

沖合い防波堤の反射特性に関する現地調査

永井紀彦* ・橋本典明** ・清水勝義***・戸引 勲****
伊藤一教*****・東江隆夫*****・小林昭男*****

1. はじめに

沖合い防波堤の反射波特性と海域における長周期波特性に関する検討を行うため、仙台新港沖合いで1994年9月中の1か月間、波高計アレイによる連続観測を行った。本報告は、反射特性に関する検討結果を示したものであり、現地観測値から周波数・波向別に反射率を算定し、反射波の影響を定量的に明らかにしたものである。

2. 現地観測

2.1 観測方法

図-1に、観測地点位置を示す。仙台新港沖では、沖合い防波堤の延長工事が進められており、ケーソン堤延長約1km（内890mは消波ブロック被覆済み）の施工が、本調査実施時点で既に完了している。また、全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス：NOWPHAS, Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours）（永井1993）の一環として、沖合い水深-20m地

点で、超音波式波高計と流速計型波向計を用いて、0.5秒サンプリング間隔で20分間の定常波浪観測が2時間毎に行われている。これより浅い水深-17mの2地点（a1～a3地点：沖合い防波堤前面、b1地点：防波堤から離れた地点）で、1994年9月の1か月間にわたって、超音波式波高計、水圧計、水平2成分流速計により0.5秒サンプリング間隔の連続観測を実施した。特にa地点では、一辺20mの正三角形アレイによる観測を行い、入・反射波の正確な分離をめざした。また、図-2は、沖合い防波堤の断面図である。データ処理は、連続観測記録を20分毎に分割して行った。

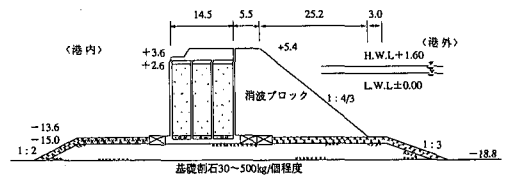


図-2 沖合い防波堤の断面図

2.2 海象状況

図-3は、観測点b1の有義波高、有義波周期を示している。横軸は日である。観測期間中、台風を含む複数の低気圧の来襲があり、9/11～12日、9/17～19日および9/30日の各期間で波浪の発達・減衰過程があった。特に9/17～19日においては、有義波高で4.5m弱、有義波周期で15秒前後の高波が来襲した。

3. 方向スペクトルと反射率

3.1 方向スペクトル

構造物からの反射特性を知るためには構造物前面域で方向スペクトルを算出し、入射波と反射波を分離する。しかし、入・反射波が存在する場合には、両者に位相関係が存在する。それゆえ、入・反射波共存場における方向スペクトル推定法が提案されており、MMLM（磯部・近藤，1983）、EMBM（橋本・小舟，1987）あるいはMEMEP（橋本ら，1993a）が代表的な推定法である。いづれの方法も構造物での反射波は位相のずれがなく、防波堤は無限長で入・反射角が等しいという仮定に基づい

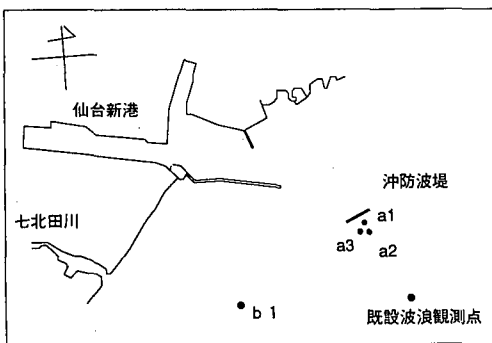


図-1 観測地点の概要

* 正会員	運輸省港湾技術研究所水工部海象調査研究室室長
** 正会員 工博	運輸省港湾技術研究所水工部海洋エネルギー利用研究室室長
*** 正会員	運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
****	運輸省第二港湾建設局 横浜調査設計事務所調査課長
***** 正会員 工修	大成建設(株) 技術研究所
***** 正会員 M.S	大成建設(株) 技術研究所
***** 正会員 工博	大成建設(株) 技術研究所

