

津波の遠心力場における実験手法の開発と ケーソン式防波堤への適用

DEVELOPMENT OF CENTRIFUGE MODELLING FOR TSUNAMI AND
ITS APPLICATION TO STABILITY OF A CAISSON TYPE BREAKWATER

三宅達夫¹・角田紘子²・前田健一³・坂井宏隆⁴・今瀬達也⁵

Michio MIYAKE, Hiroko SUMIDA, Kenichi MAEDA, Hirotaka SAKAI and Tatsuya IMASE,

¹正会員 工博 東洋建設(株) 総合技術研究所 所長 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

²東洋建設(株) 総合技術研究所 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

³正会員 博(工) 名古屋工業大学准教授 都市社会工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

⁴学生会員 修(工) 名古屋工業大学 都市社会工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

⁵学生会員 名古屋工業大学 都市社会工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

A lot of studies concerning the estimation of the wave force have been performed to evaluate the stability of the structures for the tsunami. However, there has been scarcely the study concerning the stability of the structure including behavior of the foundation ground due to the tsunami. This paper describes about the deformation behavior of a caisson and response of the pore water pressure in the foundation ground to evaluate the stability of a caisson type breakwater subjected to tsunami. The model tests were performed in a centrifuge where scaling law was satisfied with respect to soil, wave and structure interaction. The device used in a series of tests is a drum type centrifuge of a diameter of 2.2m. The tsunami was generated by the rapid opening and shutting of the gate of reservoir. The adjustment of the tsunami height was controlled with the water level difference of the reservoir and the test zone. The characteristics of tsunami wave in a centrifuge show good agreement with the past information in 1g test.

Key Words : *Tsunami, breakwater, stability, centrifuge, model test*

1. まえがき

津波研究は段波速度, 構造物に作用する衝撃波圧, 漂流物による構造物へのダメージ, 越流による浸水被害・遡上高さなどについて主に水理実験や数値解析により行われてきた。一方, 津波流による海底地盤の浸食, 堆積物移動および再堆積などの現地調査や数値解析なども行われている。更に, マウンドや海底地盤の崩落が防波堤被害の要因であるとの報告もある。しかし, 地盤を含む挙動の解明は 1g 場の実験では土の自重効果による応力～ひずみ～強度関係を十分反映できないため相似則に制限が大きい。

そこで本研究は流体, 地盤および構造物の挙動において相似則が満たされる遠心力場での模型実験手法の開発およびその適用事例として砂地盤上のケーソン式防波堤の津波来襲時のケーソンに作用する波力・揚圧力, マウンド内流速, 基礎地盤の挙動について報告する。開発した津波発生装置は従来の 1g 場で行われてきたゲート急開方式を遠心力場に適用できるようにゲートの重量をバランサーによって極小化できるように工夫している。使用した遠心力装置

はドラム型と呼ばれるもので, 実験容器全体が円筒状で, その半分を模型領域に, 残り半分を貯水槽として使った。地盤の間隙流体には波浪伝播と地盤圧密の時間相似則が満たされるように遠心加速度比に等しい動粘性係数を有する粘性流体を使用した。

2. 遠心力場における相似則

(1) 間隙流体と地盤における相似則

一般に模型実験は実物大試験に代わるものとして実施されてきた。遠心力場における相似則の詳細については例えば Ovesen, N. K.¹⁾, 高田・日下部²⁾を参照されたい。ここでは地盤工学における遠心力場実験の必要性を簡単に記述する。応力～ひずみ関係について次の 2 つの仮定を設けている。即ち, 1). 実物に使用される材料は一つの応力～ひずみ～時間関係をあらわす。2). 模型材料は応力とひずみの縮尺係数 σ, ε によって実物材料に関連付けられる相似な応力～ひずみ特性を持っている。これらの仮定は次のように表される。

$$N = L_p / L_m, V_p = N^3 \cdot V_m \quad (1a)$$

ここに、 N は実物に対する模型の幾何学的な縮尺比または遠心加速度比、 L は長さ、 V は体積、添え字 p, m はそれぞれ実物と模型を表す。相似性において、間隙流体圧を含む全ての応力は σ によって縮尺され、全ての力は $N^2 \cdot \sigma$ によって縮尺される。自重に関する縮尺は次式による。

$$\gamma_{sp} \cdot (1 - n_p) \cdot V_p / \gamma_{sm} \cdot (1 - n_m) \cdot V_m = N^2 \cdot \sigma \quad (1b)$$

