

遠心力鋳鋼管柱とH形はり接合部の実験的研究

若 林 実・佐々木良一・貴 島 嘉 夫

AN EXPERIMENTAL STUDY ON CENTRIFUGALLY CAST PIPE COLUMN TO H-BEAM CONNECTIONS

By Minoru WAKABAYASHI, Ryoichi SASAKI and Yoshio KISHIMA

Synopsis

This paper presents some results obtained from a series of experiments on the strength and behavior of structural connection consisting of centrifugally-cast steel pipe column and wide flange beam. Three types experiments were carried out; "vertical load type", "horizontal load type", and simplified "tension type" tests.

Test result implies that the thickness of the pipe column at the connection significantly affects the strength and behavior of the beam-to-column connections as the ones investigated, and so does the existence of ring stiffeners. The result also indicates that this type of connections has much better characteristics both in strength and in ductility, when ring stiffeners are provided than when without them.

1. ま え が き

本研究は、近年わが国でとみに採用されている、鋼管構造中の、鋼管柱とH形はり接合部をとりあげ、それが鉛直荷重、あるいは、地震や風のような水平荷重を受けるときに示す挙動および耐力を、接合部の実大実験ならびに2種類の模型実験によって検討したものである。とくに本研究では、次の2点に着目した。

- 1) 接合部附近に設けられる、鋼管柱の厚肉部（パネルゾーン）の管壁厚さおよびその長さが、接合部全体の變形性状・耐力に与える影響をみる。
- 2) 接合部のスチフナーの有無による、さらには、スチフナーの寸法の相違による、接合部全体の變形挙動や耐力の差違を調べる。

模型実験としては、実大の約1/3の試験体2体についてそれぞれ、鉛直荷重時および水平荷重時に相当する載荷をし、その挙動を調べた。これら2体の模型実験は、後に行なった実大実験のパイロット・テストとしての意味をも同時に持ち、その載荷方法、ならびに種々の測定方法を検討した。この模型試験体をさらに簡単化し、鉛直荷重を受ける接合部の引張り側フランジと鋼管柱だけを取り出した、“引張り型”試験体について、上述のように、鋼管柱厚肉部の管壁厚さ、リング・スチフナーの有無および寸法をパラメーターとして、それらが接合部の全体としての挙動に及ぼす影響を調べた。このための“引張り型”試験体は合計11体である。

実大実験のための試験体は、上述の模型実験用試験体と同じプロポーションを持つものとし、鉛直荷重を受けるものと、水平荷重を受けるものと、それぞれ1体づつについて実大実験を行なった。ここで、“引張り型”および模型の実験から得られる結果を実大実験からのものと比較することによって、この種の模型実験の有用性を確かめることも、本研究の目的とするところであった。

Table 1 Chemical composition of centrifugally-cast steel pipe — Japanese Industrial Standard and Chemical Analysis results. (%)

Specimen	C	P	S	Mn	Si	C _{eq}
PJ-0, 1	0.17	0.032	0.014	1.20	0.21	0.38
PJ-2, 4	0.15	0.022	0.014	1.24	0.31	0.37
PJ-3, 6	0.16	0.024	0.022	1.17	0.36	0.37
PJ-5 (column)	0.14	0.019	0.030	1.19	0.21	0.35
PJ-10 (column)						
PJ-5 (joint)	0.15	0.026	0.018	1.26	0.23	0.37
PJ-7						
PJ-10 (joint)						
PJ-8,9	0.19	0.035	0.025	1.31	0.36	0.42
PJVM	0.18	0.021	0.023	1.28	0.28	0.39
PJHM						
PJVF	0.17	0.020	0.014	1.20	0.24	0.38
PJHF	0.18	0.021	0.012	1.43	0.27	0.43
JIS G5201 (SCW-50-CF)	0.20 (max.)	0.040 (max.)	0.040 (max.)	—	—	0.44 (max.)

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%)$$

Table 2 Material properties — Japanese Industrial Standard and Test results.

	Specimen	Tension Test			Impact Test
		σ_y kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	Elongation %	kg·m
Pipe Column	PJ-0, 1	32.3	54.5	35.9	4.6
	PJ-2, 4	36.1	52.5	29.8	5.1
	PJ-3, 6	35.5	52.5	30.3	5.3
	PJ-5 (column)	35.5	52.7	29.5	4.3
	PJ-10 (column)				
	PJ-5 (joint)				
	PJ-7	34.0	52.4	30.6	3.4
	PJ-10 (joint)				
	PJ-8, 9	38.3	53.6	29.2	4.7
	PJVM	35.3	54.8	29.1	4.3
	PJHM				
	PJVF	35.3	51.0	36.7	6.4
	PJHF	38.1	53.7	35.3	4.3
	JIS G5201 (SCW 50-CF)	32 (min.)	50 (min.)	23 (min.)	2.8 (min.)
H-Beam	PJ-0-2	34.3	56.1	23.6	
	PJ-3-10	35.0	56.1	23.5	
	PJVM	31.8	44.7	33.3	
	PJHM				
	PJVF	31.4	50.2	34.1	
	PJHF	30.1	48.4	36.1	

2. 実験の計画

2.1 遠心力鋳鋼管について

試験体の柱材として用いた鋼管は、遠心力鋳鋼管であり、これは日本工業規格 (JIS-G5201 溶接構造用遠心力鋳鋼管) に基づいて、製造、検査、試験を行なわれた材料である。採用した鋳鋼管は、そのうちの、SCW50-CF であり、その化学成分および炭素当量は、Table 1 のように定められている。また、この材料の機械的性質は、引張試験による降伏点応力度 (σ_y)、引張り強さ (σ_u) と伸び、およびシャルピー衝撃試験による、吸収エネルギー量について、それぞれ最小値が Table 2 のように定められている。

2.2 鉛直荷重を受ける接合部の実験

鉛直荷重を受ける接合部の実験として、実大実験および実大の約 1/3 の模型実験のほかに、もう一種類の、さらに単純化された試験体についての“引張り型”実験も試みた。すなわち、鉛直荷重下の接合部附近から、引張り側のフランジとスチフナー・リングおよび鋼管柱だけを取り出した試験体に引張り力を加えて実験した。鋼管柱の寸法は模型試験体と同じであり、この、“引張り型”試験体では、特に、鋼管柱の接合部近傍での、管壁厚さと厚肉部の長さをパラメーターとし、それぞれ2種とった。さらに、この11体の“引張り型”試験体には、スチフナーのないものも5体含まれ、スチフナーの有無による、接合部全体としての挙動の相違を調べることにした。また、リング・スチフナーのついた“引張り型”試験体6体では、リング・スチフナーの厚さ (フランジ板の厚さに等しい)、および最小幅を変え、これらの寸法が接合部の変形性状・耐力に及ぼす影響を調べた。したがって、これら11体の“引張り型”試験体には、ひとつも重複したものはない。

“引張り型”試験体のひとつを、Fig. 1 に模式的に示す。鉛直荷重を受ける接合部では、H形はりのウェブ中心線に関して、上下のフランジが逆対称の力を受ける状況にあるので、このウェブ中心線上では、鋼管柱には変形を生じないものとみなし、したがって、“引張り型”試験体では、鋼管柱をこの位置で切り (ウェブせいの 1/2, l_2) 鋼板を溶接し、この点での鋼管の変形を抑制した。また、同図に示すように、鋼管柱の反対側の長さ (l_1) は、想定した柱のモーメントの反曲点位置を越えたところまでとった。

本実験で採用したスチフナーの形は、Fig. 1 に示したような、円弧の 1/4 の形のリング・スチフナー1種とした。これは、接合部附近での、予測しがたい応力集中現象をできるだけ避けるためである。

鉛直荷重を受ける接合部の実大および模型実験は、Fig. 2 に示されたような方法で行なった。実大実験と模型実験とは全く同じ要領であり、ただ試験体の寸法だけが異なる。

2.3 水平荷重を受ける接合部の実験

実大試験体およびその約 1/3 の模型試験体のそれぞれ1体づつについて、水平荷重を加える実験を行なった。形状は実大、模型試験体とも同じであり、これらの試験体形状の概略、および載荷方法を模式的に Fig. 3 に示す。載荷の機構を簡単にするために、鋼管柱とH形はりからなる十字型の接合部試験体を、X字型に試験機内に据え、1台の圧縮試験機によって図示のように載荷した。この載荷の仕組みも、実大、模型の両実験について全く同様である。

これら鉛直荷重、あるいは、水平荷重を受ける接合

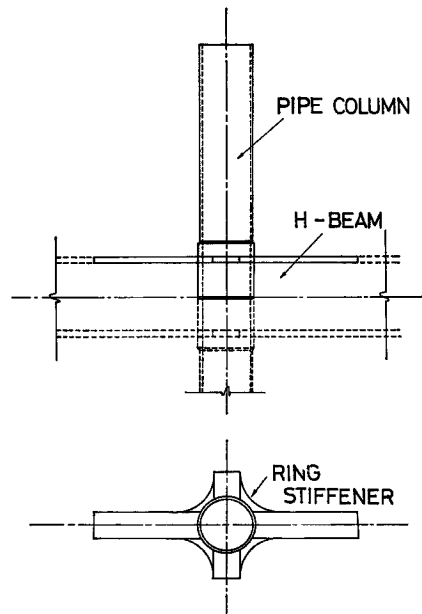


Fig. 1 Philosophy of “tension type” specimen.

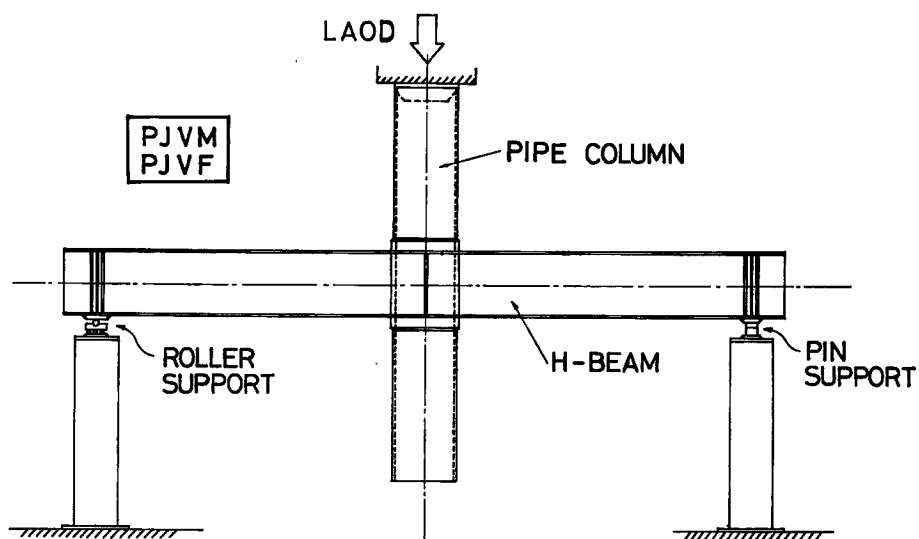


Fig. 2 Loading system for "vertical load type" testing—PJVM and PJVF.

