

免震建物のデータベースと観測記録に基づく免震性能の現状分析

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 飛田研究室 田中佑治

1. 序論

1982年に初めて評定を受けた免震建物は、その後1995年の兵庫県南部地震を契機とした耐震性への関心の高まりと、2000年の建設省告示第2009号「免震建築物の構造方法に関する安全に必要な技術的基準を定める件」の施行により普及が進んだ(図1)。また、2000年以降、住宅メーカーが一般認定取得することで、住宅1棟毎の評定が不要となり、免震住宅が急激に普及した。現在では住宅メーカー1社だけでも約4000棟の免震住宅を建築するなど、社会に広く普及しつつある。

一方で、2000年以前のように全ての免震建物がビルディングレターで公開された期間と比べて、2000年以降は複数の評価機関での性能評価の開始、さらに告示免震建物の増加などにより、国内の免震建物の全数を把握することは困難になってきている。これまで、免震構造協会などが調査した結果や、公表資料をもとにした報告は行われているが、構造、用途、規模などの概略の傾向分析に留まっており、免震建物を取り巻く社会状況や地域特性、地震危険度や地盤状況などの情報も含めて現状を多面的に分析した例は少ない。加えて、免震建物の設計事例が増加するに従い、計画・構造設計に関する扱ひも多様となっている。特に免震建物の耐震性能を大きく左右する固有周期や設計入力地震動の設定、免震層のクリアランスなどの傾向、さらにそれらの地域、用途による違いや構造設計機関・評定機関による姿勢の差などを把握しておくことは、将来の地震災害における免震建物の状況を予測する上で重要である。

そうした中で2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した。各地で大きな地震動を記録したが、免震建物では大きな被害は報告されていない。しかし、震源から離れた地域で長周期地震動によると思われる非常に大きな応答変位が観測された。今後の発生が懸念されて

いる東海・東南海・南海地震などでも長周期地震動により同様の事態が発生する可能性がある。今回の地震による記録の分析は、免震建物の被害の軽減に繋がり、建物の安全性を高める上で非常に重要である。

以上のような背景を踏まえ、本論では国内の免震建物を可能な限り網羅し、基本的な建物諸元に加えて耐震性に関する項目も整理したデータベースを構築し、これを用いて国内の免震建物の全体的な状況や地震時の特性について明らかにする。加えて、実在する免震建物の観測記録の分析により免震建物の振動特性や、地震時に起こり得る現象について明らかにする。以上より、免震建物の地震時の状況について多面的に示すことを目的とする。

2. 国内免震建物のデータベースの概要

本論では、国内免震建物データベースを、以下の5点のデータを元に構築した。

- ①ビルディングレター掲載の性能評定・評価シート
- ②BGRC掲載の性能評定・評価シート
- ③MENSHIN掲載の国内の免震建物一覧表
- ④(社)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

上記の各資料は含まれる件数やデータ項目が異なっており、各項目の記載内容や表記(たとえば建物用途の分類や免震部材の名称など)も統一されていない。各資料は、以下の特徴を有している。①、②は個々の建物に関する最も詳細な資料で、必要とする項目をほぼ全て網羅しているが、印刷物のため一件ずつ電子データ化する必要がある。③は約1800件強を含み、ほぼ全ての項目が入力されている。ただし性能に関わる項目は含まれていない。④は約2500件の免震建物を含む電子データである。件名・所在地・用途・評定年などは8割以上が入力されているが、性能に関わる項目の記載があるのは全体の1/4~1/5程度にとどまる。⑤は国土交通省が告示以降に認定した全ての建物とその性能評価を行った機関が記載されている。免震建物だけでなく高層建物なども含まれており、リストから免震建物を区別することは困難である。

