地震リスクを考慮した港湾矢板群の維持補修シミュレーションモデル*

A SIMULATION MODEL FOR MAINTENANCE/REHABILITATION OF PORT FACILITY WITH REFERENCE TO SEISMIC RISK*

藤森裕二** ・小川貴裕*** ・紅谷昇平**** ・貝戸清之***** ・小林潔司*6
by Yuji FUJIMORI**, Takahiro OGAWA***, Shohei BENIYA****, Kiyoyuki KAITO***** and Kiyosi KOBAYASHI*6

1．はじめに

わが国の土木施設は高度経済成長期に建設されたものが多く，今後施設が一斉に維持更新期を迎えることとなる．これに伴い，維持補修費用が大幅に増加することが予想されており，ライフサイクル費用の最小化に資するような維持補修戦略を検討することが重要な課題となっている．さらに，近い将来に大規模地震の発生が予想される中，地震リスクとその防災対策を同時に考慮に入れた維持補修計画を策定することも求められている．

本研究では，土木施設の中でも特に港湾施設の矢板構造物の維持補修問題を取りあげる．わが国の港湾に膨大な量の矢板構造物が設置されている．その中には腐食が進行し，力学的強度が著しく低下している矢板も少なくない．矢板構造物が損壊した場合，背後地に立地する構造物やそこで活動する多くの人々に甚大な影響を与えることは想像に難くない．さらに，大規模地震の発生を想定した場合，早急な補強対策が必要となる矢板は膨大な量に及ぶ．限られた予算の中で矢板構造物の維持補修による防災投資効果を確保するためには，矢板の補修に関する優先順位を決定することが重要な課題である．

従来より，土木施設の劣化過程を確定的・確率的モデルで表現し，ライフサイクル費用の最小化を目的とする最適補修政策モデルが数多く提案されている．しかし，港湾矢板構造物の場合，背後地の土地利用状況や矢板背後の地盤特性が多様であり，矢板施設の損壊がもたらす社会・経済的リスクの大きさが個々の矢板施設ごとに異なる．このような社会・経済的リスクを検討するためには，矢板構造物の力学的安定性の検討に基づいた災害リスクの評価と，矢板群全体の期待ライフサイクル費用評価を同時に実施することが必要となる．

以上の問題意識の下，本研究では地震発生時における矢板構造物の力学的安定性評価モデルと，地震リスクを考慮した矢板群の維持補修シミュレーションモデルを提案する．その上で，予算制約の下で，地震被害も考慮した期待ライフサイクル費用を可能な限り抑制するような矢板構造物群の補修戦略や補修優先順位を求める方法論を提案する．以下，**2**．では，本研究における基本的な考え方について，**3**．では，矢板構造物の力学的安定性評価モデルについて，**4**．では，地震の発生がポワソン到着する場合を想定し，矢板構造物の望ましい維持補修政策を検討するためのシミュレーションモデルについて説明する．

2．本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

土木施設のライフサイクル費用の最小化を目指した最適維持補修モデルに関しては，すでに数多くの研究蓄積がある．これらの既往研究は，確定的な劣化曲線を用いて，ライフサイクル費用を最小にするような最適維持補修政策を求めるモデル，劣化過程の不確実性を考慮した確率論的モデルに分類できる．舗装，橋梁，トンネル，道路付帯施設等の実施の土木構造物を対象とした維持補修モデルも提案されている．しかし，港湾矢板群の維持補修問題に関しては，ほとんど研究が進展していない．

港湾矢板施設群の場合，ライフサイクル費用の中で，矢板自体の維持補修に要する直接的な費用よりも，高潮，地震，津波等の自然災害により，矢板が破壊した場合に発生する1次被害(背後地の人的被害，経済活動への影響)および2次被害(港湾施設が使用不能となることによる経済活動への影響)の占めるウエイトが大きい．さらに，矢板背後地の地盤条件や土地利用条件により，矢板

*キーワーズ：アセットマネジメント，地震リスク，港湾施設，シミュレーションモデル，ライフサイクル費用
**学生会員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1-2
e-mail: fujimori.yuji@student.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)
***正会員　株式会社 日建設計総合研究所
(〒541-8528 大阪市中央区高麗橋4-6-2
e-mail: ogawat@nikken.co.jp)
****正会員 人と防災未来センター 主任研究員
(〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通1-5-2
e-mail: beniyas@dri.ne.jp)
*****正会員 大阪大学大学院工学研究科 特任講師
(〒565-0871 吹田市山田丘2-1
e-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp)
*6フェロー 京都大学経営管理大学院経営管理講座 教授
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町
e-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)

