

浮上型の模型を用いた直立浮上式防波堤に関する大規模実験

Large Scale Tests on Buoyancy-Driven Vertical Piling Breakwater with Buoyancy-Driven Piles

有川太郎¹・中野史丈²・菊池喜昭³・小林真⁴・木原一禎⁵・櫻井良宏⁶・虎石龍彦⁷

Taro ARIKAWA, Fumitake NAKANO, Yoshiaki KIKUCHI, Makoto KOBAYASHI, Kazuyoshi KIHARA
Yoshihiro SAKURAI and Tatsuhiko TORAISHI

This report describes the results of the large scale model tests on the buoyancy-driven vertical piling breakwater by using the buoyancy-driven piles. This breakwater consists of rows of steel pipe piles and each pile consists of upper and lower steel pipes. The overall performance of this breakwater has been verified, but the relation between stress and wave power is not cleared at the part of lap joint between upper pipes and lower pipes, at which large stress may be occurred. So, the large scale model tests by using the buoyancy-driven piles were conducted. Main results of this paper are that movement of the upper pile under waves is confirmed and the relationship between the strain at the lap part and the wave power is clarified qualitatively.

1. はじめに

港口から浸入する津波力の軽減のため、可動式防波堤が検討されている。その可動式防波堤のひとつとして直立浮上式防波堤が考えられている。直立浮上式防波堤は、上下に分かれる浮上タイプの鋼管防波堤であり、その水理特性については、固定鋼管を用いて大規模実験により検討し(有川ら, 2007), その結果として、本防波堤が高波・津波に対して効果的であることが示された。しかし、上部・下部鋼管構造であるため、そのラップ部には大きな応力が作用することが考えられるものの、波力と上部鋼管の動きとの相関関係、段波津波に対する波圧と鋼管挙動が不明であり、その定量化が困難である。そこで、上部・下部鋼管を持つ浮上型の模型を用いた大規模実験を実施し、波力、段波における挙動について検討した。

2. 実験準備

(1) 実験断面および波浪条件

鋼管は直径約50cmとし、水路内に5本埋め込む。そのうち2本は単杭(固定鋼管として両端に設置)、3本は浮上管(可動鋼管として中央部に設置)とした。模型設置場所における断面および平面図を図-1に示す。開口率は11.3%(回転防止材を含めれば7.1%)となっている。図面上、碎石と表示されている部分を砂に置き換えた砂層実験と、碎石をいれた礫層実験を行った。風波対象波として、周

期3.5s~6.0s, 入射波高0.2~0.7m, 津波対象波としては、周期10s~30s, 入射波高0.2m~1.8mで行い、防波堤前水深は1.2m, 1.5mとした。

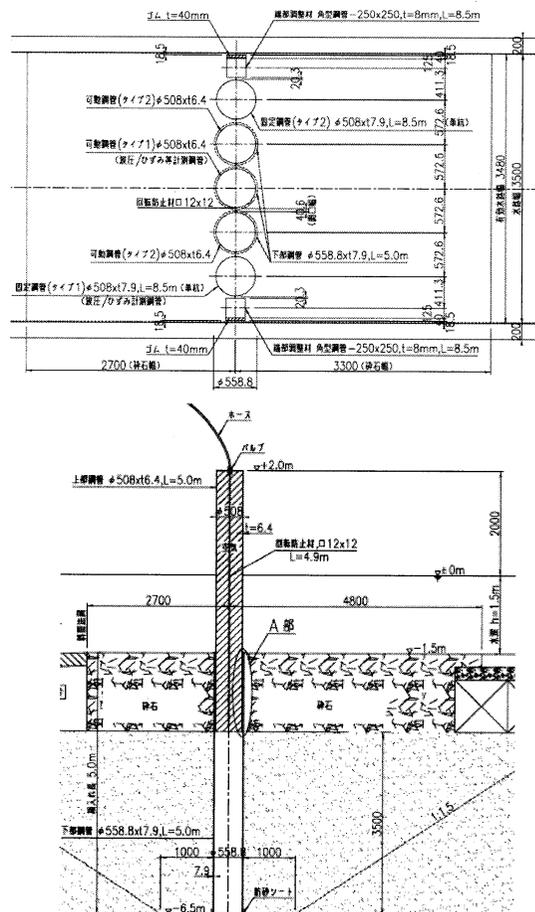


図-1 実験図面(上: 平面図, 下: 断面図)

