

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

Uplift Forces on Pier Deck of Coastal Bridges and the Role of Air

下迫健一郎¹・Giovanni CUOMO²・高橋重雄³

Kenichiro SHIMOSAKO, Giovanni CUOMO and Shigeo TAKAHASHI

Recent failures of coastal bridges during extreme storm events have focused attention on the need for research on wave loading of coastal structures suspended slightly above the still water level. This paper presents findings from large-scale experimental work carried out in the wave basin. Measurements from physical model tests are used to gain insights on the dynamics of wave-loading of coastal bridges and to derive prediction methods for both quasi-static and impulsive wave loads. The effect of openings in the bridge deck is also discussed, and guidance derived for design purpose.

1. はじめに

水面付近の水平板に作用する揚圧力については、古くから種々の研究が行われており、棧橋の上部工や杭式ドルフィンの上部工など、静水面付近にあり水面とほぼ平行な構造物には、条件によっては衝撃的な揚圧力が作用する危険性があることが知られている。たとえば、合田(1967)は、水平板に作用する揚圧力を、波面と板との衝突による運動量の急変に起因する力であると考え、カルマンの理論から水平板に作用する重複波による揚圧力の算定式を示している。また、谷本ら(1978)は、同様な水平板に作用する揚圧力を算定する方法を、ワグナーの理論に基づいて示している。一方、伊藤ら(1967)は、棧橋およびデタッチドピア上部工に作用する揚圧力について、模型実験に基づいた算定式を示している。また、室田ら(1966)、永井ら(1966)、堀川ら(1967)、樺木ら(1988)も、棧橋に作用する揚圧力について実験的研究をおこなっている。さらに、Cuomoら(2007)は、棧橋に作用する揚圧力について、地形変化や構造物の影響による波浪変形なども考慮した算定式を、二次元水理模型実験の結果に基づいて提案している。

ただし、実際の構造物の底面は必ずしも平坦ではない場合も多く、そうした詳細な形状に対応した研究はあまり行われていない。本研究は、臨港道路の棧橋部に作用する揚圧力について、棧橋部の平面的曲線および底面の複雑な形状を再現した模型を用いて、大縮尺の三次元水理模型実験を行い、棧橋に作用する揚圧力の特性とそれに及ぼす空気塊の影響について明らかにするとともに、こうした揚圧力の算定法を提案することを目的としたものである。

2. 実験方法

(1) 実験施設と実験ケース

実験は、国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所所有の三次元平面水槽で行った。図-1は、水槽における棧橋模型のレイアウトを示したものである。水槽の大きさは、長さ46.8m、幅34.6m、高さ1.1mであり、今回の実験は、導波板で区切られた幅25mの部分で行った。棧橋模型は曲線形状をしており、中央部での長さは約12.5mである。実験は、臨港臨港道路棧橋部周辺を対象として、模型縮尺1/10で現地を再現し、棧橋底面に作用する揚圧力を測定した。

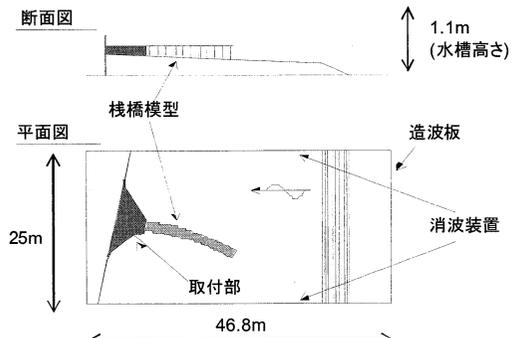


図-1 棧橋模型のレイアウト

本論文における物理量は、原則として現地換算値で示すものとする。水深は、棧橋の陸側取付部でCDL-2.3mであり、沖に向かって約1/200の海底勾配となっている。実験は規則波を用い、潮位を3種類、周期を4種類、波高については周期ごとに3段階変化させた。ただし、縦断方向の揚圧力については、波高は各周期での H_{max} 相当の1ケースのみとしている。表-1は、実験における波浪条件一覧である。ここに示している波高は、棧橋模型の中央付近(取付部から約50mの位置)における波高を基準とし、造波可能な最大波高(砕波限界波高)を H_{max} と定

