

離岸堤による波浪減殺効果の現地観測

富永 正照*・坂本 忠彦**

1. ま え が き

近年各地で離岸堤が積極的に築造される気運にある。離岸堤は、海中に構造物をつくり、来襲する波浪の勢力をこの構造物で減殺して、岸に到達する波力を減じ、うちあげ高、越波量などを減少させるとともに、海浜の侵食を防ごうとする工法である。また離岸堤の背後の海面は、離岸堤の無い部分に比較して穏やかなため、波による掃流砂、浮遊砂はこの部分に沈殿、堆積し、いわゆるトンボロ現象が生じて汀線が前進することが多い。したがって、近年顕著になりつつある海岸侵食の対策工法としてきわめて有効な工法と考えられるが、このような工法が現在まであまり採用されなかったのは、前例が少なく確実な効果を期待するには、技術的に多少の不安がありかつかなり多額の工費を要するなどの理由により、やや敬遠されてきたものと考えられる。たとえば離岸堤によりどの程度波浪が減殺できるのか、どのような離岸堤の構造、配置が適切なのかなど、未知の点が多い。

著者らは、ここ数年来、離岸堤工法の合理的な設計に資するための研究を続けており、その成果の一部はすでに報告¹⁾したが、ここでは、離岸堤による波浪減殺効果についての、現地観測の結果を報告する。

2. 観測場所および観測方式

(1) 観測の対象とした離岸堤

離岸堤による波浪減殺効果を、離岸堤内外の波高比で検討することとし、離岸堤の規模、設置水深および観測の便などを検討した結果、次の2箇所の離岸堤を対象とした。これらの離岸堤の天端は、いずれも静水面上より十分突出して、観測中はその天端を波が越えることはなく、潜堤のような形にはならなかった。

a) 富山湾沿岸下新川海岸赤川離岸堤

建設省黒部工事事務所が、富山県下新川郡朝日町赤川地先に設置したものである。下新川海岸は海岸侵食が著しいことで有名であり、赤川地先も過去に幾多の災害を受けてきた。底質は礫であるが、海岸堤防前面には浜は全く無くなってきており、消波ブロックにより越波および前面洗掘に対処している。離岸堤は消波効果による背後堤防への波のうちあげ高、越波量の減少効果および、トンボロの発生による養浜効果を目的として、昭和45年6月20日に工事を開始し、8月9日に延長100m1基が完成した。その構造は図-1に示したが使用ブロックは16トンテトラポッドである。既設海岸堤防より40m程度の沖合の、水深4.7mの位置の、比較的急峻な海底勾

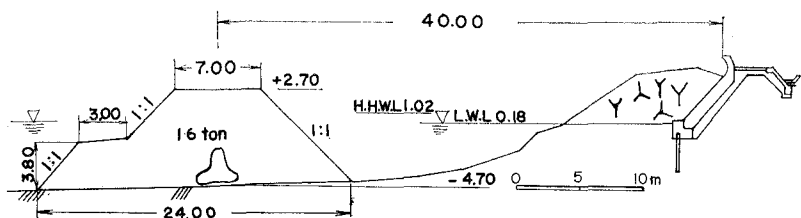


図-1 富山湾沿岸下新川海岸赤川離岸堤構造図

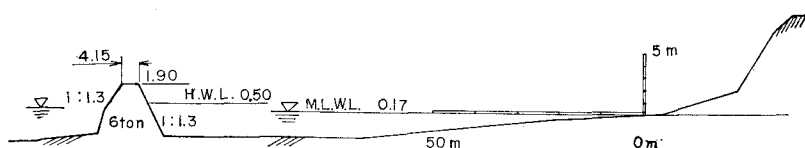


図-2 新潟沿岸金井町海岸離岸堤構造図

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

** 正会員 建設省河川局海岸課

配上に設置されたのが特長である。以上黒部海岸と呼ぶことにする。

b) 新潟沿岸金衛町海岸離岸堤

新潟県が昭和41年より新潟市関屋金衛町地先に、海岸侵食対策を目的として、汀線より130m程度沖合の水深2~2.5m程度の位置に設置中の離岸堤群のうち、41年に施工し、43年および45年に嵩上げ工事を行なったA離岸堤を対象とした。使用ブロックは6トン六脚ブロックである。工事施工中からトンボロ現象が生じ、施工後40m程度汀線が前進したが、この離岸堤に関する詳細は豊島²⁾の報告を参照されたい。以下新潟海岸と呼ぶことにする。

