

変動水圧による護岸周辺地盤の 流動に関する基礎的研究

小谷裕司¹・吉村知恵²・前野詩朗³・名合宏之⁴

¹正会員 工修 岡山大学大学院自然科学研究科博士課程 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

²正会員 工修 日本建設コンサルタント株式会社 (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19)

³正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

⁴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 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

洪水時や高波浪時には、河川護岸や海岸護岸の裏込め土砂の流出により堤防内部に空洞が発生し、構造物が被災する事例が多く見られる。この裏込め土砂の流出による被災事例は、構造物周辺地盤上に作用する変動水圧と密接に関係することが著者らの研究等から明らかにされている。本研究では、変動水圧による護岸裏込め土砂の流動を予測するための基礎的資料を得ることを目的として、変動水圧特性や地盤特性を考慮した実験を行い、護岸周辺部の土砂の流動状況を実験的に把握した。加えて、多孔質弾性体理論を用いて地盤内の応力状態を数値解析し、地盤の流動に及ぼす各種の特性量の影響について検討した。

Key Words : liquefaction, water pressure variation, pore water pressure, stress angle, sea wall, back-filling sand

1. はじめに

洪水時や高波浪時には、河川護岸や海岸護岸など多くの水理構造物の損壊が見られる。このような構造物破壊の原因として、構造物そのものに直接作用する流体力によるものが取り上げられ、構造物の設計基準などにも取り入れられている。しかし、現地の被災例を見ると、構造物そのものに直接作用する外力による破壊に加え、構造物周辺地盤の強度低下等に伴い破壊に至る例も多く見られる。

洪水時の流れや台風時に構造物に作用する波浪は、激しい水面変動を伴う状態にある。このような場においては、構造物周辺地盤上に絶えず強度の変動水圧が作用するため、周辺地盤に過剰間隙水圧が発生し、地盤の有効応力が時間的に変化する¹⁾⁻⁹⁾。また、変動水圧などの外力条件や地盤条件によっては、液状化が発生する。

善ら⁶⁾や前野ら⁷⁾は、現地においても波浪による海底地盤の液状化が発生することを確認している。したがって、実際の構造物設計に際しては、このような波一地盤一構造物系の相互作用を考慮することが必要であるが、現状においては、波が変動水圧として砂地盤上に作用することによる地盤の力学挙動に関してはあまり考慮されていない。

以上のような背景を踏まえて、著者ら⁸⁾⁻¹⁰⁾は、洪水や波浪時に河川護岸や海岸護岸などの裏込め土砂が流出して、護岸内部が空洞化する現象に着目し、その力学機構について検討してきた。

護岸周辺では、図-1に示すように、波の谷が護岸前面にさしかかった時には、護岸前面砂層に上向きの変動水圧（静水圧状態からの変動分）が作用し、前面砂層の有効応力が減少する。逆に、波の峰の時には、下向きの変動水圧が周期的に作用し、地盤は高密度化する³⁾。前者の波の谷が護岸前面にさしかかった時には、変動水圧や地盤条件などによっては図中の斜線部分で液状化が発生し、護岸前面の洗掘や護岸裏込め土砂の流出などが生じ、構造物が破壊に至るものと推定される。

本研究では、波浪場におけるこのような護岸周辺地盤の挙動を明らかにするための力学的研究の第一歩として、護岸前面に一様な変動水圧が作用する場合を対象として地盤の挙動を実験的かつ理論的に検討する。すなわち、変動水圧の周波数、振幅、地盤材料の透水性および護岸の根入れ長の違いが、護岸周辺地盤の挙動に与える影響を実験的に検討する。また、護岸周辺地盤の間隙水圧分布および応力分布を多孔質弾性体理論を用いて数値解析的に明らかにし、護岸周辺地盤の土砂の流動機構について考察する。

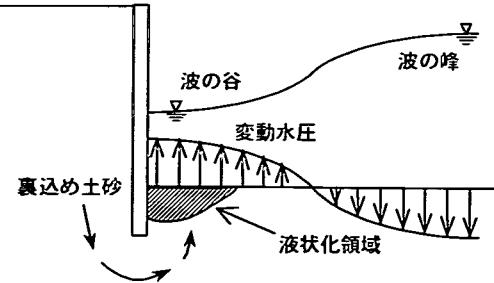


図-1 変動水圧による裏込め土砂の流出説明図

2. 護岸裏込め土砂の流出に関する実験

(1) 実験方法

実験には、図-2に示す、幅80 cm、奥行き30 cmの鉛直2次元砂層模型を用いた。護岸形式としては単純な鉛直護岸を対象とする。砂層模型は、護岸前面の砂層上が水で満たされており、自由表面を有するシリンダー部と接続されている。したがって、シリンダー内の水面に作用する変動空気圧が砂層面上に一様に伝えられる構造となっている。砂層構成材料には、高飽和状態の豊浦標準砂($d_{50}=0.25$ mm)および粗粒砂($d_{50}=1.42$ mm)の2種類を用いた。砂層の設置方法は、模型容器に適量の水を張り、乾燥させた砂を所定の間隙率になるようにできるかぎり均質に締め固めた。

また、護岸周辺砂層の運動の可視化を行うために着色砂を層状に設置した。裏込め土砂の流出量は、実験開始後任意の時間に護岸前面に流出した砂の状況を撮影した写真からそれぞれの時間における砂層高を判読し、変動水圧による砂層の沈下高を差し引いたものを流出高とし、奥行き方向に積分して算定する。この方法により得られる土砂の流出量は、流出砂層の間隙率が場所的に大きく変化する場合には実質の砂層の流出量とは異なる。しかし、今回の実験においては流出砂層の間隙率は0.39～0.41程度であり、平均的には初期間隙率と同程度であったため、流出体積により流出量の概略値は把握できるものと考えた。なお、流出高は護岸前面から25 cm～30 cm離れた地点での砂層表面の地盤高を基準として算出している。また、Pt.1～Pt.7 (Pt.1は水中の測点)において間隙水圧を測定した。

