

1. はじめに

既存構造物の地震安全性を向上することが重要な課題であるが、一方では公共事業に対する予算は年々削減されているため、限られた予算のもとで、補強を要する対象構造物を適切に選定していくことの重要性が指摘されている。

本研究では、供用期間や重要度の異なる構造物に対し、供用期間中に構造物を維持するために必要な全ての費用であるライフサイクルコストに基づいた耐震補強優先順位の策定法を提案し、実在の長大橋に適用してその有用性を検証する。

2. ライフサイクルコスト (Life Cycle Cost : LCC)

(1) 耐震設計における LCC

LCC は、構造物が建設されてから、その設計耐用年数中に要する建設・補修費用の総和をいう。

本研究では、耐震補強を行うことにより LCC がどれだけ改善されるかを評価することにより補強の優先順位を決定するので、LCC に維持管理費等は含めず、次式によって LCC を定義することとする。

$$LCC = C_I + \sum_{i=1}^N P_{fi} C_{fi} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 C_I は補強コスト、 $\sum_{i=1}^N P_{fi} C_{fi}$ (損傷確率 × 損傷時コスト) は地震リスク、 N は限界状態の数である。

地震時における損傷確率は、地震危険度曲線 (Seismic Hazard Curve) と損傷度曲線 (Fragility Curve) を用いて、

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(a) \frac{dF_S(a)}{da} da \dots\dots\dots (2)$$

の数値積分によって求めることができる。ここで、 $F_S(a)$ は地震外力が a を超える年超過確率 (地震危険度曲線: 外力 S)、 $F_R(a)$ は地震外力が a の時に構造物が損傷を受ける確率 (損傷度曲線: 耐力 R) である。

(2) 損傷度曲線

損傷度曲線は、ある地震動レベルに対する構造物の損傷確率を表す曲線である。地震動ごとに不確定性要因を考慮した信頼性解析を行って算出するべきであるが、本研究では損傷度曲線の中央値が重要であり、動的解析において安全率が 1.0 となるときの加速度が損傷度曲線の中央値になると仮定する。また、損傷度曲線の分布は対数正規分布で表現できるものとした¹⁾。

(3) コスト

LCC に基づいた補強戦略を考える場合、補強に必要な費用はもちろん、地震時に損傷を受ける対象の価値を金額で評価しておく必要がある。補強コストについては、補強項目ごとに工事費用の推定額を用いる。損傷時コストについては復旧コスト、復旧工期等は定量化できるが、構造物が地震による損傷を受けることが社会に与える影響は定量化し難いため、倍率係数を設定し、倍率係数を変化させることによって社会的影響が耐震補強優先順位に及ぼす影響について検討することとする。

(4) DLCC

耐震補強を行う前後で、LCC の改善度が大きい順に補強の優先順位を決定する。そのために耐震補強を行わない場合の LCC と補強を行った場合の LCC の差、つまり

$$DLCC = LCC_0 - LCC_R = \left(\sum_{i=1}^{N_0} P_{fi}^0 C_{fi}^0 \right) - \left(C_R + \sum_{i=1}^{N_R} P_{fi}^R C_{fi}^R \right) \dots\dots\dots (3)$$

を定義する。ここで、 P_{fi}^0 は耐震補強を行わない場合の損傷確率、 P_{fi}^R は耐震補強を行った場合の損傷確率、 C_R は補強コスト、 C_{fi}^0 は耐震補強を行わない場合の損傷時コスト、 C_{fi}^R は耐震補強を行った場合の損傷時コスト、 N_0 は耐震補強を行わない場合の限界状態の数、 N_R は耐震補強を行った場合の限界状態の数である。ここでは、この DLCC が大きいものほど、耐震補強を行う効果が大きいと考える。

3. 劣化

構造物は経年劣化により耐力が低下するため、劣化の進行により損傷度曲線は危険側へシフトする。劣化の進行は劣化レベルを離散化して確率的に取扱うこととし、マルコフ過程で表現できるものとする。遷移確率行列については、 t 年後の劣化レベルについて、データから得られる平均値・分散値とマルコフ過程によって得られる劣化状態の平均値・分散値の差を最小とするように求める。各劣化レベルに対応した損傷度曲線から、各劣化レベルに対応した損傷確率を算出することで、 t 年後の年損傷確率を次式で求める²⁾。

$$P_F(t) = \sum_{k=1}^m p_f(k, t) \cdot s(k, t) \quad , \quad \sum_{k=1}^m s(k, t) = 1.0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $p_f(k, t)$ は劣化レベルが k である時の年損傷確率、 $s(k, t)$ はマルコフ過程から求まる供用開始 t 年後に構造物の劣化レベルが k である確率、 m は劣化レベルの数である。

