汀線付近における常時波浪による人身事故について

Research on Person's Fall Accident near Shoreline with Ordinary Waves

吉野真史¹・丸山和英²・木村克俊³

Masafumi YOSHINO, Kazuhide MARUYAMA and Katsutoshi KIMURA

A person in a shallow beach near shoreline at Moheji Coast in Hokkaido died due to wave that had ordinary height in November, 2008. In order to reproduce the situation of the fall accident in a shallow beach, two-dimensional hydraulic model tests and numerical calculation were carried out to examine the wave force on a human body. The fall limit ratio was newly proposed for estimating the qualitative risk of person's fall accidents, and its applicability was confirmed. Based on these results, possibilities of person's fall accidents with ordinary waves were confirmed, and the safety tide level was shown for some wave conditions. A basic idea of the safety management was also proposed for shallow beach.

1. はじめに

海岸の汀線付近は、海釣りの場、海水浴等レジャーの場、採藻・採貝漁場として幅広く利用されているが、波浪による事故も多く、貴重な人命が数多く失われている。高波浪来襲時には人は沿岸に接近しないが、常時波浪時にはさまざまな目的で海岸を利用する。しかし、厳しい気象擾乱が来襲していない常時波浪時でも人身事故は発生する危険性は少なくないと考えられる。

人の安全性に関して、親水性防波堤については高橋ら(1992)、岩礁上については吉野ら(2009)、傾斜護岸上については吉野ら(2011)の研究があるが、汀線付近の遠浅な海浜やリーフ土地形の水中部における人の安全性に関する研究はこれまでになされていない。本研究においては、汀線付近における近年の人身事故事例を基に、水理模型実験で事故時の海象状況を再現して事故原因を明らかにするとともに、転倒限界条件を確認する。その上で、人の転倒を定量的に評価する手法を提案するとともに、数値波動水路CADMAS-SURF(2001)による数値解析にて転倒限界波力を示す波高、周期、位置等の条件を明らかにし、事故リスクの高い条件を把握する。それらの結果を基に、現地で簡易に計画できる事故抑制手法を提案することを目的とする。

2. 北海道沿岸における沿岸人身事故

(1) 事故の統計

図-1は、主要新聞3紙の道内版の記事検索を行って、

図-1 北海道における原因別沿岸水難死亡事故件数

北海道内の沿岸における水難死亡事故を抽出した結果である。これによると、平成5年～21年に、採藻等漁業従事者の漁業者で33件、海釣り中の遊漁者で98件の死亡事故が発生している。また、死亡に至らない事例を含めると、事故数は相当数になると推察される。

誰もが危険を感じる高波浪時には、沿岸に接近する人はいないだろうが、このように、釣りや採藻等漁業中に事故が発生したということは、常時波浪時においても人が転倒し漂流するリスクがあることを示唆している。

ただし、拾いコンブ漁に代表される採藻等漁業や遊漁は地域の重要な基幹産業となっており、禁止することは現実的ではない。そのため、現地で簡易に計画できる実効的な対策立案が必要である。

(2) 人身事故の事例

平成20年11月2日午前6時頃、北海道北斗市茂辺地海岸にてサケ釣りをしていた男性が波にさらわれて死亡した。現地は遠浅のリーフ地形であり、地元聞き取り結果によると被害者は胴長および救命胴衣を着用して沖合リーフ先端付近でサケ釣りをしていた。現地踏査によるサケ釣りの状況を図-2に、事故位置と現地測量によるリーフの範囲(D.L.-0.5m)を図-3に示す。図-4には近隣の施設で観測された波浪と推算潮位を示す。波高は当初0.5m程度であり、午前4～6時にかけて上昇したものの、 $H_{1/3}=0.87m$ 、

1 正会員	(株)アルファ水工コンサルタンツ統括
グループリーダー
2 学生会員	室蘭工業大学大学院工学研究科
くらし環境系領域
3 正会員 博(工)	室蘭工業大学教授大学院工学研究科
くらし環境系領域

図-2 事故位置におけるサケ釣りの状況
(平成22年10月24日撮影)

