

段階施工を可能とする防波堤整備工法について —連結セルラーブロック工法—

港湾空港部 港湾建設課 ○掛水 則秀

林 誉命

函館開発建設部 江差事務所 工務課

丸山 政行

ケーソン式防波堤は、急速施工が可能で施工時の耐波安定性に優れ、大規模施工による効率化が図れることから、最も多く用いられている防波堤構造である。しかし、ケーソン1函のみの製作等、施工規模が小さい場合には、総事業費が割高になったり、施工期間が長くなることがある。本論では、施工規模が小さい場合の効率的な防波堤整備を実現するセルラーブロックを用いた防波堤整備工法を提案し、その設計方法等について報告するものである。

キーワード：段階施工、セルラーブロック

1. はじめに

防波堤工事は、気象海象の影響を受けやすく、海上・海中での施工能力は陸上工事に比べて劣るため、できる限り海上・海中での作業期間と施工量を減らすことが工程、品質、経済性の上から有利となる場合が多い。

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陸上で製作し、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。

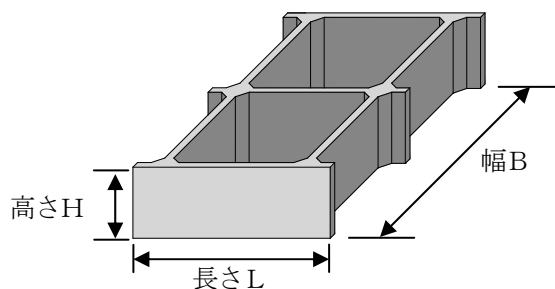
ケーソンの製作は、進水が容易に行えるケーソン製作用台船（フローティングドック：FD）（写真－1）を用いるのが一般的であるが、ケーソン1函のみの製作等、施工規模が小さい場合には、FDの回航費や損料等により、ケーソン1函あたりの費用が割高となり、また、施設完成までの期間が長くなることがある。さらに、ケーソン1函の製作のためにも、まとまった予算が必要となることから、予算に応じた柔軟な防波堤延伸が行えない欠点がある。

このため、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、小型部材のセルラーブロック（図－1）の連結による防波堤整備を行う連結セルラーブロック工法を提案し、本報告では、連結セルラーブロック工法による防波堤の耐波安定性や経済性等について検討するものである。

なお、セルラーブロック工法は、陸上製作したプレキャスト型枠を起重機船等で据付を行い、型枠内に中詰コ



写真－1 ケーソン製作用台船



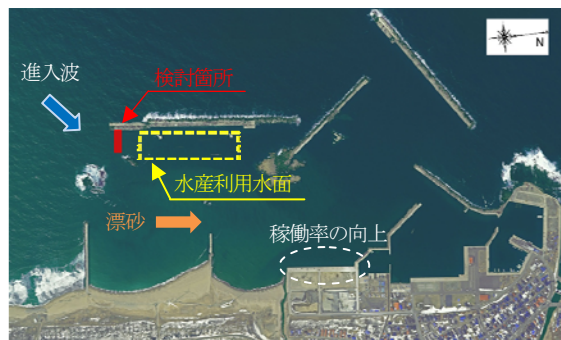
図－1 セルラーブロック

ンクリートを打設する構造である。セルラーブロックの重量が増加すると運搬や据付時に起重機船等の制約を受けるが、型枠のみの構造であることから、プレキャストブロックに比べブロックの大型化が可能である。また、場所打ちコンクリートと比べて、型枠の重量が増加することから施工時の耐波安定性に優れている。

2. 検討対象施設

連結セルラーブロック工法の現地検討対象施設は、図－2に示す瀬棚港東外防波堤とした。瀬棚港東外防波堤

は、岸壁の稼働率向上のほか、港外からの漂砂流入及び港内での海底砂移動の抑止、水産利用を目的とした静穏水域の創出を目的とした施設である。



図－２ 検討対象施設

3. 検討条件

本検討における設計条件は表－１に示すとおりであり、最大水深は12.9mと大水深であるものの、波除的な施設であることから、設計有義波は50年確率波で3.2mと比較的小さい条件である。

