

曲面を有する鋼製橋脚柱の反復曲げ強度に関する研究

工務部 設計課 大志万 和 也
同 部 同 課 鈴 木 巖
同 部 同 課 加賀山 泰 一

要 約

近年、鋼製橋脚においてもRC橋脚と同様にコーナー部に曲面を持たせた箱型柱の採用が増えつつある。このタイプの鋼製橋脚の柱部に着目し、地震時の様に反復曲げを受けた場合の強度特性を、実験ならびに解析的に検討した。その結果、コーナー部に曲面をもたせた場合、従来の箱型断面に比べ、靱性が改善され、座屈直後の急激な耐荷力の低下がみられず、耐震性の面で優れていることが明らかとなった。

まえがき

阪神高速道路は都市高速道路という性格上、橋脚を設置する位置で、様々な制約条件を受ける場合も少なくない。そのため、RC橋脚に比べ小さな断面が可能となる鋼製橋脚の採用が多い。一方、鋼製橋脚については、RC橋脚に比べ一般に靱性が劣ると言われており、鋼製橋脚の靱性に対する研究、および検討が各機関で行われている。最近、阪神高速道路では、従来の円形あるいは箱型の柱断面に代わり、景観面の配慮から箱型断面のコーナー部に曲面を持たせる鋼製橋脚を採用している例がある。過去の箱型断面での反復曲げ強度の研究成果では、鋼製橋脚柱の破壊性状については、圧縮フランジの弾塑性座屈後、最終的にフランジ

とウエブの溶接線に沿った亀裂により破壊へと至ることが多い。この結果から考察すると、フランジとウエブの溶接線の亀裂を防げれば、鋼製橋脚の靱性が向上するものと考えられ、箱型断面柱のコーナー部に曲面を持たせることは、靱性面でも有利な構造の一つとして期待できる。

したがって、本研究では、コーナー部に曲面を持つ箱型断面柱について、一定軸力の基で反復曲げモーメントを受ける場合の靱性に着目し、実験ならびに有限要素法による解析を行うとともに、過去の研究成果より定めた簡易解析法により曲げモーメント-曲率の履歴曲線（以下 $M - \Phi$ 曲線）を求め、実験値との比較を行った

1 載荷実験

1-1 検討対象モデル

本研究では、T形単柱の柱部を対象とし、柱部に地震荷重が作用した場合、簡略化すれば曲げモーメントM、せん断力Q、軸力Pを受けることとなるが、設計上の観点より図-1のようにMとPの効果のみを考えることとした。そして、過去の実績調査により判断し、地震荷重を受けた場合のモデルとして、軸方向圧縮力Phを一定に保ち、曲げたモーメントMが時間的に変化するものと考えた(1)式参照)。

$$P_t / P_{s,q} = 0.2 \quad M = M(t) \quad (1)$$

ここに $P_{s,q}$: 降伏荷重

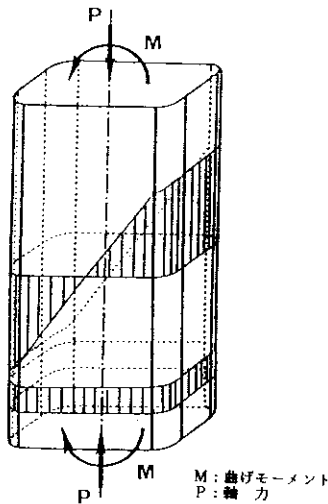


図-1 検討対象モデル

従来、曲げモーメントと軸力の相関関係を実験的に調べる場合、偏心圧縮試験が用いられてきたが、本実験では一定軸力の基で両振りの繰り返し曲げをかける載荷形式とした。これは、実橋脚に地震荷重が作用した場合、上部工の自重が一定軸力として作用しているため、この載荷形式が妥当であると考えたことによる。

1-2 供試体

一般に、箱型断面の柱の耐荷力に影響を及ぼすパラメータとしては、補剛材の剛比、フランジの一般化幅厚比が考えられる。一方、コーナー部に曲面をもつ箱型断面の柱の場合のパラメータとしては、さらに、コーナー部の曲率半径、曲面板の一般化半径板厚比、フランジ、ウェブの平板部分

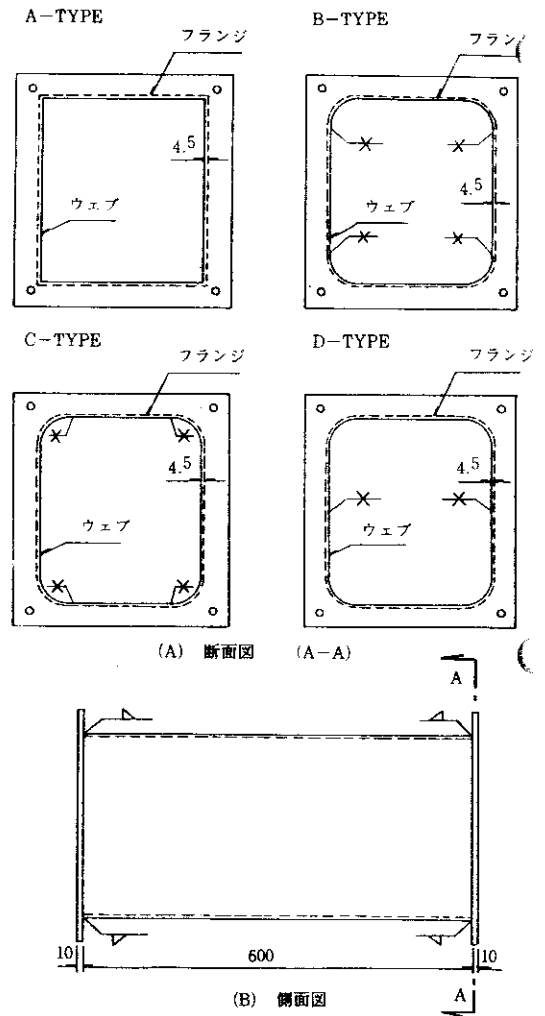


図-2 供試体 (単位: mm)

の幅厚比、そして、箱型断面の全幅の幅厚比が考えられる。

実験では以上のパラメータを考慮に入れ、実施すべきであるが、今回は、第一段階として、図-2に示すような4種類の供試体により実験を行い、コーナー部に曲面をもたせることによる耐荷力および靱性の改善効果と、溶接箇所の影響について検討した。

