

海上工事の施工管理における波浪予測の運用について

駒口友章*・進藤信博**・川合紀章***・木村克俊****

1. 緒 言

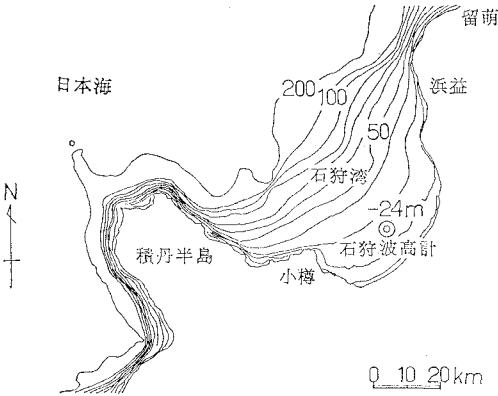
日本海側の港湾工事の現場では、冬期は発達した季節風の影響によって海象条件が非常に厳しくなることが知られている。このため、秋口や春先が工事期間に含まれる場合は、現場の監督員は日々の海象の変化に十分に注意を払い、効率的な施工を心掛けることが要求される。しかし、実際は現地において海象を観測してから作業の順序を変更する場合もあり、特に波浪状況の変化の予測は必須の課題となる。各種の波浪予測モデルはこのような目的に対して有効に利用できるものとして注目されている。統計的な概念に基づく波浪予測モデルは、波浪の実測値とその発生原因となる気象要素（特に気圧値）との相関関係を調べて将来の波浪を予測するものであり、予測計算において特別な知識を必要としないことやパソコンを用いて現地でも簡単に計算が行えるという利点をもっている。また、このような現場向けの簡便な波浪予測モデルとしては、須田・湯沢（1983）の提案する重回帰モデルをはじめとして、数種類の統計モデルが開発されて、その適用性が検討されており（小舟ら、1987）、1～2日程度の日数を必要とする作業の施工管理に用いることを目的として波浪予測を行う場合には、いずれのモデルも実用的に十分な予測精度が期待できる。

本研究では、①石狩湾内にある海上工事の施工現場を対象として重回帰法による波浪予測モデルを作成し、このモデルの現地への簡便な適用方法を検討する。また、②実際に波浪予測を行った結果と現地の波浪観測結果の比較からモデルの現地への適用性を検討し、さらに今回の手法による波浪予測情報が海上施工に対して有効に利用できる範囲および実用的な利用法を示す。

2. 計画の概要

（1）計画対象地点

波浪予測の対象地点は、図－1 に示す石狩湾の北部に位置する浜益漁港である。この浜益漁港は留萌港と石狩湾新港の中間に位置する。周辺海域では、近隣の石狩湾新港において波浪予測が行われているが、石狩湾新港からは約 50 km 程度離れているために、積丹半島の遮蔽の影響や周辺地形の違い等から波向によっては来襲波浪が石狩湾新港とはかなり異なる場合がある。



図－1 波浪予測の対象地点

（2）工種および作業限界波高

現在、浜益漁港では群別地区に新たに分港の建設が進められており、平成 2 年度の主要な作業内容は①基礎工、②本体工、③上部・胸壁工、④消波工である。このうち、波浪予測は主に②③④の工事を対象としている。表－1 に各工種の作業限界波高を示す。

表－1 作業限界波高の設定

作 業 内 容	作業限界波高
ケーソン曳航・据付	50cm
上部コンクリート打設	70cm
胸壁コンクリート打設	70cm
消波ブロック据付（20t, 25t）	100cm
根固ブロック据付	50cm

* 正会員 日本テトラポッド(株) 応用水理研究所
** 正会員 日本テトラポッド(株) 札幌支店
*** 正会員 工修 前北海道開発局港湾部港湾建設課
(運輸第三港湾建設局神戸調査設計事務所次長)
**** 正会員 前北海道開発局小樽開発建設部
(北海道開発局開発土木研究所主任研究員)

