

# 振動実験に基づく5層構造物の擬似的損傷検出

## Pseudo-Damage Detection in a Five-Story Structure Based on Shaking Test

川島 学 MANABU KAWASHIMA

鈴木 亨 TORU SUZUKI

(株)免制震デバイス 中南 滋樹 SHIGEKI NAKAMINAMI

本稿は、5層の鉄骨造建物を対象に実施した振動実験のデータに基づき、構造物の損傷検出を目的として行った検討について報告するものである。構造物の損傷は各層に設けたブレースを脱着することにより人為的に付加している。検討の結果、層剛性を損傷指標とみなすことによって損傷箇所が明瞭に捉えられ、剛性の低下量により損傷程度の評価が可能であることが確認された。以上より、本稿の手法による実構造物に対する損傷評価の適用性が示されたと考えられる。

キーワード：損傷検出、振動実験、層剛性、構造ヘルスマニタリング

This paper describes vibration-based damage detection of a five-story steel-framed structure based on measured structural response records during shaking tests. Artificial damages were produced in the structure by removing some braces placed in each stories. From the results of examinations, locations of damages were detected accurately with a focus on story stiffness as a measure for damages considering story stiffness as damage index, and extent of the damages was also quantified by the amount of stiffness reductions. It is shown that applicability of this procedure is verified to motion records in actual-size structure.

**Key Words:** Damage Detection, Shaking Test, Story Stiffness, Structural Health Monitoring

### 1. はじめに

近年のストック型社会への志向を背景として、構造ヘルスマニタリング<sup>1)</sup>に関する研究・開発が広く行われている。構造ヘルスマニタリングとは、構造物に設置したセンサにより振動や歪みなどを測定することによって、構造物に生じた、または蓄積した損傷の程度を把握し、その健全性を評価する技術である。固有振動数や応力の集中する位置での歪み量などを健全性の指標としたシステムがすでに開発され、実用化されつつある。

強震動を経験した構造物の固有振動数が低下するという現象は、古くより知られるものである<sup>2)</sup>。ところが、固有振動数は特定の振動モードの広義剛性を反映したものであり、損傷箇所やその程度を定量化することが困難であるという問題が指摘されてきた。濱本ら<sup>3)</sup>は、複数モードの固有振動数の変化と損傷のパターンを結びつける手法を提案し、この問題にひとつの解決の方向を与えた。その後、斎藤<sup>4)</sup>は、固有振動数に加えて刺激関数(モード形)の情報をを用いて層損傷を確率論的に評価す

る手法を提案し、数値解析のデータに適用しその有効性を主張している。

その一方で、建物の層剛性を直接評価し、その低下量を損傷指標とする研究がある。中村ら<sup>5)</sup>は、1995年兵庫県南部地震で被災した2建物において、補強工事の前後で常時微動測定を実施し、層剛性の変化と損傷の程度について考察を行っている。吉元ら<sup>6)</sup>は、複素モード空間上における各層での力の釣り合いから、層剛性と粘性減衰係数を同定する手法を提案している。これらの研究成果は、層剛性という工学量を損傷の指標とするため、建築構造設計で想定するモデルとの連続性があり、一般の実務者にも受け入れられやすい点に優位性があるものと思われる。しかしながら、実際に一定以上の損傷が生じた建物においてこの種の検討が行われた例は、上に挙げた論文などのほか数少なく、ことに実構造物における検証は未だ十分ではない。

以上を踏まえ、著者らは、5層構造物に人為的な損傷を付加して振動実験を実施し、その損傷を振動データより検出することを試みた。本稿はその結果について報告

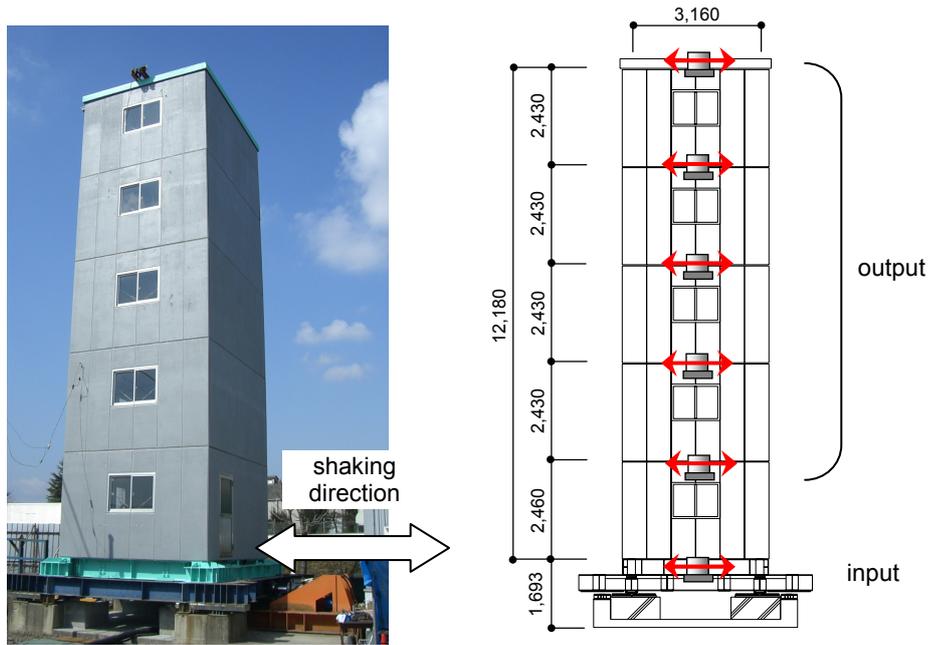


図-1 建物の全景写真(左)と立面図および加速度計の配置(右)

