

外周ラーメン構造の解析

仲 威 雄^{*}
加 藤 勉^{**}
中 尾 雅 躬^{***}

§0 序

本論文では、図(0-1)に概略を示す様な水平荷重に対する耐力要素を外周のみに持つ箱型建造物の、水平荷重に対する弾性挙動を知ることが目的とした。このため、従来の水平荷重方向にあるラーメンのみを耐力要素とする考えに換えて、柱の伸縮を考慮し水平荷重に対して直角方向にあるラーメンの抵抗を考えた。解析の方法としては、剛性マトリックス法、撓角法その他が考えられるが、本論文では柱の伸縮を考慮し梁の伸縮を無視した撓角法を用いた。パネルゾーンの変形及び柱、梁の断面変形は式が煩雑となるため考慮していないが、これらを含めて解析を行うことも可能である。(補-1)

解析の前提とした仮定を以下に記す。

- (1) 柱の伸縮を考慮し、梁の伸縮を考慮しない。
- (2) 柱、梁の剪断変形及びパネルゾーンの変形を考慮しない。
- (3) 水平荷重に直角方向のラーメン(以下 F -フレームと呼ぶ)の面外剛性を考慮しない。
- (4) F -フレームは水平荷重方向のラーメン(以下 W -フレームと呼ぶ)に対し各階節点で接続された鉛直バネとして抵抗するものとする。
- (5) 建物平面は F 、 W -フレームに直交する2つの対称軸を持つものとする。(この仮定は本質的なものではなく、解析式の適用を若干変更することにより、任意の平面形状の建物に対して同じ方法が適用出来る。)

註・1

§1では F -フレームを抵抗バネに置換する方法を示し、§2では W -フレームに抵抗バネを考慮した全フレームの解析法について述べる。§3では§1、§2の数値計算について述べ、§4に若干の例題についての解析結果を示す。

計算には、主として東京大学大型計算機センターのHITAC5020Eを用いた。

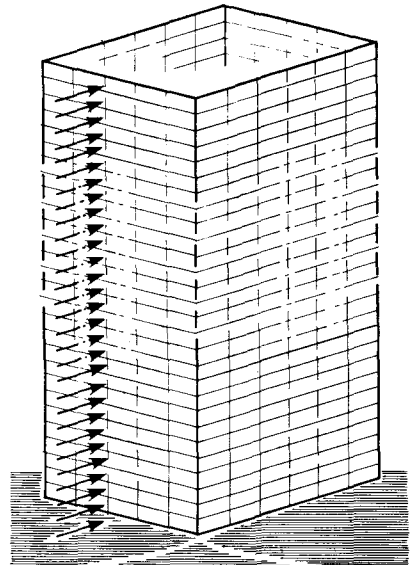


FIG.0-1

*東京大学教授 **同 助教授 ***同 大学院生

1・2 Fフレーム解析の基本式

図(1-2)の様に各層各柱列を夫々添字 k, i で表わし、 k 層 i 柱列の節点(以下 (k, i) 節点と呼ぶ)まわりを取り出し2図(1-3)に示す。図の様に節点回転角を T 、柱部材角を CR 、梁部材角を BR 、柱断面積を CAN 、柱、梁の剛比を CK, BK に夫々添字を付けて表わす。

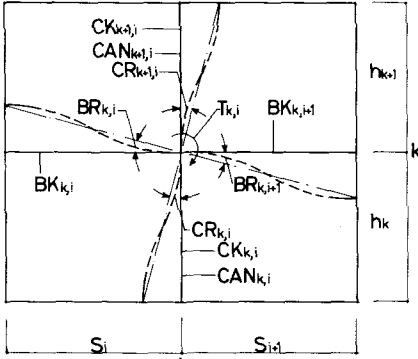


FIG.1-3

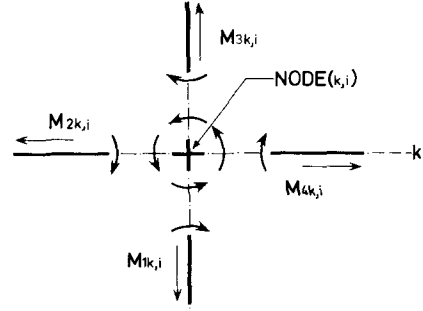


FIG.1-4

(k, i) 節点を中心として夫々 $(k-1, i)$ 、 $(k, i-1)$ 、 $(k+1, i)$ 、 $(k, i+1)$ 節点に向かう材の (k, i) 節点側の材端モーメントを図(1-4)の如く $M1_{k,i}$ 、 $M2_{k,i}$ 、 $M3_{k,i}$ 、 $M4_{k,i}$ で表わせば、図(1-3)の記号を用いて、

$$M1_{k,i} = 2EK_0 \cdot CK_{k,i} \cdot (2 \cdot T_{k,i} + T_{k-1,i} - 3 \cdot CR_{k,i}) \quad \dots\dots (1-4)$$

$$M2_{k,i} = 2EK_0 \cdot BK_{k,i} \cdot (2 \cdot T_{k,i} + T_{k,i-1} - 3 \cdot BR_{k,i}) \quad \dots\dots (1-5)$$

$$M3_{k,i} = 2EK_0 \cdot CK_{k+1,i} \cdot (2 \cdot T_{k,i} + T_{k+1,i} - 3 \cdot CR_{k+1,i}) \quad \dots\dots (1-6)$$

$$M4_{k,i} = 2EK_0 \cdot BK_{k,i+1} \cdot (2 \cdot T_{k,i} + T_{k,i+1} - 3 \cdot BR_{k,i+1}) \quad \dots\dots (1-7)$$

