

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1155 June 2007

フラップ式構造物の波浪および津波に対する水理特性

下迫 健一郎
清宮 理
仲保 京一
大久 保寛
由井 孝昌

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. フラップ式構造物の概要	4
2.1 フラップ式構造物の分類	4
2.2 フラップ式構造物に関する既往の研究	4
3. 波浪作用時における水理特性	5
3.1 実験の概要	5
3.2 越波・反射実験	5
3.3 波圧実験	7
4. 段波津波作用時における水理特性	8
4.1 実験の概要	8
4.2 段波作用時における動揺式フラップの挙動	9
4.3 段波作用時の水位と流速	9
4.4 段波作用時の波圧および回転モーメント	11
5. 浮上・沈降時における挙動	13
5.1 実験の概要	13
5.2 実験結果	14
5.3 フラップの浮上運動計算法	15
5.4 模型実験結果との比較	17
6. まとめ	18
謝辞	18
参考文献	19

Hydraulic Characteristics of Flap Gate for Storm Surge and Tsunami

Kenichiro Shimosako*
Osamu Kiyomiya**
Kyouichi Nakayasu***
Hiroshi Ookubo****
Takamasa Yui*****

Synopsis

It is apprehensive for the sea level rise due to global warming. The sea level rise increases vulnerability to inundation in coastal areas due to storm surges and high waves. Also, preventing from tsunami is quite important. We have proposed the flap-type gate as a mobile barrier, installed at a mouth of a harbor along a sea-bottom, for the protection against storm surge and tsunami.

This paper presents the results derived by the hydraulic model tests conducted in the wave flume in order to comprehend the characteristics of wave overtopping and wave pressure distribution on the flap body both for storm surge and Tsunami, as well as the characteristics of the motion of the gate rising to the water surface or sinking to the bottom. Major conclusions are as follows:

- 1) Wave overtopping and wave reflection rate increases as the angle between the water surface and the flap gate increases.
- 2) The wave forces on the flap gate can be evaluated by the Goda formula. However, when the angle between the water surface and the flap gate is relatively small, the impulsive force is generated by the breaking wave.
- 3) The impulsive surge front pressure on flap gate generated by Tsunami is relatively large especially fixed type flap that inclines toward seaward, or non-fixed type flap.
- 4) The standing wave pressures generated by Tsunami can be estimated by extended Goda formula for both fixed type and non-fixed type flap gate.
- 5) The motion of the flap gate rising to the water surface and sinking to the bottom is greatly dependent on the air chamber volume in the flap body and the side walls beside the flap gate.
- 6) The rising motion predicted numerically using the mathematical model compares well with experiment motion, if the coefficients for the equation of the motion in the mathematical model can be suitably determined.

Key Words: flap-type gate, storm surge, Tsunami, wave pressure, wave overtopping, hydraulic model test

* Head, Maritime Structures Division, Marine Environment and Engineering Department

** Waseda University

*** Hitachi Ship Engineering Corporation

**** Nippon Steel Engineering Corporation

***** Ishikawajima Harima Heavy Industries

Port and Airport Research Institute, Independent Administrative Institution 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5043 Fax : +81-46-842-7846 e-mail: shimosako@pari.go.jp

フラップ式構造物の波浪および津波に対する水理特性

下迫健一郎*
清宮 理**
仲保京一***
大久保寛****
由井孝昌*****

要 旨

津波・高潮対策の一つとして、常時は海底に格納し、必要ときに操作して設置する可動式の防御施設（フラップ式構造物）が提案されている。しかしながら、フラップ式構造物の浮上・沈降時における挙動や、津波時における水理特性等については不明な点も多い。したがって、フラップ式構造物の実用化を進めるためには、これらの特性を明らかにする必要がある。

本研究では、フラップ式構造物の水理特性を把握するため、波浪に対する越波、反射波、遡上、波圧に関する水理模型実験を行った。また、段波津波を作用させる実験も行い、津波波力、フラップ式構造物による津波の変形、津波作用時におけるゲートの挙動についても検討した。さらに、静水時における浮上・沈降時の挙動を把握するため、扉体内の空気量を一定にした場合の浮上・沈降実験と、空気量を変化させながらの浮上・沈降実験を行った。本研究の主要な結論は以下のとおりである。

- 1) フラップの起立角度が大きいほど反射率が大きく、越波流量も多い。
- 2) フラップ式構造物に作用する波浪による波力については、起立角度が60度以上であれば、合田式による波力と同じかやや小さい程度であるが、45度の場合には衝撃的な波力が作用して合田式よりも大きな波力となる場合がある。
- 3) 段波津波による衝撃段波波圧は、固定式で起立角度が90度の場合には池野らの提案した波圧分布とほぼ一致するが、固定式で75度の場合および動揺式の場合には、池野らの提案式よりも大きな波圧が作用する。
- 4) 段波津波による重複波圧については、起立角度や支持方法による差はあまりなく、平均的には谷本らの式とよく一致する。
- 5) フラップの浮上・沈降運動に対して、空気充填率の影響が大きく、充填率が大きければ浮上は早く、沈降は遅くなる。また、フラップの周辺条件として側壁がある場合や隣接するフラップとの隙間が狭い場合には、浮上・沈降時間は長くなる。
- 6) フラップの浮上運動の計算法を誘導した。付加質量慣性モーメントを運動の時間関数として設定することにより、種々の条件下でのフラップの浮上運動をほぼ再現できた。

キーワード：フラップゲート，津波，高潮，可動式，水理模型実験

* 海洋・水工部耐波研究室長

** 早稲田大学

*** 日立造船鉄構

**** 新日鉄エンジニアリング

***** 石川島播磨重工業

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail：shimosako@pari.go.jp

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響による海面水位の上昇や台風の影響の巨大化によって、沿岸域における高潮災害の危険性が高まっている。また、東海・東南海・南海地震など津波の来襲を伴う大規模地震の発生が近いと予測され、沿岸域における津波対策の整備も急務となっている。こうした高潮・津波対策の一つとして、可動式のフラップ式構造物の適用が検討されている。

フラップ式構造物は、図-1 に示すように常時は海底に伏せた状態で設置し、高潮や津波が予測されるときにフラップ（扉体）の内部に空気を送り込み、浮力を与えることで急速に浮き上がらせる構造になっている。高潮や津波が過ぎたあとは、空気を排除してフラップを再び海底に沈降させる。このため、常時は港口や航路を閉塞することがなく、船舶の航行や海水の流れを阻害しない。

本研究は、フラップ式構造物の実用化を目指し、波浪時および津波時における水理特性ならびに浮上・沈降時における挙動等について、水理模型実験による種々の検討を行ったものである。

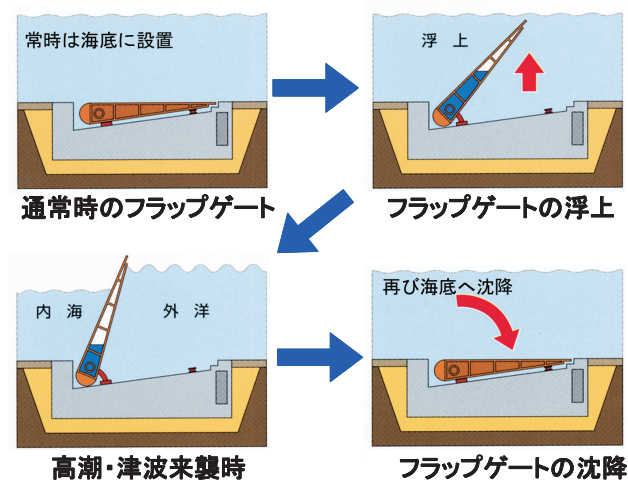


図-1 フラップ式構造物の原理

2. フラップ式構造物の概要

2.1 フラップ式構造物の分類

図-1 に示すように、フラップ式構造物の海底側はピン構造であり、フラップ内外の水位差により生じる水圧荷重は、海底部ピン構造付近に設けた支持機構あるいは、チェーン、鋼棒などのテンション部材を介して基礎構造物へ伝達される。表-1 に示すように、フラップの傾斜方向によって順フラップ型と逆フラップ型に分類され、さ

らに、水圧荷重の支持方法の違いにより固定式と動揺式に分類される。

順フラップ型は、フラップの浮上後、水位差の発生に伴う水圧荷重とバランスするまでフラップが沈み込むのに対して、逆フラップ型は水圧荷重をフラップに働く浮力とは別に支持するため、水圧荷重によってさらに立ち上がる。ベネチアにおける高潮対策（モーゼ計画）として、現在建設中のフラップ式構造物は順フラップ型であり、想定している水位差は 2m 程度で波浪条件もあまり厳しくない。また、特に支持機構がなく、波浪によって動揺するタイプである。

一方、日本における高潮・津波対策として設置する場合、かなり大きな水位差や波力が想定され、順フラップ型の場合には、大きな浮力を得るためにフラップが巨大になる。また、津波の場合、できるだけ短時間で浮上させる必要があり、そのためにもフラップは小さいほうが望ましい。したがって、日本においては逆フラップ型のほうが有利と考えられるため、本研究においては逆フラップ型の構造を検討の対象とした。

固定式は、水位や水面の変動があった場合でもフラップが動かないよう、両方向の荷重に対して支持を行うため、港内側の静穏度を確保するためには非常に有効であるが、建設コストが高くなる問題点がある。一方、動揺式は建設コストの低減は可能であるが、一方向のみの荷重支持となるため、水面の変動に伴うフラップの動揺の影響を考慮する必要がある。

表-1 フラップ式構造物の分類

	順フラップ	逆フラップ
固定式	<p>①水位の低い側に傾斜 ②水位変化・波浪に対し動揺しない 事例：河川ゲートに多数あり</p>	<p>①水位の高い側に傾斜 ②水位変化・波浪に対し動揺しない 本研究の対象</p>
動揺式	<p>①水位の低い側に傾斜 ②水位変化・波浪に対し動揺する 事例：モーゼ計画(ベネチア)</p>	<p>①水位の高い側に傾斜 ②水位変化・波浪に対し動揺する 本研究の対象</p>

2.2 フラップ式構造物に関する既往の研究

フラップ式構造物に関しては、従来から堰や樋門などに利用されてきたが、水理特性についてはあまり深く検討されたことはなかった。また、ベネチアのフラップ式構造物に関しては、波浪条件があまり厳しくないため、

