

ライフサイクル地震損失コスト の考え方と事例

井関 泰文¹・増川 淳二²

¹正会員 (株)イー・アール・エス (〒102-0083 東京都港区赤坂 3-11-15)

²正会員 鹿島建設(株) (〒107-8388 東京都港区元赤坂 1-2-7)

本報は、地震リスクマネジメントにおける対策意思決定のための指標の1つとして、「ライフサイクル地震損失コスト」の考え方について紹介する。「ライフサイクル地震損失コスト」は、予定供用期間中の年間期待損失額の合計として算出され、新設、既存施設の耐震性能レベルの検討に用いることができる。

分析事例として、高架橋を対象とした解析的アプローチによる物的地震損失の予測システムを紹介している。

Key Words: Risk Management, Seismic Risk, Life Cycle Cost, Risk Curve, RC structure

1. まえがき

阪神淡路大震災を教訓に、耐震性の低い建造物の耐震補強の重要性が改めて認識された。また、近年経年劣化による既存建造物の耐力低下が問題になってきている。これらに対応するための耐震補強の要否、時期、及び性能レベルを決める際にも、新設建造物と同様に対象施設が抱える地震リスクを考えた意思決定が必要である。

本報では、地震リスクマネジメントの考え方について概説した後、対策意思決定のための指標の1つとして、ライフサイクル地震損失コストについて紹介する。

ライフサイクル地震損失コストは、補強や劣化による建造物の各部材の耐力変化を考慮しながら、地震による物的被害の復旧コストや営業損失として算出される年間期待損失額の耐用年数期間中の合計として算出される。耐震性能向上による便益は、その後の地震リスクの低減量として評価される。

ライフサイクル地震損失コストは、維持管理費用などを含むライフサイクルコスト(LCC)の一部として考慮することになる。

2. 地震リスクマネジメント

「リスクマネジメント」は、対象とするリスク(社会・経済的損失の可能性)に対し、できるだけ合理的な判断基準によりその対策の意思決定を行うプロセスを意味する。この場合、関係者の合意を得るためにで

きるだけエンジニア以外の人々にも理解しやすい形でリスクの大きさを説明することが重要である。企業の場合にはエンジニア出身でない経営トップ、あるいは公共施設であれば一般住民などが対象となる。

エンジニアは、地震動の大きさと構築物の損傷(コンクリートのひび割れ~倒壊など)の関係解明に目を向け勝ちであるが、経営者や損害保険会社は、対象施設全体がどの程度の確率でどの程度の損失(経済的損失)を受けるかを重要視する。

まず重要な点は、リスクを構成する要素を明確にすることである。一般の建造物設計では、耐用年数に1~2度は来ると考えられる地震動に対してはその機能を維持し、発生する可能性は極めて小さいがゼロとはいえない地震動に対しては人命に係るような構造被害が発生しないこととされる。一方、例えば企業を例にとった場合には、

- ① 従業員や第三者の人身損失
- ② 物的被害損失(修復費用)
- ③ 営業停止による営業利益損失
- ④ 取引関係のある企業に間接的に及ぶ損失
- ⑤ 長期的な企業評価の低下による損失

などの多様な損失を評価する必要がある。特に、①と⑤を除く3つの項目に対しては、金銭価値として評価されてこそ、エンジニア以外の関係者を含めた判断が可能になると考えられる。

次に重要な点は、損失の大きさに対する企業経営への影響度合を明確にすることである。その程度は、企業の置かれる内的・外的環境によって異なるため、実

際には財務状況や市場動向などを考慮しながら、これらのリスクへの対応を決定することになる。

例えば、同じような売上高の企業でも、1億円の地震による損失が多大な影響をその企業に与え、倒産に追い込まれることがある一方、内部留保金を抱える財務状況の良い企業にとっては、10億円の損失により倒産となることは無い場合がある。