(2) 地盤内間隙水圧分布に影響する因子と実験条件

砂層内の間隙水圧分布は、以下のような、変動水圧、砂層地盤、水および構造物による特性を表す各種の物理量によって影響される。

①変動水圧に関する特性量：変動水圧の振幅(水頭)、変動周波数、平均水圧

②砂層地盤に関する特性量：砂粒子の密度、砂層の圧縮

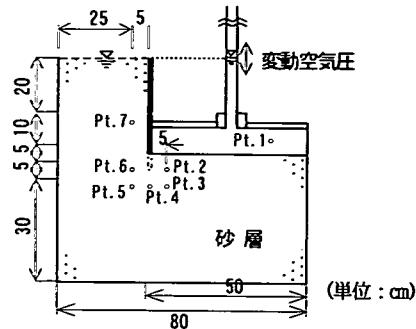


図-2 鉛直2次元砂層模型実験装置

表-1 実験条件

ケ-ス	周波数 f (Hz)	振幅 a (cm)	根入れ長 l (cm)	平均粒径 d_{50} (mm)	透水係数 k (cm/s)
Case1	1.0	40	5.0	0.25	0.012
Case2	1.0	35	5.0	0.25	0.012
Case3	1.0	30	5.0	0.25	0.012
Case4	0.5	40	5.0	0.25	0.012
Case5	1.5	40	5.0	0.25	0.012
Case6	1.0	40	5.0	1.42	0.140
Case7	1.0	40	10.0	0.25	0.012

率、砂層の間隙率(水並びに空気の体積含有率)、透水係数、砂層厚

③水に関する特性量：水の密度、水の圧縮率

④構造物に関する特性量：形状、護岸の根入れ長

このうち、本研究では、波と地盤と構造物の相互作用を考慮した海岸構造物の合理的設計法を確立するための基礎として、これらの特性量のうち現象に大きな影響を及ぼすと考えられる下線を施した特性量に着目して、表-1に示す7つのケースについて実験を行った。

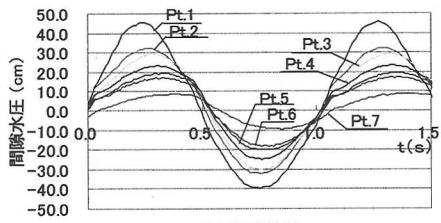
Case 1 (周波数: 1.0 Hz, 振幅: 40 cm, 平均粒径: 0.25 mm, 透水係数: 0.012 cm/s, 根入れ長: 5.0 cm) を基準として、Case 2, Case 3 は変動水圧の振幅を、Case 4, Case 5 は周波数をそれぞれ変化させたケースである。また、Case 6 は透水係数を変化させたケースであり、Case 7 は護岸の根入れ長を変化させたケースである。これらの実験により、各種の特性量の違いによる護岸裏込め土砂の流出機構の違いについて検討する。なお、砂層の初期間隙率は $\lambda=0.40$ 程度となるように地盤の締め度合いを一様としている。

3. 実験結果および考察

(1) 間隙水圧と有効応力

a) 間隙水圧変動

図-3はCase 1 (平均粒径: 0.25 mm, 透水係数: 0.012 cm/s, 根入れ長: 5.0 cm) における地盤条件のもと、



(a) 実験結果

図-3 変動間隙水圧の時間変化 (Case 1)

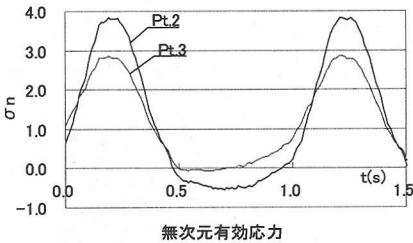


図-4 無次元有効応力の時間変化 (Case 1)

周波数：1.0 Hz、振幅：40 cm の変動水圧を作成させた場合の地盤内各測点での変動間隙水圧の時間変化を示したものである。

同図より、波の峰の時間帯では護岸前面に作用する変動水圧が、振幅の減衰および位相の遅れを伴いながら砂層内に伝播していることがわかる。一方、波の谷の時間帯では、振幅はある程度は減衰するものの、波の峰の時よりも減衰率が若干小さくなっている。また、位相の遅れは波の峰の時間帯よりかなり小さくなることがわかる。

b) 有効応力変動

図-4 は Case 1 における護岸前面砂層内の測点 Pt.2, Pt.3 における無次元有効応力 σ_n の時間変化を示している。無次元有効応力は測点位置における過剰間隙水圧と砂の上載荷重とから次式により算出している。

$$\sigma_n = 1 - \frac{\rho g h'}{(\rho_s - \rho)gy(1-\lambda)} \quad (1)$$

ここに、 ρ ：水の密度、 ρ_s ：砂の密度、 g ：重力加速度、 h' ：過剰間隙水圧水頭、 y ：砂層表面を原点とする距離（鉛直下方向を正）、 λ ：間隙率である。

同図より、波の谷の時間帯において有効応力が 0 以下となっており、護岸前面砂層が液状化していることがわかる。また、砂層表面に近いほど液状化の継続時間が長くなっていることが示されている。図-3 の変動水圧分布において波の谷の時に測点 Pt.2, Pt.3 の振幅減衰と位相の遅れが波の峰の時のそれらよりも小さかったのは、液状化が発生したため間隙水圧の伝播形態が変化し、振幅減衰や位相の遅れが発生し難くなったためであると考えられる。

