

変動水圧作用下における高飽和砂層の動的現象の相似律に関する研究

名合宏之¹・前野詩朗²

¹正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700 岡山市津島中 2-1-1)

²正会員 工博 岡山大学講師 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700 岡山市津島中 2-1-1)

波などの変動水圧が砂地盤上に作用することにより、地盤内の間隙水圧分布が時間的に変化し、地盤の有効応力が減少し、極端な場合には液状化が発生することが知られている。近年この現象に関する室内実験等が多く行われるようになってきているが、変動水圧の特性や地盤材料の特性を考慮した実物と模型との相似関係については明らかにされていない。そこで、本研究では、模型実験を行う際に必要となる相似律を数学モデルより誘導し、その妥当性と適用上の問題点について数値解析的に検討した。

Key Words : *similitude, sand bed, liquefaction, water wave*

1. はじめに

波浪時や洪水時には、強度の変動水圧が砂地盤上に作用する。この変動水圧の作用を受けて、地盤内の間隙水圧分布が時間的に変化することが大草ら¹⁾により示されたのに続いて、Yamamoto²⁾やMadsen³⁾らは多孔質弾性体理論に基づく解析を行い、変動水圧により地盤の有効応力が変化することを明らかにしている。さらに、Nagoら⁴⁾⁻⁶⁾は、鉛直1次元砂層模型を用いた実験および解析を行い、地盤内の間隙水圧が時間的に変化することにより、極端な場合には砂地盤が液状化することを明らかにしている。また、酒井ら⁷⁾は、波による海底地盤の動的応答問題を理論的に取り扱い、碎波帯領域における地盤の液状化条件を示すとともに、液状化深さが波高の約半分程度にまで達することがあることを示している。このような場に設置される水理構造物の地盤条件は強度の面からみて非常に不安定であり、ときには構造物破壊をもたらすことも予想される。このような観点から、近年、多くの研究者により、波などの周期的な水圧荷重下における構造物周辺地盤の動的挙動を取り扱った研究がなされてきている。すなわち、善^{8),9)}、Nagoら¹⁰⁾、Maenoら¹¹⁾、間瀬ら^{12),13)}は、波による防波堤周辺地盤の動的安定性の問題を取り扱っている。また、MacPherson¹⁴⁾やMcDougalら¹⁵⁾は海底パイプラインの安定性の問題を取り扱っている。以上の研究のほとんどが現象を数学モデルを用いて理論的に取り扱ったものである。これらの研究により、現象の基本的な性質の説明はほぼ可能になったものと考えてよい。しかし、理論解

析する際の、地盤定数の取り扱いなどにおいて、いまだ不明確な部分も多い。また、理論解析では複雑な境界条件下での取り扱いに困難を伴うことが多い。したがって、このような、水—土—構造物系の動的問題に対する取り扱いを確立するためには、理論解析のみならず現象の物理モデルによる説明もあわせてすすめていくことが必要である。

以上のような背景のもと、現象をモデル化した室内実験がNago^{4)-6),16),17)}、善^{9),18)}、前野¹⁹⁾、Maeno²⁰⁾、Foda²¹⁾、Shimizu²²⁾、Towhata²³⁾らによって盛んになされるようになってきている。しかし、これらの研究においては、室内実験において用いている水圧荷重の大きさやその変動周期、さらに、地盤材料をも考慮した場合の模型と実物との相似関係についてはこれまでのところ十分論議されていないようである。そこで本研究では、変動水圧作用下における砂層の動的挙動を模型実験によって再現する場合に必要な現象の相似律を数学モデルより誘導し、誘導された相似律の妥当性と適用上の問題点について数値解析的に検討するものである。

なお、砂層の動的現象としては、間隙水圧や有効応力が時間的に変化し、それにもなつて液状化が発生するまでの段階の現象と、液状化した砂層が流動する段階の現象とがある。また、前者においても、砂層が近似的に弾性的挙動を示す場合と、弾塑性的挙動を示す場合とがある²⁴⁾。前者のうち、弾性的挙動を示す場合の数学モデルはほぼ確立したものが得られているのに対し、弾塑性的挙動を示す場合あるいは後者の流動段階に対するモデルはいまだ確立されていない。本研究では、このような

動的現象の相似則を確立するための第一歩として、数学モデルがほぼ確立している弾性的挙動を示す動的現象を対象とする。

2. 相似律の誘導

著者らは、従来より、変動水圧作用下における高飽和砂層の動的挙動を解明するために、室内実験スケールのモデルを対象として、鉛直1次元および鉛直2次元問題に関する実験的な検討を行ってきた。また、現象説明のための基礎式を多孔質弾性体理論より導き、導いた基礎式の鉛直1次元および鉛直2次元問題に対する数値解析を行い、変動水圧作用下における砂地盤の動的挙動の理論的な説明が可能であることを明らかにしてきた^{4)~6)}。また、善ら¹⁸⁾も、著者らと同様な基礎式を誘導し、室内実験により理論の検証を行っている。さらに、善ら²⁵⁾は、現地の海底地盤中の間隙水圧および有効応力変動について、観測結果と理論解析結果を比較し、両者がよく一致することを示すとともに、砕波帯内の不規則波に対しても、善らが提案した基礎方程式が妥当であることを示している。したがって、波などの変動水圧が作用する場における地盤の挙動を表すこれらの数学モデルは、現象を説明するための力学的法則を満足しているものであることが示されたものと判断される。そこで、本研究では、著者らが従来より用いてきた基礎式により、モデルと実物との相似関係が成立するための条件を誘導し、その適用法と適用性について検討する。その場合、現象の基本的な性質は鉛直1次元モデルによって十分説明されることから、基礎式としてはそのモデルに対するものを用いることにする。

鉛直1次元モデルに対して、変動水圧作用下における砂地盤の動的挙動、とくに間隙水圧分布を説明する基礎式は次式のように表される⁴⁾。

$$\left(\alpha + \beta\lambda_w + \frac{\lambda_a}{P}\right) \frac{\partial h'}{\partial t} + \left(\beta\lambda_w + \frac{\lambda_a}{P}\right) \frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{k}{\rho g} \frac{\partial^2 h'}{\partial y^2} \quad (1)$$

