

防波堤捨石マウンド内の津波浸透流の影響と腹付工の効果について

大村 厚夫*・佐藤 昌宏**・青木 伸之***・成田 圭介****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

*** 前 国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 前任建設管理官

**** 国土交通省 東北地方整備局 仙台港湾空港技術調査事務所 建設管理官

ケーソン式防波堤に津波が来襲した場合、防波堤の港内外水位差にともない基礎捨石マウンド内に浸透流が発生して支持力が低下する。この現象を定量的に把握するために、地盤解析汎用プログラム「GeoFem 改良版」を適用して検討するとともに、港内側腹付工による支持力増加の効果を確認した。

キーワード：津波, 防波堤, 浸透力, 基礎マウンド, 支持力, GeoFem

1. はじめに

「防波堤の耐津波設計ガイドライン(平成27年一部改訂)」¹⁾には、津波による港内外水位差にともなう浸透流の影響で、マウンド支持力が低下する現象について、解説されているが、FEM等を適用する場合の具体的な検討方法は示されていない。このため、浸透力の有・無の条件を考慮可能な「GeoFem 改良版」²⁾を基本断面及び腹付工断面に適用し、支持力低下の影響を定量的に把握した。さらに、一般的な支持力検討法である「簡易ビショップ法(浸透力を考慮しない)」³⁾を用いた円弧すべり解析結果とGeoFemで求めた耐力作用比を比較して、両方法の相関性を確認した。

2. 検討内容と方法

2.1 検討断面

検討対象にはL1津波作用時の転倒・滑動モードに比較して支持力モードが厳しい基本断面(図-1)を選定するとともに、対策工の一つである腹付工断面(図-2)を設定して、支持力の耐力作用比を比較した。

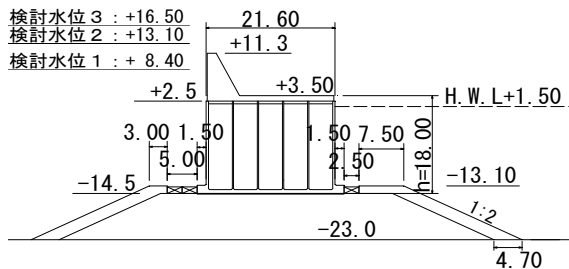


図-1 Case 1 基本断面

腹付工断面では、腹付工の高さと法面増厚効果の確認を目的にCase2~5の4断面を設定した。

腹付工の天端高は、ケーソン壁高(h=18m)の1/3(D.L. -8.5m), 1/4(D.L. -10.0m)とした。また、法面厚を増厚するケースは、全て1.65mと同一にした。

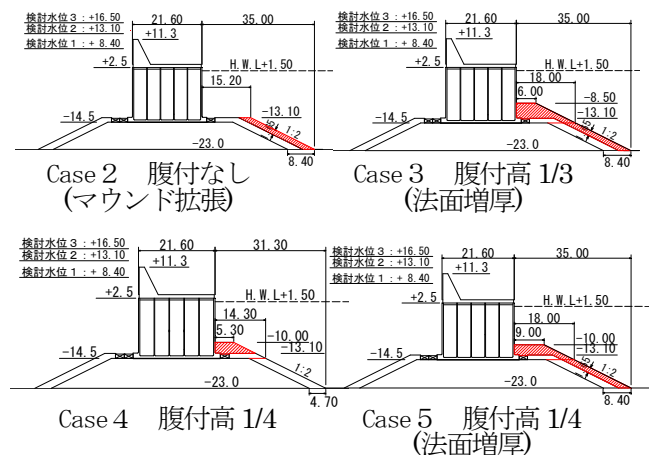


図-2 Case2~5 腹付工断面

2.2 検討水位および防波堤に作用する波圧

支持力の安定性を照査する検討水位は、津波水位上昇による耐力作用比の低下傾向を把握するために3ケースの検討水位を設定した。「検討水位1」は、津波が防波堤を越流しない条件として、港外側水位を発生頻度の高い津波相当のD.L.+8.40m(港内側水位との差6.9m)とした。「検討水位2」は最大クラスの津波相当のD.L.+13.10m(港内側水位との差11.6m)、「検討水位3」は最大クラスの津波を超えるD.L.+16.50m(港内側水位との差15.0m)を設定した。なお、港内側水位は塑望平均満潮位のD.L.+1.50mに固定とした。

