海上空港における進入灯点検桟橋に作用する揚圧力と その分布に関する実験的検討

Model Experiment for Estimation of Uplift Pressure for Piled Jetty of Approach Light on Offshore Airport

齋藤英治¹ · 平山克也² · 稲垣茂樹³ · 平石哲也²

Eiji SAITOH, Katsuya HIRAYAMA, Shigeki INAGAKI and Tetsuya HIRAISHI

On offshore airport, approach light is prepared in the sea and long piled jetty from the revetment of the airport is required for inspection of many lights of it. The uplift pressure by sea wave, however, has not been enough understood yet except by standing wave in front of a piled wharf. In this study, some model experiments are conducted to estimate the uplift pressure under the long thin piled jetty by oblique and random waves.

1. はじめに

航空機の安全な離発着のためには進入灯が必須である が、海上空港のほとんどの進入灯は、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設けられる 桟橋には、桟橋式護岸や杭式ドルフィンの上部工などと 同様に、荒天時、波による揚圧力が作用すると考えられ る.このような水面付近の水平板に作用する揚圧力につ いては古くから様々な実験的検討が行われ、例えば、次 のような算定式が提案されている(伊藤・竹田, 1967).

$p_k = 4\rho_0 g H$	(1)
$q = \rho_0 g (1.6H - 0.9S)$		2)

ここに、 p_k は揚圧力強度のピーク値の平均値の特性値、 ρ_{0S} は海水の単位体積重量、Hは入射波高、qは p_k に対応 する渡版の振動限界重量、Sはクリアランスである。し かし、進入灯点検桟橋のように、護岸に対し長く突き出 た比較的幅の狭い構造物に作用する揚圧力は、岸沖方向 に分布する波浪場の影響を受けやすいと考えられる。

一方,下迫ら(2008)は、陸から海へ延びる臨港道路 桟橋部の複雑な底面形状に作用する揚圧力を大縮尺3次 元模型実験により測定し、桟橋に作用する揚圧力の特性 やそれに及ぼす空気塊の影響を明らかにするとともに、 各地点の波高、最大水位とクリアランスから、準静的揚 圧力および最大揚圧力を算定する手法を提案している. しかし、この適用にあたっては桟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、多方向不規則波造波装置を備えた

 1
 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

 2 正会員
 博(工)
 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部

 3 正会員
 工修
 (株)エコー
 防災・水工部

平面水槽内に,単純化した進入灯点検桟橋と護岸からな る模型を設置し,主に最大波高作用時に桟橋底面(桁下 部および床版部)に生じる揚圧力を測定して,その特性 を考察するとともに,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,このような構造物に適用する揚圧力算定式の改良を 試みた.さらに,維持管理に資することを目的として, 不規則波浪中に作用する繰返し荷重の大きさを推定した.

2. 実験概要

多方向不規則造波平面水槽に模型縮尺1/20の進入灯桟 橋模型(実機長さ140m,幅2m)を設置して揚圧力を計 測する実験を行った.実験風景を写真-1に示す.

桟橋模型は両端部に桁を有する逆凹型とし,護岸に見 立てたブロック壁に対し直角に沖へ伸びる構造とした. また,消波護岸を想定して,法先長さ33m程度の消波工 を砕石により整形し,護岸前面に設置した.これらの概 要を図-1に示す.また,揚圧力の計測点は,岸沖方向の 12箇所の桁部底面および床版部底面に設置した合計24点 とし,同時に,これらに隣接する各地点(12箇所)で水 位変動を計測した.これらの詳細を図-2に示す.



写真-1 実験風景(手前:護岸,中央:桟橋,奥:造波機)



(b) 断面図 図-2 揚圧力の計測点

実験波は規則波と多方向不規則波の2種類とし、いず れも3波向(桟橋の長手方向に対して0度, 22.5度, 45度) とした.ここで、規則波の実験波高は最高波高Hmaxを想 定し、有義波高の1.8倍に設定した.すなわち、実験波 の有義波高を3.0m(模型量で16.5cm)とすると、最高波 高H_{max} = 5.4m (模型量で27.0cm) となる. これは,本実 験で用いた多方向不規則波造波装置が発生できる最大波 にほぼ相当する.また,典型的な風波を想定して波形勾 配を0.04とし、実験波の周期は7.4~7.6s程度とした.一 方,不規則波のスペクトルは修正ブレッドシュナイダ ー・光易型とし、COSn型の方向分布関数の方向集中度 パラメータは $S_{max} = 25$ とした. さらに,造波水深は16m (模型量で80cm)とし、揚圧力には静水面から桟橋まで のクリアランスが重要なパラメータとなることから、潮 位を3種類設定して実験を行った.また、規則波を用い た実験では有効波5波に対し2回繰り返し、多方向不規則 波を用いた実験では約250波の2波群について、計測およ び解析を行った.これらの実験ケースを表-1に示す.