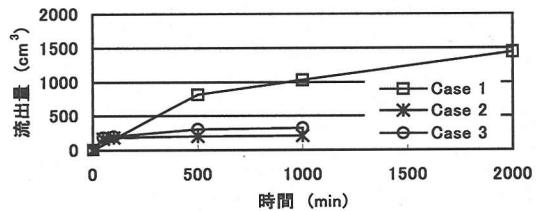
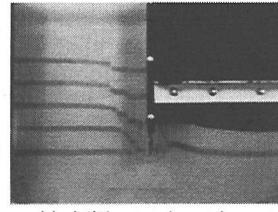
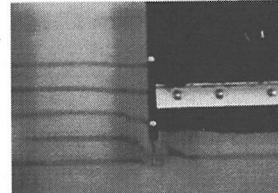


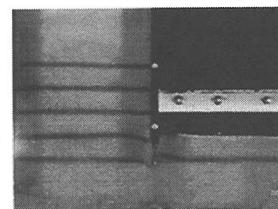
図-5 振幅の違いによる裏込め土砂の流出量の変化



(a) 振幅 40 cm (Case 1)



(b) 振幅 35 cm (Case 2)



(c) 振幅 30 cm (Case 3)

写真-1 振幅の違いによる土砂の流出状況

(2) 土砂流出特性

a) 変動水圧の振幅の影響

図-5 は変動水圧の振幅（水頭）を 40 cm (Case 1), 35 cm (Case 2), 30 cm (Case 3) と変化させた場合の護岸裏込め土砂の流出量の時間変化を示している。この図より、振幅が 30 cm と 35 cm では流出量の大きな違いは見られないが、振幅が 40 cm では、早い段階（500 分程度）から多量の土砂の流动が起こり、護岸裏込め土砂の流出量は、Case 2, Case 3 に比べ、2 倍以上と極端に多くなることがわかる。

写真-1 は実験開始後 1000 分経過した時の裏込め土砂の流出状況を撮影したものである。この写真に見られるように、振幅が大きくなると、護岸裏込め内部において数段のせん断すべり面が発生してくることがわかる。また、Case 1 について、写真-2 で示している 2000 分後の

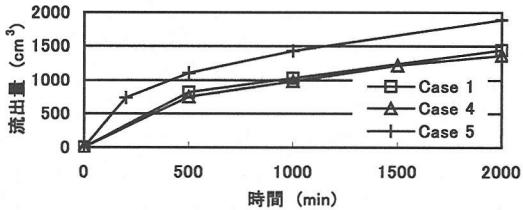


図-6 周波数の違いによる裏込め土砂の流出量の変化

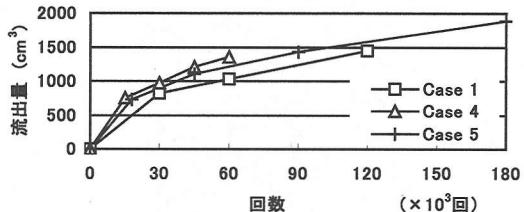
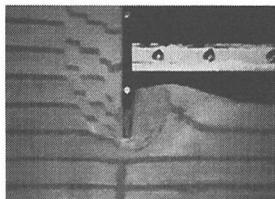
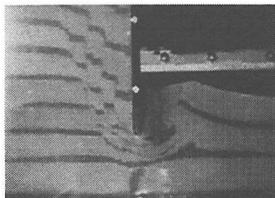


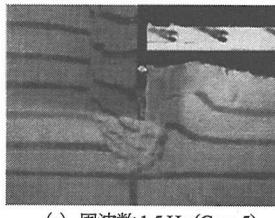
図-7 作用回数における裏込め土砂の流出量



(a) 周波数 0.5 Hz (Case 4)



(b) 周波数 1.0 Hz (Case 1)



(c) 周波数 1.5 Hz (Case 5)

写真-2 周波数の違いによる土砂の流出状況

土砂の流出状況と比較すると、時間の経過とともに流動化範囲が拡大していることがわかる。

b) 変動水圧の周波数の影響

図-6 は、変動水圧の周波数を 0.5 Hz (Case 4), 1.0 Hz (Case 1), 1.5Hz (Case 5) と変化させた場合の護岸裏込め土砂の流出量の時間変化を示している。この図より、変動水圧の載荷時間が一定の場合の周波数の影響を検討する。変動水圧の周波数が 0.5 Hz (Case 4), 1.0 Hz (Case 1) の場

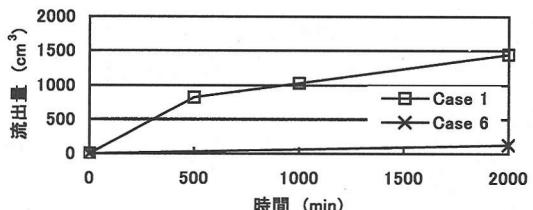
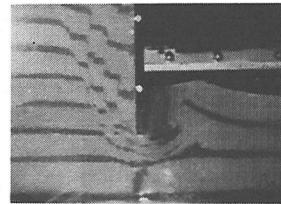
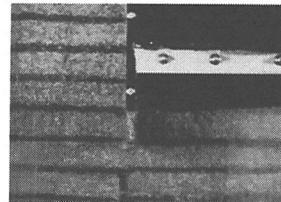


図-8 透水係数の違いによる裏込め土砂の流出量の変化



(a) 透水係数 $k=0.012 \text{ cm/s}$ (Case 1)



(b) 透水係数 $k=0.140 \text{ cm/s}$ (Case 6)

写真-3 透水係数の違いによる土砂の流出状況

合には、流出量の顕著な差は見られないが、周波数が 1.5 Hz と大きくなると護岸前面への土砂の流出量が多くなっていることがわかる。また、いずれのケースも早い時間帯（500 分程度迄）でかなりの土砂が流出し、時間の経過とともに単位時間あたりの流出量は徐々に減少している。

図-7 は、作用回数における周波数の違いによる護岸裏込め土砂の流出量を示している。同図に示すように、流出量は 0.5 Hz (Case 4), 1.5Hz (Case 5), 1.0 Hz (Case 1) の順になくなっている。作用回数が一定の場合、周波数が大きくなれば流出量が多くなると予測されるが、本実験結果においては、同一作用回数の基での周波数の違いによる定性的な傾向は認められなかった。これは、図-4 に示されるように 1 サイクル内における護岸前面砂層の有効応力が負となる液状化の継続時間に大きく影響するためと考えられる。

