

[185] 上下地震動が RC 造有壁立体架構の動的弾性挙動に及ぼす影響

正会員 ○菊池健児（大分大学工学部）
 正会員 吉村浩二（大分大学工学部）
 篠田広明（大分大学大学院）

1. まえがき

中低層鉄筋コンクリート造（以下RC造と略す）架構の現行の耐震設計法では、地震動の上下成分に対する検討は一般に行われていない。しかしながら、近年の地震被害の中には上下方向地動の影響があったと思われる事例も幾つか報告されていることや、地震動の水平成分よりも大きな最大加速度をもつ上下成分の加速度記録が得られていることなどを考慮すると、上下方向地動が中低層RC造架構の地震時挙動に及ぼす影響について検討する必要があると考える。ところで、上下地震動が建築構造物に及ぼす影響に関する研究は近年多く行われるようになって来たが中低層RC造有壁架構を対象とした検討例は少ない。

本研究はこれらの架構を対象としており、平面架構モデルに対してはその上下方向の固有振動特性や水平・上下方向地動を受ける場合の動的弾性挙動を既に検討し、耐震壁が架構の上下方向振動特性に大きな影響を与えることなどを明らかにした¹⁾。本論では耐震壁を有する立体架構モデルを用いて同様の検討を行っている。なお、本論は弾性解析であるために架構の地震時挙動を推定する上で限界があるが、1次設計（許容応力度設計）に用いる地震荷重に上下地震動の影響を考慮する必要性の検討資料や、塑性域における検討を行う際の基礎的資料になると考えている。

2. 解析モデル

解析の対象とした立体架構は図-1に示す形状の6層3×3スパン架構である。立体架構内の各構面は無壁構面および有壁構面で構成され、有壁構面の壁配置は図-2中に示す6種類のいずれかをとる。文献1でこれらの構面を平面架構として解析した結果、壁配置形式L1, M1では最低次の上下方向振動モードが1階のどの柱もほぼ均等に伸縮するモードとなり、L2, M2および無壁平面架構は内柱の伸縮が外柱に較べ顕著に現れる。また、L3, M3は独立柱である3通り内柱の伸縮が他の柱に較べ極めて大きくなっている。本論ではこれらの有壁構面を図-2に示すように配置した有壁立体架構（24種類）

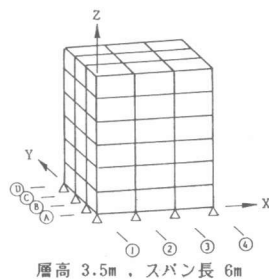


図-1 立体架構モデル

および無壁立体架構を設定した。架構名は有壁構面の配置形式名-有壁構面名で表す（無壁立体架構の架構名は"0"とする）。有壁構面の配置形式名の最初の1文字はX方向、次の1文字はY方向の有壁構面の配置形式を表す。EおよびIはそれぞれ外側または内側の2構面に有壁構面が配置されており、E'およびI'はA通りまたはB通りにのみ有壁構面が配置されている。また0はその方向がすべて無壁構面であることを示す。タイプE'0およびI'0は建物のねじれが生じる架構である。一方、EE, IE, IIはY方向にも有壁構面を配置した架構で、直交方向構面の壁配置の影響を検討するために設定した。部材断面寸法は全架構について、柱の幅・せいが60cm、はりの幅45cm、せい60cm（基礎ばりのせい100cm）、壁厚18cmとした。架構の重量分布（図-3）の決定にあたっては、文献1の重量分布の仮定と同様にY方向に小ばりが1本づつ配置されているとし、X方向はりの中間に質点をもつ分布とした。ただし、X方向はりが耐震壁の付帯りとなる場合には中間節点を設けず、その重量を左右の柱・はり接合部節点に均等に振り分けた。

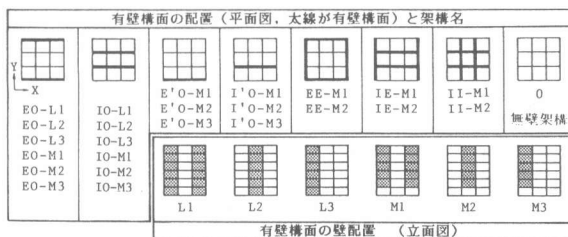


図-2 立体架構の有壁構面配置および有壁構面の壁配置

図-3は架構の重量分布を示す。質量は各節点に均等に振り分けられ、単位はtFである。図中の記号は質量を表し、●は15.0、●は24.6、●は12.3、●は6.15を示す。X方向はりの中間に質点をもつ分布とした。ただし、X方向はりが耐震壁の付帯りとなる場合には中間節点を設けず、その重量を左右の柱・はり接合部節点に均等に振り分けた。

