

## 建築骨組みの剪断力方程式の研究

### Study of Shear Stress for Framed Construction

山本嘉孝

Yoshitaka YAMAMOTO

#### [1] はじめに

建築架構の応力を解くとき、節点方程式と free body (自由体) の釣り合いを考える剪断力方程式 (層方程式) がある。それは架構の柱頭を切断し梁と共に形成した自由体の剪断力の釣り合い、あるいは材端応力の仕事量を解く手法である。しかし異形ラーメンを剪断力方程式によって解く場合、自由体に生じる不規則な角度を有する切断面の曲げモーメント、剪断力と軸力の釣り合いを考慮する必要があり煩雑になる。この点を容易に解決するため仮想仕事式を使って解いている。本研究では一端を滑節支持の異形ラーメンを例に、剪断力方程式の解明と立体架構への応用の可能性を検証してみた。

#### [2] 剪断力方程式についての基本事項

##### (1) 剪断力方程式 I

図2-1で  $ik$  が0点を中心任意の回転をなした時、その直角変位点を  $i'k'$  とする。図2-2で  $ik$  部材に働く釣合力系は材端曲げモーメントの他に  $P, N_{ik}, N_{ki}, Q_{ik}, Q_{ki}$  がある。今、直角変位点  $i', k'$  よりこれらの応力までの垂直距離を  $\eta_i, \eta_k, \xi_i, \xi_k$  とする。 $ik$  部材の仮想仕事  $L_{ik}$  は節点側で考えると、 $P_i$  を  $i$  節点の外力、 $c_i$  をその直角変位として

$$L_{ik} = P_i c_i + N_{ik} \eta_i - N_{ki} \eta_k - Q_{ik} \xi_i - Q_{ki} \xi_k \quad (2-1)$$

で、 $ik$  部材に材長変化が起こらぬものと考え

$$\eta_i = \eta_k \quad (2-2)$$

となり  $ik$  部材の軸方向の釣合を考えると

$$P \cos \alpha - N_{ik} + N_{ki} = 0$$

である。ゆえに

$$N_{ik} - N_{ki} - P \cos \alpha = 0 \quad (2-3)$$

であるから (2-1) 式に (2-2)、(2-3) 両式を代入すれば

$$L_{ik} = P_i c_i + P \cos \alpha \eta_i - Q_{ik} \xi_i - Q_{ki} \xi_k$$

となる。ここで

$$P_i c_i + P \cos \alpha \eta_i = \sum \bar{P} c \quad (2-4)$$

とおけば

$$L_{ik} = \sum \bar{P} c - (Q_{ik} \xi_i + Q_{ki} \xi_k)$$

が導かれる。次に、 $ik$  部材のみでなくラーメン全体の仮想仕事  $L$  を考えてみると

$$L = \sum \bar{P} c - \sum (Q_{ik} \xi_i + Q_{ki} \xi_k)$$

然るに、ラーメンの質点系におけるこれ等の外力と材端応力の釣合力系が任意の微小な変位との組合せによってなされる仮想仕事  $L = 0$  であるから

$$\sum \bar{P} c - \sum (Q_{ik} \xi_i + Q_{ki} \xi_k) = 0 \quad (2-5)$$

である。

ここに  $\sum \bar{P} c$  は外力のなす仮想仕事 (中間荷重  $P$  の部材に対する垂直成分は除いてある)。

又  $\sum (Q_{ik} \xi_i + Q_{ki} \xi_k)$  は材端剪断力のなす仮想仕事である。上式は剪断力の項のみで表されるから剪断力方程式と呼んでいる。

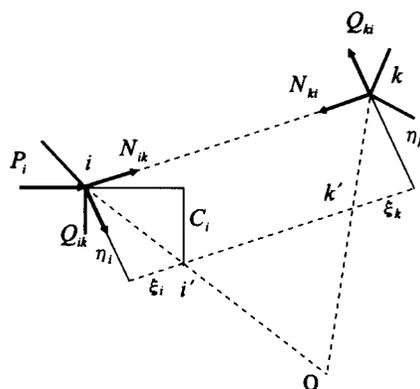


図 2-1 直角変位図

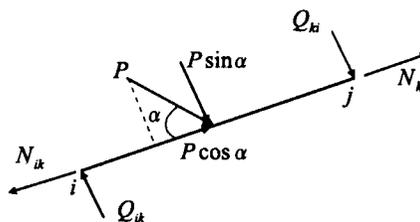


図 2-2 中間外力

(2) 剪断力方程式 II

図2-3、図2-4および図2-5に示すように外力  $P_i$  と  $m_i$  が節点  $i$  に作用して釣合状態にある構造物を節点  $i$  に集まる各材を切り離して釣合を考える。

