

建物を対象とした地震リスク評価の現状

中村 敏治^{*1}・坂本 成弘^{*2}

Keywords : seismic risk, seismic risk management, probable maximum loss

地震リスク, 地震リスクマネジメント, 予想最大損失

1. はじめに

ここ10年の間に、兵庫県南部地震（M7.3、最大震度7）、鳥取県西部地震（M7.3、最大震度6強）、芸予地震（M6.7、最大震度6弱）など人的・物的被害を生じる地震が発生している。このような被害を発生させる大地震は、いつどこで発生するか明確に把握することが困難であり、かつ、都市近郊で発生したときの被害は甚大なものとなる。また、近年、地震予知技術の発展に伴い、東海地震、南海地震、東南海地震等の巨大地震の発生確率が示され、地域行政・民間でもその対応が検討され始めている。

我々は、このような大地震に対しどのように対処すべきなのであろうか。今までの取り組みは成功しているのだろうか。建物の設計法は、大地震が発生するたびに修正され、現在では弾塑性設計も取り入れられて、大地震でも倒壊しない設計がなされている。また、耐震補強設計においても、これと同程度の性能となるように行われている。しかしこれらは、倒壊させないということであり、被害を生じさせないという事ではない。我々は震災後も被害を受けた建物を補修・補強して使用していくか、建て直すかしなければならない。

全く被害を受けない建物を作ることができない以上、地震が発生したときに、建物にどの程度の被害が発生するのかを定量的に把握（地震リスク評価）し、更にこれをコントロールすることを考えなければならない。これが地震リスクマネジメント（SRM：Seismic Risk Management）である。

一方、1995年以降、不動産投資に係る諸法（不動産特定共同事業法、SPC法、投資信託法）の整備が進み、不動産を流動化・証券化する動きが普及し始めている。こ

の過程で、不動産評価の一項目として地震リスク評価が必要であり、不動産の流動化・証券化の普及に伴い地震リスク評価業務も増えつつある。しかし、そこで評価される地震リスクは主としてPML（Probable Maximum Loss、予想最大損失）であり、この値は地震リスク評価における一側面の値でしかない。

一般に行われている地震リスク評価のほとんどは、SRMに用いるためのものではなく、不動産の流動化・証券化のためのものであるのが現状である。

本論文では、SRM手法の概説を行うとともに、この手法を基に行われている地震リスク評価の現状について紹介する。

2. 地震リスク評価

2.1 地震リスクの表示方法

一般にリスクと言うと、様々な受け取り方がある。被害を生じさせるような事象そのものを指す場合、その事象の発生する確率を指す場合、生じた被害の程度を指す場合、予想した被害からの乖離の大きさを指す場合など、対象とするリスク内容や使われ方によって表現方法が異なっている。

工学の分野でリスクを取り扱うためには、定量的な評価がなされなければならない。そうして初めてコントロールすることが可能となる。地震によるリスクを対象とする場合、事象（被害）の起こりやすさとその損失の大きさの二面で評価するのが望ましい。一般に、前者は発生確率で、後者は貨幣価値換算であらわすことが多い。

2.2 地震リスクの範囲

地震リスクの内容を分類すると、大別して、直接損失と間接損失に分けられる。直接損失は地震の揺れによって構造物や機器などが直接損傷することにより発生する

* 1 技術センター建築技術開発部建築生産技術開発室

* 2 (株)篠塚研究所

損失で、有形なものとして物的損失、無形なものとして営業損失に分けられる。物的損失は損傷した構造体や機器などの修復や取り替えに要する費用、営業損失は構造体や機器などの損傷により一部あるいは完全に機能を喪失し営業不可能になったことによる損失である。間接損失は対象とする建物以外の被害（例えば、隣接建物の衝突やインフラ施設の被害など）が派生的に影響して被る損失で、直接損失と同様に、物的損失と営業損失に分けることができる。

