

I-10

三要素パワーモデルの形状指数算定式とその評価

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
 名古屋工業大学 正員 後 藤 芳 顯
 室蘭工業大学 正員 松 岡 健 一
 室蘭工業大学 学生員 小 泉 正 樹

1. はじめに

鋼平面骨組構造において、梁と柱の接合部は、通常2種類の仮定に基づいて構造計算が行われている。一つはラーメン構造において定義される剛結接合、もう一つはトラス構造に代表されるピン接合である。しかしながら実際の接合部の挙動に目を向けてみると、剛結接合とピン接合の中間的かつ非線形な剛性特性を有することが過去の実験、研究等により明らかになっている。実状に即した平面骨組構造の構造計算を行うためには半剛結接合部の特性を十分に把握し、この特性を構造解析プログラムに効率良く組み込むことが重要となってくる。

このような経緯から今まで数多くの接合部モデルが報告されている。簡易的モデルは linearモデルであり、最も一般的なモデルは Frye-Morrisの多項式モデル¹⁾である。また岸-Chenは次の2種類のモデルを提案している。Chen-Luiの exponentialモデルを修正し curve-fitting により忠実に実験値を再現することの可能な修正 exponentialモデル²⁾と、Richard-Abbott³⁾の応力歪関係評価式に基づく三要素 powerモデルである。

図-1には、top- and seat-angle 接合の実験値とそれに基づき決定された3種類の評価式 (Frye-Morrisの多項式モデル、修正 exponentialモデル、三要素 powerモデル) が示されている。

岸-Chenが提案した三要素 powerモデル⁴⁾は、接合部初期剛性 R_{ki} と限界曲げ耐力 M_u 、形状指数 n の三つのパラメーターから構成されている。接合部初期剛性 R_{ki} と限界曲げ耐力 M_u は、接合部に用いているアングル材の変形性状を力学的にモデル化することにより定式化が可能でその値を算出することができるのであるが、形状指数 n を力学的に定式化することは非常に困難な問題となっている。現在、著者等は半剛結接合に関するデータベース⁵⁾を用いて三要素 powerモデルと実験データの両者間に最小自乗法を適用し形状指数 n の値を決定している。この方法は実験値を良く再現することができるが、上述の多項式モデルや修正 exponentialモデルと同様実験値がなければ、 $M-\theta_r$ 曲線を得ることができないという難点を持っている。

そこで本論文では、半剛結接合に関するデータベースから得られる実験データに直接最小自乗法を適用して求められた形状指数 n を縦軸、 R_{ki} と M_u の比を横軸にとりグラフ化し、そのプロットされたデータを直線回帰することで形状指数算定式の決定を試みた。さらにその算定式の妥当性を検討するために、構造解析を行い、修正 exponentialモデルを用いた場合の応答結果と比較する形でその妥当性の検討を行った。

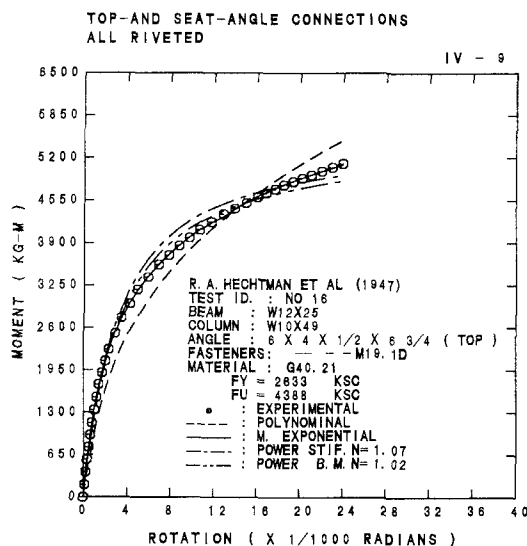


図-1 実験値と3種類の評価式

Prediction Equation of the Shape Parameter of Three-parameter Power Model and its Applicability

by Norimitsu KISHI, Yoshiaki GOTO, Ken-ichi MATSUOKA and Masaki KOIZUMI

2. 三要素 powerモデルとその無次元化

本論文では、Richard-Abbottが応力歪関係のモデルに用いた四要素 powerモデルを三要素型に縮小して応用することを試みている。式は、以下に示す通りである。

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

但し $\theta_0 = M_u / R_{ki}$

このモデルの最大の利点は、三つのパラメーターを力学的に決定することが可能であれば設計への対応が容易であると考えられることや、モーメント M 、相対回転角 θ_r や任意点の接合部接線剛性を繰り返し計算を用いずに直接的に算出することが可能で、非線形構造解析において計算時間の短縮を図ることができること等である。