いずれにせよ、リスクマネジメントの重要なポイントは、できるだけ一般化された指標（今のところは金銭価値がベスト）によりリスクを定量化し、その対策費用についても同指標で評価することにより最適な対策の意思決定をすることにある。特に、本報では扱わない企業地震保険などのファイナンシャルな対策法では、金銭価値としてのリスク評価は不可欠である。

3. ライフサイクル地震損失コスト

発生確率の低い巨大地震によっても損傷を受けることが無いように構造物を構築することは、その経済性から考えて適切な判断ではない。このことは、構造物はその耐用期間中に、地震による被害を受ける可能性を許容することを意味する。どのような耐震性能レベルを構造物に持たせることが、先に述べたリスクマネジメントの観点から最適となるであろうか？

近年、我国の構築物の設計においても、ライフサイクルコスト(LCC)の概念が重要との認識が強くなってきた。構築物はその機能を果たすためには、完成後の維持補修の費用は必要不可欠である。1年間では小さくてもその予定供用年数である50~100年で考えると、かなり大きな費用となる。従って、初期の建設時においても、将来のLCCを見据えた計画・設計は重要である。この場合の供用時のコストにおいて、各種の自然災害リスクのコストも対象とされるべきである。

$$LCC = \text{初期建設費用} + \text{維持管理補修費用} + \text{廃棄費用} \\ + \text{自然災害リスク費用（地震など）} \quad (1)$$

我国では、世界有数の地震国であるにも係らず地震保険の普及が遅れているといわれている。地震リスク対策として保険を利用するならば、明らかに毎年のお費として地震リスク対策コストが計上されることになる。仮に、企業地震保険料の支出がないとしても、経済活動を行う主体としては、抱えているリスクを可能な限り定量的に、できれば金銭価値として評価するこ

とが重要である。

地震で難しいのは、例えば今後30年間にどの程度の規模の地震が発生するかを確定することはできないことである。従って、合理的な説明を展開するためには地震動を確率事象として扱うこととなる。

予定供用年数など時間の概念を入れたライフサイクル地震損失コストは、年期待（平均）損失額に割引率の概念を導入し、式(2)で算出される。ここで、 C_i としているのは、構造物の経年劣化による耐力低下を考慮した各年度の地震リスク量を変数となることを意味している。

$$C_{ERLCC} = \sum_{i=1}^T \frac{C_i}{(r+1)^{i-1}} \quad (2)$$

C_{ERLCC} : ライフサイクル地震損失コスト

C_i : i 年目の年間期待（平均）損失額

i : 年度

T : 予定供用年数

r : 割引率

以上では、施設保有者の観点から考えているのでリスク合計年数を予定供用年数としているが、例えば建設費用を債券化する場合などは、その投資家にとってのリスク対象年数はその償還期間となる。

4. ライフサイクル地震損失コストの算出法

(1) 地震リスク（予想損失額）の算出

我国では、一部の土木構造物については実際の被害事例に基づいて地震動と損傷程度の間係を整理したものが報告されている。^{1) 2)} 建築物の場合は、阪神淡路大震災を初めとした数多くの地震被害が分析され、構造種別毎の地震動と被害状況の間係を損傷度関数（フレンジー曲線と呼ばれる）としてまとめられている。さらに、建築物の構造部材・非構造部材・設備など建物全体の地震による損失額を、再調達価格（対象建物を新築する場合に要する費用）に対する比（損失率）から予測するシステムなども開発されている。

なお、米国連邦危機管理局 FEMA が開発した地震被害予測システム HAZUS では、各種の土木構造物における損傷率・損失曲線が規定されている³⁾。

これらはいずれも簡易化された被害予測手法であり、適用に際しては地震動特性や動的構造特性などを詳細に反映することは困難である。

実被害データに基づいた損傷度曲線や損失曲線が得られない場合、解析的なアプローチから損傷度を予測し、その損傷を修復に必要な工事費用や必要日数を別途算出するといった手法が必要となる。

