

矩形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究

Experimented study on the seismic performance of the rectangle section steel piers

野村和弘†、青木徹彦††、鈴木森晶†††

Kazuhiro NOMURA, Tetsuhiko AOKI, Moriaki SUZUKI

Several types of rigid frame are utilized according to the conditions of location in the highway in a city. The rectangular section with the long side toward a bridge axis is generally used in rigid frame pier. Researches on the steel piers with oblong section have not been done, so far. Then, experimental study is conducted to investigate the seismic performance of rectangular steel section piers, with and without concrete inside the pier bottom. Making α as the aspect ration (length, width ratio) of oblong section, ten values of this parameter are used in the test. A square section pier with taper steel plate is also examined in order to investigate efficacy of the taper plate.

1. 序論

兵庫県南部地震では、都市高速道路において多く採用されている鋼製橋脚にも被害が発生した。その後、鋼製橋脚については、その耐震性について様々な報告^{1) 2) 3)}がなされている。これからの構造物の耐震設計は、数百年1度起きるような地震に対しては、局所的な損傷は許すが破壊しないだけの耐荷力を持たせるという観念から、変形性能の大きい構造物が要求されている。

都市における高速道路では、その立地条件からラーメン橋脚など様々な橋脚が利用されている。ラーメン橋脚では橋軸方向に長辺を有する長方形断面が用いられるのが一般的である。従来の鋼製橋脚の耐震性に関する多くの研究では、正方形断面が多く、長方形断面については十分な研究³⁾がなされていない。

本研究では、長方形断面のアスペクト比 α (縦、横比)をパ

† 愛知工業大学 大学院 建設システム工学専攻

†† 愛知工業大学 工学部 土木工学科(豊田市)

††† 愛知工業大学 工学部 土木工学科(豊田市)

ラメータとし、コンクリート充填の有無により静的繰り返し実験から耐震性能を検討する。またテーパ鋼板を用いた正方形断面橋脚で実験を行い、テーパ鋼板の有効性を検討する。

2. 実験概要

2.1 実験試験体

2.1.1 コンクリート無充填の試験体

鋼材には SS400 を用い、断面の縦横比(アスペクト比)が 0.50、0.71、1.42、2.00 の4体を実験する。テーパ鋼板を用いた試験体ではフランジ、ウェブ両面とも基部から1125mmまで板厚を変化させる。実験に用いる実験試験体断面寸法を図1に示す。板厚は6mm、テーパ鋼板の板厚は最小厚を6mm、最大厚は9mmである。実験試験体緒元を表1に示す。縦リブ寸法は60×6mmである。公称降伏応力 σ_y は235kN/mm²、ヤング係数Eは 2.06×10^5 kN/mm²、ポアソン比 ν は0.3である。

2.1.2 コンクリート充填の試験体

鋼材には SM490Y を用い、断面の縦横比(アスペクト比)が 0.33、0.50、0.67、0.68、1.50、2.00 の6体を実験する。実

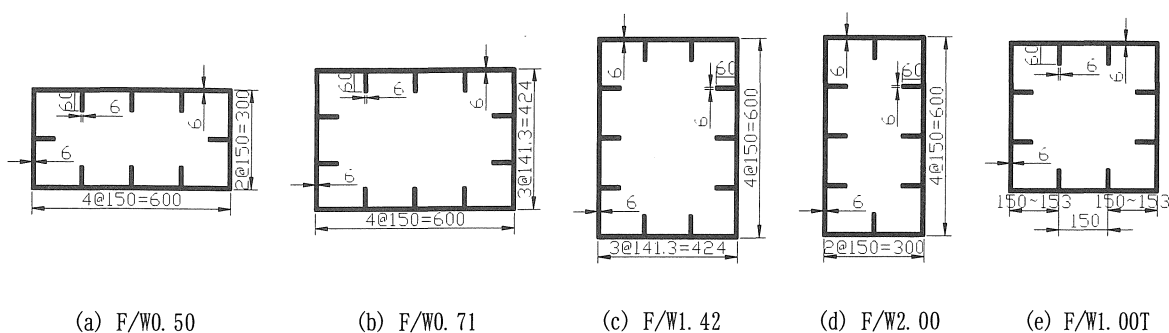


図1 試験体断面図(コンクリート無充填)

表1 実験試験体諸元(コンクリート無充填)