地震火災に関しては、自己出火によるものは直接損失、延焼によるものは間接損失と分別している。

なお、人命に関してはその貨幣価値換算の是非も含めて容易ではなく、別途評価する場合が多い。

どこまでの範囲を地震リスクに含めるかは、主体者が対象建物の目的に応じて適切に設定すべき項目である。一般に、間接損失は主体者のみでは対応することが困難であり、地震リスクの範囲からは除外することが多い。

2.3 地震リスク評価手法の概要

現時点では、地震リスクを評価する手法に統一された方法はないが、その一例を図-1 に示す。

地震リスクを評価するためには、まず、建物の構造特性・設備システムや価値の情報等を収集し、被害要因を網羅的に把握する必要がある。各被害要因について地震損傷度曲線（ fragility curve ）を評価してイベントツリー解析を行い、地震ロス関数を求める^{1),2)}。地震損傷度曲線は、イベントツリーにおける分岐確率を示し、(1) 式に示すような対数正規分布として表す。

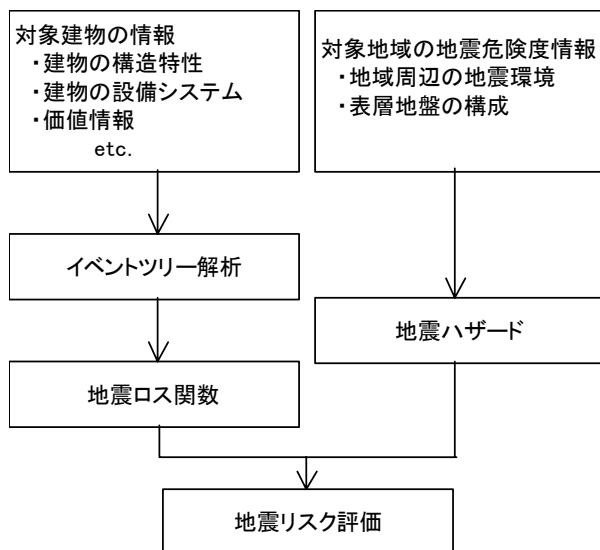


図-1 地震リスク評価の例
Example of seismic risk evaluation

$$Fz(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \zeta z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln z - \ln r_m}{\zeta} \right)^2 \right] dz \quad (1)$$

ここに、 α は建物に作用する最大加速度、 r_m は建物耐力の中央値、 ζ は建物耐力の対数標準偏差を示す。

イベントツリー解析からは、考えられる損失とその発生確率（地震損失分布）を求めることができる。図-3 に示す地震ロス関数は、イベントツリー解析から求めた地震損失分布の期待値（平均値）をプロットしたものである。この地震ロス関数は、どの程度の地震（最大加速度）が発生すると、どの程度の損失（地震損失期待値）を生じるかの情報を提供するものである。建物の地震損傷度曲線の一例を図-2 に、イベントツリー解析から地震ロス関数作成の概要を図-3 に示す。

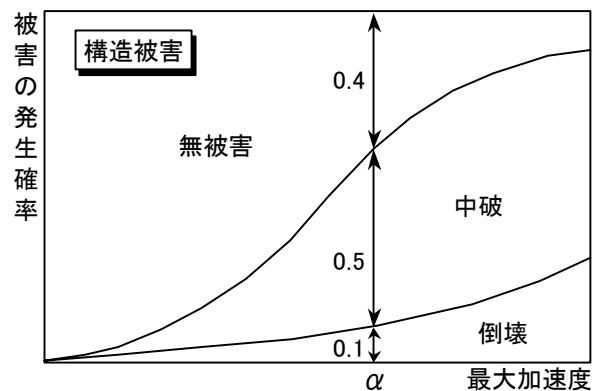


図-2 地震損傷度曲線の例
Example of fragility curve

最大加速度 α (cm/s ²)	大規模液状化被害	構造被害	設備被害	発生確率 P_i	損失 C_i
0.9 (0.0)	無被害	無被害	0.2 (0.0)	0.072	0.0
			0.8 (0.2)	0.288	0.2
		0.5 (0.6)	0.2 (0.0)	0.090	0.6
		小破	0.8 (0.2)	0.360	0.8
		0.1 (1.0)		0.090	1.0
		大破以上		0.100	1.0
0.1 (1.0)	大破以上				
イベントツリー解析					地震損失期待値 $\sum P_i C_i = 0.590$

