

# 一般骨組内に含まれる鉄筋コンクリート L 形断面耐震壁の弾塑性部材モデル

## その1 構成方程式

### INELASTIC MODEL OF REINFORCED CONCRETE L-SHAPED SHEAR WALLS INCLUDED IN FRAMES Part I "Constitutive equations"

小島雅樹\*, 荒井康幸\*\*, 溝口光男\*\*\*, 鈴木友訓\*\*\*\*  
Masaki KOJIMA, Yasuyuki ARAI, Mitsuo MIZOGUCHI  
and Tomonori SUZUKI

Generally, L-shaped shear walls are used in the RC structures. Until now, there were not many studies on the analysis method considering non-planar shear wall sections, such as L, T, U, etc.. According to the research of authors, the behavior of L-shaped shear walls is completely different from that of the plane wall. Therefore, the analysis neglecting the continuity of an orthogonal wall is unsuitable. We proposed the elastic analysis method considering the interaction between two wall panels within the L-shaped shear wall. Its elastic analysis has been developed into the inelastic analysis method for independent L-shaped shear walls. In this paper, the numerical model for inelastic analysis of a three-dimensional frame including L-shaped shear walls is reconstructed based on this inelastic analysis method, and the constitutive equations is induced.

**Keywords:** reinforced concrete, earthquake resisting wall, L-shaped shear wall, elastic-plastic model

鉄筋コンクリート, 耐震壁, L形断面壁, 弾塑性モデル

#### 1. はじめに

建築構造物には、直交する二方向の壁板が連続して配置され、壁断面がL形やコ形となる場合が少なくない。これらの開断面立体耐震壁を含む骨組の構造解析法に関して、著者らは拙論<sup>1)</sup>において、隣接する壁縁に境界応力として縁伸縮力と云う概念を導入した開断面壁の弾性解析法を提案した。その解析結果はVlasovの薄肉弾性ばりの理論<sup>2)</sup>と一致し、さらにせん断変形を考慮した振り解析もできるものである。また、拙論<sup>3)</sup>においては種々のモデル建物に適用した計算例を示すと共に、直交する壁の連続性を無視した解析では立体としての剛性や変形特性を評価できず、その誤差は無視できないほど大きくなるのでこの種の壁を含む建物の解析には不相当であることを示した。しかし、上記の解析法は弾性範囲に止まっており、弾塑性域にわたって連続する2枚の壁板の立体的な効果を考慮できる解析法は未だ提案されていない。近年の構造設計においては、耐震壁のモデル化としてブレース置換モデルやエレメント置換モデルがよく用いられているが、これらのモデルを立体耐震壁に適用しても、隣接する壁縁の力の釣合いと適合条件を満たすのは各層に設けた節点位置のみなので、立体耐震壁の応力を評価すること

はできない。したがって、ひび割れ発生から鉄筋の降伏に至るまでの弾塑性挙動を精確に解析することはできないので、立体耐震壁についての新たな部材モデルが必要である。独立したL形断面壁については、著者らは拙論<sup>4)</sup>において弾塑性曲げ変形を弾性変形と塑性変形の和で表す部材モデルを考案し、前報<sup>5)</sup>では実験資料によってそのモデルの検証を行った。その結果、塑性変形を表す要素の復元力特性やその定数を適切に定めることができれば、考案したモデルによってL形断面壁の主要な特性を精度良く表現できることが確かめられた。そこで本論文では、L形断面壁を含む立体骨組の弾塑性解析に使用できる部材モデルに再構築し、その構成方程式を導出する。

#### 2. 部材モデルの基本仮定

モデルの基本的な考え方は拙論<sup>1)</sup>および拙論<sup>4)</sup>と同様であるが取りまとめて記すと以下のようである。

- 1) 弾塑性解析の範囲は、曲げ降伏後コンクリートが圧壊して耐力が低下する以前までとする。
- 2) 弾塑性変形は、弾性変形と塑性変形の和で表す。

\* 西松建設(株)技術研究所 課長・工修

\*\* 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 教授・工博

\*\*\* 室蘭工業大学工学部建設システム工学科  
助教授・博士(工学)

\*\*\*\* 室蘭工業大学大学院工学研究科建設システム工学専攻  
大学院生

Manager, Technical Research Institute, Nishimatsu Construction, M. Eng.  
Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Faculty of Engineering, Muroran  
Institute of Technology, Dr. Eng.  
Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Faculty of Engineering,  
Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.  
Graduate Student, Division of Civil Engineering and Architecture, Graduate School  
of Engineering, Muroran Institute of Technology

- 3) 弾性変形の算定には、L形を構成する2枚の壁板を分割し、壁縁に縁伸縮力を設定した壁要素として取り扱う。
- 4) 壁要素は、せん断変形と軸方向変形を考慮した曲げ材として取り扱い、面外剛性は無視する。
- 5) 塑性変形は、各側柱位置に仮想した変断面棒要素（塑性柱）と各柱脚部に挿入したバネ要素（塑性バネ）で表し、隣り合う塑性柱間には平面保持を仮定する。
- 6) 塑性柱の脚部からの高さ  $z$  での軸方向柔性  $f$  は、脚部を  $f_0$  とし、軸方向力が0となる高さ  $h_0$  で0とする下式の2次式で表す。

