

防波堤法線に断続的な開口部を有するときの伝達率の推定法

谷本勝利*・吉本靖俊**・道下 勲***

1. ま え が き

防波堤は本来、外海の厳しい波浪から静穏な海域を確保するために設けられるものであり、我が国では捨石マウンド上に不透過なコンクリートケーソンを据え付けた混成堤を間隔をおかず連続的に配置するのが一般的である。ところで、近年海洋空間の有効利用を図るため、外海の巨大な波浪を制御し、適度に静穏な海域を造成する技術の開発が望まれており、この目的のために筆者らも各種の透過性構造物の水理特性を検討しているところである¹⁾。このような外海の大水深域に築造する防波堤は必然的に大断面となり、その建設技術上の問題点の克服はもちろんのこと建設費の低減も重要な課題である。そこで、背後海域の利用条件に対応した適度な静穏度を確保できるならば、透過性防波堤の延長線（以下、法線と呼ぶ）上にさらに断続的に開口部を設け、実施工延長を短縮することも考えられる。この場合、防波堤背後には堤体を透過する波（以下、透過波と呼ぶ）に加えて、開口部からの回折波（以下、侵入波と呼ぶ）が共存することになり、そのときの波高分布を明らかにする必要がある。この波高分布は一樣でなく複雑な分布となるが、防波堤の効果としてはある適当な面積での平均波高を求めて、これと入射波高の比で定義した平均伝達率のかたちで評価することができる。

本研究はこのような防波堤法線に断続的に開口部を有する場合の背後域波高について、数値波動解析法^{2),3)}による数値計算および水理実験を行って、開口部からの侵入波を含めた平均伝達率の推定法を提示するものである。ただし、検討の対象とするのは防波堤堤体がある一定間隔ごとに一定の幅の開口部をもって直線上に配置される場合で、これに規則波および単一方向不規則波が正面から直角に入射する場合である。

2. 数値計算による検討

(1) 計算条件

本研究においては、水深 $h=50\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ （有義波波長 $L_{1/3}=256.9\text{m}$ ）の波を現地での一応の具体的対象として計算条件等を設定する。

防波堤堤体は前述したように、ある一定間隔 l ごとに一定の幅の開口部をもって配置し、この間隔 l を配置幅、開口幅の l に対する比を法線開口率 ϵ と呼ぶ。計算はこの 1 配置幅を対象として行い、図-1 はその計算領域を示したものである。波の進行方向の全長は 1140m （ $\equiv 4.44L_{1/3}$ ）で、沖側端から 480m （ $\equiv 1.87L_{1/3}$ ）の位置に幅 30m の堤体を設け、その背面から岸側端までの長さは 630m （ $\equiv 2.45L_{1/3}$ ）である。計算領域の幅 l は 150m （ $\equiv 0.58L_{1/3}$ ）を標準とし、一部配置幅の検討で $l=300\text{m}$ （ $\equiv 1.17L_{1/3}$ ）に変化させた。境界条件は領域の両側方が完全反射、岸側端が完全消波であり、計算上の堤体はすべて不透過で完全反射とする。

図中に示しているように、堤体背面と側方境界との交

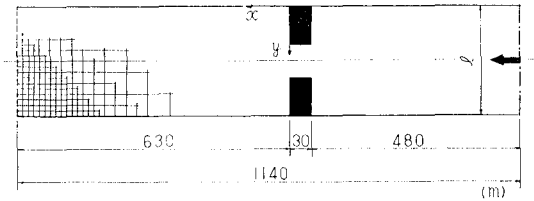


図-1 計算領域

表-1 計算条件一覧表

堤体配置条件		水 深 h (m)	入射波条件		計 算 条 件		
配置幅 l (m)	法線開口率 ε		周 期 T (s)	波 長 L (m)	時間間隔 Δt (s)	メッシュ間隔 ΔS (m)	
150.0	0.2	50.0	6.94	75.0	0.383	7.5	
			7.60	90.0	0.422		
	0.4		8.23	105.0	0.412		
			10.52	165.0	0.583	15.0	
300.0	0.6		12.20	210.0	0.610		30.0
	0.8		15.70	300.0	0.867		
			18.12	360.0	1.006		

