

浮体式空港島による波浪・河川流への影響に関する実験

平石 哲也*・奥野 光洋**・鈴木 智浩***・稲垣 茂樹***

大型河川の河口部に建設される浮体式の海上空港が、波と河川流に与える影響について模型実験を実施している。実験水槽は、多面式多方向不規則波造波装置と複数の潮流発生装置を有する“環境インテリジェント水槽”で、実験縮尺は 1/250 である。空港島の構造は、現地換算で長さ 3000 m の鋼製浮体で、河口よりの 1000 m は喫水 8 m の楕形、それ以外の部分は、喫水 1.8 m の箱形浮体からなっている。計画高水量が流下し、外洋性のうねりが作用している場合に、流速と波高の分布が測定された結果、楕形中心部の流速は海象条件によらず小さいこと、浮体背後の既設埋立地間での水路流速は、波高が大きくなると増加することが判明した。空港島の波透過率は 0.5 程度であった。

1. はじめに

航空需要の伸張に伴い、首都圏や関西圏では沖合いに人工島を建設して新たな空港を開港する計画が進められている。人工島の建設工法としては、従来までの埋立式や栈橋式に加えて、耐震性が高く、建設工期が比較的短いと考えられる浮体式が注目されている。一方、我が国の大都市圏は河口沖積層に発達し、大都市近傍の空港島建設計画では、河川流への影響を適切に評価し、河川出水への影響を最小限にしておく必要がある。著者ら(2002)は、すでに、埋立式と栈橋式の人工島が河口に建設された場合を想定し、模型実験で河川流の流下状況に対する影響を調べた。

浮体式空港は局所的な水位変動によって浮力のばらつきが生じ、動揺量や係留力が変化する可能性がある。したがって洪水時の河口部での波の“せきあげ”による波高増大を設計時に評価しなければならない。海域の波や流れの変化は数値計算で検討される場合もあるが、地形や構造物の形状が複雑になると、数式中の係数・定数の設定が困難で正確な推定ができない。そこで、羽田空港の沖合い拡張案をモデルケースとし、多方向不規則波と流れを任意の方向へ発生させることができる実験水槽を用いて、箱形と楕形のポンツーンを組み合わせた長大浮体式空港が河口付近に設置された場合を設定して、模型実験で、空港島周辺の流況、洪水時の波浪の変化と浮体への影響等について調べた。

2. 実験の概要

図-1 に、実験水槽における造波装置、河川を含む周辺地形模型および浮体式人工島模型の配置を示す。水槽の長さ、幅はそれぞれ 30 および 40 m で、図の上および右側側壁に沿って 94 枚の造波板からなる多方向不規則波が設置されている。造波機の駆動信号は、各造波板の設

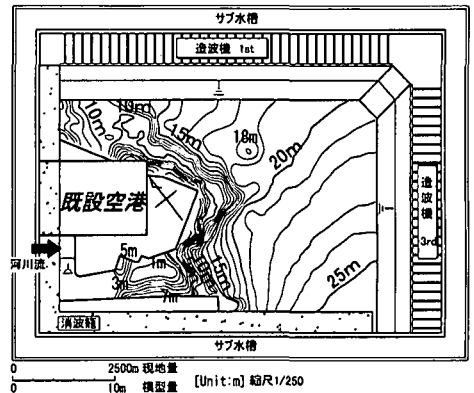


図-1 実験水槽と模型地形

置位置を考慮して、マルチ・フェース造波機制御方式(平石ら, 1995)にしたがった。

造波機の下方には、幅 120 cm、高さ 10 cm の吐出口を有する床面設置型の潮流発生機が、水槽全側面に沿って合計 78 機置かれている。本研究では、左側面の発生機を用いて河川流を再現した。模型は歪みを持たず、縮尺は 1/250 で、フルードの相似則にしたがっている。

