

【技術ノート】

スリーブ管補強による有孔梁の
加力実験と設計方法Static Test of Beams with Holes Reinforced
by Sleeve Pipes and a Design Method梅澤 宣雄*
Nobuo UMEZAWA松崎 宏之**
Hiroyuki MATSUZAKI佐川 久夫***
Hisao SAGAWA松崎 一明***
Kazuaki MATSUZAKI

1. まえがき

ウェブに円形貫通孔をもつH形梁の補強に関して、次の補強方法が用いられるのが一般的である。

- ① スリーブ管補強
- ② 当て板補強
- ③ V形スチフナ補強
- ④ 垂直スチフナ補強
- ⑤ 上記補強法の組み合わせ

上記の補強法のうち、特に鉄骨鉄筋コンクリート造(以下SRC造と略す)において、スリーブ管補強ならびにスリーブ管+当て板補強が最も多く採用されている。また、開口の小さな場合などで過剰補強と思われる設計も時折見受けられるのが現状である。

無補強およびスリーブ管付有孔梁の耐力と設計法については、既に幾つかの実験が報告され^{1)~2)}、設計式が提案されている³⁾。この中では、スリーブ管長が小さいこともあり、管全長を有効として計算が行われている。しかし、SRC造においてはスリーブ管がフランジ幅に比べかなり長いのが一般的であり、管全体が一様に働かない場合が考えられる。この事に注目し、本実験ではスリーブ管の管長を変え、また梁断面に対してウェブ左右のスリーブ管の長さを変えた(以下偏心と称す)実大の試験体を作製し、加力実験を行い、前述の設計式³⁾にスリーブ管有効長を考慮した場合の計算値と比較する。

