

左右の梁せいが異なる角形鋼管柱・梁接合部パネルの力学性状  
(その2. 十字架構荷実験)

宮定 章\*1

同 桑原 進\*2

同 熊野豪人\*1

同 井上一朗\*3

1. 序

本論その2では角形鋼管柱・H形鋼段違い梁接合部パネルを対象とし、その剛性・耐力を含む力学性状を把握することを目的として行った十字架構荷実験について述べる。また、その1で提案したパネルの耐力推定式による計算値と実験値とを比較・検討する。

試験体の柱・パネルにはBCR295, 梁・通しダイアフラム・内ダイアフラムにはSN490Bを用いる。素材の機械的性質を表2に、素材対応表を表3に示す。表中の  $t$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ ,  $El.$  はそれぞれ板厚, 降伏応力度, 引張強さ, 破断伸びの実測値を表す。降伏応力度は0.2%offset値とする。

表2 素材の機械的性質

試験片名	$t$ (mm)	$\sigma_y$ (t/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (t/cm <sup>2</sup> )	$El.$ (%)
梁フランジ-A	11.9	4.13	5.62	37.0
梁フランジ-B	11.9	3.26	5.42	49.1
梁ウェブ-A	6.0	3.85	5.59	34.4
梁ウェブ-B	6.5	3.98	5.66	38.3
ダイアフラム-A	16.0	3.36	5.17	47.4
ダイアフラム-B	15.9	3.88	5.74	50.0
鋼管9mm-A	9.3	3.99	4.86	44.5
鋼管12mm-A	12.0	3.77	4.41	39.7
鋼管12mm-B	12.3	3.94	4.61	44.5
鋼管16mm-A	16.4	4.39	4.85	42.2
鋼管16mm-B	16.1	4.43	5.08	50.7

2. 試験体

試験体は図1に示すような冷間ロール成形角形鋼管柱とBH梁で構成される通しダイアフラム形式の十字形部分架構である。また梁2の下フランジ位置には内ダイアフラムを挿入する。試験体一覧を表1に示す。試験体は計10体である。実験パラメータは梁せい差・軸力比・幅厚比であり、梁せい差は0mm, 100mm, 200mmの3種類、幅厚比は28, 21の2種類、軸力比は0.0, 0.5の2種類とする。パネルのアスペクト比はすべて1.6である。

表3 素材対応表

試験体名	柱	パネル	梁フランジ	梁ウェブ	ダイアフラム
R2816-0	12-B	9-A	B	B	B
R2816-5	12-B	9-A	B	B	B
R2116-0	16-B	12-B	B	B	B
R2116-5	16-B	12-B	B	B	B
R2816-0-b10	12-B	9-A	B	B	B
R2816-5-b10	12-B	9-A	B	B	B
R2816-0-b20	12-A	9-A	A	A	A
R2816-5-b20	12-A	9-A	A	A	A
R2116-0-b10	16-A	12-B	A	A	A
R2116-5-b10	16-A	12-B	A	A	A

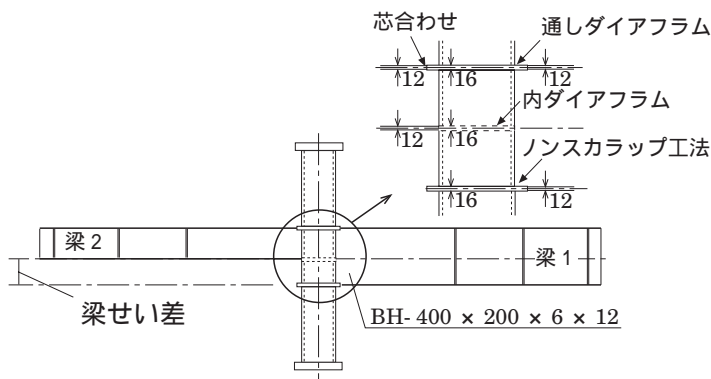


図1 十字架構試験体 (梁せい差200mmの場合)