図の左側に示した水槽内の 8 m 四方の矩形水槽は、別の実験に用いている仮設水槽である。一部が本実験で対象とする模型地形上に出ているため、本実験を開始する前に、仮設水槽が無い状態で計測した潮流速、流向(平石ら, 2002)と、本水槽で同一の出力信号で発生させた潮流速や流向を比較した。その結果、両者に差は生じていなかったため、仮設水槽の凸部の影響は無いものとして本実験を行った。

図-2 に沖合空港島模型の位置と計測器の配置を示す。実験では、造波機前面で波の方向スペクトルを測定して、空港島周辺の広い範囲での流況を調べるために、水平 2 成分電磁流速計 10 台、容量式波高計 22 本を設置したが、本研究での解析には、図に示す 10 カ所の流速計と 4 ヶ所の波高計による測定値を用いた。波は、図の右側のサードフェース造波面から、造波面に対して 90°方向

* 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
** (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
*** 正会員 工修 (株) エコー 沿岸デザイン本部

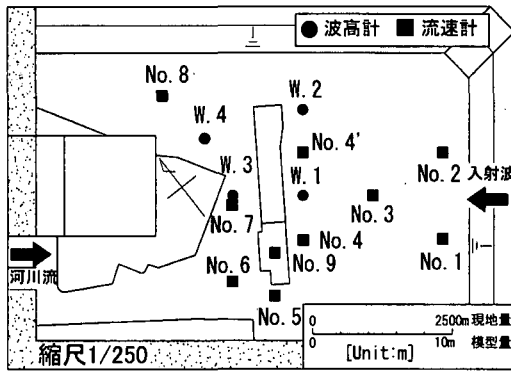


図-2 実験水槽における計測器の配置

へ造波している。この方向は現地でほぼSEに相当する。河口周辺での潮流は0.5 m/sが現地では生じている可能性があるが、実験対象とする高水量が大きいため、上げ潮、下げ潮が河川流速に及ぼす影響は微小である（平石ら、2002）。そこで、本研究では、潮流の再現はしていない。

図中のNo. 9流速計は、浮体の櫛形の中央に設置したもので、浮体模型に小さな穴をあけて流速計を挿入し、櫛形部での流況変化を調べた。河川流量は、現在および将来の計画高水量で、それぞれ、4600および7000 m³/sで、河川内のNo. 6流速計より上流側に、あらかじめ5本の流速計を河川横断方向に設置し、それらの計測流速と流域横断面積の積から得られた流量が目標値に一致するように、流れ発生装置の出力を調整した。測点No. 7は空港島と既設埋立地間の水路流速を測定する。空港島沖側の波高測定点W. 1, W. 2には40 cmの間隔で2本の波高計を隣接させ、入射波分離法（合田ら、1976）で浮体の反射率を解析した。浮体の波透過率は、沖側の入射波高と、空港島背後のW. 3, W. 4での観測波高の比から推定した。表-1に実験で用いた波、河川流の諸元をまとめた。

なお、容量式波高計で測定した水位変動からは、統計処理後、有義波高および最高波高を整理し、流速データ連続観測値を統計処理し、平均流速と流向を求めた。また、平均的な流れの状況を求めるために、直径2.5 cmのフローターを河川上流側から流し、模型床上で30 sec間隔（現地換算量で約8 min間隔）で水槽天井から写真撮影を実施してフローターの位置を求めて軌跡を整理した。海底地形は、25 m以深は水平床とした。

沖合空港島の浮体模型としては、鋼製の箱体を連結させたメガフロート形式（たとえば、太田ら、1998）が一般的に計画されている。作用波に対する動揺やねじれなどは、連結された長大構造の平均的な曲げ剛性に大きく影響される。浮体構造としては、喫水の小さい矩形構造

表-1 実験で用いた波と河川流

入射波	波高	周期	波向	方向集中度	造波波数
	5.8 m 2.0 m	14.2 s	SE	$S_{\max}=10$	500 波
多摩川放水路流量		計画高水流量		将来計画高水流量	
		4600 m ³ /s		7000 m ³ /s	
潮 位		満潮位			
		L.W.L.+2.1 m			