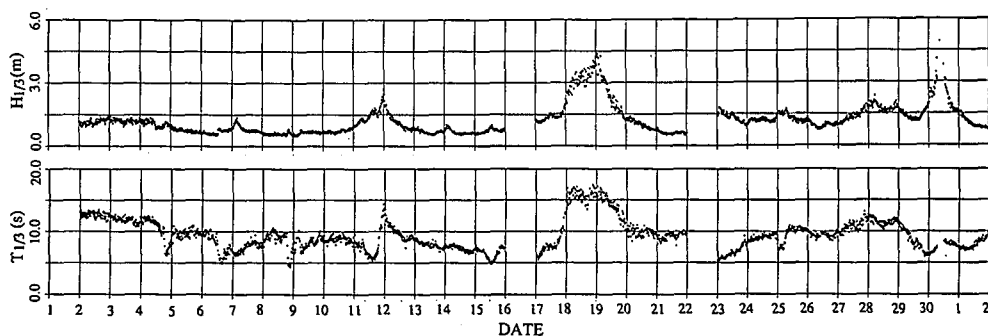
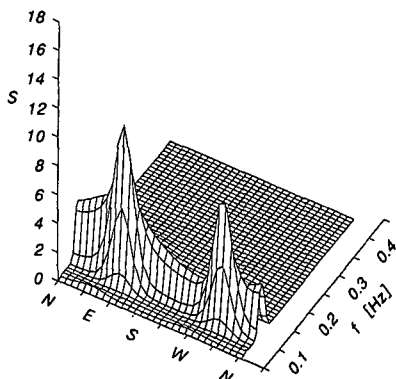


図-3 有義波高と有義波周期の経時変化

図-4 代表的な方向スペクトル
(1994年9月18日13時50分)

ている。しかし、消波工を有し、マウンドが巨大な本構造物の場合、反射面は複数存在し、防波堤は有限長であるため、上記の仮定は満足しない。このため、ここでは拡張最大エントロピー原理法(橋本ら, 1993b)を用いた。

図-4は、高波浪来襲時の9月18日13時50分の方角スペクトルの推定結果である。図より、入射波と反射波のピークを明確に推定できていることがわかる。このときの入射波はE方向に卓越し、反射波はNW方向に卓越している。

3.2 反 射 率

不規則波による反射率の定義にはいくつかある(磯部・近藤, 1983)。ここでは、2種類の定義の反射率について検討した。方向スペクトルは周波数と波向の関数であるので、入・反射の仮定の下で各成分波について反射率を求めることができる。そこで、第1の定義は方向スペクトルの各入射波成分波 $S_i(f, \theta_i)$ とそれに対応する反射波成分の比をとって反射率の算定を行った(式(1))。

$$K_r(f, \theta) = \sqrt{S_r(f, \theta) / S_i(f, \theta)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 K_r は各成分波に対する反射率、 S_r 、 S_i は反射成分と入射成分のスペクトル成分である。

図-5では、入射波成分のピーク値に対して算定した

反射率の経時変化を示した。図より、 K_r は全般にばらつきが大きく、0から1までほぼ一様に散らばっている。波高が2m以下の比較的小さい場合にばらつきが大きい、波高が大きい場合には時間的に連続変化する傾向にある。特に9月18~20日に着目すると、反射率が0.2から1.0弱、そして0.2という様に変化している。

第2の定義として、推定された方向スペクトルを入・反射波を示す波向範囲についてそれぞれ積分したものの比の平方根をとって反射率とした(式(2))。

$$K_r = \sqrt{\int_{\theta_r}^{\theta_i} \int_0^{f_{\max}} S(f, \theta) \Delta f \Delta \theta / \int_{\theta_r}^{\theta_i} \int_0^{f_{\max}} S(f, \theta) \Delta f \Delta \theta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 θ_i は入射波の波向範囲、 θ_r は反射波の波向範囲、 $f_{\max}$ は解析における最大周波数、 K_r は平均的な反射率である。

図-6は、式(2)によって算出した反射率の経時変化である。全体的にばらつきはあるものの、時間的に連続に変化しており、その値も0.2から0.8程度の範囲で変化している。

