港湾構造物のライフサイクル管理

善 一 章*

* 国際航路協会 WG31 メンバー

Life Cycle Management of Port Structures

Kazuaki Zen*

* PIANC PTC-II WG31 Member

Port authorities are interested in the behavior of the civil engineering elements of port infrastructure, particularly with respect to the financial, technical, safety and environmental decisions to be taken during the life-time of the structures. It therefore follows that to avoid unexpected large-scale rehabilitation measures as a consequence of neglected periodic maintenance, a systematical planning and budgeting of maintenance activities is necessary. Life Cycle Management (LCM), and its precursor Whole Life Costing (WLC), will contribute to a realistic approach of maintenance policy, including decision-making, planning, budgeting and funding of inspection and repair activities during the life-time of port structures.

PIANC PTC-II Working Group 31 (WG31) was constituted in 1993 to review and offer guidance on the use of LCM for new and existing structures in ports and published the LCM Report in 1998. In accordance with the LCM Report, the significance and outline of LCM, the outline and example of WLC and the case study of LCM are presented.

Key words : PIANC, LCM, WLC, discount rate, present worth factor, concentrated corrosion, low water level corrosion, corrosion damage, salt induced corrosion.

1. は じ め に

日本では、1970年代～1980年代にかけて、港湾構造物の腐食調査が旧運輸省港湾技術研究所（現：独立行政法人 港湾空港技術研究所）を中心として行われた。調査の結果、港湾鋼構造物（鋼矢板、鋼管杭など）では、特定部位に発生する集中腐食のために、比較的短期間で使用不能となるケースのあることがわかった¹⁾。特に、平均干潮面付近の損傷が著しい。また、海水面上に暴露する鉄筋コンクリート部材では、塩害のため早期劣化が発生した²⁾。鋼構造物の集中腐食や鉄筋コンクリート部材の塩害は海外の港湾構造物でも同様に発生している。（3章参照）。

集中腐食や塩害による損傷の結果、比較的短期間で構造物の大規模な補修が必要となる。これは定期的なメンテナンスを怠ったためで、著しい場合には、港湾管理者は、補修費のほかに補修期間中の施設の閉鎖による莫大な経済的損失を蒙る。このような経済的損失を避けるには、メンテナンス活動の組織的計画と予算措置を伴うライフサイクル管理 (LCM) が必要となる。日本では、20世紀後半に建設された構造物の老朽化が進み、21世紀には社会資本ストックの維持管理が重要な問題と認識され、最適な管理を行って所定の性能と安全性を保持し、財政負担を最小化する社会資本ストックの LCM の必要性が提唱されている。港湾の分野でも港湾構造物のストックが膨大であり（20数兆円ともいわれる）、これらストックの効率的な維持管理が重要な問題である。海外でも

腐食損傷の発生から、港湾構造物の維持管理の必要性が認識されている。

港湾構造物の LCM の必要性は各国共通であるから、国際航路協会の技術部会 WG31 で港湾構造物の LCM を検討した。本報では、PIANC PTC-II WG31 報告を参照して、2章 PIANC PTC-II WG31, 3章 海外における腐食損傷傾向, 4章 LCM サイクルとホールライフコストイング (WLC), 5章 WLC の適用例, 6章 LCM による維持管理例を紹介する。

2. PIANC PTC-II WG31

国際航路会議協会 (Permanent International Association of Navigation Congress : PIANC) は、近世以来、河川や運河を利用した内陸水運の発達したヨーロッパで、円滑かつ効率的な交通・交易のために国際間の協議が必要となり 1885 年に設立された団体で、国連の諮問機関にも指定されている。ベルギー国ブリュッセルに本部を置き、当初は内陸水路・内陸港を検討の対象としたが、1898 年から海洋港も検討の対象として扱うようになった。参加国は日本を含めて 67 か国である。各種委員会の中、必要テーマの研究活動を行う常設技術委員会 (Permanent Technical Committee : PTC) I, II がある。PTC-I は内陸水路及び内陸港を、PTC-II は海洋港を担当する。1999 年に国際航路会議協会から国際航路協会 (International Navigation Association) に改名され、同時に、PTC-II は MarCom (Marine Navigation Committee) に変更された。ただし、略称の PIANC はこれまで通り使用することになったので、ここでは、国際航路協会を従来通り PIANC と呼ぶことにする。