(3) 波浪予測の実施手順

図-2 に現地での波浪予測の実施手順を示す。ここで対象とする各工種はいずれも作業の1～2日前に波浪予測等の気象判断が必要となる。このため、図のように波浪予測は朝10時と夕方5時の1日2回実施するが、朝10時の予測では半日の波高の変化を把握するため、予測当日の12時から22時までの2時間ごとの波高の予測値を求める。また、夕方5時には翌日9時から3日後までの9時と15時の波高の変化を予測する。

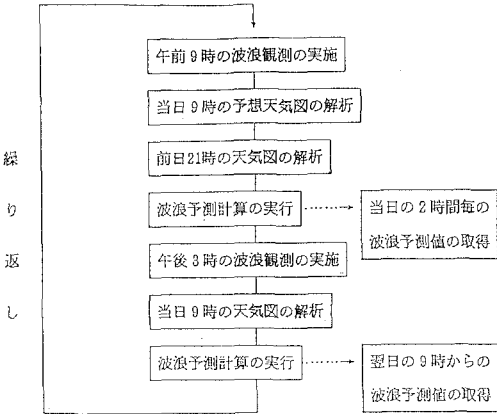


図-2 波浪予測の実施手順

図-2 に示すように、波浪予測を現場でパソコンにて行う場合、実況天気図、予想天気図および予測時点で見られる波浪の観測値が必要である。各々の天気図は気象ファクシミリ放送を受信して取得する。また、波浪予測の情報をできるだけ有効に利用できるように、各データが取得できる時刻を考慮して事前にタイムスケジュールを作業員と協議する必要がある。図-3 に今回の波浪予測のタイムスケジュールを示す。

(4) 波浪予測モデルの概要

波浪予測モデルは、現場でパソコンを用いて予測を行うことを前提として、式(1)に示す重回帰型モデルを作成する。

$$\log(Y)=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_nx_n\cdots(1)$$

ここで、Yは予測波高、 a_0 は定数、 $a_1, a_2, \dots, a_n$ は回帰係数、 $x_1, x_2, \dots, x_n$ は説明変数である。

このとき、説明変数は予測実行時までには得られる実測波高と天気図から読み取る気圧値である。周知のようにこのモデルは一定時間後の波高値を現在までに知り得る気象要因をもとに回帰式により予測するものである。この場合、一般に重回帰係数の寄与率は予測実行時の直前の実測波高が大きくなる傾向がある。しかしながら、浜益漁港では過去の波浪観測記録がない。そこで回帰係数は石狩湾新港の波浪観測値に対して同定するように求めるが、今回の予測手法では現地地1日2回の波浪観測を行い、この結果を補正データとして予測モデルに取り込む方法を採用する。また、天気図からわが国を含んだ広範囲の測点の気圧値を読みとるが、今回のモデルでは各気圧測点の波高に対する寄与率を求めて、各々の予測時間に対して寄与率の大きな測点を選択する方法とする。

(5) 現地の波浪観測の概要

前述したように、今回の波浪予測手法は現地の波浪観測を定期的に行う必要がある。このため、浜益漁港(群別地区)西防波堤上から1日2回(午前9時、午後3時)の波浪の目視観測を行う。また、スタジア式波高計を漁港原点に設置して波浪記録をとり、これから波高、周期を読み取ることにより観測精度を確保する。