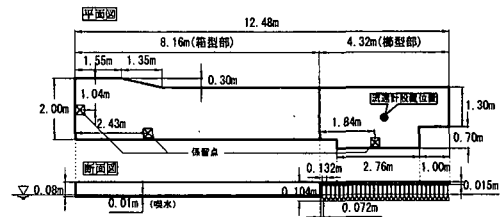


図-3 浮体模型の詳細図

（箱形）が、これまで検討対象として数値計算や模型実験が実施されてきた。しかし、河川の流域や河口では河川からの表層流をなるべく阻害しないように、橋脚のように水面付近の構造物断面をできるだけ小さくする必要がある。そこで、本実験で対象とした浮体式空港島は、図-3に示すように、河口側の1000 mを櫛形構造、それ以外の2000 mを箱形構造とした複合形式で考案されている。櫛形部分の水面での横断幅は2.8 m、流域の幅に対する櫛形構造の橋脚部の幅の総計の比を求めると、約8%である。水面での橋脚幅が小さいと浮力が確保できないので、櫛形構造部では、河川流に影響を与えないと考えられる水深付近に空洞のフーティングを取り付けて浮力体としている。喫水は、箱形部が1.8 m、櫛形部が8 mである。単位幅あたりの曲げ剛性は、現地で計画されている構造を対象に箱形部で $EI/B=4.3 \times 10^{14}$ Nm、櫛形部で $EI/B=9.4 \times 10^{13}$ Nmと推定できる。模型での目標曲げ剛性は、箱形部と櫛形部でそれぞれ $EI/B=1.1 \times 10^{15}$ Nmおよび $EI/B=2.4 \times 10^{14}$ Nmとなる。この曲げ剛性を再現するために、浮体模型は、アルミ製の薄板で製作し、発泡スチロールで浮力を調整し、目標喫水を確保した。波浪中の浮体動揺は、本研究では報告していない。

3. 実験の結果

（1）流況観測

図-4に河川上流から流下させたフローターの時間的な位置変化を示す。有義波高2.0 m、周期14.2 sの波と河川流を発生させた後に、波先端が河川内に到達し、十分水槽内が攪乱されてから、河川内でフローターを流出させて、水槽天井からビデオ撮影で軌跡を撮影した。図

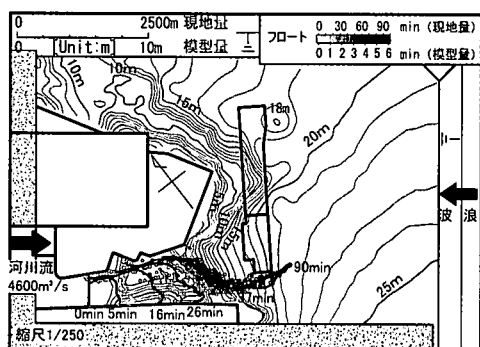
—4(a)および(b)はそれぞれ、河川流量が4600および7000 m^3/s のケースを示す。図—4(a)では、流出後30分でフローターは主に河川の右岸よりに沖合へ流れ出し、時間の経過に伴って河口に広く分布するようになる。しかし、60分以降では、あまり広がらずに、空港島の西側に集中し、やがて空港島を回り込むように沖合へ流出する。フローターの中で空港島の楕形部に引っかかり、滞留するようなものは現れなかった。このことから、河川から出水する流れは、右岸を中心に流下し、拡散による流速低下はあまり顕著にならず、空港島の西側から沖合へ流出していくことがわかる。図—4(b)では、フローターの移動速度が速く、30分後には一部のフローターが空港島に到達し、90分後には、ほとんどのものが空港島より沖側へ流出する。沖側では、やや拡散する傾向が現れ、空港島を通過すると、フローターはまっすぐ流下せずに広い海域へ徐々に広がっていくようである。流量が7000 m^3/s の場合でもフローターが楕形部に引っかかることはなかった。

