

ダクティリティに基づく鋼製橋脚の有効な断面形状に関する実験的研究

THE EFFECTIVE CROSS SECTION OF BRIDGE PIERS FOR STRENGTH AND DUCTILITY

渡邊英一^{*}, 杉浦邦征^{**}, 播本章一^{***}, 長谷川敏之^{****}

By Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA, Shoichi HARIMOTO and Toshiyuki HASEGAWA

In recent days, the necessity to assess the actual reliability of structures against expected severe loadings such as strong ground motions has emerged. The present study is an investigation on the effective cross sectional shape of bridge piers, paying attention to superiority in strength and ductility. The different cross sections: box with sharp corners, box with round corners and circular section were subjected to a comparative study by keeping the sectional area, slenderness parameter and section modulus regarding the strength and deformation as nearly equal as possible. The experimental results showed that circular section is superior in ductility before the ultimate strength has been reached when bending deformation is less than about three times of yielding curvature. In addition, it is observed that both the stiffened box and the circular sections can be improved in strength and ductility as compared with the non-stiffened box sections.

1. はじめに

現在、構造物には、先のサンフランシスコで発生したロマ・ブリータ地震にみられたような脆性的破壊を防ぐべく、耐震変形性能すなわちダクティリティを有することが求められつつある。鋼構造物のダクティリティを高める方法としては、①部材断面のコーナー部に丸みをつけるなど有効な断面形状を使用する、②低降伏比鋼材などにみられる初期降伏以降の材料強度特性および一様伸びの性質を有効利用する、③合成構造とする、④部材断面の幅厚比、細長比を小さくする、⑤不静定構造にする、などが考えられ、さまざまな研究が行われている^{1), 2), 3)}。

一方、わが国においては、高速道路網の建設に伴い高架構造をとることが多く、鋼製橋脚を用いる場合も多くなっている。鋼製橋脚には、従来より円形断面や箱型断面が多く用いられてきたが、最近ではコーナー部を曲面にした箱型断面（以下R付箱断面と言う）や小判型断面など特殊な断面が採用される場合もある。しかし、これらの断面形状は主に、美観や経済性により決定されており、力学的な有効性をも含めて比較検討された例は少ない。

* Ph. D., 工博	京都大学教授 工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
** Ph. D.	京都大学助手 工学部土木工学科	(〒606 京都市左京区吉田本町)
***	駒井鉄工株式会社 常務取締役 技術本部副本部長	(〒555 大阪市西淀川区中島2-5-1)
**** 工修	駒井鉄工株式会社 大阪橋梁設計部設計二課係長	(〒555 大阪市西淀川区中島2-5-1)

本研究は、鋼製橋脚の柱部材に着目し、どのような断面形状が強度およびダクティリティに対して有効であり、また実設計に有利であるかについて比較検討を行うものである。

2. 載荷実験

本研究では、鋼製橋脚の構造形式として最も基本的なものの一つであるT型橋脚を対象とする。T型橋脚は、図-1に示すように梁部、隅角部、そして柱部に分けられる。本研究では、柱基部のダイヤフラムに挟まれた1パネルをはり一柱セグメントとして取り上げ、一定の軸圧縮力と反復曲げを想定し載荷実験を行い、その基本的特性を明らかにする。T型橋脚が地震荷重を受けると柱部は曲げモーメントM、せん断力Q、そして軸力Pを受ける。ここでは、塑性ヒンジが基部に形成され、その長さは柱長に比べて比較的小さいため曲げモーメント勾配は無視し、設計上重要なM、Pの効果のみを考えた状態をモデル化して載荷実験を行うものとする。

(1) 荷重載荷形式

昭和48年度の旧道路橋示方書⁴⁾によれば、軸方向圧縮応力度を σ_c 、曲げ圧縮応力度を σ_{bc} とする許容応力度として次式を満足しなければならないとしている。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}} + \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_{ba}} < 1 \quad (1)$$

ここに σ_{ca} : 弱軸回りの許容軸方向圧縮応力度

σ_{ba} : 許容曲げ圧縮応力度

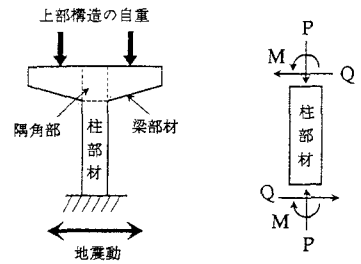


図-1 T型橋脚柱

中井等の実績調査報告書^{5), 6)}によると、この旧道路橋示方書に基づいて設計された88本のラーメン橋脚において、式(1)の左辺第一項と第二項の値をプロットすれば、図-2のようになることが報告されている。本研究では、この実績調査報告に基づき、軸方向圧縮力 P_h を降伏圧縮荷重 P_y の20%および33%で一定に保ち、曲げモーメントMが時間的に変化すると考え、次の載荷形式を採用する(図-3)。

$$P_h/P_y = 0.20, 0.33 \quad M = M(t) \quad (2)$$

このような載荷実験を行うために、40tonfサーボ試験機2台を用いた載荷試験システムを用いた。1台は軸方向圧縮力を作用させ、もう1台は両振りの繰り返し純曲げを発生させた。載荷装置の全体図を図-4に示す。

