

鋼構造骨組の設計における柱はり接合部の考慮

加藤 勉* ○中尾雅躬**

§.1 序

鋼構造骨組の設計を行う場合に骨組の弾性挙動に対して鋼材の許容応力度を適用して行う弾性設計法と、骨組の崩壊に至る塑性挙動に並脚する塑性設計法が考えられる。弾性設計法は永い歴史と経験にも基づくと共に、骨組の塑性挙動を考慮した部分も規準¹⁾に盛り込まれているが、仮定される外力に対して骨組の弾性解析を行い、得られる各部の応力を規定の許容応力度以下で伝達し得る部材および接合法を選択するという極めて明快な手順から構成されることが特徴である。弾性設計法に関する電子計算機の利用は我が国においても既に十年以上の実績があって、多くの構造解析用汎用プログラムが導入・開発され多用されている。また、自動設計プログラム(例えば文献2)や設計者との対話型プログラム³⁾なども利用され、プログラムのリファインメントや規準変更等に対応するプログラム保守、設計図書作成・構造体の生産に対応するターミナル・インターフェース、などに関する工夫、あるいは近年研究が盛んに行われている最適設計法がコスト・パフォーマンスにひき合う形で実用化できるかといった点などが今後の主な問題点であろう。

塑性設計法についてみると、解析方法では完全弾塑性のモーメント-曲率関係あるいは応力-ひずみ関係に基づく極限解析の手法が確立されており、また鋼素材のひずみ硬化現象を考慮した解析に関する多くの研究も行われているが、複雑な形状の鋼構造物の崩壊に至る挙動を未だ十分な精度で把握しきれていないのが現状であろう。我が国における構造物の設計においては耐震に対する考慮が極めて重要な部分を占め、日本建築学会においても従来の静的震度法に代るものとしての地震の荷重効果に関する検討⁴⁾が現在進められており、そこでは骨組の復元力特性が重要なファクターとなっている。また強震を受ける鋼構造骨組の崩壊に対する安全性の評価は、地震動により骨組中に入力されるエネルギーと骨組がその塑性変形能力によって吸収し得るエネルギーとの比較によ、て行うことができること⁵⁾と、骨組が吸収できるエネルギーの値は各層の復元力特性より求められることから、骨組の崩壊に至るまでの復元力特性および変形能力を推定することが必要である。また設計法上の問題点として、骨組の耐震安全性に関与する塑性変形能力を確保するため、柱・はり・柱はり接合部・ブレース・耐震壁などの骨組構成要素にどのように塑性変形を配分するか、また配分比は目的に応じて自由に調節可能かといった点が重要である。

本論文では鋼構造骨組の復元力特性推定と、荷重分布が静的に与えられる場合の骨組崩壊解析を念頭に置いて作成した2例の解析プログラムについて述べ、鋼構造骨組の設計において柱はり接合部の挙動を考慮することの意義について検討を加える。また、弾性設計法から塑性設計法への移行を考えた場合の設計に対する電子計算機の利用法に関する展望についても若干の検討を行う。

§.2 プログラム例

筆者らが作成したプログラムは、以下に示すように部材の復元力特性について単純な仮定を行った

*東京大学教授・工博

**東京電機大学助教授・工博

汎用型のもの1例と、部材の復元力特性をなるべく忠実に表現しようとした小型のもの1例である。

2.1 プログラム-A

節点を点と考える任意形状の平面骨組あるいはパネルゾーンを持つ矩形ラーメンについて弾性解析および、塑性ヒンジの逐次追跡による弾塑性解析を行うことができるプログラムである。弾塑性解析では部材のモーメント-曲率関係を完全弾塑性として扱い、パネルゾーンの復元力特性はtri-linearとして扱っている。塑性ヒンジの発生条件は文献6)にある方法を用いた。ユーザ領域が400~500 KB程度の計算機で使えるような中程度の平面骨組用汎用プログラムで、総節点数 400・総部材数600まで扱えるようにした。計算結果の視覚化を考慮し、X-Yプロットにより荷重図、固定荷重によるモーメント図・せん断力図・軸力図、崩壊時のモーメント図・せん断力図・軸力図、崩壊モード図、荷重増分-変位の図、などを出力できるようにしたため、FORTRAN 言語で約 5500 ステップを要した。プログラムはオーバーレイ構造の4セグメントから構成されている。プログラムの処理概要を Fig. 1 に示す。計算例として、Fig. 2a に荷重図、Fig. 2b にモーメント図、Fig. 2c に崩壊モード図、Fig. 2d に荷重増分-変位の図(復元力特性)を示した。