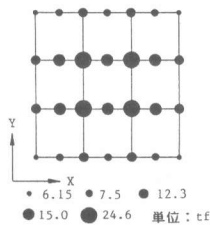


図-3 重量分布

3. 立体架構の剛性マトリックス

本解析で用いる立体架構の剛性マトリックスを作成するための基本的な解析仮定は次の通りである。

(1)床スラブはその面内に剛とする(はりの軸伸縮は生じない)。(2)柱・はり部材は構面内の曲げ変形、せん断変形および柱・はり接合部の剛域を考慮するが、ねじり剛性は無視する。また、柱部材には軸方向変形を考慮する。床スラブの協力幅によるはりの曲げ剛性の増大は考慮しない。(3)耐震壁の剛性評価には富井・山川の多連耐震壁の剛性マトリックス³⁾を用いる。(4)各節点にはX, Y, Z軸まわりのモーメント外力(または慣性力)は働かない。

上記の仮定(1),(4)を用いて各構面の平面架構としての剛性マトリックスを式(1a),(1b)のように縮合する(添字k, lはそれぞれX, Y方向構面の位置(通り)を表す)。ただし、柱軸方向剛性はその重複を調整するため、XまたはY方向いずれかの構面でのみ算入する。

$$\begin{Bmatrix} X \\ Z \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} k \\ k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix}_k \dots(1a) \quad \begin{Bmatrix} Y \\ Z \end{Bmatrix}_l = \begin{bmatrix} l \\ l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ w \end{Bmatrix}_l \dots(1b)$$

ここに、 $\{x\}$, $\{y\}$, $\{z\}$ = 各構面各層のX, Y方向水平外力および各節点の鉛直外力

$\{u\}$, $\{v\}$, $\{w\}$ = 各構面各層のX, Y方向水平変位および各節点の鉛直変位

剛床仮定を用いると、各構面各層の水平変位 $\{u\}_k$, $\{v\}_l$ と立体架構各層床スラブ上の任意の点(代表点と呼ぶ)のX, Y方向水平変位 $\{U_o\}$, $\{V_o\}$ と鉛直軸まわりの床スラブの回転角 $\{\theta_{zo}\}$ との関係はマトリックス $[A]_k$, $[A]_l$ を介して次式で表わせる。

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}_k = [A]_k \begin{Bmatrix} U_o \\ V_o \\ \theta_{zo} \end{Bmatrix} \dots\dots(2a) \quad \begin{Bmatrix} v \\ w \end{Bmatrix}_l = [A]_l \begin{Bmatrix} U_o \\ V_o \\ \theta_{zo} \end{Bmatrix} \dots\dots(2b)$$

また、各構面にある節点の鉛直変位 $\{w\}_k$, $\{w\}_l$ と立体架構内の基礎節点を除く全節点の鉛直変位ベクトル $\{W\}$ との関係はマトリックス $[B]_k$, $[B]_l$ を介して次式で表わせる。

$$\begin{Bmatrix} w \end{Bmatrix}_k = [B]_k \{W\} \dots\dots(3a) \quad \begin{Bmatrix} w \end{Bmatrix}_l = [B]_l \{W\} \dots\dots(3b)$$

各構面各層に作用する水平外力は式(4a)により各層代表点に作用するX方向水平外力 $\{X_o\}$, Y方向水平外力 $\{Y_o\}$ および鉛直軸まわりのモーメント外力 $\{M_{zo}\}$ に置き換えることができる。また、立体架構各節点に作用する鉛直外力 $\{Z\}$ は、各構面にある各節点の鉛直外力の合力として次式で表わすことができる。なお、s, tはそれぞれX方向またはY方向構面の数を表す。

$$\begin{Bmatrix} X_o \\ Y_o \\ M_{zo} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^s [A]_k^T \{x\}_k + \sum_{l=1}^t [A]_l^T \{y\}_l \dots\dots(4a)$$

$$\{Z\} = \sum_{k=1}^s [B]_k^T \{z\}_k + \sum_{l=1}^t [B]_l^T \{z\}_l \dots\dots(4b)$$

