

津波による浸透流を考慮した防波堤捨石マウンドの支持力低下に関する検討

大村厚夫*・若崎正光*・佐藤昌宏**・柴田大介***・上原甲太郎***・佐藤 真****

* (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

*** (株) 日本港湾コンサルタント 技術本部技術一部第一課

**** 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

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よって基礎捨石マウンド内に浸透流が発生し、捨石に浸透力が作用して支持力が低下する。この現象による支持力低減の大きさを定量的に把握するため、腹付工の形状を変化させた防波堤断面について、地盤解析汎用プログラム「GeoFem 改良版」を適用して数値計算を行い、支持力低下が防波堤の港内外水位差と関係があることを確認した。また、現行の技術基準において基礎マウンドの支持力性能照査に用いられている「簡易ビショップ法による円弧すべり計算」結果に対して、FEM で求めた低減率を用いて「浸透流の影響を考慮した耐力作用比」を算定することで、実務設計において FEM による数値計算や模型実験等の詳細検討を省略できる場合があることを設計フローに整理した。

キーワード：津波、防波堤、浸透流、基礎マウンド、支持力、GeoFem、設計法

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、捨石マウンドの支持力が低下する現象について解説されているが、これを考慮した設計法は現時点で構築されていない。本研究では、「GeoFem 改良版」²⁾を 2 種類の基本断面と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。また、一般的な支持力検討法である「簡易ビショップ法(浸透流を考慮しない)」³⁾を用いた円弧すべり解析結果と FEM で求めた耐力作用比を比較して、両解析方法の差異を確認し、さらに浸透流による支持力低下の影響を、実務設計に利用する際の簡便な設計フローを整理して示した。

2. 検討対象断面と津波波力

2.1 検討断面

検討対象とする防波堤には、L2 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 及び図-3)を選定するとともに、対策工の 1 つである腹付工断面(図-2 及び図-4)を設定して、各ケースに対する支持力の限界水平力を比較した。

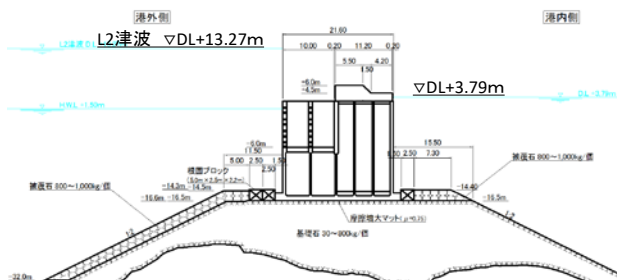


図-1 Case1-1 基本断面 (A)

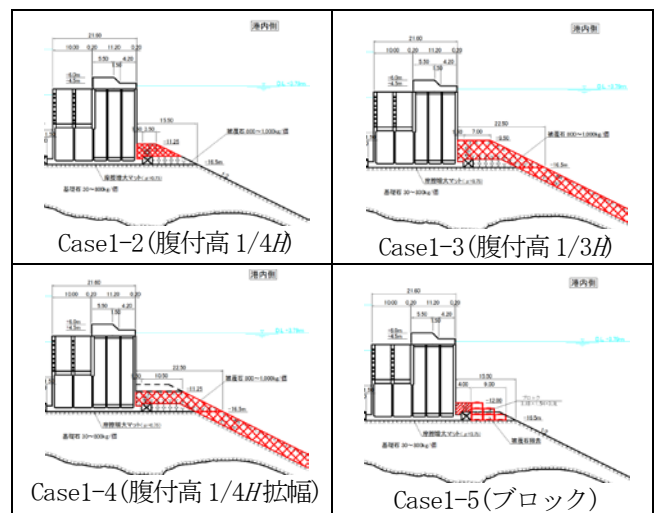


図-2 Case1-2～Case1-5 腹付工断面

基本断面(A)の腹付工の天端高は、ケーソン壁高($H=21\text{m}$)の $1/3$ (D.L. -9.5m)、 $1/4$ (D.L. -11.25m) とし、法面厚の増厚は 3.30m に統一した。

基本断面(B)の腹付工の天端高は、ケーソン壁高($H=18\text{m}$)の $1/3$ (D.L. -8.5m)、 $1/4$ (D.L. -10.0m) し、法面厚の増厚は 1.65m に統一した。

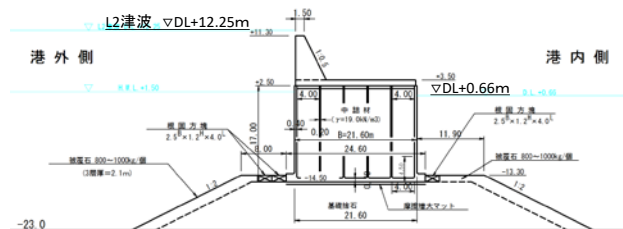


図-3 Case2-1 基本断面 (B)

