

断面パラメータが鋼製橋脚の耐震設計へ及ぼす影響に関する研究

On Effect of Sectional Parameters on Seismic Design of Steel Framed Piers

北海学園大学工学部土木工学科
 北海学園大学大学院
 北海学園大学大学院
 山口大学工学部社会建設工学科
 北武コンサルタント(株)

正員 杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)
 ○ 学生員 佐々木利健 (Masakatsu Sasaki)
 学生員 名畑信宏 (Nobuhiro Nahata)
 正員 古川浩平 (Kohei Furukawa)
 正員 渡邊忠朋 (Tadatomo Watanabe)

1. まえがき

新道路橋示方書(平成14年3月改定,以下,新道示)¹⁾は,旧道路橋示方書(平成8年12月改定,旧道示)²⁾と比較すると鋼製橋脚の耐震設計に関する規定がより具体的に示されるようになった。例えば,旧道示では,コンクリートを充填した鋼製橋脚に関しては許容ひずみが規定されていたが,コンクリートを充填しない鋼製橋脚に関しては,許容ひずみが規定されていなかった。それに対して,新道示では,コンクリートを充填する,および充填しない鋼製橋脚に関して,それぞれ許容ひずみを算定するための公式が規定されるようになった。

この許容ひずみは,構造物の静的解析を行う際に必要となる骨格曲線の算定や,動的解析を行う際に必要となる非線形履歴モデルの算定,さらに,動的解析による構造物の耐震性の照査に必要な許容値の設定のために重要なパラメータとなる。これらの公式には,適用範囲が示されており,いくつかの断面パラメータのとりうる値の範囲が制限されている。しかし,適用範囲として制限される断面パラメータの内,補剛板の幅厚比パラメータ R_F と板パネルの幅厚比パラメータ R_R の上限値が,コンクリートを充填した場合と,充填しない場合で異なる範囲で規定されている。

鋼製橋脚における柱は,コンクリートを部分充填した場合,充填部と無充填部で断面を変化させないのが一般的である。つまり,同一断面に対して,充填した部分と無充填の部分で許容ひずみ式の適用範囲が異なることは,設計上問題が生じる可能性が考えられるが,一般には下記の理由により問題にされていない。例えば,多くの単柱式の橋脚において,コンクリートの充填高さは,コンクリート充填部直上のひずみが,降伏ひずみをこえない高さまで充填するという事になっている。このため,無充填部はひずみの照査を必要とせず,無充填部のひずみの公式を用いることがないので許容ひずみ式の適用範囲の違いは,問題になることはない。しかし,門型ラーメン橋脚などでは,無充填部である柱上部のひずみの照査が必要になる可能性が考えられる。

本研究では,新道示に示されるこれらの基準に基づき,従来から提案してきた最適耐震設計システム³⁾を用いて,鋼製橋脚の最適耐震設計を行い,上記のケースの検討を行ってきた。その結果,耐震性能に関する条件は必ずしもアクティブにならず,断面寸法に関する条件や,許容ひずみ式の適用範囲に関する条件が,支配的になってい

表-1 R_F, R_R の上下限值

	R_F		R_R	
	下限値	上限値	下限値	上限値
充填部	0.2	0.7	0.3	0.7
無充填部	0.2	0.5	0.3	0.5

る傾向が見られた⁴⁾。そこで,上部積載荷重を増減して設計を行い,アクティブ(設計を支配する)な条件がどのように変化するか,さらに,適用範囲がどの程度設計結果に影響を与えているか検討を試みた。

2. 鋼製矩形断面のパラメータ

新道示では,コンクリートを充填した,および充填しない鋼製橋脚に対して,前記のように,それぞれ許容ひずみ式が示されている。さらに,この適用範囲として,いくつかの断面パラメータのとりうる値が制限されている。許容ひずみ式は,矩形断面と円形断面の式がそれぞれ示されている。本研究では,矩形断面を対象としている。矩形断面の許容ひずみ式の公式とその適用範囲として規定される断面パラメータについて以下に説明する。

