

論文 限られた数の加速度計の観測記録に基づくRC造建物の剛性低下階の推定方法の検討

大野 歩美*1・易 卓然*2・Jonathan MONICAL*3・前田 匡樹*4

要旨：地震発生後、建物の損傷の評価を行い将来の地震による応答を正しく推定するためには、建物の構造特性を正しく推定することが重要である。本研究では、建物内に設置した少数の加速度計の応答観測記録より求める各次固有周期を用いて、地震発生前後の各階の剛性の変化を推定することで損傷発生階を推定する方法について提案し、解析モデルによりその妥当性の検討を行った。2個の加速度計を用いる場合、基礎とモード形に基づき決定した中間層に設置し、得られる観測記録より求める各次固有周期と最大応答加速度を使用することで、実際の建物の剛性分布を正しく推定することができた。

キーワード：構造ヘルスマモニタリング、観測記録、周期の変化、モード解析、剛性低下階の推定

1. はじめに

震災復旧において、被災建物の継続使用の可否や余震に対する安全性を早急に判断することは重要である。現状、建物の被災度を評価する方法である応急危険度判定¹⁾や被災度区分判定²⁾では、技術者が一棟一棟建物の被災状況を目視で調査する必要があり、多大な労力と時間を要する。また、被災建物の中には簡単に立ち入ることのできない建物も存在するといった課題が挙げられる。そこで筆者らは、建物内に設置した加速度計の観測記録と等価1質点系に縮約した構造解析モデルによる復元力特性を用いて、目視での調査を行わずに建物全体の被災度を判定する方法、応答を推定する方法について提案をし、検討を行った³⁾。

本研究では、既往の研究³⁾の手法を多層建物に展開するため、図-1に示すように、建物内の限られた層に設置した加速度計の観測記録より、目視での調査を行わずに各階の損傷程度を推定することを目的とする。建物の損傷を評価し、将来の地震による応答を正しく推定する

ためには、地震発生後の建物の各階の構造特性を正しく評価し、損傷の有無や位置(層)を把握することが重要である。そこで本論文では、鉄筋コンクリート造建物の損傷に大きな影響を受ける剛性について着目し、観測記録を用いて各階の剛性を推定する方法について提案する。また、剛性分布を推定する上での最適な加速度計の設置階についても検討を行う。本検討では、まず2質点系により剛性分布推定法の妥当性の検討を行い、それを4質点系の解析モデルに適用することで、提案手法を検証した。

2. 建物各階の剛性の推定手法

本研究で提案するのは、図-2に示すように、建物内に設置した加速度計の観測記録より建物の固有周期を求め、求めた固有周期に基づき各階の剛性分布を推定する方法である。ここでは、設置できる加速度計は最小の2個(基礎と他1層)に限られている場合を検討対象とする。以下、推定法の流れを示す。

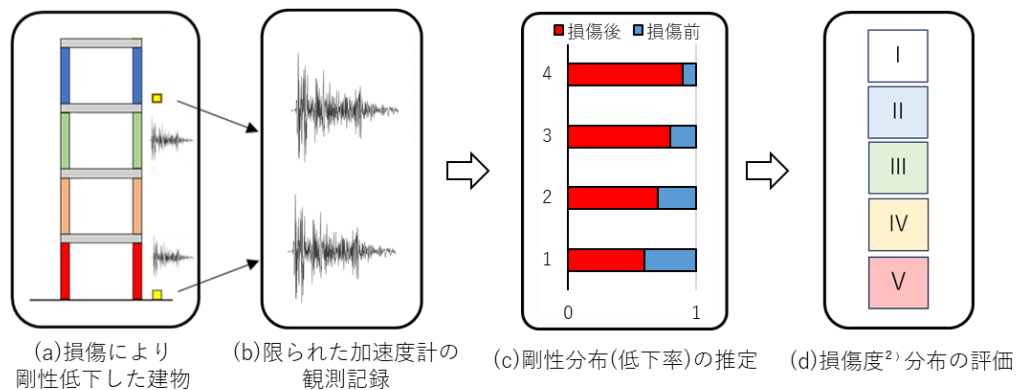


図-1 研究の全体像

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)
 *2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程後期 (学生会員)
 *3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 研究員 博士 (工学) (正会員)
 *4 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