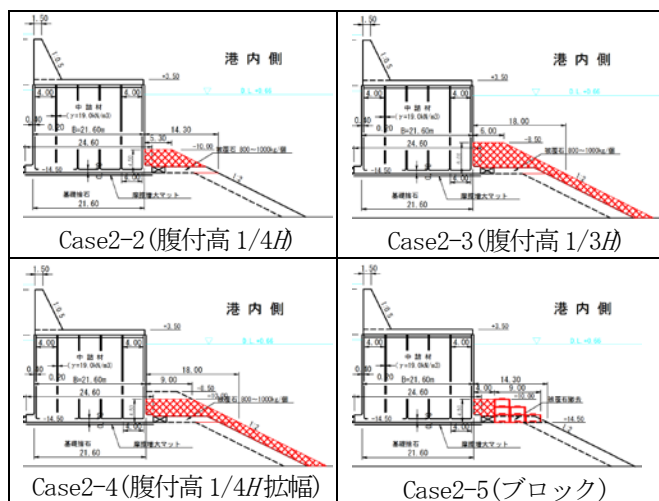


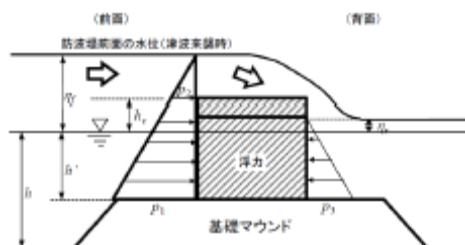
図-4 Case2-1～Case2-5 腹付工断面

2.2 検討水位および防波堤に作用する波圧

支持力の安定性照査は、津波が越流状態となる L2 津波水位にて行った。基本断面(A)の検討水位は、港外側水位 D.L. +13.27m, 港内側水位 D.L. +3.39m, 水位差 9.48m とした。

基本断面(B)の検討水位は、港外側 D.L. +12.25m, 港内側水位 D.L. +0.66m, 水位差 11.59m とした。

本研究では、津波が防波堤を越流する場合を対象とするため、防波堤に作用する津波波圧の算定には、「静水圧差による算定式」を適用した。波圧分布図⁴⁾と波圧強度式を式(1)～式(3)に示す。



※浮力については、水没している堤体全体(前面水位を背面まで考慮した場合の容積：斜線の部分)として計算し、揚圧力については考慮しない。

図-5 津波波圧分布図¹⁾

$$p_1 = \alpha_f \cdot \rho_0 \cdot g(\eta_f + h') \quad (1)$$

$$p_2 = (\eta_f - h_c) / (\eta_f + h') p_1 \quad (2)$$

$$p_3 = \alpha_r \cdot \rho_0 \cdot g(\eta_r + h') \quad (3)$$

ここに、

p_1 : 堤体前面下端部における波圧強度 (kN/m²)

p_2 : 堤体前面上端部における波圧強度 (kN/m²)

p_3 : 堤体背面下端部における波圧強度 (kN/m²)

$\rho_0 \cdot g$: 海水の単位体積重量(kN/m³)

h' : 堤体の前面における水深(m)

h_c : 堤体の静水面上の高さ(m)

η_f : 静水面上の前面の津波高さ(m)

η_r : 静水面上の背面の津波高さ(m)

α_f : 前面の静水圧補正係数 (1.05)

α_r : 背面の静水圧補正係数 (0.90)

3. FEM 解析による津波浸透流の影響

3.1 GeoFem の適用方法

(1) FEM による解析フロー

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²⁾。図-6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段階で実施し、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 ($F=i \cdot \gamma_w$) を事前に求めて、応力変形解析時に浸透力を各要素の積分点に付加する方法を採っている。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ている^{4), 5)}。

