

I-17

接合部の非線形特性を考慮した鋼骨組の挙動解析

室蘭工業大学 正員 岸 徳光

室蘭工業大学 正員 松岡 健一

名古屋工業大学 正員 後藤 芳顕

室蘭工業大学 学生員 工藤 正彦

1. はじめに

鋼骨組構造に関する AISC-LRFD の設計基準では、接合部の $M-\theta_r$ 特性に従い、剛結接合構造 (FR 構造) と半剛結接合 (PR 構造) に分類しているが、柱部材の $P-\delta$, $P-\Delta$ 効果を考慮した最大曲げモーメントの算定に関しては剛結接合構造に対する手法 (B_1, B_2 法) のみが示されている。また、 B_1, B_2 法も線形構造解析を用いて $P-\delta$, $P-\Delta$ 効果を考慮することが可能であるものの、それぞれに対して構造解析が必要であり、 B_1, B_2 係数の算定も煩雑な手計算を要する等、未だ不便さも残されているのが現状のように思われる。一方、アングル系、プレート系接合を用いた梁-柱の接合部は非線形な $M-\theta_r$ 特性を示し、その程度も接合部の構成材料によって大きく変化することが過去の実験結果より明らかになっている。

著者等はこれまで、接合部の $M-\theta_r$ 特性に関するデータベースの作成や、アングル系接合に限定して接合部剛性の主パラメータである初期剛性、限界曲げ耐力算定に関する定式化を行っている。さらにこれらを三要素パワーモデルに組み込み、与えられた接合材料の形状寸法に対して直接的に非線形な $M-\theta_r$ 評価式を与えることを試みている。また先に、接合部の $M-\theta_r$ 特性に関するデータベース、幾何学的非線形のみを考慮し比較の変形が小さい場合を対象とした剛性方程式を用いて作成された構造解析プログラムと解析結果の図化処理のプログラムから成る解析システムを作成している。

本論文では、半剛結骨組構造に関しても剛結接合同様の設計計算を可能にすることを目的として、実設計計算にできるだけ対応しやすくするために上記解析システムの改良を行い、数値解析例として top- and seat- angle 接合を用いた場合の挙動解析を行った。なお、本論文で採用している構造解析手法は幾何学的非線形を考慮した剛性方程式に接合部の $M-\theta_r$ 特性を組み込んでいるため、AISC-LRFD の設計基準で採用されている B_1, B_2 法を用いることなく直接、最大断面力を算定することが可能である。

2. 解析システムの改良点

2.1. $M-\theta_r$ 評価式の定数ファイル

これまでの接合部剛性評価モデルのパラメータ算定用プログラム PACOM (Parameter Analysis of Connection Model) は接合部の $M-\theta_r$ 特性に関するデータベースプログラム SCDB (Steel Connection Data Bank) を基にして作成されている。ここでは、実設計に応用可能のようにデータベースとは独立に、与えられた接合部アングル材、梁断面に対して非線形な $M-\theta_r$ 評価式を与えるルーチンを付加している。その評価式は著者等が先に定式化した接合部初期剛性、限界曲げ耐力およびデータベースを用いて決定された形状指数を用いる三要素パワーモデルである。同式は無次元化式で示すと式 (1) のようになる。

