

# 論文 扁平断面部材を有する架構の構造特性

杉本 訓祥\*1・大西 直毅\*2・田尻 清太郎\*3・楠 浩一\*4

**要旨：**2023年にトルコ南部で発生した大地震では、多くの建物が倒壊し甚大な被害が発生した。その後に行われた被害調査では、被災建物の部材の損傷度の観察のほか、常時微動計測が行われた。本報では、調査結果を踏まえて建物全体の解析モデルを作成し、固有値解析やホワイトノイズに対する応答解析を行い、振動特性を検証した。解析結果は必ずしも計測結果とは対応しなかったものの、ねじれ挙動が卓越することで、方向により特性が異なることが確認された。さらに剛心の推定を行い、エレベーターや階段室などのコア部の連層耐震壁による偏心に伴い、被害が生じたことが推察された。

**キーワード：**固有振動数、フーリエスペクトル、偏心、FEM

## 1. はじめに

2023年2月6日、トルコ南部の東アナトリア断層沿いを震源とする大地震が発生して甚大な被害が生じた。この一連の地震では、現地時間4:17と約9時間後の13:24の2度にわたり、Mw7を超える地震が連続して発生したことから、被害が拡大した。この地震を受けて、日本からも各学会が協力してさまざまな被害状況調査が行われた<sup>1),2),3)</sup>。現地調査では、鉄筋コンクリート造建物被災状況を詳細に調査して被災度区分判定を実施したり、常時微動計測も行った。調査した鉄筋コンクリート造建物の多くは、長方形の柱（壁柱）が多用されており、日本のような概ね正方形断面の柱は少ない傾向が見られた<sup>2)</sup>ことから、扁平断面柱の構造特性（剛性や限界変形など）を検討した<sup>4)</sup>。断面積が等しい正方形断面と扁平断面を設定し、復元力特性および靱性能を比較したところ、ねじれを無視した場合であれば、耐力は比較的同等になるものの靱性能の違いは大きいことが確認された（図-1）。

以上の背景を踏まえて、本報では、被害状況の詳細調査結果や被災建物の微動観測記録を踏まえて、扁平断面部材で構成された鉄筋コンクリート造建物の振動特性や被害への影響について検討する。特に、調査対象建物を三次元でモデル化し固有値解析やホワイトノイズによる応答解析を行い、被害状況や微動計測結果との整合性について分析する。

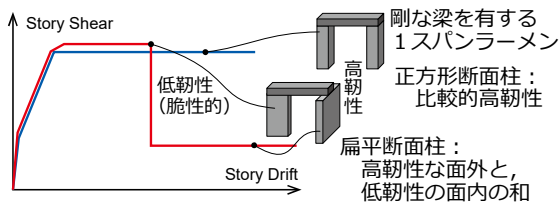


図-1 部材断面の異なるラーメンの変形性能モード<sup>4)</sup>

## 2. 既往実験を対象としたモデル化手法の妥当性検証

本報では、FEM解析により固有値解析や振動モードの検討を行う。そこでここでは、架構全体のモデル化手法の妥当性を検証するため、振動特性を明確に計測した振動実験を対象とした解析を行った。検討対象は、筆者らも参加した縮尺30%のRC造試験体を用いた振動台実験である<sup>5),6)</sup>。本報では、FEM解析は、汎用解析ソフト「FINAL」を用いた<sup>7),8)</sup>。

### 2.1 振動実験試験体

振動実験試験体の概観を写真-1に、解析モデルを図-2に、試験体平面図を図-3にそれぞれ示す。試験体は6階建ての一般的な共同住宅を想定しており、梁間方向（Y方向）は2層以上の連層耐震壁を含む耐震壁付きラーメン構造、桁行方向（X方向）は純ラーメン構造となっている。1層は比較的大空間を確保するため、内側スパンの耐震壁は少なくなる一方で、妻面に耐震壁を確保している。2層以上は両妻面は開口を有する壁のため、三方スリットを設け、構造上は2スパンラーメンとし、内側2構面は連層耐震壁としている。本報では、弾性解析を行うこととし、実験時の材料試験結果平均値を用いて、コンクリートと鉄筋のヤング係数は、それぞれ $3.07 \times 10^4$  [N/mm<sup>2</sup>],  $1.90 \times 10^5$  [N/mm<sup>2</sup>]とした。解析モデルは、3章にて後述するように、床と耐震壁は四辺形要素とし、柱・梁部材はビーム要素とした。なお、解析では妻面の三方スリット壁は考慮していない。

