

性能設計を活用したRC建造物の 保守頻度・時期の最適化に関する研究

Optimization of Maintenance Frequency and Time for RC Structures based on Performance-Based Design

赤石沢総光*, 吉田郁政**, 安田登***, 宮本幸始****

Nobuhiko AKAISHIZAWA, Ikumasa YOSHIDA, Noboru YASUDA, and Koji MIYAMOTO

- * 工修 東京電力(株) 電力技術研究所土木グループ (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)
- ** 工博 東電設計(株) 第二土木本部原子力土木部 (〒110-0015 台東区東上野3-3-3)
- *** 工博 東京電力(株) 電力技術研究所土木グループ (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)
- **** 工博 東京電力(株) 電力技術研究所 (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

Reinforced concrete structures deteriorate with elapse of time after the beginning of services, due to many kinds of factors such as chloride-induced damage and carbonation. Hence, appropriate maintenance for structures is being needed, and the establishment of effective maintenance strategy is one of the most important issues for civil engineers. In this study, structural deterioration with elapse of time, defect detectability by inspection, and repair effect are modeled, based on Frangopol's method, for seismic failure modes for a RC pier. Then, frequency and time of optimal maintenance is studied, in the sense of life-cycle cost (LCC). Using genetic algorithm (GA) with life-cycle cost as an objective function and the maintenance frequency and time as variables, both frequency and time of maintenance are optimized. As a result, the validity of the maintenance strategy with GA is verified.

Key Words: inspection & repair, life-cycle cost, damage probability, genetic algorithm

1. はじめに

国内における建造物の設計法は、仕様規定型から性能規定型へ変わりつつある。性能設計は、要求性能を明確に設定し保有性能がその要求性能を満足するか否かを直接照査する設計体系であり、国際規格である ISO2394 など、国外主要先進国の基準の基本となっている。この体系は従来の仕様規定と異なり、自由度の高い設計法と言える。このため従来に比べれば、経済的で合理的な設計や保守管理が行いやすくなると考えられ、ライフサイクルコスト (以下、LCCと記す) に代表されるコストに基づく評価は、今後様々な場面で求められることが予想される。

現在、社会・経済情勢の変化に伴い、社会インフラの大量・大規模開発の時代が終焉を迎え、これまでの資産を有効に活用していくことが求められる時代へと変貌しつつある。構造技術者の仕事も、建設中心から保守中心へと重点が移行しつつある。このため、既設建造物の保守のあり方を再評価し、より合理的な保守戦略策定のために保守技術者の意志決定を支援するシステムを開発することは、重要な課題になってきている。

最適保守計画に関する研究としては、Mori らの研究^{1), 2)}、Frangopol らの研究^{3), 4)}、松島らの研究⁵⁾などが挙げられる。いずれもLCCに着目して最適な補修計画の構築方法を提案している先駆的な研究であるが、常時の終局限界状態を対象としており、地震時の損傷モードは考慮していない。地震国である日本、とりわけ地震活動度の高い東京周辺では、建造物の安全性を考える上で地震時の損傷モードが設計上クリティカルとなる場合が多い。

そこで本研究では、地震時の損傷モードを対象としてLCCに基づく合理的な保守戦略策定支援システムのプロトタイプを構築し、その有効性を検証する。ケーススタディの対象はRC橋脚とし、点検費用、補修費用および地震による期待損失費用を考慮したLCCの試算を行うとともに保守計画の最適化を試みる。最適化には遺伝的アルゴリズム (GA; Genetic Algorithm) を用いることとし、LCCを目的関数、点検補修の回数と時期を最適化変数とする。経年劣化、点検精度および補修効果は、Frangopol らのモデル³⁾を踏襲し耐震問題へ拡張するとともに、建造物の損傷劣化度進行のばらつきを評価できるよう改良を行った。

2. 性能設計体系における建造物の維持管理の合理化

現在、RC 建造物の耐久性に関わる設計⁶⁾は、設計耐用期間後の性能低下 (耐久性低下) 分を予め担保する形で行っている。

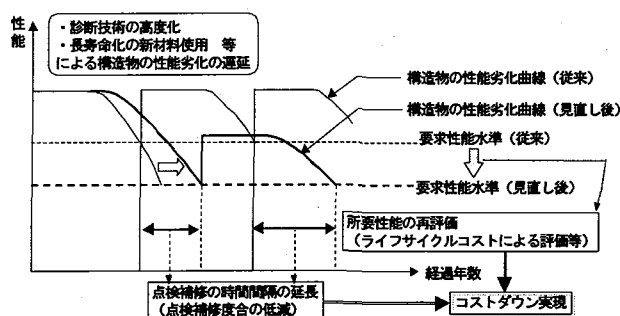


図-1 建造物の維持管理の合理化例 (概念図)

したがって、供用期間中の適切な保守管理による劣化防止や性能改善効果を直接見込むことができず、効果的に合理化を図るのは一般には困難である。

一方、性能設計体系では構造物の性能を考えると、時間軸に対する性能の低下度合いや補修効果を考慮した保守管理を行うことができるため、保守戦略の幅が広がるとともに、経済性を考慮した最適な戦略を練ることも可能である。図-1には、診断技術の高度化や新材料の使用による構造物の性能劣化の遅延あるいは要求性能水準の見直しによる合理化の概念を示す。このため、構造物の経年劣化、点検精度および補修効果等を適切にモデル化することができ、これにより要求性能の満足度を任意の時点で確認できるようになれば、今まで以上に保守の合理化が進むと考えられる。

