経年劣化構造物の検査計画立案と不確実因子の影響

正員 藤 本 由紀夫*

Inspection Planning for Deteriorating Structures and the Influence of Inevitable Uncertain Parameters

Yukio Fujimoto, *Member*

Summary

In the previous paper, the authors presented a sequential cost minimization method for the inspection planning problem of fatigue deteriorating structures¹⁾. The method aims to find an optimal strategy so that the total expected cost in the period between the present inspection and the next be minimum. The optimization is repeatedly carried out at every inspection. The sequential cost minimization is a sub-optimization method of inspection strategy. However, the strategies predicted by the method are close to the lifetime optimal one in most cases. Further, the optimization can be accomplished with realistic computational effort even for large system.

In this paper, first of all, the content of the sequential cost minimization method is briefly reviewed, and the applicability of the method is examined for an actual member set consisting of structural elements with round fillet weld. Then, the influences of inevitable uncertain parameters on inspection planning are discussed.

The uncertainties related to inspection planning can be classified into two categories: engineering uncertainty and economical/social uncertainty. With respect to the engineering uncertainty, it is further divided into two groups: reducible uncertainty and non-reducible uncertainty.

For reducible uncertainty, initial uncertainty can be gradually reduced by updating the inspection results and/or service experiences. The Bayesian analysis is applied in conjunction with the sequential cost minimization method for a member set which has an uncertainty in the fatigue property of members. It is made clear that the “visual and conditional mechanical inspection method” and “sampling mechanical inspection method” become profitable when a large uncertainty exists in the fatigue life of members.

For non-reducible uncertainty, initial uncertainty remains through the whole service of the structures. Two types of sensitivity analysis are carried out. First, giving a small change for individual parameters, the degrees of influence of each parameter on the inspection content, the cumulative operating cost and the failure probability are investigated. Second, sensitivity analysis is carried out by giving a large change for a single parameter. As a result, it is found that the optimization of inspection strategy itself has an effect to decrease the influence of this large uncertainty on the operating cost.

1. 緒 言

構造物の使用中の安全性は、種々の安全項目について適

切な検査・補修を行うことで確保できる。しかし、安全確保は一般にコスト上昇を伴うので、過剰な検査・補修を行うことは適当でない。検査・補修費用、使用目的、万一事故が生じたときのリスクなどから、その構造物に最適な信頼度レベルが存在すると考えられる。そのレベルを決定する最善の方策は生涯コストミニマム基準による意志決定である。

しかし、種々関与してくる確率やコストの多くは不確実

* 広島大学工学部

原稿受理 平成4年6月26日

秋季講演会において講演 平成4年11月9, 10日

性を含んでおり、コストミニマム基準の定式化を行ったとしても、果たして最適な方策が得られるか疑問がある。そこで、従来の検査計画立案では経験的判断が重要視されてきた。

ところが最近、構造物の高信頼度化の要求、環境汚染に対するリスクの見直し、あるいは寿命に近づいた構造物の増加傾向などから、検査計画を経験や主観のみに頼って決定することがむづかしくなってきた。すなわち、より合理的なメンテナンスを追求すると、使用中の構造信頼度や、検査・補修の適切さを客観的に評価する手法が必要になる。この問題は、検査による稼働損失や破壊リスクの大きい構造物で今後、益々切実な課題になると思われる。

このような観点から、著者らは逐次コストミニマム法による経年劣化構造物の検査計画立案法を提案し、疲労損傷の可能性のある構造物を対象に解析を行ってその有効性を示した。また、提案手法が検査計画立案のみでなく、設計、建造を通じた生涯コスト最適化にも利用できることを示した²⁾。

本研究ではまず、2章で逐次コストミニマム法の要約を述べ、3章で角回し溶接継手の疲労劣化損傷を対象にした解析例を示す。次に4章以降で、関与する種々の不確実性が検査計画に及ぼす影響について検討する。

現実の検査計画は不確実性が存在する状況下で立案されるので、不確実性が有るときと無いとき、および不確実性の種類により検査計画に生じる差異を明らかにしておく必要がある。4章で検査に関与する不確実性の分類を行った後、5章では部材疲労寿命が不確実な場合について、検査結果を追加情報とするベイジアン解析を行う。そして検査計画に表れる特徴を考察するとともに、“目視および条件付き詳細検査”や“サンプリング詳細検査”が実構造物で有利になる理由を明らかにする。6章では、解析条件やコス

ト項目の内容を変化させて感度解析を行い、各パラメータの検査計画への影響度評価を行う。また、検査の最適化を計ること自身に、使用コストの不確実性を減少させる効果があることを示す。

2. 逐次コストミニマム法による検査計画立案¹⁾

繰り返し検査を受ける構造物の検査計画は多段意志決定問題 (Multi-stage decision process) であり、その生涯最適化はきわめて複雑となる³⁾。逐次コストミニマム法はこの困難さを克服するための近似最適化法である。現時点から次の検査時までの検査計画の最適化を計り、これを各検査時毎に逐次繰り返すことにより、実用上生涯最適と見なせる検査計画を立案する。また、複数の構造部材群から成る構造物全体の検査計画も現実的な計算時間で立案可能である。

疲労損傷の可能性のある複数の部材群から構成された構造物を想定する。各部材群内の部材は同一母集団からのサンプルと見なせるものとする。ある検査時 (t) から次の検査時 ($t+1$) の間にかかる期待コスト $CT(t, t+1)$ は、次式で表すことができる (Fig. 1 参照)。

$$CT(t, t+1) = \sum_{j=\text{set } t}^{\text{set } t+1} C_j(t, t+1) + C_{\text{sws}} \quad (1)$$

$$C_j(t, t+1) = C(\text{inspection}) + C(\text{repair}) \\ + C(\text{member failure}) \\ + C(\text{catastrophic failure}) \quad (2)$$

$$C_{\text{sws}} = C(\text{scheduled system down}) \quad (3)$$

ここで、(1)式の“ j ”は構造物が L 種類の部材群から構成されていることを表す。 $C_j(t, t+1)$ は部材群“ j ”にかかる次期検査までの期待コストである。 $C(\text{inspection})$ 、 $C(\text{repair})$ はそれぞれ、検査時刻 t での検査費用、補修費用である。 C_{sws} は検査で計画的に使用停止したときの稼働損

Fig. 1 Cost required for structure in an inspection interval.

