

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	木質系平面異種混構造の変位モード予測法
Title(English)	
著者(和文)	山崎義弘, 坂田弘安
Authors(English)	Yoshihiro Yamazaki, Hiroyasu Sakata
出典(和文)	日本地震工学会第12回年次大会梗概集, Vol. , No. , pp. 1-10
Citation(English)	, Vol. , No. , pp. 1-10
発行日 / Pub. date	2016, 9



木質系平面異種混構造の変位モード予測法

山崎義弘¹⁾、坂田弘安²⁾

1) 正会員 東京工業大学、助教 博士（工学）

e-mail : yamazaki.y.ai@m.titech.ac.jp

2) 正会員 東京工業大学、教授 工博

e-mail : sakata.h.aa@m.titech.ac.jp

要 約

中大規模木質構造を実現する一つの方法として、鉄筋コンクリート造等のコアを設けた平面異種混構造があるが、その複雑な振動モード形状や異種構造間の接合部に生じる応力の評価には課題がある。本論では、筆者らの既提案の理論を展開し、様々な壁配置をもつ平面異種混構造の変位モード予測法を新たに提案する。なるべく少ないパラメータで様々な壁配置を表現するとともに、それらを用いた簡便な予測式を導出し、質点系モデルの固有値解析結果と比較することで、良好な精度であることを示す。

キーワード： 中大規模木造、連続体モデル、振動モード、動的挙動

1. はじめに

環境負荷低減や国産材利活用を目的として、中大規模木質構造の建設が推進されている。低層で平面規模が大きい場合には、耐震性・耐火性を向上させるために、建物の一部を鉄筋コンクリート造等でコア化した平面異種混構造を採用するケースがある。しかし、平面異種混構造は既存の設計指針¹⁾でも対象外とされており、複雑な振動モード形状や異種構造間の接合部に生じる応力の評価等、様々な課題も指摘されている²⁾。

そこで筆者らは、まずは木造部分の耐力壁が均一かつ密に配置された場合を想定して、木質系平面異種混構造を連続体モデルに置換し、振動特性や地震力分布の定式化を行った³⁾。また、1/3縮尺模型の振動台実験により、地震時挙動の把握も行った⁴⁾。本論では、様々な壁配置をもつモデルに対して適用できるように、文献3で提案した理論を展開し、新たな変位モード予測法を提案する。なるべく少ないパラメータで様々な壁配置を表現するとともに、それらを用いた簡便な予測式を導出する。

2. 変位モード予測式の導出

2.1 既往理論

まずは文献3で対象とした、剛性の等しい耐力壁が均一かつ密に配置された場合を想定した、均一せん断板の理論を示す。本理論は、木造部分とコア部分の固有周期が十分離れていることを前提とし、コア部分を剛として、木造部分の動的挙動を再現するものである。

図1のように、耐力壁や水平構面が連続せん断バネで表され、質量も均一に分布しているとすれば、

二方向に異なるせん断弾性係数をもつ連続体、すなわち均一せん断板にモデル化できる。その支配方程式は次式のように表される。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + G_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

$$G_x = l_f \sum_y k_f / (H - h/2) , \quad G_y = h \sum_x k_w / (L_f - l_f/2) \quad (2a,b)$$

ここに、 ρ は厚さを考慮した密度、 G_x, G_y はそれぞれ水平構面と耐力壁の剛性を反映したせん断弾性係数である。 k_f は水平構面 1 スパンあたり（長さ l_f ）のせん断剛性、 k_w は耐力壁などの鉛直構面の 1 構面あたり（高さ h ）のせん断剛性であり、 L_f, H はそれぞれ建物幅（水平構面全長）と建物高さである。

$x=0$ における片側コアを考慮し、解の固有関数 $\phi_{mn}(x, y)$ と固有円振動数 ω_{mn} を次式のように得る。

$$\phi_{mn}(x, y) = \sin \frac{(2m-1)\pi x}{2L_f} \sin \frac{(2n-1)\pi y}{2H} , \quad \omega_{mn} = \sqrt{\left(\frac{(2m-1)\pi}{2L_f} \right)^2 \frac{G_x}{\rho} + \left(\frac{(2n-1)\pi}{2H} \right)^2 \frac{G_y}{\rho}} \quad (3a,b)$$

ここに、 m, n はそれぞれ x 方向・ y 方向の固有関数のモード次数に相当する。

文献 3 では $x=L_f$ や $y=H$ で自由端としたため、これらの位置の微分係数がゼロになるという境界条件から平易な固有関数を得ることができたが、適用範囲として耐力壁の配置に制約があった。

