には (3.9), (3.10) 式で表されている軸力による全塑性せん断耐力の低下を点線で示している．図より，(3.9) 式よりも (3.10) 式の方が角形鋼管 0° 方向の軸力による低下をよく表している．十字形骨組試験体では幅厚比 42 のパネルのせん断耐力を (3.10) 式は 1 割程度過大評価している．幅厚比 42 は柱でいうと FC ランクの断面であり，柱とパネルの断面が同じであればあまり用いられることは無いが，パネルを積極的に塑性化させるためなどに用いる場合には，パネルのせん断耐力を  $Q_p$  よりも小さくなることを考慮する必要である．

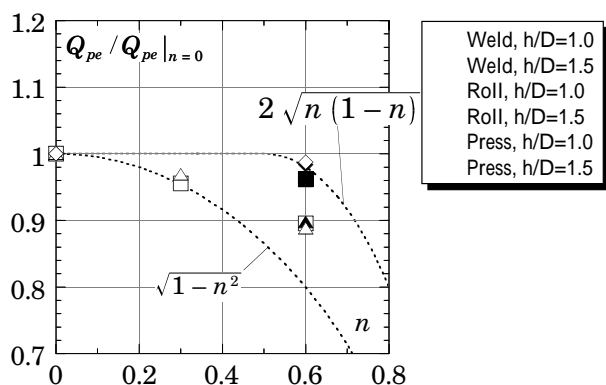


図 3.34 軸力の影響 (パネル部分試験体)

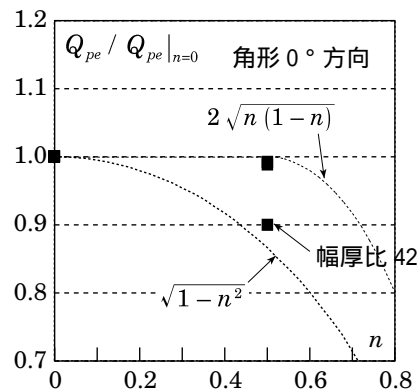


図 3.35 軸力の影響 (十字形骨組試験体)

4) 既往の実験結果と耐力式の比較

図 3.36, 3.37 には角形鋼管と円形鋼管の実験より得られたせん断耐力  $Q_{pe}$  と(3.9), (3.10) 式によるせん断耐力  $Q_p$ , 伊藤式による  $Q_I$ , 田中式による  $Q_T$  との比較を示している. 斜めの点線にプロットが近いほど耐力式より得られたパネルのせん断耐力と実験より得られたせん断耐力が良く一致していることを示している. 今回提案した  $Q_p$  と田中式・伊藤式の中では,  $Q_p$  が実験結果より得られたパネルのせん断耐力と最もよく対応している. 角形鋼管  $0^\circ$  方向では  $Q_{pe}/Q_p = 0.83 \sim 0.94$  (平均値 0.90), 角形鋼管  $45^\circ$  方向では,  $Q_{pe}/Q_p = 0.87 \sim 1.03$  (平均値 0.95), 円形鋼管では,  $Q_{pe}/Q_p = 0.98 \sim 1.12$  (平均値 1.03) となる.