失, $C(\text{member failure})$ には破壊部材の補修費用および不意の使用停止に伴う稼働損失が含まれる。 $C(\text{catastrophic failure})$ は部材破壊が大規模破壊に発展したときのリスクである。

最適化は各検査時毎に(1)式の最小化を計ることで行う。最適化パラメータは、検査手法および検査間隔である。

検査手法は、次の5つの手法から各部材群毎に最適な手法を選択し適用する。

- ・ 検査を行わない (NO)
- ・ 目視検査 (VI)
- ・ 詳細検査 (MI)
- ・ 目視および条件付き詳細検査 (V & M)
- ・ サンプルング詳細検査 (SM)

ここで、(V & M)および (SM) の内容は次のようである。(V & M)ではまず、部材群全てに目視検査を行ない、損傷がまったく発見されなければ検査を終了する。損傷が一箇所でも発見された場合には全ての部材に詳細検査を行なう。(SM) ではまず、部材群の一部をサンプルングし詳細検査を行なう。もし損傷が全く発見されなければそれ以上検査しない。一箇所でも発見すれば残りの部材全てに詳細検査を行う。

検査間隔は、適用可能な選択枝から構造物に最適なものを選んで適用する。たとえば選択枝が1年と2年の場合を考えると、検査間隔1年を選んだ場合の次の2年間の期待コストは(4)式で、また間隔2年を選んだ場合の期待コストは(5)式で与えられる。

$$CT(t, t+2) = \sum_{j=\text{set } 1}^{\text{set } L} C_j(t, t+1) + \sum_{j=\text{set } 1}^{\text{set } L} C_j(t+1, t+2) + 2C_{\text{sws}} \quad (4)$$

$$CT(t, t+2) = \sum_{j=\text{set } 1}^{\text{set } L} C_j(t, t+2) + C_{\text{sws}} \quad (5)$$

上式では検査時点毎に C_{sws} が加算される点に注意が必要である。

(4)式が(5)式より小さければ間隔1年を選び、そうでなければ2年を選ぶ。選択枝が3種類以上ある場合も同様である。Fig. 2は選択枝が1年, 2年, 4年の場合の選択手順を示す。

上述の操作で、検査手法と検査間隔の同時最適化を行い、これを各検査時毎に逐次繰り返すことにより生涯にわたる検査計画を立案する。こうして立案した計画は生涯コストミニマムに近いものとなり、実用上最適と見なすことができる。また、検査時毎に逐次最適化を計るので、構造物の状況に応じて検査計画を改善することも容易である。

き裂の検出能力が確率的であること、部材破壊が生じた場合には緊急に使用停止して補修することおよび、部材破壊は P_{fc} の確率で大規模破壊に推移することを仮定すると、 $C_j(t, t+1)$ は採用した検査手法毎に次のように表すことができる。

Fig. 2 Selection of suitable inspection interval.

・ 検査無し (NO) : $C_j(t, t+1|\text{NO}) = G \times P_{F1} \times C_F$ (6)

・ 目視検査 (VI) : $C_j(t, t+1|\text{VI}) = G \times \{C_{\text{vi}} + P_{\text{dv}} \times (C_{\text{zmi}} + C_{\text{rd}}) + (1 - P_{\text{dv}}) \times P_{F2} \times C_F\}$ (7)

・ 機器(詳細)検査 (MI) :
 $C_j(t, t+1|\text{MI}) = G \times \{C_{\text{mi}} + P_{\text{dm}} \times C_{\text{rd}} + (1 - P_{\text{dm}}) \times P_{F3} \times C_F\}$ (8)

・ 目視および条件付機器検査 (V & M) :
 $C_j(t, t+1|V \& M) = G \times [C_{\text{vi}} + P_{\text{dv}} \times (C_{\text{zmi}} + C_{\text{rd}}) + (1 - P_{\text{dv}}) \times \{(1 - P_{\text{dv}})^{G-1} \times P_{F2} \times C_F + \{1 - (1 - P_{\text{dv}})^{G-1}\} \times \{C_{\text{mi}} + P_{\text{dm}} \times C_{\text{rd}} + (1 - P_{\text{dm}}) \times P_{F3} \times C_F\}\}]$ (9)

・ サンプルング詳細検査 (SM) :
 $C_j(t, t+1|\text{SM}) = \alpha \times G \times \{C_{\text{mi}} + P_{\text{dm}} \times C_{\text{rd}} + (1 - P_{\text{dm}}) \times P_{F3} \times C_F\} + (1 - \alpha) \times G \times \{[1 - (1 - P_{\text{dm}})^{\alpha G}] \times \{C_{\text{mi}} + P_{\text{dm}} \times C_{\text{rd}} + (1 - P_{\text{dm}}) \times P_{F3} \times C_F\} + (1 - P_{\text{dm}})^{\alpha G} \times P_{F1} \times C_F\}$ (10)

ここで、 $C_F = (1 - P_{\text{fc}}) \times (C_{\text{swa}} + C_{\text{rf}}) + P_{\text{fc}} \times C_{\text{cf}}$ (11)

$G = m \times P_{\text{sv}}$ (12)

である。また使用した記号の意味は次の通りである。

m : 部材群内の部材数

α : サンプルング率

P_{F1}, P_{F2}, P_{F3} : 今回の検査がそれぞれ (NO), (VI), (MI) であったとして、次期検査までに部材破壊を起こす確率

$P_{\text{dv}}, P_{\text{dm}}$: 目視あるいは詳細検査で損傷を発見できる確率

P_{fc} : 部材破壊が大規模破壊に拡大する確率

P_{SV} : 現在まで補修を経験していない確率

C_{VI} , C_{MI} : 一部材あたりの目視あるいは詳細検査費用

C_{ZMI} : 目視検査で発見された損傷箇所についてもサイジングなどのため詳細検査を行う場合には $C_{ZMI} = C_{MI}$, 詳細検査を行なう必要の無い場合には $C_{ZMI} = 0$

C_{RD} : 検査で発見された損傷の補修費用 (損傷程度, 発見時期の関数)

C_{RF} : 破壊した部材の補修費用 (破壊時期の関数)

