

補剛箱形変断面鋼製橋脚の変断面部座屈が生じない条件に関する解析的研究

中村 佳昭¹・葛 漢彬²

¹学生会員 名城大学大学院 理工学研究科建設システム工学専攻 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail:113437007@ccalummi.meijo-u.ac.jp

²正会員 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

E-mail:gehanbin@meijo-u.ac.jp

本論文は、補剛箱形変断面鋼製橋脚の数値解析の結果および変断面部で座屈が生じない条件式の提案に関してまとめたものである。断面が2段階に変化する補剛箱形変断面鋼製橋脚において、変断面部で局部座屈が生じると、橋脚基部で生じる場合に比べて耐震性能が低下してしまうことを踏まえ、補剛箱形変断面鋼製橋脚モデルに対して行った準静的解析の結果をもとに構造パラメータの変動を考慮した変断面部で座屈が生じないための条件式を提案する。本研究の結論として、今回提案した条件式を設計に取り入れることで、補剛箱形変断面鋼製橋脚の座屈位置および耐震性能の低下の有無を容易に知ることができる。

Key Words : variable stiffened box section, steel bridge pier, buckling, quasi-static analysis, earthquake resistant design method

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震で生じた鋼製橋脚に被害のうち、変断面構造であることに起因して生じた被害（主に変断面部の局部座屈）がいくつか確認されたこともあり、兵庫県南部地震以降はより耐震性を考慮し、断面が一樣である等断面鋼製橋脚が主に用いられ、現在までにさまざまな研究が行われており¹⁾⁵⁾、耐震性能および耐震設計に関する数多くの有用な知見が得られているが、一方で変断面鋼製橋脚に関する研究はさほど進んでいない。

しかし、変断面鋼製橋脚が等断面鋼製橋脚に対して持つ経済性や軽量化といった優位性に加え、設計条件次第では等断面鋼製橋脚と同等の耐震性能を有することが確保できると考えられるため、変断面鋼製橋脚の耐震設計に関する研究の意義は大きいと考える。

本研究では、断面が2段階に変化する補剛箱形変断面鋼製橋脚のモデルに対して行った準静的解析の結果より局部座屈の発生箇所の検証を行い、その結果をもとに主要な構造パラメータの変動を考慮した補剛箱形変断面鋼製橋脚の変断面部で座屈しない条件式の提案および過去の研究⁶⁾で示した損傷度評価を用いた設計法に比べてよ

り簡易的となる条件式を用いた設計法の提案に関しても検討を行う。

2. 研究の考え方と流れ

本研究の考え方として、変断面橋脚において橋脚基部に比べて薄肉である変断面部で局部座屈が生じると、橋脚基部で生じる場合に比べて耐震性能が低下するため（4章で詳述）、橋脚基部で局部座屈が生じるような設計を行い、かつその範囲内で変断面部周辺の板厚を薄くし、経済性を高めることが良い設計であると考え。以上を踏まえ、本研究の流れを図-1に示す。また、以下に図-1における各プロセスについての内容を示す。

1. 基部および変断面部に適用される構造パラメータ等より一次設計を行い、変断面橋脚の寸法や作用軸力等を決定する。
2. プロセス1の結果をもとに作成した変断面橋脚モデルに対して準静的解析を行う。
3. 解析結果をもとに、橋脚基部で局部座屈が生じる際の変断面部の板厚 t_2 の最小値を決定する。値が定まるまでは t_2 を増減させてプロセス1~3を繰り返す。

