

I-67 接合部剛性特性の分類に関する一検討

室蘭工業大学	正員	岸 徳光
室蘭工業大学	正員	Rafiq Hasan
室蘭工業大学	正員	小室 雅人
室蘭工業大学	学生員	村田 浩一

1. はじめに

一般に、鋼骨組構造物の梁-柱の接合部は、1) 剛結接合、2) 半剛結接合、3) ピン接合の3種類の接合状態に分類することができる。アメリカ鋼構造協会 (AISC) では、梁-柱接合部に関して上記のような3種類の接合状態を規定している。しかしながら、接合部の強度や剛性等による具体的な接合部の分類法に関する定義は未だなされていないのが現状である。一方、ヨーロッパの統一規格である EC3¹⁾では、1992年から体系的な接合部分類法が導入されている。また、Bjorhovde 等が 1990 年に提案した分類法²⁾もある。これらの分類法は研究対象として多くの研究者によって用いられ、その妥当性が検討されている。両分類法とも、接合部曲げモーメント M は、梁の塑性曲げモーメント M_p を用いて無次元化され、接合部の相対回転角 θ_r は、EC3 では梁の部材長 L_b で、Bjorhovde 等による分類法では梁の高さ d によって算定される塑性回転角 θ_p を用いて無次元化されている。このことは、これらの分類法が梁材の長さや高さなどの形状寸法に大きく依存していることを意味している。しかしながら、接合部の $M - \theta_r$ 特性に関する実験的研究によれば、その特性は梁の形状寸法等よりも、主に接合部の形状寸法 (例えば、アングル材の形状・板厚、ボルトの位置等) に大きく依存することが明らかになっている。また、これらの分類法では、接合部の分類をバイリニアまたはトリリニア型で定義しているが、実際の接合部は非線形な $M - \theta_r$ 特性を有しており、これらの分類法は必ずしも実状に即してはいないものと判断される。このような観点より、本論文では上記の問題点を解決するための新しい分類法を提案し、実骨組を用いた数値解析により、その妥当性を検討している。

2. 既存の分類法とその問題点

現在、梁-柱接合部の分類法としては、EC3 及び Bjorhovde 等による分類法の2つが提案されている。それらの分類法は上述のように無次元量で整理されている。図-1に2つの分類法の概形図を示す。図の縦軸は無次元曲げモーメント $\bar{M}$ 、横軸は無次元回転角 $\bar{\theta}$ であり、それぞれ以下のように定義されている。

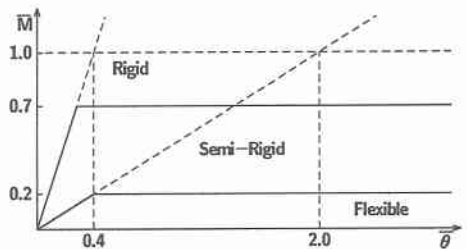
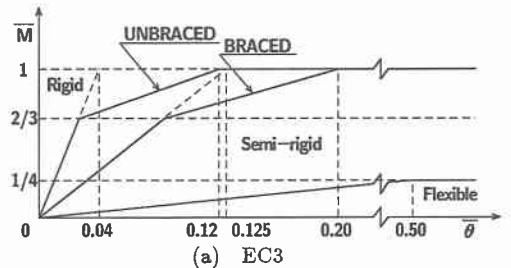
$$\bar{M} = M / M_p, \quad \bar{\theta} = \theta_r / \theta_p \quad (1),(2)$$

EC3 ; Bjorhovde et al. ;

$$\theta_p = \frac{M_p}{EI_b/L_b} \quad \theta_p = \frac{M_p}{EI_b/5d} \quad (3),(4)$$

ここで、

M : 接合部曲げモーメント	L_b : 梁の部材長
θ_r : 接合部相対回転角	d : 梁の高さ
M_p : 梁の塑性曲げモーメント	E : ヤング係数
θ_p : 梁の塑性回転角	I_b : 断面2次モーメント



(b) Bjorhovde et al.