ここに、 α ：砂層の圧縮率、 β ：水の圧縮率、 λ_a 、 λ_w ：空気および水の体積含有率、 t ：時間、 P ：絶対圧、 h' ：過剰間隙水圧水頭、 h_s ：砂層表面に作用する変動水圧水頭、 k ：透水係数、 ρ ：水の密度、 y ：砂層表面を原点とする距離（鉛直下方を正）である。上式を実物および模型に対して示すと次のようになる。

$$\left(\alpha_p + \beta_p\lambda_{wp} + \frac{\lambda_{ap}}{P_p}\right) \frac{\partial h'_p}{\partial t} + \left(\beta_p\lambda_{wp} + \frac{\lambda_{ap}}{P_p}\right) \frac{\partial h'_{sp}}{\partial t} = \frac{k_p}{\rho_p g_p} \frac{\partial^2 h'_p}{\partial y_p^2} \quad (2)$$

$$\left(\alpha_m + \beta_m\lambda_{wm} + \frac{\lambda_{am}}{P_m}\right) \frac{\partial h'_m}{\partial t} +$$

$$\left(\beta_m\lambda_{wm} + \frac{\lambda_{am}}{P_m}\right) \frac{\partial h'_{sm}}{\partial t} = \frac{k_m}{\rho_m g_m} \frac{\partial^2 h'_m}{\partial y_m^2} \quad (3)$$

上式中の添え字 p と m はそれぞれ実物および模型に対するものである。ここで、任意の物理量 x の縮尺を N_x で表し、模型に対する基礎式 (3) を書き換えると次のようになる。

$$\begin{aligned} & \left(N_\alpha \alpha_p + N_\beta N_{\lambda_w} \beta_p \lambda_{wp} + \frac{N_{\lambda_a} \lambda_{ap}}{N_P P_p}\right) \frac{N_h}{N_t} \frac{\partial h'_p}{\partial t} + \\ & \left(N_\beta N_{\lambda_w} \beta_p \lambda_{wp} + \frac{N_{\lambda_a} \lambda_{ap}}{N_P P_p}\right) \frac{N_{h_s}}{N_t} \frac{\partial h'_{sp}}{\partial t} = \\ & \frac{N_k N_h}{N_\rho N_g N_y^2} \frac{k_p}{\rho_p g_p} \frac{\partial^2 h'_p}{\partial y_p^2} \end{aligned} \quad (4)$$

上式が実物に対する式 (2) と同等であるためには次式を満足する必要がある。

$$N_\alpha \frac{N_L}{N_t} = N_\beta N_{\lambda_w} \frac{N_L}{N_t} = \frac{N_P N_{\lambda_a} N_L}{N_\beta^2 N_t} = \frac{N_k}{N_\rho N_g N_L} \quad (5)$$

ここに、長さに関する縮尺はすべて N_L で表している。また、基準となる圧力 \bar{P} とその圧力状態での空気含有率 $\bar{\lambda}_a$ を用いると、ボイルの法則により $\lambda_a = (\bar{P}/P)\bar{\lambda}_a$ となることから、空気含有率の縮尺 N_{λ_a} を $(N_P/N_P)/N_{\lambda_a}$ と表している。空気含有率の縮尺を基準圧力状態における縮尺に変換したのは、砂層内の対応する各点で異なる値を持つ縮尺関係 N_{λ_a} よりも、大気圧のような基準圧力状態での縮尺関係 N_{λ_a} を用いた方が模型と実物における空気量の対応関係が理解しやすいと考えたためである。

式 (5) において、基準圧力 \bar{P} は模型と実物で同じ、すなわち、 $N_P = 1$ とし、さらに、著者らが従来の研究⁶⁾ で明らかにしたように、砂層内に微量の空気（空気の体積含有率にして約 0.1% 以上）が存在すると間隙水の圧縮率 β を含む項は無視できることを考慮すると、次のような相似条件が得られる。

$$N_t = N_\rho N_g \frac{N_{\lambda_a} N_L^2}{N_\beta^2 N_k} \quad (6)$$

$$N_\alpha = \frac{N_{\lambda_a}}{N_\beta^2} \quad (7)$$

したがって、式 (6) および式 (7) で表される条件を満足するように各物理量の縮尺を決定すれば、間隙水圧に関する相似性は満足される。

さらに、地盤の変位に対する相似を満足させようとする場合には、上式の条件の他に、次式で表される地盤の変位と間隙水圧との関係式の相似性が満足されなければならない⁹⁾。

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} = \rho g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (8)$$

ここに、 u_y ：地盤変位、 h ：変動間隙水圧水頭である。前述の手法と同様にして、式 (8) より、長さの縮尺をすべて同じ N_L にすると、つぎの相似条件が得られる。

$$N_\alpha N_\rho N_g N_L = 1 \quad (9)$$

結局、砂層の動的現象の相似律は、式 (6)、(7) および (9) によって表される。

ところで、式(6)および式(7)より、式(9)の左辺の量を表示すると、

$$N_a N_p N_g N_L = N_i \frac{N_k}{N_L} = \gamma \quad (10)$$

となる。すなわち、式(6)および式(7)で示される相似条件のみの場合は、 γ の値をある程度自由に選ぶことができ、 N_L 、 N_i および N_k の選択の自由度が大きい。しかし、式(9)の条件をつけ加えることにより、 γ の値が固定され、それらの選択の幅が限定されることになる。模型実験においては、各種物理量の選択の自由度が大きい方が望ましいこと、また、主要な現象の相似性が確保できておれば、実験の目的が達成されることなどを考えると、本研究で対象とする現象では、間隙水圧の相似性が確保される式(6)および式(7)の条件をもとに模型を作製すれば、その模型は厳密な意味では相似性は保たれていないが、実験の目的を満足する。なお、このような近似的相似模型による実験結果より、地盤変位を推定する方法としてはつぎのような方法が考えられる。

