

トラップ式ダブルリーフ RC 中空構造物のブロック化 Examination for changing into a block the large caisson used for WATAR[®]

福本 正*

Tadashi Fukumoto

要 約

近年、海岸保全施設としての人工リーフは、単年度発注における経済性、施工性を考慮して、暫定断面での施工が増加している。トラップ式ダブルリーフもその消波性能や水位上昇量抑制機能を保持したまま、暫定断面に対応し得るように大型 RC 構造物のブロック化を試みた。従前のトラップ式ダブルリーフ 1 基が設置されている小松海岸を対象とし、数値波動水槽 CADMAS-SURF を用いて定量的な検討を行った。その結果、他工法に比べて省断面で所定の性能が確保できることが確認された。製作ヤードの確保や大型起重機船の回航に依存せず、暫定断面施工が可能と考える。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 数値計算の概要とブロック化の提案
- § 3. 小松海岸の現状と数値計算の適用
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

侵食対策が必要な海岸を管轄する行政機関では、年間の事業費の減少、地元業者との連携など地域における整備上の制限が顕在化している。対象海岸線は長く、毎年のように被災している現状を踏まえると、対策は急務であるものの、年間に施工できる延長は経済上限られてくる。そこで、暫定断面方式という考え方が普及しつつある。暫定断面方式とは、当該海岸において消波性能に関する要求性能を満たす岸沖方向の完成断面に対して、約半分程度の断面を施工し、沿岸方向の整備延伸を図るものである。年間の整備費が一定である場合、完成断面より施工延長を長くできる、下手側の海岸への影響を小さくし海岸全体としての被災を軽減できるとされている。暫定断面方式での施工の結果、堆砂効果や地形の安定性が確認できた場合は、完成断面には移行せず、そのままの形状を維持することとなる。しかしながら、消波性能は要求性能を満足していないため、汀線に到達する波浪減衰は期待できない。このため、汀線近傍の安定性も含めた事業費として考えると、単純にはコスト縮減とはならないものと考えられる。

一方、トラップ式ダブルリーフ (WATAR[®]) は大型 RC 構造物 (以降、函体と称す) を設置するため、出来上がり形状は完成断面となり、暫定断面方式に対応できない。また、函体製作ヤードの確保、据付けのための大型起重機船の確保など、製作・施工上の課題も存在する。

以上のことから、トラップ式ダブルリーフを暫定断面方式で提案するにあたり、消波機能を保持した函体のブロック化について CADMAS-SURF¹⁾ を用いた数値計算によって必要な断面形状を示すとともに、他工法との比較を行った。

§ 2. 数値計算の概要とブロック化の提案

2-1 CADMAS-SURF の概要

CADMAS-SURF は、従来の断面 2 次元造波水路の模型実験に代わり得る手法であり、海域施設の耐波設計への適用を目的に開発され、自由表面や碎波の影響を十分考慮できるツールである¹⁾。

・連続式

$$\frac{\partial \gamma_v}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

・運動方程式

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} \\ = \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - R_x \end{aligned} \quad (2)$$

* 技術研究所技術戦略グループ

$$\begin{aligned} & \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} \\ &= \frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - R_z \end{aligned} \quad (3)$$

2次元非圧縮粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式(1)から式(3)によって実施した。ここで、 t ：時間、 x, z ：水平、鉛直座標、 u, w ：流速の水平、鉛直成分、 ρ ：密度、 p ：圧力、 ν_e ：分子動粘性係数と渦動粘性係数の和、 g ：重力加速度、 γ_v ：空隙率、 γ_x, γ_z ：水平、鉛直方向の面積透過率、 λ ：慣性力に関する係数である。

