

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

建物群の耐震計画策定における地震リスク評価の応用に関する研究

Application of Seismic Risk Analysis to Aseismic Planning for  
Portfolio of Buildings

申請者

福島 誠一郎  
Seiichiro FUKUSHIMA

2023年5月

我が国では地震、風水害、火山噴火などの様々な自然災害が発生しており、中でも、予測の困難さや被害が甚大かつ広域となる地震への対応が不可欠である。地震被害を軽減し安全な社会を実現するためには社会を構成する建物の耐震計画が重要であり、耐震設計諸基準の整備、性能を基盤とした性能設計の導入、地震ハザードマップの作成、特定の建物に対する重要度係数の付与、耐震診断の実施等、建物単体に関する法整備や関連する技術開発が適時実施されてきた。解決すべき課題は未だ残るものの、兵庫県南部地震において新耐震設計で設計された建物には被害が少なかったこと等、その効果は着実に現れている。また、地震ハザードマップの公開等も行われ、地震防災に係る意識も醸成されてきている。

さて、これらの施策の多くは建物単体に関するものである。例えば、耐震設計や性能設計で示される要求性能は建物単体として保有すべき性能である。また、地震ハザードマップは地点毎の評価結果の表示であり、同じ再現期間の地震動が同時に発生するわけではない。

ところで、建物は単体として成立しているものばかりではなく、他の建物とともに建物群を構成するものもある。その場合、建物単体に関する法整備や技術開発は、建物群に対しては不十分であり、機能の連関や地震動強度の空間相関を考慮した建物群の建設地点の選定、限られた予算の中での耐震投資の案分等、建物群固有の解決すべき課題も多い。

他方、近年では損害保険分野において複数建物を対象とした解析的なリスク評価が実施されている。地震や台風は広域災害に繋がるためであり、また、統計処理に足る十分なデータがないことから、数値計算によるアプローチを採用せざるを得ないためである。さらに、このような複数建物の地震リスク評価に資する計算環境の充実や、関連する技術開発が精力的に行われていることも、このようなリスク評価実施の推進力となっている。

本論文では、以上を背景として、複数建物を対象とする地震リスク評価手法に着目し、建物群の耐震計画の策定に応用することを目的とした。

本論文は5つの章からなっており、第1章は序論、第2章から第4章は建物群の耐震計画に資するリスク評価手法に関する具体的な検討、第5章は結論である。

第1章では、本論文の背景と目的を述べるとともに、本論文全体の解析の基礎となるマルチイベントモデルと、その結果として求められる損失の考え方を整理した。続いて、本論文に関係する既往文献を調査し、その概要と課題について整理した。最後に本論文の構成を示した。

第2章では、「地震ハザードの相関を考慮した代替建物の配置」と題して、建物群の配置計画について検討を行った。災害時の対応活動を確実なものとするに

は、拠点建物が被災した場合に備えて代替建物を用意しておくことが望ましい。代替建物への機能移転の効率を考えるならば、拠点建物と代替建物の距離は小さいほど有利であるが、2 建物の同時被災の可能性を低減するには、両者の距離は大きいほど有利である。

本章では、このような二律背反の条件に対する解決策として、「拠点建物位置に所与の地震動強度が発生した場合に代替建物位置に発生する地震動強度の期待値」を示す代替建物の条件付き地震ハザードを提案した。また、提案した手法を関東地方に立地する 21 棟からなるモデル建物群に適用し、東京都庁位置に立地する拠点建物に対する代替建物の条件付き地震ハザード曲線を評価した。評価の結果として地震動強度の不確実性の地点間相関の評価が結果に大きな影響を与えること等を明らかにし、構築した手法が妥当であることを示した。

次に、条件付き地震ハザード曲線から得られる最大加速度（PGA）を用いて拠点建物位置の PGA に対する代替建物位置の PGA の比を規準化 PGA として求め、その空間分布を示した。規準化 PGA の分布は寄与する地震に依存するため、想定する再現期間によってその傾向が異なること、地震動強度の不確実性の地点間相関の評価が結果に大きな影響を与えることを示した。

さらに、条件付き地震ハザード曲線とその空間分布を基に、所与の拠点建物に対する代替建物の立地について考察を行った。代替建物の配置は必ずしも工学的な側面のみから決定されるものではなく、企業経営の方針や方策、地域経済に対する企業貢献といった複数の側面から意思決定されるものであることを示した。

