

大規模水理模型実験による津波・高波に対する 直立浮上式防波堤の水理特性に関する研究

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF BUOYANCY-DRIVEN
VERTICAL PILING BREAKWATER FOR TSUNAMI AND WIND WAVE
BY LARGE SCALE MODEL TEST

有川太郎¹・下迫健一郎²・小林真³・虎石龍彦⁴・荒井清⁵・木原一禎⁶

Taro ARIKAWA, Kenichiro SHIMOSAKO, Makoto KOBAYASHI,
Tatsuhiko TORAISHI, Kiyoshi ARAI, Kazuyoshi KIHARA

¹正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所津波防災研究センター(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

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 修(工) (株)大林組 土木技術本部設計第二部(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴非会員 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)

⁵正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 土木本部設計部(〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁶非会員 三菱重工橋梁エンジニアリング(株) 橋梁技術部(〒108-8215 東京都港区港南2-16-5)

An innovative ‘buoyancy-driven vertical piling breakwater’ is under development to protect harbor facilities behind the breakwater against tsunamis and high waves. This breakwater consists of rows of steel pipe piles and each pile consists of upper and lower steel pipes. Upper steel pipe is normally encased in lower steel pipe which driven into seabed and thus there small gap exists between upper pipes. When tsunami or high wave is predicted, the upper pipes quickly rise up to the water surface driven by the buoyancy of air supplied into the upper pipes.

A few experimental researches have been conducted on the hydraulic characteristics of this type of breakwater with gaps. In this study, hydraulic model experiments and numerical simulations were carried out to investigate the wave transmission through the breakwater and wave pressures acting on the upper pipes. As a result of the study, the breakwater's performance against tsunamis and high waves has been verified.

Key Words: Tsunami, Movable breakwater, Buoyancy-driven vertical piling breakwater,
Large scale model test, Numerical simulation

1. はじめに

大規模な地震による巨大津波, 地球温暖化による海面上昇・台風の巨大化により沿岸域における自然災害の危険性が増している。ところが, 港湾においては, 航路(港口)部には防波堤を設置できなかったことから, 航路から侵入する津波・高波のエネルギーを遮断し, 安全な港湾を整備することは難しいのが現状であった。

この問題を解決すべく, 常時は鋼管を海底面下に沈設し, 津波・高波来襲時など異常時にのみ上部鋼管を水面上に浮上させて港内施設等を守るという新形式の防波堤「直立浮上式防波堤」の実用化に向けた開発を行っている。本防波堤は図-1に示すように, 上・下部鋼管から成る鞘管構造であり, 隣接する上部鋼管の間には5~10%程度の開口部を有しているが(写真-1参照), そのような柱列構造物の

水理特性は一部の研究^{1), 2)}を除き解明されていない。

本研究では, 本防波堤の津波・高波に対する防御(消波)効果, 作用波圧及び開口部通過流速等について大規模水理模型実験と数値シミュレーションにより明らかにすることを目的とする。

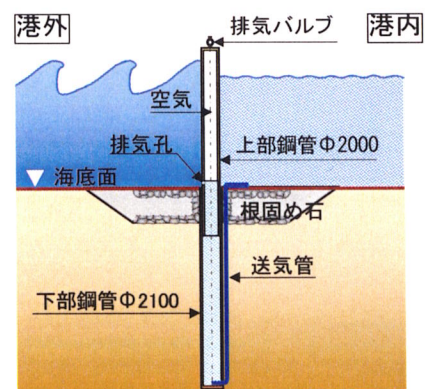


図-1 直立浮上式防波堤構造例 (断面図)

2. 水理模型実験

(1) 実験水路及び直立浮上式防波堤模型

実験は、図-2に示す大規模波動地盤総合水路を用いて行った。同水路は、基本水路の長さが184m、深さ12m、幅3.5mであり、水槽中央部に長さ67m、深さ4mの砂地盤層を有する。造波機はピストン型で発生させることが可能な波高は周期と水深により異なり、周期7s程度で3.5m、周期25sで1m程度である。