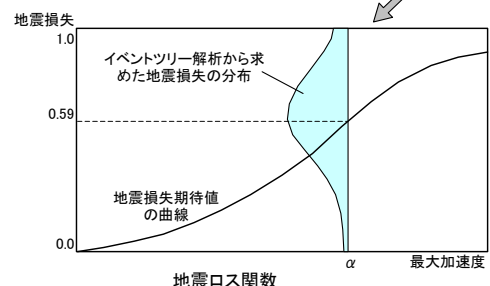


図-3 イベントツリー解析と地震ロス関数
Event tree analysis and seismic loss function

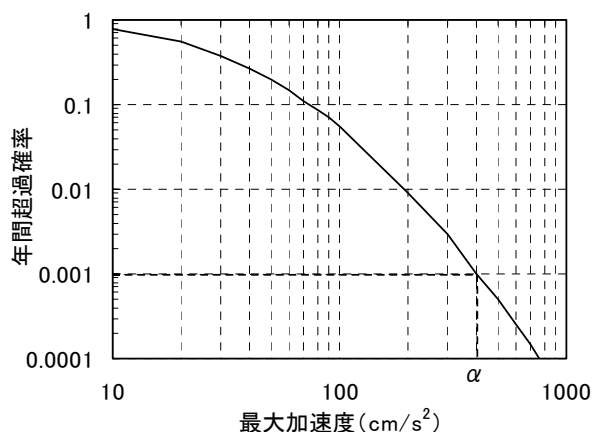


図-4 地震ハザードの例
Example of seismic hazard

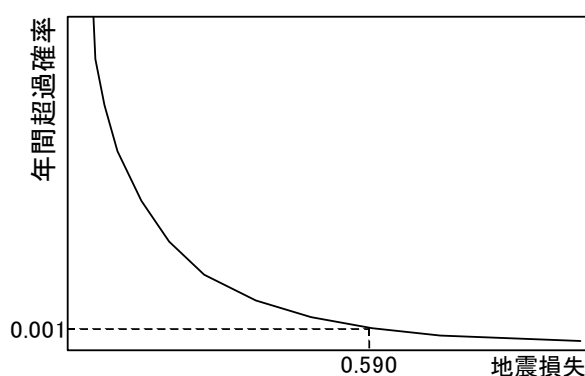


図-5 地震リスクカーブの例
Example of seismic risk curve

一方、建物とは別に、その地域でどの程度の地震（最大加速度）が発生するかを把握する必要がある。この地震危険度を把握するために、対象地域周辺の歴史地震・活断層・プレート境界地震などのデータを調査・収集するとともに、対象地点の表層地盤の特性を把握し、その地域の地震ハザードを作成する。この地震ハザードは、この地域にどの程度の地震（最大加速度）が、どの程度の確率で発生するかの情報を提供するものである。地震ハザードの一例を図-4に示す。

上記の地震ロス関数と地震ハザードから共通の最大加速度を消去して地震リスクカーブを作成し、地震リスクを評価する。これにより地震の年間超過確率に対応した地震リスクが示される。図-5に地震リスクカーブの一例を示す。地震リスクカーブを積分したもの（地震リスクカーブの下面積）は年間地震リスクと呼ばれ、1年間に被る地震損失の期待値を示し、保険における純率に相当する。

なお、地震ハザードを用いずに、活断層地震やプレート境界地震および地殻内地震をシナリオ地震としてモデル化（震源位置、マグニチュード、発生頻度 etc.）³⁾し、

1つ1つのシナリオ地震に対する地震リスク（地震損失期待値）を評価する方法もある。この場合、地震リスクの大きい順にシナリオ地震の発生確率を加算することにより、図-5と同等の地震リスクカーブを作成することができる。

