

各種橋脚断面形状の耐荷力の検討（その1）

Examination of Loads Withstood by Bridge Pier with Various Sectional Forms (Part 1)

能 登 宥 愿*¹
Hiroyoshi NOTO

林 暢 彦*²
Nobuhiko HAYASHI

金 原 慎 一*³
Shinichi KIMBARA

Summary

In recent years steel bridge technologies have been undergoing remarkable changes which are without precedent. We are now entering a new era when bridges are designed by harmonizing the concepts of designers with the landscapes demanded by local inhabitants.

Bridge structures of visual importance include piers and main towers. This series of reports discusses two matters related to selecting the sectional forms of piers.

One matter is methods of manufacturing piers of various sectional forms and ascertaining the quality of piers thus manufactured.

The other matter is the effect the sectional forms of piers have on the ductility of piers. It is important to investigate how the sectional forms contribute to the ductility of piers against continuous static loads and the repeated loads which threaten brittle fracture in an earthquake.

Part 2 of this series will be a report on ductility.

1. まえがき

ここ数年時代の流れとともに、鋼橋の分野でも今までになく技術の変化が顕著になっている。その一面としてたくさんの橋梁を供給する時代から、設計者のデザインに対するコンセプトが、地域の人々の景観に対する要求と融和するかたちで、橋をデザインする時代に移行している。我々は、道路をまた橋を、主として生活の手段として長い間利用してきた。しかし少しずつ人々の生活にゆとりがでてくると、いままであまり目のいかなかった部分にも多くの人の目が向き、さらにそれを現実の世界にも取り入れようとする。人々は日本の美術、音楽、建物等有形、無形の芸術・文化遺産等を鑑賞し、また海外のそれらに遭遇し感動を覚える。そこから徐々に自分なりの審美眼が生まれ、創造される物に対する要求が醸造されてくる。またゆとりの中から、望ましい街並み、憩いの場所のイメージが生まれてくる。都市部、田園部、山間部等いろいろな場所に橋は架けられるが、そこにはそれぞれが持つイメージがあり、橋の形、色彩を広い意味で周囲とマッチさせるデザインがなされる。

橋の一部を構成する市街地の橋脚、シンボリックな長大吊形式橋梁の主塔等は特に視覚的なポイントとなる。

柱の各種断面形状とその製作方法の主要な点は、鋼板の曲率の付け方、鋼板の組立方とその順序、溶接方法と

品質の確認である。

力学的観点からは、柱の断面形状が持続荷重下の静的耐荷力および地震時の繰り返し荷重下の脆性的破壊に対するダクティリティの保有等にどのように関与しているかを調べるのが重要である。

そこで、ここでは柱の断面に着目し、矩形、八角形、二隅円弧付き矩形（梁側二隅円弧コーナーと梁反対側二隅円弧コーナー）、四隅円弧付き矩形、円形、台形を選定する。但し、本論文では前4断面を対象とし主に静的耐荷力を扱い、後3断面およびダクティリティについては（その2）の論文で扱うものとする。

論文の構成は、最初に柱断面の景観面からの形状選定、次に各断面の製作、静的対荷力とする。

2. 断面形状の特長と製作

(1) 景観面からの断面形状の有する特徴

橋は地域環境の中で目立つ構造物であり、特に橋脚はランドマーク的な役割が大きいこと、また配置的に横荷重に対して多大な抵抗力を必要とすることから、力学的に合理的でなおかつ景観的に優れた演出効果のある形状が選定されなければならない。

*1技術本部先行技術研究室長 *2技術本部先行技術研究室

*3松本工場生産設計課課長代理

1) 矩形断面

矩形断面は基本的な形状で、鋼製橋脚が施工された当初から数多く用いられている。それだけかなり人の目に慣れた形状で信頼感・安定感があるが、近距離で目に触れる市街地では、重苦しさ、堅さを感じる。しかし、設置する位置を変えて、少し距離を離して眺望することができる郊外で、しかも多少柱高の高い縦横比の大きい断面では、近代的な合理性を感じさせる。

2) 八角形断面

ヨーロッパの長支間の吊形式橋梁の主塔では、矩形断面の柱の高さ方向に溝を付けて、スレンダーでかつモダンなイメージを人々に抱かせることに成功している。

八角形断面は、二方向に同様な剛性を与え、なおかつ光による陰影によりスレンダーなイメージを創り出す。湾口、湖の水面遥か高くそびえ立つ長大橋の主塔の柱に陽光が照射すると、縦方向に細長く光の影が入り、メリハリの効いたスレンダーな感じを与える。また都市内の高架橋においては、一般的に断面と柱高とのサイズ比が0.2~0.3とごつい感じを与える。そこで断面を八角形にすることにより、光の創り出す陰影で場合によっては、0.1~0.15位に実際よりもスレンダーに見せる。このことは人々が感じる高架橋の下面の重苦しさを緩和させる効果がある。

