

津波による浸透力作用下の防波堤基礎マウンドの安定性に関する検討

長野 卓*・大村 厚夫**・及川 隆***・青木 伸之****

* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 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 所長

**** 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

本検討は、津波によって発生する防波堤の内外水位差により、防波堤基礎マウンドに浸透流が発生し、基礎の支持力が低下する事象について、FEM 解析を用いて防波堤の基礎の支持力の安定性を照査するとともに、粘り強い構造と対策工法について検討を実施した。

キーワード：防波堤基礎マウンド、腹付工、浸透力、支持力低下、GeoFem

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震における防波堤の津波被害の教訓から、津波による浸透力に対する対応が求められている。東北地方整備局管内防波堤から抽出した5施設(釜石港湾口地区防波堤、久慈港湾口地区防波堤、宮古港竜神崎地区防波堤、大船渡港湾口防波堤、相馬港本港地区沖防波堤)を対象に、津波によって発生する防波堤の内外水位差により、捨石マウンドに浸透流が発生し、基礎の支持力が低下する事象について、浸透流解析と応力変形解析を用いて防波堤の基礎の支持力の安定性を照査するとともに、粘り強い構造と対策工法について検討した。

2. 浸透力による支持力低下度合の把握

2.1 概要

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、「浸透力を考慮する場合」と「浸透力を考慮しない場合」の両ケースについて、FEM 解析を実施し、解析結果をもとに「津波波力～ケーソン天端水平変位関係図」を作成することで浸透力による影響について確認した。図-1に、浸透力を考慮した場合のGeoFemによる検討フローを示す。

なお、FEM 解析(浸透流解析および応力変形解析)には、港湾空港技術研究所と(一財)沿岸技術研究センターが開発したプログラム「GeoFem」を、津波水位差によりマウンド内に発生する浸透力を考慮できるように改良して用いた。

GeoFem は仮想的な弾・粘塑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。

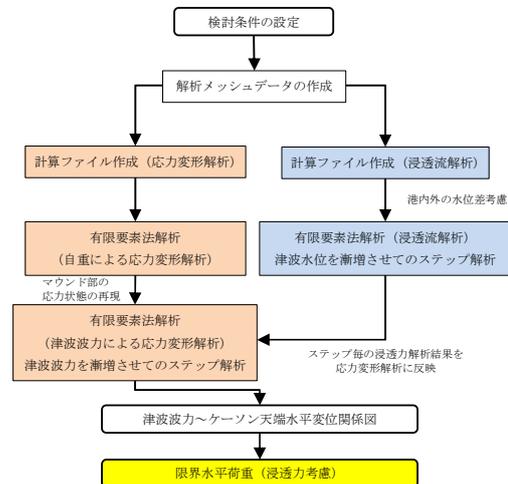


図-1 GeoFemによる検討フロー(浸透力を考慮した場合)

2.2 GeoFem 解析

防波堤基礎捨石マウンドの定数は、ケーソン直下及び港外側マウンドはケーソン上載による拘束圧を考慮し、港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下、港湾基準という。)1)に準じて $c=20\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=35^\circ$ を設定する。一方、港内側はケーソン直下と比較して拘束圧が小さいため $\phi=40^\circ$ とし、粘着力 c は $0.01\sim 10\text{kN/m}^2$ に変化させる。変形係数は、既往研究の値を参考に設定した。なお、本検討では浸透力の影響を把握することに主眼を置いているため、ケーソン下部の摩擦増大マット等の細部はモデル化していない(図-2)。

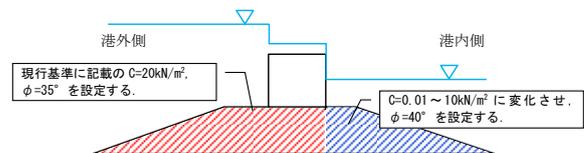


図-2 マウンド定数設定のイメージ

支持力の安定性を照査する水位差は3ケースとし、津波シミュレーションの水位変動状況に基づいて(検討水位1:L1津波の最大水位差, 検討水位2:L2津波の最大水位差, 検討水位3:L2津波の港外側最大水位と港内側最低水位の差)設定した。水位条件は塑望平均満潮位(D.L.+1.50m)を港内側水位高とした。

