

日本海(佐渡沖)における燈標に作用した最大波高について

長 崎 作 治*

1. ま え が き

一里島燈標は、新潟県佐渡郡相川港外約 1.6 km の位置に、昭和 33 年度新設された。その後、昭和 40 年、41 年度の冬季風浪のため、鉄筋コンクリート造の塔身にきれつを生じたので、昭和 42 年度、きれつ部分にモルタルを注入し補修を行なった。さらに、昭和 43 年度には、12, 1, 2, 3 月の冬期間、燈標に舟を接舷できないことなども合せ考えて、光源を太陽電池とする直径 96 cm、厚さ 16 mm、長さ 13.4 m の鋼管柱（内部にプレパックドコンクリートでん充）構造による燈標をすぐそばに新しく建替えた。しかし、昭和 44 年 12 月 3 日、冬期風浪のため、燈身が根巻きコンクリート付近から約 3 度傾斜した。この事実から、当初設計に際し、日本海沿岸の波の特性を考慮し、推定した設計最大波高と、昭和 44 年 12 月 3 日、約 20 時間にわたり実際に作用した波高とでは、かなりの差があることがわかった。燈標に作用する水平方向の外力は波高によって決定されるといっても過言ではなく、波高のとりかたいかんは、構造物の安定計算に大きな影響をおよぼす。耐用年数内に構造物に作用するであろう最大波高を推定することは、いろいろな面から困難なことではあるが、設計上の最大波高は決定しなければならない。

この最大波高について、とくに日本海側の孤点に設置された構造物の実例から今後の参考になればと思い、以下とりまとてみました。

2. 設 計 波

一般に設計に使用する波の決定は、既往 10 カ年以上にわたる実測値によることが望ましいが、海洋構造物の場合、洋上の孤点に設置されるため、とうてい耐用年数を考慮した設計波を実測値から求めることは、現状では不可能である。

よって、最寄りの 30 カ年以上にわたる既往の風資料をもとにして、設置点に生ずるであろう波浪の推算値を求め、ある期間の波の実測資料から、この値を補正して設計波とする場合が多い。

外海で発生する波（風波）を推定するには、海洋構造物の設置位置が外洋の場合は、天気図（速報天気図 3

時、15 時気象庁発行、印刷天気図 9 時、21 時気象協会発行）から、陸地に近接している場合は、もよりの測候所の毎時風記録か、もし測候所が奥地にあり、海上、海浜の気象を確実に把握することが困難であると判断した際は、全国海岸線の要所に配置された、24 カ所の燈台の風記録（毎日 9 時、15 時、21 時の 3 回気象観測と風浪、うねりの観測を実施している）から総合的に風域、すなわち波の発生域を決め、その長さおよび波の減衰距離、風域内の風向、風速、継続時間をまず求め、これより、台風時発生する外洋の波については、原則としてウィルソン法を、精度を重視しなくてもよい時は、坂本、中島、木村の“太平洋岸の台風による波の特性とその推定法”により推定することとしている。

冬期、季節風による外洋の波を推定するには、ウィルソン法、SMB 法による。

以上の推定により求められた波の諸元は不規則波群を代表する有義波（1/3 最大波）のものであるから、最大波に換算しなければならない。また、構造物が浅海にある場合は水深による波の変化、波の屈折等を考慮して設計波を決める必要がある。ここで、深海とは水深が波長の 1/2 以上の所、浅海とは水深が波長の 1/2 以下の所をいう。なお構造物が碎波帯内、または碎波点より岸側にある場合には、そこで起こりうる進行波の限界波高をもって最大波高と推定する。

日本海における来襲波諸元の推算には、支配的な波として冬季節風による波をとっている。それは、台風が日本海を北上するときは、減衰期に入り、進行速度は、70~100 km/h ときわめて早く、波は急激に発生するが、継続時間が短いため、あまり大きくはならない。

しかし、冬期は、平均風速 10 m/sec 以上の N~W の風が 20~60 時間程度吹送し、その風域内で生ずる最大風速に対応する波高は、台風による場合よりも大きな値を示すことが多い。なお、冬期季節風の傾向として、一般に風向の変化はきわめて少なく、吹送距離は 200~300 km 以下であり、風速は 30 m/sec をこえることはきわめてまれであるから、波は風速とその吹送時間によって支配される。よって、日本海では波の周期（ T ）は、13 sec をこえることは、ほとんどなく、太平洋岸の台風時の波にくらべると著しく短く、移動性の小さな局地性風域内の波として取扱うことができる。したがって、海岸

