

親水性護岸や防波堤の利用限界に関する事例解析

A Case Study on Safety Operation of amenity-oriented seawalls and breakwaters

高橋重雄*、遠藤仁彦**

Shigeo.Takahashi, Kimihiko Endoh

People on seawalls and breakwaters can enjoy very comfortable sea environment. However such places are actually dangerous to the users especially when waves are high. A fishing park was built in 1984 on a seawall of Tarumi reclaimed land in Kobe City. The park has been operated very safely and successfully. The data concerning its operation with measured waves are analyzed to investigate safety operation of such amenity-oriented sea structures. A short series of experiments are also conducted to reproduce the wave overtopping on the seawall.

Key words : overtopping waves , safety against waves , amenity-oriented breakwater , operation rate

1. まえがき

現在、市民が散策を楽しんだり、釣りを楽しめる親水性護岸は全国にかなりの数があり、従来安全性の観点から人の立ち入りを禁止してきた防波堤でさえも、市民に開放するものが計画中を含めて14例ほどある。これらの施設は市民と海との距離を近づけ、親水性が高まる反面、自然条件によっては危険となるために、安全に対する十分な検討が必要である。

人の安全性確保の有効な手段としては、一定の基準を設けて入園を管理する方法があり、実際に風や波に基準を設けて対応している施設が多い。具体的には、風の基準に対して風速計を設置したり、波の基準に対して波浪注意報で対応しているものが多い。波浪注意報は明確な判断基準であるが、対象とする地域が比較的広域であり、護岸や防波堤近傍の地形などの影響を考慮することができない。また、最近越波しにくくするために天端高さを上げたり、親水性の観点から天端高さを低くするなど様々な検討がされているが、波浪注意報の基準は構造物の形状を考慮することができない。したがって、今後の多様な要請に対処するためには、構造物周辺の海域特性や構造物の形状を考慮した利用限界基準の検討が必要である。

本報告では、親水性施設として比較的古く、波高などの現地観測を実施している神戸平磯海釣り公園の親水性護岸を対象として、入園禁止事例の解析および水理模型実験を行い、主に波に対する利用限界基準を検討している。なお、当護岸の波に対する入園禁止基準は、波しぶきが天端面を濡らしたときであり、結果的に周辺の海域特性や構造条件を考慮したものである。主な検討内容は、①入園禁止時の状況および波浪注意報との関係、②簡易的な利用限界波高の算定式の提案と妥当性の検討、③施設の稼働率の検討、である。さらに、全国の19事例と神戸平磯の事例を海象条件や構造条件について比較検討し、一般的な利用限界基準や施設の稼働率の特性を考察している。

2. 現地調査および室内実験の概要

(1) 神戸平磯海釣り公園

当公園は神戸市新垂下水処理場の南側の埋立護岸にあり、護岸の天端を海釣り公園として1984年9月より市民に開放したものである。図-1は、施設の平面図を示しており、開放している護岸は総延長約1400mである。年間約12万人の人が訪れ、ピーク時には約2000人が魚釣りを楽しんでいる。施設内には、ベンチ、公衆便所、ゴミ箱などの利便施設や手すり、避雷針、浮き輪などの安全施設が設置されている。

図-2は、護岸の断面を示しており、構造形式はパラベット後退型で遊水室に上床版があるスリットケーソン式護岸である。天端高さは釣り台部分とパラベット部分で異なっており、釣り台部分の天端は越波を許容する高さになっており、通常の防波堤と同様に設計有義波高の0.6倍の高さになっている。また、パラベット部分の天端はあまり越波しない高さになっており、設計最高波高の1.0倍となっている。なお、当護岸の設計波は有義波高4.6m、周期8sである。

(2) 管理形態と入園禁止基準

公園の管理は、神戸市の委託で財団法人神戸市海浜管理協会が行っている。開園時間は季節によって異なり、

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室長 (239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室