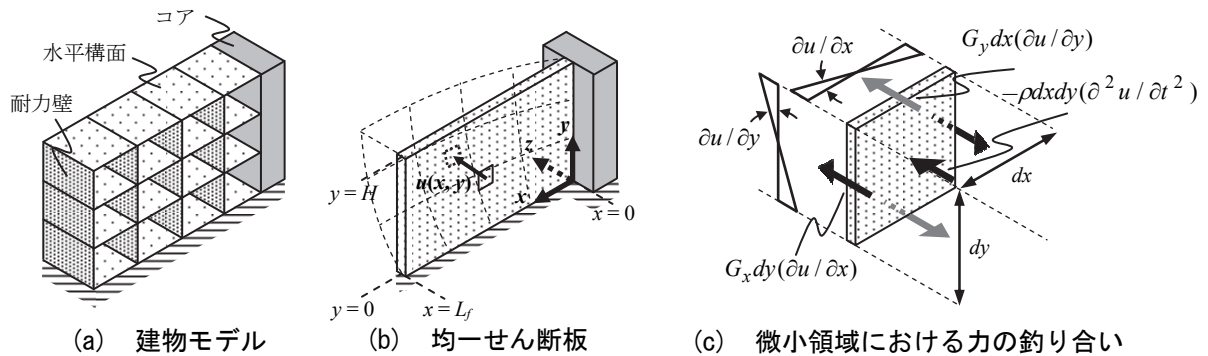


図1 均一せん断板によるモデル化³⁾

2.2 平面異種混構造の分類

建築計画上の理由から、図 2 のように建物内部の耐力壁を減らし、外壁面に耐力壁を集中させるというプランも多いと考えられ、図 3 のように均一せん断板の端部に集中せん断バネを与えたモデルを考慮する。このバネは幅がゼロで単位長さあたりのせん断剛性を K_x, K_y とする。以下では K_x, K_y のいずれかがゼロでない場合をタイプ I、いずれもゼロでない場合をタイプ II とする。なお、後述するがタイプ II においては $G_y \neq 0$ か $G_y = 0$ かでも区別をする。

2.3 タイプ I の変位モード予測理論

本節では $K_x = 0, K_y \neq 0$ として進める。タイプ I の固有関数 $\phi(x, y)$ において、 $\phi(x, y) = \phi_x(x) \phi_y(y)$ のような変数分離が可能であるとすれば、境界条件である式(4a,b)を満たす固有関数として式(4c)が考えられる。

$$\phi(0, y) = \phi(x, 0) = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{y=H} = 0, \quad \phi(x, y) = \phi_0 \sin \theta_x x \sin \frac{\pi y}{2H} \quad (4a-c)$$

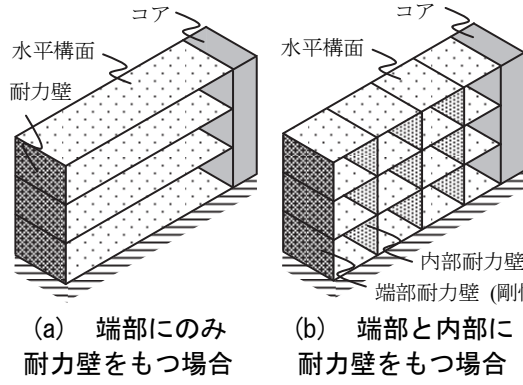


図2 本論で対象とする建物モデル

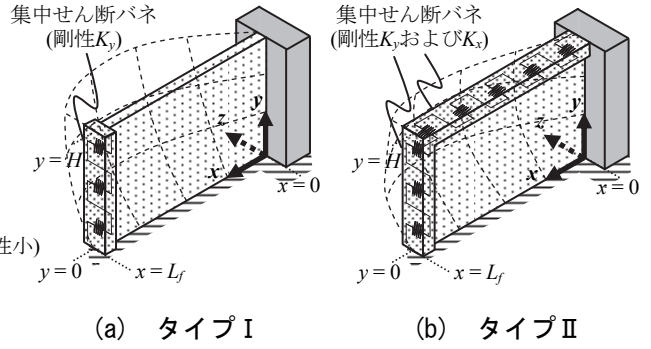


図3 本論で扱うモデルの分類

$x = L_f$ の集中せん断バネの位置での境界条件として式(5a)を与えると、式(5b)が得られる。

$$K_y \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \Big|_{x=L_f} = G_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=L_f}, \quad \pi^2 K_y \tan(\theta_x L_f) = -4H^2 G_x \theta_x \quad (5a,b)$$

