

I-63 半剛結横移動骨組柱の耐力照査に関する一検討

室蘭工業大学 正員 小室 雅人
 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 松岡 健一

1. はじめに

鋼構造に関する AISC-LRFD の設計基準¹⁾では、接合部の剛性レベルにより、構造形式を剛結接合構造と半剛結接合構造に分類し、終局限界状態における断面力の算定には、幾何学的非線形を考慮することが規定されている。剛結接合骨組に関しては、終局限界状態における断面力の算定法(線形弾性解析法による B_1/B_2 法¹⁾)や耐力照査に必要な有効座屈長係数(以後、 K 値と呼ぶ)の算定法(alignment chart 法²⁾)が規定されている。しかしながら、半剛結接合骨組に関しては、具体的な設計方法の提示がなく、現時点では設計が不可能な状態となっている。

このような観点より、著者等は半剛結接合骨組を合理的に設計するために種々の検討を行ってきた^{3)~8)}。その結果、接合部の非線形な剛性特性の評価法、幾何学的非線形を考慮した断面力・変形量の算定法、接合部の非線形な剛性特性を考慮した K 値の算定法等を提案している。また、EWS を用いることを基本として、これらの成果を組み合わせるにより、剛結接合骨組と同様な設計概念に基づいた半剛結接合骨組の断面設計システムを開発している⁹⁾。

一方、著者等はより簡易に部材断面力を算定評価するために、剛結接合骨組柱に対して利用可能な B_1/B_2 法の半剛結接合骨組柱への適用性に関する研究も行っている¹⁰⁾。

本研究では、断面力の算定のみならず部材の耐力照査までを含めたより簡易な半剛結接合骨組柱の設計手法の確立を目的として、接合部の剛性特性を実状に即した非線形曲線により評価する手法と beam-line 法により線形にモデル化する手法に加え、断面力算定法として、従来からの B_1/B_2 法と半剛結接合骨組では横移動骨組成分が卓越すると考え B_2 係数のみを考慮する方法を組み合わせた4手法の適用性について数値解析的に検討を行った。数値解析は一層一径間骨組および二層一径間骨組の2種類の骨組について行い、前述の断面設計システムによる結果と比較することにより、各手法の適用性を検討している。なお、本研究では特に横移動骨組に対して検討を行うものとする。

2. 耐力照査手順

本研究では、AISC-LRFD の設計基準に基づき、剛結接合骨組柱に対する照査手順と同様に半剛結接合骨組柱の耐力照査を試みる。図-1にそのフローチャートを示す。図中の*は、剛結接合骨組柱における部材照査の流れを示している。以下、その手順内容を説明する。

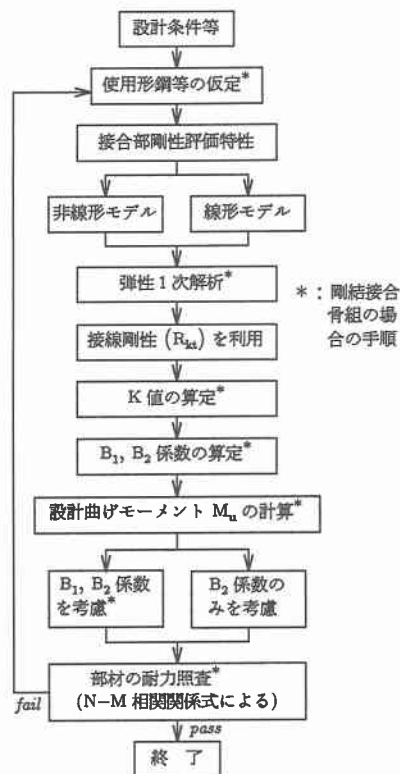


図-1 部材照査の流れ

1) 接合部剛性特性のモデル化：

本研究では、接合部剛性特性のモデル化として、実際の挙動に即した非線形曲線により評価する方法 (model1) と beam-line 法により線形にモデル化する方法 (model2) の2種類を仮定している。図-2に接合部剛性特性のモデル化の概略を示す。