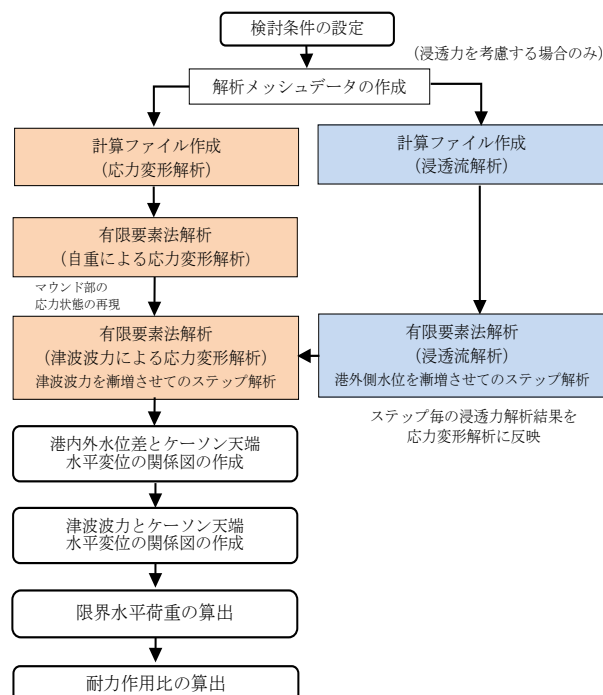


図-6 GeoFem を用いた基礎の支持力照査フロー

(2) 浸透流解析

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。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。なお、港内側の水位は変動しない一定値を与え、港外側の水頭は 0.20m ずつ漸増させ、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、津波の波圧強度式により算定した水平力を計算ステップ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では水平力を漸増させた

応力変形解析を行う。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することで、浸透流の影響を考慮する。図-7 に FEM 解析における解析モデルを示す。

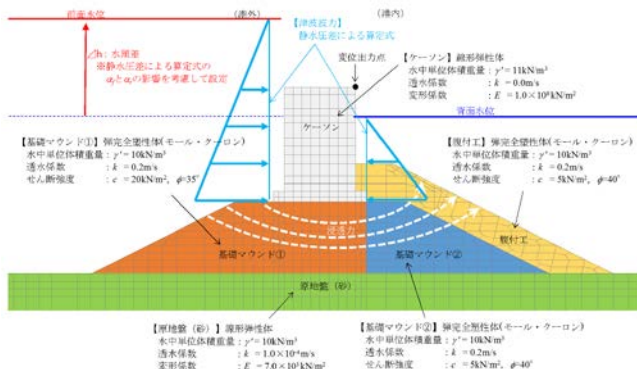


図-7 FEM 解析における解析モデルイメージ

3.2 支持力解析モデル

(1) 解析モデルの物性値

図-8 に Case1-1 の解析モデルを、図-9 に Case2-1 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 $E=600N+1000$ (KN/m²) 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の概略値 1×10^{-4} m/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。

基礎捨石マウンドの見掛けの粘着力とせん断抵抗角は、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、港内側マウンドは浸透力によって拘束圧が低下する影響を考慮して、 $c=5$ (kN/m²)、 $\phi=40^\circ$ に設定した。

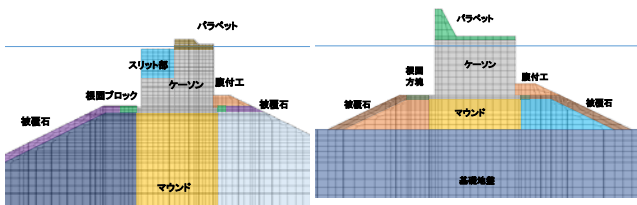


図-8 解析モデル Case1-2 および Case2-2

表-1 解析モデルの物性値

要素名	構成則	単位体積重量 γ or γ' (KN/m ³)	粘着力 C (KN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (度)	変形係数 E (KN/m ²)	ポアソン比 ν	透水係数 k (m/s)
パラベット	線形弾性体	22.54 (11.76)	—	—	$1.00E+08$	0.17	$1.00E-09$
ケーソン	線形弾性体	20.58 (10.49)	—	—	$1.00E+08$	0.17	$1.00E-09$
ケーソンスリット部	線形弾性体	5.29 (3.04)	—	—	$1.00E+08$	0.17	$1.00E-09$
根固ブロック	線形弾性体	11.47	—	—	$3.00E+04$	0.17	$1.60E-03$
根固方塊	線形弾性体	12.45	—	—	$3.00E+04$	0.17	$1.00E-09$
被覆石(港外側)	完全弾塑性	10.00	20.00	35	$3.00E+04$	0.33	$2.00E-01$
被覆石(港内側)	完全弾塑性	10.00	5.00	40	$3.00E+04$	0.33	$2.00E-01$
マウンド(港外側)	完全弾塑性	10.00	20.00	35	$3.00E+04$	0.33	$2.00E-01$
マウンド(ケーソン直下)	完全弾塑性	10.00	20.00	35	$3.00E+04$	0.33	$2.00E-01$
マウンド(港内側)	完全弾塑性	10.00	5.00	40	$3.00E+04$	0.33	$2.00E-01$
腹付工	完全弾塑性	10.00	5.00	40	$3.00E+04$	0.33	$2.00E-01$
基礎地盤	線形弾性体	10.00	—	—	$7.00E+03$	0.33	$1.00E-04$