3) 二隅円弧付き矩形

市街地の構造物は圧倒的に直角のコーナーを有する直線で構成されたものが多い。その建物で囲まれた歩道を歩いている時、柔らかな曲面に出会うとほっとすることがある。歩道の近傍の橋脚の自分の見える側が曲面である場合がこれである。これは直平面と曲面のバランス、曲面の持つ柔らかさによるものと思われる。

(2) 製作

ここでは製作技術の中で、各種断面形状の溶接部の開先、断面変化の板厚逃げ、寸法押さえ、組立について述べる。

1) 矩形断面

断面構成はウェブの間にフランジを挟む形で角合わせをし、基本的に板厚変化を外逃げとする。この場合は、断面寸法が高さ方向に一定（等断面）であれば箱内のダ

イアフラムは同一寸法に製作することができる。但し例外的に、外側に板厚変化することが嫌われる場合、例えば光の照射によって変化していることが目立ちそれ自身困るときは、内逃げにすることがあるが、この場合ダイアフラム寸法は変化する。これは近景で見られる都市内の高架橋に稀にある。

角溶接は板厚にもよるが、溶接量を減らし溶接変形を抑えることから、一般的に内側（挟まれる側）にくる板にK開先をとることが多い。

2) 八角形断面

断面はダイアフラムに合わせる形で1パネルおきに4枚置いたところに、その間にパネルを各1枚ずつ4枚外から当てて組み立てる。断面の寸法押さえは板厚の内側の交点とし、基本的に板厚変化を外逃げとする。この場合は、断面寸法が一定であれば箱内のダイアフラムは同一寸法に製作することができる。

八角形の形状から、8枚の板は板厚方向に45°になるためその先端をカットすれば、溶接量の少ない変形K開先の角溶接となる。この角溶接は箱の内外から溶接する。（図-1参照）

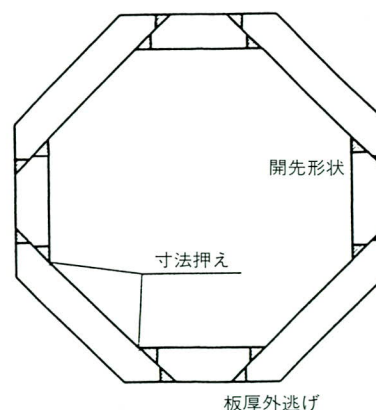


図-1 八角形断面柱の溶接開先と組立

3) 二隅円弧付き矩形

断面は直平面3面即ち、ウェブの間にフランジを挟む形で角合わせをし、同時にローラーベンディングにより曲げられた円弧コーナー付きの浅い船底型の部分とダイアフラムを介して組み立てられる。基本的に板厚変化は外逃げとする。この場合、断面寸法が一定であれば箱内のダイアフラムは同一寸法に製作することができる。但し、外側に板厚変化することが嫌われる場合、例えば光

の照射によって変化していることが目立ちそれ自身困るときは、製作上工数は増えるが内逃げにすることがある。

これは近景で見る都市内の高架橋に稀にある。

角溶接は矩形と同様であるが、その他に板同士の突き合わせ溶接もある。板厚にもよるが、溶接量を減らし溶接変形を抑えることから、K開先をとることが多い。また柱の長手方向に曲げキャンバーを付けることはほとんどないが、付ける場合は設計時点での配慮が必要である。

3. 構造解析

(1) 構造モデル

柱の断面形状は次の4タイプとする。

- ① 矩形断面
- ② 八角形断面
- ③ 梁側二隅円弧付き矩形
- ④ 梁の反対側二隅円弧付き矩形

構造モデルは今後の荷重実験を考慮し、L型梁付き柱とする。また荷重の荷重位置、支持位置は局所的な変形を避けるために剛性の高いシェル要素を使用した。

(図-2 参照)

