

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

2023年7月

福島 誠一郎
Seiichiro FUKUSHIMA

This page intentionally left blank

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

2023年7月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

福島 誠一郎
Seiichiro FUKUSHIMA

This page intentionally left blank

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	2
1.2	マルチイベントモデルによるリスク評価	7
1.2.1	マルチイベントモデルの概念	7
1.2.2	マルチイベントモデルによるリスク評価手順	8
1.2.3	マルチイベントモデルによる利点と欠点	12
1.3	スカラー量による地震リスクの定量化	14
1.3.1	T年期待損失	14
1.3.2	予想最大損失	16
1.3.3	期待ショートフォール	18
1.4	既往の研究	19
1.4.1	建物の重要度係数に係る研究	19
1.4.2	耐震補強計画に係る研究	22
1.4.3	マルチイベントモデルの応用に係る研究	24
1.5	論文の構成	29
第2章	地震ハザードの相関を考慮した代替建物の配置	31
2.1	はじめに	32
2.2	地点間相関を考慮した地震ハザード評価の提案	34
2.2.1	拠点建物の地震ハザード評価	34
2.2.2	代替建物の条件付き地震ハザード評価	36
2.3	関東地域を対象とした適用例	39
2.3.1	諸条件の設定	39
2.3.2	解析結果	43
2.4	基準化加速度の面的な分布と代替建物の配置	48
2.4.1	諸条件の設定	48
2.4.2	解析結果	49
2.4.3	代替建物の配置に関する考察	51
2.5	まとめ	52

第3章	地震リスクに基づく建物群の耐震性能の設定	53
3.1	はじめに	54
3.2	建物群の損失に対する寄与	56
3.2.1	想定する地震リスク解析手法	56
3.2.2	建物群の損失への寄与	57
3.3	関東地域を対象とした適用例	61
3.3.1	諸条件の設定	61
3.3.2	寄与率の評価結果	67
3.3.3	寄与率と地震リスク曲線の関係	69
3.4	リスク低減に基づく耐震性能の設定	70
3.4.1	耐震性能の定義	70
3.4.2	最適耐震性能とその実現手順	70
3.4.3	最適投資額とリスク低減の関係	72
3.4.4	最適投資額と設計せん断力係数の関係	77
3.5	まとめ	78
第4章	周辺地域の被災程度に基づく耐震重要度係数の設定	81
4.1	はじめに	82
4.2	重要度係数設定の枠組み	84
4.2.1	重要度係数の設定指標	84
4.2.2	期待条件付損傷確率の評価方法	84
4.2.3	重要度係数の設定	86
4.3	期待条件付供用確率の試算のための条件設定	87
4.3.1	拠点建物と周辺地域の設定	87
4.3.2	拠点建物の地震フラジリティ曲線	88
4.3.3	周辺建物の地震フラジリティ曲線	98
4.4	期待条件付供用確率の試算	103
4.4.1	評価手順	103
4.4.2	評価条件	106
4.4.3	評価結果	106
4.4.4	諸条件が期待条件付供用確率に与える影響	110
4.5	重要度係数の設定	114
4.5.1	期待条件付供用確率に対応する重要度係数	114
4.5.2	現行の重要度係数の位置づけ	117
4.5.3	目標期待条件付供用確率の設定	118
4.6	まとめ	119

第 5 章	結論	121
5.1	本論文の結論	122
5.2	今後の課題	125
参考文献	128
付録	132
研究業績	140
謝辞	146

This page intentionally left blank

略語一覧

略語	英語	日本語訳／本論文での意味・説明
AEL	Annual Expected Loss	年期待損失／1年間に発生する損失の期待値
BCP	Business Continuity Plan	事業継続計画／企業が「自然災害や感染症など緊急事態が発生した際、重要な事業を継続させること、もし中断しても可能な限り短い期間で復旧させるための方法や体制を示す計画」のこと
CVaR	Conditional Value at Risk	条件付きバリュエーション・アット・リスク／所与の年超過確率で与えられる数値を超える数値の期待値
ECPA	Expected Conditional Probability of Availability	期待条件付供用確率／周辺建物が所与の被災状態にあるときに拠点建物が使用可能である確率の期待値、本論文で設定
ES	Expected Shortfall	期待ショートフォール／所与の年超過確率で与えられる損失を超える損失の期待値
MSC	Monte-Carlo Simulation	モンテカルロシミュレーション／確実な事象について起こりうる結果を推定するために使用される数学的技法
PGA	Peak Ground Acceleration	地表最大加速度／地表位置で規定される地震動の最大加速度
PGV	Peak Ground Velocity	地表最大速度／地表位置で規定される地震動の最大速度
PML	Probable Maximum Loss	予想最大損失／所与の年超過確率で与えられる損失
PRA	Probabilistic Risk Assessment	確率論的リスク評価／リスクの大きさを確率によって定量化する手法、原子力分野で広く用いられている
SFC	Seismic Fragility Curve	地震 fragility 曲線／構造物の脆弱性を表す関数で、横軸に地震動強さを、縦軸に損傷確率を取ったもの
SHC	Seismic Hazard Curve	地震ハザード曲線／地震動の発生確率を表す関数で、横軸に地震動強さを、縦軸に当該地震動強さを超える地震動の年間発生確率を取ったもの
SRC	Seismic Risk Curve	地震リスク曲線／地震リスクの発生確率を表す関数で、横軸に地震リスクを、縦軸に当該地震リスクを超えるリスクの年間発生確率を取ったもの
UHS	Uniform Hazard Spectrum	一様ハザードスペクトル／同一の年超過確率となるような応答加速度を周期毎に並べたもの、等確率スペクトルとも言う
VaR	Value at Risk	バリュエーション・アット・リスク／所与の年超過確率で与えられる数値

This page intentionally left blank

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

我が国は地震、風水害、火山噴火などの様々な自然災害に囲まれており、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。

不確実な地震に対して最も重要で基本となる対策は耐震基準の整備であり、表 1.1-1 に示すように、震災による教訓や研究成果を踏まえて法令や設計基準が随時整備されてきた^{1.1)}。昭和 25 年に建築基準法が制定され、いくつかの被害地震を経て 1980 年には建築基準法施行令が改正され、翌 1981 年から施行された。「新耐震」と呼ばれている現行の設計法は、動的な考え方を大幅に取り入れたものとなっている。また、1980 年代より、新しい構造システムとして免震構造や制震（振）構造が登場し、我が国における構造設計は新たな発展をみせている。

1995 年の兵庫県南部地震を契機に、日本においても「性能設計」への移行が唱えられ、(旧)建設省建築研究所・(社)鋼材倶楽部^{1.2)}、SEAO^{1.3)}、木村・他^{1.4)}が、建築物あるいは主要構造体のグレードに応じて 3 ないし 4 点の設計ポイントを要求する性能マトリクスを提案している。また、兵庫県南部地震においては、新耐震で設計された建物には甚大被害が発生しない一方、新耐震以前の設計法（旧耐震）で設計された建物の多くに被害が見られた。このことに基づき、旧耐震で設計された建物の耐震性能を向上させるために耐震改修促進法が制定され、施行された。なお、耐震改修促進法の対象は、防災上の機能が期待される建物や不特定多数の人が集まる建物等、特定構造物と呼ばれる建物に限定されている。

平成 10 年には、社会の多様化するニーズに対応すべく、性能を基盤とした建築構造設計体系（性能設計）^{1.5)}が示された。性能設計は使用性・修復性・安全性といった性能が所与の地震動強度において確保されることを求める設計体系で、地震動強度の設定や性能の評価方法の採択等、設計者に多くの裁量が与えられている。さらに、2011 年の東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえて、来るべき首都直下地震や南海トラフの地震に備えるために耐震改修促進法の改正が行われ、前出の特定構造物の範囲が拡大された。

ところで、建築基準法は守るべき基準を示すもので、施主や設計者はそれ以上の性能を与える裁量が与えられている。そこで、既存の設計法の枠組みを用い、耐震重要度係数という形で機能に応じた性能を付与することも行われている。例えば、「官庁施設の総合耐震・対津波計画規準」（国土交通省）^{1.6)}、「防災拠点となる建築物に係る機能継続ガイドライン」（国土交通省）^{1.7)}では耐震重要度に応じた性能の検討が求められている。また、一般建物を対象とした場合、住宅の品質確保の促進等に関する法律（国土交通省）^{1.8)}では、住宅の性能表示として耐震等級を設定し、所与の耐震重要度に応じた性能を確保している。既存建物については、耐震診断^{1.9)}により建物が保有する耐力が検討され、結果に応じて耐震補強が実施されている。耐震診断では耐震性の判断指標である構造耐震判定指標 I_{50} の算定に建物の用途が反映されることとなっている。

表 1.1-1 震災と耐震関連基準の変遷

年	地震	法規・規準等	備考
明 24	濃尾地震		れんが造の被害が大
治 25			震災予防調査会の設立
3		「家屋耐震構造論」(佐野利器)	設計震度の提案
大 8		市街地建築物法の公布 (1920 年施行)	建物の高さは 100 尺以下と制定
11		「架構建築耐震構造論」(内藤多仲)	たわみ角法の紹介
正 12	関東大地震		建物被害が大
13		市街地建築物法の改正	水平震度 0.1 の導入
8		鉄筋コンクリート構造計算規準の発表	耐震設計の計算法の提案
8	三陸地震		津波被害が大
16		鉄骨造計算規準の発表	
19	東南海地震		
22		日本建築規格 3001 号	長期・短期の導入, 震度 0.2
昭 23	福井地震		
25		建築基準法の制定	設計震度の改定
38		建築基準法の改正	高さ制限の撤廃
39	新潟地震		液状化による被害が大
43	十勝沖地震		短柱にせん断破壊
45		建築基準法施行令の改正 (1971 年施行)	せん断補強筋法の強化
和 46		鉄筋コンクリート構造計算規準の改定	せん断補強筋法の強化
49	伊豆半島沖地震		
50	大分県中部地震		
53	伊豆大島近海地震		
53	宮城県沖地震		都市型の地震災害
55		建築基準法施行令の改正 (1981 年施行)	新耐震設計法の制定
58	日本海中部地震		液状化の被害
5	釧路沖地震		
5	北海道南西沖地震		津波の被害が大
6	北海道東方沖地震		
平 6	三陸はるか沖地震		
7	兵庫県南部地震		都市直下型地震で, 被害甚大
7		耐震改修促進法の施行	耐震補への対応
成 10		建築基準法の改正	性能設計の導入
12		建築基準法施行令の改正	木造住宅対応
23	東北地方太平洋沖地震		
25		耐震改修促進法の改正	首都直下, 南海トラフ対応

また、建物をどこに建設するかという立地に関する検討も重要な対策である。耐震に係る立地検討で有用な情報は、当該地点で想定される地震動の大きさである。建築基準法では、耐震設計用の数値として地域係数 Z と振動特性係数 R_f が示されている。前者は日本列島を概観したときの地震動の相対的な大きさを示すもので、最大地震動に対する低減係数として与えられている。後者は地盤の揺れやすさを示すもので、地盤を第1種地盤～第3種地盤に分類している。

さらに近年では、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション^{1.10)}による日本全国のハザード関連マップの公開や各地方自治体のハザードマップや揺れやすさマップの提供等、立地検討のための情報が整いつつある。また、日本建築学会荷重指針^{1.11)}でも防災科学技術研究所との連携による設計用地震動マップや一様ハザードスペクトル (UHS : Uniform Hazard Spectrum) が掲載され、立地検討にも資する情報を得ることが可能になってきた。

本論文では、耐震に係る計画や検討を耐震計画と称する。以上に示したように、建物の耐震計画については、法整備や関連する技術開発が適時実施されてきたと言える。ただし、これらは建物単体に関するものである。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。例えば、一連の生産施設、サプライチェーンを構成する企業の保有建物、等が考えられる。また、災害対応拠点としての機能が要求される公共建物や避難所建物も、地域の建物とともに建物群を構成していると言えよう。

さて、建物単体に関する法整備や技術開発は、建物群を考えた場合には不十分な場合がある。例えば、地震ハザードマップは地点毎の評価結果の表示であり、複数地点に発生する地震動強度間の相関といった空間的な情報は有していない。そのため、複数地点に存在する建物群の地震時の被害を想定して耐震計画を進めるには不十分である。もちろん、想定地震による地震動マップあるいはリスクマップも存在しており、これらによる計画立案も行われているが、想定地震という「条件付き」の評価であることから、将来発生する地震について網羅的な計画であるとは言えない。また、2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震では、事業継続計画 (BCP : Business Continuity Plan)^{1.12)}のためのサプライチェーンの重要性が改めて確認されたが、サプライチェーンの性能を確保するには、単体の性能を確保するとともに、建物群を構成する建物の機能の連関も考慮した群としての耐震計画も必要になってくる。さらに、複数の建物を所有する企業が建物群の耐震性能を検討する場合には、所与の予算の中で最適な耐震性能の案分を模索することも考えられる。このように建物群を対象とした場合には、単体建物の場合には存在しない課題が発生する。

冒頭に述べたように、耐震計画とは地震に対する事前の備えであるから、将来の不確実な負の事象 (被害、損失等) を考慮する必要がある。このような不確実な負の事象は一般にリスクと呼ばれ、負の事象の大きさとその蓋然性の2つ観点で評価される。例えば、図 1.1-1 は性能設計で示されている性能水準マップであるが、横軸に状態 (負の事象の大きさ)、縦軸に入力地震動の大きさ (蓋然性) という2つ指標でリスクを捉えていることに相当する。なお、同図においては、

リスクの大きさは $A < B < C$ の順である。すなわち、性能設計とはリスクに着目した設計体系と考えることができる。

なお、本論文では、地震によるリスクを地震リスクと称する。

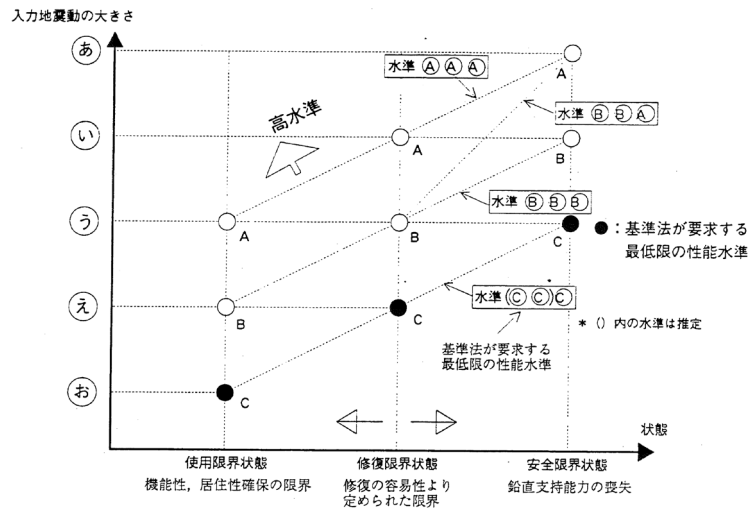


図 1.1-1 性能水準マップ (文献 1.5 より)

建物や構築物の地震リスクの定量化手法は、1970年代より原子力発電所施設を対象に地震PRA (Probabilistic Risk Analysis) ^{1.13)}として開発・実施されてきた。地震PRAでは、地震動強度と当該地震動強度を超過する地震動の年間発生確率(年超過確率)の関係を示す地震ハザード曲線(SHC: Seismic Hazard Curve)、地震動強度と建物の損傷確率の関係を表す地震フラジリティ曲線(SFC: Seismic Fragility Curve)が評価される。さらに、両曲線の合積により年損傷確率が評価され、この値が許容値以下であることで原子力発電所施設の安全性が担保される。なお、原子力発電所の地震PRAは対象の重要性が高いこともあり、前出のSHCやSFCの評価についても最新の知見が反映される。また、蓋然的不確実性の評価と併せて、認識論的不確実性も定量化される。

損害保険分野においても複数建物を対象としたリスク評価が実施されている。損害保険では自動車事故に対する保険料率算定のように過去の統計データを用いる対象もあるが、地震や台風といった自然災害に対しては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している。前述した原子力発電所施設の地震PRAとの主要な差異は以下のようである。

- ① リスク量として所与の年超過確率に対する対象建物群の被害費用あるいは被害率(再調達価額に対する被害費用の比)が採用している。

② 異なる地域に立地する複数建物を扱うことから SHC を利用することができない。

後者②への対応としては、SHC の代わりにマルチイベントモデル^{1,14)}を用いた評価が実施されている。ただし、その評価における地震ハザード評価や地震脆弱性評価においては、前出の原子力発電所の地震 PRA 等で培われた最新の知見が反映されている。なお、マルチイベントモデルについては、1.2 で説明を行う。

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への応用について検討することを目的とする。

1.2 マルチイベントモデルによるリスク評価

マルチイベントモデルは、主に損害保険分野におけるリスク評価手法として開発が行われてきた。手法が明快であるため、今では損害保険分野を越えて、その適用分野を広げている。本論文においてもマルチイベントモデルを応用して各章の検討を行っている。第2章では、イベント毎に拠建物地点とその代替建物地点の地震動強さを評価し、拠点建物地点の地震動強さを条件とした代替建物地点の地震動強さの期待値を求めている。第3章では、建物群全体の損失に対する各建物の損失の寄与率をイベント毎に評価し、寄与率の期待値を平準化することによる耐震投資策を提案し検討している。第4章では、イベント毎に周辺建物の被災程度を評価し、被災程度を条件とした拠点建物の使用可能性の期待値を求めている。

本節では、損害保険分野におけるマルチイベントモデルの解析手法を示すとともに、その出力である地震リスク曲線（SRC：Seismic Risk Curve）について説明を行う。

1.2.1 マルチイベントモデルの概念

建物群の損失をリスク量としたマルチイベントモデルを用いたリスク評価を説明する。その概念を図 1.2.1-1 に示す。同図に示されるように複数のイベント（離散化された震源）の1つ1つに対して建物毎に損失の評価を行い、その総和を建物群の損失とするものである。個々の建物については地震動強度と損失の関係が示されているのに対して、建物群についてはこの関係が示されていない。これは建物群に対する地震動強度のスカラー量が得られないためである。

イベント毎の損失の評価

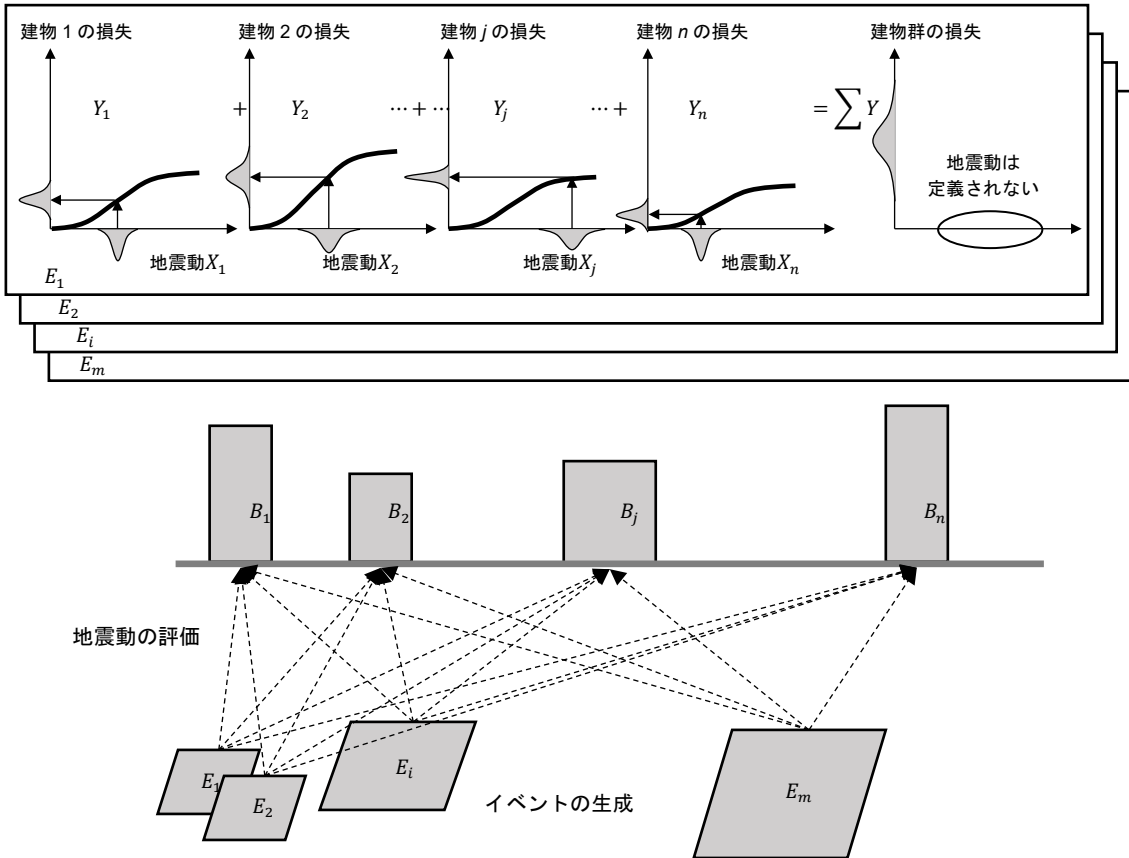


図 1.2.1-1 マルチイベントモデルの概念

1.2.2 マルチイベントモデルによるリスク評価手順

リスク評価の手順を以下に示す。

- 手順1 震源モデルからイベント*i*を生成する。
- 手順2 イベント*i*による建物*j*の地点における地震動強 x_{ij} を評価する。
- 手順3 地震動強 x_{ij} のモンテカルロサンプル X_{ij} を発生させる。
- 手順4 モンテカルロサンプル X_{ij} による建物群の損失サンプル Y_i を評価する。
- 手順5 損失サンプル Y_i とイベント*i*の年発生頻度から地震リスク曲線の評価する。

(1) 手順1：イベントの生成

イベントは離散化された震源で、地震ハザード解析と同様の震源モデルから生成する。各イベントは下記に示すような震源断層に関する巨視的情報を持つ。

基準点位置	東経, 北緯, 基準点深さ
形状	走向, 傾斜角, 断層長さ, 断層幅
地震規模	マグニチュード
地震活動度	年発生頻度

震源モデルは海溝型の巨大震源や活断層のような特定震源と中小地震を表す領域震源から構成されるのが一般的である。特定震源の場合には、特定震源＝イベントであるが、領域震源の場合には、位置、震源深さ、地震規模を離散化して複数のイベントを発生させる。その際、イベントの発生頻度は離散化方針に従って各イベントについて案分する。具体的には、位置と震源深さに関しては一様ランダムに、マグニチュードに関してはグーテンベルク・リヒター式に従って案分される。

(2) 手順2：イベントによる地震動強度の推定

所与のイベントに対する対象地点における地震動強度は地震動予測式を用いて推定する。地震動予測の方法には多くのものが提案されており、より詳細な波形合成法等もあるが、マルチイベントモデルでは想定するイベントと地点の組み合わせ数が膨大になるため、地震動予測式を用いることが殆どである。

地震動予測式とは、地震規模、震源深さ、評価地点と断層までの距離、地震タイプ等を変数として地震動強度を推定するもので、観測記録の回帰結果として得られる。地震動予測式の選定に関しては評価者に裁量を与えられているが、選定においては、観測記録に含まれるデータや観測点情報等を鑑み、当該評価に対して適切なデータから構築された式であることを確認する必要がある。

(3) 手順3：地震動強度のサンプルの生成

地震動予測式は地震観測記録の回帰式であるため、回帰誤差（推定誤差）が存在する。そのためイベントが確定したとしても想定される地震動強度には不確実性が存在する。地震動強度の不確実性は対数正規分布で表されることが多いが、地震動強度と損失は一般的には線形な関係になく、この不確実性によって生じる損失の不確実性は理論確率分布では与えられない。そこで、モンテカルロシミュレーション（MCS：Monte-Carlo Simulation）によって評価する。そのための地震動強度のサンプルをイベント毎・地点毎に生成する。なお、複数地点の地震動強度の不確実性には相関があるため、相関を有するサンプルの発生を行うことになる。具体的には、地震動強度の不確実性を震源に関する不確実性と伝播に関する不確実性に分離し、前者については完全相関を、後者については地点間の距離に応じた相関を与える。なお、地点数が多い場合には相関を有するサンプルの発生には膨大な計算労力を必要とするため、後者に関しては独立を想定することも実際的である。

イベント i による建物 j 地点の地震動強度の確率分布を地震動強度のサンプルの集合 X_{ij} とする。

また、 X_{ij} から生成した MCS の試行 k におけるサンプル値を x_{ijk} とする。

(4) 手順4：建物群の損失の確率分布の評価

地震動強度のサンプル値 x_{ijk} によって個々の建物に発生する損失を y_{ijk} とし次式で与える。

$$y_{ijk} = f_D(x_{ijk}) \quad (1.2.2-1)$$

ここに、 $f_D(x_{ijk})$ は地震動強度と損失を関連づける関数で、本論文では被害関数と称する。なお、被害関数は解析的に求めるもの、被害調査に基づくもの等があり、その選択は評価者の裁量である。解析的な方法では、複数の被害レベルに対応した SFC と対応する被害レベルにおける建物の被害額あるいは被害率（被害額を再調達価額で除したもの）を組み合わせる被害関数を作成する。建物の属性（構造種別、建物高さ、建設年、地盤種別、等）の反映が容易である反面、現実的な建物強さや損失の評価が困難であるという欠点がある。被害調査に基づく場合には、現実的な建物強さや損失の評価が反映されるものの、建物属性の反映が困難であったり当該被害の固有性（例えば、地震、地震動特性、地盤特性、等）の除去が困難であったりという欠点がある。

建物群の損失 y_{ik} は各建物の損失の単純和として次式で与える。

$$y_{ik} = \sum_{j=1}^n y_{ijk} \quad (1.2.2-2)$$

ここに、 n は建物群を構成する建物の数である。MCS の結果として得られた y_{ik} の集合 Y_i をイベント i による建物群の損失分布と見做す。

(5) 手順5：地震リスク曲線の評価

地震リスク曲線は建物の損失と当該損失を超える損失の年発生確率（年超過確率）の関係を表すもので、地震イベントリスク曲線あるいは地震リスク曲線の2つが用いられることが多い。

地震イベントリスク曲線はイベント毎のリスク量を代表値（例えば90%非超過値）で表し、当該イベントの発生確率と組み合わせるものである。他方、地震リスク曲線は地震イベントリスク曲線と異なり、イベント毎のリスク量を確率量として評価するものである。

地震リスク曲線の評価の前提として、全イベントについて、損失の分布 Y とイベントの年発生頻度 ν が得られているものとする。なお、地震リスク曲線からは地震リスク評価に用いる損失を求めることができる。具体的な損失とその評価方法については1.3に示す。

地震イベントリスク曲線

イベント j による損失の分布 Y_j に対して所定の非超過確率値 $y_j(c)$ を次式により求める。

$$y_j(c) = F_{Y_j}^{-1}(c) \quad (1.2.2-3)$$

ここに、 c は損失の非超過確率値で、 $0 < c < 1$ の値をとる。 $F_{Y_j}(\cdot)$ は建物群の損失の累積分布関数で、損失の分布 Y_j から求められる。 c はリスクの回避性向を表すもので、0.5 (50%) を代入した場合には損失の中央値が得られる。実際のリスク評価では90%の値が採用されることが多い。

次に、 $y_j(c)$ 以上の損失を与えるイベントの年発生頻度 v_i を累積し、年超過頻度 $v(y_j(c))$ を求める。これを示すのが次式である。

$$v(y_j(c)) = \sum_{i=1}^m u \cdot v_i \quad (1.2.2-4)$$

ここに、 m はイベントの総数である。 u は $y_j(c)$ の大きさに応じてイベントを採択するための変数で、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u &= 1, \text{ if } y_i(c) \geq y_j(c) \\ u &= 0, \text{ if } y_i(c) < y_j(c) \end{aligned} \quad (1.2.2-5)$$

$y_j(c)$ の値を横軸に、年超過頻度 $v(y_j(c))$ を縦軸にとったものが地震イベントリスク曲線である。なお、年超過頻度の代わりに年超過確率を用いることも多く、その場合はポアソン過程を用いて頻度 v を確率 p に変換する。これを示すのが次式である。

$$p = 1 - \exp(-v) \quad (1.2.2-6)$$

なお、式(1.2.2-4)が示すように、累積される頻度はイベントの発生頻度であるから、縦軸の年超過確率は、損失の発生確率ではなく、災害イベントの発生確率を示していることに注意が必要である。

地震イベントリスク曲線の利点として、損失とイベントの関係が明確であることが挙げられる。他方、イベント j による損失を確定値 $y_i(c)$ としているために、当該損失の発生頻度に寄与するイベントが二分され、一方は確実に寄与し他方は全く寄与しない等、現実的ではない仮定が導入されるという問題がある。

地震リスク曲線

所与の損失の閾値を y_0 とする。このとき、イベント i による損失が y_0 を超過する確率は次式で与えられる。

$$p(Y_i > y_0) = 1 - F_{Y_i}(y_0) \quad (1.2.2-7)$$

ここに、 $F_{Y_i}(\cdot)$ は建物群の損失の累積分布関数である。 $p(Y_i > y_0)$ はイベント i が発生したという条件付き確率なので、これにイベント i の年発生頻度 v_i を乗じ、さらに全イベントについて総和することで、閾値 y_0 を超過する損失の年発生頻度 $v(Y > y_0)$ を求めることができる。これを示すのが次式である。

$$v(Y > y_0) = \sum_{i=1}^m v_i \cdot p(Y_i > y_0) \quad (1.2.2-8)$$

y_0 の値を横軸に、年超過頻度 $v(Y > y_0)$ を縦軸にとったものが地震リスク曲線である。地震イベント曲線と同様、必要に応じてポアソン過程を用いて頻度 v を確率 p に変換する。式(1.2.2-8)が示すように、累積される頻度はイベントの発生頻度ではなく、損失予測の不確実性 $p(Y_i > y_0)$ を取り込むことでイベントによって損失が当該閾値を超過する頻度に換算されている。

地震リスク曲線は地震イベントリスク曲線と異なり、全てのイベントが寄与する。また、リスクの回避性向を表す非超過確率値 c が存在しないことから、評価者による任意性が排除されるという利点がある。その反面、損失とイベントの関係が明確に現れないため、具体的な地震像が把握しにくいことが欠点である。

1.2.3 マルチイベントモデルによる利点と欠点

(1) マルチイベントモデルの利点

リスク評価におけるマルチイベントモデルの最も大きな利点は、SHCを介さない点にある。そのため、前述したような複数地点に分布する建物群の損失評価を可能にするだけでなく、所与のイベントに対する地震動の空間的な評価により、建物間の機能連関の評価等への適用も可能となる。

また、地震ハザード解析の結果であるSHCでは埋没してしまうイベント固有のデータをその後の解析に繋げることができることも利点の1つである。例えば、SHCを用いた場合には、スカラー量である地震動強度のみが地震脆弱性解析に引き継がれるが、マルチイベントモデルでは地震規模や震源深さ、あるいは地震タイプといった情報を伝えることができ、より詳細なリスク解析が可能となる。

具体的な活用事例については1.4に示す。

(2) マルチイベントモデルの欠点

マルチイベントモデルの欠点は、MCSの援用に伴う計算負荷が膨大になることである。地震動強さとリスク量の関係が陽な形で与えられない場合、地震動強さの不確実性によるリスク量の不確実性を評価するにはMCSによらざるを得ない。リスク量の不確実性は確率分布として評価されるが、その評価精度はMCSの試行数に依存するため、精度の高い評価を実施するには相応の試行数が必要となる。また、少ない試行数で精度の高い評価結果を得るには、良質な乱数の発生が不可欠で、乱数の独立性（周期）と一様性を確保することが必要である^{1.15)}。

生成するイベントが膨大であるという点もマルチイベントモデルの計算負荷の増大に関わっている。地震動予測式を採用する場合、地点から遠いイベントについては計算から除外できるこ

とが知られている。しかしながら、広範な地域に立地する建物群を対象とした場合には、いずれの建物からも遠いことが必要となり、結果として建物単体の場合に比べてより多くのイベントを採用することになる。ところで、前述したようにイベントは大地震を発生させる特定震源と中小地震を発生させる領域震源から生成されるが、後者から生成されたものは数こそ多いものの結果として生じる地震動強度が小さい。したがって領域震源に対応したイベントについては少ないグループに集約することも、実際的な対応である^{1.16)}。

1.3 スカラー量による地震リスクの定量化

SRC は、損失と当該損失の年超過確率の関係を表すものである。地震リスクは、その大きさと発生蓋然性を用いて把握するのが重要であるので、SRC は優れたリスク表現手法であると言える。他方、複数の地震リスクを比較する場合には判断が困難な場合が生じる。なお、本節では地震リスクについて記載するが、その他のリスクに対しても適用可能である。

図 1.3-1 は模式的に 2 つの SRC を比較したもので、破線がリスク A を、実線がリスク B を表している。同図の左側は SRC が交差しない場合で、このときは、リスク A よりもリスク B の方が高リスクであると言える。すなわち、任意の損失に対してはリスク B の方がリスク A よりも年超過確率が高く、任意の年超過確率に対してはリスク B の方がリスク A よりも損失が大きいからである。他方、右側の図のように SRC が交差する場合には、交差点を境にリスク A とリスク B の大小関係が異なることになる。

そこで、地震リスクの相互比較や地震リスクの軽減量の確認等を行う場合には、いくつかの損失の定義が用いられている。

なお、本論文では第 3 章において、後述する予想最大損失を評価している。

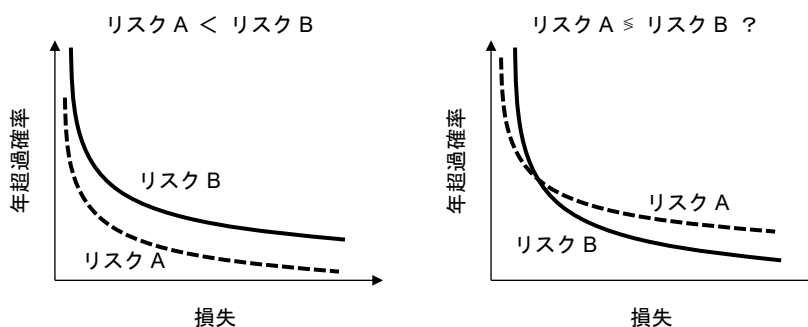


図 1.3-1 地震リスク曲線によるリスク比較

1.3.1 T 年期待損失

T 年期待損失は、今後 T 年の間に発生する損失の期待値であり、1 年間当たりの損失の期待値（年期待損失 AEL : Annual Expected Loss）に年数 T を乗じて求める。

1 年間当たりの損失の確率密度関数を $f_L(x)$ と表す。ここで、 x は損失である。このとき、T 年期待損失 $\tilde{x}(T)$ は次式で与えられる。

$$\tilde{x}(T) = T \cdot \bar{x} = T \int_0^{\infty} x f_L(x) dx \quad (1.3.1-1)$$

ここに、 \bar{x} は AEL である。

SRC を $R(x)$ とする。 $R(x)$ は、損失の確率分布関数 $F_L(x)$ を 1 から引いた値であるので、次式で表される。

$$R(x) = 1 - F_L(x) \quad (1.3.1-2)$$

確率分布関数 $F_L(x)$ の微分は確率密度関数 $f_L(x)$ であるので、式(1.3.1-1)の右辺の $f_L(x)$ を $R(x)$ の導関数 $R'(x)$ で表すと次式が得られる。

$$\bar{x} = \int_0^{\infty} x \{-R'(x)\} dx \quad (1.3.1-3)$$

したがって、部分積分により、次式が得られる。

$$\int_0^{\infty} x \{-R'(x)\} dx = \left[-xR(x) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(x) dx \quad (1.3.1-4)$$

式(1.3.1-4)の右辺第 1 項は、 $\lim_{x \rightarrow \infty} -xR(x) = 0$ 、 $\lim_{x \rightarrow 0} -xR(x) = 0$ より、定積分の値は 0 となる。右辺第 2 項は SRC の面積に相当する。第 1 項の極限については、発散することなく 0 に収束することを示す必要があるが、「 $\lim_{x \rightarrow \infty} -xR(x) = 0$ 」に関しては、地震動強度に頭打ちがあり、それを超える確率が 0 であること、「 $\lim_{x \rightarrow 0} -xR(x) = 0$ 」に関しては、地震動強度 0 に対する超過確率が 1 であることで、説明可能である。

式(1.3.1-4)では 0 から ∞ までの積分範囲を考えたが、損失の範囲として上下限值を設定する場合がある。例えば、損害保険であれば免責額や引受限度額の設定等が相当する。そこで、下限値を l 、上限値を u として式(1.3.1-4)を書き直すと次式が得られる。

$$\int_l^u x \{-R'(x)\} dx = \left[-xR(x) \right]_l^u + \int_l^u R(x) dx \quad (1.3.1-5)$$

式(1.3.1-5)の右辺を図化したものが図 1.3.1-1 である。同図の左下の図に示される長方形の面積 $lR(l)$ は下限値を 0 にした場合には 0 となり、同様に面積 $uR(u)$ は上限値を ∞ にした場合には 0 となることも伺える。

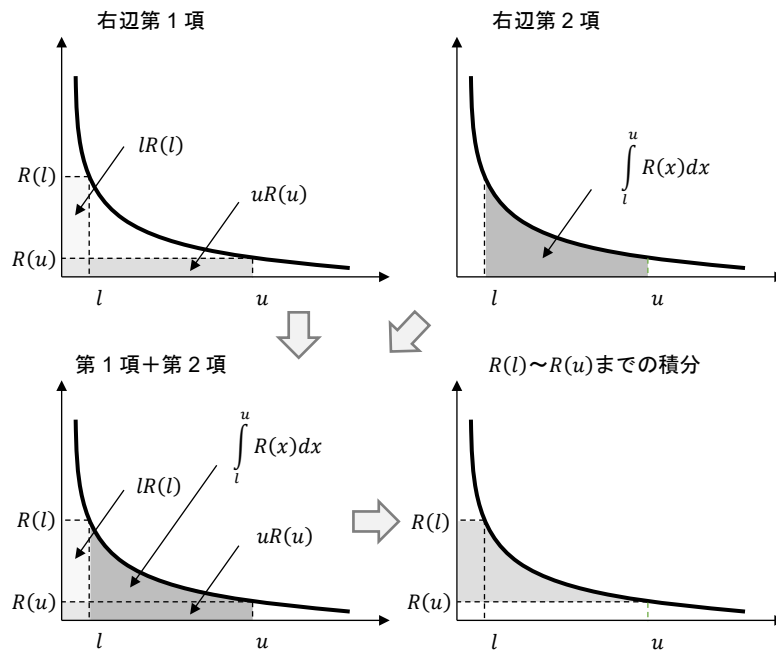


図 1.3.1-1 上下限を有する損失の地震リスク曲線表示

また、図 1.3.1-1 の右下の図から明らかなように、地震リスク曲線を Y 軸に沿って $R(l)$ から $R(u)$ まで積分することで、上下限值を有する AEL を求めることができる。これを示すのが次式である。

$$\int_l^u x\{-R'(x)\}dx = -\int_l^u x \frac{dR}{dx} dx = -\int_{R(l)}^{R(u)} x(R)dR = \int_{R(u)}^{R(l)} x(R)dR \quad (1.3.1-6)$$

ここに、 $x(R)$ は年超過確率 R が与えられたときの損失 x である。

1.3.2 予想最大損失

予想最大損失 (PML : Probable Maximum Loss) はバリュー・アット・リスク (VaR : Value at Risk) と呼ばれ、所与の年超過確率に相当する損失として定義される。本論文の第 3 章では、建物群の損失に対する各建物損失の寄与率を評価するが、その損失の定義として PML を採用している。

PML を x_{pml} 、所与の年超過確率を p_{ex} とすると、両者は次式で関係付けられる。

$$x_{pml} = R^{-1}(p_{ex}) \quad (1.3.2-1)$$

ここに、 $R^{-1}(\cdot)$ はSRCの逆関数である。 p_{ex} の与え方は想定する年数を T 、リスク回避性向を表す損失の許容確率を p_a とすると、 p_{ex} は次式で与えられる。

$$p_{ex} = 1 - (1 - p_a)^{1/T} \quad (1.3.2-2)$$

例えば、PML算定には、年超過確率1/475が用いられることが多い。これは、供用年数を50年、損失の許容確率を0.1とした場合に相当する。

さて、SRCが与えられたとき、損失 x とその年超過確率 $R(x)$ の積を考えると、これは図1.3.1-1において、 $lR(l)$ による長方形の部分に相当する。 $R(x)$ は損失 x 以上の損失の累積確率なので、 x を超える損失については x と見做していることになる。同時に、図1.3.1-1において l は下限値であることから、損失 x 未満の損失は発生しないことでもある。

