

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1201

September 2009

海上の進入灯点検棧橋に対する揚圧力算定式の提案

齋藤 英治

平山 克也

春尾 和人

平石 哲也

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. まえがき	4
2. 実験概要	4
2.1 実験施設および実験模型	5
2.2 実験条件および実験ケース	5
2.3 揚圧力の測定方法	6
3. 最大揚圧力および準静的揚圧力	8
3.1 測定結果	8
3.2 揚圧力とクリアランスの関係	11
3.3 最大揚圧力の発生過程とその変動性	13
3.4 揚圧力算定式の検討	15
3.5 揚圧力算定式の適用例	17
4. 揚圧力の発生頻度	17
4.1 不規則波浪中の揚圧力発生率	17
4.2 不規則波浪中の揚圧力の発生頻度	18
5. まとめ	21
6. おわりに	21
参考文献	22
記号表	22

Model Experiment for Uplift Wave Pressure Acting on Inspection Piled Jetty of Approach Light in Offshore Airport

Eiji SAITOH*

Katsuya HIRAYAMA**

Kazuto HARUO*

Tetsuya Hiraishi***

Synopsis

Many offshore airports are constructed by reclamation and some expanded runways of near shore airports are extended from reclaimed land to the sea in Japan. On such airports, an approach light system is installed in the sea and a long jetty supported in vertical piles is required for inspection of many lights of the system. The estimation of wave uplift force become important because of low clearance of jetty face above sea level. The uplift pressure by sea wave, however, has not been enough understood yet except of standing wave in front of a piled wharf. In this study, model experiment is conducted to estimate the uplift wave pressure acting on a long thin piled jetty with the condition of waves.

According to the results of these model experiments, it is confirmed that the maximum uplift pressure is appeared at $X/L=0.5$, that is the nearest wave standing point as X is the distance from the seawall covered with armor blocks and L is the incident wave length. The traditional design formula; $p_k=4\rho gH$ proposed by Ito and Takeda (1967) can be still applied in $X/L \leq 0.5$. On the other hand, it is cleared that the design uplift pressure under the offshore part of piled jetty can be reduced according to the relative clearance for the acting wave height in each position, and new design formulae are newly proposed in $X/L > 0.5$. Moreover, the probability density of the appearance of uplift pressure is estimated for random waves.

Key Words: Uplift pressure, piled jetty, offshore airport, model experiment, standing wave, random wave

* Researcher, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Department

** Head, Wave Group, Coastal and Ocean Eng. Research Division, Marine Environment and Eng. Department

*** Director, Marine Environment and Eng. Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:saitoh-e84nb@pari.go.jp

海上の進入灯点検棧橋に対する揚圧力算定式の提案

齋藤 英治*・平山 克也**・春尾 和人*・平石 哲也***

要 旨

我が国は周囲を海に囲まれた島国であるため、海上埋め立てや棧橋工法による海上空港が全国で整備されている。また、既存の空港においても滑走路延長部は海上へ拡張されることが多く、拡張部の構造は海上空港と同様になる。一方、航空機の安全な離発着には進入灯が必須であり、これらの海上空港では、進入灯は海中に設置された孤立塔列となっている。これらの進入灯の点検を行うためには棧橋を設ける必要があるが、荒天時に点検用棧橋に作用する波力や揚圧力については計算式が提案されていない。そこで、本研究では、このような棧橋あるいは幅の狭い構造物にかかる揚圧力推定式を水理模型実験を行うことにより検討した。

実験の結果、進入灯棧橋のように、消波工で被覆された護岸から沖側に張り出した棧橋の揚圧力は、重複波の腹位置となる $X/L \approx 0.5$ （ここで、 X は護岸からの距離、 L は入射波の波長）において、最大揚圧力が発生し、護岸との取付部を含む $X/L \leq 0.5$ の範囲では、従来どおり、棧橋式護岸に対して提案された伊藤・竹田（1967）の式 $p_k = 4 \rho_0 g H$ を適用することが妥当であることが確認された。一方、これより沖側（ $X/L > 0.5$ ）では、重複波の腹位置であっても最大揚圧力はそれほど顕著には卓越せず、対象位置での（重複）波高に対する相対クリアランス S/H に応じて、設計揚圧力を低減できることが確認されたため、伊藤・竹田（1967）による振動限界重量の算定式の係数を修正することにより、新たな設計式 2 式を提案した。さらに、不規則波浪作用中における揚圧力分布を明らかにし、繰り返し荷重としては $P/\rho g H = 0.6$ 以下の荷重が全体の 80% 以上を占めることを確認した。なお、本実験で使用した棧橋模型は床版底面に桁部を有する構造であったが、得られた実験結果において空気圧縮による影響は見られなかった。

キーワード：揚圧力，進入灯点検棧橋，海上空港，水理模型実験，重複波，不規則波

* 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チーム研究官

** 海洋・水工部海洋研究領域波浪研究チームリーダー

*** 海洋・水工部長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:saitoh-e84nb@pari.go.jp

1. まえがき

日本は周囲を海に囲まれているため、海上埋め立てや栈橋工法による海上空港が全国で整備されている。また、既存の空港においても、滑走路延長部は海上へ拡張されることが多く、拡張部の構造は海上空港と同じになることがほとんどである。写真-1および写真-2に代表例を示す。

一方、航空機の安全な離発着のためには進入灯が必須であり(写真-3)、海上空港の場合は、そのほとんどで進入灯は海中に設置された孤立塔となる。これらの進入灯点検のためには、栈橋を設ける必要があるが、荒天時に点検用栈橋に作用する波力や波の揚圧力については、計算式が提案されていないのが現状である。近年新たに建設された空港では、進入灯の設置高さを高く取り、揚圧力を設計対象外としている例も見られるが、古くから設置されている海上空港や、滑走路を海側に延伸した空港等では、設計潮位に対するクリアランスが十分取れない



写真-1 海上埋立空港 (例：関西国際空港)



写真-2 滑走路延長空港 (例：新潟空港)

ため、揚圧力を対象としている。これらの空港に設置された進入灯点検栈橋では、これまでは、港湾で用いられる栈橋式岸壁に作用する揚圧力式が用いられてきたが、これは入・反射波が重複する海域での設計式であり、進入灯点検栈橋の沖側のように、護岸からの反射波の影響が小さくなると考えられる海域での適用は、過大な波力となっていると想定され、経済的にも適切で安全性の高い揚圧力設計式が必要である。

海上に突き出た構造物に作用する揚圧力実験では、下迫ら(2008)の研究がある。これは複雑な底面形状に作用する揚圧力の特性を把握することにより、最大揚圧力、準静的揚圧力を算定する手法を提案したものであるが、この適用にあたっては、栈橋周辺の波浪場を別途算定する必要がある。そこで、本研究では、平面水理模型実験により進入灯点検栈橋にかかる揚圧力を測定して、それらの岸沖方向分布を既存の揚圧力算定式と比較し、コスト縮減と安全性確保の観点から、進入灯点検栈橋のような幅狭で岸沖方向に長く突き出た構造物に適用する揚圧力算定式の改良を試みた。さらに、揚圧力の空間分布や不規則波中の発生頻度の検討結果等は、栈橋の維持管理計画にかかる基礎資料としても活用できると考えられる。



写真-3 進入灯点検栈橋 (例：那覇空港)

2. 実験概要

本実験では、進入灯点検栈橋モデルを対象に栈橋の桁および床版に作用する揚圧力を測定した。測定結果より揚圧力の時間変化や揚圧力の空間分布を明らかにするとともに、最大揚圧力とクリアランスの関係の整理等を行い、これらの結果から、新たな揚圧力算定式の検討を行った。また、揚圧力の発生分布から揚圧力の発生率と頻度分布の検討を行った。実験の概要と実験ケース、揚圧力の測定方法等は以下の通りである。

2.1 実験施設および実験模型

実験には、港湾空港技術研究所所有の多方向不規則波造波水槽（デュアルフェースサーペント水槽）を使用した。（図-2.1）この水槽は、幅48m、長さ25m、深さ2mの平面水槽で、側壁に沿って幅60cmのピストン型造波機100台が設置された2面式の造波水槽である。この水槽では、斜め方向へ進む規則波、斜め方向へ進む一方不規則波および多方向不規則波を造波することができる（Hiraishi et.al,1998）。

実験対象とする進入灯点検橋橋梁模型「以下、“栈橋模型”という」のうち、栈橋部は、新潟空港進入灯点検橋を参考として鋼材で製作した。延長は模型量7m（現地量140m、1/20縮尺）とし、栈橋床版の中央には、揚圧力測定のための波圧計が取り付け可能となるよう製作した。実験模型の全体図を図-2.2に、波圧計取り付け位置の平面図および断面図をそれぞれ、図-2.3、図-2.4に示す。

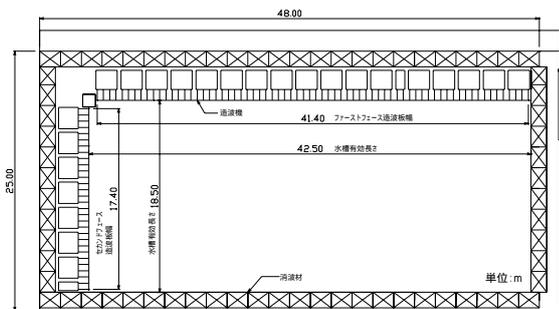


図-2.1 多方向不規則波造波水槽

2.2 実験条件

本実験では、海上に設置された空港島の進入灯点検橋を対象としている。関西国際空港護岸を実験の対象とした南ら（2007）の越波量低減法に関する模型実験では、設計沖波諸元は、 $H_0=3.3\text{m}$ 、 $T=7.1\text{s}$ であり、その波形勾配は0.042であった。合田（2008）により示された風波・うねりの波高と周期の関係を表す図-2.5を見ると、関西国際空港の沖波諸元は、幅広の曲線付近に位置しており、発達した典型的な風波であることがわかる。そこで、実験波として典型的な風波を想定し、有義波の波形勾配を0.04に設定した。また、周期は7.4～7.6s程度とした。

このとき、実験波の有義波高 $H_{1/3}$ は3.3m（模型量で16.5cm）となる。また、最高波を $1.8H_{1/3}$ として考慮すると、最大で5.94m（模型量で29.7cm）の波高が造波可能な水深条件を設定する必要がある。そこで、対象が海上空港であることを考慮し、ある程度の水深を確保しながら上記の波浪が造波可能となるように実験水深の上限値を16m（模型量で80cm）に設定した。また、栈橋に作用する揚圧力は実験波高と静水面上から栈橋床板までのクリアランスが重要なパラメータとなるため、実験水位を3種類に変更し、クリアランスの違いによる揚圧力の違いが評価できるように水深条件を設定した。

実験波は多方向不規則波と規則波の2種類とした。不規則波のスペクトルは修正ブレットシュナイダー光易型とし、方向集中度パラメータ S_{max} は波形勾配、水深波長比等を勘案して $S_{\text{max}}=25$ に設定した。不規則波の波群は2種類とした。規則波の実験波高は最高波 H_{max} を想定し、 $1.8H_{1/3}$

