港湾構造物のライフサイクル管理-V

善 一 章*

* 国際航路協会 WG31 メンバー

Life Cycle Management of Port Structures - V

Kazuaki Zen*

* PIANC PTC-II WG31 Member

Cash flows are important in engineering economy since they form the basis for evaluating alternatives. The Present Worth (PW) method is popular because all future cash flows are converted into present dollars and makes it easy to determine the economic advantage of one alternative over another.

The PW is determined by using the equation $PW = FW(1+r)^{-N}$, where PW: present worth, FW: future worth, r : discount rate, N : compounding period. The factor $(1+r)^{-N}$ is known as the present worth factor. If discount rates remain constant at $r\%$ for the PW, FW, AW, all three values are equivalent. Hence, the AW and FW values can be easily computed for a project from the equivalent PW value.

In this report, the relationship between the PW factors and time for different rates, the examples of equivalence calculation of the FW and AW values from the PW value, and the examples of the application of the PW method to port structures are shown.

Key words: PW, FW, AW, PW method, cash flow, equivalence

1. 緒 言

キャッシュフローは、プロジェクトの経済評価の基礎をなすので、工学経済では重要である。プロジェクトの経済性を評価する方法にPW（現在価値）法、FW（将来価値）法、AW（年価値）法がある。この中、PW法は全ての将来キャッシュフローを現在ドルに変換するため一般的な評価法であり、PW法によって容易に経済評価ができる。

PW, AW, FW 間には、減価率が一定ならば等価の関係がある。等価の関係から、キャッシュフローを用いて求めたPWは容易にAW, FWに変換できる。

カムサール港鉦石栈橋の防食補修では、アウトフロー（流出）は建設費＋補修費＋閉鎖費、インフロー（流入）は施設撤去費（撤去材の市場価値）である。このケースでは、建設費、補修費、閉鎖費、撤去費を用いてPW法を適用し、鉦石栈橋の防食補修工法の経済性を比較した。なお、閉鎖費は補修時の栈橋閉鎖に伴う経済的損失である。

日本でもライフサイクル管理（LCM）についての関心が高まってきたので、WG31 報告¹⁾を参照して港湾構造物のLCMを示した²⁾⁻⁷⁾。この中、参考文献3) 4) 5) は、WG31 報告から港湾環境におけるLCMの指針、材料劣化と維持管理一般、木材劣化・点検・メンテナンス・補修を紹介した。また、港湾構造物の防食補修に関するキャッシュフローデータが少ないので、参考文献2) 6) 7) では、カムサール港の補修に関するキャッシュフローデータを利用して港湾構造物の防食補修に関するLCMを係数的に考察した。

本報の2章では、カムサール港のキャッシュフローデ

ータを使用してPW法の特性を係数的に検討し、3章では想定した防食材コスト比を用いて港湾鋼構造物の防食補修工法の経済比較を行った。

2. 現在価値（PW）法の特性

2.1 にPW法の基礎であるキャッシュフロー、2.2 に減価係数のPW法に及ぼす影響、2.3 にキャッシュフローを用いて算出したPWを等価の関係からAW, FWへ変換した例を示す。

2.1 キャッシュフロー

カムサール港鉦石栈橋の補修工法の選定にPW法が適用された。カムサール港では、キャッシュアウトフローの建設費、補修費、閉鎖費を正符号、キャッシュインフローの施設撤去費を負符号で表した¹⁾。ただし、例えば、構造物撤去後に環境汚染のため環境回復に投資するコストが撤去施設の市場価値を上回る場合、撤去費も正符号となる。キャッシュアウトフローを正符号、キャッシュインフローを負符号とする場合、トータルコストのPW値が正符号であることは支出費＞流出費を意味するので、累積PW値の小さい補修工法が経済的である。カムサール港ではトータルコストが小さい補修工法が選択された。カムサール港の例のように、PW法の適用にはキャッシュフローが必要である。

