

I-40 鋼梁一柱の接合部剛性評価に関する 実験結果の集積

室蘭工業大学 学生員 伊藤 和久
 室蘭工業大学 正 員 岸 徳光
 室蘭工業大学 正 員 松岡 健一
 Purdue 大学 W. F. Chen
 日本大学 正 員 能町 純雄

1. はじめに

これまで、鋼骨組構造物の解析において、一般的には接合部は完全固定あるいはピン接合と仮定して設計がなされてきた。現実にはピン接合を仮定する場合でもある程度の剛性を有し、その特性も非線形であることが明らかとなっている。鋼骨組構造物の合理的な設計手法を確立するために、この梁-柱接合部のM- θ 特性を合理的に評価するための実験研究並びに理論研究が1930年代から継続的になされている。1980年代に入ると、それまでに行なわれた実験結果の系統的な調査がNethercot¹⁾によって行なわれ、またGoverdhan²⁾により実験結果の収集が試みられている。

特に、LRFD(Load and Resistance Factor Design)³⁾のPR(partially restrained)タイプ接合を用いる場合には接合部のM- θ 特性を組み込んだ非線形構造解析に基づいて設計が行なわれなければならない。このため、半剛性接合を有する骨組構造物のより合理的な設計法を確立するためには、接合部の適切な剛性評価を行なわなければならない。全世界の接合部剛性評価に関する実験データを基にしたデータベースの作成とその効率的な運用の必要性が叫ばれている。

本論文ではこのような要求に基づき、有効と思われる接合部剛性評価に関する実験データを集積するとともに、これらを機能的に運用するための支援ソフトの作成を行なったのでこの概要を報告する。

2. 接合部のM- θ 特性のモデル化

過去にいくつかの接合部のモデルが提案されている。初期の頃のモデルは初期剛性のみを用いる線形モデルであった。これは容易に解析に適用しうるが、半面、大部分の回転角範囲に対して適していないという欠点を持っている。このため、この改良型としてbilinearモデル、piece-wise linearモデルが考えられた。しかし剛性が急激に変化する欠点を持っていた。Jones等⁴⁾はcubic-B-splineモデルを提案した。しかし、このモデルは定式化のために多くのデータを必要とし、工学的には不向きのように考えられる。またその他にRichard等⁵⁾が提案したパワーモデル、Chen-Lui等⁶⁾が提案したexponentialモデルらがあるが、いずれも長所、短所を持っており、現時点では、接合部のM- θ 特性を完全に正確に表すモデルは提案されていない。

ここでは現時点で最もよく応用されているFrye-Morris⁷⁾の多項式モデル、実験結果に対して曲線補間を行なうことによって得られる岸-Chen⁸⁾の修正exponentialモデル、接合部のパラメータ、特性からのみ定式化されるパワーモデル、の三つについて説明する。

1) 多項式モデル

このモデルは、過去に多く用いられており、これはSommer⁹⁾の手法を基にFrye-Morrisが提案したモデルである。このモデルは実験結果を基に、係数を最小二乗法を用いて決定するものである。実験結果をよく近似するモデルではあるが、負の剛性を与えるという欠点を持っている。このモデルの一般形としては

$$\theta_r = C_1 \cdot (KM) + C_2 \cdot (KM)^3 + C_3 \cdot (KM)^5 \quad \dots\dots(1)$$

ここでCi: 曲線補間係数 K: 接合部のパラメータからなる標準化係数

2) 修正 exponentialモデル

Chen-Luiのexponentialモデルを岸-Chenによって線形成分も含むように改良されたモデルである。これ

は次のような形の関数である。

$$M = M_0 + \sum_{j=1}^m C_j [1 - \exp(-\frac{|\theta_r|}{2j\alpha})] + \sum_{k=1}^n D_k (|\theta_r| - |\theta_k|) \cdot H[|\theta_r| - |\theta_k|] \quad \dots\dots(2)$$

ここで M_0 : 初期接合部モーメント

$H[\]$: Heavisideのステップ関数

α : scaling factor

$H[\theta] = 1 \quad (\theta > 0)$

θ_k : k番目の線形成分の始まる回転角

$H[\theta] = 0 \quad (\theta < 0)$

C_j, D_k : 曲線補間係数

元の $M-\theta$ データに対して線形補間法を用いて各データ間の重み関数を等しくし、 C_j, D_k が決定される。任意の回転角 $|\theta_r|$ における剛性は、式(2)を $|\theta_r|$ で微分することによって得られる。