さらに、本実験ではウェブの幅厚比が93と大きなため座屈現象が見られ、これについても検討する。

2. 耐力算定式

耐力算定式の詳細は参考文献^{1)~3)}に譲り、ここではそ

の概要について述べる。

(1) 記号

算定式の提案に先立ち、用いられる記号について示す。

a) 寸法

図-1に図示するもののほか、下記の記号を用いる。

θ : 孔中心位置から崩壊断面のウェブ孔縁の位置までの角度

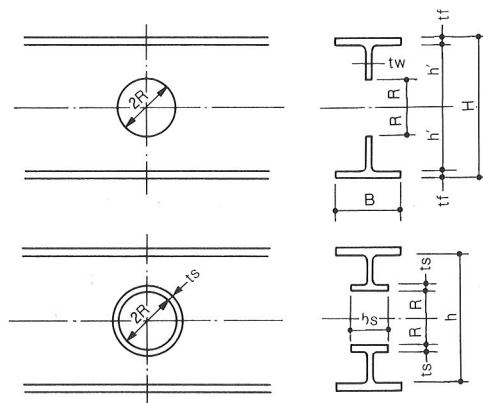


図-1 記号説明

b) 応力度

M_{fy} : フランジの降伏応力度

M_{ω} : フィーレンディール作用によりウェブに生ずる直応力度

M_{ω_y} : ウェブの降伏応力度

M_{sy} : スリーブ管の降伏応力度

M_{ω_y} : ウェブの降伏せん断応力度で $\sigma_{wy}/\sqrt{3}$ とする。

c) 応力・耐力

M_p : はり無孔部分の全塑性モーメント

*川田工業㈱栃木工場設計課課長 **川田工業㈱栃木工場設計課 ***川田工業㈱栃木工場生産技術課

- M_{fp} : はりのフランジのみの全塑性モーメント
 M_{fph} : 無補強有孔はり純せん断時のせん断耐力を保持しながらもち得る曲げ耐力
 M_{phs} : スリーブ管補強付有孔はりの全塑性モーメント
 M_{ps} : スリーブ管肉の全塑性モーメント
 M_B : フランジおよびスリーブ管が曲げを負担するとした時の全塑性モーメント
 V_p : 無孔はりのウェブ断面のせん断耐力
 V_{ph} : 無補強有孔はりのせん断耐力
 V_{phs} : スリーブ管補強付有孔はりのせん断耐力
 α : 無補強有孔はりのせん断耐力を求める時の孔中心断面のウェブのせん断耐力に対する低減係数
 β : 無補強有孔はりの曲げ耐力 M_{fph} の M_{fp} に対する低減係数を定める係数
 ξ : スリーブ管補強付有孔はりのウェブ部分のせん断耐力補正係数
 η : スリーブ管補強付有孔はりのスリーブ管が受持つせん断補強係数

(2) 無補強の場合^{1),3)}

a) せん断耐力

せん断耐力 V_{ph} は、ウェブに残る最小断面（孔中心位置）に降伏せん断応力を乗じた値より小さくなるので、低減係数を α として次式を表す。

$$V_{ph} = \alpha (1 - \bar{R}) V_p \quad (1)$$

ただし

$$\bar{R} = 2R/h \text{ で } \bar{R} \leq 0.6, V_p = h \cdot t_w \cdot \tau_{wy}$$

$$\alpha = 1 - 0.167(1 - 0.93\bar{t}_f)\bar{R} - 0.016 \times \{(1 - 0.93\bar{t}_f)\bar{R}\}^2 - 0.292 \{1 - 0.93\bar{t}_f\}\bar{R}^3 \quad (2)$$

b) 曲げ耐力

降伏せん断力 V_{ph} を保持したまま、梁が負担し得る曲げ耐力 M_{fph} は、有孔部のフィレンデル作用によりフランジ内に直応力が生ずるため、フランジのみの全塑性モーメント M_{fp} より多少小さくなり、

$$M_{fph} = (1 - \beta \frac{h' \cdot t_w}{B \cdot t_f}) M_{fp} \quad (3)$$

ただし、

$$\beta = 0.284 (1 - 1.5\bar{t}_f) \bar{R} - 0.063 \{(1 - 1.5\bar{t}_f)\bar{R}\}^2 - 0.145 \{(1 - 1.5\bar{t}_f)\bar{R}\}^3$$

実際の梁設計においては、有孔部分の耐力のほかに梁全体の横座屈の検討を要するので、両者のうち小さい方

をもって耐力とする。

(3) スリーブ管補強付の場合^{2),3)}

a) せん断耐力

スリーブ管で補強した場合のせん断耐力は、文献の解析法により、 θ の関数で表され、 ξ をウェブ部分のせん断強度割増係数、 η をスリーブ管のせん断補強係数として次式で表わされる。

$$V_{phs} = \xi V_p + \eta \cdot M_{ps} / R \quad (4)$$

ただし

$$\xi = 1 - \bar{R} (1 + 2\bar{t}_s) \cos \theta$$

$$\eta = 2 \{ \sqrt{(1 + \bar{t}_s)^2 \sin^2 2\theta + 4\bar{t}_s^2} - (\sin^2 2\theta + 3 \cos^2 2\theta) - (1 + \bar{t}_s) \times \sin 2\theta \} / \{ \bar{t}_s^2 (\sin^2 2\theta + 3 \cos^2 2\theta) \}$$

$$\theta = 264 \times 4 \sqrt{b_s / t_w \cdot \bar{t}_s} - 1,506 \times 4 \sqrt{b_s / t_w \cdot \bar{t}_s^2} + 3,195 \times 4 \sqrt{b_s / t_w \cdot \bar{t}_s^3} \quad (5)$$

b) 曲げ耐力

開口により生じた曲げ耐力の低下は、スリーブ管補強により容易に回復し、無孔部の曲げ耐力を上回る場合が多い。純曲げ時の耐力 M_{us} は、無孔部のはりの全塑性モーメント M_p と、スリーブ管付の場合の全塑性モーメント M_{ps} のうち小さい方で求められる。

