ダブルバリア型浮消波堤における*C*_d値および*C*_m値の計測と 平面波浪特性についての考察

Experimental Study on Drag and Inertia Coefficients of Double Barrier Floating Breakwater

沖 和哉¹·平野宗治²·四辻拓哉³·柿木哲哉⁴·由比政年⁵·山田文彦⁶·辻本剛三⁷

Kazuya OKI, Muneharu HIRANO, Takuya YOTSUJI, Tetsuya KAKINOKI Masatoshi YUHI, Fumihiko YAMADA and Gozo TSUJIMOTO

Experimental Study is conducted in horizontal 2-D wave basin to investigate the wave dissipation performance of Double Barrier Floating Breakwater (DBFB), which is restrained by vertical piles. The results are compared to that of fixed breakwater. The pressures on the front and lee sides of breakwater are examined in order to evaluate a drag coefficient, C_d and a hydrodynamic-mass coefficient, C_m of DBFB. The transmission coefficients are then estimated from these hydrodynamic coefficients under various conditions. The applicability of the formula proposed by Harms (1979) are also discussed.

1. はじめに

浮消波堤は小規模な閉鎖性水域における静穏度確保に 有効な構造物のひとつである. 浮消波堤については古く から数多く研究されており,近年においては矩形浮体構 造物だけでなく, 円形ブイ型 (Liangら,2004), π形型 (Gesrah,2006), 浮パイプ型 (Hegdeら,2007), ニューマ チック型(Koo,2009)および複合ブロックによる透過型 (Wang and Sun,2010) など様々なタイプの浮消波堤につ いて,実験あるいは数値解析によって研究されている. これらの報告を概観すると、まず、支持形式の違いが浮 消波堤の性能評価に大きく影響することがわかる. 索係 留式の場合には運動の自由度が高く、浮体の挙動が複雑 であるため,現象の把握が難しい.一方,杭係留式では 浮体の動きが制限されるため、簡易に評価ができる可能 性がある.実用上は簡便な手法で消波性能を推定できる ことが望ましい.現状では索係留式の研究報告と比べて 杭係留式の浮消波堤に関する研究は少ない.次に,先に 示した研究を含め,既往の研究の多くは断面二次元によ る検討が主である.実際の現象は平面的であるため、断 面二次元での検討によって得られた結果との差がどのよ うな形でどの程度現れるかについては議論の必要があ る. 索係留式の場合には平面的な運動を考えるとさらに 自由度が高くなり現象がより複雑となるが、杭係留式の 場合にはこの点においても比較的扱いやすいものと推察

1	正会員	博(工)	京都大学講師先端技術グローバルリーダー
			養成ユニット
2			金沢大学自然科学研究科博士前期課程
3	学生会員		金沢大学自然科学研究科博士前期課程
4	正会員	博(工)	神戸高専准教授都市工学科
5	正会員	博(工)	金沢大学教授理工研究域環境デザイン学系
6	正会員	博(工)	熊本大学教授大学院自然科学研究科
7	フェロー	工博	神戸高専教授都市工学科

される.

浮消波堤の性能を検討する際には透過率の推定が必要 である. Harms (1979) は古タイヤを利用した浮消波堤 について, 抗力係数 C_d および質量係数 C_m の比 C_d/C_m を一 定としてエネルギーバランスから深海条件における透過 率算定式を提案している. Hegdeら(2007)は浮パイプ 型消波堤の実験結果からHarmsの透過率算定式によりC_d 値を逆算して検討を行っているが、実際にCa値がどの程 度になるのかについては不明である. 沖ら(2009)は, Harmsの透過率算定式中の堤体幅と入射波長の比のみを パラメータとしてダブルバリア型浮消波堤(以下DBFB と略)での断面二次元実験結果から経験的に求めた簡便 な透過率算定曲線を適用すると,固定条件に近い結果が 得られるとしている. 辻本ら(2009)は、C₄に対してC₄ は小さいとして任意水深におけるDBFBの透過率算定式 を導出している.また,抗力係数についてレイノルズ数 との関係で評価している.抗力係数C_dおよび質量係数 C"を構造物に応じて最適に与えれば、Harmsの考え方に 基づく透過率算定式を他の浮体形式にも適用可能と考え られる.

