

講演名：熊本地震での建物被害および免震建物の挙動

講演目次：(1)建築物の被害状況

(2)免震構造の地震時挙動

(1)建築物の被害状況

熊本地震(以下本地震)による耐震建物の被害と、免震建物の地震時挙動について調査した結果を報告する。4月14日に益城町付近を震源としたマグニチュード6.5の地震が、その28時間後4月16日にはマグニチュード7.5の地震が発生し、地表には断層のき裂が現れた。この断層のき裂は布田川断層帯に沿った所で発生しており、本震といわれている4月16日の地震でこの布田川断層帯が動いたことになる。

本地震についてK-NETの観測点で、減衰を5%から30%与えて数水準の計算を実施、比較し、加速度応答スペクトルを分析すると短周期領域が大きいことが確認された(資料 p.1_中段右側参照)。この断層より西側にある所は短周期領域が卓越しているということになり、東側へ行くにしたがって緩やかに長周期成分が卓越している。阿蘇付近になると短周期成分が落ち、逆に3秒周期付近にピークが出るようなものが含まれており、長周期成分が出てきていることが分かった。今回紹介したスペクトルは全てEW方向であり、断層にはほぼ平行している成分となる。1995年の兵庫県南部地震では断層直交成分NS方向が卓越していた。すなわち、これまで断層帯で地震が発生した場合、断層直交成分が卓越することが一般的と考えられていたが、今回の地震では断層平行成分が卓越していたことになる。

震源となった益城町等の被害状況を報告する(資料 p.1_下段左側～p.1_下段左側参照)。日本建築学会等で調査をした結果によると東西方向に倒れている建物が多数だったことが確認された。益城町・木山地区など、いろいろな地域でたくさんの建物の被害が見られた。今回は2回の大きな地震が発生しており、前震・4月14日では被害がなかった建物も、本震・4月16日を受け、倒壊した事例も多く確認された。

益城町の寺院では前震ではほとんど被害がなかった建物が本震で完全に潰れていることが確認された(資料 p.2_上段左側参照)。こういった事例は多く、比較的新しい木造住宅においても前震では無被害でも、本震で倒壊したというもの確認された。

また、旧耐震のみならず新耐震以降の住宅でも同様の被害が見られたことは問題であると考えている。本地震では、木造の基準が少し改定された2000年以降の建物でも倒壊した住宅が数棟あり、本来の建築基準法の目的、倒壊をさせないということからすると、課題が残ることになり、この点に関しては木造の研究者の方々が色々な調査等を実施し、倒壊要因について分析がなされていると考えている。

鉄骨構造(店舗と兼用している住宅)でも同様に前震ではほとんど被害がなかったが、本震で潰れた建物(資料 p.1_下段右側参照)、鉄骨構造(共同住宅)でも前震は何とか耐えたが、本震で倒れ、隣に寄りかかってしまったような事例も確認された(資料 p.3_上段右側参照)。これら鉄骨の詳細を確認すると溶接部の破断などが見られるものもあり、設計なり施工に課題があったと考えられるものも確認された。

RCの住宅でも被害があり、地上3階建ての建物で1層が倒壊している事例が確認された(資料 p.3_中段右側参照)。

また、益城町の学校(地上2階または3階建て)でも被害があり、1階の柱脚、柱頭の破壊が確認さ

れた。同じく益城町役場でも被害が確認された。「小破」とされており、建物外観上はほとんど被害が見られなかったが、地盤や、杭が損傷していたため、建物は使用できなくなった(資料 p.3_下段右側参照)。災害時に防災拠点となるような施設が使えることはその後の災害対応や復旧等に不都合が生じたと考えている。現在、益城町役場は同じ場所に免震建物として再建されており、本年 5 月 8 日から新役場が稼働している。その隣には益城町の復興まちづくりセンターが完成(耐震構造)し、熊本地震の被害、対応状況などが展示されている(資料 p.4_上段左側参照)。現在、益城町の町中は新しい住宅が建ち始めている場所もあるが、まだまだ更地の場所もある状況である。