1 正会員 博(工)(独)港湾空港技術研究所
2 九州地方整備局 別府港湾空港・整備事務所
3 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所
4 正会員 修(工)(株)大林組
5 正会員 修(工)三菱重工鉄構エンジニアリング(株)
6 東亜建設工業(株)
7 新日鉄エンジニアリング(株)

(2) 計測項目

水位、波圧、鋼管の歪み、鋼管の岸沖方向の変位および加速度を計測した(図-2)。測定は2000Hzで行った。

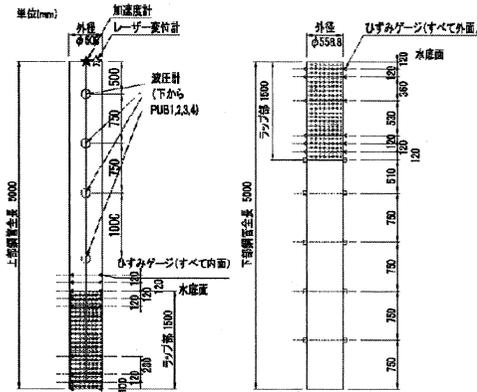


図-2 計測器位置(左:上部管, 右:下部管)

(3) 鋼管模型ならびに地盤作成

鋼管の作成にあたり、計画水深1.5m、防波堤天端高2.0m、段波津波高1.0m、模型地盤条件 $N=10\sim 20$ 程度に締め付けた地盤条件において、事前に鋼管・地盤の変形を検査し、幾何学スケールを約1/4として模型を作成した。ただし、鋼管模型は、コストの関係から汎用の肉厚を使っているため、実際より固めになっている。また実際に作成された地盤の固さは、複数回地盤固さ調査を動的コーン貫入試験により調査したところ、平均的には、 N 値が4~5程度であった。

3. 風波対象波の結果

(1) 実験の様子と時系列

図-3に周期5.0s、波高0.5m、水深1.5m時における、鋼管前の水位(防波堤よりも1.5m造波版側)、波圧(PUB1, PUB2)、上部鋼管天端の加速度・水平変位を示す。上部鋼管天端の加速度・水平変位はプラスが沖向きを表す。水位が最大に達する手前で上部管が下部管にぶつかり(A点)、その後水位が最大になるまで、上部管が押され緩やかに岸側に変位する(B点)。このときの変位量は、1)下部管の地盤に対する変形量、2)上部管の曲げによる変形量、3)下部鋼管の口の部分の変形量、4)上部管と下部管の隙間による変動量の4つの合計となる。これを見るとだいたい35cm程度のところでおよそ20mm上部鋼管の天端が動いたところで、下部鋼管と接触していることがわかる。そのときに加速度は最大 10.0m/s^2 程度となっている。そして、波が引いて静水位程度になり上部鋼管の変位が急激に沖側に戻り(C点)、水位が下がることにより今度は沖側に上部鋼管が傾き、上部鋼管と下部鋼管が接触する(D点)。このときにもほぼ同程度の加速度が

作用している。このAからDまでの動きが一連の動きとなって繰り返す。

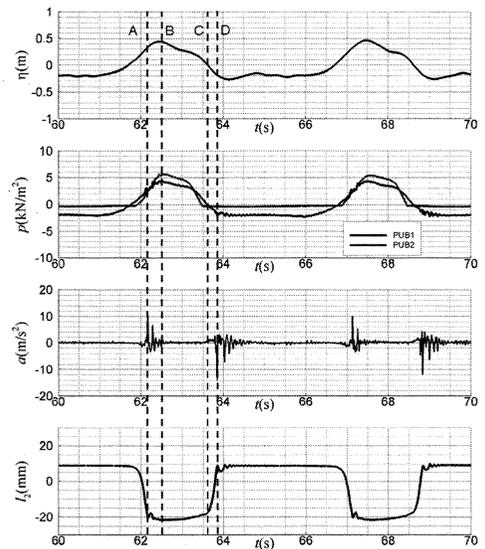


図-3 時系列の例(周期5.0s, 波高0.5m, 水深1.5m)