$$m = \frac{\theta}{(1 + \theta^n)^{1/n}} \quad \dots (1)$$

但し、 $m = M/M_u$, $\theta = \theta_r/\theta_0$ であり、

Prediction Equation of Structural Analysis of Flexibly Jointed Frame

by Norimitsu KISHI, Ken-ichi MATSUOKA, Yoshiaki GOTO and Masahiko KUDO

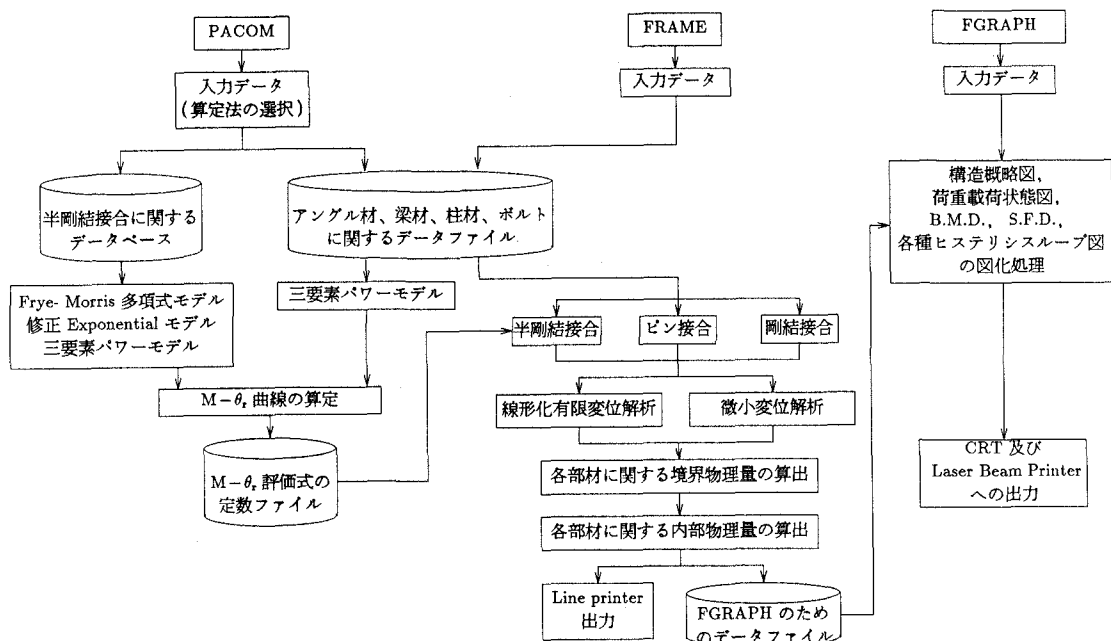


図-1 改良された解析システムの流れ図

M : 接合部モーメント, M_u : 接合部限界曲げ耐力, θ_r : 接合部相対回転角, $\theta_0 := M_u/R_{ki}$ (塑性回転角), R_{ki} : 初期剛性, n : 形状指数である。

また、形状指数 n は表-1 のような算定式より求めている。

2.2. 入力データの簡素化

これまで、梁、柱、接合部アンゲル材、ボルトなどの断面諸量は全て解析の都度入力してきた。しかし、現実には特殊な場合を除いて型材以外利用しないものと考えられるため、本論文ではあらかじめ型材の断面諸量重量に

表-1 形状指数算定式の一覧

接合タイプ	形状指数 n	データ数
single web-angle 接合	$0.520 \log_{10} \theta_0 + 2.291$... $\log_{10} \theta_0 > -3.073$ 0.695 ... $\log_{10} \theta_0 \leq -3.073$	16
double web-angle 接合	$1.332 \log_{10} \theta_0 + 3.952$... $\log_{10} \theta_0 > -2.582$ 0.573 ... $\log_{10} \theta_0 \leq -2.582$	14
top- and seat-angle 接合 (double web-angle 付設)	$1.398 \log_{10} \theta_0 + 4.631$... $\log_{10} \theta_0 > -2.721$ 0.827 ... $\log_{10} \theta_0 \leq -2.721$	17
top- and seat-angle 接合	$2.003 \log_{10} \theta_0 + 6.070$... $\log_{10} \theta_0 > -2.880$ 0.302 ... $\log_{10} \theta_0 \leq -2.880$	15
header-plate 接合	$0.512 \log_{10} \theta_0 + 2.264$... $\log_{10} \theta_0 > -2.390$ 1.041 ... $\log_{10} \theta_0 \leq -2.390$	15

関するデータファイルを作成し入力簡素化を図った。従って、入力時には型式のみを入力するだけでよい。本論文で改良された部分を含む解析システムの流れ図を図-1 に示している。