(2) 観測方法

波高観測は、離岸堤の沖側および内側に設置した浮標(直径40cmの漁業用発泡スチロール製)の運動を、陸上よりトランシット式波高計により記録する方法によった。記録紙の紙送り速度は1mm/secであり、検定結果十分な精度を有していた。観測は数回試みたが有効な記録の得られたのは、黒部海岸では45年10月および46年3月の2回、新潟海岸では45年10月の1回であった。

観測は原則として10分間連続して行なったが5分間の観測も若干ある。黒部海岸では2台の波高計により離岸堤の沖と内側の波高を原則として同時観測した。しかし新潟海岸では計器の都合により、1台の波高計で内側および沖側の波高を交互に観測した。観測記録はデジタルトレーサーにより1mmごとにサンプリングし、波高解析およびスペクトル解析を行なった。

(3) 観測当日の天候および海面状況

黒部海岸：45年10月20日；晴。午前中は風は穏やかであったが午後になると突風まじりの5~10m/sec.程度の風が海上より陸上方向に吹き出し、風波が発達してきた。午後になると浮標の運動が大きくなり、トランシット式波高計で追跡しきれなくなったので観測を中止。

45年10月21日；晴。夜の間に風はおさまり、海面は穏やかになっていた。

46年3月17日；晴。風速3~5m/sec.の風が海上より陸上方向に吹いていて、波頂はときどき白くなり、一部碎波していた。

表-1 黒部海岸波高解析結果一覧表

離岸堤の内側 (Inside of the off-shore breakwater)						離岸堤の外側 (Outside of the off-shore breakwater)						
観測年月日	単位 cm sec	$H_{I, \max}$ $T_{I, \max}$	$H_{I, 1/10}$ $T_{I, 1/10}$	$H_{I, 1/3}$ $T_{I, 1/3}$	$H_{I, \text{mean}}$ $T_{I, \text{mean}}$	観測時刻	$H_{O, \max}$ $T_{O, \max}$	$H_{O, 1/10}$ $T_{O, 1/10}$	$H_{O, 1/3}$ $T_{O, 1/3}$	$H_{O, \text{mean}}$ $T_{O, \text{mean}}$	$H_{I, 1/3}$ $H_{O, 1/3}$	$T_{I, 1/3}$ $T_{O, 1/3}$
昭和45年 10月20日	10時5分	40.2	31.3	22.2	13.6							
	10分間観測	7.0	7.8	7.2	6.1							
	10時25分	41.6	30.6	22.0	13.9	11時00分	137.1	108.8	85.2	55.4	0.258	1.07
	10分間	9.0	6.5	7.2	6.2	10分間	6.0	7.2	5.7	5.3		
	11時50分	37.7	33.0	25.9	16.7	11時50分	132.4	98.7	80.2	54.3	0.323	1.12
	10分間	8.0	6.5	6.4	5.4	10分間	8.0	5.8	5.7	4.7		
	13時01分	40.8	34.5	27.0	17.3	12時5分	126.3	112.0	99.6	65.4	0.271	0.95
	10分間	7.0	6.2	5.9	4.6	10分間	7.0	6.5	6.2	5.1		
	13時40分	42.8	38.2	31.0	20.6	13時40分	151.3	118.5	94.7	64.2	0.327	1.27
	10分間	7.0	7.4	7.1	5.2	10分間	7.0	7.2	5.6	4.4		
昭和45年 10月21日						14時20分	146.8	128.2	105.0	72.9		
						10分間	6.0	5.0	5.0	4.6		
						15時10分	138.9	129.7	110.7	75.8		
						10分間	7.0	7.3	6.5	5.0		
	11時10分	26.1	25.3	22.6	15.4	11時10分	51.7	42.7	28.6	17.4	0.790	1.05
	5分間	9.0	6.8	6.9	6.3	5分間	8.0	6.8	6.6	4.9		
昭和46年 3月17日	13時30分	61.9	48.3	34.8	19.8	13時30分	79.8	61.5	51.4	32.7	0.677	1.21
	10分間	5.0	5.8	5.2	4.7	10分間	4.0	4.5	4.3	3.4		
	14時10分	51.0	44.2	36.0	22.5	14時10分	77.8	62.6	51.0	31.7	0.706	1.08
	10分間	6.0	5.5	5.3	4.4	10分間	6.0	5.4	4.9	4.0		
	15時20分	42.6	31.4	25.1	15.6	15時20分	80.4	54.3	44.3	26.5	0.567	1.12
	10分間	7.0	6.3	5.8	4.8	10分間	5.0	5.1	5.2	4.1		
昭和46年 3月18日	15時45分	45.5	35.4	28.0	17.9	15時45分	55.2	45.4	37.2	23.6	0.753	1.06
	10分間	6.0	5.8	5.3	4.6	10分間	6.0	5.2	5.0	4.3		
	13時50分	30.4	24.2	18.5	11.9	13時50分	39.1	31.7	27.4	17.5	0.675	1.18
	10分間	4.0	5.7	6.0	5.9	10分間	5.0	5.0	5.1	4.3		
	14時50分	30.1	23.0	18.5	11.8	14時50分	44.5	39.9	30.1	18.3	0.615	1.11
	10分間	6.0	5.7	6.0	5.7	10分間	5.0	5.6	5.4	4.3		
	15時35分	29.4	24.1	19.3	12.8	15時35分	50.3	42.8	33.5	20.1	0.576	1.13
	10分間	5.0	5.8	6.2	5.9	10分間	5.0	5.6	5.5	5.5		