揚圧力の測定は以下のようにして行った.まず,規則 波を用いた揚圧力実験では,造波開始と同時に水位変動

表-1 実験ケース

	現地量(目標値)							
波種類	波向き	クリアランス	水深	波高		周期	波長	波形勾配
	(度)	8 (m)	h (m)	H _{1/3} (m)	$\begin{array}{c} H_{max} \\ (m) \end{array}$	T _{1/3} (s)	L _{1/3} (m)	H/L
多方向 不規則波	0.00.5.45	1.0	16.0	3.0	_	7.4	74.6	
		2.0	15.0			7.5	74.7	0.040
		3.0	14.0			7.6	74.5	
規則波	0,22.5,45	1.0	16.0			7.4	74.6	
		2.0	15.0	_	5.4	7.5	74.7	0.072
		3.0	14.0			7.6	74.5	

データを計測し,模型からの反射波が造波板に到達する 前に造波機を停止させ,停止した造波板で再反射された 波が模型に作用するまでの30秒間を測定対象とした.こ のうち,波高が安定した最初の5波程度を対象として, 1000Hzの高速サンプリングで得られた水圧データの時系 列変動から,衝撃的な最大揚圧力,および準静的な揚圧 力を算定した.一方,多方向不規則波を用いた揚圧力実 験では,吸収造波機能付きの造波装置によって造波され た多方向不規則波による水槽内の多重反射が,ほぼ定常 状態になってからの約250波を対象とした.ただし,こ の場合にはデータ量が膨大となるため,水圧変動のサン プリング間隔は100Hzとした.なお,揚圧力計測地点に おける波面上昇速度は,隣接地点で計測した水位変動デ ータを用いて谷本ら(1980)の方法にならい算定した.

3. 規則波に対する実験結果

規則波を用いた実験では,進入灯桟橋底面に作用する 最大揚圧力P_{max}および準静的揚圧力P_{qs}(揚圧力の時間変 動波形のうち腰掛部)に着目し,揚圧力の空間分布やク リアランスとの関係について検討した.

(1) 揚圧力の時間変化

規則波に対して得られた各計測点における揚圧力と水 位の同時波形の例を図-3に示す.図は、桟橋の沖側計測点 から護岸取付部にかけての代表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てい る(取付部の座標をX=0とし、沖向きを正とした).

図より,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.実験対象とした桟橋模型は,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(b) 参照)を有している.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や,桁 によって閉じ込められた空気塊が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. これは、桟橋の横断面が長手方向に同様なため、ある地 点で波面が上昇しても空気塊が閉じ込められず、空気圧 縮が生じにくかったためと考えられる.なお、X=5mの 揚圧力波形にみられる微細な振動波形は、桟橋模型の剛 性に起因する微小な振動によるものと考えられる.また、 波面上昇速度について、波の入射角やクリアランスによ る違いはあまり見られなかったが、重複波の腹位置とな るX/L=0.5の地点を除き、最大揚圧力との相関が認めら れた.

(2) 揚圧力の空間分布

桟橋模型の桁下部および床版部に作用する最大揚圧力 の空間分布について、クリアランスや入射角の違いに着 目して比較した結果を図-4に示す.ここで、図の縦軸は、 各地点の入射波高Hを用いて無次元化した揚圧力であ る.なお、揚圧力実験におけるこれらの入射波高は、波 高検定実験で予め計測した、造波波高に対する桟橋設置 位置での波高比を利用して推定した.また横軸は、取付 護岸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Lで無次元化して示した.