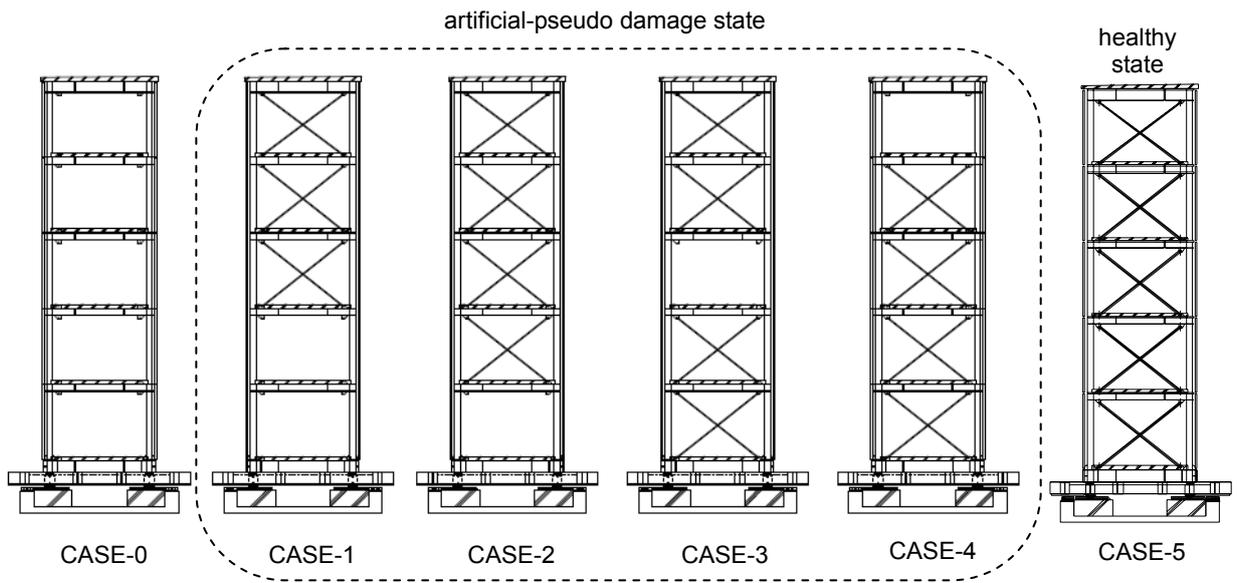


図-2 擬似的損傷のパターン

するものである。構造物の損傷は、工学量である層剛性の低下量として評価することとし、損傷の程度を別途計算された静的解析の結果と比較検討した。

2. 振動実験の概要

振動実験は、(株)免震デバイス技術センターにある5層の鉄骨造建屋において実施した。図-1に建屋の全景写真および立面図を示す。建屋は全体で約14mの高さであり、各層高さは2.43mである。四隅の角型鋼管の柱とH形鋼の梁により躯体が構成され、スラブはPCaコンクリート板(X型ブレースにて補強)、外壁はALC板であ

る。加振には油圧アクチュエーターを用い、建屋基部を変位制御により一方向加振した。

建屋の損傷状態は、各階加振方向の2構面に設けられたブレースを脱着することにより擬似的に作り出した。擬似的損傷のパターンは、図-2に示すCASE-1～CASE-4の4パターンである。CASE-1、CASE-2では下層、CASE-3では中間層、CASE-4は最上層に損傷が模擬されている。結果の比較のために、主フレームのみの状態(CASE-0)、全層にブレースを設置した状態(CASE-5)での加振も実施している。CASE-5は、損傷が生じていない健全な状態とみなせる。