また、クレーンの規格により、セルラーブロック１個の重量が制約されることから、北海道内で在場船数が多い200t吊以上の起重機船又はクレーン付台船で施工が可能な構造とした。なお、200t吊起重機船およびクレーン付台船の吊能力は、作業半径を考慮するとおよそ70tであり、セルラーブロックの重量を70t程度以下にする必要がある。

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= ± 0.0 m, H. W. L= $+0.5$ m
現地盤水深	-12.9m～-10.7m
設計波	10年確率波 $T=11.7$ s, $H_{max}=4.5$ m, $H_{1/3}=2.9$ m, $\beta=0^\circ$
	50年確率波 $T=14.2$ s, $H_{max}=5.6$ m, $H_{1/3}=3.2$ m, $\beta=0^\circ$

4. セルラーブロックの連結方法

来襲する波浪に長期にわたって防波堤機能を確保するためには、個々のセルラーブロックの連結による一体化が重要となる。

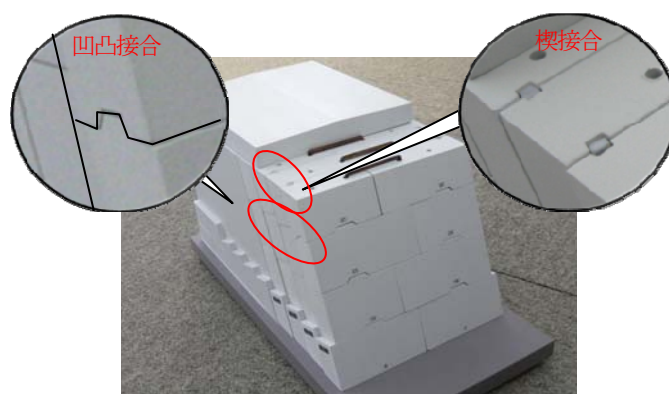
写真－２は、廣井勇博士が約100年前に設計、施工を指揮した小樽港北防波堤である。この防波堤は、斜塊と

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、写真－３に示すように凹凸接合や楔接合が施されている。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は見られないのは、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。

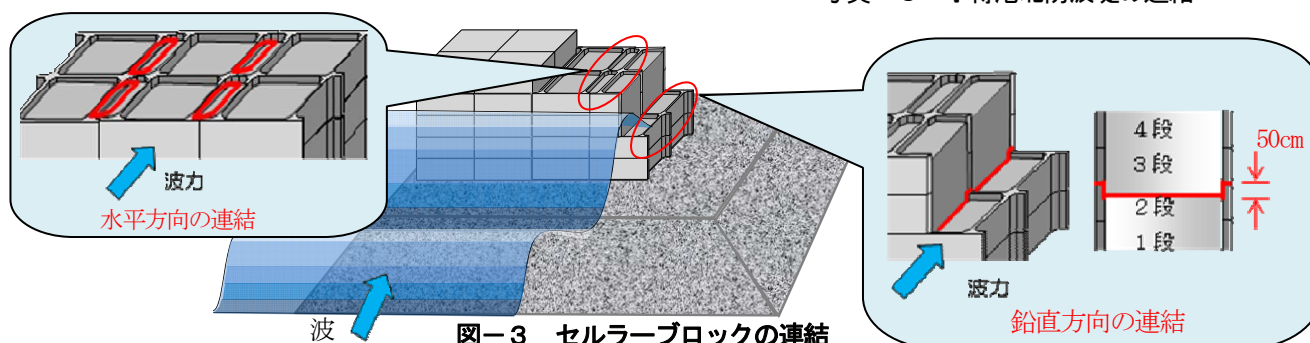
小樽港北防波堤における斜塊ブロックの連結方法を参考に、図－３に示すように、セルラーブロックの連結のため、中詰材として水中コンクリートを打設し、上下・左右の一体化を図ることとした。延長方向の連結については、セルラーブロックの袖部に突出壁を設け、隣り合うブロックとの間に水中コンクリートを打設することとした。鉛直方向の連結については、積み重ねたセルラーブロックを水中コンクリートの中詰めにより一体化を図るが、施工量の関係で最上段まで一体化できない場合は、セルラーブロックの天端高と水中コンクリートの打ち継ぎ部に50cm程度の差を設ける（図－３の２段目、３段目）ことで連結した。



