
2019 年度修士論文

基壇型偏心鉄筋コンクリート建物の
非線形応答性状に関する研究

2020 年 1 月

首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域 博士前期課程

18852521 久保 毅晃

指導教員 壁谷澤 寿一

目次

第1章 序論	1
1-1 研究背景と目的	2
1-2 既往の研究	3
1-3 用語の説明	4
第2章 研究方法	5
2-1 非線形時での定モード抽出	6
2-2 有効質量比	7
2-3 外力分布	7
2-4 入力地震動	8
2-5 解析の流れ	9
第3章 解析モデル	11
3-1 建物モデル	12
3-2 部材モデル	21
第4章 解析結果	25
4-1 解析結果の概要	26
4-2 WL モデル	31
4-3 WH モデル	50
4-4 WLX モデル	70
4-5 WHX モデル	90
第5章 応答精度推定手法	111
5-1 応答精度推定手法の提案	112
5-2 検証結果	114
第6章 結論	117
6-1 まとめ	118
6-2 今後の課題	118
参考文献	119
謝辞	120
付録	121

第 1 章 序論

1-1 研究背景と目的

現在の耐震設計では建物をフレームにモデル化して、 A_i 外力分布を仮定して静的漸増載荷解析を行い、荷重変形関係を求める。これは静的漸増載荷の解析結果が地震時の建物の崩壊形を再現可能であることを前提としている。さらに、限界耐力計算法では等価 1 自由度形に縮約したモデルの応答解析を行い、地震時の応答状態を求める手法が用いられている。

一方で、建物が不整形となり高次モードの影響が卓越すると A_i 外力分布を仮定した静的漸増載荷解析結果では地震時の応答状態を把握できなくなる場合がある。限界耐力計算法の適用には建物の 1 次モード有効質量比の制限が設けられている。

一般に建物の不整形性を表す指標としては剛性率・偏心率があり、連層耐震壁の偏在した基壇型の建物では不整形性の影響が最も大きく表れる。

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震での建物被害^①では、下層部が偏心した基壇型の鉄筋コンクリート造建物において下層部と上層部が切り替わる層において柔構面の柱が大きく損傷している。また、複数の集合住宅においても塔屋において大きな被害が確認されており、これらの建物被害には少なからず高次モードによる応答性状が影響していると考えられる。

本研究では、基壇型偏心鉄筋コンクリート建物の 3 次元骨組モデルの地震応答解析を行い、高次モードが建物崩壊形に与える影響を検討するとともに、従来の、静的漸増載荷解析で地震応答解析の崩壊形が異なるケースを把握するための評価方法を提案する。

1-2 既往の研究

藤井⁽²⁾は各階の重心が鉛直上にあり、各層の剛性偏心距離、耐力偏心距離および弾力半径が等しい多層 1 軸偏心建物において、1 次有効質量比が 0.6 以上であれば等価な単層 1 軸偏心系に縮約ができ、非線形応答の評価が可能であることを示した。しかし 1 層のみに偏心がある建物や基壇型建物、セットバックを有する建物についてはモード形の変動を考慮した静的漸増載荷解析を行って等価 1 自由度系の質点モデルを作成する必要があるが、ステップごとに固有値解析を行う提案手法では計算量が膨大になるため適用できないことを指摘している。

壁谷澤⁽³⁾らは偏心 RC 造建造物の振動実験および地震応答解析からねじれ応答モードの性状を分析する手法を示し、1 次有効質量比が大きい建造物では 1 次モード変形が卓越するため 1 次モードのみを考慮した縮約で非線形応答が可能であること、1 次有効質量比が小さい建造物でも塑性化が進むと 1+2 次モード重ね合わせ外力分布による静的漸増載荷解析に漸近する傾向があることを示した。一方でばねの復元力モデルによって 1 次有効質量比の推移に変化が生じていることを指摘している。

1-3 用語の説明

箱型建物	下層から最上層まで同じ平面形状である建物
基壇型建物	上層部の平面が下層部よりも小さくなっている建物
下層部	本研究では1層と2層を下層部とする
上層部	本研究では3層よりも上の層とする

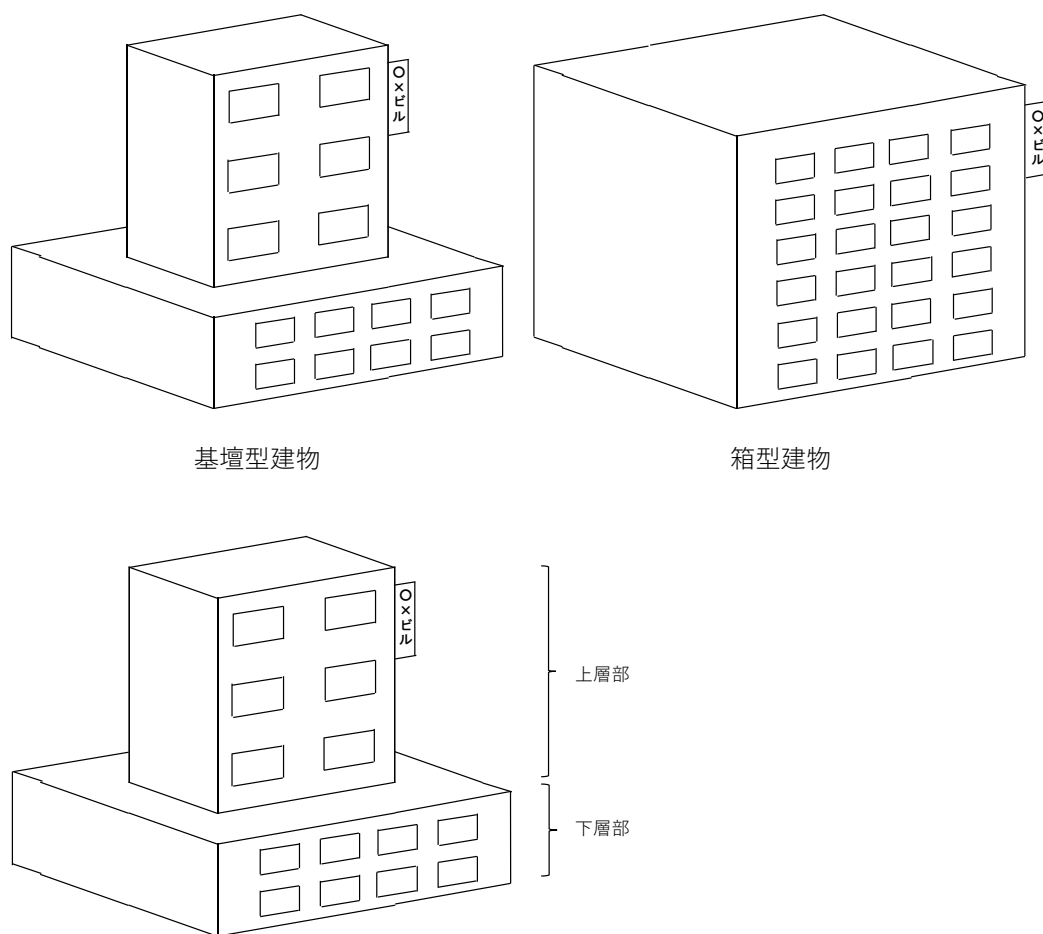


図 1.3.1 基壇型建物と箱型建物

第 2 章 研究方法

2-1 非線形時での定モード抽出

滝沢⁽⁴⁾は動的な応答次に支配的なモード形を,時刻歴応答データ $\{f(t)\}$ に対して最適な定モードベクトル $\{X\}$ と時刻歴関数の $q(t)$ に近似できると仮定し,誤差 $\{f(t)\} - \{X\}q(t)$ を左右から質量マトリクス $[m]$ に乗じた値の積分値が最小となるモードベクトル $\{X\}$ を(2.1.1)から(2.1.4)式によって導出可能であること示している。モードベクトル $\{X\}$ は固有値問題を解くことで得られる固有ベクトル $\{u_i\}$ となる。時刻歴応答データとこれらを用いて,ある時刻歴応答解析の応答変形から定モード抽出が可能になる。

$$\{f(t)\} \sim \{X\}q(t) \quad (2.1.1)$$

$$E = \int_{t_0}^{t_1} [\{f(t)\} - \{X\}q(t)]^T [m] [\{f(t)\} - \{X\}q(t)] dt \quad (2.1.2)$$

$$[R] = \int_{t_0}^{t_1} \{f(t)\} \{f(t)\}^T dt \quad (2.1.3)$$

$$([m][R][m])\{u_i\} = \lambda_i [m]\{u_i\} \quad (i = 1 \sim N) \quad (2.1.4)$$

また,2次モード以降も $k = 2 \sim N$ にわたって(2.1.5)(2.1.6)式のように抽出することが可能である。

$$\{f_k(t)\} = \{f_k(t)\} - \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\{u_i\}^T [m] \{f(t)\}}{\{u_i\}^T [m] \{u_i\}} \{u_i\} \quad (2.1.5)$$

$$[R_k] = \int_{t_0}^{t_1} \{f_k(t)\} \{f_k(t)\}^T dt \quad (2.1.6)$$

2-2 有効質量比

有効質量比はあるモード振動形における全体の振動への影響を表す指標であり、 i 次モードベクトル $\{u_i\}$ の i 次有効質量比 M_i は地震動の入力方向を表すベクトル $\{\alpha\} = [1\ 0\ 1\ 0\ \dots]^T$, 建物の総重量 M と刺激係数 β_i から(2.2.1)(2.2.2)式によって算出する。

$$\beta_i = \frac{\{u_i\}^T[M]\{\alpha\}}{\{u_i\}^T[M]\{u_i\}} \quad (2.2.1)$$

$$M_i = \frac{\beta_i\{u_i\}^T[M]\{u_i\}}{M} \quad (2.2.2)$$

有効質量比が大きい値の振動モードでは、元の系における全体の振動に対して大きく寄与する。限界耐力計算では 1 次有効質量比が 0.75 以上であることを適用条件としている。

2-3 外力分布

静的漸増載荷解析の外力分布は A_i 分布にもとづく外力分布 $\{F_{Ai}\}$ および 1 次モード形外力分布 $\{F_1\}$ と 1+2 次モード形外力分布 $\{F_{1+2}\}$ の 3 種類設定する。

1 次モード形外力分布 $\{F_1\}$ と 1+2 次モード形外力分布 $\{F_{1+2}\}$ は弾性状態の時刻歴応答解析から抽出した i 次モードベクトル $\{u_i\}$ と刺激係数 β_i , 質量マトリクス $[m]$, i 次モード加速度応答スペクトル値 S_{ai} から (2.3.1)(2.3.2)式によって算出した⁽⁵⁾。

$$\{F_1\} = [m]\beta_1\{u_1\}S_{a1} \quad (2.3.1)$$

$$\{F_{1+2}\} = [m](\beta_1\{u_1\}S_{a1} + \beta_2\{u_2\}S_{a2}) \quad (2.3.2)$$

2-4 入力地震動

入力地震動は日本建築センター模擬波 BCJ-L2 を使用した。入力加速度倍率は最小 0.1 倍から 0.25 倍、0.5 倍と 0.25 倍刻みで、最大 2.0 倍まで作用させた。入力時間は 0 秒から 60 秒までとし、入力方向は Y 方向のみとした。入力倍率 1.0 倍時の加速度応答スペクトルを図 2.4.1 に入力地震動の時刻歴波形を図 2.4.2 に示す。

本研究では弾性状態の定モード $\{u_i\}$ および有効質量比 M_i は入力加速度倍率を 0.1 倍として作用させた時刻歴応答変位データから算出した。

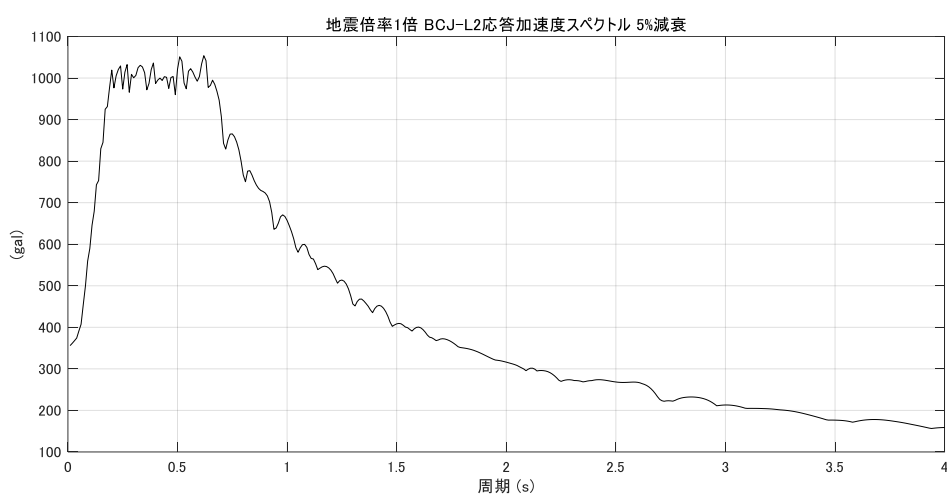


図 2.4.1 入力地震動応答加速度スペクトル

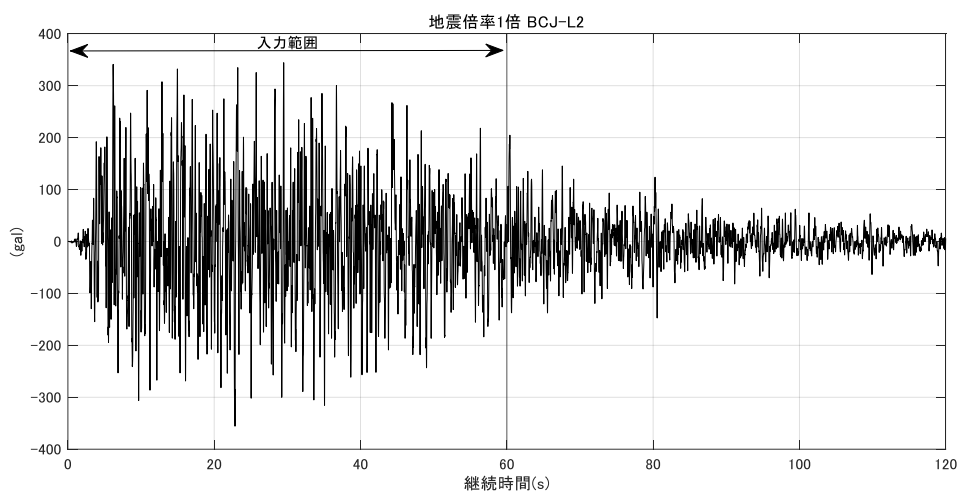


図 2.4.2 入力地震動

2-5 解析の流れ

本研究での解析の流れを図 2.5.1 に示す。

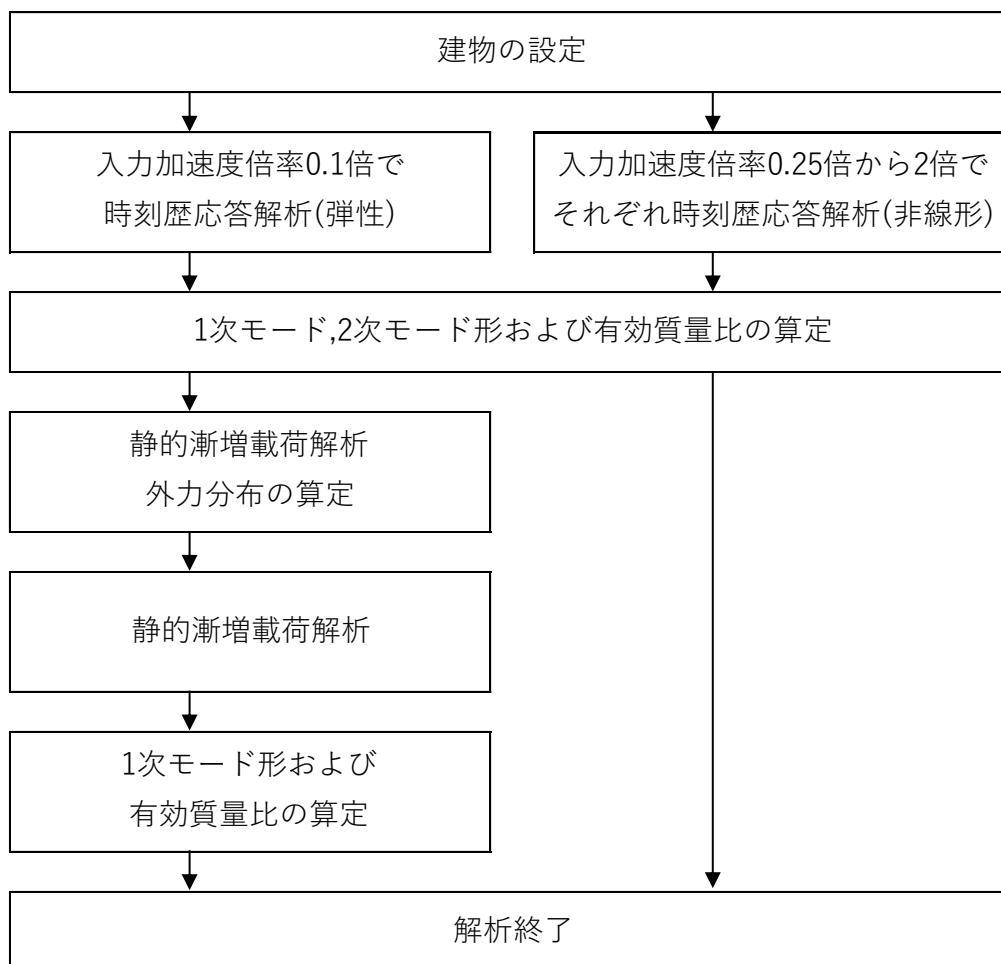


図 2.5.1 解析の流れ

第3章 解析モデル

3-1 建物モデル

解析建物は図 3.1.1 から図 3.1.9 に示すように箱型モデルを基準として、Y 構面を 1 スパンオフセットした基壇型 B モデルと X,Y 構面を 1 スパンオフセットした基壇型 A モデルを設定した。

下層部はいずれも、5×3 スパンであり、上層部は基壇型 A モデルでは 3×1 スパン、基壇型 B モデルでは 5×1 スパンとし、各モデルとも各層の重心が鉛直上になるように配置した。下層部の層数は 2 層で固定とし、上層部の層数をそれぞれ 1,3,5 層と変化させ、下層部と上層部の合計が 3 層、5 層、7 層と設定した。階高は全層で 4m とし、1 スパンの長さは X 方向 Y 方向ともに 6m とした。

部材の寸法は、3 層モデルでは、柱は 500mm 角、梁は 400mm×750mm、5 層モデルでは、柱は 600mm 角、梁は 500mm×900mm、7 層モデルでは、柱は 700mm 角、梁は 650mm×900mm とした。

耐震壁は各モデル共通で、壁厚は 150mm とした。耐震壁は WL モデルでは下層部にのみ配置し、上層部は純ラーメンとしたモデル、WH モデルでは最上層まで耐震壁を配置したモデルを設定した。耐震壁は重心位置について対称になるように X2,Y2-Y3 位置と X5,Y2-Y3 位置に配置をし、X5 の耐震壁の剛性を X2 の半分に低下させたモデル、剛性および耐力を X2 の半分に低下させたモデル(モデル名末尾に X を記載)を作成し、Y 方向に 1 軸偏心のねじれ振動が発生するように設定した。

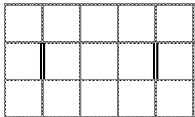


各階の重量と回転慣性重量は箱型モデルと基壇型モデルの下層部で 6480 kN と 660960 kNm²、基壇型 A モデルの上層部で 1296 kN と 38880 kNm²、基壇型 B モデルの上層部で 2160kN と 168480 kNm² とした。単位面積当たりの重量は 12kN/m² とした。

各モデルの主筋量は 1 層の柱脚部分と梁端部で降伏するように表 3.1.1 の通りに設定した。建築基準法による偏心率は上層部 WL モデルでは箱型、基壇型いずれも偏心しないように設定した。耐震壁のある層では表 3.1.2 の通りであった。各階は剛床を仮定し、X,Y 方向の並進および回転の 3 自由度とした。

表3.1.1 部材諸元

モデル	部材	主筋量	断面
3層	梁	6-D29	400x750
	基礎梁	8-D29	600x1400
	柱	16-D29	500x500
5層	梁	8-D29	500x900
	基礎梁	10-D29	600x1400
	柱	24-D29	600x600
7層	梁	10-D29	650x900
	基礎梁	12-D29	600x1400
	柱	32-D29	700x700
共通	耐震壁	D10@200ダブル	150厚

表3.1.2 各層の偏心率

平面形状			
3層	偏心距離 e_x (mm) 2474 弾力半径 r_{ex} (mm) 22265 弾力半径 r_{ey} (mm) 9327 偏心率 R_{ey} 0.265 F_{ey} 1.384	偏心距離 e_x (mm) 2826 弾力半径 r_{ex} (mm) 28394 弾力半径 r_{ey} (mm) 8725 偏心率 R_{ey} 0.324 F_{ey} 1.5	偏心距離 e_x (mm) 2801 弾力半径 r_{ex} (mm) 32822 弾力半径 r_{ey} (mm) 8448 偏心率 R_{ey} 0.332 F_{ey} 1.5
5層	偏心距離 e_x (mm) 2091 弾力半径 r_{ex} (mm) 17942 弾力半径 r_{ey} (mm) 9876 偏心率 R_{ey} 0.212 F_{ey} 1.206	偏心距離 e_x (mm) 2384 弾力半径 r_{ex} (mm) 21054 弾力半径 r_{ey} (mm) 8889 偏心率 R_{ey} 0.268 F_{ey} 1.394	偏心距離 e_x (mm) 2620 弾力半径 r_{ex} (mm) 23638 弾力半径 r_{ey} (mm) 8409 偏心率 R_{ey} 0.312 F_{ey} 1.5
7層	偏心距離 e_x (mm) 1675 弾力半径 r_{ex} (mm) 15685 弾力半径 r_{ey} (mm) 10425 偏心率 R_{ey} 0.161 F_{ey} 1.036	偏心距離 e_x (mm) 2249 弾力半径 r_{ex} (mm) 17459 弾力半径 r_{ey} (mm) 9228 偏心率 R_{ey} 0.244 F_{ey} 1.312	偏心距離 e_x (mm) 2374 弾力半径 r_{ex} (mm) 18279 弾力半径 r_{ey} (mm) 8350 偏心率 R_{ey} 0.284 F_{ey} 1.448

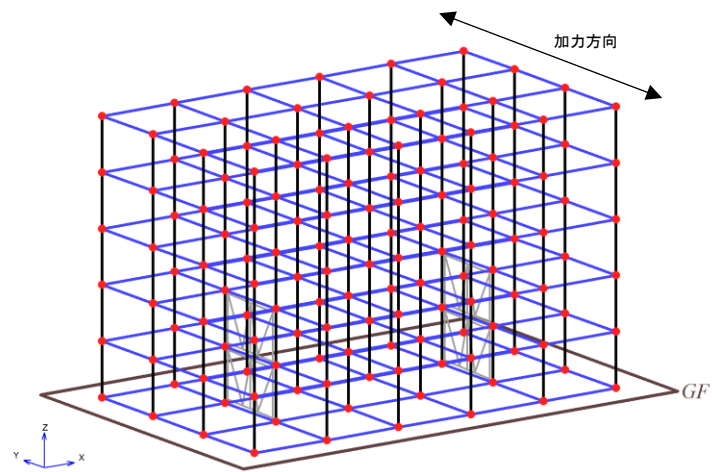


図 3.1.1 N型 WL モデル (Model-5N-WL)

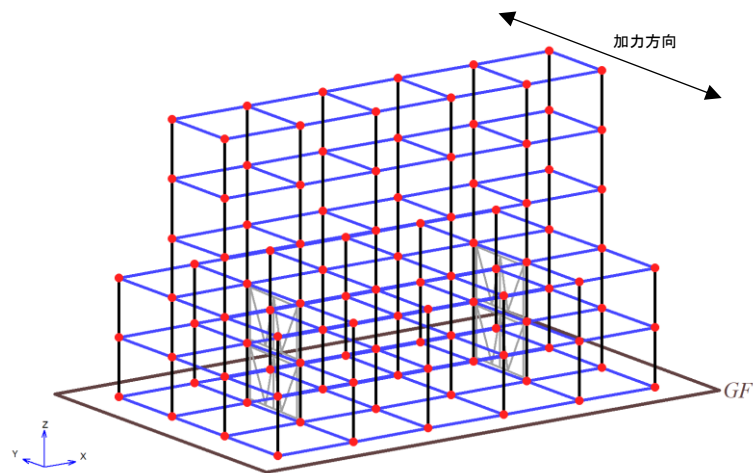


図 3.1.2 B型 WL モデル (Model-5B-WL)

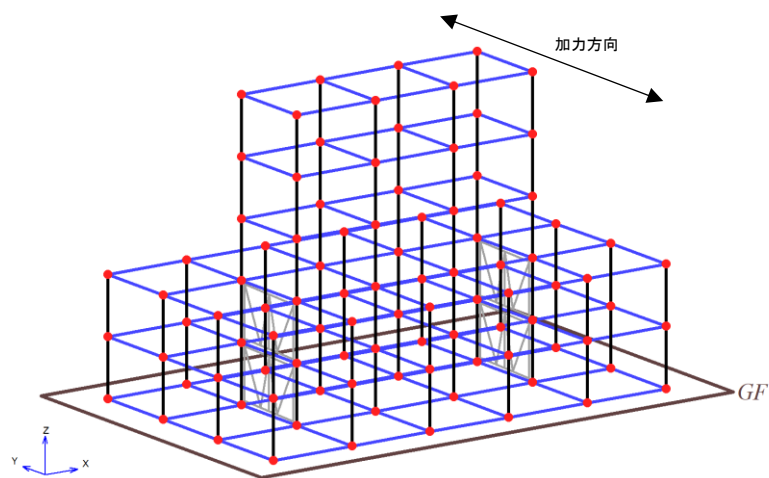


図 3.1.3 A型 WL モデル (Model-5A-WL)

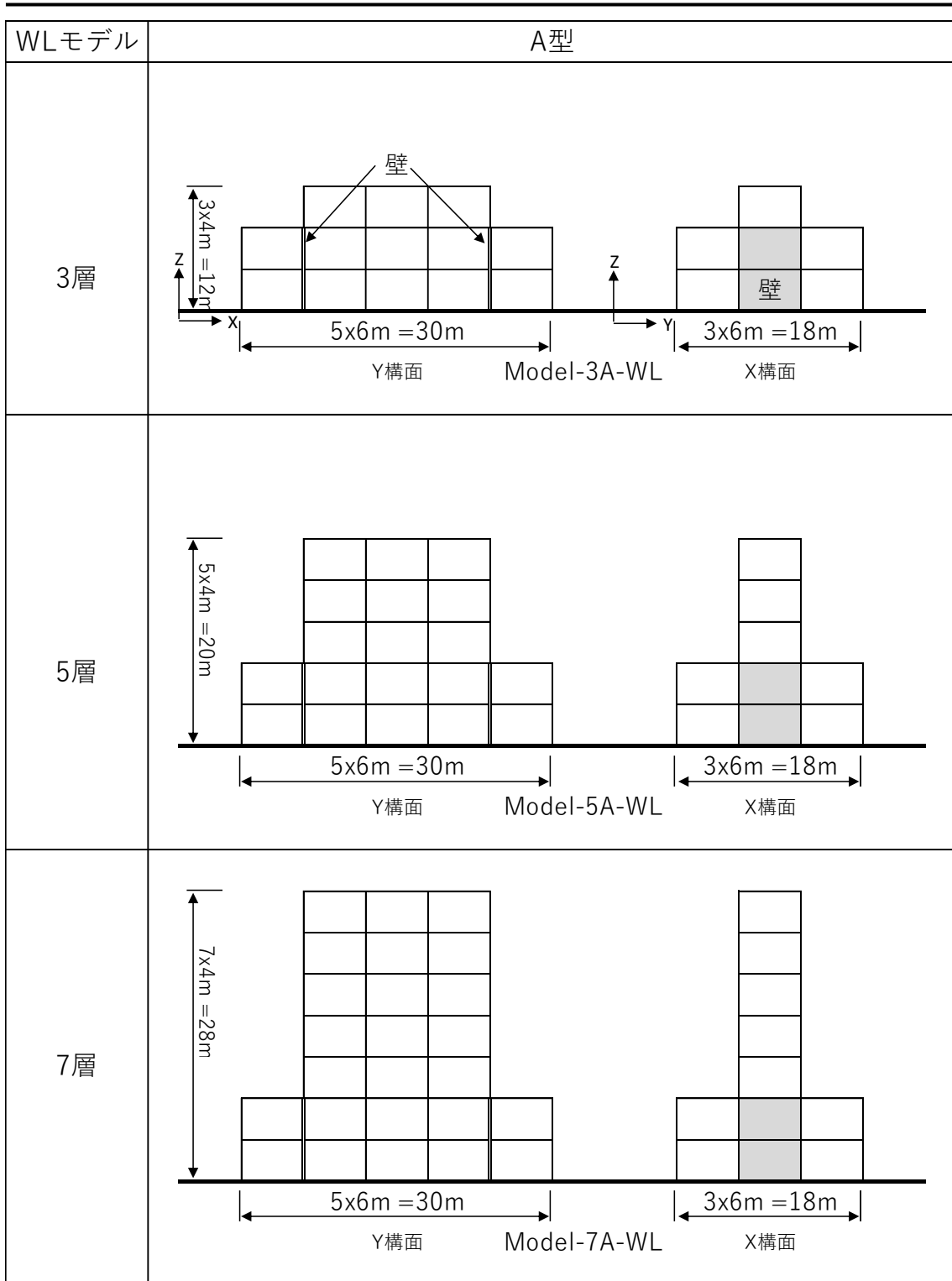


図 3.1.4 A型 WL モデル

WLモデル	B型
3層	<p>壁</p> <p>3x4m = 12m</p> <p>z</p> <p>x</p> <p>5x6m = 30m</p> <p>Y構面</p> <p>Model-3B-WL</p> <p>z</p> <p>y</p> <p>3x6m = 18m</p> <p>X構面</p>
5層	<p>5x4m = 20m</p> <p>Y構面</p> <p>Model-5B-WL</p> <p>X構面</p>
7層	<p>7x4m = 28m</p> <p>Y構面</p> <p>Model-7B-WL</p> <p>X構面</p>

図 3.1.5 B型 WL モデル

WLモデル	N型
3層	<p>壁</p> <p>3x4m = 12m</p> <p>5x6m = 30m</p> <p>3x6m = 18m</p> <p>Y構面 Model-3N-WL X構面</p>
5層	<p>5x4m = 20m</p> <p>Y構面 Model-5N-WL X構面</p>
7層	<p>7x4m = 28m</p> <p>Y構面 Model-7N-WL X構面</p>

図 3.1.6 N型 WL モデル

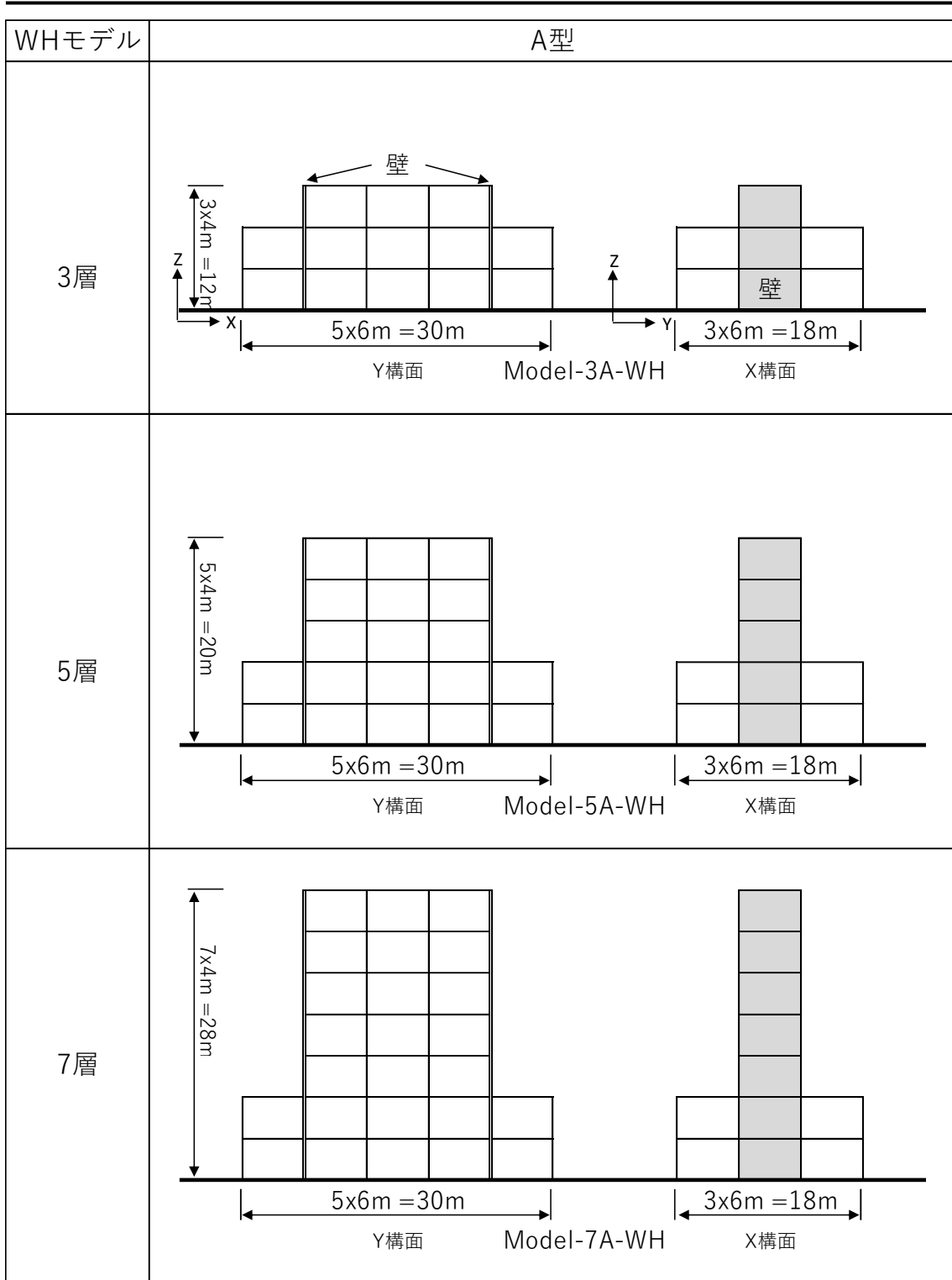


図 3.1.7 A型 WH モデル

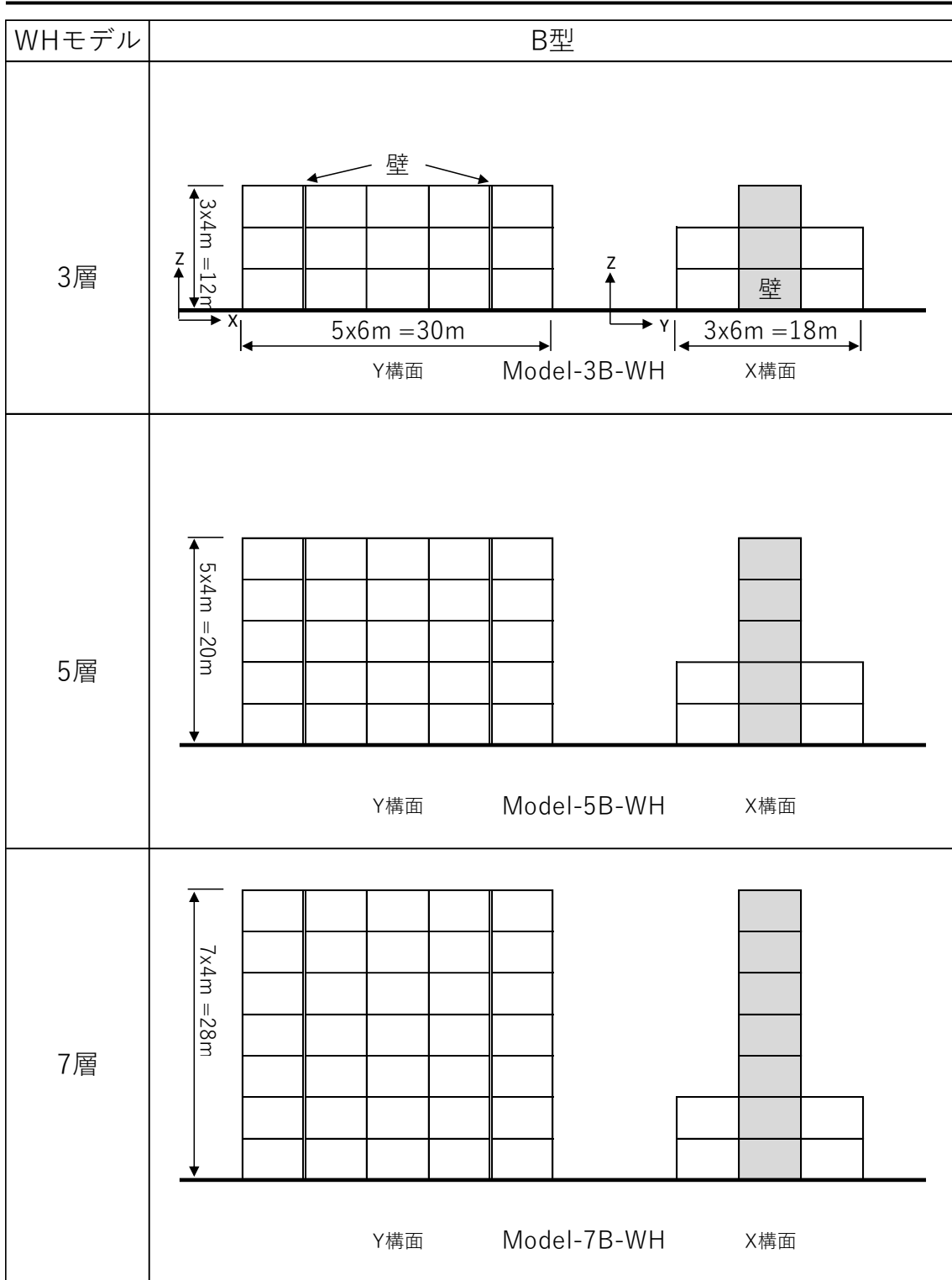


図 3.1.8 B 型 WH モデル

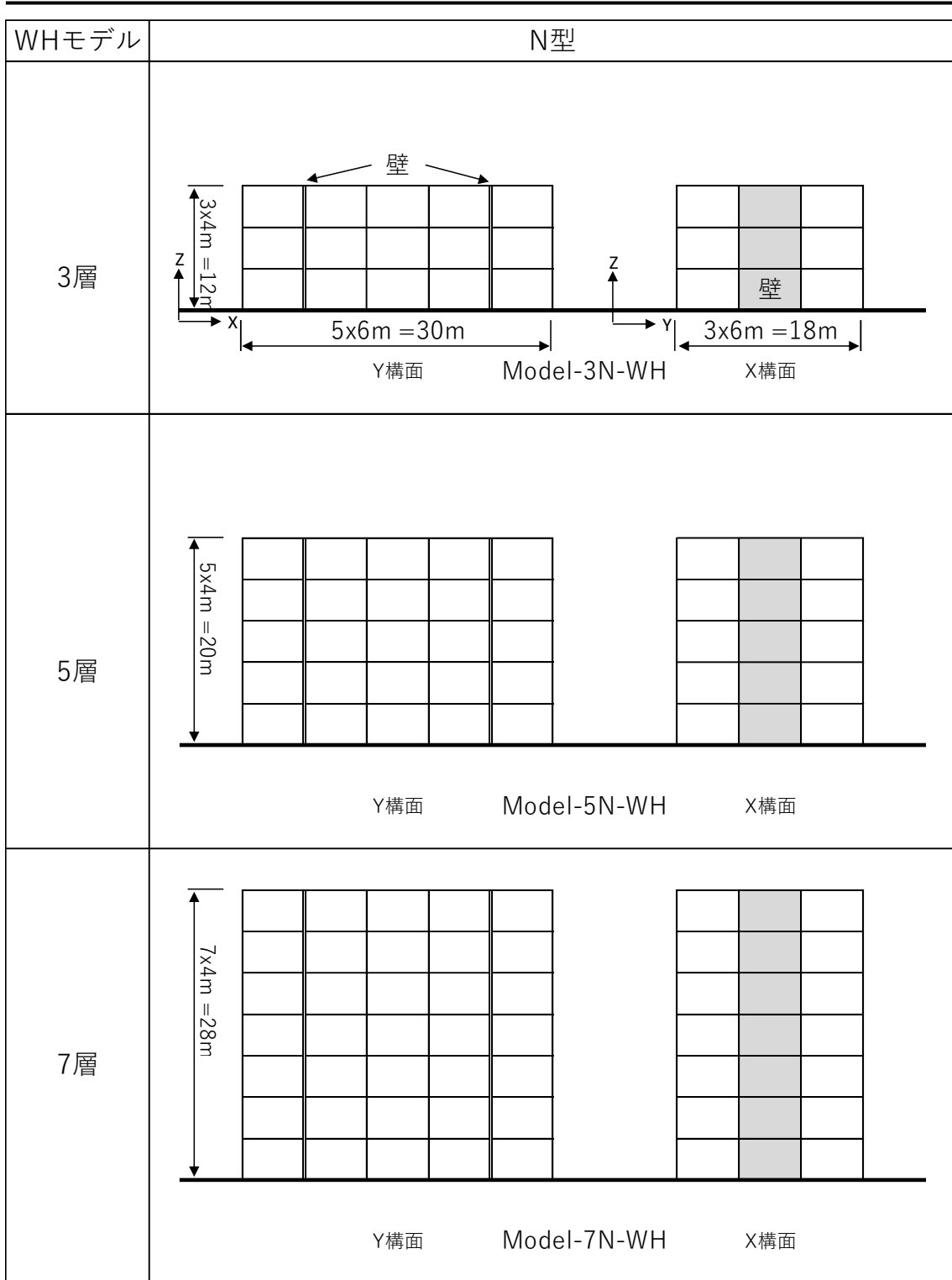


図 3.1.9 N型 WH モデル

3-2 部材モデル

柱および梁は材端ばねモデル,壁は3本柱モデルとし,曲げおよび軸ばねの剛性,強度,降伏点剛性低下率については構造関係技術基準解説書⁽⁶⁾に基づいて式(3.2.1)から式(3.2.10)のように設定した。柱と梁のせん断ばねについてはせん断破壊が生じないと仮定し,弾性とした。壁の曲げ終局強度および曲げの降伏時剛性低下率については壁板部分のみの断面解析によって算出した。軸ばねは軸ばねモデルとし,曲げばねは **takeda** モデルとした。解析は3次元骨組解析プログラム **Canny**⁽⁷⁾ を使用した。

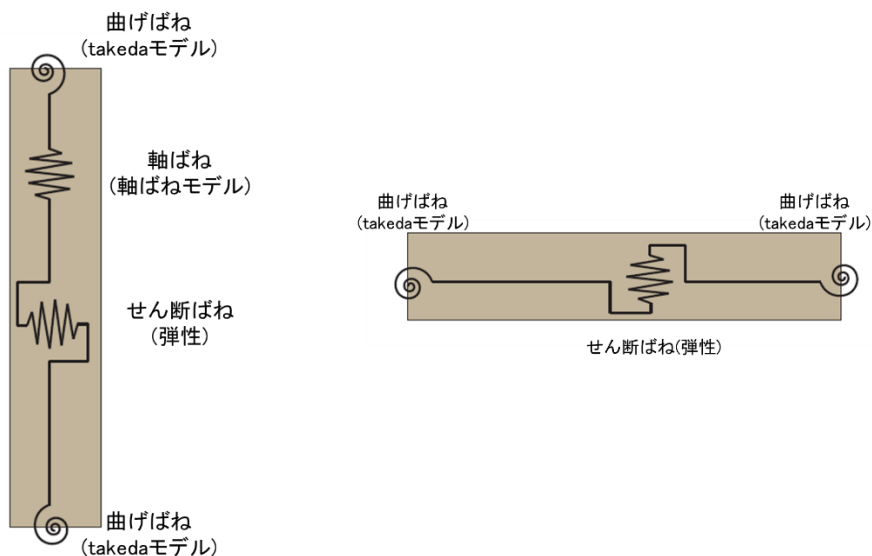


図 3.2.1 柱および梁部材モデル

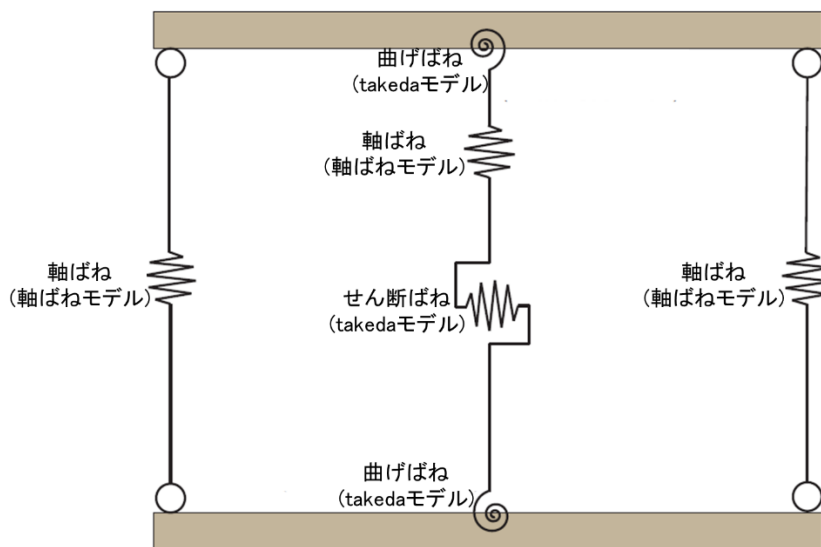


図 3.2.2 壁部材モデル

柱梁および壁のひび割れ強度 M_c [N・mm]

$$M_c = 0.56\sqrt{\sigma_B}Z_e + \frac{ND}{6} \quad (3.2.1)$$

σ_B : コンクリートの圧縮強度 [N/mm²]

Z_e : 鉄筋を考慮した断面係数 [mm³]

N : 軸方向力で構造計算書の値を用いた [N]

D : 部材せい [mm]

柱の終局曲げモーメント M_u [N・mm]

$$M_u = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND \left(1 - \frac{N}{bDF_c}\right) \quad (3.2.2)$$

N : 柱軸方向力 [N]

a_t : 引張主筋断面積 [mm²]

a_g : 柱主筋全断面積 [mm²]

b : 柱断面幅 [mm]

D : 柱断面せい [mm]

σ_y : 主筋降伏強度 [N/mm²]

F_c : コンクリートの圧縮強度 [N/mm²]

柱の中心圧縮時終局強度 N_{max} [N]および中心引張時終局強度 N_{min} [N]

$$N_{max} = bDF_c + a_g\sigma_y \quad (3.2.3)$$

$$N_{min} = -a_g\sigma_y \quad (3.2.4)$$

梁の終局曲げモーメント M_u [N・mm]

$$M_u = 0.9a_t\sigma_y d \quad (3.2.5)$$

a_t : 引張側鉄筋断面積 [mm²]

σ_y : 主筋降伏強度 [N/mm²]

d : 有効せい [mm]

柱梁の剛性低下率

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64np_t + 0.0430 a/D + 0.33\eta_0)\left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (3.2.6)$$

n : ヤング係数比

p_t : 引張鉄筋比 (= a_t/bD)

a/D : シアスパン比 (内法長さ ÷ 2)

η_0 : 軸力比

d : 有効せい [mm]

D : 部材せい [mm]

柱梁および壁の水平剛性

$$K_e = \frac{1}{1/K_f + 1/K_s} \quad (3.2.7)$$

K_f : 曲げ剛性 (= $\frac{12EI}{L^3}$)