波浪に対する安定性ではなく、波浪による動揺を主とした検討が行われた (Vittori, 1998)。

著者らは、これまでに大規模可動式高潮防潮堤としてのフラップ式構造物の基本的な水理特性について、水理模型実験および数値解析、ならびに試設計を行っている (富田ら, 2003)。また、数値計算による斜板に作用する波圧分布の計算も可能となっている (沿岸開発技術研究センター, 2001)。しかしながら、フラップ式構造物の浮上・沈降時における挙動や、津波時における水理特性に関する検討は行われていない。

3. 波浪作用時における水理特性

3.1 実験の概要

(1) 実験水路と実験模型

波浪作用時におけるフラップ式構造物の水理特性を把握するため、固定式を対象として、越波・反射波・波圧に関する水理模型実験を実施した (清宮ら, 2005)。実験は、長さ 105m、幅 3m、深さ 2.5m の造波水路で行った。水路は隔壁によって幅 0.8m の主水路と幅 2.0m の副水路に分割されており、本実験は主水路で行った。

実験に用いた模型は、以前行った実験 (富田ら, 2003) で使用したもので、フラップ模型は厚さ 10mm のステンレス板でできており、半円形の架台によってゲート傾斜角度を 15 度ピッチで固定できる。図-2 に実験模型の諸元を示す。なお、以前の実験ではゲート長を一定として実験を行ったが、今回の実験では、静水面上の天端高 h_c が同じとなるよう、傾斜角に応じてゲート長を調整した。

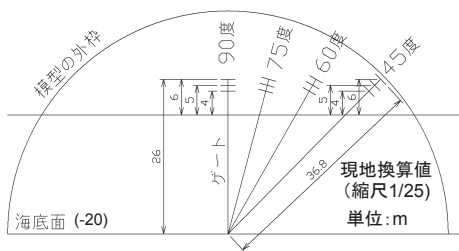


図-2 実験模型の諸元

(2) 実験ケースと実験波

実験は、越波および反射波測定実験と波圧測定実験に大別される。本実験は、特定の現地を想定したものではないが、水深 20m 程度と仮定すると、縮尺は 1/25 となる。表-2 は、実験ケースの一覧を現地量に換算して示したものである。フラップの起立角度は沖側を 0 度としている。すなわち、海底面に垂直な状態が 90 度、沖側に

15 度傾斜した状態が 75 度である。越波・反射実験については不規則波を用い、天端高 h_c は一般的な護岸の天端を参考に、ある程度の越波が生じる高さとして 4.0~6.0m とした。一方、波圧実験については規則波を用い、天端を十分高くして非越波の条件で波を作用させた。

表-2 実験ケース一覧

実験種類	フラップ条件				波浪条件				
	角度	天端高	波種類	h (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	H/L	波群数	
越波・反射実験	45度 60度 75度 90度	4.0m 5.0m 6.0m	不規則波	20	8	3	0.034	2波群	
						10	3		0.025
						4	0.033		
						5	0.041		
		14	3	0.016					
			4	0.022					
			5	0.027					
	波圧実験	45度 60度 75度 90度 120度	高天端 (非越波)	規則波	20	5	1		0.026
							1.6	0.041	1回
							1.8	0.046	1回
						5.5	1.88	0.040	1回
6						2.2	0.040	1回	
						3.3	0.060	1回	
8						4	0.073	1回	
						4	0.045	1回	
						6	0.068	1回	
10						7.2	0.081	1回	
						6.2	0.051	1回	
						7.1	0.059	1回	
12						9	0.059	1回	
14						12.2	0.067	1回	

3.2 越波・反射実験

(1) 実験方法

フラップ式構造物の最適な形状と規模を選定するためには、波の伝達特性を明らかにする必要がある。以前の実験 (富田ら, 2003) では波高伝達率 (入射有義波高と伝達有義波高の比) を計測しているが、相対天端高 (天端高と有義波高の比 $h_c/H_{1/3}$) が比較的大きい場合の伝達率は誤差が大きく、その特性が明らかでない。そこで、今回の実験では、比較的相対天端高の大きい条件を対象として、越波量の測定を行った。また、波の反射率についても計測した。なお、不規則波の作用波数は周期に関係なくすべて 200 波とした。

図-3 は、越波・反射実験における計測装置の配置を示したものである。越波については、越波した水を導水路によって集水ますに流し、ますに流入した水量を計測時間で割って平均越波流量を求めた。また、反射波については、合田ら (1976) の方法を用いて反射率を解析した。

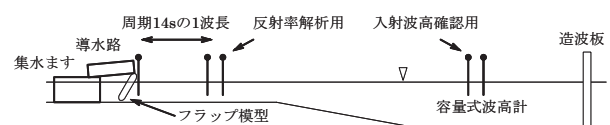


図-3 越波・反射実験における計測装置の配置

(2) 実験結果

1) 越波特性

図-4 は、有義波周期 $T_{1/3}$ が 10s、天端高 h_c が 5m のケースにおけるフラップの起立角度と越波流量の関係を示したもので、横軸に入射有義波高 $H_{1/3}$ 、縦軸に無次元越波流量 $Q/\sqrt{2gH^3}$ をとっている。波高が大きくなるほど越波量が増加するのは当然であるが、フラップの起立角度が大きくなることによっても越波量が増えていることが分かる。ただし、75 度と 90 度ではその違いはあまり顕著ではない。

図-5 は、有義波周期 $T_{1/3}$ が 10s、起立角度が 75 度のケースにおける天端高と越波流量の関係について、図-4 と同様に示したものである。同じ波高であれば天端高の低いほうの越波量が多くなるのは当然であるが、相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が同じであれば、無次元越波流量はほぼ同じ値となっている。たとえば、相対天端高が 1.0 程度の場合、無次元越波流量はほぼ 1.0×10^{-3} 程度である。

なお、ここには示していないが、相対天端高が同じであれば、有義波周期が 8s および 14s の場合もほぼ同じ無次元越波流量となっており、今回の実験範囲においては周期による越波特性の違いはほとんど見られなかった。

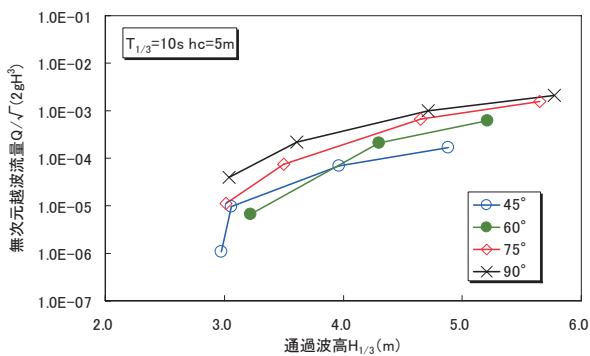


図-4 フラップの起立角度と越波流量の関係

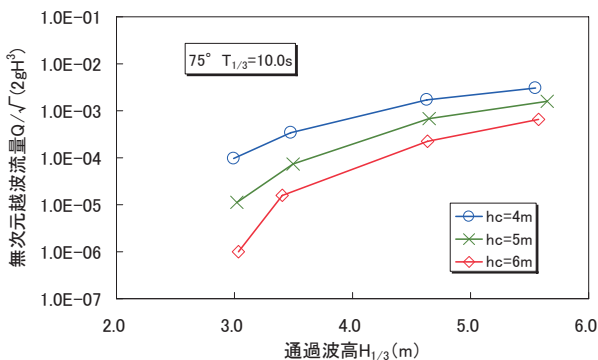


図-5 フラップの天端高と越波流量の関係

2) 反射波特性

図-6 は、有義波周期 $T_{1/3}$ が 10s、天端高 h_c が 5m のケースにおけるフラップの起立角度と反射率の関係を示したものである。反射率は 0.83~0.93 程度と全体的に高いが、波高が大きくなり起立角度が小さいほど、反射率はやや小さくなる。波高が大きくなるにつれて反射率が小さくなるのは、越波量が増加して伝達波の割合が大きくなり、反射波のエネルギーが小さくなるためである。また、起立角度の小さいほうが反射率が小さいのは、波がフラップの斜面に沿うように反射することによって砕波状態となり、エネルギー損失が大きくなるためと考えられる。

図-7 は、有義波周期 $T_{1/3}$ が 10s、起立角度が 75 度のケースにおける天端高と反射率の関係について、図-4 と同様に示したものである。相対天端高が 1.0 以上であれば反射率はほぼ 0.90 程度であり、相対天端高が 1.0 より小さくなると、越波によって若干反射率が低下するものの、その影響はあまり大きくないことが分かる。

なお、ここには示していないが、反射率に関しても、有義波周期が 8s および 14s の場合についてもほぼ同じ傾向となっており、今回の実験範囲においては周期による反射率の顕著な差は見られなかった。

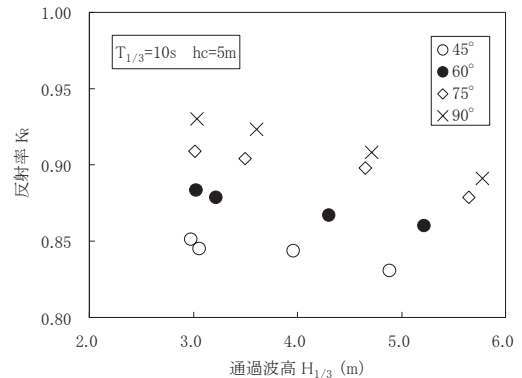


図-6 フラップの起立角度と反射率の関係

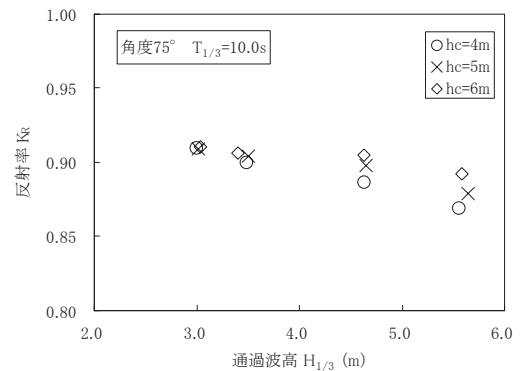


図-7 フラップの天端高と反射率の関係

3.3 波圧実験

(1) 実験方法

固定式のフラップ式構造物に作用する波圧特性を確認するため、フラップに10～11個の超小型波圧計を取り付け、起立角度を変化させて規則波を作用させた。波圧計の定格容量は20kPa (200gf/cm²)で、取り付け箇所は図-8に示すとおりである。なお、図では一番上の波圧計の位置でフラップの天端が途切れているが、実際には越波を生じないように天端を十分高くして実験を行っている。データのサンプリングは、衝撃的な波圧を測定できるように1000Hzとし、造波板からの再反射波の影響が現れない有効波5波を解析対象とした。