WG31 は PTC-II の 31 番目のワーキンググループで、

* 〒213-0011 川崎市高津区久本 3-6-1-401 (3-6-1-401, Hisamoto, Takatsuku, Kawasaki, 213-0011 Japan)

前期作業（1993～1998）では、港湾構造物の LCM を検討した。前期報告“港湾構造物の LCM：一般原理”³⁾は 1998 年に発刊され、その内容は、LCM の定義、LCM を行う理由、ホールライフコストイング (WLC)、LCM 実施の概要、LCM システムの設定と運用指針、推奨、ケーススタディ、参考文献である。後期作業（1998～2002）では、10 年前に発刊された WG17 報告（塩水環境における材料劣化：1990）を改訂した。後期報告（未刊）の内容は“港湾構造物の点検・維持・補修”⁴⁾である。後期報告では前期報告を LCM 報告という。本報でも同様に前期報告を LCM 報告と呼ぶことにする。なお、WG31 の構成は、11 か国 18 名である。

3. 海外における腐食損傷傾向

海外における港湾構造物の腐食による損傷傾向は、日本の港湾構造物の損傷傾向^{1), 2)}に類似している。すなわち、鋼構造物では、飛沫帯は飛沫帯腐食によって損傷し、平均干潮面直下付近では集中腐食が発生している。また、漂砂のある海域では海泥面に集中腐食が発生している。ヨーロッパでは、平均干潮面付近に発生する集中腐食を干潮面腐食 (low water level corrosion) と呼んでいる。また、海面上に暴露する鉄筋コンクリート部材では、塩害が発生している。

腐食による経済的損失は、例えば、構造物の維持管理を怠ったために補修が必要となり、補修費（直接費）2 万ドル、補修時の施設閉鎖による経済的損失（間接費）150 万ドルであった。施設閉鎖による大きな経済的損失の発生によって、当該港の関係者は改めて LCM の必要性を痛感した。

図 1 に、北西ヨーロッパ（イギリス・フランス・ベルギー・オランダ・ドイツ・デンマーク）において干潮面腐食が発生した港の位置（黒三角印）を示す⁵⁾。図 1 に示すように、干潮面腐食はヨーロッパ各国で発生している。このほか、干潮面付近における集中腐食はアメリカなどでも発生している。図 2 にスウェーデンにおける腐食調査港の位置を示す⁶⁾。スウェーデン各港における最大腐食速度は干潮面付近で 0.2 mm/yr～0.4 mm/yr であった。北欧では、干潮面腐食の発生因として、氷の接触や船のプロペラによる高流速 (1.5 m/s) の海水噴射などをあげている。これは、集中腐食の発生因が衝突・磨耗などによるさび層除去に依存することを示している。腐食調査港では、干潮面腐食によって発生した鋼矢板の穴が凸矢板の、例えば、角部にあき、穴から裏込め土砂が流出して空洞化した。このような現象は日本の鋼矢板構造物でも見られる。鋼矢板防砂堤では、漂砂により海泥面のさび層が除去された箇所での腐食速度は約 3 mm/yr で、9 mm 厚の鋼矢板が 3 年足らずで切断状態になった例がある⁷⁾。また、栈橋上部工の鉄筋コンクリート部材の塩害が各国で発生しており、塩害による損傷は港湾構造物損傷の一因である²⁾。

4. ライフサイクル管理 (LCM)