図-1 既存の接合部分類システム

図より、各境界線の接合部初期剛性 R_{ki} はそれぞれの境界線の初期勾配から容易に算出することが可能である。表一に各境界線の初期剛性を一覧にして示す。表より、初期剛性 R_{ki} は部材長 L_b または高さ d などの梁の形状寸法によって定義され、接合部の形状寸法等とは無関係となっている。このことは、半剛結接合部の $M-\theta_r$ 特性は、主に接合部の形状寸法に影響を受けるという過去の実験的研究成果に反している。また、実際の接合部の $M-\theta_r$ 特性は非線形特性を有しているにもかかわらず、両分類法ではバイリニアまたはトリリニア型で接合部を分類している。以上より、EC3 及び Bjorhovde 等による分類法は、実状に対応していないことより、実際に適用することは困難であるものと考えられる。

表一 各分類法による初期剛性 R_{ki} の境界値

		半剛結接合領域	
		最大値	最小値
EC3	braced	$8EI_b/L_b$	$EI_b/2L_b$
	unbraced	$25EI_b/L_b$	
Bjorhovde et al.		$EI_b/2d$	$EI_b/10d$

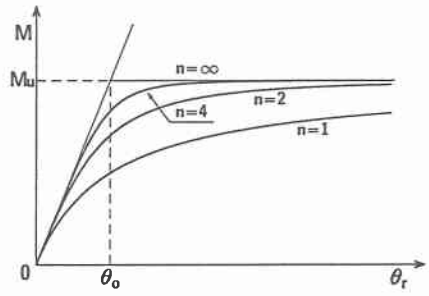
最大値：剛結接合と半剛結接合の境界値を示す
最小値：半剛結接合とピン接合の境界値を示す

3. 本研究で提案する接合部分類システムの概要

本研究で提案する接合部分類法は、1) 剛結接合、2) 半剛結接合、3) ピン接合の3つの接合状態を2本の非線形曲線によって分類定義するものである。この方法は、他の接合部分類法では、バイリニアまたはトリリニア型で定義しているのに対して、より実状に即した分類法であると考えられる。本研究で提案する2本の非線形曲線は、三要素パワーモデル³⁾によって定義している。三要素パワーモデルは、接合部初期剛性 R_{ki} 、限界曲げ耐力 M_u 及び形状指数 n の3つのパラメーターから構成されるもので、一般に次式のように示される。

$$M = \frac{R_{ki}\theta_r}{\left[1 + \left(\theta_r/\theta_0\right)^n\right]^{1/n}} \tag{5}$$

ここで、 M ：接合部曲げモーメント
 θ_r ：接合部相対回転角
 θ_0 ：塑性回転角（ $= M_u / R_{ki}$ ）



図一 三要素パワーモデル

図一に三要素パワーモデルの概形図を示す。図より、接合部の $M-\theta_r$ 曲線は、形状指数 n の変化により、平面的な状態からバイリニア型 ($n = \infty$) の状態まで制御可能であることがわかる。本研究では、上記の3つのパラメータについて、著者らによって過去に行われた半剛結接合に関する数値解析結果^{4),5)}を基に決定することとした。以下に2本の曲線のパラメータの決定方法について述べることにする。

1) 接合部初期剛性 R_{ki} ：

接合部初期剛性 R_{ki} に関しては、過去の研究成果^{4),5)}より、半剛結接合とピン接合の境界線の場合には $10^{4.5}$ (kip-in/rad) を、剛結接合と半剛結接合の境界線の場合には 10^6 (kip-in/rad) を採用することとした。

2) 限界曲げ耐力 M_u ：

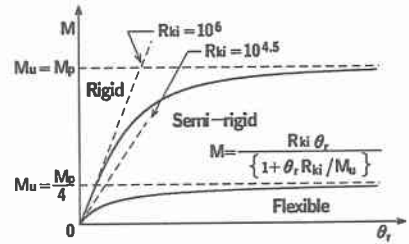
限界曲げ耐力 M_u に関しては、過去の数値解析結果^{4),5)}より、EC3 の分類法による限界曲げ耐力が適切であることを確認している。したがって、限界曲げ耐力 M_u には、EC3 の分類法の限界曲げ耐力を採用することとし、半剛結接合とピン接合の境界線では $M_p/4$ 、剛結接合と半剛結接合の境界線では M_p を用いることとした。