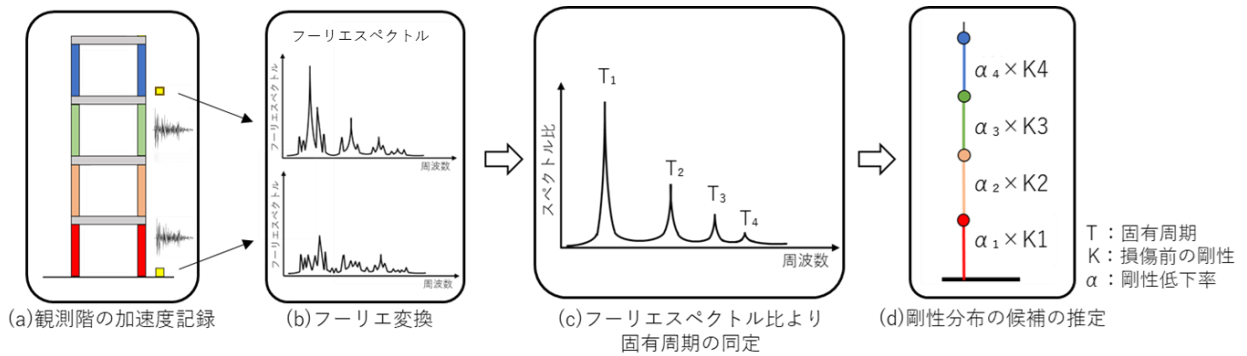


図-2 各階剛性分布の候補の決定

(1) 固有周期の抽出

地震発生時の基礎と他1層の加速度記録をフーリエ変換し、それらのフーリエスペクトル比により各次の固有周期を同定する。地震発生ごとにこれを行うことで、固有周期の変化からいずれかの層に損傷による剛性低下が発生したことが推定できる。

(2) 剛性分布の候補の推定

建物の損傷前の各階の剛性（設計時の剛性）に対する剛性低下率を α_n (n:階数)とし、(1)で求めた各次の固有周期と、剛性低下率 α_n を用いて計算する各次周期の誤差の2乗和の合計が最小となるような剛性低下率の組み合わせを求める。ここで使用する誤差の求め方を式(1)に示す。

$$\text{周期 } T \text{ の誤差} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{計算} T_i - \text{観測} T_i)^2} \quad (1)$$

n:建物の階数

(3) モード形を考慮した最大応答加速度の比較による剛性分布の決定

式(1)により求める各次周期 T の誤差の合計が最小となる建物の各階の剛性低下率は、3章で詳述するように、複数求まる場合がある。さらに、観測記録より得られる固有周期の誤差も考慮すると、誤差が小さくなる複数の剛性低下率の組み合わせのなかから、実際の建物の状態

と一致する正しい分布を選択する必要がある場合が考えられる。

そこで本研究では、各次モードの形状（刺激関数）が異なる中間層に加速度計を設置し、その最大応答加速度を使用することで効果的に正しい剛性分布を推定することとする（図-3）。複数求まる剛性分布からは、異なる振動モード形が得られ、各次モードの組み合わせにより最大応答加速度が異なる階が存在することが考えられる。よって、求めた複数の剛性分布に対応して作成した解析モデルの応答解析結果と、違いの見られる中間層に設置した加速度計の観測記録の最大応答加速度を比較することにより、適切な剛性分布を選定することとする。

(4) 損傷場所・程度の評価

以上で求めた各次固有周期と各階の剛性低下率に基づき、損傷の有無の判断や損傷場所・程度の評価を行う。本論文では、紙面制限から詳述しないが、将来的には本手法により求めた剛性低下率より応答変位を地震発生ごとに求めることで、損傷度や被災度の判定を行うことを目指している（図-4）。