を得る。ここに、 E はヤング係数、 K_0 は標準剛度である。

今、部材の標準長さを h_0 とし、 (k, i) 節点の鉛直上方への変位を $h_0 \cdot Y_{k,i}$ とおくと次式を得る。

$$BR_{k,i} = h_0 \cdot (Y_{k,i-1} - Y_{k,i}) / S_i \quad \dots\dots (1-8)$$

$$BR_{k,i+1} = h_0 \cdot (Y_{k,i} - Y_{k,i+1}) / S_{i+1} \quad \dots\dots (1-9)$$

又、梁の伸縮を無視することから、次式の様における。

$$CR_{k,i} \equiv CR_k, \quad CR_{k+1,i} \equiv CR_{k+1} \quad \dots\dots (1-10)$$

(1-4)～(1-10)式により、材端モーメントの表現式(1-11)を得る。

$$\begin{bmatrix} M1_{k,i} \\ CK_{k,i} \\ M2_{k,i} \\ BK_{k,i} \\ M3_{k,i} \\ CK_{k+1,i} \\ M4_{k,i} \\ BK_{k,i+1} \end{bmatrix} = 2EK_0 \cdot \begin{bmatrix} T_{k,i} & T_{k-1,i} & T_{k,i-1} & T_{k+1,i} & T_{k,i+1} & Y_{k,i} & Y_{k,i-1} & Y_{k,i+1} & CR_k & CR_{k+1} \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{3h_0}{S_i} & -\frac{3h_0}{S_i} & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{3h_0}{S_{i+1}} & 0 & \frac{3h_0}{S_{i+1}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{k,i} \\ T_{k-1,i} \\ T_{k,i-1} \\ T_{k+1,i} \\ T_{k,i+1} \\ Y_{k,i} \\ Y_{k,i-1} \\ Y_{k,i+1} \\ CR_k \\ CR_{k+1} \end{bmatrix} \quad \dots\dots (1-11)$$

(a) 節点モーメント 合式

(k, i) 節点まわりのモーメントの釣合いから、

$$-M_{1,k,i} - M_{2,k,i} - M_{3,k,i} - M_{4,k,i} = 0$$

であり、(1-11)式を代入して整理すれば、(1-12)式を得る。

V.	C.
$T_{k,i}$	$2 \cdot \{CK_{k,i} + BK_{k,i} + CK_{k+1,i} + BK_{k+1,i}\}$
$T_{k-1,i}$	$CK_{k,i}$
$T_{k,i-1}$	$BK_{k,i}$
$T_{k+1,i}$	$CK_{k+1,i}$
$T_{k,i+1}$	$BK_{k+1,i}$
$Y_{k,i}$	$3 \cdot \{BK_{k,i}/S_i - BK_{k+1,i}/S_{i+1}\} \cdot h_0$
$Y_{k,i-1}$	$-3 \cdot BK_{k,i} \cdot h_0 / S_i$
$Y_{k,i+1}$	$3 \cdot BK_{k+1,i} \cdot h_0 / S_{i+1}$
CR_k	$-3 \cdot CK_{k,i}$
CR_{k+1}	$-3 \cdot CK_{k+1,i}$

EQUILIBRIUM OF MOMENT
AT NODE (k, i)

$$\Sigma (V.) \times (C.) = 0 \quad \cdots \cdots (1-12)$$

(b) 節点鉛直力釣合式

(k, i) 節点に加わる鉛直力の釣合いを図(1-5)で考えてみる。図の様に、上、下の柱から加わる力

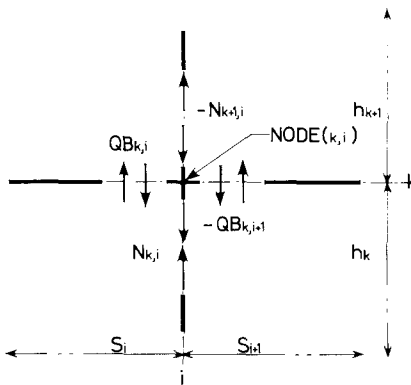


FIG1-5

及び左右の梁から加わる力を鉛直下方に夫々、 $-N_{k+1,i}$; $N_{k,i}$; $QB_{k,i}$; $-QB_{k,i+1}$ とすれば、

$$\left. \begin{aligned} N_{k,i} &= E \cdot C A N_{k,i} \cdot h_0 \cdot (Y_{k,i} - Y_{k-1,i}) / h_k \\ N_{k+1,i} &= E \cdot C A N_{k+1,i} \cdot h_0 \cdot (Y_{k+1,i} - Y_{k,i}) / h_{k+1} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (1-13)$$

$$\left. \begin{aligned} QB_{k,i} &= (M_{4,k,i-1} + M_{2,k,i}) / S_i \\ QB_{k,i+1} &= (M_{4,k,i} + M_{2,k,i+1}) / S_{i+1} \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (1-14)$$

