

破壊確率を考慮した既存栈橋の補修方法選択法に関する一考察

A Study on the Repair Method of the Existing Pile-Supported Wharf Considering Failure Probability

長尾 毅*, 佐藤秀政**, 宮島正悟***

Takashi NAGAO, Hidemasa SATO and Shogo MIYAJIMA

*正会員 工博 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

**正会員 工修 復建調査設計株式会社 (〒732-0052 広島県広島市東区光町2-10-11)

***正会員 工修 国土交通省 名古屋港湾空港技術調査事務所 (〒457-0833 愛知県名古屋市中南区東又兵衛町1-57-3)

Some existing pile-supported wharves need to be repaired because of the insufficient countermeasures against corrosion. However, total amount of budget to be spent for maintaining the civil engineering works is reducing year by year. Therefore, it is very important to obtain the optimal repair strategy of the deteriorating structures. In this study, we discuss the optimal repair strategy of the existing pile supported wharf from the viewpoint of minimizing the expected total cost, which is defined as the multiplication of the failure probability and the repair cost. We conducted the reliability analyses and evaluated the failure probability of the pile-supported wharf in accordance with the repair strategy.

Keywords : life cycle management, earthquake, pile-supported wharf, failure probability

1. はじめに

我が国の社会資本施設は、高度経済成長期を経て、これまでにかなりの量がストックされてきた。今後は既存施設の適切な維持管理が重要となるが、近年の財政事情の逼迫を考慮すると、できる限り低い負担で、施設の将来の性能劣化に対応した効率的な維持管理を行うライフサイクルマネジメントの検討が必要である。

土木分野のライフサイクルマネジメントの研究には、橋梁を対象にした事例が多い。既往研究の例として、例えば、杉本ら¹⁾、貝戸ら²⁾、中原ら³⁾の研究をあげることができる。杉本ら¹⁾は、将来的な予算シナリオの推移に注目し、予算シナリオと橋梁群の健全度の経年的な関係を示すとともに、投資する予算シナリオの最適化を図った。貝戸ら²⁾は、橋梁の健全度の進展にマルコフ連鎖モデルを用いて、年平均費用の概念に基づき最適補修戦略を求めた。また、中原ら³⁾は、橋梁の維持補修戦略の最適化問題に、補修方法・補修間隔を遺伝子情報とした遺伝的アルゴリズムを適用し、維持補修戦略の最適化を検討した。ただしこれらの研究は、力学的な構造物の健全度評価をもとにしたものではない。

被害リスクを定量的に評価する手法として信頼性理論による破壊確率を用いる方法が挙げられる。このような観点からの研究として、例えば、高圧ガスパイプラインを対象にした小池⁴⁾の研究がある。これは、荷重の扱いは確定的であるものの、信頼性手法を用いて漏洩事故による被害リスクを定量的に評価するとともに、リスク転嫁コストまで考慮したマネジメント手法を用いて維持管

理戦略の最適化を検討したものである。

本研究で対象とする港湾構造物の場合には、被害リスクの考慮として、供用期間中に想定される様々な再現期間の地震動の作用に対して、経年的な劣化状況を考慮した構造物の性能を評価する必要がある。その場合、発生応力度を許容応力度の比で評価する方法⁵⁾では被害リスクの考慮としては不十分であるため最適な補修方法の選択という観点からは検討の余地があると考えられ、破壊確率を考慮した確率論的な経済評価手法の導入が必要と考えられる。

本研究では栈橋を検討対象とする。栈橋は、港湾構造物の中で、特に維持補修の検討が必要な鋼構造物である。港湾鋼構造物は、陸上鋼構造物に比べ、海水に接し、潮位や波しぶきを受ける苛酷な環境下にあるため、腐食に対する適切な策を講じなければいけない。鋼材の防食法として、電気防食工法、塗覆装工法、腐食しろ工法がある⁶⁾。この中で、腐食しろ工法は、想定される腐食量を見込んだ鋼材肉厚とするもので、集中腐食等の著しい腐食が生じる恐れがない場合に限り採用されてきた。しかしながら実際には、集中腐食等の発生により施設の性能低下が問題となっているものも少なくない。

検討対象とした栈橋は建設後20年以上経過した施設で、集中腐食により設計時に想定していた以上の肉厚の減少が確認され、補修の必要が認められたものである。このため、震度、鋼材降伏応力度などの通常信頼性解析で確率変数として扱うパラメータのほか、本研究では腐食量を確率変数として扱い、補修費と破壊時費用からなる期待費用を指標として補修戦略の最適化を検討した。

2. 信頼性評価

2.1 検討条件

(1) 対象施設

本研究で対象とした施設は、図-1に示す既存の直杭式横棧橋である。図示しているように、4列ある鋼管杭の最も陸側の杭のみが他と比較して厚い肉厚に設定されている。これは、棧橋が土留めの斜面上に建設されるものであるために杭自由長が各杭で異なり、陸側の自由長の短い杭ほど断面力が大きくなることによる結果である。

本施設は供用開始から20年以上が経過しており、鋼管杭の腐食が問題となっている。原設計断面は、設計震度0.20で設計されたもので、鋼管杭の諸元は、必要肉厚に腐食による減厚を見込んだ余裕しりを付加する腐食しる工法が用いられていた。しかしながら、供用後20年経過時点で行われた鋼管杭の腐食量調査で集中腐食による当初想定以上の肉厚の減少が確認された。腐食の主な原因は、接岸・離岸する船舶のスクリューによる酸素供給量の増加および錆層の連続剥離と考えられる。

肉厚減少に対する対策として、本施設は腐食量調査後に杭の深度-1.0m以浅に全杭一律の厚さによるペトロラタムライニング施工による補修が行われた。しかしながら、この補修方法が最適なものであるという保証は無いことから、本研究ではペトロラタムライニング施工前の、供用開始後20年経過時の棧橋の性能をもとにして、補修戦略の検討を行う。

(2) 耐震性能照査

本研究における耐震性能照査フローを図-2に示す。まず、工学的基盤における地震動は、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を考慮した工学的基盤における時刻歴波形として与えた⁷⁾。地震動の再現期間は、50,75,100,150,200,500年とした。図-3,4に工学的基盤における再現期間75年の入力地震動の時刻歴波形および各再現期間の地震動のフーリエスペクトルを示す。