また、曲げとせん断が同時に加わる場合も、ウェブがせん断力を負担し、フランジとスリーブ管が曲げを負担すると考えた時のモーメントを降伏曲げ耐力とし、曲げとせん断を独立に検定する事ができる。降伏曲げ強度 M_B は次の式で求められる。

$$M_B = B \cdot t_f (2h' + t_f) \sigma_{fy} + b_s \cdot t_s (2R + t_s) \sigma_{sy} \quad (6)$$

3. 加力実験^{5),6)}

(1) 実験目的

上記の耐力算定式では、スリーブ管長が短いこともあり、全長を有効としている。しかし、実際のSRC造の場合、型枠兼用ということもあり、フランジ幅よりも長いスリーブ管の方が一般的である。また、時にはウェブ面からスリーブ管先端までの距離が左右対称でない場合もある。実際にはフランジ幅より長かったり、左右非対称であったりするスリーブ管の有効長を知ることを目的に実大の加力実験を行った。

(2) 試験体

試験体は図-2に示すように、SS41の溶接組立梁のウェブに円形孔を設け、スリーブ管を全周隅肉溶接した

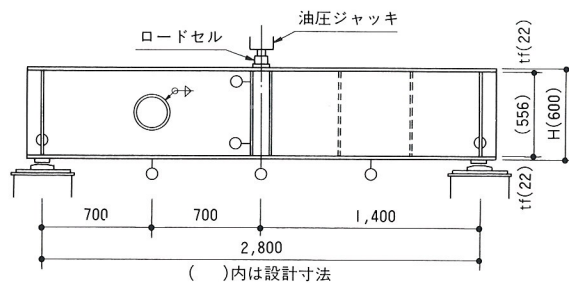


図-2 試験体

ものである。試験体の寸法を表-1に示す。この中でS-1は無孔梁、S-2は無補強有孔梁、S-3～S-7は偏心無しのスリーブ管補強梁、S-8とS-9は偏心を有するスリーブ管補強梁、S-10は当て板補強梁、S-11は垂直スチフナ（位置は孔中心より200mm）補強梁である。

試験に用いた素材の機械的性質を表-2に示す。

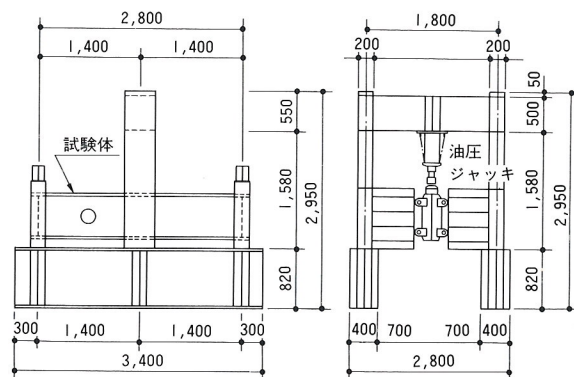
(3) 載荷方法と測定方法

載荷方法は図-3に示すように、支点間2,800mmの単純支持梁の中央1点載荷とした。梁は載荷点において横倒れを生じないように、ウェブ上下端近傍で横方向への移動を拘束し、鉛直方向には移動が可能になるようにローラを取り付けた。また、支点においても横方向への移動を拘束してある。各試験体とも予備載荷の後に本載荷を行った。