- 1) A-TYPE…従来の箱型断面柱
- 2) B-TYPE…曲面を持ったフランジ板と、ウェブ板をウェブ面で溶接した柱
- 3) C-TYPE…曲面を持ったウェブ板と、フランジ板をフランジ面で溶接した柱
- 4) D-TYPE…曲面を持ったウェブ板とフランジ板をウェブ板中央で溶接した柱

供試体は各々4体ずつ製作し、このうち1体は残留応力測定用とした。

供試体の各名称は表-1のように定めた。

表-1 供試体の名称

	載荷実験	残留応力測定	予備載荷実験
A-TYPE	A1, A2	AR	AO
B-TYPE	B1, B2	BR	BO
C-TYPE	C1, C2	CR	CO
D-TYPE	D1, D2	DR	DO

表-2 供試体の設計耐荷力

(単位: ton)

供試体	P_y	P_p	P_{s0}
A Type	31.7	36.7	118.8
B.C.D.Type	27.7	32.7	109.9

P_y : 初期降伏荷重

P_p : 全塑性モーメントに対応する鉛直荷重

P_{s0} : 全断面降伏荷重

設計された供試体について、初期降伏の応力状態に対する鉛直荷重を初期降伏荷重

P_y 、全塑性状態に対する鉛直荷重を P_p 、全断面降伏荷重を P_{s0} としてそれぞれ表-2に示す。

1-3 載荷方法

曲げの載荷方法と軸方向圧縮力の有無により表-3に示す載荷ケースとした。ここで、変位制御とは、供試体の鉛直たわみをもとに

$$dn = (1 + (n-1)\Delta)d. \quad (2)$$

n : サイクル数

d_n : n サイクル時点での除荷基準となる最大鉛直たわみ (mm)

$d_0 = 2.5\text{mm}$

$\Delta = 0.2$

なる除荷基準を考え、サイクルが増すに連れて除荷する際の最大鉛直たわみを漸増していく制御方法である。また、曲率制御とは、除荷基準となる供試体の最大曲率を一定にしたまま2~4サイクル載荷し最大曲率の値を漸増していくものである(図-3参照)。

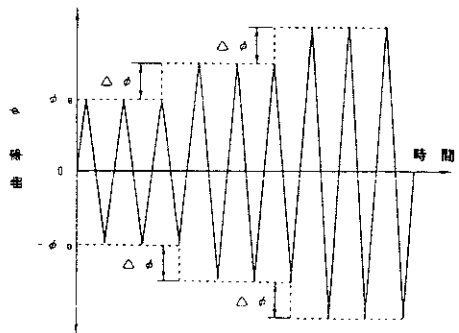


図-3 段階的一定曲率制御の場合の除荷基準

1-4 載荷装置

図-4に載荷装置を示す。鉛直方向のサーボアクチュエータにより、二点載荷で上下方向の両振りの荷重を与え、供試体を純曲げの状態とした。一方、水平方向のサーボアクチュエータによりPC鋼棒を引っ張り、供試体に一定の軸方向圧縮力を加えた。

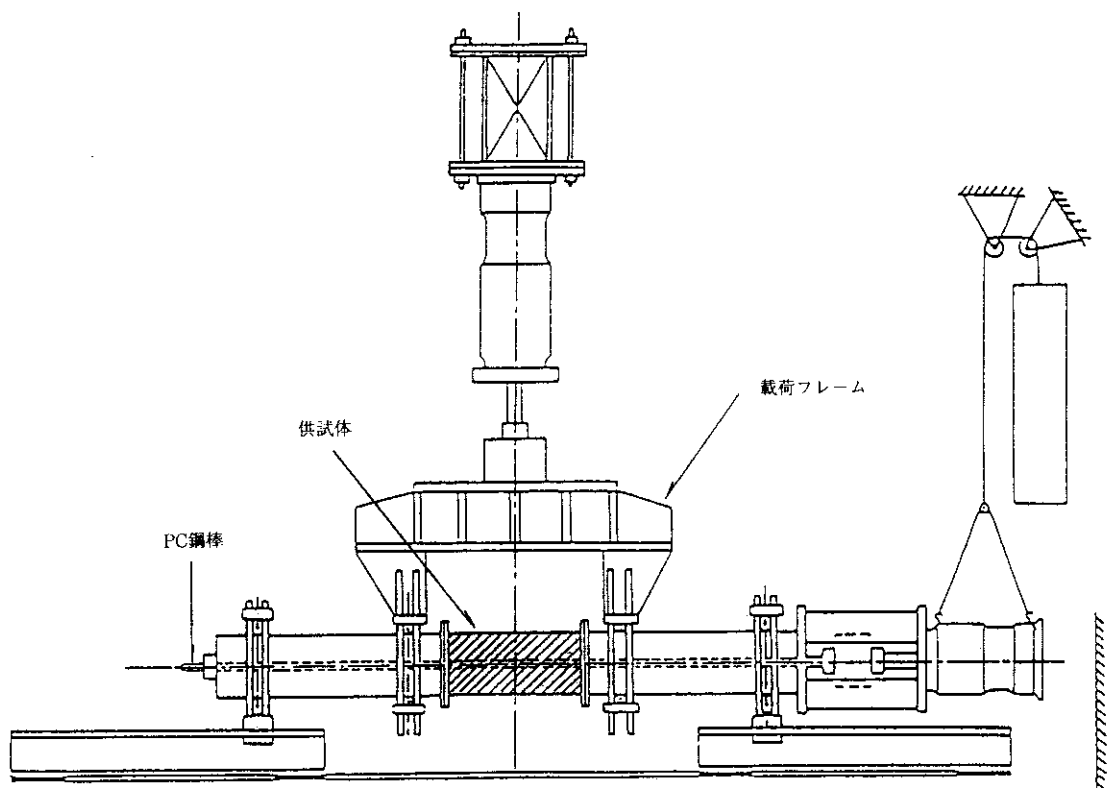


図-4 载荷装置全体図

本実験では測定データをオンラインで同時に処理し、フィードバック制御を行った。マイクロコンピュータ2台を用い、1台は実験システムの制御用、もう1台は測定データの記録用とした。

