

# 免震建物の現状と地震観測記録に基づく振動特性の評価

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻  
博士課程前期課程 2年 護研究室 李彦劫

## 1. 序論

日本は地震多発国であり、1995年には兵庫県南部地震、2003年に十勝沖地震、2004年に新潟県中越地震が発生し、さらに2011年には日本観測史上最大級となるモーメントマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。東北地方太平洋沖地震は、1995年以後から全国的に建設され始めて以来、免震建物が経験した初めての広域巨大地震である。本震発生以後、大きな余震が度重なり、津波の発生も伴ったことで、東北地方及び関東地方の太平洋沿岸を中心に、岩手県、福島県、宮城県、茨城県など非常に広い地域が被災した。また、この地震では、長周期成分の地震波が強く放出されたため、免震建物のような長周期構造物への影響が注目されている。被害調査によって、今回の地震において免震建物の構造躯体にほとんど損傷は生じておらず、免震構造としての性能を十分発揮したと考えられるが、被害が全くなかったとは言えない。免震層変形が40cmを超えたものや一部の免震部材にひび割れが見られるなど、免震性能に影響が及ぶ被害を受けたことが報告された。このような問題を踏まえて、将来発生する南海トラフ巨大地震と首都直下型地震に向けて、免震建物の安全性を向上させることは重要な課題となっている。

免震建物の安全性を向上させるためには、現在の免震建物の問題点について検討することが必要である。これには、免震建物の建設状況を把握するのが前提となる。既往の研究において、免震建物の性能を大きく左右する固有周期、クリアランス、設計用入力地震動などについて、2011年までの傾向が既に分析されている。しかし、東北地方太平洋沖地震を経験した後、免震建物の建設の傾向に関する報告はほとんどない。将来の大地震に対する免震建物の安全性を向上するために、2011年以後の免震建物の建設状況の変化並びに建設された免震建物の振動特性を把握するのは非常に重要である。

以上のような背景を踏まえて、本論では、既に構築されたデータベースを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震以来、日本国内の免震建物の建設傾向の変化に着目して分析する。加えて、実在する免震建物の地震応答観測記録を用いて、近年の建設傾向において比較的特殊な構造と一般的な構造を有する2棟の免震建物における地震時の振動性状の同異を明らかにする。また、来たる大地震に向けて、免震建物の安全性を向上する方策を示すことを目的とする。

## 2. 免震データベースの概要と既往研究

### 1) データベースの概要と既往の研究成果

本論で用いた免震データベースは以下の資料を元に構築されている。

- ①ビルディングレターに掲載された性能評定・評価シート
- ②GBRCに掲載された性能評定・評価シート
- ③MENSHINに掲載された国内の免震建物の一覧表

### ④日本免震構造協会作成の免震建物データ

### ⑤国交省公開の構造方法等の認定に係る帳簿

このデータベースに基づいて、既往の研究では主に免震建物の件数、建設地、建物用途、規模など建物の概要に関する項目と免震層位置、免震部材、評価機関、採用地震動、クリアランス、一次固有周期など免震性能に関する項目について2011年までの傾向の分析を行った。

### 2) 地震観測記録に基づいた免震建物に関する既往研究

本論では、地震観測記録に基づく免震建物の既往の研究を把握するために、「免震」と「観測」を基に、様々なキーワードで、2014年10月までに公表された論文をインターネットで検索して、その内容の分布を検討した。内容に応じて、検索された論文を「振動特性」、「地震応答」、「実験」、「応答解析」、「その他」の五項目に統合し、投稿件数の年代順の分布を図1に示す。

1995年兵庫県南部地震が発生するまで、投稿論文の数は少なく、内容としては、観測記録や実験で得られたデータによる免震建物の基本的な振動特性と免震性能の把握に関する論文が多い。1995年以後、免震技術の発展と共に、免震建物の地震観測に関する論文の数が多くなっている。また、「地震応答」に関する論文は大地震が発生する年の翌年で多くなる傾向がある。そして、2003年前後から、超高層免震建物の地震応答評価に関する論文が現れ、応答解析に関する論文も多くなっている。近年では、2011年東北地方太平洋沖地震における免震建物の応答に関する論文が多いほか、「解析」で建物の地震応答を求める論文の割合が以前より高くなっている。また、「その他」において、2003年以後から、免震建物における地震時の揺れの体感的アンケート調査に関する論文が見られる。免震建物の性能だけではなく、人に対する居住性への関心が近年高まっていることが分かる。

