

隅角部の曲面の大きさが箱形断面鋼製橋脚の耐震性能に及ぼす影響

Influence of size of round corner on seismic resistance performance of box-section steel pier

大賀水田生*, 竹村慎一郎**, 今村覚***, 新大輔****

Mitao OHGA, Shinichiro TAKEMURA, Satoru IMAMURA and Daisuke ATARASHI

*正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

**学生員 愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程 生産工学専攻 (同上)

***正会員 川田建設(株) (〒114-8505 東京都北区滝野川6-3-1)

****学生員 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程 環境建設工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町3)

In this paper, influences of round corner on seismic resistance performance such as ultimate strength and energy absorption capacity of round corner box-section steel piers are examined. The longitudinally unstiffened and stiffened round corner box-section steel piers are analyzed by finite element stability analysis under constant vertical and incremental cyclic horizontal load. In finite element stability analysis, isoparametric shell element with 9-nodes is adopted, and geometrical and material nonlinearities are considered. The seismic resistance performances of the box-section without round corners steel piers are also examined to compare with that of round corner steel piers. It is concluded that ultimate strength and energy absorption capacity of round corner box-section steel piers increase as the size of round corners becomes large.

Key words : FEM, round corner, cyclic load, ultimate strength, energy absorption capacity

1. はじめに

1995年1月に発生した阪神大震災では、これまで変形性能に優れた構造と考えられていた鋼製橋脚においても、上部構造の重量による軸圧縮と水平地震力の作用により補剛板の角溶接部に割れが生じたり、鋼管の提灯座屈による過度の変形により割れが生じるなどの脆性的な破壊が発生し、大きな被害を被った。そのため、鋼製橋脚の耐震性能の向上や合理的な耐震設計法の確立を目的として、鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的・解析的研究が精力的に行われている^{1)~5)}。

平成14年3月改訂の道路橋示方書・同解説V耐震設計編⁶⁾には、鋼製橋脚が大きな地震力を受けた場合の座屈や亀裂により生じる脆性的な破壊を防ぎ、所要の変形性能を確保するために、1) 橋脚の内部に適切にコンクリートを充填した鋼製橋脚、2) 隅角部にコーナープレートを当てて補強した橋脚、3) 隅角部を曲面とし角溶接部をなくした橋脚、4) 隅角部の溶接継手に十分な溶込みを確保できるように配慮した橋脚が示されている。これらの橋脚構

造の中で3) 隅角部を曲面とする構造形式は阪神大震災以前から主に景観性に配慮した鋼製橋脚として提案され、特に都市部で採用されている。しかしながら、隅角部を曲面とする構造形式の力学的な研究はあまり行われておらず、さらに隅角部の曲面の大きさが橋脚の耐荷力や変形性能に及ぼす影響について詳細に検討した研究はほとんど行われていない^{7)~10)}。

そこで、本研究では隅角部を曲面とした箱形断面鋼製橋脚のFEM耐荷力解析を行い、曲面の大きさが橋脚の耐震性能(耐荷力、変形性能)に及ぼす影響を考察するとともに、隅角部の曲面の有用性について検討する。

まず、隅角部を曲面とした箱形断面鋼製橋脚の基本的な挙動を把握するため、補剛材を有しない無補剛断面鋼製橋脚(以下、無補剛橋脚)の最大耐荷力およびエネルギー吸収量について検討を行い、その後、より実橋脚に近い断面を有する補剛断面鋼製橋脚(以下、補剛橋脚)での検討を行う。なお、水平荷重については、地震時の動的荷重を考慮した繰返し載荷での検討を行う。

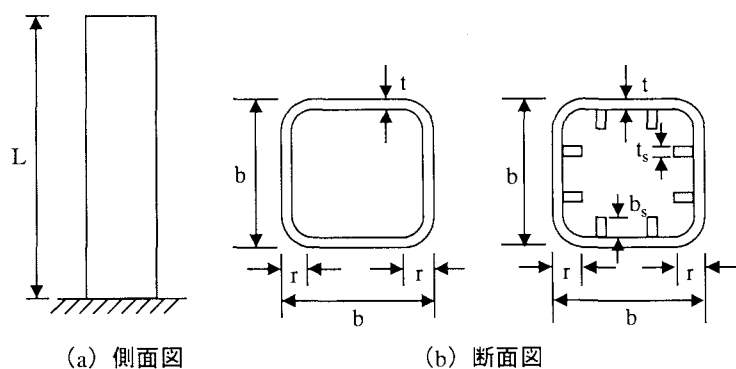
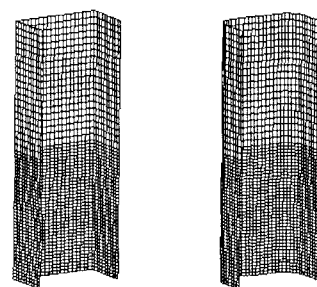


