

次世代の耐震設計法：地震リスクを考える

武蔵工業大学 教授 吉川弘道、
篠塚研究所 主席研究員 中村孝明

‘リスク’とは、‘将来における不確かな損失あるいは不利益’と定義できる。これを定量的に記述すると、‘被害の発生確率とそのときの被害規模との合積’と表され、様々な意思決定に利用される工学的指標となる。特に、地震リスクは既にいくつかの分野にて試算／活用されている。さらに、リスクマネジメントはリスク指標を活用した総合的な地震防災計画を立案／実行するための枠組みであり、リスク解析がコア技術になる。地震リスク解析は、リスクの定量化（Risk Quantification）であるとともに、耐震設計を超える合理的な耐震性能指標となり得るもので、次世代の耐震設計法として期待できる。

前半では、リスク解析とリスクマネジメントを簡単に紹介し、後半では、地震リスクの利用実態と耐震性能指標について考察する。

リスク解析とリスクマネジメント

‘リスク’って何だろう？

リスクという言葉は日常においても頻繁に使われが、一体、‘リスク’って何だろう？百科事典から引用すると、①予測できない危険（リスクが大きい）、②保険者の担保責任（大辞林）のように説明される。これに呼応して、リスクィー（risky：危険な、冒険的な、きわどい）なる用語もたびたび用いられ、日常的に馴染みのある言葉であろう。特に、リスクということばは、‘滅多に起こらないが、もし起きると大変なことになる’、ということが言外にあり、このことが重要な意味合いを示唆する。

さて、これらを、‘広義のリスク’と考え、工学的に定義される‘狭義のリスク’が重要となり、ここに紹介したい。

狭義のリスクは、次のような宝くじの例を見れば容易に理解できる。例えば、次の2つの一等賞金があったとする（実在しない想定例題である）。

① 1等賞金2億円。発行2千万本のうち3本当選。

② 1等賞金1億円。発行6百万本のうち2本当選。

購入者は、賞金額に目を奪われ勝ちであるが、冷静に考えると、両者の期待値は、

$$\textcircled{1} \quad 2\text{億円} \times \frac{3\text{本}}{2\text{千万本}} = (2 \cdot 10^8) \frac{3}{2 \cdot 10^7} = 30\text{円}$$

$$\textcircled{2} \quad 1\text{億円} \times \frac{2\text{本}}{6\text{百万本}} = (1 \cdot 10^8) \frac{2}{6 \cdot 10^6} = 33\text{円}$$

となること単純に算定される。すなわち、期待値から見ると、②の方が、上回ることが客観的に判断できる（ただし、宝くじ②の購入者は、この33円を受け取ることはない。多分、‘はずれ’であり、極々稀に一億円が当ることに注意されたい）。

これを地震リスクに置き換えれば、地震の発生確率と地震発生による損傷または被害をセットで示すことである。

例えば、

‘○△地域における、今後 30 年間に於いて 2500 戸が半壊する確率は 2.5%’

‘△□橋梁は、単年度で 120 万円の損傷が見込まれる’

さて、以上のような前段のもと、地震リスクを構造物の損傷期待値として表すと、次式のように明確に定義される。

$$\text{リスク(Risk)} = \text{地震の発生確率(Hazard)} \times \text{被害の発生確率(Vulnerability)} \times \text{そのときの被害額 (Consequence)} \quad (1)$$

単純に表現すれば、「リスク＝発生確率×影響度」と明快に説明できる。これを数学的に表現すると、次式で示される。

$$\text{地震リスク } R = \text{損失の発生する確率 } p \times \text{損失の規模 } D \quad (2)$$

$$R = \sum_{j=1}^k (p_j \times D_j), \text{ ただし、 } \sum_{j=1}^k p_j = 1 \quad (3)$$

ここで大切なことは、高耐震性とは、被害の発生確率は極めて小さいが、一旦被災すると大きな損傷を受け、かつ運行停止など社会的な影響が大きいことを想定するものである。従来型の耐震設計は、‘これだけの地震に耐えられる’ことを照査するものであり、地震リスクは、‘これだけ、壊れるかもしれない’ことを示すものと説明できる。

地震リスク解析の成果

次に、地震リスク解析によって得られる‘成果(product)’を紹介しよう。リスク解析には、信頼性理論に基づくやや面倒な数学的な処理が必要とするが、本稿ではこれを省略して、主要な結果を例示したい。