写真－２ 小樽港北防波堤



写真－３ 小樽港北防波堤の連結



図－３ セルラーブロックの連結

5. 防波堤の基本設計

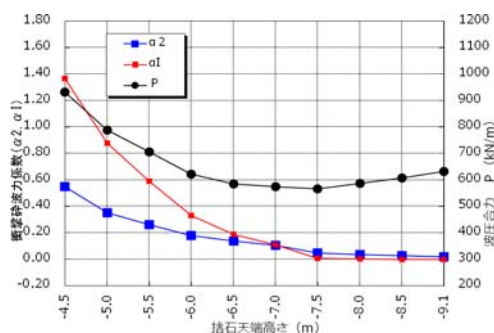
(1) 基礎捨石天端高

ケーソン式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、セルラーブロック工法では、基礎捨石の天端を高くするとセルラー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、基礎捨石の天端を高くすると衝撃砕波による波圧合力の増大が問題となる。このため、セルラーブロック工法では、衝撃砕波が発生しない範囲で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⁹⁾における係数 α_2 及び衝撃波力係数 α_I （縦軸左側）、波圧合力 P （縦軸右側）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、 α_2 より α_I が大きくなり、衝撃砕波の発生により波圧合力が急激に大きくなる。

このため、本条件で捨石天端高は-7.0mまで高くすることができる。

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、セルラー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も変わらないことから、経済性を考慮して、捨石の天端高を-7.5mとした。



図－4 捨石天端高と衝撃砕波力係数

(2) 完成時の安定性

表－2は、完成時（図－5）における耐力作用比を示したものである。堤体全体の安定性に関しては、支持力に関する耐力作用比が厳しいものとなっており、1.00を確保するため堤体幅が10.2m必要となる。

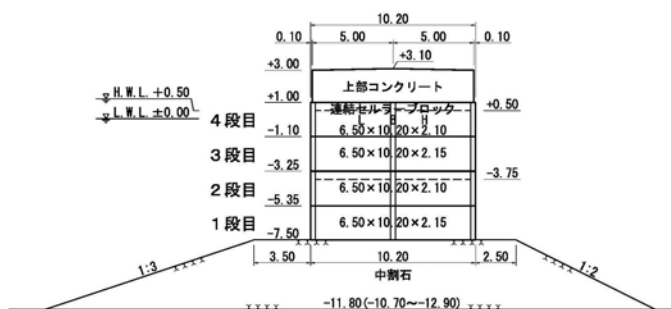
表－2 完成時の耐波安定性

		耐力作用比	
		H.W.L時	L.W.L時
本体下端 (-7.50m)	滑 動	1.286 $\geq$ 1.0	1.302 $\geq$ 1.0
	転 倒	1.881 $\geq$ 1.0	1.933 $\geq$ 1.0
	端趾圧(kN/m ²)	347.398 $<$ 500	351.629 $<$ 500
	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
3段目下端 (-3.25m)	滑 動	1.193 $\geq$ 1.0	1.239 $\geq$ 1.0
	転 倒	4.320 $\geq$ 1.0	4.578 $\geq$ 1.0
上部下端 (+1.00m)	滑 動	1.892 $\geq$ 1.0	1.983 $\geq$ 1.0
	転 倒	19.435 $\geq$ 1.0	20.578 $\geq$ 1.0

(3) セルラーブロックの諸元

堤体を構成するセルラー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の安全性が確保されていることから、断面方向には分割せず、延長方向と鉛直方向に連結することとし、セルラーブロック幅Bを10.2mとした。