写真-2 は、実験開始 2000 分後の裏込め土砂の流出状況を示したものである。この写真より、周波数が大きくなると根入れ下部の流動層の領域が拡大することがわかる。とくに、周波数を 1.5 Hz とした場合には、根入れ下端より 2 段下の着色砂層まで変動水圧の影響による流動が生じるようになり、流動範囲が拡大するのみならず着色砂の乱れも激しくなる様子が見られる。

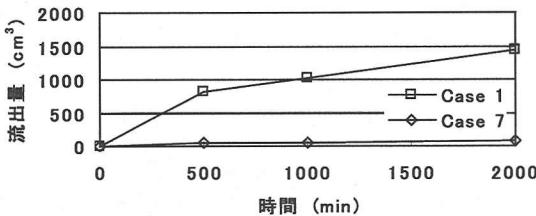


図-9 根入れ長さの違いによる裏込め土砂の流出量の変化

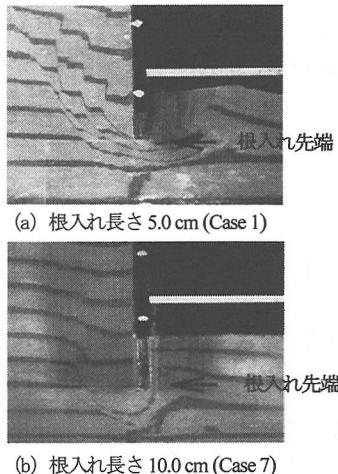


写真-4 根入れ長さの違いによる土砂の流出状況

c) 砂層の透水係数の影響

ここでは、砂層構成材料の透水性の違いが流出現象に及ぼす影響を検討する。実験は、豊浦標準砂 (Case 1 : $d_{50} \approx 0.25\text{mm}$, $k = 0.012\text{ cm/s}$) と透水性の高い粗粒砂 (Case 6 : $d_{50} \approx 1.42\text{ mm}$, $k = 0.140\text{ cm/s}$) の粒径の異なる 2 種類の地盤材料を用いて行った。

図-8 および写真-3 は、実験結果より得られた流出土砂量の時間変化および 2000 分後の流出状況を示している。これらの結果より、Case 6 の 2000 分後の流出土砂量は、Case 1 の 1/15 程度であり、透水性が高い地盤ほど、護岸裏込め土砂は流出しにくくなることがわかる。これは、透水性が高くなることにより、変動水圧が砂層内を伝播する際の間隙水圧振幅の減衰、位相の遅れが減少し、砂層内の浸透圧が小さくなつたためであると考えられる¹¹⁾。したがって、護岸周辺部に粒径の大きい透水性の高い地盤材料を配置すれば、地盤の流動抑制効果が期待されよう。

d) 護岸根入れ長の影響

ここでは、護岸先端部の根入れ長（護岸前面の地盤からの深さ）を 5.0 cm (Case 1) と 10.0 cm (Case 7) の 2 通りについて実験を行い、護岸裏込め土砂の流出特性を検討した。実験結果より得られた流出土砂量の時間変化および 2000 分後の土砂の流出状況を図-9 および写真-4

に示している。

図-9 より、2000 分後の流出量は、根入れ長を長くするとごくわずかとなることがわかる。これは、変動水圧の作用により砂層内に浸透力が発生し、裏込め土砂が、護岸前面に移動しようとするが、根入れ長を長くしたことにより、護岸前面での土被り厚が大きくなり流出抵抗力が増加したためと考えられる。

しかし、写真-4 に示した護岸裏込め内部の砂層の流动状況を見ると、両ケースとも同程度の範囲において砂層が流动しており、さらに長時間変動水圧が作用するような状況下では、根入れ長を長くしても徐々に流出していくことが予測される。

以上の結果より、根入れ長を長くすると、護岸前面土砂の土被り効果により、早い段階における土砂の流出はかなり抑えられるが、根入れ長が十分長くない場合には、さらに長時間の変動水圧が作用するような場合には土砂が流出していく可能性があることが示された。

4. 流出特性に関する理論的考察

本章においては、護岸周辺地盤の間隙水圧分布や応力状態といった力学特性を多孔質弾性体と仮定した浸透流理論^{12), 13)}を用いて数値解析的に検討し、その結果を用いて護岸裏込め土砂の流出特性について理論的な面から考察を加える。

(1) 解析方法および基礎式

砂層表面に変動水圧場が作用した場合の砂層内の力学的挙動は、弾性砂層内の浸透流問題と同様な手法で解くことが可能である。つまり、理論解析にあたっての条件として以下のことを仮定する。

- ①間隙は水および微量の空気に占められており、間隙率 λ は水及び空気の体積含有率 λ_w , λ_a の和によって表される。
- ②砂層内を浸透する水の流動はダルシーの法則に従う。
- ③間隙空気の圧縮はボイルの法則に従う。
- ④砂および水は圧縮性を有する。
- ⑤砂地盤は弾性体であり、その構造骨格の変形はフックの法則に従う。

これらの仮定の下で、砂層の間隙水圧と変位を支配する基礎式は以下のように表される。

$$G \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

$$G \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) + \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho g \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3)$$

$$\rho g \left(\beta \lambda_w + \frac{\lambda_a}{p} \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

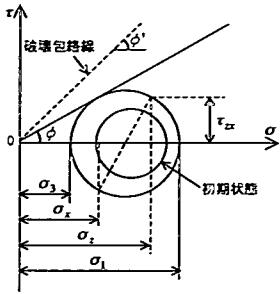


図-10 モールの応力円

ここに、 β ：水の圧縮率、 ρ ：水の密度、 g ：重力加速度、 λ_w 、 λ_a ：水および空気の体積含有率、 p ：絶対圧、 h ：変動間隙水圧水頭、 u_x, u_z ： x, z 方向の砂層の変位、 k ：透水係数、 G ：せん断弾性係数、 ν ：ポアソン比である。