46年3月18日;風速1~2 m/sec. で海上はべたなぎで地元の人の話では、この季節としては、非常に珍しいとのことであった。波はうねり状であった。

新潟海岸: 45年10月22日および23日;晴。両日も海面は非常に穏やかで、うねりが認められた。微風が海上より陸上方向に吹いており、午前中より午後の方が若干波高が大きくなっていることが認められた。

3. 波高解析

観測結果を波高解析した結果を表一1および2に示した。波高解析は zero up cross 法によった。なお今後必要ある場合は、離岸堤の沖側および内側であることを表示するため、沖側での値に対して outside の意味で添字 O を、内側の値に対して inside の意味で添字 I をつける。なお離岸堤の沖側の観測値は沖側からの入射波とその離岸堤からの反射波を含んだものであり、内側の観測

値は離岸堤からの透過波とその海浜(黒部の場合は消波工)からの反射波を含んだものであることに注意しなければならない。したがって、離岸堤内外での波高の比が厳密に離岸堤の透過率を示すものではないが、離岸堤および海浜(消波工)からの反射率を同一と仮定し、両者の比で近似的に透過率とし、離岸堤による波浪減殺効果を検討することにする。

波高解析の結果得られた各統計量の関係を離岸堤の内外にわけて調べてみると表一3 のようになる。測定波数はおよそ $N=100$ であるから、 $H_{\max}$ と $H_{1/3}$ の関係は離岸堤内外とも理論値 $H_{\max}/H_{1/3}=1.53$ と妥当な一致を示している。 $H_{1/10}$ および H_{mean} についてもほぼ満足すべき一致を示している。これらのことよりトランシット式波高計による観測はかなりの精度で行なわれたと判断できる。また離岸堤内の波高分布も、離岸堤の波浪減殺効果にかかわらず、ほぼ離岸堤の沖側の波高分布