(2) 流速変化

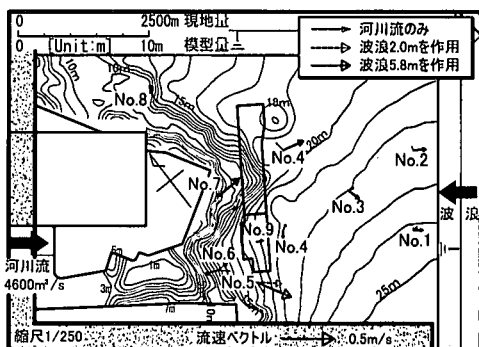
図—5に、波と河川流が作用した場合の空港島周辺の2成分流速計で測定した平均流速ベクトルを示す。図—5

(a)および(b)は、それぞれ河川流量4600 m^3/s および7000 m^3/s に相当する。各図で、波を作用させない場合、作用有義波高2.0 mおよび5.8 mの場合を比較した。なお、流速計の番号は沖側より順番につけている。水深が深い沖合では、水深レベルで流速が異なり、本来は水深方向の流速分布も検討しておくべきであるが、ここでは、水深の中間付近の流速を測定した。

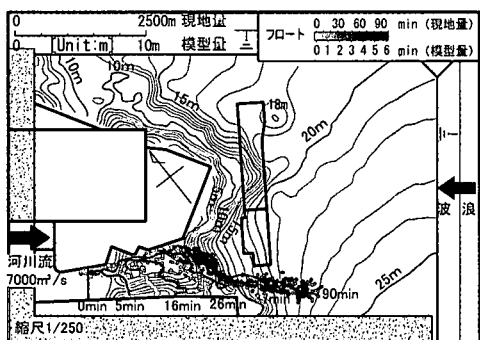
図—5(a)においては、河川流だけのケースに比較して、波浪を作用させると流速の絶対値は大きくなる。特に浅海域でのNo. 3, No. 5では差が顕著で、波高5.8 mの場合には、河川流のみのケースに比較して流速ベクトルの絶対値は2倍以上になる。また、流速ベクトルの向きも変化し、No. 4で見られるように河川流のみの場合は空港島に沿った北よりの流向が観測できるが、波浪が作用すると流速ベクトルの方向は波向に近くなり、波浪の影響が強くなることがわかる。図—5(b)での河川流量7000 m^3/s の場合には、河口No. 5では、河川流のみの場合に絶対値が最も大きく、波浪の作用により、沖合へ進む河川流が影響を受け、やや小さくなることがわかる。その他の観測点でのベクトルの向きなどは、図—5(a)の観測結果と大きく変わらない。



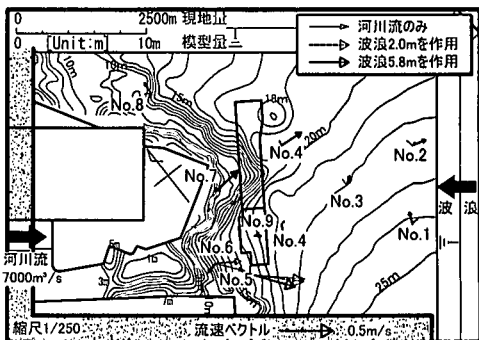
(a) 河川流量 4600 m^3/s



(a) 河川流量 4600 m^3/s



(b) 河川流量 7000 m^3/s



(b) 河川流量 7000 m^3/s

図—4 河川から流出したフローターの移動

図—5 空港島周辺の観測流速ベクトルの変化

各点での流速変化を詳細に検討するために、代表点での流速変化を調べた。図-6は、流速が最も大きくなる河口部の測点(図-5では、No.5)の流速の変化を示す。河川水が無い場合でも、波浪による流れ、すなわち海浜流の影響は大きく、波高 $H_s=5.8\text{ m}$ のときは平均流速 $U=0.3\text{ m/s}$ になる。 H_s による流速が大きい場合には、河川流の影響は小さく、河川出水時にも U は大きく変化しない。河川流が $4600\text{ m}^3/\text{s}$ の場合には河川流のみの場合に $U=0.13\text{ m/s}$ であり、 H_s が 2 m でも大きく変化はしていない。河川流が $7000\text{ m}^3/\text{s}$ の場合には H_s が増加するにつれて合成流速は小さくなっており、海浜流と河川流の流向が一致していないために、相殺効果が現れ、 $H_s=0\text{ m}$ のときに U は最大となっている。