工学的基盤の地震波形をもとに、一次元地震応答計算コードDYNEQ[®]を用いて杭固定点(海底面下 $1/\beta_p$ の位置)の応答地震動を求める。ここで、 β_p は杭の剛性や地盤反力係数によって求まる値で、次式で定義される。

$$\beta_p = 4\sqrt{\frac{k_h D}{4EI}} \quad (1)$$

ここに、 β_p :杭の特性値 (cm^{-1})、 k_h :水平地盤反力係数 (N/cm^3)、 D :杭の直径 (cm)、 EI :杭の曲げ剛性 ($\text{N}\cdot\text{cm}^2$)である。

次に、棧橋の固有周期に対応した応答加速度最大値を求め、重力加速度で除すことにより震度を得る。なお、棧橋の固有周期は、骨組み解析の結果をもとに1.24(s)と算出された。

以上の方法で図-2に示すフローに従い、各再現期間の地震動に対する照査用震度を求めると表-1のとおりとなる。75年再現期間の震度は0.136であり、原設計の設計

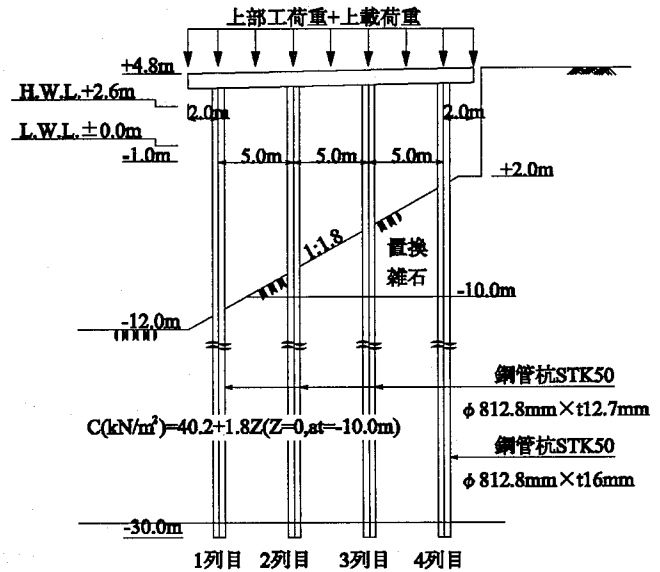


図-1 検討対象断面

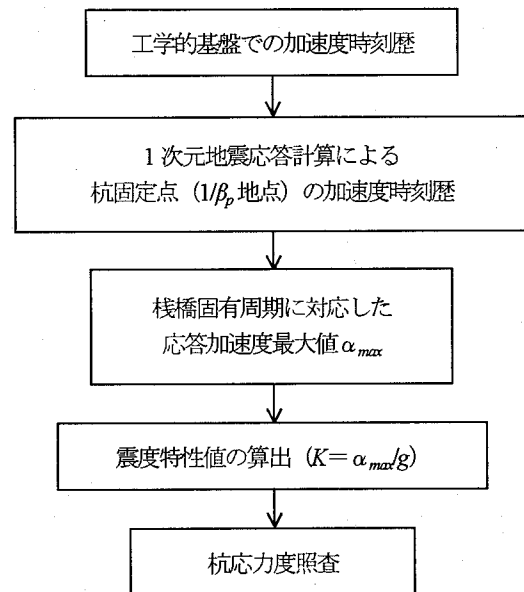
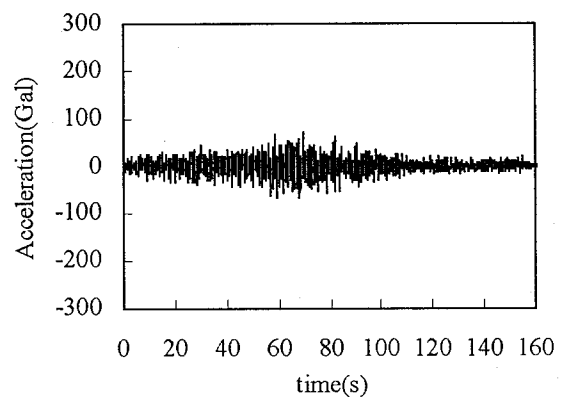


図-2 耐震性能照査フロー



(再現期間75年)

図-3 工学的基盤における地震波形

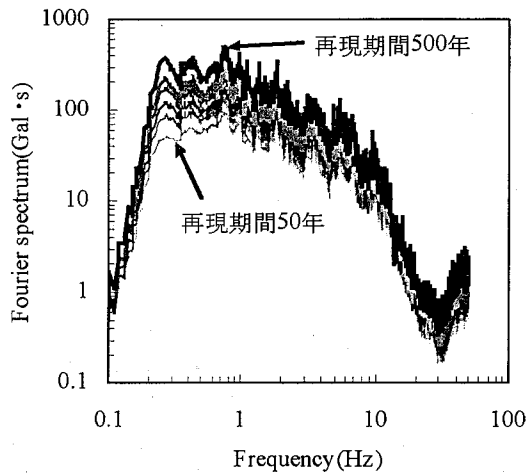


図4 フーリエスペクトル

表-1 照査用震度

地震動の 再現期間 (年)	入力加 速度最 大値 (Gal)	1/ β_p 地点 の応答加 速度最大 値(Gal)	栈橋上部工 の応答加 速度最大 値(Gal)	照査用 震度
50	80.9	131.1	120.3	0.123
75	70.8	110.2	133.1	0.136
100	84.2	133.5	168.3	0.172
150	107.2	165.5	224.9	0.229
200	126.4	191.1	272.3	0.278
500	200.6	260.6	414.3	0.423

震度0.20と比較すると小さな値となっている。この理由は次のとおりである。

本施設設計時の設計震度は、地域別震度・地盤種別係数・重要度係数の積で求められていた。ここで、地域別震度は全国を5ブロックに分けて設定した値で、構造物が建設されるサイト特有のものではない。また、地盤種別係数は地震動の増幅を考慮する係数であるが、これは必ずしも正確な値とはいえない。さらに、重要度係数は、構造物の重要度に応じて設定された値で、安全性余裕が見込まれている。それに対して、本研究では、震度は前述のように震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を考慮した方法で求めた再現期間75年の信頼度50%に対する地震動に対して算出したものである。このため、従前の方法による原設計の設計震度と本研究で算出した震度は異なる値となる。本研究では表-1の震度をもとに検討を行うが、原設計の設計震度と実際の震度の違いが補修戦略に与える影響を評価するために、仮に、再現期間75年の地震動に対する震度が原設計の設計震度になった場合についても検討を行っている。