これら二通りの方法で反射率を算定してみると、経時変化が連続的であることから式(2)による方法が全般的に妥当な結果を与えると判断できる。しかし、9月18~20日にかけては式(1)と式(2)の結果で同じ傾向が見られ、波高、周期および反射率が大きい場合、スペクトルピークに対する式(1)でも妥当な結果を与えると判断できる。一方、波高が比較的小さい場合には式(1)の方法ではばらつきが大きい。これは、方向スペクトル推定におけるノイズ混入に伴う誤差に起因していると考えられ、波高が小さい場合には推定誤差の影響が相対的に大きくなるためと考えられる。また、反射率が大きい9月18~20日にかけて、前述のように式(1)と式(2)は同傾向を示し、スペクトルピークに対する式(1)が比較の妥当な結果を与え、逆に反射率が小さい場合、式(2)が比較の妥当な結果を与える。このことは、磯部・近藤(1983)の検討結果と定性的に一致している。

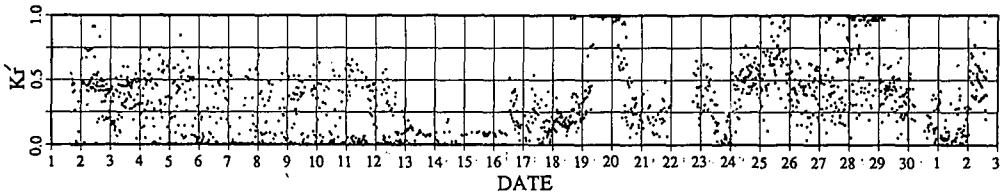


図-5 式(1)を用いたピークモードの反射率

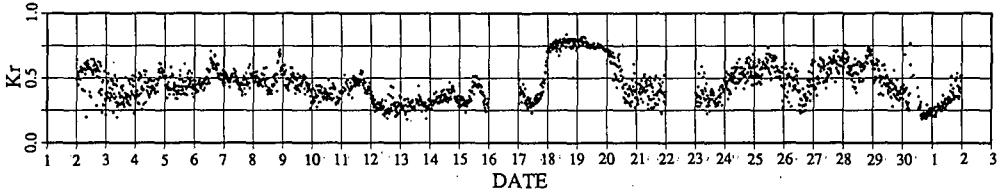


図-6 式(2)を用いた反射率

以後の本論中に用いる反射率は、式(2)の結果とする。

4. 反射特性の検討

4.1 反射率と波浪統計量の関係

ここでは、反射率と波浪統計量の関係について検討する。消波構造物の反射率は周期依存性を示すことは、上床・湯村(1976)、Thornton・Calhoun(1972)および片野ら(1991)の報告に認められる。

本論においても有義波周期と反射率の関係を調べた結果、反射率は周期依存性を有する結果となった。図-7は、有義波周期と反射率の関係を示している。ただし、この反射率は有義波高を0.5m、有義波周期を2.0秒の幅で階級分けし、その階級毎の平均値である。

図より、防波堤の反射率は約0.4~0.8の範囲にあり、反射率は周期が長くなるほど大きくなる傾向を示している。しかし、同一の周期階級において、波高と反射率の間に明確な関係は見られず、有義波高への依存性は小さい。

そこで、この有義波高と周期の関係をより詳しく見るために二つの顕著な暴浪時の反射率を有義波高と有義波周期からもとめた波形勾配 k_a で整理した(図-8)。図-8中の○で示したものは11~13日の暴浪時(case 1)の結果で、最大で有義波高が約3m、周期が14秒まで発達した。●は17~21日の暴浪時(case 2)で、最大で有義波高が約4m、周期が17秒であった。図よりデータのバラツキはあるものの、両ケースとも反射率の k_a に対する顕著な依存性はみられない。case 2では約0.8程度でほぼ一定値となっているのに対し、case 1では約0.5でおよそ一定となっている。図-9は9月11日21時50分(有義波高2.65m、有義波周期13秒)と9月18日3時50分(有義波高3m、有義波周期15秒)の方向関数で、