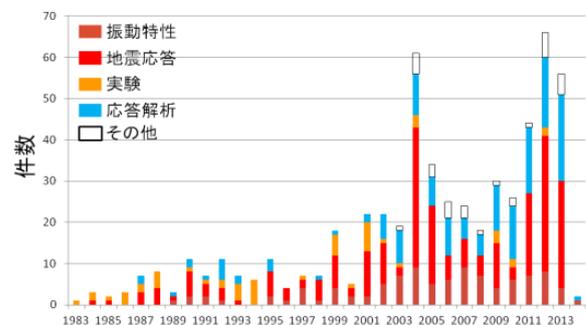


図1 地震記録に基づく免震建物に関する論文の投稿数の分布

### 3. データベースに基づく国内免震建物の現状分析

#### 1) 免震建物の概要に関する分析

図2に全国の免震建物の年毎の認定数の推移を示す。免震

建物の年間認定数は、2008年でピークの291棟に至ったが、2009年から急に減っていることが見られる。近年では、2011年東北地方太平洋沖地震の発生の影響で、2012年から免震建物の棟数が再び急激に増加している傾向が見られた。

免震建物の用途として、図3に示したように、免震建物全数に対する病院と庁舎など災害時の重要施設の割合が、2011年から増加していることが分かる。

建築規模として、近年では、超高層免震建物の棟数の減少に伴って、軒高もやや減っている傾向がある。加えて、建築面積が5000m<sup>2</sup>以上の免震建物の数が少なくなることから、大規模な免震建物の数が少なくなっていると言える。

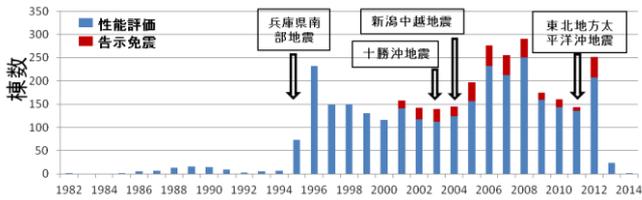


図2 免震建物年間認定数の推移

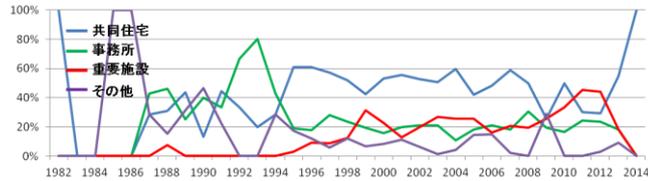


図3 免震建物の各主要な用途の割合の推移

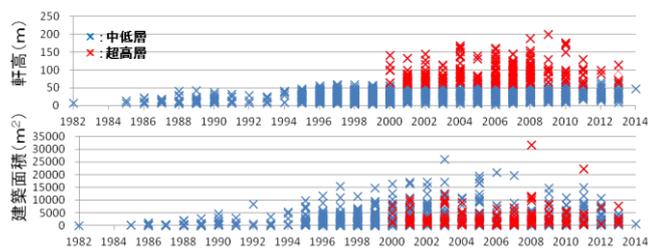


図4 建築規模の推移

## 2) 免震性能に関する分析

免震建物の設計一次免震周期について、図5で示したように、近年では、中低層免震建物の免震周期が4~5秒であり、過去より長周期になっているが、超高層免震建物の免震周期が短くなっている傾向が見られる。

水平クリアランスについて、図6で示したように、近年においてクリアランスが50~60cmに集中している。これは、新しい免震部材・免震システムの開発、建物規模、設計入力地震動、法令の施行など多方面の影響を受けていると考えられる。

免震部材について、図7で示したように、天然系積層ゴム支承とプラグ入り積層ゴム系支承の使用率が高く、併用される場合も多いほか、すべり支承や粘性型ダンパーなど大変形時安定な性能を提供できる免震部材の使用率が近年で高くなっている。

