

港湾構造物の LCM（ライフサイクルマネジメント）技術の高度化に関する研究

（独）港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造強度研究室 加藤 絵万

1. はじめに

港湾構造物の機能を必要な期間、良好な状態に保持するためには、発生する変状を効率的に発見し、それを合理的に評価し、効果的な対策を施すという一連のメンテナンスが不可欠である。加えて、機能が陳腐化した構造物の改良・更新を適切に計画・遂行していくことも必要である。本論文では、ライフサイクルコスト（LCC）を指標とした戦略的な維持管理計画の立案を可能とするシステムの確立を目的として行われた、鉄筋コンクリート（RC）構造物に対する種々の LCM 技術開発について報告する。

2. 港湾 RC 構造物のメンテナンスの現状

港湾 RC 構造物では、外部環境からの塩化物イオンの侵入により内部鋼材が腐食し、かぶりコンクリートのひび割れ・剥離・剥落が生じる、いわゆる塩害が問題となる。特に、栈橋のコンクリート上部工は、設置環境が厳しく塩害を受けやすい構造様式であるため、劣化事例が極めて多いのが特徴である。これに対する一般的なメンテナンスの手順として、①約1年毎に行う目視点検に基づく劣化度判定、②必要に応じた詳細調査とこれに基づく劣化進行予測、③②の結果を基に改良・撤去など維持管理対策の策定、の3ステップが行われている。①劣化度判定は、はり・スラブなど各部材毎の劣化度（表-1 参照）を基に、最終的には栈橋の1ブロックを単位として総合的に行われる。劣化度Ⅱ・Ⅲの場合、②詳細調査の可否を検討し、Ⅳ・Ⅴの場合は直ちに③改良等対策を検討するという流れとなっている。

表-1 劣化度判定の標準

劣化度項目	0	I	II	III	IV	V
鉄筋の腐食	なし	コンクリート表面に点錆がみられる	一部に錆汁がみられる	錆汁多し	浮きさび多し	浮きさび著しい
ひび割れ	なし	一部にひび割れが見られる	ひび割れやや多し	ひび割れ多し	幅数mm以上のひび割れ多数	(かぶりコンクリートの状況で判断)
かぶりコンクリートの剥離・剥落	なし	なし	一部に浮きがみられる	一部に剥離・剥落がみられる	剥離・剥落多し	剥離・剥落が著しい
点検による調査要否の判定	調査の必要なし (点検継続)		必要に応じて調査		要補修	

3. LCM 技術に関する取組み

現状のメンテナンス手法は、いわゆる事後対策が主体であり、対象構造物の残存機能や寿命など定量的な指標を与えることができない。合理的なメンテナンスを行うためには、図-1に示すような、将来の利用計画や供用年数などを加味したライフサイクルシナリオと高精度な劣化進行予測に基づいたメンテナンス手法を早急に確立することが重要である。ここでは、この目的のために現在取り組んでいる要素技術の開発について報告する。

構造物の全体や部材毎の劣化・変状を予測するモデルを構築することができれば、構造

物の完成直後から、あるいは既設構造物の健全度診断に基づく現有性能評価時点から、将来の性能変動を定量的に評価できるようになる。このとき、設計条件や環境条件等を考慮した理論的かつ普遍的なアプローチも考えられるが、近年における RC 構造物の劣化の顕在化を考慮すれば、実際の環境下で汎用的に運用できる手法を構築することが急務である。そこで、3. 1では、実際の構造物のこれまでの変状の進行状況から、将来の変状の進行を劣化度に基づいて予測する手法について報告する。

劣化度の進行に伴って、RC 構造物の保有性能は低下する。しかし、変状・劣化程度と保有性能の低下の関係については定量的な評価手法はなく、目視観察に基づいた定性的かつ主観的な情報により、保有性能が間接的に判断されているのが現状である。3. 2においては、RC 構造物の構造性能と変状程度の関係に着目し、理論的かつ普遍的な劣化予測手法の構築を目標として実施している、劣化した RC 部材の構造性能評価に関する種々の検討について報告する。

