

防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性

平口博丸*・池野正明*・大橋裕寿**
柏木洋之***・樋口豊久****

1. はじめに

高波の来襲時や異常潮位の場合、あるいは地球温暖化に伴う海面上昇が実際に生じた場合には、防波堤を越波した波（伝達波）が港内静穏度に及ぼす影響が大きくなる。越波伝達波は不連続な水理現象であり、理論や数値計算による検討は困難なため、実験的検討が主になされてきた。規則波を対象とした研究としては、近藤・佐藤（1963）、合川・竹田（1966）、Goda（1969）、篠田・山本（1980）、森下・綿貫（1981）などの研究があり、波高伝達率が実験式として提案されている。また、不規則波を対象としたものには、合田ら（1974）、谷本・大里（1979）などの研究がある。これら従来の研究では、波高と周期の伝達率に関する検討がほとんどであり、伝達波の周波数スペクトルについて検討した例は非常に少ない。

本研究は、2次元不規則波を対象として越波伝達波の水理模型実験を行い、伝達波の周波数スペクトルに共通して見られる特徴を明らかにすると共に、波高・周期の伝達率について従来の実験結果と比較したものである。

2. 水理模型実験とデータ解析

2.1 実験方法と実験条件

実験には、図-1 に示す断面2次元水路（長さ19m、幅0.3m、深さ0.55m）、および水面波形制御方式の無反射型造波機（平口・鹿島，1988；Hirakuchi et. al., 1990）を用い、水深21.5cmの一樣水深部に防波堤模型を設置した。対象とした防波堤形式は図-2 に示すように、

- Type-A：消波ブロック被覆堤
(10種類；A1～A10)
- Type-B：消波ブロック両面被覆堤
(3種類；B1～B3)
- Type-C：混成堤
(11種類；C1～C11)

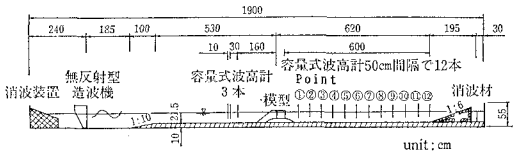


図-1 実験装置の概要

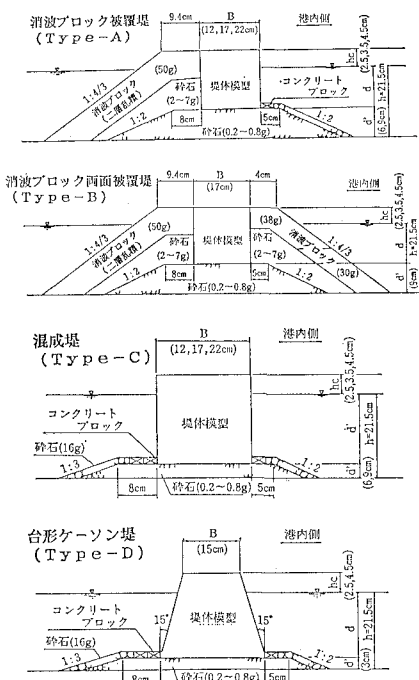


図-2 防波堤模型の断面形状

- Type-D：台形ケーソン式防波堤
(2種類；D1, D2)

の4タイプであり、各形式の防波堤の天端高 h_c 、天端幅 B 、マウンド厚 d' を変化させ、計26種類の防波堤に因して実験を行った。各防波堤の諸元を表-1に示す。

入射波は、Bretschneider一光易型の不規則波とし、表-2に示す6種類の波(W1～6)を用いた。また、入射波スペクトルはこれらの不規則波と同一で、波の連なり

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所水理部
*** 東京電力(株) 建設部土木課
**** 工修 東京電力(株) 建設部土木調査課
***** 正会員 工修 東電設計(株) 第二土木本部火力土木部