3) 形状指数 n ：

形状指数 n に関しては、図一に示すように n の値によって $M-\theta_r$ 曲線が変化することより、適切な値を決定する必要がある。本研究では、より簡易な分類法の提案を目的としていることにより、 $n=1.0$ として検討を行っている。

表—2 パラメータの一覧

	半剛結接合領域	
	最大値	最小値
初期剛性 R_{ki} (kip-in/rad)	10^6	$10^{4.5}$
限界曲げ耐力 M_u (kip-in)	M_p	$M_p/4$
形状指数 n	1.0	



図—3 本研究で提案する分類法

表—2 に本研究で提案する分類法の各パラメータを、また図—3 にその概形図を示す。

4. 数値解析のための仮定

上述のように決定された新分類法の妥当性の検討は実骨組を用いた数値解析により行うこととする。その際、半剛結接合骨組の接合部に剛結接合またはピン接合を仮定した場合に得られる解析結果を真値と考え、新分類法に基づいた $M - \theta_r$ 曲線を適用して得られる解析結果を真値に対して無次元化する形で整理検討を行った。解析は AISC-LRFD の設計基準⁶⁾に基づいて、横移動量に対しては使用荷重状態を、曲げモーメントに対しては係数倍荷重状態を想定して行っている。本研究では図—4 に示すような 3 種類の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、節点番号及び使用形鋼を示している。なお、全ての骨組において、奥行き中心間隔は 300 in とし、基本荷重強度を表—3 のように仮定した。本研究では、AISC-LRFD の設計基準に従うこととしており、使用単位は米国の慣用単位に、形鋼の呼称は同設計基準書に従っている。また、使用荷重及び係数倍荷重の組み合わせは、前者に対しては $D + L + W$ を、後者に関しては $1.2D + 0.5L + 1.3W$ を選択した。表—4 に各状態の作用荷重の一覧を示す。なお、全ての構造解析は、後藤・Chen⁷⁾によって示された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法を採用している。

表—3 各基準荷重強度の一覧

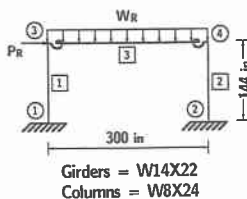
	死荷重 (D)	活荷重 (L)	風荷重 (W)
屋根部	20 psf	20 psf	20 psf
床版部	68 psf	40 psf	

(1 psf = 4.89 kgf/m²)

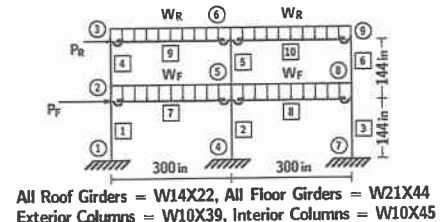
表—4 作用荷重一覧

	等分布荷重 (kip/in)		集中荷重 (kip)	
	屋根部	床版部	屋根部	床版部
使用荷重	0.0833	0.0250	3.0	6.0
係数倍荷重	0.0708	0.2117	3.9	7.8

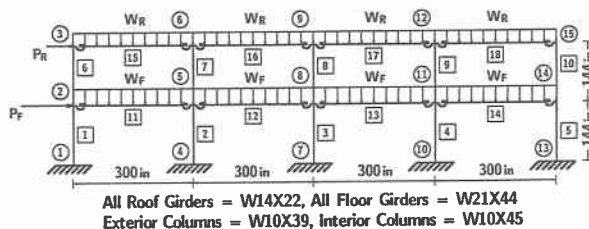
(1 kip/in = 178.74 kgf/cm, 1kip = 454 kgf)



