

I - 15

鋼製橋脚の耐震設計における設計感度に関する一考察

北海学園大学 正員 杉本博之 ○学生員 村部剛史 学生員 朝日啓太
 山口大学 正員 古川浩平 日本電子計算(株) 正員 松田 宏

1. はじめに 平成7年度の兵庫県南部地震では、高架高速道路の倒壊が数多く見られた。その中でも、それ以前までは地震による被害が少なかった鋼製橋脚（コンクリートを充填しない）にも損傷が見られた。こうした中で、兵庫県南部地震以降、鋼製橋脚の耐震設計が見直されている。

耐震設計に関する研究においては、鉄筋コンクリート（以下RCと略する）構造物における実験が、各研究機関で盛んに行われてきた。そのため、RC構造物は、鉄筋径、かぶり、コンクリート強度などの断面諸元が決定すれば、降伏ひずみ、限界ひずみ（ ϵ_y , ϵ_a ）、降伏モーメント、限界モーメント（ M_y , M_a ）については、道路橋示方書V¹⁾に掲載されている各式で容易に算出することができる。耐震設計の解析、照査に保耐法あるいは動解を用いる場合には、この限界ひずみの設定が特に重要になる。一方、鋼製橋脚においては、各研究機関における実験結果等から、断面を構成する種々のパラメータの関数として限界ひずみを与える公式が提案されている状態にある。

そこで本研究では、まず提案されている種々の限界ひずみと降伏ひずみの比の公式を用いてプッシュオーバー解析を行い、それらの荷重変位曲線および吸収エネルギー等を比較することを目的の一つとする。また本研究では、最終的に鋼製橋脚の耐震最適設計を目的としているが、そのために提案されている公式を用いた構造系の応答値の各設計パラメータに対する感度を調べる必要がある。それで、鋼製橋脚を例にとり、設計パラメータを変化させてプッシュオーバー解析と非線形動的解析を行い、それぞれにおける感度を検討することを目的の二とする。

なお、本研究における非線形静的解析、動的解析についての計算プログラムは汎用動的解析システムTDAPIIIを使用した。

2. 鋼製橋脚の耐震設計 道路橋示方書Vによると、コンクリートを充填しない鋼製橋脚の場合では、非線形性を考慮した動的解析に用いる弾塑性挙動を表す諸数値、例えば骨格曲線などについては、同等の供試体を作成して、正負交番繰返し載荷実験やハイブリッド地震応答実験などを行い、それらの結果から導くこととされている。一般的に非線形性を考慮した鋼製橋脚の変形は、地震時保有水平耐力法や動的解析法をおこなった際に、部材の曲げ変形が大きく支配されるため、部材による復元力特性である骨格曲線には、モーメント（M）と曲率（ Φ ）の関係を与える必要がある。本研究で検討する提案公式は、このM- Φ 関係を導く際に必要となる鋼材の応力度（ σ ）とひずみ（ ϵ ）との関係（ファイバーモデル）において、圧縮フランジが終局状態となる限界ひずみを定めたものである。この限界ひずみが定量的に定められれば、骨格曲線が確定し、プッシュオーバー解析などによる設計照査が可能となる。

2-1 プッシュオーバー解析 本研究におけるプッシュオーバー解析は、静的解析法における地震時保有水平耐力法の一手法である。この手法は、静的な荷重を漸増载荷することで、材料が弾性域から塑性域に段階的に変化していく過程が確認できるため、一般的には、塑性化する部分については、塑性ヒンジあるいは塑性ヒンジ長として考えられる。今回の研究では、塑性ヒンジ長として骨格曲線を計算した。なお、骨格曲線については図-1のトリリニアモデルを使用している。

2-2 非線形動的解析 本研究で使用する動的解析法は、対象とする構造物が地震力を受けた場合に、構造物の変位、断面力などに対する挙動を、より実際に近い状態で解析することができる手法である。動的解析に使用する構造モデルについては、実際の橋脚と同一に考えるために、減衰定数、固有周期、そして必

Basic research on sensitivities of design parameters of steel framed bridge piers in their seismic design

By Hiroyuki SUGIMOTO, Tsuyoshi MURABE, Kohei FURUKAWA & Hiroshi Matsuda

要とされる箇所に非線形材料特性である骨格曲線，などを入力する必要がある．そこで本研究では，減衰定数は0.01，骨格曲線はバイリニアモデルを使用して計算を行った．また，構造物に与えた地震波は，神戸海洋気象台原波形を使用している．

