

性能照査指標およびAHP手法による港湾構造物 の総合評価方法

A SYNTHETIC EVALUATION METHOD FOR PORT FACILITY STRUCTURES USING AHP MODEL AND PERFORMANCE INDICES

関口信一郎¹・宮部 秀一²・岸 哲也³
Shin-ichiro SEKIGUCHI, Syuichi MIYABE, Tetsuya KISHI

¹正会員 工博 北海道開発局開発環境課 (〒060-8511 札幌市北区北八条西二丁目)

²正会員 北海道開発局小樽開発建設部小樽港湾建設事務所 (〒047-0008 小樽市築港二番二号)

³正会員 北海道開発局帯広開発建設部帯広道路事務所 (〒089-0536 中川郡幕別町札内西町73-6)

In general, the plannings of infrastructures require evaluation in every aspect. However, for decades, the construction cost has been used exclusively as a sole means of measuring structural performances. One criterion is not sufficient for evaluating the structure under the complex conditions.

The main objective of this paper is to develop an appropriate evaluation method for the structures of port facilities. The evaluation method proposed herein uses AHP (Analytic Hierarchy Process) model and performance indices. An AHP model is suitable for evaluating both qualitative and quantitative data. The performance indices are used for evaluation criteria and the rationale for weighting, when using the AHP model. The proposed model is applicable for evaluating performances of any infrastructures.

Key Words : performance indices, AHP model, structure of port facilities

1. はじめに

与えられた設計条件に対して最適な港湾構造物を採用するための評価手法としては、建設コストを指標として評価するのが一般的である。また近年、環境や景観等が重視されるに伴って、構造物のライフサイクルを考慮しその間に発生する環境負荷としてCO₂やNO_xなどを指標としたり、それを貨幣換算して評価する方法等も開発されている¹⁾。

しかし環境や財政の制約下において、環境負荷を低減し、増大が予想される維持管理費を確保しながら、豊かで住みよい社会を形成していくための社会基盤整備を行うためには、建設コストや環境負荷のような単一の評価項目によるのではなく、考慮すべき項目を網羅した上で候補となる構造物を評価・決定していくことが求められる。

本論文では、総合的に構造物を評価する方法として、性能照査型設計に用いる照査指標を評価指標とし要求される性能を満足していることを確認した上で、最も重要な評価項目についてAHP手法(階層分析法)を用いて評価する方法を提案する。本評価方法において設計照査指標およびAHP手法を用いる利点は以下の通りである。

最近の設計法の動向として、構造物への要求を具

体的に設定し、それに対応する性能項目及び照査基準を設定してこれを満足するように設計する性能照査型設計に移行しつつある。その最も特徴的な点は、構造物に要求される性能(要求性能)を明確にするとともに、これまで別々に扱われてきた構造設計、材料、施工および維持管理を総合的に扱い、相互にフィードバックを可能にすることにある。

構造物の評価に性能照査型設計と共通の照査指標を用いることにより、構造物の計画・設計・施工・維持管理と評価が共通の理念と尺度によって体系的に行うことができる。

また、AHP手法によって景観のような質的情報も、指標値のような数値的情報と同様に定量化して処理できる。

本論文においては港湾構造物を対象としているが、評価指標を適切に選択することにより土木構造物全体に適用可能である。

2. AHP手法と評価項目・評価指標

(1) 港湾構造物における評価項目及び評価指標

性能照査型設計における要求性能の項目としては、安全性、使用性、耐久性、施工性、環境性の他、災害を受けた際の復旧性などが考えられる。

採択する構造物を評価する場合、性能照査型設計の照査指標に対応するものを評価指標と呼ぶことにする。

環境負荷については、大気汚染の軽減や地球温暖化の防止の指標としてNOx、CO₂排出量や消費エネルギー量を用いて環境負荷評価を試みる研究があるが、①前提条件の設定の適否②将来推定における不確実性の扱い等に問題があること③鉄筋コンクリート構造物のライフサイクルを考慮したCO₂排出量の多くは鉄筋およびコンクリートの製造時に発生すること¹⁾から、本論文では環境負荷の指標としてCO₂排出量に代えて資材使用量を指標として使用する。それによって、排出されるCO₂の相対的量の他、使用資材や廃棄物の量の低減も考慮できる。