### 2.2 振動特性の実験結果との比較

汎用解析ソフト「FINAL」では、剛性マトリクスと質量マトリクスを用いて非減衰系の固有値解析が可能である。固有値解析によって得た固有振動数を、実験で得られた固有値検索加振結果と比較して図-4に示す。固有値検索においては、入力地震動と最上階の応答記録を用

\*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院・教授 博(工) (正会員)

\*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院・講師 博(工) (正会員)

\*3 東京大学・准教授 博(工) (正会員)

\*4 東京大学 地震研究所・教授 博(工) (正会員)



写真-1 試験体写真<sup>5)</sup>

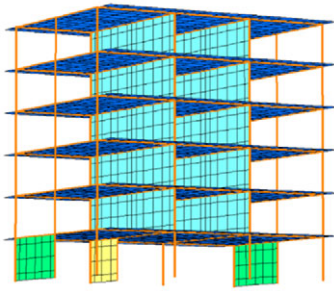


図-2 解析モデル

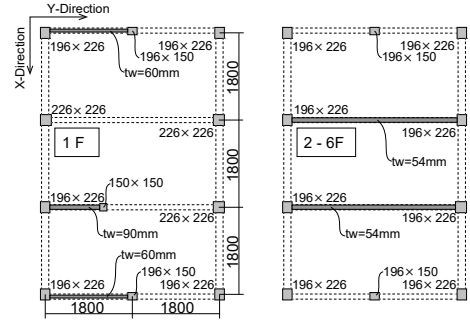


図-3 試験体平面図

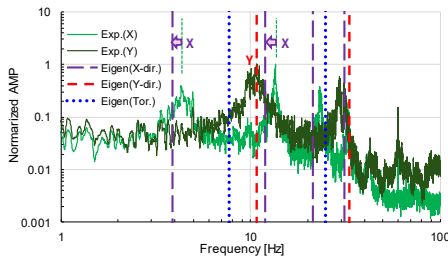
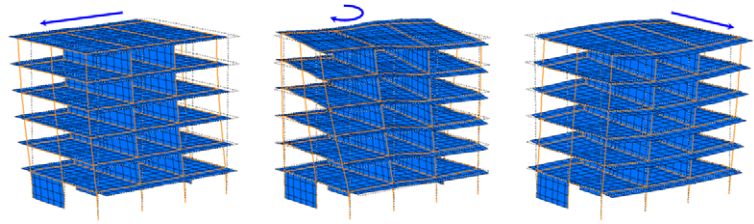


図-4 固有値検索試験と解析の比較



(a) 1次(X方向・桁行) (b) 2次(ねじれ) (c) 3次(Y方向・梁間)

図-5 縮小6層耐震壁付きフレーム解析結果の固有モード

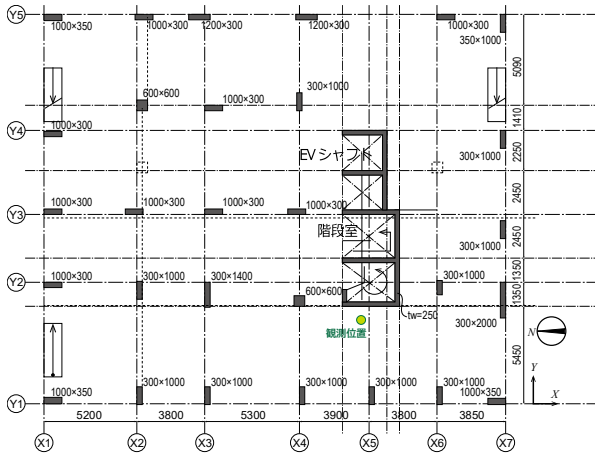


図-6 調査建物の平面図

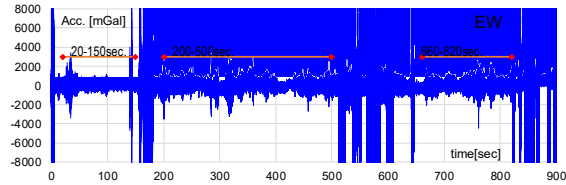


図-7 計測データの時刻歴 (EW方向)