以上の資料から、本論ではデータベースを以下のように構築した。まず、最も項目が整っている③を元に、詳細な①、②と対応付けて各物件の詳細な項目を追加し、さらに⑤を用いて告示以降の評価機関の情報を加えた。また各項目の記載内容について表記を統一した。このデータベースを「詳細データ」と呼ぶ。免震性能に関わる項目が比較的揃っており、クリアランスなどのデータを含む物件は1855件となる。これらは、いずれも評定を受けた物件であり、告示免震は含まれていない。またデータの公開が遅れる傾向にあり、最近の2010年、2011年のデータは件数が少ないことを分析において注意する必

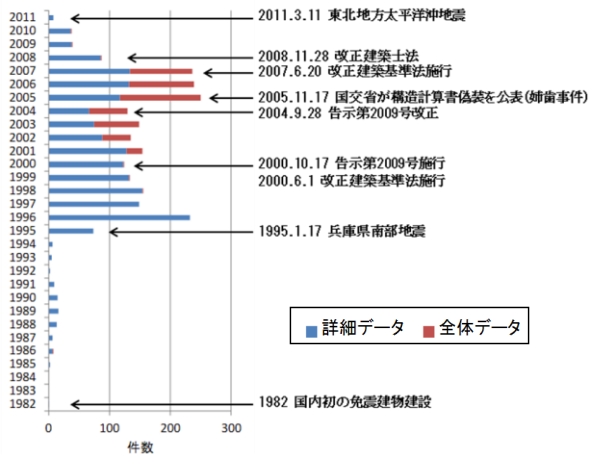


図1 免震建物の件数の推移

要がある。さらに、詳細な建築場所を特定できた物件については緯度・経度データも入力しており、GIS や Google Earth などを用いて、特定の建物の概要や建物分布などを表示・分析できる環境を整えている。これにより、地震動、地盤あるいは都市、社会などの地理情報と合わせて傾向を分析することを可能とした。最後に、④は、記載件数は多いものの項目の記載にばらつきがあるため、件名・建築場所・認定年が記載されている 2223 件を用いて、3 章の建物概要に関する分析に使用した。これを本論では「全体データ」と呼ぶ。

3. 国内免震建物の現状分析

3.1 免震建物の建物概要に関する分析

3.1.1 件数の推移

図 1 から、初めて免震建物が認定された 1982 年から 1994 年までは、毎年数件～10 数件で増加は見られなかったが、兵庫県南部地震の影響で 1995 年から 1996 年にかけて急増していることが分かる。その後やや件数を減らして横ばい状態となるが、2005 年以降は再び件数が増えている。なお、全体データと詳細データの差が、特に最近多くなっていることが分かる。

3.1.2 建設地の分布

免震建物数の全国割合を超高層建物、人口、県民総生産の全国割合と比較して図 2 に示す。免震建物の分布は主に 3 大都市圏に集中し、県内総生産に類似した傾向を示していることから、地域の経済活動に関連していると言える。宮城県、東京都、静岡県は免震建物の割合が大きく、宮城県沖地震や東海地震に対する意識の高さが関係していると考えられる。

3.1.3 建物用途

免震建物の用途で、最も多いのが共同住宅で全体の半数弱、次いで事務所となるが、共同住宅の数は事務所の 3 倍に及ぶ。それに続いて病院、庁舎など災害拠点となる建物の数が多く、地震に対する意識が強いことが分かる。以上 4 用途で全体の約 8 割に及ぶ。また、免震建物における特徴的な用途としては上位に位置する病院、研究所、電算センターなどが挙げられる。

3.1.4 建物規模

免震建物の軒高は増加傾向にあり、90 年代後半から 60m を越え始め、近年では 100m を越える免震建物も多い。軒高が 60m を越える建物のほとんどは共同住宅と事務所である。延床面積、建築面積の推移も軒高と同様に増加傾向にある。

3.1.5 免震層位置

免震建物は免震層位置によって大きく基礎免震と中間階免震の 2 つに分類されるが、国内の多くは基礎免震であり、中間階免震は 2 割ほどである。中間階免震は 2000 年頃まで増加傾向にあったが近年は横ばい状態である。

