ϵ 法を用いたコンピュータによる構造解析*

高野 英 資**, 原 利 昭**, 根 本 洋 一***

A Study of the Structural Analysis of a Rigid Frame by the ϵ -Method Using a Digital Computer

by Eisuke TAKANO, Toshiaki HARA, and Yoichi NEMOTO

The principle of structural analysis by the ϵ -method was investigated for a two dimensional multi-storied and multi-span rectangular rigid frame loaded vertically or horizontally, in cases where the base of the columns of a rigid frame are all fixed. An example of a digital computing program for the structural analysis of a rigid frame was constructed on the basis of the ϵ -method, and various quantities were computed through this program. The ϵ -method, named by the authors, is one of the slope-deflection methods by which Tatsumi⁽¹⁾ has already reported various results relating to end moments, angles of rotation of each joint and each member, and other aspects of the multi-storied and multi-span rectangular rigid frame in general, figuratively, using the calculation table. Finally, the results calculated by the digital computing program were shown in several figures in the present paper.

Key Words : Structural Analysis, Rectangular Rigid Frame, Multi-Storied and Multi-span Frame, Slope-Deflection Method, Digital Computing Program

1. 緒 言

不静定構造物の構造解析には、有力な試索法として広く用いられているモーメント分配法や、たわみ角法の反復計算を図上計算に発展させたカニ法、コンピュータによる計算に便利な剛性マトリックス法など、多くの方法がある^{(1)~(3)}。剛性マトリックス法は、節点変位と節点回転角および部材の剛性をマトリックスによって、きれいな形に整理し、節点でのつりあい方程式を逆マトリックス法によって解いて、変形と断面力をもとめる方法で、二次元から三次元へと発展させた汎用プログラムなども、すでに完成している。しかしこの方法は、解析の特性を生かすためには、大容量のコンピュータを使用するのが妥当であり、これに比してカニ法や、本論文で述べる ϵ 法⁽¹⁾——著者らの命名である——はスケールも小さく、内容的に欲ばらなければ、現在広く普及しつつあるパーソナルコンピュータによって、十分演算が可能である。

次に撓角撓度法の一つである ϵ 法について、電子計

算機を用いて演算する場合の解析の原理と手順を、水平力ならびに垂直力が同時に、あるいはそれぞれ単独で存在する場合の、高層多スパン一般矩形ラーメンを例にとり、次に示そう。

2. ラーメン各部材の節点

初めに n_c 層 m_s スパンラーメンを、図 1 のように縦が n_c+1 個、横が m_s+2 個の、破線で描かれた長

図 1 高層多スパンラーメン

* 昭和 60 年 10 月 2 日 第 63 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 3 月 4 日。

** 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐 2 の町 8050)。

*** 正員、北日本エンジニアリング(株)(〒951 新潟市本町 8 番町)。

方形状マス目を用い、太い実線のように描く。マス目の頂角には、左から右へ、また上から下へと、一連の番号が付されている。いま便宜上、ラーメンの各節点を実節点、ラーメン周辺の破線のみが交わる頂角を仮想節点と呼ぶことにする。このとき、左から m 番め、上から n 番めのラーメンの節点番号は m, n を用いると、次式のように表すことができる。

$$i = (n-1)(m_s+3) + m \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで m, n は整数であり、柱脚を含めれば、矩形ラーメンの実節点に対する m は 2 から m_s+2 までの値を、また n は 2 から n_c+2 までのあいだの値をとる（仮想節点を含めれば、 m, n は 1 から、それぞれ $MM = m_s+3, NN = n_c+2$ までの整数値をとる）。

3. ε法によるラーメンの理論解析

次に電子計算機のプログラミングに便利のようにラーメン解析に必要な諸式を誘導しよう。いま、図1の任意の節点 i に連なる周囲の各部材について考えてみよう。節点 i の左、右、上、下の各節点の番号を、図2のごとく、それぞれ l, r, u, d とする。層数が n_c 個、スパン数が m_s 個の高層多スパン一般矩形ラーメン（柱脚固定）において、任意の節点 i に隣接する各部材の材端 i における曲げモーメント $M_{ij} (j=l, r, u, d)$ は、各節点回転角 θ_i, θ_j ならびに、上から第 $n-1$ 層および第 n 層の各柱の上下端節点の相対部材回転角 R_{n-1}, R_n を用いて表すと、撓角撓度法の基本公式から、次式のように求めることができる。すなわち、はりについては