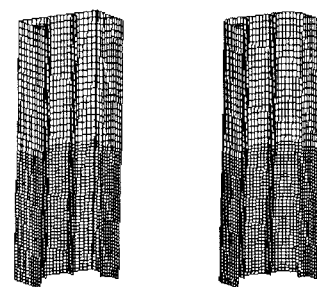
図-1 隅角部を曲面とした橋脚

表-1 解析モデルの諸元

	無補剛橋脚	補剛橋脚
断面幅 b	210 (cm)	
高さ L	580 (cm)	
板厚 t	3 (cm)	
補剛材高さ b_s		23.5 (cm)
補剛材厚 t_s		3 (cm)
幅厚比パラメータ R	1.72	
補剛材間幅厚比 パラメータ R_R		0.57
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.20	0.21
曲率比 r/b	0.0, 0.1, 0.2, 0.3	
軸力比 N/N_y	0.0, 0.1, 0.15, 0.2	
ヤング係数 E	205.8 (GPa)	
ポアソン比 μ	0.3	
降伏応力 σ_y	450.8 (MPa)	



(a) 無補剛橋脚



(b) 補剛橋脚

図-2 解析モデル

2. 解析概要

2.1 FEM 耐荷力解析

本研究での FEM 耐荷力解析では、9 節点を有するアイソパラメトリック退化シェル要素を用いており、解析では幾何学的および材料学的非線形性を考慮している。幾何学的非線形挙動はラグランジュ法による増分理論に基づいている。また、材料学的非線形性挙動は、*von-Mises* の降伏条件に従うものとするとともに、*Prandtl-Reuss* の応力-ひずみ関係を用いており、材料構成則は等方硬化則に従うものとしている。

非線形計算は荷重増分法を用いているが、各荷重増分段階における載荷方法としては、最大耐荷力以降において安定した解が得られる等の理由から、橋脚端部に一定の変位を与える方法(強制変位法)を用いており、強制変位を与えた各節点での節点力の和を本解析での水平荷重の大きさとしている。

2.2 解析モデル

本研究では、図-1 に示すような隅角部を曲面とした無補剛および補剛橋脚の解析を行った。解析モデルの諸元を表-1 に示す。また、比較のために隅角部が曲面でない通

常の箱形断面($r/b=0.0$)についても検討した。なお、本研究では無補剛および補剛橋脚の双方においてダイヤフラムは考慮していない。

解析モデルは、断面の対称性を考慮して図-2 に示すような 1/2 断面としている。また、要素分割は断面方向に無補剛橋脚で 20 分割、補剛橋脚で 32 分割としており、軸方向には、図-2 に示すように無補剛および補剛橋脚の双方において橋脚基部に局部座屈が発生することを考慮して橋脚基部から 1/2 の高さまでを 20 分割と細かくし、残り 1/2 部分を 10 分割の計 30 分割としている。なお、図-2 ではアイソパラメトリックシェル要素の中間節点を用いて要素を 4 分割しているため、実際の要素分割よりも細かな表示となっている。境界条件は、橋脚基部を固定支持、上端部を自由としている(図-2)。

解析モデルの鋼材は溶接構造用鋼材 SM570(ヤング係数 $E=205.8\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\mu=0.3$ 、降伏応力 $\sigma_y=450.8\text{MPa}$)を想定している。鋼材の応力-ひずみ関係は、ひずみ硬化の影響を考慮して二次勾配 $E/100$ のバイリニア型とした(図-3)。