即ち、

$$\sigma = N \cdot \rho_s \cdot (1 - n_p) / (1 - n_m) \quad (1c)$$

同様に、固体相への揚圧力は

$$\sigma = N \cdot \rho_f \cdot (1 - n_p) / (1 - n_m) \quad (1d)$$

となり、更に間隙流体の自重の縮尺は

$$\sigma = N \cdot \rho_f \cdot n_p / n_m \quad (1e)$$

で表される。式(1c)と式(1d)、式(1d)と式(1e)から次式が導かれる。

$$\rho = \rho_s = \rho_f, n_p = n_m \quad (1f)$$

また、式(1e)から次式が得られる。

$$\sigma = N \cdot \rho \quad (1g)$$

ここに、 γ は単位体積重量、 ρ は密度、添え字 s, f はそれぞれ固体相と流体相を表す。ここで、式(1a)と式(1g)において、模型と実物と同じ材料を使用するならば、次式となり、 σ は N 倍となる。

$$\rho_s = \rho_f, \rho = 1 \quad (1h)$$

一方、応力の相似性を確保するならば、単位体積重量比 γ を $1/N$ に減じなければならない。この単位体積重量は周知のように 単位体積重量(γ) = 密度(ρ) $\cdot$ g (加速度)である。したがって、密度を $1/N$ にする代わり模型の加速度を N 倍とすれば良い。これにより応力に関する σ もひずみに関する ε も等しくなる。すなわち、幾何学的相似は大変形下でも常に満たされることになる。この加速度を遠心力で与えれば良い。表-1 に遠心力場での代表的な各物理量に関する相似則を示す。

(2) 遠心力場における津波実験の相似則

流体の周期性が海底地盤に与える効果を理論的に示した詳細は Sekiguchi et al.³⁾, Sassa & Sekiguchi⁴⁾を

参照されたい。特に粘性スケーリング導入の必要性についてそれらの文献から主要旨を抜粋して示す。

表-1 遠心力場での相似則

物理量		模型/実物
長	さ	1/N
加	速	N
質	量	1
力		1/N ²
応	力	1
ひ	ず	1
変	位	1/N
時	間	1/N ²
	圧密・浸透	1/N ²
	慣性力	1/N
	クリープ	1

Ng の遠心力場において $1/N$ 実験模型を用いる。波長 L 、周期 T の正弦波の伝播を考えると、線形波理論により、波の分散関係は式(2a)で与えられる。

$$\omega^2 = N \cdot g \cdot \kappa \cdot \tanh(\kappa \cdot h) \quad (2a)$$

ここに、 $\omega (= 2\pi/T)$ は波の円振動数、 $\kappa (= 2\pi/L)$ は波数、 h は地盤表面上の流体厚である。波浪伝播に関する時間相似則を満足するには次の要請を満たす必要がある。即ち、1).無次元量($\kappa \cdot h$)は模型と実物で同じである。2).それ故に、 κ_p を実物の波数とすると模型における波数 κ_m は $N \cdot \kappa_p$ となる。したがって、遠心模型における波の円振動数 ω_m は次式を満足しなければならない。

$$\omega_m = \omega_p \cdot \sqrt{N \cdot (\kappa_m / \kappa_p)} = N \cdot \omega_p \quad (2b)$$

ここに、 ω_p は実物の波の円振動数である。

次に必要となるのが振動に伴う地盤圧密に関する時間の相似則である。この際、波浪伝播下の飽和砂地盤は部分排水条件下で繰り返し载荷を受けて繰り返しせん断を受けていることに留意する。即ち、飽和砂地盤中の要素の体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v$ は弾性成分 $\Delta\varepsilon_v^{(1)}$ と粒状体の負のダイレイタンシー特性に起因する塑性成分 $\Delta\varepsilon_v^{(2)}$ からなると考えられる。弾性体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v^{(1)}$ は土骨格の圧縮係数 m_v を介して鉛直有効応力増分 $\Delta\sigma_v$ と関係している。即ち、

$$\partial\varepsilon_v / \partial t = m_v \cdot (\partial\sigma_v' / \partial t + \partial\varepsilon_v^{(2)} / \partial t) \quad (2c)$$

