

海岸堤防の空洞化発生機構に関する実験的研究

岩崎 福久* ・ 田中 茂信** ・ 佐藤 慎司***
 名合 宏之**** ・ 前野 詩朗***** ・ 小谷 祐司*****

1. はじめに

近年、昭和30年代より造られてきた直立形式の堤防や護岸の被災事例の内、堤体材料が何らかの要因で吸い出された結果堤防内部に空洞が生じ、堤防自体の耐波力性が減少し被災に至る事例が数多く見られる（例えば、宇多・五十嵐，1992）。このような堤体材料の吸い出しによる堤防内部の空洞の発生に関して、これまで幾つかの要因が考えられてきた。例えば、目地の老朽化や施工不良によって生じた隙間から堤体材料が吸い出される現象や、根固工が散乱し洗掘が進んだ結果矢板下端から堤体材料が吸い出される現象等である。

本研究は堤防の主な被災要因である空洞化現象の発生機構の解明と、空洞化現象の抑制技術の試案の適用性を検討するため大型模型実験を行った。

2. 空洞化発生機構とその抑制対策に関する模型実験

2.1 実験概要

堤防の空洞化発生要因としては、1.で述べたもの以外に、近年注目されている「波浪による海底地盤の液状化現象」による堤防材料の吸い出しが考えられている。波浪による海底地盤の液状化は、善ら（1989）や前野ら（1992）によって現地で確認されている。また海岸構造物周辺の地盤の液状化は、前野（1993）や善ら（1989）により特殊な条件下における実験で確認されている。例えば前野（1993）は、護岸基礎周辺地盤の液状化により堤体材料が吸い出される現象を2次元実験により確認しているが、この実験はピストンを介した水圧変動が構造物前面の砂層上全体に一樣に作用した場合の地盤の液状化現象を研究したものである。しかし現地においては、堤防前面の地盤が波浪に伴う流れによる洗掘の影響も受けながら液状化すると考えられ、前野（1993）が行った実

験結果と異なる現象が起こり得ると考えられる。これらのことから、現地に近い条件での空洞の発生機構の解明が必要とされる。

堤防周辺地盤の液状化に起因して吸い出しが生じていると考えれば（前野，1993），基礎周辺地盤の液状化対策を行うことにより、空洞の発生に対処できると考えられる。そこで、空洞化現象の抑制技術として、清水（1994）に倣い透水性の矢板を用いた堤体材料の吸い出しを防止する対策を考えた。この場合も上記の空洞化の発生機構と同様、実際の波浪作用条件下での適用性に関する課題が残されている。

以上の理由により、現地に近い条件における現象の相似性を考慮して（名合・前野，1995），空洞化現象の発生を再現するため実験縮尺を1/5程度とし、コンクリート製の直立形式の堤防を水路内に作成した。実験は、空洞化現象発生機構の解明および空洞化現象抑制技術の効果を確認するため、堤防周辺の地盤内の間隙水圧分布の計測、堤防周辺の地盤の挙動、地盤の液状化現象および空洞の発生状況の観察を行った。

2.2 実験方法

実験装置を図-1に示す。使用した波浪水路は長さ150m、深さ5mであり、この水路に堤防の模型を設置した。作成した堤防模型は基礎から頂部までの高さ3.0mの直立堤であり、表のり勾配1:0.5、裏のり勾配1:3とし、表のりは厚さ10cmの鉄筋コンクリートで被覆した。また、表のり下端部には基礎工を設け、止水工には厚さ5cm、長さ40cmの木製矢板を用いた。

表-1に実験条件を、表-2に堤防および海浜模型を構成している砂の土質諸元を示す。ただし、入射波高およ

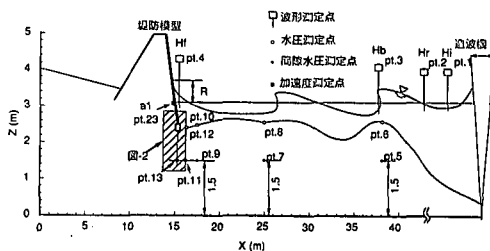


図-1 実験水路と堤防模型

- * 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室研究員
- ** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室室長
- *** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室主任研究員
- **** 正会員 工博 岡山大学工学部環境デザイン工学科教授
- ***** 正会員 工博 岡山大学工学部環境デザイン工学科講師
- ***** 正会員 工修 岡山大学大学院自然科学研究科博士課程