と表わせる。従って(k, i)節点に鉛直上方に $V_{k,i}$ なる外力が加わる時、(k, i)節点の鉛直方向合式は

$$N_{k,i} - N_{k+1,i} + QB_{k,i} - QB_{k,i+1} - V_{k,i} = 0$$

となる。(1-11)、(1-13)、(1-14)式を代入して整理すれば、(1-15)式を得る。

V.	C.
$T_{k,i}$	$3 \cdot (BK_{k,i} / S_i - BK_{k,i+1} / S_{i+1}) \cdot h_0$
$T_{k,i-1}$	$3 \cdot BK_{k,i} \cdot h_0 / S_i$
$T_{k,i+1}$	$-3 \cdot BK_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{i+1}$
$Y_{k,i}$	$6 \cdot BK_{k,i} \cdot (h_0 / S_i)^2 + 6 \cdot BK_{k,i+1} \cdot (h_0 / S_{i+1})^2$ $+ 0.5 \cdot CAN_{k,i} \cdot h_0^2 / K_0 / h_k + 0.5 \cdot CAN_{k,i+1} \cdot h_0^2 / K_0 / h_{k+1}$
$Y_{k-1,i}$	$-0.5 \cdot CAN_{k,i} \cdot h_0^2 / K_0 / h_k$
$Y_{k+1,i}$	$-0.5 \cdot CAN_{k,i+1} \cdot h_0^2 / K_0 / h_{k+1}$
$Y_{k,i-1}$	$-6 \cdot BK_{k,i} \cdot (h_0 / S_i)^2$
$Y_{k,i+1}$	$-6 \cdot BK_{k,i+1} \cdot (h_0 / S_{i+1})^2$

EQUILIBRIUM OF VERTICAL
FORCE AT NODE (k, i)

$$\Sigma(V.) \times (C.) = \frac{h_0}{2EK_0} V_{k,i} \cdots (1-15)$$

(c) まとめ

§ 0 の仮定(5)により、(1-12)式に於て CR_k, CR_{k+1} を変数として考慮する必要のないことは直ちにわかる。 $f_j = 1$ かつ $f_i = 0$ ($i \neq j$) としたときに連立方程式(1-12)、(1-15)を解けば、(1-12)式の d_k が、 $d_k = h_0 \cdot Y_{k,1}$ と定まり、求まった $d_1 \cdots d_r$ は、マトリックス ${}_R F$ の第 j 列を表わすことになる。この j を $1 \sim r$ まで変化させればマトリックス ${}_R F$ が定まる。

§2 全フレームの解析

2・1 概 要

全フレームの解析を行なうには、図(2-1)に示す W -フレームの端部に § 1 で求めたマトリックス ${}_R S$ で表わされる抗抵バネが付いたモデルを解析すればよい。(仮定(4)) 仮定(5)により、 W -フレーム左端部節点の鉛直上方変位を $d_1 \cdots d_r$ 、抗抵バネによる反力を鉛直下方に $f_1 \cdots f_r$ とすれば、

$$f_k = \sum_{j=1}^r {}_R S_{k,j} \cdots d_j \quad \cdots \cdots \cdots (2-1)$$

である。

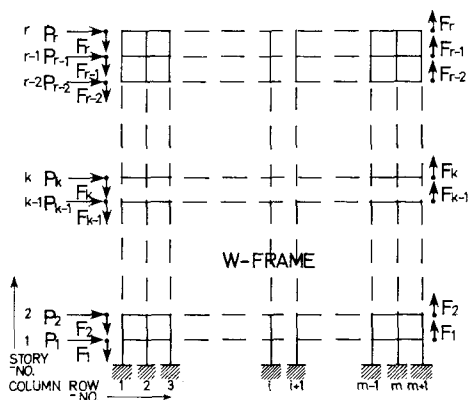


FIG.2-1

以下、図(2-1)の様に、水平荷重 $P_1 \cdots P_r$ を受け F -フレームによる抗抵を受ける W -フレームを解析する方法について述べる。

2・2 全フレーム解析の基本式

材端モーメントの表現式は § 1 の(1-11)式に同じである。

(a) 節点モーメント鉛合式

§ 1 の (1-1 2) を用いる。

(b) 節点鉛直力 合式

§ 1 と同様の手順で式が導びかれるが、(2-1) 式を考慮して、 $i = 1$ のときには次式を用いる。

$$\begin{aligned}
 & (-3BK_{k,i+1}h_0/S_{i+1}) \cdot T_{k,i} + (-3BK_{k,i+1}h_0/S_{i+1}) \cdot T_{k,i+1} \\
 & + \{6 \cdot BK_{k,i+1}(h_0/S_{i+1})^2 + 0.5 \cdot h_0^2 R S_{k,k} / E / K_0\} \cdot Y_{k,i} - 6BK_{k,i+1} \cdot (h_0/S_{i+1})^2 Y_{k,i+1} \\
 & + \sum_{l=k} (0.5 \cdot h_0^2 R S_{k,l} / E / K_0) \cdot Y_{l,i} = 0 \quad (i=1) \quad \text{----- (2-2)}
 \end{aligned}$$

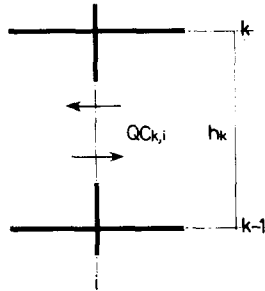


FIG.2-2

$i \neq 1$ のときは勿論 (1-1 5) 式で $V_{k,i} = 0$ とおいた式を用いればよい。

(c) 層 断力 合式

図 (2-2) の様に、 W -フレームを k 層で切断して i 番目の柱の剪断力を $Q C_{k,i}$ とすれば、

$$Q C_{k,i} = -(M_{1k,i} + M_{3k-1,i}) / h_k$$

を得る。 k 層の水平力の釣合いを考えれば、

$$\sum_i Q C_{k,i} = \sum_{j=k}^i P_j$$

でなければならない。この 2 式と (1-1 1) 式より (2-3) 式を得る。

V.	C.
$T_{k,i}$	$-3 \cdot C K_{k,i}$
$T_{k-1,i}$	$-3 \cdot C K_{k,i}$
$C R_k$	$\sum_i 6 \cdot C K_{k,i}$

EQUILIBRIUM OF LATERAL FORCE

AT STORY k

$$\sum (V.) \times (C.) = \frac{h_k}{2 \cdot E K_0} \cdot \sum_k P_j \quad \text{----- (2-3)}$$

