

数理・データサイエンスにおける確率統計・数理統計手法に基づく
確率論的リスク解析(PRA)を用いた木造建築物の耐震性能評価に関する建築情報分析
- 災害リスクマネジメント手法を用いた建築構造システムの地震リスク分析 -

Architectural Information Analysis of Seismic Performance Evaluation for Wooden Building by Probabilistic Risk
Analysis Based on Probability Statistics and Mathematic Statistics Method on Mathematics and Data Science
- Seismic Risk Analysis for Architectural Structure System by Disaster Risk Management -

常井 友也[†]

Tomoya Tsunei

(連絡先・HP)¹⁾: <https://article-notice.wixsite.com/rules>

1. はじめに

日本における災害の現状²⁾として、気候変動等によって、自然災害のリスクは高まってきている傾向にあり、過去の災害の被災事例、また自然的条件から地震・豪雨・土砂災害等が発生しやすい特性を有していることが判明している。そのため、近年では、ほぼ毎年のように水害・土砂災害、地震・津波等の自然災害が発生している。近年における主な災害としては、平成23年「東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)」、平成28年「熊本地震」、平成30年「大阪府北部地震」、平成30年「北海道胆振東部地震」、平成30年7月豪雨(西日本豪雨)、「令和元年東日本台風」、「令和2年7月豪雨(熊本豪雨)」等により大規模な被害を受けた。さらに、令和3年7月1日から大雨による「熱海市伊豆山土石流災害」は、静岡県熱海市における土石流の被害を中心に複数の都府県において多くの人命や家屋への被害のほか、ライフラインなどにも甚大な被害を生じさせた。令和6年「能登半島地震」では、地震、津波、火災による複合災害が発生し、1981年以前の旧耐震基準(表-1)で建てられた古い木造住宅において、1階部分が倒壊(層崩壊)する被害が多く生じた。さらに、今後、西日本全域に及ぶと想定される「南海トラフ地震」は、今後30年以内にM8~M9クラスの大規模地震が発生する確率は70%と想定されている。また、近年の豪雨災害の発生状況から現在の気候変動に伴う風水害等の頻発化・激甚化が、今後懸念されている。

現状の防災対策に関する課題^{2),3)}としては、ハード対策として施設整備に関しては、「限られた予算の中で、防災の観点から総合的に優先度などを勘案し、防災力の効果的な向上につながる施設整備を進める」ことが挙げられる。次に、ソフト対策として防災体制の整備については、「災害に強い地域づくりを進めるため、公助だけでなく、共助、自助をも含めた防災体制」の確立を行うことが挙げられる。また、過去の災害の被害事例から住民の災害リスク(ハザードマップ)に対する認知、理解が不足していることが挙げられる。さらに、広域的な被害が想定される大都市圏等において、実効性のある広域防災体制(災害拠点病院等の整備、消防・警察等の救急体制の整備等)の構築を行うことが挙げられる。

そのため、参考文献^{4),5)}では、「災害リスクの情報²⁾」の分析・評価として、建築構造物に潜在する地震時の被害特性を定量的に評価できる「地震リスク」を用いて、建築構造物の地震時被害予測損失に関するリスク分析が実施されている。

表-1 木造建築物の建築基準法(耐震性能に関する基準)の変遷

旧耐震基準	1959年	1981年	2000年
旧耐震基準	旧耐震基準	新耐震基準	2000年耐震基準
【耐震診断が必要】	【必要量が算出】 (壁量の算出)	【必要量が改正】 (壁量の算出)	【耐力壁の配置パターン】、 【基礎形状】、 【柱間、柱脚、 筋交いの接合方法】 に関して規定
【壁量不足が算出されることから、耐震診断が必要】	【壁量不足が算出されることから、耐震診断が必要】	【必要量が改正】 (壁量の算出)	