試験体名		F/W0.50	F/W0.71	F/W1.42	F/W2.00	F/W1.00T
アスペクト比	α	0.50	0.71	1.42	2.00	1.00
縦補剛材剛比	γ_1	73.3	51.9	36.7	36.7	34.3
最適剛比	γ^*	19.9	17.7	12.0	12.0	14.9
	γ/γ^*	3.68	2.92	3.06	3.06	2.30
幅厚比パラメータ	R_R	0.445	0.419	0.445	0.445	0.395
	R_F	0.252	0.252	0.259	0.259	0.267
細長比パラメータ	λ	0.260	0.251	0.262	0.443	0.314
コンクリートの有無		無	無	無	無	無

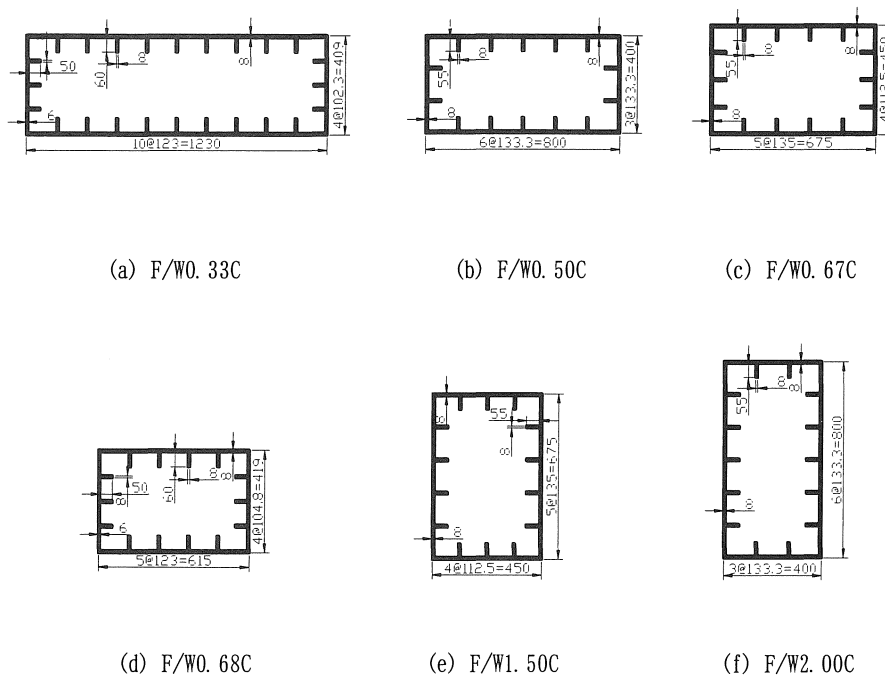


図2 試験体断面図(コンクリート充填)

表2 実験試験体諸元(コンクリート充填)

試験体名		F/W0.33C	F/W0.50C	F/W0.67C	F/W0.68C	F/W1.50C	F/W2.00C
アスペクト比	α	0.33	0.50	0.67	0.68	1.50	2.00
(無充填部)							
縦補剛材剛比	γ_1	41.5	23.8	21.2	40.5	14.1	11.9
最適剛比	γ^*	15.5	7.6	8.8	14.6	4.6	4.0
	γ/γ^*	2.67	3.12	2.40	2.77	3.06	2.99
(コンクリート充填部)							
縦補剛材剛比	γ_1	41.5	23.8	21.2	40.5	14.1	11.9
最適剛比	γ^*	12.7	22.4	26.0	12.0	13.8	11.9
	γ/γ^*	3.26	1.06	0.82	3.38	1.02	1.00
幅厚比パラメータ	R_R	0.350	0.342	0.289	0.359	0.347	0.342
	R_F	0.197	0.333	0.318	0.198	0.343	0.342
細長比パラメータ	λ	0.166	0.236	0.267	0.305	0.370	0.403
コンクリートの有無		有	有	有	有	有	有
コンクリート充填比	hc/h	0.213	0.178	0.178	0.213	0.178	0.178

験に用いる実験試験体断面寸法を図2に示す。板厚は8mmである。実験試験体諸元を表2に示す。鋼材の公称降伏応力 σ_y は355kN/mm²、ヤング係数Eは2.06×10⁸kN/mm²、ポアソン比 ν は0.3である。またコンクリートの強度は17kN/mm²である。コンクリート充填比(充填高さhc/試験体高さh)はF/W0.33CとF/W0.68Cは0.123、F/W0.50C、F/W0.67C、F/W1.50C、F/W2.00Cは0.178である。

2.2 幅厚比パラメータ・細長比パラメータ

補剛材間パネルの板パネルの幅厚比パラメータ R_R 、補剛板の幅厚比パラメータ R_F 、細長比パラメータ λ は式(1)、(2)、(3)によって与えられる⁴⁾。

$$R_R = \frac{b}{n \cdot t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2) \sigma_y}{4\pi^2 E}} \quad (1)$$

$$R_F = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2) \sigma_y}{\pi^2 k_F E}} \quad (2)$$