の損壊リスクや経済的損失リスクが個別の矢板によって多様に異なることが挙げられる．このため，自然災害の発生による矢板施設の損壊リスクを明示的に考慮することが必要となる．これに対し，既往の維持補修モデルは，構造物の劣化過程を統計的モデルで表現しており，構造物の損壊に関する力学的メカニズムを明示的に考慮しているわけではない．さらに，地震等の外力を考慮した最適維持補修モデルに関しては，若干の研究事例が存在するが，構造物の耐震性評価と連動したモデル構造になっていない．このため，個々の施設ごとの個別性が極めて大きい矢板構造物の維持補修問題に，伝統的な最適維持補修モデルを用いることができないという限界がある．本研究では，地盤安定評価モデルを用いて，個々の施設の被災ポテンシャルや経済損失リスクをミクロに評価することの重要性に着目する．それと同時に，期待ライフサイクル費用評価や予算管理戦略，補修の優先順位の決定は，矢板群全体を考慮したマクロな評価が必要となる．本研究では，ミクロなレベルでの被災ポテンシャルの検討とマクロなレベルでの維持補修戦略の決定を同時に検討できるようなシミュレーションを提案する．

(2) 地震リスク

地震動のポワソン到着モデルは，いわば「いつ起こるかわからない地震の発生リスク」を表現したものである．ポワソン到着モデルは，過去の記憶を持たない現象を対象としており，地震の到着率は時間を通じて一定である．ポワソン過程とは，1) 事象の生起は互いに独立である (独立性)，2) 事象が発生する確率は時間に依らず一定である (定常性)，3) 微小時間の間にはたかだか1回しか事象は発生しない (希少性) というルールをもつ事象の発生過程である．以下，このような特性を有する到着過程を，ポワソン到着過程と呼ぶこととする．地震リスクがポワソン到着過程に従う場合，矢板の補修タイミングを決定する際に，期待ライフサイクル費用を算出することには新規性はない．しかしながら，先述したように地震リスクと力学的性能を明示的に考慮した事例は著者らの知る限り存在せず，この点に本研究の独自性を見出すことができる．

(3) ハイブリッドモデル

本研究で提案するモデルは，1) 個別矢板の地盤安定性に対する力学的評価 (矢板安定性評価モデルと呼ぶ) と，2) 矢板群全体を対象に，地震リスクと予算制約を考慮した維持補修シミュレーション (維持補修シミュレーションモデルと呼ぶ) が連動するようなハイブリッドモデルとなっている．矢板安定性評価モデルは，個別の矢板を対象としたミクロな補修戦略の検討，維持補修シミュレーションモデルは，矢板群全体の補修戦略と予算案を検討するようなマクロな維持補修戦略を検討するための情報を作成することを目的としている．ハイブリッドモデルは，現在時刻を起点として，各年次ごとに地震リスクを考慮しながら矢板の力学的安定性を評価するとともに，計画期全体を通じて期待ライフサイクル費用を最小にするような矢板群の維持補修戦略を分析することを目的としている．

3. 矢板の安全性評価モデル

(1) 矢板の安定性評価

設計で期待されている常時と地震時の発生曲げモーメント (設計値) と，実測された腐食量から推計される抵抗曲げモーメント (実測値) を比較し，矢板の地盤安定性を評価する．このうち，発生曲げモーメントは，前提条件から算出される主動土圧，残留水圧，動水圧に基づいて算出される．一方，抵抗曲げモーメントは，腐食量の実測値に基づいて算出される．なお，本研究では矢板群の腐食管理を行うことを目的としており，以下で提案するシミュレーションモデルでは地震時に発生する地盤の液状化現象は考慮しない．

(2) 健全度ランク評価

防潮堤での評価基準としては，水平震度に対する矢板の曲げモーメントで表された耐力を指標とし，地震時，平常時の耐力を踏まえて健全度を6ランクに区分する．健全度ランクの設定については，1が最も健全性が高く，直下型地震レベルを想定した震度$0.25 \leq k_h$に耐え得る耐力を有する．これ以降は，東南海・南海地震レベルを想定した震度$0.2 \leq k_h < 0.25$に耐え得るものをランク2，$0.15 \leq k_h < 0.2$に耐え得るものをランク3，$0.1 \leq k_h < 0.15$に耐え得るものをランク4，$0.0 \leq k_h < 0.1$に耐え得るものをランク5，地震が発生していない常時であっても耐力が不足している$k_h < 0$をランク6とする．