3. 限界ひずみの提案公式 本研究では，補剛材のある薄肉箱型断面から構成される鋼製橋脚について検討する．検討する提案公式は，以下に示す式(1)，式(2)，式(3)，及び式(4)である．

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_y} = 29 - 39.3R_f \quad \dots (1)^{2)}$$

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_y} = \frac{0.8(1 - P/P_y)^{0.94}}{(R_f \cdot \lambda_s^{0.18} - 0.168)^{25}} + 2.78(1 - P/P_y)^{0.68} \quad \dots (2)^{3)}$$

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_y} = \frac{3.0}{R_f} \quad \dots (3)^{4)}$$

$$\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_y} = 20 - 25R_f \quad \dots (4)^{5)}$$

ここで， ε_a は限界ひずみ， ε_y は終局ひずみ， P/P_y は軸力比， λ_s 補剛材細長比パラメータである．また， R_f は板パネルの幅厚比パラメータ， R_r は補剛板の幅厚比パラメータであり次式で定義される．

$$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot 12(1 - \mu^2)}{E \pi^2 k_R}} \quad \dots (5)$$

$$R_r = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot 12(1 - \mu^2)}{E \pi^2 k_F}} \quad \dots (6)$$

ここで， b は補剛板全幅， t は板厚， ν はポアソン比， σ_y は降伏応力度， k_R と k_F は座屈係数⁶⁾， E はヤング係数である．

各提案公式について，式(1)と式(4)の両式は扱うパラメータや形式もほぼ同等であるのに対して，式(3)はそれらを簡略化した形式となっている．以上の提案公式3式については，鋼製橋脚の断面構成を R_f で評価しているのに対して，式(2)は R_f ， P/P_y ， λ_s の3パラメータを用いて断面を評価している．また，対象とする鋼製橋脚の断面形式について，式(1)，式(3)，式(4)については，長方形断面ではなく正方形断面でしか提案公式を用いることができない制約がある．従って本研究では，正方形断面の範囲で構造断面パラメータを変更することとした．これらの提案公式以外にも，他に提案されている⁷⁾が，それは軟化領域を含み，本研究で使用した計算プログラムの適応性の関係で，上記の4公式の検討にとどめた．

4. 構造モデル 本研究で対象としたのは，高さ5.8m，横幅5.0mの一層門型ラーメン構造⁸⁾であり図-2に示した．橋脚，梁断面については，図-3と図-4に示した．図-2の隅角部については，その部分を剛域と考えるために，接続する橋脚と梁の断面積，断面2次モーメントの2倍の値を与えている．また，部材に与える骨格曲線については，基部と剛域端部から0.6mの4箇所は非線形材料として，他の部分は線形弾性材料として考える．今回の門型ラーメンにおける上部荷重は，隅角部の両節点に665kNを

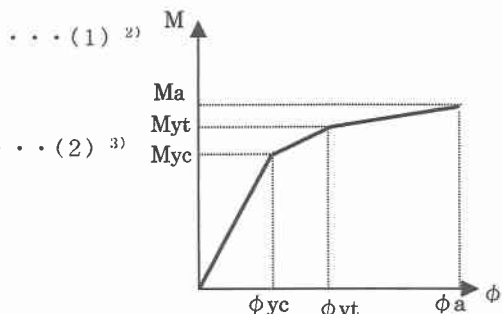


図-1 部材骨格曲線

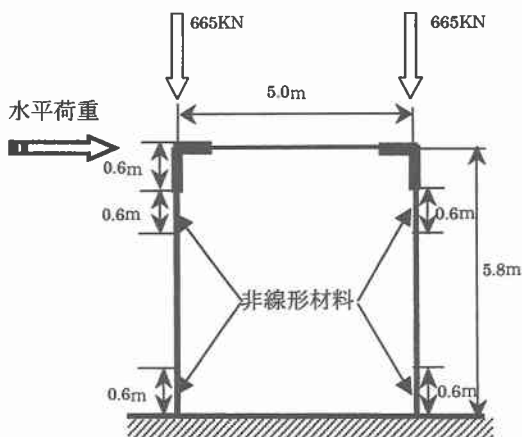


図-2 門型ラーメン構造

載荷させている。計算に用
 いる断面寸法を表-1 に示
 した。基準断面が公式間の
 違いを検討するための断面
 寸法であり、No.1~No. 12
 の断面が、公式(3)を用いて
 設計パラメータの感度を計
 算するためのものである。

