浮体式津波避難シェルターの開発に関する基礎的実験

FUNDAMENTAL EXPERIMENT FOR DEVELOPMENT OF FLOATING-TYPE EVACUATION SHELTER FROM TSUNAMI

重松孝昌[1]・明知顕三[2]・小池敏也[3]
Takaaki SHIGEMASTU, Kenzo AKECHI and Toshiya KOIKE

[1] 正会員　工博　大阪市立大学大学院工学研究科　准教授（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）
[2] 国土交通省近畿地方建設局木津川上流河川事務所（〒518-0723 三重県名張市木屋町 812-1）
[3] 大阪市立大学　大学運営本部研究支援課（〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138）

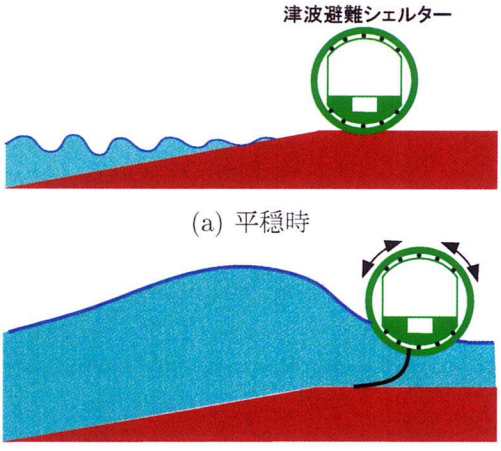
As an urgent and temporal evacuation facility from tsunami, floating-type evacuation shelter is proposed in this study. In order to understand incipient motion of the floating-type evacuation shelter after tsuami atacks, hydraulic experiment was carried out. In the experiments, On the basis of experimental results, the relationship incipient motion of floating-type shelter and wave property is presented.

Key Words: *Tsunami, floating structure, evacuation shelter*

1. はじめに

津波に対する避難システムは，津波発生の有無の検討，津波来襲時刻・規模の予測，避難警報システムによる避難誘導，等の過程を経て行われる．現在の避難システムの多くは，津波の発生から津波が来襲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よう想定されている．しかし，近地津波発生時には避難に要する時間が十分に確保できない，また，地震によって避難経路が被害を受けて容易に高所へ避難できない等の場合があると危惧されている．また，高齢者などの災害時要支援者を短時間で安全な場所へ避難・誘導は極めて重要な検討課題であると言える．

そこで，本研究は，このような津波防災・減災システムの課題を克服するひとつの手段として，緊急かつ一時的な避難施設として**図–1** に示すような浮体式津波避難シェルターを提案・開発しようとするものである．浮体式津波避難シェルターは，上部は避難空間として利用し，下部は安定性を得るために重錘の役割と備蓄などの機能を備えるための空間とからなることを想定している．また，津波流体力を受けて浮遊するため，陸域への移動や沖側への流出を抑制するために，係留することを想定している．同図に示すような浮体式の避難シェルターを，海水浴場や河川敷遊技場，津波浸水予想地域内の避難場所空白区の公園等に設置し，避難する時間的余裕の無い人々に利用していただくことによって津波減災に寄与することを目的としている．

