

## 6. 経済性指標に基づく耐震性能の評価事例

### 6.1 概説

本報告では、ライフサイクルコストを最小化するという経済性照査の観点からの耐震設計法について論じている。本章では、高架橋を対象とした2つのケーススタディについて示す。

6.2 は佐藤委員他によるもので、高架道路橋を対象として、地域的な地震危険度の高低ならびに社会的重要度が変化した場合の期待総費用（初期コストと供用期間におけるリスクの和）の違いについて分析している。そこでは3.3で述べた照査法のうち、ハザード曲線とフラジリティ曲線による照査法を用いている。6.3 は鹿島の井関氏らの研究グループによるもので、本ワーキングで話題提供としてお話しいただいたものである。鉄道高架橋の橋脚を対象として、耐力の経年変化を考慮したライフサイクル地震損失と初期コストの総和を最小化するような耐震性能レベルを求める方法論について示している。ここではハザード曲線に適合する模擬地震動を用いた地震応答解析を用いている。なお、6.3で用いられている「地震損失コスト」は概念としては間接被害を含むものであるが、例題では「復旧コスト」が対象とされている。いずれの事例でも、レベル2地震動による耐震性能（安全性）の拘束（図3.3-3）は陽な形では盛り込まれていないが、地震ハザード評価、応答・損傷の評価、ライフサイクルコストの評価という一連の検討の流れを具体的に理解することができる。

構造物の地震リスク評価については、数年来多くの研究が行われるようになっており、特に建物の不動産評価の分野では地震リスクの高低を表わす指標としてPMLが普及しつつある<sup>1)-3)</sup>。地震リスク評価に関わる種々の不確定性を定量化するには必ずしもデータが十分でないこと、ライフサイクルコストの定義や評価方法が必ずしも標準化された現状にはないことなど、今後多くの研究課題を残すが、公共投資に対する説明責任が厳しく問われている現在において、構造物の耐震設計にも経済性の観点を盛り込んでいくことは不可避な要請である。

ハザード評価、フラジリティ評価、損失コストなどに関するデータベースを組織的に構築していくことに加えて、実地震の際に生じた被害を経済性も含めて定量化し、開示していくことが今後は必要である。

### 参考文献（6.1）

- 1) 石川裕ほか：建物の地震リスクの評価方法，日本建築学会技術報告集，第11号，pp.275-278，2000.
- 2) 福島誠一郎ほか：地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価，日本建築学会計画系論文集，第552号，pp.169-176，2002.
- 3) （PMLの定義）建築・設備維持保全推進協会：不動産投資・取引におけるエンジニアリングレポート作成に係るガイドライン，pp.71-82，2001.

## 6.2 高架道路橋に対する目標性能設定

### (1) 概説

経済性によって設計の内容を「調整」することが合理性をもち得るということを示すための試算例を、以下(2)～(5)に示す。この計算を行った基本的な問題意識は、「全国一律の基準による設計」から「地域ごとの構造物の利用状況を反映した設計」の可能性を模索するところにある。昨今の高速道路誘致論議も念頭にあるが、「全国道路ネットワークの幹線部分でなく、地域への取り付け部分」で、部分の安全性のシステム全体への波及効果が低く、しかも「自主財源でコストダウンが必要とされる」状況が生じたときに、どのようなオプションがあり得るか、そのためにどのような思考過程を経るか、といった問題提起の、ほんの入口ともいえるべきものである。

5章で触れられているような厳密な経済分析をしているわけではなく、また実際のコストに占める「構造断面の大小」の影響の評価もしてはいない。単に、社会全体の中に「地震危険度の高い地域と低い地域」があり、「重要度(単純に交通量のみで表わす)の高い地域と低い地域」があり、それぞれに同程度の構造物の計画があったとしたときに、「地震危険度も重要度も低い地域の構造物の断面」を削って「高い地域」ものを増やしてやれば、全体のリスクはより合理化できるとしているのである。