すなわち、損失として x_{pml} を考えるとということは、 x_{pml} を超える損失は全て x_{pml} であり、 p_{ex} 未満の損失は全て0であると見做すことになる。このような確率分布の年間期待値を取って求めるなら、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \int_{x_{pml}}^{\infty} x_{pml} f_L(x) dx \\ &= x_{pml} \int_{x_{pml}}^{\infty} f_L(x) dx = x_{pml} R(x_{pml}) \end{aligned} \quad (1.3.2-3)$$

これは、図1.3.1-1とも整合する。さて、式(1.3.2-3)より、 x_{pml} はその年間期待値 \bar{x} を $1/R(x_{pml})$ 倍したことになり、これは $1/p_{ex}$ 倍したことと同じである。これを示すのが、図1.3.2-1である。

さて、式(1.3.2-2)を書き換えると次式が得られる。

$$1 - p_a = (1 - p_{ex})^T \quad (1.3.2-4)$$

である。ここで、 p_{ex} が1に比べて小さい値であると仮定すると、

$$p_a \cong T \cdot p_{ex} \quad (1.3.2-5)$$

となるので、前述の「AELを $1/p_{ex}$ 倍した」ことは、「AELを T/p_a 倍した」したことになる。

すなわち、PMLとは、PML以上の損失をPMLとし、またPML以下の損失が発生しないという条件で求めたT年間期待損失にリスク回避性向を反映したものと捉えることができる。PML以下の損失が発生しないという仮定は、例えば、「高頻度・低損失の事象は通常のコストとして参入し、地震リスクとは捉えない」とも考えられる。他方、PML以上の損失はPMLとするというのは、損害保険会社の引受限度額のようなものであり、慣例的に用いられてはいるが、地震リスクの指標としては適切ではない。

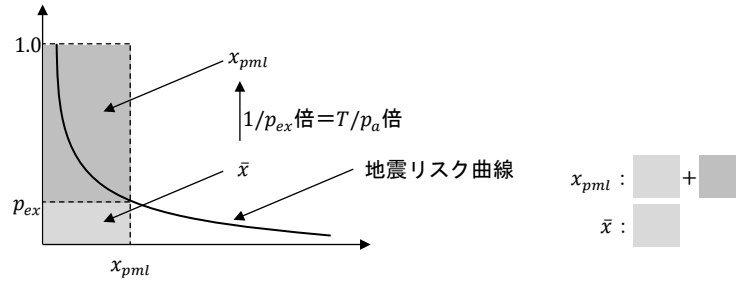


図 1.3.2-1 地震リスク曲線と PML の関係

1.3.3 期待ショートフォール

ショートフォールは金融の世界で、閾値を超えた部分を指し、期待ショートフォール (ES : Expected Shortfall) は閾値を超えた部分の平均 (重心) を示す。期待ショートフォールは、条件付きバリュー・アット・リスク (CVaR : Conditional Value at Risk) とも呼ばれる。所与の年超過確率を p_{ex} に対して予想最大損失 x_{pml} が与えられたとすると、期待ショートフォール x_{es} はその定義により、次式で与えられる。

$$x_{es} = \int_{x_{pml}}^{\infty} x f_L(x) dx \Big/ \int_{x_{pml}}^{\infty} f_L(x) dx \tag{1.3.3-1}$$

ここに、 $f_L(x)$ は前出の損失の確率密度関数である。

式(1.3.3-1)の右辺の分子は、式(1.3.1-5)において、 $l = x_{pml}$ 、 $u = \infty$ としたものであり、分母は p_{ex} であることから、下限値を x_{pml} 、上限値を ∞ とした \bar{x} を $1/p_{ex}$ 倍したものと言える。これを示すのが、図 1.3.3-1 である。

したがって、PML と同様の考え方をを用いるなら、期待ショートフォールは、下限値を PML とした T 年期待損失にリスク回避性向を反映したものと捉えることができる。

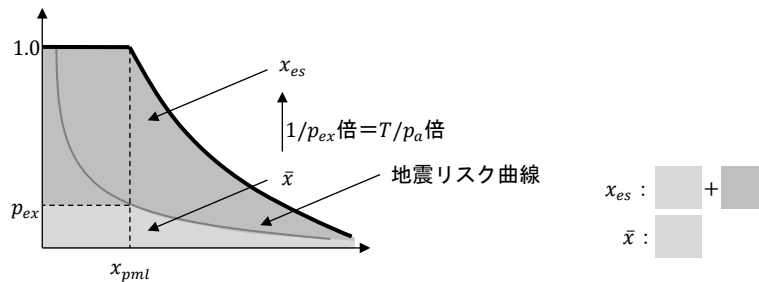


図 1.3.3-1 地震リスク曲線と期待ショートフォールの関係

1.4 既往の研究

本論文とも関連の深い既往の論文をまとめる。具体的には、建物の耐震性能の与え方に関するもの、耐震化における投資方針に関するもの、1.2 で示したマルチイベントモデルの応用に関するもの、の3つに分類し、論文の概要を示す。

1.4.1 建物の重要度係数に係る研究

本項では、建物の耐震性能の与え方に関する研究として、重要度係数の設定方法に係るものを取り上げた。

神原・他は期待総費用最小化原理に基づく方法と地震リスク一定の原理に基づく方法の2つを取り上げ、定式化を試みている。中村・他は期待総費用最小化原理に基づく方法を火力発電所建物に適用し、建物用途の特殊性が評価結果に与える影響を検討している。青木は期待総費用最小化原理の代わりに期待効用最大化原理を用いて重要度係数の設定を試みている。高田・神原は複数建物を対象として、期待総費用最小化原理に基づく重要度係数の設定方法提案している。

(1) 神原・他の研究^{1,17)}

社会的に重要な建物、地震後の復旧拠点となる施設、災害を軽減する施設等は通常の建物よりも設計用地震荷重を大きく設定する必要がある。本研究では、実在する事務所建物を対象として、初期建設費用、被害発生時の費用を考慮して重要度係数の定量化を試みている。定量化の方法として期待総費用最小化に基づく方法とリスク一定に基づく方法の2つを採用している。

期待総費用最小化に基づく方法では、初期建設費用と地震時被害額の期待値の和を期待総費用として、期待総費用を次式で求めている。

$$C_T(q) = C_I(q) + \sum_{i=1}^n P_{F_i}(q) \cdot C_{F_i} \quad (1.4.1-1)$$

ここに、 q は1次設計用ベースシア係数、 C_T は期待総費用、 C_I は初期建設費用、 C_{F_i} は被害事象 i の被害費用、 P_{F_i} は被害事象 i の発生確率、 n は被害事象の総数である。 $C_T(q)$ が最小となる時の q を最適ベースシア係数とし、現行設計のベースシア係数 $C_0 = 0.2$ との比を重要度係数 I_1 とする。

他方、リスク一定に基づく方法では、式(1.4.1-1)の右辺第2項が建物によらず一定であるという前提で、基準となる建物との相対的な関係で設計用ベースシア係数を定めるといふものである。すなわち、

$$\sum_{i=1}^n P_{F_i}^a(q^a) \cdot C_{F_i}^a = \sum_{i=1}^n P_{F_i}^b(q^b) \cdot C_{F_i}^b \quad (1.4.1-2)$$

となるような建物 b の 1 次設計用ベースシア係数 q^b に対する建物 a の 1 次設計用ベースシア係数 q^a の比を重要度係数 I_2 とする。

以上の考え方を東京都内に建つ事務所建物（鉄骨造，地上 8 階，延床面積 16,000m²）に適用し，重要度係数の評価を試みた結果， $I_1 = 1.5$ ， $I_2 = 1.8$ という値を得た。

本研究は重要度係数の評価法の提案と実装を示したものである。期待総費用最小化原理は考え方が明確であり，最適な設計用ベースシア係数が定量的に求められるという利点があるものの，機能上重要な建物であっても初期建設費用が増大するなら重要度係数は低いままで良いという結果にも繋がる可能性がある点が課題である。他方，リスク一定に基づく方法では，前記の課題はないものの，相対比較であるため，参照する建物の選択に恣意性が残るといった課題が存在する。

(2) 中村・他の研究^{1,18)}

本研究では，一般用途の建物と特殊用途の建物の差異は建築物の機能にあると捉え，機能の違いを要求性能に反映させることにより，一般建築物との連続性を維持できる「建築物の機能」に着目した要求性能に基づく耐震設計法の考え方を示している。なお，特殊用途の建築物の例として，原子炉施設，病院，発電所，美術館，銀行，計算機センターが挙げられている。

まず，建築物の機能レベルとして 5 段階のレベルを設定し，当該機能レベルを満足するに必要な構成要素の性能レベルを関連付けた。具体的な構成要素として，構造要素，非構造要素，建築設備機器，固有内容物が対象となっている。

次に，各構成要素の性能レベルを満足するに必要な個別部材の具体的な性能の関係（例えば，梁にヒンジが形成される，ブレースが破断する，等）を関連づけた。また，非構造部材に対しては層間変形角で損傷を規定し，建築設備機器と固有内容物については構造要素の性能を基に判断する。

さらに，提案手法を用いて，火力発電所タービン建屋の設計法を示している。建築物の機能レベルは 4 段階とし，火力発電所タービン建屋固有の機能として，以下を示している。

レベル 1	発電，定期点検に支障なし
レベル 2	当該建屋の使用を一部中止，定期点検時期・方法の見直しが必要
レベル 3	当該建屋の使用を全面中止
レベル 4	当該建屋での発電再開不能

上記の性能を有する建築物の設計地震力評価を期待総費用最小化原理により求めている。設計地震力と初期建設費用の関係は既往研究を基に判断し，地震時の損失については上記の性能から想定している。期待総費用を最小化するような 1 次設計用ベースシア係数は 0.6 となり，重要度係数 3.0 に相当する。この値は重要度係数としてよく用いられている 1.25 や 1.5 に比べて大きい，これは，建築設備機器や内容物の被害が構造部材の性能の関数として与えられており，

建築設備機器や内容物の耐震性能が反映されていないためである。建築設備機器や内容物の耐震性能が建物の1次設計用ベースシア係数に依存しないと想定した場合には、最適な1次設計用ベースシア係数は、建築設備機器や内容物の設計用ベースシア係数に等しくなる。

本研究は重要度係数の評価法の提案と実装を示したものである。ここでは、建物躯体に比べて内容物の資産額が大きいことが特徴であり、このような場合には、建物の耐震設計だけでは合理的な判断が難しいことが示されたと言える。

(3) 青木の研究^{1.19), 1.20)}

本研究では、建築空間を捉える視点として、物理的（力学的）性質、経済的性質、社会的性質の3つに類型化し、建築空間をこの3つのサブシステムからなるシステムとして定式化し、重要度をこのシステムの入力パラメータと捉えている。物理的サブシステムは重要度係数を与えると建物の破壊確率が定まるシステムとなり、経済的サブシステムは建設費と重要度係数を関係づけるサブシステムとなっている。社会的サブシステムは破壊確率によって定まる各状況下における建物利用の社会的効用を決定付けるシステムとなっている。

次に、総効用を建物使用期間内における社会的効用の総和から建設費を引いたものと考え、この効用が最大化する重要度係数を最適な重要度係数としている。これは、建設費を正の値とし、また効用の代わりに損失を用いて、その総和を最小化するという期待総費用最小化に対応するものである。

さらに、建設費当たりの効用変動率、建設費に当たり建設費の増加率を求め、外力及び耐力に関する確率分布が正規分布の場合、あるいは対数正規分布場合について重要度係数を求めている。ここで得られた重要度分布はパラメータ解析の結果であり、広範な値を示しているが、重要度係数1.0~1.6程度については、外力及び耐力の変動係数が0.4程度の場合に相当する。

本研究は期待効用最大化の観点で最適設計レベルの評価法を示したものである。物理的性質を損傷確率に、経済的損傷確率を初期建設費用に、社会的性質を被害費用と捉えるなら、期待効用最大化は期待総費用最小化の各項目の符号を変えたものと考えることができる。

(4) 高田・神原の研究^{1.21)}

本研究では、広域にわたって複数の建物を建設する地方の行政庁や、複数建物・設備を有する電力会社等の建設費用に最適配分を考えるため、建物間の破壊事象の相関を考慮した期待総費用最小化原理の複数建物への拡張を試みている。

まず、次式による複数建物を対象とした期待総費用を定式化している。

$$C_T(q_1, \dots, q_n) = \sum_{i=1}^n C_{ii}(q_i) + \sum_{i=1}^n P_{Fi}(q_i) \cdot C_{Fi} \quad (1.4.1-3)$$

ここに、 i は建物を表す添え字で、 q_i は1次設計用ベースシア係数、 C_T は期待総費用、 C_i は初期建設費用、 C_{Fi} は被害費用、 P_{Fi} は被害の発生確率、 n は建物数である。単一建物の場合と同様に、 $C_T(q_1, \dots, q_n)$ を q_i で偏微分することで建物毎に最適な設計ベースシア係数を求めることができる。

なお、建物の機能上の相関により損害が各建物の損害の単純累加とならない場合には、陽な形で解を求めることはできず、数値解析、あるいは上下限による推定幅を持つ評価にならざるを得ない。

本研究は複数建物について期待総費用原理を適用するための定式化を示したものである。定式化は明確であるが、機能の相関の反映等、解決すべき課題もあり、複数建物への適用は現実的には困難であると言える。

1.4.2 耐震補強計画に係る研究

本項では、耐震化における投資方針に関する研究として、耐震補強計画立案に係るものを取り上げた。

奈良岡・他は複数の耐震改修案の優先順位付けを行うことを目的に、内部収益率に基づいた評価方法を提案し、定式化している。奈良岡はさらに、複数建物を対象にした耐震投資の優先付けの方法を提案し、業務に依存関係がある建物群への適用を試みている。松下は Markovitz による平均-分散モデルを2棟からなる建物群の耐震補強に適用し、損失の平均と分散がともに小さくなるような投資策の存在可能性を検討している。

(1) 奈良岡・他の研究^{1,22)}

耐震改修においては、人命の安全性が最重要である一方、事務所ビルなどの収益用不動産においては、耐震改修も費用対効果の観点から意思決定されることがある。本研究では、費用対効果を考慮して建物群あるいは単独建物に対する複数の耐震改修案の優先順位付けを行うことを目的に、内部収益率に基づいた評価方法を定式化している。

建物 j について、耐震改修費用を c_j 、耐震改修前後の地震による損失の期待値をそれぞれ s_{0j} と s_{1j} 、内部収益率（キャッシュフロー系列の費用対効果）を irr_j 、供用期間数を n_j としたとき、これらの関係は次式で表される。

$$-c_j + (s_{0j} - s_{1j})/irr_j \cdot [1 - 1/(1 + irr_j)^{n_j}] = 0 \quad (1.4.2-1)$$

irr_j は費用対効果を表すので、 irr_j の大きいものから順位付けを行えば良い。

さらに、東京都千代田区と名古屋市中区に立地する旧耐震・鉄骨鉄筋コンクリート造の中小事務所ビルをモデルとして、提案手法の適用を行っている。なお、地盤種別は増幅率を 1.4, 1.6, 2.0 とした 3 種を設定し、被害は直接被害のみとしている。結果として、優先順位は地盤種別が支配的（増幅率の大きい方が優先度が高い）であり、各種別の中では名古屋よりは東京の方が、優先度が高いという結果を得た。

耐震改修によりいずれのケースも地震による損失が約半分となっているが、内部収益率はいずれも負となっており、このことは直接被害をのみを対象とした場合には耐震改修による地震損失の低減よりも、耐震改修費用の方が高いことを意味している。また、内部収益率を正にするには、間接被害を適切に評価し、計算に組み入れることが必要である。

本研究は耐震補強に係る費用対効果を指標として、費用対効果の大きなものから補強するという戦略を提案するものである。耐震改修目標が耐震診断基準を満たすこととしているので、費用対効果の観点で耐震補強量を定めるには至っていない。間接被害を考慮しない場合には耐震補強の妥当性が得られないというのも、間接被害の想定が一般に不確実であることを考えると、課題であると言える。

(2) 奈良岡の研究^{1,23)}

本研究は既報の続報で、複数の施設を対象にして、耐震投資の最適配分の決定を支援するための検討を行っている。具体的には、業務に依存関係があり、ある施設が被災することによって他の施設に被害が波及するような場合を想定している。

j 番目と l 番目の施設の波及被害の影響を考慮して、 l 番目の施設の被害による j 番目の施設への波及被害額の年期待値に対する係数を $\alpha(j, l)$ とすると、次式に示す r を最大化する c_j を求めることになる。

$$\sum_{j=1}^k \left[-c_j + \sum_{i=0}^{n_j} \frac{S_{0j} - S_{1j}}{(1+r)^i} + \sum_{l=1}^k \alpha(j, l) \gamma(c_l) \sum_{i=0}^{n_j} U(\min(n_j, n_l) - 1) \frac{S_{0l} - S_{1l}}{(1+r)^i} \right] = 0 \quad (1.4.2-2)$$

ここに、 $\gamma(c_l)$ は、 $c_l > 0$ のとき 1、 $c_l = 0$ のとき 0 となる関数、 U はステップ関数である。

以上の定式化の結果を、東京都、名古屋市、大阪市、仙台市に立地する旧耐震・鉄骨鉄筋コンクリート造の中小事務所ビルに適用している。地盤は既報と同じ増幅率を有する 3 種類である。検討の結果として、波及の程度により施設の優先度が異なることが示されている。

本研究でも間接被害を考慮しない場合には耐震補強の妥当性が得られないという結果になっている。ただし例題ではあるが、被害の波及により最適配分の結果が異なることは事業継続計画の立案等においては着目すべき結果であると言える。

(3) 松下の研究^{1,24)}

本研究は地域内に複数施設を保有する建築主が、耐震補強計画の初期段階で、補強投資比率の組合せ（ポートフォリオ）を概算的に決定できるようにすることを念頭に、明快な統計量による地震リスク判定基準を提案し、それに基づく意思決定モデルの理論整備を図ることを目的としている。

ポートフォリオ理論は元々ファイナンスの分野で展開されたもので、Markovitzによる平均-分散モデルがバイブル的な存在である。具体的には複数の株式に投資をする場合の最適組合せを平均と分散（不確かさの指標）という2つの尺度から求めようとするものである。投資比率を変数として、平均がより大きく、分散がより小さいという解を求めるのであるが、両者はトレードオフの関係にあるので一意には定まらず、パレート最適集合として解が与えられる。

本研究では株式投資における最適投資を、建物群への耐震補強に係る最適投資へと展開し、その実現性を検討している。株式投資の場合には、投資の結果として株価が変動しないという仮定を置くが、耐震補強投資の場合は投資の結果として損失の平均や分散が低減する点に特徴がある。また、耐震補強投資の場合は損失の平均と分散を指標とするため、両者とも小さくなるような範囲にパレート最適集合が存在する。

例題として、東京都内に2棟の耐震補強対象建物が存在するという設定で、最適補強投資比率決定のために平均-分散モデルの構築が行われた。さらに数値計算により、補強投資チャート（平均-標準偏差関係図）の有効性を検証し、平均の極小条件を満たせば、意思決定者は補強投資チャートを用いて最適解を選出できることを示した。

本研究では、2棟の建物を対象に、平均と分散（あるいは標準偏差）の2指標に基づき、最適な補強投資の設定方法を提案している。リスク評価ではPMLとして90%非超過値がしばしば用いられているが、これは平均と標準偏差の組み合わせ方の1つである。平均と標準偏差の組み合わせをより弾力的にしたのが本研究の成果である。なお、本研究では2棟の建物を扱っているが、3以上の建物に拡張することは今後の課題であると結んでいる。

1.4.3 マルチイベントモデルの応用に係る研究

本項では、マルチイベントモデルの応用可能性を把握するため、損害保険分野以外での活用を取り上げた。

林・他はイベント毎に最大加速度と最大速度の同時確率分布を求め、イベントの発生頻度を重みとした加重和により同時地震ハザード曲線を評価している。Satoda *et al.*はマルチイベントモデルの優位性の1つである地震情報の保存性を用いて最大加速度と地震マグニチュードをイベント毎に求め、各イベントにおいて液状化計算を実施することによって液状化危険度評価を実施している。また、イベント毎に複数の指標を評価することにより、複数指標の同時ハザードの

評価も試みている。西川・他はイベント毎に各建物の損傷確率を評価し、フォールトツリー解析により機能連関のある建物群の系としてのリスクを評価している。堀・他は事業継続計画の策定支援を目的として、拠点建物が被災したときの支援建物の使用性を確率的に評価するとともに、支援建物の配置についても検討を加えている。

(1) 林・他の研究^{1,25)}

地震動強度の確率論的な記述として SHC が用いられている。SHC は所与の地震動強度とその年超過確率の関係を表すものであるが、単一の地震動強度を指標とすることでその他の情報を棄却してしまうという欠点がある。そこで、本研究では、単一の地震動強度の代わりに2つの地震動強度の年同時超過確率を示す地震ハザード曲面を提案している。用いた地震動強度は、最大加速度（PGA：Peak Ground Acceleration）と最大速度（PGV：Peak Ground Velocity）である。

SHC の評価では、イベント毎に地震動強度の確率密度関数を評価し、閾値を超過する確率を求めるが、地震ハザード曲面の評価では、図 1.4.3-1 に示すように、同時確率密度関数から同時超過確率を求めている。なお、同時確率密度関数の評価には PGA と PGV の不確実性の相関の評価が必要であり、本検討では K-NET と KiK-net の観測記録を用いた結果、0.75 という値を得ている。

さらに、得られた評価手法を関東地域の複数の地点に適用し、内陸の地震が支配的な北関東地域と海溝型の地震が支配的な南関東地域では地震ハザード曲面に明確な差があることが示された。また、感度解析として、マグニチュードの変数として相関を与えた場合、震源距離の変数として相関を与えた場合の結果も示されている。

本研究はマルチイベントモデルの活用方法の 1 つとして、地震ハザード評価における活用事例を示したものである。本研究成果を活用する場合には地震ハザード評価と対になる PGA と PGV を指標として地震フラジリティ曲面の開発が今後必要となろう。

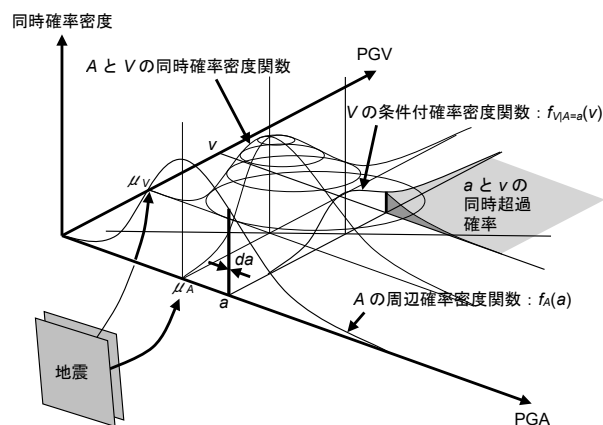


図 1.4.3-1 イベントによる同時超過確率

(2) Satoda *et al.*の研究^{1,26)}

マルチイベントモデルの優位性の1つとして、地震動強度以外の情報を引き渡すことができることが挙げられる。本研究では、地震動強度であるPGAとともに、マグニチュードの値を引き渡すことで、確率論的な液状化危険度評価を実現している。

確率論的評価を目的としているため、液状化解析も詳細なものではなく、建築基礎構造設計指針に記載されている簡易手法を採用している。具体的には、イベント毎にMCSによるPGAのサンプルを生成し、当該イベントのマグニチュードとPGAサンプルから液状化リスク値(PL値、沈下量、側方流動量)のサンプルを発生させ、液状化リスク値の確率分布を評価している。さらに、その結果を全イベントについて統合することで液状化リスクに係るSHCを評価している。

液状化しない場合には上記の液状化リスク値は0となるので、液状化リスク値の確率分布も地震動強度とは異なり対数正規分布で表現することができない。本研究では、リスク量が0となる離散確率値と0以外の確率分布に結果を案分した上で全体の確率分布を評価している。また、このようにイベント毎にリスク値を評価するため、複数のリスク値に対する同時ハザード曲面評価も可能である。評価例を図1.4.3-2に示す。

本研究はマルチイベントモデルの活用方法の1つとして、液状化による確率論的ハザード解析を行っている。液状化危険度の評価では地震動の継続時間が重要であり、それを想定するための条件としてマグニチュードが引き渡されている。マグニチュードが関係する情報としては地震動の継続時間の他にも周期特性があり、例えばPGAと組み合わせることでイベント毎に応答スペクトルを推定することも適用事例として考えられる。

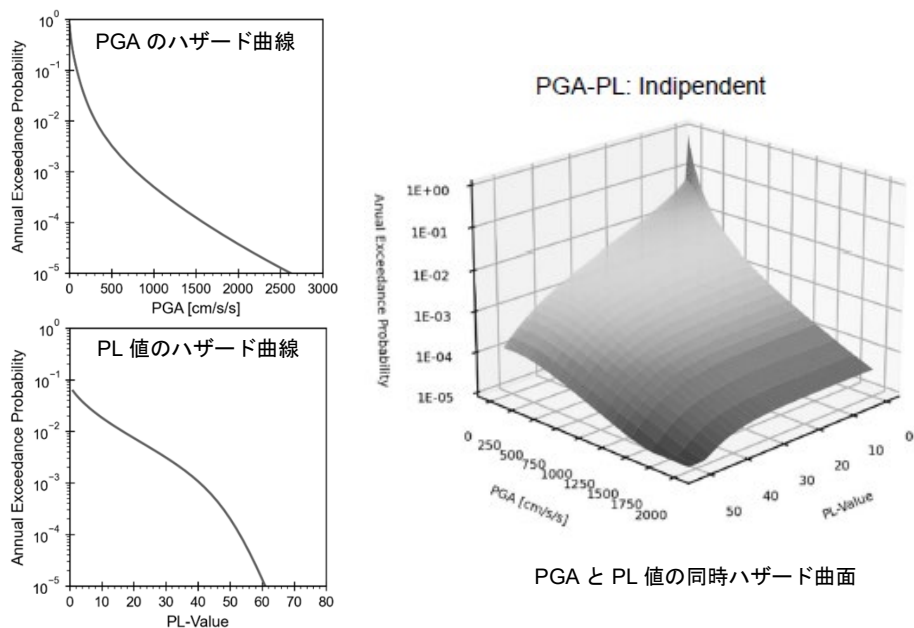


図 1.4.3-2 マルチイベントモデルによる確率論的液状化危険度解析

(3) 西川・他の研究^{1,27)}

企業の事業継続を確実なものとするため、サプライチェーンの確保が重要視されている。本研究ではマルチイベントモデルの活用の一つとして機能連関を有する建物群のシステムとしての地震リスクを評価し、サプライチェーンの選定が地震リスクに与える影響を検討している。

リスクの指標としては、業務停止期間が採用され、システムとしての機能の連関は直列／並列でモデル化されている。直列の場合は系を構成する各建物の最大停止期間を、並列の場合は各建物の最小停止期間としている。

図 1.4.3-3 に示すように、東京 23 区内に配置した 5 建物、関東地域に配置した 5 建物、東京から 300km 県内に配置した 5 建物について、それぞれ、直列型、並列型、併用型のモデルサプライチェーンを構築した。本検討の結果として、サプライチェーンの業務停止に係るリスク曲線の評価が可能であることが確認された。また、定量的評価を行うことで、業務停止にクリティカルな建物の抽出、地理的な建物分散の効果の把握等が可能になることが示された。このリスク解析手法は、サプライチェーンに依存する企業が BCP を考える上で、拠点をどのように配置するか、クリティカルな拠点をどのように多重化するか等の経営戦略立案の有力なツールとなる。

本研究はマルチイベントモデルの活用方法の一つとして、機能的な相関を有する建物群のリスク評価を実施したものである。システムの連関解析としてイベントツリーを採用し、エンドブランチの値の計算の方法により直列系・並列系のそれぞれを表現している。建物地点位置での地震動評価は共通であるが、地震動による損傷評価の部分を適宜工夫することで、より複雑な事象のリスク評価に適用可能であることが示されている。

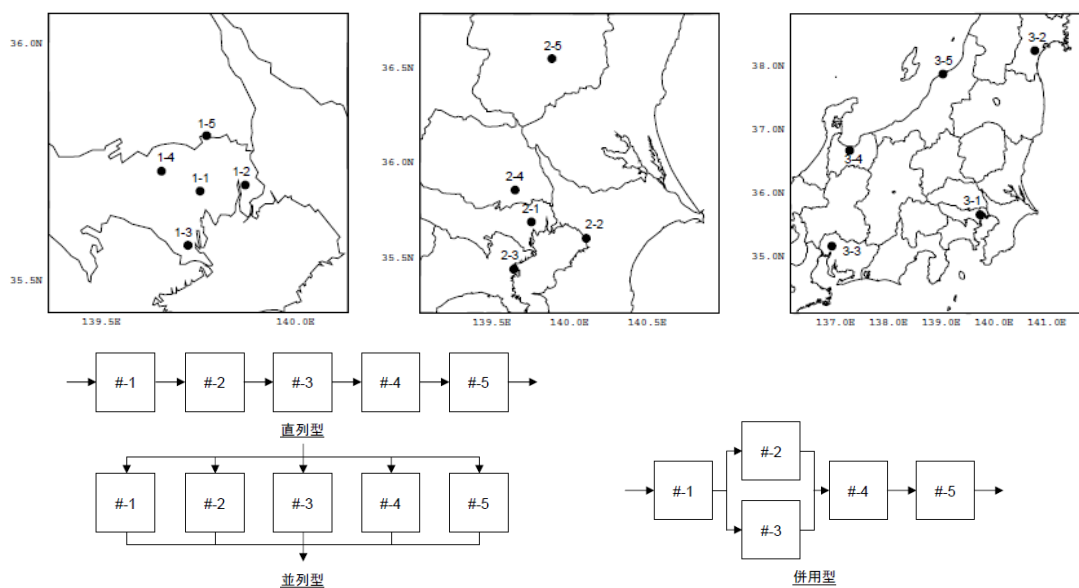


図 1.4.3-3 西川・他の研究における建物配置と連結性

(4) 堀・他の研究^{1,28)}

地震後の事業継続を確実なものとするには、被災事業所建物（以下、拠点建物）の被害を予め想定しておくとともに、当該事業に係る業務建物、インフラ施設、従業員住宅といった建物・施設（以下、支援建物）についても、その被害を想定しておき、適切な事業継続計画を策定することが必要である。本研究は、確率論的な評価を基本として拠点建物の被害と支援建物の被害の関係を定量化し、事業継続に資する手法の構築を目的として実施されたものである。

拠点建物の被害と支援建物の被害の関係は、拠点建物が所与の損傷レベル（L1～L3 とし、変形角で規定）にあるときの支援建物の損傷レベルの期待値により定量化している。具体的には、図 1.4.3-4 の左図に示す建物配置を対象に、拠点建物（00）と支援建物（01-15）の損傷の関係を評価している。

また、事業継続においては、支援建物の使用可能性とともに、支援建物までの距離も重要である。そこで、拠点建物と支援建物の距離と支援建物の使用可能性の関係について検討を行っている。拠点建物の被害が L1, L2, L3 であるときの周辺建物の使用可能確率と拠点建物までの距離の関係を図 1.4.3-4 の右図に示している。同図によれば、拠点建物の被災状況に応じた各支援建物の使用可能性が評価されるため、地点間の距離と併せて、より現実的な事業継続計画の策定が可能になる。また、事業継続の観点で必要な支援建物数を想定することができれば、耐震補強や代替施設の確保といった具体的な事前対応策につなげることも可能である。

本研究はイベント毎に建物の応答を求め、建物の被害を想定するもので、マルチイベントモデルの応答として捉えることができる。また、損傷の相関の評価に留まらず建物間距離と使用可能性の関係を評価することにより、配置の検討に資することができる。

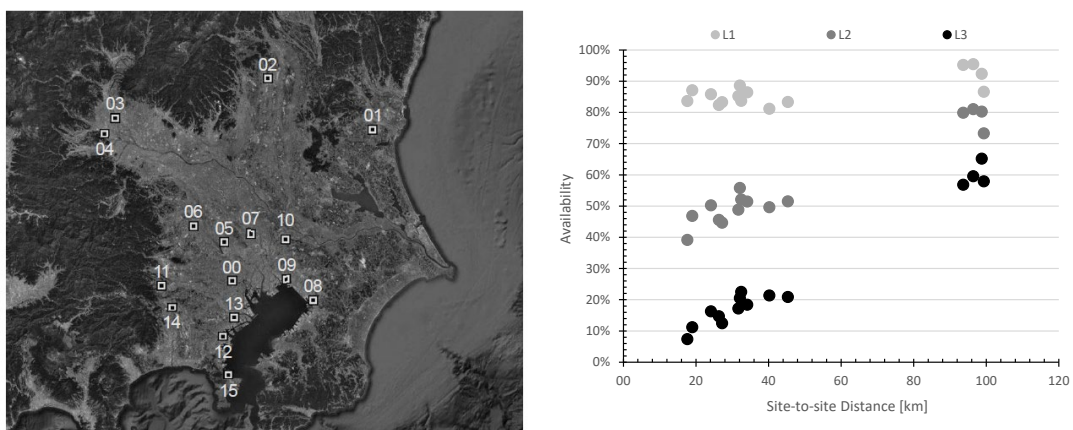


図 1.4.3-4 堀・他の研究における支援建物の使用可能性（00：拠点建物，01-15：支援建物）

1.5 論文の構成

本論文は5つの章から構成されている。

第1章は序論である。研究の背景と目的、本論文全体の解析の基本となるマルチイベントモデル、損失の定義、関連する既往研究の整理、本論文の構成について述べる。

第2章では、耐震計画の内、建物群の配置計画について検討を行う。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する。また、条件付 SHC から得られる 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 の比を求め、その空間分布を示す。

さらに、条件付 SHC 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配置について考察を行う。

第3章では、耐震計画の内、建物群への耐震投資の最適配分について検討を行う。ここで耐震投資の配分とは、所与の建物群に対する資産の配分、耐震投資の配分、の2つを言う。資産の配分についてはある程度自明であり、地震危険度の低い地点に立地する建物に多くの資産を、地震危険度の高い地点に立地する建物に少ない資産を配分することが望ましく、本章ではそれを確認する。

まず、建物群としての損失を地震リスクの指標とし、建物群の損失に対する各建物の損失の寄与を求める。資産配分に関する検討に基づき、各建物の寄与が平準にすることが建物群の損失の低減に繋がることを確認する。

次に、耐震投資を耐震性向上とし、与えられた投資額(ここでは耐震性向上に係る費用とする)の中で最大効果を与える配分方法を提案するとともに、モデル建物群に適用してその妥当性を検証する。

第4章では、耐震計画の内、拠点建物の保有すべき耐震性能について検討を行う。拠点建物周辺の建物(周辺建物)に甚大な被害が発生している場合に拠点建物が使用可能である必要があるか、あるいは、周辺建物が健全な場合に拠点建物が使用可能である必要があるか、については拠点建物に求められる機能によって判断が分かれる。

本章では、まず、周辺建物の地震時の状況を条件とした拠点建物の供用性を建物の耐震性能を表す指標として採用し、その定量化の方法を提案する。次に、モデル建物群を対象に、提案手法

第1章

の実現可能性を確認するとともに、評価における条件設定が当該指標に与える影響を感度解析により検討する。

さらに、提案手法で得られる指標を基に、拠点建物の重要度係数の設定可能性について検討するとともに、既存の重要度係数と当該指標の関係について考察を加える。

第5章では、本論文の各章で得られた成果を記載するとともに、今後の展望について記載する。

第2章 地震ハザードの相関を考慮した代替建物の配置

2.1 はじめに

企業は経営の安定を図るため、企業を取り巻く様々なリスクについて回避方策を採る。その1つに多重防護があり、その具体的な方策として代替建物を準備しておくことは有効な施策である。代替建物の設置が検討されるものには、例えば、データセンターや災害対策本部がある。同一のデータを複数のデータセンターで保管することで、全てのデータが同時に毀損する確率を極めて低く抑えることができる。また、災害対策本部が設置される建物が被災した場合に、代替建物に対策本部を移転することで迅速な対応活動を維持することができる。このように、代替建物を準備しておくことで、その機能確保が補強される建物（拠点建物）のリスクは、代替建物のリスクとともに検討されなくてはならない。

ところで、偶発事故や局所的に発生する災害に対しては、前述したような代替建物による冗長性が有効に発揮されると考えられる。他方、地震リスクは、地震という共通事象により引き起こされるリスクであり、広域かつ同時に発生するため、前述した冗長性が発揮されないことが考えられる。例えば、拠点建物に近接した地点、南海トラフのように震源域が広く拠点建物と同程度の地震動が発生する場合、あるいは、より大きな地震動強度の発生が予想される地点に代替建物を設置した場合には、代替建物設置の効果が薄いことは容易に理解できる。

地震リスクの回避という観点からは、地震活動が低く拠点建物と離れた地域に代替建物を設置することが合理的である。しかし現実には、「電子媒体は直ちに移動できるが書類等の重量物は移動が困難である」、「既存の工場の近くに新たに工場を建設したい」、「一部の地域でのみ事業を展開している」というように、代替建物を拠点建物近くに設置することが望ましい、あるいは、そのように設置せざるを得ない状況が十分に想定できる。すなわち、代替建物の配置はリスク回避と企業活動の円滑化という相反する条件を考慮して決定されなくてはならない。この企業活動の円滑化には、地震対策本部設置等の非常時の行動も含まれる。

本章では、拠点建物と代替建物からなる建物群を想定し、「冗長建物群」と称する。冗長建物群が従来の地震リスク解析^{2.1)~2.3)}で用いられてきた建物群と異なるのは、構成する建物の機能に連関があり、拠点建物のバックアップとして代替施設を位置づけている点にある。すなわち、拠点建物が被災したという条件での代替建物の使用性が問われることになる。

したがって、冗長建物群の地震リスク解析を行う場合には、SHCの設定が問題となる。拠点建物と代替建物が近接している場合には同一のSHCを用いることも妥当であると考えられるが、代替建物が拠点建物から離れている場合、拠点建物と同一のSHCを用いることは不合理である。一方、拠点建物の地震ハザード評価とは独立に代替建物のSHCを採用することは、異なった地震による地震ハザードを同時に考えていることとなり、1つの系としての冗長建物群のリスクを検討する上では不適切である。

そこで、拠点建物の SHC との相関を考慮した代替建物用の SHC として条件付 SHC を提案する。また、条件付 SHC の活用方法として、面的なハザード値の分布に基づく代替建物の配置を示す。

2.2 地点間相関を考慮した地震ハザード評価の提案

ここでは、まず、拠点建物の地震ハザード評価について現行の方法を説明する。地震ハザード評価は概念的にはマグニチュードの確率分布や距離の確率分布で定式化されるが、実際に評価においてはマルチイベントモデルであり、本章とも親和性が高い。さらに、拠点建物の地震動強度との相関を有する代替地点の地震動強度に基づき、代替建物の地震ハザード評価方法を提案し、定式化する。

2.2.1 拠点建物の地震ハザード評価

地震ハザードは、地震動強度が所与の値 a を超える年間確率（年超過確率） $P(a)$ で表され、地震発生過程としてポアソン過程を想定した場合には、次式で与えられる。

$$P(a) = 1 - \exp[-v(a)] \quad (2.2.1-1)$$

ここに、 $v(a)$ は地震動強度が a を超える年間頻度（年超過頻度）であり、活動域毎のマグニチュードや震源距離、あるいは距離減衰式のばらつき等を確率変数として、次式のように表される。

$$v(a) = \sum_{k=1}^n v_k^* \int_m \int_x f_{M_k}(m) f_{X_k}(x) p(a|m, x) dx dm \quad (2.2.1-2)$$

ここに、

- v_k^* : 活動域 k での地震の年発生頻度
- $f_{M_k}(m)$: 活動域 k におけるマグニチュードの確率密度関数
- $f_{X_k}(x)$: 活動域 k に対する距離の確率密度
- $p(a|m, x)$: マグニチュード m 、距離 x の地震が発生した場合に、地震動強度が a を超える確率
- n : 活動域の個数

である。

ところで、実際の地震ハザード評価では、マグニチュードに応じた破壊面を仮定し解析地点までの最短距離を求めるといようにマグニチュードと距離が独立でない場合もあり、また、変数に震源深さが含まれる等、より現実的で複雑な評価が求められている^{2,4)}。そのため、(2.2.1-2)式を用いる代わりに、活動域毎にマグニチュードに応じた地震を想定し、これを活動域内に一様ランダムに配置して地震ハザードを求めることが行われている。これを示すのが次式である。

$$v(a) = \sum_{k=1}^n v_k^* \sum_{i=1}^{nm_k} p_k(m_i) \frac{1}{nx_k(m_i)} \sum_{j=1}^{nx_k(m_i)} p(a|m_i, x_j, h_i) \quad (2.2.1-3)$$

ここに,

v_k^* : 活動域 k での地震の年発生頻度

$p_k(m_i)$: 活動域 k でマグニチュード m_i の地震が発生する相対頻度

$p(a|m_i, x_j, h_i)$: マグニチュード m_i , 距離 x_j , 深さ h_i の地震が発生した場合に, 地震動強度が a を超える確率

n : 活動域の個数

nm_k : 活動域 k で考慮するマグニチュードの離散化数

$nx_k(m_i)$: 活動域 k でマグニチュード m_i の地震が発生した場合の破壊面数

である.