3.3 検討結果

(1) 限界水平力

本検討では、浸透力による支持力低下の影響度合いを比較するため、同じ解析モデルを使用して「浸透流を考慮しない場合」と「浸透流を考慮する場合」の解析を実施し、解析ステップ毎に「津波波力とケーソン天端水平変位の関係 (荷重変位図) (図-9)」に整理して限界水平力を求めた。

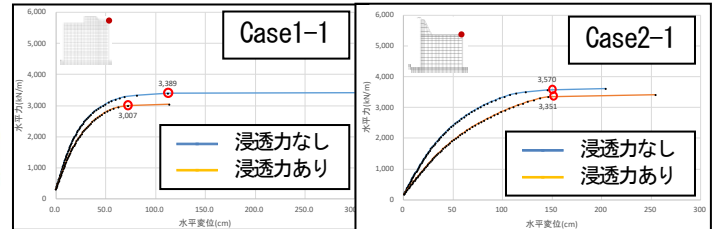


図-9 荷重変位図

(2) 検討結果一覧 (浸透流の影響 有り・無し)

表-2 に検討結果の一覧を示す。

津波による浸透流の影響を、限界水平力の低減率 (= FEM(浸透力有り)の限界水平力 ÷ FEM(浸透力無し)の限界水平力) で評価すれば、浸透流を考慮した場合の限界水平力は 6 ~ 12% 低下し、水位差との相関が見られた。

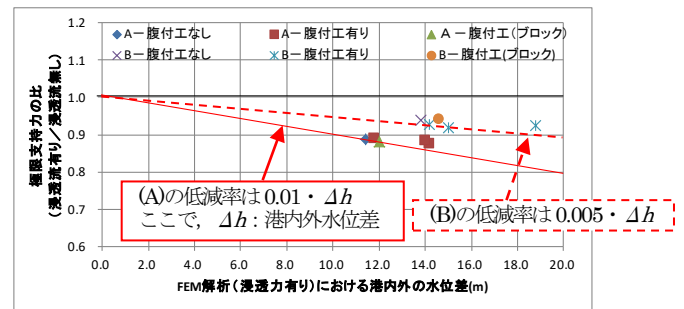


図-10 FEM の結果 (浸透流無し・有り) の比較

(3) 耐力作用比の比較 (簡易ビショップ法と FEM)

簡易ビショップ法で求めた円弧すべりの耐力作用比と GeoFem(浸透流無しの場合) で求めた耐力作用比には図-11 のような差異が確認された。今回の各断面の耐力作用比は、簡易ビショップ法 < FEM(浸透流無し) となり、3 割程度の乖離が確認された。

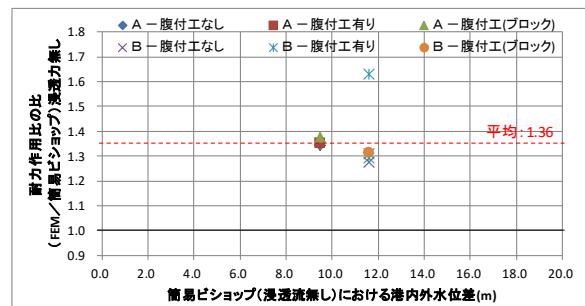


図-11 簡易ビショップ法と FEM(浸透流無し) の比較

表-2 検討結果一覧表

防波堤タイプ	腹付形状	水位条件			外力	浸透流無し		浸透流有り		浸透流の影響	支持力の耐力作用比			解析法の影響
		港外側	港内側	水位差	L2津波波力 (KN/m)	限界水位差 (m)	限界水平力 (KN/m)	限界水位差 (m)	限界水平力 (KN/m)	極限支持力の比	簡易ビショッブ	FEM (浸透流無し)	FEM (浸透流有り)	FEM/簡易ビショッブ
	計算式	—	—	—	①	②	③	④	⑤	⑤/③	⑥	③/①	⑤/①	(③/①)/⑥
A	Case1-1	D.L.+13.27 m	D.L.+3.79 m	9.48m	2,549	13.00	3,389	11.40	3,007	0.89	0.99	1.33	1.18	1.34
	Case1-2				2,549	13.40	3,485	11.80	3,103	0.89	1.01	1.37	1.22	1.35
	Case1-3				2,549	16.40	4,201	14.20	3,676	0.87	1.22	1.65	1.44	1.35
	Case1-4				2,549	16.00	4,105	14.00	3,628	0.88	1.20	1.61	1.42	1.34
	Case1-5				2,549	13.80	3,580	12.00	3,151	0.88	1.02	1.40	1.24	1.38
B	Case2-1	D.L.+12.25 m	D.L.+0.66 m	11.59m	2,746	14.60	3,570	13.80	3,351	0.94	1.02	1.30	1.22	1.27
	Case2-2				2,746	15.20	3,734	14.20	3,461	0.93	1.04	1.36	1.26	1.31
	Case2-3				2,746	20.20	5,103	18.80	4,720	0.92	1.14	1.86	1.72	1.63
	Case2-4				2,746	16.20	4,008	15.00	3,680	0.92	1.13	1.46	1.34	1.29
	Case2-5				2,746	15.40	3,789	14.60	3,570	0.94	1.05	1.38	1.30	1.31

