

新技術開発探訪

段階整備を可能とする 防波堤整備工法の開発 —連結セルラーブロック工法—

国土交通省 北海道開発局 港湾空港部 港湾建設課 あおい 青井 てるき 晃樹

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製作することが可能なため、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最も多く用いられている防波堤の構造形式である。

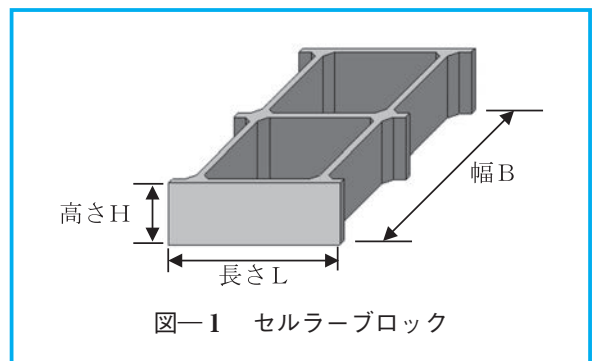
ケーソンの製作は、写真—1に示すような進水が容易に行えるケーソン製作用台船（フローティングドック：FD）を用いるのが一般的であるが、ケーソン1函のみの製作等、施工規模が小さい場合には、FDの回航費や損料等によりケーソン1函あたりの費用が割高となり、結果的に施設完成



写真—1 FDによるケーソン製作（同時製作4函）

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がある。

このため、北海道開発局では、施工規模が小さい場合のコスト縮減と予算規模に応じた柔軟な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ーブロックの連結により防波堤整備を行う「連結セルラーブロック工法」を開発した。



2. 工法の概要と特徴

連結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、型枠内に中詰コンクリートを打設する構造である。セルラーブロックは、プレキャストブロックに比べ型枠のみの構造であることから、運搬・据付時に起重機船等によるブロック重量の制約を受けにく

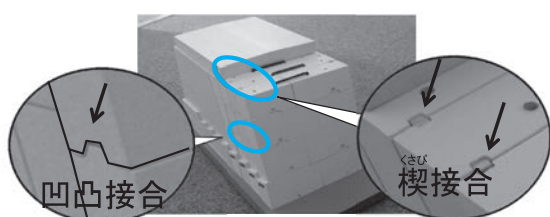
く、ブロック大型化が可能である。また、場所打ちコンクリートと比べて型枠の組立・解体が不要であることから施工日数を短縮でき、重量が増加することから施工時の耐波安定性に優れている。

本工法では、防波堤整備にFDを必要とせず、各港に在場する吊能力200トン程度の起重機船で整備が可能である。また、ブロック個数の調整により予算規模に応じた着実な防波堤の延伸が可能となる。

3. セルラーブロックの連結方法

来襲する波浪に対して長期にわたり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（一体化）が重要となる。

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、個々のブロックを連結するため、凹凸接合や楔接合が施されている（写真—2）。このため、個々のコンクリートブロックが一体化され、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