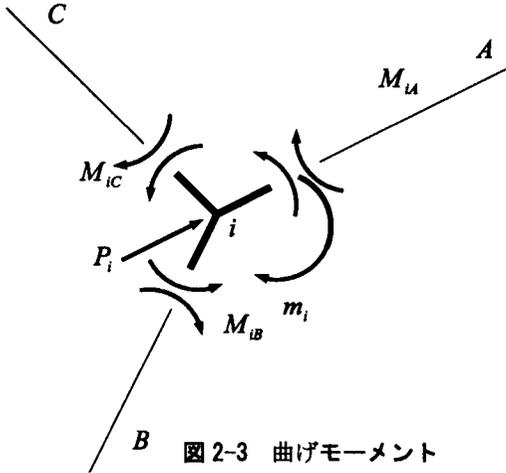


図 2-3 曲げモーメント

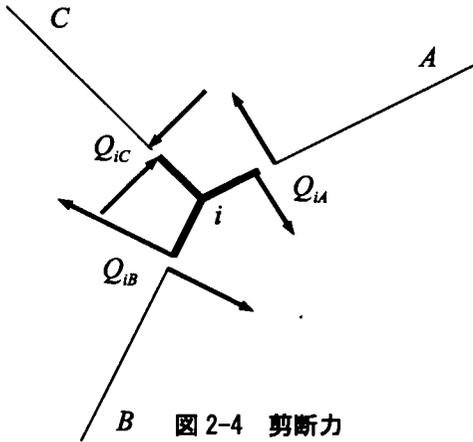


図 2-4 剪断力

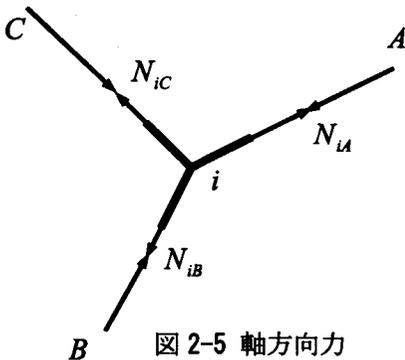


図 2-5 軸方向力

このとき、節点  $i$  は直接節点に作用する  $P_i$ 、 $m_i$  と、材端断面応力  $N$ 、 $Q$ 、 $M$  に対応する節点側応力  $-N_i$ 、 $-Q_i$ 、 $-M_i$  とで釣合を保つ。

任意に設けた  $XY$  座標に関する節点  $i$  の釣合条件式は、次式で表される。

$$\sum_i X = 0, \sum_i Y = 0, \sum_i M = 0 \quad (2-6)$$

上式中の  $\sum_i$  は、節点に集まる応力の総和である。この節点  $i$  に微小仮想変位  $\delta_i$  及び回転角  $\theta_i$  を考え、 $\bar{\delta}_i$  の座標成分を  $\bar{\delta}_{ix}$ 、 $\bar{\delta}_{iy}$  とすれば、次のような仮想仕事式が得られる。

$$\bar{\delta}_{ix} \sum_i X + \bar{\delta}_{iy} \sum_i Y + \bar{\theta}_i \sum_i M = 0 \quad (2-7)$$

この場合の節点  $i$  の仮想変位は自由に選び得るものである。上式を具体的に書けば、次式が得られる。

$$P_i \bar{C}_i - \sum_i Q_i \bar{\xi}_i - \sum_i N_i \bar{\eta}_i + \bar{\theta}_i (m_i - \sum_i M_i) = 0 \quad (2-8)$$

上式中の  $\bar{C}_i$ 、 $\bar{\xi}_i$  および  $\bar{\eta}_i$  は  $\bar{\delta}_i$  のそれぞれの  $P_i$ 、 $Q_i$ 、 $N_i$  方向成分である。仮想変位は自由であるからここで、 $\bar{\delta}_i = 0$ 、 $\bar{\theta}_i = 1$  の仮想変位を選べば、上式から次式が得られる。

$$\sum_i M_i = m_i \quad (2-9)$$

この式は、節点  $i$  に関するモーメントの釣合式そのものであり、節点方程式と呼ばれている。次に仮想変位として  $\bar{\delta}_i$ 、 $\bar{\theta}_i = 1$  を選べば、次式が得られる。

$$P_i \bar{C}_i - \sum_i Q_i \bar{\xi}_i - \sum_i N_i \bar{\eta}_i = 0 \quad (2-10)$$

この式を構造物の全節点に関する総和として書けば、次式が得られる。

$$\sum_i P_i \bar{C}_i - \sum_i Q_i \bar{\xi}_i - \sum_i N_i \bar{\eta}_i = 0 \quad (2-11)$$

上式中の  $\sum_i$  は全節点に関する総和、 $\sum_i$  は節点  $i$  に関する総和である。

ここで上式左辺の剪断応力  $Q$ 、軸方向応力  $N$  に関する仕事の項を変更する目的で、節点  $i$  に集まる各材中の任意材  $ik$  の仕事を考える。