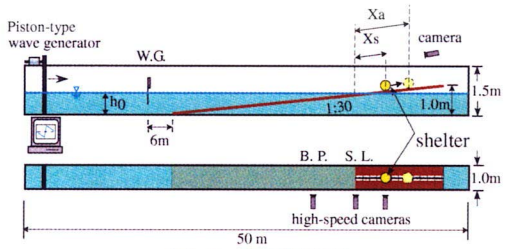


(a) 平穏時

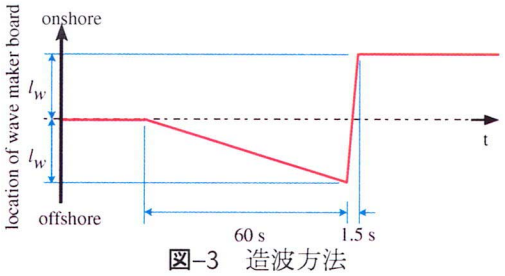
(b) 津波来襲時

図–1　津波避難シェルター概念図

本論文は，その基礎的段階として浮体式津波避難シェルターに津波外力が作用したときの初期運動特性を水理実験によって明らかにしようとするものである．た



図–2　実験概要



図–3　造波方法

だし，本論文では係留施設については考慮していない．

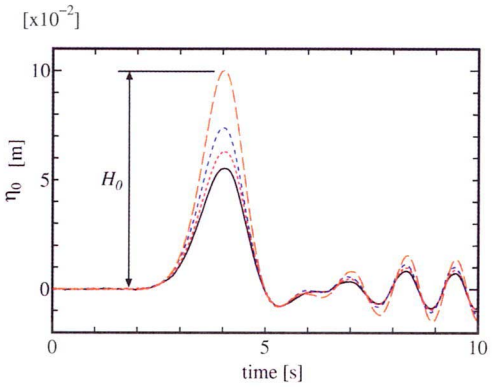
2.　実験概要および実験条件

(1)　実験水槽

実験は，**図–2** に示すような長さ 50m，幅 1m，高さ 1.8m の片面ガラス張り二次元造波水槽を用いて行った．水槽には，造波機から約 10m 離れた位置から勾配 1/30 の一様な斜面が設けられている．水深 h は 0.8m と一定とした．造波機は電動モーター式のピストン型の造波機で，これを中立の位置から 60 秒かけて所定量 (L_w) だけ沖側へ引いた後，1.5 秒間で中立の位置よりも岸側に L_w だけ押し出すことによって造波した (**図–3** 参照)．水平床部を伝播する発生波は，斜面法先から 6m 沖側に設置した容量式波高計によって計測した．**図–4** はストローク L_w を 4 種類に変化させて造波したときの水面変動量を，前述の波高計によって計測した結果を示したものである．波形記録には，静水状態から水面が隆起して最大値を示した後に静水面よりも低下し，その後は振幅の小さな波が観測されている．それぞれの波の振幅は異なるものの，変動の周期は全く同じであることが確認できる．本研究では，静水面と最高水面の高さの差を沖における波高 H_0 と定義することにする．このような要領で造波した波の水平床における波高 (以後，沖波高と称す) は，大凡，$H_0 = 0.057$，0.065，0.075，0.112m の 4 種類であった．

(2)　浸水深，遡上距離の計測方法

前述の要領で発生させた波は，斜面上で砕波した後，初期汀線を超えて遡上する．砕波帯及び汀線における水面変動を，高速度ビデオカメラを用いて 125fps で撮影し，得られた画像から砕波波高・砕波水深，および汀



図–4　水平床上における波形記録

線位置における浸水深の経時変化を求めた．また，波の遡上距離 X_u は，予めスケールを斜面上に貼り付けておき，波の遡上状況を市販のビデオカメラで撮影し，画像から読み取ることによって求めた．

(3)　シェルターの諸元

シェルターの模型は，プラスチック製の球体中に鉛板をシリコンで固定することによって作成した．**表–1** に示すように，シェルター径 D および質量 W あるいは吃水 H を変化させて実験を行った．

表–1　シェルター模型の諸元

Model No.	シェルター径 D [m]	質量 W [kg]	吃水 H [m]	H/D
1	0.035	0.0144	0.021	0.594
2	0.075	0.0591	0.026	0.344
3	0.075	0.1220	0.041	0.543
4	0.075	0.1852	0.057	0.759
5	0.120	0.4989	0.065	0.543

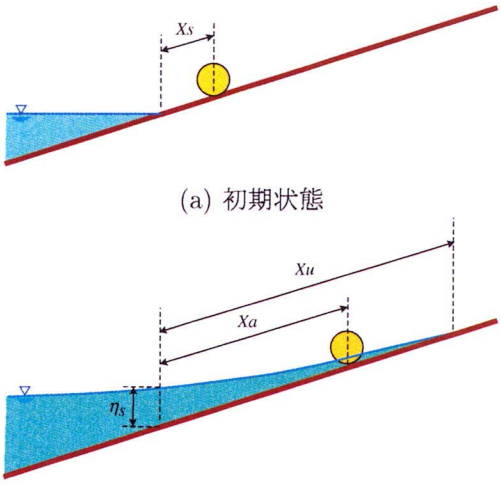
(4)　シェルターの運動解析

予め汀線から X_s だけ離して設置したシェルターの模型は，波の遡上とともに斜面上を移動する．このときのシェルターの初期運動を，水槽側面から高速度ビデオカメラを用いて 250fps で撮影した．得られた画像から，並進速度，並進加速度，回転角速度，回転角加速度を求めた．また，シェルターの着底位置 X_a を計測し，シェルターの初期位置 X_s および沖波高 H_0 がシェルターの運動諸元および着底位置に及ぼす影響について検討した．尚，シェルターの着底位置については実験を 3 回行ってその平均値を持って計測値とした．

