

免震の実用化

ついこのあいだのこととを感じるが、当時福岡大学教授であった多田英之先生が免震構造の研究開発を始められたとき、“地盤から建物を絶縁するんや”と説明され、従来の建築構造と全く異なる構法に驚いた記憶がある。それ以来、免震構造の研究開発にかかわり、30年が経過した。最初は積層ゴムの開発でさまざまな形状の試験体を試験しては特性を評価した。そして1981年に実用化に耐えうる積層ゴムの製品ができた。ただ、直径は30cmであった。その積層ゴムを使った2階建ての免震住宅(八千代台住宅)ができあがり、さまざまな振動実験をしたのが1983年だった。当時は積層ゴムへの信頼性、地盤の液状化、やや長周期地震動に対する共振応答、高層化への限界、リダンダンシー不足などが指摘されていた。これらの課題を克服してきた結果が今の免震技術の到達点といえる。

当初、免震構造は旧建築基準法第38条に基づいて日本建築センターに設けられた委員会で評定をうける必要があった。評定委員会の場では、設計用地震動の設定から免震部材の特性まで、回答が難しい質疑を受けることもあった。免震構造というそれまでなかった新しい構造形式が実現できたのは、旧38条があったからだと思う。しかし、2000年に建築基準法は性能規定化をめざして大改定された。旧38条もなくなり、免震部材は「免震材料」という変な名称がつけられ、大臣認定を取得することが求められた。それから10年以上が経過し、免震部材の大臣認定もすっかり馴染んでいるようだ。大臣認定を取得し各種の免震部材の特性値が規格化されることは、ある意味便利ではあるし、下手な使い方をされないような抑止力(?)になっているかもしれないが、積層ゴムやダンパーの壊れ方を知らない方も増えたように感じる。免震構造にとって最も重要なアイソレータやダンパーが、どのように変形し、どれくらいエネルギーを吸収できるのか、是非その目で確認していただくことが重要であると感じている。

免震建物の地震時性能

八千代台住宅の後、免震構造はなかなか増えなかったものの、1995年の兵庫県南部地震を契機に、免震構造の適用例が急激に増えていった。現在では3000棟くらいの免震建物が建てられてきている(戸建て免震住宅を除く)。これはもちろん世界一の棟数である。免震構造の地震観測記録は、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震、そして2011年東北地方太平洋沖地震などで得られている。これらの地震観測記録をまとめたのが図1である。図の横軸は免震層の基礎部で観測された最大加速度、縦軸は基礎部の最大加速度に対する上部構造の最大加速度の比率を示す。黒いマークが東北地方太平洋沖地震での記録^{1)~5)}で、他はその他の地震記録によるものである。この図から、基礎部の加速度が大きくなるほど免震効果が発揮され、最大で入力加速度の1/3~1/4程度まで低減できていることがわかる。

東北地方太平洋沖地震においても免震構造は十分な性能を発揮した。図2に防災科学技術研究所の強震観測網(K-net, Kik-net)で得られた地震記録を用いて解析した免震建物の最大応答変位を示す。解析では1自由度系モデルを用い、免震層はバイリニア型とした。降伏荷重は建物総重量の3%、降伏変位は1cm、降伏後剛性(2次剛性)に基づく周期を1秒~10秒まで変化させて解析を行っている。多くの応答変位は20cm~30cm程度以下であるものの、いくつかの観測記録で

は40cmを超えるものもある。特にIBRH07（江戸崎）では周期3秒付近で大きな応答となっている。このような応答となる要因については観測地点の状況など詳細な検証が必要である。

一方で、履歴系ダンパーの塑性化（損傷）やエキスパンションジョイントの不具合なども一部報告されている⁶⁾⁷⁾。履歴系ダンパーは部材を塑性化させることで地震エネルギーを吸収する。そのため大きな地震を何度かうけると当初の性能を十分に発揮できなくなり、交換することも必要となる。文献8)では宮城県にある免震建物（図2のMYG006古川の観測点の近くに建つ建物）で実際に鉛ダンパーが交換されたことが紹介されている。回収された鉛ダンパーは数度の大きな地震を経験し、形状の変化も見られた。東北地方太平洋沖地震の本震時には30cm以上の最大変形をうけたものと推定される。回収した鉛ダンパーの残存性能の確認試験を本学で実施した結果、降伏耐力はほぼ初期値と同等であり、エネルギー吸収能力もまだまだ残されていることが確認された。履歴系ダンパーの残存性能を評価するためには、免震建物の地震時応答を推定することが必要となる。地震計が設置されていることが望ましいが、少なくとも免震層に「けがき式変位計」を設置すべきであろう。免震クリアランス部分のエキスパンションジョイントについては、意匠性だけでなく地震時の3次元挙動を十分考慮して、可動性を確認することが求められる。また、免震構造の津波に対する挙動もこれからの大きなテーマといえる。

