

防災・減災に欠かせない建設の力 ③

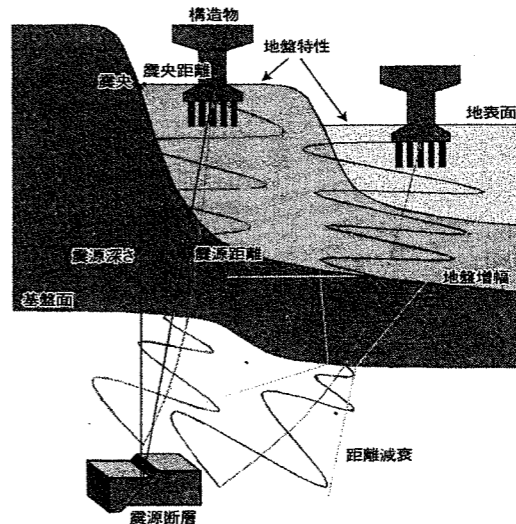


図1 地震波の発生・伝播・増幅と構造物の応答と被災
震源断層から発生した地震波は、数キロメートルから数百キロメートルに及ぶ距離の地盤を伝播し、建設地点の地盤にて変化・増幅する。ついでには、地震波が基礎より入り、構造物は応答し、時として甚大な災害となる。

地震工学・耐震設計は多くの要素技術によって構成され、現在は性能照査型耐震設計が定着しているが、ここでは筆者が提唱する地震リスクを加えて報告したい。耐震性能設計と地震リスク評価は、防災・減災技術を支える重要なソフト技術の両輪として機能するものである。ここでは、両輪の特徴と上手な使い分けを提案したい。

東京都市大学 工学部都市工学科(災害軽減工学) 教授
吉川 弘道

性能設計と地震リスク評価 防災・減災技術を支えるソフト技術の両輪

上手な使い分け提案

震源断層から構造物の被災まで、地震時に構造物が大きく揺れ動き、時として甚大な被害を被るのは、どのようなメカニズムによるものだろうか？これを一言で言い表すことは容易ではない。このように呼ばれて、地震防災の観点から極めて基本的な概念であるが、わが国では両者を統合した議論が散見されるに過ぎない。私の拙著では前者 Demand を「オフフェンス攻撃」、後者 Capacity を「ディフェンス(防御)」と喻えて、この二つがあるが、設計エンジニアに好評であった。耐震性能設計と地震リスク(ここで採り上げる耐震設計(性能照査型)と地震リスク)は、地震発生確率とそのときの被災規模の積により定義される。一方、地震リスク(Engineering Risk)は、地震発生確率と特定の構造物に適用したリスク評価による。表1では、ソフト技術の両輪を比較・説明したが、次の点を付記したい。

義のリスク(Engineering Risk)は、地震発生確率と特定の構造物に適用したリスク評価による。表1では、ソフト技術の両輪を比較・説明したが、次の点を付記したい。

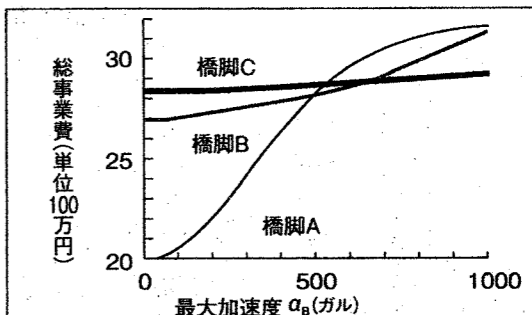


図2 地震リスク関数を援用した事業費の算定:耐震補強戦略
橋脚A 道路橋示方書(旧基準)に設計、耐震・耐力とも不十分で、現行示方書の耐震性能を満たさない。
橋脚B 橋脚Aに対し、現行示方書を満たすような耐震補強(t=250ミリメートルRC巻立て補強費概算700万円)を実施。
橋脚C 現行示方書に準拠し断面性能を増強した(新設または再構築したものと考える)。

「**私たちが築くのは、
ごころです。**」

今、人は地球について考えています。そして、自然のことを想っています。地球があって、緑にあふれ、人々が生活する。私たちはそんな基本的なことから考えたい。私たちのふるさと・地球にやさしい技術の確立。熊谷組の変わらぬテーマです。