(2.2.1-3)式によれば, 膨大な数のイベントによる地震ハザードの総和として拠点建物の地震ハザードが計算されることがわかる. すなわち, 対象地点の地震動強度をリスク量とした場合のマルチイベントモデルが地震ハザード解析である.

地震ハザードに寄与する地震という観点からは, 震源やマグニチュードに応じてイベントを分離する必要はない. そこで, 議論を容易にするため, 以下のように(2.2.1-3)式を書き換える.

$$v(a) = \sum_{i=1}^N v_i p_i(a) = \sum_{i=1}^N v_i \Phi \left[\frac{\ln(\check{A}_i/a)}{\zeta} \right] \quad (2.2.1-4)$$

ここに,

v_i : イベント i の年発生頻度

$p_i(a)$: イベント i が発生したという条件で, 地震動強度が a を超える確率

\check{A}_i : イベント i による評価地点で発生する地震動強度の中央値

ζ : 地震動予測式の不確実性を表す自然対数標準偏差

$\Phi[\cdot]$: 標準正規分布関数

N : イベント数

である.

2.2.2 代替建物の条件付き地震ハザード評価

ここでは、代替建物の条件付き地震ハザードを「拠点建物位置に所与の大きさ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」と定義する。このような定義により、拠点建物と代替建物における地震動強度の関係を得ることができる。

イベント*i*が発生したときに、所与の地震動強度*a*の年間発生頻度 $\lambda_i(a)$ を次式で与える。

$$\lambda_i(a) = v_i \times \left(\Phi \left[\frac{\ln(\check{A}_i/(a - \Delta a/2))}{\zeta} \right] - \Phi \left[\frac{\ln(\check{A}_i/(a + \Delta a/2))}{\zeta} \right] \right) \quad (2.2.2-1)$$

ここに、 Δa は地震動強度の刻み幅である。地震動強度*a*と地震動予測式で得られる中央値 \check{A}_i は次式で関係付けられる。

$$a = \check{A}_i \times \exp(\beta\zeta) \quad (2.2.2-2)$$

ここに、 β は中央値からの乖離の度合いを規定する係数で、信頼性指標と称する。

さて、地震動予測式の不確実性は、震源の破壊過程における不確実性と伝播における不確実性に分離される^{2.5)}。前者の不確実性を表す対数標準偏差を ζ_S 、後者の不確実性を表す対数標準偏差を ζ_P とし、これらは互いに独立であるとする、次式のように関係付けられる。

$$\zeta^2 = \zeta_S^2 + \zeta_P^2 \quad (2.2.2-3)$$

ζ_S と ζ_P を用いて(2.2.2-2)式を次式のように表す。

$$a = \check{A}_i \times \exp(\beta_S\zeta_S + \beta_P\zeta_P) \quad (2.2.2-4)$$

このとき、信頼性指標である β_S と β_P は次式で与えられる。

$$\beta_S = \beta \times \frac{\zeta_S}{\zeta} \quad (2.2.2-5)$$

$$\beta_P = \beta \times \frac{\zeta_P}{\zeta}$$

なお、信頼性指標を β_S と β_P に分離したのは、後述するように震源過程の不確実性に関する地震動強度の変動の相関と、伝播の不確実性に係る相関が異なるからである。

震源の破壊過程における不確実性は拠点建物及び代替建物について共通である。これに対して伝播における不確実性は地点間距離に応じた相関を有すると考えられる。これを踏まえて、イベント*i*による拠点建物位置の地震動強度が*a*となるときに代替建物位置の地震動強度の $\check{a}_{j|i}(a)$ を次のように定める。

$$\check{a}_{j|i}(a) = \check{A}_{j|i} \times \exp(\gamma_S\beta_S\zeta_S + \gamma_P\beta_P\zeta_P) \quad (2.2.2-6)$$

ここに、 $\bar{A}_{j|i}$ はイベント*i*によって代替建物*j*の位置に発生する地震動強度の中央値である。

係数 γ_S と γ_P は拠点建物と代替建物の位置における地震動予測式の変動の相関を表す相関係数で、 $\gamma = 1$ であれば完全相関を、 $\gamma = 0$ であれば独立を表す。ここでは、次式に示すように相関係数 γ を設定した。

$$\gamma = \exp(-kx) \quad (2.2.2-7)$$

ここに、 x は拠点建物と代替建物の地点間距離、 k は地点間距離による相関の低減度合いを規定する係数である。なお、 $k = 0$ ならば x によらず完全相関となり、 $k = \infty$ ならば x によらず独立となる。

全イベントによる期待値 $\bar{a}_j(a)$ は、地震動強度 a の年間発生頻度 $\lambda_i(a)$ を重みとした加重平均として次式で与えられる。

$$\bar{a}_j(a) = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i(a) \times \bar{a}_{j|i}(a)}{\sum_{i=1}^N \lambda_i(a)} \quad (2.2.2-8)$$

また、地震動強度の年間発生頻度は次式で与えられる。

$$\lambda(a) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(a) \quad (2.2.2-9)$$

(2.2.2-8)式と(2.2.2-9)式を用いて当該地震動強度と年超過頻度を求め、さらに年超過確率に変換することで、代替建物のSHCを求めることができる。以上に示した代替建物の地震ハザード評価の手順を図2.2.2-1にまとめる。

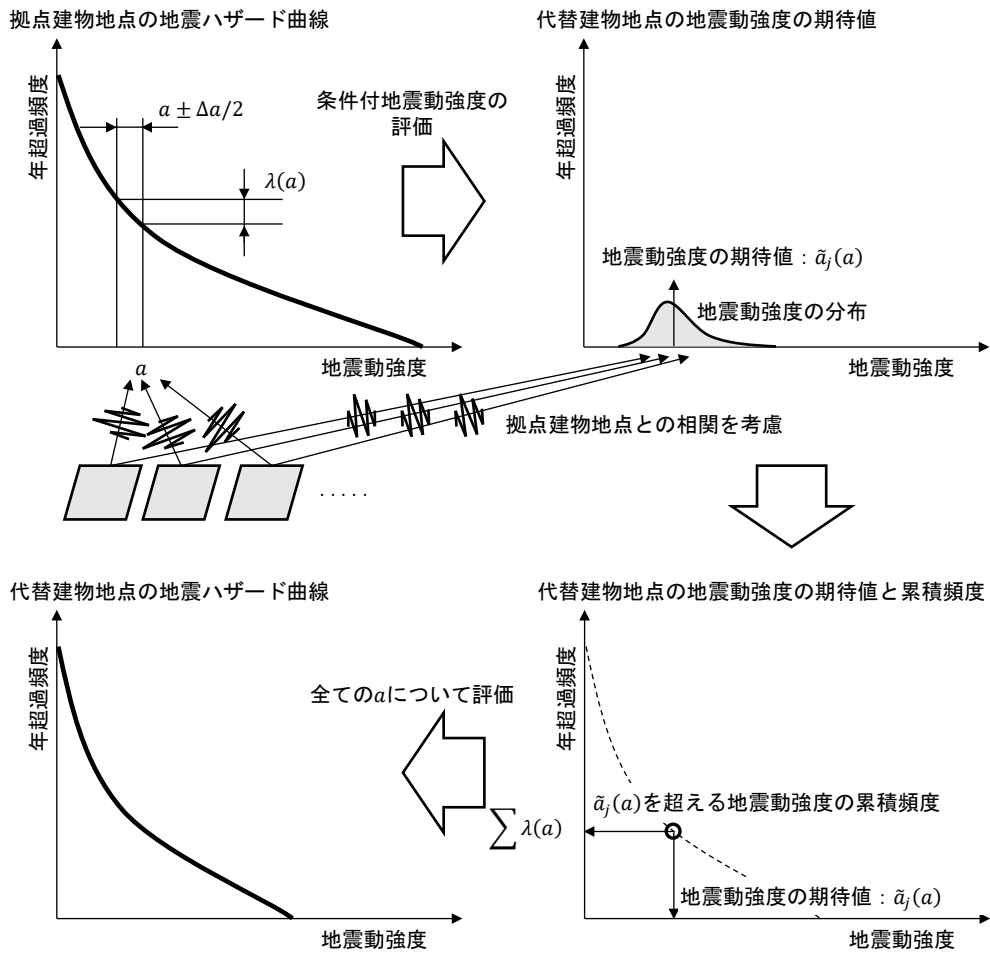


図 2.2.2-1 代替建物の地震ハザード評価の概念

2.3 関東地域を対象とした適用例

ここでは、関東地域を対象に、拠点建物と代替建物の配置について提案手法を実施し、その効果を確認する。なお、提案手法の実施に際し、採用した地震活動モデル、地震動予測式といった条件を明示する。効果の確認は代替建物用の SHC の比較の他、拠点建物の PGA で代替建物の PGA を規準化した規準化 PGA の比較によって行う。

2.3.1 諸条件の設定

(1) 震源モデル

震源モデルは Annaka & Yashiro^{2,6)}を用いて設定した。

大地震発生活動域は、海域ではマグニチュード 7.5 程度以上、陸域ではマグニチュード 7.0 以上の地震が繰り返し発生する領域とし、固有地震モデルによりモデル化した。中小地震発生活動域についてはゲーテンベルグ・リヒターのモデル (b 値モデル) を採用し、1885 年 1 月～1997 年 7 月のマグニチュード 6 以上の地震数を求め、それに基づき b 値を仮定して A 値を求めた。なお、マグニチュード 6 以上の地震が発生していない場合は、1926 年 1 月～1997 年 7 月のマグニチュード 5 以上の地震数に基づいた。

設定した地震活動域を図 2.3.1-1 に示す。また、表 2.3.1-1 に地震活動域モデルの諸元をまとめる。大地震発生活動域の内、1～14 は内陸活断層、S1～S3 は相模トラフ沿いに発生する海溝型地震、N1 は南海トラフ沿いに発生する海溝型地震である。最大マグニチュードには幅を持たせており、相対頻度は一様である。

中小地震発生活動域は上記に示すように、b 値モデルを採用した。領域の離散化は、東西・南北方向には 5km を超えない格子で等分割した。また、深さは 5km とした。

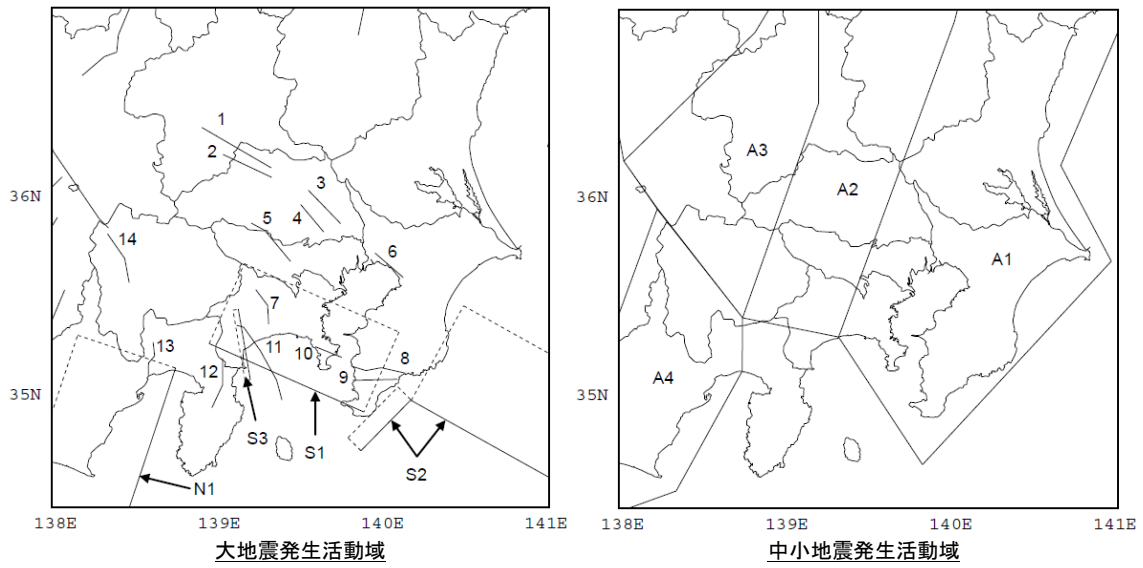


図 2.3.1-1 設定した地震活動域

表 2.3.1-1(1) 地震活動域の諸元 (大地震発生活動域)

活動域 番号	発生間隔 (年)	最大 M	b 値	活動域 番号	発生間隔 (年)	最大 M	b 値
1	1182	7.0-7.6	0.0	2	5212	6.9-7.3	0.0
3	79283	7.0-7.4	0.0	4	5931	6.8-7.2	0.0
5	8710	7.1-7.5	0.0	6	5676	6.8-7.2	0.0
7	7239	6.9-7.3	0.0	8	2842	7.1-7.5	0.0
9	2639	7.0-7.4	0.0	10	1365	6.6-7.0	0.0
11	1625	7.5-7.9	0.0	12	877	7.1-7.5	0.0
13	1917	6.8-7.2	0.0	14	2851	7.1-7.5	0.0
S1	200	7.8-8.2	0.0	S2	1000	7.8-8.2	0.0
S3	73	6.8-7.2	0.0	N1	130	7.6-8.0	0.0

表 2.3.1-1(2) 地震活動域の諸元 (中小地震発生活動域)

活動域 番号	A 値	M の範囲	b 値	活動域 番号	発生間隔 (年)	最大 M	b 値
A1	2.344	5.0-7.0	0.9	A2	4.235	5.0-7.0	0.9
A3	1.645	5.0-7.0	0.9	A4	3.344	5.0-7.0	0.9

(2) 地震動予測式

地震動予測式についても前出の Annaka & Yashiro に基づき、次式に示す安中式を採用した。

$$\begin{aligned} \log a &= 0.61M_j + 0.0501h - 2.203 \log d + 1.377 \\ d &= (\Delta^2 + 0.45h^2)^{1/2} + 0.22 \exp(0.699M_j) \end{aligned} \quad (2.3.1-1)$$

ここに、

a : 工学的基盤における PGA (cm/s/s)

Δ : 断層最短距離を与える断層上の点の地表投影点から評価地点までの距離 (km)

h : 断層中心深さ (km)

M_j : 気象庁マグニチュード

である。また、地震動予測式の不確実性を表す対数標準偏差は自然対数で 0.5 と設定した。

(3) 建物の配置

建物の配置を図 2.3.1-2 に示す。図中の数値は建物番号である。拠点建物（建物番号 0）は東京都庁位置に、代替建物（建物番号 1～20）は市区の役所位置に配置した。また、各建物の座標を表 2.3.1-2 に示す。

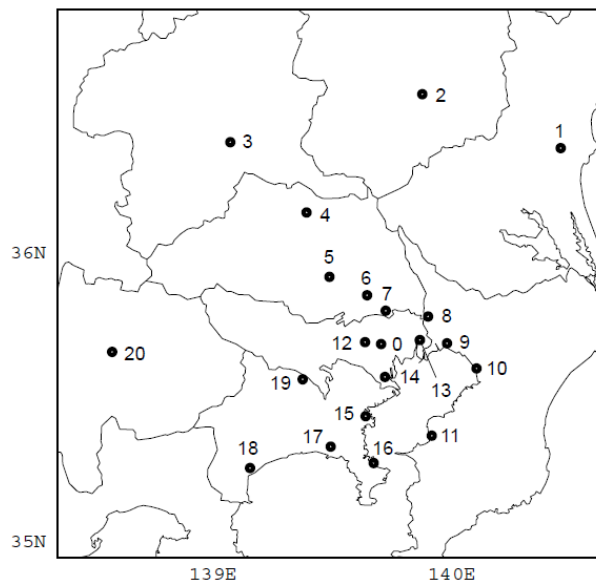


図 2.3.1-2 拠点建物と代替建物の配置

表 2.3.1-2 拠点建物と代替建物の座標

建物 番号	対象役所	東経 (°)	北緯 (°)	建物 0 からの距離 (km)
0	東京都庁	139.7075	35.6897	
1	水戸市役所	140.4747	36.3625	101.990
2	宇都宮市役所	139.8858	36.5519	97.315
3	前橋市役所	139.0667	36.3861	96.718
4	熊谷市役所	139.3919	36.1442	58.190
5	川越市役所	139.4892	35.9219	32.699
6	さいたま市役所	139.6486	35.8583	19.749
7	川口市役所	139.7272	35.8047	13.191
8	松戸市役所	139.9064	35.7844	20.995
9	船橋市役所	139.9858	35.6914	25.196
10	千葉市役所	140.1100	35.6042	37.590
11	木更津市役所	139.9200	35.3728	39.824
12	杉並区役所	139.6397	35.6964	6.262
13	江戸川区役所	139.8717	35.7033	14.973
14	大田区役所	139.7236	35.5761	12.380
15	横浜市役所	139.6417	35.4406	27.971
16	横須賀市役所	139.6753	35.2789	45.362
17	藤沢市役所	139.4947	35.3358	43.476
18	小田原市役所	139.1556	35.2614	68.831
19	相模原市役所	139.3764	35.5681	32.762
20	甲府市役所	138.5714	35.6592	102.906

(4) 地震動予測式の不確実性の案分と地点間相関

地震動予測式の不確実性は、震源過程における不確実性と伝播における不確実性に案分する。案分については、林・他^{2,7)}にあるように観測記録に基づいて設定することができるが、ここでは案分比率をパラメータとして、表 2.3.1-3 に示す 3 つの解析ケースを採用した。

ケース 1 は地震動強度の変動が震源過程における不確実性に起因すると想定し、拠点建物位置と代替建物位置で地震動の変動が完全相関であるとしたものである。現実的ではないが解析ケースの極端な場合として採用した。ケース 2 は前出の林・他の研究に近い値で、震源過程における不確実性と伝播における不確実性を考慮している。なお、解析ケースであるので ζ_S と ζ_P に同じ値を与えている。ケース 3 は地震動強度の変動が伝播における不確実性に起因すると想定したものである。拠点建物と代替建物の距離で相関が決まるため、距離が大きい場合にはほぼ独立となる。

表 2.3.1-3 地震動予測式の不確実性の案分と解析ケース

解析ケース	ζ_s	ζ_p
ケース 1	0.500	0.000
ケース 2	0.354	0.354
ケース 3	0.000	0.500

なお、表 2.3.1-3 に示した対数標準偏差の値であるが、前述したように地震動予測式の不確実性を表す対数標準偏差は自然対数で 0.5 であるので、次式に示すように分散が一定となるように案分を行った。

$$\zeta_s^2 + \zeta_p^2 = 0.5^2 \quad (2.3.1-2)$$

また、地点間距離による相関の低減を表す係数 k は、震源過程の不確実性については $k = 0$ とし、地点間距離によらず完全相関であることを仮定した。他方、伝播の不確実性については、高田・他^{2,8)}を参照して $k = 1/20$ とした。想定している地点間距離と相関係数の関係を図 2.3.1-3 に示す。図の横軸は地点間距離、縦軸は相関で、地点間距離が 0 (同一地点) では完全相関となり、距離が増大するに従い相関が低減している様子が見て取れる。

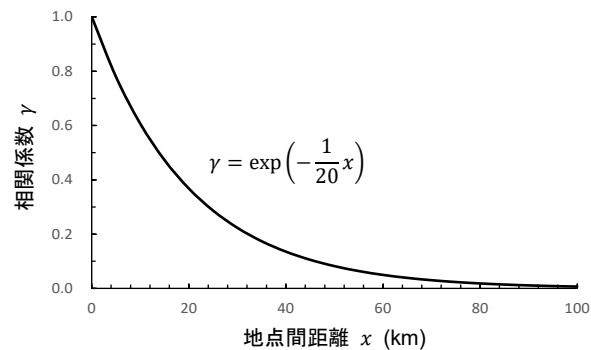


図 2.3.1-3 伝播に係る不確実性の地点間相関

2.3.2 解析結果

(1) 地震ハザード曲線による比較

いくつかの地点について求めた SHC を図 2.3.2-1 に示す。図中で、太い実線は拠点建物の SHC を、太い点線は個別に評価した代替建物の SHC を示す。また、細い実線、細い一点鎖線、細い破線は代替建物の条件付 SHC を示し、括弧内の数字は解析ケースを表している。各建物位置での SHC の特徴は以下のようである。

- 建物 2 北関東に位置しており、個別に評価した場合でも拠点建物より地震ハザードが小さく、条件付きとした場合ではさらに地震ハザードは小さくなる。
- 建物 12 拠点建物に隣接した位置にあり、その地震ハザードは、個別に求めた場合、及び完全相関を仮定して条件付きで評価した場合には、拠点建物の地震ハザードに極めて類似している。
- 建物 15 拠点建物の南方に位置しており、関東地域の大地震として支配的な関東地震（地震活動域 S1）の影響を大きく受けると考えられる。個別に評価した代替建物の地震ハザードと完全相関を仮定して条件付きで評価した地震ハザードは、ともに拠点建物の地震ハザードよりも大きくなっている。
- 建物 18 より地震活動度の高い地点に位置しており、個別に評価した場合には最も大きな地震ハザードを示している。

拠点建物と代替建物が近接していない限り、主建物の地震ハザード及び個別に評価した代替建物の地震ハザードは条件付き地震ハザードと大きく異なっており、前述したように、これらを冗長建物群に適用することはできない。また、距離減衰式のばらつきの案分と相関の評価が条件付き地震ハザードに与える影響が大きいことが明らかで、ケース 3<ケース 2<ケース 1 と相関が高くなるに従い、地震ハザードが大きくなる。

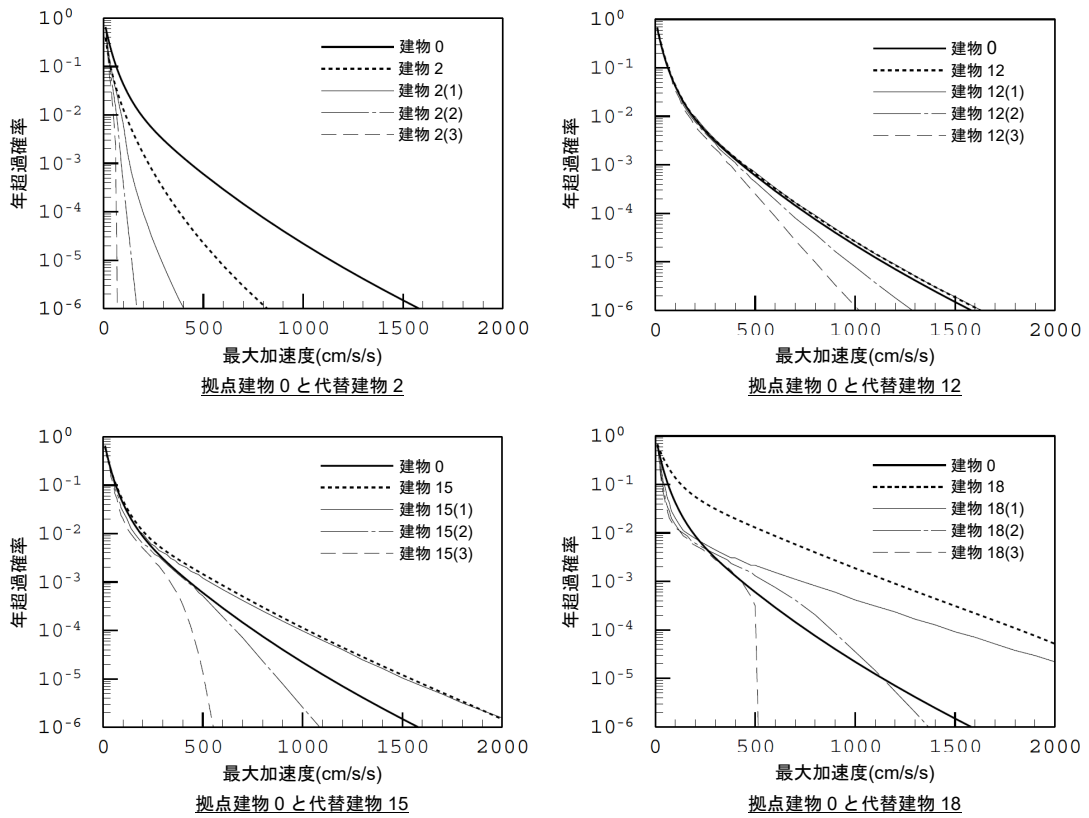


図 2.3.2-1 拠点建物と代替建物の地震ハザード曲線

(2) 地震動強度の相対比較

同一の再現期間（年超過確率の逆数）について代替建物地点の PGA を拠点建物地点の PGA で除したものを、ここでは規準化 PGA と称する。50 年，100 年，200 年，500 年，1000 年の再現期間について、各建物の規準化 PGA を比較したものを図 2.3.2-2 に示す。

再現期間が短い場合、各建物周辺の中小地震の寄与が大きくなるため、例えば、ケース 1 では、拠点建物に近接した地点（建物 6-10，12-15，19）での規準化 PGA は 1.0 に近く、拠点建物から遠い地点（建物 1-5，16-18，20）の規準化 PGA は 1.0 を下回る傾向が見られる。再現期間が長くなるに従い、拠点建物の地震ハザードに支配的な関東地震の影響をより強く受けることとなり、南関東地域に位置する建物（建物 11，15-19）の規準化 PGA は 1.0 を超えることとなる。これは前述したように、特に建物 18 において顕著である。また、東京以北の建物の基準化加速度は減少する傾向にある。

上記の傾向はケース 2 及びケース 3 においても同様である。ただし、式(2.2.2-6)に示したように、相関が小さくなるほど距離減衰式のばらつきの影響が現れにくくなり、結果として大きな地震動強度の発生が抑えられる。式(2.2.2-6)を解析ケース毎に書き直すと次式となる。

$$\tilde{a}_{j|i}(a) = \check{A}_{j|i} \times \exp(\beta\zeta) \quad , \text{ for Case1} \quad (2.3.2-1a)$$

$$\tilde{a}_{j|i}(a) = \check{A}_{j|i} \times \exp\left[\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\gamma_p\right)\beta\zeta\right] \quad , \text{ for Case2} \quad (2.3.2-1b)$$

$$\tilde{a}_{j|i}(a) = \check{A}_{j|i} \times \exp(\gamma_p\beta\zeta) \quad , \text{ for Case3} \quad (2.3.2-1c)$$

ケース 1 では $\zeta_s = \zeta$ ， $\zeta_p = 0$ ，ケース 2 では， $\zeta_s = \zeta_p = \zeta/2$ ，ケース 3 では $\zeta_s = 0$ ， $\zeta_p = \zeta$ としている。また、震源に係る相関係数 γ_s は 1.0 であることから式中では表示していない。

伝播に係る相関係数 γ_p の値は地点間距離に応じて 0.0 から 1.0 の範囲の値を取ることから、拠点建物における地震動強度の中央値からの乖離の程度を表す $\beta\zeta$ の影響は、ケース 1 \geq ケース 2 \geq ケース 3 となる。等号が成立するのは $\gamma_p = 1.0$ のときで、拠点建物と代替建物が同一地点に立地している場合である。

さて、SHC の閾値の PGA と各イベントで評価される信頼性指標 β の関係は当該イベントが与える地震動強度によって異なるものの、PGA が大きい場合ほど β がより大きな正の値を取ることになる。すなわち、式(2.3.2-1)に示した指数部分の値はケース 1 \geq ケース 2 \geq ケース 3 の順で大きくなる。

そのため、同一地点で比較すると、ケース 3 \rightarrow ケース 2 \rightarrow ケース 1 と地震ハザードの相関が大きくなるほど規準化 PGA の値は全体的に大きくなるのがわかる。また同様の理由によって地点間距離が大きいほど規準 PGA の値は小さくなる。特にケース 3 では、ほとんどの地点と再現期間において、基準化 PGA が 1.0 を下回っている。

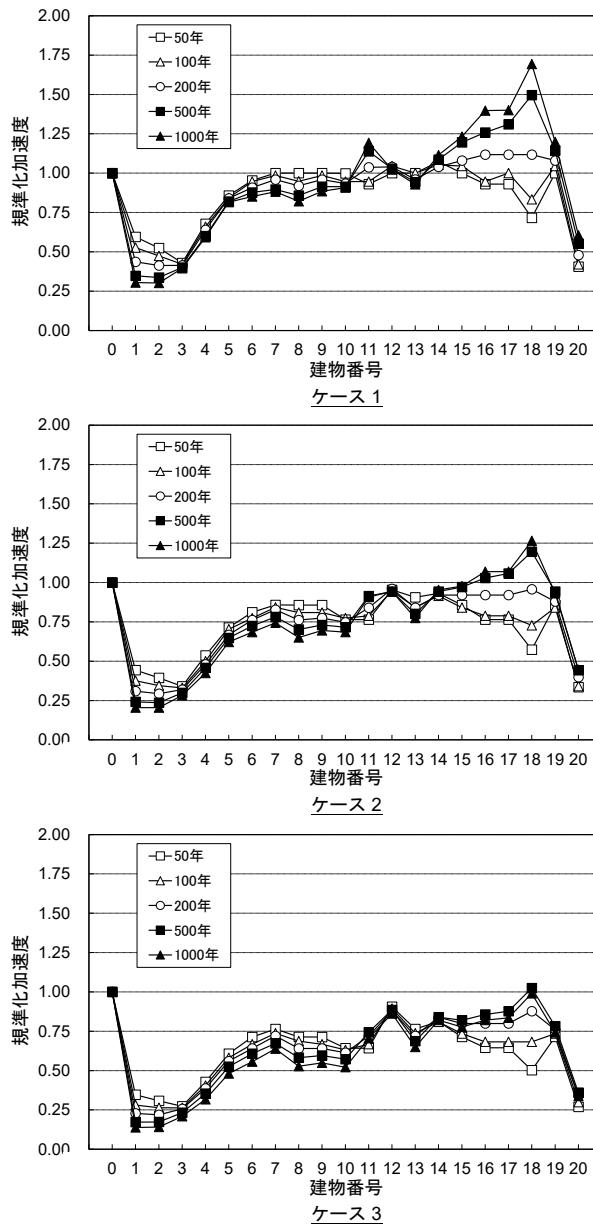


図 2.3.2-2 再現期間毎の規格化加速度の比較

2.4 基準化加速度の面的な分布と代替建物の配置

ここでは、関東地域を対象に、拠点建物を中心として、2.3 で求めた規準化 PGA の面的な分布を求め、代替建物の配置について考察する。なお、規準化 PGA は再現期間や地震動強度の地点間の相関によって異なるため、これらは解析パラメータとして、考察に加える。

2.4.1 諸条件の設定

2.3 で示した拠点建物(建物0)を中心とした半径100kmの円内を10km四方の格子に分割し、各格子中央位置での条件付SHCを求め、50年ならびに1000年の再現期間に対応した規準化PGAを求めた。評価対象地点を図2.4.1-1に示す。

震源モデル、地震動予測モデルに関しても2.3で用いたものを採用した。また、地震動予測式の案分比率、地点間相関、解析ケースについても2.3と同様とした。

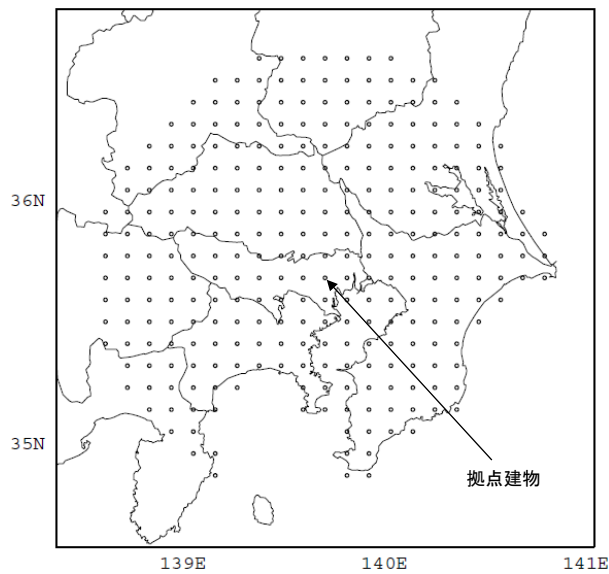


図 2.4.1-1 規準化加速度評価対象地点

2.4.2 解析結果

所与の再現期間に対する規準化 PGA の分布を図 2.4.2-1 に示す。規準化 PGA の大きさは同図中の正方形の辺長に比例させている。

再現期間 50 年の場合、拠点建物の規準化 PGA を最大として、拠点建物から遠ざかるに従い規準化 PGA が小さくなっていく様子が見て取れる。規準化 PGA の減少の程度と傾向は解析ケースによって異なり、ケース 1 では、規準化 PGA が 1.0 に近い地点が、拠点建物を中心に、ある程度広域に亘っている。これは、地震動の変動が地点間で完全相関であるためである。また、規準化 PGA の低減の程度に関しては、拠点建物から西方よりは東方が、北方よりは南方が、低減の程度が小さいことがわかる。ただし、方位による差異はそれほど大きくない。これは、再現期間 50 年では、直下の背景的地震が支配的であるためと考えられる。

ケース 2 では、規準化 PGA が 1.0 に近い地点がケース 1 に比較して少なくなっている。このことはケース 3 において、より顕著である。これは、ケース 2、ケース 3 となるに従い、相関の度合いが低下するためである。ただし、規準化 PGA の低減の程度と方位の関係については、ケース 1 と同様である。

再現期間 1000 年の場合、拠点建物の地震ハザードに支配的と考えられる関東地震の影響が強く現れ、その結果、地震活動域の上縁に沿った地点で規準化 PGA が大きくなっている。具体的には、地震活動域 S1 の上縁に対応した房総半島南端から神奈川と静岡の県境を結んだ線上で規準化 PGA が大きくなっており、特にケース 1 では 2.0 に近い値が得られている。また、支配的な地震活動域が拠点建物よりも南方に位置していることに対応し、北関東地域の規準化 PGA は、再現期間が 50 年の場合に比べ、より小さくなっている。これは北関東地域の PGA が小さいわけではなく、拠点建物の PGA との相対評価において小さいことを意味している。

ケース 2 とケース 3 についても、傾向はケース 1 と同様である。再現期間 50 年の場合と同様、ケース 1→ケース 2→ケース 3 と相関が小さくなるに従い、規準化 PGA は小さくなる。

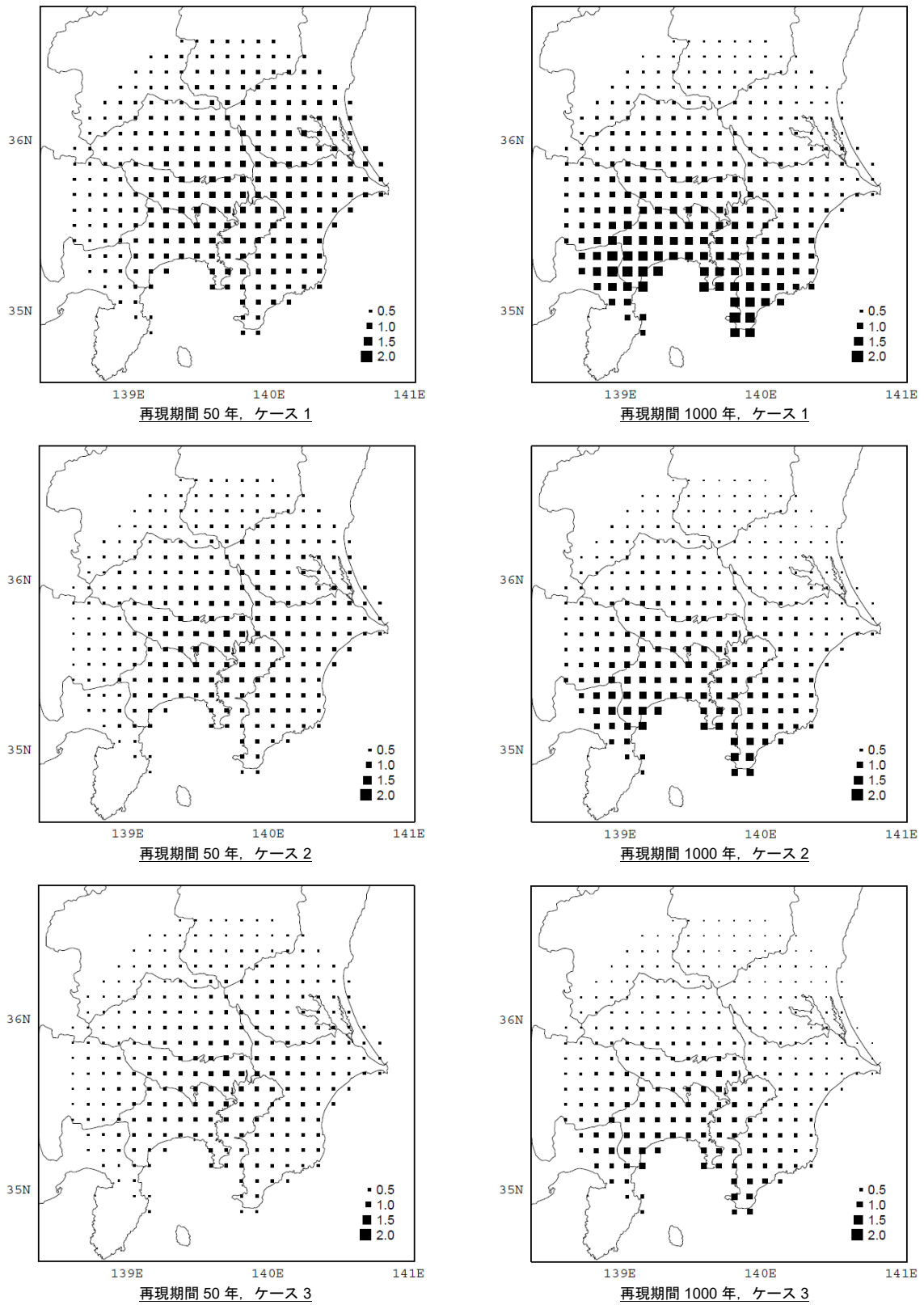


図 2.4.2-1 再現期間に対応した規準化加速度の分布

2.4.3 代替建物の配置に関する考察

図 2.4.2-1 から明らかなように、再現期間が短い場合には、拠点建物からの距離と規準化 PGA の大きさの関係は単調な関係にあり、前述したように方位による若干の差異は見られるものの、代替建物の候補地は拠点建物からの距離を基に選定することが可能であると考えられる。これに対し、再現期間が長い場合には固有の地震活動域の影響により拠点建物からの距離と規準化 PGA の大きさの関係は必ずしも単調ではないことから、拠点建物からの距離とともに、代替建物と支配的な地震活動域の位置関係についても考慮が必要である。

冗長建物群における代替建物の配置は、その機能を保証すべき地震動強度レベル、あるいは当該地震動強度の再現期間を基に決定することが合理的であると考えられる。図 2.3.1-2 における建物 0 を拠点建物として、代替建物の設置位置を検討する。

例えば、データセンターのように、拠点建物自体の耐震性が高いために低頻度の地震に対してのみ冗長性を発揮する必要があるものについては、拠点建物の北東の近距離に代替建物を設置することが効果的である。

これに対し、工場の新設のように、個々の建物の耐震性はそれほど高くないために高頻度の地震に対して冗長性を発揮したい場合には、拠点建物からある程度遠方に代替建物を設置する必要がある。この場合には、拠点建物からの方向はそれほど重要ではない。なお、低頻度の大地震に対しては、地震保険等の他のリスクマネジメント施策が行われる必要がある。

また、災害対策本部のように、様々な地震に対して機能維持を求められるものについては、上記の 2 ケースを鑑み、拠点建物の北東のある程度遠方に代替建物を設置することが効果的であると言える。