(d) まとめ

(a)~(c)に述べた連立方程式 (1-1 2)、(2-2)、(2-3) を解けば、全フレームの剛性が求められ、応力分布は (1-1 1) 式等によって定まる。

(註 1) F -フレームが対称でないときは抵抗バネのマトリックス $R F$ を両端部について別々に求めればよい。又、 W -フレームが対称でないときには、 W -フレーム両端部の抵抗バネを考慮して計算を行えばよい。

§3 数値計算

3・1 概 要

数値計算は次の3段階について行うことになる。

- (1) F -フレームについてマトリックス ${}_R F$ を計算する。
- (2) ${}_R S = ({}_R F)^{-1}$ を用いて、水平力分布 P_k につき W -フレームの各節点変位及び部材材端応力を計算し、 F -フレームと接する節点に於ける拘束力 $V_{k,1}$ を計算する。
- (3) 鉛直力分布 $-V_{k,1}$ について F -フレームの各節点変位及び部材材端応力を計算する。

以下3・2では(1)、(3)について、3・3では(2)について簡単に述べ、実際に作成したプログラムのフローチャートを図(3-1)、(3-2)に示す。

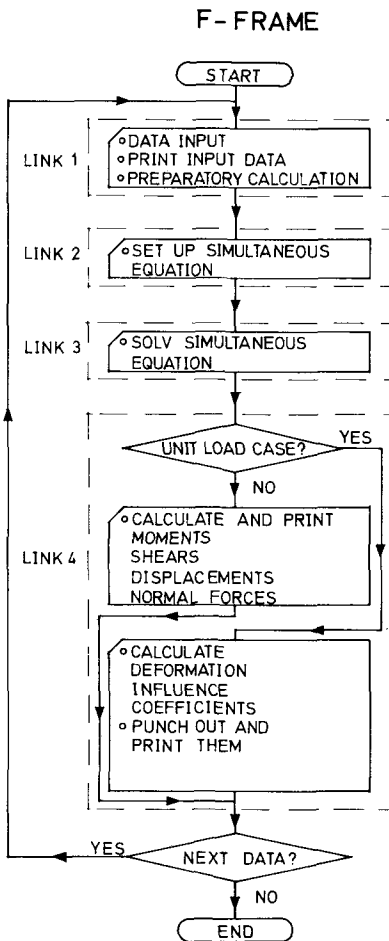


FIG. 3-1

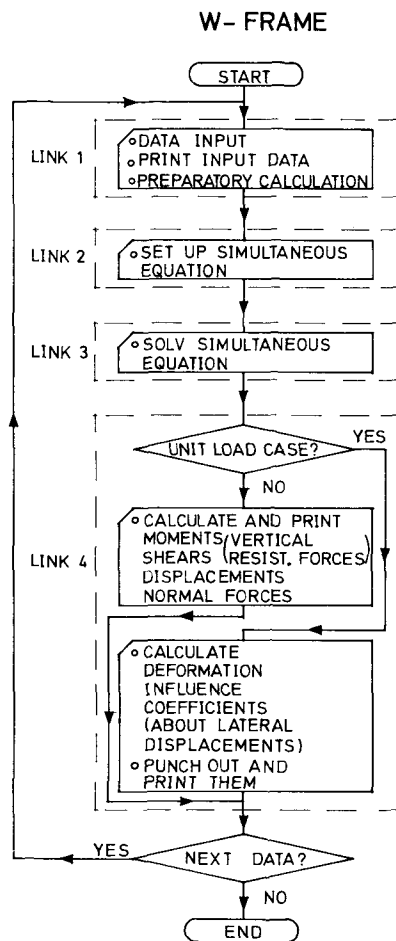


FIG. 3-2

3・2 F-フレーム

仮定(5)により計算に際してはフレームの半分を考慮すれば済む。このときスパン数 n の奇、偶により $n=2n'$ 、 $n=2n'+1$ の2通りの場合が考えられる。連立方程式(1-12)、(1-15)が、

$$A \cdot X = B$$

と表わされるとして、変数 X の順序の選び方について好都合な方法を(a)、(b)に記す。

(a) $n=2n'$ のとき

$$\left. \begin{aligned} X_j = T_{k,i} &\leftrightarrow j = r \cdot (i-1) + k \quad k=1, \dots, r ; i=1 \dots n' \\ X_j = Y_{k,i} &\leftrightarrow j = r(i-1) + k + r \cdot n' \quad k=1 \dots r ; i=1 \dots n' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-1)$$

又、対称条件から $Y_{k,n'} = Y_{k,n'+2}$ を用いる。

(b) $n=2n'+1$ のとき

$$\left. \begin{aligned} X_j = T_{k,i} &\leftrightarrow j = r \cdot (i-1) + k \quad k=1, \dots, r ; i=1 \dots, n'+1 \\ X_j = Y_{k,i} &\leftrightarrow j = r \cdot (i-1) + k + r(n'+1) \quad k=1, \dots, r ; i=1, \dots, n'+1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-2)$$