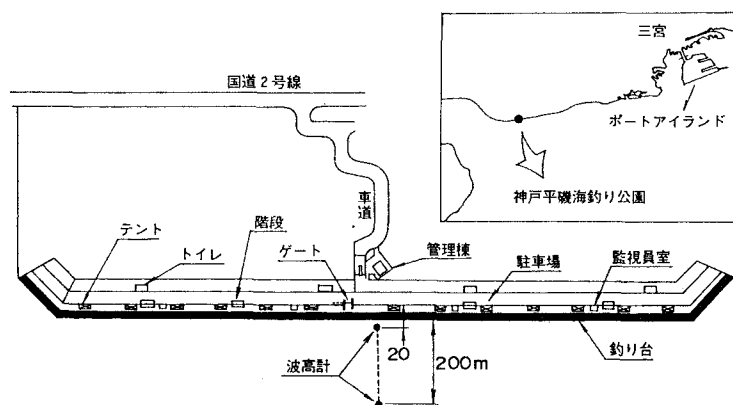


図-1 神戸平磯海釣り公園の平面図

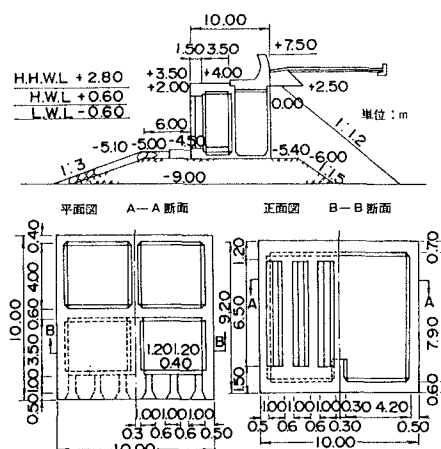


図-2 護岸の断面図

例えば6～9月が6～21時である。また、気象・海象条件によっては釣り人が危険にさらされるので、上記開園時間内で以下の基準を満たした場合に入園禁止となり、管理事務所によって入り口ゲートが閉鎖される。

- ① 風速20m/s以上（風速計設置）
- ② 雷が20km以内で発生した場合（感知器設置）
- ③ 釣り場に波しぶきがかかる状態（目視）

上記基準のほかに、気象台から出される気象情報なども参考にして入園禁止の判断をしている。なお、1991年8月現在、海への転落などの事故は1件もない。

(3) 現地観測

当護岸では、1981年よりスリットケーソンに作用する波力の現地観測を実施しており、その中で波浪観測および潮位観測、風向風速観測を行っている。波浪観測は、護岸の沖合20m（設置水深TP-8.0m）と200m（設置水深TP-8.3m）に設置している2台の超音波式波高計で、平常時2時間おき、異常気象時1時間おきに観測¹⁾を実施している。本報告では、入園禁止時、波浪注意報発生時等におけるこれらの観測データを利用している。

(4) 室内実験

実験は全長160m、幅1m、高さ1.5mの長水路で、縮尺1/16で行った。実験波は規則波で、周期は1.25～2.0s（現地換算5.0～8.0s）とした。実験では、主に堤体前面での打ち上げ高さを測定し、越波状況を観察した。

3. 平磯海釣り公園での入園禁止状況

(1) 入園禁止時の自然条件

自然条件で入園禁止となった事例は、1984年9月から1991年8月1日まで9例あり、表-1に入園禁止の原因、判断基準および波高、風速などを示している。この表より以下のことがわかる。

- ① 最も多い入園禁止の原因は波しぶきによるもので8例あり、次は風で2例、最も少ないのが雷で1例だけであった。なお、風の2例は波しぶきの8例の中に重複している。

表-1 入園禁止の事例

事例	日時	原因	判断基準	波高最大時						入園禁止時					
				$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{U}$ (m/s)	潮位 (cm)	風向	入園禁止時間	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{U}$ (m/s)	潮位 (cm)	風向	入園禁止時間
A	1987. 8. 31	12号台風	風、波しぶき	2.19	5.5	24.9	49	SSW	10	1.28	4.7	18.2	19	S	6
B	1987. 10. 17	19号台風	風、波しぶき	3.11	7.0	23.5	97	S	4	1.58	5.3	19.6	61	WSW	6
C	1989. 8. 27	17号台風	波しぶき	1.08	6.6	10.9	81	WNW	15	0.87	3.9	18.7	34	ENE	6
D	1989. 8. 30	日本海低気圧	雷	1.01	5.0	16.0	78	SSW	18	0.84	3.8	16.9	24	S	16
E	1990. 6. 9	日本海低気圧	波しぶき	1.48	3.8	18.4	-5	S	12	1.48	3.8	18.4	-5	S	12
F	1990. 8. 22	14号台風	波しぶき	2.48		17.3	2	SSE	17			11.1		E	7
G	1990. 8. 23	14号台風	波しぶき	2.11		17.2	32	S	6	2.11		17.2	32	S	6
H	1990. 9. 19	19号台風	波しぶき			17.8		N	21			10.9		ENE	7
I	1990. 9. 20	19号台風	波しぶき			9.4		NNW	10			7.4		WNW	6