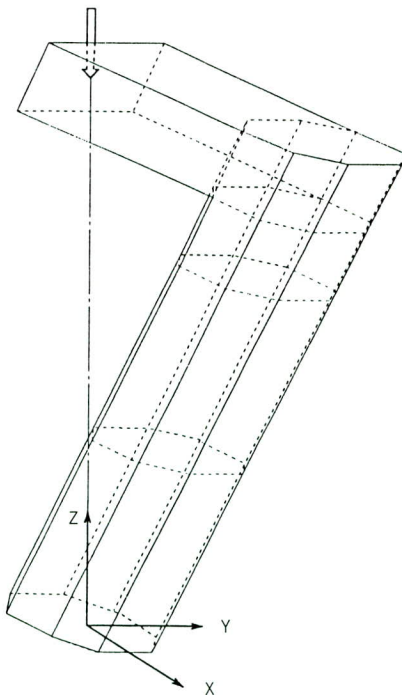


図-2 構造モデル

(2) 設計条件

① 断面積一定 (縦補剛材算入しない) $A=53.19\text{cm}^2$
フランジ、ウェブ厚 $t=4.5\text{mm}$

② 縦補剛材の有無と剛度
標準補剛材 $\text{pl}35 \times 4.5$ $I=6.43 > I_{\text{req}}=5.03\text{cm}^4$
補強補剛材 $\text{pl}55 \times 6$ $I=33.27 > I_{\text{req}}=6.26\text{cm}^4$

③ 幅厚比パラメータ: R_f
補剛材の基準耐荷力曲線¹⁾より、局部座屈と降伏点応力の比 ($\sigma_{\text{cr}}/\sigma_y$) が0.5以内であれば降伏点応力まで局部座屈しない。ここでの補剛材ありのタイプは、ほぼこれに対応している。

$$R_f = b/t \sqrt{\{(\sigma_y/E) (12 (1-\mu^2) / \pi^2 k)\}}$$

b : 板幅、 t : 板厚、 σ_y : 鋼材の降伏点

E : ヤング係数、 μ : ポアソン比

k : 座屈係数 (両端支持=4.0、補剛材=4n²)

④ 細長比パラメータ: λ
軸方向力が圧縮の場合、その軸方向応力、細長比パラメータにより付加曲げモーメントの影響がある。しかし、ここではその λ も0.2位と小さいので、作用曲げモーメントの約1%に相当するくらいである。

$$\lambda = Kh/r \{1 / \pi \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)}\}$$

K : 有効座屈長係数 (=2.0)

h : 柱高、 r : 断面2次半径

⑤ 隅角部の補強
補強範囲は梁幅の1/2とし、板厚は次の通りとする。

ウェブのみ $tw=14\text{mm}$

ウェブ、フランジ共 $tw=14\text{mm}$ $tf=14\text{mm}$

⑥ 降伏時の荷重とそのときの変位 P_y 、 δ_y の定義

$$P_y = \sigma_y \{ (ab/c - az/c) / Z + 1/A \}$$

A : 断面積 (=53.19cm²)、 Z : 断面係数

a : 梁の長さ (=65.0cm)、 b : 柱高 (=130.0)

c : 斜辺長 (=145.0cm)

z : 局部座屈の生じる位置 (=25.0cm)

ここでは、 δ_y は応力の最大値が降伏点に達したときの荷重方向 (Z 方向) の変位を示す。

⑥ 荷重載荷

静的な Z 方向の圧縮 (部材がL型のため曲げと軸圧縮として作用) 載荷とする。

表-1 幅厚比パラメータ

	縦補剛材	b	t	k	Rf
矩形	無し	29.55	0.45	4	1.168
	有り	29.55	0.45	16	0.584
二隅円弧 矩形	無し	29.55	0.45	4	1.168
	有り	29.55	0.45	16	0.584
八角形	無し	14.78	0.45	4	0.584

表-2 細長比パラメータ

	r	K	h	λ
矩形	12.065	2.0	130.0	0.232
二隅円弧	11.632	2.0	130.0	0.241
八角形	12.953	2.0	130.0	0.216

(2) 解析条件

解析は4節点シェル要素による有限要素法解析とする。その条件は次の通りである。

- ①弾塑性、大変形解析
- ②フォン・ミーゼスの降伏条件
- ③降伏応力はひずみ速度依存性を考慮しない
- ④加工硬化係数=0.0
- ⑤等方硬化則：今回は繰り返し荷重载荷を行わないのでこの硬化則とする

(3) 解析結果

1) 矩形断面

a. 隅角部ウェブ補強で縦補剛材無しモデル

●C4-WSN 1 (末尾の1は断面寸法を板厚中心)

$$P_y = 21.863tf : Z \text{ 方向変位 } \delta y = 3.9mm$$

$$P_{max} = 24.71tf : \quad \delta = 5.6mm$$

$$\text{崩壊時 } P_e = 14.71tf : \quad \delta_e = 11.4mm$$

崩壊時梁下端から350(支点から850)で梁側フランジ全体がXの正の方向(梁の無い側)に最大値27.5mm(幅方向の局部座屈変形は同様に断面内側に12mm)変形し、梁反対側フランジがXの正の方向に8mm(局部座屈変形は反対に断面内側に2mm)、ウェブの梁側が外側に15.5mm縦補剛材有りに比べて広い幅に亘って撓む。このことから、矩形断面に軸方向圧縮力と同時に地震力のよ