(2) 計算方法および計算条件

a) 計算方法

上記の基礎式のうち、式(4)に含まれる絶対圧 p は変動間隙水圧水頭 h の関数であるため、式(4)は非線形方程式となる。したがって理論解を得ることが困難であることから、本研究においては、重み付き残差法の一つである Galerkin 法による有限要素解析を用いて数値解析した。

また、砂層内の応力状態を評価する方法として、基礎式より求められる水平および鉛直方向の変位 u_x, u_z を用いて、次式で示される応力-ひずみの関係より各応力を求め、図-10 に示されるモールの応力円より砂層内の応力状態を検討した。

$$\sigma_x = 2G \left\{ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right\} \quad (5)$$

$$\sigma_z = 2G \left\{ \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right\} \quad (6)$$

$$\tau_{xz} = G \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \quad (7)$$

すなわち、原点とモールの応力円の接線が σ 軸となす角度 ϕ （以下、応力角と呼ぶ）と砂の内部摩擦角 ϕ' との間に次式が成立場合には、地盤強度が低下し不安定な状態に達したものとする¹⁴⁾。

$$\sin \phi \geq \sin \phi' \left(\sin \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right) \quad (8)$$

ここに、 ϕ は応力角、 ϕ' は砂の内部摩擦角を示す。また、 σ_1, σ_3 は主応力であり、次式で与えられる。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{xz}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2}{4} + \tau_{xz}^2} \quad (10)$$

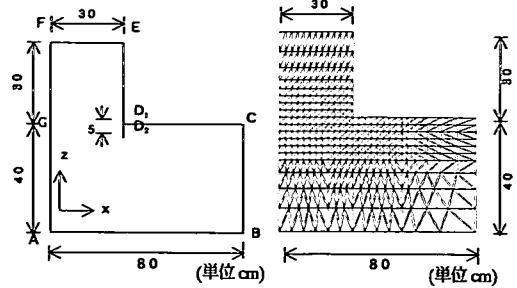


図-11 解析対象モデル

図-12 有限要素分割図

b) 解析モデルおよび計算条件

実験結果より示されるように、護岸裏込め土砂の流出に伴い、護岸前面砂地盤の表面形状は徐々に変化する。しかし、実験初期の段階の土砂流出量が大きいことを考慮すると、実験初期の護岸周辺地盤の動的挙動を知ることが重要であることがわかる。そこで、以下の解析では、変動水圧が作用する護岸周辺地盤の間隙水圧分布および浸透圧分布を解析するにあたり、図-2 に示した初期状態の砂層をモデル化した図-11 に示すような解析モデルを採用した。なお、図-12 は、解析に用いた有限要素分割図を示している。

本解析で使用する境界条件は、以下に示すとおりである。

- ①AF, BC, D₂E で $u_x = 0$
- ②AB で $u_z = 0$
- ③CD₁ で $h = h_s$ ， EF で $h = 0$
- ④AB, BC, DE, AF で $\partial h / \partial n = 0$ (n は境界の法線方向)

$$⑤CD_1, EF \text{ で } \sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz} = 0$$

ここに、 u_x, u_z は x, z 方向の変位、 h_s は図-11 の護岸前面砂層表面上に作用する変動水圧で、ここでは、実験結果により得られた Pt.1 の変動水圧を護岸前面砂層面上に一様に与えた。また、基礎式に含まれる諸定数の値は、実験等を考慮して以下の値を採用した。

$$\begin{aligned} \lambda_w &= 0.40, \lambda_a = 0.03, \beta = 4.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}, \\ G &= 3.45 \times 10^8 \text{ N/m}^2, \nu = 0.45, P_0 = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2, \\ \Delta t &= 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}, \rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, g = 9.8 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