なお、時間方向の離散化は Euler 法を、運動方程式と連続式の練成には SMAC (Simplified Marker and Cell) 法を用いている。

2-2 計算条件の検証

石川海岸美川 2 工区で施工したトラップ式ダブルリーフの消波性能を再現することで、計算条件の妥当性を検証する。図-1 に数値計算のための海底地形を示す。トラップ式ダブルリーフが施工される前の 2001 年 11 月における深浅測量結果を基に作成した。ここで、離岸距離 100 m に存在する消波ブロックで形成された没水型離岸堤は、透過性が高く汀線に到達する波高の減衰に寄与しないと考える、再現していない。計算格子は x 方向（岸沖方向）336、 z 方向 32（静水面下 16 格子）である。図中には、トラップ式ダブルリーフの断面を表示している。

計算入力のための対象波浪は、美川 2 工区における年数回来襲波（波高 $H=4.0$ m、周期 $T=10.0$ s）である。天端水深は、 -2.0 m (H.W.L. : T.P.+0.5 m) とした。

計算ケースとして、捨石マウンド、被覆石および被覆ブロックの空隙率 (POROUS 値) を表-1 のように 4 種類設定した。値 1.0 は計算セル中に構造物はなく、値 0.0 は構造物のみで空隙なしを意味する。CASE 1~CASE 3 では座標指定 (POROUS.TBL)、CASE 4 ではセル指定 (POROUS.V) で空隙率を設定した。表中には計算結果の透過率も示す。

図-2 は、一例として CASE 4 の水位変動を示したものである。計算上の波高の読み取りとしては、最沖側のセルの水面変動から入射波を、構造物背後の水深が約 5.0 m（現地観測時の計測器設置水深）となるセルの水面変動から透過波をそれぞれ読み取り、3 波の平均値として算出した。目標透過率 $Kt \leq 0.36$ に対するトラップ式ダブルリーフの実績^{2),3)} が、現地観測結果 $Kt=0.32$ 、模型実験結果 $Kt=0.36$ であったことを踏まえ、消波性能の指標である透過率によって計算結果を検証した。表-1 に示すように全てのケースで目標透過率は達成している。

空隙率が同一である CASE 2 と CASE 4 で計算結果が異なっている。これは、POROUS.TBL で空隙率を設定した場合、水平方向に 2~3 セル余分（勾配が緩い場合は 5~10 セル）に POROUS 部分を作ってしまう、実際よりも幅が長くなっていた。これが計算結果に大きく影響した原因と考えられる。したがって、CASE 4 の計算結果が目標透過率に最も近いことを踏まえ、以降の計算では、CASE 4 の設定条件に統一した。

確認のため CASE 4 の条件において、現地で想定されているエネルギー平均波（波高 $H=2.5$ m、周期 $T=7.0$ s、設計目標値 $Kt \leq 0.44$ ）を作用させた。計算結果から得られた透過率は、 $Kt=0.46$ であった。模型実験および現地観測結果が $Kt=0.44$ であったことを考えると、上記設定はほぼ妥当であると判断する。

なお、海底勾配については OBST.TBL で設定した。計算時間が多少長くなる程度で、結果に大きな影響はなかった (Kt の少数第 2 位が 1 小さくなる)。

2-3 ブロック化の考え方

トラップ式ダブルリーフの大型函体をブロック化するにあたり、

- ①トラップ式ダブルリーフの函体内に取付けられている斜板の機能を踏襲する

表-1 検証計算結果

CASE	空隙率			透過率 Kt
	捨石 マウンド	被覆石	被覆 ブロック	
1	0.3	0.1	0.1	0.316
2		0.2		0.337
3	0.4	0.3	0.2	0.353
4	0.3	0.2	0.1	0.354

