

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 拡張クリギング法に基づく建物地点ごとの地震ハザードと
確率的損傷度関数を用いた木造建物の地震リスク評価に関する研究

(Study on Seismic Risk Assessment of Wooden Houses

Using Seismic Hazard at an Arbitrary Point Estimated by Advanced
Kriging Method and Probabilistic Damage Index Function)

氏 名 水谷 由香里

論 文 内 容 の 要 旨

わが国では近年においても大規模な地震により甚大な被害を受けている。例えば 1995 年に発生した兵庫県南部地震では約 6,400 人が死亡し、約 10 万棟の建物が全壊、約 14 万棟の建物が半壊した。人的被害についてしてみると、死者数の約 84%が 1981 年の新耐震設計法の施行以前に建てられ、現行の基準を満たさないまま存在する建物（以下、既存不適格建物）の倒壊や家具の下敷きが原因となっている。この倒壊した既存不適格建物の多くは木造建物とされている。これ以降に発生した 2007 年の新潟県中越沖地震では死者数約 70 人、約 1,300 棟の建物が全壊、約 6,300 棟の建物が半壊し、2016 年の熊本地震では死者数約 100 人、約 8,000 棟の建物が全壊、約 3 万棟の建物が半壊したと報告されているが、いずれの地震においても被害は既存不適格建物である木造建物に集中したとされている。

既存不適格建物は、平成 20 年時点で全国に約 1,050 万戸、平成 25 年時点で約 900 万戸存在するとされている。近い将来起こりうる南海トラフ地震や首都直下型地震などの巨大地震による建物被害や人的被害を軽減するためには、これらの耐震診断や耐震改修を進めることが明白であるものの、その進捗状況は芳しくない。一般市民を対象とした建物の耐震に関するアンケート調査結果などによれば、大地震発生の可能性は半数の人が認識しており、大地震時に建物が被害を受ける可能性や耐震改修による効果についても約 7 割の人が認識しているにもかかわらず、耐震診断や耐震改修を行うことに対しては約 7 割の人が消極的であるという結果が報告されている。

その理由として、第 1 に建物所有者への経済的負担が大きいこと、第 2 にその費用対効果を表わすための地震リスク情報が少ないことが挙げられている。

第 1 に、建物所有者への経済的負担については、多くの自治体が木造建物の改修補助金制度を設けるなど耐震化に努めているものの、改修後の耐震診断評点 I_g （以下、評点 I_g ）が現行耐震基準相当となる 1.0 を満たさなければ補助の対象とならない場合が多い。このため、本来早急に改修されるべき非常に評点 I_g の低い建物を 1.0 に引き上げるためには多額の費用が掛かることから、結果的に改修を断念することにつながる可能性が高い。こうした実情を鑑みて、愛知県全体を対象とした地震リスク評価を行い、県全体では目標評点 I_g を 0.7 程度としても死亡者数の低減や費用対効果に対して最も効果が高くなること、そして、死亡者数の低減のためには目標評点 I_g を上げることも耐震改修戸数を増やすことの方が極めて重要であることを示した研究が行われている。これを踏まえて、経済的負担を抑えるために、目標評点 I_g を 1.0 未滿とする簡易耐震改修にも補助金を支給し、改修を促進するよう愛知県に提言した。結果、この提言は名古屋市をはじめ、一宮市や岐阜県など近隣の自治体のみならず、全国における自治体の制度に反映されている。

第 2 に、地震リスクについては、これまでに様々な研究が行われている。一般的に地震リスクは、(1) 発生する地震動の大きさと (2) 発生した場合の建物被害の大きさの組み合わせにより、建物に発生しうる被害の大きさを定量的に評価するものである。

まず、(1) 発生する地震動の大きさには、建物地点での地動最大速度（以下、PGV）や計測震度といった地震動強さにより評価されることとなり、地震動強さ評価にはこれまでほとんどの場合、ボーリングデータに基づく 500m や 250m といったメッシュ単位で仮想地盤モデルを用いて作成する方法が用いられている。しかしながら実際のところは、ひとつのメッシュの中での増幅などの地盤特性や地震動強さは一様ではない。50m 四方として細分化を行う方法もありうるが、ボーリングデータの存在しないメッシュが増大する可能性が高く、仮想地盤モデル作成の費用も増大することとなる。より詳細な評価方法として FEM を用いる方法もあるが、そのために必要となる詳細な地盤情報が自治体単位全域で調査されているケースは皆無であり、自治体全域の建物に対し適用することは現状では不可能である。

次に、(2) 地震が発生した場合の建物被害の大きさの評価には、一般には被害率関数がしばしば用いられている。これは建物を建築構造や年代別に区分し、それぞれにおいて地震動強さと「全壊」や「半壊」といった被害率との関係を示したものである。しかし、建物の振動特性や耐震性能は同じ建築構造や年代であっても大きく異なるものの、多くの場合これらは被害率曲線で考慮されていない。したがって、個々の建物の被害推定や耐震改修などの事前対策による地震リスク低減効果を評価することができない。一方、損傷度関数は建物の耐力を考慮した、建物 1 棟ごとの被害を表わすことができる。しかしながら、地盤種別が考慮されていないことや海溝型地震への適用が不明確であるといったいくつかの難点がある。