間隙流体を非圧縮性と仮定すると土の貯留方程式は次式で表される。

$$\partial\varepsilon_v / \partial t = -k_D / \gamma_f \cdot (\partial^2 u_e / \partial x^2 + \partial^2 u_e / \partial z^2) \quad (2d)$$

ここに、 u_e は過剰間隙水圧、 k_D はダルシーの透水

係数, γ_f は流体の単位体積重量である. ここで, 波の伝播方向の過剰間隙水圧の勾配は鉛直方向の勾配と比較して無視できると仮定すると, 式(2d)は次式となる.

$$\partial \varepsilon_v / \partial t = -k_D / \gamma_f \cdot \partial^2 u_e / \partial z^2 = -K / \nu \cdot \partial^2 u_e / \partial z^2 \quad (2e)$$

ここに, K は絶対透水係数, ν は間隙流体の動粘性係数である. 式(2c)と式(2e)より次式が得られる.

$$m_v \cdot (\partial \sigma_v / \partial t - \partial u / \partial t) + \partial \varepsilon_v^{(2)} / \partial t = -K / \nu \cdot \partial^2 u_e / \partial z^2 \quad (2f)$$

ここで, 波の 1 サイクルにおける鉛直応力増分 $\Delta \sigma_v$ と過剰間隙水圧 $u_e^{(1)}$ の時間平均がゼロであることに留意し, 無次元量 $\kappa \cdot z$ の導入により式(2f)は次式の形となる.

$$\begin{aligned} \partial u_e^{(2)} / \partial(\omega t) &= K / (m_v \cdot \nu \cdot \omega) \cdot \kappa^2 \cdot \partial^2 u_e^{(2)} / \partial(\kappa z)^2 \\ &+ 1 / m_v \cdot \partial \varepsilon_v^{(2)} / \partial(\omega t) \end{aligned} \quad (2g)$$

上式は部分排水条件下で波浪伝播による繰り返せん断を受ける飽和砂地盤中の残留間隙水圧 $u_e^{(2)}$ の蓄積過程を支配する基礎方程式と考えられる. 実物と遠心模型の時間相似則を合わせるためには式(2g)中の係数を一定にする必要がある. この際, 実物と模型で同一材料を使用し, 同一初期状態なら, 絶対透水係数 K は一定であることに注意する. また, 土の圧縮係数 m_v は土の拘束依存性を考慮し, 実物と模型で同一であると仮定できる. したがって, 次式が満足されなければならない.

$$\nu \cdot \omega / \kappa^2 = \text{const.} \quad (2h)$$

波浪伝播に関する時間相似則の要請: $\kappa_m = N \cdot \kappa_p$, $\omega_m = N \cdot \omega_p$ を考慮すると, 式(2h)より Ng の遠心力場における流体の動粘性係数 ν_m は次式を満足しなければならない.

$$\nu_m = N \cdot \nu_p \quad (2i)$$

ここに, ν_p は実物の間隙流体の動粘性係数である. このような粘性スケーリングの導入により波浪伝播と地盤圧密に関する時間相似則の両者を同時に満足することができる.

3. 遠心力場津波実験

(1) 実験装置と挙動計測

本研究に使用した遠心力载荷装置は円筒状容器を有するドラム型と呼ばれるもので模式図を図-1 に, 概略仕様を表-2 に示す. 写真-1 に円筒状の回転容器を示す. 寸法は幅 30cm, 奥行き 30cm で 2 箇所

に観測用の透明なレキサンシート窓を配している. 図-2 に示すように, この円筒容器の半分を模型領域とし, 残りを貯水部としてゲートで遮断されている. 模型領域側と貯水側に水位差をつけた後, ゲートを急開することによって段波津波を発生させるものである. ゲートの作動には小型の空気シリンダーを使っている. ゲート重量の最小化は空気シリンダーの両サイドに取り付けたバランサーで行っている. 空気圧は外部のコンプレッサーから図-1 の回転中心軸の下端にあるロータリージョイントを介して空気シリンダーに供給している. 実験データは回転体中心部に設置した動ひずみデータロガーに収録した後, 無線ランによりパソコンに取り込んでいる. 砂地盤を含む捨石マウンド, 防波堤や津波挙動は 4 台の高速カメラで観察・記録した. サンプル間隔は圧力や波高は 1/1000 秒で, 高速カメラの撮影は 500 フレーム/秒で行った.

