

砕波促進技術を応用した高消波性能を有する浮防波堤の基本的特性

池畑義人* ・ 樋田 操** ・ 松永信博***
山口裕昭**** ・ 山本一仁***** ・ 鶴崎賢一*****

著者らは従来の箱型浮体の両側面に入射波の砕波を促進するためのトラス構造物を取り付けた鋼製浮防波堤を提案してきた。本研究ではトラス部の底面に格子を取り付けた改良型トラス付き浮防波堤の消波性能に関する定性的特性を模型実験によって調べた。その結果、改良型トラス付き浮防波堤は通常の箱型浮防波堤と比較して非常に高い消波能力を有することが確認できた。また、トラス部底面の格子は浮防波堤の消波能力の向上に寄与するという結果が得られた。さらに画像解析を用いて浮体の動揺特性を調べることによってトラス付き鋼製浮防波堤の消波原理を明らかにするとともに、その安定性を調べた。

1. はじめに

地球温暖化の気象への影響が顕在化し始めたと言われる中、平成16年に我が国に上陸した台風は観測史上最多の10個にのぼった。今後このような気象現象が継続すれば、これまで比較的進入波高の小さかった海域や内湾においても、高潮や高波による災害頻度が増大することが懸念される。このことから沿岸域での高波浪対策は急務となりつつあるため、その対策の一つとして浮防波堤の利用が考えられる。

非重力方式の一種である浮防波堤は、海面上に浮かぶ構造物が入射波の一部を反射させると同時に越波等によって波浪の低減をはかっている。浮防波堤はその構造から高波浪が入射する海域へ設置することが困難である。しかし一方では、①潮位差が大きな海域でもその消波効果はほとんど変わらない、②施工費が水深にそれほど依存しない、③施工が海底地形や地質にあまり影響されない、④移設が容易である、⑤海水交換や魚類等の生息条件を妨げない、といった利点もある。このため、近年では海上工事現場のみでなく、リゾート海域や養殖魚場等の小海域における静穏化を目的として、浮防波堤の建設が増えている。

浮防波堤に関しては、これまで数々のタイプの研究・開発がなされており、その構造や材質も多岐にわたっているが、現在ではPCコンクリート製の箱型浮防波堤が最も広く用いられている。その理由として、設計・施工が比較的容易で、浮体の安定性と耐久性に優れているこ

とが上げられる。その一方、中村ら(1998)は入射波と反射波の相互干渉により、堤体前方(沖側)の波高が著しく高くなるという問題を指摘している。

Kanzakiら(2000)およびMatsunagaら(2002)は、これまで鋼製の箱型浮防波堤の前方(沖側)と後方(岸側)にトラス構造物を取り付けた浮防波堤を提案し、その消波性能を模型実験により明らかにしてきた。その結果、この浮防波堤は箱型浮体に取り付けたトラス構造物と浮体とが一体となって動揺し、砕波を促進することで波エネルギーを消散させることから、高い消波性能を有することが認められた。本研究では、この鋼製浮防波堤を「トラス構造物を有する鋼製浮防波堤」(Floating Breakwater with Truss)と名付け、以下略してFBTと呼ぶことにする。写真-1は、大分県佐伯市沖の大島漁港沖に、実証実験の目的で設置されていたFBTである。現在実証実験は終了しており、このFBTは漁礁として海底に沈設されている。

本研究の目的は、FBTのトラス構造物の底面に、空隙率を変化させるための格子を取り付けて砕波効率を一層向上させることによって高消波性能を有するFBTを開発することである。また、開発したFBTによる波の透過率を定量化することにより、透過率とFBTの形状諸元との関係を明らかにすることである。さらに、FBTの動揺特性実験を行い、その消波原理及び浮体としての安定性を確認することである。



