

4章 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建物の補修費用の評価法

4.1 序

地震時における建物の期待損失額は、被災度ごとに求められる建物の損傷確率に補修費用を乗じることで評価される。従って、小破、中破などの被災度に対する補修費用の設定が、地震損失を評価するうえで重要となる。建物の地震損失評価法として、イベントツリー解析^{1), 2)}などを用いて多数の損傷モードの発生確率を解析的に求めて各々の損傷モードに対して補修費用を設定するケースと、過去の地震被害データに基づき補修費用を経験的に設定するケースが考えられる。前者の手法では、多数の損傷モードに対する補修費用から建物の損失分布が評価されるが、地震被害との整合性を検証しておく必要がある。一方、後者の手法では、構造形式などに応じた建物の補修費用を、過去の地震被害データを用いて容易に決定できるが、地震被害データは限定的であり、対象建物の特性を反映させた補修費用を設定するには工夫を要する。従って、いずれの手法を用いるにしても、地震被害データより求められる建物の補修費用を、できる限り詳細に分析しておく必要がある。神田ら^{3), 4)}は、兵庫県南部地震で被災した210棟の建物を対象に、補修時の建築工事費および総工事費、あるいは躯体工事費および総工事費が既知のデータから、建築工事費および躯体工事費の総工事費に対する比率を評価している。HAZUS⁵⁾では、新築費用に対する建物の補修費用の比率を、小破2%、中破10%、大破50%で与えているが、個別建物の補修費用は評価者が建物状況などを判断して設定することになっている。このように、現状では、工事別の補修費用は詳細に検討されていないが、躯体工事費だけでなく仕上げ工事費や設備工事費などの補修費用の構成比が評価されると、何の補修工事に費用を要するかがわかり費用対効果の高い地震対策を実施できる。

4章では、兵庫県南部地震で被災した27棟の建物を対象に、工事種類別に補修費用を調査し、建物ごとに工事別補修費用の構成比を求める。つぎに、工事種類ごとに単位面積あたりの補修費用を計算し、工事別の補修費用を統計的に分析する。このとき、構造形式や建物用途に対しても、工事別の補修費用を評価する。さらに、工事別の補修費用の分布を確率分布を用いて回帰し、確率分布への適合性について検討する。

4.2 個別建物の補修費用に関する検討

4.2.1 補修費用データ

兵庫県南部地震に対して補修工事を行った27棟の建物を対象に、補修費用の調査を行った。ここで、これらの建物の属性を、被災度別、構造形式別、建物階数別に図4.1に示す。地震時における補修費用を決定するうえで最も重要となる建物の被災度として、日本建築防災協会の被災度判定基準⁶⁾に従い、小破、中破および大破を設定した。ここで、小破は軽微な被害を含んでおり、また大破の建物は取り壊さずに補修をして再使用した建物を対象とした。小破ならびに中破の棟数は10棟以上あるが、大破の場合にはもともとの母集団の棟数が少ないこともあり、ここではデータが入手可能な3棟のみ調査した。構造形式別では、RC造が9棟、SRC造が10棟ならびにS造が8棟である。建物階数別では、6～9階の建物の棟数が15棟で最も多く、10階以上の建物は3棟である。また、建物用途別では事務所ビルが圧倒的に多く、この他では店舗や集合住宅などが含まれている。

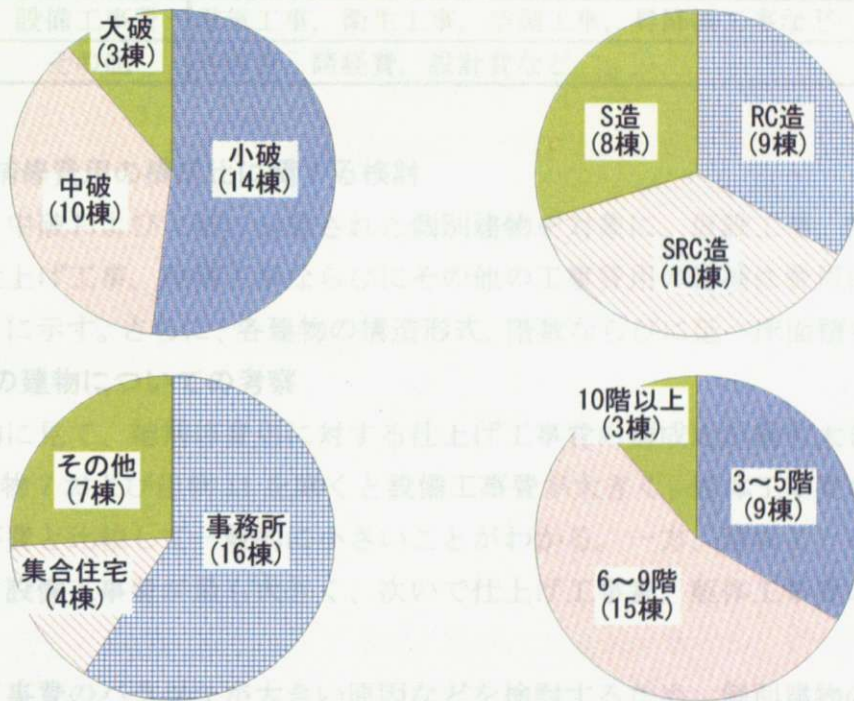


図 4.1 調査建物の構成内容

一方、補修費用の項目として、総補修費用（以下に記す全ての工事費の合計）のほか、仮設工事費、解体工事費、躯体工事費、仕上げ工事費、設備工事費、その他の6項目の工事に対して補修費用の調査を行った。ここで、仮設工事費は、主に共通仮設工事費と直接仮設工事費から構成されている。共通仮設工事費は現場の仮囲いや現場経費など直接的に工事に関係しない費用を指し、また直接仮設工事費は足場架設や

安全設備費など建築や設備工事をする際の費用を指している。躯体工事費は、柱、梁、壁などの構造部材に対する補修費用を指し、具体的にはエポキシ樹脂の注入や鉄板補強などの工事費用である。仕上げ工事費は、内装工事や外装工事などに要する費用であり、ここでは屋根工事、金属工事、防水工事、タイル工事、建具工事、ガラス工事、左官工事、塗装工事などに要する費用を合計して求めた。設備工事費は、電気工事、衛生工事、空調工事、昇降機工事などの合計である。その他は、外構費、諸経費、設計費などである。

表 4.1 工事種類と工事内容の関係

工事種類	工事内容
仮設工事費	共通仮設工事、直接仮設工事
解体工事費	解体工事
躯体工事費	柱、梁、壁などの構造部材の補修工事
仕上げ工事費	ガラス工事、左官工事、塗装工事、建具工事、タイル工事、防水工事、金属工事、屋根工事など
設備工事費	電気工事、衛生工事、空調工事、昇降機工事など
その他	外構費、諸経費、設計費など

4.2.2 補修費用の構成比に関する検討

小破、中破および大破に分類された個別建物を対象に、仮設工事、解体工事、躯体工事、仕上げ工事、設備工事ならびにその他の工事費用の総補修費用に対する構成比を図 4.2 に示す。さらに、各建物の構造形式、階数ならびに延べ床面積も併せて示す。

(1) 小破の建物についての考察

全体的に見て、総補修費用に対する仕上げ工事費の構成比が最も大きく、続いて建物 3、建物 7 および建物 11 を除くと設備工事費が大きく、躯体工事費の構成比はこれらの工事費と比較して一般的に小さいことがわかる。一方、建物ごとの構成比のバラツキは、設備工事費が最も大きく、次いで仕上げ工事費、躯体工事費の順になっている。

設備工事費のバラツキが大きい原因などを検討するため、個別建物の被害状況について述べる。設備工事費の構成比が約 0.5 と大きい建物 1 では、電灯分電盤の取り付けなどによる幹線設備工事に伴う電気工事費や衛生工事費が設備工事費を大きくした要因となっている。同様に、建物 10 では高架水槽の補修を含んだ衛生工事費や空調工事が大きく、建物 8 では衛生工事費、昇降機工事費ならびに電気工事費が大きくなっている。逆に、設備工事費の構成比がかなり小さい建物 14 では、建築工事に伴うファンコイルの取り付けのみで基本的に設備は無被害であり、また建物 3 では衛生工事のみである。従って、建築設備の地震被害は、被害発生が例えば電気設備のみの単独被

害なのかあるいは他の設備も含んだ複合被害なのかに大きく左右されるので、これが設備工事費の構成比が建物ごとにばらつく原因であると考えられる。

つぎに、仕上げ工事費の構成比が約 0.5 と大きい建物 3 では、全層にわたり床のタイル被害が発生し、さらに一部の層では天井の落下被害があったためである。一方、RC 造の躯体補修の内容は、壁や床に発生したひび割れのエポキシ樹脂注入であるが、S 造では鉄骨階段の復旧や PC 版などの取り付け金物の鉄骨補強であり、鉄骨躯体そのものの補修は行われていない。また、解体工事費の構成比が約 0.2 と大きい建物 7 であるが、この工事費は土間や犬走などの外構部分の解体費用であり、建物そのものの解体に要した費用ではない。

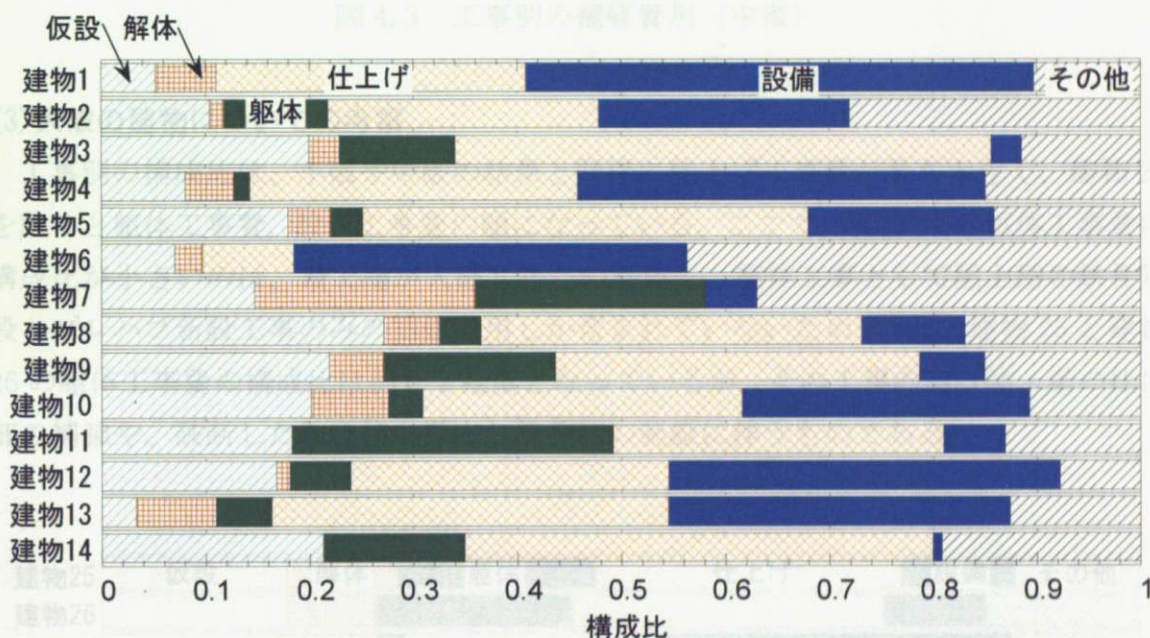


図 4.2 工事別の補修費用（小破）

(2) 中破の建物についての考察

小破の場合と同様に、仕上げ工事費の構成比が最も大きいですが、設備工事費と躯体工事費の大小関係は建物ごとに異なり、躯体工事費が小破と比較して大きくなっていることがわかる。一方、補修費用のバラツキの全体的傾向は小破の場合とほぼ同様であるが、躯体工事費のバラツキが仕上げ工事費よりも若干大きくなっている。ところで、建物 18 では、躯体工事費の構成比が約 0.25 と大きくなっているが、これは一部の地中梁の補強工事ならびに鉄板巻きによる柱の補強工事が行われたためである。

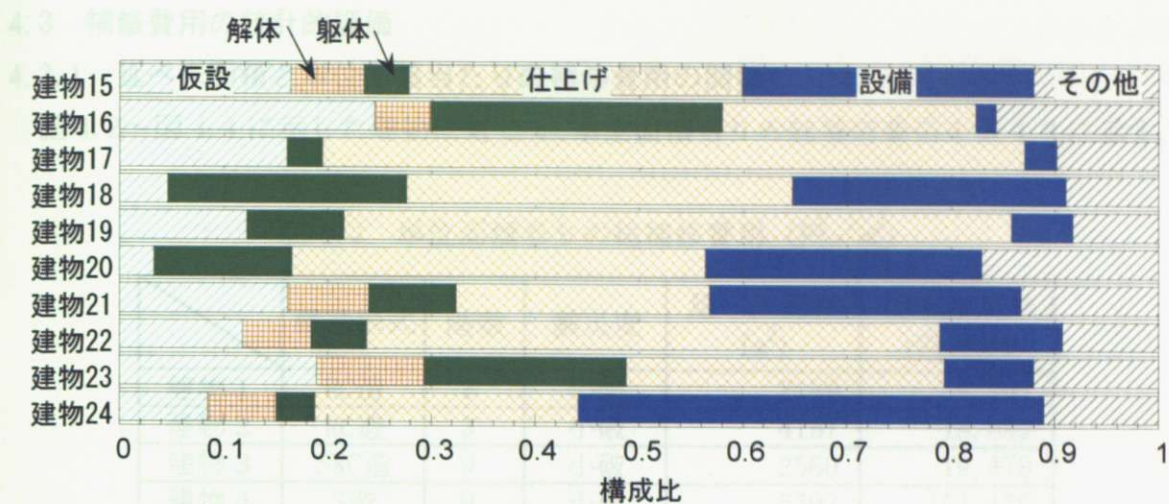


図 4.3 工事別の補修費用（中破）

(3) 大破の建物についての考察

工事別の構成比は、小破や中破の結果と同様に仕上げ工事費が最も大きく、建物 27 を除くと躯体工事費、設備工事費の順になっている。ここで、建物 27 の躯体工事費の構成比が小さいのは、最上層が大破したため解体し、躯体工事として屋上階の鉄骨階段とプレハブ新設工事のみの補修費用しか含まれていないためである。建物 25 と建物 26 の躯体工事費の構成比は約 0.2 程度となっているが、その工事内容は柱・梁の仕口部の補強や、破断した鉄骨柱を撤去し鉄骨柱の新設に伴うものである。

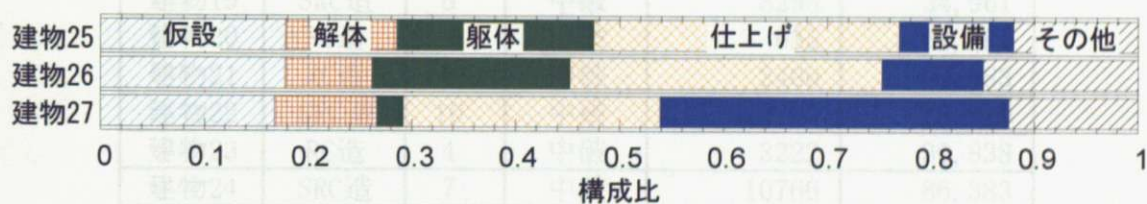


図 4.4 工事別の補修費用（大破）

以上、個別建物の補修費用について調査すると、同一の被災度でも建物の被害原因により、工事別の補修費用の構成比はかなり異なることがわかった。このため、同一の被災度に分類された建物群を対象に、工事別の補修費用を統計的観点から検討する。

さくなるに従い単位面積当たりの補修費用が低下するなど、延べ床面積と補修費用の間に相関があると、単位面積当たりの補修費用を用いて統計的検討を行うときに延べ床面積による影響を考慮しなければならない。

このため、各工事別に、延べ床面積と単位面積当たりの補修費用の関係について検討する。一例として、躯体工事費、仕上げ工事費、設備工事費、総補修費用について

4.3 補修費用の統計的評価

4.3.1 延べ床面積と単位面積当たりの補修費用の関係

図 4.2～図 4.4 に示した建物に対して、単位面積当たりの総補修費用を表 4.2 に示す。

表 4.2 単位面積当たりの総補修費用 (円/㎡)

	構造形式	階数	被災度	延べ床面積 (㎡)	総補修費用 (円/㎡)
建物 1	RC造	3	小破	2189	5,291
建物 2	RC造	3	小破	4157	18,042
建物 3	SRC造	9	小破	2560	19,879
建物 4	S造	9	小破	5392	151,150
建物 5	S造	8	小破	9239	92,196
建物 6	S造	3	小破	2121	13,535
建物 7	RC造	3	小破	1495	47,023
建物 8	S造	8	小破	503	61,531
建物 9	SRC造	7	小破	4119	36,684
建物10	RC造	5	小破	9000	5,667
建物11	S造	8	小破	1300	7,023
建物12	SRC造	7	小破	23244	22,328
建物13	S造	3	小破	1102	35,436
建物14	SRC造	10	小破	3180	27,563
建物15	S造	7	中破	635	337,795
建物16	SRC造	9	中破	16926	135,014
建物17	SRC造	12	中破	9858	10,753
建物18	RC造	5	中破	2636	48,511
建物19	SRC造	8	中破	8295	34,961
建物20	RC造	6	中破	635	62,992
建物21	RC造	9	中破	2400	47,083
建物22	SRC造	10	中破	11700	78,889
建物23	RC造	4	中破	3222	30,838
建物24	SRC造	7	中破	10766	86,383
建物25	S造	8	大破	897	156,942
建物26	S造	8	大破	1309	88,617
建物27	RC造	5	大破	3060	111,438

このとき、延べ床面積で基準化した単位面積当たりの補修費用C（＝建物の補修費用／延べ床面積）を用いて、補修費用の統計的分析を行う。この際、延べ床面積が大きくなるに従い単位面積当たりの補修費用が低下するなど、延べ床面積と補修費用の間に相関があると、単位面積当たりの補修費用を用いて統計的分析をするときに延べ床面積による影響を考慮しなければならない。

このため、各工事別に、延べ床面積と単位面積当たりの補修費用の関係について検討する。一例として、躯体工事費、仕上げ工事費、設備工事費、総補修費用について、

延べ床面積と単位面積当たりの補修費用の関係を図 4.5 に示す。ただし、縦軸の単位面積当たりの補修費用 C は、同一の被災度に属する建物の補修費用の平均値 μ_c で基準化している。

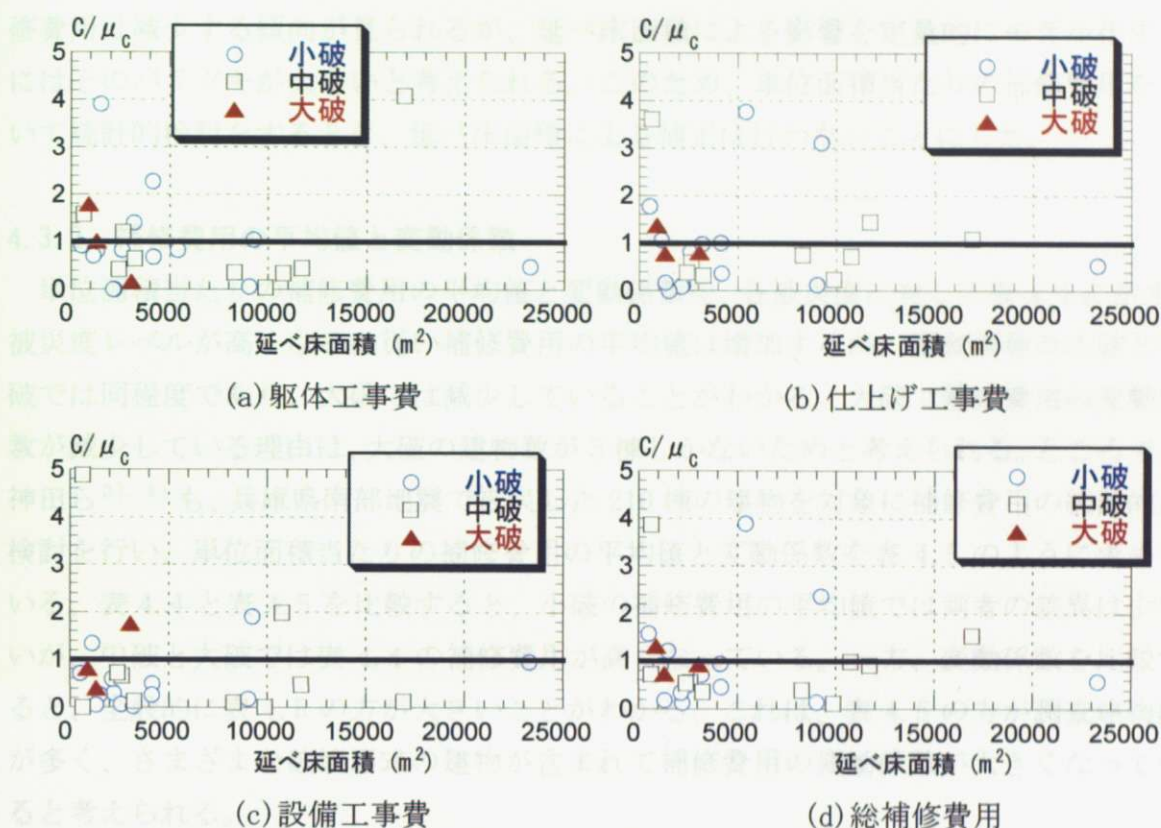


図 4.5 延べ床面積と単位面積当たりの補修費用の関係

小破および中破では延べ床面積と単位面積当たりの補修費用の間に明確な相関性は見られないが、大破では躯体工事費と設備工事費において相関性があることがわかる。このため、被災度別に、正の相関が最も高い工事とその相関係数、同様に負の相関が最も高い場合について表 4.3 に示す。