C_{CF} : 大規模破壊を起こしたときの損失

C_{SWA} : 部材破壊で不意に使用停止した場合の稼働損失

なお, P_{Fc} 以外の確率は, 疲労き裂発生と伝播の両確率特性を考慮したマルコフ連鎖モデル⁴⁾で計算する。

3. 角回し溶接継手部材群への適用

Fig. 3 は, 川野⁹⁾により行われた角回し溶接継手の疲労試験結果である。この部材では角回し部の溶接止端にまづ浅いき裂が発生し, スチフナー厚さまでは表面方向に比較的速く成長する。フェイスプレート母材に進入する段階で, 表面方向への成長は鈍り板厚方向へ主に成長する。板厚方向へある程度成長すると表面方向にも再び成長を開始してその後破断する。

いま, この継手 200 から成る部材群を考える。き裂発生および破断時のき裂長さを, それぞれ表面長さ 10 mm および 80 mm とする。疲労寿命分布は, き裂発生寿命が ($\bar{N}_c = 6$ 年, $\alpha = 3$), 伝播寿命が ($\bar{N}_p = 54$ 年, $\alpha = 5$) のワイブル分布に従うとする (Table 1 参照)。

$$f_N(N) = (\alpha/\beta) \times (N/\beta)^{\alpha-1} \times \exp\{-(N/\beta)^\alpha\} \quad (13)$$

なお, 疲労寿命分布の形状母数 α は文献⁶⁾を参考に決定した。Fig. 4 は, 上述の疲労過程をマルコフ連鎖モデルでシミュレートした例である (サンプル数 100)。

Fig. 3 Crack growth at toe of round fillet weld. (by reference to Kawano et al.⁹⁾)

角回し溶接部は欠陥を生じ易い箇所であるので, 初期欠陥確率 P_{ID} を Table 1 に示すように, 0.1 あるいは 0.2 とした 3 つの Case で解析を行った。初期欠陥長さとその存在確率を Fig. 5 に示す。

検査能力は表面き裂長さに対して決まると仮定する。目視および詳細検査の POD 曲線を Fig. 6 に示す。検査で発見したき裂は疲労損傷が再発しないよう完全補修するものとする。選択可能な検査間隔は 1 年, 2 年, 4 年の 3 通りとする。

コスト項目の内容をその他の解析条件とともに Table 1 に示す。表中の C_{VI} , C_{MI} は 1 部材あたりの検査費用である。 C_{RD} , C_{RF} は一定値としている。

この部材群に対し逐次コストミニマム法で立案した検査

Table 1 Condition of analysis for structural elements with round fillet weld.

Number of members	200
Fatigue property of member $2a_0 = 10.0$ mm $2a_{max} = 80.0$ mm	$\bar{N}_c = 6$ years Weibull shape parameter : 3 $\bar{N}_p = 54$ years Weibull shape parameter : 5
Initial defect condition	Case A : $P_{ID} = 0.10$ Case B : $P_{ID} = 0.20$ Case C : $P_{ID} = 0.20$
POD Curve for VI and MI Methods	VI : $POD = 1.0 - \exp\{-0.025 \times (2a - 10.0)\}$ MI : $POD = 1.0 - \exp\{-0.10 \times (2a - 10.0)\}$
Cost items (US \$)	
$C_{VI} = 10.0$ $C_{SWS} = 10^4$ $C_{RD} = 10^3$ (Constant) $C_{CF} = 2.0 \times 10^8$	$C_{MI} = 100.0$ $C_{SWA} = 10^6$ $C_{RF} = 5.0 \times 10^5$ (Constant) $P_{FC} = 0.01$

Fig. 4 Sample functions of fatigue process generated by Markov Chain Model.

	10 mm	20 mm	21 mm	24 mm

Case A	0.10	—	—	—
Case B	0.10	0.05	0.05	—
Case C	0.10	0.05	0.03	0.02

Fig. 5 Content of initial defect, P_{ID} .

計画を Table 2 に示す。検査間隔はすべて 4 年が選択されている。初期欠陥が短い Case A では 20 年目まで検査しないのが最適であるが、長い初期欠陥が存在する Case C では 4 年目からの検査が必要である。また、目視および条件付き詳細検査 (V & M) やサンプリング詳細検査 (SM) は全く選択されていない。表中の C_{OP} は 32 年間使用した場合の累積使用コストであり、(14) 式で計算できる。当然な

Fig. 6 POD curves.

がら、初期欠陥が多い場合ほど C_{OP} は増大している。

$$C_{OP} = \sum_{t=0}^{\text{Life time}} CT(t, t+i), \quad i=1 \text{ or } 2 \text{ or } 4 \quad (14)$$

Table 2 Results of inspection planning.

Case	Selected inspection years and qualities								C_{op} US \$	P_f
A	4	8	12	16	20	24	28	32	3.2×10^5	2.06×10^{-4}
	—	—	—	—	V	V	M	M		
B	4	8	12	16	20	24	28	32	4.0×10^5	2.27×10^{-4}
	—	V	M	M	M	M	M	M		
C	4	8	12	16	20	24	28	32	4.6×10^5	2.57×10^{-4}
	M	M	V	V	M	M	M	M		

V: Visual inspection M: Mechanical inspection

$$C_F = (1.0 - P_{FC}) \times (C_{SWA} + C_{RF}) + P_{FC} \times C_{CF}$$

Table 3 Results of inspection planning. (Fixed interval inspections)

Case	Selected inspection qualities																C_{OP} (US \$)	P_f
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32		
A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	V	V	V	M	M	M	4.2×10^5	3.04×10^{-4}
B	—	—	—	—	V	V	V	M	V	V	V	M	V	V	M	V	5.7×10^5	4.28×10^{-4}
C	—	V	M	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	M	V	5.3×10^5	2.83×10^{-4}

Table 3は検査間隔を2年に固定して、検査手法のみの最適化を行った結果である。この場合には検査費用の少なくすむ目視検査が多く採用されている。また、 C_{OP} は検査間隔を自由に選択できる場合 (Table 2) に比べて少しづつ大きくなっていることがわかる。なお、Case Cの C_{OP} がCase Bのそれよりも小さくなっている理由は、6年目の検査で選択された (MI) が破壊確率を抑えるのに効果的であることによると考えられる。

Fig. 7は上述の検査計画で継手部材群を使用したときの累積破壊確率 P_f と使用年数 S_y の関係を示す。検査計画はコスト基準で立案しており、破壊確率は全く制御していない。図より32年使用後の P_f は3つのCaseとも 10^{-4} から 10^{-3} の範囲内にある。この他多くの解析例^{1),2)}で、部材の疲労特性やコスト内容が常識的範囲内であれば、部材信頼度はほぼ 10^{-5} ~ 10^{-3} のレベルに収まるという結果が得られた。このレベルは一般の構造物で望まれる信頼度である。