・地震ロス関数と地震リスク曲線

図1は、構造物の地震ロス関数 (Seismic Loss Function) を模式的に示すものであり、地震動規模に対する構造物の損傷程度を対応させたものである。ここでは、地震動規模として最大基盤加速度を、損傷レベルを損失額 (または再調達価格) にて例示している。すなわち、地震ロス関数によって、「どのくらいの加速度が入力したら、どれくらいの損害を被るか」を端的に説明してくれる。

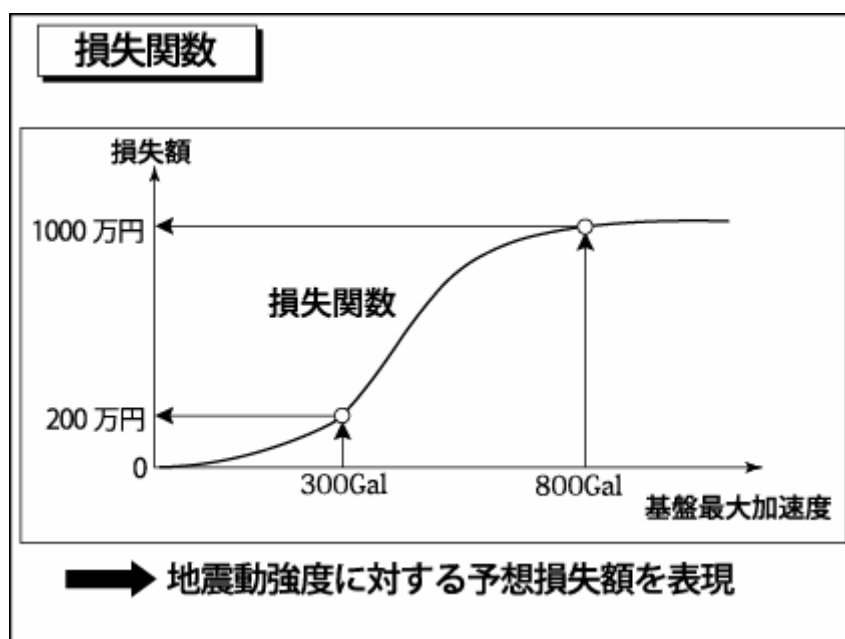


図1 地震ロス関数 (Seismic Loss Function)

そして、地震動規模を消去して、地震損傷レベル(損失額)の発生確率(超過確率)を求め、これを地震リスク曲線(Seismic Risk Curve)と呼ぶ。図2では、リスクカーブを模式的に表したもので、例えば、損失額100万円⇒1.5%、損失額1000万円⇒0.1%、となっている。このようにして、地震による損失レベルが直接的に求まるのが特徴である。地震リスク曲線には、もはや、基盤加速度に代表される地震規模は直接現れないので、例えば、他の災害ハザード(洪水、地滑り、津波)と同等に比較し、また対象構造物が同じであれば合算できる。

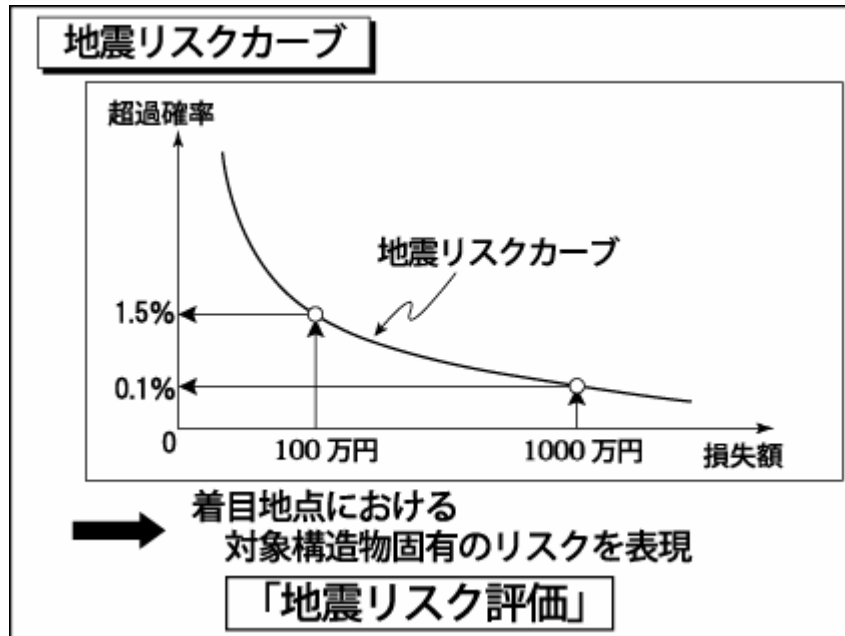
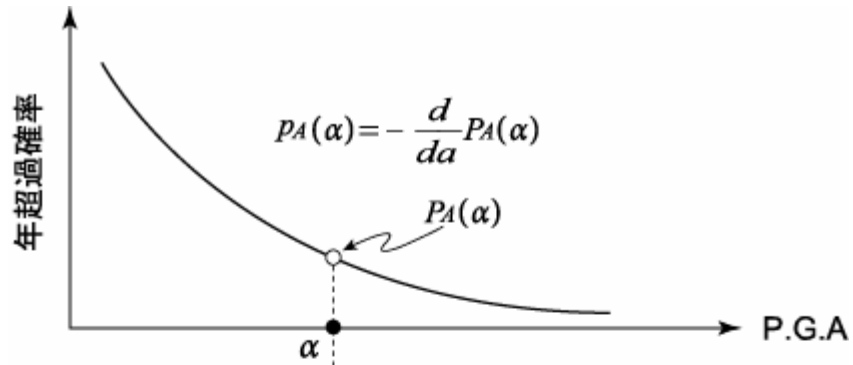