3. RC 構造物の経年劣化の考え方

本研究では、塩害による鉄筋腐食を取り扱う。ただし腐食現象に伴う鉄筋膨張による付着切れやコンクリート剥離の影響等は考慮しない。

3.1 鉄筋断面の経年変化モデル

鉄筋の腐食は通常、塩化物イオンのコンクリート内への浸入によって始まる。いったん腐食が始まると、鉄筋の断面積はある割合で時間とともに減少する。ここでは、Frangopol らのモデル⁹⁾に基づき、時間経過に伴う鉄筋量の減少を(1)式および(2)式のようにモデル化する。

$$A_s(t) = \frac{\pi}{4} \sum_{j=1}^n \{D_j(t)\}^2 \quad \cdots(1)$$

$$D_j(t) = \begin{cases} D_{j0} & ; 0 \leq t \leq T_{ij} \\ D_{j0} - 2\nu \cdot (t - T_{ij}) & ; T_{ij} \leq t \leq T_{ij} + D_{j0}/2\nu \\ 0 & ; T_{ij} + D_{j0}/2\nu \leq t \end{cases} \quad \cdots(2)$$

ここに、 $A_s(t)$: 供用開始 t 年後の鉄筋の断面積、 $D_j(t)$: 供用開始 t 年後の鉄筋 j の直径、 n : 対象とする鉄筋の総数、 D_{j0} : 鉄筋 j の初期直径、 ν : 年当たりの腐食率、 t : 経過年、および T_{ij} : 鉄筋 j の腐食開始年である。

3.2 構造物の損傷に関する経年変化モデル

Frangopol ら³⁾は、(1)式に従い鉄筋腐食による構造物の損傷劣化が一定の割合で進行するとしているが、実際の損傷劣化の進行にはばらつきが存在する。本研究では図-2に示すように、このような劣化進行の不確定性に対して損傷劣化レベルを離散化し確率的な取り扱いを行う。すなわち、ある損傷劣化レベルにある構造物は1年後に確定的に次の劣化レベルに移るのではなく、ある確率に従って、現状を維持したり、平均的な腐食速度で劣化したり、より早く劣化したりといくつかの損傷劣化の状態遷移を仮定する。なお、確定的に劣化が進行する場合は平均的な劣化

進行の遷移確率を1.0とし、それ以外の状態遷移確率を0.0としていることに相当する。

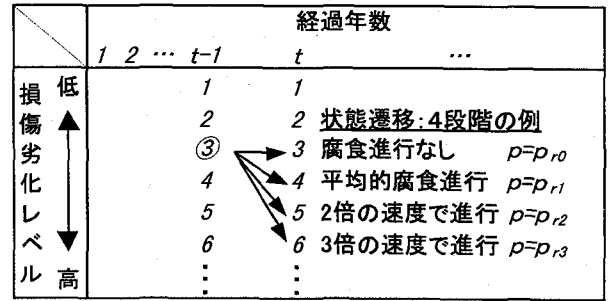


図-2 劣化進行の不確定性に関するモデル概念図

供用開始 t 年後に、ある損傷劣化レベルに至る確率は、一様マルコフ連鎖の概念から、(3)式で表せる。 $P(t)$ は供用開始 t 年後に構造物の損傷劣化レベルが k ($k=1, \dots, m$) である確率 $p(k, t)$ の集合から成る列ベクトルを表す。 M は $(t-1)$ 年後の損傷劣化レベルから t 年後の損傷劣化レベルに移行する遷移確率行列を表す。

なお損傷劣化レベル k とは、腐食の進展にばらつきがない(平均的腐食速度で劣化進行する)としたときの供用開始 k 年後の損傷劣化状態をいう。

$$P(t) = M \cdot P(t-1) \quad \cdots(3)$$

ここで、

$$P(t) = \begin{bmatrix} p(1,t) \\ p(2,t) \\ p(3,t) \\ \vdots \\ p(m,t) \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} p_{r0} & & & \\ p_{r1} & p_{r0} & & \\ p_{r2} & p_{r1} & p_{r0} & \\ \vdots & p_{r2} & p_{r1} & \vdots \\ & & p_{r2} & \ddots \end{bmatrix}$$

である。

4. 点検精度と補修効果のモデル化

点検精度および補修効果のモデル化にあたり、(4)式のように劣化度 $\eta(t)$ ($0 \leq \eta \leq 1.0$) を定義する³⁾。 $\eta=0$ とは劣化が全くない状態であり、 $\eta=1.0$ とは腐食により鉄筋がなくなる状態を表す。

$$\eta(t) = \frac{D_0 - D(t)}{D_0} = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq t \leq T_i \\ \frac{2\nu(t-T_i)}{D_0} & ; T_i \leq t \leq T_r \\ \frac{2\nu(t-T_i)}{D_0} + \eta_{rep} & ; T_r \leq t \end{cases} \quad \cdots(4)$$

ここに、 $\eta(t)$: t 年後における構造物の劣化度、 D_0 : 初期の鉄筋径、 T_i : 鉄筋の腐食開始年、 η_{rep} : 補修直後の劣化度、および T_r : 補修の年である。

点検精度については、点検により補修が必要な劣化を検出する確率(検出率)を d とし、 d が劣化度 η に依存すると考え、(5)式のようにモデル化する³⁾。ただし、検出率 d

は正規分布 Φ に従うと仮定する。

$$d(\eta) = \begin{cases} 0 & ; 0 \leq \eta \leq \eta_{\min} \\ \Phi\{(\eta - \eta_{0.5})/\sigma\} & ; \eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max} \\ 1.0 & ; \eta_{\max} \leq \eta \end{cases} \quad \dots(5)$$