防波堤に作用する波圧の算定では、背後水位の上昇を考慮した波圧分布算定式を用いた(式(1)~式(4))および波圧分布図⁴⁾(図-3)を示す。

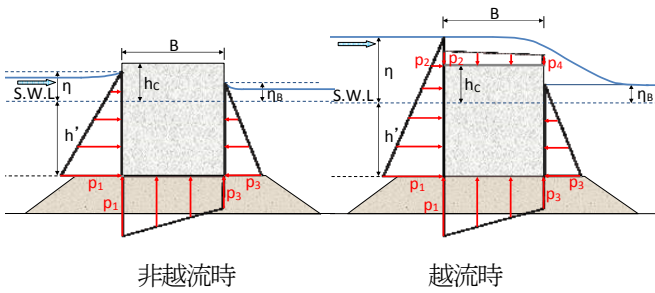


図-3 波圧分布図⁴⁾

○前面波力 P の算定 (非越流時は $p_2=0$)

$$P = 1/2(p_1 + p_2)(h' + hc^*) \quad \text{式(1)}$$

$$p_1 = \rho_0 g (h' + \eta) \times \alpha_I$$

$$p_2 = (\eta - hc^*) / (h' + \eta) p_1$$

$$hc^* = \min(\eta, hc)$$

○背面波力 P_B の算定 (非越流時は $p_4=0$)

$$P_B = 1/2(p_3 + p_4)(h' + hc_B^*) \quad \text{式(2)}$$

$$p_3 = \rho_0 g (h' + \eta_B) \times \alpha_{IB}$$

$$p_4 = (\eta_B - hc_B^*) / (h' + \eta_B) p_3$$

$$hc_B^* = \min(\eta_B, hc)$$

○揚圧力合力 P_U の算定 (浮力, 揚力を含む)

$$P_U = 1/2(p_1 + p_3)B - 1/2(p_2 + p_4)B \quad \text{式(3)}$$

○堤体重量

$$W = W_{dy} \quad \text{式(4)}$$

ここで,

η : 静水面上の前面の津波高さ (m)

η_B : 静水面上の背面の津波高さ (m)

h' : 堤体の前面における水深 (m)

$\rho_0 g$: 海水の単位体積重量 (kN/m³)

p_1 : 堤体下端部における前面波圧強度 (kN/m²)

p_2 : 堤体上端部における前面波圧強度 (kN/m²)

p_3 : 堤体下端部における背面波圧強度 (kN/m²)

p_4 : 堤体上端部における背面波圧強度 (kN/m²)

B : 堤体幅 (m)

hc : 堤体の静水面上の高さ (m)

W_{dy} : 堤体の空中重量 (kN/m)

α_I : 前面の静水圧補正係数

α_{IB} : 背面の静水圧補正係数

当式は、防波堤前後の波圧分布を静水圧分布形と仮定している。また、堤体上面と下面に作用する圧力を直接評価することで、浮力及び越流時に流れの作用によって生じる揚力は、揚圧力合力 P_U として一体して評価できることが特徴である。

なお、静水圧に対する変動率 (静水圧補正係数) は、防波堤前面の波圧に対して $\alpha_I = 1.05$, 背後圧は $\alpha_{IB} = 0.90$ とした¹⁾。

3. 津波浸透流を考慮した支持力照査方法

3.1 GeoFem 適用の基本的な考え方

(1) 地盤解析汎用プログラム「GeoFem 改良版」²⁾

GeoFem は仮想的な弾・粘塑性性アルゴリズムに基づく計算法 (仮想粘性法) を導入し、地盤など一部要素が破壊状態に近い条件であっても安定的に計算を行える特徴を有している²⁾。