$$M_{il} = 2EK_{bl}(2\theta_i + \theta_l) + C_{il} \quad \cdots \cdots (2)$$

$$M_{ir} = 2EK_{br}(2\theta_i + \theta_r) - C_{ir} \quad \cdots \cdots (3)$$

であり、柱については

$$M_{iu} = 2EK_{cu}(2\theta_i + \theta_u - 3R_{n-1}) \quad \cdots \cdots (4)$$

$$M_{id} = 2EK_{ci}(2\theta_i + \theta_d - 3R_n) \quad \cdots \cdots (5)$$

図2 任意の節点 i に隣接する節点の番号

となる。式中、 E は各部材のもつ縦弾性係数、 K_{bl}, K_{br} は節点 l, i を左端にもつはりの剛度、 K_{cu}, K_{ci} は節点 u, i を上端にもつ柱の剛度（または剛比）である。さらに C_{il}, C_{ir} ははり il, ir において、はりの両端を完全固定した場合に、それぞれのはりに働く垂直荷重 P_0 のみによって、各部材端の節点 i に生ずる固定端モーメントであり、垂直方向荷重状態が与えられると、あらかじめ計算しておくことができるものである（図3など参照）。

また、第 $n-1$ 層および第 n 層の柱の上端並びに下端における材端曲げモーメントは、それぞれ第 $n-1$ 層については

$$M_{ui} = 2EK_{cu}(2\theta_u + \theta_i - 3R_{n-1}) \quad \cdots \cdots (6)$$

$$M_{iu} = 2EK_{cu}(2\theta_i + \theta_u - 3R_{n-1}) \quad \cdots \cdots (7)$$

第 n 層については

$$M_{id} = 2EK_{ci}(2\theta_i + \theta_d - 3R_n) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$M_{di} = 2EK_{ci}(2\theta_d + \theta_i - 3R_n) \quad \cdots \cdots (9)$$

となる。式(6)～(9)は柱 iu, di について示したが、同じ各層内の他の柱についても同様に表すことができる。ここに、以上の諸式において用いた添字は、前節式(1)の i を用いると、図2から

$$l = i-1, r = i+1, u = i-(m_s+3)$$

$$d = i+(m_s+3)$$

$$\cdots \cdots (10)$$

となり、いずれも m, n が与えられると定まる値である。いうまでもなく、実節点の場合、各層ごとに、 m は 2 から m_s+2 までの整数値をとる。また n は、柱脚を除けば 2 から n_c+1 までの値をとるが、 $n = n_c+2$ となる柱脚 i においては、柱脚固定の場合の材端曲げモーメント M_{iu} の式は、 $\theta_i = 0$ であることを考慮すれば、

$$M_{iu} = 2EK_{cu}(\theta_u - 3R_{n-1}) \quad \cdots \cdots (11)$$

と書ける。

次に、以上の諸式において

$$\left. \begin{aligned} 2E\theta_i &= \varphi_i, 2E\theta_j = \varphi_j \\ 6ER_{n-1} &= \phi_{n-1}, 6ER_n = \phi_n \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (12)$$

とおき、式(2)～(5)を節点 i における平衡式

$$M_{il} + M_{ir} + M_{iu} + M_{id} = 0 \quad \cdots \cdots (13)$$

図3 固定端モーメント

に代入して整理すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & 2(K_{bl} + K_{bi} + K_{cu} + K_{ci})\varphi_i \\ & = -(K_{bl}\varphi_l + K_{bi}\varphi_r + K_{cu}\varphi_u + K_{ci}\varphi_d) \\ & + K_{cu}\psi_{n-1} + K_{ci}\psi_n + C_{ir} - C_{il} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

また、後述する第 $n-1$ 層および第 n 層の層モーメントを M_{n-1}, M_n とし、各層ごとに成立する次の平衡条件式、すなわち第 $n-1$ 層に対する層方程式

$$\sum_{m=2}^{m_s+2} (M_{iu} + M_{ui}) + M_{n-1} = 0 \dots\dots\dots (15)$$

および第 n 層に対する層方程式

$$\sum_{m=2}^{m_s+2} (M_{id} + M_{di}) + M_n = 0 \dots\dots\dots (16)$$

に式(6)～(9)を代入して、式(12)の関係を用いれば、それぞれ第 $n-1$ 層ならびに第 n 層に対する次の諸式

$$\sum_{m=2}^{m_s+2} \{3K_{cu}(\varphi_i + \varphi_u) - 2\psi_{n-1}K_{cu}\} + M_{n-1} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

$$\sum_{m=2}^{m_s+2} \{3K_{ci}(\varphi_i + \varphi_d) - 2\psi_n K_{ci}\} + M_n = 0 \dots\dots\dots (18)$$