なお、検討に用いた地震動は、地震カタログデータ、活断層データおよび断層モデルデータの3つの地震データを用いて算出したものである。そのため、各再現期間

の地震動で貢献度が最も高い地震データが異なり、今回の検討では、再現期間50年の地震動は地震カタログが優勢で、再現期間75年以上の地震動は断層モデルデータが優勢となった。表-1で再現期間50年の地震動と再現期間75年の地震動の入力加速度最大値が逆転するのはこのためである。ただし、栈橋上部工の応答加速度および照査用震度は、再現期間に対応して増加している。

(3) 信頼性解析

性能照査は、各再現期間の地震動に対して各杭の縁部降伏に関する限界状態を対象に行う。

$$g = \sigma_y - \sigma_d(k_h, K, F) \geq 0 \quad (2)$$

ここに、 σ_y :鋼管杭の降伏強度、 k_h :水平地盤反力係数、 K :照査用震度、 F :腐食量、 σ_d :鋼管杭に発生する応力度 ($\sigma_d = N/A \pm M/Z$)、 N :杭の軸方向力、 A :杭の断面積、 M :杭の曲げモーメント、 Z :杭の断面係数である。

信頼性解析に用いた確率変数は、鋼材降伏強度、水平地盤反力係数、照査用震度、腐食量で表-2に示す統計量と分布形を設定した。鋼材降伏強度、水平地盤反力係数、照査用震度の確率変数は、長尾ら⁹⁾の研究を参考に設定した。震度の平均値は、各再現期間の地震動を用いて算出した表-1に示した震度である。腐食量の確率変数は、対象施設の20年経過時点で調査された腐食データを用いて、以下の方法で設定した。

腐食量調査では、1測点あたり4箇所の肉厚測定を行っており、その平均値をその測点の残存肉厚とし、残存肉厚と初期肉厚との相違に基づき、平均腐食速度を次式のとおり定義する。

$$v = \frac{F}{Y} = \frac{t_1 - t_2}{Y} \quad (3)$$

ここに、 v :平均腐食速度(mm/y)、 F :腐食量(mm)、 Y :腐食期間(y)、 t_1 :初期肉厚(mm)、 t_2 :残存肉厚(mm)である。

図-5に対象施設の供用開始から20年経過時点の各杭列の平均腐食速度の深度方向分布を示す。ここに示す平均腐食速度は、本研究で断面設定を行ったスパンで測定されたものである。また、図中の凡例は、海側から数えた杭列数を表している(以下、杭列名は海側から数えた

表-2 信頼性解析に用いた確率変数

確率変数	平均値	変動係数	分布形
鋼材降伏強度 (SKK490)	377 (N/mm ²)	8%	正規
水平地盤反力 係数	2000N (kN/m ³)	75.5%	対数正規
照査用震度	—	20%	対数正規
腐食量	—	88%	対数正規

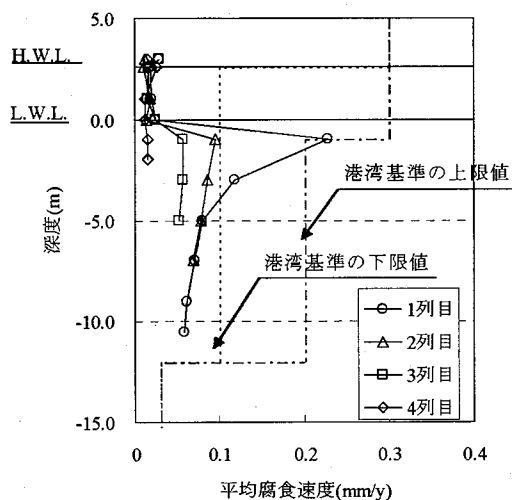


図5 平均腐食速度の深度分布

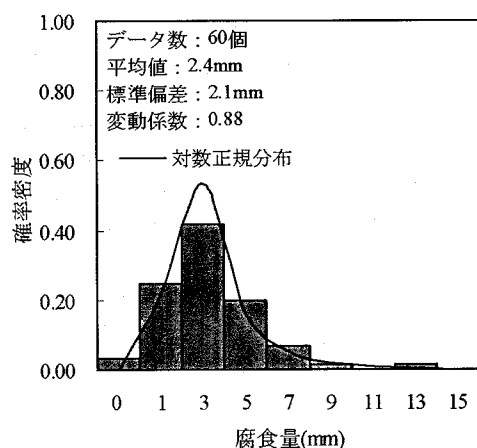


図6 1列目の深度-1.00mにおける腐食量の頻度分布

列数をいう)。また、図中には、港湾基準⁹⁾に示されている腐食環境ごとの鋼材の腐食速度の標準的な範囲の上限値と下限値を示している。この標準値は、H.W.L. (朔望平均満潮面) 以上で 0.3mm/y, H.W.L. ~ L.W.L. -1.0m (L.W.L.: 朔望平均干潮面) で 0.1~0.3mm/y, 海中中部で 0.1~0.2mm/y, 海底土中部で 0.03mm/y である。これらの値と比較すると、対象スパンの平均腐食速度は、0.0m 以浅および-1.0m 以深で小さく、-1.0m 付近で大きいことが分かる。

本研究では、図-5に示したように、1列目の深度-1.0m における平均腐食速度が大きいことから、信頼性解析ではこの箇所の腐食量を確率変数として設定することとした。図-6に1列目の深度-1.0m における腐食量の頻度分布を示す。このデータは、全調査スパンにおける1列目の深度-1.0m のデータで、データ数は60個である。これより、1列目の深度-1.0m の腐食量の確率変数は、平均腐食速度から推測した経年後の腐食量を平均値と設定し、変動係数は88%とした。なお、分布形は、腐食量は正值しかとらないため対数正規分布とした。

以上の条件に従い、杭の応力度照査を骨組解析をもとに行った。骨組解析では、経年後の腐食を考慮できるように各杭の深度方向に 2.0m 程度間隔で節点を設け、各節点間の部材ごとに腐食量を考慮した杭の断面積、断面係数等を設定できるようにモデル化した。経年後の腐食量は、式(3)で求まる平均腐食速度から推測した値を各部材ごとに設定した。上述のように、1列目の深度-1.0m の腐食量を確率変数として設定し、それ以外の箇所は、腐食量を確定値として与えた。