- ② 入園禁止の原因は台風または日本海低気圧であり、春から秋に入園禁止が起きている。
- ③ 開園途中で波高の増大によって入園禁止となった事例は事例Eのみである。入園禁止2時間前の波高は有義波で67cmであり、この間81cmも波高が増大している。
- ④ 波しぶきによって入園禁止となっている事例では同時にかなり大きな風速も生じており、越波しない波高であっても、波しぶきが堤前で打ち上がりやすく、風によって天端面に運ばれていることも考えられる。波しぶき程度の越波状況はそれ自体危険ではないが、さらに波高が大きくなると人間に危険を及ぼすようになるために、警告の役割を果たしている。

(2) 波浪注意報・警報と入園禁止

表-2は、1989年の神戸地方と全国平均（61地域）の波浪注意報・警報の発生回数²⁾を示している。波浪注意報の全国平均発生回数は61.5回に対して神戸地方は54回、また波浪警報は全国平均で3.3回に対して神戸地方が2回と全国平均よりやや少ない。ただし、北海道の一部など波浪注意報の発表回数が特に多い地方を除くと、神戸地方はほぼ全国平均となる。神戸での波浪注意報の規準は有義波高で1.5m、警報が3mである。この規準は、海域によって異なり、外海の波浪の厳しい海域では神戸の2倍の波高となっている。

図-3は、神戸地方の波浪注意報・警報の発生延べ日数を示しており、1985年から1990年までの各月毎の平均値を示している。神戸地方は、秋から冬にかけて波浪注意報の発生日数が多く、最も多い1月が8日程度、最も少ない9月が1日程度となっている。また、当公園の入園禁止は年に数回程度で注意報発生回数と比べると少なく、波浪注意報が波しぶきの基準よりかなり安全側になっていることがわかる。ただし、越波状況は天端高さによって異なるので、波しぶきの目視観測による入園禁止と波浪注意報による入園禁止とは安全性の程度が施設によって変化すると考えられる。

図-4は、波浪注意報・警報発生時における最高波高と有義波高の最大値を月別に平均したものを示している。最高波高は注意報の発生頻度とは逆に、8月を中心に春から夏が大きく、季節によって波浪注意報発生時の波浪状況が異なっていることがわかる。当公園の入園禁止は注意報発生頻度が少ないが、発生時の波高が比較的大きい春から秋にかけて生じている。