3. 1 マルコフ連鎖モデルによる変状進展予測¹⁾

港湾 RC 構造物の劣化は複雑な機構により進行するため、その過程を確率論的に扱うことで全体的な傾向を把握することが有効である。そこで、図-2に示すマルコフ連鎖モデルを用い、実測の変状程度を最も精度良く推定できる遷移確率を設定することで、変状の進展予測を可能とするモデルを構築した。これは、ある変状程度を示す施設は、1年

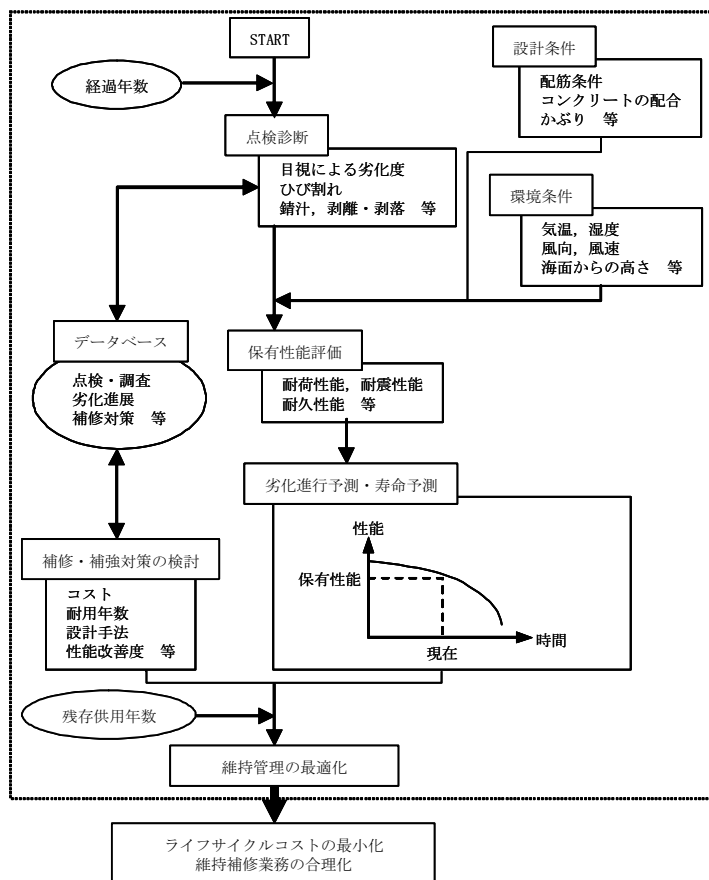
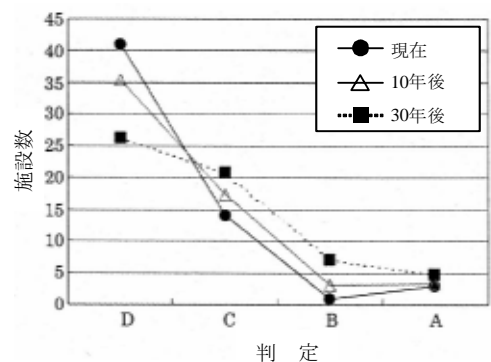
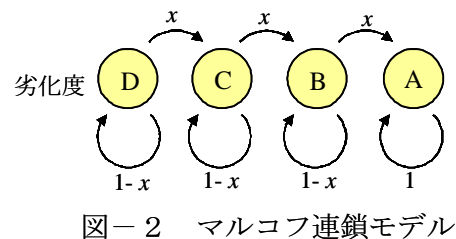