3.2 免震建物の基本性能に関する分析

3.2.1 免震部材

アイソレータは 90 年代後半、高減衰積造ゴムが多く使

用されたが、近年は天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、転がり支承が多く使用されている。ダンパーは 90 年代、鋼材ダンパーと鉛ダンパーが多くを占めていたが、近年はオイルダンパーの使用が多い。

3.2.2 評価機関

2000 年以降の主要評価機関の割合の推移を図 3 に示す。日本建築センターが占める割合は 2000 年以降少なくなっており、近年の評価機関の多様化の様子が分かる。

3.2.3 採用地震動

サイト波 (レベル 2) の採用状況の推移を図 4 に示す。首都圏、中京圏における推移の様子は、全国のそれと比較的類似しているが、近畿圏のそれは全体的に割合が少なく他の地域と大きく異なった傾向が見られる。

3.2.4 クリアランス

用途別のクリアランスの割合の推移を図 5 に示す。共同住宅、事務所に比べ病院、庁舎のクリアランスは大きいことが分かる。病院、庁舎では、90 年代後半から 60cm 以上が 6 割程度を占め、以前から比較的大きめに確保さ

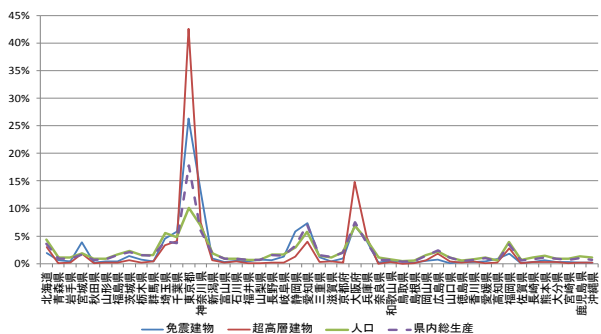


図 2 免震建物と超高層建物、人口、県民総生産の分布

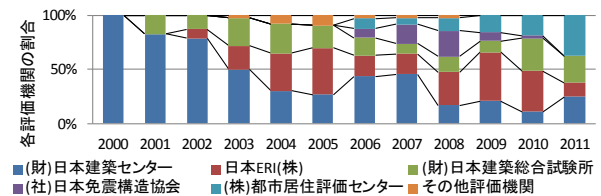


図 3 2000 年以降の評価機関の推移

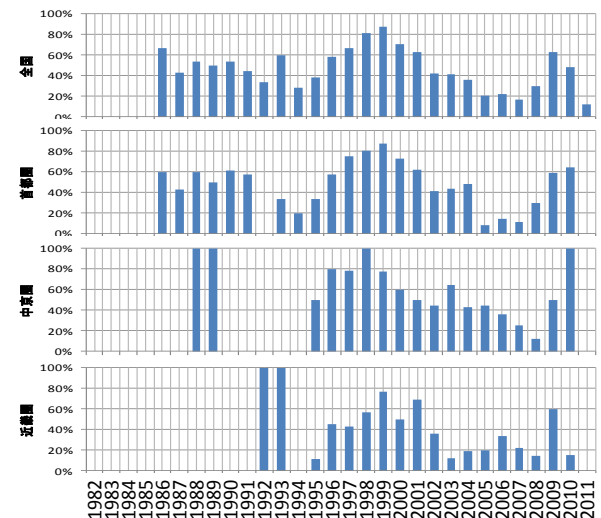


図 4 地域別のサイト波 (L2) の採用状況の推移

れていた。一方、共同住宅や事務所では、90年代後半ではクリアランスが60cm未満の物件が大多数を占め、50cm未満の物件も多かった。全体の傾向としては、近年クリアランスを大きく確保する傾向にあると言える。