式(9)は、式(8)における変位 u_y の縮尺を一般的な長さの縮尺 N_L と同じと考えて誘導されたものであるが、変位の縮尺を N_L とは変えて N'_L とすると、式(9)の相似条件はつぎのように書き換えられる。

$$N_a N_p N_g N_L \frac{N'_L}{N_L} = 1 \quad (11)$$

この式と式(10)より、

$$N'_L = \gamma N_L \quad (12)$$

が得られる。すなわち、式(6)および式(7)の条件のもとに作製された近似的に相似な模型においては、変位の縮尺が γN_L となるのがわかる。したがって、実験結果より実物の変位を求めるには $(1/\gamma N_L)$ 倍すればよい。なお、現実の問題では、次節で述べるように、式(7)の条件を厳密に満足させることが困難であること、また、対象とする現象ではこの条件の成立がそれほど重要ではないこともあって、式(7)の条件を省いた近似的相似モデルが採用される。この場合には、 γ としては、式(7)を考慮して誘導された $N_i N_k / N_L$ ではなく、式(11)より直接誘導される $N_a N_p N_g N_L$ を用いばよい。

以上に示した相似条件の誘導にあたっては、模型における変動水圧の載荷方法については特に限定した条件を付加していない。すなわち、模型における変動水圧の振幅や周期は任意の値を採用できるとしている。しかし、波による海底地盤の動的現象を対象とし、模型に波動水槽を用いる場合には、上記の条件の他に、波動現象の特性より決まる独自の関係、すなわち、フルードの相似条件

$$N_i = (N_L / N_g)^{1/2} \quad (13)$$

を満足しなければならない。この条件を式(6)、式(7)

の条件と組み合わせると、

$$\frac{N_k}{N_p N_g^2 N_a N_L} = 1 \quad (14)$$

となる。この式は無次元量 $k/\rho g^2 \alpha t L$ が実物と模型で同じでなければならないことを意味する。圧縮率 α がせん断弾性係数 G の逆数と同様な意味をもつ物理量であることを考慮すると、この無次元量は、酒井ら⁷⁾が示した、波による海底地盤の動的現象を支配する二つの重要なパラメーターのひとつ $kG/\rho g^2 Th$ (T :周期、 h :水深)と同じ性質のものであることがわかる。なお、彼らが示したいま一つのパラメーター G/β' (β' :間隙水の有効体積弾性係数、酒井らの論文では β と表現している)には、式(7)より導かれる無次元量 $\lambda a/\alpha P$ が対応している。酒井ら²⁰⁾は、式(14)で示される条件より、通常の砂を用いた小模型の波動水槽実験では液化現象の再現は困難であることを指摘している。この波動水槽実験による現象の再現性の可否については次節で考察する。

3. 相似律の適用法と解析対象モデル

前節で誘導した相似律の具体的な適用法について検討する。まず、対象とする現象として、図-1に示されるような現地を対象とした鉛直1次元モデルを考える。すなわち、厚さ D の砂層面上に変動水圧 $\rho g(h_0 + a_0 \sin 2\pi f t)$ が作用している状態である。式(6)および式(7)中の N_p は、 N_L に対して非線形でかつ深さ方向に変化する縮尺であるが、ここでは、砂層面上に作用する水圧が平均水圧 $\rho g h_0$ であると仮定し、砂層の厚さの2分の1の深さにおける間隙水圧の絶対圧の縮尺を N_p として採用する。すなわち、 N_p は次式のように表わされるものとする。

$$N_p = \frac{P_{om} + \rho_m g_m (h_{om} + D_m/2)}{P_{op} + \rho_p g_p (h_{op} + D_p/2)} \quad (15)$$

この場合、対象とする実物の大きさおよび長さの縮尺 N_L が決まれば、大気圧、重力の加速度および間隙流体の密度の縮尺は、特別な場合をのぞいて、 N_{p_0} 、 N_p 、 $N_g = 1$ であるので N_p を算出できる。つぎに、圧縮率の縮尺 N_a は、式(7)より、 N'_a と N_p によって算出されるが、現実には、 N'_a が0.5~1程度であると推定されること、また、水深10m程度の浅海域で発生する地盤の動的現象を対象とすれば、採用される長さの縮尺 N_L は一般に数分の一から数十分の一程度であり、この場合 N_p が0.5程度となることを考慮すると、 N_a は数倍程度となり、実物と模型の圧縮率の値はオーダー的にはほぼ一致する。著者らが従来の研究で示したように⁶⁾、砂層の圧縮率の値のオーダーが変わらない場合には、砂層上部の液化領域の動的挙動に及ぼす圧縮率の影響はほと

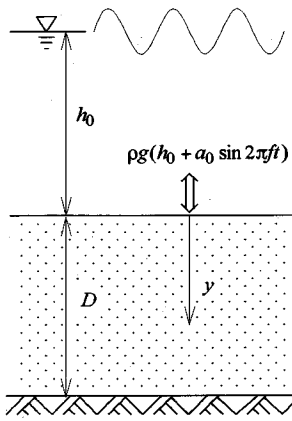


図-1 解析対象モデル

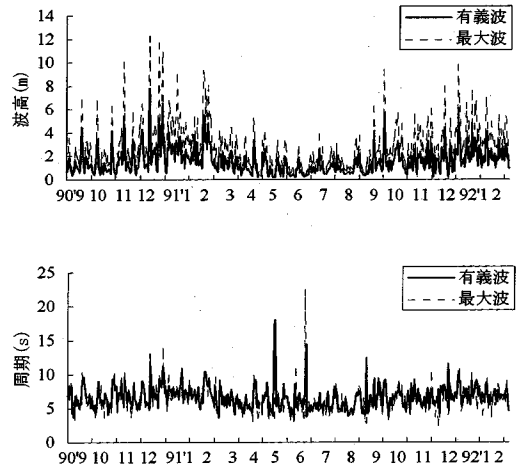


図-2 鹿島沿岸の波浪特性

んどない。したがって、砂層の圧縮率の縮尺については現象に与える影響が少ないので、圧縮率に関する式(7)の相似条件はとくに考慮しなくてもよいことになり、式(6)で表される相似条件のみを満足するように各物理量の縮尺を決定すれば、実物の現象を模型でほぼ再現できることになる。また、現実問題として、式(7)の条件を満足する模型材料を選ぶことは困難でもあり、実現可能な近似的に相似な模型としては、式(6)の条件のみを満足する模型を考えるのが妥当であろう。