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 防波堤研究室長
** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 防波堤研究室
*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 昭和59年度研修員（五洋建設株式会社）

点を原点にとり、波の進行方向に x 軸、幅方向に y 軸をとって背後域の座標を表わす。

数値波動解析法による計算は規則波について行い、不規則波に対しては後述するように規則波の結果を合成する。表-1 にこれらの計算条件を一括して示しているが法線開口率 ε は 0.2~0.8 の範囲で 4 種類、入射波の周期は 6.94s~18.12s の範囲で 7 種類に変化させた。

(2) 配置幅の影響

同じ法線開口率であっても配置幅のとり方によって平均伝達率が変化する可能性がある。そのため $\varepsilon=0.2$ の条件について前述したように l を 2 種に変化させて計算を実施した。図-2 はその結果を示したもので、横軸は規則波の波長に対する相対配置幅 l/L 、縦軸は $x/L=1.0, 2.0, 3.0$ の線上での平均伝達率 $\bar{K}_D$ である。 $\bar{K}_D$ は x/L や l/L によって変化する、特に $l/L \approx 1.5$ 付近で大きくなる傾向を示している。図中、横軸に $l=150\text{m}$, 300m の場合の周期 T の値を付記してあるが、この極大条件は $l=150\text{m}$ の場合 $T \approx 8\text{s}$, $l=300\text{m}$ の場合 $T \approx 13\text{s}$ にあたる。したがって、本研究で具体的対象としている $T_{1/3}=14\text{s}$ の波に対しては $l=300\text{m}$ の条件は好ましくなく、以後 $l=150\text{m}$ の条件での計算結果に基づいて検討を進める。

(3) 規則波に対する平均伝達率（不透過堤の場合）

平均伝達率は対象領域のとり方によって若干変化する可能性があるが、以後の検討では堤体背面から岸側への距離と配置幅の比 x/l が 0.86~2.57（対象有義波波長との比 $x/L_{1/3}$ で 0.5~1.5 に相当）の範囲のすべての計算点での波高比の自乗平均を平均伝達率と定義し、 $\bar{K}_D$ と表記する。ここに、自乗平均をとったのはエネルギーの伝達率に対応させたものであるが、実際には単純平均とそれほど違いがない。また、' を付したのは背後域の波は開口部からの侵入波のみで、透過波の影響を考

慮していない値であることを意味する。

図-3 は後述の規則波合成の成分波として用いる $T=6.94, 10.52, 12.20, 15.70, 18.12\text{s}$ の規則波による $\bar{K}_D$ を ε に対してプロットしたものである。これによると、 $\bar{K}_D$ は周期の短い $T=6.9\text{s}$ の場合他の周期条件とやや異なっているが、全体的には ε が 0 から 1 へと大きくなるにつれて、 $\bar{K}_D$ も 0 から 1 へと滑らかに増大しており、周期の影響はそれほど大きくないことが知られる。

(4) 規則波に対する平均伝達率（透過堤の場合）

(3) は堤体が不透過な場合の開口部から侵入波に対する平均伝達率を示したものであるが、堤体が透過性である場合にはさらに堤体を通過する透過波を考慮する必要がある。法線に開口部を有するときには、この透過波も回折効果を受けることになり、本研究ではこのときの平均伝達率を開口部からの侵入波に対する平均伝達率と堤体からの透過波に対する平均伝達率のエネルギー合成によって求める。堤体透過波に対する平均伝達率は、堤体自体の透過率を K_T としたとき、法線開口率が $1-\varepsilon$ のときの図-3 による $\bar{K}_D$ の K_T 倍で与えられる。したがって、両者を合成したときの規則波による平均伝達率 $\bar{K}_D$ は次式で与えられる。

$$\bar{K}_D(\varepsilon) = [\{\bar{K}_D'(\varepsilon)\}^2 + \{K_T \cdot \bar{K}_D(1-\varepsilon)\}^2]^{1/2} \quad \cdots (1)$$

ここに () を付したのは値が法線開口率 ε によって変化することを表わしている。

(5) 不規則波に対する平均伝達率

不規則波に対する平均伝達率は規則波による結果を用いて、不規則波のスペクトル密度に対応した各成分波の分担率を重みとして合成することにより求められる。ただし、透過性構造物の透過率は一般に周波数の関数であり、成分波の周期によって変化することが指摘されている¹⁾。しかし、ここではこれを一定とみなす。