び周期は目標値であり、実際は多重反射が生じ非常に乱れた波浪場であった。実験は、不透水性矢板を用いたケース1と、空洞化抑制技術として透水性の矢板を用いたケース2の2ケース行った。ケース2で用いた矢板には、10 cm 格子の交点に直径

1 cm の孔を設けることにより透水性を持たせた。ただし、裏込め材料がその孔から流出しないようステンレス製の網で矢板表面を覆った。堤防沖側の海底初期地形は、予備実験において模型に24時間波浪を作用させ、ある程度安定した海浜地形を初期地形とした。ただし、矢板下端からの土被りが20 cm となるように堤防前面から沖側3 m まで砂を盛って平坦とした地形を初期地形とした。表-2に示すように、実験で使用した砂は粒度が割合均一な砂であった。また地盤は緩めであり、その間隙率0.39~0.49と幅を持っていた。

実験での計測項目は入射波形、碎波波形、堤防前面波形、反射率、打ち上げ高、地盤中の間隙水圧、堤防に加わる加速度である。図-1に波高、圧力、加速度の測定点の配置全体図を、図-2に堤防近傍の測定点の配置状況を示す。入射波形、反射率、碎波波形、および堤防前面での波形を得るために、容量式波高計を図-1に示す4点に設置した。さらに地盤内の間隙水圧分布、圧力の伝達特性を把握するため、間隙水圧計を18台設置した。また堤防の振動特性を把握するため加速度計を1台設置した。

造波時間はケース1で延べ900分、ケース2は実験途中で大規模な吸い出しが生じたため400分とした。さらに堤防より沖側25 m までの地形変化を測定した。波、圧

表-1 実験条件

	ケース1	ケース2
矢板の透水性	無し	有り
H_0 (cm)	90.0	
T (s)	4.0	
堤防前面初期水深(cm)	90.0	

表-2 土質諸元

比重	2.77
中央粒径(mm)	0.21
均等係数	1.98
透水係数(cm/s)	7.42×10^{-3}
間隙率	0.39~0.49

力、加速度は、造波開始直後、造波開始4分後、10分後、25分後、60分後、150分後、300分後、480分後、720分後、900分後において、サンプリング間隔0.1 sec.で1分間計測した。ただし、ケース2では、400分で造波を止めたため480分以降の計測は行っていない。

一方堤体材料および矢板付近の地盤の変位は、海浜模型用の砂と色が異なる豊浦標準砂を用いた厚さ2 cm の層のマーカーを9層と、2.5 cm 角のマーカーを4箇所設置することにより可視化し2台のビデオカメラで水路側方より撮影した。図-2にマーカーの設置状況を示す。なお波、圧力、加速度を計測した時間はガラス面に面したマーカーの初期の位置からの移動距離を測定した。

3. 実験結果

本論文では、水面波形、堤防周辺の地盤の変位、変動水圧の伝達特性、有効応力に関し詳述するものとする。

3.1 水面波形

図-3にケース1, 2で計測した入射波(H_i)、碎波点(H_b)、堤防前面(H_f)の有義波高の時間変化を示す。ケース1, 2とも入射波高および碎波波高は、最初増加傾向を示し、10分経過以降はほぼ一定値をとる。一方堤防前面波高は時間が経過するにつれ増加を続ける傾向がある。これは、時間の経過とともに堤防前面が洗掘され水深が大きくなり、存在しうる波高が大きくなったためと考えられる。

図-4にケース1の造波開始直後、300分および900分経過時における堤防前面の水面波形のパワースペクトルを示す。この図より、 $t=0$ ではピーク周波数が入射波と同じく0.25 Hz 付近にあるのに対し、300分および900分経過時にはピーク周波数が明瞭でなくまた低周波成分が実験開始直後に比べ多く含まれていることが読みとれる。すなわち、実験開始直後は反射波の影響がなかったためピークが明瞭に出たが、300分経過時点では多重反射の影響で0.1 Hz 付近の成分が含まれるようになったものと考えられる。

3.2 地盤の変位

図-5, 6はそれぞれケース1, 2において計測した2.5 cm 角マーカーの変位と堤防前面の地形変化を表したものである。図中の数字は造波開始からの経過時間である。これより矢板の透水性の有無により、地盤の変位方向お

