

応答関数を用いた不規則波による越波伝達波の算定法

池野正明*・平口博丸*・井上素行**
柏木洋之***・樋口豊久****

1. はじめに

越波は、波が防波堤背後へ飛び込む不連続な水理現象であり、理論的な検討が難しく、越波による防波堤背後への伝達波の評価は、従来実験的に検討されてきた(Goda, 1969; 谷本・大里, 1978). 越波伝達波に対する数少ない理論的研究として松井・倉田ら(1980)や倉田(1981)の研究があり、伝達波を Cauchy-Poisson 波(CP 波)の重ね合わせとしてモデル化し、規則波が入射した場合の伝達波の周波数スペクトル特性などをうまく再現しているが、不規則波への適用はなされていない。

本研究は、伝達波の周波数スペクトルを適切に算定できる手法の開発を目的として、CP 波による理論解と不規則波実験から得られる伝達波の入射波に対する周波数応答関数を基に、伝達波の応答関数の標準形を提案し、これを用いて不規則波による越波伝達波を算定する手法を提案するものである。

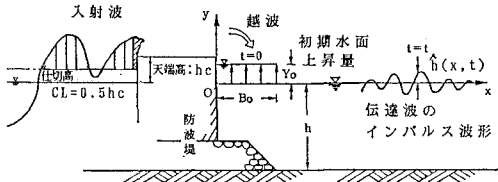
2. 応答関数を用いた越波伝達波の算定法

(1) CP 波による応答関数の理論解

図一1 に示すように、時刻 $t=0$ における越波によって、防波堤背後の水域の幅 B_0 の区間に高さ Y_0 のような水面上昇が生じ、それが港内へ伝播すると考えると、伝達波のインパルス波形 $\hat{h}(x, t)$ は、倉田ら(1980, 1981)により CP 波を用いて次のように表わすことができる。

$$\hat{h}(x, t) = \text{Real} \left[\int_0^\infty \frac{8\pi Y_0 \cdot f \cdot \sin k B_0 \cdot \cos k x}{\sqrt{g h} \cdot k (\tanh k h + k h \cdot \text{sech}^2 k h)} e^{i 2 \pi f t} d f \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 f は周波数、 h は水深、 g は重力加速度、 k は波数、 x は防波堤背後からの距離である。ただし、式(1)は、倉田らの無次元表示式を FFT 解析に適用するために変形して表示している。倉田らは、規則波1波



図一1 伝達波のモデル化

当りの越波量を1つのインパルスとみなし、これと等価な水位上昇量 $B_0 \times Y_0$ によって生じる CP 波を入射波の周期に重ね合わせてモデル化した。本研究では、不規則波による越波伝達波へ適用するため、次節で述べる仕切りを越える入射波部分の時系列を入力時系列として、1つのインパルスとみなし、初期水位上昇高さ Y_0 を、 Δt 毎に入力時系列の大きさに対応させて変化させた。

(2) 不規則波による伝達波のモデル化

入射波は、その全てが防波堤を越波して伝達波を生じさせるとは考えられないことから、図一1 に示すように、入射波に対してある仕切り高 CL を仮定し、それを越える波のみを防波堤背後への入力時系列と考える。この入力時系列と伝達波との間の因果関係を規定する応答関数を想定すると、伝達波は、入力時系列とこれによるインパルス応答関数との畳み込み積分で表わされることが出来る。さらに、伝達波のインパルス応答関数と周波数応答関数はフーリエ変換の関係にあることから、式(2)に示すように、入力時系列の複素フーリエ係数と周波数応答関数を掛け合わせ、逆フーリエ変換を利用して、伝達波時系列を求めることができる。従って、入射波の種類や天端高に依存しない周波数応答関数を適切に定めることができれば、伝達波を算定することができる。

$$y(x, t) = \int_0^t y_I(\tau) \cdot \hat{h}(x, t - \tau) d\tau = \text{Real} \left[\int_0^\infty Y_I(f) \cdot \hat{H}(f, x) \cdot e^{i 2 \pi f t} d f \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $y(x, t)$ は伝達波の時系列、 $y_I(t)$ は入射波のうち仕切りを越える部分の入力時系列、 $Y_I(f)$ は入