(2) AHP手法

本手法による分析の手順は以下のとおりである。
①分析に必要な要素を階層構造化して整理する。本論文においては、最適構造物の決定—評価項目—代替案という階層構造になる。
②各階層の要素を一对比較しながら上位レベルの要素に対する重み付けを行う。各要素の重みは要素の一对比較マトリックスの最大固有値と正規化された固有ベクトルを求めることによって得られる。固有ベクトルは各要素の重みベクトルである。

最適構造物の決定に対する評価項目の重みベクトルをW、m個の評価項目から見た代替案の重みベクトルをW₁、W₂、...、W_mとすると、代替案の総合的な重みベクトルXは式(2.1)で表され、最終目的である代替案の順位付けができる。

$$X = [W_1 W_2 \dots W_m] W \quad (2.1)$$

一对比較を行う回答者は、答えに一貫性を求められる。整合度指数C. I. は答えの一貫性を表す尺度であり、式(2.2)で表される。本論文の事例ではC. I. が0.1以下のとき一对比較の回答に整合性を有することとした²⁾。

$$C. I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2.2)$$

ここに、λ_{max}は一对比較マトリックスの最大固有値、nは要素数である。

3. 評価方法

評価の手順は以下による。

- ①評価項目ごとに評価指標を設定する。評価指標は複数でも良い。
- ②評価指標値を算定する。定性的なデータは文章あるいは図・写真にする。
- ③評価指標ごとに採択基準値を設定し、各構造物ごとに全ての指標が採択基準を上回っていることを確認する。採択基準を下回っている場合は、当該構造物を除外する。
- ④最重要の評価項目の指標（指標化できない場合は、定性的文章あるいは図・写真等）を選定し、AHP手法

によって重み付けを行い、最も値の高い構造物を採択する。

4. 評価事例

(1) 評価項目・評価指標の設定

表-1の設計条件に対して防波堤構造を決定するための評価を行った。対象とした構造は、消波ブロックによって被覆したケーソン堤（消波ブロック被覆堤）、直立消波ケーソン堤、斜面スリットケーソン堤³⁾の3種である（図-1参照）。

防波堤構造を決定するために用いる評価項目および評価指標を表-2に整理した。

表-1 設計条件

	項目	数値
設計波	最大波高(Hmax)	12.0m
	有義波高(H1/3)	7.0m
	周期(T0)	10.5sec
	入射角(β)	0°
潮位	潮位(H.W.L.)	+1.5m
	海底勾配	1/50
地形	現地盤高	-14.7m
	マウンド高	-12.0m

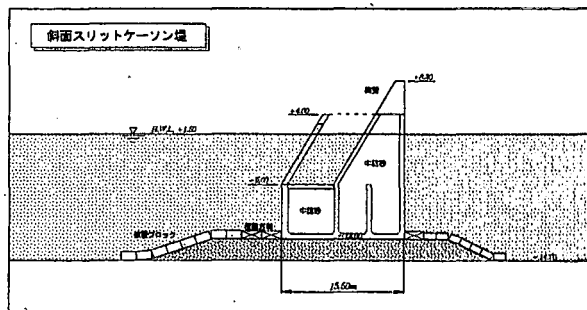
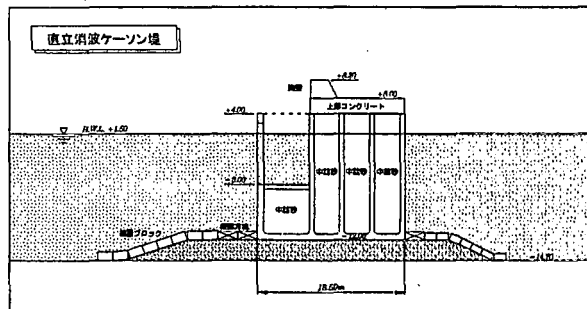
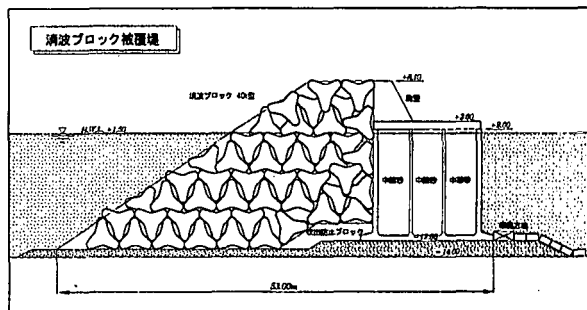