セルラーブロックの高さH、長さLについては、本体工の高さが8.5m（マウンド天端-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分割することとし、H=2.1m及び2.15m、L=6.5mとした。



図－5 完成時断面

(4) セルラーブロックの段階施工

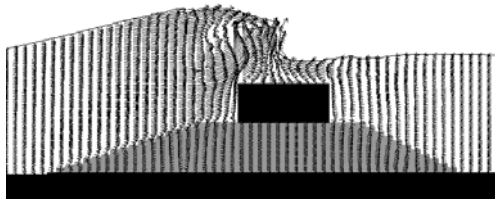
予算の状況に柔軟に対応するため、暫定断面としてセルラーブロックの2段目で打ち止め（潜堤状態）することを想定し、セルラーブロック1段目、2段目を据付け直後に水中コンクリートを打設することから、1段目と2段目は一体化がなされていると考える。

また、2段目と3段目については、2段目の天端下50cmから水中コンクリートの打設により連結を図るが、打ち継ぎ面として一体とは見なさない。このため、前掲の表－2に示すとおり、上部工に加えて3段目下端の安定照査が必要となる。さらに、後述するとおり、暫定時の潜堤状況における対波安定性の検討が必要となる。

(5) 暫定時の安定性

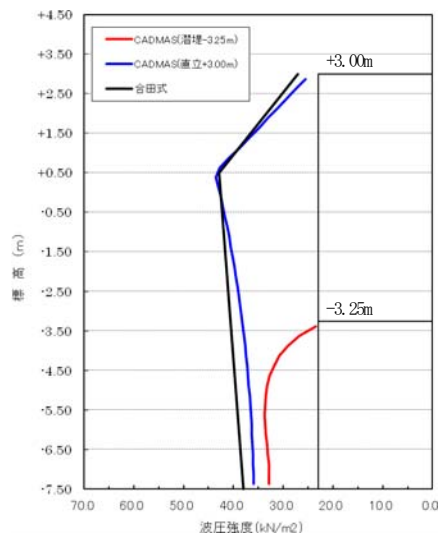
① 波圧分布

暫定時については、今回のケースでは、セルラーブロック2段（-3.25m）まで施工した潜堤状態での安定性の検討が必要となる。中田²⁾らによると、水理模型実験の結果、防波堤の天端が低くなると、波圧合力が合田式の値を下回ることが報告されている。このため、暫定時の安定性の検討を適切に行うため、数値波動水路（CADMAS - SURF）を用いた数値計算を実施した。なお、CADMAS - SURFは、自由水面の処理にVOF法を用いたNavier-Stokes式を直接計算するモデルであり、潜堤状態での越波を含めた堤体周辺の流体運動の詳細な再現が可能である。（図－6）



図－6 CADMAS-SURF による再現結果

図－7は、数値計算結果と合田式の算定結果を示したものである。完成断面である天端高+3.1mの条件における合田式の波圧分布が黒の実線、数値計算結果を青の実線で示している。静水面以下で数値計算結果が若干小さくなっているものの、波圧の最大値や波圧分布の形状は良く再現されている。また、赤の実線は、潜堤状態となる天端高-3.25mの数値計算結果である。完成断面の青の実線と比較すると、潜堤天端付近の波圧が減少している。これは、完成断面では、波浪がほぼ反射する条件であるが、潜堤状態では越波により波のエネルギーの一部が堤体に作用しないためと考えられる。ここで、完成断面の数値計算結果の潜堤天端高-3.25m以深の波圧合力は156kN/m、潜堤状態の波圧合力は135kN/mであり、その比は0.86（波圧低減率）となり、数値計算結果では越波により14%の波圧が減少したことを表している。また、同様に堤体に作用する揚圧力については、波圧低減率が0.77となった。



図－7 波圧分布図

②耐波安定性

暫定時の堤体の安定性を検討する波圧については、数値計算結果を直接使用するのではなく、安全側を考慮して、完成断面の合田式による波圧に前述した波圧低減率を乗じることにより算定した。