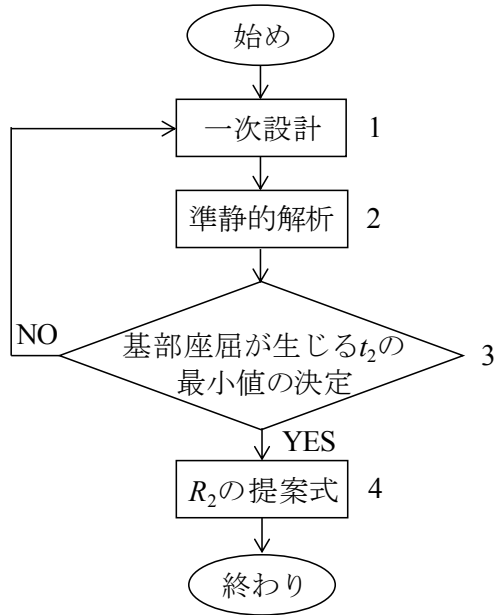


図-1 研究の流れ

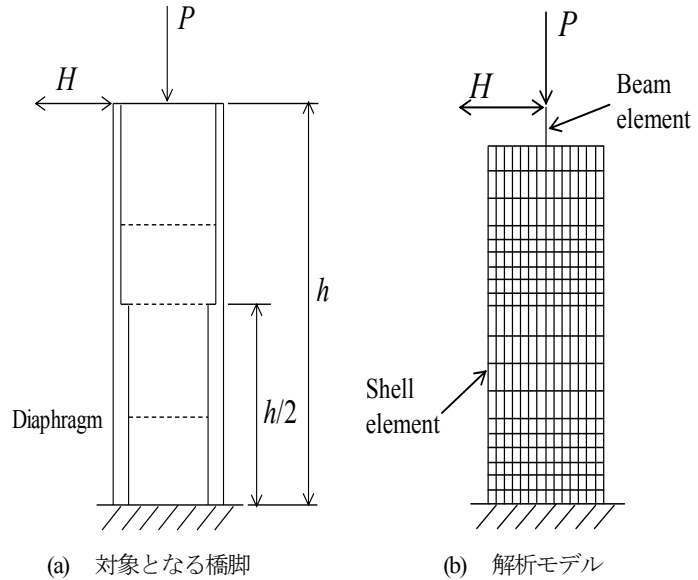


図-2 変断面鋼製橋脚

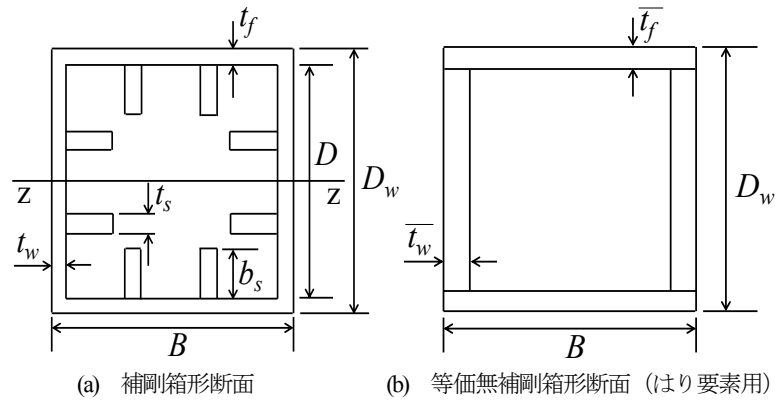


図-3 断面図

表-1 材料定数

σ_y (MPa)		E (GPa)	ν
$t \leq 16mm$	$16mm < t \leq 40mm$		
325	315	206	0.3

4. 定まった t_2 の最小値の結果をもとに、主要な構造パラメータの変動を考慮した変断面部で座屈しない条件式を変断面部の幅厚比パラメータの式として提案する。

3. 解析概要

(1) 解析モデル

解析の対象となる橋脚は、図-2(a)に示す高さ $h/2$ で断面が変化する変断面橋脚である。本研究における変断面橋脚の設計手順は、橋脚基部に適用する構造パラメータ