こうした、単純化した仮定を用いることで、(7)の表 6.2-3 等にしたような、地域の特性に応じた目標性能の対比が明確に出てくることになる。現実にかような対比を示すのは容易なことではないが、社会が技術者に対して、どういうリスクに対し、どういう合理性をもたせるかといった、目標性能決定の背景に対しての説明責任を要求しつつあるのもまた事実であろう。

### (2) 地震リスクマネジメント

「リスク」とは、さまざまな意味として認識されるが本研究では発生確率と損失額の積である期待損失額をリスクと呼ぶ。地震リスクマネジメントとはまず、リスクの識別と分析を行い、リスクを評価し、次にこれをマネジメントする方策を検討し、最後に方策を実行することで行われる<sup>2)</sup>。

この節で紹介するリスクマネジメントでは式(6.2-1)のように初期コストと供用期間におけるリスクの和である期待総費用を考え、最小化することを考える。ただし、構造物ごとに考えるのではなく、条件の異なる多くの構造物全体に対してトータルで最小化することを目的とする<sup>3)</sup>。

$$C_T = C_I + R \rightarrow \min \quad (6.2-1)$$

$C_T$ : 期待総費用  $C_I$ : 初期費用  $R$ : 供用期間におけるリスク

リスクには多様な項目が含まれるのだが(例えば老朽化など)、

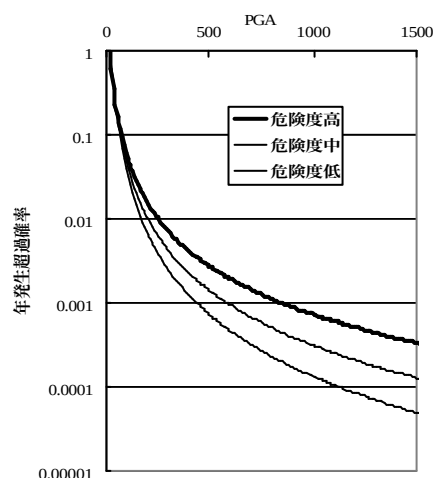


図 6.2-1 ハザード曲線

ここでは原因を地震に限定し、かつ構造物被害と外部効果という経済評価の対象になりやすいもののみを想定した。レベル2地震で問題になるような人命に関わる現象は、ここでは対象外とした。

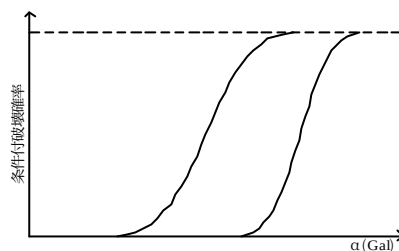


図 6.2-2 フラジリティ曲線

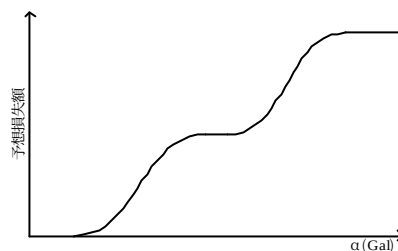


図 6.3-3 ロスカーブ

### 地震リスクマネジメントを行

うための情報として、建設地点の地震危険度を図 6.2-1 のようなハザード曲線で表わした。また、地震動に対する構造物の損傷度を表わすもとして図 6.2-2 のフラジリティ曲線を用いた。フラジリティ曲線の縦軸の条件付破壊確率は地震加速度を作用させ信頼性解析を行い求める。この時、限界状態を 2 つ考えると 2 本のフラジリティ曲線を書くことが出来る。条件付破壊確率とその限界状態で生じる損失額の積の各限界状態に関する総和を予想損失額と呼び、これを縦軸にとったものを図 6.2-3 のロスカーブという。

ロスカーブの予想損失額を横軸にとり、ハザードカーブの年発生超過確率を縦軸にとったものを図 6.2-4 のようなリスクカーブという。式 (6.2-2) のように積分すると両軸と曲線の囲む面積が年期待損失額すなわち単年のリスクになることが分かる。

$$Risk = \int_p dR = \int_p C_f dp \quad (6.2-2)$$

地震危険度が高いとリスクカーブが上方に推移し、また社会的重要度が高いと右側に推移して、リスクが大きく算出される。リスクカーブでは、リスク性状を表現することができる。図 6.2-5 のような 2 種類のリスクカーブは年期待損失額が同じだとしてもこれらを異なるものと市民は認識する。