2.3 載荷方法

本研究では、橋脚頭部に上部構造重量を想定した軸方向

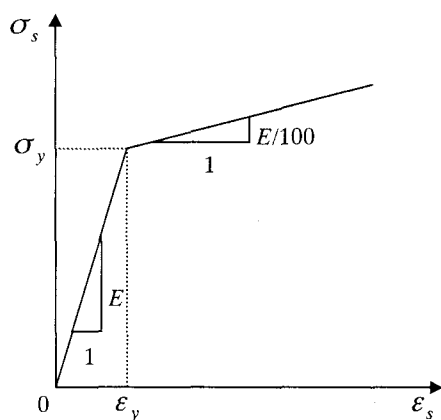


図-3 応力-ひずみ関係

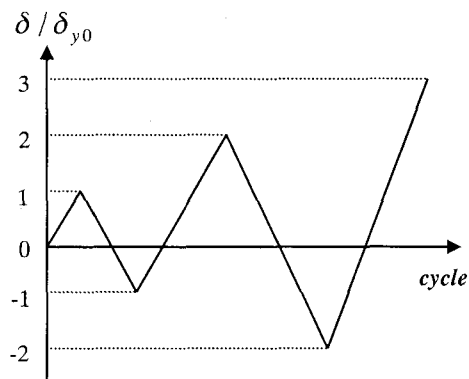


図-4 載荷パターン

荷重を載荷した後、地震動を想定した水平荷重を強制変位により与えた。

軸方向荷重の大きさは、無補剛橋脚においては全断面降伏荷重($N_y = A\sigma_y$)の0%, 10%, 15%, 20%(軸力比 $N/N_y = 0.0, 0.1, 0.15, 0.2$)を、補剛橋脚においては全断面降伏荷重の0%, 10%, 20%, 30%(軸力比 $N/N_y = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$)の軸方向荷重を作用させた。なお、補剛橋脚の軸方向荷重算出の際に補剛材は軸方向荷重に抵抗しないものとしている。

水平荷重は、軸方向荷重を考慮しない状態(軸力比 $N/N_y = 0.0$)で橋脚基部に初めて降伏が生じる時の水平荷重(初降伏水平荷重 H_{y0})に対する載荷点での変位(初降伏水平変位 δ_{y0})を基準とし、図-4に示すように漸増させた。なお、初降伏水平荷重 H_{y0} および初降伏水平変位 δ_{y0} は橋脚を片持ち梁として考え、それぞれ式(1), (2)により決定した。

$$H_{y0} = \sigma_y \frac{z}{L} \quad (1)$$

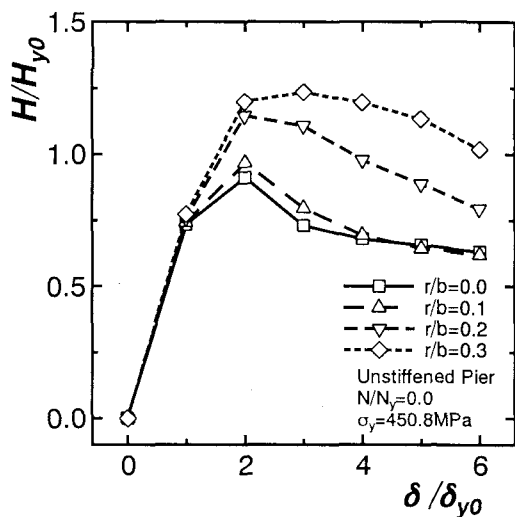
$$\delta_{y0} = \frac{H_{y0} L^3}{3EI} \quad (2)$$

ここで、 L ：橋脚高さ、 E ：ヤング係数、 I ：断面二次モーメント、 z ：断面係数、 σ_y ：降伏応力である。なお、補剛橋脚における断面二次モーメント I は補剛材を含んだ値としている。

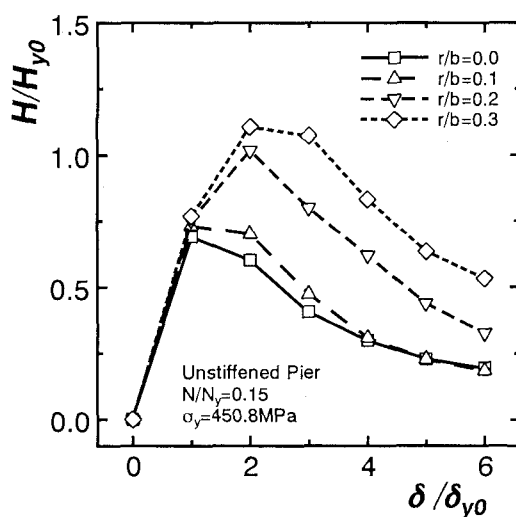
3. 最大耐力に関する検討

本節では、無補剛および補剛橋脚において隅角部の曲面の大きさが最大耐力に及ぼす影響についての検討を行う。

図-5は無補剛橋脚における軸力比 $N/N_y = 0.0, 0.15$ での包絡線を、図-8は補剛橋脚における軸力比 $N/N_y = 0.0, 0.2$ での包絡線を示している。また、図-6は無補剛橋脚における最大耐力時での橋脚基部を拡大した変形状態および