より一次設計を行い、橋脚基部の断面寸法、橋脚全体の高さ、作用軸力等を求め、その後に変断面部の板厚を定めることで、変断面部の断面寸法が求まる。また、準静的解析に用いる変断面橋脚モデルは図-2(b)となり、局部座屈が生じる基部および変断面部周辺にシェル要素を適用し⁷⁾、残りの部分にははり要素を適用する。断面は、シェル要素は図-3(a)の補剛箱形断面を用い、はり要素は図-3(b)の等価無補剛箱形断面を用いており²⁾、本研究では図中の断面の幅 B および高さ D_w が等しいとしている。ダイアフラムは、断面変化点および上下の断面の区間それぞれに対して縦横比 $\alpha = 1.0$ のピッチで設置する。また、構造と荷重の対称性から1/2モデルとして解析を行う⁸⁾。

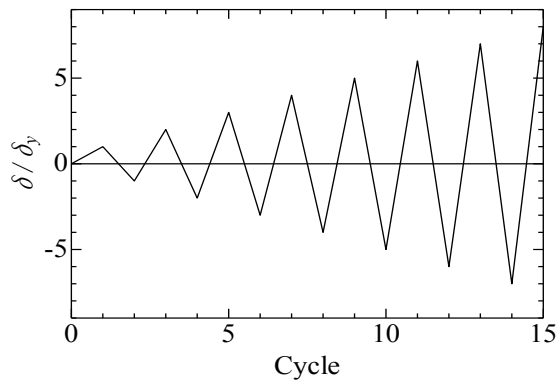


図-4 漸増繰り返し載荷パターン

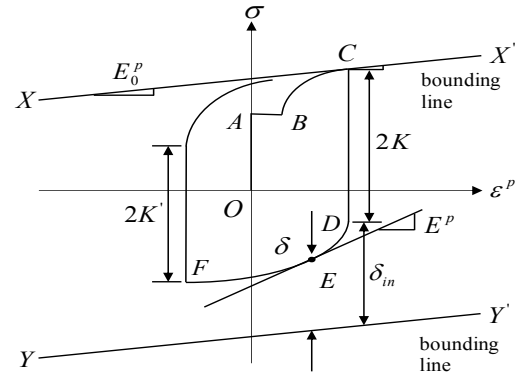


図-5 修正2曲面モデル

表-2 解析モデルの諸元

No.	R_1	$\overline{\lambda}_1$	γ/γ^*	α	h (mm)	b_1 (mm)	t_1 (mm)	b_{s1} (mm)	P/P_{y1}	H_y (MN)	δ_y (mm)
Case1	0.30	0.30	3.0	1.0	4023	875	20	172	0.17	1.57	15.23
Case2	0.35				4741	1021		178	0.18	1.79	18.14
Case3	0.40				5460	1167		184	0.18	2.02	21.06
Case4	0.45				6178	1313		190	0.18	2.23	23.91
Case5	0.50				6895	1459		195	0.17	2.38	26.09
Case6	0.30	0.40			5364	875		172	0.14	1.23	28.27
Case7	0.35				6322	1021		178	0.14	1.41	33.70
Case8	0.40				7280	1167		184	0.14	1.58	39.13
Case9	0.45				8237	1313		190	0.14	1.75	44.44
Case10	0.50				9194	1459		195	0.14	1.87	48.51
Case11	0.30	0.50			6705	875		172	0.11	1.01	45.40
Case12	0.35				7902	1021		178	0.11	1.16	54.14
Case13	0.40				9099	1167		184	0.12	1.30	62.88
Case14	0.45				10296	1313		190	0.12	1.44	71.41
Case15	0.50				11492	1459		195	0.11	1.54	77.96

