

浮体パネルによる越波低減護岸の有効性に関する実験的研究

Experimental Study on Effectiveness of Wave Overtopping Reduction Seawall with Floating Panel

川崎浩司¹・舟橋 徹²・福本 正³

Koji KAWASAKI, Toru FUNAHASHI and Tadashi FUKUMOTO

An upright seawall with floating panels was proposed in this study in order to mitigate wave overtopping disasters induced by storm surge or high wave. Laboratory experiments were carried out using a two-dimensional wave flume for confirming the effectiveness of the floating panel as a countermeasure against wave overtopping and examining the dynamic behavior of the floating panel. As a result, the floating panel was found to have a great reduction effect of wave overtopping under regular wave action as well as infragravity wave action by following the water surface elevation in front of the seawall. It was also confirmed that the phase lag between the behaviors of the floating panel and the water surface increases as wave period approaches the natural period of the vertical oscillation of the floating panel.

1. はじめに

1959年の伊勢湾台風以降、さまざまな沿岸防災施設の整備が進められてきた。しかし、現在においても高潮・高波災害がなくなることはなく、構造物の老朽化による被害の拡大も懸念されている。さらに、IPCCの第4次評価報告書(2007)によると、世界の海水面は今世紀末までに13cm～59cm上昇すると推算されており、今後、高潮災害の増加が予想される。高潮災害に対する対策方法として、さまざまな方法が提案されているが、現状では、天端高の嵩上げによる方法が一般的である。

1999年の海岸法の改正により、防災のみならず海域の景観や利用の面にも配慮した海岸防災施設のあり方が重要視されるようになった。このような社会的要請の下、親水性に考慮し、低天端で防災機能に優れた新しい形式の海岸構造物が求められている。一方、建設コストの縮減により、また防災ではなく減災を目的とした海岸施設整備への要望の変化により、既存の護岸に越波低減効果を有する対策を施すことで、防災機能の向上が試みられている(例えば、川崎・笹田, 2009)。

上記の背景を鑑み、本研究では、景観や親水性に配慮し、減災を目的とした維持管理が容易な構造物として、既設の直立護岸前面に浮体パネルを設置した新たな護岸形式を提案する。具体的には、図-1に示すように、高潮や高波が来襲した際、護岸胸壁に設置された浮体パネル

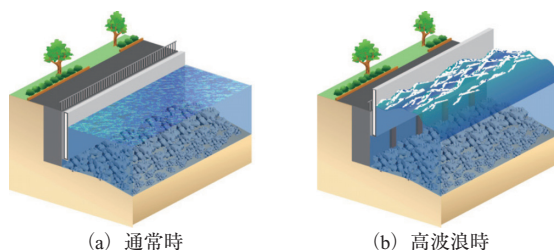


図-1 浮体パネル設置直立護岸の概念図

が自然外力である波浪によって上下に動くことで、既設護岸を越えて堤内地に流れ込む海水を低減させる護岸形式である。浮体パネルは水面変動に追従することにより、波が作用する際に護岸天端高の嵩上げと同様の効果が期待でき、大規模な越波・越流に対しても軽減効果が得られると考えられる。

さらに、本研究では、水理模型実験を実施することにより、規則波作用下あるいは高波を想定した長周期波作用下における浮体パネルの越波低減性能を明らかにするとともに、浮体パネルの動的挙動特性を把握することにより、新たな護岸形式としての浮体パネル設置護岸の有効性を検討する。

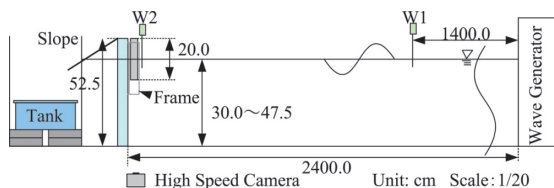


図-2 実験装置

- | | | |
|--------|------|---------------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 2 学生会員 | 学(工) | 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 |
| 3 | 博(工) | 西松建設(株)技術研究所土木技術課 |