が得られる。式(17)、(18)から ψ_{n-1}, ψ_n を求めると

$$\psi_{n-1} = \frac{1.5}{\sum_{m=2}^{m_s+2} K_{cu}} \left\{ \sum_{m=2}^{m_s+2} K_{cu}(\varphi_i + \varphi_u) + \frac{M_{n-1}}{3} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$\psi_n = \frac{1.5}{\sum_{m=2}^{m_s+2} K_{ci}} \left\{ \sum_{m=2}^{m_s+2} K_{ci}(\varphi_i + \varphi_d) + \frac{M_n}{3} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

となる。いま

$$\mathcal{R}_{n-1} = \frac{\psi_{n-1}}{1.5} \sum_{m=2}^{m_s+2} K_{cu}, \quad \mathcal{R}_n = \frac{\psi_n}{1.5} \sum_{m=2}^{m_s+2} K_{ci} \dots\dots\dots (21)$$

$$K_{SUMi} = K_{bl} + K_{bi} + K_{cu} + K_{ci} = \rho_i/2 \dots\dots\dots (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{il} &= K_{bl}/\rho_i, \quad \gamma_{ir} = K_{bi}/\rho_i \\ \gamma_{iu} &= K_{cu}/\rho_i, \quad \gamma_{id} = K_{ci}/\rho_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

$$\delta_u = 1.5K_{cu} / \sum_{m=2}^{m_s+2} K_{cu}, \quad \delta_i = 1.5K_{ci} / \sum_{m=2}^{m_s+2} K_{ci} \dots\dots\dots (24)$$

とおき、さらに

$$\gamma_{ij}\rho_i = \gamma_{ji}\rho_j \quad (j=l, r, u, d) \dots\dots\dots (25)$$

を考慮すれば、式(14)および式(19)、(20)はそれぞれ

$$\begin{aligned} \rho_i\varphi_i &= -(\gamma_{li}\rho_l\varphi_l + \gamma_{ri}\rho_r\varphi_r + \gamma_{ui}\rho_u\varphi_u \\ & + \gamma_{di}\rho_d\varphi_d) + \delta_u \mathcal{R}_{n-1} + \delta_i \mathcal{R}_n + C_{ir} - C_{il} \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

$$\mathcal{R}_{n-1} = \sum_{m=2}^{m_s+2} (\gamma_{iu}\rho_i\varphi_i + \gamma_{ui}\rho_u\varphi_u) + \frac{M_{n-1}}{3} \dots\dots\dots (27)$$

$$\mathcal{R}_n = \sum_{m=2}^{m_s+2} (\gamma_{id}\rho_i\varphi_i + \gamma_{di}\rho_d\varphi_d) + \frac{M_n}{3} \dots\dots\dots (28)$$

となり、 $\rho_i\varphi_i = \varepsilon_i$ などとかくと

$$\varepsilon_i = -(\gamma_{li}\varepsilon_l + \gamma_{ri}\varepsilon_r + \gamma_{ui}\varepsilon_u + \gamma_{di}\varepsilon_d)$$

$$+ \delta_u \mathcal{R}_{n-1} + \delta_i \mathcal{R}_n + C_{ir} - C_{il} \dots\dots\dots (29)$$

$$\mathcal{R}_{n-1} = \sum_{m=2}^{m_s+2} (\gamma_{iu}\varepsilon_i + \gamma_{ui}\varepsilon_u) + \frac{M_{n-1}}{3} \dots\dots\dots (30)$$

$$\mathcal{R}_n = \sum_{m=2}^{m_s+2} (\gamma_{id}\varepsilon_i + \gamma_{di}\varepsilon_d) + \frac{M_n}{3} \dots\dots\dots (31)$$

が得られる。 $\gamma_{ij}(j=l, r, u, d)$ は節点ごとに定まるもので伝達率といわれ、各層ごとに定まる $\mathcal{R}_{n-1}, \mathcal{R}_n$ は撓度係数、各柱ごとに定まる δ_u, δ_i は分配率と呼ばれ、柱の上端部節点番号が添字として付されている。 $\varepsilon_i, \varepsilon_j$ はたわみ角係数といわれる。