図2地震リスク曲線(Seismic Risk Curve)

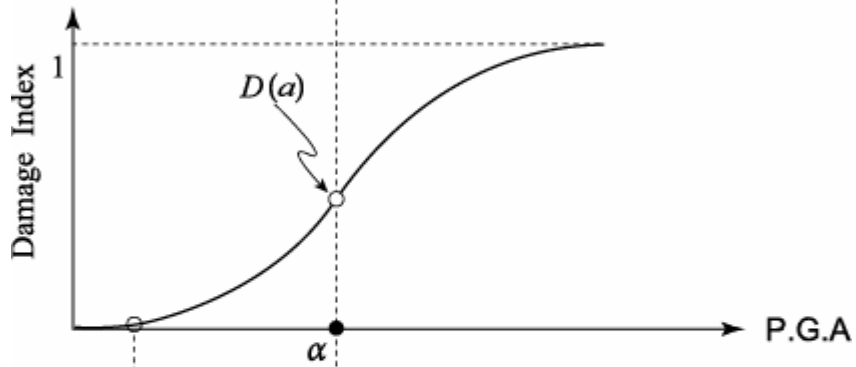
・ 損傷期待値

図3では、対象施設の損傷期待値の算定手順を示している。これは、建設地点の地震ハザード曲線(同図(a))と、対象施設の地震ロス関数(同図(b))との合積をとり、損傷期待値密度関数(同図(c))を算定している。

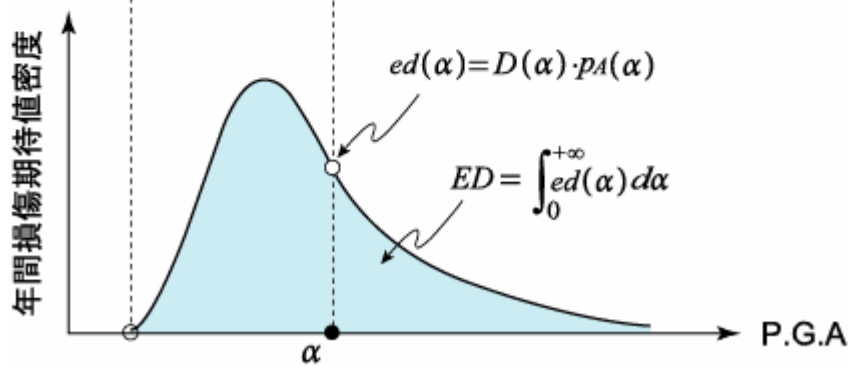
図(c)のような期待値の密度関数 ed は、予想される大小様々な地震動(例えば、最大加速度 $PGA: \alpha$)に対するリスクの大きさを表すもので、その面積 ED は、(年間の)損傷期待値の総和になり、これが狭義の地震リスクを定量的に表したものである(リスクの定量化/Risk Quantification)。



(a) 地震ハザード曲線



(b) Damage Index Curve



(c) 年間損傷期待値密度曲線

年間損傷期待値の算定

図 3 損傷期待値の算定手順

地震リスクマネジメントへの展開

さて、以上のような地震リスク解析による定量的客観的な情報をもとに、災害防止のための具体的かつ効果的な施策を講ずることができる。このような総合的な防災対策を‘地震リスクマネジメント（Seismic Risk Management：SRM 略す）’と呼び、その考え方と適用例を紹介しよう。