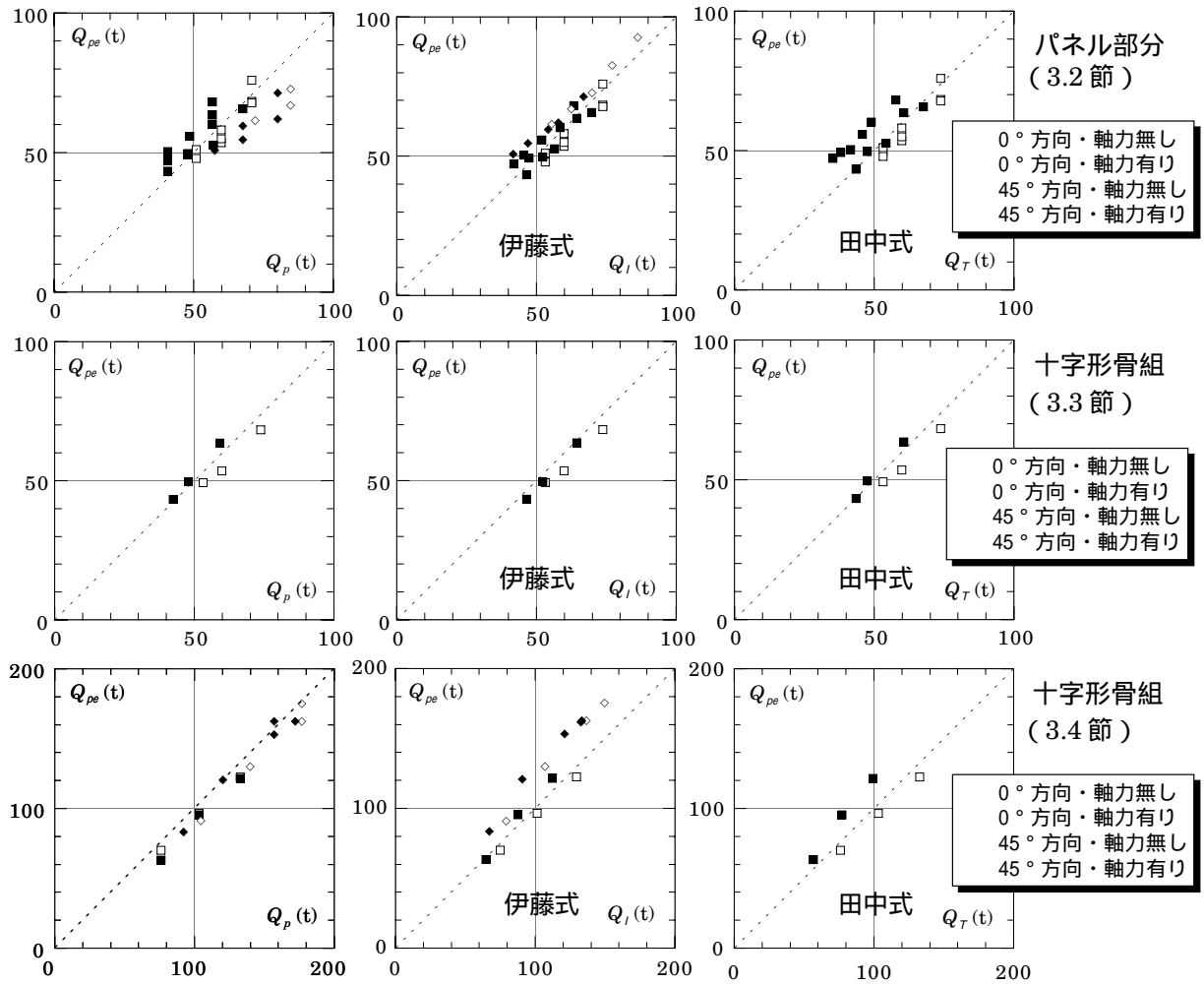


図 3.36 全塑性せん断耐力式と実験結果の比較 (角形鋼管・ $0^\circ$  方向と  $45^\circ$  方向)