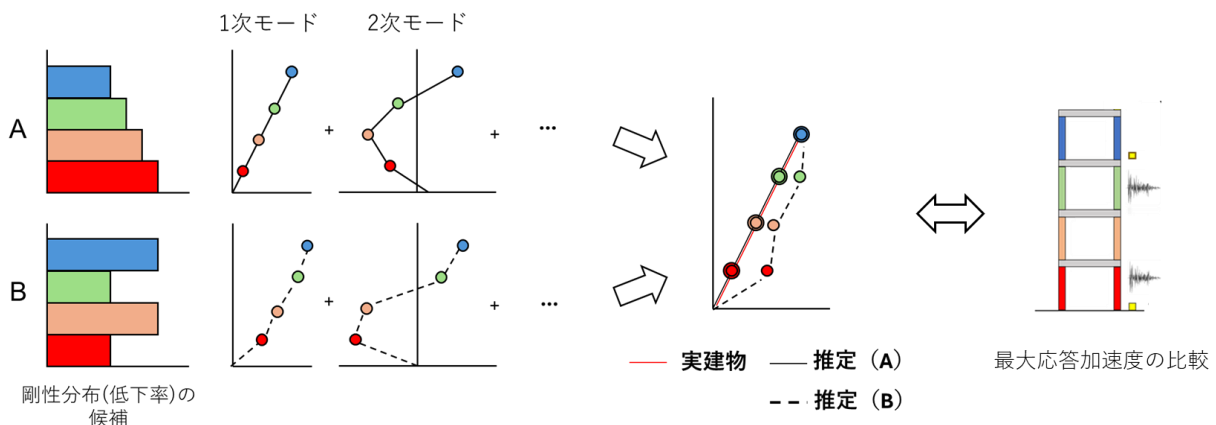


図-3 各階剛性分布の推定

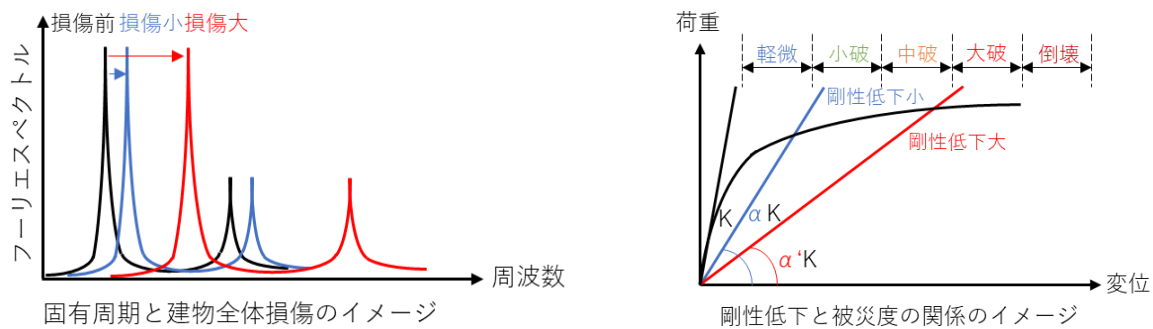


図-4 建物の損傷程度の評価のイメージ

3. 2質点系モデルでの提案手法の妥当性の検討

本章では、2質点系モデルを用いて提案する各階の剛性の推定方法の妥当性について検討を行う。検討に用いる2質点系モデルの各パラメータの値を表-1に示す。解析モデルは、1, 2層の質量・剛性が等しく1次固有周期が $T=0.5(\text{sec})$ となるように設定した。ここでは、地震発生時の建物の各階の剛性低下率を表-2, 表-3のように設定した2つのケースを考えることとする。これらは式(1)による最小誤差より求める剛性分布(剛性低下率)の組み合わせが1つに定まる場合と、複数となる場合の例となっており、それぞれのモデルにおいて弾性応答となる地震動を入力(JMA 神戸波, 入力加速度倍率を2%として使用)し、基礎と中間層である1階に設置した加速度計より得られた観測記録を用いて一連の提案手法の検討を行う。今回の検討においては、各層の剛性低下率 α_n の検討範囲は0.20以上1.00以下で0.05刻みとする。また実建物の値は設定した建物の特性を解析モデルに反映させ得られる結果とする。