表一2 新潟海岸波高解析結果一覧表

離岸堤の内側 (Inside of the off-shore breakwater)						離岸堤の外側 (Outside of the off-shore breakwater)						
観測年月日	単位 cm sec	$H_{I, \max}$ $T_{I, \max}$	$H_{I, 1/10}$ $T_{I, 1/10}$	$H_{I, 1/3}$ $T_{I, 1/3}$	$H_{I, \text{mean}}$ $T_{I, \text{mean}}$	観測時刻	$H_{O, \max}$ $T_{O, \max}$	$H_{O, 1/10}$ $T_{O, 1/10}$	$H_{O, 1/3}$ $T_{O, 1/3}$	$H_{O, \text{mean}}$ $T_{O, \text{mean}}$	$\frac{H_{I, 1/3}}{H_{O, 1/3}}$	$\frac{T_{I, 1/3}}{T_{O, 1/3}}$
昭和45年 10月22日	13時55分 10 分 間	25.2 6.0	19.8 7.1	16.2 6.5	10.8 6.3							
	14時15分 5 分 間	26.6 10.0	22.7 6.4	19.2 5.8	15.1 5.4	14時30分 5 分 間	56.3 5.0	48.4 5.1	43.3 4.5	33.5 4.5	0.443	1.29
	14時45分 5 分 間	23.3 10.0	20.2 6.6	15.3 5.9	8.8 5.1	14時35分 5 分 間	57.6 4.0	46.8 5.3	36.0 4.3	23.5 3.7	0.425	1.37
	15時10分 10 分 間	33.0 4.0	26.1 4.8	21.1 5.1	13.1 4.8							
	15時35分 10 分 間	22.4 6.0	21.0 6.8	18.3 6.6	11.6 6.2	15時50分 10 分 間	62.0 4.0	42.9 5.0	33.3 4.8	21.4 4.7	0.550	1.38
昭和45年 10月23日	9時30分 10 分 間	32.0 8.0	23.3 6.2	17.4 6.4	11.0 6.2	9時40分 10 分 間	55.3 6.0	40.1 5.9	30.0 5.7	18.3 5.5	0.580	1.12
						10時35分 10 分 間	42.6 6.0	34.9 5.9	27.9 5.7	17.0 5.2		
						10時45分 10 分 間	47.1 7.0	40.5 5.9	34.3 6.0	22.4 6.3		
	11時50分 10 分 間	28.3 5.0	21.5 6.5	17.0 5.7	11.5 5.6	12時10分 10 分 間	76.4 7.0	52.3 5.8	42.4 5.3	28.8 4.9	0.401	1.08
	13時25分 10 分 間	27.6 6.0	23.1 5.2	18.8 5.4	12.9 4.9	13時10分 10 分 間	70.5 5.0	50.5 4.5	39.4 4.9	27.3 4.3	0.477	1.10
	14時40分 10 分 間	28.5 5.0	24.2 5.5	19.2 5.5	12.8 5.5	14時55分 10 分 間	68.5 4.0	51.1 4.2	42.1 4.4	30.7 4.2	0.456	1.25
	15時45分 10 分 間	31.6 6.0	27.3 5.9	22.9 5.9	16.2 4.9	15時30分 10 分 間	58.4 5.0	50.4 4.9	41.7 5.0	28.8 4.7	0.549	1.18

表一3 波高統計量間の関係(波数 $N=100$ 場合)

区 分 平 均 値	離 岸 堤 の 内 側			離 岸 堤 の 外 側		
	$H_{I, \max}/H_{I, 1/3}$	$H_{I, 1/10}/H_{I, 1/3}$	$H_{I, \text{mean}}/H_{I, 1/3}$	$H_{O, \max}/H_{O, 1/3}$	$H_{O, 1/10}/H_{O, 1/3}$	$H_{I, \text{mean}}/H_{I, 1/3}$
黒 部 海 岸	1.579	1.268	0.648	1.527	1.243	0.613
新 潟 海 岸	1.535	1.283	0.649	1.513	1.253	0.665
理 論 値				1.53	1.27	0.625

