

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

ON A STRUCTURAL ANALYSIS SYSTEM FOR PLANE FRAMES COMBINED
WITH THE DATA BASE OF SEMI-RIGID CONNECTIONS

岸 徳光 * 後藤芳顯 ** 松岡健一 ***

by Norimitsu KISHI, Yoshiaki GOTO and Ken-ichi G. MATSUOKA

In order to accurately estimate the second-order effects on the behavior of steel frames with semi-rigid connections as well as to perform the practical design more easily and rationally, an attempt was made to develop a structural analysis program which precisely considers the characteristics of semi-rigid connections. This program is composed of the following three main routines :

- (1) The procedure for the structural analysis based on the method presented by Goto-Chen. This method, which uses closed-form solutions, takes into account the geometrical nonlinearity along with the inelastic property of connections.
- (2) Program PACOM (Parameter Analysis of COnection Models) to prepare the parameters for the prediction equations of semi-rigid connection models which was developed based on the program SCDB (Steel Connection Data Bank).
- (3) Graphic routine for drawing the general configuration and sectional force diagrams of the overall structure under the proposed loading step and likewise for the hysteresis loop in relation to the connection moment and relative rotation.

Development of this system was effectively done by using Engineering Work Station (EWS) with a drawing function on a CRT display.

1. はじめに

従来より、鋼骨組構造体の設計計算は梁と柱の接合部を剛あるいはピンと理想化した形で行われている。しかしながら、直接梁を柱に十分補剛して溶接接合する場合を除き、接合部を鋼アングル材あるいは鋼平板を用いボルト(古くはリベット)によって締結する場合は、ピンと剛接合の中間的で非線形な分布性状を示すことが実験より明らかになっている。たとえば single web-angle 接合や double web-angle 接合, header plate 接合は剛性が比較的小さくピン接合に近い性状を、end plate 接合系の接合方式は剛性も大きく剛接合に近い剛性特性を、また top- and seat-angle 接合系の接合方式の場合は上記剛性の中間的な性状を示すことが明かになっている。

耐力限界や使用性限界を基本として構造物の設計を行う限界状態設計法を適用する場合は、これら接合部の特性を考慮したより厳密な解析法を用いて変形性能や断面力の算定あるいは有効座屈長に関する算定計算が必須なものと考

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部土木工学科 (050 室蘭市水元町27番1号)

** 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (466 名古屋市昭和区御器所町)

*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部土木工学科 (050 室蘭市水元町27番1号)

えられる。このため、限界状態設計法に移行している欧米各国では、接合部剛性評価に関する研究や非線形な接合部剛性特性を考慮した骨組構造解析法に関する検討が種々行われている。前者に関しては、過去に行われた実験データの整理¹⁾やデータベースの作成^{2),3)}、構造解析プログラムに組み込むための接合部剛性評価モデルの作成⁴⁾等の研究が行われている。一方、解析手法に関しては接合部の剛性特性のみを考慮した解析手法や、部材の材料非線形性まで考慮した解析手法等種々発表されているが、いずれも所定の精度を得るためには多大の数値計算を必要とするようである。

最近、後藤とChen^{5),6)}は幾何学的非線形のみを考慮し比較的小さい場合に対して十分な精度を有する梁-柱の式を定式化することによって、要素分割数の低減化を可能にした。この結果、EWS (エンジニアリングワークステーション) 程度の能力を有するコンピューターを用いて、所要の精度を保持した半剛結接合を有する鋼骨組構造物の変形性能や部材断面力計算のリアルタイム処理が可能となり、実用設計計算に応用することができるようになった。

ここでは、上記解析手法と実状に即した接合部の半剛結特性を効率よく組み込むための接合部剛性特性評価モデルのパラメータ算出用プログラム、および解析結果の図化処理のためのプログラムを結合した半剛結接合を有する平面鋼骨組構造物の変形状及び断面力算定のための解析システムを作成したので報告する。