ここに $\eta_{0.5}$ は確率 0.5 で検出できる劣化度を表し $\eta_{0.5}$ を 0.1, 標準偏差 σ を 0.01 とする。検出に関する上・下限値 $\eta_{\min}$, $\eta_{\max}$ は平均からの距離 (3 σ) より, $\eta_{\min} = 0.7 \cdot \eta_{0.5} = 0.07$, $\eta_{\max} = 1.3 \cdot \eta_{0.5} = 0.13$ とする。点検費用 C_{ins} は, (6)式を用いる¹⁾。なお, α_{ins} は初期費用 C_i の 0.07 倍とする³⁾。

$$C_{ins} = \alpha_{ins} \cdot (1 - \eta_{\min})^{20} \quad \dots(6)$$

なお, 検出率は劣化度 η の関数であり, 補修を行わない場合, その確率は時間経過にしたがい増加する。本研究では, 点検時に補修を要する劣化が検出されれば, 必ず補修を行うとする。すなわち, 補修の要否は点検精度のみに依存するとした。

補修効果については, (7)式のようにモデル化する³⁾。

$$\eta_{rep} = \begin{cases} \eta_i & ; 0 \leq \eta \leq \eta_{\min} \\ (\eta_i + \eta_{\min})/2 & ; \eta_{\min} \leq \eta \leq \eta_{\max} \\ \eta_{0.5} & ; \eta_{\max} \leq \eta \end{cases} \quad \dots(7)$$

ここに, η_{rep} : 補修直後の劣化度 (劣化の改善度), および η_i : 劣化検出時の劣化度である。また補修費用としては, (8)式を用いる^{1),3)}。

$$C_{rep} = \alpha_{rep} \cdot \{(M_{r,a} - M_{r,b})/M_{r,0}\}^\gamma = \alpha_{rep} \cdot e_{rep}^\gamma \quad \dots(8)$$

ここに, α_{rep} : 立替え費用 (=初期費用 C_i), $M_{r,a}$: 補修後の曲げ耐力, $M_{r,b}$: 補修前の曲げ耐力, $M_{r,0}$: 建設直後の曲げ耐力, γ : モデルパラメータ (=0.5), および e_{rep} : 補修劣化である。

5. 年損傷確率の算定

供用開始 t 年後の構造物の年損傷確率は, 時間経過に伴う構造物の耐力低下に応じて求められる fragility 曲線と地震ハザード曲線を基に算定できる。なお fragility 曲線とは, 横軸に地震動強度 (多くの場合, 最大加速度), 縦軸に限界状態の超過確率 (条件付きの損傷確率) を示したもので, 耐力の不確定性を表すものである。

年損傷確率の算定手順を下記に示す。

- ① 供用開始 t ($t = t_1, t_2, \dots$) 年後の鉄筋量 $A_s(t)$ を算定する。
- ② 上記の鉄筋量 $A_s(t)$ について, 適当な n 組の基盤加速度 a_i ($i = 1, \dots, n$) に対する損傷確率 $Fr_i(a)$ を算定する。なお損傷確率は, 考慮すべき損傷モードに応じて設定した限界状態に対する信頼性解析により算定する。
- ③ fragility 曲線 $Fr_i(a)$ は対数正規分布に従うと仮定し, 経過年数 t に対応した fragility 曲線の平均 $\mu(t)$, 標準偏差 $\sigma(t)$ を各々求め, fragility 曲線群 $Fr(a)$ ($t = t_1, t_2, \dots$) を求める。

- ④ 図-3に示すように, 地震ハザード曲線と fragility 曲線のコンボリューションにより (9)式から経過年数 t に応じた年損傷確率 $p_f(t)$ を求める。なお, $p_f(t)$ は損傷劣化の進行のばらつきがないとして算定される。

$$p_f(t) = \int_0^\infty Fr_i(a) \cdot \frac{dFs(a)}{da} \cdot da \quad \dots(9)$$

ここに, $p_f(t)$: 経過年数 t に対応した年損傷確率, $Fr_i(a)$: 経過年数 t に対応した基盤加速度 a に対する損傷確率および $Fs(a)$: 基盤加速度 a の年超過確率である。

- ⑤ 構造物の損傷劣化レベルは離散的な確率変数としたことから, 取りうる損傷劣化レベル k ($k = 1, \dots, m$) の確率を全て考慮することにより供用開始 t 年後の年損傷確率 $P_F(t)$ は, (10)式から算定できる。

$$P_F(t) = \sum_{k=1}^m p_f(f|k, t) \cdot p(k, t) \quad \dots(10)$$

$$\sum_{k=1}^m p(k, t) = 1.0 \quad \dots(11)$$

ここに, $P_F(t)$: LCC算定に用いる供用開始 t 年後の年損傷確率, $p_f(f|k, t)$: 供用開始 t 年後に構造物の損傷劣化レベルが k であるときの年損傷確率 (9)式参照), および $p(k, t)$: (3)式から求める供用開始 t 年後に構造物の損傷劣化レベルが k である確率である。(10)式中の $p_f(f|k, t)$ は, 損傷劣化レベル k が腐食進展にばらつきがない場合の供用開始 k 年後の損傷劣化状態であることから, 図-3下段の損傷劣化レベル k と年損傷確率 $p_f(f|k)$ の関係から算定できる。