これらをふまえて、本研究では浮体の支持形式および 平面波浪特性という二つの観点から現象をみるため、杭 係留式の浮体構造物であるDBFBに着目して平面水槽に て模型実験を行い、平面波浪特性である波向きおよび回 折の影響による透過率の違いについて調べる.また、動 揺の影響を比較するため、消波堤を固定した場合と可動 とした場合の透過率の違いについて調べる.さらに、消 波堤前後面において実測した圧力の差から抗力係数*C*_dお よび質量係数*C*_mを推定する方法を試み、Harmsの手法に 基づく透過率算定式を適用して波浪数値モデルによりそ の妥当性について検証する.



2. 平面水槽実験

(1) 実験概要

図-1に示すように,北陸電力(株)所有の平面造波水 槽(28.5m×17.0m)のほぼ中央に,岸沖方向幅0.25m, 沿岸方向長さ2.0m,高さ0.122m(その内バリア長0.05m) のDBFB模型を設置する.水深を31.2cmとし,周期 1.0secの規則波を入射角0°および25°として入射させる. なお,静水時における喫水深は9.1cmである.DBFBは水 底から鉛直に立てられた8本の鋼製杭によって支持され, ベアリングにより上下方向にのみスムーズに動くことが できる.浮体を杭に固定した固定条件および自由に動く ことのできる可動条件にて実験を行う.すべてのケース において,図-1に示すように消波堤周辺の水位変動を 40cm間隔(x軸をまたぐ個所のみ軸対称に20cm間隔)で 126点(沖側54点,岸側72点)計測する.

(2) 波向きおよび固定・可動条件による差の比較

図-2および図-3に直入射の場合における無次元波高分 布について, 消波堤を固定した場合および可動の場合の 実験結果をそれぞれ示す.平面座標は図-1に示すように, 消波堤前面中心を原点として岸方向にx軸, 消波堤前面 に沿う方向にy軸とし,各々入射波長で無次元化されて いる.これらの結果を比較すると,反射率は固定の場合 が高く,波高減衰率も固定の場合の方が大きいことがわ かる.これは,固定条件の方が入射波が反射されやすく, その分透過エネルギーが減少するためである.

図-4および図-5は、入射角が25°の場合の無次元波高 分布について、それぞれ消波堤が固定された場合および 可動の場合の結果である.入射角以外の条件は、前述の 直入射の場合と同じである.直入射の場合と同様に、可



表-1 無次元波高二乗平均(直入射)

	固定		可動	
	消波堤前面	消波堤背後	消波堤前面	消波堤背後
N	54	72	54	72
ΣH^2	87.9	47.8	64	56.4
H _{RMS}	1.276	0.815	1.089	0.885

表-2 無次元波高二乗平均(入射角25°)

	固定		可動	
	消波堤前面	消波堤背後	消波堤前面	消波堤背後
N	54	72	54	72
ΣH^2	101	51.04	87.63	52.45
H_{RMS}	1.367	0.842	1.274	0.854

動条件と比較して固定条件の方が反射率および波高減衰 率ともに高くなっている.消波堤背後において,波高が 低い領域はおおむね波の入射角に応じた方向に広がって いる.直入射条件である図-2および図-3の結果と比較す ると,消波堤の固定および可動条件ともに,反射率が大 きくなる.波高減衰率については後述する.