3.　実験結果

(1)　汀線における浸水深 (η_S)

シェルターの初期運動は，遡上域の流体運動と密接な関係があると推察される．汀線における流体運動の



(a) 初期状態

(b) 着底位置 X_a と最大遡上距離 X_u

図–5　シェルターの初期位置と着底位置

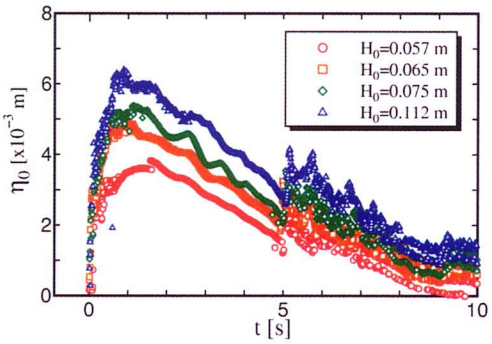
詳細を計測することは困難であるので，ここでは，汀線における浸水深を計測し，後述するシェルターの初期運動との関連性について検討することとする．汀線における浸水深 η_S は，高速ビデオカメラを用いて125fpsで撮影した画像を用いて計測した．すなわち，汀線位置において流体を表す輝度値が高いピクセルのうち，最も高い位置にあるものを水面と判断した．ただし，明らかに飛沫と判断されるものは削除した．このようにして求めた η_S の経時変化を，**図–6** に示す．図中の時間 t は，汀線において水位が上昇し始めた時を原点としている．同図によれば，いずれの沖波高 H_0 の場合においても，汀線において水位は急激に上昇してその後，やや大きな振動を伴って ($H_0 = 0.057$m の場合には明瞭な変動は見られない) 緩やかに減少し，およそ $t = 5$ 秒以後は激しい変動を伴いながら減少する傾向を示すことがわかる．撮影画像と比較してみれば，$t = 5$ 秒以降は引き波によるものであることがわかった．

いま，汀線位置における浸水深の最大値を $\eta_{S\max}$ と表すことにすれば，$H_0 = 0.057$m の場合には $\eta_{S\max} = 0.038$m，$H_0 = 0.065$m の場合には $\eta_{S\max} = 0.049$m，$H_0 = 0.075$m の場合には $\eta_{S\max} = 0.054$m，$H_0 = 0.112$m の場合には $\eta_{S\max} = 0.064$m であり，$0.571 \leq \eta_{S\max}/H_0 \leq 0.754$ であった．

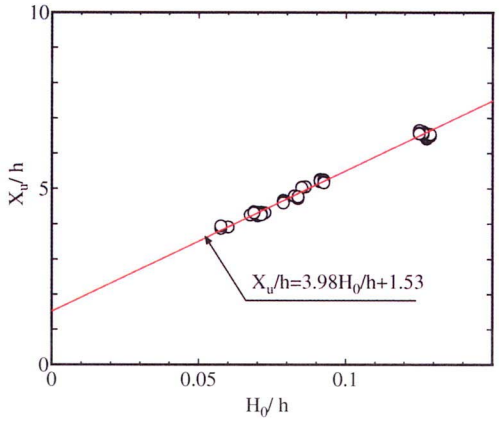
(2)　遡上距離

図–7 は，孤立波の斜面遡上距離 X_u と沖波高 H_0 との関係を示したものである．本実験条件の下では，両者には極めて高い線形関係があることがわかる．

Archetti and Brocchini (2002) は，海浜における波の遡上の時系列と水深積分されたスワッシュゾーン内の運動量フラックスとの間に強い相関があることを示している．すなわち，波の遡上距離は，斜面に到達するまでの波が持っている運動量フラックスを水深積分したものの最大値と比例関係にあることを示唆してい



図–6　汀線における浸水深の経時変化



図–7　遡上距離

る．そこで，Hughes (2004) は，波が最大限に遡上した瞬間には，**図–8** に斜線で示した領域内の流体はほとんど静止していると仮定し，斜線領域 ABC 内の流体の重量 $W_{(\mathrm{ABC})}$ と一定水深部における水深積分された運動量フラックスの最大値 $(M_F)_{\max}$ との間に次式の関係が成り立つと仮定した．

$$K_P(M_F)_{\max} = K_M W_{(\mathrm{ABC})} \tag{1}$$

ここに，K_M は未知の比例定数，K_P は斜面の空隙率に関する減衰率で不透過斜面の場合は $K_P = 1$ である．$W_{(\mathrm{ABC})}$ は幾何学的に次式によって求められる．

