セルラブロックを用いた新たな防波堤整備工法の開発と現地への適用

Development of New Breakwater Construction Methods with Cellular Blocks

上久保勝美¹・早川哲也²・林 誉命³・掛水則秀⁴
酒井和彦⁵・山本泰司¹・時沢武史⁶・木村克俊⁷

Katsumi KAMIKUBO, Tetsuya HAYAKAWA, Takanori HAYASHI, Norihide KAKEMIZU
Kazuhiko SAKAI, Yasuji YAMAMOTO, Takeshi TOKIZAWA and Katsutoshi KIMURA

Most breakwaters in Japan are caisson breakwaters. However, the lower is the number of caissons constructed in a year, the higher is the construction cost per caisson, because the cost of floating dock operation is fixed, irrespective of caisson number. Therefore, a construction method was developed in which breakwaters are constructed not of caissons but of connecting cellular blocks. This paper proposes a design method for connecting cellular blocks and examines wave force characteristics in the construction stage by using hydraulic model tests. It was found that the proposed construction method could cut the project cost by 15% and could cut the project duration by 3 years at the Port of Setana.

1. はじめに

ケーソン式防波堤は、ケーソンと呼ばれる鉄筋コンクリートの函塊を製作し、進水、据付した後にケーソン内に中詰材を投入する構造物であるため、海上・海中の作業量が少なく、急速施工が可能で施工時の耐波安定性に優れている。また、複数のケーソンを同時に製作することが可能で、大規模施工による効率化が図れる利点がある。このため、ケーソン式防波堤は防波堤整備に最も多く用いられている構造形式である。

ケーソンの製作は、進水が容易に行えるケーソン製作用台船（フローティングドック：FD）を用いるのが一般的であるが、ケーソン1函のみの製作等、施工規模が小さい条件では、FDの回航費や損料等により、ケーソン1函あたりの費用が割高となる場合がある。さらに、ケーソン1函の製作のために、まとまった予算が必要となることから、予算に応じた柔軟な防波堤延伸が行えない場合もある。

著者らは、施工規模が小さい場合のコスト縮減と予算に応じた段階整備を可能にするため、図-1に示すプレキャスト型枠の一種であるセルラブロックの連結による防波堤整備を行う連結セルラブロック工法を開発した。本工法は、陸上製作したセルラブロックを起重機船等により据付け、型枠内に中詰コンクリートを打設するものである。

本報告では、連結セルラブロック工法の現地施工を実現するため、耐波安定性を確保するための設計方法およびブロック間の連結方法を検討するものである。特に、セルラブロックを段積みする過程で潜堤と同様な没水状態が発生する場合があるので、その波力特性について水理模型実験により詳細な検討を行った。

2. 前提条件

(1) 現地検討箇所

連結セルラブロック工法の検討は、北海道の日本海側に位置する瀬棚港の東外防波堤を対象にした（図-2）。東外防波堤は、岸壁の稼働率向上のほか、港外からの漂

図-1 セルラブロック

図-2 瀬棚港における検討箇所

1 正会員	博(工)	(独法)土木研究所寒地土木研究所
2	博(工)	国土交通省北海道開発局 港湾空港部
3	修(工)	国土交通省北海道開発局 港湾空港部
4		国土交通省北海道開発局 網走港湾事務所
5 正会員	修(水産)	(独法)土木研究所寒地土木研究所
6		(一社)寒地港湾技術研究センター
7 フェロー	博(工)	室蘭工業大学大学院教授

図-3 セラブロックの連結

表-1 設計条件

設計供用期間	50年
海底勾配	$i=1/100$
設計潮位	L.W.L.= $\pm 0.0\text{m}$, H.W.L.= $+0.5\text{m}$
現地盤水深	-12.9m $\sim$ -10.7m
設計波	10年確率波 $T_{1/3}=11.7\text{s}$, $H_{\max}=4.5\text{m}$, $H_{1/3}=2.9\text{m}$, $\beta=0^\circ$
	50年確率波 $T_{1/3}=14.2\text{s}$, $H_{\max}=5.6\text{m}$, $H_{1/3}=3.2\text{m}$, $\beta=0^\circ$

砂流入および港内での海底砂移動の抑止、水産利用のための静穏水域の創出を目的とした施設である。汀線と平行な既設の東外防波堤から直角に波除的な防波堤90mを整備する計画があり、連結セラブロック工法の適用を検討した。

(2) 設計条件およびセラブロックの質量

本検討における設計条件を表-1に示す。最大水深は-12.9mであるが、波除的な施設であることから、設計波は50年確率波で $H_{1/3}=3.2\text{m}$ と比較的小さい。