次に前出の層モーメントについて言及しておこう。 M_n は高層多スパンラーメンの上から第 n 層の層モーメントで、第 n 層の柱の上端部におけるせん断力、すなわち第 n 層の上端部を含み、その層より上部に働く水平力 P_K の総和として与えられる力 H_n と、第 n 層の柱の長さ h_n との積で式(32)のように与えられ、あらかじめ計算しておくことができる。

$$M_n = h_n H_n = h_n \sum_K P_K \dots\dots\dots (32)$$

さらに第 n 層が柱の中間の、下端から y_K のところになんらかの水平力 P'_K をうける場合には、それぞれの水平力が第 n 層の柱の下端に与える曲げモーメントの和を、式(32)の右辺に加えて、 M_n をあらかじめ求めておけばよい。すなわち式(32)の代わりに、次の式(33)を用いる(図4など参照)。

$$M_n = h_n H_n + \sum_K (y_K P'_K) \dots\dots\dots (33)$$

ここで注意すべきことは、水平力 P_K, P'_K などによって与えられるモーメントが、材端曲げモーメントと同様、右回りのものを正として取扱っていることである。これは節点回転角あるいはたわみ角と呼ばれている角 θ_i や、部材回転角 R_n がいずれも部材を、部材の元の位置に対して、右回りに回転するものを正として定めていることとあわせて重要なことである。

さて、ε法においては、節点回転角 θ_i 、したがって φ_i を求めるには、あらかじめその第1近似解を仮定し、逐次近似解法により順次近似度をあげていく方法を用いる。式(14)および式(19)、(20)中の右辺の φ の値をすべて φ_i に等しいとすると、次の諸式をうる。

図4 ラーメンに働く水平力と層モーメント

$$3(K_{bi} + K_{ci} + K_{cu} + K_{ci})\varphi_i \\ = K_{cu}\psi_{n-1} + K_{ci}\psi_n + C_{ir} - C_{il} \quad \dots\dots\dots(34)$$

$$\psi_{n-1} = 3\varphi_i + \frac{1.5}{\sum_{m=2}^{m_s+2} K_{cu}} \frac{M_{n-1}}{3} \quad \dots\dots\dots(35)$$

$$\psi_n = 3\varphi_i + \frac{1.5}{\sum_{m=2}^{m_s+2} K_{ci}} \frac{M_n}{3} \quad \dots\dots\dots(36)$$

式(35), (36)を式(34)に代入すれば, 式(22)~(25)などの諸式を用いて, 一般層における ε_i の仮定値 ε_{ai} , すなわち第1近似解式(37)を求めることができる。

$$\varepsilon_{ai} = \left\{ \frac{1}{3} (M_{n-1}\delta_u + M_n\delta_i) + C_{ir} - C_{il} \right\} \\ / 3(\gamma_{il} + \gamma_{ir}) \quad \dots\dots\dots(37)$$

最下階の節点 ε_i の仮定値についても, 柱脚が固定されている場合を考慮すれば, 一般層の場合と同様な計算から, その第1近似値式(38)を合理的に決定することができる。

$$\varepsilon_{ai} = \left\{ \frac{1}{3} (M_{n-1}\delta_u + M_n\delta_i) + C_{ir} - C_{il} \right\} \\ / \{3(\gamma_{il} + \gamma_{ir}) + 0.5\gamma_{id}\} \quad \dots\dots\dots(38)$$

4. 計算の流れ図と計算プログラム

さて, 以上の準備ができたので, 次に具体的な計算に移る手順を示そう。もちろん, 電子計算機による計算をはじめる前には, 図1のように, 高層多スパンラーメンの図を描き, 各節点番号を確認するとともに, 各部材の剛度(または剛比) K_{bi} , K_{ci} を求め, 各はりに働く垂直力 P_o から C_{il} , C_{ir} を, また各柱に働く水平