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
** 正会員 工修 東京電力(株) 工務部 工務土木課
*** 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

力時系列の複素フーリエ係数, $\hat{h}(x, t)$ はインパルス応答関数, $\hat{H}(f, x)$ は周波数応答関数である。

3. 不規則波実験から得られる伝達波の応答関数

(1) 水理模型実験

図-2 に示すように, 無反射型造波機を設置した長さ 19 m, 幅 0.3 m, 深さ 0.55 m の 2 次元造波水路を用いて伝達波に関する断面 2 次元実験を実施した。対象とした防波堤は, 代表的な構造形式である混成堤と消波ブロック被覆ケーソン堤を用い, 模型縮尺を 1/100 とした。表-1 に堤体模型の諸元を, 図-3 に消波ブロック被覆ケーソン堤模型の断面図を示す。なお, 水深 h を 21.5 cm と一定とし, 堤体の天端高 hc を 3 種類, 天端幅 B を 3 種類変化させた。

入射波は, 不規則波および規則波を対象とした。不規則波は, Bretschneider—光易型周波数スペクトルを用いて, 表-1 に示すような 6 種類の有義波諸元となるように設定した。規則波は不規則波の有義波諸元と同じ波高と周期の組合せとして設定した。入射波は, あらかじめ堤体模型が無い状態で, 堤体設置付近に設置された容量式波高計により測定した。

伝達波は, 防波堤を越えた水塊が打ち込むことにより擾乱が伝播する複雑な現象であり, その測定位置によって波高と周期が異なることから, 図-2 に示すように, 堤体背面から 50 cm 間隔に 12 地点で測定した。伝達波計測時には, 164 sec 間作成した造波信号をつなぎ合わせて繰り返し造波し, 測定時間を, 不規則波の場合には造波信号の 1 サイクルと同じ 164 sec 間 (0.04 sec 刻みで 4096 個), 規則波の場合には 20 sec 間 (0.04 sec 刻みで 512) 個とした。なお, 実験方法の詳細は平口ら (1991) と同様である。

(2) 応答関数の算定方法

入射波と伝達波は同時計測されていないが, 入射波 1 サイクルの造波時間と伝達波の測定時間が等しいことから, 伝達波の時系列に対応するように入射波時系列のタイムラグを補正することが可能である。そこで, 応答関数の算定に先立ち, 入射波時系列と伝達波の時系列との相関が最大となるラグタイムを求め, この時間だけ入射波時系列をずらした。図-4 は, 測定した入射波のうち, 仕切り高 0.5 hc 以上の波形を取り出した時系列と測定した伝達波時系列を比較したものである。これによると, 両者の波群特性はよく一致し, 高い相関関係が見られる。図-5 は, 測定した入射波のうち, 仕切り高 0.5 hc 以上の波形部分の周波数スペクトルと伝達波の周波数スペクトルを比較したものである。図によると, 両者のスペクトル形はよく似ており, 応答関数の算定の可能性が示唆される。

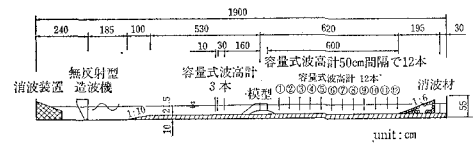


図-2 伝達波の計測状況

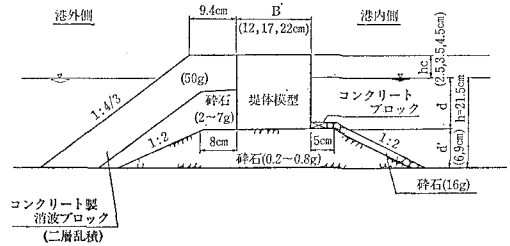


図-3 防波堤模型の断面図 (消波ブロック被覆ケーソン堤)