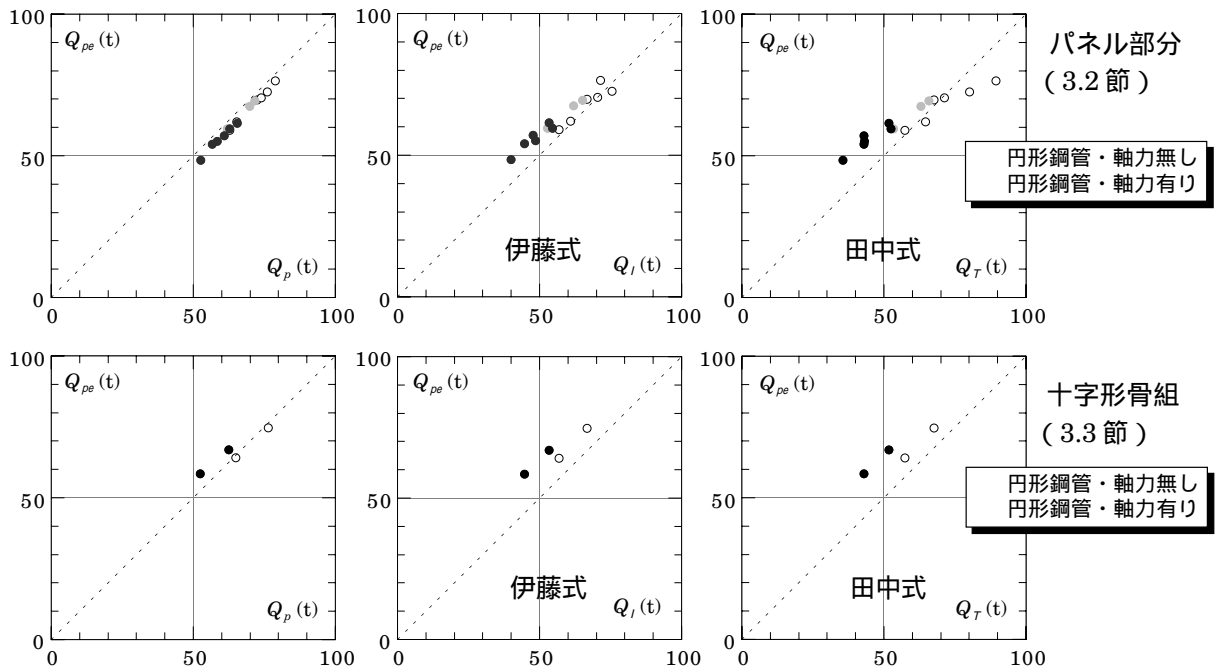


図 3.37 全塑性せん断耐力式と実験結果の比較 (円形鋼管)

### 3.7 パネルの降伏せん断耐力

パネルの許容応力度設計に用いることを想定したパネルの降伏せん断耐力について考える。ここでは、曲げ材の降伏モーメントに相当するパネルのせん断力を降伏せん断耐力と呼ぶ。パネル載荷実験より得られるせん断力 - せん断変形角関係で剛性が初期剛性の  $1/3$  までに低下した点でのせん断力を  $Q_{1/3}$  とし、これを実験から得られる降伏せん断耐力と考える。

まず、実験から得られる降伏せん断耐力に及ぼす軸力の影響について検討する。図 3.38 に  $Q_{1/3}$  を同パラメータの軸力比 0 の試験体の  $Q_{1/3}$  で無次元化したものを角形鋼管  $0^\circ$  方向・角形鋼管  $45^\circ$  方向・円形鋼管別に示す。軸力による降伏せん断耐力の低下は全塑性せん断耐力  $Q_{pe}$  の場合と同様に評価することができる。次に実験による降伏せん断耐力を次式で表される降伏せん断耐力  $Q_y$  で評価することを試みる。降伏せん断耐力  $Q_y$  は、曲げ材の形状係数に相当する係数  $\kappa$  でパネルの全塑性せん断耐力  $Q_p$  を除して表す。

$$Q_y = Q_p / \kappa \quad (3.11)$$

ただし、 $\kappa$  は平面保持の仮定に基づいて計算された弾性せん断応力度分布 (図 3.39 参照) の最大せん断応力度と平均せん断応力度の比であり、次式で得られる。

$$\kappa = 9 / 8 \doteq 1.125 \quad (\text{角形鋼管 } 0^\circ \text{ 方向}) \quad (3.12)$$

$$\kappa = 3 / 2 = 1.5 \quad (\text{角形鋼管 } 45^\circ \text{ 方向}) \quad (3.13)$$

$$\kappa = 4 / \pi \doteq 1.273 \quad (\text{円形鋼管}) \quad (3.14)$$

(3.11) 式により得られる各試験体の  $Q_y$  は表 3.1, 3.5, 3.7 の実験結果一覧の中に付記している。図 3.40, 3.41 には、(3.11) 式で得られる  $Q_y$  と実験から得られる  $Q_{1/3}$  の比較を示す。図より円形鋼管では実験より得られる降伏せん断耐力  $Q_{1/3}$  と (3.11) 式より得られるパネルの降伏せん断耐力  $Q_y$  が良く対応している。角形鋼管  $0^\circ$  方向の場合、 $Q_y$  は実験より得られた降伏せん断耐力  $Q_{1/3}$  を平均 11% 過大評価する。これは全塑性せん断耐力の実験値  $Q_{pe}$  と計算値  $Q_p$  の差とほぼ一致するので、 $\kappa$  の評価に影響を及