接合部が載荷される場合

$$R_k = R_{kt} = \frac{dM}{d|\theta_r|} = \sum_{j=1}^m \frac{C_j}{2j\alpha} \exp(-\frac{|\theta_r|}{2j\alpha}) + \sum_{k=1}^n D_k \cdot H[|\theta_r| - |\theta_k|] \quad \dots\dots(3)$$

除荷される場合

$$R_k = R_{ki} = \frac{dM}{d|\theta_r|} \Big|_{|\theta_r|=0} = \sum_{j=1}^m \frac{C_j}{2j\alpha} + D_k \cdot H[-|\theta_k|] \quad |_{k=1} \quad \dots\dots(4)$$

このモデルの長所として次の点が挙げられる。

①定式化は相対的に単純であり簡略である。②非線形解析の全回転角範囲で載荷、除荷を扱うことが可能である。③データの接合剛性の急激な変化を定式化可能なものとしている。

プログラムにおいては $m=6$ として処理されている。

3) 三つのパラメータを持つパワーモデル

上記の修正exponentialモデルは、実験結果に対して最小二乗法を用いることによって得られる曲線補間式である。これとは異なる観点から、岸-Chenが接合部の $M-\theta$ 特性を評価する手法としてパワーモデルの使用を提案した。これは簡略な解析モデルで求めた接合部の初期剛性と限界曲げ耐力および形状指数の三つのパラメータのみを用いて、接合部の $M-\theta$ 曲線を表すものであり、剛性を代数計算式で直接算出することができる。また本モデルを用いると、接合部の剛性を考慮した設計が容易に行なえるものと考えられる。

このモデルの一般式は

$$M = \frac{R_{ki} \cdot \theta_r}{\{1 + (\theta_r/\theta_0)^n\}^{1/n}} \quad \dots\dots(5)$$

ここで R_{ki} : 初期剛性 M_u : 限界曲げ耐力 θ_0 : 塑性回転角 ($= M_u/R_{ki}$) n : 形状指数

3. 収集したデータの一般的留意点

収集した実験結果を次の7つのタイプに分類した。

- 1) シングルウェブアングル接合
シングルプレート接合
- 2) ダブルウェブアングル接合
- 3) タブルウェブアングルを有するトップアンドシートアングル接合
- 4) トップアンドシートアングル接合
- 5) エクステンディッドエンドプレート接合
- 6) フラッシュエンドプレート接合
- 7) ヘッダープレート接合

次に、各接合タイプについて説明する。

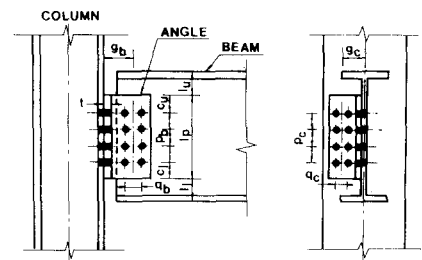


図-1 シングルウェブアングル接合

1) シングルウェブアングル接合、シングルプレート接合

シングルウェブアングル接合は図-1に示されるように、ボルトあるいは溶接によって柱と梁のウェブとを一つのアングル材によって連結する接合である。またシングルプレート接合はアングル材の代りにプレートを用いる接合で図-2のように示される。この接合はシングルウェブアングル接合より少ない材料ですむ。シングルウェブアングル接合とシングルプレート接合は、剛性が小さいためピン接合に近いものと考えられる。この接合に関してはLipson¹⁰⁾が詳細な実験を行っている。

2) ダブルウェブアングル接合

ダブルウェブアングル接合は図-3に示されるようにボルトあるいは溶接によって柱と梁のウェブとを、二つのアングル材により連結する接合である。ダブルウェブアングル接合に関しては、Rathbun¹¹⁾の実験においてリベットが用いられていたが、Bell等¹²⁾がリベット、ボルトを用いた場合について実験を行ないLewitt等¹³⁾がさらに補足の実験を行なった。今日では、一般に高力ボルトが使用されている。接合部の剛性についてはシングルウェブアングル接合、シングルプレート接合よりも剛性は大きい、これもピン接合に近いと考えられる。

3) ダブルウェブアングルを有するトップアンドシートアングル接合

図-4にこの接合が示される。この接合は柱と梁の上下フランジとをアングル材で連結したトップアンドシートアングル接合にダブルウェブアングルを付加した接合である。ダブルウェブアングルを有する場合と有しない場合のトップアンドシートアングル接合は、半剛性接合の代表的な接合形式としてよく用いられている。この接合については、Altman等¹⁴⁾やAzizinamini等¹⁵⁾により行なわれた試験結果を収集している。