表 4.3 延べ床面積と単位面積当たりの補修費用の相関係数

被災度	正の相関		負の相関	
	工事名	相関係数	工事名	相関係数
小破	設備工事	0.122	躯体工事	-0.208
中破	躯体工事	0.374	設備工事	-0.391
大破	設備工事	0.887	躯体工事	-0.949

小破および中破に対する相関係数の絶対値は最大でも約 0.4 以下であるが、大破で

は躯体工事費の相関係数が約-0.95 となっている。躯体工事費に対する負の相関が高い理由として、損傷がある層に集中して大破と判定されたケースでは、補修費用を延べ床面積で基準化すると、建物規模が大きくなると単位面積当たりの補修費用は安くなるからである。工事種類により、延べ床面積が増加するに従い単位面積当たりの補修費用は減少する傾向が見られるが、延べ床面積による影響を定量的にモデル化するにはそのバラツキが大きいと考えられる。このため、単位面積当たりの補修費用を用いて統計的検討をするとき、延べ床面積による補正は行わないことにした。

4.3.2 補修費用の平均値と変動係数

単位面積当たりの補修費用の平均値と変動係数を、各被災度に対して表 4.4 に示す。被災度レベルが高くなるに従い補修費用の平均値は増加するが、変動係数は小破と中破では同程度であり、大破では減少していることがわかる。大破で補修費用の変動係数が減少している理由は、大破の建物数が 3 棟しかないためと考えられる。ところで、神田ら^{3), 4)}も、兵庫県南部地震で被災した 210 棟の建物を対象に補修費用の統計的な検討を行い、単位面積当たりの補修費用の平均値と変動係数を表 4.5 のように求めている。表 4.4 と表 4.5 を比較すると、小破の補修費用の平均値では両者の差異は少ないが、中破と大破では表 4.4 の補修費用が高くなっている。一方、変動係数を比較すると、全般的に表 4.5 の方が大きいことがわかる。これは、表 4.5 の方が調査建物数が多く、さまざまな破壊形式の建物が含まれて補修費用の変動係数が大きくなっていると考えられる。

表 4.4 単位面積当たりの補修費用の平均値と変動係数

	小破	中破	大破
平均値(円/㎡)	38810	87321	118998
変動係数	1.04	1.08	0.29

表 4.5 単位面積当たりの補修費用の平均値と変動係数（神田らの研究^{3), 4)}

	小破	中破	大破
平均値(円/㎡)	30100	45500	54600
変動係数	1.49	1.32	1.18

つぎに、構造形式別に、補修費用の平均値と変動係数を評価する。RC 造建物（SRC 造を含む）と S 造建物に対して、単位面積当たりの補修費用の平均値と変動係数を求めると表 4.6 となり、一方、神田らの研究^{3), 4)}では表 4.7 となる。ただし、表 4.6 において、RC 造建物（大破）と S 造建物（中破）の変動係数が空欄になっているのは、

該当建物が1棟しか存在しないためである。RC造建物とS造建物の補修費用の平均値を比較すると、S造建物の補修費用がRC造建物よりも高く、この傾向は神田らの研究とも一致している。補修費用の変動係数については、構造形式の相違による明確な差異は見られないことがわかる。

表 4.6 単位面積当たりの補修費用の平均値と変動係数

		小破	中破	大破
RC造建物 (SRC造を含む)	平均値(円/㎡)	22810	59491	111438
	変動係数	0.63	0.62	——
S造建物	平均値(円/㎡)	60145	137795	122779
	変動係数	0.91	——	0.39

表 4.7 単位面積当たりの補修費用の平均値と変動係数 (神田らの研究^{3), 4)})

		小破	中破	大破
RC造建物 (SRC造を含む)	平均値(円/㎡)	29000	42700	45700
	変動係数	1.55	1.25	0.84
S造建物	平均値(円/㎡)	36900	75200	76300
	変動係数	1.24	1.37	1.31

4.3.3 工事別の補修費用の構成比

(1) 工事別の補修費用の平均値

各工事別に、補修費用の平均値を総補修費用の平均値で基準化した値を、被災度別に図 4.6 に示す。

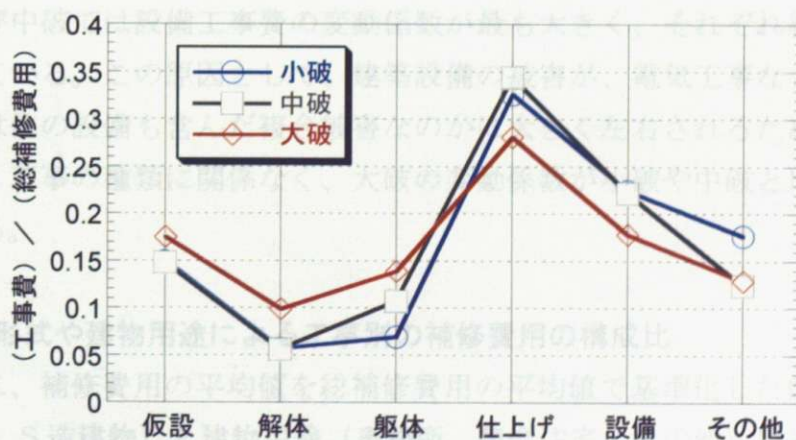


図 4.6 総補修費用に対する各工事の補修費用の平均値

全体的に見ると、建物の被災度にはほぼ関係なく、総補修費用に対して仕上げ工事費の占める割合が約 0.3 程度で最も高く、次いで設備工事費の約 0.2、躯体工事費の約 0.1 の順になっていることがわかる。従って、地震時に生じる損失を効果的に低減させるためには、躯体の耐震性能を高めることに加えて、仕上げや建築設備の耐震性能を高くすることが重要であるといえる。また、躯体工事費では、小破から大破へと被災度レベルが高くなるに連れ総補修費用に占める割合が大きくなっているが、仕上げや設備工事費では大破での割合が小さくなる傾向がある。この原因として、大破では、仮設や解体工事費の占める割合が小破と比較して大きくなっていることが考えられる。ただし、この現象は総補修費用に占める割合が減少しているだけであり、仕上げや設備工事費の平均値は、被害程度が甚大になるに連れ大きくなっている。

(2) 工事別の補修費用の変動係数

工事別の補修費用の変動係数を、被災度ごとに図 4.7 に示す。

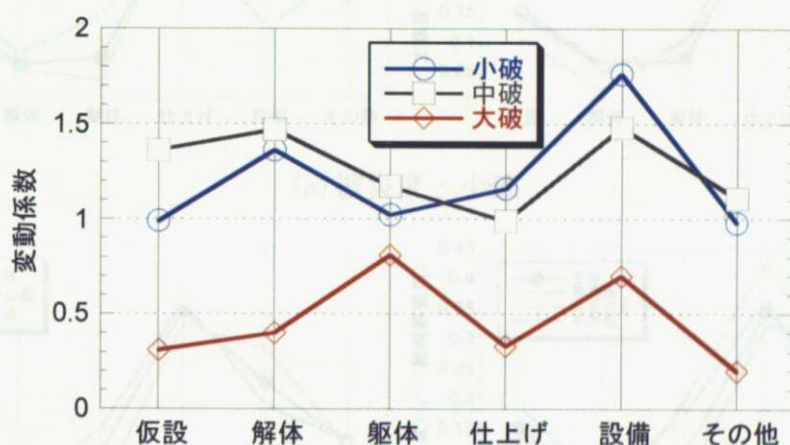


図 4.7 総補修費用に対する各工事の補修費用の変動係数

小破および中破では設備工事費の変動係数が最も大きく、それぞれ約 1.8、約 1.5 程度となっている。この原因として、建築設備の被害が、電気工事などの単独被害なのかあるいは他の設備も含んだ複合被害なのかに大きく左右されるためである。全体的に見ると、工事の種類に関係なく、大破の変動係数が小破や中破と比較して小さいことがわかる。

4.3.4 構造形式や建物用途による工事別の補修費用の構成比

各工事別に、補修費用の平均値を総補修費用の平均値で基準化した値を、構造形式 (RC 造建物, S 造建物) と建物用途 (事務所, 集合住宅, その他) に対して図 4.8 に示す。

構造形式に着目すると、小破と中破の躯体工事費は、RC 造建物よりも S 造建物の方

が安く、小破の S 造建物では、4.2.2 節で述べたように主要な構造部分に被害が生じていないことに対応している。一方、小破と中破の設備工事費は、RC 造建物よりも S 造建物の方が高いことがわかる。これは、3.4.3 節における建築設備の被害率曲線の比較結果から、RC 造建物よりも S 造建物の方が被害率曲線の中央値が小さく、地震被害を受けやすいことに対応している。つぎに、建物用途に着目すると、各工事別の補修費用に有為な傾向は見られず、神田らの研究^{3), 4)}において、建物全体の工事費を対象とした結果とほぼ一致している。

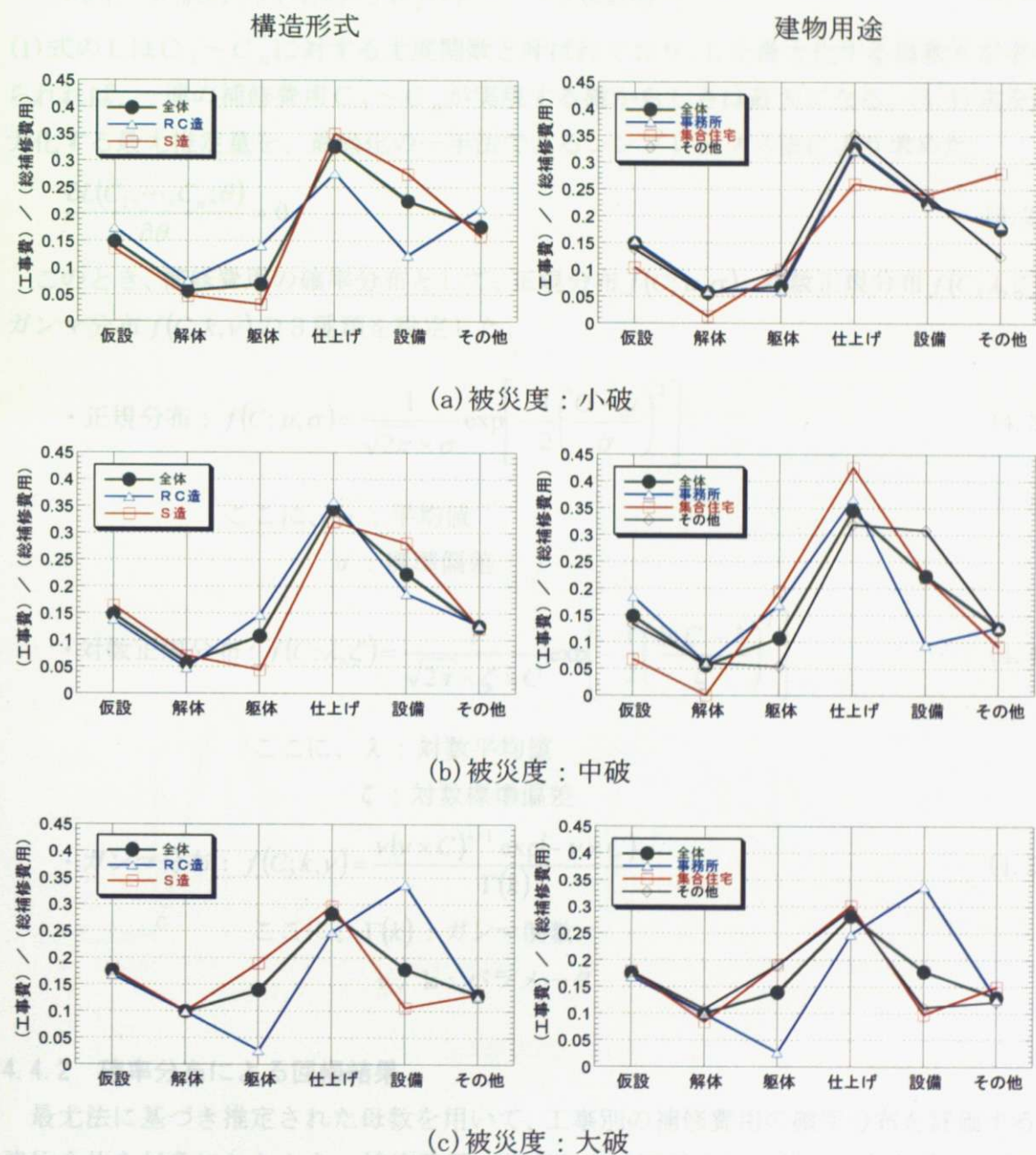


図 4.8 総補修費用に対する各工事の補修費用の平均値

4.4 確率分布を用いた補修費用の分布の回帰

4.4.1 補修費用の分布の回帰法

確率分布を用いた回帰法として、一般的に積率法と最尤法があるが、本研究では最尤法を採用した。単位面積当たりの補修費用 C を確率変数と考えて、推定する母数 θ を有する確率密度関数 $f(C; \theta)$ を設定する。このとき、個々の建物の補修費用が互いに独立であると仮定すると、 n 棟の建物の補修費用 $C_1 \sim C_n$ が実現する確からしさ L は、確率密度関数 $f(C; \theta)$ を用いて(4.1)式のように表現される⁷⁾。

$$L(C_1, \dots, C_n; \theta) = f(C_1; \theta) \times f(C_2; \theta) \times \dots \times f(C_n; \theta) \quad (4.1)$$

(1)式の L は $C_1 \sim C_n$ に対する尤度関数と呼ばれており、 L を最大化する母数 θ が求められれば、一連の補修費用 $C_1 \sim C_n$ が実現する確からしさは最大になる。(4.1)式を最大化する最尤推定量を、最適化の一手法であるシンプレックス法により求めた。

$$\frac{\partial L(C_1, \dots, C_n; \theta)}{\partial \theta} = 0 \quad (4.2)$$

このとき、補修費用の確率分布として、正規分布 $f(C; \mu, \sigma)$ 、対数正規分布 $f(C; \lambda, \zeta)$ 、ガンマ分布 $f(C; k, \nu)$ の3種類を設定した。

$$\cdot \text{正規分布: } f(C; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{C - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

ここに、 μ : 平均値
 σ : 標準偏差

$$\cdot \text{対数正規分布: } f(C; \lambda, \zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \zeta \times C} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln C - \lambda}{\zeta} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

ここに、 λ : 対数平均値
 ζ : 対数標準偏差

$$\cdot \text{ガンマ分布: } f(C; k, \nu) = \frac{\nu(\nu \times C)^{k-1} \exp(-\nu \times C)}{\Gamma(k)} \quad (4.5)$$

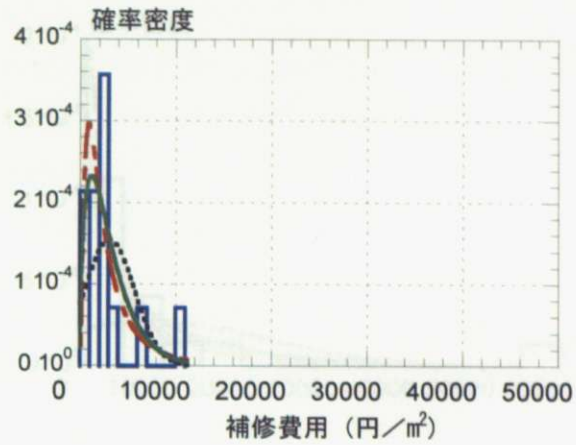
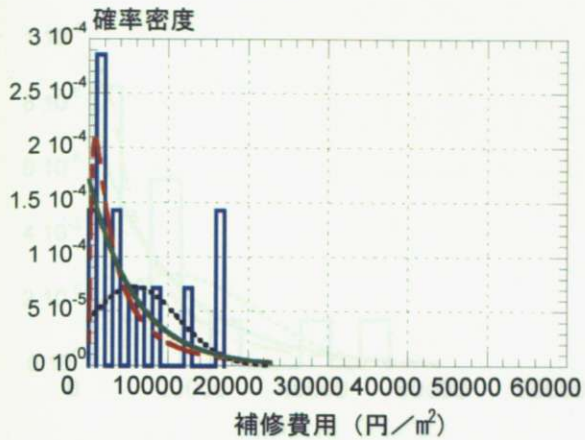
ここに、 $\Gamma(k)$: ガンマ関数
 ν, k : パラメータ

4.4.2 確率分布による回帰結果

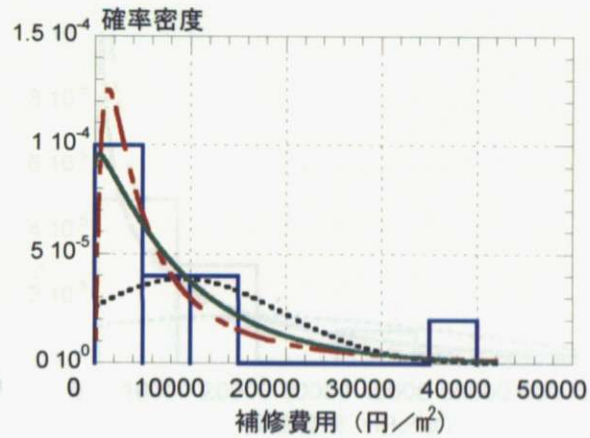
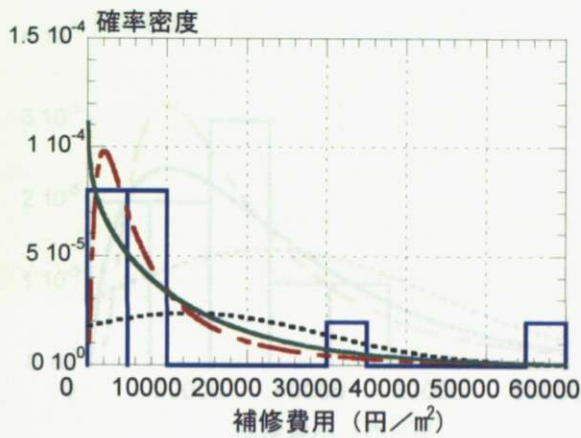
最尤法に基づき推定された母数を用いて、工事別の補修費用の確率分布を評価する。建物全体を対象にしたとき、補修費用の頻度分布に回帰された確率分布を重ねて表現すると、解体工事費、躯体工事費、仕上げ工事費、設備工事費に対して図4.9となる。

解体工事費

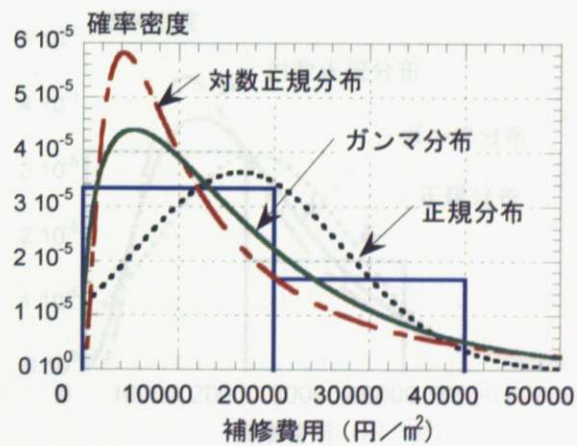
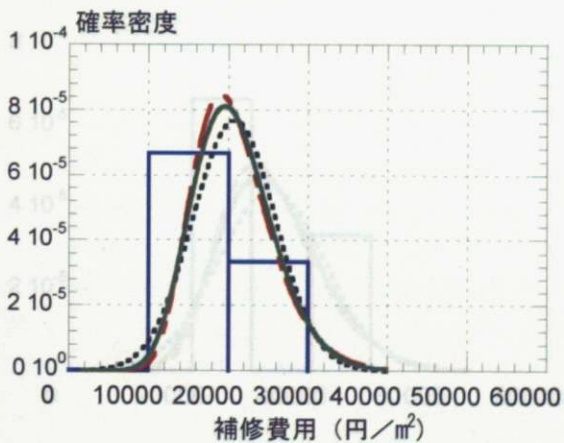
躯体工事費



(a) 被災度：小破



(b) 被災度：中破



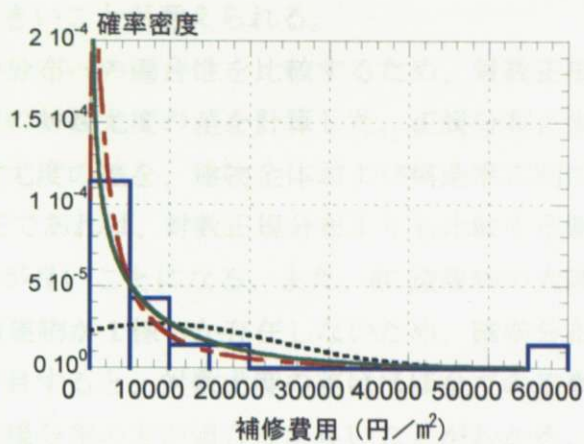
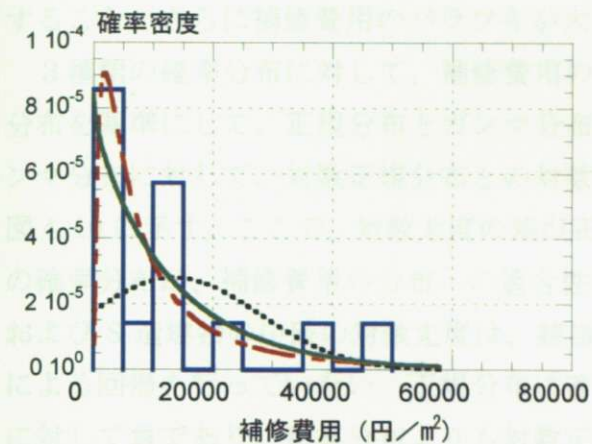
(c) 被災度：大破