ここで構築した手法を用いることにより、「同時被災の回避」と「災害時移動の容易性」という相反する条件下で代替建物の配置を決定することが可能になった。

第 3 章は「地震リスクに基づく建物群の耐震性能の設定」と題して、建物群への耐震投資の最適配分について検討を行った。耐震投資には上限があり、どのように投資の案分を設定するかは重要な課題である。ここでは建物群の損失を最小化する配分方法について検討した。建物群のリスク低減効果としてリスク分散が挙げられることから、寄与率の評価がリスク低減効果に関連すると考え、まず、最適配分を実現するための指標として、建物群の損失に対する建物群を構成する各建物の損失の寄与率を提案し、その評価方法を提案した。また、提案手法を関東地方に立地する 20 棟からなる建物群に適用し、資産配分を解析パラメータとして、建物群の損失と寄与率の分布を比較検討した。その結果、寄与率が平準化するほど建物群の損失が小さいことを確認した。

さらに、得られた知見より、リスクマネジメント施策として、寄与率を平準化するように耐震施策対象建物と対策程度を決定する手順を提案した。また、この手順を前記の建物群に適用し、その有効性を確認した。この有効性は、①効率性、②恣意性の排除、にある。提案手順は逐次、「最弱な」建物の耐震性を上げること

になるので、最も費用対効果が高くなるとともに、過剰投資を避けることができる。また、投資対象が数値で示されるため、耐震投資の対象や量に恣意性が入ることがなくなる。

ここで構築した手法を用いることにより、限られた投資額の中で最適な投資案分を決定することが可能になった。

第4章は「周辺地域の被災程度に基づく耐震重要度係数の設定」と題して、拠点建物の保有すべき耐震性能について検討を行なった。拠点建物周辺の建物群の状況に応じて、拠点建物がどの程度使用可能であるべきかは、拠点建物の耐震性能を設定する上で重要な検討課題である。

本章では、周辺建物の状況を条件とした拠点建物（対象建物）の使用可能性を期待条件付供用確率によって定量化することを提案し、期待条件付供用確率の算出方法を示した。また、同手法を東京都庁位置に対象建物を置く建物群について適用した。まず適用に先立ち、対象建物と周辺建物の耐震性能を地震脆弱性曲線として定量化した。対象建物に関しては設計地震動強度の違いを反映するために、重要度係数と地震脆弱性曲線の特性値の関係を求めた。他方、周辺建物については住宅土地統計を基に、構造種別・階数・建設年代に応じた地震脆弱性曲線を求め、棟数比率を重みとした加重平均を周辺建物の地震脆弱性曲線とした。

次に、提案手法を用いて周辺建物の状況に応じた対象建物の期待条件付供用確率を求め、重要度係数と期待条件付供用確率との関係を定量化した。また、感度解析を行い、評価における諸条件が期待条件付供用確率に与える影響を検討した。結果として、重要度係数の割増が有効でない場合においても、諸条件の緩和によって期待条件付供用確率が向上することが明らかとなった。

さらに、重要度係数と期待条件付供用確率の関係を概観し、期待条件付供用確率を目標とした重要度係数の設定方法を提案した。既存の重要度係数は、本検討の範囲では、重要度係数 1.0（70%）、1.25（80%）、1.5（85%）である（括弧内の数値は期待条件付供用確率）。

ここで構築した手法を用いることにより、地震時における拠点建物の使用可能性を判断できるとともに、必要な使用可能性を実現するための耐震性能の設定が可能となった。

第5章では、結論として前章までの成果をまとめるとともに、本論文で提案した各手法を実用に供するための今後の課題を抽出した。具体的には、2地点以上の代替地点の選定、地点間相関と周期間相関の統合、資産案分と耐震性向上案分の統合、耐震補強における耐震性向上案分の検討、条件付供用確率を設計目標とした設計体系の構築が示された。