(a) $N/N_y = 0.0$



(b) $N/N_y = 0.15$

図-5 包絡線（無補剛橋脚）

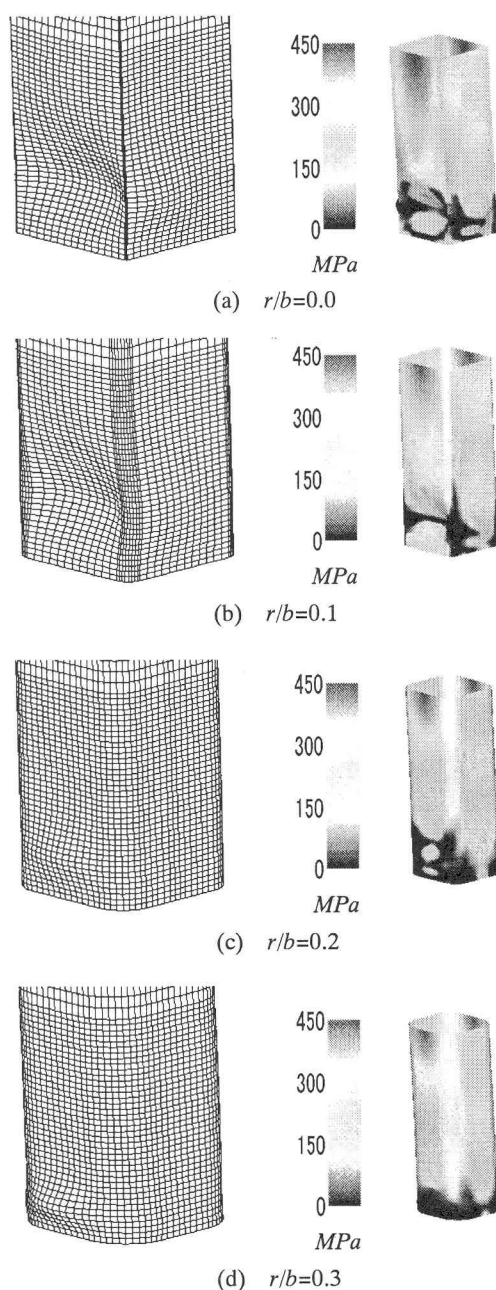


図-6 変形形状および応力分布
(無補剛橋脚, $N/N_y=0.0$)

び応力分布を示している。図-9は補剛橋脚における4cycleおよび最大耐力時での橋脚基部を拡大した変形形状を示している。さらに、図-7, 10は無補剛および補剛橋脚での隅角部の曲面の大きさが橋脚の最大耐力に及ぼす影響、すなわち曲面を設けることによる最大耐力力の箱形断面($r/b=0.0$)に対する増加の割合を種々の軸力比 N/N_y に対して示している。なお、図-5, 8の縦軸には水平荷重 H を初降伏水平荷重 H_{y0} で除した値を、横軸には水平変位 δ を初降伏水平変位 δ_{y0} で除した値を示している。また、図-7, 10の縦軸にはそれぞれの軸力比 N/N_y での最大耐力力 H_m を箱形断面($r/b=0.0$)での最大耐力力 $H_{m0.0}$ で除

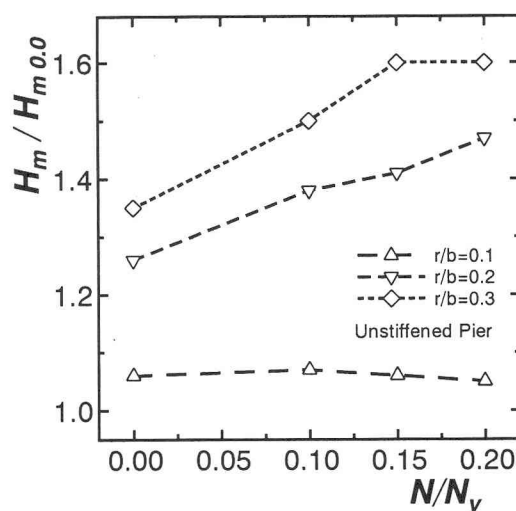


図-7 最大耐力比 (無補剛橋脚)

した値を、横軸には軸力比 N/N_y をとっている。

3.1 無補剛橋脚

(1) $N/N_y=0.0$ での検討

図-5(a)より明らかなように、隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大耐力力は、箱形断面($r/b=0.0$)に比較してほとんど変化は見受けられないが、曲面が大きくなると($r/b=0.2, 0.3$)、箱形断面に対して約1.3, 1.4倍程度上昇している。