次に、上記で設定した水位差について、防波堤の耐津波設計ガイドライン²⁾における谷本式(津波が防波堤を越流しない場合)と静水圧差による算定式(津波が防波堤を越流する場合)を用いて津波波力を算定した(表-1)。なお、津波波力の算定において、静水圧式を適用する場合は港内外の静水圧補正係数 $a_f=1.05$, $a_r=0.90$ を考慮した。

また、GeoFem解析では、港内外の水位差を20mと設定し、100ステップに分割して漸増させる(20cmずつ水位を上昇させる)ステップ解析とした(図-3)。

図-4に、検討に使用した釜石港の解析モデル、表-2にその解析モデルの物性値を示す。

3. 限界水平荷重の算定方法

防波堤の支持力検討において、簡易 Bishop 法では「耐力作用比」を用いて防波堤の安定性を評価するが、GeoFemでは耐力作用比を算定することが出来ないため、「限界水平荷重」と「検討水位時の水平荷重」の比をとり、「耐力比」と定義して評価した。ここで、限界水平荷重とは、右図に示すように荷重変位曲線の変曲点を過ぎて変位が一定になる時の荷重と定義した(図-5)。

表-1 各検討水位の津波水平荷重(津波波力)

検討対象	検討水位	水平荷重(kN/m)	適用式
釜石港	検討水位1	1,331	静水圧式
	検討水位2	2,285	静水圧式
	検討水位3	3,289	静水圧式

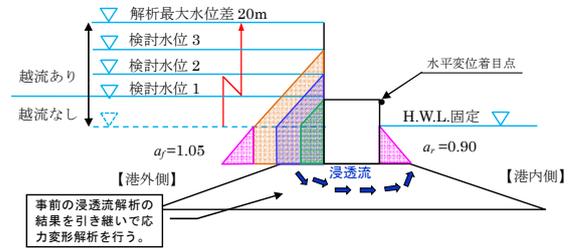


図-3 GeoFemによるステップ解析のイメージ

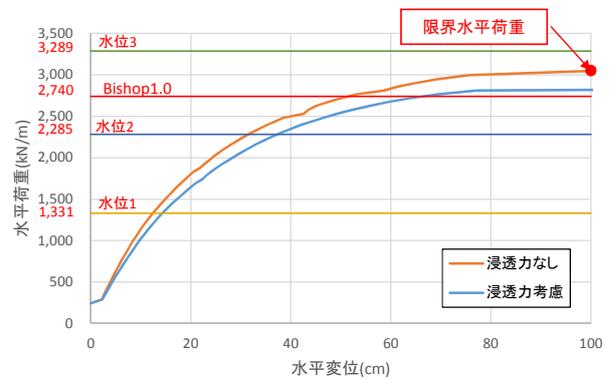


図-5 限界水平荷重の定義

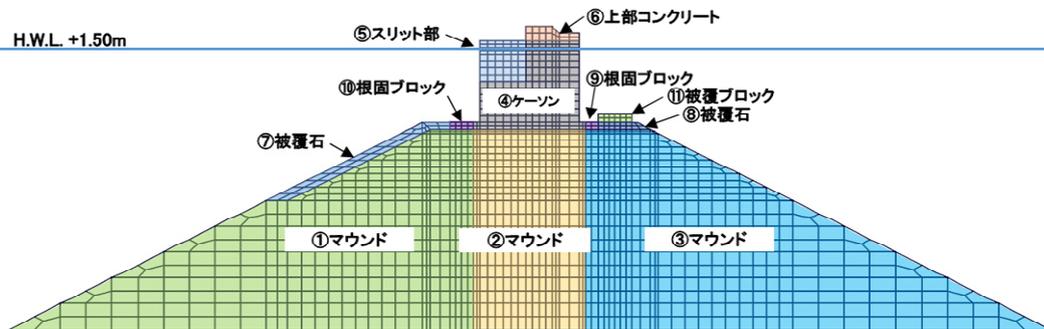


図-4 解析モデル(釜石港)