信頼性設計では、構造物あるいは構造部材に対する“望ましい信頼度”が問題になる。ところが具体的問題になる

と、コストやリスク見積りで生じる個人差、検査を組み込んだ信頼性解析法や最適化法の不備などから、その客観的評価は容易でない。上述のように、解析で得られる検査計画や部材信頼度が現実離れた結果を生じない事実は、コストミニマム基準の検査計画立案が、意志決定時の判断材料として実用化できる可能性を示唆していると言えよう。

4. 検査計画立案時の不確実性

検査計画立案に関与する不確実性は、工学的不確実性と社会、経済的不確実性に大別できる。“工学的不確実性”はさらに次の2つに分類できる。

- (1) 構造物の使用や検査を通じて得られる情報を基に、初期の不確実性が次第に解明できるもの。部材疲労寿命や検査能力などの不確実性はこの種類に属する。
 - (2) 初期の不確実性が使用期間中も継続するもの。大規模損傷時のリスクや不意の使用停止に伴う損失のように、希な事象故に不確実なものはこの種類に属する。
- 社会、経済的不確実性とは、
- (3) 金利、インフレなど社会、経済状況に強く影響を受ける種類の不確実性である。

(1)の不確実性にはベイジアン解析が有効である。信頼性基準の検査計画立案問題へのベイジアン解析の適用例はいくつか見られるが⁷⁾、本研究ではコストミニマム基準の検査計画立案問題にベイジアン解析を適用する。

(2)の不確実性には専門家の主観的判断を導入せざるを得ない。その際、検査計画に敏感に影響する主観因子とそうでない因子を承知しておく必要がある。本研究では感度解析により各因子の影響度評価を行う。

(3)の不確実性は、金利、インフレの長期予測値をコスト項目に時間関数として反映させると、これらを考慮した長期検査計画の立案が可能である。また、逐次コストミニマム法は、近い将来のある期間での最適化を逐次繰り返す方法を用いるので、社会、経済状況を参考にその都度コスト項目の内容を変更することにより、状況に適応した検査計画を立案できる。

現実の検査では(1)から(3)の不確実性が同時に存在するので、初期に立案した検査計画は、使用期間中逐次見直され改善を計ることになる。ベイジアン解析との併用や、コスト内容の変更などに容易に対処できる点は、逐次コストミニマム法の特長である。

Fig. 7 P_f - S_y curves.

5. 疲労寿命の不確実性が検査計画へ及ぼす影響

5.1 ベイジアン解析

部材の疲労寿命に不確実性が存在する場合の Bayesian 解析法を述べる。

n 回目検査で各部材に生じる事象は次の 3 つのどれかに属する^{8),9)}。

Event A：前回検査と今回の検査間で部材破壊を生じた。

Event B1：検査で疲労損傷を発見した。

Event B2：検査で疲労損傷が発見されなかった。

今回の検査で目視検査 (VI) を採用する場合、各事象の生起確率は次のように表わせる (Fig. 8(a) 参照)。

$$\begin{aligned} \Pr[\text{Event A}] &= P_{F2}(n-1, n) \\ &\quad / \{P_{F2}(n-1, n) + P_{SV}(n)\} \\ \Pr[\text{Event B1}] &= P_{bv} \times P_{SV}(n) \\ &\quad / \{P_{F2}(n-1, n) + P_{SV}(n)\} \\ \Pr[\text{Event B2}] &= (1 - P_{bv}) \times P_{SV}(n) \\ &\quad / \{P_{F2}(n-1, n) + P_{SV}(n)\} \end{aligned} \quad (15)$$

なお、 P_{F2} 、 P_{SV} には、時刻を明確にするために $(n-1, n)$ 、 (n) を付けている。

今回の検査で詳細検査 (MI) を採用する場合には、(15) 式の P_{F2} 、 P_{bv} をそれぞれ P_{F3} 、 P_{DM} に置き換えればよく、検査を行わない (NO) 場合にはそれぞれ P_{F1} 、 $P_{bv}=0$ に置き換えればよい。(V & M) や (SM) を適用する場合も、個々の部材毎に見ると NO、VI あるいは MI のどれかが適用されるので、実際に適用した手法に対して生起確率を求める。

ある部材群について、 $(n-1)$ 回の検査終了時までに破壊も補修も経験したことの無い部材が M 個あるとする。 n 回目検査の結果、 M 部材中 m_1 部材に Event A が、 m_2 部材に Event B1 が、残りの $(M - m_1 - m_2)$ 部材に Event B2 が生じたとする。すると、部材群全体に生じた事象の尤度数関 $L(n)$ は次式となる。

$$\begin{aligned} L(n) &= \{\Pr[\text{Event A}]\}^{m_1} \times \{\Pr[\text{Event B1}]\}^{m_2} \\ &\quad \times \{\Pr[\text{Event B2}]\}^{(M - m_1 - m_2)} \end{aligned} \quad (16)$$

ベイズの式を用いると、 n 回目検査後の部材疲労特性の事後分布 $f^{(n)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ は次式で計算できる。

$$\begin{aligned} &f^{(n)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p) \\ &= \frac{\{\prod_{k=1}^n L(k)\} \times f^{(0)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)}{\iint \{\prod_{k=1}^n L(k)\} \times f^{(0)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p) d\bar{N}_c d\bar{N}_p} \end{aligned} \quad (17)$$

上式で肩付きの (n) は n 回目検査後を表す。 $\bar{N}_c$ 、 $\bar{N}_p$ は部材寿命の平均値である。また、 $f^{(0)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ は疲労特性の事前分布であり、その分布形は事前に主観的に決定しておく。本研究では、事前分布として離散的一様分布を仮定した。まず、真の寿命平均値 $(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ が必ず含まれるように $\bar{N}_c$ 、 $\bar{N}_p$ の分布の上下限値を設定し、次に、その範囲を k 組に等分割し各組に確率 $1/k$ を与え一様離散分布を決定した。

$$f^{(0)}(\bar{N}_c(i), \bar{N}_p(i)) = 1/k, \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (18)$$

(17) 式を第 1 回目検査から順次適用すると、事前分布に含まれる疲労寿命の不確実性を減少させることができる。

疲労寿命の事後分布を考慮すると、2 章で述べた $C_j(t, t+1)$ は次式の周辺分布で計算できる。

$$\begin{aligned} C_j(t, t+1) &= \iint C_j(t, t+1 | \bar{N}_c, \bar{N}_p) \\ &\quad \times f^{(n)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p) d\bar{N}_c d\bar{N}_p \end{aligned} \quad (19)$$

Fig. 8(b) は逐次コストミニマム法とベイジアン解析法を併用した検査計画立案過程を順を追って示す。

Fig. 8(b) Procedure of Bayesian analysis.