箱形断面($r/b=0.0$)および曲面が小さい場合($r/b=0.1$)、図-6(a), (b)より明らかなように、最大耐力時に橋脚基部に大きな局部座屈が発生し、隅角部およびフランジ、ウェブの一部に応力集中が生じている。

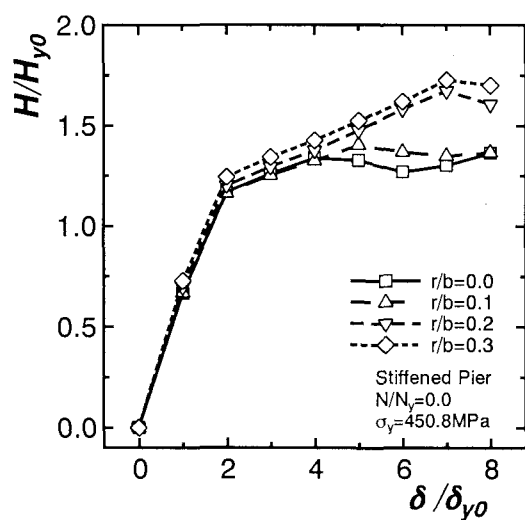
一方、曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)、図-6(c), (d)より明らかなように、最大耐力時に橋脚基部のフランジに円周方向に膨らむような局部座屈の発生が見られるが、箱形断面($r/b=0.0$)に比較して変形量が小さく、また橋脚基部全体に高い応力が分布している。このことが、曲面が大きい場合での最大耐力力が、箱形断面に比較して大きく上昇する要因と考えられる。

(2) $N/N_y=0.15$ での検討

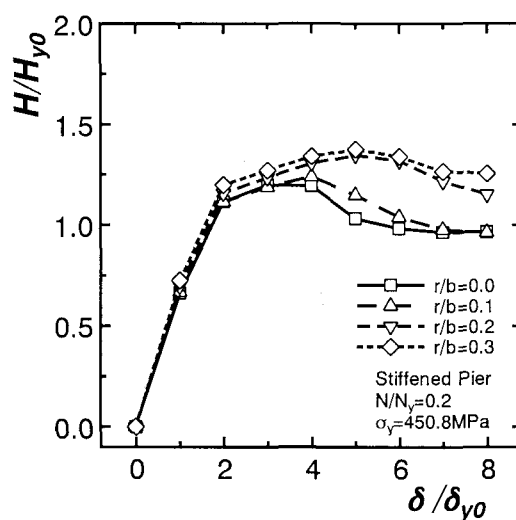
図-5(b)より明らかなように、 $N/N_y=0.0$ の場合と同様、隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大耐力力は箱形断面($r/b=0.0$)に比較して大きな変化は見受けられないが、曲面が大きくなると($r/b=0.2, 0.3$)、箱形断面に比較して最大耐力力が約1.4, 1.6倍程度上昇している。

(3) 種々の軸力比 N/N_y での検討

図-7より明らかなように、隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大耐力力の箱形断面($r/b=0.0$)に対する増加は、いずれの軸力比 N/N_y においてもほとんど認められない($H_m/H_{m0.0} \approx 1$)。一方、隅角部の曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)での最大耐力力の増加の割合は箱形断面に比較して大



(a) $N/N_y=0.0$



(b) $N/N_y=0.2$

図-8 包絡線 (補剛橋脚)

きくなっており、その傾向は曲率比および軸力比が大きくなるほど顕著になっている。

3.2 補剛橋脚

(1) $N/N_y=0.0$ の検討

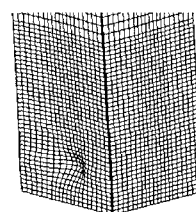
図-8(a)より明らかなように、隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大耐荷力は、箱形断面($r/b=0.0$)に比較して大きな変化は見受けられないが、曲面が大きくなると($r/b=0.2, 0.3$)、箱形断面に対して約 1.3 倍程度上昇している。ここに、図-8(a)に示す箱形断面の耐荷力が 6cycle 以降再び上昇しているが、ここでは最初に耐荷力が減少し始める 4cycle を最大耐荷力としている。

補剛橋脚の変形状態については、まず箱形断面の場合($r/b=0.0$)、図-9(a)に示すように、最大耐荷力時(4cycle)に橋脚基部のフランジ補剛材間に局部座屈が生じている。このことから、箱形断面の最大耐荷力は局部座屈強度に大きく依存するものと考えられる。