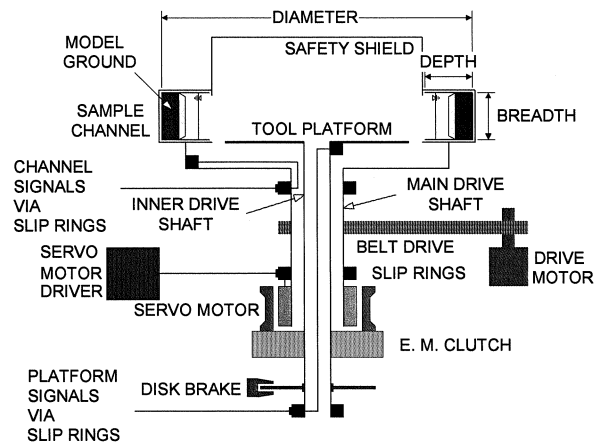


図-1 遠心装置の模式図

表-2 遠心装置の概略仕様

回転有効半径	cm	110
模型実験容器 寸法	cm	延長691×幅80(30)×深さ30
実物領域(440G時)	m	延長3041×幅352(132)×深さ132
最大回転数	r.p.m	600
最大加速度	G	440
搭載可能最大重量	kg	3700
有効搭載量	G-ton	1628
メインモーター	kW	37
無線LAN	Mbps	54
ロータリージョイント	系統	2
駆動方式	同心二軸	
付帯設備30	流体供給・水位調整装置	
測定装置	動ひずみデータロガー	
	高速カメラ Max10000fps・カラー	
	超小型センサー・レーザー変位計など	

(2) 実験模型

基礎地盤には豊浦砂を用い, 流体の水位変動に伴う圧密変形と透水性の相似則を満たすため, 前章で述べたように間隙は粘性スケーリングに基づき水の N 倍の粘性流体で飽和した. 粘性流体の作製はセルロース系の粉体を水で溶いて所定の遠心加速度に合せるように粘度を調整した.

砂地盤密度は変形の発生を容易にするため、相対密度 $Dr = 40\%$ の緩詰とした。砂地盤の作製と飽和は所定加速度に該当する粘度を有する粘性流体と $Dr = 40\%$ に該当する乾燥重量の豊浦砂を脱気槽内で十分攪拌して空気を抜いた後、図-3 に示す模型実験土槽に各層毎、投入と凍結を繰り返しながら所

