

1. はじめに

本研究では、地震時における応急危険度判定の効率化を目指した「建築物の復旧支援システム」を継続して研究・開発している。これは地震発生後速やかに公共建築物、既存木造住宅等の被害推定を行い、その結果を web 上で発信し、応急危険度判定活動の迅速化・効率化を支援するシステムである。その被害推定手法には一次推定、二次推定の二段階があり、一次推定は地震発生後すぐにデータが得られる計測震度より被害率関数を用いて被害推定を行う手法である。一方、二次推定は地震発生後数時間経過した後に公開される加速度波形を用いて応答スペクトルを算出し、限界耐力計算によって被害推定を行う手法であり、地震動特性や建物の耐震性能を考慮した被害推定手法となっている。

現在までに RC 造を中心とする公共建築物については一次・二次推定ともシステム上で推定可能であるが、性能にばらつきのある木造住宅については建物毎の耐震性能評価が難しいことから、未だ二次推定手法が確立されていない。また最近の地震調査報告から、一次推定結果は実被害の状況と比較して推定精度に大きなばらつきがあることが判っている。そこで本研究では、木造住宅の二次推定を可能とするため、既存木造住宅を対象とした限界耐力法による被害推定手法の開発を行い、推定精度の検証及び一次推定に対する優位性を確認し、推定結果の傾向を明らかにすることを目的とする。

2. 被害推定手法

本研究で提案する二次推定手法について述べる。二次推定では限界耐力計算により、建物の耐力曲線と地動の Sa-Sd 曲線から建物の応答を求め、木造住宅の被害を推定する。従って、計測震度の情報のみから被害を推定する一次推定と比較して、より詳細に被害を推定できる可能性がある。

推定はまず耐震診断における評点毎に耐力曲線をモデル化し、続いて観測された応答スペクトルを用いて面的な応答スペクトルの分布を推定する。そして推定対象区域の各地点において、限界耐力計算による応答推定を行い、構造信頼性工学で破壊確率に似た概念を持つ信頼性指標を用いて確率論的に全壊確率の推定を行う。最後にその全壊確率を、耐震診断データを用いて年代別に重み付けし、地区毎に全壊率を算出するというものである。以下よりその手法の詳細について説明を行う。

2.1 既存木造住宅の耐力曲線のモデル化

耐力曲線及び被災度のモデル化は既往の震動実験<sup>2)</sup>と、以下より説明する木造架構の静的加力実験結果を用いた。

2.1.1 木造架構の静的加力実験

提案する手法では、被害推定に限界耐力計算結果を用いる。その際、全壊とみなす層間変形角の評価が必要となるが、被災度区分判定基準では層間変形角と被災度の関係性について不明瞭な部分が多い。そこで、層間変形角と被災度との関係を明らかにし全壊とみなす層間変形角を定量的に評価するため、実大スケールの木造架構について静的加力実験を行った。

試験体は出隅のある木造骨組試験体で、外壁は木ずり、ラスシート、モルタル塗りが、内壁は石膏ボード(9mm)が耐力要素となる。試験体立面図を図1に示す。

荷重は、図1に示した試験体に水平力を加えることで行う。層間変形角 1/400, 1/200, 1/120, 1/60, 1/30rad をそれぞれ 2 サイクル, 1/20, 1/15rad を 1 サイクル, その後 1/6rad まで押し切るという加力スケジュールで正負繰返し荷重を行った。

また、各ピーク後の除荷時には被災度区分判定を行う。判定は文献<sup>3)</sup>に基づき、被災度は d0(無被害), d1(被害軽微), d2(小破), d3(中破), d4(大破), d5(倒壊)の6段階で、全壊とするのは d4 以上である。

2.1.2 実験結果と被災度及び耐力曲線のモデル化

実験結果として、荷重変形関係係数線及び被災度と層間変形角の関係を図2, 図3にそれぞれ示す。

図2より変形が進んだ領域でも荷重は最大荷重時の約 1/5 を維持していることがわかる。また図3からは、全壊 (=d4) と判定できる層間変形角は概ね 1/15rad であることが判る。

これらの結果と既往の大型三次元震動台を用いて行われた既存木造住宅の実大震動実験<sup>2)</sup>から得られた荷重変形関係よりモデル化した評点 0.1~1.6 までの耐力曲線に、最大耐力の 1/5 を耐力の下限值とすることとした修正を加え、耐力曲線のモデル化を行った。その結果を図4に示す。

