

直立浮上式防波堤の数値計算手法に関する研究

A STUDY ABOUT THE NUMERICAL COMPUTATION TECHNIQUE OF BUOYANCY-DRIVEN VERTICAL PILING BREAKWATER

木原一禎¹・有川太郎²・坂口章³・濱地克也⁴・永友久信⁵・山本邦弘⁶
Kazuyoshi KIHARA, Taro ARIKAWA, Akira SAKAGUCHI, Katsuya HAMACHI,
Hisanobu NAGATOMO, Kunihiro YAMAMOTO

¹正会員 工修 三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 橋梁事業本部 (〒108-8215 東京都港区港南2-16-5)

²正会員 博(工) 独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所
(〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1-57-3)

⁴正会員(株) 工修 大林組 海洋土木技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁵東亜建設工業(株) 土木部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁶工修 新日鉄エンジニアリング(株) 海洋・エネルギー事業部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

For the safety of the harbor at the time of emergency, it is effective to shut up a port entrance. However, there are problems such as the security of the seaway in normal time and recovery of seaway after the disaster. Therefore new type mobile breakwater, "Buoyancy-Driven Vertical Pilling System Breakwater" which is stored under the seabed, was developed. In the experiment at Numazu port, the impulsive strain due to the gap between the main body and the stabilizer was measured, so it is recognized the importance to resolve the phenomenon.

Therefore, the numerical calculation model to simulate the motion of the mobile breakwater in waves was developed. The stabilizers were modeled in non linear spring/damping elements and external forces were obtained from modified Morison's equation. As the results, it is possible to evaluate the motion with tolerable precision to choose the value of the drag coefficient depending on the blockage of main bodies.

Key Words : *Buoyancy-Driven Vertical Pilling System , mobile breakwater pile, levitated breakwater, breakwater, seawall*

1. はじめに

港湾や漁港の航路(港口)部は, 船舶の航路確保などのため, 常に開放されていなければならない。昨今, 地球温暖化の影響と見られる台風の大規模化, 平均海面の上昇, スマトラ地震などに見られるような大規模地震による津波の発生など, 沿岸域における災害リスクが高まっている。

これらの災害への有効な対策手段の一つとして, 港湾や漁港の航路(港口)部を緊急時(異常時)にのみ遮蔽することがあげられるが, 港湾や漁港の航路(港口)部は, 船舶の航路確保のため, 常に開放されていなければならない。しかし, 平常時における航路確保, 災害後の航路復帰等の利便性や船舶航行の安全性の確保などの理由により航路を締め切る防波堤の事例はなかった。この問題を解決すべく, 常時においては防波堤を海底地盤内に格納し, 異常

時のみ航路を封鎖して, 外海からの進入波を遮蔽して港内施設を守り, 災害回避後早期に航路が確保できる新形式可動式防波堤「直立浮上式防波堤」の実用化に向け開発研究を行ってきた。^{1), 2), 3), 4), 11)}

2. 技術課題

直立浮上式防波堤は, 図-1に示すように, 上部鋼管が下部鋼管に挿入された鞘管構造となっていることが特徴である。そのため, 上部鋼管の径は下部鋼管より小さくなっており, 上下部鋼管の間には隙間が生じる。隙間部には, 杭の動揺を低減させるため, スタビライザーと呼ばれる隙間材を取り付けている。このスタビライザーにより上部鋼管の動揺が低減できるが, 残りのわずかな隙間であっても鋼管杭上端では5~15cm程度動揺が発生し, 上下部鋼管の接触時に衝撃力が発生する。