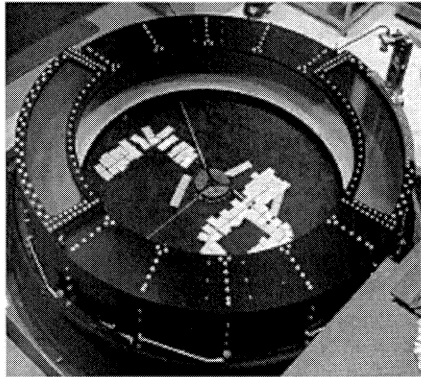


写真-1 透明窓を有する回転円筒容器

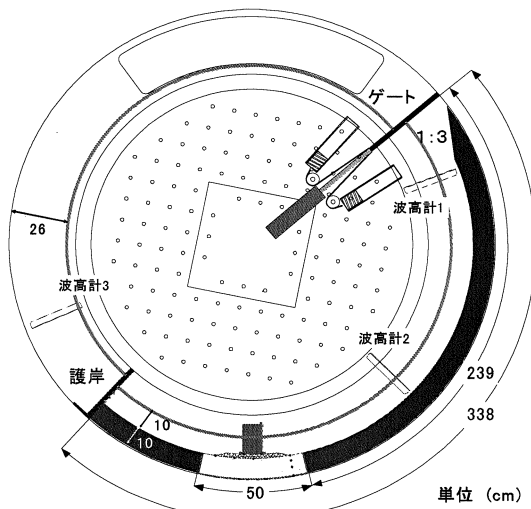


図-2 実験水路と計測器の配置

定深度に間隙水圧計を埋設していく。最終層を凍結した後、砂地盤表面をその位置で同心円になる半径で削り出した砂の乾燥重量を計測して、砂地盤重量を算出し直して相対密度を最終的に求めている。次に、凍結した砂地盤上に捨石マウンドとして 2cm 厚さになるように、中間粒径 2.9mm の礫を敷いた。その上に重量調整したアルミ製ケーソン模型を奥行き方向に 3 個並べ、更に注水した後、全てを凍結した。ケーソン模型の寸法は高さ 15.0cm、幅 8.7cm、フーチング幅 11.7cm、奥行き 9cm で、上部に 1cm 高さのパラペットを有している。中央部のケーソン模型には図-3 に示す高さに直径 6mm の半導体ひずみゲージタイプの圧力計を波圧測定用に 5 箇所設置した。また、ケーソン底面には揚圧力測定のため、ケーソン底面中央から前趾側へ 4cm、後趾側へ 4cm の位置に直径 8mm の半導体ひずみゲージタイプの間隙水圧計を設置している。捨石マウンド内の流速を間接的に算出するため、砂地盤と捨石マウンドの

境界に、ケーソン中央・捨石マウンド法尻およびその中間に先述の間隙水圧計を設置した。ケーソン模型は剛体として変形しないものと考えてアルミ製を採用した。即ち、ケーソンは滑動、転倒、沈下のような剛体としてのみ変位すると仮定している。一方、矢板のように構造物自体の変形が全体の挙動に重要な因子となる場合は、矢板剛性 EI の相似則を合わせるため、同一材料を使い、単位奥行きあたりの矢板厚を $1/N^3$ にすればよい。

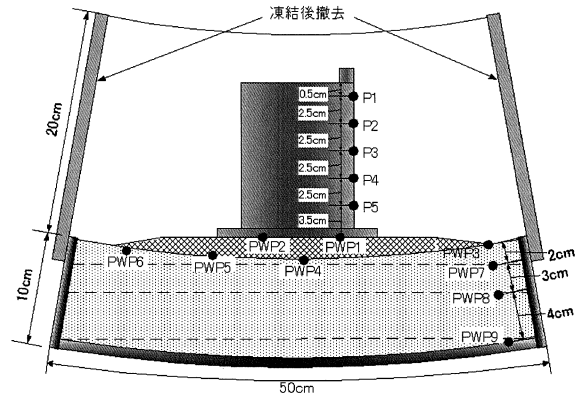


図-3 実験土槽と模型配置

実験土槽は実験効率を上げるために、写真-1 の回転容器の透明窓の位置に内挿する構造になっている。前面は透明なレキサンシートで残りはアルミ製である。側面は模型作製から凍結完了までは約 30cm 高さであるが、回転容器に挿入する際には、砂地盤高さまでを残し、上部は撤去できる構造となっている。

(3) 実験結果と考察

a) 津波の検定

本装置で行う高加速度場の津波実験が 1g 場で行われてきた津波波形を再現出来ているか検討するため、図-2 の海底床や模型のない水路で 32g のもと、模型部水位 $h = 17.5\text{cm}$ 、貯水部水位 $H = 23.0\text{cm}$ でダム・ブレイク実験を行った。静水位からの水位変動を図-4 に、直立壁に作用する静水圧からの波圧増分を図-5 に示す。図-4 において各波高計を入射波が通過した時刻から求めた波速は 8.18m/s であり、線形長波理論の波速 $c = \sqrt{gh} = 7.41\text{m/s}$ および、福井ら⁹⁾の理論式(3a)から求めた波速 8.01m/s とほぼ一致している。

$$c = \sqrt{g \cdot (a_i + h)(a_i + 2h)} / \sqrt{2(a_i + h - \zeta \cdot a_i)} \quad (3a)$$

ここに、 a_i は入射波高(0.6m)、 ζ は段波の進行に伴う攪乱と底面粗度の程度を表す係数である。

図-5 の波圧記録からは動波圧および重複波圧、持続波圧が確認できる。谷本ら⁶⁾が提案した最大重複波圧の式(3b)から求めた p_s は 12.95kN/m² であり、実験値が 2kN/m² 程度大きい。また、彼らは最大到