図-4に、GeoFemを用いた基礎の支持力照査フローを示す。GeoFemでは、浸透流解析と応力変形解析を2段階で実施する。

GeoFemは、津波水位差によりマウンド内に発生する浸透力の考慮が可能であり³⁾、浸透流解析によりマウンドの各要素の積分点に作用する浸透力 ($F=i \cdot \gamma_w$) を求めて、応力変形解析時に浸透力をマウンドの各要素の積分点に付加させている。

なお、浸透流の平均流速 v と動水勾配 i の関係にはダルシー則を用いた。

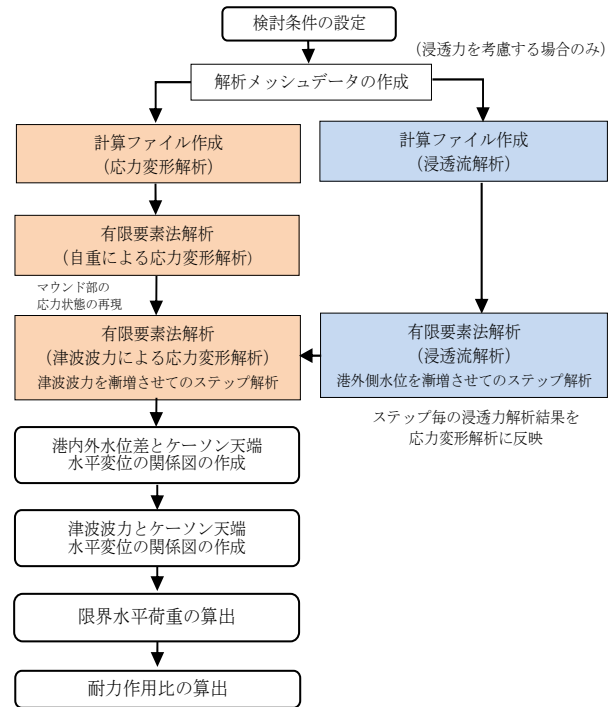


図-4 GeoFem を用いた基礎の支持力照査フロー

(2) 浸透流解析

まず、検討断面の解析メッシュデータを作成し、第一段階では浸透流解析を行う際の計算ファイルを作成する。ここで、マウンド内の浸透力は、水頭差によって発生することから、マウンドに作用する水頭 H (m) を設定する。水頭の設定では、港内側の水位は変動しない一定値 (H.W.L. +1.50m) として水頭 0.0m を与える。一方、港外側の水頭は 0.20m ずつ漸増し、最大 100 ステップの浸透流解析を行う。

(3) 応力変形解析

第二段階では、応力変形解析を行う際の計算ファイルを作成する。計算ファイルは、津波波力式により算定した水平力と揚圧力を水位差毎にケーソンへ作用させる。ステップ1では自重解析による要素内の初期応力計算を行う。ステップ2では初期水圧(水頭差 0.0m)を作用させ、ステップ3~102では水平力と揚圧力を漸増させた応力変形解析を行う。図-6に津波波力による分布荷重の設定イメージを示す。なお、各解析ステップでは、先行して求めた浸透力を作用させて計算している。

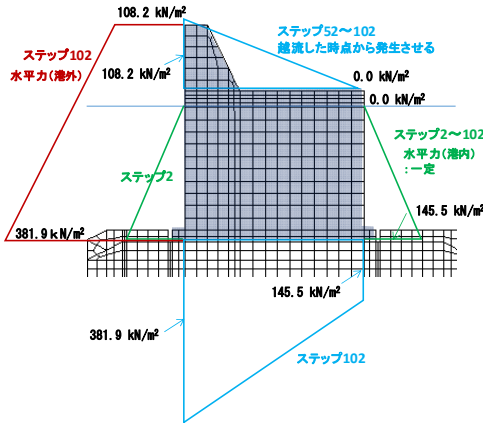


図-5 津波波力による分布荷重 (応力変形解析)