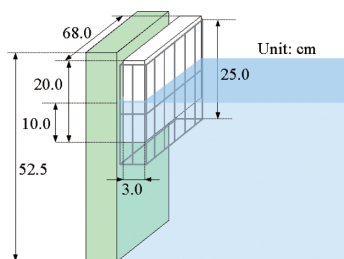


図-3 浮体パネル設置護岸の模型

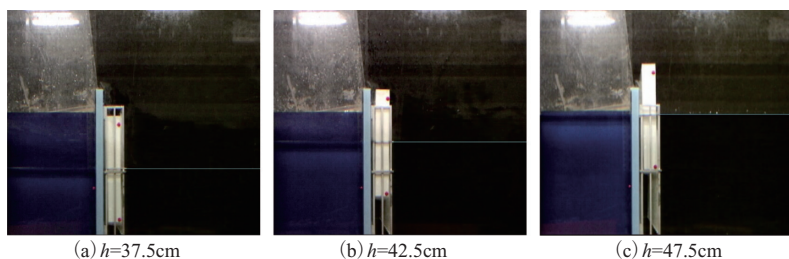


写真-1 各水深における浮体パネルの初期位置

2. 水理模型実験

(1) 実験装置

名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻所有の断面2次元造波水槽（長さ30m，幅0.7m，高さ0.9m）を用いて水理模型実験を行った。図-2に実験模型の概要を示す。本実験では，模型縮尺を1/20とし，直立護岸前面に図-3に示す浮体パネルを設置した。浮体パネルは，厚さ3.0cm，高さ20.0cm，幅68cmの亚克力製の直方体で，喫水を10.0cmとした。また，浮体パネルは潮位または波浪による水位変化に伴い，高さ25.0cmのアルミ製フレーム内を上下方向に動く形式である。

(2) 実験条件

本実験では，規則波および高波を想定した長周期波（押し波）を作用させた。規則波の実験では，周期を $T=0.85s$ ， $1.00s$ ， $1.34s$ ， $1.79s$ ， $2.24s$ の5種類，波高を $H=7cm$ ， $10cm$ ， $15cm$ ， $20cm$ の4種類，静水深を $h=30cm$ ， $35cm$ ， $37.5cm$ ， $42.5cm$ ， $47.5cm$ の5種類変化させて実験を行った。写真-1に示すように，浮体パネルの初期位置は静水深 h によって異なり， $h=42.5cm$ のときに直立護岸天端高と浮体パネルの天端高が一致する。また，長周期波の実験では，水深 $h=47.5cm$ において，周期と波高をそれぞれ $T=15s$ ， $H=3.7cm$ （長周期波1）および $T=10s$ ， $H=5.6cm$ （長周期波2）の2種類を作用させた。

なお，護岸を設置しない予備実験を行い，入射波条件を設定した。規則波については，図-2に示した地点W1を波高検定地点とし，ゼロダウクロス法を用いて入射波の波高と周期を算出した。長周期波に関しては，地点W1を通過した時の静水面からの実高値を波高，造波板を動かした時間を周期と定義した。

(3) 実験方法

直立護岸のみを設置した場合と直立護岸前面に浮体パネルを設置した場合で水理模型実験を行った。越波量の測定に関しては，直立護岸背後の遮水領域部に設置した越波枡を用いて行い，直立護岸上部に接続した幅30cmの導水板を介して護岸を越えた水塊を収集した。規則波実験では波高が安定してから5波を，長周期波実験では1波を対象として護岸を越えた水塊の重量を測定し，