その他、各ケースに対する解析条件は、表-1 のとおりである。

(3) 数値解析結果の検討

図-13 は、Case 1 の場合の実験開始時における各測点での変動間隙水圧の 2 周期分の時間変化について。実験結果と数値解析結果を比較したものである。

まず、解析結果においても実験結果と同様に、護岸

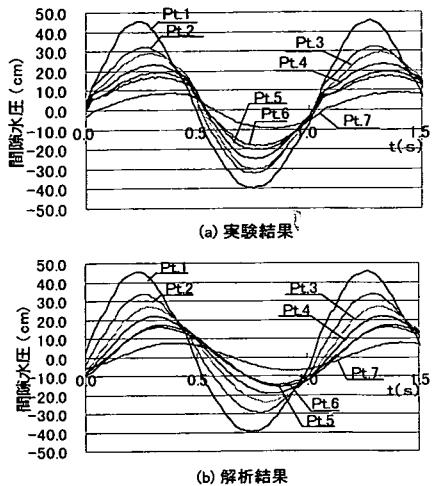


図-13 間隙水圧分布の実験並びに解析結果

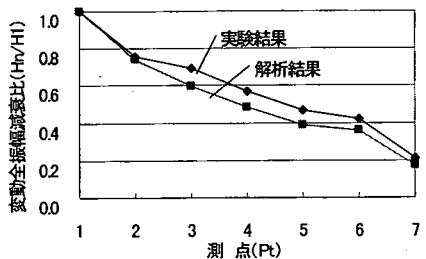


図-14 間隙水圧の変動全振幅減衰比

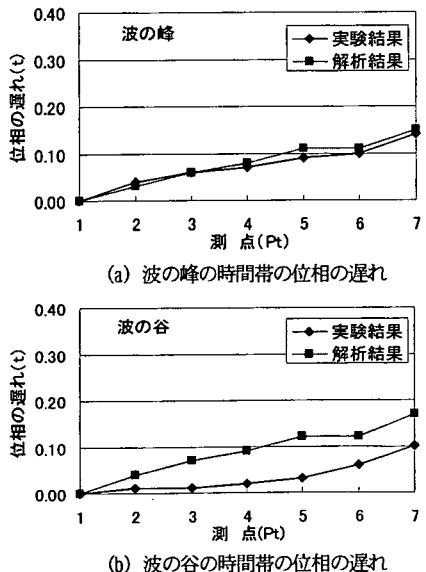


図-15 間隙水圧の位相の遅れ

前面砂層面上に作用する変動水圧が、砂層内へ振幅減衰および位相の遅れを伴いながら裏込め砂層内部へ伝播することがわかる。以下において、振幅減衰および位相の

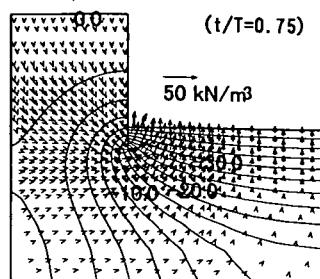


図-16 等間隙水圧および浸透力分布 (Case 1)

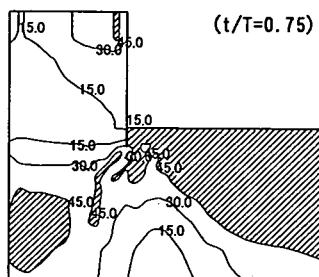


図-17 応力角分布特性 (Case 1)

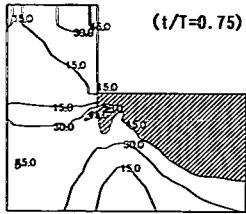
遅れについてさらに詳細に検討する。

図-14は、図-13に示される変動間隙水圧の実験値と解析値の波高の減衰比（各測点の波高とPt.1の波高との比）を比較したものである。波高の減衰比はPt.3～Pt.6において解析値が若干過小評価にあるが、その値は数%程度とほぼ実験値と等しい結果となっている。

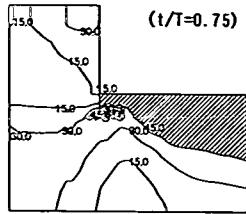
図-15(a), (b)は、それぞれ波の峰と波の谷における位相の遅れについて実験値と解析値を比較したものである。波の峰における位相の遅れについては、両者はほぼ一致している。しかし、波の谷の時においては、解析の方が位相の遅れが大きくなっている。これは、図-4の無次元有効応力の実験結果に示されるように、護岸前面の砂層が液状化して地盤が緩むことにより、変動水圧が伝播しやすくなつたためであり、このような現象を考慮していない弾性解析における精度の限界を示すものである。

このように部分的な問題点はあるものの、解析値は実験結果の示す地盤内の間隙水圧の伝達傾向を定性的に再現できているものと判断される。また、波の谷の時の間隙水圧の波高減衰と位相の遅れの解析値は実験値よりやや大きめに評価しており、地盤の安定性の面から見ると、本解析結果はより液状化し易い結果を示すこととなる。したがって、本解析手法を用いて構造物を設計する場合、安全サイドに設計することになる。

本研究は、護岸周辺部の地盤強度の低下領域を予測し、設計指針へ取り入れることを目的としており、その為にはなるべく簡便な計算手法が望まれる。こうした点を考

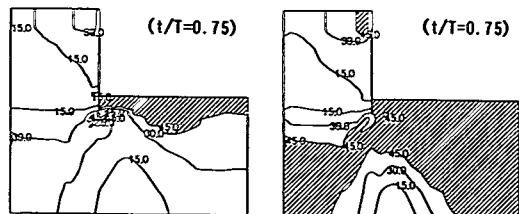


応力角分布 (Case 2)

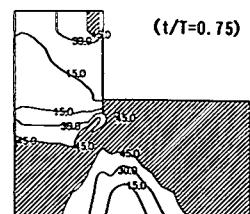


応力角分布 (Case 3)

図-18 応力角分布に及ぼす振幅の影響



応力角分布 (Case 4)



応力角分布 (Case 5)

図-19 応力角分布に及ぼす周波数の影響

慮し、以下では本解析手法を用いて護岸周辺地盤の力学挙動を検討することにする。

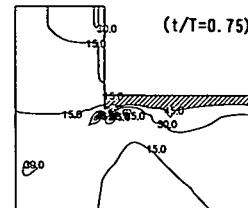
図-16は、Case 1について数値解析した結果より得られた等間隙水圧線および単位体積当たりの浸透力の大きさを示したものである。この図は、周期的に変化する変動水圧により護岸周辺部の砂が最も流動化しやすい時間帯、すなわち、護岸前面における水圧が平均水圧より下がった時間帯（図-13における $t/T=0.75, T$ ：周期）の解析結果を示している。

この図より、護岸背面から護岸前面へと廻り込むように裏込め土砂を流出させようとする浸透力が発生し、護岸の根入れ周辺砂層の浸透力がかなり大きくなっていることがわかる。浸透力分布の示す傾向は、写真-1で示した根入れ先端部の土砂流出の傾向と比較的良く一致している。解析の結果より示された護岸裏込め土砂を流出させようとする浸透力の発生は、図-13で示した変動水圧の1周期の間で見るとわずかな時間帯で生じる現象である。しかし、長期に渡る変動水圧の作用を受けることにより、裏込め土砂が徐々に護岸前面に移動することが予測される。このことより、変動水圧場において護岸周辺部に発生する浸透力と裏込め土砂の流出現象とは密接な関係があることがわかる。