ここで、b:フランジ板幅、n:補剛材で区切られるパネル数、t:フランジ板厚、 ν :ポアソン比、 σ_y :降伏応力、E:ヤング係数、 k_F :座屈係数である。

$$\lambda = \frac{2h}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

ここで、h:試験体高さ、r:断面2次半径である。

2.3 載荷装置

2.3.1 コンクリート無充填の試験体

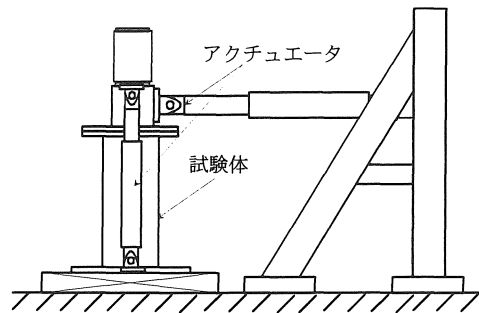


図3 載荷装置(コンクリート無充填)

コンクリート無充填の試験体の載荷装置および試験体の設置状況を図3に示す。試験体の上部部に載荷ブロックを設け、その上に軸力用載荷ビームを設置する。載荷ビーム両端に1000kNアクチュエータを1基ずつ取り付け、鉛直方向に一定軸力を保つように載荷した。水平載荷は、載荷ブロックに2000kNアクチュエータを取り付けて載荷した。

水平力が載荷されると試験体に傾きが生じるが、アクチュエータの両端は、ピン支持されているため傾きには十分対応できるようになっている。

実験は、試験体の断面積に対し鋼材の降伏応力の15%軸力を一定持続載荷する。

2.3.2 コンクリート充填の試験体

コンクリート充填の試験体の載荷装置および試験体の設置状況を図4に示す。コンクリート無充填の試験体に比べ水平力が大きくなるため試験体は水平に設置した。あらかじめ実験床に設置した試験体取付け用の架台に横置きにした状態で

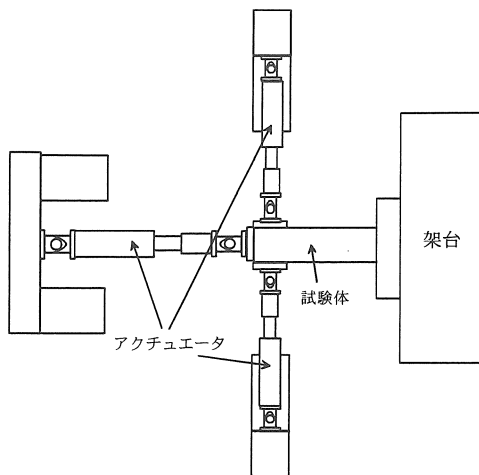


図4 荷重装置(コンクリート充填)

PC 鋼棒により固定した。4000kN アクチュエータにより鉛直方向に一定軸力を保つように荷重した。水平荷重は、2000kN アクチュエータ 2 機により荷重した。

試験体は横置き状態であるため、荷重面外のモーメントが発生しないように、下側にレールを組み合わせた受台を配置した。

実験は、アスペクト比 0.33 と 0.68 は試験体の断面積に対し鋼材の降伏応力の 6%、アスペクト比 0.50、0.67、1.50、2.00 は 15% 軸力を一定持続荷重する。

2. 4 荷重方法

2. 4. 1 コンクリート無充填の試験体

実験は上部構造重量を想定した一定軸力を荷重した後、水平力を荷重した。水平力荷重は、変位制御で行い降伏水平変位 δ_y の整数倍の変位を片振幅として、各振幅における繰り返し回数を 1 回とする両振りの漸増繰り返し荷重を行った。

2. 4. 2 コンクリート充填の試験体

実験はコンクリート無充填と同様の方法で行った。しかし、各振幅における繰り返し回数を 3 回とし、両振りの漸増繰り返し荷重を行った。過去の研究³⁾と比較するため繰り返し回数を 3 回とした。