信頼性解析は、骨組解析により求めた断面力をもとに一次信頼性理論 (FORM: First Order Reliability Method)¹⁰⁾を用いて実施した。FORMに基づき算出される信頼性指標 β は、破壊点 ($g=0$, g : 限界状態関数) から限界状態関数の平均値がどの程度離れているかを示す尺度であり安全性余裕の目安である。限界状態関数 g が正規確率変数であれば、信頼性指標 β と破壊確率 P_f は次のような関係にある。したがって、信頼性指標が大きいほど、破壊確率は小さくなる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$: 標準正規確率分布関数である。

(4) 生起確率の計算方法

地震動の作用により破壊が生起する確率を補修工適用時点から 30 年間検討した。生起確率の算出方法を以下に示す。

いま、 t 年後に対象とする地震動 i が作用した場合に破壊する確率を P_{fi} とおくと、 t 年後に地震動の作用により、はじめて破壊する確率 $P_f(t)$ は次のように定義できる。

$$P_f(t) = \sum_{i=1}^m P_{fi}(t) \quad (5)$$

$$P_{fi}(t) = \begin{cases} q_i \cdot P_{fi} & t=1 \\ q_i \cdot P_{fi} \cdot E_i & t \geq 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_i = \left[\prod_{j=1}^{t-1} \{1 - q_i \cdot P_{fi}\} \right] \quad (7)$$

ここに、 $P_f(t)$: 地震動の作用により t 年後にはじめて破壊する確率、 m : 対象とする地震動のランク数 (=6, 再現期間 50,75,100,150,200,500 年の地震動を対象)、 q_i : 対象とする地震動 i の年平均発生確率 (= $1/r_i - 1/r_{i+1}$, ただし再現期間 500 年の地震動に対しては $1/500$) r は、対象とする地震動の再現期間 (年)、 E_i : $t-1$ 年後までに対象とする地震動 i により破壊しない確率、 t : 経過年数 (年) である。

したがって、検討期間中に地震動の作用により破壊が生起する確率 P_T は、毎年のはじめて破壊する確率を検討期間分総和して、次式のとおり求めることができる。以下、この破壊確率を T 年間の破壊確率と定義する。

$$P_T = \sum_{t=1}^T P_f(t) \quad (8)$$

ここに、 P_T : T 年間の破壊確率、 T : 検討期間 (年) である。

(5) 検討ケース

検討ケースを表-3 に示す。case1 は、未補修の場合で、現状の腐食速度で経年的に腐食が進行するケースである。補修を行うケースは、工法、補修対象杭、鋼板厚、補修下端を考慮して設定を行った。補修工法は、現在一般的に用いられている鋼板溶接工法、塗覆装工法、電気防食工法を組み合わせて設定した。補修対象杭は、全杭対象にした場合 (case2_1, 2, 3, 1, 3, 2, 3, 3, 6) と 3 列目または 2, 3 列目を対象にした場合 (case4_1, 4, 2, 5, 1, 5_2) を設定した。ここで、2, 3 列目を対象とした理由は、図-1 に示したとおり、原設計では 4 列目の杭剛性が他列の杭剛性よりも高く、補修時点で 3 列目の杭応力度が最も厳しかったためである。補修厚は、検討開始時点の腐食が最も激しい箇所の腐食量が 5mm 程度であることを考慮して、5mm の場合と、その 2 倍の 10mm の場合を設定した。鋼板溶接および塗覆装の補修下端は、腐食速度から判断すると深度-1.0m または深度-2.0m が適当と考えられるが、補修下端深度を-2.0m とした場合について事前に検討した結果、電気防食工法を適用すると、防食効率 90% で腐食速度が現状の 1/10 となるため経年的な腐食量が小さく、補修下端深度を-1.0m とした場合の破壊確率とほぼ同程度の値となった。したがって、本研究では、補修下端深度は、深度-1.0m に設定し検討することとした。また、腐食速度が早く、経年的な腐食が最も激しい深度 ±0.0m ~ -1.0m の範囲のみ対象に鋼板溶接と塗覆装を行う場合を考え case6 とした。なお、case2_1, 3_1 の補修鋼板厚は、 $t=0$ mm と設定しているため、実際は鋼板溶接

を行わないケースである。また、case1, case2_1, case2_2 は電気防食を行わないケースであるが、補修を施した時点で現在の港湾基準が適用されるため、電気防食を行うことが必須となる。このためこれらのケースは実際には適用されないケースであるが、他との比較のために参考として検討するものである。なお、本施設において 20 年経過時点で実際に施工されたペトロラタムライニング施工は、case2_1 に相当する。

2.2 信頼性評価

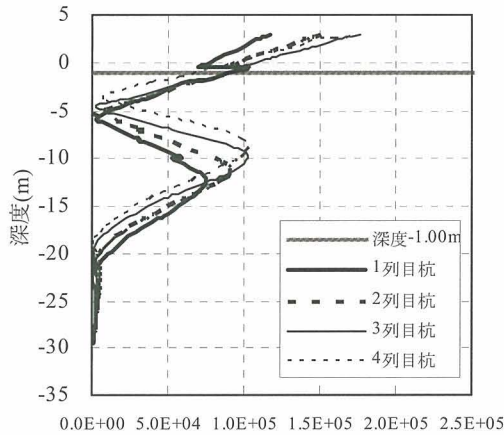
(1) 杭応力度

信頼性解析の結果を検討するにあたり、まず、各確率変数を確定値とした場合の骨組解析結果から考察を行う。図-7, 8 に、それぞれ検討開始時点後 5 年経過時および 30 年経過時の、再現期間 75 年の地震動の作用による杭の応力度の軸方向分布を示す。検討ケースは、case1, case2_2 である。