図-1 防波堤の構造形式

表一 2 防波堤の評価表

評価項目		評価指標	消波ブロック被覆堤	直立消波ケソン堤	斜面スリットケソン堤
安全性	耐用期間中(50年)に作用する設計外力に対し、所定の限界状態を満足すること。	現在のところは安全率により検討(堤体、部材、マウンド)	共 通		
使用性	耐用期間中に作用する波に対し、港外の反射波および港内の静穏度が所定の状態を満足すること。	反射率 波高伝達率	0.3 0.1	0.4 0.1	0.4 0.1
耐久性 (維持管理含)	耐用期間中、堤体およびマウンドの品質が確保され、防波堤の機能が保持されていること。	耐久性保持期間(鉄筋が錆び始めるまでの期間)注)	5 6年	5 6年	1 0 3年
施工性	施工速度が速く、安全性が高く、施工誤差が小さく、かつ施工欠陥がでにくいこと。	施工日数 (函据付2日とする)	7 6日	8 8日	5 1日
復旧性 環境性	被災後の機能回復工事が容易であること。 地球温暖化防止 海洋への負荷(海面消失面積)	使用資材量 (m当り) 鉄筋コンクリート(m ³) 中詰砂(m ³) 捨石量(m ³) 海面占有幅(m)	157.3 151 82.8 53.0	60.1 136 76 18.5	36.9 116 70 15.5
経済性 景観	建設コストが安く、効果を早く発現できる。	建設費(千円/m)	12,629	9,328	9,078

注) 鉄筋位置でのコンクリート塩化物イオン濃度が1.2kg/m³に達する時間、鉄筋かぶり100mm。
普通ポルトランドセメント。w/c=50%として一次元FEM解析による

安全性については、評価指標は現行設計法によるため設定できないが、性能照査型設計によった場合はすべて重力式防波堤であるため評価指標は共通となる。

使用性の評価項目は、小型船が航行できる波高に対する反射性および荒天時における港内の静穏性とする。評価指標は、各々反射率および波高伝達率とする。

耐久性の評価項目は、堤体本体およびマウンドの耐久性、消波ブロックの機能維持性である。現行設計法では、照査指標を設定しておらず、維持管理については耐用期間中機能が維持できるものとして考慮していない。

施工性の評価項目は、施工効率性および施工確実性(施工管理の容易性)である。評価指標は施工日数とする。

復旧性の評価項目は、想定される被災とそれに対する復旧の容易さである。本事例では評価していない。

環境性の評価指標は、①生態系および地形への配慮として、漂砂および反射波の影響、②防波堤設置による海面消失、③建設に投入する資材の量および廃棄物となる量等が考えられる。本事例においては、漂砂および反射波による影響のないことが調査でわかっているため、最も影響が大きい③を評価指標に設定した。

景観については景観創出、周辺景観との調和という視点から写真あるいはCG等によって相対評価する。

経済性の評価指標として、建設コストあるいはライフサイクルを考慮した建設と維持管理を合わせたコストが考えられるが、防波堤の場合は前者を評価指標とした。

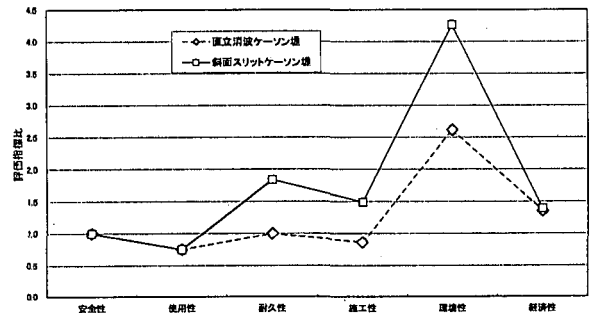
(2) 基準となる評価指標値の設定

以上から評価表を作成すると、表一2のように整理できる。当該事例の設計条件に対しては消波ブロック被覆堤を採用するのが一般的であるので、各評価項目ごとに消波ブロック被覆堤の評価指標値を基準として、他のタイプの評価指標値を除き図に整理する(図一2)。その場合、使用性・施工性・環境