力 P_K , P'_K から M_n を求めておく必要がある。以下これらの M_n , K_{bi} , K_{ci} , C_{il} , C_{ir} を電子計算機に入力すれば, 電子計算機は図5のフローチャートに従い, 演算結果を出力することになる。なお, ここで仮想節点および仮想節点に隣接する実節点の中には, 関連する各層, 各部材の M_n , K_{bi} , K_{ci} , C_{il} , C_{ir} およびこれらに關係する他の計算機変数の一部の値が, これらの節点位置に応じ, 計算プログラムの中であらかじめ零として設定されているものがあり, ユーザは実節点に関する M_n , K_{bi} , K_{ci} , C_{il} , C_{ir} の値のみを, 入力データとして, 与えればよい。

図5は大まかな計算プログラムのフローチャートを示したものであるが, 一般矩形ラーメン各部材の剛度(または剛比), 各はりの固定端モーメント, 層モーメントが入力されると, 合理的に仮定された ε_i の第1近似値 ε_{ai} を用いて, ε_i , R_n の繰返し演算を行い, 順次, より高次の ε_i , R_n の近似値を求め, 第 $L-1$ 近似値 $\varepsilon_i^{(L-1)}$, $R_n^{(L-1)}$ と第 L 近似値 $\varepsilon_i^{(L)}$, $R_n^{(L)}$ のそれが, 実用上満足する精度において等しくなるまで, 計算が繰返されるようになっている。かくして得られた第 L 近似の $\varepsilon_i^{(L)}$, $R_n^{(L)}$ が求める結果であるが, ε_i の繰返し演算による一致の精度は, 最下層の $m = m_s + 2$, $n = n_c + 1$ の節点のたわみ角係数 ε_{icp} に関してチェックを行っており, 小数点以下の希望する桁数まで ε_i の値が一致するよう, 演算が継続するプログラムとして作られている($LL=1$ のとき小数点以下1位まで一致, $LL=3$ のとき小数点以下3位まで一致するなど)。

$\varepsilon_i^{(L)}$, $R_n^{(L)}$ が得られると, 計算プログラムの中では引き続き撓角撓度法の基本公式により, 各部材の材端曲げモーメント M_{ij} が計算され, これらが各節点のまわりの平衡条件ならびに各層ごとの平衡条件を満たすことを確認する部分へと移行し, 一連の計算結果を出力した後, 全計算を終了する形となっている。

表 1

Variable	in Title	in Computation	Variable	in Title	in Computation
n_c	NCLM	NCLM	δ_i	DEL(I)	DLDR(I)
m_s	MSPN	MSPN	R_n	R(N)	SMRN(K)
K_{bi}	BK(I)	BKCK(I)	M_{il}	AMN1(I)	AMN1
K_{ci}	CK(I)	BKCK(J)	M_{ir}	AMPI(I)	AMPI
C_{il}	CL(I)	CLCR(I)	M_{id}	AMNM(I)	AMNM
C_{ir}	CR(I)	CLCR(J)	M_{id}	AMPM(I)	AMPM
M_n	SM(N)	SMRN(N)	$\varepsilon_i \gamma_{il}$	AML(I)	AMLR(I)
γ_{il}	TL(I)	TLTR(I)	$\varepsilon_i \gamma_{ir}$	AMR(I)	AMLR(J)
γ_{ir}	TR(I)	TLTR(J)	$\varepsilon_i \gamma_{id}$	AMU(I)	AMUD(I)
γ_{id}	TU(I)	TUTD(I)	$\varepsilon_i \gamma_{id}$	AMD(I)	AMUD(J)
γ_{id}	TD(I)	TUTD(J)	$\delta_i R_n$	DEL(I)	DLDR(J)
ε_i	ENO(I)	EN(I)		*R(N)	
	EN(I)	EN(J)			

where $NN=NCLM+2$, $MM=MSPN+3$, $I=(N-1)*MM+M$
 $J=NN*MM+I$, $K=NN+N$

図 5 ε法を用いた電子計算機による計算の流れ図

本プログラムは柱脚固定の場合における高層多スパン一般矩形ラーメンのε法による構造解析のプログラムであるが、次章の計算例とともに、理解に便利のように、計算プログラムの中に使用されている計算機変数ならびに各小タイトル中の記号が、前述の諸式で使用した各変数と、いかに対応しているかを、まとめて表1に与えておいた。また本プログラムでは $MM \times NN = 36$ を確保しているの、本プログラムによる計算可能な、層数 n_c に対するスパン数 m_s の最大値は表2に示したようになる。