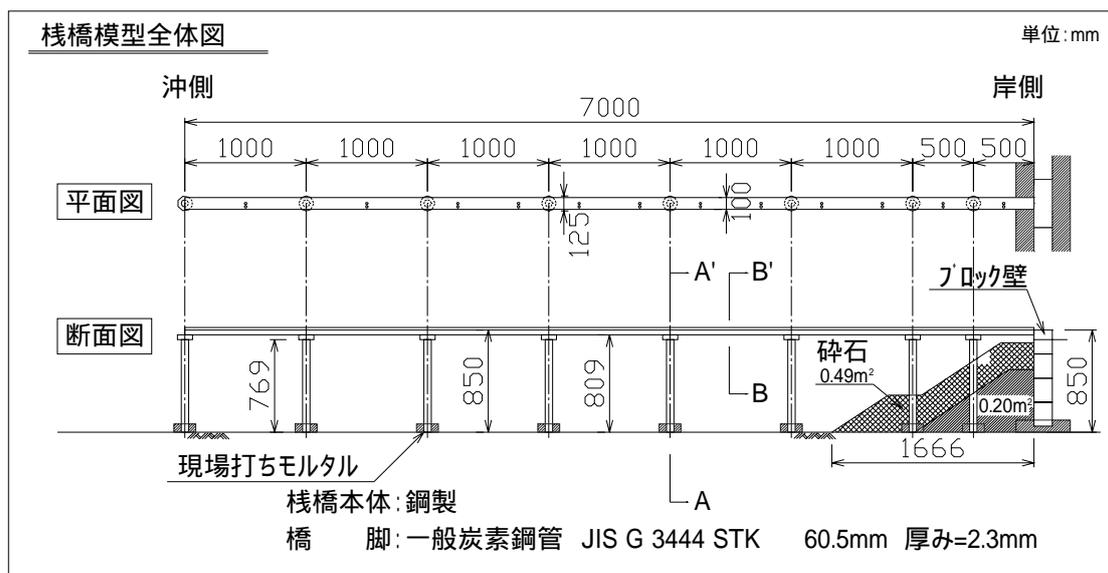


図-2.2 進入灯点検橋模型全体図

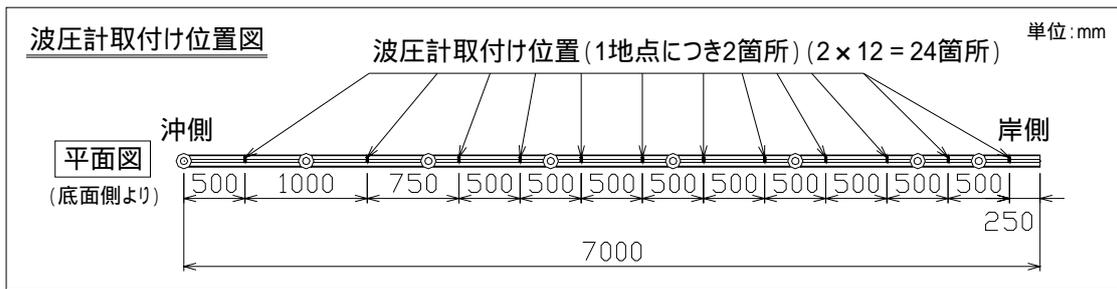


図-2.3 波圧計取り付け位置平面図

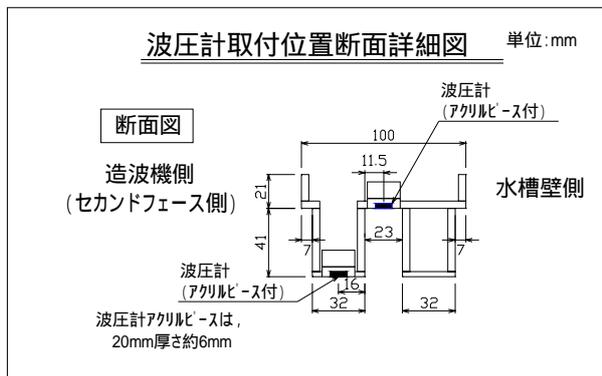


図-2.4 波圧計取り付け位置断面図

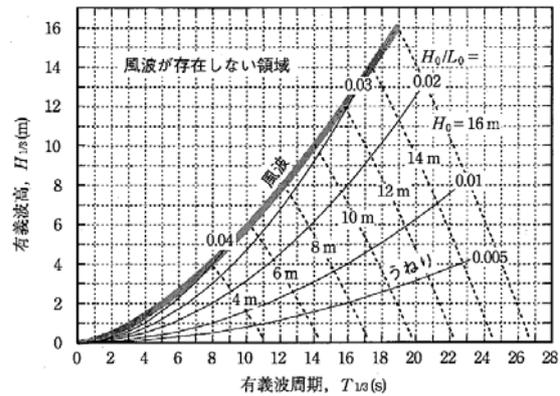


図-2.5 風波・うねりの波高と周期の関係
(合田, 2008 より転載)

に設定した。なお、最高波の周期は、有義波周期と同じとした。実験波向は多方向不規則波、規則波ともに3波向(0度, 22.5度, 45度)とした。不規則波は約250波の計測、規則波は有効波を解析対象とした。ここで「有効波」とは、造波機が造波を開始した後に、模型からの反射波等により作用波が乱れ始める前の安定した波を指すものと

定義する。本実験では8波~12波となる。

以上の結果を踏まえ、実験ケースを表-2.1のとおり設定した。

表-2.1 実験ケース表

波種類	現地量							
	床板高さ (m)	クリアンス (m)	水深 h (m)	浅水 係数 Ks	実験水槽内発生目標諸元			
					波高 H _{1/3} (m)	周期 T _{1/3} (s)	波長 L (m)	波形勾配 H _{1/3} /L
多方向 不規則波	17.0	1.0	16.0	0.92	3.0	7.4	74.6	0.040
		2.0	15.0	0.92	3.0	7.5	74.7	0.040
		3.0	14.0	0.92	3.0	7.6	74.5	0.040
規則波	17.0	1.0	16.0		5.4	7.4	74.6	0.072
		2.0	15.0		5.4	7.5	74.7	0.072
		3.0	14.0		5.4	7.6	74.5	0.072

- 注1) 多方向不規則波は2波群で実施する。
 注2) 規則波は繰り返し2回の計測を実施する。
 注3) 多方向不規則波は、各実験水深で波形勾配が0.04となるよう周期を設定している。
 注4) 規則波の波高はH=1.8H_{1/3}で設定している。

2.3 揚圧力の測定方法

(1) 規則波による揚圧力

規則波による揚圧力実験では、有効波を対象に栈橋の床板や桁材に作用する揚圧力を計測した。有効波をすべて捉えるため、造波開始と同時に水位変動データの計測を開始した。表-2.2は図-2.6に示す3種類の波向ごとに造波する造波板から反射面(護岸法線位置)までの距離に応じて、規則波実験における有効波の波数を検討した結果である。表を見ると、最も有効波の波数が少ないのは、反射面までの距離が短い入射角0度するときであり、有効波の波数は8波と推定される。ただし、この有効波のうち、最初の数波は造波機の起動処理の影響で波高が小さくなっている。規則波実験では、模型からの反射波が造波板に到達した後も造波を継続すると、造波板による発生波で波が歪められてしまうため、反射波が造波板に到達する前に造波機を停止させた。一方、造波機を停止させても、模型からの反射波は停止した造波板で再反射して模

型に作用するので、この間のデータ収集は継続した。これらを踏まえ、データ収集時間は、再反射波到達時間の最大値とほぼ同じ30秒とした。

また、規則波による揚圧力の計測では、揚圧力の衝撃成分が計測可能となるように1000Hzの高速サンプリングによるデータ計測を実施した。これにより規則波による揚圧力実験でのデータ収集条件は、表-2.3のとおりとした。規則波実験では、同じ波浪条件で繰り返し2回の計測を行う。規則波では水位変動と波圧の同時記録から、波高が安定した最初の5波程度を抽出して解析した。

表-2.2 規則波実験における造波時間の検討結果

現地量			模型量									
床版高さ (m)	リアブラス (m)	水深h (m)	$T_{1/3}$ (s)	波長 $L_{1/3}$ (m)	波速C (m/s)	波速C (m/s)	入射角 (°)	区間長 (m)	反射波 到達時間 (s)	再反射波 到達時間 (s)	有効波 造波数	
17	1	16	7.4	74.61	10.08	2.25	0	16.20	14.4	21.6	8	
							22.5	17.53	15.6	23.4	9	
							45	22.91	20.4	30.5	12	
							0	16.20	14.5	21.8	8	
							22.5	17.53	15.7	23.6	9	
							45	22.91	20.5	30.8	12	
	2	15	7.5	74.71	9.96	2.23	0	16.20	14.5	21.8	8	
							22.5	17.53	15.7	23.6	9	
							45	22.91	20.5	30.8	12	
							0	16.20	14.8	22.2	8	
							22.5	17.53	16.0	24.0	9	
							45	22.91	20.9	31.4	12	
3	14	7.6	74.54	9.81	2.19	0	16.20	14.5	21.8	8		
						22.5	17.53	15.6	23.4	9		
						45	22.91	20.4	30.5	12		
						0	16.20	14.5	21.8	8		
						22.5	17.53	15.7	23.6	9		
						45	22.91	20.5	30.8	12		

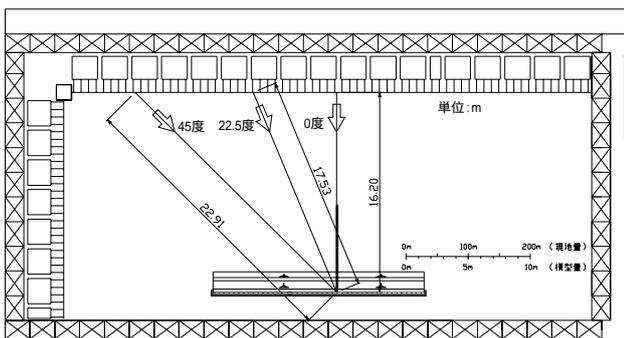


図-2.6 各入射波における造波板から反射面までの距離

(2) 多方向不規則波による揚圧力

多方向不規則波の揚圧力実験では、造波開始直後から水槽内の多重反射波が定常になるのを待ってから約250波を対象として計測した。これは、このような長時間の計測では、反射波の影響が現れるためである。造波開始から計測開始までの待ち時間は、谷本ら(1983)の考え方を適用し、造波板から反射面までの距離を波の群速度で割った時間の6倍以上とした。実験水深と入射角に応じた待ち時間の検討は表-2.4のとおりであり、待ち時間を3分とした。(X/C_g×6が最も長いのは102sの約2分であり、この条件は斜め入射波である。谷本らの計測待ち時間の考え方は断面実験に対するものである。斜め入射波の場合には、反射波が定常状態に達するまでに少し時間がかかる。そこで待ち時間を増して、3分とした。なお、各入射波における造波板から反射面までの距離は、図

-2.6のとおりである。)本実験では揚圧力の計測を行うので、データのサンプリング間隔は細かく設定することが望ましい。そこでサンプリング周波数100Hzとして、約250波の計測が可能なデータ収集を行った。多方向不規則波による揚圧力実験のデータ収集条件は、表-2.5のとおりである。

表-2.3 規則波実験におけるデータ収集条件

現地量	模型量	水位計測	揚圧力計測		
$T_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}/20$ (s)	dt(s)	データ数 N_d	計測時間 $dt*N_d$ (s)
7.4	1.65	0.083	0.001	35000	35
7.5	1.68	0.084			
7.6	1.70	0.085			

注) 計測時間、計測データ数は、造波開始前5秒間の初期水位計測分のデータを含む

表-2.4 計測待ち時間の検討

現地量	模型量	水位計測	揚圧力計測			
$T_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}/20$ (s)	計測波数	dt(s)	データ数 N_d	計測時間 $dt*N_d$ (s)
7.4	1.65	0.083	273	0.01	40960	409.6
7.5	1.68	0.084	268			
7.6	1.70	0.085	264			

表-2.5 多方向不規則波の揚圧力実験データ収集条件

現地量	模型量	水位計測	揚圧力計測			
$T_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{mean}/20$ (s)	計測波数	dt(s)	データ数 N_d	計測時間 $dt*N_d$ (s)
7.4	1.65	1.50	273	0.01	40960	409.6
7.5	1.68	1.53	268			
7.6	1.70	1.55	264			

(3) 計測位置および波面上昇速度の解析法

実験データの計測位置を、図-2.7に示す。栈橋位置では、図-2.3に示した波圧計取り付け位置に隣接させて波高計を設置した。護岸法線付近では、碎石部(現地では消波工にあたる)があるので、碎石部(Ch.22)では、保護材を用いて波高計を石材層内に埋め込んで設置した。栈橋の揚圧力計測地点に隣接位置での水位変動の計測を行うことにより、揚圧力計測地点における波面上昇速度を把握することができる。

波面上昇速度の解析は、谷本ら(1980)にならない図-2.8に示すように揚圧力の測定データから、揚圧力がピークに達した時の時間 t_2 を読み取り、その後、波面上昇速度測定波形から t_1 , t_2 に対応する水位 η_1 , η_2 を読み取り、波面上昇速度を算出した。なお、 t_2 の時刻において η_2 が床版

底面の高さを超えている場合には、水位が床版底面の高さに達した瞬間の水位を η_2 として、その位置までの時間および水面高さをを用いて波面上昇速度を算出した。

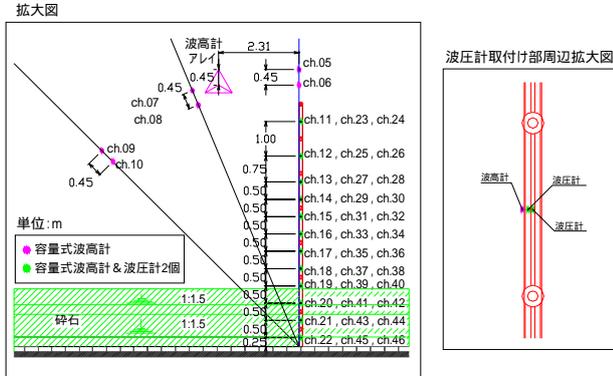


図-2.7 計測機器配置拡大図

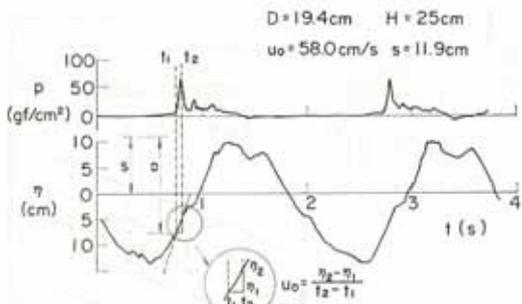


図-2.8 波高計による波面上昇速度と空気層の厚さの測定手法 (谷本ら, 1983 から転載)

3. 最大揚圧力および準静的揚圧力

栈橋に作用する揚圧力を考える場合、技術基準 (港湾の施設の技術上の基準・同解説) では、衝撃的な揚圧力のほかに衝撃力でない揚圧力も作用することに注意する必要があると記されている。そこで、規則波実験では、1波中の最大揚圧力 (ピーク値) P_{max} だけでなく、ピーク後のやや作用時間の長い腰掛け部の圧力についても検討を行った。揚圧力の腰掛け部の圧力は、下迫らにならない準静的揚圧力 P_{qs} と標記した。