## 早稲田大学 博士（建築学） 学位申請 研究業績書

氏名： 福島 誠一郎

印

(2023年 4月 28日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	福島誠一郎: 周辺地域の被災程度に基づく建物の耐震重要度係数の設定の試み, 日本建築学会構造系論文集, vol.88, No.805, 383-394, 2023.3
論文	福島誠一郎, 矢代晴実, 吉川弘道: 供給量を考慮したサプライチェーンの業務停止期間に関する地震リスク解析, 日本建築学会環境系論文集, Vol.75, No.655, 853-860, 2010.9
論文	Fukushima S.: Vector-valued fragility analysis using PGA and PGV simultaneously as ground-motion intensity measures, Journal of Disaster Research, Vol.5, No.4, 407-416, 2010.8
論文	Fukushima S., Hayashi T.: Development of conditional probabilistic seismic hazard map, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, 2009.9
論文	西川智, 福島誠一郎, 矢代晴実: サプライチェーンを考慮した地震時事業継続のためのリスク解析手法の提案, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.630, 1053-1060, 2008.8
論文	林孝幸, 福島誠一郎, 矢代晴実: 加速度と速度を地震動指標に用いた確率論的地震危険度評価手法の構築, 日本建築学会構造系論文集, No.617, 185-192, 2007.7
論文	林孝幸, 福島誠一郎, 矢代晴実: 最大加速度と最大速度の積を地震動指標に用いた確率論的地震動評価, 構造物の安全性および信頼性, Vol.6, 697-704, 2007.6
論文	佐藤一郎, 矢代晴実, 福島誠一郎: ベーシスリスクに着目した地震リスクデリバティブの設計手法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.614, 261-268, 2007.4
論文	西川智, 福島誠一郎, 矢代晴実: 事業継続のためのリスクファイナンス手法の提案, 日本建築学会環境系論文集, No.607, 101-108, 2006.9
論文	Fukushima S., Yashiro H.: Seismic performance level of buildings based on the earthquake risk of portfolio, Proc. of 100th Anniversary Earthquake Conference, CD-ROM, 2006.4
論文	林孝幸, 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響, 日本建築学会構造系論文集, No.600, 203-210, 2006.2
○論文	福島誠一郎, 矢代晴実: ポートフォリオの地震リスクに基づく建物の耐震性能の設定, 日本建築学会構造系論文集, No.593, 185-192, 2005.7
論文	矢代晴実, 福島誠一郎, 都築充雄: 地震リスクスワップの成立性と条件設定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.586, 107-114, 2004.12
○論文	福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ハザードの相関を考慮した代替建物の配置, 日本建築学会環境系論文集, No.575, 91-98, 2004.1
論文	矢代晴実, 福島誠一郎, 都築充雄: 地震リスクスワップに関する基礎的研究, 構造物の安全性および信頼性, Vol.5, 103-108, 2003.11
論文	福島誠一郎, 矢代晴実: リスク移転を考慮した耐震性能レベル設定の考え方, 日本建築学会構造系論文集, No.567, 197-204, 2003.5
論文	矢代晴実, 福島誠一郎: 地震リスク証券化に関する数理解析, 統計数理, 特集「ファイナンス統計学」, 第50巻第2号, 259-278, 2002.12
論文	福島誠一郎, 矢代晴実: 地震リスクの証券化における条件設定に関する解析, 日本建築学会計画系論文集, No.555, 295-302, 2002.5
論文	福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価, 日本建築学会計画系論文集, No.552, 169-176, 2002.2
論文	中村紀吉, 成川匡文, 岸野泰章, 福島誠一郎, 岩田衛, 和田章: 特殊用途建築物に適用可能な機能に基づく耐震設計の考え方, 日本建築学会構造系論文集, No.511, 149-156, 1998.9
講演	Satoda A., Fukushima S., Oshima M., Okuda H.: Two-step probabilistic ground deformation hazard analysis for seismic risk assessment of plant facilities, Transaction of 26th SMiRT, Paper ID Tu.4.E.3, 2022.7
講演	Oshima M., Satoda A., Fukushima S.: Evaluation of joint probabilistic hazard of ground shaking and deformation using multi-event model, 17th WCEE, Paper ID 8c-0058, 2021.9
講演	Satoda A., Oshima M., Fukushima S.: Evaluation of seismic risk of plant site consisting of various types of structures using multi-event model, 17th WCEE, Paper ID 8c-0060, 2021.9