* 正会員 東海大学教授 海洋学部土木工学科

の風記録から波の特性を推定しても大きな誤りはない。ブレットシュナイダー法によれば、風速が大きく、吹送距離 (F) の比較的小さい場合 ($gF/u^2 < 10,000$) 波高は風速に比例し、周期は風速の平方根に比例する。このような関係から秋田沖の自然条件として、運輸技術研究所は、最大風速 (U_m) と波高 (H_m) の関係を

$$H_m = 0.27 U_m \dots\dots\dots (1)$$

また、周期 (T_s) と最大風速 (U_m) との関係を

$$T_s = 2.4 \sqrt{U_m} \dots\dots\dots (2)$$

とみた。一方海岸の風速から来襲波諸元を推算する場合、海岸の風記録には、秋田港工事事務所における記録を用いることとしたが、統計年数が短いため、秋田気象台の観測記録を海岸の風に換算して使用している。その結果、冬季節風の最大風速は、約 $26 \sim 27$ m/sec であり、これを海岸の風に換算すると 30 m/sec 強となり、この最大風速に対応する波浪諸元は式 (1), (2) から $H_m = 8$ m, $T = 13$ sec となる。この値は、有義波の諸元であるから、ブレットシュナイダーによる最大波高 $H_{\max}$ と有義波高 $H_{1/3}$ との関係

$$H_{\max} = H_{1/3} \times \left(145 \frac{gh}{u^2} \right)^{0.1} \times 1.1 \dots\dots\dots (3)$$

から、 $u = 30$ m/sec, $H_{1/3} = 8$ m, 水深 $h = 10 \sim 20$ m の場合、最大波高は $H_{\max} = 8 \times (1.4 \sim 1.6) = 11 \sim 13$ m となる。

一里島は相川港外約 1.4 km の距離にあり、平水時、長径 8 m, 短径 5 m の小判形の平面を有する干出 1.8 m の小島で、その周辺には北西 150 m の位置に干出するオキテグリ、北方 800 m に干出するカサグリ、東南方 220 m にシデエグリ等の岩礁が散在し、付近水深は 20 m である。なお、地形的には W~WNW 方向から来襲波が作用する場合、もっとも波高は大となる。

3. 一里島燈標における設計波の最大波高

(1) 沖波、波高 (H_0)、周期 (T_0) の算定

沖波の波高および周期は、過去において、最大波浪を起こしたと思われる台風または季節風等について、当時の風速、吹走距離、連吹時間等から前述のごとく、SMB 法等によって推定することができる。しかし、一里島の設計に使用した沖波の波高周期、 $H_0 = 8$ m, $T_0 = 11$ sec は、もよりの相川測候所における目視による過去の波浪最大観測値と、同島におけるもう 1 カ所の正規気象観測を行なう弾崎燈台の資料とから推定した。その理由は、設置位置が相川港の港外 1.4 km で測候所ともわずか 2.5 km という至近距離にあることと、同島北端に位置する弾崎燈台の資料も十分参考できたからである。

a) 相川測候所の目視観測による波高

昭和 32 年 8 月から昭和 33 年 3 月まで各月の目視観測による波高の最大値は表一に示すとおりで、過去の最

大風速には 31.3 m/sec がある。波高および周期を目視で観測するには、昭和 28 年 2 月気象庁制定の風浪階級表を参照し、その波高を階級づけ、周期は連続 10 波をストップウォッチにより、繰り返し、3 回測定し平均値とするわけである。

表一 目視波高の各月の最大値 (相川測候所)

年 月	風			う			ね	り
	日	階 級	周 期 (sec)	日	階 級	周 期 (sec)		
32	8	30	3	8	29	4	10	
	9	19	4	12	18	3	8	
	10	19	4	9	1	3	7	
	11	29	5	15	28	3	9	
	12	20	5	9	19	8	17	
33	1	6日間連続	6	12	19	5	12	
	2	13	6	9	16	2	13	
	3	3	6	9		1	11	

b) 弾崎燈台の風速と目視による波高

昭和 28 年から 33 年までの 5 カ年間に於ける冬期 (1, 2, 3 月) の風速と目視による波浪の最高値を示すと表二のとおりである。この表から、最大風速は 40 m/sec 以上にもおよぶことがあり、冬期間はつねに 25 m/sec 前後の季節風が吹きつけ、最多風向は NW で、最大風浪には階級 7、つまり、波高 $6 \sim 9$ m が生じていることが判明した。