基礎形式について、図8に示したように、中低層免震建物が杭基礎で地下室なしの形にしたものの割合が過去から近年かけて大きく占めている。

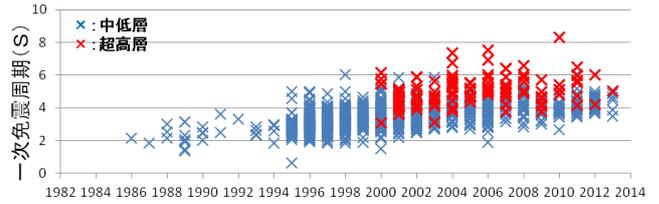


図5 設計免震一次固有周期の推移

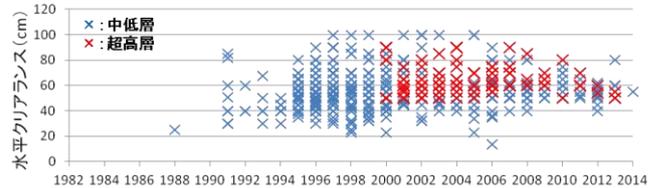


図6 水平クリアランスの推移

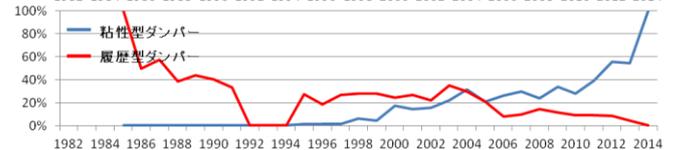
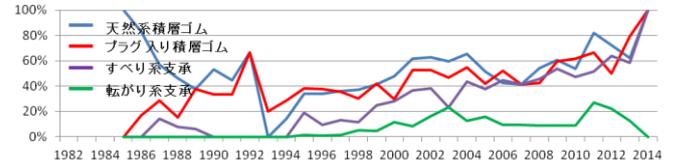


図7 主要な免震部材の使用率の推移

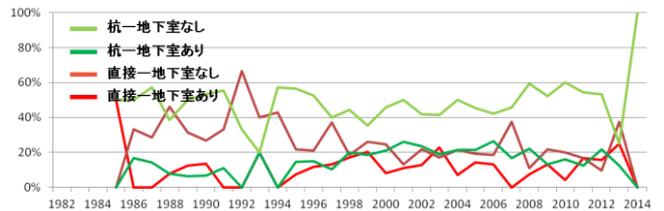


図8 中低層免震建物各基礎形式の割合の推移

## 3) 免震建物設計面と研究面の関係について

1995年以前、免震建物が周期2~3秒の小規模なものであり、実際に地震観測を実施した免震建物は少ない。この時期で発表された論文は免震構法の開発や免震建物基本性能の実験に関する研究の論文が大半である。

1995年から2000年前後まで、免震建物がやや大規模になり、免震周期も3~4秒になっている。この時期の免震建物の研究は、免震建物の地震応答や振動特性に関する論文が多く、解析による地震応答評価に関する論文も現われた。

2000年から2011年まで、超高層免震建物の出現に伴って、引抜力の問題を検討するなど上下振動に関する論文を加えて、超高層免震建物に関する論文が現われた。また、新しい免震構法の出現に伴って、これらの開発や評価手法に関する論文もこの時期に見られた。

2011年前後から現在まで、東北地方太平洋沖地震を経験し、南海トラフ巨大地震に向けて、免震建物の構造上の各要素(規模、免震部材の使用など)が安全側になる傾向がある。研究面では、主要な免震部材の性能の再検討や新しい免震部材・免震システムの開発のための解析的な検討に関する論文が多くなった。



## 5. 同敷地内に立地する構造が異なる免震建物の振動性状

特殊な免震構造が免震建物地震時の振動特性に与える影響を明確にするために、同敷地内に立地し、一般的な免震構造を有する名古屋大学医学部附属病院中央診療棟の振動特性を外来診療棟の振動特性と比較する。

中央診療棟は地上7階建・地下2階建の中間階免震建物であり、基礎形式は杭基礎である。また、免震層にCLBを配置せず、上部建物にロングスパン構造も採用していないため、前述した免震建物の現状によって、一般的な免震構造である。観測体制は外来診療棟と同じ目的で、基礎上部、1階、最上階の中央部と端部及び地表面に加速度計を配置した。表1で示した地震記録と同時に観測された建物の応答記録を用いて以下の比較を行った。ただし、当該敷地で観測された最も大きな記録の2012年5月5日愛知県西部地震の記録のみを示す。

### 1) 揺れ振動

免震層での揺れと上部建物での揺れと比べて、図15に示したように、外来診療棟が免震層での揺れの方が大きいのにに対して、中央診療棟の揺れ振動が上部建物で大きく増幅している。

### 2) ロッキング振動

図16のロッキング成分の加速度フーリエスペクトルから、中央診療棟のロッキング成分が幾つか卓越しているが、外来診療棟と同様に、ロッキングしていることは考えにくい。

### 3) 水平方向有効入力

図17で示した水平2方向の有効入力から、根入れが深い杭基礎の中央診療棟の方が、入力損失効果が顕著であり、上部建物の揺れの影響も小さい。

### 4) 免震層での上下振動増幅率

図18で示した両建物免震層の中央部と端部における上下振動の増幅率のように、外来診療棟中央部のCLBにおける上下振動の増幅率が端部の鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)における増幅率より小さい。これに対して、中央診療棟の中央部と端部における天然系積層ゴム支承(NRB)とLRBの上下振動増幅率が同程度である。