・ 充填の場合

$$\epsilon_a / \epsilon_y = 7 \quad \dots \dots \dots (1)$$

・ 無充填の場合

$$\epsilon_a / \epsilon_y = 20 - 25R_F \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで, ϵ_a は鋼材の許容ひずみ, ϵ_y は鋼材の降伏ひずみ, R_F は補剛板の幅厚比パラメータである。式(1), (2)ともに,圧縮応力を受けるフランジの板厚中心位置におけるひずみを規定したものである。表-1に, R_F , および R_R の適用範囲の上下限值を示す。表中の R_R は板パネルの幅厚比パラメータである。 R_F, R_R ともに充填部の上限値が0.7, 無充填部の上限値が0.5であり, 充填部の上限値が緩和されている。 R_R および R_F の式を以下に示す。

$$R_F = \frac{B'}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot 12(1-\mu^2)}{E_s \cdot \pi^2 k_F}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$R_R = \frac{B'}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot 12(1-\mu^2)}{E_s \cdot \pi^2 k_R}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで, B' は補剛板の幅, t は板厚, σ_y は鋼材の降伏応力, E_s は鋼材のヤング係数, μ はポアソン比, k_F, k_R は座屈係数である。

これらの他に以下の3式が適用範囲として規定されている。

$$0 \leq N/N_y \leq 0.2 \quad (\text{共通}) \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$0.2 \leq \lambda \leq 0.4 \quad (\text{共通}) \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\gamma_1 / \gamma_1^* \leq 1 \quad (\text{無充填のみ}) \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 λ は細長比パラメータ、 γ_1 は縦方向補剛材の剛比、 γ_1^* は線形座屈理論から求められる最適剛比である。 N/N_y は軸力比であり、 N は作用軸力、 N_y は降伏軸力である。

また、門型鋼製ラーメン橋脚の面内方向に対しては、柱部の変動軸力が式(1)、(2)の適用範囲内にある場合は、式(1)、(2)をもとに算定される骨格曲線を用いて柱部の設計を行ってよいと記述されている。

3. 最適耐震設計

鋼製橋脚の耐震設計は、最適耐震設計システムを用いて行った。最適耐震設計システムは、まず、静的非線形解析法に基づく耐震性の照査法に最適化手法を応用して1次設計を求める。次に、その1次設計に対して時刻歴応答解析により耐震性の照査を行う設計システム³⁾である。この1次設計における耐震性の照査法として、道路橋のための非線形応答スペクトル図⁵⁾を用いる非線形スペクトル法を用いている。

3.1 設計変数 本研究では、門型ラーメン橋脚の柱部材のみを設計の対象としている。また、断面形状は、矩形断面としている。設計変数は、図-1に示す断面寸法として、断面高さ H 、フランジ板厚 T_f 、ウェブ板厚 T_w 、補剛材高さ B_s 、補剛材板厚 T_s 、フランジ補剛材本数 N_f 、ウェブ補剛材本数 N_w の計7変数としている。 H は、850~2400mmの50mm間隔で32通りの候補値を設定している。 B は H に係数 k を乗じて算定され、数値計算では k は $\sqrt{3}$ としている。 T_f 、 T_w 、 T_s は、それぞれ、8、9、10、11、12、13、14、16、19、22、25、28、32、34、36、38mmの16通りの候補値を設定している。また、補剛材の断面寸法はフランジもウェブも等しいとしている。 B_s は、50~360mmの10mm間隔で32通り、 N_f 、 N_w は0~15本の16通りの候補値を設定している。

3.2 目的関数 目的関数は、鋼製橋脚の初期建設コストを考慮して、材料に関するコストと補剛材の溶接に関するコストの線形和として以下の式で与えられる⁶⁾。

$$OBJ = \frac{V}{V_0} + \alpha \cdot N \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$V_0 = L \cdot A_0 \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで、 V は柱の総容積 (m^3)、 N は縦方向補剛材の総本数、 α は V と N のコスト比、 V_0 は V を無次元化するために導入されたパラメータ、 L は柱の総長さ (m)、 A_0 は基準断面 (m^2)である。 α の値は、鋼材の単位重量当りのコストと補剛材の溶接に必要なコストを考慮している。数値計算では、 $\alpha=0.08$ として設計している。