以下では、上述の近似的な相似条件を採用した模型が実物の現象をどの程度再現しうるか、また、その問題点の所在を明らかにするため、基礎式(2)および(3)を用いて数値解析的に検討する。この検討にあたって、まず、実物としては、鳥取県弓ヶ浜を対象として調査した波浪条件・地盤条件を参考にしてモデル化した諸元を用いる。すなわち、水深10mで厚さ10mの海底地盤上に周期10秒、振幅5mの波が作用している状態を対象とし、透水係数は豊浦標準砂の約10倍のものを採用する。図-2は舞鶴海洋気象台が出している海上気象概報による波高および周期に関する波浪資料のうち、鳥取県弓ヶ浜海岸に比較的近い鹿島沿岸波浪計によるデータ(1990年9月~1992年2月)を示したものである。この図より、現地付近においては、9月から翌年2月までの間の台風および冬季風浪により波高の大きな波が発生し、その最大波高は約数メートルから十数メートルに達し、その周期も約10秒程度であることがわかる。

図-3は、前述の実物を対象として $N_p, N_g=1$ の場合に、式(6)より得られる相似関係について、長さの縮尺 N_L と時間の縮尺 N_t との関係を示したものである。同図の横軸には、 N_L の値と同時に式(15)より算出される N_p の値が示されている。この図より、長さの縮尺 N_L およびパラメー

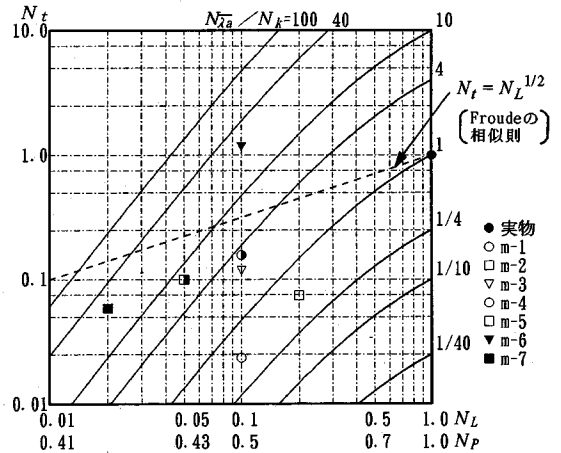


図-3 長さの縮尺 N_L と時間の縮尺 N_t との関係 ($N_p, N_g=1, h_0=10\text{ m}, D=10\text{ m}$)

ター N_{α}/N_k を決定することにより、時間の縮尺 N_t を読み取ることができる。つぎに、模型としては、縮尺関係が図-3に示される m-1 から m-7 までのものおよびこの図には示されない特殊な場合 ($N_g \neq 1$) として m-8 を採用した。m-1, m-2, m-3 は、模型において現地と同じ砂試料を用いることを想定したケースである。m-4, m-5 は、粒径の異なる砂試料を用いる場合、m-6, m-7 は比重の異なる砂試料を用いる場合を想定している。さらに、m-8 は重力加速度を変化させた場合を想定している。計算に採用した具体的な値および各相似模型の縮尺は表-1 および表-2 に示している。なお、模型の砂層の圧縮率に関しては、実物と同程度のものを用いることを前提とし、 $N_{\alpha}=1$ を採用している。表中には、参考までに、式(7)の条件を満足する α および N_{α} の値を括弧内に示している。表中の ρ_s および $N\rho_s$ はそれぞれ

表一 解析条件

模型	D(m)	h ₀ (m)	a ₀ (m)	T(sec)	k(cm/s)	α(10 ⁻⁹ ×m ² /N)	λ _α	λ _w	ρ _s (g/cm ³)	g(m/s ²)
m-1	1.0	1.0	0.50	0.24	0.100	1.0(2.4)	0.005	0.40	2.65	9.8
m-2	2.0	2.0	1.00	0.74	0.100	1.0(1.8)	0.005	0.40	2.65	9.8
m-3	1.0	1.0	0.50	1.18	0.020	1.0(2.4)	0.005	0.40	2.65	9.8
m-4	1.0	1.0	0.50	1.59	0.015	1.0(2.4)	0.005	0.40	2.65	9.8
m-5	0.5	0.5	0.25	1.00	0.015	1.0(6.0)	0.011	0.40	2.65	9.8
m-6	1.0	1.0	0.50	11.76	0.002	1.0(2.4)	0.005	0.40	1.77	9.8
m-7	0.2	0.2	0.10	0.59	0.002	1.0(2.9)	0.005	0.40	1.77	9.8
m-8	1.0	1.0	0.50	1.00	0.100	1.0(1.0)	0.010	0.40	2.65	98.0
実物	10.0	10.0	5.00	10.00	0.100	1.0(1.0)	0.010	0.40	2.65	9.8

実物および模型における共通の条件: ρ = 1.00(g/cm³), β = 4.3 × 10⁻¹⁰ (m²/N), P₀ = 1.013 × 10⁵ (N/m²)
 ()内の数値は式(7)の条件を満足する場合の値

