

現地観測による波の変形

大野 正 夫*・入 江 功**・大 堀 晃 一***

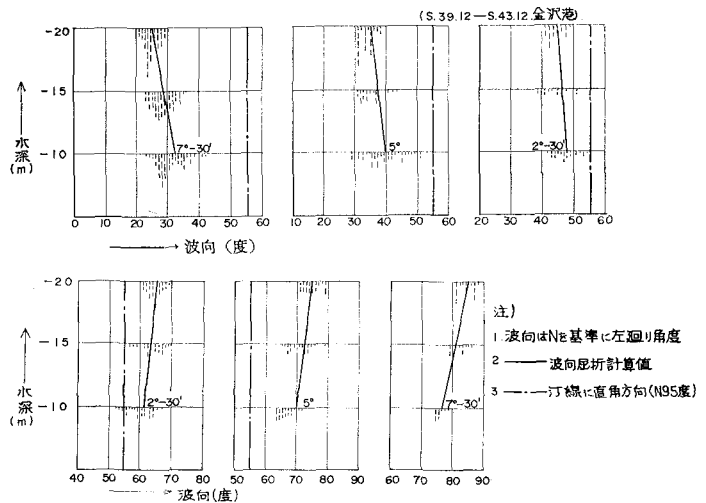
1. はしがき

最近では、外海に面する海岸を埋立て、一重の防波堤で囲まれた水域内に直接大型船舶が係留する、いわゆる埋立式港湾が多く建設されている。この形式の港は、波をまず外防波堤でしゃへいし、さらに内陸へ掘り込んで、いわば二重に防護された水域を泊地として利用する掘込式港湾に比べ、防波堤の安定、機能に対する重要度は一層高いものとなる。すなわち、防波堤本体をはじめ、港内における船舶の係留、諸施設の安全を期するため、外海から海岸へ到るまでの屈折、砕波、回折等の波の変形過程をできるだけ正確に把握する必要がある。波の変形については、過去に理論計算、模型実験による多くの成果があり、活用されているわけであるが、それらの解析法が前提とする波の性質が、不規則な現地の波と必ずしも同じでない場合や、現象が縮尺効果を有する場合は、現地観測により解析値の妥当性を検討する必要がある。本報告は、波の変形について現地観測した結果を整理し、既往の解析法による結果と比較して、必要であれば補正し、できるだけ正確に現地波をとらえようと試みたものである。

2. 波の屈折

波の屈折の解析は、媒体のちがいによる速度変化に起因する光の屈折と同様、スネルの法則によっているが、波の進行曲線が極端に収束する場合は波峰線方向の水位伝播、すなわち回折効果を入れる必要があり、これについては伊藤・谷本が解析法を与えている¹⁾。単調な等深線を持つ海底の場合、規則的な水の波の屈折が、スネルの法則により、工学的許容範囲内で解析できることは、実験的に確認されている²⁾。港が建設される海岸は特殊な場合を除き、単調な等深線をもつものが多いが、構造物設計に対しては、レーダーにより現地波の波向を求め、スネルの法則により屈折係数を求め、設計波を出し

ている。しかしそれが技術目的のものとはいえ、正弦波の屈折理論が不規則な現地波の屈折とどの程度一致するのか、さらに、レーダーによる波向は妥当なものかどうかについて、ある程度の目安は持っておく必要がある。



図—1 レーダー観測による波向の水深による変化と波向屈折計算値との比較

図—1 は、比較的単調な等深線をした金沢港のレーダーによる波向観測で、-20m、-15m、-10m 地点を通過するときの波向の変化を調べたものである。この海岸の等深線に直角方向は、N95°W であるが、全体的に、水深が浅くなるにつれ、波向が等深線に直角になろうとする傾向がみられる。図中には、正弦波の平行海岸における屈折の理論値が実線で示してあるが、データのばらつきはあるにしても、平均値は、互いに一致しているとみてよいと思われる。現地波は砕波をともなった不規則なものであるにもかかわらず、その屈折はスネルの法則で近似でき、また、レーダーも妥当な波向をとらえていると考えることができる。