対称条件より $Y_{k,n'+1} = Y_{k,n'+2}$; $T_{k,n'+1} = -T_{k,n'+2}$ を用いる。

方程式を解いて X が定まれば材端応力は(1-11)、(1-13)式等から求まる。

3・3 W-フレーム

3・2と同じくスパン数 m の奇、偶に応じ(a)、(b)の方法で変数 X を選ぶのが好都合であろう。

(a) $m=2m'$ のとき

$$\left. \begin{aligned} X_j = T_{k,i} &\leftrightarrow j = r(i-1) + k \quad k=1, \dots, r ; i=1, \dots, m'+1 \\ X_j = Y_{k,i} &\leftrightarrow j = r(i-1) + k + r(m'+1) \quad k=1, \dots, r ; i=1, \dots, m' \\ X_j = CR_k &\leftrightarrow j = k + r(2m'+1) \quad k=1, \dots, r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-3)$$

対称条件より、 $T_{k,m'} = T_{k,m'+2}$ を用い、(2-3)式で CR_k の係数は $(\sum_{i=1}^{m'} 6 \cdot CK_{k,i} + 3 \cdot CK_{k,m'+1})$

とし、右辺を $(h_k \sum_{j=k}^r P_j) / 4EK_0$ とする。

(b) $m=2m'+1$ のとき

$$\left. \begin{aligned} X_j = T_{k,i} &\leftrightarrow j = r(i-1) + k \quad k=1, \dots, r ; i=1, \dots, m'+1 \\ X_j = Y_{k,i} &\leftrightarrow j = r(i-1) + k + r(m'+1) \quad k=1, \dots, r ; i=1, \dots, m'+1 \\ X_j = CR_k &\leftrightarrow j = k + 2 \cdot r(m'+1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-4)$$

材端応力等は3・2と同様に求められ、F-フレームとの間の拘束力 $V_{k,1}$ は次式によって計算される。

$$V_{k,1} = \sum_{j=1}^r \cdot R S_{k,j} \cdot Y_{j,1} \cdot h_0 \dots\dots\dots (3-5)$$

§4 計算例

図(4-1)、(4-1')、表(4-1)及び、図(4-5)、(4-5')、表(4-2)に示す2つの例題について行った計算結果を図(4-2)、(4-3)、(4-4)及び(4-6)、(4-7)、(4-8)に示す。F-フレームの抵抗を考えず、従来のようにW-フレームのみを水平耐力要素として計算した結果を点線で

示して比較してある。

これらの結果より、例題の様な箱型構造物を鉛直の片持梁と考えたとき、フランジ部分に当る F フレームには shear-lag の現象が大きく見られ、本論文の様な解析の必要性が判る。

(補) 柱、梁及びパネルゾーンの剪断変形を考慮する場合

柱、梁及びパネルゾーンの剪断変形を考慮する場合の解析式について述べる。 (k, i) 節点まわりの諸元及び、材端モーメントの表現を図 (A-1)、(A-2) に示す。BAS、CAS は夫々柱及び梁の剪断変形に有効な面積、 T は節点の柱側材端回転角、 G はパネルゾーン剪断変形角、 TP はパネルゾーンの板厚である。 G の符号を図 (A-3) に示す。

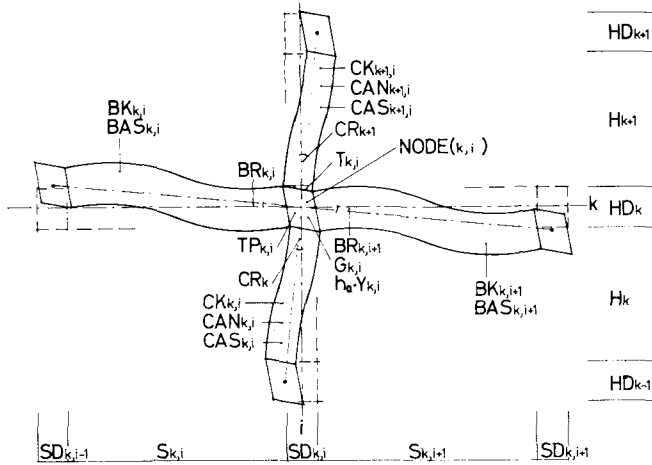


FIG. A-1

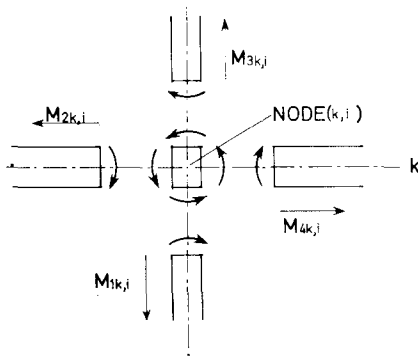


FIG. A-2

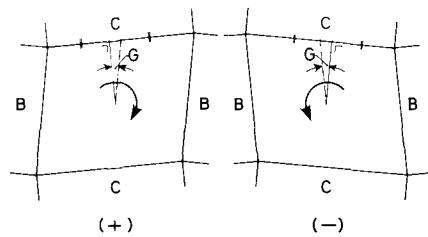


FIG. A-3

材端モーメントは (A-2) 式の符号を用いて、(A-1) 式で表わされる。(註-2)