日本建築学会では本地震後、益城町の建物の悉皆調査を実施した(資料 p.4_上段右側参照)。2016 年 5 月 3 日から 8 日まで延べ 200 人以上で約 2,600 棟の全建物を調査した。赤い点が被害の大きい建物で大破、倒壊を示している。青い点は無被害、緑の点は小破を示している。県道沿いに集中しているが、その要因は不明となっている。また、悉皆調査のうち、木造建物のみを抽出した被害率の割合を調査した(資料 p.4_中段左側参照)。一番右側の棒グラフは建設年代を問わず木造建物全数の調査結果を示す。この棒グラフから 4 割ぐらいの木造建物は無被害だが、それ以外は何らかの被害が出ていることが確認された。また、年代別に見ると、年代が上がるに従って無被害の割合が増えていることが確認された。ただし、81 年以降の新耐震だからといって完璧ではないことも本調査から確認できた。前述の被害の原因について名古屋大学の先生方によると「断層のずれ」が一因といわれている。また、益城町にも断層のずれ・地盤のずれがあったのではないかとされており、後の国交省の調査の結果、確かに益城町の下には活断層らしき物があるという結果が得られている。また、前述の通り益城町がベッドタウンとして発展してきたのは県道沿いからであり、この発展開始は 1929 年時であるため、県道沿いには古い建物が多かったことが被害地域が集中している要因ではないかとも推測される。

震災から 7 年が経過するが、益城町は未だ復興途上である。地震が発生すると応急危険度判定が行われるが、「調査済」と貼付した建物でも安全を保証するものではない。前震で「調査済」と貼付した建物に住民の方が戻ってきて本震で潰れてしまうということも発生しうるかもしれない。よって、この応急危険度判定をどう定義するかも今後の課題のひとつと考える。

今回の益城町の悉皆調査から、建築基準法のレベルを超えるような大きな揺れがあったということは間違いなかったと考える。また、2000 年以降に建設された建物の半数以上は無被害だったが、倒壊した建物もあった。すなわち、複数回の強振動を受けることをどこまで想定し、設計に反映していくかも課題のひとつと考える。

南阿蘇村でも大学生 3 人が亡くなる被害が確認された。建物は 2 階建てのアパートであった(資料 p.5_上段、中段参照)。資料の写真の通り地面にき裂が走っており、そのき裂の先にあった建物が大きな被害を受けている。東海大学で被害を受けた校舎は震災遺構として保存されている。また、この敷地のすぐ近くには震災ミュージアムが建設中であり、今年(2023 年) 7 月オープン予定となっている。

熊本市内でも鉄骨構造の被害、古い建物の被害も確認された。資料の写真は 1 階ピロティ部分が完全に倒壊した事例である(資料 p.6_上段、右側参照)。

また、次の資料の写真では別のマンションの事例を示す(資料 p.6_中段、左側参照)。1 階が完全に潰れてしまった事例、柱がせん断破壊した事例が確認された。次の資料は本日見学コースにあった宇土

市役所であり、被害を受けたため免震構造として再建された(資料 p.6_中段、右側参照)。

RC造と木造の被害についてもまとめを報告する。RC構造物で倒壊、崩壊した建物の11棟は全て旧耐震であり、現行の耐震であれば大きな被害を受けた物はなかった。また、木造住宅で調査対象とした70棟のうち51棟では、接合部仕様が不十分だったために倒壊に至ったと推測される。

古い建物の耐震補強の推進についてまとめを報告する。古い建物の耐震性をどうやって改善していくか、耐震補強を進めていくかを考えていく必要がある。また、こういった大きな地震を受けても建物の被害を少なくする、あるいは町として災害に強い町にするためには免震構造とすることはひとつの手段であり、また基本的にはより高い耐震性を持つ建物とすることが必要と考える。

また、阿蘇神社という重要文化財の神社の楼門および拝殿が倒壊した。周りにある古い木造住宅等は全く無被害の中で、当該神社だけが倒壊したのは長周期な成分が卓越した波が発生したことが原因であると推定している。現在、当該神社は再建が進んでおり、ほぼ完成している。こういった重要文化財や熊本城のような著名な物は上述の通り復旧がなされるが、そうでないものは復旧が進んでいないのが実状であり、今後の課題のひとつ考える。