Fig. 8(a) Event tree of inspection results.

- ① n 回目の検査時に達すると、まず $f^{(n-1)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ を用いて (19) 式のコスト評価を行い、 n 回目検査で採用する検査手法と $(n+1)$ 回目の検査時期を決定する。
- ② 決定した検査手法に従い検査を行う。
- ③ 検査結果から事後分布 $f^{(n)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ を計算する。
- ④ 新しい事後分布 $f^{(n)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ を用いて、 $(n+1)$ 回目の検査時期を再度決定しなおす。
- ⑤ ④で決定した検査時まで構造物を使用する。
- ⑥ $(n+1)$ 回目の検査時に達すると、 $f^{(n)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ を用いて①を実行し、その後②から⑤を繰り返す。

この計算プロセスでは、検査の前後で事後分布が変化することを考慮し、 n 回目の検査終了後 $(n+1)$ 回目の検査時を再度計算している。

5.2 解析例

5.2.1 解析条件

Fig. 9 に示す溶接継手から成る単一部材群 (部材数 200) を想定する。部材破壊は溶接止端部から発生した表面き裂が板厚貫通深さに達した時点で定義する。部材破壊を生じると、補修する以前に大規模破壊に発展する可能性が 0.5% ($P_{fc}=0.005$) あるとする。疲労き裂発生寿命 N_c (深さ 1.0 mm の表面き裂で定義) および板厚貫通までの伝播寿命 N_p のばらつきは、それぞれ形状母数が 3.0 および 4.0 の 2 母数ワイブル分布で近似できるものとする。き裂は (表面長さ/き裂深さ) の比が一定で成長し、深さ方向への平均的成長は Paris 則 (指数 $m=2$) で表せるものとする。

N_c および N_p の平均値は、荷重推定精度その他の不確実性により、 $\bar{N}_c$ は 5 年から 50 年、 $\bar{N}_p$ は 5 年から 30 年の範囲内に納まる程度にしか言えないものとする。そこでこの範囲を 10 組に離散化し、各組に一樣な確率 0.1 を与え、これを事前分布 $f^{(0)}(\bar{N}_c, \bar{N}_p)$ とする。

検査は 1 年に一回行なうこととし、適用可能な手法から最適なものを選択し用いる。検査で損傷が発見された場合には同じ部材に損傷が再発しないよう完全に補修を行なう。目視および詳細検査の POD 曲線をき裂深さに対して Fig. 10 に示す。

解析に使用したコスト項目の内容を Fig. 11 に示す。き裂検出部材の補修費用 C_{RD} 、および破壊部材の補修費用 C_{RF} は文献 1) で述べた理由により損傷程度および補修時

Fig. 9 Surface crack initiated from butt weld joint.

期の関数としている。 C_{RD} はき裂深さが 5 mm 以下を Small, 5 から 10 mm を Medium, 10 mm 以上を Large とした。なお初期欠陥確率 P_{ID} は零とする。

解析結果は次の 3 条件について示す。

Case A: 部材の疲労寿命の真の値が $\bar{N}_c=25$ 年、 $\bar{N}_p=15$ 年にある場合。検査は (NO), (VI), (MI) および (V & M) 法から選択する。

Case B: 部材の疲労寿命の真の値が $\bar{N}_c=15$ 年、 $\bar{N}_p=10$ 年にある場合。検査は (NO), (VI), (MI) および (SM) 法から選択する。(SM) 法のサンプリング率 α は 10% とする。

Case C: Case A で部材の疲労寿命を $\bar{N}_c=15$ 年、 $\bar{N}_p=10$ 年に変更した場合。

目視検査能力として Case A では Fig. 10 の実線を、Case B, C では破線を用いる。なお、ここで (V & M) と (SM) の選択を問題としていないのは、両手法が本質的に混合して使用する方法では無いと考えたためである。

Fig. 10 POD curves.

Fig. 11 Content of cost items.

5.2.2 解析結果

Table 4(a), (b)に、逐次コストミニマム法で立案した検査計画と検査で発見した疲労損傷部材数を示す。各表には、真の疲労寿命が既知の場合の検査手法も比較のために示している(Truthと記したもの)。なお、検査プロセスは、真の疲労特性に従う乱数を200部材について発生し、モンテカルロ法で行っている。Fig. 12(a), (b)はベジアン解析で求めた疲労寿命の事後分布を検査時毎に示す。

Case Aでは8年目まで(V & M)法が選択されるが、疲労損傷が発見されないため9年目以降(VI)法が選択されている。疲労寿命の事後分布を見ると、10年目まではピークが現れていないが、この時点ですでに($\bar{N}_c=5$ 年, $\bar{N}_p=5$ 年)と($\bar{N}_c=10$ 年, $\bar{N}_p=7$ 年)の可能性はほとんど無いことが推定されている。14年目に(VI)法でき裂が一個発見され、この時事後分布にピークが生じる。15年目以降では真の疲労寿命位置に明瞭なピークが現れている。

Case Bでは7年目まで(SM)法が選択され、以降(MI)法が選ばれている。7年目と10年目にそれぞれ1個、13個のき裂が発見されており、10年目で既に事後分布にピークが生じている。従ってTable 4(b)では、10年目以降の検査手法はベジアン解析とTruthで同じになっている。

Table 4(a) Result of Bayesian analysis. (Applicable qualities are NO, VI, MI and V & M methods)

Case A

$\bar{N}_c = 25$ years, $\bar{N}_p = 15$ years, $P_{ID} = 0.00$

Inspection year t	Bayesian approach		Truth
	Inspection method at t	Number of detected cracks	Inspection method at t
1	—	—	—
2	—	—	—
3	V	—	—
4	V&M	—	—
5	V&M	—	—
6	V&M	—	—
7	V&M	—	—
8	V&M	—	—
9	V	—	—
10	V	—	V
11	V	—	V
12	V	—	V
13	V	—	V
14	V	1	V
15	V	—	V
16	V	2	V
17	V	1	M
18	V	2	V
19	V	6	V
20	M	16	M