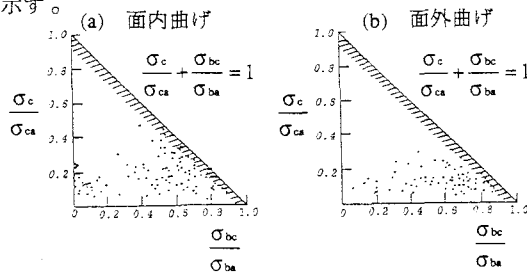


図-2 軸方向圧縮力と曲げモーメントの相関関係

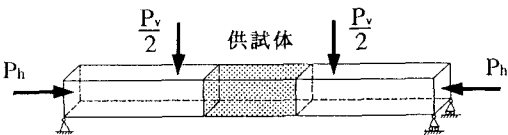


図-3 載荷形式

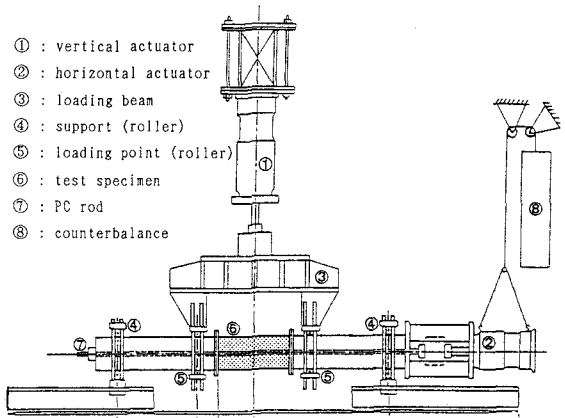


図-4 載荷装置全体図

軸圧縮力は供試体の内側に挿入したP C鋼棒の引張りに対する反力として与え、常にその値が一定であるようにした。その際、軸力が供試体全体に一樣に作用するように、供試体両端部のフランジ4隅にひずみゲージを設置し、荷重の偏心をチェックした。また、繰り返し曲げが供試体全体に一樣に作用するように設定した。

軸力は荷重制御とし、曲げについては変位制御（曲率制御）による次のような载荷形式を採用した。

载荷形式1：片振りの漸増曲げ変形を作用させる。

载荷形式2：両振りの繰り返し曲げ変形を作用させる。

繰り返し曲げ载荷での曲率振幅の例を図-5に示す。

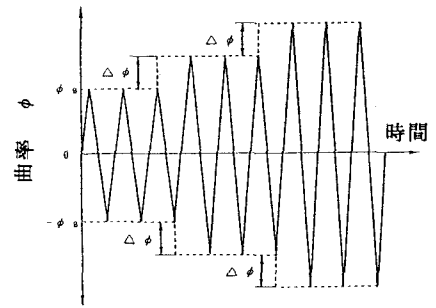


図-5 曲率入力波形

(2) 供試体

本研究では断面形状の異なる部材について比較検討を試みているため、断面形状の違い以外の諸量を出来る限り統一する必要がある。しかし、全ての断面諸量を統一するのは困難であることから、下記の考え方のもとに図-6に示す供試体により比較検討を行うこととした。

① 軸力の影響を同じとし、経済性比較

の視点から断面積Aを一定とする。

② 全体座屈の影響を同じとするため、細長比パラメーターλを一定とする。

③ 局部座屈の影響を同じとするため、一般化幅厚比Rを道路橋示方書に基づき $\sigma_{cr}/\sigma_y = 1$ を保証する限界値とする。

④ コーナー部の曲率半径rは $r/B=1/4, 1/5, 1/6$ と変化させる。

⑤ 補剛材の剛比 γ/γ_0 は実橋脚の基部断面を考慮し、 $\gamma/\gamma_0 = 3$ とする。

⑥ 断面定数Zの差は、比較検討時に断面力および変形をそれぞれ無次元化することで対応する。

各供試体の载荷条件を表-1に示す。

ここで、TYPE-Aは箱型断面、TYPE-ARIB

は縦リブ付き箱型断面、TYPE-B34, B40, B50はそれぞれ曲率半径34mm, 40mm, 50mmのラウンドコーナーをもつ断面、TYPE-BALLはTYPE-Aと等しい幅と高さでコーナーを曲率30mmとした断面、そしてTYPE-Cは円形断面である。さらに、供試体名の添字M1, M2, C1, C2は、荷重载荷条件を表している。

また、JIS規格に従った材料試験および実測寸法から算出した断面諸量を表-2に示す。そして、具体的な比較検討項目および断面諸量の取扱いについてまとめたものが表-3である。