K_s : せん断剛性 (= $\frac{GA}{L}$)

E : コンクリートのヤング係数 [N/mm²]

G : せん断剛性 (= $\frac{E}{2(1+\nu)}$) [N/mm²]

ν : コンクリートのポアソン比

L : 部材長 [mm]

I : 部材の断面 2 次モーメント [mm⁴]

壁のせん断ひび割れ強度 Q_c [kgf]

$$Q_c = \tau_{cr} t l \quad (3.2.8)$$

$$\tau_{cr} : \min \left\{ \frac{1}{20} F_c, 1.5 \left(5.0 + \frac{1}{100} F_c \right) \right\} \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

t : 耐震壁の壁厚 [cm]

l : 側柱中心間距離 [cm]

F_c : コンクリートの圧縮強度 [kgf/cm²]で 360 kgf/cm² 以下

壁のせん断終局強度 Q_u [N]

$$Q_u = \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (F_c + 18)}{M/Q_D + 0.12} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} p_{wh}} + 0.1 \sigma_0 \right\} t_e j \quad (3.2.9)$$

t_e : I形断面を長さ t_e と断面積 $t_e d$ とが等しい等価長方形断面に置き換えた時の幅 [mm]
ただし、 t_e は壁厚 t の 1.5 倍以下とする

D : 耐力壁の全長 [mm]

j : $7d/8$ [mm]

p_{te} : 等価引張鉄筋比 (= $100^{a_t} / t_e d$)

a_t : I形断面の場合は引張側柱内の主筋断面積、長方形断面の場合は端部の曲げ補強筋の断面積 [mm²]

d : I形断面の場合 $D - D_c/2$ (D_c は圧縮側柱のせい) 長方形断面の場合は $0.95D$ [mm²]

σ_{wh} : t_e を厚さと考えた場合の水平せん断補強筋比

p_{wh} : 水平せん断補強筋の降伏強度 [N/mm²]

σ_0 : 全断面積に対する平均軸方向応力度 [N/mm²]

壁のせん断剛性低下率 β_u

$$\beta_u = 0.46 p_w \sigma_y / F_c + 0.14 \quad (3.2.10)$$

p_w : 壁筋比

σ_y : 壁筋の降伏強度 [kgf/cm²]

F_c : コンクリートの圧縮強度 [kgf/cm²]

第 4 章 解析結果

4-1 解析結果の概要

各解析モデルについて、時刻歴応答解析から抽出した変形モードに基づく有効質量比と最上階重心位置の最大変形の推移関係について模式的に表したものを図 4.1.1 に示す。

下層にのみ耐震壁がある WL モデルでは、変形が大きくなるにつれて 1 次有効質量比が低下し、低層で基壇型に近いほど 1 次有効質量比の低下が大きく、高層で箱型になるにつれて低下の度合いが小さくなる傾向があった。

上層にも耐震壁がある WH モデルでは各ケースとも変形が大きくなるにつれて 1 次有効質量比が増大する傾向があった。箱型モデルでは 1 次有効質量比が 0.8 以上であり、各静的漸増载荷解析との対応精度が高かった。

したがって、静的漸増载荷解析との対応精度は、基壇型で低層になるほど各静的漸増载荷解析と時刻歴応答解析との対応精度が悪くなる傾向があった。

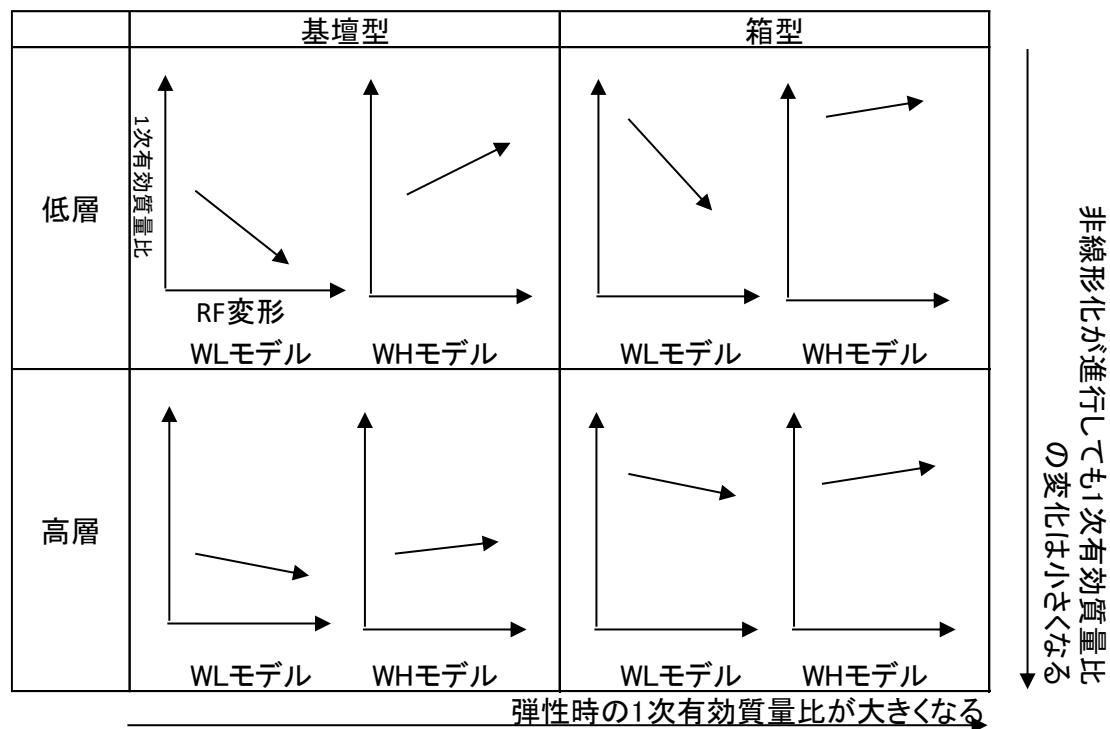


図 4.1.1 有効質量比の推移の概要

本研究での解析結果は 4-2 節から 4-5 節に示す。各節の図 1 は最上階変位に対する変形モードに基づく有効質量比の推移を示す。1 次有効質量比については静的漸増載荷解析の結果も併せて示す。

各節の図 2 は加速度倍率 0.1 倍, 0.5 倍, 1.0 倍, 1.5 倍, 2.0 倍での時刻歴応答解析における最大変形時の抽出変形を示す。

各節の図 3 は弾性時の 1 次モードと 2 次モード形と周期を示す。

各節の図 4 は時刻歴応答解析と静的漸増載荷解析の最大層間変形角分布を示す。層間変形角は変形が大きくなり非線形化が進んだ加速度倍率 1.75 倍での時刻歴応答解析で計測された最大変形時の層間変形角を使用した。静的漸増載荷解析では, 時刻歴応答解析での最上階重心変形と同じ変形になる時の層間変形角を示している。

時刻歴応答解析と静的漸増載荷解析で有効質量比の推移にばらつきがみられたケースに関して, 各節の図 5 に塑性ヒンジの形成位置を示す。時刻歴応答解析では加速度倍率 2.0 倍での解析終了時点で塑性ヒンジが発生した箇所を示し, 静的漸増載荷解析ではいずれかの層の層間変形角が 0.04 rad に達するまで載荷した最終ステップでの塑性ヒンジを示す。耐震壁のある箇所は灰色で着色してあり, ×印は壁がせん断破壊したことを示す。

本研究での解析結果から, 有効質量比の推移と層間変形角に関して以下のケースを紹介する。

弾性時の 1 次有効質量比が大きく変形の増大に伴って 1 次有効質量比の低下した 3A-WL モデル(4-2-1 節)

弾性時の 1 次有効質量比が小さく変形の増大に伴って 1 次有効質量比が低下した 7A-WL モデル(4-2-3 節)

弾性時の 1 次有効質量比が大きく変形の増大に伴って 1 次有効質量比が低下した 7N-WL モデル(4-2-9 節)

弾性時の 1 次有効質量比が大きく変形の増大に伴って 1 次有効質量比が増加した 7N-WH モデル(4-3-9 節)

また, 静的漸増載荷解析で外力に捩れモーメントを与えるかどうかについて違いがみられた 7A-WH モデル(4-3-3 節)についても紹介する。

3A-WL モデル(4-2-1 節)

有効質量比の推移

時刻歴応答解析では弾性時に 0.7 程度の 1 次有効質量比が変形の増大に伴って最終的に 0.2 まで低下した。逆に 2 次有効質量比は弾性時 0.2 程度であったが最終的に 0.7 まで増加し、2 次モードの影響が大きくなった。各静的漸増載荷解析は全解析ケースの中で最もばらつきが生じ、時刻歴応答解析との対応精度は悪かった。

層間変形角

1 次モード外力分布および A_i 分布に基づく外力分布では上層部である 3 階の層間変形角が大きくなった一方で 1+2 次外力分布での静的漸増載荷解析では 1 層の層間変形角が大きくなった。

塑性ヒンジ図

1 次モード形外力分布および A_i 分布に基づく外力分布での静的漸増載荷解析では、3 層目に塑性ヒンジが集中して形成され、下層部ではまったく塑性ヒンジが形成されなかった。これは層間変形角の項で示したように 3 層目で変形が集中したことと対応する。

一方 1+2 次モード形外力分布では 1 層に塑性ヒンジが集中して形成された。また、1 次モード形外力分布および A_i 分布に基づく外力分布での静的漸増載荷解析ではみられなかった 1 層耐震壁のせん断破壊を確認できた。さらに、他の解析ケースとは異なり剛構面である X1 構面にも塑性ヒンジが形成された。

時刻歴応答解析では X1 面から柔構面である X6 構面に向かって塑性ヒンジが形成されていることから、ねじれ変形が生じている。1 次モード形外力分布および A_i 分布に基づく外力分布での静的漸増載荷解析では 3 層梁端部でヒンジが形成されたが 3 層柱頭柱脚ではヒンジはみられなかった。また、1+2 次モード形外力分布での静的漸増載荷解析結果にみられるように 1 層耐震壁がせん断破壊し、X2~X6 構面での 2 層梁端部や X5, X6 構面での Y2, Y3 柱頭柱脚でヒンジが形成されている。一方で剛構面耐震壁のせん断破壊は生じておらず、再現できていない。このことから、モード形の外力分布が異なるために、塑性ヒンジ形成箇所が異なることで、地震時刻歴応答解析との対応が悪くなったと考えられる。2 次モード外力の影響によって部分崩壊を生じるような場合、1 次モード外力分布による静的漸増載荷解析では応答推定精度が悪くなる。

7A-WL モデル(4-2-3 節)

有効質量比の推移

時刻歴応答解析では 1 次有効質量比が弾性時に 0.4 程度と低いが, 変形が増大しても 0.3 程度で, 減少幅は小さかった。一方で 2 次質量比も最終的に 0.4 程度であり, 他の解析ケースよりも 1 次と 2 次の有効質量比の和が小さかった。各静的漸増載荷解析との変形の増大による 1 次有効質量比の変化は, 概ね似たような傾向であり, 1 次モード形外力分布での静的解析が最も精度よく対応した。

層間変形角

時刻歴応答解析, 静的漸増載荷解析とともに上層部で層間変形角が大きくなった。一方で 3A-WL モデルとは異なりどの静的漸増載荷解析ケースでも変形分布は似た形状であった。

7N-WL モデル(4-2-9 節)

有効質量比の推移

時刻歴応答解析では 1 次有効質量比が弾性時に 0.8 程度あり, その後も 0.75 に若干低下する程度で減少幅は小さかった。2 次有効質量比も 0.15 程度から若干変動する程度で 1 次モードが支配的なケースであった。各静的漸増載荷解析との推定精度も良好であった。

層間変形角

時刻歴応答解析, 静的漸増載荷解析とともに上層部で層間変形角が大きくなった。一方で 3A-WL モデルとは異なりどの静的漸増載荷解析ケースでも変形分布は似た形状であった。

7N-WH モデル(4-3-9 節)

有効質量比の推移

時刻歴応答解析では 1 次有効質量比が弾性時に 0.8 程度あり, その後も 0.9 程度に増加した。WH モデルでは WL モデルと異なり, 変形の増大にしたがって 1 次有効質量比が増加する傾向がみられる。2 次モードは 0.05 未満と低い推移で 1 次モードが支配的なケースとなった。各静的漸増載荷解析との推定精度も良好であった。

層間変形角

全層に耐震壁があることで(4-2-3)(4-2-9)とは異なり上層部の変形が小さくなったことが確認できる。時刻歴応答解析と静的漸増載荷解析の分布比較をすると, 1 次モード形外力分布, 1+2 次モード形外力分布ともに精度の高応がみられた。

7A-WH モデル(4-3-3 節)

有効質量比の推移

時刻歴応答解析では 1 次有効質量比が弾性時に 0.5 程度あり, その後も 0.05 程度の増加であった。1 次モード外力分布形による静的漸増載荷解析では 1 次有効質量比が 0.5 程度で推移したことに対して A_i 分布に基づく外力分布形による静的漸増載荷解析では 1 次有効質量比が 0.7 程度まで増加し, 対応にばらつきがみられた点が 3A-WL モデル(4-2-1 節)とは異なった。一方で 1 次モード外力分布形と 1+2 次外力分布形で対応にばらつきがみられた点は 3A-WL モデル(4-2-1 節)と同じであった。

層間変形角

全層に耐震壁があることで WL モデルとは異なり上層部の変形が小さくなった。 A_i 分布に基づく外力分布での静的漸増載荷解析よりも 1 次モード外力分布形による静的漸増載荷解析の方が時刻歴応答解析と精度よく推定できた。

塑性ヒンジ図

X2 構面の耐震壁の破壊性状が 1+2 次モード外力分布形と A_i 分布形での静的漸増載荷解析では地震応答解析と異なっている。一方で 1 次モード外力分布形では耐震壁の破壊性状が地震応答解析と近くなった。捩れモーメントを与える 1 次モード外力分布形による静的漸増載荷解析の方が, A_i 分布での静的漸増載荷解析よりも柔構面壁の壊れ方が地震応答解析とより対応した。これは 3A-WL モデルと異なり, 全層に耐震壁があることで層の耐力が高くなり, 2 次モード外力によって部分崩壊させるに至らなかったため, 1 次モード外力によって変形モードが決まったと考えられる。