2. 解析システムの構成

半剛結接合を有する平面鋼骨組構造物の変形状及び各荷重ステップにおける断面力を効率よく算定するために、三つ

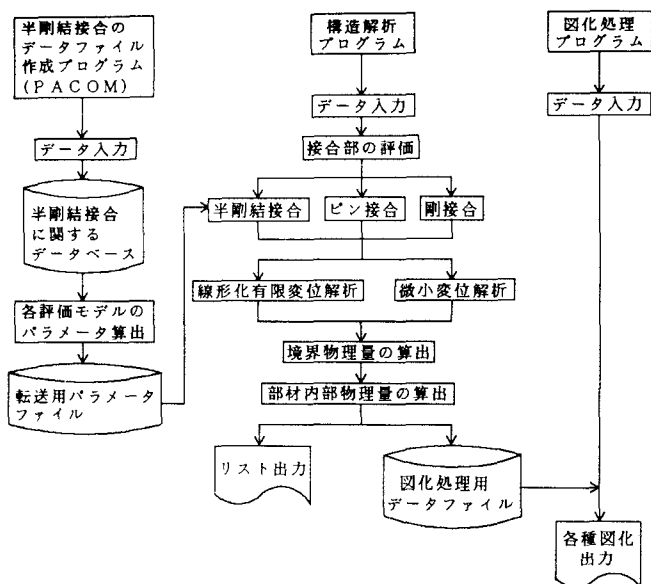


図-1. 解析システムの流れ図

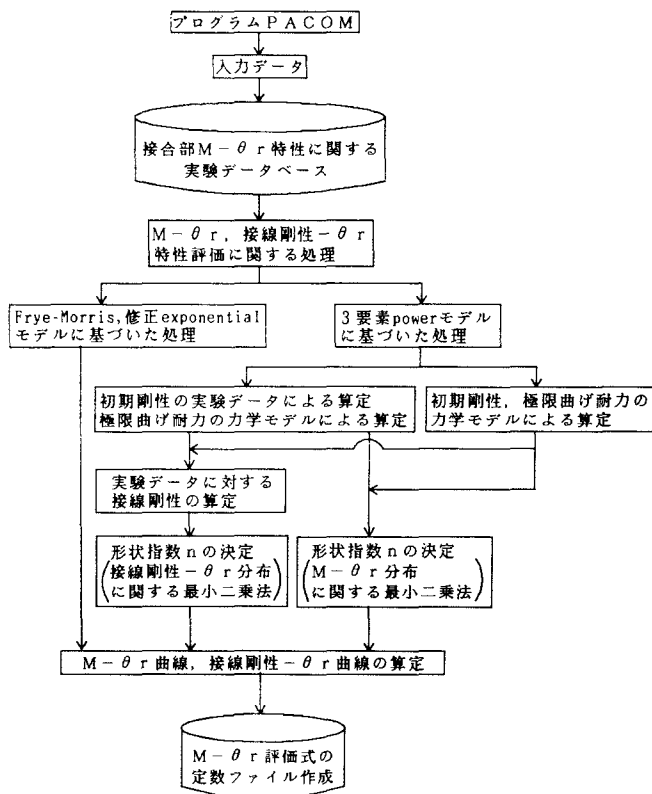


図-2. プログラム PACOM の流れ図

の主プログラムからなる解析システムを作成した。図-1には解析システムの簡単な流れ図を示している。以下に各主プログラムについての概要を述べる。

2.1. 半剛結接合に関するデータファイル作成用プログラム

現実に即した接合部剛性特性を利用可能にするために、米国、カナダ、および英国を中心とした国々において発表された論文及び報告書に基づいて作成されたデータベース³⁾を用いることとした。実験データは離散的な値であるため、これを構造解析プログラムに直接組み込むことは不可能である。ここでは、SCDB (Steel Connection Data Bank program)⁷⁾を改良し、さらに図、表、リスト作成ルーチンを削除して作られた接合部剛性評価モデルのパラメータ算出用プログラムPACOM (Parameter Analysis of Connection Model)を用いて、構造解析プログラムへの転送用ファイルの作成を行っている。図-2にPACOMの流れ図を示している。図に示すようにFrye-Morrisの多項式モデル⁸⁾、修正 exponential モデル⁷⁾、三要素 power モデル⁴⁾の三種類の評価モデルに関するパラメータが算出可能になっている。修正 exponential モデルは実験結果を精度よく表すための曲線補間式で、実験データの代用としての利用が可能なものとなっている。また、三要素 power モデルに関しては現在のところ angle 接合タイプと header plate 接合に関してのみが算出可能である。初期剛性は力学モデルからの算出と実験データから直接差分近似して求めることができ、形状指数 n に関しても下記の2つの機能すなわち、

- 1) 実験データから求められる $M-\theta_r$ 分布あるいは接線剛性- θ_r 分布と三要素パワーモデル間に最小自乗法を適用して決定するルーチン
- 2) 1)によって求められた n を基にして接合タイプ毎、あるいは全データに対して統計処理を施し n を $\log_{10} R_{ki}$ の一次式で決定するルーチン