2. 数理・データサイエンスにおける確率統計・数理統計手法

情報工学における「数理・データサイエンス」の対象項目としては、「確率・統計解析」、「AI(人工知能)」、「情報技術(情報通信・データベース・セキュリティ等)」、「ソフトウェア開発・プログラミング」、「企業や組織の問題解決(経営管理等)」などが挙げられる。「確率論的リスク解析(PRA)」は、損害等の事象の確率関数を「数理モデル」で表現し定量化することで、「発生頻度(発生確率)」と「影響(損失額)」を評価し、その積である「期待値(平均値)」を「リスク」として、定量的に評価する手法であり、「確率統計・数理統計学」に分類することができる。

本研究では、都市・構造物のリスク分析・最適設計として、建築構造システム(鉄筋コンクリート造・鉄骨造・木造)の中でも、木造建築物における木造住宅を取り上げ、地震時の被害特性を定量的に評価できる確率論的リスク解析(PRA)(構造信頼性設計)に基づく地震リスクマネジメント手法を用いて、木造建築物の耐震安全性評価として、「災害リスクの情報²⁾」の定量的評価を行うことを目的とする。

またさらに、確率論的リスク解析(PRA)は、構造物の信頼性解析、安全性解析で用いられている分析手法である。そのため、本研究では「地震損害保険」に適応可能な「推定損害額の評価手法」として、確率論的リスク解析(PRA)を用いて、リスク分析を行う。

3. 建築分野における情報技術を活用した建築情報

近年、建築分野においては、DX推進により、セメント系材料による3Dプリンティング技術を活用した建設工事のデジタルファブリケーションや、コンピュータ上に、建築物の3次元の形状情報を作成した建築情報モデルを構築するBIM(Building Information Modeling)、設計の計算を自動化するコンピュータショナルデザイン、画像生成AIの技術

を活用した建築設計プロセス・建築デザインなど、情報技術を活用した建築技術が導入されている。また、建築物の「施設情報管理(維持管理情報)」として、「建築物の企画・設計から、施工、竣工、運用を経て、修繕、解体処分」するまでの建築物の全期間に要する総費用である「建築物のライフサイクルコストLCC」の分析(ファシリティマネジメントFM)が、建築情報では重要であると考えられる。

また、現在、建設業界、不動産業界にAIなどのデジタル技術を導入した「建設DX」、「建築・都市DX」、「不動産DX」が検討されている。その方法の1つとして、AI・ICT技術等の最新技術を駆使して、防災、交通、エネルギー循環等のマネジメントの高度化(計画、整備、管理・運営等)により、都市や地域が抱える課題を解決する持続可能な都市である「スマートシティ」の構築が検討されている。その中でも防災分野²⁾においては、地震・豪雨等の自然災害に対して、「事前に具体的な被害予測」を行う防災情報システム、スマート防災の構築が重要であると考えられる。そのため、本研究では、地震リスク(災害リスク)分析に基づく「災害リスクの情報²⁾」を用いた地震等の自然災害の被害予測に利用できる防災情報システムの検討を目的とする。

さらに、建築分野においては、持続可能な開発目標SDGsの「気候変動への対策(目標13)」において、脱炭素社会、地球温暖化防止(GX)に向けた建築物として、「建築構造物の木造化・木質化」による木造建築物の推進が検討されている。そのため、本研究では、「建築情報・建築経済」、「不動産リスクマネジメント」、都市部・地方部の住宅政策における「都市経済分析」の観点から、SDGsの「住み続けられるまちづくりを(目標11)」として、木造建築物の地震時損失コストを考慮したライフサイクルコスト分析を実施し、ライフサイクルにおいて生じる費用の構成を把握することを目的とする。

4. 確率論的リスク解析(PRA)に基づく地震リスクマネジメント手法と木造建築物のライフサイクルコストの分析手法

本研究においては、地震リスクを発生確率と損失額の積である「期待値(平均値)」として取り扱い、地震リスク分析(災害リスク分析)を実施する。したがって、地震リスク R (地震時予測損失額)は、式(1)のように定義することができる。また、確率論的リスク解析(PRA)において使用される構造物の損傷発生確率の確率関数(確率密度関数)の「数理モデル」として、正規分布、対数正規分布、 β 分布、ワイブル分布、ポアソン分布等(図-1)が考えられるが、本研究で使用する確率関数の「数理モデル」は、式(2)に示すように、対数正規分布とした。