本研究では、この衝撃力についてメカニズムを明らかにするとともに、汎用的に設計・施工に反映できる数値計算モデルの開発を目的とする。

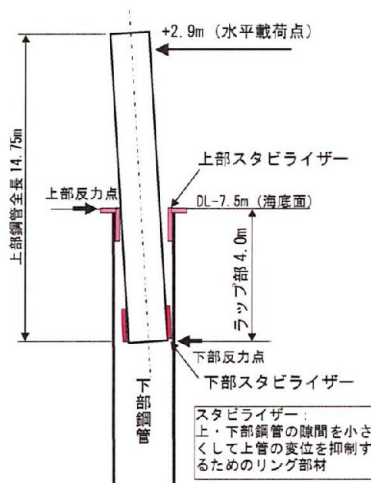


図-1 鞘管部の構造

3. 衝撃力

以下に示すデータは平成 18 年沼津港において実施した実証試験の結果である。上部鋼管を約2週間浮上させたままの状態に維持し、波浪時における波圧、加速度、ひずみを自動計測した。計測期間中に台風18号(10月16日)の影響を受け有義波高 $H_{1/3}=0.49\text{m}$ ($H_{\text{MAX}}=0.87\text{m}$)の最大波高が発生した。その時の時刻歴波形(6秒間抽出)を図-2に示す。

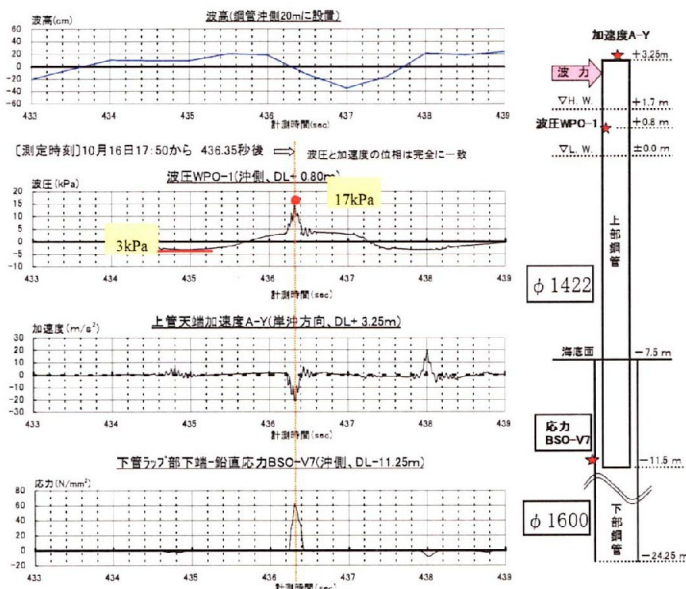


図-2 上・下部鋼管接触時の衝突波形

波高計は鋼管中心位置より16m沖合いに設置していたため、波形の位相は他の計測項目と直接対応していないが、港外側波圧計(WPO-1: 静水面+0.8m)の波形を見ると、波周期と同等の周期を有する通常

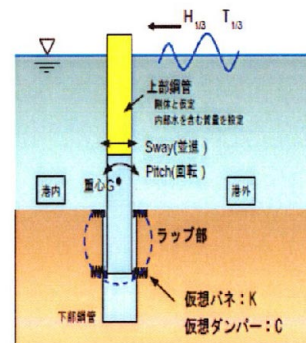
波圧(3kPa)に加えて、衝撃的な水圧(14kPa)が発生し、合計すると17kPaとなった。この衝撃的な水圧は、上・下部鋼管がラップ部で接触の際に発生する加速度に起因する動水圧であると考えられ、動揺波形はかなりの頻度で計測された。この接触に伴い、下部鋼管沖側接触部(BSO-V7)には比較的大きな応力が発生した。この衝撃力を緩和するには、隙間を出るだけ小さくすることが有効である。³⁾