図-1 LCMのフロー



※A~Dは表-1中の劣化度と以下のように対応

変状程度	D	C	B	A		
劣化度(表-1)	0	I	II	III	IV	V

図-3 変状程度の将来進展予測

経過すると遷移確率 x で変状が進行し、残りの施設は確率 $1-x$ で同じ判定に留まるという考えに基づいている。実際に、防波堤上部工の沈下に関して将来の変状程度の分布を予測した結果を図-3に示す。変状程度 A~D は、それぞれ同図に示す劣化度 0~V に対応している。今後、維持管理対策を行わない場合、同図に示すような変状の進展が予測されることとなる。このモデルにより、例えば 30 年後、A あるいは B と判断され対策を要する施設数の推定が可能となるため、結果として、対策時期の決定や対策費用の算出等、ライフサイクルコストの低減に貢献することが期待される。

3. 2 劣化した RC 部材の構造性能評価に関するアプローチ

3. 2. 1 鉄筋腐食が RC はりの耐荷性能に及ぼす影響²⁾

鉄筋を腐食させた RC はりの曲げ載荷試験を行い、鉄筋腐食が部材の耐荷性能に及ぼす影響について検討を行った。図-4に主筋の断面減少率と RC はりの終局荷重の関係を示す。図中の直線は、鉄筋の断面減少を考慮して現行の設計手法により終局荷重を解析した結果である。これより、鉄筋が腐食した RC はりの終局荷重は、鉄筋の断面減少を考慮するだけでは評価できないことが分かる。これは、腐食により鉄筋とコンクリート間の付着劣化が生じ、変形が局所的に進行した結果と考えられる。よって、終局荷重の評価の際には、鉄筋の断面減少だけでなく、付着劣化を考慮する必要がある。

3. 2. 2 鉄筋腐食が RC はりの変形性能に及ぼす影響³⁾

主筋およびせん断補強筋の腐食程度を変化させた RC はりの正負交番載荷試験を実施し、鉄筋腐食が部材の変形性能に及ぼす影響について実験的検討を行った。主筋の断面減少率とじん性率の関係、ならびにせん断補強筋の断面減少率とじん性率の関係を図-5に示す。ここで、じん性率ははりの初期降伏変位に対する終局変位の割合を示し、部材の耐震性能を現す指標である。これより、主筋の腐食は、断面減少と鉄筋とコンクリート間の付着劣化により変形性能の低下を招くことが考えられ、断面減少率が 15% 程度以上の場合、変形性能への影響が顕著となることが予測された。一方、せん断補強筋の腐食は、断面減少率が 40% 程度以上の場合、変形性能への影響が顕著となることが予測された。

