

曲げせん断型モデルと ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定と損傷同定

その2 数値シミュレーション

正会員 ○南 良忠\* 同 桑原 誠\* 同 吉富信太\* 同 竹脇 出\*

2. 構造—2. 振動

システム同定, 構造ヘルスマonitoring, ARX モデル, 曲げせん断型モデル, 剛性・減衰同定

1. 序

前報(その1)<sup>1)</sup>で提案した損傷同定法について、ここでは実測データの代用として20層3スパン骨組モデルの応答解析結果を用い、実建物への適用を想定した場合における手法の妥当性を示す<sup>2)</sup>。

2. 提案損傷同定法の骨組モデルの応答解析結果への適用

2.1 骨組モデルの応答解析結果を用いた損傷同定

骨組モデルは1,2層の階高を5[m]、3~20層を4[m]、各層の質量を  $1.20 \times 10^5$  [kg] に設定し、ヤング係数は  $2.05 \times 10^5$  [N/mm<sup>2</sup>] とする。また、柱・梁の断面性能を表1に示す。解析において骨組モデルは剛床仮定とし、梁は曲げ変形のみ、柱は曲げ変形および伸縮を生じるものとする。これにより、曲げせん断型モデルを想定する。

このような骨組モデルに対し、まず El Centro NS 1940 を入力して解析した各層の加速度応答を用いて損傷同定を行う。解析において想定した損傷パターン(Pattern 1~20)を、図1~3に示す。ただし、50%低減は梁・柱の剛性低減率であり、層剛性の低減率ではないことに注意する。Northridge 地震や神戸地震において、梁端部に損傷が生じた報告がなされている。材端に損傷が生じた場合をピン接合と見なすと、このレベルの損傷は想定し得るレベルである。

以下、Pattern 1,3,5,6,9(梁損傷)および Pattern 16(柱損傷)の結果を代表例として示す。表2は各損傷パターンにおける1次固有周期の変化率である。この結果から、損傷前後における1次周期の変化は非常に小さいことがわかる。これは、固有周期は建物全体の挙動に関する指標であるからだと考えられ、局所的な損傷をこのような建物全体の挙動に関する指標から捉えるのは困難である。

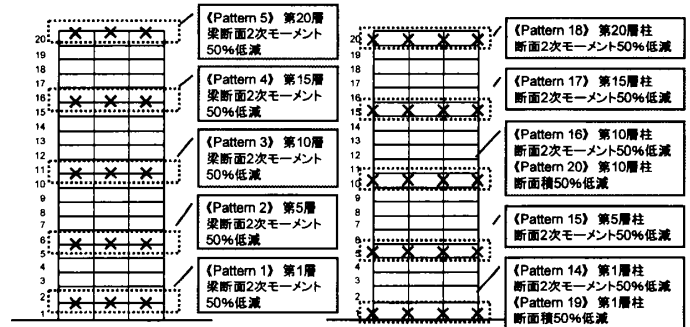


図1 梁・柱損傷パターン図

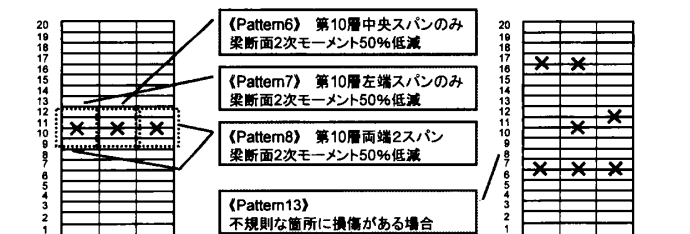


図2 スパン別梁損傷パターン図

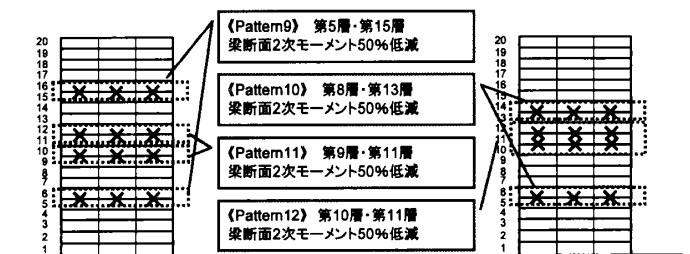


図3 複数層梁損傷パターン図

表1 骨組モデルの断面性能

層	柱		梁
	断面積 (m <sup>2</sup> )	断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )	断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )
16~20	0.0404	0.00190	0.00172
11~15	0.0465	0.00216	0.00292
6~10	0.0553	0.00364	0.00292
1~5	0.0809	0.00704	0.00411