表-1 防波堤模型と入射波の諸元

防波堤様式	天端高 h_c (cm)	堤体幅 B (cm)	マウンド厚 d' (cm)	波浪条件	
				$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (sec)
混成堤 (消波プロ ック被覆ケ ーソン堤)	2.5	12.0	6.0 (9.0)	4.5 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5	1.0 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6
		17.0			
		22.0			
	3.5	12.0	6.0 (9.0)		
		17.0			
		22.0			
	4.5	12.0	6.0 (9.0)		
		17.0			
		22.0			
	2.5	22.0	9.0 (6.0)		
		(17.0)			

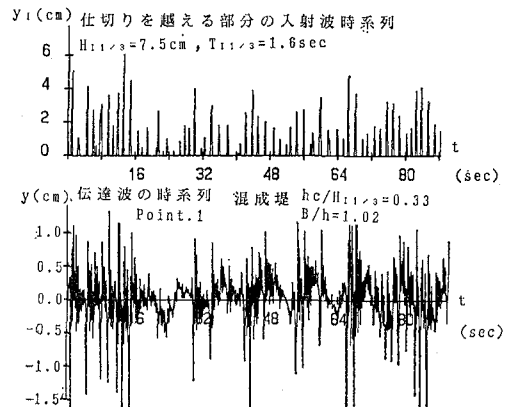


図-4 仕切りを越える部分の入射波時系列と伝達波時系列の比較

伝達波の周波数応答関数 $\hat{H}(f)$ は, 図-6 に示すように, 仕切りを越える入射波波形部分とそれによって生じ

る伝達波とから、各々の周波数スペクトル $P_t(f)$ と $P_i(f)$ を求め、それらの比の平方根 $\sqrt{P_t(f)/P_i(f)}$ として定義した。応答関数を検討する際には、入射波に対する仕切り高 CL の設定の仕方が重要となる。混成堤前面では、入射波が完全反射に近い状態で重複するため、波高が入射波高の2倍程度まで増大し、防波堤を越えて伝達波となる。従って、入射波の片振幅が静水面からの防波堤天端高の半分の高さ以上で越波を生じることになる。このことから、入射波の仕切り高 CL を、天の端高の半分の高さ ($CL=0.5h_c$) とした。消波ブロック被覆ケーソン堤では、被覆ブロックの消波特性により、堤体前面での反射率が低下するため、仕切り高 CL の値を $0.5h_c$ 以上に選ぶ必要がある。しかし、本実験条件の範囲内で CL の値を $0.5h_c \sim h_c$ に変化させても、応答関数の大きさが変化するだけで、周波数特性は相似形を保つことから、仕切り高 CL の値を混成堤と同様の $0.5h_c$ とし、被覆ブロックの消波効果による越波量の低下を応答関数の大きさの低下として反映させた。

(3) 伝達波の応答関数の特性

図-7 は、消波ブロック被覆ケーソン堤背後 50 cm の地点 Point. 1 における伝達波の応答関数の代表例で、同一の天端高と天端幅の堤体に対して異なる種類の入射波が作用した場合を比較したものである。図によると、各応答関数に若干の差がみられるが、入射波の種類にかかわらず、よく似た特性を示すことがわかる。また、天端高を変化させても同様の結果となった。図-8 は、入射波と天端高の異なる混成堤について、各々算定した応答関数を各測定地点ごとに平均した後、スプライン曲線で補間したものである。図によると、入射波の周波数帯に相当する $0.2 \sim 2.5 \text{ Hz}$ 付近の応答値は、伝達波の測定地点が異なっても、ほぼ一定と見なすことができるが、 2.5 Hz 以上の高周波数成分には越波の打ち込みによる擾乱に起因するものが含まれると推察され、堤体から離れるに従って次第に減衰するため、離れた測定地点ほど応答値が低下している。また、測定地点に関わらず、 0.1 Hz 付近の低周波数成分の応答値が大きくなっている。防波堤背後水域（長さ約 700 cm ）の固有周波数を算定すると 0.1 Hz となる。このため、伝達波の固有周波数成分が励起されたものと推察される。消波ブロック被覆ケーソンの応答値は、被覆ブロックの消波効果により、混成堤に比べ全周波数帯にわたって2割程度小さくなった。また、3種類の天端幅の混成堤のうち、幅 22 cm の場合の応答値は、幅 12 cm の場合に比べ、全周波数帯にわたって1割程度小さくなった。