2.2 減価係数のPW法に及ぼす影響

PW法は(1)式で示される。

$$PW = FW(1+r)^{-N} \\ = FW(P/F, r, N) \quad (1)$$

ここで、PW：現在価値、FW：将来価値、 r ：減価率

N ：複利期間、 $(1+r)^{-N}$ ：現在価値係数、

$(P/F, r, N)$ ：現在価値係数の函数記号。

図1に、 $r=3\%$, 8% , $N=50$ 年の時の現在価値係数の経

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

図1 現在価値係数の経年変化 (減価率 A: 3%, B: 8%)

年変化を示す。図1に示すように、現在価値係数は経年とともに低減し、低減の程度は減価率の大きいほど著しい。すなわち、減価率が大きいほど長期的には減価率のトータルコストへの影響が無視できるようになる。図1の傾向は、防食補修工法の特성에応じて初期に多く投資するかメンテナンス費を後年に回すかを判断するオーナーに参考となる。

カムサール港の補修工法案にはオプション1 (初期投資が小) とオプション2 (初期投資が大) があり、PW法を用いてトータルコストが小さいオプション2が補修工法に選定された(表1参照)。減価係数に含まれる減価率 r は、PW法の適用上重要なパラメーターの一つで、MARR (合理的収益率)⁶⁾ またはプロジェクトに対するハードル率ともいわれる。言い換えると、選定するプロジェクトは、選定されないプロジェクト以上の収益が期待される。MARR値は、一般に、プロジェクトのための資本利子にオーナーの判断で利潤やリスクを加算した値に設定される。

カムサール港の補修工法オプション1とオプション2のPW法によるトータルコストの比較の条件及び結果は、表1の通りである。図1から、初期投資を減額してメンテナンス費を後年に回す工法が経済的と推察される。しかし、カムサール港の補修例では、補修回数がオプション1の37回からオプション2の7回に激減した。このため、オプション2は初期投資を増額してもメンテナンス費の減額程度が著しいので、PWは減価率3%、8%とも減少した。この結果、オプション2が初期投資を増額したにもかかわらずに選定された。このように初期投資の大きいオプション2の方が有利になったのは、オプション1では、初期投資 (\$M12) に比べてメンテナンス費 (\$M120.5) が約10倍大きいことによる。本来、初期投資を減少させることが経済的であるが、カムサール港のように、初期投資を増加させてもメンテナンス費を著しく減少させる工法の方が経済的であるケースもある。従って、港湾構造物のLCMには立地条件及び工法の特長によって制約があるので、PW法の適用に当たってはメンテナンスの方法とコストの比較検討が必要である。

トータルコストのPW値算出に対する初期投資と撤去費の影響を比較するために、表1のオプション2について初期投資と撤

去費を変化させてみる。オプション2について、初期投資のみを2倍にしたケースをオプション2'、撤去費のみを2倍にしたケースをオプション2''とする。表2に、オプション2, 2', 2''のコストの内訳とトータルコストのPW値を示す。

表2に見られるように、減価率3%、8%ともオプションの経済性は $2 > 2'' > 2'$ の順序である。初期投資の増加によるトータルコストのPW変化は、オプション2'では約1.22倍 (減価率3%)、1.75倍 (減価率8%) に増加するのに対して、撤去費の増加によるトータルコストのPW変化は、オプション2''では1.03倍 (減価率3%)、1.004倍 (減価率8%) と非常に小さい。これは、撤去費は最終年に発生するため、図1に示すように経年とともに減価係数が減少して50年後の減価係数は0.2281 (減価率3%)、0.0213 (減価率8%) となることによる。これに対して、初期投資のコストは低減しないでそのままPW値に加算されるので、トータルコストへの影響が大きい。