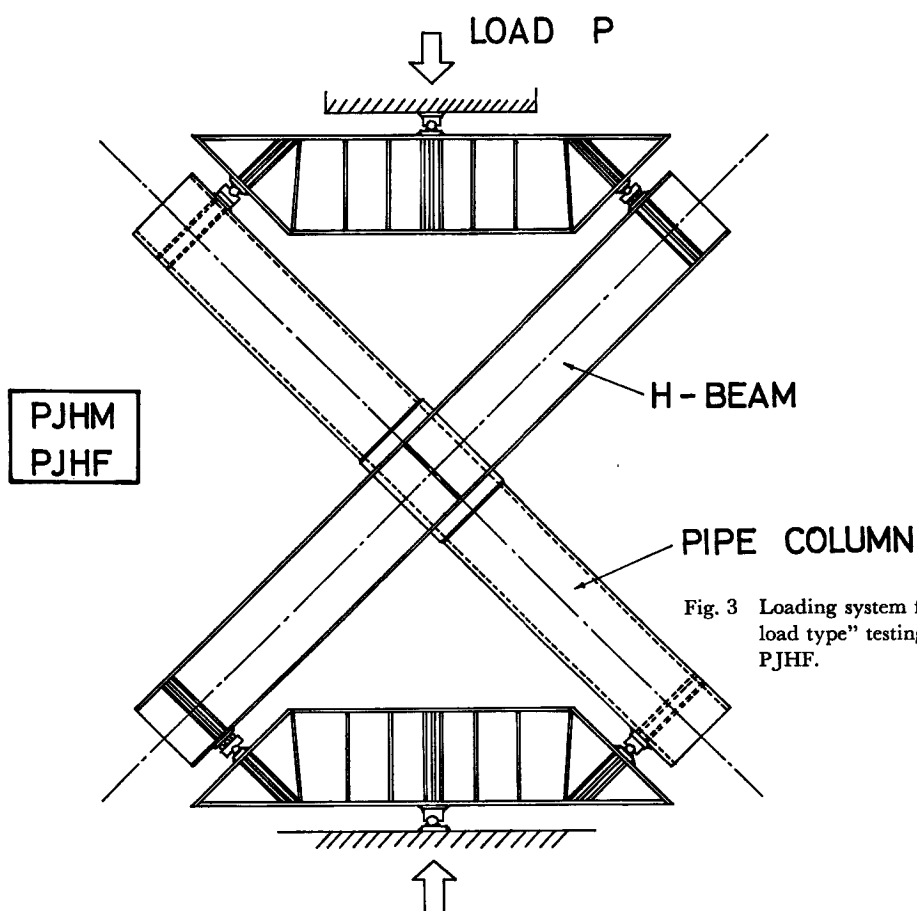


Fig. 3 Loading system for "horizontal load type" testing—PJHM and PJHF.

Table 3 Dimensions of test specimens—PJVM, PJVF, PJHM and PJHF. (mm)

Specimen Name	Pipe Column		H-Beam	Size	Loading
	Diameter	Thickness			
PJVM	200	× 8	H-200×100×5.5×8	Model	Vertical
PJVF	600	× 24	H-588×300×12×20	Full Scale	Vertical
PJHM	200	× 8	H-200×100×5.5×8	Model	Horizontal
PJHF	600	× 24	H-588×300×12×20	Full Scale	Horizontal

部の、実大および模型実験の計画を Table 3 に示す。

3. 試験体の形状と寸法

3.1 実大実験のための試験体

鉛直荷重あるいは水平荷重を受ける接合部の、実大実験のための試験体を、それぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示す。このいずれも、後述の“引張り型”試験体の PJ-6 と同じプロポーションを持つものである。

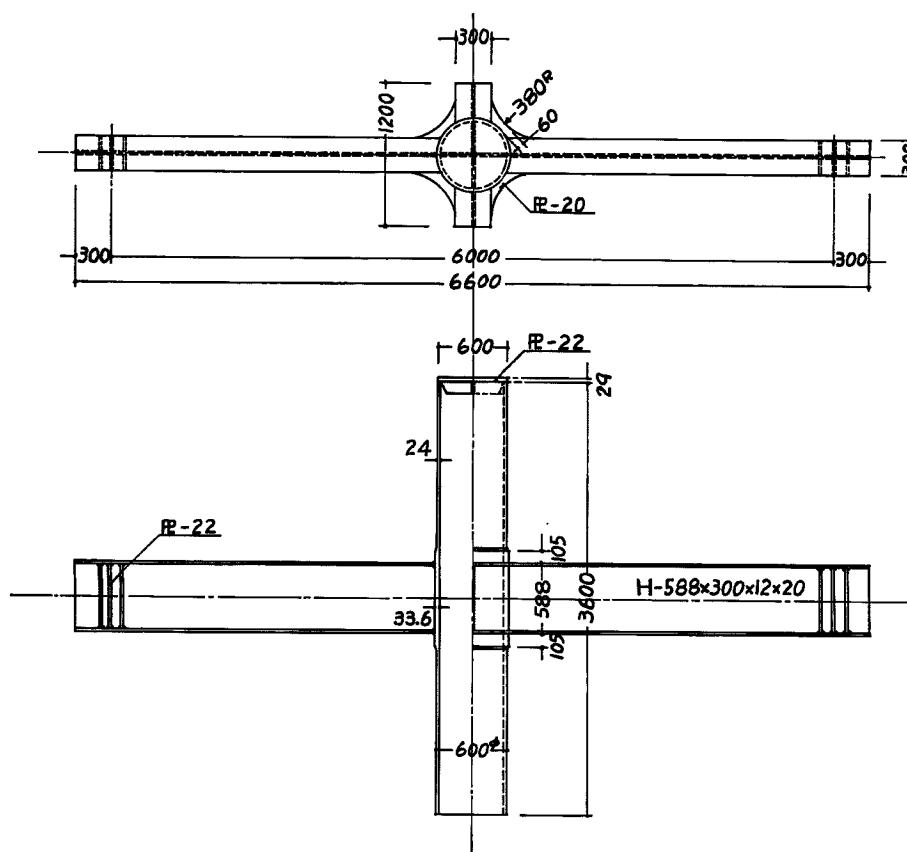


Fig. 4 Detail of full scale specimen—PJVF.

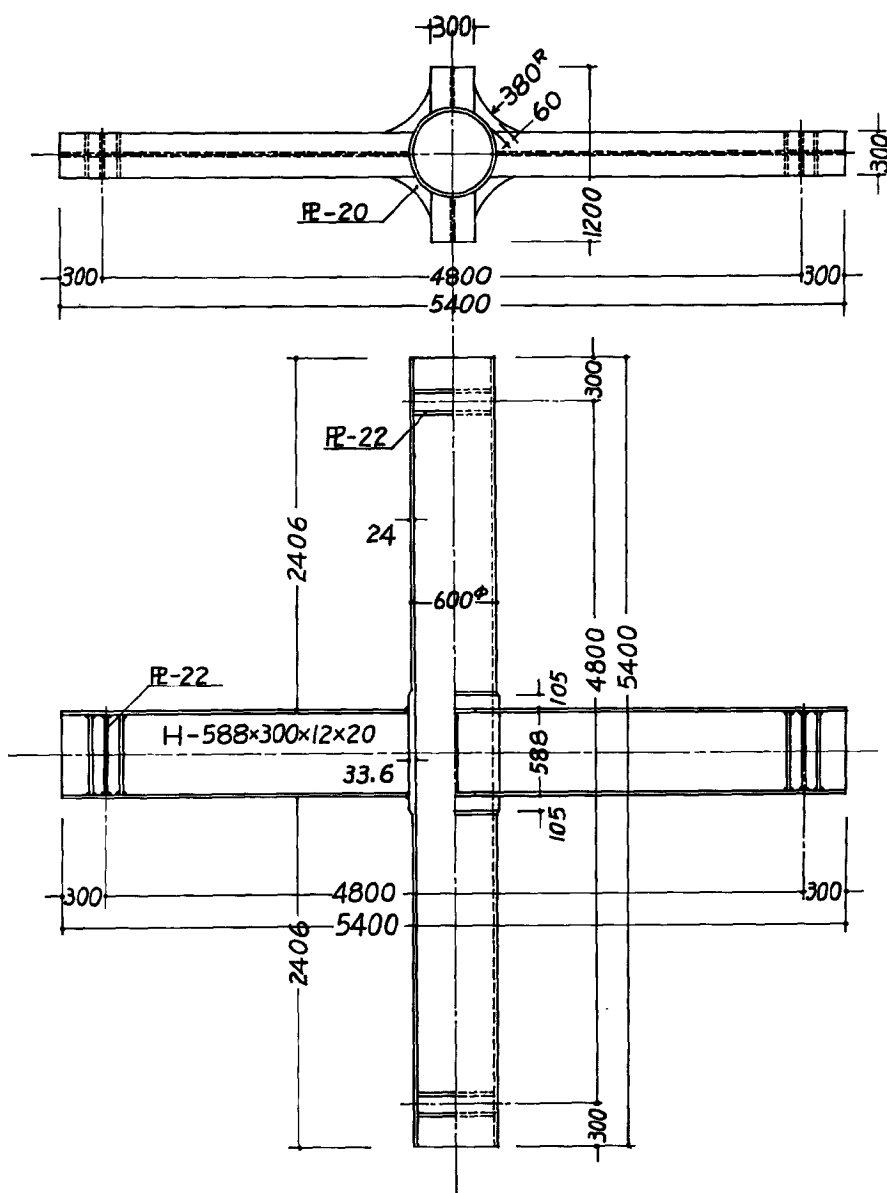


Fig. 5 Detail of full scale specimen—PJHF.

3.2 模型実験のための試験体

鉛直荷重あるいは水平荷重を受ける接合部の、模型実験用試験体を、それぞれ Fig. 6 と Fig. 7 に示す。これらはいずれも対応する実大試験体と同じ形状を持ち、寸法はその約 1/3 である。すなわちこれらは、後述の、“引張り型”試験体と全く同じ形状、寸法を持っている。ただし、H 形はりについては、実験中に加えられる曲げモーメントが、実大実験の場合の 1/3 になるように、寸法を縮小した。

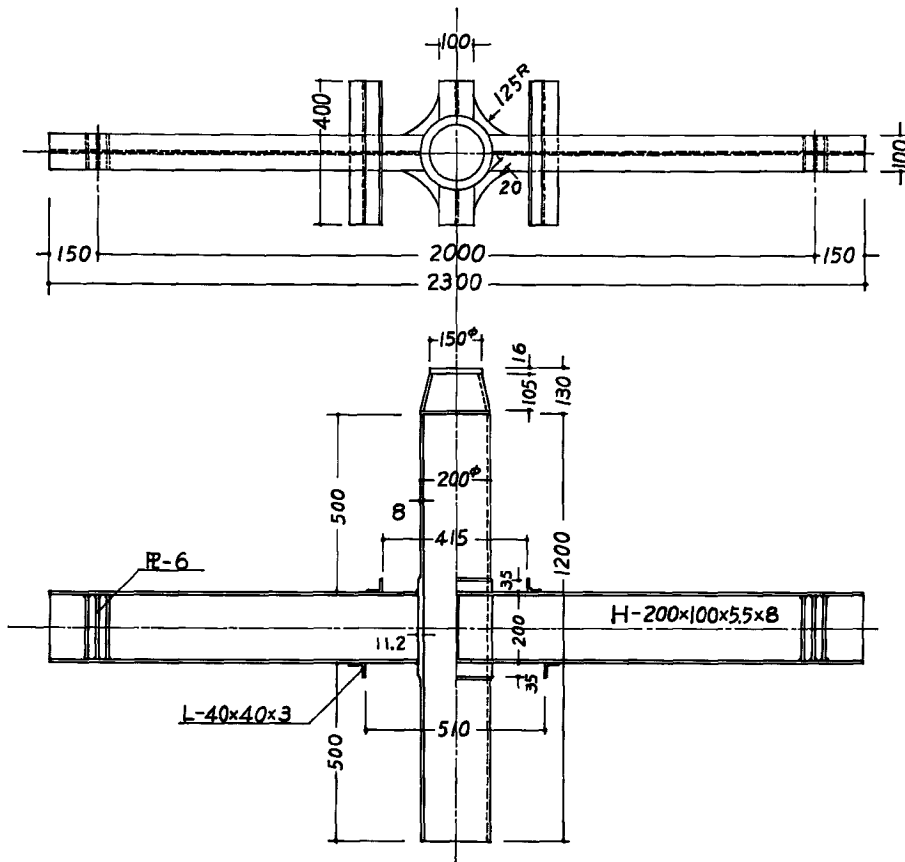


Fig. 6 Detail of model specimen—PJVM.