(a) 一層一径間骨組



(b) 二層二径間骨組



(c) 二層四径間骨組

図—4 解析に用いた半剛結接合骨組の一覧

5. 数値解析結果

提案した新分類法の妥当性の検討に関しては、半剛結接合とピン接合及び剛結接合と半剛結接合の境界線ごとに分けて考察することとする。また、併せて既存の 2 つの分類法 (EC3, Bjorhovde et al.) の結果についても示している。以下に各項目に分けて検討を行う。

5.1. 半剛結接合とピン接合の境界線の妥当性

4. でも述べたが、境界線の妥当性については、提案した分類法を用いた接合部の $M - \theta_r$ 曲線による解析結果を、接合部をピン接合と仮定した場合の解析結果 (真値) によって無次元化することにより整理検討を行った。曲げモーメント M 及び横移動量 Δ については、次式によって無次元化し、それぞれを m^* , d^* と定義することとした。なお、曲げモーメントに関しては、接合部をピン接合と仮定していることより、部材中央部での曲げモーメントについて検討を行っている。

$$m^* \text{ or } d^* = \frac{\text{各分類法による解析結果}}{\text{接合部をピン接合と仮定した場合の解析結果}}$$

(6)

式 (6) は、 m^* もしくは d^* が 1.0 に近いほど分類法としての精度が良いことを意味している。図-5 には、一層一径間骨組の解析結果を示している。図は、縦軸に無次元曲げモーメント m^* または横変形量 d^* を、横軸には初期剛性 R_{ki} の常用対数 $\text{Log}_{10}R_{ki}$ を取って整理したものである。図中の ○ 印は半剛結接合に関するデータベース⁸⁾に格納されている single web-angle 接合を適用した場合の解析結果⁴⁾を示している。図より、提案した新分類法は、他の 2 つの分類法と比較して、 m^* , d^* とも 1.0 に近い位置に分布していることがわかる。また、 m^* , d^* を比較すると、いずれの分類法でも m^* のほうが 1.0 に近い分布となっていることがわかる。表-5 は、本研究で解析を行った三骨組の結果について示したものである。表中の m^* は任意の部材の無次元中央部モーメントを、 d^* は風荷重を受ける節点の無次元横移動量を示している。表より、

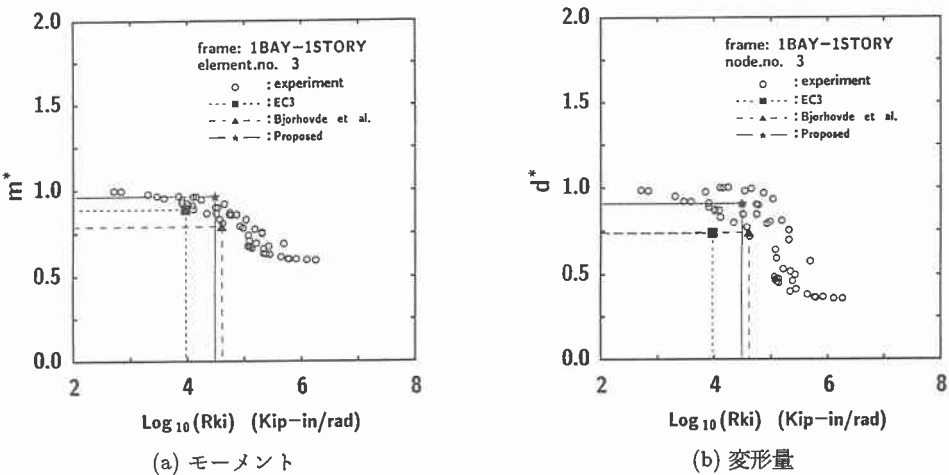


図-5 数値解析結果

表-5 ピン接合と半剛結接合の境界線の数値解析結果一覧

Frame	nondimensional moment m^*				nondimensional displacement d^*			
	elem.no.	proposed	EC3	Bjor.	node.no.	proposed	EC3	Bjor.
1bay-1story	3	0.959	0.882	0.784	3	0.905	0.732	0.735
	8	0.988	0.870	0.782	2	0.872	0.480	0.481
2bay-2story	10	0.959	0.869	0.750	3	0.848	0.428	0.456
	11	0.988	0.873	0.777	2	0.847	0.452	0.473
4bay-2story	15	0.957	0.870	0.728	3	0.820	0.400	0.463