表1 試験体一覧

試験体名	梁せい差	軸力比	幅厚比	パネル	柱	梁1	梁2
R2816-0	0mm	0.0	28	-250 x 250 x 9	-250 x 250 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12
R2816-5	0mm	0.5	28	-250 x 250 x 9	-250 x 250 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12
R2116-0	0mm	0.0	21	-250 x 250 x 12	-250 x 250 x 16	H-400 x 200 x 6 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12
R2116-5	0mm	0.5	21	-250 x 250 x 12	-250 x 250 x 16	H-400 x 200 x 6 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12
R2816-0-b10	100mm	0.0	28	-250 x 250 x 9	-250 x 250 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12	H-300 x 200 x 6 x 12
R2816-5-b10	100mm	0.5	28	-250 x 250 x 9	-250 x 250 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12	H-300 x 200 x 6 x 12
R2816-0-b20	200mm	0.0	28	-250 x 250 x 9	-250 x 250 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12	H-200 x 200 x 6 x 12
R2816-5-b20	200mm	0.5	28	-250 x 250 x 9	-250 x 250 x 12	H-400 x 200 x 6 x 12	H-200 x 200 x 6 x 12
R2116-0-b10	100mm	0.0	21	-250 x 250 x 12	-250 x 250 x 16	H-400 x 200 x 6 x 12	H-300 x 200 x 6 x 12
R2116-5-b10	100mm	0.5	21	-250 x 250 x 12	-250 x 250 x 16	H-400 x 200 x 6 x 12	H-300 x 200 x 6 x 12

The elasto-plastic behaviors of joint panels at the connection of rectangular steel column and two H-shaped beams with different depth (Part 2. The test for cruciform subassemblies)

パネル・柱の角形鋼管のシームは、フランジ側に位置させる。ダイアフラムとパネルの溶接には裏当金を用いず、裏波溶接とする。柱とエンドプレートの溶接には裏当金を用いる。梁フランジとダイアフラムは芯合わせとし、ノンスラップ工法で溶接接合する。また試験体はすべてパネルが柱・梁よりも先に降伏するように設計されている。その結果、柱の鋼管厚はパネルの1サイズ上の鋼管厚、通しダイアフラム・内ダイアフラムの板厚は梁フランジの1サイズ上の板厚(16mm)としている。

### 3. 載荷方法および測定方法

図2に載荷方法を示す。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。また、試験体の梁には横座屈止めを取り付ける。柱に所定の軸力を導入した後、両側の梁の回転角が常に等しくなるように制御しつつ、梁両端のオイルジャッキで載荷する。載荷プログラムは、パネル1降伏時のせん断変形角に対し、4倍・8倍・12倍のループをそれぞれ2回ずつ載荷する。

図3にパネル部分の測定点およびせん断変形角を示す。パネルの平均せん断変形角 $\bar{\gamma}$ ・パネル1のせん断変形角 $\gamma_1$ ・パネル2のせん断変形角 $\gamma_2$ は、図3に示すパネル対角の変形および軸方向変形より算定し、次式で得られる。

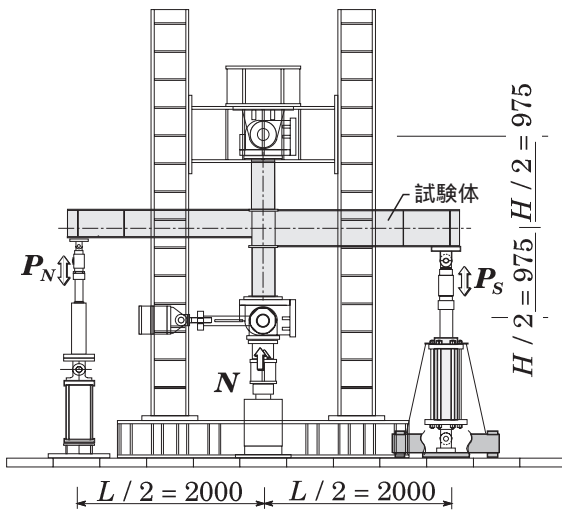


図2 載荷方法

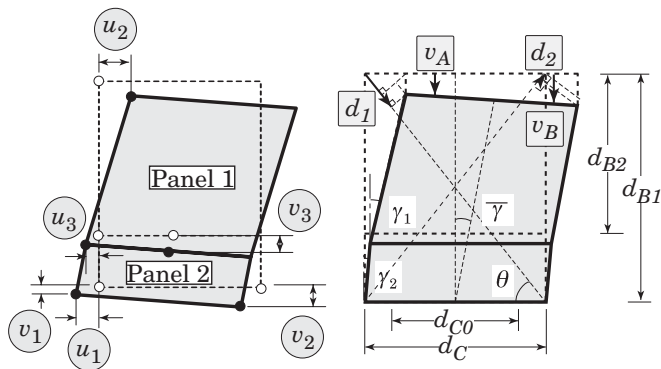


図3 パネル部分の測定点

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{2 d_{B1} \cos \theta} \left\{ d_1 + d_2 - \frac{d_C}{d_{C0}} (v_A - v_B) \sin \theta \right\} \quad (1)$$

$$\gamma_1 = \frac{u_2 + u_3}{d_{B2}} - \frac{v_2 - v_1}{d_C} \quad (2)$$

$$\gamma_2 = \frac{u_1 - u_3}{d_{B1} - d_{B2}} - \frac{v_2 - v_1}{d_C} \quad (3)$$