図-7は、浮体の楕円部の中央に設置した測点(No.9)の流速変化を示す。図-6に示した浮体式空港の外側の測点と比較すると流速値は非常に小さく、1オーダー小さくなっている。流速観測点は大きく離れていないので、これは楕円部が流れに対しては障害物となるため、河川流の多くが空港島外側を回って外海へ広がることを示している。これは、本実験結果をデータベースとして保存し、各種の数値計算モデルの検証データとして活用する場合に重要で、楕円部の流域に対する影響を適切に計算モデルに組み入れる必要がある。図に示すように、測点No.9の流速値は小さいが、波高が大きくなると、流速もやや速くなる傾向を示す。河川流量が $7000\text{ m}^3/\text{s}$ の場合に、河川流量 $4600\text{ m}^3/\text{s}$ に比べて流速値が小さくなる理由としては、空港島の外側での流速が大きく、流下しやすいため、抵抗が大きい楕円部への流入が小さくなるためと考えられる。

空港島背後と既設人工島との間にできる水路の流速は、空港島への連絡橋の安定性や、既存の干潟への影響評価のために重要な要素となる。図-8に水路の測点No.7での流速変化を示す。河川流だけを発生させた場合には、流量が大きくなっても測点No.7での流速は大きくならず、たかだか 0.04 m/s 程度である。 $H_s=2.0\text{ m}$ の場合でも、河川流だけの場合に比べて、若干流速は大きくなるが、その大きさは 0.05 m/s 以下である。 $H_s=5.8\text{ m}$ の場合には、河川流の大きさに係わらず、測点No.7の流速は大きくなり、 0.25 m/s 以上になる。測点No.7での流速は、波による海浜流に起因しており、水深が浅くなって、その影響が顕著になるために、水路の流速は大きくなり、河川流による影響は小さい。埋立式を対象とした実験(平石ら、2002)では、河川流が空港島によって分流され、背後水路へも流入する状況が観察されたが、浮体式の場合は、喫水が浅く水底まで遮蔽していないので、明瞭な分流が生じなかった。