1-5 測定方法

実験では以下に示す方法で、各項目を測定した。

- (1) 鉛直荷重 サーボアクチュエータに内蔵されたロードセルにより測定した。
- (2) 鉛直たわみ スパン中央部での鉛直たわみの測定は不可能であったため、図-5に示すように载荷点より20cm外側の左右2点で計測した。

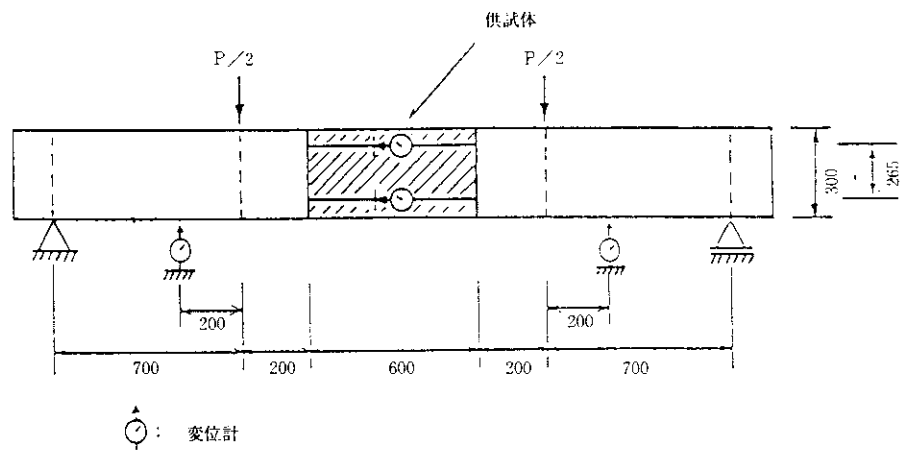


図-5 桁柱の鉛直たわみ、供試体曲率の測定点 (単位 ; mm)

(3) 供試体の曲率 図-5 に示す供試体の上縁部、下縁部に設置された変位計形による測定値をもとに (3) 式により求めた

$$\Phi = (u_1, u_2) / L \cdot dt \quad (3)$$

Φ : 曲率 dt: 変位計間の距離

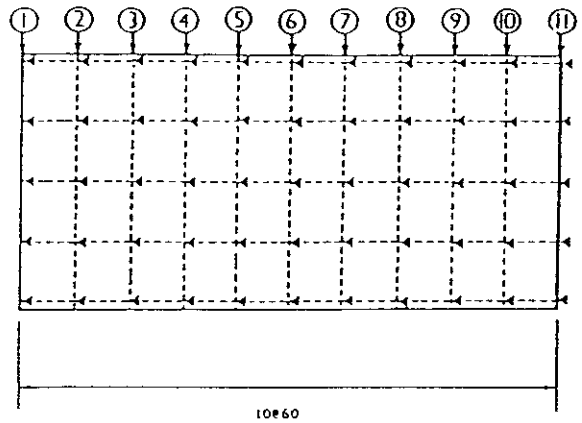
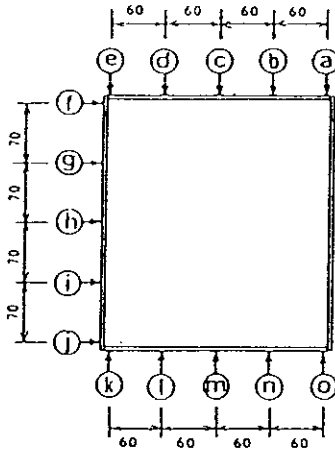
L : 供試体全長

u_1, u_2 : 上下の変位計による測定値 (圧縮を正)

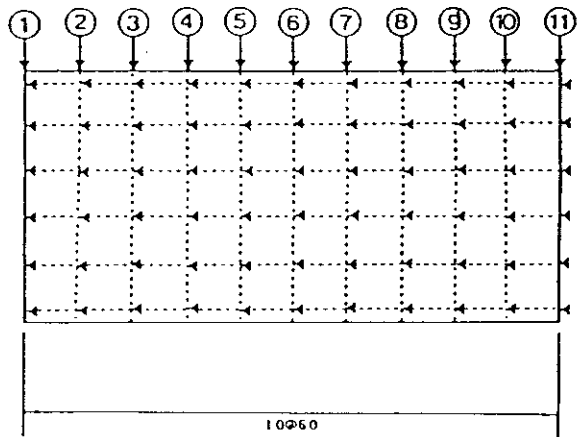
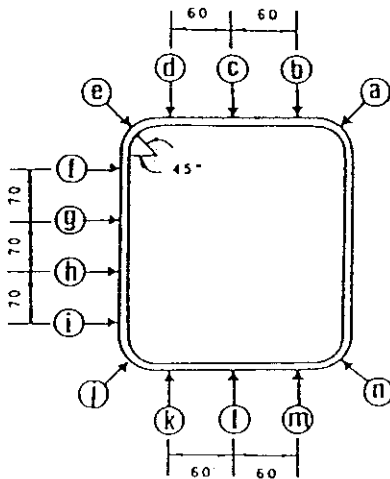
(4) フランジ・ウェブの面外たわみ フランジ2面、ウェブ1面について、図-6 に示す各断面で測定した。測定は半サイクル毎、すなわち除荷終了後の荷重が0の状態で行った。

(5) 供試体中央断面におけるひずみ 供試体の中央断面において、図-7 に示す測定点で行った。ひずみゲージは2軸ゲージによ1-アクティブ1

A-TYPE



B-TYPE, C-TYPE, D-TYPE



◀ : 測定点

図-6 フランジ、ウェブおよびコーナーの面外たわみ測定点 (単位 ; mm)

ダミー法により測定した。

1-6 予備実験

1-6-1 材料実験

供試体各部材料の降伏応力、ヤング率、ポアソン比等を求めるため、供試体に用いた板厚4.5mmの母材より、JIS規格5号試験片を5本製作し、標準引張試験を行った。ヤング率、ポアソン比の算出は、比例領域に対し最小自乗法を適用して、0.2%オフセット法により求めた。

1-6-2 残留応力測定試験

実験供試体と同一条件で製作された4タイプの供試体について残留応力を測定した。残留応力は切断による応力解放に伴い変化するひずみの値より測定を行った。測定位置は、それぞれフランジ、ウエブ各1面、コーナー部2面とし、切断線の長さを約12cm、幅は溶接付近およびコーナー部では