階	初期剛性 (kN/mm)	降伏耐力 (kN)	質量(kg)
1	4.0	20.0	10000
2	4.0	20.0	10000

3.1 剛性分布が1つのみ求まる場合(ケース1)

(1) 固有周期の抽出

地震発生時の基礎・中間層の加速度記録よりフーリエスペクトル比を求めると、表-2に示す各次周期と同様の値が推定できた。損傷前の1次固有周期 $T=0.5(\text{sec})$ に対して、同定された1次周期は $0.545(\text{sec})$ であることから、建物に損傷が生じて剛性低下していることは分かるが、損傷場所(層)は同定できない。

(2) 剛性分布の候補の推定

式(1)により求めた誤差の小さい上位の剛性低下率 α_n

の分布を図-5, 図-6に示す。図-5, 図-6より、 α_1 と α_2 の値は1つの値に収束していることがわかる。また、その値は実際の建物の剛性低下率と等しいことがわかる(表-2)。

表-2 固有周期と各階の剛性低下率 ケース1

階・次数	固有周期 (sec)	剛性低下率	
		実建物	推定1
1	0.545	0.9	0.9
2	0.213	0.8	0.8

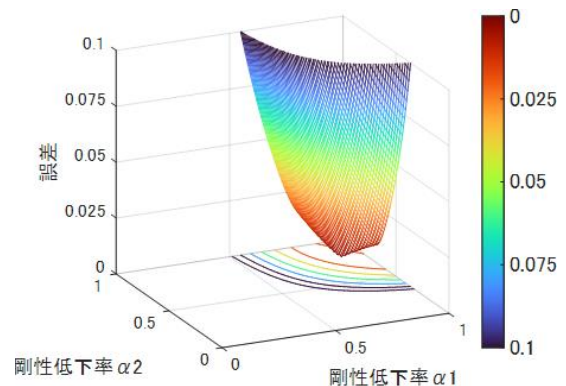


図-5 誤差の計算結果

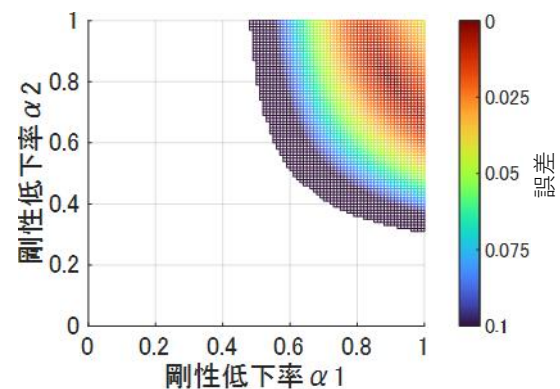


図-6 剛性低下率の分布

(3) 損傷場所・程度の評価

基準モデルと比較した剛性低下率は、 $\alpha_1=0.9$ 、 $\alpha_2=0.8$ となり、2層の剛性低下率がやや小さいことから、2層の方に大きな損傷が生じていることが推定できる。

3.2 剛性分布が複数求まる場合（ケース2）

(1) 固有周期の抽出

地震発生時の基礎・中間層の加速度記録よりフーリエスペクトル比を求めると、表-3に示す各次周期と同様の値が推定できた。損傷前の1次固有周期 $T=0.5(\text{sec})$ に対して、同定された1次周期は $0.804(\text{sec})$ であることから、ケース1より大きな剛性低下、すなわち損傷が建物に生じていることが分かる。

(2) 剛性分布の候補の推定

式(1)により求めた誤差の小さい上位の剛性低下率 α_n の分布を図-7、図-8に示す。図-7、図-8より、 α_1 と α_2 の組み合わせは(0.4, 0.4)と(0.8, 0.2)の2つの推定値に収束していることがわかる(表-3)。いずれの推定も大きな剛性低下が起きているが、層の剛性低下の程度が異なる。