測定は荷重をロードセル、変形をダイヤルゲージ(図-1に示す9ヶ所)、フランジ、ウェブ、スリーブ管の歪を歪ゲージ(22ヶ所)で測定した。

測定はすべて静歪測定器で測定し、数値をマイコンに収録した。

加力実験の全景を写真-1に示す。



圖一 3 載荷裝置

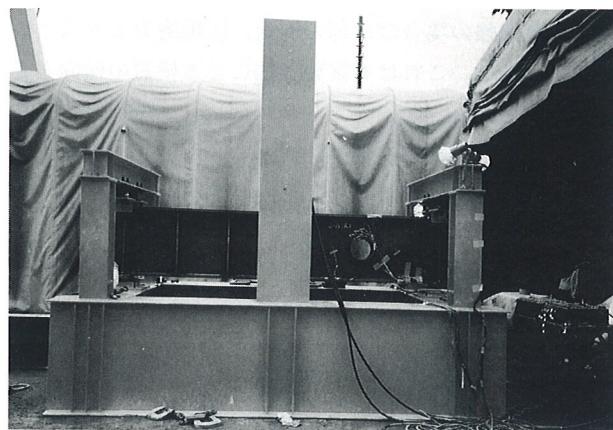


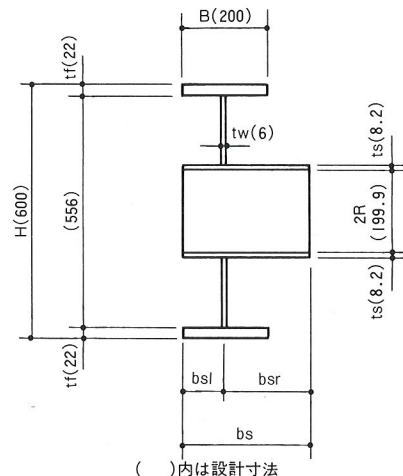
写真-1 実験状況

表-2 素材の機械的性質

	降伏点 σ_y (t/cm ²)	引張強さ σ_b (t/cm ²)	伸 び σ (%)	σ_b/σ_y	ヤング係数 E (t/cm ²)
フランジ (t= 22)	2.640	4.235	28.8	1.604	1.953
ウェブ (t= 6)	3.385	4.739	31.0	1.400	1.890
スリーブ管(t=8.2)	3.520	4.755	12.8	1.351	2.035

表-1 試験体寸法

試験体	H	B	tf	tw	2R	ts	bs	bsl	bsr
S-1	600.8	201.35	21.80	5.60	—	—	—	—	—
S-2	600.6	201.40	21.65	5.50	202.1	—	—	—	—
S-3	599.9	201.50	21.55	5.60	212.2	4.60	100.6	50.8	49.8
S-4	599.3	201.50	21.60	5.50	199.9	8.10	99.6	48.8	50.8
S-5	599.4	201.70	21.70	5.60	200.0	8.10	200.6	101.8	98.8
S-6	599.5	201.70	21.75	5.60	200.0	8.10	299.6	148.8	150.8
S-7	601.0	201.60	21.75	5.50	200.0	8.10	400.6	201.8	198.8
S-8	600.3	201.60	21.75	5.55	200.0	8.10	299.6	100.8	198.8
S-9	600.5	201.65	21.90	5.60	200.1	8.10	399.6	98.8	300.8
S-10	600.3	201.50	21.55	5.50	198.5	PL-5.70×456×456			
S-11	598.5	201.40	21.65	5.60	200.0	Stiff. PL-5.60×90×557			



(4) 実験結果

a) V- γ 曲線

図-4にV(せん断力)- γ (せん断変形角)曲線を示す。ここで、せん断力Vは荷重より換算し、せん断変形角 γ は両支点と支間中央の変位および支間中央におけるはりの回転角から計算した。

降伏せん断耐力 V_y は、等価剛性が初期剛性の2/3となる時の値とした。図-4の中に▼印でこれを示す。また、この値は計算値とともに表-4に示す。

b) ウェブ歪分布

無補強およびスリーブ管補強の試験体の耐力近傍でのウェブの歪分布を図-5に示す。この図より、無補強の場合は孔中心より45°方向での引張応力が大きく、スリーブ管補強の場合は頂部の引張、圧縮応力とも大きいことがわかる。これは有限要素法による検討の傾向とよく一致している。

