

I-64 半剛結横拘束骨組柱の耐力照査に関する一検討

室蘭工業大学	正員	岸 徳光
室蘭工業大学	正員	小室 雅人
室蘭工業大学	正員	松岡 健一
室蘭工業大学	学生員	寺島 彰人

1. はじめに

現在、構造物の設計方法は許容応力設計法から限界状態設計法へ移行する方向にある。米国では既に限界状態設計法に基づいた AISC-LRFD の設計規準¹⁾が規定されている。同設計規準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 (FR 構造) と半剛結接合構造 (PR 構造) に分類し、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、幾何学的非線形を考慮した断面力の算定法として、線形弾性解析法を基本とした B_1/B_2 法¹⁾が、また、部材照査に必要な有効座屈長係数 (K 値) の算定法として alignment chart 法²⁾が示されている。しかしながら、半剛結接合骨組に関しては、具体的な設計手法が明示されておらず、現時点では同規準に基づいた設計が不可能となっている。

このような観点より、著者等は半剛結接合骨組の合理的な設計手法の確立を目的として、接合部の非線形な $M-\theta$ 特性の評価をはじめ種々の検討を行ってきた^{3)~8)}。また、EWS を用い幾何学的非線形及び接合部の非線形特性を考慮した半剛結接合骨組の断面設計システム⁹⁾を開発している。

本研究では、断面力の算定及び耐力照査までを含めた半剛結接合骨組のより簡易な設計手法の確立を目的として、特に半剛結横拘束骨組柱の材端モーメントおよび柱の K 値の評価に関し、接合部剛性特性を実状に即した非線形曲線を用いて評価する手法と beam-line 法により線形にモデル化する手法を取りあげ、各手法の適用性を数値解析的に検討した。数値解析は一層一径間骨組及び二層一径間骨組について行い、各手法の適用性に関しては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行っている。なお、本研究は横拘束骨組を対象としていることより、断面力算定法である B_1/B_2 法に関しては、 B_1 係数のみを考慮することとした。また、 B_1 係数及び耐力照査に必要な K 値については、著者等によって定式化されている手法⁷⁾を用いて算定している。

2. 断面力算定法

本研究では、 B_1/B_2 法により断面力を算定することとした。 B_1/B_2 法は、弾性一次解析を基本とし $P-\delta$ 、 $P-\Delta$ 効果をそれぞれ B_1 、 B_2 係数を用いて考慮する方法である。本解析では横拘束骨組を対象としていることより、水平方向変位による $P-\Delta$ 効果は存在しない。従って、幾何学的非線形を考慮した部材曲げモーメント M_u は次式によって求められる。

$$M_u = B_1 \times M^* \quad (1)$$

ここで、 B_1 係数は

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

である。

ここで、
 P_u : 着目している柱の作用軸力
 P_{ek} : 着目している柱のオイラーの座屈荷重 $= \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$
 C_m : $0.6 - 0.4 M_A/M_B$
 M_A/M_B : 着目している柱材の大きい材端モーメントに対する小さい材端モーメントの割合
 M^* : 与えられた骨組の弾性一次解析による曲げモーメントである。

3. 接合部剛性特性の評価手法

本研究では、接合部剛性特性を以下に示す2つの手法で評価している。

1) 接合部剛性に非線形曲線を導入する方法 (手法1)

この手法は、接合部剛性特性の評価に非線形な $M-\theta_r$ 曲線を導入し、弾性一次解析を行う手法であり、弾性一次解析により得られた接合部接線剛性は K 値の算定時に用いられる。

2) 接合部剛性を線形にモデル化する方法 (手法2)

この手法は、接合部剛性特性を beam-line 法を用いて線形にモデル化する手法である。図-1 に示すような曲げ剛性 EI の梁材に等分布荷重 w が作用していると仮定すると、梁の材端モーメント M と材端相対回転角 θ_r には次式のような線形関係が成立する。

$$M = \frac{wL^2}{12} \left(1 - \frac{\theta_r}{\theta_{b0}}\right) \tag{3}$$

ここで、 θ_{b0} は両端ピン支持の材端回転角 ($wL^3/24EI$)、 L は部材長である。式 (3) による beam-line と接合部の非線形な $M-\theta_r$ 曲線と重ね合わせることにより、両者の交差する点 A が接合部モーメント M 及び相対回転角 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 (図-2 参照)。このようにして得られた割線剛性、接線剛性はそれぞれ弾性一次解析及び K 値の算定時に用いられる。