## 早稲田大学 博士（建築学） 学位申請 研究業績書

氏名： 福島 誠一郎

印

(2023年 4月 28日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	Satoda S., Oshima M., <u>Fukushima S.</u> , Okuda H.: Two-step probabilistic ground deformation analysis for the plant risk management, 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, MS19-3-02, 2020.12
講演	堀裕弘, 木村江里, 渡部弘之, <u>福島誠一郎</u> : 事業継続のための支援建物の条件付き被害評価, レジリエント建築シンポジウム論文集, 44-50, 2020.11
講演	木村江里, 堀裕弘, 渡部弘之, <u>福島誠一郎</u> : 使用可能建物数を指標とした確率論的地震リスク評価, レジリエント建築シンポジウム論文集, 51-57, 2020.11
講演	<u>Fukushima S.</u> : Effects of aftershocks on seismic risk, Transaction of 25th SMiRT, Session D7-S4, 2019.8
講演	Satoda A., <u>Fukushima S.</u> , Oshima M.: Evaluation of Plant Risk based on multi-event model, Transaction of 25th SMiRT, Session D7-S1, 2019.8
講演	<u>Fukushima S.</u> , Watabe H., Yashiro H.: Seismic risk evaluation of facilities considering aftershocks, 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No.10864, 2019.6
講演	<u>Fukushima S.</u> , Watabe H., Yashiro H.: Development of risk evaluation method considering aftershocks, 7th ACEE, Paper No.0080, 2018.11
講演	<u>Fukushima S.</u> , Watabe H., Yashiro H.: Development of risk evaluation method considering aftershocks, 8th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Paper No.8257, 2018.11
講演	<u>Fukushima S.</u> : Probabilistic seismic risk analysis of system consisting of several facilities, 16th WCEE, Paper ID 1927, 2017.1
講演	<u>Fukushima S.</u> : Risk analysis of portfolio of facilities using multi-event model, Transaction of 23rd SMiRT, Paper No.562, 2015.8
講演	<u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: Evaluation of joint probabilistic seismic hazard surface, Transaction of 22nd SMiRT, Paper No.516, 2013.8
講演	<u>福島誠一郎</u> , 矢代晴実, 吉川弘道: 複数拠点からの同時調達を含むサプライチェーンシステムの業務停止に関するリスクマネジメント, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 2810-2817, 2010.11
講演	<u>Fukushima S.</u> , Hayashi T.: Conditional probabilistic hazard map for risk management of supply chain system, 14th ECEE, Paper No.783, 2010.9
講演	<u>Fukushima S.</u> , Hayashi T.: Seismic risk analysis utilizing the PGA and PGV simultaneously as ground motion measures, Transaction of 20th SMiRT, Paper No.2389, 2009.8
講演	Sato I., Yashiro H., <u>Fukushima S.</u> : Design method of trigger event definition of CAT bond focusing on reduction in basis risk, 14th WCEE, Paper ID S01-02-023, 2008.10
講演	Nishikawa S., <u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: New risk analysis method to evaluate BCP of supply chain dependent enterprise, 14th WCEE, Paper ID 10-0061, 2008.10
講演	Omine H., Hayashi T., Yashiro H., <u>Fukushima S.</u> : Seismic risk analysis method using both PGA and PGV, 14th WCEE, Paper ID 07-0161, 2008.10
講演	Hayashi T., <u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: Proposal of the conditional probabilistic hazard map, 14th WCEE, Paper ID 07-0159, 2008.10
講演	西川智, <u>福島誠一郎</u> , 矢代晴実: サプライチェーンに依存する企業の地震時BCP策定のためのリスク評価手法の提案, 第57回理論応用力学講演会 講演論文集, 135-136, 2008.6
講演	<u>Fukushima S.</u> , Hayashi T., Yashiro H.: Seismic hazard analysis based on the joint probability density function of PGA and PGV, Transaction of 19th SMiRT, Paper No.M03/1, 2007.8
講演	Nishikawa S., <u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: Proposal of a new risk finance method for business continuity, 1st ECEES, Paper No.1461, 2006.9
講演	<u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: Feasibility study on seismic risk swap using pure parametric triggers for business continuity, 1st ECEES, Paper No.800, 2006.9