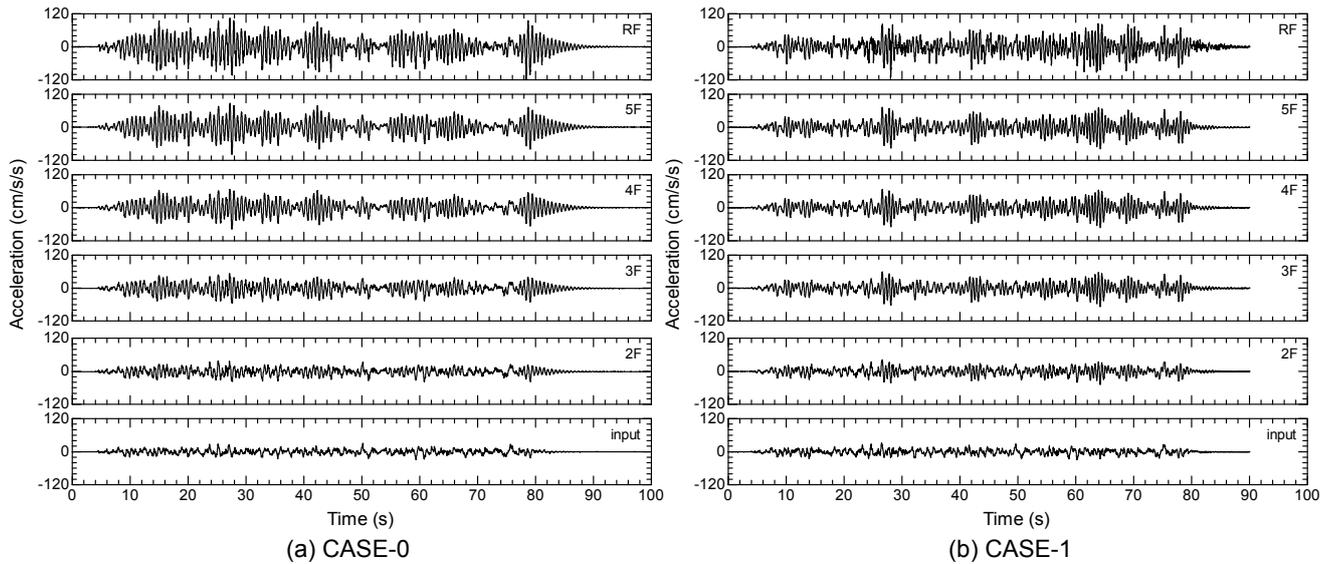


図-3 収録加速度波形の一例 (No.7; white noise 波入力時)

表-1 入力地震波一覧

No.	地震	発生年	名称	最大値 ( $\text{cm/s}^2$ )
1	Imperial Valley	1940	El Centro NS	37
2	Kern Country	1952	Taft EW	34
3	十勝沖	1968	Hachinohe NS	48
4			Hachinohe EW	39
5	兵庫県南部	1995	JMA 神戸 NS	22
6	模擬地震波	—	BCJ L2	39
7			white noise	28

実験では、それぞれの CASE で表-1 に示す複数の地震波を入力し、各層床中央における加速度波形を収録した。建物基部の記録が入力、建屋 2 階～屋上階床の 5 記録が出力となる。各入力波は、最大加速度が表中の値となるよう振幅を調整した。

図-3 に、広い周波数帯で一定の振幅を有する数値的に作成した模擬地震波 (No.7; white noise 波) を入力し、各階で収録された加速度波形を示す。ここでは一例として、CASE-0 および CASE-1 の実験で得られた波形を示している。上層となるに従い加速度は増幅し、最大で  $100 \sim 120 \text{cm/s}^2$  程度の応答値となっている。なお、実験時に生じた最大の層間変形角は約  $1/1,000$  であり、全 CASE を通じて建屋は弾性状態に保たれている。

事前に静的解析を実施した際に用いた各層の重量と、多質点モデルに置換した各層の剛性を表-2 に示す。人為的な損傷を模擬するために各層に配したブレースは、表中の値とほぼ等しい剛性が付加されるよう断面を選定しており、ブレースを付加することによって層剛性は 2 倍

表-2 静的解析による多質点系モデルの諸元

STORY	WEIGHT (kN)	STIFFNESS (kN/m)
5	66.6	4854
4	57.2	5531
3	57.2	5845
2	56.5	6178
1	58.1	7384

程度となる実験計画である。ただし、各層には同一断面のブレースを設置しているため、層によって付加される剛性の割合は異なることになる。

### 3. 損傷検出手法

本稿では層剛性の低下を損傷の指標とみなすため、層剛性を精度よく評価することが肝要となる。本章では、本稿で層剛性の評価に用いた 2 つの手法の原理についてその概要をまとめる。

まず、2 手法において共通に仮定する前提条件について述べておく。構造物が基部からの一方向入力  $u_g$  を受ける時、次の振動方程式が成立する。

$$[M]\{\ddot{u}_s\} + [C]\{\dot{u}_s\} + [K]\{u_s\} = -[M]\{1\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  は、それぞれ質量、粘性減衰、剛性行列であり、変数上のドットは時間微分を意味する。 $\{u_s\}$  は入力動  $u_g$  に対する構造物の相対応答を表し、本章においてその自由度は  $n$  であるとする。 $\{1\}$  は全要素が 1 のベクトルであり、外力となる慣性力の作用位置を表している。構造物をせん断型振動系と仮定したとき、各  $i$  層での復元力と慣性力の釣り合いは次式で表される。

$$c_i(\dot{u}_s^{(i)} - \dot{u}_s^{(i-1)}) + k_i(u_s^{(i)} - u_s^{(i-1)}) = -\sum_{k=i}^n m_k(\ddot{u}_g + \dot{u}_s^{(k)}) \quad (2)$$

ここで、 $m_i$ 、 $c_i$ 、 $k_i$  および  $u_s^{(i)}$  は、 $i$  番目の要素の質量、減衰係数、剛性、および相対応答を表す。図-4 に、自由度を  $n=5$  としたせん断型振動系のモデル図を示す。

