津波が作用する可動式L型防波堤に関する遠心模型実験

Centrifuge Tests for a Movable L-shape Breakwater Subjected to Tsunami

三宅達夫¹・澤田 豊²・角田紘子³・鶴ヶ崎和博⁴

Michio MIYAKE, Yutaka SAWADA, Hiroko SUMIDA and Kazuhiro TSURUGASAKI

In this study, centrifuge tests and numerical analyses for a movable L-shape breakwater subjected to tsunami were conducted in order to discuss the wave pressure. As a result of tests, it was revealed that the movable L-shape breakwater was stable for tsunami due to the vertical water pressure acting on the upper surface of the breakwater. In addition, the up-lift force was reduced from 30 to 40 % using an impermeable sheet. The level and the distribution of wave pressure in centrifuge tests were in good agreement with the results of numerical analyses. Furthermore in this study, the simple method to estimate the wave pressure was suggested. The suggested estimation method was also in good agreement with the test results.

1. はじめに

東海・東南海・南海地震など大規模地震の発生が予想 されて久しい.このような海溝型地震に伴い,津波の来 襲が懸念されている.津波に関する研究では,福井ら (1962)が水理模型実験から段波の堤体衝突により発生 する水位および波圧に関して検討し,波速の算定式を提 案している.また,谷本ら(1984)は,日本海中部地震 津波の被災原因を検討すると伴に,直立構造物に作用す る波力の算定式を提案している.さらに,砕波段波を対 象とした実験的検討(松富,1991;池野ら,2001),傾 斜構造物に作用する段波波力の検討(水谷・今村,2000), など多くの研究が見られる.

近年,津波対策構造物として短時間で港口を閉鎖し, 港内への津波の進入を抑制するフラップゲート式可動防 波堤が提案されている(白井ら,2005;2006).このよ うな可動式L型防波堤の特徴は,図-1に示すように水平



1	正会員	工博	東洋建設(株)	総合技術研究所	所長
2 3	正会員	博(農)	東洋建設(株) 東洋建設(株)	鳴尾研究所 鳴尾研究所	
4	正会員	博(工)	東洋建設(株)	鳴尾研究所	

波力による滑動に対して,底版上面に下向きに作用する 鉛直動波圧により滑動抵抗を得るものである.また,図-1 に示すような根入れ部を有するタイプでは,埋戻し材の 受働土圧も期待できる.本論文では,ドラム型遠心載荷 装置を用いた津波実験ならびに数値波動水槽の耐波設計 への適用に関する研究会,CADMAS-SURF2D (2008)に よる数値解析を行い,可動式L型防波堤に作用する津波 外力について評価を行った.

2. 遠心場における相似則

本研究で用いた遠心場における相似則は以下のように なる.幾何学的相似比をNとすると(添え字pとmはそ れぞれ原型と模型を示す),

 $L_m = L_n / N$ (1)

と表わされ、Ng場での時間に関する相似則は、重力加速 度が

 $g_m / g_p = N$ (2)

と表わされるので,

となることから,

$$T_{\rm m} = T_{\rm n} / N$$
 (4)

で表わされる.したがって,速度は

となる. ここに, *L*は長さ, *g*は重力加速度(9.81m/s²), *T*は時間, *u*は速度をそれぞれ示す. また, 波力*F*については、

表-1 遠心力場における相似則

	原型	模型
長さ	L	L/N
体積	V	V/N^3
重力加速度	1g	Ng
速度	и	и
時間	Т	T/N
力	F	F/N^2
圧力	р	р

$$F_p = \rho_p \cdot V_p \cdot du_p / dT_p$$

= $\rho_p \cdot L_p^3 \cdot L_p / T_p^2$ (6)

となり、原型と模型で同じ流体を用いるならば、 $\rho_p = \rho_m$ であるので、

$$F_n / F_m = N^2 \cdots (7)$$

と表わされ, 波圧*p*は原型と模型とで幾何学的に相似な 位置において,

$$p_{m} = F_{m} / L_{m}^{2} = (F_{p} / N^{2}) / (L_{p} / N^{2})$$

$$= p_{p}$$
(8)

となる.ここに、 ρ は密度、Vは体積である.ちなみに、 Ng場の模型実験ではFroude則は満たされている.Ng場 における、原型と模型の代表的な相似則を表-1に示す.

3. 実験および解析概要

(1) 実験装置および計測機器

実験に用いた遠心力載荷装置は円筒状容器を有するド ラム型と呼ばれるもので模式図を図-2に示す.円筒容器 寸法は直径2.2m,幅0.3m,奥行き0.3mで2箇所に観測用 の透明な窓を配している.この円筒容器にゲートを取り 付け,図-3に示すように,実験水路側(模型部)と貯水 側に水位差をつけた後,ゲートを急開することによって 段波津波を発生させるものである.なお,当装置を用い た遠心場における段波津波の妥当性に関しては1g場での ダムブレイク実験との比較から既に検証されている(三 宅ら,2009).