a) 目視観測

目視観測はかなり主観的なものであり、ある程度の個人誤差は避けられない。このため、これをできるだけ小さくするように、観測開始前に一定の基準を決めて行な

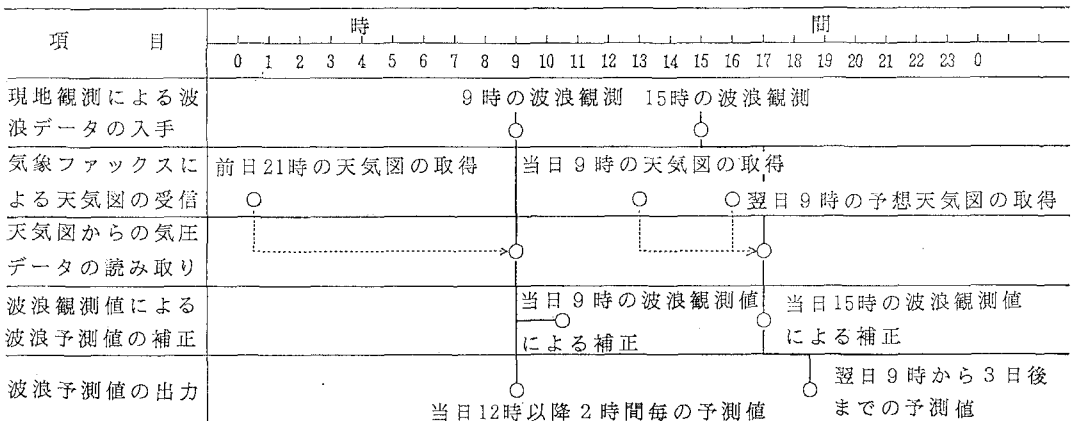


図-3 波浪予測のタイムスケジュール

う必要がある。具体的には、西防波堤上で観測位置、目標物を予め選定し、同一の基準で波高、周期および波向を測定する。各々の観測精度としては、波高は原則として 25 cm 間隔で読み取るため、ケーソンにスケールを取り付けて水面から波の峰までの高さを観測する。また、周期はストップウォッチを使用して 20 波程度の平均とする。波向は予めコンパスによって方位を確認し、8 方位により観測する。

b) スタジア式高波計による波浪観測

スタジア式波高計は、海上に設けた目標物（ブイ等の浮標）の波浪による上下の動揺運動を陸上の高所よりレンズでとらえ、この変化を自記ペンの移動に変換して波浪記録を得るものである。波浪観測の方法としては、記録器とブイとの距離を約 200 m とし、観測時間は約 10 分間とする。

以上の観測方法により得られる気象データは、天候、風浪階級、波高 (m)、周期 (sec)、風向、波向等である。

3. 浜益漁港と近隣港湾の海象特性

重回帰型の波浪予測モデルは特異な気象擾乱や地域性の強い波浪に対してはその予測精度が低下する場合がある。このため、波浪予測情報を施工管理に有効に利用するためには、予測対象地点ならびに周辺の海象特性を予め十分に理解しておくことが重要である。ここでは、石狩湾周辺の海象についての気象資料（日本気象協会、1990）の収集整理や現地でのヒアリングを行う。また、石狩湾新港沖で取得された波浪観測記録を整理し、石狩湾内の港湾におけるの一般的な波浪特性を把握するとともに、石狩湾全体を対象とした浅海域での波浪変形計算を実施する。なお、ここで年間の季節は 1～2 月および 12 月を冬とし、3～5 月を春、6～8 月を夏、9～11 月を秋として取り扱う。

(1) 石狩湾周辺の一般的な海象

石狩湾新港では、通年の風向は NW と SE を中心とした 2 方向が卓越している。季節別では、施工期である夏期に限り SE、ESE の風向が卓越しており、風速も大きくなる。他の時期については NW 系の風が最も強くなっており、その出現頻度は SE 系の風と同程度である。周辺の各地における風況は全体的には石狩と類似しているが、浜益漁港では夏期には W、SW 方向の風もみられる。

石狩湾新港の波浪状況としては、沖波の来襲方向は年間を通じて N、NNW、NW、WNW、W の 5 波向にはば限定される。このうち、特に高波浪となるのは NNW、NW の 2 通りであり、その出現頻度も大きい。周期は通年で 2～10 sec である。これを季節別にみると、夏は