達高も式(3c)で提案しており、 $\eta=1.8m$ は実験の最大重複波高 2.0m と 20cm 程度の差は有るものの近い値を示している。これらの水位変動特性や波圧特性から遠心力場でのゲート急開方式の津波実験は従来の 1g 場実験の結果を再現できるといえる。

$$p_s = 2.2\rho \cdot g \cdot a_i \quad (3b)$$

$$\eta = 3.0a_i \quad (3c)$$

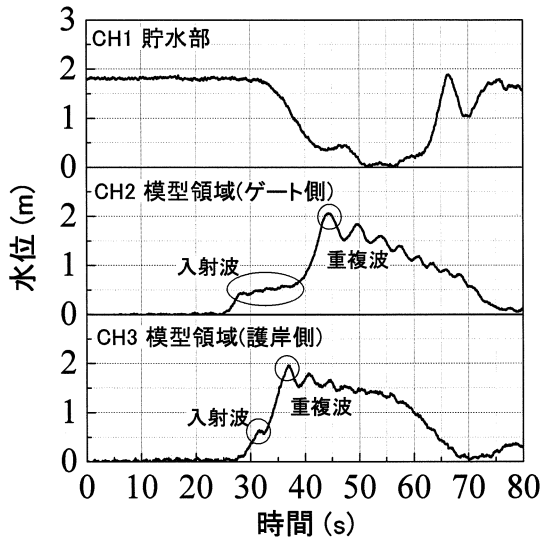


図-4 水位増分記録

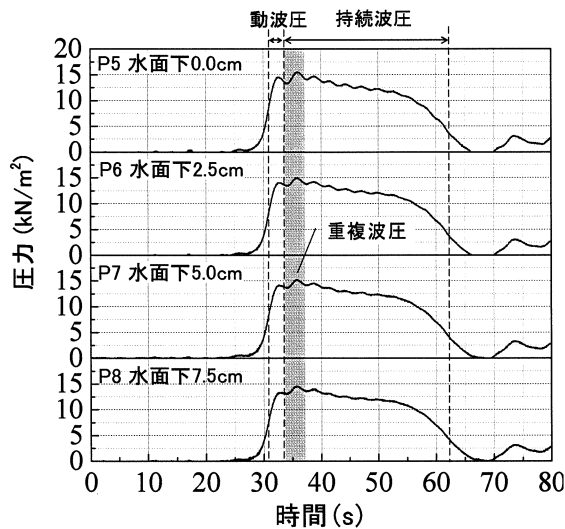


図-5 波圧増分記録

b) 防波堤実験結果

本実験も遠心加速度 32g のもとで行った。したがって、砂地盤は 32cst の粘性流体で飽和した。砂地盤以外は圧密変形を起こさないで水道水を使っている。模型部水位 $h=10cm$ 、貯水部水位 16cm である。捨石マウンドの中間粒径は $d_{50}=2.9mm$ である。図-6 に水位変動を示す。最大重複波高は入射波高 $a_i=0.7m$ の 3.57 倍程度と大きい。ケーソンを越流しない設計であったが、写真-2 の高速度カメラの映像をみると越流している。残念ながらカメラ位置が悪く、越流高さは確認できなかった。

波圧増分記録を図-7 に示す。本ケースの入射波

高は $a_i=0.7m$ で、段波波圧 $p_i=17.5kN/m^2$ は $2.5\rho \cdot g \cdot a_i$ で池野ら⁷⁾の 3.5 より小さく、谷本ら⁶⁾の実験結果 2.4 とほぼ同じ結果となっている。最大重複波圧 $p_s=18.0kN/m^2$ は $2.57\rho \cdot g \cdot a_i$ と式(3b)の算定式より若干大きい。最大到達高は越流により不明であるが、静水位上のケーソン高は 2.56m 程度あるので、 $\eta > 3.66a_i$ と推測され、池野ら⁷⁾の $6.0a_i$ よりも小さく、式(3c)より大きい。波速を式(3a)で求めて、水谷・今村⁸⁾の提案式(3d)と比較すると、 $c=6.51m/s$ なので、 $p_f=31.39kN/m^2$ となり、本実験結果の $15kN/m^2$ の 2 倍程度の値を与える。