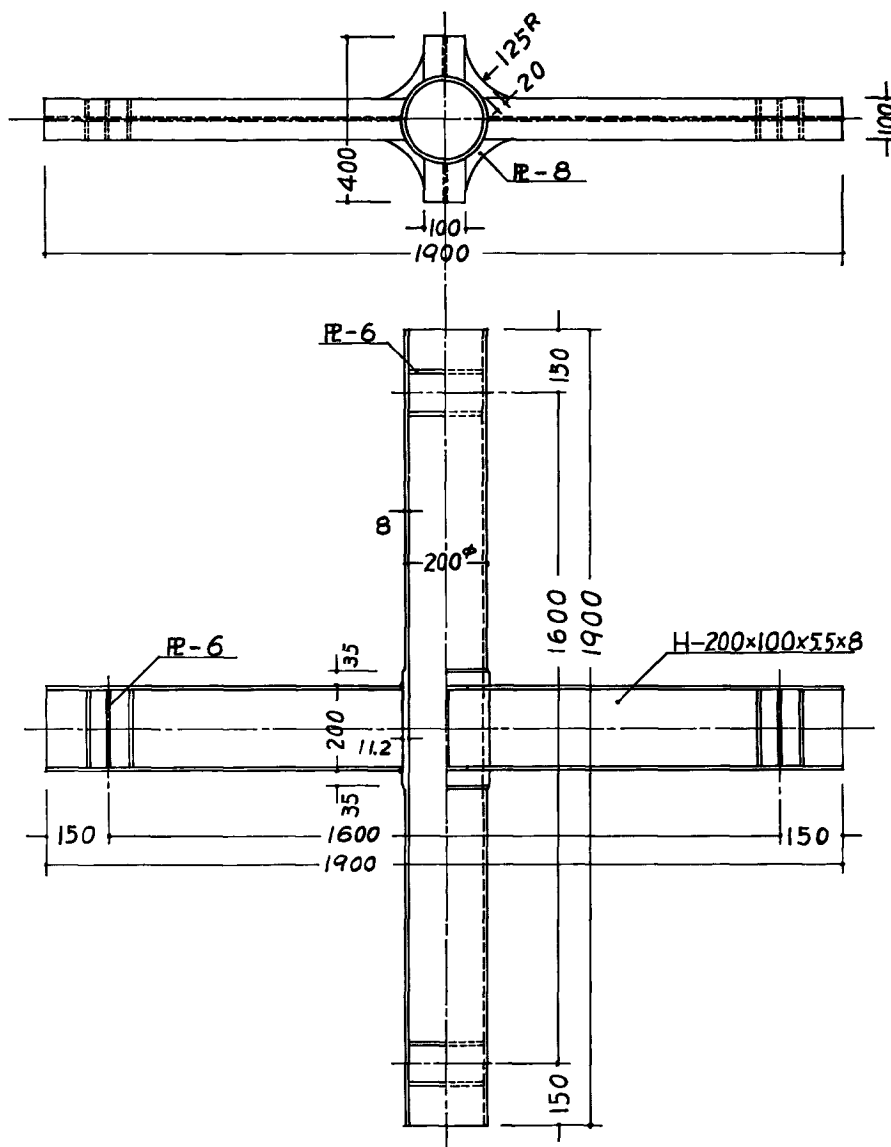


Fig. 7 Detail of model specimen—PJHM.

3.3 “引張り型” 実験のための試験体

“引張り型”試験体は合計11体あり、それらの形状と寸法の名称（記号）は Fig. 8 に、また個々の寸法は Table 4 に示されている。11体のうち 5 体 (PJ-0~2, 8, 9) はスチフナーのないもの、残りの 6 体 (PJ-3~7, 10) はリング・スチフナーのあるものである。PJ-0 と PJ-1 は他の 9 体に比較して大きな試験体であり、さらに PJ-1 と PJ-2 は寸法は異なるが、プロポーションは全く同一である。なお、PJ-10 は、形状、寸法とも PJ-7 と同一であって、ただ溶接によって生じる推測不能の要素をできるだけ少なくするために、接合部の溶接組み立て後に焼鈍した ($610 \pm 10^{\circ}\text{C}$ で 3.5 時間のひずみ取り焼鈍)。

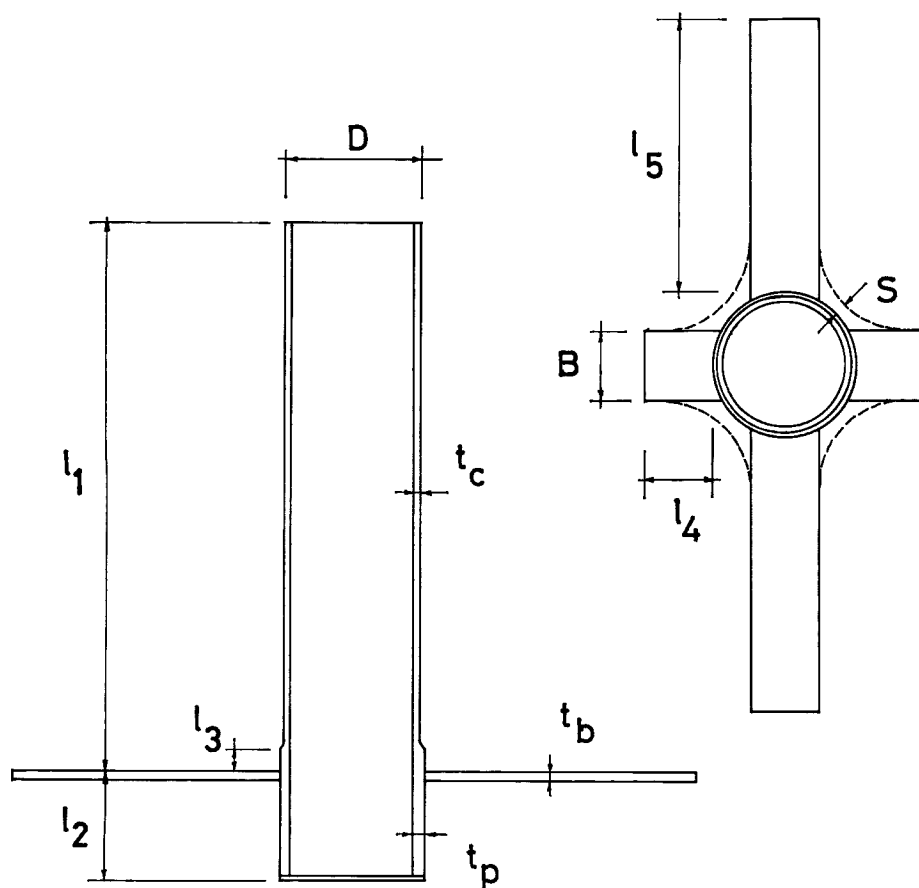


Fig. 8 Nomenclature for "tension type" specimens.

Table 4 Dimensions of "tension type" specimens. (mm)

Specimen Name	Pipe Column							H-Beam				Ring Stiffener	
	D	t_p/t_c	t_c	t_p	l_1	l_2	l_3	B	t_b	l_4	l_5	t	S
P J - 0	300	1.0	12	12.0	1200	200	50	150	25	150	500		
P J - 1	300	1.4	12	16.8	1200	200	50	150	25	150	500		
P J - 2	200	1.4	8	11.2	800	150	35	100	22	100	500		
P J - 8	200	1.6	8	12.8	800	150	35	100	22	100	500		
P J - 9	200	1.4	8	11.2	800	150	50	100	22	100	500		
P J - 3	200	1.4	8	11.2	800	150	35	100	22	100	500	22	30
P J - 4	200	1.4	8	11.2	800	150	35	100	22	100	500	22	20
P J - 5	200	1.4	8	11.2	800	150	35	100	22	100	500	22	10
P J - 6	200	1.4	8	11.2	800	150	35	100	12	100	500	12	20
P J - 7	200	1.4	8	11.2	800	150	35	100	12	100	500	12	10
P J -10 (annealed)	200	1.4	8	11.2	800	150	35	100	12	100	500	12	10

4. 実験の方法

4.1 “引張り型” 実験 (PJ-0~10)

引張り力の加力は、合計11体の“引張り型”試験体のうち PJ-0 と PJ-1 については、能力 200ton の、また、その他については、能力 100ton の、いずれも油圧式万能試験機によって行なった。これら“引張り型”実験では、試験体を試験機内に据えたのち、鋼管柱の自重による、望まぬ変形を除くために、重錘によって、カウンター・バランスし、実験中は、鋼管柱を水平に保つようにした。なお、引張り力の载荷は静的に行なった。“引張り型”実験中の試験体および測定装置を、**Photo. 1** に示す。

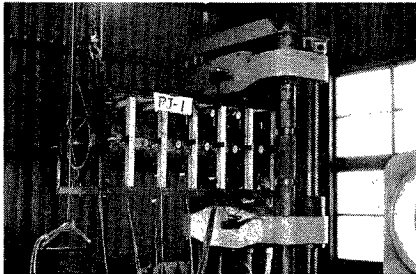


Photo. 1 “Tension type” test set-up.

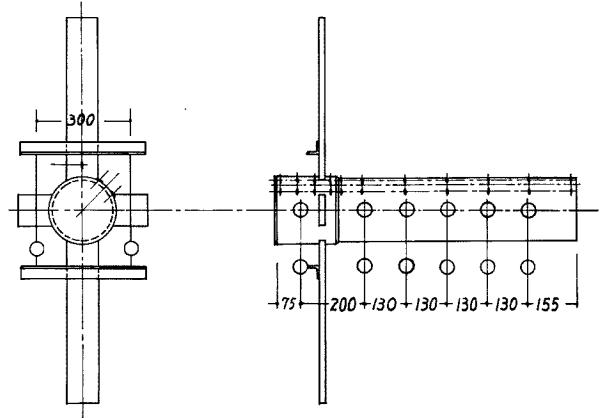


Fig. 9 Typical wire strain gage location for “tension type” specimens—PJ-8.

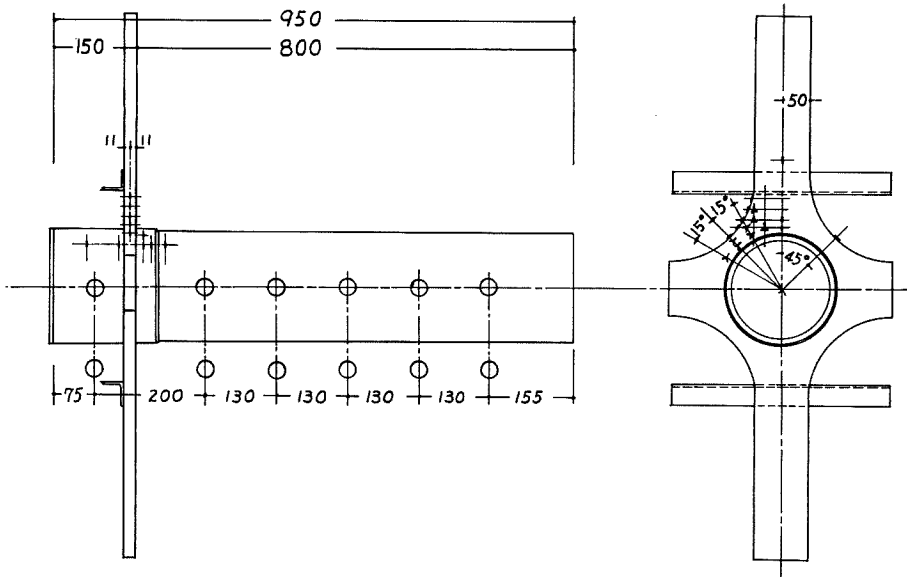


Fig. 10 Typical wire strain gage location for “tension type” specimens—PJ-3.