4. 地震リスクを考慮した維持補修シミュレーション

(1) 前提条件

港湾管理者が矢板群を管理する場合を考える．矢板群はN個の矢板により構成されている．いま，カレンダー時間軸上に等間隔に設けられた離散的な時刻においてある予算制約と優先順位決定ルールに従って，矢板の補修を実施するような維持補修業務を考える．以下，カレンダー時刻のことを「時刻」と呼ぶ．さらに，初期時刻t_0を起点とする離散的時間軸

$$t_z = t_0 + zd \ (z = 0, 1, \cdots) \tag{1}$$

を導入する．ここに添え字z $(z = 0, 1, \cdots)$は時間間隔dの離散的時刻における時刻番号を表す．所与の規模の地震が発生した場合，事前に設定した健全度$\bar{k}$より状態の

悪い矢板を破壊すると仮定する．時刻t_zにおける矢板nの健全度をK個の離散的なレーティングを表す状態変数

$$\zeta_n(t_z) = k \ (k = 1, \cdots, K) \tag{2}$$

を用いて表現する．ただし，状態変数kの値が大きくなるほど，健全度が低下していることを表す．なお，矢板の健全度は力学的安定性によって判定される．

つぎに，劣化が進行した矢板の健全度を回復するための補修工法を選定する．健全度に応じて補修工法を決定するルールを「補修アクション」と呼ぶ．いま，矢板nの補修アクションベクトル$\boldsymbol{\eta}^{d_n}$を

$$\boldsymbol{\eta}^{d_n} = (\eta^{d_n}(1), \cdots, \eta^{d_n}(K)) \tag{3}$$

と表す．ここに，補修政策$d_n \in D_n$は，各健全度kに対して，その時点で実施する補修アクションを指定する一連のルールを表す．また，D_nは矢板nに対して適用可能な補修政策の集合を表す．補修政策d_nを構成する補修アクション$\eta^{d_n}(k) \in \eta_{D_n}(k)$は，健全度$k$に対して補修を実施し，健全度が$\eta^{d_n}(k)$に推移することを意味する．

さらに，補修アクション$\boldsymbol{\eta}^{d_n}$に必要となる矢板nの補修費用を費用ベクトル$\boldsymbol{c}_n^{d_n} = (c_n^{d_n}(1), \cdots, c_n^{d_n}(K))$により表す．矢板$n$の健全度を$k$から$j$ $(1 \leq j \leq k)$へ回復させるための費用をc_n^{kj}と表せば，$\eta^{d_n}(k) = j$のとき，$c_n^{d_n}(k) = c_n^{kj}$が成立する．このとき，補修費用は条件

$$\begin{aligned} & c_n^{jj} \leq \cdots \leq c_n^{kj} \leq \cdots \leq c_n^{Kj} \\ & (j \leq k \leq K; j = 1, \cdots, K-1) \end{aligned} \tag{4}$$

を満足すると仮定する．このことは補修前の矢板の健全度が悪くなるほど，特定の健全度に回復させるための費用が大きくなることを意味する．このとき，矢板nの補修政策$d_n \in D_n$の内容は，各健全度kに対して採用する補修アクション$\eta^{d_n}(k)$と補修費用$c_n^{d_n}(k)$の組$(\eta^{d_n}(k), c_n^{d_n}(k))$ $k = 1, \cdots, K$により記述される．

(2) 補修優先順位の決定

補修政策$d_n \in D_n$を構成する補修アクション$\eta^{d_n}(k)$により生じる矢板nの時刻t_zにおける健全度の変化に対して，

$$q_{kj}^{d_n}(t_z) = \begin{cases} 1 & \eta^{d_n}(k) = j\text{のとき} \\ 0 & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{5}$$
$$(j, k = 1, \cdots, K)$$

と定義する．このとき，総数Nの矢板群のうち，補修が必要となる矢板の数は，

$$Q(t_z) = \sum_{n=1}^{N} q_{kj}^{d_n}(t_z) \tag{6}$$

となる．これらの補修候補集合Ω_Mに対して，事前に設定した優先順位決定ルールに基づいて，優先順位の高い順に番号設定$(m = 1, \cdots, Q(t_z))$を行う．本研究の適用事例では，補修優先順位を，1) 重要度の高い施設，2) 地震時の安全率 (対象年度の抵抗曲げモーメント／発生曲げモーメント) の低い施設の順に設定している．この操作により，矢板mは補修優先順位がm番目の矢板であることを示す．さらに，時刻t_zにおける予算制約関数を$\bar{c}_M(t_z)$とする．なお，予算制約の変動を考慮しない場合には，$\bar{c}_M(t_z)$を定数と設定すればよい．予算制約下においては，補修優先順位の高い矢板から補修費用を積み上げ，予算制約を超えない範囲までの補修候補が実際の補修対象となる．具体的には条件式,

$$m_M^* = \arg\max_m \left\{ m | \bar{c}_M(t_z) - \sum_{i=1}^{m} c_i^{kj}(t_z) \geq 0 \right\} \tag{7}$$