図6は3層2スパン矩形ラーメン(柱脚固定)が、各はりとも等分布荷重 w をうけ、また各層に図示のような水平荷重 P をうけている場合を示す。図中、括弧のついた数字はラーメンの各はり、ならびに各柱が有する剛度を、後述する節点7と節点8を結ぶはりの剛度で除した剛比を示し、各層の柱の高さ(階高)および各はり間(スパン)が付記されている。

さて、図6の例題を電子計算機を用いて計算するには、まず図1のような作図を行い、ラーメン各部節点をもつ節点番号などの確認を行う必要がある。図6には、このようにして得られた節点番号が、仮想節点を含めた図中に、示されている。電子計算機への入力データとなる層モーメント $M_n (n=2, 3, 4)$ は、第2層から順に

$$M_2 = 7 \text{ t} \times 4 \text{ m} = 28 \text{ tm}$$

$$M_3 = (7 \text{ t} + 9 \text{ t}) \times 4 \text{ m} = 64 \text{ tm}$$

$$M_4 = (7 \text{ t} + 9 \text{ t} + 10 \text{ t}) \times 5 \text{ m} = 130 \text{ tm}$$

となる。(1 tm = 9.8 kN·m) また、各はりの固定端モーメント C_{il}, C_{ir} は、図3を参照して、 $n=2$ のとき、各節点に関して次のように得られる。

$$\begin{aligned} \text{節点7: } C_{76} &= 0, C_{78} = 4.8 \times 8^2 \div 12 \\ &= 25.6 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{節点8: } C_{87} &= 25.6 \text{ tm}, C_{89} = 4.8 \times 4^2 \div 12 \\ &= 6.4 \text{ tm} \end{aligned}$$

$$\text{節点9: } C_{98} = 6.4 \text{ tm}, C_{9,10} = 0$$

同様に、他層、他節点についても以下のような各値をうることができる。

表2 $MM \times NN = 36$ の場合の層数 n_c に対するスパン数 m_s の最大値

$MM \times NN$	n_c	NN	$(MM)_{\max}$	$m_s \max$
36	1	3	12	9
36	2	4	9	6
35	3	5	7	4
36	4	6	6	3
35	5	7	5	2
32	6	8	4	1
36	7	9	4	1
$NN = n_c + 2, MM = m_s + 3$				

$$\text{節点12: } C_{12,11} = 0, C_{12,13} = 32.0 \text{ tm}$$

$$\text{節点13: } C_{13,12} = 32.0 \text{ tm}, C_{13,14} = 8.0 \text{ tm}$$

$$\text{節点14: } C_{14,13} = 8.0 \text{ tm}, C_{14,15} = 0$$

$$\text{節点17: } C_{17,16} = 0, C_{17,18} = 32.0 \text{ tm}$$

$$\text{節点18: } C_{18,17} = 32.0 \text{ tm}, C_{18,19} = 8.0 \text{ tm}$$

$$\text{節点19: } C_{19,18} = 8.0 \text{ tm}, C_{19,20} = 0$$

以上のようにして得られた層モーメント M_n 、剛度 K_{bi}, K_{ci} (本例題では直接剛比の値を用いる)、固定端モーメント C_{il}, C_{ir} を、図5の流れ図でデータ入力(2)として示した順序に従い入力すれば、あとは事前に与えてある後述のIVH, JJJ, LLL, LLに関するユーザの指示に従い、必要な諸量を出力することになる。すなわち、データ入力(2)は各層ごとに、若い番号の実節点から順に入力し、まず第2層から第3層、第4層へと、 $M_2; K_{b7}, K_{c7}, C_{76}, C_{78}; K_{b8}, K_{c8}, C_{87}, C_{89}; K_{b9}, K_{c9}, C_{9,8}, C_{9,10}; M_3; K_{b12}, K_{c12}, C_{12,11}, C_{12,13}; \dots; M_4; K_{b17}, K_{c17}, C_{17,16}, C_{17,18}; \dots; K_{b19}, K_{c19}, C_{19,18}, C_{19,20}$ の順に入力(ただし $K_{b9} = K_{b14} = K_{b19} = 0$)すればよいのであるが、実際にはこれらの入力データ(2)は紙テープなどにあらかじめパンチしておくようにする。また流れ図によれば、これに先立ちユーザは必要に応じ、前述のように、標題欄の印字形式 (IVH = 1は垂直荷重のみのとき, IVH = 2は水平荷重のみのとき, IVH = 3は垂直・水平両荷重が働くときをしめす。)を指定し、各演算の繰返し回ごとに演算結果の印字を必要とするときには、タイプ入力として、JJJ = 1を、最終回の演算結果のみ印字する必要があるときには JJJ = 2を指定する。次に余裕演算繰返回数 LLL の指定に関しては、通常ε法で図上計算を行う場合には、 ϵ_i の値が小数点以下第3位まで一致すれば、実用上充分である場合が多く、これらの場合には演算はだいたい10回程度以内で所要の結果