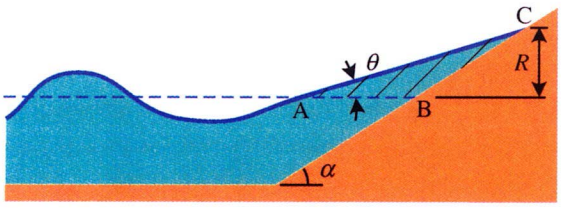
$$W_{(\mathrm{ABC})} = \frac{\rho g}{2}\frac{R^2}{\tan\alpha}\left[\frac{\tan\alpha}{\tan\theta} - 1\right] \tag{2}$$

ここに，R は静水面からの最大遡上高さ L, α は斜面勾配, θ は静水面と遡上水面とのなす角度を表す．遡上水面は，直線で表されると仮定している．式 (2) を式 (1) に代入し，両辺を h^2 で除することによって，次式が導かれる．

$$\frac{R}{h} = \left(\frac{2K_p\tan\alpha}{K_M\left[\tan\alpha/\tan\theta - 1\right]}\right)^{1/2}\left[\frac{M_F}{\rho g h^2}\right]^{1/2} \tag{3}$$

さらに，簡潔に表記すれば

$$\frac{R}{h} = CF(\alpha)\left[\frac{M_F}{\rho g h^2}\right]^{1/2} \tag{4}$$



図–8　滑らかな斜面上における最大遡上高さ

となる．ここに，C は未知定数，$F(\alpha)$ は斜面勾配に関する関数であり，実験的に決定する必要がある．なお，便宜上，波の運動量フラックスの最大値を表す添え字“max”は省略して記載している．

一方，Hughes(2004) は，一次の孤立波理論を用いて，運動量フラックスを次式のように誘導している．

$$\left(\frac{M_F}{\rho g h^2}\right)_{\max} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{H_0}{h}\right)^2 + 2\left(\frac{H_0}{h}\right)\right] + \frac{N^2}{2M}\left(\frac{H_0}{h}+1\right)\left\{\tan\left[\frac{M}{2}\left(\frac{H_0}{h}+1\right)\right] + \frac{1}{3}\tan^3\left[\frac{M}{2}\left(\frac{H_0}{h}+1\right)\right]\right\} \quad (5)$$

ここに，ρ は流体の密度，g は重力加速度，h は水平床部における水深を表し，M および N は実験的に求められた係数を含む形で次式で与えられる．

$$M = 0.98\left\{\tanh\left[2.24\left(\frac{H_0}{h}\right)\right]\right\}^{0.44} \quad (6)$$

$$N = 0.69\tanh\left[2.38\left(\frac{H_0}{h}\right)\right] \quad (7)$$

式 (5) からわかるように，孤立波に関する水深積分された運動量フラックスの最大値は，相対波高 H_0/h のみによって表される関数である．式 (5) の第 1 項は圧力の，また，第 2 項は水平流速の寄与を表している．

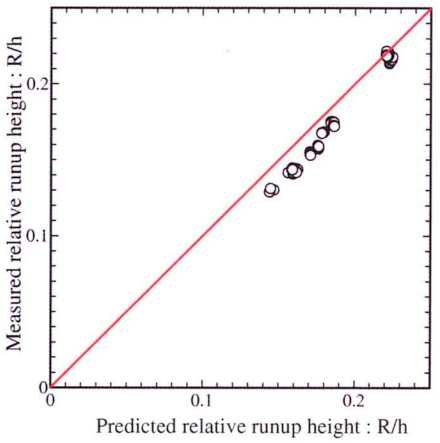
Hall and Watts (1953), Li (2000) and Briggs et al.(1995) は，それぞれ，斜面勾配 $\cot\alpha$ =11.43, 15.0, 30.0 を有する斜面上の孤立波の最大遡上高さ R を実験によって計測している．Hughes(2004) は，これらの実験結果を用いて，式 (4) 中の実験係数を決定し，斜面上で砕波を伴う孤立波の遡上高さの予測式を次式のように導いている．

$$\frac{R}{h} = (1.39 - 0.027\cot\alpha)\left[\frac{M_F}{\rho g h^2}\right]^{1/2} \quad (8)$$