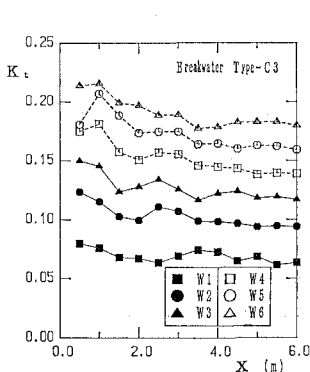
表-1 防波堤模型の種類とその諸元

防波堤の形式	防波堤 Type	h_c (cm)	B (cm)	d' (cm)
消波ブロック被覆堤	A1	2.5	12	9
	A2*		17	
	A3		22	
	A4	3.5	12	
	A5*		17	
	A6		22	
	A7	4.5	12	
	A8*		17	
	A9		22	
	A10	2.5	17	6
両面被覆堤	B1	2.5	17	9
	B2	3.5	17	
	B3	4.5	17	
混成堤	C1	2.5	12	6
	C2		17	
	C3*		22	
	C4	3.5	17	
	C5*		22	
	C6	4.5	12	
	C7		17	
	C8*		22	
	C9	2.5	22	9
	C10	-1.5	22	0
	C11	-5.5	22	
台形ケレン堤	D1*	2.5	15	3
	D2*	4.5	15	

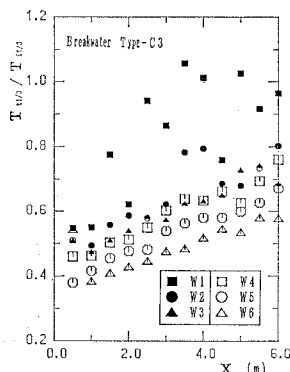
(注) *印: 越波流量の測定

表-2 実験に用いた不規則波の諸元

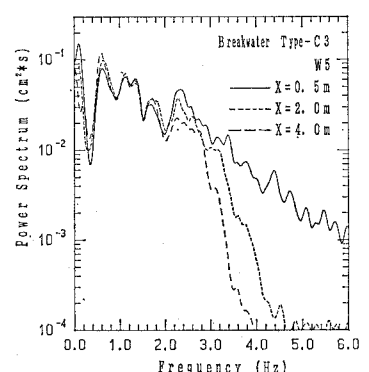
有義波高 有義波周期	不規則波の種類					
	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5	W 6
$H_{1/3}$ (cm)	4.5	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
$T_{1/3}$ (s)	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6



(a) 有義波高伝達率



(b) 有義波周期の変化率



(c) 周波数スペクトル

図-3 越波後の波の伝播特性

具合いが異なる不規則波を別途作成し、不規則波の統計的変動性が伝達波に及ぼす影響も検討した。なお、これらの入射波は重複波型の越波形態を示した。

図-1 に示したように、防波堤背後に12台の波高計を50 cm 間隔に並べ、伝達波の水面波形を測定した。不規則波の測定時間は約160秒 ($\Delta t=0.04$ s, データ数 4096) であり、100 波以上を計測した。また、防波堤直後に越波計量升を設置し、160秒間の越波量を測定した。

なお、越波による防波堤前面および背後の水位変化、および越波量測定時の水路内の平均水位変化を防ぐために、水路端部に水位調整装置と還流ポンプを設ける等の工夫をし、水路内の水位変化を2~3 mm 以下に押えた。

2.2 データ解析

防波堤背後の12地点 ($x=0\sim6$ m) で測定された水面変位から、ゼロ・アップクロス法により伝達波の有義波高・周期 ($H_{1/3}$, $T_{1/3}$) 等を計算すると共に、FFT 法により伝達波の周波数スペクトル P を求めた。図-3 は、混成堤 Type-C3 の場合について、波高伝達率 $K_t (=H_{1/3}/H_{1/3})$, 周期の変化率 ($T_{1/3}/T_{1/3}$), および周波数スペクトルの伝播特性を示した一例である。図-3(a), (b) は W1~W6 の入射波, 図-3(c) は $x=0.5, 2.0, 4.0$ m 地点での W5 の入射波に対する結果である。伝達率の特徴として、①波高の最高値は、防波堤から1波長以内に現れ、その後は伝播にともない K_t にして 0.02~0.04 程度減衰する、②周期の変化率は、伝播にともない 0.2~0.4 程度逆に長くなる、③入射波高・周期が大きくなると周期の変化率は小さくなる、ことが分かる。一方、周波数スペクトルの特徴として、④ 2.5 Hz 以上の高周波成分は伝播するに従い急激に減衰する、⑤エネルギーの大きな 2.5 Hz 以下の周波数成分は、場所によって若干変化する、⑥ 0.2 Hz 以下の低周波側にエネルギーのピークが存在するとともに、入射波のピーク周波数 f_{p1} およびその倍周波数付近にもスペクトルの極大値が存在する (谷本・大里, 1979) こ