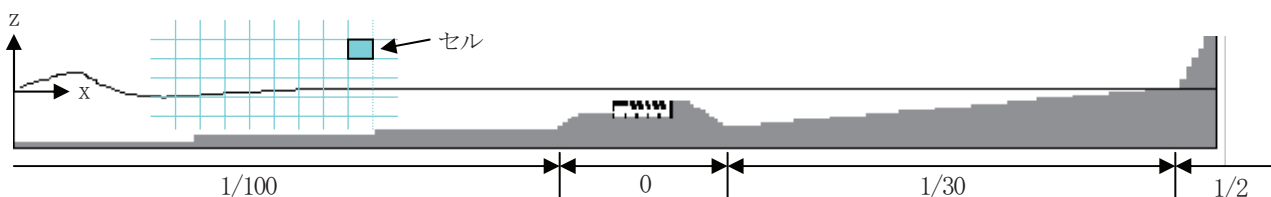


図-1 美川 2 工区再現計算の海底地形 (図中の数値は海底勾配)

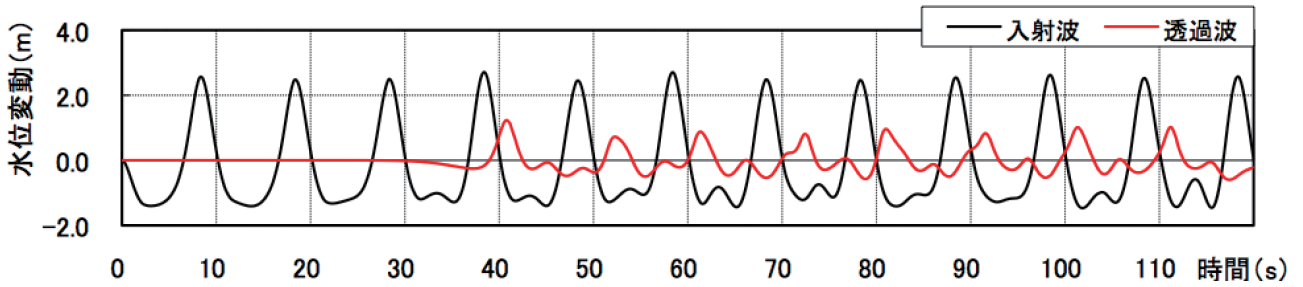


図-2 年数回来襲波の時系列 (CASE 4 の計算結果)

- ②ブロック化に伴う安定性の低下 (単体としての重量の大幅な減少) を補うため、かみ合わせ形式とする。
- ③製作の容易さを追求する (主要部は、前後の向きが同じ)。

といった事項を考慮し、図-3 のようなトラップブロック (以降、Tブロックと称す) を提案した。

§3. 小松海岸の現状と数値計算の適用

3-1 小松海岸の現状

小松海岸は、石川県の小松市から加賀市 (片山津海岸) にわたる海岸で、汀線の侵食が著しく、毎年のように護岸やその背後の天端陥没などの被害を受けている。このため、国土交通省では、小松海岸および片山津海岸を2004年に直轄石川海岸の区間として延伸し、工事に着手した。人工リーフ15基の整備と汀線近傍への475,000 m³の養浜が計画されている。整備すべき人工リーフの1基目として、小松市浜佐美地先にトラップ式ダブルリーフ

が延長180m (2005年に5函体 (75m)、2006年に7函体 (105m) の据付) 施工された⁴⁾。

なお、直轄化延伸後の2005年以降も、直立堤護岸およびその背後の被災が生じており^{5), 6), 7)}、早急な対策が望まれている。

3-2 小松海岸での計算条件

(1) 初期計算

まず、構造物がない場合の小松海岸における数値計算を行った。対象断面は図-4である。後述する各種人工リーフの天端幅 (岸沖方向の長さ) を変化させるため、透過波および水位上昇量を記録・評価するセルは、図中の4点とした。天端水深は全てH.W.L.時2.0mに統一し、波浪条件は以下のように設定した。目標透過率は美川海岸と同等である²⁾と想定した。

- ・年数回来襲波 (波高4.0m, 周期10.0s), $Kt \leq 0.36$
- ・エネルギー平均波 (波高2.5m, 周期7.0s), $Kt \leq 0.44$