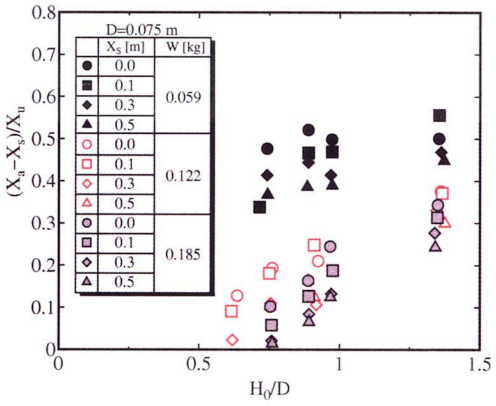
図–9 は，式 (8) による遡上高さの予測値と本実験による実測値との比較を示したものである．**図–9** によれば，予測値はやや実測値を過大評価する傾向があるものの，大凡，実験値を推定できることがわかる．

(3)　シェルターの移動距離

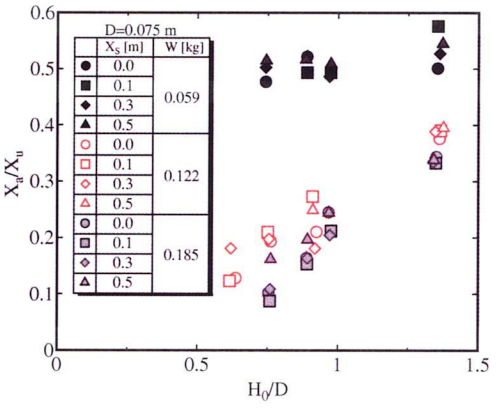
本実験条件の下では，シェルター模型は波の遡上とともに斜面上を岸側へと移動して着底し，引き波になっても沖側へと移動することはなく汀線を越えて漂流することはなかった．**図–10** は，シェルターの移動距離 $X_a - Xs$ と沖波高 H_0 との関係を示したものである．いずれのケースも，大凡，シェルターの初期位置 X_s が汀線に近いほど，移動距離が大きいことがわかる．