1 正会員 博(工)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
2 PhD ローマ大学
3 フェロー 工博 港湾空港技術研究所 研究主監

義している。 H_{max} の値は潮位および周期によって異なり、1.53~2.38m程度である。実験における有効波数は5波とし、同じ波高を2回繰り返し行い、2回のデータの平均値を用いて整理した。なお、本論文では、単にHとした場合はここに示した波高を表し、 H_s と記述した場合には揚圧力の各測点における波高を表すものとする。

表-1 波浪条件一覧

揚圧力測定	潮位	波高	周期
縦断方向	C.D.L.+4.69m	H_{max}	6.75 s
	C.D.L.+4.20m		5.44 s
	C.D.L.+3.74m		4.70 s
	C.D.L.+3.74m		4.00 s
横断方向	C.D.L.+4.69m	$0.7H_{max}$	6.75 s
	C.D.L.+4.20m	$0.85H_{max}$	5.44 s
	C.D.L.+3.74m	H_{max}	4.70 s
	C.D.L.+3.74m	H_{max}	4.00 s

(2) 実験模型と計測内容

栈橋は、4×11本の杭(直径1.5m)で支持された梁部材の上に床版が載っている構造であり、底面から見ると、梁の部分と梁部材に囲まれた床版部分とがある。写真-1の左側は、栈橋模型底部の状況を示している。床版部は梁部に比べて水面からの位置が高く、波作用時に空気が閉じこめられる形状となっている。図-2は、栈橋模型底面における波圧計の取付位置の分布を示したものである。ただし、波圧計の個数の制約から、実験では栈橋縦断方向の揚圧力分布と横断方向の揚圧力分布に分けて計測を行った。揚圧力データのサンプリングは、作用時間の短い衝撃的な波力も測定できるように1000Hzとした。また、図には示していないが、写真-1の右側にあるように、梁部に囲まれた床版部分の中央の一部に、幅1.5cm、長さ12cm(模型量)の開口部(空気抜き)を設けており、開口部の有無による揚圧力の比較も行った。さらに、この開口部および栈橋の側面に容量式波高計を設置し、波高および波面上昇速度も計測している。

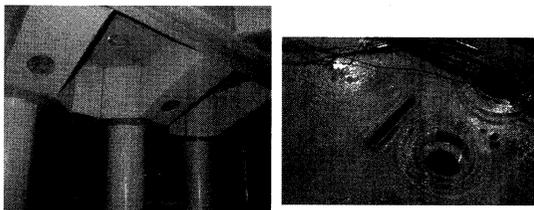


写真-1 栈橋模型の底面および開口部

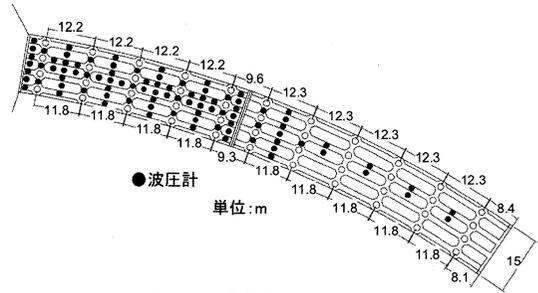


図-2 波圧計取付位置の分布

なお、床版部と梁部とで高さが異なるだけでなく、栈橋全体が護岸との取付部から沖側に向かって徐々に高くなっている。そのため、静水面から栈橋底面までのクリアランス c_i は場所によって大きく異なる。図-3は、静水面から揚圧力測定点までの距離の分布を示したものである。梁部については、取付部に近い位置では栈橋底面が水面下となる場所もある。