3.2 解析モデルの設定

(1) 解析モデルの物性値

図-6にCase1基本断面の解析モデルを、表-1に解析に用いた物性値を示す。

原地盤の砂質土層 (N値=10) の変形係数は、GeoFemマニュアルに準じて $E=6N+10$ (kgf/cm²) (日本道路協会) を用いて設定した。また、透水係数は、港湾基準に準じて砂層の透水係数概略値 1×10^{-2} cm/s とした。なお、ケーソン下部の摩擦増大マットはモデル化していない。

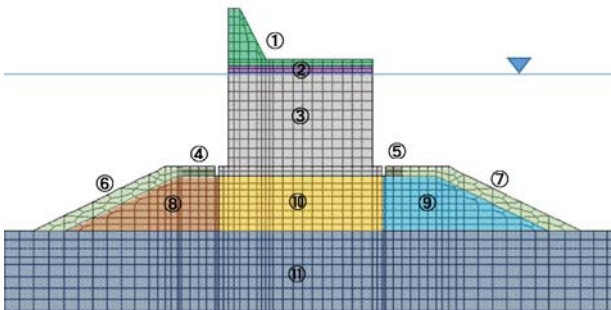


図-6 解析モデル (Case 1 基本断面)

(2) 基礎捨石マウンドの物性値

基礎捨石マウンドの見掛けの粘着力と内部摩擦角については、堤体直下及び港外側マウンド部は港湾基準に

準じて $c=20$ (kN/m²)、 $\phi=35^\circ$ を、港内側マウンドは拘束圧が小さいため $c=5$ (kN/m²)、 $\phi=40^\circ$ に設定した。

表-1 解析モデルの物性値 (Case 1 基本断面)

No.	地層区分	構成則	土質試験の粘着力		せん断抵抗角 ϕ (度)	変形係数 E(MN/m ²)	ポアソン比 v	透水係数 k(m/s)
			c(KN/m ²)					
1	上部コンクリート	線形弾性体	—	—	—	1.00E+05	0.17	0.0
2	ケーソン	線形弾性体	—	—	—	1.00E+05	0.17	0
3								
4	根固ブロック	Mohr-Coulomb 弾塑性性	—	—	—	1.00E+05	0.17	1.00E-09
5	被覆石	Mohr-Coulomb 弾塑性性	20.00	35	30	0.33	0.2	0.2
6								
7	マウンド (港外側)	Mohr-Coulomb 弾塑性性	20.00	35	30	0.33	0.2	0.2
8	マウンド (港内側)	Mohr-Coulomb 弾塑性性	5.00	40	30	0.33	0.2	0.2
9	マウンド (ケーソン直下)	Mohr-Coulomb 弾塑性性	20.00	35	30	0.33	0.2	0.2
10	マウンド (ケーソン直下)	Mohr-Coulomb 弾塑性性	20.00	35	30	0.33	0.2	0.2
11	砂質土層	線形弾性体	—	—	30	7	0.33	1.00E-04

3.3 検討結果

(1) 限界水平荷重

本検討では、浸透力による支持力低下現象の影響度合いを比較するため、「浸透力を考慮しない場合」と「浸透力を考慮する場合」の両ケースについて解析を実施した。計算結果は、解析ステップ毎に「港内外水位差とケーソン天端水平変位の関係 (水位差変位図) (図-7)」、 「水平力 (津波波力) とケーソン天端水平変位の関係 (荷重変位図) (図-8)」に整理して浸透力による影響を確認した。