いて、それぞれフーリエ変換した結果の比率を求め、応答倍率から卓越振動数を得ることが一般的である。一方、本報で述べる被災建物における微動計測では、最上階の応答のみ計測しており、入力に対する応答倍率を得ることができない。そこで、本節における振動実験結果に対する検証においても、最上階の応答のみを用いて検証することとした。また、最上階の4隅に配置した加速度記録の平均値を用いた。

図-4に示すように、6層建物モデルの固有値解析結果は振動実験結果のフーリエスペクトルのピーク（最大値で基準化）と概ね対応している。桁行方向（X方向）の固有値解析結果は、図中の矢印（⇔）で示すように、実験値に比べて振動数が低い傾向があるが、梁間方向（Y方向）はほぼ一致している。このことから、固有振動数の評価に関しては、本報のモデル化手法は概ね妥当と判断できる。また、最上階加速度計測値のみによりフーリエスペクトルを描いたが、概ねピークが確認できおり、実建物において最上階のデータのみでも推定できる可能性が示されたといえる。

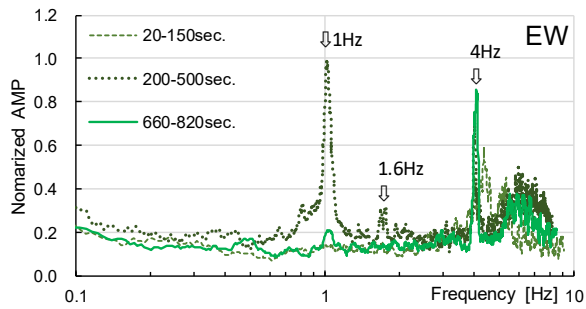
解析の結果得られた振動モードを図-5に示す。桁行方向が1次、梁間方向は3次となり、ねじれモードが2次となっている。このように、固有値解析結果では、ねじれモードの固有値が得られるが、図-4に示す振動実験結果のフーリエスペクトルでは、ねじれモードの振動数が卓越する様子はみられない。

### 3. 調査建物を対象とした検証

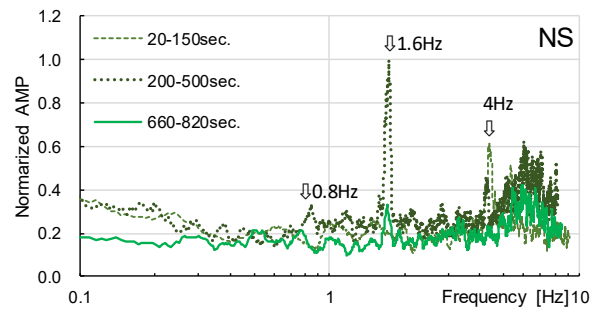
#### 3.1.被災建物の調査結果概要

ここでは、対象建物の調査概要について述べる。調査の詳細や全体像については文献を参照されたい<sup>3)</sup>。

調査建物の1階平面図を図-6に示す。東西方向をY軸としている。最上階において、微動計測を行った。最上階の階段室壁際の床にセンサーを設置し、約15分程度計測を続けた。計測結果の時刻歴を図-7に示す。図に示す通り、一部で断続的に過剰な加速度が記録されており、これは、調査者が周囲を歩いたり、階段を上下移