4-2 WL モデル

4-2-1 3A-WL モデル

Model-3A-WL

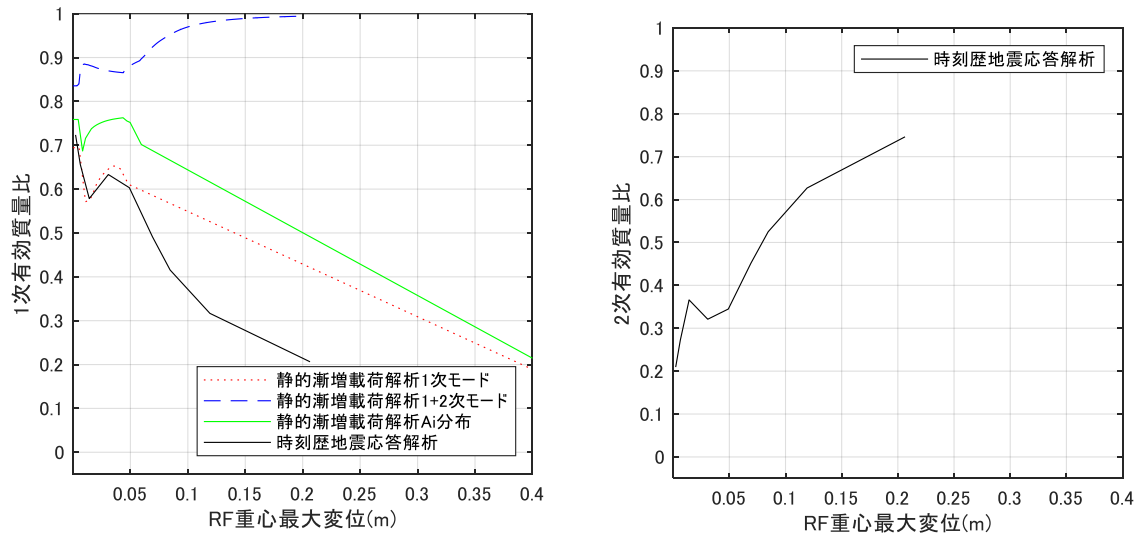


図 4. 2. 1. 1 変形と有効質量比の推移

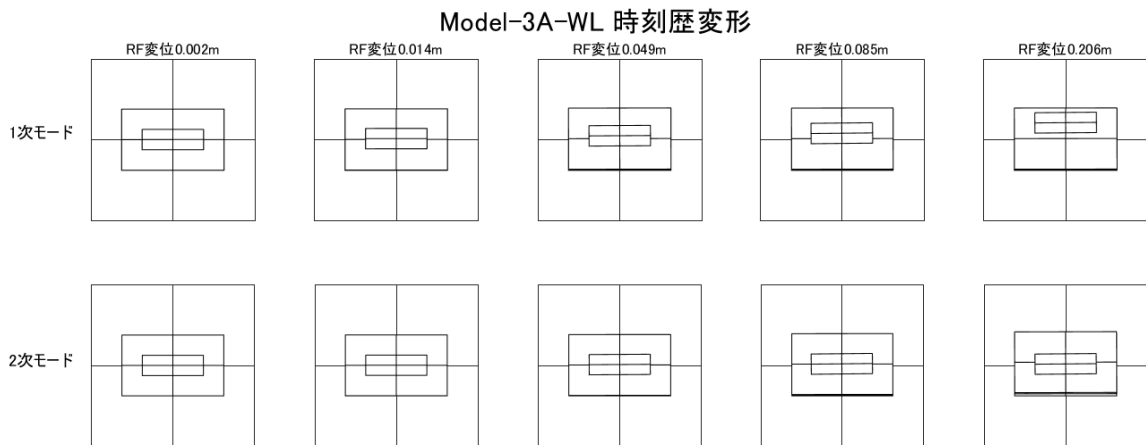


図 4. 2. 1. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

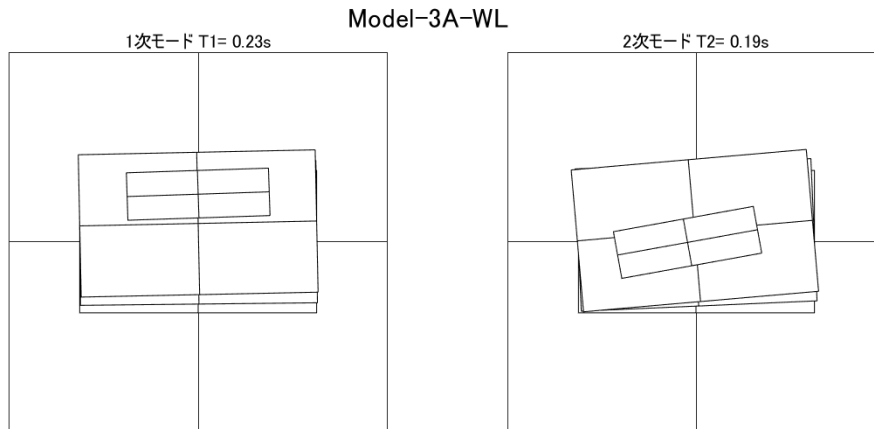


図 4. 2. 1. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

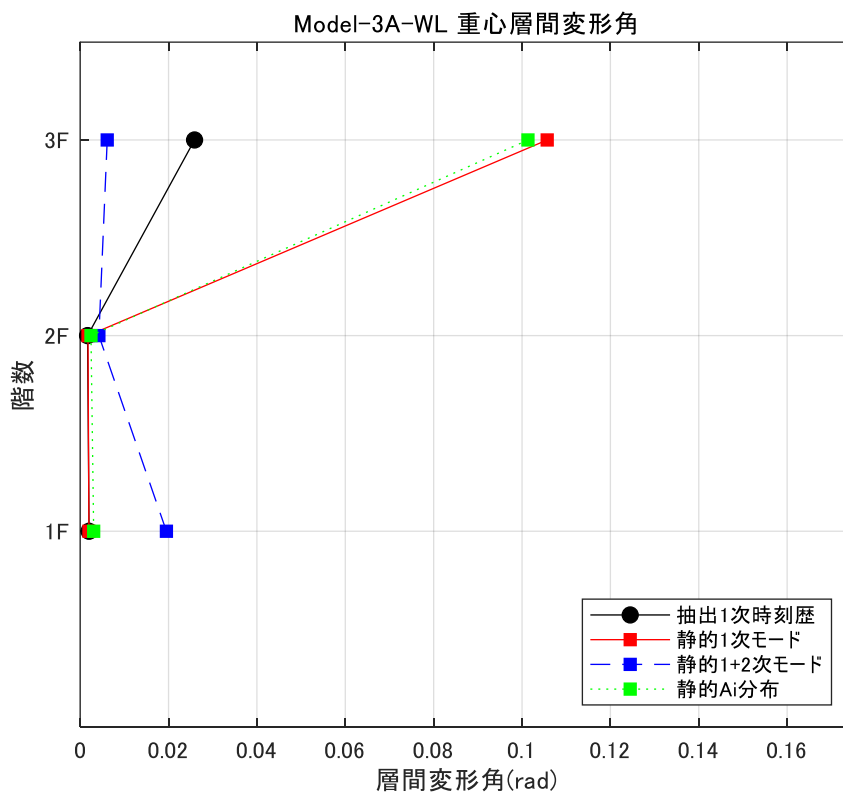


図 4. 2. 1. 4 重心層間変形角

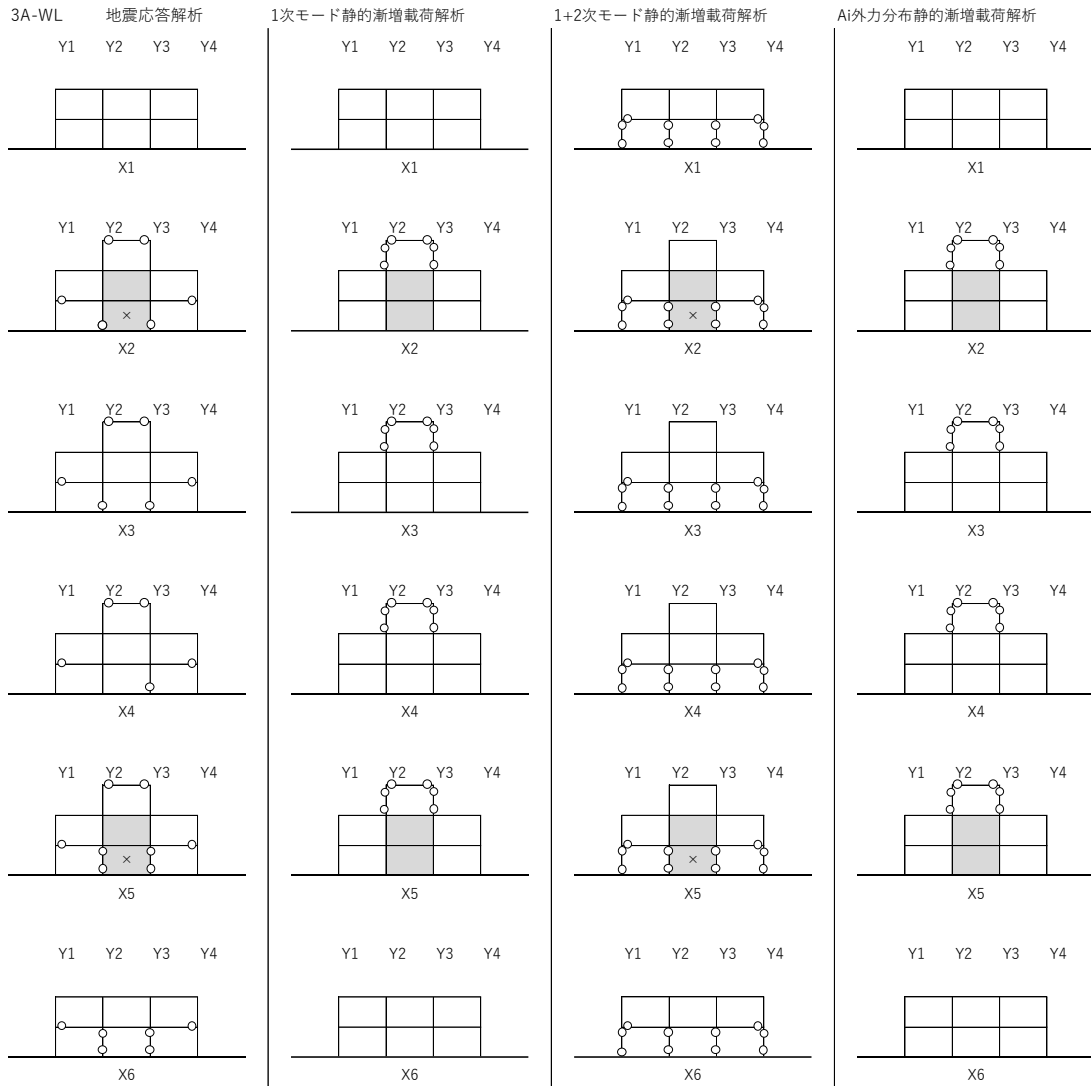


図 4.2.1.5 塑性ヒンジ図

4-2-2 5A-WL モデル

Model-5A-WL

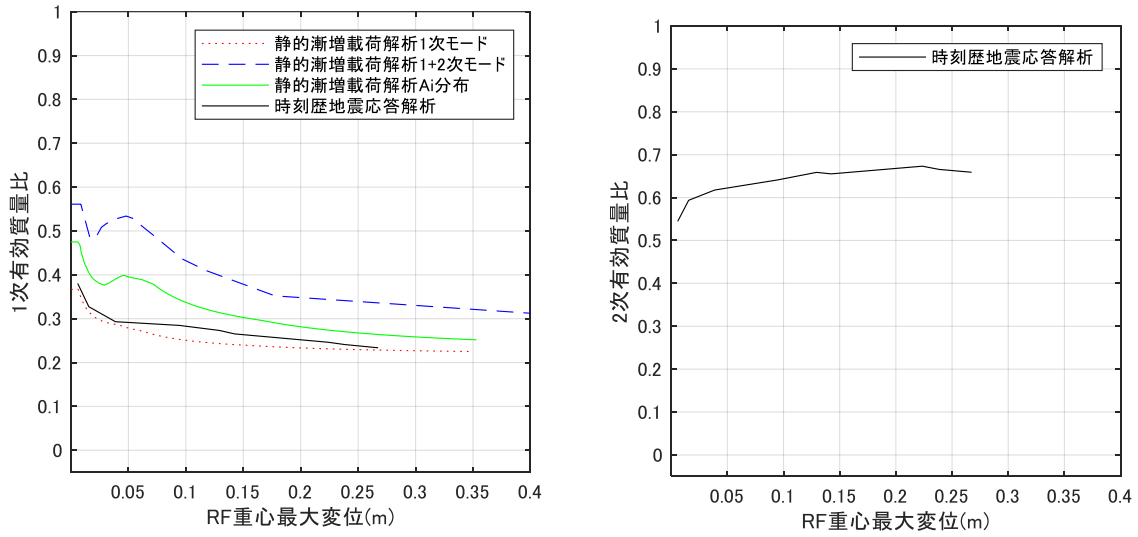


図 4. 2. 2. 1 変形と有効質量比の推移

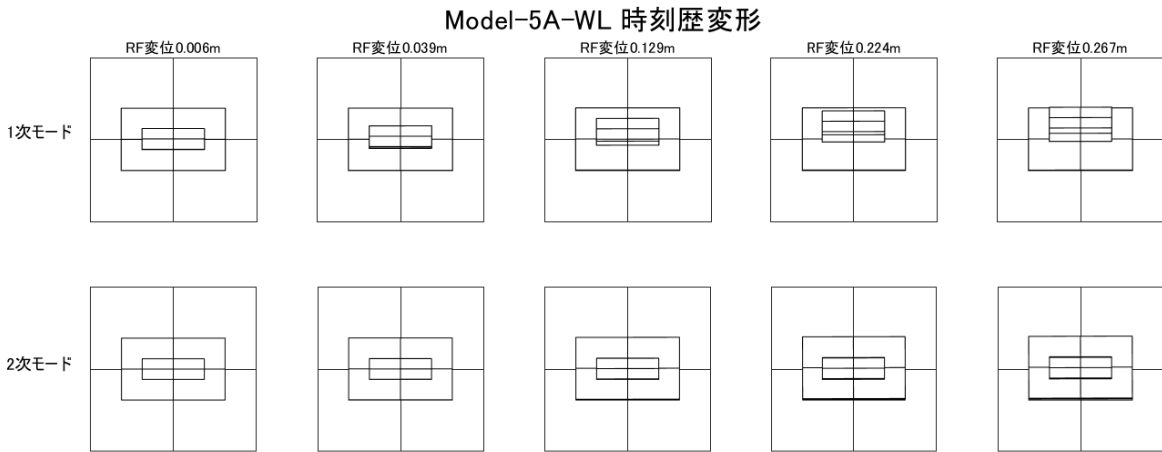


図 4. 2. 2. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

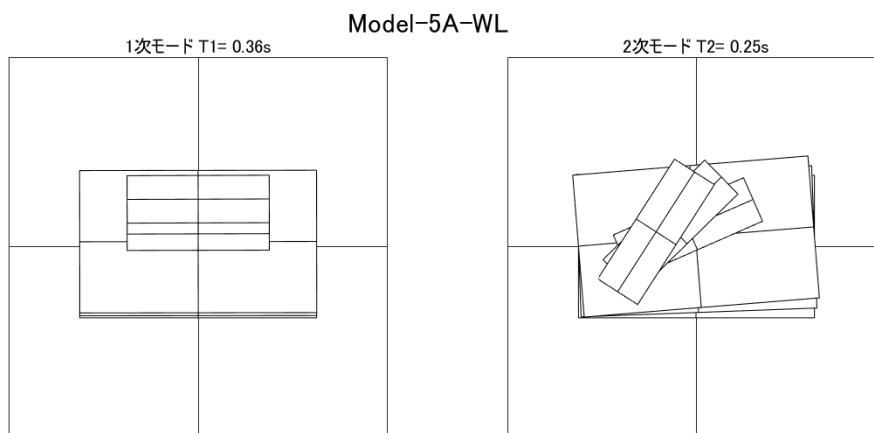


図 4. 2. 2. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

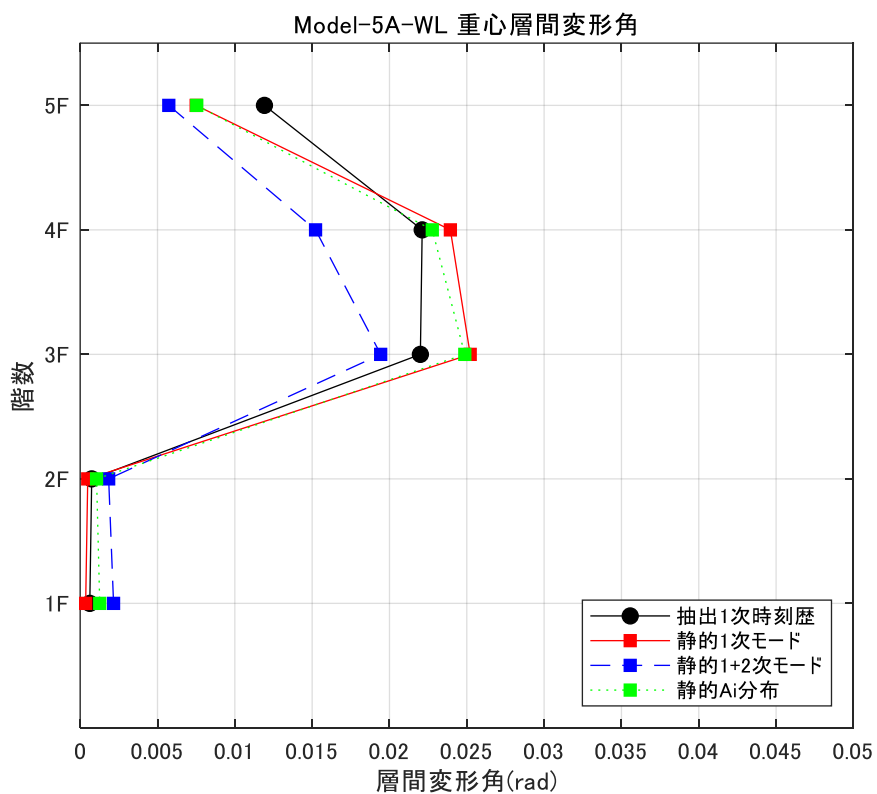


図 4. 2. 2. 4 重心層間変形角

4-2-3 7A-WL モデル

Model-7A-WL

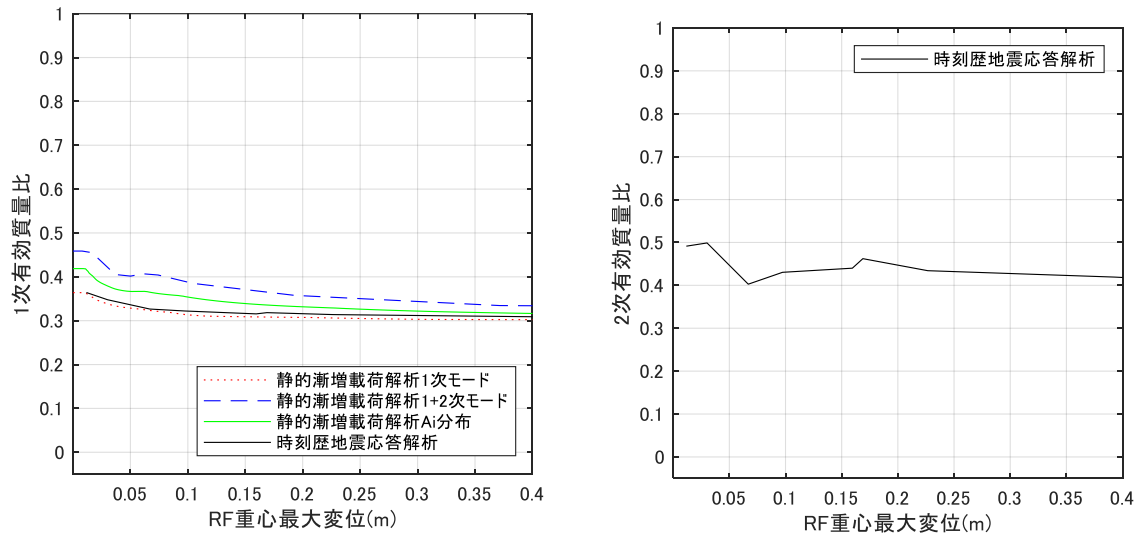


図 4. 2. 3. 1 変形と有効質量比の推移

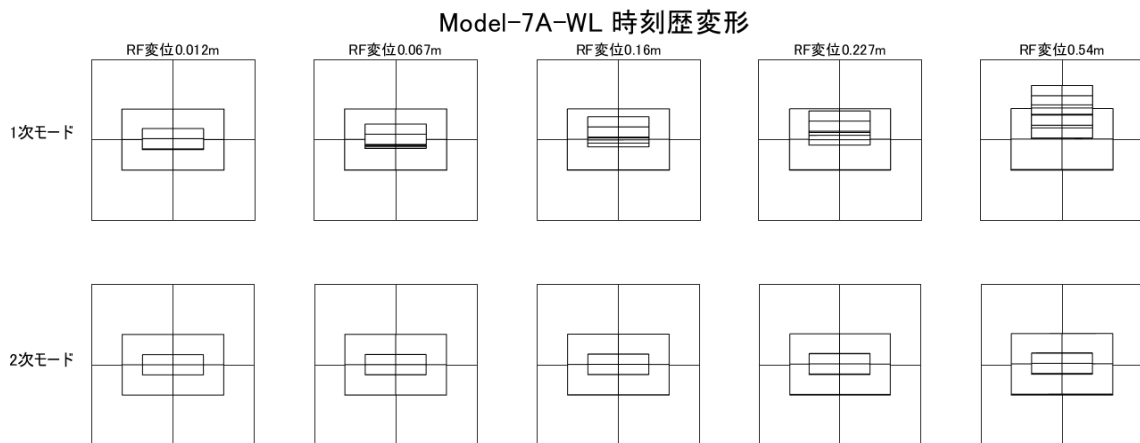


図 4. 2. 3. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

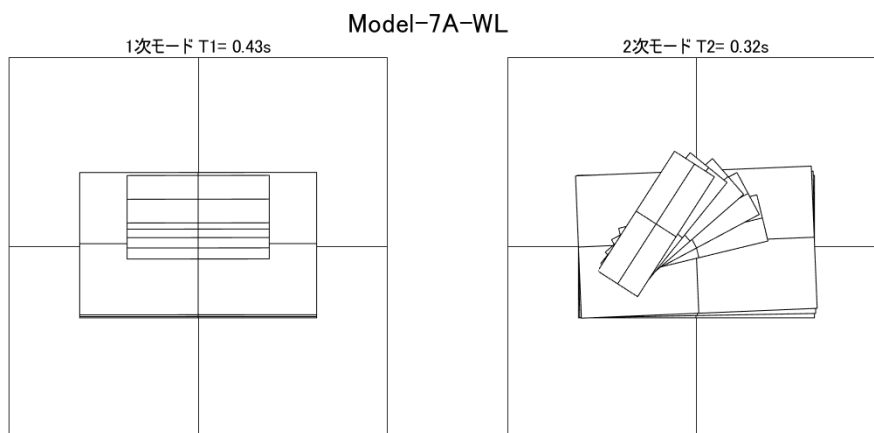


図 4. 2. 3. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

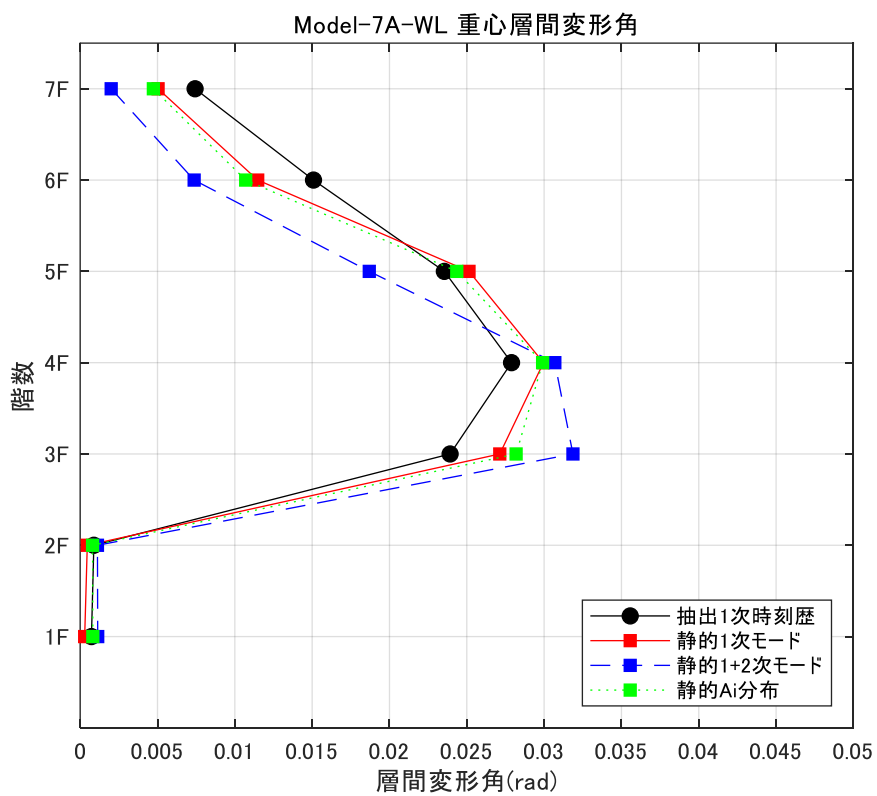


図 4. 2. 3. 4 重心層間変形角

4-2-4 3B-WL モデル

Model-3B-WL

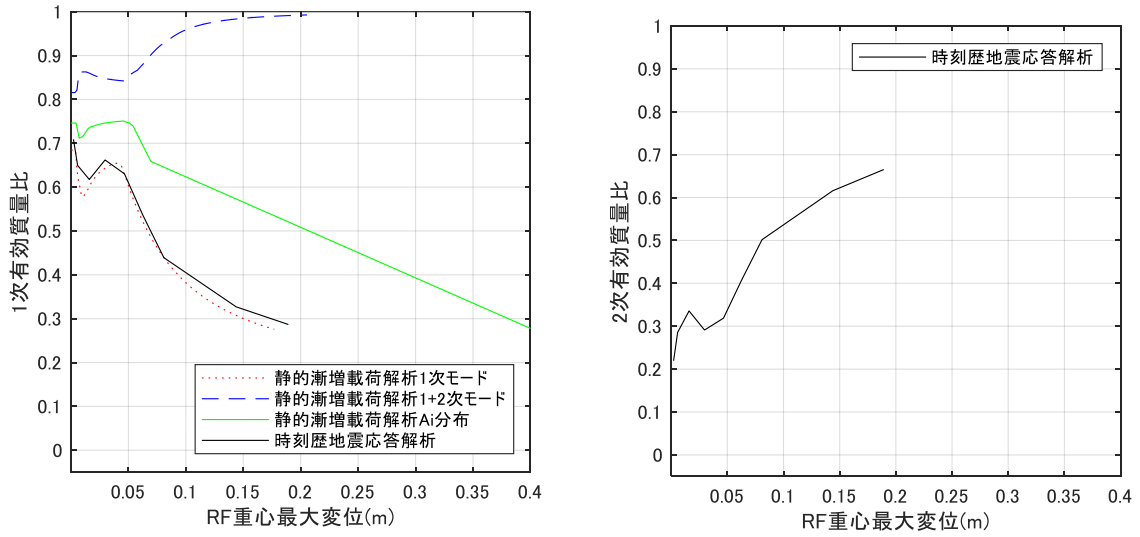


図 4.2.4.1 変形と有効質量比の推移

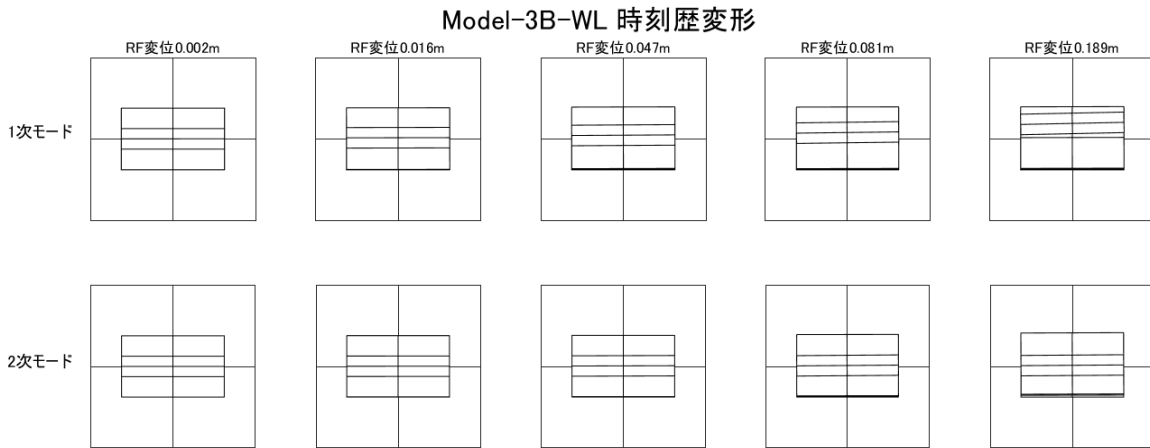


図 4.2.4.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

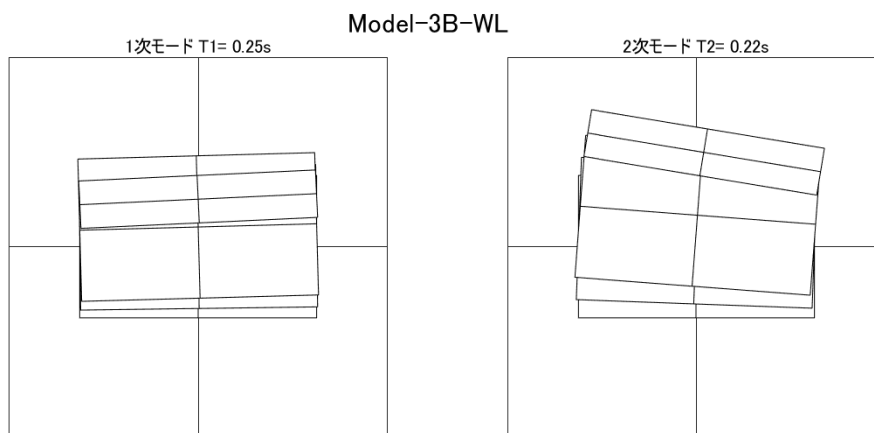


図 4. 2. 4. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

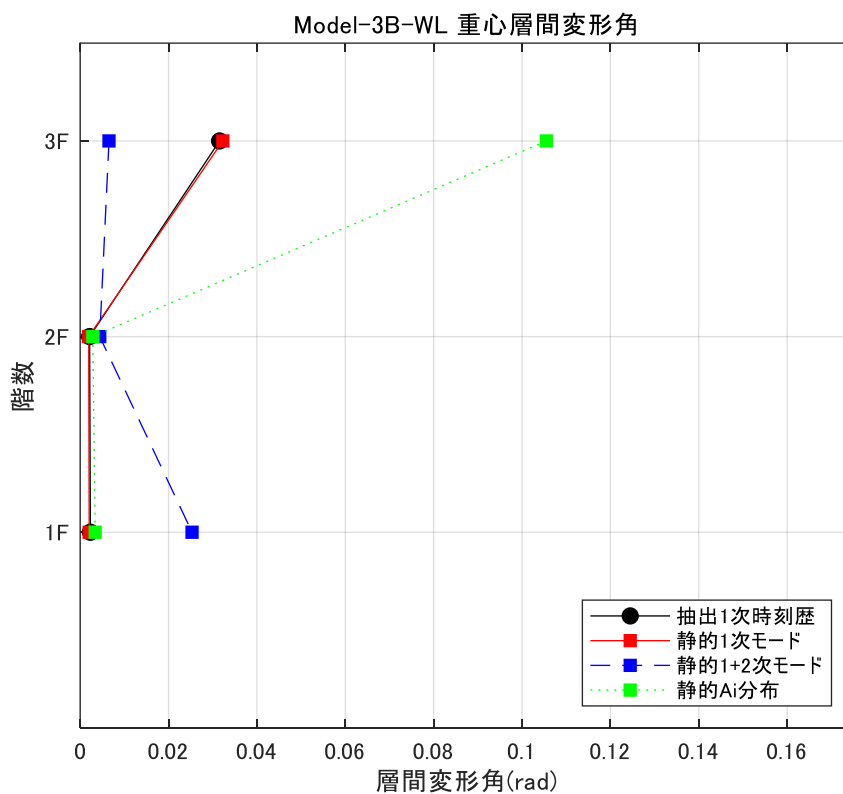


図 4. 2. 4. 4 重心層間変形角

4-2-5 5B-WL モデル

Model-5B-WL

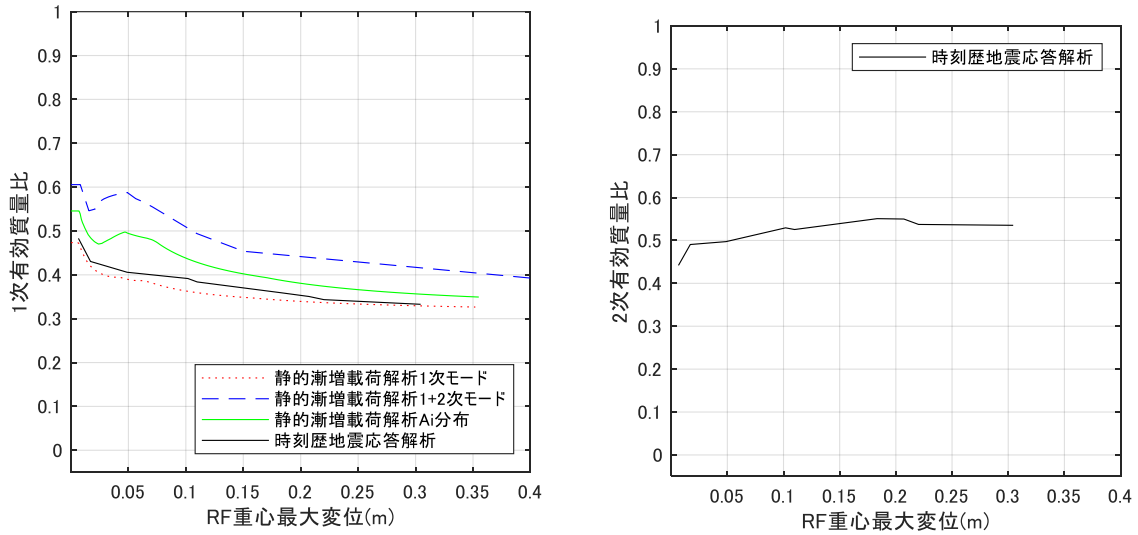


図 4. 2. 5. 1 変形と有効質量比の推移

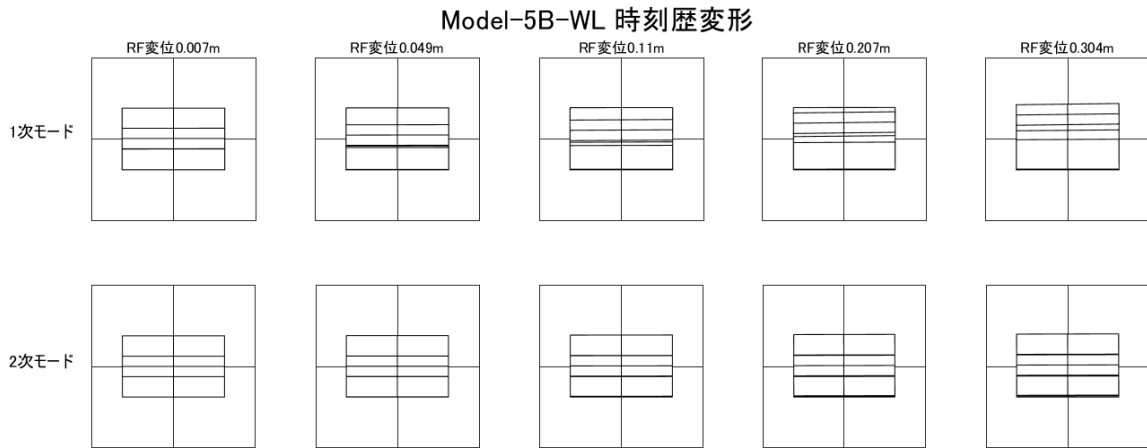


図 4. 2. 5. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

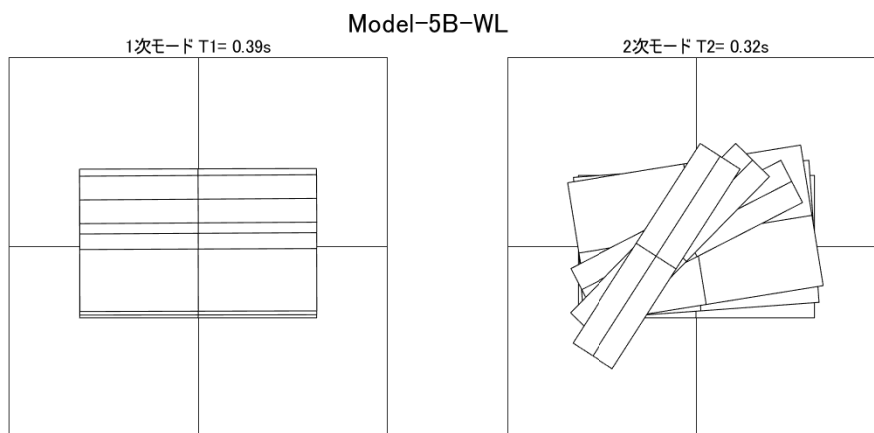


図 4. 2. 5. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

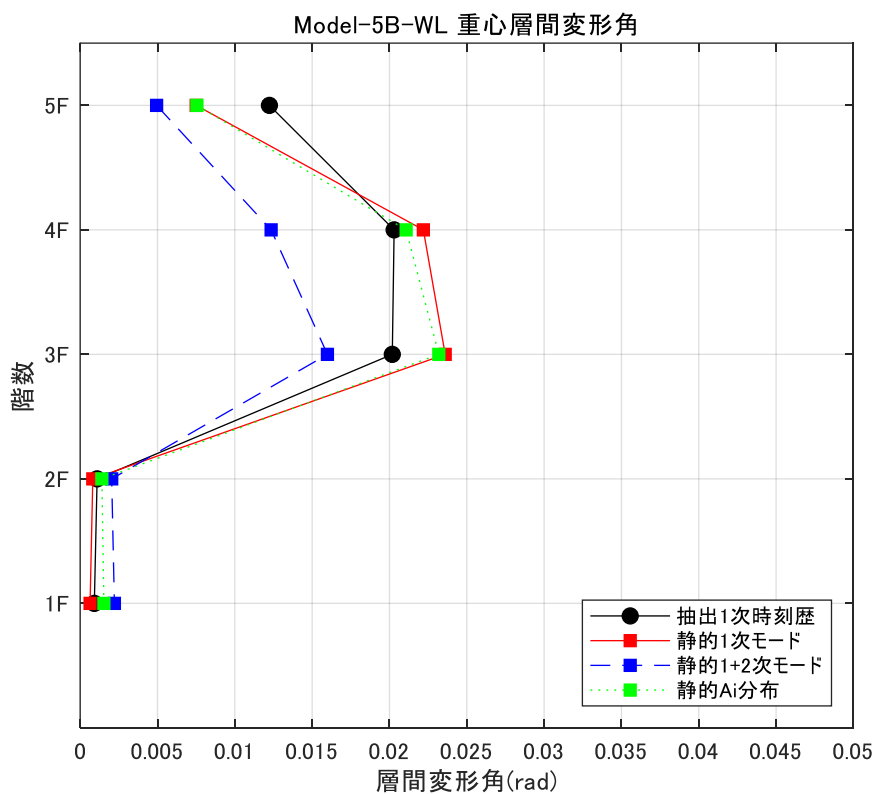


図 4. 2. 5. 4 重心層間変形角

4-2-6 7B-WL モデル

Model-7B-WL

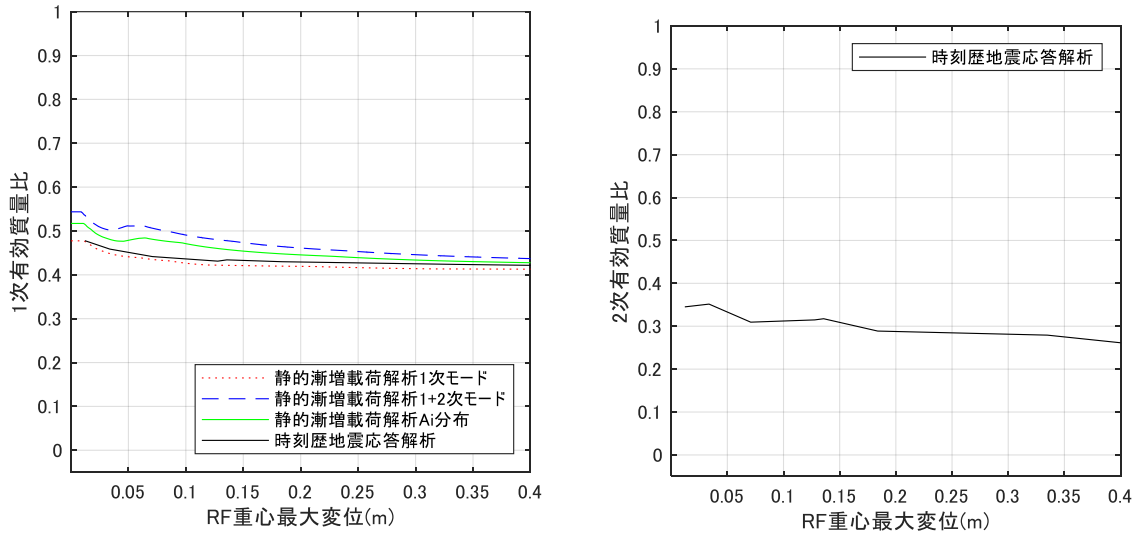


図 4. 2. 6. 1 変形と有効質量比の推移

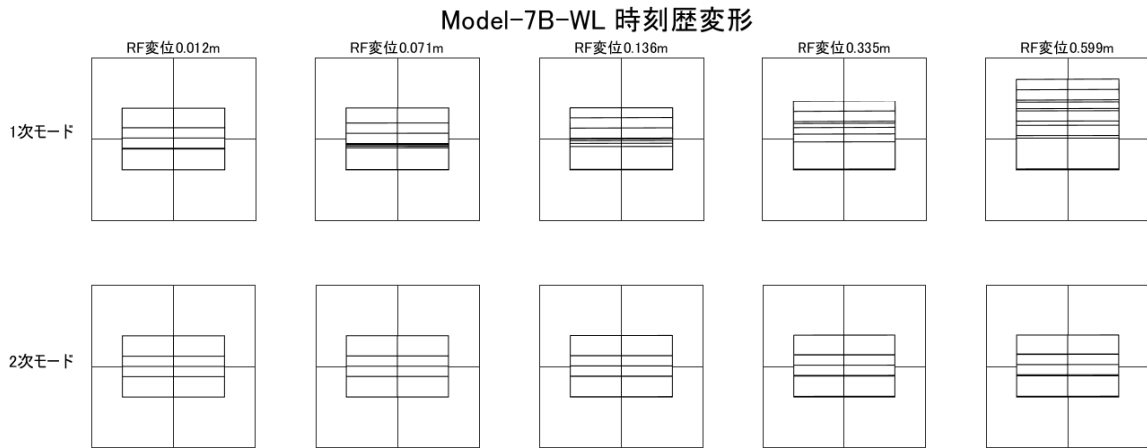


図 4. 2. 6. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

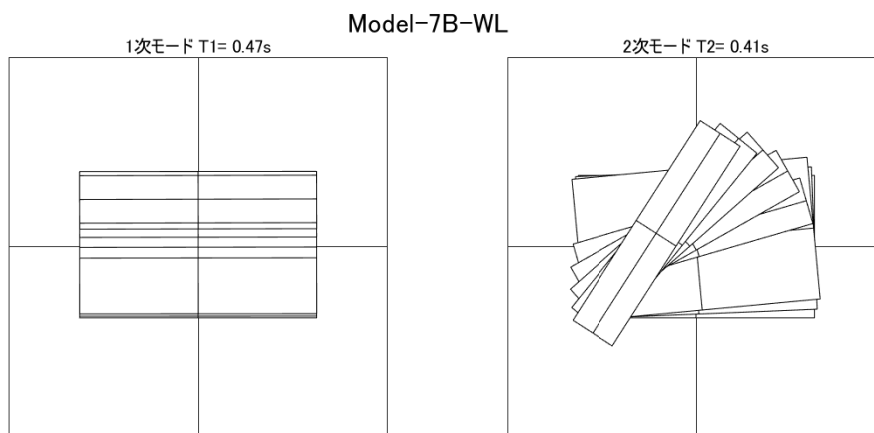


图 4. 2. 6. 3 弹性時 1 次モード, 2 次モード

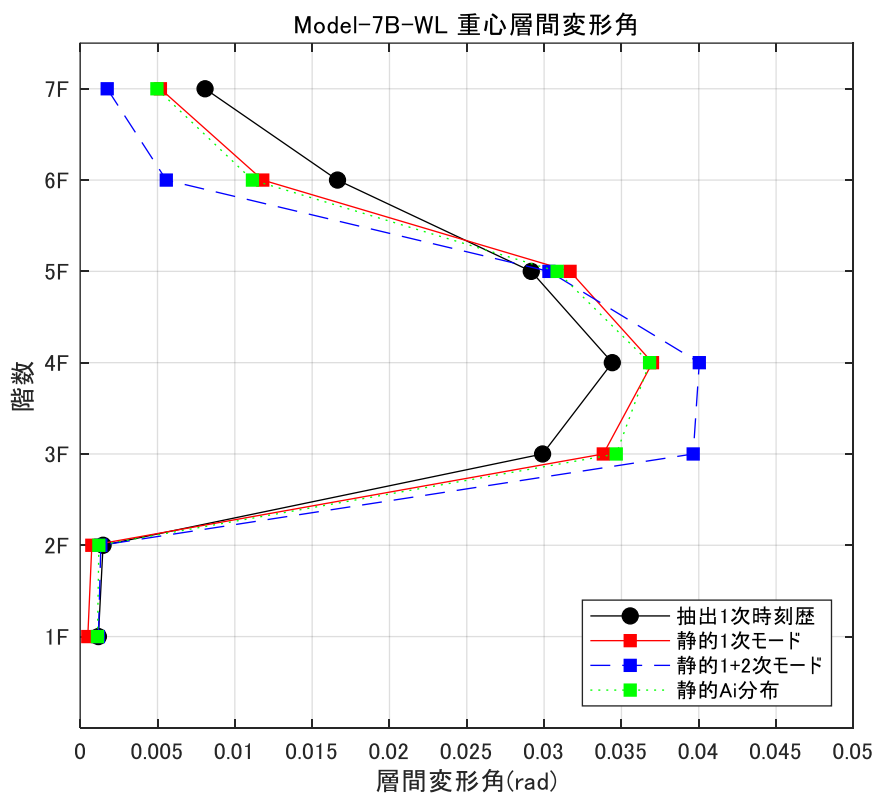


图 4. 2. 6. 4 重心層間変形角

4-2-7 3N-WL モデル

Model-3N-WL

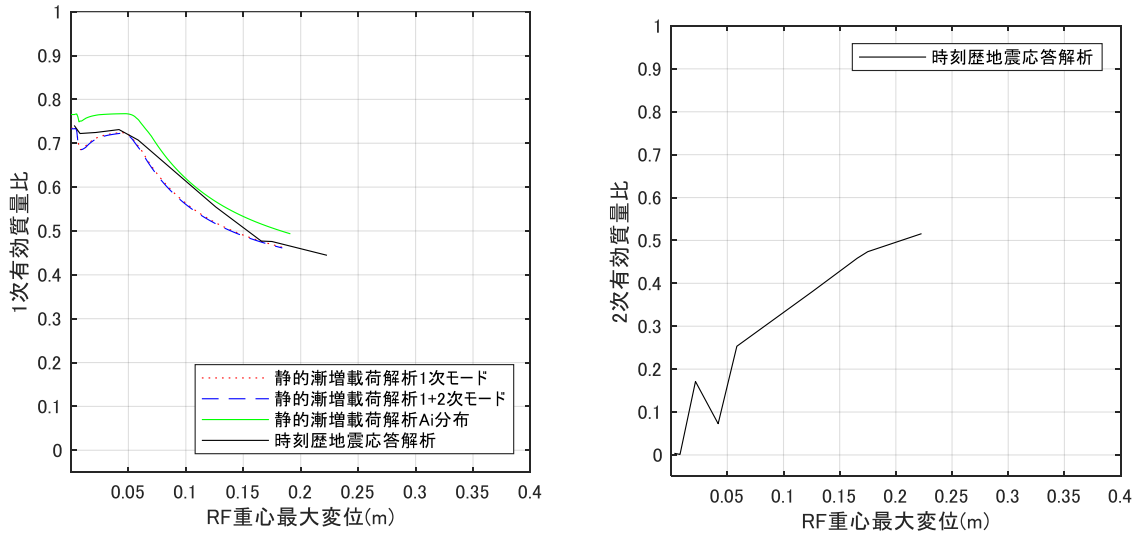


図 4. 2. 7. 1 変形と有効質量比の推移

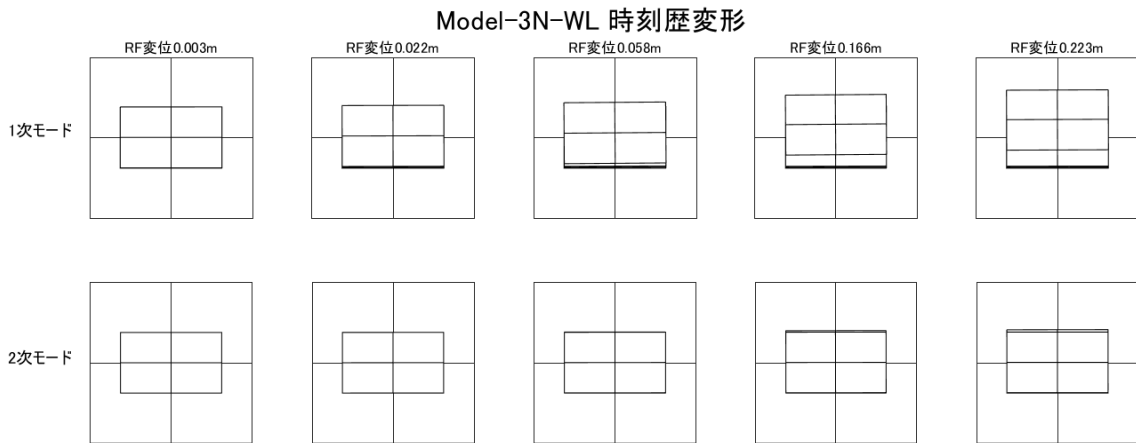


図 4. 2. 7. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

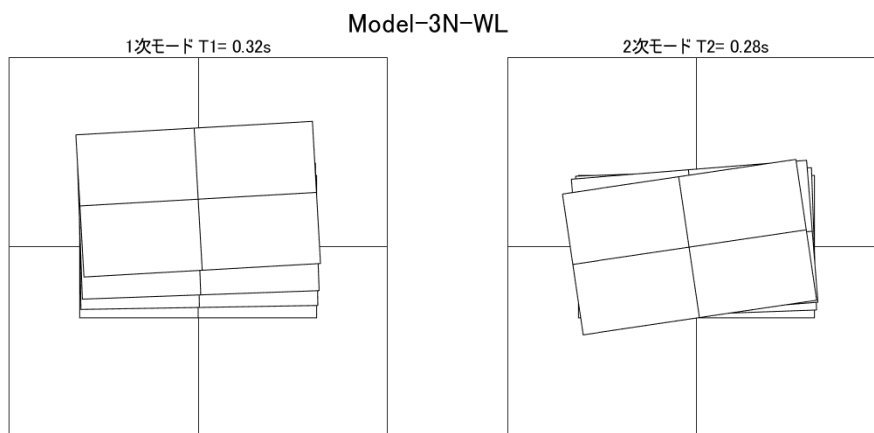


図 4. 2. 7. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

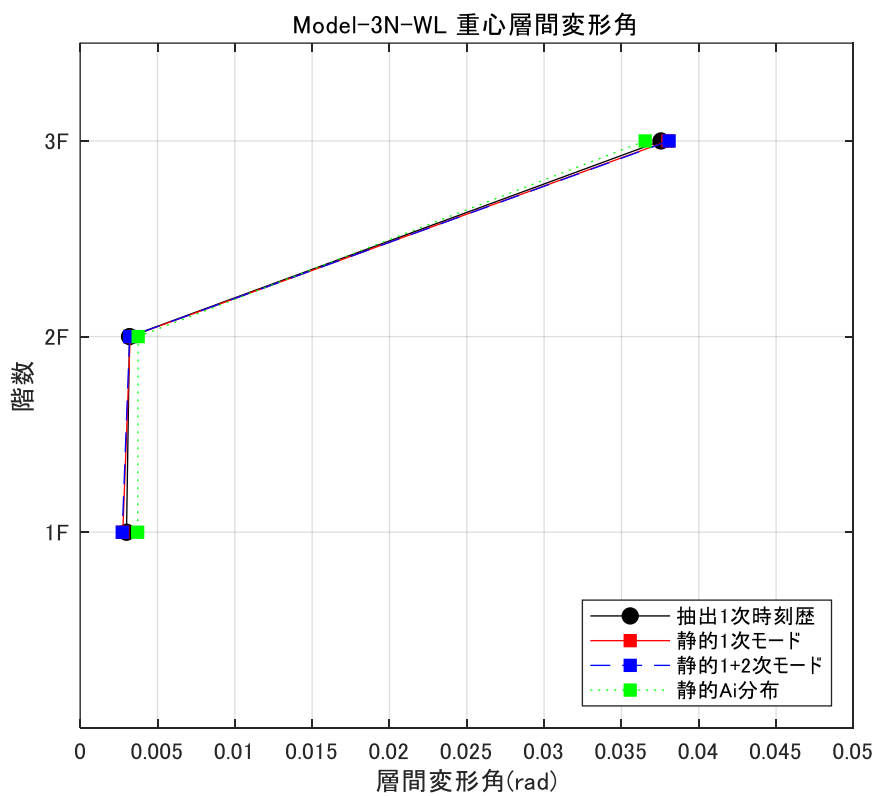


図 4. 2. 7. 4 重心層間変形角

4-2-8 5N-WL モデル

Model-5N-WL

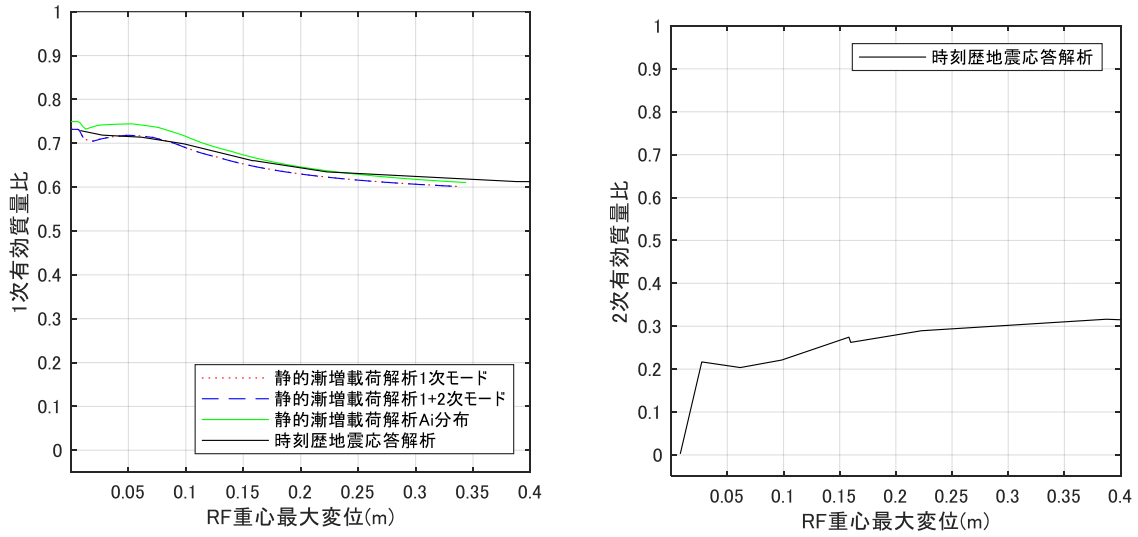


図 4.2.8.1 変形と有効質量比の推移

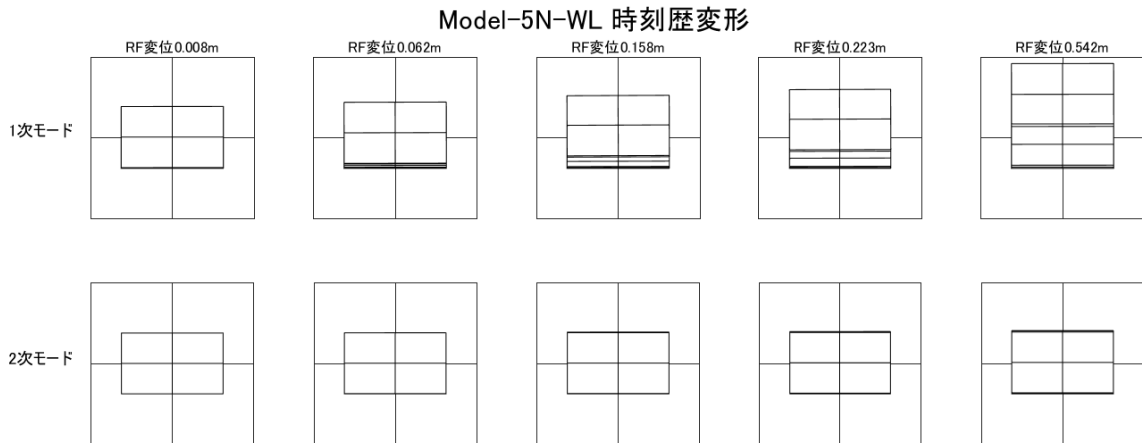


図 4.2.8.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

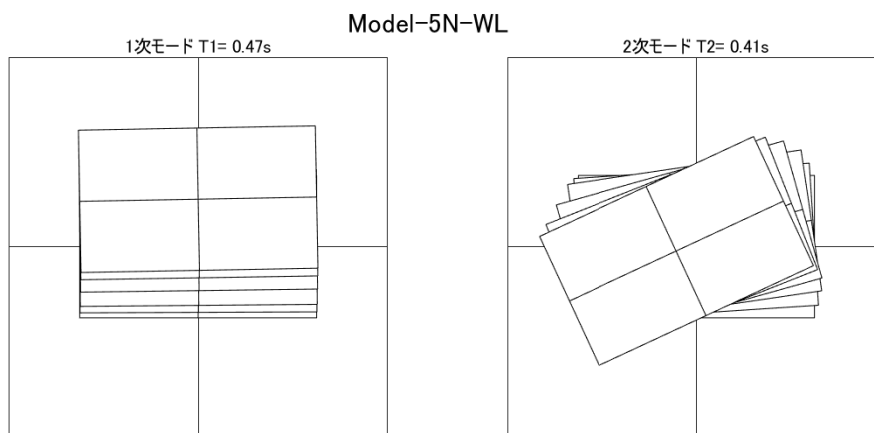


図 4. 2. 8. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

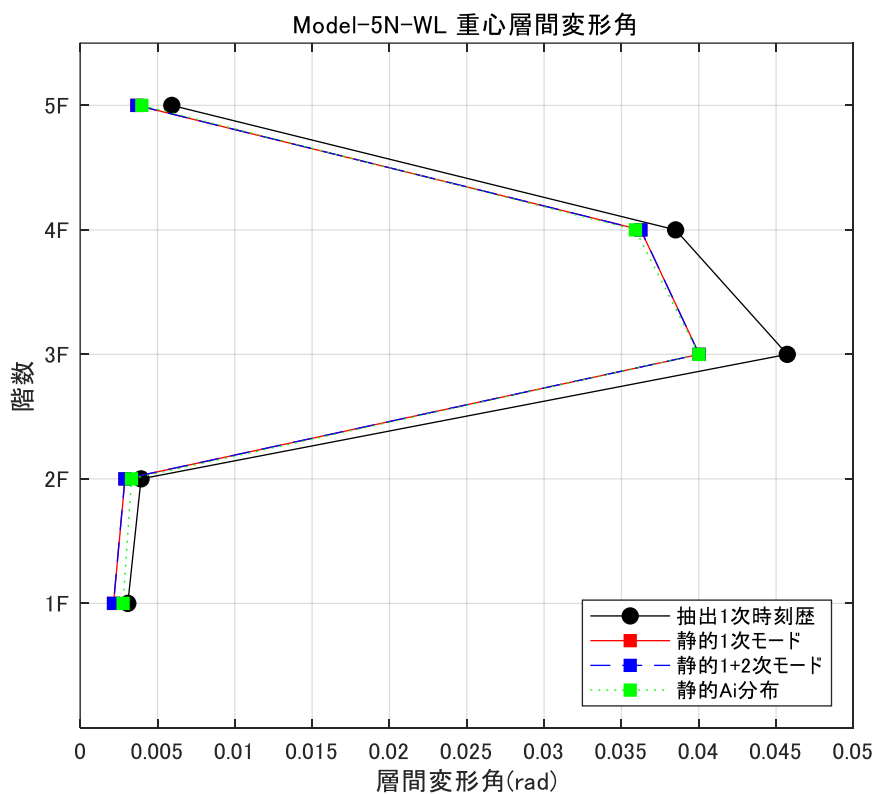


図 4. 2. 8. 4 重心層間変形角

4-2-9 7N-WL モデル

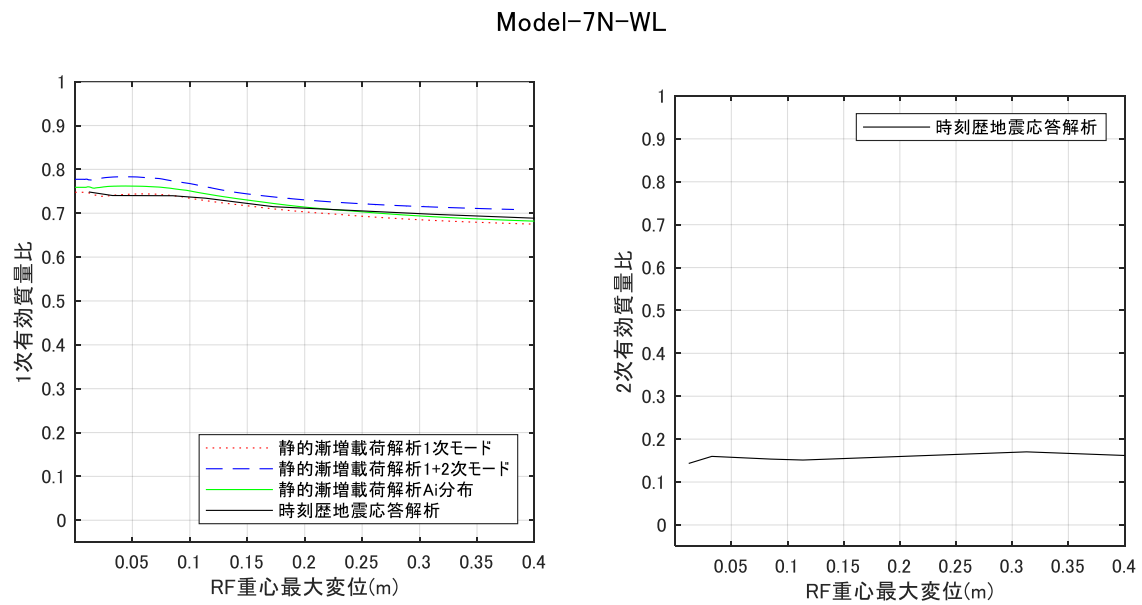


図 4. 2. 9. 1 変形と有効質量比の推移

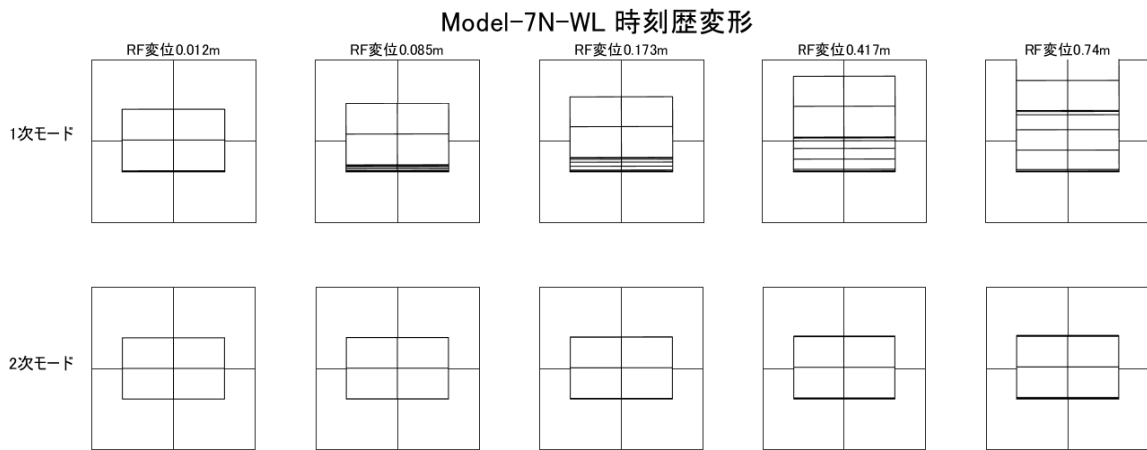


図 4. 2. 9. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

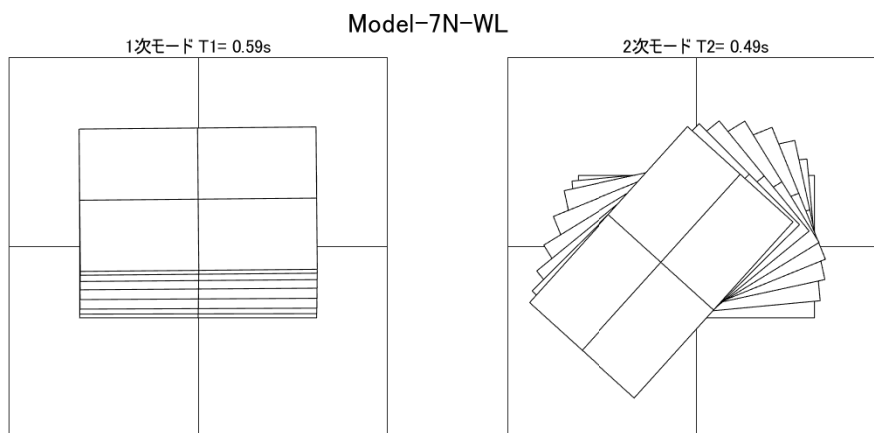


図 4. 2. 9. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

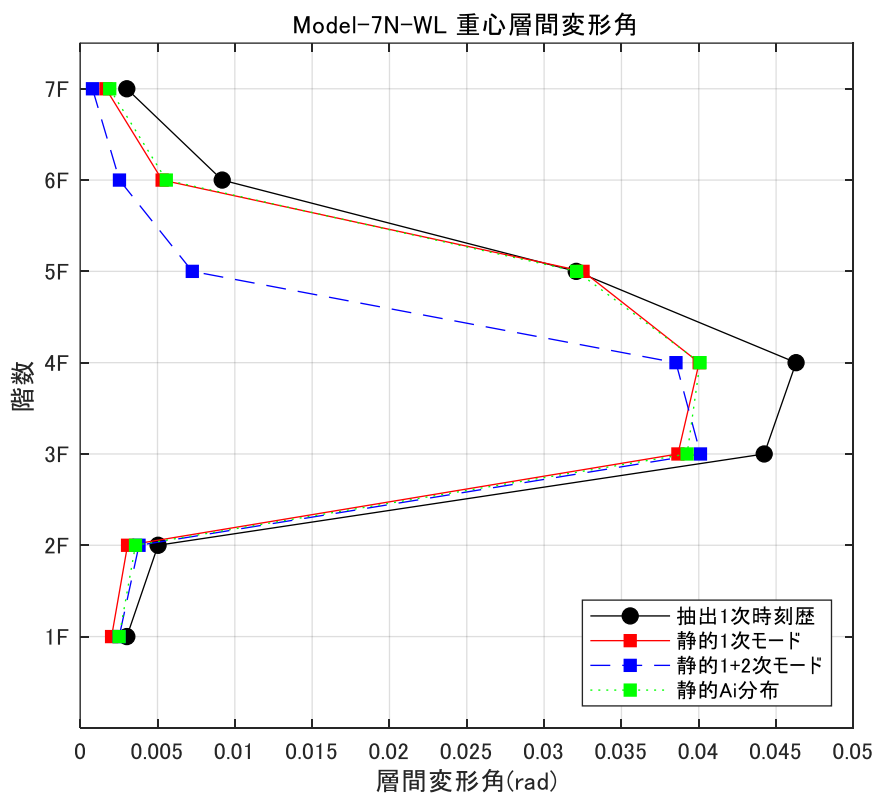


図 4. 2. 9. 4 重心層間変形角

4-3 WH モデル

4-3-1 3A-WH モデル

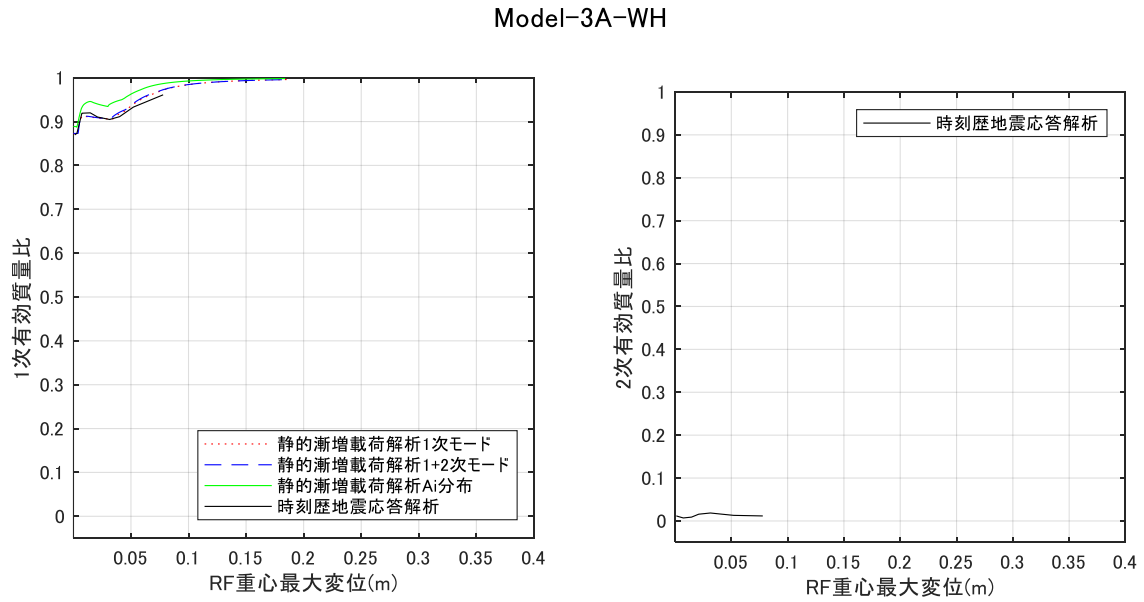


図 4.3.1.1 変形と有効質量比の推移

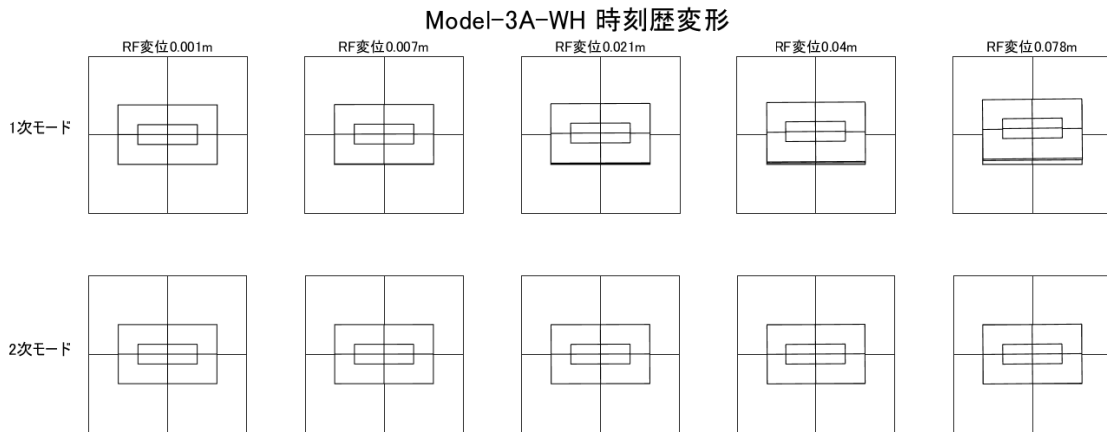


図 4.3.1.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

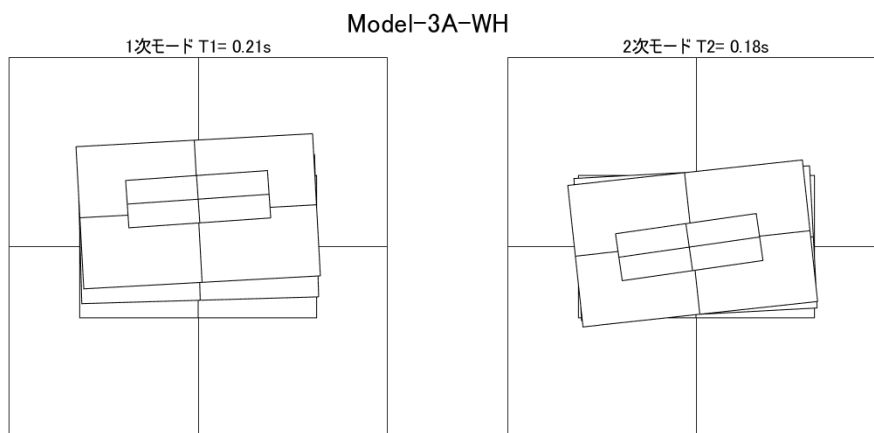


図 4. 3. 1. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

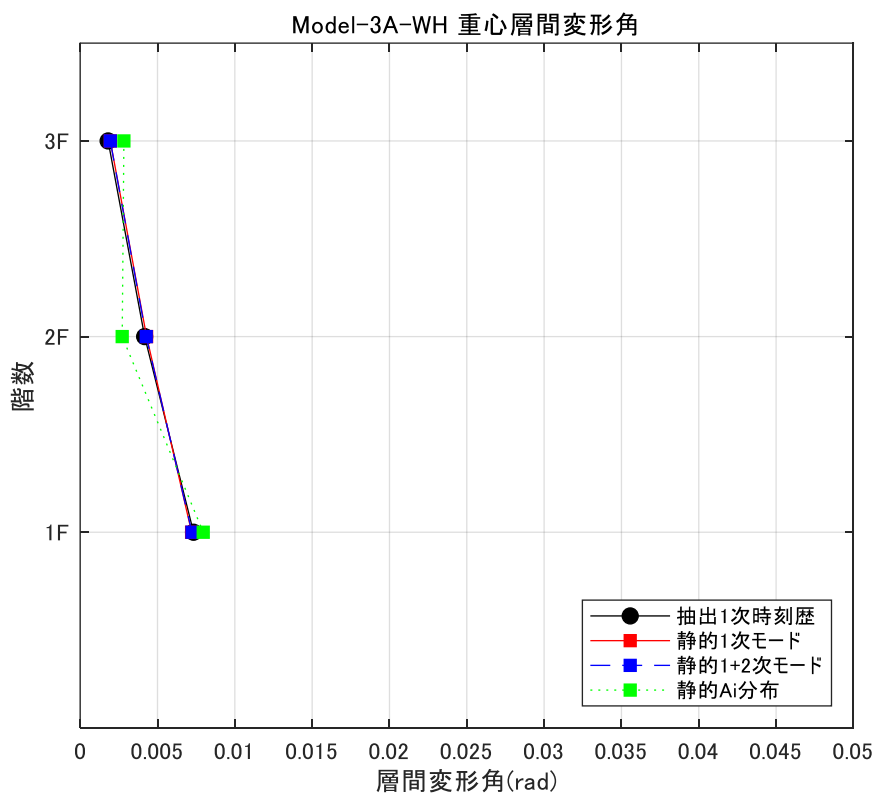


図 4. 3. 1. 4 重心層間変形角

4-3-2 5A-WH モデル

Model-5A-WH

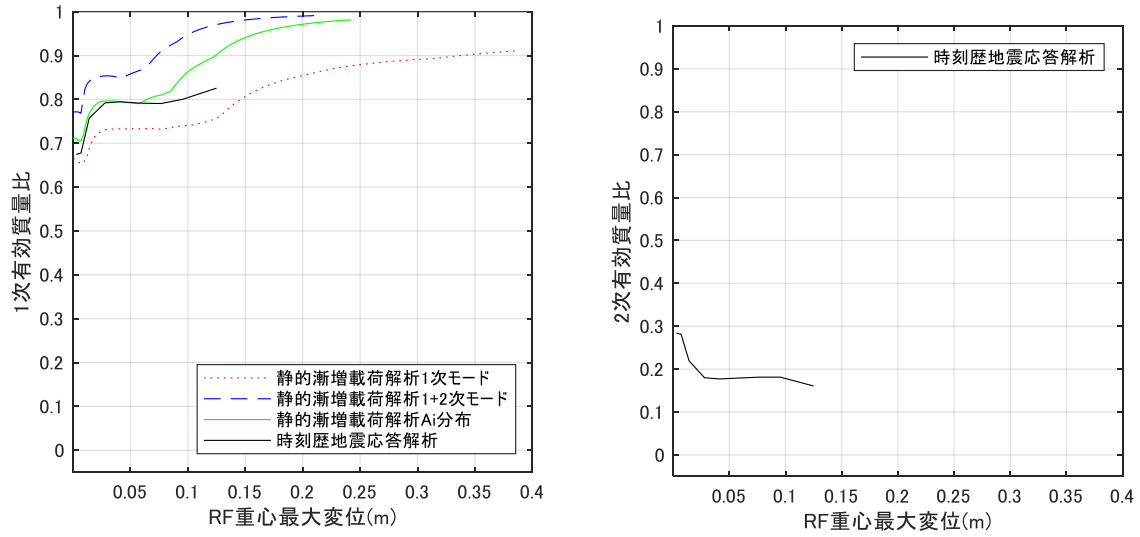


図 4.3.2.1 変形と有効質量比の推移

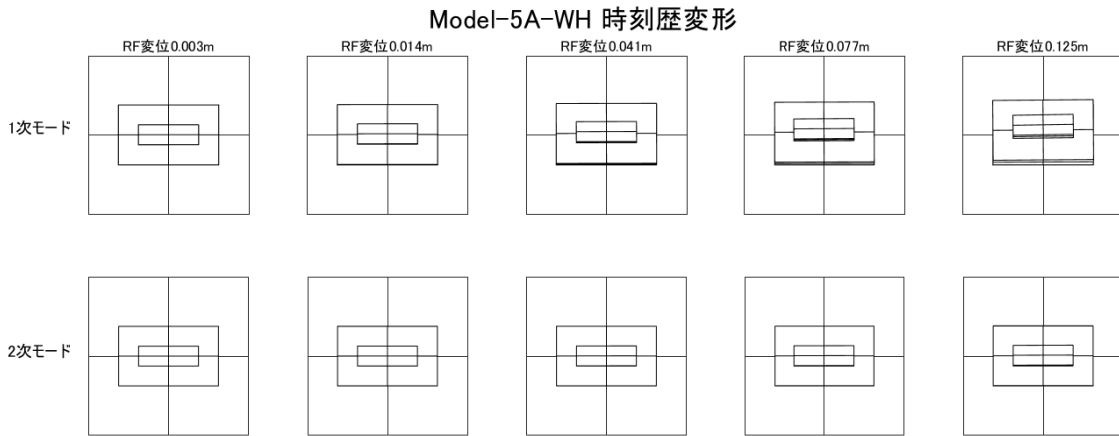


図 4.3.2.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

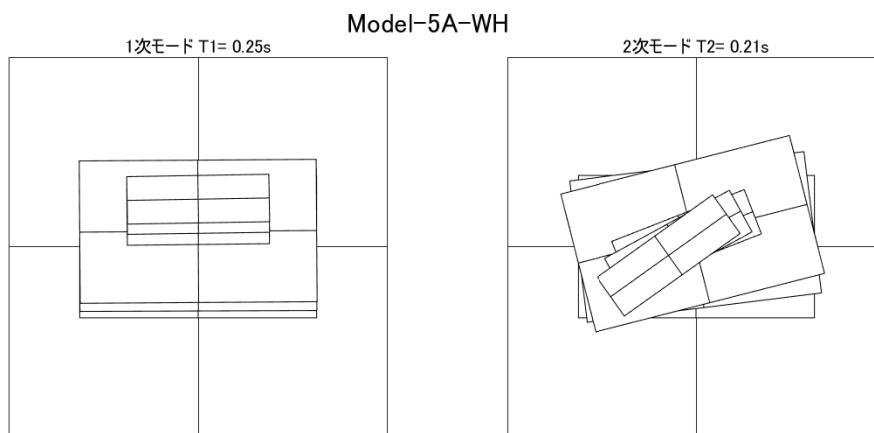


図 4. 3. 2. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

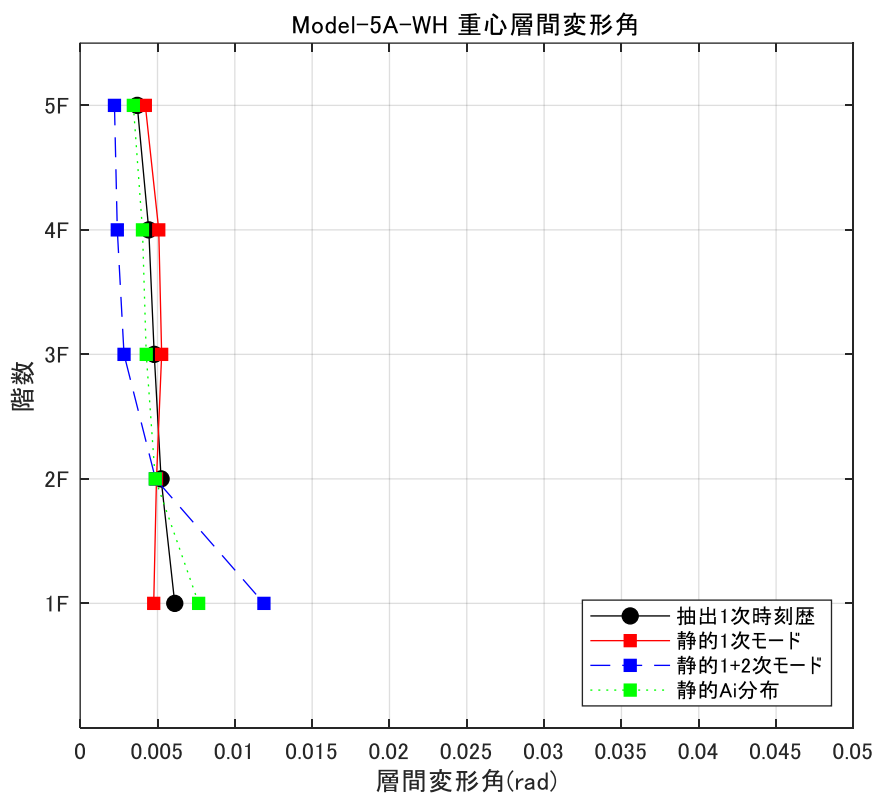
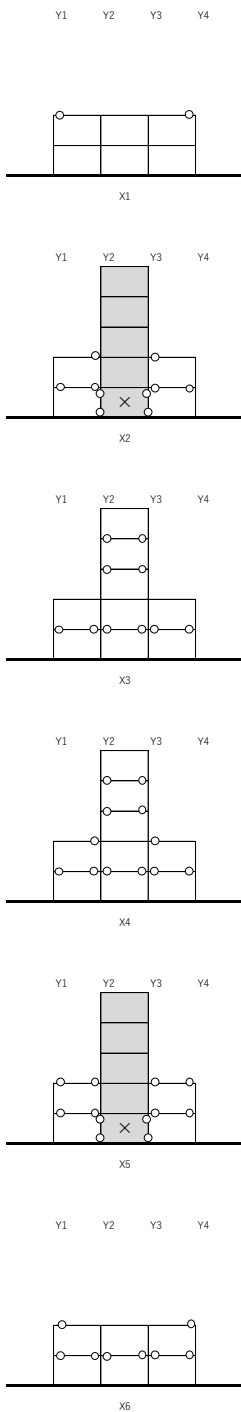
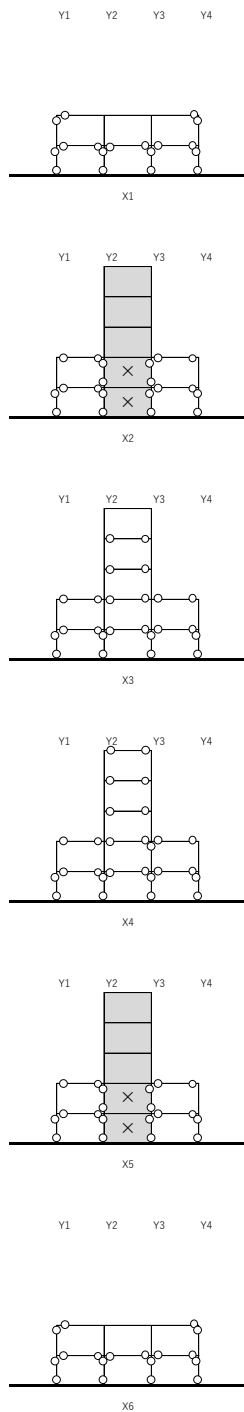