計算格子をx方向356, z方向50 (静水面下25) とし、入射波 (セル1) と透過波 (構造物岸端部から約40m離れた地点: セル245 or 265 or 285 or 305) から透過率を算定した。水位変動の図は割愛するが、波高が2.5mの場合、沖からの入射波浪はあまり減衰しない。しかしながら、波高が4.0mの場合、波高に対して相対的に水深が浅いため、若干減衰した。また、両者とも水位上昇量はほとんどないことが確認された。

(2) 比較対象構造物

計算時に設定する必要がある以下の部材については、検証計算結果を踏まえて空隙率を決定した。

- ・海底地盤: 0.01, ・捨石マウンド: 0.3
- ・被覆ブロック: 0.4, ・被覆石: 0.2

計算結果を比較するため、全ての計算条件を固定値とした。ここで、計算格子幅を全区間同一の値とすると、計算時間が非常に長くなる。一方、計算の安定性を確保するため、格子幅を大きくする場合は10%程度に抑えることが推奨されている。そこで、数ケースの試算を行い、水位変動などの安定性を確認した上で、x方向 (岸沖方向) の計算格子は、構造物の周辺部分を0.5mと細かく設定した。z方向は0.5m格子幅を基準としたが、上端と下端の5格子分を1.0mとした。

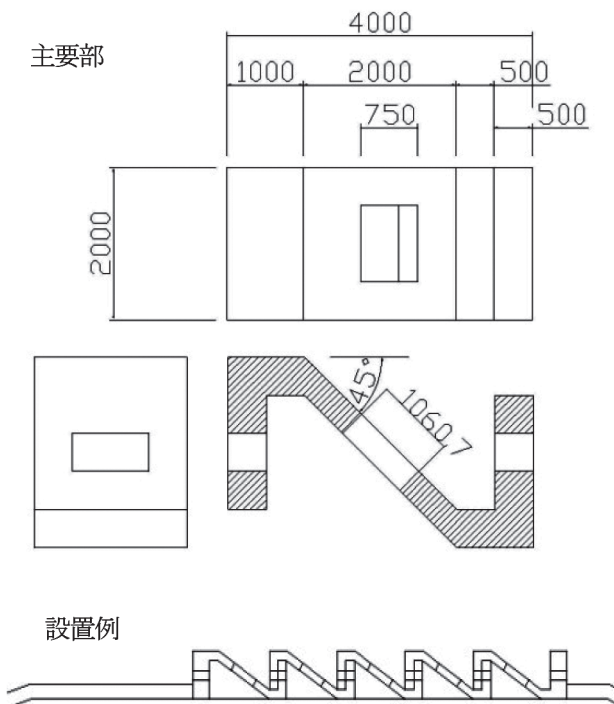


図-3 Tブロックの概要

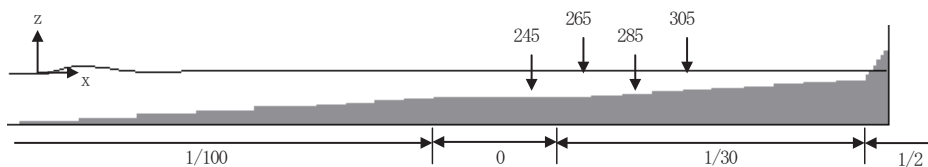


図-4 小松海岸の断面

図-5 に示す比較対象ブロック⁸⁾ (以降、A ブロックと称す) の空隙率は、そのブロックの形状を考慮し、

- ・天端：0.4 ,
- ・脚部：0.9

とした。ここで、A ブロックは、立方格子状のブロックであり、中央断面で計算条件を設定すると、天端の開口部 (スリット) によって、構造物がないこととなり、そのため、計算によって得られた消波性能が大幅に悪くなった。そこで、A ブロックの天端は空隙 (POROUS) として設定した。脚部についても同様である。