写真-1 実証実験中のFBT

- | | | |
|------------|------|-------------------------------|
| * 正 会 員 | 博(理) | 日本文理大学助教授工学部建設都市工学科 |
| ** 正 会 員 | 博(工) | 日本文理大学教授工学部建設都市工学科 |
| *** 正 会 員 | 工博 | 九州大学教授大学院総合理工学研究院環境
流体力学部門 |
| **** 学生会員 | | 日本文理大学大学院工学研究科環境情報
学専攻 |
| ***** 学生会員 | | 山口大学大学院理工学研究科社会建設工
学専攻 |
| ***** 学生会員 | 博(工) | (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
特別研究員 |

表-1 FBT 模型の形状

浮体本体幅 W (cm)	トラス幅 a (cm)	格子幅 M (cm)
16	8	2
24	12	4
32	16	6
40	20	
48	24	

2. 実験概要

(1) 実験装置

図-1 に実験で使用した造波水槽の概要を示す。水槽の全長は32 m, 幅は0.60 m, 高さは0.94 m である。実験水深 h は0.60 m に固定した。水槽の岸側端には、波の反射を抑えるために緩勾配消波装置が設けられている。水槽中央部には図-2 に示すような FBT の模型がアンカとチェーンで緩係留されている。

FBT の模型は箱型浮体本体の前後に碎波促進のためのトラス構造物を取り付けられている。図-2 の W は浮体本体幅, a はトラス幅である。FBT の奥行きは水槽幅に合わせて0.50 m に固定された。全ての実験において FBT の浮体本体高さ (h_p) は0.12 m, トラス前面の高さ (h_t) は0.060 m に固定した。また浮体喫水は浮体重量を調節することで浮体本体高さ (h_p) の1/2の0.060 m になるように設定した。さらに本研究の重要な目的である FBT の碎波促進効率の向上のために、トラス構

造物の底面に図-3 に示すような空隙率の異なる格子を取り付けている。格子の厚みは1.0 cm に固定し、格子幅 M は格子の厚みの中心間隔である。

FBT 模型は表-1 に示す W と a を組み合わせて16種類の異なる大きさのものを使用した。それぞれの模型について格子を取り付けない場合と2～3種類の格子を取り付けた場合についての実験を実施した。これらの条件をすべて組み合わせると合計64種類となった。

表-2 実験に使用した波の条件

Run	造波周期 T (s)	波長 L (m)	波高勾配 H/L	相対水深 h/L
1	2.0	4.4	0.029	0.14
2	1.4	2.8	0.050	0.22
3	1.3	2.3	0.058	0.26
4	1.1	1.9	0.050	0.32
5	1.0	1.5	0.058	0.39
6	0.91	1.3	0.053	0.47
7	0.83	1.1	0.052	0.56
8	0.77	0.92	0.057	0.65
9	0.71	0.79	0.056	0.76
10	0.67	0.70	0.050	0.86
11	0.63	0.62	0.050	0.97
12	0.59	0.54	0.050	1.1
13	0.56	0.49	0.043	1.2