$$f = \left(1 - \frac{z}{h_0}\right)^2 f_0 \quad \dots(1)$$

### 3. L形断面壁の弾塑性変形

#### 3.1 L形断面壁の節点力と節点変位

フープで囲まれた柱部分のあるL形断面壁の形状および各部の名称を図1のように定義する。ここで、 $l_X, l_Y$  はそれぞれ壁長さであり、 $l_{kX}, l_{kY}$  はそれぞれ柱中心間距離を表している。3次元座標系と壁脚固定のL形断面壁の節点を図2のようにとると、節点④～⑥の1節点6自由度の節点力と節点変位は、前述の仮定により壁板の面外剛性を無視するので同図(a)のように表される。また、各壁板には平面保持を仮定するので、同図(b)に示すように壁頂の水平力を  $Q_X, Q_Y$ 、水平変位を  $\delta_X, \delta_Y$ 、柱頂部の鉛直力を  $N_C, N_X, N_Y$ 、鉛直変位を  $v_C, v_X, v_Y$  とすると、これらと節点力・節点変位との間には(2)式の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} Q_X &= X_4 + X_5, & \delta_X &= u_4 = u_5 \\ Q_Y &= Y_4 + Y_6, & \delta_Y &= v_4 = v_6 \\ N_C &= Z_4 + (M_{y4} + M_{y5})/l_{kX} - (M_{x4} + M_{x6})/l_{kY} \\ N_X &= Z_5 - (M_{y4} + M_{y5})/l_{kX} \\ N_Y &= Z_6 + (M_{x4} + M_{x6})/l_{kY} \\ \theta_{y4} &= \theta_{y5} = (v_C - v_X)/l_{kX} \\ \theta_{x4} &= \theta_{x6} = (v_Y - v_C)/l_{kY} \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

したがって、図2(b)に示す力と変形の間関係を求めれば、同図(a)に示す節点力を受ける場合の節点変位を定めることができる。以下では、同図(b)に示す力の増分と変位の増分の間関係を求める。

#### 3.2 弾性変形

L形断面を構成する各壁を図3に示すようにX壁、Y壁に分割し、壁縁に縁伸縮力の増分  $\Delta n$  を設定する。図中の  $I, A, t, l$  はそれぞれ壁要素の断面2次モーメント、断面積、壁厚、中立軸位置であり、サフィックスは壁名を表している。壁厚より大きい柱形を有する場合には、柱断面積が柱中心に集中しているものとみなして問題を単純化し、C柱の断面積は両壁に等分して壁要素の断面2次モーメント、断面積を定める<sup>1)</sup>。

高さ  $z$  での全曲げモーメントの増分  $\Delta \bar{M}$  と全軸力の増分  $\Delta \bar{N}$  は、それぞれ各壁要素について次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{M}_X &= -(h-z)\Delta Q_X - \Delta N_C \cdot l_X' + \Delta N_X(l_{kX} - l_X') + \Delta n \cdot l_X' \\ \Delta \bar{M}_Y &= -(h-z)\Delta Q_Y + \Delta N_Y(l_{kY} - l_Y') - \Delta n \cdot l_Y' \\ \Delta \bar{N}_X &= \Delta N_C + \Delta N_X - \Delta n \\ \Delta \bar{N}_Y &= \Delta N_Y + \Delta n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