を満足するようなm_M^*個の矢板群が補修されることになり，$Q(t_z) - m_M^*$個の矢板群の補修が次年度以降に見送られることになる．ただし，argは上式の右辺を最大にするmを指定する記号である．以上が矢板群に対する通常時の維持補修であり，地震動が発生しない限り，次年度以降も同様に補修優先順位を決定し，維持補修業務を実施することになる．

つぎに，地震の発生時の復旧作業に着目しよう．簡便化のために，地震が発生する年度において，地震は通常の維持補修業務が完了した後に発生するものと考える．シミュレーションでは，地震はある確率に従って発生すると考える．前述したように，地震発生時においては，健全度$\bar{k}$より状態の悪い矢板は破壊する．このとき，破壊する矢板の総数は,

$$R(t_z) = \sum_{n=1}^{N} I_{\zeta_n(t_z) \geq \bar{k}} \tag{8}$$

と定義できる．ただし，$I_{\mathcal{A}}$は条件$\mathcal{A}$が成立するときに1，そうでないときに0となる指示関数であり，$I_{\zeta_n(t_z) \geq \bar{k}}$は,

$$I_{\zeta_n(t_z) \geq \bar{k}} = \begin{cases} 1 & \zeta_n(t_z) \geq \bar{k}\text{のとき} \\ 0 & \text{それ以外のとき} \end{cases} \tag{9}$$

を意味する．これらが復旧候補集合Ω_Mであり，事前に設定した復旧優先順位決定ルールに基づいて，優先順位の高い順に改めて番号設定$(m_R = 1, \cdots, R(t_z))$を行う．さらに，時刻$t_z$における復旧予算関数を$\bar{c}_R(t_z)$とする．復旧優先順位の高い矢板から復旧費用を積み上げ，予算制約を超えない範囲までの復旧候補が実際の復旧対象となる．具体的には条件式,

$$m_R^* = \arg\max_m \left\{ m | \bar{c}_R(t_z) - \sum_{i=1}^{m} c_i^{K1}(t_z) \geq 0 \right\} \tag{10}$$

を満足するようなm_R^*個の矢板群が復旧されることになり，$R(t_z) - m_R^*$個の矢板群の補修が次年度以降に見送られることになる．なお，本研究においては，地震により破壊された矢板の復旧を通常の維持補修予算を用いて実施することや，その逆の実施もないと考える．すなわち,

補修候補集合と復旧候補集合の間には，$\Omega_M \cup \Omega_R = \phi$ が成立する．

(3) 地震リスクを考慮した補修シミュレーション

ポワソン到着過程に関する詳細は省略するが，以下の補修シミュレーションにおいては，過去の地震発生記録から地震の到着率を算定し，その到着率に基づくポワソン分布からの乱数発生により地震発生を表現する．

現在時点における矢板群の健全度が算定されているとする．その上で，地震リスクを考慮した矢板群の維持補修シミュレーションを試みる．本研究では，モンテカルロ・シミュレーションにより地震発生を表現し，ある補修政策の下でのライフサイクル費用パスを得る．ライフサイクル費用パスは，矢板群の維持補修過程として起こり得る１つの確定的なパスを表している．将来時点における維持補修過程は，無数のライフサイクル費用パスの集合であり，このようなパスの集合を以下の手順で算出し，地震リスクを考慮した期待ライフサイクル費用最小化補修政策を決定する．

ステップ１　矢板群に対して，実現可能な補修政策 d_n^q $(q = 1, \cdots, Q)$ を設定する．これらのうち，期待ライフサイクル費用最小化を達成する政策が最適補修政策となる．$q = 1$ とする．

ステップ２　ライフサイクル費用パスの番号を $s = 1$，パスの発生目標個数を S と設定する．また，ライフサイクル費用評価のための目標期間を Z とする．

ステップ３　現在時点をシミュレーションの初期時点として考え，シミュレーション上のサンプル時点を $z = 0$ に設定する．初期時点で獲得されている情報は，矢板群の健全度情報であり，これを $\tilde{\boldsymbol{r}}_{t_0}^s$ と表す．記号「˜」は，サンプルパスに関わる情報であることを示す．また添え字 s はサンプルパス番号を表す．$z = 1$ に更新する．