2) 有効座屈長係数 (K 値) の算定：

K値算定に関しては、著者等によって提案されている手法^{7),8)}を用いて評価することとした。この手法は alignment chart 過程に基づき、接合部剛性を考慮できるように修正したものである。本研究では、前述の model1 に関しては弾性1次解析により、model2 に関しては beam-line 法により求められる接線剛性 (R_{kt}) を用いてK値を算定している。なお、本研究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) 部材曲げモーメント M_u の計算：

部材曲げモーメント M_u は、 B_1/B_2 法により算定することとした。本研究では、従来からの B_1 、 B_2 係数を用いる方法の他、半剛結接合骨組では横移動骨組成分が卓越すると考え B_2 係数のみを使用する方法の2種類について計算している。各手法の一般式を以下に示す。

$$M_u = B_1 \times M_{ms} + B_2 \times M_H \tag{1a}$$

$$M_u = B_2 \times M^* \tag{1b}$$

ここで、 B_1 、 B_2 ：部材の P- δ 、P- Δ 効果を考慮するための係数、 M_{ms} 、 M_H ：弾性1次解析による横拘束、横移動骨組の断面力、 M^* ：与系骨組における断面力である。従って、本研究では表-1に示すような4種類の設計手法について検討を行った。

4) 部材の耐力照査：

本研究では、AISC-LRFD の設計基準で規定されている以下の式により部材の耐力照査を行う。

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 : \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1.0 \tag{2a}$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 : \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1.0 \tag{2b}$$

ここで、 ϕ_c ：軸圧縮力に関する抵抗係数 (=0.85)、 ϕ_b ：曲げモーメントに関する抵抗係数 (=0.90)、 P_u ：作用軸力、 P_n ：軸圧縮耐力、 M_u ：部材曲げモーメント、 M_n ：部材曲げ耐力である。

3. 数値解析仮定

本研究では図-3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。図中に各骨組の要素番号、節点番号、形状寸法および使用形鋼の呼称を示している。表-2

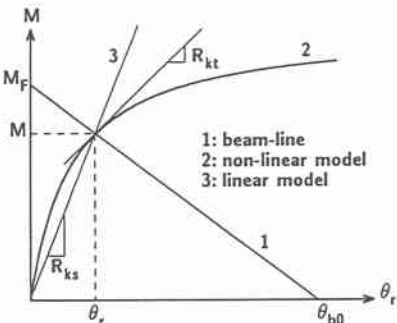
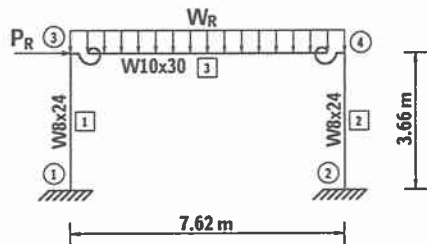


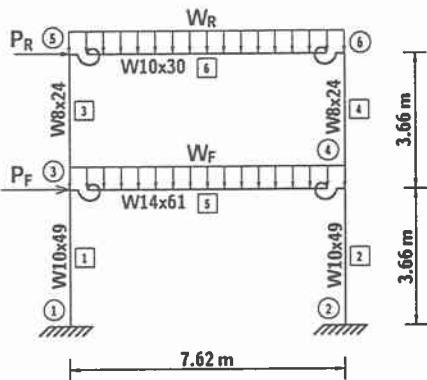
図-2 接合部剛性特性のモデル化

表-1 設計手法一覧

	接合部 剛性特性	M_u
手法1	nonlinear model	B_1/B_2 法
手法2		B_2 係数のみ
手法3	linear model	B_1/B_2 法
手法4		B_2 係数のみ



(a) 一層一径間骨組



(b) 二層一径間骨組

図-3 解析に用いた半剛結接合骨組

表-2 断面諸元一覧

	column		beam	
	W8×24	W10×49	W10×30	W14×61
断面積 A $\times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$	4.57	9.29	5.70	11.5
断面二次 モーメント $\times 10^{-5} \text{ (m}^4\text{)}$	3.45	11.3	7.08	26.6
高さ d (m)	0.201	0.253	0.266	0.353