次に、本研究では、確率論的リスク解析手法(PRA)として、図-2に示すような地震リスクマネジメントの算出フローに従って、地震リスクマネジメントを行う。図-3に解析対象地域における水平最大加速度と年超過確率の関係を表す地震ハザード曲線を示す。さらに、本研究では、「災害リスクの情報²⁾」を定量的に把握するために、式(3)に示すように、イニシャルコスト $C_{initial}$ として「初期建設費用」、ランニングコスト $C_{running}$ として「維持管理費用」の中でも「地震時損失コスト(地震リスク R)」を評価項目としたライフサイクルコスト(LCC)分析を実施する。木造住宅の耐用年数は、長期優良住宅認定では100年超とあるが、設計供用期間 n は、耐火構造住宅の耐用年数70年⁶⁾とした。

$$R = \sum P \times C \quad (1) \quad LCC = C_{initial} + \sum_{t=1}^n R(t) \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2)$$

ここで、 R は地震リスク(期待値)、 P は発生確率、 C は損失額、 $C_{initial}$ は木造建築物の初期建設費用、 R は地震リスク、 μ は正規分布の平均値、 σ は正規分布の標準偏差、 n は設計供用期間を示す。

5. 木造建築物の解析対象モデル

木造建築物の建築工法には、木造住宅の場合、「木造軸組工法(在来工法)」、「木造枠組壁工法(ツーバイフォー工法)」、「ユニット工法(プレハブ工法)」、「ラーメン工法」等が存在する。本研究では、柱、梁、筋交い等の骨組みを組み合わせてつくりあげる「木造軸組工法(在来工法)」で建築された新築(現行の耐震基準)の木造住宅を解析対象モデルとする。本研究の解析対象モデルの立面図を図-4に示す。耐力壁は、構造用合板(9mm)、筋かい(45×90)を使用した。

6. 木造建築物の構造設計手法

木造建築物(木造住宅)の構造設計手法⁷⁾には、壁量計算(建築基準法、性能評価・品確法)、許容応力度計算、限界耐力計算、保有水平耐力計算、時刻歴応答解析(地震応答解析)が存在するが、本研究では、時刻歴応答解析(地震応答解析)を用いて木造建築物(木造住宅)の構造設計を行った。時刻歴応答解析(地震応答解析)とは、建築構造物の地表面に地震動を入力して、建築物の各階の加速度、速度、変位を計算する振動解析のことである。

[†] 常井建築設計事務所 / 常井技術士事務所 博士(工学)、技術士、1級建築施工管理技士、コンクリート主任技士、コンクリート診断士
Tsunei Architectural Design Office / Tsunei Professional Engineering Office,
Dr.Eng., P.E.Jp, First-Class Architectural Construction Management Engineer,
Chief Concrete Engineer, Concrete Maintenance Engineer

6.1 構造計画

木造建築物の柱の断面設計は、建築基準法施行令の規定を基に、「横架材間の垂直距離に対する柱寸法の割合」を1階部分では1/30、2階部分(最上階)では1/33とした。また、柱寸法は式(4)に示すように柱の有効細長比 L_k/i を満たすように決定した。さらに、梁の寸法に関しては、式(5)を満たすように寸法を決定した。

構造用合板(9mm)、筋かい(45×90)の耐力壁の剛性は、参考文献⁹⁾を基に、壁倍率、存在壁量の長さからせん断力に対する抵抗力である「許容せん断耐力 P_d 」を求め、許容せん断耐力時の層間変形が1/150(rad)であると想定し、式(6)から剛性の算出を行った。

$$\frac{L_k}{i} < 150 \quad (4) \quad \frac{D}{l} > \frac{1}{12} \quad (5) \quad K = 150 \times \frac{P_d}{H} \quad (6)$$

ここで、 L_k は屈屈長さ(横架材間の垂直距離)(mm)、 i は断面二次半径(mm)、 D は梁せい、 l は梁の有効長さ、 K は耐力壁の剛性(kN/mm)、 P_d は許容せん断耐力(kN)、 H は耐力壁の天端高さ(階高)(mm)を示す。