3 章に示すように、港湾構造物は腐食による損傷が不

図 1 北西ヨーロッパにおける干潮面腐食の発生位置

図 2 スウェーデンにおける腐食調査位置

可避であり、特に集中腐食による損傷が短期間で著しい。この結果、日本では、港湾鋼構造物は仮設物を除いて原則として技術基準に準拠して防食するように技術マニュアルが改訂された⁸⁾。一方、各国における港湾構造物の維持管理が十分に行われているとはいえず、むしろ構造物が損傷してから対策がとられている。また、維持管理や補修工事の際、公共施設の閉鎖はできるだけ避けることが望まれ、ライフサイクルコストを安くするには直接費（補修費合計）のコストダウンのほか、間接費（閉鎖に伴う損失費合計）をできるだけなくすることが必要である。これに対して、LCM システムの目的は、寿命期間を通じて港湾構造物の維持管理を容易にするために、費用対効果のある実用的なシステムをオーナーに提供することである。

LCM には、財政上・技術上・安全上の局面がある。

共プロジェクトの評価にB/C法が使用される。B(便益)とC(コスト)には、一般に、PW値が使用される。B/C法では、 $B/C > 1.0$ または $B/C = 1.0$ の場合、プロジェクトの建設は有意であると判定する。B/C法における社会便益の算定はコスト算定に比べて難しい。なお、B/C法での減価率は、日本における適用例では、一般に、4%を使用している。)

オーナーは、契約形式にかかわらず設計・建設の発注前に自分の要求をWLCによって明確にすることができる。従って、オーナーはWLCの検討を押し進め、検討するための資金を配分する必要がある。

技術者は、WLCに関係する項目の数量化が求められる。例えば、各種計画案のコスト比較、耐久性に関する比較設計、点検とメンテナンス、将来の施設撤去、短期部材の計画許容、性能プロファイルの明確化などである。また、メンテナンスマニュアルの整備も必要である。

LCMでは、公的または民間施設にかかわらず、メンテナンス管理が必要である。メンテナンス管理者の役割には、点検体制、補修・取替え計画、中期補修の予算化、耐久性に関するデータベース、廃棄または再建に対する長期計画などの検討がある。

5. WLCの適用例

LCM報告のWLC適用例は、新鉱山輸出栈橋の計画段階における二つの設計オプションのライフサイクルコストを比較する。単純化したオプションのパラメータは以下の通りである。

- ・環境：熱帯
- ・建設費：オプション1：\$12M
オプション2：\$18M
- ・鉱山の期待寿命：50年
- ・輸出する鉱石の商品価値は\$40/トンである。年間輸出高は0年～8年では8百万トン、9年～50年では12百万トンである。
- ・施設閉鎖による損失：0年～8年では\$1.84M、9年～50年では\$2.72Mである。
- ・メンテナンスコスト(\$M/年)：

年	オプション1	年	オプション2
0～7	0	0～12	0
8～14	1.5	13	2.5
15～19	1.0	18	2.0
20～27	0.2	23	2.5
28～34	0.5	28	2.5
35～39	0.2	33	2.0
40～44	1.0	38	2.0
45～50	0	43	2.5
		45～50	0

- ・係船岸の撤去費：オプション1：\$4M
オプション2：\$5M
- ・減価率：3%と8%

評価結果

- (1) オプション1, 2の現在価値コストを、図4(減価率3%)と図5(減価率8%)に示す。
- (2) ホールライフコストは、次の通り：

	減価率3%	減価率8%
オプション1	\$73M	\$36M
オプション2	\$36M	\$24M

この結果、減価率3%と8%ともオプション2の方が有利である。なお、ホールライフコスト差は、減価率3%に比べて減価率8%の方が接近している。

- (3) 従って、減価率8%では、パラメータの数値変化、または他のパラメータの導入によって選択が変わることが予想される。例えば、オプション1の熱帯環境(7年間補修の必要がない)を温帯環境(20年間補修の必要がない)と仮定して、これをオプション(1)とする。オプション(1)のホールライフコストは、次の通り：

	減価率3%	減価率8%
オプション(1)	\$41M	\$19M

ホールライフコストは、減価率8%ではオプション(1)の方が有利となる(図5参照)。

- (4) オプション2の施設閉鎖日数は、オプション1の施設閉鎖日数の約1/5である。減価率3%の時の直接費(補修費)と間接費(閉鎖に伴う損失)は、次の通り：

	直接費	間接費
オプション1	\$15.5M	\$45.7M
オプション2	\$8.5M	\$9.7M

ライフサイクルコストを減少するには、直接費のみでなく間接費が小さい工法が望ましい。

- (5) 栈橋の建設期間が鉱山開設の支配的要因であ

図4 オプション1, (1), 2の現在価値コスト(減価率3%)