実験は水平・鉛直縮尺とも1/5のひずみ無し模型で行った。実験断面は、図-2に示すように1/30勾配の斜路部と水平部から成る。斜面法肩から2.7m位置の水平部に鋼管直径約0.4mの直立浮上式防波堤模型7本を水路幅方向に設置した。

模型は、図-1に示す本防波堤の上部鋼管が浮上した状態を対象として、上部鋼管のみモデル化を行った。鋼管天端レベルは、所定の入射波で越波（越流）しないように設置した。

写真-1に鋼管模型の背面（岸側）の状況を示す。

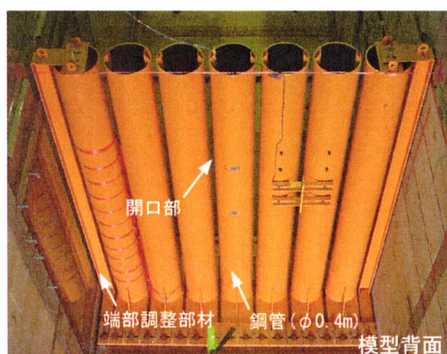


写真-1 実験模型

(2) 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。津波対象波（20.1s～26.8s：現地換算値45s～60s）は単一波であり、風波対象波（3.6s～5.4s：現地換算値8s～12s）はすべて規則波である。

開口率は、本防波堤の施工性を考慮して0.10を標準とし、0.05間隔で増減させた。事前の数値解析結果から0.15以上の開口率では防御効果はかなり小さくなると予想されたため0.15を上限とした。

表-1 実験ケース

No.	h (m)	H/a ₁ (m)	T (s)	杭径 (m)	開口率	開口幅 (m)	備考
1	2.0	0.8	25.0	0.4064	0.05	0.021	津波対象波
2	2.0	0.4	26.8	0.4064			
3	2.0	0.8	20.1	0.4064			
4	2.0	0.8	5.4	0.4064			風波対象波
5	2.0	0.8	3.6	0.4064			風波対象波
6	2.0	0.8	25.0	0.4064	0.10	0.045	津波対象波
7	2.0	0.4	26.8	0.4064			
8	2.0	0.8	20.1	0.4064			
9	2.0	0.8	5.4	0.4064			風波対象波
10	2.0	0.8	3.6	0.4064			津波対象波
11	2.5	0.8	25.0	0.4064			
12	2.5	0.8	5.4	0.4064	0.15	0.072	風波対象波
13	2.0	0.8	25.0	0.4064			津波対象波
14	2.0	0.4	26.8	0.4064			
15	2.0	0.8	20.1	0.4064			
16	2.0	0.8	5.4	0.4064			風波対象波
17	2.0	0.8	3.6	0.4064			

※H：風波対象波の場合：波高

※a₁：津波対象波の場合：津波高（静水面上の水位）

$$\text{開口率} = b / (D + b)$$

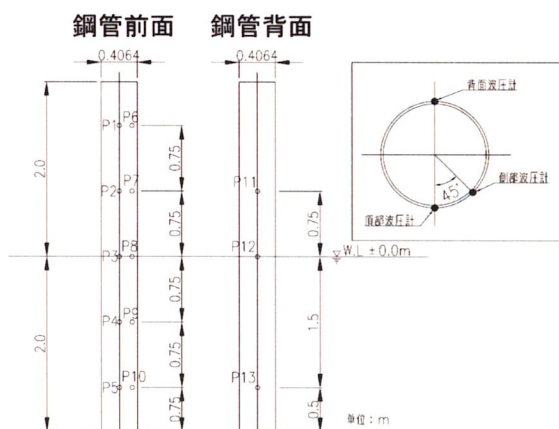
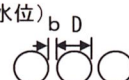