(2) 波高と加速度・変位の関係

砂層実験の結果を用いて、波高と加速度ならびに、上部鋼管の変位について検討を行う。水深1.5m時における、上部鋼管天端の加速度と波高の関係を図-4に示す。黒丸が最大値を白抜きが最小値を表す(以降同じ)。入射波高は、防波堤より沖側50m位置でのものを用いた。これを見るとわかるように徐々に加速度が大きくなっていくが、図-5上図に示す上部鋼管天端変位と波高の関係をみると、天端変位に大きな変化はない。一方で、図-5下図に示す固定鋼管の天端の変位量を見ると、波高が大きくなると1mm程度岸側に押されている。この原因は曲げによる歪み量と地盤の変形量の合計となる。

可動式鋼管の変位量は、3.(1)項で記述した通り、合計4つの要因により支配されるが、固定鋼管の変位量を見る限り、1), 2)の要因よりも3), 4)の要因が大きいかつ、本実験範囲内の波浪においては、波高により大きな変化がないことから4)の上・下部鋼管の隙間に依存した変動量に、もっとも動きが支配されることがわかる。

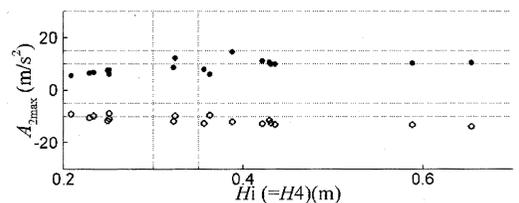


図-4 波高と加速度(水深1.5m, 砂層)

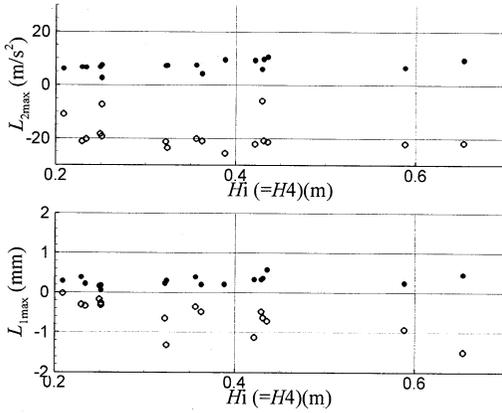


図-5 波高と天端変位(水深1.5m, 砂層, 上:上部鋼管天端, 下:固定鋼管天端)

次に、礫層実験における波高と加速度・変位の関係を図-6、図-7に示す。水深1.5mのときの結果である。これを見ると礫層と砂層との差は、今回の実験ではほとんど見られなかった。これは礫層と砂層との地盤固さがほとんど変わらなかったことを意味しているが、礫層における間詰めの問題等もあり、今後、鋼管の固さとの相対関係などを通じて解明していきたい。

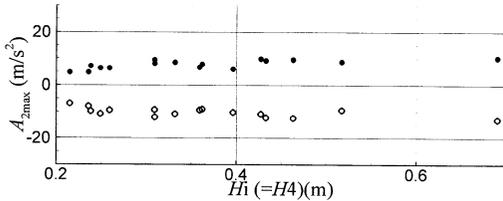


図-6 波高と加速度(水深1.5m, 礫層)

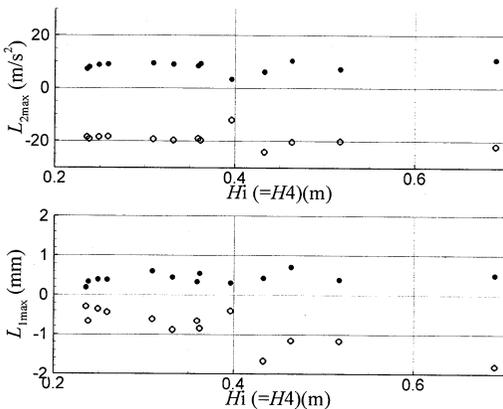


図-7 波高と天端変位(水深1.5m, 礫層, 上:上部鋼管天端, 下:固定鋼管天端)