図-4 は $T_{1/3}=14.0\text{s}$ の Bretschneider・光型型スペク

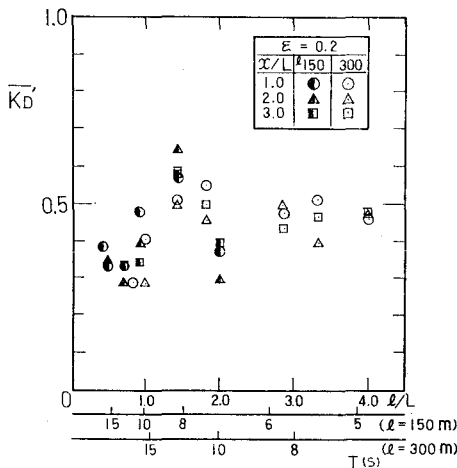


図-2 配置幅の影響

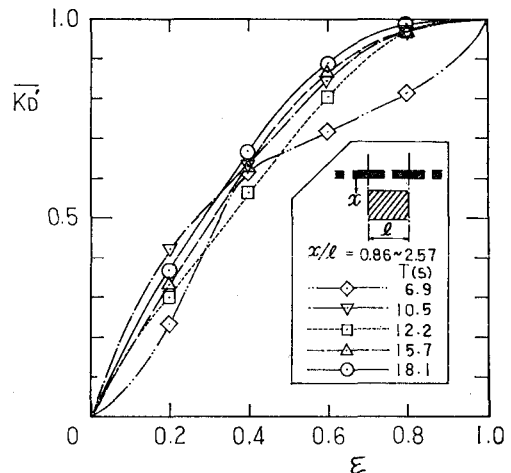


図-3 規則波に対する平均伝達率（不透過性堤体）

トルに対し、成分波の周期を前述の5種の周期で代表させたときの平均伝達率を示したものである。堤体自体の透過率 K_T をパラメータとして表示しており、 $K_T=0$ は不透過堤を表わす。 $\varepsilon=0$ のときには $\bar{K}_D=K_T$ であり、 ε が大きくなるにつれて $\bar{K}_D$ の値は増大し、 $\varepsilon=1.0$ のときには $\bar{K}_D=1.0$ となる。

実際に透過性構造物を法線方向に開口部を設けて設置する場合には、目標の伝達率に対して構造物自体の透過率と法線開口率を選定することになる。そのため、横軸

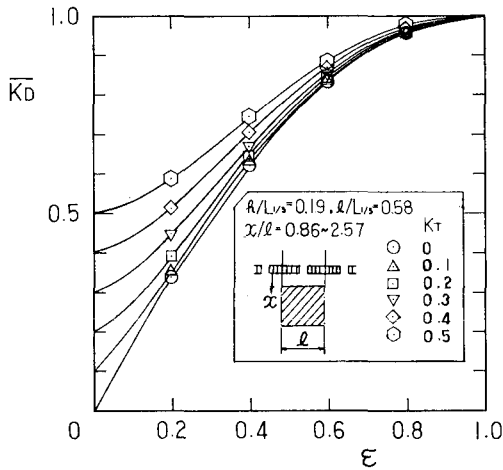


図-4 不規則波に対する平均伝達率 (透過性堤体)

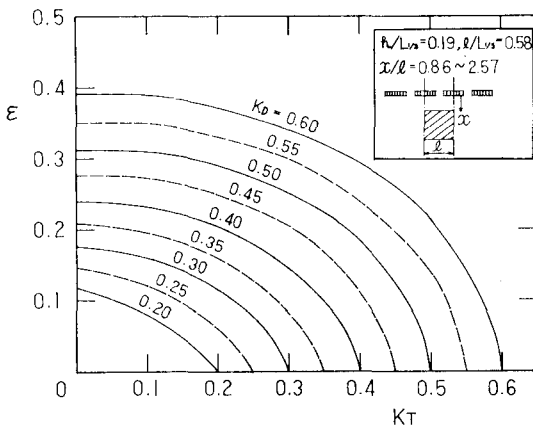


図-5 堤体自体の透過率と法線開口率の関係

に K_T 、縦軸に ε をとり、パラメータを平均伝達率として図-4を書き換えたものが図-5である。これによりたとえば $\bar{K}_D=0.40$ を目標とするならば、 $K_T=0.3$ の場合 $\varepsilon=0.145$ 、 $K_T=0.2$ の場合 $\varepsilon=0.205$ 、 $K_T=0.1$ の場合 $\varepsilon=0.235$ というように、 K_T に応じて法線開口率 ε を容易に読み取ることが