また、スタビライザーに緩衝材を取り付けることも有効であると考えている。

本研究では、この衝撃力のメカニズムを解明し、今後の設計に役立てるための数値計算モデル(シミュレーションモデル)を構築することを目的とする。

4. 動揺シミュレーション解析

直立浮上式防波堤の挙動、スタビライザーの反力を推定・評価するためのシミュレーション計算の方法として、非線形浅水波及び流体力の評価をより合理的に行う方法を検討した。非線形波の評価には流れ関数法を用い、流体力の評価には構造体の運動を考慮した修正モリソン式を用いた。水中で上部鋼管に波力が作用する領域と、波力が作用しない下部鋼管領域に分けて、モリソン式における抗力係数 C_D 、質量係数 C_M を設定した。下部鋼管部は狭い隙間を有しており、抗力係数が大きくなる。⁵⁾モデルのイメージを図-3に示す。



計算モデル 図-3 波浪中の応答解析モデル

$$(m + M_a) \ddot{x}(t) + \{c(x(t)) + C\} \dot{x}(t) + \{k(x(t)) + K\} x(t) = F(t) \quad (1)$$

$x(t)$: 浮体の並進成分, および重心点周りの回転成分に関する変位ベクトル

m : 浮体重心周りの 6 方向成分(並進, 回転)に対応した質量マトリクス

M_a : 浮体の付加質量マトリクス

$k(x), c(x)$: 支持構造(スタビライザー部)の剛性, 減衰マトリクス

K : 浮体の浮力ばねマトリクス

C : 浮体の自由動揺における造波減衰マトリクス

$F(t)$: 浮体へ作用する波強制力ベクトル

(1) 流れ関数法による非線形波の評価

非線形波の表現の方法は種々存在する．今回のモデルでは，浮上している上部鋼管が上下部鋼管の隙間の影響で動揺するため，わずかな波浪外力が作用しただけで上部鋼管とスタビライザーの接触が生じることになる．たとえばStokes波で波を表現した場合に，高次の波成分による外力が前記のような影響を及ぼすことが予想される．そこで，Dean¹³⁾による流れ関数法に基づく浅水域非線形理論を用いることとした．流れ関数 ϕ は次式のように表現できる．

$$\phi(x, z, t) = \sum_{n=1}^N B_n \sinh 2n\pi \frac{h+z}{\lambda} \cos 2n\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \quad (2)$$

流れ関数によって，円柱位置での流速，加速度が求められる．この場合，円柱の存在によって近似的に波形が変形しないと考える．

(2) モリソン式による流体力の評価

上部鋼管は波浪荷重によって動揺しやすく，荷重を算出する際の加速度，速度を評価する際に，上部鋼管の運動を考慮する必要がある．そこで，流体力の評価には，構造体の運動を考慮した修正モリソン式を適用した．

鋼管全体に作用する荷重を算出する際に，ストリップ法により円柱断面に作用する断面力を円柱上下方向に積分して，3次元流体力を求めた．ストリップに作用する波力はモリソン式により次式(3)となる．

$$df(z) = \frac{\rho}{2} C_D D dz |u_x(z)| u_x(z) + \rho A dz C_M a_x(z) \quad (3)$$

ただし，

ρ : 海水密度

D : 円柱直径

A : 円柱の断面積 ($=\pi D^2/4$)

h : 水深

ζ : 波面

$u_x(z)$: strip中心位置における波によるx方向流体速度

$a_x(z)$: strip中心位置における波によるx方向の流体加速度

C_D : 円柱断面の抗力係数

C_M : 円柱断面の質量係数

(3) 流体力係数の評価

通常円形断面の間に作用する抗力は， $C_D=1.0$ ， $C_M=2.0$ で評価されることが多い．これは，流体中に円筒形の構造物が1本だけ，もしくは間隔をあけて設置されており，流体が円柱の背後の回りこみやすい状況での流体力である．

しかし，今回の実験のように円柱が多数並んだ状態では，水が円柱の背後に回りこみにくくなる．Chakrabarti⁵⁾らによれば，円筒が密に並んだ場合，クーリガン・カーペンター数 (KC 数) に応じて，