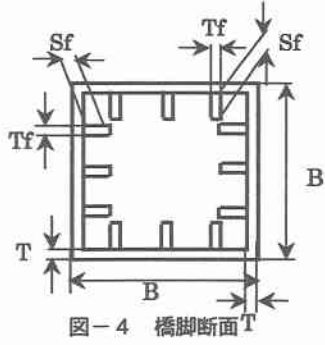
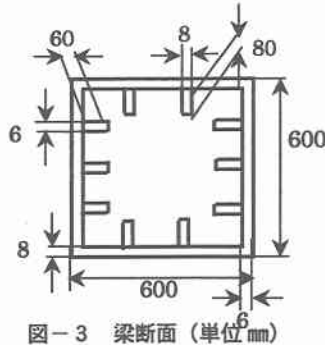


表-1 構造断面パラメータ変化における断面諸元

供試体	補剛板(cm)		本数	補剛材(cm)		ダイヤフラム 間隔(cm)	A(cm ²)	I(cm ⁴)	軸力比	幅厚比	
	B	T		Sf	Tf					Rr	Rf
基準	60.0	0.6	3	6.0	0.6	60.0	185.76	102138	0.120	0.495	0.382
NO1	55.0	0.6	3	6.0	0.6	60.0	173.76	79471	0.128	0.454	0.370
NO2	65.0	0.6	3	6.0	0.6	60.0	197.76	128684	0.113	0.537	0.394
NO3	60.0	0.5	3	6.0	0.6	60.0	162.20	88640	0.138	0.594	0.361
NO4	60.0	0.7	3	6.0	0.6	60.0	209.24	115497	0.107	0.425	0.401
NO5	60.0	0.6	2	6.0	0.6	60.0	171.36	95334	0.130	0.660	0.423
NO6	60.0	0.6	4	6.0	0.6	60.0	200.16	109083	0.111	0.396	0.355
NO7	60.0	0.6	3	5.0	0.6	60.0	178.56	99552	0.125	0.495	0.485
NO8	60.0	0.6	3	7.0	0.6	60.0	192.96	104555	0.116	0.495	0.312
NO9	60.0	0.6	3	6.0	0.5	60.0	178.56	99088	0.125	0.495	0.407
NO10	60.0	0.6	3	6.0	0.7	60.0	192.96	105187	0.116	0.495	0.363
NO11	60.0	0.6	3	6.0	0.6	55.0	185.76	102138	0.120	0.495	0.351
NO12	60.0	0.6	3	6.0	0.6	65.0	185.76	102138	0.120	0.495	0.413

表-2 提案公式別による
 プッシュオーバー解析結果

プッシュオーバー解析結果		
	P[kN]	δ [cm]
提案式(1)	967	8.960
提案式(2)	899	5.335
提案式(3)	914	5.806
提案式(4)	947	7.412

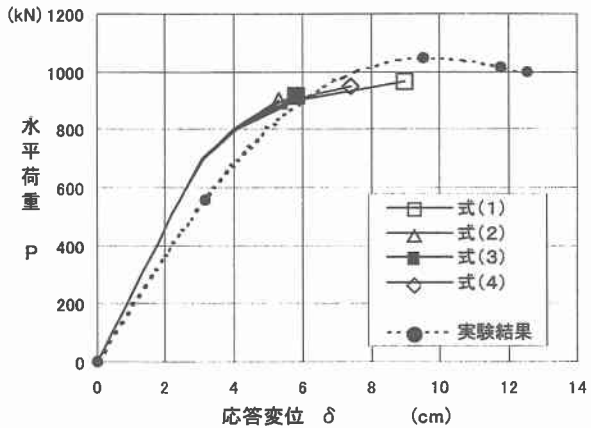


図-5 提案公式別と実験結果による荷重変位曲線

5. 提案公式による計算結果と考察

4つの提案公式について、それぞれ比較するため図-2に示した
 ように、門型ラーメンの頂部に水平方向から荷重を漸増させるプッシュオーバー解析を行った。なお、使用
 した鋼製橋脚断面は前記のように表-1における基準断面を選択して行った。得られた解析結果の内、最大
 荷重と変位の関係を表したのが表-2である。また、この計算例に関しては実験結果が発表されている⁸⁾。