新分類法では、 m^* で最大約 5 %， d^* で最大約 18 % 程度の誤差を有しているものの、他の 2 分類法（EC3 では m^* で約 13 %， d^* で約 60 %，Bjorhovde 等による分類法では m^* で約 23 %， d^* で約 54 %）と比較して、優れた結果が得られていることがわかる。これより、提案する新分類法は、他の 2 つの分類法に比べ精度良く接合部を分類できるものと判断される。

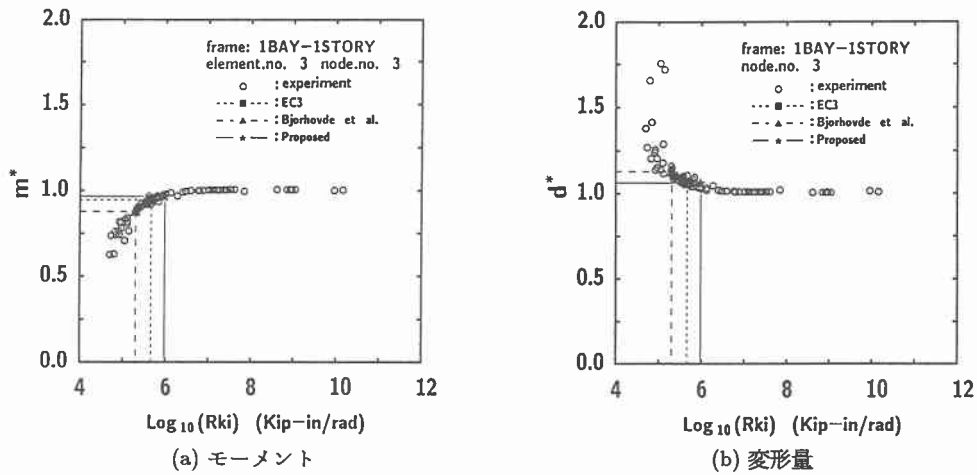
5.2. 剛結接合と半剛結接合の境界線の妥当性

剛結接合と半剛結接合の境界線の妥当性については、5.1. と同様に各分類法による解析結果を剛結接合と仮定した場合の解析結果（真値）によって無次元化することにより整理検討を行った。無次元接合部モーメント m^* ，無次元横移動量 d^* は以下の式で定義される。

$$m^* \text{ or } d^* = \frac{\text{各分類法による解析結果}}{\text{接合部を剛結接合と仮定した場合の解析結果}}$$

(7)

図－6 には、一層一径間骨組の解析結果を示している。図中の ○ 印はデータベースに格納されている extended end-plate 接合を適用した場合の解析結果⁵⁾を示している。図より提案した新分類法は、他の 2 つの分類法と比較して、 m^* ， d^* とともに 1.0 に近い位置に分布していることがわかる。表－6 は、本研究で解析を行った三骨組の結果について示したものである。表より、 m^* に関しては、すべての骨組において提案した新分類法が、他の 2 分類法と比較して同等あるいはそれ以上の精度を有していることがわかる。しかしながら、 d^* に関しては、EC3 で最大約 8 %，Bjorhovde 等による分類法で最大約 24 % の誤差であるのに対し、新分類法では最大約 28 % となっている。この誤差は、設計的には安全側の値を与えるものであることより、工学的には許容されるものと判断される。また、分類法の単純化、モーメントに対する精度の良さを考慮し、また横移動量に対しても Bjorhovde 等による分類法と同程度の精度を有することから $n=1.0$ とした分類法でも十分適用可能であるものと考えられる。