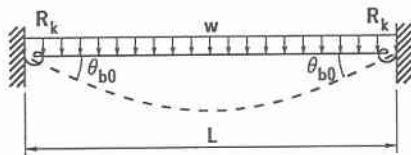


図-1 梁材のモデル化

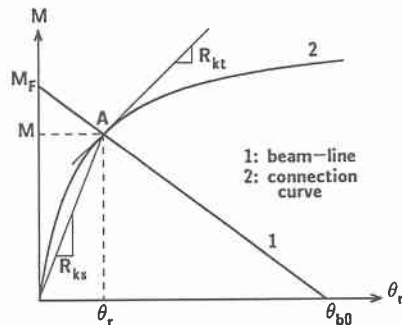


図-2 非線形な $M-\theta_r$ 曲線と beam-line

表-1 基準荷重強度一覧

	死荷重 (D)	活荷重 (L)
屋根部 (R)	0.958 kPa	0.958 kPa
床版部 (F)	3.256 kPa	1.915 kPa

4. 数値解析のための仮定

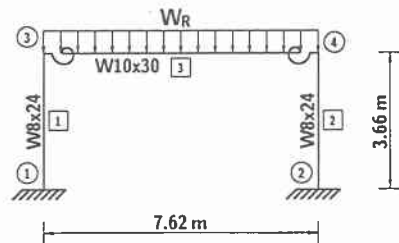
本研究では、図-3 に示すような 2 種類の半剛結接合骨組について数値解析を行った。図中に各骨組の部材番号、節点番号、形状寸法及び使用形鋼を示している。また、形鋼の呼称については AISC-LRFD の設計基準に従っている。なお、柱の奥行き中心間隔は 7.62 m としている。

本研究では基準荷重強度を表-1 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 の設計基準の中から $1.2D + 1.6L + 0.5L_R$ を採用した。従って、各梁に作用する等分布荷重は、屋根部で $W_R = 24.09$ kN/m、床版部で $W_F = 53.14$ kN/m となる。

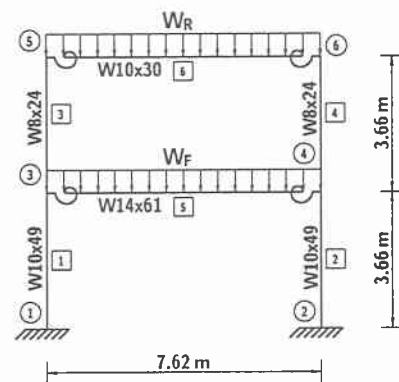
半剛結接合部の非線形な剛性特性の評価に関しては、著者等によって提案されている三要素パワーモデル¹⁰⁾を用いることとする。このモデルは接合部初期剛性 R_{ki} 、限界曲げ耐力 M_{uc} 、及び形状指数 n の 3 つのパラメータから構成されるもので、無次元化した接合部モーメント m 及び接線剛性 r は次式のように示される。

$$m = \frac{\theta}{(1 + \theta^n)^{1/n}} \tag{4}$$

$$r = \frac{1}{(1 + \theta^n)^{(n+1)/n}} \tag{5}$$



(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

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_{ki}/R_{ki}

M : 接合部モーメント

R_{ki} : 接合部接線剛性

θ : 無次元相対回転角 = θ_r/θ_0

θ_r : 接合部相対回転角

θ_0 : 塑性回転角 = M_{uc}/R_{ki}

である。

本解析では、3つのパラメータのうち、接合部限界曲げ耐力 M_{uc} を梁の塑性曲げモーメントに等しく取り、形状指数 n は $n = 1$ としている。また、接合部初期剛性 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することとし、

$$\alpha = \frac{EI_b}{dR_{ki}} \quad (6)$$

α を 2, 5, 10 と変化させている。ここで、 E は弾性係数、 I_b は梁材の断面二次モーメント、 d は梁材の高さである。図-4 には本解析で用いた $M-\theta_r$ 曲線を屋根部、床版部に分けて示している。

本研究では、AISC-LRFD の設計基準に基づいて柱部材の耐力照査を行うものとする。照査式は軸力と曲げモーメントから構成されるものであり、一般式は次の通りである。

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2 : \quad \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1.0 \quad (7a)$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2 : \quad \frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1.0 \quad (7b)$$

ただし、

P_n : 軸圧縮耐力

M_n : 部材曲げ耐力 (= 塑性曲げモーメント)