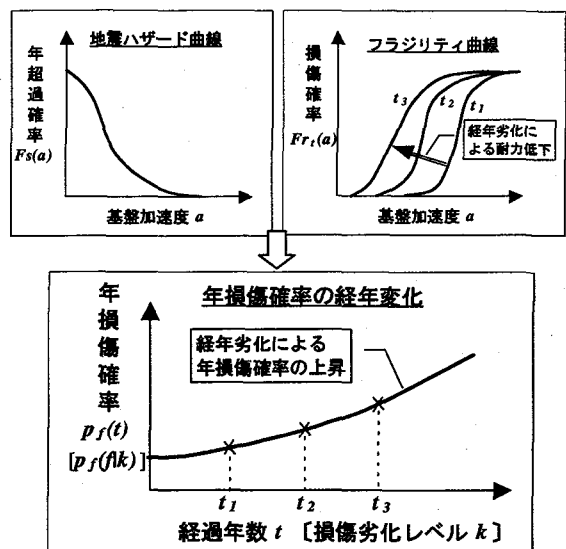


図-3 経過年数 (損傷劣化レベル) に対応した年損傷確率の算定概念図

6. LCCの算定

LCCの算定には(12)式を用いる。LCCを構成する費用としては, 初期費用, 点検費用および補修費用の直接費

用に加え、地震活動度の高い地点に構造物が設置されていることを考え、地震による期待損失費用も考慮する。

年期待損失費用は、(10)式から求まる年損傷確率 $P_d(t)$ と損傷時損失費用 C_F の積に点検・補修費用を加えて算定する。また地震による期待損失費用は、損傷事象が年ごとに独立と考え、時間方向に毎年の $C_F \cdot P_d(t)$ の総和をとって算定する。

$$C_{ET} = C_I + \sum_{\ell} (C_{ins} + C_{rep}) + \sum_{t=1}^T C_F \cdot P_d(t) \quad \cdots (12)$$

ここに、 C_{ET} : LCC, C_I : 初期費用, C_{ins} : 点検費用, C_{rep} : 補修費用, C_F : 地震による損傷時損失費用, $P_d(t)$: 供用開始 t 年後の年損傷確率, ℓ : 点検補修回数, および T : 供用期間である。なお、供用開始 t 年後の点検費用、補修費用および損失費用の算定には、社会的割引率を考慮する。

7. GAによる保守計画の最適化

保守計画の最適化にあたっては、LCCが最小となるように、点検補修の回数と時期を算定する。すなわち、目的関数をLCC、最適化変数を点検補修の回数・時期とする最適化問題として定式化する。点検補修の回数・時期の算定にあたっては、その回数が整数値であることやその時期に関して複数の局所解が存在することが予想されることから、DFP法や共役勾配法などの微分に基づく通常の最適化手法では解を求めることが困難である。このため、GAを用いて最適化を行う。その概念図を図-4に示す。GAは乱数を用いた大域探索手法の一種であり、近年の計算機能力のめざましい向上に伴い、実用的な方法として様々な分野で用いられるようになってきた。本研究では、従来の2進法による方法よりも効率がよいとされる実数交叉型GA^{7), 8), 9)}を用いる。

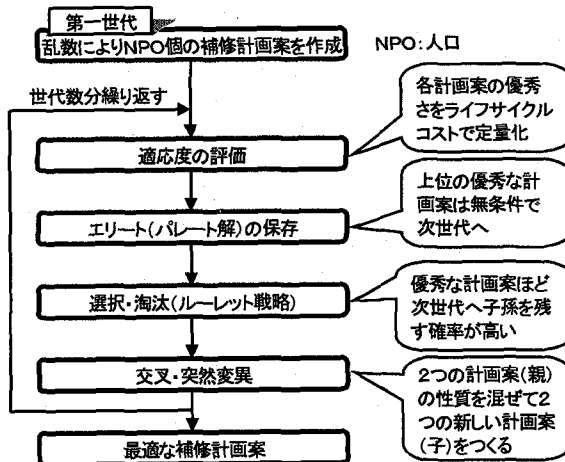


図-4 GAによる保守最適化フロー

8. 数値計算例

8.1 検討モデルおよび条件設定

図-5に検討対象RC橋脚を示す。対象橋脚は高さ10m、幅5m、奥行2.2mであり、初期の鉄筋径は主筋D29、せん断筋D13とし、東京湾岸F地点の基盤面上に設置（表層の影響なし）されているとする。検討は橋軸方向とする。橋脚に作用する水平地震外力は、橋脚の固有周期と応答加速度から算定する。

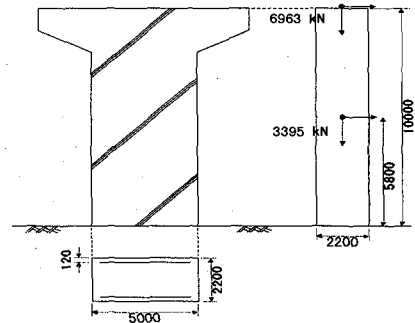


図-5 検討橋脚の形状

これ以降の検討条件は、表-1に示すように設定する。なお本検討では、数値的な試算に重点を置いている。

状態遷移は3段階とし、各々の遷移確率についてはほぼ8割が平均的に腐食進行すると考えて設定した。損傷時の損失費用についてはその明確な算定が困難であるため、ここでは初期費用の10倍とした。また本検討では、初期費用 C_I の値を特に設定せず、後述する保守計画案の検討では想定する計画案のLCCの相対的比較のみを行う。

表-1 検討条件

項目	設定条件
供用期間 T	50年
腐食開始年 T_f	供用開始3年後
鉄筋腐食率 ν	0.08 mm/年
状態遷移確率*	$(p_0, p_1, p_2) = (0.1, 0.8, 0.1)$
損傷時損失費用 C_F	初期費用の10倍
社会的割引率	2%

* p_0 は1年間劣化が進行しない状態の確率, p_1 は腐食率分だけ劣化する確率, p_2 は腐食率の2倍の速度で劣化進行する確率を表す。

8.2 不確定要因の抽出とモデル化

外力側の不確定要因は地震外力のみとし、対象地点の地震ハザード曲線¹⁰⁾ (図-6参照) から求まる基盤加速度の超過確率を考慮する。なお、地震の発生頻度や基盤加速度の大きさはその不確定性が大きいため、本来感度分析などによる十分な検討が必要であるが、本検討では数値的な試算に重点を置いているため平均的なハザード曲線を用いる。