表-3 固有周期と各階の剛性低下率 ケース2

階・次数	固有周期 (sec)	剛性低下率		
		実建物	推定1	推定2
1	0.804	0.4	0.4	0.8
2	0.307	0.4	0.4	0.2

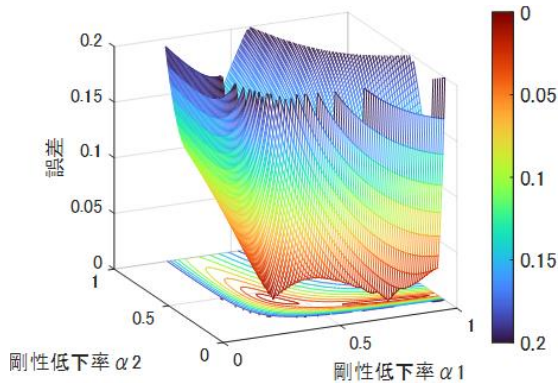


図-7 誤差の計算結果

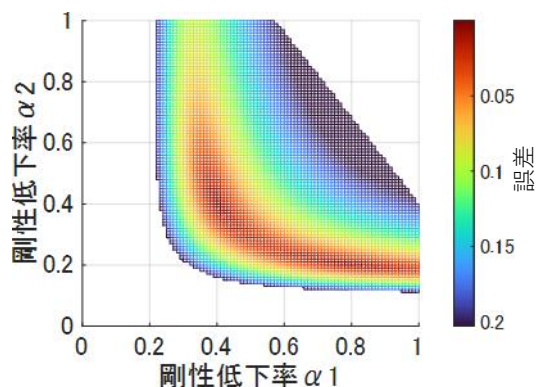


図-8 剛性低下率の分布

(3) モード形を考慮した最大応答加速度の比較による剛性分布の決定

求めた α_1 と α_2 の組み合わせの候補よりそれぞれ解析モデルを作成し、地震動を入力することで得られた各階の最大応答加速度の値を比較する(表-4)。また、モード形についての比較もあわせて行う。図-9に示すように、推定1と推定2の固有モード形は異なるが、2階の刺激係数は、2つの推定で等しい。これより、2階の応答加速度は2つの推定で等しいが、1階では大きく異なり、推定1が実建物の最大応答加速度と一致していることがわかる。よって加速度計を各次モードの形状の異なる1階(中間層)に設置することで、実際の建物の状態と一致する正しい分布を選択することができることが確認できた。

表-4 各階の最大絶対加速度(gal)

階	実建物	推定1	推定2
1	59.4	59.4	104.5
2	83.4	83.4	83.4

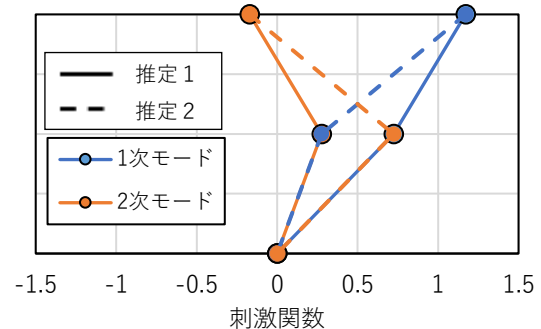


図-9 モード形の比較

(4) 損傷場所・程度の評価

以上より、加速度計を中間層に設置することで、実際の建物の状態と一致する正しい剛性分布を選択することができ、1層、2層の剛性低下率がともに0.4であることがわかることから、各層に同程度の大きな損傷が発生していると推定できる。

4. 4質点系モデルへの提案手法の適用結果

本章では、3章に示した各階剛性の推定手法の中高層建物に対する適用性を検討するため、4質点系モデルを用いて各階剛性分布の推定方法と加速度計の設置階についての検討を行う。検討に用いる4質点系モデルの各パラメータの値を表-5に示す。解析モデルは、1~4層の質量が等しく、各階の初期剛性は設計用層せん断力分布係数 A_i に基づき設定を行い、1次固有周期が $T=0.5(\text{sec})$ となるように設定した。ここでは、地震発生時の建物の