4) トップアンドシートアングル接合

図-5にこの接合が示される。この接合についてはRathbunやHechtman等¹⁶⁾により、リベットに関して実験が行なわれている。

5,6) エクステンディッドエンドプレート接合、フラッシュエンドプレート接合

エンドプレート接合は一般に、工場で梁のフランジとウェブ両方にプレートを溶接しておき、現場において

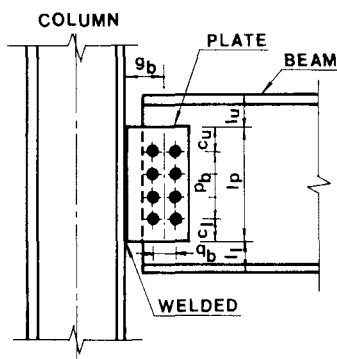


図-2 シングルプレート接合

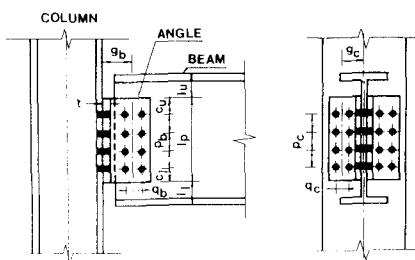


図-3 ダブルウェブアングル接合

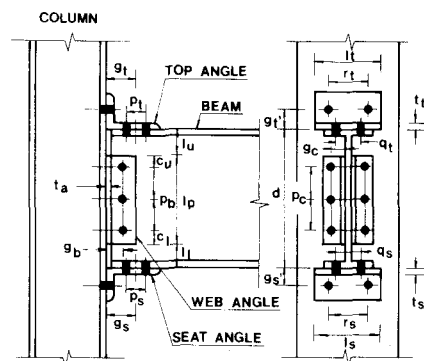


図-4 ダブルウェブアングルを有するトップアンドシートアングル接合

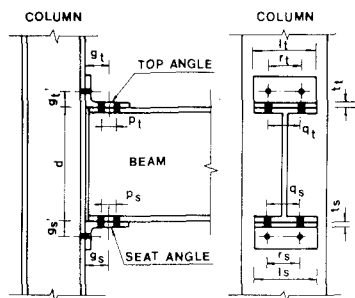


図-5 トップアンドシートアングル接合

柱とボルトで連結されるものである。図-6に引張のみ、図-7に引張、圧縮の両方向に拡がった場合のエクステンディッドエンドプレート接合を示している。またフラッシュエンドプレート接合の例を図-8に示す。一般に、引張のみのエクステンディッドエンドプレート接合が用いられるが、引張、圧縮方向に拡大しているエクステンディッドエンドプレート接合は、応力の逆転が起る場合に用いられる。また、フラッシュエンドプレート接合は、エクステンディッドエンドプレート接合よりも多少剛性が小さいが、簡易建築物の屋根などに用いられている。エクステンディッドエンドプレート接合は、柱部材における補剛材の有無にもよるが、一般に剛性が大きく剛な接合であると考えられる。エンドプレート接合に関しては数多くの研究者によって実験解析がなされ、収集されたデータは数多くあるが、その解析手法は各々異なっており、モデルも多岐にわたっている。

7) ヘッダープレート接合

この接合は、図-9に示されるようにプレートと梁のウェブが溶接されプレートと柱とがボルトで連結されており、なおかつプレートの高さが桁高よりも小さい接合である。この接合は剛性の程度から、ダブルウェブアングル接合と同様な接合タイプに属するものと考えられる。この接合に関してはZommerの実験結果が収集されている。

4. 収集された実験結果の整理方法並びにその応用について

接合部剛性の適切な評価のため、実験データを基にしたデータベースの作成が要求されているが、本論文では前章で分類された接合タイプを考慮し、これまで収集した実験データを次のような項目別に整理した。

- 1) 接合タイプと締結形式
- 2) 研究者名、試験ID、研究国名
- 3) 材料の特性と締結材の寸法
- 4) アングル材とプレートの材料強度
- 5) 梁 - 柱接合で用いられてる全パラメータ
- 6) $M - \theta$ に関する実験値

上記の項目に従って入力された各データは、利用目的に容易に対応できるようにさらに次のような7つの機能をもつプログラムによって用いられる。

- 1) US単位からMKS単位への変換
- 2) 各実験データのセットと印刷
- 3) 各接合タイプについての一覧表のセットと印刷

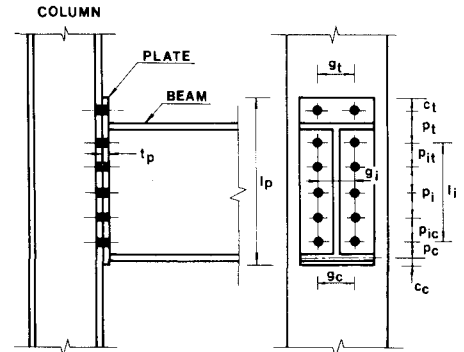


図-6 エクステンディッドエンドプレート接合
(引張のみ)