上式の三角方程式の代数解は得られないため、以下では1次モードのみを対象として近似解を導出する。

$x = L_f$ に集中せん断バネが無い場合 ($K_y = 0$) は、文献3の均一せん断板の解と一致し、 $x = L_f$ の集中せん断バネが剛な場合 ($K_y = \infty$) は、両端にコアを持つモデルに一致する。集中せん断バネの剛性が有限値の場合は、これらの線形結合で表されると考える。すなわち、それぞれの固有関数を ϕ_{NN} , ϕ_{NR} とし、次式のような試行関数 ϕ_a を導入する。

$$\begin{aligned} \phi_a(x, y) &= \phi_{NN}(x, y) + \phi_{NR}(x, y) \\ &= \phi_{NN0} \sin \frac{\pi x}{2L_f} \sin \frac{\pi y}{2H} + \phi_{NR0} \sin \frac{\pi x}{L_f} \sin \frac{\pi y}{2H} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)における係数 ϕ_{NN0} , ϕ_{NR0} をレイリー・リッツ法⁵⁾を用いて決定すれば、大まかな変位モードを近似できると考えられる。ただし、ここで得られる近似解は式(5b)の境界条件を必ずしも満たさない。係数 ϕ_{NN0} , ϕ_{NR0} は、式(7b)の固有値問題を形成する。

$$\phi_a^T = \{\phi_{NN0}, \phi_{NR0}\}^T, \quad -\omega^2 \mathbf{m} \phi_a + \mathbf{k} \phi_a = \mathbf{0} \quad (7a,b)$$

$$\mathbf{m} = \frac{\rho}{2} \begin{bmatrix} \frac{HL_f}{2} & \frac{4HL_f}{3\pi} \\ \text{sym.} & \frac{HL_f}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{k} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} G_x \frac{\pi^2 H}{8L_f} + G_y \frac{\pi^2 L_f}{8H} + K_y \frac{\pi^2}{4H} & G_x \frac{\pi H}{3L_f} + G_y \frac{\pi L_f}{3H} \\ \text{sym.} & G_x \frac{\pi^2 H}{2L_f} + G_y \frac{\pi^2 L_f}{8H} \end{bmatrix} \quad (8a,b)$$

ここで、式を簡素化するために以下のようなパラメータを導入する。

$$\beta = \frac{G_y / H^2}{G_x / L_f^2}, \quad \gamma_y = \frac{K_y / (H^2 L_f)}{G_x / L_f^2} = \frac{K_y L_f}{G_x H^2}, \quad \gamma_x = \frac{K_x / (L_f^2 H)}{G_x / L_f^2} = \frac{K_x}{G_x H} \quad (9a-c)$$

β は異方性パラメータと呼ぶもので、耐力壁と水平構面の堅さの相対バランスを表す³⁾。 $x = L_f$ の集中せ

ん断バネについては K_y を L_f で均せば同様の扱いが可能となり、これを式(9b)のように γ_y で表す。次節で必要となるが、 $y=H$ の集中せん断バネも同様に K_x を H で均して扱い、 γ_x と表す。すなわち、タイプ I は $\gamma_x = 0$ を意味する。本論で取り扱う平面異種混構造の変位モードは、 $\beta, \gamma_y, \gamma_x$ の 3 種の無次元パラメータによって表すことができる。これらを用いて式(7b)の固有方程式を解けば、 ϕ_{NN0}, ϕ_{NR0} とともに固有円振動数の近似解 ω も得られる。ただし、2 自由度系のため二つのモードが得られるが、常に 1 次モード（最小固有値）を採用する。

ところで、厳密解を表す式(5b)は、

$$\frac{\theta_x L_f}{\tan(\theta_x L_f)} = -\frac{\pi^2}{4} \gamma_y \quad (10)$$

と書き換えられる。これより、厳密解における振動数 θ_y 、すなわち変位モードは γ_y のみで決定されることが分かる。レイリー・リッツ法を用いた式(7b)を解いて求まる変位モードの近似解も、 γ_y のみで決定されることを確認している。

そこで、図4に示すように式(7b)を解いて得られる $\gamma_y - \phi_{NR0}/\phi_{NN0}$ 関係にほぼ線形の関係が見られたため、 $\gamma_y = 0 \sim 1$ における関係から最小二乗法より以下の近似式を得た。

$$\frac{\phi_{NR0}}{\phi_{NN0}} \approx 0.63 \gamma_y \quad (11)$$

$\gamma_y = 0 \sim 1$ では非常に高い精度を有するものの、 $\gamma_y > 1$ では ϕ_{NR0}/ϕ_{NN0} を低めに評価する傾向にあるが、そのようなケースでは ϕ_{NR0}/ϕ_{NN0} 自体が大きく、 ϕ_{NR0} の成分が卓越しているため、多少の誤差は問題とならない。以下では、式(7b)を解く代わりに式(11)から得る変位モードを用いる手法を提案するが、その場合、固有円振動数 ω は求まらない。