と同様の分布をするものと思われる。

次に周期について調べてみよう。 $T_{1/3}$ と T_{mean} の間には一般に $T_{1/3}/T_{\text{mean}}=1.0\sim 1.26$ の関係があり発達期の波ほど大きな値をとり、減衰期の波、つまりうねりのような波では1に近くなるといわれている。表-1および2より45年10月20日の黒部海岸における $T_{0,1/3}/T_{0,\text{mean}}$ の平均値を計算すると、1.24となる。同じく45年10月22日および23日の新潟海岸における平均値は1.07となる。これはすでに述べたように、黒部海岸では発達期の波であったのに対し、新潟海岸の波は減衰期状態を示していたのと良く一致する。

$H_{I,1/3}$ と $H_{0,1/3}$ を使用して離岸堤による波浪減殺効果を定性的に調べてみよう。黒部海岸では45年10月20日は $\overline{H_{0,1/3}} \approx 90 \text{ cm}$ であり、 $\overline{H_{I,1/3}}/\overline{H_{0,1/3}} \approx 0.30$ である。これに対し、10月21日は1回の観測値しかないが $H_{0,1/3} = 28.6 \text{ cm}$ であり、 $H_{I,1/3}/H_{0,1/3} = 0.790$ と透過性は非常に高い。両日とも $T_{0,1/3} \approx 6 \text{ sec}$ であるから、波高が大きくなると急激に透過率が減少することがわかる。46年3月17日および18日は $\overline{H_{0,1/3}} \approx 40 \text{ cm}$ 、 $\overline{T_{0,1/3}} \approx 5 \text{ sec}$ であり、それに対して $\overline{H_{I,1/3}}/\overline{H_{0,1/3}} \approx 0.65$ である。表

表-4 赤川離岸堤沈下状況調査(黒部工事事務所)

測定位置	45年6月 完成時	45年8月	45年11月	46年5月
東端天端高	T.P. 2.1m	1.4	0.5	0.2
中央天端高	T.P. 2.1m	1.6	0.8	0.7
西端天端高	T.P. 2.1m	1.8	1.7	1.0

—4に示したように、45年、10月と46年3月では、離岸堤の沈下のため離岸堤の波浪減殺効果が若干変化していることも予想されるのであるが、このような方法では、周期の違いが考慮されていないこともあってははっきりしない。この点については後に波形勾配との検討の項で考察する。

新潟海岸では $\overline{H_{0,1/3}} \approx 40 \text{ cm}$ 、 $\overline{T_{0,1/3}} \approx 4.9 \text{ sec}$ で $\overline{H_{I,1/3}}/\overline{H_{0,1/3}} \approx 0.49$ である。46年3月の黒部海岸と条件が似ているが減殺効果の違いは離岸堤の構造、水深などによるものであろう。

4. エネルギースペクトルによる解析

観測資料を利用してエネルギースペクトルを計算してみた。データ数は約600, lag 50 で計算した。代表的な

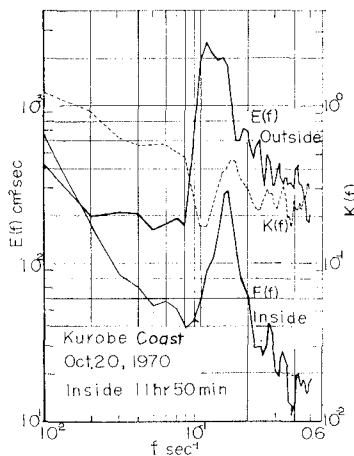


図-3 エネルギースペクトル図(黒部海岸)

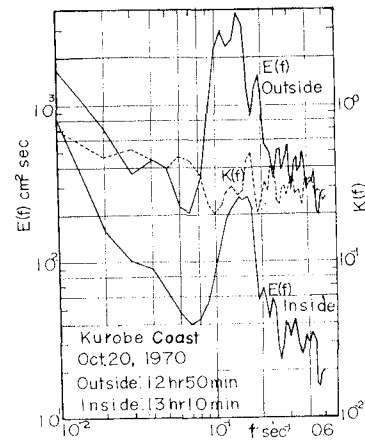


図-4 エネルギースペクトル図(黒部海岸)

