

白老港における裏埋土の吸い出し防止対策工の実証実験（第2報）

室蘭開発建設部 苫小牧港湾事務所 ○岩田 真
西村 智美
高田 稔年

限りある港湾・漁港水域を有効的、機能的に活用するために、比較的波浪が厳しい位置に埋立地を配置することがある。このような埋立地の護岸には耐波性、越波防止などの防波堤性能を有する防波護岸が造られ、主として混成堤形式が用いられる。一方、外海の波浪を直接受ける防波護岸の背後地では、捨石マウンドを透過した波の作用などにより埋立土砂が吸い出され、陥没、沈下が生じる事例が少なくなく、その多くで防砂シートの損傷が確認されている。

白老港第3商港区防波護岸において、防砂シートの損傷防止に主眼を置いた吸い出し防止対策工の現地実証実験を行っている。本報では、その実験結果などから対策工の有効性について考察を行う。

キーワード：吸い出し、防波護岸、間隙水圧

1. 実験の目的

防波護岸に主として用いられる混成堤形式の構造は、まず、捨石マウンド上に本体工（一般にはケーソン）を設置し、次に、本体工背後に裏込石を投入、成形し、裏込石表面を防砂シートで覆ったのち、埋立土の投入、敷均しを行うのが一般的である。

このような構造の埋立地で発生した吸い出し被災では、その要因として、防砂シートが損傷したためと考えられる、あるいは実際に損傷が確認されている事例が多い。

防砂シートに損傷を与える主な作用としては、埋立時の土塊の落下衝撃、施工途中（埋立前）や完成後に受ける波（捨石マウンドを透過してくる波）の繰り返し荷重などが指摘されており、両者はいずれも防砂シートに生じるせん断力が損傷の直接的な原因となる。

本実験で検討している吸い出し防止対策工は、次のとおりである。

第1は、裏込石と防砂シートとの間に、裏込石よりも粒径の小さいフィルター層を設ける。裏込部表面の凹凸を小さくし、より面的に防砂シートと裏込部が接するようすることで荷重の分散を図るためである。

第2は、捨石マウンドと裏込石との間にマットを敷設する。護岸前面から捨石マウンドを透過し護岸背後の裏込石内へと伝搬される波の圧力をマットにおいて遮断することで、防砂シート敷設位置へ及ぶエネルギーを低減させるためである。

以上の二重の対策工により防砂シートの損傷を防止することで、吸い出し被災の主たる要因を除こうとするものである。

2. 実験の概要

(1) 実施箇所

実証実験の実施箇所は、写真-1に示す白老港第3商港区防波護岸である。第3商港区では水深11mの岸壁を核とした新たな埠頭を造成中であり、写真は実験当時の整備進捗状況を表している。最終的には第2商港区と同様の形状で埋め立てられ、港の西端に位置する新たな防波護岸は外海の波浪を直接受けることとなる。



写真-1 実施箇所

(2) 実験区間

整備途上の防波護岸（全長545mのうち実験時の延長360m）のうち、先端（沖）側から135mを実験区間とし、さらに次のとおり分割した。

- ①先端側から45m（ケーソン3函分）には捨石マウンドと裏込石の間にアスファルトマットを敷設した。
→アスファルトマット区間（以下、As区間）

- ②As区間に続く45mにはアスファルトマットに替え
ンクリートマットを敷設した。
→コンクリートマット区間 (以下、Co区間)
- ③Co区間に続く45mにはマットを敷設しない。
→従来型区間 (以下、従来型)

また、各区間の真ん中に位置するケーソン1函分15mには、正規の形状に対し1m下がりで投入した裏込石上にフィルター層を設けた上で防砂シートを敷設した。防砂シートの押さえには、埋立後に近い状態とするために一般的に使用する小土のうに替え、製鋼スラグを中詰材とした約0.3t/個の土のうを概ね2mメッシュで配置した。
図-1に実験区間の平面図を示す。