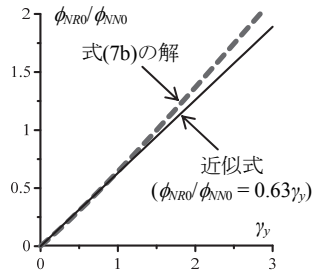


図4 タイプ I の変位モード近似式の精度

2.4 タイプ II の変位モード予測理論

タイプ I の式(5a)に加え、 $y=H$ での集中せん断バネと、集中せん断バネの交差部 $(x, y) = (L_f, H)$ での境界条件として次式を与える。

$$K_x \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x^2} \Big|_{y=H} = G_y \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \Big|_{y=H}, \quad K_y \frac{\partial \phi_1}{\partial y} \Big|_{x=L_f, y=H} = -K_x \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \Big|_{x=L_f, y=H} \quad (12a,b)$$

ただし、これら全てを満たす固有関数は一般に $\phi(x, y) = \phi_x(x)\phi_y(y)$ のような変数分離の形で表すことができない。また、建物内部に耐力壁が無い場合、すなわち $G_y = 0$ の場合には連続体モデルとしての振る舞いも現れにくくなるため、以下では $G_y \neq 0$ と $G_y = 0$ で区別して予測法を示す。

1) $G_y \neq 0$ の場合

まずは変数分離ができると仮定して前節と同様の手法により近似解を求め、そこで発生する誤差を解消する修正項を加えることを考える。解が次式のように表されたとする。

$$\phi_a(x, y) = \left(\phi_{NN0} \sin \frac{\pi x}{2L_f} + \phi_{NR0} \sin \frac{\pi x}{L_f} \right) \left(\phi_{RN0} \sin \frac{\pi y}{2H} + \phi_{RR0} \sin \frac{\pi y}{H} \right) \quad (13)$$

ここに、 ϕ_{NN0} , ϕ_{NR0} は前節の手法で求まる $K_x = 0$ のときのモード、 ϕ_{RN0} , ϕ_{RR0} は $K_y = 0$ とした上で (x, y) を反転させたモードであり、前節と同様に以下のように近似できる。

$$\frac{\phi_{RR0}}{\phi_{RN0}} \approx 0.63 \gamma_x / \beta \quad (14)$$

式(13)で得られるモードは、式(5a),(12)の境界条件を考慮していないため、特に集中せん断バネのある $x = L_f$, $y = H$ で大きなエラーが生じる。そこで、式(13)の近似モード ϕ_a に修正モード ϕ'_a を加え、式(12b)の境界条件を満たすようにすることを考える (図5)。これは、 ϕ_a の $(x, y) = (L_f, H)$ で生じる不釣り合い力を解消することを表し、その物理的意味合いから、 ϕ'_a とは $(x, y) = (L_f, H)$ に静的集中荷重を与えたときのモードと考える。ただし、 ϕ'_a の厳密解を求めることは容易でないため、以下のように近似する。

