

岩礁上における高波による人の転落事故の原因 分析とその対策に関する研究

RESEARCH ON CAUSE ANALYSIS AND MEASURES OF PERSON'S FALL ACCIDENT ON SHORE REEF BY HIGH WAVES

吉野真史¹・上久保勝美²・木村克俊³

Masafumi YOSHINO, Katsumi KAMIKUBO and Katsutoshi KIMURA

¹正会員 (株)アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 札幌市西区発寒9条14丁目516-336)

²正会員 (独)土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 博(工) 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

Two people on the shore reef at A coast in Hokkaido died due to overtopping wave in October, 2008. In the present study, the geographical data around the shore reef and the meteorological data when the accident occurred were collected. In order to reproduce the situation of the accident, two-dimensional hydraulic model tests were carried out to examine the wave force on human body. The flow characteristics around this shore reef were also studied by the numerical calculation using the modified Boussinesq equations. Based on these results, findings to set the entry limit to a shore reef were obtained. In addition, a basic idea of the safety management was proposed for the amenity-oriented sea-front parks.

Key Words : *fall accident, shore reef, wave overtopping, numerical calculation, hydraulic model test*

1. はじめに

2008年10月12日午前6時過ぎに、日本海に面した北海道内のA海岸の岩礁にて、2名の若者(男性1名、女性1名)が高波にさらわれて死亡する事故が発生した。周辺海域では前々日から時化が続いており、管轄する気象台は、強風波浪注意報を発令していた。事故が発生した岩礁は図-1に示すとおり先端が円形の小島となっていて、簡易橋が設置されている。事故時は犠牲者を含め5名が海中に転落したが、生存者3名は簡易橋にしがみついて難を逃れたものの、犠牲者2名は強い流れで漂流したと推定されている。このような事故の対策として簡単なのは、海岸から市民を排除することである。しかしそれは、市民が海に親しむ機会を奪うことでもあり、安全に海に親しめる方策を進めることが必要と考えられる。

親水性防波堤上の人々の安全性については高橋ら¹⁾の研究がある。しかし、岩礁のような傾斜面を有する地形に対する研究はこれまでになされていない。

これらに鑑み、以下の事項を目的として本研究を実施した。

①事故時の気象・海象観測データ、事故時と同規模の気象擾乱期の現地観察、及び数値解析にて事故時の波浪・流況を検討し、事故の原因を特定する。

②岩礁上に立つ人の安全性を検討するために、人に作用する波力を水理模型実験にて求めた上で、安全性に配慮した親水施設管理の考え方を提案する。

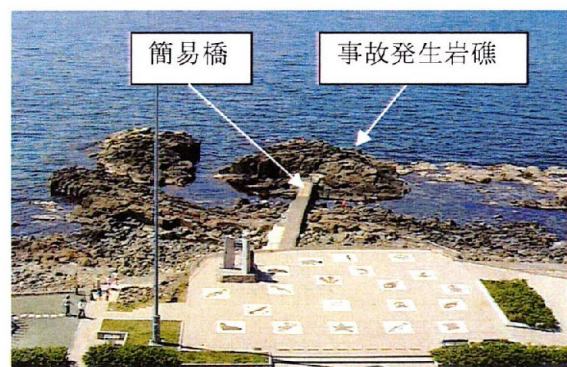


図-1 A海岸の岩礁の状況

2. 事故発生時の自然条件

(1) 地形特性

事故発生岩礁周辺海域の地形データは水深10m程度で深しか存在しないため、地元関係者にヒアリングを行って、周辺の海底地形を図-2のように推定した。周辺は沖側直近まで水深が10~16m、岩礁前

面で 4m 程度、岩礁内部は 3~4m、簡易橋設置位置は 60cm 程度である。このような急深な海底地形であるため、岩礁前面で急激に砕波して岩礁周辺に非常に強い流れが発生したと考えられる。