図–9　遡上高さの予測値と実測値との関係



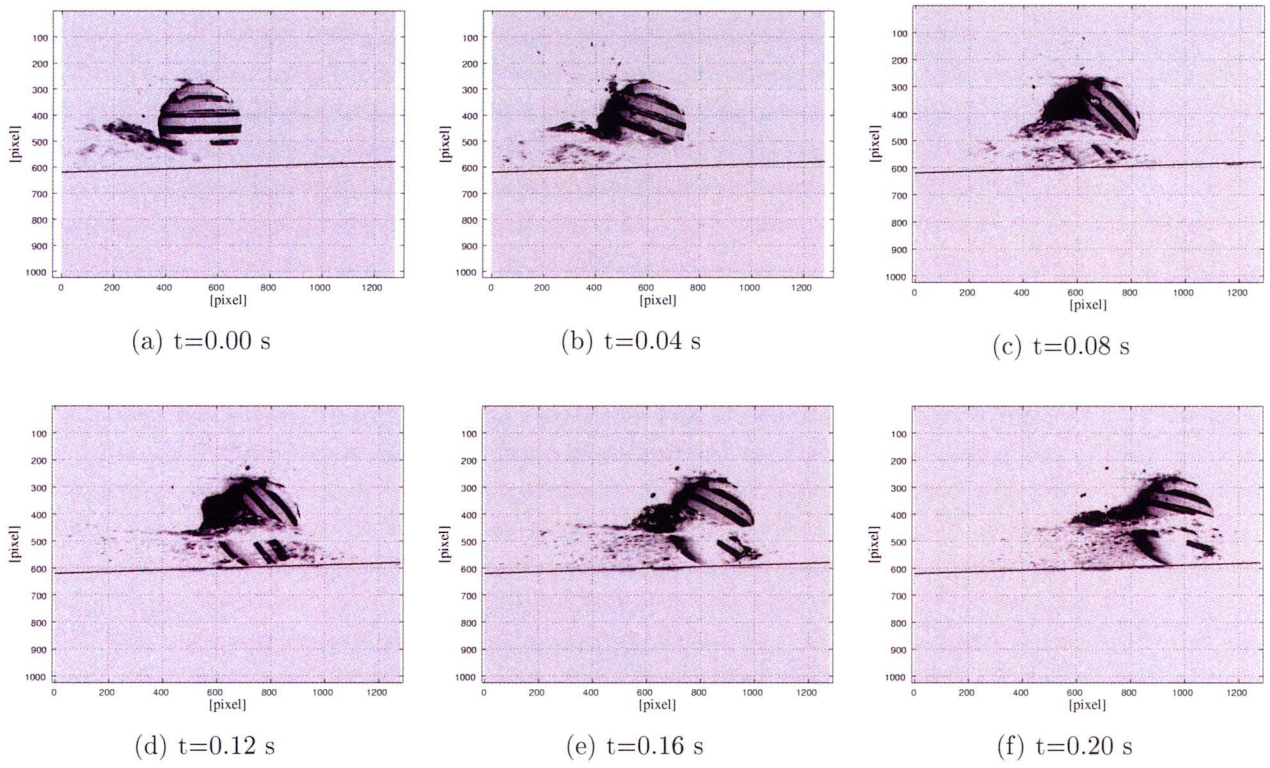
図–10　シェルターの移動距離



図–11　シェルターの着底位置

(4)　シェルターの着底位置

図–11 は，シェルターの着底位置 X_a と沖波高 H_0 との関係を，それぞれ最大遡上距離およびシェルター径で無次元化して示したものである．孤立波の斜面遡上距離 X_u と沖波高 H_0 との関係を示したものである．ば



(a) t=0.00 s　(b) t=0.04 s　(c) t=0.08 s

(d) t=0.12 s　(e) t=0.16 s　(f) t=0.20 s

図–12　波作用時のシェルターの運動 ($D = 0.075$m, $H/D = 0.543$, $H_0 = 0.057$m, $X_s = 0$m)

らつきは見られるものの，本実験条件の下では，両者には極めて高い線形関係があることがわかる．

(5)　シェルターの運動特性

図–12 は，汀線に置かれた $D = 0.075$m, $H/D = 0.543$ のシェルターに，$H_0 = 0.057$m の波が作用した直後のシェルター模型の初期運動を高速度ビデオカメラで 250fps で撮影したものである．波が作用すると，シェルターは回転しながら斜面上を岸側へと移動することがわかる．これは，**図–12** において球状シェルターの左側から徐々に浸水深が増加してくるために，浮力のアンバランスが生じ，その結果，シェルターを時計方向に回転させることになるとともに，浸水深の増加に伴って並進運動が始まるためであると考えられる．浮力のアンバランスは，シェルターの質量が大きいほど大きくなり，その結果，シェルターの回転量も大きくなることが一連の実験結果より明らかになっている．また，シェルターは常に水底と接しており，水底から大きく離れることなく移動している様子が見て取れる．このことは，斜面上のシェルターの運動過程にはシェルター模型の吃水が影響を及ぼしていることを示唆している．

(6)　シェルターの着底位置と吃水との関係

図–13 は，汀線からシェルターの着定位置までの距離 X_a と吃水 H との関係を示したものである．同図によれば，吃水が大きくなるとともにシェルターの着定位置は汀線に近くなることがわかる．また，同じ吃水であれば，沖波高 H_0 が大きいほど，シェルターの着定位置は汀線から遠ざかることも明らかである．**図–14** は，着底位置 X_a を波の最大遡上距離 X_u で，また，吃水 H を沖波高 H_0 で無次元化して示したものである．図中の曲線は，最小自乗法で求めた近似曲線で，

$$X_a/X_u = \exp[-2.74(H/H_0) + 0.29] \qquad (9)$$

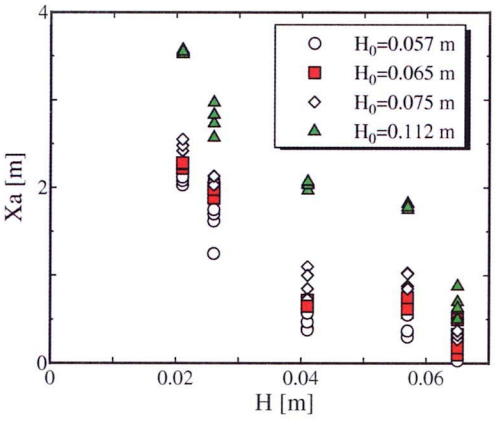
で表される．ばらつきはあるものの，両者の関係は，概ね，上式で求めることができる．