式(2a)~(3b)を式(1a),(1b)に代入し、さらにこれらの式を式(4a),(4b)に代入しまとめると式(5)が得られる。式(5)が本解析で用いる立体架構の剛性方程式である。

$$\{P\} = [K] \{\Delta\} \dots\dots(5)$$

ここに、 $\{P\} = \{X_o^T, Y_o^T, M_{zo}^T, Z^T\}^T$

$\{\Delta\} = \{U_o^T, V_o^T, \theta_{zo}^T, W^T\}^T$

4. 固有値解析

各床位置での水平2方向慣性力および鉛直軸まわりの回転方向慣性力、および各節点の鉛直方向慣性力を考慮して固有値解析を行ない²⁾、固有周期および刺激関数を求めた。

固有振動形の例として、Type I0-M1とIE-M1の2架構の上下方向振動が顕著に現れる代表的な振動形を図-4に示す。本論では上下方向振動が顕著に現れる最低次のモード(Type I0-M1では10次、IE-M1では7次)を上下方向1次と定義する。解析に用いた架構の上下方向1次はすべて図に見られるような柱軸伸縮のモードになっていた。図-5は全架構の上下方向1次とした次数の上下方向入力に対する刺激関数を屋根床部分について示している。図中、太線および網掛けはその位

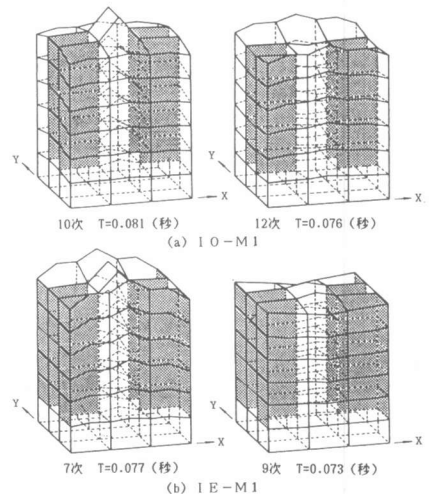


図-4 振動形の例

置に壁が存在することを表している。図より、立体架構の上下方向振動モードは平面架構の場合と同様に壁配置形式の相連によりかなり異なることがわかる。Y方向構面がすべて無壁架構であるE0, I0, E'0, I'0タイプについてみると、Type I0-L1, I0-M1ではX方向外側構面と内側構面の平面架構としての上下方向1次固有周期の逆転あるいは接近により(図-6参照)外側構面ののびが見られるが、その他の架構では外側構面より質量の大きい内側構面の柱軸伸縮が顕著に現れている。また、これらの構面のモードは文献1に示した平面架構のモードと良く対応していた。一方、両方向に耐震壁が配置されたEE, IE, IIタイプの架構では、他のタイプに比べ各構面間の連成が強まっている。

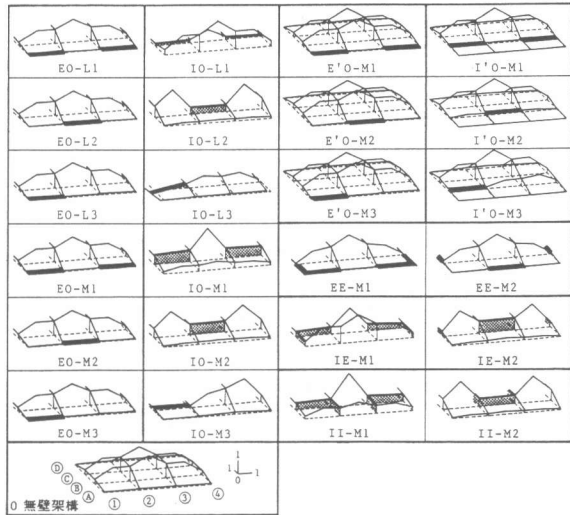


図-5 上下方向入力に対する刺激関数(上下方向1次)