3. 地震リスクマネジメント

定量的に把握した地震リスクが、主体者の許容範囲内がない場合、何らかの対策が必要となる。地震リスク結果に対する対応の概念図を図-6に示す。

地震損失が許容範囲内に収まるほど小さい場合（図-6中の(1)の領域）、発生確率が低くても高くても特に対策を講じる必要はない。すなわち、保有という対策を採ることを意味する。地震リスクの保有は自己資金などにより対応する方策で、地震損失を更に下げするために要する費用の方が、地震損失低減効果よりも大きくなる場合に採られる方策である。

発生確率は低いが地震損失が大きい場合（(2)の領域）、その一部あるいは全部を他者に転嫁することが可能である。具体的には、保険の付保や建物の証券化である。低頻度・大損失部分を転嫁することにより主体者の地震リスクを低減することができる。

発生確率・地震損失ともに大きい場合（(3)の領域）、構造物や設備機器の耐震補強や設備システムの変更など大規模な対策により、地震リスクの回避を図る必要がある。すなわち、耐震補強等を行って図-5に示した地震リスクカーブを全体的に左へシフトさせることを意味する。

保険付保・証券化については他に譲ることとし、耐震補強等による対策での要点を以下に述べる。具体的な対策を検討するにあたっては、まず、地震リスクの内容を把握することが重要である。つまり、各被害要因（例え

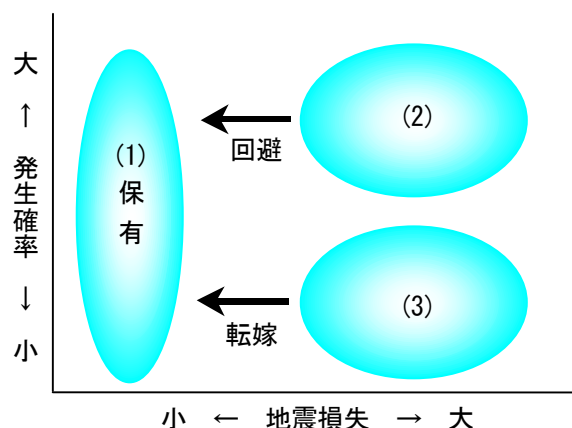


図-6 リスク対応概念図
Outline of risk countermeasure

ば、構造被害や設備被害など）による損失が地震リスクに占める割合を調べ、どの被害要因を改善すれば最も効果的であるかを把握するのである。次に、これに対する具体的対策を検討する。なお、この検討における地震危険度（どの程度の頻度で発生する地震動か）は主体者が決めるべきものである。100年に1度の地震動と1000年に1度の地震動では、地震リスクの大きさはもちろんのこと、その内容（各被害要因が地震リスクに占める割合）も異なるため、対策も異なるのが一般的である。

また、対策実施後の年間地震リスクおよび対策費用を算出し、現状維持の場合と対策を実施する場合の両者についてLCC（Life Cycle Cost）評価に基づいた比較を行い、経済的にも合理的な対策であることを確認すべきである。

4. 現状の地震リスク評価

実際に行われている地震リスク評価は、証券化あるいは売買に伴う調査、いわゆるデューデリジェンス業務の項目としてなされる場合が多い。この場合、前述のように地震PML評価に留まる場合がほとんどであり、地震リスクの内容分析やリスク低減のための対策検討まで行うケースは稀である。

地震PMLは、「再現期間475年に相当する地震に対し、90%非超過確率に相当する物的損失」と定義されている。なお、再現期間475年に相当する地震は、供用期間50年に10%の超過確率に相当する地震を指す。地震PMLの概念図を図-7に、地震損失分布曲線を下限値0.0、上限値1.0とした β 分布で表した場合の地震PML値（ C_{PML} ）の評価式を（2）、（3）式に示す。