2.2 プログラム-B

矩形ラーメンについて部材のひずみ硬化を考慮した解析を行うプログラムである。パネルゾーンの復元力特性はプログラム-Aと同様tri-linearとして扱っている。素材の応力-ひずみ曲線は鋼素材について代表的なものとして Fig. 3 に示すようにモデル化している。同図中ヤング率を E 、ひずみ硬化率を E_{st} 、降伏応力度を σ_Y 、引張強さを σ_B (一般には部材端の耐力が局部座屈で決定することが多いので、スタブコラムテストによる最大圧縮応力度をとる)、ひずみ硬化開始ひずみを ϵ_{st} 、降伏ひずみを $\epsilon_Y (= \sigma_Y/E)$ として、

$$\begin{aligned} k &= \epsilon_{st} / \epsilon_Y \\ n &= E_{st} / E \\ k_B &= k + \frac{(\sigma_B - \sigma_Y)}{E_{st} \cdot \epsilon_Y} \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

である。部材はH形鋼又は角形鋼管を考慮して、断面性能を Fig. 4 に示すような2フランジモデルで近似した。2フランジモデルの常数 A および d は、材の断面2次モーメント I および塑性断面係数 Z_p から、

$$\begin{aligned} A &= \frac{Z_p^2}{2I} \\ d &= \frac{2I}{Z_p} \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

として定めた。このようなモデルから求められる部材のモーメント-曲率関係は Fig. 5a~Fig. 5c に示されるようになる。モーメントを M 、曲率を ϕ とし、軸力零の場合の全塑性モーメントを M_{p0} 、これに対応する曲率を ϕ_{p0} として、

$$m = M / M_{p0} \quad \phi = \phi / \phi_{p0} \quad \dots\dots(3)$$

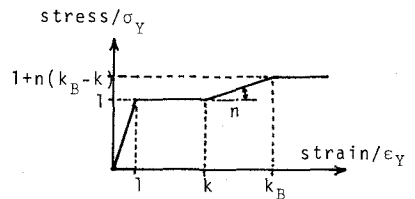


Fig. 3 Stress-strain relation of material

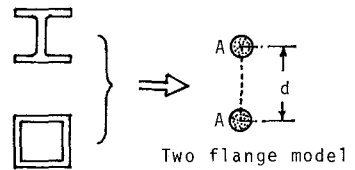


Fig. 4 Idealization of section

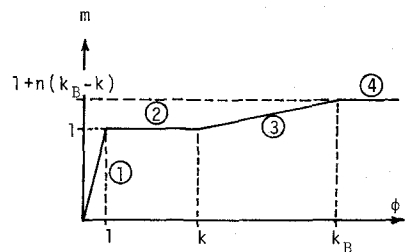


Fig. 5a m-φ relation ($\alpha=0$)

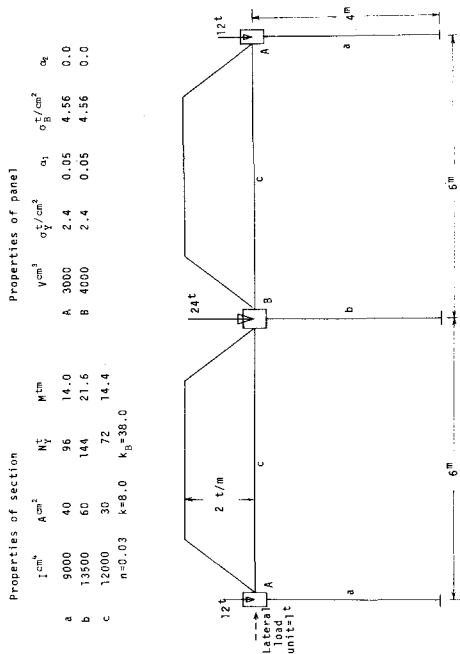


Fig.8a Example of analysis (Load diagram)