測定の対象としたのは、1) フランジ・プレートとのひずみ、2) リング・スチフナーおよび鋼管柱の近傍での、フランジプレートのひずみ (PJ-3~7, 10のみ)、3) 鋼管柱の外表面のひずみ、4) 鋼管柱の長さ方向に沿った変形量、および、5) 接合部全体の、引張り力方向の伸び、の諸量である。1) の測定には、単軸のワイヤー・ストレイン・ゲージ (W. S. G.) を、2) の測定には、3 軸 (120°) のロゼット・ゲージを、3) には、2 軸 (90°) のクロス・ゲージを、また 4) と 5) には、ダイヤルゲージ (1/100mm) を用いた。スチフナーのない試験体の W. S. G. 貼付位置の一例 (PJ-8) を Fig. 9 に、リング・スチフナーのついたものの一例 (PJ-3) を Fig. 10 に示す。またダイヤル・ゲージによる測定点、測定方法の詳細を Fig. 11 に示す。

“引張り型”実験は、試験機の能力の許すかぎり、試験体のどこかに亀裂を生じ、引張り力の最大値を越えるところまで続け、諸変形量を測定した。

4.2 鉛直荷重を受ける接合部の実験

4.2.1 模型実験 (PJVM)

鉛直荷重を受ける模型実験について、荷重方法は、Fig. 2 に示した通りである。この実験では、油圧式ジャッキによって加力し、静的単調荷重とした。測定した変形量は、1) はりフランジ中心線上のひずみ (単軸 W. S. G.)、2) 鋼管柱近傍でのフランジ・プレートおよびリング・スチフナーのひずみ (上下両側のフラ

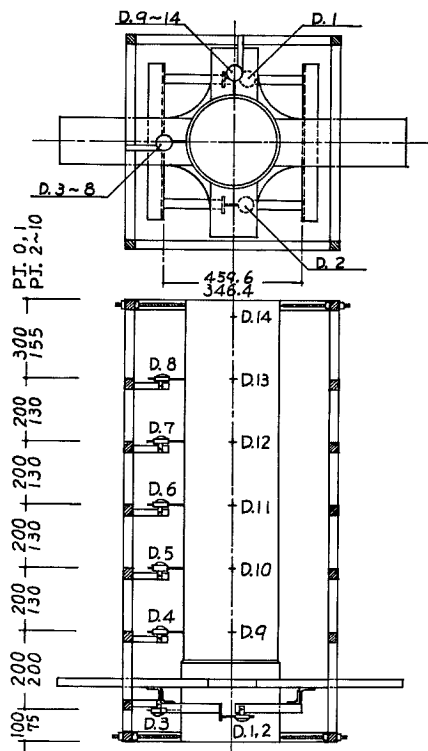


Fig. 11 Dial gage instrumentation for “tension type” testing.

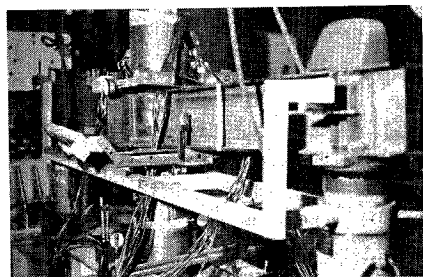


Photo. 2 Test set-up for “vertical load type” testing. (PJVM)

ンジについて両面とも。3 軸 (120°) の W. S. G.)、3) 鋼管柱の外表面のひずみ (2 軸 (90°) の W. S. G.)、4) 接合部のたわみ、5) 接合部の回転量、6) ローラー支点での移動量、7) 接合部位置および鋼管下端での面外変位、の諸量である。4) ~ 7) の測定にはダイヤル・ゲージを用いた。4) および 5) を測定するためのダイヤル・ゲージは全て、H 型はりの両支点で支えられた木製の測定枠に取り付けられている。この測定装置を Photo. 2 に示す。W. S. G. の貼付位置は、基本的には、“引張り型”試験体の PJ-6 と同じである。

4.2.2 実大実験 (PJVF)

鉛直荷重を受ける実大実験については、荷重方法の原理、測定方法とも、PJVM (4.2.1) の場合と同様であるが、加力は、能力 1 000ton の大型圧縮試験機を用いた。

4.3 水平荷重を受ける接合部の実験

4.3.1 模型実験 (PJHM)

水平荷重を受ける接合部の模型実験は、Fig. 3 に示したような方法で行なった。荷重は油圧ジャッキに依り、静的単調荷重とした。測定した変形量は、1) はりフランジ表面中心線上のひずみ (上下両側のフラ

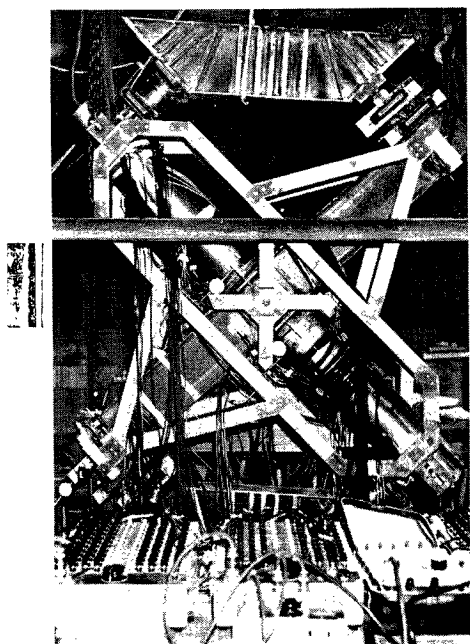


Photo. 3 Test set-up for "horizontal load type" testing (PJHM).

ンジについて。単軸の W.S.G.), 2) リング・スチフナーおよび接合部近傍でのフランジのひずみ (両側フランジの両面について。3 軸 (120°) のロゼット・ゲージ), 3) 鋼管柱の外表面のひずみ (2 軸 (90°) のクロス・ゲージ), 4) H 形はり両端の支点でのたわみ, 5) 接合部パネル・ゾーンのせん断変形, 6) ローラー支点の移動量, 7) 接合部位置での面外変位量, の諸量である。4) ~ 7) の測定はダイヤル・ゲージに依った。そのうち, H 形はりの両端のたわみは鋼管柱の上下両端で支持された測定装置用の木枠から腕木を出し, ダイヤル・ゲージで測り, また, 接合部パネル・ゾーンのせん断変形は, 接合部両面の中心で固定された木枠に取り付けたダイヤル・ゲージに依って, 4 方向から測定した。W.S.G. の貼付位置は, "引張り型" 実験の PJ-6 の場合と基本的に同じである。Photo. 3 にこの実験の様様を示す。

4.3.2 実大実験 (PJHF)

水平荷重を受ける接合部の実大実験は, その載荷方法, 測定した諸変形量, 測定方法とも, 基本的には PJHM (4.3.1) の場合と同様であるが, 加力は, 能力 1 000 ton の大型圧縮試験機によって行なった。

5. 実験の結果

5.1 材料の化学組成および機械的性質

本実験に用いた遠心力鋳鋼管材料について行なった, 化学分析試験の結果を, Table 1 に示す。これらの値はいずれも, JIS G5201 の規格を満足している。また同じ材料について行なった, 引張り試験および衝撃試験の結果は, Table 2 に示されている。引張り試験の結果は降伏点応力度 (σ_y), 引張強さ (σ_u), それらの比 (σ_y/σ_u) および伸び率を, また, 衝撃試験の結果は, シャルピー試験による吸収エネルギーの値を, それぞれ示してある。これらの値はいずれも, 同じ規格を満たしている。

"引張り型" 試験体に用いた, フランジ・プレートおよび, その他の試験体に用いた, 圧延 H 形鋼について行なった引張り試験の結果も, 同じ表に示されており, それぞれ, 構造用鋼材 SM50, および SM41 に関する JIS 規格の値を満足している。

5.2 "引張り型" 実験の結果

5.2.1 スチフナーのないもの (PJ-0~2, 8, 9)

リング・スチフナーのない鋼管接合部の "引張り型" 実験で観察された事柄を, PJ-0, 1, 2, 8, 9 の 5 体の試験体について, 以下に記す。

PJ-0: 引張り力を増すとともに, フランジ・プレートと鋼管との取り付け隅角部に亀裂を生じて耐力は急に降下した。管壁の変形は比較的小さい。この亀裂箇所は Photos. 4, 5 に示されている。最大耐力は 84.3 ton であった。

PJ-1: これと, 上の PJ-0 との 2 体だけが, 他のものに比較して, 寸法の大きな試験体である。亀裂を生じた位置, および, 破壊の状況は, 上の PJ-0 と同様であり, 最大耐力は 104.0 ton であった。

PJ-2: 亀裂は, 上記 2 体の場合と同様に, フランジ・プレートと鋼管との溶接接合部に生じ, 最大耐力に至った。その後, フランジ・プレートは, その先端からはがれて抜けるような状況となった。鋼管

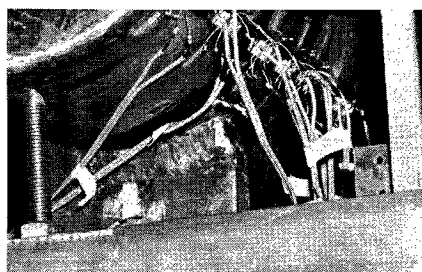


Photo. 4 Detail of crack-PJ-0.

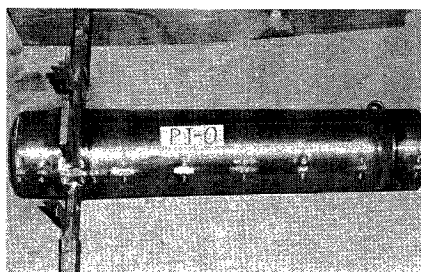


Photo. 5 "Tension type" specimen PJ-0 after test.

壁には亀裂は生じなかった。最大耐力は48.0 ton であった。この試験体の破壊の状況を **Photo. 6** に示す。

PJ-8 : PJ-2 より、鋼管の肉厚が大きい試験体であり、その他の寸法は、PJ-2 と全く同じである。PJ-2 より最大耐力は大きい (68.0 ton), 荷重—変形曲線は似た形をしており、破壊状況も、同様であった。

PJ-9 : PJ-2 と比較して、鋼管の厚肉部の長さ (l_3) が長くなった試験体である。荷重—変形曲線、破壊状況とも上記のPJ-2 あるいは、PJ-8 と良く似ていた。最大耐力は 55.0 ton であった。

これら5体の、スチフナーのない鋼管接合部の、“引張り型” 実験によって得られた、荷重—変形曲線を **Fig. 12** に示す。この図で縦軸は、フランジ・プレートに加えられた引張り力 P (ton), 横軸は、引張り方向の、接合部全体としての伸び量を、その検長で除した、無次元変形量である。5体のうち、PJ-0 と PJ-1 とは、他の3体に比べて寸法の大きな試験体であり、また PJ-1 と PJ-2 は前述のように、寸法は異なるが、プロポーションは全く同じものである。そこで、全5体を、合せ比較するために、図の縦軸を、計算による降伏荷重 P_y (後述) で除した P/P_y に変換すると、

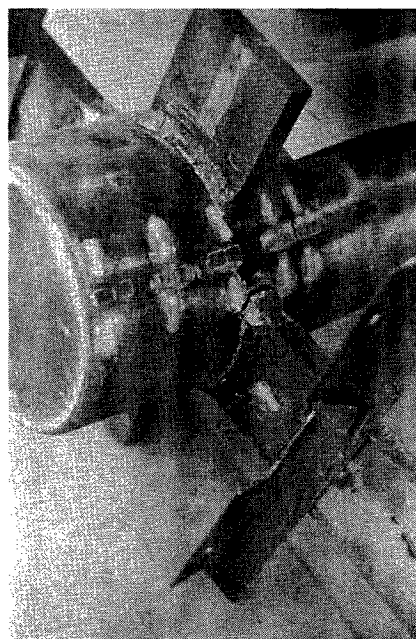


Photo. 6 Failure in "tension type" specimen PJ-2.

Table 5 Comparison of "tension type" specimens without stiffener—Effect of pipe thickness.

Specimen	$\frac{t_p}{t_e}$	P_u (ton)	Ratio	$\frac{\delta}{l}$ at P_u	Ratio
P J - 0	1.0	38.9	1.00	5.25×10^{-2}	1.00
P J - 1	1.4	48.0	1.23	4.00	0.75
P J - 2				3.90	0.75
P J - 8	1.6	68.2	1.75	3.76	0.72

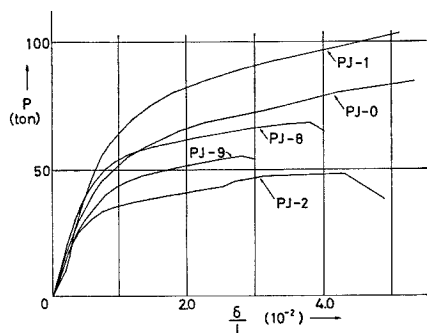


Fig. 12 Load-elongation curves of "tension type" specimens without stiffener—PJ-0~2, 8 and 9.