その実験結果の4点を内挿した曲線と各公式で計算した水平荷重－水平変位の関係を図－5に示した。図－5の結果から、荷重変位曲線の履歴は、弾性域でほぼ等しく、塑性域に入ると勾配が多少異なる程度であることがわかった。例えば、各提案公式別の限界ひずみ点について着目してみると、式（1）と式（2）の間では、荷重68kN、変位3.625cm程度の差が生じている。このように、水平力、変位で比較するとそれほど大きな差は見られないが、エネルギーで考えると式（1）は6199kN・cm、式（2）は2841kN・cm、式（3）は3223kN・cm、及び式（4）は4717kN・cmという結果を与えており、最大で3358kN・cmものエネルギー差が生じていることになる。保耐法では、このエネルギーが設計に敏感に影響するので、どの公式を使うかは重要な問題となることが以上の計算例からも伺える。

6. 設計パラメータに対する設計感度の計算の結果と考察

前節では、各提案公式についての検討を行ったが、ここでは、構造断面パラメータ変化における感度について検討する。ただし、本研究では、ラーメン構造の橋脚部分に注目して、構造断面パラメータを変化させることとする。その際に、設計感度を見るために変化した構造断面パラメータは、母材の板幅と板厚、補剛材の高さと板厚そして本数、ダイヤフラム間隔、の計6種類を基準断面から増減させた。表－1において黒で塗りつぶしているセルは、断面構造パラメータを変化させた箇所となっている。また、ここで使用した提案公式は式（3）を用いた。

まず、各ケースでプッシュオーバー解析を行い、先程と同様に最大荷重と変位について表－3にまとめた。また荷重変位曲線を表したのが図－6から図－11である。また、動的解析の最大応答水平変位結果を示したが表－4である。構造断面パラメータの感度を検討するために、各パラメータとの組み合わせを増やし、2つの構造断面パラメータ変化と最大応答変位の関係を3次元等高線で表したのが図－12から図－14である。

まず、構造断面パラメータ変化における、図－6から図－11までの荷重変位曲線で確認できる設計感度として2パターンに分類できると考えられる。1つ目は、図－9から図－11までにおいて、基準断面と構造断面パラメータを増減させた荷重変位曲線の間では、限界ひずみに達した点が、ほぼ基準断面の荷重変位曲線の延長上にある。従って、補剛材高さ、補剛材厚さ、ダイヤフラム間隔については、水平変位を増減させる感度が出ているため、靱性に対する影響が大きいと思われる。それに対して、2つ目として図－6から図－8において、基準断面と構造断面パラメータを増減させた荷重変位曲線の間では、限界ひずみに達する点が、縦軸の水平荷重で上下方向に変化する感度が出ていることから耐力に対する影響が大きいと思われる。

次に、動的解析結果から考察を行うことにする。図－12から図－14において、平面内の中心が基準断面での結果である。従って、これらの結果から、断面構造パラメータ変化による感度は、上記のプッシュオーバー解析と同様に全てにおいて出ている。しかし、これらのパラメータの中で、補剛材高さを増減させた時の最大応答水平変位の結果だけが、他のパラメータとは逆の感度が出ている。

7. あとがき 鋼製橋脚の耐震設計について、まず限界ひずみの重要性を説明し、提案されている4つの公式を用いて曲げモーメント－曲率の骨格曲線を計算し、実験結果の公表されている鋼製橋脚を例に取りプッシュオーバー解析により比較を行った。

表－3 プッシュオーバー解析の結果

	提案式(3)	
	P[kN]	δ [cm]
基本	914	5.806
NO1	786	6.357
NO2	1041	5.264
NO3	799	5.887
NO4	1027	5.781
NO5	831	5.187
NO6	985	6.146
NO7	858	4.942
NO8	966	6.976
NO9	876	5.461
NO10	952	6.180
NO11	923	6.192
NO12	892	5.315

表－4 動的解析の結果

	動的解析 最大変位 [cm]
基本	16.814
NO1	22.330
NO2	16.330
NO3	20.485
NO4	16.929
NO5	17.753
NO6	16.882
NO7	16.466
NO8	17.100
NO9	17.015
NO10	16.771
NO11	17.038
NO12	17.038