3. 半剛結骨組構造の解析条件等

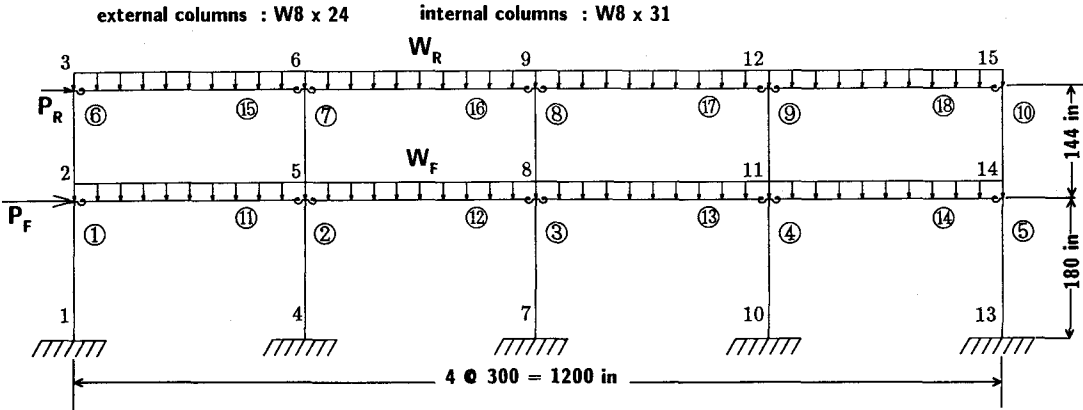
2.で改良された平面骨組構造解析システムを用い、S.D.Lindsey が半剛結骨組構造の挙動解析例に用いた 2 層 4 径間骨組を基本にして検討を行った。

本論文では、接合部に top- and seat- angle 接合を用いた場合について下記に示す項目について検討を行った。すなわち、

- 1) 使用荷重載荷時の屋根部水平方向変位
- 2) 係数倍荷重載荷時の柱部最大曲げモーメント

について、接合部アングル材寸法や梁、柱の型番を変化させ検討を行った。また、剛結接合を仮定し AISC-LRFD の B_1, B_2 法を用いた場合の断面モーメントも求め上記結果と比較を行っている。なお、本解析では S.D.Lindsey が用いた骨組を基本としていること、また梁、柱、アングル材等全て AISC-LRFD の設計基準に基づいていること等により、米国慣用単位系を用いて整理している。

3.1. 骨組および接合部アングル材の主形状寸法および設定荷重



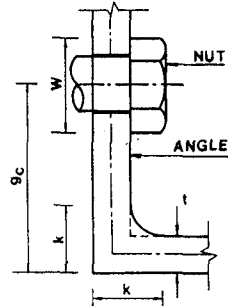
図－2 解析に用いた 2 層 4 径間骨組

図－2 に本解析に用いた 2 層 4 径間骨組の主形状寸法、要素、節点番号を示す。また、本骨組の中心間距離は 25 ft (7.62m) であり、各基準荷重強度は床板死荷重：68psf，床板活荷重：40psf，屋根死荷重：20psf，屋根活荷重：12psf，風荷重：15psf (1psf=4.89 kg/m²) であり、使用荷重、係数倍荷重はそれぞれ

使用荷重 (D+L)		係数倍荷重 (1.2D+0.5L1.3W)	
$W_R = 0.0667 \text{ kip/in}$	$P_R = 2.925 \text{ kip}$	$W_R = 0.0625 \text{ kip/in}$	$P_R = 3.803 \text{ kip}$
$W_F = 0.2250 \text{ kip/in}$	$P_F = 6.581 \text{ kip}$	$W_F = 0.2117 \text{ kip/in}$	$P_F = 8.556 \text{ kip}$

となる。

一方、接合部のアングル材主形状寸法に関しては、図－3 に示すようなアングル材において、板厚 t 、アングル材の長さ ℓ 、アングル材のかかと部から梁フランジに近接する締結孔中心点までの距離 g_c 、を種々変化させ検討を行っている。なお、接合部初期剛性、限界曲げ耐力の算定式に関しては紙面の都合により省略する。