A ブロックは暫定断面天端幅 21.3 m (3 m 標準型ブロック 7 個)、完成断面天端幅 42.65 m (3 m 標準型ブロック 14 個) が考えられている⁸⁾。従来型人工リーフについては、捨石マウンドと、被覆ブロックで構成される台形状の構造物である。3 種類の構造物の天端水深は 2.0 m に統一した。このため、従来型人工リーフが捨石量は、3 種類の中で最も多くなる。

一例として、天端幅を 20 m 程度とした場合の 3 種類の構造物の計算格子を図-6 に示す。各人工リーフの天端幅については、表-2 のように設定した。A ブロックの最小値および最大値については、小松海岸で暫定断面および完成断面として用いられている値とした。従来型人工リーフについては、人工リーフの設計の手引き (改訂版) を参照⁹⁾ するとともに、その最大値は、美川海岸での完成断面としての実績値¹⁰⁾ とした。対象波浪および目標透過率は初期計算と同様とした。

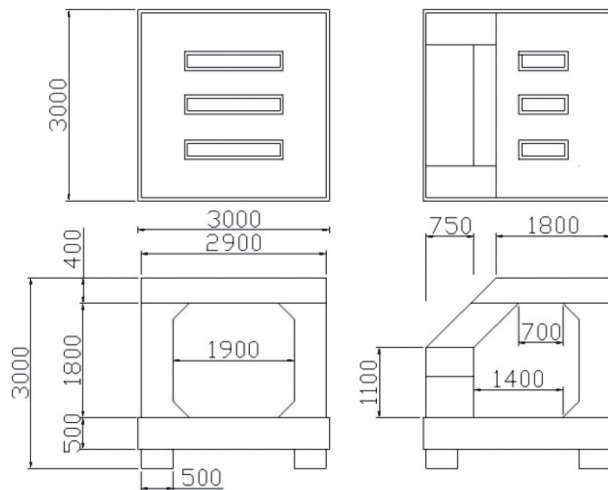


図-5 A ブロックの形状寸法 (中央部と端部)

表-2 3 種類の人工リーフの天端幅

天端幅 (m)		
T ブロック	A ブロック	従来型人工リーフ
11.0	-	10
20.0	21.3	20
32.0	-	30
41.0	39.6	-
	42.65	
-	-	50
4 ケース	3 ケース	4 ケース