(3) 波高と鋼管応力の関係

礫層実験の結果を用いて、波高と鋼管応力の関係を検討する。図-8に周期5.0s, 入射波高50cm, 水深1.5mの

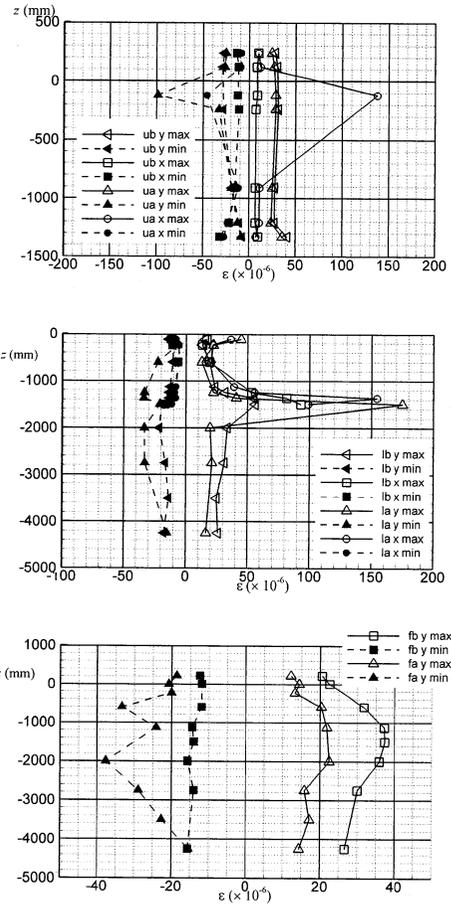


図-8 最大ひずみの鉛直分布(上:上部鋼管, 中:下部鋼管, 下:固定鋼管, 周期5.0s, 波高0.5m, 水深1.5m)

きの上部鋼管・下部鋼管・固定鋼管の最大歪み鉛直分布を示す。正と負の最大をそれぞれ示す。

固定鋼管と比較すると、上部・下部鋼管のラップ部において(上部鋼管の-120mm, 1350mm付近, 下部鋼管の0mm, -1500mm付近), 非常に大きな歪みが生じていることがわかる。

上部鋼管の岸側(uaシリーズ)は、押波時において岸側に傾く際に生じ、x方向(管の周方向)の正側で最大値が生じている。また、y方向(管軸方向)には、負の側に最大値が生じている。つまり、つまり、接触した際に管が横方向にのびながら曲げ変形したことを意味する。

一方で、沖側(ubシリーズ)では、両方ともに接触部の最大歪みは認められず、下部の接触部(-1500mm)の接触で止まった可能性が考えられる。下部鋼管では沖側(lb), 岸側(la)ともに、x, y方向ともに正側に最大歪みが生じており、接触時に管が広がるとともに、引張りによる曲げが生じていることがわかる。

さらに、ほぼ点で支えていることが見受けられるため、

上部鋼管から下部鋼管へは、集中荷重として力が伝達していることになる。そのほかの場所の歪みは、固定鋼管と同程度のオーダーであり、応力分布に大きな差が無いことがわかる。

図-9には、下部鋼管岸側のy方向最大歪みと波高の関係を見たものである。波高が増大するのに比例して大きくなるのがわかる。これは、上部鋼管が波高が大きくなればなるほど、早い速度でぶつかることを意味する。

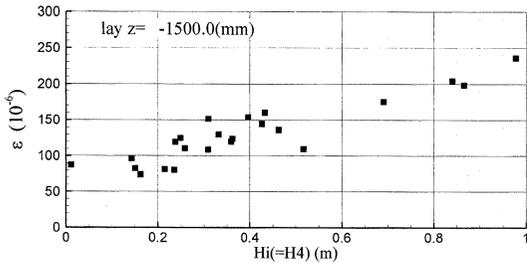


図-9 部鋼管最大ひずみと波高との関係(水深1.5m)

4. 津波対象波の結果

ここでは、周期の長い津波対象波を対象として、波力と鋼管応力の関係、上部鋼管の変形量を考察する。

(1) 実験の様子と時系列

図-10に周期30s、津波高0.5m、水深1.5mの条件のときの、鋼管前の水位、波圧(PUB1、およびPUB2)、上部鋼管天端の加速度・水平変位を示す。周期が長いので、波圧は鉛直方向に、ほぼ一致しており、水位が最大のときに、最大波圧が作用している(B点)。また、加速度は水位がゆっくり上がるため、風波対象波に比べて同等の高