## 早稲田大学 博士（建築学） 学位申請 研究業績書

氏名： 福島 誠一郎

印

(2023年 4月 28日 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	Yashiro H., <u>Fukushima S.</u> : Fundability study on feasibility of seismic risk swap and its condition setting, 5th annual IIASA-DPRI Forum on INTEGRATED DISASTER RISK MANAGEMENT –Innovations in Science and Policy–, CD-ROM, 2005.9
講演	<u>Fukushima S.</u> : Risk financing method for mitigating earthquake risk of portfolio of buildings, Proc. of International Symposium on Earthquake Engineering Commemorating 10th Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake, Vol. 1, A-61-70, 2005.1
講演	Sato I., Yashiro H., <u>Fukushima S.</u> : Seismic performance level of buildings considering risk financing, Proc. of International Symposium on Earthquake Engineering Commemorating 10th Anniversary of the 1995 Kobe Earthquake, Vol. 2, I-113-122, 2005.1
講演	<u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: Seismic performance level of buildings considering risk financing, 13th WCEE, Paper No.41, 2004.8
講演	福本幸成, <u>福島誠一郎</u> : 電力設備群の地震リスクアセスメント, 電力土木, No.309, 43-47, 2004.1
講演	<u>福島誠一郎</u> , 矢代晴実: 複数の地震リスクマネジメント施策を組み合わせたLCCに関する研究, 第27回地震工学研究発表会論文集, CD-ROM, 2003.12
講演	福本幸成, <u>福島誠一郎</u> : 電力設備群の地震リスクアセスメント, 日本リスク研究発表会第16回研究発表会講演論文集, 254-259, 2003.11
講演	<u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: Development of seismic hazard curves for the portfolio of facilities, Transaction of 17th SMiRT, Paper No.M02-2, 2003.8
講演	<u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: An analysis for conditioning setting in securitizing seismic risk, 3rd DPRI-IIASA international Symposium on INTEGRATED DISASTER RISK MANAGEMENT, 2003.7
講演	<u>Fukushima S.</u> , Yashiro H.: Effect of diversifying facilities on seismic risks of enterprises, 7th U.S./Japan Workshop on Urban Earthquake Hazard Reduction, 2003.3
講演	Yashiro H., <u>Fukushima S.</u> : Seismic risk analysis on portfolio of buildings in Japan, Symposium on Seismology, Earthquake Hazard Assessment and Risk Management, 2002.11
講演	<u>福島誠一郎</u> : リスク移転を考慮したポートフォリオリスクの定量化, 災害数学の現状と将来展望, 京都大学防災研究所(一般研究集会), 2002.11
講演	<u>福島誠一郎</u> , 矢代晴実: 多地点物件を対象とした地震リスクマネジメントについての一考察, 第26回地震工学研究発表会論文集, 1469-1472, 2001.8
その他(論文)	渡部弘之, 矢代晴実, <u>福島誠一郎</u> : サイクロンリスク証券化におけるパラメトリック・トリガーの条件設定に関する考察, インドにおけるサイクロンリスクのための基礎研究(その2), 日本建築学会計画系論文集, Vol.81, No.719, 109-116, 2016.1
その他(論文)	渡部弘之, 矢代晴実, <u>福島誠一郎</u> : サイクロンリスクにおける平均-標準偏差に基づくポートフォリオの分析, 日本建築学会環境系論文集, Vol.80, No.714, 665-671, 2015.8
その他(論文)	渡部弘之, 矢代晴実, <u>福島誠一郎</u> : インドにおけるサイクロンリスク解析のための確率モデルの基礎研究, 日本建築学会環境系論文集, No.621, 83-90, 2007.11
その他(論文)	新井伸夫, 矢代晴実, <u>福島誠一郎</u> : 資本市場からの資金調達に基づく防災まちづくり事業のリスク評価, 日本建築学会環境系論文集, No.589, 91-98, 2005.3
その他(論文)	新井伸夫, 矢代晴実, <u>福島誠一郎</u> : 防災まちづくり事業推進のための市場原理に則った資金調達手法に関する基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集, No.584, 91-98, 2004.10
その他(論文)	赤石沢総光, <u>福島誠一郎</u> , 安田登: 企業財務を考慮した地震保険によるリスク移転の評価に関する考察, 土木学会論文集, No.763/VI-63, 95-106, 2004.6
その他(論文)	新井伸夫, 矢代晴実, <u>福島誠一郎</u> : 都市の防災・復興における市場原理を活用した資金調達の提案, 日本建築学会総合論文誌, 第2号, 100-105, 2004.2
その他(論文)	新井伸夫, 矢代晴実, <u>福島誠一郎</u> : 市場原理に則った防災まちづくり事業の推進に関する基礎的研究, 構造物の安全性および信頼性, Vol.5, 91-96, 2003.11
	その他198件