

地震記録に基づく立体振動を考慮した建物の 振動特性の変化に関する研究

栗田研究室

4109635

松原 貴章

1. はじめに

既存建物の長期利用・長寿命化には構造健全性を逐次評価・把握し、補修及び補強の要否を判断する必要がある。近年では、振動観測記録に基づく構造健全性診断法の開発研究が盛んに行われている。濱本ら¹⁾は建物全体の剛性を表す固有振動数と、層の剛性を表す振動モードの変化から、損傷の有無や損傷層を推定する方法の有用性を実験的に明らかにしている。実建物を対象に固有振動数の経年変化から損傷評価を試みる研究は多く報告されているが²⁾、損傷層推定に有用であると考えられる振動モードの経年変化から損傷評価を行っている研究は少ない。また固有振動数は損傷に関係なく振幅依存性によって変化することが多く報告されているが³⁾、振動モードの振幅依存性は未だ報告されていない。そこで本研究では、地震観測記録を用いて振動モードの振幅依存性について検討を行った。また振幅依存性による固有振動数、振動モードの変化量から剛性変化に対する相違について検討を行った。

2. 対象建物及び地震観測概要

2.1 対象建物概要

対象建物は、1980年に竣工した東京理科大学神楽坂1号館(以降、1号館と略称)である。本建物は、地下1階、地上17階、塔屋1階、X方向(長辺方向)45.12m、Y方向(短辺方向)19.40m、最高高さ63.10mの一部耐震壁を併用した鉄骨鉄筋コンクリート造である。図1(a)に屋上階梁伏図を示す。

2.2 地震観測概要

地震観測は、地下1階・5階・10階・屋上階の計4箇所で行っており(図1(b))、2002年3月から現在までに243地震記録(屋上階の計測震度が1.0以上)を蓄積している。全地震観測記録の内、最大入力加速度5gal以下が全体の約95%を占めており、最大入力加速度38.6gal(Y方向)を計測した2005年7月23日の地震記録は蓄積する全地震記録の中で最も大きい地震動である。地震計のサンプリング周波数を100Hzに設定し、水平2成分・上下1成分の計3成分の加速度を記録している。