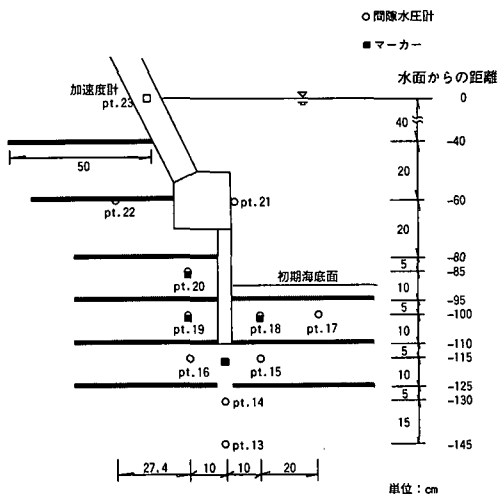


図-2 堤防周辺の計測機・マーカーの配置

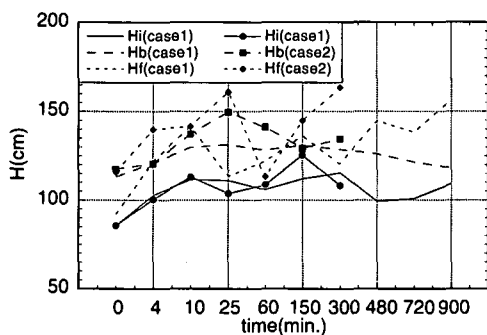


図-3 有義波高 (入射波, 砕波点, 堤防前面)

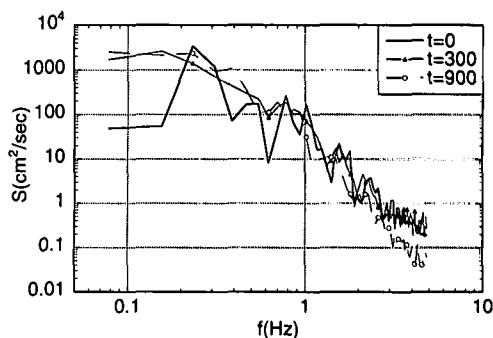


図-4 堤防前面波形のパワースペクトル

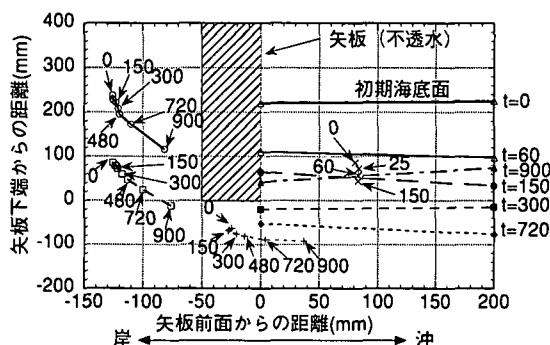


図-5 マーカーの変位と海底面の変化 (ケース 1)

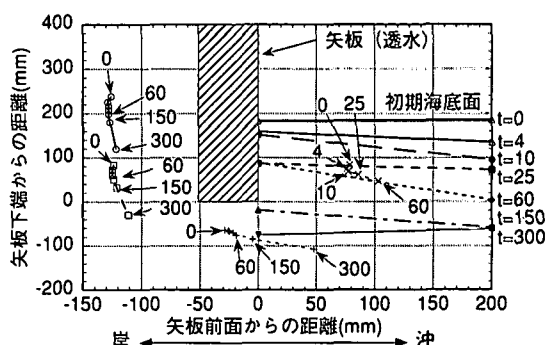


図-6 マーカーの変位と海底面の変化 (ケース 2)

よび変形進行速度に違いが見られることがわかる。すなわち、不透水性矢板のケース 1 では、矢板背後の上下のマーカーが造波開始後 300 分までは変化が小さく、300 分経過した頃から右斜め下方方向に移動しているのに対し、透水性矢板のケース 2 では、矢板背後のマーカーが上下とも造波開始後から鉛直下方に移動している。また、鉛直変位ではケース 1 の 900 分の変位と、ケース 2 の 300 分の変位がほぼ等しいことから、ケース 2 の変形進行速度がケース 1 に比べかなり大きいことがわかる。矢板下方のマーカーについても、変形進行速度に関し同様のことが言える。また、両ケースとも、矢板前面の洗掘が進み矢板下端の土被りが無くなってから、矢板背後の地盤の変位が急増することが分かる。ただし、図-5 のケース 1 において $t=900$ 分時の矢板前面の海底面が上昇しているのは、造波開始 720 分以降に急激に堤体材料が矢板前面へ吸い出され堆積したためである。