表-2 解析モデルの物性値(釜石港)

No.	地層区分	構成則	有効単位体積重量 γ または γ' (KN/m^3)	土質試験の粘着力 c (KN/m^2)	せん断抵抗角 ϕ (度)	変形係数 E (MN/m^2)	ポアソン比 ν	透水係数 k (m/s)
1	マウンド(港外側)	Mohr-Coulomb 弾塑性	1.00	20.00	35	30	0.33	0.2
2	マウンド(ケーソン直下)	Mohr-Coulomb 弾塑性	1.00	20.00	35	30	0.33	0.2
3	マウンド(港内側)	Mohr-Coulomb 弾塑性	1.00	0.01,5,10,20	35,40	30	0.33	0.2
4	ケーソン	線形弾性体	1.20	20.00	—	1.00E+05	0.17	0
5	ケーソンスリット	線形弾性体	3.00	20.00	—	1.00E+05	0.17	0
6	上部コンクリート	線形弾性体	12.50	20.00	—	1.00E+05	0.17	0
7	被覆石(港外側)	Mohr-Coulomb 弾塑性	1.00	20.00	35	30	0.33	0.2
8	被覆石(港内側)	Mohr-Coulomb 弾塑性	1.00	20.00	35	30	0.33	0.2
9	根固ブロック(港内側)	Mohr-Coulomb 弾塑性	1.00	20.00	35	30	0.33	0.2
10	根固ブロック(港外側)	Mohr-Coulomb 弾塑性	1.00	20.00	35	30	0.33	0.2
11	被覆ブロック(港内側)	線形弾性体	1.00	20.00	—	30	0.33	0.2

4. 検討結果

4.1 浸透力の有無による限界荷重の比較

本検討では、津波水位差によりマウンド内に発生する浸透力を考慮したGeoFem解析を行ない、比較のために浸透力を考慮しない場合の解析も実施した。表-3に釜石における安定検討結果一覧を示す。また、荷重変位図も合わせて示す(図-6~図-11)。

検討の結果、GeoFemでは、浸透力の考慮により耐力比(限界水平荷重/検討水位時の水平荷重)が1割程度低下する結果となった。これは、既往研究³⁾とも概ね整合が取れた結果である。

また、荷重変位図に着目すると、現行基準の支持力照査手法(簡易Bishop法)で耐力作用比1.0となるように逆算した水平荷重は、GeoFem(浸透力なし)の限界荷重よりも小さく、安全側の設計であると考えられる。これは、既往研究⁴⁾とも概ね整合が取れた結果であり、現行設計法では耐力作用比1.0としているものの、浸透力を考慮しない場合には1割程度の安全性の余裕が含まれていると考えられる。

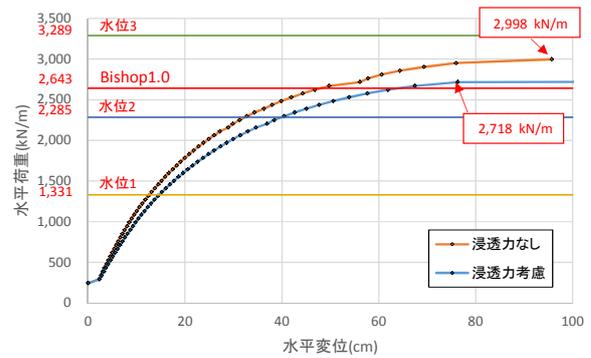


図-7 荷重変位
($c=5\text{kN/m}^2$, $\phi=40^\circ$)