防波堤模型の模式図および計測器配置を図-4に示す. 模型には圧力計および間隙水圧計がそれぞれ壁面に5個, 上面に4個,前面に2個,底面に3個,背面に3個の計17 個設置されている. なお,水路幅に対する防波堤模型の 幅は99.6%であり,0.4%の隙間がある.実験データは回 転体中心部に設置された動ひずみデータロガーにより 1/1000秒でサンプリングを行い,無線LANによりパソコ ンに転送した.さらに観測用窓から高速度カメラ(500 コマ/秒)にて防波堤周辺部を撮影した.



(2) 実験手順および実験ケース

当実験の主目的である可動式L型防波堤の津波外力を 検討するため、海底地盤の領域には変形を許さない石膏 を用いた.石膏上に基礎材として厚さ16mmの礫を敷き, 防波堤模型を設置した.再度,礫により根入れ部の埋戻 しを行った後,模型中心部付近まで注水し,模型土槽を 一時凍結させた.凍結後,模型土槽を円筒容器に設置し, 遠心加速度11g場にて解凍を行った.解凍後,容器内の 水位を調整し,遠心加速度が70gまで到達した後,ゲー ト急開による津波実験を実施するという流れである.

実験は防波堤周辺材の粒径を変えたCase_A ($D_{50}=2.9$ mm)とCase_B($D_{50}=0.8$ mm),これに揚圧力低減を目的に防波堤沖側底部に不透水シートを使用したCase_CとCase_Dの計4ケースについて実施した.各ケー



スで模型部の水位(静水位)を150mm,180mm(貯水部 は200mm,230mmで+50mmの水位差)と変えて実施し, 静水位の違いによる波圧特性への影響が無いことを確認 した.

(3) 数值解析概要

本研究では遠心場における津波実験の妥当性ならびに 計測精度を検証することを目的に、Case_Aを対象にした 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会、 CADMAS-SURF2D (2008)による数値解析を実施した. 解析は模型寸法でモデル化し、模型実験と同様に重力加 速度を70倍として実施した.なお、基礎捨石と埋戻し材 の透水モデルには、Dupuit-Forchheimer則(式 (9)~(11)) を用いた.

$$-(1 / \rho)(\partial p / \partial x) = 1/(a + b|u|) \qquad (9)$$

$$a = \alpha_0 \left\{ (1 - n)^3 / n^2 \right\} \left\{ v / d^2 \right\} \qquad (10)$$

$$b = \beta_0 \left\{ (1 - n) / n^3 \right\} \left\{ 1 / d \right\} \qquad (11)$$

ここに ρ は流体の密度,pは圧力,uは流速,nは防波堤周 辺材の空隙率 (=0.484),vは動粘性係数 (1.31 × 10⁻⁶m²/s), dは捨石の代表粒径 (D_{50} =2.9mm)を示す.また, α_0 , β_0 はそれぞれ1500, 3.6とした(近藤・竹田, 1983).

4. 実験結果および解析結果

(1) 水位增分変化

図-5にCase_A(静水位150mm)における波高計により 計測した水位増分変化を示す.なお,水位ならびに時間 は相似則により原型スケールで示している.図-5からゲ ート急開後,模型部ゲート側の水位が増加していること がわかる.入射波としては1.6m程度であった.さらに水 位は防波堤からの反射波と重複することにより最大4.3m 程度まで上昇した.

(2) 防波堤壁面および上面に作用する動波圧変化

図-6,図-7にCase_A(静水位150mm)における防波堤



壁面および上面に作用する動波圧の時刻歴を示す.図-6 から初期静水面より下側の壁面に作用する動波圧は津波 の作用により上昇し,最大動波圧に達する.さらにその 後,持続的な波圧を受けることがわかる.静水面上側の 波圧は下側に比べて小さく,静水面+44mmではほとんど 発生していないことがわかる.

図-7から,上面に作用する動波圧は35~40kN/m²程度 であり,壁面に作用する最大動波圧と同程度の大きさで あり,またその作用時刻もほぼ同一であることがわかる. これらの大きな鉛直動波圧が作用することにより,底面 において滑動に対する摩擦抵抗が増大するものと考えら れる.

(3) 防波堤に作用する水圧分布

全てのケースにおける防波堤壁面に作用する最大動波 圧分布の実験結果および解析結果を図-8に、その同時刻 における各面に作用する水圧分布を図-9に示す.なお、 図-8、図-9の圧力値は入射波高aと水の単位体積重量w (=pNg) で除すことにより、無次元化を行った.また図-8 の縦軸は静水面からの距離を入射波高で除す事により無 次元化を行った.

図-8, 図-9よりCase_Aを対象に実施した数値解析結果 は分布形状・大きさともに実験結果と良く一致してお り,当防波堤に作用する津波外力をCADMAS-SURF2D (2008)により十分な精度で予測できるものと考えら れる.

図-8および図-9では基礎材および埋戻し材の粒径が異 なるCase_AとCase_BおよびCase_CとCase_Dを同じ凡例 にて示している.これは当津波実験において,両者に優 位な差異が認めらなかったことによるものである.すな わち防波堤周辺材の粒径の差異による水圧分布への影響 は小さかったものと考えられる.この要因として,周期 が長いことにより圧力の減衰がほとんど生じなかったた



めと考えられる.