構造物の全節点の仮想変位に伴って  $ik$  材も材端を  $ik$  節点に（ピンで接続しているかのように）結ばれたまま変位回転した場合の仮想仕事式を求めると。

このとき材は変形しないものとして、仮想回転

## 建築骨組みの剪断力方程式の研究

角を  $\phi_{(ik)}$ 、 $ik$  材上の中間外力の仕事  $P_{(ik)} \cdot C_{(ik)}$  で表して、 $ik$  材に関する仕事式を求め、これを更に全構造材に関する総和で表せば次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \sum P_{(ik)} \overline{C_{(ik)}} + \sum (Q_{ik} \overline{F_{ik}} + Q_{ki} \overline{F_{ki}}) \\ & + \sum (N_{ik} \overline{\eta_{ik}} + N_{ki} \overline{\eta_{ki}}) + \sum (M_{ik} + M_{ki}) \overline{\phi_{(ik)}} = 0 \end{aligned} \quad (2-12)$$

上式と (2-11) 式の左辺第 2、第 3 項は共に材端及び節点側の剪断応力  $Q$ 、軸方向応力  $N$  の仕事に関する全構造にわたる総和であり、同じ意味を持つ。(2-11) 式を (2-12) 式によって変形すれば、次式が得られる。

$$\sum P_i \overline{C_i} + \sum P_{(ik)} \overline{C_{(ik)}} + \sum (M_{ik} + M_{ki}) \overline{\phi_{(ik)}} = 0 \quad (2-13)$$

上式の左辺の第 1、第 2 項をまとめて  $P \cdot \overline{C}$  で表せば、次式が得られる。ただし、

$$\left. \begin{aligned} & - \sum (M_{ik} + M_{ki}) \overline{\phi_{(ik)}} = P \cdot \overline{C} \\ P \cdot \overline{C} & = \sum P_i \overline{C_i} + \sum P_{(ik)} \overline{C_{(ik)}} + \sum m_{(ik)} \overline{\phi_{(ik)}} + \sum P_{\omega(ik)} \overline{C_{\omega(ik)}} \end{aligned} \right\} \quad (2-14)$$

$m_{(ik)}$  は中間外力によるの曲げモーメント  $P_{\omega(ik)}$   $C_{\omega(ik)}$  は中間分布荷重の合力  $P_{\omega(ik)}$  の仕事である。ここで (2-14) 式は、剪断力方程式と呼ばれている。この剪断力方程式の仮想変位は、次のような制約条件を持つ。つまり材で結ばれた節点間距離は、節点の仮想変位の前後を通じて変わらない。つまり節点間に相対距離変化または材長変化を生じない。

次に、節点間相対距離変化が生じる場合の剪断力方程式について述べる。

節点間に相対距離変化を生じる場合は  $ik$  両節点が仮想変位によって相対距離  $\Delta \overline{l_{(ik)}}$  だけ伸びたものとして、次式のように表す。

$$\begin{aligned} \Delta \overline{l_{(ik)}} & = \overline{F_{(ik)}} l_{(ik)} \\ \therefore \overline{F_{(ik)}} & = \frac{\Delta \overline{l_{(ik)}}}{l_{(ik)}} \end{aligned} \quad (2-15)$$

上式中  $l_{(ik)}$  は変形前の原構造の  $ik$  節点間距離であり、 $ik$  材の材長である。 $\overline{F_{(ik)}}$  は  $ik$  材の伸度であり、縮みの場合は負で表す。仮想変位は微小なものと考え相対距離の変化量  $\Delta \overline{l_{(ik)}}$  は、原構造の  $ik$  材軸と平行な方向に考えるものとする。

構造物の全節点の仮想変位に伴って  $ik$  材も材端

を  $ik$  節点に (ピンで接続しているかのように) 結ばれたまま変位回転し、更に  $ik$  節点間に相対距離変化  $\Delta \overline{l_{(ik)}}$  を生じるものとする。

このとき、 $ik$  材が変形しないものとし、その材端が両節点に結ばれたままであるとすれば、材の中間のいずれかの点で材は切断され  $\Delta \overline{l_{(ik)}}$  だけ隙間を生じることになる。ここで  $ik$  材上任意点に選んだ節断点を  $a$  とし、切断面応力を  $N_a$ 、 $Q_a$ 、 $M_a$  とする。

このような仮想変形による  $ik$  材の仮想仕事式を求め、全材にわたる総和で表せば、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \sum P_{(ik)} \overline{C_{(ik)}} + \sum (Q_{ik} \overline{F_{ik}} + Q_{ki} \overline{F_{ki}}) + \sum (N_{ik} \overline{\eta_{ik}} + N_{ki} \overline{\eta_{ki}}) \\ & + \sum (M_{ik} + M_{ki}) \overline{\phi_{(ik)}} - \sum N_a \overline{F_{(ik)}} l_{(ik)} = 0 \end{aligned} \quad (2-16)$$