リスクマネジメントの考え方と実践方法は、多くの提案があるが、ここでは、これらの共通的な流れを例示したい。これは3つのステップにて構成され、次のように説明できる。

Step 1 リスクの認識：

対象施設にどのようなリスク、すなわち危険因子が存在するかを確認することから始まる（ここで言うリスクは、広義のリスクである）。そして、特定されたハザードによる具体的な被害／損害の可能性を分析する。SRMでは、まず、隠れたリスクを顕在化させることから始まり、この Step 1 は大切な出発点となる。

Step 2 リスクの把握：

次に、対象地域にどの程度の自然災害が生じ、その災害が生じた時にどの程度の被害が生じるか、定量的に分析／調査する。地震リスクの場合、先述した各関数や指標が、この Step 2 にて活かされる。すなわち、ハザード曲線によって当該地域の地震規模を表すことができ、地震ロス関数によって地震発生時の被害を定量化できる。また、地震による損失は、物的被害に加えて、営業損失、インフラ機能の喪失、地域社会への影響など、あらゆる不測の事態を想定しなければならない。

Step 3 リスク対策の実行：

リスクの全貌が詳らかになれば、今度はリスクを軽減するための対策を立案し、実行策を選定することが最終的な段階となる（SRMでは、‘リスクが軽微なので、このままで大丈夫（リスクの保有）’ということもあり得る）。リスク低減は、従来のような、耐震補強にとどまらず、リスクの保有、および損害保険のようなファイナンスによる転嫁など、防災対策の選択肢は多岐に渉る。

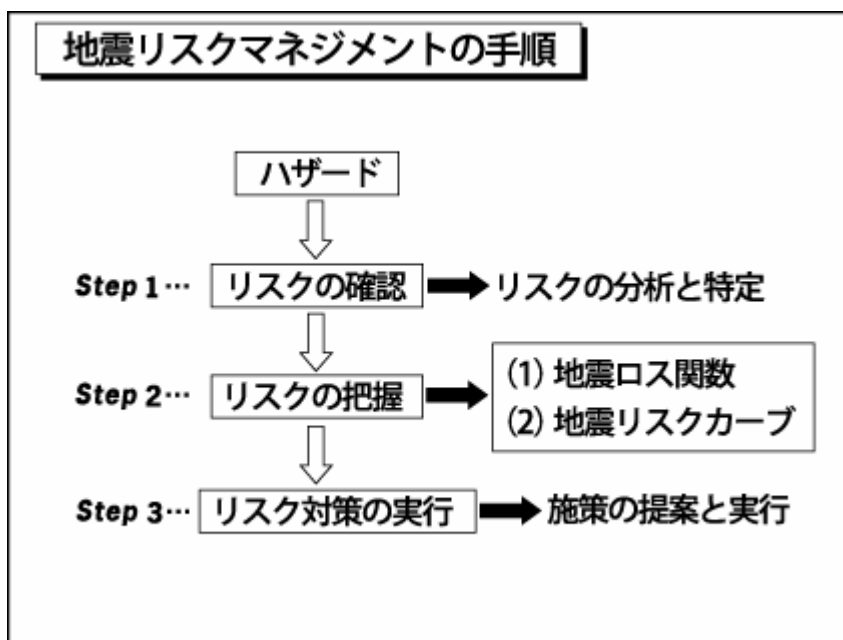


図 4 地震リスクマネジメントの構成と手順

地震リスクと耐震性能指標

様々な耐震性能指標

建物の耐震性能を示す指標は多様である。例えば、耐震偽造問題でも話題となった保有水平体力と必要保有水平耐力との比、あるいは古い耐震基準で設計された建物の耐震改修を促すための『耐震改修促進法』に基づく Is 値 (seismic Index of Structure) などがある。ところが、住宅の購入を考えている個人、建物を売買する当事者、さらには必要な資金を融資する金融機関などは、これら指標を専門家間で交わされる暗号のようなものと受け止めている。このため「現行の耐震基準を満たしている」、「耐震基準の 0.5 の耐力しかない」、といった画一的で不明瞭な情報を受け入れるしかない。一方、平成 12 年には『住宅の品質確保の促進等に関する法律』に基づく耐震等級が登場した。等級は 1~3 で表示され、等級 2 は現行基準の 1.25 倍、等級 3 は 1.5 倍の耐震性能を有することになっている。等級を取得することで安心感は得られものの、大地震が発生した際の被害状況や損害額を示すものではなく、必ずしも十分なものではない。