ステップ４　補修優先順位決定ルールに基づき，予算制約を満足する補修対象を決定し，補修費用の総額 $c_M^{s,d_n^q}(t_z) = \sum_{i=1}^{m_M^*} c_i^{kj}(t_z)$ を算出する．これらを当該年度 t_z の維持補修費用として計上する．一方，地震が一度でも発生している場合には，復旧の優先順位決定ルールと復旧予算制約を勘案しながら，復旧対象を決定し，復旧費用 $c_R^{s,d_n^q}(t_z) = \sum_{i=1}^{m_R^*} c_i^{K1}(t_z)$ を計上する．また，維持補修あるいは復旧された矢板の健全度を適切な健全度に回復させ，$\tilde{\boldsymbol{r}}_{t_z}^s$ とする．

ステップ５　過去の地震発生記録により地震の到着率を算定する．その到着率に基づくポワソン分布から乱数を発生させ，地震発生のモンテカルロ・シミュレーションを行う．その結果を，

$$\delta^s(t_z) = \begin{cases} 0 & \text{地震が発生しないとき} \\ 1 & \text{地震が発生するとき} \end{cases} \tag{11}$$

と表す．

ステップ６　t_z が目標期間 t_Z に，ライフサイクル費用パスの数 s が目標回数 S に，さらに補修政策 q が全政策数 Q に到達していれば，**ステップ７**へ進む．t_z が目標期間 t_Z に，s が目標回数 S に到達しているが，q が全政策数 Q に到達していない場合には，$z = 0$，$s = 1$，$q = q + 1$ として**ステップ１**へ戻る．また，t_z が目標期間 t_Z に到達しているが，s と q が目標回数 S，全政策数 Q に到達していない場合は，$z = 0$，$s = s + 1$ として**ステップ３**へ戻る．それ以外の場合には，$z = z + 1$ として**ステップ４**へ戻る．

ステップ７　以上の手順により，各補修政策 d_n^q $(q = 1, \cdots, Q)$ に対して，現在時点を初期時点とする維持補修過程に関する合計 S 個のライフサイクル費用パスを獲得することができる．ライフサイクル費用パス s は，維持補修過程に関する確定パスであり，その内容は次式で表すことができる．

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}}^{s,d_n^q} = (\tilde{\boldsymbol{\xi}}_{t_0}^{s,d_n^q}, \cdots, \tilde{\boldsymbol{\xi}}_{t_Z}^{s,d_n^q}) \tag{12a}$$

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}}_{t_z}^{s,d_n^q} = \{\tilde{\delta}^s(t_z), \tilde{c}_M^{s,d_n^q}(t_z), \tilde{c}_R^{s,d_n^q}(t_z)\} \tag{12b}$$

さらに，この情報に基づいて，補修政策 d_n^q に対するライフサイクル費用パス s，期待ライフサイクル費用を算出する．

$$C^{s,d_n^q} = \sum_{z=0}^{Z} \frac{\tilde{c}_M^{s,d_n^q}(t_z) + \tilde{\delta}^s(t_z)\tilde{c}_R^{s,d_n^q}(t_z)}{(1+\rho)^{t_z}} \tag{13a}$$

$$LCC^{d_n^q} = \frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S} C^{s,d_n^q} \tag{13b}$$

最終的に期待ライフサイクル費用の最小化を目的とするライフサイクル費用最小化モデルは，

$$\begin{aligned} LCC^{d_n^*} &= \min_{d_n^q \in D_n} \left\{ LCC^{d_n^q} \right\} \\ &= \min_{d_n^q \in D_n} \left\{ \frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S}\sum_{z=0}^{Z} \frac{\tilde{c}_M^{s,d_n^q}(t_z) + \tilde{\delta}^s(t_z)\tilde{c}_R^{s,d_n^q}(t_z)}{(1+\rho)^{t_z}} \right\} \end{aligned} \tag{14}$$

と定式化することができ，最適補修政策は d_n^* となる．

5. おわりに

本研究では，港湾矢板構造物を対象として，地震動に対する矢板背後地の地盤安定性を評価する力学的モデルと，所与の維持補修政策，優先順位決定ルールの下で，矢板群全体の劣化・補修過程を記述するシミュレーションモデルを提案し，その上で，予算制約の下で，地震被害も考慮に入れた期待ライフサイクル費用を可能な限り低減するような維持補修政策を求めるための方法論を提案した．なお，著者らはすでに，実際の港湾矢板構造物を対象とした実証分析を実施しているが，実証分析に関しては，紙面の都合上，講演会当日に報告させて頂く．