各階の剛性低下率を表-6、表-7のように設定した2つのケース（上層の損傷が大きいケースと下層が大きいケース）を考えると、2質点系モデルでの検討と同様に地震動を入力し、基礎と中間層に設置した加速度計より得られた観測記録を用いて剛性分布の推定を行う。式(1)により誤差を求める際には3次周期までを使用し、2質点系での検討と同様、剛性低下率 α_n の検討範囲は0.20以上1.00以下で0.05刻みとする。

表-5 4質点系基準モデルの設定

階	初期剛性 (kN/mm)	降伏耐力 (kN)	質量(kg)
1	16.0	80.0	10000
2	13.9	69.7	10000
3	10.9	54.6	10000
4	6.8	34.0	10000

4.1 建物の上層の損傷が大きい場合（ケース1）

(1) 固有周期の抽出

地震発生時の基礎・中間層の加速度記録よりフーリエスペクトル比を求めると、表-6に示す各次周期(1~3)と同様の値が推定できた。損傷前の1次固有周期 $T=0.5(\text{sec})$ に対して、同定された1次周期は $0.601(\text{sec})$ と、建物に損傷が生じて剛性低下していることはわかるが、損傷場所（層）が同定できないのは、2質点系と同様である。

(2) 剛性分布の候補の推定

式(1)により求めた誤差の小さい上位の剛性低下率 α_n を表-6に示す。本検討モデルでは、3.1節と同様に1組の剛性低下分布が最も誤差の小さい組み合わせとして求まり、その値は実建物の状態と一致するものであった。

表-6 固有周期と各階の剛性低下率
ケース1（建物の上層が損傷）

階・次数	固有周期 (sec)	剛性低下率	
		実建物	推定1
1	0.601	1.0	1.0
2	0.270	0.8	0.8
3	0.161	0.6	0.6
4	0.106	0.4	0.4

(3) 損傷場所・程度の評価

以上より、基準モデルと比較した剛性低下率が、1階から順に1.0, 0.8, 0.6, 0.4と求まり、1階には損傷がないが、上層にいくに従い、損傷が大きくなるのが推定できた。

4.2 建物の下層の損傷が大きい場合（ケース2）

(1) 固有周期の抽出

地震発生時の基礎・中間層の加速度記録よりフーリエスペクトル比を求めると、表-7に示す各次周期(1~3)と同様の値が推定できた。損傷前の1次固有周期 $T=0.5(\text{sec})$ に対して、同定された1次周期は $0.668(\text{sec})$ となり、ケース1よりやや長周期化していることから、建物全体の損傷はケース1よりやや大きいと推定される。

(2) 剛性分布の候補の推定

式(1)により求めた誤差の小さい上位の剛性低下率 α_n を表-7に示す。ケース2では、3.2節と同様に複数の剛性低下分布が誤差の小さい組み合わせとして求まった。表-7では、式(1)の計算に使用していない4次周期まで誤差が小さい剛性低下率の組み合わせを例として示している。

表-7 固有周期と各階の剛性低下率
ケース2（建物の下層が損傷）

階・次数	固有周期 (sec)	剛性低下率		
		実建物	推定1	推定2
1	0.668	0.4	0.4	0.7
2	0.234	0.6	0.6	0.35
3	0.151	0.8	0.8	1
4	0.117	1.0	1.0	0.75

(3) モード形を考慮した最大応答加速度の比較による剛性分布の決定

それぞれのモード形と最大応答加速度についての比較を表-8、図-10に示す。固有モードの刺激係数は、2階及び4階では2つの推定でほぼ一致するが、1階及び3階では違いが見られ、結果として、剛性低下モデルの応答解析に基づく各階の最大応答加速度は、推定1が実建物と一致していることがわかる。これより推定1が正しい剛性低下分布であると決定できる。以上より、加速度計の位置としては、1階もしくは3階のいずれかの階に設置することで実際の建物の状態と一致する正しい分布を選択することができることがわかった。