c) スリーブ管の有効長

スリーブ管の有効長は、スリーブ管の頂点より22.5°

の位置の管長方向に50mmピッチで貼付した歪ゲージの歪分布より算出する。すなわち、図-6に示すように有効長 b_{se} はある荷重時での歪分布より次式で計算する。

$$b_{se} = \Sigma (\epsilon_i \times 50) / \epsilon_{imax} \quad (7)$$

ここで、 ϵ_i : スリーブ管の歪、 ϵ_{imax} : スリーブ管の最大歪である。

試験体S-7の荷重とスリーブ管の歪分布の関係を図-7に示す。この結果より、荷重と歪分布はほぼ相似形をしており、有孔梁の耐力の計算にあたっては、耐力近傍の荷重状態での値を採用する。

表-3に今回求めたスリーブ管の有効長を示す。この結果によれば、スリーブ管の偏心の有無により有効長の割合がかなり異なる。すなわち、スリーブ管が無偏心の場合はスリーブ管長の約80%が有効と考えられる。また、スリーブ管が偏心している場合は、偏心量が大きいほど有効長の割合が小さくなる傾向が見られるが、有効長としては約50%と考えられる。

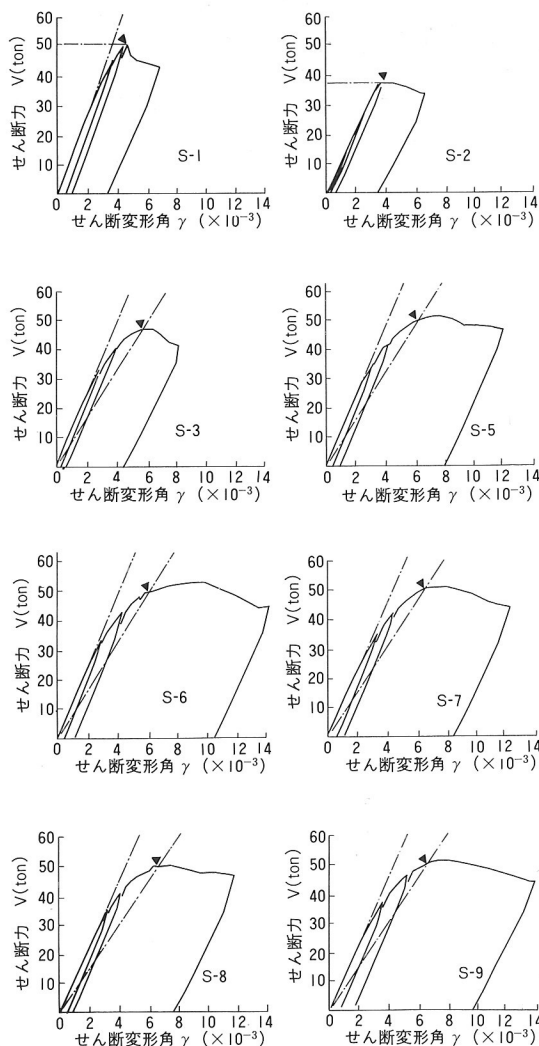
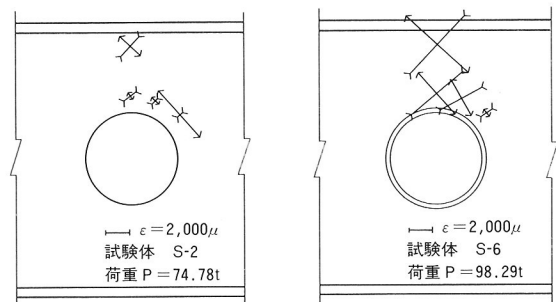
図-4 V- γ 曲線