(2) 解析的な地震リスク算出法

図-1は、ライフサイクル地震損失コスト算定を目的として開発されたシステムの分析フローを示す。このシステムは、任意のRC骨組構造物を対象としたものであり、骨組解析、応答解析、地震損失コスト算定の3つから構成されている。既に、幾つかの論文等⁴⁾にこれらの分析内容を説明したものがあるので、詳細については省略する。

骨組解析では、構造物を骨組でモデル化して荷重-変位(頭部)関係を計算し(プッシュオーバー解析)、それぞれの変位レベルによって規定される各部材の損傷レベルとあらかじめ用意された損傷レベルに応じた部位別補修費データベースから復旧コストを算定する。

応答解析では、骨組解析結果を元に作成された質点系モデルに対する時刻歴地震応答解析を行うことができ、設定された地震動に対する最大塑性応答変位の算定ができる。入力地震動については、対象構造物地点における工学基盤での等リスク応答スペクトルと地震

ハザード曲線から、サンプル波を作成している。

対象とする構造物に損傷を与える地震動については、様々な大きさのものが考えられるのは言うまでもない。従って、上記のハザード曲線上の幾つかの地震動レベルに対して動解を実施し、その結果として予測される損傷状態から損失額を算定する。この手順を踏むことにより、得られる地震動の年超過確率と損失額を表すポイントを連ねたリスクカーブ(横軸: 予想損失額、縦軸: 年超過確率)を作成する。リスクカーブと横軸・縦軸とで囲まれた面積は年期待損失額を意味する。この値を式(2)に準じて予定残存供用期間の合計として算出したものが、ライフサイクル地震損失コストとなる。

なお、開発したシステムでは、構造物の残存供用期間中の劣化及び補強等による耐力の変化を破壊モード・部材・経過年次毎に考慮できるように、耐力変化率を入力できるようにしている。

損失対象としては、復旧までに要する関連主体の経済損失を考慮する必要がある。例えば、対象施設の利用者から収入を得ている主体にとっては営業利益の損失であり、その利用者にとっては、利用できないことによる二次的な経済損失である。