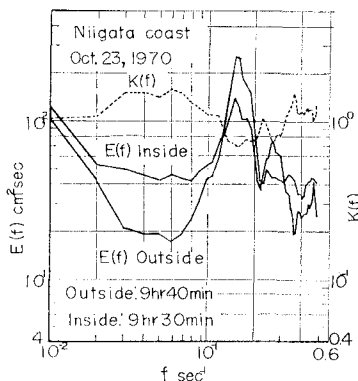


図-5 エネルギースペクトル図(新潟海岸)

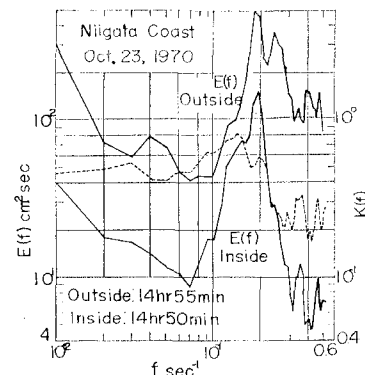


図-6 エネルギースペクトル図(新潟海岸)

計算例を図-3, 4, 5 および 6 に示した。これらの図において $f=0.5 \text{ sec}^{-1}$ 以上 (周期 2 sec 以下) の高周波数成分および $f=0.08 \text{ sec}^{-1}$ 以下 (周期 12 sec 以上) の低周波数成分のエネルギー成分がかなり高い値を示している。これは高周波数成分の場合はトランシット式波高計で波浪の高周波数成分まで十分に追跡できないための誤差, デジタル化する際の読み取り誤差などによるものである。低周波数成分は波による浮標の前後左右の移動によるものであり, したがってこれらのエネルギースペクトルを検討するにあたり, これらの成分は無視しなければならない。図-3 および 5 は黒部海岸および新潟海岸でそれぞれ午前中に観測したものの結果であるが, ピーク付近に注目すれば単一のピークであることがわかる。一方図-4 および 6 はそれぞれ午後観測したものであるがピーク付近の形状は単一でなく, いくつかのピークが認められる。これは波高解析のときにも述べたように, 午前中は風が弱く, 沖より来襲してきた波が主体であるのに午後になると風の影響を受けて沖からの波に局地的に発生した周期の短かい風波が重ね合わさっているものと理解される。エネルギースペクトル E の値について各周波数ごとに内側と沖側の比の平方根をとったものを各図に $K(f)$ として示してある。これは離岸堤の周波数応答関数ともいうべきものを示しているが, これはその周波数成分の波高要素の比と考えることができるので, これをもって波浪減殺効果を調べることもできる。各図において $K(f)$ の $f=0.08 \sim 0.5$ 程度までの平均値と $H_{1/3}/H_{0,1/3}$ による波浪効果の判定と比較してみると良く一致している。なお注目すべきことは, $K(f)$ がピーク付近で若干減少している傾向はうかがえるが, ほぼ一定とみなされる程度の値を示していることであって, これは各周波数成分が同じような割合で透過したことを示している。これは著者らが離岸堤からの波の透過性について, 理論的および実験的検討を行なった際の結論の一つ「波形勾配の小さい波は透過しやすい」と一見, 相反し, もっと高周波数成分の減衰が激しくても良いようであるが, ほぼ一様とみなされる値を示すことは現象の強い非線形性を示すものであろう。

4. 波浪減殺効果と波浪要素との関係

波浪減殺効果は数多くの要素に支配される複雑なものであるが, まず沖波波形勾配と減殺効果の関係を調べてみよう。図-7 に示したように波形勾配が大きくなると減殺効果も大きくなる。ここで H_0 は $H_{0,1/3}$ より計算した沖波波高であり, L_0 は $L_0=1.56 \times T_{0,1/3}^2$ である。同一波形勾配に対し黒部海岸と新潟海岸の波浪減殺効果が異なるのは離岸堤の構造, 設置水深の相違などが主な原因と考えられる。黒部海岸でも45年10月と46年3月との観測値に傾向の違いがみられるのは, 先に述べたよう