以上から、疲労寿命に不確実性の強い使用初期では、(V & M)や(SM)法が多く選択され、寿命の不確実性が減少するにつれて、これらは採用されなくなることがわかる。また、疲労寿命の事前分布を今回仮定したようにかなり荒く設定した場合には、損傷がごくわずかに発見された時点で既に事後分布にピークが生じ、真の寿命が推定できることがわかる。

Case Cでは10年目検査後に事後分布にピークが生じた。Fig. 13はCase Cについて、各検査間隔内($t, t+1$)の破壊確率 P_f と期待コスト $C_f(t, t+1)$ の推移を示す。疲労寿命の不確実性が強い初期では、“寿命が短い可能性もある”と判断されるので、 P_f および $C_f(t, t+1)$ の推定値はTruthと比べて相当大きい。しかし、次第に真の寿命が明らかになるにつれて、 P_f , $C_f(t, t+1)$ ともにTruthと一致してくることがわかる。

5.3 コスト評価式に基づく検討

統計的に確定した条件下では、最適手法として(V & M)や(SM)法が選択され無いことは前報⁹⁾でも指摘したし、3章の解析結果からも明かである。本節ではその理由をコスト評価式に基づいて考察する。簡単のため $C_f(t, t+1/VI)$ を $C(VI)$, $C_f(t, t+1/V \& M)$ を $C(V \& M)$, …

Table 4(b) Result of Bayesian analysis. (Applicable qualities are NO, VI, MI and SM methods)

Case B

$\bar{N}_c = 15$ years, $\bar{N}_p = 10$ years, $P_{ID} = 0.00$

Inspection year t	Bayesian approach		Truth
	Inspection method at t	Number of detected cracks	Inspection method at t
1	—	—	—
2	—	—	—
3	SM	—	—
4	SM	—	—
5	SM	—	—
6	SM	—	V
7	SM	1(M)	V
8	—	—	M
9	V	—	M
10	M	13	M
11	M	10	M
12	M	13	M
13	M	15	M
14	M	8	M
15	M	9	M
16	M	14	M
17	M	16	M
18	M	10	M
19	M	17	M
20	M	15	M

Fig. 12(a) Posterior density of fatigue life.

Fig. 12(b) Posterior density of fatigue life.

Fig. 13 Contents of $C_j(t, t+1)$ and P_f .

というように書くことにする。

(9)式の $C(V \& M)$ を(7)式および(8)式を用いて表わし、少し変形すると次式が得られる。

$$\frac{C(V \& M)}{C(VI)} = 1 + \{1 - P_{DV} - (1 - P_{DV})^G\} \times \left(\frac{C(MI)}{C(VI)} - \frac{G \times P_{F2} \times C_F}{C(VI)} \right) \quad (20)$$

また(10)式の $C(SM)$ を(6)式および(8)式を用いて表わすと次式となる。

$$\frac{C(SM)}{C(MI)} = 1 + (1 - a) \times (1 - P_{DM})^{aG} \times \left(\frac{C(NO)}{C(MI)} - 1 \right) \quad (21)$$

(20)式で $\{C(V \& M)/C(VI)\}$ と $\{C(MI)/C(VI)\}$ の関係は、Fig. 14(a)中のB点 ($G \times P_{F2} \times C_F/C(VI), 1$) を通る

直線である。 $(0 < 1 - P_{DV} - (1 - P_{DV})^G < 1)$ なので直線の勾配は0から1の範囲にあり、 $(G \times P_{F2} \times C_F/C(VI) \leq 1)$ からB点の位置が決まる。図より区間[A, B]では $C(V \& M) \leq C(VI)$ である。また、線分ABは直線Lよりも上に位置しているので $C(V \& M) > C(MI)$ である。よってコスト順位は線分[A, B]上では $C(VI) \geq C(V \& M) > C(MI)$ となる。同様に順位を考えると、

線分 [B, C] 上では、 $C(V \& M) \geq C(VI) \geq C(MI)$

線分 [C, D] 上では、 $C(V \& M) \geq C(MI) \geq C(VI)$

線分 [D, E] 上では、 $C(MI) \geq C(V \& M) > C(VI)$

となり、(VI)、(MI)のいずれかが常に最小コストを与えることがわかる。

(21)式を図示すると Fig. 14(b) のようになる。すなわち点 (1, 1) を通る勾配が0から1の直線である $(0 < (1 - a))$

(a) V&M inspection method

(b) SM inspection method

Fig. 14 Cost comparison among five inspection methods.

$\times(1-P_{DM})^{ac} < 1$). 上の場合と同様にコスト順位を考えると、

線分 [A, B] 上では, $C(MI) \geq C(SM) \geq C(NO)$

線分 [B, C] 上では, $C(NO) \geq C(SM) \geq C(MI)$

となり, $C(SM)$ は常に $C(NO)$ と $C(MI)$ の中間に位置することになる。

ところが疲労寿命に不確実性がある場合には, 解析例に示したように使用の初期で (V & M) や (SM) がコストミニマムとなる。Fig. 15 はその理由を模式的に示したものである (V & M の場合)。特定の疲労寿命に対してはこれらの手法が期待コスト最小となることはない。しかし, 疲労寿命が変化すると (NO), (VI), (MI) の期待コスト大小が入れ替わる。ベイジアン解析では, 各疲労寿命における期待コストを (19) 式の疲労寿命の事後密度で重み付けた平均値で表すので, (V & M) や (SM) が期待コスト最小になることが生じる。実構造物の検査で (V & M) や (SM) が選択される背景には, 経験的にこの不確実性を考慮に入れているものと考えられる。なお, (V & M), (SM) 法の有利さは, 信頼性基準の解析では知ることができない。コスト基準の解析によって初めて明かにできるものである。

6. 感度解析

6.1 パラメータ変動の影響

解析に含まれるパラメータが検査計画に及ぼす影響を見るため, ある基準条件から各パラメータ値を単独に 1/2 あるいは 2 倍に変化させ感度解析を行った。Table 5 に解析基準に選んだ部材数 200 の単一部材群 (Fig. 9 の溶接継手部材を想定) の疲労特性, 初期欠陥確率, 検査能力およびコスト項目の内容を示す。

Table 6 に基準状態での検査計画立案結果を示す。表中には 22 年の使用期間中の検査手法, 累積使用コスト C_{OP} および累積破壊確率 P_f を示している。

Table 7 に感度解析結果を示す。(C_{VI} , C_{MI}) および ($\bar{N}_c$,

Fig. 15 Profit of V & M and SM inspection methods.