以下本章で述べるのは、構造物の振動状態が式(1)および式(2)に従うとの仮定のもとで、剛性  $k_i$  および減衰係数  $c_i$  を求めるための2手法の概要である。なお、各層の質量は既知であるとする。

(1) 手法(A) ~モードパラメータに基づく手法~

第一の手法(以降では手法(A)と称する)は、吉元ら<sup>6)</sup>によって提案された、モード空間上での力の釣り合い式に基づく手法である。

構造物の相対応答  $\{u_s\}$  は、次のように各次モードの和に展開することができる。

$$\{u_s\} = \sum_{j=1}^n \beta_j \{\phi_j\} q_j \cdot e^{\lambda_j t} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_j$ 、 $\beta_j$ 、 $\{\phi_j\}$  は、式(1)より構成される固有値問題を解いて得られる  $j$  次モードの固有値、刺激係数、モードベクトルであり、 $q_j$  は一般化座標である。式(3)において特定の  $j$  次モードに着目し、これを式(2)に代入すれば、次式を得る。

$$(\lambda_j c_i + k_i)(\phi_j^{(i)} - \phi_j^{(i-1)}) = -\lambda_j^2 \left[ \frac{1}{G_j(\lambda_j)} + 1 \right] \cdot \sum_{k=i}^n m_k \phi_j^{(k)} \quad (4)$$

ここに、 $G_j(s)$  は  $j$  次モードに関する伝達関数を意味し、Laplace 領域において次式で表わされる。

$$G_j(s) = \frac{Q_j(s)}{U_g(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi_j \omega_j s + \omega_j^2} \quad (5)$$

ここで、 $U_g(s)$ 、 $Q_j(s)$  は入力動、 $j$  次モードの一般化座標の Laplace 変換を表し、 $\omega_j$ 、 $\xi_j$  はそれぞれ  $j$  次の固有円振動数、減衰定数である。このとき、固有値  $\lambda_j$  は式(5)の伝達関数の極であることから、式(4)右辺の[ ]内は1に等しく、次式が得られる。

$$(\lambda_j c_i + k_i)(\phi_j^{(i)} - \phi_j^{(i-1)}) = -\lambda_j^2 \sum_{k=i}^n m_k \phi_j^{(k)} \quad (6)$$

導出の過程は一部異なるが、上式は吉元ら<sup>6)</sup>により導かれた式と同一である。さて、式(6)は複素数の相等の条件より実部、虚部ともに成立するため、

$$\begin{bmatrix} \Re[\Delta\phi_j^{(i)}] & \Re[\lambda_j \Delta\phi_j^{(i)}] \\ \Im[\Delta\phi_j^{(i)}] & \Im[\lambda_j \Delta\phi_j^{(i)}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_i \\ c_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Re[f_j^{(i)}] \\ \Im[f_j^{(i)}] \end{Bmatrix} \quad (7)$$

と等価な行列表現が得られる。ここで、 $\Re[\bullet]$ 、 $\Im[\bullet]$  はそ

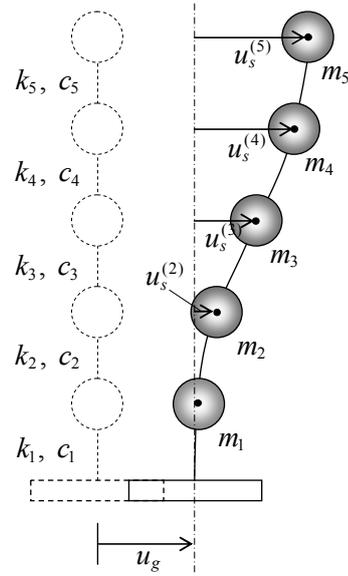


図-4 せん断型振動系のモデル図

れぞれ実部および虚部をとることを意味し、

$$\Delta\phi_j^{(i)} = \phi_j^{(i)} - \phi_j^{(i-1)}, f_j^{(i)} = -\lambda_j^2 \sum_{k=i}^n m_k \phi_j^{(k)} \quad (8)$$

という記法を導入した。最終的に式(7)より、層剛性、層減衰係数が

$$\begin{Bmatrix} k_i \\ c_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Re[\Delta\phi_j^{(i)}] & \Re[\lambda_j \Delta\phi_j^{(i)}] \\ \Im[\Delta\phi_j^{(i)}] & \Im[\lambda_j \Delta\phi_j^{(i)}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \Re[f_j^{(i)}] \\ \Im[f_j^{(i)}] \end{Bmatrix} \quad (9)$$

として求められる。以上が、手法(A)の概要である。

この手法(A)では、ここまでの議論より明らかなように、系のモーダルパラメータである固有値  $\lambda_j$  およびモードベクトル  $\{\phi_j\}$  を同定する必要がある。本稿では、システム同定手法の一種である、部分空間法<sup>7)</sup>によってこれらの諸量を同定することとする。これは部分空間法が、多入力多出力系の同定問題へ容易に適用できるという特筆すべき特徴を有するためである。

