

I-65 B_1/B_2 法を用いた半剛結構移動骨組柱の断面力評価

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 名古屋工業大学 正員 後 藤 芳 顕
 室蘭工業大学 正員 小 室 雅 人
 室蘭工業大学 学生員 横 地 和 彦

1. はじめに

現在、構造物の設計方法に関する考え方は限界状態設計法が主流となりつつある。既に欧米では、鋼構造物に関して限界状態設計法に基づいた設計指針が用いられており、我が国でもその作業が進められている。限界状態設計法の一つである AISC-LRFD の設計基準¹⁾では、安全性照査のための断面力の算定には幾何学的非線形を考慮することが規定されている。近年、幾何学的非線形を考慮した弾性二次解析法等の高度な構造解析手法に関する研究が盛んに行われている。しかしながら、これらの手法は膨大な計算量と、設計者にある程度の知識を必要とすることから、実設計への適用には時間を要するものと考えられる。

一方、線形弾性解析法を基本とした B_1/B_2 法¹⁾は、簡易に幾何学的非線形を考慮して断面力を算定できることから、鋼平面骨組の設計に広く用いられている。しかしながら、この方法は、現在梁-柱接合部が剛結接合の場合にのみ適用可能となっている。近年、この方法を半剛結接合骨組柱の断面力算定に適用する研究が行われており、Barakat-Chen が B_1/B_2 法と beam-line 法を組み合わせた手法を提案している²⁾。この手法では B_1, B_2 係数に含まれる柱の有効座屈長係数 (K 値) を接合部の割線剛性を用いて評価している。しかしながら、後藤等の研究^{3), 4)}によると、分岐後も接合部が載荷状態にあることが明らかになっていることより、 K 値は接合部接線剛性を用いて評価しなければならないものと考えられる。

本論文では、半剛結接合骨組柱に対しても剛結接合骨組柱と同様に B_1/B_2 法を適用し断面力を適切に算定評価する方法を確立することを目的として、接合部剛性を非線形曲線として評価する場合と、beam-line 法により線形にモデル化する場合に対し、 B_1/B_2 法を用いる方法と B_2 係数のみを考慮する方法を組み合わせた4手法について検討を行った。解析は一層一径間骨組と二層一径間骨組について行い、載荷荷重や接合部剛性を変化させた場合の各手法の妥当性を弾性二次解析結果との比較により検討している。なお、 B_1, B_2 係数に含まれる K 値の算定には、接合部接線剛性を用いることとし、弾性二次解析には幾何学的非線形を考慮した剛性方程式と、接合部の非線形な剛性特性を組み合わせた構造解析アルゴリズム⁵⁾を用いている。

2. B_1/B_2 法

B_1/B_2 法は、図-1に示されるように、与えられた荷重状態に対する骨組を横拘束骨組と横移動骨組に対する載荷状態の合成と考える方法である。各骨組の弾性一次解析による曲げモーメント値をそれぞれ M_{nt} , M_{lt} とすると、幾何学的非線形を考慮した曲げモーメント値 M_u は次式のように示される。

$$M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt} \quad (1)$$

ここで、

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - P_u/P_{ek}} \geq 1.0 \quad (2)$$

$$B_2 = \frac{1}{1 - \Sigma P_u \Delta_0 / \Sigma H L} \quad (3)$$

$$\text{または、} \frac{1}{1 - \Sigma P_u / \Sigma P_{ek}} \quad (4)$$

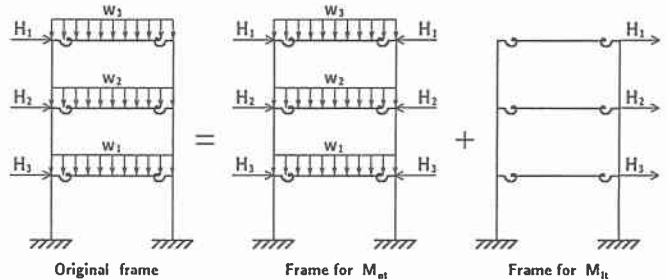


図-1 骨組構造の分解の模式図

P_u	: 着目している柱の作用軸力	ΣH	: Δ_0 を生成する全層の水平力の総和
ΣP_u	: 層の柱に作用する軸力の総和	L	: 着目している層の高さ
P_{ek}	: 着目している柱のオイラーの座屈荷重	C_m	: $0.6 - 0.4 M_A/M_B$
Δ_0	: 着目している層の水平方向変位量		
M_A/M_B	: 着目している柱材の両端の材端モーメントの比 ($M_A < M_B$)		