表二 風速と風浪 (目視) の冬期各月の最大値

(弾崎燈台)

年 月 日	風 向	風 速 (m/sec)	風 浪 階 級	
28	2 1	WNW	43.2	7
	2 1	NW	27.8	7
	3 1	NW	26.5	7
29	1 29	NW	32.8	6
	2 29	NW	24.1	6
	3 13	W	27.5	5
30	1 5	NNW	27.7	7
	2 20	WNW	26.2	7
	3 18	NW	23.3	6
31	1 29	NW	28.7	7
	2 10	NNW	29.2	7
	3 12	NW	32.7	6
32	1 12	NNW	30.0	6
	2 13	NW	24.2	6
	3 22	NNW	33.3	6
33	1 3	NNW	27.0	7
	2 13	WNW	30.0	6
	3 3	NW	29.2	6

c) 沖波波高 (H_0) と周期 (T_0) の決定

弾崎の最大風速値 43.2 m/sec は波高 12 m 以上を生ずることとなるが、目視による波高観測値は階級 7、つまり、 $6 \sim 9$ m であり、一応この値が正しいとすれば、この波高を生ずると思われる風速は、 $25 \sim 34$ m/sec となる。風速 30 m/sec の場合、波高と周期との関係は、SMB

図表から

波高 (m)	周期 (sec)
6	9.4
7	10.2
8	10.9
9	11.7

となり、このうち波高 6 m, 周期 9.4 sec は、昭和 33 年 2 月 13 日、および 3 月 3 日の相川、弾崎の記録とほぼ一致する。よって、設計波高を決定するための沖波波高としては、 $H_0=8$ m, 周期 $T_0=11$ sec が適当ではないかと判断してこの値を採用することとした。

(2) 設計波高の決定

a) 最大潮差と異常潮差

佐渡付近における最大干満の潮位差は 0.38 m と推定されている。また異常潮位時における偏位量としては、昭和 27 年から 33 年までの異常潮位と思われる値のうち、最大のものから、偏位量を推定すると昭和 28 年 12 月 10 日 19 時 50 分の観測値 0.67 m があり、この時の計算潮位は 0.22 m であるから 0.45 m となる。よって最大干満潮差の 0.38 m と異常潮位偏差 0.45 m の計 0.83 m が最大の潮差となる。

b) 砕波水深 (d_b)

海岸工学(Ⅱ)アイバーセンの砕け波水深指標図から、砕波水深 (d_b) を求めると、 $H_0/T^2=26.3/121=0.217$ よって図から $d_b/H_0=1.11$ $\therefore d_b=1.11 \times H_0 \div 8.9$ m となる。

ゆえに最大潮差と異常潮差を差し引いた 8.07 m の平水時水深地点で砕波すると推定した。

c) 海底勾配 (i)

海図からはほぼ NW 方向の水深を調べ海底勾配 $i=1/20$ とみた。

d) 砕波高 (H_b)

$$i=1/20, H_0=8\text{m}=26.3\text{ ft}, H_0/T^2=0.217$$

よってアイバーセンの深海波の險しさと浜勾配の関数としての砕波水深対砕波高図より、 $d_b/H_b=1.19$

$$\therefore H_b = \frac{d_b}{1.19} = 7.5\text{ m}$$

e) 波頂の高さ (y_b)

アイバーセンの砕け波の峰指標図から、 $y_b/H_b=2.05$ よって海底面からの波の峰高は $y_b=2.05, H_b=15.2$ m となる。

以上から図-1 の構造物に作用する波型が描かれ、円形柱体波圧理論から構造物の各断面に作用する水平波力を算出し、これに安定する断面と形状を決定した。

以上は昭和 33 年の設計であるから海岸工学Ⅱの図表を用いたが、これを港湾構造物設計基準（昭和 42 年 4 月）の図表から参考までに求めてみると次のごとくなる。

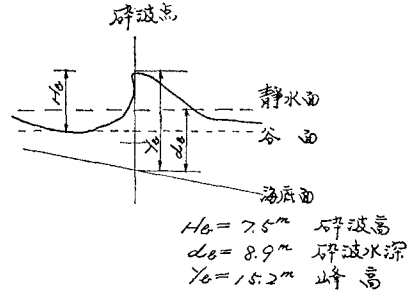


図-1 砕波の波形

b') 砕波水深 (h_b)