できる。この図は水深 50m、有義波周期 14.0s の条件で求めたものであるが、前掲の図-3に示したように、 $T=10s$ を超える4種類の規則波に対する平均伝達率は、周期によってそれほど大きな違いがないことから、これらを主な成分波とする長周期不規則波については、ある程度の誤差を許容すれば、図-5によって平均伝達率の概略値を見積ることができる。

3. 水理実験による検討

(1) 実験の方法および条件

数値計算結果の妥当性を検討するために水理実験を行った。実験に用いた水路は長さ 163m、幅 1.0m、深さ 1.5m の不規則波長水路である。水路幅 1.0m を数値計算における配置幅 l ($=150m$) の $1/2$ に対応させており、現地対象条件に対しては縮尺 $1/75$ になる。

図-6に模型堤体の位置および背後域での波高測点を示す。防波堤は幅 40cm の不透過 ($K_T=0$) な直立堤である。波高測点の範囲は数値計算における平均伝達率の算定対象領域 ($x/l=0.86\sim 2.57$) に一致させ、水路長方向に9測線、1測線上11点の99測点である。

実験条件は表-2に示したとおりで、法線開口率 ε は 0.2, 0.4, 0.6 の3種に変化させた。水深 h は 66.7cm の一定で、実験波は規則波が $T=1.21\sim 2.09s$ の範囲で4種、不規則波が $T_{1/3}=1.62s$ の1種である。これらの規則波の周期は縮尺 $1/75$ としたとき、表-1中の長いほうからの4周期に対応し、不規則波の有義波周期は、14.0sに対応する。波高は各周期条件について波形勾配が0.035となるように設定した。ただし、不規則波の場合には長時間波を連続して作用させるために、造波板か

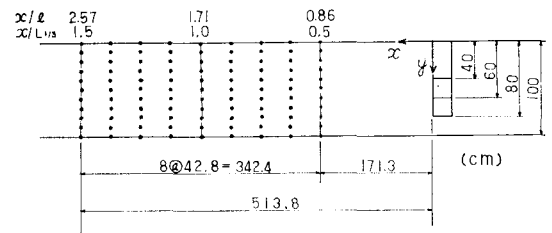


図-6 侵入波高の側定位置

表-2 実験条件一覧表

堤体配置条件		水深 h (cm)	入射波条件					
配置幅 l (m)	法線開口率 ε		波の種類	$T, T_{1/3}$ (s)	$L, L_{1/3}$ (cm)	$H, H_{1/3}$ (cm)	h/L	H/L
2.0	0.2	66.7	規則波	1.21	220	7.7	0.303	0.035
				1.41	280	9.8	0.238	
				1.81	400	14.0	0.167	
				2.09	480	16.8	0.139	
	0.6		不規則波	1.62	343	12.0	0.197	

らの再反射波の影響によって堤体設置以前の状態で設定した通過波の波高条件とは若干異なる。そのため、模型設置後の堤体と造波板との間の多重反射係が十分定常⁴⁾に達するのを待って、堤体前方で測定した波形から入・反射波の分離計算⁵⁾を行い入射波高を求め、これを波高比の算定に用いる基準波高とした。しかし、今回用いた水路は非常に長く、かつ側壁等の粗度が大きで水路における減衰が大きいので、造波板による再反射波の影響は小さい。実験条件のうち反射率が最も高い $\varepsilon=0.2$ の条件でも波高増大率（再反射波の影響を含めた分離入射波高/通過波の有義波高）は 1.05 程度であった。