B_2 係数の算定法には、式 (3), (4) の2つの方法が存在するが、本研究では断面力算定後の部材照査の簡易性を考慮し、 K 値を含む式 (4) を用いることとした。なお、本解析は分岐問題であることより、 K 値算定時には風荷重を無視することとした。

3. K 値の算定

半剛結接合骨組柱の K 値算定のための固有値方程式の定式化^{6),7)}は、alignment chart 過程⁸⁾と接合部に線形スプリングを導入することにより行っている。半剛結接合骨組柱に alignment chart 過程を適用するための主な修正点は以下の通りである。

- (1) 後藤等の研究成果⁴⁾に基づき、梁の材端に座屈時の接合部接線剛性を有する線形スプリングを導入する。
- (2) 載荷荷重は、接合部接線剛性評価時以外には無視する。
- (3) 部分構造モデルの梁-柱接合部が剛結接合以外の場合には、(1)によって規定された線形スプリングによる相対回転角を考慮し、梁および柱の撓角撓度式を修正する。

図-2 (a), (b) に $c2$ 柱の K 値を求める場合の alignment chart 過程に基づいた剛結横拘束、横移動骨組の部分構造モデルを示す。 $c2$ 柱の B 端がピンあるいは固定支持され $c3$ 柱が存在しない場合は、図-3 (a), (b) に示すような部分構造モデルを考え、固有値方程式を誘導している。

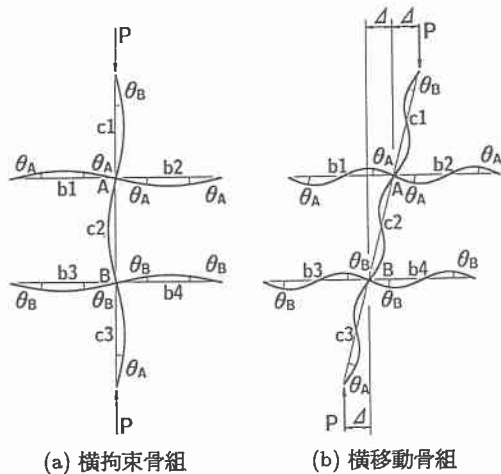


図-2 部分構造モデル

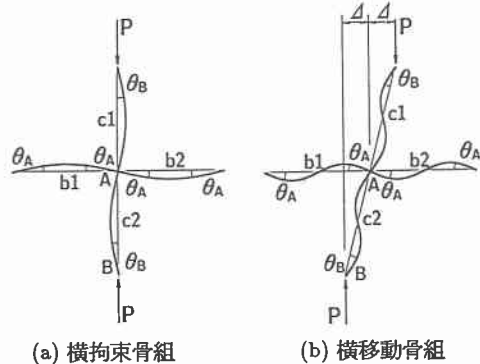


図-3 部分構造モデル ($c1$, $c2$ 柱のみ存在)

4. 接合部剛性特性の評価

本研究では、以下に示す2種類の方法で接合部剛性特性の評価を行うこととした。

1) 非線形曲線により評価する方法：

実状に即して、接合部剛性に非線形な $M-\theta_r$ 曲線を導入し、弾性一次解析を行う方法である。 K 値算定のための接線剛性は、微小変位理論に基づいた剛性方程式と接合部の非線形な剛性特性を組み合わせた方法により直接算定している。

2) 線形にモデル化する方法：

本研究では、接合部剛性特性の評価をより簡易に

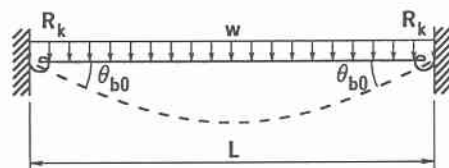


図-4 梁材のモデル化

行うために、beam-line 法により接合部の剛性特性を線形にモデル化することを試みている。beam-line 法は、図-4 に示すような曲げ剛性 EI の梁材に等分布荷重 w が作用した場合に、梁の材端モーメント M と材端回転角 θ_r には線形関係が成立することを利用したものである。梁の材端モーメント M と材端回転角 θ_r には次式の関係が成立する。

$$M = \frac{wL^2}{12} \left(1 - \frac{\theta_r}{\theta_{b0}} \right) \quad (5)$$

ここで、

θ_{b0} : 両端ピン支持の材端回転角 ($wL^3/24EI$)