図－3 アングル材

3.2. B_1, B_2 法による部材最大曲げモーメントの算定

AISC-LRFD 示方書では $P-\delta, P-\Delta$ 効果を考慮し、部材の最大曲げモーメントを算定する方法として B_1, B_2 法を採用している。この方法は、与えられた係数倍荷重載荷状態を対称変形荷重載荷状態 ($P-\delta$ 効果) と逆対称変形荷重載荷状態 ($P-\Delta$ 効果) に分類し、それぞれについて線形構造解析を行い、その結果を基にして B_1, B_2 係数及び断面力を算定するもので、一般に式 (2) のように与えられている。

$$M_u = B_1 M_{nt} + B_2 M_{\ell t} \quad \dots (2)$$

ここで、 M_u ：部材の最大曲げモーメント、 M_{nt} ：対称変形荷重載荷時の最大曲げモーメント、 $M_{\ell t}$ ：逆対称変形荷重載荷時の最大曲げモーメントであり、 B_1, B_2 は、

$$B_1 = \frac{C_m}{(1 - P_u/P_e)} \geq 1 \quad \dots (3)$$

$$B_2 = 1 / \left\{ 1 - \Sigma P_u \left(\frac{\Delta_{oh}}{\Sigma HL} \right) \right\} \quad \text{or} \quad B_2 = 1 / \left\{ 1 - \frac{\Sigma P_u}{\Sigma P_e} \right\} \quad \dots (4), (5)$$

として示される。上式において、 P_u ：考えている部材に作用する軸力、 P_e ：有効長係数（K factor）を考慮したオイラーの座屈荷重、 C_m ：材端モーメントや拘束条件によって決定される係数、 Δ_{oh} ：考えている層の相対水平変位、 L ：考えている層の高さ、 ΣP_u ：考えている層に作用する軸力の総和、 ΣH ：考えている層に作用する水平せん断力の総和である。

4. 解析結果

4.1. 接合部 $M-\theta_r$ 特性について

アンゲル材の型番および接合部パラメータを変化させた場合の接合部 $M-\theta_r$ 曲線を図-4に示す。図-4(a)には梁材としてW18x50, top- and seat- angle 材として、L8x3 1/2x1/2, $g_c=2.5$ in を用い、 ℓ を変化させた場合の結果を、図-4(b)には梁材としてW18x50, アンゲル材として、L8x3 1/2x3/8, $\ell=6$ in として、 g_c を変化させた場合の結果を示している。

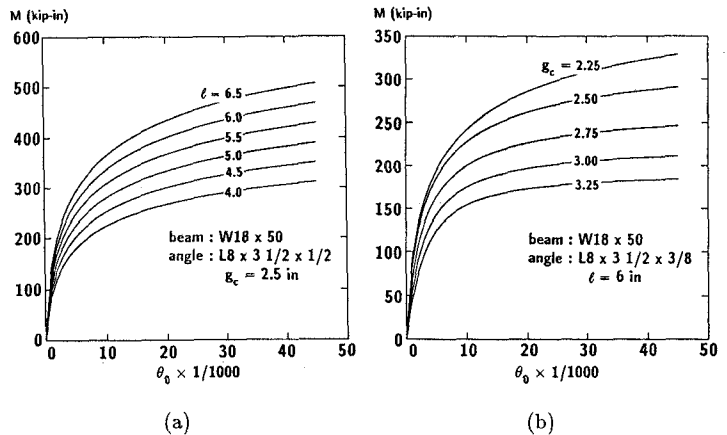


図-4 アンゲル材寸法を変化させた場合の $M-\theta_r$ 曲線

図-4(a)では ℓ を増加させることにより、図-4(b)では g_c を減少させることにより、初期剛性、限界曲げ耐力が大きくなることがわかる。図-4(a)では $\ell=6.5$ in の場合が $\ell=4.0$ in の場合の、図-4(b)では $g_c=2.25$ in の場合が $g_c=3.25$ in より、約2倍の初期剛性、限界曲げ耐力を示しているようである。