波圧データの解析では、まず各波圧計の受圧面積の比率に応じた重み付けを行って、フラップ全体に作用する合力の波形を作成した。次に、各測点での波圧および合力について、1波ごとのピーク値解析を行い、5波のうちの最大値、最小値、平均値、中間値を求めた。

実験結果の整理においては、規則波実験の場合、通常は平均値を用いることが多い。しかしながら、今回の実験では、5波中の1波だけにきわめて衝撃的な大きい波力が作用する場合やほとんど波力が作用しない場合など、ばらつきが大きく平均値を用いるのが適切でないと思われるケースが多く見られた。そのため、今回の波圧実験結果については、平均値ではなく中間値（大きいほうから3番目の値）を用いて整理した。

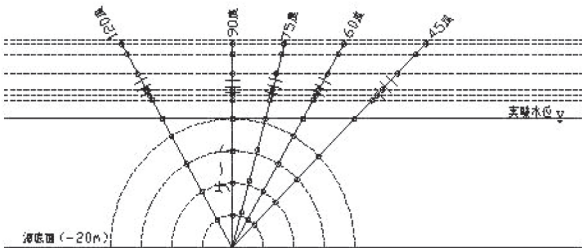


図-8 波圧計の取り付け位置

(2) 実験結果

1) 各測点におけるピーク波圧

図-9は、周期10s、波高6.2mの条件で計測した各点の波圧のピーク値について、鉛直方向分布の一例を示したものである。すなわち、各点の波圧は必ずしも同時刻の値ではない。波圧の値は、水の単位体積重量 $w_0 (= \rho_0 g)$ 、 ρ_0 : 水の密度、 g : 重力加速度)および波高 H で無次元化した波圧強度で表しており、図には、合田式により計算した直立壁に作用する波圧分布も示している。

起立角度が60～90度の範囲では、波圧強度および分

布形はほとんど同じである。起立角度が120度（港内側へ傾斜）の場合、静水面より下の波圧が他のケースと比べてやや小さくなっている。これは、波が斜面上を遡上することによる効果と考えられる。一方、起立角度が45度の場合、他のケースと比べて全体的に波圧が大きく、特に静水面から+5.0m付近にかけて、合田式による計算値よりもかなり大きな波圧となっている。これは、反射波の影響によって水塊が静水面上のフラップにぶつかり、衝撃的な波圧が作用するためである。起立角度が45度のケースを除けば、フラップに作用する波圧は合田式の計算値以下であり、通常の直立壁と同様に合田式による波圧を用いて設計が可能であると考えられる。

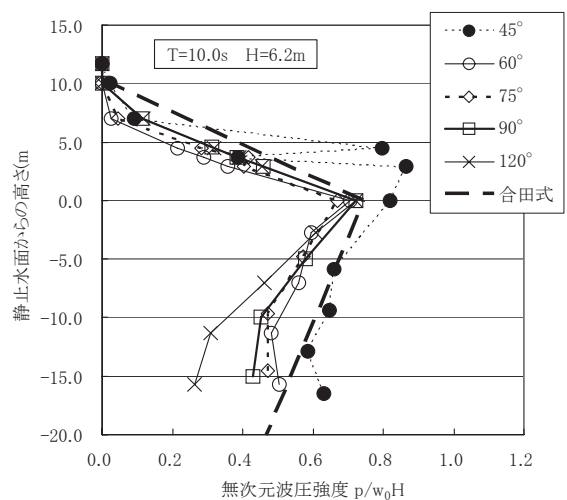


図-9 ピーク波圧の鉛直方向分布

2) 合成波力

フラップを固定する構造を設計するためには、フラップ全体に作用する合力が必要となる。そこで、各測点で計測した波圧に受圧面積を乗じて足し合わせ、模型の法線方向単位長さあたりに作用する合力を計算した。

図-10は、波圧合力と起立角度および周期の関係を示したもので、縦軸は波圧合力を合田式で計算される同じ天端高の直立壁に作用する波力で無次元化した値である。全体的に起立角度の小さいほうが波力が大きくなっている。これは、天端高が同じ場合、起立角度が小さいほどフラップが長く、全体に作用する合力が大きくなるためであり、単位面積当たりの波圧強度についてはそれほど差がない。ただし、起立角度45度の場合には、図-9でも明らかのように、他のケースと比べて大きな波力が作用している。なお、どの起立角度についても周期14sの場合に波力比が小さくなっているが、これは、14sの場合には他の周期に比べて波高が大きく、砕波後の波が作用したため波力があまり大きくならなかったと考えられる。

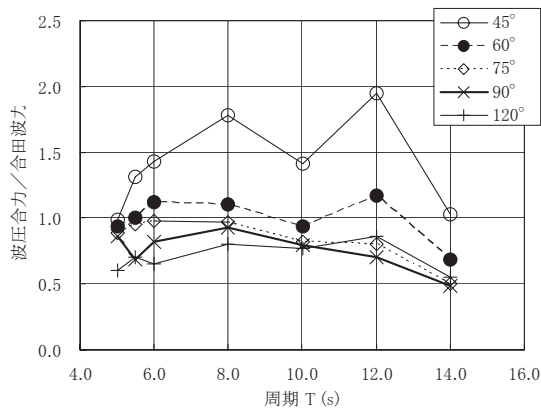


図-10 フラップ全体に作用する合成波力

3) 同時波圧分布

合成波力が最大となる時刻における同時波圧分布の特徴についても検討を行った。図-11 は、フラップの起立角度が 45 度の場合における同時波圧分布であり、波圧強度は図-9 と同様に無次元化して示している。

全体的に、静水面より少し高い位置で波圧が最大となっている。なお、周期 6s 以下では静水面で波圧が最大となっているが、これは波高が小さいため静水面より上の測点にはあまり大きな波力が作用しなかったためと考えられる。また、周期が長いほうが全体として波力が大きく、特に静水面下での波圧の低減が小さい。すなわち、周期の長い波が作用する場合、各測点の位相差が比較的小さく、合成波力最大時に静水面下の波圧もほぼ最大となっているのに対して、周期の短い波の場合は各測点の波圧の位相差が大きく、合成波力が最大となるときには静水面付近の波圧のみが大きく、静水面下では波力が小さくなっている。一方、図-12 は、起立角度が 120 度の場合の結果である。すべてのケースにおいて静水面で波圧が最大であり、起立角度 45 度の場合に比べて、海底面に近づくにつれて波圧の減少する割合が大きいことが分かる。

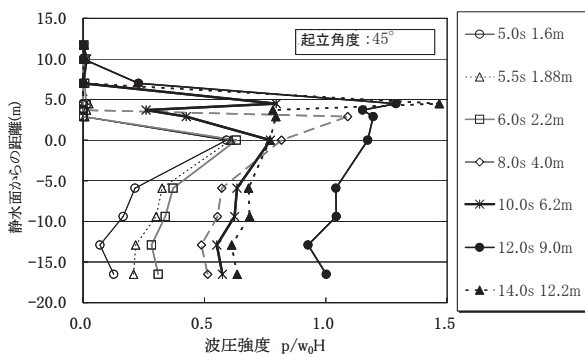


図-11 同時波圧の鉛直方向分布（起立角度 45 度）

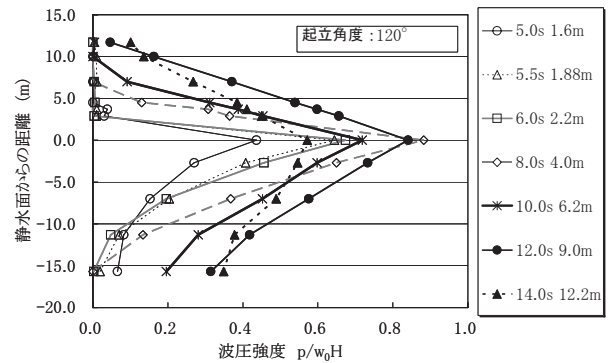


図-12 同時波圧の鉛直方向分布（起立角度 120 度）

4. 段波津波作用時における水理特性

4.1 実験の概要

段波津波作用時におけるフラップ式構造物の水理特性を把握するため、固定式および動揺式を対象として、作用波圧およびフラップの挙動に関する水理模型実験を実施した（清宮ら、2006a）。実験は、ゲート引上式段波発生装置を有する、東京海洋大学所有の長さ 25m の二次元水路で行った。図-13 に、実験水路と波高計およびフラップ模型の設置位置を示す。実験縮尺は現地の 1/50 を想定した。スケールの影響を考慮するとやや小さいものの、段波の性質を定性的に把握するには十分である。

実験に用いた模型は、図-14 に示すとおりで、固定式模型は起立角度を 75 度と 90 度に設定できるようになっており、フラップの前面に超小型波圧計、頂部背面にロードセルが取り付けられている。また、動揺式模型はテンションロッドが取り付けられており、フラップの起立角度が 0 度（海底面に沈んだ状態）では完全に折れ曲がった状態、90 度のときに水平面から 39 度で伸びきった状態となるように設定されており、テンションロッドにはひずみゲージが取り付けられている。

実験では、段波の水位と流速、段波作用時におけるフラップの挙動、フラップに作用する波圧および回転モーメントについて計測を行った。表-3 は、主要な実験ケースを示したもので、動揺式の起立角度は初期角度である。

段波の水位は、固定式では段波発生ゲートから岸側に 1m の位置に 1 台（波高計①）、フラップ前面に 1 台（波高計⑤）、フラップ前面から沖側に 0.6m（波高計④）、2m（波高計③）、2.5m（波高計②）の位置に各 1 台、フラップ前面から岸側に 1m（波高計⑥）の位置に 1 台の計 6 台の容量式波高計を設置して行った。動揺式ではフラップ前面への波高計設置が困難であるため、前面を除く 5 台の容量式波高計により測定を行った。