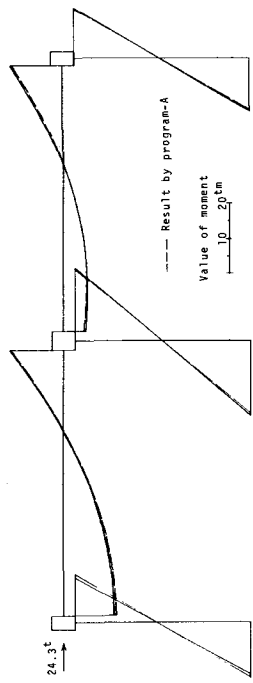


Fig.8b Example of analysis (Moment diagram)

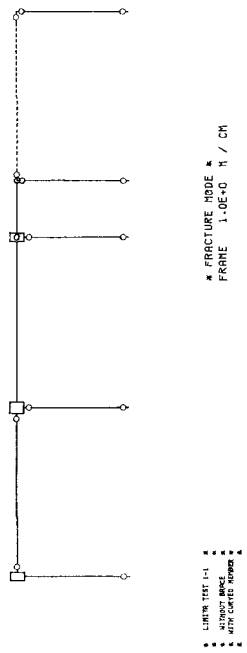


Fig.2c Example of analysis (Fracture mode)

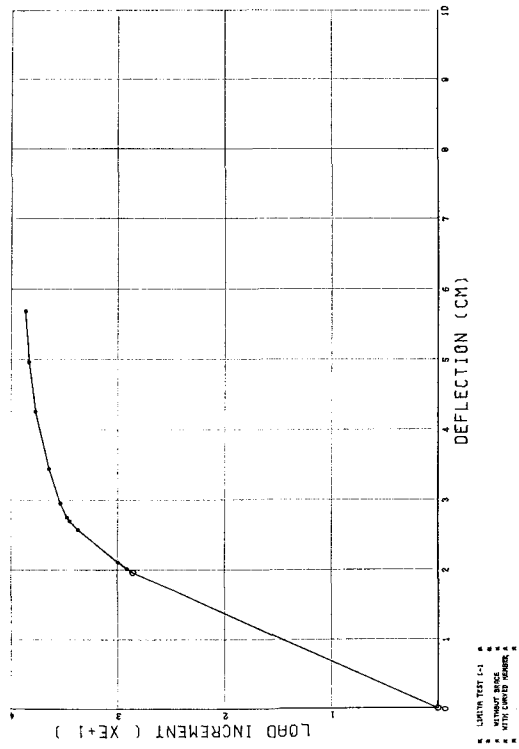


Fig.2d Example of analysis (Load factor-deflection relation)

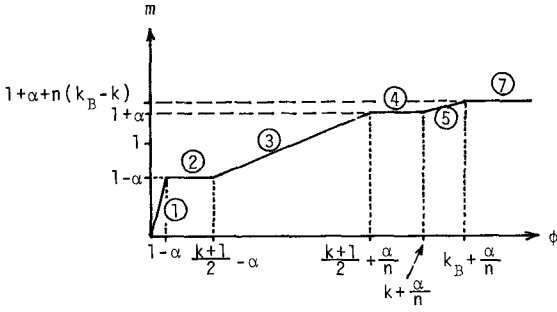


Fig. 5b m-φ relation ($\alpha \leq \frac{n}{2}(k_B - k)$)

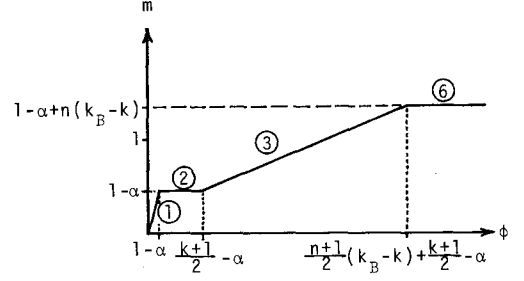


Fig. 5c m-φ relation ($\alpha > \frac{n}{2}(k_B - k)$)

と表わしておく。また軸力 N の降伏軸力 N_Y に対する比を α とする。プログラム中の数値的な取扱いでは m の ϕ に関する微係数の値が零では具合が悪いので、以下のような m - ϕ 関係を用いている。