L : 部材長

図-5 に示されるように、式 (5) による beam-line と非線形な $M-\theta_r$ 曲線を重ね合わせることで、両者の交差する点 A が接合部モーメント M および相対回転角 θ_r を意味する。従って、原点と点 A を結んだ直線の傾きが割線剛性 (R_{ks})、点 A における曲線の接線の傾きが接線剛性 (R_{kt}) となる。このように得られた割線剛性、接線剛性はそれぞれ弾性一次解析および K 値の算定時に用いられる。

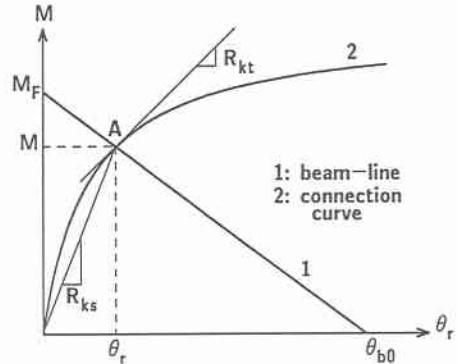


図-5 非線形な $M-\theta_r$ 曲線と beam-line

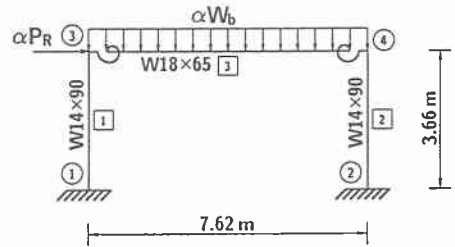
5. 数値解析のための仮定

本研究では図-6 に示すような2種類の半剛結接合骨組について検討を行った。図中に各骨組の部材番号、節点番号、形状寸法および各部材の使用形鋼を示している。また、奥行き中心間隔は 7.62 m としている。本研究では、AISC-LRFD の設計基準に従うこととしているため、形鋼の呼称については同設計基準に従っている。断面力算定のための基本荷重強度は、死荷重 (D): 3.256 kPa、活荷重 (L): 1.915 kPa、風荷重 (W): 0.958 kPa と設定し、係数倍荷重載荷時を想定していることより、 $1.2D + 0.5L + 1.3W$ の組み合わせ荷重を用いている。従って、各梁に作用する等分布荷重 W_b は 37.07 kN/m、風荷重による水平方向集中荷重は $P_R = 17.37$ kN、 $P_F = 34.73$ kN となる。

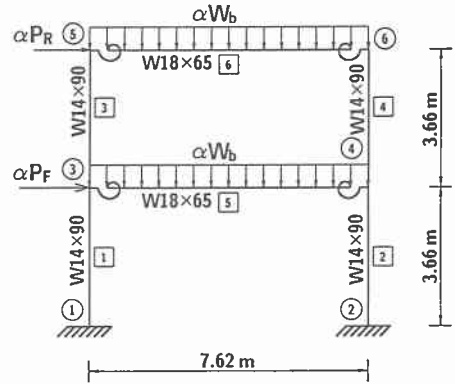
本研究では載荷荷重を変化させた場合の各手法の妥当性について検討を行うため、基本荷重に荷重係数 α ($0.1 \leq \alpha \leq 2.0$) を乗じ、載荷荷重を変化させている。

半剛結接合部の非線形な剛性特性の評価は、著者等によって提案されている三要素パワーモデル⁹⁾を用いている。このモデルは接合部初期剛性 R_{ki} 、限界曲げ耐力 M_{uc} 、及び形状指数 n の3つのパラメータから構成されるもので、無次元化した接合部モーメント m および接合部接線剛性 r は次式のように示される。

$$m = \frac{\theta}{(1 + \theta^n)^{1/n}}, \quad r = \frac{1}{(1 + \theta^n)^{(n+1)/n}} \quad (6), (7)$$



(a) 一層一径間骨組



(b) 二層一径間骨組

図-6 解析に用いた骨組

ここで、

- m

:

無次元接合部モーメント = M/M_{uc}
- r

:

無次元接合部接線剛性 = R_{kt}/R_{ki}
- M

:

接合部モーメント
- R_{kt}

:

接合部接線剛性
- θ

:

無次元相対回転角 = θ_z/θ_0
- θ_z

:

接合部相対回転角
- θ_0

:

塑性回転角 = M_{uc}/R_{ki}

本解析では、3つのパラメータのうち、限界曲げ耐力 M_{uc} を梁の塑性曲げモーメント ($M_p=541.2 \text{ kNm}$) に等しくとり、形状指数 n は 1 としている。また、接合部初期剛性 R_{ki} に関しては、梁の曲げ剛性を用いて次式のように無次元化することとし、

$$\rho^* = \frac{EI_b}{L_b R_{ki}}$$

(8)

$\rho^* = 0.001, 0.2, 2.0$ と変化させることにより、代表的な3つの接合状態(剛結, 半剛結, ピン接合)を想定して、解析を行っている。図-7 に各 ρ^* に対する半剛結接合部の非線形な $M - \theta_r$ 曲線を示している。

本研究では、断面力算定法として、従来の B_1/B_2 法に加え、半剛結接合骨組では横移動骨組成分が卓越するとして、 B_2 係数のみを考慮する方法についても検討を行うこととした。この手法は与えられた骨組に対して弾性一次解析を行い、得られた曲げモーメントに B_2 係数を乗じることにより部材曲げモーメントを求めるものである。表-1 に本解析で検討する解析手法の一覧を示す。

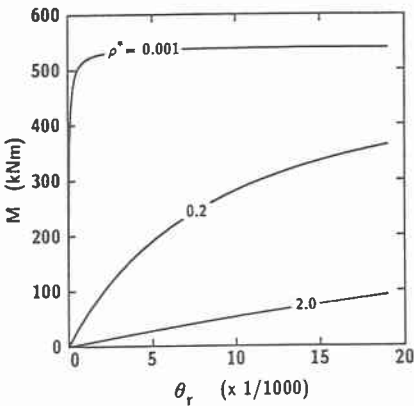


図-7 解析に用いた $M-\theta_r$ 曲線

表-1 解析手法一覧

	接合部の剛性評価	M_u の算定方法
手法1	実状に即して非線形に評価する	従来の B_1/B_2 法を用いる
手法2		B_2 係数のみを用いる
手法3	beam-line 法により	従来の B_1/B_2 法を用いる
手法4	線形にモデル化する	B_2 係数のみを用いる

6. 数値解析結果

本解析では、4手法により求められた部材曲げモーメントと、弾性二次解析による結果 (M_{exact}) との比をとる形で各手法の妥当性の検討を行うこととした。すなわち、その比が1.0に近いほど両者の差は小さく、1.0より大きければ安全側の値を、逆に小さければ危険側の値を与えることを意味している。なお、本研究では設計時に必要となる各部材の最大曲げモーメントにのみ着目して結果を整理している。

図-8 に一層一径間骨組の結果を示す。図は縦軸に無次元部材曲げモーメント m^* 、横軸に荷重係数 α をとって整理している。また、併せて α に対する M_{exact} の分布も示している。なお、図に示している数値は $\alpha = 2.0$ のときの M_{exact} である。図 (a) より、 $\rho^* = 0.001$ の場合 (剛結接合に近い場合) には4手法とも α に関わらず m^* は 1.0 近傍に分布しており、良い結果が得られていることがわかる。一方、図 (b), (c) より $\rho^* = 0.2$ と 2.0 の場合には α の増大とともに4手法とも誤差が増大する傾向がみられる。しかしながら、その誤差は $\alpha = 2.0$ においても 5 % 以内であり、4手法とも工学的には十分適用可能であるものと考えられる。

図-9 に二層一径間骨組の結果を示す。本数値解析では、全体構造系における固有値解析に基づいて、二層骨組の K 値の最大値は 4 であることを考慮し、 B_2 係数算定時には、その最大値を 4 として解析を行っている。図 (a) より $\rho^* = 0.001$ の場合には一層一径間骨組の場合と同様、 α に関わらず4手法とも m^* は 1.0 付近に分布していることがわかる。一方、図 (b) より $\rho^* = 0.2$ の場合には α の増大とともに各手法と