図 4.9 補修費用の分布および確率分布による比較

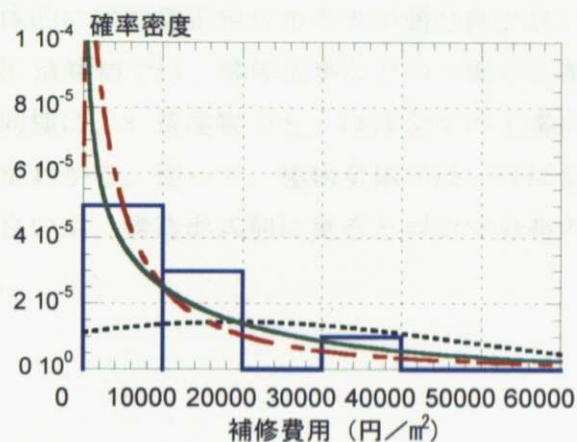
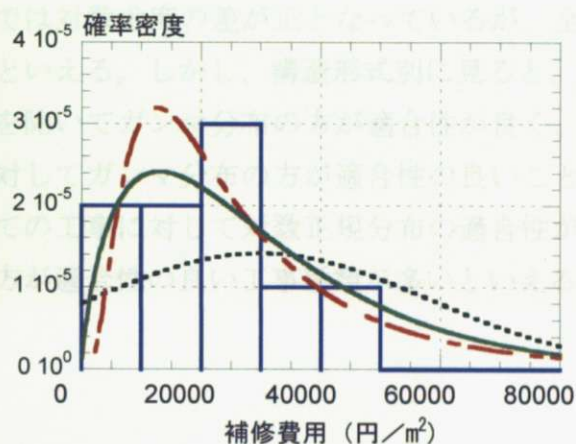
図 4.9 より、対数正規分布とガンマ分布の形状は互いに似ているが、正規分布はこれらの分布と異なった傾向を示している。この原因として、対数正規分布とガンマ分

仕上り工事費

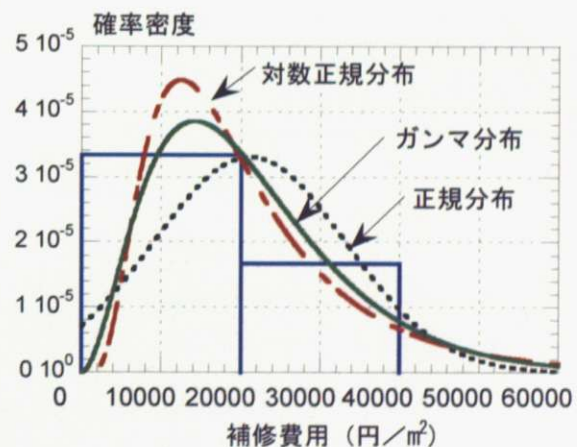
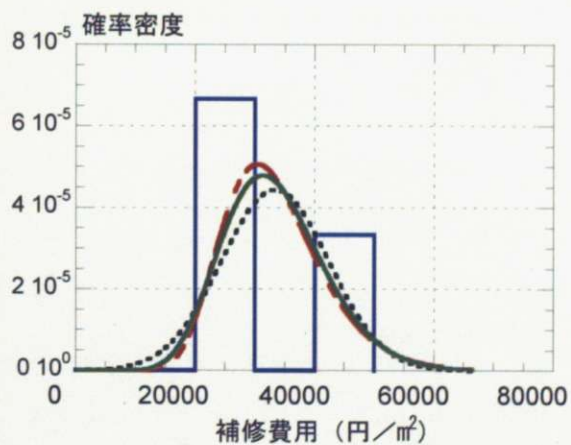
設備工事費



(a) 被災度：小破



(b) 被災度：中破



(c) 被災度：大破

図 4.9 補修費用の分布および確率分布による回帰

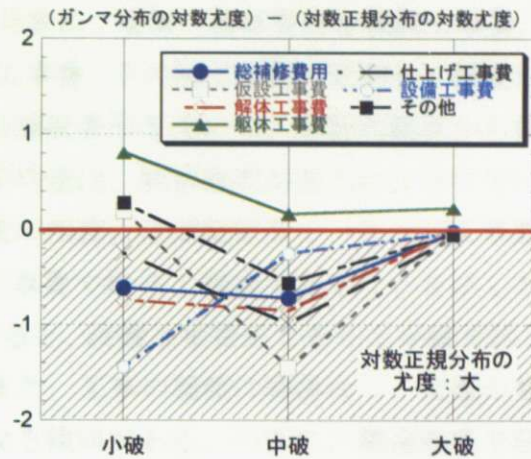
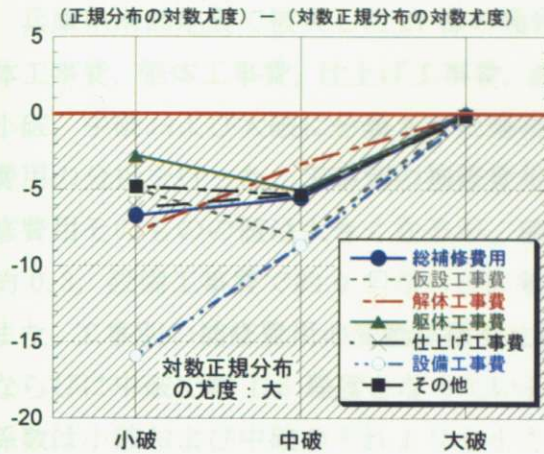
図 4.9 より、対数正規分布とガンマ分布の形状は互いに似ているが、正規分布はこれらの分布と異なった傾向を示している。この原因として、対数正規分布とガンマ分

布の確率変数は正の領域のみで定義されるが正規分布の確率変数は負の領域にも分布すること、さらに補修費用のバラツキが大きいことが考えられる。

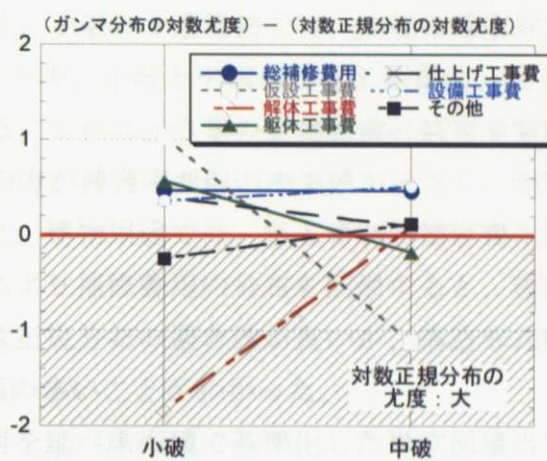
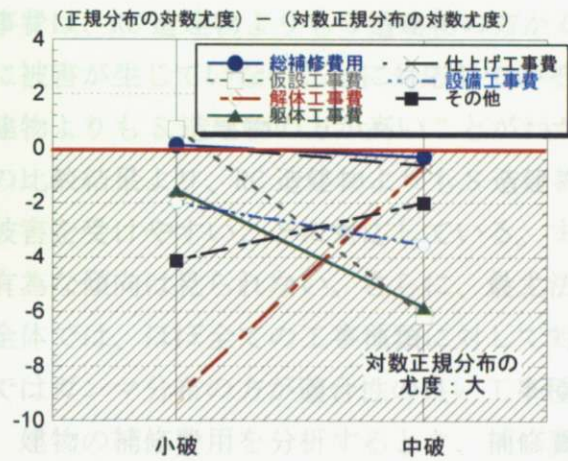
3種類の確率分布に対して、補修費用の分布への適合性を比較するため、対数正規分布を基準にして、正規分布とガンマ分布の対数尤度の差を計算した。正規分布とガンマ分布に対して、対数正規分布との対数尤度の差を、建物全体および構造形式別に図4.10に示す。ここで、対数尤度の差が正であれば、対数正規分布よりも比較する側の確率分布が、補修費用の分布への適合性が良いことになる。また、RC造建物の大破およびS造建物の中破の対数尤度は、該当建物が1棟しか存在しないため、確率分布による回帰を行っていない。正規分布に着目すると、対数尤度の差はほぼ全ての工事に対して負であり、正規分布よりも対数正規分布の方が適合性が良いことがわかる。一方、ガンマ分布では、建物全体を対象にしたときは、躯体工事費など一部の工事費では対数尤度の差が正となっているが、全体的には対数正規分布の方が適合性が良いといえる。しかし、構造形式別に見ると、RC造建物では、解体工事などの一部の工事を除いてガンマ分布の方が適合性が良く、同様に、S造建物でも、ほぼ全ての工事に対してガンマ分布の方が適合性の良いことがわかる。従って、建物全体では、ほぼ全ての工事に対して対数正規分布の適合性が良いが、構造形式別に見るとガンマ分布の方が適合性の良い工事種類が多いといえる。

正規分布

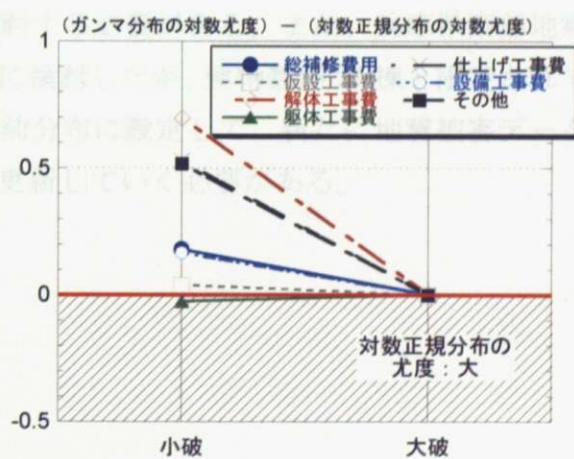
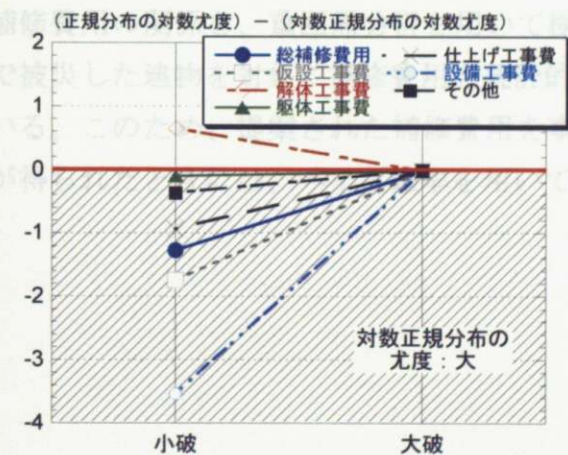
ガンマ分布



(a) 建物全体



(b) RC 造建物 (SRC 造建物を含む)



(c) S 造建物

図 4.10 対数正規分布を基準にしたときの対数尤度の比較

4.5 まとめ

兵庫県南部地震で被災した 27 棟の建物を対象に、建物の補修費用を仮設工事費、解体工事費、躯体工事費、仕上げ工事費、設備工事費、その他工事費に区別して調査し、小破、中破および大破に分類された建物群の補修費用を用いて、統計的観点から補修費用の分析を行った。工事別の補修費用の平均値は、被害程度が甚大になるに従い補修費用そのものの値は大きくなるが、被災度の相違にほぼ関係なく、仕上げ工事費で約 0.3、設備工事費で約 0.2 ならびに躯体工事費で約 0.1 程度であることを示した。また、工事別の補修費用の変動係数を比較すると、設備工事費が大きくて小破で約 1.8 ならびに中破で約 1.5 程度となっている。また、工事の種類に関係なく、大破の変動係数は小破および中破のそれよりも小さくなる傾向がある。つぎに、構造形式や建物用途による工事別の補修費用について検討した。構造形式では、小破と中破の躯体工事費は、RC 造建物よりも S 造建物の方が安く、小破の S 造建物では、主要な構造部分に被害が生じていないことに対応している。一方、小破と中破の設備工事費は、RC 造建物よりも S 造建物の方が高いことがわかる。これは、3 章の建築設備の被害率曲線の比較結果より、RC 造建物よりも S 造建物の方が被害率曲線の中央値が小さく、地震被害を受けやすいことに対応している。また、建物用途では、各工事別の補修費用に有為な傾向は見られない。さらに、最尤法により補修費用の分布を回帰すると、建物全体では、ほぼ全ての工事種類に対して対数正規分布の適合性が良いが、構造形式別ではガンマ分布の方が適合性の良い工事種類の多いことがわかった。

建物の補修費用を分析するとき、補修費用を延べ床面積で基準化した単位面積当りの補修費用を用いて評価した。今後は、延べ床面積、構造形式、建物用途の各指標と補修費用の関係を、重回帰分析を用いて検討する必要がある。また、兵庫県南部地震で被災した建物を対象に補修費用を統計的に検討したが、建物数が 27 棟と限定されている。このため、提案された補修費用を事前分布に設定して、新たに地震被害データが得られたときには、ベイズ確率を用いて更新していく必要がある。

4 章の参考文献

- 1) 水谷 守ほか：地震リスクマネジメント(SRM)手法による地震対策の定量評価（その１）～（その３），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.99-104, 1996
- 2) M. Mizutani : Basic Methodology of Seismic Risk Management (SRM) Procedure, International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), pp.1581-1588, 1998
- 3) 平川 倫生, 神田 順：終局限界状態以前に発生する破壊時費用の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.69-70, 1997
- 4) 神田 順(代表)：損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用地震荷重，東京大学建築学専攻神田研究室，1998
- 5) Federal Emergency Management Agency(FEMA)：HAZUS99 Technical Manual, 1999
- 6) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針，1991
- 7) 伊藤 学, 亀田 弘行 訳：土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，1977
- 8) 諏訪 仁, 関 松太郎：兵庫県南部地震の補修費用に関する統計的評価，構造工学論文集，Vol.50B, pp.269-276, 2004

5章 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建物の補修期間の評価法

5.1 序

地震時に建物被害が生じると、建物や什器などの直接被害に加えて、代替施設の確保ができない限り、事業中断による間接被害が生じる。建物の用途によっては、直接被害よりも間接被害が大きくなる可能性もあり、建物の補修費用のみならず補修期間が地震リスクを評価するうえで重要となる。最近では、大地震が発生したときでも、企業などに対して事業の継続性が求められており、予め特定された重要業務については、事業継続計画を策定する際に目標復旧時間および目標復旧レベルの設定が必要になっている^{1)~4)}。重要業務の目標復旧時間を決定するときは、建物の補修期間を参照する必要がある。建物の補修期間は、被災度レベル、建物規模、構造形式、建物用途、建物の重要度などに加えて、建設地周辺におけるインフラ施設の復旧、建設会社の対応力など、さまざまな要因により影響を受けると考えられる。従って、建物の補修期間を被災度などの情報を用いて解析的に予測することは難しく、むしろ地震被害データを利用して建物の補修期間を予測する手法が有効となる。文献5)では、兵庫県南部地震で大破した公共建物を対象に、層崩壊した層の解体工事および補修工事の内容、補修工事の期間について述べている。飯場ら⁶⁾は、2004年10月の新潟県中越地震で被災した病院を対象に、機能回復までの時間および建物の完全復旧までの時間について、地震発生後の経過日数と累積人工の関係などを詳細に調査している。HAZUS⁷⁾では、28種類の建物用途に対して被災度別に、建物の物理的な補修期間、資金調達や設計を含んだ建物の復旧期間ならびにビジネス中断期間の係数が設定されているが、延べ床面積や構造形式などの指標と建物の補修期間の関係などについては言及されていない。このように、個別の事例については地震後の補修期間が整理されているが、建物の補修期間の予測法は提案されていない。

5章では、兵庫県南部地震で被災した62棟の建物に対してその補修期間を調査し、3.3.1節で求められた兵庫県南部地震における面的な最大速度分布と建物の補修期間の関係や、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途と補修期間の関係について検討する。また、本研究で用いたデータ以外の異なる地震被害調査による建物の補修期間との相互比較を行い、その適用性を確認する。これらの検討結果に基づき、地震被害データによる建物の補修期間との残差が最小となるように、建物の補修期間の予測法を提案する。さらに、最近建設された建物の延べ床面積と新築期間の関係を調査し、新築期間に対する地震時における補修期間の関係も検討し、HAZUSの手法との相互比較を行う。

5.2 建物の補修期間データ

兵庫県南部地震で被災した62棟の建物（小破44棟、中破14棟、大破4棟）を対象に、建物の補修期間を調査した。ここで、補修期間は、工事着工から竣工までの期間で定義し、工事に着手するまでの期間は含んでいない。ところで、事業継続性の観点からは、被災した後に事業を再開できるまでの復旧時間が重要となる。建物の被災度レベルが低いと、建物用途にもよるが、建物の補修工事が完全に終了しなくても部分的に事業を再開することが可能となる。従って、事業再開までの復旧期間は、建物の補修期間よりも一般的に短くなると考えられる。また、建物の被災度は、日本建築防災協会の被災度判定基準⁸⁾に従い、小破は軽微な被害を含んでおり、大破は取り壊さずに補修を行い再使用した建物を対象にしている。調査建物の所在地としては、神戸市が大多数であり、この他に芦屋市、宝塚市、西宮市などが含まれている。一方、調査建物の構成について、建物階数と被災度の関係を表5.1に、延べ床面積と被災度の関係を表5.2に、構造形式と被災度の関係を表5.3に、建物用途と被災度の関係を表5.4に示す。なお、表5.4において、その他の用途には、店舗、工場、倉庫などの建物が含まれている。これらの表より、調査建物の内訳として、建物階数は6～9階が多く、延べ床面積は5000m²以下が多く、構造形式はRC造建物が多く、建物用途として事務所が多いことがわかる。

表 5.1 建物階数と被災度の関係

	小破	中破	大破
5階以下	20	0	3
6～9階	17	10	0
10階以上	7	4	1
合計	44	14	4

表 5.2 延べ床面積と被災度の関係

	小破	中破	大破
5000m ² 以下	24	5	3
5001～9999m ²	11	5	1
10000m ² 以上	9	4	0
合計	44	14	4

表 5.3 構造形式と被災度の関係

	小破	中破	大破
RC造 (SRC造を含む)	26	13	3
S造	18	1	1
合計	44	14	4

表 5.4 建物用途と被災度の関係

	小破	中破	大破
事務所	23	5	3
集合住宅	5	3	0
店舗	5	4	0
倉庫	5	0	0
工場	1	1	1
その他	5	1	0
合計	44	14	4

5.3 各指標と建物の補修期間の関係

表 5.1～表 5.4 に示した、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途の各指標と建物の補修期間の関係について検討する。

5.3.1 建物階数と補修期間の関係

建物階数と補修期間の関係を、被災度別に図 5.1 に示す。これらの図より、建物階数と補修期間には、明確な関係は存在しないことがわかる。

5.3.2 延べ床面積と補修期間の関係

建物の延べ床面積と補修期間の関係を、被災度別に図 5.2 に示す。なお、小破と中破の一部の建物では、主に実施された工事種類も併せて示している。

小破の建物の補修期間に着目すると、延べ床面積が比較的小さいのに補修期間の長い建物は、躯体工事に加えて仕上げ工事や設備工事が行われ、さらに補修工事よりも業務を優先させている。逆に、延べ床面積が比較的大きいのに補修期間の短い建物は、主として躯体工事が行われ、仕上げ工事や設備工事はあまり実施されていない。中破の建物の補修期間では、柱や耐震壁の補修工事が必要になると、延べ床面積が比較的小さいのに建物の補修期間が長くなることがわかる。

図 5.2 より、延べ床面積と建物の補修期間の関係にはバラツキがあるものの、延べ床面積が増加すると、補修期間は漸増する傾向が見られる。延べ床面積が増加したとき補修期間が頭打ちになる傾向は、建物規模が大きくなれば、それだけ多くの人工を費やして建物を補修したためと推測される。ここで、延べ床面積と建物の補修期間の関係を、(5.1)式を用いて回帰する。

$$T = a \times S^b \quad (5.1)$$

ここに、S：延べ床面積 (m²)

T：建物の補修期間 (日)

a, b：回帰係数

このとき、Tの自然対数 $\ln T$ と地震被害データから求められる建物の補修期間 R の自然対数 $\ln R$ との残差の和 Δ

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (\ln R_i - \ln T_i)^2 \quad (5.2)$$

が、最小となるように回帰係数 a と b を求める。

$$a = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln R_i - b \times \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln S_i \right) \right] \quad (5.3)$$