なお、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、「再現期間 1000 年の大地震でも営業を継続する」とか「再現期間 50 年の地震では平常通り営業するが、再現期間 1000 年の地震に対しては業務停止を容認する」といった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。

図 2.4.2-1 に示したような規準化 PGA の分布、あるいは特定の候補地における条件付 SHC を評価することは、代替建物の配置に関する有益な情報を意思決定者に与えることができ、複数建物の配置計画に資するものと考えられる。

2.5 まとめ

本章では機能的な連関を有する建物群を冗長建物群と呼び、冗長建物群における代替建物の条件付 SHC の評価方法を示した。さらに、関東地域に複数の代替建物を配置し、個別に評価した SHC と、代替建物と拠点建物位置の PGA の相関を考慮した条件付 SHC を比較検討した。また、所定の年超過確率における拠点建物位置の PGA に対する代替建物位置の PGA の比を規準化 PGA とし、規準化 PGA の面的な分布を評価した。これらの検討により、以下の知見を得た。

- 知見 1 条件付 SHC を求めることで、「拠点建物の地震ハザードを代替建物に適用する」、「拠点建物とは個別に代替建物の地震ハザードを評価する」ことの不合理性を示すことができる。
- 知見 2 拠点主建物と代替建物の距離が遠いほど、条件付き地震ハザード評価において地震動予測式におけるばらつきの案分の影響が顕著になる。
- 知見 3 対象とする年超過確率によって規準化 PGA の分布は大きく異なり、年超過確率が大きい場合には拠点建物からの距離に応じて規準化 PGA が低減するのに対し、年超過確率が小さい場合には拠点建物の地震ハザードに支配的な地震活動域との位置関係が影響を与えるようになる。
- 知見 4 冗長建物群における代替建物の設置位置は、冗長建物群の機能を保証すべき地震動レベルを基に、規準化 PGA の分布から設定することができる。

本章では、拠点建物と代替建物の地震ハザードの相関に基づき、代替建物の配置について検討を行った。伝播におけるばらつきの相関は、2 地点の地点間距離だけではなく、地震のマグニチュードや建物から震源までの距離によっても異なることも考えられる。これに関しては、地震記録の分析を含めた検討が必要となる。また、拠点建物のバックアップとしての代替建物は予算や人員の制約から 1 棟で十分な場合がほとんどであると思われるが、より確実なリスク回避に対する要求やより複雑な被害の波及への対応を考えるならば、複数の代替建物を設置することも重要となってくる。これらに関しては今後の課題とする。

第3章 地震リスクに基づく建物群の耐震性能の設定

3.1 はじめに

建物群の地震リスクは、損失とその年超過確率の関係を表す SRC により定量化され、この SRC を基に、耐震補強や地震保険の購入といった具体的な地震リスクマネジメント施策が実施される。また、地震リスクマネジメント施策実施前後の SRC を比較することにより、AEL や PML の低減量を求め、当該施策の妥当性を検討することができる^{3.1)}。

ところで、地震リスクマネジメント施策の実施は、一般に費用を伴うため、建物群の所有する企業経営者の立場からは効率的な施策の実施が求められる。これは、限られた予算内で最大のリスク低減を行うことであり、リスク回避という本来の目的とともに、株主等への説明責任を果たす上でも必要になってくる。

地震リスクマネジメント施策の内、被災の軽減及び被災後対応に要する負荷の軽減に効果的である耐震性の向上に着目した場合、従来は個別の建物毎に必要な耐震性能を付与してきた。企業においては、経営上の要となる施設については、他の建物よりも大きな耐震性を与えるといった施策が採られている。このような施策は前述のように費用を伴うもので、例えば、中村・他^{3.2)}はこの費用増の妥当性をライフサイクルコスト (LCC) 最小化の観点から説明している。LCC 評価における地震リスクは、前出の AEL と供用年数から求められるが、AEL は、高頻度・低損害の地震リスクから低頻度・高損害の地震リスクまで、全ての地震リスクを含んでいる。したがって、LCC を最小化する、あるいは地震リスクの AEL を低減するといった視点では、どの地震リスクを低減しているのかは明らかにならない。地震リスクマネジメントの施策は、頻度と損害という 2 つの側面から検討されるものであるため、地震リスクの変化を地震リスクマネジメント施策の効果と捉えて、施策の妥当性を確認する必要がある^{3.3)}。

他方、建物群の地震リスクは、構成する建物全体の損失を指標としており、当該損失に対して各建物の損失がどの程度寄与しているのかは明確ではない。損失の寄与は地震動強度 (地震ハザード) だけではなく、建物の脆弱性 (地震脆弱性) や建物の資産額によっても異なるからである。また、その結果として建物群の損失のレベルによっても寄与は変化する。すなわち、建物群の地震リスク曲線が与えられたとしても、それだけでは具体的にどの建物に地震リスクマネジメント施策を実施するかを判断することができない。また、その量についても判断は困難であり、例えば、設計用地震強度を一律に 1.5 倍する、といった施策も合理性を持たない。

本章では以上を鑑み、まず、建物群の地震リスクへの各建物の寄与を明らかにする。なお、地震リスクへの寄与であるが、SRC は損失と年超過確率の 2 変数で記述されるために、そのままでは、寄与の大きさを定量化しにくい。そこで、1.3 に示した損失指標の内、地震リスクの指標として良く参照される PML を用いることとした。次に、地震リスクマネジメント施策として資産の移動を想定し、資産の移動により各建物の寄与がどのように変化するかを確認し、地震リスクマネジメント施策の可能性を検討する。

さらに、得られた知見を耐震性向上に適用する。寄与率に基づく最適耐震性向上施策立案の具体的な手法を提案するとともに、試算を通して提案手法の効果を確認する。

3.2 建物群の損失に対する寄与

ここでは、マルチイベントモデルを援用し、建物群の地震リスクカーブの所与の損失に対する各建物の損失を求める。建物群の損失は、各イベント内のサンプル毎に評価されることから、分解された損失は、イベントの発生頻度を MCS のサンプル数に応じた重みを有するので、その加重統計値として各建物の損失を評価し、それを寄与とする。なお、損失の定義として、「所与の年超過確率に対する損失」を採用する。

3.2.1 想定する地震リスク解析手法

建物群のリスク解析手法については、第1章で示したマルチイベントモデルを採用する。また、地震リスク曲線には、「地震イベントリスク曲線」を用いることとし、各イベントの損失として90%非超過値を採用する。なお、本章では簡便のため、以下、「地震イベントリスク曲線」をSRCと称する。

参考として、第1章に示したマルチイベントモデルによるSRC評価の概要を図3.2.1-1にまとめる。

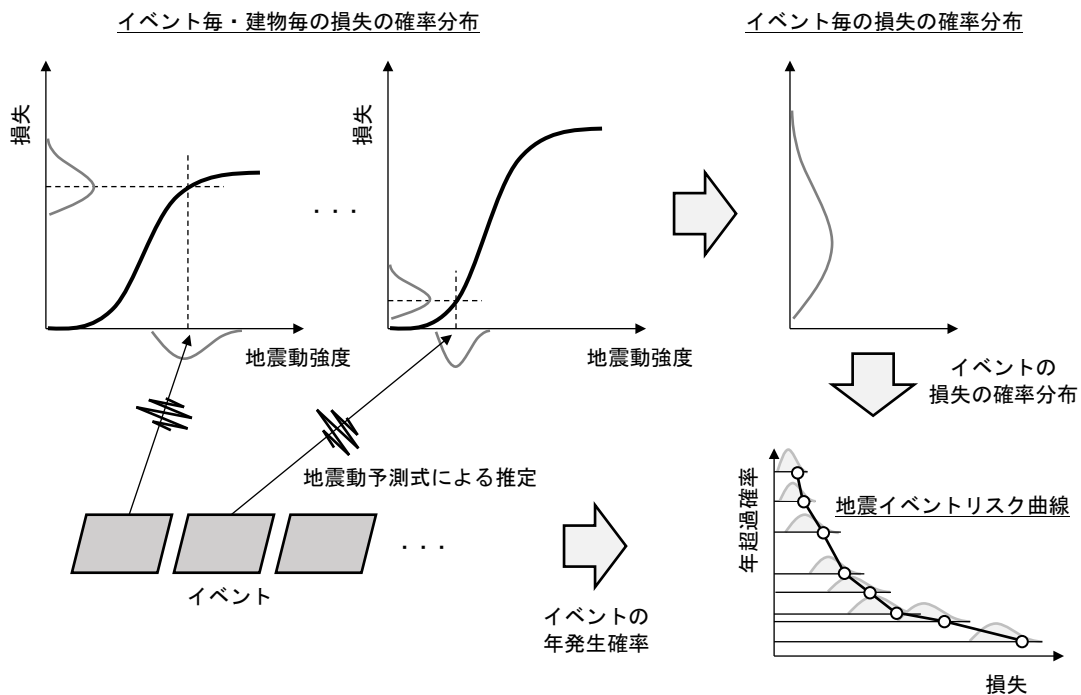


図 3.2.1-1 想定する SRC 評価の概要

3.2.2 建物群の損失への寄与

建物群の損失に対する各建物の損失の寄与は、以下の条件を満たすように求める。

条件1 同一のイベントサンプルについての寄与とする。

条件2 寄与の平均像を評価する。

マルチイベントモデルでは、建物群の損失の代わりに個別建物の損失を用いることにより、個別建物の SRC を求めることができる。ただし、所定の年超過確率の損失を与えるようなイベントサンプル（所与のイベントによる地震動強度のサンプル）が必ずしも同一ではないため、個別建物のリスクカーブから寄与を直接評価することは不適切である。このことを規定するのが条件1である。

また、マルチイベントモデルでは MCS による損失評価を行っているため、ただ1つのサンプルから寄与を求めることは適切ではなく、当該損失を与えるような複数のサンプルについて寄与を検討する必要がある。このことを示すのが条件2である。

本章では図 3.2.2-1 に示す手順により各建物の損失への寄与率を評価する。なお、寄与率とは、寄与の総和が1となるように寄与を規準化したものとする。

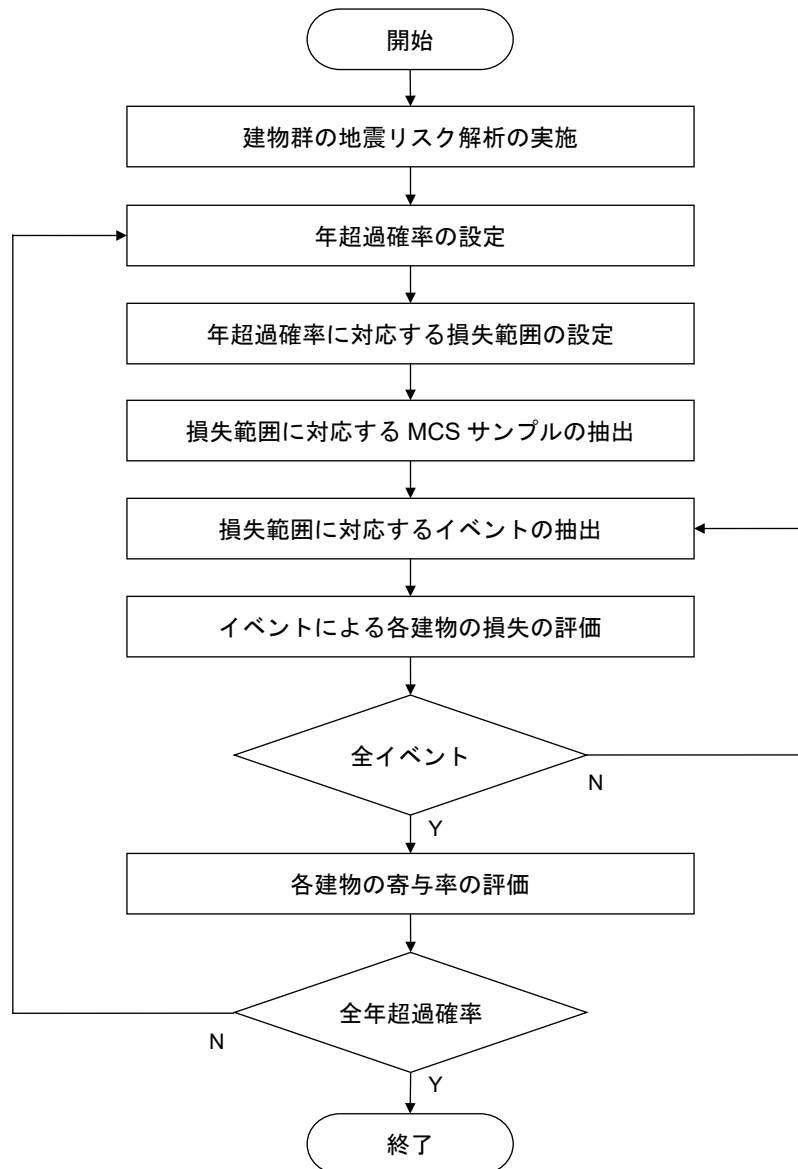


図 3.2.2-1 建物群の損失に対する寄与率評価の手順

(1) 建物群のリスク解析の実施

1.2 に示した手法に基づき建物群のリスク解析を実施する。なお、建物群の損失と各建物の損失の関係を利用するため、各イベント（想定地震）ならびに当該イベントにおける MCS のサンプルについて統計処理を行うことはせず、イベント毎、MCS サンプル毎にリスクカーブが得られているものとする。これは、前出の条件 1 に対応するものである。

(2) 年超過確率の設定

損失の寄与は、想定する年超過確率によって異なるため、ここでは評価条件として年超過確率 p を設定する。

(3) 年超過確率に対応する損失範囲の設定

図 3.2.2-1 において、年超過確率 p に対応する損失を $x(p)$ 、損失の範囲を $x(p) \pm \Delta x(p)$ とする。ここに示すように、寄与率の評価においては、年超過確率に応じた損失を用いるため、予め SRC の逆関数を求めておく。損失の範囲 $\Delta x(p)$ は、同範囲内にある程度のサンプルが入るように設定する。なお、ここでの損失は建物群の損失の 90% 非超過値とする。

(4) 損失範囲に対応するモンテカルロサンプルの抽出

設定した損失の範囲 $x(p) \pm \Delta x(p)$ に入る MCS サンプルを抽出し、この範囲に入る MCS サンプル数を $n_s(p)$ とする。

(5) 損失範囲に対応するイベントの抽出

設定した損失の範囲に対応したイベントを MCS から抽出する。

(6) イベントによる各建物の損失の評価

次に、建物 j の期待損失 $\bar{x}_j(k, p)$ を次式で求める。

$$\bar{x}_j(k, p) = \frac{\sum_{i=1}^{n_E(k, p)} v_i(k, p) x_{j|i}(k, p)}{\sum_{i=1}^{n_E(k, p)} v_i(k, p)} \quad (3.2.2-1)$$

ここに、

$v_i(k, p)$: 年超過確率 p 、サンプル k におけるイベント $i(k, p)$ の年間発生頻度
 $x_{j|i}(k, p)$: 年超過確率 p 、サンプル k におけるイベント $i(k, p)$ による建物 j の損失
 $n_E(k, p)$: 年超過確率 p 、サンプル k におけるイベント数

である。

(7) 各建物の寄与率の評価

さらに、MCS サンプルについて平均を取り、建物 j の平均損失 $\bar{x}_j(p)$ を求める。これを示すのが次式である。

$$\tilde{x}_j(p) = \frac{1}{n_S(p)} \sum_{k=1}^{n_S(p)} \bar{x}_j(k, p) \quad (3.2.2-2)$$

このようにして求めた $\tilde{x}_j(p)$ を全建物について規準化したものを、当該年超過確率 p における寄与率 $\alpha(p, j)$ として次式で与える.

$$\alpha(p, j) = \tilde{x}_j(p) / \sum_{j=1}^n \tilde{x}_j(p) \quad (3.2.2-3)$$

ここに、 n は建物数である.

ところで、式(3.2.2-2)の両辺を全建物について総和すると次式が得られる.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \tilde{x}_j(p) &= \sum_{j=1}^n \frac{1}{n_S(p)} \sum_{k=1}^{n_S(p)} \bar{x}_j(k, p) \\ &= \frac{1}{n_S(p)} \sum_{k=1}^{n_S(p)} \sum_{j=1}^n \bar{x}_j(k, p) \end{aligned} \quad (3.2.2-4)$$

式(3.2.2-4)は、 $\tilde{x}_j(k, p)$ のサンプル平均の総和と $\tilde{x}_j(k, p)$ の総和のサンプル平均、すなわち、建物群の損失のサンプル平均が等しいことを示しており、式(3.2.2-3)における規準化が、建物群の損失のサンプル平均に対する各建物の損失のサンプル平均の寄与率を求めることであることを表している.

3.3 関東地域を対象とした適用例

ここでは、関東地域に配置された建物群を対象に提案手法を適用し、寄与率（寄与の総和が 1.0 となるように規準化したもの）と地震リスク曲線の関係性を評価する。なお、寄与率の評価では、資産の配分を変数とする。

3.3.1 諸条件の設定

(1) 震源モデル

震源モデルは、第 2 章で用いたものを採用し、その詳細は第 2 章に記載した。参考として、設定した地震活動域を図 3.3.1-1 に、地震活動域モデルの諸元を表 3.3.1-1 に再掲する。

大地震発生活動域の内、1～14 は内陸活断層、S1～S3 は相模トラフ沿いに発生する海溝型地震、N1 は南海トラフ沿いに発生する海溝型地震である。最大マグニチュードには幅を持たせており、相対頻度は一様である。

中小地震発生活動域は上記に示すように、b 値モデルを採用した。領域の離散化は、東西・南北方向には 5km を超えない格子で等分割した。また、深さ方向は 5km とした。

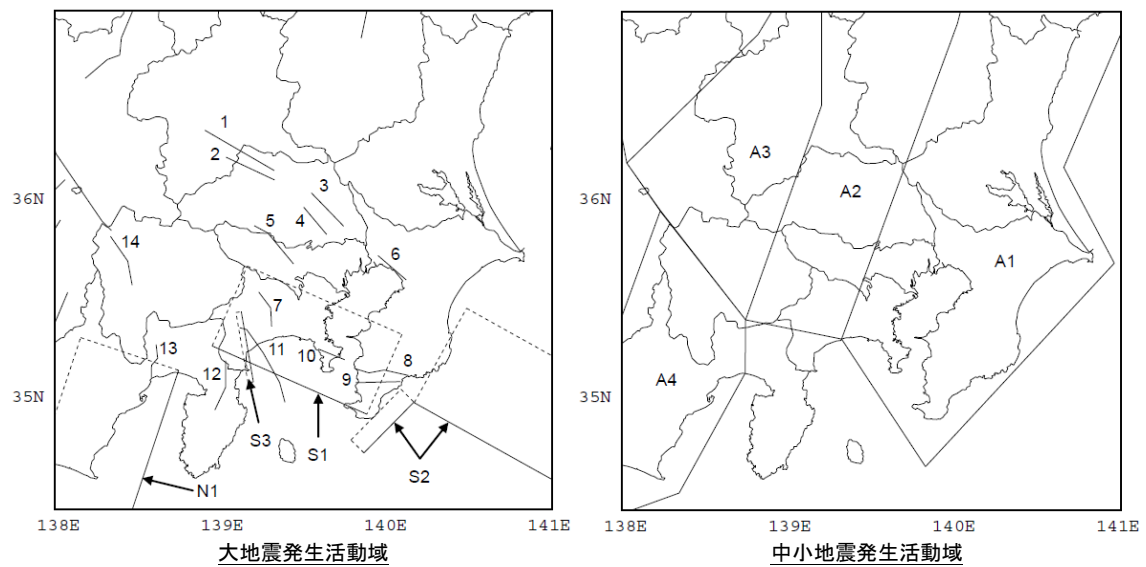


図 3.3.1-1 設定した地震活動域

表 3.3.1-1(1) 地震活動域の諸元（大地震発生活動域）

活動域 番号	発生間隔 (年)	最大 M	b 値	活動域 番号	発生間隔 (年)	最大 M	b 値
1	1182	7.0-7.6	0.0	2	5212	6.9-7.3	0.0
3	79283	7.0-7.4	0.0	4	5931	6.8-7.2	0.0
5	8710	7.1-7.5	0.0	6	5676	6.8-7.2	0.0
7	7239	6.9-7.3	0.0	8	2842	7.1-7.5	0.0
9	2639	7.0-7.4	0.0	10	1365	6.6-7.0	0.0
11	1625	7.5-7.9	0.0	12	877	7.1-7.5	0.0
13	1917	6.8-7.2	0.0	14	2851	7.1-7.5	0.0
S1	200	7.8-8.2	0.0	S2	1000	7.8-8.2	0.0
S3	73	6.8-7.2	0.0	N1	130	7.6-8.0	0.0

表 3.3.1-1(2) 地震活動域の諸元（中小地震発生活動域）

活動域 番号	A 値	M の範囲	b 値	活動域 番号	発生間隔 (年)	最大 M	b 値
A1	2.344	5.0-7.0	0.9	A2	4.235	5.0-7.0	0.9
A3	1.645	5.0-7.0	0.9	A4	3.344	5.0-7.0	0.9

(2) 地震動予測式

地震動予測式についても第2章と同様に、次式に示す安中式を採用した。

$$\begin{aligned} \log a &= 0.61M_j + 0.0501h - 2.203 \log d + 1.377 \\ d &= (\Delta^2 + 0.45h^2)^{1/2} + 0.22 \exp(0.699M_j) \end{aligned} \tag{3.3.1-1}$$

ここに、

a : 工学的基盤における PGA (cm/s/s)

Δ : 断層最短距離を与える断層上の点の地表投影点から評価地点までの距離 (km)

h : 断層中心深さ (km)

M_j : 気象庁マグニチュード

である。また、地震動予測式の不確実性を表す対数標準偏差は自然対数で 0.5 と設定し、震源に係る不確実性と伝播に係る不確実性の案分は 1 : 1 とした。

(3) 建物の配置

関東地方に配置された 20 の建物からなる建物群を設定した。建物群を構成する各建物の配置を図 3.3.1-2 に示す。図中の数値は建物番号である。各建物の座標を表 3.3.1-2 に示す。

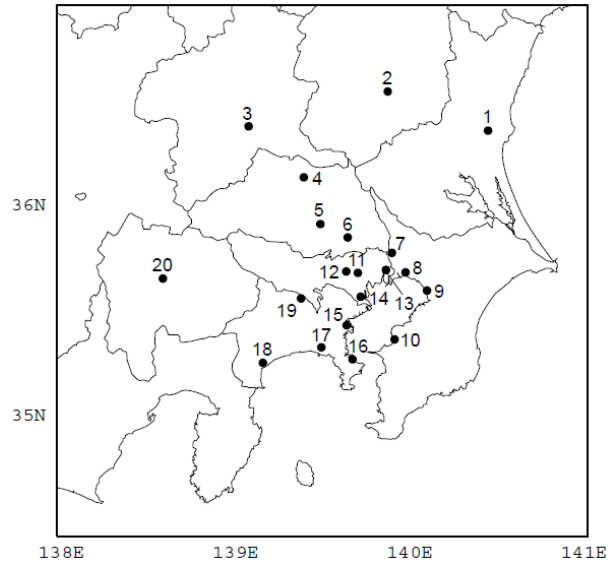


図 3.3.1-2 建物群の配置

表 3.3.1-2 建物群の座標

建物番号	東経 (°)	北緯 (°)	建物番号	東経 (°)	北緯 (°)
1	140.4747	36.3625	2	139.8858	36.5519
3	139.0667	36.3861	4	139.3919	36.1442
5	139.4892	35.9219	6	139.6486	35.8583
7	139.9064	35.7844	8	139.9858	35.6914
9	140.1100	35.6042	10	139.9200	35.3728
11	139.7075	35.6897	12	139.6397	35.6964
13	139.8717	35.7033	14	139.7236	35.5761
15	139.6417	35.4406	16	139.6753	35.2789
17	139.4947	35.3358	18	139.1556	35.2614
19	139.3764	35.5681	20	138.5714	35.6592

(4) 建物の脆弱性と被害率

建物の脆弱性は SFC で定量化する。SFC の確率分布を対数正規分布であると仮定し、ばらつきを表す対数標準偏差と SFC 上の 1 点を定めることで、その中央耐力加速度を設定した。なお、SFC は、小破、中破、大破、倒壊の各被害程度について設定した。設定した値を表 3.3.1-3 に示す。

SFC の対数標準偏差については中村・他^{3,4)}のものを採用した。SFC 上の 1 点であるが、現行の 1 次設計と 2 次設計がそれぞれ小破、大破に相当し、標準せん断力係数に対応した PGA ($C_0=0.2$ に対して 80gal, $C_0=1.0$ に対して 400gal) が入力した場合に 1%の損傷確率になると仮定した。中破と倒壊に関しては、耐力加速度が等間隔になるように値を設定した。

なお、このように求めた耐力加速度は建物 1 階の応答に対応するものであるが、表層の増幅特性を 1.5 とし^{3,5)}、また、表層の PGA に対する建物の応答加速度の最大値の比を 0.7 と仮定することで^{3,6)}、表 3.3.1-3 に示した値を工学的基盤位置のものと読み替える。

被害率は、建物資産に対する損失の比と定義し、前出の中村・他を参照し、小破 5%、中破 10%、大破 30%、倒壊 100%とした。建物の SFC の特性値(フラジリティ特性値)及び被害率を表 3.3.1-3 にまとめる。得られた SFC を図 3.3.1-3 に示す。横軸は PGA で、縦軸は損傷確率である。

表 3.3.1-3 被害程度別の地震フラジリティ特性値と被害率

被害程度	フラジリティ特性値		被害率 (%)
	中央値 (Gal)	対数標準偏差	
小破	200	0.4	5
中破	600	0.4	10
大破	1000	0.4	30
倒壊	1400	0.4	100

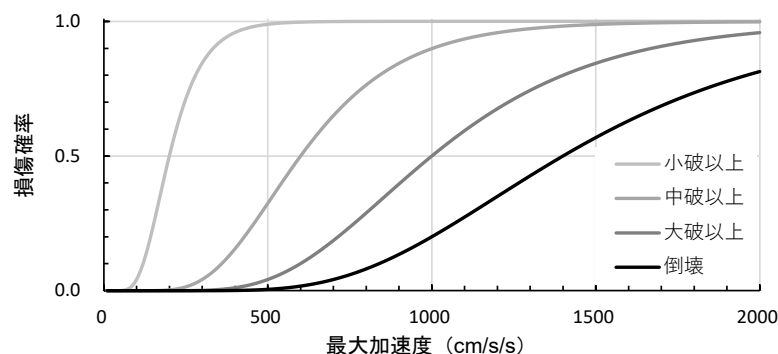


図 3.3.1-3 地震フラジリティ曲線

(5) 建物の地震被害関数

地震動強度 x と被害率 $F_{DR}(x)$ の関係をここでは地震被害関数と呼び、次式で与える。

$$F_{DR}(x) = \sum_{i=1}^{n-1} r_i [F_i(x) - F_{i+1}(x)] + r_n F_n(x) \quad (3.3.1-2)$$

ここに、

i : 被害程度を表す添え字で、1 : 小破、2 : 中破、3 : 大破、4 : 倒壊に相当

$F_i(x)$: 被害程度 i に対応する SFC

r_i : 被害程度 i に対応する被害率

n : 被害程度の総数 ($n = 4$)

である。

得られた地震被害関数を図 3.3.1-4 に示す。横軸は PGA、縦軸は被害率（再調達価額に対する被害額の比）を示している。同図から明らかなように、低 PGA 領域では、小破あるいは中破が支配的（合計に対する寄与が大きい）であるが、PGA が大きくなるに従い、大破あるいは倒壊の寄与が増す。また、800(cm/s/s)を超えるような高 PGA 領域では倒壊が支配的となる。

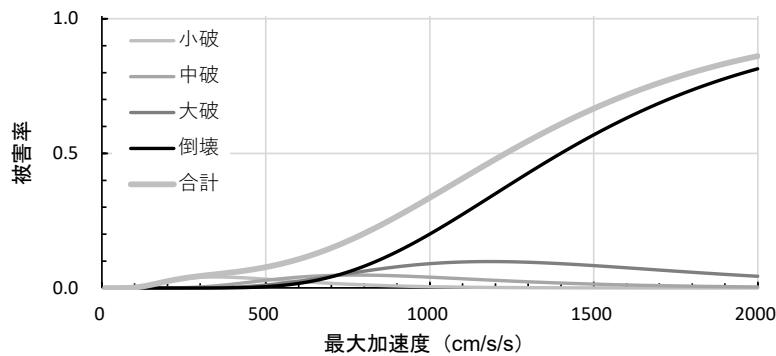


図 3.3.1-4 地震被害関数

(6) 建物の資産

建物の建物群への寄与は、建物の耐震性、地震環境、建物資産（営業利益を含む）の3項目が影響する。耐震性が低いほど、地震危険度が高いほど、また、建物資産が大きいほど寄与率が高い。これらの項目の内、建物資産は、法規制や経営上の制約を受けずに、企業経営者が任意に設定できるものである。

そこで、資産の配置が建物群に与える影響を検討するため、表 3.3.1-4 に示すような3ケース

の資産配置を設定した。ただし、全資産の総和はケースによらず同一とした。ケース1は建物資産を一律に100としたもので、基準となる解析ケースとして設定した。ケース2は地震危険度の高い4地域から危険度の低い4地域に一律に資産を移動したもので、リスク回避のために取られるであろう施策として設定した。ケース3は地震危険度の低い4地域から危険度の高い4地域に一律に資産を移動したものである。このような施策を取ることは現実的ではないが、ここでは解析ケースとして設定した。

なお、地震危険度の高低の判断は、福島・矢代^{3,8)}に基づいて行った。参考として、Annaka & Yashiro^{3,9)}のモデルによる各建物地点のSHCを図3.3.1-5に示す。横軸はPGAを、縦軸は当該PGAの年超過確率を示している。

表 3.3.1-4 建物群の資産配置

解析ケース	資産配置の方針	設定した建物資産 (括弧内は対応建物番号)
ケース1	一様に資産を配置	100×20 棟 (1~20)
ケース2	地震危険度の高い地域から 低い地域に資産を移動	175×4 棟 (1, 2, 3, 4) 25×4 棟 (15, 16, 17, 18) 100×12 棟 (5~14, 19, 20)
ケース3	地震危険度の低い地域から 高い地域に資産を移動	25×4 棟 (1, 2, 3, 4) 175×4 棟 (15, 16, 17, 18) 100×12 棟 (5~14, 19, 20)

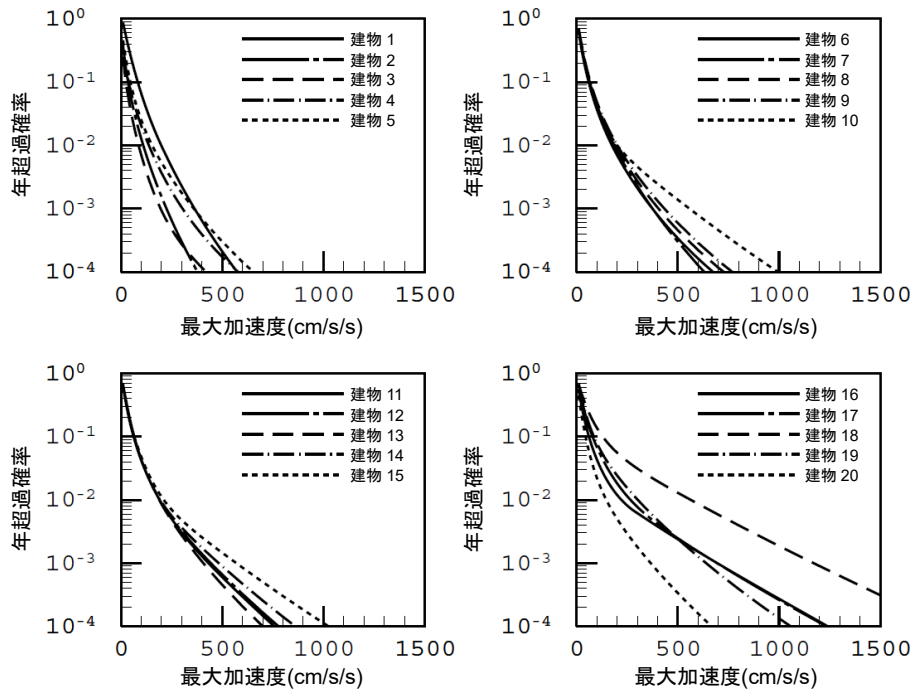


図 3.3.1-5 各建物地点の地震ハザード曲線

3.3.2 寄与率の評価結果

寄与率の評価結果を図 3.3.2-1 に示す。横軸は建物を、縦軸は寄与率を示している。参照する年超過確率は、 $1/50 \sim 1/1000$ を対数軸上で 4 等分した値とした。図 3.3.2-1 から明らかなように、資産の配置により、各建物の寄与率は大きく変動する。

ケース 1 は、資産配置が一様であるため、地震危険度の差異が直接現れており、地震危険度の高い建物 18 が最も大きな寄与率を示している。建物 18 の寄与率は年超過確率が小さくなるに従い増加し、その後減少するという傾向を示している。建物が南関東に比較的集中していることから、建物群の損失に支配的な震源は関東地震（震源番号：S1）である。年超過確率が小さくなるほど（PGA が大きくなるほど）、当該震源の影響が大きくなり、その結果、震源近傍の建物 18 の寄与率が大きくなる。さらに年超過確率が小さくなると、建物 18 の被害額はほぼ上限に達し、周辺の建物（建物 10, 16, 17）の影響が増大するため、相対的に寄与率が低下することとなったと考えられる。

ケース 2 では、地震危険度の大きい地域から小さい地域へ資産を移動したことにより、全建物でほぼ均一の寄与率が得られている。年超過確率が小さくなると、建物 10, 14~19 の寄与率が大きくなるが、これは前述したように、建物群の損失に支配的な関東地震によるものと考えられる。また、そもそも地震危険度の低い北関東に立地する建物 1~4 についても、ある程度の寄与率を示すことがわかる。

ケース3はケース2とは反対に、地震危険度の小さい地域から大きい地域へ資産を移動したものである。寄与率の傾向はケース1の傾向をさらに強調したものとなっており、例えば、年超過確率が小さい場合に、建物18の寄与率が減少し、周辺建物の寄与率が増大する傾向がより明確になっている。建物1~4の寄与率は無視しうる程度である。

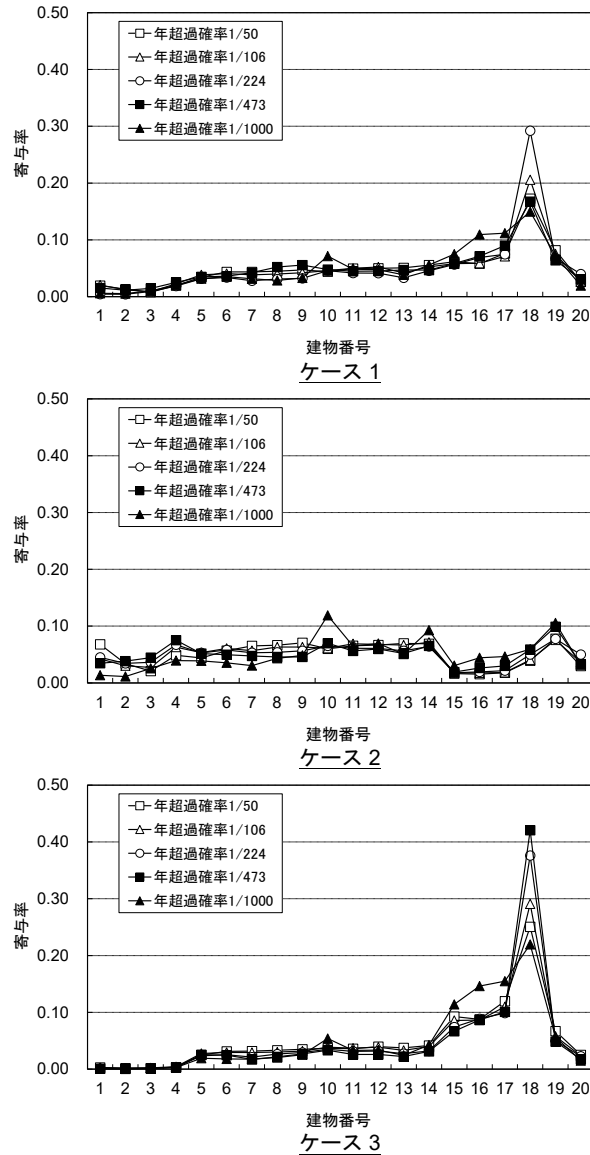


図 3.3.2-1 建物群の損失に対する各建物の寄与

3.3.3 寄与率と地震リスク曲線の関係

図 3.3.3-1 に各ケースの SRC の比較を示す。ここで示す SRC は 1.2 で示したイベントリスクカーブで、損失として 90%非超過値を採用している。同図と図 3.3.2-1 の対比から明らかなように、寄与率が平準化しているものほど、リスクが小さいことがわかる。ここで、リスクが小さいとは、同一の年超過に対する損失が小さい、あるいは、同一の損失に対する年超過確率が小さいことを言う。

文献 3.1) が示すように、建物群を構築することによるリスク低減効果は、個々の建物の損失の同時発生を抑止すること（リスク分散すること）で得られる。寄与率が平準であるということは、リスク分散の効果が表れていることを意味するので、寄与率の平準度合いは建物群のリスク低減効果を間接的に表す指標と見做すことができると考えられる。

また、このことは、寄与率を平準にするような対策を講じることで、より効果的なリスク低減が可能であることを示している。例えば、ケース 1 の寄与率分布が与えられた場合に、その寄与率を平準化するような施策として資産の移動を取り上げ、それを建物 15~18 に対して行ったものがケース 2 であると捉えることができる。

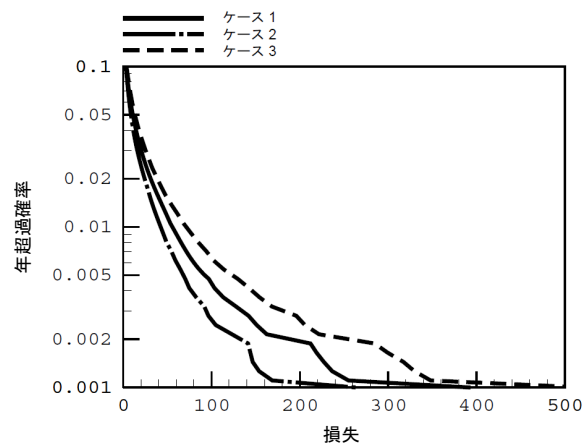


図 3.3.3-1 地震リスク曲線の比較

3.4 リスク低減に基づく耐震性能の設定

ここでは、3.3の知見から、寄与率の平準化に基づいて適切な耐震投資を実現するための手順を提案する。なお、ここでいう耐震投資とは設計用地震動レベルの割増を想定する。提案された手順による損失の低減と、他の耐震投資手順による損失の低減を比較し、本提案手順の有効性を確認する。

3.4.1 耐震性能の定義

リスクを低減させる施策の1つに、設計地震力の割増が挙げられる。設計地震力の割増方法としては、建物建設地点の地震危険度を反映した地域係数の導入、あるいは、建物が内包する財産・機能の重要性を反映した重要度係数の導入がある。

これらは個々の建物の健全性確保という立場をとり、建物群としての観点からは考えられていないため、複数建物の所有者の立場からは必ずしも十分ではない。複数建物の所有者が建物群のリスクマネジメントを考える場合には、建物群のリスクを効率的に低減させるような施策が必要となってくる。

ここでは、建物群のリスクを低減するような設計地震力の割増をもって各建物が保有すべき耐震性能と定義する。設計地震力の割増の度合いが大きいほど、耐震性能が高いことになる。

3.4.2 最適耐震性能とその実現手順

(1) 最適耐震性能の与え方

耐震性能の与え方には、①所定の耐震目標を満たすような最小投資による耐震性能、②投資可能な範囲内の最大の耐震性能、の2つの方法が考えられる。個々の建物が保有すべき最低耐震性能が建築基準法等で規定されていると条件で、上記の2つの考え方はともに最大の投資効果を求めるといえるものである。

ここでは、最大の投資効果を与えるような耐震性能の配分をもって、建物群の最適耐震性能とする。

(2) 最適耐震性能の実現手順

最適耐震性能の実現の基本的な考え方は、投資可能額を細分化し、所定の条件に達するまで細分化された投資額（投資額の増分）を、建物群を構成する各建物に投入する、というものである。最適耐震性能実現の手順を図 3.4.2-1 に示す。