4. 適用例

(1) LCC の評価

阪神高速道路公団が所有している長大橋 18 橋を対象として耐震補強の優先度について検討を行う。

震源として上町断層系を想定する。再現期間は約 15000 年であり、最終活動時期の推定幅が非常に大きいため、発生はボアソン過程に従うものと仮定する。危険度曲線は上町断層系における地震の発生率のみを対象としている。

補強を行う場合、行わない場合それぞれについて損傷が予測される構造物の損傷度曲線と危険度曲線から年損傷確率を算出した。なお、損傷度曲線の中央値はすでに行われている耐震安全性検討の資料に基づいて決定した。対象橋梁に対して残存供用期間 20 年と仮定し、20 年間の損傷確率を算出した。

各橋梁ごとに補強コストと損傷時コストを設定することにより、補強前後の LCC の評価を行った。本検討において損傷時コストは次式で定義した。

$$\text{損傷時コスト } C_{fi} = (\text{復旧コスト} + \text{料金収入の減額}) \times a \times k \quad \dots\dots\dots (5)$$

断面交通量より各橋梁の重要度係数 a を設定し、コストの計算に反映させた。 k は社会的影響の度合いを評価する係数である。 k の値を変化させることで補強順序に及ぼす社会的な影響の効果を検討する。

(2) 耐震補強優先順位の検討

損傷時コストの倍率係数についてパラメータスタディを行ったところ、順位の入れ替わる箇所もあったが、全体の傾向に大きな影響はなかった。本検討では全橋に対して同一の倍率係数を考えているが、当該橋梁の社会的な影響の程度を評価するためには、迂回路の有無や社会経済圏の広がり等を反映した係数を各橋梁ごとに設定する必要があると言える。

劣化を考慮しない場合と考慮した場合とを比べると、優先順位の変わる箇所があった。竣工時からの経過年数の異なる橋梁において、経過年数の長い橋梁が上位になった点特徴的である。耐震補強優先順位の決定には、構造物の経年劣化による耐力低下を考慮することが必要であることが分かる。

5. 結論

本研究では、地震リスクを考慮した LCC に着目し、効果的な補強戦略を決定するための基礎的な研究を行った。耐震補強を行うことによる地震リスクの低減を補強前後の LCC の差である DLCC によって評価し、複数の構造物の DLCC を比較することにより、耐震補強の相対的な優先順位付けを行う手法を提案した。また、構造物の劣化を確率論的に予測し、優先順位決定に及ぼす劣化度の影響を検討した。結果として、損傷が予測される構造要素の LCC 評価には適切な劣化予測が必要であることを示した。実在橋梁に適用した結果、耐震補強の優先順位を決定するための判断資料を与えることができた。

参考文献

1) 諏訪仁, 野畑有秀, 関松太郎, 若松邦夫, 鈴木直子, 三橋英二: 建物の地震リスク評価法の開発-予想最大損失額 (PML) 評価ソフトの開発-, 大林組技術研究所報, No.63, pp.61-66, 2001.
2) 赤石沢総光, 吉田郁政, 安田登, 宮本幸始: RC 構造物の点検補修頻度の最適化に関する研究, 構造工学論文集, No.47A, pp.277-284, 2001.

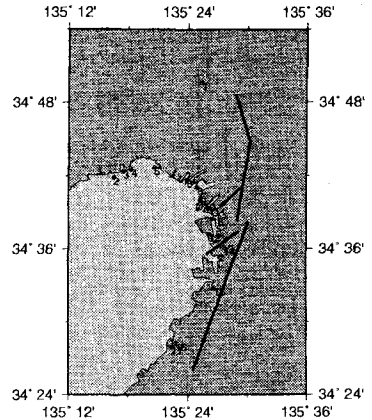


図-1 上町断層系と対象橋梁