二重式浮体式津波避難シェルターの運動特性に関する実験的研究

An Experimental Study for Motion Characteristics of a Floating-Type Evacuation Shelter Covered by a Sphere Shell from Tsunami

重松孝昌¹・中東大輔²

Takaaki SHIGEMATSU and Daisuke NAKAHIGASHI

A float-type evacuation shelter has ever been proposed as one of urgent evacuation facilities by one of the authors. In this study, a new shelter covered by a sphere shell was proposed in order to control rotation of evacuation space for refuge. A series of hydraulic experiment was carried out to understand motion of the outer spherical shell and inner shelter. The outer shell had been kept rotating immediately after tsunami attack. In contrast, the inner shelter rotated once, but reverted back to the initial condition. The possibility of control of rotation velocity of the inner shelter by the weight was implied.

1. はじめに

従来、津波発生時の避難システムは、津波が発生してから襲来するまでの時間に、比較的標高の高い地点に住民を誘導するものが一般的である。しかし、近地で津波が発生した場合には、すべての住民が高所に避難する時間が十分に確保できない可能性や、避難経路が地震による被害を受けて高所への避難が容易ではない等の状況が危惧されている。さらに、避難を行う時間がある程度確保できる場合でも、高齢者や地震による重傷者、土地勘の無い海のレジャー客、水門を閉める作業者等は高所への避難行動を容易に行えない場合もある。また、想定していない規模の津波が来襲した場合には、津波防御施設が破壊され、場合によっては内陸奥部にまで津波が浸水することも起こりえることは、今となっては周知の事実である。このような差し迫った状況下に置かれた人々の生命を救う手段を考えることは、極めて重要な課題のひ

とつである。

本研究は、津波襲来時の危機的な状況に置かれた人々の緊急避難場所として、図-1に示すような浮体式の津波避難シェルターを提案するものである。浮体式津波避難シェルターは上部を避難空間として利用し、下部に浮遊時の安定性を得るための重錘の役割と備蓄の機能を備える空間を想定しており、海水浴場や浸水予想地域の公園などに設置し、高所へ避難する時間的余裕が無い人々に利用していただくことで、津波減災に寄与することを目的としている。既往研究(重松ら, 2008)によって、津波作用時のシェルターの基礎的な運動特性が明らかにされたが、構造諸元によっては津波作用時にシェルターが大きく回転することが課題として指摘されている。

本論文では、シェルターに避難した人々の安全を確保する一案として、避難空間である内殻シェルターと津波流体力から内部を保護する外殻シェルターの二重構造を有する浮体式津波避難シェルターを考案し、水理実験によって、内殻シェルターの運動特性、および、外殻シェルターに作用する波力と津波諸元との関係について検討することを目的とする。

図-1 浮体式津波避難シェルターの概念図

図-2 実験概要

1 正会員 博(工) 大阪市立大学教授大学院工学研究科 任
2 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科

図-3 造波方法

図-4 シェルター模型の概要

表-1 実験ケース

Model No.	総質量 M[kg]	吃水 H[m]	H/Do
1	0.334	0.042	0.280
2	0.408	0.047	0.313
3	0.482	0.051	0.340

写真-1 シェルター模型

2. 実験概要および実験条件

(1) 実験水槽

実験は、図-2に示すような長さ100m、幅3.0m、深さ3.0mの二次元造波水槽を用いて行った。水槽には、造波機から約30m離れた位置から勾配1/30の様な斜面が設けられており、水平床部における水深 h を1.5mと一定にして実験を行った。造波機をPCによって制御し、中立位置から100秒かけて所定量 L_w だけ沖側に引いた後、時間 t_s で中立位置よりも L_w だけ岸側に押し出すことによって造波した（図-3参照）。なお、本研究では、 $L_w = 399\text{mm}$ 、 $t_s = 2\text{s}$ および 4s とした。