うな繰り返し水平力を作用させると、フランジは断面の内側に、ウェブのフランジに近接する部分は外側にまた中心部分は内側に局部座屈現象を呈することが推定される。(図-3a参照)

●C4-WSN 2 (末尾の2は断面寸法を板厚の外側)

$$P_y = 22.480tf : Z \text{ 方向変位 } \delta y = 3.9mm$$

$$P_{max} = 26.29tf : \quad \delta = 5.7mm$$

$$\text{崩壊時 } P_e = 14.7tf : \quad \delta_e = 12.0mm$$

崩壊時梁下端から350(支点から850)で梁側フランジ全体が内側X方向に変形し最大値28.5mm(幅方向の局部座屈変形12mm)、梁反対側フランジがX方向に8.5mm、ウェブの梁側が外側に16mm縦補剛材有りに比べて広い幅に亘って撓む。

b. 隅角部ウェブ補強で縦補剛材有りモデル

●C4-WSY 1

$$P_y = 21.863tf : Z \text{ 方向変位 } \delta y = 3.9mm$$

$$P_{max} = 33.06tf : \quad \delta = 9.6mm$$

$$\text{崩壊時 } P_e = 21.67tf : \quad \delta_e = 20.0mm$$

崩壊時梁下端から300(支点から900)で梁側フランジ全体が内側に32.4mm(幅方向の変形は1/4,3/4点が17mm)撓む。(図-3b参照)

c. 隅角部ウェブ補強で所要の5倍の縦補剛材有りモデル

●C4-W 5 SY 1

$$P_y = 21.863tf : Z \text{ 方向変位 } \delta y = 3.8mm$$

$$P_{max} = 34.43tf : \quad \delta = 10.4mm$$

$$\text{崩壊時 } P_e = 23.46tf : \quad \delta_e = 22.9mm$$

梁下端から300(支点から900)で梁側フランジ全体が内側に33.3mm(幅方向の変形は1/4,3/4点が18mm)撓む。

本モデルがフランジ・ウェブ共に補強したC4-FW 5 SY 1と比べて最大耐荷力が低くないのは、フランジ厚が急変していないことによると思われる。(図-3c参照)

d. 隅角部フランジ・ウェブ共補強で縦補剛材有りモデル

●C4-FWSY 1

$$P_y = 21.863tf : Z \text{ 方向変位 } \delta y = 3.7mm$$

$$P_{max} = 32.69tf : \quad \delta = 8.4mm$$

$$\text{崩壊時 } P_e = 20.65tf : \quad \delta_e = 20.5mm$$

崩壊時梁下端から300（支点から900）で梁側フランジ全体が内側に35.7mm（幅方向の変形は1/4,3/4点が21mm）撓む。

隅角部をフランジ・ウェブ共補強したこのタイプよりもウェブのみ補強したタイプの方が最大荷重は僅かに大きい。（図-3d 参照）

●C4-FWSY 2（断面寸法は板厚中心）

$P_{max} = 22.480tf$: Z 方向変位 $\delta y = 3.5mm$

$P_{max} = 33.73tf$: " $\delta = 6.4mm$

崩壊時 $P_e = 20.62tf$: " $\delta_e = 21.0mm$

崩壊時梁下端から300（支点から900）で梁側フランジ全体が内側に35.7mm（幅方向の変形は1/4,3/4点が21mm）撓む。

e. 隅角部フランジ・ウェブ共補強で5倍縦補剛材有りモデル

●C4-FW 5 SY 1

$P_y = 21.863tf$: Z 方向変位 $\delta y = 3.5mm$

$P_{max} = 34.06tf$: " $\delta = 7.6mm$

崩壊時 $P_e = 22.52tf$: " $\delta_e = 22.1mm$

隅角部ウェブのみ補強 C4-W 5 SY 1 と似た性状を示す。（図-3e 参照）

2) 八角形断面

a. 隅角部フランジ・ウェブ共補強で縦補剛材無しモデル

●C8-FWSN 1

多角形断面柱は断面積一定の場合、断面を構成するパネル数が矩形から増加することによりパネルの幅厚比は減少し（ $b/t = 65.7 \rightarrow 32.8$ ）パネルの局部座屈強度は上昇する。八角形の内接円の直径 D を板厚で除した値 $D/t = 79.3$ で、鋼管（SS 400）が降伏点まで局部座屈を起こさないための最大径厚比は100である。