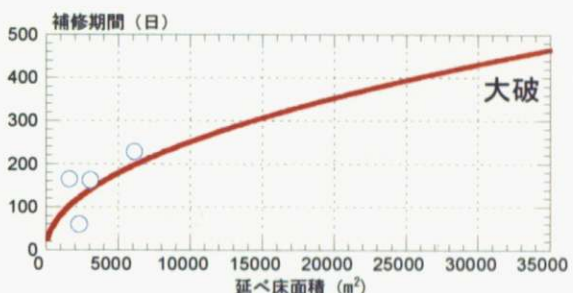
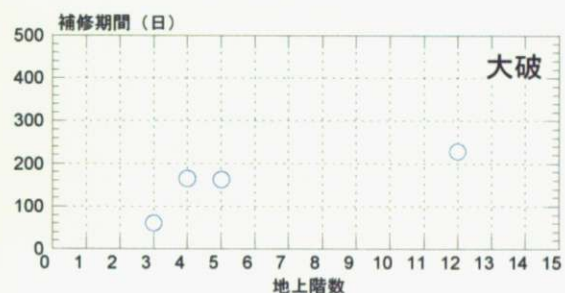
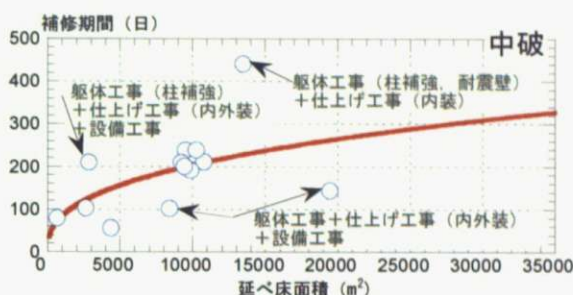
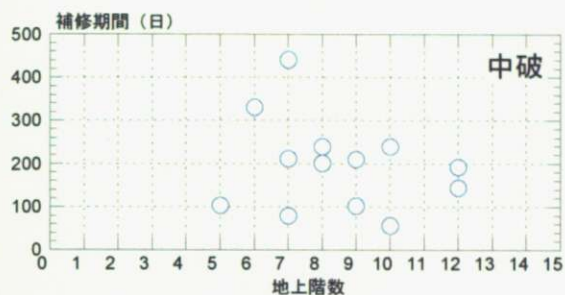
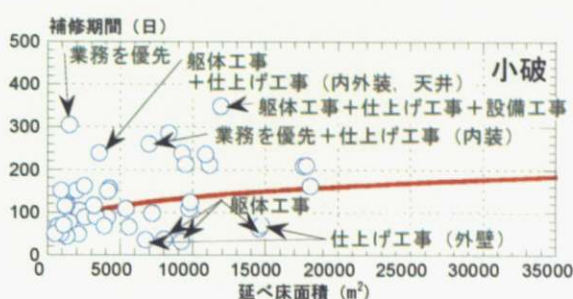
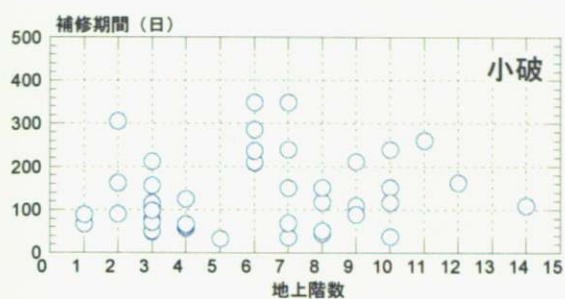


図 5.1 建物階数と補修期間の関係

図 5.2 延べ床面積と補修期間の関係

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \left(\ln S_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln S_j \right) \times \left(\ln R_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln R_j \right) \right\}}{\sum_{i=1}^n \left(\ln S_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \ln S_j \right)^2} \quad (5.4)$$

それぞれの被災度に対して、延べ床面積 S と建物の補修期間 T の回帰式が、(5.5) 式～(5.7) 式のように評価される。

$$\text{小破: } T = 15.2 \times S^{0.24} \quad (5.5)$$

$$\text{中破: } T = 6.2 \times S^{0.38} \quad (5.6)$$

$$\text{大破: } T = 2.8 \times S^{0.49} \quad (5.7)$$

5.3.3 構造形式と補修期間の関係

建物の構造形式を RC 造建物 (SRC 造を含む) と S 造建物に分類したとき、延べ床面積と建物の補修期間の関係を、図 5.3 に示す。

構造形式の相違による建物の補修期間への影響を検討するため、構造形式別に、延

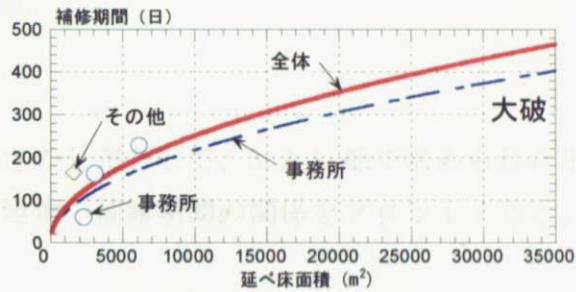
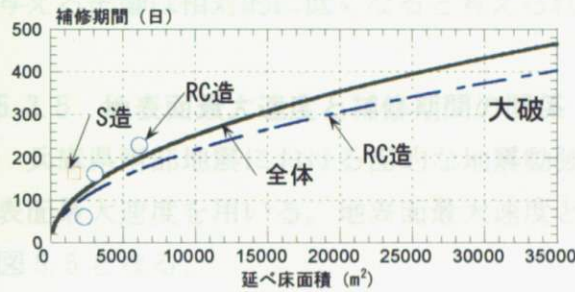
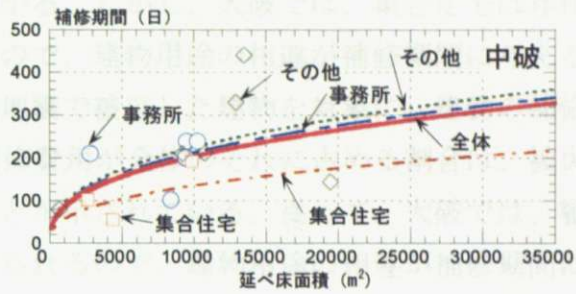
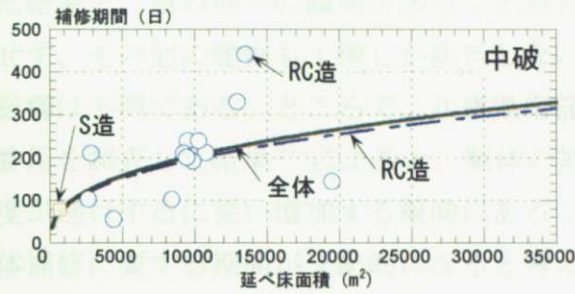
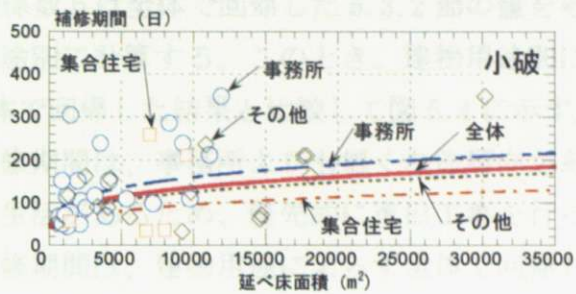
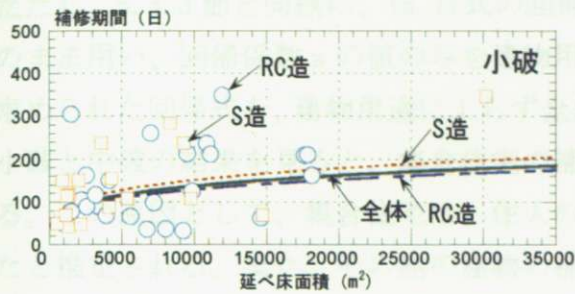


図 5.3 構造形式と補修期間の関係

図 5.4 建物用途と補修期間の関係

べ床面積と建物の補修期間の関係を(5.1)式より回帰する。この際、地震被害データを構造形式別に分類すると、該当するデータ数が少なくなり、統計的不確実性が増加する。このため、延べ床面積の増加による補修期間の増加傾向は、構造形式に拘らず一定であると仮定した。従って、(5.1)式の回帰係数 b は構造形式によらず全体で回帰した 5.3.2 節の値をそのまま用い、回帰係数 a の値のみを構造形式別に計算する。このとき、構造形式別に求められた回帰式を、構造形式によらず全体で回帰した結果と比較して図 3 に示す。小破の結果を見ると、RC 造建物と S 造建物の回帰式には、ほとんど差異は無いことがわかる。中破と大破では、S 造建物は 1 棟しか存在しないが、とくに RC 造建物の回帰式から大きく離れていないことがわかる。以上の結果より、構造形式の相違が、建物の補修期間に与える影響は小さいと考えられる。

5.3.4 建物用途と補修期間の関係

建物用途を事務所、集合住宅ならびにその他の用途に分類したとき、延べ床面積と建物の補修期間の関係を、図 5.4 に示す。

同様に、建物用途別に、延べ床面積と建物の補修期間の関係を(5.1)式より回帰する。

ただし、5.3.3 節と同様に、(5.1) 式の回帰係数 b は全体で回帰した 5.3.2 節の値をそのまま用い、回帰係数 a の値のみを建物用途別に計算する。このとき、建物用途別に求められた回帰式を、建物用途によらず全体で回帰した結果と比較して図 5.4 に示す。小破と中破の結果を見ると、集合住宅の補修期間は、事務所よりも短くなる傾向がある。この原因として、集合住宅は、住人の生活があるため、優先的に復旧工事を行ったと推定される。また、その他の建物の補修期間は、建物用途によらず全体で回帰した結果と、概ね同一の傾向があることがわかる。しかし、大破では、集合住宅は存在せず、その他の建物も 1 棟しか該当しないので、建物用途の相違が補修期間に与える影響は不明である。ところで、兵庫県南部地震で被災した建物を対象に、建物の補修費用を調査した結果⁹⁾によると、躯体の補修費用が全体のそれに占める割合は、被災度が進行するに従い増加する傾向にあることが示されている。従って、大破では、躯体補修に要する期間が支配的になると考えられるので、建物用途の相違が補修期間に与える影響は相対的に低くなると考えられる。

5.3.5 地表面最大速度と補修期間の関係

兵庫県南部地震における面的な地震動強さの分布として、3.3.1 節で求められた地表面最大速度を用いる。地表面最大速度と建物の補修期間の関係をプロットすると、図 5.5 となる。

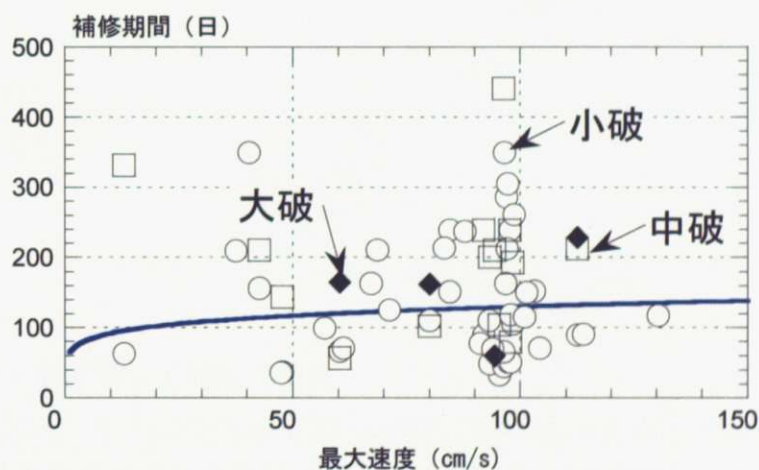


図 5.5 地表面最大速度と建物の補修期間の関係

図 5.5 より、地表面最大速度と建物の補修期間の関係にはバラツキが大きく、地表面最大速度が大きくなるにつれて、建物の補修期間が長くなる傾向は見られない。しかし、地表面最大速度に建物用途などの条件を付加することで、建物の補修期間の予測精度が向上する可能性もある。このため、地表面最大速度が大きくなるにつれて建物の被災度も甚大になり、地表面最大速度と建物の被災度には関連性があると仮定し、

被災度の区別をしないで地表面最大速度 V と建物の補修期間 T の関係を回帰すると、(5.8)式が求められる。

$$T = 64.5 \times V^{0.15} \quad (5.8)$$

ここに、 V ：地表面最大速度 (cm/s)

T ：建物の補修期間 (日)

5.4 異なる地震被害調査による建物の補修期間との比較

5.3 節では、兵庫県南部地震で被災した 62 棟の建物を対象に、延べ床面積と建物の補修期間の関係などについて評価した。このため、5.3 節で求められた関係式の適用性を確認するため、神戸市本庁舎 2 号館と新潟県中越地震で被災した病院の補修期間との相互比較を行う。

(1) 神戸市本庁舎 2 号館の事例⁵⁾

兵庫県南部地震において、神戸市本庁舎 2 号館（SRC 造，地下 1 階・地上 8 階，延べ床面積 23620m²）は大破したため、層崩壊した 6 階部分を含む上層部を撤去し、補修した下層部に S 造を 1 層だけ載せる補修工事が行われた。このとき、上層部の撤去作業と下層部の補修・補強工事を平行して進め、さらに夜間作業も行い約 8 ヶ月で工事を完了させた。この補修工事の事例を、図 5.2 にプロットすると図 5.6 となる。この結果と、回帰式から推定された補修期間を比較すると、神戸市本庁舎 2 号館の補修期間の方が短いことがわかる。この原因として補修工事の平行作業や夜間工事を実施して、できるだけ工期を短縮したことが考えられる。

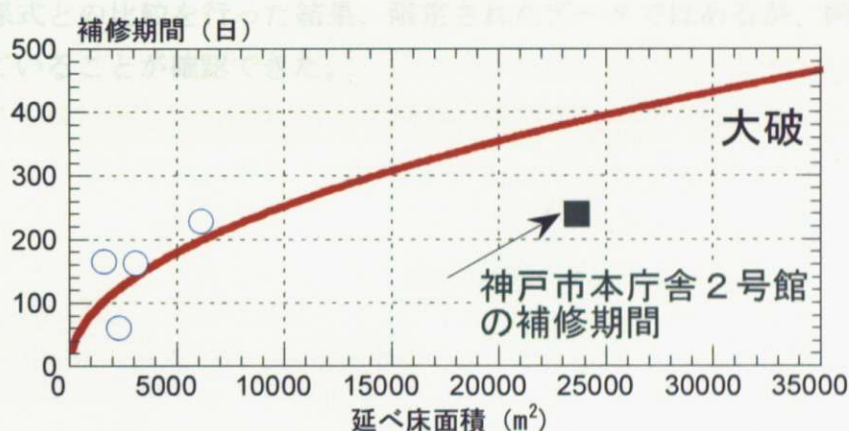


図 5.6 公共建物の補修期間との比較

(2) 新潟県中越地震における病院の事例

飯場ら⁶⁾は、2004 年 10 月の新潟県中越地震で被災した病院を対象に、建物の機能回復の期間や完全復旧するまでの補修期間について詳細に調査している。病院は、5 棟の建物がエキスパンションで結ばれている RC 造建物（1 棟は SRC 造，延べ床面積 20292m²）であり、このうち 1 棟は大破したので解体されているが、残り 4 棟の建物の被災度は概ね軽微であり補修工事が行われている。病院としての機能は、地震発生 16 日後に回復しているが、建物が完全に復旧したのは 159 日後であった。この原因として、躯体の損傷が軽微であっても、給排水や電気・ガスなどの設備系統の調査・補修、医療機器の再調整、内外装の補修工事などが必要となったからである。この事例を、兵庫県南部地震における補修期間データに基づいた回帰式と比較すると、図 5.7 とな

る。この結果は、予測式から推定される補修期間とほぼ一致していることがわかる。

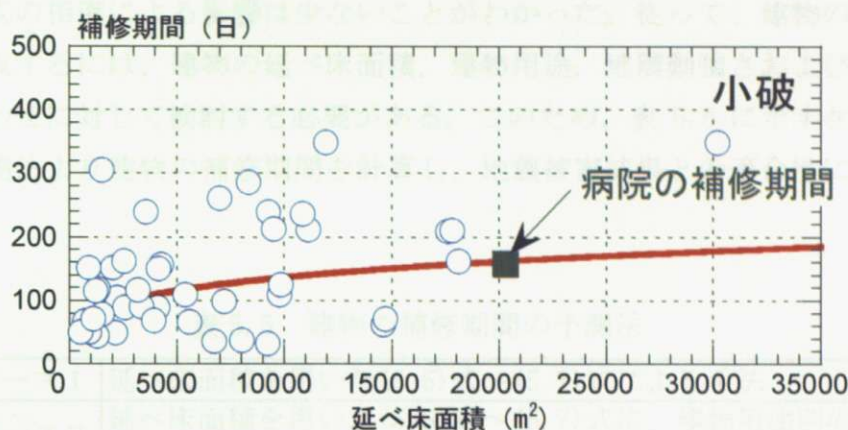


図 5.7 病院の補修期間との比較

神戸市本庁舎 2 号館と新潟県中越地震で被災した病院の事例を対象に、5.3 節で求められた関係式との比較を行った結果、限定されたデータではあるが、両者の関係は概ね対応していることが確認できた。

表 5.6 建物損壊別の補修係数

	事務所	住宅	その他
小破および中破	1.1	0.7	1
大破		1	

ケース 4 では、延べ床面積と地表面最大速度の両者を用いた回帰式を、(5.9) 式で与える。

$$T = a \times S^b \times V^c \quad (5.9)$$

ここに、 S ：延べ床面積 (m^2)

V ：地表面最大速度 (cm/s)

T ：建物の補修期間 (日)

a, b, c ：回帰係数

ここで、地震被害データから回帰係数 $a \sim c$ を直接的に求めようとすると、大破ではデータ数が少ないため、局所的な最適点に収束することがわかった。このため、回帰係数 b の値は (5.5) 式～(5.7) 式で、また回帰係数 c の値は (5.8) 式で与え、回帰係数 a

5.5 建物の補修期間の予測式の検討

5.3 節の検討結果より、建物の補修期間は、建物階数との間に定性的な関係はなく、また構造形式の相違による影響は少ないことがわかった。従って、建物の補修期間の予測式を作成するには、建物の延べ床面積、建物用途、地震動強さおよびこれらの要因の組み合わせに対して検討する必要がある。このため、表 5.5 に示すケース 1～ケース 4 の予測法より建物の補修期間を計算し、地震被害結果との適合性について検討する。

表 5.5 建物の補修期間の予測法

ケース 1	延べ床面積を用いた (5.5) 式～(5.7) 式による手法
ケース 2	延べ床面積を用いた (5.5) 式～(5.7) 式に、建物用途別の補正係数 d (表 5.6 の値) を乗じる手法
ケース 3	地表面最大速度を用いた (5.8) 式による手法
ケース 4	延べ床面積と最大速度を用いた (5.11) 式～(5.13) 式に、建物用途別の補正係数 d (表 5.6 の値) を乗じる手法

ケース 2 およびケース 4 に対する建物用途別の補正係数 d は、5.3.4 節の結果を踏まえ、小破と中破は表 5.6 に示すように建物用途に応じて補正係数を与え、大破は該当建物数が少ないため補正係数を 1.0 に設定した。

表 5.6 建物用途別の補正係数 d

	事務所	集合住宅	その他
小破および中破	1.1	0.7	1
大破	1		

ケース 4 では、延べ床面積と地表面最大速度の両者を用いた回帰式を、(5.9) 式で与える。

$$T = a \times S^b \times V^c \quad (5.9)$$

ここに、S : 延べ床面積 (m²)

V : 地表面最大速度 (cm/s)

T : 建物の補修期間 (日)

a, b, c : 回帰係数

ここで、地震被害データから回帰係数 a～c を直接的に求めようとすると、大破ではデータ数が少ないため、局所的な最適点に収束することがわかった。このため、回帰係数 b の値は (5.5) 式～(5.7) 式で、また回帰係数 c の値は (5.8) 式で与え、回帰係数 a

の値のみを(5.10)式を用いて計算する。

$$a = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln R_i - b \times \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln S_i \right) - c \times \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln V_i \right) \right] \quad (5.10)$$

このとき、それぞれの被災度に対して、建物の補修期間の予測式が(5.11)式～(5.13)式のように求められる。

$$\text{小破} : T = 7.8 \times S^{0.24} \times V^{0.15} \quad (5.11)$$

$$\text{中破} : T = 3.2 \times S^{0.38} \times V^{0.15} \quad (5.12)$$

$$\text{大破} : T = 1.4 \times S^{0.49} \times V^{0.15} \quad (5.13)$$

ケース1～ケース4の適合性を検討するため、各建物の残差 Δ_i ($i = 1 \sim n$)を合計して残差平方和Eを計算する。

$$\text{ケース1} \sim \text{ケース3} : E = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} \quad (5.14)$$

$$\text{ケース4} : E = \sqrt{\frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2} \quad (5.15)$$

ケース1～ケース4で計算された残差平方和を、ケース1に対する比率で計算すると表5.7となる。

表5.7 ケース1の残差に対する比率

ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
1	0.982	1.188	0.985

ケース3より、地表面最大速度のみを用いて建物の補修期間を予測すると、残差平方和が大きくなる。一方、ケース2とケース4を比較すると、延べ床面積に地表面最大速度を併用して建物の補修期間を予測しても、残差平方和はほとんど改善されないことがわかる。従って、ケース1～ケース4の中では、ケース2の建物用途ごとに延べ床面積を用いて建物の補修期間を予測する手法が、補修期間との整合性が良いと考えられる。従って、事務所と集合住宅を対象とした補修期間の予測式は、小破と中破に対して(5.16)式～(5.19)式となる。