現在このモデルは、single/double web-angle 接合⁶⁾、top- and seat-angle 接合^{7),8)} (double web-angleを付設するものとししないものの2種類)、header-plate接合の5種類の接合タイプに適用することができる。

次に上式の両辺を M_u で割り無次元化を試みると、以下のような式となる。

$$\frac{M}{M_u} = \frac{(R_{ki} / M_u) \theta_r}{\left\{ 1 + \left[(R_{ki} / M_u) \theta_r \right]^n \right\}^{1/n}} \quad \dots \dots (2)$$

3. 形状指数 n の決定

形状指数 n の決定に関して、以下の3種類の方法で決定した。

- 1) 実験値 $M-\theta_r$ 分布と三要素 powerモデル間に直接最小自乗法を適用して、データベースに含まれている全ての実験ケースに関して形状指数 n を決定する。
 - 2) 1)により求められた形状指数 n を基に、接合タイプ毎、あるいは全接合タイプに対し形状指数 n の評価式として $\log_{10} R_{ki}$ の一次式を決定する。(方法 (1))
 - 3) 2)と同様の操作を行い、 $\log_{10}(R_{ki}/M_u)$ の一次式を決定する。(方法 (2))
- 1) ~ 3) に示す三要素 powerモデルの形状指数 n の決定方法は、プログラム PACOM⁹⁾ (Parameter Analysis of COnnection Models) に組み込まれている。

表ー1 形状指数算定式

接合タイプ	形状指数 n (方法 (1))	形状指数 n (方法 (2))	No. of data
single web-angle 接合	$-0.068 \log_{10} R_{ki} + 1.598$	$-0.520 \log_{10}(R_{ki}/M_u) + 2.291$	16
double web-angle 接合	$-0.583 \log_{10} R_{ki} + 4.468$	$-1.332 \log_{10}(R_{ki}/M_u) + 3.952$	14
top- and seat-angle 接合 (double web-angle 付設)	$-2.158 \log_{10} R_{ki} + 15.20$	$-3.716 \log_{10}(R_{ki}/M_u) + 10.39$	22
top- and seat-angle 接合	$-0.827 \log_{10} R_{ki} + 6.383$	$-2.003 \log_{10}(R_{ki}/M_u) + 6.070$	15
header-plate 接合	$-0.361 \log_{10} R_{ki} + 3.359$	$-0.512 \log_{10}(R_{ki}/M_u) + 2.264$	15
上記全接合タイプ	$-0.447 \log_{10} R_{ki} + 4.008$	$-1.053 \log_{10}(R_{ki}/M_u) + 3.684$	82

表ー1 に方法 (1),(2) で得られた各接合タイプ毎あるいは全接合タイプのデータを用いた場合の算定式を示す。図ー2 には、 $\log_{10}(R_{ki}/M_u)$ の一次式を用いて形状指数 n を算定する場合について、 n の分布状況と回帰直線を示す。(a)はdouble web-angle接合タイプのみのデータを用いた場合であり、(b)は全データを考慮した場合の結果である。

方法 (1) の場合は $\log_{10}R_{ki}$ を用いているため、その係数は次元を含んだ形で評価されているものと考えられる。一方、方法 (2) の場合は $\log_{10}(R_{ki}/M_u)$ を変数としているため全てが無次元で処理されており、用いる単位系にも無関係で統一がとれているものと考えられる。これにより本論文では方法 (2) で得られた評価式を用いて検討を行うものとした。