表2 1次固有周期の変化率 [%]

Pattern	1	3	5	6	9	16
損傷前 [s]	2.195					
損傷後 [s]	2.224	2.218	2.195	2.202	2.228	2.215
変化率 [%]	+1.32	+1.05	+0.00	+0.32	+1.50	+0.91

図4はPattern 3(梁損傷)とPattern 16(柱損傷)の損傷前後における1次刺激関数である。この図から、損傷による明確な変化が読み取れる。ただし、全層分の固有モード変化を捉えるには多層のデータを必要とする煩雑さを伴う。

前報(その1)より、提案する損傷同定法に用いる同定関数の定義式および剛性の同定式を引用する。

$$F_j(\omega) = \left( \frac{-\omega^2 \sum_{i=j}^N m_i}{\ddot{U}_g + \ddot{Y}_{j-1}} - 1 \right)^{-1} = \frac{1}{k_{sj} + i\omega c_{sj}} + \frac{H_j}{\sum_{i=j}^N m_i} \sum_{m=1}^N \left[ \frac{\sum_{i=m}^N \{m_i(H'_i - H'_{m-1})\}}{k_{bm} + i\omega c_{bm}} \right] \quad (1)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} [\text{Re}\{F_j(\omega)\}] = \frac{1}{k_{sj}} + \frac{H_j}{\sum_{i=j}^N m_i} \sum_{m=1}^N \left[ \frac{\sum_{i=m}^N \{m_i(H'_i - H'_{m-1})\}}{k_{bm}} \right] \quad (2)$$

本損傷同定法は、(1)式で定義される同定関数  $F_j(\omega)$  の実部極限值を損傷前後において比較して損傷層を検出する手法である。ここでは、Pattern 3とPattern 16の損傷前後における同定関数を図5,6に示す。損傷同定に用いるのは  $\omega \rightarrow 0$  極限值のみであるが、 $\omega=0$  付近のデータを同定関数として描くことで、極限值計算の安定性を確認できる。

また、採用するARX次数は前報(その1)の2.3節で論じたようにFit図に基づき適切な値を選択している。その一例として、Pattern 3(梁損傷)の損傷前後における第10層のFit図を図7に示す。

### 2.1.1 梁損傷の場合

図5より、第10,11層の同定関数極限值に、損傷前後において明らかな増加が確認できる。一方、第9,12層の同定関数極限值は、損傷前後でほぼ同値であることが確認できる。Pattern 3では、第10層の天井梁が損傷した場合を想定しており、梁の損傷では隣接する層の剛性を低減すると考えられる。つまり、損傷層は第10,11層であり、図5の結果から本手法により損傷層の同定が可能であることが確認できる。

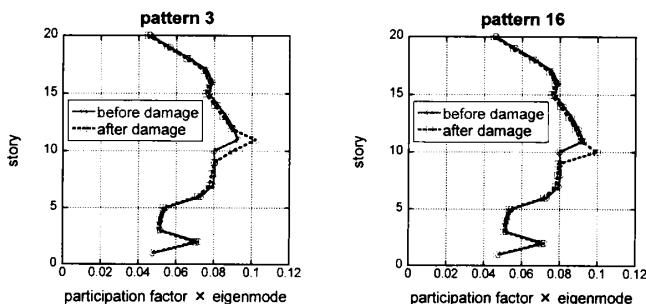


図4 損傷前後における1次刺激関数(Pattern 3,16)