(2) シェルターの諸元

厚さ2.5mmのプラスチックで作成された外径が $D_i = 0.10\text{m}$ 及び $D_o = 0.15\text{m}$ の二球体を用い、前者を内殻シェルター、後者を外殻シェルターとする二重式津波避難シェルターの模型を作製した。内殻シェルターの内部に円盤状の鉛板をシリコンで固定することによって、その重心が低くなるようにするとともに、その外部には真鍮製のベアリングを3カ所取り付け付けた。このようにして作製した内殻シェルターを外殻シェルターによって被覆することによって、両シェルターの運動が異なる二重式津波避難シェルターの模型とした。模型概念図を図-4に、実験で用いた模型を写真-1に示す。外殻シェルターの質量は $M_o = 0.209\text{kg}$ であった。内殻シェルターの質量 M_i を鉛板の質量を変えることによって変化させ、その結果として二重式津波避難シェルターの総質量 M を変化させた。実験に用いたシェルターの総質量およびそれぞれの場合の吃水 H を表-1に示す。

(3) 計測項目および計測装置

水平床部に容量式波高計（株）ケネック）を、汀線上方に超音波式水位計（（株）キーエンス）をそれぞれ1

図-5 水平床における波形

台設置し、サンプリング周波数100Hzで、水平床部および汀線における水位変動を計測した。また、汀線においては底面設置式電磁流速計（（株）ケネック）を用いて、流速の経時変化を1000Hzで計測した。

シェルターの模型を汀線に設置して孤立波を作用させ、波が作用したときのシェルターの運動を、水槽側面の観察室（ガラス壁面）から3台の高速度ビデオカメラ（（株）フォトロン）を用いて、シャッタースピード1/1000s、撮影間隔125fpsで撮影した。撮影にあたっては、水槽上部から2台のメタルハライドランプ（250W）を用いた。予め、内殻シェルター及び外殻シェルターに縞模様をつけておき、縞模様の傾きからそれぞれのシェルターの回転量を解析できるように工夫した。実験は同条件の下で3回ずつ行い、得られた画像から内殻・外殻シェルターの斜面に沿った並進速度 u_s および並進加速度 a_s 、回転角 θ 、回転角速度 ω 、回転角加速度 α をそれぞれ求めた。

外殻シェルター外壁面には、底面から6cmの位置に波圧計（株式会社エス・エス・ケイ）を設置し、外殻シェルターに孤立波が作用した際の波圧を、1000Hzで計測

図-6 汀線における水位の経時変化

図-7 汀線における流速の経時変化

図-8 孤立波作用時のシェルターの運動 ($t_s = 2s$)

した。

3. 実験結果

(1) 作用波

図-5は、水平床上における波形を示したものである。 $t_s = 2s$ で造波した波は孤立波として形成されていることが分かる。一方、 $t_s = 4s$ で造波した波は双頭型の波形を示し、 $t_s = 2s$ で造波した場合よりも波高が小さくなっていることが分かる。

図-6は、超音波水位計で計測された汀線上における水位の経時変化を示したものである。図中の $t = 0$ は汀線において水位が上昇を始めた時刻を原点としている。汀線における水位は、波の到達とともに急激に上昇し、概ね一定の水位で最大水位を示すが、その後、緩やかに水位が低下する傾向が見られた。また、最大水位は、 $t_s = 2s$

の孤立波のほうが $t_s = 4s$ で造波した波の場合よりもやや大きい傾向が見られた。

(2) 汀線流速

図-7は、初期汀線位置における流速を、岸側方向を正として表したものである。波の到達後に、流速は急激に大きくなり、最大値を示した後は緩やかに減少する。 $t_s = 2s$ で造波した場合のほうが最大流速は大きい。また、概ね $t = 5s$ 後には流速が負の方向を示し、引き波が生じていることがわかる。

(3) シェルターの運動特性

図-8は、質量の異なる各シェルター模型に $t_s = 2s$ の孤立波を作用させた直後の初期運動を、汀線側に設置した2台の高速度ビデオカメラで撮影したものである。いずれの質量のシェルター模型も、波が作用すると岸側へ移動を開始し、同時に内殻・外殻シェルター共に岸向きの