3. 砕波による波高変化

既往の波浪観測結果によれば、波高計の設置水深が大きいほど観測最大有義波高も大きくなっている。これは、有義波高にも水深に応じた砕波限界波高が存在することを示すもので、構造物の設計上重要なことである。この有義波高の砕波による減衰については、合田が不規

* 正会員 運輸省第一港湾建設局技術次長

** 正会員 運輸省第一港湾建設局酒田港工事事務所次長

*** 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所調査課長

則波の波高分布の浅海域における変化を、現地資料を参考にモデル化し、理論計算および実験をおこなっている。³⁾しかし砕波現象には縮尺効果があるものと思われるので、酒田港において、現地観測によりこれを調べて

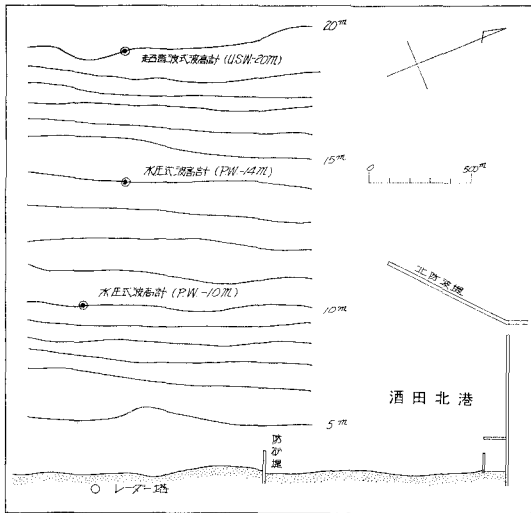


図-2 三つの波高計の設置位置

みた。図-2 に示すように、酒田港海岸は、単調な平行海岸であり、-20 m 地点に超音波式波高計 (U.S.W.)、-14 m 地点に水圧式波高計 (P.W.)、-10 m 地点に水圧式波高計 (P.W.) と、水深の異なる三点に波高計を設置し、昭和 48 年 10 月より同時観測を開始した。観測期間中の波向は、陸上のレーダーにより観測した。有義波高の減衰率は、まず、-20 m (U.S.W.) の波高 $(H_{1/3})_{20}$ を用い、-14 m 地点までの屈折係数 Kr_{14} 、浅水度係数 Ks_{14} により、 $Hs^* = Ks_{14} \cdot Kr_{14} \cdot (H_{1/3})_{20}$ を求め、これと同時刻の -14 m (P.W.) の有義波高との比を計算し、同様に -10 m 地点までに対して $Hs^* = Ks_{10} \cdot Kr_{10} \cdot (H_{1/3})_{20}$ を求め同時刻の -10 m (P.W.) の有義波高との比を計算することによって。さらに、-14 m の波高 $(H_{1/3})_{14}$ を基準にして、 $Hs^* = KsKr(H_{1/3})_{14}$ を求め、これと、-10 m