P_u : 作用軸力

である。

ここで、軸圧縮耐力 P_n は次のように求められる。

$$P_n = A F_{cr} \quad (8)$$

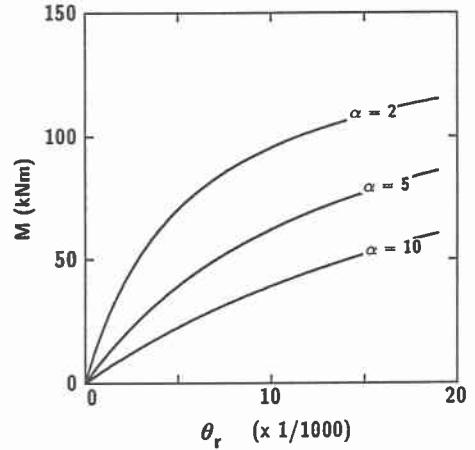
ここで、

$$\lambda_c \leq 1.5 : \quad F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y \quad (9a)$$

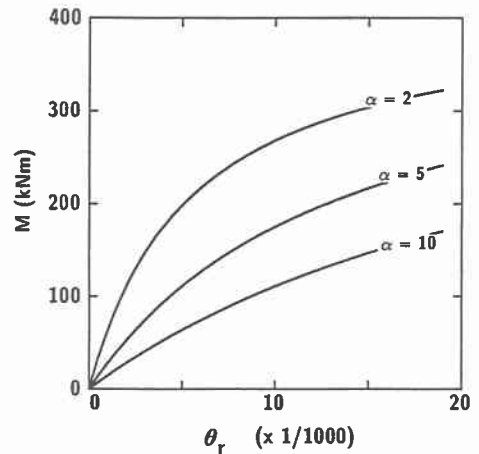
$$\lambda_c > 1.5 : \quad F_{cr} = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) F_y \quad (9b)$$

$$\lambda_c = \frac{K l_c}{r \pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (10)$$

である。



(a) 屋根部 (W10x30)



(b) 床版部 (W14x61)

図-4 解析に用いた $M-\theta_r$ 曲線

M_u : 部材曲げモーメント

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)