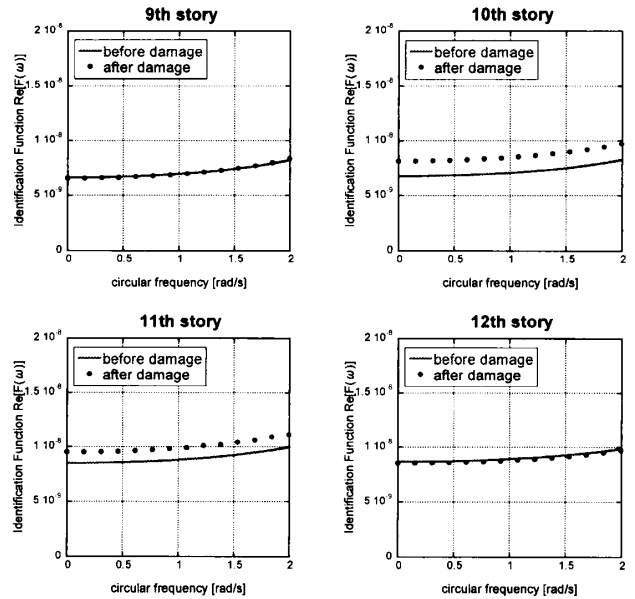


図5 損傷前後における同定関数 (Pattern 3 : El Centro NS 1940)

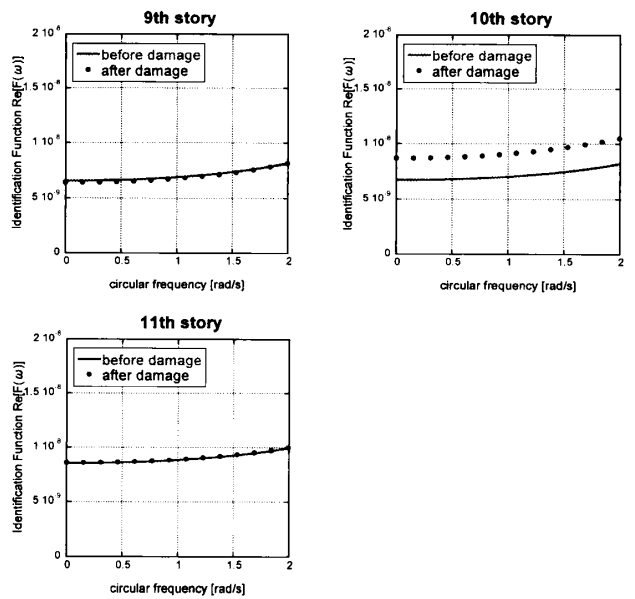
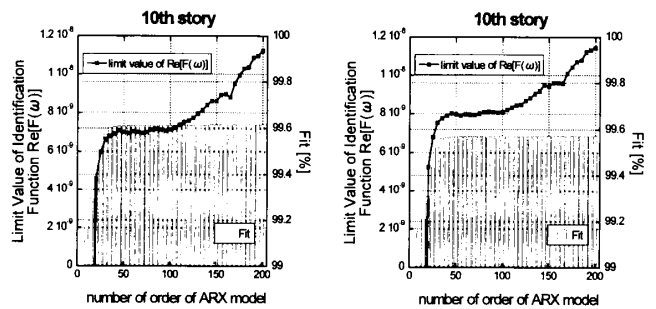


図6 損傷前後における同定関数 (Pattern 16 : El Centro NS 1940)



(a) 損傷前 (b) 損傷後  
図7 Fit図例 (Pattern 3 第10層)

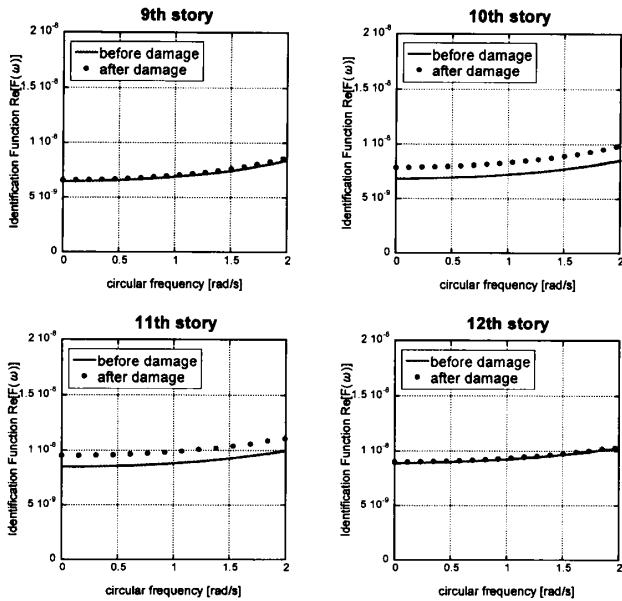


図8 損傷前後における同定関数

(Pattern 3: 振動数域の釣合式から導出した伝達関数を用いて描いた理論値の同定関数)