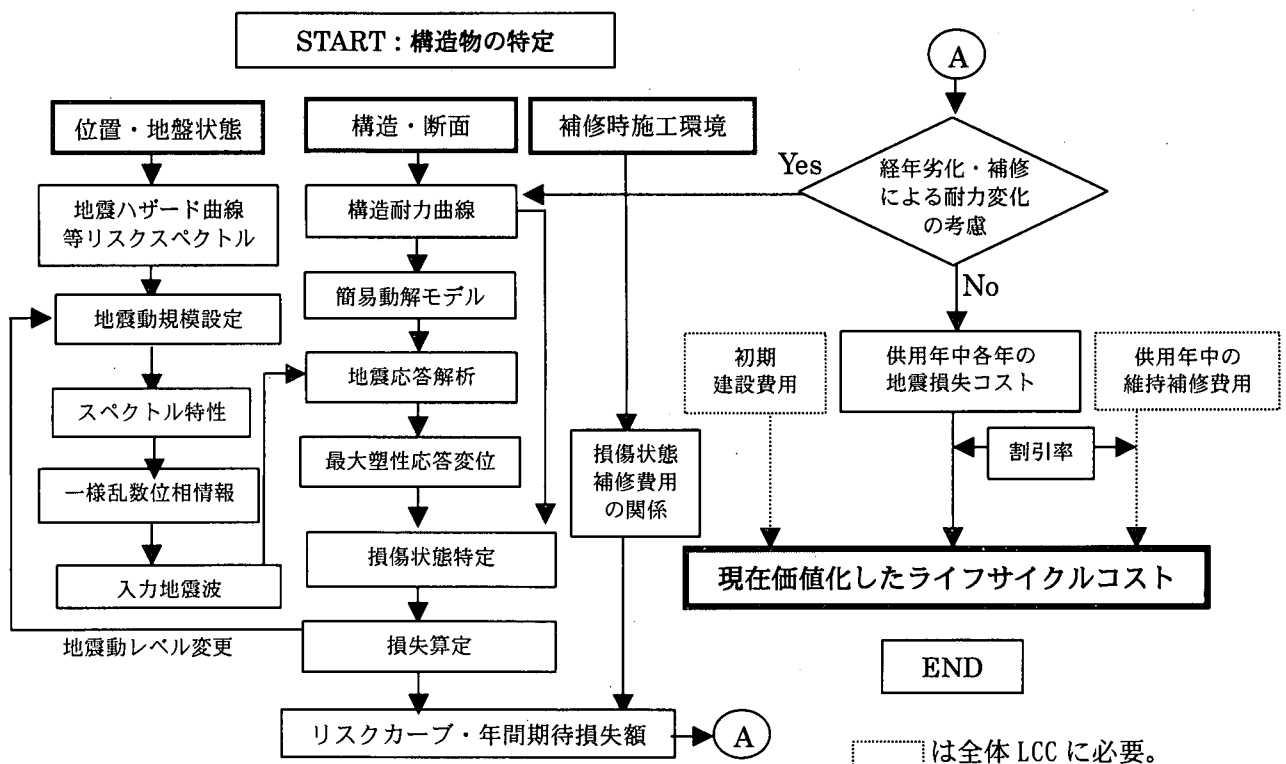


図-1 高架橋のライフサイクル地震損失コスト算定システムフロー

(3) 不確定性の問題

地震動による構造物の損傷度の算出過程においては、様々な不確定性が含まれている。震源モデル、地震動伝播などの地震動に関するもの、そして構造物の耐力に関するものである。

図-1に示すフローでは、動的解析に用いる入力地震動として、等リスク応答スペクトルを満足する多数の波形を用いたシミュレーション解析を行うことにより、不確定性を考慮することができる。また、耐力については、確率分布として定義することにより特定の地震動に対しても様々な損傷レベルとなる現象を表現することが可能になる。

耐震性能レベルを決める意思決定者には、最終的に得られる年期待損失額やライフサイクル地震損失コストが重要な指標であるが、この値が有する不確定性に関する議論については、一部の研究⁵⁾があるものの、筆者の知る範囲では明快な考え方が整理されていないようである。

不確定性の議論の必要性については、期待効用理論⁶⁾という概念により説明されるが、効用関数の決定自体が簡単ではないという課題もあり、構造物の地震リスクマネジメントでの扱いの研究が必要である。

(4) 時系列変化の考慮

年間期待損失額は、厳密に言えば分析時点における地震危険度と構造物の耐力状態に対して算出されるものである。

地震危険度については、時間依存性を考慮できる地震については、毎年その発生確率が変化していく。例えば、ある地震が今後10年間発生しなかった場合には、10年後に予想される地震の年発生確率は現時点に比較すると大きなものとなる。ライフサイクル地震損失コストを構成する各年の年期待損失額を算出する際に地震発生確率の時間依存性をどのように考慮すべきかについては、今後の検討が必要である。

一方、構造物の耐力に関しては建設時の設計施工品質や構造物の置かれた外的環境によりその進展スピードに差があるものの確実に劣化する。従って、有意な劣化が予想される耐用年数に対して議論を進める場合には、この影響を考慮する必要がある。本報で紹介しているシステムでは、この現象を考慮できるようにしているが、構造物の置かれた環境特性を考慮した実際の劣化進行度の予測に関する研究成果を反映する必要がある。

5. 解析事例

(1) ライフサイクル地震損失コストの算出

以下の事例における損失額については、一般構造物としては実際より過大な数値となっているので、内容については算出手法の理解の資料と考えて頂きたい。

図-2は、仮想の事例として分析を実施した鉄道高架橋橋脚のモデル概要図(橋脚を中心に10mスパンの1スパン分を取り出して解析)を示す。地中部の杭基礎には、地盤バネをつけたモデルとしている。部材の復元力モデルと関連付けた損傷レベルについては、図-3に示す設定をしている。