写真-2 浮体パネルの挙動解析例

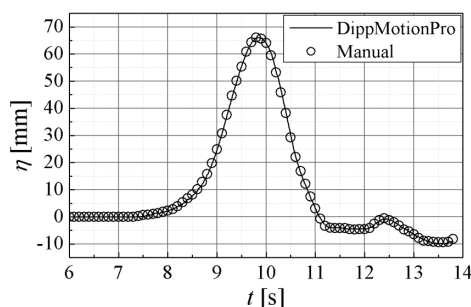


図-4 読み取りによる測定値と解析値の比較（長周期波の場合）

それぞれのケースに対して3回測定した平均値を越波量とした。規則波作用時の越波流量は，越波量を5周期分の時間および導水板の幅で割ることで算出した。なお，アルミ製フレームは越波量にほとんど影響を与えないと仮定し，直立護岸のみの場合も含むすべてのケースにおいて，フレームを設置した状態で実験を行った。

浮体パネルの越波低減効果を明確にするために，本研究では，浮体パネル設置による越波低減率 R [%]を式(1)のように定義した。これより，越波低減率 R が大きいほど，浮体パネルの効果が顕著であることを示す。

$$R = \frac{q_v - q_s}{q_v} \times 100 [\%] \quad \text{..... (1)}$$

ここで， q_v は直立護岸のみの場合の越波流量， q_s は浮体パネルを設置した場合の越波流量である。

浮体パネルの動的挙動の測定については，高精細ビデオカメラHAS-D3（DITECT製）で撮影した実験動画を，運動解析ソフトウェア（DITECT製：DIPP-Motion Pro）を用いて解析することで行った。具体的には，写真-2に示すように，浮体パネル側面に設置した円印（ $\phi=6mm$ ）

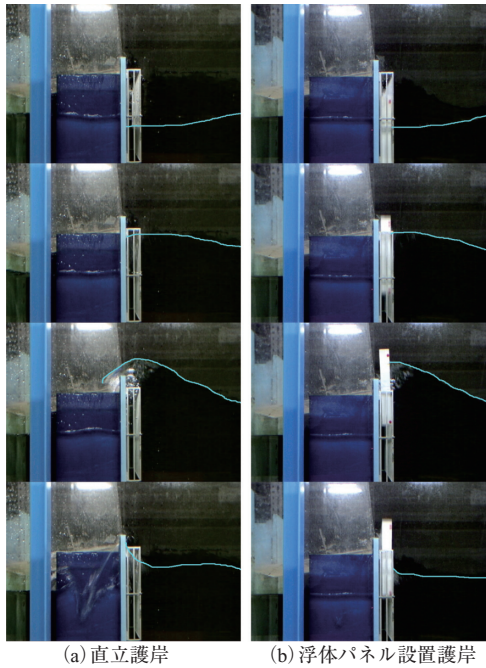


写真-3 各護岸周辺の越波状況

を相関追尾することにより、浮体パネルの座標を算出した。なお、図-4に例示するように、運動解析ソフトウェアによる解析値は読み取り測定値とよく一致しており、浮体パネルの挙動測定の妥当性を検証している。また、図-2に示した地点W2（浮体パネル前面）における水位変動も同時に計測した。

3. 実験結果と考察

(1) 規則波作用場

規則波作用場における、浮体パネルの越波低減効果を把握するために、直立護岸のみの場合と直立護岸前面に浮体パネルを設置した場合で、護岸周辺の越波特性を比較する。

写真-3 (a) および (b) に、直立護岸と浮体パネル設置護岸に規則波 ($h=37.5\text{cm}$, $T=1.79\text{s}$, $H=15\text{cm}$) が作用した場合の越波の様子を示す。同写真 (a) に示すように、直立護岸のみの場合、護岸天端上を大規模に越波する様子が確認される。一方、直立護岸前面に浮体パネルを設置した同写真 (b) をみると、護岸前面の水位が上昇するとともに浮体パネルが浮上し、浮体パネル前面で水を堰き止めることによって直立護岸背後への越波を防止する様子が明確に認められる。このように、直立護岸前面に設置した浮体パネルが自然外力である波の力を利用し、浮上することで、直立護岸背後への越波流量を低減させることが可能であることがわかった。

