

環境性・耐久性・経済性に優れた 斜面スリットケーソン堤の開発

関口 信一郎

SEKIGUCHI Shin-ichiro

正会員 工博

国土交通省北海道開発局 室蘭開発建設部長

窪内 篤

KUBOUCHI Atsushi

正会員

(独)北海道開発土木研究所 環境水工部港湾研究室長

1999年、大水深高波浪海域に適用する防波堤として斜面スリットケーソンを製作した。翌年から津軽海峡を臨む福島漁港において現地計測を行うとともに、一般化のための水理実験および設計・施工方法の検討を行ってきた(図-1)。防波堤に求められる性能を限界まで追求することによって達成された、環境負荷が小さく耐久性・施工性・経済性に優れた斜面スリットケーソン堤の概要を紹介する。

大水深高波浪に適用する要件を備えることを実証

大水深高波浪の海域に適用する防波堤が具備すべき条件は、消波ブロック被覆堤より建設コストが安い、施工がしやすい、厳しい海象条件に耐える耐久性、耐波性を有するということである。また地球温暖化の防止が重要な課題となっている今日ではCO₂排出量など環境に与える負荷が小さいことも建設にあたって必須の要件となる。

それらの要件を満たすために設計の基本とすべき方針は防波堤の構造が単純で施工が確実・簡単なことであり、そのためには防波堤に求められる性能(要求性能)を明確にしたうえで必要不可欠な機能を有する最も単純な形状と構造を追求する必要があった。斜面スリットケーソン堤の開発においては使用性、施工性、耐久性、環境性を特に重視した。当該堤の特徴、水理特性、構造については後述する。

福島漁港において実証試験を行い、斜面スリットケーソン堤がこれらの要件を満足することを確認した。設計条件は設計波高(H_{max})6.0m、周期(T_0)10.3秒、入射角0度、海底勾配1/50、設置水深-8.0mである。写真-1は現況である。消波ブロックと比較し海面に占める面積が小さく環境・景観上も優れていることがわかる。国土の美しさが注目されている今日、大切な視点のひとつである。

水理特性

堤体に作用する波力を小さくする方法としては、消波ブロックあるいは遊水室と有孔壁によってそのエネルギーを消費する方法が採られるのが一般的であるが、同様な効果を得るために斜面を用いる方法も知られている。

斜面に波力が作用するとその水平分力のみが堤体を不安定にする方向に働き、鉛直分力は滑動および転倒に対する抵抗を増大する方向に働くため耐波性が向上する(図-2)。ま



図-1 福島漁港位置



写真-1 斜面スリットケーソン(福島漁港)