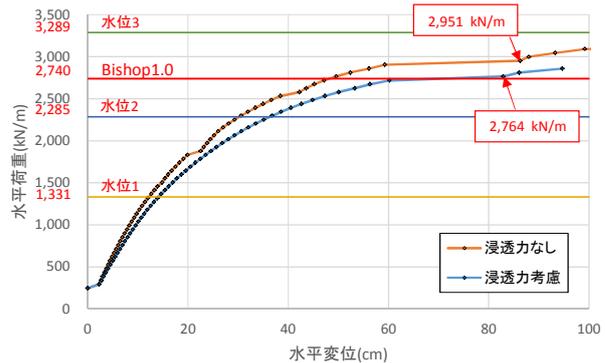


図-8 荷重変位
($c=10\text{kN/m}^2$, $\phi=40^\circ$)

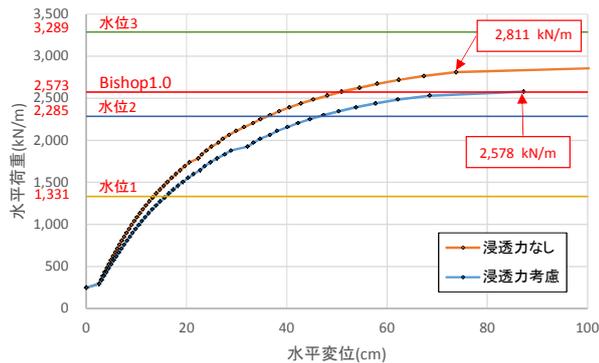


図-6 荷重変位
($c=0.01\text{kN/m}^2$, $\phi=40^\circ$)

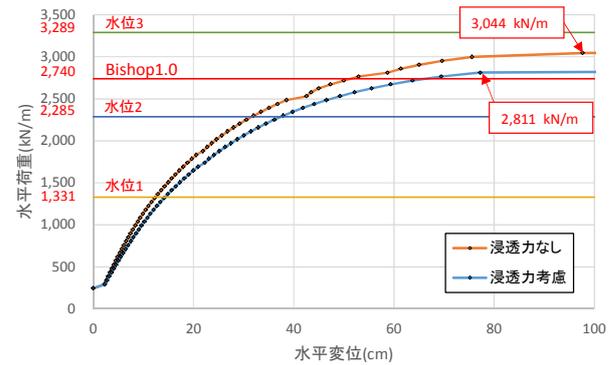


図-9 荷重変位
($c=20\text{kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$)

表-3 検討結果一覧 (釜石港)

ケース	地盤定数 (捨石基礎マウンド)		水位条件			津波外力 (kN/m)		①限界 水平荷重 (GeoFem) (浸透力なし)	②限界 水平荷重 (GeoFem) (浸透力あり)	③耐力比 (GeoFem) (浸透力なし) =①/津波外力 ($\alpha'=1.05$ $\alpha''=0.9$)	④耐力比 (GeoFem) (浸透力あり) =②/津波外力 ($\alpha'=1.05$ $\alpha''=0.9$)	耐力比 低減率 (④/③)	
	粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	せん断 抵抗角 $\phi(^{\circ})$	港外側	港内側	水位差	$\alpha'=1.0$ $\alpha''=1.0$	$\alpha'=1.05$ $\alpha''=0.9$						
													水位1
1-1	0.01	40	水位1	D.L.+6.5m		5.0m	1,034.6	1,331.1	2,811	2,578	2.11	1.94	0.92
1-2			水位2	D.L.+10.5m	D.L.+1.5m	9.0m	1,943.6	2,285.1					
1-3			水位3	D.L.+14.7m		13.2m	2,897.6	3,288.6					
2-1	5	40	水位1	D.L.+6.5m		5.0m	1,034.6	1,331.1	2,998	2,718	2.25	2.04	0.91
2-2			水位2	D.L.+10.5m	D.L.+1.5m	9.0m	1,943.6	2,285.1					
2-3			水位3	D.L.+14.7m		13.2m	2,897.6	3,288.6					
3-1	10	40	水位1	D.L.+6.5m		5.0m	1,034.6	1,331.1	2,951	2,764	2.22	2.08	0.94
3-2			水位2	D.L.+10.5m	D.L.+1.5m	9.0m	1,943.6	2,285.1					
3-3			水位3	D.L.+14.7m		13.2m	2,897.6	3,288.6					
4-1	20	35	水位1	D.L.+6.5m		5.0m	1,034.6	1,331.1	3,044	2,811	2.29	2.11	0.92
4-2			水位2	D.L.+10.5m	D.L.+1.5m	9.0m	1,943.6	2,285.1					
4-3			水位3	D.L.+14.7m		13.2m	2,897.6	3,288.6					