$\bar{N}_p$) は, その両方を 1/2 あるいは 2 倍に変化させている。POD については同表の下に示す値を用いた。表中には, 22 年間の目視および詳細検査回数の内訳と C_{OP} および P_f を示している。

同表より, 検査計画や C_{OP} および P_f に最も敏感な因子は部材疲労寿命であることがわかる。また, 補修費用 C_{RD} , C_{RF} , 不意の使用停止に伴う損失 C_{SWA} , および部材破壊が大規模破壊に拡大する確率 P_{FC} などは, 多少変化しても検査計画や C_{OP} および P_f にほとんど影響を与えないことがわかる。

さらに詳細にみると, 次のようなことがわかる。検査費用 (C_{VI} , C_{MI}) が大きくなると, 検査費用のかかる (MI) から (VI) へ検査手法が変わってくる。このため P_f は多少大きくなる。検査時の稼働損失 C_{SWS} が小さくなると, 検査間隔を小さくして (VI) を頻繁に行うのがよく, C_{SWS} が大きくなると (MI) を間隔を空けて行うのがよい。初期欠陥 P_{i0} や検査能力の POD 曲線も検査内容と使用コスト C_{OP} に

Table 5 Condition of analysis for butt welded joints.

Number of members	200
Fatigue property of member $a_0 = 1.0 \text{ mm}$ $a_{\max} = 20.0 \text{ mm}$	$\bar{N}_c = 50 \text{ years}$ Weibull shape parameter:3 $\bar{N}_p = 20 \text{ years}$ Weibull shape parameter:4
Initial defect condition	$P_{ID} = 0.01$
POD Curve for VI and MI Methods	VI : $POD = 1.0 - \exp\{-0.2 \times (a - 3.0)\}$ MI : $POD = 1.0 - \exp\{-0.4 \times (a - 1.0)\}$
Cost items	
$C_{VI} = 10.0 \text{ US \$}$ $C_{SWS} = 2.0 \times 10^4 \text{ US \$}$ $C_{RD}, C_{RF} \text{ see Figure 11}$	$C_{MI} = 100.0 \text{ US \$}$ $C_{SWA} = 10^6 \text{ US \$}$ $C_{CF} = 2.0 \times 10^8 \text{ US \$}$ $P_{FC} = 0.05$

Table 6 Result of inspection planning.

Parameter		Inspection years and qualities										$C_{op} \text{ \$}$	P_f
Basic cond.	P_{FC}	4	8	10	12	14	16	18	20	22		3.42×10^5	4.9×10^{-5}
	0.05	M	M	M	V	V	V	V	M	V			

相当の影響を与える。 P_{ID} が増加したり、検査能力のPODが低下した場合には検査を頻繁に行う必要がある。検査能力が向上すると(MI)を間隔を空けて行うのがよい。

以上の結果は、Table 5の解析条件と見比べて考えると、通常の検査技術者が行う判断とよく一致するように思われる。

6.2 不確実性が大きい場合

部材破壊から大規模破壊に発展する確率 P_{FC} は、大規模破壊を幾度も経験しない限り設定困難な確率である。類似事故を参考に経験的に決定するにしてもかなりの誤差を覚悟せざるを得ない。しかも、初期の不確実性が使用期間中も継続して存在する。そこで、Table 5において P_{FC} のみを $P_{FC}=0.00$ (部材破壊が生じてても大規模破壊に発展しない)から0.50(発展する可能性が1/2)まで大幅に変化させて検査計画への影響を調べた。その他の解析条件はTable 5と同じである。

P_{FC} が変化すると、(11)式の部材破壊に起因するリスク C_F が次式のように変化する。

$$C_F = (1 - P_{FC}) \times (C_{SWA} + C_{RF}) + P_{FC} \times C_{CF} \quad (11')$$

Table 8は種々の P_{FC} に対する検査計画立案結果を示す。またFig. 16には、検査計画に従って使用した場合の、累積破壊確率 P_f と使用年数 S_y の関係を示す。

P_{FC} をTable 8のように変化させると、 C_F は50ないし100倍変化する((11')式で C_{RF} が時間関数のため上段に C_F の最小値を下段に最大値を示す)。それにより、20年間の検査回数は5から9回まで変化し、 C_F が大きいほど綿密な検査を行っている。同表には、立案した検査計画に従って検査した場合と、使用期間中全く検査しない場合につ

Fig. 16 P_f - S_y curves.

いて累積使用コスト C_{OP} を示している。 C_F が50ないし100倍変化しても、繰り返し検査を行えば C_{OP} の不確実性は約2.3倍に縮小されている。これに対して全く検査を行わない場合には、 C_F の変化がそのまま C_{OP} の変化として表れている。これは繰り返し検査により破壊確率が適当なレベルに抑制され、その結果 C_{OP} に占める破壊リスクの割合が相対的に小さくなるためである。 P_{FC} が大きいほど P_f が抑制される様子はFig. 16からも了解できる。

Table 7 Results of sensitivity analysis.

Parameter		Number of inspections during 22 years' service			C_{OP} $\times 10^5$ \$	P_f $\times 10^{-5}$
		VI	MI	Total		
C_{VI}	1/2	3	5	8	2.79	4.2
C_{MI}	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	7	1	8	4.96	12.0
C_{RD}	1/2	4	4	8	3.40	4.9
	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	4	4	8	3.55	4.9
C_{RF}	1/2	4	4	8	3.42	4.9
	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	4	4	8	3.44	4.9
C_{SWA}	1/2	4	4	8	3.40	5.0
	1	4	4	8	3.40	4.9
	2	4	4	8	3.50	4.9
C_{SWS}	1/2	18	0	18	2.59	1.2
	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	0	5	5	4.93	4.2
C_{CF}	1/2	3	4	7	3.25	5.0
	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	3	5	8	3.91	4.3
P_{FC}	1/2	3	4	7	3.22	5.0
	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	3	5	8	3.91	4.3
P_{ID}	1/2	1	5	6	3.18	5.2
	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	7	4	11	3.93	5.0
POD	Bad	13	2	15	4.50	3.5
	Med	4	4	8	3.42	4.9
	Good	0	5	5	2.72	1.5
$\bar{N}_c$	1/2	4	14	18	8.70	10.5
$\bar{N}_p$	1	4	4	8	3.42	4.9
	2	3	1	4	1.63	0.8