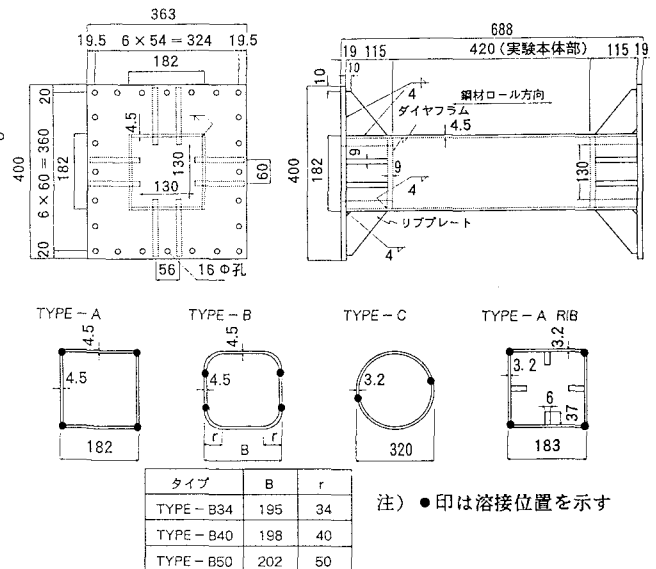


図-6 供試体の設計寸法（単位:mm）

表-1 各供試体の载荷条件および名称

タイプ	単調曲げ载荷		繰り返し曲げ载荷	
	P/PY=0.20	0.33	P/PY=0.20	0.33
TYPE-A	A-M1	A-M2	A-C1	A-C2
TYPE-ARIB	AR-M1			
TYPE-B34	B34-M1	B34-M2	B34-C1	B34-C2
TYPE-B40	B40-M1			
TYPE-B50	B50-M1	B50-M2		
TYPE-BALL	BA-M1			
TYPE-C	C-M1	C-M2	C-C1	C-C2

表－２ 供試体の断面諸量（実測値）

供試体名	板厚 t(mm)	幅		r 半径 (mm)	一般化幅厚比		部材長 l(mm)	細長比 λ	断面積 A (cm ²)	断面定数 Z (cm ³)	材料試験結果		
		B(mm)	D(mm)		R (Flat部)	R (Shell部)					E (10 ⁶ kgf/cm ²)	ν	σ_y (kgf/cm ²)
A-M1	4.25	181.4	181.6		0.755		419	0.063	30.13	174	2.150	0.2914	2536
AR-M1	3.05	182.5	182.2		0.572		402	0.070	30.01	151	2.061	0.2857	2794
B34-M1	4.25	194.5	195.2	33.3	0.561	0.127	440	0.065	30.13	178	2.037	0.2774	2523
B40-M1	4.25	197.4	198.2	39.7	0.518	0.139	443	0.065	30.16	179	2.037	0.2774	2523
BA-M1	4.25	181.8	182.3	29.7	0.778	0.120	410	0.065	28.21	156	2.050	0.2765	2534
C-M1	3.05	320.7	320.7			0.350	649	0.069	30.44	239	1.983	0.2754	2773
A-M2	4.25	181.2	181.7		0.754		419	0.063	30.12	174	2.150	0.2914	2536
B34-M2	4.25	194.7	195.7	33.8	0.557	0.128	438	0.065	30.15	179	2.037	0.2774	2523
B50-M2	4.25	201.4	202.4	48.5	0.458	0.153	449	0.065	30.22	180	2.050	0.2765	2534
C-M2	3.05	320.5	320.5			0.350	649	0.069	30.42	239	1.983	0.2754	2773
A-C1	4.25	182.3	181.6		0.759		419	0.063	30.21	175	2.150	0.2914	2536
B34-C1	4.25	194.6	195.2	33.4	0.561	0.127	439	0.065	30.13	178	2.037	0.2774	2523
C-C1	3.05	320.7	320.7			0.350	648	0.069	30.44	239	1.983	0.2754	2773
A-C2	4.25	181.8	181.8		0.757		419	0.063	30.18	175	2.150	0.2914	2536
B34-C2	4.25	194.3	195.3	33.2	0.561	0.127	439	0.065	30.13	178	2.037	0.2774	2523
C-C2	3.05	320.8	320.8			0.350	648	0.069	30.45	239	1.983	0.2754	2773

$$\text{Flat Plate Element} : R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{K\pi E}} \quad \text{Shell Element} : R = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)\sigma_y t}{E}}$$

表－３ 比較検討内容一覧表

断面形状タイプ	断 面 形 状 タ イ プ							断面諸量				
	断面諸量	A	ARIE	B34	B40	B50	BALL	C	断面積	断面定数	一般化 幅厚比 R	細長比 パラメータ λ
比較検討項目									A	Z		
		R=0.700	0.500	0.500	0.465	0.403	0.700	0.307				
① 断面形状の影響		○		○				○	□		□	□
② 曲率半径 r の 大きさ				○	○	○			□	□		□
③ ラウンドコーナー とリブの補剛効果			○	○					□		□	□
④ ラウンドコーナー の有効性		○					○				□	□