隅角部に曲面を有する場合での変形状態は、曲面が小さい場合($r/b=0.1$)、図-9(b)に示すように、4cycle で箱形断面($r/b=0.0$)と同様、橋脚基部のフランジ補剛材間に局部座屈が生じており、その後 5cycle まで若干耐荷力の上昇が見られるが、箱形断面とほぼ同様の傾向を示しており、箱形断面と同様、曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大耐荷力は局部座屈強度に大きく依存するものと考えられる。

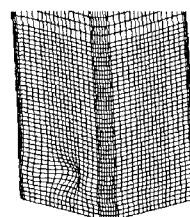
一方、曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)、図-9(c), (d)に示すように 4cycle で箱形断面と同様、橋脚基部のフランジ補剛材間に局部座屈が生じている。しかしながら、局部座屈が発生した 4cycle で最大耐荷力に達しておらず、さらに座屈による変形が橋脚基部のフランジ全体に広がり、かつ橋脚基部のウェブにも変形が見られる 7cycle 付近まで耐荷力が上昇している。

最大耐荷力時(4cycle)

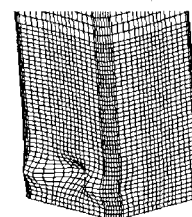


(a) $r/b=0.0$

4cycle

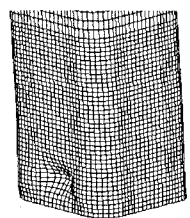


最大耐荷力時(5cycle)

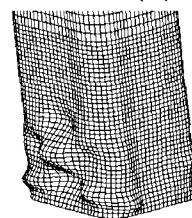


(b) $r/b=0.1$

4cycle

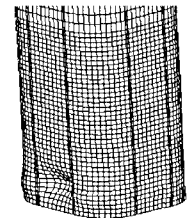


最大耐荷力時(7cycle)

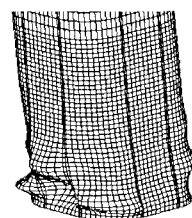


(c) $r/b=0.2$

4cycle



最大耐荷力時(7cycle)



(d) $r/b=0.3$

図-9 変形状態 (補剛橋脚, $N/N_y=0.0$)

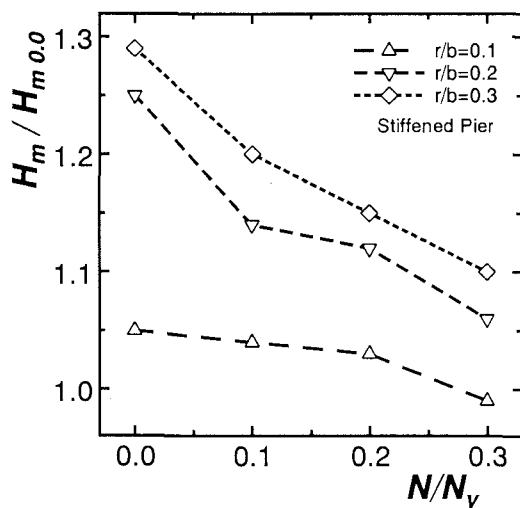


図-10 最大耐力比（補剛橋脚）

(2) $N/N_y=0.2$ での検討

図-8(b)より明らかなように、 $N/N_y=0.0$ の場合と同様、隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大耐力は、箱形断面($r/b=0.0$)に比較して大きな変化は見受けられないが、曲面が大きくなると($r/b=0.2, 0.3$)、箱形断面に対して約 1.1, 1.2 倍程度上昇している。

(3) 種々の軸力比 N/N_y での検討

図-10 より明らかなように、隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大耐力の箱形断面($r/b=0.0$)に対する増加は、いずれの軸力比 N/N_y においてもほとんど認められない($H_m/H_{m0.0} \approx 1$)。一方、隅角部の曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)での最大耐力の増加の割合は箱形断面に比較して大きくなっているが、その傾向は軸力比が大きくなるほど小さくなっている。

これらのことより、無補剛および補剛橋脚いずれにおいても曲率比 $r/b=0.2$ 程度の曲面を設けた場合に最大耐力は効率的に改善されることが明らかになった。

4. エネルギー吸収量に関する検討

コンクリートを充填しない鋼製橋脚の耐震設計においては、脆性的な破壊を防ぎ変形性能に優れた構造とすることが求められている。そこで本節では、隅角部の曲面の大きさが橋脚の変形性能に及ぼす影響をエネルギー吸収量を用いて検討する。