図 4. 3. 2. 4 重心層間変形角

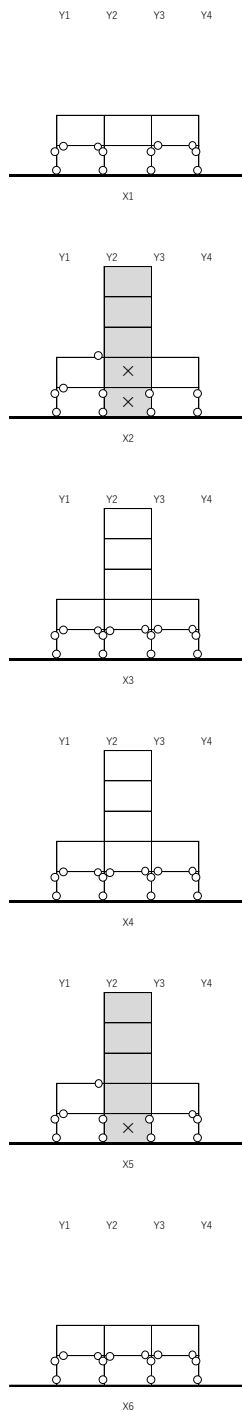
5A-WH 地震応答解析



1次モード静の漸増载荷解析



1+2次モード静の漸増载荷解析



Ai外力分布静の漸増载荷解析

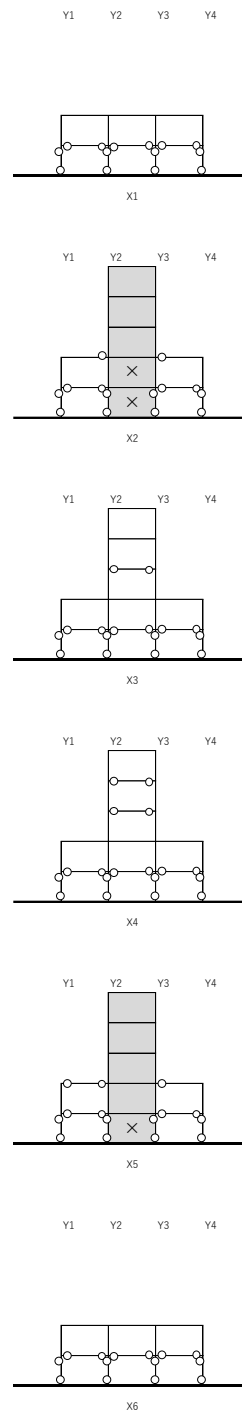


図 4.3.2.5 塑性ヒンジ図

4-3-3 7A-WH モデル

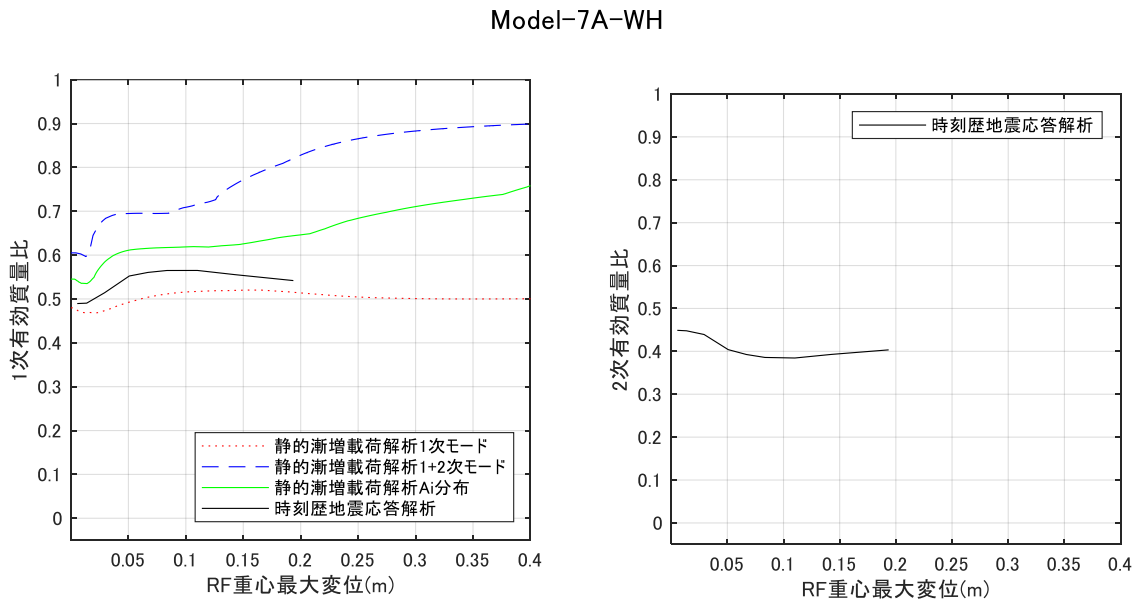


図 4. 3. 3. 1 変形と有効質量比の推移

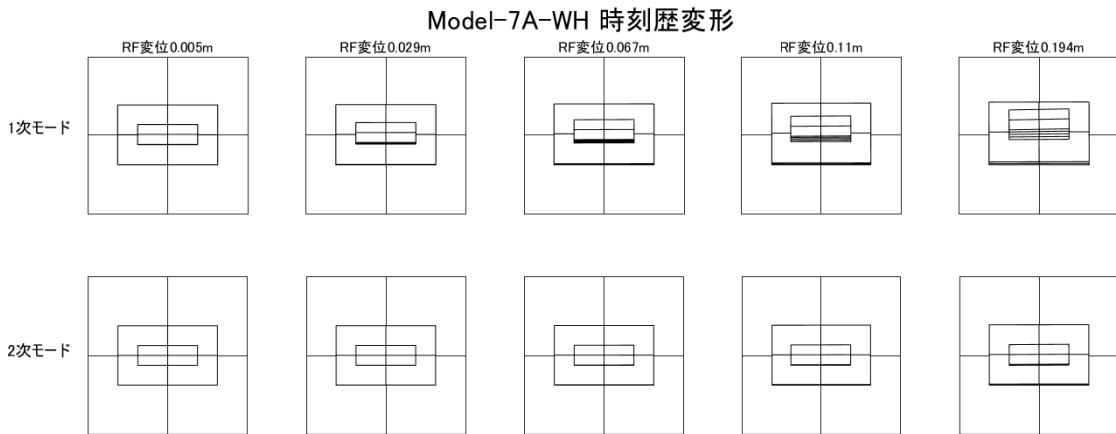


図 4. 3. 3. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

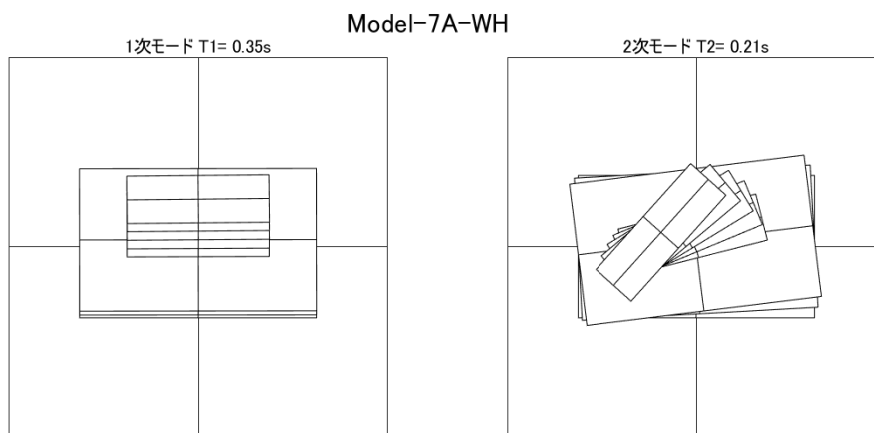


図 4. 3. 3. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

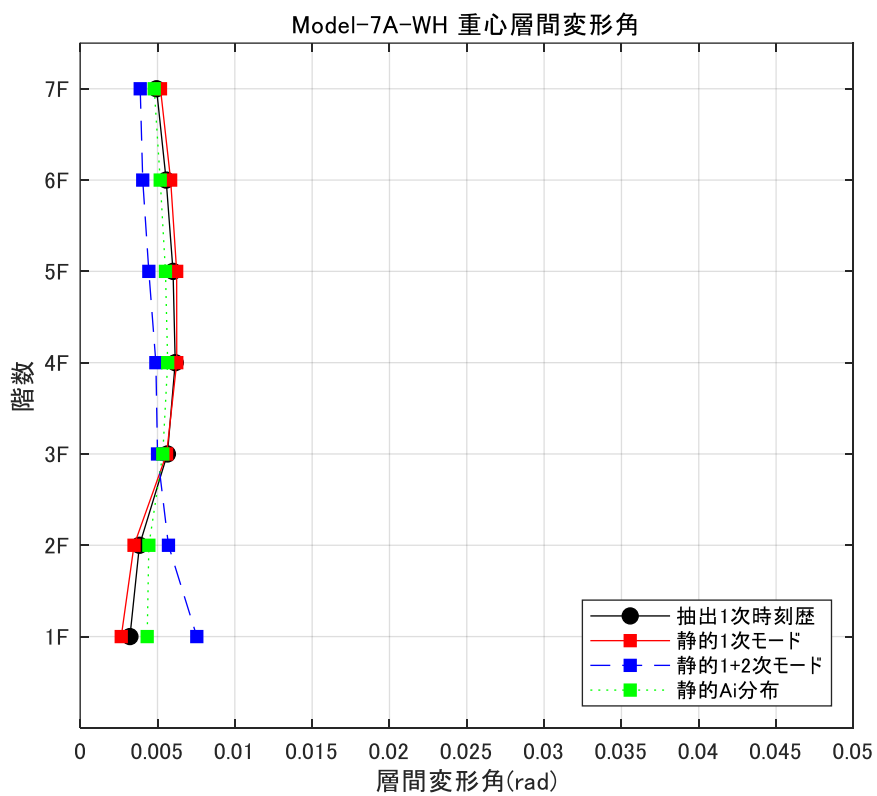
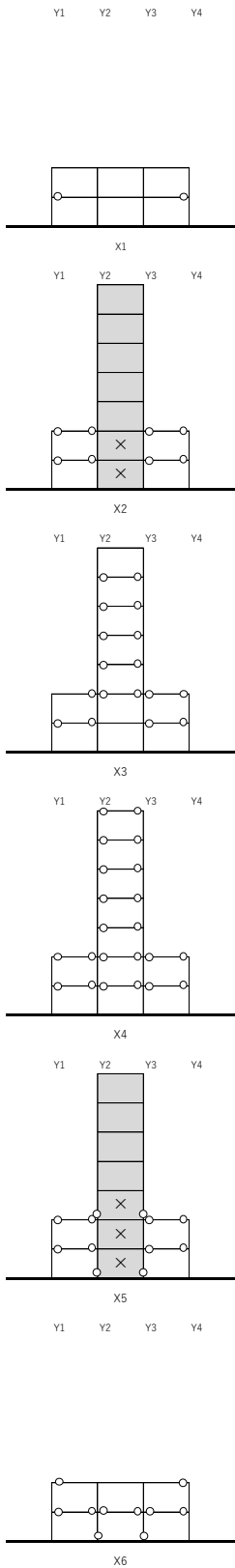
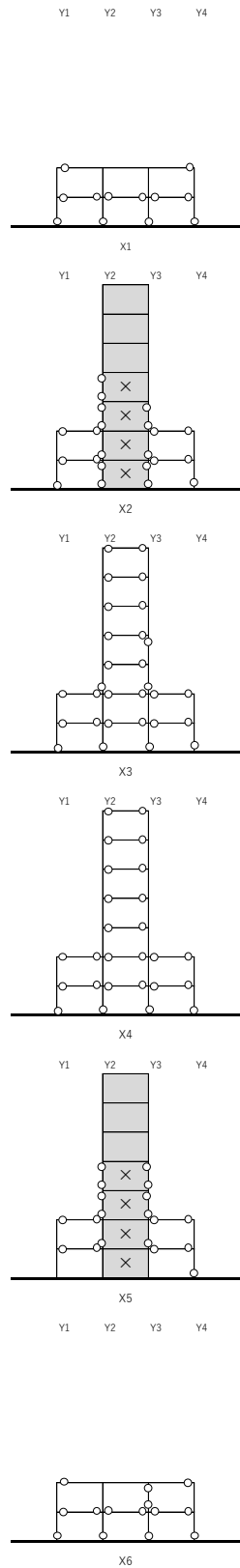