とが分かる。これらの点は、防波堤の構造形式によらず、伝達波に共通して見られる特徴である。

そこで本研究では、防波堤背後の1波長(入射波に対する波長; W1~6の波長は124~219cm)の区間内の平均値を、波高や周期の伝達率としてデータの整理を行った。一方、伝達波の周波数スペクトルは、12地点のスペクトルを平均することにより、上記⑥で述べた場所による変動性を除去した。

なお、波の連なり具合が異なる3種類の入射波を作させたが、 K_t は ± 0.01 程度の差しかなかった。従って、本実験の場合には、不規則波の統計的変動性が伝達波の実験結果に与える影響は小さいものと判断された。

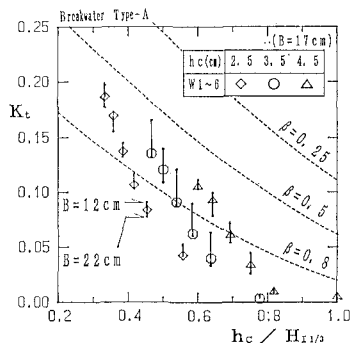
3. 波高・周期の伝達率

図-4は、 K_t を、天端高と入射波高の比 $h_c/H_{1/3}$ で整理したものであり、天端幅による違いを縦棒で示した。同一の $h_c/H_{1/3}$ に対して、消波ブロック被覆堤の K_t は、混成堤よりも0.02~0.04程度小さい。また、防波堤の天端幅 B が広がると K_t は小さくなり、 B の影響は混成堤の方が顕著である。図-4中の破線は、Goda (1969) の規則波に関する実験式

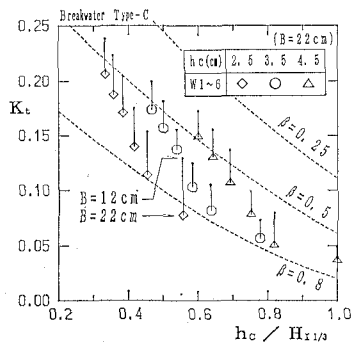
$$K_t = \left[0.25 \left[1 - \sin \left\{ \frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{h_c}{H_I} + \beta \right) \right\} \right]^2 + 0.01 \left(1 - \frac{d}{h} \right)^{2.5} \right] \dots \dots \dots (1)$$

において、マウンドの効果を無視 ($d/h=1$) し、 $\alpha=2.2$ とした時の計算値である。混成堤の場合、規則波および不規則波を対象とした従来の実験結果(近藤・佐藤, 1963; 合田ら, 1966, 1974)は $\beta=0.2\sim 0.5$ の値を示すが、本実験結果では $\beta=0.5\sim 0.8$ 程度の値となっており、従来の実験値のばらつきの下限值に近いといえる。なお図は割愛したが、潜堤型防波堤 Type-C10, C11 の K_t も $\beta=0.8\sim 0.5$ の範囲内にあった。一方、消波ブロック被覆堤の場合、本実験結果の K_t は、 $h_c/H_{1/3} > 0.8$ において非常に小さいため、式(1)で実験結果を表わすのは難しい(森下・綿貫, 1981)。

図-5は、越波流量 q (lit./m/s) と波高・周期の変化率の関係を示したものであり、 $B=17$ cm の消波ブロック被覆堤 (Type-A2, A5, A8), $B=22$ cm の混成堤 (Type-B3, B5, B8), $B=15$ cm の台形ケーソン堤 (Type-D1, D2) の結果である。本実験の範囲内では、 q と K_t の間にはかなり密接な関係があると言える。また、混成堤や台形ケーソン堤の周期伝達率は、0.4~0.6程度であり、越波流量が多くなるに従ってデータのばら