(2) 材料定数

材料定数は表-1に示されており、鋼材はSM490としている。ここで、 σ_y =降伏応力、 E =弾性係数、 ν =ポアソン比である。

(3) 構成則および載荷パターン

載荷パターンは図-4に示す漸増繰り返し載荷、構成則は文献³⁾⁵⁾と同様に、図-5に示す修正2曲面モデルを用いる。

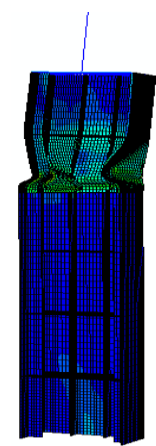
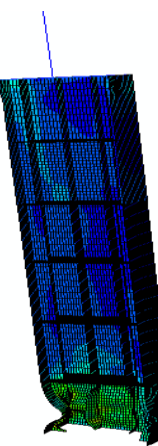
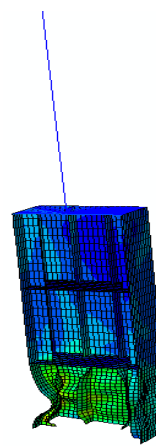
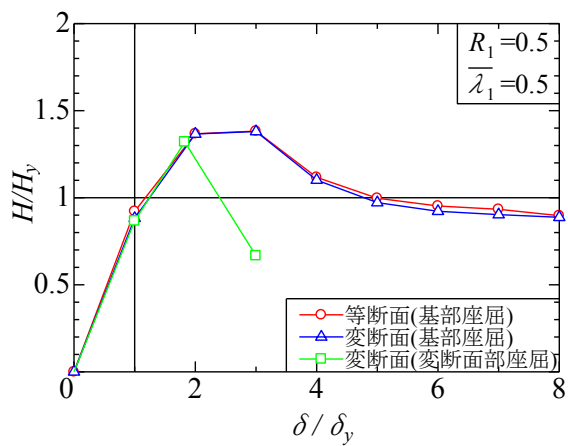
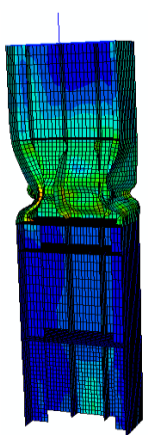
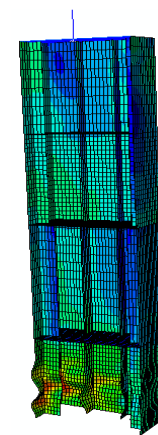
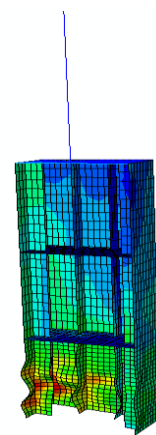
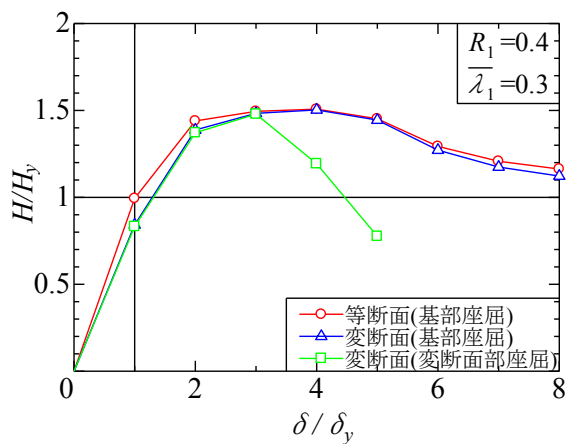
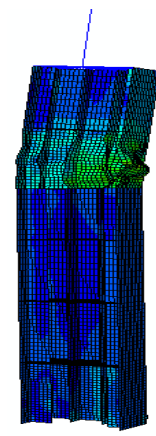
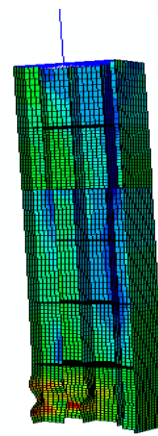
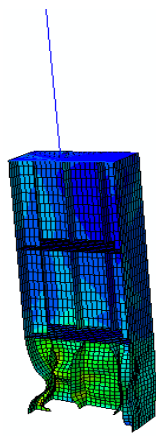
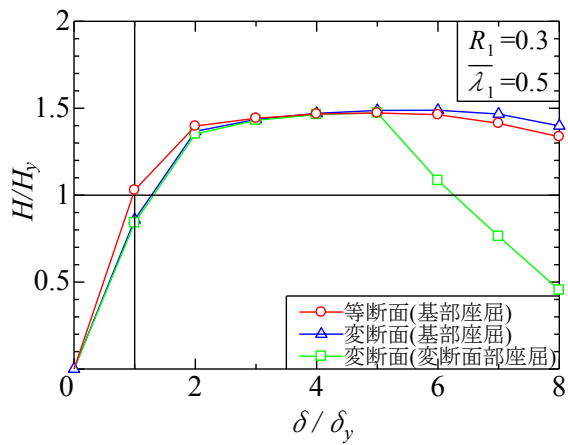
(4) 解析モデルの諸元