図-5 ウェブの歪分布

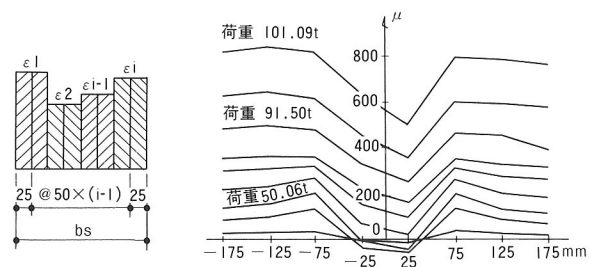


図-6 有効長の計算

図-7 スリーブ管の歪分布

表-3 スリーブ管の有効長

試験体	スリーブ管長さ bs (cm)	スリーブ管有効長 bse (cm)	bse/bs (%)
偏心 なし	S-5: 200	169.4	84.7
	S-6: 300	250.0	83.3
	S-7: 400	353.6	88.4
偏心 あり	S-8: (100+200) 300	161.1	53.7
	S-9: (100+300) 400	188.1	47.0

(5) 計算値と実験値の比較

a) 耐力算定式による計算値と実験値との比較

表-4にせん断耐力の計算値と実験値を示す。表-4では、スリーブ管の有効長を考慮した値も示しており、実験値との比較にこの値を用いた。なお、各耐力の算定にあたっては2の耐力算定式を用いた。無孔梁(S-1)の耐力は、張力場作用を考慮して、Basler式⁴⁾より

$$\frac{V_{ph}}{V_p} = \frac{\tau}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{(1 - \tau_{cr}/\tau_y)}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \quad (8)$$

を用いた。

ここで、

τ_{cr} : ウェブのせん断座屈応力

$\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$

a : ウェブ補剛間隔

h : ウェブ成

$V_p : \tau_y \cdot h \cdot t_w$

当て板補強有孔梁(S-10)は、当て板の断面をウェブ平均板厚に換算して、2の算定式より求めた。

垂直スチフナ付有孔梁(S-11)は、垂直スチフナの効果を無視して、2の算定式より求めた。

b) FEMによる座屈解析値との比較

構造解析汎用プログラムNASTRANを用いて静解析と座屈解析を行った。解析モデルは試験体の中心線からスリーブ管のある側のみ要素分割し、境界条件を与え、荷重は2の耐力算定式に基づく値を用いた。表-5に静解析のうち中央点のたわみ、表-6に座屈解析における1次モードの座屈値を示す。また、図-8、写真-2にウェブの座屈状況、図-9に座屈モードの解析値を示す。

まず静解析のうち中央点のたわみは、解析値に比べ実験値の方が20%前後大きい³⁾、これは解析値が線形解析であるのに対して、実験値は塑性域に入っているためと

表-5 静解析(中央点のたわみ)

	荷重 (t)	実験値 δ (mm)	NASTRAN δ_N (mm)	δ/δ_N
S-2	35.40	4.76	3.89	1.22
S-5	44.44	5.32	4.62	1.15
S-7	49.22	6.09	5.17	1.18
S-8	43.92	5.60	4.59	1.22
S-9	45.09	5.53	4.67	1.18

表-6 座屈解析と実験値

	荷重 (t)	座屈値 (1次モード) Ver(t)	実験値 Vmax(t)	Vcr/Vmax
S-2	35.40	0.882	31.22	1.20
S-5	44.44	1.070	47.55	1.07
S-7	49.22	0.925	45.53	1.12
S-8	43.92	1.059	49.95	1.07
S-9	45.09	1.060	47.80	1.07