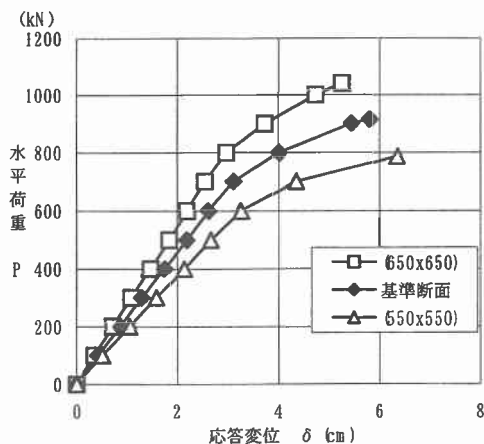


図-6 板幅変化におけるP- δ 曲線

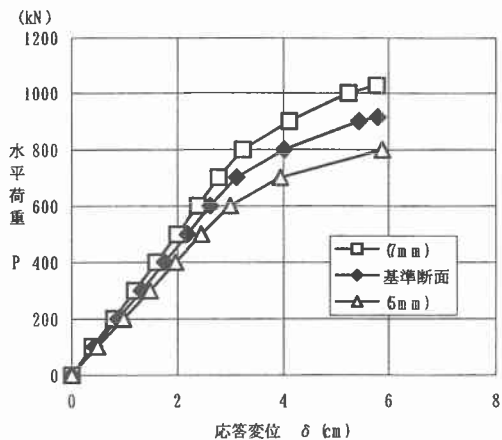


図-7 板厚変化におけるP- δ 曲線

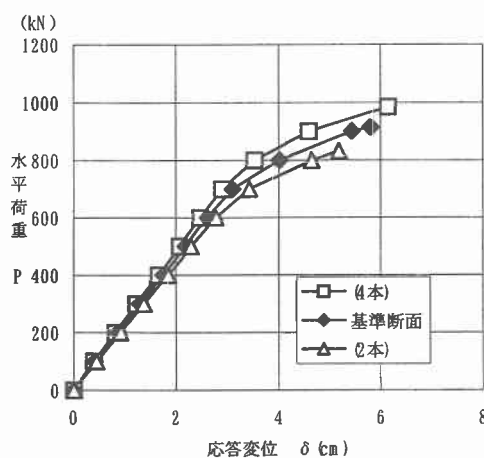


図-8 補剛材本数変化におけるP- δ 曲線

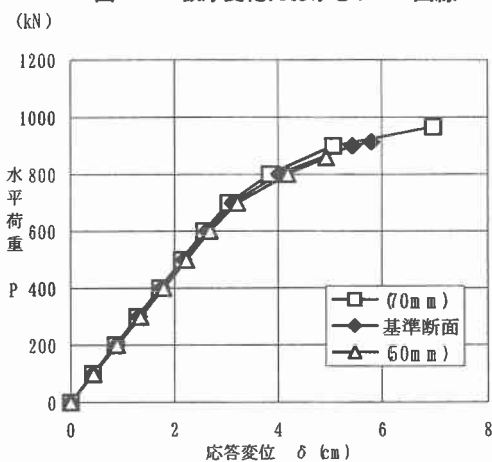


図-9 補剛材高さ変化におけるP- δ 曲線

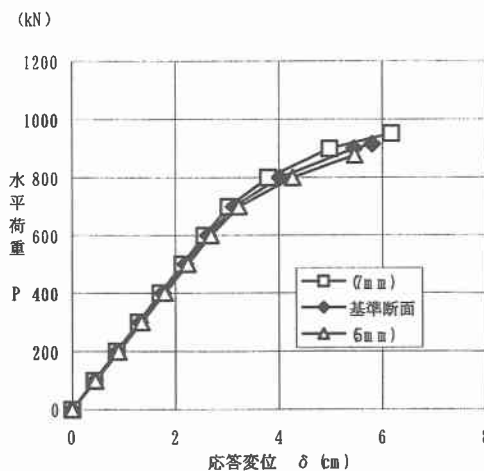


図-10 補剛材厚さ変化におけるP- δ 曲線

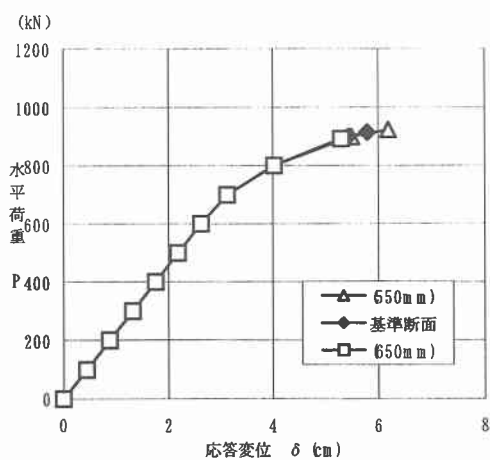


図-11 ダイアフラム変化におけるP- δ 曲線

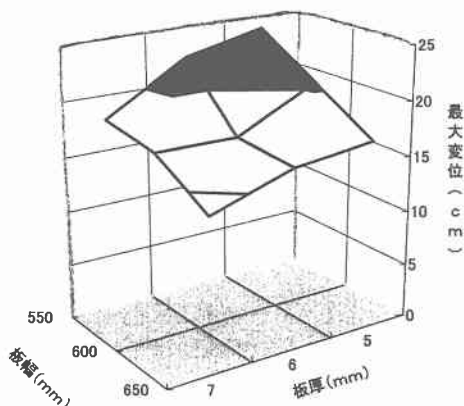


図-1 2 板厚, 板幅, 応答変位による等高線

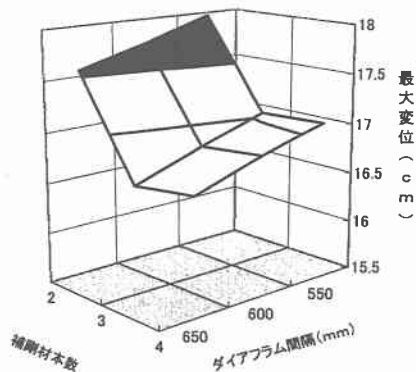


図-1 3 ダイアフラム, 補剛材本数, 応答変位による等高線

その結果, 一つの計算例ではあるが, 限界変位あるいはエネルギー等の値において, 公式間に少くない差があることがわかった。この点に関しては, できるだけ早く設計基準としての統一見解が得られることを期待する。

また, 限界ひずみの提案公式の一つを用いて, 鋼製橋脚の断面を構成する板厚, 板幅等の設計パラメータの値を種々変えて計算し応答値の感度を検討した。これは, 本研究が目的としている鋼製橋脚の耐震最適設計を行うにあたり, 各設計パラメータの応答値に対する感度の勾配の評価, また設計空間の吟味検討のために行うものである。今回検討したパラメータはすべてそれぞれの感度を示し, 鋼製橋脚の設計において重要な変数であることが確認された。