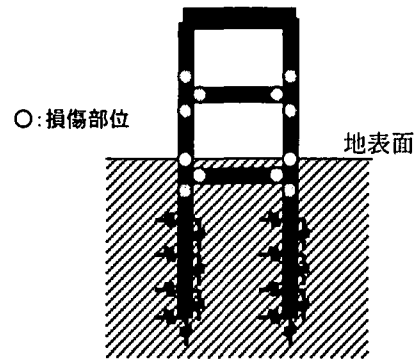
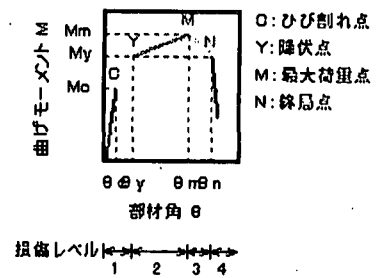


図-2 高架橋解析モデル

【凡例】

- 無損傷
- 曲げひび割れ(小)
- 曲げひび割れ(大)
- かぶり剥離・鉄筋座屈
- 曲げ破壊
- せん断破壊



損傷レベル	損傷状況
1	無
2	場合によっては補修が必要
3	補修が必要
4	補修が必要、場合によっては部材の取替えが必要

図-3 RC部材の復元力モデルと損傷レベル

図-4～7は、それぞれ解析途中の結果をパソコン画面で表示したものである。図-4は、上記の骨組モデルの頭部に荷重を作用させた場合の荷重-変位の関係を示す。図-5は、図-4の頭部変位量に対応して規定される各構造部位の損傷を修復するために要する費用を算出した結果をグラフ化したものである。

図-6は、対象地点の地震危険度解析により得られたハザード曲線を示す。

図-7は、最大加速度を変化させながら対象橋脚の質点モデルに、最大加速度を変化させた地震波を用いて実施した動的解析により得られる経過年数ごとの損傷復旧費用と、地震波の最大加速度との関係を示した図である。ここでの地震波形は、対象地点に設定された等リスク応答スペクトルに適合するように作成している。損傷復旧費用は、動的解析から算出される橋脚頭部の最大応答変位から図-5の関係図に従って、順次様々な大きさの地震動レベル対して算出される。