図6 3層2スパン矩形ラーメン

との一致の精度が不足と判断されたときには、改めて少し多めにみて、例えば $LLL=20$ として、その数字を指定すればよい。ここで計算精度を示す LL の指定がきびしくなればなるほど、余剰演算繰返し数 LLL

図 7 ϵ 法による構造解析の電子計算機プログラム

を多めにとる必要があることはいうまでもない。

本章の演算結果例は JJJ = 2 の場合を示しており、図 9 は図 6 の例題の演算結果から材端モーメントの値をラーメン図に付記して示したものである。図 10 にはさらにラーメン各部材が受ける曲げモーメントの様子を描いておいた。

なお、本例題では水平力と垂直力が同時に働く場合の材端曲げモーメントを直接求めているが、水平力、垂直力がそれぞれ単独で働く場合の結果を求め、それらの和をとれば、先の材端曲げモーメントの値と一致することはいうまでもない。

6. 結 言

以上、撓角撓度法の一つである ε 法について、電子計算機を用いて演算する場合の解析法と演算プログラムならびに計算例について示した。ε 法については異が文献(1)の中で、図上計算法について詳しく解説しているが、電子計算機による演算プログラムについては著者らのものが最初のものであり、構造解析にたずさわる技術者が、比較的小容量のパーソナルコンピュータを用いて楽しく演算結果を得ることに役立てて下されば幸いである。

最後に、テープ作成や電子計算機による計算、デー

```

17HAMMM(1), 3X, 7HAMPM(1), 3X, 6HTOT(1) /
DO 198 N=2, NN
  BMNM=0.
  BMPM=0.
DO 195 M=2, MM1
  I=(N-1)*MM+M
  J=NN+MM+1
  K=NN+N
  IPRM=I+MM
  INRM=I-MM
  JNRM=J-MM
  IF (N-NN) 186, 179, 179
179 AMN1=0.
  AMP1=0.
  AMNM=AMUD(JNMM)-SMRN(K-1)*OLDR(INMM)
  ARPM=0.
  EN(I)=0.
  EN(J)=0.
  GO TO 190
186 AMN1=2.*AMLR(I)*AMLR(J-1)+OLCR(I)
  AMP1=2.*AMLR(J)*AMLR(I+1)-OLCR(J)
  AMNM=2.*AMUD(I)*AMUD(JNMM)-SMRN(K-1)*OLDR(INMM)
  ARPM=2.*AMUD(J)*AMUD(IPRM)-SMRN(K)*OLDR(I)
190 TOT=AMN1+AMP1+AMNM+ARPM
  BMNM=BMNM+AMNM
  BMPM=BMPM+ARPM
  WRITE(6, 192) I, EN(I), L, EN(J), AMN1, AMP1, AMNM,
    2AMPM, TOT
194 FORMAT(115.F11.4, 16.F11.4, 4.F13.3, 4.F10.3)
195 CONTINUE
  BNDP(N)=BMNM
  BNDP(K)=BMPM
198 CONTINUE
199 WRITE(6, 200)
200 FORMAT(12X, 3H* N, 4X, 5HSM(N), 2X, 7HBMPM(N), 2X,
    39HBMM(N+1), 2X, 6HSUM(N) /
DO 207 N=2, NN1
  K=NN+N
  SUM(N)=SMRN(N)+BNDP(K)+BNDP(N+1)
  N1=N+1
  WRITE(6, 206) N, SMRN(N), BNDP(K), BNDP(N1), SUM(N)
206 FORMAT(115.F10.2, 3F10.3)
207 CONTINUE
GO TO 1
STOP
END