(a) EW 成分



(c) NS 成分

図-8 計測データのフーリエスペクトル

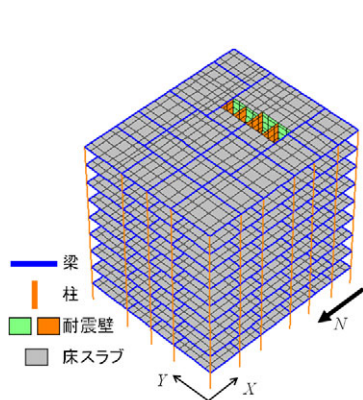


図-9 対象建物モデル図

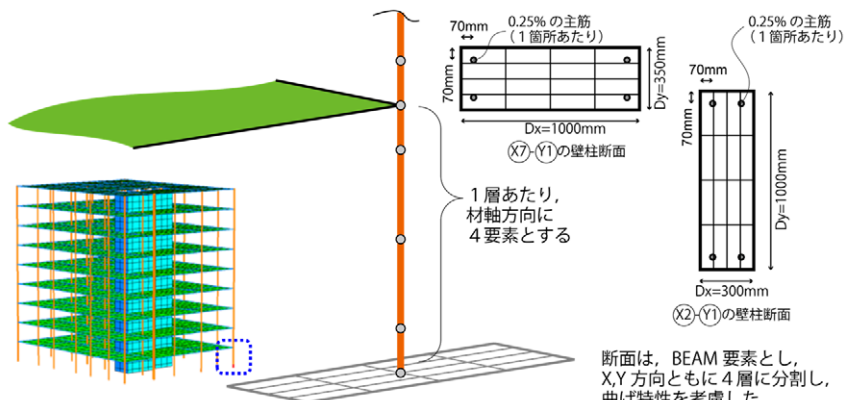


図-10 鉛直部材のモデル化 (BEAM 要素)



写真-2 X2 通り Y4 の柱と梁

動したことに伴う波形と推測される。そこで、これらの加速度記録を除くため、計測開始から 20~150 秒, 200~500 秒, 660~820 秒の区間のデータを検討対象とすることとした。常時微動計測により得られた加速度時刻歴のフーリエ変換結果を図-8 に示す。一般に、固有値検索では、入力波形と応答値 (主に最上階の応答加速度時刻歴) から得られるフーリエスペクトルの比をとり、入力に対する応答倍率、すなわち伝達関数として描くことで卓越振動数を把握するが、本計測では、最上階の応答のみ計測されていることから、最上階応答値のスペクトルを示した。各方向の最大値で基準化して示した。対象区間により明瞭さが異なるものの、0.8, 1.0, 1.6Hz, および 4.0Hz 付近にピークがみられる。

### 3.2. 検討対象建物のモデル化

解析モデルを図-9 に示す。調査時に入手した計画時の図面にに基づき、柱は、壁柱状の 1000×300 を基本とし

ている。場所により、長辺方向が X 方向または Y 方向となるよう配置されており、その本数は概ね等しい。また、一部に正方形断面柱も配置されている。これらの壁柱はすべて線材要素でモデル化し、エレベーターシャフトおよび階段室 (X5 通りの Y2~Y4 間) 周りのみ四辺形要素とした。壁柱の線材要素は曲げ剛性を考慮できるよう X,Y 方向とも 4 層に分割した。主筋量は、コンクリート断面積の 1% と仮定し、隅から 70mm の位置に 0.25% づつ均等に配置するものとした (図-10 参照)。また、耐震壁 (EV シャフトと階段室) は、壁厚 250mm とし、鉄筋量は縦横とも 0.6% とした。梁部材は、平面図中に破線で示すよう配置した (図-10 および図-9 のモデル図参照)。梁部材は、扁平断面の壁柱との取り合いのため同一構面内に配置されない部分が見られ (例えば Y2 通りの梁の X3 との交点や Y4 通りの X2, X3, X4, および写真-2 参照)、剛節骨組としての効果が小さいと考えられる。解析は弾性とし、コンクリートと鉄筋のヤング係数はそれぞれ  $2.1 \times 10^4$  [N/mm<sup>2</sup>],  $2.05 \times 10^5$  [N/mm<sup>2</sup>] とした。

平面図や実測により、鉛直部材は概ね仮定できたが、梁部材については不明である。また、振動特性に影響を与える重量についても不明であるため、ここでは、梁断面と建物重量をそれぞれ 2 通り仮定した。すなわち、梁断面については、幅 300mm×せい 500mm, および幅 400mm×せい 600mm の 2 通りを、また、重量について

は、単位面積当たりの重量が  $12\text{kN/m}^2$  と、 $9.6\text{kN/m}^2$  の 2 通りを、それぞれ設定した。曲げ剛性は、断面二次モーメントにして  $1:2$ 、重量については  $100\%:80\%$  の関係となる。解析ケースは表-1 に示した。