3.1 測定結果

実験により得られた揚圧力は、全て ρgH で無次元化して比較検討を行った。また、作用波の波高はすべて H_{max} とした。

(1) 揚圧力の時間変化

図-3.1は、実験により得られた各計測点における揚圧

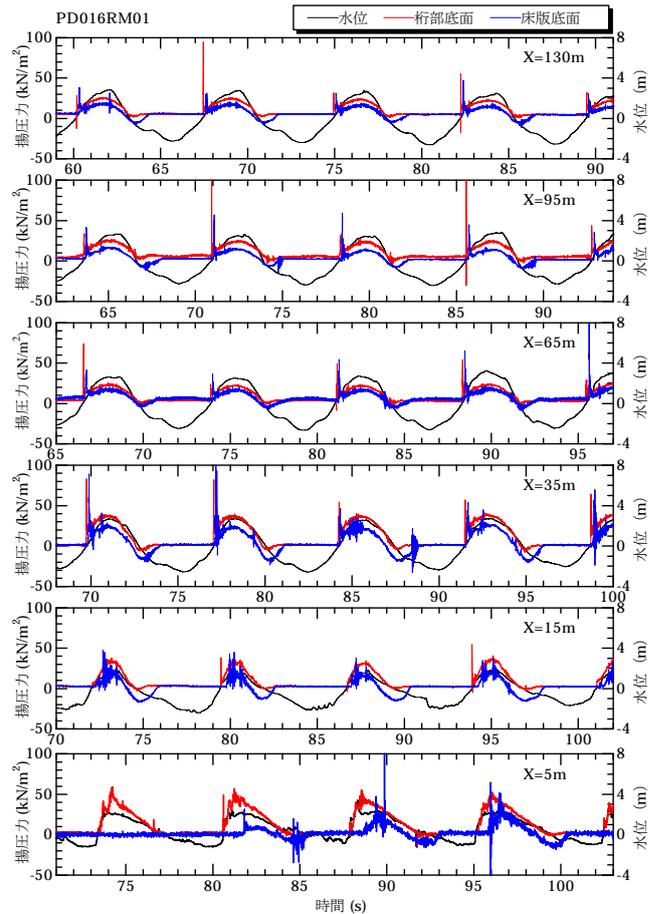


図-3.1 水位と揚圧力の同時波形の一例 (規則波 入射角 0° クリアランス 1m)

力と水位の同時波形のサンプルの一例である。図は、栈橋の沖側計測点から取付部側にかけて6地点を選んで順に並べ、上下で概ね同位相となるように時間軸を設定して示したものである (取付部 $X=0$ とし、冲向きを正とした)。また、この図では衝撃的な揚圧力のピーク値よりも、むしろ揚圧力の波形を確認しやすくするため、図の縦軸に示す揚圧力の最大値は 100kN/m^2 までの表示に限定した。

図を見ると、取付部から同じ距離にある桁部底面と床版底面の時間波形は、揚圧力の大きさに差が見られるものの、波形は類似した形状にあることがわかる。実験対象とした栈橋模型は、横断方向に見て床版の下部の両側に桁部を有する構造 (図-2.4参照) となっている。このような構造では、桁によって波面が乱され揚圧力の発生状況が複雑になること、また、桁によって空気層が閉じこめられ上昇する波面により圧縮されることによる影響等が指摘されている (例えば、下迫ら, 2008)。しかし、今回計測された揚圧力は、床版底面であっても桁部底面と同様に単発型の波形となっており、空気圧縮による顕著な振動はほとんど生じていないことがわかる。この原

因は、栈橋の断面形状が栈橋の長手方向に同じ断面であり、ある地点で波面が上昇しても、長手方向に空気の逃げ場が残されているので、空気圧縮が生じにくかったためと考えられる。したがって、本実験の計測値に対しては、そのままフルード相似則を適用して良いことが確認された。なお、 $X=5m$ の揚圧力波形にみられる微細な振動は、栈橋模型の剛性に起因する微小な振動によるものと

考えられる。

(2) 揚圧力の空間分布

モデル栈橋に作用する最大揚圧力および準静的揚圧力の空間分布について、クリアランス (S) や、入射角の違いに着目して比較したものを、図-3.2~図-3.5に示す。図の縦軸は、各地点の入射波高 (H) を用いて無次元化し

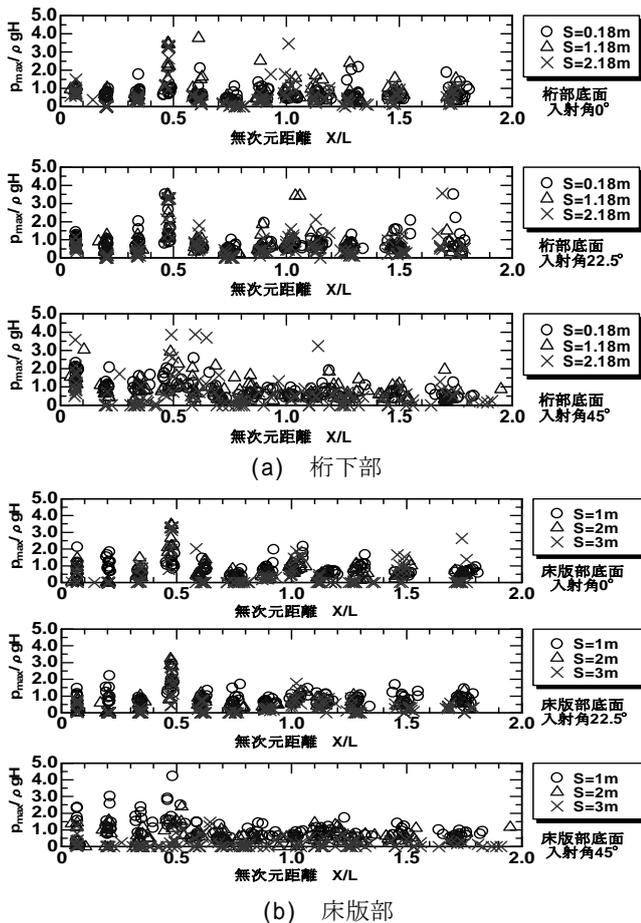


図-3.2 クリアランスの違いによる最大揚圧力の空間分布の比較

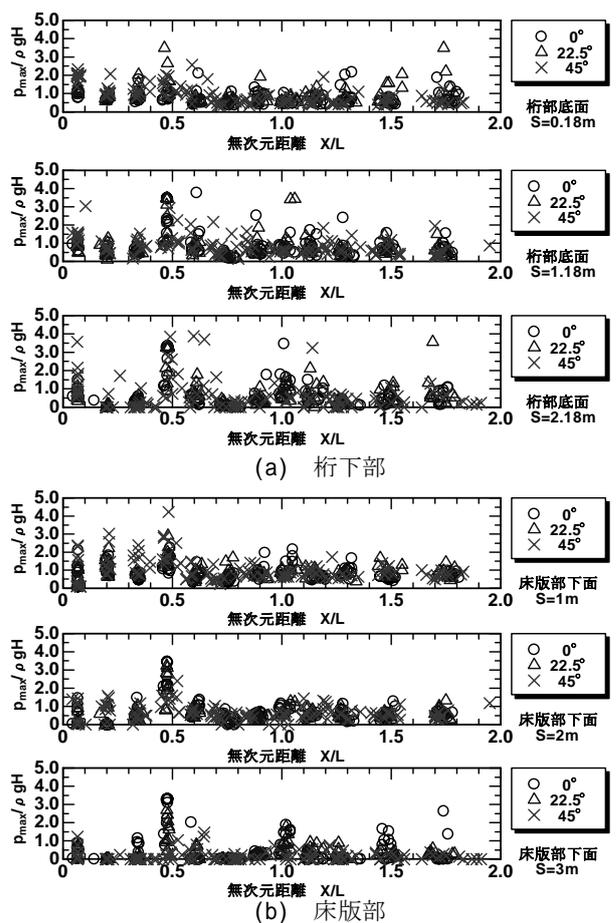


図-3.3 入射角の違いによる最大揚圧力の空間分布の比較



写真-3.1 栈橋取付部の護岸高さ

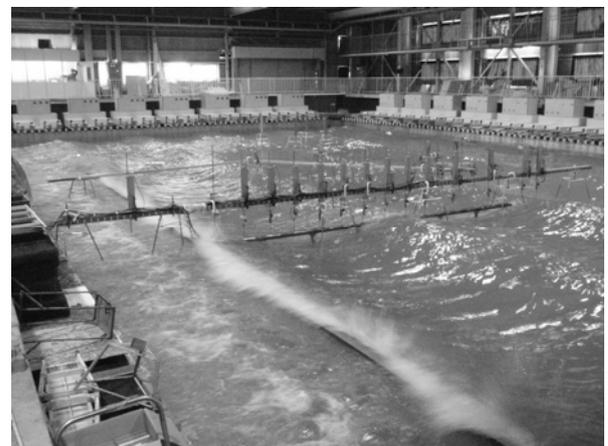


写真-3.2 護岸越波状況

た揚圧力である。ここで、入射波高は、事前実施した波高検定実験で把握した沖側位置と栈橋設置位置で計測された波高の比を利用して、揚圧力実験で計測した沖側位置の入射波高から栈橋設置位置の入射波高を推定したものである。また、横軸は、栈橋取付部から揚圧力計測位置までの距離 X を計測地点における波長で無次元化した。これらの図より以下のことがわかった。

a) 最大揚圧力の空間分布特性

図-3.2, 図-3.3より、波向きやクリアランスの違いに関わらず、ほとんどのケースにおいて、 $X/L=0.5$ 位置（半波長位置）での最大揚圧力が卓越している。この位置における揚圧力は ρgH の4倍程度である。この原因は、この位置が重複波の腹位置に相当するためであると考えられる。この他にも $X/L=0, 1.0, 1.5$ の位置で重複波の腹になり得るが、護岸前面に消波工（実験では石材）を有する今回のモデル栈橋の場合、護岸から離れ、入射角が大きくなるほど重複波による顕著な影響は生じにくく判断できる。

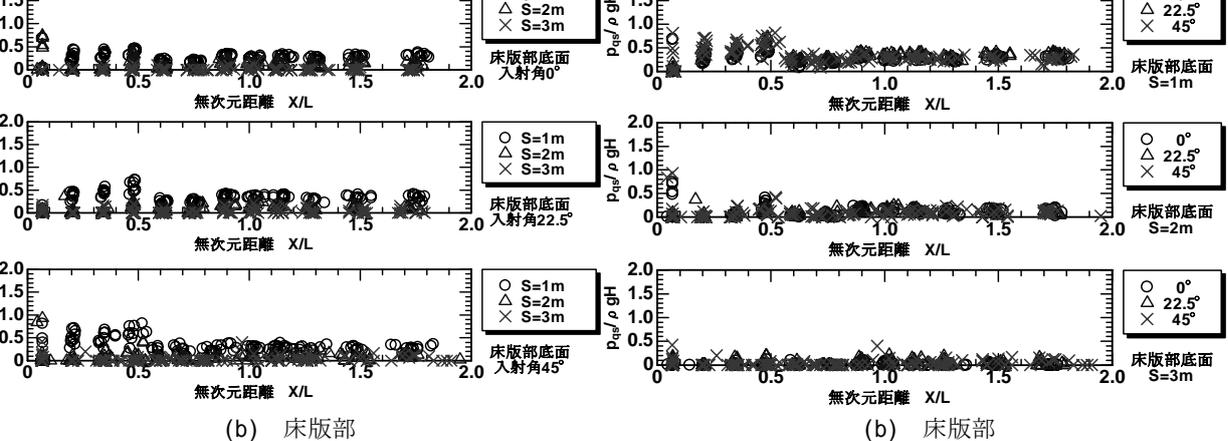
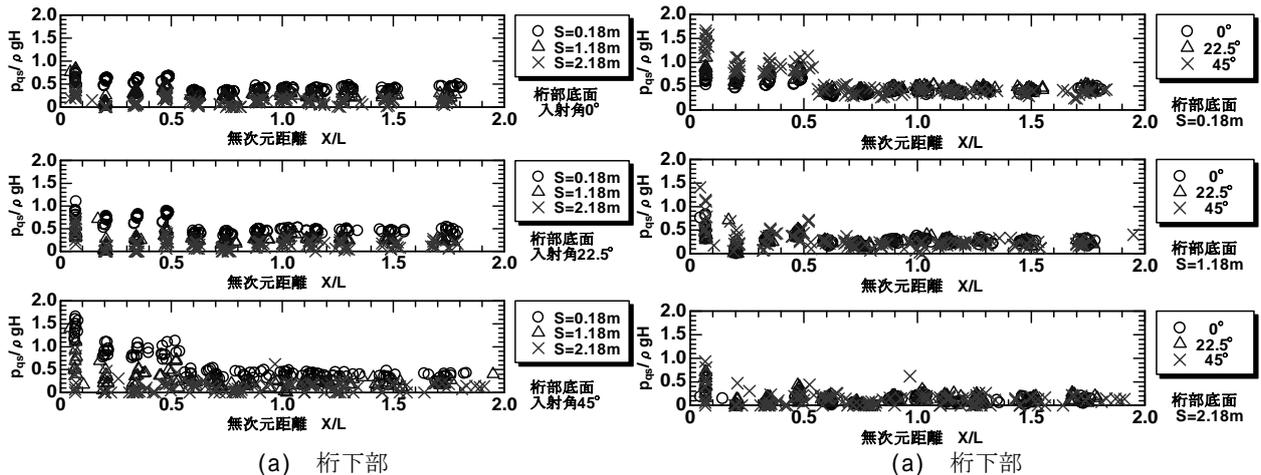