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} M1_{k,i} & M2_{k,i} & M3_{k,i} & M4_{k,i} \\ CK_{k,i} & BK_{k,i} & CK_{k+1,i} & BK_{k+1,i} \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} CA_{k,i} & CB_{k,i} & 0 & 0 & 0 & CC_{k,i} & CC_{k,i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -CC_{k,i} & 0 \\ +CC_{k,i} & +CC_{k,i} & 0 & 0 & 0 & xRH2_k & xRH1_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x(1+RH1_k+RH2_k) \\ xRH2_k & xRH1_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} BA_{k,i} & BB_{k,i} & 0 & 0 & 0 & BA_{k,i} & 0 & BB_{k,i} & 0 & 0 & BC_{k,i} & -BC_{k,i} & 0 & 0 & 0 \\ +BC_{k,i} & 0 & +BC_{k,i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & xh_0/S_{k,i} & xh_0/S_{k,i} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} xRS2_{k,i} & xRS1_{k,i} & 0 & 0 & 0 & CA_{k+1,i} & CB_{k+1,i} & 0 & 0 & CC_{k+1,i} & 0 & 0 & CC_{k+1,i} & 0 & 0 & -CC_{k+1,i} \\ +CC_{k+1,i} & 0 & 0 & +CC_{k+1,i} & 0 & +CC_{k+1,i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x(1+RH1_{k+1}+RH2_{k+1}) \\ xRH1_{k+1} & xRH2_{k+1} & 0 & 0 & 0 & xRH1_{k+1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} BA_{k+1,i} & BB_{k+1,i} & 0 & 0 & 0 & BA_{k+1,i} & 0 & BB_{k+1,i} & 0 & 0 & BC_{k+1,i} & -BC_{k+1,i} & 0 & 0 & 0 \\ +BC_{k+1,i} & 0 & 0 & +BC_{k+1,i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & xh_0/S_{k+1,i} & xh_0/S_{k+1,i} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} xRS1_{k+1,i} & xRS2_{k+1,i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
& \times \begin{bmatrix} T_{k,i} & T_{k-1,i} & T_{k,i-1} & T_{k+1,i} & T_{k,i+1} & G_{k,i} & G_{k-1,i} & G_{k,i-1} & G_{k+1,i} & G_{k,i+1} & Y_{k,i} & Y_{k,i-1} & Y_{k,i+1} & CR_k & CR_{k+1} \end{bmatrix} \\
& \text{----- (A-1)}
\end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
RH1_k &= \frac{HD_{k,i}}{2 \cdot H_k} & CA_{k,i} &= CY_{k,i} + 0.5 & BA_{k,i} &= BY_{k,i} + 0.5 \\
RH2_k &= \frac{HD_{k,i}}{2 \cdot H_k} & CB_{k,i} &= CY_{k,i} - 0.5 & BB_{k,i} &= BY_{k,i} - 0.5 \\
RS1_{k,i} &= \frac{SD_{k,i+1}}{2 \cdot S_{k,i}} & CC_{k,i} &= 2 \cdot CY_{k,i} & BC_{k,i} &= 2 \cdot BY_{k,i} \\
RS2_{k,i} &= \frac{SD_{k,i}}{2 \cdot S_{k,i}} & CY_{k,i} &= \frac{1.5}{CAS_{k,i} \cdot H_k} & BY_{k,i} &= \frac{1.5}{BAS_{k,i} \cdot S_{k,i}}
\end{aligned} \right\} \text{--- (A-2)}$$

(a) 節点モーメント釣合式

(k, i) 節点中心点まわりのモーメントの釣合いより、マクロ法によるとき (A-3) 式、ミクロ法によるとき (A-4) 式が導びかれる。(註-2)

EQUILIBRIUM OF MOMENT AT NODE(k, i)		MACRO
V.		C.
$T_{k,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{(1+2 \cdot RH2_k) \cdot CC_{k,i} + 1\} + 0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{(1+2 \cdot RH1_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i} + 1\} + 0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot \{(1+2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot BC_{k,i} + 1\} + 0.5 \cdot BK_{k+1,i} \cdot \{(1+2 \cdot RS1_{k+1,i}) \cdot BC_{k+1,i} + 1\}$	
$T_{k-1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{(1+2 \cdot RH1_k) \cdot CC_{k,i} - 1\}$	
$T_{k,i-1}$	$0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot \{(1+2 \cdot RS1_k) \cdot BC_{k,i} - 1\}$	
$T_{k+1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{(1+2 \cdot RH2_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i} - 1\}$	
$T_{k,i+1}$	$0.5 \cdot BK_{k+1,i} \cdot \{(1+2 \cdot RS2_{k+1,i}) \cdot BC_{k+1,i} - 1\}$	
$G_{k,i}$	$CK_{k,i} \cdot RH2_k \cdot CC_{k,i} + CK_{k+1,i} \cdot RH1_{k+1} \cdot CC_{k+1,i} + 0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot (BC_{k,i} + 1) + 0.5 \cdot BK_{k+1,i} \cdot (BC_{k+1,i} + 1)$	
$G_{k-1,i}$	$CK_{k,i} \cdot RH1_k \cdot CC_{k,i}$	
$G_{k,i-1}$	$0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot (BC_{k,i} - 1)$	
$G_{k+1,i}$	$CK_{k+1,i} \cdot RH2_{k+1} \cdot CC_{k+1,i}$	
$G_{k,i+1}$	$0.5 \cdot BK_{k+1,i} \cdot (BC_{k+1,i} - 1)$	
$Y_{k,i}$	$BK_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i} - BK_{k+1,i} \cdot BC_{k+1,i} \cdot h_0 / S_{k+1,i}$	
$Y_{k,i-1}$	$-BK_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i}$	
$Y_{k,i+1}$	$BK_{k+1,i} \cdot BC_{k+1,i} \cdot h_0 / S_{k+1,i}$	
CR_k	$-CK_{k,i} \cdot (1+RH1_k+RH2_k) \cdot CC_{k,i}$	
CR_{k+1}	$-CK_{k+1,i} \cdot (1+RH1_{k+1}+RH2_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i}$	
$\Sigma(V) \times (C) = 0$		----- (A-3)