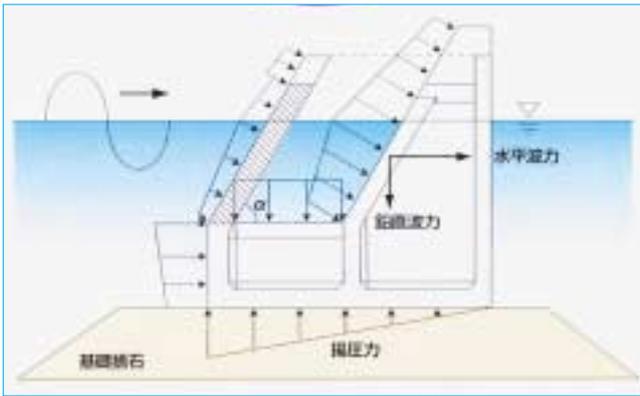


図-2 斜面スリットケーソンの波圧分布

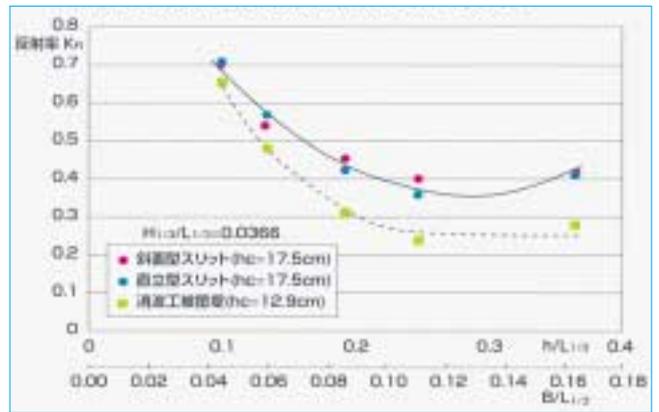


図-4 反射特性の比較

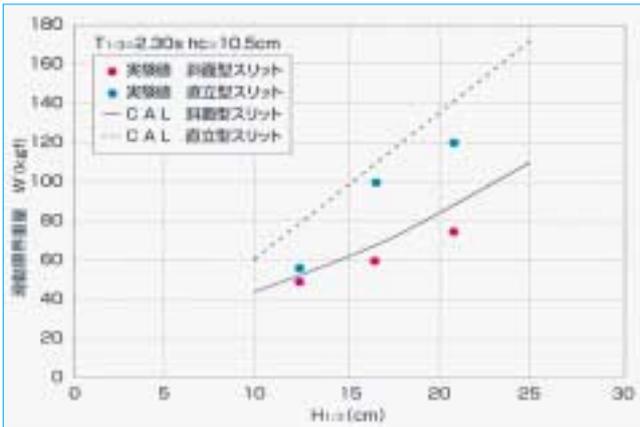


図-3 波高と滑動限界重量

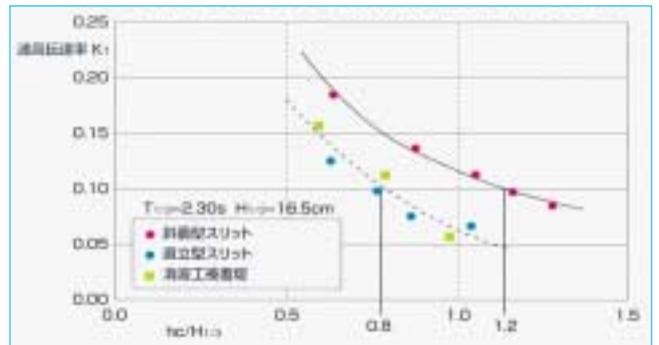


図-5 伝達波特性の比較

たスリット部を通過する際、波は渦を発生しエネルギーを消費するので波力と反射波を低減する。その効果は波長に大きく影響される。これらの効果によって、ある波力に対し堤体が滑動しない最小の堤体重量（滑動限界重量）は直立消波ケーソン堤と比較して格段に小さくなる（図3）。また両者の差は波高が増加するほど広がる傾向にある。堤体に作用する波力は、直立消波堤および上部斜面堤に用いる波力算定式を用いて計算する。

要求性能のうち使用性については反射波に着目し、小船が防波堤近傍を航行するのに支障がない程度であればよく、福島漁港を対象とした水理実験によると図4に示すようにその反射率は直立消波の場合とほぼ同等である。

伝達波特性については波高伝達率を用いる。波高伝達率は入射波高に対する堤体背後の伝達波高の比で表わし、その目標値を0.1とすると図5に示すように必要な相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ は消波ブロック被覆堤および直立スリット堤で0.8程度、斜面スリット堤で1.2程度となる。

効率的で確実な施工を可能にするPFC工法

斜面スリットケーソンは図6(a)(b)に示すように部材の中心に鉄骨を立て、高耐久性埋設型枠とRCプレキャスト型枠で囲んだ空間に分離抵抗型流動コンクリートを充填して