もし、 $ik$  材が切断されずその代わり弾性伸び変形を生じたものとするれば、上式の  $N_a$  項の仕事は伸び変形による材内応力の仕事  $W_i = \sum N_a \overline{F_{(ik)}} l_{(ik)}$  を表すことになる。これに伴って中間外力の仕事  $\sum P_{(ik)} \overline{C_{(ik)}}$  の値も弾性変形による仕事分だけ増加する。

(2-12) 式を (2-16) 式によって変形すれば、次式が得られる。

$$\sum P_i \overline{C_i} + \sum P_{(ik)} \overline{C_{(ik)}} + \sum (M_{ik} + M_{ki}) \overline{\phi_{(ik)}} - \sum N_a \overline{F_{(ik)}} l_{(ik)} = 0 \quad (2-17)$$

左辺の第 1、第 2 項をまとめて  $P \cdot \overline{C}$  で表せば、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} & - \sum (M_{ik} + M_{ki}) \overline{\phi_{(ik)}} + \sum N_a \overline{F_{(ik)}} l_{(ik)} = P \cdot \overline{C} \\ P \cdot \overline{C} & = \sum P_i \overline{C_i} + \sum P_{(ik)} \overline{C_{(ik)}} + \sum m_{(ik)} \overline{\phi_{(ik)}} + \sum P_{\omega(ik)} \overline{C_{\omega(ik)}} \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

ただし  $m_{(ik)}$  は中間外力の曲げモーメント  $P_{\omega(ik)} \overline{C_{\omega(ik)}}$  は中間分布荷重の合力の  $P_{\omega(ik)}$  仕事である。上式は、両節点間に相対距離変化を生じる場合の剪断力方程式を表す。