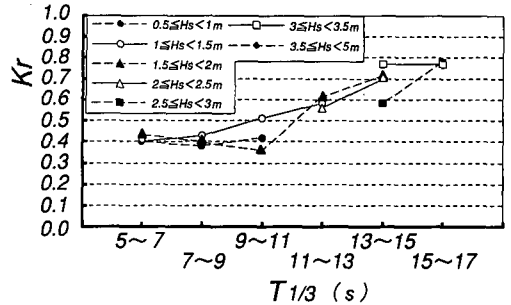
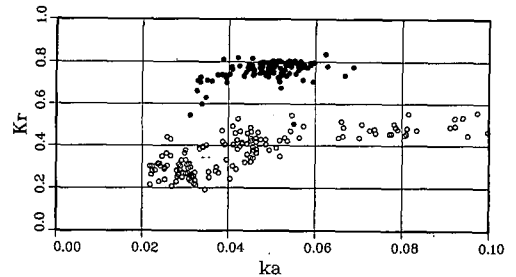


図-7 有義波周期と反射率の関係


 図-8 波形勾配 k_a と反射率の関係

波高と周期がほぼ等しいものを比較した。両者の方向関数の形状は良く似ている。しかし、入射波の波向が異なるためにこの反射率の違いが生じた。case 1の入射波方向は防波堤に対して40度、case 2ではほぼ直角方向であった。したがって、入射波の波向は反射率に対して大きな影響を与え、対象とした防波堤では、入射波の波向が大きくなると反射率減少する。

これらの検討の結果、反射率は周期と波向に関する依存性が高いので、それをまとめたのが表-1である。表-

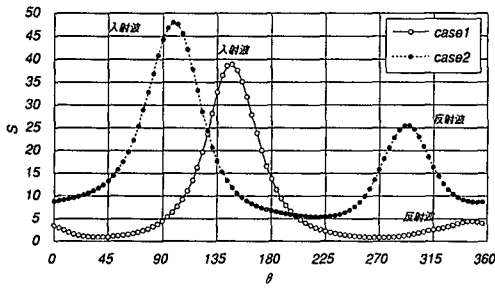


図-9 方向関数の比較

表-1 主波向と有義波周期と反射率の関係

	0 ≤ θ ≤ 22.5	22.5 ≤ θ ≤ 45	45 ≤ θ ≤ 67.5	67.5 ≤ θ ≤ 90	90 ≤ θ ≤ 112.5	112.5 ≤ θ ≤ 135	135 ≤ θ ≤ 157.5	157.5 ≤ θ ≤ 180	180 ≤ θ ≤ 202.5
T _s ≤ 5	0	0	0	0	0	0.53	0.64	0	0
5 ≤ T _s ≤ 7	0	0	0.5	0.49	0.39	0.4	0.45	0	0
7 ≤ T _s ≤ 9	0	0	0.37	0.44	0.38	0.36	0.4	0	0
9 ≤ T _s ≤ 11	0	0	0.34	0.6	0.48	0.42	0.41	0	0
11 ≤ T _s ≤ 13	0	0	0.35	0.65	0.47	0.52	0.44	0	0
13 ≤ T _s ≤ 15	0	0	0	0.75	0.64	0.59	0.48	0	0
15 ≤ T _s	0	0	0	0.74	0.77	0	0	0	0

1 中の平均値は各階級の平均値である。ただし、波向 110 度が防波堤の法線方向と一致し、東よりの場合 110 度以下、南よりのとき 110 度以上である。

防波堤に対して入射波の波向が直角に近い場合には、周期が長いほど反射率は高くなるが、周期が長くても入射波の波向が斜めになると反射率は低くなる。しかし、周期が 9 秒以下の場合には、波向に対する依存性は低く、ほぼ 0.4 前後の値となっている。

4.2 反射率とスペクトル形状

反射率は周期と波向によって変化するが、同じ周期や波向であっても、スペクトル形状によって反射率が変化する。そこで、方向集中度が比較的高いデータに着目してスペクトル形状が反射率に与える影響について整理した。