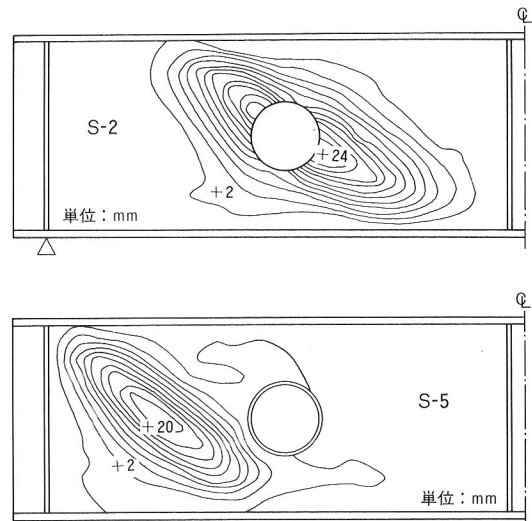


図-8 ウェブの座屈状況

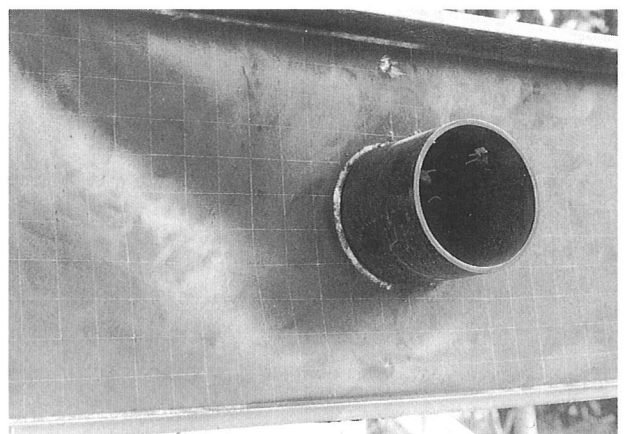


写真-2 ウェブの座屈状況 (S-8)

表-4 せん断耐力の計算値と実験値

試験体	V_{pn}	V_{ph} or V_{phs}	V_{phe}	V_y	単位 (t)	
					$\frac{V_y}{V_{ph}}$ or	$\frac{V_y}{V_{phe}}$
S-1	60.98	46.86	—	50.30	1.07	
S-2	38.18	35.40	—	37.20	1.05	
S-3	37.73	39.05	—	46.75	1.20	
S-4	38.29	41.44	—	48.90	1.18	
S-5	38.96	45.39	44.44	49.65	1.12	
S-6	38.96	48.29	46.88	49.10	1.05	
S-7	38.43	50.48	49.22	50.25	1.02	
S-8	38.70	48.02	43.92	49.75	1.13	
S-9	39.03	51.07	45.09	50.25	1.11	
S-10	62.63	51.18	—	—	—	
	59.89	45.56	—	52.75	1.16	
S-11	38.87	36.07	—	43.90	1.21	

V_{pn} : ウェブ純断面のせん断耐力

V_{ph} : 無補強有孔梁のせん断耐力

V_{phs} : スリーブ管付有孔梁のせん断耐力(全スリーブ管有効)

V_{phe} : スリーブ管付有孔梁のせん断耐力(スリーブ管の有効長)