図-8から,壁面に作用する最大動波圧は全てのケース で一致し,これは谷本ら(1984)の提案する沖側の直立 防波堤に作用する津波波圧の予測式に概ね一致すること がわかる.

また,図-9から不透水シートを使用していない Case_AおよびCase_Bにおいて,根入れ部の前面,底面, 背面に作用する水圧は2.2から線形的に減少しているこ とがわかる.すなわち,津波は周期が長く,沖側と陸側 の間に生じる水頭差が圧力勾配として作用したものと考 えられる.一方,不透水シートを敷設したCase_Cおよ びCase_Dにおいては,底面および背面に作用する水圧 が減少していることがわかる.すなわち,不透水シート を防波堤沖側底部に敷設した場合,底面に作用する揚圧





力をある程度低減できることから,当防波堤本体の軽量 化が図れるものと考えられる.さらに,津波来襲時の港 内側における急激な水位上昇を緩和させる効果も期待で きる.

5.実験結果の評価

当防波堤に作用する津波外力はCADMAS-SURF2D (2008)により十分な精度で評価できることがわかった. ここでは当防波堤の基礎設計確立のために、さらに簡便 な推定式を提案する(図-10).当提案推定式においては 壁面に作用する波圧は谷本ら(1984)の式を採用するも のとし、上面に作用する動波圧についても谷本ら(1984) の提案する静水面下における動波圧式(無次元化値で2.2) を採用するものとする.さらに根入れ部における前面, 底面,背面の水圧は構造物の設置長さに沿って低減する ように設定する.これらを式で表わすと,

20

1.50

1.55

$p_1 = 2.2aw$	
$p_2 = p_1 - p_1 L_1 / L$	
$p_3 = P_2 - p_1 L_2 / L$	
$L = L_1 + L_2 + L_3$	

となる. ここで*p*₁, *p*₂, *p*₃, *L*₁, *L*₂, *L*₃は図-10に示され る水圧および長さである.

また、不透水シートを使用した場合における底面およ び背面での圧力低減については実験結果から与えること とする.すなわち、防波堤底面の最も沖側の実測値P_e (図-4のP12)と式(12)から算定される同位置の圧力P_c との比P_e/P_cを圧力低減率とすると、Case_Cおよび Case_Dにおける圧力低減率と入射波高との関係は図-11 のようになる.図-11から圧力は入射波高に依らず28~ 41%程度に低減されることがわかる.ここでは安全側を 採り、底面および背面の圧力低減を41%とした.圧力低 減を考慮した推定値を図-9に示す.図-9より、不透水シ ートを使用した場合の圧力低減を41%にすることによ り、比較的精度良く安全側に評価できることがわかった.

6.まとめ

本研究では、可動式L型防波堤の基礎設計を目的にド ラム型遠心載荷装置を用いた津波実験ならびに CADMAS-SURF2D (2008)による数値解析を行った.本 研究より得られた知見を以下に示す

- ・壁面に作用する最大動波圧は谷本ら(1984)の式に良く一致する.
- ・上面に作用する動波圧についても谷本ら(1984)の提 案する静水面下の動波圧にほぼ一致する.
- ・不透水シートを防波堤前面底部に敷設することにより 揚圧力が28~41%程度に低減される。
- ・当防波堤への津波外力に関して提案した簡易推定式は 実験結果を概ね評価できる.

今後は当防波堤の基礎設計確立のために防波堤基礎 地盤の支持力や埋戻し材の受働抵抗に関して検討を行 う予定である.

参考文献

- 池野正明・森 信人・田中寛好 (2001):砕波段波津波による 波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的検討,海工 論文集,第48巻, pp.846-850.
- 近藤俶郎·竹田英章(1983):消波構造物,森北出版, p275.





1.65

1.70

1.75

1.80

1.60

- 白井秀治・永田修一・藤田 孝・新里英幸・仲保京一・高橋 和夫 (2005):高潮・津波対策用のフラップ式可動ゲート の開発,海洋開発論文集,第21巻, pp.109-114.
- 白井秀治・藤田 孝・木村雄一郎・山口映二・仲保京一 (2006):フラップ式可動ゲートの津波低減性能に関する 模型実験,海洋開発論文集,第22巻, pp.577-582.
- 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会(2008): CADMAS-SURF実務計算事例集,沿岸開発技術ライブラ リー, No.30.
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋 (1984):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検討,第31 回海講論文集, pp.257-261.
- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄(1962):津波の 研究(I),第9回海岸工学講演会講演集, pp.44-49.
- 松冨英夫(1991):砕波段波衝突時の圧力分布と全波力,海工 論文集,第38巻, pp.626-630.
- 水谷 将・今村文彦 (2000):構造物に作用する段波波力の実 験,海工論文集,第47巻, pp.946-950.
- 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, Vol.25, pp.87-92.