波高も 1.5 m 以下と比較的小さく、周期も 2～6 sec の風波となる。しかし、秋になると波高も高くなって 3 m 以上となる場合もあり、周期も 3～8 sec と少し長くなっている。これに対して、留萌港では秋は波高・周期ともに石狩湾新港と同様の傾向であるが、夏の波高は少し高めである。また、浜益漁港は石狩湾の湾奥に位置することもあるが、水深の違いによる波浪の屈折の他、波向きによっては積丹半島の遮蔽の影響も若干受けている。このため、W 方向よりの波向に対して石狩湾新港よりも高波浪となる傾向がある。また、南西方向からの波浪は、積丹半島によって遮蔽される方向からの波浪であるにも関わらずにうねり性の波となる。このうねりは減衰が非常に遅いので、実際の海上施工には大きな影響を与える場合が多い。

(2) 波浪変形計算の結果

実際の施工現場では浅海域で変形した波浪が来襲すると考えられる。ここでは、施工現場に來襲する波浪を予測するために不規則波の波浪変形計算を実施する。波浪変形計算の計算手法は、波の屈折を考慮してエネルギー平衡方程式を解く方法とする。なお、沖波の主波向は N～W までの 5 ケースである。表-2 に計算によって得られた波高比及び波向の分布から石狩地点（石狩湾新港沖の波高計の位置）と浜益地点でのそれぞれの値を示す。

表-2 波浪変形計算の結果

ケース No.	沖波向	石 狩 地 点		浜 益 地 点	
		波高比	波 向	波高比	波 向
1	N	0.76	N 5.6°W	0.75	N 9.1°W
2	NNW	0.87	N22.8°W	0.87	N24.1°W
3	NW	0.92	N45.0°W	0.94	N45.6°W
4	WNW	0.79	N63.7°W	0.93	N67.8°W
5	W	0.62	N70.4°W	0.84	N90.1°W

表-2 に示すように、石狩地点の波高比は NNW や NW の波向に対して高くなる。一方、浜益地点の波高比は石狩地点よりも W 方向寄りの場合に高くなる傾向があり、NW、WN 方向に対して高波浪となる。これは、石狩地点では積丹半島の遮蔽の影響があるためと考えられる。また、浜益漁港の施工現場では、N 方向の波は地形による遮蔽の影響を少し受けて波高が小さくなっている。次いで、波向についてみると、石狩地点では W 方向を除いて初めに与えた主波向とほぼ一致しているが、浜益地点における波向は全体的に少し W 方向寄りとなる。

(3) 浜益漁港に高波浪が来襲する要因

浜益漁港に高波浪が来襲する気象要因としては、①低気圧、②前線、③台風などがある。①では特に低気圧が石狩湾の西側を移動・通過する場合に、石狩、浜益の風

向は SW~W~NW へと変化するが、風向が W 方向寄りになってから急速に波浪は発達して浜益付近に襲撃する。②の場合、低気圧と副低気圧あるいは台風が日本海を挟んだ状態のとき、強い気圧の谷ができるとともに発達した前線が現れる。このとき、日本海海上は大時化の状態となり、十分に発達した波浪が石狩湾へ来襲する。③の場合、太平洋沿岸と異なり台風は北海道に近づいた時には温帯低気圧に変わっていることが多い。しかし、北海道の北東部海上に低気圧があり、かつ台風の移動速度が遅い場合には②と同様に前線の発達する状態となって高波浪が石狩湾に襲撃することがある。

なお、ここで示した気象状態ではいずれも浜益漁港でうねり性の高波浪が来襲することが多く、施工管理および安全管理上の十分な警戒体制が必要である。

4. 波浪予測の実施

(1) 波浪予測の実施結果

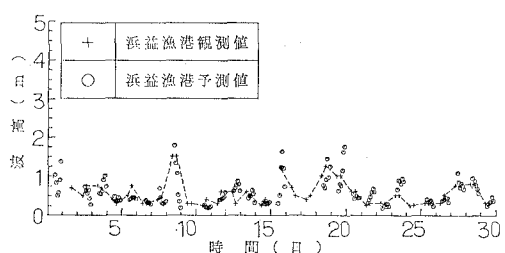
ここでは、現地で施工期間に合わせて波浪予測を行った結果を報告し、今回の方法によって得られる予測情報が実際の工事に有効に利用できる範囲を検討する。