(1) $\alpha = 0$ のとき (Fig. 5a)

① $1 > \phi \geq 0$ ($1 > m \geq 0$)

$$m = \phi$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = 1 \quad \phi = m$$

② $k > \phi \geq 1$ ($\epsilon(k-1)+1 > m \geq 1$)

$$m = \epsilon(\phi-1)+1$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \epsilon \quad \phi = \frac{m-1}{\epsilon} + 1$$

③ $k_B > \phi \geq k$ ($n(k_B-k)+1+(k-1)\epsilon > m \geq \epsilon(k-1)+1$)

$$m = n(\phi-k)+1+(k-1)\epsilon$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = n \quad \phi = \frac{m-1-(k-1)\epsilon}{n} + k$$

④ $\phi \geq k_B$ ($m \geq n(k_B-k)+1+(k-1)\epsilon$)

$$m = \epsilon(\phi-k_B+k-1)+n(k_B-k)+1$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \epsilon \quad \phi = \frac{m-1-n(k_B-k)}{\epsilon} + (k_B-k+1)$$

(2) $\alpha \geq 0$ のとき (Fig. 5b, Fig. 5c)

① $1-\alpha > \phi \geq 0$ ($1-\alpha > m \geq 0$)

$$m = \phi$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = 1 \quad \phi = m$$

② $\frac{k+1}{2} - \alpha > \phi \geq 1-\alpha$ ($1-\alpha+\frac{k-1}{2}\epsilon > m \geq 1$)

$$m = \epsilon(\phi-1+\alpha)+1-\alpha$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \epsilon \quad \phi = 1-\alpha+\frac{m-1+\alpha}{\epsilon}$$

(2)-1 $\alpha \leq \frac{n}{2}(k_B - k)$ のとき (Fig. 5b)

③ $\frac{k+1}{2} + \frac{\alpha}{n} > \phi \geq \frac{k+1}{2} - \alpha$ ($1+\alpha+\frac{k-1}{2}\epsilon > m \geq 1-\alpha+\frac{k-1}{2}\epsilon$)

$$m = \frac{2n}{1+n}(\phi - \frac{k+1}{2} + \alpha) + 1 - \alpha + \frac{k-1}{2}\epsilon$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \frac{2n}{1+n}, \quad \phi = \frac{k+1}{2} - \alpha + \frac{1+n}{2n}(m-1+\alpha-\frac{k-1}{2}\epsilon)$$

④ $k + \frac{\alpha}{n} > \phi \geq \frac{k+1}{2} + \frac{\alpha}{n}$ ($1+\alpha+(k-1)\epsilon > m \geq 1+\alpha+\frac{k-1}{2}\epsilon$)

$$m = \epsilon(\phi-1-\frac{\alpha}{n})+1+\alpha$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \epsilon \quad \phi = 1+\frac{\alpha}{n}+\frac{m-1-\alpha}{\epsilon}$$

⑤ $k_B + \frac{\alpha}{n} > \phi \geq k + \frac{\alpha}{n}$ ($1+\alpha+n(k_B-k)+(k-1)\epsilon > m \geq 1+\alpha+(k-1)\epsilon$)

$$m = n(\phi-k)+1+(k-1)\epsilon$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = n \quad \phi = k + \frac{m-1-(k-1)\epsilon}{n}$$

⑦ $\phi \geq k_B + \frac{\alpha}{n}$ ($m \geq 1+\alpha+n(k_B-k)+(k-1)\epsilon$)

$$m = \epsilon(\phi-k_B+k-1)+n(k_B-k)+1$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \epsilon \quad \phi = \frac{m-1-n(k_B-k)}{\epsilon} + k_B-k+1$$

(2)-2 $\alpha > \frac{n}{2}(k_B - k)$ のとき (Fig. 5c)