表-2に解析モデルの諸元を示す。表中は橋脚基部に適用、またはそれらをもとに行った一次設計より得られた結果（基部のパラメータは添字に1と表記）を示しており、 R =幅厚比パラメータ、 $\bar{\lambda}$ =細長比パラメータ、 γ/γ^* =補剛材剛比（ γ^* =線形座屈理論から求められる必要最小剛比）、 α =縦横比、 h =橋脚全体の高さ、 t =断

面全体の板厚、 b_s =補剛材幅、 P/P_y =軸力比（ P =軸圧縮力、 P_y =全断面降伏軸力）、 H_y =降伏水平荷重、 δ_y =降伏変位である。主要な構造パラメータの変動範囲として、基部の幅厚比パラメータおよび細長比パラメータが0.3～0.5となっており、このような各パラメータの範囲は耐震設計において実用的な範囲であると考えられる。

4. 座屈箇所が耐震性能に及ぼす影響

この章では、変断面橋脚における座屈箇所が耐震性能に及ぼす影響について検討する。例として、異なる幅厚比または細長比パラメータを用いて設計を行った変断面モデルおよび比較に用いる等断面モデルの履歴曲線の包絡線および座屈モードを図-6に示す。各例において図-6(a)の包絡線を見ると、図-6(b)の座屈モードのうち、基部で座屈が生じた変断面モデルは同じく基部で座屈が生



(a) 水平荷重－水平変位曲線の包絡線

(b) 座屈モード

図-6 座屈箇所が耐震性能に及ぼす影響

じた等断面モデルに近い履歴特性を示しており、同等の耐震性能を有しているといえる。一方、変断面部で座屈が生じた変断面モデルは等断面モデルと比べて最大荷重後の荷重低下の勾配が大きく、基部で座屈が生じた場合と比べて耐震性能が大きく低下することがわかる。また、

変断面部に着目すると、基部で座屈が生じたモデルと比べて変断面部で座屈が生じたモデルの方が薄肉であることから、変断面橋脚における過度な経済性の追求は、変断面部での座屈を引き起こし、耐震性能の低下に繋がるといえる。

表-3 解析結果

No.	R_1	$\overline{\lambda}_1$	t_1 (mm)	2SM		M-KH	
				R_2	t_2 (mm)	R_2	t_2 (mm)
Case1	0.30	0.30	20	0.48	12.6	0.50	12.2
Case2	0.35			0.55	12.9	0.58	12.3
Case3	0.40			0.62	13.0	0.67	12.3
Case4	0.45			0.70	13.0	0.74	12.5
Case5	0.50			0.77	13.1	0.80	12.7
Case6	0.30	0.40		0.49	12.4	0.51	12.1
Case7	0.35			0.56	12.7	0.59	12.2
Case8	0.40			0.63	12.7	0.67	12.2
Case9	0.45			0.71	12.8	0.74	12.4
Case10	0.50			0.78	12.9	0.82	12.5
Case11	0.30	0.50		0.50	12.1	0.51	11.8
Case12	0.35			0.57	12.3	0.60	11.7
Case13	0.40			0.64	12.5	0.69	11.7
Case14	0.45			0.72	12.5	0.76	11.9
Case15	0.50			0.80	12.6	0.82	12.3