図 4. 3. 3. 4 重心層間変形角

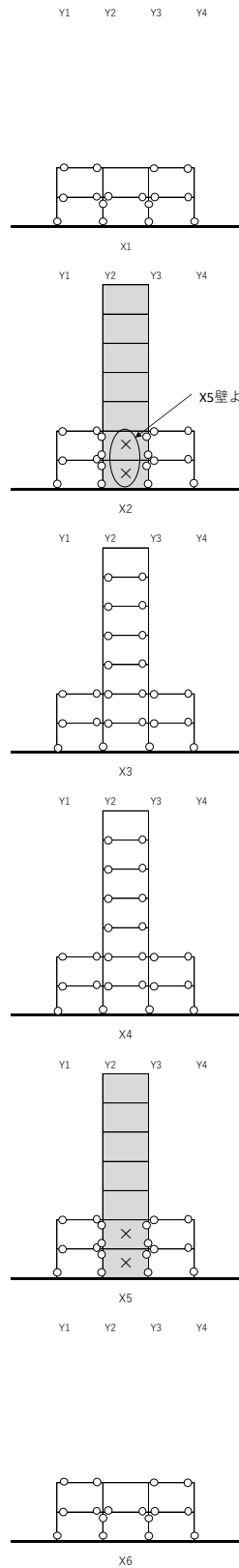
7A-WH 地震応答解析



1次モード静的漸増載荷解析



1+2次モード静的漸増載荷解析



Ai外力分布静的漸増載荷解析

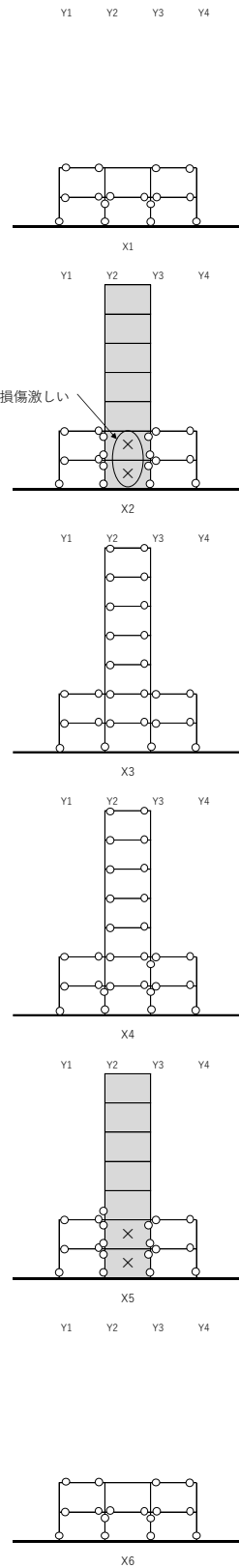


図 4.3.3.4 塑性ヒンジ図

4-3-4 3B-WH モデル

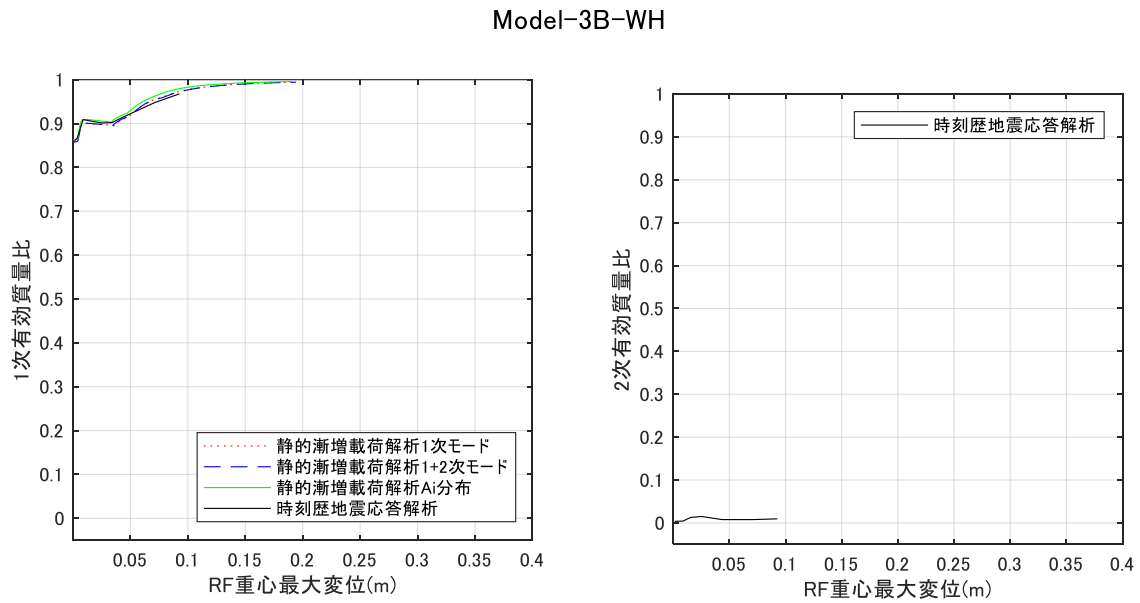


図 4.3.4.1 変形と有効質量比の推移

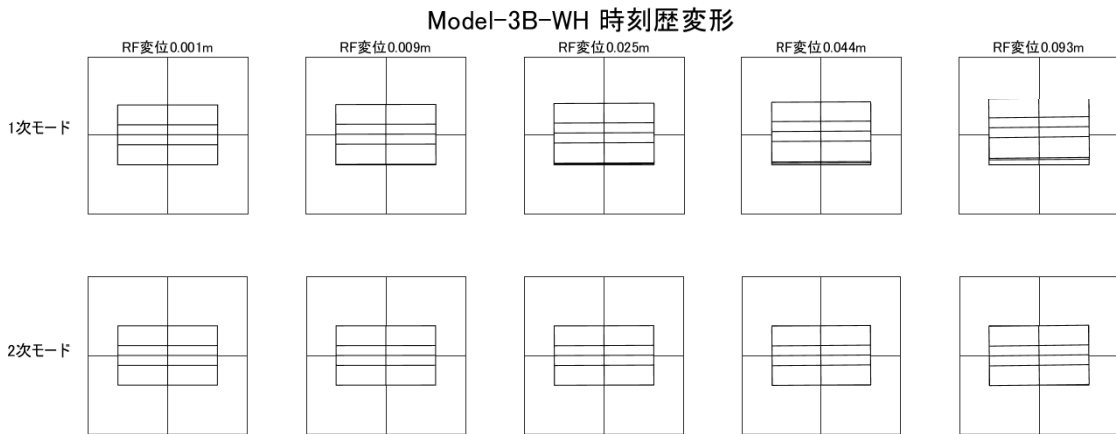


図 4.3.4.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

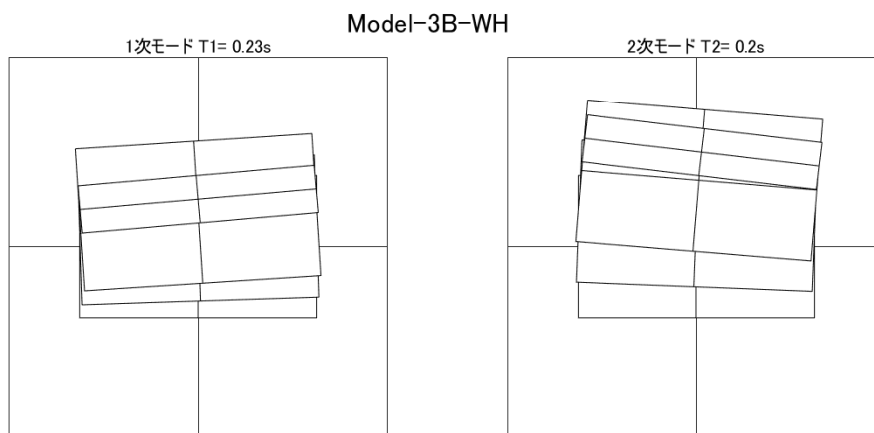


図 4. 3. 4. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

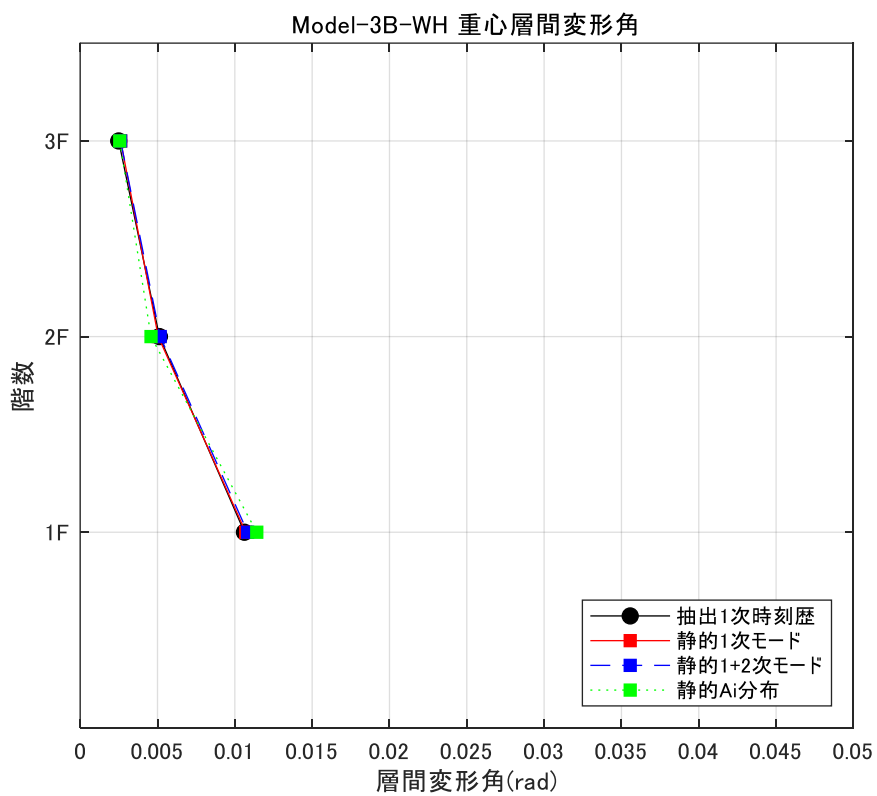


図 4. 3. 4. 4 重心層間変形角

4-3-5 5B-WH モデル

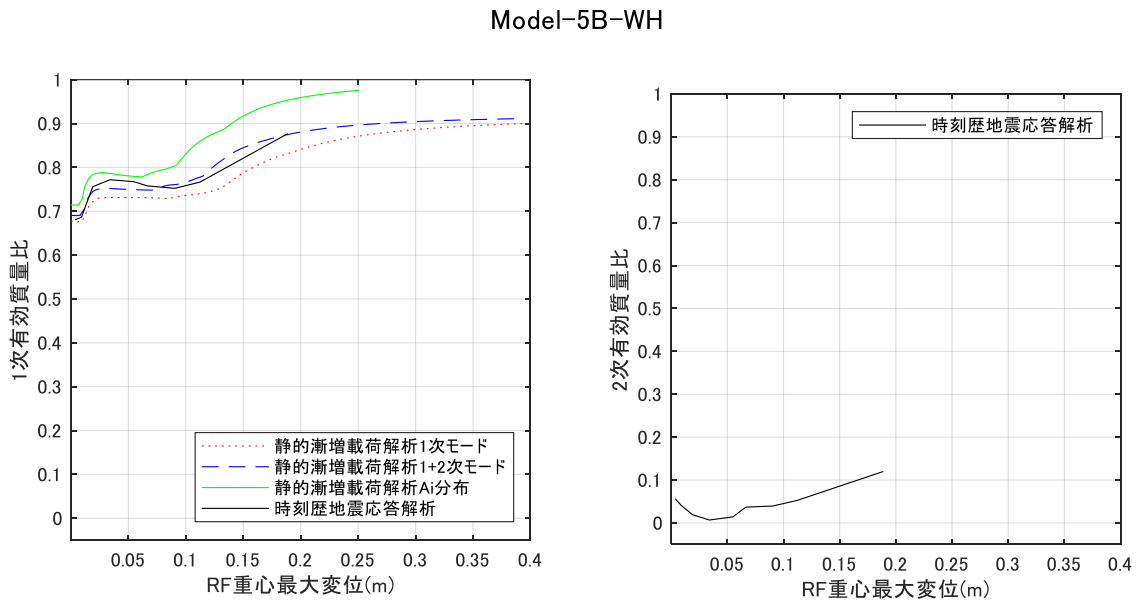


図 4.3.5.1 変形と有効質量比の推移

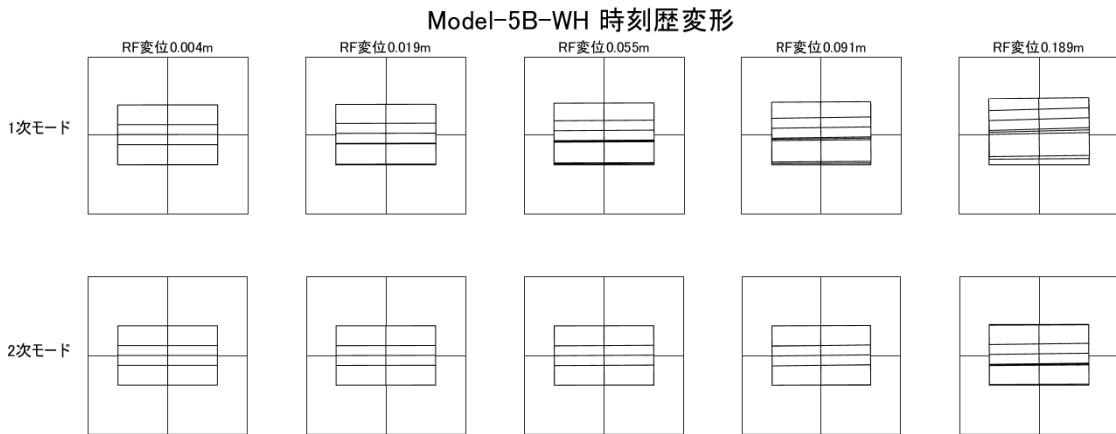


図 4.3.5.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

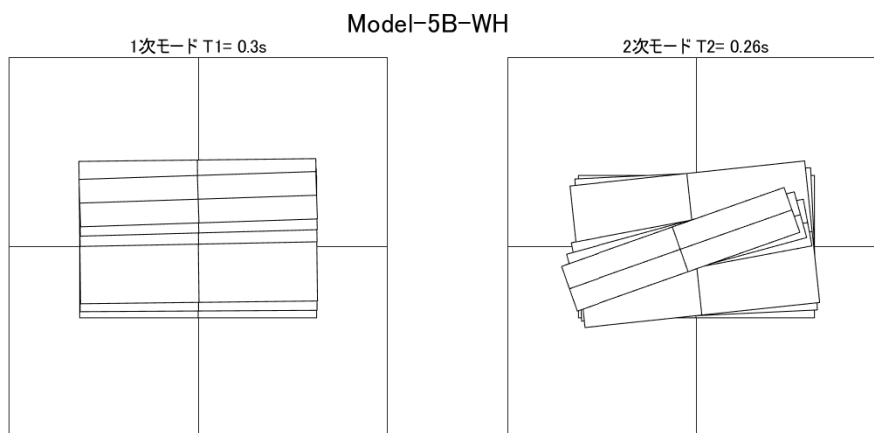


図 4. 3. 5. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

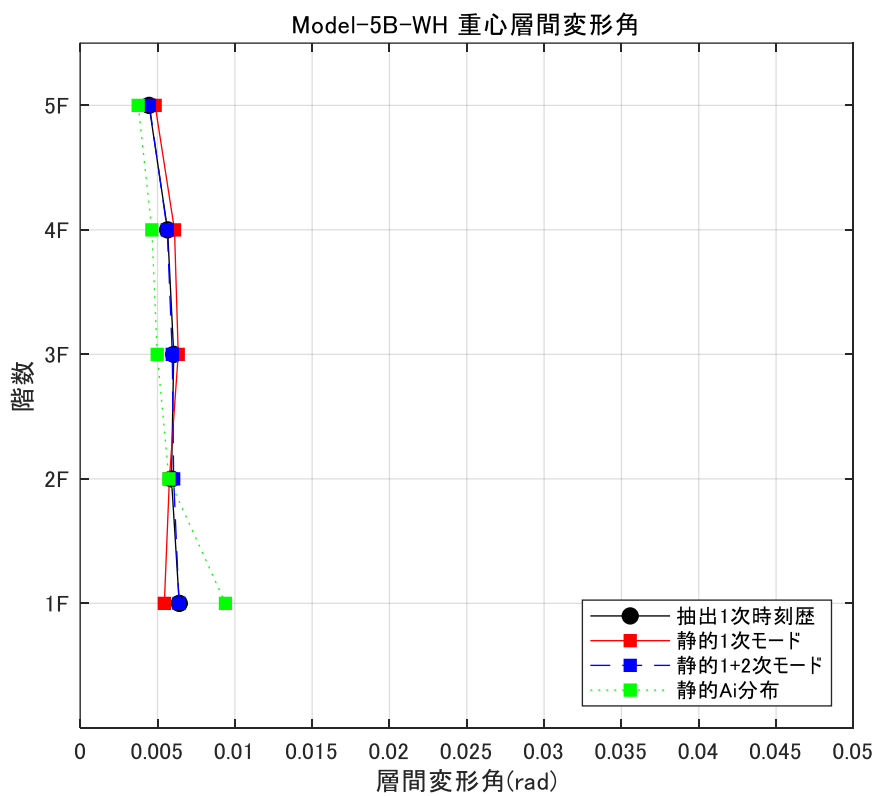


図 4. 3. 5. 4 重心層間変形角

4-3-6 7B-WH モデル

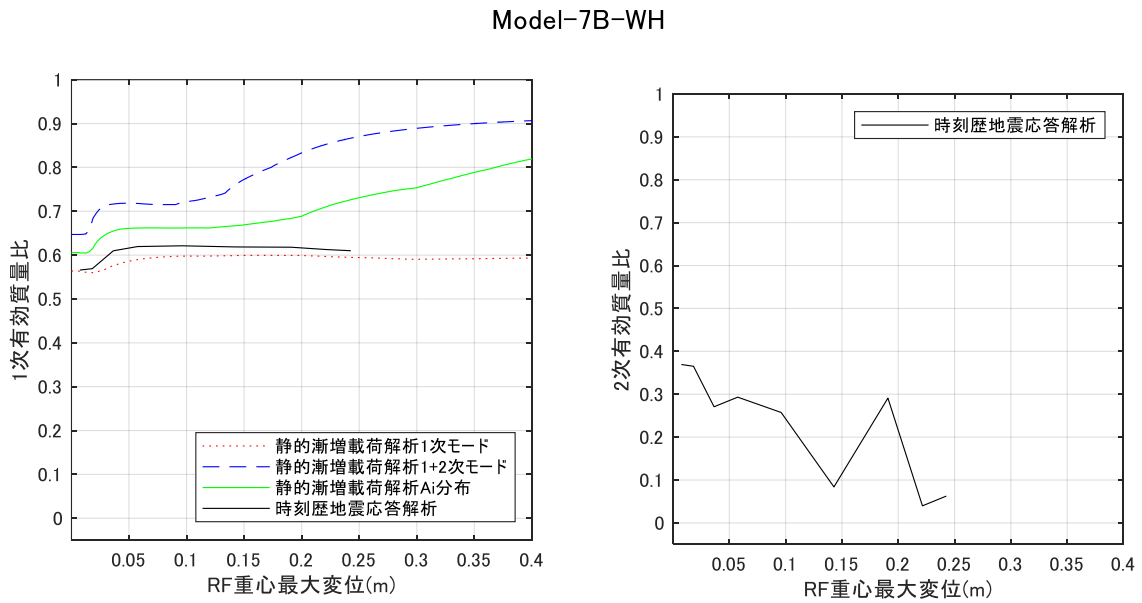


図 4.3.6.1 変形と有効質量比の推移

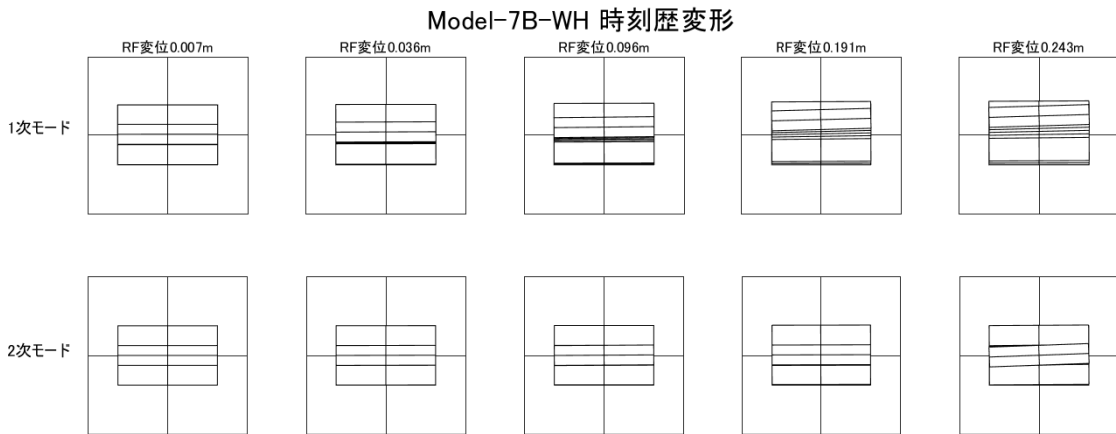


図 4.3.6.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

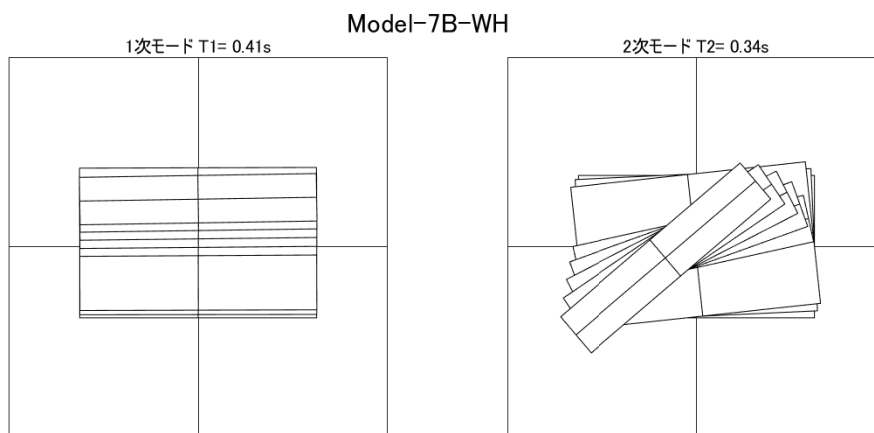


図 4. 3. 6. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

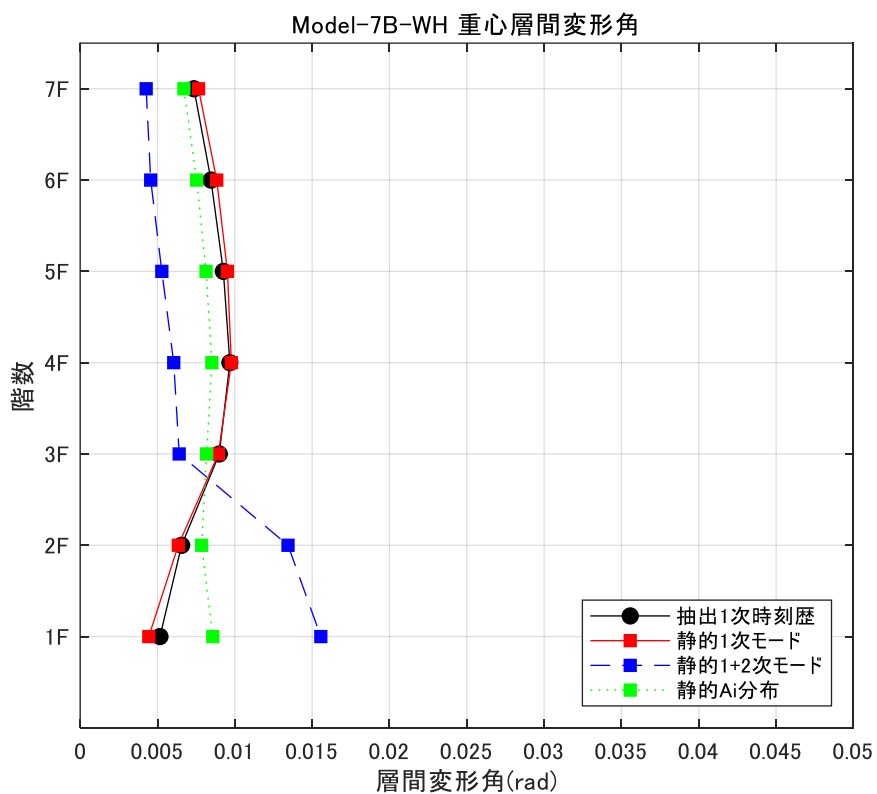


図 4. 3. 6. 4 重心層間変形角

4-3-7 3N-WH モデル

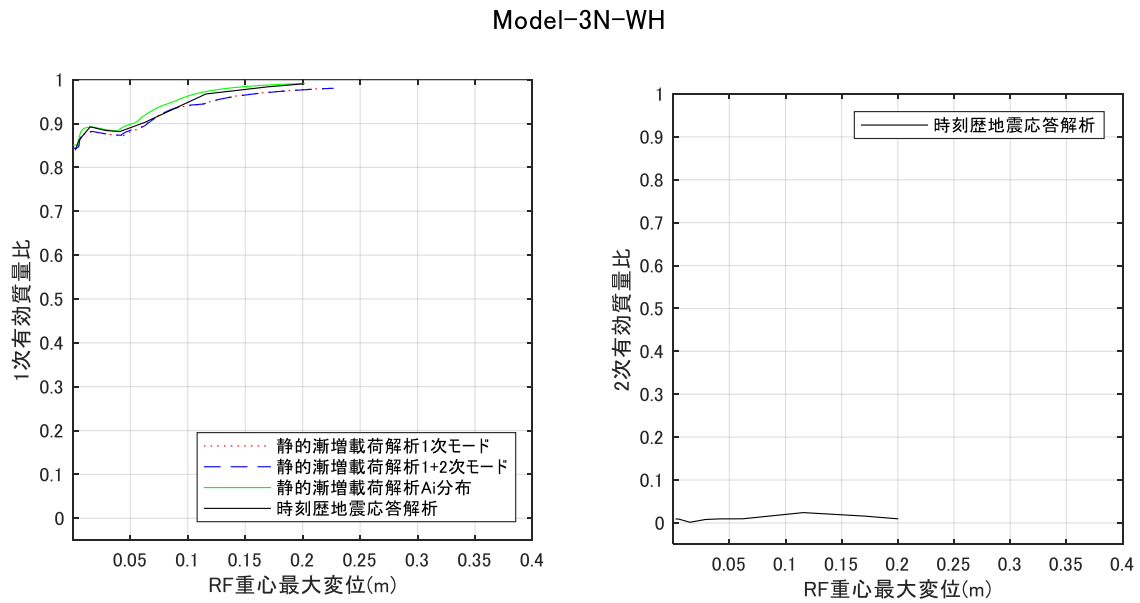


図 4.3.7.1 変形と有効質量比の推移

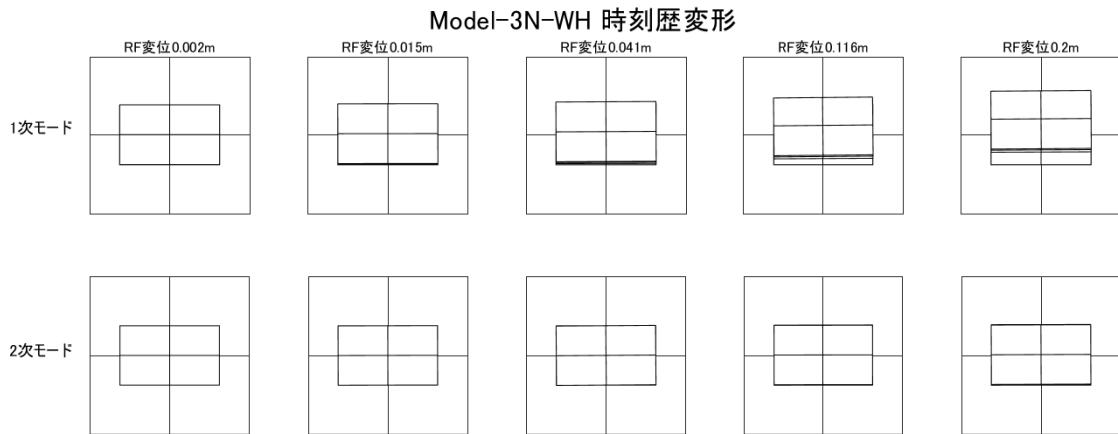


図 4.3.7.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

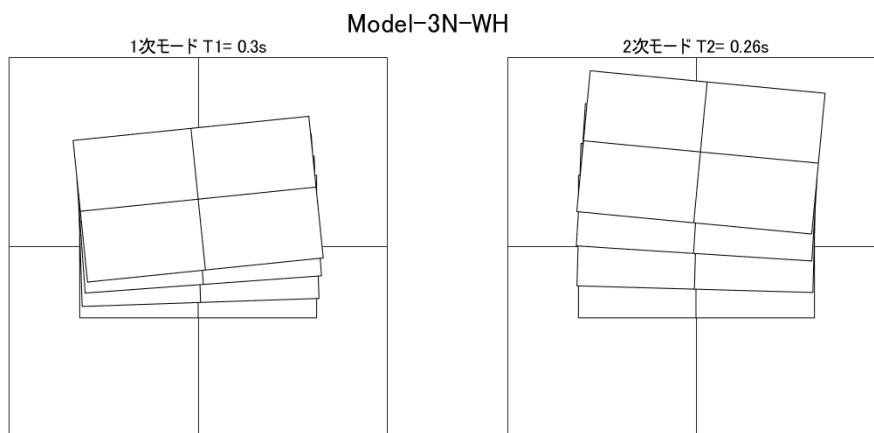


図 4. 3. 7. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

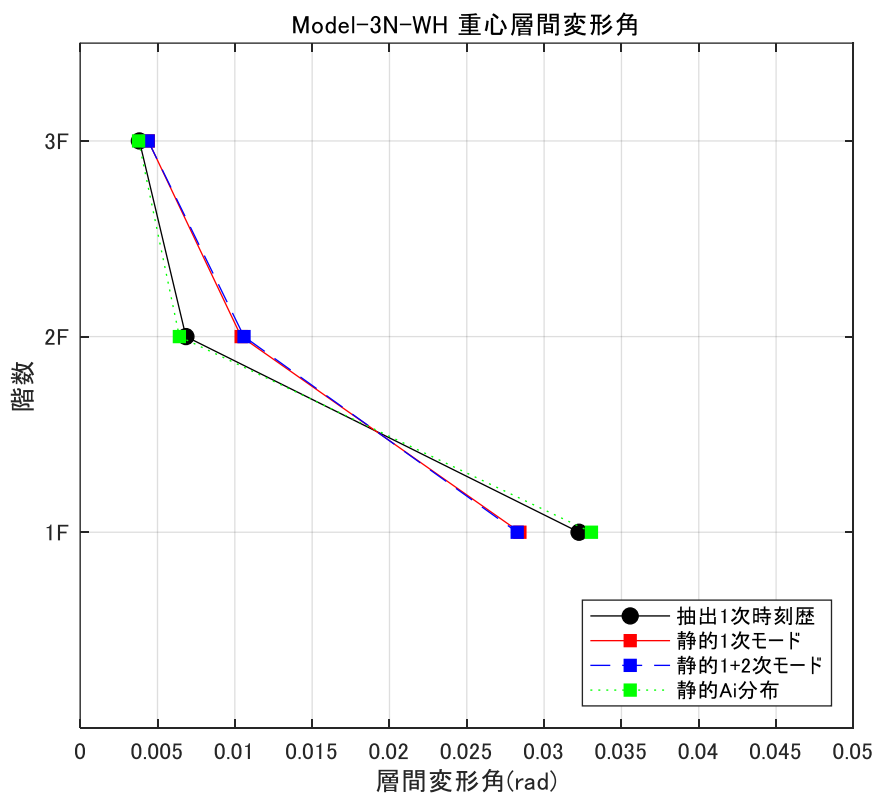


図 4. 3. 7. 4 重心層間変形角

4-3-8 5N-WH モデル

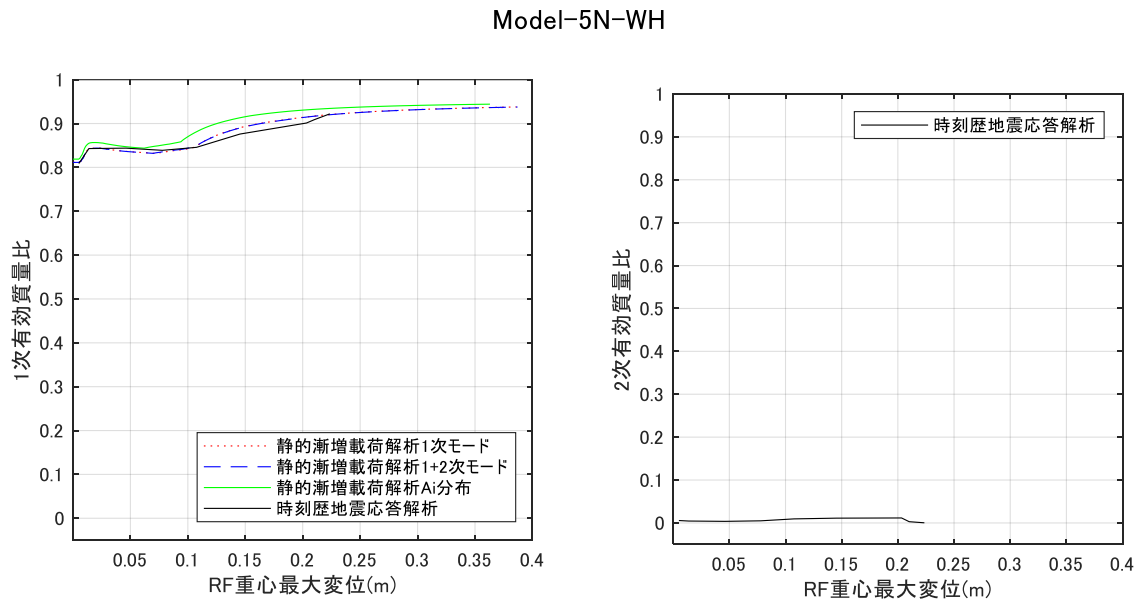


図 4.3.8.1 変形と有効質量比の推移

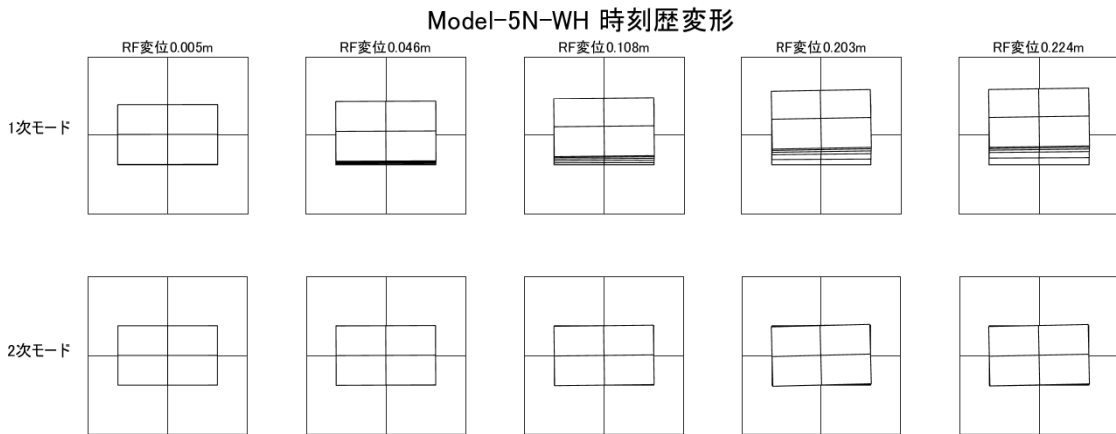


図 4.3.8.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

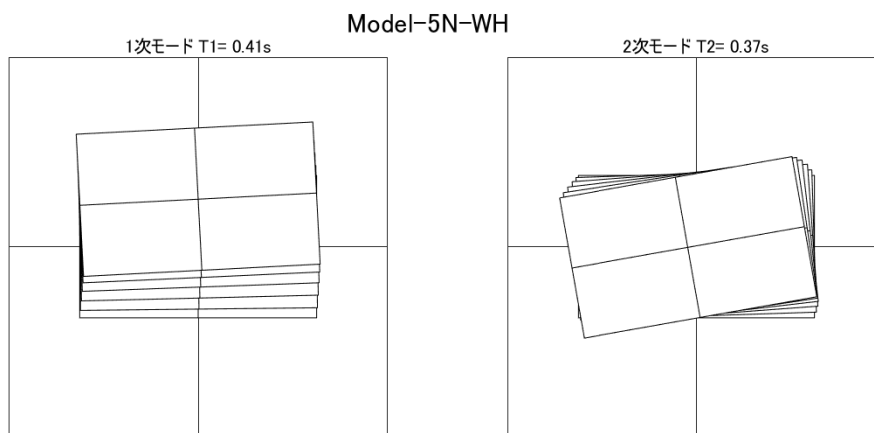


図 4. 3. 8. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

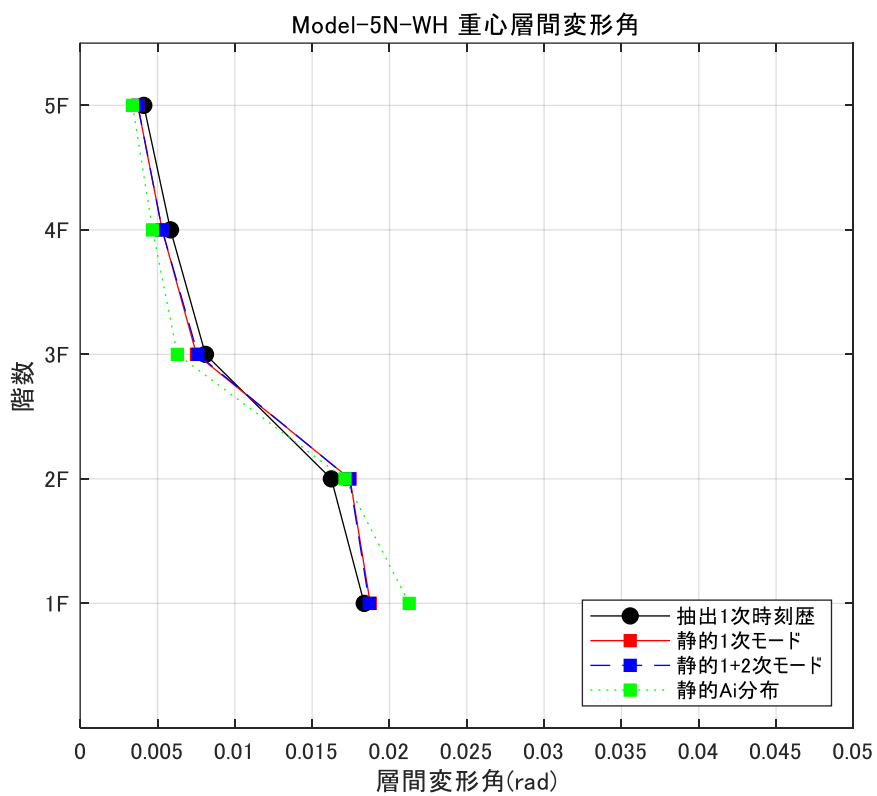


図 4. 3. 8. 4 重心層間変形角

4-3-9 7N-WH モデル

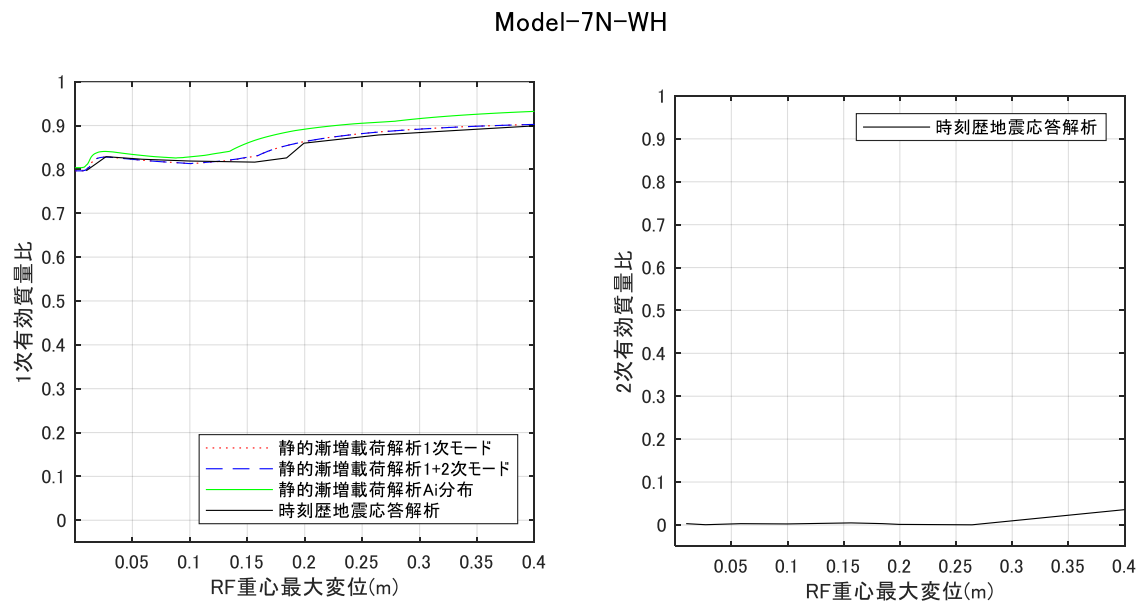


図 4.3.9.1 変形と有効質量比の推移

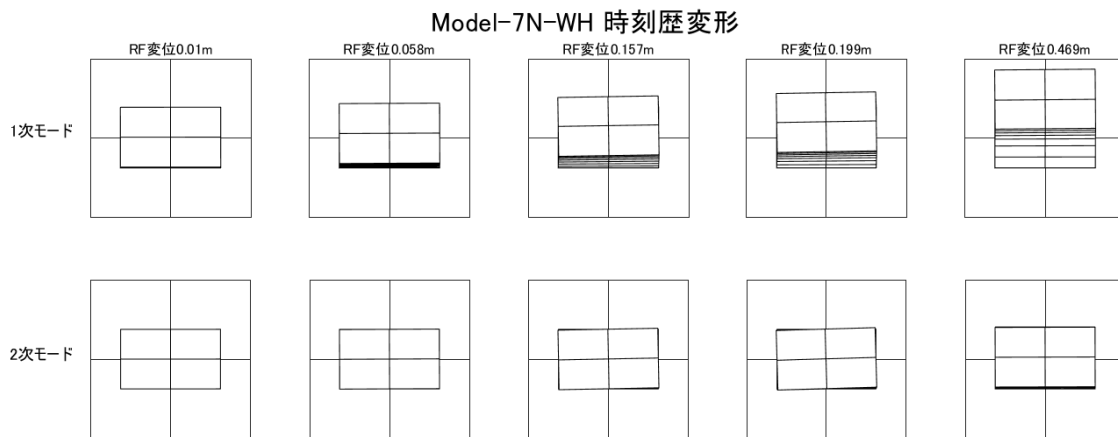


図 4.3.9.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

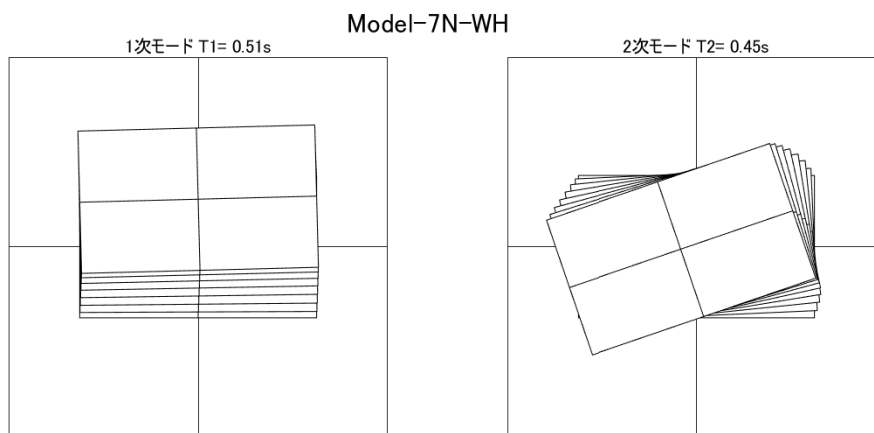


図 4. 3. 9. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

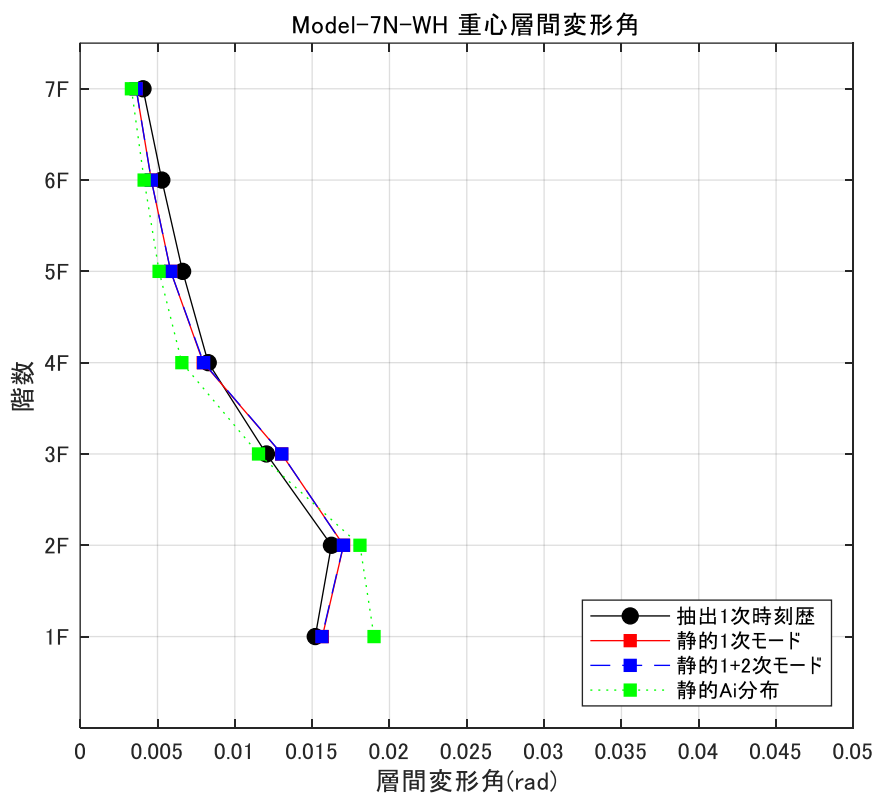


図 4. 3. 9. 4 重心層間変形角

4-4 WLX モデル

4-4-1 3A-WLX モデル

Model-3A-WLX

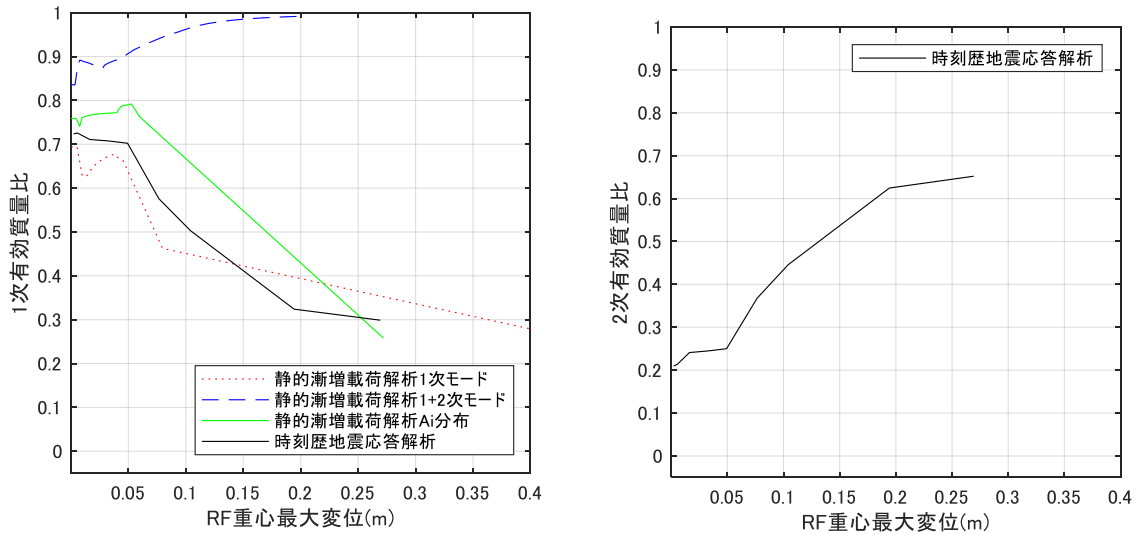


図 4. 4. 1. 1 変形と有効質量比の推移

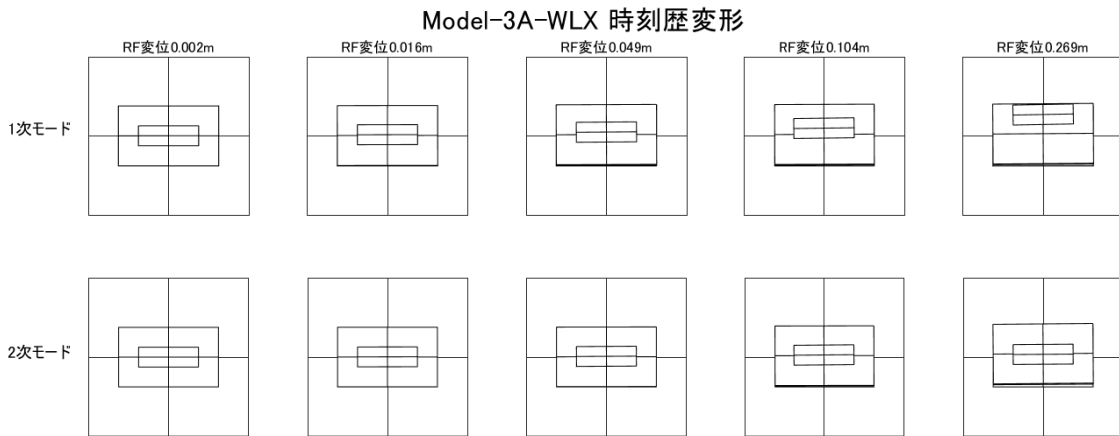


図 4. 4. 1. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

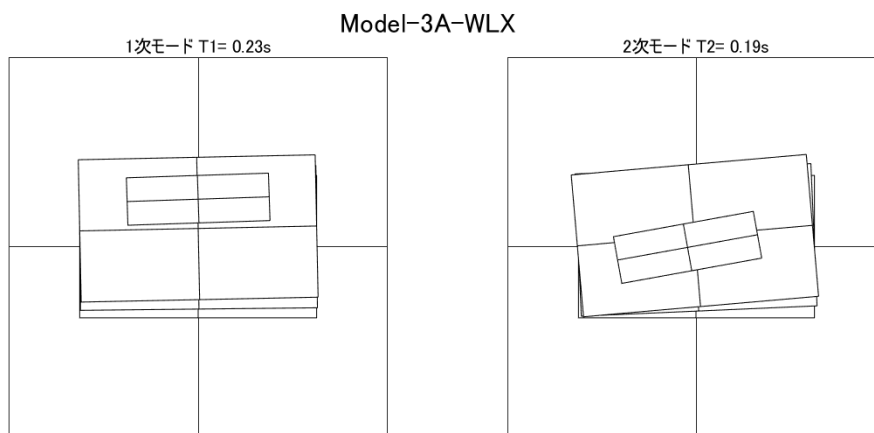


図 4. 4. 1. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

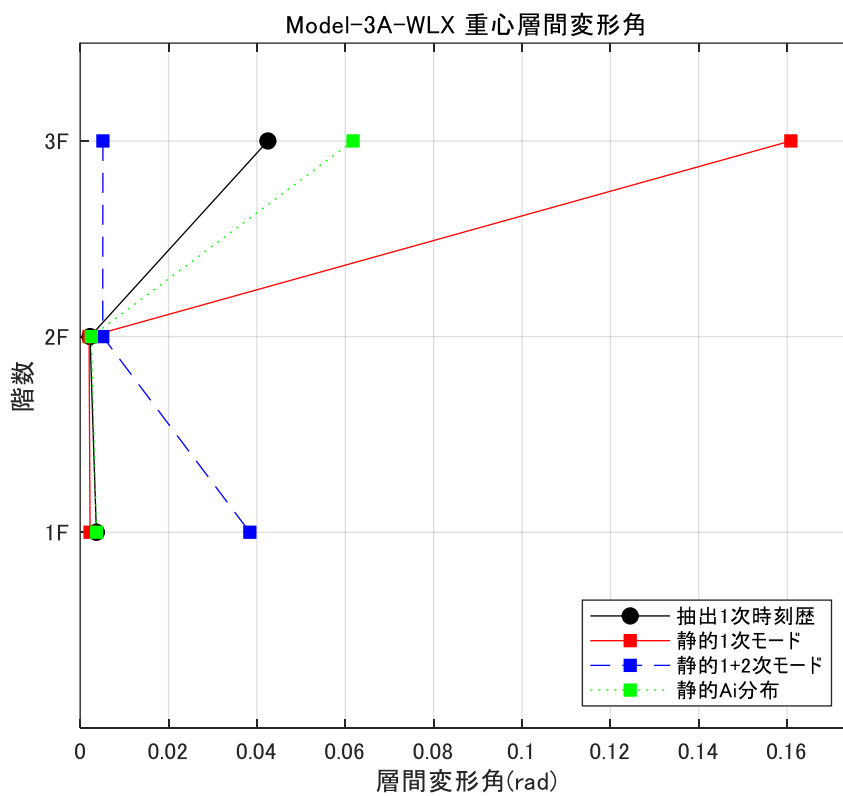


図 4. 4. 1. 4 重心層間変形角

4-4-2 5A-WLX モデル

Model-5A-WLX

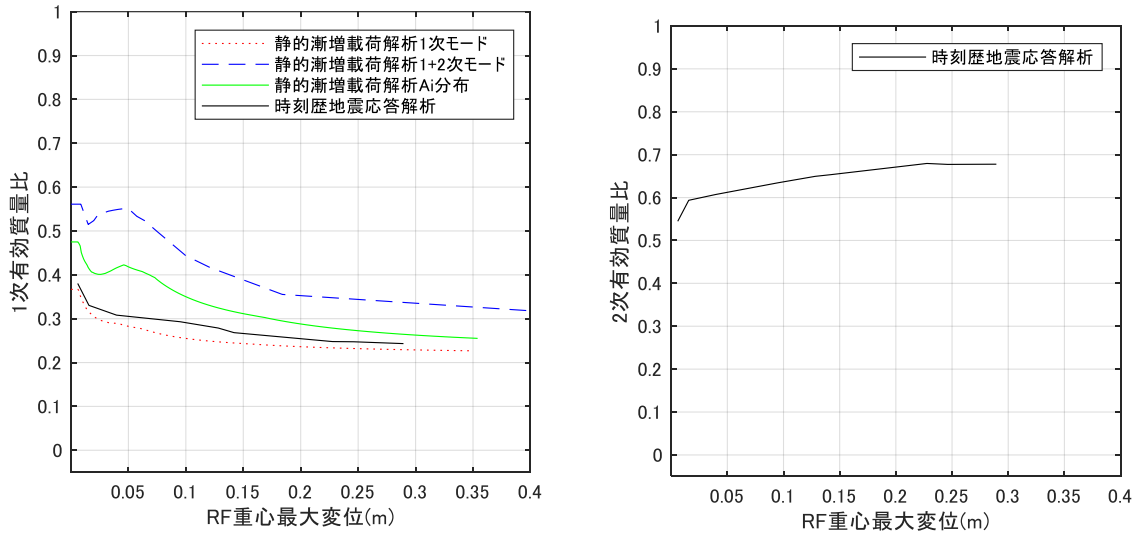


図 4. 4. 2. 1 変形と有効質量比の推移

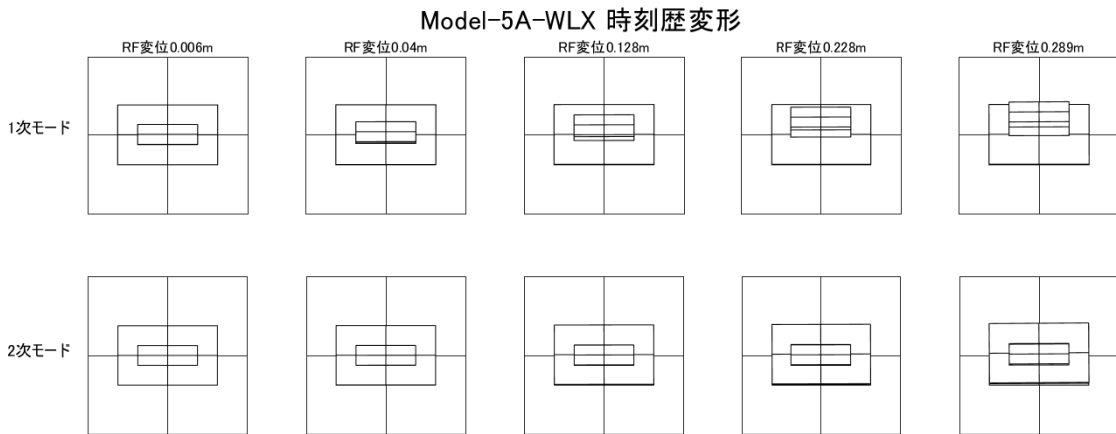


図 4. 4. 2. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

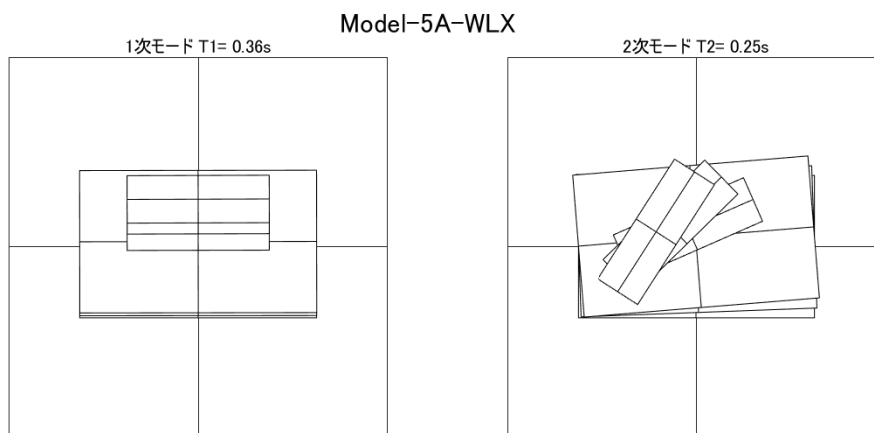


図 4. 4. 2. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