・事務所：

$$\text{小破} : T = 16.7 \times S^{0.24} \quad (5.16)$$

$$\text{中破} : T = 6.8 \times S^{0.38} \quad (5.17)$$

・集合住宅：

$$\text{小破} : T = 10.6 \times S^{0.24} \quad (5.18)$$

$$\text{中破} : T = 4.3 \times S^{0.38} \quad (5.19)$$

ところで、図 5.2 の延べ床面積と補修期間の関係を見ると、回帰式まわりのバラツキが大きく、建物の補修期間の標準偏差を計算するとき、このバラツキを適切に考慮する必要がある。このため、延べ床面積と補修期間の関係式である(5.5)式～(5.7)式まわりの残差平方和を(5.2)式から計算し、残差平方和が延べ床面積によらず一定であると仮定して、建物の補修期間の平均値に対する変動係数を計算すると表 5.8 となる。

表 5.8 回帰式まわりの変動係数 V_u

	小破	中破	大破
補修期間の残差平方和 (日)	82.5	89.8	67.3
補修期間の平均値 (日)	137.6	102.1	153.8
回帰式まわりの変動係数	0.60	0.88	0.44

被災度により回帰式まわりの変動係数 V_u は異なるが、建物数による統計的不確定性の影響をできるだけ低減するため、全ての被災度に対して、当該建物数が多い小破の値 0.6 を用いる。従って、回帰式まわりの変動係数 V_u を考慮した、建物の補修期間の変動係数 V_A は(5.20)式より求められる。

$$V_A = \sqrt{\left\{ \frac{\sigma_T}{\mu_T} \right\}^2 + V_u^2} \quad (5.20)$$

ここに、 V_u : 回帰式まわりの変動係数で、 $V_u=0.6$ を設定

μ_T : 建物の補修期間の平均値

σ_T : 建物の補修期間の標準偏差

5.6 新築期間に対する建物の補修期間の関係

建物の新築期間に対する地震時における補修期間の関係について調査するため、最近建設された建物の新築期間を調査した。調査した建物数は31棟であり、地下室の有無、構造形式、建物用途、階数別に整理すると、表5.9～表5.12となる。

表 5.9 地下の有無

地下無し	地下有り
16 棟	15 棟

表 5.10 構造形式

RC 造 (SRC 造を含む)	S 造
21 棟	10 棟

表 5.11 建物用途

事務所	集合住宅
14 棟	17 棟

表 5.12 建物階数

5 階以下	6 ～ 9 階	10 ～ 15 階
9 棟	10 棟	12 棟

このとき、建物用途ごとの延べ床面積と新築期間の関係は図 5.8 となり、延べ床面積 S と新築期間 T の回帰式は(5.21)式～(5.23)式となる。

$$\cdot \text{全体} : T = 50.9 \times S^{0.25} \quad (5.21)$$

$$\cdot \text{事務所} : T = 47.1 \times S^{0.24} \quad (5.22)$$

$$\cdot \text{集合住宅} : T = 68.2 \times S^{0.22} \quad (5.23)$$

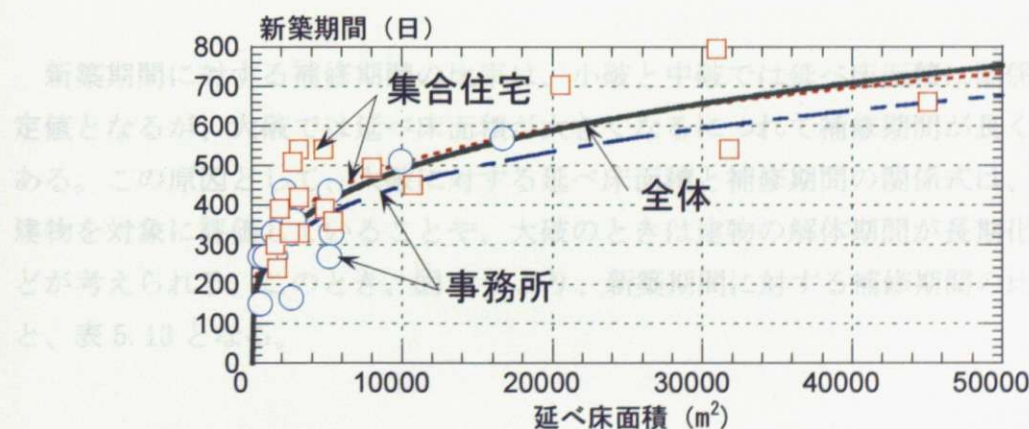
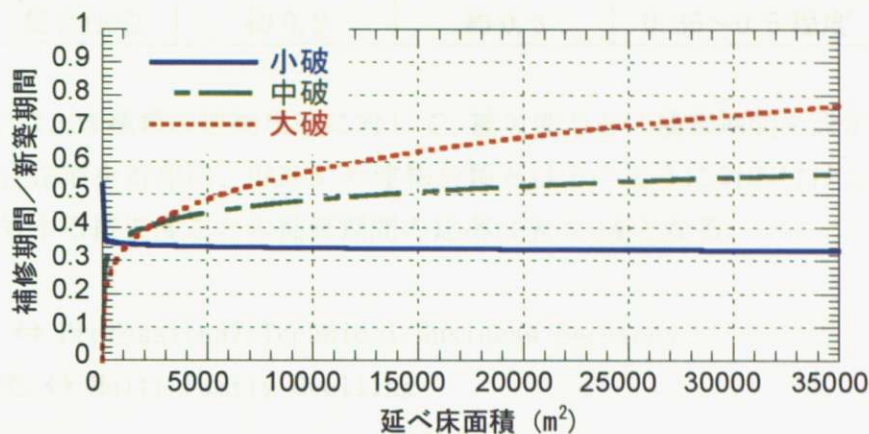
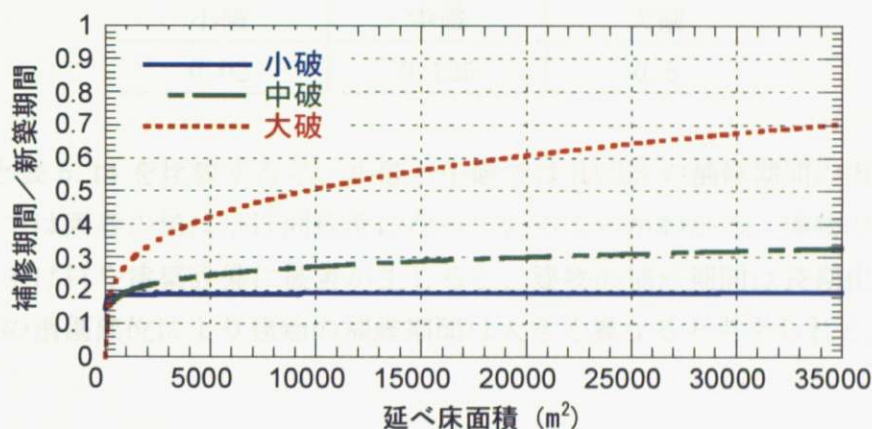


図 5.8 延べ床面積と新築期間の関係

延べ床面積と補修期間の関係式および延べ床面積と新築期間の関係式の両者を用いて、事務所と集合住宅を対象に、新築期間に対する補修期間の比率を計算すると図 5.9 が得られる。



(a) 事務所



(b) 集合住宅

図 5.9 新築期間に対する補修期間の比率

新築期間に対する補修期間の比率は、小破と中破では延べ床面積に関係なくほぼ一定値となるが、大破では延べ床面積が大きくなるにつれて補修期間が長くなる傾向がある。この原因として、大破に対する延べ床面積と補修期間の関係式は、4 棟のみの建物を対象に評価していることや、大破のときは建物の解体期間が長期化することなどが考えられる。このとき、図 5.9 より、新築期間に対する補修期間の比率を求めると、表 5.13 となる。

表 5.13 新築期間に対する補修期間の比率

	小破	中破	大破
事務所	約 0.3	約 0.4	0.4～0.6 程度
集合住宅	約 0.2	約 0.3	0.35～0.5 程度

HAZUS⁷⁾では、28 種類の建物用途に対して、被災度ごとに補修期間を設定している。事務所と集合住宅を対象に、HAZUS の建物分類と以下のように対応付けると、倒壊の補修期間に対する被災度ごとの補修期間の比率は表 5.14 となる。

- ・事務所 ⇔ Professional/Technical/Business Services
- ・集合住宅 ⇔ Multi Family Dwelling

表 5.14 倒壊の補修期間に対する被災度ごとの補修期間の比率⁷⁾

小破	中破	大破
0.02	0.125	0.5

表 5.13 と表 5.14 を比較すると、小破と中破では HAZUS の補修期間の方がかなり短い。大破では両者の値はほぼ同程度になっていることがわかる。建物の被災度が小破でも、仕上げ材や建築設備に被害が生じると、建物の補修期間は長期化する傾向があり、建物の損傷部位により建物の補修期間は大きく異なると考えられる。

5.7 まとめ

地震時における建物の補修期間は、建物の被災度レベル、建物規模、構造形式、建物用途、建物の重要度などに加えて、建設地周辺におけるインフラ施設の復旧、建設会社の対応能力など、さまざまな要因により影響を受けると考えられる。従って、建物の補修期間を被災度などの情報を用いて解析的に予測することは難しく、むしろ地震被害データを利用して建物の補修期間を予測する手法が有効となる。

このため、兵庫県南部地震で被災した 62 棟の建物を対象に建物の補修期間を調査し、まず、兵庫県南部地震における地表面最大速度と建物の補修期間の関係を評価した。しかし、地表面最大速度と補修期間の関係はバラツキが大きく、地表面最大速度のみの指標を用いて建物補修期間を予測することは難しい。つぎに、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途と補修期間の関係について検討した。建物階数と補修期間には、明確な関係は見られない。延べ床面積と補修期間の関係は、バラツキがあるものの新築建物の施工期間と同様に、延べ床面積が大きくなるに従い補修期間も漸増する傾向がある。延べ床面積と補修期間の関係にバラツキが見られる原因として、同一の被災度でも建物の破壊形式が異なることや、補修工事よりも業務を優先させた事例があることなど、が考えられる。また、構造形式の相違による補修期間の差異は少ない。一方、事務所の補修期間は、集合住宅よりも長くなる傾向があり、住人の生活を考慮して優先的に復旧工事を行ったと考えられる。以上の検討結果をもとに、建物用途（事務所、集合住宅ならびにその他）別に、延べ床面積を用いて建物の補修期間を予測すると、地震被害データと回帰式との残差が小さくなることを示した。このとき、地震被害データから得られる建物の補修期間のバラツキが比較的大きいので、予測式まわりの残差を考慮して補修期間の変動係数を設定する。

ところで、本研究で用いた地震データ以外の建物の補修期間との比較を行うと、兵庫県南部地震で大破した神戸市本庁舎 2 号館の事例では補修期間をやや長く評価するものの、新潟県中越地震において軽微の被害を受けた病院の事例では補修期間をほぼ正確に予測できることを確認した。

さらに、最近建設された建物の延べ床面積と新築期間の関係を調査し、新築期間に対する地震時における補修期間の関係について検討した。この結果、新築期間に対する補修期間の比率は、事務所では、小破で約 0.3，中破で約 0.4，大破で 0.4～0.6 程度、また集合住宅では、小破で約 0.2，中破で約 0.3，大破で 0.35～0.5 程度であることを示した。

建物の補修期間を予測するとき、地表面最大速度、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途別に補修期間との関係について評価した。今後は、地表面最大速度、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途の各指標と補修期間の関係を、重回帰分析により検討する必要がある。また、地震時における建物の補修期間は、建物の重要度、

建設地周辺におけるインフラ施設の復旧状態など、5章で考慮した要因以外にも影響を受けると考えられる。今後、建物の補修期間を予測するときは、これらの要因を組み込み、評価モデルをさらに改良していく必要がある。

5章の参考文献

- 1) 内閣府（防災担当）：事業継続ガイドライン 第一版，2005
- 2) SEMI 日本地区BCM研究会：事業継続マネジメント入門－自然災害や事故に備える製造業のためのリスクマネジメント－，共立出版，2005
- 3) 川合 廣樹：企業の事業継続性と地震リスク，震災予防，No. 201，2005
- 4) 小林 誠 監修：事業継続マネジメント（BCM）構築の実際，日本規格協会，2006
- 5) 日経アーキテクチュア：現場報告・神戸市本庁舎2号館（崩壊した中間層より上を撤去、既存建物にS造を1層重ねる），pp. 156-161，1996
- 6) 飯場 正紀，福山 洋，斎藤 大樹，向井 智久，鶏田 隆，溜 正俊，太田 俊也，福島 順一，小山 実，長島 一郎：平成16年新潟県中越地震における小千谷総合病院の地震応答に関する調査報告書，建築研究資料No. 105，独立行政法人 建築研究所，2007
- 7) Federal Emergency Management Agency (FEMA)：HAZUS Technical Manual，1999
- 8) 諏訪 仁，神田 順：兵庫県南部地震の被害データを用いた建物補修期間の統計的検討，構造工学論文集，Vol. 53B，pp. 311-316，2007
- 9) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針，1991
- 10) 諏訪 仁，関 松太郎：兵庫県南部地震の補修費用に関する統計的評価，構造工学論文集，Vol. 50B，pp. 269-276，2004

6章 建物の地震リスク評価法

6.1 序

建物の地震リスクは、建設地の地震ハザード評価と建物の地震損失評価の両者に基づき評価される。地震ハザード解析を行うときの震源および地震活動度のモデルとして、全国を対象とした確率論的地震動予測地図¹⁾や建築物荷重指針(2004年版)²⁾による手法などが既に提案されている。全国を対象とした確率論的地震動予測地図では、主要98断層帯に発生する固有地震、海溝型地震、その他の地震(長期評価の対象となっていない地震)に分類してモデル化している。このとき、地震の発生確率は、平均発生間隔や最新発生時期がわかる地震については更新過程あるいは時間予測モデルに基づきBPT分布を用いて評価し、平均発生間隔や最新発生時期が不明な地震についてはポアソン過程でモデル化している。建築物荷重指針(2004年版)では、考慮する地震を、大規模な地震が発生するプレート境界地震、活断層と、これら以外の背景地震でモデル化している。このとき、プレート境界地震と活断層は固有地震モデルで設定し、背景地震は地震規模の分布がGutenberg-Richter式に基づくb値モデルで設定している。ただし、地震発生はポアソン過程でモデル化している。一方、吉田ら^{3), 4)}は、全国に散在した複数建物を対象に地震リスクを評価するため、確率論的地震ハザード曲線を模擬できるように、全国を対象とした地震データセットを作成している。このように、地震ハザード解析を行うときの震源および地震活動度のモデルは、さまざまな形で既に提案されている。

地震に対する建設地の地震動特性は、震源特性、伝播特性、地盤特性の重ね合わせにより決定される。地震ハザード解析を行うとき、建設地の地震動強さは、距離減衰式を用いて計算されることが多く、最大加速度や最大速度などの地震動指標と年超過確率の関係が出力される。しかし、建物の地震損傷度曲線を評価するには、地震波に対する建物応答が必要となるが、最大加速度や最大速度などの地震動指標の情報だけでは建物応答を評価することはできない。このため、石田ら⁵⁾は、地震環境や地盤増幅を考慮して地表における応答スペクトルを確率論的に評価する手法を示し、地表の一樣ハザードスペクトルを入力として等価線形化法に基づいた応答スペクトル法により建物の地震リスク評価法を提案している。高橋⁶⁾は、時刻歴解析を伴わない簡易なシミュレーションモデルによる地震リスク評価法を提案し、その適用例を示している。一例として、国土数値情報に基づき表層地盤の影響を考慮できる距離減衰式を用いて、応答スペクトルを作成している。また、高橋ら⁷⁾は、地震リスクを評価する際の地震波として、震源パラメータや断層破壊面のサイズを与えて地震基盤面における地震波を統計的グリーン関数法により生成し、表層地盤モデルに入力して地表面の地震波を作成している。神田ら⁸⁾は、あらかじめ指定した超過確率に対応する波を断層モデルによる予測地震動から選択し、これらの地震波を震源域やマグニチュードで分類し、共通の特性を有しているかどうかの分析を行い、各分類ご

とに共通の特性を有する模擬地震動を作成する方法を提案している。このように、既往研究では、応答スペクトルや一様ハザードスペクトルを用いて建物応答を評価する手法や、断層モデルを用いて超過確率に対応する地震波を作成する手法などが提案されている。応答スペクトルを用いる手法では、多質点系の特定層への変形集中が十分に表現できず、層崩壊が起きるケースでは地震損失の評価精度が低下するなどの問題点がある。断層モデルを用いる手法では、現状では断層パラメータを特定できる地震は限定されていることや、断層パラメータの推定幅などが今後の検討課題となっている。

つぎに、建物の地震損失は、建物の地震損傷度曲線を用いて計算される損傷確率と建物の補修費用の積に基づき評価される。従って、建物の損傷クライテリアならびに補修費用の設定は、地震リスクを評価するうえで重要なパラメータとなる。高橋⁶⁾は、応答スペクトルを用いて限界耐力計算法により建物の地震応答予測を行い、応答値を fragility 曲線および機能復旧曲線に適用して地震リスクを評価している。高橋ら⁷⁾は、統計的グリーン関数法から作成された地震波に対して建物の応答値を求め、構造部材、変形依存型非構造部材（仕上げなど）、加速度依存型非構造部材（設備など）に対して、HAZUS⁹⁾の損傷クライテリアを参考に地震損傷度曲線を作成している。このように、建物の損傷クライテリアや補修費用の設定では HAZUS の手法が参考にされるケースが多いが、その設定根拠などについては十分に検討されていないのが現状である。

また、建物の地震リスクを表現する指標として、一般的に、年損失期待値、地震予想最大損失率(PML)、地震ライフサイクルコストなどが用いられている。篠塚ら¹⁰⁾は、損失の年超過確率関数を用いて評価期間N年間の極値分布を定式化し、地震予想最大損失率(PML)を極値分布の平均値で与えることを提案している。村地ら¹¹⁾は、地震リスクの指標として PML を設定し、PML の算出に必要な地震活動情報、距離減衰式、地盤情報、建物被害モデルなどの入力データに関して最新の情報を与え、PML 分析プログラムを作成している。坪田ら¹²⁾は、高橋による地震ライフサイクルコストの簡易分析手法⁶⁾に基づき、その実用化プログラムの開発を行っている。

6章では、兵庫県南部地震における地震被害データを用いて2章～5章で得られた成果に基づき、建物の地震リスク評価法を構築する。地震ハザード解析を行なうときの震源ならびに地震活動度のモデルとして、全国を対象とした地震データセット^{3), 4)}を採用する。地震に対する基準地盤での最大速度は、司・翠川の速度距離減衰式¹³⁾を用いて計算し、基準地盤に対する地表の速度増幅率は国土数値情報を用いた手法¹⁴⁾から計算する。このとき、震源特性、伝播特性、地盤特性の影響を簡易的に評価するため、建築物荷重指針(1993年版)¹⁵⁾で提案されている地表面の加速度応答スペクトルを設定し、このスペクトルを目標に複数の地震波を作成した。つぎに、多数の地震波に対して地震応答解析を行い、2章で求められた RC 造建物を対象とした損傷クライテリアに基づき、各層の地震損傷度曲線を作成する。4章で求められた建物の補修費用を用いて、

地震損傷度曲線から計算される損傷確率に補修費用を乗じて建物の地震損失曲線进行评估する。さらに、5章で求められた建物の補修期間を設定し、建物の地震補修期間曲線を提案する。これらの結果に基づき、建物の地震リスク曲線ならびに建物の地震補修期間リスク曲線进行评估する。最後に、RC造10階の建物を設定して地震リスクの評価例を示す。

6.2 建設地の地震ハザード評価法

6.2.1 震源および地震活動度のモデル化

震源および地震活動度のモデルとして、吉田らの地震データセット^{3), 4)}を用いる。震源モデルとして、図6.1のプレート境界、図6.2の内陸の活断層および背景震源の3タイプを設定する。プレート境界は、太平洋プレートの沈み込み、フィリピン海プレートの相模トラフでの潜り込み、南海トラフでの潜り込み、日向灘域の潜り込みを3次元曲面でモデル化した。内陸の活断層は、主要な活断層帯とこれ以外の松田の起震断層¹⁶⁾を線状の震源としてモデル化した。背景震源は、プレート境界および内陸の活断層以外の地震発生を考慮するためのもので、萩原の地震地帯構造区分¹⁷⁾に基づき、深さ10kmの平面的な震源領域としてモデル化した。震源の地震活動度は、表6.1～表6.3に示すように、Gutenberg-Richter式に基づくb値モデル¹⁸⁾と固有地震モデルを用いて評価した。プレート境界震源に用いる歴史地震データとして、マグニチュードが5以上の地震を対象とし、内陸の活断層震源は断層線近傍のマグニチュード4以上の地震を対象にした。内陸地震で活断層に対応付けられない地震は、背景震源で考慮した。地震の発生頻度はそれぞれの震源の地震活動度に応じて算定し、地震のマグニチュードは、6以下で0.5刻み、6～7で0.2刻み、7以上で0.1刻みで定義し、マグニチュードが大きくなるに従って小さい刻みで与えるようにした。一方、地震の配置は、震源領域に設定した20km間隔のグリッド上に、地震を均等に配置した。