図-3 波圧・流速測定位置

(3) 水理模型実験結果

写真-2に鋼管背後から撮影した通過波の状況、写真-3に水槽側壁の観測窓から撮影した通過波の状況を示す。写真-3より、同一入射波高の条件における鋼管背後の渦の規模は、津波対象波の方が風波対象波よりかなり大きいことが分かる。

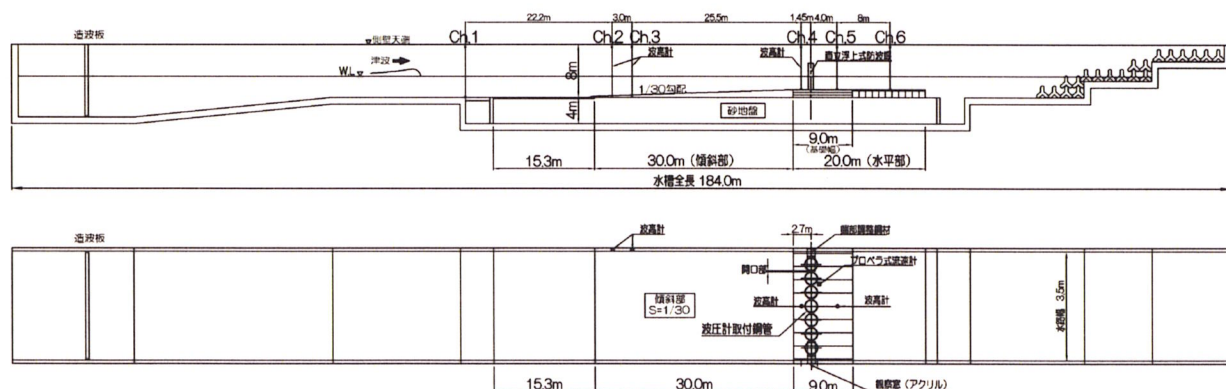
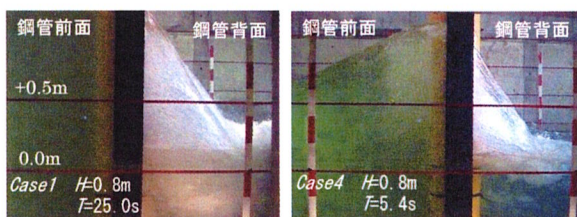


図-2 実験水路及び模型



写真-2 鋼管背後から見た通過波の状況
(津波対象波)



①津波対象波 (Case1) ②風波対象波 (Case4)
写真-3 観測窓から見た通過波の状況

a) 透過率

図-4に、全17ケースの入射波周期と透過率の関係を示した。なお、透過率 K_t は、鋼管背後 (Ch. 5) の透過波高を波高検定時の入射波高で除した比で定義した。

風波対象波グループと津波対象波グループに分類した場合、同一グループ内では周期が長い方が透過率は大きくなる。また、同一周期であれば、開口率の増加とともに透過率は大きくなる。一方、グループ分けを行わない場合、津波対象波グループの方が透過率は小さい。

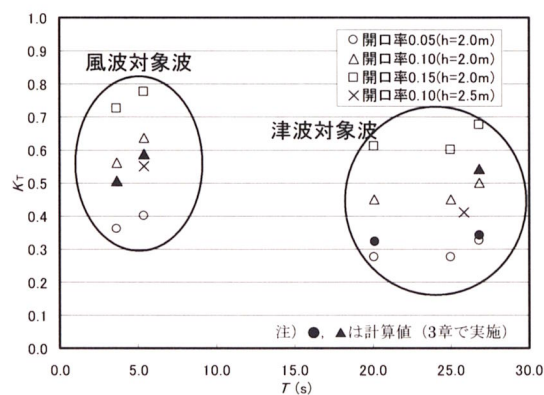


図-4 入射波周期と透過率の関係 (実験値)