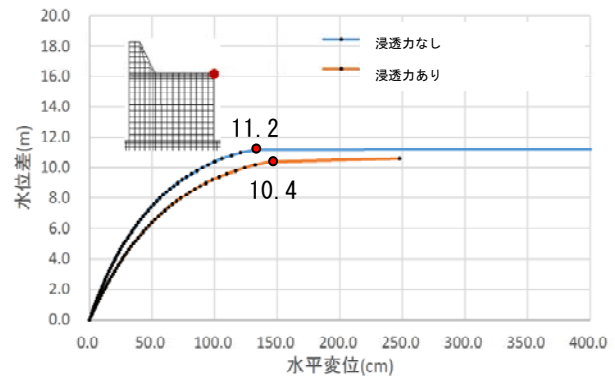


図-7 水位差変位図 (Case 1 基本断面)

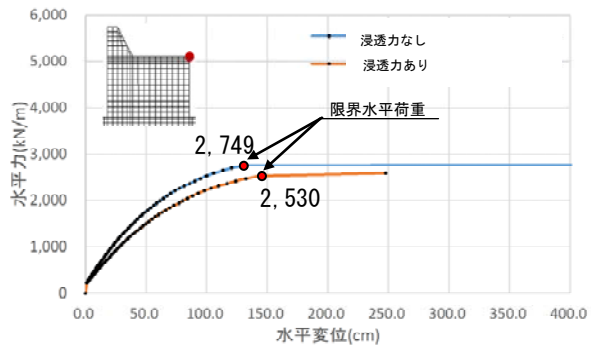


図-8 荷重変位図 (Case 1 基本断面)

表-2 検討結果一覧

腹付形状	水位条件			①津波 波力 (kN/m)	②限界 水平荷重 (浸透力なし)	③限界 水平荷重 (浸透力あり)	GeoFem			1m ³ /mあたりの腹付 効果 = (③-Case1③) ÷ 腹付石量	簡易ビシヨップ法 耐力作用比	
	港外側	港内側	水位差				耐力作用比 (浸透力なし) =②/①	耐力作用比 (浸透力あり) =③/①	耐力作用比 低減率 =③/②			
Case1 基本断面	水位1	D.L.+8.4m	D.L.+1.5m	6.9m	1,618	2,749	2,530	1.70 > 1.00	1.56 > 1.00	0.920	-	1.62 > 1.00
	水位2	D.L.+13.1m		11.6m	2,860			0.96 < 1.00	0.88 < 1.00			0.89 < 1.00
	水位3	D.L.+16.5m		15.0m	3,790			0.73 < 1.00	0.67 < 1.00			0.55 < 1.00
Case2 腹付なし (マウンド拡張)	水位1	D.L.+8.4m	D.L.+1.5m	6.9m	1,618	2,859	2,585	1.77 > 1.00	1.60 > 1.00	0.904	1.5	1.73 > 1.00
	水位2	D.L.+13.1m		11.6m	2,860			1.00 > 1.00	0.90 < 1.00			0.96 < 1.00
	水位3	D.L.+16.5m		15.0m	3,790			0.75 < 1.00	0.68 < 1.00			0.61 < 1.00
Case3 腹付高 1/3 (法面増厚)	水位1	D.L.+8.4m	D.L.+1.5m	6.9m	1,618	3,351	3,132	2.07 > 1.00	1.94 > 1.00	0.935	7.0	1.78 > 1.00
	水位2	D.L.+13.1m		11.6m	2,860			1.17 > 1.00	1.10 > 1.00			1.00 > 1.00
	水位3	D.L.+16.5m		15.0m	3,790			0.88 < 1.00	0.83 < 1.00			0.65 < 1.00
Case4 腹付高 1/4	水位1	D.L.+8.4m	D.L.+1.5m	6.9m	1,618	3,077	2,859	1.90 > 1.00	1.77 > 1.00	0.929	12.5	1.65 > 1.00
	水位2	D.L.+13.1m		11.6m	2,860			1.08 > 1.00	0.99 < 1.00			0.91 < 1.00
	水位3	D.L.+16.5m		15.0m	3,790			0.81 < 1.00	0.75 < 1.00			0.57 < 1.00
Case5 腹付高 1/4 (法面増厚)	水位1	D.L.+8.4m	D.L.+1.5m	6.9m	1,618	3,296	3,077	2.04 > 1.00	1.90 > 1.00	0.934	7.4	1.77 > 1.00
	水位2	D.L.+13.1m		11.6m	2,860			1.15 > 1.00	1.08 > 1.00			1.01 > 1.00
	水位3	D.L.+16.5m		15.0m	3,790			0.87 < 1.00	0.81 < 1.00			0.64 < 1.00