(2) 規則波に対する計算値との比較

図-7 (a), (b), (c) は規則波による実験結果を計算値と比較して例示したものであり、 $T=1.21, 1.41, 2.09$ s の周期条件に対する、それぞれ $x/l=0.86, 1.71, 2.57$ の

線上での波高比 (K_D) である。横軸の $y/l=0$ は堤体長の中心の後方、 $y/l=0.5$ は開口部中心の後方に対応する。波高比の分布は周期の短い $T=1.21$ s の条件では、特に計算値において y 方向（水路幅方向）の変化が大きい。実験値にもこの傾向が認められるが、計算値ほど顕著ではない。しかし、このような場合でも水路幅方向の平均値をとると、実験値と計算値はほぼ一致する。周期が長い場合には水路幅方向の変化は小さく実験値と計算値は非常によく一致している。

なお、実験による測定波形には開口部での非線形現象に伴って高次波が発生し、特に ε が小さい条件において波形が非常に乱れる。そのため、測定波形をフーリエ解析し、基本周期（入射波の周期）に対する値から波高を求め、これを用いて波高比を計算した。

(3) 不規則波に対する計算値との比較

図-8 は不規則波に対する実験結果を計算値と比較して示したものである。図に示す実験値のうち規則波の結果は、港内の 99 ケ所の全測点に対する平均伝達率を用いて数値計算結果と同じ方法で不規則波として合成したものである。また、不規則波の実験値は通常のゼロアップ解析による侵入波の有義波高から求めたものであり、港内の全測点に対する自乗平均伝達率である。規則波合成による実験値は計算値とよく一致しているが、不規則波の実験値は法線開口率が小さいときに若干大きくなっている。これは、波が開口部から侵入するときに発生する高次波とこれにより励起される水路固有の横波の影響であると考えられるため、侵入波についてスペクトルを調べた。図-9 (a), (b) は $x/l=1.71$ ($x/L_{1/3}=1.0$) における水路中央位置 ($y/l=0.25$) および開口部側水路側壁位置 ($y/l=0.5$) での侵入波のスペクトルを法線開口率別に示したものである。両図とも侵入波のスペクトルは法線開口率が小さくなるにつれて全体的に小さくなって