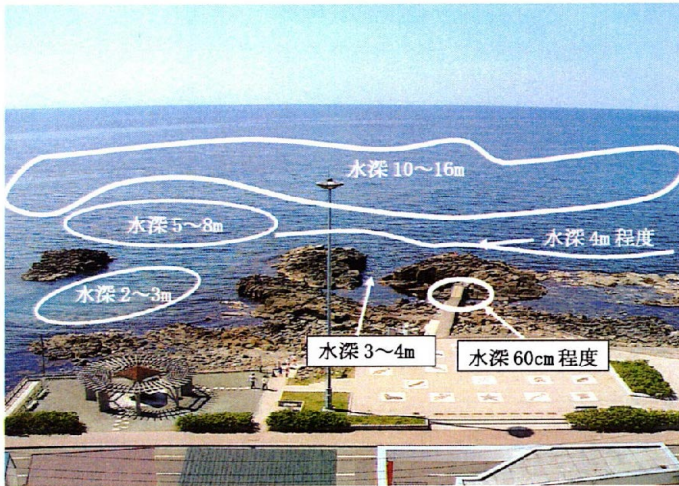


図-2 海底地形の概要

(2) 事故時の気象・海象特性

a) 気圧配置

図-3 に事故時として 2008 年 10 月 11~12 日の気圧配置を示す。中心気圧が最大で 974hPa を示す強い低気圧が大陸から東へ進みサハリンを横断してオホーツク海に抜ける進路をとった。このためオホーツク海を中心とした同心円状の気圧配置となり、北海道日本海沿岸では W~NW 方向の強い風が吹いた。

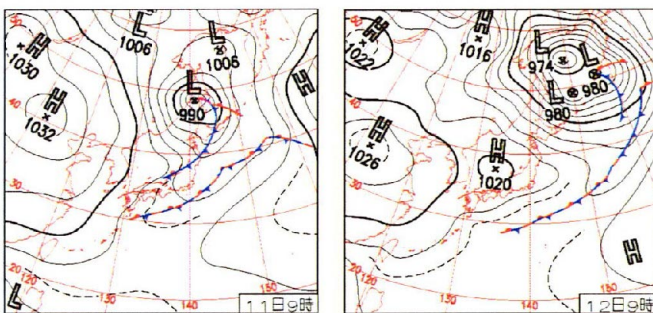


図-3 2008 年 10 月 11 日~12 日の気圧配置

b) 風向風速

図-4 に事故時の周辺測候所の風向・風速経時変化を示す。風向は概ね WSW~WNW で推移しており、風速は、事故前日 10 月 11 日 4 時から急速に大きくなり、10m/s 以上の強風が続いていた。事故時の風速は 10.9m/s、風向は WNW であった。

c) 波浪

事故発生地点から約 8km 離れた海域に A 港ナウファス測点がある。図-5 に事故時の A 港ナウファスにおける有義波高、有義波周期、波向の経時変化を示す。事故時は、前日 10 月 11 日 4 時から波浪が発達しはじめ、事故発生時の 10 月 12 日 6 時に最大

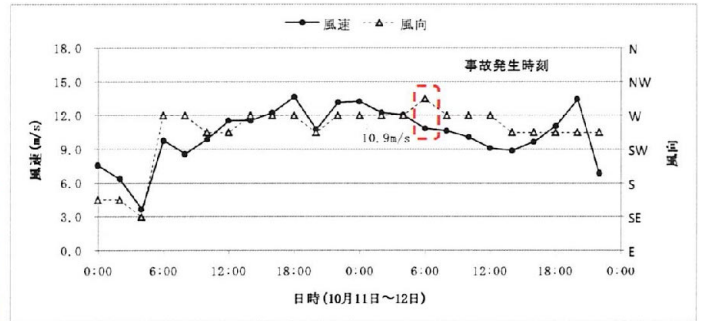


図-4 事故時の風向・風速の経時変化(周辺測候所)