図-5に開口率と透過率の関係について示す。

同図より、開口率が大きくなるに従って透過率が大きくなっていることが分かる。なお、標準的な開口率0.10の場合、周期によっても異なるが、風波対象波に対して透過率0.56~0.63、津波対象波に対して透過率0.45~0.5となる。

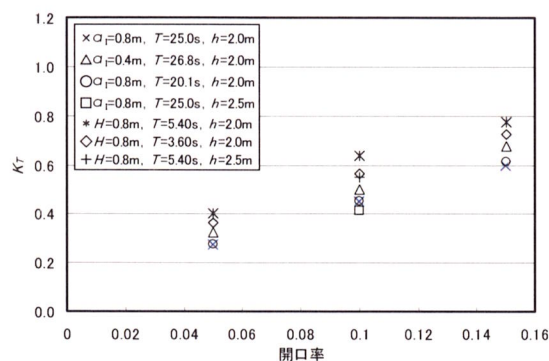


図-5 開口率と透過率の関係 (実験値)

b) 鋼管開口部の通過流速

図-6に、津波対象波における開口部通過流速の時系列を示す。また、図-7に開口率と開口部通過流速の関係を示す。なお、開口部通過流速 u は $a_l \sqrt{g/h}$ (津波流速) で無次元化した。同図より、無次元最大流速については開口率0.1で最大値3.8となり、次いで開口率0.05, 0.15の順に流速が小さくなっている。一方、無次元平均流速については、開口率0.1で最大値2.0となるものの、開口率0.05及び開口率0.15の流速との差異は小さい。

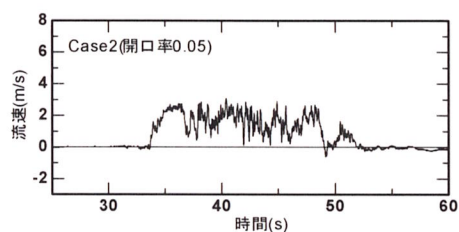


図-6 開口部通過流速の時系列 (実験値)
(津波対象波: $a_l = 0.4m$, $T = 26.8s$)

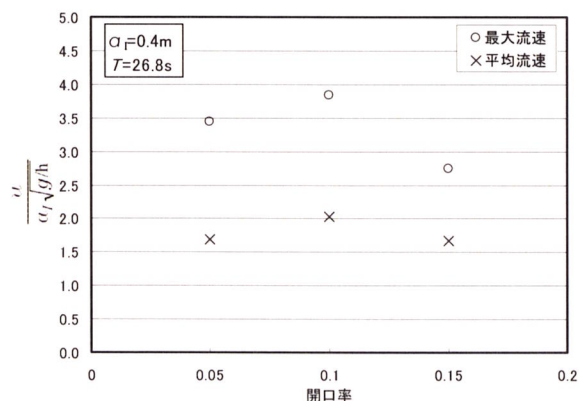


図-7 開口率と開口部を通過する流速の関係 (実験値)
(津波対象波: $a_l = 0.4m$, $T = 26.8s$)

c) 作用波圧

① 波圧波形

図-8に、津波対象波 (Case1) 作用時の鋼管前面波圧波形を示す (P1~P5: 図-3参照)。同図より、水位が到達していないP1を除くP2~P5については、

水位と波圧の位相は良く一致していることが分かる。また、本実験では非碎波の津波のみを対象としていることから、衝撃波圧の発生時に見られるような作用時間が短く鋭いピークを持つ波形は現れていない。

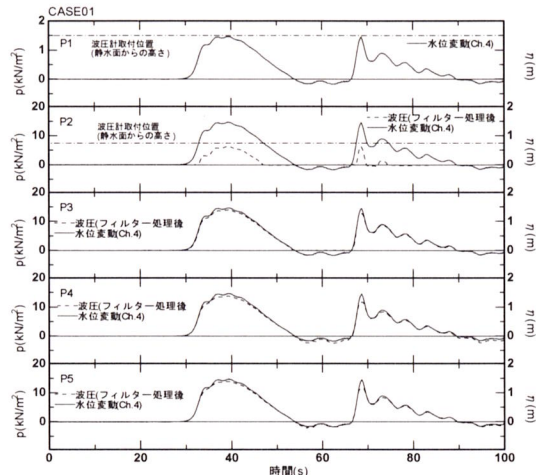


図-8 鋼管前面波圧の時系列（実験値）
(Case1: $a_1 = 0.8\text{m}$, $T = 25.0\text{s}$, $h = 2.0\text{m}$)