【荷重-変位】

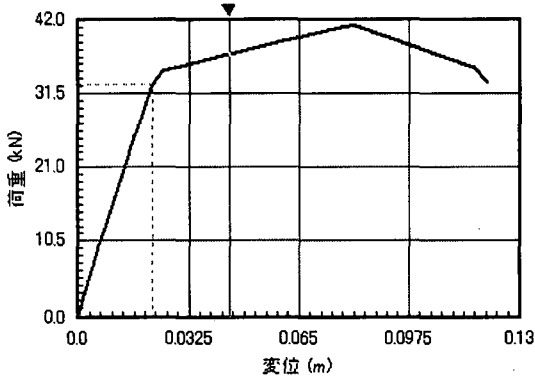


図-4 橋脚頭部における荷重-変位の関係

【復旧コスト-応答変位】

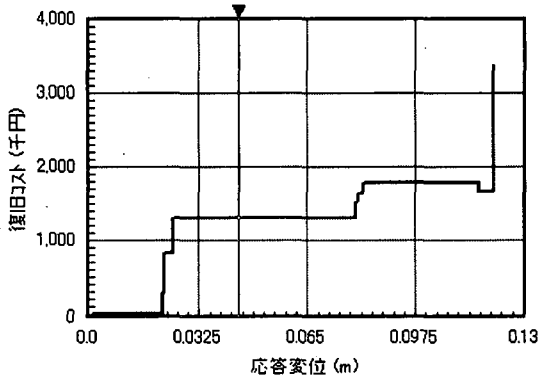


図-5 橋脚頭部応答変位-復旧コストの関係

【ハザード曲線】

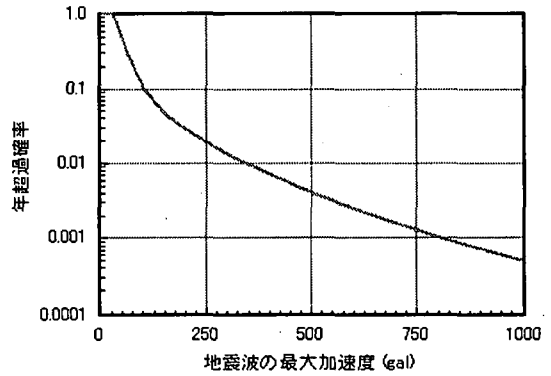


図-6 対象地点の地震危険度分析結果

【復旧コスト-最大加速度】

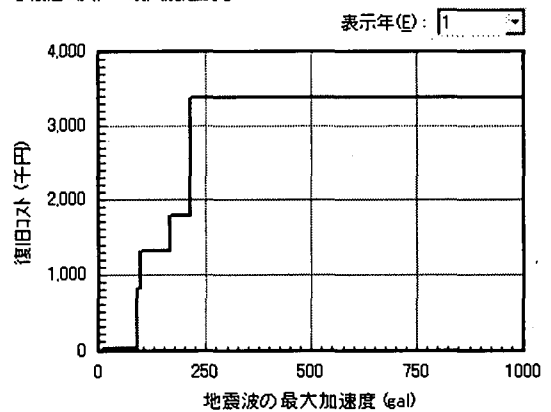


図-7 地震波最大速度と復旧コストの関係

図-8は、例題として設定した構造物の耐力変化を示している。この事例では、残存供用期間 50 年の内、9～12 年目に耐力低下が進行し、13 年目に補修により耐力を回復したもとしている（以降の年の説明は省略）。

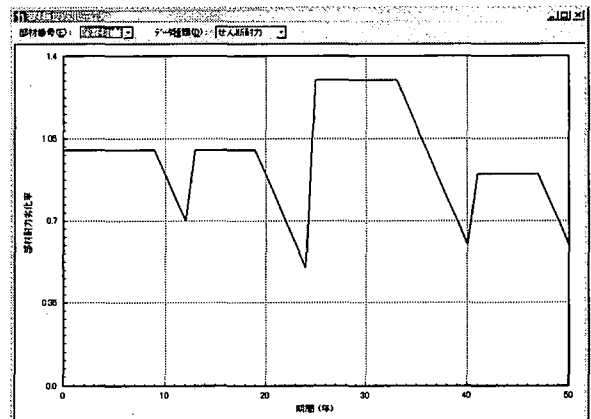


図-8 構造物の耐力低下/回復の設定例

図-9は、図-8で設定した残存供用期間中の劣化を考慮した場合の、各年の年間期待損失額の経年変化を示す。当然のことであるが、劣化による耐力低下により年期期待損失額が大きくなることが判る。

図-10は、図-9を累積値として表示したものである。例えば、残存供用年数が13年の場合、地震損失コスト（地震リスク）は現在価値ベースで330万円程度であり、50年とすると830万円となる（この例では13、25、41年目に劣化補修や耐震補強を実施している）。