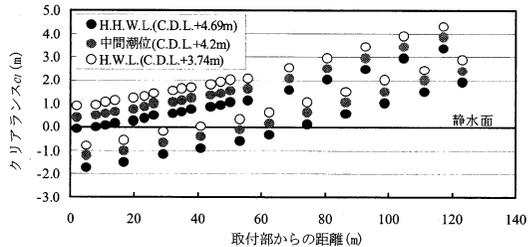


図-3 静水面から揚圧力測定点までの距離の分布

3. 実験結果

(1) 波浪変形と揚圧力の分布

a) 最大水位の分布

波が沖から岸に伝播する際には、水深の変化および構造物の影響によって波高が変化する。図-4は、各測点における最大水位 η_{max} を波高 H で無次元化した値を、開口部ありと開口部なしに分けて、すべての実験ケースについて平均した結果の分布を示したもので、No.30が陸側取付部に最も近い点である。左側が開口部ありとなしをすべて平均したデータであり、中央が開口部なしのみ、右側は開口部ありのみのデータである。最大水位は陸側に近づくにしたがって小さくなっているが、取付部のところではやや大きくなっている。これは、陸側からの反射波の影響による重複的な水位の上昇と考えられる。また、開口部ありのほうが開口部なしに比べて全体的に最大水位が低くなっており、開口部の影響によって波高の減衰が促進されたものと考えられる。

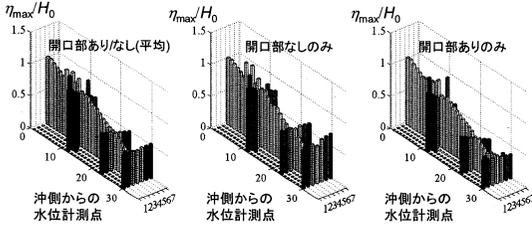


図-4 無次元最大水位の分布

b) 揚圧力の分布

揚圧力については、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準静的揚圧力(腰掛け部の値) P_{qs+} についても解析を行った。図-5は、 P_{max} および P_{qs+} と、後述する最大揚圧力の立ち上がり時間 t_r について、実測波圧の例でその定義を示したものである。なお、図から分かるように波圧波形には細かい変動があるため、実際の解析においては、wavelet変換を用いて値を算定している。

図-6は、 P_{max} および P_{qs+} を水の密度、重力加速度 g および測定位置における波高 H_s とで無次元化した値 P_{max}^* および P_{qs+}^* について、図-4と同様にすべての実験ケースについて平均した結果の分布を示したものである。No.10付近とNo.30付近において、無次元揚圧力がやや大きくなっているが、これは、No.10付近が通過波による揚圧力のピーク、取付部に近いNo.30付近が重複波の作用による揚圧力のピークと考えられる。