### 2.1.2 柱損傷の場合

Pattern 16は柱が損傷した場合であり、当該層の剛性のみが低減される。つまり、損傷層は第10層のみである。図6より、第10層の同定関数極限值に、損傷前後において明らかな増加が確認できる。一方、第9,11層の同定関数極限值は、損傷前後でほぼ同値であることが確認できるため、本手法は柱損傷の場合にも適用可能であるといえる。

### 2.1.3 提案手法の精度と信頼性について

図8は、振動数領域の運動方程式を解いて得られる伝達関数を用いて導出した同定関数である。つまり、(1)式から数値的に得られる理論値である。図5と図8の各グラフを比較すると、非常に類似していることが確認できる。さらに、表3および表4に各パターンの極限值増加率を示す。表3は理論値の同定関数を用いて得られる値であり、表4はEl Centro NS 1940を入力して得られた応答にARXモデルを用いて得られた値である。この2つの表から、その他の損傷パターンについても同様に類似した結果が得られていることがわかる。その他の層で損傷が生じた場合や、Pattern 9のような複数層に損傷が生じた場合にも、本手法が十分適用可能であるといえる。

ただし、Pattern 6では損傷規模が非常に小さく極限値の増加率も他のパターンに比べて小さい。この

表3 同定関数極限値の増加率 [%] (理論値)

層	Pattern (梁損傷)					Pattern (柱損傷)
	1	3	5	6	9	16
20	0.00		+2.98			
19	0.00		+0.35			
18						
17					+1.04	
16					+9.79	
15					+9.61	
14					+0.69	
13						
12		+0.97		+0.55		
11		+12.7		+3.29		+0.44
10		+14.9		+3.80		+27.2
9		+1.54		+0.66		+0.44
8						
7					+1.47	
6					+14.2	
5					+18.8	
4					+2.55	
3	+2.53					
2	+19.3					
1	+24.9					

表4 同定関数極限値の増加率 [%] (El Centro NS)

層	Pattern (梁損傷)					Pattern (柱損傷)
	1	3	5	6	9	16
20	-0.01		+2.97			
19	-0.01		+0.39			
18						
17					-2.20	
16					+9.70	
15					+14.2	
14					-4.18	
13						
12		-1.49		+0.47		
11		+11.8		+3.42		+0.45
10		+20.6		+1.76		+29.4
9		-0.97		+2.46		-2.35
8						
7					+1.20	
6					+14.3	
5					+18.3	
4					+3.80	
3	+2.54					
2	+24.4					
1	+26.0					

表5 同定関数極限値の増加率 [%] (Pattern 3)

層	Pattern3 (梁損傷)				
	理論値	El Centro	Taft	Hachinohe	El Centro (20% noise)
12	+0.97	-1.49	+0.97	+1.00	+2.05
11	+12.7	+11.8	+12.0	+12.0	+13.2
10	+14.9	+20.6	+15.2	+15.1	+33.5
9	+1.54	-0.97	+1.91	+2.11	+1.77

ような場合、損傷層と非損傷層で明確な違いを確認することが困難になり得ることに注意が必要となる。また、曲げせん断型モデルにおいて、回転剛性は主に柱の軸剛性に依存する。(2)式からわかるように、

回転剛性は当該層から最上層の同定関数極限值に影響するが、せん断剛性は上層に影響を及ぼさない。表 3 および表 4 に、Pattern 1 について上層への影響を例示しているが、19 層と 20 層への影響は無視できる結果であるといえる。さらに、Pattern 3 について異なる入力波として、Taft EW 1952 および Hachinohe NS 1968 を用いた場合の結果を表 5 に示す。この結果から、異なる入力の場合にも本手法は有効であるといえる。