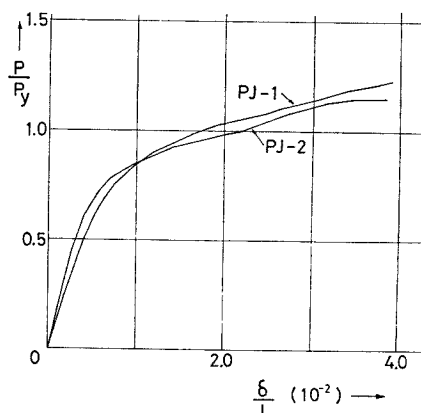


Fig. 13 Modified load-elongation curve of PJ-1 compared with that of PJ-2.

Table 6 Comparison of "tension type" specimens without stiffener—Effect of length of thick portion.

Specimen	l_3	P_u (ton)	Ratio	$\frac{\delta}{l}$ at P_u	Ratio
P J - 2	35	48.0	1.00	3.95×10^{-2}	1.00
P J - 9	50	55.0	1.15	2.80	0.72



Photo. 7 Failure of stiffener in "tension type" specimen PJ-3.

この PJ-1 と PJ-2 との荷重—変形曲線は、Fig. 13 のようになり、両者の一致の良いことが分る。そこで、これら 2 体の耐力を全く同じと考え、耐力の比に従って、スチフナーのない試験体 5 体について比較すると、Table 5 のようになる。表中、 l_p は鋼管柱の接合部に設けられた厚肉部の管壁厚さ、 l_e はそれ以外の部分の管壁厚さ、 P_u は最大引張り力であり、 P_u の比は PJ-0 を基準としたものである。また、" δ/l at P_u " は、最大耐力時の、接合部の変形量であり、それらの比は、やはり PJ-0 を基準にした数値である。特にこの表は、鋼管厚肉部の管壁厚さと、耐力・変形能力との関係を示すものであり、表から分るように、管壁が厚くなるに従って、耐力が大きくなるが、変形能力は次第に劣ってくる。

次に、厚肉部の長さ (l_3) の違いによる、耐力・変形能力の差をみるために、PJ-2 と PJ-9 (l_3 以外の寸法は全く同じ) のみを取り出したのが、Table 6 である。この表で、2 種類の比率は、いずれも PJ-2 を基準として求められている。表から分るように、厚肉部が長くなるほど、耐力は大きくなり、変形能力は逆に悪化している。

5.2.2 スチフナーのあるもの (PJ-3~7, 10)

リング・スチフナーのついた“引張り型”試験体について、実験によって観察された事柄を以下に記す。

PJ-3：最大耐力は118.0tonであったが、引張り力がおよそ104tonの時に、衝撃者とともに、フランジ・プレートと鋼管との境界の溶接部分に亀裂を生じ、更に引張り力上昇の後に、この亀裂がスチフナーを横切って、最大耐力に至った。亀裂の状態を **Photo. 7** に示す。

PJ-4：この実験は、試験機的能力の都合によって、引張り力が102tonの時点で中止した。この時点で、降伏荷重は明らかにすぎている。この試験体のリング・スチフナーは、その最小幅 (S) が20mmで、PJ-3 よりも小さいが、最大耐力はそれほど低くはならなかった。

PJ-5：リング・スチフナーの最小幅が更に小さくなっている試験体であるが、最大耐力はそれほど低下しなかった。スチフナーに亀裂を生じ、耐力の低下を見た。最大引張り力は102.4tonであった。

PJ-6：フランジ・プレートの板厚が、PJ-4 よりも小さな試験体である。引張り力が降伏荷重を越えた後、急に伸びが増大するのは、PJ-4 と変らないが、リング・スチフナーより、フランジ・プレートのひずみの増加が著しく、この部分に亀裂を生じた。したがって、リング・スチフナーにはまだ余裕があった。最大耐力は69.2tonであった。

PJ-7：これは、PJ-6 よりもスチフナーの最小幅が更に小さくなったものであり、同時に、PJ-5 と比較して、フランジ・プレートが薄いものである。PJ-6 の場合と同様に、フランジ・プレートに生じた亀裂が耐力を決定しているが、リング・スチフナーも、ほぼ同時に耐力に至ったようである。最大引張り力は67.2tonであった。

PJ-10：形状・寸法ともにPJ-7と全く同じ試験体であるが、これは接合部の溶接組み立て後に、全体を焼鈍したものである。破壊状況などはPJ-7と同様であった。最大荷重は57.0tonであった。

フランジ・プレートの厚いもの ($t_b=22\text{mm}$) 3体 (PJ-3~5) について、荷重と変形の関係を **Fig. 14** に示す。

ここで、縦軸は、引張り力を、フランジ・プレートの降伏荷重で除したもので、加えた引張り力に比例する無次元量であり、横軸は、接合部全体の伸び (δ) を、その検長 (l) で除したもので、接合部の平均的な変

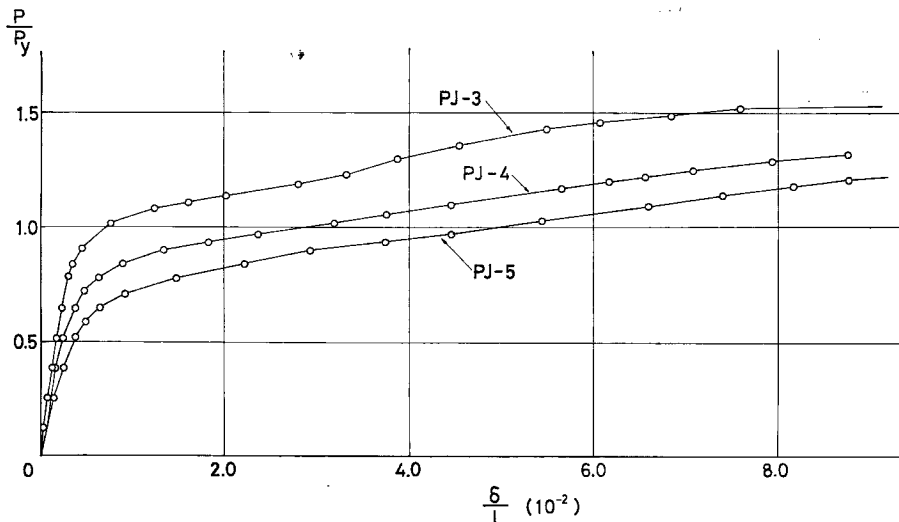


Fig. 14 Load-elongation curves of “tension type” specimens with stiffener—PJ-3~5— $t_b=22\text{mm}$.

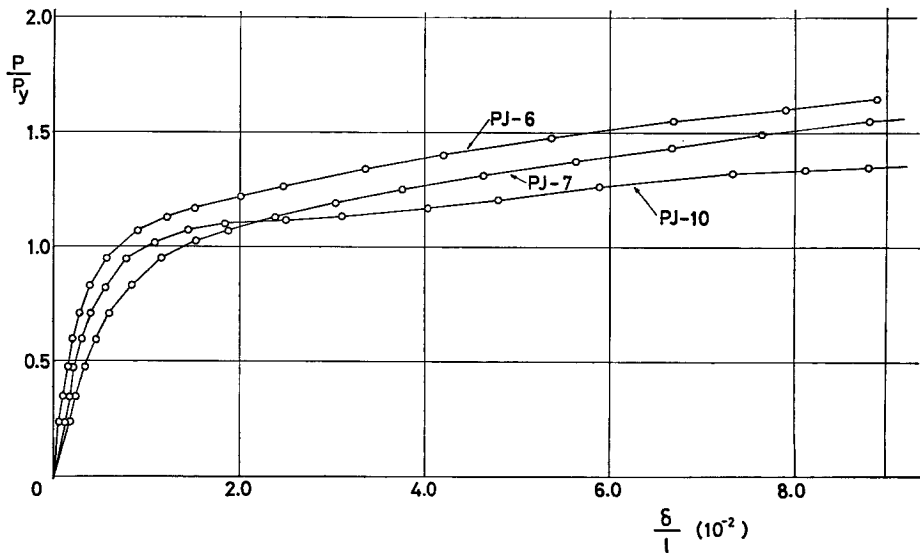


Fig. 15 Load-elongation curves of "tension type" specimens with stiffener—PJ—6, 7 and 10— $t_b=12\text{mm}$

形量を表わす無次元量である。これによると、接合部の剛性は、PJ-3, PJ-4, PJ-5 の順に低くなっている。これら 3 体とも、亀裂は、リング・スチフナーに生じた。

また、フランジ・プレートの厚さが 12mm のもの 3 体 (PJ-6, 7, 10) について、全く同様の、荷重—変形曲線を描いたものが、Fig. 15 である。これによると、接合部の剛性は、PJ-6 が最も高く、PJ-7, PJ-10 がそれに続く。これら 3 体とも、フランジ・プレートで破断したために、最大耐力は互いに近い値であった。

リング・スチフナーのついた“引張り型”試験体 5 体について、それらの最大耐力およびその時の接合部の変形量を比較して Table 7 に示す。PJ-6, 7, 10 では、フランジ・プレートで耐力が尽きたために、リング・スチフナーの最小幅 (S) が最大耐力、あるいは、変形能力に及ぼす影響は、さほど明らかではない。しかし、PJ-3~5 を比較して、この最小幅 (S) が耐力、変形能力に及ぼす影響を、更に、PJ-5 と 7 を比較して、フランジ・プレートの板厚による影響を比較的に明瞭に見ることが出来た。すなわち、リング・スチフナーの最小幅 (S) を変化した試験体 (PJ-3~5) の実験結果より、最小幅が大きくなれば最大耐力は上昇し、変形能力は逆に低下する。しかし、この違いは、いずれも大きくはない。

次に、PJ-5 と比較して、薄いフランジ・プレートを持つ PJ-7 では、耐力、変形能力ともに劣っており、鋼管柱に比べてフランジ・プレートが弱すぎたことが分る。ただし、リング・スチフナーは、このフランジ・プレートとは釣合った寸法であった。

Table 7 Comparison of "tension type" specimens with stiffener — Effect of stiffener size.

Specimen	S (mm)	P_u (ton)	Ratio	$\frac{\delta}{l}$ at P_u	Ratio
P J - 3	30	118.0	1.15	10.12×10^{-2}	0.86
P J - 4	20	—	—	—	—
P J - 5	10	102.4	1.00	11.84	1.00
P J - 6	20	69.2	0.68	8.91	0.75
P J - 7	10	67.2	0.66	10.49	0.86

5.2.3 リング・スチフナーの有無についての比較

リング・スチフナーのある試験体 PJ-3, 5 と、これと同じ寸法を持ち、スチフナーのない試験体 PJ-2 との、結果を比較して、Table 8 に示す。PJ-3 には、最小幅 30mm の、また、PJ-5 には、10mm のリング・スチフナーがついていたが、このいずれも、耐力、変形能力の双方について、スチフナーのない PJ-2 よりは、格段に優れていることが分る。

次に、スチフナーはなく、鋼管の管壁厚さを厚くした試験体 PJ-8 と、PJ-3 および PJ-5 との実験結果を比較したのが Table 9 である。この表でも、これら 3 体について、最大耐力 (P_u) と、その荷重での変形量を比べている。この表の示す通り、リング・スチフナーのあるものは、PJ-8 に比べて、最大耐力において 1.5 倍以上、最大耐力時の変形において 2.7~3.2 倍の値を示し、リング・スチフナーが有効であることを如実に表わしている。

鋼管厚肉部の長さ (l_s) を、PJ-2 よりも長くとした試験体 PJ-9 と、リング・スチフナーのある試験体 PJ-3 あるいは PJ-5 とを比較したのが Table 10 である。この表によっても、いかにリング・スチフナーが有効であるかが良く分る。

以上の種々の比較を総合して、寸法の小さいものでも、リング・スチフナーがついておれば、鋼管接合部の性能は格段に良くなることが分る。また、厚肉部の長さ (l_s) は、接合部の耐力や変形性能に、さほど大きな影響を与えないようであるが、後述のように (6. 参照)、管壁の協力幅と一致するように取るのが望ましいと思われる。

Table 8 Comparison of "tension type" specimens—Contribution of stiffener existence.