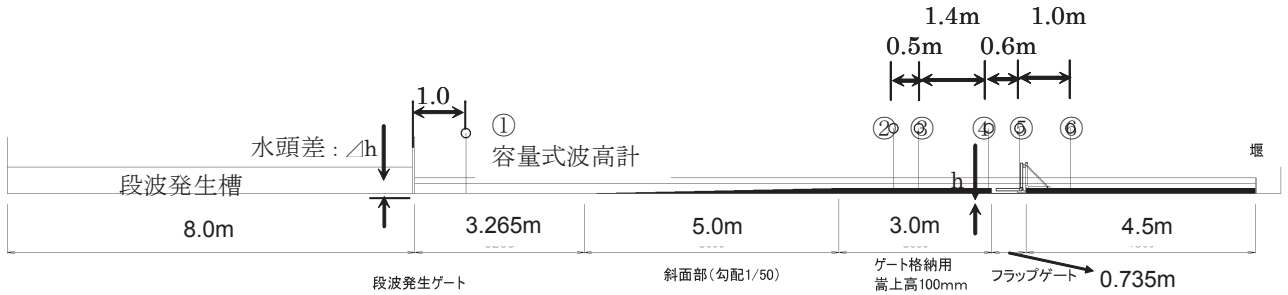


図-13 実験装置全体

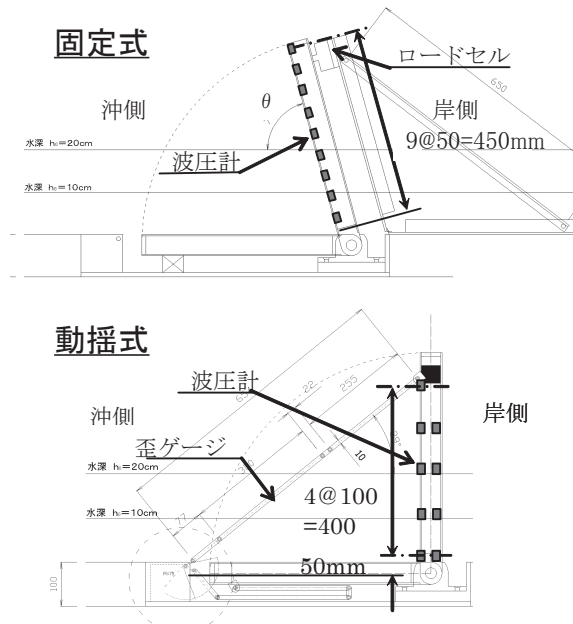


図-14 実験模型の諸元

表-3 実験ケース一覧

タイプ	ケース	起立角度 θ (°)	扉体位置水深 h (cm)	段波発生槽水位差 Δh (cm)
固定式	Case01	90	0	10,30,50,
	Case02		10	70 の
	Case03		20	4 ケース
	Case04	75	0	10,30,50,
	Case05		10	70 の
	Case06		20	4 ケース
動揺式	Case07	4	0	10,30,50,
	Case08	15	10	70 の
	Case09	26	20	4 ケース

動揺式の起立角度は初期角度である。

波圧については、固定式ではフラップ前面の底部から 5cm から 45cm まで 5cm ピッチで計 9 点に波圧計を配置した。また、動揺式ではフラップ前面の底部から 5cm、

15cm、25cm、35cm、45cm の 5 点と後面の底部から 5cm、15cm、25cm、35cm の 4 点に波圧計を配置した。

さらに、固定式では、フラップの回転中心から 450mm の位置に、フラップに対して直角にロードセルを取り付け、作用する回転モーメントを測定した。動揺式では、フラップの回転中心から 450mm の位置にひずみゲージを貼り付けた折りたたみ式ロッドを取り付け、ロッド張力を測定し、その水平分力から回転モーメントを算出した。データのサンプリング周波数は、水位、波圧、ロードセル、ひずみのいずれも 1000Hz である。

4.2 段波作用時における動揺式フラップの挙動

フラップ式構造物は浮力により浮上する設備であるため、動揺式では設置場所の水深により津波作用前の姿勢が異なる。したがって、フラップの挙動に与える水深の影響を把握することが重要である。動揺式の挙動および津波の変形状況を観察するため、フラップ模型側面にデジタルビデオカメラを設置して撮影を行った。その結果、いずれの実験ケースの水深においてもフラップは段波に追従してスムーズに動揺することが確認された。

4.3 段波作用時の水位と流速

(1) 段波波高および流速の測定

水位測定は波高計①の水位が初期水位から 0.2cm 上昇した点から 100 データ (0.1s) 前を時系列変化の零点とし、反射波が段波発生ゲートに戻るまでの間の計測を行った。段波波高は、波高計③において水位が上昇しほぼ一定の値となる時刻から 2.0 秒間の平均値として定義した。また、流速については、波高計③と波高計④の水位が一定のしきい値を超える時間差を計測し、波高計③と波高計④の距離をその時間差で除して算出した。

各実験ケースの段波波高および波速測定結果を表-4 に示す。段波の波速としては、福井ら(1962)の実験により以下の算定式が提案されている。

$$c = \sqrt{\frac{gH(H+h)}{2(H-\eta\zeta)}} \quad (1)$$

ここに、 g : 重力加速度、 H : 全水深 ($h+\zeta$)、 h : 水深、 η : 抵抗係数、 ζ : 段波波高である。

今回の実験結果は全体的に福井らの算定式によく合っている。水深が小さく段波発生槽水位差も小さい場合には算定式より小さな値となったが、これは底面摩擦の影響が出ているものと考えられる。

表-4 段波波高および波速測定結果

水深 h (cm)	水位差 Δh (cm)	段波 波高 ζ (cm)	波速測 定結果 cc (m/s)	算定式に よる波速 ce (m/s)
0	10	4.5	0.5	1.1
	30	8.3	1.3	1.5
	50	14.5	1.5	2.0
	70	19.7	2.3	2.4
10	10	4.4	0.9	1.3
	30	12.3	1.7	1.9
	50	19.4	2.2	2.4
	70	25.3	2.5	2.8
20	10	4.8	1.7	1.7
	30	13.3	2.1	2.1
	50	20.7	2.3	2.5
	70	27.5	3.2	2.9

(2) 津波の変形

段波衝突時の津波変形は、波高がフラップを大きく越波する条件では、起立角度や支持方式による大きな差は認められないが、越波しない条件では顕著な違いが確認された。写真-1は、 $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=30\text{cm}$ のときの津波の変形状況を示したものである。固定式・起立角度 90° では段波衝突後、鉛直上方に水塊が放出され、固定式・起立角度 75° では斜面に沿って沖側上方に水塊が放出される。一方、動揺式では固定式に比較して水面の変形が穏やかである。これは、動揺式では底部回転軸を中心にフラップが岸側に回転移動するため、フラップに対する段波の相対波速が小さくなるためと考えられる。

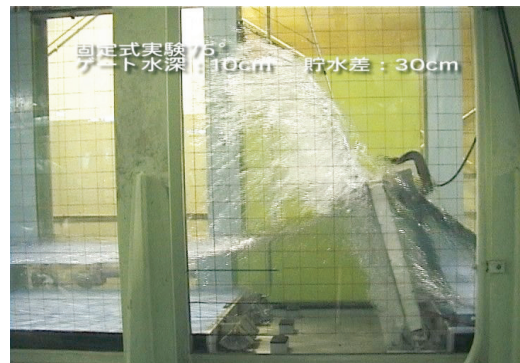
(3) 水位の変化

段波津波作用時の沖側水位（波高計③の位置）と岸側水位（波高計⑥の位置）の変化の一例として、 $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=50\text{cm}$ のときの計測結果を図-15に示す。

実験結果より、越波による岸側の水位上昇は固定式で起立角度による差は認められないが、動揺式ではやや遅れる傾向が見られ、越波による水位上昇の前に、フラップの起き上がりに伴う波の発生が確認された。



(固定式, 90度)



(固定式, 75度)



(動揺式)

写真-1 津波の変形状況

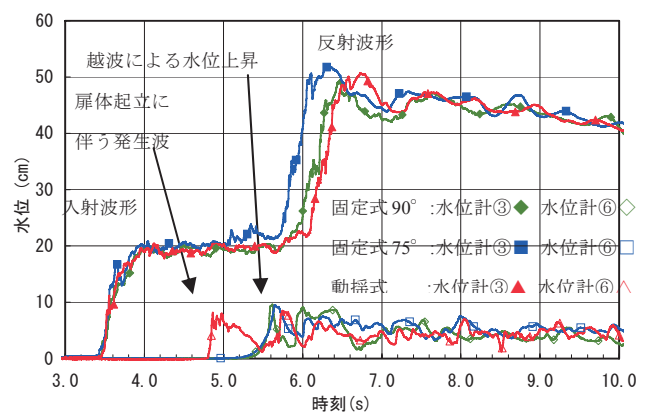


図-15 段波作用時の水位の変化

4.4 段波作用時の波圧および回転モーメント

直立壁に段波が作用する場合の波圧の時系列変化は、段波がフラップに作用することによって生じる衝撃的な波圧と、フラップ前面の水位上昇によって生じる持続的な波圧が存在することが報告されている(福井ら, 1962; 池野ら, 2001; 有川ら, 2005). 本研究では, 前者を段波波圧, 後者を重複波圧と区分して整理を行う.

(1) 段波波圧と重複波圧の発生時刻

波圧の時系列の一例として, $h=10\text{cm}$, $\Delta h=50\text{cm}$ のときの固定式の計測結果を図-16 に, 動揺式の計測結果を図-17 に示し, 動揺式の段波波圧発生時のフラップの状況を写真-2 に示す.

実験結果より, 固定式では段波波圧, 重複波圧ともに起立角度による差は認められない. 固定式と動揺式を比較すると, 段波波圧, 重複波圧ともに動揺式の方がやや遅れて発生する結果となった. これは, 動揺式では段波がフラップに衝突するときに段波波圧のピーク(これを衝撃段波波圧と呼ぶ)が発生するのではなく, 段波がフラップに衝突した後, フラップが完全に起立した瞬間(厳密には衝撃力により伸びたロッドが縮み, フラップが沖側にわずかに動く瞬間)に波圧が最大となるためである. ただし, 重複波圧については, 起立角度や支持方式の違いによる差は認められなかった.