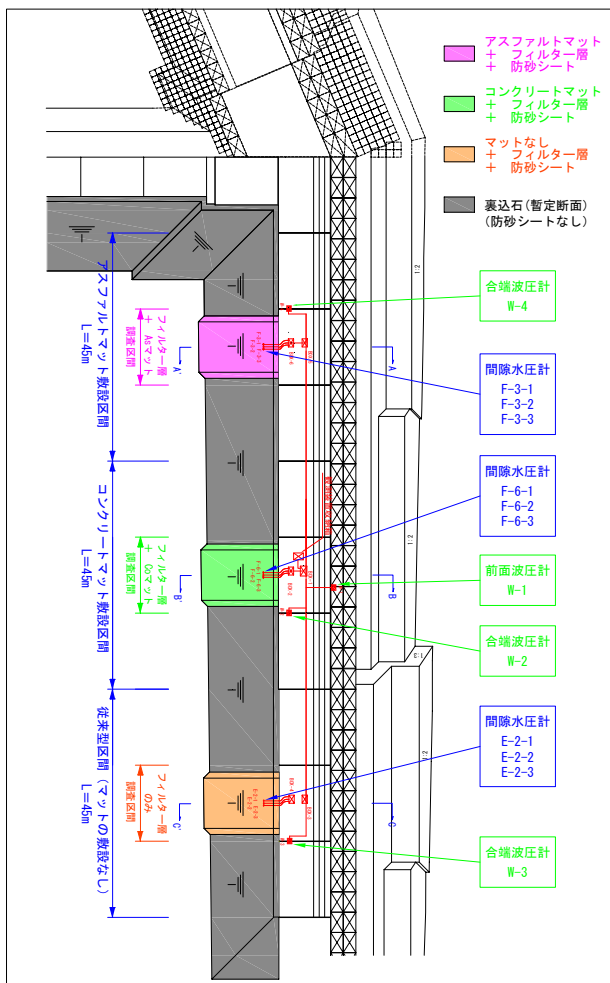


図-1 実験区間 (平面図)

(3) 観測機器

実験に用いた観測機器とその設置位置は次のとおりである。図-2には設置位置を断面的に表した。

- ①実験期間中に来襲した波浪の諸元を把握するため、白老港港外 (島防波堤先端部沖300m) に波高計を設置した。(写真-1)
- ②捨石マウンドを透過してくる波がマットにより低減される度合いを確認するため、各区間の捨石マウ

ンド内1箇所、裏込石内2箇所に間隙水圧計を設置した。(図-1, 2)

- ③マットにより遮断された波がケーソン合端部へ伝搬することを想定し、各区間のケーソン合端部の天端面上に波圧計を設置した。(図-1, 2) (写真-2)
- ④護岸前面の波圧を把握するため、実験区間全長の中央位置に波圧計を設置した。(図-1, 2)

なお、図-2に示しているとおり、ケーソン合端部には港外側に膨張目地、港内側には高強度目地板と、二重の目地対策が施されている (本実験のために設置したのではなく、安全上 (経験上)、当初から設置を予定していたものである)。よって、本実験ではケーソン合端部からの圧力伝搬は無視している。

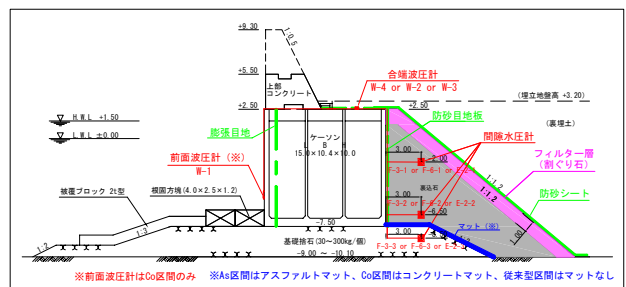


図-2 実施区間 (断面図)



写真-2 ケーソン合端部 (天端面)

(4) マットとフィルター層

a) アスファルトマット

洗掘防止工などに使用するマット (t=80cm) と同一のものを用いるが、遮蔽性があまりに高いと、潮の干満により護岸前後で大きな水位差が生じる懸念があるため、マットにφ10cmの孔を40cmメッシュ間隔で穿ち、開口率が5%となるよう加工した。

b) コンクリートマット

厚さ20cm、一辺50cmの正六角形の形状をしたコンクリート製ブロックを用いる。このブロックを一定数を一纏めにマット状とした上で吊架台を用いて敷設し、この繰り返しにより捨石マウンド表面を被覆する。

