

清水建設(株) 正員 藤田 宗久

1. まえがき

鋼製海洋構造物では、部材の疲労破壊を防ぐため、供用期間中にひびわれ検査が行なわれる。一般に海洋構造物には高い安全性が要求され、またその検査も地上構造物より費用がかかることから、最適な検査時期を定める手法が必要であるが、この種の検査時期は経験則に基づいて定められているのが現状である。最近信頼性解析手法の発達を背景に上記の分野の研究¹⁾²⁾が行なわれるようになり、著者らは、先に、信頼性理論とひびわれ進展モデルとを結合させて、構造物の維持費を最小にするような検査時間を定める手法を示した³⁾。本報告では、文献3)の論究を基に、常時波浪を受ける海洋構造物を対象に、その供用期間中のある期間において既に計画されている検査時期を改善する一手法を提示するものである。

2. 予想維持費

説明を簡単にするために、1要素の場合について記述する。この要素の検査が、 $t = t_s$ に計画されているとする。この計画された検査時期を $t = t_i$ に変更した時に、期間 $[0, t_s]$ で予想される維持費 $C(t_i, t_s)$ の計算方法を示す。維持費としては、検査費 CI 、補修費 CR 、構造物の破壊に伴う修復費 CF (全て定数)を考える。また、検査・補修に要する時間は、 t_s に比べて無視できる程小さいと仮定する。期間 $[0, t_s]$ のEvent/Decision Treeを図-1に示す。図中、 $Pf'(t_i)$ は、 $[0, t_i]$ 間での要素の破壊確率で、動的外力が要素強度を超過する確率として求められる。 $PR(t_i)$ は、 $t = t_i$ の検査によって得られたひびわれ長が、与えられている限界長(これを越えると補修が行なわれる)を越える確率である。ひびわれ長は、Paris-Erdogan則に基づき算定する。 $Pf''(t_s - t_i)$ は、 $t = t_i$ に検査が行なわれた($t = t_i$ に要素が破壊していない)という条件下での、 $[t_i, t_s]$ 間での要素の破壊確率で、 $Pf''(t_s - t_i) = Pf'(t_s) - Pf'(t_i)$ となる。この場合、 $t = t_i$ における検査は実際には未実施なので、 $Pf'(t)$ の関数自身は更新されない。 $Pf''(t_s - t_i)$ は、 $t = t_i$ に補修が行なわれたという条件下での、 $[t_i, t_s]$ 間での要素の破壊確率で、補修により $t = 0$ の状態と同じ要素に交換されると仮定すると、 $Pf''(t_s - t_i) = Pf'(t_s - t_i)$ となる。これらの確率関数を図-2に示す。図-1から明らかなように、 $C(t_i, t_s)$ は次式で与えられる。

$$C(t_i, t_s) = Pf'(t_i)CF + \{1 - Pf'(t_i)\} [CI + PR(t_i)\{CR + Pf''(t_s - t_i)CF\} + \{1 - PR(t_i)\}Pf''(t_s - t_i)CF] \quad \dots\dots\dots (1)$$

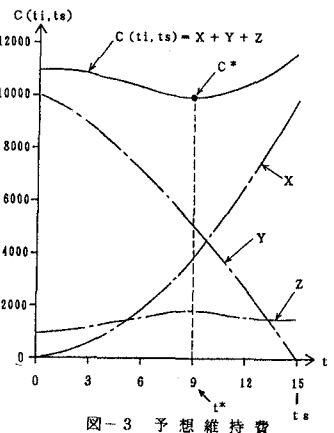
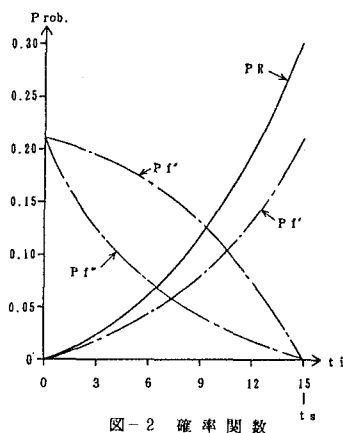
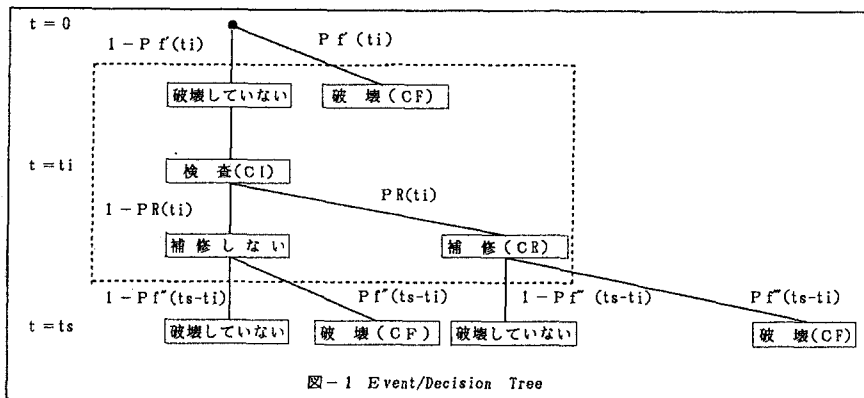
この維持費の最小限を C^* 、その時の検査時期を t^* とする(図-3)。