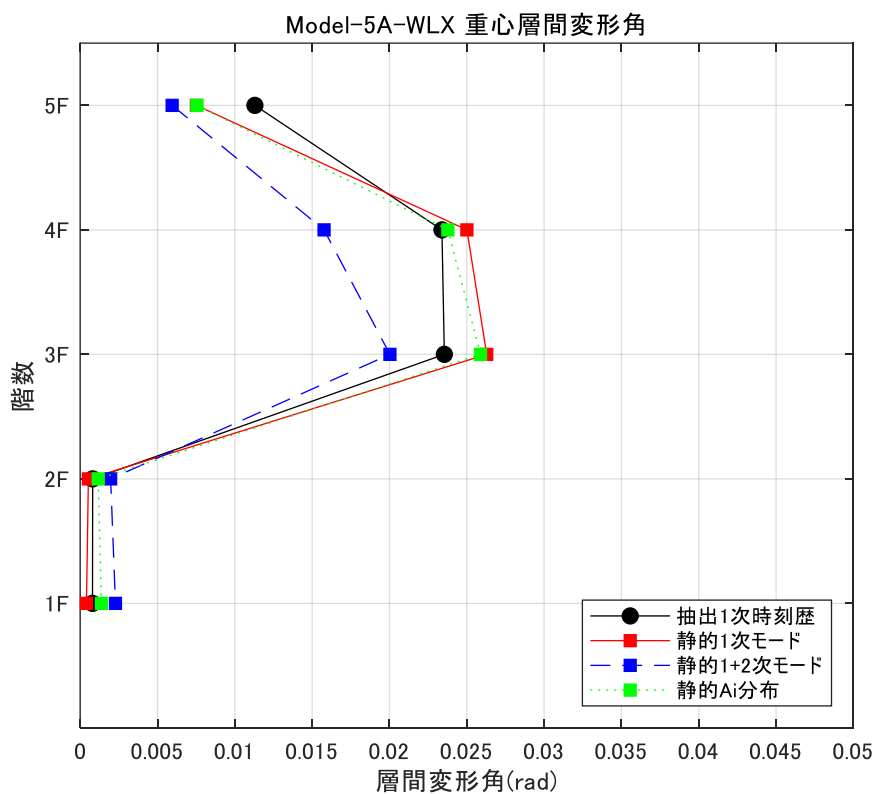


図 4. 4. 2. 4 重心層間変形角

4-4-3 7A-WLX モデル

Model-7A-WLX

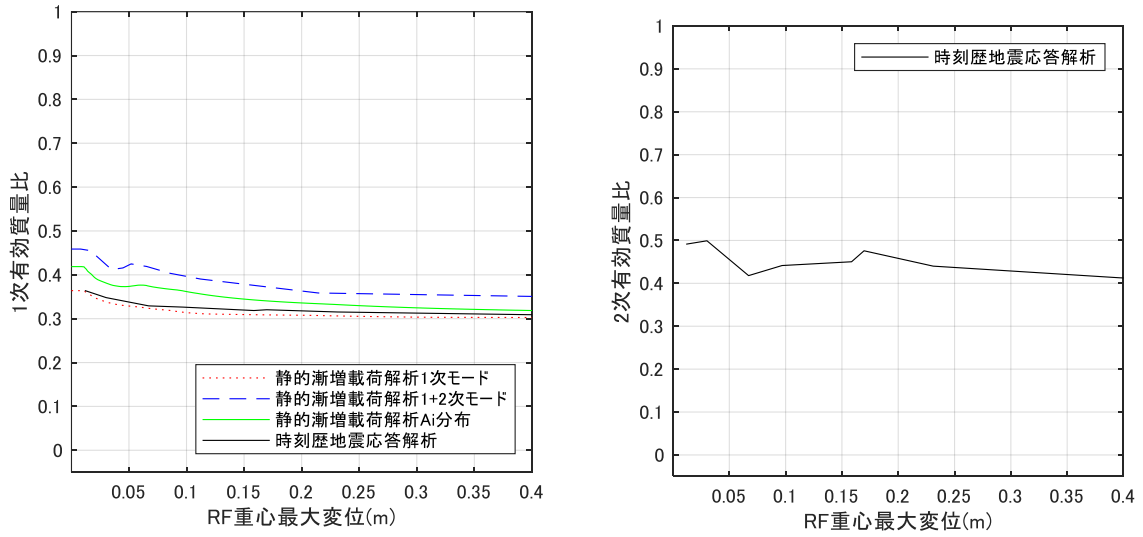


図 4. 4. 3. 1 変形と有効質量比の推移

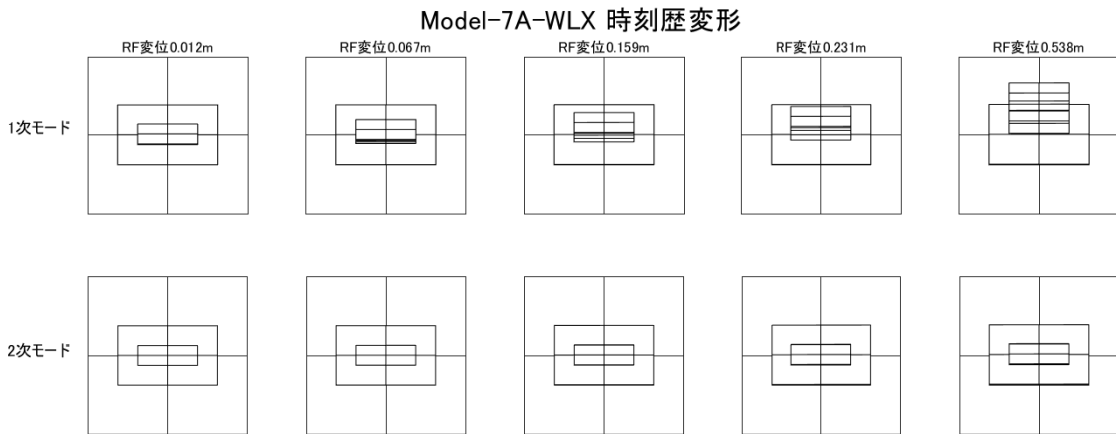


図 4. 4. 3. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

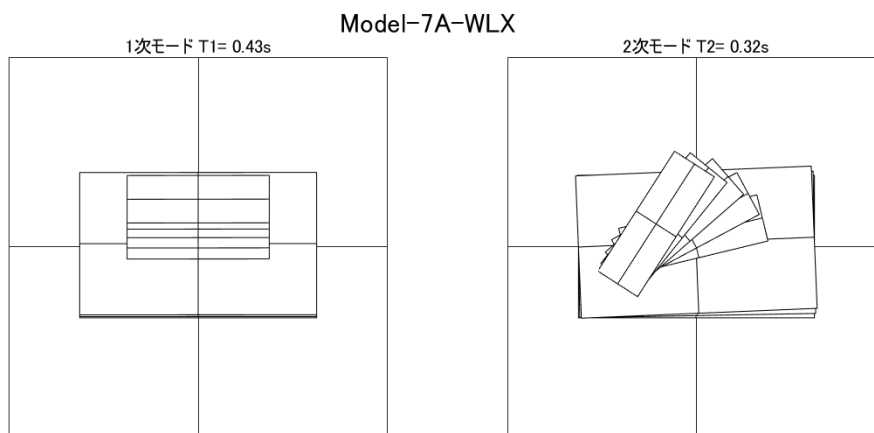


図 4. 4. 3. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

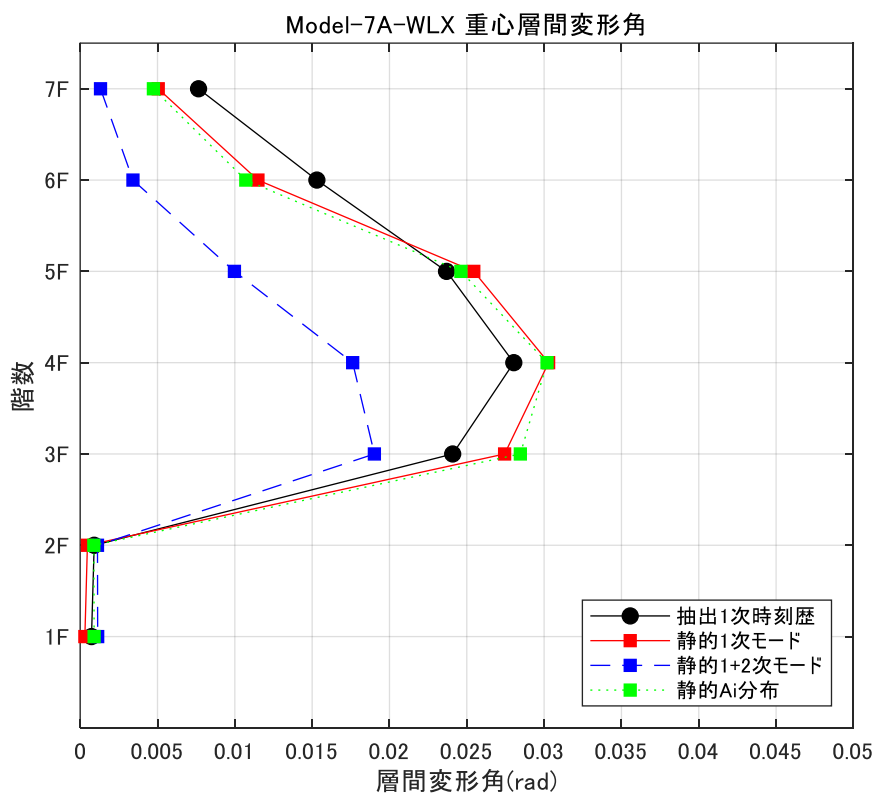


図 4. 4. 3. 4 重心層間変形角

4-4-4 3B-WLX モデル

Model-3B-WLX

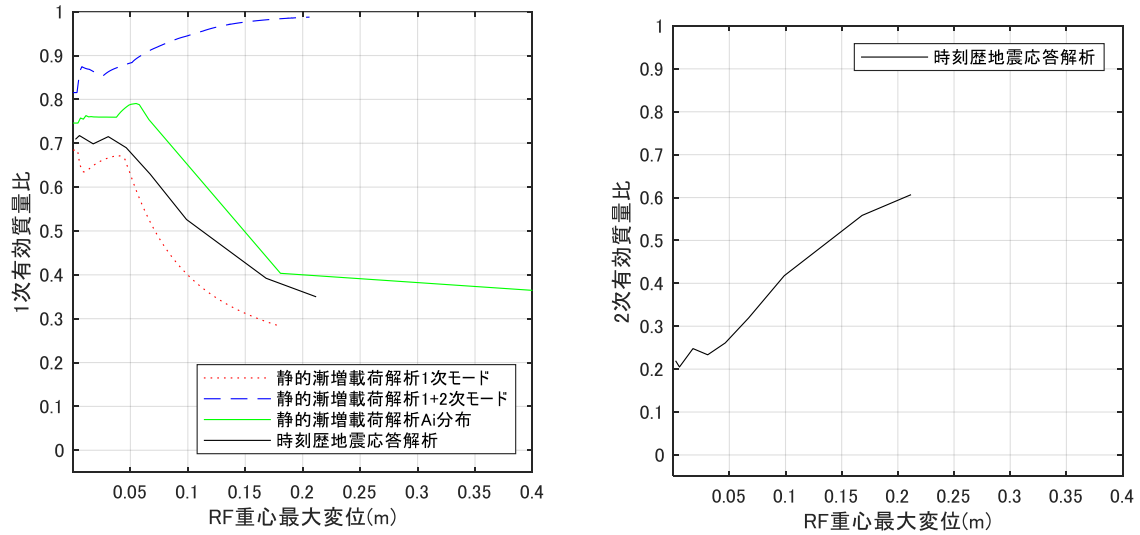


図 4. 4. 4. 1 変形と有効質量比の推移

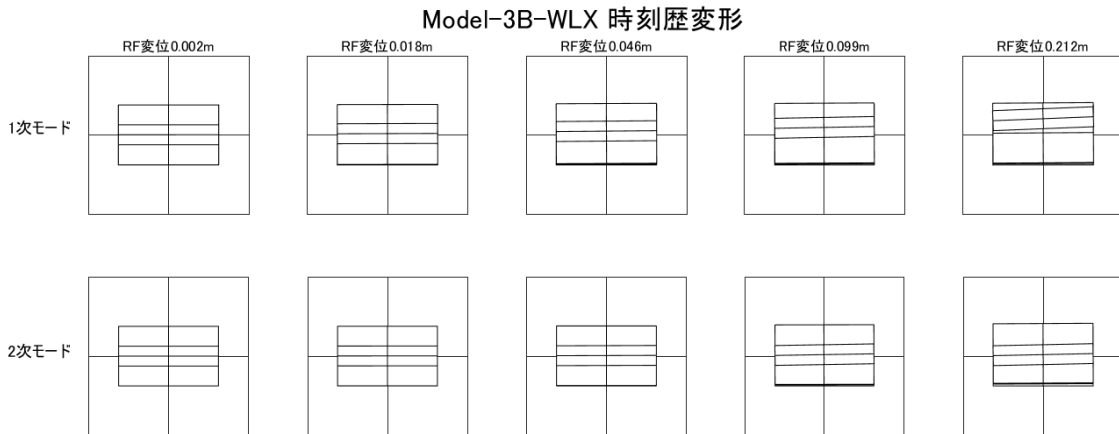


図 4. 4. 4. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

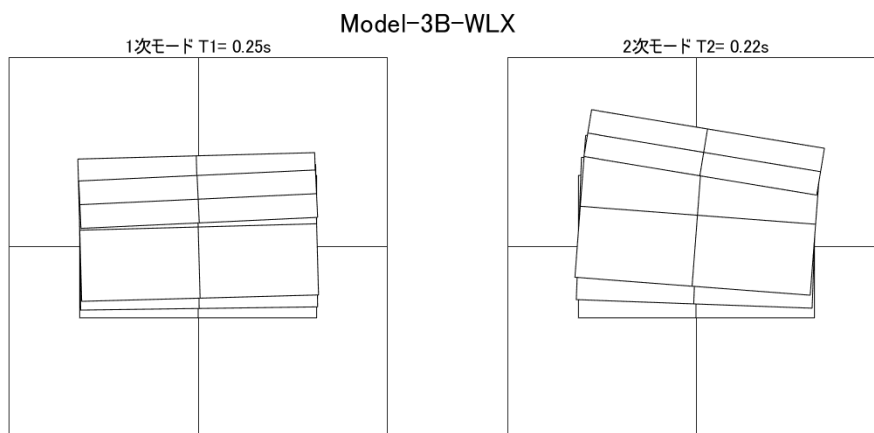


図 4. 4. 4. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

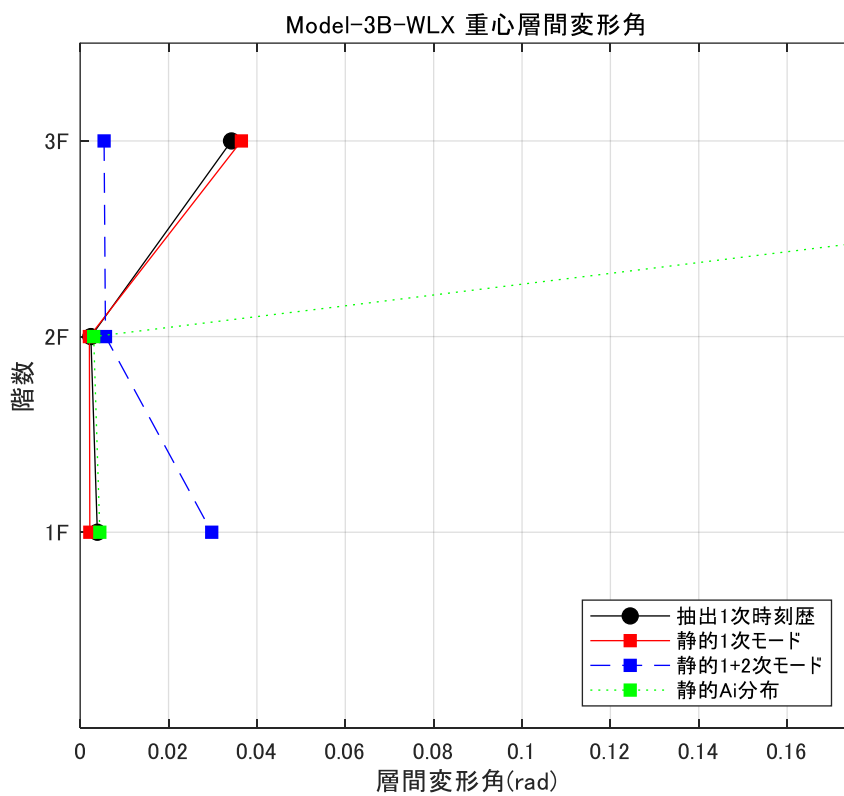


図 4. 4. 4. 4 重心層間変形角

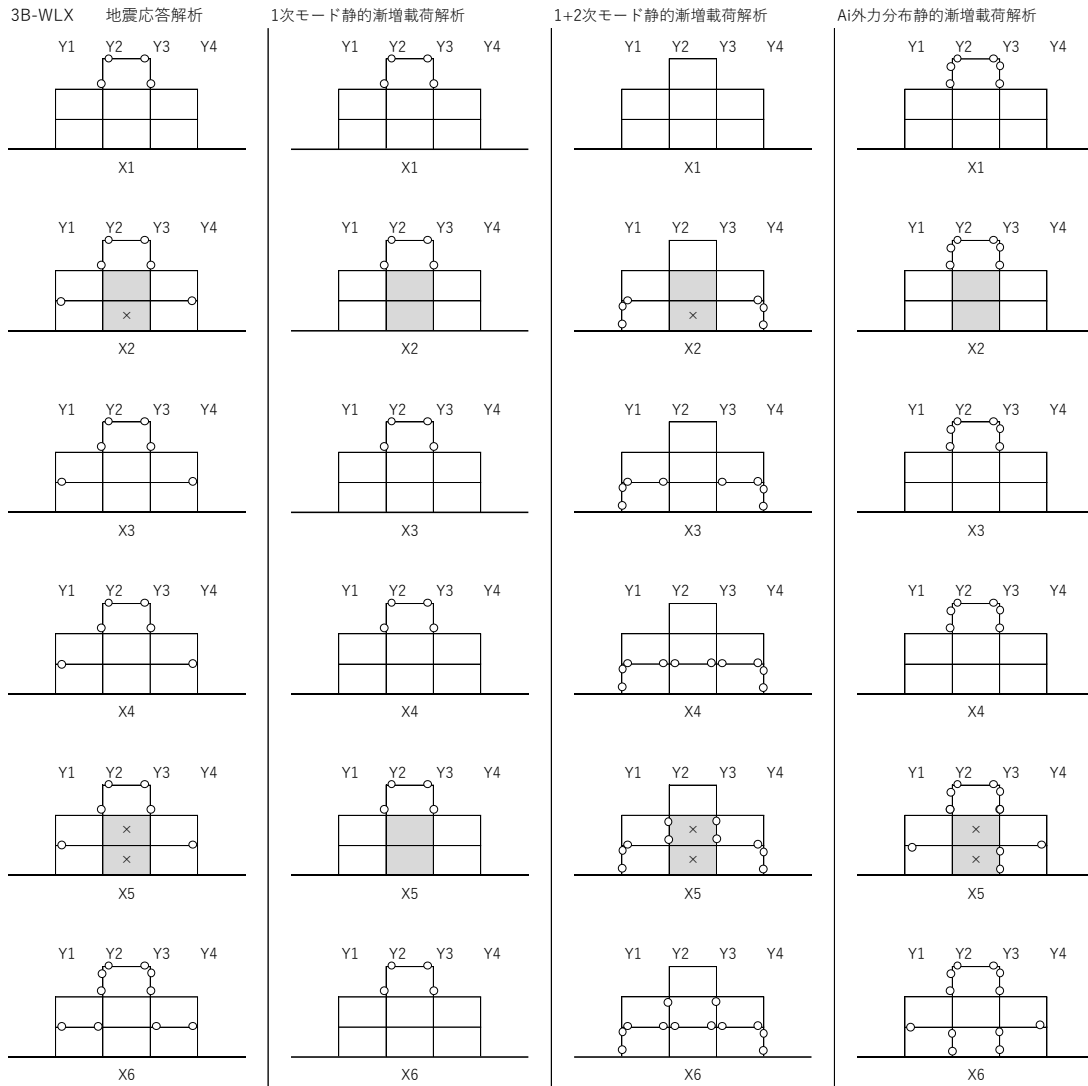


図 4.4.4.5 塑性ヒンジ図

4-4-5 5B-WLX モデル

Model-5B-WLX

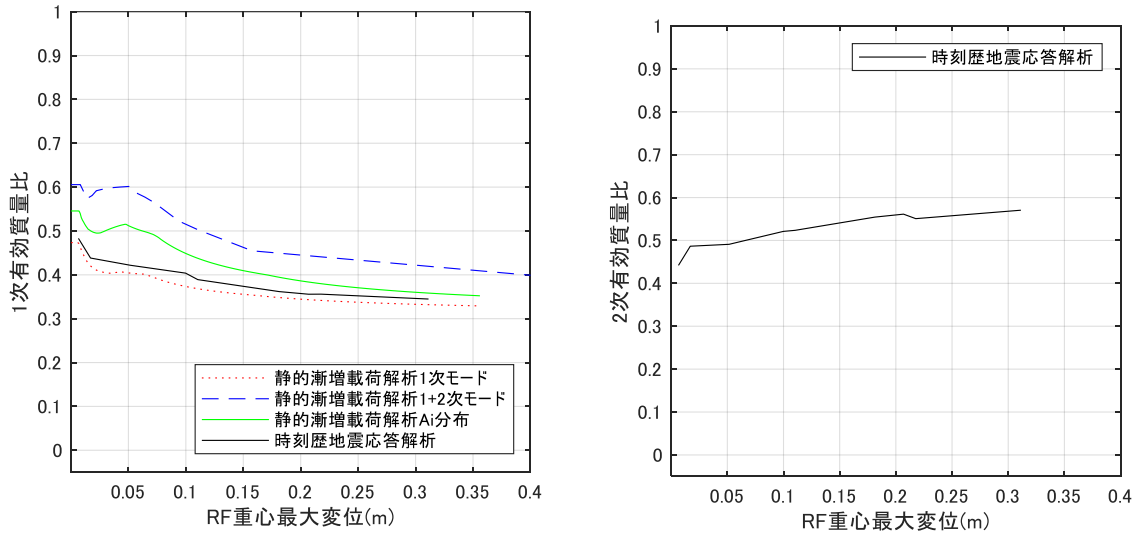


図 4. 4. 5. 1 変形と有効質量比の推移

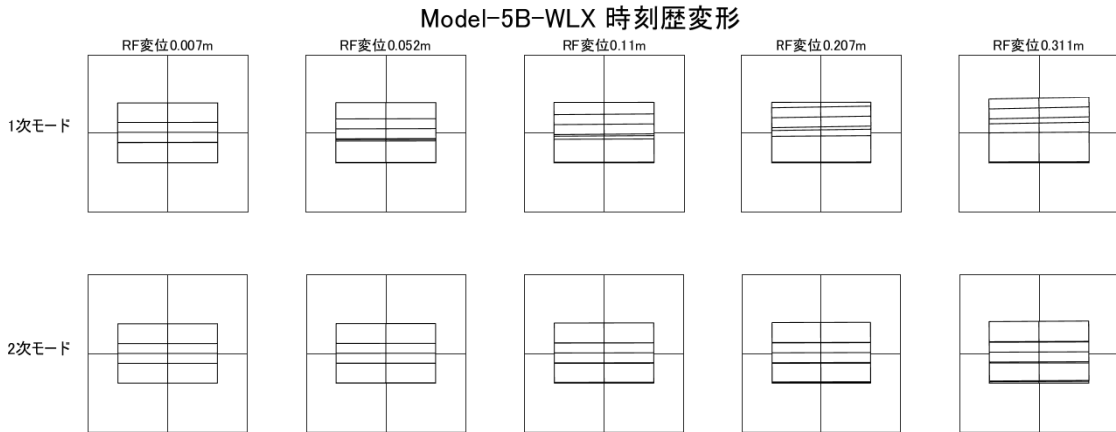


図 4. 4. 5. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

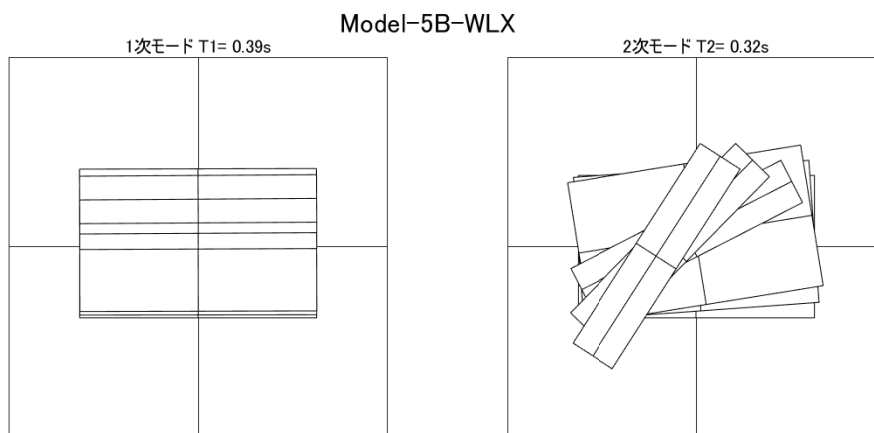


図 4. 4. 5. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

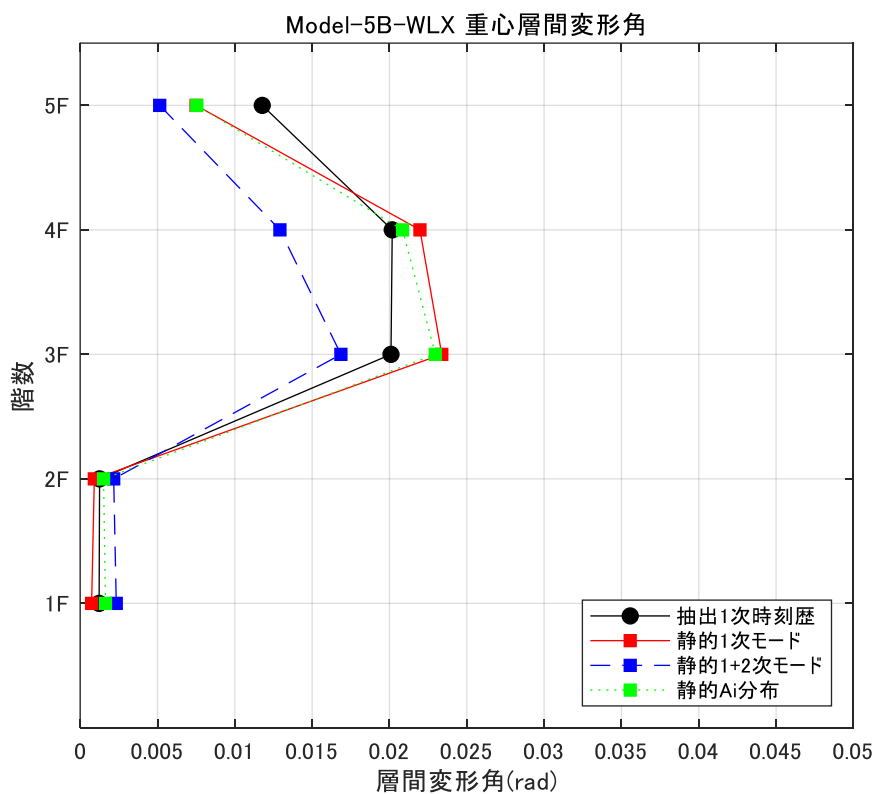


図 4. 4. 5. 4 重心層間変形角

4-4-6 7B-WLX モデル

Model-7B-WLX

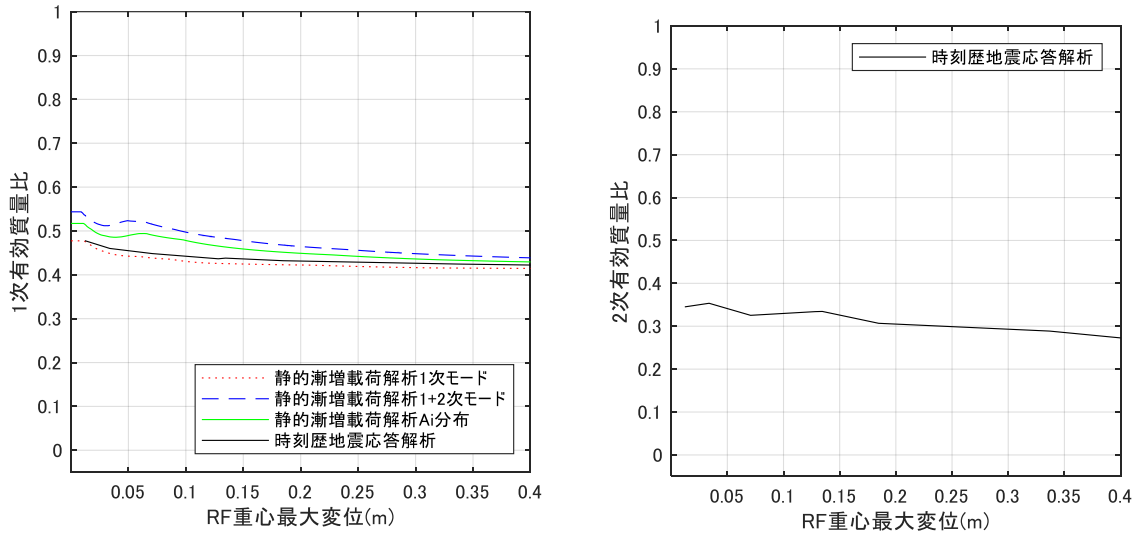


図 4. 4. 6. 1 変形と有効質量比の推移

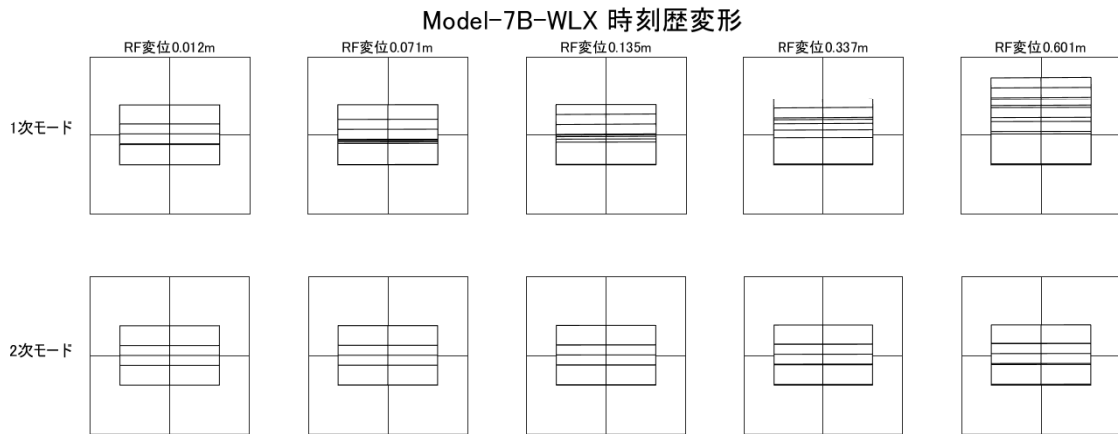


図 4. 4. 6. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

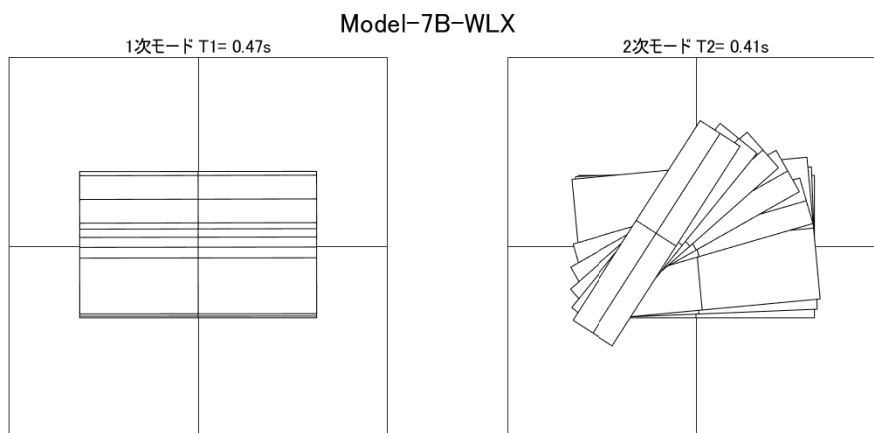


图 4. 4. 6. 3 弹性時 1 次モード, 2 次モード

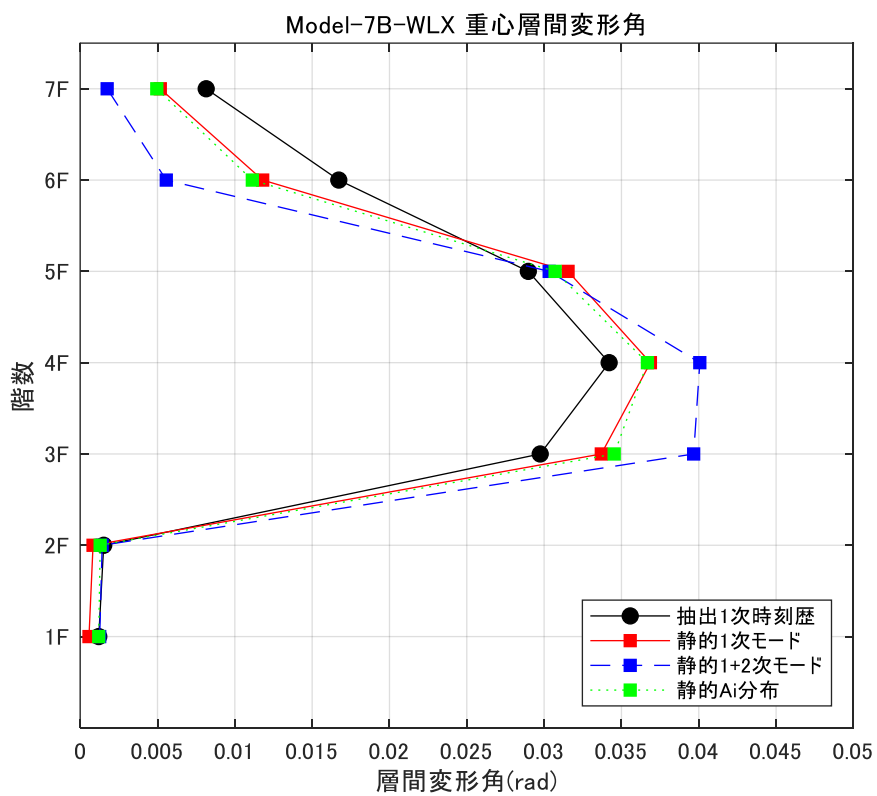


图 4. 4. 6. 4 重心層間変形角

4-4-7 3N-WLX モデル

Model-3N-WLX

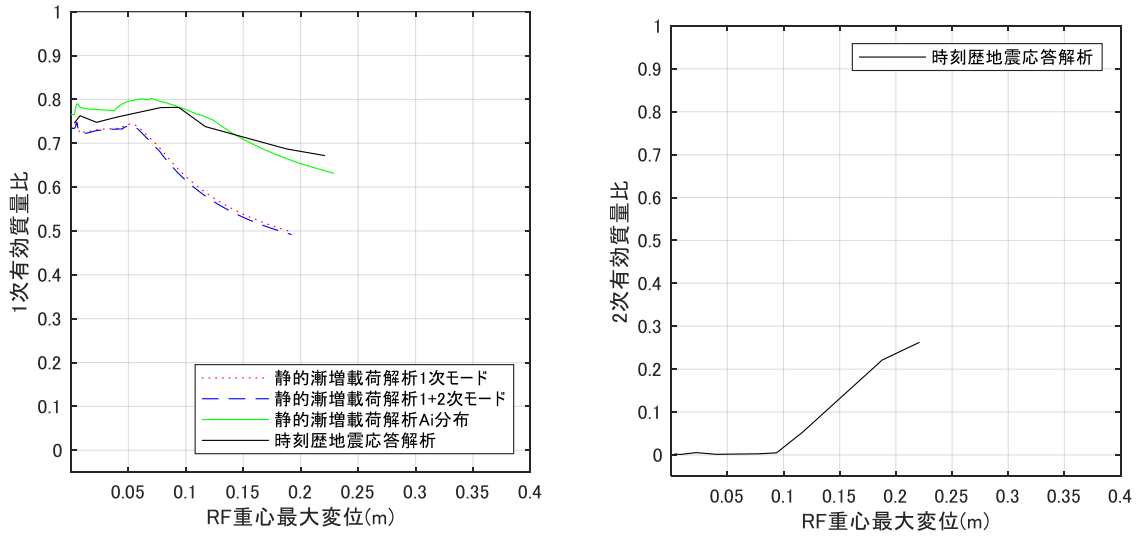


図 4. 4. 7. 1 変形と有効質量比の推移

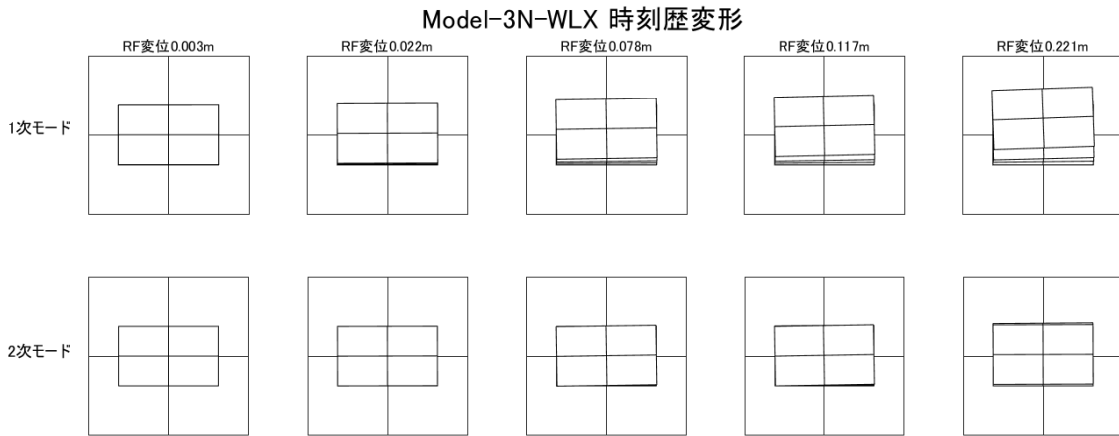


図 4. 4. 7. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

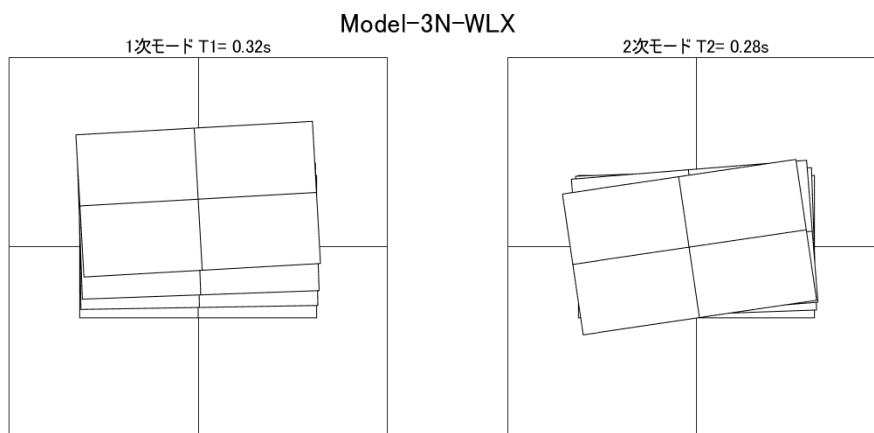


図 4. 4. 7. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

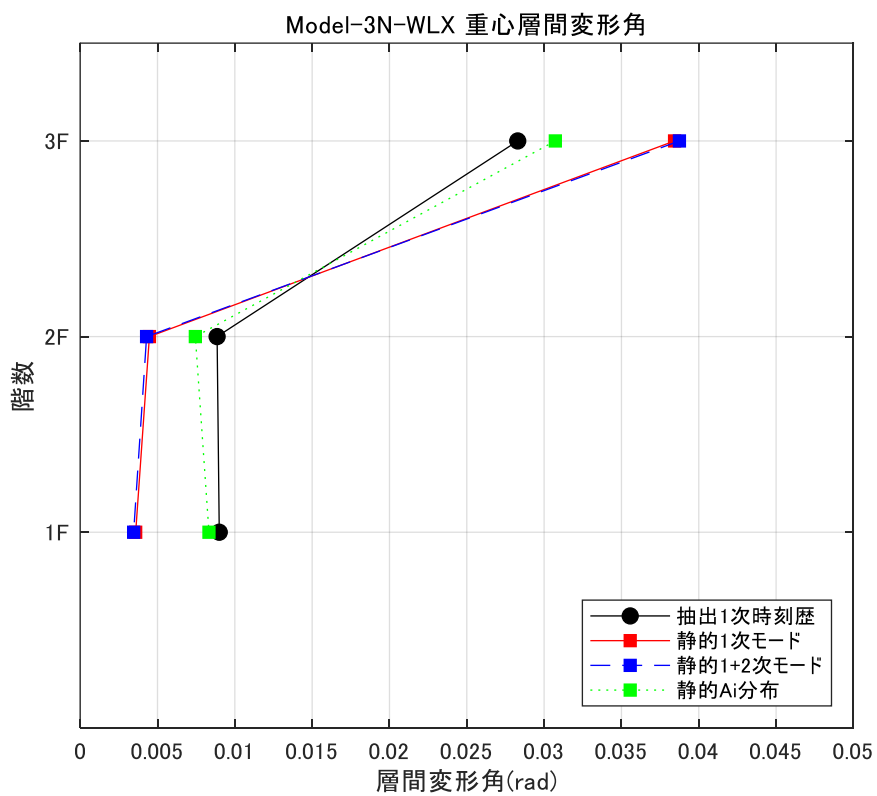
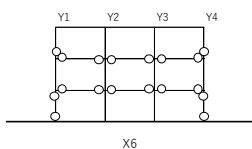
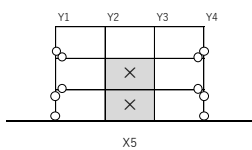
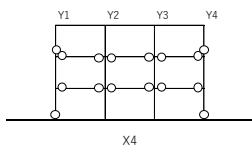
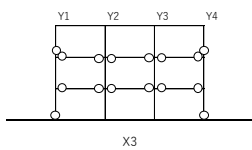
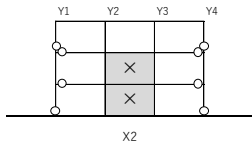
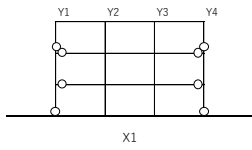
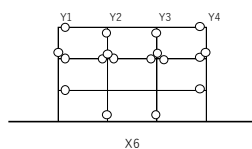
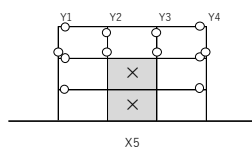
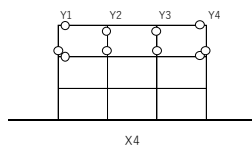
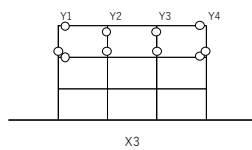
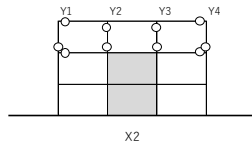
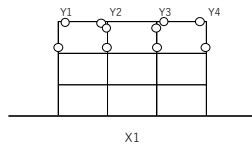


図 4. 4. 7. 4 重心層間変形角

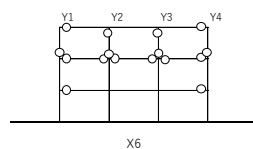
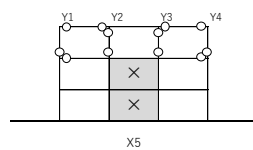
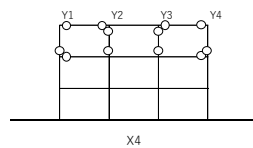
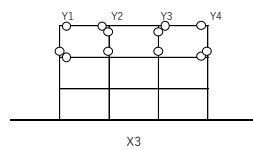
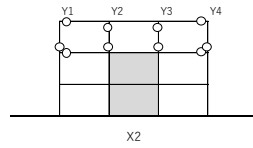
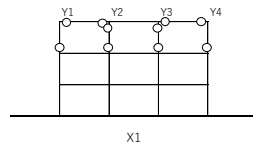
3N-WLX 地震応答解析



1次モード静的漸増载荷解析



1+2次モード静的漸増载荷解析



Ai外力分布静的漸増载荷解析

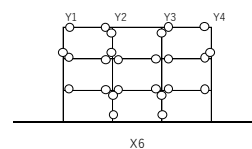
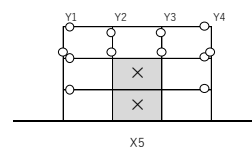
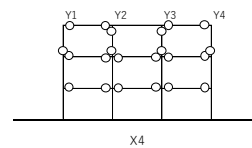
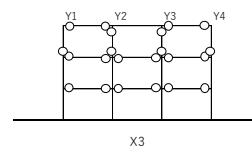
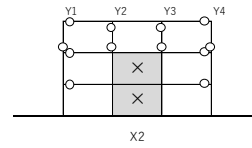
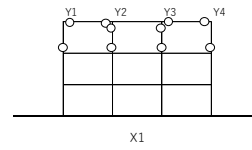