② 鋼管に作用する合成波力及び同時波圧

ここでは、鋼管に作用する合成波力を定義し、次いで合成波力最大時における各計測点の波圧の分布（同時波圧 p^* ）について検討を行う。

入射波方向の合成波力は、静水面以下については、波圧に各波圧計の分担面積を乗じて波力を算出した。一方、静水面上については、三角形の波圧分布を設定して、各計測点の波圧と波の作用高さから波力を算出した。これらを鉛直方向に合算して、鋼管単位幅当たりに換算した波力 (KN/m) とした。

図-9に、鋼管の前面、側面及び背面に作用する合成波力の時系列の一例を示す。なお、図中上段は、鋼管前面及び背面の水位変動である。

同図より、前面水位が最大となる時刻に前面及び側面の波力が最大値となり、背面水位が最大となる時刻に背面波力が最大となっており、水位と合成波力の位相は完全に一致している（全ケース共通）。

よって、前面の合成波力が最大となる時刻における同時波圧 p^* を用いて結果の整理を行う。

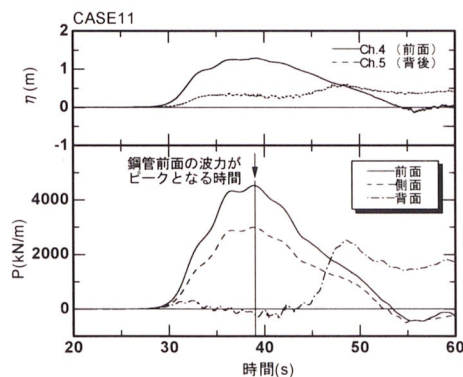


図-9 合成波力の時系列の一例（実験値：Case11）

図-10に、風波対象波（ $H = 0.8\text{m}$, $T = 5.4\text{s}$ ）について、無次元同時波圧 $p^* / \rho g H$ （以下、単に同時波圧と称す）の鉛直分布を示す。

同図より、同時波圧は静水面で最も大きく、水深方向に次第に小さくなっている。また、開口率が大きくなるほど前面水位が低下し、前面の同時波圧が小さくなる傾向にある。また、合田式から求めた波圧分布と比較すると、静水面においては同時波圧の方が10%（開口率0.05）～20%（開口率0.15）程度小さくなっている。この傾向は、合田式が「開口部の無い直立壁」に作用する波圧算定式であることから考えても明らかである。

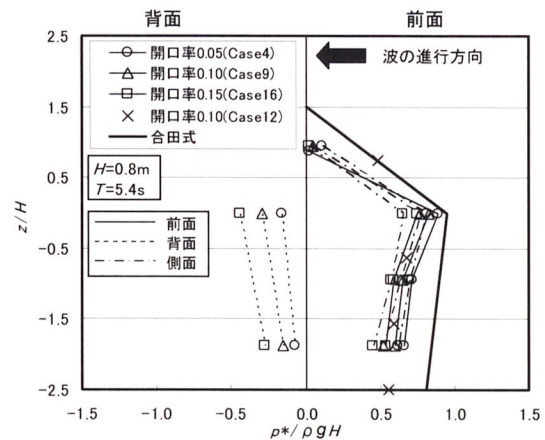


図-10 同時波圧の鉛直分布（実験値）
(風波対象波: $H = 0.8\text{m}$, $T = 5.4\text{s}$)