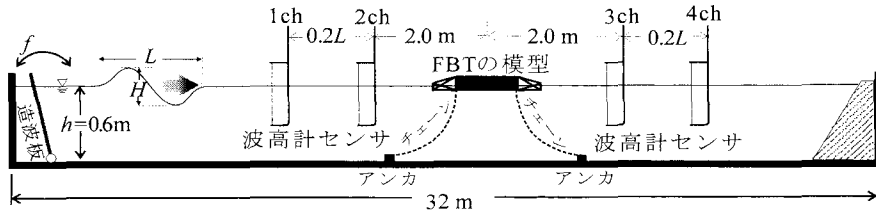


図-1 実験水槽の概要

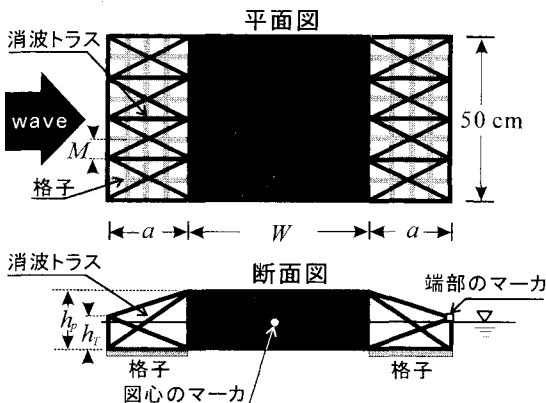


図-2 FBT の模型の模式図

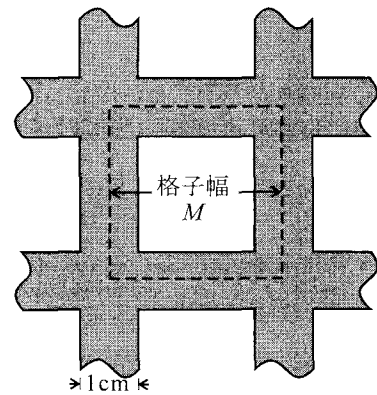


図-3 格子の模式図

(2) 実験に使用した波の条件

表-2は実験に用いた波の条件を示す。実験では造波周期 T を $0.56 \sim 2.0$ s に変え、かつ波形勾配 H/L がほぼ 0.05 になるように造波振幅を調整して合計13通りの入射波を作用させた。なお、表-2の網掛け部分 Run.3, 9, 12は後述する動揺特性実験を行った条件である。

(3) データ取得方法

FBT 模型の前方(沖側)と後方(岸側)には、図-1に示すように容量式波高計がそれぞれ2本ずつ設置された。そこから得られた波高データをデジタルレコーダに記録した。造波板から発生した入射波(波高 H , 周期 T , 波長 L)は、造波を開始後3分経過してからサンプリング周波数 20 Hz でデジタルレコーダに 8192 個 (409.6 秒間)のデータを記録した。4つの波高計から取得された波高データを使って、合田ら(1976)が提唱した分離推定法により入射波高 H_i , 反射波高 H_r および透過波高 H_t を算定した。反射率 K_r は H_r と H_i の r.m.s. の値の比から算定した。波高計センサーの設置位置は、それぞれの波高計の間隔が $L/4$ の整数倍に一致すると分離推定法が適用できなくなるため $0.2L$ に設定し、模型に近い波高計センサー2ch および3ch は、模型の動揺の影響を直接受けないように、模型から 2.0 m 離して設置した。

(4) FBT の動揺の計測

FBT の動揺特性実験は、FBT の模型の設置位置において浮体の動態を水槽外側からビデオカメラにより撮影することにより実施した。得られた画像から図-2に示した浮体模型断面の図心と端部に取り付けたマークを追跡して前後揺と上下揺を算定した。実験に用いた浮体の条件は、浮体のみ ($W = 32$ cm) の場合、 $W = 32$ cm, $a = 16$ cm において格子無しの場合、前述の W と a において $M = 2$ cm 及び 4 cm の場合の4条件とした。実験波には表-2で示した Run.3, 9, 12の3つの条件を用いて合計12条件で動揺特性を調べた。

3. 消波特性の定量的評価

(1) パラメータの整理

FBT の消波特性を定量的に評価するために、ここでは透過率 K_t の値に着目する。 K_t を決定する支配的なパラメータは、設置海域の水深 h , 入射波の波長 L と波高 H , また FBT の形状を代表するスケールとして浮体本体幅 W と高さ h_p , トラス幅 a とトラス前面高さ h_T , 喫水 D および格子幅 M があげられる。すなわち K_t は

$$K_t = f(h, L, W, a, h_p, h_T, D, M) \quad \cdots \cdots (1)$$

と表現できる。(1)式に次元解析を適用すると

$$K_t = f(W/L, W/h, H/L, a/W, h_p/H, h_T/h_p, D/h_T, M/a) \quad \cdots \cdots (2)$$