表二 実物に対する縮尺

模型	図 2 中の記号	N _L	N _P	N _t	N _k	N _α	N _{λ_α}	N _{ρ_s}	N _g	γ
m-1	○	1/10	1/2.2	1/42.3	1	1(2.4)	1/2	1	1	0.10(0.24)
m-2	□	1/5	1/1.9	1/13.5	1	1(1.8)	1/2	1	1	0.20(0.37)
m-3	▽	1/10	1/2.2	1/8.5	1/5	1(2.4)	1/2	1	1	0.10(0.24)
m-4	●	1/10	1/2.2	1/6.3	1/6.7	1(2.4)	1/2	1	1	0.10(0.24)
m-5	■	1/20	1/2.3	1/10	1/6.7	1(6)	1.1	1	1	0.05(0.30)
m-6	▼	1/10	1/2.2	1.2	1/50	1(2.4)	1/2	2/3	1	0.10(0.24)
m-7	■	1/50	1/2.4	1/17.0	1/50	1(2.9)	1/2	2/3	1	0.02(0.06)
m-8	△	1/10	1	1/10	1	1(1)	1	1	10	1.00(1.00)

()内の数値は式(7)の条件を満足する場合の値

れ、土粒子実質部分の密度およびその縮尺を表す。

図中の $N_t = N_L^{1/2}$ の曲線はフルードの相似則を表したものである。波動水槽を用いて実験を行う場合には、この曲線上の相似関係を満足しなければならない。この図より、 $N_{λ_α} / N_k$ の値が 1 以下の場合には、酒井ら²⁰⁾ が述べているように、小模型での現象の再現は不可能であることがわかる。しかし、透水係数 k の小さな材料を使うなどして $N_{λ_α} / N_k$ を大きくすれば小模型での実験が可能となることがわかる。

4. 相似律の適用性の検討

(1) 実験において現地と同じ砂試料を用いる場合

(m-1, m-2, m-3)

実験において現地と同じ砂を用い、長さの縮尺 10 分の 1 の実験を行う場合 (m-1) を考える。透水係数の縮尺は現地と同じ砂試料を用いるので $N_k = 1$ とした。また、空気量については、現地の砂地盤の空気含有率が約 1% 程度であると考えられるので、模型において再現可能な値を仮定した ($N_{λ_α} = 1/2$)。したがって、図-3 のパラメーター $N_{λ_α} / N_k$ は 1/2 となり、時間の縮尺 N_t は 0.024 (=1/42.3) にすれば良いことがわかる。図-4 は、この m-1 の場合の砂層内の間隙水圧、有効応力

および変位に関する解析結果を無次元化して示したものである。有効応力 $σ_v$ は、

$$σ_v = (ρ_s - ρ)gy(1 - λ) - ρgh \quad (16)$$

と表され、その無次元量 $σ_n$ は次式で表されている。

$$σ_n = 1 - \frac{ρgh}{(ρ_s - ρ)gy(1 - λ)} \quad (17)$$

これらの式中の $λ(=λ_w + λ_α)$ は間隙率を示している。比較のために実物を対象とした解析結果も同時に示している。なお、模型の変位については、式 (12) で示した関係を用いて補正した値、すなわち、解析結果より得られる値を $1/γ(=1/N_α N_ρ N_g N_L = 1/N_L)$ 倍した値を用いている。この図より、模型と実物とを比較すると、若干の相違はあるもののほぼ相似関係は満足しているとみなしてよい。この若干の相違の原因は、深さ方向に変化する縮尺である N_P を、式 (15) で示したように、砂層中心点の位置で代表させたことと、圧縮率の縮尺 $N_α$ を 1 としたことによる。以上のように、m-1 の模型は、ほぼ実物を再現することがわかったが、変動水圧の周期については、 $N_t = 0.024$ であり、現地における波の周期を 10 秒とする場合、模型では 0.24 秒となり、実験では変動水圧の周期が短くなりすぎて再現しにくくなる。そこで、実験が可能となるように時間の縮尺 N_t が 1/10 程

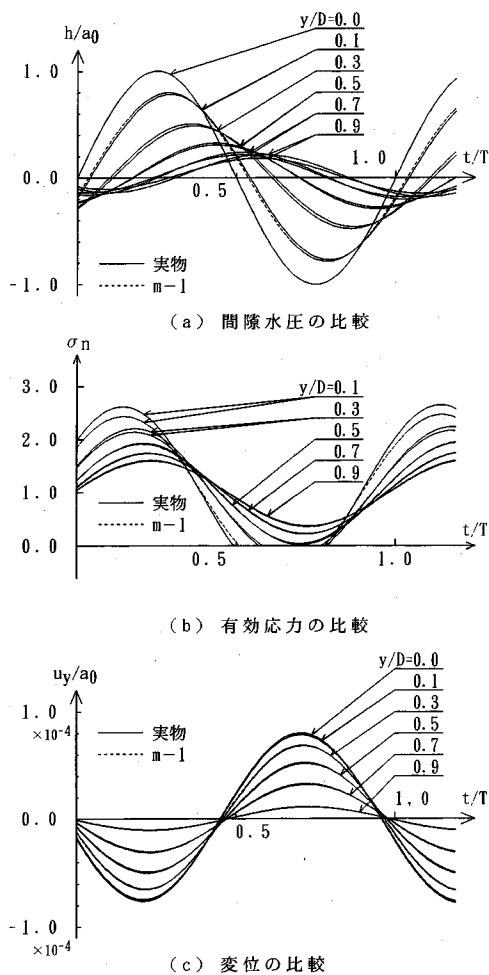


図4 実物と模型 (m-1) の比較

度となるような場合を以下では考える。

m-2 は、模型の長さの縮尺を $1/5$ とし、その他の条件は m-1 と同様にした場合である。図-3 より、このときの時間の縮尺は $N_t = 0.074$ ($=1/13.5$) となり、実験で再現可能な値となる。つぎに、m-3 は、模型の大きさ、砂層材料は m-1 と同じであるが、模型で用いる流体として粘性の大きなものを用い、透水係数 k を小さくした場合である。この場合は、図-3 中のパラメーター N_{za}/N_k が 2.5 となるから、時間の縮尺は 0.118 ($=1/8.5$) にすれば良いことになり、実験において再現可能な値となる。掲載していないが、m-2 および m-3 の場合の解析結果も図-4 とほぼ同様な結果が得られており、いずれの場合も実物をよく再現できていることが示された。