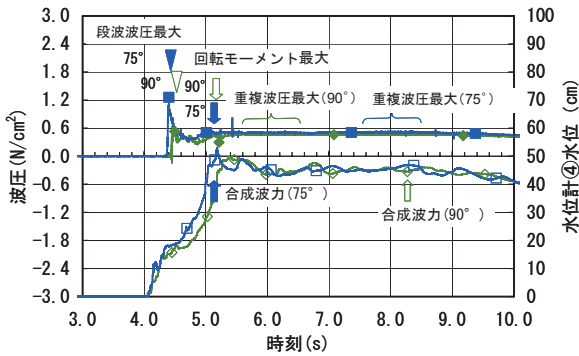


図-16 波圧と沖側水位の時系列変化(固定式)

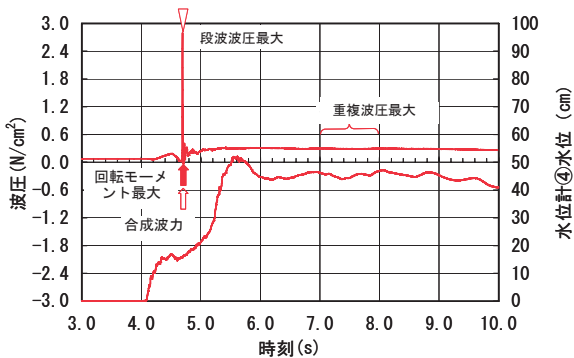


図-17 波圧と沖側水位の時系列変化(動揺式)

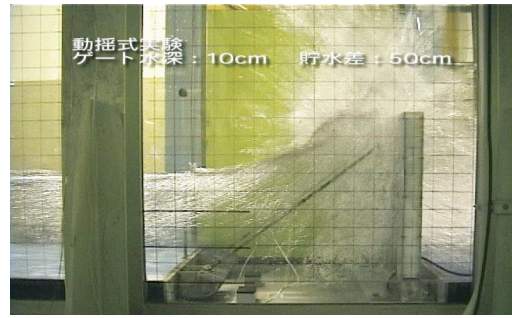


写真-2 衝撃段波波圧発生時の状況(動揺式)

(2) 衝撃段波波圧

衝撃段波波圧について, 福井ら(1962)は次式を提案している.

$$P_{dm} \cdot \zeta = K \frac{w \cdot c^4}{g^2} \quad (2)$$

ここに, P_{dm} : 最大衝撃波圧, ζ : 段波波高, K : 波圧係数, w : 水の単位重量, c : 波速, g : 重力加速度である.

図-18 は, 実験結果を示したものである. 実験結果から, 波圧係数 K は起立角度 90° のとき 0.43 , 75° のとき 0.89 , 動揺式では 1.23 であった. 福井らは直立壁に対する波圧係数として 0.51 を採用しており, 本実験の起立角度 90° の方がやや小さな値を示している.

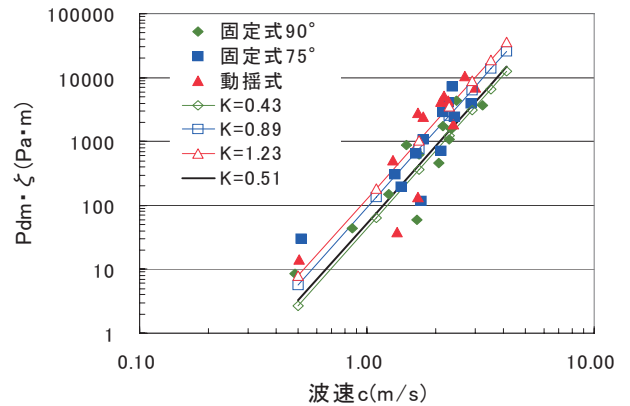


図-18 衝撃段波波圧

(3) 衝撃段波波圧の鉛直分布

衝撃段波波圧の鉛直分布について, 池野ら(2001)は次式を提案している.

$$P/(\rho \cdot g \cdot a_H) = 2.2(1 - z/3a_H) \cdot \alpha \quad (0 \leq z/a_H \leq 3) \quad (3)$$

$$P/(\rho \cdot g \cdot a_H) = 2.2\alpha \quad (z/a_H \leq 0) \quad (4)$$

ここに、 P ：最大波圧、 z ：静水面上向き正の座標、 a_H ：進行段波振幅、 ρ ：流体の密度、 g ：重力加速度、 α ：碎波による波圧の割増係数で次の値としている。

$$\alpha = 1.36 \quad (0 \leq z/a_H \leq 3) \quad (5)$$

$$\alpha = 1.36(1 + 0.52z/a_H) \quad (-0.5 \leq z/a_H \leq 0) \quad (6)$$

$$\alpha = 1.0 \quad (z/a_H \leq -0.5) \quad (7)$$

実験結果の一例として $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=50\text{cm}$ のときの各計測点における衝撃段波波圧の計測結果を図-19 に示す。縦軸は段波波高で無次元化した距離、横軸は段波波高と単位体積重量で無次元化した波圧強度とした。

衝撃段波波圧については、固定式では起立角度 90 度の場合には池野ら(2001)の提案した波圧分布に比較的近いが、 75 度の場合には池野らの値よりも大きい。また、動揺式は固定式よりさらに大きな値を示している。固定式と動揺式で大きな差が見られるが、これは、固定式では段波の衝突によって衝撃波圧が発生するのに対して、動揺式では前述のようにロッドが伸びきった直後にわずかに縮む際に、フラップが瞬間的に沖側に動いてより大きな衝撃波圧が発生するためと考えられる。

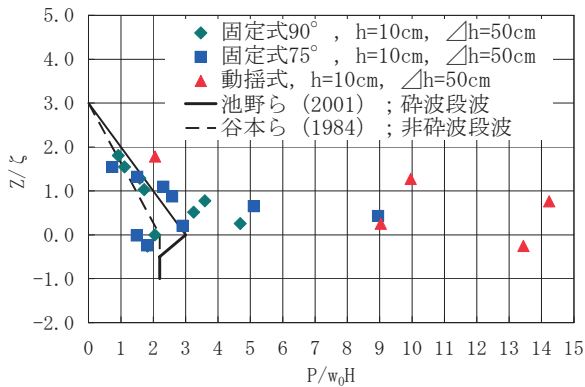


図-19 衝撃段波波圧の鉛直分布

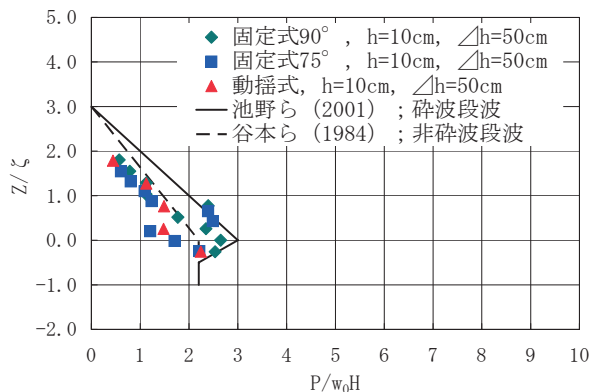


図-20 最大重複波圧の鉛直分布

(4) 重複波圧の鉛直分布

重複波圧最大時の鉛直分布の一例として、 $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=50\text{cm}$ のときの測定結果について図-20 に示す。重複波圧については、起立角度や支持方式によらず、池野らの式よりやや小さな値を示し、平均的には谷本らの式とよく一致する結果となった。

(5) 合成波力

各時系列の中でフラップに作用する最大波力を算出するため、前面の波圧計の時系列データに受圧面積で重み付けをして足し合わせ、合成波力を作成した。 $h=10\text{cm}$ のときの合成波力の最大値を図-21 に示し、その鉛直分布の一例として、 $h=10\text{cm}$ 、 $\Delta h=50\text{cm}$ のときの測定結果を図-22 に示した。また合成波力が最大となる時刻を図-16、図-17 に示している。

実験結果から、固定式では重複波圧発生時に合成波力が最大となり、動揺式では衝撃段波圧発生時に合成波力も最大となっている。固定式では 90° と 75° に差は見られないが、固定式と動揺式では動揺式のほうが大きな値を示す。ただし、動揺式における波力のピークは瞬間的なものであり、連続的に作用するものではない。これは前述のとおり、波圧の発生原因が固定式と動揺式で異なることに起因するものと考えられる。

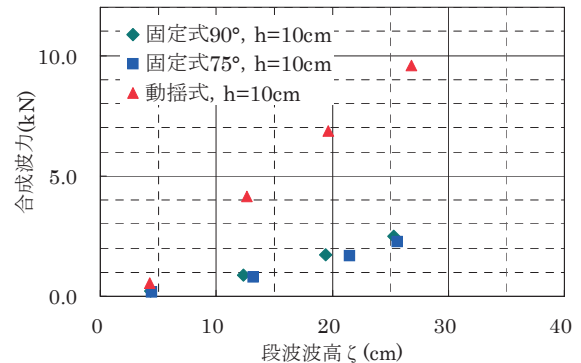


図-21 段波波高と合成波力

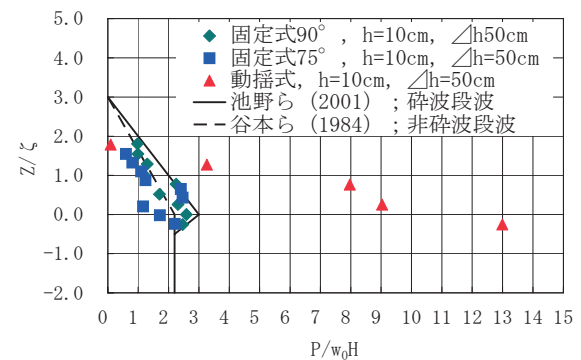


図-22 合成波力の鉛直分布

(5) 回転モーメント

固定式のフラップに作用する回転モーメントについて、上部ロードセルの測定値から算出した値を縦軸に、合成波力から算出した値を横軸にとり整理したものを図-23 に示す。また、動揺式のフラップに作用する回転モーメントについて、ロード張力の測定値から算出した値を縦軸に、合成波力から算出した値を横軸にとり整理したものを図-24 に示す。

固定式では、ロードセルの荷重から算出した値と合成波圧から算出した値はほぼ 1:1 で対応しており、測定値は信頼できるものと判断できる。動揺式では瞬間的に固定式の 4~10 倍の回転モーメントが発生しており、ロード張力から算出した値と合成波圧から算出した値も 1:1 対応とはなっていない。これは動揺式におけるロードには、段波波圧の他にフラップの慣性力が付加されるためと考えられる。