注 1) 図中の一般化幅厚比 R は、設計値を示す。

2) ○印のタイプについて、□印パラメータを一定にすることにより比較検討を行うものとする。

3. 実験結果と考察

実験結果として、図－7 に漸増曲げ载荷の曲げモーメント－曲率関係を、表－4 にそのときの最大耐荷力 M_u/M_y および曲率 ϕ_u/ϕ_y を、そして図－8 に漸増曲げ载荷時の一般的な荷重－変形特性を示す。また、図－9 に繰返し载荷の曲げモーメント－曲率関係を示す。

(1) 断面形状の違いによる比較検討

箱型断面、R 付箱型断面および円形断面の特性の違いを調べるため、まず漸増曲げを行った A タイプ、B 34 タイプおよび C タイプについて比較検討を行う。

図-7 (a), (b) に示す3タイプのM- ϕ 曲線より、次のことが明かとなった。

- ① Aタイプは、座屈直後の強度低下が著しく、その傾向は、軸圧縮力比が大きいほど顕著である。
- ② B34タイプは、座屈直後の強度低下がなだらかなり、変形性能に優れているが強度のピークがやや低くなっている。
- ③ Cタイプは、他のタイプと比して強度のピークまでの硬化域が長く、それに伴い耐荷力は高くなっている。また表-4から明らかなように、最大耐荷力、曲率ともAタイプ、B34タイプより大きな値を示しており、エネルギー吸収能が大きいと考えられる。

次に、繰り返し曲げ実験結果について考察する。

図-9 (a)~(f)にAタイプ、B34タイプおよびCタイプのM- ϕ 曲線を示す。軸圧縮力 $P=0.20P_y$ の場合の結果より、次のことが明らかになった。

- ① Aタイプは、 $\phi/\phi_y=1.5$ までは健全であり、座屈直後の耐荷力の劣下が大きい。ただし、座屈後のサイクルでは強度はおちるものの安定した変形状を示している。
- ② B34タイプは、 $\phi/\phi_y=2.0$ までは健全であり、座屈直後の耐荷力の劣下は小さく安定している。また座屈後のサイクルにおいても耐荷力の低下はそれほど大きくなく、なめらかな変形状を示している。
- ③ Cタイプは、 $\phi/\phi_y=2.5$ までは健全であり、座屈前の耐荷力、変形性能とも優れていると言える。

なお、軸圧縮力比が $P=0.33P_y$ と高くなった場合は、健全なループが各タイプそれぞれ $\phi/\phi_y=1.0, 1.5, 2.0$ とおちてくるが、全体の傾向としたら $0.20P_y$ の軸圧縮力の場合と同様である。

図-10は、図-9 (a), (c), (e)と同じ繰り返し載荷実験中の面外たわみの状態を示している。図中の数値は、その時々における面外たわみ量(mm)を表している。図より明らかなように、各供試体とも初期面外変形は最大1mm程度であり、道路橋示方書に規定されている部材平坦度($B/150=1.2\text{mm}$)を満足することから、実構造物に近い条件の初期変形を有することが確認された。

また、面外たわみの進行状況については以下のことが明らかになった。

- ① Aタイプにおける面外たわみは、最大耐力に達するまでは小さく、最大耐力に達してからは局部的に急速に進展している。たわみ波形は、上・下フランジでは供試体内側へ、ウェブでは外側へ変形した形状である。
- ② B34タイプにおいて面外たわみは、最大耐力に達するまでにわずかな進展しており、最大耐力以降も緩やかな進展をみせている。たわみ波形は、Aタイプと同様の傾向にある。
- ③ Cタイプにおいては、最大耐力時の面外たわみは非常に小さく、それ以降も進展は少ない。なお、発生位置は供試体端部であり、たわみ波形はシェル特有の円周方向へ伝播した形状であった。

以上より、現行道路橋示方書に基づき鋼製橋脚(軸圧縮力比 $P/P_y=0.20$ 程度)を設計することを想定した場合、繰り返し載荷で ϕ_y の2.5~3.0倍程度まで耐荷力、ダクティリティとも優れているCタイプが優れた断面形状と言える。ただし、円形断面は特に軸力比が大きい場合、正負交互の曲げモーメント作用下において、円周方向に沿って局部座屈波形が伝播することに注意する必要がある。さらに、今後、大規模な地震に対しては構造物の崩壊を限界状態と考えるような設計法が導入された場合は、ピーク以降の耐荷力劣下の性状が重要視されると考えられる。