2. 5 降伏水平変位 δ_y の決定

繰り返し荷重実験において基本変位量となる降伏水平変位 δ_y はそれぞれ次のように定めた。

2. 5. 1 コンクリート無充填の試験体

水平荷重 H が、式(4)によって与えられる降伏水平荷重に達した時の変位を降伏水平変位 δ_y とした。

$$H_y = \left(\sigma_y - \frac{N}{A} \right) \frac{Z}{h} \quad (4)$$

ここで、 H_y : 軸力を考慮した降伏水平荷重、 σ_y : 降伏応力、

N : 軸力、 A : 断面積、 Z : 断面係数、 h : 試験体高さである。

2. 5. 2 コンクリート充填の試験体

引張り側フランジ面におけるひずみが材料試験より得られた鋼材の降伏ひずみの値に達した時の変位を降伏水平変位 δ_y とした。

3. 実験結果

3. 1 荷重-変位履歴曲線

漸増繰り返し荷重実験結果のうち、水平荷重 H と水平変位 δ の関係を図 5 および図 6 に示す。図は縦軸に降伏水平荷重 H_y と横軸に降伏水平変位 δ_y で基準化したものである。実験は最大荷重に至った後、最大荷重の半分以下に低下するまで行った。アスペクト比 1.42 の試験体は実験開始後に軸力として圧縮力を与えるところを引張り力を与え、 $3\delta_y$ 側まで荷重した後、正しい軸力に戻した。したがって、本来の試験体性能を示していない可能性があるのでアスペクト比 1.42 のデータは参考程度にとどめておく。

3. 2 最大荷重の推定

最大荷重に関する推定式(5)⁴⁾に本実験で求められたデータをプロットすると、図 7 に示す結果が得られた。

$$\frac{H_{\max}}{H_y} = \frac{0.101}{R_R \lambda} + 0.880 \quad (5)$$

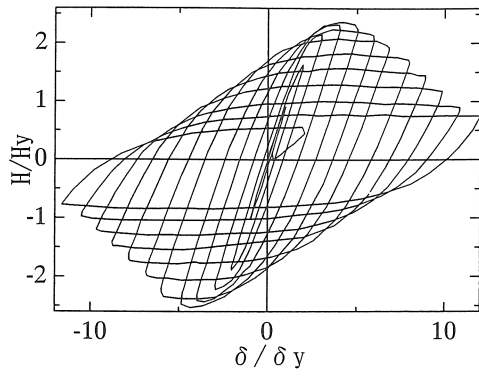
推定式(5)は現在のところ単柱式で上部構造重量が中心軸に作用するコンクリート無充填の鋼製橋脚に限られるとされている。しかし本研究ではアスペクト比、コンクリートの有無に関わらず回帰曲線の上にほぼ乗っているのがわかる。アスペクト比が 0.50 や 2.00 ような極端な長方形断面であっても、既存の推定式を用いることができると言える。最大荷重を推定する際に幅厚比パラメータと細長比パラメータの組合せが重要であると言える。しかし傾向としてコンクリート充填試験体は推定値より少し小さな値を示した。

3. 3 累積エネルギー吸収量

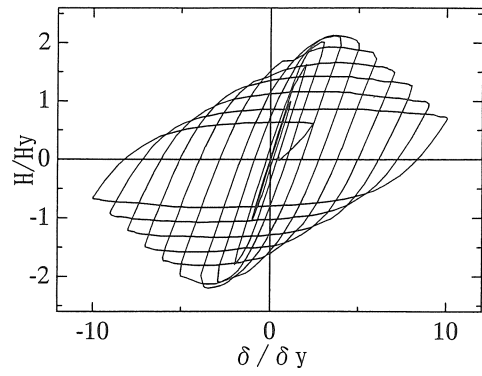
アスペクト比と鋼断面積当たりの累積エネルギー吸収量の関係を図 8 に示す。エネルギー吸収量は荷重-変位曲線を積分することにより求めた。実線はアスペクト比 1.42 の試験体とテーパ鋼板の試験体を除いた他の 3 体での近似線である。

コンクリート無充填試験体はアスペクト比が大きくなるほどエネルギー吸収量は減少していくことがわかる。また、テーパ鋼板を用いた試験体は他のコンクリート無充填試験体と比べて 35% 大きなエネルギー吸収性能があった。

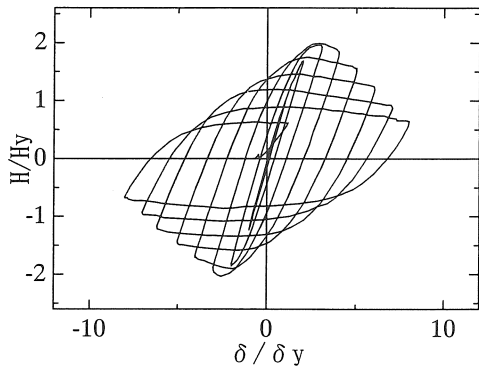
コンクリート充填試験体に、大きなばらつきが見られ一定の傾向は現れなかった。この原因の究明は今後の課題である。