ケース 2 で変位の方向がケース 1 に比べ鉛直方向であること、変位の速度が大きい理由としては、変動水圧の伝達特性の違いによる地盤中の有効応力の影響が考えられる。善ら (1987) によれば、地盤中の有効応力は地盤中に伝播する波浪による変動水圧により、静水時の有効応力と比べ、波の峰では大きく、逆に波の谷では小さくなる。したがって、地盤は波の峰の位相の時締め固め

られることになる。ケース 1, 2 とも矢板前面のマーカーが、実験の初期段階で鉛直方向に変位しているのは、この波浪による締め固めの結果生じたものであると考えられる。また、ケース 2 で矢板背後の地盤の変位方向がケース 1 に比べ鉛直下方寄りになった理由として、ケース 2 では矢板に透水性を持たせたため、矢板背後に波浪による変動水圧が伝播し易くなり、ケース 1 に比べて波浪による締め固めの影響が大きくなったものと考えられる。つまり、ケース 1 では矢板周辺の地盤に円弧状の滑りが生じその影響で変位が右斜め下方に向いたが、ケース 2 では、波浪による締め固めの影響が主であったため、鉛直方向に偏った変位になったものと考えられる。

3.3 変動水圧の伝達特性

変動水圧の地盤中の伝達特性を調べるために、pt. 21 の水圧波形を基準とし矢板周辺の間隙水圧の位相と伝達関数を計算した。図-7, 8 にケース 1 での位相 (θ_{pp}) と伝達関数 (T_f) を、図-9, 10 にケース 2 での位相と伝達関数を示す。 θ_{pp} が正の値を示すとき pt. 21 に比べ位相が遅れていることを表しており、 T_f が大きいほど、その周波数成分の圧力変動が減衰せずに伝わっていることを表している。図-9 から、矢板背後の測定点の pt. 19, pt. 20 の位相が pt. 21 に比べ、ピーク周波数を中心とした周波数帯で位相が遅れていることが分かる。特に 0.25 Hz で

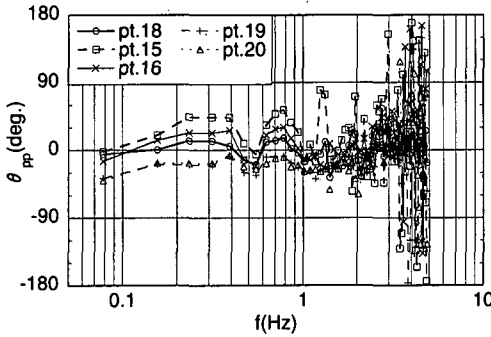


図-7 矢板周囲の間隙水圧の位相 (ケース1)

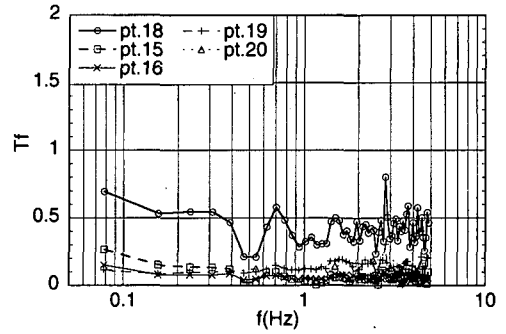


図-8 矢板周囲の間隙水圧の伝達関数 (ケース1)

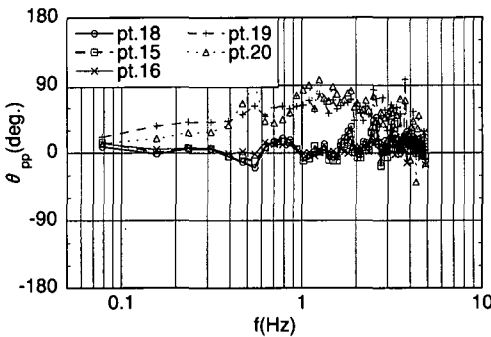


図-9 矢板周囲の間隙水圧の位相 (ケース2)