4.2. 使用荷重載荷時の挙動解析

図-5に屋根部梁材にW14x22、床部梁材としてW18x50を用い、接合部アンゲル材としてL8x3 1/2x3/8, $g_c=2.5$ in とし、 $\ell=4$ in, 6 in とした場合の使用荷重載荷時の変形挙動を剛結接合の場合と比較して示している。

$\ell=6$ in の場合は $\ell=4$ in の場合と比較して約2倍の接合部剛度を有していると考えられるが、水平変位にはそれほど差異はなく、それぞれ剛結接合の場合の4.5, 5.5倍程度となっているようである。半剛結接合の場合には各柱材は一端固定、他端自由の梁に類似の挙動を示しているようであるが、剛結接合の場合は支点と床、屋根部が固定支持され、かつ床、屋根部が同程度に右方向へ移動しているように示されている。

図-6には、屋根部梁材としてW14x22, 床部梁材としてW18x50, 接合部アンゲル材として g_c を2.5 in にし、 ℓ を4.0 in から6.5 in まで変化させた場合（図-6(a)）と、 ℓ を一定にし、 g_c をそれぞれ2.25 in から3.25 in まで変化させ

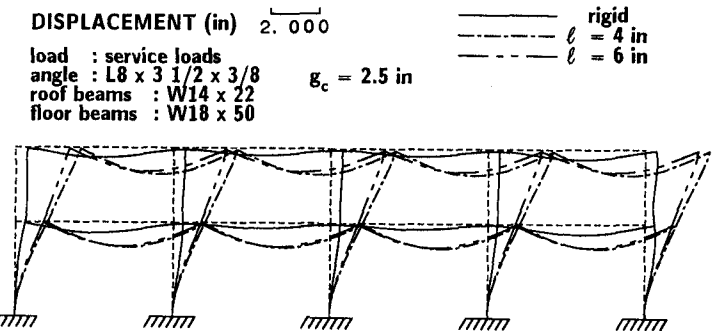


図-5 使用荷重載荷状態における変形図

た場合について（図-6(b)）を、屋根部水平変位(Δ)を屋根の高さHで除し無次元化して示している。

また図-7には、屋根部梁材として W12x19, 床部梁材として W18x46 を用いた場合の、図-6と同様の解析結果について示している。

図-7の結果は、図-6に比較して屋根部梁材の桁高が小さくなっており、梁の剛性や接合部剛性が低下するため水平移動量が若干大きくなっているようである。半剛結接合の場合は $L8 \times 3 \frac{1}{2} \times 1/2$ が最も剛のようで、 $\Delta/H=1/200$ 程度の値を示している。全体的には $1/200 \sim 1/70$ 程度にあるようである。剛結接合の場合は前記のように変形量も少なく、図-6の場合は0.00152, 図-7の場合には0.00159となっている。

4.3. 係数倍荷重載荷時の断面力解析

図-8に屋根部梁材として w14 x 22, 床部梁材として w18x50 を用い接合部アングル材として g_c を 2.5in とし、 $L8 \times 3 \frac{1}{2} \times 1/2$ を用い $\ell = 4in, 6in$ と変化した場合の係数倍荷重載荷時の曲げモーメント図、せん断力図を剛結接合の場合と比較して示している。半剛結接合の場合、屋根部のモーメント分布は載荷荷重も比較的小さいために剛結接合の場合と著しい差異はないようである。床部モーメントに関しては載荷荷重も大きいので、半剛結接合の場合にはピン支持に近い分布性状を示している。一方、せん断力分布に関しては剛結接合を含めた接合形式の違いによる差異は小さいため、ここでは示していない。

表-2には屋根部梁材として W14x22, 床部梁材として W18x50, 接合部アングル材として $L8 \times 3 \frac{1}{2} \times 1/2$ を用いた場合の柱の材端モーメントについて、剛結接合を仮定し線形解析で求められた各材端モーメントに対する比で表し