(2) 手法(B) ~時刻歴波形に基づく手法~

前節の手法(A)に対し、式(2)の時間領域での釣り合い式を直接利用する方法が本稿で利用する第二の手法(B)である<sup>5)</sup>。

式(2)より、時間ステップ  $(t)$  における釣り合い式を次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \delta_i(t) & \dot{\delta}_i(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_i \\ c_i \end{Bmatrix} = F(t) \quad (10)$$

ここに、 $\delta_i = u_s^{(i)} - u_s^{(i-1)}$  であり、 $F(t)$  は式(2)右辺の慣性力項を置き換えたものである。式(10)は全時間ステップについて成立することから次式が成り立つ。

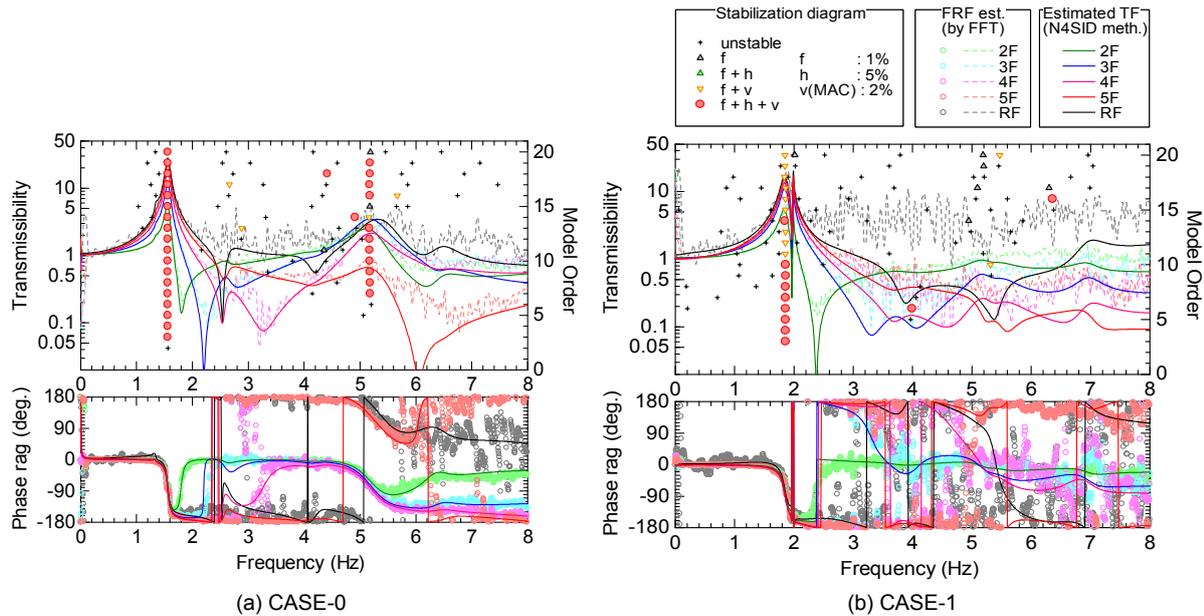


図-5 スペクトル解析およびシステム同定によって得られた系の振動特性 (No.7; white noise 波入力時)

$$\begin{bmatrix} \delta_i(1) & \dot{\delta}_i(1) \\ \vdots & \vdots \\ \delta_i(N) & \dot{\delta}_i(N) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_i \\ c_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(1) \\ \vdots \\ F(N) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$N$  は波形の全ステップ数を表す。上式は過剰条件の連立方程式であり、一般には解を一意に決定することができない。そこで、次式により最小自乗の意味で解を求めることとする。

$$\begin{Bmatrix} k_i \\ c_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_i(1) & \dot{\delta}_i(1) \\ \vdots & \vdots \\ \delta_i(N) & \dot{\delta}_i(N) \end{bmatrix}^{\dagger} \begin{Bmatrix} F(1) \\ \vdots \\ F(N) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ここで、 $[\bullet]^{\dagger}$  は Moore-Penrose の擬似逆行列を表している。これが、手法 (B) の概要である。

手法 (B) は手法 (A) と比較して簡易な方法であり、剛性評価に必要となるのは加速度、速度、変位の時刻歴波形のみである。適用にあたり注意すべき点は、波形を数値積分する際のノイズの適切な取り扱いである。

#### 4. 損傷検出とその評価

##### (1) スペクトル解析とシステム同定

損傷検出に先立ち、対象建物の基本的な振動性状を概観しておく。ここでは、図-3 において波形が示されている white noise 波 (No.7) 入力時の CASE-0, CASE-1 に関する結果を示す。

図-5 に、スペクトル解析によって推定された周波数応答関数  $H_R$ <sup>8)</sup> (Frequency Response Function; FRF) の結果を破線および中空のプロットにより、システム同定によ

って得られた伝達関数 (Transfer Function; TF) の推定値を実線により、それぞれ振幅と位相差について示した。なお、TF の推定値は、システムの次数を 10 次として部分空間法 (N4SID 法<sup>7)</sup>) を用いて同定したものである。

CASE-0 の結果では、振幅、位相差ともに両結果により一致が見られ、その性状は一般的なせん断型振動系のものと類似している。すなわち、約 1.6Hz の振幅値に明瞭なピークが見られ、この付近で位相が同相から逆相へと転じている。さらに、5Hz をやや超えた部分にも緩やかなピークと位相の変化が観察される。