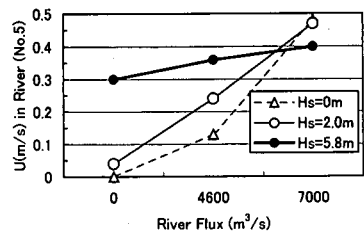


図-6 河口部の流速変化

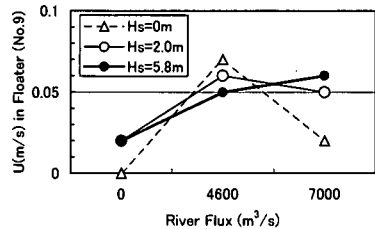


図-7 浮体楕円部の流速変化

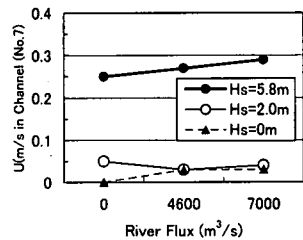


図-8 空港島背後の水路での流速変化

(3) 波の変化

河口付近の逆流中において波高増大が生じることは、これまで指摘されており、(たとえば、中川ら、1994)、本研究でも、浮体構造物の係留装置の設計のために河口付近での波高変化を調べた。図-9は、河口部の波高計W.5で測定した有義波高 $H_{1/3}$ と最高波高 $H_{\max}$ の変化である。河川流がないときの波高を1として、河川流が加わったときの波高を波高増大率で表している。 $H_s=5.8\text{ m}$ の場合には、河川流量が増加しても、波高は大きくなり、波高増大率は、 $H_{\max}$ および $H_{1/3}$ の両者で、ほぼ1.0である。したがって、 H_s が 5.8 m 以上の時は、河川流の影響が小さく、いわゆる“せき上げ効果”による河口付近での波高増大は顕著にならない。一方、 $H_s=2.0\text{ m}$ の場合には、河川流量の増大に伴って波高増大率が大きくなり、有義波高で1.1倍、最高波高で1.3倍の波高増大が現れる。したがって“せき上げ効果”は、本実験の範囲では、波高が小さいほど、河川流量が大きいほど顕著に表われる。

浮体式空港は、浮防波堤として機能する。波の遮蔽効

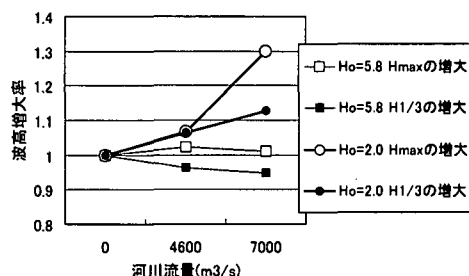


図-9 河口における波高増大

果が大きい場合には、背後の航路での静穏を確保するための新たな防波堤建設が不要になる。ここでは、実地形と平面的な影響を考慮した場合として、前述の波高計 W. 1 および W. 2 で入射波高と反射波高を解析し、W. 3 と W. 4 で透過波高を解析した。図-10 に浮体の箱形部の反射率および透過率を示す。あらかじめ、W. 1 と W. 2 での測定値に相違がないことを確認して、両者の平均値で反射率 K_R を解析した。図-10(a) に示すように反射率は河川流量によらず一定で、 $H_s=2.0$ および 5.8 m のときに K_R は約 0.4 および 0.5 になる。

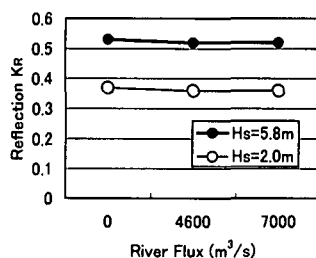
図-10(b) の透過率は、波高が大きくなると増加する傾向を示し、 $H_s=5.8$ m で $K_T=0.5\sim0.6$ 程度である。 $H_s=2.0$ m の場合には $K_T=0.52$ 程度で河川流量によらず一定である。このように本実験で対象とした浮体空港の箱形部は、透過率約 0.5 の浮防波堤として機能する。

4. あとがき

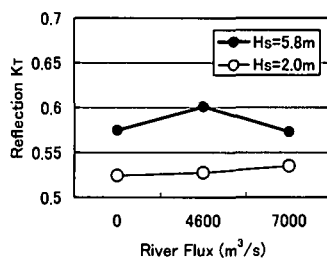
河口近傍に大型浮体式空港が建設される場合を想定して、流速ベクトルや波高の変化を実験で調べ、沖合いからの波によって流況が変化することを示した。実験結果は、空港島の河川流域環境への影響評価に活用する。

参考文献

太田 真・池上国広・山口洋一 (1998): 超大型浮体式海洋構造



(a) 反射率



(b) 透過率

図-10 浮体箱形部における波の反射と透過

物の波浪中応答に関する実験的研究, 西部造船会会報, 第 95 号, pp. 99-108.

合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験による入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.

中川康之・鶴谷広一・橋本典明 (1994): 方向スペクトルの推定に及ぼす流れの影響に関する検討, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 116-120.

平石哲也・金澤 剛 (1995): 多面式造波装置の適用性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 131-135.

平石哲也・奥野光洋・宮里一郎 (2002): 沖合い空港島による波浪・河川流への影響に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 701-705.