に使用形鋼の断面諸元を示す。骨組はいずれの場合も奥行き中心間隔は 7.62 m と仮定している。本研究では、各基準荷重強度を表-3 のように設定し、終局限界状態を想定していることより、荷重の組み合わせとして AISC-LRFD の設計基準の 1.2 D + 0.5 L + 1.3 W を採用することとした。表-4 に載荷荷重の一覧を示す。

接合部の非線形な剛性特性の評価には、著者等によって提案されている三要素パワーモデル³⁾を用いることとした。このモデルは限界曲げ耐力 M_{uc} 、接合部初期剛性 R_{ki} および形状指数 n の 3 つのパラメータから構成されるものである。本研究では、このモデルの 3 つのパラメータのうち、限界曲げ耐力 M_{uc} については、梁の塑性曲げモーメント M_p に等しくとり、形状指数 n は $n = 1$ としている。また、初期剛性 R_{ki} に関しては、Bjorhovde の論文¹¹⁾を参考に次式のように無次元化し、

$$\alpha = \frac{E_b I_b}{d R_{ki}} \quad (3)$$

ここで、 E_b : 梁の弾性係数 ($2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$)

I_b : 梁の断面二次モーメント

d : 梁の高さ

α を 2, 5, 10 と変化させている。図-4 に解析に用いた $M - \theta_r$ 曲線を屋根部、床版部に分けて示す。

4. 解析結果および考察

本研究では、提案した 4 手法の照査結果と既存の設計システム⁹⁾による結果 (exact) を比較する形で、その適用性を検討している。なお、部材曲げモーメント M_u とは、部材に作用する二つの材端曲げモーメントのうち大きな曲げモーメントのことである。表-4 は一層一径間骨組の $\alpha = 5$ の場合についての結果を示したものである。表中の ξ

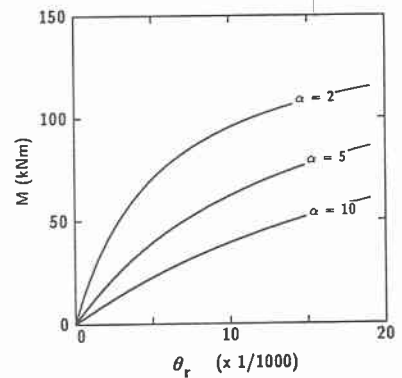
は照査式 (式 (2)) の左辺であり、この値が 1.0 以下であれば柱の耐力照査を満足することを意味している。表より、風荷重が作用する柱 (部材番号 1) よりも風荷重が作用しない柱 (部材番号 2) の ξ が大きいことがわかる。これは、水平方向集中荷重の影響により、部材番号 2 の部材曲げモーメント M_u が、部材番号 1

表-3 基準荷重強度一覧 (kPa)

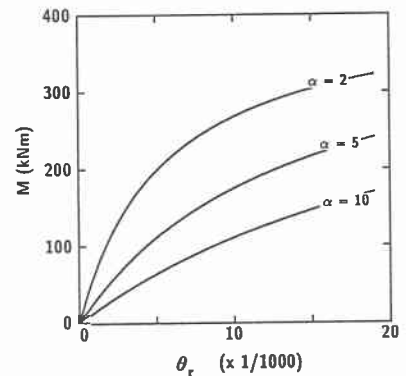
	死荷重 (D)	活荷重 (L)	風荷重 (W)
屋根部	1.92	0.958	0.958
床版部	3.26	0.958	

表-4 載荷荷重一覧

	等分布荷重 $W \text{ (kN/m)}$	集中荷重 $P \text{ (kN)}$
屋根部 R	12.4	17.4
床版部 F	37.1	34.7



(a) 屋根部 (W10×30)



(b) 床版部 (W14×61)