$P_y = 21.086tf$: Z 方向変位 $\delta y = 6.3mm$

$P_{max} = 33.61tf$: " $\delta = 7.2mm$

崩壊時 $P_e = 25.0tf$: " $\delta_e = 29.6mm$

崩壊時柱全体としての変形は曲げの作用する方向であるが、梁側の3つパネルの局部座屈は箱の外側に膨らんでいる。このことから、円形に近い特性を有する八角形に地震力のような繰り返し水平力を作用させると全周が膨らむ象の脚座屈現象を呈することがわかる。（図-3f 参照）

3) 梁側二隅円弧付き矩形

a. 隅角部フランジ・ウェブ共補強で縦補剛材有りモデル

●CRI-FWSY

$P_y = 16.696tf$: Z 方向変位 $\delta y = 2.8mm$

$P_{max} = 33.35tf$: " $\delta = 9.3mm$

崩壊時 $P_e = 22.54tf$: " $\delta_e = 31.9mm$

八角形断面と同様に大きな変形まで耐力を保有できる。（図-3g 参照）

4) 梁の反対側二隅円弧付き矩形

a. 隅角部フランジ・ウェブ共補強で縦補剛材無しモデル

●CRO-FWSN

$P_y = 24.148tf$: Z 方向変位 $\delta y = 4.0mm$

$P_{max} = 28.80tf$: " $\delta = 5.5mm$

崩壊時 $P_e = 15.86tf$: " $\delta_e = 12.9mm$

このモデルは今まで述べてきた矩形断面モデルと性状が大きく異なっている。即ち次の縦補剛材のあるモデルでは、梁のある側のフランジが矩形断面の場合と同様に箱内側に凹んでいるのに対して、縦補剛材の無いこのモデルでは外側に膨らんでいる。これは八角形断面と似た変形形状である。しかし、八角形断面は円形断面と性質が似ていることから、今まで良く知られている象の脚座屈として捉えることができる。しかし、梁の反対側二隅円弧付き矩形においては、縦補剛材の有無で変形形状が大きく変わることになる。そこで、この補剛材の断面積を変化させることによる挙動を（その2）で検討する予定である。（図-3h 参照）