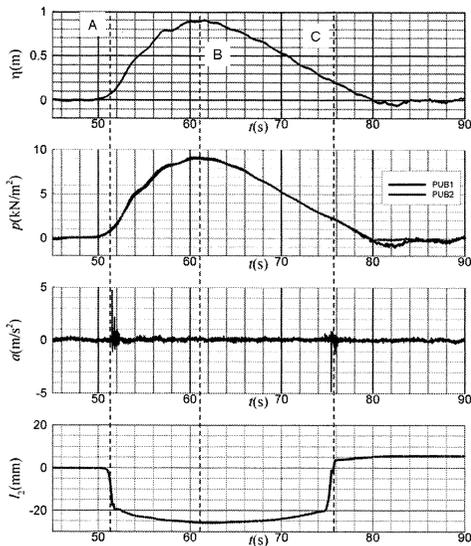


図-10 時系列の例(周期30s、津波高0.5m、水深1.5m)

さであるにもかかわらず小さい(A点)。

変位は、岸側に25mm最大で生じており、図-5と比較すると4mm程度の差がある。接触までは、上部・下部の隙間によるものとする、このケースの場合、5.0mmが上部・下部鋼管の接触後に生じた変位であり、図-5のケースの場合は1.7mmでありおよそ3倍の差がある。それぞれのケースの最大波圧の鉛直分布を図-11に示す。点線は予想される波圧分布である。これを見ると風波対象波のケースは津波対象波のケースの波力の半分程度であることから、作用時間の影響が考えられる。

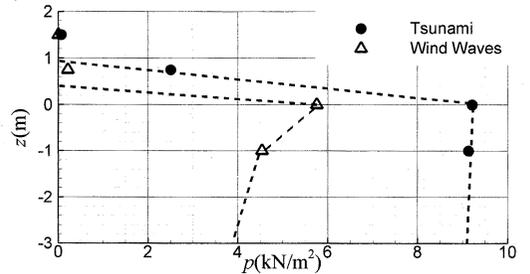


図-11 波圧鉛直分布の比較(風波：周期5.0s、波高0.5m、津波：周期30.0s、津波高0.5m、水深1.5m)

(2) 津波高と天端変位・加速度との関係

風波対象波と同じく砂層と礫層の明確な差は無かったため、礫層実験のみの結果を図-12に示す。横軸には津波高をとり、上図に固定鋼管天端、中図に上部鋼管天端、下図に上部鋼管加速度との関係を示す。この津波高の範囲では、風波対象波より衝突の加速度は小さいものの、天端変位が大きくなっていることがわかる。固定鋼管天端変位は、津波高0.45mを越えたあたりから大きくなり最大10mmを越える。同様に上部鋼管天端変位も上部・下部鋼管の隙間の分を差し引くと10mm程度となり、固

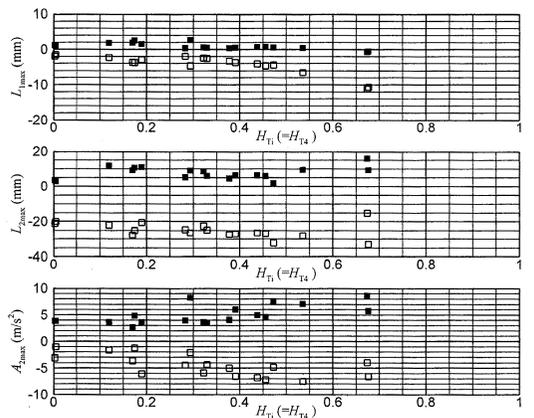


図-12 津波高と天端変位・加速度(水深1.5m、礫層、上：固定鋼管天端、中：上部鋼管天端、下：上部鋼管加速度)

定鋼管の天端変位と同等である。これは、先ほど同様、波力だけでなく作用時間の長さが影響していると考えられる。今後、地盤や鋼管の変形を数値解析等であきらかにすることにより、明確にしていきたい。

(3) 津波力と応力の関係

ここでは特に衝撃段波津波力と応力を見る。写真-1は、津波高1.8mのものがまさに防波堤前で砕波しつつ作用する直前のものである。図-13に沖側(b), 岸側(a)のy方向の最大歪みの鉛直分布を示す。ここでは、接触部において不連続が見られるものの、固定管と同程度のオーダーであり、また、全体として変形していることがわかる。