図 4.4.7.5 塑性ヒンジ図

4-4-8 5N-WLX モデル

Model-5N-WLX

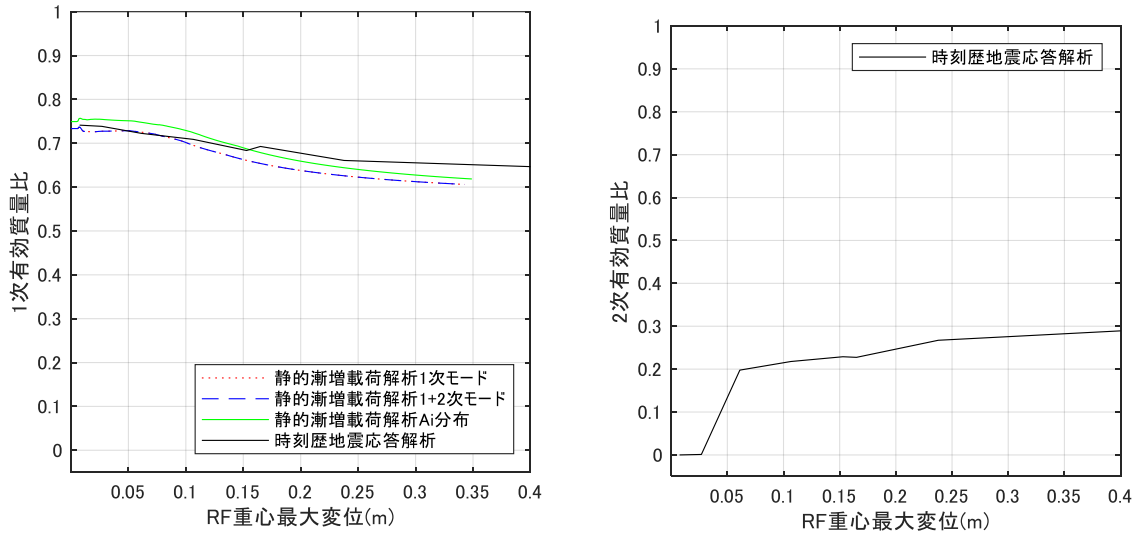


図 4. 4. 8. 1 変形と有効質量比の推移

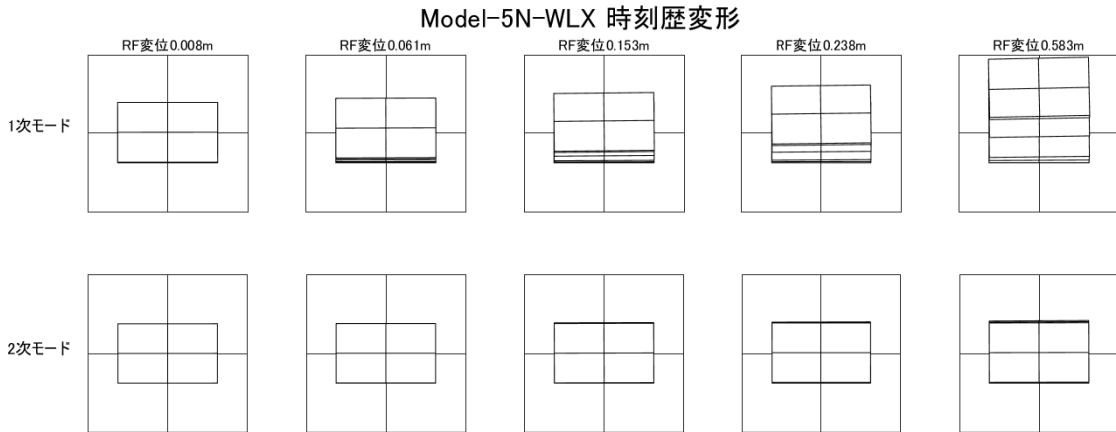


図 4. 4. 8. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

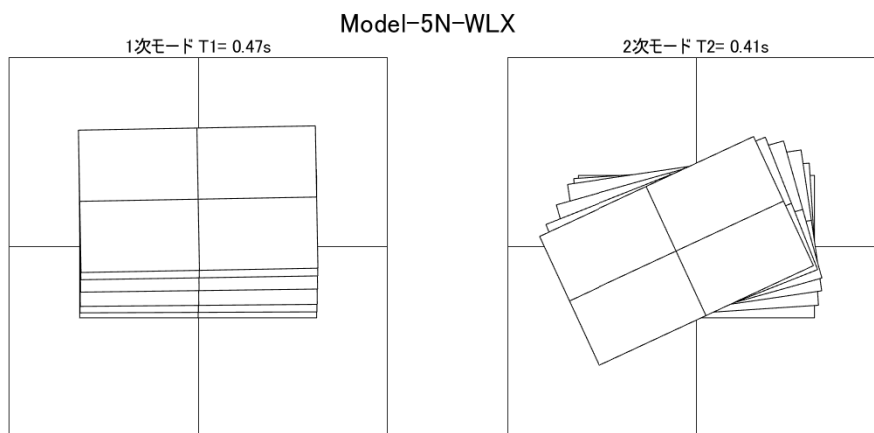


図 4. 4. 8. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

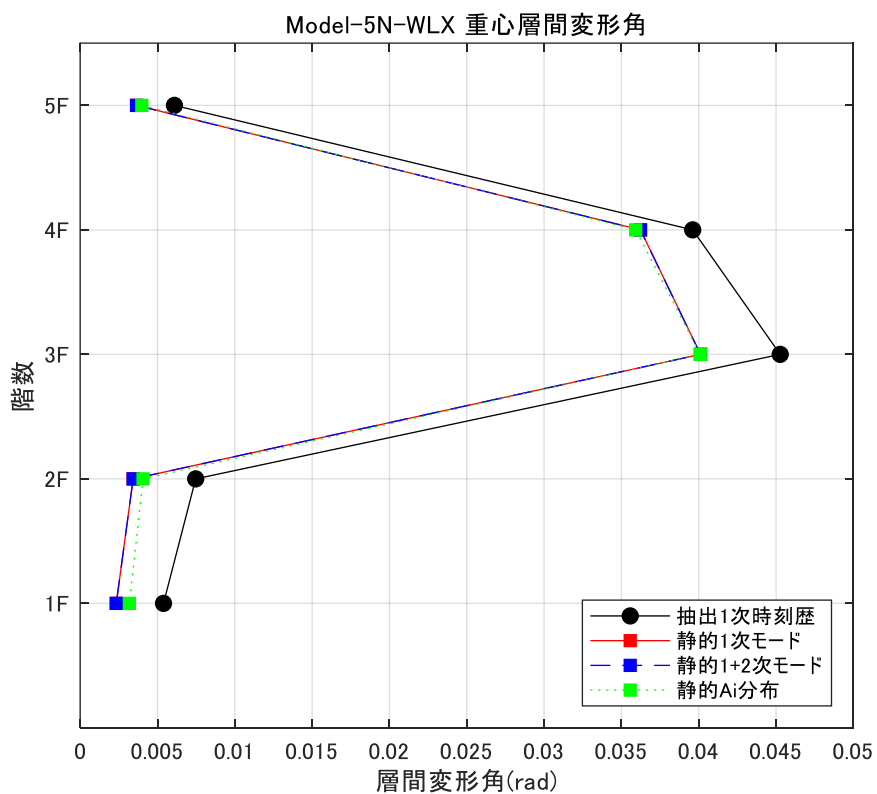


図 4. 4. 8. 4 重心層間変形角

4-4-9 7N-WLX モデル

Model-7N-WLX

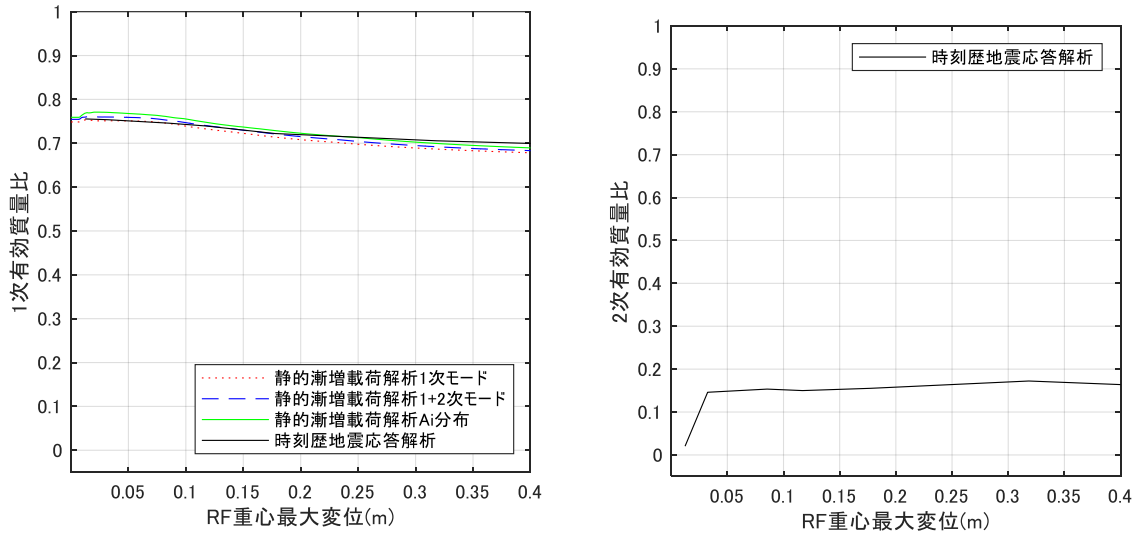


図 4. 4. 9. 1 変形と有効質量比の推移

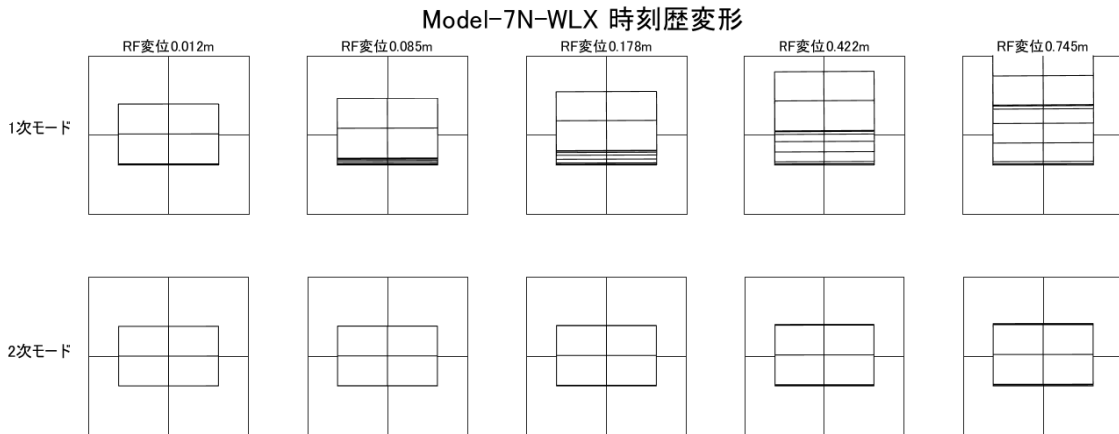


図 4. 4. 9. 2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

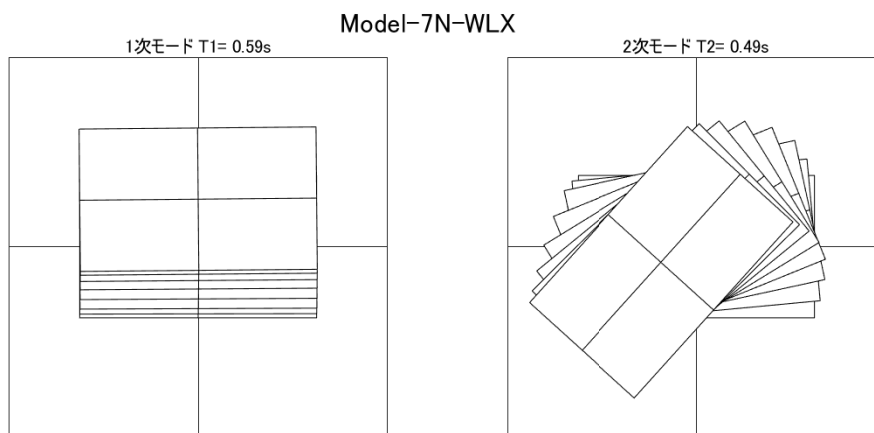


図 4. 4. 9. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

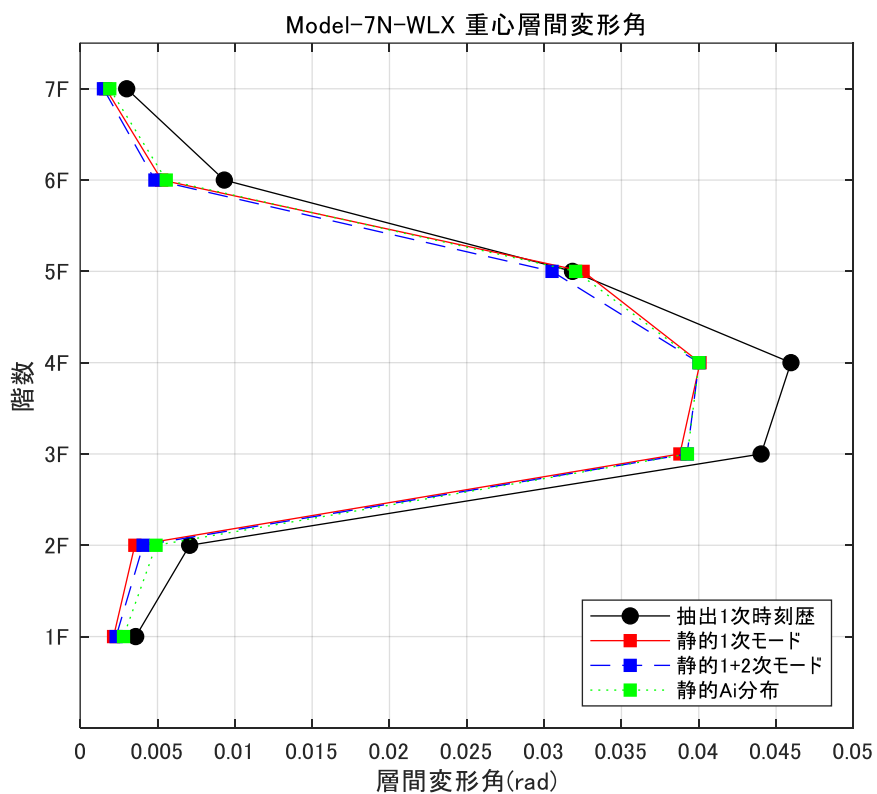


図 4. 4. 9. 4 重心層間変形角

4-5 WHX モデル

4-5-1 3A-WHX モデル

Model-3A-WHX

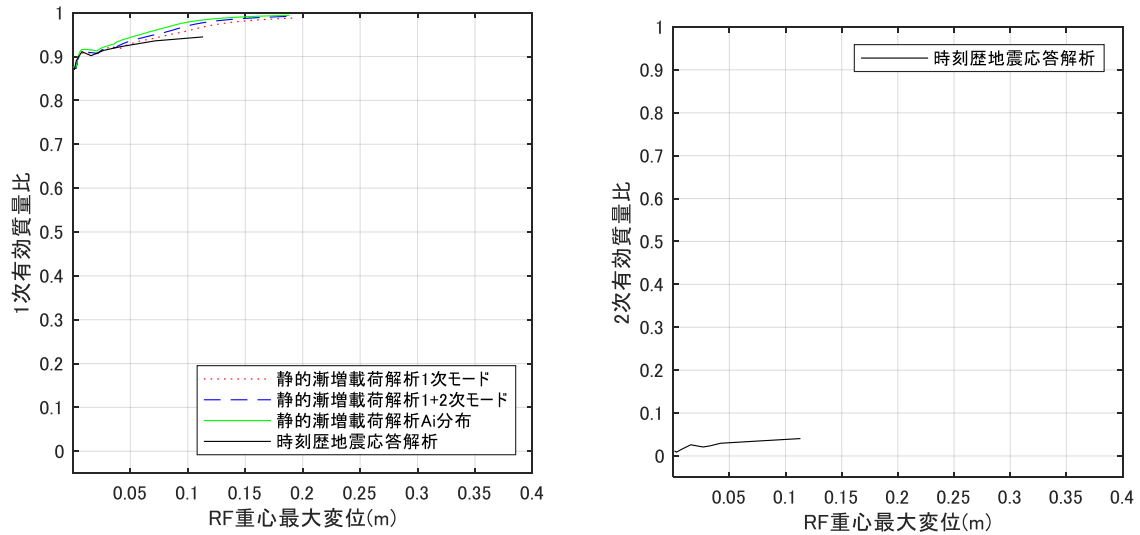


図 4.5.1.1 変形と有効質量比の推移

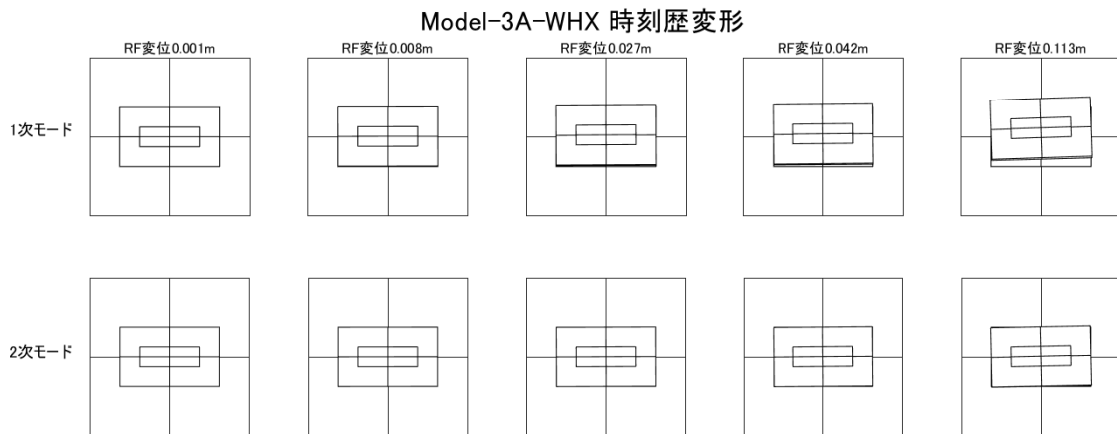


図 4.5.1.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

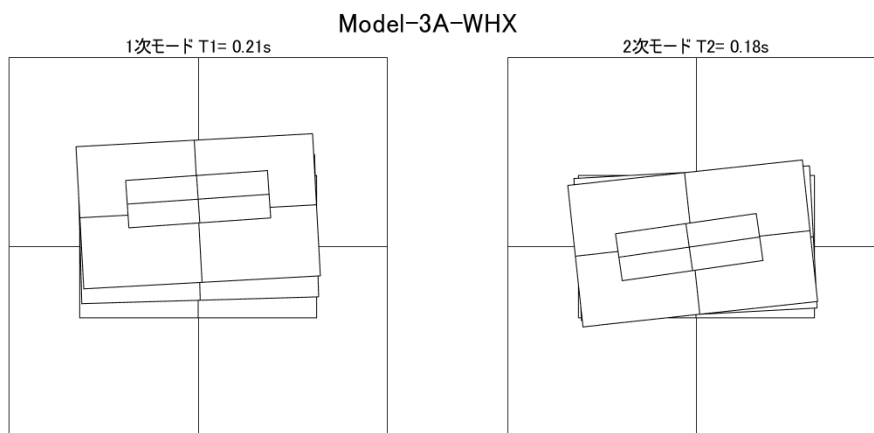


図 4. 5. 1. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

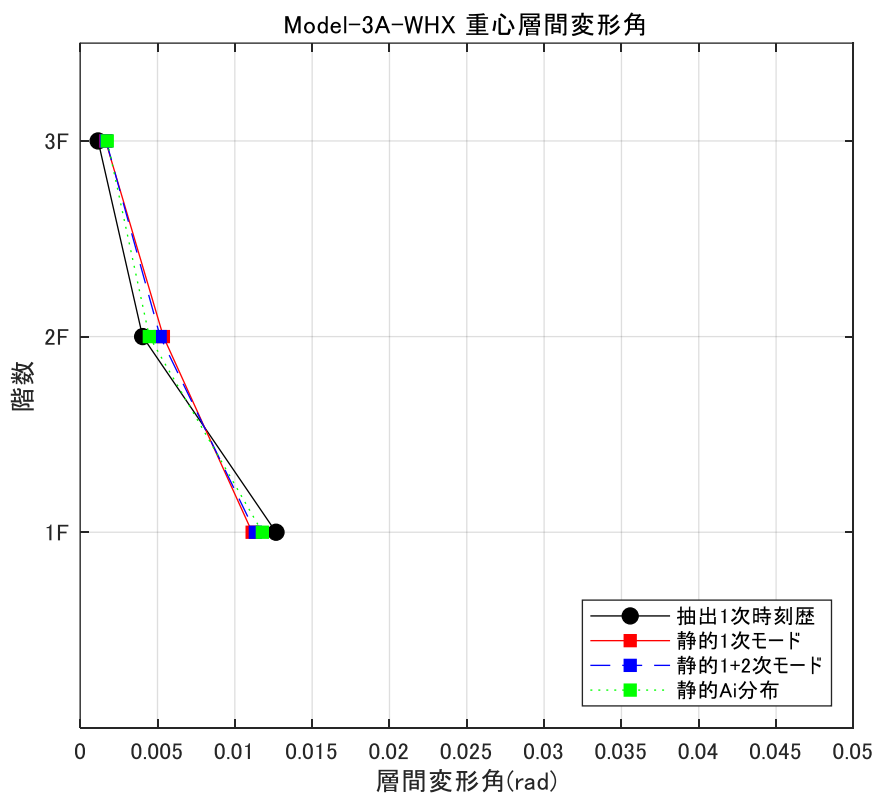


図 4. 5. 1. 4 重心層間変形角

4-5-2 5A-WHX モデル

Model-5A-WHX

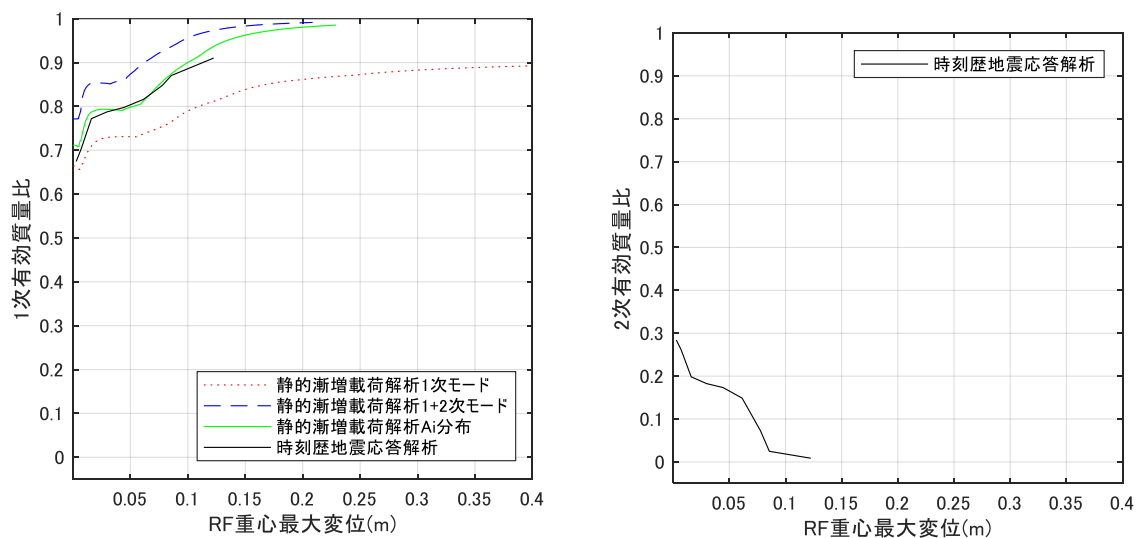


図 4.5.2.1 変形と有効質量比の推移

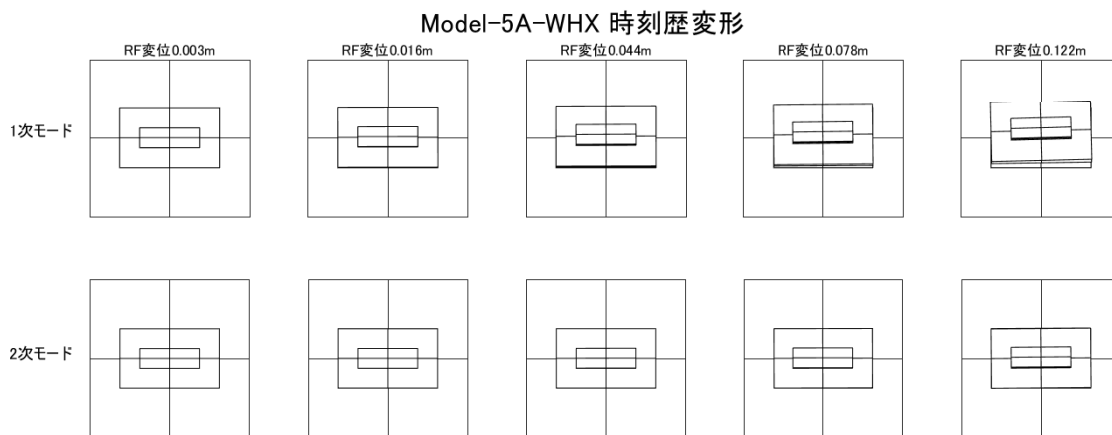


図 4.5.2.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

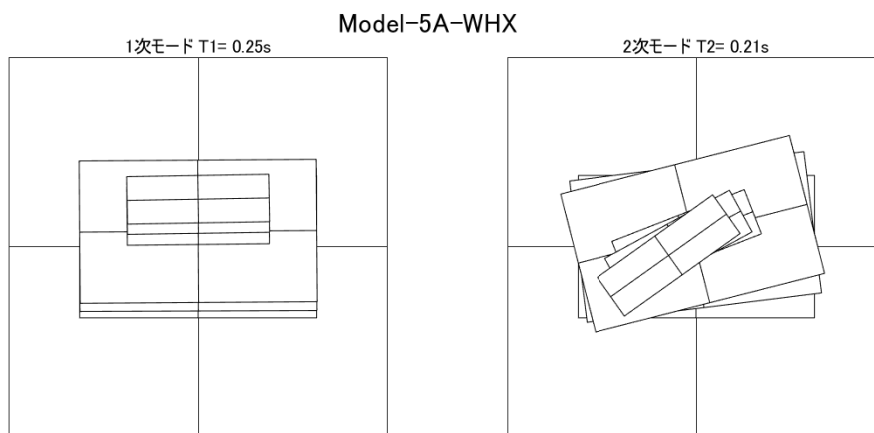


図 4. 5. 2. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

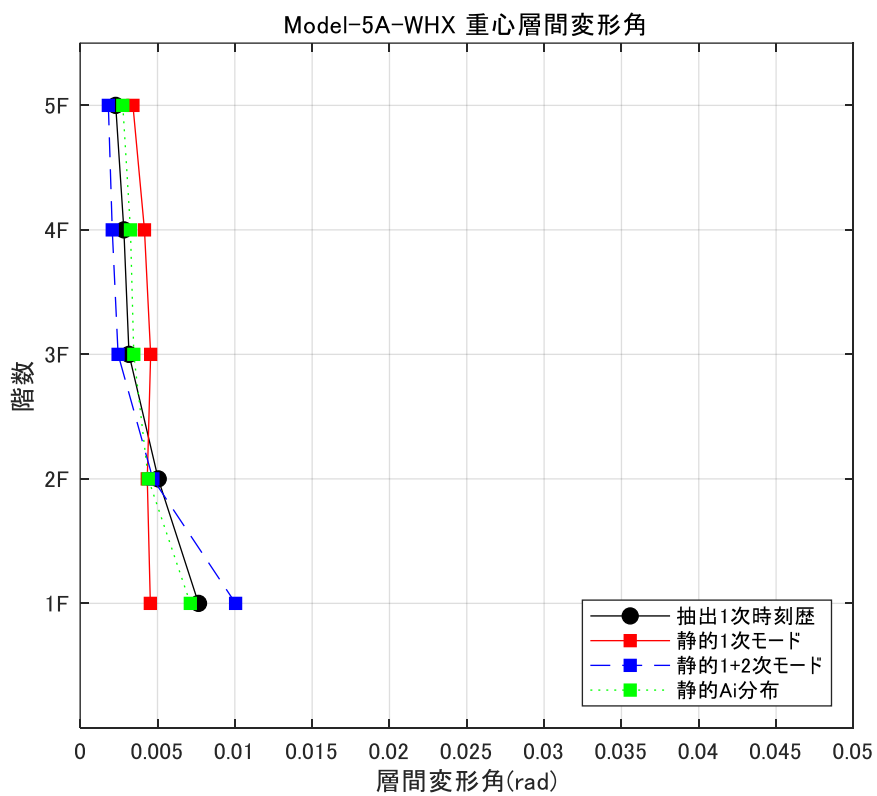
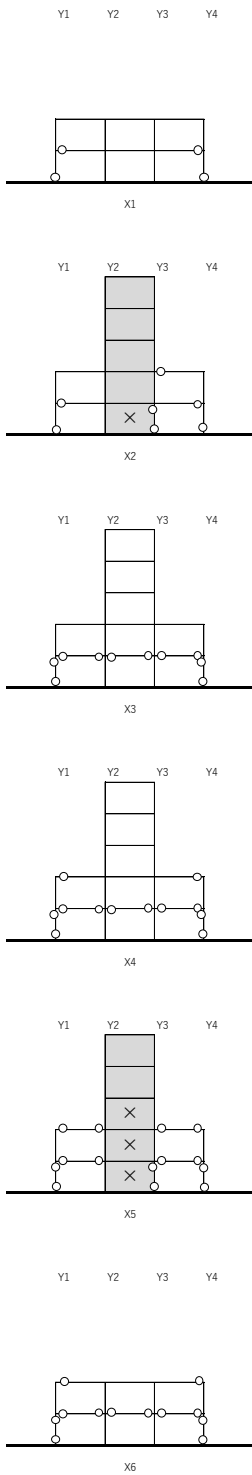
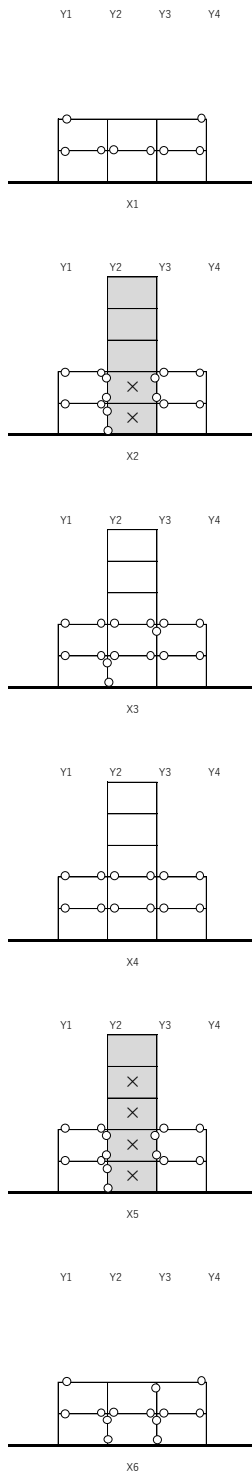


図 4. 5. 2. 4 重心層間変形角

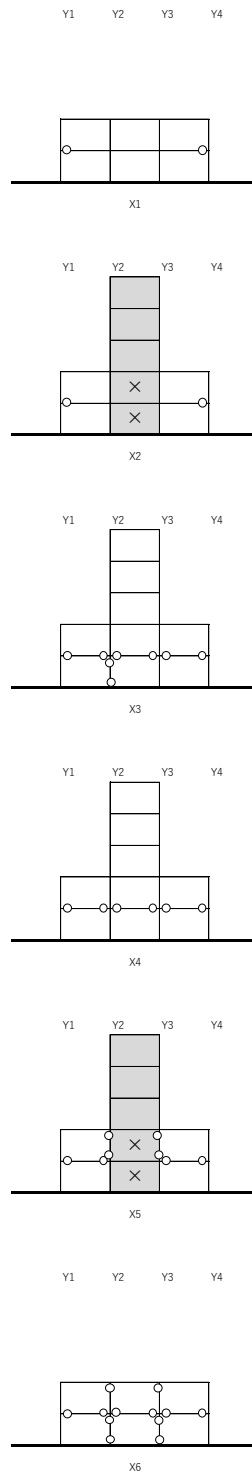
5A-WHX 地震応答解析



1次モード静的漸増载荷解析



1+2次モード静的漸増载荷解析



Ai外力分布静的漸増载荷解析

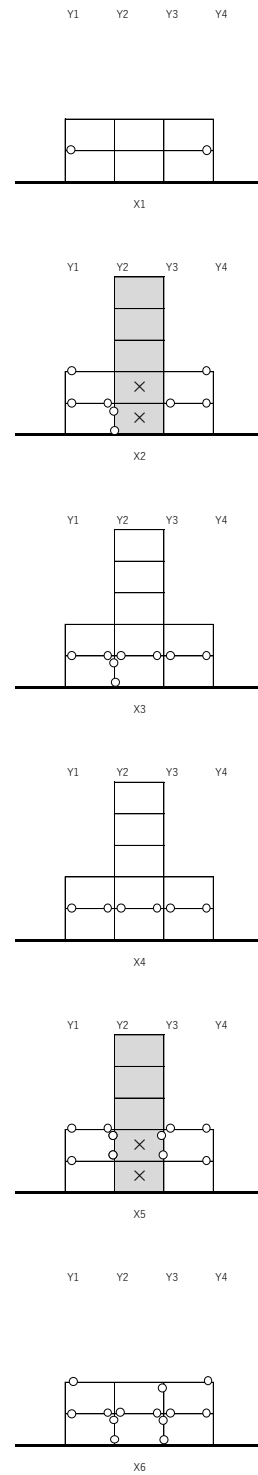


図 4.5.2.5 塑性ヒンジ図

4-5-3 7A-WHX モデル

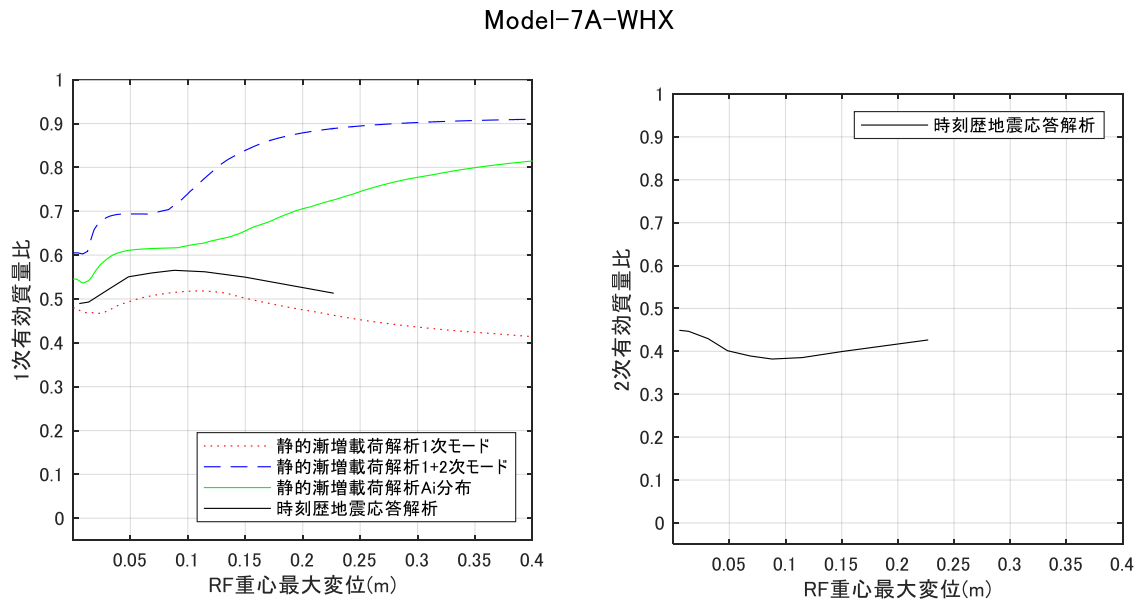


図 4.5.3.1 変形と有効質量比の推移

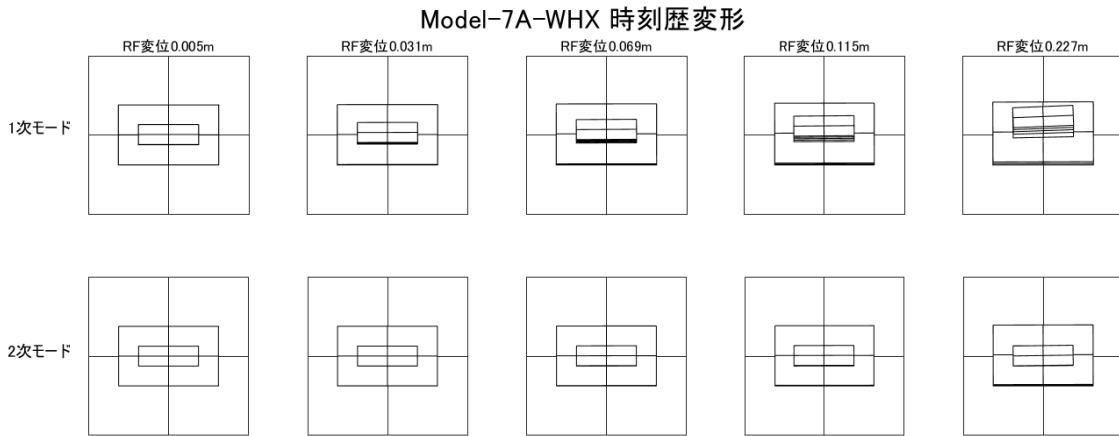


図 4.5.3.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

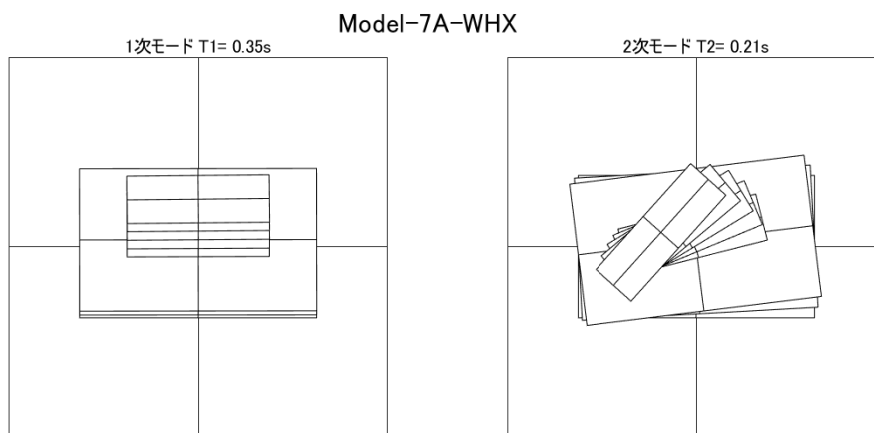


図 4. 5. 3. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

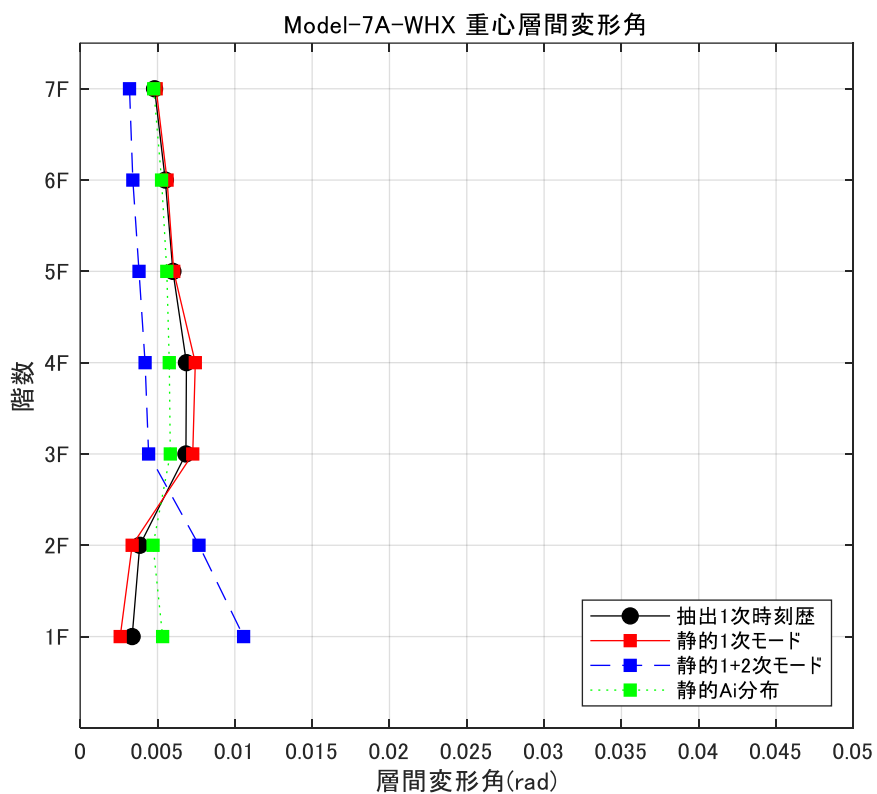
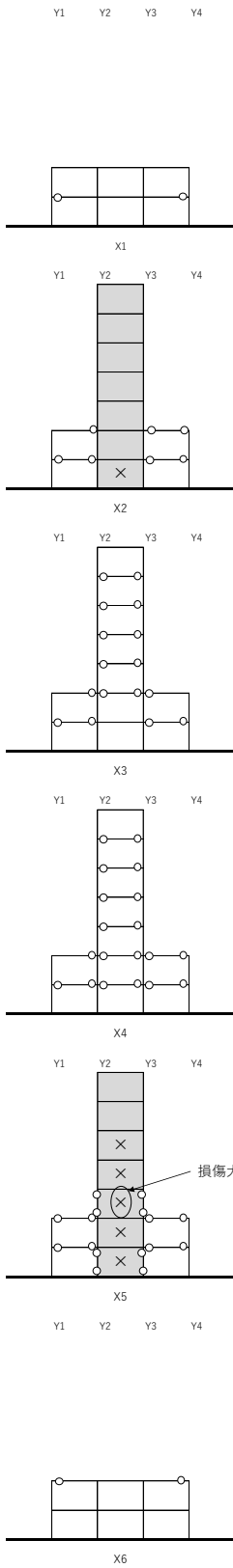
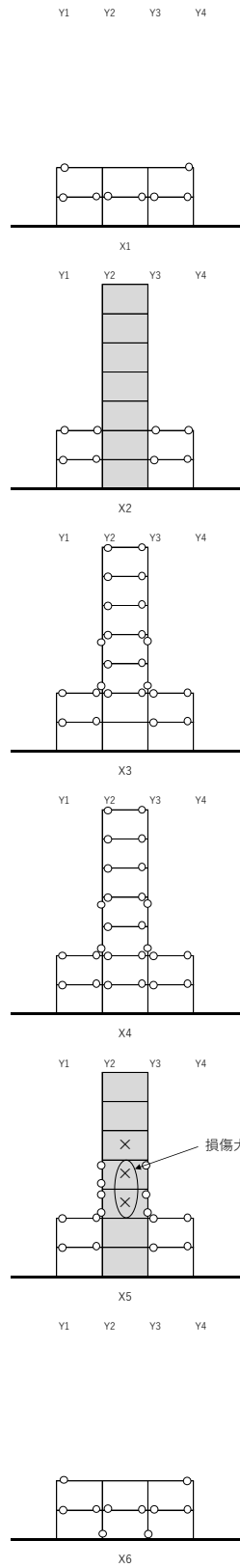