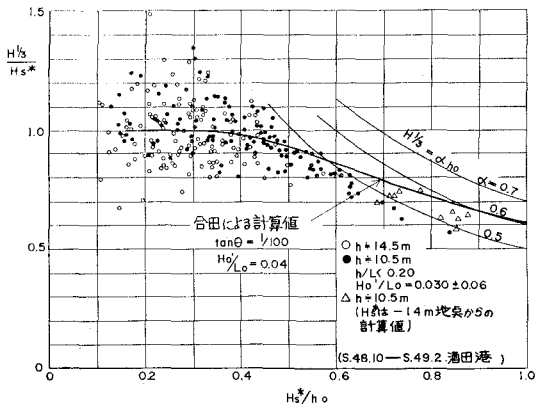


図-3 浅海域における有義波高の減衰

(P.W.) の有義波高との比についても計算した。結果は図-3 に示すとおりで、横軸は Hs^* と水深 h_0 (潮位 +50 cm) との比をとったものである。データのばらつきはあるが、図によれば、 $Hs^*/h_0 = 0.3$ 以上になれば、有義波高は海底の影響をうけているのがわかる。図中には、合田による波高変化曲線 ($Hs^*/L_0 = 0.04$, 海底勾配 = 1/100)⁴⁾が入れているが、 $Hs^*/h_0 = 0.5$ 以下の領域に対してはほぼ観測値の平均、それ以上に対しては、観測値の上限にきている。したがって、現地においてある水深に生じる最大有義波高に対しては、この曲線は妥当な値を与えていると考えられる。 $Hs^*/h_0 < 0.5$ において、観測値のばらつきが非常に大きいのは、水圧式波高計の比較的小さい波に対する観測精度が落ちるためと思われる。著者らは、酒田港の -14 m 地点に、水圧式波高計と、超音波式波高計を同時設置して、両者の特性を比較したが、それによると、周期 8 sec 以上の波に対しては、両者の観測値はほとんど等しいが、それ以下になると、ばらつきも大きくなっていた。また、ある水深に対する最大有義波高を近似的に $H_{1/3} = ah_0$ として表わした場合の $\alpha = 0.5, 0.6, 0.7$ に対する限界曲線が図中に示してあるが、これによれば、 $\alpha = 0.6$ となっている。しかし、海底勾配が、本海岸 ($\tan \theta = 1/130$) より急な海岸では、 α はこれより大きな値となり、港湾関係では、通常の海岸に対し、 $\alpha = 0.65$ を暫定的に用いている。以上のような砕波による波高減衰過程において、最大波高 H_{max} と有義波高 $H_{1/3}$ の比がどう変化するかを示したのが図-4 である。本観測

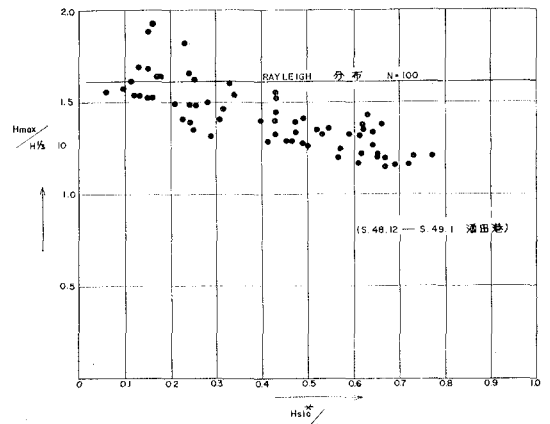


図-4 浅海域における最大波高と有義波高の比の変化 (波数 $N=100$ 波)

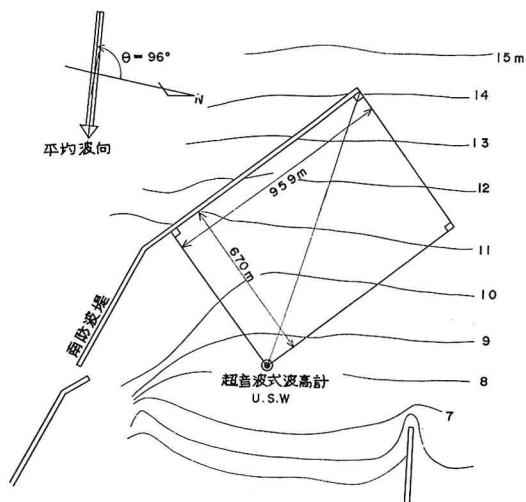
の波高整理にあたっては、波数 $N=100$ を用いたが、波高分布がレーリー分布にしたがうときは、 $N=100$ に対し、平均 $(H_{max}/H_{1/3}) = 1.6$ となる。図によれば $(Hs_{10}^*/h_0) = 0.3 \sim 0.4$ 以上になるとこのレーリー分布則に従わなくなっており、 $(H_{max}/H_{1/3})$ は次第に減少している。また図-3 において、有義波高も $(Hs^*/h_0) = 0.3$ あたり

から減少しはじめていることから、海底の影響による有義波高の減衰は、波群の中の大きい方の波から碎けて限界波高に達し、それらが水深に応じて減少して行く結果生ずるものであることがわかる。なお、図-3において、仮想通過有義波高 H_s^* を -14 m (P.W.) の波高を用いて計算した (Δ) 印は、 $(H_{1/3})_{14}$ そのものがすでに減衰の影響を受け、 H_s^* が多少小さめになっていることが考えられるが、図の縦軸、横軸の表現法からして、碎波限界曲線を与える上にはこの影響はあまりないものと考えられる。