3. 検査時間の改善

C^* に対しては一般に、① $C^* < CF Pf'(t_s)$ 、② $C^* < q^*$ という2つの制約条件が考えられる。①の右辺は、検査を行わない場合に $[0, t_s]$ 間に予想される維持費で、もし①が満足されなければ検査を行わない方が経済的になる。この場合には、 $\tilde{t}_s = t_s + \Delta t$ と t_s を延長し、再度(1)式を計算し、 C^* を求める。②の制約条件は維持費の予算から与えられる制約条件で、 q^* は $[0, t^*)$ 間に支出可能な維持費である。たとえば、 $[0, t_s]$ 間の維持費の予算が Q と与えられているとすると、 $q^* = (Q/t_s)t^*$ のように計算される。もし②の制約条件が満たされなければ、 $\tilde{t}_s = t_s - \Delta t$ と変更し、この $\tilde{t}_s$ に対して C^* を求める。 t_s の変更に際しては q^* も変更される。このような手順を①、②の制約条件が満足されるまで繰り返し、最適な検査時期 t^* が求められる。もちろん、両方の制約条件が同時に満足されない場合もあり得る。これは一般に Q が要素の破壊確率とは無関係に定められている事に起因する。このような場合には、 CI と CR を減らすように、検査・補修の方法を改善するか、要素の信頼性の検討に基づき Q を増加させるような対策が採られることになると考えられる。以上に述べた手法を、供用期間全体にわたり、最適な検査回数および各々の検査の最適時期を求める手法へ拡張する方法ならびにシステムへ適用する場合について次に述べる。

4. 複数の検査への拡張およびシステムへの適用

複数の検査へ拡張する場合には、まず、与えられた複数の検査回数について検査時期の最適化を行ない、次いで検査回数の最適化を行なうという2段階の最適化が必要となる。また、検査後に要素を補修しない場合は、 $Pf'(t)$ と $PR(t)$ の関数を検査結果に基づいてベイズの定理によって更新しなければならない³⁾ため計算労力は増すが、その際必要となる等号制約と不等号制約の積事象の破壊確率も信頼性解析手法の最近の発達によって算出は容易である。本手法はCRを定数としているため、損傷の程度によって補修方法が異なる場合には適用できないが、システムでも、ある要素で補修が必要になった時、その要素と同等の機能を持つ要素群全てを新要素に交換するという補修方法が採られるならば、本手法は適用が可能である。実際、動的荷重を受ける並列システムでは(特に脆性要素で構成される場合)、システムの破壊に至る主要経路は要素の連鎖破壊によるものと考えられる⁴⁾ので、このような連鎖破壊を防ぐためには、上述した補修方法はより現実的であるものと思われる。



〈参考文献〉

- 1) Madsen, H.O.: "Model Updating in Reliability Theory", Proc. ICASP-5, Vol.1, pp.564-577, Vancouver, May, 1987
- 2) Sorensen, J.D., Thoft-Christensen, P.: "Inspection and Repair Strategies for Concrete Structures", 2nd Working Conf. on Reliability and Optimization of Structural Systems, London, September, 1988
- 3) Fujita, M., Schall, G., Rackwitz, R.: "Adaptive Reliability-based Inspection Strategies for Structures Subject to Fatigue", to be appeared in Proc. ICOSSAR'89, San Francisco, August, 1989
- 4) Fujita, M., Grigoriu, M., Rackwitz, R.: "Reliability of Daniels Systems Oscillators Including Dynamic Redistribution", Proc. 5th ASCE Speciality Conf., pp.424-427, Blacksburg, Virginia, May, 1988