(2) ラウンドコーナー曲率半径 r の最適な大きさについての検討

今回の実験では、B34、B40、B50の3タイプのR付箱型断面形状タイプで比較検討を行った。これらはそれぞれ、 $r/B=1/6, 1/5, 1/4$ であり、比較的現実に用いられる可能性の高い範囲でモデル化している。図-7 (c), (d) に示す実験結果より曲率半径 r が大きいほど耐荷力が高くなっており、変形性能も優れていることが分かる。この傾向は、軸圧縮力 $0.20P_y, 0.33P_y$ とも同様であり、曲率半径 r が大きくなることにより圧縮フランジ部分におけるシェル要素のしめる割合が増加し、円形断面の性状に近づくためと考えられる。

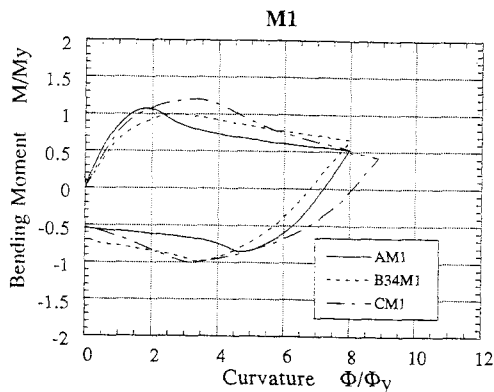
(3) ラウンドコーナーの有効性検討

ラウンドコーナーの有効性を検討するためにAタイプとBALLタイプについて比較を行う。図-7 (e) に示したM- ϕ 曲線より、強度についても変形性能についてもBALLタイプが優れており、箱断面に曲率を設けることは、ダクティリティ向上のため大きな効果があることが分かった。BALLタイプは、座屈後もしばらく一定の耐荷力を保ち、その後ゆるやかに耐荷力が低下する。これは、ラウンドコーナー部があることにより座屈したフランジ板部分の変形をなめらかにウェブに伝達するため、コーナー部に応力集中が起こりにくく、エネルギーの流れがスムーズに行われるためと考えられる。

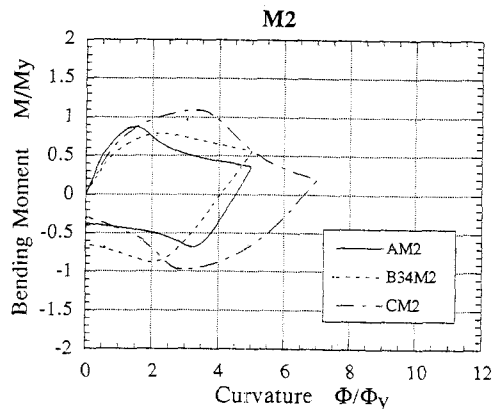
(4) ラウンドコーナーの補剛効果の検討

ラウンドコーナー部が、板に対してどの程度の補剛効果があるのかを検討するため、ARIBタイプとB34タイプについて比較を行う。図-7 (f) に示す実験結果より、リブ付箱型断面のARIBタイプは変形性能が非常に大きく、 $\phi/\phi_y = 8$ まで耐荷力の劣下がみられない。これは、リブによって座屈変形がおさえられ、変形の進展によっておこる耐荷力劣下を防いだためと考えられる。なお、リブの剛度については道路橋示方書に基づいて算出し、剛度比 $\gamma/\gamma_0 = 3$ としている。このように高いリブ剛度比にもかかわらず、座屈モードはリブ位置が明確に座屈の節となっていなかった。この現象は、道路橋示方書に規定されている必要リブ剛度は必ずしもリブ位置で座屈の節になるように設定しているのではなく、一般化幅厚比 $R < 0.5$ の範囲においては補剛板の耐力が降伏応力度 σ_y まで保証されるように設定しているためと考えられる。また、B34タイプは、ARIBタイプほどではないにしても強度の低下は非常に小さく優れた変形性能を有しておりリブの補剛効果に近い性状を示している。

以上より、ラウンドコーナーによる補剛効果は期待できるが、本研究で用いた $r/B=1/6$ 程度のラウンドコーナーの場合は、リブ剛度比 $\gamma/\gamma_0 = 3$ ほどの補剛効果は期待できないと考えられる。

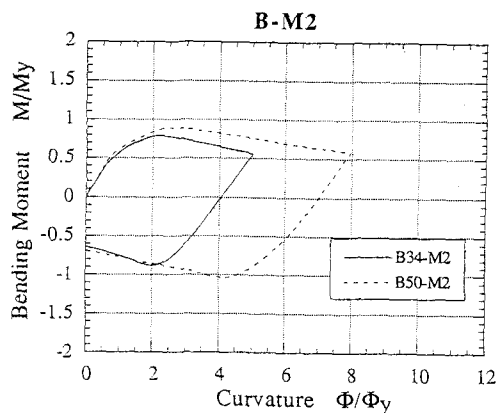
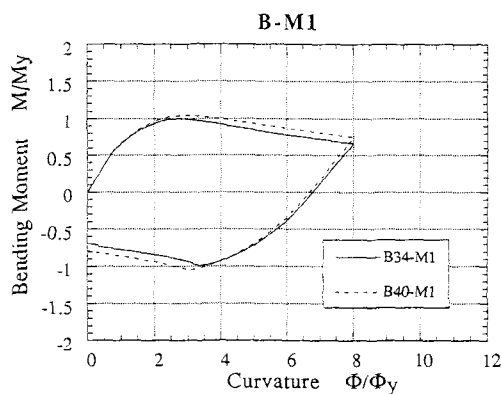