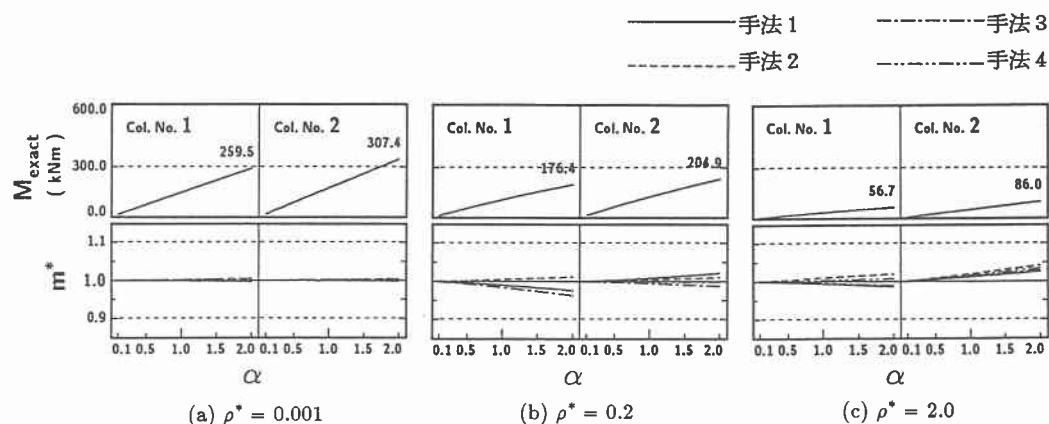


図-8 一層一径間骨組における解析結果

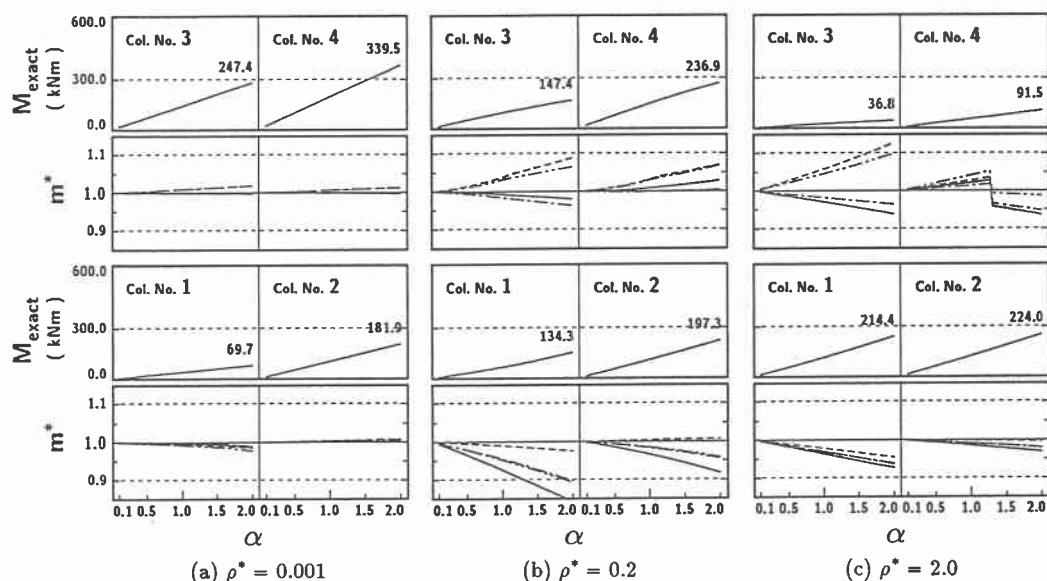


図-9 二層一径間骨組における解析結果

も M_{exact} に対する誤差が大きくなる傾向が見られる。特に風荷重を受ける側の柱（柱番号1および3）で顕著に表れている。また、全体として一層目の柱においては危険側の値を、二層目の柱においては安全側の値を示す傾向にあることがわかる。特に柱番号1（風荷重を受ける側の一層目の柱）においては4手法とも過小評価しており、手法1では15%以上の誤差が生じている。図(c)より $\rho^* = 2.0$ においても、 $\rho^* = 0.2$ の場合と同様、 α の増大とともに誤差は増大し、特に風荷重を受ける側の柱の誤差が大きくなっている。また、一層目の柱は過小評価、二層目の柱においては安全側の値を示す傾向にあることも $\rho^* = 0.2$ の場合と同様である。特に柱番号3（風荷重を受ける側の二層目の柱）で、手法2が10%以上の誤差を示している。しかしながら、一般に骨組構造物は左右対称に設計されることより、部材断面力の大きい方の柱（柱番号2および4）に対して照査が行われる。したがって、それらの柱における各手法の誤差がいずれも10%以内にあることを考慮すると、4手法とも工学的には適用可能であるものと考えられる。また $\rho^* = 2.0$ の場合の柱番号4において m^* が不連続となっているが、これは部材曲げモーメントの着目点が反転したことによるものである。