以上の結果より、実験において現地の砂を用いる場合には、実験における変動水圧の周期の制約を受けて、あまり小さな模型縮尺を採用することはできないが、ある

程度以上大きな模型を用いるとか、小さな模型でも流体の粘性を変えて透水係数を小さくするなどして、相似模型を得ることが可能である。

(2) 実験において豊浦標準砂を用いる場合

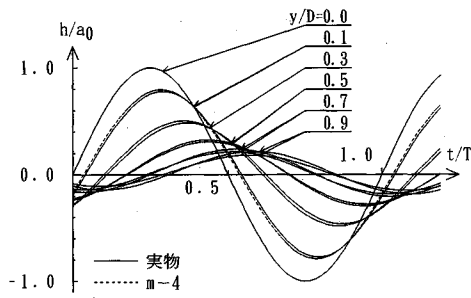
(m-4, m-5)

ここでは、豊浦標準砂を砂試料として用いる場合の相似律の関係を検討する。この豊浦標準砂は著者らが従来の研究で実験に用いたものであると同時に、そのほかの研究からによっても地盤材料としてよく用いられている。m-4 は、長さの縮尺および含有空気量の縮尺は m-1 の場合と同様にした。すなわち、 $N_L = 1/10$ および $N_{za} = 0.5$ を想定している。透水係数の縮尺 N_k は、透水試験の結果を考慮して $1/6.7$ を採用した。式 (6) の関係より、 $N_t = 0.159$ ($=1/6.3$) となることがわかる。m-5 は $N_L = 1/20$ および $N_t = 1/10$ とした場合である。この場合、表-2 に示されるように、 $N_{za} = 1.1$ となり、ほぼ現地の含有空気量と一致する。以上の m-4 および m-5 は、変動水圧の周期、振幅および砂層圧等の条件からみて、著者らが従来の研究で取り扱った条件^{4)~6)} とほぼ一致するものである。図-5 は m-4 に対する解析結果を示したものである。この図より、模型は実物をよく再現しているのがわかる。したがって、著者らが従来の研究で行った豊浦標準砂を用いた模型実験は、ここで対象としたような実物との相似関係をほぼ満足しているものといえる。

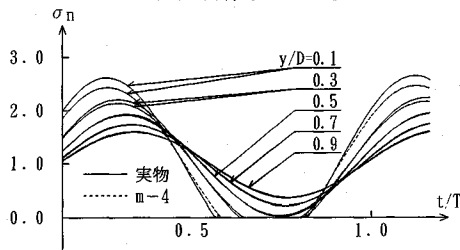
(3) 実験において比重の異なる地盤材料を用いる場合

(m-6, m-7)

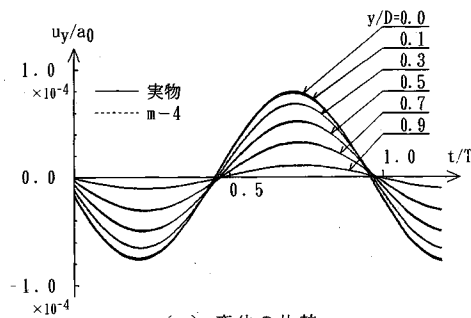
比重の異なる材料を地盤構成材料として用いる場合を考える。ここでは、水理実験の移動床模型などでよく用いられている石炭粉を用いる場合を想定する。石炭粉を用いるため、透水係数の縮尺は表-2 に示されるように $N_k = 1/50$ とかなり小さくなり、長さの縮尺を $1/10$ とすると、 $N_t = 1.2$ となる (m-6)。したがって、この場合、実験で現地の現象を再現しようとすると、実験時間が実時間よりも長くなってしまい実用的でない。m-7 は、長さの縮尺を $1/50$ とした場合である。この場合、時間の縮尺は $N_t = 1/17$ ($=0.059$) となり、実験時間の面からみて適当な模型となることがわかる。図-6 (m-7) は解析結果を示したものである。間隙水圧および補正変位に関しては実物をよく再現していることがわかる。しかし、有効応力についてみると、地盤材料の比重が小さくなったため、実物の場合とかなり異なる結果、すなわち、有効応力の変動量が大きく、また、実物に較べ液化しやすいという結果が得られる。このような傾向は図には示していないが、m-6 の場合も同様である。



(a) 間隙水圧の比較

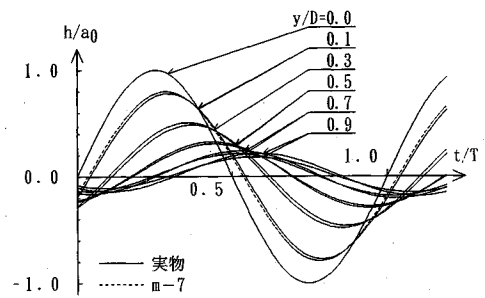


(b) 有効応力の比較

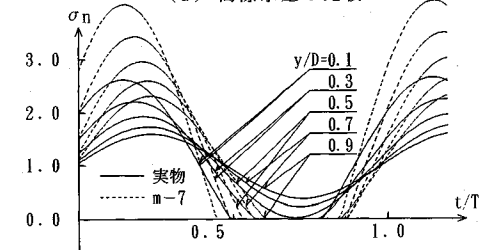


(c) 変位の比較

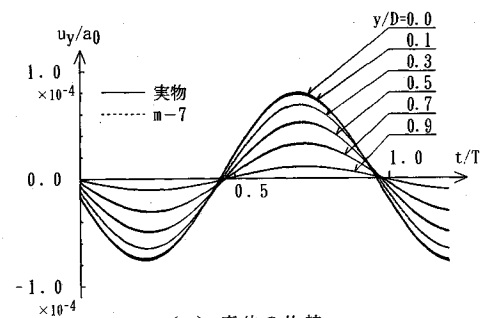
図-5 実物と模型 (m-4) の比較



(a) 間隙水圧の比較



(b) 有効応力の比較



(c) 変位の比較

図-6 実物と模型 (m-7) の比較

このような実物と模型における有効応力の違いの原因を2.で述べた相似律の誘導と同様の手法を用いて検討してみる。有効応力 σ_v の表示式 (16) より、有効応力が相似であるためには次式が成立しなければならない。

$$N_{\sigma_v} = N_{(\rho_s/\rho)} N_g N_L N_{(1-\lambda)} = N_p N_g N_L \quad (18)$$