有義波高 4.40m、周期 9.3s、波向き NW となり、非常に厳しい波浪状況を示した。図-6 に後に詳述する観察時(事故 1 ヶ月後 11 月 8 日 14 時)の経時変化を示す。観察時は欠測が多いが、前日 11 月 7 日 12 時には有義波高が 2m を超えており、観察時の 11 月 8 日 14 時に最大有義波高 5.84m、周期 10.8s、波向き NNW となった。両者の波浪特性として沖波での波形勾配を比較すると事故時は $H_o/L_o=0.033$ 、観察時は $H_o/L_o=0.032$ であり、波向が近いことも併せて考えると、波高に差異はあるものの、概ね同等な性質の波浪が来襲したと考えられる。

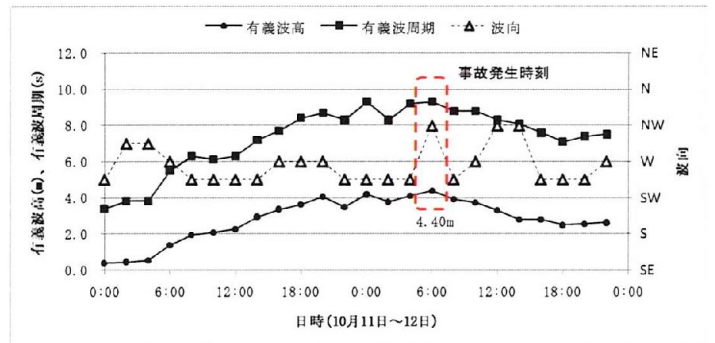


図-5 事故時の波高・周期・波向きの経時変化(A 港ナウファス)

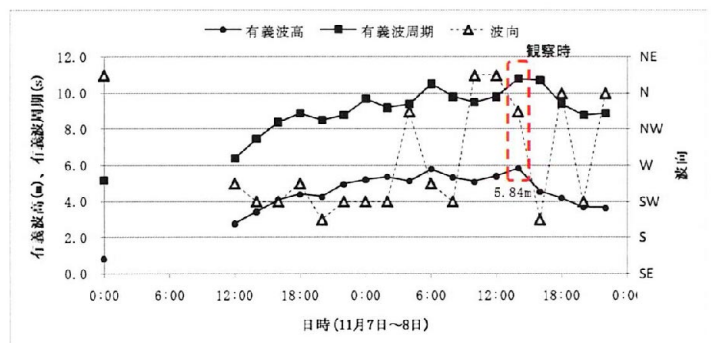


図-6 観察時の波高・周期・波向きの経時変化(A 港ナウファス)

d) 注意報・警報

表-1 に被災時、観察時の注意報・警報一覧を示す。気象条件の悪化に伴い、十分に注意が喚起されていたと考えられる。

表-1 被災時、観察時の注意報・警報一覧

	日時	注意報		警報	
		強風	波浪	暴風	波浪
被災時	10月10日16:14	発令	発令		
	10月13日6:20	解除	解除		
観察時	11月6日20:41	発令	発令		
	11月7日14:10	警報へ	警報へ	発令	発令
	11月8日15:15	発令		注意報へ	↓
	11月8日22:42	↓	発令		注意報へ
	11月9日11:34	解除	↓		
	11月9日21:10		解除		

(3) A 海岸岩礁周辺における波浪・流動観察

事故1ヶ月後の11月8日に、A海岸岩礁に来襲した高波浪・流動の状況を観察した。観察は同日14時に行い、岩礁背後テラスおよび高台にてビデオを撮影した。前に述べたとおり、事故時と観察時の気象・海象状況は概ね類似しているため、事故時も観察結果と同様の現象が発生していたと考えられる。

図-7 にビデオ映像から切り出した写真を示す。A海岸岩礁における波浪・流動現象は概ね以下のサイクルで示される。

- ①岩礁に波浪が来襲
- ②波浪が岩礁に衝突し越波
- ③越波水塊が着水し岩礁左側で水位上昇
- ④左側から強い流れが右へ回る
- ⑤左右からの流れが中央で衝突
- ⑥沖から更に波浪が来襲して水位上昇
- ⑦波が引く