を有しており、それぞれ目的に応じ各パラメータを選択決定することが可能となっている。他、上記三モデルの一般的な概要については文献 3) を参照されたい。

2.2. 半剛結接合された平面鋼骨組の構造解析プログラム

2.2.1. 解析手法の定式化

解析手法は、先に後藤-Chen^{5),6)}によって示され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を対象として、解析的に誘導された梁-柱の剛性方程式を用いている。定式化過程は文献 5),6) に詳細に述べられているのでここではその概要のみを示す。

いま、図-3に示すような部材において、 x 方向、 y 方向の変位及び回転角を u_0 , v_0 , α , さらに軸力、せん断力、曲げモーメントを N , S , M とすると、釣合いに関する基礎微分方程式は、

$$N' = 0 \quad (1.a)$$

$$(N v_0' + M')' + p_y = 0 \quad (1.b)$$

ただし、" ' " は x に関する微分記号である。

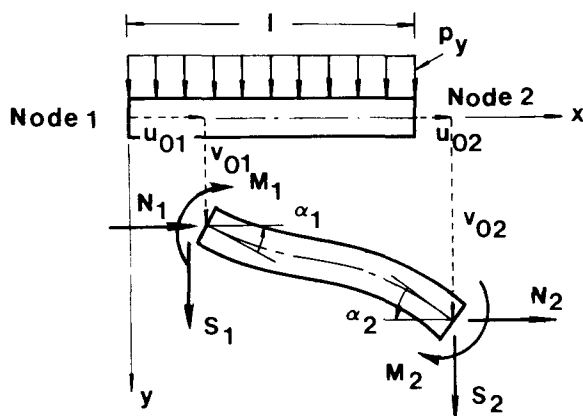


図-3. 梁柱要素

また、節点1,2における変位及び断面力の境界値は、

$$u_0 = u_{0i}, \quad N = n_x N_i \quad (2.a)$$

$$v_0 = v_{0i}, \quad N v_0' + M' = n_x S_i \quad (2.b)$$

$$v_0' = \alpha_i, \quad M = -n_x M_i \quad (2.c)$$

ただし、 $i = 1, 2$ である。また、 n_x は、節点1で-1, 節点2で1の値をとる。

また、断面力と変位の関係式は、

$$N = EA \left\{ u_0' + \frac{1}{2} (v_0')^2 \right\} \quad (3.a)$$

$$M = -EI v_0'' \quad (3.b)$$

である。

上式(3)を式(1)に代入し、さらに式(2)を用いることによって節点力を節点変位及び分布荷重を用いて解析的に整理することが出来る。剛性方程式の係数はすべて軸力 N_1 の関数となり、その符号(正, 負, 零)によってそれぞれ三角関数, 双曲線関数, 四次関数で表されるが、三角関数, 双曲線関数をべき級数展開することによって剛性方程式の統一化及び軸力が微少な場合の数値解析における精度低下の防止を行っている。