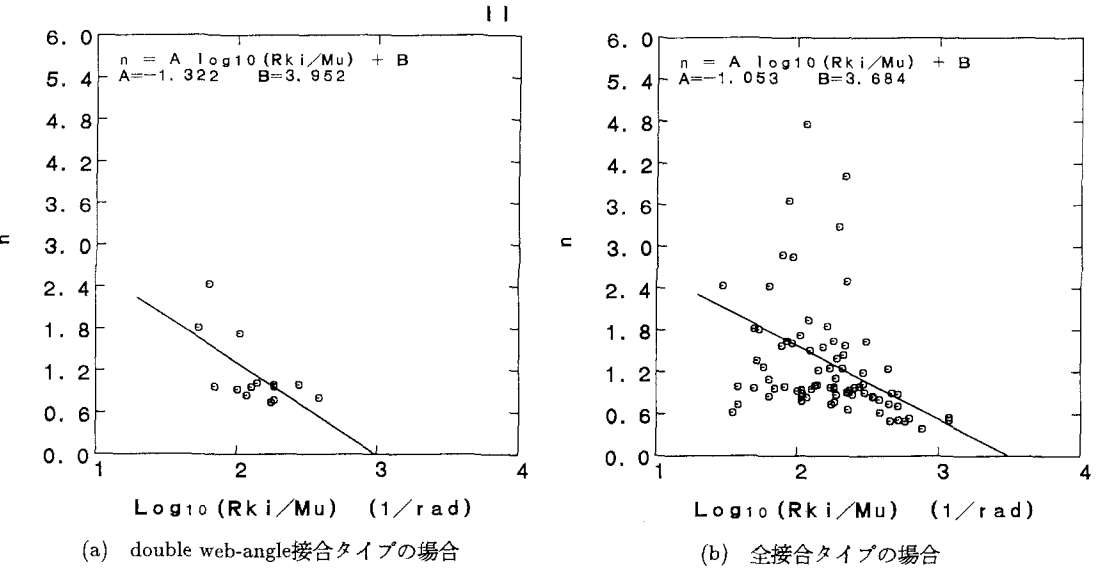


図-2 形状指数 n の分布状況と回帰直線

4. 形状指数算定式の構造解析への適用性について

前節では形状指数 n の算定式とその決定方法について述べたが、ここでは形状指数決定のための回帰式の構造解析への適用性について検討を行った。

4.1. 検討方法

Moncarz等¹⁰⁾及び後藤等¹¹⁾が解析例として用いた一、二、三層一径間鋼骨組構造を取り上げその接合部に、データベースに集積されている半剛結接合の特性を適用し次のような手順に従って数値解析を行った。すなわち、

- (1) データベースから得られる各実験データに対して修正 exponential モデルを適用して構造解析を行い各節点の断面力、変形量を求める。
- (2) $n - \log_{10}(R_{ki}/M_u)$ の形状指数評価式より得られる形状指数 (全接合タイプで決定した算定式と各接合タイプ毎に決定した算定式の2種類) を三要素 powerモデルに適用し、構造解析を行う。
- (3) 各節点の断面力、変形量について (2)の結果の (1)の結果に対する比を計算し、無次元化して整理する。
- (4) 以上 (1)~(3)までの操作を半剛結接合に関するデータベース中の三要素 powerモデルの適用可能な全 82種類のデータについて行う。

以上の操作を行った後、縦軸には無次元化された断面力、変形量を取り、横軸には $\log_{10}(R_{ki}/M_u)$ で統一しグラフ化して比較検討を行った。

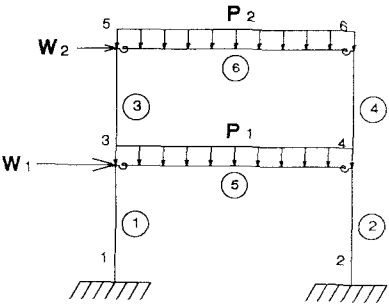


図-3 解析モデル

図-3には用いた構造解析モデルと載荷荷重を示し、表-2には部材断面諸量と載荷荷重量が示してある。(紙面の都合上、二層一径間骨組のみ示す。)

構造解析については、先に後藤-Chen¹²⁾が示した幾何学的非線形のみを考慮し、比較的変形が小さい場合に対し十分な精度を有する梁と柱の剛性方程式と、非線形な半剛結特性とを組み合わせた非線形構造解析のアルゴリズムを用いている。

表-2 部材断面諸量と載荷荷重量

部材番号	部材長 (cm)	断面積 (cm ²)	断面二次モーメント (cm ⁴)
1	365.76	62.65	7075.93
2	365.76	62.65	7075.93
3	365.76	62.65	7075.93
4	365.76	62.65	7075.93
5	731.52	83.87	35088.31
6	731.52	58.84	15608.68