各立体架構の上下方向1次固有周期(T_v)を図-6に示す。図中には、X方向構面をそれぞれ独立な平面架構とみなした場合の外側構面および内側構面の T_v をあわせて示している。図より、 T_v は壁配置により変動が大きいことが分かる。またY方向の構面がすべて無壁架構の T_v は、X方向の外側または内側構面の平面架構としての T_v のいずれかとよく対応しており、これら立体架構の T_v は平面架構の解析より推定できる。

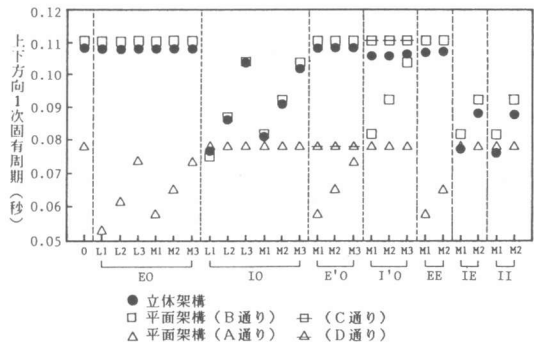


図-6 上下方向1次固有周期

なお、本解析モデルの T_v は柱・はり接合部のみに質点を設けた解析モデルの T_v に対して1割前後長めの値になっていた。

5. 動的応答解析

動的応答解析では地震波にEl Centro 1940を用い、そのNS成分をX方向に、UD成分をZ方向にそれぞれ1方向入力した場合およびこれらを同時入力した場合の3ケースを行った。解法にはモード合成法を用い(0.02秒より長い固有周期をもつモードを考慮)、振動方程式の数値積分の時間刻みは0.002秒、継続時間は10秒、減衰定数はすべてのモードに対し5%とした。なお、動的応答解析は有壁構面の壁配置がM1, M2またはM3である18架構および無壁架構について行った。

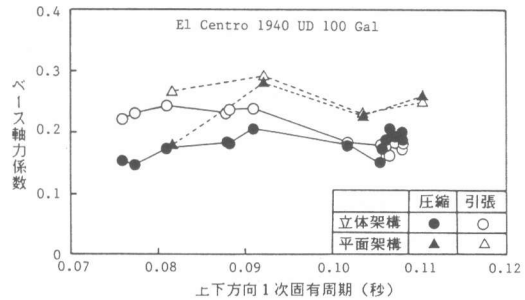


図-7 ベース軸力係数

各時刻の1階柱軸力の総和の最大値(ベース軸力)を建物総重量で除した値をベース軸力係数と定義し、上下方向1次固有周期との関係を図-7に示す。最大加速度100Galの上下方向地動(El Centro 1940 UD成分)が1階の鉛直方向応答量に及ぼす影響は、ベース軸力係数にして0.15~0.24になっている。また立体架構は平面架構よりやや低い値となっている。これは、各柱軸力が最大になる時刻が異なるためベース軸力は各柱軸力の最大値の総和より小さくなるが、その傾向が立体架構でより大きいためである。

最大加速度100Galの上下方向成分のみにより1階柱に生じる圧縮軸力または引張軸力の最大値(dN_u)をその柱の長期軸力(N_L)で除した値の典型的な例を図-8に示す。ここで、長期柱軸力は設計で通常よく用いられる柱の負担面積より算出する方法により求めた(隅柱、側柱および中柱の N_L の比は1:2:4)。

図より、 dN_u/N_L の値は同じ位置の柱でも壁配置により大きく異なり、最も大きくなる柱で長期軸力の44%程度の値になる。図中に●、○印で示した値はX方向内側通りを平面架構として動的解析して求めた最大軸力であるが、Y方向がすべて無壁構面であるE0、I0、E'0、I'0タイプおよび無壁架構の場合には平面架構の結果とほぼ一致しており、平面架構の解析より軸力応答の予測が可能であることを示している。一方、Y方向にもM1の有壁構面が配置された架構では配置されない架構に比べ(例えばIE-M1とI0-M1の比較)、X方向内側構面柱の軸力が減少し、外側構面柱の軸力が増大している。このような2方向壁配置の架構の場合には立体的な配慮が必要であろう。