3.3 制約条件 制約条件は、耐震性能の照査に関する条件と、構造細目に関する条件で構成される。

前記したように本研究では、1次設計における耐震性の照査法として、道路橋のための非線形スペクトル法を

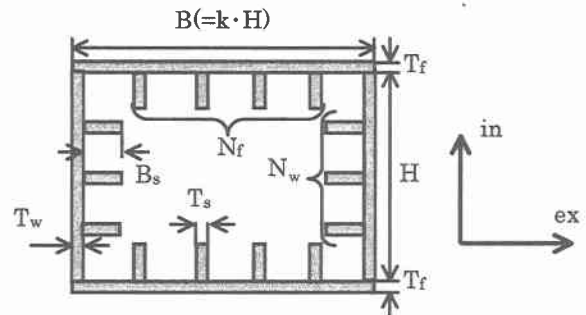


図-1 設計変数

用いている。非線形スペクトル法は、構造物の固有周期と降伏震度から、応答塑性率を算定する簡易動的解析である。その際の制約条件は次式で定義される。

$$g(1) = \mu_{I \text{ in}} / \mu_{a \text{ in}} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (10)$$

$$g(2) = \mu_{II \text{ in}} / \mu_{a \text{ in}} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$g(3) = \mu_{I \text{ ex}} / \mu_{a \text{ ex}} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$g(4) = \mu_{II \text{ ex}} / \mu_{a \text{ ex}} - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 $\mu_{I \text{ in}}$ 、 $\mu_{II \text{ in}}$ はそれぞれ面内、面外方向におけるタイプI地震動に対応した非線形スペクトル図より得られた応答塑性率、 $\mu_{II \text{ in}}$ 、 $\mu_{II \text{ ex}}$ はそれぞれ面内、面外方向におけるタイプII地震動に対応した非線形スペクトル図より得られた応答塑性率である。 $\mu_{a \text{ in}}$ 、 $\mu_{a \text{ ex}}$ はそれぞれ面内、面外方向の許容塑性率である。

構造細目に関する条件は、局部座屈発生を防ぐための条件と許容ひずみ式の適用範囲に関する条件がある。それぞれ面内方向と面外方向、および充填部と無充填部に断面寸法に関して、制約条件を設定している。

圧縮応力を受ける補剛板、および縦方向補剛材に関して、道路橋示方書・同解説II鋼橋編⁷⁾に従って、局部座屈発生を防ぐために、以下の制約条件を設定している。

補剛板の幅厚比は以下の式を満足しなければならない。

$$g(5) = B' / t (\beta_1 f_n) - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (14)$$

ここで、 B' は補剛板内幅、 β_1 は鋼種によって決定される値、 t は補剛板板厚、 n は補剛材によって区切られるパネル数 (n =縦方向補剛材本数+1)、 f は応力勾配の係数で $f=1$ とした。

補剛材の幅厚比は以下の式を満足しなければならない。

$$g(6) = b_s / t_s \beta_2 - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 b_s は補剛材高さ、 β_2 は鋼種によって決定される値、 t_s は縦方向補剛材板厚である。

縦方向補剛材1個の断面2次モーメント、および断面積は、以下の式を満足しなければならない。

$$g(7) = B' t_s \gamma_{Lreq} / 11 I_L - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (16)$$

$$g(8) = B' t / (10n) A_L - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 γ_{Lreq} は縦方向補剛材必要剛比、 I_L は縦方向補剛材1個の断面2次モーメント、 A_L は縦方向補剛材1個の断面積である。