図-3.4 クリアランスの違いによる準静的揚圧力の空間分布の比較

また、図-3.3からわかるように、この $X/L=0.5$ 位置においては、(a)桁下部、(b)床版部ともにクリアランスが大きい条件の方が、揚圧力が大きくなる傾向が見られる。一方、その他の位置では、特に床版部底面における揚圧力は、波向きに関わらず、全体的に、クリアランスが小さいほど揚圧力が大きくなる傾向が見られる。なお、図-3.2(a)の上段に示すように、桁部底面で、特に入射角が小さいときクリアランスによる明確な違いはがみられなかった原因には、後述するように、越波による反射波の低減が影響しているものと考えられる。

このように、進入灯栈橋に作用する最大揚圧力の空間分布は、波向きやクリアランスに関わらず、重複波が作用する $X/L=0.5$ の位置で卓越すること、およびその他の位置ではクリアランスが小さいほど大きくなることが明らかとなった。ただし、今回の実験結果においては、図-3.2の(a)桁下部、(b)床版部ともに、 $X/L=0.5$ 位置において、入射角が小さい時ほど、クリアランスが大きい条件でも最大揚圧力が大きくなるという例外もみられる。この要因としては、次のようなことが考えられる。

すなわち、写真-3.1に示すように、今回のモデル栈橋の取付部の護岸壁の高さは栈橋の床版の高さと同じ高さで条件設定されている。したがって、例えば床版までのクリアランスが最小の1mのケースでは、護岸高さ h_c は1mとなり、入射波高に対して小さい。このため、写真-3.2に示すように、沖側からの入射波が護岸を大きく越波することにより、護岸からの反射波高が小さくなる。これに対して、床版までのクリアランスが大きくなれば、護岸高さ h_c も大きくなるので、越波が相対的に小さくなる分だけ、沖側への反射波高が大きくなると考えられる。このため、特に重複波が作用する位置の最大揚圧力に関して、それ以外の位置との両者の差異が大きくなったと考えられる。

b) 準静的揚圧力の空間分布特性

図-3.4、図-3.5より、準静的揚圧力は波向きにかかわらず、クリアランスが小さくなるほど揚圧力が大きくなる傾向が確認できる。また、全体的に見て揚圧力の大きさは一定値となっている傾向が見られるが、 $X/L=0.5$ を境に、その値や出現特性が異なっていることがわかる。

まず、図-3.5のうち、 $X/L \leq 0.5$ の範囲では、特に、クリアランス1m以下の場合、波の入射角が大きくなるに従い、

揚圧力が大きくなる傾向が見られる。これは、護岸壁面からの反射の影響に加え、消波工による波浪変形（浅水変形と砕波）の影響が大きいと考えられる。

一方、図-3.5のうち、消波工前面の一樣水深部にあたる $X/L > 0.5$ の範囲では、沖から入射する進行波は、ほとんど波浪変形することなく各地点に作用するので、準静的揚圧力が概ね一定となったと考えられる。

3.2 揚圧力とクリアランスの関係

図-3.6、図-3.7は、それぞれ最大揚圧力と準静的揚圧力について、各計測地点における揚圧力とクリアランスの関係を整理した結果である。縦軸は入射波高を用いて無次元化した揚圧力であり、横軸は、各部材（桁部、床版部）に対するクリアランスを、各計測地点における反射波を含んだ実測波高 H_s で無次元化して示した。なお、これらは部材を区別せずに、取付部からの距離ごとにまとめて示した。この理由は、これら2箇所計測された揚圧力の波形は、部材は異なるが類似した傾向にあることが確認されたためである（例えば図-3.1）。これらの図より、以下のことがわかった。

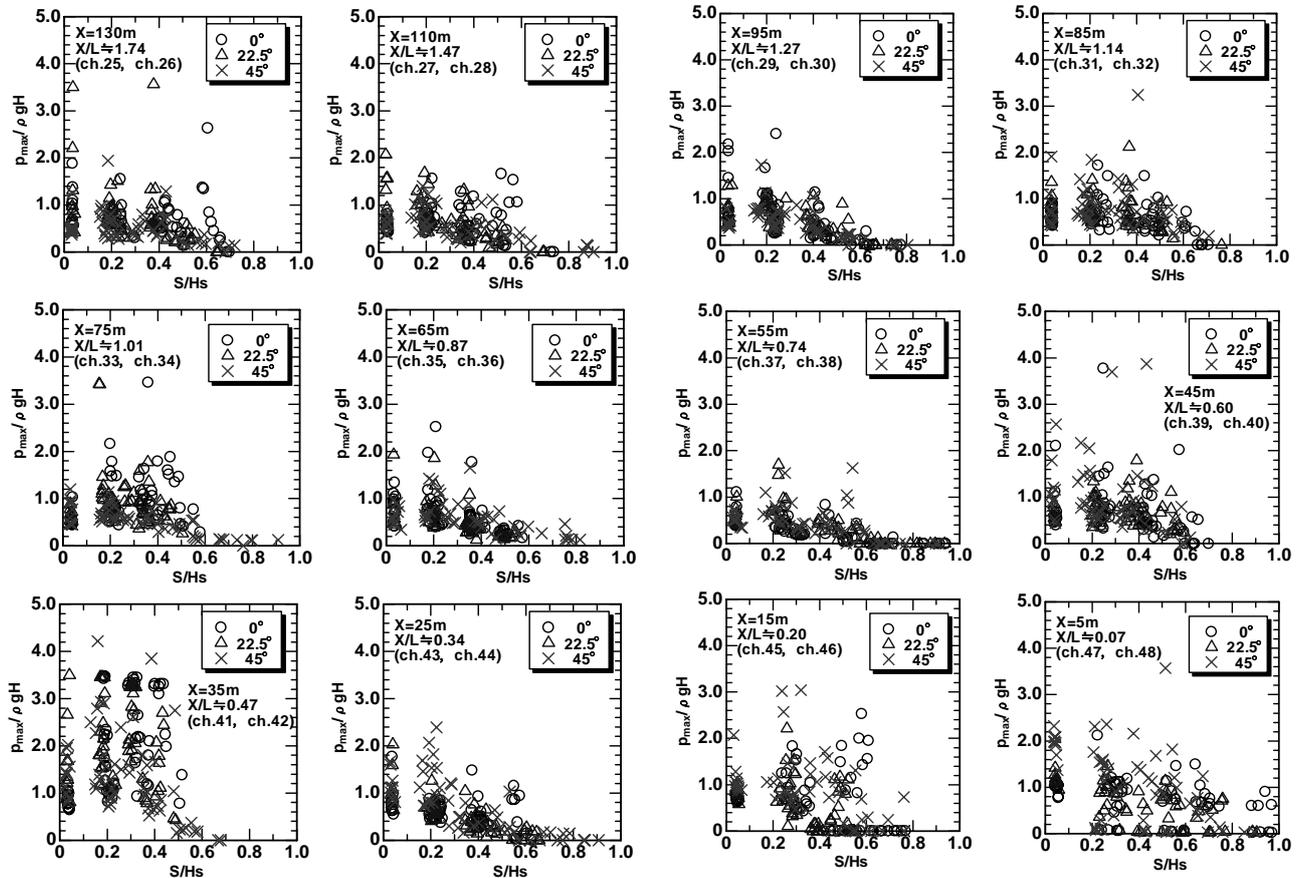


図-3.6 各計測位置における最大揚圧力とクリアランス (S/H_s) の関係

(1) 最大揚圧力

図-3.6より、いずれの計測地点においても、クリアランスに対して波高が大きくなる (S/H_s が小さくなる)ほど、揚圧力が大きくなる傾向が確認できる。

また、揚圧力の分布については、 $X/L \leq 0.5$ の範囲では、入射角による大きな違いは見られなかった。しかし、揚圧力分布は、特に $X/L \approx 0.47$ の位置で大きくばらつき、 $S/H_s \leq 0.5$ 付近で急激に揚圧力分布が立ち上がり、広く分散している。これは、この地点が重複波の腹に相当する位置に当たり、 H_s が常に大きくなっているためであると考えられる。なお、このとき得られた最大揚圧力の最大値は $4.0 \rho gH$ 程度であった。また、入射角の違いにより重複波の腹位置が大きく変化しなかった原因としては、 $X/L \approx 0.47$ が消波工の法先より少し沖側にあたり、これより岸側では、急激な屈折変形が生じて、護岸に対して、より直入射に近い角度で波が入射したためと推測される。

一方、これより沖側の $X/L > 0.5$ の範囲では、入射角が大きいとき揚圧力が低減する傾向が伺える。これは、揚圧力の空間分布においても考察したように、護岸から離れるほど、護岸近傍で形成される重複波の影響を受けにくくなったためと考えられる。また、多少のばらつきはあるものの、揚圧力は相対クリアランス (S/H_s) が大きくなるほど小さくなるという右肩下りの分布となっている

ことがわかる。なお、クリアランスがゼロのときに発生する最大揚圧力の最大値は、いずれの地点も $4.0 \rho gH$ を下回っていた。

(2) 準静的揚圧力

図-3.7より、最大揚圧力の場合 (図-3.6) と同様に、いずれの計測地点においても、相対クリアランス S/H_s が大きくなると、揚圧力が小さくなる右肩下りの分布となっている。しかし、そのばらつきは、準静的揚圧力の方が最大揚圧力に比べ、明らかに小さい傾向にある。

また、 $X/L \leq 0.5$ の範囲では、最大揚圧力の時と同様に、揚圧力のばらつきが大きくなる傾向にある。特に $X=5m$ 位置では、最もばらつきが大きく、発生する揚圧力と相対クリアランスの範囲も大きくなっている。これは、この位置が栈橋取付部直前であり、護岸壁に波が打ち上げられているためである。すなわち、護岸前面の消波工 (石材部) により波が変形することにより、沖側と比べて無次元揚圧力の分布幅やばらつきが大きくなったと考えられる。なお、このときの準静的揚圧力の最大値は、 $1.0 \sim 1.5 \rho gH$ であった。

一方、沖側の $X/L > 0.5$ の範囲では、クリアランスと揚圧力の関係は、どの計測地点も比較的類似した右肩下りの分布となっており、揚圧力の発生限界となる相対クリ

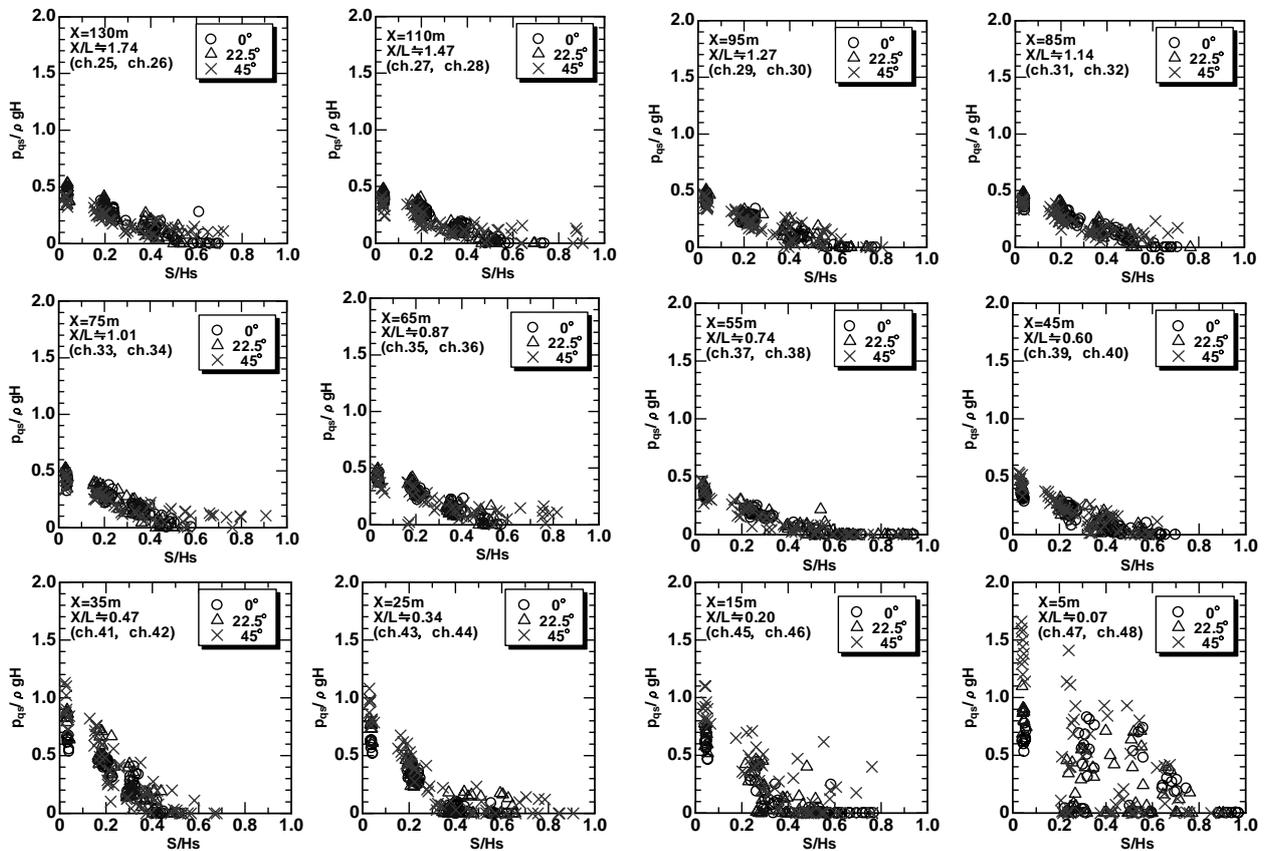


図-3.7 各計測位置における準静的揚圧力とクリアランス (S/H_s) の関係

アランス S/H_0 は0.6~0.7程度となっている。また、各計測地点での揚圧力には、入射角による大きな違いは無いと判断できる。これは、揚圧力は構造物下方の水面が上昇して、構造物に衝突することによって作用する力であるため、波の方向性に影響は受けないと考えられるからである。ただし、栈橋の長手方向（今回の実験では、入射角0度方向）では、来襲する波に対して栈橋の橋脚が抵抗となり、波高が減衰する可能性が考えられる。しかし、今回の実験で対象としたのは、現地量でも2mしか幅員のない栈橋であるため、橋脚も径が現地量で $\phi=1.2\text{m}$ 程度（模型量で60mm程度）の小さい円柱となっており、波に対する対抗も小さいと考えられる。以上の理由により、今回の実験では、特に準静的揚圧力に関して、入射角の違いはほとんどみられなかったと判断できる。