図-10 は、入射波の主波向が 67.5~112.5 度で周期 13 秒以上のデータをスペクトル尖鋭度パラメタ (Q_p) で整理した結果である。

データにはばらつきがあるものの、 Q_p が 3 程度までは Q_p の増加にともない反射率が増加する傾向にある。しかし、それより Q_p が大きくなると反射率が 0.8 程度に漸近し、さらに反射率が増す傾向にはない。 $Q_p \approx 2$ のときピアソモスコビッチスペクトルに対応しそれより Q_p が大きい狭帯スペクトルになると波の多方向性や不規則性の影響が小さくなることを示している。それに対して、 Q_p

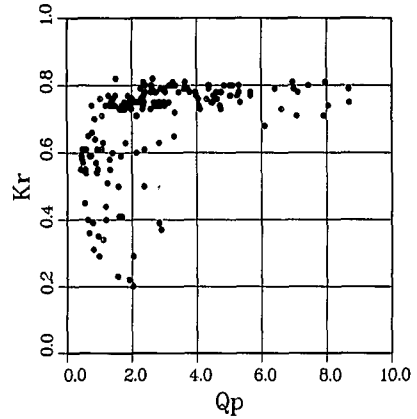


図-10 スペクトル尖鋭度パラメタ Q_p と反射率 K_r の関係

が 2 以下の広帯域スペクトルでは波の多方向性や不規則性の影響がおおきく、反射率も低下しばらつきも大きくなる。このことは、周期が長く方向集中度の高いうねり性の波浪条件の場合、消波構造物の反射率は規則波に対して最大となり、方向分散性や周波数分散性が反射率を見かけ上低下させることを示している。

5. 反射波の影響範囲

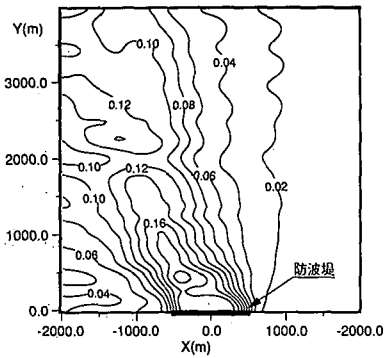
消波構造物の反射率を知ることは、その周辺海域の静穏度と関わるため重要であり、反射波の影響範囲を知ることが周辺海域の静穏度を把握するために必要である。ここでは、4. で求めた現地における反射率を用いて反射率の影響範囲について検討した。

5.1 計算方法

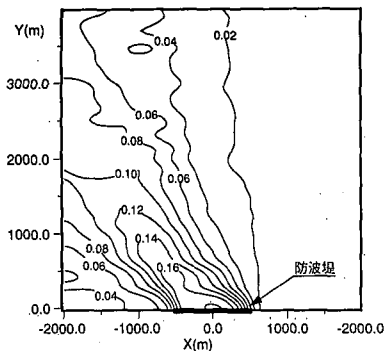
反射波の影響範囲の計算は、まず規則波による島堤の反射・回折の近似解 (合田ら, 1971) を用いて、波向きについて 11 方向 ($\Delta\theta = \pi/12$)、周波数について 11 種類 ($\Delta T = 2.0$ s) の影響係数 (回折係数と同義) を算出した。計算領域は、沖防波堤前面で沖方向に 4 km、防波堤法線方向に防波堤の中心から ± 2 km とした。計算は両方向とも 40 m 間隔の格子点について行った。入射波としては、方向スペクトルとしブレッドシュナイダー・光易型周波数スペクトル、光易型方向関数を用いて次式により不規則波の影響係数を求めた。ただし、方向集中度パラメタ S_{max} は 75 としている。

$$(K_r)_{av}(x, y) = \left[\frac{1}{m_o} \int_0^{\theta_{max}} \int_{\theta_{min}} S(f, \theta, \theta_m, T_{1/3}) \cdot K^2(f, \theta, x, y) d\theta df \right]^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