一方、CASE-1 の結果では、振幅がピークとなる振動数は 2Hz 弱と CASE-0 の結果と比べてやや大きくなり、ブレースを設置した影響が表れていることが分かる。3Hz 程度までは CASE-0 と同じく FRF と TF の推定値はよく一致しているが、さらに高振動数域において両者に対応関係を見出すのは困難である。高振動数域では位相が大きく乱れていることから、ブレースの設置によって複雑な振動が生じているものと推測される。

推定された FRF, TF の振幅値を示した図中のプロットは、右縦軸に示すシステムの次数を変化させながら同定した固有振動数の値を示したものである。この種の図は、Peeters *et al.*<sup>9)</sup> によって stabilization diagram と呼ばれているものであり、これらのプロットは極の安定性基準によって分類して示されている。具体的には、固有振動数、減衰定数、およびモードベクトルの変化率を表現する指標 MAC (Modal Assurance Criterion) の変化量が、図中凡例に示す基準値を満足した場合に安定と判別している<sup>10)</sup>。なお、 $j$  次モードの固有振動数  $f_j$  は、同定された系の  $j$

表-3 モーダルパラメータに基づく手法 [手法 (A)] による層剛性の評価値 (単位: kN/m)

STORY	CASE-0		CASE-1		CASE-2		CASE-3		CASE-4		CASE-5	
5	1808	(0.56)	1695	(0.52)	2311	(0.71)	3094	(0.95)	3236	(1.00)	3247	(1.00)
4	6118	(0.52)	14120	(1.20)	14266	(1.21)	14427	(1.23)	13772	(1.17)	11774	(1.00)
3	6737	(0.46)	16851	(1.14)	18220	(1.24)	9057	(0.61)	17597	(1.19)	14752	(1.00)
2	6971	(0.41)	7956	(0.46)	19222	(1.12)	19182	(1.12)	19948	(1.16)	17190	(1.00)
1	9110	(0.39)	9485	(0.40)	11120	(0.47)	23698	(1.01)	23146	(0.98)	23557	(1.00)

表-4 時刻歴波形に基づく手法 [手法 (B)] による層剛性の評価値 (単位: kN/m)

STORY	CASE-0		CASE-1		CASE-2		CASE-3		CASE-4		CASE-5	
5	862	(2.13)	267	(0.66)	309	(0.76)	344	(0.85)	565	(1.40)	404	(1.00)
4	6147	(0.53)	14341	(1.24)	13786	(1.20)	13419	(1.16)	13562	(1.18)	11533	(1.00)
3	6783	(0.47)	16846	(1.16)	17699	(1.22)	8831	(0.61)	17411	(1.20)	14531	(1.00)
2	6953	(0.41)	7981	(0.47)	18683	(1.11)	18794	(1.11)	19571	(1.16)	16893	(1.00)
1	8897	(0.44)	9184	(0.46)	10526	(0.52)	20168	(1.00)	19645	(0.98)	20109	(1.00)

次の固有値  $\lambda_j$  より, 減衰定数  $\xi_j$  とともに下式により求められる。

$$f_j = \frac{\lambda_j \lambda_j^*}{2\pi}, \quad \xi_j = -\frac{\Re[\lambda_j]}{\lambda_j \lambda_j^*} \quad (13)$$

図-5 より, 安定して評価されている極から求めた固有振動数は, 推定された FRF, TF のピーク位置と対応していることが分かる。したがって, この図より物理的な振動モードを判別することができる。つまり, CASE-0 では約 1.6Hz, 5Hz に評価されている安定な極に対応して 1 次, 2 次モードが評価されているのに対し, CASE-1 では 2Hz 附近の 1 次モードのみが安定して評価されたと判断される。CASE-2~CASE-5 の記録に対して同様の検討を行なったところ, CASE-1 の場合と同様に, 1 次モードのみが安定して評価される結果となった。

(2) 層剛性の評価値

前章において定式化した手法 (A), (B) によって評価した層剛性の値を, 表-3, 表-4 にそれぞれ示す。表-3, 表-4 中の括弧内の数値は, CASE-5 の剛性値で各 CASE において評価されている剛性値を規格化した値であり, これはブレースを取り外すことにより生じた剛性低下の程度を表している。以後本章では, この量を剛性の低下率と称す。表中網かけの部分は, ブレースを未設置の層, すなわち擬似的損傷層であることを表している。図-6 は, 表-3, 表-4 に示された層剛性値をプロットしたものであり, 比較のため, 表-2 に示した静的解析によって得られている結果を灰破線で同時に示している。