2.2.2. 接合部のモデル化および非線形計算

半剛結接合を有する鋼骨組の実解析において、各接合部は載荷状態や接合部の剛性特性、幾何学的非線形性の考慮により載荷および除荷挙動を示すものと考えられる。しかしながら、接合部の履歴挙動に関する研究は Popov⁹⁾ や Azizinamini et al¹⁰⁾ 等によって特定の接合形式についての実験が行われているに過ぎず、また評価式も示されていない。ここでは、各パラメータがプログラムPACOMによって与えられる単純載荷に対する $M-\theta_r$ 特性評価式を図-4に示されるような Independent Hardening Model¹¹⁾ を用いて解析式に組み込んでいる。すなわち、接合部モーメントに関して零から正あるいは負方向への載荷に対しては評価式より与えられる $M-\theta_r$ 特性を採用し、除荷点からモーメント零までの間は初期剛性 R_{ki} を有し線形的に挙動するものと仮定している。図-4について割線剛性を用いた一般式で示すと、任意点の接合部モーメント M は

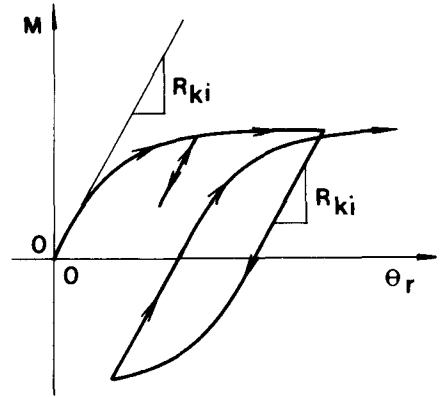


図-4. 接合部の構成則

$$M = R_k (\theta_r - \theta_{r0}) + M_0 \quad (4)$$

ここで、

M_0 : 除荷開始点の接合部モーメントであり、載荷開始時には $M_0 = 0$ とする。

θ_{r0} : 除荷開始点の接合部相対回転角

R_k : 接合部割線剛性であり、除荷後には除荷点からの割線を用いている。

剛性方程式は各部材端部の接合を、剛接合, 半剛結接合, ピン接合, の三形式が可能になるように、材端たわみ角 α_i を相対回転角を考慮して節点のたわみ角 α_{ci} に変換し整理している。解析は荷重増分法と割線剛性法を併用した繰返し計算法^{5),6)}によって行われている。

なお、通常の幾何学的非線形解析では Newton-Raphson 法を用いた方が収束性は速いが、半剛結接合として実験データのような不規則な $M-\theta_r$ 曲線を用いる場合（修正 exponential モデルを用いることによってほぼ実験データの特性が再現可能である）は、割線剛性法を用いた方が効率よく解を求めることができ、設計を対象とするような変位が極端に大きくならない場合における鋼骨組構造の変形性や断面力算定に対し有効な手法であるものと考えられる。また、本プログラムでは、各荷重載荷ステップにおける節点の応答値は勿論であるが、構造全体の変形や断面力分布を図化可能にするために、これらの値を基本式に代入して各部材内の変形や断面力を算出できるようになっている。

2.3. 図化処理プログラム

2.2の構造解析プログラムによって求められる応答出力結果を効率よく整理するために、ここではポストプロセッサとしての図化処理プログラムを作成している。図化処理は単一の入力データに対しては勿論であるが、接合境界や半剛結の程度あるいは評価モデルの違いによる各応答出力結果の差違についての比較が容易に出来るように留意されている。

図化項目は以下に示す三つである。

1. 解析しようとしている骨組構造体の概形図及び荷重載荷状態図
2. 各荷重段階における構造全体の変形状態に関する概形図、曲げモーメント図、せん断力図
3. 指定された接合部の $M-\theta_r$ 曲線と曲げモーメントおよび節点変位と載荷荷重に関するヒステリシスループ図