図-5に、規則波作用時における直立護岸と浮体パネル

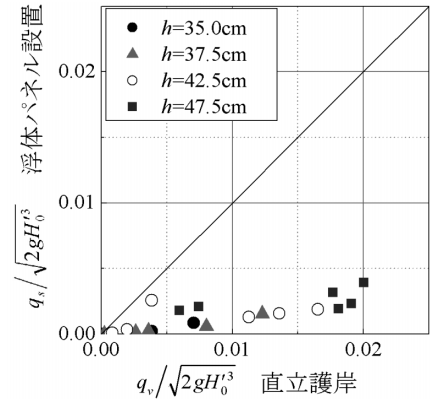


図-5 浮体パネルの有無による無次元越波流量の比較

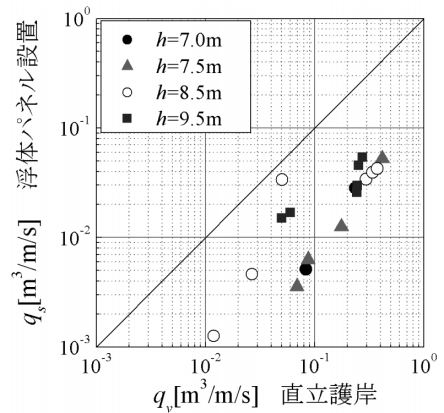
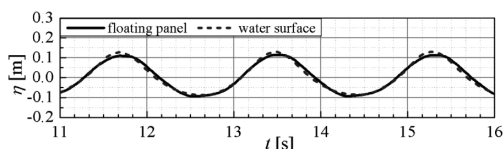


図-6 浮体パネルの有無による現地越波流量の比較

設置護岸の無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ の比較をそれぞれ示す。ここで、 H_0 は換算沖波波高である。同図から、直立護岸前面に浮体パネルを設置することにより、越波防止性能が大幅に向上していることがわかる。また、大規模越波が発生する場合に対しても、浮体パネルにはほぼ一定の越波低減効果があるといえる。これは、小規模な越波や飛沫の軽減を目的とした一般的な波返し工（川崎・笹田, 2009）を用いた越波対策は、越波流量が増加するにしたがって越波低減効果が低下するのに対して、浮体パネルを用いた越波対策は、波高が既設護岸天端高を越え、天端上を越流するような波浪条件に対しても有効であることを示している。今回行った実験ケースの範囲内において、浮体パネル設置護岸の越波低減率 R は、水深 $h=35.0\text{cm}$, 37.5cm , 42.5cm では約89%、水深 $h=47.5\text{cm}$ では約84%となった。これは、図-5の縦横軸を現地換算越波流量 $q [\text{m}^3/\text{m/s}]$ に変換した図-6からもわかるように、現地換算で越波流量が $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{m}^3/\text{m/s}$ オーダーの大規模越波が発生する波浪条件に対しても、浮体パネルの設置により越波流量を $0 \sim 10^{-2} \text{m}^3/\text{m/s}$ 程度まで抑制する効果があることを示す。



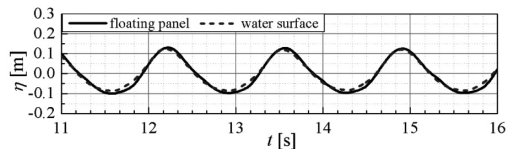
(a) 浮体パネル周辺の連続写真(1コマ0.188sで表示)



(b) 浮体パネルの挙動, 水位変動の時系列変化

図-7 規則波作用時の浮体パネルの挙動と水面変動 ($T=1.79s$)

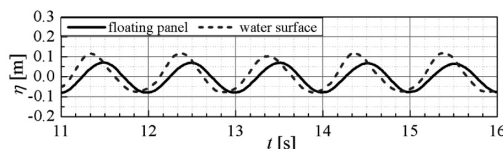
(a) 浮体パネル周辺の連続写真(1コマ0.094sで表示)



(b) 浮体パネルの挙動, 水位変動の時系列変化

図-8 規則波作用時の浮体パネルの挙動と水面変動 ($T=1.34s$)