抗力係数が変化する (例えば隙間が 10% の場合には， C_D 値が 0.6~0.8) ことが報告されている．^{6), 7), 8)}

本構造では，図-4 のように円筒形状に回転止めストッパーがついているため，計算では C_D 値を変化させ，実験値に近い応答を示す C_D 値を模索した．

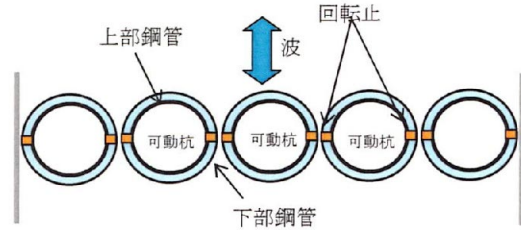


図-4 鋼管杭配置イメージ

5. 実験値との数値モデルの比較

(1) 実験モデル

(独) 港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路 (長さ: 184m, 深さ: 12m, 幅: 3.5m) を用いて風波と津波を対象にして実験を行った．(図-5 及び写真-1 参照) 実験に用いた鋼管杭のうち中央3本の杭は可動式とし (下部鋼管を水路内に埋設)，鋼管杭は上部鋼管 $\phi 508\text{mm} \times 5000\text{mm}$ ，下部鋼管 $\phi 558.8\text{mm} \times 5000\text{mm}$ で．鋼管杭の隙間は上部で 2.5mm，下部で 5.5mm である．

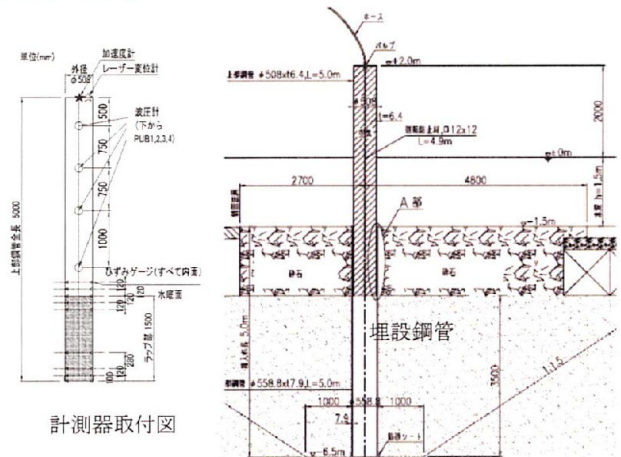


図-5 実験図面・計測器位置



写真-1 模型実験の模様

(2) 波浪条件

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。上述した衝撃力については、津波より風波の方が顕著である。これは、比較的短い周期の波の場合は動揺が大きい。一方、津波は外海から最大波が到達する前に杭は片側に押されており、衝突現象より耐力が問題になる。そのため、本報では、 $H_{1/3}=0.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=5.0\text{s}$ の風波の事例を紹介する。

(3) 実験結果

水槽実験における鋼管 1 本での応答波形を図-6 に示す。図-6 では、押し波により、波がピークになる直前に加速度がピークに達し、引き波に転じると今度は引き波のピーク直前に逆向きに加速度が増大している。加速度の値は引き波の方が大きい値を示している。