同図に示す手順の特徴は、耐震投資を行う度に地震リスク解析を実施し、得られた寄与率から次の投入先を探索することにある。このような手順を踏むことで、耐震投入が最も必要な建物に常に耐震投入を行うことができる。

投資額の増分を離散的に与えるため、厳密な意味では「最適耐震性能」とはならないが、増分を十分小さくすることで、実用上は不足のない解が得られると考えている。

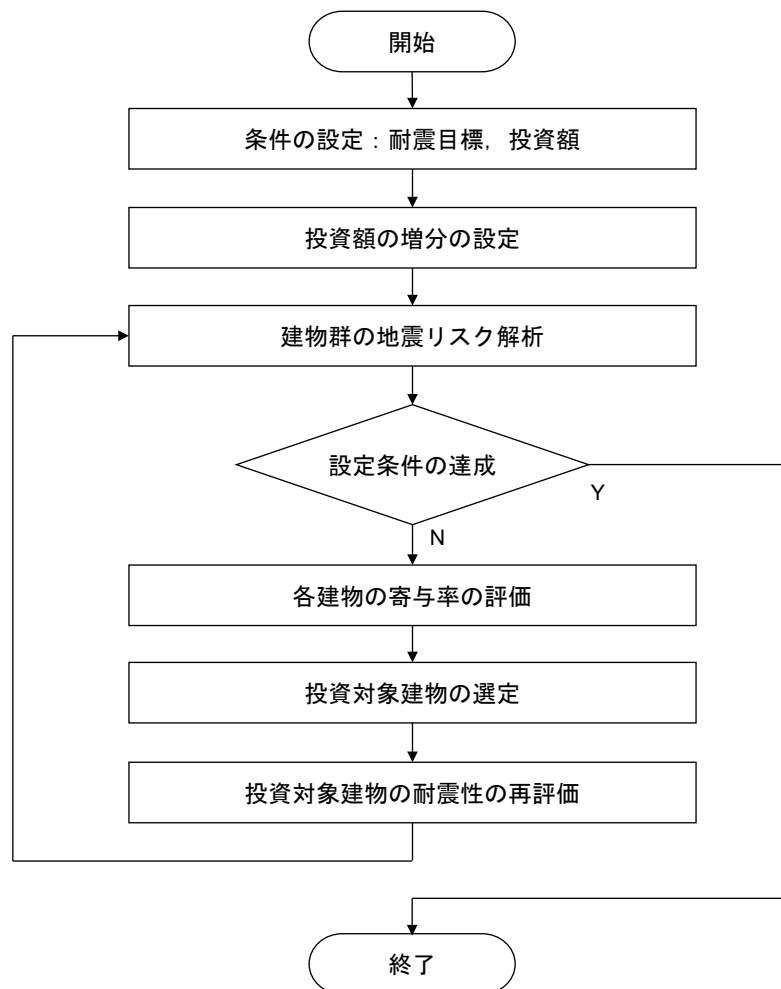


図 3.4.2-1 最適性能の実現手順

3.4.3 最適投資額とリスク低減の関係

(1) 条件の設定

図 3.3.1-2 に示した建物群を対象に、耐震投資額とリスク低減量との関係を求める。なお、リスク量として不動産の証券化等で用いられている年超過確率 1/475 に対応した PML を採用する。耐震対策前の建物の fragility 特性値は表 3.3.1-3 に示した値とし、建物資産の配置は表 3.3.1-4 に示したケース 1 とした。図 3.3.3-1 に示したように、資産の初期配置により地震リスクは異なるが、ここでは、耐震対策の影響を議論することが目的であることから、1 ケースについての検討でも結果の本質は維持されると判断している。

また、簡便のため、表 3.3.1-3 に示した SFC の中央値は、標準せん断力係数に比例すると仮定した。さらに、建物内財産や営業利益を含む建物資産に占める躯体コストの割合が一般には低いことを理由として、建物資産は標準せん断力係数によらず一定とした。

投資額については、耐震性能の増分（設計用標準せん断力係数の増分）と初期建設費用の増分がほぼ線形関係で表されることを利用して^{3.9)}、標準せん断力の増分をもって投資額の増分に代えることとした。

(2) 耐震投資施策の設定

耐震投資施策として、表 3.4.3-1 に示す 4 ケースの方法を採用した。いずれのケースにおいても標準せん断力係数の増分の総和の最大値は 2.0 とした。

表 3.4.3-1 耐震投資施策一覧

解析ケース	耐震性能向上の方針	標準せん断力の増分 (増分/step×step 数)
ケース 1-1	図 3.4.2-1 に示した手順により、耐震性能向上対象建物を逐次探索	1 棟あたり 0.05 (0.05/step×40step)
ケース 1-2	全建物について一律に耐震性能を向上	1 棟あたり 0.05 (1.0/step×2step)
ケース 1-3	PML に対する寄与の大きい 10 建物（8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19）について一律に耐震性能を向上	1 棟あたり 0.05 (0.5/step×4step)
ケース 1-4	PML に対する寄与の大きい神奈川県内の 5 建物（15, 16, 17, 18, 19）について一律に耐震性能を向上	1 棟あたり 0.05 (0.25/step×8step)

ケース 1-1 は提案手法によるもので、各建物の寄与率を評価しながら、最も寄与率の高い建物の耐震性能を増加させていくものである。ケース 1-2 は単純に全建物について一律に耐震性能を増加させていくものである。ケース 1-3 とケース 1-4 は地震活動度を定性的に評価しながら耐震性能を付与することに対応しており、地震危険度が高いと判断された地域の建物の耐震性能を

増加させるもので、ケース 1-4 は「地震危険度に大きな差異がある」という判断を一層反映したものである。

(3) 耐震投資量と PML の関係

標準せん断力係数の増分の総和と建物群の PML の低減量との関係を図 3.4.3-1 に示す。横軸は標準せん断力係数の増分の総和で、耐震投資の総量と見做す。横軸は耐震投資前の PML から耐震投資後の PML を引いたもので、値が大きいほど耐震投資の効果が高いことを意味する。同図からは、耐震投資額の大きさによらず、ケース 1-1 最も大きく PML を低減することがわかる。

寄与率に関係なく、主観的な判断で耐震投資を実施した場合（ケース 1-2～1-4）、標準せん断力係数の増分が小さい場合には、PML に支配的な建物に投資をすること（ケース 1-4）が効果的であり、全体に投資すること（ケース 1-2）は非効率である。一方、標準せん断力係数の増分が大きい場合には、ケース 1-4 は効率が著しく低下する。これは、既に PML を支配しないまでに耐震性が高まった建物に耐震投資を行うこととなるからと考えられる。このような場合にはある程度全体的に耐震投資を行うケース 1-2 あるいはケース 1-3 が望ましい。

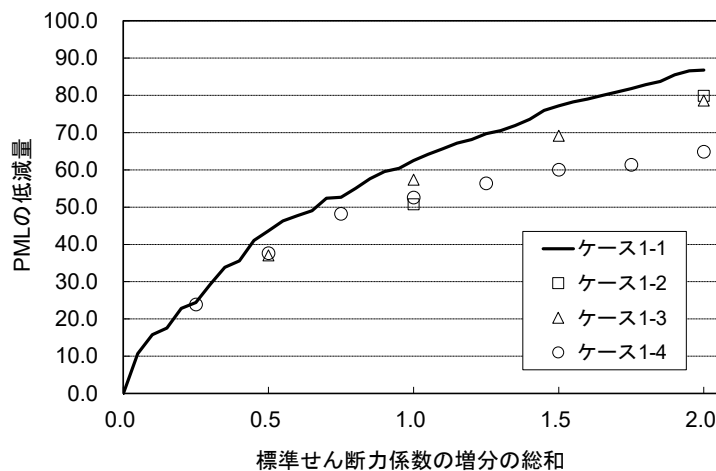


図 3.4.3-1 耐震投資量と PML の低減量との関係

(4) 耐震投資量と耐震投資施策の関係

ケース 1-1 の耐震投資額と耐震投資施策の関係を、建物群を構成する建物について整理した。その結果を図 3.4.3-2 に示す。横軸は建物を、縦軸は当該層耐震投資における建物のせん断力係数を示している。耐震投資額が少ない場合、適切な投資は、建物 18 を中心とした地域の建物に限られる。これは、ケース 1-4 に近い施策であり、図 3.4.3-1 に示されるように、両ケースの PML 低減量には大きな差は現れない。一方、耐震投資額が多い場合には、東京・神奈川・千葉・埼玉・

山梨の1都4県に存在する建物について施策が行われる。これは表3.4.3-1のケース1-2あるいはケース1-3に近い施策である。これらの傾向は図3.4.3-1と調和的である。

図3.4.3-2で示されるような耐震投資施策を、主観的な判断のみから設定することは難しく、また、説明性にも乏しい。他方、図3.4.2-1に示した手順は、客観的かつ系統的な方法で効率的な耐震投資施策を与えるものである。

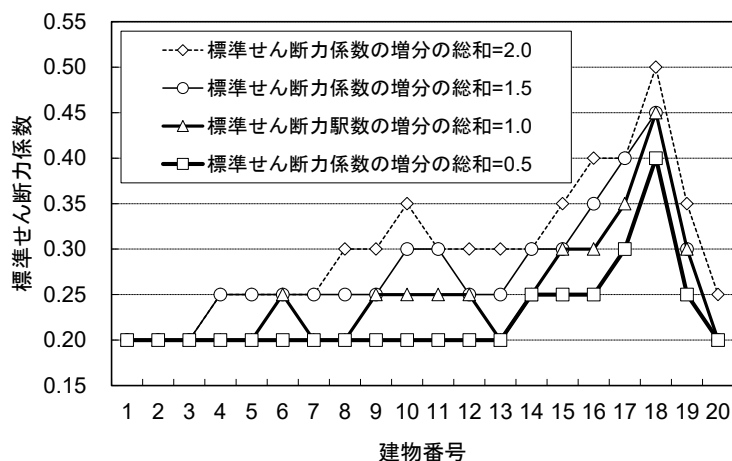


図 3.4.3-2 耐震投資量と耐震投資施策との関係 (ケース 1-1)

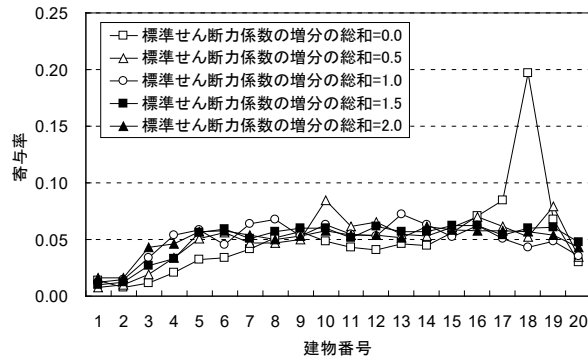
(5) 耐震投資施策が建物の寄与率に与える影響

耐震投資額と寄与率の関係を図3.4.3-3に、解析ケース毎に示す。横軸は建物を、縦軸は寄与率を示している。

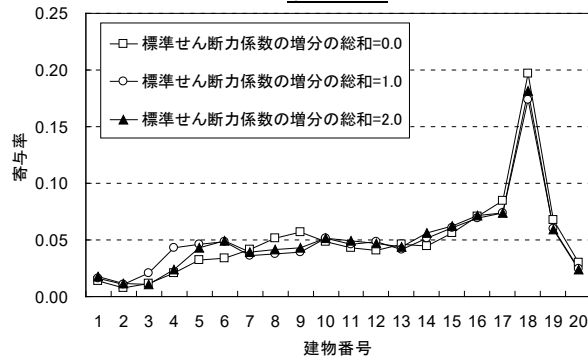
ケース1-1では、耐震投資額がそれほど多くない場合でも寄与率はある程度平準化されている。また、耐震投資額の増加に伴い、寄与率がさらに平準化される様子が見られる。

ケース1-2では、1棟についての耐震性能の向上が小さく、その程度も均質である。その結果、各建物のPMLの低減に頭打ちが現れず、均等に低減されたため、寄与率も耐震施策の程度によらず、同一の分布形状を保持していることが見て取れる。

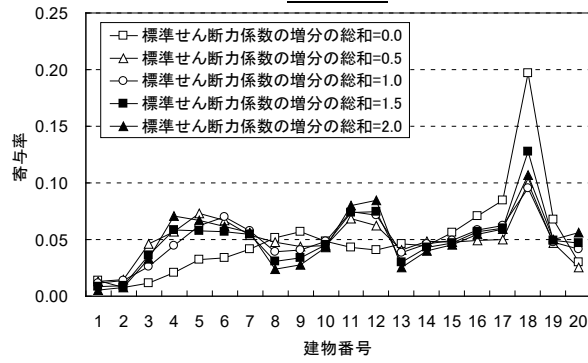
ケース1-3と1-4では、耐震投資額が上昇するに従い、耐震施策の対象ではない建物の寄与率が大きくなってきている。特にケース1-4では、標準せん断力係数の増分の総和が1.0を超えた場合、耐震施策の対象建物の寄与率は変わらず、対象外の建物の寄与率のみが増加するという傾向が現れている。これは、耐震施策の対象建物の耐震性能向上が過度になっていることであり、図3.4.3-1に示したようなPML低減効果の頭打ちに繋がるものと考えられる。



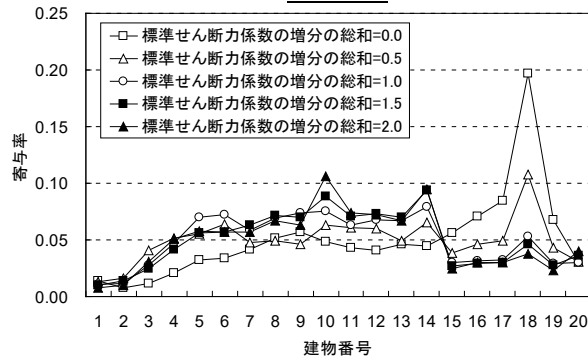
ケース 1-1



ケース 1-2



ケース 1-3



ケース 1-4

図 3.4.3-3 耐震投資施策が建物の寄与率に与える影響

なお、図 3.4.3-3 では北関東に位置する建物 1 と 2 の寄与率は低いままである。他方、図 3.3.2-1 のケース 2 に示されるように、資産の配分によっては建物 1 と 2 の寄与率が増大する。このことから、寄与率に着目するなら資産の配分と耐震投資の 2 手法の組合せも効果的であると考えられる。

(6) 耐震投資量と寄与率の平準化の関係

以上より、資産配分の場合と同様、耐震性の向上についても、寄与率の平準化が建物群のリスク低減に繋がることが明らかになった。図 3.4.3-4 は、標準せん断力係数の増分の総和と寄与率の標準偏差との関係を示したものである。横軸に耐震投資の総量を、縦軸に寄与率の値をとっている。せん断力係数の増分が離散的であることから、必ずしも単調減少にはなっていないが、図 3.4.2-1 に示した手順を踏むこと（ケース 1-1）で、標準せん断力係数の増加に伴い寄与率の標準偏差が小さくなる傾向にあることがわかる。

ケース 1-2 は一律に耐震投資を行うものであるが、対数標準偏差はほぼ横ばいであり、結果として前述したように非効率的な投資に繋がっている。

ケース 1-3 とケース 1-4 は投入量が少ない場合には対数標準偏差が減少するが、投入量が多くなると増加傾向となる。これらのケースでは投入量が多い場合には過剰投資となり、投資効果が薄れることが示された。対数標準偏差の傾向と調和的である。

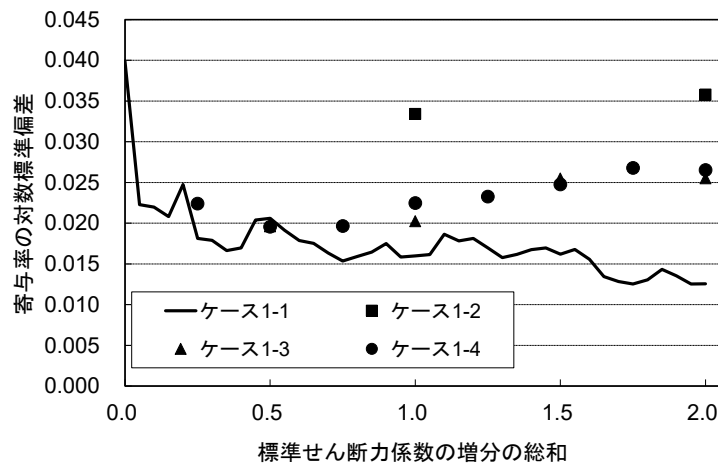


図 3.4.3-4 耐震投資と寄与率の標準偏差との関係

3.4.4 最適投資額と設計せん断力係数の関係

前述したように、図 3.4.2-1 に示した手順に従えば、建物群を構成する建物が保有すべき耐震性能を系統的に求めることができる。本提案手法の特徴は、設定する耐震投資額あるいはリスク低減量に応じて最適な耐震性能を機械的に設定できる点にある。

図 3.4.3-2 を基に、耐震投資量に応じた建物の設計せん断力係数を整理したものが表 3.4.4-1 である。同表より、投入可能な耐震投資額に応じた最適耐震施策 ($C_0=0.2$ 以上の設計せん断力の適用) を求めることができる。

なお、同表に示した耐震投資量（設計せん断力係数の増分の総和）は与条件であり、どの程度の耐震投資量が望ましいかについては、投資額、損失の低減量、建物所有者のリスク回避性向により定まるものである。

表 3.4.4-1 耐震投資量に応じた建物の設計せん断力係数の設定

建物 番号	設計せん断力係数の増分の総和				建物 番号	設計せん断力係数の増分の総和			
	0.5	1.0	1.5	2.0		0.5	1.0	1.5	2.0
1	0.20	0.20	0.20	0.20	2	0.20	0.20	0.20	0.20
3	0.20	0.20	0.20	0.20	4	0.20	0.20	0.25	0.25
5	0.20	0.20	0.25	0.25	6	0.20	0.25	0.25	0.25
7	0.20	0.20	0.25	0.25	8	0.20	0.20	0.25	0.30
9	0.20	0.25	0.25	0.30	10	0.20	0.25	0.30	0.35
11	0.20	0.25	0.30	0.30	12	0.20	0.25	0.25	0.30
13	0.20	0.20	0.25	0.30	14	0.25	0.25	0.30	0.30
15	0.25	0.30	0.30	0.35	16	0.25	0.30	0.35	0.40
17	0.30	0.35	0.40	0.40	18	0.40	0.45	0.45	0.50
19	0.25	0.30	0.30	0.35	20	0.20	0.20	0.20	0.25

3.5 まとめ

本章では、地震リスクマネジメント施策として、まず、資産の配分に着目し、関東地域に設定したモデル建物群を対象に建物群の地震リスクに与える資産配置の影響を、各建物の寄与率として比較検討した。また、各建物の寄与率に着目して、これを平準化するような耐震性向上施策を実施した場合と、定性的な判断に基づく施策を実施した場合のPMLの低減量を評価・比較した。これらの検討により、以下の知見を得た。

- 知見1 建物群の地震リスク低減効果を寄与率の観点から定性的に評価することが可能であり、建物の寄与率の差が小さいほど（寄与率が平準であるほど）リスク低減効果が高い。
- 知見2 地震危険度の高い地点の資産を地震危険度の低い地点に移転する、といった耐震施策の妥当性は寄与率の平準化として表すことができる。
- 知見3 PMLの算出に用いる年超過確率により寄与率は変化し、特に年超過確率が小さい場合には、個々の建物の損失に頭打ちが現れるために、寄与率分布の傾向が大きく異なることになる。
- 知見4 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ことで、効率的な耐震施策を求めることができ、PMLの低減量が与えられた場合には最小の耐震投資額を、投資額が与えられた場合には最大のPMLの低減量を得ることができる。

本章では、建物群のPMLに対する個々の建物の寄与率を基に効果的な地震リスクマネジメント施策を求める手法を提案し、その有用性を確認した。今回の検討範囲では耐震性能の向上を施策として取り上げたが、人命確保を前提とした上での耐震性能の低減も考慮する事項であると考えられる。

また、資産の再配置も地震リスクマネジメント施策として効果的である。耐震性の向上と同様の考え方をを用い、単位の資産を寄与の最も大きい建物から寄与の最も小さな建物に逐次移動させることで効率的な資産移動施策を求めることができる。このような施策においても本提案手法は有効であると考えられる。

なお、地震リスクマネジメント施策は単独で用いることは少なく、複数の手法を組み合わせることが实际的である。したがって3.4.3で述べたように、耐震性能の向上と資産の移動の組み合わせの合理的な設定法の検討が必要である。この場合、変動させる変数が複数であることから、統一的な尺度（例えば、金銭価値換算）が求められるが、この換算における不確実性の介入も実際の適用における障壁となる。複数変数をどのように変化させていくのかも重要な検討課題であり、遺伝アルゴリズム等の援用による実用的な解決策の検討が不可欠である。

さらに、耐震性能の向上や資産の移動には、各々現実的な制約もある。この制約条件を加味した上での最適施策の策定が必要である。

This page intentionally left blank

第4章 周辺地域の被災程度に基づく耐震重要度係数の設定

4.1 はじめに

我が国の建築基準法には耐震重要度の設定はない。建築基準法は満たすべき最低基準を定めたものであり、施主や設計者の判断により耐震設計レベルを設定することが前提となっているからである。しかし、現実的にはこのような判断を実施することは難しく、多くの一般的な建物の設計においては、重要度係数の設定は行われていない。

他方、「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準（国土交通省）」^{4.1)}では官庁施設の耐震性について、建物を構造体、建築非構造部材、建築設備に分類した上で、それぞれについて耐震安全性能の分類を設けている。構造体に関しては、建築基準法上必要とされる耐震性能を1.0とした場合に、それに乗じる重要度係数を設定しており、特に重要な施設であるⅠ類施設については1.5、多数の者が利用する施設（Ⅰ類施設を除く）であるⅡ類施設については1.25、その他の施設であるⅢ類施設については1.0となっている。なお、この重要度係数は設計地震動強度の割増率として反映される。本基準は、「防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン（国土交通省）」^{4.2)}でも参照されており、機能継続に係る目標に応じて建築基準法の1.25倍、1.5倍の地震力に対する検討が求められている。また、「住宅の品質確保の促進等に関する法律（国土交通省）」^{4.3)}では、住宅の性能表示として耐震等級を設定し、建築基準法に定める「極めて希に発生する地震力の1倍（等級1）、1.25倍（等級2）、1.5倍（等級3）の力に対して倒壊・崩壊しないことを求めている。

建物以外では、例えば高圧ガス設備等耐震設計^{4.4)}では、設備の重要度をⅠa、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの4レベルに分類し、それぞれ1.00、0.80、0.65、0.50の重要度係数を設計震度に乗じることとなっている。なお、重要度は、内容物の毒性、内容物の量、施設境界線までの距離に応じて、割り当てられている。また、原子力発電所施設の耐震設計^{4.5)}では、地震により発生する可能性のある環境への放射線による影響の観点から、施設をSクラス、Bクラス、Cクラスの3種に分類し、それぞれについて、3.0、1.5、1.0の重要度係数を割り当て、設計地震動の割増を行っている。

このように、重要度分類についてはその判断根拠が示されているが、重要度係数の値の説明はなく、地震動強度の差異が建物や構造物の地震時性能にどのような影響を与えるかについては明確ではない。中村・他^{4.6)}は火力発電所建物を対象に、期待総費用が最小となるベースシアを評価しており、建築基準法のベースシアに対する比を重要度係数とするなら、これは重要度係数の定量化の試みとして考えられる。この場合、建物の地震時の性能は期待被害費用として間接的に表現されることになる。ただし、期待総費用最小化に基づく設計地震動強度（あるいは重要度係数）の設定は考え方が明確である反面、初期建設費用の影響が入るため、必ずしも建物の重要度に整合しないという問題もある。すなわち、重要な建物であっても、耐震性能の向上に費用を要するものについては、重要度係数は小さくなる。反対に、費用の面で耐震性能の向上が容易ならば、重要度の低い建物について大きな重要度係数が設定されることになる。

また、重要度係数を介さない設計地震動強度レベルの設定には、SHCを用いることも行われ、建築物荷重指針^{4.7)}やJ-SHIS地震ハザードステーション^{4.8)}では、全国の地震ハザード解析結果

が入手可能である。ただし、参照する年超過確率については施主や設計者の判断によることから、十分に普及しているとは言えない状態である。

ところで、以上に示したような重要度係数の設定、あるいは地震動強度レベルの設定においては、当該建物の性能のみが着目されているが、建物によっては、周辺の被災状況（周辺建物の耐震性能）に応じて耐震性能を設定することが重要である。例えば、避難所としての機能が想定されている学校建物は、周辺建物よりも高い耐震性能が求められる。周辺建物の耐震性能が十分高く避難民の数が限定的である場合には、むしろ学校建物の耐震性は低くても良いという考えもできるが、地震動強度の不確実性による被災状況の不確実性を考えるのであれば、周辺建物の耐震性能との相対関係で耐震性能を規定することが良い。また、官庁建物のように、災害時機能の確保と通常機能の維持が要求される場合には、周辺建物の被災のみでなく、健全性にも考慮した上で、当該建物の耐震性能を設定することが必要である。

本章では以上を鑑み、周辺建物が地震時に使用できない、あるいは地震時にも健全である、といった状況において対象となる建物が使用できるか否かを定量化する。すなわち、拠点建物と周辺建物を建物群としたときの、周辺建物の条件付きとした拠点建物の耐震性能を求めることになる。

さらに、得られた結果を用いて拠点建物の重要度係数の検討を行う。

4.2 重要度係数設定の枠組み

拠点となる建物(拠点建物)を取り囲む建物群(周辺建物)の地震災害時の状況を条件として、拠点建物を使用できる確率(供用確率)を指標とした重要度設定の枠組みを構築する。なお、拠点建物としては避難拠点となる公共建物(学校や病院)が想定されるが、支店や関連会社あるいは顧客として周辺建物を想定することで、企業のBCP策定にも資すると考えられる。

4.2.1 重要度係数の設定指標

重要度係数を設定するための指標として、期待条件付供用確率(CEPA: Expected Conditional Probability of Availability)を定義する。重要度係数の設定を試みる建物を拠点建物、周辺地域に立地する建物を周辺建物とする。前述したように、周辺建物の用途に応じて、それらが損傷した場合と健全である場合の2ケースを想定する。周辺建物が所与の損傷状態にあるとき、あるいは、健全状態にあるときに、重要度係数 I の拠点建物が今後 t 年間に利用可能である確率をCEPAとし、式(4.2.1-1)で定義する。

$$p_A(t, I, p_L, p_U) = (1 - p_F(I, p_L, p_U))^t \quad (4.2.1-1)$$

ここに、

$p_A(t, I, p_L, p_U)$: 今後 t 年間のCEPA

$p_F(I, p_L, p_U)$: 重要度係数 I の拠点建物の年期待条件付損傷確率

p_L : 周辺建物の損傷確率あるいは健全確率の下限值

p_U : 周辺建物の損傷確率あるいは健全確率の上限值

である。

以上からわかるように、周辺建物の被災状況は、被災レベルと被災建物数の2つの変数で規定される。被災レベルについては限界状態で規定し、被災数については間接的に、周辺建物の損傷確率あるいは健全確率の下限值と上限値である p_L と p_U により規定する。

4.2.2 期待条件付損傷確率の評価方法

(1) 周辺建物の地震時状況の設定

周辺建物の地震時の状況は地震動強度の相関を考慮したMCSを採用したマルチイベントモデル^{4.9)}により評価する。イベント i 、MCSの試行 k における周辺建物の平均損傷確率を $p_{f,i,k}$ 、平均健全確率 $p_{s,i,k}$ をとするならば、これらは次式で求められる。

$$p_{f,i,k} = \sum_{j=1}^N p_{j,i,k} / N \quad (4.2.2-1a)$$

$$p_{s,i,k} = \sum_{j=1}^N (1 - p_{j,i,k}) / N \quad (4.2.2-1b)$$

ここに、

$p_{j,i,k}$: イベント*i*, MCS の試行*k*における周辺建物*j*の損傷確率
 N : 周辺建物数

である。

(2) 拠点建物の条件付き損傷確率

MCS の試行*k*において $p_{f,i,k}$ あるいは $p_{s,i,k}$ が所与の設定確率範囲 ($p_L \sim p_U$) 内にあるかどうかを示す変数を u_k とし、範囲内にある場合は $u_k = 1$ 、範囲内にはない場合は $u_k = 0$ とする。拠点建物の損傷確率を $p_{0,i,k}(I)$ とすると、イベント*i*における拠点建物の条件付き損傷確率は式(4.2.2-2)で求められる。

$$p_{0,i}(I, p_L, p_U) = \frac{\sum_{k=1}^m (p_{0,i,k}(I) \cdot u_k)}{\sum_{k=1}^m u_k} \quad (4.2.2-2)$$

ここに、 m はMCSの試行数である。

式(4.2.2-2)が示すように、条件付き損傷確率とは、周辺建物の状況が設定した条件を満たす場合の、拠点建物の損傷確率の平均値である。周辺建物の状況を表す確率 $p_{f,i,k}$ あるいは $p_{s,i,k}$ は同式においては直接反映されず、変数 u_k により間接的に反映される。

さらに、イベント*i*の年間発生頻度を v_i とすると、拠点建物の年期待条件付き損傷頻度 $v_F(I, p_L, p_U)$ は式(4.2.2-3)で求められる。

$$v_F(I, p_L, p_U) = \sum_{i=1}^n (v_i \cdot p_{0,i}(I, p_L, p_U)) \quad (4.2.2-3)$$

ここに、 n はイベント数である。年期待条件付き損傷確率は、ポアソン過程により、式(4.2.2-4)で求められる。

$$p_F(I, p_L, p_U) = 1 - \exp(-v_F(I, p_L, p_U)) \quad (4.2.2-4)$$

式(4.2.2-4)で得られた年期待条件付き損傷確率を式(4.2.1-1)に代入することで、 t 年 ECPA を求めることができる。

4.2.3 重要度係数の設定

所与の目標 ECPA に対し、それを実現するような重要度係数をもって、拠点建物の重要度係数とする。なお、重要度係数の設定は 4.5 に示す。

4.3 期待条件付供用確率の試算のための条件設定

モデルサイトに立地する用途・階数の異なる拠点建物について ECPA を算定するには、重要度係数に応じた建物の SFC が必要である。この場合、SFC を被害データから構築することは不可能で、解析的に求めることが必要となる。ここでは、地震環境や SFC の設定等、提案手法の適用可能性を検討するための条件設定を行う。

4.3.1 拠点建物と周辺地域の設定

学校建物を想定して鉄筋コンクリート造 3 階建物、役所建物を想定して鉄筋コンクリート造 8 階建物の 2 つをモデル拠点建物として設定した。避難所として学校建物を考える場合には、体育館を想定することが通常であるが、本検討においては、建物階数による結果の差異を検討することも視野に入れ、体育館と学校建物の耐震性が同程度であると仮定した。なお、体育館の被害については、天井の落下等の固有の事象も存在するが、これは拠点建物の限界状態に係る感度解析のパラメータに含まれると考えた。

立地地点は東京都庁位置とした。また、拠点建物から半径 3(km)、12(km)、24(km)の 3 範囲を周辺地域とし、それぞれ Area 1、Area 2、Area 3 とした。拠点建物の位置ならびに周辺地域の範囲を図 4.3.1-1 に示す。同図に示すように、周辺地域は必ずしも実際の行政界とは一致していないが、ここでは、周辺地域の大きさが重要度係数設定に与える影響を検討するための仮想地域として設定している。また、同図に示した AVS30 は深さ 30(m)までの地盤の平均 S 波速度(cm/s)である。

周辺建物は周辺地域内に一様に分布するものと仮定し、各周辺地域を格子分割したその中央に置いた。格子サイズは周辺地域の大きさに応じ、Area 1 では、0.5km 四方、Area 2 では 2.0km 四方、Area 3 では 4.0km 四方とした。これは、周辺建物の数を概ね揃えるためである。なお、格子中央が海域にある場合は、立地地点から除外した。周辺地域の形状設定と同様に、地域内に建物が一様分布することは非現実的な仮定ではあるが、本論文の目的を阻害するものではない。

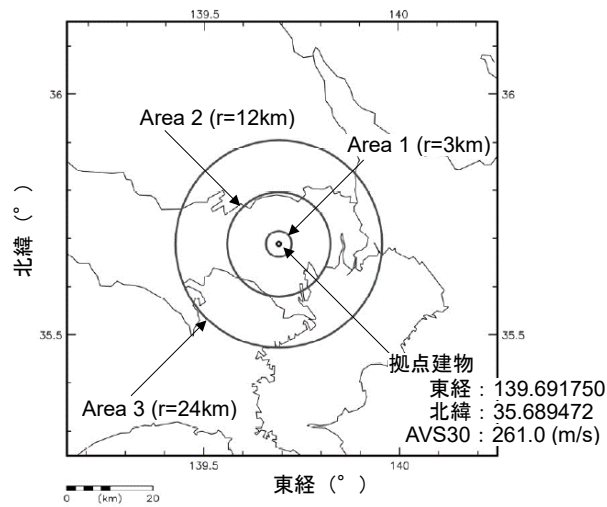


図 4.3.1-1 拠点建物の位置と周辺地域の範囲

4.3.2 拠点建物の地震フラジリティ曲線

(1) 評価方法

地震フラジリティ評価の概念を図 4.3.2-1 に示す。地震動強度を x とし、 x による応答の確率分布を $R(x)$ とする。また、耐力の確率分布を C とする。 $R(x)$ と C の確率分布形を仮定して損傷確率 $p(x)$ を得て、 x と $p(x)$ を回帰することでSFCのパラメータである耐力地震動強度の中央値と対数標準偏差を得る。なお、本試算では、地震動強度指標としてPGVを用いた。

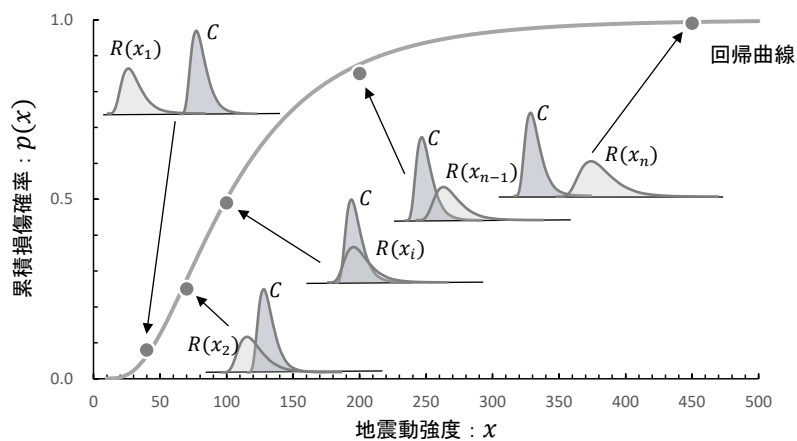


図 4.3.2-1 地震フラジリティ評価の概念

SFC の評価では建物が強い非線形状態に至るような地震動強度においても応答の不確実性を評価することが必要となること、各不確実性要因と応答の不確実性の関係は陽な関係では与えられないことから、MCS を援用して $R(x)$ を求める。応答解析方法の選択は任意であるが、ここでは計算が容易で解が安定している限界耐力計算法^{4,10)}を用いた。

MCS の試行数は 200 とし、SFC の評価において考慮する不確実要因は以下の 5 変数とした。

入力に係る不確実要因	・ 応答スペクトル
建物応答に係る不確実要因	・ 剛性
	・ 強度
	・ 減衰
建物応答に係る不確実要因	・ 限界変形角

(2) デマンド・スペクトル

限界耐力計算におけるデマンド・スペクトルは当該サイトにおける UHS を中央値とした応答スペクトル群から評価した。評価地点は図 4.3.1-1 に示した東京都庁位置である。

震源モデルは J-SHIS のウェブサイトからダウンロードした 2019 年モデルを用いて設定した。地震発生確率はポアソン過程とした。地震動予測式は「防災科学技術研究所研究資料 第 336 号^{4,11)}」の応答スペクトル計算方法 (Kanno et al. (2006)^{4,12)} の式に補正を加えたもの) を用いた。Kanno et al. (2006) の地震動予測式を式(4.3.2-1)に示す。

$$\log SA = a_1 M_w + b_1 X - \log(X + d_1 \cdot 10^{0.50 M_w}) - c_1 \quad (D \leq 30 \text{ km}) \quad (4.3.2-1a)$$

$$\log SA = a_2 M_w + b_2 X - \log(X) - c_2 \quad (D > 30 \text{ km}) \quad (4.3.2-1b)$$

ここに、 SA は解析に使用した観測点の平均的地盤 ($V_s=300(\text{m/s})$ 相当) における減衰定数 5% の加速度応答スペクトル (cm/s/s)、 M_w はモーメントマグニチュード、 X は断層最短距離 (km)、 D は震源深さ (km) である。また、 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 及び a_2 、 b_2 、 c_2 は周期毎に与えられる回帰係数である。応答スペクトルと同様の形式で $PGA(\text{cm/s/s})$ と $PGV(\text{cm/s})$ の回帰係数も示されており、これら地震動強度についても推定される。

表層地盤の増幅率は、 $AVS30$ を変数として式(4.3.2-2)で与えられる。

$$G = p \cdot \log AVS30 + q \quad (4.3.2-2)$$

ここに、 G は周期 T における地盤増幅率、 p 、 q は回帰係数で周期毎に与えられる。

得られた UHS を図 4.3.2-2 に示す。UHS の再現期間は 10 年、100 年、1000 年、10000 年、100000 年の 5 レベルとした。また、周期 0.01 秒の位置に PGA の値を、10 秒の位置に PGV の値を示している。

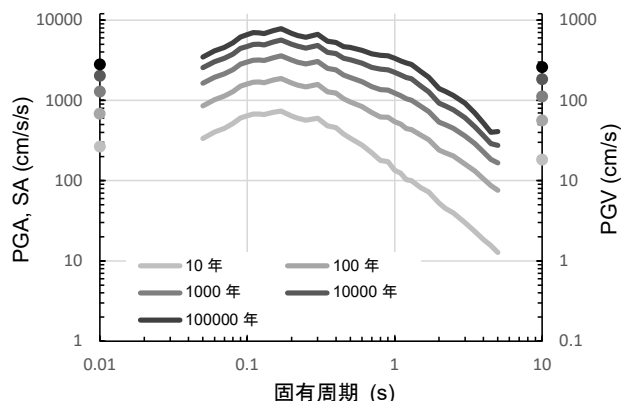


図 4.3.2-2 再現期間毎の一様ハザードスペクトル

再現期間 10 年の場合を除いては UHS の形状はほぼ同一であることがわかる。再現期間 10 年といった高頻度の発生確率の地震の多くは、サイト近傍の中小地震（背景的地震）であり、結果として小マグニチュードの地震の寄与が多いために長周期領域の応答加速度値がそれほど大きくないものと考えられる。再現期間 100 年以上の UHS は低頻度の大地震を含むようになり、長周期領域の応答加速度値も大きくなっている様子がうかがえる。また、その形状もほぼ同一と見做せることから、支配的な地震も共通であると考えられる。

次に、再現期間 1000 年の UHS 形状を中央値として、前出の「防災科学技術研究所研究資料第 336 号」に従って不確実性を与えデマンド・スペクトルのサンプルを生成した。なお、加速度応答スペクトルの不確実性には周期間の相関があるため、田中ら^{4.13)}による式(8)を用いて周期間相関を与えた。

$$\rho(t_1, t_2) = 1.0 - 0.308 \left| \ln \left(\frac{t_1}{t_2} \right) \right| \quad \text{for } t_1, t_2 \geq 0.1 \quad (4.3.2-3)$$

ここに、 t_1 と t_2 は固有周期である。固有周期が 0.1 未満の場合には相関係数は 1.0 とする。なお、UHS そのものは不確実性を考慮した結果であり、これを平均として不確実性を与えることは慣行であり原理的には正しくないことには注意が必要である。UHS と応答スペクトルの形状の類似性については、付録 2 にまとめた。

得られた UHS 群を図 4.3.2-3 に示す。同図に示す UHS の数は MCS の試行数と合わせ 200 である。同図は PGV の中央値が 10 cm/s となるように規準化したものである。