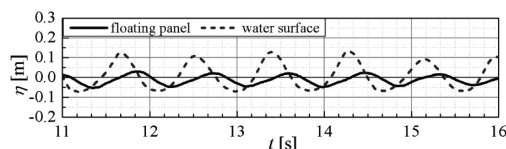
(a) 浮体パネル周辺の連続写真(1コマ0.094sで表示)



(b) 浮体パネルの上下変位と水位の時間変動

図-9 規則波作用時の浮体パネルの挙動と水面変動 ($T=1.00s$)

(a) 浮体パネル周辺の連続写真(1コマ0.094sで表示)



(b) 浮体パネルの上下変位と水位の時間変動

図-10 規則波作用時の浮体パネルの挙動と水面変動 ($T=0.85s$)

実験の様子を観察すると、浮体パネル設置護岸で越波が発生する場合に2種類の越波形式がみられた。具体的には、浮体パネル上部を越波する場合（越波形式1）、浮体パネルの下から回り込んだ水塊が、浮体パネルと直立護岸の隙間から湧き出すように堤内へ流入する場合（越波形式2）の2種類である。越波形式2は、浮体パネルの設置に伴う構造的な隙間が原因であり、なんらかの隙間防止策を施すことにより越波流量を大幅に低減可能であると考えられる。一方、越波形式1は、浮体パネルが水位変動に追随しきれていない場合に観察された。このことから、浮体パネルの追随性の違いによって越波防止性能に差異が生じると考えている。そこで、浮体パネルの追随性に着目して、図-7～図-10に、水深 $h=42.5\text{cm}$ 、波高 $H=10\text{cm}$ で周期 T の異なる規則波が浮体パネル設置護岸に作用した時の (a) 高精細ビデオカメラで撮影した浮体パネル近傍の連続写真と (b) 浮体パネルの挙動と護岸前面の水位変動の時系列変化をそれぞれ示す。図-7と図-8に示す実験ケース ($T=1.79s, 1.34s$) では、浮体パネルが直立護岸前面の水位変動を良好に追随し、滑らかに上下運

動を繰り返している。このような追随性の高いケースでは、浮体パネルは天端高を一定に保ったまま上下運動するため、波峰作用時に浮体パネル上部からの越波（越波形式1）は発生しない。一方、図-9、図-10に示す実験ケース ($T=1.0s, 0.85s$) では、浮体パネルの位相が水位変動とずれるとともに、上下運動の振幅も小さい。このような追随性が低いケースでは、浮体パネルが浮上する最中にパネル上部からの越波（越波形式1）が発生し、水塊が直立護岸背後へと流入する様子がうかがえる。

位相が遅れる原因として、浮体パネルの固有周期と波の周期の関係が考えられる。そこで、位相のずれ δ [rad]を、水面変動がピーク値を示す時刻 t と浮体パネルの変動がピーク値を示す時刻 t_s の差から次式で算出した。

$$\delta = \frac{2\pi(t_s - t)}{T} \text{ [rad]} \dots\dots\dots (2)$$

ついで、浮体パネルの固有周期 T_s を、以下の手順で求めた。まず実験で、浮体パネルを水没する程度沈めて静止させておく。次に、浮体パネルを素早く離し、動揺する様子を高速ビデオカメラで撮影する。最後に、得られ

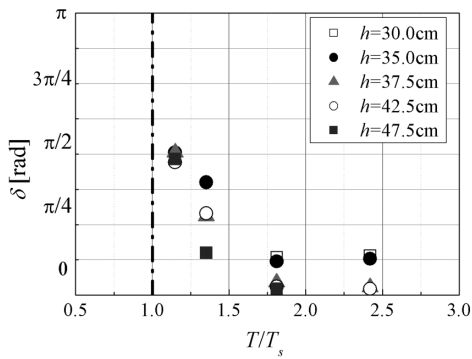
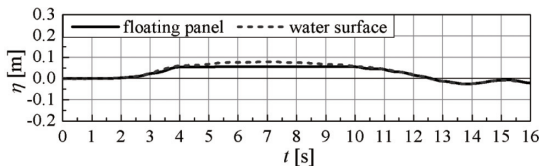