## (3) 一般的な剪断力方程式

図2-6のラーメンの剪断力方程式を解く場合は図2-7のように柱頭をB、Cで切断した梁を自由体として釣り合いを考える。

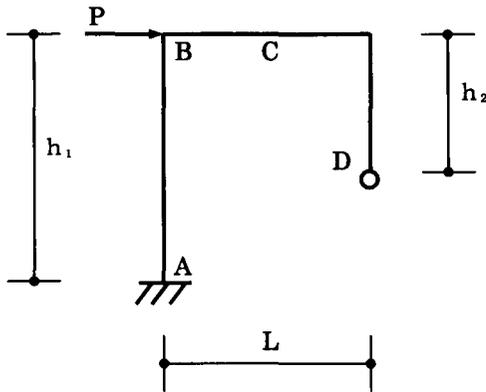


図 2-6

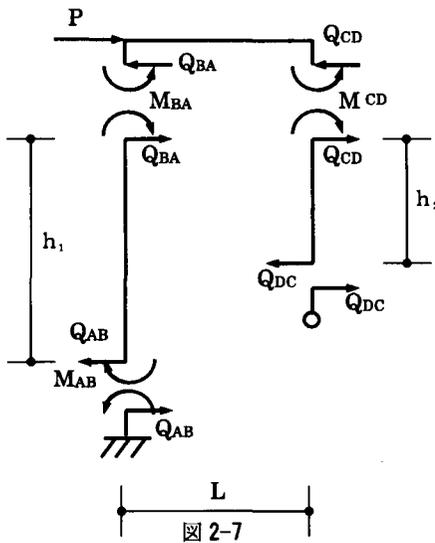


図 2-7

X方向の剪断力の釣り合いを考えると

$$\sum X = +P - Q_{BA} - Q_{CD} = 0$$

となり、またA-B材とC-D材の釣り合いから

$$Q_{BA}h_1 = -(M_{AB} + M_{BA})$$

$$Q_{CD}h_2 = -M_{CD}$$

となる。これらの式が、いわゆる剪断力方程式である。

次に図2-8のラーメンの剪断力方程式を考える。図2-9のように自由体Aと自由体Bについての剪断力方程式を求める。

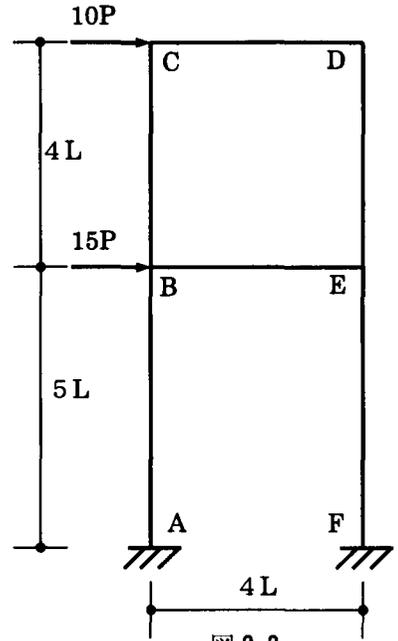


図 2-8

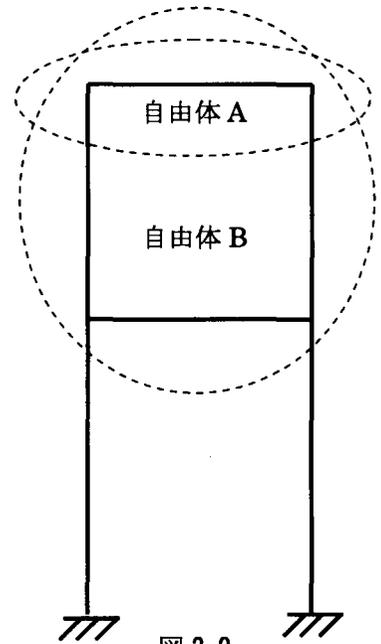


図 2-9

自由体Aについては図2-10の釣り合いから

$$\sum X = +10P - Q_{CB} - Q_{DE} = 0$$

となり、自由体Bについては図2-11の釣り合いから

$$\sum X = +10P + 15P - Q_{BA} - Q_{EF} = 0$$

となる。

またB-C材とD-E材の釣り合いから

$$Q_{CB}4l = -(M_{BC} + M_{CB})$$

$$Q_{DE}4l = -(M_{DE} + M_{ED})$$

$$Q_{BA}6l = -(M_{AB} + M_{BA})$$

$$Q_{EF}6l = -(M_{EF} + M_{FE})$$

となる。これらの式が、いわゆる剪断力方程式である。

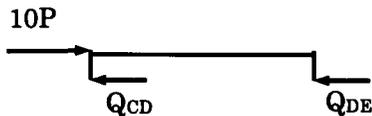


図 2-10

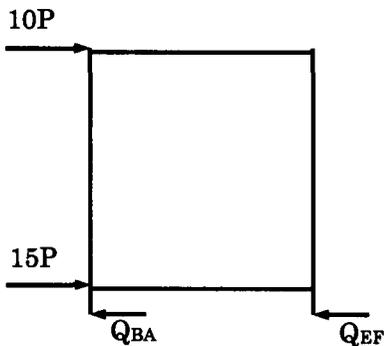


図 2-11

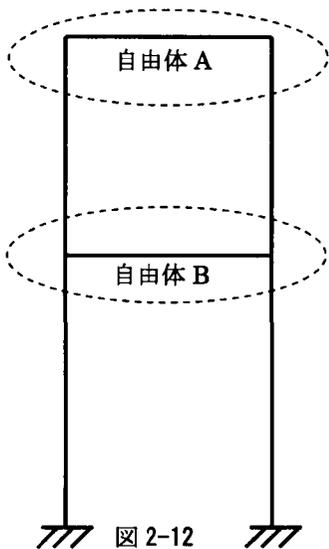


図 2-12

次に外力の釣りを考えてみる。この場合は図2-12のように自由体を取る。

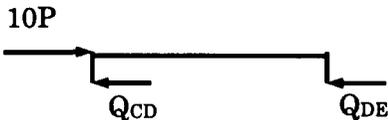


図 2-13

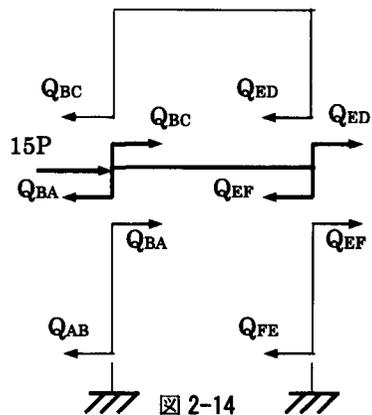


図 2-14

自由体Aについては前問と同様で、図2-13の釣り合いから

$$\sum X = +10P - Q_{CD} - Q_{DE} = 0$$

となり、自由体Bについては図2-14の釣り合いから

$$\sum X = +15P - Q_{BC} - Q_{BA} + Q_{ED} - Q_{EF} = 0$$

となる。

またB-C材、D-E材とA-B材、E-F材の釣り合いから

$$Q_{CD}4l = -(M_{CD} + M_{DC})$$

$$Q_{DE}4l = -(M_{DE} + M_{ED})$$

$$Q_{BC}4l = -(M_{BC} + M_{CB})$$

$$Q_{BA}6l = -(M_{AB} + M_{BA})$$

$$Q_{ED}4l = -(M_{DE} + M_{ED})$$