3. 立体振動を考慮した地震記録のシステム同定

3.1 システム同定の概要及び手法

本研究では地震記録の解析手法として、モーダルモデルに基づく2方向入出力モデル⁴⁾によるシステ

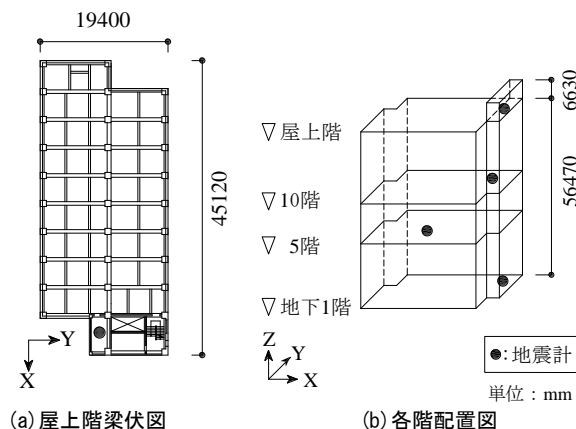


図1 地震計配置図

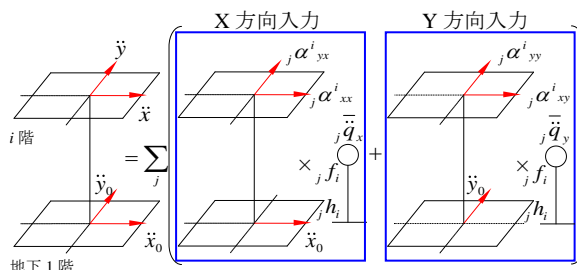


図2 2方向入出力モデルのシステム同定概要図

$$\begin{aligned}
 \begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \end{Bmatrix} &= \sum_j \left[\beta_j \begin{Bmatrix} U_x^j \\ U_y^j \end{Bmatrix} \left\{ \bar{q}_x(j, f_i, h_i) + \beta_j \begin{Bmatrix} U_x^j \\ U_y^j \end{Bmatrix} \left\{ \bar{q}_y(j, f_i, h_i) \right\} \right\} \right] \\
 &= \sum_j \begin{bmatrix} \alpha_{xx}^j & \alpha_{xy}^j \\ \alpha_{yx}^j & \alpha_{yy}^j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{q}_x(j, f_i, h_i) \\ \bar{q}_y(j, f_i, h_i) \end{Bmatrix} \quad (1) \\
 \begin{cases} j \bar{q}_x + 2 \cdot j h_i \cdot j \omega_i \cdot j \bar{q}_x + j \omega_i^2 \cdot j \bar{q}_x = -\ddot{x}_0 \\ j \bar{q}_y + 2 \cdot j h_i \cdot j \omega_i \cdot j \bar{q}_y + j \omega_i^2 \cdot j \bar{q}_y = -\ddot{y}_0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

ここに、 β : 刺激係数、 U : 固有モード、 f : 固有振動数、 h : 減衰定数、 α : 刺激関数、 ω : 固有円振動数、添え字 j : j 次モード、添え字 i : i 階

ム同定を採用した(図2及び式(1))。振れ1次モードを除いたX方向・Y方向並進1次及び2次モードと振れ2次モードを同定範囲とし、各次モードのモーダルパラメータ(固有振動数・減衰定数・刺激関数)を同定している。ここで同定する際は、修正 Gauss Newton 法を用いて5階、10階、屋上階の応答加速

度の同定誤差が最小となることを同定条件としている。

3.2 刺激関数の大きさと振動角度について

入力地震動の X 方向加振、Y 方向加振による刺激関数(α_{xx} 、 α_{yx} 、 α_{xy} 、 α_{yy})と、刺激関数の大きさ R_x 、 R_y 及び振動角度 θ_x 、 θ_y の関係を図 3 に示す。ここで、刺激関数の大きさは振動モードに相当する。また本研究では、1 号館の振動方向と建物の X 軸とのなす角度を振動角度(反時計回りを正とする)と定義し、j 次モードの刺激関数の大きさと振動角度は式(2)で表される。

$$R_x(j) = \sqrt{j\alpha_{xx}^2 + j\alpha_{yx}^2}, \quad R_y(j) = \sqrt{j\alpha_{xy}^2 + j\alpha_{yy}^2} \quad (2)$$

$$\theta_x(j) = \arctan\left(\frac{j\alpha_{yx}}{j\alpha_{xx}}\right), \quad \theta_y(j) = \arctan\left(\frac{j\alpha_{yy}}{j\alpha_{xy}}\right)$$

4. 地震動強さとモーダルパラメータの関係

本論文では全 243 地震記録の内、同定誤差が小さく、かつ安定的な同定結果が得られた 83 記録を用いて分析を行った。但し、振れ 2 次モードの同定結果はばらつきが大きいため考察の対象としない。

4.1 83 地震記録を用いた分析

4.1.1 解析結果の妥当性

同定結果の一例として、図 4 に 2003 年 9 月 20 日の地震記録の屋上階におけるフーリエスペクトルを示す。図 4 の同定誤差は 0.08 であることから、精度良く同定できていることが確認できる。表 1 に各階における同定誤差の最大値・最小値・平均値を示す。表 1 より、下階ほど同定誤差が大きくなることがわかる。

表 1 各階の同定誤差(最大値・最小値・平均値)

	屋上階	10階	5階
最大値	0.27	0.37	0.38
最小値	0.05	0.06	0.08
平均値	0.12	0.15	0.17

4.1.2 地震動強さと振動角度の関係

図 5 に最大入力加速度 RSS と屋上階における各次モードの振動角度の関係を示す。ここで横軸の最大入力加速度 RSS は、各方向入力加速度の二乗和平方(RSS)の最大値を採用している。図 5 よりばらつきが見られるものの、最大入力加速度 RSS の増減によって各次モードの振動角度は増加または減少しないことが確認できる。表 2 に各階各次モードの振動角度の平均値と標準偏差を示す。表 2 より、X 方向、Y 方向並進 1 次では各階の平均値及び標準偏差は概ね同じであるのに対して、X 方向、Y 方向並進 2 次では各階平均値に差が見られ、また標準偏差は並進 1 次比べて大きいことがわかる。この理由として、並進 2 次モードの同定精度が挙げられる。より精度良く同定できれば、並進 2 次の振動角度の問題は改善されると考える。

