九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性に関する水理模型実験

笠間，清伸
九州大学

善，功企
九州大学

春日井，康夫
九州大学

https://hdl.handle.net/2324/7218214

出版情報：Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering). 69 (2), pp.I_966-I_970, 2013. Japan Society of Civil Engineers
バージョン：
権利関係：© 2013 by Japan Society of Civil Engineers

KYUSHU UNIVERSITY

土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. 69, No. 2, 2013, I_966-I_970

浸透流に着目したケーソン式混成防波堤の安定性に関する水理模型実験

Model experiment for the instability of caisson-type composite breakwater under tsunami condition

笠間清伸[1]・善　功企[2]・春日井康夫[3]

Kiyonobu KASAMA, Kouki ZEN and Yasuo KASUGAI

In order to investigate the instability mechanism of caisson-type composite breakwater under tsunami condition, a scale of 1/100 model experiment was performed in laboratory. Loading tests were also carried out to investigate the reduction of bearing capacity under the existence of seepage flow. From the results of laboratory experiment and theoretical analysis, it was confirmed that the bearing capacity of rubble-mound can considerably decrease due to the tsunami-induced seepage flow. It is concluded that the effect of seepage flow in the rubble-mound should be taken into account when making a design of the caisson-type composite breakwater against tsunami.

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では，津波により防波堤や防潮堤などの港湾施設が甚大な被害を受けた．これまで，稲富ら（1994），Miyake・Yanagihata（1999），陸田・土井（2006），長尾・吉岡（2008），三宅ら（2009），今瀬ら（2011）などの研究者により防波堤や防潮堤の被害メカニズムが研究されてきており，被災の原因として，①防波堤前面と背面の水位差に起因して作用する水平力，②防波堤の越流水ならびに目地で発生する流水による捨石マウンドの洗掘，③捨石マウンドの支持力の低下などが考えられている．著者らの研究グループは，津波による防波堤直下の捨石マウンド内に発生する浸透流に着目して，防波堤の被災メカニズムを検討してきた（笠間ら，2012）．

本論文では，防波堤に来襲する津波を模擬した水理模型実験を実施し，津波により発生する防波堤直下の捨石マウンドの間隙水圧を実験的に調べた．その結果を用いて，防波堤直下の捨石マウンドの間隙水圧分布および浸透流に着目して，捨石マウンドの浸透破壊ならびに防波堤のすべり破壊の可能性を検討した．さらに，防波堤の不安定化を防止することを目的として，港内側の捨石マウンド上に蛇籠を設置した実験も行い，津波作用時の捨石マウンド内に発生する浸透破壊の防止効果ならびに支持力改善効果を検討した．

2. 実験概要

図-1に実験装置の概略と計測器の配置図を示す．模型防波堤は釜石湾口防波堤南堤をモデルに作製し，縮尺は1/100とした．捨石マウンドは，2mm～4.75mmの砕石を用い，飽和密度は1.86g/cm^{3}とした．模型防波堤の大きさは，高さ195mm，幅185mm，奥行き190mm，密度2.03g/cm^{3}とした．前回の実験（笠間ら，2012）とは，より小さな砕石を用いて捨石マウンドを作製した点が異なる．

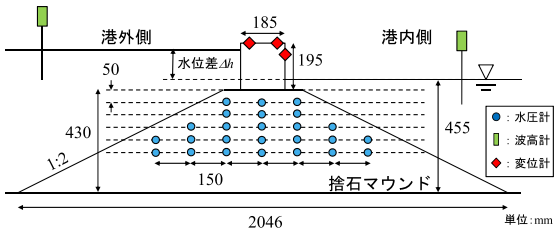


図-1　実験装置の概略と実験器具の配置

本実験では，津波の衝撃力を再現するのではなく，津波により防波堤の前面と背面に水位差が生じている状態を水中ポンプを用いて再現した．水位差は40mm，80mm，120mmおよび145mmであり，それぞれ4m，8m，12mおよび14.5mに相当する津波を再現した．本論文では，水位が上昇，下降した方をそれぞれ港外側，港内側と呼ぶ．水位差を作用させた状態で図-1の水圧計の位置で，捨石マウンド内の水圧分布を測定し，水圧分布から捨石マウンド内の動水勾配iを計算した．