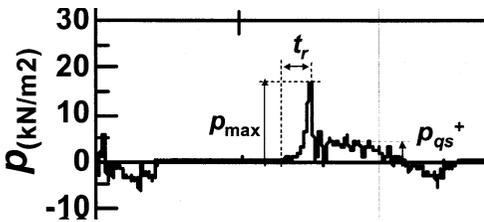


図-5 P_{max} , P_{qs+} , t_r の定義

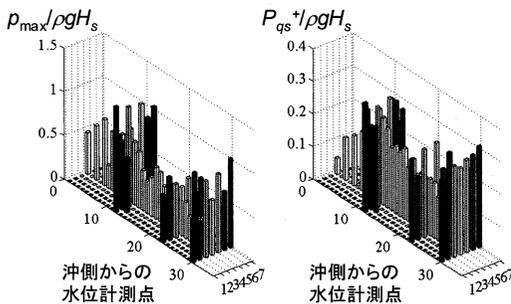


図-6 無次元揚圧力の分布

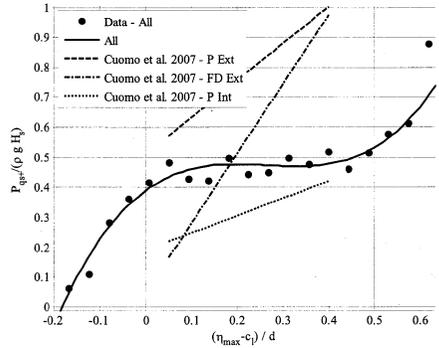


図-7(a) 床版部における最大水位と揚圧力

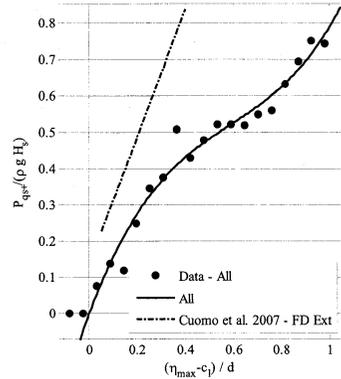


図-7(b) 梁部(縦断方向)における最大水位と揚圧力

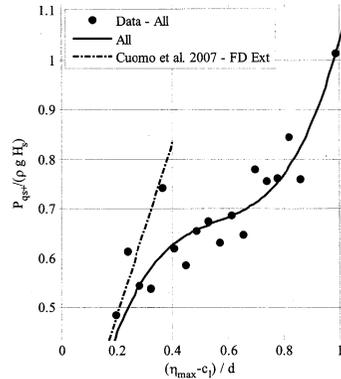


図-7(c) 梁部(横断方向)における最大水位と揚圧力

(2) 準静的揚圧力の特性

Cuomoら(2007)によれば、無次元化した準静的揚圧力 P_{qs+} は、無次元化した局所的な静水圧水頭 $\eta^*(=(\eta_{max}-c_i)/d)$ の関数で表すことができる。ここに、 d は当該地点での水深である。図-7は、床版部および梁部に作用する揚圧力についてこれらの関係を表したもので、実験結果の回帰式(実線)と、Cuomoら(2007)の算定式も合わせて示している。今回の実験結果では、開口部の有無で P_{qs+} の値にほとんど差がなかったため、測点ごとに開口部ありとなし両方のすべてのケースの値を平均してプロットした。なお、床版部分は梁部材に囲まれた空間となっているた

め、横軸が0より小さいとき(波面が床版に届かない状態)でも、水面が梁部材まで到達すると空気が閉じこめられて揚圧力が作用する。一方、梁部の場合、波面が部材に届かない状態では揚圧力は作用しない。

床版部の場合、揚圧力と静水圧水頭の関係は3つの部分にわけられる。すなわち、 $\eta^* < 0$ の範囲では P_{qs+}^* は0から0.4程度まで急激に増加している。0 < $\eta^* < 0.4$ の範囲では P_{qs+}^* は0.4~0.5程度でほぼ一定となっている。0.4 < $\eta^* < 0.65$ の範囲では P_{qs+}^* は再び0.7程度まで増加している。また、梁部についても、比較的似たような関係があり、図中の回帰式は3次関数として以下のように表すことができる。

$$P^* = a \cdot \eta^{*3} + b \cdot \eta^{*2} + c \cdot \eta^* + d \quad (1)$$

ここに、a~dの係数および相関係数は、表-2に示すとおりである。どの部材も相関係数はかなり高く、回帰式は実験結果をよく再現している。

なお、図には示していないが、開口部ありとなしのデータを別々に平均した場合、全体的に見ると開口部ありのほうが P_{qs+}^* の値がやや小さくなる傾向にある。ただし、開口部ありの場合には床版部分での最大水位も上昇するため、必ずしも揚圧力の絶対値が減少するわけではなく、逆に波面が直接作用することによって揚圧力が大きくなる場合もある。

表-2 準静的揚圧力算定における係数

部材	開口部	a	b	c	d	R ²
床版	あり&なし	5.75	-4.53	1.11	0.39	0.95
梁(縦断方向)	あり&なし	1.32	-2.33	1.80	0	0.96
梁(横断方向)	あり&なし	3.17	-5.32	3.19	0	0.87