地震動強さと固有振動数・刺激関数の大きさの関係から振幅依存性を評価するに当り、各次モードに

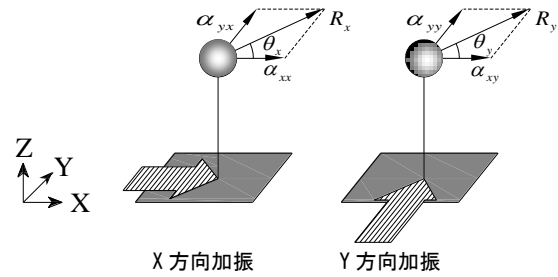


図 3 刺激関数と刺激関数の大きさ及び振動角度の関係

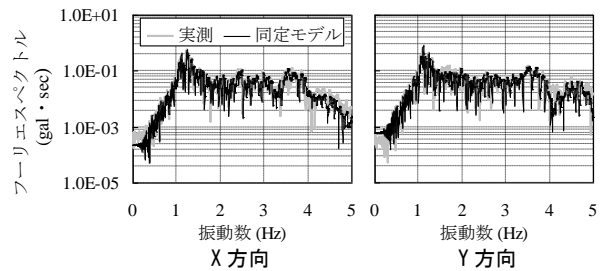


図 4 フーリエスペクトルによる観測記録と同定結果の比較

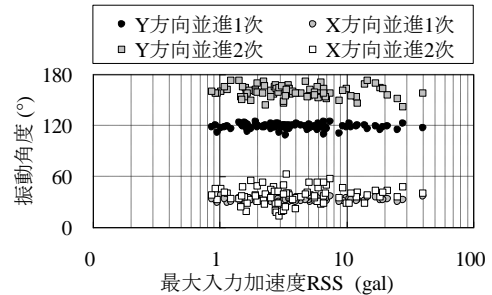


図 5 最大入力加速度 RSS と屋上階の各次モードの振動角度

表 2 各階各次モードにおける振動角度の平均値と標準偏差

	平均値(°)			標準偏差(°)		
	屋上階	10階	5階	屋上階	10階	5階
X方向並進1次	32.4	28.7	25.9	1.88	1.70	2.76
Y方向並進1次	118	120	120	3.14	3.47	3.33
X方向並進2次	36.6	48.0	51.2	9.63	10.98	9.92
Y方向並進2次	159	137	133	6.74	5.94	5.60

おける振動角度の違いを分析に反映させる必要がある。本研究では、各地震記録から算出された各階各次モードの振動角度を用いて式(3)より X 方向・Y 方向入力加速度を補正し、補正後の X 方向・Y 方向の最大入力加速度を用いて分析を行った。

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}'_0 \\ \ddot{y}'_0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \cos\theta_y & \sin\theta_y \\ -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_0 \\ \ddot{y}_0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 \ddot{x}'_0, \ddot{y}'_0 : 補正後の X 方向、Y 方向入力加速度

\ddot{x}_0, \ddot{y}_0 : 補正前の X 方向、Y 方向入力加速度

$$\Delta = \cos\theta_x \cos\theta_y + \sin\theta_x \sin\theta_y$$

最大入力加速度と固有振動数・刺激関数の大きさの関係から導かれる回帰直線の切片に対する傾き(式(4))を、固有振動数の変化率(a_f/b_f)、刺激関数の大きさの変化率(a_p/b_p)として分析を行った。

$$y = ax + b = b \left(\frac{a}{b}x + 1 \right) \quad (4)$$

ここに、 a : 傾き, x : 最大入力加速度(gal), b : 切片

4.1.3 固有振動数の変化率

図 6 に各階各次モードの固有振動数変化率の絶対値を示す。図 6 より各階各次モードで固有振動数の振幅依存性が確認できた。また Y 方向並進 1 次の変化率は他のモードの変化率に比べて約 3 割低いことがわかる。X 方向、Y 方向並進 2 次において各階の変化率が僅かに異なっているが、これは同定誤差による影響であると考えられる。