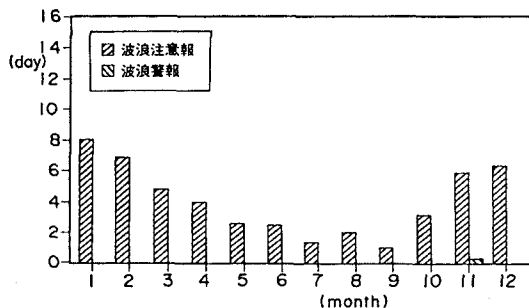


図-3 波浪注意報・警報の発表延べ日数

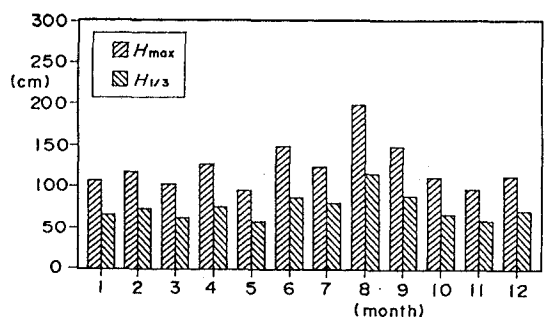


図-4 波浪注意報・警報発表時の波高

4. 波高による利用限界

(1) 利用限界波高の考え方

利用限界波高は、管理形態などにより考え方が変わってくる。この利用限界波高とは、実質的に危険となる越波限界の波高として定義しており、越波の具体的な状況としては波しぶきが天端面を越える場合（波しぶき発生波高）と越波水の実質部分が越える場合（越波発生波高）の二通りを考えている。越波水の実質部分が天端面を流れる状態は人間にとって非常に危険であるが、波しぶきが天端面を濡らす状態はそれほど危険ではない。しかし、波しぶきが発生する状態は今後実質部分が越波する可能性を示唆しており、しかも目視で簡単に判断できることから実際の利用限界を考える際には重要な基準になると思われる。

越波の発生条件は、防波堤前面の打ち上げ高さが天端高さに等しくなった場合と考える。ここで、著者らが³⁾越波水の運動をモデル化したときに用いた式(1)に示す波頂高比 K （打ち上げ高さ R を波高 H で無次元化したもの）を用い、打ち上げ高さが天端高さに等しいとして式を展開すると、越波発生波高 H_{oc} は式(3)で示すことができる。なお、式(3)は波の実質部分の打ち上げを対象とした式である。

$$K = \frac{R}{H} = 1.0 + \alpha_1 \frac{H}{h_m} \quad ; \quad \frac{H}{h_m} < \frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}}{2\alpha_1} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} h_m &= d & : B_M/L \geq 0.16 \\ &= d + (h - d) \frac{0.16 - B_M/L}{0.06} & : 0.11 \leq B_M/L < 0.16 \\ &= h & : B_M/L < 0.11 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$H_{ot} = \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + 4\alpha_1 h_c / h_m}}{2\alpha_1} \right) h_m \quad (3)$$

ここに、 α_1 ：堤体形状による補正係数でスリットケーソン堤（上床版あり）の場合 $\alpha_1 = 0.5$ 、 h_c ：天端高さ、 h_m ：マウンドの影響を考慮した堤体前面水深、 B_M ：マウンド肩幅、 L ：堤体前面水深での波長、 d ：マウンド上の水深

波しぶきは、越波水の実質部分が越える波高よりも小さい波高で生じる。ここでの波しぶきとは、くずれ波から風で運ばれる細かい飛沫を対象としていない、波が堤体前面に作用した際に天端面より上方に打ち上がるしぶきを対象としている。波しぶきの発生には波形勾配や風の影響が関係しているが、式(3)と同様に越波水本体の実質部分の打ち上げ高さを基準にして、簡略的に波しぶき発生波高 H_s を考える。 H_s は後述の実験結果や現地データから、実質部分が天端高さのほぼ7割に達した場合に波しぶきが発生することがわかり、式(1)を修正して式(4)で表すことにした。

$$H_s = \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + 2.8\alpha_1 h_c / h_m}}{2\alpha_1} \right) h_m \quad (4)$$

なお、施設の稼働率を検討する際には、通常有義波高を用いており、本報告では H_{ot} や H_s を最高波高と考えて、以下の式で有義波高 $H_{1/3}$ に換算している。

$$(H_{1/3})_s = \frac{1}{1.8} H_s, \quad (H_{1/3})_{ot} = \frac{1}{1.8} H_{ot} \quad (5)$$

(2) 実験結果との比較

図-5は、打ち上げ高さを波高で無次元化した波頂高比 K の実験値と式(1)による計算値を比較したものである。波高の小さな場合には実験値が計算値よりやや小さくなっており、越波する限界程度の波高では実験値と計算値がほぼ一致している。図中の点線は越波限界の波高($H = H_{ot}$)を示し、今回の周期では計算による越波発生波高は $H = (0.8 \sim 0.88) h_c$ となり、式(5)で換算した有義波高を相対天端高さで示すと $h_c / H_{1/3} = 2.04 \sim 2.25$ となる。計算の越波領域において実験でもほぼ越波しており、式(3)がほぼ妥当であることがわかる。次に、破線は波しぶきの限界を示し、計算による波しぶき限界波高($H = H_s$)が $H = (0.59 \sim 0.64) h_c$ 、相対天端高さ $h_c / H_{1/3} = 2.82 \sim 3.05$ となる。波しぶきは、計算の発生領域において実験でもほぼ発生しており、式(4)がほぼ妥当であることがわかる。なお、実験において波しぶきの発生基準は、天端面から上方に波しぶきや小さな水塊が打ち上がった場合としている。