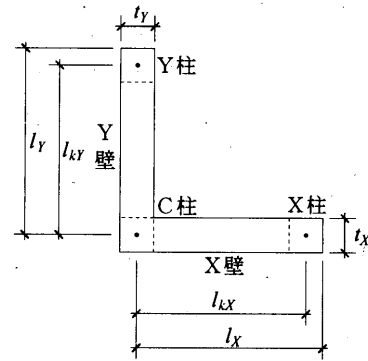


図1 L形断面壁の記号の定義

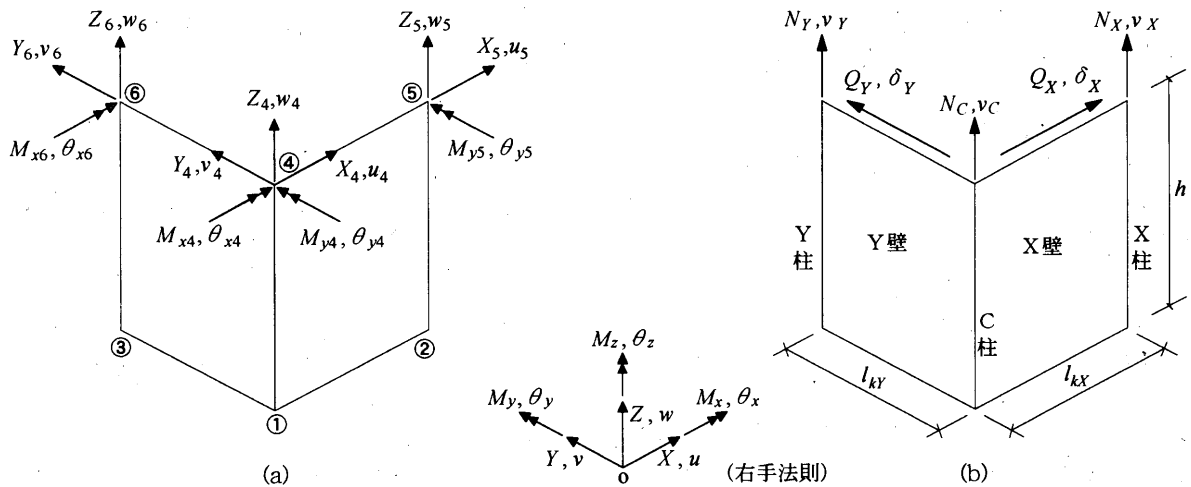


図2 3次元座標系と節点力・節点変位

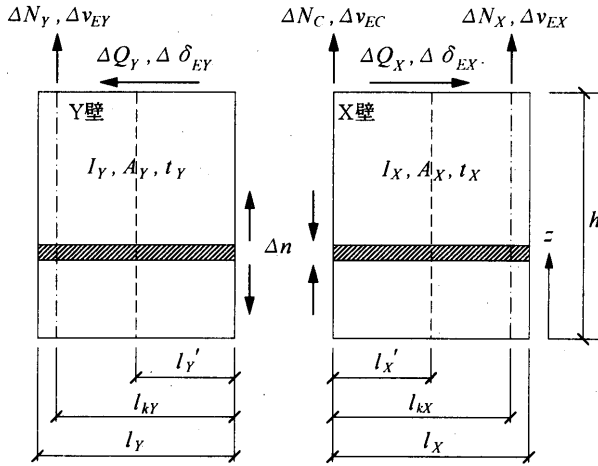


図3 弾性要素

ここで、 $\{\Delta\bar{M}\} = \{\Delta\bar{M}_X \ \Delta\bar{M}_Y\}^T$ ,  $\{\Delta\bar{N}\} = \{\Delta\bar{N}_X \ \Delta\bar{N}_Y\}^T$ ,  
 $\{\Delta Q\} = \{\Delta Q_X \ \Delta Q_Y\}^T$ ,  $\{\Delta N\} = \{\Delta N_C \ \Delta N_X \ \Delta N_Y\}^T$  においてマ  
 トリックス表示すると次式となる。

$$\{\Delta\bar{M}\} = -[l_1]\{\Delta N\} - (h-z)\{\Delta Q\} - [l_2]\{1\}\Delta n \quad \dots(4)$$

$$\{\Delta\bar{N}\} = [e_1]\{\Delta N\} + [e_2]\{1\}\Delta n \quad \dots(5)$$

ここに、

$$[l_1] = \begin{bmatrix} l'_X & -(l_{kX} - l'_X) & 0 \\ 0 & 0 & -(l_{kY} - l'_Y) \end{bmatrix}, [l_2] = \begin{bmatrix} -l'_X & 0 \\ 0 & l'_Y \end{bmatrix}$$

$$[e_1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [e_2] = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \{1\} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

隣接する壁縁の適合条件は、

$$\frac{\Delta\bar{N}_X}{EA_X} - l'_X \frac{\Delta\bar{M}_X}{EI_X} = \frac{\Delta\bar{N}_Y}{EA_Y} - l'_Y \frac{\Delta\bar{M}_Y}{EI_Y} \quad \dots(6)$$

ここに、 $E$ は弾性係数である。(6)式をマトリックス表示すると、

$$\{1\}^T ([l_2][I]^{-1}\{\Delta\bar{M}\} - [e_2][A]^{-1}\{\Delta\bar{N}\}) = 0 \quad \dots(7)$$

ここに、

$$[I] = \begin{bmatrix} I_X & 0 \\ 0 & I_Y \end{bmatrix}, [A] = \begin{bmatrix} A_X & 0 \\ 0 & A_Y \end{bmatrix}$$

(7)式に(4)、(5)式を代入して $\Delta n$ について解くと、

$$\Delta n = \frac{1}{\alpha} \{1\}^T \left( -[l_2][I]^{-1}[l_1] + [e_2][A]^{-1}[e_1] \right) \{\Delta N\} - [l_2][I]^{-1}(h-z)\{\Delta Q\} \quad \dots(8)$$

ここに、

$$\alpha = \{1\}^T \left( [l_2][I]^{-1}[l_2] + [A]^{-1} \right) \{1\}$$

高さ  $z$  での各壁要素の曲率の増分  $\{\Delta\phi_E\} = \{\Delta\phi_{EX} \ \Delta\phi_{EY}\}^T$  は、

$$\{\Delta\phi_E\} = -\frac{1}{E}[I]^{-1}\{\Delta\bar{M}\} \quad \dots(9)$$

であるから、(4)、(8)、(9)式より、

$$\{\Delta\phi_E\} = [A_1]\{\Delta N\} + (h-z)[A_m]\{\Delta Q\} \quad \dots(10)$$

ここに、

$$[A_1] = [A_m][l_1] - [A_{mn}][e_1]$$

$$[A_m] = \frac{1}{E} \left( [I]^{-1} - \frac{1}{\alpha} \{I'\}\{I'\}^T \right)$$

$$[A_{mn}] = \frac{1}{\alpha E} \{I'\}\{A'\}^T$$

$$\{I'\} = [I]^{-1}[l_2]\{1\}$$

$$\{A'\} = [A]^{-1}[e_2]\{1\}$$

また、高さ  $z$  での各壁要素中立軸位置における軸方向歪み度の増分  $\{\Delta\varepsilon_E\} = \{\Delta\varepsilon_{EX} \ \Delta\varepsilon_{EY}\}^T$  は、

$$\{\Delta\varepsilon_E\} = \frac{1}{E}[A]^{-1}\{\Delta\bar{N}\} \quad \dots(11)$$

であるから、(5)、(8)、(11)式より、

$$\{\Delta\varepsilon_E\} = [A_2]\{\Delta N\} - (h-z)[A_{mn}]^T\{\Delta Q\} \quad \dots(12)$$

ここに、

$$[A_2] = [A_n][e_1] - [A_{mn}]^T[l_1]$$

$$[A_n] = \frac{1}{E} \left( [A]^{-1} - \frac{1}{\alpha} \{A'\}\{A'\}^T \right)$$