性・経済性については、評価指標値が小さい程優れていることになり一見して優劣を判断しにくいので、逆数を取り、評価指標値が高い程、評価が優れているように再整理した。

図一2により、使用性(反射率)を除いた全項目について、基準値とした消波ブロック被覆堤の評価指標値を上回っている。小船が当該防波堤近傍を通過する限界の波高として、反射率を直立消波の程度に押さえることを条件とすると、3タイプの防波堤は全ての評価項目において基準とする条件を満足していることが確認できる。

建設コストのみに着目した場合は、斜面スリットケソン堤が最も経済的であるが、直立消波ケソン堤と斜面スリットケソン堤の値が近似しており、この段階の精度ではいずれの堤が採用されても大差がない。



図一 2 消波ブロック被覆堤を基準とした評価指標比

(3) AHP手法による評価項目の対比較

次の段階は、その地域の実情を考慮して重要な評価項目を選定し、AHP手法によって最適な構造を決定することである。要素の階層構造を図一3に示す。

ここで、耐久性、施工性、環境性、経済性、景観を最重要評価項目に選定する。

次に各評価項目の対比較を行い評価項目間の重み付けをする(表一3(a))。点数(重要度の尺度)は文献2)によった。評価項目間の重みベクトル(耐久性、施工性、環境性、経済性、景観)は(0.286, 0.258, 0.119, 0.286, 0.051)となった。回

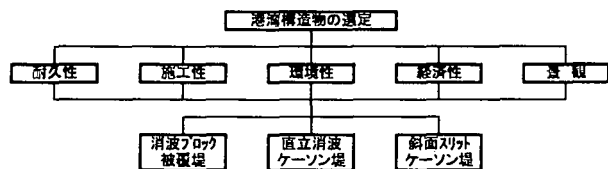


図-3 港湾構造物選定における階層構造

表-3(a) AHP手法による評価項目の一対比較

a \ b	耐久性	施工性	環境性	経済性	景観
耐久性	1	1	3	1	5
施工性	1	1	3	1	3
環境性	1/3	1/3	1	1/3	5
経済性	1	1	3	1	5
景観	1/5	1/3	1/5	1/5	1

※空欄に点数を記入すること。 $\lambda_{max}=5.226$ C.I.=0.057

注) 点数

- 5 : aの方がbより重要 1/5 : aよりもbの方が重要
- 3 : aの方がbよりやや重要 1/3 : aよりもbの方がやや重要
- 1 : 両者は同じくらい重要

表-3(b) 環境性に関する3タイプの一対比較

	消波ブロック被覆堤	直立消波ケーソン堤	斜面スリットケーソン堤
消波ブロック被覆堤	1	1/3	1/5
直立消波ケーソン堤	3	1	1/3
斜面スリットケーソン堤	5	3	1

$\lambda_{max}=3.037$ C.I.=0.019

答者は耐久性および施工性を重視し環境にはあまり配慮していない結果となっている。防波堤の建設場所は水深が深く波浪が大きいことから、堅固な構造物を安全に効率よく建設することが、より重要であると判断した結果であると思われる。

さらに、表-2あるいは図-2を参考にして、評価項目ごとに3タイプの防波堤の重み付けを行う。景観については、写真を用いて重み付けを行った。

環境性に対する3タイプの防波堤の一対比較マトリックスを表-3(b)に示す。重みベクトル(消波ブロック被覆堤, 直立消波ケーソン堤, 斜面スリットケーソン堤)は(0.105, 0.258, 0.637)となり、斜面スリットケーソン堤の評価が高い。