$$p_f = 0.12\rho \cdot g \cdot c^4 / (g^2 \cdot a_i) \quad (3d)$$

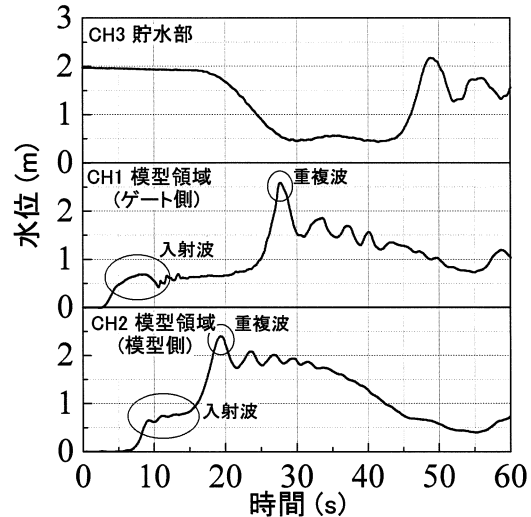


図-6 水位増分記録

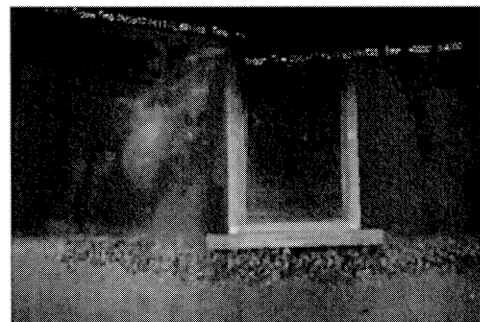


写真- 2 津波の越流状況

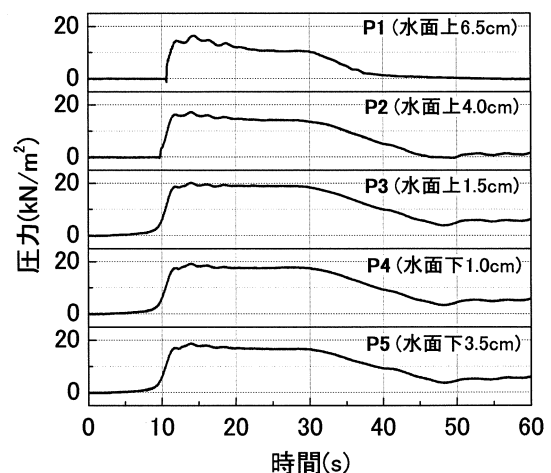


図-7 波圧増分記録

地盤内間隙水圧応答を図-8に示す。深度ゼロの水圧は水位変動を表すので、津波の来襲に伴い間隙水圧は地盤深度が大きくなるに従って上昇に遅れを生じている。一方、水位が低下に向かうと残留間隙水圧 $u_e^{(2)}$ となって現れ、図-9に示すように地盤の有効土被り圧と釣り合い状態にある。これは押し波時の継続時間が長いほど水位低下時あるいは引き波時に地盤被害が大きくなることが予想される。

捨石マウンド内圧力およびケーソンへの揚圧力を図-10に示す。揚圧力分布は谷本ら⁵⁾の三角形分布ではなく、台形分布である。それらの水圧差からDF則⁸⁾を用いて捨石マウンド内流速を算出したのが図-11であり、ケーソンの後方で流速が大きくカメラ画像にも捨石の移動が見られる。