図より,揚圧力は反射波の影響が大きい取付護岸近傍 で大きく,次に重複波の腹位置となる,入射波長に対す る護岸との相対距離が*X/L*=0.5となる地点で卓越し, *pgH*の4倍程度となっていることがわかる.また,この



他にも*X/L* = 1.0, 1.5の位置で重複波の腹になり得るが, 揚圧力としては*X/L* = 0.5の位置が最大であり,桁下部, 床版部ともに,クリアランスが大きく入射角が小さいケ ースを除き,護岸からの距離による明瞭な違いはさほど みられない.一方,図には示していないが,準静的揚圧 力の空間分布ではこの傾向がより明瞭に現れている.す なわち,*X/L* = 0.5より沖側では,入射角や護岸からの距 離に関わらず揚圧力はほぼ一定で,クリアランスが小さ いほど大きくなっている.さらに,*X/L* = 0.5より岸側で は、クリアランスが小さく入射角が大きいほど,消波工 による波浪変形に伴う波高増加とも相まって揚圧力が大 害くなり,護岸前面では1.5*pgH*程度の準静的揚圧力が作 用していた.

(3) 揚圧力とクリアランスの関係

図-5は、各代表計測地点における最大揚圧力と相対ク リアランス*S/H*_sとの関係を整理した結果である.ここで、 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(桁および床版)に対するクリアランス*S* 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、図の左側が*X/L*>0.5、右側が *X/L*s0.5である.

図より,揚圧力が卓越した*X/L*=0.5位置を境として, 最大揚圧力の分布傾向が異なることが確認できる.すな わち,進入灯桟橋のように沖側に張り出した桟橋の揚圧 力は,護岸近傍を含む*X/L*≤0.5の範囲では,相対クリア



ランスによらずほぼ4pgHまでに収まっていることから, 桟橋式護岸に対して提案された式(1)を適用すること が妥当と思われる.しかし,これより沖側のX/L>0.5の 範囲では,ほぼ右肩下がりの分布となっていることから, 相対クリアランスに応じて揚圧力を低減できる可能性が あることが示唆された.なお,このとき,入射角が大き いほど,護岸近傍で形成される重複波の影響を受けにく くなるため,揚圧力が低減する傾向が伺える.しかし, 明瞭な違いを確認するまでには至らなかった.

そこで、X/L>0.5の範囲において、部材(桁および床版)や波の入射角の違いを区別せずに、有効波5波に対して個々に発生した最大揚圧力 P_{max} をプロットした結果を図-6(a)に示す.なお、これらの度数分布はほぼ正規分布で表され、超過確率5%となる揚圧力比は $P_{max}/P_{mean}=1.85$ 、最大値は $P_{max}/P_{mean}=3.4$ であった.ここで、図-5と同様に、図の縦軸は入射波高で無次元化した最大揚圧力、横軸は相対クリアランスである.さらに、式(1)を細い破線、式(2)を細い点線で示した(ただし、 $H=H_s$ とみなした).

図より,式(1)は今回の実験結果を包括しているも のの,経済性を考慮した場合には,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,実験結果と既往の提案式を勘案し,X/L≤0.5に 対しては上述のように式(1)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,式(2)の係数を 修正した次の2式を提案した.特に式(4a)は,今回の



(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-6 実験結果と揚圧力算定式との比較 (*X*/*L*>0.5)

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(3a)を修 正したものである.

$$p_{k} = \rho_{0}g(4H - 0.9S\frac{H}{H_{s}}) = \rho_{0}gH\left(4 - 0.9\frac{S}{H_{s}}\right) \cdots (3a)$$
$$p_{k} = \rho_{0}g(4H - 3.4S\frac{H}{H_{s}}) = \rho_{0}gH\left(4 - 3.4\frac{S}{H_{s}}\right) \cdots (4a)$$

いずれの式も,相対クリアランスがゼロの場合には式 (1) に一致し,相対クリアランスが大きくなるにつれ, 算定される揚圧力が小さくなる特性を有する.また,こ れらを実験結果に対して描いた図-6(a)よりわかるよう に,式(3a)は今回の実験結果の上限を表し,式(4a) 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.