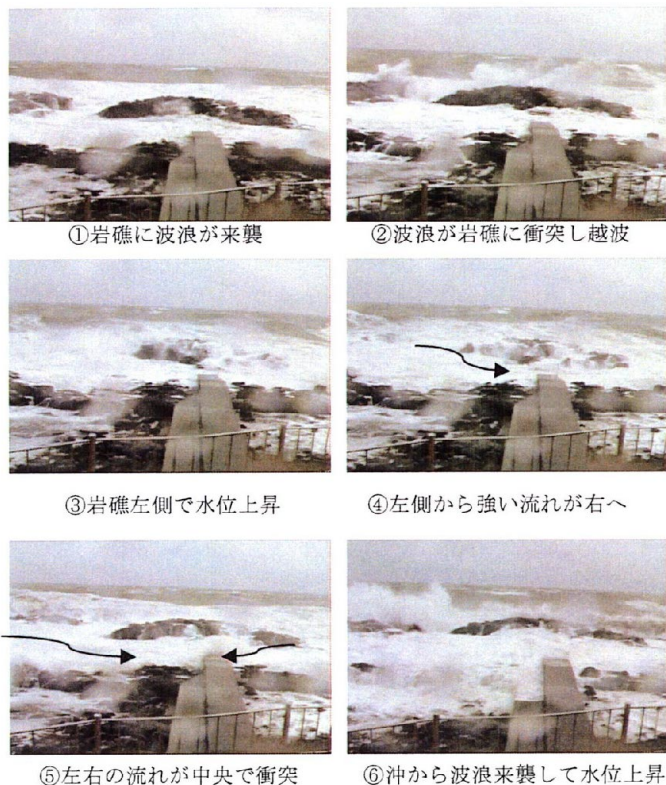


図-7 岩礁における波浪・流動状況

このような状況下で岩礁に渡る場合には、岩礁からの越波が頭上から来襲して転落し、続いて沖に向かって左側から強い流れが来襲し、右へ回って沖へ漂流する可能性が高いと考えられる。

3. 岩礁周辺における波浪・流況

(1) 波浪・流況の再現計算

事故発生時の波浪条件に対して、非線形分散波方程式モデルを利用して波浪・流動場を再現した。非線形分散波モデルには修正ブシネスク方程式モデルを適用した。修正ブシネスク方程式モデルは、平山ら²⁾による非線形波浪モデル(NOWT-PARI ver4.6c3)をベースに中山ら³⁾が計算の安定性、精度向上のために改良したモデルである。計算条件を表-2に示す。波浪外力は事故時の波浪をCase5とし、Case1~4は波高 H_o を1~4mとして、周期 T はCase5と同一波形勾配($H_o/L_o=0.033$)となるようにして決定した。

表-2 計算条件

計算格子幅	2m
計算格子数	X=600, Y=400
波浪外力	Case1: $H_o=1.0\text{m}$, $T=4.4\text{s}$ Case2: $H_o=2.0\text{m}$, $T=6.3\text{s}$ Case3: $H_o=3.0\text{m}$, $T=7.7\text{s}$ Case4: $H_o=4.0\text{m}$, $T=8.9\text{s}$ Case5: $H_o=4.4\text{m}$, $T=9.3\text{s}$
潮位	DL+0.2m
波向	NW
不規則波成分波数	200成分(BMスペクトル)

図-8 にCase5の波高分布図を、図-9 に岩礁背後のスカラー流速の平均値と最大値を、図-10 にスカラー流速振幅の最大値、1/10最大値、1/3最大値を示す。事故発生岩礁の前面は来襲波浪と反射波が重なって3m以上の波高となった。背後の最大流速は、波高 H_o が2m不足で1m/sに達し、事故時波浪では1.03m/sであった。流速振幅は、 H_o が4mで概ね一定となり最大流速振幅は事故時波浪で0.96m/sであった。岩礁前面は急深であるため、波浪が減衰せずに来襲し、岩礁前面で大きな波高を示すと共に、小さい波高でも流速の最大値は1m/sに及んだと考えられる。また、流速振幅としては概ね波高に合わせて増加しており、波高が高くなると、常時強い流速振幅が発生するようになったと考えられる。海水浴において遊泳者を沖へ漂流させる強い離岸流の流速は一般に1~2m/s程度とされており、岩礁に転落した人を沖まで漂流させるに十分な流速が発生していたと考えられる。