4.1.4 刺激関数の大きさの変化率

図 7(a)・(b) に X 方向加振、Y 方向加振による各階各次モードの刺激関数の大きさの変化率を示す。なお図 7(a)・(b)の破線枠は、加振方向と振動方向が一致する箇所を表す。破線枠に着目すると、各階各次モードの変化率はすべて正の値となっており、回帰直線は右上がりになることがわかる。従って、最大入力加速度の増加に伴って各階各次モードの刺激関数の大きさは増加傾向にあることから、振動モードの振幅依存性が示唆される。

4.1.5 剛性変化に対する相違の検討

振幅依存性による固有振動数の変化率と刺激関数の大きさの変化率を比較し、剛性変化に対する相違を検討する。本研究では、固有振動数変化率に対する刺激関数の大きさの変化率の比を「変化率比」と定義し検討を行った。ここで、変化率比が 1.0 以上であれば振動モードは剛性変化に対して固有振動数と同等、もしくはそれ以上の変化をしていると評価することができる。図 8 に各階各次モードの変化率比を示す。図 8 より並進 1 次では、各階共に固有振動数の変化率に比べて刺激関数の大きさの変化率の方が大きいことがわかる。一方、X 方向並進 2 次の 5 階と Y 方向並進 2 次の全階では固有振動数の変化率の方が大きいことを示している。従って、並進 1 次では剛性変化に伴い固有振動数よりも振動モードの方が変化することが示唆された。

4.2 入力地震動が励起させるモード別の分析

建物の応答は入力地震動の種類によって、並進 1 次モードまたは並進 2 次モードが励起する場合の 2 つに大別できる。本研究では 83 地震記録の入力地震動を、並進 1 次モードを励起させる type.1 と、並進 2 次モードを励起させる type.2 に分類し、固有振動数、刺激関数の大きさの変化率についてより詳細に分析を行った。

4.2.1 固有振動数の変化率

図 9(a)・(b) に type.1、type.2 における各階各次モードの固有振動数変化率の絶対値を示す。表 3 に type.1 と type.2 の固有振動数変化率の比を示す。表 3 より、X 方向・Y 方向並進 1 次及び Y 方向並進 2 次は、type.2 の固有振動数変化率に比べて type.1 の方が大きいことがわかる。一方 X 方向並進 2 次は、type.2 の固有振動数変化率の方が僅かに大きいことがわかる。従って建物全体の損傷評価では、入力

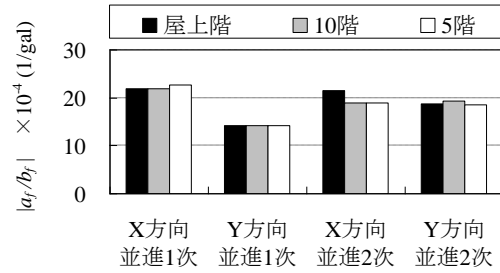
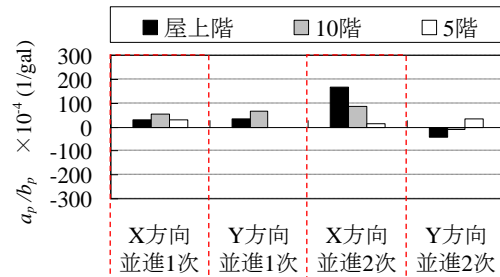
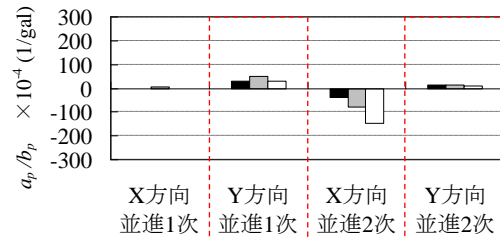