—人と地球の未来を考える—
熊谷組
本社 ● 〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1 TEL: 03-3260-2111
ホームページ URL http://www.kumagagumi.co.jp

表1 性能設計と地震リスク評価:特徴と概要

	耐震性能設計 performance-based seismic design	地震リスク seismic risk assessment
概要・趣旨と内容	構造物の新設時に行う構造設計。構造種別・事業所毎に制定されている示方書/指針に準拠する。従来の仕様設計から、構造/機能の性能を直接照査し、準拠示方書の計算式に従って判定される。	地震強度(地震ハザード)と構造物脆弱性(フラジリティ特性)から、直接構造被害の可能性を算定する。信頼性理論を援用して、発生確率×被災程度によって定量化される。
設計/評価概要:地震動、構造特性、最終出力		
a: 入力値/地震動	レベル1/レベル2地震動(多段階設定): ・修正震度法:設計スペクトル ・非線形スペクトル法:韧性評価 ・動的応答解析法:時刻歴史波形	ハザード曲線:地震動規模(PGV/PGA)の超過関数として表される。通常、J-SHISモデルに基づき、近年、複数震源モデルが多用される。
b: 入力/構造物特性	・構造諸元/材料特性を事前に分析/入力。 ・構造系(2次元/3次元モデル)、復元力特性、静的動的な特性etc.を入力	・フラジリティ曲線/地震ロス関数(被災規模の確率関数)により定義する。 ・再調達価格(金額)、機能停止期間(日/月)のようにな有用な定量化を採用。
c: 最終的出力	設計照査結果:各種照査式による判定結果 道路示方書の場合: $P_a > R_{hc}W$: OK コンクリート示方書の場合: $V_c \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0$: OK	AEL: 年間損失期待値 NEL: 地震損失の期待値 PML: 予想最大損失 VaR, Tail-VaR, etc. ボルトネック指数
適用示方書 適用事例	・道路橋示方書同解説(道路協会):5編のうち耐震設計編 ・鉄道橋示方書同解説(鉄道総合技術研究所) ・コンクリート標準示方書(土木学会) この他にも、土木学会/各協会より多くの示方書/指針/ガイドラインが発刊されている(その実数は調査中)。	・リスクビジネスにおける個別解析事例 ・土木学会/日本建築学会の委員会報告 ・不動産エンジニアリングレポート(耐震PML評価)

△事例① 地震ロス関数による耐震補強評価
まず、RC橋脚を対象とした耐震補強戦略を提示した(図2)。これは、当該構造物の事業費用を、「事業費用+初期建設費用+耐震補強費用+地震損失」として試算したものである。ここでは、地震ロス関数を援用して地震損失を算定したことがポイントであり、図の横軸が最大加速度 a_g である。図の末尾に示したような橋脚A、橋脚B、橋脚Cの3橋脚を想定している。

広範囲なリスクシミュレーション実施 構造形式ごとに検討・精査を

図2の開始点(基盤加速度 $\alpha_B=10\%$)の値は、既に発生した費用(初期費用+補強費用)を意味し、地震動強さ α_B の増大とともに、地震損失の規模が大きくなり、やがては大破(全損失)に及ぶ頭打ちとなる。ここで、地震動強さ α_B の増加に対する事業費の増加割合が、3橋脚で異なることに注意されたい。

橋脚Aは耐力・靱性が最も小さいが、中程度の地震動 ($\alpha_B=400\%$) まで、その事業費が他の2橋脚よりも低い。しかし、地震動の大きさが500%程度となる3橋脚の大小関係が逆転し、耐震補強された橋脚Bの場合が最も低くなる。そして、初期費用が一番高い橋脚Cは、600%以上の地震動(相当大きい地震イベント)に対し、事業費が最も低くなっていることがわかる。このような試算が地震リスク解析手法で可能となり、例えば、ライフサイクルコストに比べて、現行設計法との整合性がとれ、使い勝手も良いと言えよう。