図-11に、実験から求めた合成波力と合田波力との比を示す。同図より、合成波力は、開口率の増加とともに合田波力に比較して小さくなる。これは、同時波圧の分布でも述べたように、開口率が大きくなるほど前面水位が低下することから容易に推察できる。

以上より、鋼管に作用する波力は開口率ごとに(1)式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{開口率} 0.05 : P &= 0.78P_G \\ \text{開口率} 0.10 : P &= 0.72P_G \\ \text{開口率} 0.15 : P &= 0.65P_G \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 P_G : 合田式による延長単位幅当たりの波力

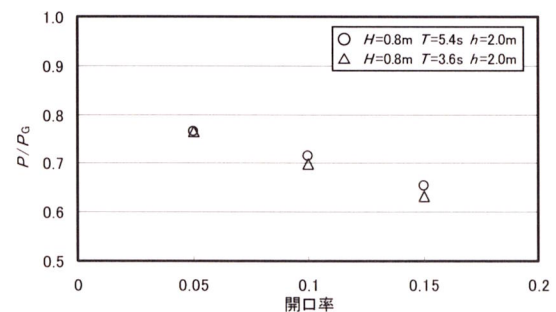


図-11 合田波力との比較（実験値：風波対象波）

図-12に、津波対象波について、鋼管前面及び背面の同時波圧 $p^* / \rho g a_1$ の鉛直分布を開口率ごとに示す。

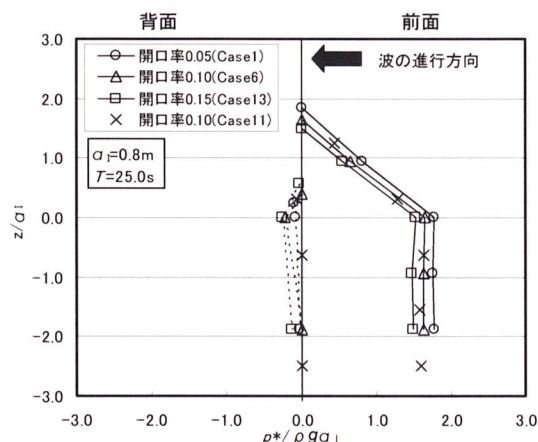


図-12 同時波圧の鉛直分布（実験値）
（津波対象波： $a_1=0.8\text{m}$, $T=25.0\text{s}$ ）

鋼管前面の静水面における同時波圧 p^* は開口率ごとに(2)式のようになる。なお、静水面下の波圧は静水面と同一となる。

$$\left. \begin{aligned} \text{開口率}0.05: p^* &= 1.8\rho g a_1 \\ \text{開口率}0.10: p^* &= 1.7\rho g a_1 \\ \text{開口率}0.15: p^* &= 1.6\rho g a_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

図-13に、鋼管前面での同時波圧 $p^* / \rho g a_1$ と谷本らが提案した「直立壁に作用する津波力算定式」³⁾による波圧分布を比較した結果を示す。

同図より、同時波圧は谷本らによる波圧分布に比べて約20%小さくなる。また、波圧の作用高さについては、谷本らは津波高の3.0倍としているが、本防波堤については津波高の2.0倍程度と小さくなっている。

以上のように、開口部を有する本防波堤では波の透過を伴うため、波圧、打ち上げ高さとも直立壁に比較して小さくなっている。

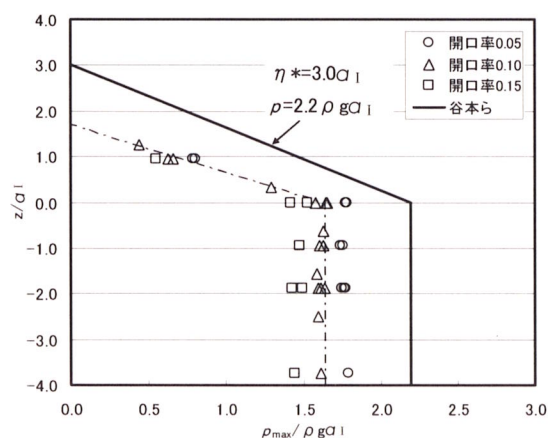


図-13 谷本式との比較（実験値：津波対象波）

3. 数値シミュレーションによる検証

ここでは、3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)を用いて、水理模型実験との比較検討を行い、透過率、開口部通過流速、作用波圧を検証する。