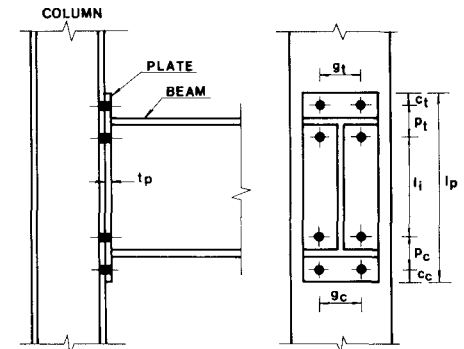


図-7 エクステンディッドエンドプレート接合
(引張、圧縮の両方)

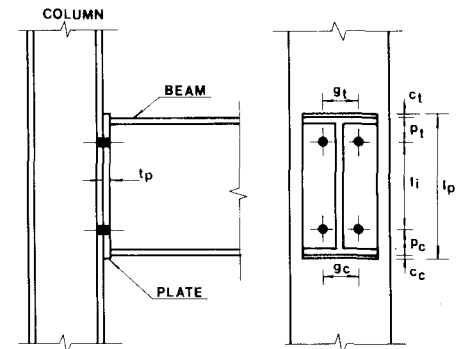


図-8 フラッシュエンドプレート接合

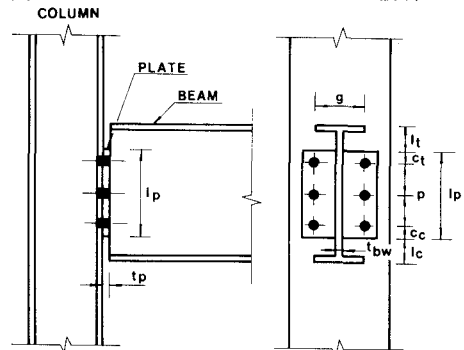


図-9 ヘッダープレート接合

- 4) 各実験データに対する三予想式の数値の決定と印刷
- 5) 各実験データ曲線とその三予想曲線を描く
- 6) 非線形構造解析プログラムへ転送するための、各実験データに関する予想式のデータファイルの作成
- 7) 同タイプの締結形式におけるM- θ 特性の比較図の作成

ユーザーの要求によって上記の解析が容易に可能となる。図-10,11,12,13 はその具体的計算例である。

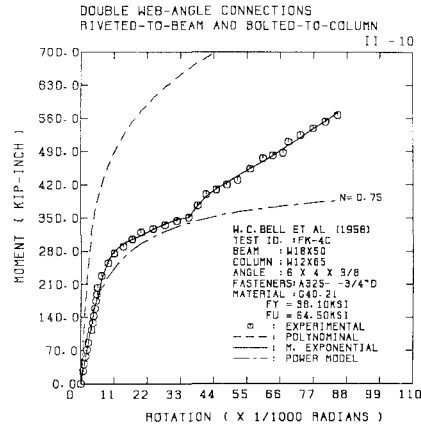


図-10 接合部のM- θ 曲線の例
(三つのモデルを含む)

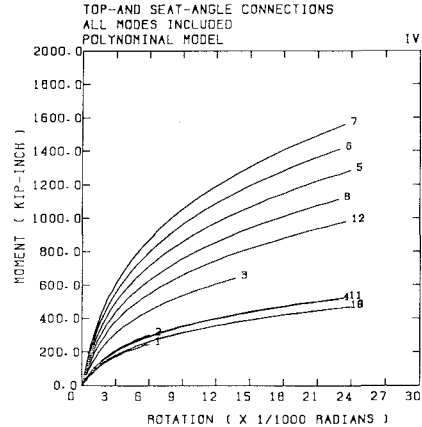


図-11 同じ接合タイプで接合パラメータを
変化させた例(多項式モデル)

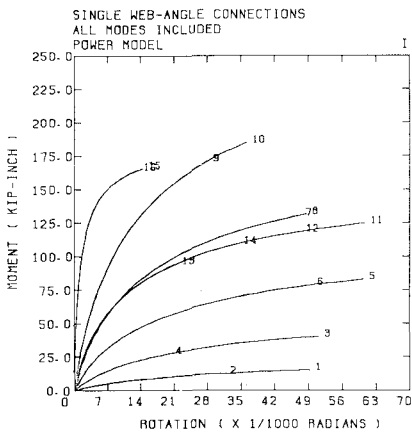


図-12 同じ接合タイプで接合パラメータを
変化させた例(パワーモデル)