EQUILIBRIUM OF MOMENT AT NODE (k,i) -MICRO-	
V.	C.
$T_{k,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{1 + (1 + 2 \cdot RH2_k)^2 \cdot CC_{k,i}\} + 0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{1 + (1 + 2 \cdot RH1_{k+1})^2 \cdot CC_{k+1,i}\}$ $+ 0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot \{1 + (1 + 2 \cdot RS2_{k,i})^2 \cdot BC_{k,i}\} + 0.5 \cdot BK_{k,i+1} \cdot \{1 + (1 + 2 \cdot RS1_{k,i+1})^2 \cdot BC_{k,i+1}\}$
$T_{k-1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH2_k) \cdot CC_{k,i} - 1\}$
$T_{k,j-1}$	$0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot BC_{k,i} - 1\}$
$T_{k+1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH1_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i} - 1\}$
$T_{k,i+1}$	$0.5 \cdot BK_{k,i+1} \cdot \{(1 + 2 \cdot RS1_{k,i+1}) \cdot BC_{k,i+1} - 1\}$
$G_{k,i}$	$CK_{k,i} \cdot (1 + 2 \cdot RH2_k) \cdot RH2_k \cdot CC_{k,i} + CK_{k+1,i} \cdot (1 + 2 \cdot RH1_{k+1}) \cdot RH1_{k+1} \cdot CC_{k+1,i}$ $+ 0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot BC_{k,i} + 1\} + 0.5 \cdot BK_{k,i+1} \cdot \{(1 + 2 \cdot RS1_{k,i+1}) \cdot BC_{k,i+1} + 1\}$
$G_{k-1,i}$	$CK_{k,i} \cdot (1 + 2 \cdot RH2_k) \cdot RH1_k \cdot CC_{k,i}$
$G_{k,i-1}$	$0.5 \cdot BK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot BC_{k,i} - 1\}$
$G_{k+1,i}$	$CK_{k+1,i} \cdot (1 + 2 \cdot RH1_{k+1}) \cdot RH2_{k+1} \cdot CC_{k+1,i}$
$G_{k,i+1}$	$0.5 \cdot BK_{k,i+1} \cdot \{(1 + 2 \cdot RS1_{k,i+1}) \cdot BC_{k,i+1} - 1\}$
$Y_{k,i}$	$BK_{k,i} \cdot (1 + 2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i} - BK_{k,i+1} \cdot (1 + 2 \cdot RS1_{k,i+1}) \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
$Y_{k,i-1}$	$-BK_{k,i} \cdot (1 + 2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i}$
$Y_{k,i+1}$	$BK_{k,i+1} \cdot (1 + 2 \cdot RS1_{k,i+1}) \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
CR_k	$-CK_{k,i} \cdot (1 + 2 \cdot RH2_k) \cdot (1 + RH1_k + RH2_k) \cdot CC_{k,i}$
CR_{k+1}	$-CK_{k+1,i} \cdot (1 + 2 \cdot RH1_{k+1}) \cdot (1 + RH1_{k+1} + RH2_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i}$

$$\sum (V.) \times (C.) = 0$$

(A-4)

(b) パネルゾーン変形式

(k, i) 節点パネルゾーンの変形条件から、マクロ法によるとき (A-5) 式、ミクロ法によるとき、(A-6) 式が導かれる。

ν は材のポアソン比、 $\alpha_{k,i}$ はパネルゾーンの変形係数で通常 1.0 とおく。(註-2)

DEFORMATION EQUATION OF PANEL ZONE -MACRO-	
V.	C.
$T_{k,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH2_k) \cdot CC_{k,i} + 1\} + 0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH1_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i} + 1\}$
$T_{k-1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH1_k) \cdot CC_{k,i} - 1\}$
$T_{k+1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH2_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i} - 1\}$
$G_{k,i}$	$CK_{k,i} \cdot RH2_k \cdot CC_{k,i} + CK_{k+1,i} \cdot RH1_{k+1} \cdot CC_{k+1,i} - 0.25 \cdot TP_{k,i} \cdot HD_k \cdot SD_{k,i} / (1 + \nu) / K_0 / \alpha_{k,i}$
$G_{k-1,i}$	$CK_{k,i} \cdot RH1_k \cdot CC_{k,i}$
$G_{k+1,i}$	$CK_{k+1,i} \cdot RH2_{k+1} \cdot CC_{k+1,i}$
CR_k	$-CK_{k,i} \cdot (1 + RH1_k + RH2_k) \cdot CC_{k,i}$
CR_{k+1}	$-CK_{k+1,i} \cdot (1 + RH1_{k+1} + RH2_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i}$

$$\sum (V.) \times (C.) = 0$$

----- (A-5)