Specimen	S (mm)	P_u (ton)	Ratio	$\frac{\delta}{l}$ at P_u	Ratio
P J - 2	none	48.0	1.00	3.95×10^{-2}	1.00
P J - 3	30	118.0	2.45	10.12	2.56
P J - 5	10	102.4	2.13	11.84	3.00

Table 9 Comparison of "tension type" specimen PJ-8 (without stiffener, $t_p/t_c=1.6$) with PJ-3 and 5 (with stiffener).

Specimen	$\frac{t_p}{t_c}$	P_u (ton)	Ratio	$\frac{\delta}{l}$ at P_u	Ratio
P J - 8	1.6	68.2	1.00	3.76×10^{-2}	1.00
P J - 3	1.4	118.0	1.73	10.12	2.69
P J - 5		102.4	1.50	11.84	3.15

Table 10 Comparison of "tension type" specimen PJ-9 (without stiffener, $l_s=50\text{mm}$) with PJ-3 and 5 (with stiffener).

Specimen	l_s (mm)	P_u (ton)	Ratio	$\frac{\delta}{l}$ at P_u	Ratio
P J - 9	50	55.0	1.00	2.80×10^{-2}	1.00
P J - 3	35	118.0	2.15	10.12	3.62
P J - 5		102.4	1.86	11.84	4.23

Table 11 Test results and predictions of “tension type” tests.

Specimen						Experiment		Prediction					$\frac{②}{①}$	$\frac{③}{①}$
	Column (mm)	$\frac{t_p}{t_c}$	l_s (mm)	t_b (mm)	S (mm)			Connection		Flange Plate				
						P_y (ton)	P_u ② (ton)	P_y (ton)	P_u ② (ton)	P_a (ton)	P_y (ton)	P_u ③ (ton)		
P J - 0	300×12	1.0	50	25	—	60.0	84.3	65.1	83.1	123.8	128.3	210.4	0.99	2.50
P J - 1	300×12	1.4	50	25	—	75.0	104.0	82.4	105.3	123.8	128.3	210.4	1.01	2.02
P J - 2	200× 8	1.4	35	22	—	37.0	48.0	41.5	53.1	72.6	77.0	123.4	1.11	2.57
P J - 8	200× 8	1.6	35	22	—	55.0	68.2	49.6	63.3	72.6	77.0	123.4	0.93	1.81
P J - 9	200× 8	1.4	50	22	—	43.0	55.0	41.5	53.1	72.6	77.0	123.4	0.96	2.24
P J - 3	200× 8	1.4	35	22	30	82.0	118.0	84.0	126.6	72.6	77.0	123.4	1.07	1.05
P J - 4	200× 8	1.4	35	22	20	65.0	—	63.0	95.0	72.6	77.0	123.4	—	—
P J - 5	200× 8	1.4	35	22	10	55.0	102.4	40.1	60.4	72.6	77.0	123.4	0.59	1.21
P J - 6	200× 8	1.4	35	12	20	43.0	69.2	43.8	66.0	39.6	42.0	67.3	0.95	0.97
P J - 7	200× 8	1.4	35	12	10	40.0	67.2	27.3	41.1	39.6	42.0	67.3	0.61	1.00
P J -10	200× 8	1.4	35	12	10	40.0	57.0	27.3	41.1	39.6	42.0	67.3	0.72	0.85

これら11体の“引張り型”実験の結果を一覧表にしたのが、Table 11 である。

5.3 鉛直荷重を受ける接合部実験の結果

5.3.1 模型実験の結果 (PJVM)

鉛直荷重を受ける接合部の模型実験結果のうち、荷重—中央たわみ曲線を Fig. 16 に示す。図中、2本

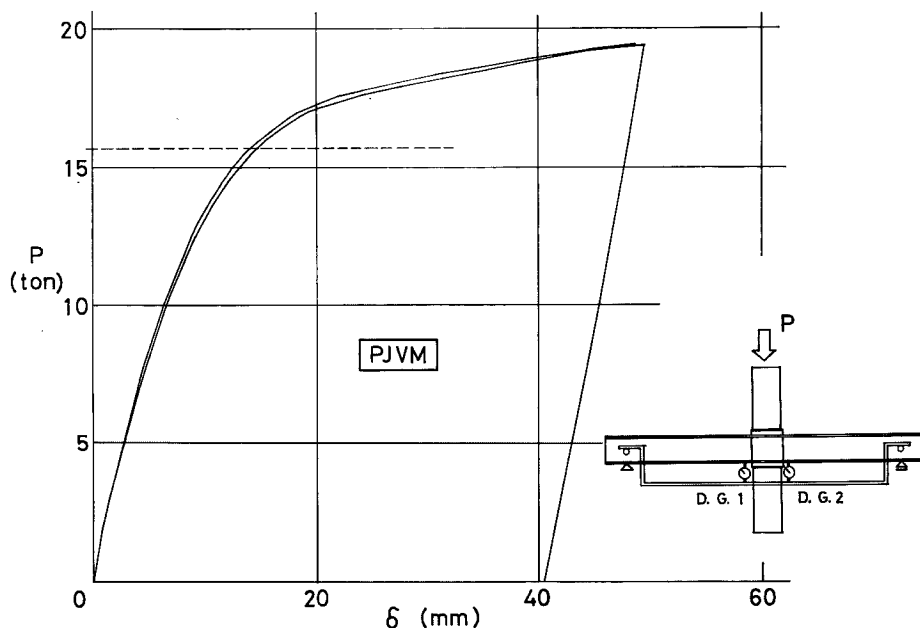


Fig. 16 Load-deflection curve of model specimen under vertical load—PJVM.

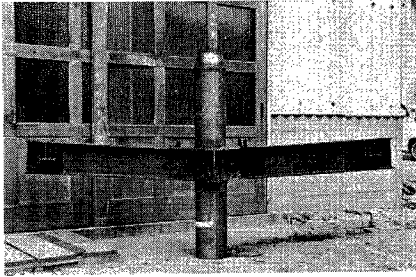


Photo. 8 PJVM after test.

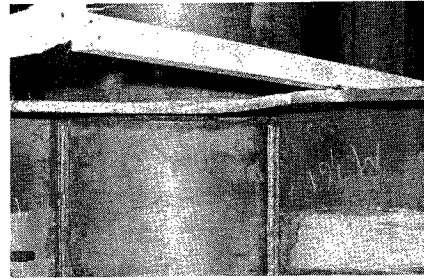


Photo. 9 Close-up of flange local buckling in PJVF.

の曲線は、同じく図に示した。接合部の左右2個所での、ダイヤル・ゲージによる測定に対応するものであり、また、破線は、後述の計算によって求めた、この接合部の降伏荷重 (P_y) を示している。

この試験体 (PJVM) は、“引張り型”試験体 PJ-6 に準じて設計したものであり、H形はりの圧縮側フランジの局部座屈が、この接合部の耐力を決定した。最大荷重は19.4tonであった。実験後の試験体を**Photo. 8**に示す。

5.3.2 実大実験の結果 (PJVF)

鉛直荷重を受ける接合部の、実大実験結果のうち、荷重—中央たわみ曲線を、**Fig. 17**に示す。模型実験の場合 (PJVM) と同様に、H形はりの圧縮側フランジが局部座屈し、耐力を決定した。最大荷重は、120tonであった。この試験体の局部座屈の様子を**Photo. 9**に示してある。

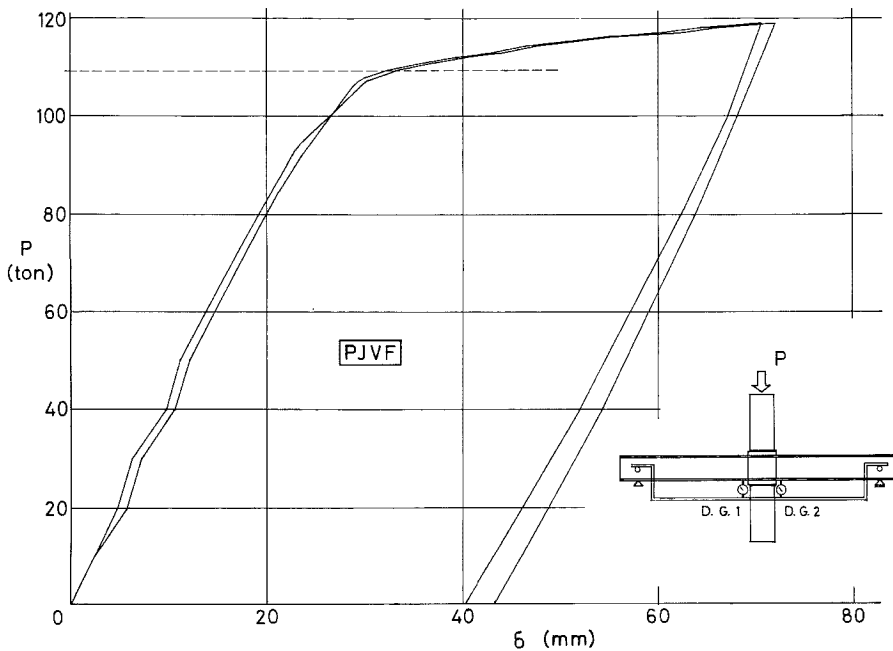


Fig. 17 Load-deflection curve of full scale specimen under vertical load—PJVF.

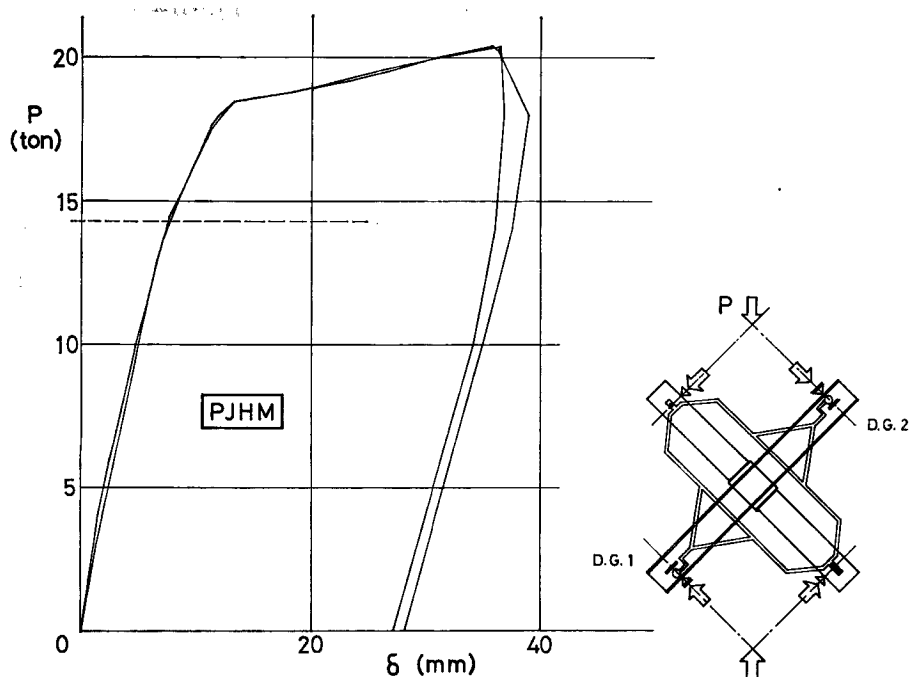


Fig. 18 Load-deflection curve of model specimen under horizontal load—PJHM.