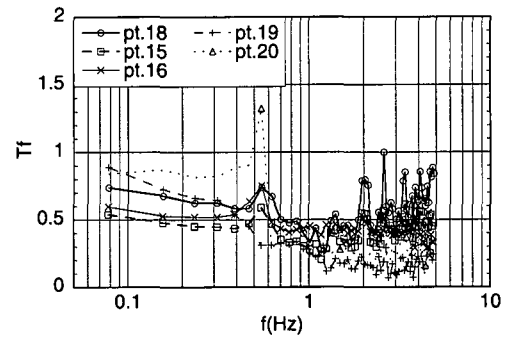


図-10 矢板周囲の間隙水圧の伝達関数 (ケース2)

は pt. 20 は pt. 21 に比べ 30 度, pt. 19 は 45 度ずれていることがわかる。

T_f に関しては図-8, 10 より, 矢板の前後とも透水性矢板を使用したケース 2 の方がケース 1 に比べて, すべての周波数帯にわたって大きくなっていることがわかる。また高周波数帯より低周波数帯の方が伝達性が高いことがわかる。

以上のことより, 間隙水圧の値は, 不透水性矢板より透水性矢板の方が伝わりやすくなっており, 前野(1993)の結果と一致する。しかし, 矢板背後の間隙水圧測定点における位相のずれに関しては, 不透水性矢板よりも透水性矢板の方が遅れを示す結果は前野(1993)の結果と相反するものである。透水性矢板により矢板背後の地盤への水圧の伝達特性が, 圧力の大きさとしては伝わりやすくなったにも拘わらず, 位相が遅れるという今回の実験結果が, 波浪場における水圧伝達特性であるかどうか現段階では明らかでない。位相の遅れは堤体材料の吸い出しに大きな影響を与える因子であり, 今後さらに詳細な検討を進める必要がある。

3.4 有効応力

図-11, 12 にそれぞれケース 1, 2 の実験開始直後で矢板前面矢板下端より約 20 cm 土被りがある状態で計測された有効応力の時系列を示す。矢板下方の測定点 pt.

13, 14 ではケース 1, 2 であまり変化が見られないのに対し, 矢板の前方 10 cm, 海底面下 25 cm に位置する pt. 15 での有効応力は, ケース 2 では有効応力が負になる位相がないことがわかる。これは矢板の透水性の影響で矢板前面の有効応力が増加し液状化しづらい環境になったためと考えられる。このように矢板前面での土被りがある場合は, 前面地盤の有効応力が増加し液状化しづらくなるため, 透水性矢板の空洞化抑制効果は有ると考えられる。

4. 空洞化現象の発生機構

今回の実験で確認された空洞化現象の発生機構としては, 従来から言われていた堤防の目地や接合部に生じた隙間からの堤体材料の吸い出しによる空洞化の他に, 新たに矢板下端部を回り込むように矢板前面へ堤体材料が流動し空洞化が発生することが確認された。

矢板下端部を回り込みによる空洞化発生機構としては, 長時間にわたる波浪的作用により矢板周囲の海底地盤内に伝達する変動水圧の位相の遅れと振幅の減衰により, 矢板周囲地盤の有効応力の減少ないしはそれによる液状化の発生により地盤支持力が低下することと, 矢板周辺部における堤体材料を流出させようとする浸透水圧の発生により, 堤体材料が矢板下端部を回り込み徐々に

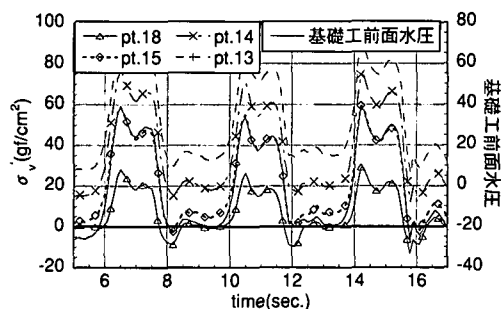


図-11 矢板周辺の有効応力 (ケース1)