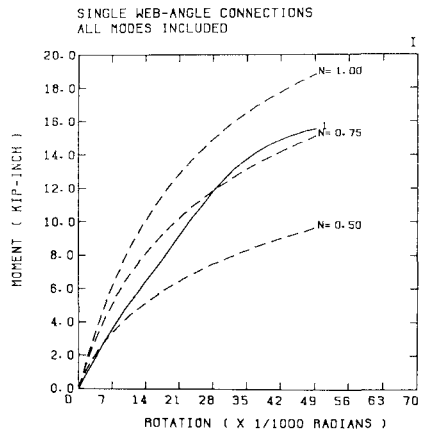


図-13 パワーモデルにおいて形状指数nを
変化させた例

5. まとめ

鋼骨組構造物の合理的な設計手法を確立する過程において、接合部のM- θ 特性を正確に評価することが必要となってくる。このため、ここでは実際の骨組構造物の解析に適用可能でかつ合理的な接合部のM- θ 特性を与えることを主な目的として、有効と思われる接合部剛性評価に関する実験データの集積とこれらを機能的に運用するための支援ソフトの作成を行なった。これによって、接合部のM- θ 特性評価式の妥当性の検討並びに、接合部の非線形な特性を直接骨組構造物の解析に組み込むことが可能となった。以上より、この支援ソフトと骨組構造物の非線形解析プログラムとを有機的に結合することによって、より有効な設計計算が可能となるものと考えられる。

参考文献

1. Nethercot, D.A. (1985), Steel Beam-to-Column Connections - a Review of Test Data, CIRIA, London.
2. Goverdhan, A.V. (1983), A Collection of Experimental Moment-Rotation Curves and Evaluation of Prediction Equations for Semi-Rigid Connections, Thesis Presented to Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science.
3. Load and Resistance Factor Design (LRFD) Specification for Structural Steel Buildings (1986), September, AISC, Chicago.
4. Jones, S.W., Kirby, P.A., and Nethercot, D.A. (1981), Modeling of Semi-Rigid Connection Behaviour and Its Influence on Steel Column Behaviour, Joints in Structural Steelwork, John Wiley & Sons, New York, 5.74-5.87.
5. Richard, R.M. and Abbott, B.J. (1975), Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. EM4, 511-515.
6. Chen, W.F. and Lui, E.M. (1985), Column with end Restraint and Bending in Load and Resistance Factor Design, AISC Engineering Journal, Third Quarter, 105-132.
7. Frye, M.J. and Morris, G.A. (1975), Analysis of Flexibly Connected Steel Frames, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 2, 280-291.
8. Kishi, N. and Chen, W.F. (1986) The Collection of Tests on Steel Beam-to-Column Connections, CE-STR-86-20, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN.
9. Sommer, W.H. (1969), Behavior of Welded-header-Plate Connections, Thesis Presented to University of Toronto in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science, Toronto, Canada.
10. Lipson, S.L. (1968), Single-Angle and Single-Plate Beam Framing Connections, Canadian Structural Engineering Conference, Toronto, Ontario, 141-162.
11. Rathbun, J.C. (1936), Elastic Properties of Rivetted Connections, The Structural Engineer, Vol. 101, ASCE, New York, 511-515.
12. Bell, W.G., Chesson, E. Jr. and Munse, W.H. (1958), Static Tests of Standard Riveted and Bolted Beam-to-Column Connections, A Progress Report of an Investigation Conducted by the University of Illinois Engineering Experiment Station.
13. Lewitt, C.W., Chesson, E. Jr. and Munse, W.H. (1966), Restraint Characteristics of Flexible Riveted and Bolted Beam-to-Column Connections, Department of Civil Engineering, University of Illinois.
14. Altman, W.G. Jr., Azizinamini, A., Bradburn, J.H. and Radzinski, J.B. (1982), Moment-Rotation Characteristics of Semi-Rigid Steel Beam-Column Connections, Department of Civil Engineering, University of South Carolina, Columbia, South Carolina.
15. Azizinamini, A., Bradburn, J.H. and Radzinski, J.B. (1985), Static and Cyclic Behavior of Semi-Rigid Steel Beam-Column Connections, Department of Civil Engineering, University of South Carolina, Columbia, South Carolina.
16. Hechtman, R.A., and Johnston, B.G. (1947), Riveted Semi-Rigid Beam-to-Column Building Connections, Progress Report No. 1, AISC Research at Lehigh University, Bethlehem, PA.