セラブロック1個の質量は、これを吊るクレーンの規格によって制約を受ける。北海道内で在場船数が多い200t吊の起重機船又はクレーン付台船の利用を前提とし、これらの作業船の吊能力を考慮して、セラブロックの質量は70t以下とした。

(3) セラブロックの連結方法

来襲する波浪に対して長期にわたって防波堤機能確保するためには、個々のセラブロックの一体化が重要となる。廣井勇博士が初代小樽築港事務所長（1897～1908）として設計、施工を指揮した小樽港北防波堤は、斜塊と呼ばれるコンクリートブロックを積み重ねた構造であり、個々のブロックの連結のため、凹凸接合や楔接合が施されている（中村ら、2005）。このため、個々のコンクリートブロックが一体となり、強固な構造となっている。100年以上経過した現在においても大きな変位が見られないのは、このようなブロックの連結の工夫の効果も発揮されているためと考えられる。

小樽港北防波堤における斜塊ブロックの連結方法を参考にし、図-3に示すように、セラブロックの連結のため、中詰材として水中コンクリートを打設し、上下・

図-4 捨石天端高と衝撃碎波力係数

左右の一体化を図ることとした。水平方向の連結については、セラブロックの袖部に突出壁を設け、隣り合うブロックとの間に水中コンクリートを打設することとした。鉛直方向の連結については、積み重ねたセラブロックを水中コンクリートの中詰めにより一体化を図るが、施工量の関係で最上段まで一体化できない場合は、図-3の2段目および3段目に示すとおり、セラブロックの天端高と水中コンクリートの打ち継ぎ部に50cm程度の差を設けることで連結する方法を採用した。

3. 防波堤の基本設計

(1) 基礎捨石の天端高

ケーソン式防波堤の基礎捨石の天端高は基礎捨石の最低必要厚により決定するのが一般的である。しかしながら、セラブロック工法では、基礎捨石の天端を高くするとセラブロックの積み上げ段数が減り、施工性の向上が期待できる一方で、衝撃碎波による波圧合力の増大が問題となる。このため、セラブロック工法では、衝撃碎波が発生しない範囲で基礎捨石の天端をできるだけ高くすることが望ましい。

図-4は、捨石天端高を横軸とし、合田式における係数 a_2 、衝撃波力係数 a_1 および波圧合力 P の変化を示したものである。天端高が-7.0mより高くなると、 a_2 より a_1 が大きくなり、衝撃碎波の発生により波圧合力 P が急激に大きくなる。このため、本条件での天端高は-7.0mが限界となる。

なお、今回のケースでは、ハドソン式により被覆材の安定質量を算定したところ、天端高を-7.5mより低くする

と、被覆ブロックが不要という結果となった。天端高を-7.0mから-7.5mに変化させても、セルラブロックの高さは変わるものの、後述するブロックの積み上げ段数は変わらないことから、被覆材を不用にできる経済性を考慮して、捨石の天端高を-7.5mとした。

(2) 完成時の安定性とセルラブロックの諸元

表-2は、図-5に示す完成時の断面における耐力作用比を示したものである。設計波（50年確率波）に対する堤体全体の安定性に関しては、各破壊モードの中で支持力が最も厳しいものとなっている。支持力に関する耐力作用比1.0を確保するためには、堤体幅を10.2mとする必要がある。

堤体を構成するセルラブロックの積み方については、断面方向の一体化が条件で表-2の安定性が確保されていることから、延長方向と鉛直方向に連結することとし、支持力の安定性を確保するため、前述のとおりセルラブロック幅Bを10.2mとした。

セルラブロックの高さ H 、長さ L については、本体工の高さが8.5m（マウンド天端高-7.5m、本体工天端高+1.0m）となることから、クレーンの吊り能力70tと L/B が1/2程度以上の条件から、鉛直方向に4個連結することとし、 $H=2.1$ mおよび 2.15 m、 $L=6.5$ mとした。

4. 没水状態での耐波安定性に関する水理模型実験

(1) 検討の必要性

予算の状況に柔軟に対応するため、暫定断面として図-5のセルラブロックの2段目で打ち止めて、没水状態のまま単年度の施工を終えることを想定する。低天端堤の直立部に作用する波力は興野ら（1997）、中田ら（1984）、藤原ら（1996）により算定法が示されているが、直立部の天端が没水した条件における波力算定法は明らかにされていない。このため、暫定時の安定性の検討を目的として、水理模型実験を行った。

(2) 実験概要

不規則波発生装置を備えた2次元造波水路（長さ28.0m、幅0.8m、深さ1.0m）に勾配 $i=1/100$ の一樣斜面を設け、縮尺を1/40として実験を行った。表-3に実験条件を、図-6に堤体模型を示す。波浪は修正Bretschneider・光易型のスペクトルを有する不規則波を用いた。また、1波群の波数は150波とし、波圧をサンプリング周期0.005sで測定した。