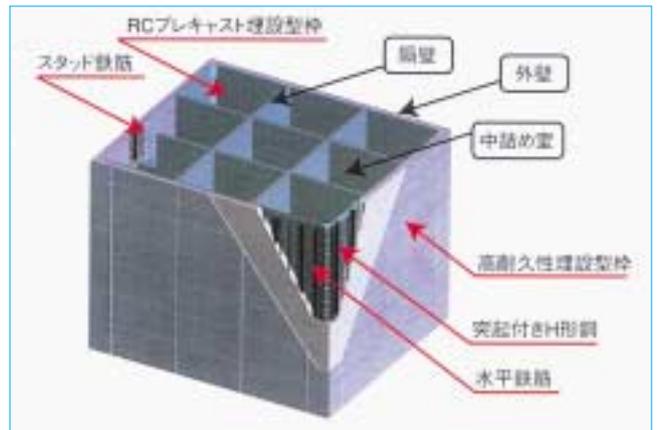


図-6 (a) PFC工法によるケーソン構造

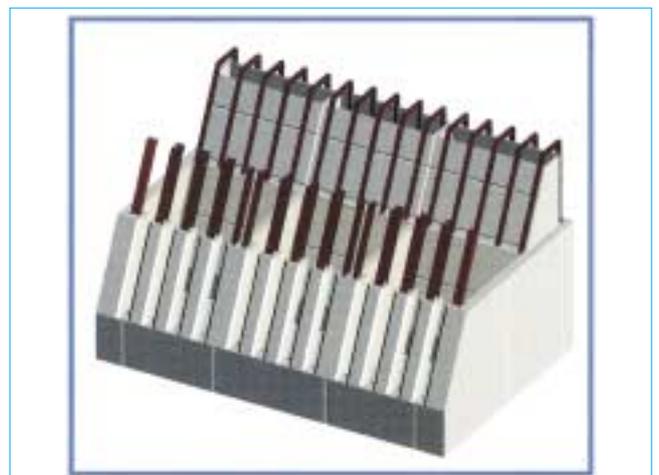


図-6 (b) 斜面スリットケーソンの構造

構築する（その構築方法をプレキャストフォームケーソン工法と称しPFC工法と略称する）。鉛直鉄筋に代えて鉄骨を用い水平鉄筋を埋設型枠の内側にあらかじめセットすることにより施工効率を大幅に向上させることができる。また埋設型枠の使用は施工の効率化および型枠用木材の削減に効果がある。PFC工法は『丈夫で安いケーソンをどこでも確実に早く作る』ことを目標に開発され、通常ケーソンやフーチングが広い幅広ケーソンを効率よく製作できる。

スリット部と斜面板を高品質に確実に施工するのがポイント

この構築方法によって斜面部を容易に構築することができる。その手順は、埋設型枠を箱形に組み立てクレーンによって所定の場所に積み上げる、外側に鉄骨を門型に組む、さらにその外側に高耐久性埋設型枠を設置し型枠間に分離抵抗型流動コンクリートを充填する（図-6(b)）。この方法により配筋の正確な設置と施工の効率化を図ることができる。

また高耐久性埋設型枠を用いることにより普通コンクリートに比較しきわめて高い耐久性とひび割れ抑制効果を保証できる。大水深高波浪の海域においてはきわめて大きな波力がスリット部に働く。それに対応して部材断面を大きくする必要があるので、施工にあたってコンクリートの温度応力によるひび割れを防ぐことがきわめて重要になる。微小なひび割れであっても長期間巨大な波力にさらされるため致命的な弱点になるからである。それを完全に防ぐには鉄骨によって断面積を小さくし、高耐久性埋設型枠で部材の表面を完全に保護する方法が最も確実である（写真-2）。また鉄骨コンクリートは鉄筋コンクリート（RC）と比較し大きな曲げせん断耐力を有することから耐荷性においても有利である。



写真-2 スリット部における鉄骨と高耐久性埋設型枠の設置

環境性をはじめ優れた総合評価

斜面スリットケーソン堤を定量的に評価してみたい。

表-1の設計条件に対して成立する斜面スリットケーソン堤、直立消波ケーソン堤、消波ブロック被覆堤を安全性、使用性、耐久性、施工性、環境性、経済性の各評価項目について比較して表-2に示す。なお安全性の評価指標として堤体の滑動量や沈下量等が考えられるが、現行設計法においてはその数値を正確に算出できず、仮に数値が算出できた場合は全て重力式防波堤であるため同等の値となる。

図-7においては消波ブロック被覆堤の各評価指標を基準

表-1 設計条件

	項目	数値
設計波	最大波高 (H_{max})	12.0 m
	有義波高 ($H_{1/3}$)	7.0 m
	周期 (T_0)	10.5 sec
	入射角 (θ)	0°
潮位	潮位 (H.W.L.)	+ 1.5 m
地形	海底勾配	1/50
	現地盤高	- 14.7 m
	マウンド高	- 12.0 m

表-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	直立消波ケーソン堤	斜面スリットケーソン堤
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	0.3	0.4	0.4
		波高伝達率	0.1	0.1	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）}	56年	56年	103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 （函据付け2日とする）	76日	88日	51日
復旧性	被災後の機能回復工事が容易であること。				
環境性	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当たり）			
		鉄筋・コンクリート (m^3)	157.3	60.1	36.9
		中詰砂 (m^3)	151	136	116
		捨石量 (m^3)	82.8	76	70
経済性	建設コストが安く、効果を早く発現できる。	海面占有幅 (m)	53.0	18.5	15.5
景観		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。鉄筋がぶり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。