2.3 経済的等価

プロジェクトのAW, PW, FW間には、次の関係がある。

$$AW = PW(A/P, r, N) = FW(A/F, r, N) \quad (2)$$

すなわち、同じ減価率 ($r\%$) ならば、AW, PW, FW 3者は等価である。なお、 $(A/P, r, N)$ 、 $(A/F, r, N)$ は次の通り：

$$(A/P, r, N) = [r(1+r)^N] / [(1+r)^N - 1]$$

$$(A/F, r, N) = r / [(1+r)^N - 1]$$

前報⁷⁾の3章 (異なる寿命のオプションに対するPW法とAW法の適用例) を用いて(2)式の関係を示す。3章のオプション1は初期投資(\$20,000)、補修費(\$/年)5,000、期間(年)6であり、オプション2は初期投資(\$30,000)、補修費(\$3,000、期間(年)9である。この例では、オプション1とオプション2の期間Nが異なるので、PW値の算出には期間Nを6年と9年の最小公倍数の18年を用い、AW値の算出には最初の1サイクル (6年) を用いた。減価率10%として、オプション1のPW₁、AW₁は次の通り：

$$\begin{aligned} PW_1 &= 20,000 + 20,000[(P/F, 10\%, 6) \\ &\quad + (P/F, 10\%, 12)] + 5,000(P/A, 10\%, 18) \\ &= \$78,669 \end{aligned} \quad (3)$$

表1 カムサール港鉤石栈橋へのPW法の適用

オプション	初期投資 (\$M)	メンテナンス費 (\$M)			撤去費 (\$M)	PW(\$M)	
		補修費	閉鎖費	合計		減価率 3%	減価率 8%
1	12	26.6	93.9	120.5	4	73	36
2	18	16	20.7	36.7	5	36	24

表2 オプション2, 2', 2''のトータルコストのPW

オプション	初期投資 (\$M)	メンテナンス費 (\$M)	撤去費 (\$M)	PW (\$M)	
				減価率 3%	減価率 8%
2	18	36.7	5	36.1	23.9
2'	36	36.7	5	44.1	41.9
2''	18	36.7	10	37.3	24.0

$$AW_1 = 20,000(A/P, 10\%, 6) + 5,000 = \$9,592 \quad (4)$$

(2)式のPWとAWの関係から、 $N=18$ 年として AW_1 を求めると、次の通り：

$$\begin{aligned} AW_1 &= PW_1(A/P, r, N) \\ &= 78,669(A/P, 10\%, 18) = 78,669(0.12193) \\ &= \$9,592 \end{aligned} \quad (5)$$

すなわち、(5)式から求めた AW_1 は(4)式から求めた AW_1 と等しいので、1サイクル(6年)について求めた AW_1 と $N=18$ 年について求めた PW_1 は等価である。

また(2)式の FW_1 と AW_1 の等価関係から、先ず(6)式で FW_1 を求め、次に(7)式から AW_1 を求めると、次の通り：

$$\begin{aligned} FW_1 &= PW_1(F/P, 10\%, 18) \\ &= 78,669(5.5599) = \$437,392 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} AW_1 &= FW_1(A/F, 10\%, 18) \\ &= 437,392(0.02193) = \$9,592 \end{aligned} \quad (7)$$

(5)式から求めた AW_1 と(7)式から求めた AW_1 は等しい。従って、 AW_1 と FW_1 は等価である。

3. 港湾構造物へのPW法の適用例

設計寿命50年の港湾鋼構造物を耐久寿命の異なる防食材で防食補修するケースの経済比較にPW法を適用する。耐久寿命50年、30年、20年、10年の防食材を、50年材、30年材、20年材、10年材といい、50年間の防食補修は、50年材単独、または30年材、20年材、10年材の組合せで行う(表3参照)。50年間の防食補修費＝防食費＋補修費＋閉鎖費とする。同一年材については、防食費＝防食材費＋取付け費、補修費＝防食材費＋更新費で、防食材取付け費＝防食材更新費、防食費＝補修費とする。単位防食面積当たりの各年材の防食費(＝補修費)は、50年材を基準として50年材：30年材：20年材：10年材＝1.0：0.70：0.45：0.25とする。なお、50年間の定期点検費は0とする。

閉鎖費が0のケースを3.1に、閉鎖費が0でないケースを3.2に述べる。

3.1 防食工法の経済比較(閉鎖費が0のケース)