手法 (A) に基づく結果は, システムの次数を 10 次と

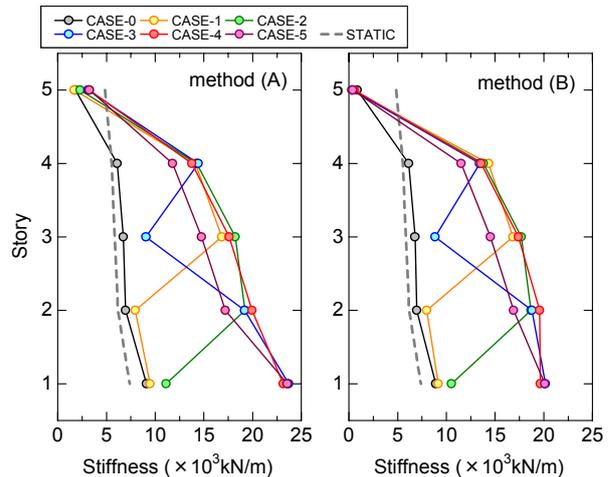


図-6 層剛性の評価値

して同定した 1 次モードの固有値およびモードベクトルに基づき評価したものである。手法 (B) の適用にあたっては, 積分波形の前半・後半に表れる非因果な低振動数成分の影響を低減するために, 0.5Hz 以上の成分をハイパスして数値積分を行った。これらの結果は white noise 波 (No.7) を入力した実験の記録を用いて計算されたものであるが, 他の地震波を入力した実験の記録を用いた場合にも同程度の値が得られることを確認している。

これらの図表より, 手法 (A), 手法 (B) のそれぞれによって評価された層剛性値は, おおむね等しい値となっていることが分かる。静的解析により得られている層剛性と, ブレースが設置されていない CASE-0 での評価値とを比較すると, 絶対値は 1~2 割程度異なっているが, 最上層を除く 1~4 層における剛性値の分布およびそのオーダーはよく対応している。最上層において, 特に手法

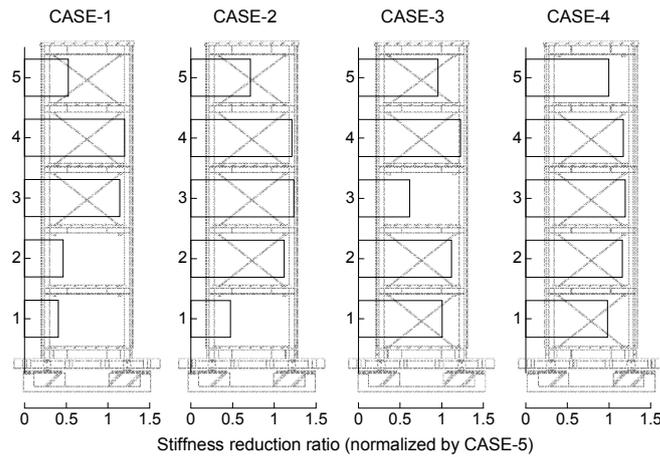


図-7 健全状態 (CASE-5) の層剛性で規格化した層剛性値

表-5 1次モードの固有振動数および減衰定数

	CASE-0		CASE-1		CASE-2		CASE-3		CASE-4		CASE-5	
$f_1$ (Hz)	1.56	(0.66)	1.85	(0.78)	2.21	(0.93)	2.26	(0.95)	2.48	(1.04)	2.38	(1.00)
$\xi_1$ (%)	2.31	(0.76)	3.50	(1.15)	2.70	(0.88)	2.93	(0.96)	2.71	(0.89)	3.05	(1.00)

(B)の結果で顕著であるが、静的解析の結果との乖離が生じているのが認められる。これは、別途実施している1次モード形の分析において、屋上床の記録に他層に対する位相差が確認されていることから、せん断型振動系の仮定が満足されず生じたものと考えられる。

手法(A)の適用にあたり、同定するシステムの次数を4次~20次と変化させたときの剛性評価値の変動は、5層の結果を除き変動係数で1%未満であった。この変動は手法(A)に内在する評価誤差によるものであるが、構造物内に顕著な損傷が生じた場合の検出精度に対しては、後述するように問題とならないレベルである。一方、手法(B)ではただひとつの剛性値が評価されるため、評価値の信頼性については別途確認する必要がある。

以上より、両手法により評価された各層の剛性値は、最上層における評価値の信頼性は低いものの、おおむね妥当なものであると判断される。

### (3) 層損傷の検出

表-3、表-4および図-6より、ブレースの設置の有無により、評価された剛性値には明瞭に差が認められている。したがって、剛性が低下した層として、疑似的損傷層が検出できていることが分かる。

ブレースを設置することによって層剛性は主架構の2倍程度となる実験計画であるため、疑似的損傷による剛性の低下率は0.5付近の値をとることが期待される。評価値の信頼性が低い5層を除くと、ややばらつきは見られるが低減率の値は0.4~0.6の範囲にあり、平均的には

静的解析で予測された剛性低下率が評価されている。これら剛性の低下率の値は、前節で述べた手法(A)に内在する評価誤差と比べて1桁以上の違いがあり、この評価誤差が本実験で付与した疑似的損傷の検出に与える影響はほぼ無視できる。

以上を模式的に表すために、手法(A)を適用して得られている剛性の低下率を横軸にとり図-7に示す。5層に損傷を設定したCASE-4を除き、明らかに疑似的な損傷層において剛性が低下していることが見て取れる。したがって、損傷は層剛性の低下として明瞭に検出され、その程度も評価可能であることが示された。