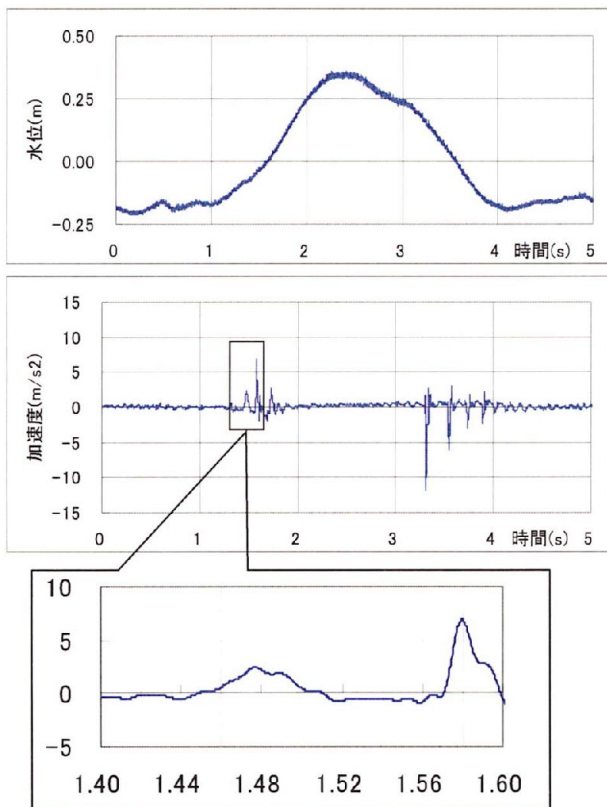


図-6 鋼管1本の実験結果 $H=0.5\text{m}$ 、 $T=5.0\text{s}$

(4) 数値計算モデル諸元^{5), 6), 7), 8)}

流体力係数：1 本柱、5 本柱の場合と、下部鋼管内における流体力の設定が必要である。 C_D については、表-1 に示す。

- ・1 本柱： $C_D=1.0$
- ・5 本柱： $C_D=4\sim 12$ で検討
- ・下部鋼管内： $C_D=10\sim 40$

で計算を行い、実験値と比較して比較的近い波形となる数値を設定した。（ C_D の影響は後述する）

表-1 実験で使用した C_D 値(実験ケース)

		1 本柱	5 本柱
水中	C_D	1.0	10.0
	C_M	2.0	2.0
下部鋼管内	C_D	40.0	40.0
	C_M	1.0	1.0

スタビライザー部のばね定数、減衰定数は、スタビライザーの剛性だけでなく、鋼管の変形の影響も考えられ、設定の目安が全くない状況であった。そこで、おおよその値を下記のように設定した

・バネ定数

接触時の半波長の長さ：約 0.03s（実験値より）

鋼管の重量：約 0.6t

→固有周期 0.06s、重量 0.6t となるバネが 6580kN/m

→1 箇所あたり $k_s=3000\text{kN/m}$ と設定

・減衰係数

臨界減衰比 5% を想定し、切りの良い数値に設定

$$\frac{c_s}{2\sqrt{mk}} = 0.05 \Rightarrow c_s = 0.1\sqrt{mk} = 6 \quad (4)$$

$c_s=5\text{kN s/m}$ に設定

また、スタビライザー部には隙間があり、下図に示すような非線形特性を考慮してモデル化した。

従って、応答計算は、非線形特性を考慮できる目的で時刻歴応答計算を実施した。

$$k(x) = \begin{cases} 0 & |x| < \delta \\ k_s \left(\frac{|x| - \delta}{\delta} \right) & |x| \geq \delta \end{cases} \quad (5a)$$

$$c(x) = \begin{cases} 0 & |x| < \delta \\ c_s & |x| \geq \delta \end{cases} \quad (5b)$$

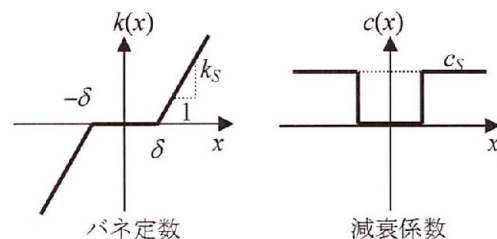


図-7 バネ定数、減衰係数のモデル化

(5) 数値計算モデルとの比較

図-6 に相当する 1 本柱での計算結果を図-8 に、5 本柱での実験結果を図-9 に、計算結果を図-10 に示す。これらのグラフから、数値計算により、実験結果の現象がよく再現出来ていることがわかる。