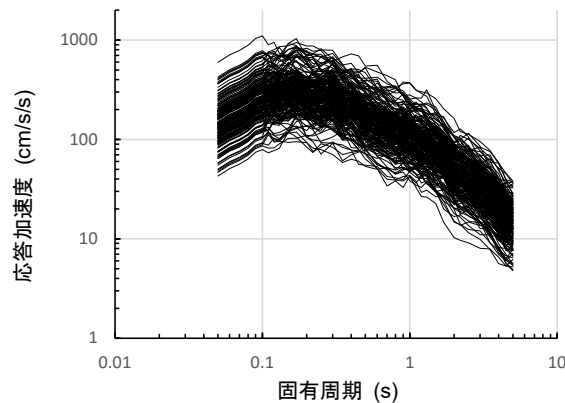


図 4.3.2-3 最大速度（10cm/s）で規準化された一様ハザードスペクトルのサンプル

(3) キャパシティ・スペクトル

キャパシティ・スペクトルは、新耐震設計基準で設計されている建物を多質点系モデルとして表し、それを1質点系モデルに縮約することで求めた。なお、地域係数は $Z = 1.0$ とし、図 4.3.1-1 に示した AVS30 の値から二種地盤を仮定した。

多質点系モデルの設定方針は以下のようである。

- 方針 1 質点の質量は同一とする。
- 方針 2 設計荷重による各層の層間変形角は同一とする。
- 方針 3 各層の高さは 3.5m で一律とする。
- 方針 4 1 次固有周期は建物高さで構造種別により求める。
- 方針 5 参照高さは、1 質点系モデルの変位に等しい変位を与える高さとする。

キャパシティ・スペクトルの形状は図 4.3.2-4 に示すようなトリリニアとした。第 1 折点の強度は 1 次設計用層せん断力 Q_1 に裕度 α を見込んだものとし、変位は強度を初期剛性 κk で除することで求める（ κ は現実的な剛性とするための割増率）。なお、キャパシティ・スペクトルの縦軸は応答加速度であるため、同図においては強度を質量 M で除した応答加速度で示している。第 2 折点の強度は構造特性係数 D_s を 0.35 とし求めた 2 次設計用層せん断力に裕度を見込んだものとし、変位は強度を割線剛性 k' で除することで求める。割線剛性と初期剛性の比は耐震壁付き RC 造建物を想定して 0.40 と設定した。また、図中の $SD_{\mu 0}$ は限界耐力計算法において減衰定数 h の算定に用いる塑性率評価用の起点であり、エネルギー等価なバイリニアのスケルトンカーブの折点として設定した。

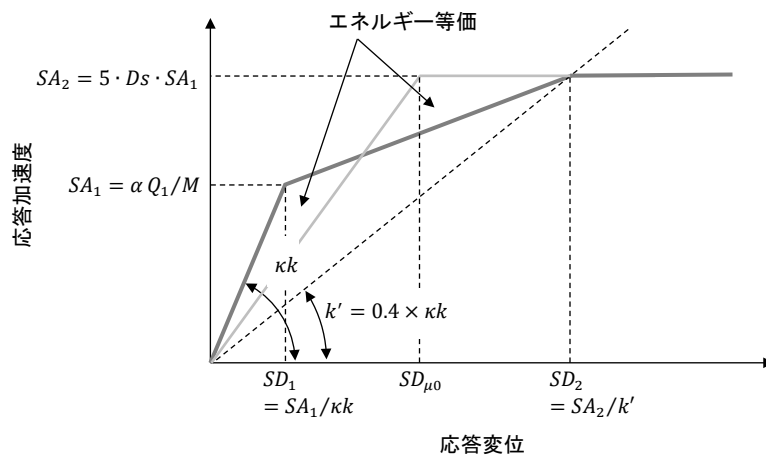


図 4.3.2-4 キャパシティ・スペクトルの設定

強度の裕度 α と剛性の割増率 κ については、変動も含め次のように設定した。強度の裕度は断面算定における裕度と材料強度の裕度の積で求めることとし、前者については工学的判断により10%、後者については森口ら^{4.14)}を参照してSD490の降伏点比から6%の強度割増を想定した。結果として強度の裕度は16.6%増しとなった。裕度の不確実性は、実強度が設計値を下回ることは極めて小さく、その確率を0.1%としたときの対数標準偏差として求めた。具体的には、0.05を得た（自然対数、数値は丸めている）。

剛性の変動は高さ式（建物高さと固有周期の関係を表す経験式）の推定誤差として評価した。現行設計の高さ式の係数は0.02であるが、地震調査推進本部^{4.15)}ではRC系建物に対する係数が0.015を中心として分布していることが示されている。これより、高さ式の係数の分布を対数正規分布とし、中央値を0.015とした。強度の場合と同様に設計上の係数を超える確率を0.1%とし、対数標準偏差で0.1を得た（自然対数、数値は丸めている）。

重要度係数を $I = 1.0$ としたときのキャパシティ・スペクトルのサンプルを図4.3.2-5に示す。サンプル数はMCSの試行数に合わせ200とした。なお、重要度係数は、折れ点1、折れ点2の強度の割増として考慮し、1.0、1.25、1.5、1.75、2.0の5種を設定した。強度の増大は主に鉄筋の割増で果たされるもの考え、剛性は重要度係数には依存しないと仮定した。

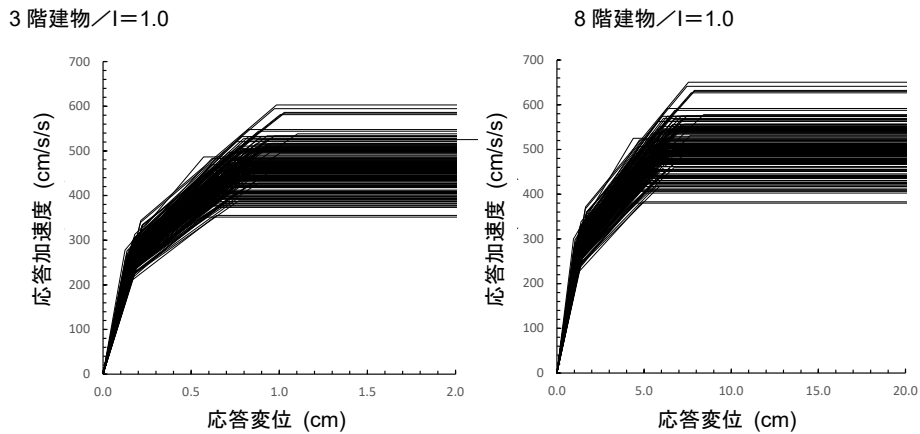


図 4.3.2-5 キャパシティ・スペクトルのサンプル

(4) 応答計算

1 質点系モデルの変位はデマンド・スペクトルとキャパシティ・スペクトルの交点から求める。デマンド・スペクトルは UHS の横軸を次式により固有周期 T から応答変位 $SD(T)$ に換算して求める。

$$SD(T) = SA(T) \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 \tag{4.3.2-4}$$

ここに、 $SA(T)$ は UHS の縦軸から得られる応答加速度である。

デマンド・スペクトルの算定に用いる 5%減衰の応答加速度は、減衰定数 h を変数として次式により補正する。

$$Fh = \frac{1.5}{1 + 10h} \tag{4.3.2-5}$$

また、減衰定数 h は次式に示す略算式により求めた。

$$h = \gamma_1 (1 - 1/\sqrt{DF}) + h_e \tag{4.3.2-6}$$

ここに、右辺第 1 項は塑性化によるエネルギー吸収に対応した減衰定数で、係数は $\gamma_1 = 0.25$ とした。 DF は図 4.3.2-4 に示した起点 ($SD_{\mu 0}$) から求められる塑性率である。右辺第 2 項は弾性応答における減衰定数である。塑性化に係る減衰定数の不確実性は図 4.3.2-5 に示した骨格曲線の変動に含まれるとした。他方、弾性応答に係る減衰定数 h_e は動的解析に用いられる 3% を中央値とした。また、設計で用いられる 5% を超える確率を 0.1% とし、対数標準偏差で 0.17 を得た (自然対数、数値は丸めている)。

入力レベルは、PGVの5~500 cm/sの区間を対数軸上で20等分した21レベルを設定した。地震動強度とこれらの関係を図4.3.2-6に示す。横軸にPGVを取り、上段が応答の中央値、下段が応答の対数標準偏差（自然対数）である。応答と重要度係数には単調な関係が見られ、重要度係数が増すほど応答の中央値が小さくなること、対数標準偏差の山の部分の発生PGVが高くなることわかる。3階建物と8階建物を比較すると3階建物の方が応答が大きい、同一のPGVに対する応答スペクトル値の差によるものである。

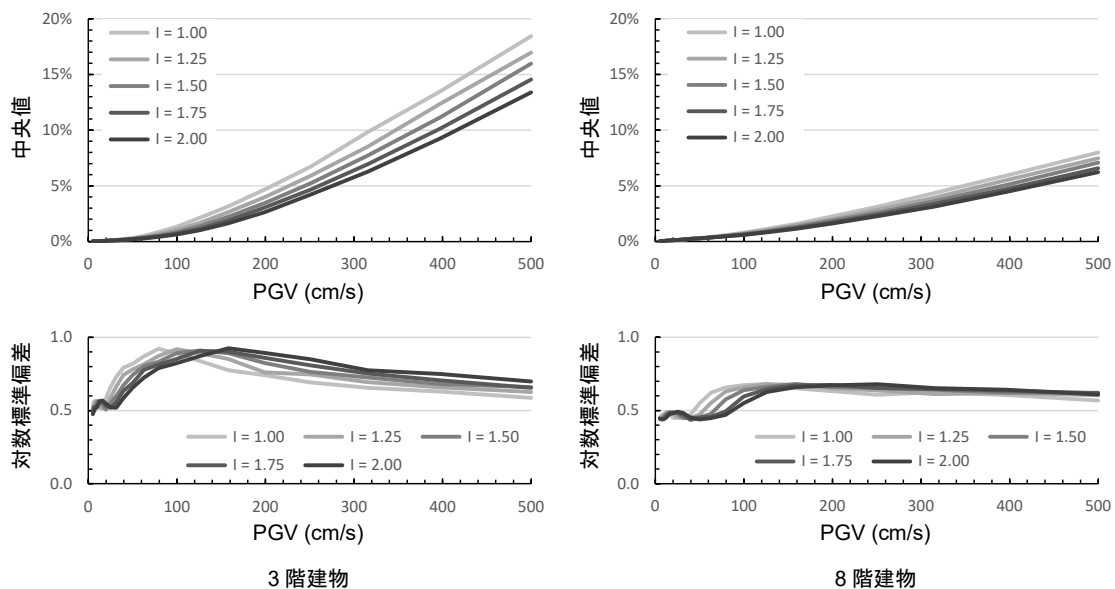


図 4.3.2-6 入力地震動強度（PGV）と応答（層間変形角）の確率特性の関係

(5) 耐力の確率分布

限界状態として、表 4.3.2-1 に示す 3 段階のレベルを想定した。各限界状態は層間変形角を閾値として規定し、L1 は 1 次設計に、L2 は 2 次設計における閾値である。L3 は L2 を超える被害の限界（ここでは倒壊限界とする）として L2 の 2 倍の値を与えた。閾値は確定値ではなく対数正規分布で表される確率量として設定し、Table 1 にその中央値と対数標準偏差を併記する。なお、対数標準偏差は、限界状態の閾値の境界を超える確率を 0.1% として設定した。境界の変形角は中央の幾何平均とし、L1 と L2 の境界は 1/141、L2 と L3 の境界は 1/71 と設定した（自然対数、数値は丸めている）。

表 4.3.2-1 拠点建物の限界状態と層間変形角の閾値の確率特性値

	限界状態	閾値（層間変形角）	
		中央値	自然対数標準偏差
L1	Immediate Occupancy（継続使用）	1/200	0.12
L2	Life Safe（人命保護）	1/100	0.12
L3	Collapse Prevention（崩壊防止）	1/50	0.12

(6) 拠点建物の地震フラジリティ曲線の評価

SFC の回帰は、図 4.3.2-1 に示したように地震動強度 x_i と損傷確率 $p(x_i)$ の関係を回帰より求める。ただし、両者を直接回帰するのではなく、 x_i の代わりにその自然対数 $\ln x_i$ を用い、 $p(x_i)$ の代わりに次式で与えられる規準化確率変数を用いた。

$$s(x_i)_j = \frac{\ln(r(x_i)/c_j)}{\sqrt{\zeta_R(x_i)^2 + \zeta_{C,j}^2}} \quad (4.3.2-7)$$

ここに、 i は解析に用いた入力レベルを表す添え字、 j は閾値を表す添え字、 $r(x_i)$ は応答の中央値、 $\zeta_R(x_i)$ は応答の対数標準偏差、 c_j は閾値の中央値、 $\zeta_{C,j}$ は閾値の対数標準偏差である。

なお、 $\ln x_i$ と $s(x_i)_j$ で回帰する理由は、データが直線状に並んでいれば、SFC に対数正規分布を仮定する妥当性が示されることと、その線形回帰直線から SFC の特性値が推定できることによる。具体的には、 $\ln x_i$ と $s(x_i)_j$ の回帰直線から、規準化確率変数 0.0 に対応する値が地震動強度の対数平均、規準化確率変数 1.0 に対応する値が地震動強度の対数平均+対数標準偏差となる。対数平均を実数に変換することで中央値が得られる。

回帰の結果を表 4.3.2-2 に示す。同表より重要度係数と中央値あるいは対数標準偏差の間には単調な関係があり、重要度が増すほど中央値ならびに対数標準偏差が増すことがわかる。また、限界状態と中央値あるいは対数標準偏差の間にも単調な関係があり、限界状態が L1→L3 になるに従い、中央値は増大し対数標準偏差は減少する傾向にある。以上の傾向は中央値については自明である。対数標準偏差については、重要度が低いほど、あるいは限界状態が高いほど建物の非線形化の程度が大きく、長周期化することによって変位一定則の効果が現れ、結果としてばらつきが小さくなったと考えられる。

建物階数で比較すると、3 階建物に比べて 8 階建物は中央値、対数標準偏差共に大きいことがわかる。中央値が大きいのは応答スペクトル値の差が現れたためで、対数標準偏差は 8 階建物の方が非線形化の程度が弱いために、変位一定則の効果が現れにくいことによると考えられる。

建物階数で比較すると、3 階建物に比べて 8 階建物は中央値、対数標準偏差共に大きいことがわかる。中央値が大きいのは応答スペクトル値の差が現れたためで、対数標準偏差は 8 階建物の方が非線形化の程度が弱いために、変位一定則の効果が現れにくいことによると考えられる。

表 4.3.2-2 回帰結果により得られた地震フラジリティ曲線の特性値

建物階数	限界状態	特性値	重要度係数				
			1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
3階建て	L1	中央値	61.83	69.32	75.81	81.38	87.88
		自然対数標準偏差	0.373	0.383	0.391	0.395	0.401
	L2	中央値	89.35	100.40	110.05	118.37	127.83
		自然対数標準偏差	0.364	0.369	0.374	0.377	0.380
	L3	中央値	126.78	141.81	155.06	166.58	179.06
		自然対数標準偏差	0.355	0.357	0.359	0.361	0.361
8階建て	L1	中央値	73.08	77.97	81.91	85.03	87.37
		自然対数標準偏差	0.427	0.435	0.443	0.447	0.451
	L2	中央値	120.23	129.27	137.09	143.86	148.92
		自然対数標準偏差	0.408	0.414	0.420	0.424	0.427
	L3	中央値	189.77	204.51	218.17	231.01	240.66
		自然対数標準偏差	0.391	0.395	0.399	0.403	0.406

拠点建物の ECPF は式(4.2.1-1)に示したように、重要度係数 I を変数とした連続関数として定義されている。そこで、任意の重要度係数に対する SFC の中央値ならびに対数標準偏差を求めることを可能にするため、表 4.3.2-2 に示した中央値と対数標準偏差（フラジリティ特性値）を重要度係数について回帰した。横軸に重要度係数を、縦軸に中央値あるいは対数標準偏差を取ると、概ね上に凸となる傾向があることから、式(4.3.2-8)に示す累乗式を採用した。

$$r = a \cdot I^b \quad (4.3.2-8)$$

ここに、 r はフラジリティ特性値、 a と b は回帰係数である。得られた回帰係数を表 4.3.2-3 に示す。また、同表の回帰係数から得られた推定値と、表 4.3.2-2 に示したフラジリティ特性値の比較を図 4.3.2-7 に示す。実線が推定値、プロットが回帰データであるが、両者は良い一致を示していることがわかる。

推定された回帰係数を用いて、建物毎、限界状態毎の SFC を求めたものが図 4.3.2-8 である。重要度係数の効果は表 4.3.2-3 に示した変数 b の大きさによるが、中央値に関しては 8 階建物よりは 3 階建物の方が効果は高く、その様子は図 4.3.2-8 から読み取ることができる。

表 4.3.2-3 フラジリティ特性値の回帰係数

建物階数	限界状態	中央値		対数標準偏差	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
3階建て	L1	61.859	0.5008	0.3739	0.1021
	L2	89.404	0.5110	0.3642	0.0625
	L3	126.830	0.4941	0.3550	0.0259
8階建て	L1	73.388	0.2593	0.4272	0.0806
	L2	120.495	0.3116	0.4081	0.0668
	L3	189.633	0.3466	0.3907	0.0542

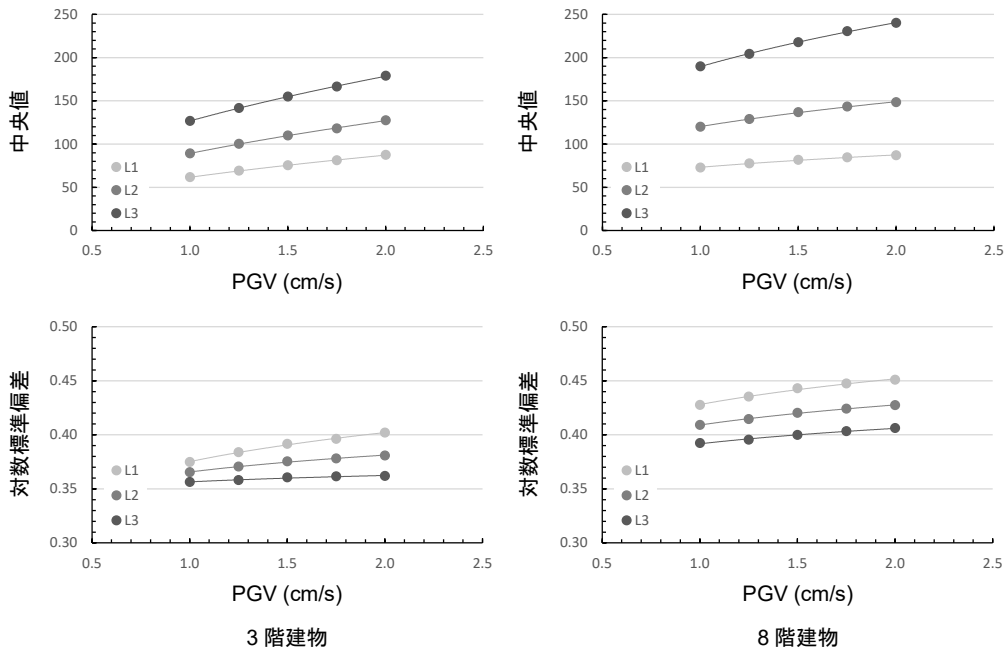


図 4.3.2-7 重要度係数とフラジリティ特性値の関係

(実線：推定値，プロット：回帰データ)

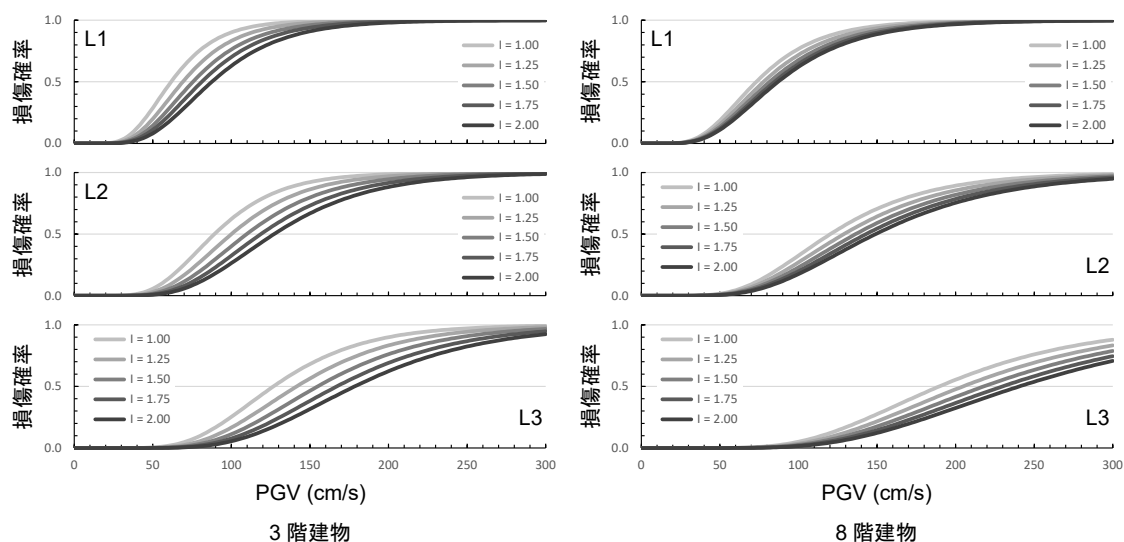


図 4.3.2-8 拠点建物の地震フラジリティ曲線

4.3.3 周辺建物の地震フラジリティ曲線

(1) 評価方法

周辺建物の SFC は、地域を構成する代表的な建物の SFC の加重和として評価する。周辺建物の SFC の算出手順は拠点建物と同様とし、重要度係数は 1.0 とする。周辺建物の SFC については、例えば佐藤ら^{4.16)}等を参照して設定することも考えられるが、拠点建物の SFC との相対的な関係を維持するため、同一の手法を採用することとした。

なお、周辺建物は、木造と非木造を想定するが、木造建物については構造設計がなされていないことから、非木造建物との相対的な関係で SFC を評価する。

(2) 周辺建物の設定

周辺建物は、構造種別、建築年代、階数といった様々な属性を異にする建物から成り立っている。これらに対して網羅的に SFC を構築することは現実的でないので、住宅土地統計^{4.17)}に基づいて表 4.3.3-1 に示すような区分を設定した。木造については 1~2 階が大半を占めるため、2 階を代表階数とした。非木造建物については、4 種の階数区分 (1~2 階, 3~5 階, 6~10 階, 11 階以上) について代表階数を 2 階, 4 階, 8 階, 12 階とした。建設年代に関しては、旧々耐震, 旧耐震, 新耐震の 3 区分に 2000 年の改訂を加えた 4 区分とし、住宅土地統計の区分に倣い、1970 年以前, 1971-1980 年, 1981-2000 年, 2001 年以降とした。

次に、木造、非木造のそれぞれについて、階数区分と建築年代の組み合わせにおける建物棟数を求めその相対比率を求めた。さらに、木造、非木造の建物棟数比を乗じ、相対比率の総和が 1.0

となるように規準化した。なお、木造、非木造の建物棟数は東京特別区の値を採用した。建物棟数の相対比率も同表に示している。

表 4.3.3-1 周辺建物の区分と建物棟数比率

構造種別	建物階数	建設年			
		-1970	1971-1980	1981-2000	2001-
木造	2	0.040	0.051	0.113	0.092
	2	0.002	0.006	0.057	0.066
非木造	4	0.020	0.051	0.152	0.098
	8	0.002	0.016	0.071	0.059
	12	0.001	0.012	0.037	0.054

(3) 応答の確率分布

周辺地域の差異を明確にするため、面積のみを違えることとし、デマンド・スペクトルは拠点建物の SFC 評価で用いたものを採用した。

また、設計年次の差は、帯筋間隔の変更や保有水平耐力の確認等、主に靱性能向上に係るものであることから、年代による差は耐力（限界変形角）に反映することとし、キャパシティ・スペクトルは年代によらず同一とした。

応答計算に係る諸条件は拠点建物と同一とし、応答（層間変形角）の中央値ならびに対数標準偏差を求めた。地震動強度とこれらの値の関係を図 4.3.3-1 に示す。図 4.3.2-6 に示した 3 階建物と 8 階建物の確率特性について述べたように建物が低層であるほど、応答の中央値、対数標準偏差が大きいという傾向が見て取れる。

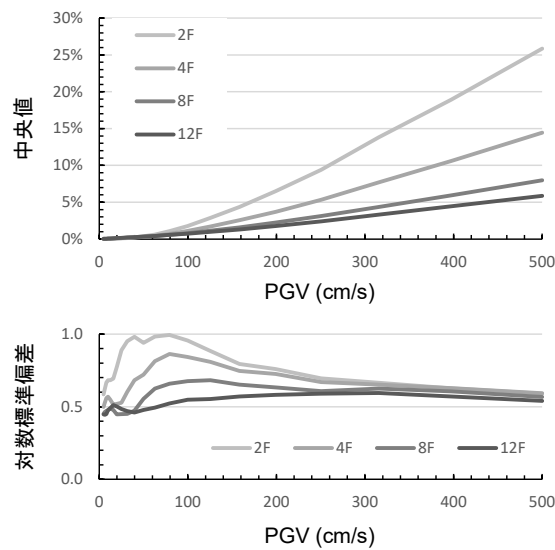


図 4.3.3-1 周辺建物（非木造）の PGV と層間変形角の確率特性の関係

(4) 耐力の確率分布

耐力は確率量とし、確率分布形としては対数正規分布を仮定した。設定した層間変形角の閾値を表 4.3.3-2 に示す。中央値については新耐震（1981-2000）を基準として、旧々耐震で 0.5 倍、旧耐震で 0.7 倍、2001 年以降で 1.2 倍の比を乗じた。これらの比率は東京都の被害想定^{4.18)}で用いている被害関数の差より設定した。

ただし、非木造建物については 2001 年以降についても 1981-2000 年の SFC を用いることとし、同表の数値は木造の SFC の評価用として参照した。

対数標準偏差については拠点建物と同様に限界状態を問わず 0.12 とした。また、この値は、建設年についても共通とした。

表 4.3.3-2 周辺建物の限界状態と層間変形角の閾値（中央値）

限界状態	建設年			
	-1970	1971-1980	1981-2000	2001-
L1 Immediate Occupancy（継続使用）	1/400	1/286	1/200	1/167
L2 Life Safe（人命保護）	1/200	1/143	1/100	1/83
L3 Collapse Prevention（崩壊防止）	1/100	1/71	1/50	1/42

注 2001 年以降の値は、木造建物の SFC の評価用に用いる。

層間変形角の閾値の対数標準偏差は建設年と限界状態によらず 0.12 とする。

(5) 周辺建物の地震フラジリティ曲線の評価

非木造建物については拠点建物と同様の手順で階数別、年代別にフラジリティ特性値を回帰した。さらに回帰したフラジリティ特性値を用いて PGV 毎に損傷確率を求め、表 4.3.3-1 の案分比に基づいて足し合わせたものを非木造建物の SFC とし、フラジリティ特性値を再度回帰して求めた。

木造建物の SFC の中央値は非木造建物の SFC の中央値に係数を乗じて設定した。具体的には、東京都で用いている被害関数の横軸を、式(4.3.3-1)を用いて震度から PGV 換算した後、所与の被害率に対する木造建物と非木造建物の PGV の比を 1:2 とし、係数 0.5 を定めた。

$$I_e = 2.68 + 1.72 \cdot \log v \quad (4.3.3-1)$$

ここに、 I_e は計測震度、 v は PGV である。

さらに、木造建物の SFC と非木造建物の SFC の加重和を周辺建物全体の SFC とした。重みは表 4.3.3-1 の案分比に基づいて設定した。得られた SFC パラメータを表 4.3.3-3 に示す。

表 4.3.3-3 回帰結果により得られた周辺建物の地震フラジリティ曲線の特性値

建物種別	限界状態	特性値	建設年				全年代
			-1970	1971-1980	1981-2000	2001-	
木造	L1	中央値	20.58	26.19	33.34	37.88	30.56
		自然対数標準偏差	0.421	0.427	0.420	0.423	0.466
	L2	中央値	32.56	42.08	51.78	58.39	48.38
		自然対数標準偏差	0.408	0.415	0.411	0.416	0.457
	L3	中央値	49.62	64.33	76.20	84.87	72.53
		自然対数標準偏差	0.396	0.405	0.406	0.413	0.443
非木造	L1	中央値	41.16	52.37	66.69	66.96	62.24
		自然対数標準偏差	0.421	0.427	0.420	0.425	0.444
	L2	中央値	65.13	84.16	103.56	104.82	98.39
		自然対数標準偏差	0.408	0.415	0.411	0.417	0.438
	L3	中央値	99.24	128.66	152.40	154.67	147.91
		自然対数標準偏差	0.396	0.405	0.406	0.414	0.430
総合	L1	中央値	32.90	41.76	53.20	55.81	48.75
		自然対数標準偏差	0.473	0.487	0.487	0.475	0.519
	L2	中央値	51.89	67.43	83.51	87.55	77.98
		自然対数標準偏差	0.474	0.488	0.490	0.478	0.529
	L3	中央値	79.84	104.51	124.38	129.59	119.42
		自然対数標準偏差	0.474	0.487	0.491	0.481	0.528

前出の佐藤・他は、非木造建物に関する既往の被害率曲線について中央値と対数標準偏差を整理している。それらの内、表 4.3.3-3 に示す対数標準偏差に近い値を示すものの中央値は、小破 17~176(cm/s)、中破 57~358(cm/s)、大破 75~483(cm/s)と広く分布している。データ数も少なく評価手法も異なるので、数値の直接的な比較の意味は薄いものの、評価した周辺建物の SFC は実被害から求められた被害関数から著しく乖離してはいないと判断する。

表 4.3.3-3 の「全年代」について求めた SFC を図 4.3.3-2 に示す。Wooden は木造建物の SFC を、No-W は非木造建物の SFC を、All は全建物の SFC をそれぞれ示している。全建物の SFC は木造建物の SFC と非木造建物の SFC の中間程度であることがわかる。

また参考として、重要度係数 1.0 における拠点建物の SFC (3F あるいは 8F で表記) を破線と点線で示した。限界状態 L1 について拠点建物と周辺建物を比較すると、3 階拠点建物は全建物よりは強靱であるが、非木造建物よりは脆弱であることがわかる。階数が高いほど SFC は強靱となる傾向があり、結果として 4 階、8 階、12 階を含む全建物の SFC の方が強靱となったためである。反対に、8 階拠点建物より階数の少ない建物を多く有することになるため、全建物の SFC は 8 階拠点建物の SFC より脆弱となる。以上の傾向は、限界状態 L2 と L3 についても見られる。

なお、複数の建物が混在していることから、周辺建物の SFC の対数標準偏差は拠点建物の SFC の標準偏差よりも大きく、図 4.3.3-2 からその様子がわかる。

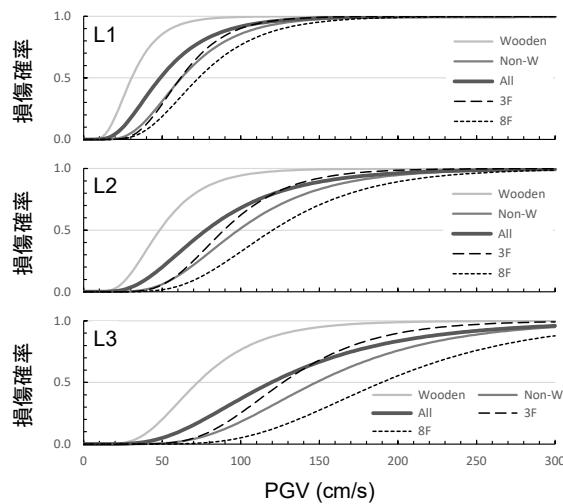


図 4.3.3-2 周辺建物の地震フラジリティ曲線

4.4 期待条件付供用確率の試算

4.3 で設定した条件に従い、提案手法の適用可能性を検討する。さらに、ECPA の評価における、想定年数や被害レベルといった諸条件の影響を把握する。このことによって、例えば、重要度係数を与える代わりに供用年数を減じる、あるいは、より多くの損傷を許容するといった施策の立案に資することができる。

4.4.1 評価手順

ECPA の評価は前出の式(4.2.1-1)に基づくが、そのためには同式に代入する拠点建物の期待条件付損傷確率を求めることが必要になる。そのための手順を図 4.4.1-1 に示す。

最初の条件設定では、拠点建物の重要度係数、周辺建物に求められる損傷確率あるいは健全確率、拠点建物ならびに周辺建物の要求機能（損傷レベル）、を設定する。

次に、地点を取り巻くイベントを抽出し、当該地点の地震動強度の中央値を地震動予測式を用いて推定する。さらに、地震動強度の不確実性を評価に反映するため、MCS により地震動強度のサンプルを発生させる。

次に、地震動強度のサンプルについて各周辺建物の状況（損傷あるいは健全）を判断し、設定した条件に合致したサンプルから拠点建物の条件付損傷確率を評価する。この条件付損傷確率は所与のイベントに対する条件付確率である。

最後に、全イベントについて拠点建物の条件付損傷確率を統合したする。統合の方法はイベントの発生頻度を重みとした加重和による。この結果を式(4.2.1-1)に代入して ECPA を得る。

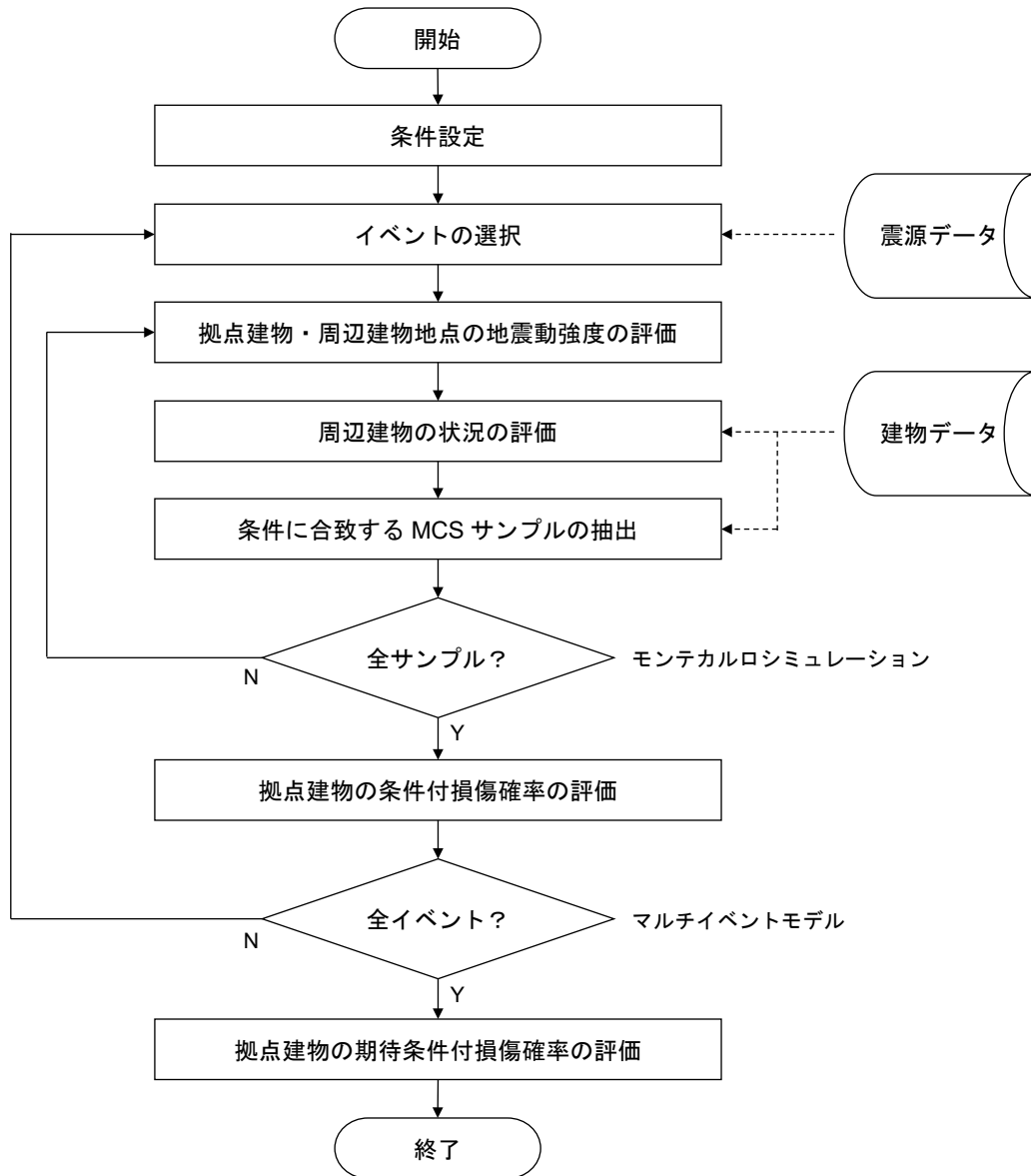


図 4.4.1-1 拠点建物の期待条件付損傷確率の評価手順

(1) 条件設定

条件設定では、拠点建物や周辺建物に求められる機能や耐震性能、周辺地域の範囲、評価年数等、ECPA の評価における項目を設定する。

(2) イベントの選択

拠点建物ならびに周辺建物の立地地点を参照し、当該地点に影響を与える震源を抽出し、離散化してイベントとする。なお、震源データについては適切に選択する。

(3) 拠点建物・周辺建物地点の地震動強度の評価

地震動強度の評価は地震動予測式により行う。地震動強度には不確実性が存在し、また、地点間の相関を有するため、相関を有する地震動強度のサンプル群としての評価を実施する。

(4) 周辺建物の状況の評価

周辺建物が所与の被害状況（あるいは健全状況）にあるかどうかを評価する。評価は周辺建物の SFC を用いて行う。

(5) 条件に合致するモンテカルロサンプルの抽出

周辺建物が所与の状況に至るサンプルを抽出する。

(6) 拠点建物の条件付損傷確率の評価

抽出されたサンプルを統計処理し、イベントが発生したという条件での拠点建物の条件付損傷確率を求める。

(7) 拠点建物の期待条件付損傷確率の評価

イベントの年発生頻度を重みとして、各イベントの拠点建物の条件付損傷確率の加重和を求め、それを期待条件付損傷確率とする。

4.4.2 評価条件

震源モデルならびに地震動予測式は地震フレンジ評価で用いたものと同じものを採用した。また、周辺地域の地盤増幅率も J-SHIS の Web サイトより入手し、地点毎に評価した。

PGV の不確実性は、震源に関する不確実性と伝播に関する不確実性からなるものとし、前者については地点間で完全相関、後者については地点間で部分相関であるとした。なお、部分相関の評価は式(4.4.2-1)に示す林ら^{4.19)}の回帰係数を用いて、地点間距離に応じて与えた。

$$\rho = \exp(-0.042 \cdot z^{1.033}) \quad (4.4.2-1)$$

ここに、 ρ は相関係数、 z は地点間距離(km)で、全体の不確実性に関する震源と伝播の寄与は 1:1、MCS の試行数は 500 とした。

4.4.3 評価結果

(1) 周辺地域の損傷確率を条件とした場合

拠点建物として避難所設備を想定した。災害時においても機能を維持できることが必要であることから限界状態を L1 とした。周辺建物は使用が困難で住民の避難所移動を余儀なくされる限界状態として L3 を設定し、SFC は全年代を想定した。

評価結果を図 4.4.3-1 に示す。各図の横軸は重要度係数、縦軸は代表建物の ECPA で、 $t = 30$ とした。また、損傷確率の下限值 p_L は 0.0 とし、上限値 p_U は変数とした。すなわち、周辺建物の損傷確率が p_U 以下であることを条件としている。重要度係数 I は 1.0~2.0 までの値を与えた。

周辺建物の損傷確率の上限値が低い場合は、地域内の限られた被害であることから代表建物の ECPA は高いが、上限値が高くなるに従い代表建物も被災する傾向が強くなり、ECPA は低くなる。

周辺地域が狭いほど、周辺建物の被害と代表建物の損傷の相関が高くなることから、ECPA は低くなる傾向がある。周辺地域が狭いほど ECPA は低くなるのは、周辺建物の損傷確率を条件としているため、周辺地域の大きさに応じた被害棟数を条件とした場合には、この傾向は変わり得ることに注意が必要である。上記の傾向の程度は、本検討の範囲内ではさほど大きくない。