(a) 断面形状の違いによる比較 ($P/P_y=0.20$)



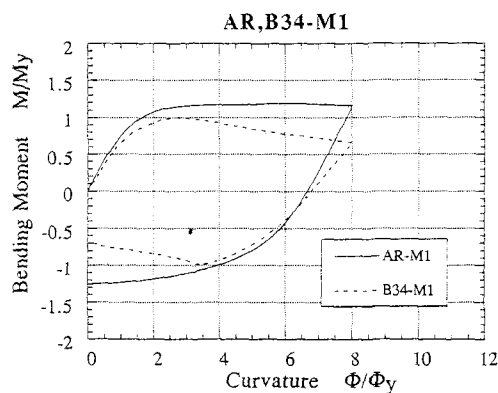
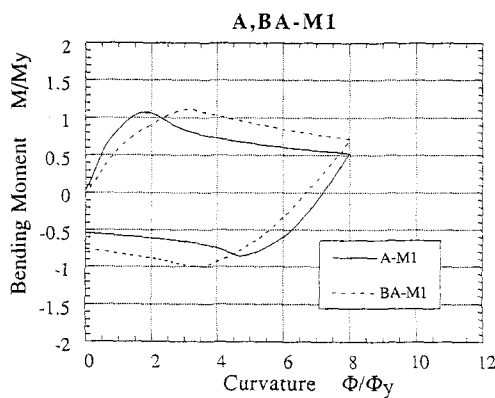
(b) 断面形状の違いによる比較 ($P/P_y=0.33$)

図-7 漸増曲げ荷の曲げモーメント-曲率関係 (その1)



(c) 曲率半径 r の大きさによる比較 ($P/P_y=0.20$)

(d) 曲率半径 r の大きさによる比較 ($P/P_y=0.33$)



(e) ラウンドコーナーの有・無による比較
($P/P_y=0.20$)

(f) ラウンドコーナーとリブ付きとの比較
($P/P_y=0.20$)

図-7 漸増曲げ載荷の曲げモーメント-曲率関係 (その2)

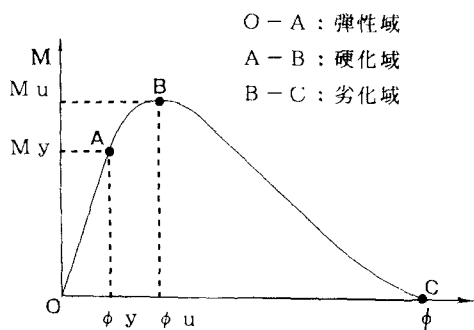
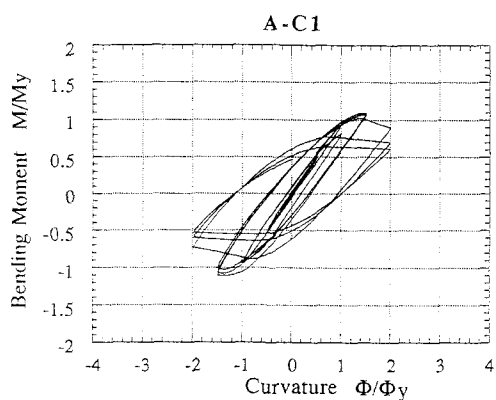


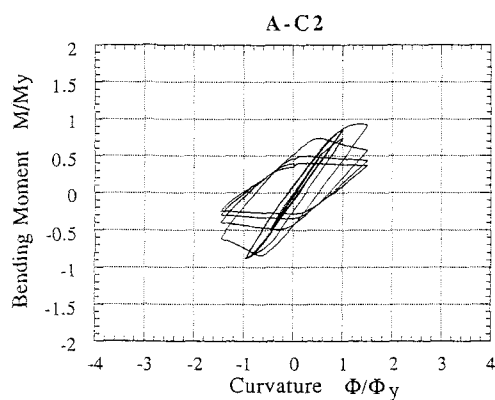
図-8 荷重-変形曲線

表-4 漸増曲げ載荷時の最大耐荷力および変形性能

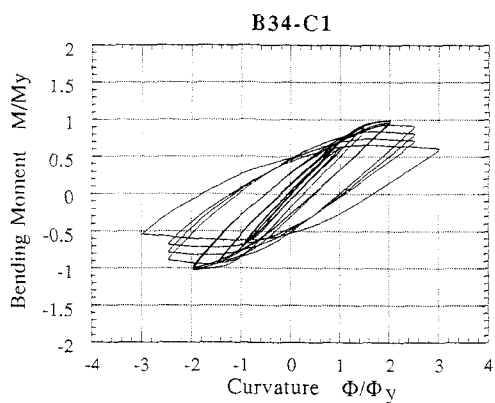
供試体名	最大耐荷力 M/My	最大耐荷力時の曲率 Φ/Φ_y
A-M1	1.06	1.80
B34-M1	1.00	2.70
C-M1	1.21	3.20
A-M2	0.86	1.55
B34-M2	0.78	2.25
C-M2	1.10	3.30
B40-M1	1.05	2.90
B50-M2	0.90	2.55
BA-M1	1.12	3.15
AR-M1	1.15	8.00