写真—2 小樽港北防波堤（模型）

結の工夫による効果が発揮されているためと考えられる。

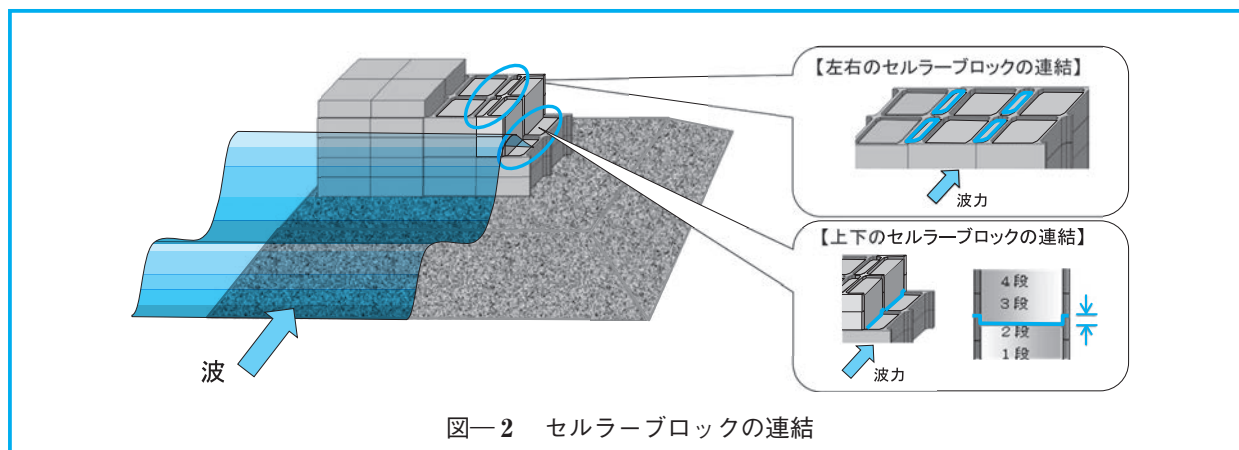
セルラーブロックの連結は、小樽港北防波堤における斜塊ブロックの連結方法を参考とし、中詰材として水中コンクリートを打設することで上下・左右の一体化を図ることとした（図—2）。

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。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内に水中コンクリートを打設し一体化を図るが、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程度の差を設けることで連結する（図—2の2段目、3段目）。

4. 没水状態での耐波安定性

本工法の開発においては、予算の状況に柔軟に対応するため、例えば暫定断面として図—2のセルラーブロックの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が想定される。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ため、この暫定断面の安定性の検討を目的として、水理模型実験（写真—3）及び数値波動水路 [CADMAS-SURF] を用いた数値計算（図—3）を実施した。

図—4は、数値計算結果と合田式の波圧算定結果の一例を示したものである。完成断面である天端高の条件における合田式の波圧分布が黒の実



図—2 セルラーブロックの連結

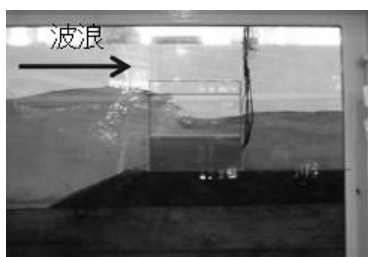


写真-3 没水状態における水理模型実験

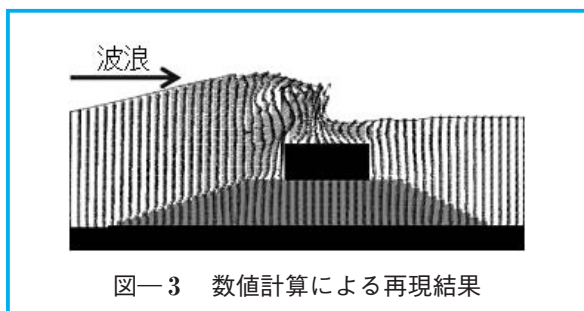


図-3 数値計算による再現結果

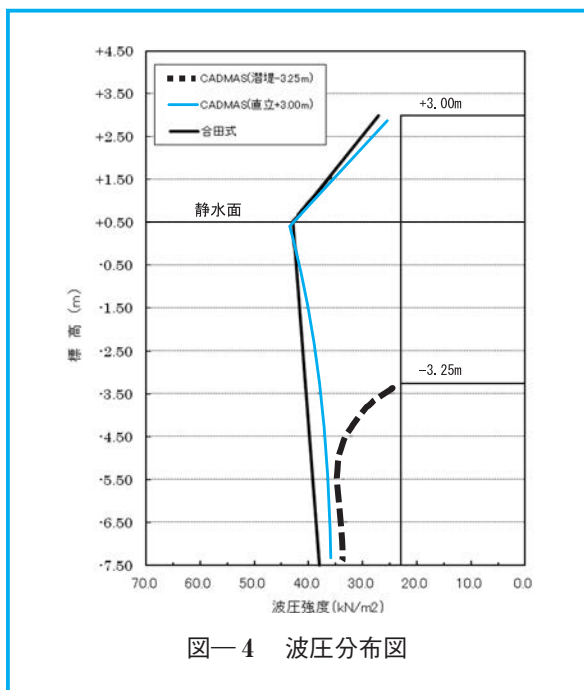


図-4 波圧分布図

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、黒の点線は、没水状態となる天端高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、没水状態の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に対し、没水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。