準静的揚圧力は、揚圧力ピーク後のやや作用時間の長い腰掛け部の圧力であり、水位上昇に伴う静水圧上昇の寄与が大きいと考えられる。図-3.1に示した揚圧力と水位の同時波形からわかるように、水位の波形は、消波工

の法先にあたる $X=35\text{m}$ ($X/L=0.5$) 付近から、少し波形が尖り始めるものの、それよりも沖側位置では、どの地点でも概ね同様な水面波形となっている。このため、 $X=45\text{m}$ 付近から沖側 ($X/L>0.5$) では、準静的揚圧力は、相対クリアランス S/H_0 に対して同様に分布したと考えられる。なお、クリアランスがゼロのときに発生する準静的揚圧力は $0.5\rho gH$ 程度であった。

3.3 最大揚圧力の発生過程とその変動性

(1) 波面上昇速度

図-3.8, 図-3.9は、モデル栈橋の各計測地点における波面上昇速度の空間分布をそれぞれ、入射角およびクリアランスの違いに着目して示した図である。これらの図より、以下のことがわかる。

図-3.8より、桁部においては、クリアランスの違いによる波面上昇速度の違いはみられないことがわかる。一方、床版部では、いずれの入射角もクリアランス $S=3\text{m}$ の

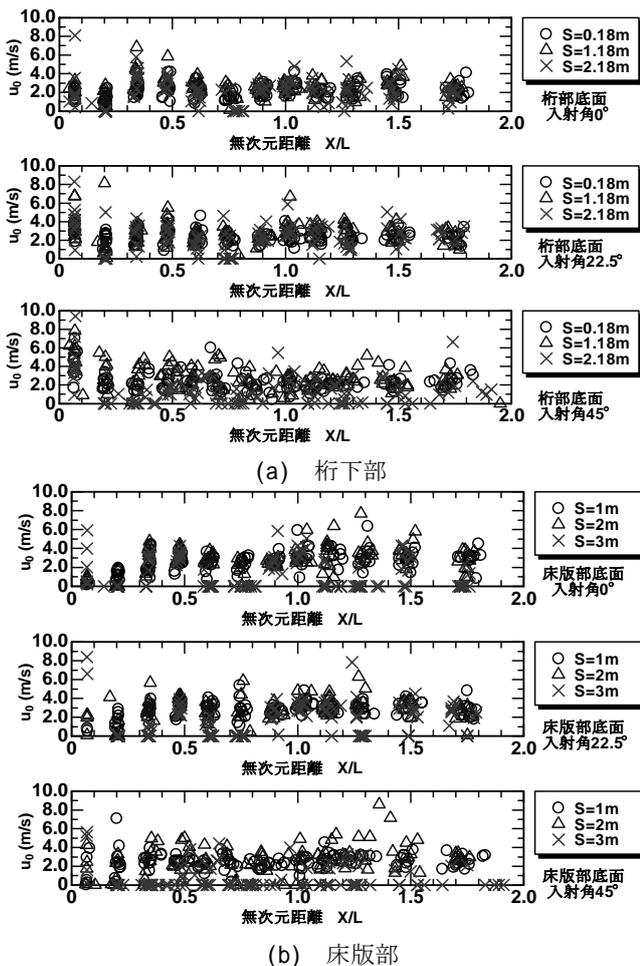


図-3.8 クリアランスの違いによる波面上昇速度の空間分布

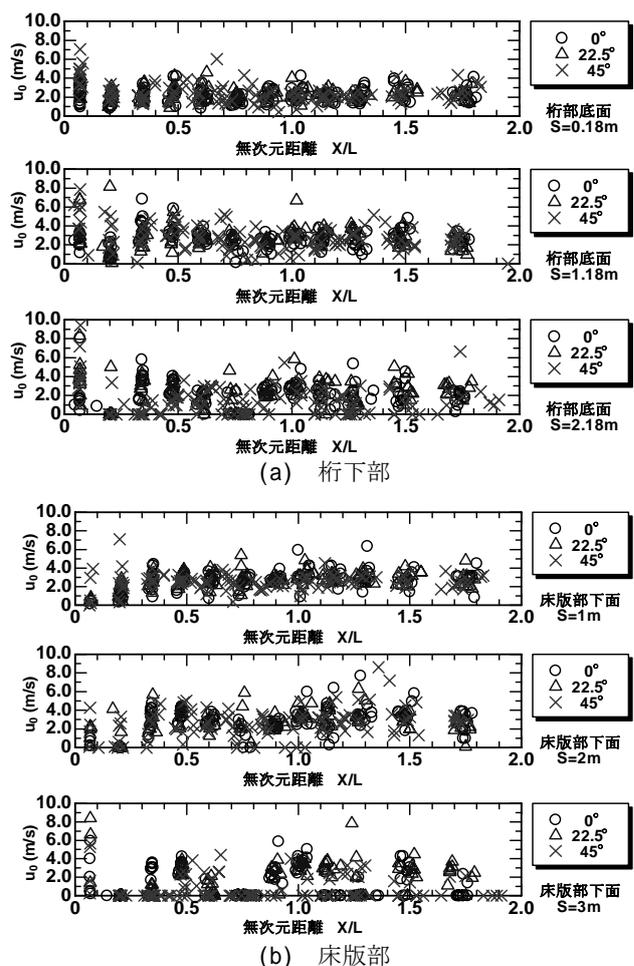


図-3.9 入射角の違いによる波面上昇速度の空間分布

場合には、他のクリアランスと比べて、全体的に波面上昇速度が低下する傾向にある。この理由は、クリアランスが3mになると、波頂部付近で栈橋に衝突するようになるためと考えられる。

また、図-3.9より、桁部において入射角の違いによる波面上昇速度の違いはあまり見られない。一方、床版部のクリアランス $S=3\text{m}$ のケースでは、入射角45度の場合、他の入射角より波面上昇速度が小さくなる傾向にあることがわかる。これは、この条件が栈橋に波頂部が当たる限界に近いクリアランスであったため、発生波の僅かな違いが影響したものと考えられる。

ところで、波面上昇速度は、最大揚圧力の大きさに寄与するものと考えられる。この関係を整理した図-3.10より、最大揚圧力は、概ね波面上昇速度に比例して大きくなる傾向が見られる。ただし、重複波の腹に近い $X/L \approx 0.47$ の位置では、ばらつきが大きくなり、相関も低くなる。

一方、波面上昇速度は、取付部直前の $X/L \approx 0.07$ に近づくほど大きくなりやすい傾向にある。これは、消波工による波の浅水変形による波形の急峻化が影響しているものと考えられる。また、特に波の入射角が大きくなるほど、波面上昇速度が大きくなる。理由としては、波が入射することにより、進行波や重複波の碎波が発生しにく

くなったことが推測される。ただし、今回計測された波面上昇速度との比例関係によって説明できる最大揚圧力の最大値は、高々 $P_{\max}/\rho gH=1.0\sim 2.0$ 程度であった。

(2) 最大揚圧力の変動幅分布

本研究で整理した規則波に対する揚圧力は、5波の有効波に対して得られた揚圧力のうち最大値である。ここでは、個々の有効波により生じる揚圧力の統計的なばらつきを整理することにより、平均的な揚圧力に対する変動性を確認した。

すなわち、本実験で解析対象とした有効波5波に対して、得られた揚圧力データを個々の計測値 P_{\max} と、その平均値 P_{mean} に対する揚圧力比 P_{\max}/P_{mean} を求め、その度数分布を調べた。結果を、図3-11に示す。また、これらの数値データを表-3.1に示す。なお、解析に利用したデータの総数は1820個である。これらより、超過確率が5%となる時の揚圧力比を求めると、 $P_{\max}/P_{\text{mean}}=1.85$ 、最大値は $P_{\max}/P_{\text{mean}}=3.4$ であった。なお、これらの結果は後述する揚圧力算定式の検討において考慮することとする。

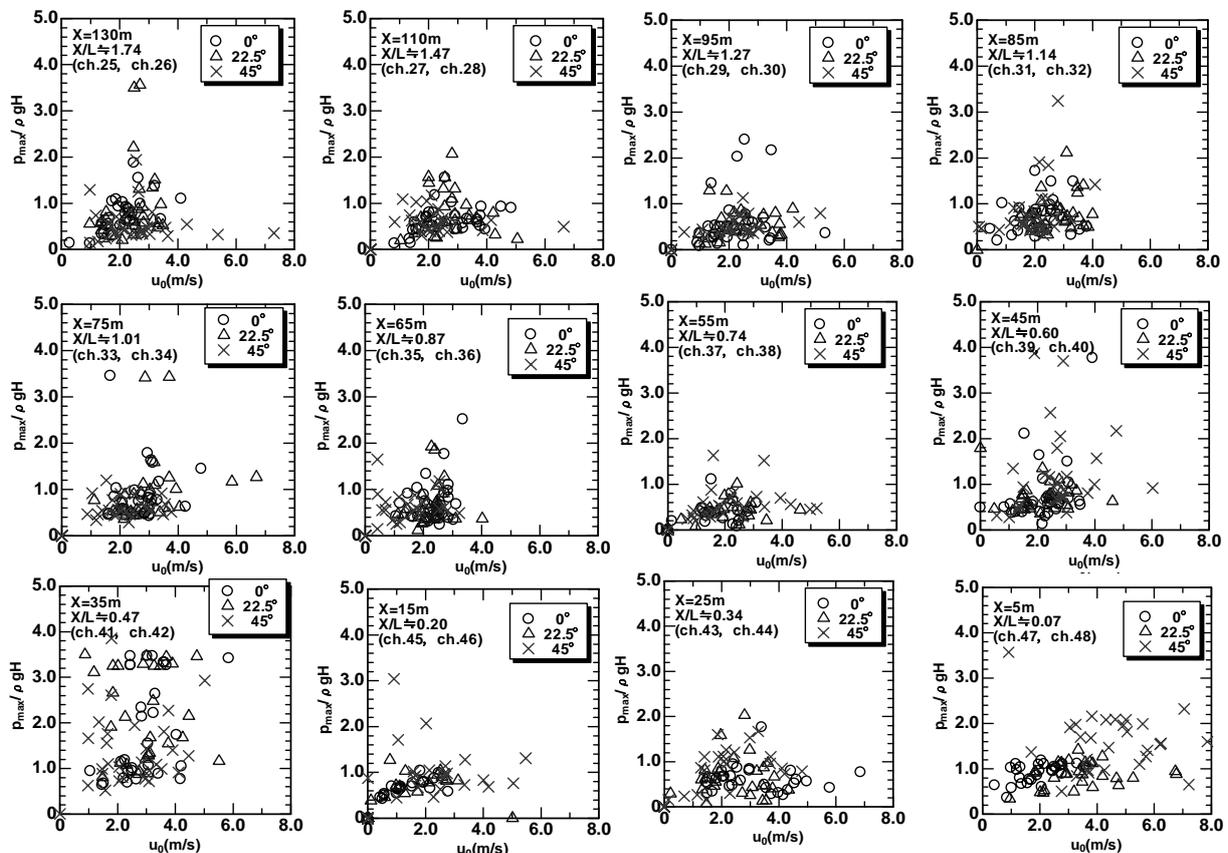


図-3.10 海面上昇速度と最大揚圧力の関係

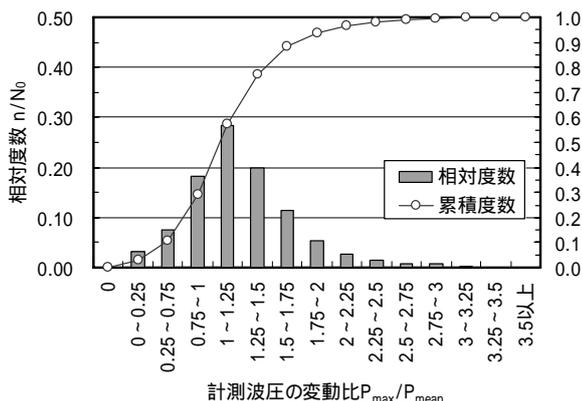


図-3.11 規則波実験における計測波圧の変動比分布

表-3.1 規則波実験における計測波圧の変動比分布 (数値データ)