図-3 事故発生位置と周辺の海底地形

図-4 事故時の観測波浪および推算潮位

$T_{1/3}=4.2\text{s}$ までにしか至らなかった。加えて同時刻に満潮となり、この際に死亡事故が発生した。なお、事故時には波浪注意報・警報は発令されていなかった。すなわち、比較的穏やかな常時波浪においても人が転倒し、漂流するリスクが存在していると考えられる。

図-5 人体への作用波力および浮力

3. 人の転倒に関する検討

(1) 転倒モデル

水中に立つ人には浮力が作用し重量が低減されるため、陸上と比して波力に対する抵抗力が低下する。ここでは吉野ら(2011)が提案した転倒限界波力 F_{cri} および転倒限界比 F/F_{cri} を基に、人を静的な円柱に模することで転倒を定量的に評価する。

図-5に円柱に模した人への作用波力および浮力を示す。転倒限界波力は式(1)で求められる。

$$F_{cri} = (W_0 - B)l_g / h_g \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 W_0 :人の重量(=人の比重×水の密度×円柱の体積×重力加速度)、 B :浮力、 l_g :転倒支点と円筒中心との距離、 h_g :人の重心の高さである。人への作用波力は、式(2)で求められる。

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_D \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ρ :水の密度、 U :流速、 A :人体の作用面積((水位+水位上昇量)×人体幅0.43m)、 C_D :抗力係数である。ここで、 F/F_{cri} を転倒限界比と定義する。転倒限界比が1を超えると人は転倒すると定量的に判断できる。

(2) 水理模型実験と数値解析

転倒限界比の適用性を確認するため、簡単な水理模型実験と数値解析を行った。図-6に示す縮尺1/12の造波水路にて、表-1に示す条件で水理模型実験を行った。波浪条件は規則波とした。この際、比重を0.85～1.3まで変化した円柱模型を設置し、各条件にて転倒する最小の比重を求めた。さらに同一条件に対して数値解析を行い、円柱位置における最大流速 u_{max} とその際の水位 η_{max} を抽出した。人は転倒限界比 $F/F_{cri}=1$ で転倒するので、この場合式(1)と式(2)は同値となる。両式に u_{max} と η_{max} を代入、展開し、各条件における転倒限界円柱(人体)比重を求め、実験結果と比較したのが図-7である。これによると、多少の上下はあるものの、実験と計算結果はおおむね整合する。以上から、転倒限界比を用いた数値解析で人の転倒を表現することが可能であると判断される。

図-6 実験水路断面形状 (現地換算値)

表-1 実験および計算の条件

水位 h (m)	1.08	1.14	1.20
波高 Ho' (m)	0.17	0.18	0.20
周期 T (s)	4.0

図-7 水深と転倒限界時の比重の関係

4. 人の転倒事故の分析

(1) 水理模型実験による事故時の作用波力確認

図-8に示すように2次元造波水路にて事故位置の海底地形 (図-3に示した横断測線) を縮尺1/9で再現し、人の位置に円筒に接続した分力計を設置して作用波力を計測した。実験条件 (現地換算値) は、事故時を想定して $h=1.13\text{m}$, $Ho'=0.9\text{m}$, $T=4.2\text{s}$ とし、ブレットシュナイダー・光易スペクトルによる不規則波を与えた。リーフ先端から後壁までの距離 $D1$ は現地と同じ27mとし、リーフ先端から波力測定点 (人の立ち位置) の距離 $D2$ を0m, 4.5m, 9.0m, 13.5m, 18.0mとして実験を行い、波力の岸沖方向分布を求めた。波力については1回の実験期間中の最大値を抽出し、その実験における人への作用波力と定義した。実験は10回行い、平均値をその条件の結果とした。

図-9に人に作用する波力の岸沖方向分布を示す。図中には平均値と標準偏差を示している。この結果によると、リーフ先端から4.5m岸側で波力がピークを示している。これは、リーフ先端で大きく変形した波浪が岸側へ伝播直後に碎波したためと考えられる。すなわち、より危険な部位は先端よりはその岸側であり、安全のため先端から岸方向へ移動することが、実際にはより危険度を増す行動であると言える。リーフ先端の波力は0.84kNであった。式 (2) で転倒限界波力 F_{cri} を求めたところ0.3kNとなり、リーフ上の全域で転倒限界波力を超えていたこと

図-8 実験水路断面形状 (現地換算値)