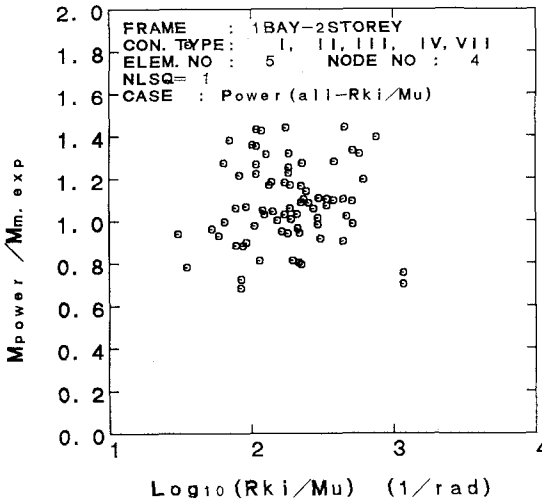
弾性係数 : 210000 kg/cm²

$W_1 = 2.613 \text{ tonf}$ $P_1 = 4.554 \text{ tonf/m}$

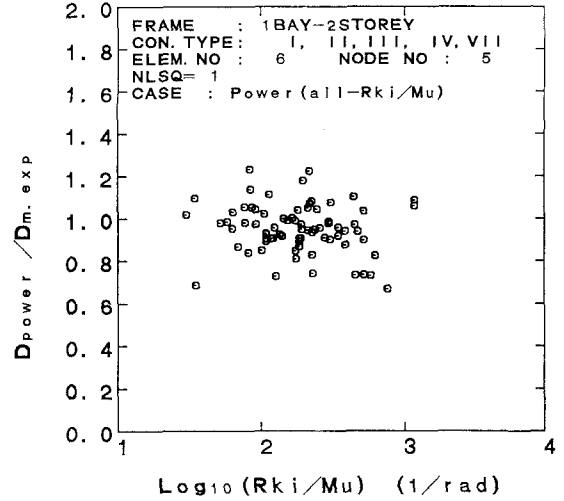
$W_2 = 1.306 \text{ tonf}$ $P_2 = 2.768 \text{ tonf/m}$

4.2. 検討結果

4.1. では、形状指数算定式において構造解析を試みたが、図

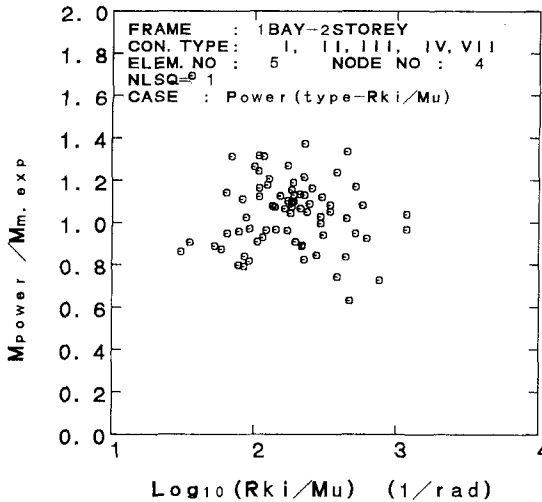


(a) 曲げモーメントの応答結果

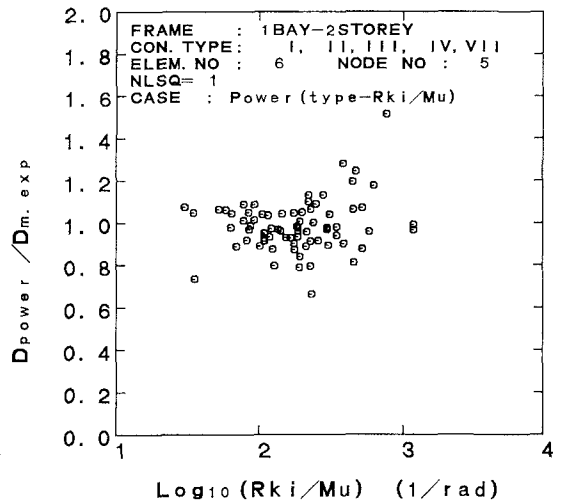


(b) 変形量の応答結果

図-4 全接合タイプを用いて決定された算定式を適用した場合の応答結果



(a) 曲げモーメントの応答結果



(b) 変形量の応答結果

図-5 各接合タイプ毎に決定した算定式を適用した場合の応答結果

－ 4, 5 にその応答結果を示す。

これらの図は 4.1.で行った検討において二層一径間骨組の曲げモーメントと変形量に関する結果を示しており、図－ 4 は全接合タイプを用いて決定された算定式を適用した場合の応答結果で、図－ 5 は各接合タイプ毎に決定した算定式を適用した場合の応答結果を同一の図に整理したものである。それぞれ (a) は曲げモーメント比、(b) は変形量比に関する結果である。

本解析においては、断面力、変形量とも最大応答値を示す節点に着目して整理した。図－ 4, 5 において、曲げモーメントに関しては部材 5 の節点 4 であり、変形量に関しては部材 6 の節点 5 についてである。

図－ 4, 5 において全接合タイプを用いて算定式を決定した場合と各接合タイプ毎に算定式を決定した場合を比較すると、全接合タイプを用いて決定した算定式を適用した場合は、若干とび抜けた値を示しているものもあるが、曲げモーメント比でおよそ 0.7～1.4、変形量比で 0.7～1.2 程度に分布している。一方、各接合タイプで算定式を決定した場合は曲げモーメント比で 0.7～1.3、変形量比で 0.8～1.2 程度に分布していることがわかる。本解析ケースの場合には各接合タイプごとに形状指数算定式を設定するほうが、実験値 $M-\theta_r$ 特性をより良く回帰していることが明らかになった。