階級値	相対度数	累積度数	超過確率
0	0	0.0%	100.0%
0~0.25	0.0313	3.1%	96.9%
0.25~0.75	0.0753	10.7%	89.3%
0.75~1	0.183	29.0%	71.0%
1~1.25	0.2835	57.3%	42.7%
1.25~1.5	0.1984	77.1%	22.9%
1.5~1.75	0.1132	88.5%	11.5%
1.75~2	0.0544	93.9%	6.1%
2~2.25	0.0269	96.6%	3.4%
2.25~2.5	0.0137	98.0%	2.0%
2.5~2.75	0.0082	98.8%	1.2%
2.75~3	0.0077	99.6%	0.4%
3~3.25	0.0027	99.8%	0.2%
3.25~3.5	0.0011	99.9%	0.1%
3.5以上	0.0005	100.0%	0.0%
総度数	N_0	1820	

3.4 揚圧力算定式の検討

規則波実験で得られた揚圧力分布について、技術基準に示されている既存の揚圧力算定式(式(1)~(3))と比較検討を行った。

式(1)は伊藤・竹田(1967)が栈橋模型実験の結果より求めた揚圧力のうち、渡版に作用する揚圧力強度のピーク値 p_k を与える。しかし、その作用時間は極めて短く、また、場所的に位相をもって作用するので、揚圧力強度が渡版の自重を超えたからといって、直ちに渡版が動揺したり、落下するものではない。そこで、彼らはこの揚圧力強度の1/5に相当する渡版の振動限界重量 q を式(2)で算出することを提案している。

$$p_k = \rho_0 g (8H - 4.5S) \quad (1)$$

$$q = \rho_0 g (1.6H - 0.9S) \quad (2)$$

なお、落下限界重量は振動限界重量の1/2~1/3である。一方、式(3)は、潮位より上部工下面までの距離(=クリアランス) S がほぼ0の場合に対するものであり、伊藤・竹田の実験値の上限に対応するものである。

$$p_k = 4\rho_0 g H \quad (3)$$

今回の実験結果を見ると、取付部からの距離が0.5波長の範囲($X/L \leq 0.5$)と、それよりも沖側において揚圧力分布の特性が異なっていた。また、部材(桁部又は床版部)の違いや、波の入射角の違いによる影響はほとんど見られなかった。そこで、既存の揚圧力算定式と今回の実験データを比較する際には、取付部からの距離が0.5Lをしきい値として実験データを2つに分類し、部材の違いや入射角の違いで区別せずに整理を試みた。

図-3.12、図-3.13は、それぞれ $X/L > 0.5$ と $X/L \leq 0.5$ の範囲に分けて整理した既存の揚圧力算定式と実験データの比較結果である。図には、有効波5波に対して個々に発生した最大揚圧力の他に、それら5波分の平均値も合わせて示した。図の横軸は相対クリアランス S/H_s であり、縦軸は最大揚圧力の無次元値 $P_{max}/\rho g H$ である。さらに、式(2)を黒の点線、式(3)を黒の破線で示した。一方、実験データの回帰式を赤の実線で示し、さらに揚圧力の平均値からのばらつき(P_{max}/P_{mean})を考慮して修正した関係式も合わせて示した。ここで適用した揚圧力分布(P_{max}/P_{mean})は、今回得られた揚圧力データのばらつきの最大値である $P_{max}/P_{mean}=3.4$ と、ばらつきの超過確率が5%となる $P_{max}/P_{mean}=1.85$ である。これらの図より、以下のことがわかる。

まず、取付部の影響が小さかったと考えられる $X/L > 0.5$ の範囲についてまとめた図-3.12を見ると、式(3)は今回計測された全ての実験値よりも大きいことがわかる。一方、式(2)に着目すると、今回計測された揚圧力が上回るデータも見られる。しかし、5波の平均値に対するばらつきで見ると、概ね実験データの上限を包絡するような結果となっている。

一方、実験値のばらつきを考慮した関係式に着目すると、まず、最大のばらつき量を考慮した $P_{max}/P_{mean}=3.4$ の式は、式(2)よりも大きな揚圧力分布を与えるが、式(3)よりは小さいことがわかる。また、ばらつきの超過確率が5%となる $P_{max}/P_{mean}=1.85$ の式は式(2)に近くなるが、相対クリアランスが大きくなるにつれて、式(2)よりも小さくなることがわかる。なお、実験データの回帰式は、概ね式(2)の1/2となっている。

次に、取付部の影響が大きい $X/L \leq 0.5$ の範囲についてまとめた図-3.13を見ると、ほぼ全ての実験値が、式(3)

で示された値以下に収まっている。一方、式(2)に着目すると、今回計測された揚圧力の方が大きいデータも多く存在する。5波の平均値分布と比較しても、相対クリアランスが大きい側では、これよりも大きな揚圧力が発生している。

一方、図-3.12と同様に、実験値のばらつきを考慮した関係式に着目すると、 $P_{max}/P_{mean}=3.4$ の式は、式(2)よりもかなり大きく、さらに、相対クリアランスが0.20以下の範囲で式(3)よりも大きくなるのがわかる。また、 $P_{max}/P_{mean}=1.85$ の式は、式(2)よりも少し大きくなるのがわかる。

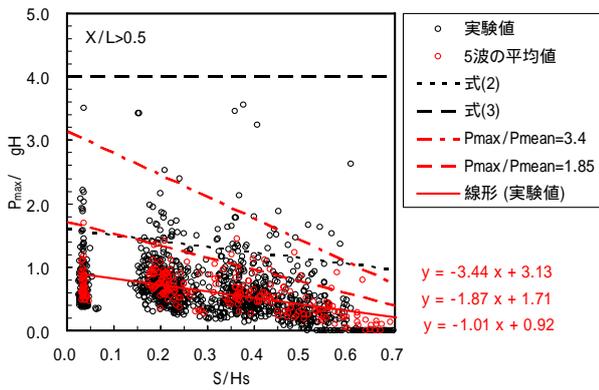


図-3.12 規則波実験における実験値と既存の揚圧力算定式との比較結果 ($X/L > 0.5$)

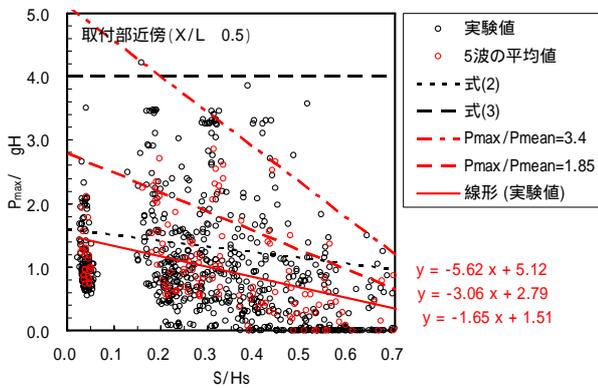


図-3.13 規則波実験における実験値と既存の揚圧力算定式との比較結果 ($X/L \leq 0.5$)

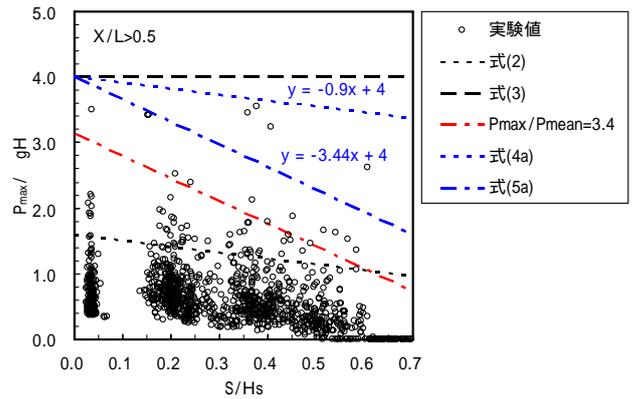
これらの結果から、栈橋式護岸の設計等に用いられる式(3)を適用すれば、今回のような取付部前面に消波工を有するような栈橋の取付部において、十分に安全な設計ができるものと考えられる。すなわち、式(3)は、実験値の上限を考慮して提案された式であるので、今回の実験結果との比較は妥当な結果が得られていると判断できる。その一方で、 $X/L > 0.5$ の範囲では、相対クリアラン

スが十分大きい場合に式(3)を適用すると、過大な設計になると考えられる。このような条件では、経済性を考慮して設計外力を少し小さくしても安全性を確保することができると考えられる。そこで、実験結果と既往の技術基準の式を勘案し、 $X/L \leq 0.5$ に対しては式(3)を適用し、 $X/L > 0.5$ に対しては、それらの連続性を考慮して、技術基準の式(2)の係数を修正した次の2式が提案できる。特に式(5a)は、今回の実験で得られた揚圧力の最大変動幅($P_{max}/P_{mean}=3.4$)を考慮した関係式と勾配が同じになるよう、式(4a)を修正したものである。

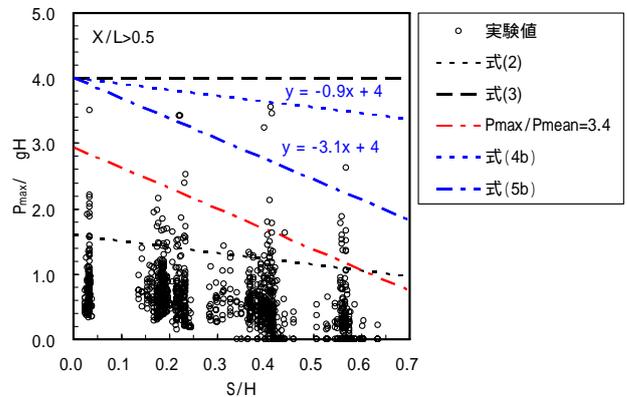
$$p_k = \rho_0 g (4H - 0.9S \frac{H}{H_s}) = \rho_0 g H \left(4 - 0.9 \frac{S}{H_s} \right) \quad (4a)$$

$$p_k = \rho_0 g (4H - 3.4S \frac{H}{H_s}) = \rho_0 g H \left(4 - 3.4 \frac{S}{H_s} \right) \quad (5a)$$

いずれの式も、相対クリアランスがゼロの場合には、式(3)で与えられる値($4\rho gH$)と一致し、相対クリアランスが大きくなるに従って、算定される揚圧力が小さ



(a) 実測波高に対する相対クリアランス S/H_s で整理



(b) 入射波高に対する相対クリアランス S/H で整理

図-3.14 実験結果と揚圧力算定式との比較結果 ($X/L > 0.5$)

くなる特性を有する。すなわち、これらの式を $X/L>0.5$ の範囲の実験結果に対して描くと、**図-3.14(a)**のようになる。図より、式(4a)は今回の実験結果の上限を表し、式(5a)は実験結果全体の分布傾向のほぼ上限を表していることがわかる。

しかし、これらの式を実際的设计で用いる際には、何らかの方法で実測波高 H_s を別途求める必要があり、設計式として使い勝手が良いとは言えない。そこで、今回の模型実験では $X/L>0.5$ の範囲では海底地形は一樣であり、護岸からの反射波の影響も空間的にほぼ一樣と考えられることから、合成波高 H_s を H に置き換えて整理を試みた。整理した結果を**図-3.14(b)**に示す。横軸に対する各プロットのばらつきは多少変化するものの、(a)とほぼ同様の右肩下がりの傾向となっている。この図より得られた結果から、以下の揚圧力算定式2式を提案する。

$$p_k = \rho_0 g (4H - 0.9S) \quad (4b)$$

$$p_k = \rho_0 g (4H - 3.1S) \quad (5b)$$

3.5 揚圧力算定式の適用例

ここでは、前項で提案した揚圧力算定式の検証を行うために、港湾空港技術研究所所有の多面式多方向不規則波造波水槽（環境インテリジェント水槽）で別途実施された、海上に設置された連絡誘導路に対する揚圧力を計測した実験結果に対して、今回提案した算定式(4b)および(5b)を適用した。検証に先立ち、この実験の対象となった誘導路に対する設計条件を、**表-3.2**に示す。なお、この実験で使用された誘導路模型の底面はフラットではないため、静水面から床版までのクリアランスに関する詳細な記述は省略するが、概ね5.2m~6.7m程度となっている。

表-3.2 誘導路設計条件

	波高 (m)	周期 (s)
2年確率波	1.97	5.9
10年確率波	2.78	6.9
100年確率波	4.15	8.3

図-3.15は、得られた実験結果に対して、提案した算定式を描いた一例である。図には、既存の技術基準に記載されている揚圧力算定式も合わせて示した。ただし、 $H=H_s$ とした。なお、既存の算定式のうち式(3)は、クリアランスの影響は考慮されないため、ここでは除外した。

図より、式(1)は実験値を大きく上回り、逆に式(2)では、相対クリアランスが小さいとき、実験値を大きく

下回る結果となっている。一方、提案式(4b)では、一部の実験結果が、これを飛び越えるものの、概ね実験値の上限を示す結果となっている。一方、提案式(5b)では、特に揚圧力の発生限界となる相対クリアランスを比較的良好に表しているようにみえる。

以上の結果から、提案した揚圧力算定式については、妥当な結果が得られると判断できる。

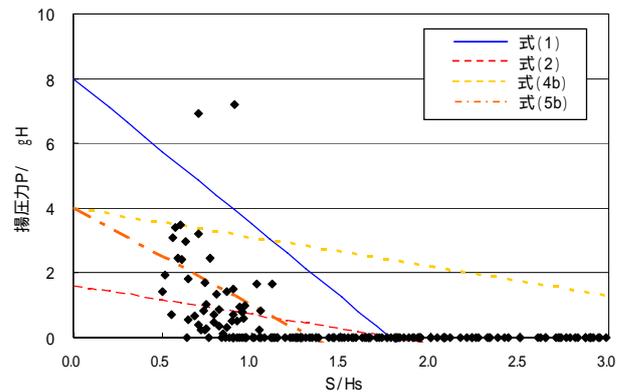


図-3.15 実験結果と算定式の結果の比較

4. 揚圧力の発生頻度

4.1 不規則波浪中の揚圧力発生率

図-4.1、**図-4.2**は桁部底面および床版部底面における栈橋取付部からの距離に対する揚圧力の発生分布を表したものである。特に、図の横軸は栈橋取付部からの距離 X を入射波の有義波の波長 L で除した無次元距離で示した。今回の実験は、それぞれ2波群の実験を実施したが、揚圧力の発生率分布には、波群による大きな違いは見られなかった。揚圧力発生率の分布図より以下のことがわかる。