ただし、図中の $d_{B1}$ ・ $d_{B2}$ は梁1・梁2のフランジ中心間距離、 $d_C$ はパネルのフランジ中心間距離(その1・図1参照)である。

また、パネルに作用する平均せん断力 $\bar{J}Q$ ・パネル1のせん断力 $JQ_{C1}$ ・パネル2のせん断力 $JQ_{C2}$ (その1・図4参照)は次式で得られる。

$$\bar{J}Q = \left\{ 2 \left( \frac{L}{2} - \frac{D_0}{2} \right) - \frac{L}{H} \right\} \frac{P_N + P_S}{2} \quad (4)$$

$$JQ_{C1} = \left( \frac{P_S}{d_{B1}} + \frac{P_N}{d_{B2}} \right) \left( \frac{L}{2} - \frac{d_C}{2} \right) - \frac{P_N + P_S}{2} \frac{L}{H} \quad (5)$$

$$JQ_{C2} = \frac{P_S}{d_{B1}} \left( \frac{L}{2} - \frac{d_C}{2} \right) - \frac{P_N + P_S}{2} \frac{L}{H} \quad (6)$$

### 4. 実験結果および考察

図4に履歴曲線を示す。図の縦軸は(4)式から得られるパネル平均せん断力 $\bar{J}Q$ 、横軸は(1)式から得られるパネル平均せん断変形角 $\bar{\gamma}$ である。図より、繰返し載荷に伴う耐力上昇はほとんど見られず、水平方向にループが拡大しているのが分かる。梁せい差・軸力比・幅厚比の影響による履歴性状の違いは見られず、すべての試験体において同様の傾向が得られた。

図5に梁せい差をパラメーターとして重ね合わせた骨格曲線を示す。図の縦軸はパネル平均せん断力 $\bar{J}Q$ 、横軸は平均せん断変形角 $\bar{\gamma}$ である。また、図中の三角印はパネル平均せん断力 - 平均せん断変形角関係の0.35% offset値を示す。本論ではこれを全塑性耐力の実験値 $Q_{pe}$ と定義する。 $Q_{pe}$ は曲げモーメントを受ける部材の全塑性モーメントに対応する指標で、パネル全体がせん断降伏応力度に達する状態を想定している。すなわち、1軸引張応力状態の鋼材の降伏点は0.2%オフセット値で定義されるが、純せん断応力状態では、 $\bar{\gamma} = 0.35\%$  オフセット値がそれに対応すると考える。幅厚比28の試験体では、軸力の有無に関わらず梁せい差100mmのとき耐力の低下が見