3. 2. 3 鉄筋腐食が鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす影響⁴⁾

3. 2. 1 および 3. 2. 2 の研究成果より、鉄筋腐食が部材の構造性能に及ぼす影響

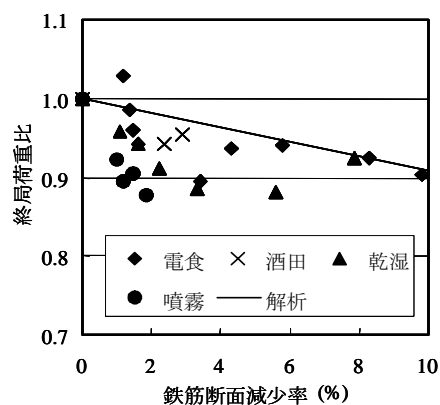


図-4 鉄筋腐食と耐荷性能の関係

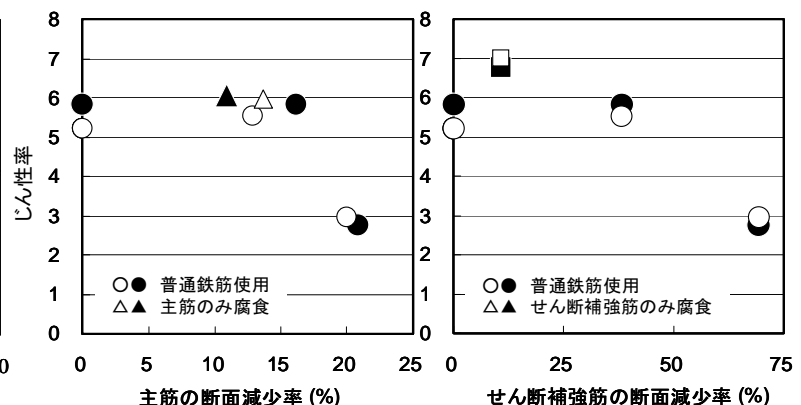


図-5 鉄筋腐食と変形性能の関係

を評価する場合、鉄筋とコンクリート間の付着劣化の考慮が不可欠である。そこで、鉄筋の腐食程度を変化させた RC はりの一軸引張試験より、鉄筋腐食が付着性能に及ぼす影響を定量的に評価する。

図-6 に一軸引張試験より得られた荷重-平均ひずみ関係を示す。鉄筋腐食が生じた試験体では、健全な試験体と比較して同一ひずみにおける荷重が低下した。これは腐食による断面減少率が大きい試験体ほど顕著であった。実験から得られた結果を基に非線形有限要素解析を行い、付着性能の定量的表現方法を提案した。解析においては、腐食による鉄筋の断面減少は鉄筋要素の断面積減少として、鉄筋とコンクリート間の付着劣化は鉄筋要素とコンクリート要素間にボンド要素を導入することにより表現した。図-7 に荷重-平均ひずみ関係の実験および解析結果を示す。鉄筋腐食による付着性能の変化を、ボンド要素のせん断応力-せん断ひずみ関係の変化で表すことにより、実験結果を精度良く再現できた。したがって、この手法を用いることにより、RC 部材の鉄筋腐食程度と構造性能を関係づけることが可能となるため、結果として、変状に応じた構造性能の経時変化について高精度な予測が可能となることが期待される。

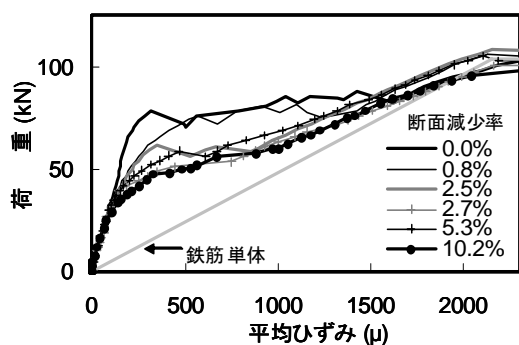


図-6 荷重-平均ひずみ関係

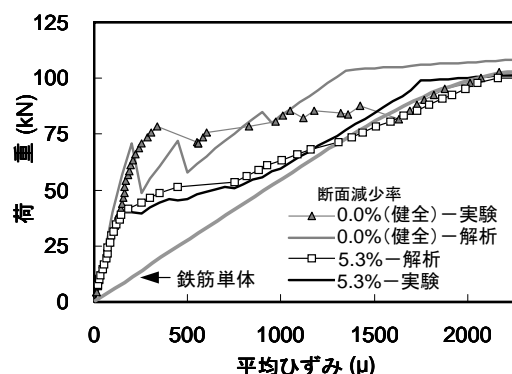


図-7 実験と解析の比較

4. まとめ

我が国全体で港湾構造物のメンテナンスに対する負担を軽減し、費用の最適化や平準化を図る方策を提示する必要があることはいままでもない。本稿では、汎用性と普遍性という異なる視点からアプローチした LCM 技術開発について報告した。今後もそれぞれの予測手法の高精度化を進め、また、それぞれを効率的に活用するために、RC 構造物の調査診断技術の高度化についても検討していきたい。

【参考文献】

- 1) 小牟禮ほか：RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発，港湾空港技術研究所報告，Vol.41, No.4, 2002.12.
- 2) 岩波ほか：鉄筋腐食が RC はりの耐荷性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.2, pp.1501—1506, 2002.7
- 3) 加藤ほか：繰返し荷重を受ける RC はりの曲げ耐力に及ぼす鉄筋腐食の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.2, pp.1849—1854, 2003.7
- 4) 加藤ほか：鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1044, 2003.3