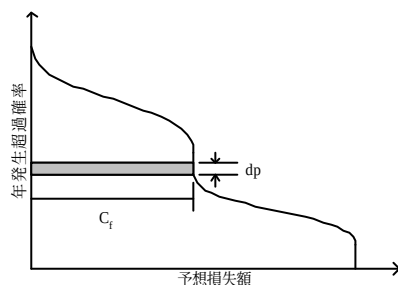


図 6.2-4 リスクカーブ

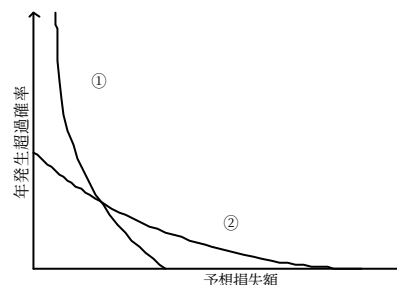


図 6.2-5 2種類のリスクカーブ

供用期間におけるリスクを初期段階において評価するため、将来リスクを割引率を用いて現在価値換算することを行った。これは5章にも説明されている。n年後の  $A_n$  円を現在価値換算すると次式のようなになる。<sup>4)</sup>

$$P_n = \frac{A_n}{(1+r)^n} \quad (6.2-3)$$

$r$ : 社会的割引率(4%)

この操作を各年にかかるリスクに対して行い、それらの総和を供用期間におけるリスクとして式(6.2-1)に用いる。

計算においては、断面板厚の増加による構造物の補強によって、費用の増加 ( $\Delta C > 0$ ) とリスクの

低減（ $\Delta R < 0$ ）が生じる。複数の構造物にこの方策を考え、投資効率である？ $\Delta R / \Delta C$ ？が最も大きい方策を実行する（以下の議論は絶対値に対して行うので、記号は省略）。「マネジメント」の観点からは $\Delta R / \Delta C$ が大きくなる構造物の断面を増やし、同時に $\Delta R / \Delta C$ が小さい「相対的に重要でない」構造物の断面の板厚を減らして、全体としての費用の増減を伴わずに総リスクを低減することを繰り返す。投資効率の均質化がこの繰返し計算の収束判定条件となる。本研究では、その後、追加オプションとして、さらに追加的に予算をかける（全体費用の増加）ことができる場合を考え、リスクが大きい構造物すなわち地震危険度、社会的重要度が高い構造物に投資して、さらなる期待総費用低減がはかれるかの判断も行った。

なお本報告書には記載しなかったが、リスクマネジメントの方策として保険の利用の可能性も検討し、また「破滅的なリスクを忌避する市民のリスク認知」を非線形の効用関数で表現して、(6.2-1) 式を補正する試み（5章で触れられている、「不安感そのものの経済価値」を反映したリスクプレミアムと対応する概念である）も行っている。しかしここでは、議論の流れを明確に示すことに主眼を置き、これらの記述は省略した。

### (3) 対象構造物

本研究において対象とする構造物は、鋼製門型ラーメン橋脚によって支持される4車線の高架道路橋とする。橋脚、桁の形状を図6.2-6に示す。橋脚の柱部・梁部の断面形状は補剛材を有しない薄肉正方形断面を考え、着目点間で段階的に板厚変化するものとする。用いる鋼材はSM400Y材とし、供用期間は50年とする。これらの構造物は地震危険度を3段階、社会的重要度を2段階考えた表6.2-1のような独立な6ヶ所に建設される場合について考える。

表 6.2-1 各構造物の状況

|                     |                     |                     |
|---------------------|---------------------|---------------------|
| 地震危険度 低<br>社会的重要度 低 | 地震危険度 中<br>社会的重要度 低 | 地震危険度 高<br>社会的重要度 低 |
| 地震危険度 低<br>社会的重要度 高 | 地震危険度 中<br>社会的重要度 高 | 地震危険度 高<br>社会的重要度 高 |