4.1 エネルギー吸収量の概要

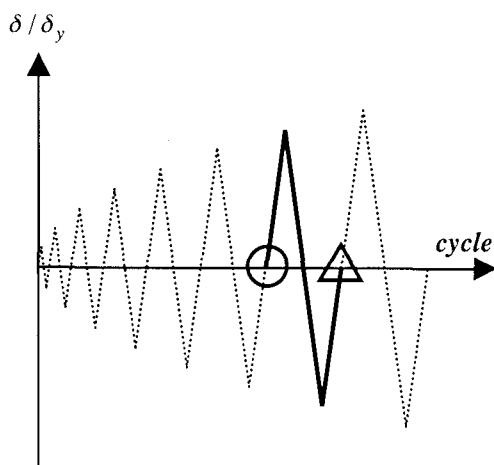
図-11 に本研究で考慮したエネルギー吸収量の概要を示している。図-11 に示すように、本研究では 1cycle の繰り返し载荷によって得られた履歴曲線から荷重軸と変位軸とで囲まれる面積をその cycle でのエネルギー吸収量 ΔW として算出している。

図-12, 13 は、無補剛橋脚($N/N_y=0.15$)および補剛橋脚($N/N_y=0.20$)でのエネルギー吸収量曲線を示している。なお、図-12, 13 の縦軸にはエネルギー吸収量 ΔW を弾性エネルギー W_{y0} で除した値を、横軸には cycle 数をとっている。ここで、弾性エネルギー W_{y0} は式(3)によって算出している。

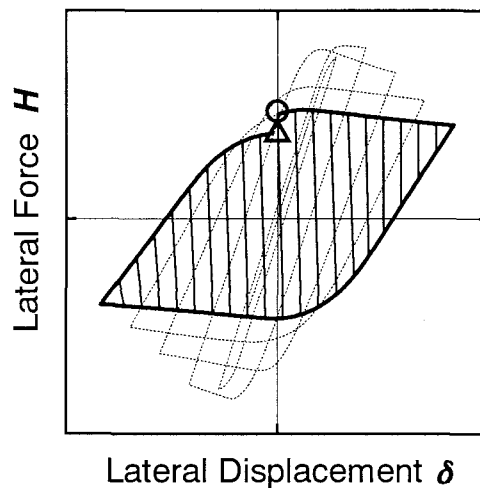
$$W_{y0} = \frac{H_{y0}\delta_{y0}}{2} \quad (3)$$

4.2 無補剛橋脚

図-12 に示すように、いずれの曲率比($r/b=0.1, 0.2, 0.3$)においても最大耐力付近である 2cycle までのエネルギー吸収量は箱形断面($r/b=0.0$)とほぼ同程度であるが、最大



(a) 荷重パターン



(b) 荷重-変位曲線

図-11 エネルギー吸収量の概要

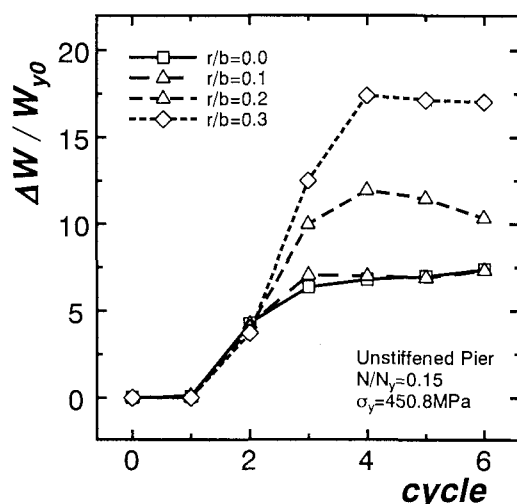


図-12 エネルギー吸収量(無補剛橋脚)

耐力力以降においては曲面が小さい場合 ($r/b=0.1$), 箱形断面とほぼ同程度であるのに対し, 曲面が大きい場合は ($r/b=0.2, 0.3$), 箱形断面に比較して大きく増加しており, その傾向は曲率比が大きくなるほど顕著になっている。

4.3 補剛橋脚

図-13 に示すように, いずれの曲率比($r/b=0.1, 0.2, 0.3$)においても, 橋脚基部の補剛材間に局部座屈が発生する 4cycle までのエネルギー吸収量は箱形断面($r/b=0.0$)と同程度であるが, 局部座屈発生以降における曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)でのエネルギー吸収量は, 箱形断面に比較して増加しており, その傾向は曲率比が大きくなるほど顕著になっている。

これらのことより, 無補剛および補剛橋脚いずれにおいても, 曲率比 $r/b=0.2$ 程度の曲面を設けた場合にエネルギー吸収量は効率的に改善されることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では, 隅角部の曲面の大きさが箱形断面鋼製橋脚の耐震性能に及ぼす影響について検討した。