3.1で使用する防食工法の内訳を表3に示す。A工法は50年材を初期に取り付けて途中の補修は行わない。B工法は30年材を初期に取り付けて30年後に20年材を取り付ける。C工法は初期に10年材を取り付け、以後10年ごとに10年材を4回更新する。表3では、A工法の防食材タイプをA50、B工法の防食材タイプをB30-20、C工法の防食材タイプをC10-10-10-10-10とする。防食工法A、B、Cによる50年間防食補修の総コストをPW法で比較した。その結果を表4に示す。

表4から、減価率3%、8%とも防食補修工法の経済性

表3 比較防食工法の内訳

防食工法	防食材タイプ	補修回数(回)	防食補修費
A	A50	0	(50年材費＋取付け費)
B	B30-20	1	(30年材費＋取付け費)＋(20年材費＋更新費)
C	C10-10-10-10-10	1	(10年材費＋取付け費)＋(10年材費＋更新費)×4

表4 防食工法の総コスト比

防食工法	総コスト比	
	減価率3%	減価率8%
A	1.00	1.00
B	0.88	0.74
C	0.75	0.45

図2 防食工法による総コスト比較(減価率3%)
A：50年材，B：30-20年材，C：10年材

図3 防食工法による総コスト比較(減価率8%)
A：50年材，B：30-20年材，C：10年材

はC工法>B工法>A工法の順序である。50年間の総コストの経年変化を図2(減価率3%)、図3(減価率8%)に示す。A工法は初期に全額投資するのに対して、B、C工法は防食費を分散投資するので、B、C工法の総コストはA工法の総コストより小さい。

B工法では防食材タイプB30-20(初期に30年材、30年後に20年材)を使用するが、初期に20年材、20年後に30年材を使用する防食材タイプをB20-30とする。防食材タイプB20-30を使用する防食工法をB'として、B工法とB'工法の経済性を比較すると、表5の通りである。表5でも図1に示す傾向が見られる。すなわち、B30-20タイプとB20-30タイプを使用するとき、コストの安い防食材(20年材)を先に使用するB'工法がコストの高い防食材(30年材)を先に使用するB工法より経済的である。

もしお金の時間価値を無視すると、A工法、B工法、B'工法、C工法の総コストは、A工法1.0、B工法1.15、B'工法1.15、C工法1.25となるが、工学経済の基本はお金の時間価値を考慮することである。従って、LCMを行うに当たって、お金の利子が付くことを認識することが必要である。本報では、港湾構造物

表5 30-20年タイプと20-30年タイプによるPW比

防食工法	防食材タイプ	PW比	
		減価率3%	減価率8%
B	B30-20	0.88	0.74
B'	B20-30	0.83	0.60

の防食補修工法の経済評価にPW法を使用した、公共部門プロジェクトの経済評価を行うB(便益)/C(コスト)分析においてもPW法を使用する²⁾。

3.2 防食工法の経済比較 (閉鎖費が0でないケース)

2.2のカムサール港の補修例では、閉鎖費のトータルコストに及ぼす影響が大きい。ここでは補修に伴う施設の閉鎖が0でない場合の例として、3.1のC工法について防食補修費に閉鎖費を加算したケースを検討する。

表1では、補修費：閉鎖費は、オプション1(毎年補修)では1:3.5、オプション2(補修間隔10~20年)では1:1.3である。このように補修間隔が長くなるにつれて工法の改良に伴って閉鎖費が減少する傾向である。ここでは補修サイクルが10年と長いので、補修費：閉鎖費=R(Repair):S(Shutdown)=1:2.6~1:0の範囲で比較する。C工法のトータルコストのPW値を表6に示す。

3.1閉鎖費が0の場合、C工法はA工法より減価率が3%、8%とも経済的であったが、閉鎖費が0でない場合、R:S比によってC工法の経済性は制約を受ける。すなわち、減価率3%ではR:Sが1:0.5以下、減価率8%では1:2.6以下ではC工法はA工法より経済的である。表6からも補修時に施設の閉鎖を必要としない防食補修工法が経済的であることが再認識される。