③ $\frac{n+1}{2}(k_B-k) + \frac{k+1}{2} - \alpha > \phi \geq \frac{k+1}{2} - \alpha$ ($n(k_B-k)+1-\alpha+\frac{k-1}{2}\epsilon > m \geq 1-\alpha+\frac{k-1}{2}\epsilon$)

$$m = \frac{2n}{1+n}(\phi - \frac{k+1}{2} + \alpha) + 1 - \alpha + \frac{k-1}{2}\epsilon$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \frac{2n}{1+n}, \quad \phi = \frac{k+1}{2} - \alpha + \frac{1+n}{2n}(m-1+\alpha-\frac{k-1}{2}\epsilon)$$

⑥ $\phi \geq \frac{n+1}{2}(k_B-k) + \frac{k+1}{2} - \alpha$ ($m \geq n(k_B-k)+1-\alpha+\frac{k-1}{2}\epsilon$)

$$m = \epsilon(\phi - \frac{n+1}{2}(k_B-k) + \alpha - 1) + n(k_B-k) + 1 - \alpha$$

$$\frac{\partial m}{\partial \phi} = \epsilon \quad \phi = \frac{m-1+\alpha-n(k_B-k)}{\epsilon} + \frac{n+1}{2}(k_B-k) + 1 - \alpha$$

ϵ は数値計算上導入した微小な値であり、実際には $10^{-2}n$ 程度としている。部材は Fig.6 に示すような区間 L_1, L_2, L_3 を N 等分し、区間長方向に $5N$ 部分に不等分割して各区間での曲率を一定として扱った。(1), (2) に示した $\partial m / \partial \phi$ の値から各区間の剛性マトリックスが定まり、部材の剛性マトリックスは Fig.7 に示すような区間 $i-1, i$ の剛性マトリックス, $K^{i-1, i+1}$ が、2 区間 $i-1, i$ および $i, i+1$ の剛性マトリックス $K^{i-1, i}$ および $K^{i, i+1}$ により、

$$K^{i-1, i+1} = \begin{Bmatrix} \begin{matrix} K_{11}^{i-1, i} & -K_{12}^{i-1, i} \cdot S \cdot K_{21}^{i-1, i} \\ -K_{21}^{i-1, i} \cdot S \cdot K_{12}^{i-1, i} & K_{22}^{i-1, i} - K_{21}^{i-1, i} \cdot S \cdot K_{12}^{i-1, i} \end{matrix} & \text{SYM.} \\ \begin{matrix} K_{12}^{i-1, i} & K_{22}^{i-1, i} \end{matrix} \end{Bmatrix} \quad \left. \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right\} \quad \begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \quad \dots (4)$$

$$S = (K_{22}^{i-1, i} + K_{11}^{i, i+1})^{-1}$$

と表わされることから順次計算できる。 K_{jk}^* は K^* マトリックスのサブマトリックス (2×2) である。 i 点の変位は、

$$U^i = -S \cdot (K_{21}^{i-1, i}, K_{12}^{i, i+1}) \cdot \begin{pmatrix} U^{i-1} \\ U^{i+1} \end{pmatrix} \quad \dots (5)$$

として計算できる。このプログラムによる解析は各部材における剛性変化を順にチェックして行くことにより進められ、解析に極めて多数のステップを要する。プログラムで扱える骨組は節点数 80・部材数 100 以下のものであるが、プログラムサイズは固化ルーチンを含み FORTRAN で約 4000 ステップである。簡単な計算例を Fig.8a~Fig.8c に示す。Fig.8b, Fig.8c にはプログラム - A による同一例の計算結果を破線で記入した。演算時間はプログラム - A によるものが約 10 sec., プログラム - B によるものが約 160 sec. であった。

5.3 柱はり接合部の考慮

弾性解析において柱はり接合部の変形を考慮すると、これを剛域と考える場合に比べて骨組の水平変形の評価に 10~20% の差が生ずることは従来より指摘され、柱はり接合部の変形を考慮する解析法が研究された。^{7), 8)} 筆者らも矩形ラーメンについてマトリックス変位法の手順に簡単に組込める定式化を行った。⁹⁾ プログラム - A, B における柱はり接合部の取扱いはこの方法によっている。柱はり接合部の耐力差による解析結果の違いをプログラム - A と同形式のプログラムにより計算した例¹⁰⁾を、Fig.9 に示す。図中には、柱はり接合部の耐力が柱はりに比べて低い場合には柱はり接合部を点と考えた解析結果より骨組の耐力は低いが、柱はり接合部の設計（主として補強方法）を調節することにより復元力特性の調節が可能であることが示される。特に鋼構造柱はり接合部は安定に大きな塑性変形が可能で部分*であって、骨組の塑性変形に対する寄与を骨組塑性率 $\mu_F = 0.3\mu_p$ というように大きい¹¹⁾ことから、鋼構造骨組の設計において柱はり接合部を考慮することの意義は、骨組の耐震性に要求される塑性変形能力の調節が可能である点にある。