図 4. 5. 3. 4 重心層間変形角

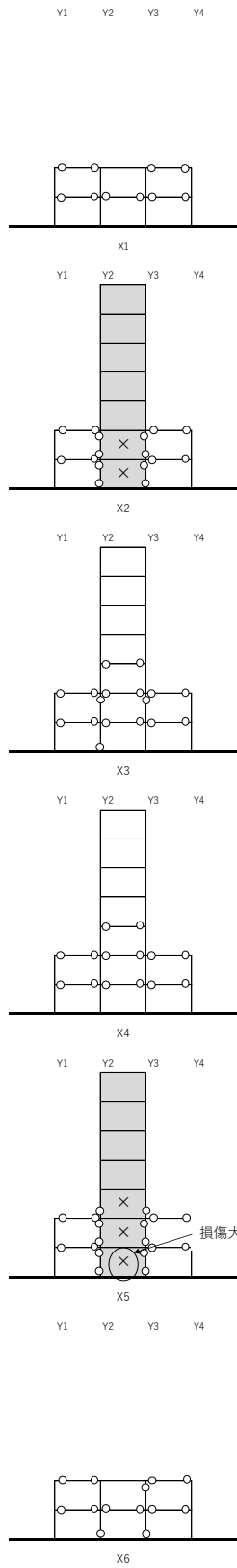
7A-WHX 地震応答解析



1次モード静的漸増载荷解析



1+2次モード静的漸増载荷解析



Ai外力分布静的漸増载荷解析

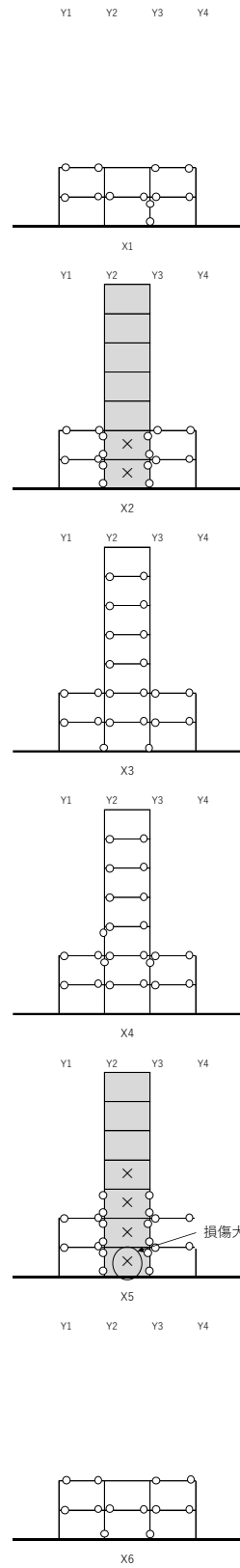


図 4.5.3.5 塑性ヒンジ図

4-5-4 3B-WHX モデル

Model-3B-WHX

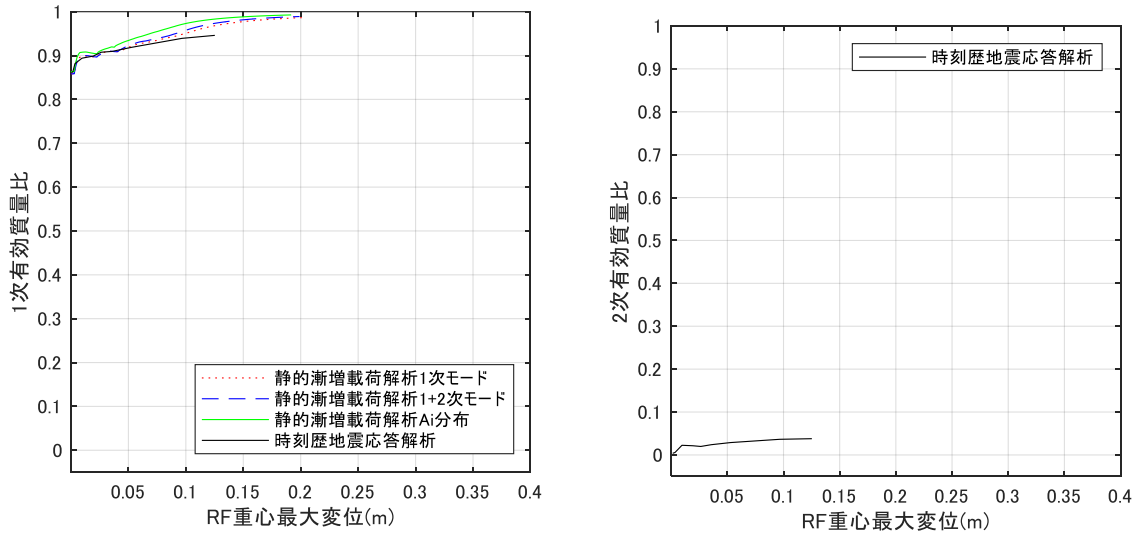


図 4.5.4.1 変形と有効質量比の推移

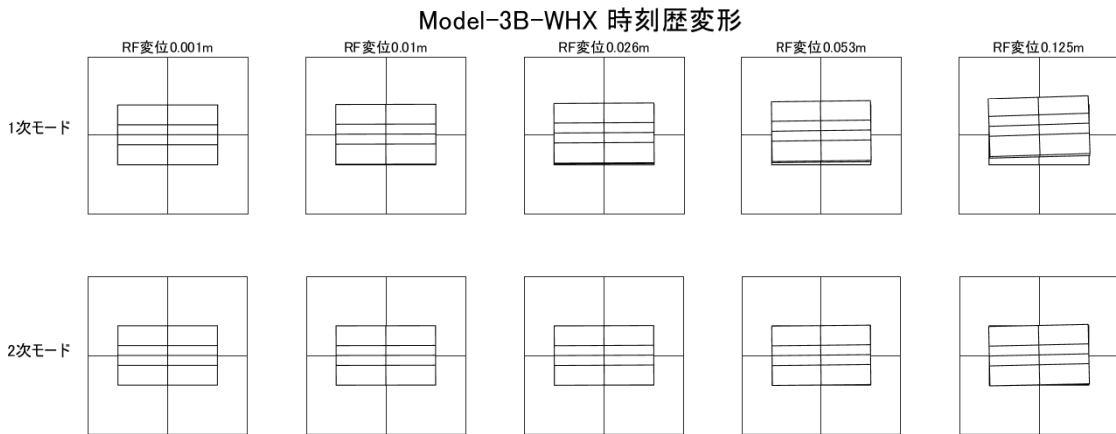


図 4.5.4.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

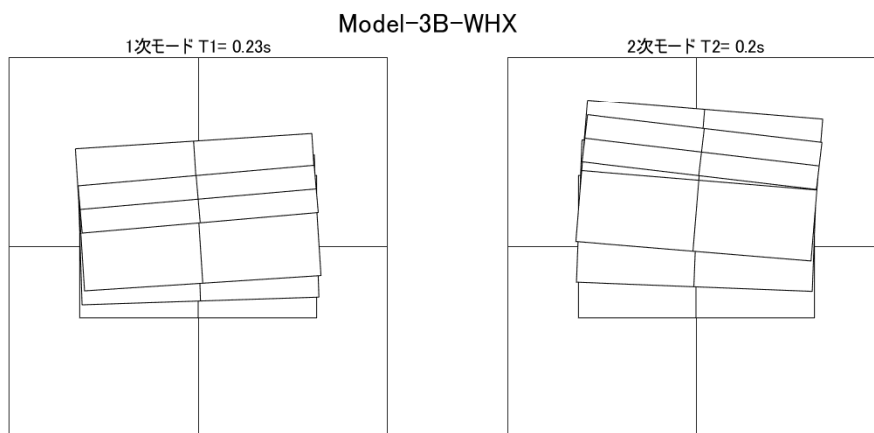


図 4.5.4.3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

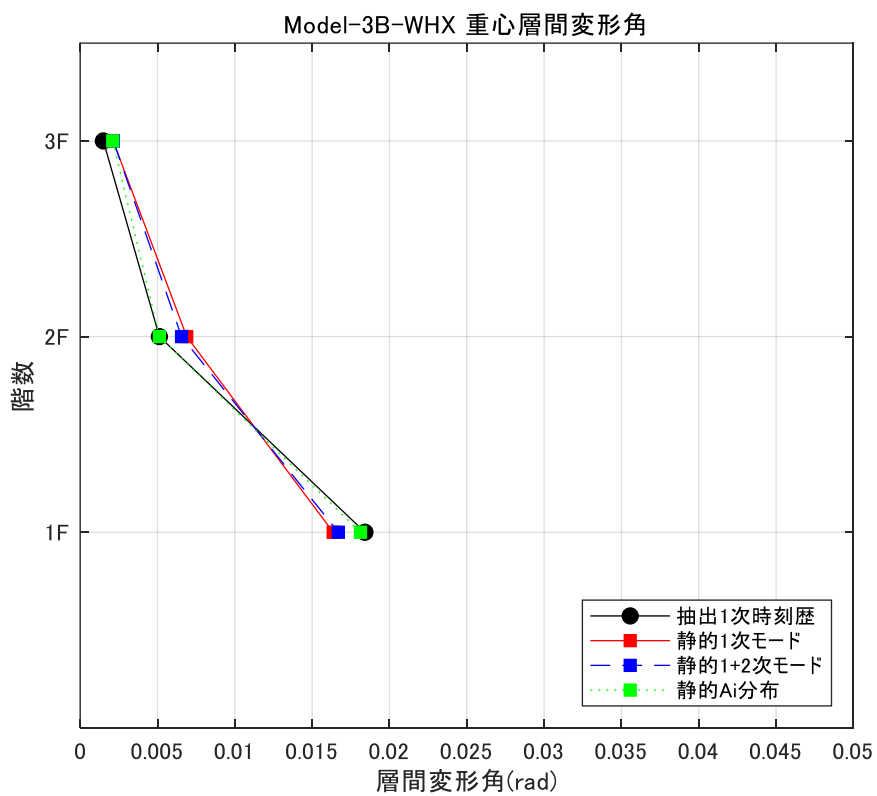


図 4.5.4.4 重心層間変形角

4-5-5 5B-WHX モデル

Model-5B-WHX

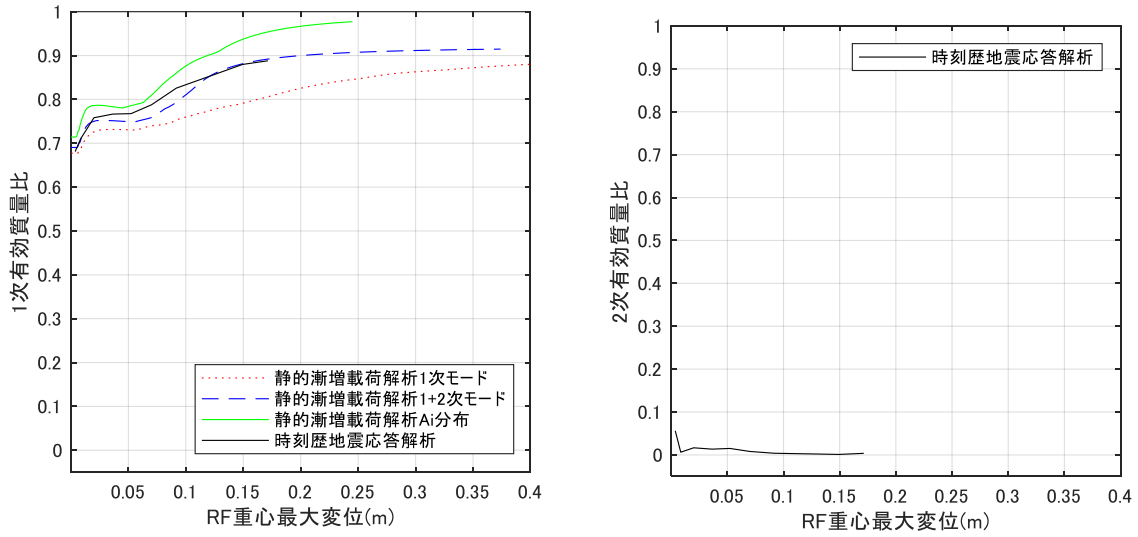


図 4.5.5.1 変形と有効質量比の推移

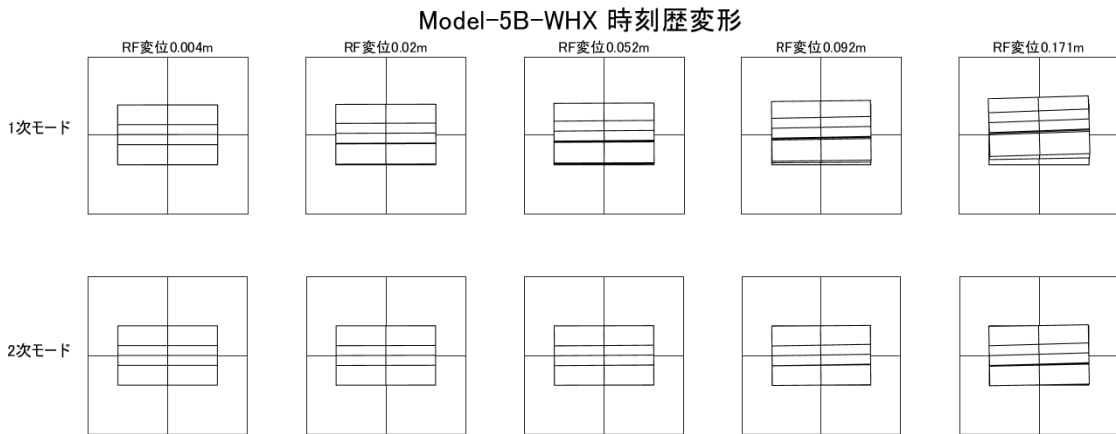


図 4.5.5.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

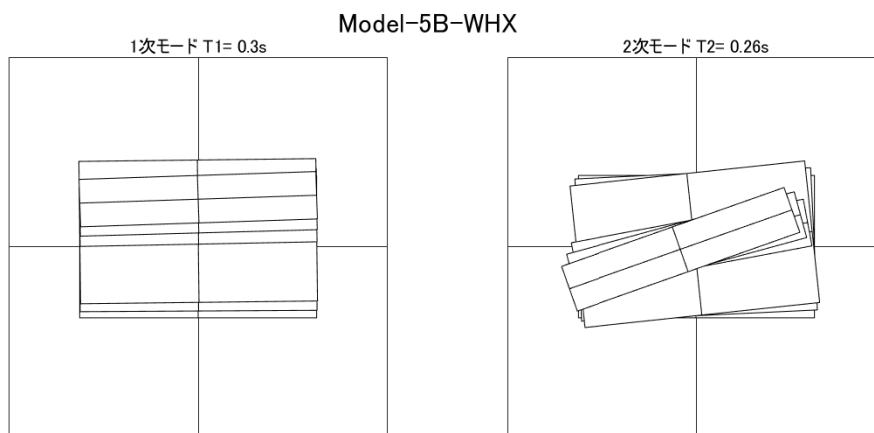


図 4.5.5.3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

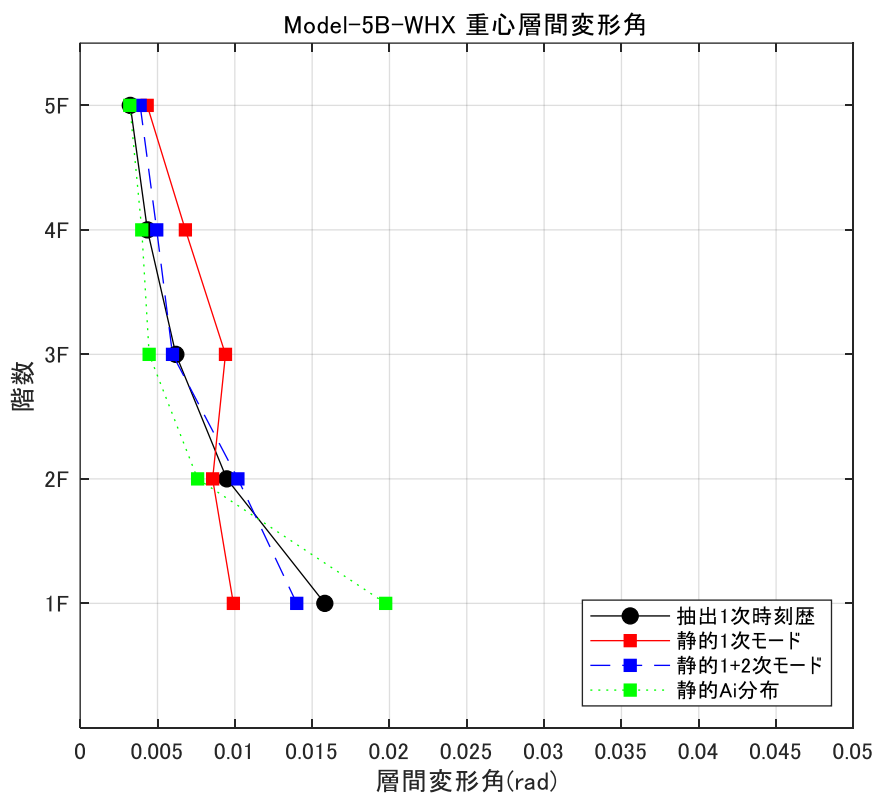


図 4.5.5.4 重心層間変形角

4-5-6 7B-WHX モデル

Model-7B-WHX

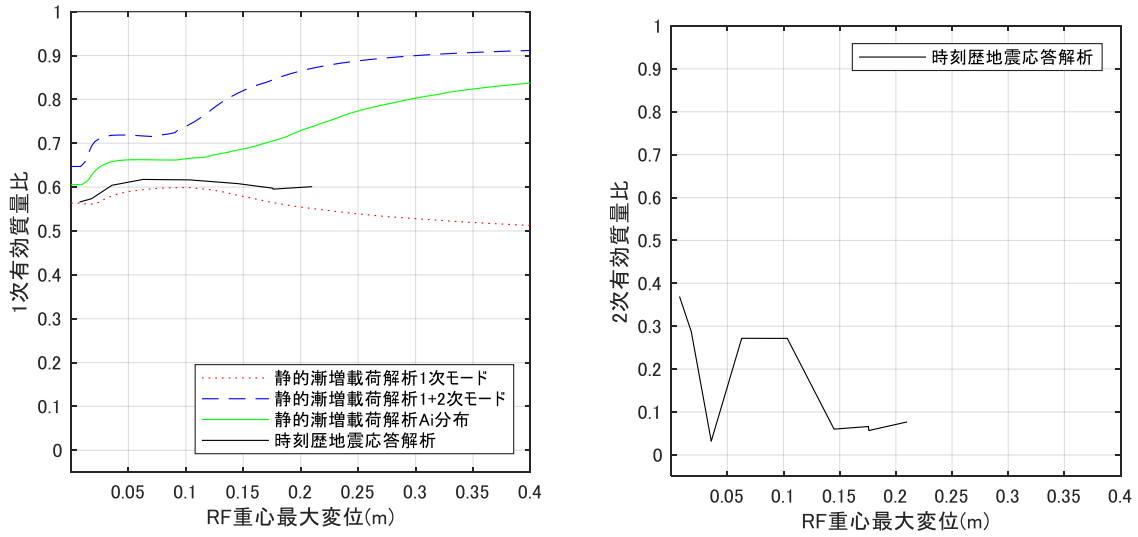


図 4.5.6.1 変形と有効質量比の推移

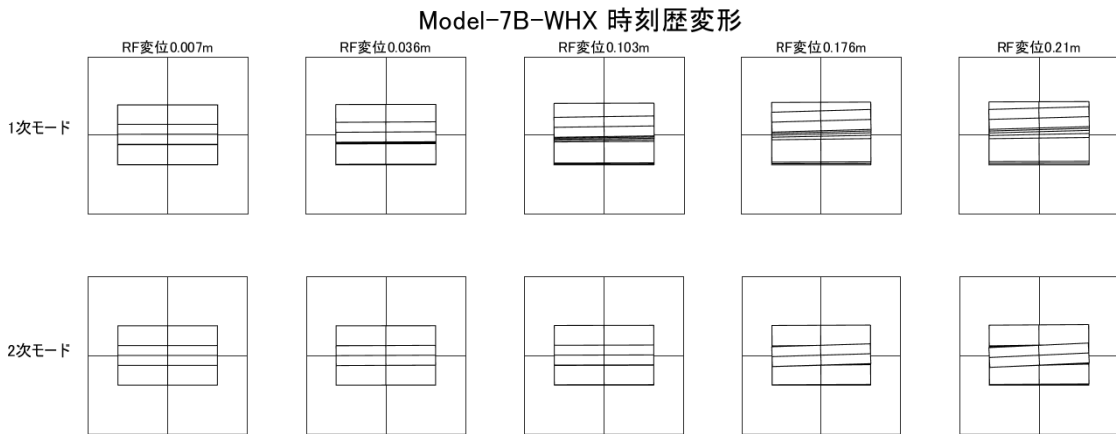


図 4.5.6.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

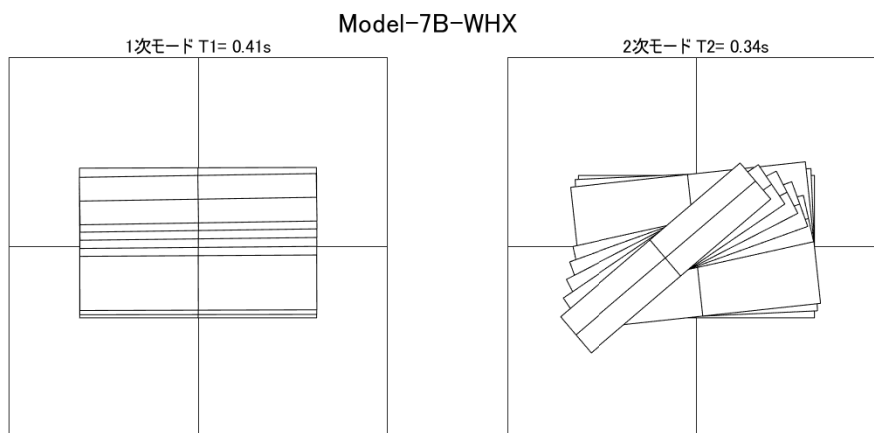


図 4. 5. 6. 3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

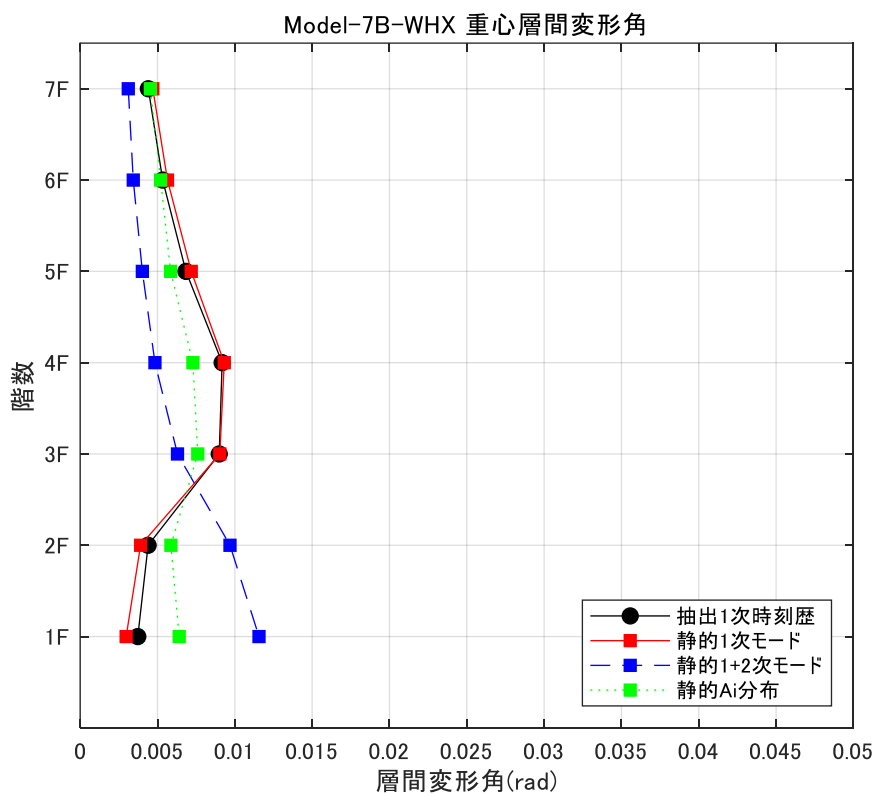


図 4. 5. 6. 4 重心層間変形角

4-5-7 3N-WHX モデル

Model-3N-WHX

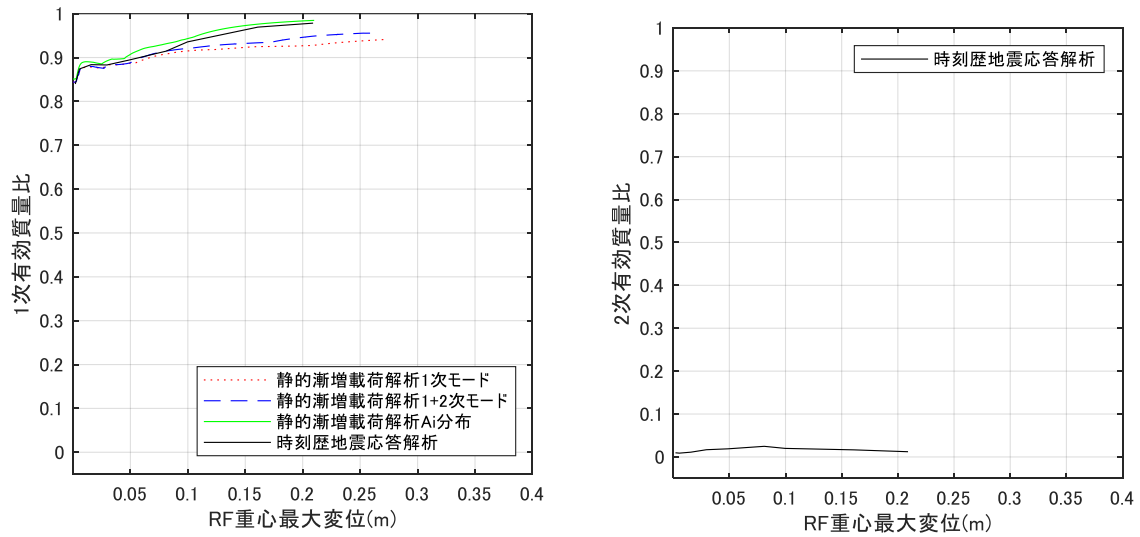


図 4.5.7.1 変形と有効質量比の推移

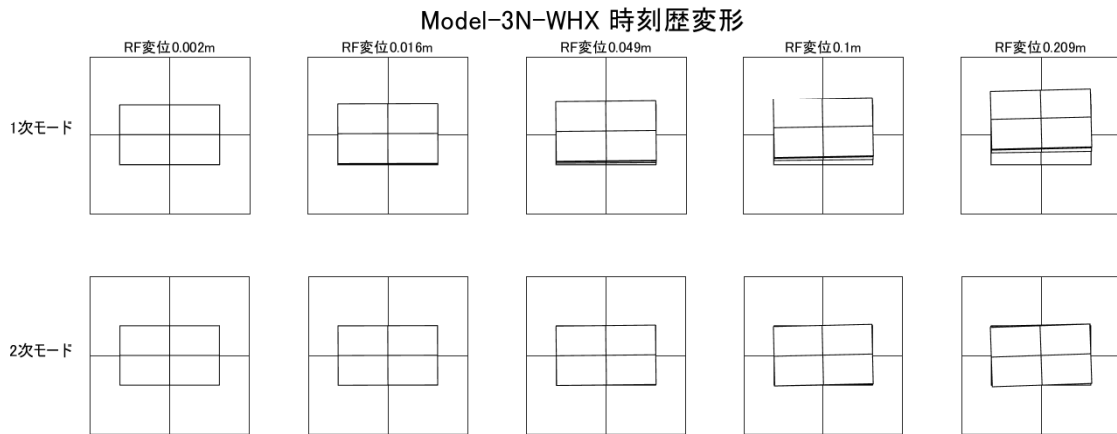


図 4.5.7.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

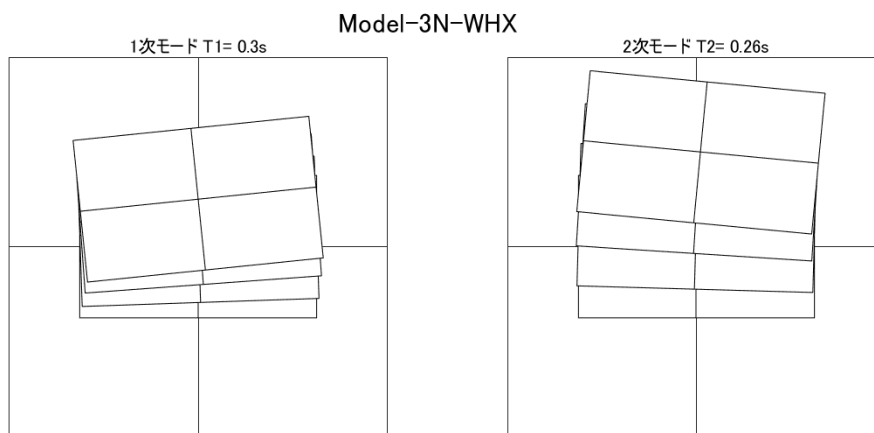


図 4.5.7.3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

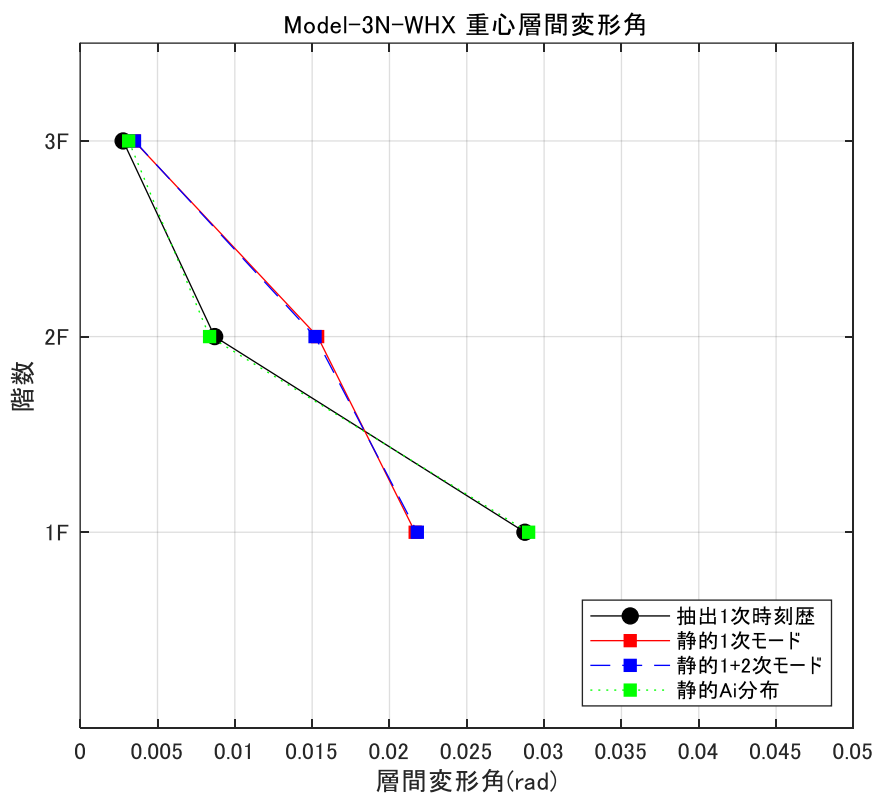


図 4.5.7.4 重心層間変形角

4-5-8 5N-WHX モデル

Model-5N-WHX

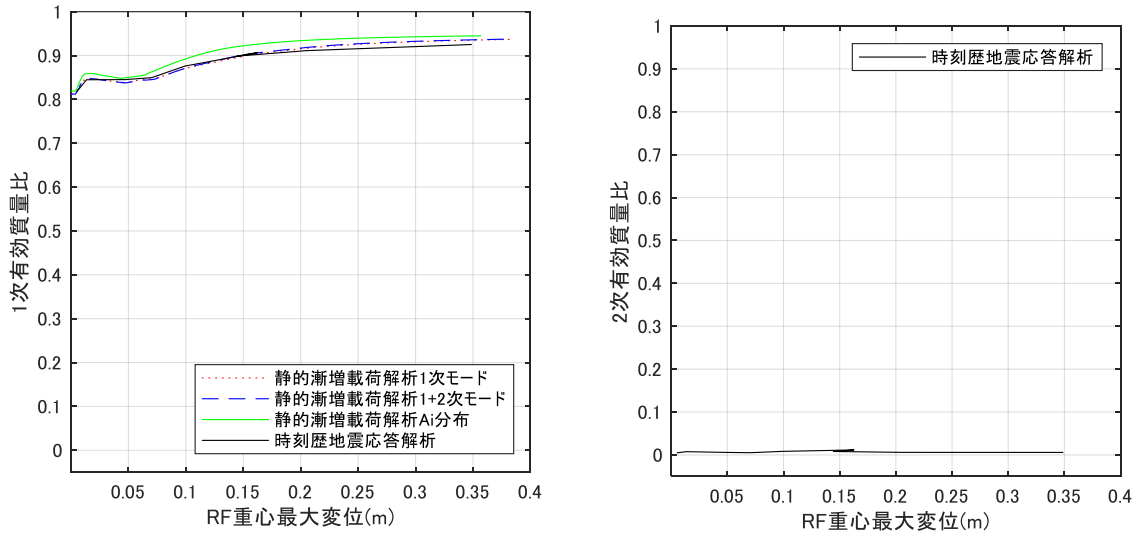


図 4.5.8.1 変形と有効質量比の推移

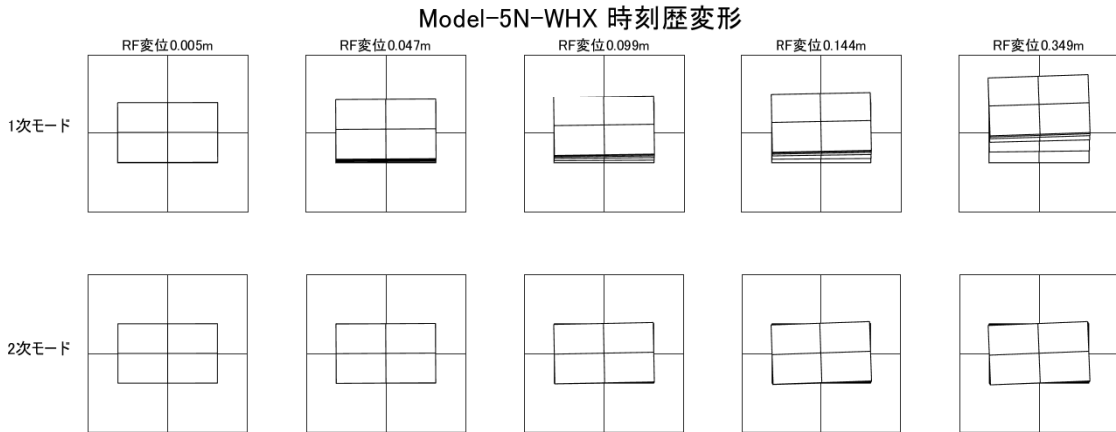


図 4.5.8.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

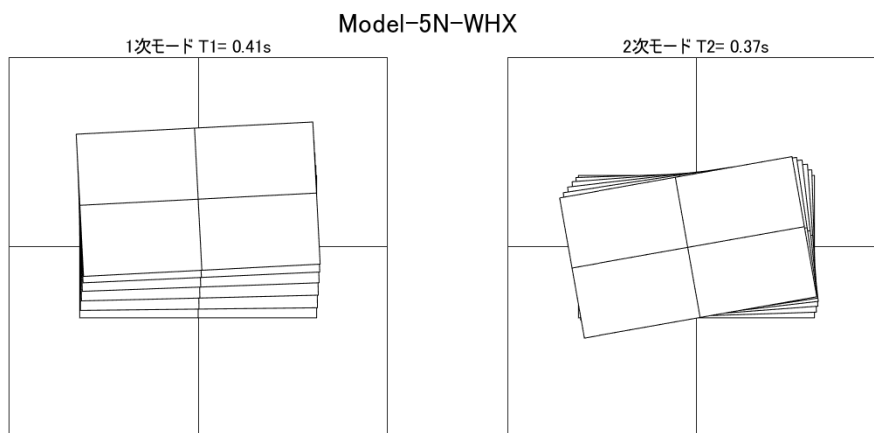


図 4.5.8.3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

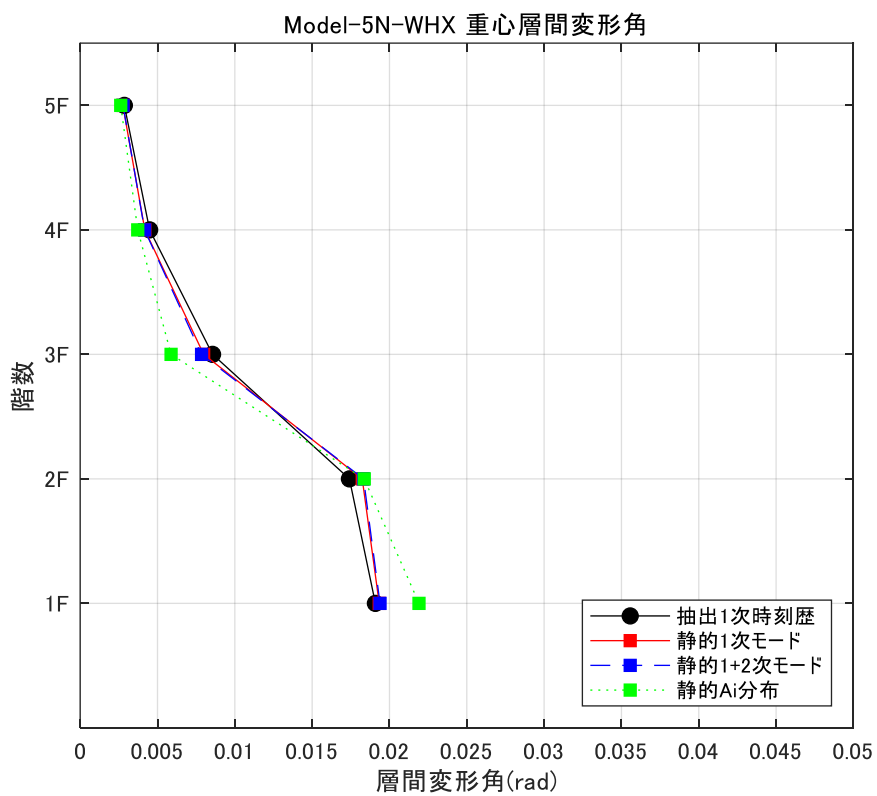


図 4.5.8.4 重心層間変形角

4-5-9 7N-WHX モデル

Model-7N-WHX

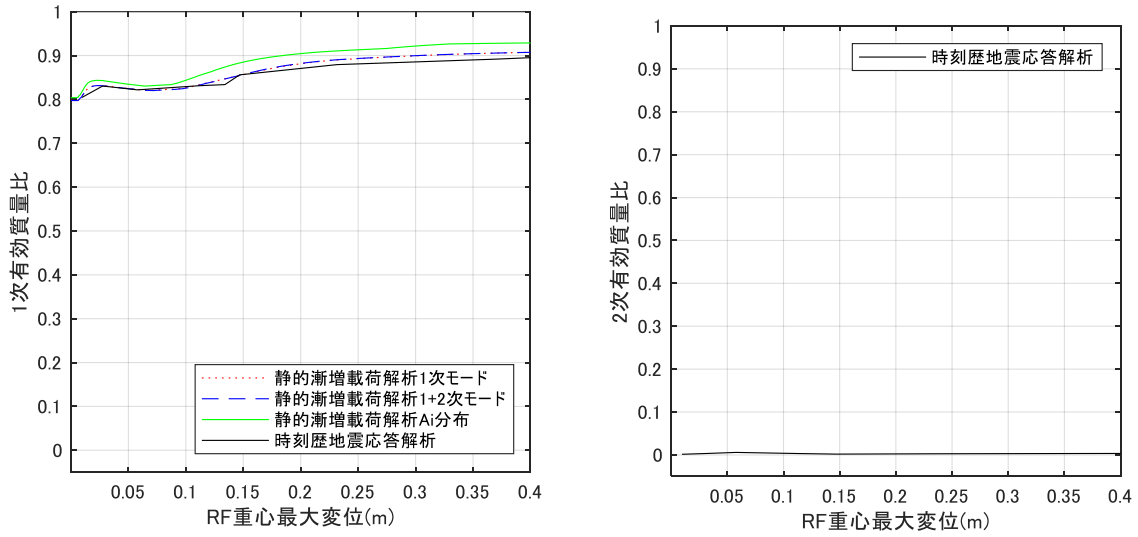


図 4.5.9.1 変形と有効質量比の推移

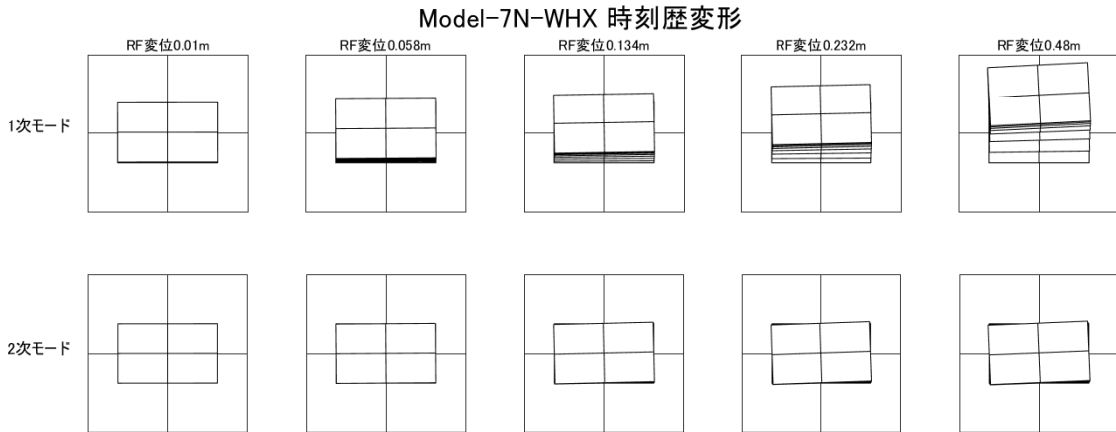


図 4.5.9.2 時刻歴応答解析変形(変形倍率 4 倍)

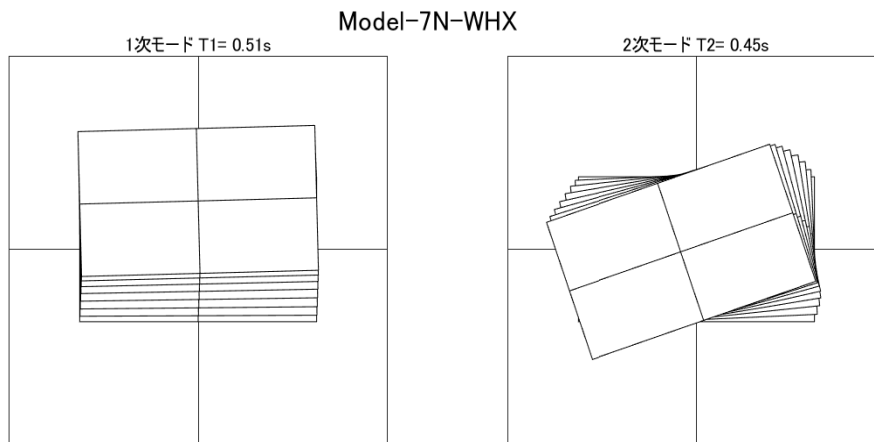


図 4.5.9.3 弾性時 1 次モード, 2 次モード

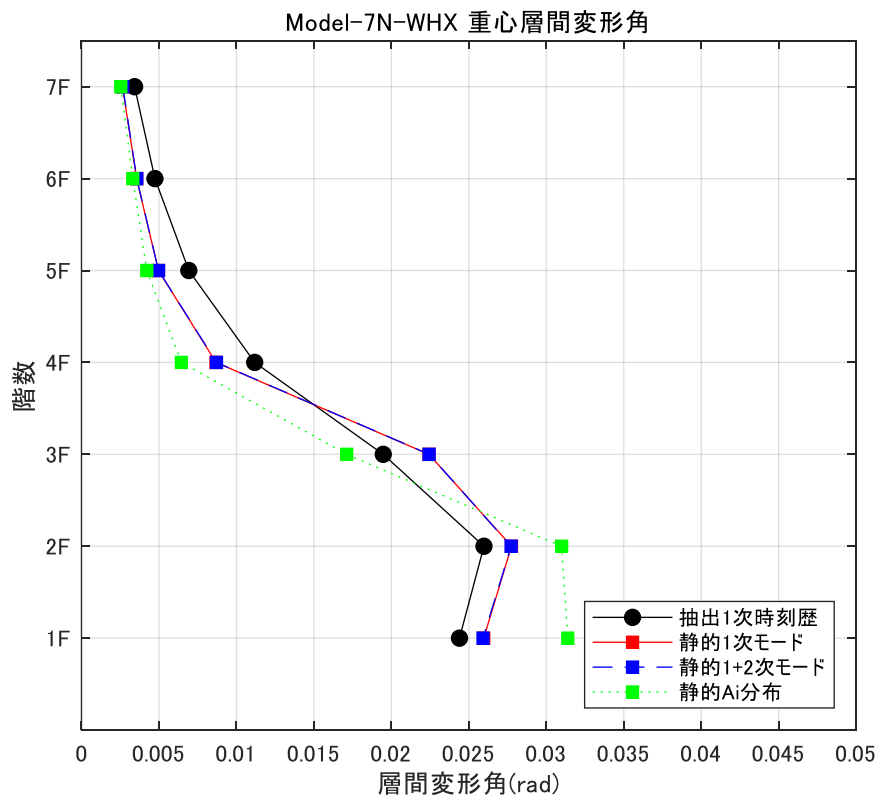


図 4.5.9.4 重心層間変形角

第5章 応答精度推定手法

5-1 応答精度推定手法の提案

第4章で述べられた解析結果から,基壇型建物の時刻歴応答解析と静的漸増載荷解析との対応には以下のような傾向が得られた。

- ① 1次モード外力分布形と1+2次モード外力分布形の対応にばらつきがあり,2次モード外力によって部分崩壊が発生し,静的漸増載荷解析と時刻歴応答解析にばらつきがあった3A-WLモデル(4-2-1節)のようなケース
- ② 1次モード外力分布形と1+2次モード外力分布形の対応にばらつきがあるが,建物の耐力が2次モード外力よりも高かったため1次モード外力分布形での静的漸増載荷解と時刻歴応答解析に対応が見られた7A-WHモデル(4-3-3節)のようなケース
- ③ 1次モード外力分布形と1+2次モード外力分布形が対応し,1次モード外力分布形での静的漸増載荷解と時刻歴応答解析に対応が見られたケース

①のように非線形化が進むにつれて2次有効質量比が増大するケースでは2次モード外力が部分崩壊耐力を上回り,建物を崩壊させる。このことから下層部のみ耐震壁があるような基壇型建物の場合は上層部の部分崩壊耐力に近い2次モード外力が発生する場合に応答推定が悪くなることが予想される。本傾向に戻ついで2次モード外力の影響によって1次モード外力分布による静的漸増載荷解析では応答推定が出来なくなるケースを推定する手法を提案する。

ステップ1

対象建物に対して,1次モードおよび1+2次モードから(2.3.1)(2.3.2)式の外力分布を設定し,それぞれの外力分布で静的漸増載荷解析を行う。次に,解析終了ステップの変形モードから1次有効質量比をそれぞれ算出する。この有効質量比に近い値の場合,どちらの外力分布で押しても1次モード外力分布により崩壊形に至るので,1次モード形外力分布での静的漸増載荷解析で地震応答状態を再現することができる。一方で有効質量比が異なる場合,モード外力が部分崩壊耐力に近くなると2次モードの影響によって層間変形角に違いが生じ,静的解析による再現精度が悪くなる。

次に②のようなケースでないことを確認するために、部分崩壊耐力に近い 2 次モード外力が発生していることを以下の手順で示す。

ステップ 2

対象建物の弾性状態における 2 次モード加速度応答スペクトル値 S_{a2} を算出する。次に 2.4 節の手法を用いて弾性状態建物の 2 次モードベクトル $\{u_2\}$ を抽出し、建物の総重量 M と (2.2.1)(2.2.2)式から 2 次モード刺激係数 β_2 を算出する。これらと建物質量マトリクス $[m]$ から 2 次モード外力 $\{F_2\}$ を (2.5.1)式から算出し、最上階加振方向の外力 F_{2RF} を求める。

$$\{F_2\} = [m]\beta_2\{u_2\}S_{a2} \quad (2.5.1)$$

上層部分に水平力が加わり、上層部が全体降伏形となる時の部分崩壊耐力 P_{RF} を算定する。このとき、(2.5.2)式を満足するような場合、2 次モード外力によって部分崩壊耐力を上回るので 1 次モード形外力分布による静的漸増載荷解析と時刻歴応答解析との対応精度が悪くなる。

$$F_{2RF} \geq P_{RF} \quad (2.5.2)$$

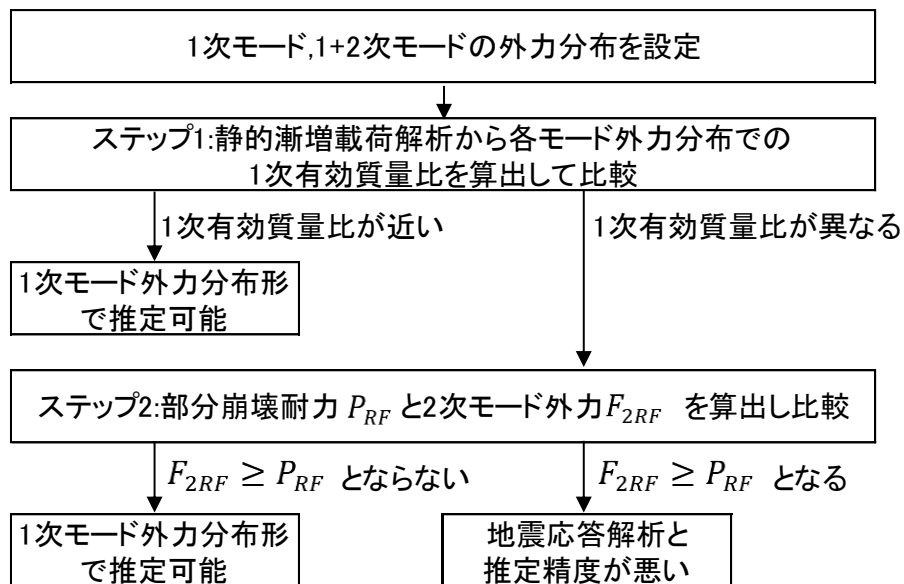


図 5.1.1 応答精度推定フロー図

5-2 検証結果

上記の推定手法ステップ1をWLモデルについて適用した結果を図5.1.2に示す。3A-WLおよび3B-WLでは非線形変形領域で1次モードと1+2次モード外力作用時の有効質量比が異なっている。同時にこの2つのモデルで部分崩壊耐力に近い2次モード外力が発生していることをステップ2で確認する。

加速度倍率は大地震を想定して最大地動加速度が430gal程度である1.25倍を仮定した。部分崩壊耐力の計算は上層部が全体降伏形となるような場合を仮想仕事法によって算定した。3A-WLモデルや3B-WLモデルでは図5.1.3に示すように部分崩壊耐力をおおよそ超えるような2次モード外力が発生していることが確認できる。

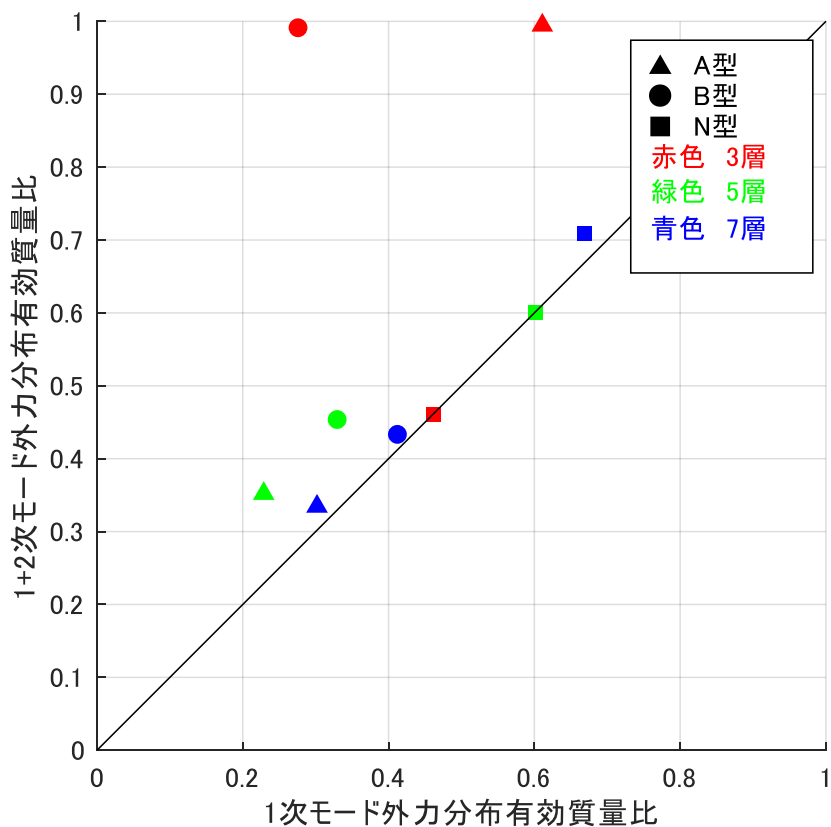


図5.1.2 WLモデル1次,1+2次静的漸増载荷解析 算出有効質量比

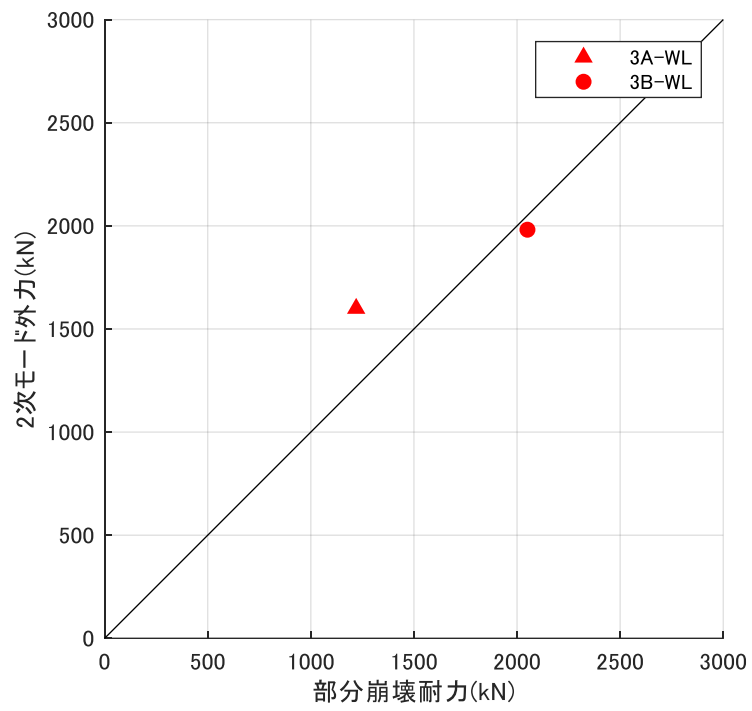


図 5. 1. 3 精度が悪い 2 ケースの 2 次モード外力と部分崩壊耐力比

第 6 章 結論

6-1 まとめ

基壇型偏心鉄筋コンクリート建物の時刻歴応答解析と静的漸増載荷解析から以下のことを示した。

- (1) 各種解析の有効質量比と変形を比較し,上層部が低層で平面が小さい,ペントハウスのような建物になるほど地震時刻歴応答解析と静的漸増載荷解析との対応精度が悪くなることを示した。
- (2) 静的漸増載荷解析の対応精度が悪いケースの塑性ヒンジ図を比較し,2次モードの影響で1次モード外力形静的漸増載荷解析と地震時刻歴応答解析との対応が悪くなることを示した。
- (3) 捩れモーメントを与える1次モード外力分布形による静的漸増載荷解析の方が, A_i 分布での静的漸増載荷解析よりも柔構面壁の壊れ方が地震応答解析とより対応することを示した。
- (4) 1次モードと1+2次モード形外力分布での静的漸増載荷解析で算出した有効質量比を比較し,2次モード外力と部分崩壊耐力を比較することで,静的漸増載荷解析で応答精度が悪くなる建物を推定する手法を提案した。

6-2 今後の課題

本研究では入力地震動を建築センターのBCJ-L2波のみ入力したが,ほかの地震動でも同様の結論が得られるのか検討が必要である。

建物モデルに関して,本研究では上層部をA型,B型で加力方向のYスパンを1スパン,N型で3スパンと設定したが,2スパン程度になった場合,どのような傾向があるのか。また,下層部を本研究では2層で固定しているが,例えば下層部5層で上層部1層のように下層部の層数が本研究と異なる建物でも同様に地震応答解析と対応精度が悪くなるのか検討が必要である。

参考文献

- 1) 木下拓也,中村尚弘,木村秀樹,石川裕次,平林聖尊：2011年東北地方太平洋沖地震における東北大学工学部人間環境形研究棟の非線形立体地震応答解析,日本建築学会構造工学論文集,pp.399-408,2018
- 2) 藤井賢志：多層1軸偏心建物の非線形地震応答評価手法に関する研究,東京大学博士論文,2002
- 3) 壁谷澤寿一：偏心鉄筋コンクリート構造物の非線形変形モードに基づく地震応答推定手法,日本建築学会構造系論文集,pp87-94,2005
- 4) 滝澤春男：梁崩壊型靱性架構の動的機構形成における定モード成分の抽出,日本建築学会構造工学論文集,pp.245-258,1990
- 5) 松森泰造：鉄筋コンクリート構造物の地震最大応答に関する研究,東京大学博士論文,2003
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所,国立研究開発法人建築研究所：2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書,2015
- 7) KANGNING LI：CANNY Structural Analysis version C06,2007
- 8) 青山博之：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計法,技報堂出版,1990

謝辞

本研究を進めるにあたり, 指導教員の東京都立大学(現 首都大学東京) 壁谷澤寿一先生からは多大な助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

このほか, 私が大学および大学院に在籍中の6年間, 友人をはじめとする数多くの方々にご助力を賜りました。厚く御礼申し上げます。

付録

静的漸増載荷解析で使用した外力分布形

		3A-WL			5A-WL			7A-WL		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進 (kN)	Y9									
	Y8							1891.8	711.4	801.8
	Y7							1651.1	1171.9	541.2
	Y6				2110.1	1025.6	771.7	1318.3	1743.3	486.2
	Y5				1632.2	1431.2	525.8	912.0	2065.0	450.8
	Y4	2552.8	1196.2	738.8	913.2	1734.6	471.4	468.1	1830.8	422.9
	Y3	5200.4	7743.1	2120.4	1212.6	7304.2	1913.9	592.6	5868.9	1790.7
	Y2	2562.7	4362.8	1417.6	539.3	4106.7	1371.7	246.5	3251.0	1338.5
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転 (kNm)	R9									
	R8							9.4	-63.6	0.0
	R7							8.9	-40.6	0.0
	R6				28.1	-149.4	0.0	8.1	-6.8	0.0
	R5				25.1	-78.2	0.0	7.0	31.4	0.0
	R4	240.7	-79.3	0.0	20.0	29.0	0.0	5.4	65.6	0.0
	R3	2216.2	483.3	0.0	176.5	1506.4	0.0	47.6	1022.6	0.0
	R2	1197.7	509.9	0.0	96.6	944.3	0.0	26.3	599.2	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

		3B-WL			5B-WL			7B-WL		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進 (kN)	Y9									
	Y8							3060.4	1323.0	1231.3
	Y7							2685.1	2026.9	847.1
	Y6				3265.8	1707.6	1170.4	2166.7	2876.3	756.4
	Y5				2560.5	2415.2	812.4	1530.6	3296.2	693.6
	Y4	3704.6	2015.4	1100.6	1494.6	2882.8	720.0	824.6	2761.6	641.6
	Y3	4730.3	7652.0	2034.9	1433.0	7041.8	1790.7	763.2	4712.4	1658.1
	Y2	2284.1	4370.5	1400.4	637.2	3947.6	1338.5	323.2	2562.9	1299.7
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転 (kNm)	R9									
	R8							64.5	-93.8	0.0
	R7							60.5	-32.7	0.0
	R6				148.4	-169.6	0.0	54.3	49.8	0.0
	R5				129.9	-30.5	0.0	44.8	125.0	0.0
	R4	695.1	801.6	0.0	99.2	163.0	0.0	32.0	168.4	0.0
	R3	2062.1	2635.4	0.0	263.3	1312.0	0.0	81.4	746.8	0.0
	R2	1079.1	1573.5	0.0	136.1	838.6	0.0	41.8	435.3	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

		3N-WL			5N-WL			7N-WL		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8							8440.0	5300.7	3301.8
	Y7							7787.0	6291.6	2306.0
	Y6				8438.5	8486.4	3048.6	6720.1	7543.0	2012.7
	Y5				7172.2	7191.6	2121.0	5278.4	8142.6	1786.1
	Y4	8500.4	8597.7	2702.8	4942.9	4933.2	1787.1	3458.2	7022.2	1585.3
	Y3	4055.4	4039.2	1790.7	2129.2	2141.7	1509.5	1589.1	4136.8	1397.8
	Y2	1841.2	1834.3	1338.5	936.7	944.5	1253.9	681.3	2030.5	1218.2
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8							622.6	1201.7	0.0
	R7							598.3	1184.1	0.0
	R6				1335.3	-7.7	0.0	554.1	1143.9	0.0
	R5				1216.4	42.7	0.0	483.8	1058.7	0.0
	R4	2401.2	787.0	0.0	965.3	111.2	0.0	377.5	889.0	0.0
	R3	2122.2	923.9	0.0	706.5	176.4	0.0	292.7	746.3	0.0
	R2	1019.1	479.9	0.0	328.8	94.3	0.0	134.6	387.7	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

		3A-WLX			5A-WLX			7A-WLX		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8							1891.8	711.4	801.8
	Y7							1651.1	1171.9	541.2
	Y6				2110.1	1025.6	771.7	1318.3	1743.3	486.2
	Y5				1632.2	1431.2	525.8	912.0	2065.0	450.8
	Y4	2552.8	1196.2	738.8	913.2	1734.6	471.4	468.1	1830.8	422.9
	Y3	5200.4	7743.1	2120.4	1212.6	7304.2	1913.9	592.6	5868.9	1790.7
	Y2	2562.7	4362.8	1417.6	539.3	4106.7	1371.7	246.5	3251.0	1338.5
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8							9.4	-63.6	0.0
	R7							8.9	-40.6	0.0
	R6				28.1	-149.4	0.0	8.1	-6.8	0.0
	R5				25.1	-78.2	0.0	7.0	31.4	0.0
	R4	240.7	-79.3	0.0	20.0	29.0	0.0	5.4	65.6	0.0
	R3	2216.2	483.3	0.0	176.5	1506.4	0.0	47.6	1022.6	0.0
	R2	1197.7	509.9	0.0	96.6	944.3	0.0	26.3	599.2	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

		3B-WLX			5B-WLX			7B-WLX		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8							3060.4	1323.0	1231.3
	Y7							2685.1	2026.9	847.1
	Y6				3265.8	1707.6	1170.4	2166.7	2876.3	756.4
	Y5				2560.5	2415.2	812.4	1530.6	3296.2	693.6
	Y4	3704.6	2015.4	1100.6	1494.6	2882.8	720.0	824.6	2761.6	641.6
	Y3	4730.3	7652.0	2034.9	1433.0	7041.8	1790.7	763.2	4712.4	1658.1
	Y2	2284.1	4370.5	1400.4	637.2	3947.6	1338.5	323.2	2562.9	1299.7
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8							64.5	-93.8	0.0
	R7							60.5	-32.7	0.0
	R6				148.4	-169.6	0.0	54.3	49.8	0.0
	R5				129.9	-30.5	0.0	44.8	125.0	0.0
	R4	695.1	801.6	0.0	99.2	163.0	0.0	32.0	168.4	0.0
	R3	2062.1	2635.4	0.0	263.3	1312.0	0.0	81.4	746.8	0.0
	R2	1079.1	1573.5	0.0	136.1	838.6	0.0	41.8	435.3	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

		3N-WLX			5N-WLX			7N-WLX		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8							8432.6	7809.4	3301.8
	Y7							7791.9	7458.4	2306.0
	Y6				8439.8	8438.7	3048.6	6745.1	6836.4	2012.7
	Y5				7196.1	7195.6	2121.0	5328.9	5826.5	1786.1
	Y4	8503.7	8588.5	2702.8	5022.5	5022.9	1787.1	3546.0	4188.3	1585.3
	Y3	4099.3	4078.0	1790.7	2331.9	2332.7	1509.5	1698.9	2176.5	1397.8
	Y2	1892.0	1875.7	1338.5	1033.3	1033.7	1253.9	724.9	962.4	1218.2
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8							863.0	4328.5	0.0
	R7							830.7	4101.0	0.0
	R6				1683.9	1699.9	0.0	771.8	3689.5	0.0
	R5				1539.9	1554.0	0.0	679.6	3086.2	0.0
	R4	2413.3	1131.6	0.0	1250.5	1260.9	0.0	541.3	2268.2	0.0
	R3	2161.2	1203.6	0.0	987.7	994.7	0.0	432.7	1572.8	0.0
	R2	1067.9	630.6	0.0	459.7	462.8	0.0	192.0	693.6	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

	3A-WH			5A-WH			7A-WH			
	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8						2196.9	1039.2	801.8	
	Y7						1822.8	1249.9	541.2	
	Y6				2376.7	1121.1	771.7	1426.2	1463.2	486.2
	Y5				1865.7	1305.5	525.8	1028.2	1603.8	450.8
	Y4	1884.2	1927.8	738.8	1317.7	1473.3	471.4	652.4	1607.0	422.9
	Y3	6998.7	7087.1	2120.4	3980.7	7498.1	1913.9	1673.9	7166.1	1790.7
	Y2	3512.9	3550.3	1417.6	1823.2	4751.9	1371.7	716.3	4116.5	1338.5
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8						72.1	-167.8	0.0	
	R7						64.5	-112.1	0.0	
	R6				134.5	-289.3	0.0	53.5	-50.7	0.0
	R5				114.5	-192.3	0.0	40.3	7.7	0.0
	R4	248.3	-1.7	0.0	87.0	-88.5	0.0	25.7	54.8	0.0
	R3	3133.0	191.0	0.0	818.8	32.1	0.0	158.7	1125.5	0.0
	R2	1707.4	232.1	0.0	448.4	310.1	0.0	89.5	707.9	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

	3B-WH			5B-WH			7B-WH			
	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8						3351.5	1737.2	1231.3	
	Y7						2815.8	2104.1	847.1	
	Y6				3486.7	3324.2	1170.4	2231.4	2474.8	756.4
	Y5				2758.2	2721.2	812.4	1631.0	2697.2	693.6
	Y4	3086.8	3120.3	1100.6	1946.9	2061.7	720.0	1050.5	2644.4	641.6
	Y3	6668.0	6698.3	2034.9	3483.5	4167.4	1790.7	1661.6	6760.4	1658.1
	Y2	3256.4	3249.8	1400.4	1561.3	2056.6	1338.5	705.2	3803.7	1299.7
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8						399.4	-596.0	0.0	
	R7						355.2	-410.4	0.0	
	R6				763.5	-2079.4	0.0	294.7	-195.3	0.0
	R5				636.0	-1588.8	0.0	223.4	9.7	0.0
	R4	690.3	118.3	0.0	465.7	-1052.9	0.0	145.9	168.2	0.0
	R3	2052.2	545.2	0.0	1007.6	-1956.7	0.0	260.8	852.1	0.0
	R2	1126.7	398.1	0.0	507.2	-786.6	0.0	131.1	545.4	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

	3N-WH			5N-WH			7N-WH			
	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8						8619.3	8667.9	3301.8	
	Y7						7803.3	7837.4	2306.0	
	Y6				8473.8	8571.1	3048.6	6720.8	6744.5	2012.7
	Y5				7183.1	7239.7	2121.0	5428.3	5443.7	1786.1
	Y4	8119.1	8255.4	2702.8	5471.7	5498.0	1787.1	3989.2	3998.1	1585.3
	Y3	5615.5	5661.0	1790.7	3519.4	3524.9	1509.5	2501.5	2505.8	1397.8
	Y2	2578.2	2578.5	1338.5	1556.0	1553.1	1253.9	1088.2	1090.3	1218.2
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8						1701.3	84.4	0.0	
	R7						1617.4	126.6	0.0	
	R6				2544.1	300.9	0.0	1459.0	152.7	0.0
	R5				2287.8	358.0	0.0	1236.5	163.7	0.0
	R4	3215.6	379.9	0.0	1845.2	356.8	0.0	958.7	156.8	0.0
	R3	2409.3	446.6	0.0	1264.9	297.9	0.0	637.3	126.5	0.0
	R2	1193.4	306.6	0.0	599.1	170.2	0.0	291.5	67.3	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

	3A-WHX			5A-WHX			7A-WHX			
	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8						2196.9	1039.0	801.8	
	Y7						1822.9	1249.8	541.2	
	Y6				2376.7	1121.1	771.7	1426.3	1463.1	486.2
	Y5				1865.7	1305.5	525.8	1028.2	1603.8	450.8
	Y4	1884.2	1927.8	738.8	1317.7	1473.3	471.4	652.4	1607.1	422.9
	Y3	6998.7	7087.1	2120.4	3980.7	7498.1	1913.9	1674.0	7166.5	1790.7
	Y2	3512.9	3550.3	1417.6	1823.2	4751.9	1371.7	716.3	4116.8	1338.5
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
回転(kNm)	R9									
	R8						68.1	-158.3	0.0	
	R7						60.9	-105.7	0.0	
	R6				134.5	-289.3	0.0	50.5	-47.8	0.0
	R5				114.5	-192.3	0.0	38.0	7.3	0.0
	R4	248.3	-1.7	0.0	87.0	-88.5	0.0	24.2	51.7	0.0
	R3	3133.0	191.0	0.0	818.8	32.1	0.0	158.7	1125.6	0.0
	R2	1707.4	232.1	0.0	448.4	310.1	0.0	89.5	708.0	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

		3B-WHX			5B-WHX			7B-WHX		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8									
	Y7							3351.5	1737.2	1231.3
	Y6							2815.8	2104.1	847.1
	Y5				3486.7	3324.2	1170.4	2231.4	2474.8	756.4
	Y4	3086.7	3120.2	1100.6	2758.2	2721.2	812.4	1631.0	2697.2	693.6
	Y3	6668.1	6698.4	2034.9	1946.9	2061.7	720.0	1050.5	2644.4	641.6
	Y2	6668.1	6698.4	2034.9	3483.5	4167.4	1790.7	1661.6	6760.4	1658.1
	GF	3257.0	3250.3	1400.4	1561.3	2056.6	1338.5	705.2	3803.7	1299.7
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
回転(kNm)	R9									
	R8									
	R7							399.4	-596.0	0.0
	R6							355.2	-410.4	0.0
	R5				763.5	-2079.4	0.0	294.7	-195.3	0.0
	R4	691.0	118.8	0.0	636.0	-1588.8	0.0	223.4	9.7	0.0
	R3	2054.3	546.8	0.0	465.7	-1052.9	0.0	145.9	168.2	0.0
	R2	1128.3	399.3	0.0	1007.6	-1956.7	0.0	260.8	852.1	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	507.2	-786.6	0.0	131.1	545.4	0.0

		3N-WHX			5N-WHX			7N-WHX		
		MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai	MODE1	MODE1+2	Ai
Y方向並進(kN)	Y9									
	Y8									
	Y7							8566.5	8627.7	3301.8
	Y6							7784.4	7825.6	2306.0
	Y5				8411.2	8533.9	3048.6	6745.7	6766.7	2012.7
	Y4	8110.8	8253.7	2702.8	7182.5	7250.1	2121.0	5502.9	5503.8	1786.1
	Y3	5619.1	5666.5	1790.7	5549.4	5566.0	1787.1	4106.9	4090.7	1585.3
	Y2	5619.1	5666.5	1790.7	3667.8	3643.5	1509.5	2625.7	2602.8	1397.8
	GF	2593.1	2590.8	1338.5	1665.3	1639.1	1253.9	1159.2	1145.2	1218.2
	GF	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
回転(kNm)	R9									
	R8									
	R7							2019.6	873.1	0.0
	R6							1927.7	867.2	0.0
	R5				2877.3	830.2	0.0	1758.5	823.2	0.0
	R4	3293.4	415.8	0.0	2613.7	843.1	0.0	1522.0	745.4	0.0
	R3	2471.4	477.6	0.0	2162.3	780.7	0.0	1220.1	629.4	0.0
	R2	1234.9	330.5	0.0	1557.6	638.8	0.0	842.5	458.3	0.0
	GF	0.0	0.0	0.0	767.3	350.7	0.0	393.6	222.8	0.0

MODE1 弾性状態の1次モード形外力分布

MODE1+2 弾性状態の1+2次モード形外力分布

Ai Ai分布に基づく外力分布