b. 隅角部フランジ・ウェブ共補強で縦補剛材有りモデル

●CRO-FWSY

$P_y = 24.148tf$: Z 方向変位 $\delta y = 3.8mm$

$P_{max} = 34.63tf$: " $\delta = 6.2mm$

崩壊時 $P_e = 21.61tf$: " $\delta = 20.5mm$

（図-3i 参照）

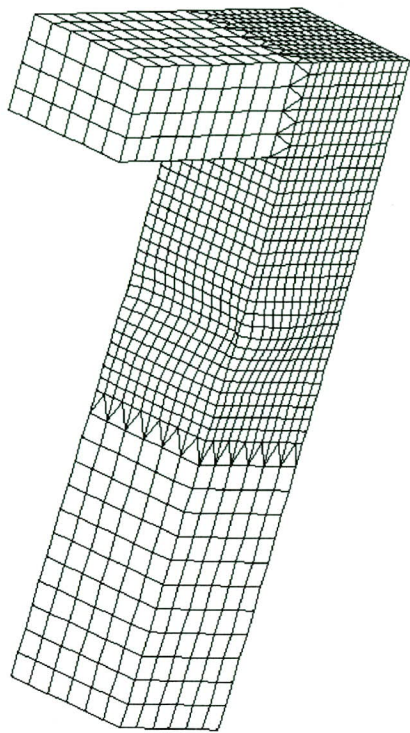


図-3a C4-WSNIの変形

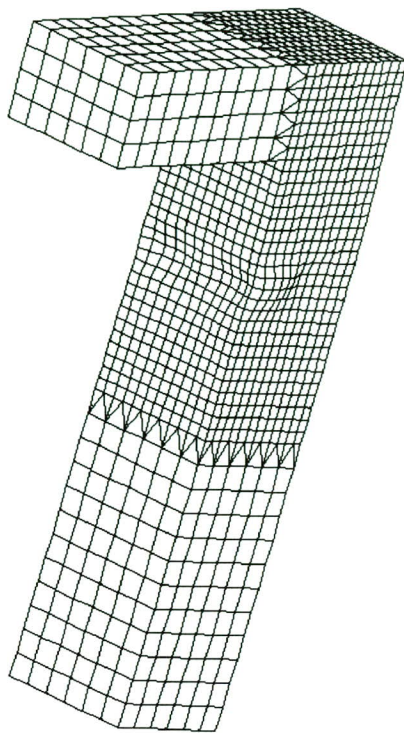


図-3b C4-WSYIの変形

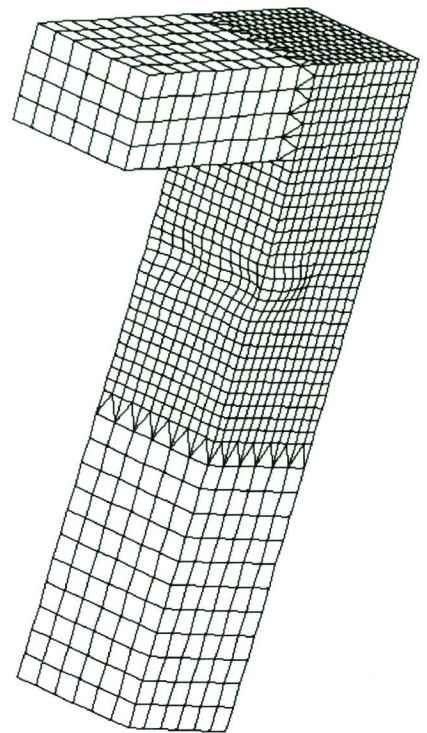


図-3c C4-W5SYIの変形

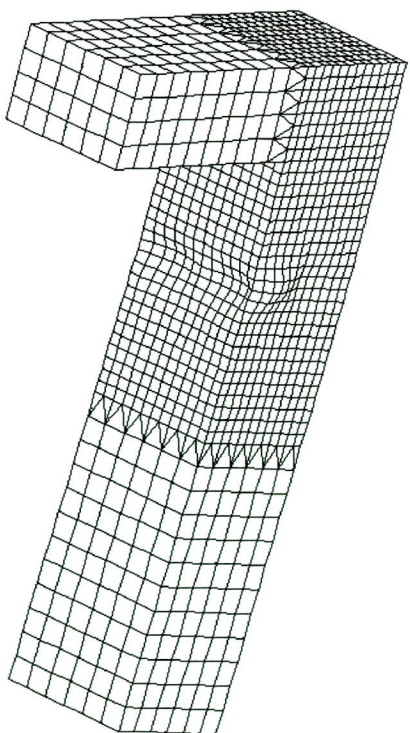


図-3d C4-FWSYIの変形

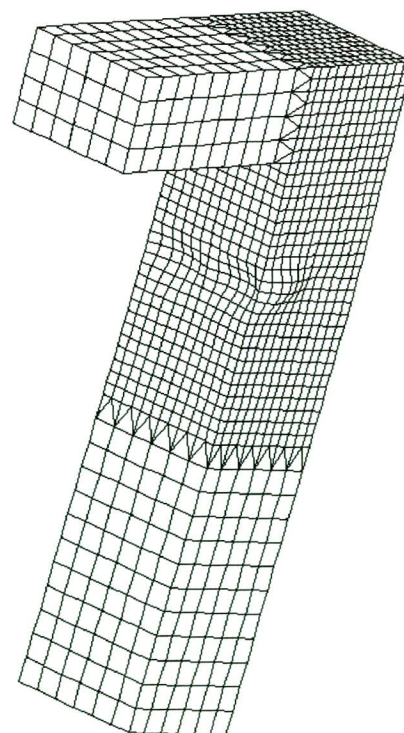


図-3e C4-FW5SYIの変形

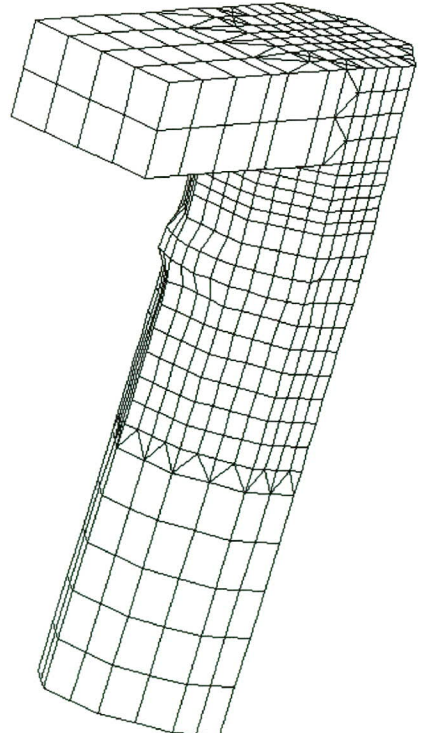


図-3f C8-FWSNIの変形

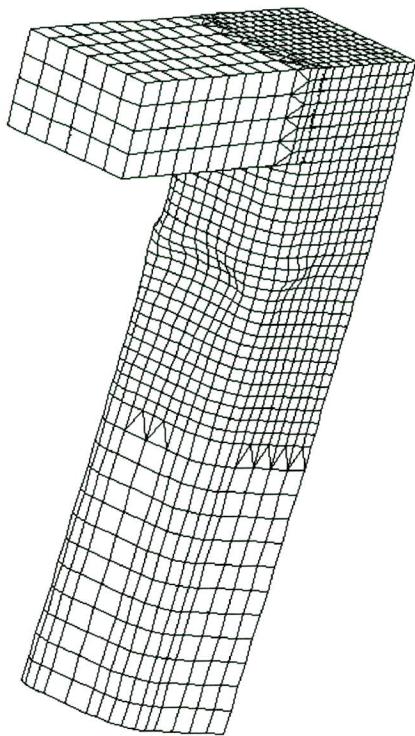


図-3 g CRI-FWSY

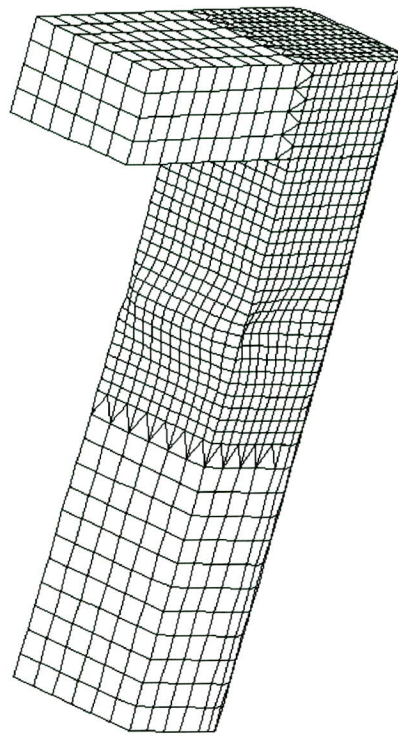


図-3 h CRO-FWSN

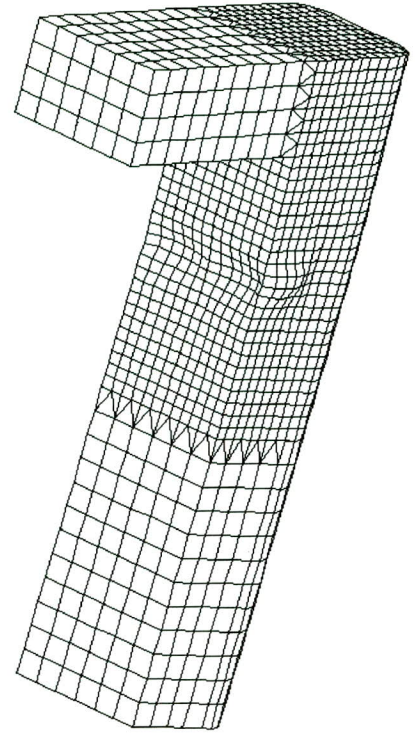