検討開始時点後 5 年経過時の各ケースの杭応力度について考察する。case1 では、3 列目の杭頭の応力度が最も大きい。通常、栈橋は斜面上に建設されるため、杭自由長の短い 4 列目の分担水平力が大きく、杭の剛性が同じであれば 4 列目の杭頭応力度が最も厳しくなるが、前述したように原設計で 4 列目のみ杭の剛性を高くしていたため、次に分担水平力の大きい 3 列目の杭頭応力度が最も厳しくなったものと考えられる。鋼板溶接を行った case2_2 では、補修部の応力度は低減されているが、補修部下端の応力度は、未補修の case1 と比べ大きくなる。これは、杭頭部の剛性を高くすることで、各杭列の水平力の分担率が変わり、補修前に杭の剛性が低かった杭列の分担水平力が大きくなるためである。

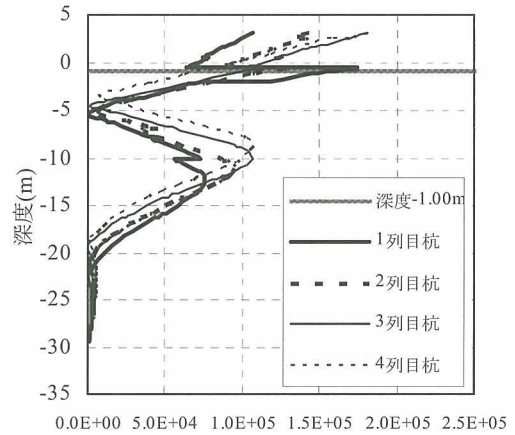
表-3 補修工の検討ケース

検討 ケース	補修工	鋼板溶接 と塗覆装 下端 (m)	対象杭		腐食速度	
			鋼板溶接 と 塗覆装	電気防食	塗覆部	それ以外
case1	未補修	—	—		現状	
case2_1	鋼板溶接($t=0$ mm)+塗覆装	-1.0	全杭	—	0	現状
case2_2	鋼板溶接($t=10$ mm)+塗覆装	-1.0	全杭	—	0	現状
case3_1	鋼板溶接($t=0$ mm)+塗覆装+電気防食	-1.0	全杭	全杭	0	現状の 1/10
case3_2	鋼板溶接($t=5$ mm)+塗覆装+電気防食	-1.0	全杭	全杭	0	現状の 1/10
case3_3	鋼板溶接($t=10$ mm)+塗覆装+電気防食	-1.0	全杭	全杭	0	現状の 1/10
case4_1	鋼板溶接($t=5$ mm)+塗覆装+電気防食	-1.0	3 列目	全杭	0	現状の 1/10
case4_2	鋼板溶接($t=10$ mm)+塗覆装+電気防食	-1.0	3 列目	全杭	0	現状の 1/10
case5_1	鋼板溶接($t=5$ mm)+塗覆装+電気防食	-1.0	2,3 列目	全杭	0	現状の 1/10
case5_2	鋼板溶接($t=10$ mm)+塗覆装+電気防食	-1.0	2,3 列目	全杭	0	現状の 1/10
case6	鋼板溶接($t=10$ mm)+塗覆装+電気防食	—	全杭	全杭	0	現状の 1/10
	塗覆装範囲(±0.0~-1.0m まで)					



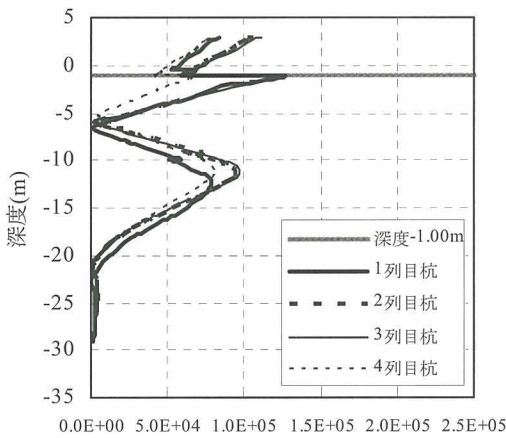
発生応力度(kN/m²)

(a) case1



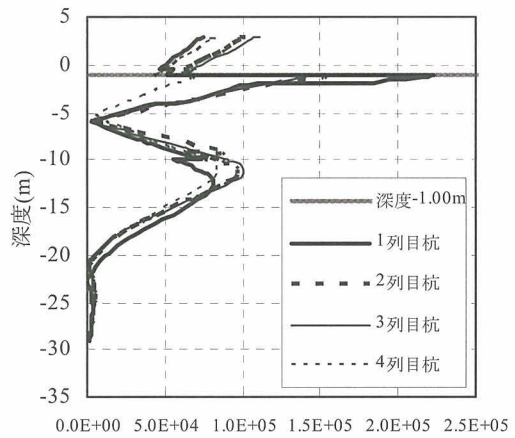
発生応力度(kN/m²)

(a) case1



発生応力度(kN/m²)

(b) case2_2



発生応力度(kN/m²)

(b) case2_2

図-7 5年経過後における杭応力度

図-8 30年経過後における杭応力度

次に、検討開始後30年経過時の各ケースの杭応力度について考察する。case1, case2_2では、1列目の深度-1.0mの節点の応力度が非常に大きくなる。これは、杭に生じる曲げモーメントが5年経過時点とそれほど変わらないのに対し、1列目の深度-1.0mの箇所は、電気防食を施さないために腐食の進行が早く、補修後30年経過時点では剛性が大きく低下するためである。

(2)破壊確率

(1)の考察をもとに、補修工法と破壊確率の関係を考察する。図-9に経過年数と各経過年の破壊確率の関係を示す。いずれのケースも経過年数とともに破壊確率は増加する。30年経過時点で最も破壊確率が小さいケースは、全杭には鋼板溶接等を行わないcase5_2である。case5_2と同様に杭列を選定して鋼板溶接を行ったケースは、いずれも破壊確率は比較的小さくなった。これは、群杭中で相対的に杭の剛性を高くした杭列を設けたため弱点部の1列目の深度-1.0mの節点に杭応力が集中するのを避