$$POD(VI) = 1.0 - \exp\{-d_1(a - 1.0)\}$$

$$POD(MI) = 1.0 - \exp\{-d_2(a - 1.0)\}$$

$$\text{Bad} : d_1=0.15, d_2=0.30$$

$$\text{Medium} : d_1=0.20, d_2=0.40$$

$$\text{Good} : d_1=0.30, d_2=0.60$$

Table 8の結果は検査計画立案の際の判断材料として利用できる。例えば Table 8 で最も安全側の検査方針を採用した場合、 P_{FC} が 0.00 から 0.50 の範囲のいかなる値であっても、累積使用コストは 4.82×10^5 ドル以下になることが判断できる。

構造物の破壊リスクに大きい不確実性が存在する場合、通常、検査計画の最適化を計ること自身無意味のように考えがちである。ところが、最適化を実行してみると、信頼度レベルの調節効果によって、累積使用コストの不確実性は大幅に減少されることがわかる。なお、現実にはどの検査計画を採用するかは、累積使用コストと負担可能な検査・補修費用との関係から決定することになる。

7. 結 言

本研究では、まず、提案した逐次コストミニマム法を実構造部材群の検査計画立案に適用することを試みた。角回し溶接継手部材の溶接止端部に発生する疲労き裂を解析対象に選び、検査手法および検査間隔を最適化パラメータとする検査計画立案を行った。

次に、検査計画立案に関与する不確実性について検討した。不確実性には、構造物の使用、検査を通じて次第に明かにできるものと、使用を続けても明かにできないものがある。

前者にはベイジアン解析が有効である。そこで、疲労寿命に不確実性がある部材群を対象に、検査結果を得る毎にベイジアン解析で疲労寿命をアップデートし、同時に逐次コストミニマム法で検査計画を改善して行く方法を提案した。後者では検査計画立案を支援する立場から、感度解析に基づく検討を行った。得られた主な結果は次のようである。

- 1) 逐次コストミニマム法は、解析に含まれるパラメータやコスト項目の内容を決定できれば、実構造部材群の検査計画立案に適用可能である。

Table 8 Influence of a large change of P_{FC} on inspection strategy.

P_{FC}	C_F	Inspection years and qualities												Cumulative operating cost US \$	Without Inspection
0.00	1.1×10^6	4	8	12	16	20	24	—	—	—	—	—	—	2.11×10^5	1.8×10^6
	2.0×10^6	V	M	M	V	V	M	—	—	—	—	—	—		
0.01	3.1×10^6	4	8	12	16	20	24	—	—	—	—	—	—	2.66×10^5	5.1×10^6
	4.0×10^6	V	M	M	M	M	M	—	—	—	—	—	—		
0.05	11.0×10^6	4	8	10	12	14	16	18	20	22	—	—	—	3.42×10^5	1.8×10^7
	12.0×10^6	M	M	M	V	V	V	V	M	V	—	—	—		
0.10	21.0×10^6	4	8	10	12	14	16	18	20	22	—	—	—	3.91×10^5	3.4×10^7
	22.0×10^6	M	M	M	V	V	M	V	M	M	—	—	—		
0.20	41.0×10^6	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	—	—	4.06×10^5	6.8×10^7
	42.0×10^6	M	M	M	M	V	M	V	M	M	M	—	—		
0.50	100.6×10^6	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	—	—	4.82×10^5	1.7×10^8
	$101. \times 10^6$	M	M	M	M	M	V	M	M	M	M	—	—		

V: Visual inspection M: Mechanical inspection

$$C_F = (1.0 - P_{FC}) \times (C_{SWA} + C_{RF}) + P_{FC} \times C_{CF}$$

- 2) 逐次コストミニマム法はベイジアン解析法と併用することにより、構造物の状況に応じた検査計画の改善を行うことができる。
- 3) 実構造物検査で採用されている“目視および条件付き詳細検査”や“サンプリング詳細検査”は、疲労寿命に不確実性が存在する場合有利な検査手法となる。このことは、コスト評価式からも推察できる。
- 4) 感度解析を行い、検査計画や破壊確率に敏感なパラメータとそうでないもの分類した。また、検査の最適化を計ると部材破壊確率が適当なレベルに抑制され、その結果、使用コストの不確実性が減少することを示した。

参 考 文 献

- 1) Fujimoto, Y., Swilem, A. M., Iwata, M. and Nagai, K.: Inspection Planning for Deteriorating Structures Based on Sequential Cost Minimization Method, 日本造船学会論文集, Vol. 170 (1991), p. 755.
- 2) 藤本, Swilem, A. M.: 生涯コストミニマム基準による構造疲労設計および検査計画の改善, 西部造船学会会報, Vol. 83 (1992), p. 215.
- 3) Madsen, H. O. and Solensen, J. D.: Probability Based Optimization of Fatigue Design, Inspection and Maintenance, Proceeding 4th International Symposium on Integrity of Offshore Structures, Elsevier Applied Science, (1990), p. 421.
- 4) 藤本, 出口, 岩田: マルコフ連鎖モデルによる劣化型損傷部材の信頼性評価, 日本造船学会論文集, Vol. 166 (1989) p. 303.
- 5) 川野, 川崎, 阪井, 野田, 伏見, 萩原: 疲労強度精査における reference 応力に関する一考察, 西部造船学会会報, Vol. 83 (1992), p. 207.
- 6) 渡辺, 藤本, 藤久保, 石川: 海洋構造物の信頼性設計における強度評価について—その2—, 第11回海洋工学シンポジウム前刷集, (1992), p. 199.
- 7) たとえば, Itagaki, H., Yamamoto, N.: Bayesian Analysis of Inspection on Ship Structural Members, ICOSSAR'85 (1985), Vol. 3, p. 533.
- 8) 板垣, 尾崎, 根本: 構造物中の欠陥分布推定に関する研究, 日本造船学会論文集, Vol. 139 (1976), p. 292.
- 9) 藤本: 構造物の疲労損傷に起因する信頼度低下に対する検査の効果, 日本造船学会論文集, Vol. 164 (1988), p. 360.