図-9 リーフ先端からの距離 $D2$ と波力の関係

図-10 常時波浪における転倒限界比の経時変化

となる。なお、図には数値解析による波力も示しているが、これについては後述する。

(2) 数値実験の方法

ここでは、数値解析にて複数の条件を設定して人に作用する波力を求め、人の立つ位置、波浪、水位による危険度を評価する。

図-8に示した断面地形をモデリングして数値実験に供した。条件としては、静水位 $h=1.13\text{m}$, 0.83m , 0.68m , 0.53m (胸元、腰、腿、膝の水位を想定)、換算沖波波高 $Ho'=1.2\text{m}$, 0.9m , 0.63m , 0.4m 、有義波周期 $T=4.2\text{s}$, 7.0s , 10.0s とした。波浪はブレットシュナイダー・光易スペクトルによる不規則波 (200波) を与えた。計算結果からリーフ上の各点における鉛直方向平均流速の計算期間中最大値を抽出し、式 (2) に代入して作用波力を求めた。

はじめに、水理模型実験と同条件で数値実験を行い、精度を確認した。その結果は、図-9に示したとおりであるが、波力は概ね一致し、数値実験の精度が確認された。

図-10は $Ho'=0.4\text{m}$, $T=4.2\text{s}$, $h=0.83\text{m}$ における転倒限界比の経時変化である。1波群200波の中で転倒限界比が1を超える事象が3回発生し、常時波浪でも波群中の最高波により人は転倒する危険性があると考えられる。

図-11 水位、D2と波力の関係

(3) 人に作用する波力

図-11は、事故時波浪 $Ho'=0.9m$ 、 $T=4.2s$ を波浪外力とし、水位 h を変化させた数値実験結果である。各水位に対して、岸沖方向位置毎の水位上昇 η とそれに応じた浮力を考慮して転倒限界波力 F_{cri} を求めると、 $h=1.13m$ では浮力が人体の重量を上回り波の有無によらず流出、 $h=0.83m$ で約 $0.1kN$ 、 $h=0.53m$ で約 $0.4kN$ であった。すなわち、 $Ho'=0.9m$ では水位に関わらず転倒したと考えられる。ただし、図から明らかなように、水位が低い干潮時は人体への作用波力は小さいが、満潮時には大きくなり危険性が増すと言え、満潮時を避けることで、転倒・漂流の危険を低下させることができると考えられる。なお、ピーク波力の位置は先端の岸側であり、前述のとおり先端から岸方向への移動は、より危険度を増す行動であると言える。

波高と波力の関係を明らかにするため、水位 $h=0.53m$ 、 $T=4.2s$ に固定し、波高を変化させて波力の変化を検討した。その結果、図-12に示すように、波高が大きいくほど波力は大きくなった。波力の分布としては、波高が大きいと碎波のエネルギーが大きい沖側で波力が強く岸側で弱いものの前述の転倒限界波力約 $0.4kN$ を全域で超えていた。波高 Ho' が $0.9m$ 以下では、沖側と岸側で波力はほぼ一定であり、 $Ho'=0.9m$ では全域で転倒限界波力を超えていたが、 $Ho'=0.63m$ 以下では下回っていた。以上から、波高が小さい場合は、波力分布は岸沖方向で概ね一定であり、一定の波高を超えると沖側だけではなく岸沖方向全域の波力が上昇し、全域で転倒の危険性を持つようになると言える。

周期と波力の関係をより明らかにするため、水位 $h=0.53m$ 、 $Ho'=0.9m$ に固定し、周期を変化させた波力の変化を図-13に示す。周期が長いほど波力は大きくなった。波力の分布としては、周期が長いと先端から岸側に波力のピークが移動しているが、十分岸に接近すると波力は同一となり周期の影響は見えなくなった。以上から、うねり来襲時は波力が増大し、先端から2～3m岸側が危険であると言える。

図-12 波高、D2と波力の関係

図-13 水位、D2と波力の関係

図-14 波高、水位と波力の関係 ($T=4.2s$)

(4) 人の転倒限界

人の転倒を定量的に評価するため、転倒限界比 F/F_{cri} を検討する。図-14に波高、水位と転倒限界比 F/F_{cri} の関係を、図-15に波高、周期と転倒限界比 F/F_{cri} の関係を示す。ここでの波力 F は、リーフ先端から2～6mの平均値とした。