ここで、建物所有者の立場から必要となる地震リスク情報は、対象となる建物がどの程度の地震リスクにさらされており、耐震改修をするか否か、するならばどの程度まで行うのかといった判断の助けとなるような具体的な情報である。そのため、適切な耐震改修の計画を立てるためには、例えば許容される損傷状況について、大地震の際に命を守ることを最優先とするの

か、被災後も継続して住み続けたいのかなどといった、個人の価値観に基づいて適切な判断が行えるようにすることが重要である。

また、自治体などの立場から必要となる地震リスク情報は、地域単位での減災対策を考慮する必要があることから、上記の建物所有者が検討しやすいような段階的な耐震化のアプローチや、各世帯の状況に応じた多様な選択肢の提供が出来るような、詳細で面的な地震リスク情報である。そのため、地震ハザードマップが上記のように 250m メッシュ単位といった大きなくくりでは、建物ごとの効果的な対策を立てることが難しいと考えられる。また、発災時において、道路閉塞や崩壊建物火災の延焼防止などといった減災施策のための人員配置や物資補給といった、緊急対応における適切な意思決定を行えるような、十分な精度を有する詳細な情報の提供も重要である。

以上の背景を踏まえ、本論文の目的は、建物所有者や自治体を対象に個々の建物に特化した地震被害低減のための費用対効果に関する地震リスクに関する情報を提供するため、木造建物を対象とした、建物地点ごとの地震ハザードおよびその地震発生時の個々の建物被害、そして建物損傷下での建物被害や人的被害を一貫して評価できる地震リスク評価方法を提案することにある。まず、建物地点ごとの地震ハザード評価方法、建物被害の評価方法を組み合わせ、個々の建物の地震リスク評価方法の提案を行う。さらに、提案方法の精度向上や発災時の地震リスク評価に用いることを念頭とした、実際の観測記録を用いた地震リスク評価方法の提案を目指す。

提案方法を用いることで、平時においては想定される地震ハザードによる個々の建物の全壊や死亡といった地震リスクや、耐震改修などによるそれらの地震リスクの低減効果を評価できることから、建物所有者や自治体の防災担当者が個々の建物に対して必要な耐震補強レベルを把握することができ、耐震改修の実施や助成を行うための意思決定を支援することが可能となる。また自治体においては詳細な防災行動計画の策定や様々な訓練などに活用できることから、地域の防災力の向上も見込むことができる。さらに発災時においては緊急対応の意思決定に不可欠な情報である被害状況について、当該地震記録を用いて高い精度と詳細さで直後に推定し提供することで、ドローンなどの効率的な運用や緊急医療活動、救援活動の支援に活用することができるなど、防災への利用法は幅広いと考えられる。

本論文は 5 章から構成されており、以下に概要を示す。

第 1 章では、本論文の研究背景や目的、論文構成について述べる。

第 2 章では、前半では一般的なリスク評価とその対応について概説する。後半では地震リスク評価の際に用いる地震ハザード評価方法と建物被害の評価方法、さらに地震リスクに関する評価式についての既往研究をそれぞれとりまとめ、これらにおける特徴や課題について整理する。

第 3 章では、木造建物を対象とした、PGV を用いる建物ごとの地震リスク評価方法を提案する。建物地点ごとの地震ハザード評価には、拡張クリギング法を適用して、想定地震に基づき対象領域内における地震動強さの空間分布を推定し、これを用いることとする。同方法による

地震動強さ推定の妥当性や有用性については、一般的なクリギング法やメッシュサイズ、最小二乗法で推定した地震動強さと比較し検証を行う。建物被害の評価には、地盤、震源といった地震動特性の違いを考慮した模擬地震波群を用いた時刻歴応答解析結果に基づく、木造建物を対象に PGV を地震動強さとした確率的損傷度関数を提案する。最後に、これら 2 つの方法を組み合わせた個々の建物における地震リスク評価例を示す。

第 4 章では、第 3 章で提案する地震リスク評価は想定地震に基づくが、精度向上のためのキャリブレーションや、発災時の地震リスクの空間分布の評価を目指すためには実際の地震観測記録を用いる必要があることに着目し、木造建物を対象とした地震動強さに固有周期依存型 SI_g を用いる建物ごとの地震リスク評価方法を提案する。建物地点ごとの地震ハザード評価には、固有周期依存型 SI_g と相関の高い速度応答スペクトルを容易に評価できる加速度フーリエ振幅スペクトルについて、拡張クリギング法を適用した建物地点での推定方法を提案する。建物被害の評価には、第 3 章での応答解析結果を用いて木造建物を対象に固有周期依存型 SI_g を地震動強さとした確率的損傷度関数を提案する。最後にこれら 2 つの方法を組み合わせた地震リスク評価例を示し、さらに第 3 章で示す地震動強さ PGV を用いた地震リスク評価との比較を行う。

第 5 章では、本論文の各章の要点をまとめ、今後の展望や課題について整理する。