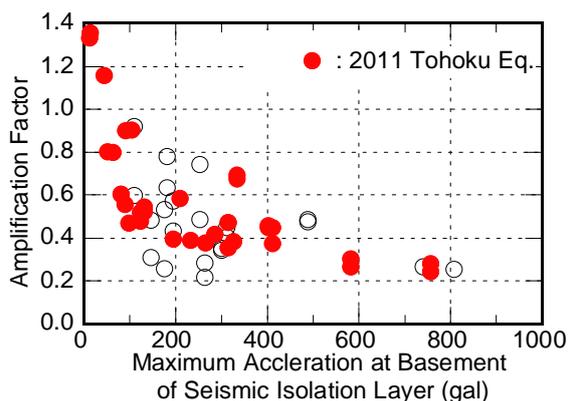


図1 地震観測記録による免震効果

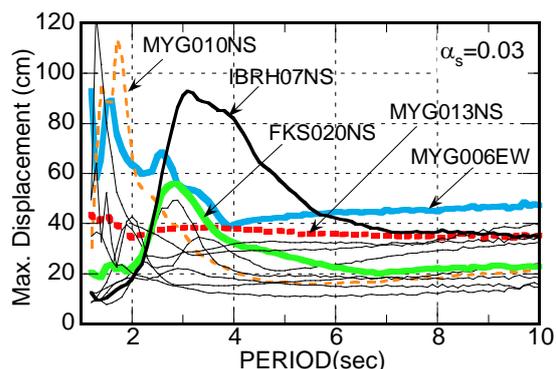


図2 免震建物の最大応答変位

今後の巨大地震に備えて

東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9という巨大地震であったが多くの被害は津波によるもので、地震による建物の被害は相対的に少なかった⁹⁾。今後想定されている東海・東南海・南海地震の連動型地震（最近では日向灘沖も入れた4連動？）では、より長周期成分が卓越した地震動になるともいわれている。また、海溝型地震だけでなく断層近傍で発生する強震動（指向性パルス）などに対する免震建物の設計も課題である。これらの地震動は建築基準法で示される地震動レベルよりも大きな応答をもたらすため、設計クライテリアの設定には十分留意する必要がある。免震構造の限界状態は、積層ゴムなどのアイソレータの変形限界（破断）による免震効果の喪失、擁壁などへの衝突による上部構造の塑性化・損傷などが考えられる。こういう状態を”想定外”としないためにも、免震層の変形能力や上部構造の耐力においてある程度の余裕が求められる。あわせて建築主への十分な説明と納得を得ることが必要である。

地震フリー建物

日本学術会議から『理学・工学分野における科学・夢ロードマップ』（2011年8月）が発表された¹⁰⁾。理工学分野の約70の学協会が参加する連絡協議会で作成されたもので、土木工学・建築分野では耐震技術の向上に取り組むことで2050年までに「地震フリー建物」を実現する構想が盛り込まれている。示されたロードマップによれば2020年ごろに高性能免震・制震技術の開発が掲げられ、大地震動で構造部材は無損傷、復旧期間は数日となっている。そして2050年には超免震ハードシステムの開発、省エネ型アクティブ制震システムの開発が掲げられ、大地震動で全て無損傷・機能継続をめざすとなっている。免震・制震技術への期待が表れている。

このロードマップがどういう根拠で示されたものか、残念ながら報告書の中に説明はない。しかし、日本学術会議の提案する「夢」を夢で終わらせないためにも、免震・制震技術をより高度化していくことが必要である。そのためには、現状の技術レベルに満足することなく、より高いレベルを求める姿勢が欠かせない。「夢」を語るところから、新しい発想と技術の展開が生まれる。これまでの地震応答で得られた教訓を踏まえて、免震技術のさらなる発展、そして地震フリー建物の実現をめざしていきたい。

謝辞

本論で示した免震構造の応答解析には防災科学技術研究所の強震観測網（K-net, Kik-net）で得られた地震動を使わせて頂きました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 建築研究所の強震観測 <http://smo.kenken.go.jp/ja/smreport/201103111446>
- 2) 加藤ほか：2011年東北地方太平洋沖地震による水戸市に建つ高層免震建物の地震観測記録、日本建築学会学術講演梗概集、2011.8
- 3) 猿田ほか：2011年東北地方太平洋沖地震における免震建物の応答、日本建築学会学術講演梗概集、2011.8
- 4) 會田ほか：3次元免震建物の開発（その17）観測記録における建物の応答、日本建築学会学術講演梗概集、2011.8
- 5) 日本地震工学会「東京電力(株)：福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所において観測された2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の本震記録」の免震重要棟での観測記録
- 6) 日本免震構造協会：第14回免震フォーラム「東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査（中間報告）」、2011.9.1
- 7) 国総研・建研「宮城県、山形県における免震建築物の状況（速報）」
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/pdf/20110311saigai-013.pdf>
- 8) 日経アーキテクチュア（2011.7.10）の特集「免震の真価」
- 9) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、2011.7
- 10) 日本学術会議 <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-h132.html>