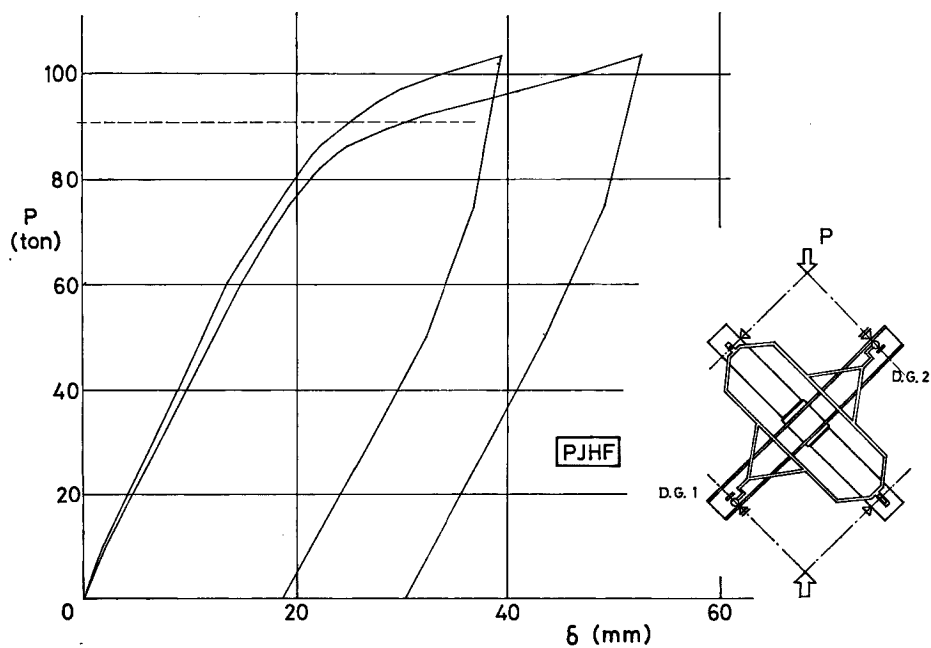


Fig. 19 Load-deflection curve of full scale specimen under horizontal load—PJHF.

5.4 水平荷重を受ける接合部実験の結果

5.4.1 模型実験の結果 (PJHM)

Fig. 18 は、水平荷重を受ける鋼管接合部の模型実験結果のうち、荷重と、H形はり端部のたわみとの関係を示したものである。図中2本の曲線は、同じく図示されている、はりの左右両端部での測定によるものである。また、破線は、後述の計算によって求めた、降伏荷重 (P_y) である。この試験体も、“引張り型”試験体の PJ-6 と同じ プロポーションに作られており、はりの圧縮側フランジが局部座屈した。最大荷重 (Fig. 18 に示した P) は 20.4ton であった。実験終了後の、この試験体を Photo. 10 に示す。

5.4.2 実大実験の結果 (PJHF)

Fig. 19 は、この実験結果のうち、荷重と、はり端部のたわみとの関係を示したもので、図中2本の曲線は、それぞれ、はりの左右両端での、ダイヤル・ゲージによる測定によるものである。また、破線は、計算によって求めた（後述）降伏荷重 (P_y) を示している。この試験体でも、はりの圧縮側フランジが局部座屈を起した。最大荷重は 103.5ton であった。実験の様様を Photo. 11 に示す。

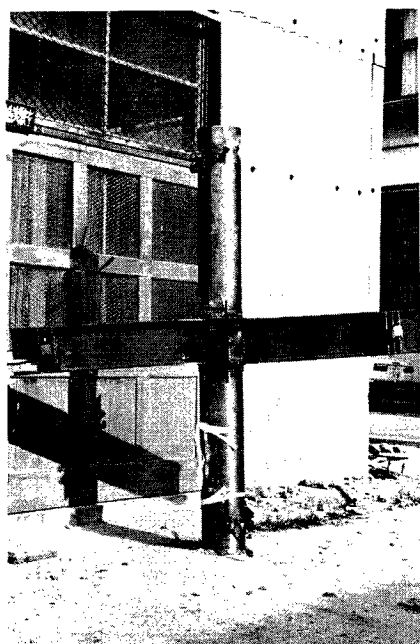


Photo. 10 PJHM after test.

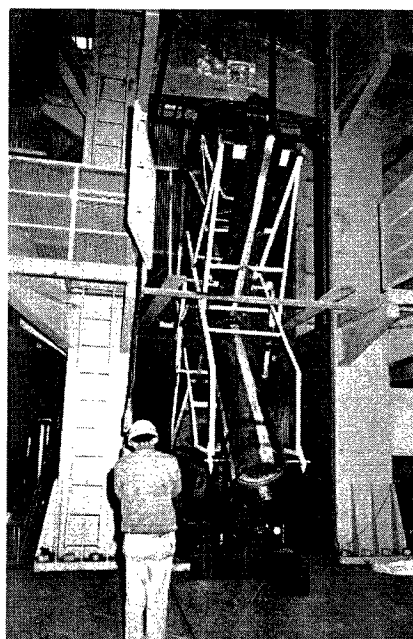


Photo. 11 Full scale test in progress—PJHF.

Table 12 Test results and predictions of model and full scale tests.

Specimen Name	Dimensions		Experiment		Prediction
	Pipe Column (mm)	H-Beam (mm)	P_y (ton)	P_u (ton)	P_y (ton)
PJVM	200×8	200×100×5.5×8	15.8	19.4	15.7
PJVF	600×24	588×300×12×20	107.0	120.0	109.7
PJHM	200×8	200×100×5.5×8	18.5	20.4	14.3
PJHF	600×24	588×300×12×20	86.5	103.5	91.0

これら4体の模型、および実大実験の一覧表が Table 12 である。この表には、左欄から順に、試験体の名称、鋼管柱とH形はりの寸法、実験によって得られた、降伏荷重と最大荷重、および後述の計算式によって求めた降伏荷重の予想値である。

5.5 模型実験と実大実験の比較

5.5.1 鉛直荷重を受ける接合部の実験について

鉛直荷重を受ける接合部の、模型実験と実大実験との結果を比較してみる。Fig. 20 に $M/M_p - \delta/l$ 曲線を示す。この図で、縦軸は、接合部に働くモーメント (M) をはりの全塑性モーメント (M_p) で除した無次元量であり、横軸は、はり中央のたわみを、はりのスパンで除した無次元量である。この図が示すように、2本の曲線は良く一致しており、模型実験の結果は十分信頼出来るものであることが分る。

5.5.2 水平荷重を受ける接合部の実験について

水平荷重を受ける接合部の、模型実験 (PJHM) と実大実験 (PJHE) について、モーメントと変形を比較したものが Fig. 21 である。この図の縦軸および横軸は、Fig. 20 の場合と同じである。この図でも、5.5.1 と同様に、模型実験は、よく実大の接合部の挙動を再現していることがわかる。

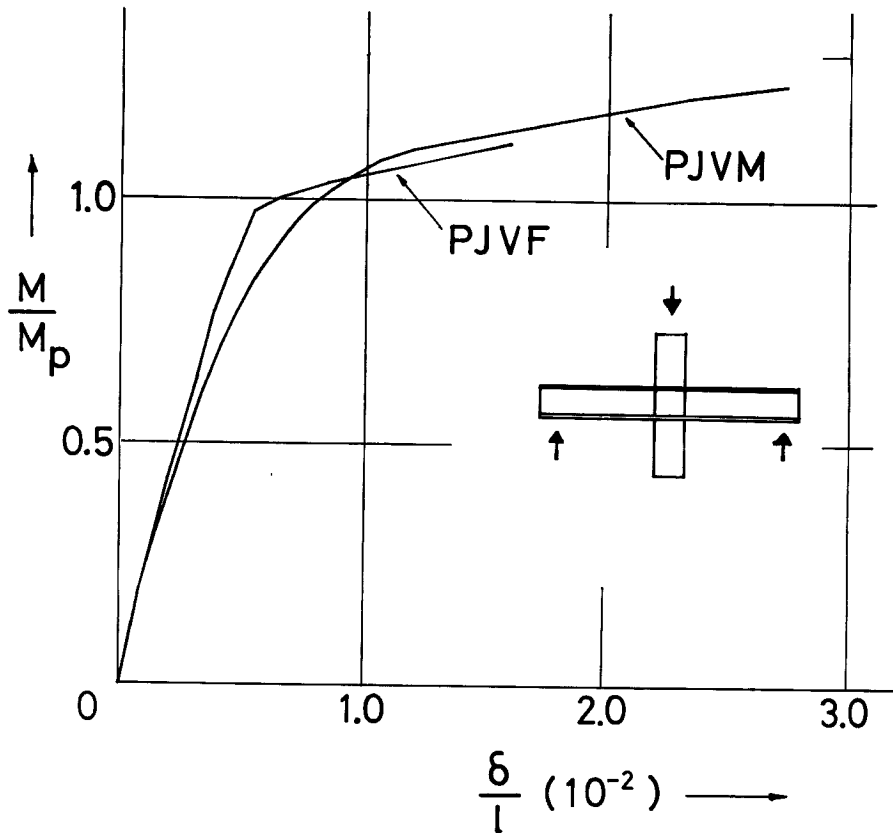


Fig. 20 Comparison of model test result with full scale test result—vertical loading case.

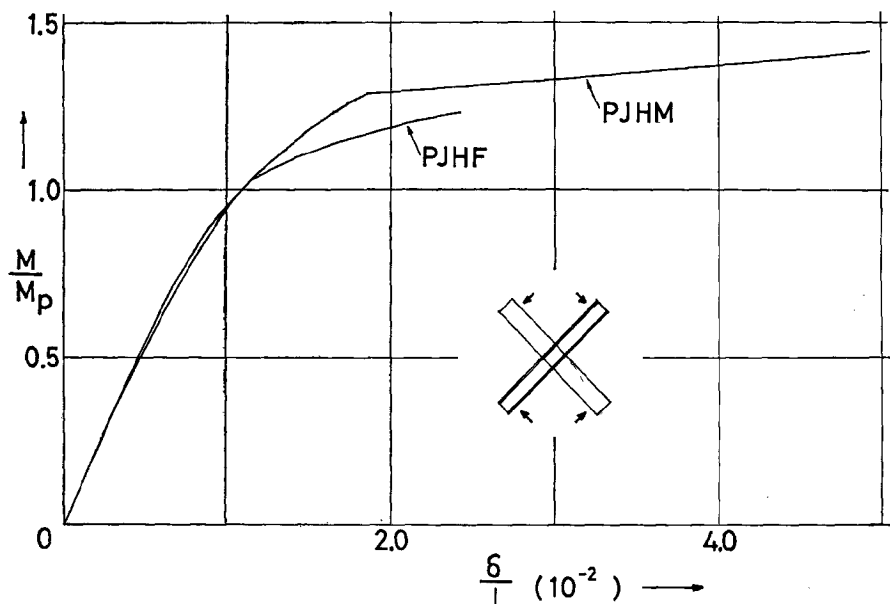


Fig. 21 Comparison of model test result with full scale test result—horizontal loading case.

5.5.3 鉛直荷重を受ける接合部の引張り側フランジと“引張り型”実験(PJ-6)との比較

鉛直荷重を受ける接合部の実験のための試験体は、模型実験用、実大実験用とも、いずれも、“引張り型”実験用の試験体の PJ-6 と同じプロポーションを持つものである。そこで、これら 3 種類の試験体、すなわ

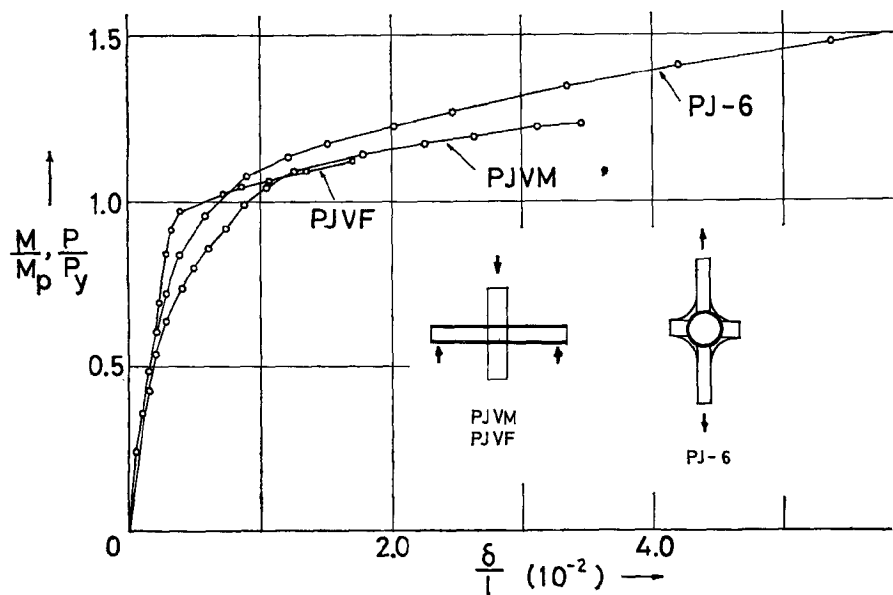


Fig. 22 Comparison of tension-side flange behavior among the results of “tension type” test, model test and full scale test.