(4) 伝達波の応答関数の標準形

CP 波の理論解は完全流体場でのポテンシャル理論に基づいたものであり、実験により求めた応答関数の高周

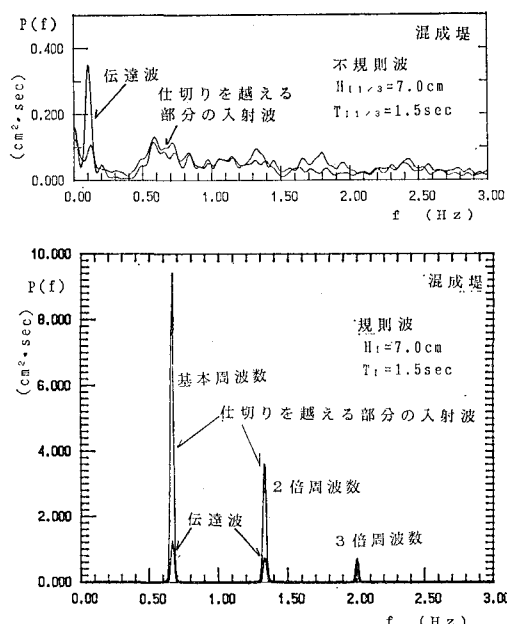


図-5 仕切りを越える部分の入射波と伝達波のパワースペクトルの比較

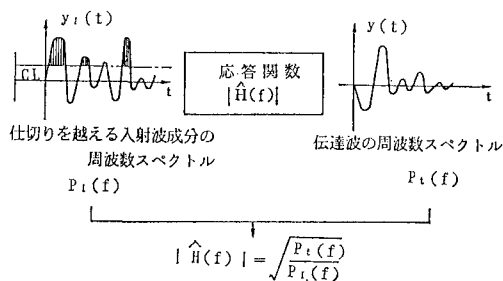


図-6 実験データからの応答関数の求め方

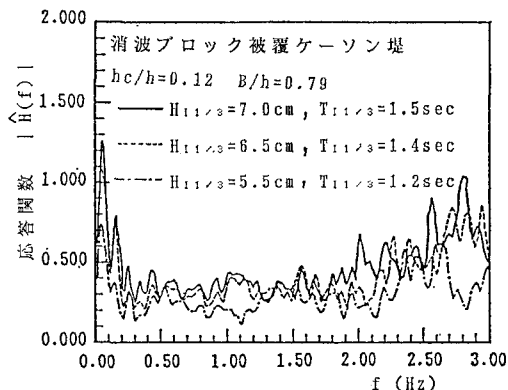


図-7 入射波の種類が異なる場合の応答関数の比較

波数成分が、伝播に伴い減衰していく現象を再現できない。そこで、この減衰効果を考慮して、理論解を改良し、伝達波の周波数応答関数の標準形を表わす関数

$\hat{H}(f, x)$ として次式を提案する。

$$\hat{H}(f, x) = \frac{8\pi\hat{Y}_0 f \cdot \sin k B_0 \cdot \cos k x \cdot \exp(-C_0 k x)}{\sqrt{g h} \cdot k (\tanh k h + k h \cdot \operatorname{sech}^2 k h)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) には3つのパラメータがあり、 B_0 はピーク周波数の位置などの周波数応答形状を規定するパラメータ、 $\hat{Y}_0$ は仕切りを越える入力波の高さと初期水位上昇高さとの換算係数 (図-1 の Y_0 は $\hat{Y}_0 \times y_i(t)$ に対応)、 C_0 は減衰パラメータである。図-9 は式 (3) による応答関数と実験により求めた応答関数を比較したものの代表例である。図のように、実験結果に合うように3つのパラメータを選定した結果、 B_0 と C_0 は一定とし、 $\hat{Y}_0$ は防波堤の構造形式 (消波ブロック被覆の有無) と天端幅により変化させた。パラメータの算定結果を