地震危険度は図6.2-1に示したハザードカーブの3種類とし、社会的重要度は山間部より都市部の方が重要と考え、そこを通過する交通量により違いを設定する。限界状態は着目点が2ヶ所塑性ヒンジ化した状態を半壊、4ヶ所塑性ヒンジ化した状態を全壊とする。それぞれの限界状態における損失額の設定は表6.2-2のように設定する。まず、6ヶ所すべての構造物を現行の許容応力度設計法により設計し、これを初期値として(2)で述べたリスクマネジメントを実行していく。

表 6.2-2 損失の種類とその影響の

|     | 復旧損失     | 経済的損失       | 補償損失           |
|-----|----------|-------------|----------------|
| 半壊時 | 再調達費の20% | 2ヶ月間の時間短縮便益 |                |
| 全壊時 | 再調達費     | 1年間の時間短縮便益  | 1,000,000,000円 |

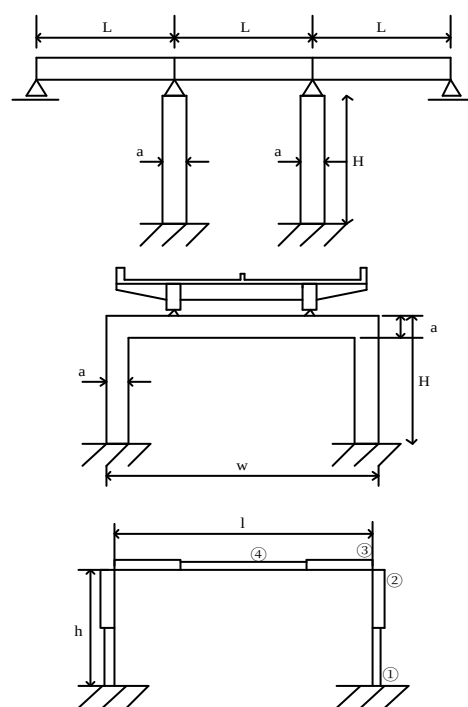


図 6.2-6 対象構造物と着目点

### (4) 高架道路橋の地震リスクマネジメント

図 6.2-7 はリスクマネジメントの各段階の投資効率である。横軸はリスクマネジメントの繰返し回数である。1 回につき断面板厚を 1mm 増加・削減させる。 $\Delta R/\Delta C(+)$ は補強される構造物の効率で、 $\Delta R/\Delta C(-)$ は断面が削減される構造物の効率である。11 回目まではリスクマネジメントにおいて重要な構造物の板厚の増加と重要でない構造物の板厚の減少を伴う付加的な費用を要しないリスクマネジメントである。その後は、付加的な費用を投資して行うリスクマネジメントである。本研究では付加的な費用の上限を 10 百万円とした。すべての段階で最初に塑性ヒンジ化する柱下部の断面板厚の増加を実行している。