これら水理模型実験と数値計算による波圧特性

の分析結果から、没水状態では合田式より小さい波圧となることを確認した。これを基に、没水状態の波力算定式を、合田の波圧算定式に波圧補正係数 κ を乗じた形の使いやすい式に一般化し、異なる条件での安定計算も可能としたことで設計法の確立を図っている。

波圧補正係数 κ の算定式を以下に示す。

$$\kappa = 0.8 \left(-1.5 \leq \frac{h_c}{H_{1/3}} < 0.0 \right) \quad (1)$$

$$\kappa = 0.4 \frac{h_c}{H_{1/3}} + 0.8 \left(0.0 \leq \frac{h_c}{H_{1/3}} < 0.5 \right) \quad (2)$$

$$\kappa = 1.0 \left(-1.5 \leq \frac{h_c}{H_{1/3}} < 0.0 \right) \quad (3)$$

ここで、

h_c : 天端高 (m)

$H_{1/3}$: 設計有義波高 (m)

である。

波圧補正係数 κ は、合田式により求めた波圧 p_1 及び揚圧力 p_u に乗じるものとするため、補正後の波圧 p'_1 及び揚圧力 p'_u は以下の式で表される。

$$p'_1 = \kappa p_1 \quad (4)$$

$$p'_u = \kappa p_u \quad (5)$$

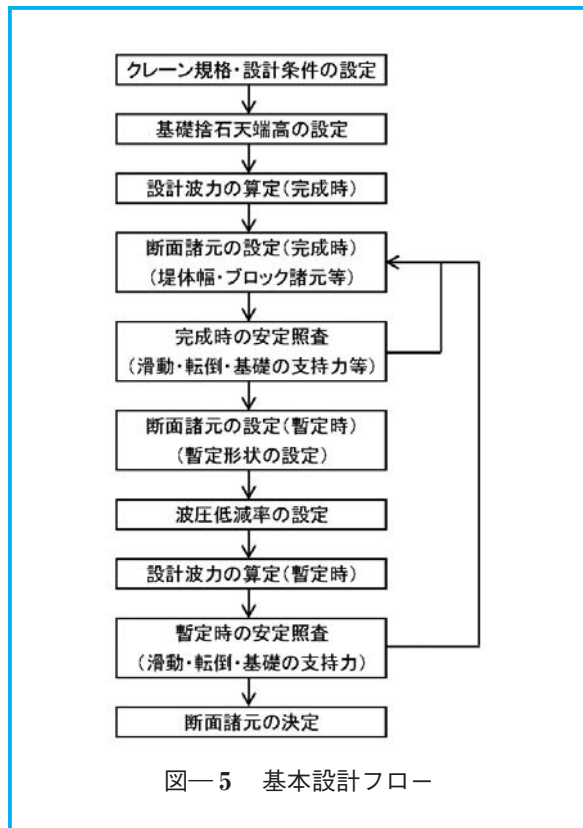
5. 連結セルラーブロックの基本設計

連結セルラーブロック工法による防波堤の基本設計フローを、図-5に示す。

200t吊程度の起重機船で施工が可能な構造とする場合、そ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。

また、本工法において基礎捨石天端を高くすると、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、衝撃砕波による波圧合力の増大が問題となるため、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。この点は、ケーソン式防波堤の基礎捨石の天端高がその最低必要厚により決定することが一般的であることと異なり、特徴的な設定方法である。