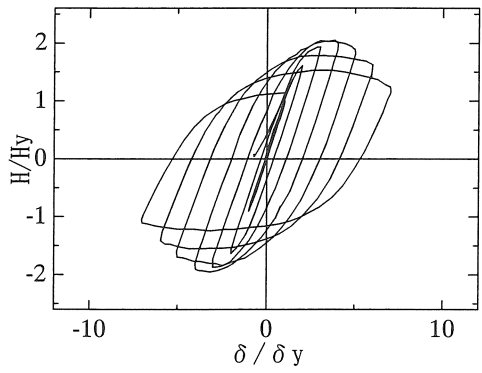
(a) F/W0.50



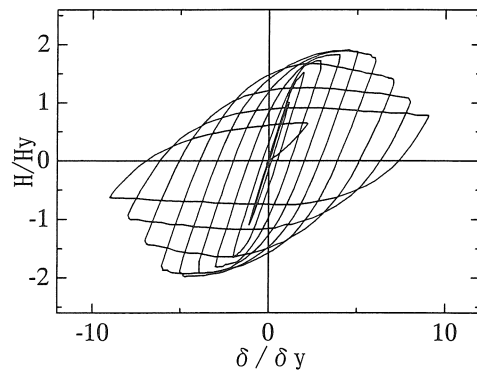
(b) F/W0.71



(c) F/W1.42

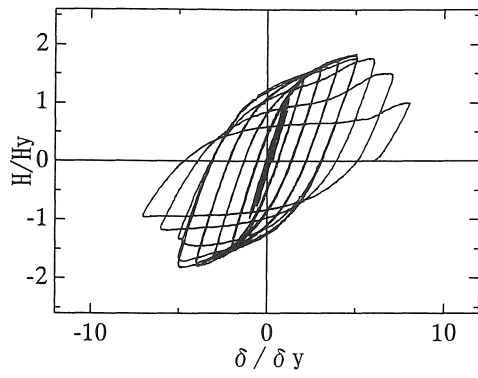


(d) F/W2.00

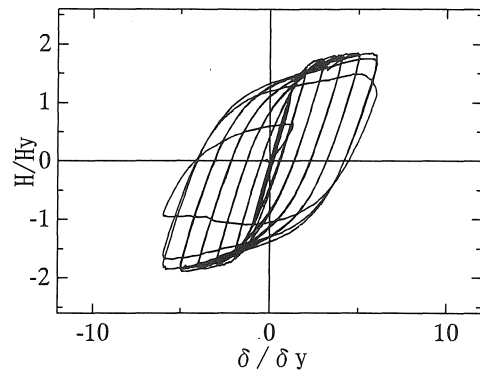


(e) F/W1.00T

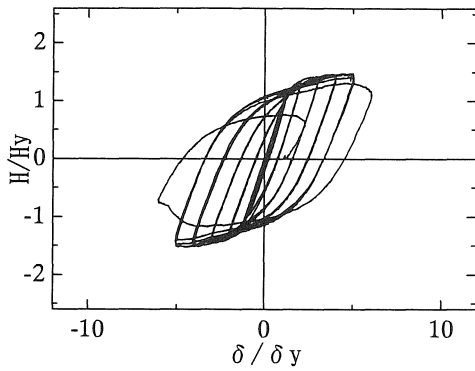
図5 水平荷重Hと水平変位 δ の関係(コンクリート無充填)