図-4 解析に用いた $M - \theta_r$ 曲線

表-4 一層一径間骨組の照査結果 ($\alpha=5$)

	element no. 1 (windward column)					element no. 2 (leeward column)				
	2nd-order analysis (exact)	1	2	3	4	2nd-order analysis (exact)	1	2	3	4
K	1.348	1.348	1.348	1.374	1.374	1.348	1.348	1.348	1.374	1.374
P_n (kN)	957.2	957.3	957.3	950.9	950.9	957.2	957.3	957.3	950.9	950.9
M_n (kNm)	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4	94.4
P_u (kN)	44.4	44.4	44.4	44.3	44.3	50.1	50.1	50.1	50.2	50.2
M_u (kNm)	19.7	19.1	20.1	18.9	19.5	41.9	42.8	42.3	41.8	42.3
ξ	0.259	0.252	0.264	0.250	0.257	0.524	0.535	0.529	0.523	0.530

ξ : Value of the left side of Eq. (2)

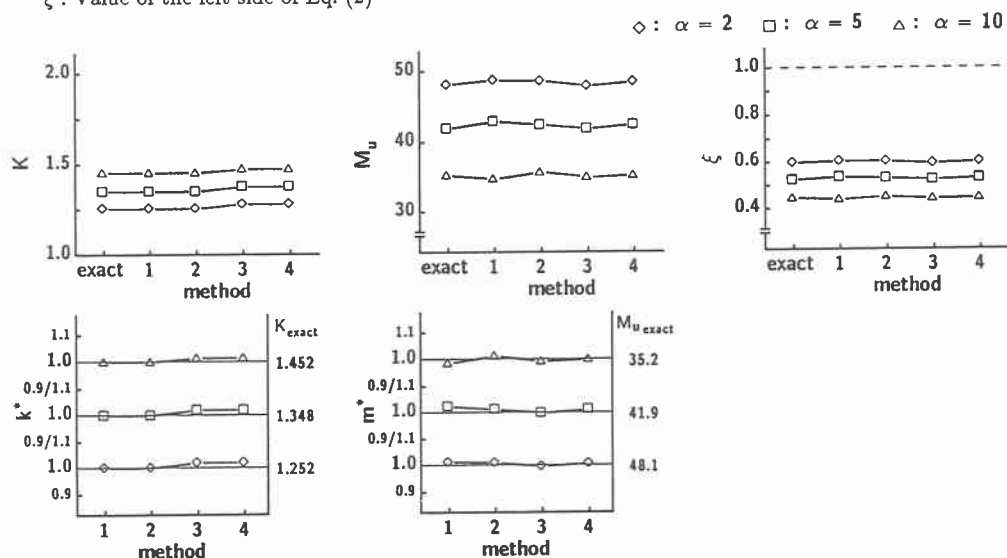
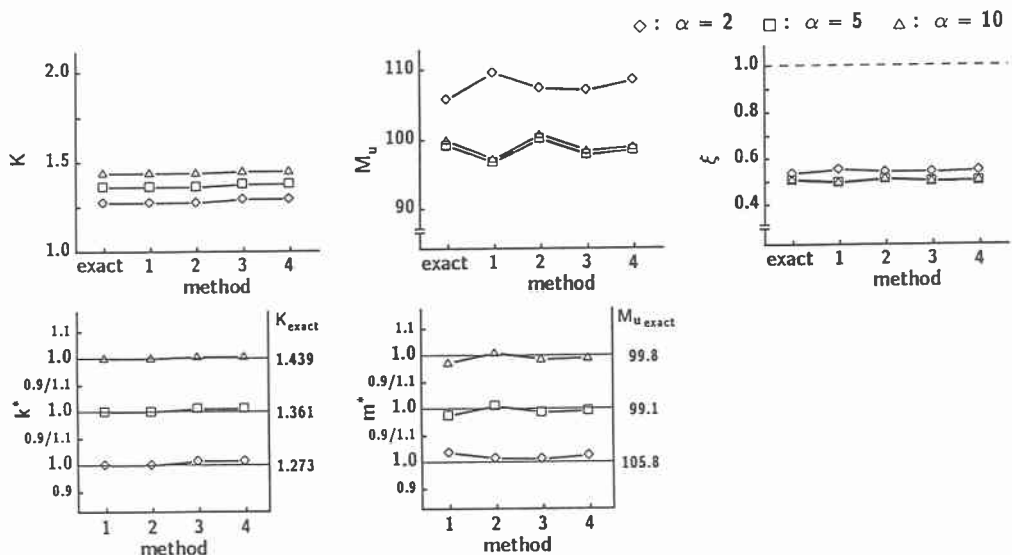