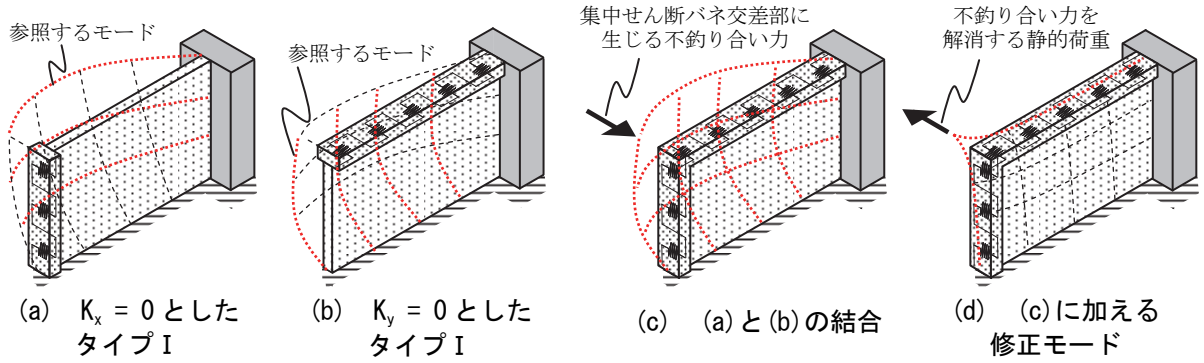


図5 タイプII ($G_y \neq 0$) の変位モード予測の考え方

まず、 ϕ'_a が次式のような指数関数で表されたとする。

$$\phi'_a(x, y) = \phi'_{a0} e^{\nu_x(1-x/L_f)} e^{\nu_y(1-y/H)} \quad (15)$$

式(15)は $\phi'_a(L_f, H) = \phi'_{a0}$ を頂点として $x = 0, y = 0$ に向かって減衰していく形状を表す。 ν_x , ν_y はそれぞれ x 方向・ y 方向への減衰の速さを表す無次元量であり、式(5a), 式(12a)の境界条件に代入して連立方程式を解くことで、次式のように求める。

$$\nu_x = -\sqrt[3]{\frac{G_x G_y^2}{K_x^2 K_y}} = -\sqrt[3]{\frac{\beta^2}{\gamma_x^2 \gamma_y}} \quad , \quad \nu_y = -\sqrt[3]{\frac{G_x^2 G_y}{K_x K_y^2}} = -\sqrt[3]{\frac{\beta}{\gamma_x \gamma_y^2}} \quad (16a, b)$$

式(15)から分かるように、 ν_x , ν_y がある程度大きくないと、 $\phi'_a(L_f, H)$ からの振幅の減衰が鈍く、 $x = 0$ や $y = 0$ で式(15)がほぼゼロとならずに、固定端での境界条件が満たされない。そこで、やや強引ではあるが

近似解は次式のように修正し、 ϕ'_{a0} を求めることにする。

$$\phi_1(x, y) = \phi_a(x, y) + \phi'_a(x, y) \frac{xy}{L_f H} \quad (17)$$

すなわち、 ϕ'_a に $xy/(L_f H)$ を乗じることで、 $(x, y) = (L_f, H)$ から $x=0, y=0$ に向けて線形的にゼロに収束させている。これは、 ϕ'_a を考慮せず、 ϕ_a のみを用いた場合に、 $(x, y) = (L_f, H)$ 近傍に誤差が集中することを勘案している。上式を式(12b)に代入し、次式を得る。

$$\phi'_{a0} = \pi \frac{\gamma_y \phi_{NN0} \phi_{RR0} + \gamma_x \phi_{NR0} \phi_{RN0}}{\gamma_y(1-\nu_y) + \gamma_x(1-\nu_x)} \approx 0.63\pi \frac{\gamma_y \gamma_x (1+1/\beta)}{\gamma_y(1-\nu_y) + \gamma_x(1-\nu_x)} \quad (18)$$

2) $G_y = 0$ の場合

建物内部に耐力壁が無いと、 $G_y = 0, \beta = 0$ となり、式(5a),(12a)で ν_x, ν_y が求まらない。そこで、まずは $K_x = 0 (\gamma_x = 0)$ としたタイプ I を考慮し、そこで生じる誤差を解消して解に近づけることを考える(図 6)。

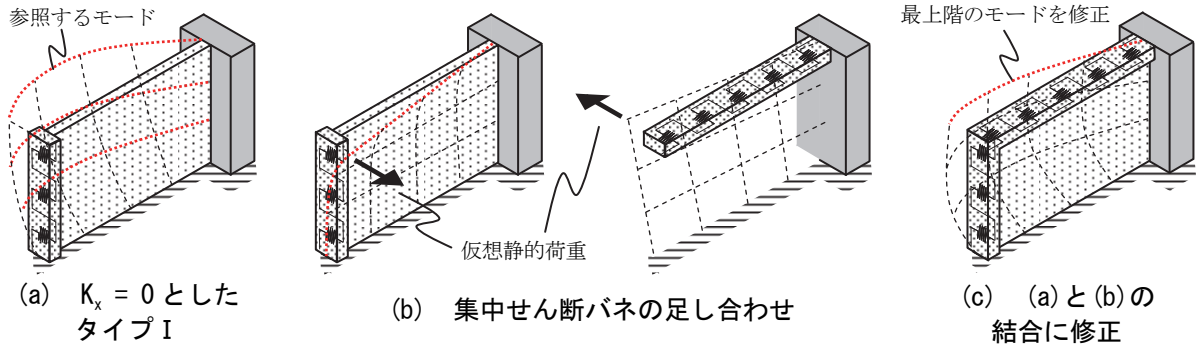


図6 タイプII ($G_y=0$) の変位モード予測の考え方

タイプIの変位モード ϕ_a (式(6))に対し、 $y=H$ の集中せん断バネを反力とした仮想静的荷重による変位 ϕ'_a を減じる(図6(b))。 ϕ_a, ϕ'_a はそれぞれ次式のように表されたとする。

$$\phi_a(x, y) = \left(\phi_{NN0} \sin \frac{\pi x}{2L_f} + \phi_{NR0} \sin \frac{\pi x}{L_f} \right) \sin \frac{\pi y}{2H}, \quad \phi'_a(x, y) = \phi'_{a0} \frac{x}{L_f} e^{\nu_y(1-y/H)} \quad (19a,b)$$