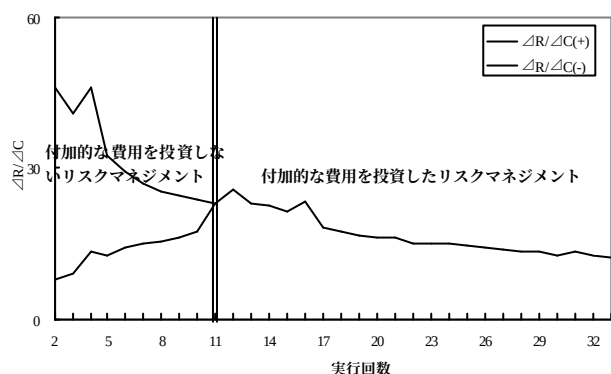


図 6.2-7 リスクマネジメントの効率

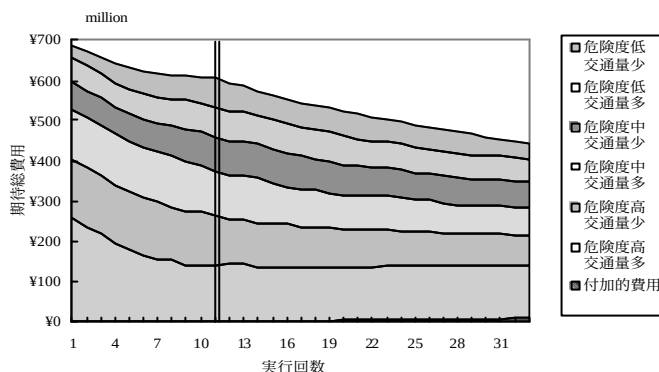


図 6.2-8 期待総費用

図 6.2-8 にリスクマネジメントによる各構造物のリスクと付加的な費用の和を示す。リスクマネジメントを行うことによりリスクの総和を低減することができている。付加的なコストを投資しないリスクマネジメントによっても初め 689 百万円あったリスクが 606 百万円になり、その後 10 百万円投資したリスクマネジメントによって 434 百万円になっている。

## (5) 目標性能の設定

性能設計における目標性能は、構造設計に関して市民に対する説明責任を果たすために市民に理解され易い表現でなくてはならない。現行の性能照査型の設計指針でも「機能健全」「機能維持」「崩壊に近い」など言葉によって表現されている。ここではこれまでの解析を目標性能として表現するために、以下の表を作成する。横軸に地震加速度をとり、それぞれの構造物の性能を「機能健全」「半壊」「全壊」という言葉で示す。比較のため最上段に、許容応力度設計法により設計された構造物の性能を示す。数字を伴う直線は地震加速度の再現期間を表す。

ある地震加速度に対して、それぞれの構造物がさまざまな性能を示している。すべての場合において災害危険度、社会的 중요度が高い構造物の性能が高くなっている。付加的な費用を投資した場合は、当然であるが性能が上昇している。このように性能に注目し、ばらつかせることにより期待総費用の最小化が実現できる。

## 参考文献 (6.2)

- 1) 小藤智久：高架道路橋に対する地震リスクマネジメントによる目標性能設定，中央大学修士論文，2003.3.
- 2) 星谷勝他：構造物の地震リスクマネジメント，山海堂 2002.4
- 3) 佐藤尚次：構造計画・設計の総合化と期待総費用最小化原則，確率・統計的意思決定に関するシンポジウム論文集 pp.11-16，1998.12
- 4) 井上裕：まちづくりの経済学，学芸出版 2001.1
- 5) 中西準子：環境リスク論，岩波書店 1995.10.

## 6.3 地震損失コスト算定システムの例

### (1) 概説

図 6.3-1 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<sup>4)</sup>にこれらの分析内容を説明したものががあるので、詳細については省略する。