(2) 検討結果一覧

表-2に検討結果の一覧を示す。津波浸透力の影響は、耐力作用比低減率(=浸透力ありの耐力作用比÷浸透力なしの耐力作用比)から、浸透流を考慮した場合には耐力作用比が6~10%低下する結果となった。また、腹付工設置による限界水平荷重の増加効果は、Case3>Case5>Case4の順位となった。一方、腹付工1m³あたりの増加効果は、Case4>Case5>Case3>Case2の順位となった。

(3) 耐力作用比の比較(簡易ビシヨップ法とGeoFem)

簡易ビシヨップ法で求めた耐力作用比とGeoFemで求めた耐力作用比(浸透力を考慮した場合)の間には図-9のような相関性が確認された。今回の場合には、簡易ビシヨップ法がGeoFemと比較して安全側の評価となるように補正する両者の関係は $y=0.925x$ となった。

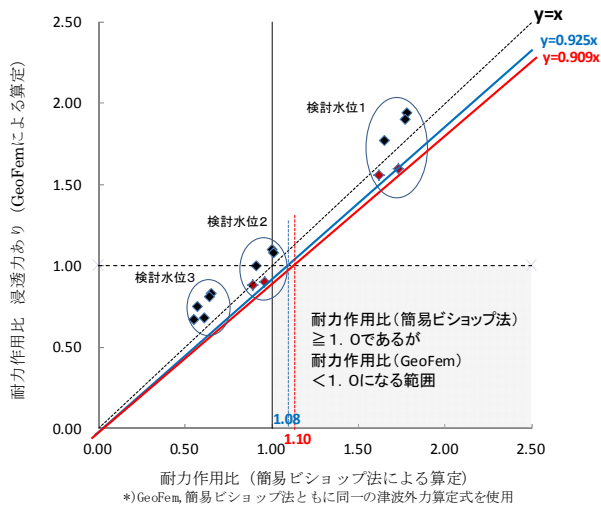


図-9 簡易ビシヨップ法とGeoFem(浸透力を考慮する場合)による耐力作用比の相関性

4. まとめ

今回の検討ケースにおいて、①浸透力考慮による耐力作用比の低下は1割程度と見込まれ、②捨石材による腹付工は、直立壁の高さの1/3~1/4の規模で限界水平荷重を2割程度増加させる効果があることが定量的に確認できた。また、「簡易ビシヨップ法による耐力作用比」と「GeoFemによる耐力作用比(浸透力考慮)」の間には、比較的良好な相関性があり、津波越流時のような浸透力の影響が大きいケースでは、簡易ビシヨップ法による耐力作用比が1.0~1.1程度となった場合には、FEM等の方法を用いた詳細検討を実施すべきであることが示唆された。

謝辞

本検討の実施にあたり、国土技術政策総合研究所の宮田正史氏、港湾空港技術研究所の渡部要一氏、鈴木高二朗氏、高橋英紀氏から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン(平成27年12月一部改訂), pp16-26, 2015.
- 2) 小林正樹：有限要素法による地盤の安定性解析, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 23, No. 1, pp. 83-101, 1984.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻), pp. 572-576, 2007.
- 4) 水産庁漁港漁場整備部整備課長通知：平成23年東日本大震災を踏まえた漁港施設の地震・津波対策の基本的な考え方<参考資料>津波に対する防波堤・岸壁の設計方法, pp. 61-68, 2014.
- 5) 高橋英紀・佐々真志・森川嘉之・渡部要一・高野大樹：津波に対するケーソン式防波堤マウンドと腹付工の安定性, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 54, No. 2, pp. 21-50, 2015.