$G_y \neq 0$ の場合と異なり、 $x < L_f$ では x 方向に線形に減衰すると考える。 $x = L_f$ における境界条件(式(5a))に代入すれば、 ν_y が次式のように求まる。

$$\nu_y = -\sqrt{\frac{G_x H^2}{K_y L}} = -\frac{1}{\sqrt{\gamma_y}} \quad (20)$$

ϕ'_a の振幅 ϕ'_{a0} は図6(b)の両モデルの $(x, y) = (L_f, H)$ における力の釣り合いと変形適合を考慮し、式(12b)に ϕ'_a を代入して次式のように求める。ただし、 $G_y \neq 0$ の場合と同様に、 ϕ'_a に y/H を乗じておく。

$$\phi'_{a0} = \frac{\gamma_x}{\gamma_y + 2\gamma_x} \phi_{NN0} \quad (21)$$

以上で求めた全モードは $(x, y) = (L_f, H)$ における力の釣り合いを満たさないため、改めて式(12b)に代入し、 $y = H$ のモードのみ次式のように修正を加える。

$$\left. \frac{\phi_{NR0}}{\phi_{NN0}} \right|_{y=H} = -\frac{1}{\pi} \phi'_{a0} = -\frac{1}{\pi} \frac{\gamma_x}{\gamma_y + 2\gamma_x} \phi_{NN0} \quad (22)$$

2.5 予測法のまとめと基準化重量を用いた書き換え

本論で扱うことのできるモデルを一般化するとともに、現行基準の A_i 分布と同様に基準化重量を用いた表現に変数変換する。まず、図7のように $M \times N$ スパンの離散化モデルを考える。水平構面の剛性は各階で同様と考え、 k_f とする。内部耐力壁の剛性を k_w 、端部耐力壁の剛性を k_{w0} とする。一般階の各節点質量 m に対し、最上階の各節点質量を m_0 とする。連続体モデルと離散化モデルの関係性、および各階の質量と剛性のバランスを考慮し、 K_y, K_x はそれぞれ次式のように求まる。

$$K_y = k_{w0} - k_w / 2, \quad K_x = k_f (1 - m_0 / m) \quad (22a, b)$$

これらにともない、 G_x, G_y もそれぞれ次式のように求まる。

$$G_x = l_f (N k_f - K_x) / (H - h / 2) \\ = l_f (N - 1 + m_0 / m) k_f / (H - h / 2), \quad G_y = h (M - 0.5) k_w / (L_f - l_f / 2) \quad (23a, b)$$

これから $\beta, \gamma_y, \gamma_x, \nu_x, \nu_y$ を計算し、さらに基準化重量 α_{xi}, α_{yj} を次式から求める。

$$\alpha_{xi} = \sum_{y=0}^H \sum_{x=xi}^{L_f} m(x, y) / m_{tot}, \quad \alpha_{yj} = \sum_{x=0}^{L_f} \sum_{y=yj}^H m(x, y) / m_{tot}, \quad m_{tot} = \sum_{y=0}^H \sum_{x=0}^{L_f} m(x, y) \quad (24a-c)$$

ここに、 $m(x, y)$ は位置 (x, y) での質量である。基準化重量は層せん断力の計算に用いられるため、一般に階高の半分の位置で分割して層ごとの質点重量として集約されるが、本論では図8のように、ある位置 (x_i, y_j) での変位モードの予測に用いるため、 $x \geq x_i, y \geq y_j$ の質量の総和から求めている。