また、天端高の違いによる波力特性を把握するため、天端高を現地換算で-4.5～+3.0mの5段階に変化させ実験を行った。なお、瀬棚港で想定している没水状態の天端高は、実験断面の $h_c=-4.5$ mと-2.2mのほぼ中間に当たる $h_c=-3.25$ m、完成時の天端高は $h_c=+3.0$ mである。設計に用いる波浪条件は、暫定断面であることから、10年確率波の $H_{1/3}=2.9$ m、 $T_{1/3}=11.7$ sとなる。

表-2 完成時の耐波安定性

		耐力作用比	
		H.W.L時	L.W.L時
滑動		$1.286 \geq 1.0$	$1.302 \geq 1.0$
転倒		$1.881 \geq 1.0$	$1.933 \geq 1.0$
支持力		$1.010 \geq 1.0$	$1.010 \geq 1.0$
円弧すべり	港外側	—	$1.468 \geq 1.0$
	港内側	—	$1.388 \geq 1.0$

図-5 完成時断面

表-3 実験条件

	実験値 (cm)	現地換算値 (m)
有義波高 $H_{1/3}$	7.5, 10.0, 12.5	3.0, 4.0, 5.0
有義波周期 $T_{1/3}$	1.58, 1.90, 2.21 (s)	10.0, 12.0, 14.0 (s)
天端高 h_c	-11.3, -5.5 ± 0.0 , +3.8, +7.5	-4.5, -2.2 ± 0.0 , +1.5, +3.0
水深 h	-25.0	-10.0
マウンド上水深 d	-21.3	-8.5

図-6 波圧計の設置位置(現地換算値)

図-7 波圧分布(不規則波)

(3) 波圧特性

図-7に $T_{1/3}=14$ s、 $H_{1/3}=5.0$ mの条件における滑動合成波力が最大となる瞬間の波圧分布を天端高をパラメータとし

て示すとともに、天端高 $h_c=+3.0\text{m}$ の条件での合田式による計算結果を示したものである。前面波圧は天端が高い条件では合田式とほぼ一致するが、没水するにしたがって波圧全体が小さくなる傾向にある。底面波圧についても同様に、天端が高い条件では合田式とほぼ一致するが、没水するにしたがって波圧分布は三角形分布を保つが、波圧全体が小さくなる傾向にある。

図-8は、天端高が $h_c=+3.0\text{m}$ の条件における、堤体の各面に作用する平均波圧の時系列変化を示したものである。波圧作用のタイミングに着目すると、前面と底面波圧はほぼ同時にピークとなり、その後、前面壁から打ち上がった水塊の落下により上面に波圧が作用している。一方、図-9は施工中において没水状態となる $h_c=-4.5\text{m}$ の場合であり、前面と底面波力のピーク時には堤体上方を通過する波浪による上面波圧が作用している。このように天端が没水する条件では、堤体を押さえる方向に上面波圧が作用する。また、図-8でみられた前面波圧の比較的鋭いピークは没水状態では発生しないことが確認できる。

(4) 波力低減率と耐波安定性

図-10(a)は、 $h_c/H_{1/3}$ と水平波力の実験値 P_{exp} を合田式による水平波力 P_{cal} で除した波力低減率の関係を示している。 $H_{1/3}/h=0.5$ の条件に着目すると $h_c/H_{1/3}=0.6$ では $P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}=0.88$ 、 $h_c/H_{1/3}=-0.9$ では $P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}=0.60$ に低減しており、相対天端高の減少とともに波圧が低減していることがわかる。これは、図-8に示したような鋭いピークを示す波圧が低減されるためと考えられる。この傾向は相対波高が大きい $H_{1/3}/h=0.5$ の場合に顕著にみられる。一方、図-10(b)は、 $h_c/H_{1/3}$ と鉛直波力の実験値 U_{exp} を合田式より得られた各天端高における鉛直波力 U_{cal} で除した値の関係を示している。 $H_{1/3}/h=0.5$ の条件に着目すると、 $h_c/H_{1/3}=0.6$ では $U_{\text{exp}}/U_{\text{cal}}=0.94$ 、 $h_c/H_{1/3}=-0.9$ では $P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}=0.57$ に低減しており、水平波力と同様に相対天端高の減少に伴い、波圧が低減していることがわかる。

表-4は、上記の実験結果を用いて瀬棚港東外防波堤における没水時の耐波安定性を検討したものである。L.W.L.時の滑動に関する耐力作用比が最も小さいが、何れも1.0を上回っており没水時の耐波安定性は確保されている。