小ブロックの集合体とするのは、捨石マウンド表面の凹凸に追従させ、これにより生じるブロック間の隙間において透水性を確保するためである。

陸上ヤードに造成した擬似捨石マウンドにおける敷設試験の状況を写真-3に示す。



写真-3 コンクリートマット敷設試験状況

c) フィルター層

フィルター層には粒径6~15cmの割り石を用いた。

なお、裏込石は一般に使用している雑割石であり、粒径はおよそ5~50cmである。

また、割り石の設置法勾配は、陸上における安定勾配試験の結果から、雑割石と同一となる1:1.2とした。

3. 実験結果

(1) 波浪観測

a) 港外波高

島防波堤沖300m(水深23m)で観測した60昼夜の波高経時変化を図-3に示す。この期間に3回の荒天に遭遇し、各回で後述の計測、調査を行った。各回で観測された最大波の諸元を表-1に示す。

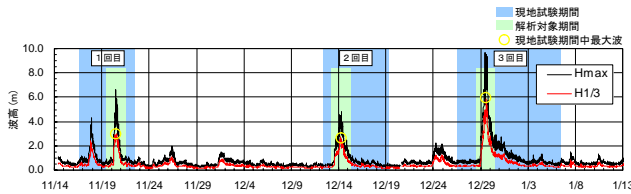


図-3 波高経時変化

表-1 各回の最大波の諸元

試験回	日時	H _{max}	T _{max}	H _{1/3}	T _{1/3}	波向
第1回	H19.11.20 14:20~14:40	5.13m	6.7s	2.96m	7.7s	SSE
第2回	H19.12.14 5:40~6:00	4.48m	8.9s	2.71m	9.3s	SSE
第3回	H19.12.29 14:40~15:00	9.27m	8.4s	5.86m	9.5s	ESE

b) 護岸前面波高

表-1の有義波高を基に各回各区間の護岸前面の直角入射波高を次の手順で算定した。直角入射波高を算定する目的は、後述する数値シミュレーションで用いるためである。

- ①表-1の有義波高を浅水係数で割り戻し、観測地点の換算沖波波高を算出。
- ②①に対し屈折・回折を考慮して各区間の換算沖波波高を算出。

③②に対し浅水変形を考慮して各区間の前面波高(斜め入射)を算出。

④③を用い、合田式により波圧合力を算出。

⑤④と波圧合力が同等となる直角入射波高を逆算。

以上により算定された護岸前面直角入射波高を表-2に示す。なお、Co区間の護岸前面に設置した波圧計の観測値と④で算出した波圧はほぼ一致した。よって、表-2の波高(計算値)も妥当であると考えられる。

表-2 護岸前面直角入射波高

試験回	日時	As区間	Co区間	従来型
第1回	H19.11.20 14:20~14:40	1.93m	1.91m	1.91m
第2回	H19.12.14 5:40~6:00	1.88m	1.86m	1.86m
第3回	H19.12.29 14:40~15:00	2.57m	2.56m	2.55m

(2) 波圧・間隙水圧

波圧、間隙水圧の測定は、バッテリー容量の関係から図-3に示す青色の期間のみ行った。表-3は実測した波圧、間隙水圧の有義値をw₀H(海水の単位体積重量×表-2の波高)で割り無次元化した値である。w₀Hを単位として用いるのは、各回各区間で波高が異なる影響を除去するためである。

表中の黄色のハッチは観測波形やスペクトルの状態から異常と認められる値である。As区間の捨石マウンド内では全ての回で良好な値を得られなかった。

また、各区間の裏込内では下段に比べ上段の値が大きい傾向にあり、通常考えられる結果とは逆になっている。これは、写真-1のとおり、護岸背面側の施設が整備途上であるため、港内回折波の影響を受けているものと考えられる。

表-3 波圧・間隙水圧

測定点		第1回	第2回	第3回	平均	
港外波圧		W-1	0.761	0.540	0.685	0.662
As区間	合端波圧	W-4	0.220	0.248	0.265	0.244
	裏込上段	F-3-1	0.081	0.060	0.076	0.072
	裏込下段	F-3-2	0.073	0.058	0.085	0.072
	基礎捨石	F-3-3	0.040	0.031	0.040	0.037
Co区間	合端波圧	W-2	0.199	0.114	0.180	0.164
	裏込上段	F-6-1	0.098	0.081	0.098	0.092
	裏込下段	F-6-2	0.089	0.074	0.095	0.086
	基礎捨石	F-6-3	0.091	0.076	0.105	0.091
従来型	合端波圧	W-3	0.201	0.133	0.191	0.175
	裏込上段	E-2-1	0.090	0.078	0.100	0.089
	裏込下段	E-2-2	0.085	0.075	0.103	0.088
	基礎捨石	E-2-3	0.086	0.075	0.102	0.088