となり、FBT の透過率は8つの無次元パラメータに依存する。しかしながら、すべてのパラメータに対してその依存性を調べることは困難である。ここでは入射波に関するパラメータのなかで波形勾配 H/L がほぼ 0.05 になるように実験条件が設定され、FBT 模型の形状が、パラメータ h_p , h_T , D は h_p/h_p , D/h_T の値がそれぞれ 0.5 と 1.0 となるように固定されているため、(2)式は

$$K_t = f(W/L, W/h, a/W, h_p/H, M/a) \quad \cdots \cdots (3)$$

と書ける。これまで取り扱われてきた箱型浮防波堤の高さは施工性と経済性からおおよそ設計波高以下に限られており、その範囲内においては h_p/H の効果がほとんど無視されているのが現状である。この実験における h_p/H の値もそのような範囲に設定されていることから(3)式はさらに

$$K_t = f(W/L, W/h, a/W, M/a) \quad \cdots \cdots (4)$$

となる。したがって、透過率 K_t はこれらの4つのパラメータに依存することになる。これらのパラメータは K_t に対して独立であると仮定すると、(4)式は

$$K_t = f_1(W/L) f_2(W/h) f_3(a/W) f_4(M/a) \quad \cdots \cdots (5)$$

となる。以下ではパラメータを独立に変化させることによって K_t と W/L の関係が残りの3つのパラメータによってどのように変化するかを系統的に調べた。ただし、平均水深 h はすべての実験で 0.6 m に固定されている。

(2) 透過率の普遍表示

図-4は、 K_t - W/L の分布を普遍表示するために、 $K_t = 0.5$ となる W/L の値 $(W/L)_0$ を代表量に選び、すべての実験条件に対して規格化したものである。多少のばらつきがみられるものの、FBT の透過率 K_t が $(W/L)/(W/L)_0$ によって非常によく規格化されていることが分かる。

また、図の斜線部分は K_t の値が 0.25 以下の領域を示している。 $(W/L)/(W/L)_0$ が 1.5 より大きくなると K_t の値は概ね 0.25 以下になっており、浮体幅よりも波長が長

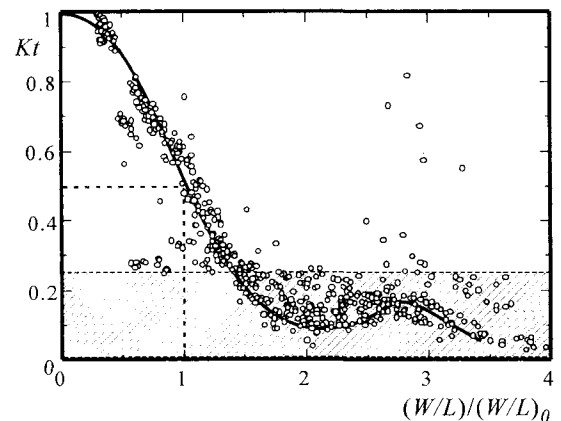


図-4 K_t の普遍形

い波に対しては FBT の消波効果が極めて高いことがわかる。

(3) トラスによる消波効果の評価

図-5(a), (b), (c)は、砕波促進の目的で取り付けた格子の効果を評価する目的で、 $W/h-a/W$ の関係において $(W/L)_0$ の等値線図を描いたものであり、それぞれ、格子の無い従来の FBT, $0.25 \leq M/a \leq 0.50$, $0.083 \leq M/a \leq 0.17$ の場合である。この図では色の濃い部分が $(W/L)_0$ の値が小さい領域である。消波性能が高いほど Kt は W/L により急激に減少する傾向があることから、 $(W/L)_0$ の値も小さくなる。すなわち、色が濃いパラメータ領域が今回の実験条件で最も消波能力が高い W/h と a/W の組み合わせとなっている。図-5によると図-5(b)と(c)には図-5(a)にはない $(W/L)_0 \leq 0.1$ の領域がある。これらの図から、トラスに格子を取り付けることで消波性能が向上し、砕波促進効果が大きいことがわかる。しかしながら、 Kt の値は、構造上の限界により、 M/a の値が大きすぎても小さすぎても問題があると考えられる。今後、 Kt に対する M/a の依存性について詳細な検討を行うとともに、例えば a/W などの値についても、実用化を考慮した場合の構造上妥当な条件を定める必要がある。