4. 波の回折

波の回折については、従来、正弦波に対するものがつかわれてきたが、最近になって永井が不規則波の回折の計算をおこなった⁴⁾。波の不規則性をとり入れたことで、永井の計算法はより現地に近いものを与えるはずであるが、同解析法に用いる波の方向スペクトルが現地において明らかでないので、すぐに回折図を求めることができない。また、便宜的に swop のスペクトルを採用して計算してみても、回折係数は従来の正弦波によるものより著しく大きく、港湾関係者にとって何らかの指針がほしいところである。第一港湾建設局では、より安全な埋立式港湾を建設するため、波のしゃへいに関する現地観測を実施したのでその一部をここに紹介する。観測は秋田港で行われたもので、港外の -20 m 地点に超音波式波高計 (U.S.W.)、港内側 -8 m 地点に同じく超音波式波高計 (U.S.W.) を設置して波高、周期を観測し、さらにレーダーにより波向を観測した。港内波高計の設置位置と防波堤の状況は、図-5 に示すとおりである。対岸は自然海浜なので、岸からの波の反射は非常に少ないとみてよい。また、南防波堤は、途中で屈曲しているが、港内波高計に達するまでの回折波に対しては、直線半無限堤の場合の回折波としてあつかうことができる。波向観測用のレーダー写真によれば、波峯線が非常に明瞭な場合とそうでない場合とがある。波峯線が明瞭になるのは、たとえばウネリのように、波の方向成分が一方向に集中している場合であり、逆に不明瞭なのは風波の

ように方向分散が大きいためと思われる。この波の方向分散度は波の回折に関係すると思われるので、写真-1～3 に示すように、波峯線の明瞭な方から順に、集中型、中間型、分散型に分けて整理した。昭和48年11月～12月



港内側波高計の位置

図-5 港内側波高計の位置

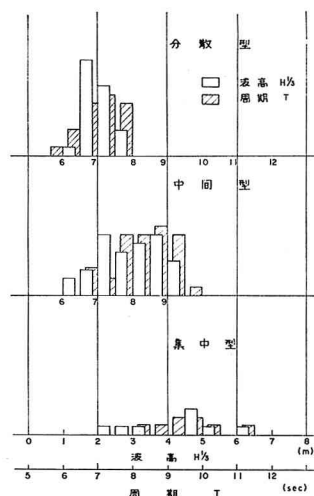


図-6 各タイプの波高と周期

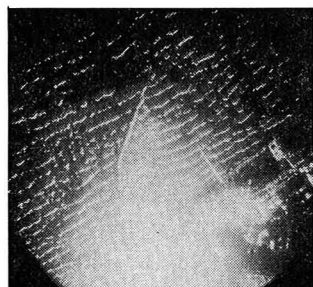


写真-1 集中型

(昭和48年12月22日16時)

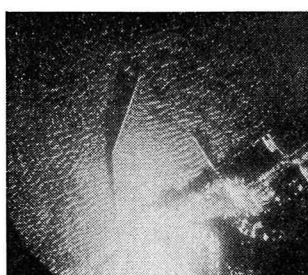


写真-2 中間型

(昭和48年12月6日10時)

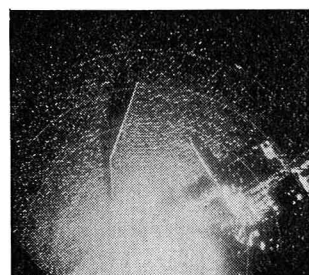


写真-3 分散型

(昭和48年12月14日16時)

のレーダー写真を以上の方法にて分類し、波高記録(港外, -20m U.S.W.)とともに整理したのが図-6である。図のように、集中型においては、分散型に比べ波の周期は長く、また波高も大きい。すなわち集中型では周期が長いので、屈折する度合いが大きく、防波堤先端部に達したところでは、各周波数成分の波向がそろったので波峰線がレーダーに明瞭に写ったものと思われる。図-7は、観測期間中の波向の変化を示したもので、波向