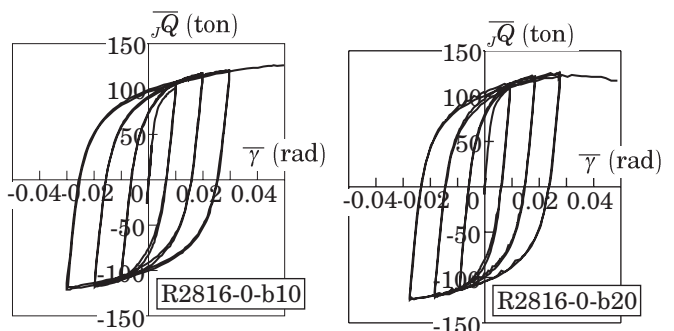


図4 パネル平均せん断力-平均せん断変形角関係

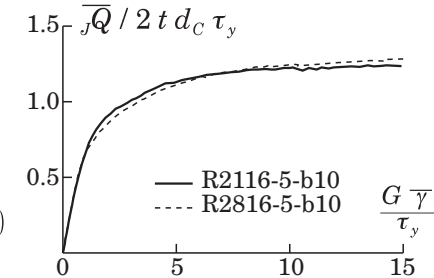
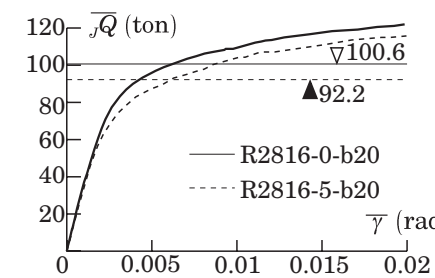
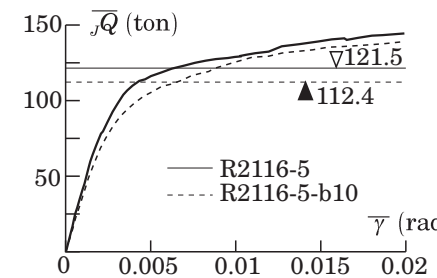
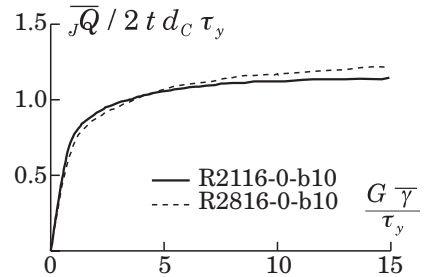
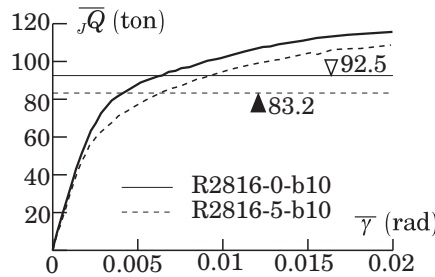
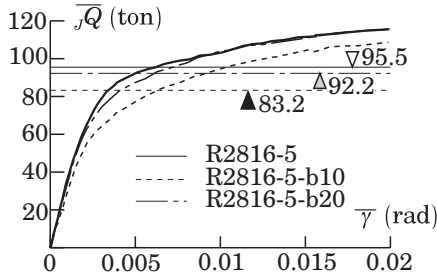
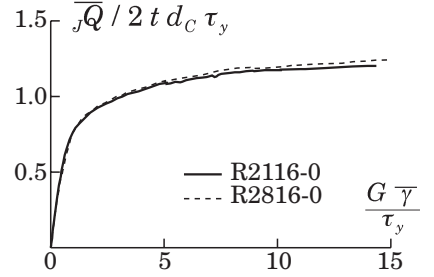
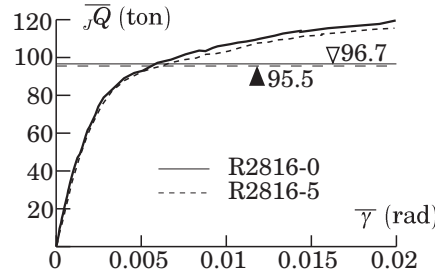
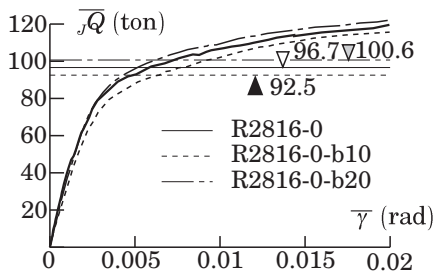


図5 骨格曲線（梁せい差別）

図6 骨格曲線（軸力比別）

図7 骨格曲線（幅厚比別）

られ、梁せい差 200mm のとき再び耐力が上昇する。表 4 にその (27)・(28) 式から得られる  $\overline{jQ}_P^A \cdot \overline{jQ}_P^B$  の計算値を示す。また、図 8 はそれを図示したものであり縦軸に  $\overline{jQ}_P^B / \overline{jQ}_P^A$ 、横軸に梁せい差を示す。計算値も同様の傾向を示し、実験値と計算値の性状がよく一致していることが分かる。

図 6 に軸力比をパラメーターとして重ね合わせた骨格曲線を示す。図より梁せい差が無い試験体では軸力による耐力の低下はほとんど見られない。これは、軸力をパネルフランジが負担するためである。一方、梁せい差がある試験体では軸力により耐力は 8% から 10% 低下する。

図 7 に幅厚比をパラメーターとして重ね合わせた骨格曲線を示す。図の縦軸、横軸はそれぞれ梁せい差 0、軸

力比 0 のときのせん断耐力とその時のせん断変形角で無次元化している。図を見ると、軸力比、梁せい差に関わらず、降伏域において曲線はほぼ重なっており、本実験の幅厚比の範囲では耐力に及ぼす影響は見られない。