1cm、板中央部では2cmとして短冊状に切断し、実施した。結果を図-8に示す。

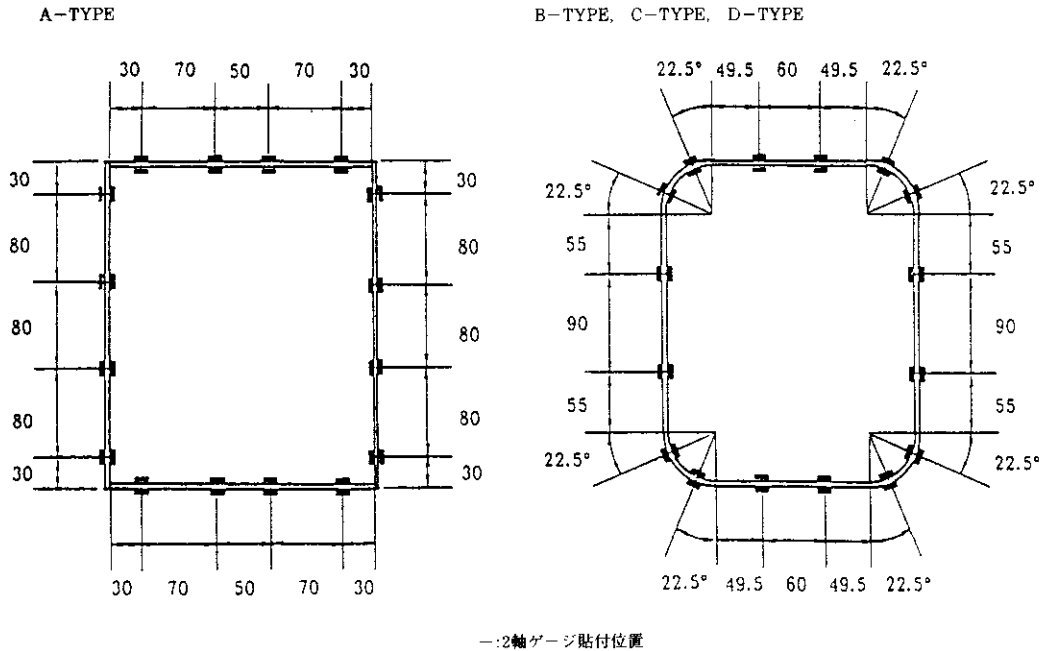
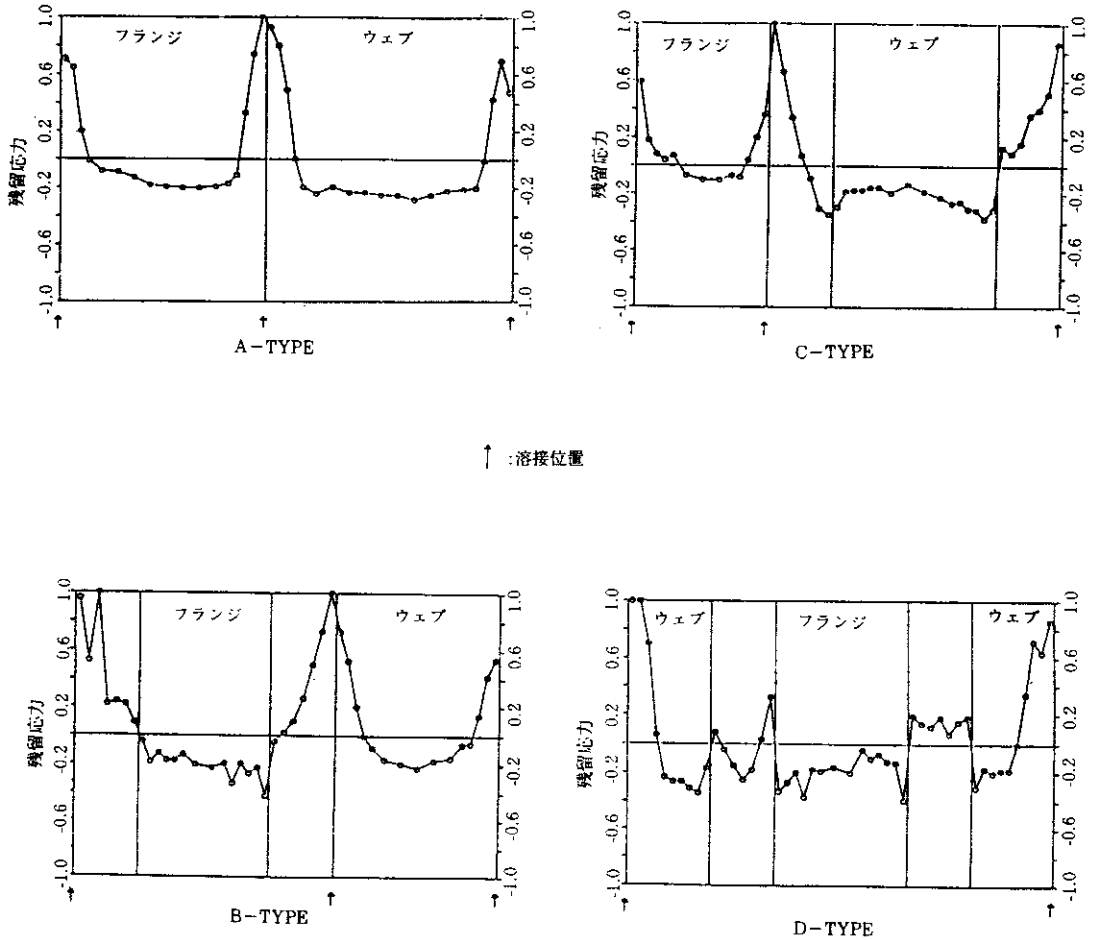


図-7 供試体中央断面におけるひずみの測定点 (単位 ; mm)



図一八 残留応力分布

2 NASTRANによる弾塑性大変形解析

2-1 概説

この節では、実験供試体と同じ断面、すなわち箱型断面、曲面付き箱型断面の柱に持続曲げ荷重を行った場合の強度特性を検討するために行った有限要素法による解析について述べる。有限要素法プログラムとして、凡用構造解析用プログラム

であるNASTRANを用いた。この解析手法は増分理論に基づく通常的手法であるが、幾何学的非線形性を考慮するために移動要素座標系を用い、解の改善にはニュートン・ラフソン法を用いた。また、荷重増分については、計算時間の許す範囲で最大限に分割して実施した。