深海波形勾配と砕波水深との関係から、 $H_0/L_0=8/196=0.0415$, ここに $L_0=1.56 T^2$ よって、 $h_b/H_0=1.16$ $\therefore h_b=1.16 H_0=9.3$ m となり、 $h_b-d_b=0.4$ m ほど深い地点が砕波点となる。

d') 砕波高 H_b'

深海波形勾配と砕波高との関係図から $i=1/20, H_0/L_0=0.0415$, よって $H_b'/H_0=1.12$ $\therefore H_b'=1.12 H_0=9$ m, $H_b'-H_b=1.5$ m とその差は大きい。これは砕波水深対砕波高図を用いず、深海波と浜勾配の関数としての砕波高指標図から砕波高 H_b は求めるべきであったと思われる。図の使用によって、計算値が大きく変わってくるので注意しなければならない。この図を使用すると、 $i=1/20, H_0/T^2=0.217$, よって $H_b/H_0=1.02$ $\therefore H_b=1.02 H_0=8.16$ m となる。

$i=1/10$ とすれば $H_b/H_0=1.2$ $\therefore H_b=1.2 H_0=9.6$ m となる。浜勾配の取り方も、構造物に最大の外力を作用させる方向の海底については、相当な金額を要するが精測してその設計上の勾配を決定することが望ましい。

4. 被災当日の推定作用波高

(1) 被災当日の風・波とその他資料

a) 海上風速

現地にもっとも近い相川測候所の昭和 44 年 12 月 3 日の地上気象観測原簿（陸上風速）から海上風速を推定するには、過去において同測候所が陸上と海上で同時観測を行ない、陸上風速 7 m/sec に対して、海上風速が最低 10 m, 最高 15 m であったことから、陸上風速を約 35% 増した値をもって海上の換算風速とし表-3 を作成した。

b) 最寄り港湾の最大波高値

もより港湾、直江津、新潟西、新潟東の昭和 44 年 12 月 2 日から 4 日にかけての $H_{\max}, H_{1/3}$ の波浪観測値は表-4 のとおりであり、 $H_{\max}=9.96$ m, $T=8.1$ sec が直江津港でみられている。

c) 日本海各港湾における過去の最大波高観測値

表-3 風速の記録 (昭和44年12月3日相川測候所)

時刻	風向	陸上風速 (10分最大)	海上風速 (m/sec)	気圧 (mb)
22.00	SW	4.2	5.7	1001.8
23.00	"	3.2	4.3	1000.9
24.00	W	8.3	11.2	999.5
1.00	"	10.8	14.6	998.9
2.00	WNW	15.2	20.5	"
3.00	"	19.7	26.6	1001.8
4.00	"	"	"	1002.5
5.00	W	14.7	19.8	1003.0
6.00	WNW	16.7	22.6	1002.7
7.00	"	19.0	25.6	1003.0
8.00	"	19.7	26.6	1004.6
9.00	"	21.5	29.0	1005.3
10.00	"	19.3	26.0	1005.7
11.00	"	"	"	1005.8
12.00	"	15.8	21.4	1006.3
13.00	W	15.7	21.2	1007.1
14.00	WNW	"	"	1006.6
15.00	"	16.3	22.0	1007.2
16.00	"	10.8	14.0	1007.5
17.00	NW	9.7	13.1	1007.1
18.00	NNW	12.5	16.9	1007.3
19.00	NW	12.2	16.5	"
20.00	WNW	7.3	9.9	1007.7

表-4 被災日前後の最寄り港湾波高観測値

(新潟調査設計事務所)

		44.12.2		44.12.3		44.12.4	
		波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)	波高 (m)	周期 (sec)
直江津	H_{max}	3.36	6.9	9.96	8.1	7.78	7.2
	$H_{1/3}$	1.91	7.1	7.26	10.4	5.67	8.3
新潟西	H_{max}	2.61	8.0	8.19	7.7	7.11	8.8
	$H_{1/3}$	1.66	7.7	5.69	13.1	4.96	12.9
新潟東	H_{max}	2.70	7.7	7.58	13.2	5.91	12.8
	$H_{1/3}$	1.94	7.9	5.30	13.6	3.85	9.9