これらに留意した上で断面諸元を設定し、完成



図—5 基本設計フロー

時における一般的な安定照査を実施する。

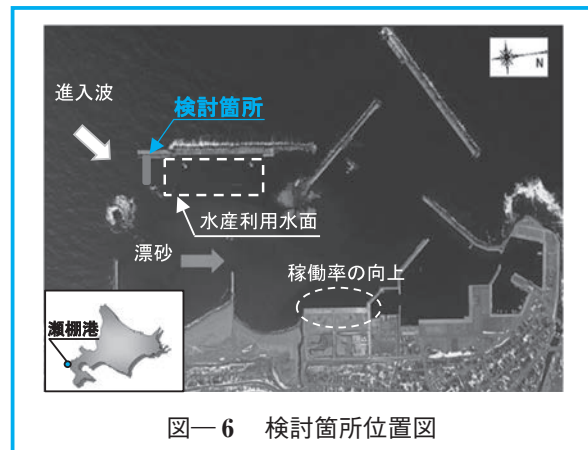
続いて、暫定時の検討においては、堤体没水状態の暫定断面を設定し、式(1)~(5)に示した波圧補正係数 κ を用いて波圧低減を行い、補正後の設計波力に対しての照査で安定を確認した上で、最終的な断面諸元を決定する。

6. 瀬棚港における検討及び現地施工

連結セルラブロック工法の検討対象施設は、北海道の南西に位置する瀬棚港の東外防波堤とした(図—6)。この防波堤は、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、水産利用のための静穏水域創出を目的とした施設である。

本検討における設計条件を表—1に示す。最大水深は12.9mと大水深であるものの、第二線防波堤であることから、設計有義波高は50年確率波で3.2mと比較的小さい。この条件において、図—5の基本設計フローに従い安定照査を行うと、断面諸元は図—7となる。