V_y : せん断耐力の実験値

考えられる。

一方、座屈解析と実験値より、無補強有孔梁(S-2)は孔周辺が大きく座屈しているのに対し、スリーブ管付有

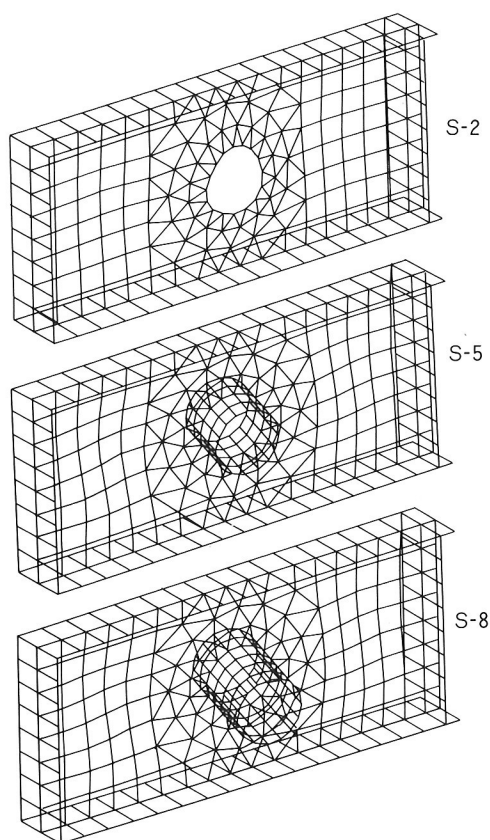


図-9 座屈モード

孔梁 (S-5, 7, 8, 9) はスリーブ管の左側で座屈している。これは解析値も実験値も同じである。また、スリーブ管付有孔梁の座屈荷重は解析値と実験値の各々はほぼ一定である。これはスリーブ管によってウェブが補剛されたためであり、座屈荷重にはスリーブ管の剛性がほとんど影響しないことを表わしている。スリーブ管の剛性は図-4 からわかるように、耐力後の変形性能を増大させるのに寄与している。

(6) 実験のまとめ

① 無孔梁、無補強有孔梁及びスリーブ管付有孔梁とも計算値と実験値はよく一致している。

② スリーブ管が無偏心 (ウェブ面を基準に管長が左右等しい) の場合は、スリーブ管の有効長の割合はほぼ一定であるが、スリーブ管の偏心が大きい程、有効長の割合が小さくなる。

③ 今回求めたスリーブ管の有効長を考慮した計算値は実験値とよく一致している。しかし、スリーブ管の径厚比などのパラメーターが考えられるので、今後の検討が必要である。

④ FEM解析による座屈モードと座屈荷重は、実験結果とよく一致している。

⑤ 当て板補強梁は試験パネル部分が無孔部分より計算値、実験値とも大きくなった。すなわち片側の当て板補強でフルウェブのせん断力が確保できた。

⑥ 垂直スチフナ補強梁 (S-11) は、実験値が計算値よりも20%程大きい。棒組効果やパネルゾーンの影響が考えられる。

⑦ 今回の実験は $110/\sqrt{F}$ のウェブ幅厚比の制限を越えたものであるが、無補強、スリーブ管補強とも降伏荷重後に座屈が生じた。

⑧ 無補強有孔梁及びスリーブ管付有孔梁の耐力近傍でのウェブの歪分布は有限要素法による検討の傾向によく一致している。

4. あとがき

今回の実験と計算により、無孔梁のせん断耐力は張力場作用を考慮して、Basler式を、無補強有孔梁とスリーブ管付有孔梁のせん断耐力は、土井・福知の提案式を用いて検討すれば、実際のせん断耐力はこの計算値を十分確保できることがわかった。今後はこの計算式に基づいて簡易計算図表を作成し、設計の便に役立てる予定である。

今回の実験にあたり御指導、御協力頂いた、岐阜高専土井康生助教授及び(株)日建設計・津山巖構造主管に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福知保長・土井康生・細川裕司：円形孔を有するはりの耐力と設計法 (1. 無補強の場合の耐力), 日本建築学会論文報告集, 第296号, 1980. 12.
- 2) 福知保長・土井康生・釜江克宏：円形孔を有するはりの耐力と設計法 (2. スリーブ管付の場合の耐力), 日本建築学会論文報告集, 第301号, 1981. 3.
- 3) 土井康生・福知保長：円形孔を有するはりの耐力と設計法 (3. 実用的耐力算定式の提案), 日本建築学会論文報告集, 第357号, 1985. 11.
- 4) 小堀為雄・吉田 博：鋼構造設計理論, 森北出版, 1977.
- 5) 松崎宏之・梅澤宣雄・福知保長・土井康生・津山巖：管長を変えたスリーブ管付有孔はりの加力実験 (その1, 実験計画と計算値), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986. 8.
- 6) 梅澤宣雄・松崎宏之・福知保長・土井康生・津山巖：管長を変えたスリーブ管付有孔はり加力実験 (その2, 実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986. 8.