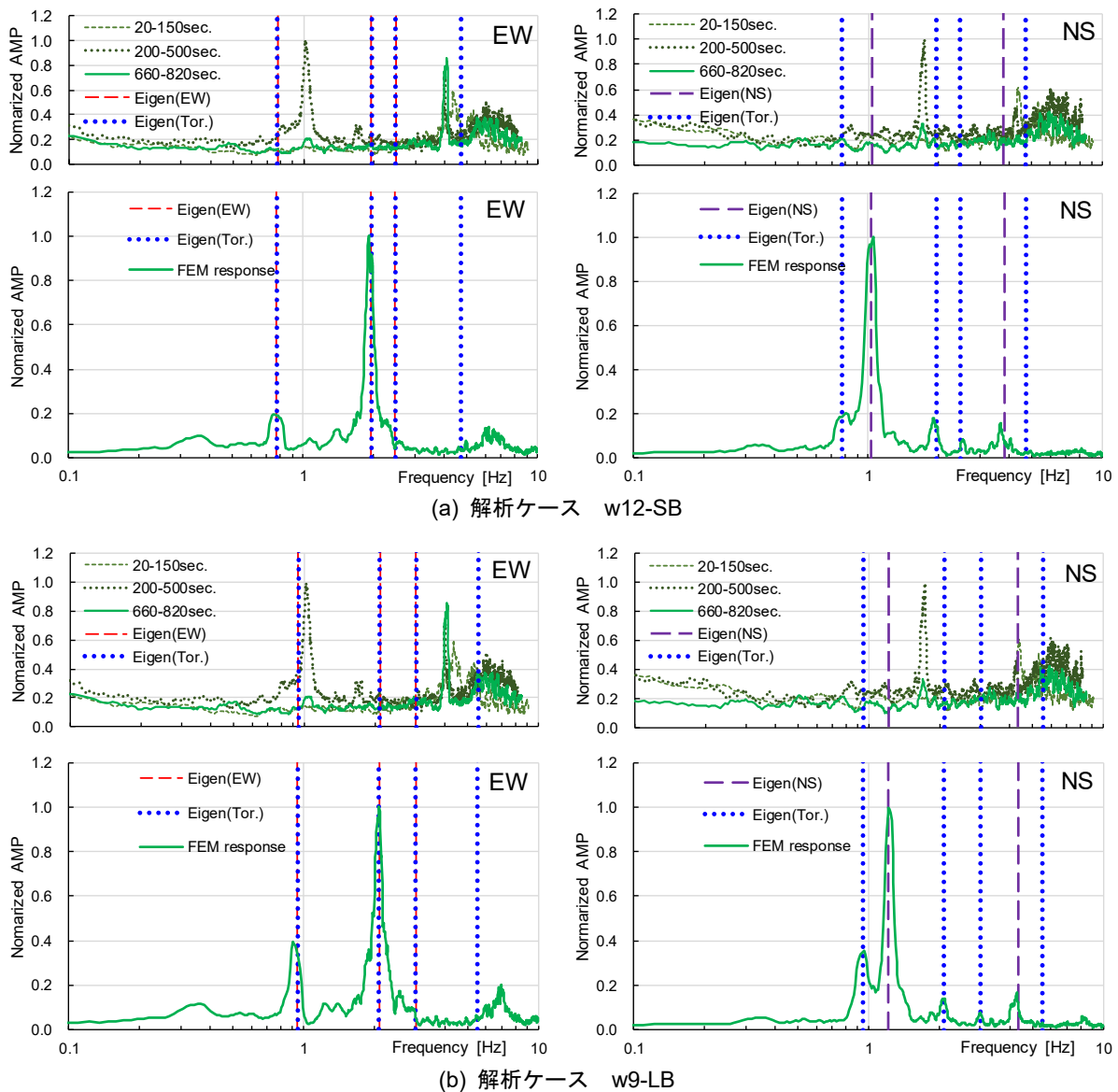
ここでは、前章と同様の固有値解析結果のほか、実測と同様に、ホワイトノイズを入力波とした地震応答解析も行い、観測地点に近い節点の応答加速度からフーリエスペクトルを求めることとした。

### 3.3. 解析結果

ここでは、固有値解析及びホワイトノイズに対する応答解析結果をもとに得られたフーリエスペクトルについて述べる。フーリエスペクトルを図-11 に、変形モードを図-12 にそれぞれ示す。フーリエスペクトルは、重量が大きく梁剛性が低い場合(振動数が最も低い場合: w12-SB) と、重量が小さく梁剛性が高い場合(振動数が