本事例においては設計の専門家が各評価項目の一対比較を行ったが、構造物の選定委員会あるいは地域住民のアンケートによって評価する方法なども考えられる。説明責任の観点から、いずれの方法を採用した場合でも、そのプロセスおよび結果を公表することを前提とする。

表-4 AHP手法による防波堤構造の重み付け

		耐久性	施工性	環境性	経済性	景観
	重み	0.286	0.258	0.119	0.286	0.051
消波ブロック被覆堤	③ 0.111	0.143	0.105	0.105	0.091	0.105
直立消波ケーソン堤	② 0.282	0.143	0.258	0.258	0.455	0.258
斜面スリットケーソン堤	① 0.606	0.714	0.637	0.637	0.455	0.637

注) ○の数値は順位

これらの重み付けの結果を用い、式(2.1)によって防波堤の総合評価を行った。計算結果を表-4に示す。同表は各評価項目から見た3タイプの防波堤の重み付けの数値および階層全体の重み付けによる各代替案の順位を示している。

斜面スリットケーソン堤が全ての評価項目で数値が高い。続いて直立消波堤, 消波ブロック被覆堤の順になっており、斜面スリットケーソン堤が採用される。

(4) 考察

AHP手法は質的なものも含め、評価の尺度が多数ある問題に対して、それを階層構造に分解し要素の一対比較を重ねていって全体的な評価を行うもので、システムアプローチと主観的判断の組み合わせより構成される。評価手法によってこれまで組織的に取り上げにくかった勘や経験を生かした意志決定ができる利点がある²⁾。その場合でも、できるだけ客観的・論理的なアプローチが望ましい。本論文では客観性・論理性を確保するため、各評価項目に関する3タイプの防波堤の重み付けの根拠を評価指標に求めている。本事例において、安全性について性能照査が可能になれば、さらに精緻な検討が可能となる。一方、耐久性、環境性、景観などの評価項目については共通の尺度がなく、時代、地域主体等によっても重みが増えるため、その重み付けについてはひとりあるいは複数の意志決定者の主観的判断によらざるを得ない。その場合は重み付けを明らかにして、透明性を確保することによって恣意的判断を牽制することが可能である。

5. 結論

本論文の目標は今日的課題に対応できる構造物の総合的評価手法の確立であり、そのための課題は各評価項目間の重み付けとその総合化である。まず評価項目ごとに要求される水準を各構造物が満たしていることを確認した上で、最重要の評価項目を選定しAHP手法によって評価・採択する方法を提案した。

事例で述べたように、建設コストのみを尺度とした評価手法では多面的な評価が出来ないが、本論文において提案した手法を用いる場合は、評価指標が異なり質的情報が混じる場合であっても、総合的かつ定量的な順位付けが可能となる。また、当然のことながら両手法では結論が相違する場合がある。

社会基盤の維持管理が重要になり環境面での制約

が強くなる中での施設整備について、ひとつの基本的な評価手法を提示できた。

AHP手法を用いる場合は、互いに独立性の高い要素を選ぶ必要がある。一方、分析しようとする問題が複雑になるにしたがって、要素間の独立性および回答の整合性を確保することが難しくなる。たとえば今後の港湾整備の課題のひとつとして、コンテナ船の大型化が急で整備・改良の時期が予測できないコンテナ岸壁の整備のあり方がある⁵⁾。本論文において提示した評価方法を、このような複雑な問題に対応できるように拡張するためには、AHP手法に内在する上記の課題を解決する必要がある。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ，No44，pp. I-20-I-38，2002.
- 2) 木下栄三：AHP手法と応用技術，総合技術センター，pp. 11-36，1993.
- 3) 関口信一郎，渥美洋一，中内勲，福士昌哉，三輪俊彦：斜面スリットケーソンの開発，土木学会海洋開発論文集，No15，pp. 487-492，2000.
- 4) (社) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，コンクリート技術シリーズ，No26，pp. 3-12，1997.
- 5) 松淵知，横田弘：係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意志決定支援システム構築に関する基礎的研究，港湾技術研究所報告，第38巻第12号，pp. 423-473，1999.