(3) 最大揚圧力の特徴

a) 最大揚圧力と準静的揚圧力の関係

図-8は、床版部に作用する揚圧力について、無次元化した最大揚圧力 P_{max}^* と準静的揚圧力 P_{qs+}^* の関係を示したものである。実験結果は、図-7と同様に測点ごとにするべの実験ケースの値を平均してプロットしている。Cuomoら(2007)によれば、 P_{max}^* と P_{qs+}^* のはほぼ比例関係にあり、 P_{max}^* は最大で P_{qs+}^* の2.5~3倍程度になるとされている(図中の太実線)が、今回の実験結果をもとに、以下に示すように、より一般的な関係式を求めた。

$$P_{max}^* = a' \cdot P_{qs+}^{*3} + b' \cdot P_{qs+}^{*2} + c' \cdot P_{qs+}^* + d' \quad (2)$$

ここに、a'~d'の係数および相関係数は、表-3に示すとおりである。なお、紙面の都合で図は示せないが、表中には縦断方向および横断方向の梁部の結果についても合わせて示している。床版部については、図-8からわ

かるように、相対的に揚圧力の小さい範囲でばらつきが見られるものの、比較的实验結果をよく再現している。一方、梁部については、縦断方向の場合には3次関数で表すことによってかなり相関係数が高くなっているが、横断方向の場合にはデータのばらつきが大きく、相関係数は低くなっている。

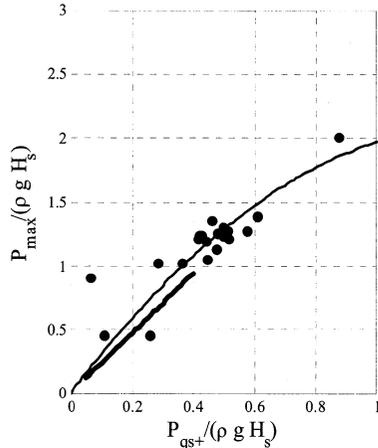


図-8 最大揚圧力と準静的揚圧力の関係

表-3 最大揚圧力算定における係数

部材	開口部	a'	b'	c'	d'	R ²
床版	あり&なし	—	-1.21	3.18	0	0.60
梁(縦断方向)	あり&なし	12.71	-18.10	8.58	0	0.94
梁(横断方向)	あり&なし	—	—	2.54	0	0.35

b) 最大揚圧力と作用時間の関係

一般に、衝撃的な最大揚圧力の値が大きくなるほど、その作用時間は短くなる。ここでは、最大揚圧力とその立ち上がり時間 t_r の関係について検討する。立ち上がり時間は、図-5に示したように、揚圧力が増加し始めてから最大値になるまで(栈橋底面が静水面下であり揚圧力が負の値も取る場合には0になってから最大値になるまで)で定義し、最大揚圧力と立ち上がり時間との間に以下の関係式を仮定する。

$$P_{max} = \alpha \cdot t_r^\beta \quad (3)$$

今回の実験結果をもとに、すべてのデータの包絡線を表すように α および β の値を求める。図-9は、左から順に床版部、梁部(縦断方向)、梁部(横断方向)、上段が開口部なし、下段が開口部ありの実験結果を表している。なお、図中の揚圧力および立ち上がり時間の値は模型量である。図中の包絡線を表す α および β の値は、表-4に示すとおりである。