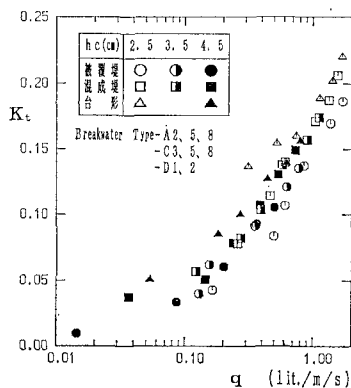


(a) 消波ブロック被覆堤

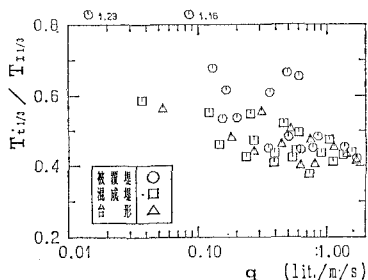


(b) 混成堤

図-4 波高伝達率



(a) 波高伝達率



(b) 周期の変化率

図-5 越波流量と伝達波の関係

つきが少なくなる。

4. 伝達波の周波数スペクトル

図-6 は、 B と h_c が異なる消波ブロック被覆堤 (Type-A1, A2, A3, A6, A9) に、同一の不規則波 W5 を作用させた時の伝達波の周波数スペクトル P を比較したものであり、上段の図は B の影響、中段の図は h_c の影響を示す。また下段の図は、Type-A3 ($B=22$ cm, $h_c=2.4$ cm) の周波数スペクトル P_0 に対する各スペクトル P との比 $\sqrt{P/P_0}$ を示す。このスペクトル比が周波数によらずほぼ一定値を取ることからも明らかなように、伝達波の周波数スペクトルは、 B や h_c が変化してもそのスペクトル形はほぼ相似形を保っていることが分かる。

図-7 は、図-6 と同様の比較を、混成堤に対して行った結果であり、 h_c の異なる Type-C3, C5, C8 のスペクトルはほぼ相似形を示すことが分かる。しかし、 B の異なる Type-C1, C2 のスペクトル比は、入射波の

ピーク周波数 f_{p1} ($=0.635$ Hz) 以上の周波数領域で増加傾向にあり、 B が狭くなるに従い f_{p1} の倍周波数成分が顕著になることを示している。

図-8 は、入射波の異なる W1~6 の不規則波に対する伝達波スペクトルの一例であり、横軸は各入射波の f_{p1} で無次元化している。W6 から W1 へと入射波高が小さくなるに従い、 f_{p1} 付近の伝達波のスペクトルピークは低周波側にシフトする傾向がある。

図-9 は、防波堤構造形式による伝達波の周波数スペクトルを比較したものであり、混成堤 (Type-C2) の周波数スペクトルを P_0 とし、Type-A2, B1, D1 に関する周波数スペクトル P との比率を示した。混成堤と台形ケーソン堤の周波数スペクトルはほぼ同じであることが分かる。また、消波ブロック被覆堤および消波ブロック両面被覆堤を比較すると、 $1 < f < f_{p1} < 2$ の範囲内では、消波ブロック被覆堤の方がスペクトルが大きくなる傾向にはあるが、両者のスペクトル形は良く似ていると言える。また、消波ブロック被覆堤は、混成堤に比

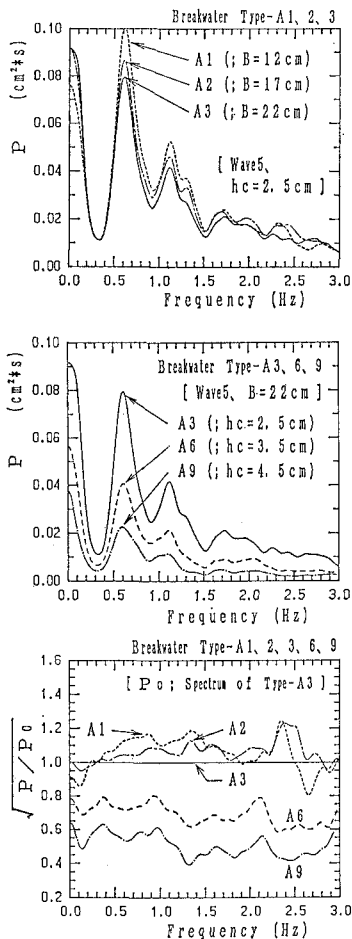


図-6 天端幅・天端高と周波数スペクトル (消波ブロック被覆堤)