* X 型、十字型などの試験体を用いた部分架構の実験からは、柱はり接合部の塑性率 $\mu_p = 20 \sim 80$ という結果が得られている。但し、純厚鋼を用いるなどの場合には脆性破壊現象に注意すべきである。

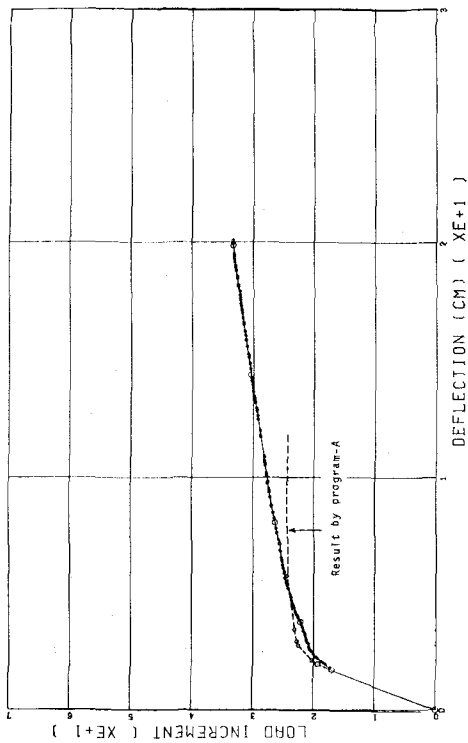


Fig. 8c Example of analysis (Load factor-deflection relation)

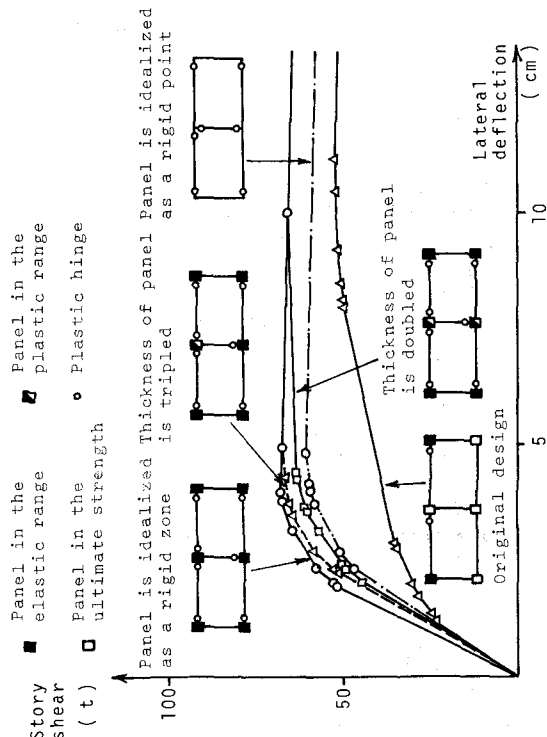


Fig. 9 Example of analysis taking the deformation of panel-zone into consideration

5-4 まとめ

鋼構造骨組の耐震設計にあつては、①骨組の耐震安全性を評価する方法、②耐震安全性を確保した骨組を設計する手順、が必要である。①については文献5)の方法を用いることができる。②に関しては、骨組各層の耐力のバランスが悪いと限られた層に塑性変形の集中を招いて崩壊に至る⁵⁾といった現象が考えられるので、骨組全体の塑性変形能力確保の他に各層への塑性変形配分がうまく行われるような手順を考慮しなければならぬ。これに対する電子計算機の利用としては、各層の復元力や塑性変形配分の概算設計にプログラム-Aのような比較的演算時間の短いプログラムを利用し、さらに各層に対してプログラム-Bのような比較的精密なプログラムによって検討を加える(このとき層ラーメンモデル¹²⁾などが活用できよう)という方法が考えられる。この手順の中で柱はり接合部は復元力特性および塑性変形能力を調節できる部分として考慮できる。また電子計算機は各時点においてプログラム可能であった方法の処理を行うtoolに過ぎないから、設計者に判断資料を整理してフィードバックできるような計算結果のパターン化、視覚化にも努力をすべきであろう。