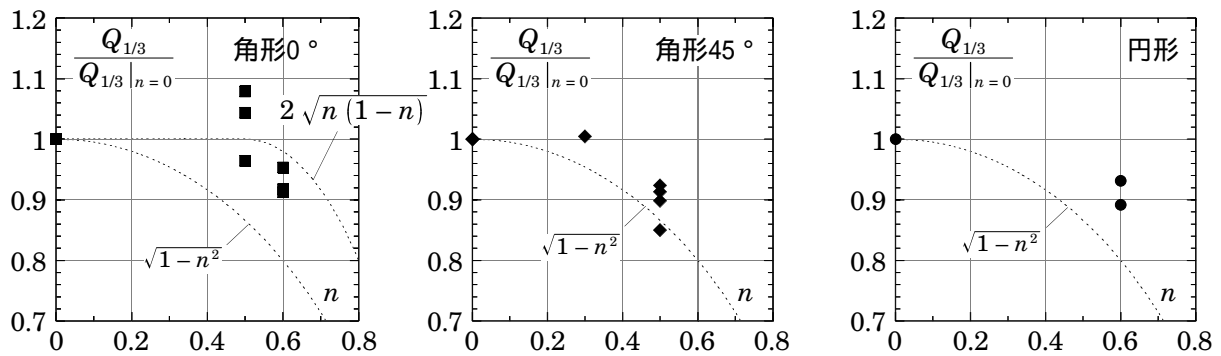


図 3.38 降伏せん断耐力に及ぼす軸力の影響

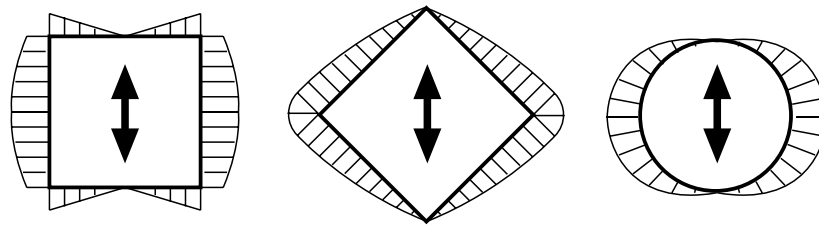


図 3.39 平面保持の仮定に基づく弾性せん断応力度分布

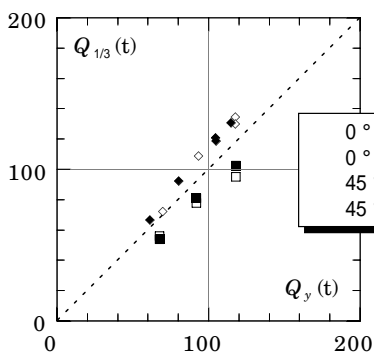


図 3.40 降伏せん断耐力の実験値と計算値の比較（角形鋼管）

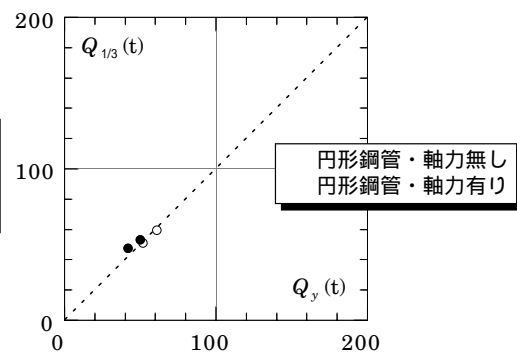


図 3.41 降伏せん断耐力の実験値と計算値の比較（円形鋼管）

ばすものではない。実験から得られたパネルの降伏せん断耐力  $Q_{1/3}$  と計算値  $Q_y$  の差が最も大きくなるのは角形鋼管  $45^\circ$  方向であり、 $Q_y$  は  $Q_{1/3}$  を平均 13% 程度過小評価する。

### 3.8 結

本章では、角形鋼管柱・H 形断面梁接合部パネル・円形鋼管柱・H 形断面梁接合部パネルを対象とし、その剛性・耐力を含む履歴挙動を把握することを目的とした実験について述べた。実験は通しダイアフラム形式のパネルを対象としたパネル部分せん断載荷実験・十字形分解骨組載荷実験の 2 種類であり、両者の実験結果を比較検討した。得られた結果を以下に要約する。