柱位置の軸方向歪み度の増分  $\{\Delta\varepsilon_{EC}\} = \{\Delta\varepsilon_{ECC} \ \Delta\varepsilon_{ECX} \ \Delta\varepsilon_{ECY}\}^T$  は、

$$\{\Delta\varepsilon_{EC}\} = [e_1]^T\{\Delta\varepsilon_E\} + [l_1]^T\{\Delta\phi_E\} \quad \dots(13)$$

と表されるから、(10)、(12)式を代入して  $z$  について積分し、柱頂部の鉛直変位の増分  $\{\Delta v_E\} = \{\Delta v_{EC} \ \Delta v_{EX} \ \Delta v_{EY}\}^T$  を求めると次式を得る。

$$\{\Delta v_E\} = [D_{E1}]\{\Delta N\} + [D_{E2}]\{\Delta Q\} \quad \dots(14)$$

ここに、

$$[D_{E1}] = h([e_1]^T[A_2] + [l_1]^T[A_1])$$

$$[D_{E2}] = \frac{h^2}{2}[A_1]^T$$

一方、(10)式を  $z$  について2回積分し、各壁頂部の水平変位の増分  $\{\Delta\delta_E\} = \{\Delta\delta_{EX} \ \Delta\delta_{EY}\}^T$  を求めると次式を得る。

$$\{\Delta\delta_E\} = [D_{E2}]^T\{\Delta N\} + [D_{E3}]\{\Delta Q\} \quad \dots(15)$$

ここに、

$$[D_{E3}] = \frac{h^3}{3}[A_m]$$

ちなみに、各柱脚部における垂直応力度の増分  $\{\Delta\sigma_{EC}\} = \{\Delta\sigma_{ECC} \ \Delta\sigma_{ECX} \ \Delta\sigma_{ECY}\}^T$  は次式で表される。

$$\{\Delta\sigma_{EC}\} = \frac{E}{h}[D_{E1}]\{\Delta N\} + \frac{2E}{h}[D_{E2}]\{\Delta Q\} \quad \dots(16)$$

3.3 塑性柱による塑性変形

塑性変形を表す塑性柱と塑性バネを図4に示す。塑性柱は各柱位置に仮想した軸方向剛性のみを持つ変断面棒要素であり、壁脚にひび割れが発生した後の壁全体の塑性変形を表す。軸方向柔性分布  $f$  は前記の(1)式で表すので、脚部における柔性  $f_o$  によって一義的に定められる。脚部柔性  $f_o$  は、ひび割れ発生時軸力、柱主筋および壁筋の降伏強度と降伏歪み度から定められる<sup>4)</sup>。なお、本論文ではコンクリートの圧壊以前を対象としているので、圧縮の場合には塑性歪みは無視して  $f_o = 0$  としている。また、立体骨組内のL形断面壁では、境界梁からの曲げ戻しによって柱頭にひび割れが生ずることもあり得るが、この場合の塑性変形は比較的小さいものと考えられ、解析の簡便さからこれを無視することとする。

高さ  $z$  での塑性柱の軸方向力の増分  $\{\Delta P\} = \{\Delta P_C \ \Delta P_X \ \Delta P_Y\}^T$  は、

$$\{\Delta P\} = \{\Delta N\} + [T_Q]\{\Delta Q\}(h-z) \quad \dots(17)$$

と表される。ここに、

$$[T_Q] = \begin{bmatrix} 1/l_{kx} & 1/l_{ky} \\ -1/l_{kx} & 0 \\ 0 & -1/l_{ky} \end{bmatrix}$$

各塑性柱の軸方向力が0となる高さ  $h_{oC}$ ,  $h_{oX}$ ,  $h_{oY}$  は、(17)式で  $\{\Delta P\} = \{0\}$  において  $z$  を求めると次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} h_{oC} &= h + \frac{\Delta N_C}{\Delta Q_X/l_{kx} + \Delta Q_Y/l_{ky}} \\ h_{oX} &= h - \frac{\Delta N_X}{\Delta Q_X/l_{kx}} \\ h_{oY} &= h - \frac{\Delta N_Y}{\Delta Q_Y/l_{ky}} \end{aligned} \right\} \quad \dots(18)$$

したがって、各塑性柱脚部の柔性を  $f_{oC}$ ,  $f_{oX}$ ,  $f_{oY}$  とすると、高さ  $z$  での柔性  $[f] = \text{diag}(f_C \ f_X \ f_Y)$  は次式のように表される。

$$[f] = [Z][F_o] \quad \dots(19)$$

ここに、

$$[Z] = \text{diag}\left(\left(1 - \frac{z}{h_{oC}}\right)^2 \ \left(1 - \frac{z}{h_{oX}}\right)^2 \ \left(1 - \frac{z}{h_{oY}}\right)^2\right)$$

$$[F_o] = \text{diag}(f_{oC} \ f_{oX} \ f_{oY})$$

高さ  $z$  での軸方向歪みの増分  $\{\Delta \epsilon_{PC}\} = \{\Delta \epsilon_{PC} \ \Delta \epsilon_{PCX} \ \Delta \epsilon_{PCY}\}^T$  は、