【地震損失コストの年期待値】

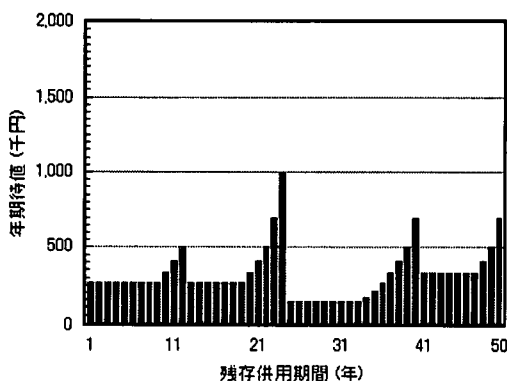


図-9 耐力の経年変化を考慮した年期期待損失額の経年変化

【ライフサイクル地震損失コスト】

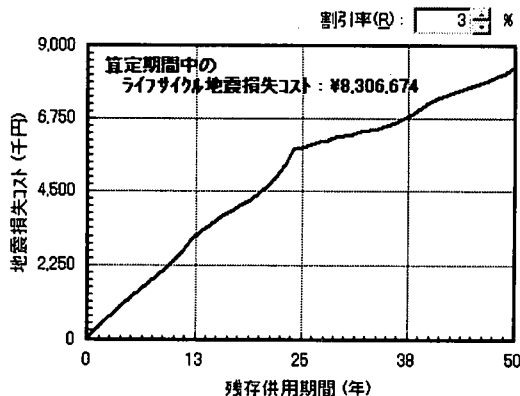


図-10 ライフサイクル地震損失コスト

(2) リスクカーブ

上記の計算過程では触れなかったが、各年の年間期待損失額を算出する上で作成されるリスクカーブを示すと図-11のようになる。滑らかなカーブとなっていないのは、図-7に示すように入力地震動の最大加速度と復旧コストの関係がステップ関数になっているためである。図中には、1年目のものと劣化が進んだ状態として12年目と24年目を併記している。

1年目のリスクカーブからは、約30%の確率で130万円以上の損失が出ることとなっている。リスクマネ

ジメントでは、しばしば年間期待損失額に着目した意思決定が行われているが、大きな議論の余地がある。すなわち、確率が低くてもリスク主体に致命的な影響を与える損失への対応である。対策手法としては、耐震性の向上を図ることも1つであるが、地震保険を始めとしたファイナンシャルな対策も考えられる。

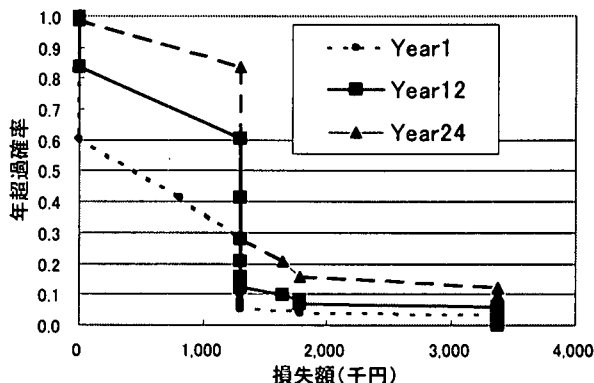


図-11 リスクカーブ (Year1, 12, 24)

(3) 耐震性能の検討

以上のようにして算出されたライフサイクル地震損失コストは、対象構造物の耐震性により異なる。しかし、耐震性能を向上させるには初期費用が高くなるので、図-12に示すように、幾つかのレベルの耐震性能を持つ計画に対して、その初期費用、地震損失コスト、(維持管理費用)の合計が最小となる解を見つけることになる。図-12では、ポイントAがそれに当たるが、前述の不確定性の要素や、低確率だが致命的な影響を与える可能性のある地震のことも考慮しながら、ハード対策以外も勘案して、リスク主体としての最適解を決定する必要がある。

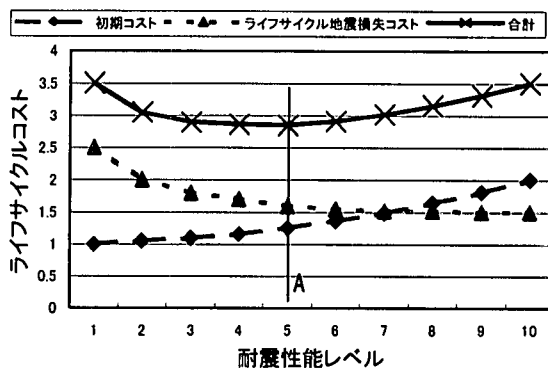


図-12 最適耐震性能の検討図

一方、既存施設の耐震補強について、費用便益比の考え方から検討する場合、耐震性能向上のための投資費用と、それにより低減される地震損失コスト(便益)の大小関係の議論となる。例えば、図-12において「初期コスト」を「耐震補強費用(1の状態からの増分のみ着目)」と読み替えて説明すると、耐震性能を1(既存状態と仮定)から7(補強による)に向上させるために0.5の投資が必要となり、以降の地震損失コストは1.0の低減となるため、B/Cは2.0となり一般論としては投資が推奨されることになる。