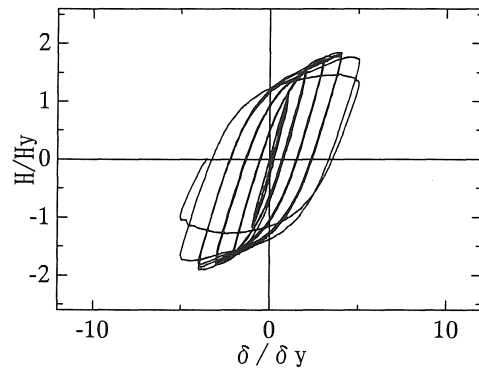
(a) F/W0.33C



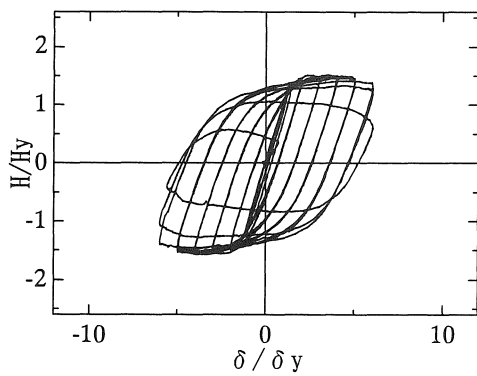
(b) F/W0.50C



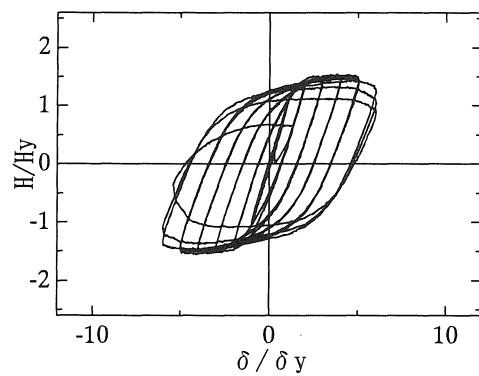
(c) F/W0.67C



(d) F/W0.68C



(e) F/W1.50C



(f) F/W2.00C

図6 水平荷重Hと水平変位δの関係(コンクリート充填)

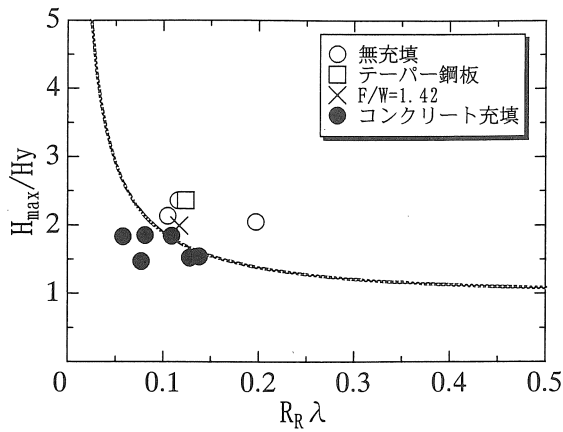


図7 最大荷重推定

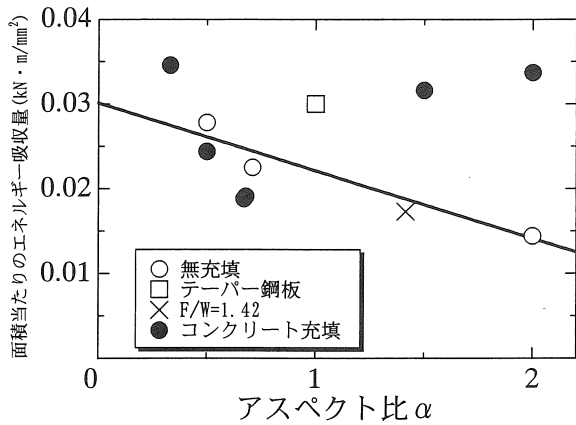


図8 累積エネルギー吸収量

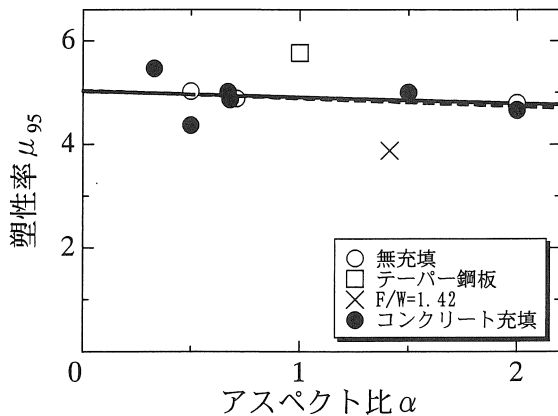


図9 塑性率

3. 4 塑性率

アスペクト比に対する塑性率の関係を図9に示す。実線はアスペクト比1.42の試験体とテーパ鋼板の試験体を除いた他の3体での近似線であり、破線はコンクリート充填試験体での近似線である。

本研究では最大荷重点を過ぎた後、最大荷重の95%の点での変位 δ_{95} を用いた式(6)で塑性率を定義する。

$$\mu_{95} = \frac{\delta_{95}}{\delta_y} \quad (6)$$

ここで、 δ_{95} :ピークを過ぎた最大荷重の95%に対する変位、 δ_y :降伏水平変位である。

テーパ鋼板の試験体はエネルギー吸収量と同様に他の試験体を約15%上回っている。

アスペクト比による影響はほとんど見られず、塑性率も5.0付近で安定している。アスペクト比1.42の試験体も計画通りの荷重を載荷すれば他の試験体と同等の値が得られたと思われる。

またコンクリート充填の影響もほとんど見られない。

3. 5 包絡線

3. 5. 1 コンクリート無充填の試験体

コンクリート無充填の各試験体の荷重-変位履歴曲線の包絡線を図10に示す。 $\delta/\delta_y=2$ までは各試験体に差は見られない。最大荷重は3~4 δ_y で表われ、テーパ鋼板を用いた試験体のみ5 δ_y であった。これは局部的ひずみが基部に集中しにくかったためと考えられる。