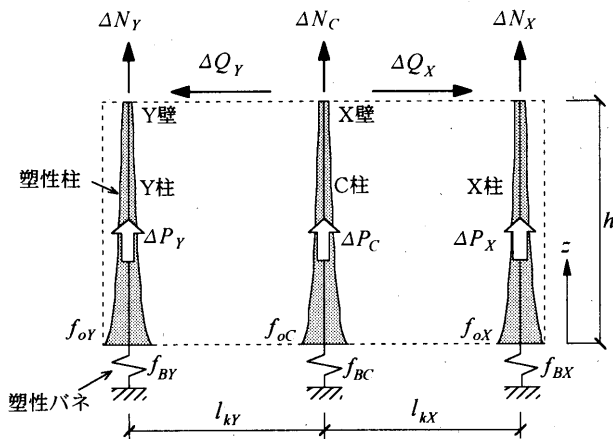


図4 塑性要素

$$\{\Delta \epsilon_{PC}\} = [f]\{\Delta P\} \quad \dots(20)$$

であるから、(17), (19)式を代入して、

$$\{\Delta \epsilon_{PC}\} = [Z][F_o]\{\Delta N\} + [Z][F_o][T_Q]\{\Delta Q\}(h-z) \quad \dots(21)$$

である。したがって、(21)式を  $z$  について積分し、塑性柱頂部の鉛直変位の増分  $\{\Delta v_P\} = \{\Delta v_{PC} \ \Delta v_{PX} \ \Delta v_{PY}\}^T$  を求めると次式を得る。

$$\{\Delta v_P\} = [D_{P1}]\{\Delta N\} + [D_{P2}]\{\Delta Q\} \quad \dots(22)$$

ここに、

$$[D_{P1}] = [H_1][F_o]$$

$$[D_{P2}] = [H_2][F_o][T_Q]$$

$$[H_1] = \text{diag}(H_{1C} \ H_{1X} \ H_{1Y})$$

$$H_{1i} = h \left( 1 - \frac{h}{h_{oi}} + \frac{h^2}{3h_{oi}^2} \right), \quad i = C, X, Y$$

$$[H_2] = \text{diag}(H_{2C} \ H_{2X} \ H_{2Y})$$

$$H_{2i} = h^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{h}{3h_{oi}} + \frac{h^2}{12h_{oi}^2} \right), \quad i = C, X, Y$$

また、隣り合う塑性柱間で平面保持を仮定しているため、各壁の高さ  $z$  での曲率の増分  $\{\Delta \phi_P\} = \{\Delta \phi_{PX} \ \Delta \phi_{PY}\}^T$  は、

$$\{\Delta \phi_P\} = [T_Q]^T \{\Delta \epsilon_{PC}\} \quad \dots(23)$$

であるから(21)式を代入して、

$$\{\Delta \phi_P\} = [T_Q]^T [Z][F_o]\{\Delta N\} + [T_Q]^T [Z][F_o][T_Q]\{\Delta Q\}(h-z) \quad \dots(24)$$

となる。したがって、(24)式を  $z$  について2回積分し、各壁頂部の水平変位の増分  $\{\Delta \delta_P\} = \{\Delta \delta_{PX} \ \Delta \delta_{PY}\}^T$  を求めると次式を得る。

$$\{\Delta \delta_P\} = [D_{P2}]^T \{\Delta N\} + [D_{P3}]\{\Delta Q\} \quad \dots(25)$$

ここに、

$$[D_{P3}] = [T_Q]^T [H_3][F_o][T_Q]$$

$$[H_3] = \text{diag}(H_{3C} \ H_{3X} \ H_{3Y})$$

$$H_{3i} = \frac{h^3}{3} \left( 1 - \frac{h}{2h_{oi}} + \frac{h^2}{10h_{oi}^2} \right), \quad i = C, X, Y$$

3.4 塑性バネによる塑性変形

各塑性柱脚部に挿入した塑性バネ(図4参照)は、鉄筋降伏後の塑性変形を表し、壁全体が圧縮側柱脚を中心として回転する現象を表現するものである。各塑性バネの柔性をそれぞれ  $f_{BC}$ ,  $f_{BX}$ ,  $f_{BY}$  とすると、バネの鉛直変位の増分  $\{\Delta v_B\} = \{\Delta v_{BC} \ \Delta v_{BX} \ \Delta v_{BY}\}^T$  は、

$$\{\Delta v_B\} = [D_{B1}]\{\Delta P_o\} \quad \dots(26)$$

ここに、

$$[D_{B1}] = \text{diag}(f_{BC} \ f_{BX} \ f_{BY})$$

$\{\Delta P_o\}$  は塑性バネに加わる鉛直力の増分であり(17)式で  $z=0$  としたものである。すなわち、柱頭の鉛直変位の増分に関して次式を得る。

$$\{\Delta v_B\} = [D_{B1}]\{\Delta N\} + [D_{B2}]\{\Delta Q\} \quad \dots(27)$$

ここに、

$$[D_{B2}] = h [D_{B1}] [T_Q]$$

塑性バネの鉛直変位によって生ずる各壁の回転角の増分  $\{\Delta\theta_B\} = \{\Delta\theta_{BX} \ \Delta\theta_{BY}\}^T$  は、 $\{\Delta\theta_B\} = [T_Q]^T \{\Delta v_B\}$  と表されるから(27)式を代入して、

$$\{\Delta\theta_B\} = [T_Q]^T [D_{B1}] \{\Delta N\} + [T_Q]^T [D_{B2}] \{\Delta Q\} \quad \dots(28)$$

となる。したがって、塑性バネの回転による各壁頂部の水平変位の増分  $\{\Delta\delta_B\} = \{\Delta\delta_{BX} \ \Delta\delta_{BY}\}^T$  は次式となる。

$$\{\Delta\delta_B\} = [D_{B2}]^T \{\Delta N\} + [D_{B3}] \{\Delta Q\} \quad \dots(29)$$