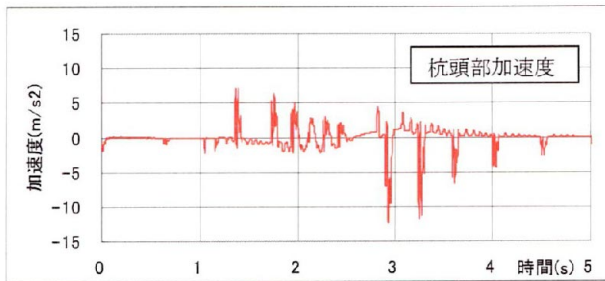


図-8 鋼管 1 本の計算結果 $H=0.5\text{m}$, $T=5.0\text{s}$

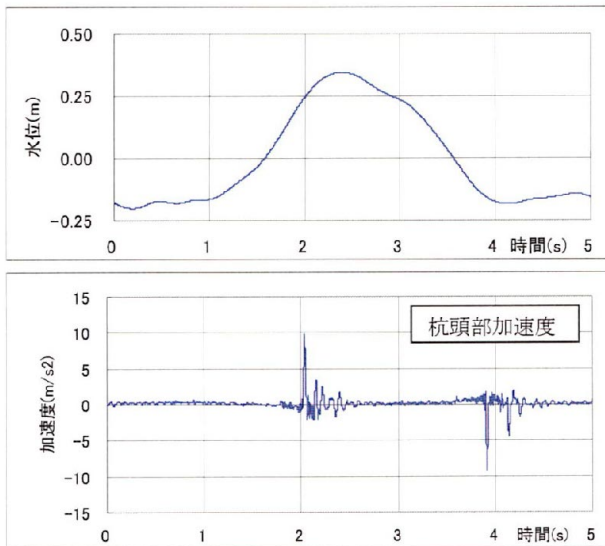


図-9 鋼管 5 本の実験結果 $H=0.5\text{m}$, $T=5.0\text{s}$

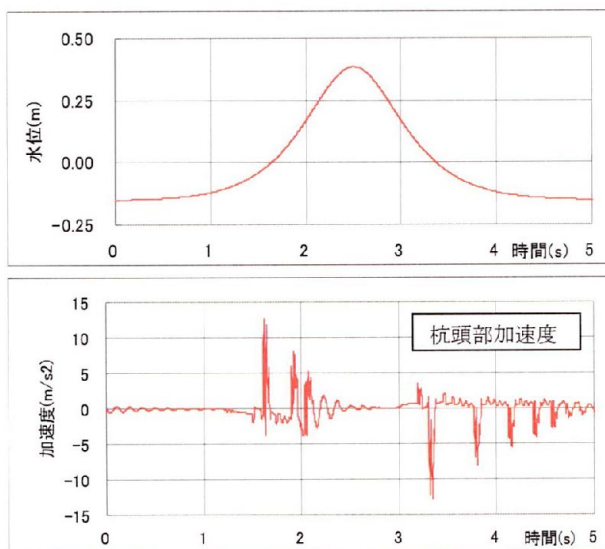


図-10 鋼管 5 本の計算結果 $H=0.5\text{m}$, $T=5.0\text{s}$

6. パラメトリックスタディ

(1) 水中部の抗力係数の影響

前述したように、鋼管を並列に並べることによって、抗力係数が変化する。そこで、 C_D を 1～14 ま

で変化させたときの上部水平加速度の最大値（押し波）と最小値（引き波）を図-11 に示す。押し波により発生する加速度は、抗力係数が大きくなるに従って増加する。一方、引き波により発生する加速度は、抗力係数によってあまり大きく変化せず、比較的大きめの加速度となっている。