図-5 一層一径間骨組の照査結果 (部材番号2)

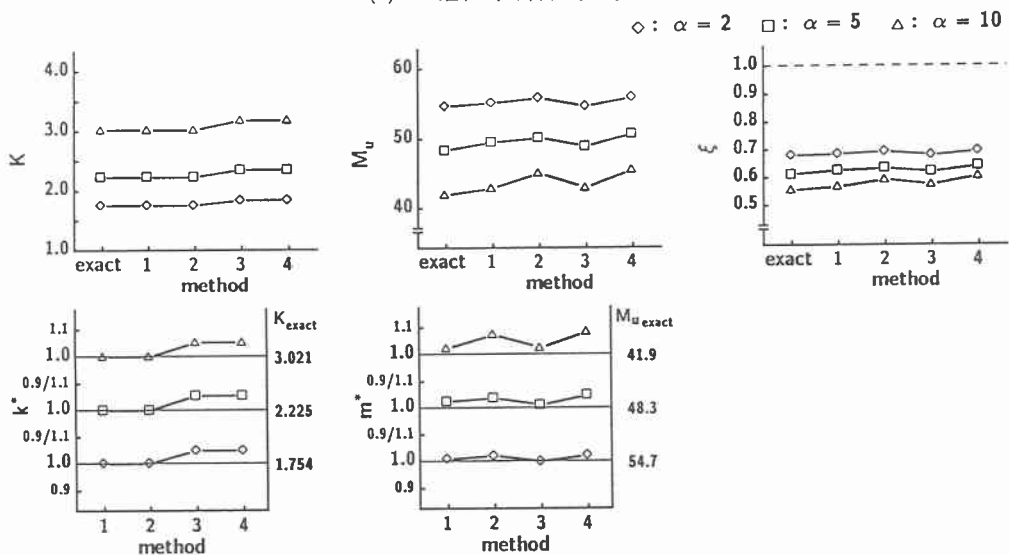
のそれよりも大きくなるためと考えられる。また、一般に骨組構造物は対称に設計されることを考慮し、以下の結果については照査結果の厳しい風荷重が作用しない柱についてのみ考察することとした。

図-5には、一層一径間骨組における $\alpha = 2, 5, 10$ の解析結果を示している。図の K 値, M_u , ξ はそれぞれ K 値, 部材曲げモーメント, 照査値を示し, k^* , m^* はそれらの値を既存の設計システムによる結果 (K_{exact} , $M_{u,exact}$) で除し, 無次元化したものである。また, 併せて K_{exact} , $M_{u,exact}$ についても示している。図中の各無次元量は, 1.0 を超えると安全側に, 1.0 以下であれば危険側にあることを意味している。図より, α が小さいもの (接合部剛性が高い) ほど K 値が小さく, ξ が大きくなる傾向が見られる。また, 各手法の無次元量に着目すると, k^* では手法3, 4が若干大きな値を示しているものの, m^* では各手法ともほぼ 1.0 近傍に分布しており, 4手法とも良好な結果が得られていることがわかる。照査値 ξ に関しては, 4手法とも ξ_{exact} とほぼ等しい値となっている。

次に二層一径間骨組について考察することとする。図-6 (a), (b) は, それぞれ二層一径間骨組の一層目, 二層目の柱 (部材番号2, 4) の結果を示したものである。まず, 一層目の柱について考察する。図 (a) より, K 値は一層一径間骨組の場合と同様, 手法3, 4で若干大きな値を示していることがわかる。部材曲げモーメント M_u に関しては, m^* の分布より手法1, 3で $\alpha = 5, 10$ の場合に若干過小評価となっているものの, その誤差は最大約 3% と小さい。他の2手法については, いずれの α に対しても, m^* はほぼ 1.0



(a) 1層目 (部材番号 2)