ここに、

$$[D_{B3}] = h^2 [T_Q]^T [D_{B1}] [T_Q]$$

### 3.5 せん断変形

壁板のせん断変形による各壁頂部の水平変位の増分  $\{\Delta\delta_S\} = \{\Delta\delta_{SX} \ \Delta\delta_{SY}\}^T$  は、次式で表される。

$$\{\Delta\delta_S\} = [D_S] \{\Delta Q\} \quad \dots(30)$$

ここに、

$$[D_S] = \text{diag} \left( \frac{\kappa_X h}{\beta_X G t_X l_X} \quad \frac{\kappa_Y h}{\beta_Y G t_Y l_Y} \right)$$

$G$  : せん断弾性係数

$\kappa_X, \kappa_Y$  : 形状係数

$\beta_X, \beta_Y$  : せん断剛性低下率

壁板のせん断ひび割れ発生後のせん断剛性については剛性低下率で考慮する。

### 3.6 スリップ変形

図5に示すようにスリップバネを挿入して、壁の全幅に亘るひび割れが発生した場合の滑りを考慮する。壁が引張軸力と曲げモーメントを受けて全幅に亘るひび割れが発生し、さらに鉄筋が降伏してひび割れ幅が大きくなると小さなせん断力でもせん断変形が増大

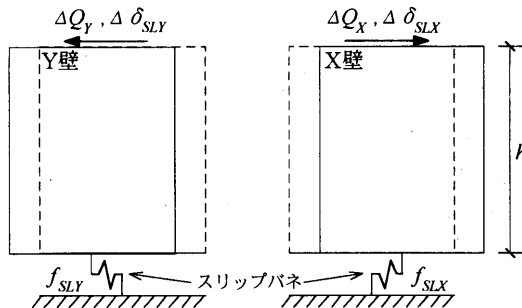


図5 スリップ要素

して、せん断力-せん断変形曲線は降伏現象の様相を呈するようになる<sup>5)</sup>。前報<sup>5)</sup>ではこの現象をせん断変形に含めて考慮したが、本論文ではスリップバネを設けて表現する。したがって、このバネの柔性はひび割れや鉄筋の降伏によって変化するものである。

各壁のスリップバネの柔性を  $f_{SLX}, f_{SLY}$  とすると、スリップ変位の増分  $\{\Delta\delta_{SL}\} = \{\Delta\delta_{SLX} \ \Delta\delta_{SLY}\}^T$  は次式となる。

$$\{\Delta\delta_{SL}\} = [D_{SL}] \{\Delta Q\} \quad \dots(31)$$

ここに、

$$[D_{SL}] = \text{diag}(f_{SLX} \ f_{SLY})$$

### 3.7 全変形

以上によって、L形断面壁の柱頂部鉛直変位の増分  $\{\Delta v\} = \{\Delta v_C \ \Delta v_X \ \Delta v_Y\}^T$  および壁頂の水平変位の増分  $\{\Delta\delta\} = \{\Delta\delta_X \ \Delta\delta_Y\}^T$  はそれぞれ、

$$\{\Delta v\} = \{\Delta v_E\} + \{\Delta v_P\} + \{\Delta v_B\} \quad \dots(32)$$

$$\{\Delta\delta\} = \{\Delta\delta_E\} + \{\Delta\delta_P\} + \{\Delta\delta_B\} + \{\Delta\delta_S\} + \{\Delta\delta_{SL}\} \quad \dots(33)$$

であるから、上式に(14)、(15)、(22)、(25)、(27)、(29)、(30)、(31)式を代入してまとめると次式を得る。

$$\{\Delta\bar{\delta}\} = [D] \{\Delta\bar{Q}\} \quad \dots(34)$$

ここに、

$$\{\Delta\bar{\delta}\} = \{\Delta v_C \ \Delta v_X \ \Delta v_Y \ \Delta\delta_X \ \Delta\delta_Y\}^T$$

$$\{\Delta\bar{Q}\} = \{\Delta N_C \ \Delta N_X \ \Delta N_Y \ \Delta Q_X \ \Delta Q_Y\}^T$$

$$[D] = \begin{bmatrix} [D_1] & [D_2] \\ [D_2]^T & [D_3] \end{bmatrix}$$

$$[D_1] = [D_{E1}] + [D_{P1}] + [D_{B1}]$$

$$[D_2] = [D_{E2}] + [D_{P2}] + [D_{B2}]$$

$$[D_3] = [D_{E3}] + [D_{P3}] + [D_{B3}] + [D_S] + [D_{SL}]$$

### 4. L形断面壁の構成方程式

L形断面壁の部材座標系と節点力・節点変位の増分および壁脚壁脚の水平力・水平変位の増分を図6のようにとり、

$$\{\Delta F_A\} = \{\Delta Z_1 \ \Delta Z_2 \ \Delta Z_3 \ \Delta X_A \ \Delta Y_A\}^T$$

$$\{\Delta F_B\} = \{\Delta Z_4 \ \Delta Z_5 \ \Delta Z_6 \ \Delta X_B \ \Delta Y_B\}^T$$

$$\{\Delta d_A\} = \{\Delta w_1 \ \Delta w_2 \ \Delta w_3 \ \Delta u_A \ \Delta v_A\}^T$$

$$\{\Delta d_B\} = \{\Delta w_4 \ \Delta w_5 \ \Delta w_6 \ \Delta u_B \ \Delta v_B\}^T$$