耐力側の不確定要因は、構造物の材料特性と耐力算定式とし、収集データ等に基づき統計特性を設定した。本研究で考慮した耐力側の不確定要因を表-2に示す。なお、本研究では各々の確率変数間に相関がないと仮定した。

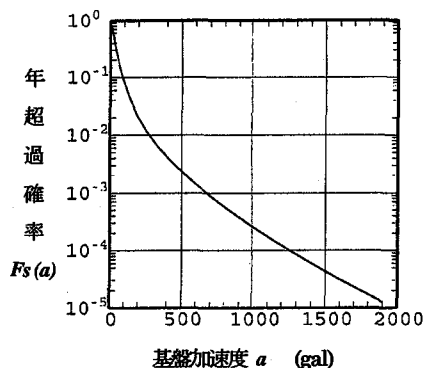


図-6 地震ハザード曲線（東京湾岸F地点）

表-2 耐力側の確率変数の統計特性

不確定要因		記号	平均値	変動係数	分布形
材料特性	コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²) f_c'	30	0.04	正規
		弾性係数 (N/mm ²) E_c	26500	0.12	正規
	鉄筋	降伏強度 (N/mm ²) f_s	360	0.05	正規
耐力算定式 (補正係数)	曲げ耐力	e_m	1.0	0.11	正規
	せん断耐力	e_v	1.0	0.08	正規
	靱性率	e_d	1.2	0.51	対数正規

8.3 限界状態関数の設定

RC 橋脚の終局限界状態の照査は通常、曲げ破壊、せん断破壊、変形破壊（変形能照査）の3つの損傷モードに対して行う。検討対象橋脚は、コンクリート標準示方書¹⁰⁾に基づき破壊モード判定が曲げ破壊モードとなるように断面設定を行ったため、本検討ではせん断破壊と変形破壊の2つの損傷モードを扱うこととする。各々のモードに対する限界状態関数は(13)式、(14)式に示す。また構造解析は線形解析を基本とし、高レベル地震動時に橋脚の基部が塑性領域に達する場合はエネルギー一定則を用いて水平力の低減を図る。

$$Z_1 = (V_{cd} \cdot e_v + V_{sd}) - V_d \quad \cdots(13)$$

$$Z_2 = \mu_d \cdot e_d - \mu_a \quad \cdots(14)$$

ここに、 V_{cd} : RC (せん断筋除く) のせん断耐力⁹⁾であり確率変数 f'_c の関数、 V_{sd} : せん断筋のせん断耐力⁹⁾であり確率変数 f_s の関数、 e_v : せん断耐力算定式の誤差を表す補正係数、 V_d : 発生せん断力、 μ_d : 橋脚の靱性率¹¹⁾であり確率変数 f'_c, f_s, e_v, e_m の関数、 e_d : 靱性率算定式の誤差を表す補正係数、および μ_a : 応答靱性率であり確率変数 f'_c, f_s, E_c の関数とした。

8.4 フラジリティ曲線の算定

フラジリティ曲線の作成にあたっては、上記の限界状態関数が負となった場合に限界状態が損なわれると考え、各々の損傷モードごとに信頼性解析を行い損傷確率を算定した。どの主筋・せん断筋の径も同じ腐食開始年から同じ比率（一定の鉄筋腐食率）で減少するとした。これより表-3に示すように腐食開始以降の経過年数に対応する

鉄筋径が算定できる。

5章で述べた方法に従い、何組かの基盤加速度値を設定し表-3から求まる鉄筋量 $A_s(a)$ に対応して(13)、(14)式から損傷確率を算定、各損傷モードに対するフラジリティ曲線を求めた結果を図-7に示す。またフラジリティ曲線が対数正規分布に従うと仮定し、 t 年後のフラジリティ曲線の平均値と変動係数を求めた結果も表-3に示す。表中のこれらの値は、構造物が損傷する最小の加速度（限界加速度）を表す耐力指標である。また任意の経過年数に対するフラジリティ曲線は、内挿により求められる。なお図-7に示すフラジリティ曲線は、劣化進行のばらつきがなく補修は全く行っていないとして算定している。

表-3 経過年数と鉄筋径・限界加速度の関係

経過年数 (年)	鉄筋径 (mm)		せん断耐力 (gal)		靱性率 (gal)	
	主筋 (D29)	せん断筋 (D13)	平均	変動係数	平均	変動係数
0.00	29.0	13.0	378	0.125	406	0.054
25.00	25.0	9.0	333	0.129	267	0.061
43.75	22.0	6.0	309	0.150	183	0.073
62.50	19.0	3.0	282	0.164	124	0.093
81.25	16.0	0.0	259	0.178	78	0.130

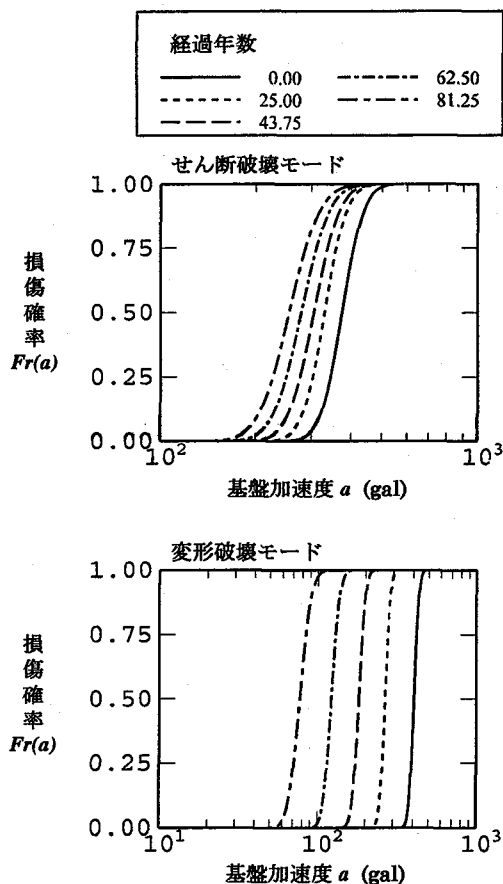


図-7 各損傷モードに対するフラジリティ曲線

地震ハザード曲線（図-6）とフラジリティ曲線（図-7）のコンボリューションから年損傷確率を算定し、その

経年変化を示したのが図-8である。

なお、図-8に示す年損傷確率はせん断破壊と変形破壊の両損傷モードの和事象に対する確率である。ばらつきの支配的要因である地震外力は両モードに対して共通であるため、各々の損傷モードは完全相関であると仮定した。すなわち、図-8に示す確率は2つのモードのうち、どちらか大きいほうの年損傷確率であり、本検討では変形破壊モードが支配的要因となった。