許容ひずみの適用範囲に関する条件は、正規化すると以下のように表される。

$$g(9) = 0.2 / R_F - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (18)$$

$$g(10) = R_F / 0.5 - 1 \leq 0 \quad (\text{無充填部}) \quad \dots \dots \dots (19)$$

$$g(11) = R_F / 0.7 - 1 \leq 0 \quad (\text{充填部}) \quad \dots \dots \dots (20)$$

$$g(12) = 0.3 / R_R - 1 \leq 0 \quad \dots \dots \dots (21)$$

$$g(13) = R_R / 0.5 - 1 \leq 0 \quad (\text{無充填部}) \quad \dots \dots \dots (22)$$

$$g(14) = R_R / 0.7 - 1 \leq 0 \quad (\text{充填部}) \quad \dots\dots (23)$$

$$g(15) = N / (0.2N_y) - 1 \leq 0 \quad \dots\dots (24)$$

$$g(16) = 0.2 / \lambda - 1 \leq 0 \quad \dots\dots (25)$$

$$g(17) = \lambda / 0.4 - 1 \leq 0 \quad \dots\dots (26)$$

$$g(18) = \gamma_1 / \gamma_1^* - 1 \leq 0 \quad (\text{無充填部}) \quad \dots\dots (27)$$

式(14)から式(27)に示した制約条件は、面内方向と面外方向の両方向を同時に考慮している。

前述したように補剛材本数は、0本もありうるとしている。その時、無補剛板の幅厚比は以下の式を満足しなければならない

$$g(19) = B' / t (\beta_{3f}) - 1 \leq 0 \quad \dots\dots (28)$$

ここで、 β_3 は鋼種によって決定される値である。 $\beta_1 \sim \beta_3$ は、道示鋼橋編⁷⁾に示される値である。

面外方向の充填直上の無充填断面が降伏しないように以下の式を条件としている。

$$g(20) = M / M_y - 1 \leq 0 \quad \dots\dots (29)$$

ここで、 M は、静的解析における終局状態の時の充填直上の曲げモーメント、 M_y は、圧縮力を受ける板厚中心位置におけるひずみが降伏ひずみに達した時の曲げモーメントである。

4. 数値計算

本研究で設計の対象とした構造モデルは、図-2に示す門型ラーメン橋脚とした。図中の右が面外方向、左が面内方向であり、両方向を同時に考慮して設計を行っている。橋脚高さは、10mとして、梁長さは、10.5mとした。また、柱部のみを設計の対象とした。コンクリート充填高さは、無充填、6m充填、全充填の3通りとした。また、6m充填の場合の柱断面は、充填部と無充填部で板厚変化を設けない様断面とした。本研究では、上部積載荷重を増減して設計を行っている。増減の割合と各荷重の値の関係を表-2に示す。表中のW1、W2、W3は図-2と対応している。上部積載荷重は、基準値の5502kN、5590kN、8297kNを基本に2割増、4割増、2割減、4割減の5通りとした。地盤種別は、I種地盤として、使用鋼材は、SM490Yとして設計を行った。

4.1 1次設計とアクティブな制約条件 上記のように、最適設計問題の定式化を行い、最適耐震設計システムにより得られた1次設計においてアクティブになった制約条件値を表-3に示す。表の横軸は、コンクリート充填高さ、それぞれの充填高さにおける上部積載荷重の増減を示している。縦軸は、目的関数値とアクティブになった制約条件の項目を示しており、exは面外方向、inは面内方向を示している。×で示している部分がアクティブになった制約条件、△で示している部分がややアクティブになった制約条件、◎で示している部分がアクティブにならなかった制約条件である。ここでは、制約条件値が $-0.100 \leq g(i) \leq -0.200$ の場合をややアクティブな状態、 $0.008 \leq g(i) \leq -0.100$ の場合をアクティブな状態としている。プラス側に0.008まで許容しているのは、数値計算上の誤差を考慮するためである。