(2) 事故発生原因の検討

これまでの調査結果から事故時の気象・海象状況

をまとめると以下のとおりとなる。

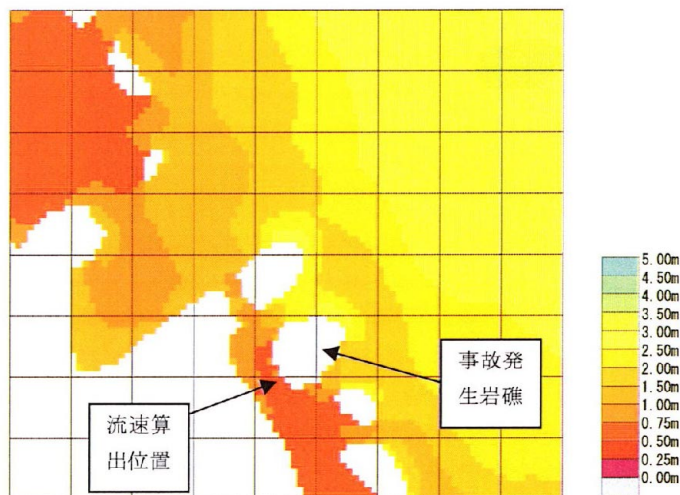


図-8 数値解析による事故時の波高分布

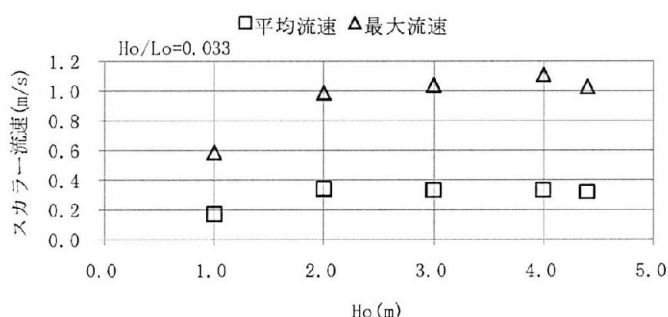


図-9 岩礁背後のスカラー流速

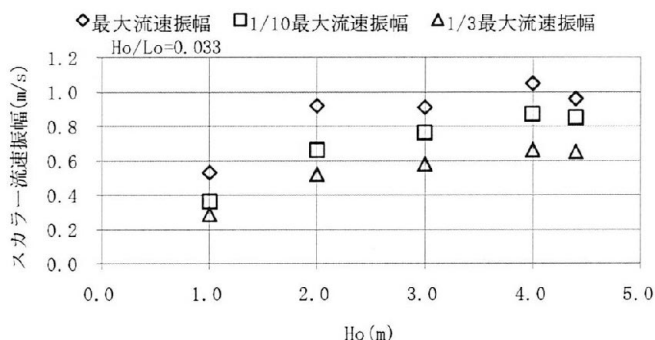


図-10 岩礁背後のスカラー流速振幅

- ①海底地形は岩礁前面が急深となっており、碎波した波浪が強い流れとなって押し寄せる特徴的な地形であった。
- ②強い低気圧がサハリンを横断しており、風速は 10.9m/s、有義波高は 4.4m を示すなど厳しい気象・海象条件であった。
- ③強風、波浪注意報が発令されており、危険性に対して注意が喚起されていた。
- ④岩礁周辺にて激しい越波と岩礁背後で左から右へ回る強い流れが観察された。
- ⑤事故時の岩礁前面の有義波高は 3m 以上、岩礁背後の流速は最大で 1.03m/s、最大流速振幅で 0.96m/s を示し、犠牲者が沖へ漂流するに十分