(1) CADMAS-SURF/3Dの概要

CADMAS-SURF/3Dは、3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式及びNavier-Stokes方程式をポアラスモデルに基づいて拡張した式を基礎方程式としている。また、海底斜面や透過性消波構造物等の複雑な形状を取り扱えるようにするために、表面形状の決定にVOFモデルを用いたものである⁴⁾。

(2) 計算条件

水理模型実験は、図-2の断面を用いているが、本検討では、計算時間の短縮のため図-14のように、鋼管1本分の領域を計算領域とし、水理模型実験より幅を狭めて計算した。その際、両側壁は摩擦無しの壁面境界条件とした。

表-2に計算条件を示す。周期等は水理模型実験にできるだけ合わせた。ケース4、6及び7では、実験では実施しなかった周期による検討を行った。

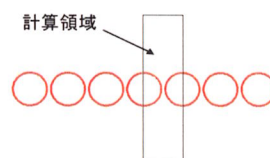


図-14 計算領域

表-2 計算条件

ケース	T(s)	H(m)	開口幅(m)	開口率	対応実験ケース
1	26.8	0.8	0.021	0.05	実験Case1
2	26.8	0.4	0.021	0.05	実験Case2
3	20.1	0.8	0.021	0.05	実験Case3
4	8.0	0.8	0.021	0.05	
5	26.8	0.8	0.042	0.1	実験Case6
6	12.0	0.8	0.042	0.1	
7	8.0	0.8	0.042	0.1	
8	5.4	0.8	0.042	0.1	実験Case9
9	3.6	0.8	0.042	0.1	実験Case10

(3) 透過率及び反射率

表-3に計算結果を示す。表中の H_I は入射波高、 H_T は透過波高、 H_R は反射波高であり、 $K_T=H_T/H_I$ 、 $K_R=H_R/H_I$ である。 K_{loss} は、エネルギーの保存から、反射率、透過率を用いて計算されるエネルギー損失率であり、(3)式の関係にある。

$$1 = K_R^2 + K_T^2 + K_{loss} \quad (3)$$

表-3から分かるように、エネルギー損失率については流速・波高などとの相関は見られないが、30%程度はエネルギーが損失していることが分かる。これは、水塊の落下によって生じる渦と開口部通過

時の渦が大きな原因と考えられる。

表-3 計算結果

ケース	$H(\text{m})$	$H_T(\text{m})$	K_T	H_R	K_R	K_{loss}
1	0.80	0.28	0.35	0.61	0.76	0.30
2	0.37	0.14	0.38	0.24	0.66	0.42
3	0.81	0.27	0.33	0.67	0.83	0.20
4	0.76	0.24	0.31			
5	0.81	0.45	0.56	0.51	0.63	0.29
6	0.78	0.43	0.56	0.43	0.55	0.38
7	0.75	0.39	0.51			
8	0.80	0.46	0.58			
9	0.80	0.40	0.50			

透過率の周期依存性については議論の余地があるが、開口率5%では30～40%の透過率であり、10%の場合には50～60%の透過率であることが示された。

図-15は、津波が通過するときの空間的な流速分布である。鋼管の直背後並びに表層に強い流れが発生している。縦渦は津波高、もしくは水深のオーダー程度のものが発生しており、横渦は、鋼管の直径程度のものが発生している。これより、透過率は津波高・管径にも依存することが予想される。