さらに、その結果に対して今回の計測で得た主波向と有義波周期に対応する反射率を乗じて影響係数を算出した。反射率は表-1 の値を用いた。主波向きと有義波周期は運輸省第二港湾建設局が仙台新港沖合で観測してい



(a) 有義波周期 12 秒, 主波向 125 度



(b) 有義波周期 12 秒, 主波向 140 度

図-11 反射波の影響範囲

る 1991~1993 年のナウファスのデータを用いて、波向・周期の出現頻度を調べ、有義波周期を 6, 8, 10, 12, 14 秒、波向を防波堤法線に対して 15, -15, 30 度とし、合計 15 ケースの波について影響係数を調べた。この計算の仮定として、反射率を各周期波向きで一定とした。すなわち、規則波の影響係数を算出する際に、個々の周期波向きについて反射率は 1.0 としており、不規則波を重ね合わせた後に、一定の反射率を乗じた。

5.2 影響範囲

図-11 は、それぞれ有義波周期 12 秒の条件で主波向 125 度および 140 度に対する影響係数である。

この影響範囲に、年間の出現頻度を乗じて足しあわせた、いわば年間平均影響係数を図-12 に示す。図より、年間平均影響係数が 0.2 を越える領域は見られず、防波堤前面の消波ブロックによって反射波の影響は年間を通じてみればかなり小さく抑えられていることがわかる。

6. 結 論

現地観測による沖合い防波堤の反射特性を検討した結果、平均的な反射率は周期の依存性が高く、対象とした

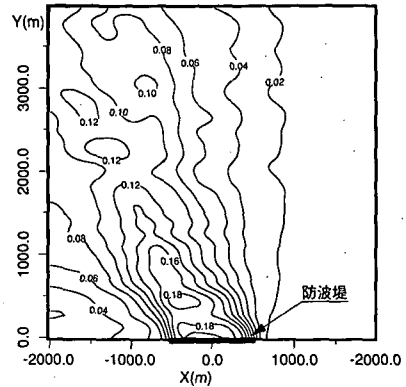


図-12 反射波の年間平均影響係数

防波堤では約 0.4~0.8 の範囲であることがわかった。また反射率は、入射波の波向きにも依存しており、入射波の波向が傾くことによって大きく減少することがわかった。また、波向の依存性は長周期に対して顕著である。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・近藤浩右 (1983): 入・反射波共存場における方向スペクトルの推定法, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 44-48.
- 上床隆彦・湯村やす (1976): 砕波帯の波の研究 (3) - 佐賀の関海岸の例 -, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 308-312.
- 片野明良・青野利夫・服部昌太郎 (1991): ブロック被覆護岸の反射特性に関する現地観測, 第 38 回海岸工学論文集, pp. 496-500.
- 合田良実, 吉村知司, 伊藤正彦 (1971): 島堤による波の反射および回折に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 10 巻, 第 2 号, pp. 3-52.
- (財) 沿岸開発技術研究センター (1994): 全国港湾海洋波浪観測資料 (NOWPHAS 1993), 861 p.
1991, 1992 年版の同資料も、同センターから刊行
- 永井紀彦 (1993): 全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス) に関する最近の研究, 平成 5 年度港研講演会講演集, pp. 15-44.
- 永井紀彦ら (1995): 全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS 1993), 港研資料, No. 796. 309 p. なお, 1991, 1992 年版の波浪観測年報は、それぞれ港湾技術研究所資料 No. 745, No. 770 を参照
- 橋本典明・小舟浩治 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第 26 巻, 第 4 号, pp. 3-33.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正 (1993a): 海洋波の方向スペクトル推定における拡張最大エントロピー原理法の修正 - 入・反射波共存場を対象として -, 港湾技術研究所報告, 第 32 巻, 第 4 号, pp. 25-47.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃 (1993b): 海洋波の方向スペクトル推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港湾技術研究所報告, 第 32 巻, 第 2 号, pp. 3-25.
- Thornton, E. B.・R. J. Calhoun (1972): Spectral resolution of breakwater reflected waves. Jour. Wtrwry., Harb., Coast Engrg. Div., ASCE, Vol. 98, No. WW4. pp. 443-460.