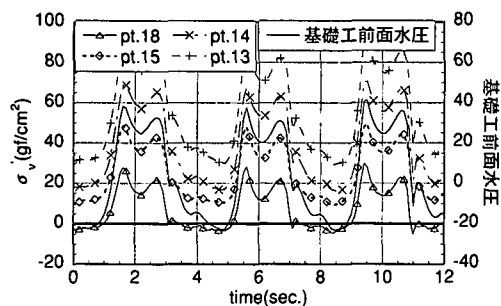


図-12 矢板周辺の有効応力 (ケース2)

流動することが原因と考えられる。

さらに、今回の実験でも明らかになったように堤防前面の洗掘が過度に進行し、矢板前面の土被りが消失した状態では、流動しやすくなった砂層が矢板下端部から急激に吸い出され、大規模な空洞が発生する。

以上のように堤防の目地や接合部にできた隙間からの堤体材料の流出以外にも、長時間にわたる波浪の作用により海底地盤内に伝達する変動水圧の影響により矢板下端部を回り込むように堤体材料が矢板前面に流出し堤防の空洞化が生じることが、現地条件に近い今回の実験において確認された。

5. 空洞化抑制対策の検討

今回の実験のように間隙率が高く緩い砂層地盤では、3.2節で示したように透水性矢板を用いた場合、矢板背後へ変動水圧が伝わりやすくなり、矢板背後の地盤は不透水性矢板を使用した場合のそれに比べて締め固まるため沈下が生じる。この沈下に対しては、堤防などの構造物周辺の地盤がある程度締まった状態で施工されている場合では問題無いが、地盤が緩く変動水圧で閉め固まるような状態である場合、沈下が生じ天端付近にもその影響が出て、空洞が生じることが予想されるため、空洞化抑制対策としてはマイナスの評点をつけなければならない。しかし、3.4節で述べたように、矢板前面の地盤は透水性矢板を設置したことにより、有効応力の増加が認め

られ液状化しづらくなるなど、矢板前面に土被りが十分ある状態であつある程度締まった地盤では空洞化対策としての効果が発揮されていると言えよう。

一方、透水性矢板を使用したケース2では、変動水圧により矢板背後の堤体材料が締め固まり、また前面地盤の有効応力が増加するなど、矢板周辺の地盤にとって安定化の方向へ向いたにも拘わらず、不透水性矢板を用いた場合より堤防前面地盤の洗掘が速く進行し、吸い出しによる空洞化が速く生じる結果となった。また、変動水圧の伝達特性の面から見ても、透水性矢板により変動水圧は矢板背後へ伝わる大きさは大きくなったものの、位相の遅れはかえって大きくなるという、従来の研究結果とは異なる結果が得られた。このように、波浪場における変動水圧の伝達特性に関しては、今後さらに詳細な検討が必要と言える。

6. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

(1) 波浪場における堤防周辺地盤の間隙水圧伝達特性を示した。しかし、変動水圧の位相差に関しては従来の研究結果と異なる点もあり、今後さらに検討する必要性が伺われた。

(2) 模型実験により、目地や接合部に出来た隙間からの吸い出しによる空洞の発生以外に、地盤の支持力低下により堤体材料が矢板下端部を回り込むように矢板前面へ徐々に流動し空洞化が発生する現象が確認された。

(3) 透水性矢板は、矢板前面に土被りがある場合、前面地盤の有効応力を増加させることが分かった。しかし、空洞化抑制工としての効果については今回の実験では明確に出来なかった。現地に適用するには洗掘防止対策との併用を含め、さらに検討を行う必要がある。

参 考 文 献

- 宇多高明・五十嵐竜行 (1992): 海岸災害写真集一豊島修博士収集のスライドをもとに、土木研究所資料第3075号, 164 p.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989): 海底地盤の波浪による液状化一現地観測及び解析一、港湾技術研究所報告, 第28巻第3号, pp. 29-57.
- 前野賢彦・唐内仁司・鈴木芳博・矢部興一 (1992): 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 576-580.
- 前野詩朗 (1993): 変動水圧による高飽和砂層の動的挙動と構造物災害防止に関する研究, 岡山大学博士論文, 143 p.
- 清水雄一 (1994): 変動水圧による構造物周辺砂地版の流動に関する研究, 岡山大学修士論文, 118 p.
- 名合宏之・前野詩朗 (1995): 変動水圧作用下における高飽和砂層の動的現象の相似律に関する研究, 土木学会論文集 No. 509, pp. 45-53.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化及び高密度化, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp. 125-180.