

# 地震リスクで考える都市防災

## — リスクの定量化と可視化への挑戦 —

### 定量的リスク評価 広義のリスクと狭義のリスク

リスクは危険性を表す概念で、「予測できない危険」として解釈できる。これに呼応して、リスクイ (Risky) … 危険な、冒険的な、きわどい) なる用語も用いられ、日常的に馴染みのある言葉であろう。

ここでは、「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、言外にある重要な意味合いであり、これらを「広義のリスク」と考える。一方、狭義のリスクは、危険要因の存在を示すハザードに、構造物の耐震性能・脆弱性を加味して、工学的リスク (Engineering Risk) として「式1」のように定量化するものである。

これは、地震損傷のイベントツリー上に整理するとわかりやすく、図1のように例示することができる。これは、単柱式橋脚を設計して、強震時の

被災を確率的に考えるものである。図中の例示のように式1の適用により、地震リスク(損害額の期待値の総額)が算定され、再調達価格の5.9%に相当することがわかる(数値は仮想条件に基づく)。

算定されたリスクRが、地震動の大きさと対象構造物の脆弱性(または耐震性能)の両者を反映した定量化であることが容易に判断されよう。

### 地震リスク曲線 リスクの全容はわかる

前例を、周辺域の全震源(シナリオ地震)に対して解析することにより地震リスク曲線が得られる。これは、建設地点の地震ハザード解析、および構造物の地震損失関数(またはフラジリティ曲線)の両者より算定され、地震損失(損失額、損失率、機能停止期間など)の超過確率を与えるもので、必

然的に、右下がりの単調減少関数(左上がりと言ふべきか)となる(図2)。

図2(c)の地震リスク曲線では、地震損失Cを想定してそのときの超過

確率を読取るか、または、超過確率を特定してそのときの地震損失を読取ることになり、リスクの全容が数値化されているとも言える。

ここでは、図2のような模式図にて包括的に提示したが、解析に際しては、ハザード評価(通例、J-S H I Sモデルを援用)、距離減衰、地盤増幅、構造物の応答・被災、など多くの要素技術を、信頼性理論によって統合するもので、多くの適用例がある。

近年では複数震源モデル(multi-

損傷レベル $j$	発生確率 $P_j$	損害 $D_j$ (百万円)	リスク $R_j$ (百万円)
損傷しない	0.63	0	0
曲げ降伏	0.30	2	0.60
曲げ終局	0.05	25	1.25
せん断破壊	0.02	48	0.96
$\Sigma P_j = 1.00$		再調達価格: 48百万円	$R = \Sigma R_j$ = 2.81百万円
		リスクR 再調達価格	$\frac{2.81}{48} = 5.9\%$

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

図1 各損傷レベルの発生確率P、損害額D、リスクRの試算例(4段階の損傷レベル(j=1~4)での発生確率 $p_j$ 、損害額 $D_j$ 、リスク $R_j$ を例示している)

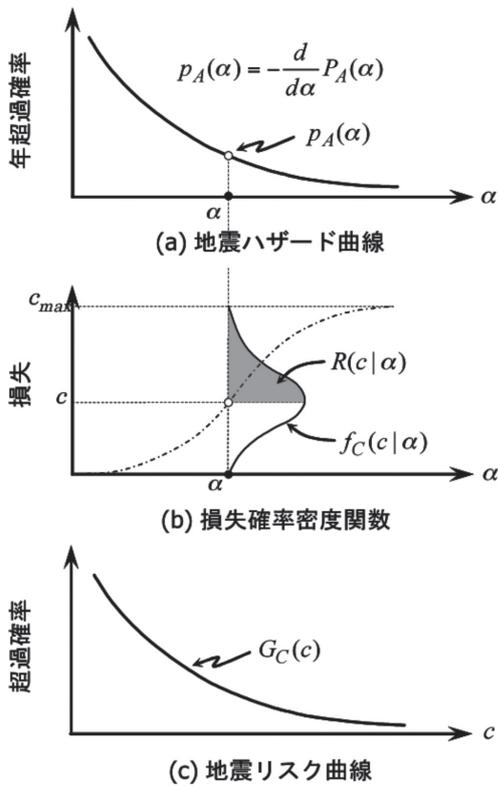


図2 地震リスク曲線の算定過程(上:地震ハザード、中:地震損失関数、下:地震リスク曲線、 $\alpha$ :最大加速度、 $c$ :地震損失率)