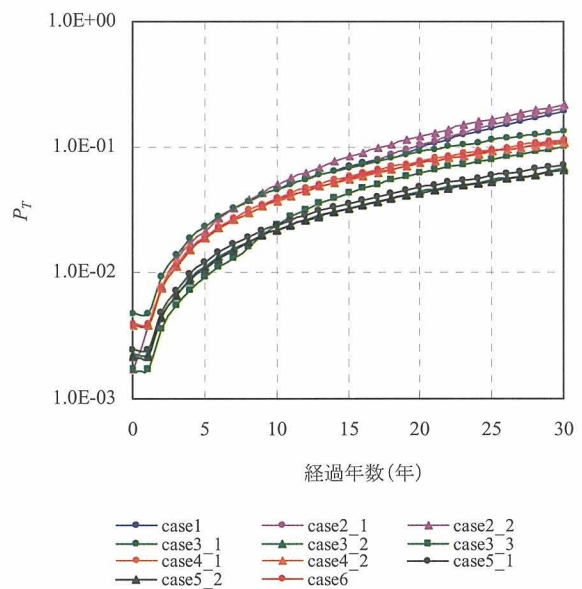


図-9 経過年数と破壊確率の関係

けることができたことによるものと考えられる。また、これらのケースでは、鋼板溶接厚を厚くした方が破壊確率は小さくなっている。一方、全杭補修したケースでは、鋼板溶接厚を厚くした方が破壊確率は大きくなる。これは、全杭対象に鋼板溶接を行う場合、杭の剛性を高くするほど、補修前に杭の剛性が低かった1列目杭に応力が集中するためである。さらに、case2_2の場合、上述のとおり杭応力が最大となる1列目の深度-1.0mの節点の剛性低下が著しいため、未補修のcase1よりも30年経過後の破壊確率が大きくなったものと考えられる。

このように、各杭の自由長が異なる栈橋の場合は、一律に補修により剛性を高くすることは補修費用のみならず破壊確率の観点からも不利な場合があるといえる。

(3) 信頼性指標最小点

5年経過後および30年経過後における全ケースの信頼性指標が最小となる節点を表4 および図-10 に示す。なお、表4 中の記号は、図-10 に示す節点を示したものである。このように各ケース、各地震動ごとに信頼性指標が最小となる節点は異なっており、また経年的にもその節点は変化していることが分かる。ここで、作用する地震動によって信頼性指標が最小となる節点異なるのは、水平力の大きさによって各節点に生じる断面力の軸方向分布が変化するためと考えられる。また、補修後30年経過時点を見ると、全杭頭に鋼板溶接を行ったcase2_2, 3_2, 3_3は、腐食の進行が早く最も剛性低下が大きい1列目の深度-1.0mの節点で信頼性指標が算出されているが、2,3列目のみ鋼板溶接を行ったcase4_1, 4_2, 5_1, 5_2は、1列目の深度-1.0mの節点で信頼性指標は算出されていない。これは、上記の考察とも調和的である。

このように、栈橋の場合はある特定の部位にのみ着目して検討を行うことは適切でない場合があるといえる。

(4) 震度の影響

前述したように、震度の設定方法の違いにより本研究と原設計の設計震度は異なる。そこで、仮に、震度に安全性の余裕がなく、再現期間75年の地震動に対する震度が原設計の設計震度と同じになった場合の破壊確率および期待費用に与える影響を検討した。ここでは、破壊確率の結果について示し、期待費用については後述する。補正は、再現期間75年の地震動に対する震度が原設計の設計震度と同じ0.20となるよう補正し、その他の再現期間の地震動に対する震度も同程度だけ大きくなるよう補正した。表5に補正前後の震度比較を示す。

検討は、未補修のcase1と、経年的な破壊確率の増加割合が小さく、30年経過後の破壊確率も比較的小さかったcase4_2および30年経過後の破壊確率が最も小さかったcase5_2について行った。図-11に経過年数と各経過年の破壊確率の関係を示す。いずれのケースも補正後の震度が大きくなるため破壊確率が大きくなるが、各ケースの経年後の破壊確率の大小関係は、震度補正前と補正後で変わっていない。

表-4 信頼性指標βの最小点

経過年数(年)	case	地震動の再現期間(年)					
		50	75	100	150	200	500
5	1	f	f	f	f	f	f
	2_1	f	f	f	f	f	f
	2_2	c	c	c	c	c	g
	3_1	f	f	f	f	f	f
	3_2	f	f	f	f	f	f
	3_3	g	g	g	g	g	g
	4_1	d	d	d	d	d	d
	4_2	d	d	d	d	d	d
	5_1	b	b	b	f	f	f
	5_2	b	e	e	e	e	e
	6	f	f	f	f	f	f
	30	1	c	c	c	c	f
2_1		c	c	c	c	c	f
2_2		c	c	c	c	c	c
3_1		f	f	f	f	f	f
3_2		c	c	c	f	f	f
3_3		c	c	c	c	c	g
4_1		d	d	d	d	d	d
4_2		d	d	d	d	d	d
5_1		b	b	b	b	b	b
5_2		b	b	b	b	b	b
6		f	f	f	f	f	f

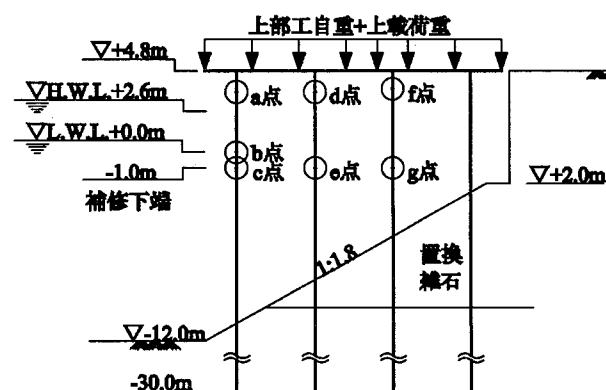


図-10 信頼性指標βの最小点

表-5 震度の補正

地震動 再現期間(年)	照査用震度	
	補正前	補正後
50	0.123	0.173
75	0.136	0.200
100	0.172	0.228
150	0.229	0.283
200	0.278	0.338
500	0.423	0.488