また，津波作用時における捨石マウンドの支持力を調べるため，水位差を作用させた状態で模型防波堤に対して載荷試験を行った．模型防波堤の重心位置に鉛直方向から荷重を載荷し，その時の平均沈下量と傾斜角を測定した．

さらに，津波作用時の防波堤の不安定化を防止することを目的として，港内側のマウンド天端に模型蛇籠を設置した条件でも実験を行った．模型蛇籠は，捨石マウンドと同材料を網状の袋に入れて作製しているため透水性が大きく，断面60×60mm，奥行き40mmで設置した．

1 正会員　博(工)　九州大学大学院工学研究院准教授
2 フェロー　博(工)　九州大学大学院工学研究院特任教授
3 正会員　博(工)　九州大学大学院工学研究院教授

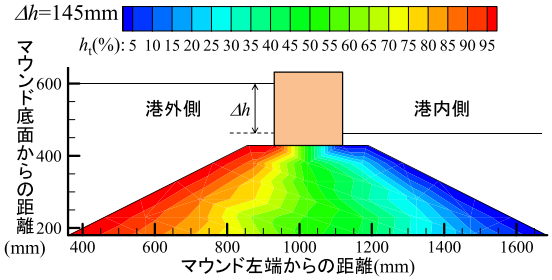


図-2　実験から得たピエゾ水頭分布図

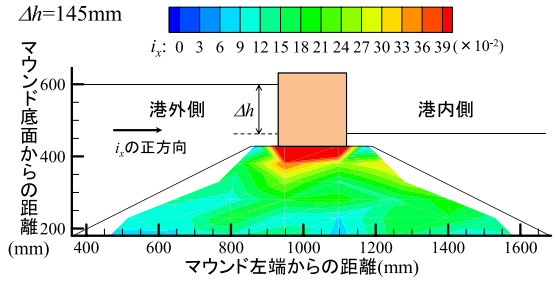
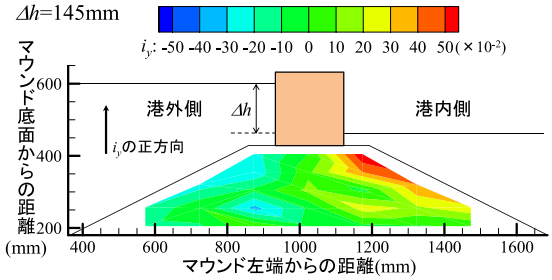
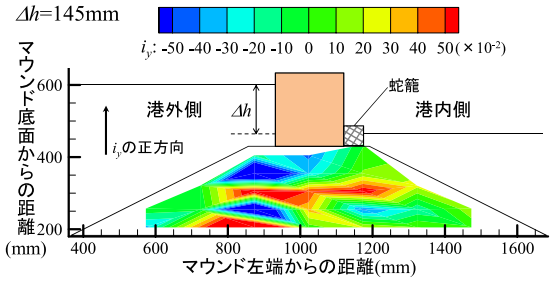


図-3　水平方向の動水勾配のコンター図



(a) 模型蛇籠なし



(b) 模型蛇籠あり

図-4　鉛直方向の動水勾配のコンター図

3. 捨石マウンド内の浸透流と浸透破壊

図-2に，模型蛇籠なしの条件における水位差145mmの時の実験から得られた捨石マウンド内のピエゾ水頭の分布図を示す．模型防波堤の港外側に水位差Hの津波が作用したとして表した．捨石マウンド内には，なめらかな水頭の変化が見られ，その水頭差は，鉛直方向よりも水平方向の変化が顕著であった．これは，捨石マウンド内は水平流が卓越することを意味する．捨石マウンド上部では水頭の変化が急であり，捨石マウンド下部では緩やかであった．

図-3に図-2のピエゾ水頭分布から計算した水平方向の動水勾配i_xのコンター図を示す．右方向を正とした．水平方向の動水勾配i_xの分布は，ほぼ対称であり，捨石マウンドの両上肩に著しく大きな値が見られた．港内側の捨石マウンドの肩付近には，水平方向の動水勾配i_xに起因して，右方向の浸透力が発生することを示唆する．したがって，港外側の捨石マウンドの安定性に変化はないが，港内側は水平方向に捨石マウンドが不安定化する可能性がある．