(7)　シェルターの並進速度

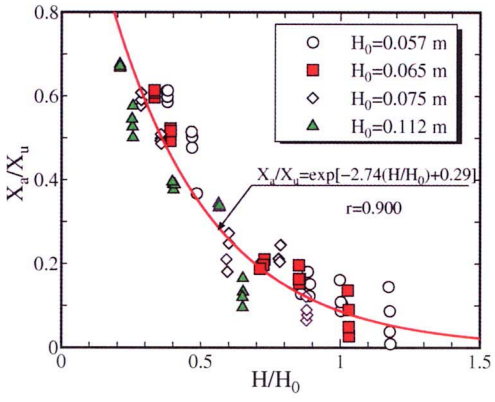
図–15 は，沖波高 $H_0 = 0.075$m の場合に，$D = 0.075$cm, $W = 0.059$kg のシェルター模型が流体力を受けて運動し始めたときの並進速度 u_s の経時変化を示したものである．同図より，u_s は，波作用直後に急激に増加し，初期位置 X_s が汀線に近い場合 ($X_s = 0.0$m および 0.1m) の場合には極大値を示した後にある速度に漸近するが，X_s が比較的汀線から離れている場合 ($X_s = 0.3$m および 0.5m) の場合には比較的緩やかに増加し，最終的にはほぼ同じ速度に達することがわかる．すなわち，シェルターの初期運動の機動力となる流体力は，シェルターを汀線近傍に設置した場合ほど大きくなる．

4.　結論

本研究で得られた結論を要約すると，以下のようである．

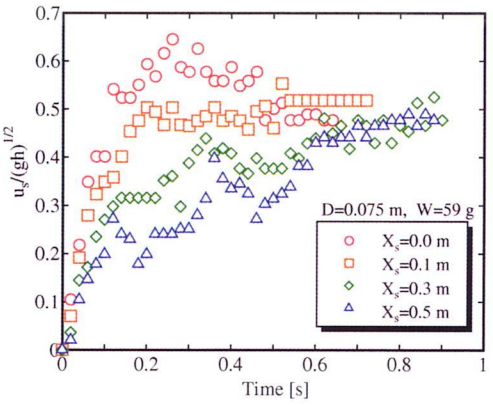


図–13　着底位置と吃水との関係



図–14　着底位置と吃水との関係

(1) 本実験条件の下では，シェルターは波作用力によって岸側へ輸送されて着底するだけで，汀線より沖側へと流されることはなかった．
(2) 波が作用するとシェルターは斜面上を移動するが，水底から大きく離れることはない．
(3) シェルター諸元が同じであれば，汀線からシェルターの着底位置までの距離は，来襲波高に依存してその増加とともに線形的に増加するものの，シェルターの初期位置に依存しない．すなわち，初期位置が汀線に使いほどシェルターの移動距離は長くなる．
(4) シェルター径が同じであれば，質量が小さいものほど汀線から着底位置までの距離は遠くなる．このことは吃水と着定位置とが密接に関係していることを示唆している．シェルターの吃水と着底位置との相関関係は，指数関数を用いて表すことができることが分かった．
(5) 一様斜面上の孤立波の遡上高さは，Hughes(2004)によって提案された予測式で概ね予測できることが確



図–15　シェルターの並進速度 ($H_0 = 0.075$m)

認された．本予測式と本研究で得られた知見に基づけば，シェルターの大凡の着定位置は推定することが可能である．
(5) シェルターは流体力を受けて運動するが，汀線に近いほど急激に並進速度が上昇し，また，大きく回転する．シェルター内に避難した人々の安全性を考えれば，シェルターの初期運動を考慮して設置位置を選定するとともに，構造的に急激な運動を抑制するような対策が必要であると考えられる．

謝辞：本研究の一部は，大阪市立大学新産業創生研究の補助を受けて遂行された．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1) Archetti, and R. and Brocchini, M.(2002) : An integral swash zone model with friciton: an experimental and numerical investigation, Coastal Engineering, Vol. 45, pp. 89-110.
2) Hughes, S.A.,(2004) : Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, Coastal Engineering, Vol. 51, pp.1085-1104.
3) Hall, and J.V., Jr., and Watts, G.M.(1953) : Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes, Technical Memorandum, No. 33, Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers, Wahington, DC.
4) Li, Y.(2000) : Tsunamis: non-breaking and breaking solitary wave run-up, Report No. KH-R-60, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.