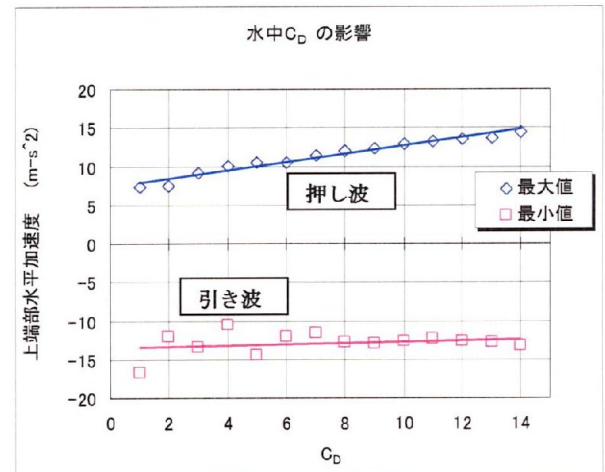


図-11 水中部材の C_D と水平加速度の最大値最小値の関係

(2) 下部鋼管内の抗力係数の影響

下部鋼管内の抗力係数は、40 という値で設定している。狭い空間で微小振幅運動をするような状況下では、 C_D 値が大きくなることが報告¹²⁾されていることから、本構造のように上部鋼管が下部鋼管内の狭い隙間で微小な運動をするような現象は、実験結果と比較して考えても、妥当なオーダであると考えられる。しかしながら、詳細については、今後検証が必要である。現状では実験結果から抗力係数を確定することは難しいため、抗力係数を 1～50 の範囲で変化させ、構築したモデルへの影響を把握する目的最大加速度の変化を調べた。図-12 より、下部鋼管の抗力係数は、上部鋼管に比べて、影響度が小さいことがわかる。

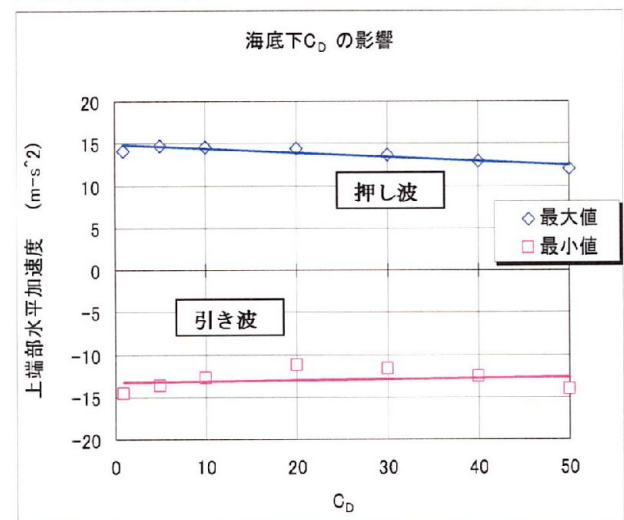


図-12 下部鋼管内 C_D と水平加速度最大値・最小値の関係

(3) スタビライザー部のバネ定数の影響

スタビライザー部の反力特性は、スタビライザーだけではなく、鋼管の変形などの影響も受ける。ただし、接触部にゴムなどの比較的柔らかい素材を貼り付けることで、多少のバネ定数に変化を付けることが可能である。

そこで、現状の 3000kN/m をベースに、バネ定数を 1500～6000kN/m まで変化させ、モデルの加速度特性を調べた。(図-13)

バネ定数が小さくなることによって、衝撃的な応答が低減し、加速度が変化していることがわかる。その変化の割合は、押し波よりも、引き波において顕著であることが示されている。