$$0.9 = \int_0^{C_{PML}} f(c; r, q | \alpha) dc \quad (2)$$

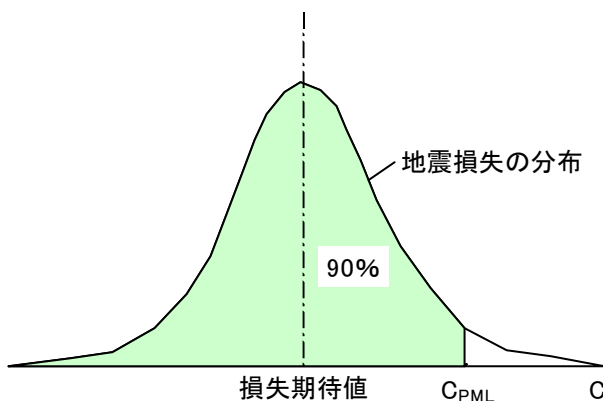


図-7 地震PMLの概念図
Outline of seismic PML

$$f(c) = \frac{c^{q-1} (1-c)^{r-1}}{B(q, r)} \quad (3)$$

ここに、 $B(q, r)$ はベータ関数、 q, r は分布のパラメータを示し、地震損失分布の平均値（ μ_c ）および標準偏差（ σ_c ）を用いて、（4）、（5）式のように表せる。

$$r = \frac{(1 - \mu_c)(\mu_c - \mu_c^2 - \sigma_c^2)}{\sigma_c^2} \quad (4)$$

$$q = \frac{\mu_c(\mu_c - \mu_c^2 - \sigma_c^2)}{\sigma_c^2} \quad (5)$$

数年前までの地震リスク評価は、既存建物を対象とする場合が多かったが、近年では計画中の建物をはじめ、以下に示すような段階の建物についても行われている。各々についてその目的と特徴を記す。

(1) 敷地

複数の建設予定地から、地震リスクが最も小さくなると予想される敷地を選定する目的で行われる。建設される建物が設計される以前の段階であるため、具体的な地震リスクを計算することはできないが、対象地点の地震危険度と地盤増幅特性により、地震リスクの観点から敷地条件を評価・比較する。

(2) 設計中の建物

地震PMLが目標値以下となるように、設計中の建物について地震リスクを評価・検討する。リスク評価結果を設計に反映するために行われるものであるが、実際には、設計段階から地震PMLを把握する目的で行われるに留まっている。

(3) 施工中の建物

施工中に地震があった場合の対処方法を検討するための情報提供を目的として、施工中の建物の地震リスクを評価する。建物の構造特性等は建物が完成した時点で発揮されるものであり、建設中の状態では周期・水平耐力等も異なる。このため、施工中の地震リスクも完成時とは異なる。施工中の地震リスク評価は、出来高に応じた、数ケースについて行われる。

(4) 既存建物

最も一般的に行われている地震リスク評価であり、建物の売却・証券化・ファンド化を目的として行われる。現地調査を行い、劣化度・設計変更等を確認して

地震リスク評価に反映させる。また、地震リスク評価結果に基づいて、対策案の検討を求められる場合もある。

(5) 耐震補強後の建物

目的は既存建物の場合と同じケースがほとんどである。耐震補強前後で、その結果を地震リスク評価で確認するために行われることもある。

5. 地震リスク評価事例

ここで紹介する事例は、施工中の建物を対象に行った地震リスク評価（ここではPML評価）事例である。

対象は東京に建設中の5棟からなる高層建物群で、主として事務所・共同住宅を中心とした複合施設である。

地震リスク評価は、全体の約75%が完成した時点と竣工後の2ケースについて行った。

地震危険度評価にはシナリオ地震を用いた。シナリオ地震は地殻内地震、活断層地震、プレート境界地震を個々にモデル化したもので、これを1つ1つ発生させて地震リスクを評価する。

代表的な建物の構造特性、設備システム、外装仕様、および地盤の増幅特性を考慮して設定した fragility および価値情報を表-1に示す。なお、表中の耐力中央値は各被害モードの建物耐力を工学的基盤での最大加速度に換算した値で、この値のとき50%の確率で対応する被害が生じるとするものである。価値情報については、建物の価格（施工中では評価時点での出来高、竣工後では完成時の再調達価格）で除した値としている。同表a)とb)を比較するとわかるように、75%完成時では構造被害の軽微被害、昇降機被害が考慮されていない。このように施工段階によって被害要因、被害モードは異なる