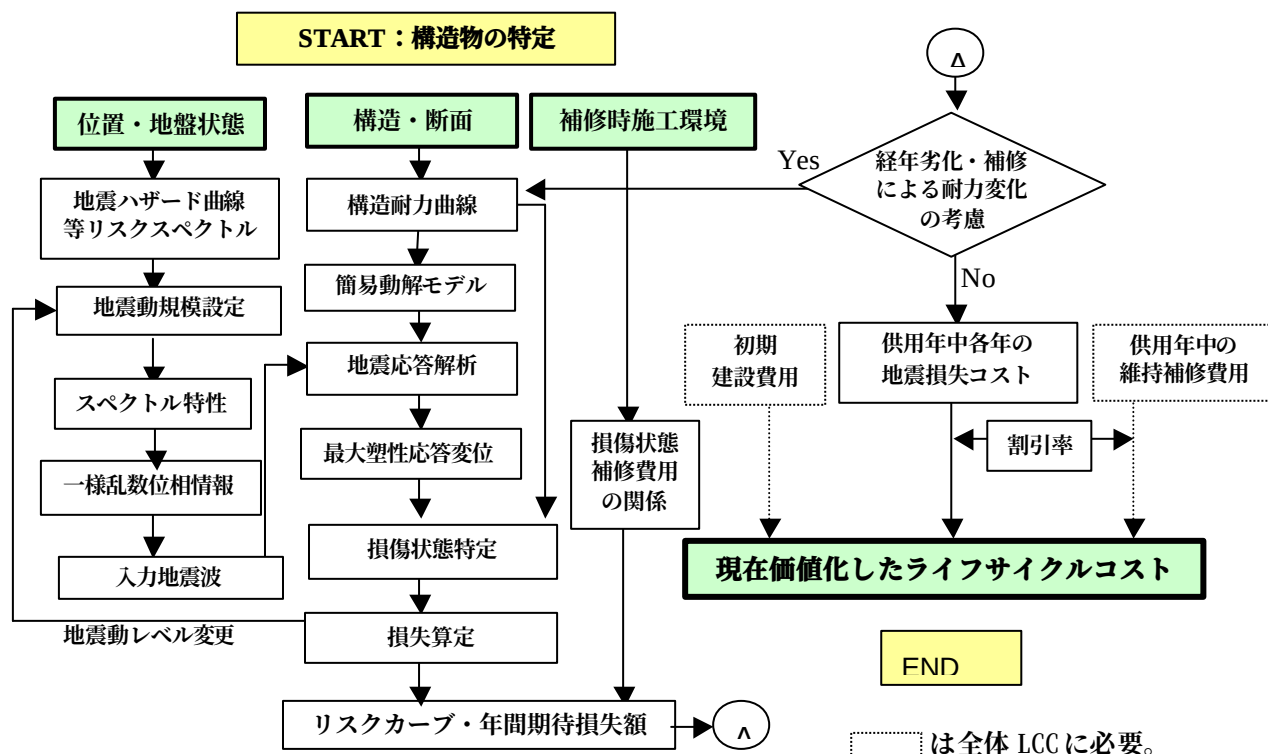


図 6.3-1 高架橋のライフサイクル地震損失コスト算定システムフロー

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。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。

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。

## (2) 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 6.3-1 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<sup>5)</sup>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<sup>6)</sup>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。

## (3) 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

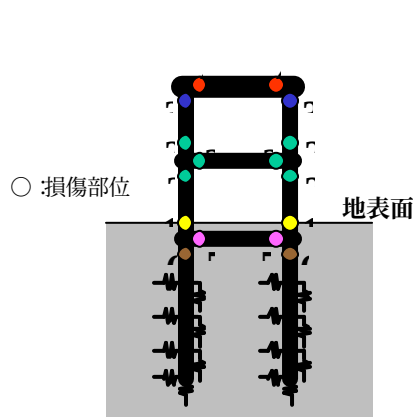


を進める場合には、この影響を考慮する必要がある。本報で紹介しているシステムでは、この現象を考慮できるようにしているが、構造物の置かれた環境特性を考慮した実際の劣化進行度の予測に関する研究成果を反映する必要がある。

#### (4) 解析条件

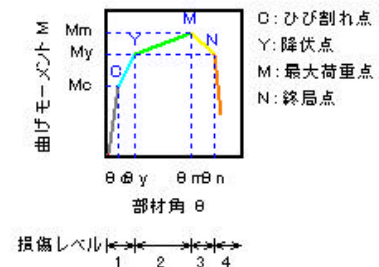
以下の事例における損失額については、一般構造物としては実際より過大な数値となっているので、内容については算出手法の理解の資料と考えて頂きたい。

図 6.3-2 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 6.3-3 に示す設定をしている。



#### 【凡 例】

- 無損傷
- 曲げひび割れ(小)
- 曲げひび割れ(大)
- かぶり剥落・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 6.3-2 高架橋解析モデル

図 6.3-3 RC 部材の復元力モデルと損傷レベル

図 6.3-4～7 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 6.3-4 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 6.3-5 は、図 6.3-4 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 6.3-6 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 6.3-7 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コストと、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。損傷復旧コストは、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 6.3-5 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】