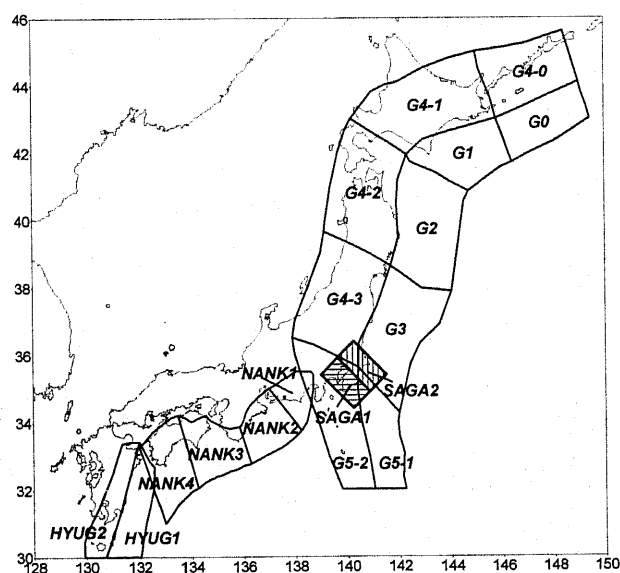


図 6.1 プレート境界震源モデル³⁾

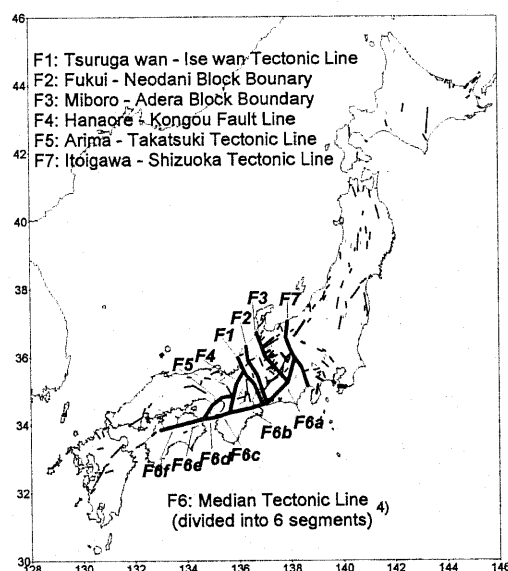


図 6.2 内陸の活断層モデル³⁾

表 6.1 プレート境界震源の b 値³⁾

領域	GR モデル				領域	GR モデル			
	b 値	Mmin	Mmax	発生率		b 値	Mmin	Mmax	発生率
G0	0.89	5.0	8.1	0.0170	G5-1	1.01	5.0	7.5	0.0018
G1	0.89		8.2	0.0121	G5-2	1.37		6.4	0.0018
G2	0.85		8.5	0.0223	NANK1	0.95		7.0	0.0030
G3	0.88		8.0	0.0176	NANK2	0.76			0.0079
G4-0	0.79		8.1	0.0030	NANK3	0.79			0.0020
G4-1	0.92		7.8	0.0023	NANK4	1.13			0.0010
G4-2	1.20		7.0	0.0019	HYUG1	0.997		7.6	0.0136
G4-3	1.25		7.2	0.0020	HYUG2	1.085		7.6	0.0028

表 6.2 プレート境界震源のパラメータ³⁾

領域	固有地震モデル		
	Mmin	Mmax	発生率
SAGA1-A	7.1	8.1	0.01
SAGA1-B	6.0	7.0	0.1
SAGA2	6.0	7.0	0.2
NANK1-4	7.1	8.4	0.02

表 6.3 活断層のパラメータ³⁾

領域	GR モデル				領域	固有地震モデル		
	b-value	Mmin	Mmax	Freq1		Mmin	Mmax	Freq2
F1	0.93	4.0	7.6	0.0438	F1	7.7	8.1	0.0033
F2	1.15		7.7	0.0270	F2	7.8	8.2	0.0033
F3	0.97		7.7	0.0241	F3	7.8	8.2	0.0040
F4	0.84		7.4	0.0302	F4	7.5	7.9	0.0033
F5	0.82		7.4	0.0366	F5	7.5	7.9	0.0007
F6a	0.83		7.4	0.0198	F6a	7.5	7.9	0.0040
F6b	0.91		7.4	0.0109	F6b	7.5	7.9	0.0002
F6c	1.20		7.2	0.0742	F6c	7.3	7.7	0.0040
F6d	0.89		7.0	0.0203	F6d	7.1	7.5	0.0040
F6e	1.18		7.4	0.0338	F6e	7.5	7.9	0.0040
F6f	0.89		6.9	0.0104	F6f	7.0	7.4	0.0040
F7	0.67		7.3	0.0178	F7	7.4	7.8	0.0067

6.2.2 地表面最大速度の評価法

地震に対する基準地盤（S 波速度 600m/s 相当）における最大速度 V_0 を、司・翠川の速度距離減衰式¹³⁾を用いて計算する。

$$\log_{10} V_0 = 0.58M_w + 0.0038D + d - 1.29 - \log_{10} \left(X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w} \right) - 0.002X \quad (6.1)$$

ここに、X：断層最短距離(km)

M_w：モーメントマグニチュード

d：地震のタイプ別係数

D：震源深さ(km)

表層地盤による速度増幅を微地形分類に基づいた手法¹⁴⁾により計算し、基準地盤の最大速度V₀に速度増幅率aを乗じて地表面最大速度を評価する。

$$\log_{10} a = 1.83 - 0.66 \log_{10} AVS \pm 0.16 \quad (6.2)$$

ここに、a：基準地盤に対する速度増幅率

AVS：地表から地下30mまでの平均S波速度

(6.2)式において、地表から地下30mまでの平均S波速度AVSは(6.3)式より求める¹⁴⁾。

$$\log_{10} AVS = a + b \log_{10} H + c \log_{10} D \pm \sigma \quad (6.3)$$

ここに、a, b, c：微地形分類から決まる係数

H：標高(m)

D：主要河川からの距離(km)

このとき、地表面最大速度を計算する際の不確定要因として、震源特性、伝播特性、地盤特性がある。距離減衰式に関する既往研究では、各要因のバラツキを以下のように分類している¹⁾。

- ・震源特性の対数標準偏差： $\zeta_e = 0.37 \sim 0.46$ 程度
- ・伝播特性の対数標準偏差： $\zeta_t = 0.23 \sim 0.46$ 程度
- ・地盤特性の対数標準偏差： $\zeta_a = 0.46$ 程度

これらの不確定要因によるバラツキを対数正規分布でモデル化し、それぞれの不確定要因によるバラツキが互いに独立であると仮定すると、地表面最大速度の対数標準偏差 ζ_v は(6.4)式から求められる。

$$\zeta_v = \sqrt{\zeta_e^2 + \zeta_t^2 + \zeta_a^2} \quad (6.4)$$

基準地盤において最大速度を評価する際のバラツキは、奥村らの研究¹⁹⁾を参考に、対数標準偏差で0.46を設定する。この値には、震源特性と伝播特性のバラツキが含まれているので、震源特性の対数標準偏差を $\zeta_e = 0.4$ と仮定し、伝播特性の対数標準偏差 ζ_t を(6.5)式から求める。

$$\zeta_t = \sqrt{0.46^2 - 0.4^2} \approx 0.23 \quad (6.5)$$

また、バラツキの速度振幅依存性は、翠川らの研究²⁰⁾に基づき、基準地盤における最大速度 PGV_0 が 25cm/s 以上の領域は、最大速度の値に応じて表 6.4 を設定する¹⁾。

表 6.4 速度振幅による対数標準偏差の設定

基準地盤における最大速度 V_0	対数標準偏差
$V_0 < 25$	0.46
$25 < V_0 < 50$	$-0.0046 \times V_0 + 0.575$
$50 < V_0$	0.345

一方、2003 年の十勝沖地震の本震と余震を対象に、サイト特性の評価と地点ごとのバラツキの評価、サイト特性を除去した後に残るバラツキ評価の検討結果¹⁾によると、微地形分類に基づいた手法で増幅率を評価する際のバラツキは、対数標準偏差で約 0.44 となっている。以上により、震源特性、伝播特性、地盤特性の対数標準偏差を、表 6.5 で設定する。

表 6.5 対数標準偏差の設定

震源特性 ζ_e	伝播特性 ζ_t	地盤特性 ζ_a
0.4	0.23	0.4

6.2.3 地表面における地震動の作成

地震動の作成方法として、設定した応答スペクトルに適合するように地震動を作成する方法や、経験的方法、半経験的方法、理論的方法、広帯域ハイブリッド法など想定地震に基づく地震動の作成方法に分類される²⁾。このうち、どの作成手法を選択するかは、入手できる情報の質と量の制限や、地震動の評価対象周期などの条件により決定される。想定地震に基づく手法では、現状では断層パラメータを特定できる地震は限定されていることや、断層パラメータの推定幅などが今後の検討課題となっている。このため、設定した応答スペクトルに適合する地震動を、以下の条件で作成する。

(1) 目標スペクトルの設定

建築物荷重指針(1993 年版)¹⁵⁾では、震源特性、伝播特性、地盤特性などの影響を簡易的に包含した地表面の加速度応答スペクトル $S_A(T, h)$ を提案している。

$$S_A(T, h) = \left(1 + \frac{f_A - 1}{d} \times \frac{T}{T_C}\right) \times F_h \times (G_A \times R_A \times A_0) \quad (0 \leq T \leq d \times T_C) \quad (6.6)$$

$$S_A(T, h) = F_h \times f_A \times (G_A \times R_A \times A_0) \quad (d \times T_C \leq T \leq T_C) \quad (6.7)$$

$$S_A(T, h) = \frac{2\pi \times F_h \times f_v \times (G_v \times R_v \times V_0)}{T} \quad (T_C \leq T) \quad (6.8)$$

ここに、 f_A : $d \times T_C \leq T \leq T_C$ における加速度応答倍率で、 $f_A = 2.5$

f_v : $T_C \leq T$ における速度応答倍率で、 $f_v = 2.0$

d : $S_A(T, h)$ が一定値をとる区間の上限周期に対する下限周期の比で、 $d = 0.5$

T_C : $S_A(T, h)$ が一定値をとる区間の上限周期

F_h : 減衰補正係数 ($h=5\%$ で、 $F_h = 1$)

A_0 : 標準地盤の地震動の最大加速度

V_0 : 標準地盤の地震動の最大速度

G_A : 地震動の最大加速度の地盤種別補正係数

G_v : 地震動の最大速度の地盤種別補正係数

R_A : 地震動の最大加速度の再現期間換算係数

R_v : 地震動の最大速度の再現期間換算係数

ここで、再現期間換算係数 R_A と R_v は、100 年再現期待値に対する r 年再現期待値の補正係数なので、その値を 1 に設定する。また、 $S_A(T, h)$ が一定値をとる区間の上限周期 T_C は、(6.9) 式で与えられる。

$$T_C = \frac{2\pi \times F_h \times f_v \times (G_v \times V_0)}{f_A \times (G_A \times A_0)} \quad (6.9)$$

標準地盤において最大速度に対する最大加速度の比は、 $A_0/V_0 = 15 (\text{sec}^{-1})$ で与えている。また、最大加速度の地盤種別補正係数 G_A は第 2 種地盤および第 3 種地盤に対して 1.2 で与えられ、最大速度の地盤種別補正係数 G_v は (6.2) 式の表層地盤による速度増幅率 ARV に等価とする。以上の条件により、司・翠川の速度距離減衰式を用いて標準地盤の最大速度 PGV_0 が計算されると、地表面の加速度応答スペクトル $S_A(T, h)$ が評価できる。

(2) 地震動の包絡関数の設定

目標の加速度応答スペクトル $S_A(T, h)$ に適合する地震動を作成する。まず、フーリエ位相スペクトルを、一様乱数で与える。そして、設定されたフーリエ振幅とフーリエ位相を用いて、フーリエ逆変換により時刻歴波形を作成する。つぎに、地震のマグニチュードを与えて、地震動の包絡関数 $E(t)$ を大崎の手法²¹⁾により設定する。

$$E(t) = \left(\frac{t}{T_a} \right)^2 \quad (0 \leq t \leq T_a) \quad (6.10)$$

$$E(t) = 1 \quad (T_a \leq t \leq T_b) \quad (6.11)$$

$$E(t) = \exp[-\alpha \times (t - T_b)] \quad (T_b \leq t \leq T_d) \quad (6.12)$$

$$\text{ここに、 } a = \frac{-\ln(0.1)}{T_d - T_b} \quad (6.13)$$

一方、地震動の継続時間 T_d は、久田式で与える。

$$T_d = 10^{(0.31M - 0.774)} \quad (6.14)$$

ここに、 M : 地震のマグニチュード

また、 T_a と T_b は、地震動の継続時間 T_d を用いて (6.15) 式と (6.16) 式で与える。

$$T_a = [0.12 - 0.04(M - 7)] \times T_d \quad (6.15)$$

$$T_b = [0.50 - 0.04(M - 7)] \times T_d \quad (6.16)$$

このとき、時刻歴波形に $E(t)$ を乗じて、第1次の地震動を作成する。このようにして得られた第1次の地震動に対して加速度応答スペクトルを計算し、目標応答スペクトルへ適合するようにフーリエ振幅を補正する。この操作を繰り返して、目標の加速度応答スペクトルに適合する地震動を作成する。

(3) 最大速度と平均マグニチュードの関係

建設地の地震ハザードは地表面最大速度を指標として評価し、また地震動の包絡形状は地震のマグニチュードの関数として与えているため、地表面最大速度と地震のマグニチュードの関係が必要になる。このため、地表面最大速度を V_i ($i=1 \sim k$) に離散化し、地表面最大速度の中央値 \bar{V} が $V_{i-1} \leq \bar{V} \leq V_i$ ($i=1 \sim k$) に該当するとき、地震の平均マグニチュード \bar{M}_i ($i=1 \sim k$) を地震の年平均発生率 ν で重み付け平均して評価する。

$$\bar{M}_i = \frac{\sum_j (\nu_{ji} \times M_{ji})}{\sum_j \nu_{ji}} \quad (6.17)$$

ここで、 M_{ji} と ν_{ji} は、地表面最大速度の中央値 \bar{V} が $V_{i-1} \leq \bar{V} \leq V_i$ ($i=1 \sim k$) に該当するときの地震 j のマグニチュードと年平均発生率である。

6.3 建物の地震リスク評価法

司・翠川の速度距離減衰式¹³⁾から計算される基準地盤における最大速度を V_0 とすると、地表面最大速度 V は、基準地盤における最大速度 V_0 に表層地盤による速度増幅率 a を乗じることで求められる。

$$V = a \times V_0 \quad (6.18)$$

ここに、 V_0 : (6.1) 式の基準地盤における最大速度

a : (6.2) 式の表層地盤による速度増幅率

つぎに、震源特性、伝播特性、地盤特性のバラツキを考慮したとき、地震 E の条件付き地表面最大速度の確率密度関数 $f(v|E)$ を、対数正規分布を用いてモデル化する。

$$f(v|E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_v v} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln v - \lambda_v}{\zeta_v}\right)^2\right] \quad (6.19)$$

ここに、 λ_v : 地表面最大速度の対数平均値

ζ_v : 地表面最大速度の対数標準偏差

このとき、地表面最大速度の対数平均値 λ_v は、(6.18) 式において、(6.1) 式の基準地盤における最大速度 V_0 ならびに (6.2) 式の速度増幅率 a を中央値に設定すると、(6.20) 式より求められる。

$$\lambda_v = \ln(a) + \ln(V_0) \quad (6.20)$$

一方、震源特性、伝播特性、地盤特性のバラツキを考慮したとき、地表面最大速度の対数標準偏差 ζ_v は (6.21) 式より求められる。

$$\zeta_v = \sqrt{\zeta_e^2 + \zeta_i^2 + \zeta_a^2} \quad (6.21)$$

建物を基礎固定の多質点せん断型モデルに置換して、地震動に対する地震応答解析を行い、地表面最大速度 V と応答層間変位 δ の関係を累乗式で回帰する。

$$\delta = d_1 \times V^{d_2} \quad (6.22)$$

ここに、 d_1, d_2 : 回帰係数

また、限界層間変形角の分布を対数正規分布でモデル化し、限界層間変形角の対数平均値と対数標準偏差は、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線を再現した損傷クライテリアに基づいて表 6.6 のように設定する。

$$P(\delta) = \Phi\left(\frac{\ln \delta - \lambda_\delta}{\zeta_\delta}\right) \quad (6.23)$$

ここに、 λ_δ : 限界層間変形角の対数平均値であり、 $\lambda_\delta = \ln(M_\delta)$

ζ_δ : 限界層間変形角の対数標準偏差

表 6.6 限界層間変形角の中央値と対数標準偏差

		中央値 M_δ			対数標準偏差 ζ_δ
		小破	中破	大破	
1970 年以前	3 階	1/41	1/22	1/18	0.18
	7 階	1/51	1/20	1/18	0.55
1982 年以降	3 階	1/46	1/24	1/20	0.38
	7 階	1/41	1/14	1/12	0.70
	10 階	1/53	1/24	1/12	0.79

以上により、地表面最大速度 V を地震動指標としたときの地震損傷度曲線 $P(V)$ が、(6.24)式より求められる。

$$P(V) = \Phi\left(\frac{\ln V - \lambda_R}{\zeta_R}\right) \quad (6.24)$$

$$\text{ここに、} \lambda_R = \frac{1}{d_2} \times (\lambda_\delta - \ln d_1) \quad (6.25)$$

$$\zeta_R = \frac{1}{d_2} \times \zeta_\delta \quad (6.26)$$

損傷モード j ($j=1 \sim m$) に対する損傷確率を $P_{ij}(V)$ 、補修費用の平均値を μ_{cij} とすると、 i 層における損失分布の平均値 $\mu_{ci}(V)$ と標準偏差 $\sigma_{ci}(V)$ は、(6.27)式と(6.28)式より求められる。

$$\mu_{ci}(V) = \sum_{j=1}^m \{ \Delta P_{ij}(V) \times \mu_{cij} \} \quad (6.27)$$

$$\sigma_{ci}(V) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \{ \Delta P_{ij}(V) \times (\mu_{cij} - \mu_{ci}(V))^2 \}} \quad (6.28)$$

$$\text{ここに、} \Delta P_{ij}(V) = P_{ij}(V) - P_{i,j+1}(V) \quad (1 \leq j \leq m-1) \quad (6.29)$$

$$\Delta P_{im}(V) = P_{im}(V) \quad (j = m) \quad (6.30)$$

建物の損失は各層の損失の和となるので、地表面最大速度 V に対する建物の損失分布の平均値 $\mu_c(V)$ と標準偏差 $\sigma_c(V)$ は、各層の損失発生が互いに独立と仮定すると、(6.29)式と(6.30)式より求められる。

$$\mu_c(V) = \sum_{i=1}^n \mu_{ci}(V) \quad (6.31)$$

$$\sigma_c(V) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{ \sigma_{ci}(V) \}^2} \quad (6.32)$$

ここに、 n : 建物の階数

地表面最大速度 V の条件付き損失分布の確率密度関数 $f(c|v)$ は、ベータ分布を用いてモデル化¹⁰⁾する。

$$f(c|v) = \frac{1}{B(q, r)} \times \frac{C^{q-1} \times (C_B - C)^{r-1}}{C_B^{q+r-1}} \quad (6.33)$$

ここに、 C_B : 新築費用

$B(q, r)$: ベータ関数

ここで、ベータ関数 $B(q, r)$ は(6.34)式より計算される。

$$B(q, r) = \frac{\Gamma(q) \times \Gamma(r)}{\Gamma(q+r)} \quad (6.34)$$

ここに、 $\Gamma(\cdot)$: ガンマ関数

(6.33)式において、パラメータ q と r は、(6.31)式の損失分布の平均値 $\mu_c(V)$ と(6.32)式の標準偏差 $\sigma_c(V)$ を用いて求められる。

$$q = \frac{(\mu_c(V) - C_B)}{C_B} \times \left\{ 1 + \frac{\mu_c(V) \times (\mu_c(V) - C_B)}{\sigma_c(V)^2} \right\} \quad (6.35)$$

$$r = -\frac{\mu_c(V)}{C_B} \times \left\{ 1 + \frac{\mu_c(V) \times (\mu_c(V) - C_B)}{\sigma_c(V)^2} \right\} \quad (6.36)$$

このとき、地表面最大速度 V の条件付き損失分布の期待値 $E[C|v]$ は、(6.33)式の地表面最大速度 V の条件付き損失分布の確率密度関数 $f(c|v)$ を用いて求められる。

$$E[C|v] = \int_0^{C_B} \{c \times f(c|v)\} dc \quad (6.37)$$

一方、90%非超過確率に相当する損失 $C_{0.9}$ は、(6.38)式を満足するように $C_{0.9}$ を逆算することにより求められる。

$$\int_0^{C_{0.9}} f(c|v) dc = 0.9 \quad (6.38)$$

地震 E の条件付き損失分布の確率密度関数 $f(c|E)$ は、(6.19)式の地震 E の条件付き地表面最大速度の確率密度関数 $f(v|E)$ で、(6.33)式の地表面最大速度 V の条件付き損失分布の確率密度関数 $f(c|v)$ を重み付け積分することにより求められる。

$$f(c|E) = \int_0^\infty \{f(c|v) \times f(v|E)\} dv \quad (6.39)$$

考慮される全ての地震 E_i ($i = 1 \sim N$) に対して、地震 E の条件付き損失額 c の超過確率 $P(C > c|E)$ は、考慮したいいずれかの地震で損失額 c が超過しても対象となるので、地震 E_i ごとに損失額 c の超過する事象の和事象として評価される。

$$\begin{aligned} P(C > c|E) &= \text{Prob}[(C > c|E_1) \cup (C > c|E_2) \cup \dots \cup (C > c|E_N)] \\ &= 1 - \text{Prob}[\overline{(C > c|E_1) \cup (C > c|E_2) \cup \dots \cup (C > c|E_N)}] \\ &= 1 - \text{Prob}[(C < c|E_1) \cap (C < c|E_2) \cap \dots \cap (C < c|E_N)] \end{aligned} \quad (6.40)$$