図-4 (a) に，図-2のピエゾ水頭分布から計算した鉛直方向の動水勾配i_yのコンター図を示す．上方向を正とした．鉛直方向の動水勾配が発生するのは，捨石マウンドの両肩付近（深さ約50mm，実スケールでは5m）に限定され，それ以下ではほとんど発生しない結果となった．港内側の捨石マウンドの肩付近では，動水勾配に起因して鉛直上方向に浸透力が発生するため，パイピングの様な捨石マウンドの移動・崩壊が起こる可能性がある．

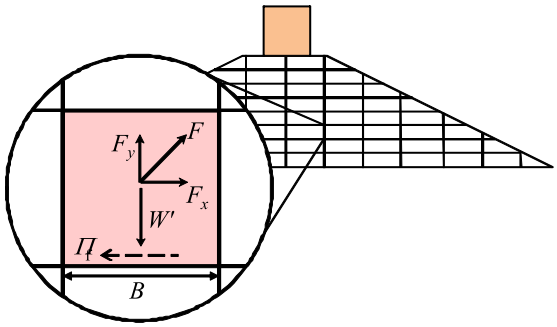


図-5　浸透破壊の考え方

図-4 (b) に，港内側の捨石マウンド上に模型蛇籠を設置した条件での鉛直方向の動水勾配i_yのコンター図を示す．模型蛇籠を設置した港内側の捨石マウンド天端付近は，動水距離が長くなるため，動水勾配が減少する結果となった．しかしながら，捨石マウンドには，不均一な鉛直動水勾配が発生し，特に，模型ケーソン直下100mm（実スケールで10m）付近の動水勾配が増加した．

津波による捨石マウンドの浸透破壊を有効応力と浸透力を用いて検討するために，図-5に示すような捨石マウンドに動水勾配iが作用した時の浸透破壊の概念を用いた．津波に起因して面積Aの捨石マウンドに発生する浸透力F，水平浸透力F_xおよび鉛直浸透力F_yは，水の単位体積重量γ_wとして次式のように表すことができる．

$$F = \sum(\gamma_w \cdot i)\cdot A \quad \cdots\cdots (1a)$$

$$F_x = \sum(\gamma_w \cdot i_x)\cdot A \quad \cdots\cdots (1b)$$

$$F_y = \sum(\gamma_w \cdot i_y)\cdot A \quad \cdots\cdots (1c)$$

また，鉛直有効上載荷重W'を受ける単位幅Bの捨石マウンドの水平方向のせん断強度T_fは，次のようになる．

$$T_f = c'\cdot B + (W' - F_y)\tan\phi \quad \cdots\cdots (2)$$

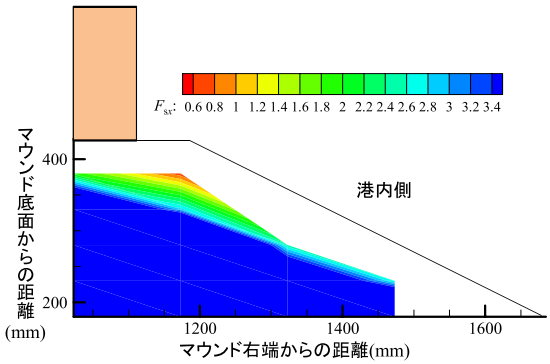
ここで，c'とϕ'はそれぞれ捨石マウンドの粘着力と内部摩擦角である．したがって，浸透破壊に対する水平方向の安全率F_{sx}は次のようになる．