## 2.2 同定精度に対するノイズレベルの影響

損傷同定法では通常、小レベルの地震時応答（余震等）や常時微動等を観測データとして用いることが望まれる。その場合には、大地震時の応答を観測データとする場合に比べて、データに含まれるノイズレベルが高いことが予想される。そこで本節では、0~150[rad/s]に帯域を有するホワイトノイズを各層の応答に付加したデータに対して本手法を適用する。応答データの RMS 値に対するホワイトノイズの RMS 値をノイズレベルとし、ここではレベル 20% のノイズを付加した場合の結果を示す。

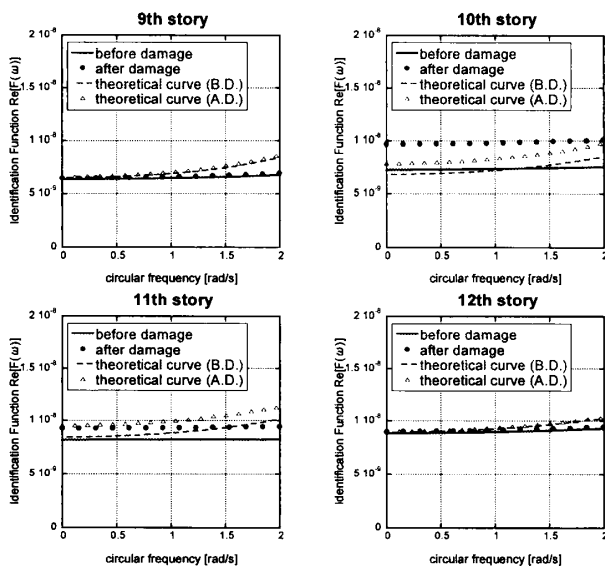


図 9 損傷前後における同定関数

(Pattern 3 : 20%ノイズでの同定関数および振動数域の釣合い式から導出した伝達関数を用いて描いた理論値の同定関数)

Pattern 3 を例として、損傷前後における同定関数極限值の増加率を表 5 に示す。また、図 9 は 20%ノイズを含む場合の同定関数と、ノイズを含まない理論値の同定関数を併せて示したグラフである。表 5 および図 9 の結果から、理論値との誤差は見られるものの損傷層の検出が可能である結果を得た。従って、本損傷同定法は、ARX 次数等を Fit 図により適切に設定した同定関数を用いることで、ノイズを含むデータに対しても有効であるといえる。

## 3. 結論

前報(その 1)で提案した高層建物についての損傷同定法を、様々な損傷パターンを想定した骨組モデルの時刻歴解析による応答を観測データの代用として用いて実建物への適用を想定し、その妥当性を検証した。本損傷同定法の特徴は以下のようにまとめられる。

- (1) 本損傷同定法では、当該層の上下床の水平加速度の計測から、各層独立に損傷同定が可能である。
- (2) 本損傷同定法は、損傷前後の同定関数極限值の比較による非常に単純な操作により、損傷検出を可能とする手法である。
- (3) 提案したシステム同定法の課題であった剛性比率・減衰比率の指定が不要である。
- (4) 小レベルの損傷が生じている場合は、同定関数極限值の増加率も小さく現れるため、損傷層の検出が難しくなる場合がある。
- (5) 損傷同定法では通常、小レベルの地震動観測（余震等）や常時微動計測が望まれており、その場合にはノイズレベルの高い計測データを扱うことが予想されるが、ARX 次数およびフィルタリング区間を Fit 図から適切に設定することで、本損傷同定法の精度を大きく改善することが期待される。

## 参考文献

- 1) 桑原誠, 南良忠, 吉富信太, 竹脇出 曲げせん断型モデルと ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定と損傷同定 (その 1 理論) 日本建築学会近畿支部研究発表会 2012.
- 2) Kuwabara, M., Yoshitomi, S. and Takewaki, I. , A new approach to system identification and damage detection of high-rise buildings, *Structural Control and Health Monitoring* (accepted for publication).