6.2 設計用入力地震動

入力地震動としては、標準的な地震動として、「EL CENTRO」、「TAFI」、「HACHINOHE」の3つの地震動⁹⁾(図-5、図-6、図-7)を入力地震動とし、その最大速度振幅を25cm/s、50cm/sに基準化し、作成した地震波をそれぞれ「稀に発生する地震動(L1地震動)」、「極めて稀に発生する地震動(L2地震動)」とする。設計用地震動⁹⁾には、L1地震動とL2地震動が設定されているが、L1地震動とは発生頻度が「比較的高く」、発生すれば「大きな被害」をもたらす地震動であり、L2地震動とは発生頻度は「極めて低い」が、発生すれば「甚大な被害」をもたらす地震動のことである。

6.3 時刻歴応答解析(地震応答解析)の解析条件

建築構造物の解析対象モデルは、簡易なモデルとし、2質点系の平面モデル(せん断ばね)(図-4)とし、基礎は固定した。復元力特性はスリップ型の履歴曲線を採用した。減衰のタイプは剛性比例型とし、減衰定数 h を設定し、減衰を決定した。数値積分法における Newmark- β 法のパラメータは $\beta=1/6$ とし、時刻刻みは $\Delta t=0.001$ (s)とした。なお、本研究では、耐震診断において木造建築物の経年劣化による耐震性能の低下(剛性の低下等)が生じないと想定した。また、耐力壁の骨格曲線は完全弾塑性と想定した。

6.4 時刻歴応答解析の設計クライテリア

設計クライテリアは層間変形角 θ (層間変位 δ /各階の高さ h) とし、目標耐震性能は表-2のように設定した。層間変形角 θ とは建築物に地震力(水平力)が作用したときの変形量(角度)を示す。

6.5 時刻歴応答解析の解析結果

時刻歴応答解析(地震応答解析)の結果を図-8、図-9に示す。解析結果からL1地震動、L2地震動ともに層間変形角 θ の最大応答値が、設計クライテリア(表-2)の許容値以内となった。

表-2 時刻歴応答解析(地震応答解析)の設計クライテリア

稀に発生する地震動 (L1地震動)	極めて稀に発生する地震動 (L2地震動)
層間変形角: 1/120(rad)	層間変形角: 1/30(rad)

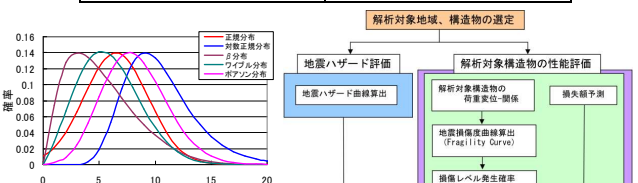


図-1 構造物の損傷発生確率の確率密度関数の数値モデル

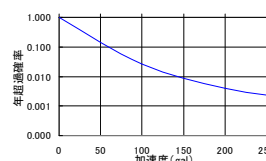


図-3 地震ハザード曲線

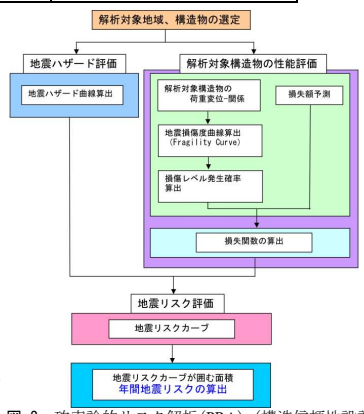
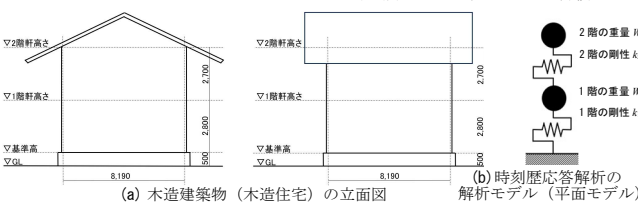