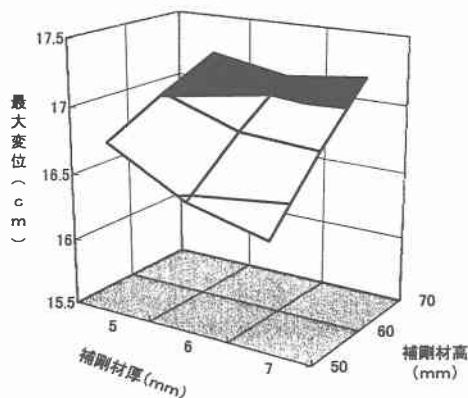


図-1 4 補剛材厚, 補剛材高, 応答変位による等高線

8. 謝辞 本研究は, 文部省私立大学学術フロンティア拠点推進事業(積雪寒冷地における災害に強い都市モジュールの開発とシステム構築)および日本橋梁建設協会の援助を受けた。また, 東光コンサルタントの高久氏より貴重なアドバイスをいただいている。末筆ではあるが謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996.
- 2) 船本・今村・半野・田嶋・松田: 塑性ヒンジを考慮した鋼製橋脚のM-φ関係に関する1検討, 第2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, 1998.
- 3) 葛・鄭・宇佐美: 短柱の変形能に基づく鋼構造物の保有性能評価法, 土木学会第54回年次学術講演会, I-B196, 1999.
- 4) 小野・西川・深谷・劉: 正負交番繰返し荷重実験結果に基づく矩形断面鋼製橋脚のM-φ関係に関する一検討, 土木学会第54回年次学術講演会, I-B169, 1999.
- 5) 西川・村越・小野・高橋: 実験結果に基づく鋼製橋脚の非線形動的解析モデル設定法, 日本技術資料, vol. 41-10, 1999.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 1996.
- 7) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.
- 8) 西川・村越・高橋・岡本・池田・森下: 鋼製ラーメン橋脚の耐力と変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 45A, 1999.