4. FBT の動揺解析

FBT の安定性と消波原理を確認するために、2.(4)で述べた手法によって FBT 模型の動揺を計測した。図-6 に $W = 32 \text{ cm}$, $a = 16 \text{ cm}$, $M = 2 \text{ cm}$ の FBT 模型に周期 0.71 s の波を作用させた場合の動揺の時系列を示し、図-7 にはこの時系列から計算した動揺の周波数スペクトルを示す。FBT 模型の断面形状から、図心位置は重心位置とほぼ同じであると考えてよい。

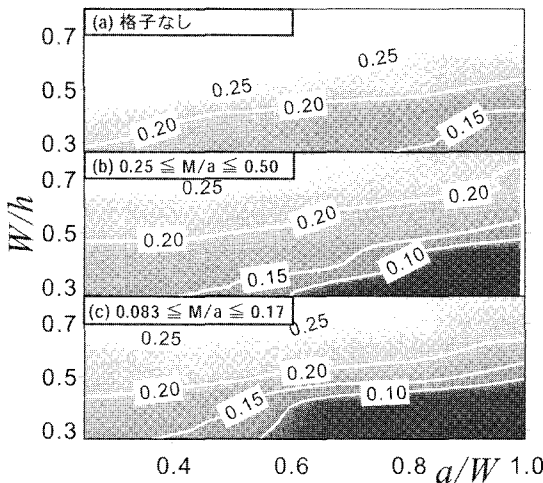


図-5 a/W と W/h に対する $(W/L)_0$ の等値線図

図-6 からこの条件の FBT 模型は前後揺に関して図心と端部がほぼ同じように動揺するものの、上下揺については端部が図心に比べて大きく振動していることがわかる。図-7(b)から、上下揺は入射波 1.4 Hz よりも低周波の成分で図心の振動エネルギーが端部のそれよりも高くなっている。また、入射波の周波数よりも高周波の成分については、前後揺と上下揺どちらも図心の振動のほうが高エネルギーである。このことから、FBT 模型は入射波よりも長い周期で回転運動をしていると考えられる。このことから、FBT の回転運動によりトラスが水面を攪拌して、消波効果を生み出していることが示唆される。しかしながら、ここまでの解析では FBT の安定性は確認できなかった。今後は更なるデータの解析が必要である。

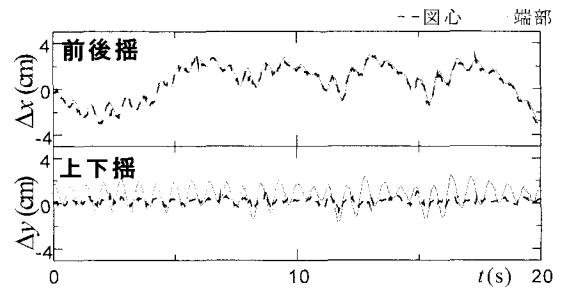


図-6 FBT の動揺の時系列
($W/L = 0.41$, $W/h = 0.53$, $a/W = 0.50$, $M/a = 0.13$, $T = 0.71 \text{ s}$)

5. おわりに

本研究では、FBT の砕波効率を向上させる目的で、トラス構造物の底面に取り付けた格子の空隙率と FBT の形状諸元を変えた詳細な実験を行い、その消波性能に対する格子の効果を評価するとともに、透過率と FBT の形状諸元との関係を明らかにした。また、FBT の動揺特性実験を行い、その安定性および消波原理を確認した。研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 透過率 Kt の W/L に対する規格化