A : 柱部材の断面積

F_y : 柱部材の降伏応力

E : 弾性係数

K : K 値

l_c : 柱部材の長さ

r : 断面二次半径

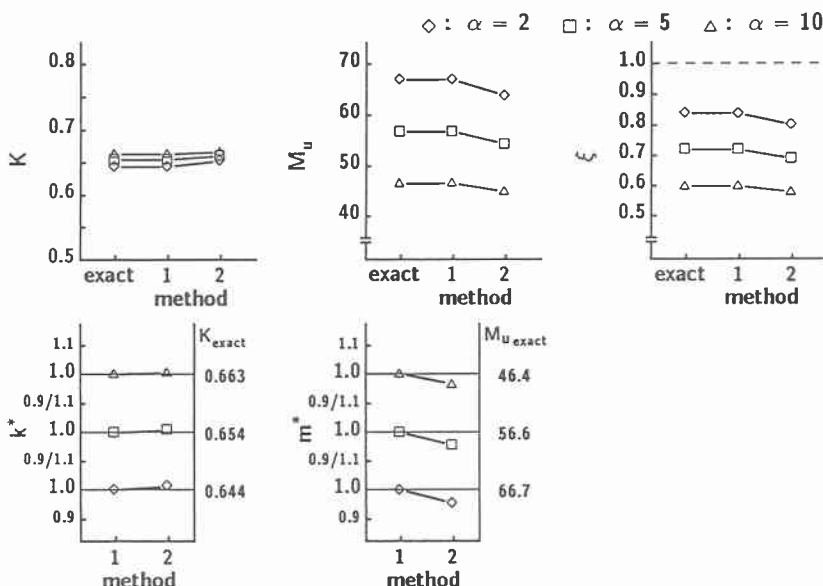


図-5 一層一径間骨組の解析結果（部材番号1）

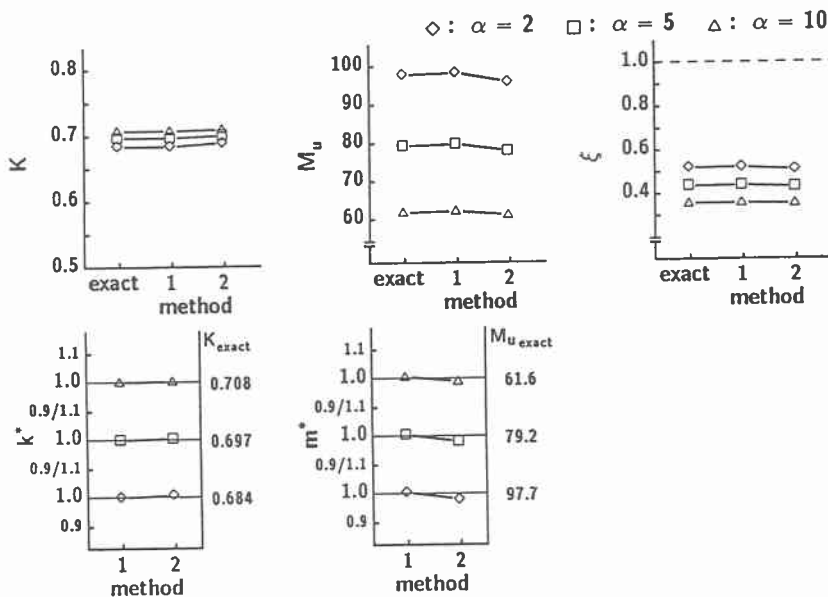
5. 数値解析結果

照査の結果は、2種類の算定法と断面設計システム⁹⁾により得られた結果（exact）を比較する形で整理している。本研究では、骨組、載荷状態が左右対称であることより骨組の左半分についてのみ着目することとした。なお、部材曲げモーメント M_u は部材に作用する2つの材端モーメントのうち大きい方を意味している。表-2 は一層一径間骨組の $\alpha = 5$ の解析結果を示している。表の ξ は式 (7) による照査値を表しており、この値が 1.0 以下であれば柱部材は安全であることを意味している。表中の部材曲げ耐力 M_n 及び作用軸力 P_u は使用部材及び載荷荷重状態により決定されるものであり、本数値解析条件では、各手法に関わらず一定値となる。また、軸圧縮耐力 P_n は式 (8)~(10) からわかるように K 値の関数となっている。表より手法2の K 値は K_{exact} より若干大きめの値を示しているものの、 P_n に関しては $P_{n,exact}$ と等しい値となっている。これより、 P_n に対する K 値の影響は小さいものと考えられる。部材曲げモーメント M_u に関しては、手法1では $M_{u,exact}$ と等しいものの、手法2では若干過小評価の値（約4%）を示している。照査値 ξ に関しても、 M_u と同様に手法2は若干小さな値となっている。以上より、照査値 ξ は、 K 値と部材曲げモーメント M_u に大きく影響されることがわかる。これより、以後の考察は K 値、 M_u 、 ξ について行うこととする。

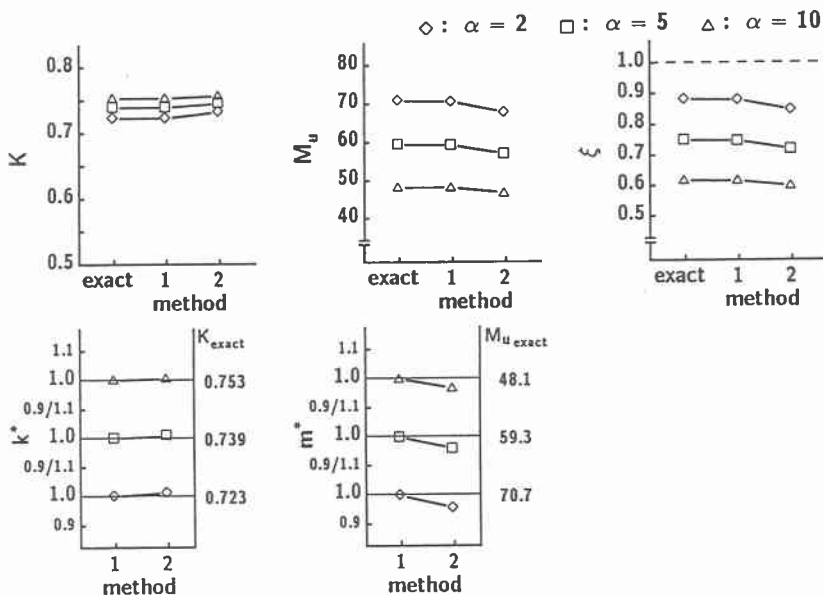
図-5 に一層一径間骨組の $\alpha = 2, 5, 10$ の解析結果を示している。図の K 、 M_u 、 ξ はそれぞれ K 値、部材曲げモーメント、照査値を示し、 k^* 、 m^* はそれらの値を断面設計システムによる結果（ K_{exact} 、 $M_{u,exact}$ ）で除し、無次元化したものである。すなわち、それらの値が 1.0 より大きければ安全側の値を、小さければ危険側の値を意味している。また、併せて断面設計システムによる結果（ K_{exact} 、 $M_{u,exact}$ ）も示している。図より、2手法とも α が大きくなる（接合部剛性が低下する）につれて K 値は若干大きくなり、 M_u は減少する傾向がみられる。無次元化した結果（ k^* 、 m^* ）について考察すると手法1ではいずれの α に対しても各値はほぼ 1.0 となっており良好な結果となっている。手法2では α に関わらず k^* は安全側の値となっ