な流速を示す厳しい海象条件であった。

地元でのヒアリングによると、生存者 3 名は簡易橋を挟んで左側、犠牲者 2 名は右側の岩礁上に立っていたことが明らかになった。岩礁背後では左から右へ強い流れが生じており、生存者は流される途中で簡易橋にしがみつき難を逃れたが、犠牲者はそのまま強い流れで沖へ流され漂流したことが事故の原因と考えられる。

A 海岸では危険性を喚起する看板は設置されているにもかかわらず事故が発生した。このような事故が繰り返されないためには、対策として、海岸毎に限界波高等の何らかの管理基準を設けて、基準以上の気象・海象条件が予想される場合には海岸から退避させることや、危険性を啓蒙する施策が必要と考えられる。

4. 岩礁上の人への作用波力

(1) 実験条件

2 次元造波水路(長さ 24m、幅 0.6m、高さ 1m)に海底勾配 1/30 の水路床及び岩礁模型を設置した。実験縮尺は 1/13、実験パラメータは表-3 のとおり、波浪条件は規則波とした。図-11 に示す岩礁模型上に、実換算身長 182cm の人体模型を設置した。人の位置は A～D の 4 地点とし、人の姿勢は図-12 に示す立位、膝つき、うつぶせの 3 姿勢とした。岩礁模型内に分力計(定格 50N)を設置し、立位では足部、膝つきでは脛部、うつぶせでは腹部を分力計の先端に取り付け、水平方向波力を測定した。以下に実験結果を示すが、値は全て現地換算値とする。

表-3 水理模型実験の実験パラメータ
(現地換算値)

沖波波高 H_o' (m)	1.0、1.3、1.5、1.7
周期 T (s)	6.0、9.0、12.0
岩礁前面傾斜角 β (°)	63
天端高さ h_c (m)	1.56、1.95、2.21
人に対する波の入射角 θ (°)	0、45、90

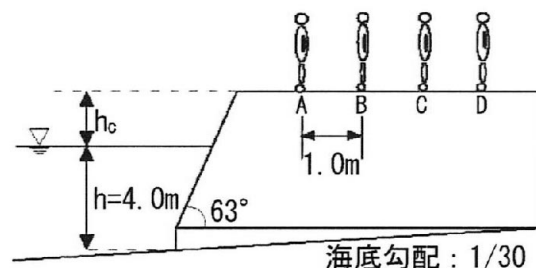


図-11 岩礁模型の諸元



図-12 人の姿勢(左から立位、膝つき、うつぶせ)

(2) 周期の影響

図-13 は $H_o'=1.5\text{m}$ 一定, $h_c=1.56\text{m}$ 一定, $T=6.0\text{s}$, 9.0s , 12.0s とした場合の波形の概略と, 岩礁上の水位を示している. また, 図-14 は位置 B, $h_c=1.56\text{m}$ 一定で波高と周期を変化させた場合の人に作用する波力である. これらによると, 人に作用する波力は周期に大きく依存し, 波高が一定でも周期が長くなると岩礁上での水位や人に作用する波力が大きくなることがわかった.