図-2 確率論的リスク解析(PRA)(構造信頼性設計)に基づく地震リスクマネジメントの評価フロー



(a) 木造建築物(木造住宅)の立面図 (b) 時刻歴応答解析の解析モデル(平面モデル)

7. 木造建築物の耐震性能評価

本研究では、建築構造物の耐震性能評価として、表-3に示すように層間変形角 θ を耐震性能の基準とした。建築構造物の耐震性能評価を実施する際、多層階(2質点系)の建築構造物を等価1自由度に集約した性能曲線を基に評価を行った。等価1自由度に集約された建築物の地震外力 F は、式(7)に示すように耐震設計上、有効質量 M_u と地震最大加速度 a_{max} で表すことできる。性能曲線の変位量から最大地震加

速 a_{max} を算出するには、式(8)に示すように、耐震設計法の一つであるエネルギー一定則を用いて算出を行った。エネルギー一定則とは、地震時の弾性応答のエネルギーと弾塑性応答のエネルギーが等しいと想定し、弾性状態の最大応答変位 δ_E から部材が降伏した構造物の最大応答変位 δ_p を求める手法である。

$$F = M_u \times a_{max} \quad (7) \quad \delta_p = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{P_E}{P_y} \right)^2 + 1 \right\} \delta_y \quad (8)$$

ここで、 F は地震外力、 M_u は有効質量、 a_{max} は地震最大加速度、 P_E は弾性応答水平力、 P_y は降伏耐力、 δ_p は弾塑性応答変位、 δ_y は降伏変位を示す。

上記を基に、最大加速度と各限界状態の変位量の関係を示す建築構造物の耐力曲線の算出を行った。

表-3 建築構造物の耐震性能評価

被災度ランク	無被害(軽微)	小破	中破	大破
層間変形角(rad)	$\leq 1/120$	$\leq 1/60$	$\leq 1/30$	$\geq 1/30$

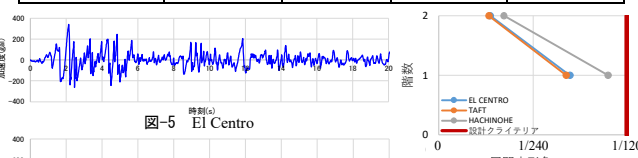


図-5 El Centro

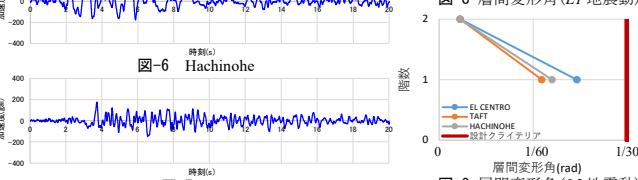


図-6 Hachinohe

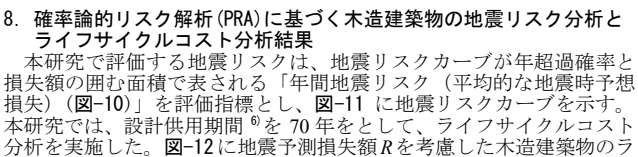


図-7 Taft

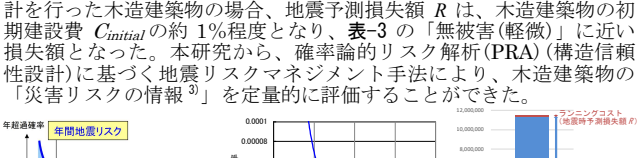


図-8 層間変形角(L1地震動)

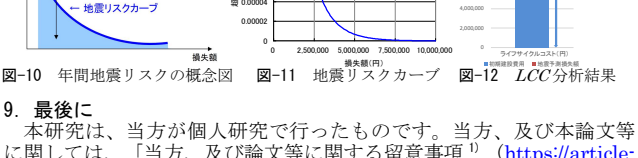


図-9 層間変形角(L2地震動)