(2)免震構造の地震時挙動

免震構造物の地震時挙動についての話しをしていく。熊本県内での免震建物は熊本市内が一番多く、南部の矢代、北部の阿蘇にもあった。本地震時、熊本県内には施工中も含めて全体で23棟の免震建物があり、うち7棟は告示設計であった。用途別でみると共同住宅(マンション等)が一番多く、次に病院、その他と続く(資料 p.8_中段、左側参照)。建物階数ではマンション等が多いこともあり10階から15階建てが最も多かった。

次に幾つかの代表的な建物を紹介する。まずは阿蘇にあるA医療施設の事例を紹介する。病棟は4階建ての免震構造、外来棟は1階建ての耐震構造となっている。ここで使われているのは天然ゴム系積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムである(資料 p.9_上段、中段参照)。前述のK-NET観測点(一の宮)まで約3kmほどの距離である。当然ながらK-NETでは3秒周期にピークを持つような地震波が観測されており、変位応答スペクトルに当てはめると周期3秒、減衰20%でも約80cmの応答が出るような波が観測されている。本医療施設では両振幅で90cmの応答がけがき板上で確認された。片振幅で最大で46cmの変形、積層ゴムのせん断ひずみに換算すると約330%となる。地震後、積層ゴムには異常は観察されていないため、継続して使用している(資料 p.9_下段参照)。

本免震建物では、少し高い書棚などが倒れた、モニターが倒れたという程度で、建物としては被害が無く、医療行為はすぐに継続できている。阿蘇地区の多くの病院では被害を受けて、医療行為が継続できていない状況であったため、免震建物とした選択は良かったとの声を同医療施設の院長先生から頂いている。ただし、エキスパンションジョイントは被害を受けている(資料 p.10_上段参照)。

また、K-NET 一の宮で観測した波形と解析モデルでの応答波形がなかなか合わないという課題がある。得られた観測波形を使用して応答解析を実施すると1.5メートルほどの変形となることになり、得られた応答変形とは合わない。深い地盤構造の影響を受けているのではないか、地震波の長周期成分を削る目的でフィルターをかけてはどうか、NS成分、EW成分の位相を少しだけずらしてはどうか、などの試みによ

り観測された応答波形に近づけることはできたが、それ以上のことができなかつたため、今後の課題と考える。

熊本市内、K 大学病院の事例を紹介する。2 棟の免震建物がある(資料 p.11_上段、中段、下段参照)。診療棟には天然ゴムとループ状の鋼棒ダンパーが使われており、外来棟には鉛プラグ入り積層ゴムが使われている。けがき板の記録では最大で約 40 cm、積層ゴムのせん断ひずみに換算すると約 230%となる。病院内、研究室ではたくさんの研究用シャーレが積んであったが、そのシャーレも倒れなかったとの声を聴くことができた。ただし、ここでもエキスパンションジョイントが被害を受けている。設計者は本損傷部の構造を知らないとのことであるため、恐らく病院側が後付けしたものと考えられるが、できるだけエキスパンションジョイントの被害が出ないような対策も必要と考える。

次に独特のスキップフロアの B 事務所の事例を紹介する(資料 p.12_下段参照)。天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーが使われており、最大で両振幅で 72 センチとなる。ここでもエキスパンションジョイントの被害が出ていた。

次に熊本市内の F 宿泊施設の事例を紹介する(資料 p.13_上段参照)。オイルダンパーと高減衰積層ゴムが使われており、オイルダンパーの動き代で見ると、約 18 cm動いたことが分かっている。ゴム部に小さな膨らみが見られたが、特に目立つ損傷はなかった。ここでもエキスパンションジョイントを跨ぐように出入口が設置されており、損傷していた(資料 p.13_下段参照)。

次に熊本市内の北側にある配送センター(倉庫)の事例を紹介する。鉛プラグ入りと天然ゴムと弾性すべり支承が使われており、建物は被害なしだった。けがき板の記録があり、最大で約 32 cm動いた(資料 p.14_上段左側参照)。エキスパンションジョイントの被害はなかったが、耐震建物と免震建物の接合部には被害があった。