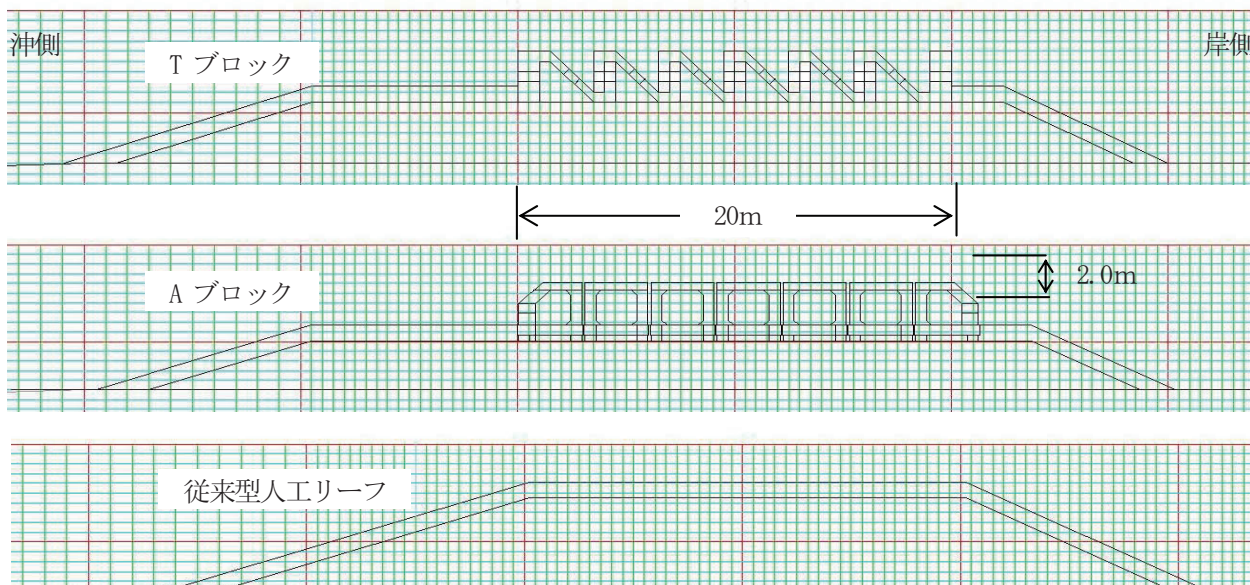


図-6 3 種類の人工リーフの計算断面

3-3 計算結果

(1) Tブロック vs Aブロック

一例として、図-7はエネルギー平均波（波高2.5 m, 周期7.0 s）を作用させたときのTブロックおよびAブロックの透過波の水位変動を示したものである。Tブロックの天端幅は20 mで、Aブロックの天端幅は21.3 mであり、透過波高には大きな違いはない。

TブロックとAブロックの各天端幅に対応する透過率を図化したものが図-8である。Tブロックは、天端幅が広くなるとともに透過率 K_t は小さくなり、天端幅が30 mを越えると一定値に漸近する（年数回来襲波では0.32, エネルギー平均波では0.42）。2種類の波浪に対する目標透過率を満足するためには、約30 mの天端幅が必要となる。ブロックの寸法・設置方法から判断すると、ブロック10個、天端幅32 m、すなわち、完成断面の形状寸法となる。暫定断面に対する目標透過率が不明であるが、2つの波浪に対する透過率がともに0.5程度となった天端幅20 mの形状をTブロックの暫定断面と設定することができる。

Aブロックは、年数回来襲波では天端幅広くなると透過率は小さくなるものの、エネルギー平均波ではその傾向が明確ではなく、ほぼ一定値となっている。想定されている完成断面では、2種類の波浪に対する目標透過率

を満足することができない。ブロック内の空隙と形状（斜板）の違いによって、Tブロックとの差が大きく生じていると考えられる。なお、暫定断面での透過率は、2種類の波浪ともに、 $K_t \approx 0.6$ であった。

(2) Tブロック vs 従来型人工リーフ

図-8と同様に、従来型人工リーフの各天端幅に対応する透過率をTブロックの結果とともに、図化したものが図-9である。従来型人工リーフは、エネルギー平均波では天端幅が20 m程度で目標透過率を満足するものの、年数回来襲波では天端幅が50 m程度必要となる。これは、人工リーフの設計の手引きから算出される天端幅と一致している。したがって、完成断面の天端幅は50 m以上必要であったことが裏付けられる。一方、エネルギー平均波に対する消波性能はTブロックより若干高く（近似曲線より下側）、年数回来襲波に対する消波性能はTブロックより低い（近似曲線より上側）。

2種類の波浪に対して $K_t \leq 0.5$ を満足する従来型の天端幅は約20 m程度となり、Tブロックの暫定断面幅と同じになる。なお、完成断面として比較すると、従来型よりTブロックの断面幅の方が小さくなる。