ものとなる。

各棟の fragility 等の情報を用いて計算した建物群の地震ロス関数を図-8に示す。また、この地域の地震危険度を考慮して求めた地震リスクカーブを図-9に示す。両図中に示している細実線は、地震損失期待値（NEL：Normal Expected Loss）を、太実線はPMLを表している。なお、図-9の縦軸が年間の累積発生確率となっているが、これはシナリオ地震を用いたための表記であり、地震ハザードを用いた場合の年間超過確率と同等である。

図-8の地震ロス関数において、施工中（75%完成時）と竣工後を比べると、NEL、PMLともに施工の方が小さな値となっている。これは、施工中の建物では上部の建物重量がなく、また仕上げ等による重量や積載荷重も設計時よりも小さいため、同一地震動に対して地震力が小さくなり、相対的に地震被害を受けにくくなったためと考えられる。

図-9に示す地震リスクカーブにおいても、地震ロス関数の場合と同様に施工の方が小さな値となっている。再現期間475年に相当する地震に対するNELは、75%完成時で0.6%、竣工後で1.9%である。同地震に対するPMLは、75%完成時で1.8%、竣工後で5.6%である。この値を見る限り、75%完成時の地震リスクは、竣工後の地震リスクの約1/3である。なお、この建物群の竣工後の地震リスクは、証券化等の不動産流動化においても問題にならない程度に小さな値であることを付記しておく。

6. 地震リスク評価の留意点

不動産市場で使われている地震リスクの値は地震

表-1 フラジリティおよび価値情報
Information of fragility and damage value

a) 75%完成時					b) 竣工後				
被害要因	損傷モード	耐力中央値 (cm/s/s)	対数 標準偏差	価値 (%)	被害要因	損傷モード	耐力中央値 (cm/s/s)	対数 標準偏差	価値 (%)
構造被害	中破	1757	0.40	11	構造被害	軽微	311	0.40	5
	大破	2413	0.40	30		中破	877	0.40	11
	倒壊	2898	0.40	100		大破	1345	0.40	30
外装被害	軽微	1486	0.40	1		倒壊	1808	0.40	100
	大破	4962	0.40	8	外装被害	軽微	1175	0.40	1
電気設備被害	大破	1014	0.45	2	外装被害	大破	3291	0.40	10
空調設備被害	大破	967	0.45	1	電気設備被害	大破	1004	0.45	12
衛生設備被害	大破	995	0.45	1	空調設備被害	大破	895	0.45	5
					衛生設備被害	大破	972	0.45	4
					昇降機設備被害	大破	884	0.45	4

PML の値を指していることが多い。地震 PML 値は、地震リスク評価における各値のばらつきを考慮した値ではあるものの、地震リスクのある一面を示しているに過ぎない。従って、地震 PML の値は建物の耐震性の目安にはなるものの、この値のみで判断することはできない。

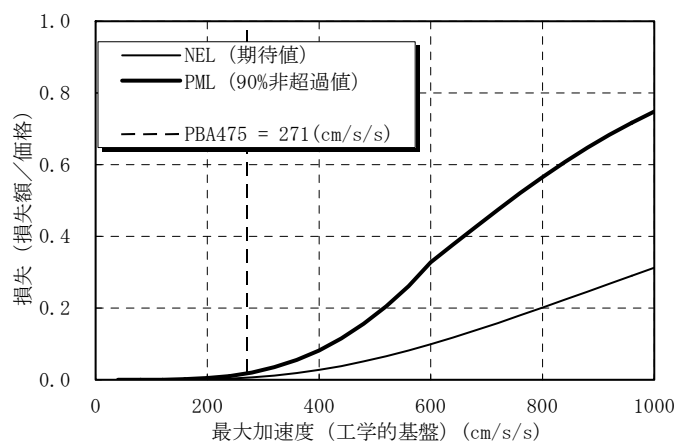
一方、不動産の流動化に伴い、地震 PML の言葉のみが一人歩きし、最近では、契約の時点で地震 PML の値がある値（一般には 15～20%）以下であることを保証することが求められている。地震リスクは確率論に基づいて算出されるものであり、本来その値を保証できるものではない。