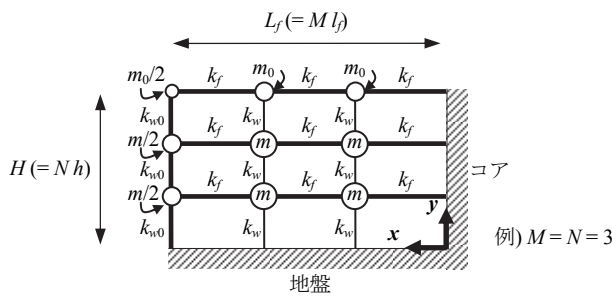


図7 本論で扱うモデルの離散化モデルによる一般化

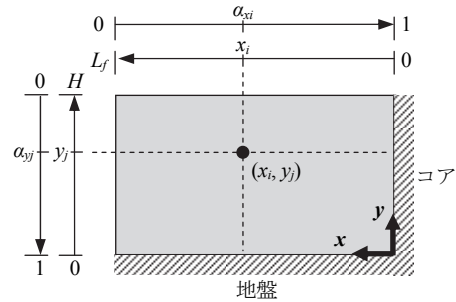


図8 基準化重量の定義

以上より、変位モードは次式のように書き改められる。式(25)はタイプⅡの $G_y \neq 0$ 、式(26)はタイプⅡの $G_y = 0$ を表し、いずれも $\gamma_x = 0$ とすればタイプⅠを包含している。

$$\phi_1(\alpha_{xi}, \alpha_{yj}) = \left(\cos \frac{\pi \alpha_{xi}}{2} + 0.63 \gamma_y \cos(\pi \alpha_{xi}) \right) \left(\cos \frac{\pi \alpha_{yj}}{2} + 0.63 \frac{\gamma_x}{\beta} \cos(\pi \alpha_{yj}) \right) + 0.63 \pi \frac{\gamma_y \gamma_x (1 + 1/\beta)}{\gamma_y (1 - \nu_y) + \gamma_x (1 - \nu_x)} (1 - \alpha_{xi})(1 - \alpha_{yj}) e^{-\sqrt[3]{\beta^2 / (\gamma_x^2 \gamma_y)} \alpha_{xi}} e^{-\sqrt[3]{\beta / (\gamma_x \gamma_y^2)} \alpha_{yj}} \quad (25)$$

$$\phi_1(\alpha_{xi}, \alpha_{yj}) = \left(\cos \frac{\pi \alpha_{xi}}{2} + \phi_{NR0} \cos(\pi \alpha_{xi}) \right) \cos \frac{\pi \alpha_{yj}}{2} - \frac{\gamma_x}{\gamma_y + 2\gamma_x} (1 - \alpha_{xi})(1 - \alpha_{yj}) e^{-\sqrt{1/\gamma_y} \alpha_{yj}} \quad , \quad \phi_{NR0} = \begin{cases} 0.63 \gamma_y & (\text{最上階以外}) \\ -\frac{1}{\pi} \frac{\gamma_x}{\gamma_y + 2\gamma_x} & (\text{最上階}) \end{cases} \quad (26a,b)$$

3. 精度検証

3.1 モデル

精度検証に用いるモデルは、文献2で示された3階建て木造校舎のプロトタイプ建物を基本とする。図9(a)の平面図に示す通り、X4-X5とX11-X12にRC造のコアをもつ。文献3では、X5-X11までの耐力壁が8m間隔で配置された部分を主な対象としていたが、本論では片側コアを含むX1-X4までを対象とする。耐力壁はX1通りのみに存在し、X4通りは解析上、固定とする。図9(b)に振動解析モデルを示す。節点質量は最上階で25ton、その他の階で50tonとした。

表1にモデル一覧を示す。水平構面の剛性 k_f を変動要因の一つとした。基本モデルは内部耐力壁をもたないが、タイプⅡでは内部耐力壁の剛性に応じて予測式を使い分ける必要があるため、内部耐力壁の剛性 k_w も変動要因とした。また、モデル1～3は最上階の水平構面のみ剛性を半分とし、タイプⅠに相当するモデルを考慮した。