揚圧力発生率の分布は、桁部底面および床版部底面ともに類似した傾向が見られ、クリアランスにほぼ依存している。

$X/L>0.5$ では、波の入射角に関係なく、発生率に空間的変動は見られず、ほぼ一定である。これは、護岸から離れるほど重複波による波高変動の影響を受けにくくなったためと考えられる。しかし、発生率が50%前後となるクリアランスでは、入射角が大きいかほど発生率が高くなっている。ただし、この時の揚圧力は、入射角が大きいかほど低減している。**(図-3.6)**

逆に、 $X/L \leq 0.5$ では、発生率は空間的に変動し、 $X/L=0.2$ 付近で最小、取付部直前で最大となる。直接的には、これは不規則波の重複波高の場所的变化によるものと考えられる。すなわち、重複波の節部となる $X/L=0.25$ の位置では、入射波と反射波の干渉により水面の上昇が小さくな

り、重複波の腹となる護岸前面では水面の上昇が大きくなったため、揚圧力が発生しやすくなったと考えられる。また、これ以外の要因としては、モデル栈橋の取付部前面の消波工上で生じる浅水変形や砕波の影響が考えられる。

以上の結果から、揚圧力発生率の空間分布は、取付部近傍を除き、波の入射角によらず、相対クリアランスごとに、ほぼ同じ傾向を示すと考えられる。そこで、全てのデータをまとめて、相対クリアランス $S/H_{1/3lm}$ と揚圧力発生率の関係を整理した結果を図-4.3に示す。なお、入射波高 $H_{1/3lm}$ は、栈橋における各計測地点での入射波高であり、揚圧力実験において沖側で得られた入射波高から、検定実施時に得られた波高比を用いて推定した波高であ

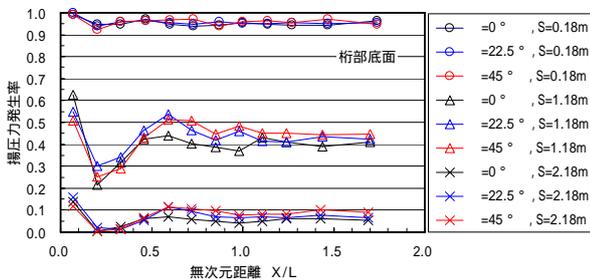


図-4.1 栈橋取付部からの距離における揚圧力の発生率分布 (桁部底面)

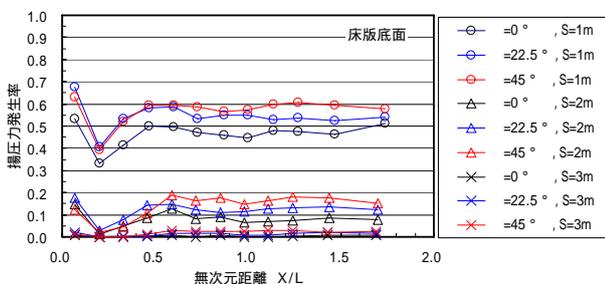


図-4.2 栈橋取付部からの距離における揚圧力の発生率分布 (床版底面)

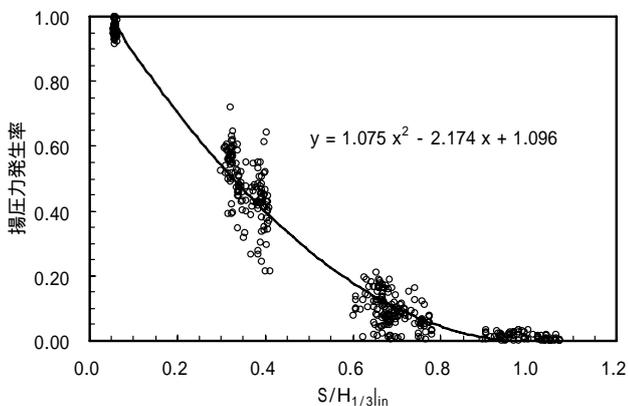


図-4.3 相対クリアランスに対する揚圧力発生率

る。なお、図にはこれらの実験結果に対する回帰式も合わせて示した。

図より、相対クリアランス $S/H_{1/3lm}$ が大きくなるほど揚圧力発生率が小さくなるのがわかる。また、図に示した回帰式を利用すると、相対クリアランス $S/H_{1/3lm}$ を0.7程度確保すると、栈橋への波作用数は約10%程度となる。今回の実験における入射波高の目標波高は約3mであるので、2.1m程度クリアランスがあれば、栈橋に作用する波浪は10%程度になることがわかる。なお、当然ながら不規則波中の波高分布を考慮しなければ、相対クリアランス $S/H_{1/3lm}=1.0$ では、揚圧力発生率はほぼゼロとなる。

4.2 不規則波浪中の揚圧力発生頻度

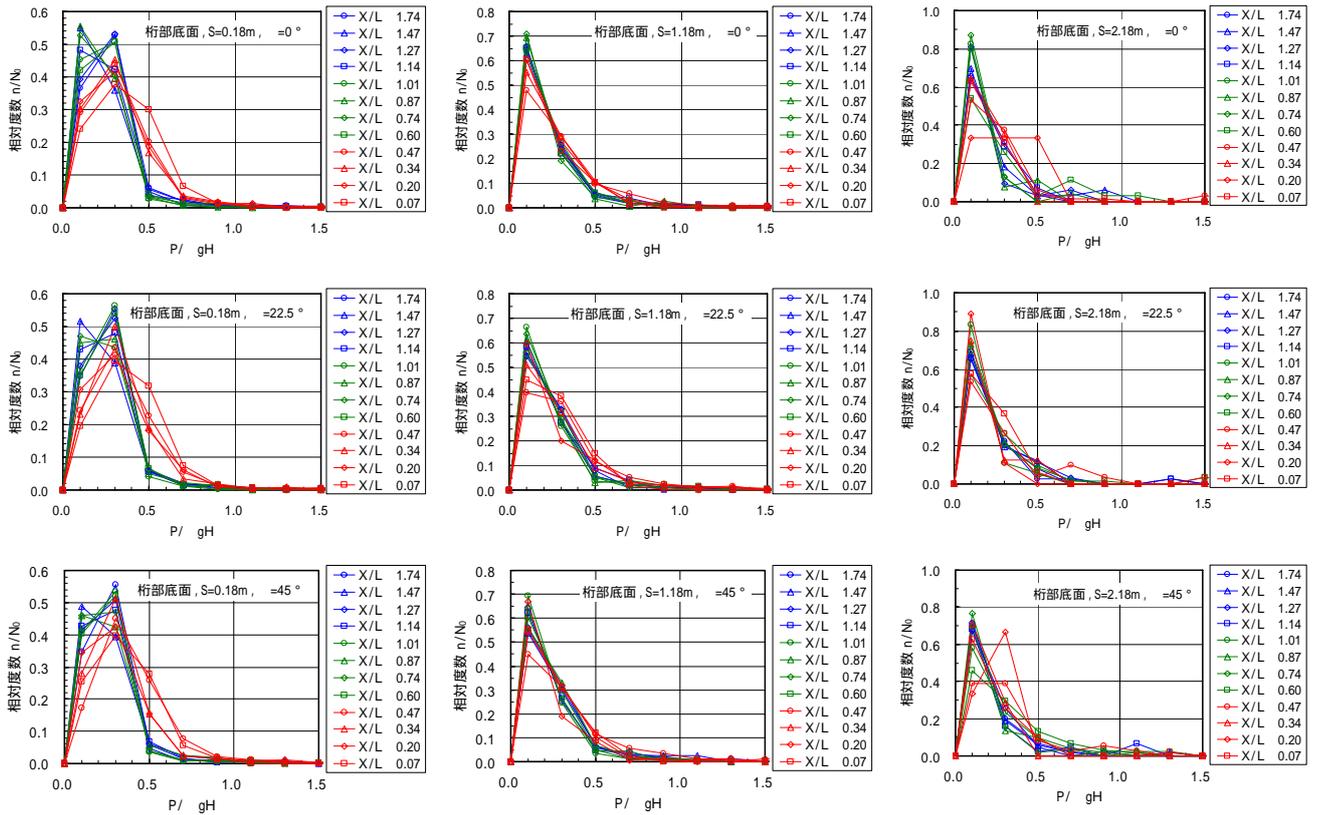
図-4.4は、多方向不規則波において計測された1波ごとの無次元揚圧力 ($P/\rho gH$) の相対度数分布解析を行った結果の一例である。ただし、揚圧力が生じなかったデータ (つまり、 $P/\rho gH=0$) は、除外している。なお、 $X/L \approx 0.47$ は、今回のモデル栈橋の消波工の法先部付近に位置しており、最大揚圧力の空間分布において、最大揚圧力が大きかった地点である。

図では、これよりも取付部に近い側を暖色系で示してある。今回の実験では、同じ実験条件に対して、波群を2種類に変更した実験を行っているが、揚圧力の発生頻度分布に関しては、波群による大きな違いは見られなかったため、グラフは2波群の実験結果を合わせて作成している。図より以下のことがわかる。

まず、桁部底面のクリアランス0.18mでは、栈橋のいずれの位置においても $P/\rho gH$ が0~0.3の間に最頻値が存在する。特に、 $X/L \approx 0.60$ 以上では、 $P/\rho gH$ がこの範囲にほとんど集中しており、これより大きな揚圧力が作用する割合は、5%程度となっている。これに対して、 $X/L \approx 0.47$ 以下の範囲では、 $P/\rho gH$ が0.4~0.6となる割合が20%~30%と比較的多く、特に取付部直近の $X/L \approx 0.07$ が最も多い結果となっている。なお、波の入射角の違いによる変化はあまり見られず、全体的に類似した傾向であった。

次に、桁部底面のクリアランス1.18mでは、0.18mのときに比べ、揚圧力の低い側 ($P/\rho gH=0 \sim 0.3$) の発生頻度が大きい傾向が見られた。

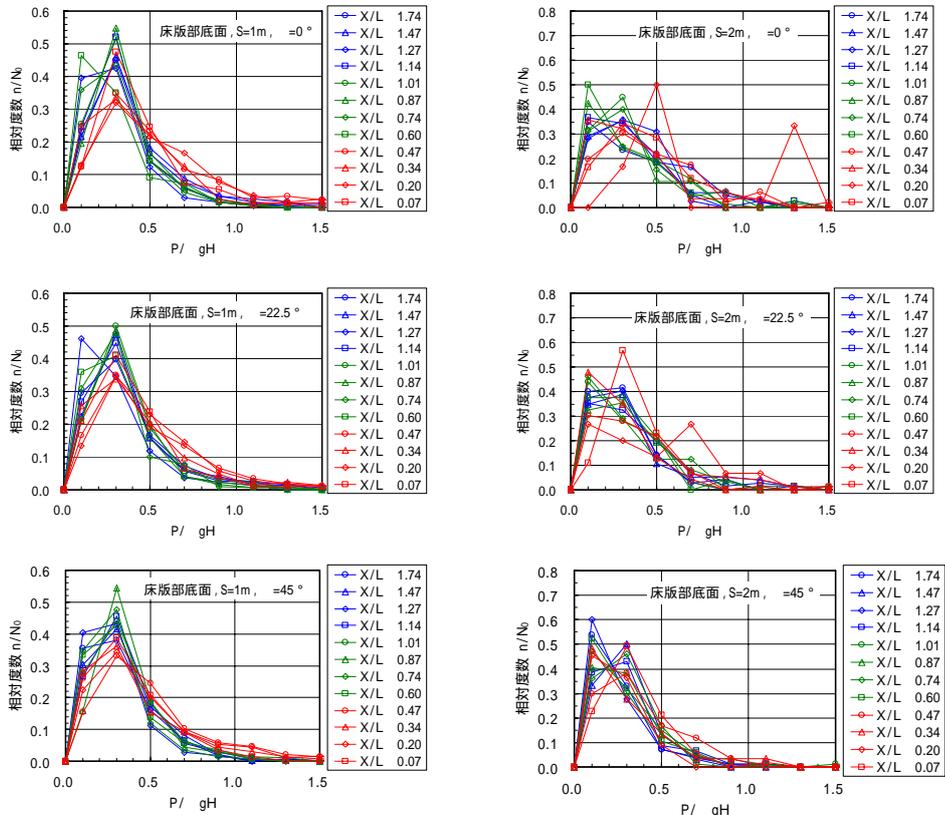
また、桁部底面のクリアランス2.18mでは、全体的に揚圧力の分布傾向は類似していたが、ここまでの他の結果と比べて少しばらつきが大きく、特に取付部近傍のばらつきが顕著であった。ばらつきが大きくなった要因としては、クリアランスが大きくなり、揚圧力の発生頻度が低下し、標本数が少なくなったことの影響が現れていると考えられる。