また、設計者においても、地震 PML と耐震診断および現行設計法における耐震性とを同一視するケースがあるが、地震 PML は構造・設備等を含めた（場合によっては営業損失も含めた）損害額で評価するものであるの

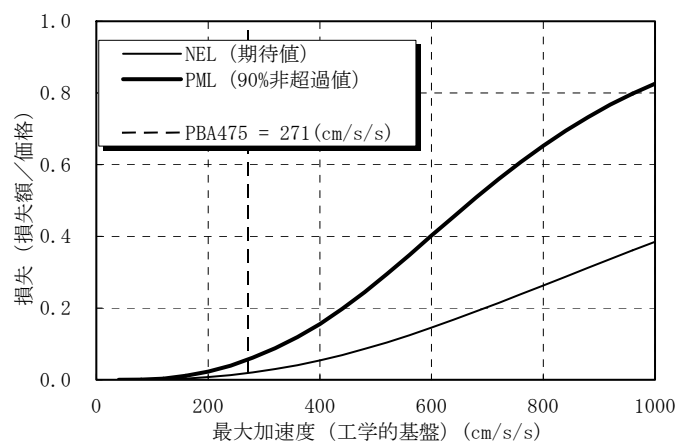
に対し、構造設計における耐震性は構造体の損傷で評価されるものである。両者の傾向を大掴みに把握することは可能と考えるが、必ずしも整合性の取れるものではない。

参考文献

- 1) 水谷守, 小倉桂治, 中村孝明, 中村政則, 木村雄一: 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 地震リスクマネジメント手法の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.99-100, 1996
- 2) (株) 篠塚研究所: 地震リスクマネジメント概説, 2000
- 3) 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, 第541号, pp.95-104, 2001
- 4) 坂本成弘, 木村雄一, 中村敏治: 建物のPML値の評価手法および試算例, 大成建設技術センター報, 第35号, 2002

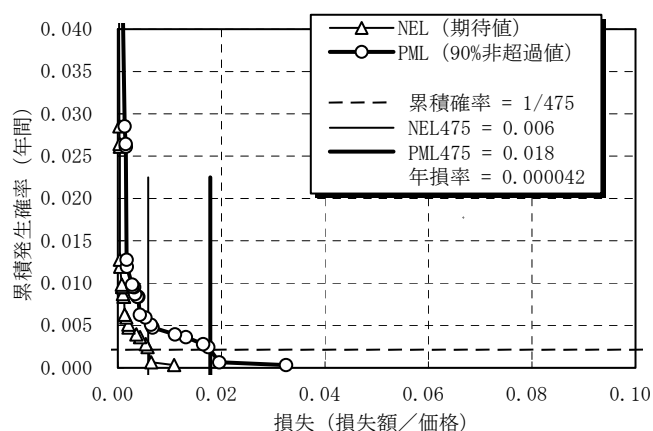


a) 75%完成時

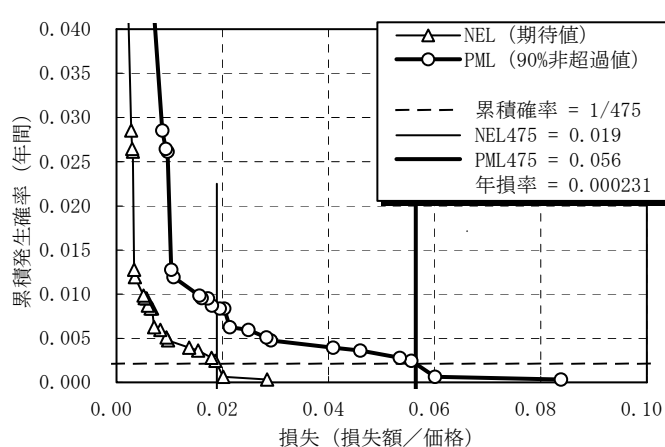


b) 竣工後

図-8 建物群の地震ロス関数
Seismic loss function of building group



a) 75%完成時



b) 竣工後

図-9 建物群の地震リスクカーブ
Seismic risk curve of building group