図-4 は、浜益漁港を対象とする2時間ごとの波浪予測値と現地の波浪観測値を比較したものである。この場合、9月、10月ともに今回の予測結果はほぼ満足できるものである。予測期間を通じて、概ね予測値は実測値の大きさや変化の傾向およびその時期を的確にとらえることができています。また、図-5 は24時間後以降の朝9時と昼3時に対する波浪予測値と現地の波浪観測値との比較結果を示す。各図をみると、全般的な予測結果は

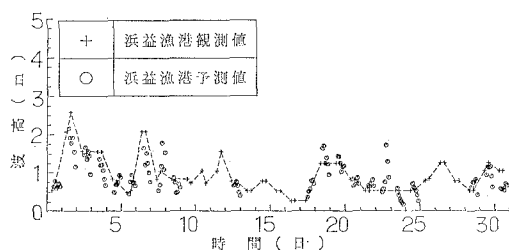
良好であるが、気象状態によっては予測値と実測値との対応が低下する場合がある。特に波浪予測の精度が低下した場合は、①9月9日頃の前線の通過後の突風によって発生したと予想される高波浪の時期、②9月20日頃の台風19号の接近時および10月初めの台風21号の来襲時前後の高波浪の時期である。これは、主にここで用いた重回帰モデルが前線の影響や特定の台風を対象とするモデルではないことが原因と考えられる。しかし、これらの気象状態にある場合は、波浪予測の精度が低下する反面、前述したように現地では天気予報等の情報が事前に得られており、高波浪に対する十分な警戒体制をとることができていた。

(2) 作業限界波高に対する波浪予測値的中率

表-3 に作業限界波高に対する波浪予測値的中率を示す。ここでは、作業限界波高に対して予測値と観測値とがどちらも大きい場合とどちらも小さい場合を予測的中としている。また、波浪予測結果は8月~10月の2時間ごとの予測値を用い、実測値は浜益漁港における観測値とする。この表からわかるように、作業限界波高 0.5m

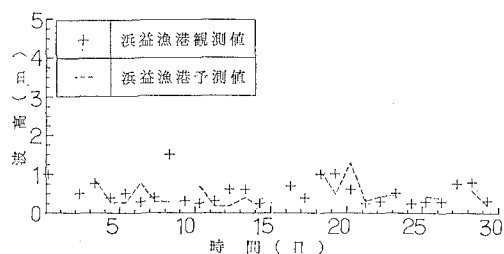


(a) 1990年9月

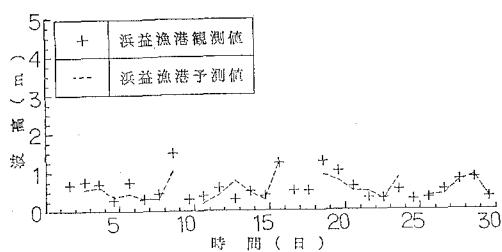


(b) 1990年10月

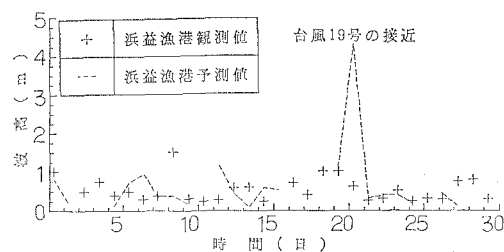
図-4 波浪予測の実施結果



(a) 24時間後に対する予測結果



(b) 30時間後に対する予測結果



(c) 48時間後に対する予測結果

図-5 波浪予測の実施結果

表-3 作業限界波高に対する波浪予測値の的中率

作業限界 波高 (m)	的 中		不 的 中		限界波高 に対する 的中率 (%)
	○-1	○-2	×-1	×-2	
	予測値も実測値 作業限界波高より も高い場合	予測値も実測値 作業限界波高より も低い場合	予測値が作業限 界波高よりも高 く実測値が低い	予測値が作業限 界波高よりも低 く実測値が高い	
0.5	30	13	1	4	89.6
0.7	16	19	5	8	72.9
1.0	10	37	0	1	97.9
総 数	56	59	6	13	134
(%)	41.8	44.0	4.5	9.7	100.0