最も高い場合: w9-LB) の 2 ケースを示した。その他のケースとともに固有振動数の一覧を表-1 に示す。2 次モードと 5 次モードは明瞭な X 方向が卓越するものの、1, 3, 4 次モードは、ねじれが卓越している。解析により得られた固有値(固有振動数)は、微動計測結果のピークとは必ずしも対応していないが、少ない重量を設定し、梁を大きくした解析ケース(w9-LB)の方が、 $0.9\sim 1\text{Hz}$ ,  $2\text{Hz}$ ,  $3\text{Hz}$  付近が実測に近づいているように見える。しかしながら、実測値は、被災後の計測であり、解析で得られるはずの被災前の特性に比べ、振動数低下後の状況と考えられ、どのピークが対応しているか判断しにくい。

建物重量や、梁の曲げ剛性の違いについては、本報で仮定した範囲でも振動数がよく変動する一方で、架構の東西・南北成分やねじれなどの固有モードの相対的な関係は大きく変動していない。すなわち、東西・南北方向



Eigen(EW), Eigen(NS), Eigen(Tor.): 固有値解析結果のうち東西、南北、ねじれ成分, FEM response: ホワイトノイズによる応答解析結果のスペクトルを示す。

図-11 フーリエスペクトルの解析と実測の比較

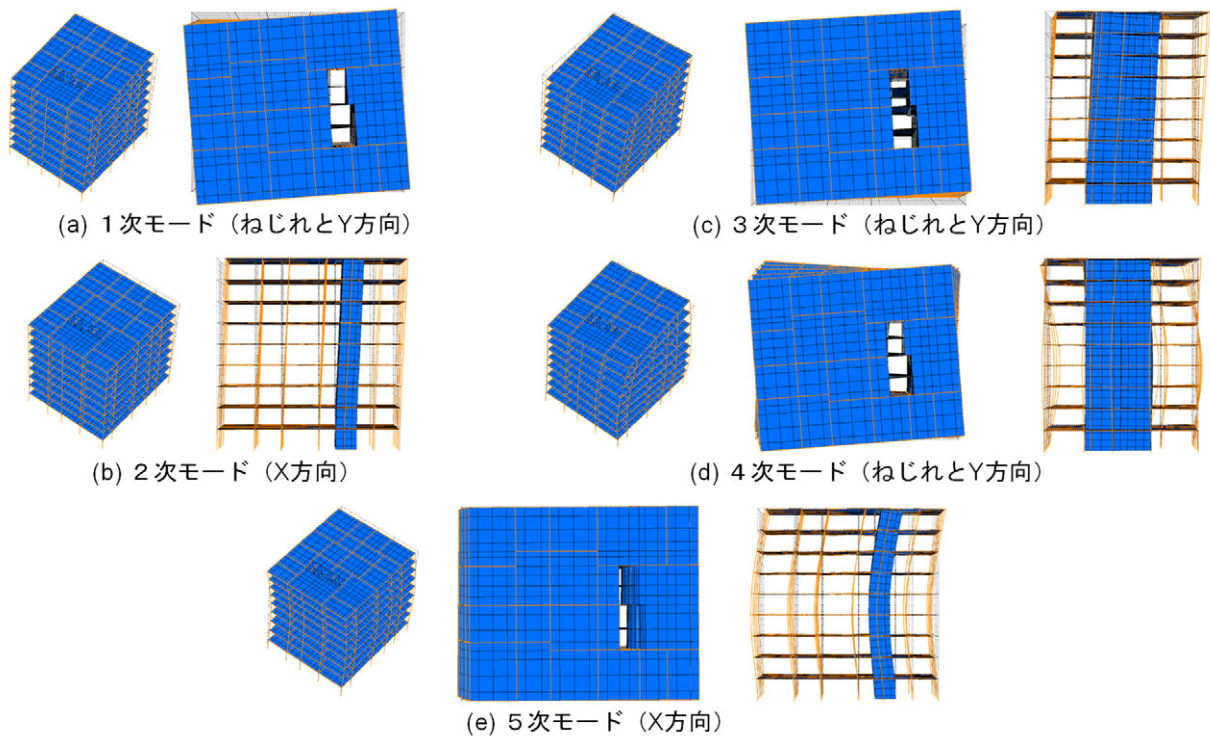


図-1.2 固有モード図（解析ケース w12-SB の場合）

表-1 解析結果一覧（各解析モデルの固有振動数）

ケース名	単位面積重量 [kN/m <sup>2</sup> ]	梁断面 幅×せい[mm]	固有振動数 [Hz]			