(3) 平磯海釣り公園現地データとの比較

図-6は、越波発生波高と波しぶき発生波高の計算値と入園禁止時の波高を比較したものである。現地データは、入園禁止時における有義波高とその日の有義波高の最大値を示しており、20m沖の測定波高を用いている。なお、現地の異常波浪時の波向きはほぼ直入射であるので、波向きによる補正は行っていない。事例Aは入園禁止時の潮位がほぼL.W.L.で波しぶきの生じる範囲となっており、4時間後の波高最大時には越波する範囲になっている。事例Bは開園前の午前4時に越波発生波高の計算値と比べてかなり波高が大きく、2時間後の開園時には波高が小さくなり波しぶきの生じる範囲となっている。事例Cは事例A、Bに比較して波は小さく、波高最大時でも波しぶきが生じている程度と考えられる。事例Eは開園途中の11:45に波しぶき（越波）により入園禁止となっており、入園禁止時の波高は入園禁止した直後のもの（11:50～12:00）である。この現地データはまさに利用限界の波高であり、計算の波しぶき領域と一致している。

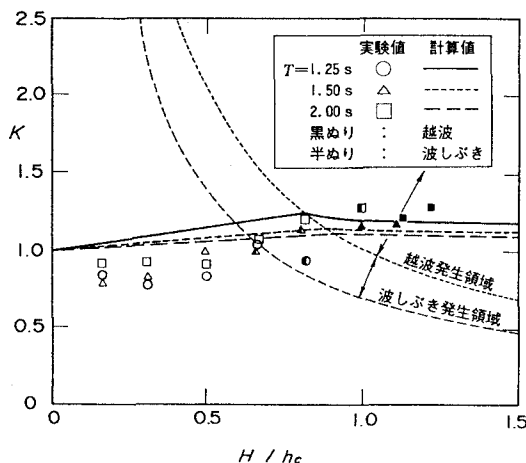


図-5 波頂高比の実験値と計算値

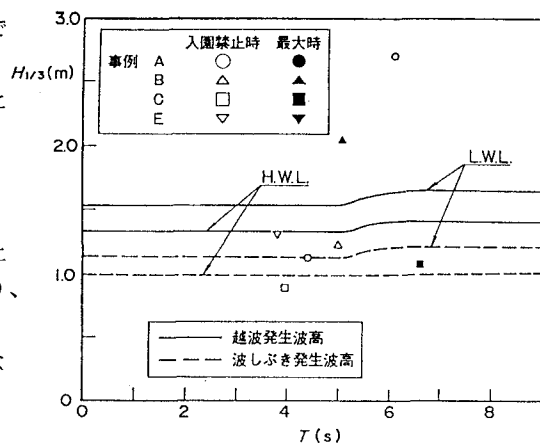


図-6 入園禁止時の波高

5. 利用限界基準と稼働率

(1) 平磯海釣り公園の稼働率

越波発生波高や波しぶき発生波高の算定式は天端高さの関数となっており、天端高さが高いほど各利用限界波高は大きく、越波しにくくなる。当施設を対象に式(3)や(4)を用いて、4種類の天端高さで各利用限界波高を計算した。天端高は現状の釣り台の高さ（設計有義波高の0.6倍）をまず考え、その他の天端高さについても検討した。天端高さbは設計有義波高の0.4倍、天端高さcは設計有義波高の0.8倍、天端高さdは設計最大波高の1.0倍である。

表-3 利用限界波高の計算値

天端高さ 利用限界波高	$0.6(H_{1/3})_D$ 2.9m	$0.4(H_{1/3})_D$ 1.84m	$0.8(H_{1/3})_D$ 3.68m	$1.0(H_{max})_D$ 6.9m
越波発生波高 H_{ot}	2.5m	1.7	3.1	5.1
波しぶき発生波高 H_s	1.8	1.2	2.2	3.8