4手法を従来の B_1/B_2 法を用いる手法(手法1と3)および B_2 係数のみを用いる手法(手法2と4)の2つに分けて考察すると、 B_2 係数のみを用いる手法の方が、従来の B_1/B_2 法を用いる手法よりも安全側の値を示す傾向にあることがわかる。特に手法4は接合部剛性特性を線形に簡易化しており、横拘束骨組の解析も不要であることから、効率的かつ工学的に安全な手法であると考えられる。

7. まとめ

本論文では、半剛結接合骨組柱に対しても剛結接合骨組と同様に B_1/B_2 法を適用し断面力を適切に算定評価する方法を確立することを目的として、接合部の剛性を非線形曲線により評価する場合と、beam-line法により線形にモデル化する場合に対し、 B_1/B_2 法を用いる方法と B_2 係数のみを考慮する方法を組み合わせた4手法によって断面力の算定を試みた。数値解析は、一層一径間骨組と二層一径間骨組について行い、載荷荷重や接合部剛性を変化させた場合の各手法の妥当性を弾性二次解析による結果と比較することにより検討している。

その結果、一層一径間骨組の場合もしくは接合部剛性が大きい場合には4手法とも弾性二次解析に対する誤差が小さく良い結果を与えることが明らかになった。一方、二層一径間骨組において接合部の剛性が小さい場合には、荷重の増大とともに各手法とも誤差が大きくなり、一層目の柱では危険側の値を示す傾向にある。特に風荷重を受ける側の柱でその傾向が顕著である。しかしながら、骨組構造物は対称に設計され、各層とも断面力の大きな部材に対して照査が行われることを考慮し、それらの柱における各手法の誤差が10%以内にあることより、4手法とも工学的に十分適用可能であるものと判断される。また、 B_2 係数のみを用いる手法は横拘束骨組の解析が不要であり、従来の B_1/B_2 法と比較して安全側の値を示すことから、効率的かつ安全な手法と言える。特に接合部を線形にモデル化し、かつ B_2 係数のみ考慮する手法は、今回解析を行った手法の中で最も簡易であり、工学的に有効な手法と考えられる。

参考文献

- 1) American Institute of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Buildings 2nd Edition, Chicago, IL., 1993.
- 2) Barakat, M. and Chen, W.F. : Design Analysis of Semi-Rigid Frames: Evaluation and Implementation, Engineering Journal, 2nd Qtr., pp.55-64, 1991.
- 3) 後藤芳顕, 鈴木五月, 松浦 聖 : はりと柱の結合部に非弾性特性を有する半剛結矩形骨組の安定性に関する一考察, 土木学会論文集, 416 / I-13, pp.329-338, 1990.
- 4) Goto, Y., Suzuki, S. and Chen, W.F. : Stability behaviour of semi-rigid sway frames, Engineering Structures, 15, 3, pp.209-219, 1993.
- 5) Goto, Y. and Chen, W.F. : On the computer-based design analysis for the flexibly jointed frames, Journal of Construction Steel Research, Special Issue on Joint Flexibility in Steel Frames (W.F. Chen Ed.), 8, 202-231, 1987.
- 6) 岸 徳光, 後藤芳顕, W.F. Chen, 小室雅人 : 半剛結横拘束骨組柱の有効座屈長係数算定法, 鋼構造年次論文報告集, 日本鋼構造協会, Vol.3, pp.53-60, 1995.
- 7) 岸 徳光, 後藤芳顕, 小室雅人 : 半剛結横移動骨組柱の有効座屈長係数の算出方法について, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.41A, pp.153-162, 1995.
- 8) Chen, W.F. and Lui, E.M. : Stability design of steel frames, CRC Press, Inc., 1991.
- 9) Chen, W.F. and Kishi, N. : Semi-rigid steel beam-to-column connections : Data base and modeling, Journal of Struct. Engrg., ASCE, 116(ST7), pp.1813-1834, 1990.