3. 5. 2 コンクリート充填の試験体

コンクリート充填の各試験体の荷重-変位履歴曲線の包絡線を図11に示す。コンクリート充填試験体は最大荷重以降、基部に引張り亀裂が発生し、繰り返しと共に大きくなったため $\delta/\delta_y=7$ 以上を記録したものはなかった。しかしながら前述の塑性率はコンクリート無充填試験体と同様の値を示している。

4. 作用モーメント・抵抗モーメント

4. 1 テーパ鋼板を用いた試験体

図12にコンクリート無充填試験体の作用モーメントと抵抗モーメントを示す。実線が板厚6mmから9mmのテーパ鋼板、点線が板厚6mmで均一な鋼板を示している。

作用モーメントが増大していくと柱基部で降伏が生じる。その後、降伏領域が拡大していき柱基部で全塑性状態に至る。柱基部が全塑性状態に至った時、板厚が均一な鋼板よりテーパ鋼板の方が降伏する面積が大きい。以上のことによりエネルギー吸収性能、塑性率で良い結果が出たと思われる。

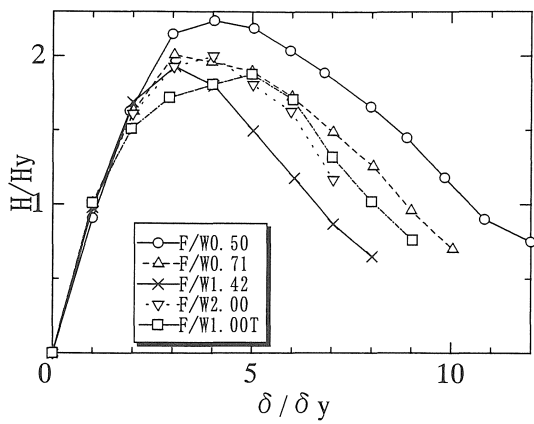


図10 包絡線(コンクリート無充填)

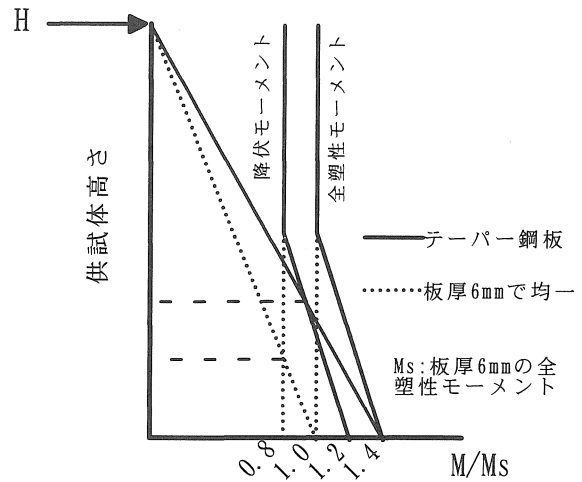


図12 作用モーメントと抵抗モーメントの関係
(テーパ鋼板を用いた試験体)

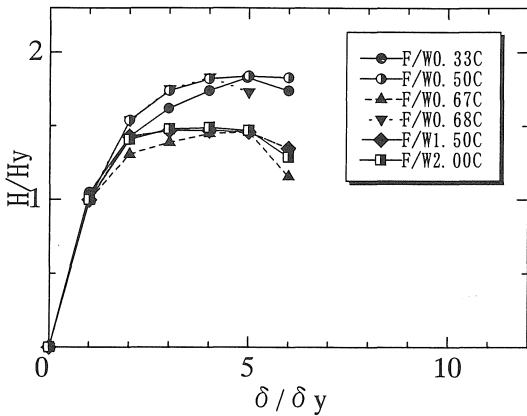


図11 包絡線(コンクリート充填)

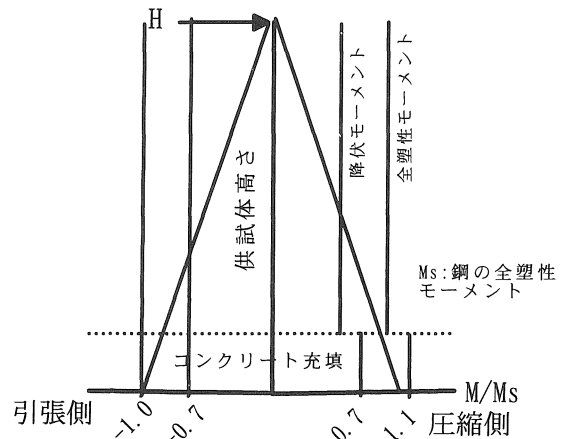


図13 作用モーメントと抵抗モーメントの関係
(コンクリート充填の試験体)