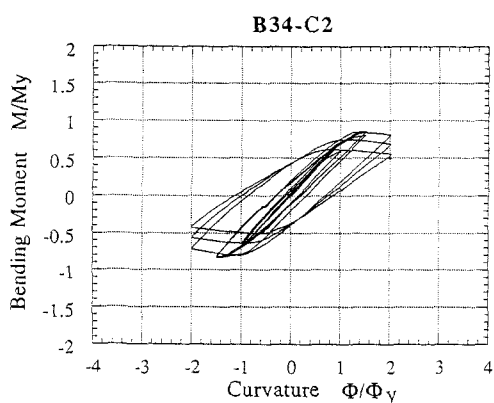
(a) TYPE - A ($P/P_y=0.20$)



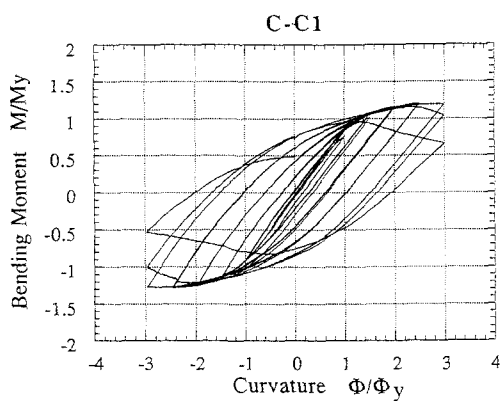
(b) TYPE - A ($P/P_y=0.33$)



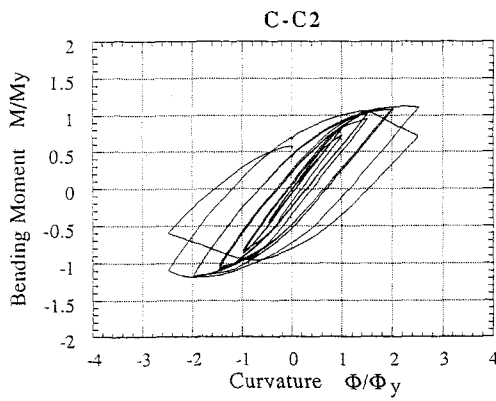
(c) TYPE - B 3 4 ($P/P_y=0.20$)



(d) TYPE - B 3 4 ($P/P_y=0.33$)

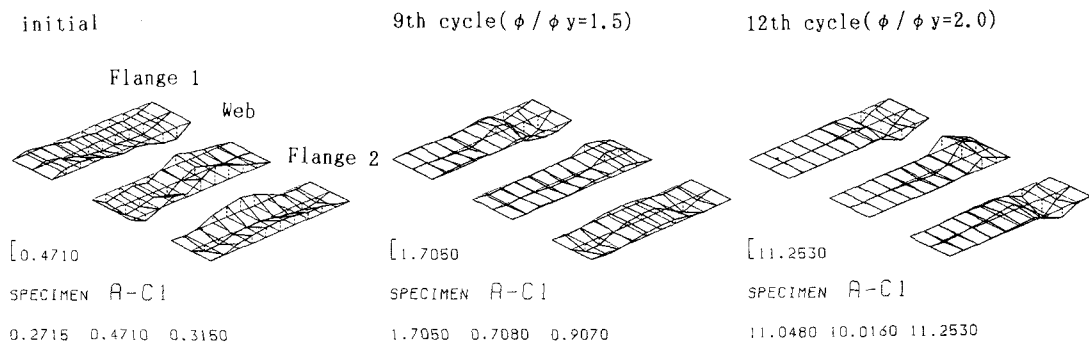


(e) TYPE - C ($P/P_y=0.20$)