(3) 防砂シート損傷調査

a) 水中目視調査

潜水士による目視調査を各回(荒天時)の前後を含む計7回実施した。調査結果は、表-4に示すとおり6回目の調査までは各区間とも損傷は確認されず、追加で行った7回目の調査で初めて損傷が確認された。7回目の調査結果を表-5に示す。

7回目の調査でもAs区間では損傷は確認されなかった。Co区間と従来型では同じく6箇所まで損傷が確認されたが、損傷程度を損傷面積の合計値で比較するならば、Co区間77.3cm²、従来型9.8cm²とCo区間の方が大きい。なお、損傷はいずれも静水面付近で発生した。

表-4 防砂シート損傷調査（水中目視）

回	月日	損傷	備考	回	月日	損傷	備考
①	11/19	無し	第1回前	⑤	12/26	無し	第3回前
②	11/22	無し	第1回後	⑥	1/7	無し	第3回後
③	12/12	無し	第2回前	⑦	1/26	有り	※追加調査
④	12/19	無し	第2回後				

※1/24にナウファス苔小牧（水深50.7m）でH_{max}=4.79m、H_{1/3}=3.45mを観測

表-5 防砂シートの損傷程度（7回目調査結果）

As区間	Co区間	従来型
損傷なし	φ10mmの円形状 3箇所 120mm×50mmの楕円状 1箇所 80mm×30mmの楕円状 1箇所 30mm×30mmのカギ形状 1箇所	φ35mmの円形状 1箇所 φ20mmの円形状 4箇所 φ10mmの円形状 1箇所

b) 陸上詳細調査

各区間に敷設した防砂シートを撤去し、陸上ヤードにおいて詳細な損傷確認を行った。調査（撤去）は工事稼働期（作業船手配）の関係もあり、敷設からおよそ5ヶ月が経過したH20.5月に行った。結果は、各区間ともに上端から下端まで無数の損傷を受けていた。この原因は次のとおり考えられる。

割ぐり石（フィルター層）は既述のとおり陸上における安定勾配試験から1:1.2とした。しかし、実験区間では法肩が痩せ、法尻に膨らみが生じた。主に港内波の影響により法崩れが生じたものと思われる。また、割ぐり石を設けていない実験区間両脇で裏込石に沈下が見られることから、実験区間においても割ぐり石下層の裏込石の沈下や裏込石内への割ぐり石の食い込みが生じたものと思われ、このことも法肩の痩せの一因と考える。

このような裏込部の形状変化と護岸前背面からの波の繰り返し作用とにより想定範囲外の損傷が生じたものと推察される。

4. 実験結果の考察

(1) 波圧・間隙水圧

ケーソン合端部の波圧について従来型を基準（1.00）とした比較を表-6に示す。As区間では平均で約40%高い値を示しており、マットにより護岸背後への伝搬を遮断された圧力がケーソン合端部へ伝搬したものと考えられる。一方、Co区間はむしろ低い値となっており、マットの遮断効果が確認できない。

表-7は裏込石下段における間隙水圧について従来型を基準とした比較である。下段での比較のみ表したのは、既述のとおりAs区間の捨石マウンド内での計測に異常が

見られるためである。また、裏込石内では上段に対し下段の方が港内波の影響が小さいと考えられるためである。

As区間では平均で約20%低い値となっており、ここでもマットの効果が確認できる。一方、Co区間は従来型とほぼ同値であり、やはり効果は確認できない。

表-6 合端波圧（従来型を1とした比較）

区間	第1回	第2回	第3回	平均	
As区間	W-4	1.09	1.87	1.38	1.39
Co区間	W-2	0.99	0.86	0.94	0.94
従来型	W-3	1.00	1.00	1.00	1.00