図-3 i CRO-FWSY

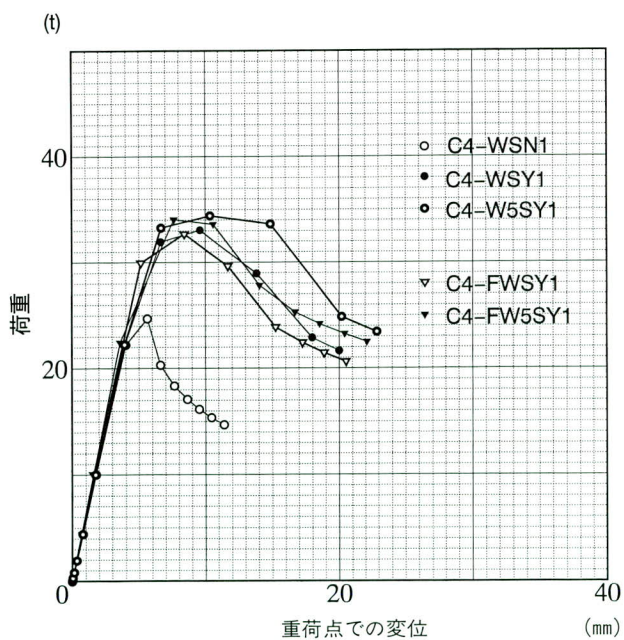


図-4 a 重荷一変位 曲線

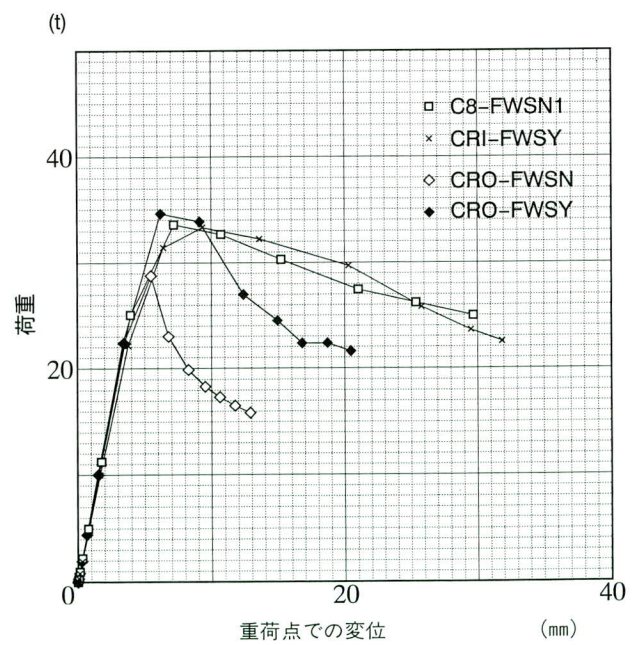


図-4 b 重荷一変位 曲線

4. 考察

各種断面形状（断面積一定）の特性について静的耐荷

力とダクティリティについて考察する。ただし、ダクティリティを示す繰り返し载荷の解析と実験は、（その2）で行うので、ここでは静的载荷による荷重一変位

曲線の、最大荷重以降の勾配で近似的に²⁾表すものと考えられる。

静的な耐荷力は隅角部の補強方法（ウェブのみの場合とウェブ・フランジ共に補強の場合）ではあまり有意差はないが、断面形状、縦方向の補剛材の有無では差がある。補剛材の無い矩形断面が24.71tfと最も低く、次に梁の反対側二隅円弧付き矩形が28.80tf、標準の補剛材の有る矩形断面が32.69tf、梁側二隅円弧付き矩形が33.35tf、補剛材の無い八角形断面が33.61tfである。また補剛材の断面を必要剛度の5倍¹⁾にした矩形断面で34.06tf、標準の補剛材の有る梁の反対側二隅円弧付き矩形が34.63tfで最大である。このことから、今回対象とした断面では、矩形断面が最も耐荷力が低く、梁側二隅円弧付き矩形、梁の反対側二隅円弧付き矩形と順次高くなり、八角形断面が最大となる。また耐荷力は補剛材を付けることにより30%位高くなるが、補剛材の剛度を必要剛度の5倍にしても4%位上昇するのみである。