図 6 各階各次モードの固有振動数変化率



(a) X 方向加振



(b) Y 方向加振

図 7 各階各次モードの刺激関数の大きさ変化率

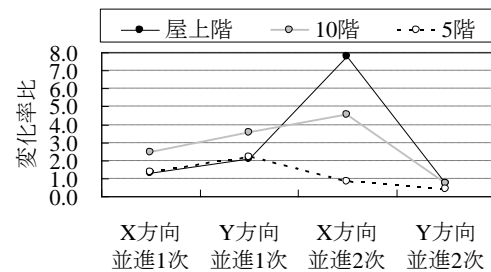


図 8 各階各次モードの変化率比

表 3 type.1 と type.2 の固有振動数変化率の比

	type.1/type.2		
	屋上階	10階	5階
X方向並進1次	1.34	1.34	1.45
Y方向並進1次	2.20	2.20	2.30
X方向並進2次	0.924	0.951	0.978
Y方向並進2次	1.37	1.59	1.64

地震動が励起させるモード別に分類した後、並進 1 次モードの固有振動数の変化によって評価することが望ましいと考えられる。

4.2.2 刺激関数の大きさの変化率

図 10(a)・(b) に type.1、type.2 における X 方向加振、Y 方向加振による各階各次モードの刺激関数の大きさの変化率を示す。なお図 10(a)・(b)の破線枠は、加振方向と振動方向が一致する箇所を表す。図 10(a)・(b)より type.1 及び type.2 における X 方向・Y

方向並進 1 次の変化率は各階共に正の値となっていることが確認できる。従って、並進 1 次の振動モードは振幅依存性を有していることがわかった。一方、type.1 及び type.2 における X 方向・Y 方向並進 2 次の各階の変化率は必ずしも正の値にならないことが確認できる。従って、並進 2 次の振動モードは振幅依存性に影響されないことが示唆される。表 4 に type.1 と type.2 の刺激関数の大きさの変化率の比を示す。なお、並進 2 次は振幅依存性が確認できなかったため、表 4 には X 方向・Y 方向並進 1 次のみを示す。図 11(a)・(b)に一例として、回帰直線から求めた中地震時(最大入力加速度:100gal)に相当する type.1、type.2、83 地震記録の振動モードの変化図を示す。

表 4 type.1 と type.2 の刺激関数の大きさの変化率の比

	type.1/type.2		
	屋上階	10階	5階
X方向並進1次	0.486	0.699	1.95
Y方向並進1次	1.29	0.556	0.214

表 4 より X 方向並進 1 次の場合、屋上階及び 10 階は type.2 の刺激関数の大きさの変化率の方が大きく、5 階は type.1 の刺激関数の大きさの変化率の方が大きいことがわかる(図 11(a))。また Y 方向並進 1 次の場合、屋上階は type.1 の刺激関数の大きさの変化率の方が大きく、10 階及び 5 階は type.2 の刺激関

数の大きさの変化率の方が大きいことがわかる(図 11(b))。以上より入力地震動が励起させるモードによって、各階の刺激関数の大きさは増減することがわかる。従って振動モードの変化による損傷評価を行う上で、入力地震動が励起させるモードと各階のモード変化の関係性を評価・把握しておくことが重要であると考えられる。

4.2.3 剛性変化に対する相違の検討

表 4 において、1.0 以上を示す場合は type.1 の刺激関数の大きさの変化率、1.0 以下を示す場合は type.2 の刺激関数の大きさの変化率を用いて算出した X 方向・Y 方向並進 1 次の変化率比を図 12 に示す。図 12 より、全階において刺激関数の大きさの変化率の方が大きいことがわかる。これまでの考察を踏まえると、並進 1 次では剛性変化に伴い固有振動数よりも振動モードの方が変化することを確認した。

5. 結論

入力地震動が励起させるモード別に分類して分析を行った。以下に本論文で得られた知見を示す。
 (1)X 方向・Y 方向並進 1 次の振動モードは振幅依存性を有している。
 (2)並進 1 次では剛性変化に伴い、固有振動数よりも振動モードの方が変化することを確認した。