表-7 裏込下段の間隙水圧（従来型を1とした比較）

区間	第1回	第2回	第3回	平均	
As区間	F-3-2	0.86	0.77	0.83	0.82
Co区間	F-6-2	1.04	0.98	0.93	0.98
従来型	E-2-2	1.00	1.00	1.00	1.00

(2) 防砂シート損傷調査

法崩れ等による割ぐり石の形状変化により、最終的に各区間とも無数に損傷を受けたことから、マットの有無と防砂シートの健全度との関係は評価できない。ただし、水中目視による調査期間中には、マットによる遮断効果が確認できたAs区間でのみ無傷であった点からマットの有効性を窺い知ることができる。

(3) Co区間

Co区間でマットによる圧力遮断効果が得られないのは次のためであると考えられる。

コンクリートマットを形成する単体の小ブロックは、今回の実験では全て同一形状寸法を用いた。このため、捨石マウンドの肩幅に対しぴったりとしたマット幅とならず、護岸ケーソンとマットとの間に平均して60cm程度の空隙（未被覆面）が生じた。この60cm幅の空隙から護岸背後へ圧力が伝搬しているものと考えられる。

なお、As区間ではアスファルトマットはほぼ隙間なく敷設されている。

5. 数値シミュレーション

現地実験断面では、防砂シートのばたつきを抑えるために製鋼スラグを中詰材とした大土のうを設置しているものの埋め立ては行われていないため、施設完成後の状態とは異なる。

裏込石が埋立土で覆われた後に護岸背後に生じる圧力を把握するため数値シミュレーションを行った。

数値シミュレーションは、WSSI（Wave-Soil-Structure Interaction）¹⁾と呼ばれる手法を用い、まず、実験断面の再現（現況再現）を行い、次に、埋立後の完成断面についての計算（将来予測）を行った。

(1) 現況再現

3回の実験回のうち、第1回目の現況再現を行った。

a) 波浪条件

波高は3 (1)b)で求めた直角入射波高を用いる。直角入射波高としているのは、WSSIが断面2次元計算のためである。また、既述のとおり現地実験断面は港内波の影響を受けている。このため、護岸背面側からの直角入射波高についても同様の方法で算出した。

表-8に入射波条件を示す。

表-8 入射波条件 (現況再現)

区 間	護岸前面波		護岸背面波	
	波高	周期	波高	周期
As区間	1.93m	7.7s	0.15m	7.7s
Co区間	1.91m	7.7s	0.20m	7.7s
従来型	1.91m	7.7s	0.26m	7.7s

b) 計算パラメータ

表-9に計算に用いた各パラメータの値を示す。

各パラメータ値は、実験区間近傍のボーリングデータや各種文献を参考として設定したが、設定根拠等の詳細はここでは割愛する。なお、表中の黄色ハッチの値は現況再現計算から最適値を求めたフィッティングパラメータである。

表-9 計算パラメータ

	透水係数 m/s	空隙率	湿潤単位 体積重量 kN/m ³	せん断弾性 係数 kN/m ²	体積弾性 係数 kN/m ²	ポアソン 比
海底土	0.000075	0.46	19.2	48,000	130,000	0.333
埋立土	0.000075	0.49	18.2	53,000	140,000	0.333
基礎捨石	1.0	0.39	19.6	180,000	480,000	0.333
裏込石	1.0	0.39	19.6	100,000	270,000	0.333
割ぐり石	0.5	0.39	17.9	90,000	240,000	0.333
被覆ブロック	1.0	0.50	16.3	6,600,000	9,000,000	0.333
アスファルトマット	0.01	0.05	21.6	8,800,000	23,000,000	0.333
コンクリートマット	0.1	0.07	22.5	9,200,000	24,000,000	0.333

※埋立土は将来予測時のみ使用

c) 計算モデル

計算領域は、港内外ともに1波長分を目安として護岸法線から港外側へ90m、港内側へ80mの計170mとした。

図-4に護岸周辺を拡大したCo区間の計算モデル図を示す。図中の赤丸箇所では現地の状況に合わせて60cmの空隙を設定した。(裏込石のパラメータを用いた。)