次に各構造設計機関別の建物用途割合とクリアランスの状況を図6に示す。構造設計機関によって建物用途の割合に特徴がみられる。A社は用途のほぼ全てが共同住

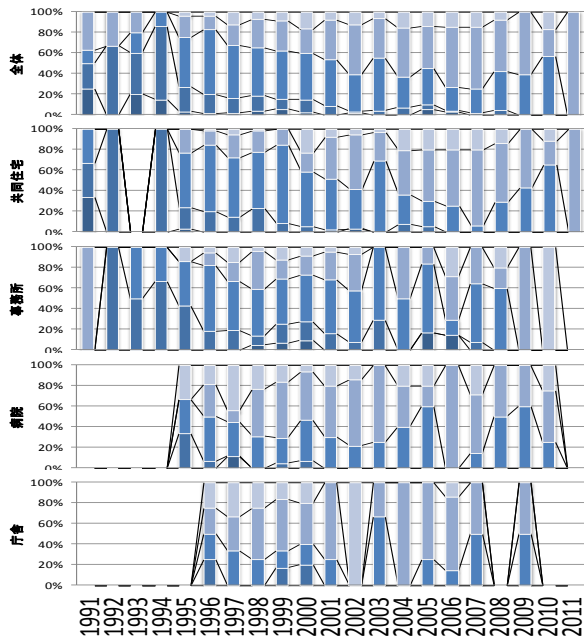


図5 用途別のクリアランスの割合の推移

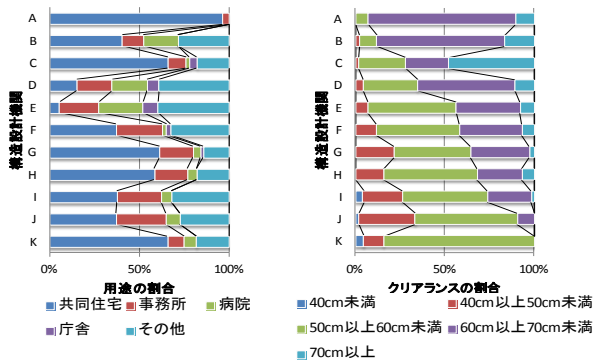


図6 構造設計機関別の用途とクリアランスの比較

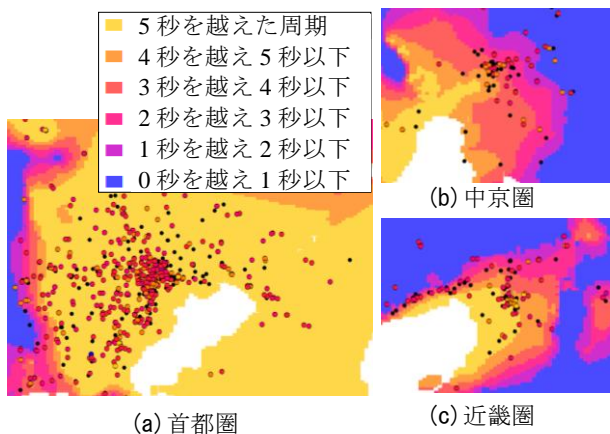


図7 深部地盤の卓越周期と免震建物の固有周期の分布

宅であり、D社、E社は他と比べ事務所の割合が非常に少ない。A社以外の構造設計機関をみると60cm以上の大きめのクリアランスを確保する傾向のある機関は、病院や庁舎の設計を多く手掛けていることが分かり、用途の影響を強く受けていると言える。

3.2.5 一次固有周期

免震建物のレベル2地震動に対する一次固有周期は、その半数が3~4秒で、9割以上の建物が2秒以上5秒未満となっている。図7に深部地盤の卓越周期分布と免震建物の分布を重ねた図を示す。中京圏、関西圏で免震建物の一次固有周期が地盤の卓越周期に近接している建物が多いことが分かる。首都圏ではそのような傾向はみられない。これは首都圏の地震基盤は深く、免震建物の一次固有周期より地盤の卓越周期がはるかに長いためである。しかし、表層地盤の増幅や深部地盤の2次の卓越周期の影響を受ける可能性に注意する必要がある。