3. 解析プログラムの応用例

2. において三つの主プログラムからなる構造解析システムの概要を述べた。ここではこのプログラムの一実行例を示す。

解析例として図-5に示される二層一径間骨組を扱った。表-1に各部材の断面諸量を示している。載荷荷重は、図-6に示すように各階層に等分布死荷重を、活荷重としては一層目に作用する分布荷重と、節点への集中荷重に変換した壁部に作用する風荷重を繰

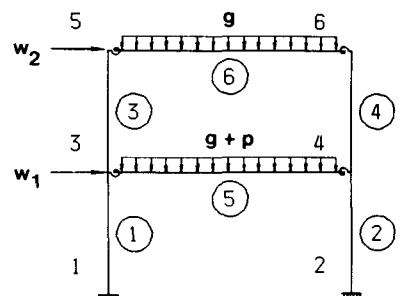


図-5. 二層一径間骨組

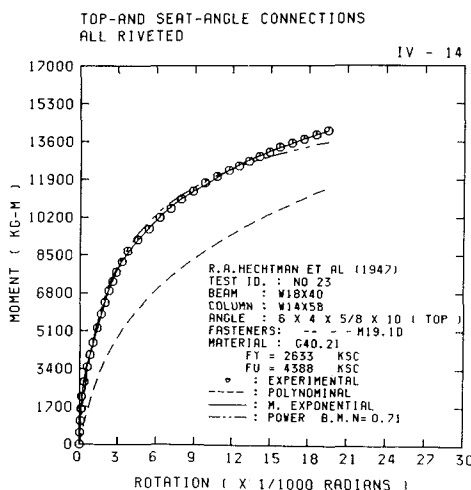


図-7. 解析に用いられた $M-\theta_r$ 曲線

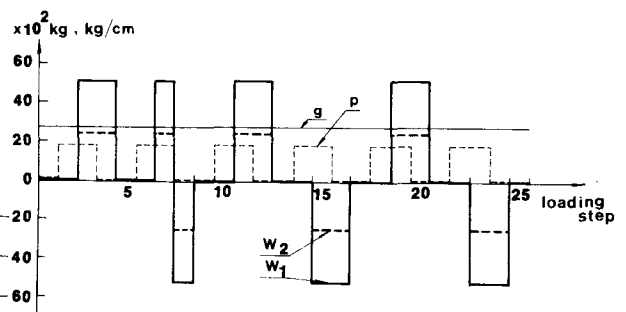


図-6. 載荷荷重ステップ図

り返し荷重として作用させている。解析は部材5、6が半剛結
 接合されている場合と剛接合さ
 れている場合について行った。
 図-7にはここで採用されてい
 る top- and seat-angle 接合の
 $M-\theta_r$ 曲線を示している。評価モ
 デルは初期剛性を力学モデルか
 ら求め、 $M-\theta_r$ に関する実験デー
 タを用いて形状指数を決定した三要素 power モデルを用いている。

表-1. 部材断面諸量

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 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)

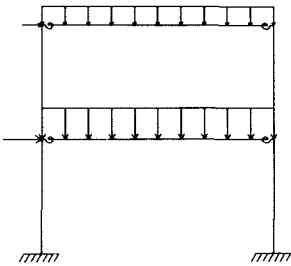
出力結果の例として、図-8に载荷ステップ19の状態における構造全体の変形状態図、曲げモーメント図、せん断力図について、半剛結接合と剛接合の場合について比較して示している。図中 scale は図化出力時の形状寸法の縮尺を、length, load はそれぞれ使用されている長さ、荷重強度の単位を示している。現在はメートルと U.S.慣用単位が使用可能となっている。また、sequence は载荷ステップの番号を、ratio はその载荷ステップにおける荷重の増分比率を示している。この場合は19ステップ、増分比率は1.0である。応答値に関する各分布図には、それぞれ単位及び基準長さ当たりの大きさも示されている。解析結果、変形図、曲げモーメント図より接合部剛性の違いによって応答分布に明確な差があることがわかる。特に、接合部近傍の変形状態に注目することにより、半剛結接合仮定にお