耐震性能指標としての PML

不動産証券化に関する法整備が進み、不動産収益を原資とする様々な金融商品が組成されると共に、多くの資金が不動産事業に流れている。一方で、広域被害を引き起こす地震災害が発生すると、優良資産が都市域に集中している実情もあり、投資資金の多くを失う可能性がある。そこで、不動産調査の項目に PML (Probable Maximum Loss) と呼ばれる耐震性能を示す指標が設けられている。これは地震リスク情報の一つであり、「対象施設あるいは施設群に対し、最大の損失をもたらす再現期間 475 年相当の地震が発生し、その場合の 90% 非超過確率に相当する物的損失額の再調達価格に対する割合」と定義されている。補足説明すると、再調達価格はその建物を再建するのに必要な金額、再現期間 475 年相当の地震は、兵庫県南部地震まではいかないまでも、かなり大きな地震である。90% 非超過確率に相当する物的損失額は、建物の被害額を予測する際のばらつきを見込んだ上で、最悪の損害額を示している。この損害額には、建物の構造主体に加え電気・衛生・空調などの諸設備、エレベータや内外装など、地震による被害金額の全てが含まれている。必要に応じて地震火災や液状化被害などを含めることもできる。このため投資家は、投資した不動産価値が地震によってどの程度毀損するかをダイレクトに知ることができる。例えば、PML20% と評価された場合、建物の価格が 20 億円であれば、地震により最悪 4 億円毀損することになる。言い換えれば、4 億円程度の補修費を見込んでおく必要があることを知る。地震被害の大きさを金銭価値として示すことは、地震保険の付保や耐震補強などの対策を費用対効果の視点から検討することができるようになる。例えば、補強対策を検討する場合、補強後の PML 値の低下分と補強費用を秤に掛けることができる。地震保険では、保険金の上限を決める目安を知ることができる。

現在 PML は耐震性能の指標として、証券化不動産以外にも通常の売買や保有資産の耐震補強の判断などにも利用されている。最近では建物の設計時に「PML が何%以下になるように設計してほしい」など、施工主の要求事項の一つに組み入れられるケースも増えている。PML の利用が拡大している背景には、難解な耐震性能を一般の人にも理解できる金銭価値で示すことで、情報としての利活用が格段に増加したことを指摘することができる。次世代の耐震設計法と言われるリスク規範型設計は、PML の登場により現実の設計法として具現化しつつある。

地震リスクの課題と今後

地震リスクの評価方法は、被害の統計データをベースとした純統計的な方法と前述した耐震工学、構造工学、信頼性工学などの知見や技術をベースとした解析的な方法とに分けられる。前者は、類型化された建物の平均的な被害率を評価するもので、広域被害想定や複数の建物をまとめて評価する場合に有効である。後者は、対象建物の設計図面や構造計算書、地盤情報に基づいた固有の耐震性能に基づくため、個別の施設や建物のリスクを評価するのに適している。しかしながら、PML 評価の実務では、純統計的な方法なのか、解析的な方法なのかは不明確なまま、評価する側の技術や誠意を信頼した上で、ブラックボックス的な扱いを半ば容認しているのが実態である。これでは、第三者による検証ができず、情報としての客観性、信憑性に欠ける。また、金銭対価が難しい人命や歴史的建造物については、非可逆的な問題（再生できない問題）として評価の対象外とされている。現状の PML は、評価方法に多少の混乱が見られものの、市民権を得ている実態を勘案すると、リスク規範型設計を視野に入れた、技術面、法制面での整備を真剣に検討する時期にきていると考える。

本文は、耐震設計の最新の話題として、地震リスクの入門編をまとめたものですが、詳細については、著者らの出版図書および公開WEBを参照ください。

第1 著者：吉川弘道

- ・ 鉄筋コンクリートの解析と設計（第2版 -限界状態設計法と性能設計法-）、丸善出版
- ・ 『もっと知りたいコンクリート講座』、<http://c-pc8.civil.musashi-tech.ac.jp/RC/>
- ・ 『鉄筋コンクリート構造物の耐震設計講座』
<http://www.civil-eye.com/report/kouza/yoshikawa/overview.htm>

第2 著者：中村孝明

- ・ 星谷勝、中村孝明：構造物の地震リスクマネジメント、山海堂
- ・ 中村孝明：確率論的資産マネジメント-民間資本から社会資本へ-、最新建設技術シリーズ第2巻、山海堂