4. 津波浸透流を考慮した支持力安定性

4.1 限界水平力の低減率の反映方法

簡易ビショッブ法と FEM 解析で求めた耐力作用比には 3 割程度の乖離があるため、FEM (浸透流有り) の結果のみで断面諸元を設定することは、危険側の設計結果を与えることになる。このため、両者を組合せて用いる方法を検討した。

4.2 浸透流の影響を考慮した計算フロー

ここでは、現行基準に採用されている簡易ビショッブ法による円弧すべり計算で求めた耐力作用比を、津波浸透流の影響による低減率で補正する方法を示す。

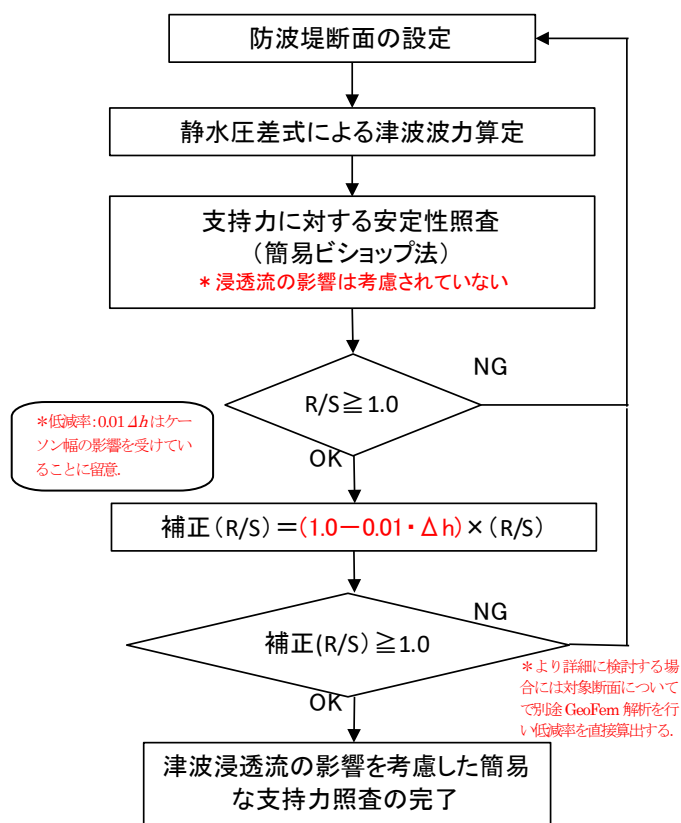


図-12 浸透流を考慮した支持力の簡易照査フロー(案)

5. まとめ

今回の検討ケースにおいて、浸透流の影響を考慮した場合の限界水平力の低下率は、水位差 10m で 10%、20m で 20%程度(ただしケーソン幅 20m 程度)と見込まれた。

また、「簡易ビショッブ法による耐力作用比」と「GeoFem(浸透流無し)の場合による耐力作用比」の間には 3 割程度の乖離があり、津波越流時のような浸透流の影響が大きいケースでは、簡易ビショッブ法による照査が FEM に比較して、より安全側の照査結果を与えることが確認された。このため、浸透流の影響を考慮した支持力照査を行う場合、簡易ビショッブ法による耐力作用比をベースとして、港内外水位差に関係づけた図-10 の低減率を掛けて補正する方法が、現時点では妥当であると考えられる。

謝辞

本報告は、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」の成果を整理したものである。対象とした防波堤は、ケーソン幅が 20m 程度と大きく、断面形状がやや特殊であることから、今後多くの防波堤断面に GeoFem が適用され、支持力照査における浸透流の影響に関する知見が蓄積され、FEM 解析を用いたより合理的な設計検討が行われることが期待される。

本検討業務の実施にあたり、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

- 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。
- 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。
- 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。
- 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，pp. 18，2013 年。
- 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。