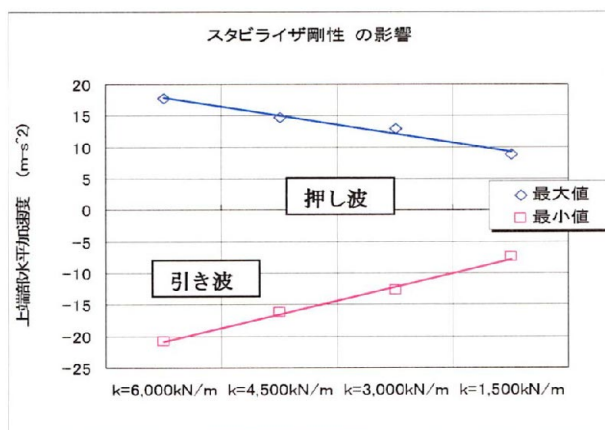


図-13 スタビライザー部剛性の影響

7. まとめ

本研究のまとめを以下に示す。

- ① 実験結果に合わせて支持部分のバネ定数、減衰係数を調整することで、修正モリソン式による運動評価がおおむね可能である。
- ② 鋼管 1 本の場合には、押し引きによる杭頭部の加速度は、引き波による加速度が大きくなり、数値計算モデルでも同じ傾向を模擬出来た。
- ③ 鋼管が複数並列に並ぶ場合には、抗力係数を大きくとることで、実験値に近い傾向が得られることがわかった。ただし、抗力係数の適正な大きさについては、今後の検討が必要である。
- ⑤ ここで示すシミュレーション計算方法は直立浮上式防波堤の設計ツールとして有効な手段と考えられる。しかしながら、各係数の設定値は水槽実験において鋼管上端部で計測された水平加速度をよりどころとして比較することによって選ばれた値である。このような設定値をより確実なものにするためには、スタビライザー部の反力特性を明らかにすることが必要であり、反力計測を含んだ実験データの補強が不可欠と考える。

謝辞：沼津港実証試験を行うに当たり、静岡県建設部港湾局、沼津土木事務所の皆様並びに（独）港湾空港技術研究所 菊池喜昭地盤・構造部長をはじめとした皆様には多大なるご支援を頂いた。

また、動揺シミュレーション解析は、三菱重工工業(株)長崎研究所の保有の汎用動揺計算プログラム MACOF^{9),10)}を使用し、松浦正己氏、谷垣信吉氏の多大なるご支援をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 有川太郎, 野村逸人, 富田孝史, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 木原一禎: 直立浮上式防波堤による現地津波防護効果に関する検討, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.936～940, 2007.
- 2) 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: 直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性, 港空研資料, o.1156, June 2007.
- 3) 有川太郎, 坂口章, 小林真, 虎石龍彦, 櫻井良宏, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の実海域実証試験, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.93～98, 2008.
- 4) 小林真: 直立浮上式防波堤の開発, 北陸地方建設事業推進協議会平成 20 年度建設技術報告会 10 月 29 日 2008
- 5) Matsuura, M. and Tanigaki S et al: A New Device of Pitch Motion Reduction of Floating Structure, Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu, Japan, May 26～31, 2002
- 6) S. K. Chakrabarti: Impact of Analytical, Model and Field Studies on the Design of Offshore Structures, Chicago Bridge and Iron Co. 1980
- 7) Chakrabarti, S. K.: "Wave Forces on Vertical Array of Tubes", Proceedings on Civil Engineering in the Ocean, San Francisco, ASCE, (1979)
- 8) Chakrabarti, S. K.: "Hydrodynamic coefficients for a vertical tube in an array", Applied Ocean Research. Vol.3 No.1, (1981)
- 9) Matsuura, M. and Ikegami, K.: "Time Domain Simulation of Dynamic Response of Semisubmersible Platform in Severe Sea Condition", Fifth International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Tokyo, (1986)
- 10) 松浦正己, 池上国広: "係留・連結された複数浮体の波浪中動揺解析法", 三菱重工技報 Vol. 31, No. 4, (1994)
- 11) 有川太郎, 坂口章, 小林真, 山本邦弘, 櫻井良宏, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の開発, 防衛施設学会 20年度年次研究発表会 2月2日 2008
- 12) Sarpkaya, T and O'Keefe, JL (1995). "Oscillating Flow about Two-and Three Dimensional Bilge Keels" Proc 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Vol. I-A, pp263-270.
- 13) Dean, R. G.: Stream function representation of nonlinear ocean waves, J. Geophys. Res. Vol. 70, pp.4561-4572, 1965.