

信頼性理論を用いた既存栈橋の補修方法選択法に関する研究

国土技術政策総合研究所 正会員 長尾 毅
 復建調査設計株式会社 正会員 ○佐藤 秀政

1. はじめに

港湾鋼構造物の地震被害リスクを評価するためには、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。被害リスクを定量的に評価する手法としては、信頼性理論による破壊確率を用いる方法が挙げられ、補修戦略の最適化問題には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。

検討対象とした栈橋は、建設後20年以上経過した施設で、下部鋼管杭に集中腐食が発生し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に、本研究では腐食量を確率変数として扱い、種々の補修工を適用した場合の下部鋼管杭の経年的な地震時リスクを破壊確率を用いて評価し、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. 検討条件

対象とした栈橋は、4本の直杭と上部工からなる水深-12mの既存の直杭式横栈橋である。原断面は、照査用震度0.20で設計されたもので、鋼管杭の諸元は、必要肉厚に腐食に対する余裕代を付加していた。

信頼性解析は、栈橋を地盤バネによって支持された杭-上部工ラーメンモデルとして骨組解析を行い、これより求めた断面力をもとに一次信頼性理論(FORM: First Order Reliability Method)を用いて実施した。信頼性解析では、鋼材降伏強度、水平地盤反力係数、照査用震度、腐食量を確率変数とした。腐食量以外の確率変数は、既往の研究成果¹⁾から統計量と分布形を設定した。腐食量は、腐食調査データより得た平均腐食速度から経年後の腐食量を設定した。ここで、腐食が最も激しい箇所の腐食量が信頼性解析に与える影響が大きいものと考えられるため、腐食速度の最も大きい最も海側杭の深度-1.0mの腐食量を確率変数とし、それ以外の箇所の腐食量は確定値として設定した。

対象とした地震動の作用は、再現期間50,75,100,150,200,500年の地震動で時刻歴波形の形で工学的基盤に与え、1次元地震応答計算を行い、杭固定点(1/β)の応答加速度を算出し、栈橋の固有周期に応じた応答加速度最大値から震度に換算した。照査用震度は、0.12, 0.14, 0.17, 0.23, 0.28, 0.42となった。図-1に工学的基盤における各再現期間の地震動のフーリエスペクトルを示す。

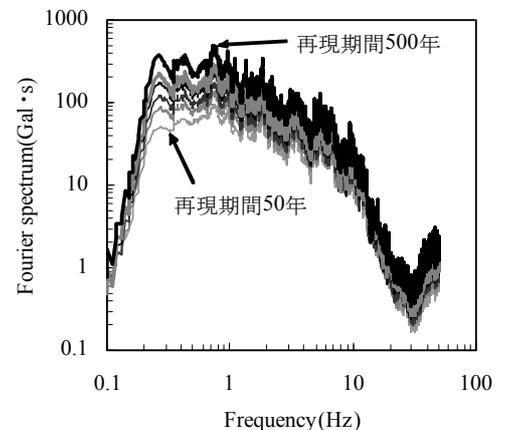


図-1 フーリエスペクトル

補修工の検討ケースを表-1に示す。補修工法は、鋼板溶接工法、塗

表-1 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($t=0\text{mm}$)+塗覆装	-1.0	全杭	—	0	現状
case2_2	鋼板溶接($t=10\text{mm}$)+塗覆装	-1.0	全杭	—	0	現状
case3	鋼板溶接($t=10\text{mm}$)+塗覆装+電気防食	-1.0	全杭	全杭	0	現状の1/10
case4	鋼板溶接($t=10\text{mm}$)+塗覆装+電気防食	-1.0	3列目	全杭	0	現状の1/10
case5	鋼板溶接($t=10\text{mm}$)+塗覆装+電気防食	-1.0	2,3列目	全杭	0	現状の1/10

キーワード 栈橋, ライフサイクルマネジメント, 補修, 地震, 破壊確率

連絡先 〒732-0052 広島県広島市東区光町 2-10-11 復建調査設計株式会社 TEL082-506-1861

覆装工法, 電気防食工法を組み合わせ設定した. 補修する杭列は, 全杭対象とする場合と補修する杭列を選定した場合を設定した.

3. 破壊確率と期待費用

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想定し, (1)式に示す限界状態関数で照査した.

$$g = \sigma_y - \sigma_d(k_h, K, F) \geq 0 \quad (1)$$

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.

地震動の作用により破壊が生起する確率は, 補修工適用時点から30年間検討した. 検討期間 T 年間に m ランクの地震動の作用により破壊が生起する確率 P_T は, (2)式より求めた.

$$P_T = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m P_{fi}(t) \quad (2)$$

ここに, $P_{fi}(t)$: 地震動 i 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), T : 検討期間(年)である.

補修戦略等を検討するには, 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, (3)式で算出した.

$$C_T = C_R + P_T \times C_S \quad (3)$$

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, 復旧費用と迂回輸送による経済損失を考慮した. 復旧費用は, 災害復旧の現状の考えに基づき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. また, 迂回輸送による経済損失は, 既往の研究成果²⁾を参考とした.

各補修工における破壊確率の経年変化を図-2に, 期待費用の経年変化を図-3に示す. case2_2のように全杭対象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未補修の case1 よりも経年後の破壊確率が大きくなった. 一方, case5のように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るため, 他案に比べ破壊確率および期待費用の経年的な増加を抑えることができ, 最も効果的な補修案となることが分かった. 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および期待費用の観点からも不利な場合があるといえる.

4. おわりに

本研究では, 信頼性理論を応用して既存の直杭式横栈橋の地震時破壊確率および期待費用の経年変化を求めた. その結果, 被害リスクを考慮した最適な補修方法を決定することができた.

参考文献:

- 1) 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
- 2) 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

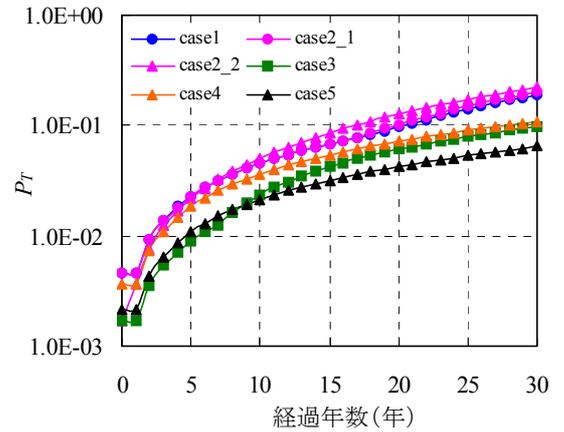


図-2 経過年数と破壊確率の関係

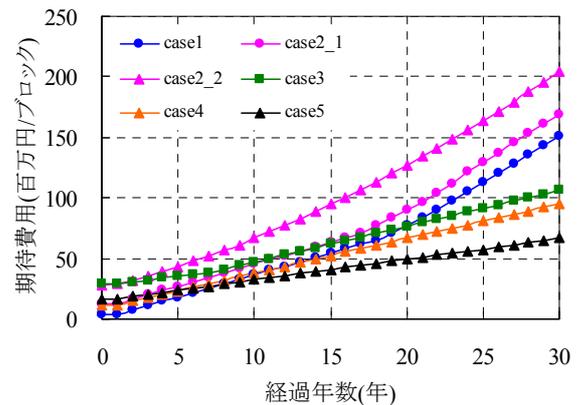


図-3 経過年数と期待費用の関係