表-2 一層一径間骨組の解析結果（ $\alpha = 5$ ）

	element number 1		
	2nd-order analysis (exact)	method 1	method 2
K	0.654	0.654	0.660
P_n (kN)	1090	1090	1090
M_n (kNm)	94.4	94.4	94.4
P_u (kN)	91.8	91.8	91.8
M_u (kNm)	56.6	56.6	54.1
ξ	0.716	0.716	0.686



(a) 一層目 (部材番号 1)



(b) 二層目 (部材番号 3)

図-6 二層一径間骨組の解析結果

ているが、 m^* は若干過小評価の値を示している。しかしながら、その誤差は 4 % 程度と小さい。照査結果 ξ に関しては、手法 1 では ξ_{exact} と等しい値となっており、手法 2 では若干小さな値を示している。

図-6 に二層一径間骨組の $\alpha = 2, 5, 10$ の解析結果を示している。図 (a) より一層目の柱における K 値、 M_u 、 ξ の変化の傾向は一層一径間骨組の場合と同様となっている。無次元化した結果について考察すると、 α に関わらず手法 1 では、各値はほぼ 1.0 となっており良好な結果となっている。手法 2 においては m^* が若干過小評価の値を示している。また、照査結果 ξ は一層一径間骨組と同様に 2 手法ともほぼ ξ_{exact} と同じ値となっている。次に、二層目の柱について着目することとする。図 (b) より、全体に一層目より K 、 ξ が

大きくなり M_u は小さくなっているが、各値の傾向は一層目とほぼ同様であることがわかる。無次元化した結果について考察すると、手法1においては、各値がほぼ 1.0 となっており良好な結果となっている。手法2においては m^* が一層目よりも過小評価の値となっているが、その誤差は 4 % 程度と小さい。照査結果 ξ については手法1では ξ_{exact} と等しい値となっており、手法2では小さな値を示しているが最大誤差は $\alpha = 2$ で 4 % 程度となっている。

以上より、本研究で提案した2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、照査が可能であることが明らかになった。手法1では断面設計システムとの誤差は非常に小さく、手法2においてもその誤差は 4 % 程度であり、2手法とも断面設計システムによる照査値を精度良く表していることがわかった。2手法を比較すると、手法2は接合部剛性を線形にモデル化することより、手法1と比較して簡略であることから有効な手法と考えられる。

6. まとめ

本研究では、断面力の算定及び耐力照査までを含めた半剛結接合骨組のより簡易な設計手法の確立を目的として、特に半剛結横拘束骨組柱の材端モーメントおよび柱の有効座屈長係数の評価に関し、接合部剛性特性を実状に即した非線形曲線を用いて評価する手法と beam-line 法により線形にモデル化する手法を取りあげ、各手法の適用性を数値解析的に検討した。数値解析は一層一径間骨組及び二層一径間骨組について行い、各手法の適用性に関しては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行った。なお、本研究は横拘束骨組を対象としていることより、断面力算定法である B_1/B_2 法に関しては、 B_1 係数のみを考慮することとした。

検討結果、本研究で提案した2手法は、いずれも断面設計システムの結果に対して、精度の良い部材の照査が可能であることが明らかになった。特に、beam-line 法を用いて接合部剛性を線形にモデル化する手法は、数値解析が簡略であり半剛結横拘束骨組の設計手法として有効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) 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.
- 11) Bjorhovde, R., Colson, A. and Brozzetti, J. : Classification system for beam-to-column connections, Journal of Struct. Engrg., ASCE, 116(ST11), pp.3059-3076, 1990.