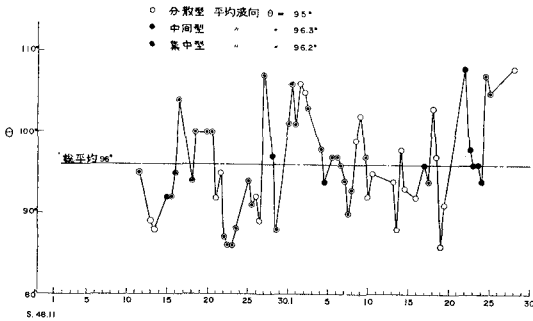


図-7 観測期間中の波向の変化

の総平均は 96° (図-5 に示すように、N 左まわり角で表示してある) であるが、集中型~分散型の各タイプに分けて波向きを平均すると、互いに多少異なっている。図-8 は、南防波堤先端と -8m (U.S.W.) とを結んだ直線距離を X_D 、港外 -20m (U.S.W.) による波長を $(L_{1/3})_i$ としたときの無次元量 $X_D/(L_{1/3})_i$ を横軸に、港内波高と港外波高との比、すなわち回折係数 $K_D = (H_{1/3})_D / (H_{1/3})_i$ をたて軸にとって、現地観測結果をプロットしたものである。図中には、単一方向スペクトル(この場合は正弦波に対するものを用いた)の回折係数を示したが、現地観測による回折係数は、その 2~3 倍にもなっている。一方、永井の不規則波の回折計算法により、方向スペクトルが $\cos^{2n}\theta$ 型の場合で $n=1\sim5$ としたときの回折係数も同時に示してあるが、現地観測値はいずれのケースより小さくなっている。また、集中型では分散型に比べ、回折係数が小さくなっているが、これは、 $\cos^{2n}\theta$ 型の方角スペクトルの n の値が大きくなり、波の集中度が高いほど回折係数が減少するという

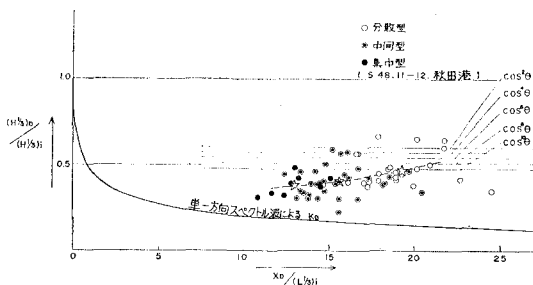


図-8 現地観測による回折係数と理論計算値の比較

永井の計算結果と傾向は一致する。図-8 から、正弦波による回折係数は、現地のそれに比べ過小であり、永井の不規則波に対する回折係数は、 n の値を適当に選定することにより近似計算ができるようである。図-9 は、港内の有義波周期 $(T_{1/3})_D$ と港外の有義波周期 $(T_{1/3})_i$ との比を示したもので、集中型では、港内周期が 8 割~9 割に減少しているが、分散型ではほとんど変化が認められない。これは、分散型では直接港外の波が港内に入ってくる率が多いのに対し、集中型ではそれが少ないためと思われる。さて、 $\cos^{2n}\theta$ 型方向スペクトルの n の値をいくらにすれば現地の回折に近いものが得られるかを調べたのが図-10 である。分散型~集中型の各タイプに