$$Q_{EF}6l = -(M_{EF} + M_{FE})$$

となる。これらの式が、いわゆる剪断力方程式である。

[3] 異形ラーメン

(1) 仮想仕事法による剪断力方程式

このラーメンはD点が移動節点であるから従属部材角は2個、独立部材角は2個存在する。そこでA-B材とB-C材を独立部材角に選ぶと直角変位図は図3-2のようになり

$$R_{AB} = 1, R_{BC} = 0 \text{ のとき}$$

$$\varphi_{CD} = 1 - \frac{C'D'}{CD} = 1 - \frac{4l}{2l} = -1$$

またD点の水平変位は  $\delta_D = 7l$  である。

そのとき仮想仕事式は

$$3Pl + (M_{AB} + M_{BA})(1) + (M_{BC} + M_{CB})(0) + (M_{CD})(-1) = 0$$

$$3Pl + M_{AB} + M_{BA} - M_{CD} = 0 \text{ (3-1)}$$

となる。ここで

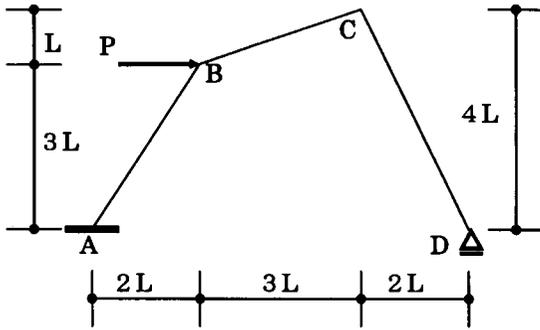


図3-1 異形ラーメン

$$M_{AB} + M_{BA} = -\sqrt{13}IQ_{BA}$$

$$M_{CD} = -2\sqrt{5}IQ_{CD}$$

だから両式を(3-1)式に代入すると

$$3Pl - \sqrt{13}IQ_{BA} + 2\sqrt{5}IQ_{CD} = 0$$

となる。

図3-3の直角変位図から

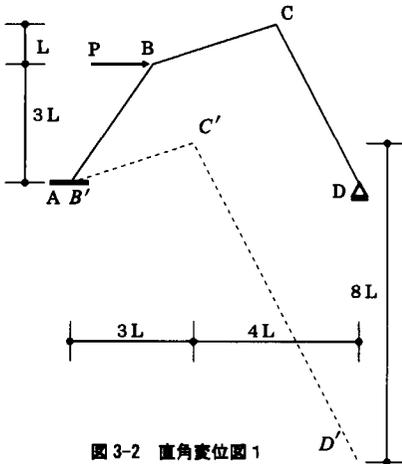


図3-2 直角変位図1

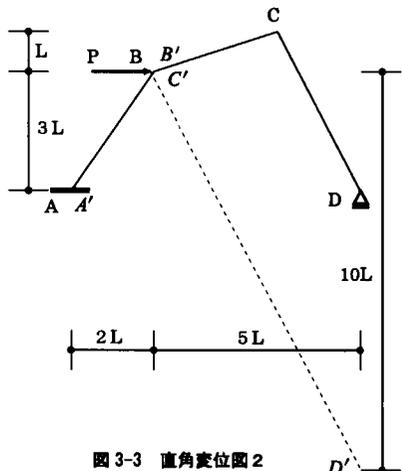


図3-3 直角変位図2

$R_{AB} = 0, R_{BC} = 1$  のとき

$$\varphi_{CD} = 1 - \frac{C'D'}{CD} = 1 - \frac{5l}{2l} = -\frac{3}{2}$$

また D 点の水平変位は  $\delta_D = 7l$  である。

この場合の仮想仕事式は

$$(M_{BC} + M_{CB})(1) + (M_{CD})(-\frac{3}{2}) = 0 \quad (3-2)$$

となる。

$$M_{BC} + M_{CB} = -\sqrt{10}IQ_{CB}$$

$$M_{CD} = -2\sqrt{5}IQ_{CD}$$

だから両式を(3-2)式に代入すると

$$-\sqrt{10}IQ_{CB} + 3\sqrt{5}IQ_{CD} = 0 \quad (3-3)$$

となる。

(2) 剪断力方程式1

C 点の変位は D 点からの相対変位であるから直角変位図から D' 点を D 点に移動させ C' 点を C' 点に移動させた点が元の C 点の実変位図と考えられる。そこで図3-4を自由体とした場合の剪断力方程式は

$$3Pl - \sqrt{13}IQ_{BA} - M_{BA} - M_{BC} + \frac{3}{\sqrt{10}}Q_{BC}2l + \frac{1}{\sqrt{10}}Q_{BC}3l - \frac{1}{\sqrt{10}}Q_{CB}3l - \frac{3}{\sqrt{10}}Q_{CB}2l + 2\sqrt{5}IQ_{CD} = 0 \quad (3-4)$$