表-3は、各天端での利用限界波高を示している。現状の釣り台の天端では、波しぶき発生波高 H_s が1.8mで越波発生波高 H_{ot} が2.5mである。また現状のパラベットの天端（天端高さd）では、 H_s が3.8mで H_{ot} が5.1mである。

表-4は、各天端での利用限界波高と表-5の周期別波高度数分布表を用いて施設の稼働率を計算した結果である。現状の釣り台部分の天端高さaでは、越波発生波高を基準とした場合稼働率が99.9%で、波しぶき発生波高を基準とした場合でも99.5%の稼働率が確保されている。一方、現地の波しぶきを利用限界に設定した稼働率は99.6%で計算結果とよく一致しており、この方法で実際の稼働率が概算できると思われる。天端を低くしたbでは、越波発生波高を基準とした稼働率が現状の天端aとほとんど変わらないが、波しぶき発生波高による稼働率は現状より4%程度低下し95.2%となった。なお、稼働率95%は1ヶ月に平均で約1.5日間の閉鎖に相当し、季節的な変動も考慮すると多い月には3～5日間程度閉鎖になると思われる。また、当施設では現状で99%以上の高い稼働率を有するために、天端高さを高くしてもそれほど効果がない。

表-4 施設の稼働率

天端高さ 波高基準	$0.6(H_{1/3})_D$ 2.9m	$0.4(H_{1/3})_D$ 1.84m	$0.8(H_{1/3})_D$ 3.68m	$1.0(H_{max})_D$ 6.9m
越波発生波高	99.6%	99.4	100.0	100.0
波しぶき発生波高	99.5	95.4	99.8	100.0

表-5 周期別波高度数

周期 波高	0 ～2.9s	3.0 ～3.9	4.0 ～4.9	5.0 ～5.9	6.0 ～6.9	7.0 ～7.9	8.0 ～8.9	9.0 ～9.9	10.0 ～10.9	11.0 ～11.9	12.0 ～12.9	13.0 ～	合計	%
0～30	303	7366	3558	542	130	30	15	2					11946	35.7
31～50	556	14170	2892	586	235	116	40	12	3	3	2		18615	55.7
51～100	61	1811	562	109	47	34	23	15	4	2			2668	8.0
101～150		27	121	8	3	1		1					161	0.5
151～200			3	14	2			1					20	0.1
201～				3	2	1							6	0.0
合計	920	23374	7136	1262	419	282	78	31	7	5	2		33416	
%	2.8	69.9	21.4	3.8	1.3	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0			100

(2) 他の施設との天端高さの比較

防波堤や護岸の天端高さは異常時波浪特性から決められており、施設の稼働率は常時波浪特性と天端高さが深く関与している。異常時と常時の波浪特性は海域ごとによって違うことから、設計波に対して一定の基準で設計された天端高さの構造物でも、海域ごとに施設の稼働率が異なってくることが考えられる。そこで、異常波浪の代表値を設計有義波高 $(H_{1/3})_D$ 、常時波浪の代表値を平均有義波高 $\overline{H_{1/3}}$ とし、それらの比 $(H_{1/3})_D/\overline{H_{1/3}}$ で波浪特性を検討する。なお、 $(H_{1/3})_D/\overline{H_{1/3}}$ が大きいほど、異常波浪に対して常時波浪が小さく、通常は比較的穏やかな海域である。他の外海に面した防波堤・護岸（オホーツク海側1事例、太平洋側8事例、日本海側9事例、沖縄1事例）では $(H_{1/3})_D/\overline{H_{1/3}}$ が5～10程度で平均7.0となるが、平磯の施設の場合12.1となり、設計波に対する常時の有義波高が他の施設に比べてかなり小さいことがわかる。

通常の防波堤の天端高さは設計有義波 $(H_{1/3})_D$ の0.6倍であるので、 $(H_{1/3})_D/\overline{H_{1/3}}$ が大きいほど常時波浪に対する天端高さが大きくなり、施設の稼働率も高くなる。そこで、常時波浪特性と天端高さとの関係を平均有義波