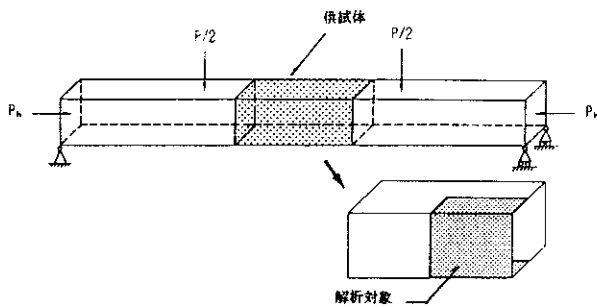


図-9 解析対象

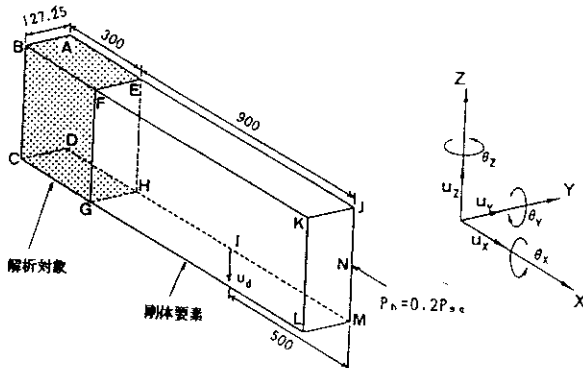


図-10 解析モデル

2-2 解析モデル

解析対象は、対称性を考慮し、図-9に示す供試体の1/4の部分とした。また、正確に曲げモーメントを作用させる観点から剛体要素を取り付け、図-10に示す解析モデルを考え、A B C Dは供試

体の中央断面、E F G Hは供試体の端部に相当する。直方体E F G H J K L Mは剛体要素であり、M点を単純支持としている。また同図に示すX軸、Y軸、Z軸の座標軸をそれぞれ決めた。

2-2-1 拘束条件

拘束条件は、供試体部分と剛体要素それぞれ以下のとおり考えた。

(1) 供試体部分対称性より、辺AE, DH上... U_y, θ_x, θ_z を拘束。辺AE, BC, CD上... U_x, θ_y, θ_z を拘束

(2) 剛体要素剛体要素は、要素全体で6自由を持つ。この6自由度を

I点... U_z

M点... $U_y, U_z, \theta_x, \theta_z, \theta_y$

N点... U_x

のように振り分け、対称性より、 U_y, θ_x, θ_z を、境界条件よりM点の U_z をそれぞれ拘束した。

2-2-2 荷重

供試体に作用させる荷重は、軸圧縮力と曲げモーメントを考え、以下のように作用させた。

軸圧縮力...N点に集中荷重を作用させる。

曲げモーメント...I点を強制変位(U_d)させることによって作用させる。

本研究で取り扱う内容は、座屈というきわめて非線形性の強い問題であるため、変位制御によることにした。

2-2-3 材料特性

材料の性質については、図-11に示すように完全弾塑性体とした。ここでは、材料の硬化については考慮せず、降伏条件としては、von-Misesの

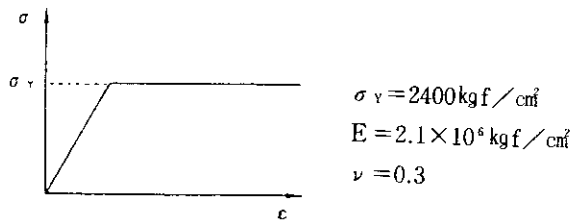


図-11 NASTRANによる解析に用いた材料特性

降伏条件を適用した。

2-3 要素分割

ここで用いた要素は平板4辺形アイソパラメトリックシェル要素である。したがって、コーナー部分の分割を細かくする必要があり、精度上の問題をなくするため10分割とした。その他の部分については、支障のない範囲で最大限に分割した。図-12に要素分割図を示す。

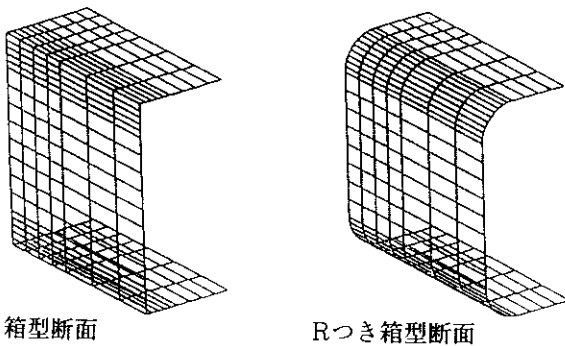


図-12 要素分割

2-4 残留応力

要素は解析上初期状態で応力を持つことは許されず、また要素の応力状態を規定することもプログラム上不可能である。したがって、各要素に温度を与え、材料特性の一つとして熱膨張率を加えることにより温度応力を発生させ、これを残留応力と等価なものとして考えた。残留応力の影響については供試体BタイプおよびCタイプに対して解析を試みた。図-13に温度分布および残留応力分布の結果(B-type)を示す。

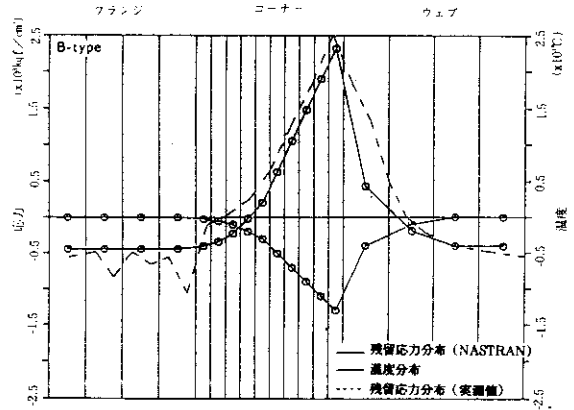


図-13 NASTRANによる解析に用いた残留応力分布

3 簡易解析法

鋼箱型断面の柱のM- Φ 曲線を求める簡易的な解析法として、簡易解析法が提案されており、本研究では、これに改良を加え曲面付き箱型断面に応用した。本解析ではフランジ板およびウェブ板内に存在する残留応力を考慮している。弾塑性解析の手順を図-14示す。