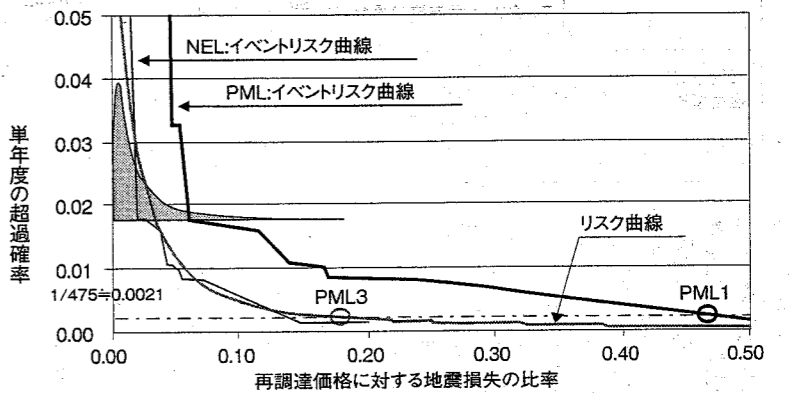


図3 複数震源モデルによる地震イベントリスク曲線

▽事例② 複数震源モデルによるリスク曲線
近年、地震ハザードとして、複数震源モデル(Multiple Event Model)を採用し、地震イベントリスク曲線として表示することが主流となっており、その一例を図3に示した。これは、対象建設サイト周辺(例えば、半径300m以内)の全地震動をサーチして、個々の震源に対し、発生確率と地震特性(震源種別、マグニチュード、震源深さなど)をリストアップするところから始まる。そして、伝播特性(距離減衰)と地盤増幅率により、到達地点(建設サイト)における地震動強度(最大加速度、最大速度など)を算定する。そして、対象構造物の脆弱性(フラシリティ曲線、または地震ロス関数)を評価する。最終的にこれら両者を信頼性理論に基づいて地震リスク曲線を表すことができる。図3は、特に、地震イベントリスク曲線と呼ばれる。

(1)では、リスク指標値(1)で、地震損失の期待値(ELI=Normal Expected Loss)および予想最大損失(PML=Probable Maximum Loss)を示している。図4は耐震と荷重Sの確率密度関数、およびリスク指標値を時系列上で模式化したものである。これを既存構造物の維持管理システムとして提案したい。

(2)では、新設時(t=0年)では、所定の標準示方書に基づいて構造設計(耐震設計)がなされるが、その後、経年劣化、荷重負荷、環境負荷による耐力R

最後に、ソフト技術の両輪を併用した応用事例を提示したい。図4は耐震と荷重Sの確率密度関数、およびリスク指標値を時系列上で模式化したものである。これを既存構造物の維持管理システムとして提案したい。

ソフト技術の再評価
昨年の大震災以来、ハード的な防災措置に対して、ソフト技術が叫ばれている。昨今、構造物の耐震技術の原点とも言うべき「耐震設計」を改めて採りあげ、同時に近年導入の機運のある「地震リスク解析」を紹介し、両者を「ソフト技術の両輪」と称したことを、再度、強調したい。今後は広範囲な構造形式のリスクシミュレーションを実施し、個々の構造形式毎に検討と精査を深めることが直近の課題と考える(詳しくは、著者のホームページ「※3」を閲覧されたい)。

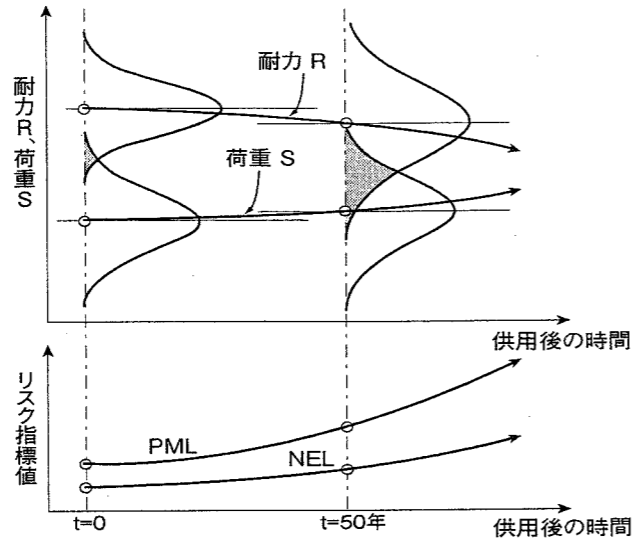


図4 時系列リスク評価による構造物の安全性評価・維持管理システムへの応用

※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2008.2)
[2] 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回シンポジウム、委員会報告・講演論文(2009.11)
[3] 地震に負けないエンジニアリング講座・耐震設計と地震リスク II www.sfm-dcp.com/