図-9 シェルターの並進速度

図-10 シェルターの並進加速度

(a) $H/Do = 0.280$ (b) $H/Do = 0.313$ (c) $H/Do = 0.340$

図-11 内殻・外殻シェルターの回転角の変化

回転を始める。その後、外殻シェルターは同方向へ回転し続けるのに対し、内殻シェルターには復元力が作用して元の状態に戻ろうと回転方向が反転する様子がわかる。そして、内殻シェルターは小さな振動を繰り返した後初期の状態に戻ることを、岸側に設置した高速度ビデオカメラによって確認している。なお、シェルターは着底後、引き波になっても沖側に流されることはなかった。これは、引き波の時には水深が吃水よりも低いためである。

a) 外殻シェルターの並進速度・並進加速度

図-9は、波が作用した直後の外殻シェルターの並進速度 u_s の経時変化を表している。同図より、波が作用した直後の u_s は吃水が小さいものほど急激に増加し、時間の経過と共にそれぞれほぼ一定の速度に漸近することがわかる。また、図-10より、シェルターに働く並進加速度は、運動開始直後に最大値を示し、時間の経過と共に小さくなることわかる。

b) シェルターの回転角及び回転角速度

図-11は、外殻シェルターおよび内殻シェルターの回転角度の経時変化を、初期状態から岸向きへの回転を正として示したものである。同図(a)~(c)を比較すると、外殻シェルターは H/Do が大きいほど、波作用直後から大きく回転の様子が見られた。これは、吃水の小さいシェルターは水深の増加とともに素早く浮上するので、外殻シェルターに作用するモーメントが小さいのに対し

て、吃水が大きい場合には、波作用後に浮上するまでに時間を要し、その結果、外殻シェルターに作用するモーメントが大きくなり、岸向に回転しやすくなるためであると考えられる。一方、内殻シェルターは、吃水の大きさに問わず概ね同様の回転特性を示すことが確認できる。すなわち、内殻シェルターの回転は外殻シェルターの回転に誘起されるものではなく、波による流体力を受けてシェルターが急激に移動することで生じる慣性力の影響によるものと考えられる。

図-12は、図-11における内殻シェルターの回転角度の経時変化を質量ごとに並べたものである。同図によると、

図-12 内殻シェルターの回転角変化

図-13 内殻シェルターの回転角速度

どの質量においても回転角の最大値はほぼ一定値をとることがわかる。図-13に示すように、内殻シェルターの初期の回転角速度は、吃水が大きいほど緩やかに増加する傾向を示している。これは、図-10において吃水が大きいほど初期の並進加速度が小さくなることに対応していると考えられ、このことは質量を変化させることで、内殻シェルターの回転に対する安全性について制御できる可能性を示唆していると考えられる。

(4) 外殻シェルターへの作用波圧

作用波圧は $t_s = 2s$ および $4s$ の孤立波を作用させた際の、シェルターの底面から6cmの位置のものを計測した。図-14は作用波圧の最大値と吃水の関係について表したものである。同図によると波圧は各ケースともばらつき

図-14 外殻シェルターへの作用波圧

が大きい、訂線の波高が高くなる $t_s = 2s$ のほうが大きい値を示す傾向がある。

4. 結論

本研究では、二重構造の浮体式津波避難シェルターを考え、水理実験により本シェルターの運動特性について検討した。波が作用すると、シェルター模型は岸側へ移動を始め、やがて着底に至る。その間、外殻シェルターは岸向きに回転を続ける。一方、内殻シェルターは、波作用直後には岸向きに回転するが、時間の経過と共に復元力が作用して元の状態に戻るということがわかった。また、外殻シェルターの並進速度は吃水が小さいほど波作用直後に急激に増加し、その結果、並進加速度も大きくなる。さらに、質量が小さいほど内殻シェルターの回転角速度が急激に増加する傾向が見られたが、内殻シェルターの最大回転角は質量によらずほぼ一定値であった。以上のことから、内殻シェルターの質量を変化させることで、回転速度を制御できる可能性が示唆された。

参考文献

- 重松孝昌・明智顕三・小池敏也（2008）：浮体式津波避難シェルターの開発に関する基礎的実験，海洋開発論文集，第24巻，pp.105-110。