および 1.0 m に対する的中率は各々 90%, 98%とかなり高いが, 0.7 m とした場合は 73% である。これに対して, 浜益漁港の現場ではその作業内容から波高 0.5 m ~ 0.7 m 前後の予測値の精度が重要視された。そこで, 作業の可否の判定に対する実質の予測精度を調べるために小名浜方式による検討(土屋ら, 1985)を行う。小名浜方式では, 作業限界波高に対してある程度の幅があると考え。すなわち作業限界波高を 0.7 m とした場合, これが実際は 0.65 m あるいは 0.75 m であって施工上では大きな問題ではない。この考え方から作業限界波高に最大 ± 10 cm の幅を許して的中率を求めた結果を表-4 に示す。

表-4 作業限界波高に幅を与えた場合の的中率

作 業 限 界 波 高 (m)		的 中 不 的 中				的中率 %
		○-1	○-2	×-1	×-2	
0.50m の場合	0.50	30	13	1	4	89.58
	0.45~0.55	33	14	1	1	95.92
	0.40~0.60	35	17	1	0	98.11
	総 数	98	44	3	5	94.67
0.70m の場合	0.70	16	19	5	8	72.92
	0.65~0.75	18	21	3	6	81.25
	0.60~0.80	19	30	2	2	92.45
	総 数	53	70	10	16	82.55
1.00m の場合	1.00	10	37	0	1	97.92
	0.95~1.05	10	37	0	1	97.92
	0.90~1.10	12	37	0	0	100.00
	総 数	32	111	0	2	98.62

表-4 に示すように作業限界波高に対して ± 10 cm までの幅を許して的中率を求めた結果, 0.7 m に対する的中率は 92% となる。この結果は, 今回の予測方法では 0.5 m ~ 0.7 m 付近の波高に対して, 予測値に実用上の幅を与えて作業の可否の判断に利用する方法が最も有効であったことを示している。以上のように, 今回の予測

方法は非常に簡便な方法であるにも関わらずに, 短期間の施工管理に対して十分に信頼できる情報を与えた。

5. 結 語

本研究では, 道内の海上工事の施工現場を対象として重回帰法による波浪予測モデルを作成し, このモデルの現地への簡便な適用方法を検討した。また, 波浪予測を実施した結果と現地の波浪観測結果との比較から, ここで用いた波浪予測手法の適用範囲や施工管理における波浪予測情報の実用的な利用法を明らかにした。以下に本研究で得られた成果を要約する。

① 現地の波浪観測結果を補正データとして使用することにより, 波浪記録のない場合についても比較的精度の良い波浪予測を実施することができる。

② 今回の波浪予測手法は非常に簡便な方法であったにも関わらずに, 施工管理用の波浪情報として十分に信頼できる予測情報を与えることができた。

③ 今回の予測手法による波浪予測結果は, 1 ~ 2 日後程度までの範囲では十分に有効な波浪情報となる。

④ 波浪予測情報を利用して工事の可否の判断を行う場合には, 作業限界波高に ± 10 cm 程度までの幅を許して利用する方法が最も実用的であることが確認された。

今後の課題としては, ①うねり性の波浪に対する波浪予測および, ②さらに長期間を対象とした波浪予測が簡便に実施できるよう予測手法を改良する予定である。

参 考 文 献

- 小舟浩治・橋本典明・亀山 豊・久高将信 (1987): 重回帰式を用いた波浪予測手法の適用について, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 167-171.
- 須田 薫・湯沢 昭 (1983): 波浪予測に基づく外海シーパースの待ち行列に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 339 号, pp. 177-185.
- 土屋義人・鹿島遼一・鈴木義和・近藤浩右・泉 雄士 (1985): 日本海中部沿岸における波浪の相関予知法, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 149-153.
- (財)日本気象協会 (1990): 日本海北部・北海道道南海域(港湾気象海象シリーズ No. 8), 気象海象要覧, 財団法人日本気象協会, p. 323.