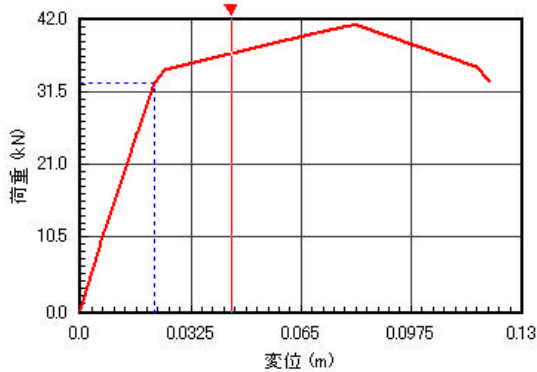


図 6.3-4 橋脚頭部における荷重－変位の関係

【復旧コスト - 応答変位】

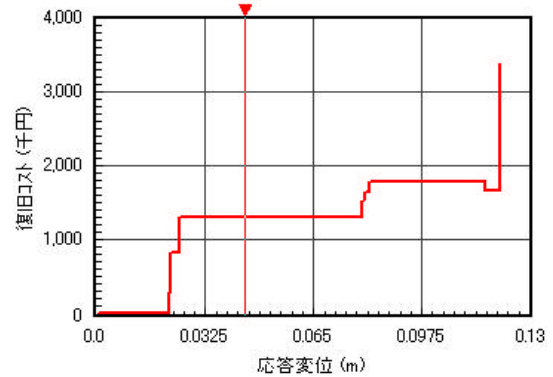


図 6.3-5 橋脚頭部応答変位－復旧コストの関係

【ハザード曲線】

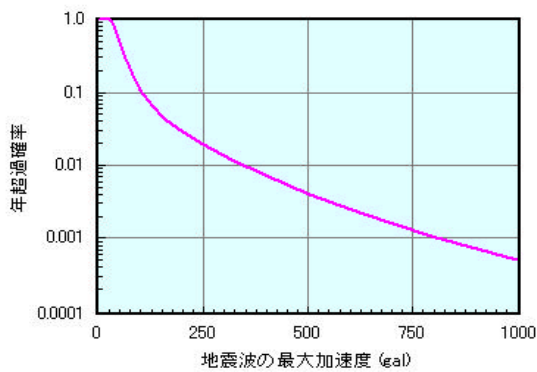


図 6.3-6 対象地点の地震危険度分析結果

【復旧コスト - 最大加速度】

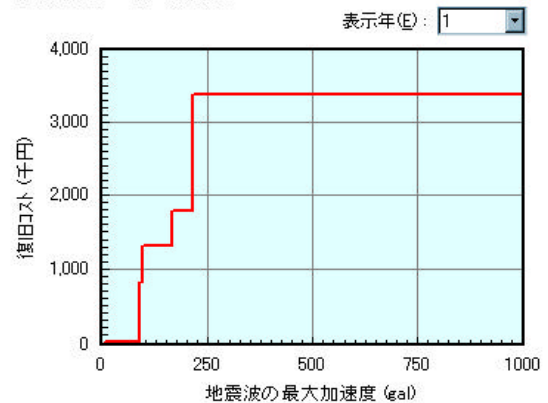


図 6.3-7 地震波最大速度と復旧コストの関係

図 6.3-8 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のとしている（以降の年の説明は省略）。

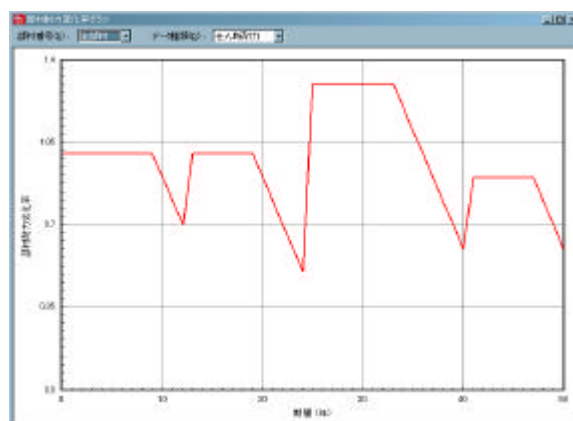


図 6.3-8 構造物の耐力低下/回復の設定例

図 6.3-9 は、図 6.3-8 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待損失額が大きくなることが判る。図 6.3-10 は、図 6.3-9 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】