目的関数値を見ると、無充填の場合は、全て同じ値を示しているが、6m充填では、2割増から4割増の間で目的関数値が大きくなっている。全充填では、上部積載荷

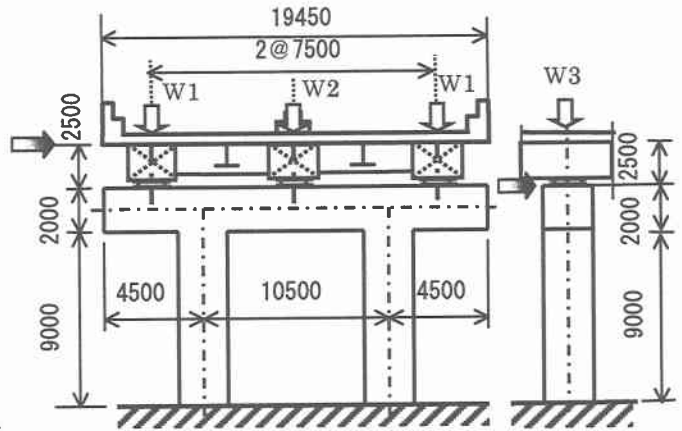


図-2 設計の対象とした構造 (mm)

表-2 上部積載荷重

		4割減	2割減	基準値	2割増	4割増
上部積載荷重 (kN)	W1	3301	4402	5502	6602	7922
	W2	3354	4472	5590	6708	8050
	W3	4978	6638	8297	9956	11947

重を減らすと目的関数値が小さくなり、増やすと、2割増で基準値よりも目的関数値が大きくなり、4割増でさらに大きくなっている。

制約条件値では、 $g(1) \sim g(4)$ を見ると、いずれのコンクリート充填高さでも、上部積載荷重を増やすとアクティブな方向に動いている。無充填では、2割増で $g(2)$ 、 $g(4)$ がややアクティブになり、4割増で $g(2)$ 、 $g(3)$ 、 $g(4)$ がアクティブになっている。6m充填では、基準値で $g(2)$ 、 $g(4)$ がややアクティブになっており、2割増と4割増で $g(2)$ 、 $g(4)$ がアクティブになっている。全充填では、2割減で $g(4)$ がややアクティブになっており、基準値で $g(4)$ がアクティブになっている。また、2割増で $g(2)$ がややアクティブになり、 $g(4)$ がアクティブになっている。さらに、4割増で $g(2)$ 、 $g(4)$ がアクティブになっている。しかし、無充填では、 $g(13)$ の面外方向がアクティブになっており、6m充填では、 $g(13)$ の面外方向がアクティブになっている。また、全充填では、 $g(14)$ の面内方向がアクティブになっている。さらに、 $g(17)$ を見ると、全充填の4割増の面外方向がややアクティブになっているのを除き、全ての条件がアクティブになっている。目的関数値と制約条件値の傾向より、無充填は2割増以下、6m充填は基準値以下、全充填は2割減以下の上部積載荷重で得られた設計は、許容ひずみ式の適用範囲に関する条件、または断面寸法に関する条件により決定されていることが分かる。

4.2 時刻歴応答解析による照査 新道示に基づいた鋼製橋脚の耐震設計では、時刻歴応答解析により耐震性の照査を行うと示されている。そこで、上記した全ての設計に対して時刻歴応答解析による照査を行った。その結果を4割増のタイプIIについて図-3に示す。それぞれの図の縦軸は、時刻歴応答解析による最大応答値を許容値で除した値をとっており、横軸は、充填高さをとっている。応答曲率比は、最大応答曲率を許容値で除した値、応答曲げモーメント比は、最大応答曲げモーメントを許容値で除した値、応答変位比は最大応答変位を許