図-14によると、 $h=0.83m$ では $Ho'=0.4m$ でも F/F_{cri} が1を超えるが、 $h=0.68m$ では $Ho'=0.5m$ 程度、 $h=0.53m$ では $Ho'=0.7m$ 程度で F/F_{cri} が1を超えている。水位が高いと波高が小さくとも、作用面積が大きいため波群中の最高波の作用により波力が増大するが、水位が低いと作用面積が小さくなるため、波力は低下している。以上により、水位に応じた転倒限界となる波高が求められたこととなるが、人の転倒に与える寄与度を考えると、波高よりは

図-15 波高、周期と波力の関係 ($h=0.53\text{m}$)

潮位が支配的要素であり、潮位が高い場合は波浪条件によらず避難することが重要であると考えられる。

図-15によると、周期が長いと波力は全般的に大きくなり、 $Ho'=0.4\text{m}$ でも転倒限界波力に至った。すなわち、干潮時で波高が小さくても、うねり性の波浪が来襲した場合は人への作用波力が大きくなり転倒に至ると結論づけられる。

5. 現地への適用と海岸管理の手法について

(1) 管理基準潮位について

北海道茂辺地海岸を想定した数値実験を行い、水位に応じた転倒限界波高を求めるとともに、周期が長いうねり性波浪の危険性について確認できた。ただし、潮位が腰より高い場合や周期が長い場合は $Ho'=0.4\text{m}$ と静穏な状況でも波群中の最高波で人は転倒する可能性が示唆されたこともあり、波高や周期を管理基準とすることには安全上問題がある。また、現地で利用する管理基準は極力簡易である必要があるため、汀線付近の安全管理基準としては潮位をベースとし、図-14に示したとおり茂辺地海岸の場合は、潮位が腰よりも高くなる場合には海域への立ち入りを禁止する措置を執るべきと考えられる。ただし、波浪変形は海底地形に依存するため、この成果を他海岸で適用するには新たに地形をモデル化して同様の検討を行う必要がある。以下にその項目案を示す。

- ①対象海域の数値モデル化
- ②数値実験と転倒限界比を基にした常時波高、周期における転倒限界潮位算出。
- ③海岸から利用者を排除する管理基準潮位の設定。

(2) 周知方法について

釣りについては、危険性を周知する看板等も考えられるが、対症療法に過ぎない。釣り情報誌、釣りテレビ番組等の愛好者が常時視聴する媒体とタイアップし、満潮時の常時波浪の危険性を認識する文化を形成した上でこそ、海岸毎の管理基準潮位周知が効果を発揮すると考える。採藻等漁業については、漁業協同組合が操業を概ね管理していることもあり、潮位を基に操業を自粛するよう傳達するべきであり、スムーズに周知できると考える。

6. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- ①人の転倒を定量的に評価する指標として転倒限界比 F/F_{crit} を提案した。
- ②茂辺地海岸死亡事故発生時にはリーフ全域で波力が転倒限界波力を超えていたことが事故の原因である。
- ③常時波浪においても潮位が高いか、周期が長いと転倒限界比は1を超えて人は転倒すると考えられる。
- ④海岸ごとに管理基準潮位を定め、潮位がそれより高い場合は海域への立ち入りを禁止することが事故防止に有効であると考えられる。

謝辞：函館海上保安部からは、事故に関するデータの提供を受けた。また、数値計算の実施に際しては、株式会社アルファ水工コンサルタンツ橋本孝治博士の協力を得た。ここに記して、謝意を表す。

参 考 文 献

- 高橋重雄, 遠藤仁彦, 室善一郎 (1992): 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)～, 港研報告, 31巻, 4号, pp. 3-29.
- 吉野真史, 上久保勝美, 木村克俊 (2009): 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, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 665-670.
- 吉野真史, 丸山和英, 山本泰司, 上久保勝美, 木村克俊 (2011): 傾斜護岸における高波による人身事故の分析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.67, No.4, 印刷中
- 財団法人沿岸開発技術研究センター (2001): 沿岸開発技術ライブラリーNo.12数値波動水路の研究・開発, 財団法人沿岸開発技術研究センター