であり、節点方程式は

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$M_{CB} + M_{CD} = 0$$

$$Q_{BC} = Q_{CB}$$

となり、これらの式を(3-4)式に代入すると剪断力方程式

$$3Pl - \sqrt{13}IQ_{BA} + 2\sqrt{5}IQ_{CD} = 0 \quad (3-5)$$

が得られる。

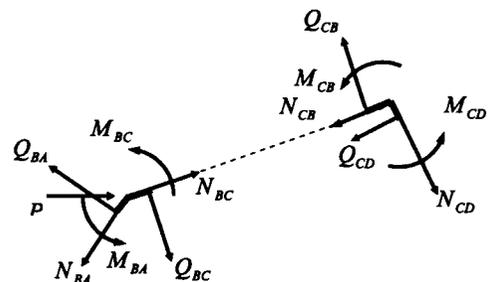


図3-4 節点自由体1

## 建築骨組みの剪断力方程式の研究

尚、 $N_{BC}$ と $N_{CB}$ による仕事量は相殺されて、それは零となる事はすでに実証されている。

また $N_{BA}$ と $N_{CD}$ による仕事量はそれぞれの力に対する距離が零であるからなしえない。

ここで $Q_{CD}$ を考える場合 $C'$ 点は $D'$ 点に対する相対変位である。しかるに図3-5に示すごとく線分 $C'-D'$ を $C'-D$ に平行移動させた $C''$ 点について考えればよい。それが(3-4)式左辺の最後項になる。

つまり部材C-Dは回転と平行移動の組み合わせである。そして自由体の切断面応力の仕事量は部材の平行移動では生じない。また部材C-D材の回転は線分 $C'-D'$ であるから、その回転を知るには線分 $C'-D$ に平行移動して考えてもよい。また線分 $D-D' = 7l$ は部材C-Dが平行移動した距離の部分であることから理解できる。

この項に関しては章末の補足で述べておく。

## (3) 剪断力方程式2

自由体を図3-4で図3-3の場合の剪断力方程式は図3-6から

$$-M_{BA} - M_{BC} - \sqrt{10} l Q_{CB} - M_{CB} - M_{CD} + 3\sqrt{5} l Q_{CD} = 0 \quad (3-6)$$

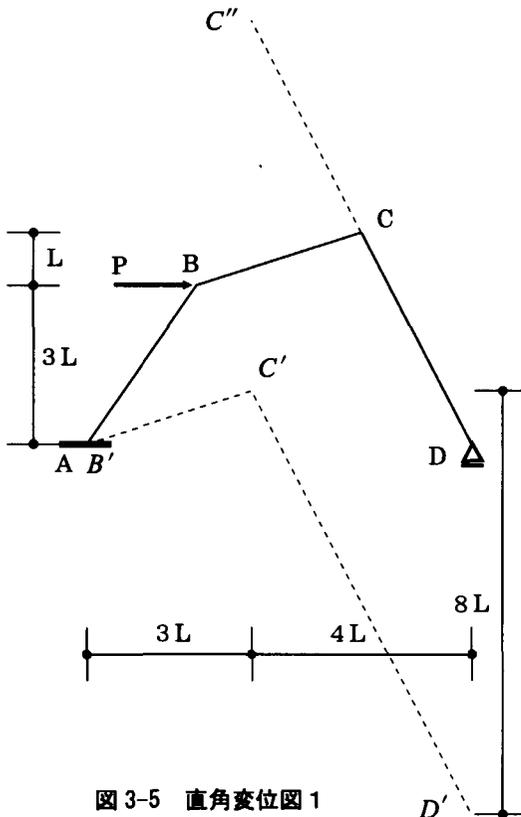


図3-5 直角変位図1

尚、 $Q_{CB}$ と $Q_{BC}$ は等しく、またB-C材に偶力として作用しているから

$$Q_{CB} \cdot m + Q_{BC} \cdot n \\ = Q_{CB} (m+n)$$

となり、 $m+n = \sqrt{10} l$ であるから、 $Q_{CB}$ と $Q_{BC}$ の仕事量は $\sqrt{10} l Q_{CB}$ となる。 $N_{BC}$ と $N_{CB}$ は前問と同様にその仕事量は相殺される。また節点方程式

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$M_{CB} + M_{CD} = 0$$

を(3-5)式に代入すると

$$-\sqrt{10} l Q_{CB} + 3\sqrt{5} l Q_{CD} = 0 \quad (3-7)$$

の剪断力方程式が得られる。

ここで、 $Q_{CD}$ を考える場合 $C'$ 点は $D'$ 点に対する相対変位である。しかるに図3-6のように線分 $C'-D'$ を $C'-D$ に平行移動させた $C''$ 点について考えればよい。それが(3-6)式の左辺の最後項になる。