$$F_{sx} = T_f / F_x \quad \cdots\cdots (3)$$

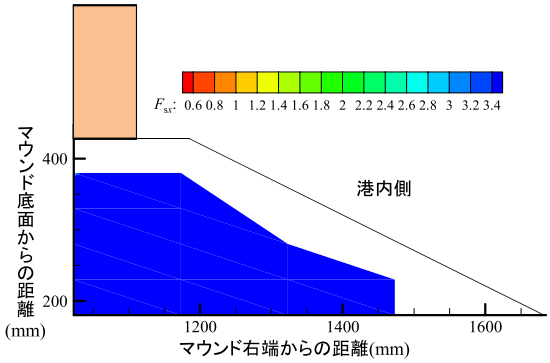
図-3と図-4で示した水位差120mmの時の鉛直・水平方向の動水勾配を用いて，式（3）による捨石マウンドの浸透破壊に関する水平方向の安全率F_{sx}のコンター図を図-6に示す．図-6（a）と（b）は，それぞれ模型蛇籠のある条件とない条件であり，捨石マウンドの不安定化となる港内側のみの分布を示す．ここで，鉛直有効上載荷重W'は，2節で説明した捨石マウンドと模型防波堤の有効単位体積重量を用いて計算した．また今回は，$c' = 0$，$\phi' = 35°$と仮定した．図-6（a）の模型蛇籠のない条件では，捨石マウンドの表面から深さ48mm付近（実スケールでは約4.8m）が局所的に不安定化するという結果が得られた．このように実験より得られた動水勾配で判断すると十分に捨石マウンドが浸透破壊するという結果が得られた．実際の実験でも，145mmの津波を作用させた条件において，捨石マウンドの移動，模型ケーソンの傾斜・転倒が観察された．したがって，津波作用時には，捨石マウンド内に発生する浸透力に起因して，捨石マウンドの浸透破壊が生じる可能性があり，実験のスケール効果も含めて十分に検討していく必要がある．一方，図-6（b）に示す模型蛇籠を設置した実験においては，捨石マウンド内に浸透破壊を生じる箇所はなく，実際の実験においても浸透破壊は生じなかった．このように浸透距離を大きくできる蛇籠を設置することで，捨石マウンド内に発生する浸透力を低減でき，さらに津波作用時における防波堤の不安定化を防止できる可能性がある．

4. 津波作用下での捨石マウンドの支持力特性

津波作用時の捨石マウンドの支持力特性を評価するために，津波作用時の捨石マウンドに対する荷重沈下曲線を図-7に示す．水位差が大きい条件において，荷重沈下曲線が4％まで到達していない理由は，水位差を一定に保ったままで載荷試験を行うと，載荷重と浸透力が同時に作用することになり，荷重の最終値付近において地盤



（a）模型蛇籠なし



（b）模型蛇籠あり

図-6　浸透破壊に関する安全率のコンター図

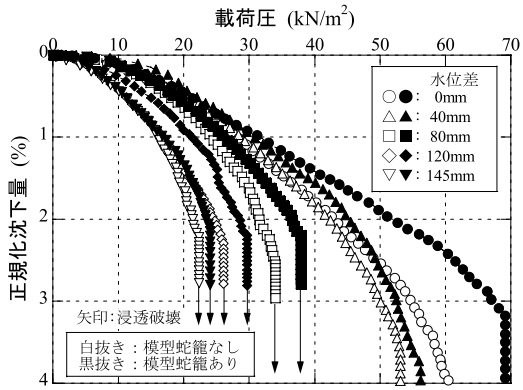


図-7　荷重沈下曲線

が浸透破壊していく破壊形態を示すためである．

そこで，得られた載荷重の最終値を極限支持力と判断すると，水位差が大きくなるほど極限支持力は減少した．また，港内側の捨石マウンドの天端上に模型蛇籠を設置することで，極限支持力は若干増加し，その支持力改善効果は，水位差が小さい時ほど顕著であった．これは，蛇籠自体の重量が小さいため，ケーソン直下の捨石マウンドの強度増加にはほとんど影響がないためであり，さらに水位差が大きくなると捨石マウンド内に生じる浸透