3 階建物と 8 階建物を比較すると、重要度係数が 1.0 である場合には 8 階建物の方が耐力が大きく、結果として ECPA は高いが、重要度係数が SFC に与える影響は 3 階建物の方が顕著であるため、ある程度以上の重要度係数を与えた場合には 3 階建物の方が ECPA が高くなる。このことは、単純に地震荷重の割増しとして重要度を反映することの問題点を示しており、重要度係数が建物の性能に与える影響を把握することが重要であると言える。

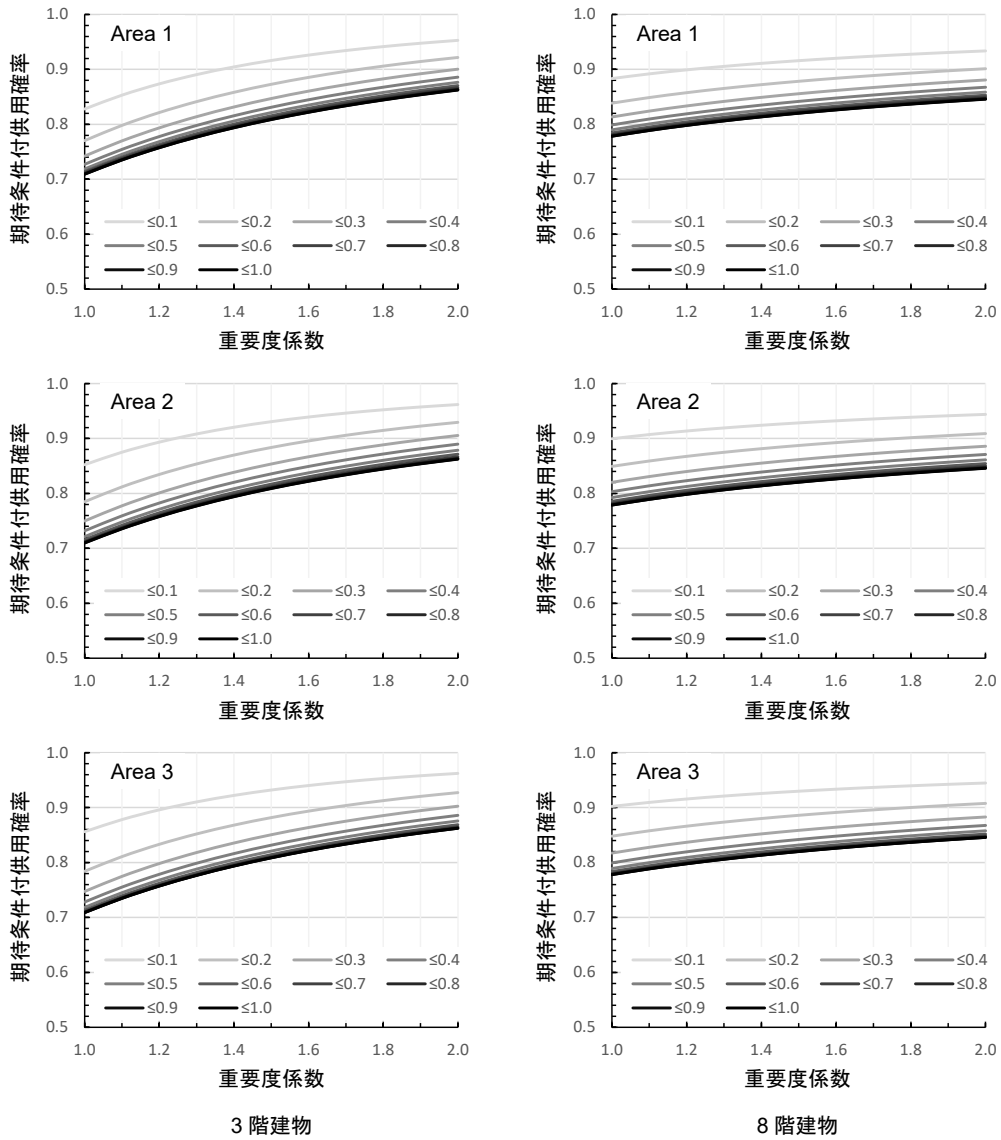


図 4.4.3-1 周辺建物の損傷確率を条件とした重要度係数と期待条件付供用確率の関係
 (想定年数： $t = 30$ ，拠点建物の限界状態：L1，周辺建物の限界状態：L3，周辺建物の年代：全年代)

(2) 周辺地域の健全確率を条件とした場合

拠点建物として役所建物を想定し、災害時の機能確保が求められるため、限界状態を L1 とした。周辺建物は日常業務がある程度実施されることを想定し、限界状態が L2 であるとして健全確率を評価した。また、その SFC は全年代とした。

評価結果を図 4.4.3-2 に示す。図の横軸は重要度係数、縦軸は代表建物の ECPA である。 $t = 30$ とし、周辺建物の健全確率の下限值 p_L は変数、上限値 p_U は 1.0 とした。すなわち、周辺建物の健全確率が p_L 超であることを条件としている。前述のケースと上下限値の取り方が異なるが、前述のケースでは周辺建物の被害が少ない場合には確実に使用可能であることが拠点建物に求められるのに対し、本ケースでは、周辺建物が多数健全である場合に使用可能であることが求められることから、上限値と下限値の設定を違えている。

周辺建物の健全確率の下限値が高い場合は、地域内の多くの建物が健全であることから代表建物の ECPA も高い。下限値が低くなるに従い周辺建物の健全性が損なわれるような地震動強度の発生頻度も増し、結果として代表建物の ECPA が低くなる。

周辺地域の差異が ECPA に与える影響は無視し得る程度であるが、健全確率の下限値が高い場合に限り、周辺地域が広いほど ECPA が小さいことがわかる。3 階建物と 8 階建物に比較に関しては、前述のケースと同様の傾向が得られた。

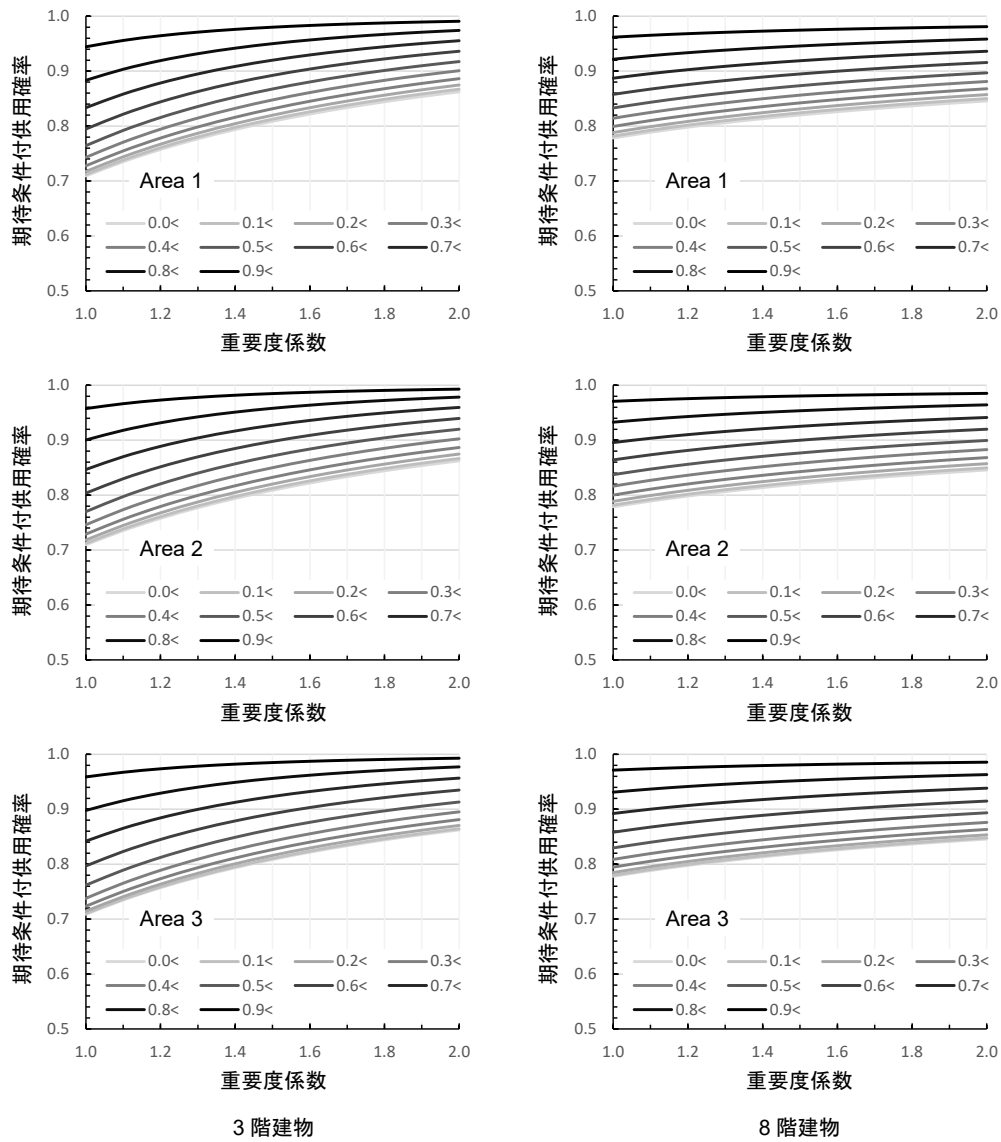


図 4.4.3-2 周辺建物の健全確率を条件とした重要度係数と期待条件付供用確率の関係
 (想定年数： $t=30$ ，拠点建物の限界状態：L1，周辺建物の限界状態：L2，周辺建物の年代：全年代)

4.4.4 諸条件が期待条件付供用確率に与える影響

ここでは、拠点建物を避難所建物、周辺地域を Area 2、周辺建物の損傷確率の上下限値を 0.5 及び 0.0 と仮定し、ECPA に対する諸条件の影響を検討した。

(1) 想定年数の影響

4.4.3 では、 $t = 30$ として ECPA を評価した。しかし、拠点建物の残存期間や想定するリスク評価期間によっては異なる想定年数 t を採用することがある。ここでは、下記を条件として想定年数の影響を求めた。

- ① 拠点建物の許容限界状態：L1
- ② 周辺建物の損傷限界状態：L3
- ③ 周辺建物の年代：全年代

得られた ECPA を図 4.4.4-1 に示す。 t が大きくなると ECPA は小さくなるが、これは、想定年数が長いほど想定年数に亘って使用可能であることは難しいことを示している。また、 t が小さい場合には ECPA は高いものの、重要度係数の効果が現れにくいことがわかる。

ECPA の増大を目的とするのであれば、重要度係数の付与の他に想定年数を軽減することで達成可能であるとも言える。経済的な観点から重要度係数の付与が困難である場合、供用年限を減じることで当該建物の使用性を確保することができる。例えば、建て替えが想定されている場合等がこれに相当する。

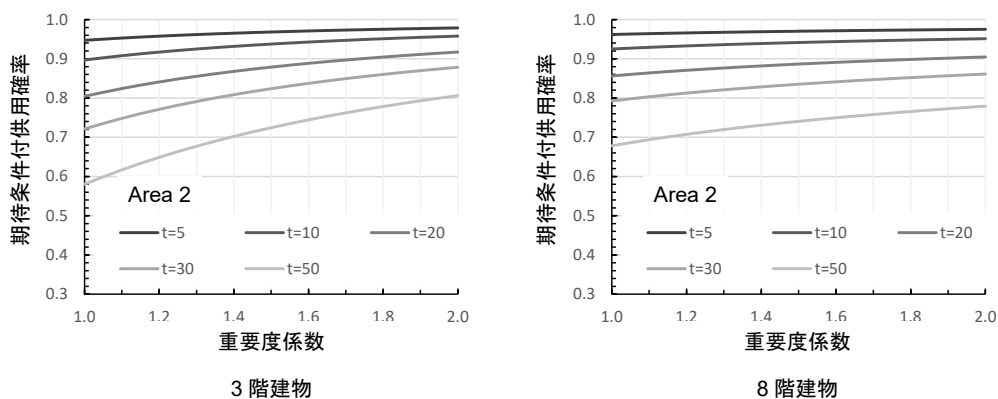


図 4.4.4-1 想定年数の設定が期待条件付供用確率に与える影響

(拠点建物の限界状態：L1，周辺建物の限界状態：L3，周辺建物の損傷確率：0.0～0.5，周辺建物の年代：全年代)

(2) 拠点建物の限界状態の影響

4.4.3 では、拠点建物が災害時にも機能を発揮できることを想定して、その許容限界状態を L1 とした。しかしながら、想定される災害時機能によっては、建物にある程度の被害が発生したとしても、機能確保が可能な場合がある。ここでは、許容限界状態を緩和した場合の ECPA を評価した。他の条件は下記のようなものである。拠点建物の残存期間や想定する。

- ① 評価期間：30 年
- ② 周辺建物の損傷限界状態：L3
- ③ 周辺建物の年代：全年代

得られた ECPA を図 4.4.4-2 に示す。許容限界が緩和されることによって ECPA が高くなることは自明であり、その結果が図にも表れている。想定年数の場合と同様、ECPA が高い場合には重要度係数の効果が現れにくいことが伺える。すなわち、拠点建物にある程度の損傷が許容できる場合（同図中の L2）、そもそも ECPA は高いが、これを重要度係数の付与でさらに向上させることは適切でないと言えよう。このような場合には同図の傾向から、許容限界状態を緩和することが現実的な施策である。本論文では重要度係数による割増を強度の増大として扱ったが、その代わりに靱性能の増大といった施策を取ることに相当し、具体的には、スリットの設置、耐震天井の採用等が考えられる。

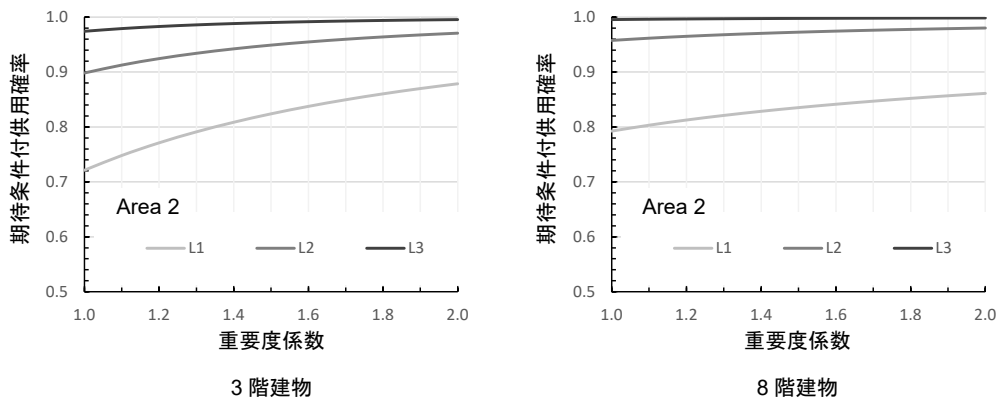


図 4.4.4-2 拠点建物の限界状態の設定が期待条件付供用確率に与える影響

(想定年数： $t=30$ ，周辺建物の限界状態：L3，周辺建物の損傷確率：0.0～0.5，周辺建物の年代：全年代)

(3) 周辺建物の限界状態の影響

4.4.3 では、拠点建物を避難所建物と想定し、周辺建物にある程度の被害が発生した場合の機能確保を検討するため、周辺建物の損傷限界状態を L3 とした。ここでは、より小さな損傷限界においても拠点建物の機能発揮が求められることを検討するため、損傷限界状態を変えた場合の ECPA を評価した。他の条件は下記のようなものである。

- ① 評価期間：30年
- ② 拠点建物の許容限界状態：L1
- ③ 周辺建物の年代：全年代

得られた ECPA を図 4.4.4-3 に示す。周辺建物の損傷限界状態が低いほど対応する地震動強度も低く、結果として ECPA が高くなる様子が見て取れる。本感度解析は拠点建物の限界状態を緩和させたときの反対のケースである。両ケースを合わせると、拠点建物と周辺建物の限界状態の差が大きいほど、すなわち、周辺建物に対して拠点建物の耐力が高いほど ECPA は高くなる。

なお、周辺建物の限界状態は与条件であるので、ECPA 向上の施策となるわけではないことに注意が必要である。

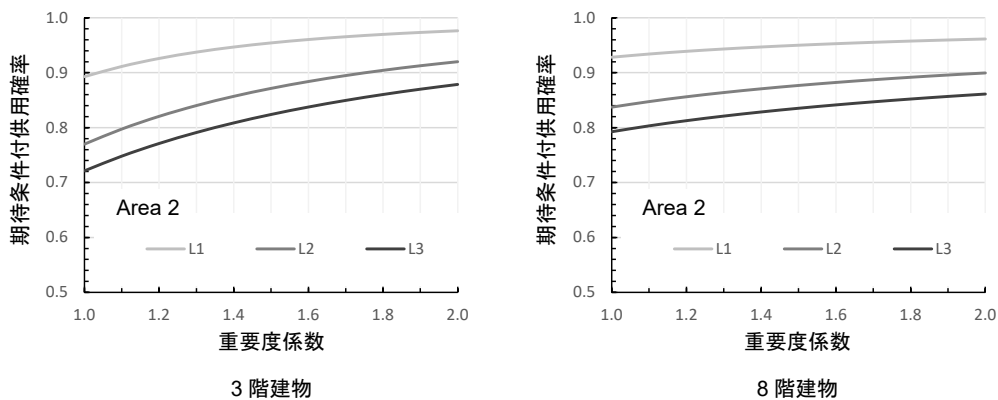


図 4.4.4-3 周辺建物の限界状態の設定が期待条件付供用確率に与える影響

(想定年数： $t=30$ ，拠点建物の限界状態：L1，周辺建物の損傷確率：0.0~0.5，周辺建物の年代：全年代)

(4) 周辺建物の建設年代の影響

4.4.3 では、現在の建物の年代分布に基づき周辺建物の耐震性を設定した。しかし、老朽建物の建替えや耐震補強等により、周辺建物の耐震性能が増加していくことが想定される。ここでは、建物の建築年代別 SFC を用いて ECPA を評価した。他の条件は下記のようなものである。

- ① 評価期間：30 年
- ② 拠点建物の許容限界状態：L1
- ③ 周辺建物の許容限界状態：L3

得られた ECPA を図 4.4.4-4 に示す。図中「All」と示されているものが 4.4.3 の結果である。

周辺建物の建築年代が低いほど所与の損傷限界に至る地震動強度も低く、結果として ECPA が高くなる。ただし、この傾向は 1970 年以前の周辺建物については大きく現れるが、1980 年以降の建物については大きな差異は見られない。これは表 4.3.3-3 に示した SFC の中央値の比較からも想定できる。なお、建築年代が新しい場合であっても ECPA が高く留まるのは、周辺建物の中に木造建物が含まれるためと考えられる。

ECPA は周辺建物の耐力によって変動するが、現行の周辺建物の構成を用いた評価であるなら、老朽建物の建て替え等の今後の変化に対しては評価結果に大きな差異は生じないと思われる。

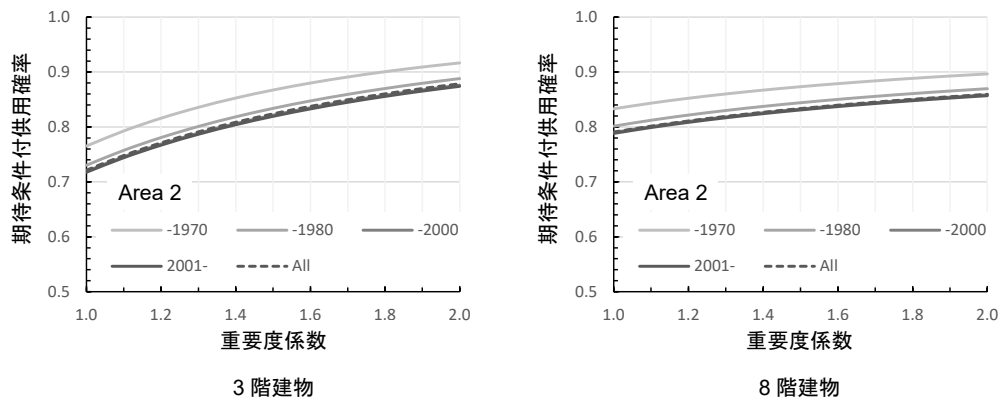


図 4.4.4-4 周辺建物の建設年代が期待条件付供用確率に与える影響

(想定年数： $t=30$ ，拠点建物の限界状態：L1，周辺建物の限界状態：L3，周辺建物の損傷確率：0.0～0.5)

4.5 重要度係数の設定

期待条件付供用確率を判断の指標とした重要度係数の設定可能性について考察を行う。

4.5.1 期待条件付供用確率に対応する重要度係数

4.4 に示したように ECPA は設定条件により大きく異なる。ここでは、周辺地域を Area 2、周辺建物の損傷確率の上下限値を 0.5 及び 0.0、あるいは周辺建物の健全確率の上下限値を 1.0 及び 0.5 として、所与の ECPA に対する重要度係数を求めた。

災害時において建物が利用可能であることが求められることと、4.4 の結果を踏まえ、目標 ECPA を 0.7~0.9 まで、0.05 刻みで設定した。次に、ECPA を重要度係数で回帰した回帰式を求め、同式の逆関数より所与の ECPA を与える重要度係数を逆算した。回帰式は、重要度係数と ECPA の関係が上に凸の形状であること、ECPA がピーク値を持つことから、二次関数を用いた。なお、逆算された重要度係数については、その下限値を 1.0、上限値を 2.0 とした。

検討ケース毎の ECPA と重要度係数の関係を図 4.5.1-1 に示す。横軸は ECPA、縦軸は当該 ECPA を達成する重要度係数を示す。同図より所与の ECPA に対してそれを実現する重要度係数を求めることができる。

3 階建物と 8 階建物を比較すると、8 階建物の方が ECPA に対する重要度係数の増加勾配が急であることがわかる。これは前述したように、ECPA の増大に関する重要度係数の効果の違いによるもので、8 階建物の場合、重要度係数を増すことによる ECPA の改善が十分に図られないためである。反対に、求める ECPA が低い場合には、8 階建物の方が必要となる重要度係数の値は小さい。

周辺建物の状況の差異に関しては、周辺建物が健全である場合の ECPA 確保よりは被災した場合の ECPA 確保に関して、より高い重要度係数の付与が必要になることがわかる。

想定年数については、例えば 10 年といった短い期間に対しては重要度係数の付与は必要ない。反対に 50 年のような長期間を想定する場合には、極めて大きな重要度係数を想定することが必要である。想定年数が重要度係数に与える影響は大きく、その設定には十分な検討が求められる。

拠点建物の損傷限界状態については、L2 あるいは L3 まで許容できるのであれば、重要度係数の設定は必要ないといえることができる。ただし、災害時機能確保という観点では L1 に留めることが重要であり、そのような場合には ECPA に応じた重要度係数の設定が求められる。

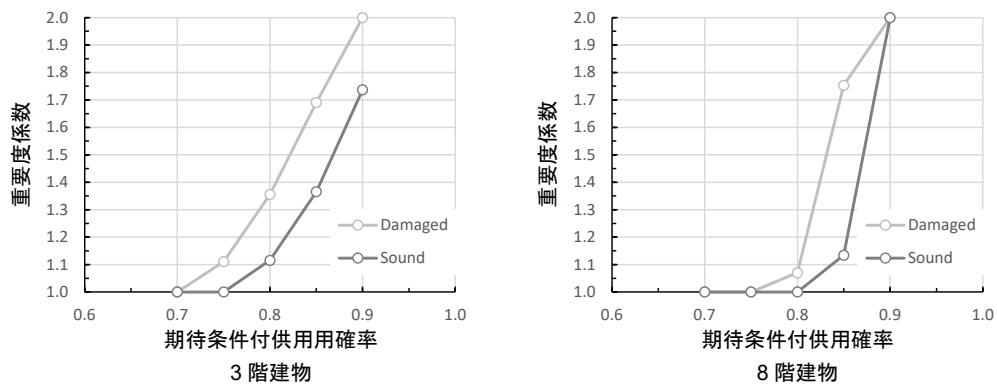
周辺建物の損傷限界状態については、L1 のような軽微と考えられる状況では重要度係数の設定は必要ない。これに対して、L2 あるいは L3 といった状況では拠点建物についても損傷の発生が想定されることから、重要度係数の設定が求められるようになる。

周辺建物の建設年の差異に関しては、1970 年以前のような古い場合を除けば、重要度係数に与える影響は大きくない。

なお、図 4.5.1-1 によれば重要度係数が 1.0 で良いケースが示されている。4.4 の結果を見ると

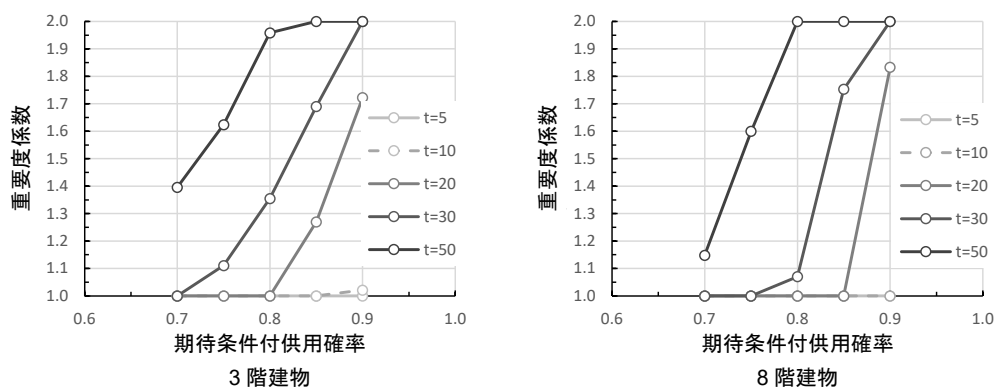
$I = 1.0$ において既に ECPA がある程度大きいものがある。これは、周辺建物に比べて、新耐震で設計された拠点建物の耐震性能が高いこと、SFC のばらつきが小さく損傷確率が低いことによるものである。このことは、1 未満の重要度係数であっても必要な ECPA が得られる可能性があることを示しており、例えば拠点建物が旧耐震で設計されているとしても、ECPA の観点からは耐震補強が不要となることもある。

以上のように、所与の ECPA に対してそれを実現するような重要度係数を設定することは可能である。ただし、対象とする建物や設定条件により結果は大きく異なるため、得られた重要度係数の適用については最終的な判断が必要であると考えられる。



周辺建物の状況

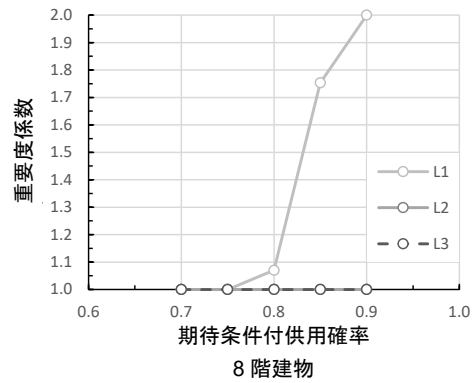
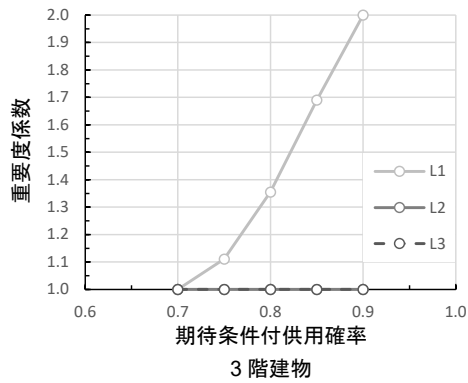
(想定年数: $t=30$, 拠点建物の限界状態: L1, 周辺建物の年代: 全年代)
 (周辺建物が損傷する場合: 周辺建物の限界状態: L3, 周辺建物の損傷確率: 0.0~0.5)
 (周辺建物が健全な場合: 周辺建物の限界状態: L2, 周辺建物の健全確率: 0.5~1.0)



想定年数

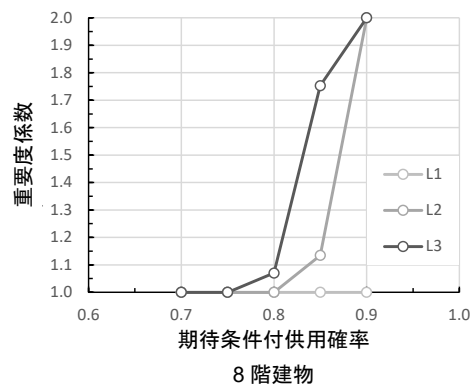
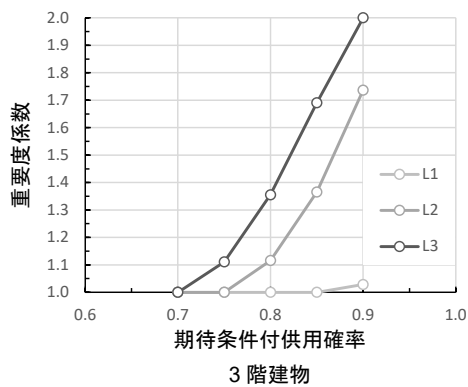
(拠点建物の限界状態: L1, 周辺建物の限界状態: L3, 周辺建物の損傷確率: 0.0~0.5, 周辺建物の年代: 全年代)

図 4.5.1-1(1) 所与の期待条件付供用確率に対する重要度係数の推定



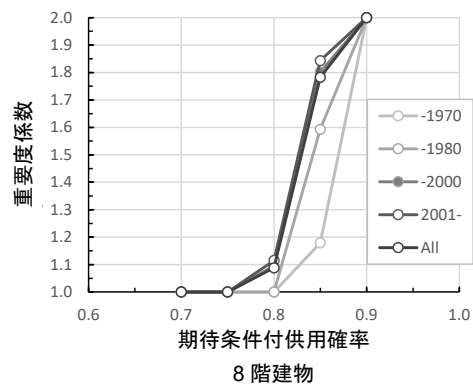
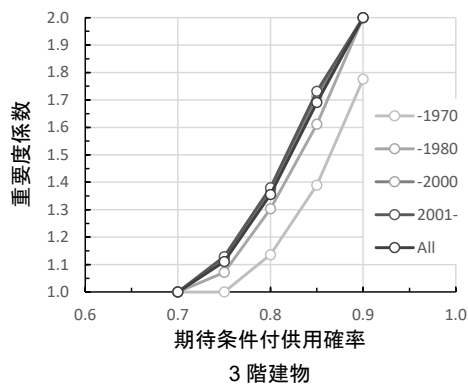
拠点建物の限界状態

(想定年数： $t=30$ ，周辺建物の限界状態：L3，周辺建物の損傷確率：0.0～0.5，周辺建物の年代：全年代)



周辺建物の限界状態

(想定年数： $t=30$ ，拠点建物の限界状態：L1，周辺建物の損傷確率：0.0～0.5，周辺建物の年代：全年代)



周辺建物の建設年

(想定年数： $t=30$ ，拠点建物の限界状態：L1，周辺建物の限界状態：L3，周辺建物の損傷確率：0.0～0.5)

図 4.5.1-1(2) 所与の期待条件付供用確率に対する重要度係数の推定

4.5.2 現行の重要度係数の位置づけ

ECPA が与えられた場合に、それに対応する重要度係数を設定するには、最終的な判断が必要である。そこで、4.5.1 に示した各ケースの結果に対して、「官庁施設の総合耐震・対津波計画基準（国土交通省）」や「住宅の品質確保の促進等に関する法律（国土交通省）」で参照されている重要度係数の位置づけを検討し、判断の一助とすることを試みる。

図 4.5.2-1 に検討結果の重ね描きを示す。横軸は ECPA，縦軸は当該 ECPA を達成する重要度係数である。また、図中には、データの回帰直線と回帰式を示している。回帰式の x は ECPA， y は重要度係数である。

所与の ECPA に対して比較的大きめの重要度係数を示すものは、想定年数 t を 50 としたときの結果である。重要度係数 1.25 は $ECPA=0.8$ に、重要度係数 1.5 は $ECPA=0.85$ に、おおよそ対応している。もちろん、図 4.5.2-1 のプロットは網羅的ではなく、また、その評価にも大きな不確実性はあるものの、重要度係数 1.0 が $ECPA=0.7$ （想定年数 t が 50 の場合を除く）に相当するとすれば、本検討の範囲では、重要度係数 1.25 で 10%、1.5 で 15%程度、ECPA が改善すると言える。

また、高い ECPA を実現するには重要度係数の付与だけでは困難であり、想定年数の再設定、限界状態の見直し、拠点建物の限界状態の緩和、周辺建物の限界状態の見直し、といった条件変更が必要であると考えられる。

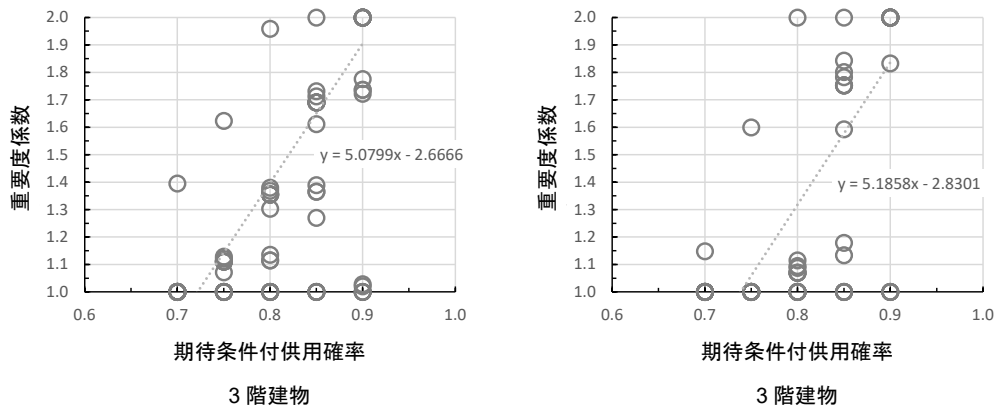


図 4.5.2-1 期待条件付供用確率と重要度係数の関係

4.5.3 目標期待条件付供用確率の設定

本章では目標 ECPA を与条件して、それを満たすような性能を与える地震力の割増を耐震重要度係数とすることを提案している。目標 ECPA については、当該建物の災害時に求められる機能、代替建物の有無、建物利用者のリスク受容度といった項目を勘案しながら、関係者の合意により設定することになる。合意については、アンケートあるいは解析分析法といった意思決定手法を援用することとなる。

4.6 まとめ

本章では、避難所建物や官公庁建物といった地震時において所定の機能を発揮することを求められる建物を対象に、周辺建物の地震時の状況との相対関係に基づく重要度係数の設定を試みた。

拠点建物と周辺建物の地震時の状況は、所与の限界状態に関する SFC を用いて評価した。SFC の作成は限界耐力計算に基づき行い、モデルサイトの UHS から生成されるデマンド・スペクトルのサンプルと、モデル建物について得られるキャパシティ・スペクトルのサンプルを用いた MCS より、不確実性を反映した。

拠点建物は新耐震設計による鉄筋コンクリート造 3 階建物と鉄筋コンクリート造 8 階建物の 2 つを想定し、東京都庁位置に配置した。また、周辺建物は住宅・土地統計調査に基づき、複数の構造種別と年代種別の建物が混在する建物群として評価し、拠点建物から半径 3km, 12km, 24km の円で与えられる地域内に一様に配置した。

まず、周辺建物が被災状況にあるとき、または、健全状態にあるときの拠点建物の ECPA を評価し、以下の知見を得た。

- 知見 1 重要度係数が増すほど、ECPA も増大する。
- 知見 2 3 階建物に比べて 8 階建物は ECPA が大きいですが、重要度係数による効果は小さく、重要度係数が大きい場合には 3 階建物の ECPA の方が大きくなる。
- 知見 3 周辺建物の被害棟数比率あるいは健全棟数比率の設定が ECPA に与える影響は大きい。
- 知見 4 周辺地域の設定が ECPA に与える影響は、本検討の範囲では大きくない。

また、周辺地域を Area 2 とし、周辺建物が被災した場合の ECPA について、その他の条件設定が与える影響の感度解析を行い、以下の知見を得た。

- 知見 7 拠点建物の共用年数の設定が ECPA に与える影響は大きい。また、共用年数が少ない場合には ECPA は高いものの重要度係数による改善の程度は小さい。
- 知見 8 拠点建物の許容限界状態を緩和した場合、ECPA は高くなるものの、共用年数の場合と同様に重要度係数による改善の程度は小さくなる。
- 知見 9 周辺建物の損傷限界を低く設定するほど、当該限界状態を与える地震動強度が小さくなるため、結果として ECPA は高くなる。
- 知見 10 周辺建物の年代区分は、1970 年以前の場合を除けば、ECPA に与える影響は小さい。このことは、得られた ECPA が、将来に亘って大きく異なることを意味

し、結果として ECPA によって設定される重要度係数が安定的であることを示す。

さらに、重要度係数と ECPA の関係を基に、所与の ECPA に対する重要度係数の設定を試みた。また冒頭で述べた重要度係数の位置づけを ECPA の観点で検討した。得られた知見は以下のようである。

知見 11 ECPA から重要度係数を設定することは可能であるが、条件設定に大きな影響を受ける。

知見 12 本検討の条件設定範囲では、重要度係数 1.0 は ECPA で 70%、1.25 は 80%、1.5 は 85%程度である。

建物の損傷の相関の影響が ECPA と重要度係数の設定に与える影響を検討するため、地震環境の異なる地域での手法適用が必要である。また、拠点建物と周辺建物の関係を企業の建物群に適用し、サプライチェーンやシステムを構成する建物群に対し、保有すべき耐震性について検討していくことも考えられ、この場合には機能の連関についても考慮する必要がある。なお、本章では ECPA に基づき重要度係数を設定したが、ECPA を直接設計目標とすることも視野に入れ、目標 ECPA の設定も含めた設計の枠組みについても今後の検討課題とする。

第5章 結論

5.1 本論文の結論

我が国は地震、風水害、火山噴火などの様々な自然災害に囲まれており、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。地震による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。

これらは建物単体に関するものであるが、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。建物単体に関する法整備や技術開発は、建物群を考えた場合には不十分であり、機能の連関や地震動強度の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を対象に複数建物を対象とした地震リスク評価が求められ、そのための技術開発も実施されるようになってきた。また、複数建物の地震リスクに資する周辺の技術開発や環境整備も行われており、解析的な方法により複数建物の地震リスク評価実施の推進力になっている。

本論文では、複数建物を対象とする地震リスク評価に着目し、建物群の耐震計画策定への応用について検討した。

第 1 章では、本論文の概要を記載した。

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について説明した。また、マルチイベントモデル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述べた。

第 2 章では、建物群の配置計画に資することを目的に、拠点建物が被災したという条件下での代替建物の使用可能性について検討した。

まず、「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条件付地震ハザード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 SHC 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 SHC と規準化 PGA の空間分布を基に、所与の拠点建物に対する代替建物の配置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の中で代替建物の配置を決定することが可能になった。

第 3 章では、建物群への耐震投資の最適配分について検討を行うことを目的に、建物群の損失を最小化する配分方法について検討した。

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 章では、拠点建物の耐震性能の確保を目的に、周辺建物の地震時の状況との相対関係に基づく重要度係数の設定について検討した。

まず、拠点建物の保有すべき耐震性能を定量化するために ECPA を提案し、その定量化手法を示した。また、同手法を東京都庁位置に拠点建物を置く建物群について適用した。適用に先立ち、拠点建物と周辺建物の耐震性能を SFC として定量化した。拠点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 SFC 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 SFC を求め、棟数比率を重みとした加重平均を周辺建物の SFC とした。

次に、提案手法を用いて周辺建物の状況に応じた拠点建物の ECPA を求め、重要度係数と ECPA 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 ECPA 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 ECPA が向上することが明らかとなった。

さらに、重要度係数と ECPA の関係を概観し、ECPA 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。

本論文では、建物群の耐震計画策定に資することを目的に、複数建物を対象に開発され実用化されてきたリスク評価手法が応用可能であることを確認した。

5.2 今後の課題

本論文では建物群の耐震計画の項目として、建物群の配置、建物群への耐震投資の配分、重要度係数の設定、を取り上げ、リスク評価手法の応用可能性を検討した。ここでは、各章での課題をまとめ、今後の検討方針を述べる。

第2章では、条件付き地震ハザードに基づく代替地点の選定方法を示した。条件付き地震ハザードの評価においては、地震動強度の絶対値とともに2地点間の相関が重要である。本論文内では、相関の程度を2地点間の距離の関数として求めたが、より精度の高い評価のためには、本文中で述べた地震のマグニチュードや建物から震源までの距離、あるいは、震源深さや地震タイプといった条件による分類も有効と考えられる。マルチイベントモデルでは、このような変数を引き継ぐことも可能であり、本解析手法の優位性である。