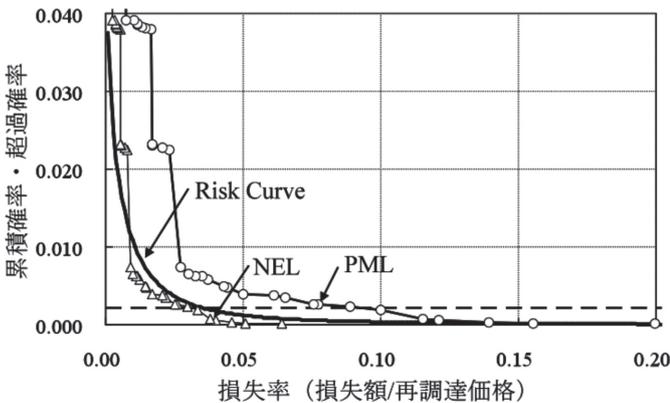


図3 地震リスクイベント曲線(横軸:損失率、縦軸:超過確率)

event model)が用いられ、NEL(地震損失の期待値)、PML(予想最大損失)に対するリスク解析が多く行われている。これは地震イベントリスク曲線と呼ばれ、図3に例示したが、これはシナリオ地震を直接用いているため、階段状の左上がり曲線を呈する。さらには、これを積分処理することにより平滑化した曲線が得られ、ここでは積分型リスク曲線と呼ぶことにする。

図中の横点線は、超過確率1—475(=0.2105%) (50年間の超過確率10%の確率値)であり、これは

## 定点リスクから線状リスクへ

これまで議論は、単独施設の地震リ

スク解析(これを定点リスクと呼ぶ)であるが、鉄道道路施設に代表される線状施設への展開(線状リスクと呼ぶ)を紹介したい。

この場合、物的損失については総和則(線状各施設の合算)にて表わされ、定点リスクの延長線にて算定される。一方、機能停止期間を考慮する場合、ただ1個所の被災により、路線全体に及ぶ機能不全を招き、これまで幾度なく経験している。この場合、対象路線を直列要素・並列要素の混在路線としてモデル化し(後述の図4a)、システム信頼性理論(直列モデルはMax

演算、並列モデルはMin演算)を適用することにより、合理的に解析することができる。

本論では、首都圏鉄道路線を対象としたシステムリスク解析に基づく復旧過程の解析事例を示したい(図4)。

図4aは、首都圏西域にて、郊外路線(A線とB線)および環状につなぐC線を設定し(延長約40km程度となる)、郊外駅から中央環状線(たとえば、JR山の手線)への到達経路に対する1方向機能性を算定するものである。図4bは、シナリオ地震の一例として大正型関東地震(M8.0)を想定し、システムリスク解析を実行し、復旧曲線として示した。

復旧曲線は、震災直後からの機能回復過程を時系列上にて示すもので、確率論に基づき算定し、その平均値を示すものである。このようなシステムリスク解析では、復旧曲線に加えて、リスク曲線、PML評価も可能であり、またポトルネック指数(路線全施設のうちcritical)が出力され、耐震補強戦略、帰宅困難者の推定などに際して定量的情報を与えることができる。

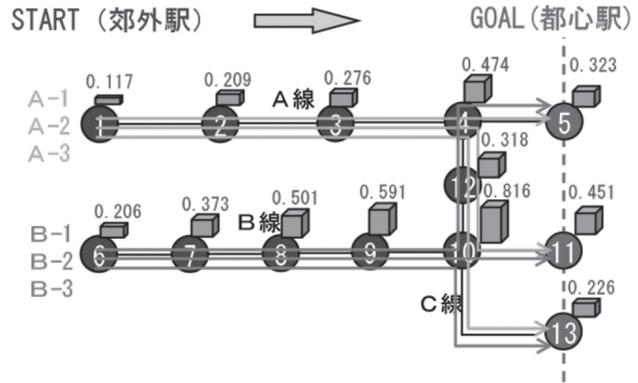
特に、事業継続計画策定(BCP、BCM)の必要性が叫ばれて久しいが、このような検討には、機能停止期間

(または復旧性能)の定量的予測が不可欠である。かつ対象施設によりその損傷特性は相当異なることになり、施設ごと、地域ごとに、地震時システムリスク解析を実行することを提案したい。