2.2 強震観測記録と地震動分布の推定

入力地震動については、防災科学研究所 K-NET をはじめとする複数の観測点で観測された加速度波形から応答スペクトルを算出する。観測点の無い地点については複数の観測点で得られた加速度記録から表層地盤の影響を取り除いて工学的基盤面上での応答スペクトルを求め、三角形線形補間によって推定する。補間の際、工学的基盤面上での応答スペクトルを求めるために用いる表層地盤の増幅率は建築基準法で定められた地盤種別毎の地盤増幅係数 Gs を用いた。また、応答スペクトルの算出に用いる減衰定数は文献<sup>4)</sup>を参考に作成した以下の式(1)を用いた。μ は全壊とする層間変形角時の塑性率である。

$$h = 0.25(1 - 1/\sqrt{\mu}) + 0.05 \quad (1)$$

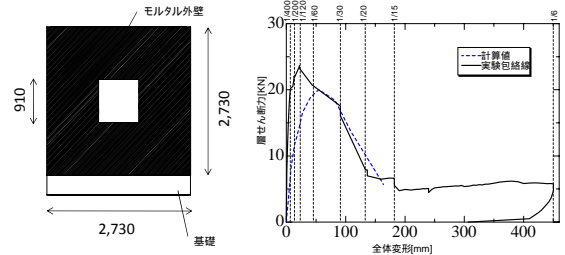


図1 試験体立面図

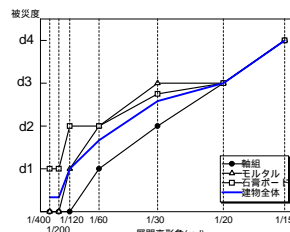


図3 層間変形角-被災度関係

図2 荷重-変形関係係数線

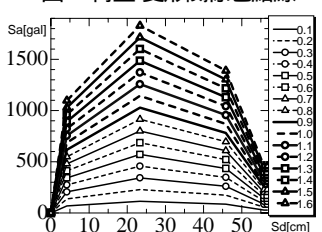


図4 評点毎の耐力曲線

2.3 限界耐力計算と被害率の推定

全壊とする層間変形角は、実際の木造住宅群を考えた場合、1/15rad で一定とすることは現実的ではなく、また応答スペクトルも一定と考えるのはやはり無理がある。そこで本手法では、応答変形(限界耐力計算法で求めた応答値)と限界変形 1/15rad を平均とした、全壊と判断するかどうかの境界)を確率変数として扱い、信頼性指標 β<sup>5)</sup>を用いた確率論的な全壊率の推定を行う。

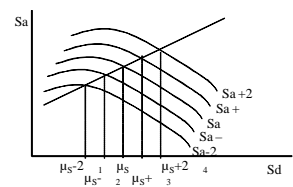


図5 μs, σs の導出

応答変形については、まずある変動係数を設定し、-2 ~ +2 の範囲まで刻みで Sa-Sd 曲線を変動させ、それぞれ限界耐力計算を行い、それぞれの応答値から図5のように応答変形の平均値 μ<sub>s</sub> と標準偏差 σ<sub>s</sub> を算定する。変動係数は 20% とした。限界変形は、応答変形と同様に変動係数を 20% とし、その平均 μ<sub>R</sub> は 1/15rad であるから標準偏差は σ<sub>R</sub> =

1/75rad となる．次に応答変形と限界変形の平均値  $\mu_S, \mu_R$  と標準偏差  $\sigma_S, \sigma_R$  を用い，以下の式(2)～(4)によって限界状態関数の平均値  $\mu_Z$ , 標準偏差  $\sigma_Z$ , 信頼性指標  $\beta$  を求め，それから全壊確率を求める．

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (2) \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (3) \quad \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (4)$$

ここまでの手順を評点毎，年代別に行い，平成 17 年度宮城県の耐震診断データ 760 件から得られる年代別(1950 年，1951-1970 年，1971-1981 年，1981-年)の評点の相対度数と年代別棟数割合に応じて重み付けし，全壊率を算出する．

### 3. 近年の被害地震の強震観測点に対する被害推定

以上まで述べた提案手法の妥当性を検討すること，また出力結果の傾向を明らかにするため，近年に起こった複数の被害地震の強震観測点での被害推定を行った．地動加速度のデータは K-NET で公開されているものを使用した．用いた観測点は，2004 年新潟県中越地震から K-NET 小千谷，十日町，長岡，2007 年能登地震から K-NET 穴水，富来，輪島，能都，2007 年新潟県中越沖地震から K-NET 柏崎，長岡の 9 観測点である．地区毎の年代別棟数データは被害調査によるものを使用した．

その推定結果を図 6 に示す．比較対象として計測震度に対応する被害率関数を用いた一次推定結果，被害調査で得られた実被害率を併せて示す．

図 6 より，一次推定及び二次推定両方について，計測震度が 6.0 より小さい観測点について実被害と概ね一致するという傾向が見られるが，計測震度が 6.0 を超える観測点では結果に大きなばらつきがある．しかし，一次推定は計測震度に対応した推定手法であるため，K-NET 小千谷や K-NET 十日町などの計測震度の割に被害が少ない観測点では推定結果と実被害に大きな差が見られる．一方，二次推定においては K-NET 十日町で二次推定結果と実被害がほぼ一致し，その他の観測点でも，被害の傾向は定性的には捉えられており，推定結果の妥当性，一次推定に対する優位性という点ではある程度評価できる結果となった．