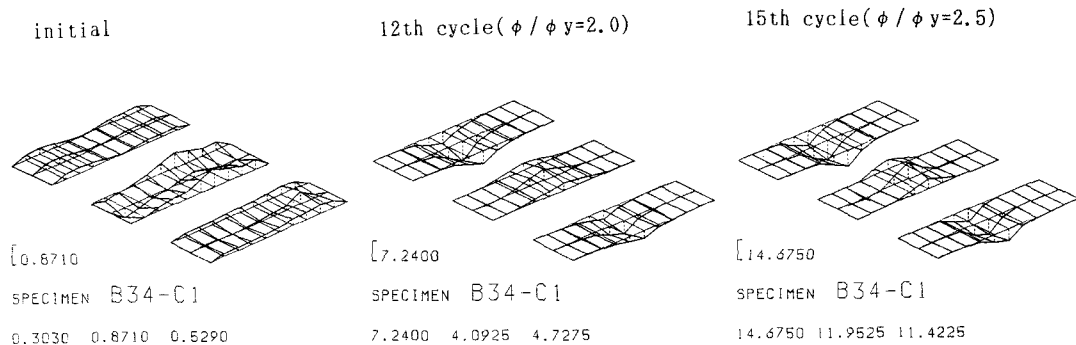


(f) TYPE - C ($P/P_y=0.33$)

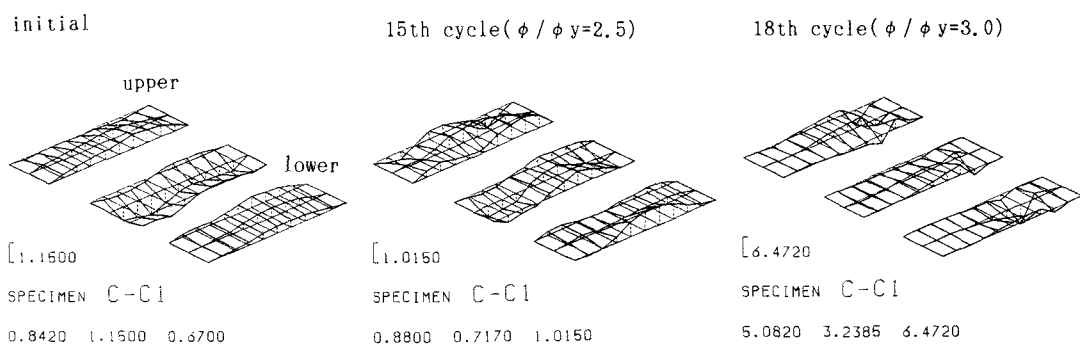
図-9 繰り返し曲げ载荷の曲げモーメント-曲率関係



(a) TYPE - A ($P/P_y=0.20$)



(b) TYPE - B 3 4 ($P/P_y=0.20$)



(c) TYPE - C ($P/P_y=0.20$)

図-10 面外たわみの進行状況

4. 結論

本研究では、各断面形状の主な断面諸量を一定とすることにより、これまで明らかにされていなかった断面形状自身の違いによる特性の比較検討を可能とした。

本研究により得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 円形断面は、実際の鋼製橋脚に生じる軸圧縮力比 ($P/P_y=0.20$ 程度) の場合は、ダクティリティ、耐荷力とも優れており、美観上だけでなく力学的にも合理的な断面形状であることが明らかになった。
- (2) R付箱型断面においては、 $r/B=1/4, 1/5, 1/6$ の範囲で、曲率半径 r が大きいほどダクティリティ、耐荷力ともに優れている。
- (3) 軸圧縮力比が0.20から0.33に増加することにより、ダクティリティ、耐荷力が大きく低下し、その傾向は繰返し載荷において顕著である。
- (4) 箱型断面のコーナー部を曲面にすることにより、ダクティリティを向上させることが可能である。
- (5) R付箱型断面のラウンドコーナー部分は、 $r/B=1/6$ 程度の場合はリブ剛度比 $\gamma/\gamma_0=3$ のリブほどの補剛効果はないが、リブを設けた場合に近い補剛効果を期待できると言える。

5. 参考文献

- (1) 阪神高速道路公団, 社団法人システム総合研究所, 京都大学構造力学研究室: 反復曲げを受ける曲面を有する鋼製橋脚の強度に関する研究(その2), 平成元年度報告書, 平成2年3月.
- (2) 渡邊英一, 杉浦邦征, 狩野正人, 高尾道明, 江見晋: コーナー部に曲率を有する箱型断面はり一柱の繰返し変形特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol. 34A, 1990年3月, pp. 33-40.
- (3) 新日本製鐵株式会社, 京都大学耐震工学研究室・構造力学研究室: 低YR鋼を用いた鋼薄肉橋脚柱の強度・変形能に関する研究, 1991年3月.
- (4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編, II 鋼橋編), 昭和48年2月.
- (5) 中井博, 河合章好, 吉川紀, 北田俊行, 酒造敏廣: 鋼製ラーメン橋脚の実績調査(上), 橋梁と基礎, 16巻6号, 1982, pp. 35-44.
- (6) 中井博, 河合章好, 吉川紀, 北田俊行, 酒造敏廣: 鋼製ラーメン橋脚の実績調査(下), 橋梁と基礎, 16巻7号, 1982, pp. 43-49.
- (7) Niwa, Y., Watanabe, E. and Isami, H., "Automated Structural Testing Using Microcomputer System," Proc. of J S C E, No. 332, 1983, pp. 21-29.

(1991年9月30日受付)