※検討水位1: L1津波の最大水位差

※検討水位2: L2津波の最大水位差

※検討水位3: L2津波の「港外側最大水位-港内側最小水位」

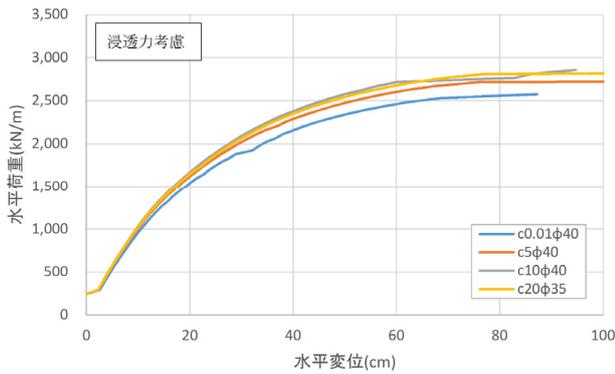


図-10 荷重変位図 (浸透流考慮)

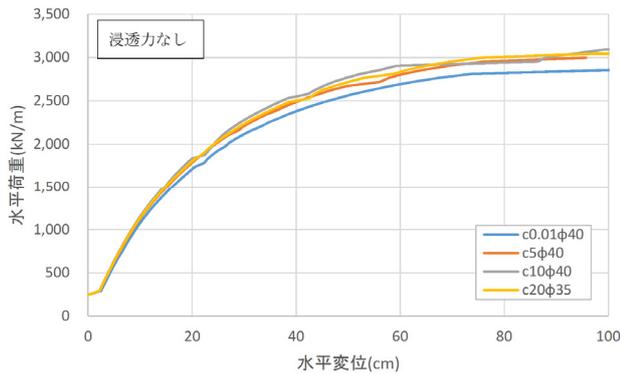


図-11 荷重変位図 (浸透流なし)

4.2 限界荷重の比較

港湾基準の支持力照査手法 (簡易 Bishop 法) の限界荷重と GeoFem の限界荷重 (浸透力なし, 静水圧式) を比較する。以下に, 両者の限界荷重を示す。これより, 釜石では港湾基準の支持力照査手法 (簡易 Bishop 法) で耐力作用比 1.0 の水平荷重は GeoFem の限界荷重との差が 1 割程度であることがわかった (表-4)。

表-4 検討結果一覧

地盤定数 (基礎捨石マウンド)		基礎の支持力の耐力作用比が1.0となる時の 水平荷重(kN/m)(浸透力なし)		
粘着力 c(kN/m ²)	せん断抵抗角 φ(°)	釜石港		
		Bishop	GeoFem	GeoFem/Bishop
0.01	40	2,573	2,811	1.09
5	40	2,643	2,998	1.13
10	40	2,740	2,951	1.08
20	35	2,740	3,044	1.11

次に, 浸透力の考慮による支持力低下の程度を確認するために, 簡易 Bishop 法と GeoFem で限界荷重が最も近い値となった釜石 (c=10kN/m², φ=40°) について, 浸透力なしの限界荷重と浸透力考慮時の限界荷重に対して簡易 Bishop 法での 1.0 の水平荷重との比を算定した。検討の結果, 浸透力を考慮することで 1 割弱の支持力低下が生じる結果となった (図-12)。