4. 被害地震における免震建物の応答・被害

4.1 東北地方太平洋沖地震での応答・被害

本節では、過去に発生した地震における免震建物の応答や被害に関して述べる。東北地方太平洋沖地震では、被災地の多くの免震建物で20cm以上の応答変位が生じた。特に応答変位が大きかった建物では40cmの応答も確認されているものの、構造躯体の損傷は確認されていない。しかし、近隣の非免震建物では構造躯体の損傷が生じるなど非常に大きな被害が生じた。室内被害に関しても、多くの免震建物では家具転倒などは生じおらず、いずれの建物においても免震性能を発揮したと言える。しかし一方で、鉛ダンパーにおけるひび割れの発生や、多くの建物でエキスパンションジョイントが損傷するなどこれまで把握することのできなかった応答や被害が明らかになった。

4.2 観測記録に基づく免震建物の応答予測

本節では作成したデータベースと東北地方太平洋沖地震における観測波形を使用して免震建物の応答予測を行った。データベースの緯度経度や一次固有周期の情報を使用することで、より実際に近いと考えられる応答の分布地図(図8)を作成した。全体として応答変位は少し大きめに出ているものの、被害調査の結果と比較的類似した分布傾向となっていると考えられる。

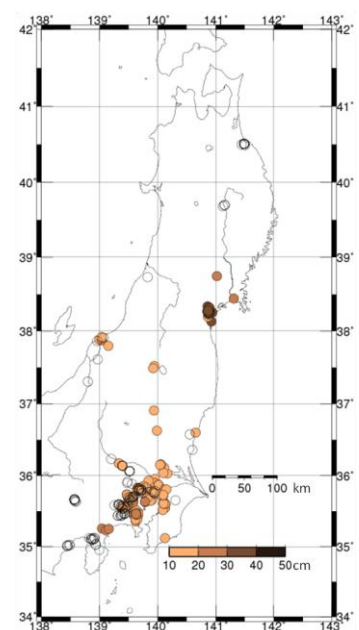


図8 応答変位予測地図

4.3 実在免震建物の観測

地震における免震建物の応答や被害に関しては、未知な部分が非常に多い。そういった建物の複雑な応答を明らかにするために、これまで実在免震建物の長期的な観測を行ってきた。本論では特に岐阜市民病院について分析を行った。岐阜市民病院は、用地不足や病床の確保のため、非常に特殊な工程の建替計画が実施され、建設途中に制振構造から免震構造へ変化する建物である。この節では常時微動計測の記録や、地震観測記録の分析を行うことで、複雑な建物の振動特性の一部を明らかにした。

5. 東北地方太平洋沖地震における免震住宅の応答

東北太平洋沖地震によって震源域から 300km 以上離れた神奈川県南西部で局所的に非常に大きな応答変位が生じた現象を、足柄平野内に建築されていた約 80 棟の免震住宅の敷地内及び K-NET などの地震観測地点付近で実施した常時微動計測を元に分析し、検討した。

5.1 足柄平野の地盤特性

足柄平野は相模トラフの延長域に位置し、沈降するトラフが丹沢山地からの砕屑物で埋められ形成された扇状地性沖積平野である。その大きさは長さ約 12km、幅約 4km で、東は大磯丘陵、北は足柄山地、西は箱根火山に接し、北と東の縁には国府津—松田断層が存在する。大磯大丘陵はその隆起側、足柄平野はその低下側に形成された。足柄平野はその 8 割程度を扇状地で、南東部には鴨宮段丘、千代台地などの低平な段丘が存在している。また、表層地盤は、北部や西部では浅く、南部に行くほど深いとされている。

5.2 足柄平野での観測記録

最大応答変位の分布を図 8 に示す。多くの点での応答変位は 50mm 以下であるが、平野中央部の西寄りでは局所的に 350mm 以上の応答変位が生じている。平野全体で応答の方向性も認められており、足柄平野と震源域を結ぶ方向に大きく応答したことが分かっている。