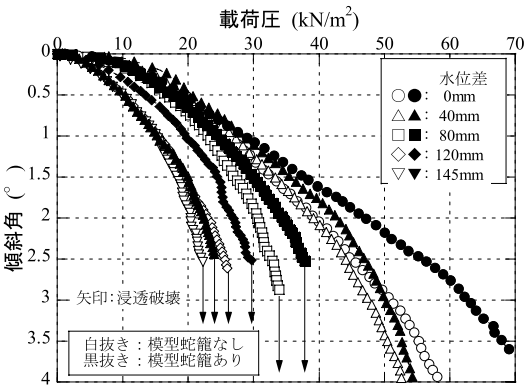


図-8　載荷圧と傾斜角の関係

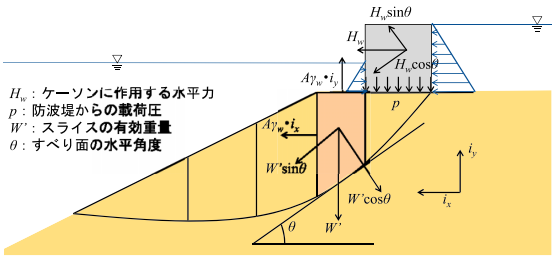


図-9　津波作用時の捨石マウンドの支持力計算

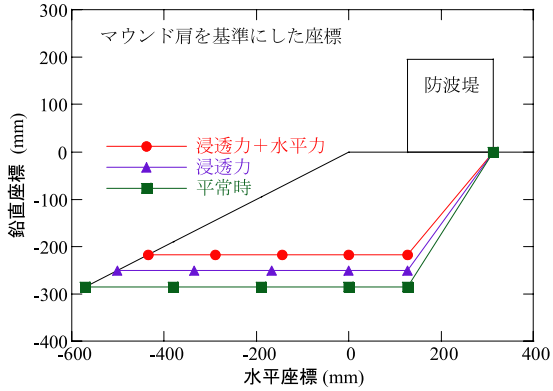


図-10　スライス分割法によるすべり面の形状

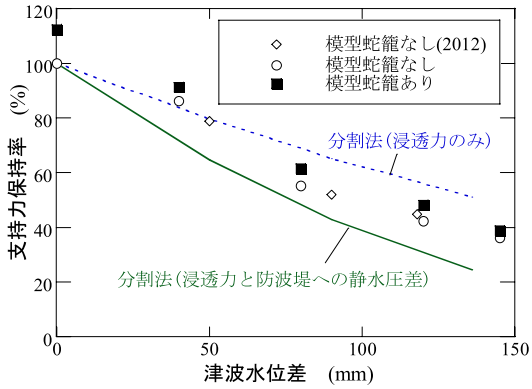


図-11　津波を考慮した支持力保持率

力が破壊現象に支配的になるためである．

図-8には，載荷試験時の載荷圧と防波堤の傾斜角の関係を示す．傾斜角は，防波堤が港内側に傾く場合を正とした．同じ載荷圧で比較すると水位差が大きくなるほど模型ケーソンの傾斜角は大きくなった．これは，水位差に起因してケーソンの側面に水平圧力が作用するためである．蛇籠設置により，水位差が小さい条件では，傾斜角の発生を低減できたが，水位差が大きい条件では，模型蛇籠の有無はほとんど傾斜角の発生に影響しなかった．

以上の観測された津波作用時における防波堤の不安定化の原因を分析すると，この水理学的な原因としては，港外側と港内側の水位差に起因して発生する水平荷重が防波堤に作用するためであり，水位差の増加とともに水平力も増加するためだと考えられる．地盤工学的な原因としては，捨石マウンド内に生じる浸透流であり，水位差が大きいほど，捨石マウンド内に生じる間隙水圧が大きくなり，それに伴い，捨石マウンド内の有効応力が小さくなり，捨石マウンドの強度ならびに支持力が低減したためであると考えられる．

津波作用時の捨石マウンドの支持力の低減を，水位差によって防波堤に作用する水平力と捨石マウンド内の間隙水圧の効果をそれぞれ分けて検討するために，津波作用時における捨石マウンドの支持力を有効応力と浸透力を考慮した図-9に示すスライス分割法により計算した．

捨石マウンド内の水平浸透力F_x，鉛直浸透力F_yおよび防波堤に作用する水平力H_wを考慮した場合には，スライス分割法における捨石マウンドの各スライスに作用するせん断力S_iと抵抗力R_iならびにすべり破壊に対する安全率は，次のようになる．

$$R_i = (W'\cos\theta - H_w\sin\theta - F_x\sin\theta - F_y\cos\theta)\tan\phi' \quad \cdots (4a)$$

$$S_i = W'\sin\theta + H_w\cos\theta + F_x\cos\theta - F_y\sin\theta \quad \cdots\cdots\cdots (4b)$$

$$F_s = \sum_{i=1}^{n} R_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} S_i \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4c)$$

ここで，捨石マウンドの極限支持力を計算する際には，防波堤から捨石マウンドに作用する荷重pを入力定数として，安全率を計算し，安全率が1.0となる荷重を捨石マウンドの支持力とした．

図-10は，計算により得られたすべり面の形状である．式（4）内の浸透力は，実験により得られた動水勾配を用いて計算した．津波が作用しない平常時のすべり面の深度に比べて，浸透力を考慮する場合には88％，浸透力と水平力の両方を考慮すると76％すべり面は浅くなった．