図-11 入射波周期と位相のずれの関係



(a) 浮体パネル周辺の連続写真 (1コマ0.6sで表示)



(b) 浮体パネルの上下変位と水位の時間変動

図-12 長周期波作用時の浮体パネルの挙動と水面変動

た動画より求めた浮体パネルの変動量の時系列から、浮体パネルの固有周期 T_s を算出する。上記の方法で求められた浮体パネルの固有周期の値は、 $T_s=0.74s$ であった。図-11に、無次元入射波周期 T/T_s と位相のずれ δ の関係を示す。同図より、入射波周期が浮体パネルの固有周期 T_s に近づくと位相差が生じていることから、入射波と浮体パネルの共振が位相のずれに影響していると推察される。また、同図から、入射波周期が同じ規則波が作用した場合、水深が小さいほど位相のずれが大きくなる傾向がみられる。

(2) 長周期波作用場

高波が浮体パネル設置護岸に作用した時の越波低減効果を調べるために、図-12に、長周期波1 ($T=15s$, $H=3.6cm$) が作用した場合における浮体パネルの挙動と水面変動を示す。長周期波が作用すると、浮体パネルは穏やかな水面上昇に伴い、水面からの高さを一定に保ちながら浮上する。そして、水位が直立護岸天端高を越えた時、浮体パネルが堰の役割を果たすことによって護岸背後への越流を防ぐ様子が認められる。このように、津波のような大きな破壊力を有する長周期波に対しても、浮体パネルが水位に伴って浮上し、護岸の嵩上げと同等の役割を果

たことが明らかとなり、越波被害低減に有効であるといえる。長周期波1、長周期波2の越波低減率 R は、それぞれ60%と81%で規則波よりもやや低いものの、越波量として測定された水塊はすべて、浮体パネルと直立護岸の隙間からの越波(越波形式2)によるもので、浮体パネルの上部からの越波は完全に防いでいることを確認している。また、越波形式2による越波を完全に防ぐことができなくても、長周期波が直接護岸を越えて越波する場合に比べて護岸背後に到達する水塊の浸入速度を遅くすること(護岸背後域の冠水までの時間が長くなる)が可能となると考えられる。したがって、浮体パネル設置護岸は、減災機能を有する越波低減護岸として十分発揮できるといえる。

4. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 規則波作用下では、浮体パネルが水位変動に追従して動くことにより、浮体パネル前面で水が堰止められ、水塊が直立護岸背後へ流入するのを防ぐことで越波流量を低減することが明らかとなった。
- (2) 浮体パネルを設置した護岸では、パネル上部を越波する越波形式1と、パネルと直立護岸の隙間から水塊が流れ込む越波形式2の発生が確認された。特に、越波形式1は、入射波が浮体パネルの固有周期に近い波浪条件で、水面変動と浮体パネルの挙動に位相差が大きい場合に多くみられた。
- (3) 今回実施した実験ケースの範囲内においては、直立護岸に浮体パネルを設置することによって、越波流量を約8割まで低減可能であることを明らかにした。さらに、浮体パネルと護岸の隙間に越波防止策を施すことにより、越波形式2の発生を抑制することが可能であり、越波低減性能が向上すると考えられる。
- (4) 高波を想定した長周期波が作用した際においても、ゆっくりと上昇する水面に追従して浮体パネルが浮上する。そして、規則波作用時と同様に、浮体パネルが護岸前面で堰の役割を果たすことにより、護岸背後へ越流するのを防ぐことがわかった。なお、護岸を越えた水塊は越波形式2によるもので、パネル上部からの越波は発生しなかった。

参考文献

- 川崎浩司・笹田泰雄(2009): 直立護岸に設置した越波対策工の越波低減効果と作用圧特性, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.766-770.
- IPCC Working Group 1: The Physical Science Basis of Climate Change(2007): Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level, http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_Ch05.pdf, 参照2010-05-10.