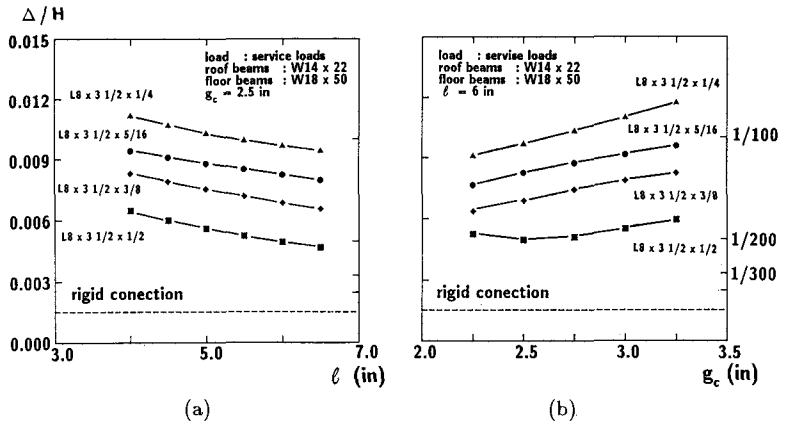


図-6 屋根部の水平変位
(屋根部梁材W14x22,床部梁材W18x50)

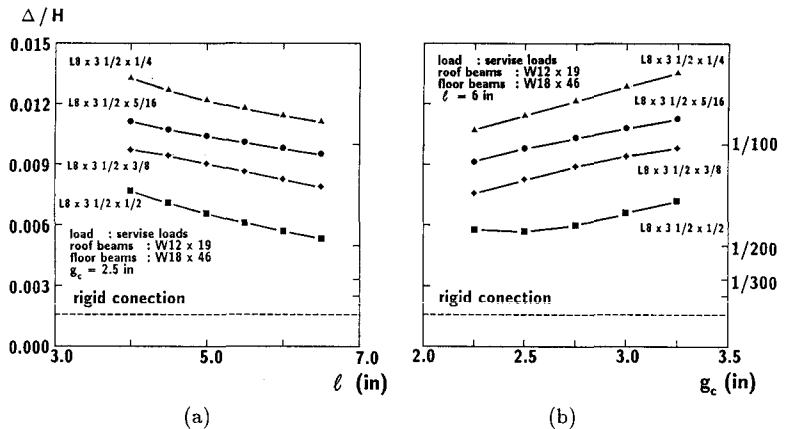


図-7 屋根部の水平変位
(屋根部梁材W12x19,床部梁材W18x46)

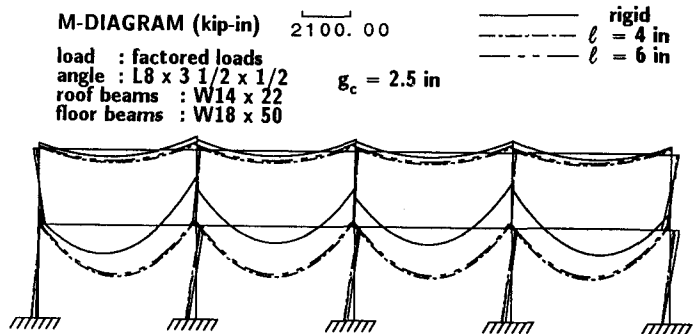


図-8 係数倍荷重載荷状態における曲げモーメント図

表-2 各部材端最大モーメントの一覧
(屋根部梁材W14x22,床部梁材W18x50,アングル材L8x31/2x1/2)