図9(b)のような離散化モデルの固有値解析から求まる1次モードを正解とし、提案手法による理論解と比較する。なお、比較の際は質量分布を考慮して刺激関数として表す。

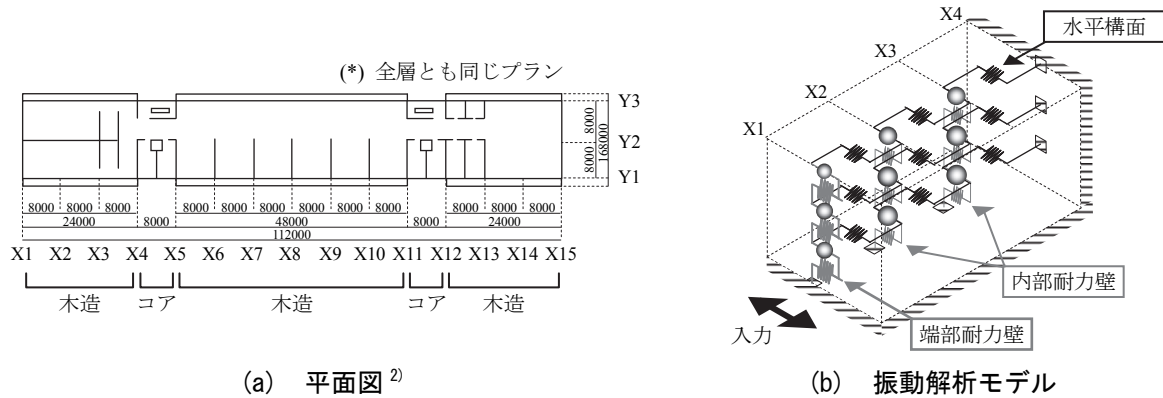


図9 対象とする平面異種混構造建物

表1 モデル一覧

モデル番号	k_f	k_{w0}	k_w	β	γ_y	γ_x
1	135	256	0.001	0.00	0.63	0.00
2	270	256	0.001	0.00	0.32	0.00
3	67.5	256	0.001	0.00	1.27	0.00
4	135	256	0.001	0.00	0.76	0.20
5	135	256	51	0.38	0.68	0.20
6	270	256	51	0.19	0.34	0.20
7	67.5	256	51	0.76	1.37	0.20

・色塗りセルは変動要因
 ・ k_f, k_{w0}, k_w の単位は kN/cm
 ・モデル1～3は、最上階のみ $k_f/2$ としている（タイプⅠに相当）

3.2 タイプⅠの予測精度

図10にモデル1～3の正解と理論解の比較を示す。水平構面剛性に応じて変位モードが敏感に変化しているが、様々なモデルに対して理論解は良好な精度と言える。

3.3 タイプⅡの予測精度

図11にモデル4～7の比較を示す。モデル4とモデル5は、 $G_y \neq 0$ の予測式と $G_y = 0$ の予測式から求める理論解を示している。モデル4のように内部耐力壁の剛性 k_w が低いと、 $G_y \neq 0$ の予測式は精度が悪く、 $G_y = 0$ の予測式の方は精度が良好である。一方、モデル5程度の k_w があると、 $G_y = 0$ の予測式の精度が低下し、 $G_y \neq 0$ の予測式の方が精度が良好である。モデル6とモデル7は、 x 方向・ y 方向のモードの非対称性が強く、モデル5に比べると若干精度が劣っている。

図12にモデル5の $G_y \neq 0$ に対応した理論解における修正項を加える前後の比較を示す。修正項が示すモードは $(x, y) = (L_f, H)$ に集中しており、 $(x, y) = (L_f, H)$ での全成分の3割ほどを占めている。図11(b)が示す通り、修正項により $(x, y) = (L_f, H)$ での振幅が改善され、全体のモード形状が正解値に近づいていることが分かる。

4. おわりに

本論では様々な壁配置の木質系平面異種混構造に対応できる変位モード予測法を提案した。質量とせん断剛性が均一に分布した連続体の端部に集中せん断バネを追加したモデルを用い、これにより広範な耐力壁配置を網羅できる。本論で対象とする平面異種混構造は短周期であり、高次モードの影響は比較的小さいため、推定する変位モードは静的地震力分布の設定にも応用できると考えられる。

現状では、タイプⅠ($\gamma_x = 0$)に関しては、任意の β, γ_y に対して予測が可能であるが、タイプⅡ($\gamma_x \neq 0$)は内部耐力壁の剛性が低い場合、すなわち β が小さく、 γ_y が大きいときには、 $G_y = 0$ に対応した予測式と使い分ける必要がある。

参考文献

- 1) 日本住宅・木材技術センター：木質系混構造建築物の構造設計の手引き, 2012.1
- 2) 日本建築学会：大規模木造建築の技術的課題と解決方法, 2012年度日本建築学会大会パネルディスカッション資料, 2012.9
- 3) 山崎義弘, 坂田弘安：剛なコアをもつ建築構造のモデル化手法と地震力評価 木質系平面異種混構造の動的挙動に関する研究 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第720号, pp.291-301, 2016.2
- 4) 山崎義弘, 澤田紗代子, 鄒迪, 坂田弘安：木質系平面異種混構造を模擬した1/3縮小模型の振動台実験 その1-その3, 日本建築学会大会大会学術講演(九州), 2016年8月（発表予定）
- 5) 寺沢寛一：自然科学者のための数学概論応用編, 岩波書店, pp.431-436, 1983.6