表－3は、上記の波圧を用いた暫定時の耐力作用比を示したものである。L.W.L.時の滑動に関する耐力作用比が一番厳しいものとなっているが、1.0を上回っており

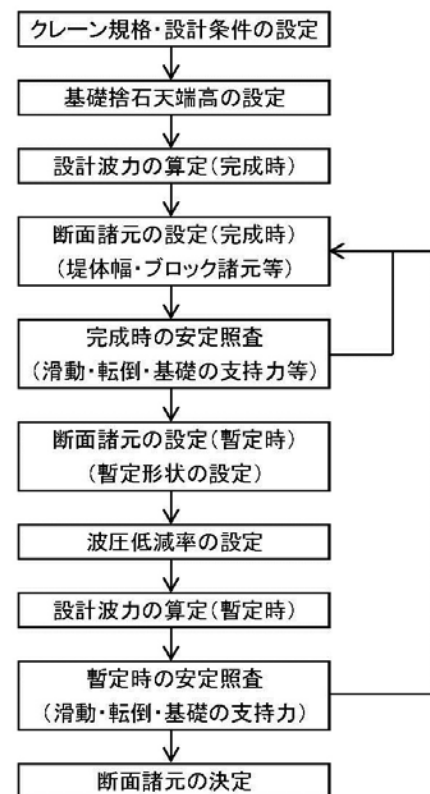
暫定時の耐波安定性は確保されている。なお、暫定時で安定性が確保されない場合は、堤体幅を広くするためクレーンの吊り能力70tを越えない範囲で、セルラーブロックの幅Bを長くし、長さLを短くする必要がある。

表－3 暫定時の耐波安定性

		耐力作用比	
		H.W.L.時	L.W.L.時
暫定時の安定性	滑動	1.330 $\geq$ 1.0	1.291 $\geq$ 1.0
	転倒	4.168 $\geq$ 1.0	4.024 $\geq$ 1.0
	端部圧 (kN/m²)	66.907 < 500	67.313 < 500
	支持力	2.090 $\geq$ 1.0	2.062 $\geq$ 1.0

(1)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－8のようになる。クレーン規格や完成断面の安定照査から堤体幅やセルラーブロックの諸元等を設定し、数値計算等から潜堤状態の波圧低減率を算出した上で、暫定断面の安定照査により安定を確認して最終的な諸元を決定する。



図－8 設計フロー

6. 瀬棚港における現地施工

瀬棚港東外防波堤延長90mを対象として、連結セルラーブロック工法とケーソン工法の比較検討を行った。な

お、ケーソン式防波堤で1年目にケーソン製作（1函）、2年目にケーソン据付（1函）を繰り返す予算規模とした。

検討した結果、1m当たりの概算工費は、ケーソン式防波堤で910万円、連結セルラーブロック工法で770万円となり、15%のコスト削減が図られる。また、工期については、13年が10年と3年短くなった。

経済性や効果の早期発現が確認されたことから、瀬棚港における連結セルラーブロック工法の採用を決定した。**写真－4**は平成25年9月に製作したセルラーブロック（L=6.5m、B=10.2m、H=2.15m）であり、平成26年度以降に据付を行う予定である。



写真－4 瀬棚港における施工状況

7. おわりに

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、連結セルラーブロック工法を提案した。検討開始から約1年間という極めて短い期間で、ブロックの連結方法や設計方法の検討とともに、瀬棚港における現地施工に繋がった。

今後は、瀬棚港での施工方法の検討とともに、高波浪域で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：連結セルラーブロック工法の検討にご助言、ご指導頂きました北海道の港湾における防波堤整備技術検討委員及びワーキンググループの方々に対し深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷本勝利，本浩司，石塚修次，合田良美：防波堤の設計波力算定式についての検討，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 11～16，1976.
- 2) 中田邦夫，寺内潔，西田仁志，梅木功：低天端混成堤の諸特性について，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 532～536，1984.