部材	節点 番号	半剛結接合					剛結			基準とした モーメント (kip-in)
		$g_c=2.50\text{in}$ $\ell=4.00\text{in}$	$g_c=2.50\text{in}$ $\ell=5.00\text{in}$	$g_c=2.50\text{in}$ $\ell=6.00\text{in}$	$g_c=2.75\text{in}$ $\ell=6.00\text{in}$	$g_c=3.00\text{in}$ $\ell=6.00\text{in}$	①	②	③	
1	1	3.68	3.39	3.13	3.11	3.25	1.16	1.33	1.22	-85.28
	2	-2.33	-2.11	-1.88	-1.76	-1.88	0.48	0.21	0.46	-32.46
2	4	1.55	1.47	1.41	1.41	1.44	1.06	1.12	1.08	-282.48
	5	0.53	0.58	0.61	0.61	0.59	1.06	1.11	1.07	297.07
3	7	1.71	1.62	1.56	1.55	1.59	1.07	1.12	1.07	-254.32
	8	0.65	0.70	0.74	0.74	0.71	1.07	1.12	1.07	242.04
4	10	1.87	1.78	1.71	1.70	1.74	1.07	1.12	1.07	-230.75
	11	0.79	0.86	0.92	0.91	0.88	1.10	1.13	1.07	195.40
5	13	1.17	1.15	1.14	1.15	1.16	1.05	1.06	1.03	-290.13
	14	0.37	0.44	0.51	0.53	0.50	1.03	1.04	1.02	379.62
6	2	0.37	0.50	0.61	0.58	0.51	1.00	1.00	1.00	301.11
	3	0.28	0.40	0.49	0.47	0.40	1.00	1.00	1.00	-252.37
7	5	0.14	0.08	0.05	0.09	0.13	1.01	1.01	1.01	-146.61
	6	1.03	1.09	1.13	1.06	1.02	1.02	1.01	1.01	125.05
8	8	0.34	0.19	0.10	0.20	0.30	1.01	1.01	1.02	-63.59
	9	1.94	2.02	2.06	1.95	1.89	1.02	1.02	1.02	66.26
9	11	-2.42	-1.36	-0.68	-1.38	-2.07	0.90	0.88	0.88	9.81
	12	10.43	10.78	10.85	10.34	10.11	1.10	1.10	1.09	12.30
10	14	0.32	0.39	0.46	0.48	0.44	1.00	1.00	1.00	-367.51
	15	0.74	0.86	0.95	0.90	0.82	1.00	1.00	1.00	329.61

①: 著者等の解析手法 (Bowing 効果を考慮) ②: B_1, B_2 法、 B_2 は式 (5) ③: B_1, B_2 法、 B_2 は式 (4) を用いた。

*剛結接合を仮定し、線形解析で得られた各材端モーメント (表右端) に対する比で表示している。

ている。比較のために剛結接合を仮定した場合について、本解析手法による解析結果と AISC LRFD の B_1, B_2 法に基づいた結果も示している。

剛結接合を仮定する場合における各解析結果について検討を行うと、柱番号 6~10 において三つの解析結果はほぼ同じような値を示しているが、一層目の柱材に関しては③の解析結果が本解析結果とほぼ一致しているが、②の解析結果は若干大きくなっているようである。一方、半剛結接合の場合は、基準モーメントが小さい部分で 2.0 以上の大きい値となっているようである。第 2 層目の床部のモーメント (節点番号 2, 5, 14) は剛結接合の場合のほぼ 1/2 以下の値であり、第 1 層目の支点モーメント (節点番号 4, 7, 10) は最低 40%, 最大 87% 増加し、節点番号 5, 8, 7 におけるモーメントは最大約 50% 程低減しており、剛結接合を仮定し線形解析結果より得られた性状とは著しく異なっていることがわかる。

接合部アングル材の ℓ を増加させた場合 ($\ell = 4\text{ in} \sim 6\text{ in}$) には、剛結接合状態の方向に値が推移していることを確認できる。また ℓ を一定とし、 g_c を 2.75 in から 3.00 in に変化させた場合には ℓ の変化ほど、値が変化しないようである。

5. まとめ

半剛結骨組構造物の挙動解析を合理的に行うことを目的として、先に開発した解析システムを改良し、数値計算例として top and seat angle 接合を有する骨組の挙動解析を梁、接合部アングル材寸法を変化させ行った。

本解析システムを用いることにより、アングル材接合に限定して、梁、柱部材同様アングル材の形状寸法を入力するだけで接合部 $M-\theta$ 特性の評価や、挙動解析を容易にできることが明らかになった。