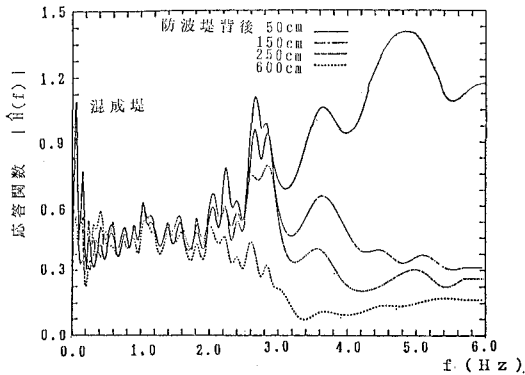


図-8 計測地点の異なる応答関数の比較

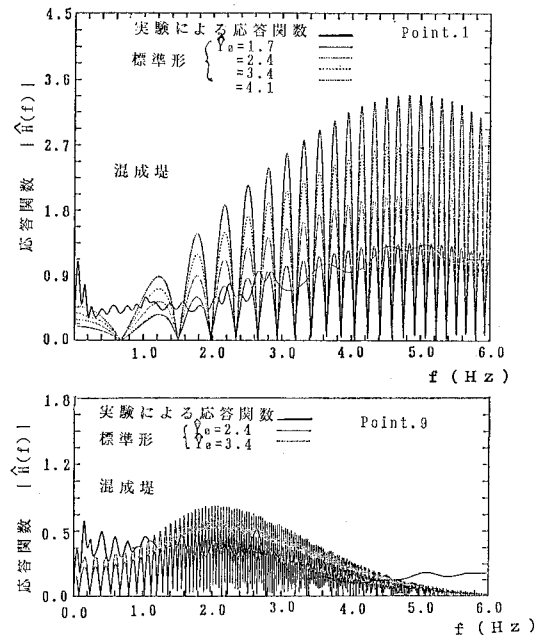


図-9 応答関数の標準形に用いるパラメータの選定

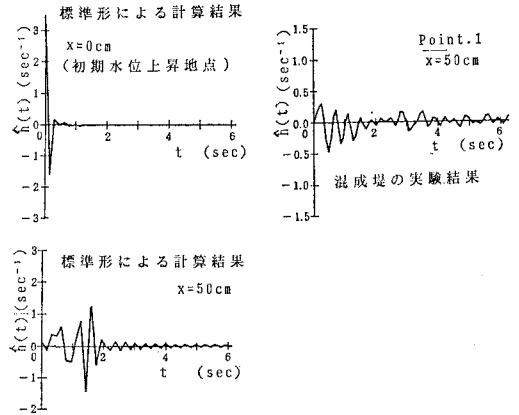


図-10 標準形によるインパルス応答関数と実験結果との比較

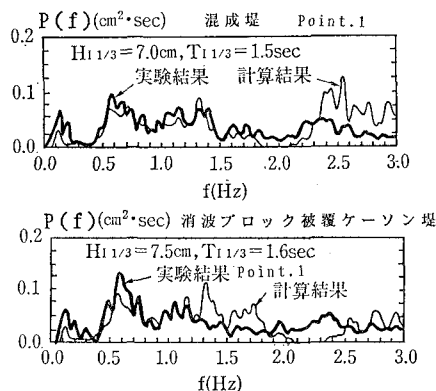
表-2 応答関数の標準形のパラメータ諸元

パラメータ	混成堤			消波ブロック被覆ケーソン堤		
	堤体幅 B (cm)			12.0	17.0	22.0
$\hat{Y}_0$	2.93	2.84	2.75	2.59	2.49	2.33
B_0 (cm)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
C_0	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003

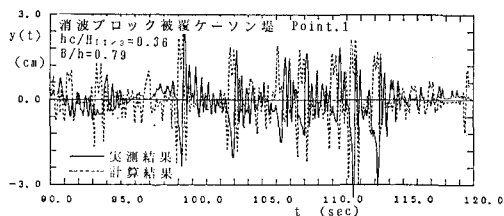
表-2 に示す。図-10 は、式 (3) による周波数応答関数を逆 FFT 解析することにより求まるインパルス応答関数の一例である。図には、不規則波実験から得られた周波数応答関数から求まるインパルス応答関数も示した。図によると、 $x=0$ である初期水位上昇地点での波形は周波数成分波の位相が揃っているため、衝撃的なインパルス波形となっているが、 $x=50$ cm の地点での波形は初期水位上昇地点から伝播していくに従い各成分波間に位相差が生じるため、幾分衝撃性が和らいだ波形となっている。不規則波実験から得られたインパルス応答関数は、 $x=50$ cm の地点 (Point. 1) で計測したものであり、定性的には $x=50$ cm の地点での式 (3) によるインパルス応答関数とよく似た波形となっている。