ち, PJVM, PJVF と PJ-6, について, それらの実験結果を比較しようとしたのが, Fig. 22 である。この図で縦軸は, PJVM と PJVF については $\dot{M}/M_p$ を, PJ-6 については P/P_y を取った。ここに, M は, 接合部に作用するモーメント, M_p は, H 形はりの全塑性モーメント, P は “引張り型” 実験における引張り力, P_y は, フランジ・プレートの引張り降伏荷重である。また, 横軸は, PJVM と PJVF については, 中央のたわみをスパンで除した無次元量, PJ-6 については, 接合部全体の伸びを, その検長で除した無次元量, をそれぞれ意味し, いずれも変形を表わす量である。この図より, これら 3 者が比較的良く一致していることがわかる。したがって, 鉛直荷重を受ける, 鋼管柱と H 形はりの接合部の挙動を調べるのに, 今回行なったような, “引張り型” 実験は十分有効なものであると考えられる。

6. 既往の計算式による解析

6.1 リング・スチフナーのない “引張り型” 試験体 (PJ-0~2, 8, 9)

Fig. 23 を参考にして, これらリング・スチフナーのない “引張り型” 試験体は, 実験時の破壊状況から推測して, 鋼管の中心角が 2α の位置に応力集中を生じ, この部分に亀裂が出来て耐力が尽きると思われる。このような接合部の耐力を求めるには, 鋼管柱の管壁の協力幅を知る必要がある。ここでは, その協力幅 (b_e) を次式のようにであると考える。

$$b_e = 1.52R\sqrt{\frac{R}{t_p}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, R = 鋼管の外径,

t_p = 鋼管の, 接合部 (厚肉部) での管壁厚さ,

この協力幅をもつ断面を, 円形のリングに置換して, リング各部の応力を求め, 耐力を計算するが, ここでは, 金谷弘の実験式¹⁾により降伏荷重および最大荷重を計算し, 実験によって得た値と比較する。

$$\text{降伏荷重: } P_y = \left(\frac{60\alpha}{\pi} + 2 \right) \sigma_y \frac{Z}{R} \times 1.5 \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{最大荷重: } P_u = \left(\frac{80\alpha}{\pi} + 2 \right) \sigma_y \frac{Z}{R} \times 1.5 \dots\dots\dots (3)$$

ここに, α = Fig. 23 に示した角度,

$$Z = b_e \times \frac{t_p^3}{6}$$

σ_y = 引張り試験によって求めた, 材料の降伏点応力度,

これらの計算式によって求めた, P_y および, P_u の値は, Table 11 の Prediction (Connection) の欄に示してある。また, 同じ表中の, Prediction (Flange Plate) の欄の数値は, 左欄から, 設計用の短期許容荷重 (P_a), フランジ・プレートの降伏荷重 (P_y) および最大荷重 (P_u) である。

この式は, 本来, 今回のような接合部とは多少異なった目的から導かれたものであるもので, 本実験にそのまま適用するには疑問があるが, Table 11 が示すように, 設計の目安をつける式としては, 有用である。

これらの結果から, 厚肉部の肉厚 (t_p) を増すことはもちろん有効であるが, 厚肉部の長さ (l_s) が上述の協力幅 (b_e) と同じか, それ以上であることが望ましいと思われる。

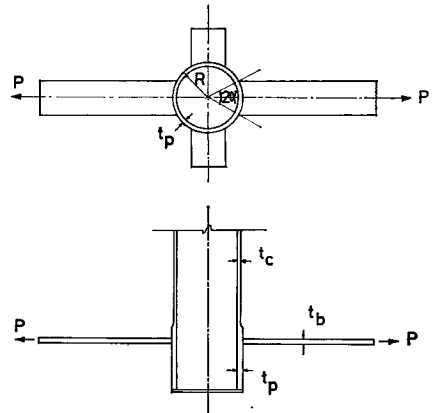


Fig. 23 Empirical analysis of “tension type” test specimen without stiffener.

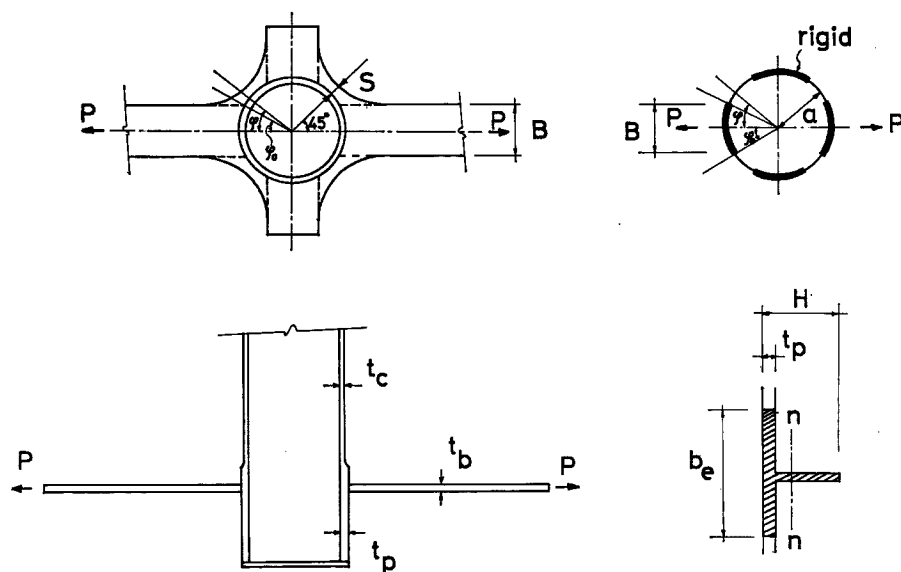


Fig. 24 Empirical analysis of "tension type" test specimen with stiffener.

6.2 リング・スチフナーのある“引張り型”試験体 (PJ-3~7,10)

リング・スチフナーを有する接合部の場合、協力幅は前述のもの (6.1 の (1) 式) とは異なるし、耐力計算式も異なる。

Fig. 24 の左側 2 図のような試験体に対して、右側 2 図のような、リング・スチフナーと管壁の一部をとった、T 形断面について、これを環状の曲線材に置き換える、置換リングによる計算法²⁾を示す。リングの変形に対する管壁の協力幅 (b_e) を次に示す。

$$b_e = 1.52\sqrt{r \cdot t_p} + t_b \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 r = 鋼管の半径 (管壁厚さの中心まで)、

t_b = リング・スチフナーの板厚、

図の T 形断面の重心軸が、半径 a の円形リングと考える。ここに、 a は、リング・スチフナーの幅の最も小さい位置 ($\varphi = 45^\circ$ の位置) での、T 形断面の重心 $n-n$ と、鋼管の中心までの距離とする。さらに、柱とはりの交叉部で、フラジン幅 B の間は剛域とみなす。このようなリングに、フランジの引張り力 P が作用した時、リングの断面 φ の位置に加わる、曲げモーメント (M)、軸方向力 (N)、せん断力 (Q) は、次式によって与えられる。Fig. 24 において、 $\varphi = 45^\circ$ の位置をモーメントの反曲点と考える。

$$M = P \left(m_1 - \frac{a}{2} \sin \varphi \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$m_1 = \frac{a}{\pi - 4\varphi_0} (\cos \varphi_0 - \sin \varphi_0) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$N = \frac{P}{2} \sin \varphi \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q = \frac{P}{2} \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 φ_0 = 引張り力の方向と剛域端の交角

上の式の適用範囲は、 $\varphi_0 \leq \varphi \leq 90^\circ - \varphi_0$ とする。

この M と N を用いて、リング断面の縁応力度 σ_1, σ_2 は、次式で求める。

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{Z} \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 A = リングの各位置における断面積、

Z = 断面係数 (材料の降伏後、曲げ応力は長方形分布するものとする)。

この場合の寸法は、今求めようとしている位置の実際の寸法 H と協力幅 b_e によって決める。

試験体の降伏荷重 P_y 、最大荷重 P_u を計算するには、材料の引張試験によって求めた降伏点応力度 (σ_y) あるいは、引張り強さ (σ_u) から、

$$\sigma_1 = 1.5\sigma_y, \sigma_2 = 1.5\sigma_u$$

のように求める。

Table 11 に示されている計算値 (Prediction-Connection の欄) は、試験体の破壊状況を考慮して、 $\varphi = \varphi_0 = 30^\circ$ の位置について計算したものである。この表によって、明らかなように、リング・スチフナーの板厚 (t_b) の大小にかかわらず、その最小幅 (S) によって実験値と計算値に相違を生じている。すなわち、 S が大きい場合 (30mm) は、両者は比較的良く一致しているが、 S が小さくなるに従って計算値が実験値を下回る結果となっている。この食い違いを正すような計算式の検討が、今後の課題であろうが、この式の与える値は、安全側の値であるので、設計には使って差し支えはない。実施設計では上述の σ_y の代りに許容引張り応力度 (f_t) を使用する。

6.3 鉛直荷重、あるいは、水平荷重を受ける試験体

模型試験体、および、実大試験体は、その寸法、形状から、**H形鋼はり**が、全体の耐力を決定するものであったので、ここでは、まとめて、それらの耐力を求める式を示し、検討することにする。

はり H形鋼は降伏後、純塑性変形するものとし、曲げ応力度は、いわゆる、長方形分布すると考える。中立軸は断面の重心軸に一致するものとし、座屈現象の影響を無視すると、曲げ応力度は次式で与えられる。

$$\sigma_{by} = \frac{M}{Z_p} \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 Z_p = 塑性断面係数。

耐力の計算は、材料の引張り試験によって求めた降伏点応力度 (σ_y) から、

$$M_p = Z_p \cdot \sigma_y$$

によって行なった。この計算結果は **Table 12** に合せて示されており、実験値と良く一致している。降伏耐力に至った後も、材料の歪硬化によって耐力は上昇する。

7. 結 語

遠心力鋼管柱と**H形鋼はり**接合部の性能について、本実験によって得られた事項をまとめると、次のようである。

- 1) “引張り型” 実験によって、リング・スチフナーのある接合部は、ない接合部に比較して、その性能は格段にすぐれていることがわかった。本実験で採用したような形状のリング・スチフナーについては、その最小幅 (S) が 10mm 程度で、スチフナーをつける目的は十分に達せられ、それ以上に最小幅を増しても、耐力の上昇は、それほど期待できない。接合部の耐力からみて、フランジ・プレート寸法と、リング・スチフナーの寸法がちょうど釣合っていると思われるのは、“引張り型” 試験体のうち、PJ-7 のような接合部である。
- 2) 鋼管接合部の厚肉部の管壁厚さが、接合部全体の挙動に及ぼす影響は大きく、この厚さが増すに従って、接合部の耐力は上昇する。また、この厚肉部の長さ (l_s) は、管壁の協力幅 (b_e) と同じぐらいの寸法にするのが効果的である。
- 3) スチフナーのない鋼管接合部では、フランジ・プレートが鋼管柱に取りついている部分 (入隅部) に応力が集中し、この部分のぜい性破壊が接合部の耐力を決定するので、これに対して、何らかの処置

を講じる必要がある。

- 4) 鉛直荷重,あるいは,水平荷重を受ける接合部の実験結果より,本実験で対象としたような,鋼管柱とH形はりの接合部は,構造物に作用する,通常の鉛直荷重を受けても,十分安全であることが判明した。
- 5) 実大実験の結果と模型実験の結果とを比較して,模型実験から得た結果は,十分信頼できるものであることが確かめられた。さらに,鉛直荷重を受ける接合部については“引張り型”実験によって,十分接合部の性質を調べ得ることもわかった。

参 考 文 献

- 1) 金谷 弘：鋼管接合部の局部変形に関する実験的研究(その2),日本建築学会論文報告集,第109号,昭40.3, p. 42.
- 2) 黒羽啓明・久光脩文・坂本 傑：鋼管柱接合部の強度・剛性に関する研究(接合部におけるスチフナーリングの弾塑性性状),日本建築学会論文報告集,第132号,昭42.2, p. 17.