簡易解析法による解析手順の中で、フランジ板とウェブ板の応力分布、ならびにそれぞれの分担する曲げモーメントを算出する場合、コーナー部分からの投影部分に存在する応力は、投影前に存在するものとして計算し、これによりコーナー部分の強度を評価した。

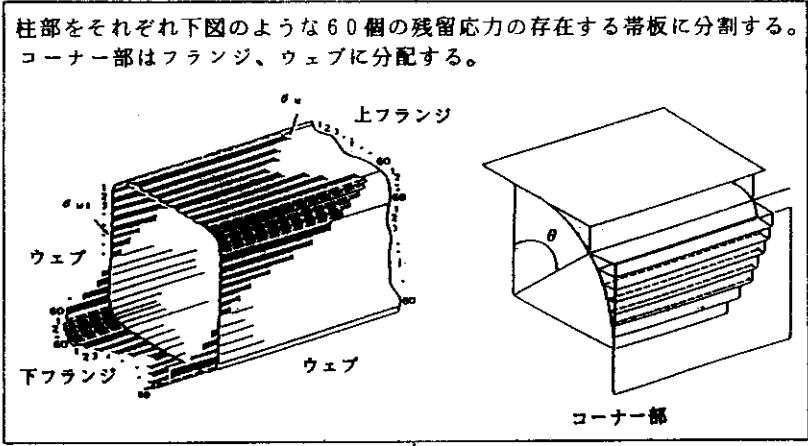
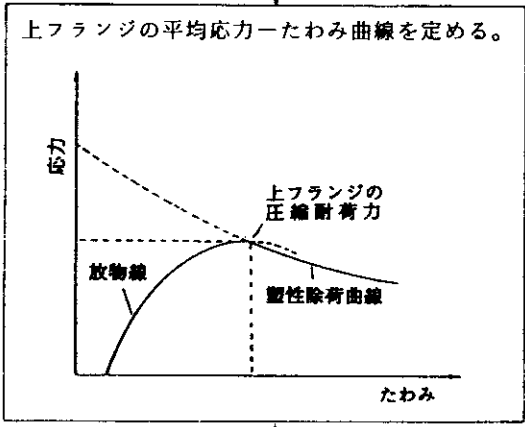
4 実験結果と考察

4-1 実験結果の考察

図-15にM- ϕ 曲線を示す。モーメントおよび曲率は、それぞれ初期降伏モーメントおよび初期降伏曲率で無次元化している。

荷重-鉛直たわみの履歴曲線(以下P-d曲線)の場合は、実験に伴う若干の不確定な要素を含み、

カタストロフィー理論により上フランジの圧縮耐荷力を求める。



上記モデルにおいて上フランジの平均応力とひずみ分布が整合するように反復計算を行う。

確定したひずみを基に断面全体のひずみ、応力、曲率を求める。

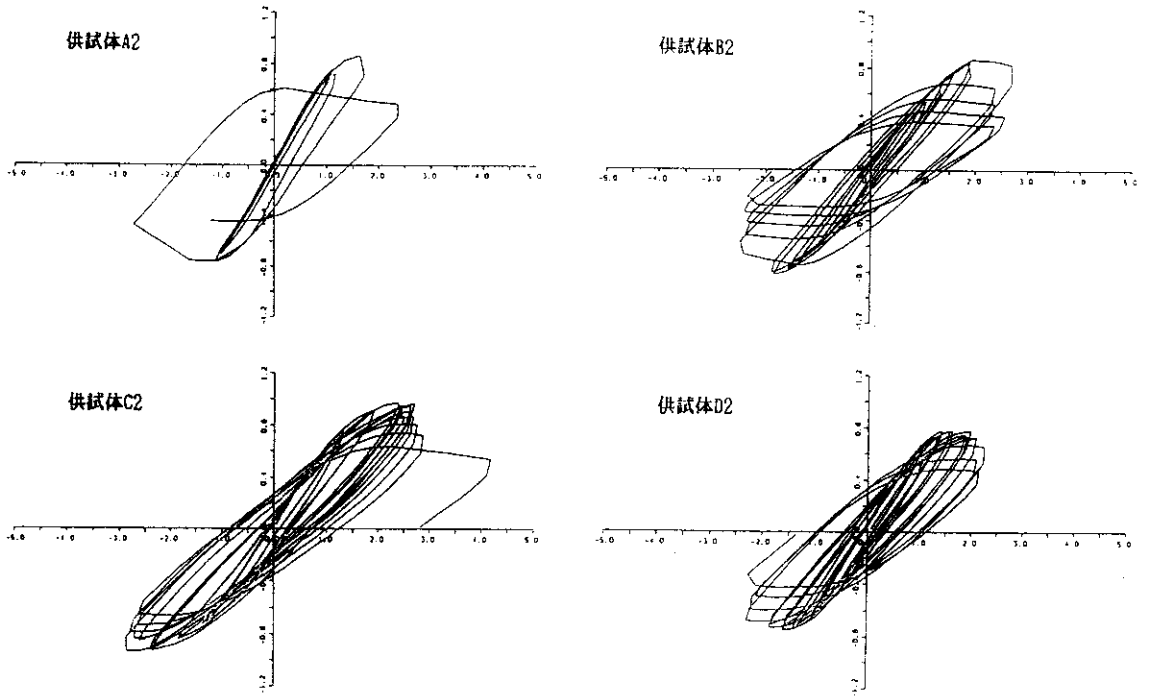
全体の曲げモーメントを算出する。

図-14 簡易解析法の手順

定量的な評価が難しいため、以下M- Φ 曲線を中心に考察を進める。なお、供試体A1, B1については、用いた変位計のストロークが短く座屈後の曲率の測定が困難となり、M- Φ 曲線は途中で切れている。したがって、その後の挙動についてはP-d曲線を参考に考えた。

4-1-1 箱型断面と曲面付き箱型断面の違い

持続曲げを行った結果(図-16参照)からは、強度については、AOの方が大きい。一方、座屈後Aタイプでは耐荷力が急激に落ちるのに対し、Bタイプでは座屈後もしばらくは一定の耐荷力を



(縦軸：曲げモーメント (M/MY)，横軸：曲率 (ϕ/ϕ_y))