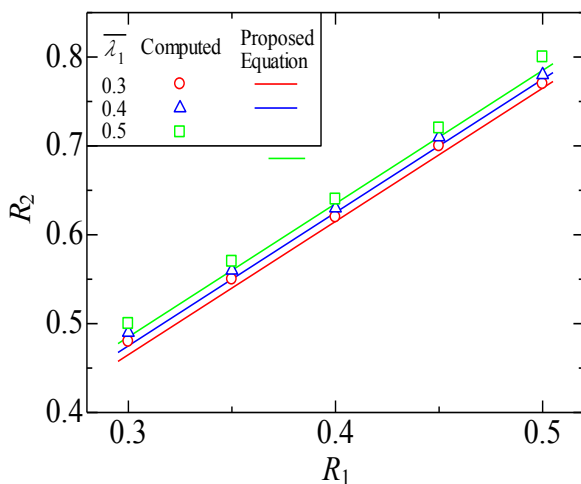
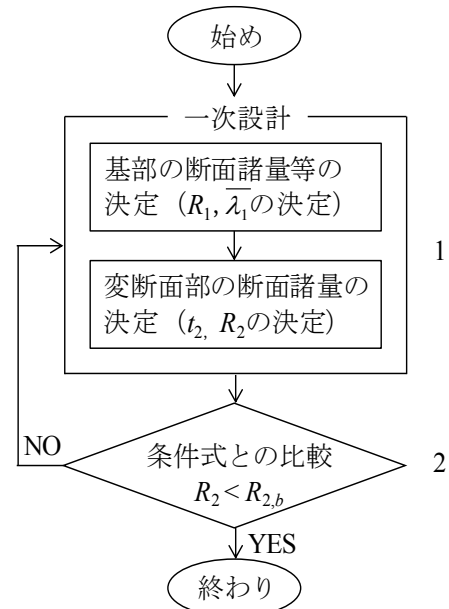
図-7 解析結果の R_1 - R_2 関係および近似直線

図-8 条件式を用いた設計法

5. 解析結果

表-3に変断面部の板厚 t_2 を増減させて行った変断面モデルの準静的解析の結果を示す。表中において、本研究で用いた修正2曲面モデル（2SM）の他に比較としてバイリニア型応力ひずみ関係に移動硬化則（B-KH）を適用した構成則を用いたときの結果も示しており、 t_2 は基部で座屈が生じるときの変断面部の板厚の最小値、 R_2 はそのときの変断面部の幅厚比パラメータを示している。表より、 R_1 が大きくなるに従い R_2 も大きくなり、また、細長比パラメータの変化が R_2 に及ぼす影響は軽微であるといえる。さらに、構成則による解析結果の比較を行う

と、全てのケースで修正2曲面モデルの方が移動硬化則に比べて R_2 が若干小さくなり、後述する条件式の提案において修正2曲面モデルより得られた結果を基に提案した条件式は、同様に移動硬化則より提案した条件式に比べて安全側となることがわかる。

6. 変断面部で座屈が生じない条件式

条件式の作成にあたっては、基部の構造パラメータである R_1 および $\bar{\lambda}_1$ を用いて変断面部の幅厚比パラメータ R_2 の式として提案する。図-7に表-6における各ケースの