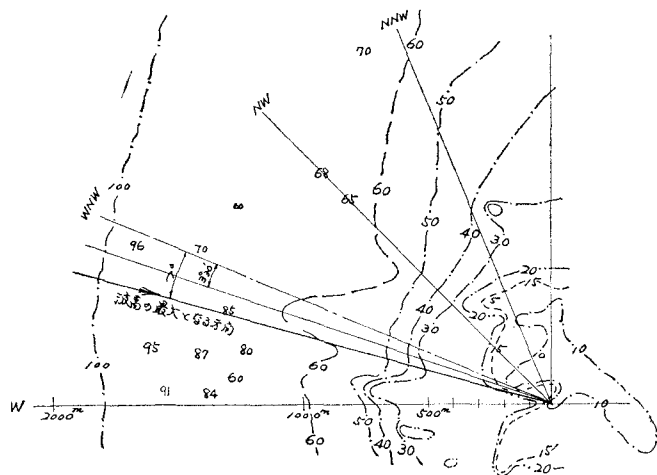


図-2 前面水深状況図

一港建, 新潟調査設計事務所の波浪観測台帳(昭和33年9月から昭和42年12月)から日本海における, 各港の最大波高を発生年月日とも調べてみたところ, 雄物川河口沖に $H_{max}=11.9\text{ m}$, $T_0=11\text{ sec}$ が昭和38年11月8日23時に発生している。

d) 作用波浪方向の前面海底状況と波の傾向

昭和41年8月海上保安庁水路部が実施した, 音響測深結果から, 燈標設置付近を拡大図化すると図-2のとおりとなる。これより, 作用波浪方向の海底状況は急勾配といえる。この図から最も大きな影響を与えると思われる波浪の侵入方向は W~WNW 間となる。一方風速大なるものを, 相川測候所資料からひろい出してみると表-5のとおりで, いずれも方向は WNW であった。

表-5 風向 W~WNW 間の最大風速値 (相川)

発生年月日	時刻	風向	風速 (m/sec)
34. 1.31	1.00 ~ 09.00	WNW	最大 22.6
	8hr 継続		最小 19.0
36. 1.26	09.00 ~ 17.00	WNW	最大 19.7
	8hr 継続		最小 17.3
40.12.16	09.00 ~ 21.00	WNW	最大 22.0
	12hr 継続		最小 19.3

表-6 W-WNW 方向の波高

(新潟調査設計事務所)

発生年月日	港湾	風向	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)
34. 1.31	秋田	NW	4.70	3.30
36. 1.26	酒田	W~WNW	5.90	3.98
40.12.16	秋田	W~WNW	6.90	4.77
"	新潟東	W~WNW	6.37	5.24
"	新潟西	W~WNW	10.50	7.45
"	佐渡入川	W~WNW	5.10	3.70

波浪が作用するところの方向前面 200m 付近に水深 9.4m の瀬が張り出しており, 一応この地点で波は砕波するものと思われる。また W から WNW の中間方向から波浪が作用すると水深条件からは最大の波浪となるが, この方向から16時間吹送した例は過去の風記録からはみあたらなかった。なお表-5の同日の日本海各港湾における波浪観測値は表-6のとおりであった。

e) 被災当日の海面の上昇高さ

昭和44年12月3日は, 08.00が満汐で潮差は約38cmである。気圧は998.9mbであったから, 気圧降下量 ΔP による水位の上昇高さ ζ は次式からは14cmである。

$$\zeta_s = K_1 dP = 0.991 \times (1013 \text{ mb} - 998.9 \text{ mb}) \div 14 \text{ cm}$$

また、風の吹きよせによる海面の上昇高さ ζ_w は 34.9 cm となる。

$$\zeta_w = K_2 W^2$$

W : 風速 (m/sec) (最大フェッチ方向)

$$K_2 : 0.048 F \cos^2 \theta / h$$

F : フェッチ (km)

h : 水深 (m)