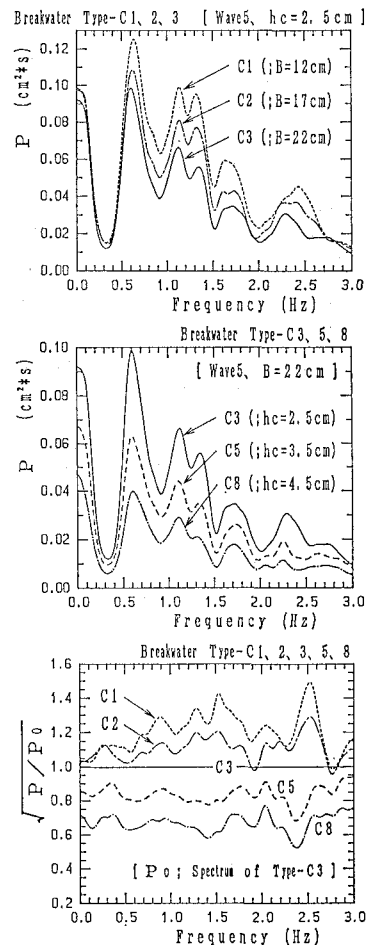
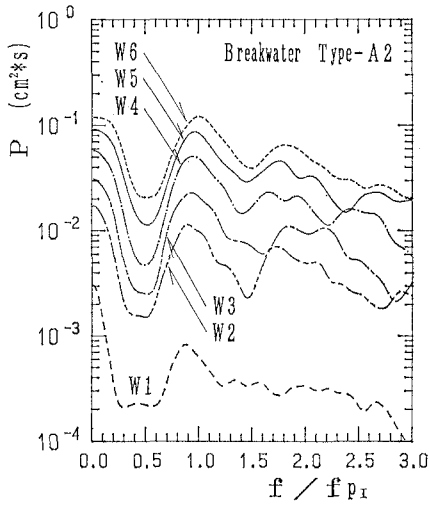
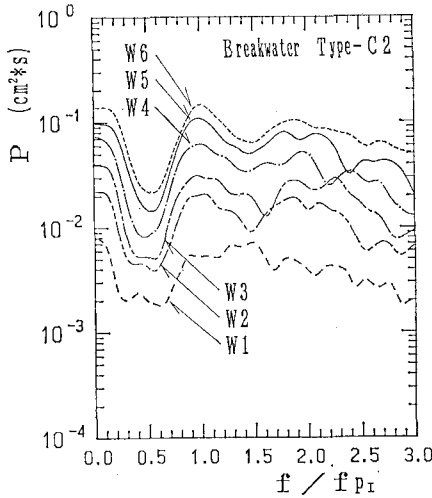


図-7 天端幅・天端高と周波数スペクトル (混成堤)



(a) 消波ブロック被覆堤



(b) 混成堤

図-8 入射波の違いによる周波数スペクトルの比較

べて、 $2f_{Pr}$ 付近の周波数帯でスペクトル値が小さくなる事が分かる。

5. おわりに

本研究の最も興味ある結論は、①天端幅・天端高が異

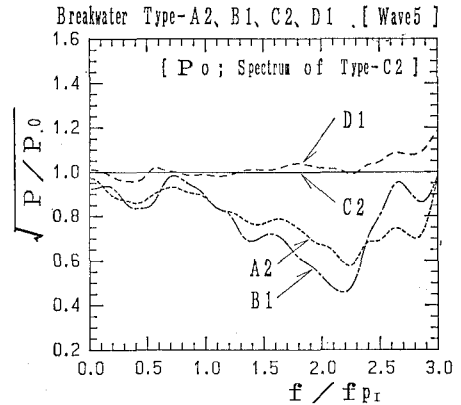


図-9 防波堤構造形式による周波数スペクトルの比較

なると伝達波の周波数スペクトルのエネルギーレベル（伝達波の波高）は変化するが、それらのスペクトル形状は、各防波堤毎に「相似形」を保っている、②構造形式が類似した混成堤と台形ケーソン堤の伝達波スペクトル形状、あるいは消波ブロック被覆堤と消波ブロック両面被覆堤のスペクトル形状は類似している、ことである。

参考文献

- 近藤徹郎・佐藤 功 (1963): 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 第117号, pp. 1-15.
- 篠田邦裕・山本正昭 (1980): 越波による港内伝達波に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 406-409.
- 森下敏夫・綿貫 啓 (1981): 消波ブロック被覆堤の波高伝達率に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 348-351.
- 合田良実・竹田英章 (1966): 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 237-242.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治 (1974): 不規則波浪実験とその特性について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 237-242.
- 谷本勝利・大里睦男 (1979): 消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 309-313.
- 平口博丸・鹿島遼一 (1988): 水面波制御方式による無反射型造波機の不規則波実験に対する適用性, 電力中央研究所 研究報告: U88013, 47 p.
- Goda, Y. (1969): Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwater, Report of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, pp. 3-18.
- Hirakuchi, H., R. Kajima and T. Kawaguchi (1990): Application of a piston-type absorbing wavemaker to irregular wave experiments, Coastal Engineering in Japan, Vol. 33, No. 1, pp. 11-24.