次に山鹿市庁舎と医療センターの事例を紹介する。この山鹿市庁舎は本地震後すぐにホームページで「免震建物で被害がなく、変形は数十センチでした」という内容をアップしてくれた。全振幅で約 16 cmであった(資料 p.14_上段右側参照)。

次に熊本県内南側に位置する Y 共同住宅の事例を紹介する(資料 p.14_中段参照)。住宅の隣にホテルが建っており、ホテルは大きな被害を受けたため、宿泊客が全員、外に出される事態となった。この Y 共同住宅には高減衰と弾性すべりと鋼材ダンパーが使われている。ここでも本住宅の関係者の方々から「やはり免震構造はいい」というコメントを頂いた。

次に免震建物の加速度応答倍率のグラフを示す(資料 p.14_下段右側参照)。横軸が免震層の基礎で観測された加速度の最大値を、縦軸は建物内で観測された最大加速度を基礎の加速度で割った倍率としている。1 を下回っているものは、上部構造の加速度が免震層の基礎よりも小さいということになり、免震効果が表れているということになる。黒い丸が 95 年の神戸の地震を示し、約 300 ガルの入力に対して応答倍率は約 1/3 に低減されている。緑の丸が新潟の地震を示し、約 800 ガルの入力に対して応答倍率は約 1/4 に低減している。水色の丸が 2005 年の福岡県西方沖地震を示し、約半分程度には加速度は低減されている。

白い丸と赤いダイヤは東北沖地震を示す。応答倍率が 1 を下回り、しっかりと免震効果が表れている建物がある一方、特に加速度が小さいエリアでは増幅していることが分かる。すなわち、設計で想定して

いる地震度よりも小さい入力に対しては、加速度は増えていることを示している。ただし、これで特に大きなクレーンが来ているとは聞いておらず、想定した地震度に対して一定の効果を発揮しているということが分かる。

今後は、これより大きな地震が来た場合、またはもっと設計レベルで小さな地震度に対しても効果を発揮するようなシステムの研究開発も必要になるかもしれない。ただし、現時点では、これまでの地震では免震構造がその効果を発揮してきていると言って良いかもしれない。

次に益城町の変位応答スペクトルを示す(資料 p.15_上段左側参照)。KIK-net 益城で観測された地震度を、益城町役場に設置された地震計、西原村役場に設置された地震計を使って、描いたそれぞれの地点の変位応答スペクトルとなる。黄色の部分約 3 秒から 6 秒の周期帯、すなわち免震構造の周期帯ということになる。減衰は 5%、10%、20%、30%と変えており、もしも益城町に免震建物があった場合、約 40 cm から 60 cm の変位応答と推定される。ただし、益城町役場に設置された地震計だと、60 センチを超えるような応答変形、西原村では 1 メートルを超えるような応答になる試算となる。西原村で観測された波形から長周期な速度応答が出ており、3 秒で最大速度が約二百数十 kine というレベルであった。そういった大きなパルス状の波形が出ており、それにより免震建物に前述の大きな変形が生じる試算となる。最近では長周期地震動に対する対策というものも考えられるようになったが、こういった長周期パルスに対する対応は、長周期地震動よりも難しい可能性があると考ええる。

長周期地震度というものは繰返しの地震動となるため、減衰の付与により一定の対応は可能だが、長周期パルスは一回の大きな波となるため、減衰の付与で良いということにはならないと考える。今後はこういったことに対して、どのように免震構造の設計をしていくかということは一つの課題と考えている。

最後にまとめを紹介する(資料 p.15_下段右側参照)。本地震において免震建物は十分にその効果を発揮し、免震建物使用者、管理者からは喜びの言葉を多く頂いた。ただし、免震エキスパンションジョイントには多くの損傷が見られたため、この点は今後も課題のひとつと考える。

また残念ながら、熊本市内には加速度計の設置がなく、またけがき式変位計の設置も病院と事務所のみであった。これらを多く設置し、如何に多くの地震の入力、応答の記録を蓄積していくかも今後の課題のひとつと考える。