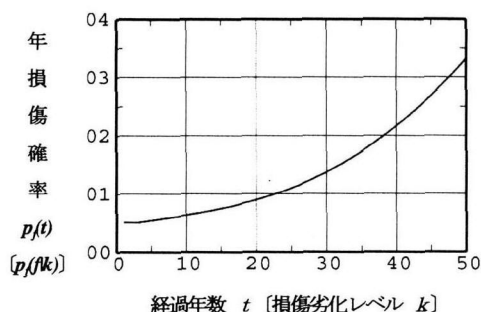


図-8 経過年数(損傷劣化レベル)に対応した年損傷確率

8.5 点検補修計画の検討

ここでは、供用開始後10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, 38, 42, 46年目(計10回)に点検補修を実施する場合(計画案1)と点検補修を行わない場合(計画案2)について考察する。

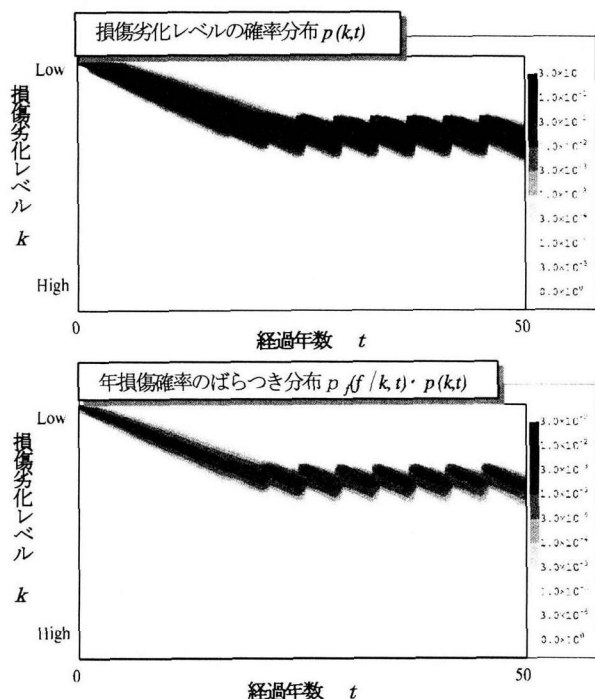


図-9 損傷劣化レベル及び年損傷確率のばらつき分布の経年変化

図-9上段は、構造物の損傷劣化レベル k の確率分布 $p(k, t)$, (3)式参照) の経年変化であり、任意の経過年

において損傷劣化レベルが k ($k=1, \dots, m$) である確率の総和をとると1.0となる((11)式参照)。同図下段は損傷劣化レベル k である確率 $p(k, t)$ に損傷劣化レベルに応じた損傷確率 $p_f(k, t)$ を乗じた確率の分布((10)式の Σ の中) の経年変化であり、任意の経過年において、この損傷確率の総和がLCCの算定に用いる供用開始 t 年後の年損傷確率 $P_d(t)$ ((10)式) となる。

最初の頃は点検による劣化の改善が見られないが、20年を越えると点検を行うごとに損傷劣化レベルが改善されている様子がわかる。

図-10には年損傷確率および年期待損失費用($P_d(t)$ と C_f の積に点検・補修費用を加算)の経年変化を示す。図中には計画案1と計画案2を併せて示す。上段の図より、計画案1では20年過ぎから年損傷確率が補修のたびに徐々に小さくなっている様子がわかる。下段の図より、年期待損失費用は点検補修により徐々に減少していくのがわかる。点検の年に費用は大きくなるが、これは点検・補修費用を加算するためである。また10年、14年、18年時は比較的小さいが、これは劣化の程度が小さく補修費用が非常に小さいためである。

時間方向に年期待損失費用の総和をとり、初期費用を加えるとLCCとなる。計画案1は、計画案2に比べ7%程度のLCCの削減につながる事がわかった。

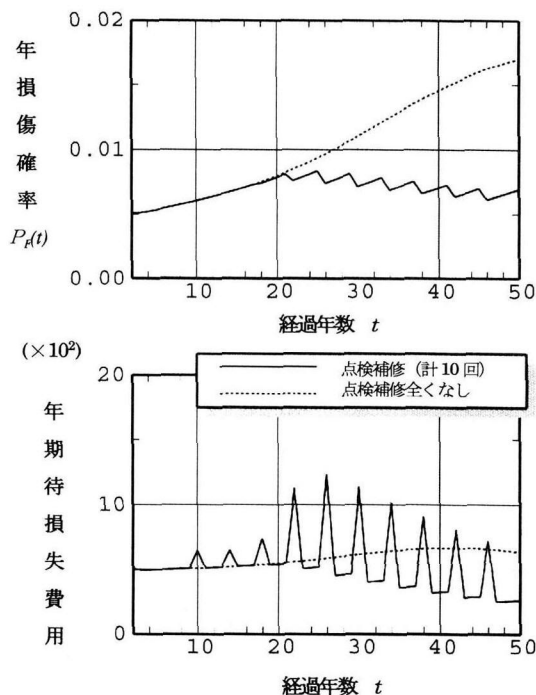


図-10 年損傷確率と年期待総費用の経年変化

8.6 GAによる最適点検補修計画の検討

(1) 定式化と計算条件

GAを用いてLCCに着目した保守計画の最適化を試みた。目的関数はLCC、最適化変数は点検補修の回数と時期である。GAによる最適化を考える上では交叉や突然

変異の結果、致死遺伝子が現れないようにする必要がある。すなわち、あり得ないような解が出現しないように定式化することや交叉の結果、親の形質が適切に次世代に伝わるような定式化が好ましい。そこで、最適化におけるパラメータを残存供用期間に対する比率 x として、(15)式のように定式化した。