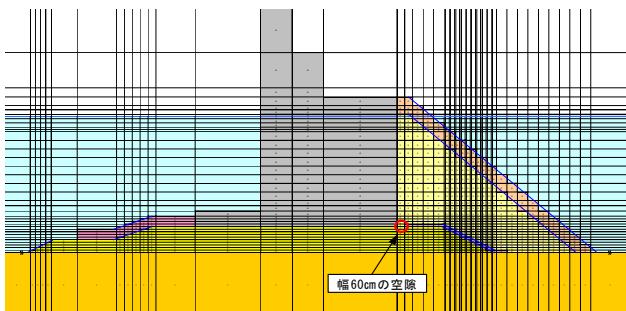


図-4 計算モデル図 (現況再現・Co区間)

d) 計算結果

現況再現の計算では、現地の状況に合わせて護岸前面波と護岸背面波を考慮するが、両方向からの波を一度に計算できないことから、前面波のみ、背面波のみの計算を行い、これらを合成することで現況再現を行った。

図-5に従来型の現況再現結果を示す。図中の赤丸の箇所に表した数字は現地実験時に得られた間隙水圧の実測値であり、実測値と計算値はほぼ一致する。同様に行ったAs区間、Co区間の計算でも概ね現況を再現することができた。

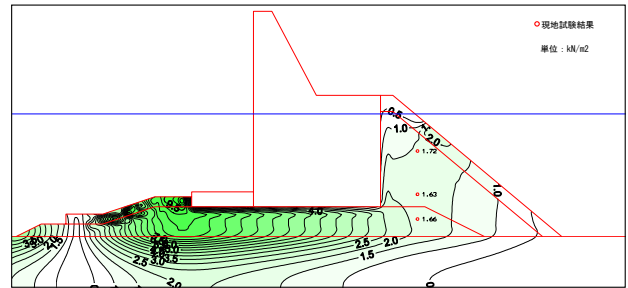


図-5 現況再現結果 (従来型)

(2) 将来予測

埋立後の完成断面において護岸背後に生じる圧力分布を計算した。

a) 波浪条件

将来予測では、護岸の設計計算時に算定した設計波の諸元を基に、現況再現と同様に直角入射波高を算出し入射波とした。

表-10に入射波条件を示す。

表-10 入射波条件 (将来予測)

区 間	波高	周期
As区間	6.6m	11.0s
Co区間	6.6m	11.0s
従来型	6.4m	11.0s

b) 計算パラメータ・計算モデル

計算パラメータは現況再現と同一である。

計算モデルについては護岸背後に埋立土を設定した点のみが現況再現と異なる点である。Co区間のモデルでは図-4と同様に幅60cmの空隙を設定している。

c) 計算結果

単位を w_0H とした場合の従来型の計算結果を図-6に示す。また、図-7には港湾技術研究所(現港湾空港技術研究所)が行ったケーソン式防波護岸の水理模型実験²⁾の結果を示す。こちらも単位は w_0H である。両者の結果はよく一致している。