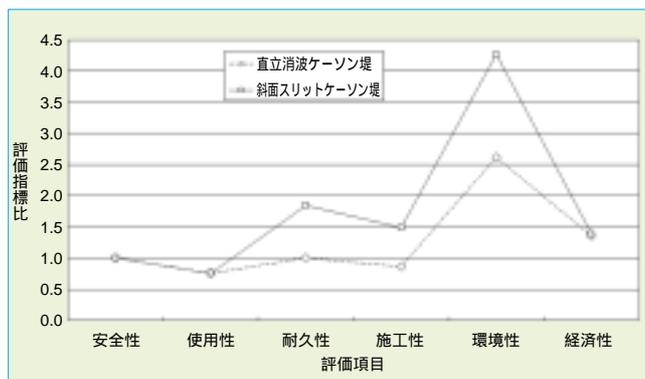


図-7 消波ブロック被覆堤を基準とした評価指標比

として他の防波堤の指標を相対化している。使用性、環境性についてはそれぞれ反射率、鉄筋コンクリート量を評価指標に選んだ。なお評価項目のうち使用性、施工性、環境性、経済性については評価指標値が小さいほど優れていることになり、図を一見して優劣が判断しにくいので指標比の逆数を取り、評価指標比が高いほど評価が優れているように再整理した。図中、消波ブロック被覆堤は全ての評価項目について評価指標比は1.0となる。

環境性についてはCO₂排出量を指標とすべきであるが、RC構造物のライフサイクルにおける全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とされる研究結果から、それら資材の使用量を指標としてライフサイクルを通した全CO₂発生量の相対比率を表すことができるとした。環境重視社会を標榜するうえでは使用エネルギーと投入する材料を最小にして要求性能の水準を有する構造を追求する必要がある。しかも高耐久性埋設型枠によって耐用年数は普通コンクリートの2倍となり、維持管理および廃棄物処理上からも有利である。

ほぼ全ての評価項目について斜面スリットケーソン堤が高い評価になっている。このように現在注目されている地球温暖化防止、資源の有効利用、ライフサイクルを考慮した社会基盤整備等の視点からも、斜面スリットケーソンは有用な構造物であることが明らかである。

今後の普及に向けて

斜面スリットケーソンの普及に向けて二つの取組みが行われてきた。第1の課題は高耐久性埋設型枠の単価を低減させることである。それは斜面スリットケーソンに限ることではなくPFC工法によるケーソン製作に共通する課題である。当該型枠を製作するための型枠の減価償却費を少ない需要量に乗せるため、効率的な施工にもかかわらず全体工費を押し上げる。例えば通常ケーソン製作においては鉄筋および型枠工に従事する従業員の延べ人数、製作日数がおのこのRCケーソンの約25%、50%しか要しないにもかかわらず、経

済優位性は設計・施工条件に左右されていた。しかしわずかずつではあるが当該工法によって通常ケーソンが作られ当初と比べて当該型枠の単価は75%程度に低下しており、通常ケーソンにおいても経済的な競争力をつけている。また当該工法を用いる時は幅広フーチングの製作が可能であり経済性も既存のものと同色ない。それに加えて製作場所を選ばないという特長をもつ。

第2は設計・施工方法の普及である。数年前より斜面スリットケーソンおよびプレキャストフォームケーソンの設計・施工マニュアルの作成が進められており、その完成が待たれている。

参考文献

- 1- 関口・瀨美・中内・宮部・福士・三輪：斜面スリットケーソンの開発，土木学会海洋開発論文集，Vol.15，pp.487-492，2000
- 2- 舟橋・横沢・三輪・関口：プレキャストフォームケーソン製作工法（PFC工法）の開発，土木建設技術シンポジウム，pp.159-166，2002
- 3- 関口・小原・舟橋・横沢：鉄骨コンクリート複合構造板状部材の曲げ耐力とひび割れ幅の評価方法に関する研究，土木学会構造工学論文集，Vol.47A，pp.1465-1473，2001
- 4- （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，No.44，2002
- 5- 関口・宮部・岸：性能照査指標およびAHP手法による港湾構造物の総合的評価方法，土木学会海洋開発論文集，Vol.19，pp.613-617，2003