$$n_i = n_{i-1} + (T - n_{i-1}) \cdot x_i \quad \dots(15)$$

ここに、 n_i : i 番目の点検の時期、および T : 供用期間である。また、 $n_0 = 0$ である。上記の関係を x_i の範囲を 0.0 から 1.0 とすると必ず供用期間内に所定の回数の点検補修時期が与えられることになる。このパラメータ x_i に関して最適化を行うことにより、所定の点検補修回数に対する最適な点検補修時期が求められることになる。

点検補修回数について最適化を考えるには、いくつか設定した点検補修回数に対して最適化を行い、得られた解のうち最小の LCC となるものを選べばよいが、何回も最適化を行う必要があり、計算に手間がかかる。そこで本研究では点検補修回数も最適化のパラメータとして定式化を行った。上記定式化において、 x の定義域を 1.0 を上回るころまで設定すると点検補修時期が供用期間を越えることがある。その場合にはそれ以前の点検補修だけを有効にして点検補修回数のカウントを行い、補修による費用低減効果の算定を行った。

以下の検討では点検補修回数の上限を 15 回として最適化を行った。その他の GA に関するパラメータは、人口 : 100, 世代数 : 50, エリート数 : 2, および突然変異率 : 0.01 とする。

(2)最適解の探索結果

GA による最適化の収束過程を図-11 に示す。横軸は世代数、縦軸は補修による費用低減効果、すなわち、補修なしの場合の LCC に対する補修有りの場合の比（達成度）を表している。図中には各世代の個体の中で LCC 最小のものと 50 番目（中央値）のものを示した。あまり大きな変動はないが、世代が進むにつれ少しずつ改善されている様子がわかる。

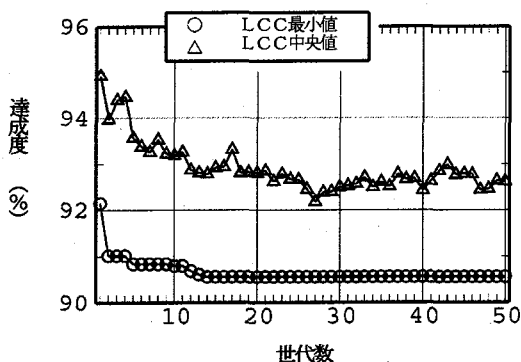


図-11 GAによる最適化の過程

図-12 には、第 1, 10, 20, 30, 40, 50 世代の各個体

の補修による費用低減効果（達成度）と点検補修回数の関係を示している。おおよそ 20 世代から安定しており、ほとんど解の改善はみられない。

結果としては、最適な点検補修回数は 4 回、最適な点検補修時期は、供用開始後 26, 31, 36, 41 年となった。

GA によって得られた解をもとに点検補修間隔を少し長くするなど、その間隔を変えた場合についていくつかの対案を考えて LCC の算定を行った。すなわち、得られた解の周辺を調べたところ、いずれの場合も GA によって求められた解の方が周辺の解に比べ LCC の改善度が高く、大域解の条件を満たしていることを確認することができた。ただし、改善度に大きな違いはなく、得られた解周辺の LCC はほぼ同じ程度であった。

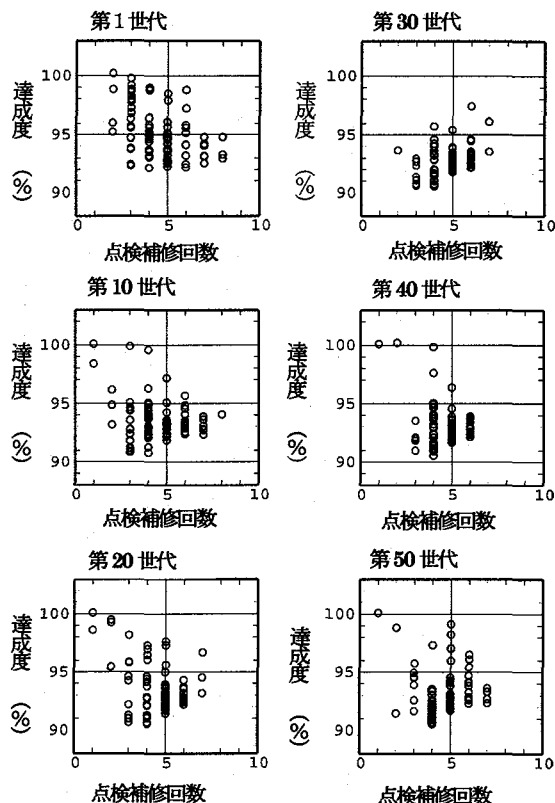


図-12 いくつかの世代における解の収束状況

(3)検討結果に対する考察

最適計画案と点検補修を行わない場合（計画案 2）に対して、年損傷確率と年期待損失費用の経年変化を示したのが図-13 である。上段の図より、最適計画案では 25 年過ぎの 4 回の補修により年損傷確率が小さく抑えられ、供用期間終了時の確率は 0.08 程度と、計画案 2 の半分程度となった。また下段の図より、年期待損失費用は補修により効果的に減少していくのがわかる。LCC に関しては、最適計画案では計画案 2 に比べ 10% 程度の削減に、また計画案 1 と比べても 3% 程度の削減になる。