図-8,9には単位を kN/m^2 とした従来型とAs区間の計算結果を示す。

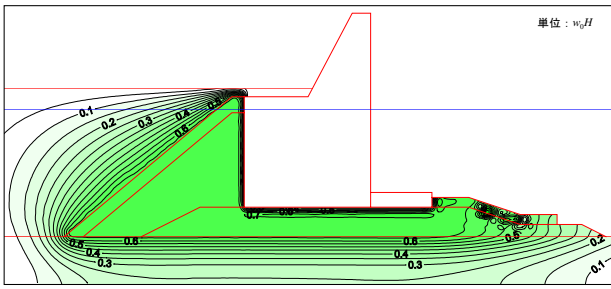


図-6 将来予測結果（従来型）＜単位： w_0H ＞

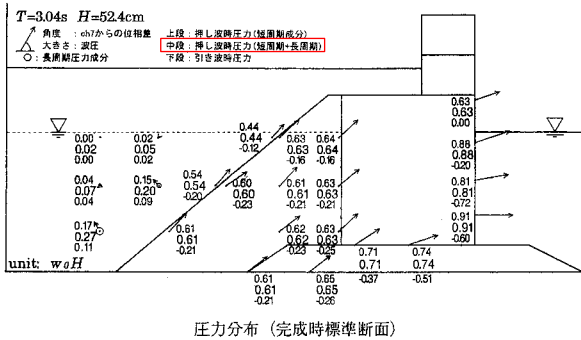


図-7 水理模型実験結果

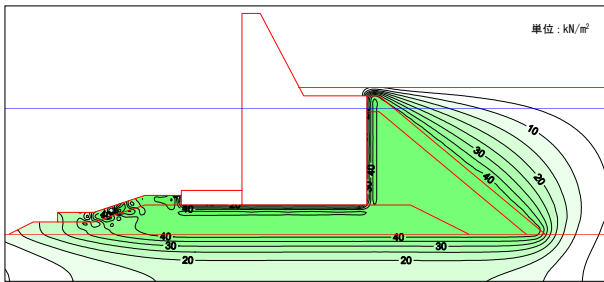


図-8 将来予測結果（従来型）＜単位： kN/m^2 ＞

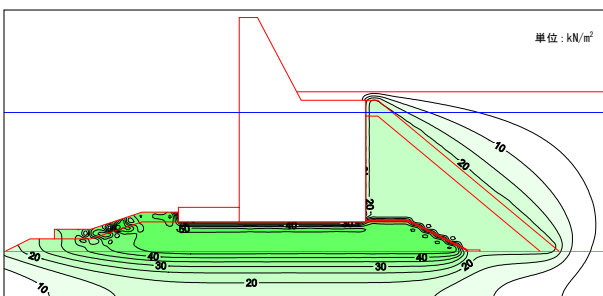


図-9 将来予測結果（As区間）

図-8, 9を比較するとAs区間では従来型に比べ裏込石内の圧力が約半分に低下しており、マットによる圧力低減が確認できた。一方、図は掲載していないが、Co区間の計算結果は従来型とほぼ同様の圧力分布となった。

ここで、コンクリートマットの効果を再検証するために60cmの空隙が無かった場合の将来予測を実施した。この結果、裏込石内の圧力は従来型に対し約60%程度まで

低下した。逆に、As区間に対して60cmの空隙を開けた場合について試みたところ、裏込石内の圧力は上昇し従来型とほぼ同一の圧力分布となった。Co区間においては、施工時に生じる空隙を袋詰めコンクリートなどで塞ぐことによりアスファルトマットとほぼ同等の低減効果が得られるものと考えられる。なお、コスト面ではコンクリートマットの方が有利である。

6. 対策工の有効性の考察

現地実験や数値シミュレーションの結果から、マットを隙間無く敷設した場合に護岸背後への圧力伝搬を低減できることが確認できた。防砂シートの損傷は、護岸背後に生じる圧力のみには依存するわけではないが、波による繰り返し作用を永続的に弱めることは、防砂シートの疲労による劣化進行を抑制し長期安定性に有利をもたらすものとする。今回の実験では、フィルター層（割ぐり石）の法崩れが防砂シートに損傷を与えた主要因となったために、圧力低減と防砂シート損傷の関係を示すことができない結果となったが、現在、割ぐり石の法勾配を見直して再度の防砂シート損傷試験を行っている。また、比較としてフィルター層を設けずに裏込石に直接防砂シートを敷設するケースについてもマット有り無し双方の区間で行っている。本対策工におけるフィルター層は、裏込部表面の凹凸を除くことで防砂シートへ与える負荷を軽減することを主目的としているが、一般に、フィルター層は埋立土の流出抑制を目的として設置される。本対策工においても防砂シートに損傷が生じた場合にはその機能も期待できる。フィルター層とマットとの二重構造により防砂シートの損傷を予防し、損傷が生じた場合にも大規模な空洞化（陥没）への進展を抑制できる可能性が高い対策と考える。

7. 今後の検討について

現地実験において、マットによる遮断効果が確認できたAs区間のケーソン合端部天端面で従来型に比べて高い圧力が計測されている。一方、将来、ケーソン天端上には水叩き舗装や臨港道路が配置される。天端面をこれら構造体で塞ぐことは、構造体自体の耐久性だけでなく、吸い出し対策を含む施設全体への影響が懸念される。このため、合端部天端面での圧抜き工の方策について引き続き検討を行っていく。

参考文献

- 1) 波—地盤—構造物の相互作用に関する有限要素解析, 海岸工学論文集, 第43巻
- 2) 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, 第35巻2号