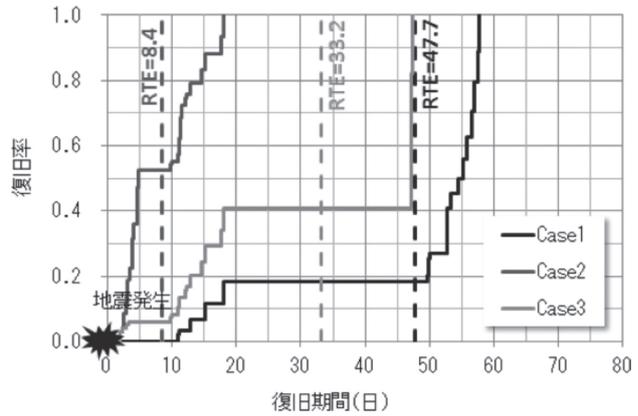
現在、浄水場施設、高速道路、生産施設(工場)、建築物のインフラ機能評価など多くの適用例を提示している。震災後の機能停止期間は、線状施設のシステム性能を評価するもので、国内外での適用事例は、きわめて限られている。

**縦断的耐震性能評価**

今回の東日本大震災では、広域の被災を経験し、多くの構造災害が発生している(その被災レベルと被災形態もさまざまである)。被災した構造施設は、異なる示方書・基準書による構造物、異なる構造形式・構造材料を含むものである。このような多種多様の構造物を「地震リスク」によって、同じ土俵上にて評価が可能となり、概念図を図5に例示した。



(a) 都市圏西部に想定した鉄道4路線：郊外A駅／B駅から環状線への通勤路線を設定



(b) 想定鉄道路線の地震システムリスク解析：関東地震 (M8.0) に対する復旧曲線 (A線：42.9km、B線：37.5km、C線：15.2km、総延長：95.6km)

図4 首都圏鉄道路線を対象としたシステムリスク解析に基づく復旧過程の解析事例

たとえば、わが国の代表的な設計基準である、道路橋示方書(道路協会)と鉄道構造物等設計標準・同解説(鉄道総合技術研究所編)を例にとっても、その形式・照査フォーマットはまったく異なる様相を呈する。さらには、土木施設の場合、構成する構造施設は、橋梁、高架橋、抗土圧構造物、地下構造物、容器構造など、多くの構

造形式を有し、これらの耐震安全性が必ずしも同一レベルとは言い難い。

図5の意味するところは、これらの異なる構造施設が、それぞれの準拠示方書または指針によって設計されるが、これらを横糸と考え、地震リスク評価(PML, AEL)が縦糸となり、同一の評価基準にて、同じ土俵にて耐震性能を評価することを提案す

各種構造物の設計基準・指針

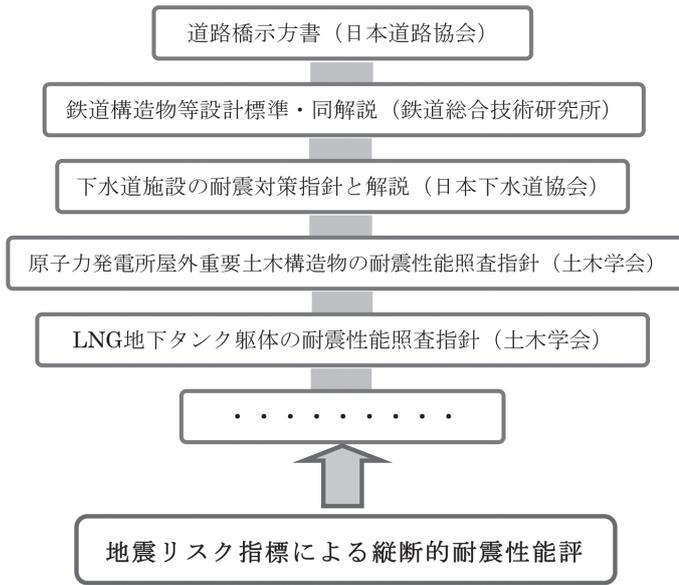


図5 地震リスク指標による縦断的耐震性能評価  
横糸: 現行各種示方書/指針類、縦糸: 地震リスク評価値 (PML475, AEL etc.)