			1次	2次	3次	4次
w12-SB	12.0	300×500	0.773	1.032	1.947	2.476
w9-SB	9.6		0.834	1.106	2.081	2.683
w12-LB	12.0	400×600	0.882	1.140	1.980	2.789
w9-LB	9.6		0.946	1.218	2.107	3.004

で振動数が大きく異なっている。本検討対象建物の場合、扁平断面を多用する事と、梁の剛性が比較的低いことで、振動モードが複雑になっていると推察される。

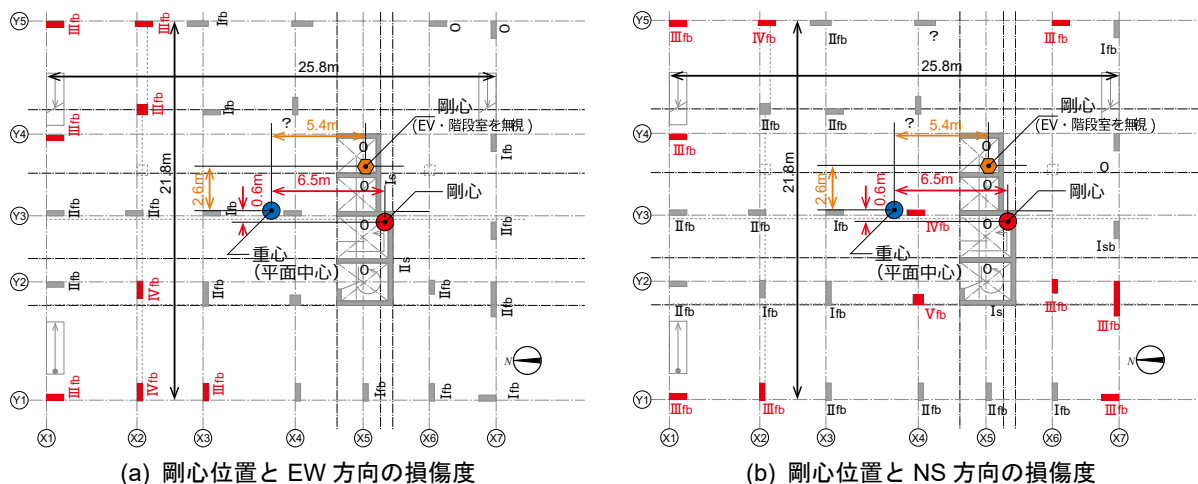
### 3.4. 偏心と損傷

ここでは、本報で対象とする被災建物の偏心について検討する。前節に述べたように、本建物はねじれモードが多数見られた。そこでここでは、扁平断面柱それぞれの曲げ剛性から、剛心位置を求め、偏心の程度について検討する。剛心の算出はRC規準付録<sup>9)</sup>の手法を参照して、D値法を準用する。本来、D値法は、鉛直部材の剛性のほか、鉛直部材に取り付く梁部材の剛性を考慮するが、本建物の梁部材の詳細が不明であるため、ここでは鉛直部材の剛度 ( $I/l$ :  $I$ :断面二次モーメント,  $l$ : 内法スパン) のみ考慮し、剛心位置を算出する。また、詳細情報はないものの、比較的整形な平面形状であることから、重心は平面の中央と仮定した。剛心位置 (赤●) を、重心 (架構平面の中心・青●), および鉛直部材の損傷度<sup>10)</sup>と比較して図-1.3に示す。X方向 (南北方向) の偏心