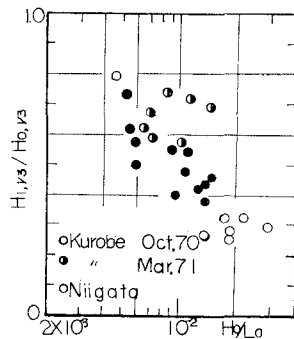


図-7 沖波波形勾配と波浪減殺効果の関係

に離岸堤の沈下によって透過性に変化が生じたものとみられ, 離岸堤の沈下により波浪減殺効果が減少している。

離岸堤の沖側と内側の周期の変化はどうであろうか。図-8 に離岸堤の内側に沖側の周期の関係を示したが, いずれも離岸堤の内側の方が周期が長くなり, しかも短周期のものほど周期が長くなる割合が大きい。これは長周期の波ほど離岸堤を透過しやすいことを考えると当然の結果といえよう。黒部海岸で45年10月と46年3月の観測値を比較すると46年3月の方が周期が長くなる割合が小さいのは, 離岸堤の沈下による波浪減殺効果の減少に対応するものであろう。

新潟海岸における潜堤での実測結果^{3), 4)} および実験結果⁵⁾ によれば潜堤の位置での砕波その他による擾乱のため, 潜堤の内側では有義波周期は短くなることが報告されている。この点が静水面上十分突出した離岸堤と, 静水面以下に没している潜堤との一番大きな相違点であろう。

6. 結 論

(1) 離岸堤による波浪減殺効果を検討するため, トランシット式波高計により, 離岸堤の沖および内側の波高観測を行なったところ, 十分な精度で観測が実施できることがわかった。

(2) 離岸堤の沖および内側の波高分布は, Rayleigh 分布を仮定して求めた理論的結果と良く一致する。

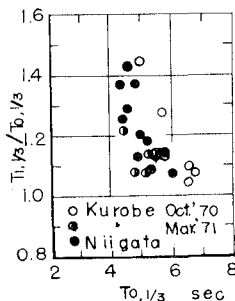


図-8 離岸堤内外における周期の変化

(3) 観測結果をスペクトル解析したところ、離岸堤内外におけるエネルギー Spektral E の比の平方根で定義した離岸堤の周波数応答関数は、ピーク付近で若干小さくなるがほぼ一定の値を示し、離岸堤による波浪減殺効果は、非線形性の強い現象であることがわかった。

(4) 離岸堤による波浪減殺効果は波形勾配が大きいほど大きくなる。減殺効果は、離岸堤の構造、水深などにも影響されるが、離岸堤が沈下すると波浪減殺効果は減少する。

(5) 離岸堤による波浪減殺効果により、離岸堤内の有義波周期は、沖側より長くなり、短周期のものほど周期が長くなる割合が大きい。離岸堤の沈下による波浪減殺効果の減少により、周期が長くなる割合も小さくなるようである。

謝辞 本観測を行なうにあたり、観測の便をはかって

いただいた建設省北陸地方建設局および黒部工事事務所、新潟県土木部河川課および新潟港湾事務所に厚く感謝の意を表する。また観測および解析に御協力いただいた土木研究所海岸研究室末吉一成・小林貞夫・川村公一各技官にも謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 富永正照・坂本忠彦：透過性構造物による波の変形に関する研究(1)，土木研究所報告第137号，1970。
- 2) 豊島 修：離岸堤の高さについて，第16回海岸工学講演会講演集，1969。
- 3) 本間 仁・酒匂敏次：潜堤に関する研究，第5回海岸工学講演会講演集，1958。
- 4) 白石直文・沼田 淳・長谷直樹：潜堤の効果について—新潟海岸の現場の観測による—，第5回海岸工学講演会講演集，1959。
- 5) 堀川清司・小森修蔵：潜堤による風波の減衰機構について，第15回海岸工学講演会講演集，1968。