図5 オプション1, (1), 2の現在価値コスト(減価率8%)

表1 点検プログラム（ストックホルム旧港）

岸壁 No.	岸壁長 (m)	目視点検		潜水点検		水深測量		TP・W		材料試験			注
		年	間隔 (年)	年	間隔 (年)	年	間隔 (年)	年	注	年			
										コ	鋼	木	
1	245	'98	10	'98	10	'98	10	'08	W	'08		'98	
2	127	'98	5	'98	5	'98	5	'98	TP ¹⁾			'98	1)控え工
3	167	'97	10	'97	10	'97	10	'98	TP ¹⁾				1)控え工
4	113	'97	10	'97	10	'97	10	'95	W	'95			
5	313	'96	5	'96	5	'96	10	'96	W	'96			
6	45	'96	10	'96	10	'96	10	'06	TP ¹⁾		'96 ²⁾		1)控え工 2)鋼矢板
7	430	'95	10	'95	10	'95	10	'05	W	'05			
8	112	'99	10	'99	10	'99	10	'95	TP ¹⁾				1)控え工
9	287	'96	5	'96	5	'01	10	'01	W	'01			
40	230	'04	10	'04	10	'04	10	'04	TP ¹⁾				1)控え工
	4,930*												

*4,930(m) = 調査岸壁全長

・表1と表2の岸壁No.1,2,3,8は同一。

・TP: 岸壁試験ピット W: 岸壁コンクリート床版上の舗装・瀝青絶縁試験

・材料試験の中, コ: コンクリート材, 鋼: 鋼材, 木: 木材を表す。

ば, 明らかに初期コストの安いオプション1が有利である。

6. 維持管理例—ストックホルム旧港³⁾

LCM システムで維持管理している港湾施設は少ない。WG31のLCM報告のケーススタディから, LCMシステムを適用しているストックホルム旧港の例を紹介する。

ストックホルム市は, ストックホルム旧港(北緯59°20', 東経18°04')の岸壁(約7km)を管理している。市の旧港維持管理の基本は, 商業施設としての重要性は低下したが, 安全性のほか, 堤防護岸, 都市造景計画, 歩行者道路, 駐車場, マリーナとして岸壁を維持することである。市は1986年～1988年に岸壁を調査し, 以後, LCMシステムを適用して定期点検, メンテナンス, 補修対策を実施している。

(1) LCM—初期段階

1) 背景

メンテナンス技術者が直面する典型的な事項は, 次の通り:

- 定期点検が行われていない。
- メンテナンス計画がない。
- メンテナンスコストに対する長期予算がない。
- メンテナンスに対する年間予算が少ない。
- 競合するメンテナンス工法の比較が難しい。

港運用者は, 管理する港湾構造物の技術・運用の状態およびメンテナンスコスト不足がもたらす問題を知る必要がある。このため, 意思決定者向けの現状説明資料が必要であり, LCMの実行には資金の長期予算化と配分が絶対条件である。

2) LCM組織: LCMは, 経験のある技術者グループによって行う。

(注3: LCM報告のLCM組織: メンテナンス部を設置してコンサルタント・大学・専門家の選抜名簿を準備し, 特別・大規模調査ではその協力を得る。名簿は定期的に更新する。メンテナンス部を

設置しない場合, メンテナンス・補修業務を資格のある専門業者に請負わせる。)

- データ収集とデータベース作成
 - 点検・調査・材料試験
 - 岸壁状態の技術的評価: 劣化度判定
 - 点検・メンテナンス・補修データの収集: 10年以内の所要メンテナンス対策リストを含む総合的評価
 - 意思決定プロセス: 意思決定者へ提案
- (2) LCM—実施段階