プログラムの作成にあたり、計算機時間の提供を載いた(株)芙蓉情報センターに感謝します。

【引用文献】

- 1) 日本建築学会,「鋼構造設計規準」。
- 2) 中村龍治,新橋東樹,「ビル建築の自動設計」,日本鋼管技報No.50,1970。
- 3) 横尾,佐藤雄二,中坂実,「手造りになった大型コンピュータ」,建築界,1971。
- 4) 日本建築学会,「地震荷重(案)」。
- 5) 加藤勉,秋山崇,「強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷」。
- 6) 日本建築学会,「鋼構造塑性設計指針」。
- 7) 日置興一郎,中村嘉房,「接合部ハルバの剪断変形を考慮した種方法」,日本建築学会論文報告集103,1964。
- 8) 田中剛,「剪断変形する接合部をもつ長方形ラーメンの種方法」,日本建築学会論文報告集109,1965。
- 9) 中尾雅男,「鋼構造ラーメンの設計と解析におけるはり接合部の変形の考慮」,東京大学工学部誌A-10,1972。
- 10) 加藤勉,中尾雅男,「鋼構造梁柱接合部ハルバラーメンの設計について」,プログラムNo.48,1973。
- 11) 中尾雅男,「鋼構造柱の剛接合部に関する研究」,東京大学論文,1975。
- 12) 加藤勉,中尾雅男,西村幹一,「断面骨組の塑性設計に関する一つのプログラム」,日本鋼構造学会研究集會,1971。

ON THE CONSIDERATION OF BEAM-TO-COLUMN CONNECTION IN DESIGN OF STEEL FRAMES

Ben KATO*, Masami NAKAO**

1. Introduction

In the structural design process of steel frames, two methods can be used. One is the elastic design method and the other is the plastic design method which is based on the plastic behavior of frame up to collapse. As for the plastic design method, limit analysis methods of frames based on the elastic perfectly plastic moment-curvature relation or the elastic perfectly plastic stress-strain relation are already established and many researches on the analysis of frames taking the strain-hardening property of material are performed, however the estimation of the plastic behavior of a complicated steel structure can be hardly made in an enough accuracy.

2. Analysis programs

Two examples of programs on the plastic analysis are presented.

2.1 Program-A

Flow of the program is shown in Fig.1. The program is a general type for plane frames where the nodal point can be assumed to be a rigid point or to have a finite rectangular size. The moment-curvature relation of member is assumed as elastic perfectly plastic. The restoring force characteristics of beam-to-column connection are assumed tri-linearly. Examples of the plotter outputs are shown in Fig.2a~2d.

2.2 Program-B

This program is designed to perform the analysis of rectangular frames composed of box- and/or H-shaped members taking the strain-hardening property of material into consideration. Stress-strain relation of material is assumed as in Fig.3. Section of member is idealized as shown in Fig.4. Moment-curvature relation of member can be classified into three types according to the value of ratio α of the axial force to the yield axial force (Fig.5a~5c). Example of the outputs are shown in Fig.8a~8c.

3. On the consideration of beam-to-column connection

An example of analysis where the effects of the reinforcement of beam-to-column connection are compared with each other is shown in Fig.9. The restoring force characteristics of frame can be controlled by the design of beam-to-column connection (mainly by its reinforcement).

4. Conclusion

A procedure of the computer application on the earthquake resistant design of steel frames is proposed. At first a rather simple program like program-A is used for the rough estimation of the restoring force characteristics of each story and the distribution of deformation capacity along the height of frame, then a more precise program like program-B is used to refine the result story-wise utilizing "story frame models". By the consideration of beam-to-column connection, restoring force characteristics and deformation capacity of frame can be controlled.

* Professor, Dr. Eng., University of Tokyo.

** Associate professor, Dr. Eng., Tokyo Denki Inst. of Tech.