4. 結 論

上記から、以下のことが言える。

- (1) PW法を適用するにはプロジェクトのキャッシュフローが必要である。
- (2) 減価率(r%)が一定ならば、PW, AW, FWは等価であるのでPWからAW, FWが容易に求められる。
- (3) PW法を適用する場合、一般に初期投資を少なくしてメンテナンス費を後期に回す工法が経済的である。この傾向は減価率が大きいほど著しい。
- (4) 防食補修工法の経済性を改善するには、工法適用時に施設閉鎖による経済的損失を伴わないことが望まし

表6 トータルコスト比に及ぼす閉鎖費の影響

減価率 (%)	C10-10-10-10-10のPW比				
	R:S				
	1:2.6	1:2	1:1	1:0.5	1:0
3	2.06	1.76	1.26	1.00	0.75
8	0.99	0.87	0.66	0.55	0.45

い。

(5) 閉鎖費が0の場合：50年寿命の港湾鋼構造物の防食補修にA工法(防食材タイプA50)、B工法(防食材タイプB30-20)、B'工法(防食材タイプB20-30)、C工法(防食材タイプC10-10-10-10-10)を適用する場合、経済性はC工法>B'工法>B工法>A工法の順に優れる。(ただし、単位面積当りの防食費(防食材費+取付け費または更新費)は、50年材:30年材:20年材:10年材=1.0:0.70:0.45:0.25とする。)

(6) 閉鎖費が0でない場合：50年寿命の港湾鋼構造物の防食補修に(5)のC工法を適用する場合、閉鎖費が補修費の0.5倍以下(減価率3%)または2.6倍以下(減価率8%)まではC工法はA工法(50年材)より経済的である。

(7) 港湾構造物では台風などによる予期できない異常事態の発生が不可避であるから、50年寿命の施設に適用する防食補修工法の点検が必要である。50年材の防食工法より経済的な10年材の防食工法は、少なくとも10年サイクルの防食材取替え時に点検が確実に行われる利点もある。

謝 辞

最後に、国際航路協会(PIANC)ならびにカムサール港補修資料をWG31に提出された英国委員、故Dr. Ronald Westに感謝します。

参 考 文 献

- 1) PIANC PTC-II WG31, Life cycle management of port structures - General principles, International Navigation Association, Supplement to Bulletin no. 99, pp.1-47(1998).
- 2) K. Zen, *Zairyo-to-Kankyo*, 52, 574 (2003).
- 3) K. Zen, *Zairyo-to-Kankyo*, 54, 136 (2005).
- 4) K. Zen, *Zairyo-to-Kankyo*, 54, 470 (2005).
- 5) K. Zen, *Zairyo-to-Kankyo*, 54, 554 (2005).
- 6) K. Zen, *Zairyo-to-Kankyo*, 56, 505 (2007).
- 7) K. Zen, *Zairyo-to-Kankyo*, 58, 82 (2009).

(2010年9月14日受理)

要 旨

キャッシュフローは、案評価をするための基礎を形成するので工学経済において重要である。現在価値法は、全ての将来キャッシュフローを現在のドルに変換するので一般的であり、他の案と比べて優れる1案の経済的有利な点を容易に決定する。現在価値は、 $PW = FW(1+r)^{-N}$ 式から求められる；ここで、PW:現在価値、FW:将来価値、r:減価率、N:複利期間。係数 $(1+r)^{-N}$ は現在価値係数として知られる。もし減価率がr%でPW, FW, AWに対して一定ならば、3者は等価である。従って、プロジェクトのAW値とFW値は等価のPW値から容易に求められる。

本報では、異なる減価係数における現在価値係数の経時変化、PW値からFW値とAW値の等価計算例、PW法の港湾構造物への適用例を示す。

キーワード 現在価値, 将来価値, 年価値, 現在価値法, キャッシュフロー, 等価