すなわち、

$$N_{(\rho_s/\rho-1)} \cdot N_{(1-\lambda)} = 1 \quad (19)$$

が成立しなければならない。ところが、m-6, m-7では、 $N_{(\rho_s/\rho-1)} = 0.46$, $N_{(1-\lambda)} = 1$ であり、式(19)が成立していない。このことが原因となって実物と模型における有効応力の差を生じている。量的には、無次元有効応力 σ_n を用いて表現すると、

$$N_{(\sigma_n-1)} = N_{(\rho_s/\rho-1)}^{-1} \cdot N_{(1-\lambda)}^{-1} = 2.17$$

となっている。

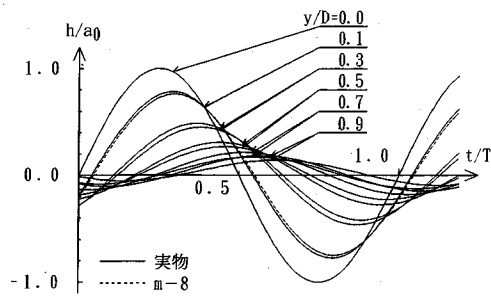
このように、比重の異なる地盤材料を用いる場合には $N_{(1-\lambda)} = 1$ の条件のもとでは有効応力の相似性が得られ

ないことがわかる。

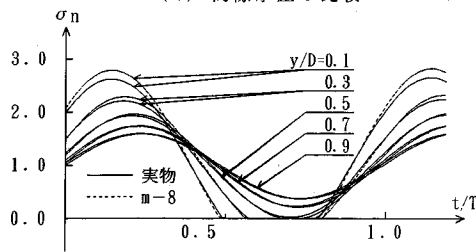
(4) 実験において重力加速度を変える場合 (m-8)

近年、土質工学の分野などにおいて、重力の加速度を変化させることのできる遠心載荷装置を用いた実験が多くなされるようになってきている。本研究で対象とするような現象についても、Sekiguchiら²⁷⁾は、遠心載荷装置に造波装置を有する水路を設置することにより、波による変動水圧が作用する場における海底地盤の挙動を重力場の異なる条件下で実験的に検討している。ここでは、このような重力加速度を変えうる模型の相似性について検討する。

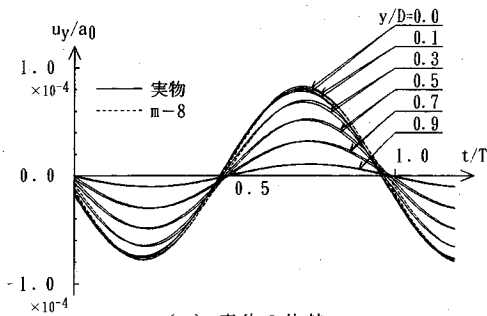
重力加速度を変え、かつ、表面波を用いる実験では、相似条件として式(6)と式(13)を同時に成立させなければならない。この場合、流体および地盤材料として実物と同じものを用いることにすると、 N_p , N_a , N_k , $N_{\rho_s} = 1$ であるから、両式より次式が得られる。



(a) 間隙水圧の比較



(b) 有効応力の比較



(c) 変位の比較

図-7 実物と模型 (m-8) の比較

$$N_L \cdot N_g = 1, N_t = N_L \quad (20)$$

なお、この場合は $\gamma=1$ となり、変位の縮尺は一般的な長さの縮尺と同じであり、補正を必要としない相似模型となっている。m-8 は、式 (20) で示される相似関係を用い、 $N_L=1/10$ とした場合の模型である。実物と模型に対する解析結果は図-7 に示されているが、両者はよい一致を示すことがわかる。

5. 結 論

本研究では、波などの変動水圧が作用する場における現地地盤の動的挙動を模型実験で再現する際の相似律の誘導を行った。また、鳥取県の弓が浜海岸の地盤条件および波浪条件を実物の代表例として採用し、いくつかの相似模型を想定して、それぞれのモデルに対して数値解析を行い、実物の再現性の検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかにされた。

(1) 砂層の動的現象の相似律を 1 次元の数学モデルより誘導した。その結果より、さらに、沿岸部での実際現象を想定して、近似的に相似な模型を得るための条件を示した。この条件は、流体密度および重力の加速度の縮尺が 1 の場合について、長さの縮尺 N_L 、時間の縮尺 N_t および空気含有率と透水係数の比の縮尺 N_{λ_0}/N_k との関係で表現された。この相似条件の中で、波動水槽を用いる実験に対する相似律も特別な場合として示された。

(2) 上述の近似的な相似条件は、重力加速度を変えようような特別な場合を除いて、砂層の圧縮性および変位の相似性を満足するものではないが、間隙水圧変化の相似性は十分確保されるものであることが示された。

(3) 現地と同じ地盤材料を用いて実験を行う場合には、変動水圧の周期の関係であまり小さな模型にすることはできないが、長さの縮尺を 1/5 程度に抑えることにより現地の現象を再現することが可能となることが示された。また、粘性の大きな流体を用い、透水係数を小さくすることにより、小さな模型(長さの縮尺が 1/10 程度)での実験が可能となることが示された。

(4) 著者らが従来に行った豊浦標準砂を地盤材料とした実験は、変動水圧などの条件からみても現地の状況をよく再現するものであることが明らかにされた。

(5) 石炭粉(砂の比重の 2/3 程度)のような比重の小さい地盤材料を用いる実験では、長さの縮尺が 1/50 程度のかかなり小さな模型での実験が可能となるが、有効応力の再現性が困難となることが示された。

(6) 重力の加速度を変えようる模型では、現地の地盤材料をそのまま実験において使用でき、現象の再現性も良いことが明らかにされた。

謝 辞：本研究を遂行するにあたって、文部省科学研究費補助金(国際学術研究, No. 04044121)を受けたことを付記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) 大草重康, 中村隆昭, 内田篤志: 波による海底地盤中の間隙水圧の変化, 第 11 回土質工学研究発表会, pp.781-784, 1976.
- 2) Yamamoto, T.: Wave Induced instability in seabeds, *Proceedings of the ASCE, Spec. Conference, Coastal Sediments*, pp.898-913, 1977.
- 3) Madsen, O. S.: Wave-induced pore pressure and effective stress in a porous bed, *Geotechnique* 28, No.4, pp.377-393, 1978.
- 4) Nago, H.: Liquefaction of highly saturated sand layer under oscillating water pressure, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ.*, Vol.16, No.1, pp.91-104, 1981.