るものである。さらに、加えるのであれば、現行体系化された性能設計は、「これだけの地震に耐えられる」ことを決められたルールのもとに照査するのに対して、地震リスクは「想定地震に対して、これだけ壊れる」ことを明示するものである。

## リスクの可視化 Risk Virtual Reality

最後に、リスク評価の出力と数値情報、バーチャルリアリティ（以下、VRと略す）の画像再現技術によって可視化することを提案したい。これは、対象構造物・入力地震動↓構造解析（動的応答解析）↓解析結果の出力↓VRによる可視化、このような流れによって具体化するもので、これまでの非線形解析の結果を、最先端のVR技術によって、ビジュアル化しようとするもので、Risk VR手法と呼ぶことにする。

図6は、Risk VR手法による強震下の橋梁被災（下部工）を可視化したもので、まずは、その画像をご覧いただきたい。これは、RC橋脚を対象として、履歴特性を持つファイバーモデルによる非線形構成則を用い、3次元の動的応答解析を実施し、コンクリー

トと鉄筋の非線形レベルに応じた画像を作画したものである。本例の場合、完全な自動化には至らないが、地震レベルと構造物の脆弱性に応じた被災レベルを、まさに「リアルに」直視することができ、エンジニア、事業者、使用者、市民の多くのステークホルダー（と呼んでいいだろう）にて防災情報を共有することが期待できる。

## 地震リスクの効用 あとがきに代えて

さて、本論のまとめとして、地震リスク評価による都市防災についての重要な事柄を再整理し、期待も込めて、あとがきとしたい。

- ・本書にて紹介した地震リスク評価は、ハザード解析、距離減衰、地盤増幅、構造物の応答・被災、など既往技術を導入し、信頼性理論によって統合したものである。言い換えると、リスク解析は、現行耐震技術の延長技術であるが、耐震性能設計が、「この設計震度では壊れない」ことを照査するのに対して、地震リスクは「これだけ壊れるかもしれない」ことを明示するものである。想定外／想定内の議論は、1-0議論（起きる／起きないの両極端議論）

であり、地震リスクは、1-0の間にある無数の被災可能性を示唆するものと理解している。

- ・都市防災、耐震補強戦略（順位付け）、BCP・BCM、リスクマネジメンツの策定・遂行には、保有リスクの分析が大前提となるが、地震リスクは、地震被害（損害額、停止日数など）を具体的に定量化するもので、すでに多くの分野に応用されている。

- ・本分野は、建築物のリスク評価（不動産のデューデリジェンス）などリスクビジネスにて先行・開発されてきたが、その手法は、近年土木分野にも浸透している。また、土木・建築両学会にて、地震リスクマネジメントに関連するシンポジウムが、期を一にして、開催されたことも付記したい。

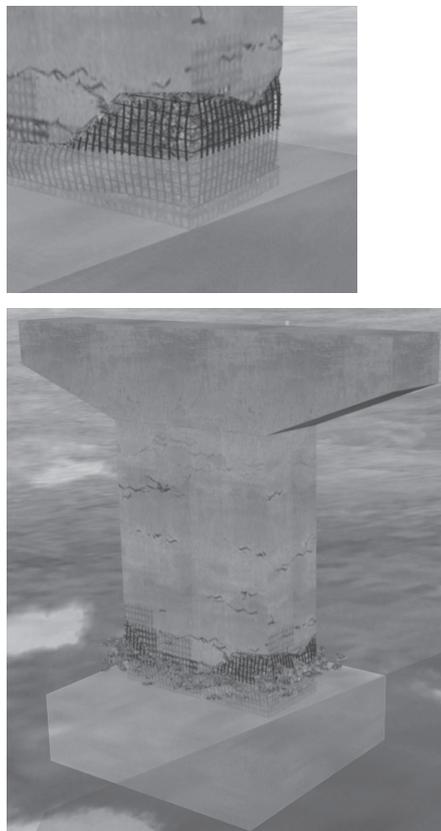


図6 地震リスクの可視化: Risk VR手法に基づく橋梁被災の再現

- ・地震リスク解析が認知・一般化される気運が整ったことも事実であるが、土木・建築分野に原子力施設も加えて、一案としては、Civil Engineeringの立場から大同団結し、わが国にて醸成された都市防災のソフト技術として統合・確立も今後の方向性として考えたい。

（吉川 弘道 フェロー会員 東京都市大学教授）

### 参考文献

- (1) 吉川弘道・鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析、丸善出版（2008年2月）
- (2) 地震時システムリスク研究会 活動報告書…システム機能モデルの構築と機能性評価（2010年5月）
- (3) 土木学会地震工学委員会 地震リスクマネジメントと事業継続性小委員会…第1回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム/委員会報告講演論文、2009年11月
- (4) 日本建築学会…地震リスク評価とリスクコミュニケーション、2009年日本建築学会大会東北（パネルディスカッション資料、2009年8月）