図-17は、Case 1における水圧下降時の砂層地盤内の応力角分布を示したものである。ここでは、地盤が強度低下し、不安定な状況における砂層内の応力状態は、式(8)が成り立つ場合としている。一般的には締め固まった地盤においては、内部摩擦角の値として $\phi = 30^\circ$ 程度を用いられるが、ここでは試案として地盤が高密度化している状況を仮定し、内部摩擦角の値として $\phi' = 45^\circ$ を採用した。この場合、応力角 ϕ' が、砂の内部摩擦角 $\phi = 45^\circ$ を超える領域（以下、不安定領域と呼ぶ）は、図中の斜線部分の領域となる。

この図より、護岸前面の右側の境界近傍ならびに護岸裏側の左側境界下層部に大きな不安定領域が見られ、また根入れ先端部から根入れ後方においても不安定領域が発生していることがわかる。

図-16の浸透力分布とから合わせて考えると、護岸直前面部と根入れ先端部の地盤強度の状態が護岸裏込め



応力角分布 (Case 6)

図-20 応力角分布に及ぼす透水係数の影響

土砂の流出に大きく影響を及ぼすことがわかる。したがって、この個所の不安定領域が大きいほど、変動水圧の繰り返し作用下においては護岸裏込め土砂の流出が多くなる傾向にあると判断される。解析結果は、実験で得られたように、根入れ付近の地盤の有効応力が減少し根入れ先端部を回り込んで裏込め土砂が流出する状況を良く再現しているといえる。

(4) 応力角分布に及ぼす各種特性量の影響

以下の考察においては、周期的に変化する変動水圧により護岸周辺部の砂が最も流動化しやすい水圧下降時を対象として検討する。

a) 変動水圧の振幅の影響

Case 1（図-17）の解析結果をもとに、図-18では、変動水圧の振幅の違い（Case 2, Case 3）による地盤の応力角分布について数値解析した結果を示す。

同図より、Case 2 ($a = 35 \text{ cm}$) , Case 3 ($a = 30 \text{ cm}$)においては、根入れ先端部においてごくわずかな不安定領域の差が見られるが、振幅が $a = 40 \text{ cm}$ (Case 1)と大きくなると、護岸前面ならびに根入れ先端部と背後部において不安定領域が拡大してくるのがわかる。

とくに、護岸裏込め土砂の流出においては、護岸直前面部ならびに根入れ先端部付近における不安定領域の大きさが影響する。振幅の大きい変動水圧の作用下では、根入れ周辺部の砂地盤の不安定領域は大きく、強度の面からみて非常に不安定な状態に置かれており、実験結果に示されるように、裏込め土砂が流出しやすい状態であると考えられる。

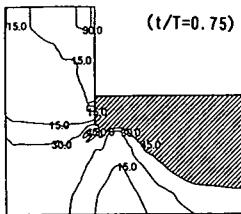


図-21 応力角分布に及ぼす根入れ長さの影響

b) 変動水圧の周波数の影響

図-17 (Case 1), 図-19 (Case 4, Case 5)は、変動周波数の違いによる砂層地盤内の応力角分布特性を示している。

これらの図より、Case 4 ($f = 0.5 \text{ Hz}$), Case 1 ($f = 1.0 \text{ Hz}$), Case 5 ($f = 1.5 \text{ Hz}$)と周波数が大きくなるほど、護岸前面ならびに根入れ先端下部において不安定領域が拡大しているのがわかる。とくに、 $f = 1.5 \text{ Hz}$ と周波数が大きくなる場合、つまり、単位時間における繰り返しの変動水圧が数多く発生する場合においては、護岸前面ならびに根入れ先端下部の砂地盤は、強度の面からみて非常に不安定な状態となり、裏込め土砂の流出が生じ易い状態にあるといえる。このことは、写真-2に見られるように、周波数が大きくなるほど根入れ先端部での流動範囲が拡がっていることと一致する。この結果より、応力角分布特性による本解析手法は、護岸裏込め土砂の流動範囲を簡便に予測するための有効な手段であるものと考える。

ただし、解析結果で示した根入れ先端付近の不安定領域の大きさは、水圧下降時の最も不安定領域が大きくなる時の瞬間的な状況である。流出土砂量を定量的に推定するためには、不安定領域の範囲とその状態が継続する時間との関係で捉える必要があるが、現段階では量的な関係の予測が行えるまでには至っていない。

c) 砂層の透水係数の影響

図-20は、砂層の地盤材料による透水係数の違い (Case 6)による砂層地盤内の応力角分布特性を示している。同図より、Case 1 (図-17)に比べ地盤の不安定領域は、護岸前面における砂層の表層部分のみであり、地盤強度は安定した状態といえる。このため、実験結果に示されるように、透水性が高い地盤においては、護岸裏込め土砂の流出が少ない結果となる。

したがって、根入れ周辺部において粒径が大きく透水性が高い材料を配置すれば、護岸裏込め土砂の流出を抑制する効果が期待できよう。

d) 根入れの長さの影響

図-21は、根入れ長さの違い (Case 7)による地盤内の応力角の分布状況である。同図と図-17 (Case 1)より、

護岸前面での不安定領域は、根入れを長くしてもほとんど変わらないが、根入れ先端部およびその裏側での不安定領域は、根入れを深くすることにより Case 1 に比べ減少傾向にあり、実験に示されるように土砂流出の抑制に効果があることを示している。

これは、護岸前面の根入れ長さが長くなると、護岸前面の土被り厚さが増し、流出抵抗力が増加して地盤強度を高めることができたためと考えられる。ただし、根入れ先端部では多少の不安定領域が残っているため、長期にわたって変動水圧を作成させた場合、裏込め土砂が徐々に流出していくことが想定される。

5. 結論

本研究では、変動水圧作用下における護岸裏込め土砂の流出現象に着目し、変動水圧の振幅、周波数、地盤材料の違いによる透水係数および護岸の根入れ深さの違いが、土砂流出現象に及ぼす影響を実験的かつ理論的に検討した。その結果、以下の点が明らかにされた。