図-11は，実測値ならびにスライス分割法を用いて計算した捨石マウンドの支持力保持率と水位差の関係であ

る．支持力保持率とは，津波作用時の支持力を平常時の模型蛇籠なしの条件での極限支持力で正規化した値である．また，図中には，我々の研究グループが4.75mm～26.5mmの砕石（平均粒径17mm）を用いて捨石マウンドを作製して同様な実験を行った結果も示している（笠間ら，2012）．実験結果に着目すると，捨石マウンドの粒径の大きさによらず，水位差の増加とともに支持力保持率は，顕著に減少した．今回の実験では，145mmの津波（実スケールで14.5m）が作用したときには，支持力が約40％まで低減する結果となった．この水位差に伴う支持力低減量は極めて大きく，津波作用時には水位差に起因して発生する浸透力が防波堤の安定性にきわめて大きな影響を与えることを指摘している．一方，模型蛇籠の支持力改善効果は，極めて小さく，特に，水位差が大きくなるほど減少した．したがって，模型蛇籠の設置は，津波作用時における天端付近の捨石マウンドの浸透破壊の防止に対して有効であるが，全体的な支持力の改善へは疑問が残る結果となった．

さらに，スライス分割法で計算した支持力保持率に着目すると，スライス分割法と実測値による支持力保持率は，同じような関係がみられたが，実験値の保持率が浸透力のみを考えた時よりも小さく，水平力まで考慮に入れた時よりも大きかった．以上のことから，捨石マウンド内の浸透力ならびに防波堤に作用する水平力を考慮したスライス分割法により，津波による捨石マウンドの支持力低減量を計算できると言える．

5. 結論

本研究では，津波を模擬した水理模型実験を実施し，地盤工学的な観点から模型防波堤の安定性を評価した．得られた知見は，以下のようになる．

(1) 津波作用時における捨石マウンド内の浸透力および浸透破壊に着目した安定評価では，捨石マウンドの浸透破壊現象をうまく評価できた．また，浸透距離を増加させるために設置した蛇籠の効果により，浸透破壊を防止することができた．

(2) 津波による水位差が大きくなるにつれて，捨石マウンド内の浸透力ならびに防波堤に作用する水平力に起因して，捨石マウンドの支持力は減少する．今回の実験では，145mmの津波（実スケールで14.5m）が作用したときには，支持力が約40％まで低減する結果となった．捨石マウンドの支持力改善に対して，模型蛇籠の設置は有効ではなかった．

(3) 津波による捨石マウンド内の浸透力と防波堤に作用する水平力を考慮したスライス分割法による支持力計算法を提案した．提案手法によれば，津波が作用しない平常時のすべり面の深度に比べて，浸透力を考慮する場合には88％，浸透力と水平力の両方を考慮すると76％，すべり面は浅くなった．

(4) 今回提案した捨石マウンド内の浸透力と防波堤に作用する水平力を考慮したスライス分割法による支持力計算法は，実験で得られた津波作用時の防波堤の支持力の低減量をうまく計算でき，防波堤の安全性評価に有効であると考えられる．

参　考　文　献

稲富隆昌・上部達生・井合　進・風間基樹・山崎浩之・松永康男・関口信一郎・水野雄三・藤本義則（1994）：1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告，港湾技術研究所報告，No.791, pp.38-64.

今瀬達也・前田健一・三宅達夫・鶴ヶ崎和博・澤田　豊・角田紘子（2011）：捨石マウンド－海底地盤への津波浸透による混成堤の不安定化，土木学会論文集B2（海岸工学，Vol.67, No.2, I_551-I_555.

笠間清伸・善　功企・陳　光斉・Dong Si-meng・武末晃洋（2012）：津波による防波堤直下の捨石マウンドの安定性に関する水理模型実験，防災・減災のための地盤構造物の設計・施工法に関するシンポジウム論文集，pp.145-148.

長尾　毅・吉岡　健（2008）：防波堤の支持力照査法に関する実験的研究，国土技術政策総合研究所資料，No.453, YSK-N-152.

三宅達夫・角田紘子・前田健一・坂井宏隆・今瀬達也（2009）：津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用，海洋開発論文集，第25巻，pp.87-92.

陸田秀美・土井康明（2006）：砕波による衝撃圧の直接推定と構造物の動的解析，土木学会論文集B，Vol.62, No.3, pp.224-237.

Miyake, M. and Yanagihata, T. (1999): Heap shape of Materials Dumped from Hopper Barges by Drum Centrifuge, Proceedings of the Ninth International offshore and Polar Engineering, Vol.1, pp.745-748.