また、地点間の距離の他、応答スペクトルの周期間の相関も同時被災を考える上で重要である。本章では、地震ハザードのみに着目したが、想定される建物の概要（例えば、構造種別や階数）が特定できる場合には、建物の応答を含めて評価することも効果的である。

さらに、2地点以上の代替地点の選定も課題である。

第3章では、損失の寄与率に基づく建物群への耐震投資配分方法を示した。本論文では、資産配分については寄与率とPMLの関係を確認するために用いるのみで、資産配分に関する耐震投資配分については未実施である。現実的な施策を実現するには、制約条件も含めた耐震性能の向上と資産の移動の組み合わせの合理的な設定法の検討が必要である。また、そのためには、資産移動や耐震化に係る現実的な費用の設定方法も課題となる。

さらに、本論文では耐震化施策として、新築設計の1次設計用ベースシア係数の増大を対象としたが、既存建物の利活用という観点からは、既存建物の耐震補強に関する投資配分の検討も今後の課題である。

第4章では、周辺建物の被災状況に基づく拠点建物の耐震性能の在り方について示した。本論文では周辺建物と拠点建物の間には機能的な連関は考慮せず、周辺建物の被害率あるいは健全率のみに着目した。企業のBCP策定等に本手法を適用するのであれば、周辺建物と拠点建物の機能の連関、周辺建物間の機能の連関を考慮できる方法の作成が必要である。

また、本論文では、目標とするECPAについての検討は行わず与条件としたが、本手法を実装する場合には、その設定の方法は喫緊の課題であり、行政担当者や企業経営者等を交えた検討が必要である。

なお、本論文では、目標とするECPAを実現するように重要度係数を与えることを提案した。これは現行の設計体系を採用した上での機能に応じた性能の付与を目的としたためである。ところで、信頼性設計等においては、荷重係数と抵抗係数を分離した設計法の導入や、損傷確率を

第5章

設計目標とすることも行われている。したがって、ECPA そのものを設計目標とするような設計枠組みの構築も今後の検討課題と考えられる。

This page intentionally left blank

参考文献

第 1 章の参考文献

- 1.1) 大橋雄二: 日本建築構造基準変遷史, 日本建築センター出版部, 1997
- 1.2) 建設省建築研究所, (社) 鋼材倶楽部: 新設計体系研究会報告書, 1995
- 1.3) Structural Engineers Association of California: VISION 2000, Performance Based Seismic Engineering of Buildings - Final Report, 1995
- 1.4) 木村正人, 稲田達夫, 小川一郎, 大垣聡, 金井宏之, 原郁雄: 性能型構造設計法についての考察 (その 2: 要求性能マトリクスの考え方), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 687-688, 1997
- 1.5) 建設省建築研究所, 日本建築センター, 国土開発技術研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」報告書, 1998
- 1.6) 国土交通省大臣官房官庁営繕部: 官庁施設の総合耐震・対津波計画基準 (平成 25 年制定), 2013
- 1.7) 国土交通省住宅局: 防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン (新築版), 2019
- 1.8) 国土交通省: 住宅の品質確保の促進等に関する法律, 1999
- 1.9) 例えば, 日本建築防災協会, 耐震改修支援センター: 2017 改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 耐震改修促進法に基づく国土工数大臣認定耐震診断及び回診改修に関する指針と解説, 2017
- 1.10) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/en/>
- 1.11) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015), 2015
- 1.12) 内閣府 防災担当: 事業継続ガイドライン -あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応-, 2013
- 1.13) 日本原子力学会: 原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準, 2015
- 1.14) 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, 67 巻 552 号, 169-176, 2002
- 1.15) 寺山翔大, 大鳥靖樹, 牟田仁: 地震リスクにおける乱数生成法の開発, 2019 年秋の大会, 日本原子力学会, 2019
- 1.16) 宇賀田健: シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価, 日本建築学会構造系論文集, 66 巻 541 号, 95-104, 2001
- 1.17) 神原浩, 高田毅士, 菊地勝, 成川匡文, 中村紀吉, 岸野泰章: リスクに基づく耐震重要度定量化の試み (その 1: 事務所建築物), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 71-72, 1997
- 1.18) 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, 63 巻 511 号, 149-156, 1998

- 1.19) 青木義次: 重要度係数の最適化, 地域公共施設の構造安全計画・その1, 日本建築学会論文報告集, 266 巻, 115-121, 1978
- 1.20) 青木義次: 重要度係数の最適化, 地域公共施設の構造安全計画・その2, 日本建築学会論文報告集, 267 巻, 113-120, 1978
- 1.21) 高田毅士, 神原浩: 複数建物の耐震重要度設定手法に関する基礎的考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 19-20, 1996
- 1.22) 奈良岡浩二, 石川裕, 古村利幸: 供用期間を考慮した費用対効果に基づく耐震改修優先度評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 527-528, 2005
- 1.23) 奈良岡浩二: 地震リスク評価に基づく複数施設に対する耐震投資の最適配分, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 681-682, 2007
- 1.24) 松下裕: 平均一分散基準に基づく建物群の最適耐震補強投資比率の決定 2棟建物の場合, 日本建築学会構造系論文集, 78 巻 693 号, 2035-2044, 2013
- 1.25) 林孝幸, 福島 誠一郎, 矢代 晴実: 最大加速度と最大速度を地震動指標に用いた確率論的地震ハザード評価, 日本建築学会構造系論文集, 72 巻 617 号, 185-192, 2007
- 1.26) 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
- 1.27) 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, 73 巻 630 号, 1053-1060, 2008
- 1.28) 堀裕弘, 木村江里, 渡部弘之, 福島誠一郎: 事業継続のための支援建物の条件付き被害評価, 日本建築学会レジリエント建築シンポジウム論文集, 44-50, 2020

第2章の参考文献

- 2.1) 中村孝明, 中村敏治: ポートフォリオ地震予想最大損失額 (PML) 評価, 日本リスク研究学会誌 12(2), 69-76, 2000
- 2.2) 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, 67 巻 552 号, 169-176, 2002
- 2.3) 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, 67 巻 555 号, 295-302, 2002
- 2.4) Annaka T. and Nozawa Y.: A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proc. 9th WCEE, II, 107-112, 1988
- 2.5) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 161-164, 1997.7
- 2.6) Annaka T. and Yashiro H.: A seismic source model with temporal dependence of large earthquake

参考文献

- occurrence for probabilistic seismic hazard analysis in Japan, Risk Analysis, WIT PRESS, 233-242, 1998
- 2.7) 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, 71 巻 600 号, 203-210, 2006
- 2.8) 高田毅士, 下村哲人: 台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性, 日本建築学会構造系論文集, 68 巻 565 号, 41-48, 2003

第 3 章の参考文献

- 3.1) 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, 67 巻 552 号, 169-176, 2002
- 3.2) 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, 63 巻 511 号, 149-156, 1998
- 3.3) 福島誠一郎: 地震リスク評価の立場から, 2004 年度日本建築学会大会構造部門 PD 資料, 52-61, 2004
- 3.4) 中村孝明, 中村敏治: ポートフォリオ地震予想最大損失額 (PML) 評価, 日本リスク研究学会誌 12(2), 69-76, 2000
- 3.5) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015) , 2015
- 3.6) 林康裕, 宮腰淳一: 兵庫県南部地震による被害率曲線, 1998 年度日本建築学会災害部門 PD 資料, pp15-20, 1998
- 3.7) 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, 69 巻 575 号, 91-98, 2004
- 3.8) Annaka T. and Yashiro H.: A seismic source model with temporal dependence of large earthquake occurrence for probabilistic seismic hazard analysis in Japan, Risk Analysis, WIT PRESS, 233-242, 1998.
- 3.9) 建設省建築研究所, 日本建築センター, 国土開発技術研究センター: 建設省総合技術開発プロジェクト「新建築構造体系の開発」報告書, 1998

第 4 章の参考文献

- 4.1) 国土交通省大臣官房官庁営繕部: 官庁施設の総合耐震・対津波計画基準 (平成 25 年制定) , 2013
- 4.2) 国土交通省住宅局: 防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン (新築版) , 2019
- 4.3) 国土交通省: 住宅の品質確保の促進等に関する法律, 1999
- 4.4) 高圧ガス保安協会: 高圧ガス設備等耐震設計, 2012

- 4.5) 一般社団法人 日本電気協会: 原子力発電所耐震設計技術規定, JEAC4601-2008, 2008
- 4.6) 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, 63 巻 511 号, 149-156, 1998
- 4.7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 (2015) , 2015
- 4.8) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/en/>
- 4.9) 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, 67 巻 552 号, 169-170, 2002
- 4.10) 例えば, 建築行政情報センター: 建築物の構造関係技術基準解説書 2020 年度版, 2020
- 4.11) 藤原広行・他: 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 336 号, 2009
- 4.12) Kanno T., Narita A., Morikawa N., Fujiwara H., Fukushima Y.: A new Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan based on Recorded Data., *Bulletin of the Seismological Society of Amerika*, 879-897, 2006
- 4.13) 田中浩平, 王敏, 高田毅: 加速度応答スペクトルの周期間の共分散構造の解明とその応用, 日本建築学会構造系論文集, 73 巻 623 号, 1727-1733, 2008
- 4.14) 森口秀樹, 中埜良昭, 藤原薫: 部材強度のばらつきを考慮した柱梁耐力比と柱ヒンジ発生確率, 日本建築学会構造系論文集, 67 巻 第 509 号, 119-126, 1998
- 4.15) 地震調査研究推進本部: 長周期地震動評価 2016 年試作版 -相模トラフ巨大地震の検討-, 2016
- 4.16) 佐藤一郎, 矢代晴実, 太田孝平, 福島誠一郎: 既往の被害率曲線のまとめ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, 359-360, 2006
- 4.17) 総務省統計局: 住宅・土地統計調査, e-Stat 政府統計の総合窓口,
(<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200522&tstat=000001127155>)
- 4.18) 東京都防災会議: 首都直下地震等による東京の被害想定 報告書, 東京都防災ホームページ, 2022,
(<https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/taisaku/torikumi/1000902/1021571.html>)
- 4.19) 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, 71 巻 600 号, 203-210, 2006

付録

付録 1 確率論的同時地震ハザード評価

付 1.1 目的

第 2 章では、拠点建物のバックアップ機能として代替建物を捉え、拠点建物が被災するという条件での代替建物の SHC を求めた。また、所与の年超過確率における拠点建物地点の PGA と代替建物位置の PGA の比を規準化 PGA とし、規準化 PGA の空間的分布に基づいて代替建物の配置について考察した。

ところで、上記に示すような条件付き地震ハザードとは別の形で地震ハザードを記述することもマルチイベントモデルを用いることで可能となる。付録 1 では、その記載方法と応用について概説する。

付 1.2 同時地震ハザードの定式化

地点 1 と地点 2 で所与の PGA の閾値 a_1 と a_2 を同時に超える PGA の年同時超過確率 $p(a_1, a_2)$ は次式で与えられる。

$$p(a_1, a_2) = 1 - \exp[-v(a_1, a_2)] \quad (\text{A1.2-1})$$

ここに、 $v(a_1, a_2)$ は年同時超過頻度で、次式で与えられる。

$$v(a_1, a_2) = \sum_{k=1}^n v_k^* \sum_{i=1}^{n_{mk}} p_k(m_i) \frac{1}{n_{ek}(m_i)} \sum_{j=1}^{n_{ek}(m_i)} p(a_1, a_2 | m_i, x_{j1}, x_{j2}, h_j) \quad (\text{A1.2-2})$$

ここに、

v_k^* : 活動域 k での地震の年発生頻度

$p_k(m_i)$: 活動域 k でマグニチュード m_i の地震が発生する相対頻度

$p(a_1, a_2 | m_i, x_{j1}, x_{j2}, h_j)$: マグニチュード m_i 、地点 1 までの距離 x_{j1} 、地点 2 までの距離 x_{j2} 、深さ h_j の地震 j が発生した場合に、地点 1 と地点 2 の PGA が同時に a_1 及び a_2 を超過する確率

n : 活動域の個数

n_{mk} : 活動域 k で考慮するマグニチュードの分割数

$n_{ek}(m_i)$: 活動域 k でマグニチュード m_i の地震が発生場合のイベント数

である。この定式化は 1.4.3 に示した林・他の定式化を拡張したもので、PGA と PGV の相関の代わりに 2 地点の PGA の相関を用いている。なお、この相関は 2 地点の距離 z を用いて次式で与えられる。

$$\rho = \exp(-0.042z^{1.033}) \quad (\text{A1.2-3})$$

付 1.3 同時地震ハザードの試算

同時地震ハザード評価の対象地点を図 A1.3-1 に示す。地点 0 は基準地点で、東京都庁位置に設定した。地点 11～14 は内陸の地震が支配的となるように地点 0 から北の方向に配置した。これに対し、地点 21～24 は海溝型の地震が支配的となるように南西の方向に配置した。

地震動モデル及び地震動予測式については、第 2 章ならびに第 3 章で用いたものと同じものを採用した。

得られた同時地震ハザード曲面を図 A1.3-2 に示す。地点 11～14 は支配的な地震が内陸地殻内の地震であるため、地点間距離が大きくなるに従い、同時地震ハザードは急速に小さくなる。特に地点 0 からの地点間距離の大きい地点 13 や地点 14 では、年同時超過確率は極めて小さく、同時被災の考慮は必要ない。

これに対し、地点 21～24 では海溝型の巨大地震の寄与が無視できないため、地点間距離の同時地震ハザードへの影響は大きくない。また、地点 23 は当該地点の地震ハザードが大きいことから、高 PGA 領域での年同時超過確率は地点 22 よりも大きく、同時被災の観点では地点間距離を大きく取ることの優位性が現れていない。

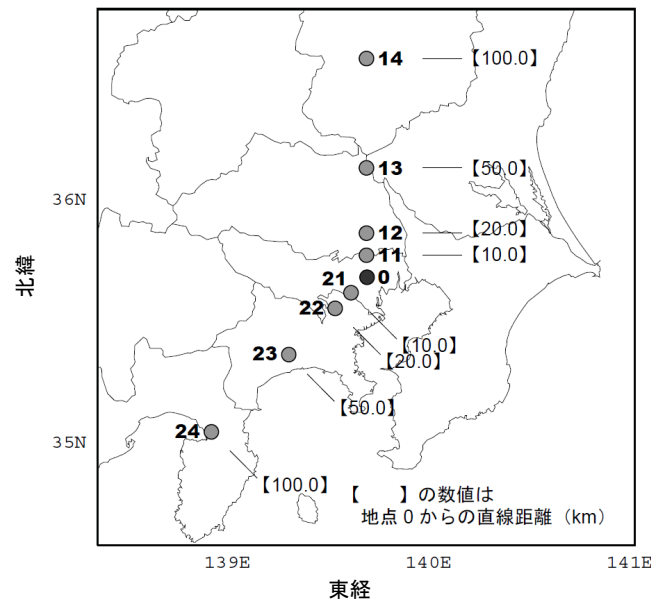


図 A1.3-1 対象地点

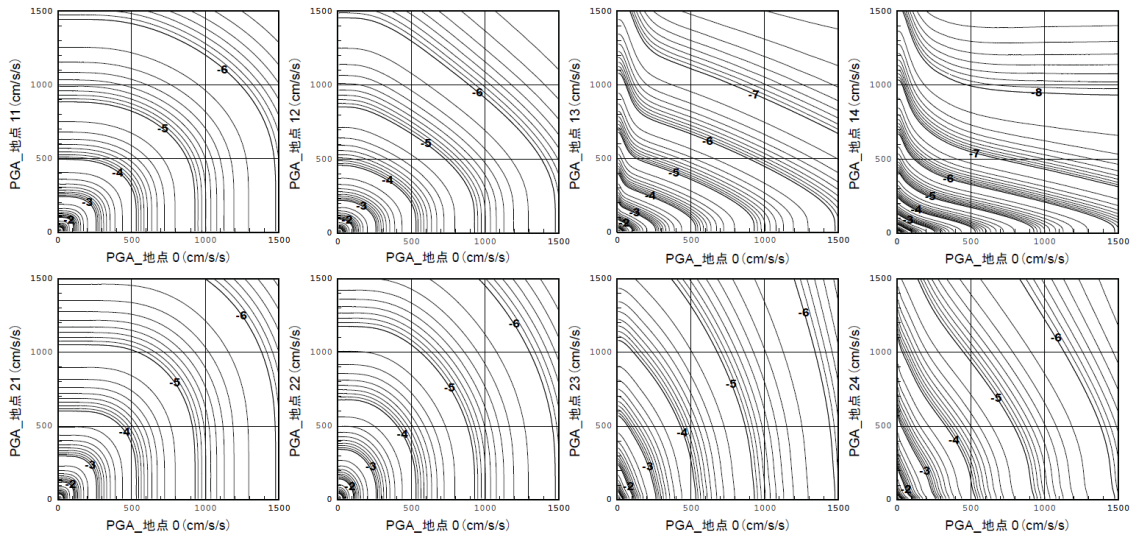


図 A1.3-2 同時地震ハザードの評価結果 (コンター上の数値は10のべき指数)

付 1.4 イベント相関の評価

同時地震ハザードは個々の地震の配置が与える相関（ここでは、イベント相関と呼ぶ）を含んでおり、この相関が高いほど同時被災の可能性が高いと考えられる。イベント相関の概念をA1.4-1に示す。地点1と地点2で同じSHCを示すとしても、配置1は負の相関、配置2は正の相関を示すことから、震源と地点の位置関係で相関に差異が出るのがわかる。

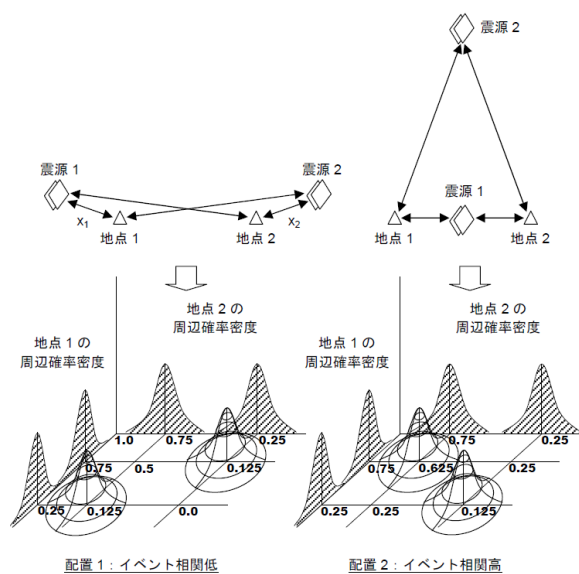


図 A1.4-1 イベント相関の概念

ところで、確率論的同時地震ハザードは、対象とする2地点の地震ハザード（同時地震ハザードの周辺確率分布に対応する）の影響を受けるため、その大きさや形状とイベント相関とは直接的に関連づけられるものではない。

同時地震ハザードを求める際に用いられる相関 ρ は、地震動強度の推定誤差を対数正規分布と仮定して求められる。他方、イベント相関の場合には、理論確率分布形の適用が困難である。これは、確率論的同時地震ハザードの形状からわかるように同時確率密度が大きく歪むことと、地点や地震環境に依存することによるものである。また、年超過確率が高い場合には地点周辺の中小地震が支配的となり、年超過確率が低い場合には稀に発生する大地震が支配的となる等、着目する地震動レベルによってもイベント相関は異なると考えられる。

そこで、次式の指標 ρ_{EV} によりイベント相関を定量化する。

$$\rho_{EV}(a_1, a_2) = \frac{p(a_1, a_2)}{p(a_1, 0) + p(0, a_2) - p(a_1, a_2)} \quad (A1.4-1)$$

$p(a_1, 0)$ と $p(0, a_2)$ は地点1及び地点2での周辺地震ハザードであるから、上式は地点1でPGAが a_1 を超える、あるいは、地点2で a_2 を超える場合に、両地点で同時に a_1 と a_2 を超える確率を与える。極めて隣接した2地点については、 $p(a_1, 0) = p(0, a_2) = p(a_1, a_2)$ であるので、 $\rho_{EV} = 1$ となる。また、2地点間の距離が大きい場合には、 $p(a_1, a_2) = 0.0$ であるので $\rho_{EV} = 0$ となる。すなわち、 ρ_{EV} は0から1の範囲で相関を表す測度である。

式(A1.4-1)によって求めたイベント相関を図A1.4-2に示す。イベント相関は周辺地震ハザードの影響がキャンセルされるため、同時被災に関する地点間距離や地震環境の影響がより明確に現れている。

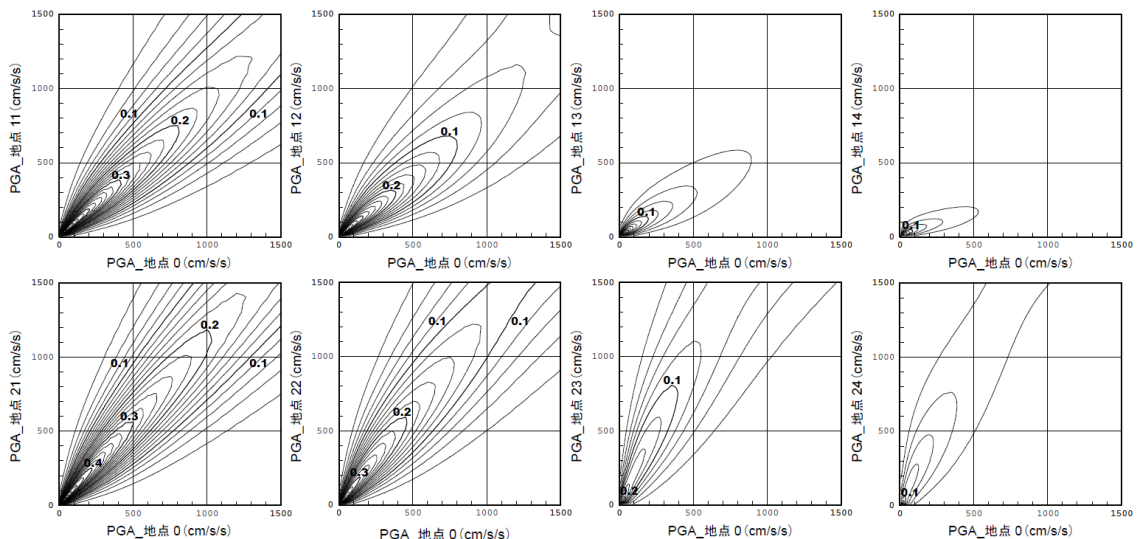


図 A1.4-2 イベント相関の評価結果

付録2 一様ハザードスペクトルに基づくデマンド・スペクトル評価

付2.1 目的

第4章では、建物の応答評価として、当該地点の一様スペクトル (UHS) を応答スペクトルの中央値と捉え、それに不確実性を考慮して応答スペクトルのサンプル群を生成し、デマンド・スペクトルのサンプル群に変換した。

UHS は所与の年超過確率に対する応答スペクトルを SHC から求め、それらを周期について結んだものであるため、想定地震に対する応答スペクトルを示すものではない。ただし、震源毎の応答スペクトルを凡そ包絡するような形状であるので、慣行として地震 fragility 評価の入力地震動策定用スペクトルとして用いられている。その妥当性の根拠としては、参照する年超過確率に対して UHS の形状が大きく変化しないことから、特定の震源が支配的となると考えられることが挙げられる。第4章に示した UHS もこの傾向を示している。

ところで、UHS はその評価において地震動推定式の不確実性が既に考慮されていることから、UHS に対して不確実性を与えることは原理的に正しくない。ここでは、第4章の応答解析に用いた UHS の形状が当該地点で想定される支配的な想定地震による応答スペクトルの形状に類似しており、結果として UHS からデマンド・スペクトルのサンプル群を生成することの妥当性を検討する。

付2.2 検討方法

当該地点の UHS を所与の地震動強度で規準化したものをスペクトル形状 $SS_1(T)$ とする。ここに、 T は固有周期である。また、当該地点で発生する応答スペクトルの平均像をスペクトル形状 $SS_2(T)$ とし、次式で定義する。

$$SS_2(T) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i S_i(T)}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (\text{A2.2-1})$$

ここに、 $S_i(T)$ はイベント毎に評価された応答スペクトル形状、 v_i は当該イベントの年発生頻度である。

マルチイベントモデルでは膨大な数の地震 (イベント) を対象とするため、個々のイベントによるスペクトル形状との比較は難しく、結果として式(A2.2-1)のように応答スペクトル形状の平均像との比較にならざると得ない。そこで、応答スペクトル形状の平均像をいくつかの特性についてまとめ、ある程度固有の震源の特徴が反映されるかどうかを確認する。

具体的に表 A2.2-1 に示す 12 ケースについて整理した。変数として、地震動予測式で用いられる地震タイプ、マグニチュード、震央距離を採用した。

A2.2-1 応答スペクトル形状評価における検討ケース

ケース番号	地震タイプ	マグニチュード	震央距離 (km)	備考
000	全地震	$5 \leq M$	$0 \leq d$	全地震による比較
100	内陸地殻内地震	$5 \leq M$	$0 \leq d$	
200	プレート間地震	$5 \leq M$	$0 \leq d$	地震タイプ別の比較
300	海洋プレート内地震	$5 \leq M$	$0 \leq d$	
010	全地震	$5 \leq M < 6$	$0 \leq d$	
020	全地震	$6 \leq M < 7$	$0 \leq d$	マグニチュード別の比較
030	全地震	$7 \leq M < 8$	$0 \leq d$	
040	全地震	$8 \leq M$	$0 \leq d$	
001	全地震	$5 \leq M$	$0 \leq d < 10$	震央距離別の比較
002	全地震	$5 \leq M$	$10 \leq d < 20$	
003	全地震	$5 \leq M$	$20 \leq d < 50$	
004	全地震	$5 \leq M$	$50 \leq d$	

付 2.3 スペクトル形状の比較

図 A2.3-1 に応答スペクトル形状の比較を示す。図中、左図は UHS を規準化したスペクトル形状 $SS_1(T)$ 、右図は応答スペクトルの平均像を $SS_2(T)$ である。また、凡例の数値は表 A2.2-1 に示したケース番号である。なお、規準化は PGA と PGV による 2 例とした。

UHS を評価する際に用いる SHC は周期あるいは参照確率によって寄与する地震が異なるために厳密な比較とはならないが、マグニチュード別に震源を区分した場合には、スペクトル形状や区分に対する傾向が良く一致していることがわかる。他方、地震タイプや震央距離に関する区分では、区分に対する感度が鈍く、 $SS_1(T)$ のいくつかの区分で見られるような長周期成分が大きいスペクトル形状は $SS_2(T)$ では見られない。これは前述したように、各震源（イベント）の寄与が異なるためである。

UHS から求めた応答スペクトル形状と個々の応答スペクトルから求めた応答スペクトル形状は厳密には一致しないものの、凡その傾向としては類似したものになっている。

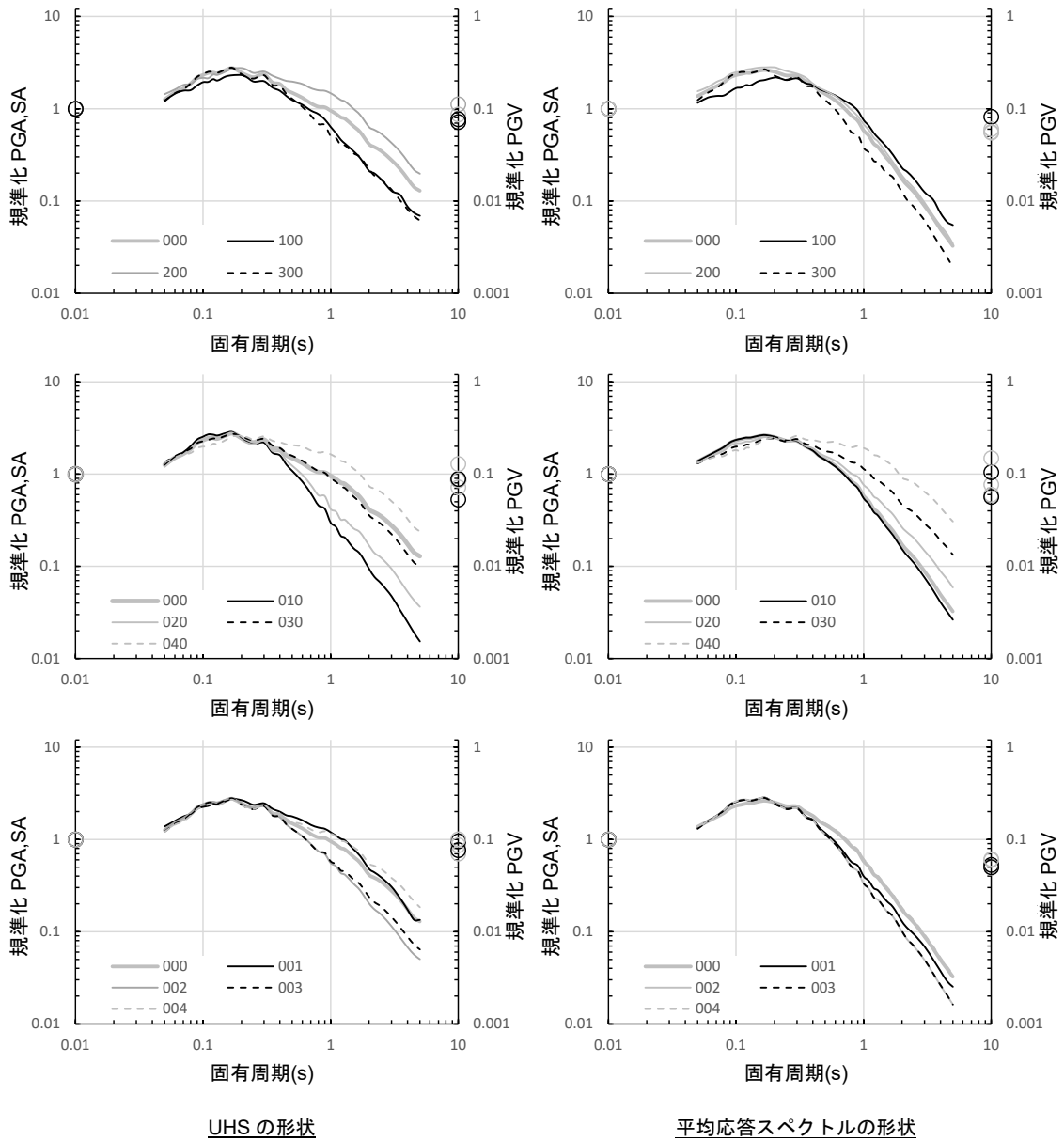


図 A2.3-1(1) スペクトル形状の比較 (PGA で規準化した場合)

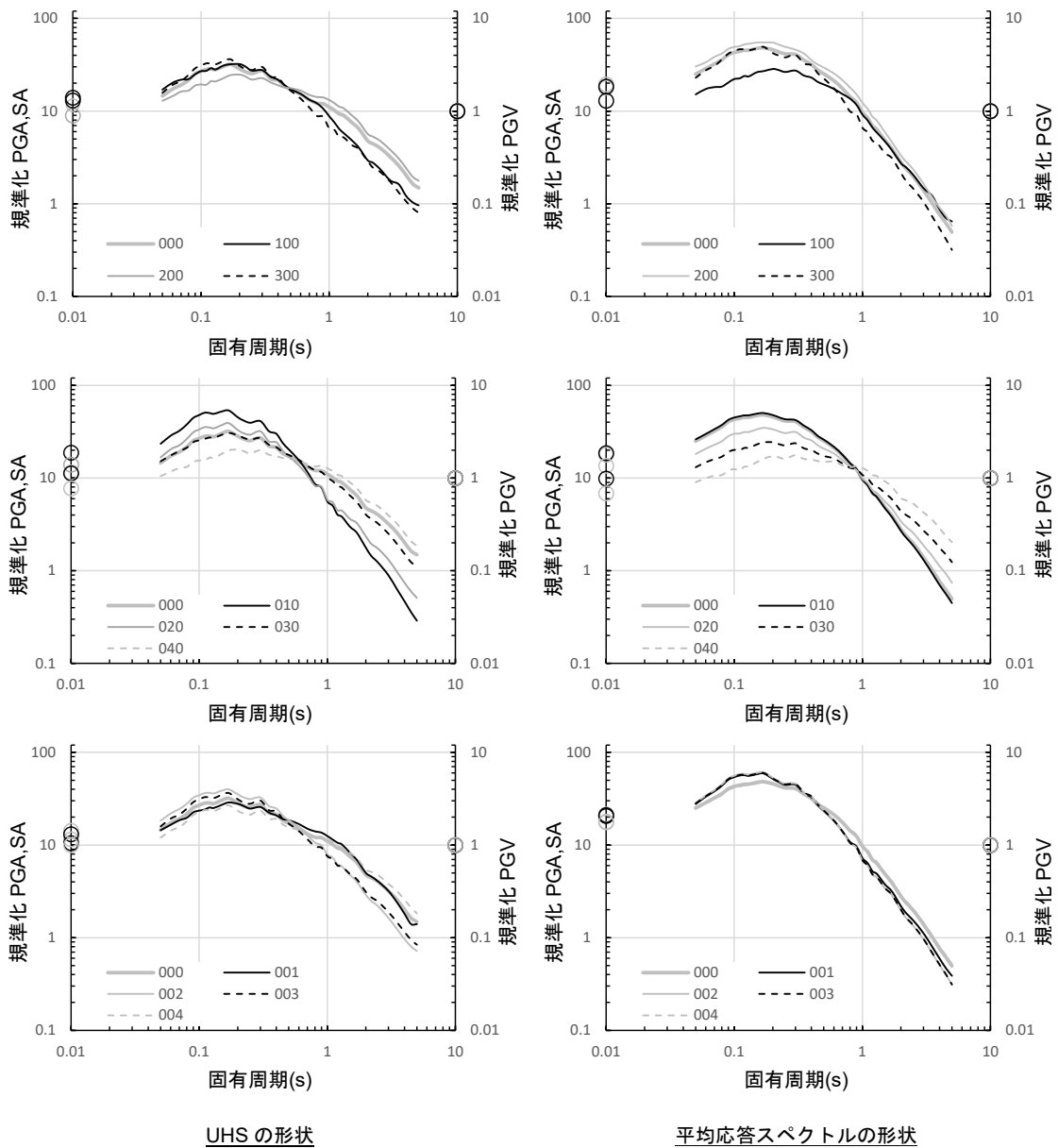


図 A2.3-2(2) スペクトル形状の比較 (PGV で規格化した場合)

研究業績

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 ○	<p><u>福島誠一郎</u>：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</p> <p><u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>，<u>吉川弘道</u>：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</p> <p><u>Fukushima S.</u>： 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</p> <p><u>Fukushima S.</u>, <u>Hayashi T.</u>: Development of conditional probabilistic seismic hazard map, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, 2009.9</p> <p>西川智，<u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p> <p>林孝幸，<u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p> <p>林孝幸，<u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p> <p>佐藤一郎，<u>矢代晴実</u>，<u>福島誠一郎</u>： 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</p> <p>西川智，<u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p> <p><u>Fukushima S.</u>, <u>Yashiro H.</u>: Seismic performance level of buildings based on the earthquake risk of portfolio, Proc. of 100th Anniversary Earthquake Conference, CD-ROM, 2006.4</p> <p>林孝幸，<u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p> <p>○ <u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p> <p><u>矢代晴実</u>，<u>福島誠一郎</u>，<u>都築充雄</u>： 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</p> <p>○ <u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p> <p><u>矢代晴実</u>，<u>福島誠一郎</u>，<u>都築充雄</u>： 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</p> <p><u>福島誠一郎</u>，<u>矢代晴実</u>： 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</p>

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	<p>矢代晴実, <u>福島誠一郎</u>: 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</p> <p><u>福島誠一郎</u>, 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</p> <p><u>福島誠一郎</u>, 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</p> <p>中村紀吉, 成川匡文, 岸野泰章, <u>福島誠一郎</u>, 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</p>
講演	<p>Satoda A., <u>Fukushima S.</u>, 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</p> <p>Oshima M., Satoda A., <u>Fukushima S.</u>: Evaluation of joint probabilistic hazard of ground shaking and deformation using multi-event model, 17th WCEE, Paper ID 8c-0058, 2021.9</p> <p>Satoda A., Oshima M., <u>Fukushima S.</u>: 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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>Fukushima S.: Effects of aftershocks on seismic risk, Transaction of 25th SMiRT, Session D7-S4, 2019.8</p> <p>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</p> <p><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</p> <p><u>Fukushima S.</u>, Watabe H., Yashiro H.: Development of risk evaluation method considering aftershocks, 7th ACEE, Paper No.0080, 2018.11</p> <p><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</p> <p><u>Fukushima S.</u>: Probabilistic seismic risk analysis of system consisting of several facilities, 16th WCEE, Paper ID 1927, 2017.1</p>

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	<p><u>Fukushima S.</u>: Risk analysis of portfolio of facilities using multi-event model, Transaction of 23rd SMiRT, Paper No.562, 2015.8</p> <p><u>Fukushima S.</u>, Yashiro H.: Evaluation of joint probabilistic seismic hazard surface, Transaction of 22nd SMiRT, Paper No.516, 2013.8</p> <p>福島誠一郎, 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</p> <p><u>Fukushima S.</u>, Hayashi T.: Conditional probabilistic hazard map for risk management of supply chain system, 14th ECEE, Paper No.783, 2010.9</p> <p><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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>Hayashi T., <u>Fukushima S.</u>, Yashiro H.: Proposal of the conditional probabilistic hazard map, 14th WCEE, Paper ID 07-0159, 2008.10</p> <p>西川智, 福島誠一郎, 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</p> <p><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</p> <p>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</p> <p><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</p> <p>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</p> <p><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</p>

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	<p>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</p> <p><u>Fukushima S.</u>, Yashiro H.: Seismic performance level of buildings considering risk financing, 13th WCEE, Paper No.41, 2004.8</p> <p>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</p> <p><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</p> <p>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</p> <p><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</p> <p><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</p> <p><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</p> <p>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</p> <p><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, 災害数理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</p> <p><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</p>
その他 (論文)	<p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p> <p>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</p>

研究業績

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）
	<p>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</p> <p>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</p> <p>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</p>

This page intentionally left blank

謝辞

謝辞

世界有数の地震国である我が国では、地震に対して安全な社会を実現することが必須であり、そのために耐震工学の分野だけではなく、建築計画や都市防災といった分野に及ぶ計画策定に貢献したく研究を続けてきました。本論文は筆者がこれまで行ってきた建物群の耐震計画に関する研究をまとめたものです。

本論文をまとめるにあたり、多くの方々からご支援を戴きました。

早稲田大学創造理工学部教授 早部安弘 先生には、指導教官として本論文をまとめる機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、懇切丁寧なご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。また、社会人になってからも田中研究室の学生諸子と交流を続けられたことは、早部先生と始めたケーブル構造の勉強会によるものです。ここに改めて感謝いたします。

早稲田大学創造理工学部教授 前田寿朗 先生、同 吉中進 先生、同 高口洋人 先生には、副査として大変貴重で有意義なご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴きました。ここに深謝の意を表します。

早稲田大学名誉教授 故・田中彌壽雄 先生には、筆者が早稲田大学理工学部建築学科及び同大学院修士課程に在学して以降、絶えずご指導及び励ましを戴きました。田中研究室の学生諸子と交流を続けられたことも田中先生のご厚意によるもので、田中研究室で得た知識や知己は本論文をまとめる上での有形無形の財産となっています。ここに深謝の意を表します。

田中研究室の卒業生である、国際美建株式会社 青木雅秀 氏、株式会社構建設計研究所 中川理 博士、株式会社リスク工学研究所 大峯秀人 氏には、建物の骨格曲線の設定において多くの貴重なご助言を戴きました。ここに感謝いたします。

東電設計株式会社 栗田哲史 博士との議論を通して、研究活動を継続することの重要性を絶えず確認してきました。また、多くの海外学会でも同行し最先端の技術について意見交換を行うことができました。ここに感謝いたします。

矢代晴実事務所 矢代晴実 博士、東京海上ディーアール株式会社 林孝幸 博士、千代田化工建設株式会社 里田啓 氏には、研究委託あるいは共同研究という形で研究を継続する大変貴重な機会を戴きました。ここに感謝いたします。

最後に、これまで研究活動を支え応援してくれた、妻 里美、娘 亜美に感謝いたします。

This page intentionally left blank

This page intentionally left blank