参照としてTブロックの向きを逆にした場合（沖側が高く岸側が低い斜板を逆向きにする）、透過率は1割程度悪くなった。水平波力を下向きに伝えるため、ブロック

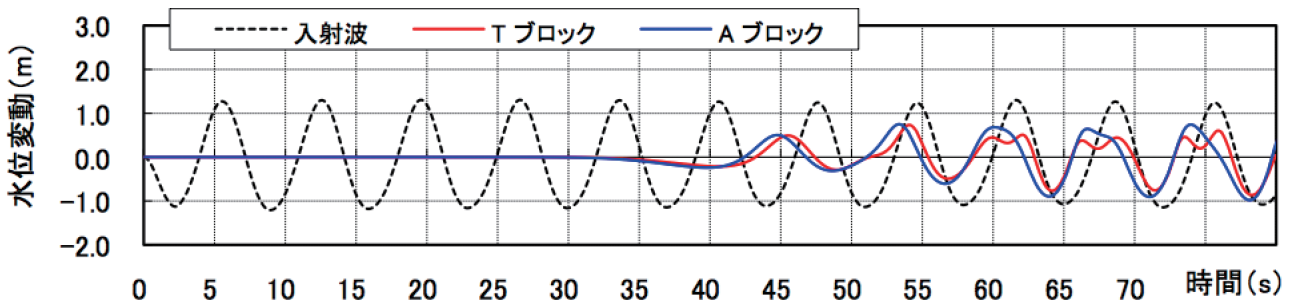


図-7 エネルギー平均波におけるTブロックおよびAブロックの水位変動

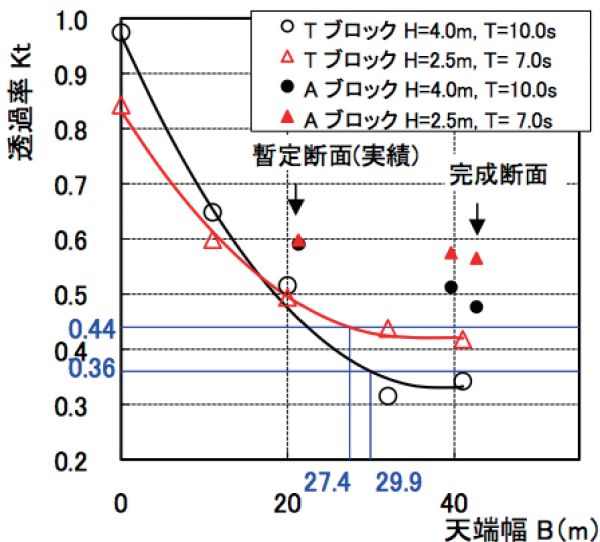


図-8 TブロックとAブロックの比較

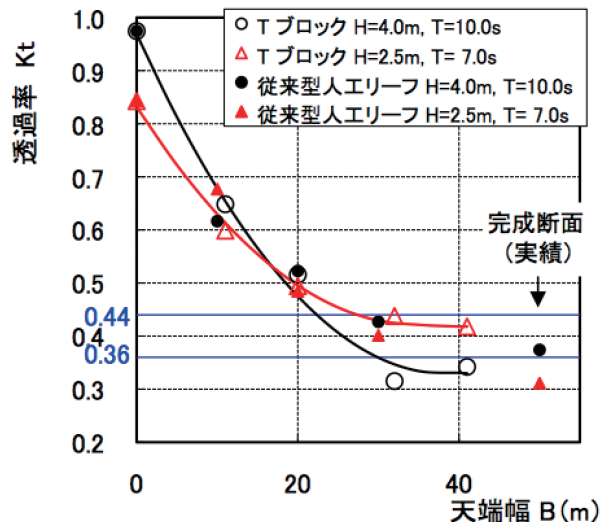


図-9 Tブロックと従来型人工リーフの比較

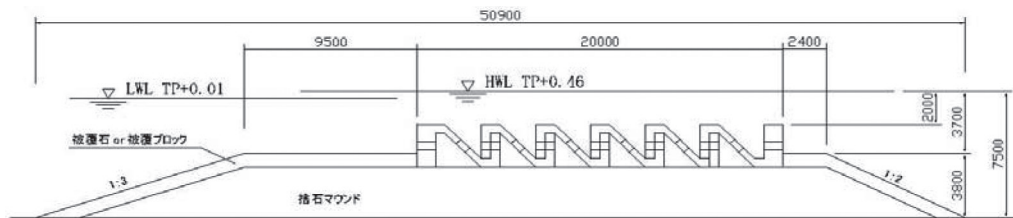


図-10 暫定断面 B=20 m

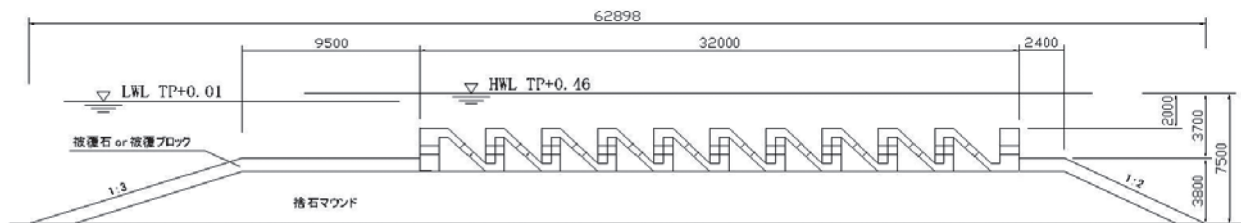


図-11 完成断面 B=32 m

表-3 各断面における天端幅、透過率、ブロック個数

	各部天端幅 (m)			透過率 Kt		ブロック (個)
	1 段目	2 段目	背面	年数回波	E 平均波	
暫定断面	9.5	20.0	2.4	0.50	0.50	6
完成断面		32.0		0.35	0.43	10

の安定性は向上するものの、トラップ式ダブルリーフの原理である「波浪を構造物内に誘導し、擾乱によるエネルギー逸散効果と沖への水塊の戻し」という基本機能が発揮されないものと考えられる。

(3) Tブロックの暫定断面と完成断面

以上の計算結果を基に、Tブロックを用いた人工リーフの暫定断面を図-10に、完成断面を図-11にそれぞれ提案する。また、両断面における年数回来襲波とエネルギー平均波に対する透過率およびTブロックの必要個数整理したものが、表-3である。

§4. おわりに

数値波動水槽 CADMAS-SURF を用いた定量的な計算を実施し、トラップ式ダブルリーフの函体のブロック化を検討した。その結果、同様なブロック形式の人工リーフや従来型人工リーフに比べて省断面で所定の性能が確保できることが確認された。これによって、大型函体の製作ヤードの確保、据付けのための大型起重機船の回航などに依存しない暫定断面施工が可能と考える。

本論では、ブロック化という極小化を検討したものであるが、函体を分割製作し、据付けすることも可能であることを確認している。今後は、施工条件に応じた海岸保全施設の提案が可能となる。