- 1) 変動水圧場においては、波の峰と谷の時間帯における間隙水圧の伝播形態がそれぞれ異なる。すなわち、波の峰の時間帯と比べて、波の谷の時間帯では砂層面近傍の地盤が液化化するため、変動水圧が地盤内に伝播する際の振幅減衰および位相の遅れが小さくなる。
- 2) 変動水圧の振幅が大きくなると、地盤の不安定領域が増すため護岸裏込め土砂の流出量は多くなる。この場合、透水性の高い地盤材料を用いたり護岸の根入れを長くすることにより、裏込め土砂の流出を抑制できる。
- 3) 周波数の影響による流出量の特性を変動水圧の作用回数により検討を行ったが、定性的な傾向は得られなかった。また、本解析結果においては、流動範囲が増加すれば流出量が増大するという明確な傾向は認められなかった。しかし、護岸内部の砂層の流出の可視化による流動範囲と数値解析に示される不安定領域の範囲については、両者に密接な関係があることが示された。
- 4) 数値解析により得られる間隙水圧は、実験結果の変動水圧の振幅減衰や位相の遅れの特性を概ね再現できる。しかし、砂層を多孔質弾性体と仮定した解析であるため、砂層が液化化した場合の解析結果は、実験結果に比べ変動水圧の振幅減衰量や位相の遅れをやや大きめに評価することになる。
- 5) 浸透力分布の解析結果によれば、波の谷の時に発生する浸透力の作用方向は裏込め土砂の流動方向と一致しており、浸透力は裏込め土砂の流出に重要な役割を果す。また、応力角分布より、応力角が大きく

地盤状態が不安定な領域は、根入れ先端部や護岸直前面で拡がる。この応力角の大きな領域のみから裏込め土砂の流動量との定量的な関係を予測することは現段階では困難であるが、応力角の大きな領域が拡大すると裏込め土砂の流出量が多くなる。

以上のように弾性解析による簡単な手法により定性的に地盤の不安定な状況は確認できた。しかし、弾性解析では地盤が液状化した場合の現象の再現性には限界があり、各種特性変量と流出量との定量的な関係を予測するまでには至らなかった。

今後は、不安定領域として設定する応力角の角度や土砂流動の指標となる各種特性量についてさらに詳細な検討を行うとともに、流動化解析の検討を進め液状化後の現象の再現性の向上を図ることにより、最適な護岸裏込め土砂の流出予測モデルを確立し、有効な流出防止の設計指針案を提示していく必要があると考えている。

謝 辞：本研究を遂行するにあたっては、坪田裕至氏(中国電力株式会社)はじめ水工学研究室の大学院生、学生諸氏の協力を得た。また、日本学術振興会科学研究費の基盤研究 (B)(1) №12450202、基盤研究 (C)(2) №11650529 の補助を受けたことを付記し、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 名合宏之：変動水圧による砂層の液状化に関する研究、水理講演会論文集、第 26 卷, pp.589-594, 1982.
- 2) Maeno, S. and Nago, H. : Numerical analysis on the dynamic behavior of sea bed around breakwater, *GEO-COAST'91*, pp.591-595, 1991.

- 3) 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 年港湾技術研究所講演会講演集, pp.77-133, 1984.
- 4) 名合宏之、前野詩朗：変動水圧作用下における護岸の裏込め土砂の吸出しに関する研究、水理講演会論文集、第 32 卷, pp.595-600, 1988.
- 5) 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水圧の解析、土木学会論文集、第 411 号 II-12, pp. 217-225, 1987.
- 6) 善 功企、山崎浩之、佐藤 泰：海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析ー、港湾技術研究所報告、第 28 卷第 3 号, pp.29-57, 1984.
- 7) 前野賀彦、唐内仁司、鈴木芳博、矢部興一：海底地盤の波浪による液状化と底質浮遊の現地観測、海岸工学論文集、第 40 卷, pp.576-580, 1993.
- 8) 名合宏之、前野詩朗、小谷裕司、西平福宏：変動水圧場における護岸の裏込め土砂の流出機構に関する研究、水工学論文集、第 39 卷, pp.721-726, 1995.
- 9) 岩崎福久、田中茂信、佐藤慎司、名合宏之、前野詩朗、小谷裕司：海岸堤防の空洞化発生機構に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 42 卷, pp.1026-1030, 1995.
- 10) 前野詩朗、小谷裕司、坪田裕至、名合宏之：高波浪場における海岸堤防周辺地盤の動的挙動に関する研究、海岸工学論文集、第 46 卷, pp.961-965, 1999.
- 11) 前野詩朗、小谷裕司、星山知恵：変動水圧場における護岸の裏込め土砂の流出限界に関する研究、海岸工学論文集、第 47 卷, pp.926-930, 2000.
- 12) Biot, M.A. : General Theory of Three-Dimensional Consolidation, *J. Appl. Phys.*, Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 13) DeWiest, R. J. M. : *Flow Through Porous Media*, Acad. Press, New York and London, pp.337-344, 1969.
- 14) Yamamoto, T. : Wave-induced pore pressure and effective stress in inhomogeneous seabed foundations, *Ocean Engineering*, Vol.8, pp.1-16. 1981.

(2000. 12. 4 受付)

FLOW OUT OF BACK-FILLING SAND BEHIND SEA WALL UNDER CYCLIC WATER PRESSURE VARIATION

Yuji KOTANI, Chie YOSHIMURA, Shiro MAENO and Hiroshi NAGO

Some hydraulic structures collapse due to flow out of the back-filling sand behind a sea wall, under flood and stormy waves. This type of destruction caused by the cavity behind the sea wall is closely related to cyclic loading of water pressure acting on the sand surface around the structure. In order to get basic information to establish a prediction technique of flow out of the back-filling sand under cyclic water pressure variation, small-scale tests were carried out considering the characteristics of the cyclic loading and the sand bed. Furthermore, the stress state in the sand bed was analyzed by the numerical analysis using poro-elastic theory. Effect of various characteristic variables on fluidization was clarified experimentally and theoretically.