5. 連結セルラブロック工法の設計フロー

前述の検討の結果、基本設計のフロー図を整理すると、図-11のようになる。まずは、利用が想定されるクレーン規格により、セルラブロック1個の質量の上限値を決め、衝撃碎波が発生しない範囲で基礎捨石の天端高を設定した後に、完成断面の安定照査からセルラブロックの諸元が決定される。

次に、没水状態のまま単年度施工を終える場合は、本研究で明らかとなった波圧低減率を用いて暫定時の安定

図-8 波圧の時系列変化($h_c=+3.0\text{m}$)

図-9 波圧の時系列変化($h_c=-4.5\text{m}$)

(a) 水平波力

(b) 鉛直波力

図-10 無次元波力と天端高

表-4 没水時の耐波安定性

	耐力作用比	
	H.W.L.時	L.W.L.時
滑動	$1.315 \geq 1.0$	$1.277 \geq 1.0$
転倒	$4.086 \geq 1.0$	$3.942 \geq 1.0$
支持力	$2.086 \geq 1.0$	$2.058 \geq 1.0$

照査を行う。仮に、安定性を確保できない場合は、例えば、堤体幅（セルラブロックの幅 L ）を大きくし、完成時と暫定時の照査を繰り返すこととなる。

6. 瀬棚港における現地施工

前出の図-2に示した瀬棚港東外防波堤のうち90m区間において、連結セルラブロック工法とケーソン工法の工費と工期の比較検討を行った。なお、ケーソン式防波堤において1年目にケーソン1函製作、2年目にケーソン1函据付を繰り返す予算規模を前提条件とした。1m当たりの概算工費は、ケーソン式防波堤では910万円、連結セルラブロック工法では770万円となり、15%のコスト削減が図られた。また、工期については、それぞれ13年、10年となり連結セルラブロック工法が3年短くなった。

以上のように経済性や効果の早期発現が確認されたことから、瀬棚港においては連結セルラブロック工法の採用を決定した。写真-1は平成25年9月に製作したセルラブロック（ $L=6.5\text{m}$, $B=10.2\text{m}$, $H=2.15\text{m}$ ）であり、平成26年度以降に据付を行う予定である。

7. 結論

本研究では、施工規模が小さい場合の防波堤整備を効率的に進めるため、連結セルラブロック工法を提案した。主要な結論は以下の通りである。

- 1) セラブロックの連結方法として、水平方向にはブロックの袖部に突出壁を設けて隣り合うブロックとの間に水中コンクリートを打設して連結する。また、鉛直方向には、積み重ねたブロックを水中コンクリートの中詰めにより一体化を図ることとした。
- 2) 没水状態においては、前面と底面波力のピーク時には堤体上方を通過する波浪によって、堤体を押さえる方向に上面波圧が作用するために安定性が向上する。また、相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ が減少するほど、より波力低減することが明らかとなった。
- 3) 一連の検討から、セラブロック工法の設計フローを整理した。基礎捨石の天端高の設定と水理模型実験の波力低減率を用いた暫定時（没水状態）の安定照査が通常の防波堤の設計とは異なる。
- 4) 瀬棚港東外防波堤延長90mを対象として、連結セラブロック工法とケーソン工法の比較を行った結果、コストは15%縮減され、工期は3年短くなることが明らかとなり、現地施工を開始した。

連結セラブロック工法に関しては、検討開始から約1年間という短い期間で、ブロックの連結方法や設計方法の検討を行い、瀬棚港における波除堤の現地施工に繋げた。今後は、瀬棚港での整備を通じて施工方法を整理するとともに、長期的な耐久性について観察していく。

図-11 設計フロー

写真-1 セラブロックの施工状況

さらに、第一線防波堤への適用性の検討を行い、本工法の更なる普及を図っていく。

謝辞：本検討にあたり「北海道の港湾における防波堤整備技術検討委員会」（委員長：北海道大学大学院 横田 弘教授）の委員の方々から貴重なご意見を賜った。ここに記して、深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 興野俊也, 貝沼憲男, 高橋由多加, 青野利夫, 藤原隆一 (1997) : 現地観測に基づく低天端ケーソン堤の安定性評価, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.836-840.
- 中田邦夫, 寺内 潔, 西田仁志, 梅木 功 (1984) : 低天端混成堤の諸特性について, 海岸工学論文集, 第31巻, pp.532-536.
- 中村弘之, 栗田 悟, 関口信一郎 (2005) : 小樽港北防波堤の構造について, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.13-18.
- 藤原隆一, 貝沼憲男, 興野俊也, 石崎崇志, 小竹康夫, 津田宗男 (1996) : 低天端ケーソン堤に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.761-765.