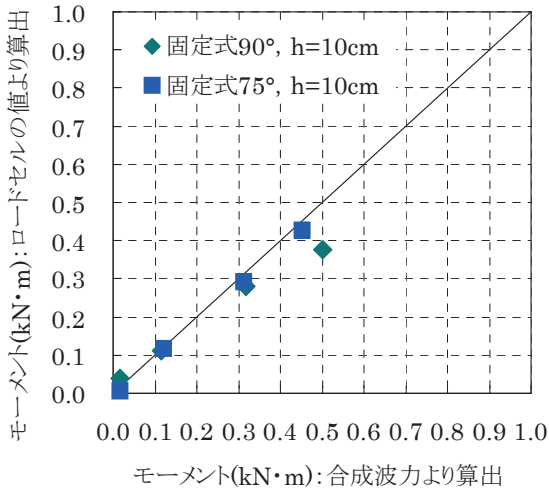


図-23 フラップの回転モーメント (固定式)

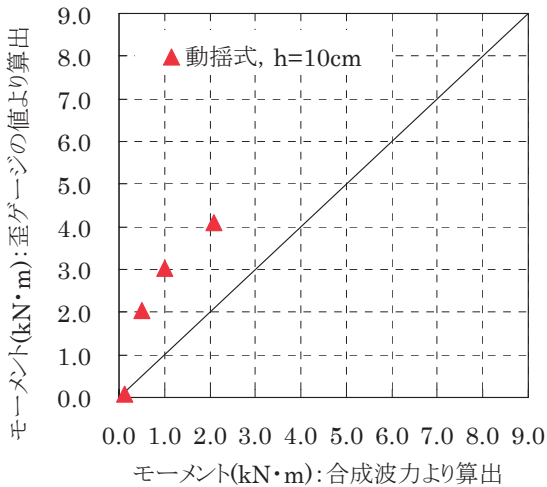


図-24 フラップの回転モーメント (動揺式)

5. 浮上・沈降時における挙動

5.1 実験の概要

フラップ式構造物の浮上・沈降時における挙動の特性を解明するため、2m幅の水槽内に図-25 に示す模型を設置し、静水中で実験を行った (清宮ら, 2006b). 模型の縮尺は現地の 1/50 を想定している。フラップの上端部に空気箱 (容積 2181cm³) を設け、内部の空気充填率を調整しながら、一定空気量によるフラップの浮上・沈降状況をビデオ撮影した。フラップの角度変化量は、画像データをもとに解析することとし、浮上・沈降に要する時間についてはストップウォッチで測定した。表-5 に実験条件を示す。実験は、空気充填率の影響を確認する実験と、隣接するフラップや側壁の影響を確認する実験とに大別される。なお、側壁はフラップに隣接する既設構造物の直立壁を想定したものである。また、空気充填率は空気箱内の容積に対する空気の体積で定義しており、空気箱の容積はフラップの全容積の約 14% に相当する。

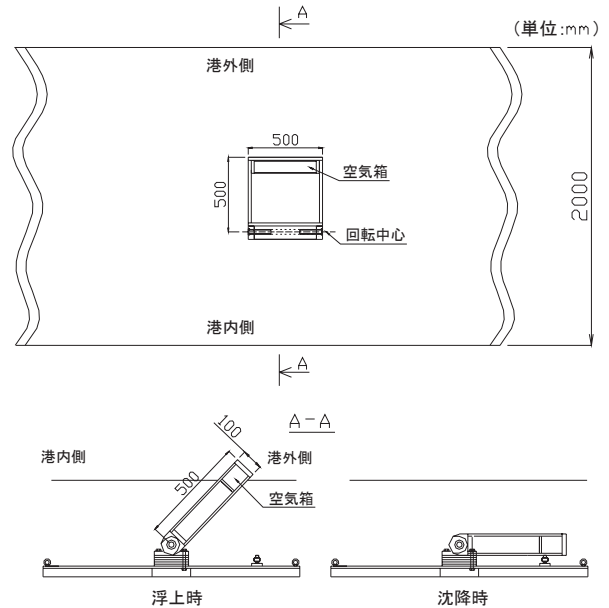


図-25 実験模型図

表-5 実験条件

空気充填率 (%)	設置水深	
	模型(cm)	<実機換算(m)>
0~100	30	< 15 >
	40	< 20 >
	50	< 25 >
	60	< 30 >

表-6 実験状態（実機換算値）

空気充填率	55%	65%
フラップ重量(kN)	16601	16327
水深(m)	15	
	20	
	25	
フラップ長さ(m)	25	
フラップ幅(m)	25	
フラップ厚さ(m)	5	
回転ピン～重心距離(m)	12.6	12.45

また、側壁や隣接フラップの影響および数値計算モデルと模型実験との妥当性検証にあたり、多くの一定空気量による浮上実験の中から、表-6 に示す実験状態を選出した。空気充填率は 55% と 65% の 2 種類、水深は 15 m、20m、25m の 3 種類である。

5.2 実験結果

(1) 空気充填率の影響実験

実験の一例として水深 20m（実機換算値）で空気充填率が異なる場合の浮上運動に対する時刻歴を図-26 に、沈降運動に対する時刻歴を図-27 に示す。時間は実機換算値である。図-26 では、運動の違いを比較できるように、フラップが水底から離れる時刻をほぼ 20s 付近に合わせて示している。

2 枚の図から明らかなように、空気量が増せば浮上に要する時間は短くなり、沈降に要する時間は長くなる。

(2) 側壁および隣接フラップの影響実験

フラップの浮上・沈降に対する側壁や隣接フラップの影響を把握するため、周辺条件を種々変えた状態で、浮上・沈降実験を実施した。たとえば、対象のフラップと側壁や隣接フラップとの隙間の大きさを変化させて、片側が側壁の場合や両側が側壁の場合の実験、またフラップの片側もしくは両側に固定フラップを配置した実験である。その中から、両側側壁（上下流長さ600mm）および両側が固定フラップ（法線長さ600mm）の場合の浮上運動について述べる。

図-28 は、空気充填率 55%、水深 20m の場合で、両側側壁の有無の影響を示したもので、図-29 は、同様に両側の固定フラップの有無の影響を示したものである。両側側壁の場合は側壁なしに比べて、水底からの立ち上がりに時間がかかり、またその後の浮上速度も小さい。この原因は、ゲート前面（上面）板が浮上により押し

た流体が、側壁の影響により後方（下面）への回り込みを阻害され、フラップに作用する力（付加質量）が大きいため浮上速度の差となって現れているものと考えられる。また、両側に固定フラップを設置した場合には、浮上速度は多少影響を受けるものの、側壁の場合に比べるとフラップ前面の流体が後方に回り込みやすいため、あまり影響を受けないことが確認できる。

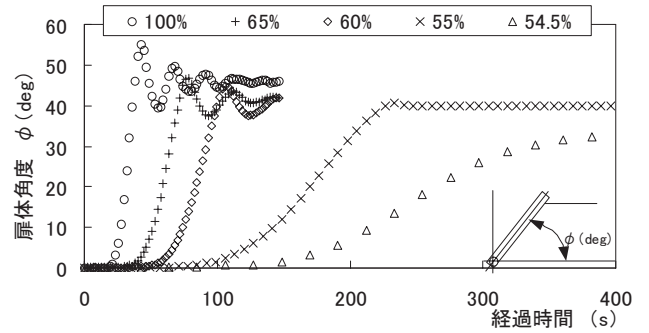


図-26 浮上運動に及ぼす空気充填率の影響（水深 20m）

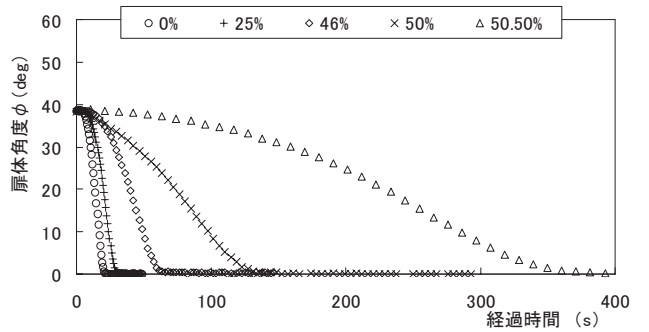


図-27 沈降運動に及ぼす空気充填率の影響（水深 20m）

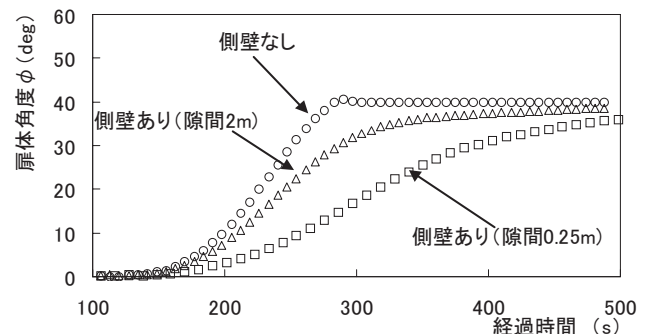


図-28 浮上運動に及ぼす側壁の影響
（空気充填率 55%、水深 20m）

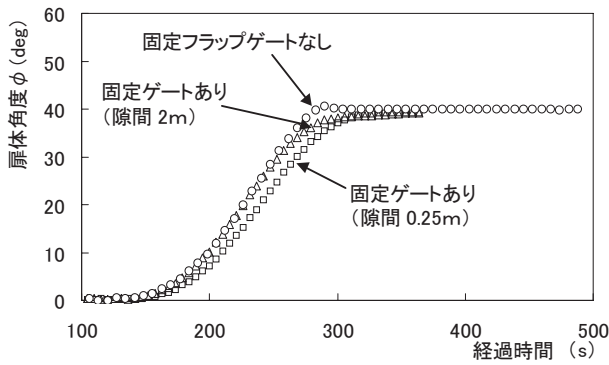


図-29 浮上運動に及ぼす固定フラップの影響
(空気充填率 55%, 水深 20m)

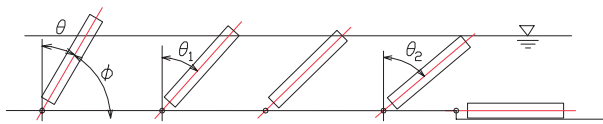


図-30 フラップの状態変化図

5.3 フラップの浮上運動計算法

(1) 運動方程式

静水中でフラップが水底から浮上するときの運動を表現する運動方程式は、次式である。

$$(I/g + m)\ddot{\theta} + N\dot{\theta} + N^{(2)}\dot{\theta}^2 = Wl_G \sin\theta - M_R(\theta) \quad (8)$$