2 STORY - 1 BAY FRAME

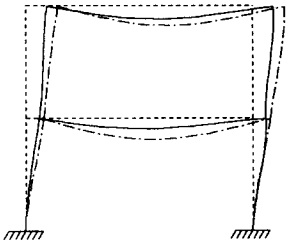
SCALE = 1 : 121.83
 LENGTH : cm
 LOAD : kg, kg/cm
 SEQUENCE - RATIO
 19 1.000

10450,800 27.680

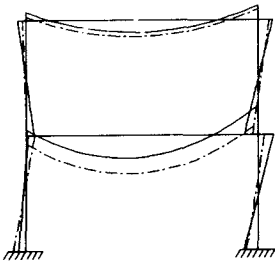
DISPLACEMENT (cm) 2.00



rigid
 semi-rigid



M-DIAGRAM (t-m) 30.00



Q-DIAGRAM (t) 19.00

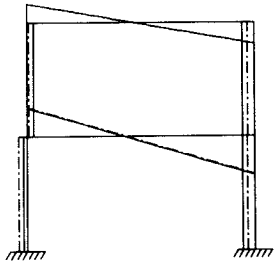


図-8. 载荷ステップ19に於ける骨組の変形図および断面力図

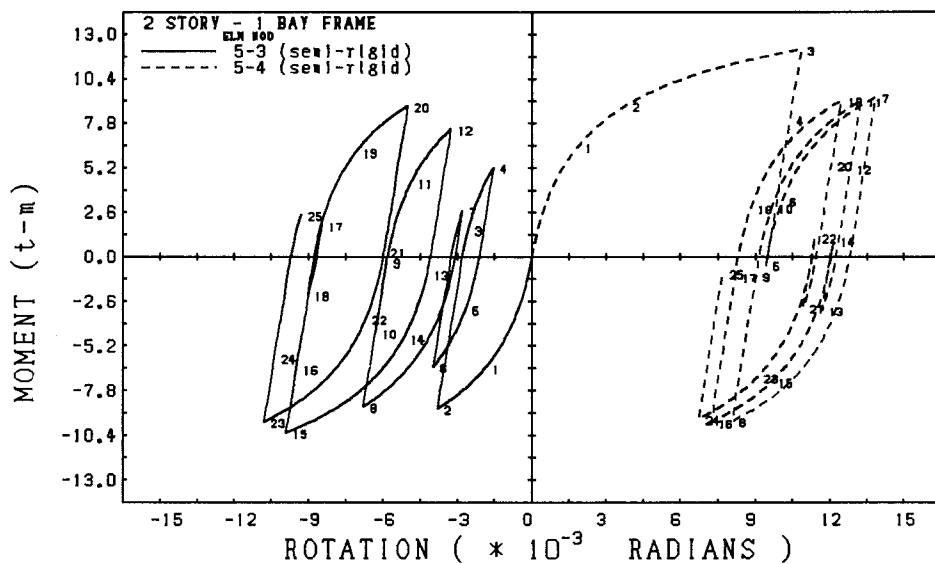


図-9. 部材5の両端部における $M-\theta_r$ に関するヒステリシスループ図

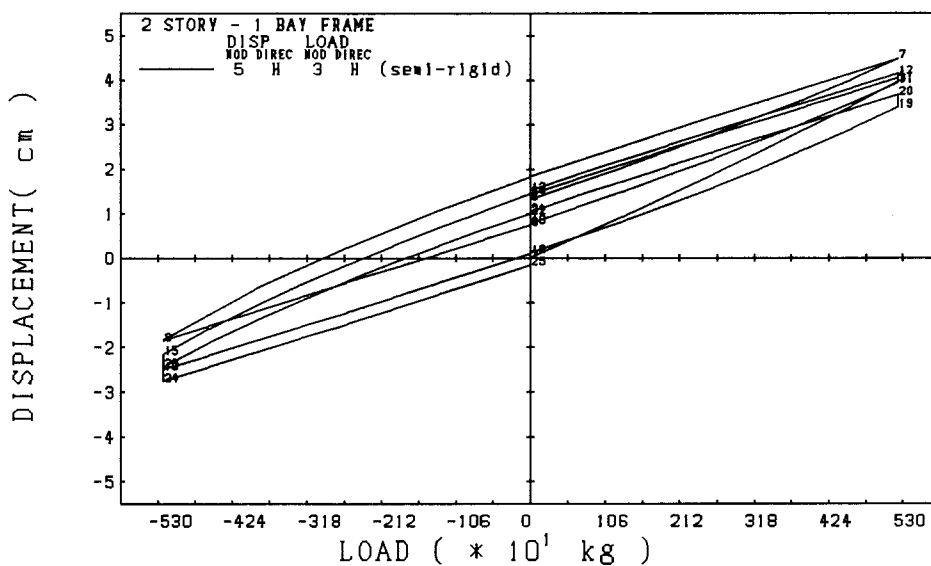


図-10. 節点3に作用する水平方向荷重と節点5の水平方向変位に関するヒステリシスループ図

ける相対回転角の存在を容易に確認できる。

図-9, 10には、それぞれ半剛結接合を用いた場合の部材5の両端部における曲げモーメントと相対回転角に関するヒステリシスループ図と、節点3に作用する水平方向荷重と節点5の水平方向変位に関するヒステリシスループ図を示している。ループ図中の数字は載荷ステップの番号を示している。ここでは示されていないが、曲げモーメントと載荷荷重に関するヒステリシスループ図の作成も可能である。これらヒステリシスループ図を用いることにより、載荷ステップに対応したそれぞれの半剛結接合部における載荷や除荷挙動の把握、相互比較や、節点の変形挙動等について詳細に検討を行うことができる。

4. おわりに

接合部の半剛結特性や幾何学的非線形を考慮した平面鋼骨組構造物の解析を実用設計計算に応用可能にすることを目的として、比較的変形が小さい場合を対象として解析的に誘導された梁-柱の式から求められる剛性方程式と、荷重増分法と割線剛性法を併用した繰り返し計算法を用いた解析手法に、半剛結接合に関するデータベースを用い接合部剛性特性評価モデルのパラメータを算出するためのプログラム、及び解析結果の図化处理プログラムを結合した平面鋼骨組構造解析システムを開発し、応用例として二層一径間骨組に繰り返し荷重が作用する場合について示した。本システムの開発により、実状に即した接合部半剛結接合を有する平面鋼骨組の解析計算が EWS 程度のコンピューターを用いることにより現場サイドで容易に可能になったものと考えられる。

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, at Nashville, Tenn., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.
3. 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.
4. たとえば, 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. Goto, Y. and Chen, W.F. (1987). "Second-order elastic analysis for frame design." J. Struct. Div., ASCE, 113(ST7), 1501-1519.
6. 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.
7. 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.
8. Frye, M.J. and Morris, G.A. (1975). "Analysis of flexibly connected steel frames." Canadian J. Civ. Engrg., 2, 280-291.
9. Popov, E.P. (1987). "Panel zone flexibility in seismic moment joint." J. Construction Steel Research, 8, Elsevier, 91-118.
10. Aziziminamini, A., Bradburn, J.H., and Radzinski, J.B. (1985). "Static and cyclic behavior of semi-rigid steel beam-column connections." Dept. of Civ. Engrg., Univ. of South Carolina, Columbia, SC.
11. 後藤芳顯, 鈴木五月, 松浦聖 (1989). "はり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, 10月, 287-296.

(1989年10月2日受付)