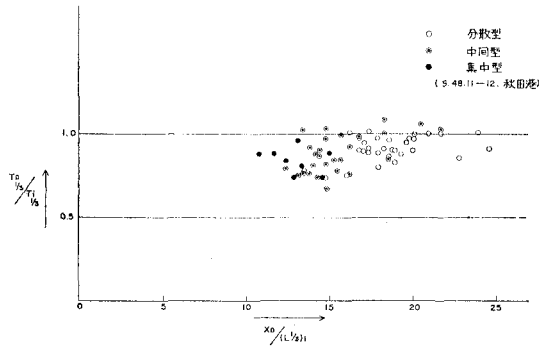


図-9 現地の回折における周期の変化

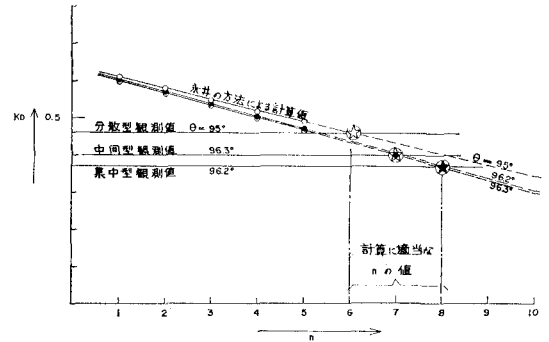
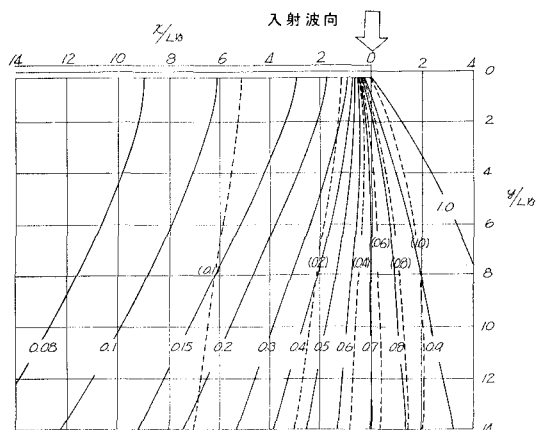


図-10 現地の回折の近似計算に適当な n の値

ついて、平均の波向が少し異なるので、それぞれの波向に対して不規則波の回折係数を計算し、現地観測値と一致するときの n の値を求めると、図のように、 $n=6\sim8$ となる。もしそうだとすれば、通常 $\frac{2}{\pi} \cos^2\theta$ の方向分散係数で表わされる海岸波に比べ、秋田港の防波堤先端に達する波はかなり集束したものとなるが、図-10 において、分散型で $n=6$ 、集中型はこれより大きく $n=8$ となっているところから、海岸波が海底の影響により屈折収束した結果、このような大きな n の値となったものと思われる。ただし、この n の値は、港内、港外波高の比を用い、永井の計算方法により逆算したものであるため、現地回折係数の近似計算のためには意味あるとし



図—11 $n=7$ のときの回折と正弦波の回折との比較
(半無限堤, 直角方向入射)

でも、実際に屈折して港口部へ到達した波の方向スペクトルがはたして $n=6\sim 8$ になるかは不明であり、これについては、今後の方向スペクトルに関する現地観測に待つほかはない。図—11 に、 $n=7$ としたときの半無限堤に直角方向から波が作用する場合の回折図を、正弦波の場合と比較して示した。図中実線が $n=7$ としたときの回折係数を示し、これが現地の回折状況を最もよく表わすと考えられるものである。これに対し、正弦波の回折係数を示す点線は、場所によっては半分程度となっており、港内の静穏度を検討する上に無視できない差異である。

5. 結 語

外海からの波を一重の防波堤でしゃへいし、その内側を直接港湾として利用する外海埋立式港湾の整備が進められているが、その計画設計にあたっては、波浪の諸特性に対していままで以上の正確な把握が必要である。その認識の上に立って本報告では、波の変形について、既往の解析法を現地観測値により検討し、いくつかの指針を得ることができた。しかし、回折による周期の変化や $Hs^*/h_0=0.8$ 以上の場合の波高変化等、まだ究明の至らない点も多々残っている。今後も、適正な観測体制を整備し、現地波の特性を調べてゆくつもりである。

謝 辞: 本研究の遂行に際し、港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室長 合田良実氏から貴重な御教唆をいただき、とくに波の碎波の解析については全面的な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。なお本研究の解析に使用した不規則波の回折計算プログラムは、元港湾技術研究所海洋水理部 永井康平主任研究官の開発になることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行・谷本勝利: 波向線交差領域での波の屈折——数値波動解析法の応用(2), 第19回海岸工学講演会論文集, 1972.
- 2) Chien, Ning: Ripple tank studies of wave refraction, Trans. A.G.U. 35, 6, 1954.
- 3) 合田良実: 不規則波の碎波指標について, 第20回海岸工学講演会論文集, 1973.
- 4) 永井康平: 不規則な海の波の防波堤による回折の計算, 第19回海岸工学講演会論文集, 1972.