また、図－ 5 の $\log_{10}(R_{ki}/M_u) > 2.5$ の領域において曲げモーメント、変位とも多少ばらつきが大きいようである。この部分のデータは、top- and seat-angle 接合タイプが多く、形状指数算定のための実験データ数がいまだ十分でないことを示しているものと思われる。

ここでは、二層一径間骨組の結果のみを示しているが、他の一層、三層一径間骨組に関しても類似の結果を示すことが明らかになっている。

以上より、接合タイプによっては実験データの不足により十分精度の良い形状指数算定式を得ることができない場合もあるが、応答結果に割増し係数を乗ずる等の処理によって十分構造解析に組み込むことが可能であるものと考えられる。

5. まとめ

半剛結接合を有する鋼平面骨組構造物において、その非線形な接合部特性と梁と柱の幾何学的非線形を考慮した応答問題に関して、AISC-LRFD の B_1 、 B_2 法を用いて算定することなしに直接的しかも合理的に断面力、変形量を算定することを目的とし、半剛結接合部のモデルとして三要素 power モデルを取り上げその妥当性について、二、三の構造物についての応答解析を基に検討を行った。

接合タイプによっては、多少ばらついている場合もあるようであるが、本論文で求められた形状指数決定のための $\log_{10}(R_{ki}/M_u)$ の一次式は、構造解析結果に割増し係数を導入することより工学的に十分適用可能であるものと考えられる。

以上より、アングル接合系の半剛結接合を有する骨組構造は、 B_1 、 B_2 法を用いることなしに直接的に幾何学的非線形を考慮した解析結果を得ることは勿論のこと、接合部の基本設計も可能になるものと考えられる。

参考文献

1. Frye, M.J. and Morris, G.A. (1975). "Analysis of flexibly connected steel frames." Canadian J. Civ. Engrg., 2, 280-291.
2. Kishi, N. and Chen, W.F. (1986). "Steel connection data bank program." CE-STR-86-18, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
3. Richard, R.M. and Abbott, B.J. (1975). "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, J. Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.101, No.EM4, 511-515.

4. 岸徳光, Chen, W.F., 松岡健一, 能町純雄 (1989). "アングル材を用いた鋼梁-柱接合部の初期剛性と極限曲げ耐力の定式化." 構造工学論文集, 土木学会, 35A(3月), 97-105.
5. Chen, W.F. and Kishi, N. (1989). "Semirigid steel beam-to-column connections: Data base and modeling." J. Struct. Div., ASCE, 115(ST1), 105-119.
岸徳光, Chen, W.F., 松岡健一, 能町純雄 (1989). "鋼梁-柱接合部の曲げ剛性評価実験に関するデータベース作成とその応用." 構造工学論文集, 土木学会, 35A(3月), 75-82.
6. Kishi, N. et al. (1987). "Moment-rotation relation of single/double web-angle connections." CE-STR-87-18, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
7. Kishi, N. and Chen, W.F. (1987). "Moment-rotation relation of top- and seat angle connections." CE-STR-87-4, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
8. Kishi, N. et al. (1987). "Moment-rotation relation of top- and seat-angle with double web-angle connections." CE-STR-87-16, School of Civ. Engrg., Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
9. 岸徳光, 後藤芳顕, 松岡健一 (1990). "半剛結接合に関するデータベースを用いた平面骨組構造解析システムの開発." 構造工学論文集, 土木学会, 36A(3月), 1065-1072.
10. Moncarz, P.D. and Gerstle, K.H. (1981). "Steel Frames with Nonlinear Connections." J. Struct. Div., ASCE, 107(ST8), 1427-1441.
11. Goto, Y. and Chen, W.F. (1987). "Second-order elastic analysis for frame design." J. Struct. Div., ASCE, 113(ST7), 1501-1519.
12. Goto, Y. and Chen, W.F. (1988). "On the computer-based design analysis for the flexibly jointed frames." J. Construction Steel Research, 8, Elsevier, 203-231.
13. 後藤芳顕, 鈴木五月, 松浦聖 (1989). "はりと柱の結合部の非弾性挙動を考慮した半剛結骨組の臨界挙動の解析." 土木学会論文集, 401/I-12, 287-296.
14. 岸徳光, 松岡健一, 能町純雄, 米田均 (1990). "半剛結接合に関するデータベースを用いた三要素パワーモデルの形状指数評価." 土木学会北海道支部論文報告集, 第46号, 1-6.