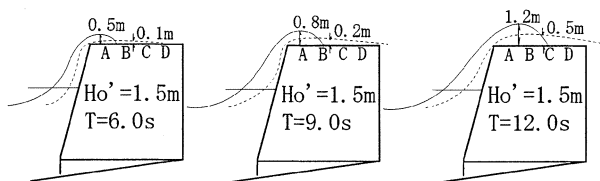


図-13 周期が岩礁上水位に与える影響

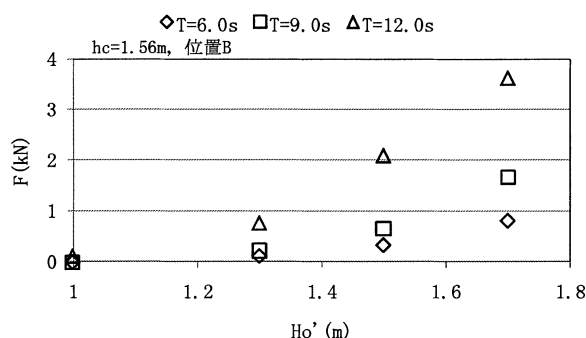


図-14 波高・周期が作用波力に与える影響

(3) 人体条件の影響

図-15 に, $T=9.0\text{s}$ 一定, $h_c=1.56\text{m}$ 一定にて人の立つ位置を変化させた際の作用波力に与える影響を H_o' 毎に示す. 位置については, $H_o'=1.5\text{m}$ までは変化がないが, $H_o'=1.7\text{m}$ と大きくなると沖側の位置ほど作用する波力が大きくなった.

図-16 に, 同条件で人に対する波の入射角と人の姿勢が作用波力に与える影響を示す. 人の姿勢については, 立位に比べてうつぶせや膝つきの場合の波力が大きかった. 水平投影面積を比較すると, うつぶせでは立位の 1.3 倍, 膝つきでは立位の 1.6 倍となることから, その影響が作用波力に現れたものと考えられる. 人の向きについては, 波に対して水平投影面積が大きくなる垂直方向にて波力が大きくなる傾向があった.

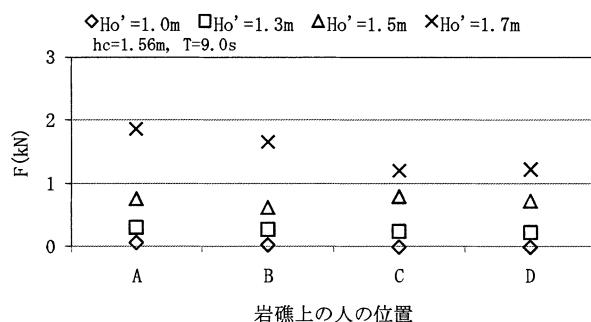


図-15 人の立つ位置が作用波力に与える影響

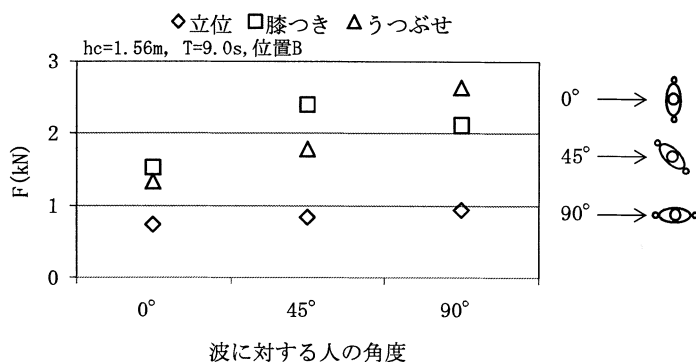


図-16 人の姿勢と向きが作用波力に与える影響

(4) 岩礁天端高の影響

図-17 に, $T=9.0\text{s}$ 一定, 位置 B にて, 波高岩礁天端高比が作用波力に与える影響を示す. いずれの天端高においても波高岩礁天端高比が概ね 0.7 を超えると人に波力が作用し始めた. すなわち, H_o' が岩礁天端高 h_c の 70% を超えると危険が生じると考えられる.

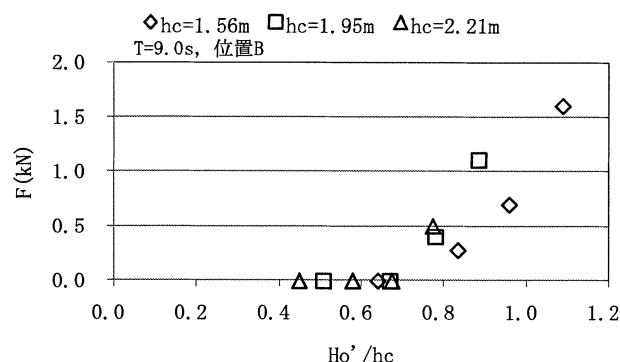


図-17 波高岩礁天端高比 H_o'/h_c が作用波力に与える影響

5. 安全性に配慮した親水施設管理のあり方

(1) 管理基準設定のあり方

当該施設の場合, 水理模型実験の結果, H_o' が岩礁天端高 h_c の 70% を超えると人に波力が作用しはじめ, 危険が生じることがわかった. 波高がさらに大きくなることが予想されるならば入構禁止の措置を執ることが考えられる. ただし, 波浪の周期, 人の立つ位置, 波に対する角度, 及び人の姿勢によって, 作用する波力は大きく変化することに注意が必要である.