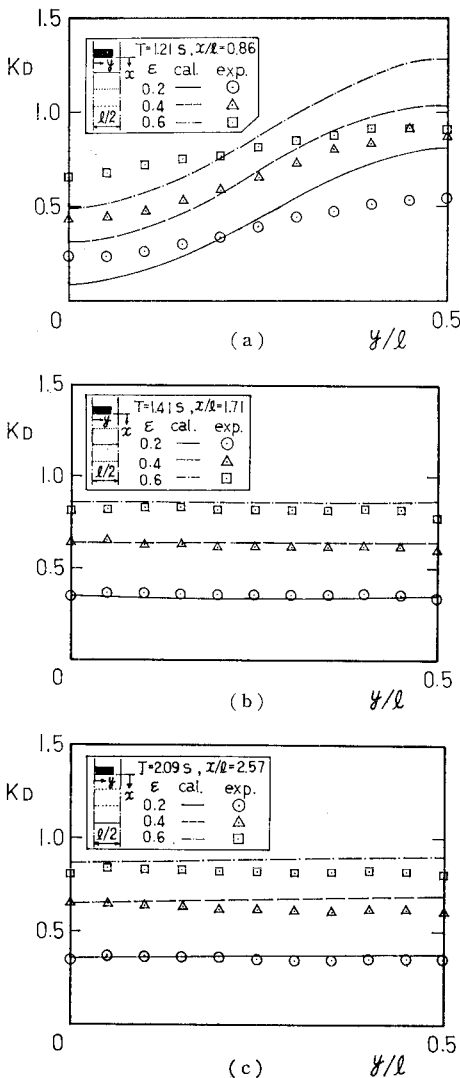


図-7 侵入波の波高分布

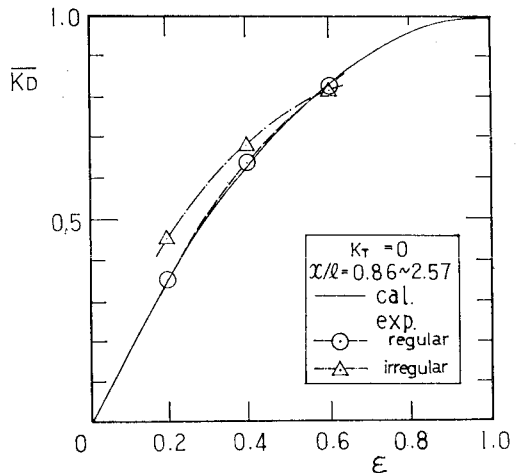


図-8 計算値と実験値の比較

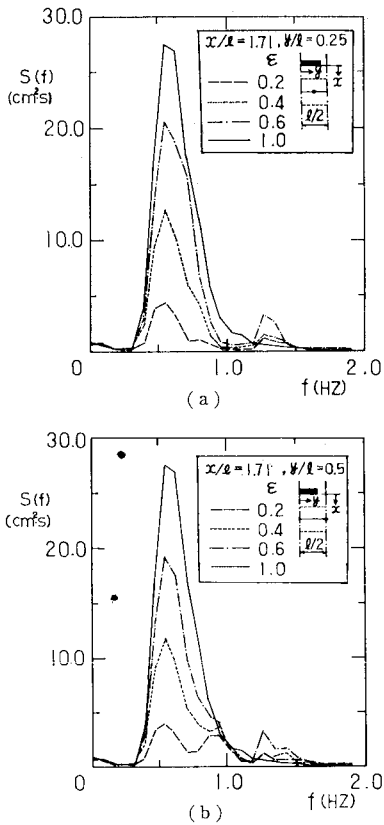


図-9 侵入波のスペクトル図

いるが、 $y/l=0.25$ の $f=1.25\text{ Hz}$ および $y/l=0.5$ の $f=0.87, 1.25\text{ Hz}$ で小さなピークが見られる。これらの周波数は水深 66.7 cm に対して水路幅 1.0 m を半波長および 1 波長とする波の周期に対応するものである。開口部からの侵入波にはもちろんこの周波数に対応する成分波は存在するが、このようにこれらの周波数に対応するスペクトル密度が顕著になるのは、開口部からの侵入波が回折して水路方向と直角あるいは斜めに進行することにより水路固有の横波が増幅されるためである。法線開口率が大きいときには、これらの周波数に対するスペクトル密度も大きくなっているが、侵入波の卓越周波数

のスペクトル密度も大きいいため、侵入波の波高に及ぼす影響は小さい。しかし、法線開口率が小さくなると、横波のスペクトル密度は、侵入波の卓越周波数のスペクトル密度に対して相対的に大きくなっているため、侵入波の波高に及ぼす影響は大きくなる。また、これらの横波の周波数以外の高周波数部で若干エネルギーが存在しているが、これは法線開口部から波が侵入するときに発生する高次波によるものである。したがって、前掲の図-8 において、法線開口率が小さくなるにつれて実験値が計算値より大きくなっているのは、上述の横波と侵入波の高次波によるものであり、特に水路固有の横波の影響を考慮すると、数値計算結果はほぼ妥当な伝達率の推定値を与えるものと言える。

4. まとめ

数値波動解析法による数値計算および水理実験により透過性防波堤の法線方向に断続的な開口部を有するときの平均伝達率の算定法および所要の平均伝達率を与える防波堤の法線開口率の算定図を示した。本研究の結果はいずれも不透過な防波堤の結果に基づいたものであり、実際の透過性防波堤の透過波の周波数特性を考慮していないなどの問題点がある。これらについては今後、透過性防波堤を用いた平面実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その 1）——透過性構造（海底設置型）の反射および伝達特性に関する不規則波実験——港研資料，No. 516，1985，37 p.
- 2) 伊藤喜行・谷本勝利：新しい方法による波動の数値計算——防波堤周辺の波高分布への適用——，港研報告 Vol. 12，No. 2，1971.6，pp. 91~120.
- 3) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：数値波動解析法による港内波高分布の計算，港研報告 Vol. 14，No. 3，1975.9，pp. 35~58.
- 4) 谷本勝利・福田英治・村永 努：水路における不規則波の再反射の影響について，港研資料，No. 467，1983，23 p.
- 5) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波における入・反射波の分離推定法，港研資料，No. 248，1976，28 p.