```

*** EN METHOD (VERTICAL-HORIZONTAL LOAD)

*** JJJ = 2 NCLM = 3 MSPN = 2 LLL = 20 LL = 5 NN = 5 MM = 5											
N	BA(I)	CA(I)	CL(I)	CR(I)	N	SM(N)	DEL(I)	TL(I)	TR(I)	TU(I)	TD(I)
7	1.000	1.510	0.000	25.400	2	28.00	0.500	0.0000	0.1992	0.0000	0.3008
8	1.210	1.510	25.400	6.400	2	28.00	0.500	0.1344	0.1626	0.0000	0.2030
9	0.000	1.510	6.400	0.000	2	28.00	0.500	0.2224	0.0000	0.0000	0.2776
12	1.250	2.220	0.000	32.000	3	64.00	0.500	0.0000	0.1255	0.1516	0.2229
13	1.570	2.220	32.000	8.000	3	64.00	0.500	0.0954	0.1198	0.1153	0.1695
14	0.000	2.220	8.000	0.000	3	64.00	0.500	0.1481	0.0000	0.1425	0.2094
17	1.860	2.510	0.000	32.000	4	130.00	0.500	0.0000	0.1411	0.1684	0.1904
18	1.570	2.510	32.000	8.000	4	130.00	0.500	0.1140	0.0962	0.1360	0.1538
19	0.000	2.510	8.000	0.000	4	130.00	0.500	0.1246	0.0000	0.1762	0.1992
N	L	I	EN(I)	AML(I)	AMR(I)	AMU(I)	AMD(I)	N	R(N)	DEL(I)*R(N)	
21	7	34.1431	0.0000	7.1998	0.0000	10.9717	2	35.4301	17.7150		
21	8	-12.6101	-1.6949	-2.0508	0.0000	-2.5593	2	35.4301	17.7150		
21	9	8.8625	1.9713	0.0000	0.0000	2.4600	2	35.4301	17.7150		
21	12	58.4862	0.0000	7.3401	8.8669	13.0361	3	72.9753	36.4877		
21	13	16.9526	1.6176	2.0317	1.9541	2.8729	3	72.9753	36.4877		
21	14	31.6130	4.6823	0.0000	4.5034	6.6208	3	72.9753	36.4877		
21	17	90.4030	0.0000	12.7579	15.2272	17.2163	4	76.2485	38.1243		
21	18	27.8398	3.1729	2.6782	3.7870	4.2817	4	76.2485	38.1243		
21	19	57.3129	7.1414	0.0000	10.0980	11.4171	4	76.2485	38.1243		
N	EN(I)	L	EN(I)	AMN(I)	AMP(I)	AMNM(I)	AMPM(I)	TOT(I)			
7	36.1431	21	36.1431	0.000	-12.895	0.000	12.895	0.000			
8	-12.6101	21	-12.6101	29.410	-8.530	0.000	-20.880	0.000			
9	8.8625	21	8.8625	8.292	0.000	0.000	-8.292	0.000			
12	58.4862	21	58.4862	0.000	-15.702	10.890	4.812	0.000			
13	16.9526	21	16.9526	42.575	0.746	-16.366	-26.955	0.000			
14	31.6131	21	31.6130	19.396	0.000	-6.248	-13.148	0.000			
17	90.4030	21	90.4030	0.000	-3.311	7.003	-3.692	0.000			
18	27.8398	21	27.8398	51.104	4.498	-26.041	-29.561	0.000			
19	57.3130	21	57.3129	24.961	0.000	-9.671	-15.290	0.000			
22	0.0000	21	0.0000	0.000	0.000	-20.908	0.000	-20.908			
23	0.0000	21	0.0000	0.000	0.000	-33.843	0.000	-33.843			
24	0.0000	21	0.0000	0.000	0.000	-26.707	0.000	-26.707			
N	SM(N)	BMPM(N)	BMM(N+1)	SUM(N)							
2	28.00	-16.276	-11.724	-0.000							
3	64.00	-35.291	-28.709	0.000							
4	130.00	-48.542	-81.458	0.000							

図 8 計算結果 (水平・垂直両荷重が働く場合)

図 9 材端曲げモーメント (単位 t·m)

図 10 各部材の曲げモーメント

タ整理などに協力下さった本学 宮島雅博技官, 信州大学 篠原和夫技官に記して感謝申上げる。

文 献

- (1) 巽, 最も実用的なラーメンの解法, (昭 16), 252, パワー社.

- (2) 榎谷・天野, たわみ角法とカニ法—多層ラーメンの図上計算法—, (昭 54), 278, 榎書店.
 (3) 塚本, モーメント分配法, (昭 42), 213, 理工図書.