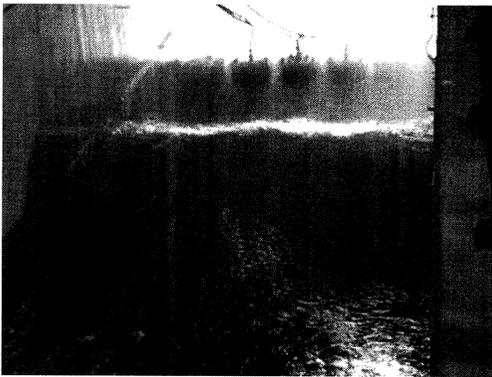


写真-1 実験の様子(周期13s, 津波高1.2m, 水深1.5m)

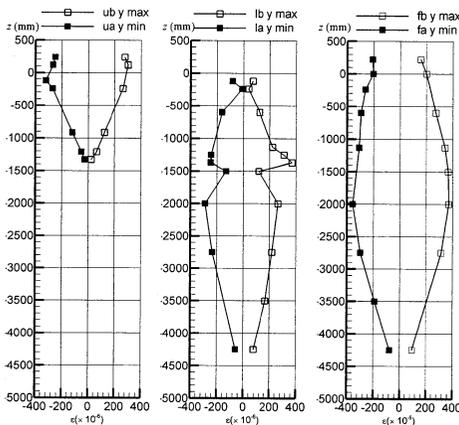


図-13 最大ひずみの鉛直分布(左: 上部, 中: 下部, 右: 固定)

図-14に作用した波圧と下部鋼管の沖側についての高さ-1350mmについている軸方向歪みの時系列を示す。ラップ部の接触による歪みはほとんど見受けられず、鋼管に作用した衝撃力によって歪みが生じていることがわかる。衝撃的な作用時に生じた歪みの大きさと重複波圧時に生じた歪みの大きさを比較したものを図-15に示す。左から、鉛直方向の無次元波圧最大値分布(衝撃・重複)、上部鋼管に作用する最大歪み分布(衝撃・重複)、衝撃時

の歪みと重複時の歪みの比の分布となっている。これより、最大重複波圧作用時の応力と、衝撃段波波圧作用時の応力を比較するとほぼ比例の関係にあることがわかり、段波津波力が作用する場合は、その力を考慮する必要があることがわかる。

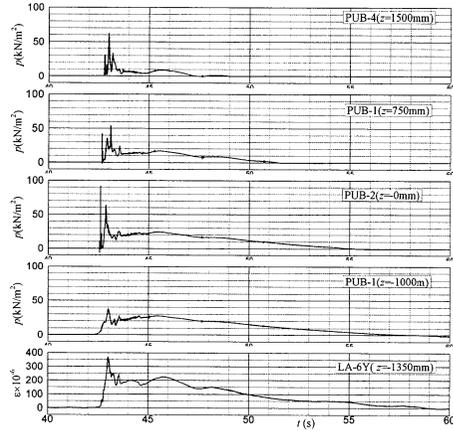


図-14 波圧と最大歪みの時系列

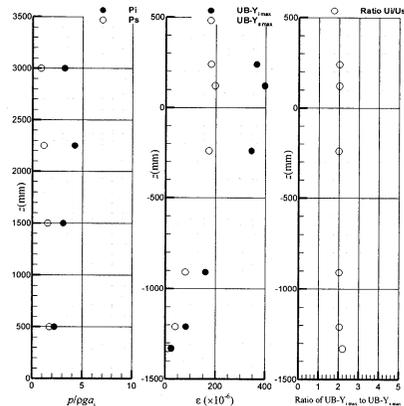


図-15 衝撃段波時と最大重複時における波圧・歪みの鉛直分布(左: 波圧, 中: 歪み, 右: 歪みの比)

5. まとめ

直立浮上式防波堤の波力による鋼管の動き、変形などを解明するため、浮上型の模型を用いた大規模な実験を行った。その結果、上下鋼管のラップ部に生じる、波力による接触応力特性ならびに、衝撃的な波力による鋼管の応力特性を定性的に明らかにした。

参考文献

有川太郎, 中野史丈, 野村逸人, 下迫健一郎, 宮島正悟, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 木原一禎(2007): 直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性, 港空所資料, No.1156.