とおくと、 $\{\Delta F_A\}$  と  $\{\Delta F_B\}$  の関係は力の釣り合い条件より、

$$\{\Delta F_A\} = -[H] \{\Delta F_B\} \quad \dots(35)$$

ここに、

$$[H] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & h/l_{kX} & h/l_{kY} \\ 0 & 1 & 0 & -h/l_{kX} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -h/l_{kY} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

であり、L形断面壁の部材変形は(34)式で表される  $\{\Delta\bar{\delta}\}$  であるか

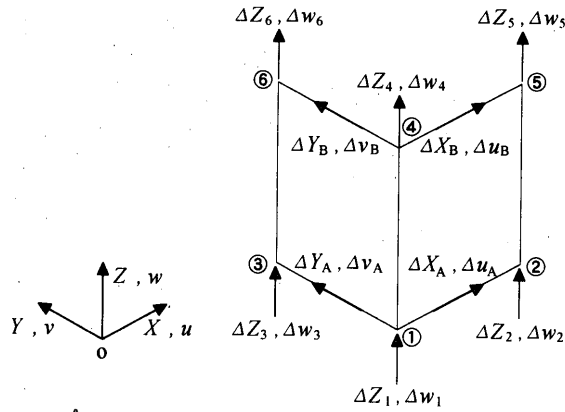


図6 L形断面壁の部材座標

ら  $\{\Delta d_A\}$  と  $\{\Delta d_B\}$  との関係は次式となる。

$$\{\Delta \bar{\delta}\} = -[H]^T \{\Delta d_A\} + \{\Delta d_B\} \quad \dots(36)$$

一方、 $\{\Delta F_B\} = \{\Delta \bar{Q}\}$  とおいている (図2 (b) と図6 参照) ので(34)式より、

$$\{\Delta F_B\} = [D]^{-1} \{\Delta \bar{\delta}\} \quad \dots(37)$$

と表される。したがって、(35)、(36)、(37)式より次式の構成方程式が得られる。

$$\{\Delta F\} = [K] \{\Delta d\} \quad \dots(38)$$

ここに、

$$\{\Delta F\} = \left\{ \begin{matrix} \{\Delta F_A\}^T \\ \{\Delta F_B\}^T \end{matrix} \right\}^T, \{\Delta d\} = \left\{ \begin{matrix} \{\Delta d_A\}^T \\ \{\Delta d_B\}^T \end{matrix} \right\}^T$$

$$[K] = \begin{bmatrix} [H][D]^{-1}[H]^T & -[H][D]^{-1} \\ -[D]^{-1}[H]^T & [D]^{-1} \end{bmatrix}$$

5. 剛床仮定におけるL形断面壁の構成方程式

基準座標系を図7 (a) のようにとると、L形断面壁の向きにより部材座標系は同図(b) に示す4通りの方向がある。基準座標に関する節点カベクトルの増分を  $\{\Delta F\}$ 、変位ベクトルの増分を  $\{\Delta d\}$  とし、座標変換マトリックスを  $[T]$  とすると部材座標系との間には、

$$\{\Delta F'\} = [T]^T \{\Delta F\} \quad \dots(39)$$

$$\{\Delta d\} = [T] \{\Delta d'\} \quad \dots(40)$$

の関係があるので、基準座標系での構成方程式は(38)式より次式を得る。

$$\{\Delta F'\} = [K'] \{\Delta d'\} \quad \dots(41)$$

ここに、

$$[K'] = [T]^T [K] [T]$$

なお、座標変換マトリックス  $[T]$  は、例えば図7 (b) の(ii) の場合には、

$$[T] = \begin{bmatrix} [T_{ii}] & [0] \\ [0] & [T_{ii}] \end{bmatrix}, [T_{ii}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

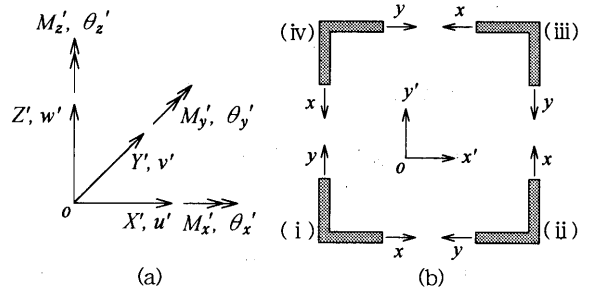


図7 基準座標と部材座標

となる。

さて、多層建物を解析する場合には、床面内を剛と仮定して解析することが一般的であろう。この場合、図8 に示すように任意のj点  $(l_{xj}, l_{yj})$  の床面内変位  $u'_j, v'_j$  は、j点を有する階の重心Oの水平変位  $u'_o, v'_o$  と振れ回転角  $\phi'_o$  によって、次式のように表される。

$$\left. \begin{matrix} u'_j = u'_o - l_{yj} \cdot \phi'_o \\ v'_j = v'_o + l_{xj} \cdot \phi'_o \end{matrix} \right\} \quad \dots(42)$$

また、j点に作用する水平力  $X'_j, Y'_j$  とz軸回りのモーメント  $M'_{zj}$  (本論文のL形断面壁の場合は0) は、O点に関して次式の水平力と振りモーメントになる。

$$\left. \begin{matrix} X'_o = X'_j \\ Y'_o = Y'_j \\ M'_{zo} = M'_{zj} - l_{yj} \cdot X'_j + l_{xj} \cdot Y'_j \end{matrix} \right\} \quad \dots(43)$$