R_1 と修正2曲面モデルを用いて得られた R_2 の値をプロットしたものおよびその近似直線を示す。図中の各近似直線は、平均値直線から標準偏差の2倍を差し引いたもので、全ての解析結果に比べて安全側となるように定めており、細長比パラメータの変動を考慮した条件式を導くと以下ようになる。

$$R_{2,b} = 1.5R_1 + 0.1\bar{\lambda}_1 - 0.014 \quad (1)$$

7. 条件式を用いた設計法

条件式を用いた変断面橋脚の設計法を図-8に示す。また、以下に図-8における各プロセスについての内容を示す。

1. 一次設計により橋脚基部および変断面部の断面諸量等を決定する。この過程で条件式との比較に用いる R_1 、 $\bar{\lambda}_1$ および R_2 が定まる。
2. プロセス1より得られた R_2 と条件式 $R_{2,b}$ の比較を行う。 R_2 が $R_{2,b}$ を上回ると変断面部で座屈が生じると考えられるため再び設計を行う必要があるが、条件式を下回れば等断面橋脚と同等の耐震性能を有し、かつ経済性の高い変断面橋脚であるといえる。

8. あとがき

本研究では、補剛箱形等断面鋼製橋脚に比べて耐震性や経済性で優位な補剛箱形変断面鋼製橋脚の設計条件に関して解析的に検討した。以下に得られた結論を示す。

1. 本研究により、主要な構造パラメータの変動を考慮した補剛箱形変断面鋼製橋脚の変断面部で座屈しな

い条件式を提案できたといえる。

2. 条件式を設計法に取り入れることで、Pushover解析のような簡易解析を用いることなく補剛箱形変断面鋼製橋脚の座屈位置および耐震性能の低下の有無を容易に知ることができる。

参考文献

- 1) 天野麻衣, 葛西昭, 宇佐美勉, 葛漢彬, 岡本真悟, 前野裕文: コンクリート部分充填鋼製橋脚の弾塑性挙動に関する実験的および解析的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.44A, pp.179-188, 1998.
- 2) 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H. P. Mamaghani, 葛漢彬: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No.525/I-33, pp.69-82, 1995.
- 3) 葛漢彬, 宇佐美勉, 高聖彬: 鋼製補剛箱形断面橋脚の繰返し弾塑性挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.46A, pp.109-118, 2000.
- 4) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉: 鋼構造物の繰返し弾塑性解析用構成則の実験データによる検証, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.44A, pp.201-210, 1998.
- 5) Usami, T., Gao, S. B. and Ge, H. B.: Elastoplastic analysis of steel members and frames subjected to cyclic loading, Engineering Structures, Vol.22, No.2, pp.135-145, 2000.
- 6) 中村佳昭, 葛漢彬: 補剛箱形変断面鋼製橋脚の変断面部で座屈しない条件に関する一検討, 平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 土木学会, I-31, pp.61-62, 2012.
- 7) 永松寿隆, 山口栄輝, 久保喜延, 南野能克: 鋼製円形変断面橋脚の有限要素解析における要素分割, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, I-028, pp.55-56, 2002.
- 8) 後藤芳顕, 山口栄輝, 濱崎義弘, 磯江暁, 野中哲也, 林正挙: 鋼製円形変断面橋脚の耐震性評価に関する解析的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.45A, pp.197-205, 1999.

NUMERICAL STUDY ON OPTIMUM DESIGN OF STEEL BRIDGE PIERS WITH VARIABLE STIFFENED BOX SECTIONS

Yoshiaki NAKAMURA and Hanbin GE

The present paper is aimed at proposing a conditional expression of avoiding local buckling in part of variable sections for steel bridge piers with variable stiffened box sections. For bridge piers with two-steps variable sections, seismic performance of structures becomes lower because of occurring buckling in part of variable sections compared with those with uniform sections. Base on this, a conditional expression for avoiding buckling in part of variable sections is proposed considering fluctuations of structural parameters from results of quasi-static analysis performed on steel bridge piers with variable stiffened box-sectional models. The analytical results show that the positions of buckling and whether seismic performance will be lower or not for steel bridge piers with variable stiffened box sections can be evaluated easily by adopting the proposed conditional expression.