桁部底面クリアランス 0.18m

桁部底面クリアランス 1.18m

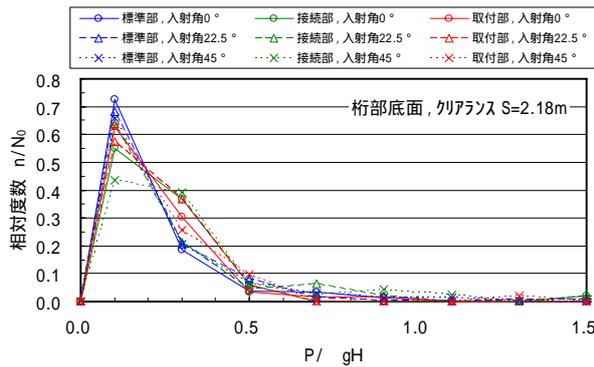
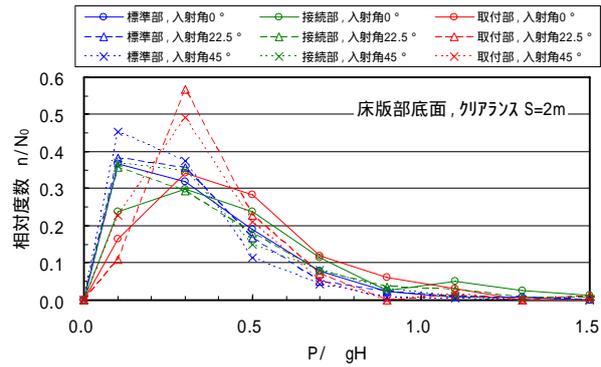
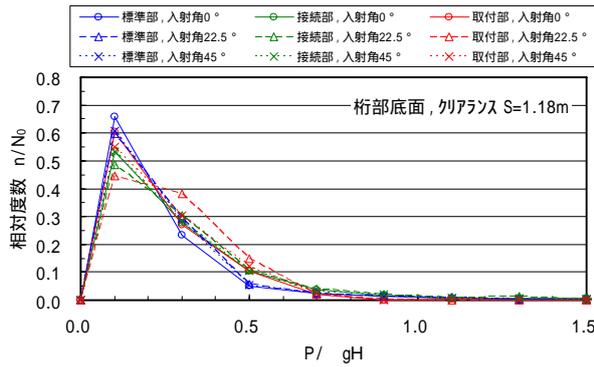
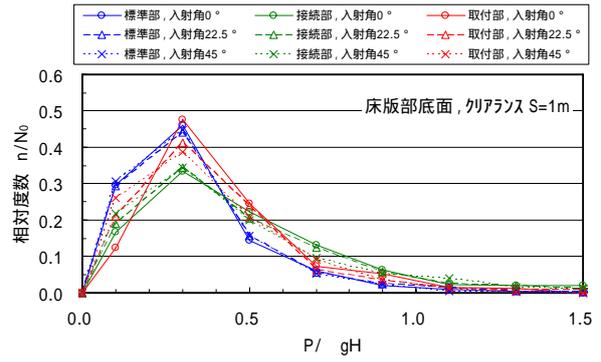
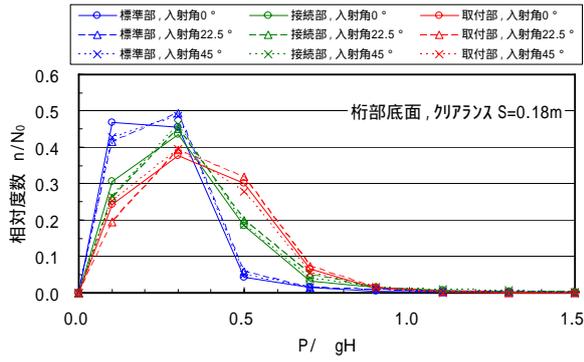
桁部底面クリアランス 2.18m



床版部底面クリアランス 1m

床版部底面クリアランス 2m

図-4.4 不規則波浪における揚圧力の相対度数分布



注) クリアランス S=3m のケースは標本数が少なすぎるので除外した

図-4.5 不規則波浪における発生揚圧力の相対度数分布 (桁部底面, 3種類の設置場所別に分類)

図-4.6 不規則波浪における発生揚圧力の相対度数分布 (床版部底面, 3種類の設置場所別に分類)

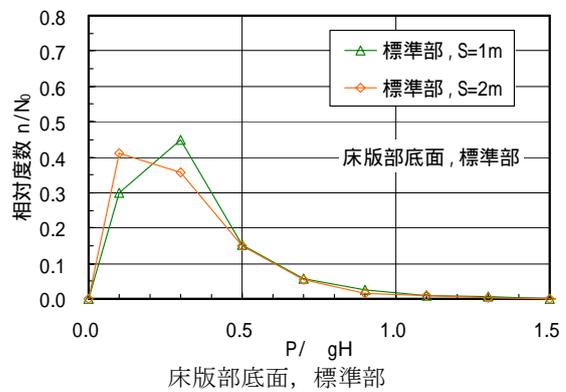
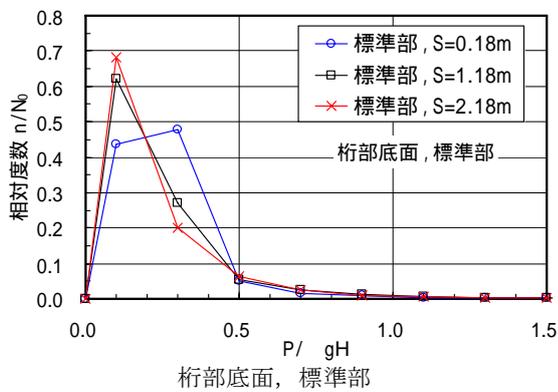


図-4.7 設置場所における発生揚圧力の相対度数分布

一方、床版部底面の結果では、まず、クリアランス1mの場合では、全体的に発生揚圧力の分布が類似した傾向となっていた。ただし、 $X/L \cong 0.47$ 以下の範囲では、これ以外と比べて $P/\rho gH=0.4$ 以上の発生頻度が大きくなる傾向が見られた。

次に、クリアランス2mでは、分布にばらつきが大きい結果であった。これは、桁部底面、クリアランス2.18mと同様に、クリアランスが大きくなることによる揚圧力の発生頻度の低下による標準数が少なくなったことが要因であると考えられる。

以上のことから、 $X/L \cong 0.60$ 以上の範囲では、クリアランスによらず、揚圧力分布は概ね類似した傾向にある一方で、取付部に近い $X/L \cong 0.47$ 以下の範囲では、少し大きい揚圧力が発生しやすい傾向にあると考えられる。これらの傾向は、クリアランスが大きい場合に顕著であると言える。

以上の考察から、揚圧力の相対度数分布は、 $X/L \cong 0.60$ 以上の範囲と、それ以外で異なる傾向が見られることがわかった。そこで、栈橋を『標準部』、『接続部』、『取付部』の3つに分類してまとめ、揚圧力分布を検討することとした。ここでいう『標準部』とは、 $X/L \cong 0.60$ 以上の範囲をまとめたものであり、『接続部』とは、 $X/L \cong 0.20 \sim 0.47$ の範囲をまとめたものである。また、『取付部』については、 $X/L \cong 0.07$ の結果のみを用いた。結果は、図-4.5、図-4.6のとおりであり、この図より以下のことがわかる。

桁部について示した図-4.5を見ると、クリアランス $S=0.18m$ （上段の図）では、3つに分類した場所毎の発生揚圧力分布は、入射角に関係無く、それぞれ概ね一致している。クリアランス $S=1.18m$ （中段の図）でも、分類した場所毎の発生揚圧力分布は、入射角に関係無く概ね一致する傾向にあるが、取付部においてのみ、入射角の違いによる差が見られた。クリアランス $S=2.18m$ （下段の図）においては、他のクリアランスに比べ、取付部、接続部において入射角の違いによる差が、より明確に見られた。一方、発生揚圧力の栈橋位置による違いは、クリアランスが小さいほど顕著になることが確認できる。

次に床版部について示した図-4.6を見ると、上段のクリアランス $S=1m$ では、場所毎の発生揚圧力分布は、概ね入射角に関係無く一致する傾向にあるが、取付部では多少入射角の違いによる差が見られる。一方、中段のクリアランス $S=2m$ では、接続部や取付部において入射角の違いによるばらつきが顕著となる。

また、桁部底面と同様に、クリアランスが小さくなる時、栈橋位置により発生揚圧力が異なる傾向が見られる。

これらをふまえ、図-4.5および図-4.6のうち、標準部

に対して、入射角による違いを区別せずにまとめた結果の一例を、それぞれ図-4.7に示す。この図より、クリアランスが著しく小さい場合には、桁部底面および床版部底面のいずれの部材も波浪作用中の繰り返し荷重として最多となるのは、 $P/\rho gH=0.2 \sim 0.4$ 程度であることがわかる。また、クリアランスが1mを超えると、波浪作用中の最多荷重としては、 $P/\rho gH=0 \sim 0.2$ 程度であることがわかる。さらに、繰り返し荷重は全体として $P/\rho gH=0.6$ 以下の荷重が全体の約80%を占めることがわかる。

5. まとめ

本実験で使用した栈橋模型では、床版底面に桁部を有する構造であったが、空気圧縮による影響は見られなかった。

最大揚圧力に関しては、重複波の腹位置となる $X/L \cong 0.5$ において、最大揚圧力が卓越しやすいことがわかった。しかし、これより沖側では、重複波の腹になり得る位置であっても、最大揚圧力は $X/L \cong 0.5$ ほどは卓越しなかった。このことから、相対的に見て、栈橋の取付部付近の方が、大きな揚圧力がかかることがわかった。

また、最大揚圧力は静水面までのクリアランスが小さくなるほど揚圧力は大きくなる傾向にあることがわかった。

さらに、これらの実験で得られた結果をもとに、揚圧力に関する既存の技術基準式との適合性を検証し、栈橋取付部からの無次元距離 $X/L \leq 0.5$ の範囲では、 $p_k = 4 \rho gH$ が妥当であることを確認できた。

また、 $X/L > 0.5$ の範囲においては、既存の技術基準式の係数を修正した、新たな揚圧力算定式を提案することができ、さらにこの算定式の妥当性を検証することができた。

さらに、不規則波浪中の揚圧力発生率と相対クリアランスの関係、および発生揚圧力の相対度数分布を確認したところ、相対クリアランスが著しく小さいとき、揚圧力発生率が高く、 $X/L > 0.5$ の範囲では、繰り返し荷重として $P/\rho gH=0.2 \sim 0.4$ 程度の揚圧力が作用することがわかった。

6. おわりに

本実験で得られた揚圧力は、栈橋沖側の海底地形が、一様水深と（仮定）して得られたものである。したがって、実際の設計の際には、波浪変形による波高変化を考慮するために、現場の海底地形や護岸部の消波構造等を

水理模型実験等により十分考慮，検討する必要があると思われる。しかしながら，これらに留意して適用する本実験にて提案した算定式は，取付部護岸に十分な消波が施された揚圧力を設計外力の対象とした空港の進入灯点検棧橋において，棧橋の架け替え工事などの設計や定期メンテナンス等の際に，使用材料，労務コスト等のコスト削減をもたらす効果が期待できると考える。

(2009年4月21日受付)

参考文献

- 伊藤喜行・竹田英章(1967)：棧橋に作用する波の揚圧力，
港湾技術研究所報告Vol.6, No.4, pp.37-68.
- 合田良実(2008)：耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計，鹿島出版会，pp. 41.
- 下迫健一郎・G.Cuomo・高橋重雄(2008)：臨港道路棧橋部に作用する揚圧力とそれに及ぼす空気塊の影響，
海岸工学論文集，第55巻，pp.861-865.
- 社団法人 日本港湾協会(2007)：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)，pp.208-209.
- 谷本勝利・高橋重雄・村上 努(1980)：直立消波ケーソンの床版に働く揚圧力—空気圧縮モデルによる検討—，
港湾空港技術研究所報告，第19巻，第1号
- 谷本勝利・富田英治・村永 努(1983)：水路における不規則波の再反射波の影響について，
港湾技研資料，No.467, 23p.
- Hiraishi, T., K. Hirayama and H. Maruyama (1998) :
Applicability of Dual Face Serpent-type Wave Generator,
Report of the Port And Harbour Research
Institute, Vol.37, No.4, pp.3-35.

記号表

- g : 重力加速度 (m/s^2)
- h : 水深 (m)
- h_c : 護岸高さ (m)
- H : (入射) 波高 (m)
- $H_{1/3}$: 有義波高 (m)
- $H_{1/3\text{lin}}$: 相対波高 (m)
- H_{max} : 最高波 (m)
- H_s : 実測波高 (m)
- L : 波長 (m)
- P : (揚) 圧力 (kN/m^2)
- P_{max} : 最大 (揚) 圧力 (kN/m^2)
- P_{mean} : 平均 (揚) 圧力 (kN/m^2)
- P_k : 揚圧力強度のピーク値の平均値の特性 (kN/m^2)
- P_{qs} : 準静的揚圧力 (kN/m^2)

- S : (静水面からの) クリアランス (m)
- S_{max} : 方向集中度パラメータ
- t : 時間 (s)
- T : 波の周期 (s)
- $T_{1/3}$: 波の有義波周期 (s)
- u_0 : 波 (波面) の上昇速度 (m/s)
- X : 距離 (m)
- η : 水位変動 (m)
- ρ_0 : 海水の単位体積重量 (kN/m^3)