高に対する天端高さの比 $h_c/H_{1/3}$ で表すと、19事例の平均が4.2に対して、当施設が7.8と約2倍の天端高さとなっている。したがって、当施設の波しぶきを基準にした稼働率99.6%は、他施設の稼働率と比べてかなり高いものと考えられる。

当施設の天端高さを平均有義波高に対する平均的な天端高さ ($h_c/H_{1/3} = 4.2$) とした場合、 $h_c = 1.6\text{m}$ (現状は $h_c = 2.9\text{m}$) と低くなる。したがって、波しぶき発生波高を利用限界波高とする稼働率は約93%と低下し、1ヶ月平均で約2日、季節変動を考慮すると1ヶ月で最大4～6日程度の閉鎖になると考えられる。なお、外海に面した平均的な波浪条件と天端高さをもつ防波堤等の場合には、同程度の稼働率になるものと思われる。

(3) 波浪注意報を基準にした場合の稼働率

波浪注意報を入園禁止基準とすると、1989年の実績で施設の稼働率が全国平均で約83%、当施設で約85%になる。また、当施設において季節変動も考慮すると、最も稼働率の低い月で約73%になる。波浪注意報を基準とした稼働率は、平均的な天端高さの施設では波しぶき発生時を利用限界とした場合と比較すると10%程度低く、安全側の基準となっている。また、当施設のような相対的に天端高さの高い場合には、波浪注意報の基準がさらに過大に安全側となることから、波浪注意報を基準にする場合には異常時と常時の波浪特性を十分に検討する必要がある。

(4) 波の条件による利用限界基準の設定

波の条件による利用限界基準は、利用目的や施設の管理方法によって考え方が違ってくる。散策が施設の利用目的の場合、波浪注意報が発表するような天候の悪い状況では、利用者の需要がほとんどないと考えられ、やや安全側な基準の波浪注意報が運用上有効な基準となる。釣りが利用目的の場合には、やや天候が悪くても利用者の需要があると考えられ、目視による波しぶき発生基準が有効である。また、施設の管理方法は、大きく分けて管理者のいる場合といない場合がある。管理者のいる場合には目視による基準が可能であるが、管理者のいない場合には安全側の基準である波浪注意報を用いて、放送施設や注意報掲示板などで対応しなければならない。現在は魚釣り目的で管理者のいる施設が多いが、今後は自由に出入りできる海上公園としての施設が増えることが予想され、波浪注意報等の予報や予測を有効に用いることが重要であると思われる。

6. 結論

今回の検討で主に以下のようなことがわかった。

- (1) 実験結果および神戸平磯の現地データから、越波発生波高と波しぶき発生波高を算定する簡単な式を提案することができた。また、利用限界波高としては、波しぶき発生波高が妥当であることがわかった。
- (2) 施設の稼働率は、天端高さによって異なるだけでなく、異常時波浪と常時波浪の特性によっても変わる。すなわち、設計有義波高と平均有義波高の比が重要となる。平磯の施設は12.1となり、他の施設(19事例)における平均7.0よりおおきく越波が生じにくくなっている。
- (3) 波浪注意報を用いて入園を禁止する場合は、目視による波しぶきの発生を基準としたものに比べて通常安全側の基準になり、場合によっては10%以上稼働率が低下する。波浪注意報は容易に利用できて便利であるが、それぞれの施設における波浪注意報発生時の波浪特性を十分検討する必要がある。

あとがき

本報告をまとめるに当たり、神戸市開発局や神戸市海浜管理協会には多大な御協力と御助言を頂き、重要な入園禁止データなどを提供して頂いた。特に、臨海開発事務所の皆木仁所長や平石佐義係長には多大な御協力を頂いた。ここに、記して深甚の感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 神戸市開発局工務課、財団法人日本気象協会神戸支部(1989)：昭和63年度垂水波浪観測業務報告書
- 2) 内部資料(1991)：波浪状況の予測と把握
- 3) 高橋重雄、遠藤仁彦、室善一郎(1991)：親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究、海岸工学論文集第38巻、pp. 536-540