ここで、地震 E_i ($i = 1 \sim N$) の発生が互いに独立であると仮定すると、地震 E の条件付き損失額 c の超過確率 $P(C > c|E)$ は、(6.41) 式より求められる。

$$P(C > c|E) = 1 - \prod_{i=1}^N \{1 - \text{Prob}[C > c|E_i]\} \quad (6.41)$$

ここに、 N : 考慮される地震の総数

つぎに、地震発生を定常ポアソン過程でモデル化すると、地震 E_i の年発生確率 $\text{Prob}[E_i]$ は、(6.42) 式より求められる。

$$\text{Prob}[E_i] = 1 - \exp(-\nu_i) \quad (6.42)$$

ここに、 ν_i : 地震 E_i の年平均発生率

以上により、損失額 c の年超過確率 $P(C > c)$ は、(6.41) 式と (6.42) 式を用いて求められる。

$$\begin{aligned} P(C > c) &= 1 - \prod_{i=1}^N [1 - \{\text{Prob}[C > c|E_i] \times \text{Prob}[E_i]\}] \\ &= 1 - \prod_{i=1}^N \left[1 - \left\{ \left(\int_c^{c_B} f(c|E_i) dc \right) \times (1 - \exp(-\nu_i)) \right\} \right] \end{aligned} \quad (6.43)$$

ここで、 $f(c|E_i)$ は地震 E_i の条件付き損失分布の確率密度関数であり、(6.39) 式より求められる。

6.4 地震リスクの評価例

6.4.1 解析条件

(1) 建設地の地震動強さの評価

建設地周辺における地震活動のモデル化として、吉田らの地震データセット³⁾・⁴⁾を用いる。地震に対する基準地盤における最大速度は、司・翠川の速度距離減衰式¹³⁾を用いて計算し、基準地盤に対する最大速度の増幅は、国土数値情報を用いた速度増幅率を用いて評価する。

(2) 入力地震動の設定

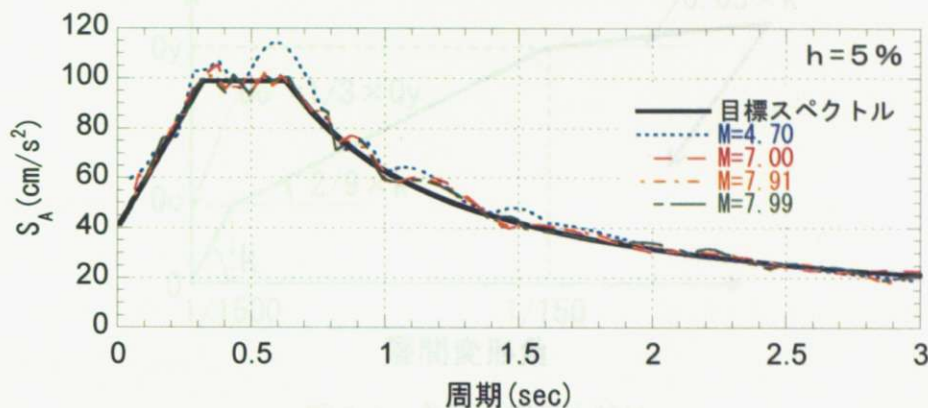
建設地は、東京（緯度：35.678，経度：139.770）に設定する。このとき、基準地盤に対する最大速度の増幅係数は 2.273 となるので、6.2.3 節の手法に従い地表面の加速度応答スペクトル $S_A(T, h)$ が求められる。つぎに、地表面最大速度の中央値と平均マグニチュードの関係を求めると、表 6.7 となる。

表 6.7 地表面最大速度の中央値と平均マグニチュードの関係

地表面最大速度の中央値 \bar{V} (cm/s)	平均マグニチュード \bar{M}
$0 \leq \bar{V} \leq 5$	4.70
$5 \leq \bar{V} \leq 10$	6.31
$10 \leq \bar{V} \leq 15$	6.61
$15 \leq \bar{V} \leq 20$	6.90
$20 \leq \bar{V} \leq 25$	7.00
$25 \leq \bar{V} \leq 30$	7.19
$30 \leq \bar{V} \leq 35$	7.35
$35 \leq \bar{V} \leq 40$	7.70
$40 \leq \bar{V} \leq 45$	7.69
$45 \leq \bar{V} \leq 50$	7.91
$50 \leq \bar{V} \leq 55$	7.89
$55 \leq \bar{V} \leq 60$	7.91
$60 \leq \bar{V} \leq 65$	7.99
$\bar{V} \geq 65$	7.99

このとき、 $S_A(T, h)$ を目標スペクトルに設定し、地表面最大速度の中央値と平均マグニチュードの関係をを用いて、地表面最大速度に応じた模擬地震動を作成する。なお、模擬地震動を作成するときの位相は乱数で与え、乱数の初期値を変化させてそれぞれの地表面最大速度に対して 10 波の模擬地震動を作成する。ここで、目標の加速度応答スペクトルを図 6.2 に、作成された模擬地震動に対する加速度応答スペクトルも図中に併せて示す。図 6.2 より、模擬地震動に対する加速度応答スペクトルは、目標スペクトルにほぼ適合して

いることがわかる。



(4) 階間変形角の設定 図 6.2 目標スペクトルとの比較

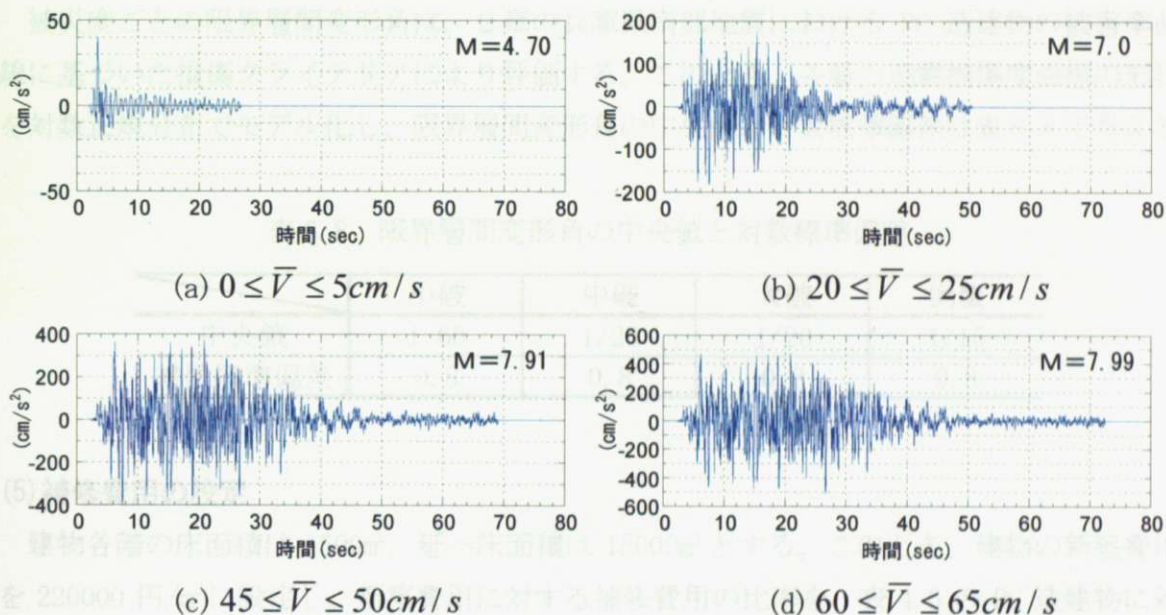


図 6.3 模擬地震動の一例

(3) 建物モデルの設定

建物モデルとして、RC 造 10 階の事務所ビルを設定し、各階の階高は 350cm、建物高さは 35m とする。また、降伏ベースシア係数は 0.3 とし、高さ方向の降伏せん断力係数は A_i 分布で与える。各層の復元力特性は、図 6.4 に示すように、ひび割れ耐力 Q_c を降伏耐力 Q_y の 1/3 に、ひび割れ変形角を 1/1500 に設定し、復元力特性は Takeda モデルで与えた。建物の減衰は、1 次の減衰定数が 3% の剛性比例型で与え、地震応答解析を行う際は瞬間剛性比例型とした。

(5.17) 式および (5.7) 式から計算し、また事務所ビルの耐震等級を 1 級と仮定すると、建物の補修期間が表 6.10 のように評価される。このとき、耐震等級 1 級と仮定し、建物の新築期間を設定する。

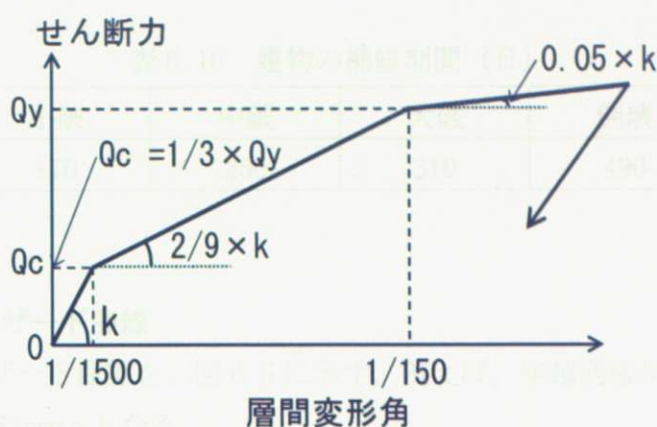


図 6.4 各層の復元力特性

(4) 限界層間変形角の設定

被災度ごとの限界層間変形角は、2章の兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線に基づいた損傷クライテリアにより評価する。このとき、各層の地震損傷度曲線の形状を対数正規分布でモデル化し、限界層間変形角の中央値と対数標準偏差は表 6.8 で与える。

表 6.8 限界層間変形角の中央値と対数標準偏差

	小破	中破	大破	倒壊
中央値	1/60	1/25	1/20	1/15
対数標準偏差	0.8	0.8	0.8	0.8

(5) 補修費用の設定

建物各階の床面積は 1500m²、延べ床面積は 15000m²とする。このとき、建物の新築費用を 220000 円/m²に設定し、新築費用に対する補修費用の比率を、表 4.5 の RC 造建物に対する補修費用の平均値を参考に表 6.9 で与える。ここで、倒壊の補修費用として、建物の新築費用を仮定する。

表 6.9 新築費用に対する補修費用の比率

小破	中破	大破	倒壊
0.1	0.3	0.5	1

(6) 補修期間の設定

建物の延べ床面積が 15000m²なので、事務所ビルの補修期間を被災度ごとに(5.16)式、(5.17)式および(5.7)式から計算し、また事務所ビルの新築期間を(5.22)式から計算すると、建物の補修期間が表 6.10 のように評価される。このとき、倒壊の補修期間として、建物の新築期間を設定する。

表 6.10 建物の補修期間（日）

小破	中破	大破	倒壊
170	250	310	490

6.4.2 評価結果

(1) 建設地の地震ハザード曲線

建設地の地震ハザード曲線を、図 6.5 に示す。例えば、年超過確率が $1/475$ のとき、地表面最大速度は約 72cm/s となる。

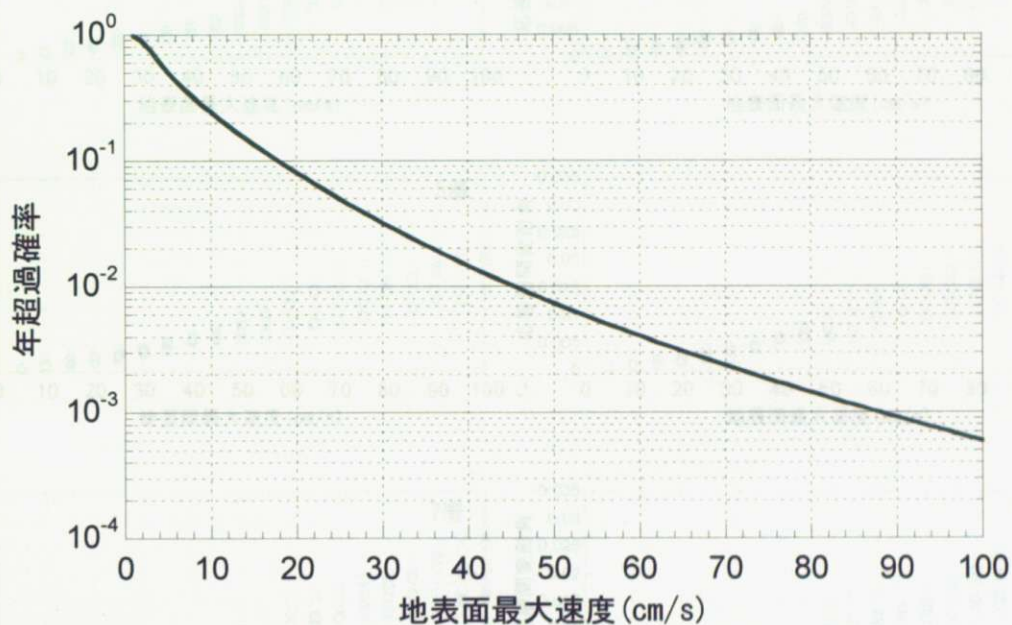


図 6.5 建設地の地震ハザード曲線

(2) 地表面最大速度と応答層間変形角の関係

RC 造 10 階建物モデルを対象に、6.4.1 節で作成された模擬地震動 200 波に対して地震応答解析を行い、地表面最大速度と応答層間変形角の関係を計算すると図 6.6 となる。図中には、地表面最大速度と応答層間変形角の関係を、(6.22) 式を用いて回帰した結果も併せて示している。

図 6.6 地表面最大速度と応答層間変形角の関係

(3) 各層の地震損傷度曲線

各層の地震損傷度曲線を、(6.24) 式より求めると図 6.7 となる。応答層間変形角の計算標準偏差は、全ての被災度に対して 0.8 を設定しているため、地表面最大速度が比較的小

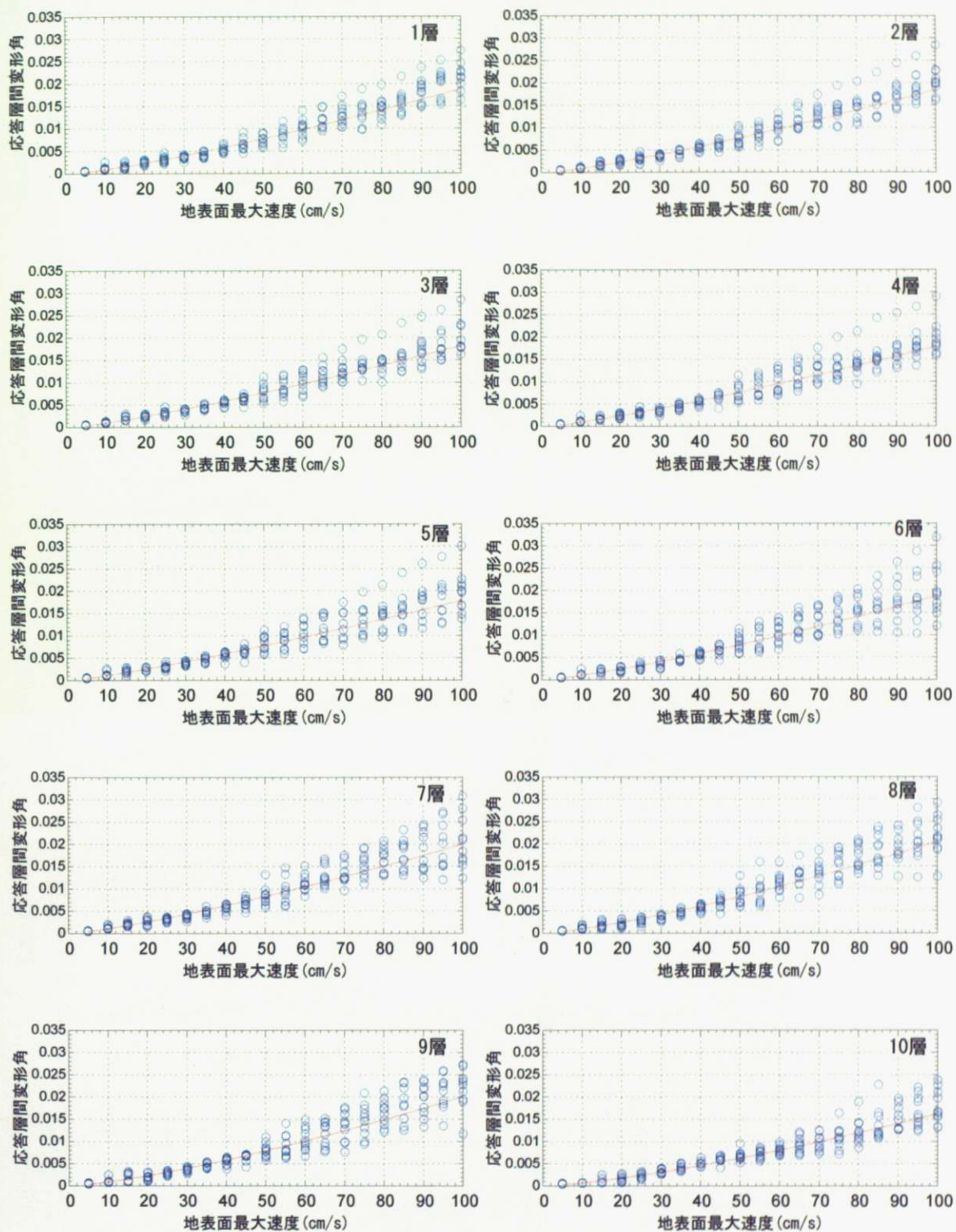


図 6.6 地表面最大速度と応答層間変形角の関係

(3) 各層の地震損傷度曲線

各層の地震損傷度曲線を、(6.24)式より求めると図 6.7 となる。限界層間変形角の対数標準偏差は、全ての被災度に対して 0.8 を設定しているので、地表面最大速度が比較的小

さい領域においても、地震損傷度曲線は互いに交差していないことがわかる。

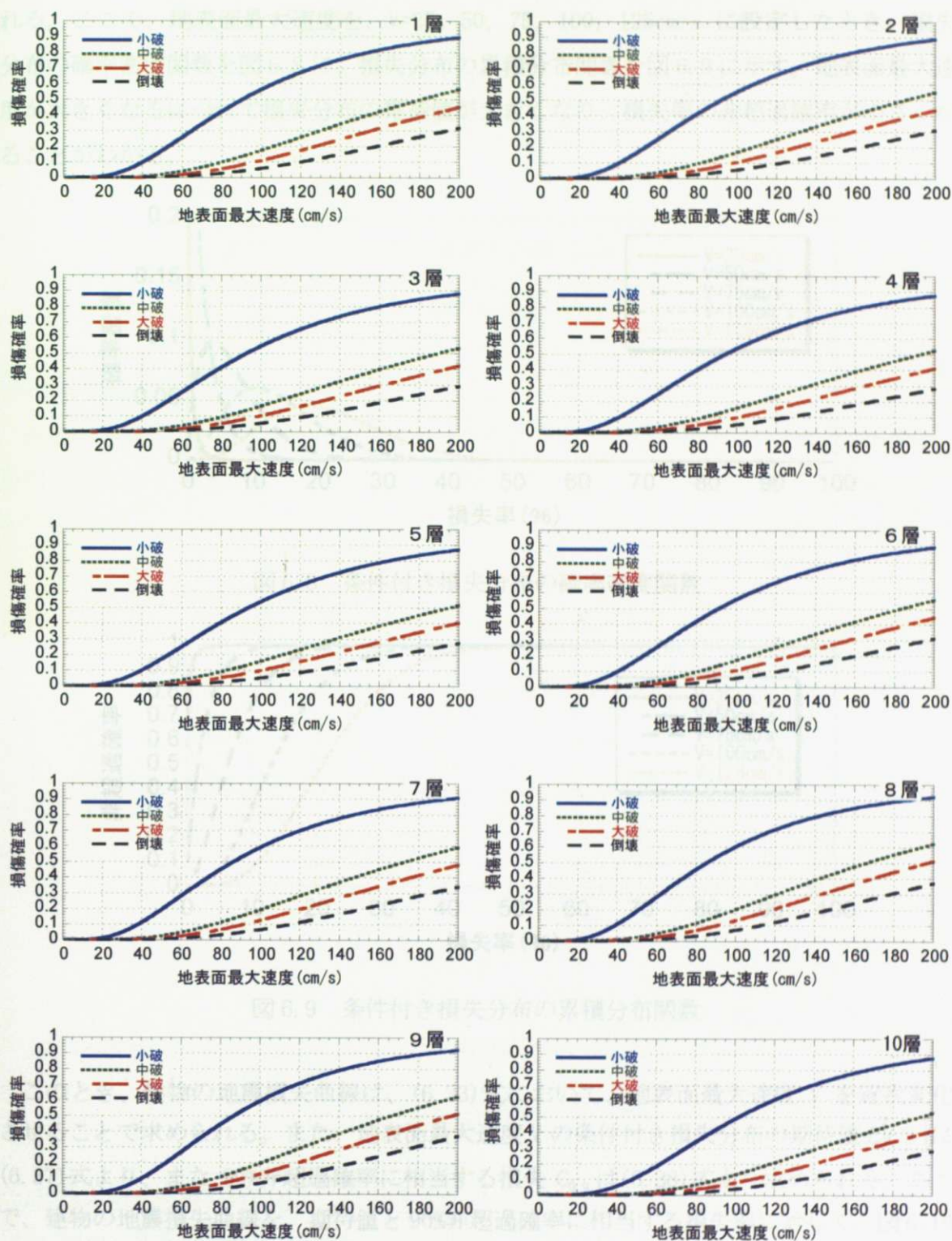


図 6.7 各層の地震損傷度曲線

(4) 建物の地震損失曲線

地表面最大速度 V の条件付き損失分布の確率密度関数 $f(c|v)$ が、(6.33) 式から求められる。ここで、地表面最大速度を、 $V=25, 50, 75, 100, 125\text{cm/s}$ に設定したとき、損失分布の確率密度関数を図 6.8 に、損失分布の累積分布関数を図 6.9 に示す。地表面最大速度が大きくなるにつれて損失分布の期待値が大きくなり、損失率の非超過確率が小さくなることわかる。