- 1) パネル部分載荷実験，十字形骨組載荷実験から得られる角形鋼管の製造方法・円形鋼管の鋼種別のパネルの履歴性状の特徴は、次に述べるそれぞれの繰返し素材試験結果のもの一致した。すなわち、ロール成形鋼管は耐力上昇が小さく移動硬化的な性状を示し、溶接組立鋼管，プレス成

形鋼管および円形鋼管はひずみ振幅が大きくなると耐力が上昇する。

- 2) パネルのせん断剛性はせん断変形のみを考慮した(3.4)式の  $K_s$  で概ね評価できる。
- 3) アスペクト比が 1.0 から 1.5 になることでパネルのせん断耐力は 1 割程度小さくなる。これはパネルせいの増大に伴いパネル端部に作用する曲げモーメントが増大するためである。
- 4) 軸力が作用すると軸力無しの場合と比較してパネルのせん断耐力は低下する。ただし、角形鋼管 0° 方向試験体では、幅厚比 42 の試験体を除き軸力によるせん断耐力の低下は数%に留まる。また、角形鋼管 45° 方向・円形鋼管試験体の軸力によるせん断耐力の低下は角形鋼管 0° 方向試験体と比較して大きくなる。
- 5) 軸力が作用する試験体では、軸力とせん断力が同時に作用するウェブがフランジより先に降伏し、その軸方向剛性が低下するため、塑性化の進展に伴ってウェブからフランジに軸力が再配分される。このため、軸力比が 0 の試験体の場合より早期に剛性が低下するものの、徐々にせん断耐力が上昇するようなせん断力 - せん断変形角関係を示す。
- 6) 軸力比が 0 の場合、45° 方向試験体のパネルせん断耐力は 0° 方向試験体と比較して 2 ~ 3 割程度大きくなる。一方、軸力比が 0.6 の場合には、1 割弱しか上昇しない。
- 7) 軸力比が大きくなるとパネルの軸方向変形も大きくなり、繰返し载荷に伴い軸方向変形が累積していく。
- 8) パネル部分せん断载荷実験と十字形骨組実験から得られた骨格曲線の比較から、角形鋼管柱試験体の場合、変形角が 0.02rad 以下の範囲では両曲線の耐力はほぼ一致する。一方、円形鋼管柱試験体では変形角が 0.01rad 程度以下の範囲で両者の耐力は良く対応する。この傾向は鋼種、製造方法、軸力比、アスペクト比に依存しない。

さらに伊藤らの行った 45° 方向十字形骨組载荷試験との比較より、以下のことがわかった。

- 9) 45° 方向十字形骨組試験から得られた結果、実験剛性と計算剛性の比・0° 方向に対する 45° 方向のせん断耐力の比は大きくなり、軸力比が 0 の試験体に対する軸力が作用する場合のせん断耐力の比は小さくなる。いずれもパネルにとりつく梁の影響によるものと考えられるが、定量的な評価には至っていない。

上記の実験結果を検討し、図 3.29 に示す角形鋼管 0° 方向、角形鋼管 45° 方向、円形鋼管パネルの全塑性せん断耐力・降伏せん断耐力の評価式を提案した。以下に、得られた結果を列記する。

- 10) パネルの全塑性せん断耐力は次式の  $Q_p$  で評価する。

$$\begin{aligned} \text{角形鋼管 } 0^\circ \text{ 方向} & : Q_p = 2 d_c t_p \tau_y & (0 \leq n \leq 0.5) \\ & Q_p = 2 \sqrt{n(1-n)} 2 d_c t_p \tau_y & (0.5 < n \leq 1.0) \\ \text{角形鋼管 } 45^\circ \text{ 方向} & : Q_p = \sqrt{1-n^2} 2 \{ \sqrt{2} d_c - 2 r_m (\sqrt{2} - 1) \} t_p \tau_y \\ \text{円形鋼管} & : Q_p = \sqrt{1-n^2} 2 d_c t_p \tau_y \end{aligned}$$

- 11) パネルの降伏せん断耐力は次式の  $Q_y$  で評価する。

$$Q_y = Q_p / \kappa$$

$$\begin{aligned} \text{ただし、角形鋼管構面方向} & : \kappa = 9 / 8 \doteq 1.125 \\ \text{角形鋼管 } 45^\circ \text{ 方向} & : \kappa = 3 / 2 = 1.5 \\ \text{円形鋼管} & : \kappa = 4 / \pi \doteq 1.273 \end{aligned}$$