5.3 常時微動計測概要

2011/9/20~9/23 の 4 日間、3 チーム 12 人態勢で計測を実施した。計測地点は罫書き記録取得地点とその周辺の数

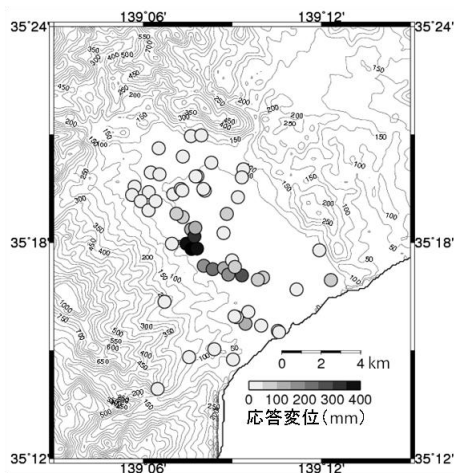


図 8 足柄平野での最大応答変位の分布

点、さらに K-NET など強震観測点周辺を加えた 76 地点である。収録時間は、30 分間を基本とした。

5.4 分析結果

常時微動記録からノイズが大きい区間を除き各計測地点の H/V スペクトルを計算した。対象建物の固有周期が 3 秒程度であることからやや長周期側の震動特性について議論するため、観測データを 163.84 秒のサンプルに分割し、それらをアンサンブル平均し算定した。なお、スペクトル形状を整え見やすくするため、0.05Hz のパーティンウィンドウで平滑化を行った。スペクトルの形状の分布及びピーク周期の分布を図 9 に示す。形状 A は 1 秒付近から短周期側にスペクトルの大きなピークがある。形状 B は緩やかな山形で 2 秒から 3 秒付近にピークを持ち、形状 C は明瞭なピークが見られない。図 9 から、足柄平野南東部は 1 秒付近、北部、南西部山間部は 0.5 秒以下、中央部西は 2 秒から 3 秒となっている。図 9 を図 8 と比較すると、形状 A の地点の多くは応答変位が 100mm 未満となっており、形状 B の地点では、半数の地点で 300mm を越える大きな応答変位となっていることが分かる。これから、相対的ではあるが、ピーク周期が 1 秒以下の地点よりもピーク周期が 2 秒から 3 秒付近である地点で変位応答が大きくなる傾向が認められた。免震住宅の多くは固有周期が 3 秒付近であることから、今回の現象は、建物と地盤の共振によるものと推測される。しかし、足柄平野はその成り立ちから非常に複雑な地下構造であると考えられ、今回の結果により現象の解明に至ったとは考えにくく、今後も更なる検討が必要である。

6. 結論

本論では、独自のデータベースから免震建物を取り巻く様々な事象と免震建物との関係性を把握し、観測記録から免震建物の地震時応答や現象、振動特性について明らかにした。さらに、データベースと観測記録を組み合わせることで応答予測を行うなど、非常に多面的な分析を行うことで、これまで把握されることのなかった国内における免震建物の現状の一端を明らかにすることができたと考える。

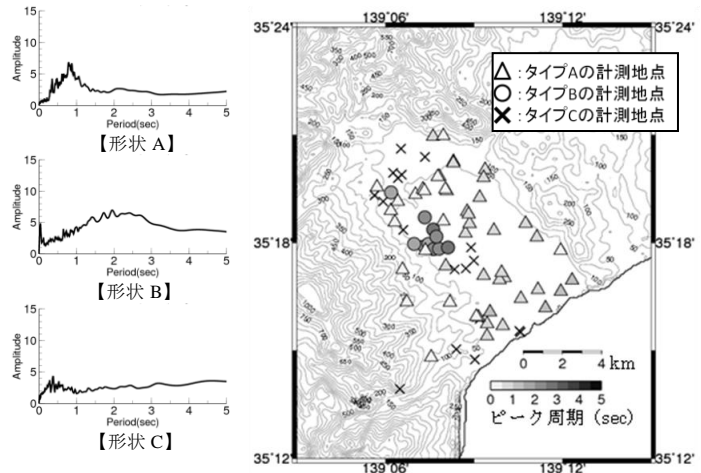


図 9 足柄平野における H/V スペクトルの形状分類及び分布