上記の検討の結果、本検討における最適化手法を用いることにより、損傷確率を低く抑え LCC を低減できる、合理的な保守戦略策定のための有用な情報・手段を与えるこ

とが可能であることがわかった。しかし、本検討では様々なパラメータ設定が必要であり、これら設定値の違いによる影響も大きいと考えられる。特に損傷時損失費用、状態遷移確率、鉄筋腐食率、供用期間などの影響が大きいと考えられ、これらパラメータの感度分析を実施し、結果に対する影響度合いを把握する必要がある。

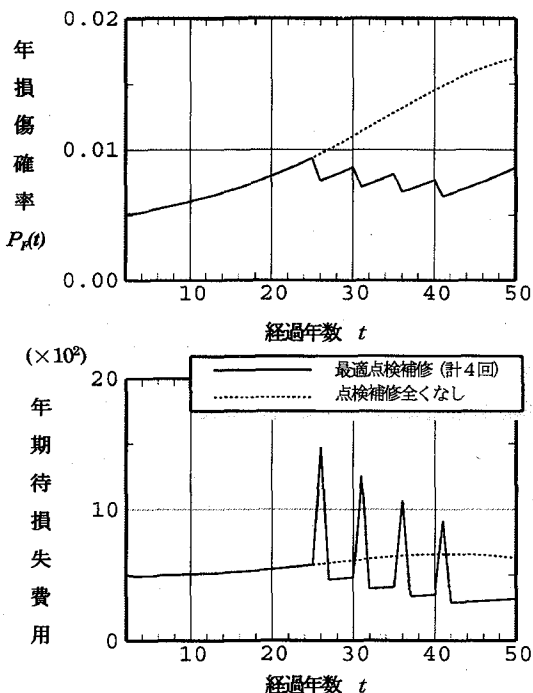


図-13 GAによって求めた最適補修計画の例
(年損傷確率と年期待総費用の経年変化)

9. 結論

本研究では、RC橋脚を対象に地震時の損傷モードを考慮して、合理的な保守戦略策定支援システムの構築に関する検討を行った。基本的にはFrangopolらの研究³⁾に基づいているが、これを発展させ地震時の損傷モードを取り扱うように拡張した。主な結果は以下のとおりである。

- 1) 構造物の損傷劣化レベルを離散的に扱うことで定式化を行い、ばらつきを考慮した損傷劣化進行モデルを構築した。すなわち、実際の損傷劣化進行のばらつきを考え、損傷劣化の状態遷移とその確率を設定する方法を提案した。
- 2) 経年劣化による構造物の耐力低下を考慮した地震時損傷確率およびLCCの算定方法を提示した。
- 3) GAを用いてLCC最小とする最適な点検補修回数と時期を算定し、その算定手法の有効性を確認した。
- 4) 上記の結果を総合して、地震時の損傷モードを考慮した最適保守戦略策定支援システムのプロトタイプを構築することができた。

性能設計体系の普及に伴う設計の規制緩和と同時に電力業界の規制緩和も本格化する中で、既存設備の性能を再評価しその結果をもとに延命化を図ったり補修時期を繰り延べたりすることは、保守管理技術者にとって今まで以上に重要となってきた。このため、本研究の目指す合理的な保守戦略策定支援システムの構築は急務の検討課題である。コストをより定量的に評価した、このような保守戦略策定支援システムの構築は、従来の管理方法の妥当性を確認したり、適切な改良、補完のための有用な手段を与えるものと考えられる。

今後、本研究成果を基礎として、実構造物を対象に経年劣化、点検精度および補修効果のモデル化等について具体的な研究を進め、現在の保守技術や視点の異なる保守管理方法などとの融合を図りながら各種の実構造物に対応した実用性の高い保守戦略策定支援システムの確立を目指していきたい。

参考文献

- 1) Mori, Y., and Ellingwood, B. R. : Maintaining Reliability of Concrete Structures. I: Role of Inspection/Repair, J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol.120, No.3, pp.824-845, 1994.
- 2) Mori, Y., and Ellingwood, B. R. : Maintaining Reliability of Concrete Structures. II: Optimum Inspection/Repair, J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol.120, No.3, pp.846-862, 1994.
- 3) Frangopol, D. M., Lin, K.-Y., and Estes, A. C. : Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures, J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol.123, No.10, pp.1390-1401, 1997.
- 4) Frangopol, D. M., Lin, K.-Y., and Estes, A. C. : Reliability of Reinforced Concrete Girders Under Corrosion Attack, J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol.123, No.3, pp.286-297, 1997.
- 5) 松島学, 関博, 松井邦人 : RC栈橋施設の最適検査間隔, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.197-204, 1992.
- 6) 土木学会 : コンクリート標準示方書 (平成8年制定), 設計編, 1996.
- 7) 小林重信・小野功 : 進化型計算に基づくシステム最適化, 計測と制御, 35-7, pp.508-513, 1996.
- 8) S. Tsutsui and A. Ghosh, D. Come and Y. Fujimoto : A real coded genetic algorithm with an explore and an exploiter populations, Proceedings of the 7th International Conference on Genetic Algorithms, 238-345, 1997.
- 9) Ikumasa Yoshida : Comparison of real coded GA (Genetic Algorithm) and binary coded GA, International Conference on Monte Carlo Simulation, 2000.
- 10) 土木学会 : コンクリート標準示方書 (平成8年制定), 耐震設計編, 1996.
- 11) 土木学会 : 阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式, コンクリート技術シリーズNo.12, 1995.

(2000年9月14日受付)