ここに、 I : フラップのヒンジ (回転軸) まわりの重量慣性モーメント、 g : 重力加速度、 m : 付加質量慣性モーメント、 N : 線形減衰係数 (造波減衰係数他)、 $N^{(2)}$: 非線形減衰係数 (粘性減衰係数)、 W : フラップの重量、 l_G : ヒンジから重心までの距離、 $M_R(\theta)$: 復元モーメントである。

回転角 $\theta(t)$ は鉛直軸からとった角度で時計まわりを正方向とする。重量慣性モーメント I は、フラップの重量分布が一様であると仮定すれば、 $Wl_0^2/3$ となる。ここに、 l_0 はフラップの長さである。

フラップの浮上時の状態変化を模式的に示したのが図-30 である。フラップの鉛直軸からとった角度を θ 、水底面からとった角度を ϕ で表し、フラップの一端が浮上時に水面に達したときの角度を θ_2 、もう一端が空中に露出するときの角度を θ_1 とする。

一方、復元モーメントはフラップの没水状態によって変化し、式 (9) ~ (11) で与えられる。

$\theta_2 \leq \theta(t)$ のとき

$$M_R(\theta) = \rho g c l_0^2 B \sin\theta \quad (9)$$

$\theta_1 \leq \theta(t) \leq \theta_2$ のとき

$$M_R(\theta) = \rho g B \left\{ c l_0^2 \cos\theta - \frac{1}{2} c_0^2 (l_0 \sin\theta - a) \right\} \tan\theta \quad (10)$$

$$c_1 = \frac{h - l_0 \cos\theta}{\sin\theta}$$

$$c_0 = c - c_1$$

$$a = \frac{2}{3} c_0 \cos\theta \left(1 + \frac{\tan^2\theta}{2} \right)$$

$$a = a_0 + c_1 \cos\theta$$

$\theta(t) \leq \theta_1$ のとき

$$M_R(\theta) = \rho g c B \left(\frac{h^2}{\cos\theta} + ca \right) \tan\theta \quad (11)$$

$$a = \frac{2}{3} c \cos\theta \left(1 + \frac{\tan^2\theta}{2} \right)$$

ここに、 B : フラップの幅 (入射波の方向に直角方向の幅)、 $2c$: フラップの厚み、 h : ヒンジ(回転軸)中心から水面までの高さである。

フラップの浮上運動を計算するにあたり、式(8)の付加質量慣性モーメント m および減衰係数 N 、 $N^{(2)}$ を、実験結果の逆解析をもとに設定する。

(2) 復元モーメント・重力によるモーメントの計算

前項の式にて求めた復元モーメント・重力によるモーメントの計算例を図-31 に示す。本ケースは表-6 に示す空気充填率 65%、水深 20m の時のものである。図-31 の横軸の θ_2 はフラップの一端が浮上時に水面に到達したときの角度である。フラップが水面上に現れると、急激に復元モーメントが減少することがわかる。

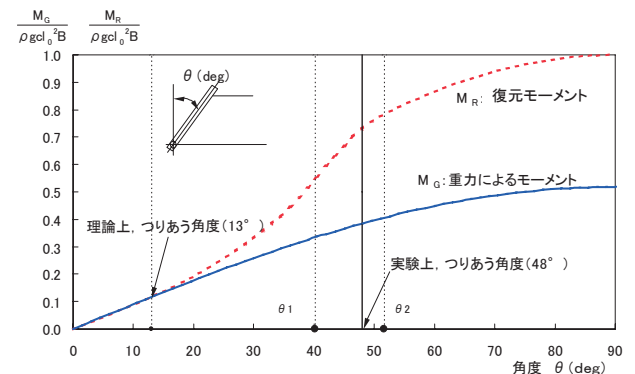


図-31 復元モーメントと重力によるモーメント
(空気充填率 65%, 水深 20m)

フラップは、重力によるモーメントと復元モーメントが等しくなるときに平衡状態となるが、図-31 に示す計算結果によれば平衡状態の角度は、 $\theta = 13^\circ$ （水底からの傾斜角では $\phi = 77^\circ$ ）である。しかし、図-26 に示す空気充填率 65% の場合の浮上運動実験結果から、平衡状態は $\phi = 42^\circ$ 付近（鉛直軸からの傾斜角では $\theta = 48^\circ$ 付近）にある。この差異は、回転軸部の摩擦力によるモーメントがフラップに作用するためと考えられる。

そこで、運動計算にあたっては、この摩擦力によるモーメントを重力によるモーメントに加え、フラップの平衡位置が実験値と計算値で一致するように補正した。摩擦力によるモーメントの補正値は、厳密には水深や空気充填率に応じて変える必要があると考えられるが、ここでは一律 0.35 とした。補正後の復元モーメントと重力によるモーメントを図-32 に示す。

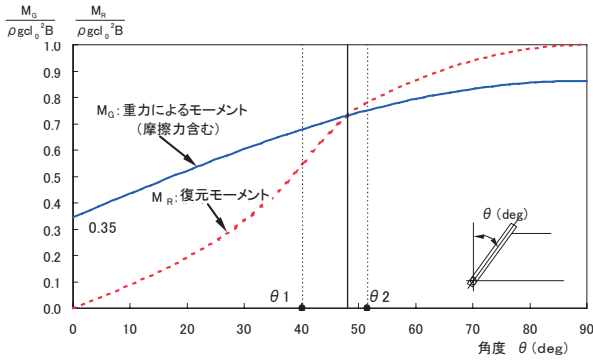


図-32 復元モーメントと重力によるモーメント
(摩擦力によるモーメントを加えて補正)

(3) 付加質量慣性モーメントおよび減衰係数の設定式(8)を具体的に数値計算するにあたって、方程式を以下のように変形する。

$$\ddot{\theta} + 2\alpha\dot{\theta} + \beta\theta\dot{\theta} = f_e(\theta) \quad (12)$$

$$2\alpha = \frac{N}{I/g+m} \quad (1/s)$$

$$\beta = \frac{N^{(2)}}{I/g+m}$$

$$f_e(\theta) = \frac{Wl_G \sin\theta - M_R(\theta)}{I/g+m} \quad (1/s^2)$$

ここに、 2α は線形減衰係数、 β は非線形減衰係数、 f_e は外力に相当する。逐次近似的に式(12)を解けば、フラップの回転角 θ の時刻歴が得られる。

1) 付加質量慣性モーメント m

フラップ浮上運動実験結果の中には、浮上終了直前に

フラップが周期的に動揺する場合がみられる。これは復元力の変化にともなうフラップの自由動揺である。このような自由動揺時の周期はフラップの固有周期に相当し、固有周期は付加質量慣性モーメントの影響を受ける。そこで、計算と実験とでこの周期が一致するように付加質量慣性モーメント m を設定することとした。比較対象の実験結果として選んだのは、空気充填率 65%、水深 20m の場合の結果である。

このときの浮上運動の計算結果を実験結果と対比し、最終的に得られた付加質量慣性モーメント（無次元値） \bar{m} は以下のとおりである。

$$\bar{m} = \frac{m}{\rho V h^2} = 9.1 \quad (13)$$

ここに、 ∇ はフラップ直立時の排水容積で $\nabla = 2chB$ となる。

フラップが水底から離れるときの状態は、浮上中よりもはるかに動きがゆるやかである。このような現象は、水底から離れるときに、フラップ前面の流体が後方へまわり込むのに、大きな力が必要であるために生じると考え、この状態での付加質量慣性モーメントは非常に大きい値であると仮定した。そして、時間の経過とともにその値は減少し、式(13)の値に近づくとしている。付加質量慣性モーメントの変化を式(14)で表す。

$$m(t) = m(1 + \delta e^{-\gamma t}) \quad (14)$$

ここに、 δ は水底から離れる状態での付加質量慣性モーメントが浮上中に比べどの程度大きいかを表し、 γ は付加質量慣性モーメントの時間変化を表す時定数に相当する。空気充填率 65%、水深 20m の場合について、浮上運動の実験結果と計算結果とをくり返し比較して以下の係数を得た。

$$\delta = 100, \quad \gamma = 0.12 \quad (1/s)$$

2) 減衰係数 N

減衰係数には線形減衰係数 2α と非線形減衰係数 β があるが、前者は水面に波が生じるための造波減衰係数やフラップの回転軸の摩擦に起因する減衰係数であり、後者は渦の発生による粘性減衰係数である。今回のフラップ浮上運動では速度がかなり小さいため、速度の自乗に比例する非線形減衰力の影響はほとんど無視できる。したがって、減衰力としては線形減衰力だけを考慮する。

フラップの浮上時には水面にはほとんど波が発生しないことを実験で確認しており、造波減衰力はほとんどないとみなせる。したがって、回転軸の摩擦に起因する減衰力が、線形減衰力の大半を占めていると考えられる。

減衰力がフラップの浮上運動に影響を与えるのは、浮

上開始から終了までの経過時間に対してと、浮上終了直前の周期運動の振幅に対してである。空気充填率 65%、水深 20m の場合を対象に、フラップの浮上運動の計算値が実験値に一致するように、線形減衰係数 2α を調整し、以下の値を得た。

$$2\alpha = \frac{N}{I/g+m} = 0.09 \quad (1/s) \quad (15)$$

この減衰係数 2α は次元のある係数であるから、模型と実機で異なる。上記の値は実機対応の値である。

3) 浮上運動の計算

以上の方法で係数を設定して、フラップの浮上運動を計算したときの計算値と実験値との対比を図-33 に示す。この図から、運動方程式の係数を適切に設定すれば、式(8)によってフラップの浮上運動を十分表現できることが分かる。

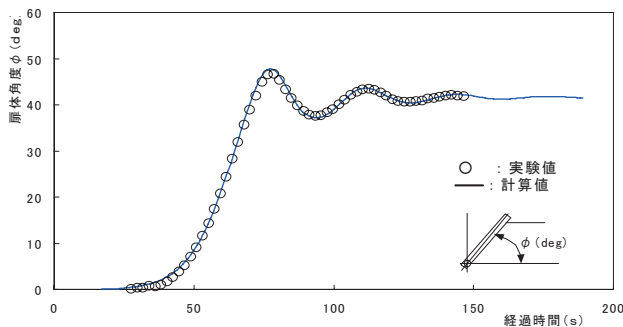


図-33 フラップの浮上運動
(空気充填率 65%、水深 20m)

5.4 模型実験結果との比較

前節では、空気充填率 65%、水深 20m の実験結果と対比して運動方程式の係数を設定した。ここでは、同じ係数を用いて、水深を変化させた場合および空気充填率を変化させた場合の浮上運動を計算し、実験値と比較する。計算に用いた係数の値を表-7 に示す。