3. 期待費用の検討

3.1 期待費用の算出方法

補修戦略等を検討するうえでは、地震時リスクをコスト化する必要がある。本研究では、 T 年間の費用を補修費と破壊時費用からなる期待費用と定義し、次式で算出する。

$$C_T = C_R + P_T \times C_S \quad (9)$$

ここに、 C_T : T 年間の期待費用、 C_R : 補修費、 P_T : T 年間の破壊確率、 C_S : 破壊時費用である。

ここで、破壊時費用は、復旧費用と経済損失を考慮する。経済損失とは、施設が破壊した場合に、当該施設を利用できないことによる間接的な被害費用を指す。通常、経済損失は、迂回輸送や輸送取り止めによってもたらされる貨物の荷主や運送業者の損失、施設利用料金の不回収による港湾管理者の損出あるいはこれらの被害が地域経済全体に及ぼす二次的な被害などをいう。しかしながら、1)市場の完全競争状態を仮定すれば、交通施設整備の効果は、交通活動の直接的な便益のみを計測すれば十分であること¹¹⁾、2)港湾管理者の損出は、社会全体からみればキャンセルアウトされる可能性があること¹²⁾、3)破壊による貨物需要の動向は予測が困難であること、などの理由から破壊による経済損失は当該施設を利用できないことによる迂回輸送の経済損失のみを考慮することとする¹³⁾。迂回輸送による経済損失の算出には、地震動の作用のない条件下（以下、永続状態と呼ぶ）の破壊に対してコンテナ貨物の流動に着目して経済損失を求めた長尾ら¹³⁾の研究を参考とした。これは、本研究の場合、当該施設のみが老朽化し不健全な状態にあるので、地震動が作用すれば、永続状態の破壊と同様に他の健全な施設は破壊せず当該施設単独の破壊が生じる可能性が高いためである。

また、本研究では災害復旧の現状の考え方に基づいて復旧費用を算出した。すなわち、被災後は原型復旧するとの考えのもと、上部工・杭の撤去、杭打設、上部工復旧を想定して、平均的な復旧作業を考慮して費用を算出した。このため、補修方法の違いによる被災モードの変化が復旧費用に及ぼす影響は考慮していない。

図-12 に補修費と破壊時費用の関係を示す。各ケースの補修費は破壊時費用の1~3%程度である。また、破壊時費用の内訳は、経済損失が全体の7割程度、復旧費用が3割程度である。また、鋼板の材料費は、補修費に占める割合が小さく、鋼板厚を厚くしても補修費の増加にはあまり影響していない。