θ : 風向と海岸線の垂線とのなす角

$$W = 22.1 \text{ m/sec}, F = 400 \text{ km}, h = 10 \text{ m}, \theta = 86^\circ 30',$$

$$\zeta_w = 4.8 \times 10^{-2} F W^2 / h \cos^2 \theta \div 34.9 \text{ cm}$$

よって水面の上昇高は、低潮面より計算上 86.9 cm となる。

(2) 推定作用波高

冬冬季節風による当日の来襲風波の沖波波高、周期を推定するには、SMB 法によることとした。当日の風資料は割合に風向、風速のばらつきが少ないので、等エネルギー線 (HT)² を使用せず、風速と吹送継続時間とから波高、周期を求めた。風向が W から WNW 間の平均風速は 22.1 m/sec (昭和 44 年 12 月 2 日 24.00~12 月 3 日 16.00) で、吹送継続時間は 16 時間であるから、SMB の風波の予知曲線から $H_{1/3} = 7.6 \text{ m}$, $T_{1/3} = 12.6 \text{ sec}$, $F = 420 \text{ km}$ となる。風速が 20 m/sec を越えた 02.00 より 15.00 までの平均風速は 23.9 m/sec, 吹送継続時間は 13 時間で、これからは $H_{1/3} = 7.8 \text{ m}$, $T_{1/3} = 12.6 \text{ sec}$, $F = 350 \text{ km}$ となる。当日の日本海各港における観測値のうち、立地条件のもっとも類似している酒田港では $H_{1/3} = 8.51 \text{ m}$ を記録している。一里島の場合、西側海底水深が酒田港の測定点よりさらに深いので、酒田港の観測値より上回るものと思われるが一応 $H_{1/3} = 7.6 \text{ m}$, $T_{1/3} = 12.6 \text{ sec}$ を実際に生じた沖波の有義波高と推定すると、最大波高 ($H_{\max}$) は $H_{\max} = 1.53 H_{1/3} \sim 1.86 H_{1/3} = 10.6 \text{ m} \sim 14.1 \text{ m}$ となる。

また進行波の砕波高はアイバーセンの深海波形勾配と砕波高との関係図から $H_0 = 10.6 \text{ m}$, $L_0 = 1.56$, $T^2 = 246 \text{ m}$, $H_0/L_0 = 10.6/246 = 0.043$, 海底勾配 $i = 1/10$ の場合、 $H_b/H_0 = 1.22$, よって $H_b = 1.22$, $H_0 = 12.9 \text{ m}$, また海底勾配 $i = 1/20$ の場合 $H_b/H_0 = 1.12$, よって $H_b = 1.12$, $H_0 = 11.9 \text{ m}$ となる。

なお、進行波の限界波高は、前面 200 m の位置に -10 m の岩盤が張り出しているので、この地点で砕波するものと思われる。その砕波高はマンクによれば、 $H_b = 0.78 h_0$, クノイド波では $H_b = 0.73 h$ と水深に限定されるので $H_b = 7.8 \sim 7.3 \text{ m}$ となる。

日本海沿岸においては、8 m を越える有義波高はめったに生じないとされていたが、同日酒田港 (-10 m) では約 10 時間連続して 8 m を越える値を観測し、しかも $H_{\max} = 9.62 \text{ m}$ でスケールアウトし、このため波の下

表-7 酒田港の波高観測値 (昭和 44 年 12 月 3 日)

時 刻	04.00	06.00	08.00	10.00	12.00
$H_{1/3}$ (m)	4.84	5.89	8.17	8.49	8.18

時 刻	14.00	16.00	18.00	20.00	22.00
$H_{1/3}$ (m)	7.96	8.51	7.96	7.54	7.07

谷から逆算して $H_{1/3}$ を推定したという。

以上諸数値より判断して推定される作用最大波高は、12 m 程度であったものと思われる。

5. む す び

当初設計では沖波波高は過去における目視の最高値とその他資料から判断して $H_0 = 8 \text{ m}$, $T = 11 \text{ sec}$ とみ、アイバーセン図から構造物に作用する砕波の最大波高を $H_b = 7.5 \text{ m}$ と推定したが 10 年後地形的に最大波浪を生ずる W - WNW 方向から平均風速 22.1 m/sec の風が 16 時間吹送し、これによって生じた風浪は砕波の進行波として構造物に最大波高 12 m 程度の波圧を作用させ約 3° 傾斜させた。

海洋の一孤点に設置される構造物の実際設計に際し、自然条件とくに作用する波浪を確実に把握しこれを設計にとり入れることは実に困難なことである。しかしプラットフォームの海面上の高さが、脚柱寸法が、構造物全体の安定が、そして工法が最大波高から決定される。耐用年数内に作用するであろう最大波高を推定することの困難さを以上の事実からご了解いただき、今後設置される日本海の海洋構造物の設計上の参考になれば幸いです。