## (4) 剪断力方程式3

自由体を図3-7で図3-2の場合の剪断力方程式は

$$3Pl - \sqrt{13} l Q_{BA} - M_{BA} + 2\sqrt{5} l Q_{CD} - M_{CD} = 0 \quad (3-8)$$

節点方程式は

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

$$M_{CB} + M_{CD} = 0$$

で

$$M_{BA} = -M_{BC}$$

$$M_{CD} = -M_{CB}$$

だから、(3-8)式に代入すると

$$3Pl - \sqrt{13} l Q_{BA} + M_{BC} + 2\sqrt{5} l Q_{CD} + M_{CB} = 0$$

となる。ここで部材B-Cは回転角を零という条件であるから、部材端の $M_{BC}$ と $M_{CB}$ による仕事量は零である。ゆえに上式は

$$3Pl - \sqrt{13} l Q_{BA} + 2\sqrt{5} l Q_{CD} = 0 \quad (3-9)$$

が導かれる。

## (5) 剪断力方程式4

自由体を図3-7で図3-3の場合の剪断力方程式は

$$-M_{BA} + 3\sqrt{5} l Q_{CD} - M_{CD} = 0 \quad (3-10)$$

節点方程式は

$$M_{BA} + M_{BC} = 0$$

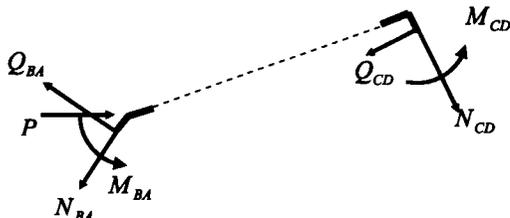


図3-7 梁自由体

$$M_{CB} + M_{CD} = 0$$

で

$$M_{BA} = -M_{BC}$$

$$M_{CD} = -M_{CB}$$

だから、(3-10)式に代入すると

$$M_{BC} + 3\sqrt{5} l Q_{CD} + M_{CB} = 0 \quad (3-11)$$

となる。また

$$M_{BC} + M_{CB} = -\sqrt{10} l Q_{CB}$$

であるから、上式を(3-11)式に代入すると

$$-\sqrt{10} l Q_{CB} + 3\sqrt{5} l Q_{CD} = 0 \quad (3-12)$$

が導かれる。

#### 【補足】

図Aは図3-2にある直角変位図を実変位で表した図である。

今、C-D材の柱頭を切断した断面応力や、その節点の仕事を検証するのだから図AでC-D材がc-d材まで変形・変位していることをみればよい。

図Bで実変位・変形した後のc-d材は回転と水平の移動を伴っている。その回転はx-Dで、水平移動はy-dで表されている。部材が回転しないで、水平移動した場合その切断面あるいは節点の応力は仕事をしない。

それゆえ図3-5のように、水平移動の項を取り除いて回転だけにした、C''-DとしてC節点の応力の仕事を求めてもよい。

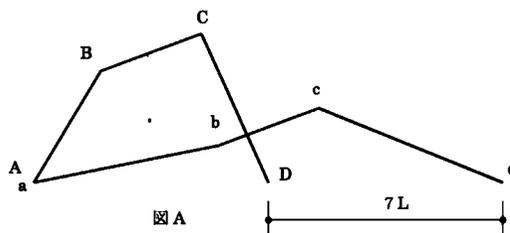
#### 【4】おわりに

平面異形架構を対象に剪断力方程式を検討してみた。架構の範疇としては、まず異形架構がありその中に門型架構が含まれていると考えるのが自然である。ゆえに仮想仕事式のほうが剪断力方程式

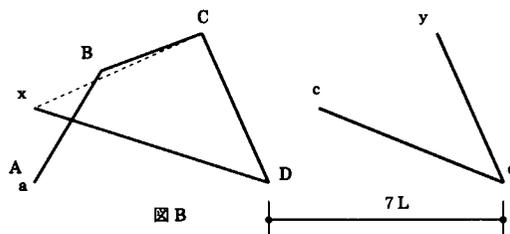
に比べて解を求め易いことが実証された。しかし立体架構を対象とした場合は直角変位図が描けないから、剪断力方程式による内部仕事量を計算したほうがよい。何故ならば空間における任意の節点間に生ずる回転、伸びを含む相対変位・変形を算出する手法を、既に当研究室で提案している。その節点変位式  $\Sigma(\vec{V} + \vec{U}) = 0$  を適用すれば、任意の節点の変位・変形後の座標が容易に計算できる。ただ部材角も同時に算出されるから仮想仕事式でも同じ要領で算定できる。

#### 【引用・参考文献】

- 1) 倉田 博：異形ラーメンの解法：学隆社
- 2) 斉藤謙次：建築構造力学：理工図書
- 3) 中村恒善：建築構造力学図説・演習Ⅱ：丸善



図A



図B

〔受理年月日 2003年9月30日〕