すべての試験体は測定上の限界から余力を残して載荷を終了しており、塑性変形能力は累積塑性せん断変形角で 0.35 rad 以上を有している。

図 9 に示す骨格曲線により、パネル 1・パネル 2 の変形状を比較する。図の縦軸は (5) 式から得られるパネル 1 のせん断力  $jQ_{C1}$  および (6) 式から得られるパネル 2 のせん断力  $jQ_{C2}$ 、横軸は (2) 式から得られるパネル 1 のせん断変形角  $\gamma_1$  および (3) 式から得られるパネル 2 のせん断変形角  $\gamma_2$  である。図よりパネル 1 が大きく変形している

のに対し、パネル 2 の変形は小さいことが分かる。幅厚比 21 の試験体のについても同様の傾向が見られる。また、梁せい差が大きくなるとパネル 2 の変形も大きくなる。図 10 に試験体の載荷終了時の写真を示す。図を見ると、パネル 1 が変形し

表 4 機構 A・機構 B の耐力比較

試験体名	$\overline{jQ}_P^A$ (ton)	$\overline{jQ}_P^B$ (ton)	$\frac{\overline{jQ}_P^B}{\overline{jQ}_P^A}$
R2816-0	103.3	-	1.00
R2816-5	89.5	-	1.00
R2116-0	132.7	-	1.00
R2116-5	114.9	-	1.00
R2816-0-b10	103.3	93.6	0.91
R2816-5-b10	89.5	83.9	0.94
R2816-0-b20	103.3	99.0	0.96
R2816-5-b20	89.5	93.1	1.04
R2116-0-b10	132.7	118.5	0.89
R2116-5-b10	114.9	106.2	0.92

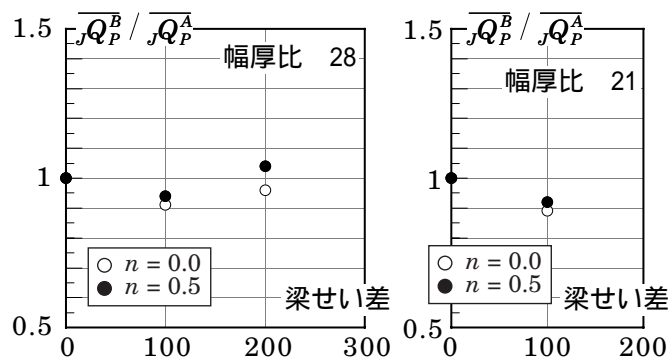


図 8 耐力式における梁せい差の影響

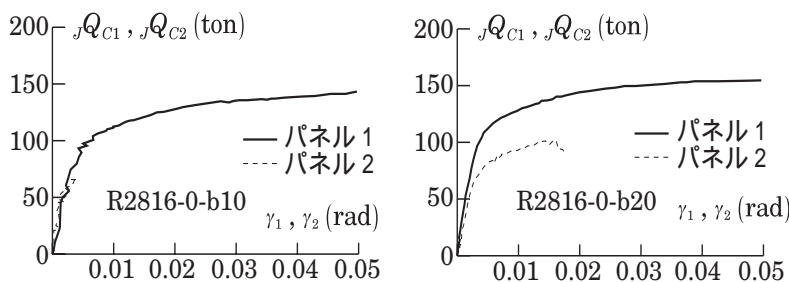


図9 パネル1・パネル2比較

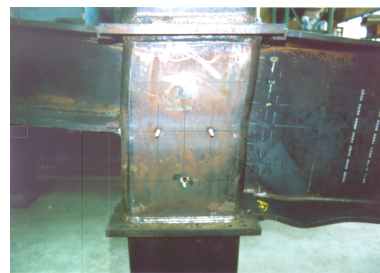


図10 載荷後の試験体 (R2816-5-b20)

ているのにパネル2はほとんど変形していない様子が分かる。また梁フランジ・梁ウェブの一部が局部座屈している。梁せい差があるすべての試験体で同様の傾向が見られた。以上の結果より、実験では梁せい差を有するすべての試験体が機構Bで降伏したと判断できる。表4に示す計算値では、R2816-5-b20を除く梁せい差を有する試験体が機構Bで崩壊すると予想しており、実験結果と一致する。R2816-5-b20については $\overline{jQ_P^A}$ と $\overline{jQ_P^B}$ にほとんど差がなく、崩壊機構による差は見られなかった。このため実験では計算値と異なる機構で降伏したと考えられる。