は小さい (Y方向偏心距離は小さい) もの、Y方向 (東西方向) の偏心は大きい (南北方向・X方向の偏心距離は大きい)。部材の損傷度を見ると、偏心により変形が大きく生じるX1, X2構面の東西方向の損傷が大きく、計算上の偏心の影響と対応している。一方で、南北方向については大きな偏りが見られないため、計算上偏心が無いことと整合しているとみることができる。ただし、建物外周に近い部材 (Y1-X1, Y1-X2, Y4-X1, Y5-X1, Y1-X7, Y2-X7, Y5-X6 など) に被害が生じている点は、ねじれ挙動による影響が表れていると考えることもできよう。また、EVシャフト、階段室の耐震壁を無視した場合も図示しており (橙●), 南東方向に偏心していることがわかり、扁平断面部材の配置の影響があると考えられる。

### 4. まとめ

本報では、扁平断面の壁柱と梁の剛性が低い、または梁により構面が構成されない架構について、振動特性と偏心について検証した。その結果以下の知見が得られた。



損傷度 I～V は文献<sup>10)</sup>による。添え字の fb は柱に取り付く梁の曲げ系の、s は柱のせん断系の損傷に基づく判定を示す。

図-1.3 各部材の損傷度

- 1) 東西・南北方向とも、壁柱状の扁平断面の鉛直部材が多用されているが、特に、エレベーターシャフトや階段室周りの耐震壁の影響で、解析上はねじれ挙動が顕著に見られた。
- 2) 対象建物は、東西方向で偏心が顕著となり、偏心により大きく変形すると考えられる構面で損傷度が大きかったことが分かった。なお、EVなどのコアを無視した扁平断面柱による偏心は東西南北の両方向に現れた。本報では、弾性解析により振動モードや固有振動数について分析したが、実被害に対する検証には非線形性を考慮し、地震応答解析により損傷度との対応を分析する必要がある。また、曲げ剛性のみ考慮して剛心进行评估しており、せん断剛性の考慮も必要であろう。

### 謝辞

本地震で亡くなられた方々に弔意を、また被災された方々にお見舞いを表します。本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助事業（特別研究推進費）の「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」、および国際緊急共同研究・調査支援プログラム（J-RAPID）「トルコの建築物の耐震性能調査と改善に向けた課題整理に関する調査研究」により実施されました。さらに、検討対象建物は、現地調査のほか、Istanbul Technical University の Ufku YAZGAN 教授より提供していただいた図面を参考にモデル化しました。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 楠浩一，日比野陽，Caglar Goksu Akkaya，Alper Ilki：2023年トルコ・シリア地震における合同災害調査の概要，Day1-G404-01，第16回地震工学シンポジウム，2023年11月
- 2) 日比野陽，大西直毅，中村聡宏，尹ロク現，楠浩一，

- 2023年トルコシリア地震における鉄筋コンクリート造建物の被害の概要，Day1-G404-05，第16回地震工学シンポジウム，2023年11月
- 3) 田尻清太郎ほか：2023年トルコ地震で被災した鉄筋コンクリート造建物の詳細調査，Day1-G404-10，第16回地震工学シンポジウム，2023年11月
- 4) 岩男和，杉本訓祥，大西直毅：RC柱の断面形状の違いによる構造的変動に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.157-158，2024年9月
- 5) 杉本訓祥，勝俣英雄，増田安彦，米沢健次ほか：縮小6層RC造耐震壁付きフレーム建物試験体の振動台実験における崩壊挙動 RC造建物の崩壊余裕度定量化のための研究開発，日本建築学会構造系論文集，第82巻，第741号，pp.1759-1768，2017年11月
- 6) 国立研究開発法人防災科学技術研究所「E-Defense 実験データアーカイブ (ASEBI)」：課題名「E201401 縮小6層RC造耐震壁フレーム建物の振動実験」<https://doi.org/10.17598/nied.0020>（閲覧日2024年12月14日）
- 7) CTC 伊藤忠テクノソリューションズ：FINAL <https://www.engineering-eye.com/FINAL/index.html>（閲覧日2024年12月26日）
- 8) 長沼一洋，米沢健次，江戸宏彰：RC構造物の三次元繰返しFEM解析の精度向上，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.427-428，2003年9月
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（1988，1991一部改）付14.鉄筋コンクリート構造耐震計算規準，pp.521～553，1991年4月，日本建築学会
- 10) 日本建築防災協会：2015年改定版震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針 [鉄筋コンクリート造/鉄骨鉄筋コンクリート造編]，2016年3月