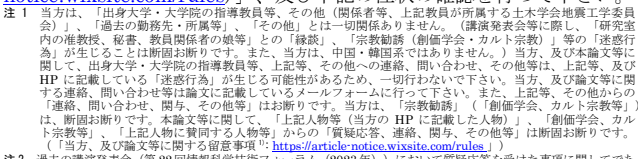


図-10 年間地震リスクの概念図

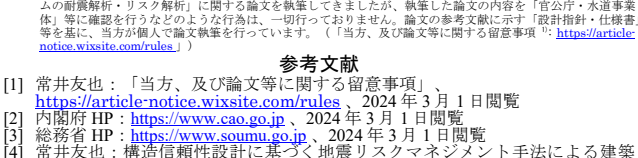


図-11 地震リスクカーブ

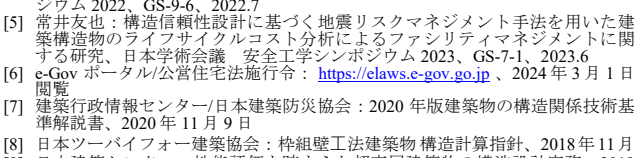


図-12 LCC分析結果

8. 確率論的リスク解析(PRA)に基づく木造建築物の地震リスク分析とライフサイクルコスト分析結果

本研究で評価する地震リスクは、地震リスクカーブが年超過確率と損失額の囲む面積で表される「年間地震リスク(平均的な地震時予想損失)(図-10)」を評価指標とし、図-11に地震リスクカーブを示す。本研究では、設計供用期間⁹⁾を70年として、ライフサイクルコスト分析を実施した。図-12に地震予測損失額 R を考慮した木造建築物のライフサイクルコストの分析結果を示す。「現行の耐震基準」で構造設計を行った木造建築物の場合、地震予測損失額 R は、木造建築物の初期建設費 $C_{initial}$ の約1%程度となり、表-3の「無被害(軽微)」に近い損失額となった。本研究から、確率論的リスク解析(PRA)(構造信頼性設計)に基づく地震リスクマネジメント手法により、木造建築物の「災害リスクの情報³⁾」を定量的に評価することができた。

9. 最後に

本研究は、当方が個人研究で行ったものです。当方、及び本論文等

に関しては、「当方、及び論文等に関する留意事項¹⁾」(<https://article.notice.wixsite.com/rules>)、及び下記の注釈の確認を行って下さい。

注1 当方は、「出身大学・大学院の指導教員等、その他(関係者等、上記教員が所属する土木学会地震工学委員会)」、「過去の勤務先・所属等」、「その他」とは一切関係ありません。(講演発表会等に際し、「研究室」の「准教授、秘書、教員関係者の娘等」との「縁談」、「宗教勧誘(創価学会・カトリック)」等の「迷惑行為」が生じることは断固お断りです。また、当方は、中国・韓国系ではありません。)当方、及び本論文等に関して、出身大学・大学院の指導教員等、上記等、その他との連絡、問い合わせ、その他等、上記等、及びHPに記載している「迷惑行為」が生じる可能性があるため、一切行わないで下さい。当方、及び論文等に関する連絡、問い合わせ等は論文に記載しているメールアドレスに行ってください。また、上記等、その他からの「連絡、問い合わせ等」は、関係者等、その他等)は断固お断りです。当方は、「宗教勧誘」(「創価学会、カトリック」等)は、断固お断りです。本論文等に関して、「上記人物等(当方のHPに記載した人物)」、「創価学会、カトリック」等、「上記人物に賛同する人物等」からの「質疑応答、連絡、関与、その他等」は断固お断りです。(「当方、及び論文等に関する留意事項」<https://article.notice.wixsite.com/rules>。)

注2 過去の講演発表会(第22回情報科学技術フォーラム(2023年))において質疑応答を受けた事項に関してであるが、当方は、教壇・データサイエンスにおける確率・統計解析手法を用いた「建築構造物・上下水道システムの耐震解析・リスク解析」に関する論文を執筆してきましたが、執筆した論文の内容を「官公庁・水道事業体」等に確認を行うなどのような行為は、一切行っておりません。論文の参考文献に示す「設計指針・仕様書」等を基に、当方が個人で論文執筆を行っています。(「当方、及び論文等に関する留意事項」<https://article.notice.wixsite.com/rules>。)