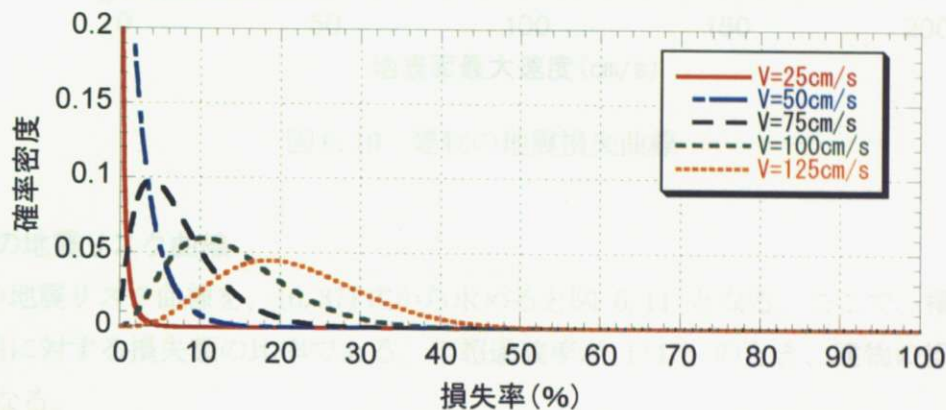


図 6.8 条件付き損失分布の確率密度関数

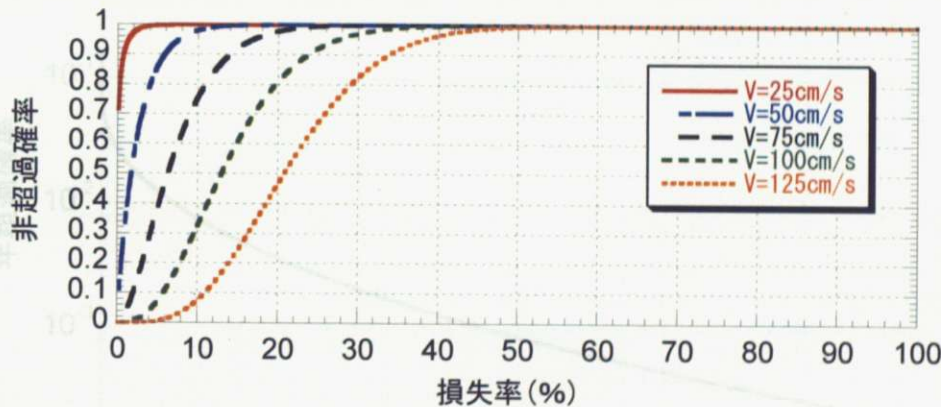


図 6.9 条件付き損失分布の累積分布関数

このとき、建物の地震損失曲線は、(6.33) 式において、地表面最大速度 V を逐次変化させることで求められる。また、地表面最大速度 V の条件付き損失分布の期待値 $E[C|v]$ は (6.37) 式より、また 90% 非超過確率に相当する損失 $C_{0.9}$ は (6.38) 式より求められる。ここで、建物の地震損失曲線を、期待値と 90% 非超過確率に相当する損失率に対して、図 6.10 に示す。地表面最大速度が 72cm/s (年超過確率 $1/475$ に相当) のとき、損失率の期待値は約 6.6%，損失率の 90% 非超過確率は約 13.0% となる。

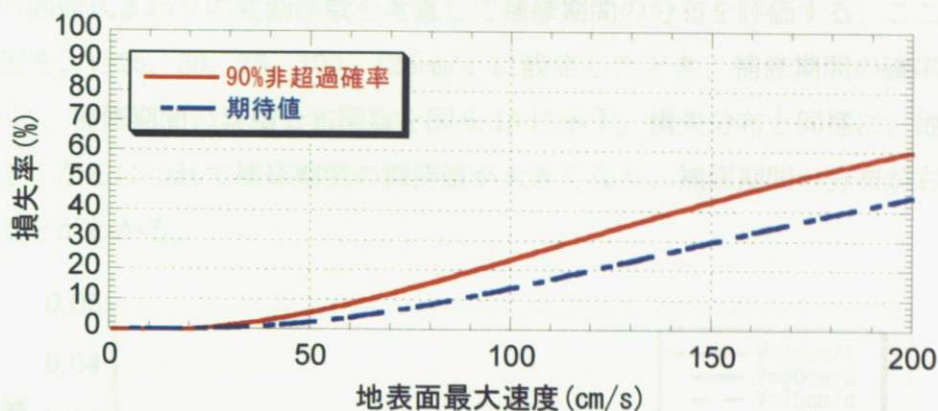


図 6.10 建物の地震損失曲線

(5) 建物の地震リスク曲線

建物の地震リスク曲線を、(6.37)式から求めると図 6.11 となる。ここで、損失率は、新築費用に対する損失額の比率である。年超過確率が $1/475$ のとき、建物の損失率は約 9.1%となる。

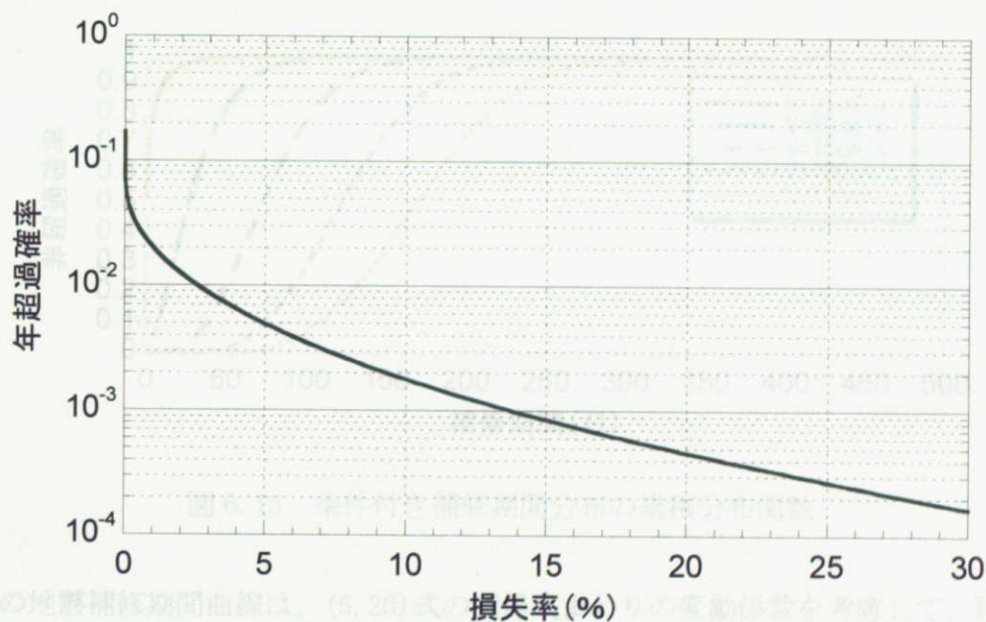


図 6.11 建物の地震リスク曲線

(6) 建物の地震補修期間曲線

(4)の地表面最大速度 V の条件付き損失分布の確率密度関数 $f(c|v)$ を計算した手法と同様に、地表面最大速度 V の条件付き補修期間分布の確率密度関数 $f(t|v)$ が求められる。この際、延べ床面積と建物の補修期間の関係は図 5.2 に示したようにバラツキがあるため、

(5.20)式の回帰式まわりの変動係数を考慮して補修期間の分布を評価する。ここで、地表面最大速度を、 $V=25, 50, 75, 100, 125\text{cm/s}$ に設定したとき、補修期間の確率密度関数を図 6.12 に、補修期間の累積分布関数を図 6.13 に示す。損失分布と同様に、地表面最大速度が大きくなるにつれて補修期間の期待値が大きくなり、補修期間の分布が右側に移動していることがわかる。

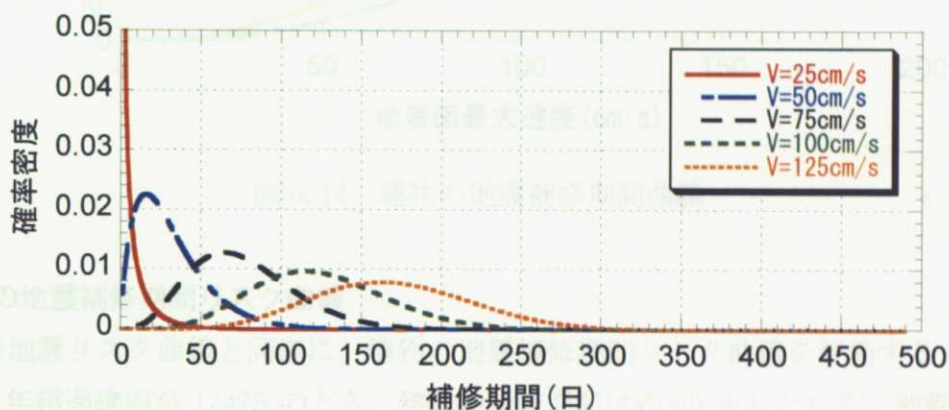


図 6.12 条件付き補修期間分布の確率密度関数

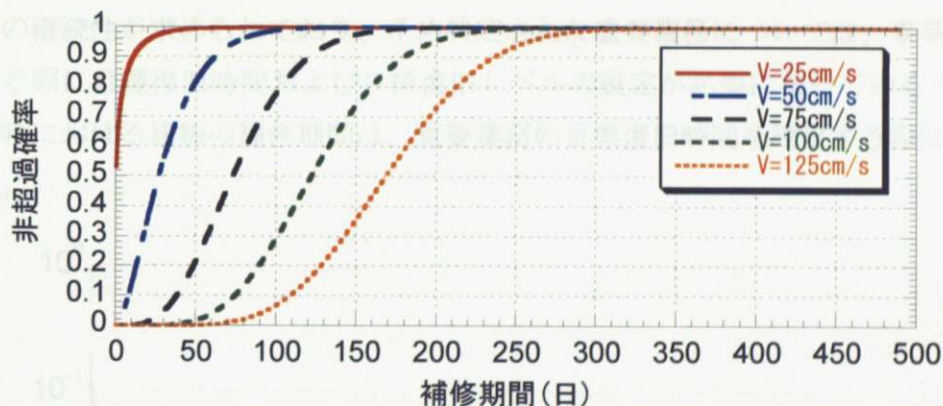


図 6.13 条件付き補修期間分布の累積分布関数

建物の地震補修期間曲線は、(5.20)式の回帰式まわりの変動係数を考慮して、建物の地震損失曲線と同様な手法により評価する。このとき、建物の地震補修期間曲線を評価すると、図 6.14 となる。地表面最大速度が 72cm/s (年超過確率 $1/475$ に相当) のとき、補修期間の期待値は約 71.1 日、補修期間の 90%非超過確率に相当する値は約 113.6 日となる。

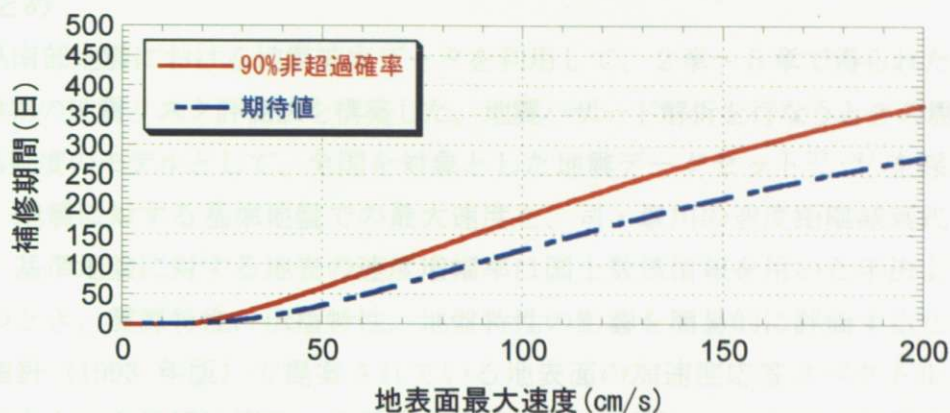


図 6.14 建物の地震補修期間曲線

(7) 建物の地震補修期間リスク曲線

建物の地震リスク曲線と同様に、建物の地震補修期間リスク曲線を評価すると図 6.15 となる。年超過確率が $1/475$ のとき、建物の補修期間は約 89.8 日となる。地震時に建物被害が生じると、建物や什器などの直接被害に加えて、代替施設の確保ができない限り、事業中断による営業損失が生じる。最近では、大地震が発生したときでも、企業などに対して事業の継続性が求められており、予め特定された重要業務については、事業継続計画を策定する際に目標復旧時間および目標復旧レベルの設定が必要になっている²²⁾。従って、地震時における建物の補修期間は、重要業務の目標復旧時間を設定する際にも有効活用される。

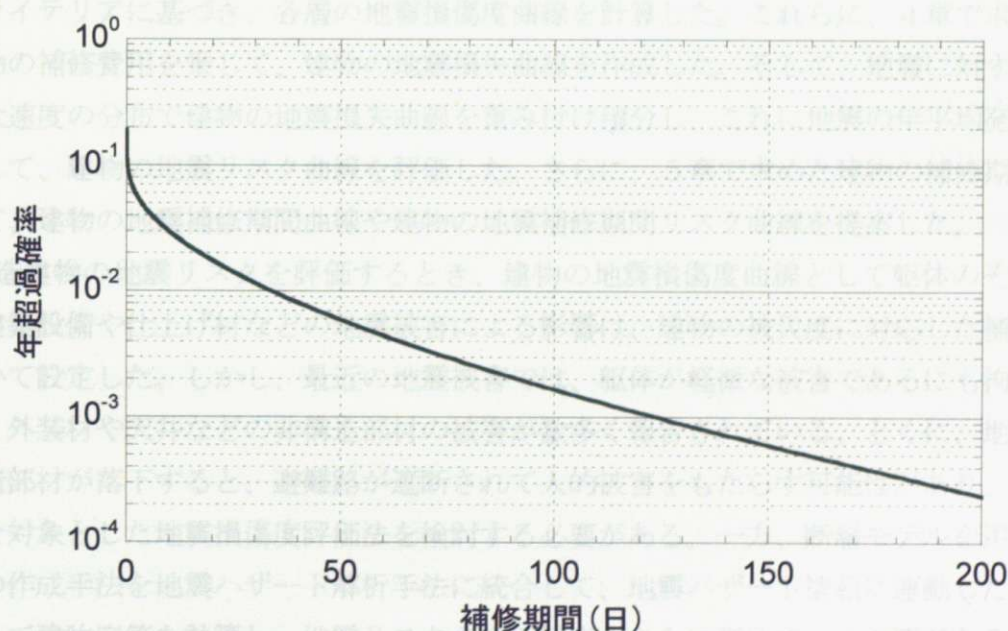


図 6.15 建物の地震補修期間リスク曲線

6.5 まとめ

兵庫県南部地震における地震被害データを利用して、2章～5章で得られた成果に基づき、建物の地震リスク評価法を構築した。地震ハザード解析を行なうときの震源ならびに地震活動度のモデルとして、全国を対象とした地震データセット³⁾・⁴⁾を採用した。つぎに、地震に対する基準地盤での最大速度を、司・翠川の速度距離減衰式を用いて計算し、基準地盤に対する地表の速度増幅率は国土数値情報を用いた手法より計算した。このとき、震源特性、伝播特性、地盤特性の影響を簡易的に評価するため、建築物荷重指針(1993年版)で提案されている地表面の加速度応答スペクトルを設定し、このスペクトルを目標に複数の地震波を作成した。つぎに、これらの地震波に対して地震応答解析を行い、2章で求められたRC造建物を対象とした損傷クライテリアに基づき、各層の地震損傷度曲線を評価する。ただし、2章で求められた損傷クライテリアは、兵庫県南部地震以外の地震被害に対して検証されていないので、限定的に使用可能であることを注意を要する。4章で求められた建物の補修費用を用いて、地震損傷度曲線から計算される損傷確率に補修費用を乗じて建物の地震損失曲線を評価する。さらに、5章で求められた建物の補修期間を設定し、建物の地震補修期間曲線を提案した。

これらの検討結果に基づき、RC造10階の建物を設定して地震リスクの評価例を示した。まず、建設地の地震ハザード曲線を計算して、地表面最大速度と年超過確率の関係を求める。つぎに、建物を基礎固定のせん断系モデルに置換して地震応答解析を行い、地表面最大速度と応答層間変形角の関係を各層ごとに計算して、2章のRC造建物を対象とした損傷クライテリアに基づき、各層の地震損傷度曲線を計算した。これらに、4章で求められた建物の補修費用を乗じて、建物の地震損失曲線を作成した。そして、地震に対する地表面最大速度の分布で建物の地震損失曲線を重み付け積分し、これに地震の年平均発生率を考慮して、建物の地震リスク曲線を評価した。さらに、5章で求めた建物の補修期間を設定して、建物の地震補修期間曲線や建物の地震補修期間リスク曲線を提案した。

RC造建物の地震リスクを評価するとき、建物の地震損傷度曲線として躯体のそれを用い、建築設備や仕上げ材などの地震被害による影響は、建物の被災度に対応した補修費用を用いて設定した。しかし、最近の地震被害では、躯体が軽微な被害であるにも拘わらず、内装・外装材や天井などの非構造部材の被害が数多く報告されている。とくに、地震時に非構造部材が落下すると、避難路が遮断されて人的被害をもたらす可能性があり、非構造部材を対象とした地震損傷度評価法を検討する必要がある。一方、断層モデルを用いた地震動の作成手法を地震ハザード解析手法に統合して、地震ハザード情報に連動した地震動に対して建物応答を計算し、地震リスクの評価精度をさらに高めていく必要がある。

6 章の参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討，2005
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004
- 3) Yoshida, Imazuka and Mizutani : Seismic Risk Assessment Procedure for a System consisting of Distributed Facilities - Part two- Seismic Hazard Modeling, ICOSAR, 2001
- 4) 吉田 伸一，今塚 善勝，水谷 守：広域に存在する施設群に対する地震リスク評価（その2：地震ハザード評価），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 41-42, 2001
- 5) 石田 寛，源栄 正人：地盤増幅を考慮した一様ハザードスペクトルに基づく建築構造物の地震リスク評価手法，日本建築学会構造系論文集，第583号，pp. 23-30, 2004
- 6) 高橋 雄司：簡易シュミレーションによる建築物の地震リスク分析，構造工学論文集，Vol. 50B, pp. 453-463, 2004
- 7) 高橋 雄司，正木 信男，穴原 一範，五十田 博：地震危険度の高い地域の建物を対象とした地震リスク・マネジメント，日本建築学会構造系論文集，第591号，pp. 25-33, 2005
- 8) 神田 順ほか：シナリオ地震の生起確率を考慮した基準地震動策定に関する研究（その7）～（その10），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 29-36, 2006
- 9) Federal Emergency Management Agency (FEMA) : HAZUS99 Technical Manual, 1999
- 10) 篠塚 正宣，中村 孝明，望月 智也：極値統計理論を用いた地震時最大予想損失額の評価手法の提案，JCOSAR論文集，pp. 25-32, 2000
- 11) 村地 由子，坪田 正紀，高橋 雄司，浅野 美次，安野 郷，泉田 伸二，谷垣 正治，竹内 貞光：建築物の地震予想最大損失(PML)分析プログラムの開発，日本建築学会技術報告集，第22号，pp. 487-490, 2005
- 12) 坪田 正紀，村地 由子，高橋 雄司ほか：限界耐力計算法を活用した簡易地震LCC分析プログラムの開発，日本建築学会技術報告集，第24号，pp. 67-72, 2006
- 13) 司 宏俊，翠川 三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp. 63-70, 1999
- 14) 藤本 一雄，翠川 三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定，日本地震工学会論文集，第3巻，2003
- 15) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，1993
- 16) 松田 時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帯図，地震研究所彙報 Vol. 65, pp. 289-319

- 17) 萩原 尊禮 編：日本列島の地震 -地震工学と地震地体構造-, 鹿島出版会, 1991
- 18) Cornell, C.A. : Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 58, pp.1583-1606, 1968
- 19) 奥村 俊彦, 渡辺 基史, 藤原 広行：2003年十勝沖地震の本震・余震記録に基づく最大速度のばらつきの検討, 日本地震学会講演予稿集, 2004年度秋季大会, B26, 2004
- 20) 翠川 三郎, 大竹 雄：地震動強さの距離減衰式にみられるバラツキに関する基礎的分析, 日本地震工学会論文集, 第3巻, 第1号, pp.59-70, 2003
- 21) 大崎 順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 2002
- 22) 内閣府（防災担当）：事業継続ガイドライン 第一版, 2005