4. 本手法の適用性検証

表-2 に示したパラメータを用いて、式 (2) により伝達波を算定し、実験結果と比較して適用性を検証した。図-11 に、混成堤と消波ブロック被覆ケーソン堤について、防波堤背後 50 cm の地点 Point. 1 における推定伝達波と実測伝達波のパワースペクトルの比較を示す。伝達波の実験には、防波堤背後水域の固有振動周波数成分が励起されている可能性があるため、パワースペクトルを比較する際、0.1 Hz 以下の低周波数成分は削除することにした。図によると、伝達波の計算結果と実



図—11 本手法による伝達波のパワースペクトルと実験結果の比較

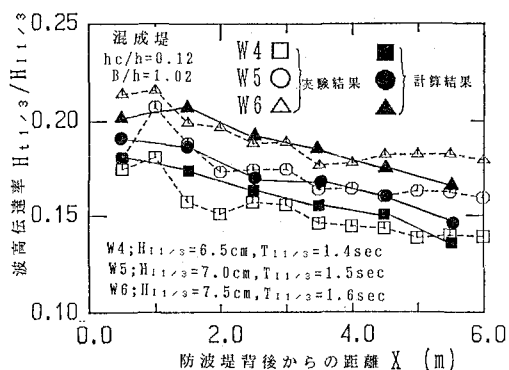


図—12 本手法による伝達波の時系列と実験結果の比較

測結果はよく一致している。図—12 に、消波ブロック被覆ケーソン堤について、防波堤背後 50 cm の地点 Point. 1 における推定伝達波と実験伝達波の時系列の比較を示す。図によると、計算結果は伝達波の実測結果の波群特性をよく再現している。

図—13 に、混成堤について、ゼロアップクロス法による伝達波の有義波高の伝播に伴う減衰状況を計算値と実測値とで比較したものである。図によると、計算結果は伝達波の実測結果の波高減衰状況をよく再現している。

伝達波の周期の伝播に伴う変化を実測値と計算値とで比較した結果、伝播に伴い、伝達波の高周波数成分が減衰し、周期が長くなる傾向を、計算結果は定性的には再現したが、実測値の周期の変化の方が若干大きくなった。また、伝達波高の最大値と有義値の比の伝播に伴う変化を実測値と計算値とで比較した結果、防波堤の



図—13 伝達波高の伝播に伴う減衰状況の実験結果と計算結果

く近傍では、水塊の打ち込みに伴う非線形現象が卓越するため、計算結果は過小評価となるが、その他の地点では実測値の傾向をよく再現した。

5. おわりに

以上、越波伝達波の周波数スペクトルを適切に算定できる手法の開発を目的として、応答関数を用いて不規則波による越波伝達波を算定する手法を提案した。本手法の適用性を検証した結果、伝達波の有義波高やスペクトル分布形状を精度よく算定できることが明かとなった。

応答関数の標準形に用いる 3 つのパラメータの値は、限られた実験条件のもとで算定されたものなので、水深や模型縮尺を変化させた場合についても、適用性を検証していく必要がある。

参考文献

- 倉田克彦 (1981): 越波による伝達波高, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 339-342.
- 谷本勝利・大里陸男 (1979): 消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について, 第 16 回海岸工学講演会論文集, pp. 309-313.
- 平口博丸・池野正明・大橋裕寿・柏木洋之・樋口豊久 (1991): 防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 506-510.
- 松井政博・倉田克彦・荻野英樹・鈴木 功 (1980): 越波による伝達波特性 (Cauchy-Poisson 波によるモデル化), 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 410-413.
- Goda, Y. (1969): Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, pp. 3-18.