### 5) 上下方向有効入力

図19で示した両建物中央部と端部における上下方向有効入力のように、水平方向と同様に、両建物中央部における上下方向基礎入力に対して中央診療棟の方が入力損失効果が顕著である。また、中央診療棟の中央部と端部の基礎入力動が同程度であることから、外来診療棟の未改良地盤における端部の基礎入力動と中央部の基礎入力動との違いが明瞭である。

## 6. 結論

本論では、構築された国内免震データベースを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震発生がして以来の構造設計における免震建物の特徴の変化に着目して、国内の免震建物の現状を分析した。また、同敷地内に立地する2棟の免震建物の同時観測された地震観測記録に基づいて、一般的な構造と比較的特殊な構造を有する免震建物の水平・上下方向の振動性状の違いを明らかにした。今後の大地震に向けて、このような振動特性の違いが免震建物に与える影響について検討する

予定である。

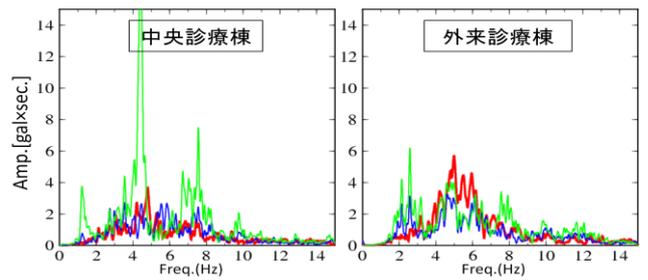


図15 建物長辺方向揺れ加速度フーリエスペクトル (bm、01、TOP)

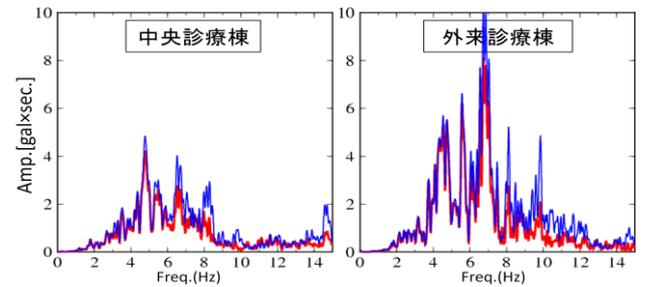


図16 建物短辺方向ロッキング加速度フーリエスペクトル (bm、01)

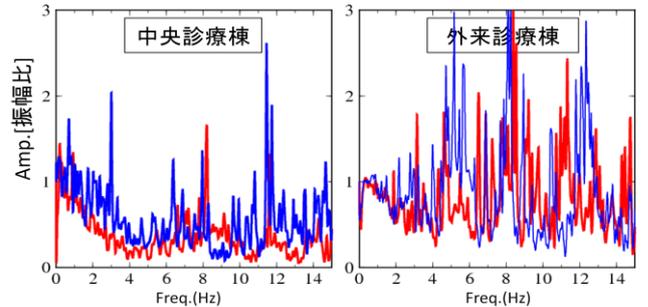


図17 水平2方向の地表に対する基礎上部の伝達関数 (EW、NS)

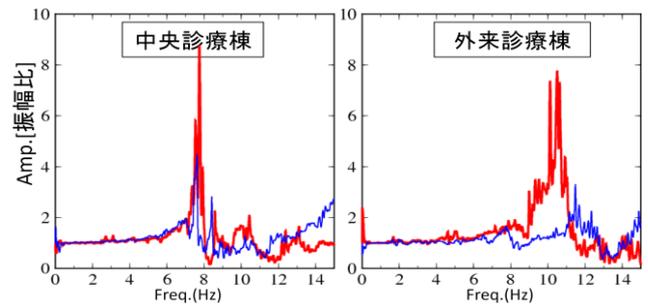


図18 免震層中央部と端部における上下振動の増幅率 (端部、中央部)

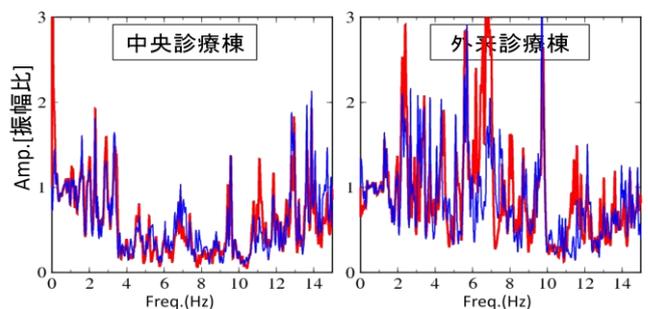


図19 上下方向における地表に対する基礎中央部と端部の伝達関数 (端部、中央部)