Kt の値は、 W/L が大きくなるにつれて急激に減少する。この $Kt-W/L$ の分布形に対して近似曲線を挿入して $Kt = 0.5$ となる W/L の値 $(W/L)_0$ を代表量として選んだ。そして、全ての実験値に対して規格化を行ったところ Kt の分布は全体として多少のばらつきが見られるものの $(W/L)_0$ によって良く規格化されることが明らかとなった。

(2) 消波に最適な FBT の形状に関する検討

W/h と a/W に対する $(W/L)_0$ の値の等値線図を作成することによって Kt が小さくなる W/h と a/W の領域が明らかになり、この結果から FBT の最適形状を決定することが可能となった。格子については、その消波効果

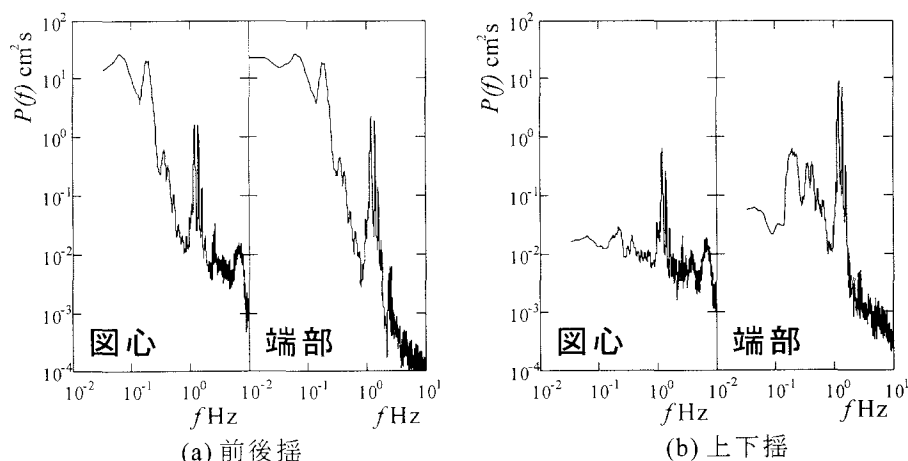


図-7 FBTの動揺のスペクトル（浮体の形状および波の条件は図-6と同じ）

は明らかになったものの、消波に最適な格子幅を探すことはできなかった。しかし、空隙率すなわち M/a が小さくなるほど $(W/L)_0$ が小さくなる領域が、 W/h が小さく a/W の大きい範囲に拡大する傾向として評価された。

(3) FBTの動揺解析

FBTの動揺特性においては、入射波よりも低周波側では図心よりも端部のほうが上下揺の成分が大きく、高周波側では上下揺、前後揺とも図心のほうが端部よりも大きく揺れていることがわかった。このことからFBTはその回転運動によってトラスが水面を攪拌することで消波効果を生み出していることがわかった。しかしながら、その安定性は確認できなかった。

本研究は九州建設弘済会建設技術に係る研究助成事業の補助を受けて実施された。水槽実験およびデータ整理

では日本文理大学海洋環境工学研究室の皆さんに多大な協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治(1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248.
- 中村孝幸・加藤健一・河野徹・上村稔(1998): スラミング現象を利用した浮防波堤の波浪制御効果について, 海洋開発論文集, Vol.14, pp. 311-315.
- Kanzaki, T., N. Matsunaga, M. Hashida, H. Tsumori and K. Uzaki (2000): Wave absorption efficiency of a steel floating breakwater with truss structure to promote wave breaking, Proc. of Techno-ocean 2000 Int. Symp., III, pp. 739-742.
- Matsunaga, N., M. Hashida, K. Uzaki, T. Kanzaki and Y. Uragami (2002): Performance of wave absorption by a steel floating breakwater with truss structure, Proc. 12th Int. Conf. on Offshore and Polar Engineering Conf., pp. 768-772.