4. 2 コンクリート充填の試験体

図13にコンクリート充填試験体の作用モーメントと抵抗モーメントを示す。

作用モーメントが増大していくと圧縮側コンクリート充填部直上で降伏が生じる。次に、引張り側柱基部で降伏が生じる。さらに、圧縮側柱基部でも降伏が生じる。その後、降伏領域が拡大していく、引張り側柱基部で全塑性状態に至る。引張り側柱基部が全塑性状態に至った辺りで、亀裂が生じ水平荷重が急激に減少する。

5. 結論

本研究では、鋼製ラーメン橋脚の長方形断面脚部を対象化した静的繰返し実験を行い断面のアスペクト比 α とコンク

リート充填の有無さらにテーパ鋼板を用いた鋼製橋脚が耐震性能に及ぼす影響を調べた。静的繰返し実験により得られた結論は以下のようにまとめられる。

1. **最大荷重推定式**ではアスペクト比、コンクリートの有無に関わらず実験値は回帰曲線上にほぼ乗っていた。極端な長方形断面であっても、既存の推定式を用いることができる。最大荷重を推定する際に幅厚比パラメータと細長比パラメータの組合せが重要であると言える。しかし傾向としてコンクリート充填試験体は推定値より少し小さな値を示した。
2. コンクリート無充填の試験体のエネルギー吸収量はアスペクト比が大きくなるほど減少していった。また、テ

ーパー鋼板を用いた試験体は他のコンクリート無充填試験体より 35%大きなエネルギー吸収性能があった。コンクリート充填した場合、ばらつきが大きく一定の傾向は見られない。

3. 塑性率はアスペクト比、コンクリート充填による影響はほとんど見られず、5.0 付近で安定している。
4. コンクリート充填試験体は $6\delta y$ で基部に引張りクラックが生じ繰り返しと共に徐々に進展していった。そのため充填するコンクリートの強度を低くするなどの検討が必要である。
5. テーパー鋼板を用いた橋脚はより多くの面積でエネルギーを吸収するので耐震性能が良い。テーパー鋼板を用いた明確な基準がないことが課題である。
6. コンクリート充填された橋脚は引張り側基部に亀裂が生じ急激に水平荷重が減少した。

謝辞：本研究では、日本橋梁建設協会の前野裕文氏、岡本隆氏らから有益なご助言を賜りました。また、本学大学院生の鈴木真一君、本学土木工学科 4 年生の保高篤司君、山本正憲君を初めとする多くの方々にご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田嶋仁志、半野久光、池田茂、興守：矩形鋼製橋脚の変形性能に関する載荷実験、構造工学論文集、Vol. 44A、pp. 1251-1258、1998. 3.
- 2) 高久達将、青木徹彦、中島一浩、熊野拓志、渡辺貞之、松田宏：長方形断面鋼製橋脚の耐荷力と変形性能に関する検討、第 4 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp. 285-292、2000. 12.
- 3) 葛漢彬、宇佐美勉、浅田秀史：コンクリート部分充填鋼製橋脚の統一的耐震照査法、第 4 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp. 285-292、2000. 12.
- 4) 土木学会、日本鋼構造協会：橋鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化、2000. 3.
- 5) 前野裕文、森下宣明、青木徹彦、鈴木森晶、梅田聡、三輪恭久：コンクリートを柱基部に部分充填した鋼製ラーメン橋脚の耐荷力実験、構造工学論文集、Vol. 47A、2001. 3. (投稿中)
- 6) 村田雅人：弾・塑性材料の力学入門、日刊工業新聞、1993.
- 7) 葛漢彬、宇佐美勉、戸谷和彦：繰り返し荷重を受けるコンクリート充填鋼管柱の強度と変形能に関する研究、構造工学論文集、Vol. 40A、pp. 163-176、1994. 3.
- 8) 中井博、北田俊行、吉川紀、中西克圭、尾山辰巳：コンクリートを充填した長方形箱型断面柱の耐荷力と変形性能に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 39A、pp. 1347-1360、1993. 3.
- 9) 前野裕文、宇佐美勉、葛漢彬、岡本隆、水谷慎吾、糸井啓次：コンクリート部分充填鋼製八角形断面橋脚の強度と変形能に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 44A、pp. 189-199、1998. 3.

(受理 平成13年 3月19日)