ところで,これらを実際の設計に用いる際には,式に 含まれる実測波高H_sを何らかの方法で別途求める必要が ある.しかしながら,今回の模型実験では,少なくとも X/L>0.5の範囲の海底地形は一様であり,護岸からの反 射波の影響も空間的にほぼ一様と考えられることから, これを入射波高Hで置き換えることを考える.このよう にして再整理した結果を図-6 (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,同様に右 肩下がりの分布傾向がみられる.したがって,水深がほ ぽ一様とみなせる海域に設置された消波護岸前面の進入 灯点検桟橋などに対しては,この図に対して得られた以 下の揚圧力算定式を適用しても良いと考えられる.

$p_k = \rho_0 g (4H - 0.9S)$	(3b)
$p_k = \rho_0 g (4H - 3.1S)$	(4b)

一方,準静的揚圧力とクリアランスの関係については, 図面等は省略するが,最大揚圧力と同様,いずれの計測 地点においても,相対クリアランスが大きくなると,揚 圧力が小さくなる右肩下がりの分布となり,特に,沖側 のX/L>0.5の範囲では,そのばらつきは非常に小さく, クリアランスがゼロのときに発生する準静的揚圧力は 0.5pgH程度であった.また,X/L≤0.5の範囲では,消波 工への波の打ち上げ等の影響により揚圧力が大きくなり, 取付護岸近傍での準静的揚圧力は1.0~1.5pgHであった.

4. 多方向不規則波に対する実験結果

多方向不規則波実験では,不規則波浪に対する揚圧力 の発生頻度および発生揚圧力分布について検討した.

(1) 不規則波浪中の揚圧力発生率

多方向不規則波による揚圧力発生率の分布は,桁下部 および床版部ともに類似した傾向が見られた.すなわち, X/L ≤ 0.5では,発生率は空間的に変動し,重複波の節部 となるX/L = 0.25付近で最小となった.しかし,X/L>0.5 では,発生率は空間的にほぼ一定であった.さらに,こ れらの傾向は,波の入射角によらず同様であった.そこ で,これらのデータをすべてまとめて,各地点の入射有 義波高に対する相対クリアランスS/H_{1/3}l_{in}と揚圧力発生率 の関係を整理した結果を,回帰式と合わせて図-7に示す. ここで揚圧力発生率は,各地点で出現した波数に対し, それらによる揚圧力の発生回数の割合として定義した.

図より,相対クリアランスが大きくなるほど揚圧力発 生率が小さくなり,相対クリアランス*S*/H_{1/3}|_{in}=1.0のとき, 揚圧力発生率はほぼゼロとなることがわかる.

(2) 不規則波浪中の揚圧力発生頻度

多方向不規則波に対して計測された1波ごとの無次元 揚圧力 ($P/\rho g H_{1/3}|_{in}$)のうち,発生率が一定とみなせる X/L > 0.5の区間で得られた相対度数分布を図-8に示す. ここで,揚圧力が生じないケース(つまり, $P/\rho g H_{1/3}|_{in}=0$) は除外し,波の入射角による違いも考慮していない.

図より,相対クリアランスが小さい場合には,桟橋底 面に作用する揚圧力の繰り返し荷重として最多となるの は, P/pgH_{1/3}|in=0.2~0.4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(すなわち,相対クリア ランスが0.33より大きく,図-7より,揚圧力発生率が 50%未満になると),繰り返し作用する揚圧力の最多荷 重としては, P/pgH_{1/3}|in=0~0.2程度であることがわかる. さらに, P/pgH_{1/3}|in=0.6以下の繰り返し荷重は,全体の約



80%を占めることがわかる.

なお,図には示していないが,護岸前面の反射波や消 波工上の波浪変形による影響を強く受ける*X/L* ≤0.5の区 間では,クリアランスが小さいほど,繰り返し荷重とし て大きな揚圧力が作用することを確認した.

5.おわりに

本研究では、平面水槽を用いて、一様水深場の消波護 岸前面に設置された進入灯点検桟橋に作用する揚圧力を 測定し、護岸から半波長以上離れた沖側で適用できる、 相対クリアランスをパラメータとした新たな揚圧力算定 式を提案した.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、相対クリアランスが小さい場合には揚圧 力発生率が高く、繰り返し荷重としてP/pgH_{1/3}in=0.2~ 0.4程度の揚圧力が作用することがわかった.

参考文献

- 伊藤喜行・竹田英章 (1967): 桟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.
- 下追健一郎・Giovanni CUOMO・高橋重雄(2008):臨港道路 桟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,pp.3-34.