すでに整備された親水施設に対しても, 現地地形や来襲する波浪条件を考慮した検討を行い, 安全を確保するための管理基準波高を設定することが望ましい.

(2) 親水施設整備と管理のあり方

これまでの親水施設整備においては, 安全性に関

しては利用者の自主的な判断に期待する部分が多かったように思われる。すなわち「注意報・警報が発令された場合には沿岸に人は立ち入らないことが常識である」という考えが背景にある。しかしながら、犠牲者は海に親しむ機会が少ない内陸からの観光客であった。このように、利用する人々が多様化すると、今回のように気象擾乱期でも立ち入り犠牲となる事例の増加が懸念される。このため現地においては、危険性を周知させかつ安全意識を高めるような情報提供が必要である。

また、今後は親水施設整備の計画段階で、管理基準波高を超える気象擾乱が予測される場合には、注意報・警報が発令されていなくても施設から退避させる管理体制を構築することが望ましい。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめて示す。

(1) 事故原因について

海底地形は急深なので、波浪がさほど減衰せず来襲する地形であった。そこに強い低気圧に起因する高波浪が来襲し、岩礁周辺では激しい越波と岩礁背後で左から右へ回る強い流れが発生した。その海象状況は数値解析結果によると、岩礁前面の有義波高は 3m 以上、岩礁背後の流速は最大で 1.03m/s、最大流速振幅で 0.96m/s を示し、犠牲者が沖へ漂流するに十分な流速を示す厳しい海象条件であった。以上から、犠牲者は高波浪にて海上へ転落し、更には岩礁背後の強い流れで沖へ流され漂流したことが事故の原因と考えられる。

(2) 岩礁上の人への作用波力について

人に作用する波力は波高と同時に周期にも大きく依存し、波高が一定でも周期が長くなると波力は

大きくなった。人の位置については、波高が $H_o' = 1.7\text{m}$ と大きくなると、沖側の位置ほど作用する波力が大きくなった。人の姿勢、向きについては、水平投影面積が大きくなるパターンで波力が大きくなった。また、波高が岩礁天端高の 70%を超えると人に波力が作用し始め、危険が生じると考えられる。

(3) 親水施設管理のあり方について

地形等の条件を再現した水理模型実験等を行って人に波力が作用し始める波高を求める必要がある。これを参考に管理基準波高を設定し、それを超える気象擾乱が予測される場合には注意報・警報が発令されていなくとも強制的に海岸から退避させるような管理体制をとることが望ましい。また現地においては、危険性を周知させかつ安全意識を高めるような情報提供が必要である。

謝辞：本研究における水理模型実験は、室蘭工業大学建設システム工学科卒業生（現国土交通省関東地方整備局）船橋雄大氏により行われたものである。また、数値解析については、(株)アルファ水工コンサルタンツ八木澤一城氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高橋重雄，遠藤仁彦，室善一朗：越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究～親水性港湾構造物に関する水工的研究(第二報)～，港湾技術研究所報告，第 31 巻，第 4 号，pp. 3-29，1992.
- 2) 平山克也，上原功，永松宏一，平石哲也：珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性，海岸工学論文集，第 45 巻，pp. 161-165，1998.
- 3) 中山哲蔵，牧野弘幸，新井雅之，大村智宏，小林学，田村仁，灘岡和夫，佐藤勝弘：港内埋没対策技術と地形変化予測モデルの開発，第 53 巻，pp. 526-530，2006.