上記の関係を壁頂壁脚の水平変位および水平力に適用すると、基準座標系における  $\{\Delta F'\}$ 、 $\{\Delta d'\}$  と剛床仮定における節点カベクトルの増分  $\{\Delta F'_o\}$ 、変位ベクトルの増分  $\{\Delta d'_o\}$  との関係は次式となる。

$$\{\Delta F'_o\} = [T_o]^T \{\Delta F'\} \quad \dots(44)$$

$$\{\Delta d'_o\} = [T_o] \{\Delta d'\} \quad \dots(45)$$

ここに、

$$\{\Delta F'_o\} = \left\{ \begin{matrix} \{\Delta F'_{oA}\}^T \\ \{\Delta F'_{oB}\}^T \end{matrix} \right\}^T$$

$$\{\Delta F'_{oA}\} = \{\Delta Z'_1 \ \Delta Z'_2 \ \Delta Z'_3 \ \Delta X'_{oA} \ \Delta Y'_{oA} \ \Delta M'_{zoA}\}^T$$

$$\{\Delta F'_{oB}\} = \{\Delta Z'_4 \ \Delta Z'_5 \ \Delta Z'_6 \ \Delta X'_{oB} \ \Delta Y'_{oB} \ \Delta M'_{zoB}\}^T$$

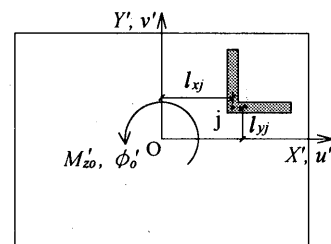


図8 床面内剛の仮定

$$\{\Delta d'_o\} = \left\{ \{\Delta d'_{oA}\}^T \{\Delta d'_{oB}\}^T \right\}^T$$

$$\{\Delta d'_{oA}\} = \{\Delta w'_1 \ \Delta w'_2 \ \Delta w'_3 \ \Delta u'_{oA} \ \Delta v'_{oA} \ \Delta \phi'_{oA}\}^T$$

$$\{\Delta d'_{oB}\} = \{\Delta w'_4 \ \Delta w'_5 \ \Delta w'_6 \ \Delta u'_{oB} \ \Delta v'_{oB} \ \Delta \phi'_{oB}\}^T$$

$$[T_o] = \begin{bmatrix} [T_{oA}] & [0] \\ [0] & [T_{oB}] \end{bmatrix}, [T_{oA}] = [T_{oB}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -l_{yj} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & l_{xj} \end{bmatrix}$$

$l_{xj}, l_{yj}$ : 基準座標における部材座標の原点の  $x, y$  座標

(44), (45)式を(41)式に代入して、剛床仮定における次式の構成方程式を得る。

$$\{\Delta F'_o\} = [K'_o] \{\Delta d'_o\} \quad \dots (46)$$

ここに,

$$[K'_o] = [T_o]^T [K'] [T_o]$$

以上によって、L形断面壁の剛性マトリックス  $[K'_o]$  が得られたので、柱、梁などの他の構造要素と共に構造物全体に組み立てると、剛床仮定における構造物の弾塑性解析を行うことができる。なお、L形断面壁の節点には未知量としての節点回転角および節点モーメントを設定していないが、境界梁が取り付く節点には(2)式に示した境界条件を代入して解析すればよい。あるいは、節点間(図6の④-⑤間、④-⑥間など)に剛な仮想梁を設けて解析してもよからう。

## 6. むすび

本論文では、立体骨組内に含まれる鉄筋コンクリートL形断面

耐震壁の弾塑性部材モデルを提案し、剛床仮定の下における構成方程式を導出した。弾塑性変形は弾性変形と塑性変形との和で表しており、塑性変形は柱脚3カ所における柔性(仮想した塑性柱と塑性バネ)のみで規定されるので解析は比較的簡単である。また、壁板全体が引張となってひび割れが横断する場合には、スリップ変形を考慮する点に特徴があろう。本モデルの適用範囲は、コンクリートが圧壊する以前の圧縮歪みが比較的小さい範囲であり、また、壁板の板厚方向の剛性は考えていないが、L形断面耐震壁の3次元な特性を考慮した建築構造物の弾塑性解析が可能である。本報(その1)は構成方程式のみの説明であるが、次報において境界梁を有するL形断面壁の実験資料に適用して本モデルの妥当性を検証する。

## 参考文献

- 1) 荒井康幸, 柴田拓二: 一般骨組内の開断面立体耐震壁の解析について, 日本建築学会論文報告集, 第313号, pp.48-57, 昭和57年3月
- 2) Vlasov, V.Z. 著, 奥村敏恵, 他邦訳: 薄肉弾性ばりの理論, 技報堂, 1967
- 3) 荒井康幸, 柴田拓二: 開断面耐震壁を含む建物の静的および動的解析(一般骨組内の開断面立体耐震壁の解析について その3), 日本建築学会構造系論文報告集, 第365号, pp.156-164, 昭和61年7月
- 4) カイラッラ・フォアド, 荒井康幸: Numerical model to predict the 3-dimensional characteristics of reinforced concrete L-shaped shear walls Part I "Theoretical model", 日本建築学会構造系論文集, 第493号, pp.73-81, 1997.3
- 5) 荒井康幸, 溝口光男, 小島雅樹, 伊藤政利: 鉄筋コンクリートL形断面耐震壁の弾塑性部材モデル(その2 モデルの検証), 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp.129-136, 2001.5

(2001年6月6日原稿受理, 2001年10月16日採用決定)