地震動の水平および上下成分を同時に入力した場合に上下成分の影響がどの程度現れるかを1階柱最大圧縮軸力について検討した。図-9は水平(X)1方向および水平(X)・上下2方向同時入力の場合の1階柱動的な最大圧縮軸力(dN_H 、 dN_{H0})と長期軸力 N_L との和をベースシヤ係数が0.2となる逆三角形静的水平外力による圧縮軸力(sN_H)と N_L の和で除した値を示している。直上に耐震壁がない内柱(これらの柱では水平荷重時軸力が小さい)に同時入力時の上下成分の影響が大きく見られるが、その他の柱では上下成分の影響はほとんど現れない。これは、文献1、2に示した時刻歴に見られるように水平成分により軸力が最大となる時刻では上下成分による軸力はあまり大きくなかったためである。なお、上下方向地動が建物のねじれや柱の曲げモーメントに及ぼす影響はほとんど見られなかった。

6. 結語

RC造6層有壁立体架構に対する解析の結果を要約すると、(1)有壁立体架構の上下方向振動特性は架構内の壁配置形式により大きく異なる。(2)一方方向がすべて無壁構面で構成される立体架構の上下方向地動による応答は平面架構としての解析結果よりほぼ推定できる。(3)耐震壁が配置されることによりその直下の柱の上下方向地動による最大軸力が大きく変化する。

なお、塑性域における検討などについては今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) 吉村、菊池：地震動の上下成分が中低層鉄筋コンクリート造有壁平面架構の動的弾性挙動に及ぼす影響、日本建築学会論文報告集、第344号、昭和59年10月
- 2) 菊池、篠田、吉村：水平および上下方向地動を受けるRC造有壁立体架構の動的挙動に関する研究(その2)(その3)、日本建築学会九州支部研究報告、第29号、昭和61年3月
- 3) 山川、富井：耐震壁の剛性マトリックス(その1)(その2)、日本建築学会中国・九州支部合同研究報告、第6号、昭和59年3月

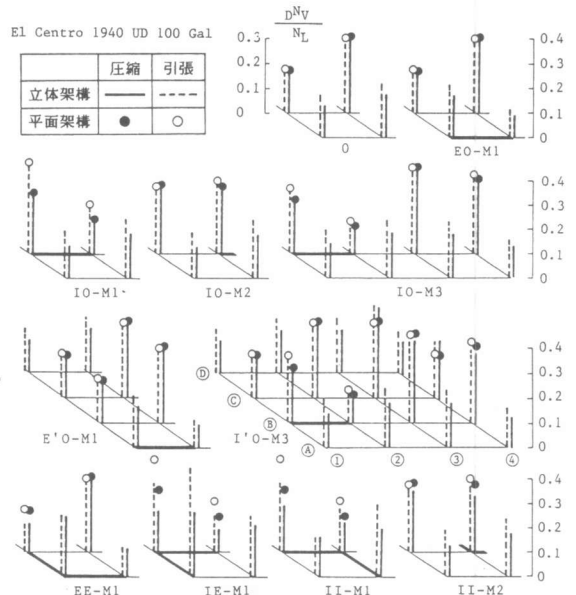


図-8 上下方向地動による1階柱最大軸力

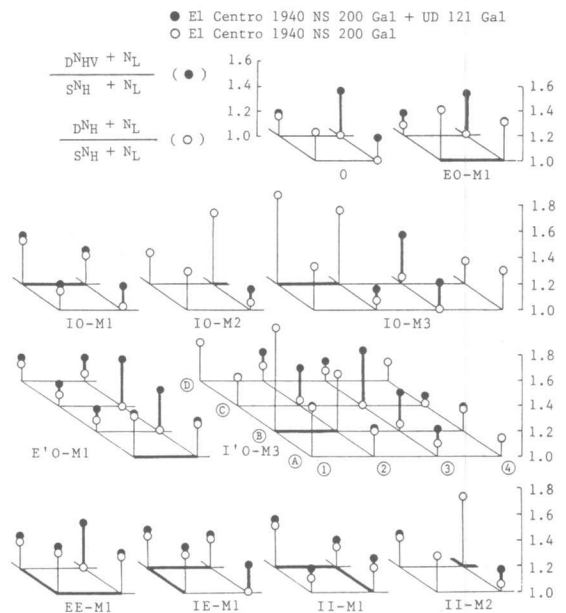


図-9 水平(X)・上下同時入力時に1階柱最大圧縮軸力に及ぼす上下方向地動の影響