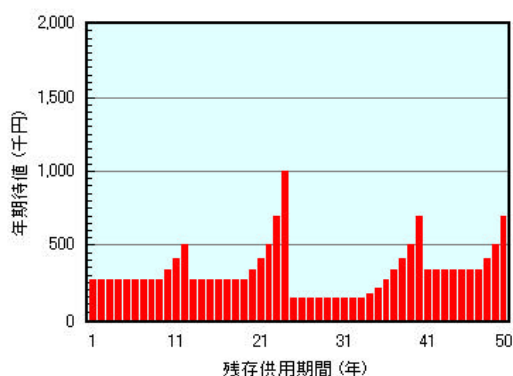


図 6.3-9 耐力の経年変化を考慮した年期待損失額の経年変化

【ライフサイクル地震損失コスト】

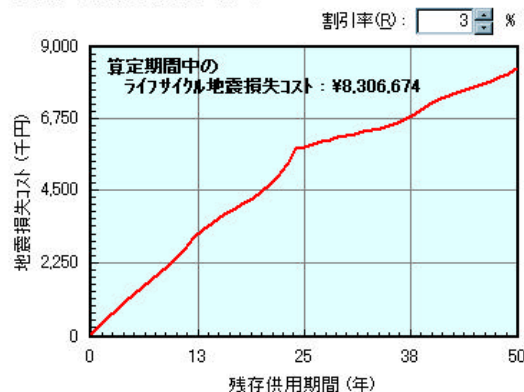


図 6.3-10 ライフサイクル地震損失コスト

## (5) 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 6.3-11 のようになる。滑らかなカーブとなっていないのは、図 6.3-7 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。

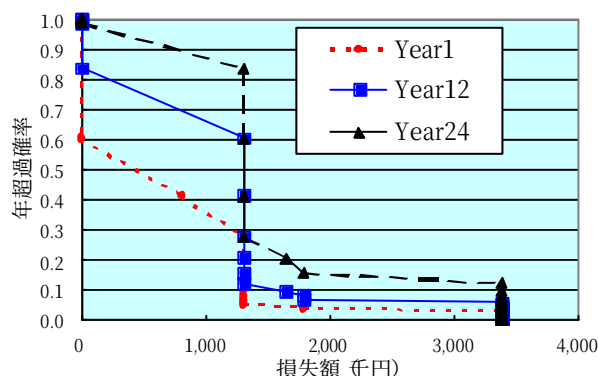


図 6.3-11 リスクカーブ (Year1,12,24)

## (6) 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コストが高くなるので、図 6.3-12 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、その初期コスト、地震損失コスト、(メンテナンスコスト)の合計が最小となる解を見つけることになる。図 6.3-12 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。

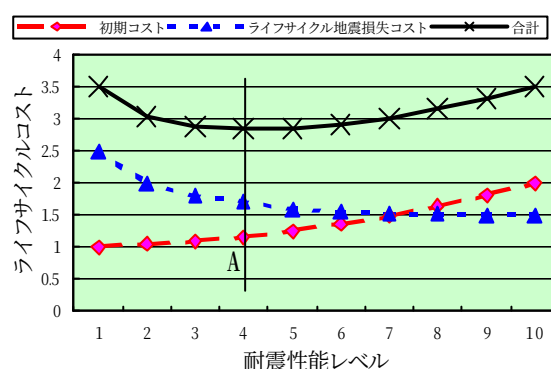


図 6.3-12 最適耐震性能の検討図

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 6.3-12 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、こういった費用便益の定量化などによる判断が必要となる。

## (7) 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のようになる。

＜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

**参考文献（6.3）**

- 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桔梗概集，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.