図 6 観測点周辺の被害推定結果

### 4. 2003 年宮城県北部の地震における宮城県全域の被害推定

前節の検討に続き，2003 年宮城県北部地震における宮城県全域の被害推定シミュレーションを行った．入力地震動として用いた加速度波形は図 7 に示す K-NET 7 点，自治体震度計 2 点の合計 9 観測点のものである．

被害推定シミュレーション結果の精度検証のための，実被害との比較を行う地区は，詳細な実被害データが得られている赤井，大塩地区(旧矢本町)，広瀬，新田，北村，前谷地地区(旧河南町)，小野地区(旧鳴瀬町)，平渡地区(旧鹿島台町)，二郷，小島地区(旧南郷町)の 10 地区とする．

被害推定結果として，表 1 に一次推定結果と二次推定結果，実全壊率<sup>7)</sup>とを併せて示す．

表 1 より，二次推定では被害が全く出ないという結果になった．表中の 10 地区以外にも被害があると推定された地域はなかった．一次推定も被害率は概ね近い範囲に収まっているものの，その定性的な傾向を捉えられているとは言えない．



図 7 シミュレーションに用いた観測点

これらの理由として，宮城県北部の地震は直下型の地震であり，震源域近傍の激しい地動を受けた地域での観測記録があまり得られていない事が考えられる．このため，被害の大きい地区の全壊率を推定するのに，実際に受けたであろう震動よりも小さい応答スペクトルで推定している可能性が高い．

また応答スペクトル補間による地震動推定結果を検討するために，鹿島台観測点，涌谷観測点について，推定地震動と観測記録の Sa-Sd 曲線の比較を行った．なお，推定にあたっては鹿島台，涌谷それぞれの観測点で実際に観測された記録は取り除いている．(1)式による減衰定数は 20.7%であった．その結果を図 8 に示す．図 8 を見ると判るとおり，震源に比較的近い涌谷，鹿島台観測点で推定した地動は観測記録と比較して過小評価されている．

これらのことから，本研究で用いた応答スペクトルの補間による推定手法では観測点の高密度化が必要であり，地震動の推定手法については今後検討が必要であると考えている．

表 1 シミュレーション結果

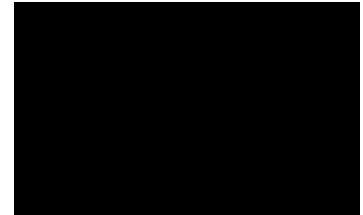


図 8 涌谷，鹿島台観測点における補間結果と観測波比較

### 5. まとめと今後の展望

既往木造住宅の地震時における被害推定手法を提案し，建築物の復旧支援システムに統合して，近年の被害地震を用いた被害推定シミュレーションを行った．得られた結果は以下の通りである．

観測点周辺の被害推定では，計測震度が 6.0 より小さな観測点で精度良い結果が得られた．

計測震度が 6.0 を超える観測点では，被害を定性的に推定することができ，一次推定に対する優位性が確認できた．またその結果は実用には耐えると考えられる．

今回対象にした宮城県北部の地震のような内陸直下型の地震については，応答スペクトルの補間推定の際，現行の手法では震源の扱い方に検討の余地があり，応答スペクトル，推定結果が両方とも過小評価された．

課題として残っている については，応答スペクトルの補間の際，地盤増幅率をより精度のよい手法で求めたものを用いることや，震源近傍の地動の評価手法の検討を行うことなどによって解決を図り，復旧支援システムの開発を進める予定である．

### 参考文献

- 菅原裕太: 建築物の復旧支援システムの開発 宮城県の公共建築物における被害予測手法の検討，東北大学工学部建築学科平成 17 年度卒業論文，2005
- 五十田博，佐藤智彦ら: 大型 3 次元振動台を活用した既存木造住宅の耐震性能向上に関する研究 その 2 耐震診断法の検証一，第十二回日本地震工学シンポジウム発表論文集，pp.1082-1085,2006
- 国土交通省: 震災建築物の被災区分判定基準および復旧技術指針，日本建築防災協会発行，pp256-264,2005
- 柴田明徳: 最新耐震構造解析，第 2 版，森北出版，p140, 2003
- 中村匠: 宮城県の耐震診断結果に基づく木造住宅被害関数の構築，日本建築学会東北支部研究報告集，pp115-118,2007
- 神田順: 限界状態設計法のすすめ，建築技術発行，pp64-90,1993,6
- 日本建築学会: 2003 年 7 月 26 日宮城県北部の地震災害調査報告，丸善株式会社，p181,2004