1) LCMの実施: 岸壁のLCMは, 市内の他の施設(橋・トンネル・擁壁・階段・デッキなど)を含む大規模LCMシステムの一部である。すなわち, 全体のLCM予算約13.5百万米ドル/年に対して, 岸壁のLCM予算はその中の0.7百万米ドル/年である。岸壁LCMは, 点検プログラム(10年), 作業プログラム(5年), 年間作業プログラム(1年)による。

2) 点検: 一般点検は全岸壁を対象に毎年行うが, 詳細点検が予定される岸壁は除く。一般点検は水面上の目視観察で, 年間コストは4,000米ドルである。変位と水準調査は, 沈下, 変位, 傾斜をチェックするために行い, 年間コストは8,000米ドルである。詳細点検は, 表1に準拠して5年または10年ごとに行う。詳細点検の内容は, 水面上下の近接目視観察, 水深測量, テストピットとウインドウ試験, コンクリート・鋼材・木材の材料試験, 荷重試験である。詳細点検データに基づく技術評価は, 安全性と支持力・メンテナンスの必要性・残存寿命の情報を与える。詳細点検プログラムは2年ごとに綿密に検討する。

3) 作業プログラム: メンテナンスと補修対策を実施するために, 作業プログラム(表2)を5年ごとに作成する。プログラムは詳細な毎年のプログラムに対する指標である。

4) 打合せとコスト: LCMグループの打合せを2か月ごとに行い, 各構造物の水準測量・点検・補

表2 作業プログラム(実行)(ストックホルム旧港)

岸壁 No.	メンテナンス費(千米ドル)					
	'91	'92	'93	'94	'95	'96
1		135			55	
2, 3	120	120			65	
8				160	15	
10					135	250
11		105	40			
12		40				
14		105	345			160
15	160			135	135	
16			25	575		15
20	345	55				
31			80	25		80
X*	40	135	80	55	55	65
合 計	665	695	570	950	460	570

X*: 計画, 設計, 入札, 管理

修などの問題処理結果や予算と比較した財政状態の検討を行う。1997年の年間予算は以下の通りである。

データ収集とデータベース作成	27,000
点検・調査・材料試験	53,000
管理・設計・入札	65,000
建設	535,000
合計	680,000 米ドル

7. お わ り に

膨大な社会資本ストックの維持管理には、ライフサイ

クルコストを最小にする LCM システムの適用, 例えば, 新設構造物については適切な防食と定期的な防食管理の実施, 既設構造物については適切な点検・防食・補修と定期的な防食管理の実施, が望まれる。

ストックホルム旧港の維持管理例に見られるように, LCM の実施には財政上の課題, 特に長期予算の策定が重要である。このためには, 港湾構造物の維持管理者に LCM の必要性及び経済性を十分に説明することが必要である。しかしながら, 港湾構造物の LCM はあまり行われていないようなので, 本報では, PTC-II WG31 の LCM 報告から関係事項を紹介した。“港湾構造物のライフサイクル管理”の啓蒙に参考となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 善 一章, 海水腐食, 防錆・防食技術便覧, 産業技術サービスセンター, pp.121~134 (2000).
- 2) 善 一章, 鋼構造物の防食・補修, 環境圏の新しい海岸工学, フジ・テクノシステム, p.1099 (1999).
- 3) PIANC PTC-II WG31, Life cycle management of port structures-General principles, International Navigation Association, Supplement to Bulletin no. 99, pp.1~47 (1998).
- 4) PIANC PTC-II WG31, Inspection, maintenance and repair of port structures, PIANC PTC-II WG31 Report-Revision 2002 (未刊).
- 5) PIANC PTC-II WG31 関係資料.
- 6) H. Klingenberg and H. Bergstrom, "Swedish Experience of Corrosion on Steel Sheet Piling Quays in the Baltic", Baltic Conference on Design, Construction and Maintenance of Harbour Structures, Swedish Geotechnical Institute, p.4 (1987).
- 7) C. W. Ross, *Corrosion*, 5 [10] 339 (1949).
- 8) 沿岸開発技術研究センター, 港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (改訂版), pp.1~371 (1997).

(2003年5月7日受理)