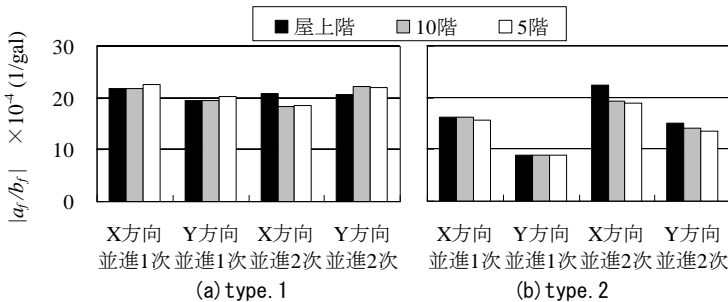
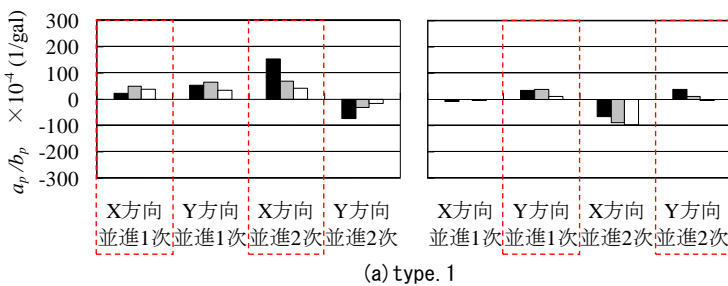
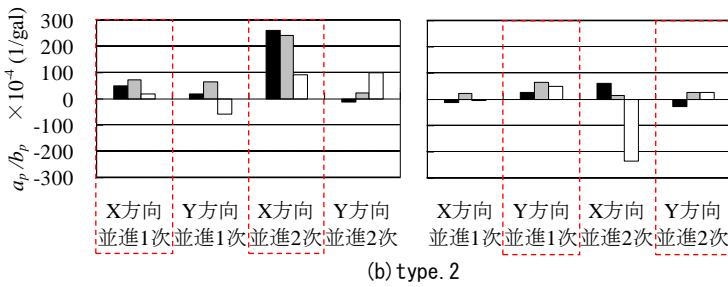


図 9 type.1、type.2 における各階各次モードの固有振動数変化率



(a) type.1



(b) type.2

X 方向加振

Y 方向加振

図 10 type.1、type.2 における各階各次モードの刺激関数の大きさの変化率

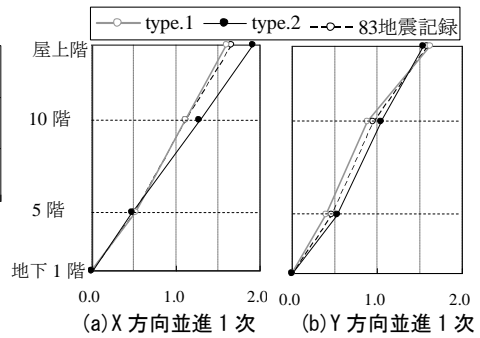


図 11 type.1、type.2 における振動モードの変化図

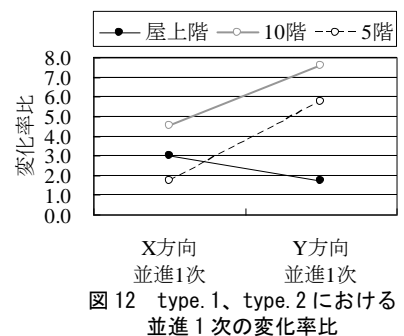


図 12 type.1、type.2 における並進 1 次の変化率比

【参考文献】

- 1) 濱本卓司ら：鉛直・水平方向探索を用いた偏心を有する多層建築物の二段階損傷検出,日本建築学会構造系論文集,第 519 号,pp.21-28,1999.5
- 2) 北村春幸ら：免震建物の長期微振動観測に基づく固有振動数の長期変動の分析,2006 年度日本建築学会関東支部研究報告書,pp.221-224
- 3) 中村充：SRC 造建物地震観測に基づく小振幅時動特性の振幅依存性評価,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.949-950,2003.9
- 4) 小原雅樹：地震応答記録に基づく構造物系の動的特性推定に関する研究,東北大学学位論文,1984