DEFORMATION EQUATION OF PANEL ZONE -MICRO-	
V.	C.
$T_{k,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH2_k) \cdot CC_{k,i} + 1\} + 0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH1_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i} + 1\}$ $+ BK_{k,i} \cdot (1 + 2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot RS2_{k,i} \cdot BC_{k,i} + BK_{k,i+1} \cdot (1 + 2 \cdot RS1_{k,i+1}) \cdot RS1_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1}$
$T_{k-1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH1_k) \cdot CC_{k,i} - 1\}$
$T_{k,j-1}$	$BK_{k,i} \cdot (1 + 2 \cdot RS1_{k,i}) \cdot RS2_{k,i} \cdot BC_{k,i}$
$T_{k+1,i}$	$0.5 \cdot CK_{k+1,i} \cdot \{(1 + 2 \cdot RH2_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i} - 1\}$
$T_{k,i+1}$	$BK_{k,i+1} \cdot (1 + 2 \cdot RS2_{k,i+1}) \cdot RS1_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1}$
$G_{k,i}$	$CK_{k,i} \cdot RH2_k \cdot CC_{k,i} + CK_{k+1,i} \cdot RH1_{k+1} \cdot CC_{k+1,i}$ $+ BK_{k,i} \cdot RS2_{k,i} \cdot BC_{k,i} + BK_{k,i+1} \cdot RS1_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1} - 0.25 \cdot TP_{k,i} \cdot HD_k \cdot SD_{k,i} / (1 + \nu) / K_0 / \alpha_{k,i}$
$G_{k-1,i}$	$CK_{k,i} \cdot RH1_k \cdot CC_{k,i}$
$G_{k,i-1}$	$BK_{k,i} \cdot RS2_{k,i} \cdot BC_{k,i}$
$G_{k+1,i}$	$CK_{k+1,i} \cdot RH2_{k+1} \cdot CC_{k+1,i}$
$G_{k,i+1}$	$BK_{k,i+1} \cdot RS1_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1}$
$Y_{k,i}$	$2 \cdot BK_{k,i} \cdot RS2_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i} - 2 \cdot BK_{k,i+1} \cdot RS1_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
$Y_{k,i-1}$	$-2 \cdot BK_{k,i} \cdot RS2_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i}$
$Y_{k,i+1}$	$2 \cdot BK_{k,i+1} \cdot RS1_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
CR_k	$-CK_{k,i} \cdot (1 + RH1_k + RH2_k) \cdot CC_{k,i}$
CR_{k+1}	$-CK_{k+1,i} \cdot (1 + RH1_{k+1} + RH2_{k+1}) \cdot CC_{k+1,i}$

$$\sum (V.) \times (C.) = 0$$

----- (A-6)

(c) 節点鉛直力釣合式

§ 1 と同様の方法で、(k, i) 節点に加わる鉛直力の釣合いから (A-7) 式が導びかれる。

EQUILIBRIUM OF VERTICAL FORCE AT NODE(k,i)	
V.	C.
$T_{k,i}$	$BK_{k,i} \cdot (1+2 \cdot RS2_{k,i}) \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i} - BK_{k,i+1} \cdot (1+2 \cdot RS1_{k,i+1}) \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
$T_{k,i-1}$	$BK_{k,i} \cdot (1+2 \cdot RS1_{k,i}) \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i}$
$T_{k,i+1}$	$-BK_{k,i+1} \cdot (1+2 \cdot RS2_{k,i+1}) \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
$G_{k,i}$	$BK_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i} - BK_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
$G_{k,i-1}$	$BK_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot h_0 / S_{k,i}$
$G_{k,i+1}$	$-BK_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1} \cdot h_0 / S_{k,i+1}$
$Y_{k,i}$	$0.5 \cdot CAN_{k,i} \cdot h_0^2 / K_0 / HC_k + 0.5 \cdot CAN_{k+1,i} \cdot h_0^2 / K_0 / HC_{k+1} + 2 \cdot BK_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot (h_0 / S_{k,i})^2 + 2 \cdot BK_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1} \cdot (h_0 / S_{k,i+1})^2$
$Y_{k-1,i}$	$-0.5 \cdot CAN_{k,i} \cdot h_0^2 / K_0 / HC_k$
$Y_{k,i-1}$	$-2 \cdot BK_{k,i} \cdot BC_{k,i} \cdot (h_0 / S_{k,i})^2$
$Y_{k+1,i}$	$-0.5 \cdot CAN_{k+1,i} \cdot h_0^2 / K_0 / HC_{k+1}$
$Y_{k,i+1}$	$-2 \cdot BK_{k,i+1} \cdot BC_{k,i+1} \cdot (h_0 / S_{k,i+1})^2$

* $HC_k = 0.5 \cdot (HD_k + HD_{k-1}) + H_k$ *

$\Sigma (V.) \times (C.) = \frac{h_0}{2 \cdot E \cdot K_0} V_{k,i} \text{ ----- (A-7)}$

(d) 層剪断力釣合式

第 k 層の水平力の釣合いから (A-8) 式が導びかれる。

EQUILIBRIUM OF LATERAL FORCE AT STORY k	
V.	C.
$T_{k,i}$	$CK_{k,i} \cdot (1+2 \cdot RH2_k) \cdot CC_{k,i}$
$T_{k-1,i}$	$CK_{k,i} \cdot (1+2 \cdot RH2_k) \cdot CC_{k,i}$
$G_{k,i}$	$2 \cdot CK_{k,i} \cdot RH2_k \cdot CC_{k,i}$
$G_{k-1,i}$	$2 \cdot CK_{k,i} \cdot RH1_k \cdot CC_{k,i}$
R_k	$-2 \cdot (1+RH1_k+RH2_k) \cdot \sum CK_{k,i} \cdot CC_{k,i}$

$\Sigma (V.) \times (C.) = -\frac{H_k}{2EK_0} \sum_k P_k \text{ ---- (A-8)}$

(e) まとめ

パネルゾーンの変形にマクロ、マイクロいずれの方法を用いるかにより、連立方程式 (A-3)、(A-5)、(A-7)、(A-8) 又は (A-4)、(A-6)、(A-7)、(A-8) を用いればよい。
(A-7) 式に於ける F フレーム、 W フレームの境界の取扱いは § 2 と同様に行えばよい。

(註-2) 日本建築学会関東支部第 38 回研究発表会論文 86

「水平荷重を受ける鋼構造柱、はりおよびその接合部の挙動について」一報告その 8-
仲威雄 加藤勉 渡部丹 中尾雅躬

謝 辞

計算に当って K.K. 日立製作所コンピューター事業部の松原、坂本両氏他の御協力を得た。又作図に当って、K.K. 不動建設の北村氏の御協力を得た。ここに掲載して感謝します。