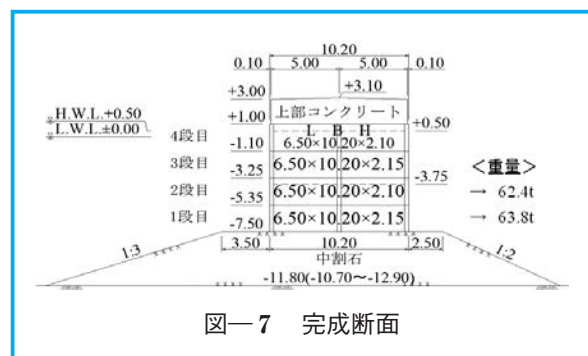
瀬棚港東外防波堤(延長90m)を対象として、



図—6 検討箇所位置図

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

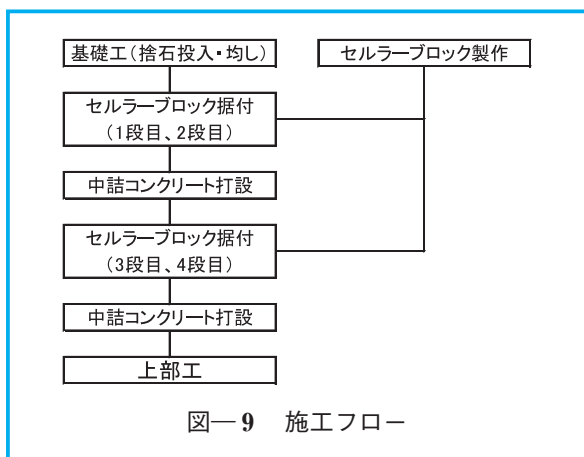
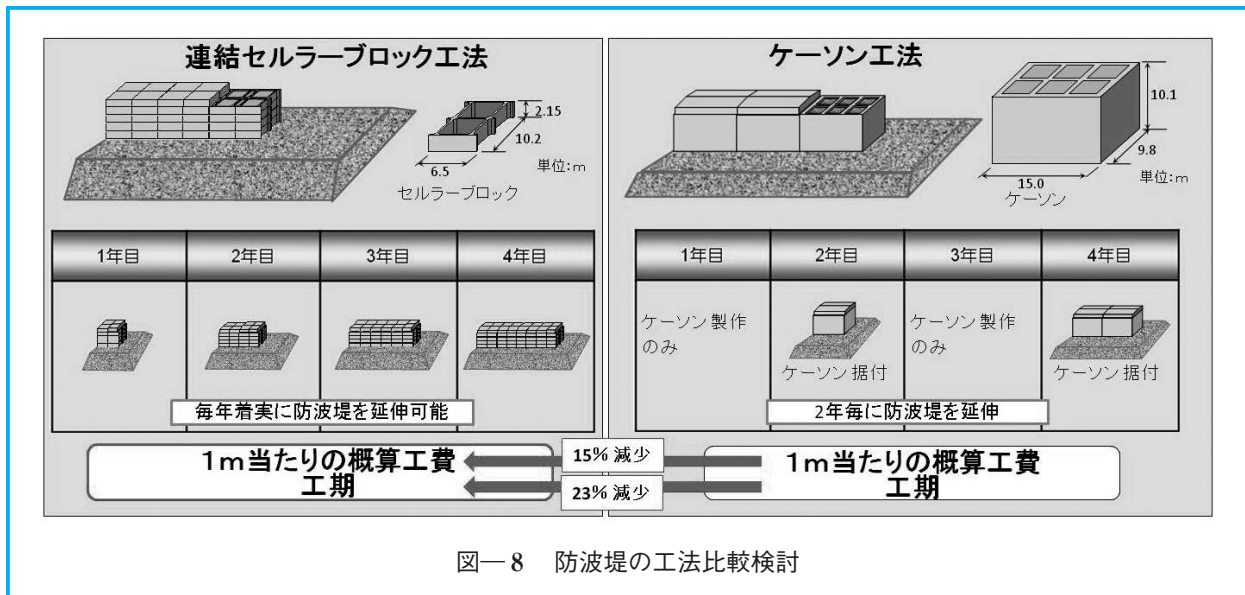


図—7 完成断面

連結セルラブロック工法とケーソン工法の比較検討を行った(図—8)。なお、予算は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函を繰り返す規模とした。

検討の結果、連結セルラブロック工法はケーソン工法と比較して工事費が15%減少し、工期が23%短縮(3年短縮)する結果となり、経済性や効果の早期発現が見込まれることから、瀬棚港において連結セルラブロック工法を採用した。

図—9に瀬棚港における連結セルラブロック工法の施工フローを示す。セルラブロックの据付は、4段のブロックを2段ずつに分けて施工している。このケースでは、2段目で施工を止める場合が想定される暫定断面となる。



写真—4 は平成26年6月に実施したセルラーブロック据付の施工状況である。

今後は、防波堤のモニタリングのほか、プロ

ク据付精度の向上等に係わる検討及び現地における実践をとおして、施工等の効率化に向けた工法

7. まとめ

施工規模が小さい場合のコスト縮減と予算規模に応じた着実な防波堤整備を実現するため、プレキャスト型枠の一種であるセルラーブロックの連結により整備効果の早期発現を可能とする新たな防波堤整備工法「連結セルラーブロック工法」を開発した。

なお、この一連の検討「段階整備を可能とする防波堤整備工法の開発」については、第39回土木学会北海道支部技術賞(平成27年度)を受賞した。

【参考文献】

- 1) 酒井和彦, 上久保勝美, 林誉命 (2013): 整備途中における混成堤の波力特性について, 第57回北海道開発技術研究発表会
- 2) 上久保勝美, 早川哲也, 林誉命, 掛水則秀, 酒井和彦, 山本泰司, 時沢武史, 木村克俊 (2014): セルラー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, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.70, No.2
- 3) 高橋博, 林誉命, 橋本茂樹 (2014): 段階整備が可能な防波堤整備工法による現地施工について—瀬棚港東外防波堤における現地施工—, 第58回北海道開発技術研究発表会