年間投資費用に制限がある場合に、既存施設の耐震補強の妥当性やその優先順位を議論するには、こうした費用便益の定量化などによる判断が必要となる。

6. 今後の課題

ライフサイクル地震損失コストの考え方における留意点整理すると以下ようになる。

<解析方法に関して>

- ① 距離減衰式の不確定性の考慮
- ② 動的解析モデルの適切な精度
- ③ ②とも関連するが、実際の地震動における損傷、損失の予測精度
- ④ 劣化進展予測精度の検証
- ⑤ 地震ハザードの経年変化の考え方

<地震リスクマネジメントとして>

- ① 単体の構造物でなく、ある特定のシステムとしてのリスク分析モデルの構築
- ② 各リスク主体の特性を反映した対策意思決定のための指標の在り方(本報では予定供用年数分の年間期待損失の現在価値総計としている)
- ③ 地震リスクのヘッジ方法のあり方
- ④ 地震リスクを考慮した劣化補修時期の決定法

7. 最後に

地震リスクマネジメントでは、リスク評価の精度に議論が集中するが、リスクマネジメントの考え方が必ずしも定着していない我が国においては有効性を主張する努力も重要であろう。多くの施設・構造物を抱えた企業にとっては、個々の施設・構造物の地震リスクを時間と費用を掛けて精度よく算定することも現時点では困難であることから、一定の精度を確保できる簡便な方法論の構築が求められていることを忘れてはならない。今後、さらなる耐震工学技術の向上により解決されていく部分もあろうが、その時々に応用可能な技術と情報により、各リスク主体として適用すべきリスク評価の内容を判断することが重要である。

(2002.1.18 受付)

参考文献

- 1) 佐々木義裕、清水保明、砂坂善雄：地震被害に基づくトンネル・土構造物の損傷度曲線に関する研究、地域安全学会研究発表会梗概集、pp.17-20、2000。
- 2) 山崎文雄、大西淳一、田山聡、高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案、第10回日本地震工学シンポジウム講演集、pp.3491-3496、1998。
- 3) HAZUS: Earthquake Loss Estimation Methodology, Technical Manual. Prepared by the National Institute of Building Science for Federal Emergency Management Agency.、1999。
- 4) 玉井真一、笹谷輝勝、渡部忠朋：コンクリート構造物の耐震性能とライフサイクルコスト、コンクリート技術シリーズコンクリート構造物の耐震性能照査、社団法人土木学会、pp.179-202、2000。
- 5) Werner ,S.D., Taylor, C.E., James ,E.,Moore III, Walton, J.S., Cho ,S.: A Risk-Based Methodology for Assessing the Seismic Performance of Highway Systems, Technical Report MCEER-00-0041, 2000。
- 6) 酒井泰弘：リスクの経済学、1996。

IDEA OF THE LIFE CYCLE LOSS COSTS DUE TO SEISMIC DAMEGES

Yasufumi Iseki (ERS Corporation), Junji Masukawa (Kajima Corporation)

This report presents the idea of seismic risk management and life cycle seismic loss costs, which is used as an index for decision making of countermeasures against earthquake-induced loss. The life cycle seismic loss cost is defined as a total monetary value of average annualized loss (AAL) due to seismic damages during future lifetime of object facilities. The value is used to determine the seismic design level of newly developed facilities and existing ones.

An analytical system for RC frame structures is introduced as an example to calculate an AAL and life cycle seismic loss costs.