ダクティリティについては、補剛材の有無によって、また補剛材の剛度を上げた場合（必要剛度の5倍）、それなりに大きくなる。しかしそれよりも、断面形状に負うところが大きく、例えば梁側二隅円弧付き矩形（梁側のフランジに曲げ圧縮が作用する場合）、四隅円弧付き矩形（両曲げの場合）、八角形断面はダクティリティの高い断面形状と言える。（図-4参照）

5. まとめ

橋脚の4種類の柱断面形状の景観・製作および静的な耐荷力について述べる。

①鋼製橋脚は景観的に優れた形状を作り出すことができる。

②製作は、強度、精度の面で十分な管理が必要である。特に曲面形状を有する柱断面の曲げ方向に製作キャンバーを付けることは難しいので、設計時点に方法を考えておく必要がある。

③静的な耐荷力は柱の断面形状に大きく左右され、矩形に比べて八角形（補剛材無し）、円弧コーナー付きの断面はその値が大きい。

④補剛材の有無による耐荷力の差はあるが、その剛度を所要値の5倍位にしても大きな差はない。

⑤ダクティリティ（推定できたとして）は断面形状によって大きな差がある。また補剛材の有無、さらにその剛度を上げたとき、それなりの効果はある。

6. あとがき

今回、限られた柱の断面形状の静的な耐荷力を検討したが、（その2）ではその他の断面形状も含めて、繰り返し荷重によるダクティリティの検討と荷重実験を行う予定である。

＜参考文献＞

- 1) 道路協会；道路橋示方書II鋼橋編 平成6年2月
- 2) 山田、青木、安藤；鋼製八角形断面柱を有するラーメン隅角部の終局強度実験、第49回年次学術講演概要集(1), 1994

1995.10.30受付