謝辞：CADMAS-SURF で計算するための条件設定に際し、名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 川崎浩司准教授にアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 財団法人 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，p. 296, 2001.
- 2) 福本 正・土橋吉輝・高村浩彰・二木 渉・安田孝志：実海域における新型人工リーフの水理特性，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 766-770, 2004.
- 3) 福本 正・高村浩彰・土橋吉輝・安田孝志：トラップ式ダブルリーフ形状寸法の算定方法，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 826-830, 2005.
- 4) 北陸地方建設事業推進協議会：技術レポート，新型人工リーフの施工紹介，北陸の建設技術，pp. 14-15, 2006.
- 5) 国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所：広報いしかわかいがん，Vol. 3, p. 2, 2006.
- 6) 金谷孝雄・野畑嘉也：石川海岸におけるプレキャストブロックによる災害復旧工事，平成 20 年度国土交通省北陸地方整備局管内事業研究会，p. 4, 2008.
- 7) 越野哲矢・中川雅允：石川海岸における海岸保全施設の巡視点検について，平成 21 年度国土交通省北陸地方整備局管内事業研究会，p. 4, 2009.
- 8) 国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所：TOPICS「新型人工リーフ 2 基を設置」，夢職人冬号，Vol. 29, 2007.
- 9) 社団法人 全国海岸協会：人工リーフの設計の手引き（改訂版），p. 95, 2004.
- 10) 国土交通省北陸地方整備局：海岸事業の再評価説明資料，石川海岸直轄海岸保全施設整備事業，p. 19, 2005.