ただし、結果を詳細に見ると、剛性の低減率は下層のブレースを取り外した場合に大きくなる傾向にある。この結果は、各層のブレースが同一断面であることと考え合わせると、CASE-0において主架構の層剛性が下層ほど大きく評価されていることと相反する。このことから、本稿において評価された層剛性値は、せん断型振動系のそれとは異なるものであることが示唆される。これは本稿で用いた手法そのものの問題点であり、その解決は今後の研究課題である。

### (4) 損傷とモーダルパラメータとの関係

手法(A)では、層剛性の評価に先立ち、モーダルパラメータが同定されている。同定された1次モードの固有振動数 $f_1$ および減衰定数 $\xi_1$ を表-5に示す。表中の括弧内の数値は、CASE-5における評価値によって規格化した値である。

評価された固有振動数の値は、ブレースを設置していない CASE-0 において最も小さい。擬似的損傷を付与した場合には、下部 2 層のブレースを除去した CASE-1 の値が最も小さく、最下層を除去した CASE-2、中間層を除去した CASE-3、最上層を除去した CASE-4 の順に固有振動数の値は大きくなる。この傾向は、既往の研究<sup>3)</sup>の知見と符合するものである。したがって、固有振動数の変化と構造物の損傷状態との間には、ある一定の相関関係が認められる。ただし、損傷層を特定することは当然ながら困難である。1 層のみのブレースを外した CASE-2～CASE-4 では、CASE-5 からの固有振動数の変化量は 1 割以下と小さく、局所的な損傷に対する固有振動数の感度は低いことが分かる。固有振動数を指標として損傷箇所を特定するには、他の指標と組み合わせる等の工夫を要する。

他方、減衰定数の評価値は 2.3%～3.5%の範囲にあり大きな変動はなく、減衰定数と損傷との間に有意な関係は見出せない。ブレースが設置されていない CASE-0 に比べて、他の CASE でやや減衰定数が大きい傾向にあるのは、ブレースの設置により各層の振動に位相差が生じ、構造物に履歴減衰が付加された可能性が考えられる。しかしながら、減衰定数の評価精度は固有振動数に比べて極端に低いことが知られており<sup>4)</sup>、この評価値のばらつきが物理的に説明されるものであるかは、さらに詳細な検討を実施して明らかにする必要がある。

## 5. 結論

本稿においては、ブレースを脱着することにより人為的に損傷を付与した実大 5 層構造物の振動実験を実施し、得られた振動記録より損傷を検出することを目的とした検討を行った。主要な結論を以下にまとめる。

- ① 擬似的損傷層において層剛性の低下が明瞭に捉えられた。したがって、層剛性を指標として層単位での損傷検出が可能である。
- ② 評価された層剛性は、おおむね事前の静的解析の結果より想定された値と対応しており、層剛性の低下率により損傷の程度を把握することができる。
- ③ 広く損傷の指標として用いられている固有振動数は、局所的な損傷に対する感度は低く、損傷箇所の特定には他の指標を組み合わせるなどの必要がある。
- ④ 本稿で用いた、各階床位置において収録された加速度記録より層剛性を評価する 2 手法は、実大構造物で得られた記録に対し有効である。

最上層の剛性値が過小評価されるなど、せん断型振動系の仮定が満足されない場合には、本稿で用いた 2 手法により信頼性の低い評価結果が得られる場合があることもまた明らかになった。このことは、曲げ変形の影響が大きくなる高層建物など、手法の適用に際し注意すべき構造物があることを意味している。せん断型振動系以外への手法の拡張など、より評価精度を向上させるための検討に今後も継続して取り組む予定である。

また、本稿で用いた手法では原理的に全層における振動記録が必要となるが、このような条件が一般の構造物で満足されることは稀である。より簡易に構造物の健全性を評価する技術の開発が、今後の重要課題である。

## 参考文献

- 1) 山本鎮男編著：ヘルスマニタリングー機械・プラント・建築・土木構造物・医療の健全性監視一，共立出版，1999
- 2) Luco, J. E., M. D. Trifunac, H. L. Wong : On the apparent change in dynamic behavior of nine-story reinforced concrete building, *Bull. Seism. Soc. Am.* 77(6), 1961-1983, 1987
- 3) 濱本卓司，森田高市，勅使川原正臣：複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出，日本建築学会構造系論文集，No.560，93-100，2002
- 4) 斎藤知生：システム同定による建築物の確率論的損傷評価，日本建築学会構造系論文集，No.557，93-100，2002
- 5) 中村 充，安井 謙：微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価，日本建築学会構造系論文集，No.517，61-68，1999
- 6) 吉元怜毅，三田 彰：多入力多出力モデルに基づく建築構造パラメタのオンライン同定，日本建築学会構造系論文集，No.574，39-44，2003
- 7) 片山 徹：システム同定一部分空間法からのアプローチ，朝倉書店，2004
- 8) 理論地震動研究会編著：地震動 その合成と波形処理，鹿島出版会，1994
- 9) Peeters, B., and De Roeck, G.: Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review, *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, ASME, 123, 659-667, 2001
- 10) 川島 学，平田裕一，小田 稔：常時微動測定に基づく超高層 RC 造建物の動特性評価，三井住友建設技術開発センター報告，No.6，2009