図-15 曲げモーメント-曲率曲線

保ち、曲率の増大と共に耐荷力がゆるやかに低下する。これは、コーナー部分に曲面をもつことにより、フランジ板の平板部分が座屈した後、かなりの曲率まで強度を維持できるためと思われる。したがって、ダクティリティーという観点からは、曲面を設けることによりかなりの効果が得られると考えられる。

次に繰り返し曲げモーメントを作用させた場合では(図-15参照)、Aタイプの場合は座屈後の変形が急激に起こるため、除荷基準をはるかに超える曲率の増大と耐荷力の低下が生じた。一方、曲面付き箱型断面の場合は、座屈直後の変形がそれほど急激でないため曲率の増加は少ない。また、座屈後のサイクルでは、耐荷力の低下が箱型断面に比べ小さく、かつ、同じ耐荷力でかなり大きな曲率を示しており、ダクティリティーにすぐれていることがわかる。

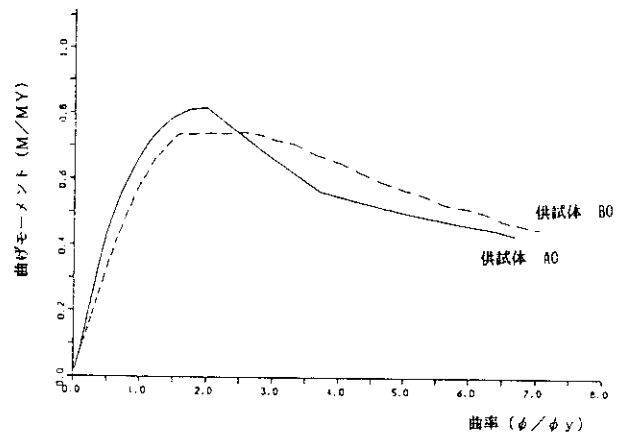


図-16 供試体AOとBOの実験結果の比較

4-1-2 曲面付箱型断面の溶接位置の違いによる効果

B, C, Dタイプを比較した場合(図-15参照)、

強度およびダクティリティーという点でCタイプが非常に大きい。これは残留応力試験の結果より、B、Dタイプでは、フランジの平板部分は圧縮状態であるのに対し、Cタイプはフランジで溶接しているため、引張の残留応力が生じているためと思われる。BタイプとDタイプでは、M- Φ 、P-d曲線からは大きな差はみられない。

4-1-3 面外たわみ

実験において、局部座屈は供試体の端部から全長の1/3程度のところでよく見られたが、中には中央で座屈したものもあった。繰り返し曲げ载荷の場合、上フランジと下フランジで局部座屈の位置が反対になる供試体も見られた。

全体に曲面付き箱型断面の供試体では、終局状態の座屈波形がコーナー部分で非常になめらかであり、亀裂の生じにくい断面形であることが言える。図-17に結果の一例を示す。(写真-1参照)

4-2 NASTRANによる解析結果

初期たわみおよび残留応力がない場合の箱型断面および曲面付き箱型断面についてのM- Φ 曲線を図-18(a)に示している(図-18(b)は座屈モードを表す)。これらの図からも実験結果同様、コーナー部に曲面を設けることにより靱性が大幅に改善されることがわかる。また、箱型断面の場合、軸圧縮力の影響により強度が低下するが、曲面付き箱型断面方はそれほど低下していないことがわかった。

M- Φ 曲線の実験結果との比較を図-19に示

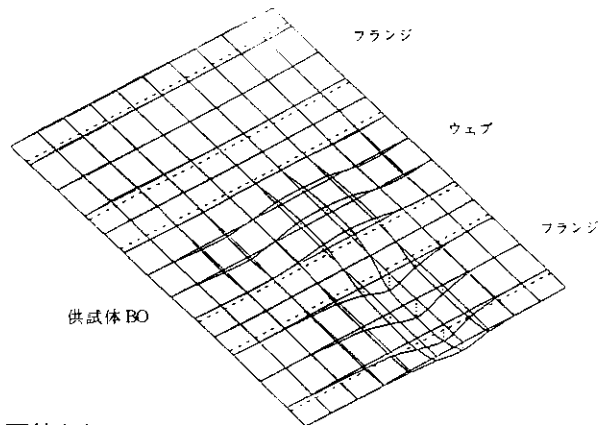
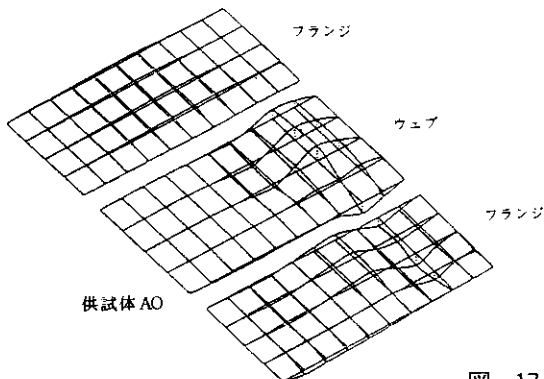


図-17 面外たわみ

している。強度の点ではかなりの差がみられるが、これは残留応力および初期たわみの影響と思われ、残留応力の影響を考えた場合、実験値に近づく傾向にある。

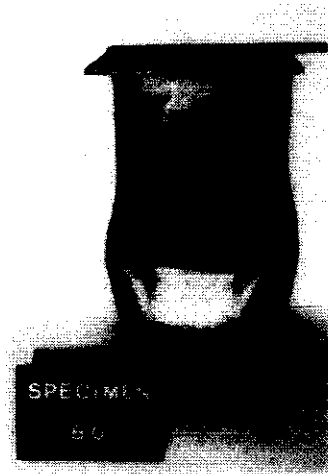
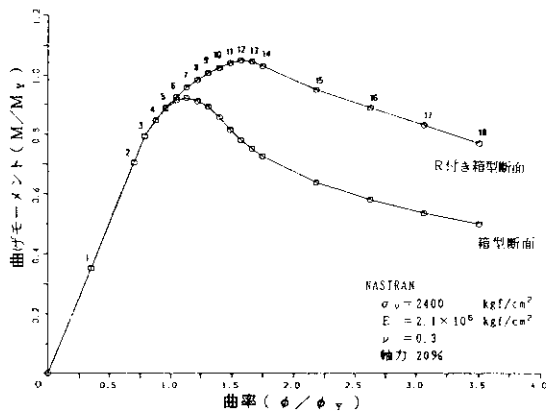