表-7 計算に用いた係数一覧

空気充填率	65%	55%
\bar{m}	9.1	
2α	0.09	
δ	100	
γ	0.12	0.025

(1) 水深を変化させた場合

まず空気充填率が同じで水深を変化させた場合の浮上運動を計算し、実験値と比較したのが図-34、35 であ

る。計算対象は水深 25m と水深 15m の 2 ケースである。このときの摩擦力に対する補正値は、それぞれ 0.21 と 0.41 である。

図に示すように、計算値は実験値をよく再現しており、このように空気充填率が等しい場合、あるひとつの実験状態から設定した係数は、ほかの実験状態に対しても有効であるといえる。

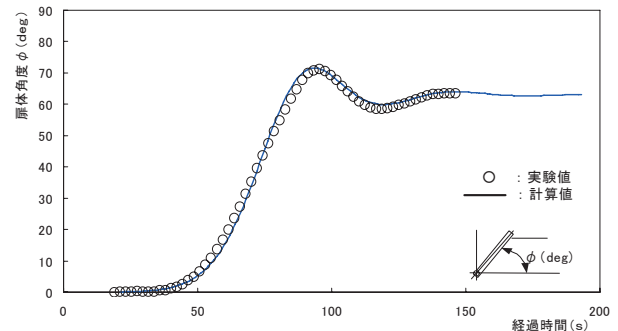


図-34 フラップの浮上運動
(空気充填率 65%、水深 25m)

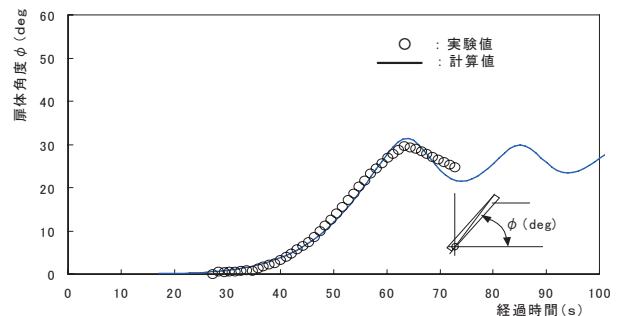


図-35 フラップの浮上運動
(空気充填率 65%、水深 15m)

(2) 空気充填率を変化させた場合

つぎに、空気充填率が小さい場合、すなわちフラップの重力によるモーメントが比較的大きい場合について検討する。検討対象は、空気充填率が 55% で、水深が 20m、25m、15m の 3 種類の実験状態である。

最初に、空気充填率 55%、水深 20m の場合を対象に、前節と同じ運動方程式の係数を用いて浮上運動を計算したが、計算値は実験値の傾向を良く再現できなかった。これは、前出の図-26 から明らかなように、空気充填率が 65% と 55% とでは、浮上運動の様子が大幅に異なるためである。そこで、空気充填率 55% の場合に対しては、表-7 に示すように係数 γ の値を調整する必要がある。

図-36~38 は、水深 15m、20m、25m の場合のフラップ浮上運動の計算値と実験値との比較である。このときの摩擦力に対する補正値は、それぞれ 0.35、0.27、0.41

である。

図-36、図-37 に示すように、浮上運動の実験値と計算値とはよく一致する。しかし、水深の大きい図-38 の場合は計算値と実験値はあまりよく一致しなかった。実験値は、浮上終了前、平衡位置に達するまでゆるやかに変化する傾向を示しているが、このような傾向は今回の運動方程式によっては再現できていない。

以上の結果から、空気充填率を変化させた場合でも、同一の運動方程式の係数を用いて、フラップの浮上運動はある程度推定できることがわかる。ただし、計算で用いる付加質量に対する時定数 γ を調整する必要がある。

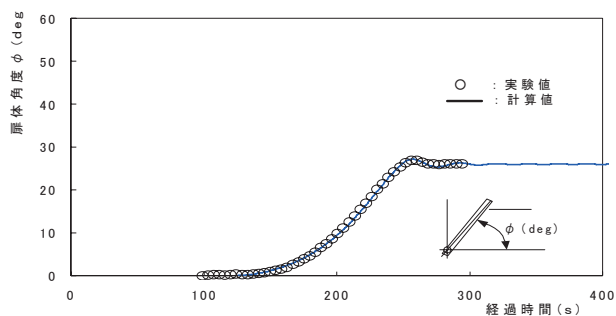


図-36 フラップの浮上運動
(空気充填率 55%, 水深 15m)

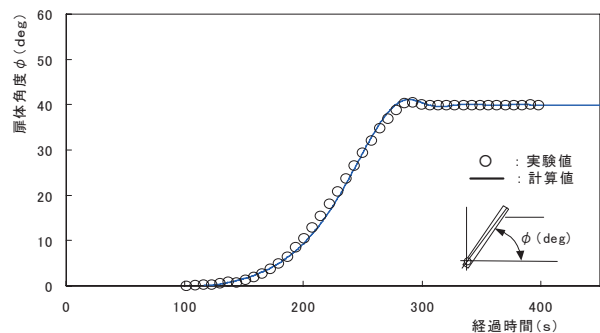


図-37 フラップの浮上運動
(空気充填率 55%, 水深 20m)

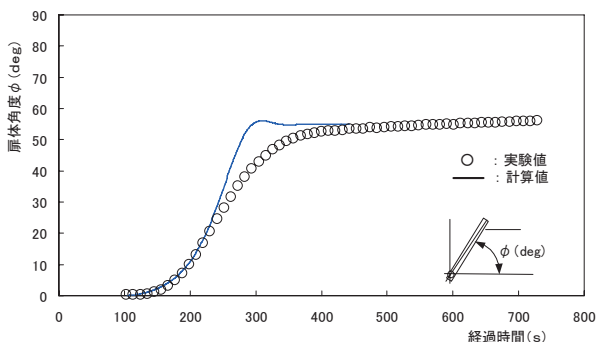


図-38 フラップの浮上運動
(空気充填率 55%, 水深 25m)

6. まとめ

本研究では、フラップ式構造物の波浪および津波に対する水理特性、ならびに浮上・沈降時における挙動の特性について、水理模型実験による検討を行った。主要な結論を以下に示す。

- 1) フラップの起立角度が大きいほど反射率が大きく、越波流量も多い。
- 2) フラップ式構造物に作用する波浪による波力については、起立角度が 60 度以上であれば、合田式による波力と同じかやや小さい程度であるが、45 度の場合には衝撃的な波力が作用して合田式よりも大きな波力となる場合がある。
- 3) 段波津波による衝撃段波波圧は、固定式で起立角度が 90 度の場合には池野らの提案した波圧分布に比較的近いが、固定式で起立角度が 75 度の場合や動揺式の場合には、池野らの提案式よりも大きな波圧が作用する。
- 4) 段波津波による重複波圧については、起立角度や支持方法による差はあまりなく、平均的には谷本らの式とよく一致する。
- 5) フラップの浮上・沈降運動に対して、空気充填率の影響が大きく、充填率が大きければ浮上は早く、沈降は遅くなる。また、フラップの周辺条件として両側に側壁がある場合には、浮上・沈降時間は長くなる。一方、両側に固定フラップがある場合には、浮上速度は多少影響を受けるものの、側壁の場合に比べると影響は小さい。
- 6) フラップの浮上運動の計算法を誘導した。付加質量慣性モーメントを運動の時間関数として設定することにより、種々の条件下でのフラップの浮上運動をほぼ再現できた。

今後は、津波・高潮対策としてフラップ式構造物の実用化を目指し、具体的な現地を対象とした試設計等を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、港湾空港技術研究所と大型防潮フラップゲート研究グループ（構成：早稲田大学、石川島播磨重工業株式会社、川崎重工業株式会社、新日本製鐵株式会社、JFE エンジニアリング株式会社、日立造船株式会社、三井造船株式会社、および三菱重工業株式会社）の共同研究として行ったものである。本研究の実施に当たっては、石川島播磨重工業の西村敬一氏、山下誠氏、市村英紀氏、新日鉄エンジニアリングの木村秀雄氏、山本邦弘氏、三

菱重工業の椎名正樹氏，土屋昌義氏，三井造船の高木芳朗氏，JFE エンジニアリングの岡田晃佳氏の協力を得ている。また，段波津波に関する水理模型実験は，東京海洋大学の施設で行っており，実験に際しては，同大学の岡安章夫教授よりご指導をいただいている。さらに，当所津波防災研究センターの富田孝史主席津波研究官には，貴重なご助言をいただいている。ここに記して，感謝の意を表する次第である。

(原稿受付：2007年3月9日)

参考文献

- 有川太郎・池辺将光・山田文則・下迫健一郎・今村文彦(2005)：護岸・陸上構造物に対する津波力の大規模実験，海岸工学論文集，第52巻，pp.746-750.
- 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研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.846-850.
- 沿岸開発技術研究センター(2001)：数値波動水路の研究・開発，沿岸開発技術研究センターライブラリー No.12，296p.
- 清宮理・下迫健一郎・仲保京一・大久保寛・長谷川巖(2005)：高潮・地震津波用フラップ式水門の越波及び波力特性について，海洋開発論文集，Vol.21，pp.103～108.
- 清宮 理・下迫健一郎・仲保京一・高木芳朗・木村秀雄(2006a)：フラップ式水門に作用する段波津波の特性，海洋開発論文集，Vol.22，pp.571～576.
- 清宮 理・下迫健一郎・由井孝昌・山下誠也・椎名正樹・土屋昌義(2006b)：フラップ式水門の浮上・沈降挙動の解析，海洋開発論文集，Vol.22，pp.691～696.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技術研資料，No.248，24p.
- 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の検討，第31回海岸工学講演会論文集，pp.257-261.
- 富田孝史・下迫健一郎・山田昌郎・横田 弘(2003)：大規模可動式防潮堤に関する基礎的研究—フラップゲートの水理特性と試設計—，港湾空港技術研究所資料，No.1060，31p.
- G.Vittori(1998)：Oscillating tidal barriers and random waves, Journal of Hydraulic Eng., pp.406-412.
- 福井芳朗・白石英彦・中村充・佐々木泰雄(1962)：津波の研究（Ⅱ）—一段波津波の堤防におよぼす影響—，第9回海岸工学講演会講演集，pp.44-49.

港湾空港技術研究所資料 No. 1155

2007. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 新高速印刷株式会社

Copyright © (2007) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。