- 5) Nago, H. and Maeno, S. : Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ.*, Vol.19, No.1 pp.13-32, 1984.
- 6) Nago, H. and Maeno, S. : Pore pressure and effective stress in a highly saturated sand bed under water pressure variation on its surface, *Natural Disaster Science*, Vol.9, No.1, pp.23-35, 1987.
- 7) 酒井哲郎, 畑中克也, 間瀬 肇 : 波浪による海底地盤内間隙水圧変動解の適用性と地盤の液化条件, 土木学会論文集, 第417号II-13, pp.275-283, 1990.
- 8) 善 功企 : 波の繰返しを受ける防波堤基礎地盤の安定性に関する研究(第1報) - 過剰間隙水圧の挙動解析, 港湾技術研究所報告, 第23巻 第2号, pp.181-206, 1984.
- 9) 善 功企 : 海洋開発における波と海底地盤の動的問題, 昭和59年度港湾技術研究所講演会講演集, pp.77-133, 1984.
- 10) Nago, H. and Maeno, S. : Dynamic behavior of sand bed around structure under wave motion, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ.*, Vol.21, No.1, pp.81-91, 1986.
- 11) Maeno, S. and Nago, H. : Numerical analysis on the dynamic behavior of sand bed around breakwater, *Proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development*, Ed. by Port and Harbour Research Institute, Vol.1, pp.591-595, 1991.
- 12) 間瀬 肇, 酒井哲郎, 西村喜弘, 前野賀彦 : 多孔性弾性体理論による防波堤に作用する揚圧力および周辺地盤内の変動間隙水圧の解析, 土木学会論文集, 第411号II-12, pp.217-225, 1988.
- 13) 間瀬 肇, 川迫郁夫, 酒井哲郎 : 混成堤基礎地盤の波浪応答に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.821-825, 1991.
- 14) MacPherson, H. : Wave forces on pipeline buried in permeable seabed, *Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE*, Vol.104, No.WW4, pp.407-419, 1978.
- 15) McDougal, W. G., Davidson, S. H., Monkmeier, P. L. and Sollitt, C. K. : Wave-induced forces on buried pipelines, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.114, pp.220-236, 1986.
- 16) Nago, H. and Maeno, H. : Movement of sand around revetment under water pressure variation, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama Univ.*, Vol.24, No.2, pp.67-78, 1990.
- 17) 名合宏之, 前野詩朗, 佐々原秀史, 西岡操 : 海岸プロットの沈下防止に関する研究, 海洋開発論文集, Vol.6, pp.229-234, 1990.
- 18) 善 功企, 山崎浩之, 渡辺 篤 : 海底地盤の波浪による液化および高密度化, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp.125-180, 1987.
- 19) 前野賀彦, 長谷川高士 : 波浪による砂層内の間隙水圧の特性, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.596-600, 1984.
- 20) Maeno, S. and Nago, H. : Settlement of a concrete block into a sand bed under water pressure variation, *Proceedings of the International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interactions*, pp.67-76, 1988.
- 21) Foda, M. A., Tzang, S. Y. and Maeno, Y. : Resonant soil liquefaction by water waves, *Proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development*, Ed. by Port and Harbour Research Institute, Vol.1, pp.549-554, 1991.
- 22) Shimizu, M. : Experimental examination of theories for wave and sea bed sands interaction, *Proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development*, Ed. by Port and Harbour Research Institute, Vol.1, pp.633-638, 1991.
- 23) Towhata, I., Kunitiwattanakul, P., Fukue, N. and Nagata, K. : Cyclic loading of confining pressure on partially saturated sand, *Proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development*, Ed. by Port and Harbour Research Institute, Vol.1, pp.639-644, 1991.
- 24) Nago, H. Maeno, S., Matsumoto, T. and Hachiman, Y. : Liquefaction and densification of loosely deposited sand bed under water pressure variation, *Proceedings of 3rd. International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol.1, pp.578-584, 1993.
- 25) 善 功企, 山崎浩之, 佐藤 泰 : 海底地盤の波浪による液化 - 現地観測および解析 -, 港湾技術研究所報告, 第28巻, 第3号, pp.29-57, 1989.
- 26) Sakai, T., Hatanaka K. and Mase H. : Wave-induced effective stress in seabed and its momentary liquefaction, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.118, No.2, pp.202-206, 1992.
- 27) Sekiguchi, H., Kita, K. and Okamoto, O. : Centrifuge modelling of wave-induced instability of sand beds, *Proceedings of the Third NTU-KU-KAIST Tri-Lateral Seminar/Workshop on Civil Engineering*, pp.199-204, 1993. (1993.11.11 受付)

SIMILITUDE ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF HIGHLY SATURATED SAND BED UNDER THE CYCLIC LOADING OF WATER PRESSURE

Hiroshi NAGO and Shiro MAENO

It is well known that the liquefaction of sand bed occurs under the cyclic loading of water pressure on its surface. Recently, many researchers have been carrying out the experimental studies on this problem. But, the similitude on this kind of dynamic behavior between prototype and model has not yet been developed. In this study, we presented the similitude of this phenomenon derived from the one-dimensional mathematical model and investigated its applicability numerically.