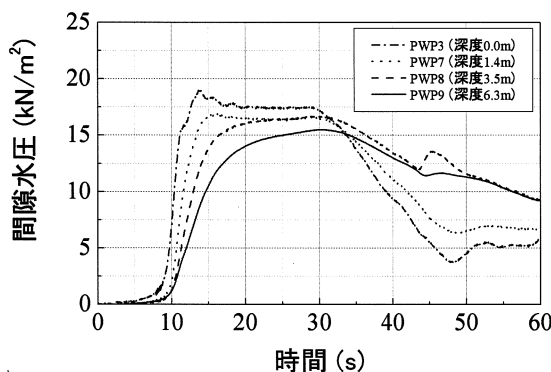


図-8 地盤内過剰間隙水圧

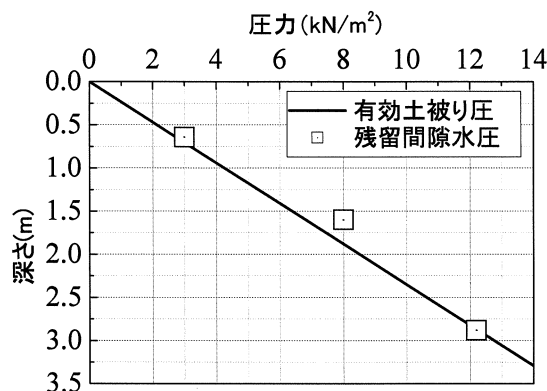


図-9 有効土被り圧と残留間隙水圧

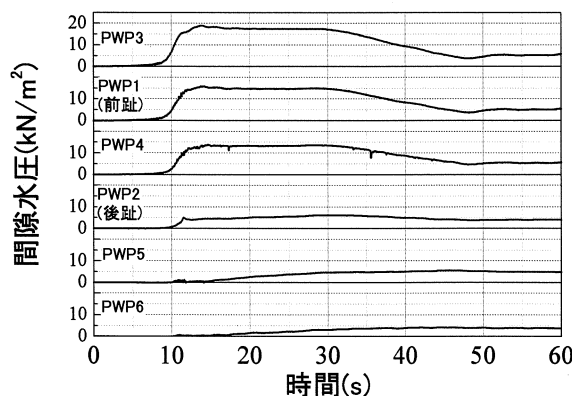


図-10 ケーソン揚圧力と捨石マウンド内水圧

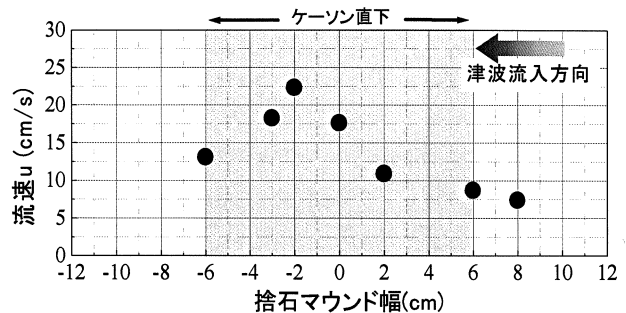


図-11 捨石マウンド内流速

4. 結論

遠心力場における津波実験装置を開発し、砂地盤上のケーソン式防波堤の挙動解明に適用した結果以下の結論を得た、

- a). 海底床が平坦な場合の波速について：
 1. 線形長波理論および福井らの理論式にほぼ一致する。
 2. 最大重複波圧は谷本らの提案より 15%程度大きい。
 3. 最大到達高さは谷本らの提案より 11%程度大きい。
- b). 海底床が 1:3 の初期勾配を有する場合のケーソン防波堤について：
 4. 最大重複波高は入射波高の 3.57 倍程度であった。
 5. 段波波圧の係数は池野らの 3.5 より小さく、谷本らの 2.4 とほぼ同じ 2.5 であった。
 6. 最大重複波圧は谷本らの提案より若干大きい。
 7. 砂地盤内の有効応力が失われるのは水位低下時であり、引き波時の地盤挙動を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Ovesen, N. K.: The application of the theory of modeling to centrifuge studies, *Draft State of The Art on Geotechnical Centrifuge Modelling*, 1985.
- 2) 高田直俊, 日下部治: 遠心模型実験 3.原理, 地盤工学会, 土と基礎, 12月号, pp89-94, 1987.
- 3) Sekiguchi, H et al.: Generation of Progressive Fluid Waves in a Geo-Centrifuge, *Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials*, June, pp.95-101, 1998.
- 4) Sassa, S and Sekiguchi H.: Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, *Geotechnique*, pp.621-638, 1999.
- 5) 福井芳朗ら: 津波の研究 (I) 一段波津波の波速について一, 海岸工学論文集, 第9巻, pp.44-49, 1962.
- 6) 谷本勝利ら: 1983 年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因検討, 海岸工学論文集, 第31巻, pp.257-261, 1984.
- 7) 池野正明ら: 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 846-850, 2001.
- 8) 水谷将, 今村文彦: 構造物に作用する段波波力の実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 946-950, 2000.
- 9) 近藤俊郎, 直立消波構造物の水理的特性, 水工学シリーズ, 81-B-1, pp. 1-16, 1981.