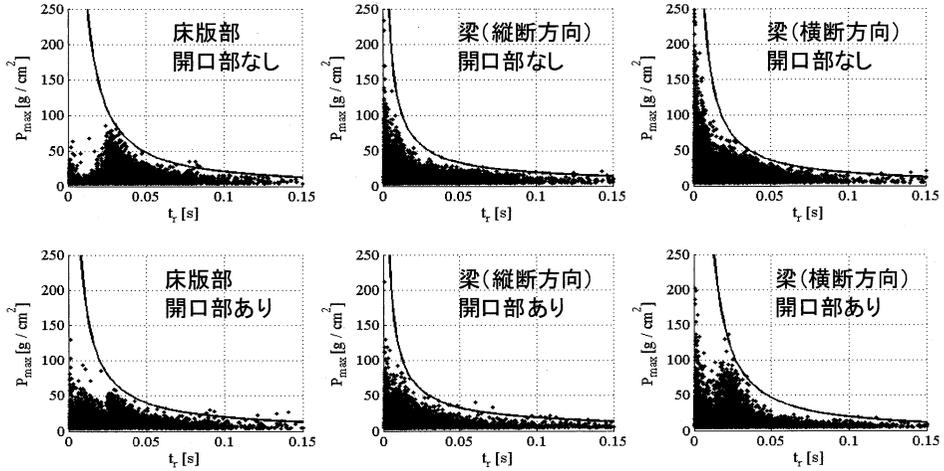


図-9 最大揚圧力と立ち上がり時間の関係

すでに述べたように、開口部の有無による揚圧力の特徴は、部材やクリアランスによって異なる。床版部については、開口部がない場合、空気塊のクッション効果によって、立ち上がり時間のやや長い場合(0.03s程度)に比較的大きな揚圧力が作用している。一方、開口部がある場合、波面が直接ぶつかることにより、立ち上がり時間の短い場合(0.02s以下)に大きな揚圧力が作用している。また、梁部については、開口部がない場合のほうが、立ち上がり時間の短い場合(0.01s以下)に大きな揚圧力が作用していることが多い。

表-4 最大揚圧力と作用時間の関係における係数

部材	開口部	α	β
床版	なし	1.3	-1.2
	あり	2.0	-1.0
梁(縦断方向)	なし	3.0	-0.8
	あり	3.0	-0.8
梁(横断方向)	なし	1.8	-1.0
	あり	1.1	-1.25

4. まとめ

本研究により、臨港道路栈橋部のように陸から海へ延びる構造物に作用する揚圧力について、実験結果に基づいて最大揚圧力および準静的揚圧力を算定する手法が提案された。こうした構造物に作用する揚圧力は、形状やクリアランスによって大きく変化するが、今回の算定式は波高のほかに最大水位とクリアランスをパラメータとして取り入れており、これまで広く用いられていた入射波高のみをパラメータとする簡単な算定式に比べて揚圧力をより精度よく推定できるものと考えられる。

実際の設計においては、たとえば流れ関数法などを用いて任意の地点における波高と最大水位を計算し、これらの値とクリアランスから、最大揚圧力を求めることができる。ただし、床版に開口部を設けることによる揚圧力の変化については、動的応答効果も含めたさらなる検討が必要である。

なお、本研究における水理模型実験は、広島港湾空港技術調査事務所および横浜港湾空港技術調査事務所により実施されたものであり、関係各位のご協力により貴重なデータをご提供いただいた。また、実験データの整理に当たっては、(株)エコーの宮里一郎氏ほかのご協力を得ている。ここに記して深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

伊藤喜行・竹田英章 (1967) : 栈橋に作用する波の揚圧力, 港研報告, 6巻, 4号, pp.37-68.
 合田良実 (1967) : 構造物に働く波力, 1967年度水工学に関する夏期研修会講義集 海岸・港湾コース, 土木学会水理委員会, pp.B-16-1-B-16-25.
 榎木 亨・後野正雄 (1988) : 栈橋床版に作用する揚圧力の水理模型実験における相似則に関する一考察, 海岸工学論文集, 第35巻, pp.677-681.
 谷本勝利・高橋重雄・和泉田芳和 (1978) : 栈橋に作用する波の揚圧力, 港研報告, 17巻, 2号, pp.3-47.
 永井荘七郎・久保 直・時川和夫 (1966) : 栈橋に働く揚圧力に関する研究(その1), 第13回海講講演集, pp.112-119.
 堀川清司・中尾忠彦・矢島昭弘 (1967) : 栈橋に働く揚圧力に関する実験的研究, 第14回海講講演集, pp.148-153.
 室田 明・古土井光昭 (1966) : 栈橋床版に作用する揚圧力についての実験的研究, 第13回海講講演集, pp.120-125.
 Cuomo G., Tirindelli M. and Allsop N.W.H. (2007) : Wave-in-deck loads on exposed jetties, Coastal Engineering, doi:10.1016/j.coastaleng.2007.01.010.