の縦軸は実験剛性を計算剛性で除した値で、横軸は試験体名である。図を見ると0.78 ~ 1.14と若干のばらつきが見られる。しかし、パネル剛性がフレーム剛性に及ぼす影響は小さいため、フレーム全体の剛性で考えるとほとんど影響がないと判断できる。

せん断耐力の実験値 $Q_{pe}$ とその1(26)式から求まる計算値 $\overline{jQ_P}$ の比較を図12に示す。図の縦軸は実験値を計算値で除した値で、横軸は試験体名である。図より0.94 ~ 1.07となり計算値と実験値はよく対応していることがわかる。

### 5. 実験結果と計算結果の比較

表5に各試験体の剛性とせん断耐力の実験値および計算値の一覧を示す。また、実験剛性 $K_e$ と計算剛性 $K_s$ の比較を図11に示す。実験剛性 $K_e$ は1/3耐力での割線剛性であり、計算剛性 $K_s$ はその1(17)式から得られる。図

### 6. 結論

本論では、段差・幅厚比・軸力比をパラメーターとした、通しダイアフラム形式の角形鋼管柱・H形鋼段違い梁接合部パネルの十字架構実験について述べた。得られた結果を以下に要約する。

表5 剛性・せん断耐力一覧表

試験体名	$K_e$ (t/rad)	$K_s$ (t/rad)	$\frac{K_e}{K_s}$	$Q_{pe}$ (ton)	$\overline{jQ_P}$ (ton)	$\frac{Q_{pe}}{\overline{jQ_P}}$
R2816-0	40499	35195	1.11	96.7	103.3	0.94
R2816-5	36004	35195	0.99	95.5	89.5	1.07
R2116-0	53931	45239	1.14	122.5	132.7	0.92
R2116-5	41282	45239	0.87	121.5	114.9	1.06
R2816-0-b10	32213	35195	0.88	92.5	93.6	0.99
R2816-5-b10	29457	35195	0.81	83.2	83.9	0.99
R2816-0-b20	36763	35195	1.03	100.6	99.0	1.02
R2816-5-b20	34045	35195	0.96	92.2	89.5	1.03
R2116-0-b10	46860	45239	0.99	122.8	118.5	1.04
R2116-5-b10	36658	45239	0.78	112.4	106.2	1.06

- (1) 梁せい差のある角形鋼管柱・H形鋼梁接合部パネルではパネル1、梁ウェブ・梁フランジの一部が降伏する機構Bで崩壊する場合がある。このときの耐力はパネル体積を全体積有効と考えた機構Aの耐力を下回る。
- (2) せん断耐力の実験値は計算値の0.94 ~ 1.07となる。
- (3) せん断耐力におよぼす軸力比の影響は、梁せい差が無い場合には見られないが、梁せい差があると耐力は低下する。
- (4) 本実験の幅厚比の範囲ではせん断耐力に及ぼす影響はほとんどない。
- (5) 実験剛性は計算剛性の0.78 ~ 1.14となり若干ばらつく。しかしパネル剛性がフレーム剛性に及ぼす影響は小さいため、フレーム全体の剛性で考えるとほとんど影響はない。

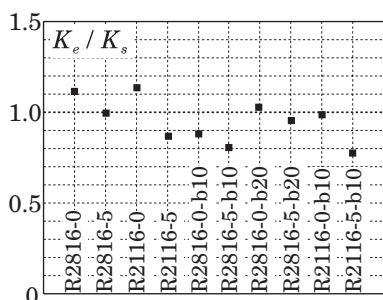


図11  $K_e$ と $K_s$ の比較

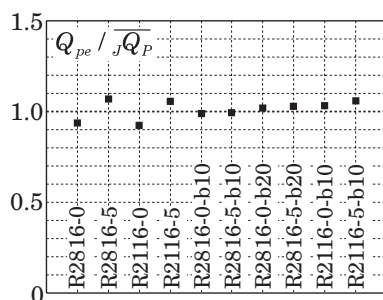


図12  $Q_{pe}$ と $\overline{jQ_P}$ の比較

謝辞・参考文献  
本論その1にまとめて記す。

\*1 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻・大学院生  
\*2 大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻・助手  
\*3 京都大学大学院工学研究科生活空間学専攻・教授

Dept. of Architectural Eng, Osaka Univ. / Graduate Student  
Dept. of Architectural Eng, Osaka Univ. / Research Associate  
Dept. of Architecture and Environmental Design, Kyoto Univ. / Professor