表-3 1次設計における目的関数とアクティブになった制約条件

目的関数	無充填					6m充填					全充填				
	4割減	2割減	基準値	2割増	4割増	4割減	2割減	基準値	2割増	4割増	4割減	2割減	基準値	2割増	4割増
g(1)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
g(2)	◎	◎	◎	△	×	◎	◎	△	×	×	◎	◎	◎	△	×
g(3)	◎	◎	◎	◎	×	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
g(4)	◎	◎	◎	△	×	◎	◎	△	×	×	◎	△	×	×	×
g(5)	ex	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	in	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
g(6)	ex	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	in	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
g(10)	in	△	△	△	△	×	×	×	×	△	-	-	-	-	-
g(11)	in	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	×	◎	◎	◎
g(13)	ex	×	×	×	×	△	△	△	△	×	-	-	-	-	-
	in	△	△	△	△	×	×	×	×	△	-	-	-	-	-
g(14)	ex	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	×	×	◎	◎
	in	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	×	×	△	×
g(15)	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	×	×	◎	×	×	×	×
g(17)	ex	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△
	in	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
g(18)	in	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-

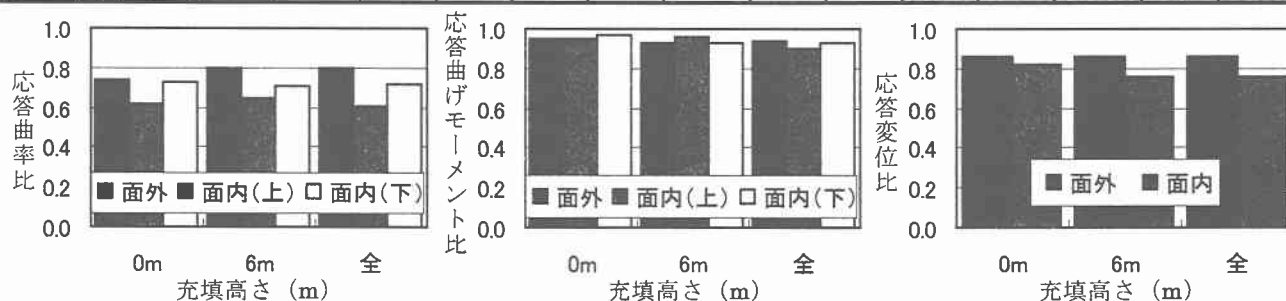


図-3 時刻歴応答解析による照査の結果 (4割増)

容値で除した値である。全てのケースで、1以下となり時刻歴応答解析による照査を満足した。

5. あとがき

上部積載荷重を4割減, 2割減, 基準値, 2割増, 4割増と増減させて耐震設計を行った。基準値で比べると無充填は, g(5), g(6)といった幅厚比の制約がアクティブとなり支配的であるが, 6m充填や全充填では R_F , R_R の上限値の制約がアクティブとなり, その結果, 目的関数値に大きな差が見られる。 R_F , R_R の上限値により設計が大きな影響を受け, 目的関数値の差が大きくなった。

また, 上部積載荷重を割増すると, 耐震性の制約条件はアクティブな方向に動き, 6m 充填, 全充填では, 目的関数値も大きな値を示している。それにより, 充填高さ別による目的関数値の大きな差は, 見られなくなった。しかし, 許容ひずみの適応範囲に関する条件もアクティブになっている。この適用範囲に関する条件の内 R_F , R_R の上限値が, 表-1 に示すように, 全充填とその他の場合で異なることが影響して, やはり, 全充填の目的

関数値が最も小さいという傾向が見られた。

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,丸善株式会社,2002.
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編,丸善株式会社,1996.
- 3) 杉本・渡邊・斎藤:RC ラーメン高架橋の耐震補強最適化に関する研究,構造工学論文集,vol.46A,pp.385-394,2000.
- 4) 杉本・佐々木・渡邊・古川:コンクリートを充填した鋼製橋脚の最適耐震設計について,土木学会第57回年次学術講演会講演概要集,I-324,pp.647-648,2002.
- 5) 杉本・佐々木・名畑・渡邊・古川:鋼製橋脚のための非線形応答スペクトルについて,土木学会第57回年次学術講演会講演概要集,I-813,pp.1625-1626,2002.
- 6) 杉本・朝日・佐々木・渡邊・古川・高久:鋼製橋脚の最適耐震設計に関する研究,北海学園大学工学部研究報告書,第28号,2002.
- 7) 日本道路協会:道路橋示方書II鋼橋編,1996