表-1および表-2に、消波堤前面および背後における無 次元波高二乗平均値H_{RMS}について、それぞれ直入射およ び斜め入射の結果を示す. Nは観測点数, Hは無次元入 射波高である.いずれの波向きにおいても可動条件より も固定条件の方が反射波が大きいことがこの結果からも わかる.斜め入射条件では、直入射の場合と比べて入射 波長に対する見かけの堤体幅が長くなるため, 透過率が 小さくなり,波高低減効果が高くなると予想されるが, 入射角が大きくなると今度は消波堤による遮蔽域が小さ くなり,回折波の影響も加わって必ずしも波高減衰領域 は広くならない. 波向きによって有効な消波領域が異な るため単純な比較はできないが、固定条件の場合、消波 堤背後では斜め入射におけるH_{RMS}が直入射より大きくな っており、トータルとして波高減衰効果が減少している. 一方,可動条件では斜め入射において反射率が大きくなる にもかかわらず波高減衰効果が高くなっている. このこと から,可動条件においては波高減衰メカニズムが固定条件 と異なり、辻本ら(2009)の可視化実験結果も考慮する と、浮体の動揺とそれにともなって発生する渦が透過波エ ネルギー減衰に大きく寄与していると考えられる.

3. C_d値および C_m値の検証

(1) C_d値および C_m値の計測および算定

透過率を評価するためには、*C*_d値および*C*_m値を推定 する必要がある.本研究では実験によってこれらの値を 簡便に計測,算定することを試みる.消波堤の岸沖両側 の側面中央に圧力センサーを取付け,消波堤の沖側近傍 での水位変動とともに時系列変化をサンプリングレート 100Hzで計測し,消波堤の両側で測定した圧力差を消波 堤に作用する力とする.流速変動は水位変動の実測値と 微小振幅波理論を併用して算出し,加速度については流 速変動の時系列から算出する.これらの計測値を用いて, 以下に示す手順にて*C*_d値および*C*_m値を算出する.

任意時刻*t*における波力,水粒子速度および加速度を それぞれ*F*(*t*),*u*(*t*)および*u*(*t*)とすると,モリソン式より, *dt*だけ異なる2時刻において以下の関係が成り立つ.

$$F(t) = \frac{1}{2}C_{d}A\rho u(t)|u(t)| + C_{m}V\rho\dot{u}(t) \cdots (1)$$

$$F(t+dt) = \frac{1}{2}C_{d}A\rho u(t+dt)|u(t+dt)| + C_{m}V\rho\dot{u}(t+dt) \cdots (2)$$

ここで,*A*は波の進行方向に対する消波堤の投影面積,*V* はバリア部を含む消波堤の体積,*p*は水の密度である. これらの式を連立させて解くと*C*_dおよび*C*_mに関する以 下の式が得られる.

$$C_{d}(t) = \frac{2\left\{F(t+dt)\dot{u}(t) - F(t)\dot{u}(t+dt)\right\}}{\rho AX(t)} \quad(3)$$

$$C_{m}(t) = \frac{F(t)u(t+dt)|u(t+dt)| - F(t+dt)u(t)|u(t)|}{\rho VX(t)} \quad(4)$$

ただし,

$$X(t) = \dot{u}(t)u(t+dt)|u(t+dt)| - \dot{u}(t+dt)u(t)|u(t)|\cdots\cdots(5)$$

である.*dt*の大きさは解の精度に関係するが、本研究で は*dt* = 0.01である.

実験は、断面二次元水路および平面水槽の両方で行う. 断面二次元水路は神戸高専所有のものを用い,平面水槽 は前出の北陸電力(株)所有のものを用いる.水深およ び入射波諸元は先の平面水槽実験と同様とし,直入射条 件において消波堤を固定した場合および可動の場合のそ れぞれについて実験を行う.

(2) 算定された C_d 値および C_m 値とその考察

図-6に、断面二次元水路で計測した水位変動および消 波堤前後面における圧力変動について、それぞれ固定条 件および可動条件の結果を示す. 横軸は時刻,縦軸左は 水位,縦軸右は消波堤前後面における圧力を圧力水頭に 換算したものであり,図中の実線は水位変動,点線は消 波堤前面における圧力変動,鎖線は背面における圧力変 動をそれぞれ表す.固定条件においては,水位変動およ び消波堤前後面における圧力変動の位相はほぼ同じであ る.可動条件の場合には,水位変動および消波堤前面で の圧力変動の位相はほぼ同じであるが,消波堤後面での 圧力変動の位相は大きくずれているのが特徴的である. これは,DBFBが動揺するために生じると考えられる.