(b) 2層目 (部材番号 4)

図-6 二層一径間骨組の照査結果

付近に分布しており、良好な結果を示している。照査値 ξ においては、部材曲げモーメントの場合と同様、手法 1, 3 で $\alpha = 5, 10$ の場合に ξ_{exact} より若干小さな値を示していることがわかる。次に、二層目の柱について着目する。二層目の柱に関しても、 K 値の分布特性は一層目の場合と同様な傾向となっている。一方、部材曲げモーメント M_u に関しては、一層目の場合と異なり、全ての手法でいずれの α に対しても安全側の値となっていることがわかる。また、その程度は α が大きくなる（接合部剛性が小さい）ほど安全側になり、手法 4 の $\alpha = 10$ では約 8 % 程度安全側の値を示している。照査値 ξ に関しては、部材曲げモーメント M_u の場合と同様、すべての手法において ξ_{exact} よりも大きな値を示し、設計的には安全側の評価を与える。なお、最大誤差は $\alpha = 10$ で約 8 % である。

以上の結果から、本研究で提案した 4 手法について総合的に判断すると、いずれの手法においても、設計

システムの結果に対して、精度良く部材の断面力算定や耐力照査が可能であることが明らかになった。その中でも手法4は、接合部剛性を線形にモデル化し、与えられた骨組を直接解析するのみであることより、最も効率的な手法であるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、断面力の算定のみならず部材の耐力照査までを含めたより簡易な半剛結接合骨組の設計手法の確立を目的として、接合部の剛性特性を実状に即した非線形曲線により評価する手法と beam-line 法により線形にモデル化する手法に加え、断面力算定法として、従来からの B_1/B_2 法と半剛結接合骨組では横移動骨組成分が卓越すると考え B_2 係数のみを考慮する方法を組み合わせた4手法の適用性について数値解析的に検討を行った。数値解析は一層一径間骨組および二層一径間骨組の2種類の骨組について行い、既存の断面設計システムによる結果と比較することにより、各手法の適用性に関する検討を行った。

検討結果、本研究で提案した4手法はいずれも断面設計システムの結果に対して、精度良く部材の断面力算定や耐力照査が可能であることが明らかになった。その中でも、接合部を beam-line 法により線形にモデル化し、かつ B_2 係数のみを考慮する方法は、与えられた骨組を直接解析するのみであり、最も効率的な手法であるものと考えられる。

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) Chen, W.F. and Lui, E.M. : Stability design of steel frames, CRC Press, Inc., 1991.
- 3) Chen, W.F. and Kishi, N. : Semi-rigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling, Journal of Struct. Engrg., ASCE, 115(ST1), 105-119, 1989.
- 4) Kishi, N. and Chen, W.F. : Moment-rotation relations of semi-rigid connections with angles, Journal of Struct. Engrg., ASCE, 116(ST7), 1813-1834, 1990.
- 5) Kishi, N., Chen, W.F., Goto, Y. and Matsuoka, K. : Analysis program for the design of flexibly jointed frames, Journal of Computers and Structures, 49, 4, 705-713, 1994.
- 6) Kishi, N., Chen, W.F., Goto, Y. and Matsuoka, K.G. : Design aid of semi-rigid connections for frame analysis, Engrg. Journal, AISC, 30, 3, 90-107, 1993.
- 7) 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, 53-60, 1995.
- 8) 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, 153-162, 1995.
- 9) 岸 徳光, 後藤芳顕, 小室雅人 : 半剛結鋼骨組構造の断面設計システムの開発, 土木学会北海道支部論文報告集, 第52号(A), 56-61, 1996.
- 10) 岸 徳光, 後藤芳顕, 小室雅人, 寺島彰人 : B_1/B_2 法を用いた半剛結鋼骨組の断面力算定に関する一考察, 土木学会北海道支部論文報告集, 第52号(A), 50-55, 1996.
- 11) Bjorhovde, R., Colson, A. and Brozzetti, J. : Classification system for beam-to-column connections, Journal of Struct. Engrg., ASCE, 116(ST11), 3059-3076, 1990.