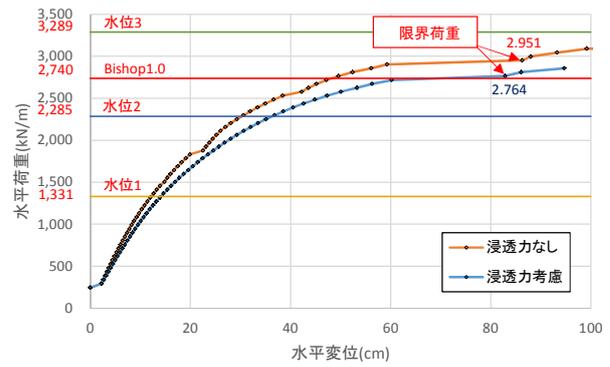


図-12 限界荷重の比較 (釜石港)
(c=10kN/m², φ=40°)

【浸透力なし】限界荷重の比率

$$= 2,951 \text{ kN/m} \div 2,740 \text{ kN/m} = 1.077$$

【浸透力考慮】限界荷重の比率

$$= 2,764 \text{ kN/m} \div 2,740 \text{ kN/m} = 1.009$$

浸透力による支持力低下

$$\Rightarrow 1.009 / 1.077 = 0.94 \text{ (6\% 低下)}$$

5. 静水圧式における補正係数の影響

釜石の断面 (浸透力考慮) に対して浸透流解析時の補正係数考慮の有無による影響を確認するために比較検討を行った。なお, 静水圧式における補正係数の考慮は, 港外側 $a_f = 1.05$, 港内側 $a_r = 0.90$ であるため, 港外側水位 21.50m を 1.05 倍, 港内側水位 +1.50m を 0.90 倍した水位差 23.93m を浸透流解析の水位差とすることで考慮した。

以下に, 浸透流解析時の静水圧補正係数考慮の有無による荷重-変位曲線を示す (図-13)。これより, 静水圧補正係数を考慮しない場合の限界水平荷重は 2,811kN/m, 考慮した場合の限界水平荷重は 2,764kN/m であり, 釜石の断面では静水圧補正係数考慮の有無による差は 1% 程度と小さいことが分かった。しかし, 他の断面でも同様の傾向となるかは今後確認が必要である。

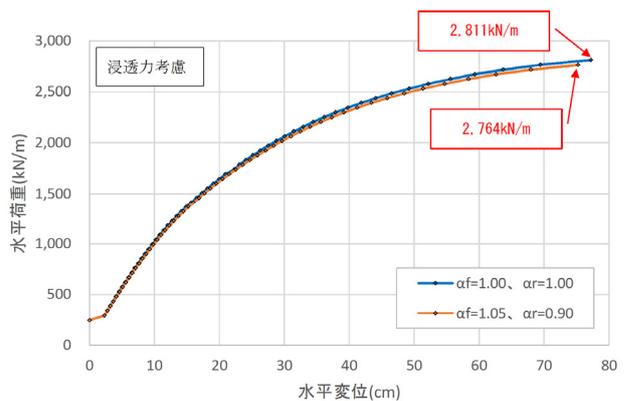


図-13 浸透流解析時の補正係数考慮の有無による比較

6. 対策工の検討

6.1 割石による腹付工の照査方法

現行の港湾基準では、(1)式に示す滑動に対する腹付工の抵抗式が提示されている。

$$f_d (W_d - P_{Bd} - P_{ud}) + R_d \geq \gamma_a P_{Hd} \quad (1)$$

f : 壁体底面と基礎との摩擦係数

W : 堤体の重量 (kN/m)

P_B : 浮力 (kN/m)

P_U : 津波の揚圧力 (kN/m)

P_H : 津波の水平波力 (kN/m)

γ_a : 構造解析係数

R : 補強した割石あるいは方塊の滑動抵抗力 (kN/m)

今回のGeoFemによる方法では、割石による腹付工のある大船渡港の断面(浸透力あり, $c=20\text{kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$)について、割石をマウンドと同等の弾・完全塑性体要素としてモデル化し、①腹付なしのケース、②腹付を壁高の1/4としたケース、③腹付を壁高の1/3としたケースを検討し、FEM解析結果から「限界水平荷重」を求めて対策効果を評価した(図-14~図-16)。