	固定		可動	
	断面二次元	平面	断面二次元	平面
C_d	1.20	0.55	11.31	7.61
C_m	0.16	0.11	0.08	0.07
C_d/C_m	7.52	4.90	142.96	111.25

表-3 C_d値およびC_m値の平均値

ここでは示さないが,平面水槽で計測した場合も,固定 条件および可動条件の位相特性は断面二次元水路のそれ と同じであった.

図-7に、上述の手順によって求めた C_d 値および C_m 値 と水位の時間変化の一例として、平面水槽の可動条件に ついて示す. 横軸は時刻、縦軸左は C_d 値または C_m 値, 縦軸右は水位であり、図中の実線は水位変動、+ は C_d 値、× は C_m 値をそれぞれ表す. 消波堤に波が到達してか ら定常な状態になるまでは*C*_d値が減少し,波が定常となると*C*_d値も周期的な変化をすることがわかる.一方,*C*_m値はほとんど変化せず常に小さな値となっている.

表-3に、定常な部分の5周期程度について位相平均し て得られるC₄値およびC₂値を示す.まず,固定条件に ついて断面二次元実験と平面実験の結果を比較すると、 C₄値は平面実験の方が小さい.この原因のひとつとして, 平面の場合には波の回折効果により抗力が小さくなった ためと考えられる. Cm値についても平面実験の方が小さ くなるが、ともに小さな値である.一方、可動条件にお いて断面二次元実験と平面実験の結果を比較すると、固 定条件の場合と同様に、平面実験の方が小さくなってい るが、値としてはともに大きい.これは、平面の場合に は固定条件と同様に回折波の影響があるが、浮体が動揺 することによってバリア先端部や浮体の隅角部で発生す る渦の効果が相対的に大きくなるため、抗力が大きくな ると考えられる. C"値については断面二次元実験と平面 実験において顕著な差はなく、同程度のオーダーである. C_d/C_m については、いずれの条件においても1より大きい、 すなわち $C_d > C_m$ となる.また,可動条件においては C_m に比してCaが卓越するとした辻本ら(2009)の考え方が 妥当であるといえる.

4. 透過率算定式の検証と数値解析

Harms (1979) は古タイヤを利用した浮消波堤の透過 率算定式を提案した. Harmsの考え方には浮体の動揺の 効果は直接入ってはいないが,本研究の実験においては 固定および可動の消波堤において*C*_a値および*C*_m値は異 なる結果が得られため,これらの値を介して動揺の影響 を考慮できる可能性がある.ここでは,先の*C*_a値および *C*_m値の検証結果をふまえ,Harmsの透過率算定式を援用 した平面波浪場の計算を行い,得られた各係数の妥当性 を検証する.冒頭で述べたように杭係留浮体は運動機構 が比較的シンプルであるため,数値解析も簡便なモデル である沖・間瀬 (2004)の位相平均型波浪予測モデルを 用いて再現を試みる.

ところで, Harmsの仮定では消波堤の高さと入射波高 の比が抗力係数*C_d*と質量係数*C_m*の比にほぼ等しいとし ているが,先の実験条件においてはその仮定は成り立た ない.そこで本研究ではこの仮定を適用しない式にて検 証する.辻本ら(2009)に倣い,浅海での適用性も考慮 すると,透過率算定式は以下の式で表される.

ここで, K_tは透過率, D_tは消波堤の高さ, Pは透過係数, Hは入射波高, Lは入射波長, Bは消波堤の岸沖方向長さ,

	固定		可動	
	断面二次元	平面	断面二次元	平面
K_t	0.92	0.96	0.57	0.68

表-4 各条件における透過率

nは群速度と波速の比である.本研究ではP=1.0とし,こ の式をDBFBに適用できるかどうかを実験で得られた値 により確かめる.