図－6 数値解析結果

表－6 半剛結接合と剛結接合の境界線の数値解析結果一覧

Frame	nondimensional moment m^*					nondimensional displacement d^*			
	elem.no.	node.no.	proposed	EC3	Bjor.	node.no.	proposed	EC3	Bjor.
1bay-1story	3	3	0.961	0.940	0.872	3	1.058	1.058	1.125
2bay-2story	8	8	0.975	0.991	0.943	2	1.196	1.046	1.150
	10	9	0.999	0.967	0.923	3	1.281	1.080	1.237
4bay-2story	11	2	0.981	0.987	0.930	2	1.207	1.057	1.161
	15	3	0.963	0.959	0.895	3	1.253	1.065	1.200

6. まとめ

本研究では、より実状に即した梁-柱の接合部の分類法の確立を目的として、非線形な曲線を用いた新しい分類法を提案した。新分類法は、著者等の提案している三要素パワーモデルを利用した方法である。三要素パワーモデルの各パラメータは、過去の研究成果より、半剛結接合とピン接合の境界線に関しては、初期剛性 R_{ki} には $10^{4.5}$ (kip-in/rad), 限界曲げ耐力 M_u には $M_p/4$ を採用し、剛結接合と半剛結接合の境界線に関しては、初期剛性 R_{ki} には 10^6 (kip-in/rad), 限界曲げ耐力 M_u には M_p を採用することとした。また、形状指数 n に関しては分類式の単純化という観点から 1.0 を選択している。本研究で提案した新分類法の妥当性は、実骨組を用いた数値解析により曲げモーメント及び横移動量の 2 つについて検討を行っている。また、併せて既存の EC3, Bjorhovde 等による分類法についても考察している。

検討結果、本研究で提案した新分類法は、曲げモーメントに関しては、既存の 2 分類法と同等あるいはそれ以上の精度で分類が可能であることが明らかになった。一方、横移動量に関しては、剛結接合と半剛結接合の境界線において、最大 28 % 程度の誤差があることが明らかになった。しかしながら、Bjorhovde 等による分類法と同程度であること、設計的には安全側の評価になることより、工学的には十分適用できるものと考えられる。以上の結果より、本研究で提案する接合部分類法は、1) 簡略である、2) 正確である、3) 実際の接合部の特性を良く表現しているの 3 点より有用な分類法であると考えられる。

参考文献

- 1) EC3 Code (1992), Design of Steel Structures, Part 1.1, European Committee for Standardization, CEN, Brussels.
- 2) Bjorhovde, R., Colson, A. and Brozzetti, J. (1990), "Classification system for beam-to-column connections," Journal of ASCE, Vol. 116, No. ST11, 3059-3076.
- 3) Kishi, N. and Chen, W.F. (1990), "Moment-rotation relations of semi-rigid connections with angles," Journal of ASCE, Vol. 116(ST7), 1813-1834.
- 4) Kishi, N., Hasan, R., Goto, Y. and Komuro, M. (1996), "Investigation on the validity of connection classification system," IABSE International Colloquium on Semi-Rigid Structural Connections, September, Istanbul, Turkey, 73-82.
- 5) Hasan, R., Kishi, N., Chen, W.F. and Matsuoka, K.G. (1995), "Evaluation of rigidity of extended end-plate connections by utilizing updated data base," CE-STR-95-19, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.
- 6) American Institute of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Buildings 2nd Edition, Chicago, IL, 1993.
- 7) Goto, Y., Chen, W. F. (1987), "On the Computer based design analysis for flexibly jointed frames, Journal of Constructional Steel Research, Special Issue on Joint Flexibility in Steel Frames (W, F, Chen Ed.), 8, 203-231
- 8) Hasan, R., Kishi, N., Chen, W. F. and Komuro, M. (1995b), "Evaluation of rigidity of extended end-plate connections by utilizing updated data base," Struc. Engrg. Report No. CE-STR-95-19, School of Civil Engineering, Purdue Univ., West Lafayette, IN.