3.2 検討結果

図-13 に、経過年数と期待費用の関係を示す。なお、費用は1ブロック当りの値である。また、将来的に発生する費用は、社会的割引率を考慮して現在の費用に換算

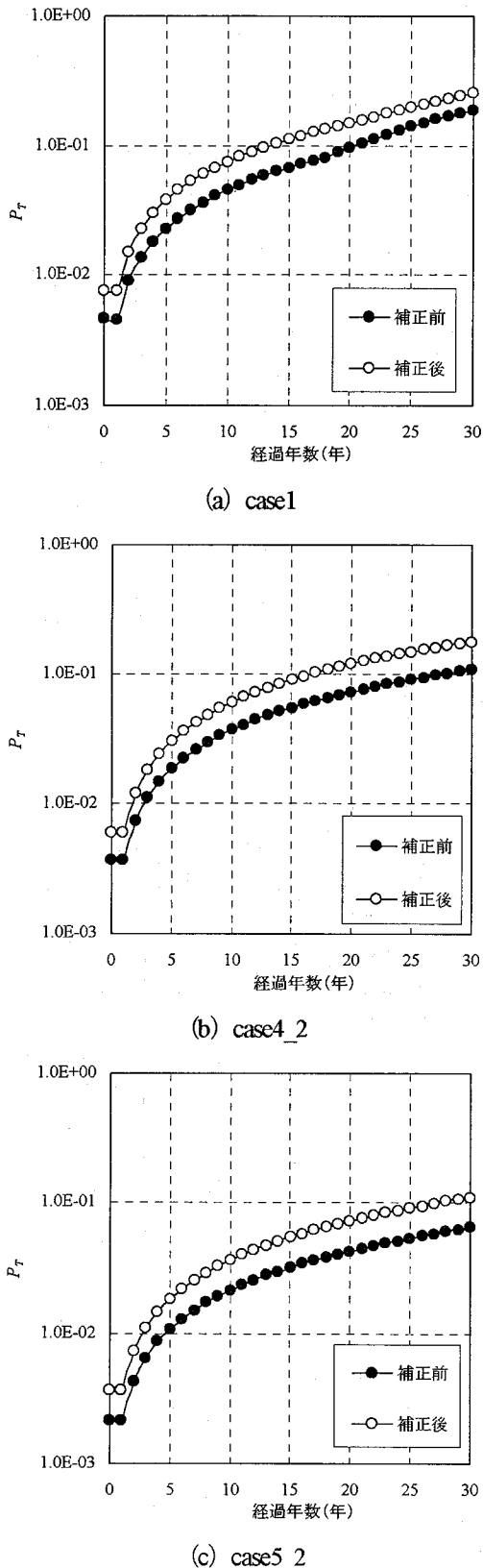


図-11 経過年数と破壊確率の関係

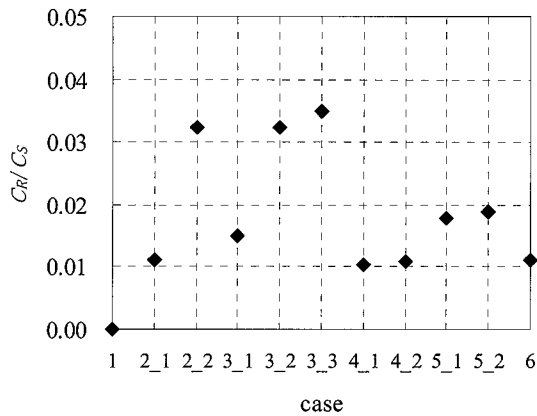


図-12 補修費と破壊時費用の関係

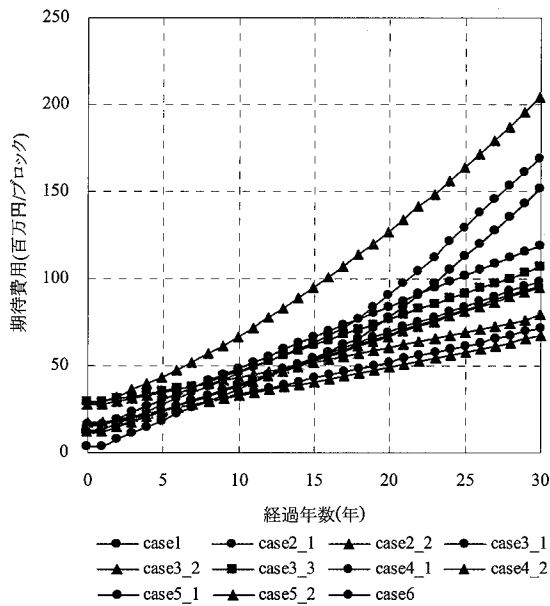


図-13 経過年数と期待費用の関係

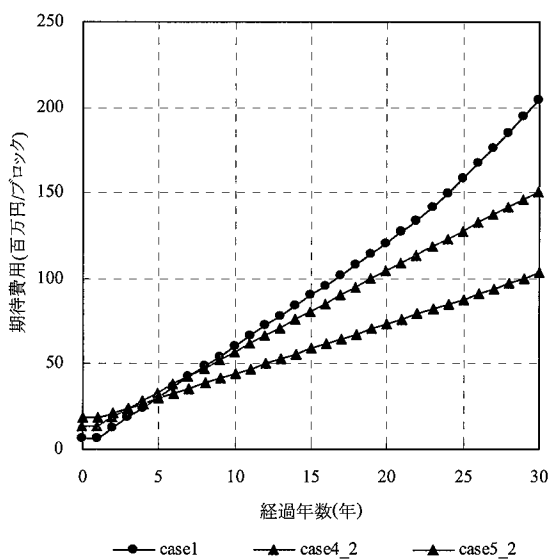


図-14 経過年数と期待費用の関係
(震度補正後)

することが一般的であるが、社会的割引率を考慮すると将来的な費用が減価されるため、本研究では、各ケースの費用差を明確にすることを目的に、社会的割引率は考慮していない。ただし、社会的割引率を考慮した場合でも各ケースの期待費用の順序は変わらないことを確認している。

各ケースとも経年的に期待費用は増加する。case1 および case2_1, 2_2 は、時間の経過とともに飛躍的に期待費用が増加する。ここで、case2_1 は 20 年経過時点で実際に施工されたペトログラムライニング施工による補修に相当し、必ずしも最適な補修方法であったとは言えない。また、破壊確率の面で有利で、かつ補修費用も比較的小さい case5_2 の期待費用の増加率が最も小さく、最も効果的な補修案であるといえる。ここで、case5_2 は、2,3 列目杭のみ鋼板溶接を行い、杭の剛性を高くしたケースである。したがって、case5_2 の条件で補修することが最も合理的ではあるが、予算の制約上、初期に大きな投資ができず段階的に補修を行っていくような場合は、次のような補修戦略を考えることができる。case1 を除くと、経過年数 5 年まで最も期待費用が安価な case4_2 と、それ以降最も安価な case5_2 を組合せたシナリオである。つまり、まず case4_2 の条件で 3 列目杭のみ補修し、5 年経過までの間に case5_2 の条件となるよう 2 列目杭の補修を行う戦略である。これは、case5_2 の条件で破壊確率が最大となる箇所条件が変わらないためである。このように、期待費用の経年的な変化を事前に把握できれば、最も合理的で効果的な補修戦略を決定することができる。

また、2.2 (4) で述べた震度を補正した場合の結果について図-14 に示す。図-13 の結果と比べ、各ケースとも破壊確率が大きくなるため期待費用は増加するが、各ケースの期待費用の大小関係は変わらず、case5_2 が最も安価なケースであるということには変わりはない。

4. まとめ

本研究では、既存の直杭式横棧橋を対象に、信頼性理論を用いて、地震時の破壊確率および期待費用を求めた。今後、老朽化した施設の増加に伴い、低負担で効果的な補修戦略の検討が重要となってくるものと考えられ、信頼性理論による破壊確率を用いた場合の検討手法の一例を示すことができた。また、本研究は、新設構造物のライフサイクルマネジメントを検討する際にも有用であると考えられる。

本研究で得た主要な結論は、以下のとおりである。

- ①信頼性指標が最小となるポイントは作用や経過年数によって変化する。このため、特定の部位のみに着目した検討を行うことは適切でない場合がある。
- ②全杭頭部に一律に鋼板溶接を行い、杭の剛性を高くすると、補修部下端の杭応力度が厳しくなり、破壊確率が大きくなるケースがある。

③鋼板溶接と塗覆装を行う杭列を選定すれば、他列の杭の弱点部に杭応力が集中することを避けることができ、破壊確率を小さくできる場合がある。

④信頼性理論を用いることによって初めて期待費用の経年変化を求めることができ、その結果、有効な補修戦略を決定することができた。

謝辞：

本研究を進めるにあたり、清水建設㈱ 藤田宗久博士に貴重なご助言を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 杉本博之, 阿部淳一, 赤泊和幸, 渡邊忠朋：公共投資の経年的シナリオに対する橋梁の健全度推移に関する研究, 土木学会論文集, No.780, I-70, pp.199-209, 2005
- 2) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801, I-73, pp.83-96, 2005
- 3) 中原耕一郎, 古田 均, 亀田学広, 高橋裕治：遺伝的アルゴリズムを用いた最適維持管理計画の策定, 土木学会年次学術講演会, V-082, pp.163-164, 2003
- 4) 小池 武：リスクマネジメント手法によるパイプラインの維持管理戦略について, 土木学会論文集, No.794, I-72, pp.189-202, 2005
- 5) 松瀨 知, 横田 弘：係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意思決定支援システムの構築に関する基礎的研究, 港湾技術研究所報告, Vol38, No.2, 1999
- 6) 運輸省港湾局監修, 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999
- 7) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析, 土木学会論文集, No.801, I-73, pp.141-158, 2005
- 8) 吉田 望, 末富岩雄：DYNEQ：等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株) 技術研究所報, 1996
- 9) 長尾 毅, 菊池喜昭, 藤田宗久, 鈴木 誠, 佐貫哲朗：栈橋式係船岸のレベル 1 地震動に対する信頼性設計法, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.201-208, 2006
- 10) Rackwitz, R. and Fiessler, B. : Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, *Computers & Structures*, Vol. 9, pp.489-494, 1978
- 11) 森杉壽芳：社会資本整備の便益評価, 勁草書房, 1997
- 12) 港湾投資の社会経済効果に関する調査委員会編：港湾投資の評価に関するガイドライン, 港湾空間高度化センター, 1999
- 13) 長尾 毅, 柴崎隆一, 尾崎竜三：経済損失を考慮した期待総費用最小化のための常時のレベル 1 信頼性設計法, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.389-400, 2005
(2006年4月13日受付)