写真-1 供試体の座屈状況

4-3 簡易解析法

図-20に簡易解析法によるM- Φ 曲線の解析結果を示す。曲線を比較すると、強度の推定はおおむね良好と言える。しかし、剛性の評価と座屈後の耐荷力の評価の点では、剛性が全体的に高く、



(a) 曲げモーメントー曲率曲線

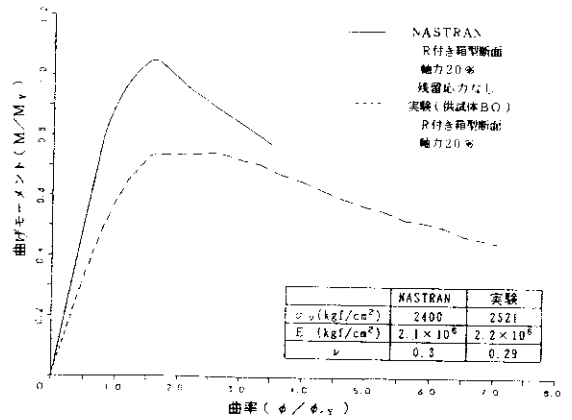
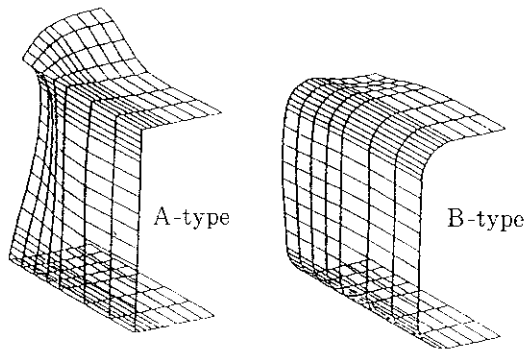


図-19 NASTRANによる解析結果

討するため、載荷実験と有限要素法による解析を行った。さらに、簡便な解析方法の一つとして簡易解析法を取り上げ、曲面付き箱型断面柱への応用を試みた。

以下に本研究で得られた結論を述べる。

(1) 有限要素法による解析の結果、残留応力や、初期たわみ等の初期不整がない場合、コー



(b) モード図

図-18 NASTRAN による解析結果

また、座屈後の耐荷力の低下をとらえにくい傾向にある。

5 結論

本研究では、反復曲げを受ける従来の鋼性箱型柱に対し、コーナー部分に曲面を持たせた柱の場合、強度および靱性がいかに改善されるか、また、溶接位置の違いがどのような影響を及ぼすかを検

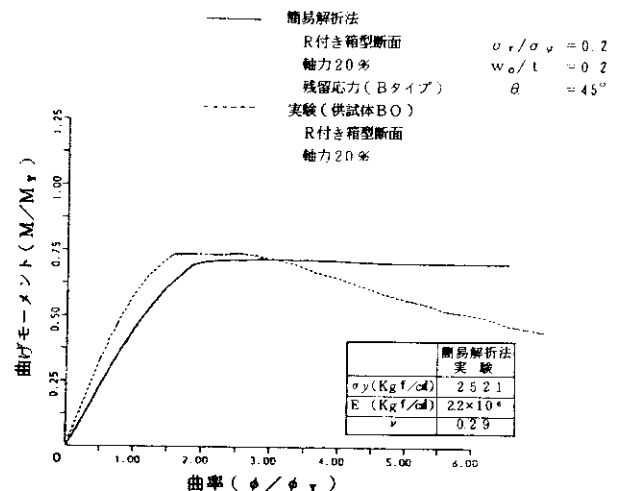


図-20 簡易解析法と実験結果の比較

ナー部分に曲面を持たせることにより、従来の箱型断面に比べ、靱性がかなり改善されることがわかった。

(2) 曲面付き箱型断面の場合は、フランジの座屈後もコーナー部の曲面部分で耐荷力が十分に維持されるため、座屈後も強度がそのまま維持され、ある程度の変形を生じた後、耐荷力が徐々に低下する。また、終局状態の座屈波形もコーナー部分でなめらかであり、亀裂の生じにくい断面形と言える

(3) 曲面付き箱型断面の場合、溶接位置の違い、すなわち残留応力分布の違いにより、強度および靱性にかなりの影響を与える。特に、フランジ板部分で溶接を施した場合、その引張の残留応力が補剛材を付けたような効果があらわれる。

(4) 簡易解析法による解析では、まだ実験結果を十分にとらえることができないが、全体の挙動の表現などについては、比較的良好な結果が得られている。

あとがき

本研究により、鋼製橋脚における曲面付き箱型断面柱では、残留応力が強度および靱性に非常に大きな影響を及ぼすことがわかった。特に、現在では景観面の理由で主にコーナー部に曲面を持たせた柱を採用しているが、靱性の面でも、地震時のような繰り返し荷重に対して従来の箱型断面より有利な構造と言える。今回の研究では、補剛材の影響については考慮しなかったが、今回の実験結果から推察すれば、座屈等に対して補剛材はかなり影響するものと思われ、今後、鋼製橋脚の靱性向上対策の一つとして、補剛材の最適配置等の検討が必要となる。最後に、本研究を進めるにあたり、実験から解析にいたるまで終始ご協力ならびに御指導を賜りました京都大学渡邊英一教授および、関係者に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団・財団法人防災研究協会・京都大学構造力学研究室：鋼橋脚の耐震性と健全度に関する研究－反復曲げを受ける

鋼箱桁柱の強度に関する研究，昭和60年3月

- 2) 阪神高速道路公団・財団法人防災研究協会・京都大学構造力学研究室：鋼橋脚の耐震性と健全度に関する研究－反復曲げを受ける鋼箱桁柱に強度に関する研究（その2）、昭和61年3月
- 3) 川崎重工業株式会社・財団法人災害化学研究所：コーナー部に曲率を有する橋脚柱に極限強度特性に関する研究，昭和63年3月
- 4) 阪神高速道路公団大阪第一建設部・横河松尾建設工事共同企業体・大阪市立大学工学部橋梁研究室：小判型断面を有する薄肉部材の耐荷力とその補剛材の設計法に関する実験的研究，昭和62年11月
- 5) 渡邊英一・北沢正彦・奥野雅弘：鋼箱型梁・柱の荷重分担特性の簡易的解析，構造工学論文集VO1.34A,PP.233-242,1988年3月