本研究で得られた主な結果は, 以下の通りである。

最大耐力力

- 1) 無補剛橋脚の場合, 隅角部の曲面が小さい場合 ($r/b=0.1$)での最大耐力力は箱形断面($r/b=0.0$)とほぼ同程度である。一方, 曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)での最大耐力力は箱形断面に比較して大きくなり, その傾向は曲率比および軸力比が大きくなるほど顕著になる。
- 2) 補剛橋脚の場合, 曲面が小さい場合($r/b=0.1$)での最大

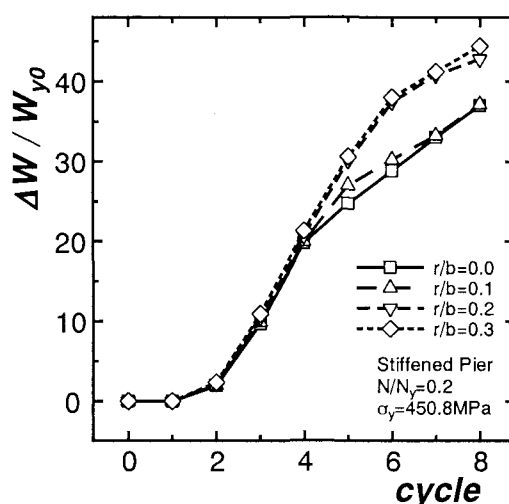


図-13 エネルギー吸収量(補剛橋脚)

耐力力は箱形断面とほぼ同程度である。一方, 曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)での最大耐力力は箱形断面に比較して大きくなるが, その傾向は軸力比が大きくなるほど小さくなる。

エネルギー吸収量

- 3) 無補剛橋脚の場合, 最大耐力力の場合と同様, 隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)でのエネルギー吸収量は箱形断面($r/b=0.0$)とほぼ同程度であるが, 隅角部の曲面が大きくなると($r/b=0.2, 0.3$), 箱形断面に比較して大きく増大する。
- 4) 補剛橋脚の場合, 無補剛橋脚の場合と同様, 隅角部の曲面が小さい場合($r/b=0.1$)でのエネルギー吸収量は箱形断面($r/b=0.0$)とほぼ同程度であるが, 曲面が大きい場合($r/b=0.2, 0.3$)でのエネルギー吸収量は, 箱形断面の場合に比較して大きくなる。

なお, 本研究では解析結果に対する検証を行っていないため, 今後実験結果等による本研究の妥当性の検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 葛漢彬・宇佐美勉・高聖彬: 鋼性補剛箱形断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.109-118, 2000年3月。
- 2) 岡本隆・水谷慎吾・長山秀昭・原茂樹・半野久光・田嶋仁志: 縦リブ補強した円形断面鋼性橋脚の耐震性評価, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.97-108, 2000年3月。
- 3) 森下益臣・青木徹彦・鈴木森晶: コンクリート充填円形鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論

文集 Vol.46A, pp73-83, 2000 年 3 月.

- 4) 松村新也・原岡雅史・岩坪要・山尾敏孝：十字型補剛壁を有する鋼製橋脚の耐震性能に関する研究, 構造工学論文集, Vol.47A, 2001 年 3 月.
- 5) 葛漢彬・高聖彬・宇佐美勉：鋼構造物の繰り返し弾塑性解析用構成則の実験データによる検証, 構造工学論文集, Vol.44A, pp201-210, 1998 年 3 月.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, v.耐震設計編, 2002 年 3 月.
- 7) 北田俊行・中井博・徳林宗孝・坂口三代治・川副孝行：コンクリートを充填し, コーナー部に曲率を設けた鋼製橋脚柱の耐荷力と変形性能とに関する実験的研究,

構造工学論文集, Vol.51-60, 2000 年 3 月.

- 8) 山口栄輝・村田洋平・後藤芳顯・林正拳・南野能克・阿部圭吾・久保喜延：繰り返し水平荷重を受ける鋼製 R 付箱形断面橋脚の弾塑性挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp109-117, 2002 年 3 月.
- 9) 大賀水田生・竹村慎一郎・今村寛：隅角部の曲面が箱形断面部材の軸圧縮特性に及ぼす影響, 応用力学論文集, Vol.5, pp. 393-400, 2002 年 8 月.
- 10) 大賀水田生・竹村慎一郎・重松恒美：隅角部に曲率を有する薄肉断面部材の線形座屈解析, 鋼構造年次論文集, 第 9 巻, pp.497-504, 2001 年 11 月.

(2003 年 9 月 12 日受付)