表-8 各階の最大絶対加速度 (gal)

階	実建物	推定1	推定2
1	65.6	65.6	88.0
2	72.2	72.2	72.4
3	86.7	86.7	79.2
4	136.1	136.1	139.6

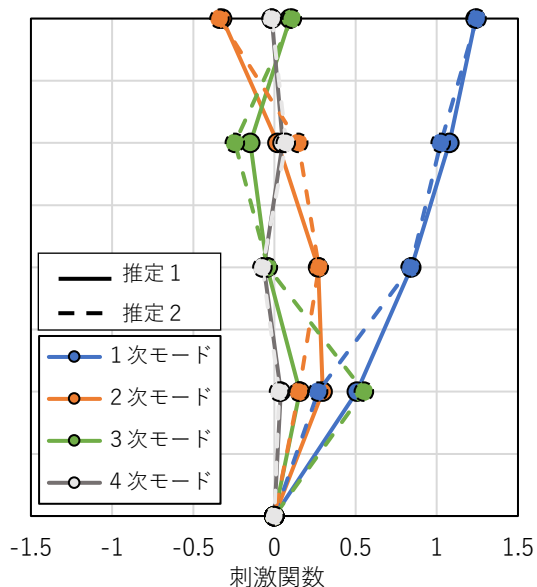


図-10 モード形の比較

(4) 損傷場所・程度の評価

剛性低下率は1階から順に0.4, 0.6, 0.8, 1.0と求まり、上層に比べて下層により大きな損傷が生じていることがわかる。以上より、4質点系の場合においても、加速度計の設置階を適切に設定することで、提案する手法により実際の建物の状態と一致する正しい剛性低下の分布を選択することができ、各階の損傷程度を評価できることが確認できた。

5. まとめ・結論

本研究では、建物内の限られた層（最少で、基礎と他1層の合計2か所）に設置した加速度計の観測記録より各階の剛性分布を推定する方法について提案し検討するとともに、剛性分布を推定する上での加速度計の設置階についての検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

(1) 応答観測記録をフーリエ変換することにより求める各次周期と、各階の剛性低下率 α_n を変化させた解析モデルを用いて計算する各次周期の誤差が最小となる剛性低下率の組み合わせを選び出すことで、剛性分布の候補を1つまたは複数に絞ることができた。

(2) 剛性分布の候補が1つに限られる場合、正しい分布と一致することが確認できた。一方で、複数の剛性分布の推定候補がある場合には、適切な階（本研究では中間層）に設置した加速度計の最大応答加速度と、解析モデルの最大応答加速度を比較することで、実際の建物の剛性分布を正しく決定することができた。

(3) 応答観測記録のフーリエ変換に基づく固有周期の変化から、建物全体の剛性低下、損傷の発生が推定できることに加えて、本研究の成果により、各階の剛性低下率が推定でき、これにより、建物の損傷発生階とその程度の推定が可能で、層レベルの被災度判定に適用できる可能性を示すことができた。

今回は弾性応答となる地震動で検討を行ったが、今回は塑性領域まで拡張し、地震による振動により塑性化、すなわち、剛性低下が進行する現実的な場合についての検討を行うとともに、実際の建物や実験にも適用することで、実建物の構造ヘルスマonitoringに適用可能な手法へと展開を目指している。

謝辞

本研究は、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」（課題番号：JPJA21P21458909、研究代表者・前田匡樹）の助成を受けたものです。また、建築研究所 関松太郎氏には多大なるご支援、ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：被災建築物応急危険度判定マニュアル，1998.1
- 2) 日本建築防災協会：2015年改訂版 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2016.3
- 3) 大野歩美，ほか：RC造建物の構造健全性評価のための観測記録に基づく性能曲線の補正法と性能曲線を用いた被災度区分判定法の検討，コンクリート工学年次論文集，第45巻第2号，pp.223-228，2023