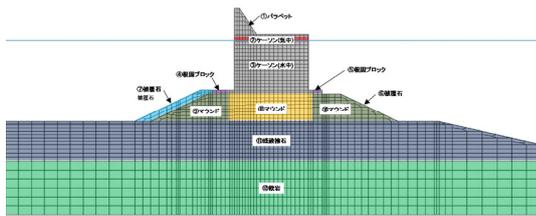


図-14 腹付無しの場合

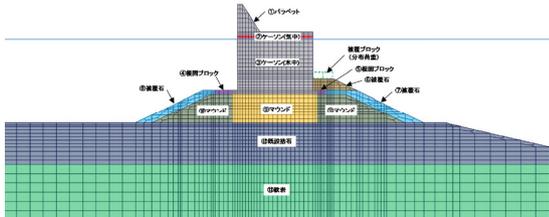


図-15 腹付を壁高の1/4とした場合

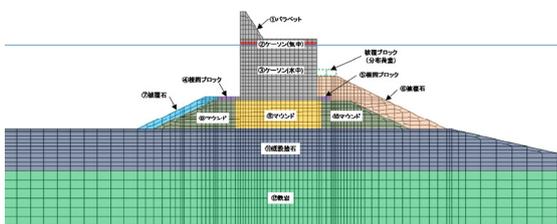


図-16 腹付を壁高の1/3とした場合

図-17に検討結果を示す。限界水平荷重は、①腹付なしのケース：2,924kN/m、②腹付を壁高の1/4としたケース：3,519kN/m、③腹付を壁高の1/3としたケース：4,065kN/mとなった。これより、防波堤背後に腹付石を設置することで滑動抵抗のみならず、浸透力による

支持力増加効果があることがわかった。今回の検討断面では、腹付を壁高の1/4とした場合でも腹付無しの場合と比較して20%程度の支持増加効果が確認された。また、腹付を壁高の1/3とすることで1/4とした場合よりも支持力がさらに15%程度向上する結果となった。

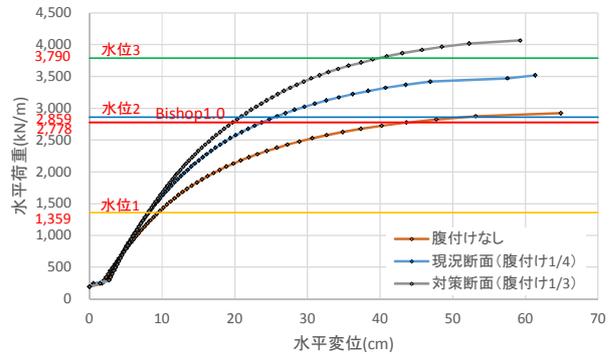


図-17 腹付の違いによる比較(大船渡港)
(浸透力あり, $c=20\text{kN/m}^2$, $\phi=35^\circ$)

7. おわりに

浸透力を考慮することで、GeoFemの結果から算定した耐力比低減率は、1割弱となった。また、腹付工を行うことで支持力増加効果があることが確認された。

今後、津波による浸透流によって防波堤基礎マウンドの支持力が低下するメカニズムが十分に理解され、我が国の防波堤耐津波設計の精度向上の一助になることを切に願う。

謝辞

本稿は、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発注の「津波による防波堤基礎マウンドの安定性検討業務」の成果の一部をまとめたものである。検討にあたっては、津波による防波堤基礎マウンドの安定性に関する検討会(座長: 国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室 宮田正史室長)の各委員、東北地方整備局 港湾空港部の関係者の皆様から貴重なご意見、ご指導を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 平成19年7月, 国土交通省港湾局
- 2) 防波堤の耐津波設計ガイドライン, 平成25年9月, 国土交通省港湾局
- 3) 高橋英紀, 佐々真志, 森川嘉之, 高野大樹: 津波による浸透作用下の防波堤基礎地盤の安定性に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, vol. 52, No. 2, 2013
- 4) 長尾毅, 門脇陽治, 土田孝, 寺内潔: 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性(第2報)~支持力安全性に関する検討~, 港湾空港技術研究所報告 Vol. 36, No. 1997