表-4に、先の実験で得られた C_d および C_m を式(6)に 代入して得られる各条件における透過率を示す. 固定条 件についてはいずれも透過率が90%を超えており、実験 結果とは合わない. これは、本研究による算定手法では 消波堤を通過する波浪のみを対象とするため、反射され るエネルギーが大きい固定条件ではうまく評価できない ことが原因と考えられる.一方,可動条件の結果につい てみると、平面実験における消波性能は断面実験でのそ れよりも16%程度低下しており、これは高木ら(1993) の報告に一致する. また,得られる平面条件での透過率 は実験結果とよく一致している. 可動条件においても反 射波は生じるが,固定条件と比べてそのエネルギーは小 さく, また, 浮体の動揺およびバリア周辺での渦により 抗力が卓越するため、良好な一致が得られると推察される. 斜め入射の場合には見かけの堤体幅が長くなるため、この 見かけの長さを考慮して透過率を計算すると、K_i=0.65と なる.この透過率を用いた平面波浪場の計算結果を図-8 に示す.ただし、ここでは透過領域のみに限定した結果 を示す.波高の大きさおよび分布傾向ともに実験結果と 良好な一致を示している.

5.おわりに

本研究では杭係留式の消波堤としてダブルバリア型浮 消波堤をとりあげ、平面模型実験を行った.まず、入射 する波向きおよび回折波の影響による平面特性を調べる とともに、消波堤を固定あるいは可動とすることにより 動揺の影響を比較した.その結果、波向きに関わらず可 動条件と比べて固定条件の方が反射率が大きいことがわ かった.また、斜め入射の場合には、固定条件では波高 低減効果が上がらないが、可動条件では高くなった.次 に、消波堤前後面での圧力差から簡便にCd値およびCm値 を評価する方法を試みた.Harmsの方法を援用した透過 率算定式に実験で得られた値を適用したところ、可動条 件では実験結果によく一致した.これらの結果から、本 手法の妥当性とCd値およびCm値を介して浮消波堤の動揺



の影響を考慮した透過率を算定できる可能性を示した.

謝辞:本研究の一部は社団法人近畿建設協会より研究助 成を受けて行った(代表者:沖 和哉).また,平面水 槽での実験に際して,熊本大学技術職員の外村隆臣氏に 助力いただいた.ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 沖 和哉・江島隆晃・山田文彦・由比政年・辻本剛三 (2009):ダブルバリア型浮消波堤における波高低減率算 定モデルの開発,海洋開発論文集,第25巻,pp.701-706.
- 沖 和哉・間瀬 肇(2004):位相平均型波浪予測モデルの高 精度化に関する研究,海岸工学論文集,第51巻, pp.1-5.
- 高木儀昌・森口朗彦・明田定満・滑川 順(1993):浮消波堤 の3次元水槽における消波性能について,海岸工学論文集, 第40巻, pp.651-655.
- 辻本剛三・沖 和哉・山田文彦・柿木哲哉・由比政年・江島 隆晃・今村 格・津嶋 了 (2009):ダブルバリア型浮消 波堤の透過率算定と平面波浪場への適用,土木学会論文 集B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.761-765.
- Gesrah, M.R. (2006): Analysis of P shaped floating breakwater in oblique waves: I. Impervious rigid wave boards, Applied Ocean Research, Vol.28, pp. 327-338.
- Harms, W. V. (1979): Design criteria for floating tire breakwater, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Vol.105, pp.149-170.
- Hegde, A. V., K. Kamath and A. S. Magadum (2007): Performance Characteristics of Horizontal Interlaced Multilayer Moored Floating Pipe Breakwater, Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering, Vol. 133, p275-285.
- Koo, W. (2009): Nonlinear time-domain analysis of motionrestrained pneumatic floating breakwater, Ocean Engineering, Vol.36, pp. 723-731.
- Liang, N. K., J. S. Huang and C. F. Li (2004): A study of spar buoy floating breakwater, Ocean Engineering, Vol.31, pp. 43-60.
- Wang, H. Y. and Z. C. Sun (2010): Experimental study of a porous floating breakwater, Ocean Engineering, Vol.37, pp. 520-527.