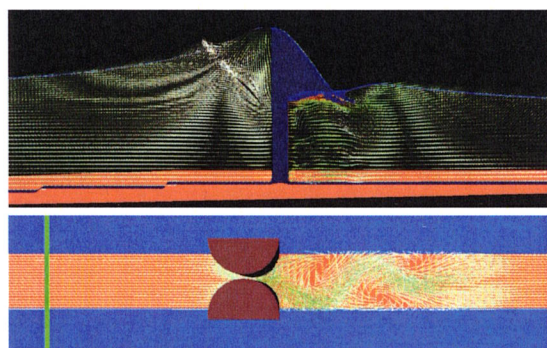


図-15 水塊の落下に伴う縦渦（上図）及び開口部通過後に生じる横渦（下図）（ケース4）

(4) 開口部通過流速

次に、津波対象波の開口部通過流速を表-4に示す。計算点は鋼管中央部付近であり、図-7の開口率5%の実験結果ともほぼ一致している。ケース5は開口率10%の結果であるが、5%より流速が小さい。

表-4 開口部通過流速（計算値）

ケース	u_{max} (m/s)	u_{min} (m/s)	$\frac{u_{\text{max}}}{a_f \sqrt{g/h}}$	$\frac{u_{\text{min}}}{a_f \sqrt{g/h}}$
1	6.0	-3.0	3.39	-1.69
2	4.2	-1.9	4.73	-2.14
3	6.0	-3.0	3.39	-1.69
5	5.2	-2.3	2.94	-1.30

(5) 作用波圧

鋼管に作用する波圧を表-5に示す。開口幅が小さいと前面波圧は大きくなることが分かる。また、10%時（ケース5）では、前面の波圧係数は1.5程度となり、谷本らの提案した波圧係数2.2よりも小さくなっている。これは、開口部より流体が逃げるた

めであるが、実験結果ともほぼ整合している。

表-5 鋼管に作用する波圧の計算結果

ケース	$p_{\text{側}}/\rho g H_i$	$p_{\text{中}}/\rho g H_i$	$p_{\text{前}}/\rho g H_i$
1	0.39	1.61	1.66(1.78)
2	0.33	1.69	1.66(1.77)
3	0.36	1.51	1.56(1.77)
5	0.46	1.44	1.49(1.65)

注) () 内の数値は実験値

4. まとめ

水理模型実験結果と数値シミュレーション結果に基づき、本防波堤の水理特性を総括する。

- ①消波性能は、開口率により変化する。標準的な開口率0.10の場合、風波対象波では透過率0.56～0.63、津波対象波では透過率0.45～0.5となる。
- ②鋼管に作用する波圧は風波対象波の場合、合田式による波圧の10～20%減、津波対象波の場合は谷本らの提案する津波波圧の約20%減となる。
- ③鋼管開口部を通過する流速の時間平均値は、開口率0.05～0.15の場合に津波流速の約2.0倍となる。これより、開口部から背後水域へ通過する概略流量を計算できる。
- ④「CADMAS-SURF/3D」によるシミュレーションでは、消波性能、波圧及び開口部通過流速が明らかとなった。それらの結果は、水理模型実験結果とも整合している。

5. 今後の課題

- ①本研究では非砕波の津波・風波に対する水理特性を明らかにしたが、今後は段波津波や砕波波圧に対しても検討を行う必要がある。
- ②数値シミュレーションにおいて、鋼管開口部における渦による損失エネルギーをさらに精度良く評価する必要がある。

参考文献

- 1) 永井莊七郎，久保直，時川和夫：鋼管防波堤に関する研究（第1報），第12回海岸工学講演会論文集，1965年，pp. 209～218.
- 2) 林泰造，服部昌太郎，白井増次郎：透過性鋼管防波堤の水理，第13回海岸工学講演会論文集，1966年，pp. 97～101.
- 3) 谷本勝利，鶴谷広一，中野晋：1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討，第31回海岸工学講演会論文集，1984年，pp. 257～261.
- 4) 有川太郎，山田文則，秋山 実：3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討，海岸工学論文集，第52巻，pp. 46～50.