

波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測

前野 賀彦*・唐内 仁司**・鈴木 芳博***・矢部 興一****

1. 序 論

沿岸に海岸構造物を設置する場合、構造物の耐波安定性の検討だけでは不十分であり、その基礎地盤の耐波安定性もまた考慮されるべきであることは、過去の被災例やこれまでの研究成果が示しているところである。また、海岸侵食対策に当たって、砂移動のメカニズムを明らかにすることは重要な課題であり、従来より各種の室内実験や現地観測が行われている。このような底質移動を含む海底地盤問題が、海底地盤内の間隙水圧変動と密接に関連していることも、最近の研究により明らかになってきている(前野, 1988)。

名合(1982)は、河川における洗掘現象が砂層中の間隙水圧変動と関連するものと考え、変動空気圧を作用させる水槽を用いて砂層中の間隙水圧の発達特性を検討すると共に理論的検討も行った。その後、善ら(1987)は、名合同様の水槽を用いることにより変動水圧を作用させて、砂層中の間隙水圧の上昇を確認すると共に、ブロック模型が砂層の流動化にともなって沈下することを確認している。しかしながら、このような間隙水圧の上昇が拘束された水槽内の現象であり長時間に渡り変動水圧を作用させた結果であることから、より現実に近い状態での確認が求められた。前野・内田(1990)は、より現実に近い状態での砂層の液状化やブロックの沈下を確認するために遠心載荷装置を用いた実験を行っているが、透水性について相似性を保つことができないことや実験に用いる底質の粒径の問題などから、波浪による海底地盤内の間隙水圧の再現には至っていない。

このような経緯から、最終的には現地観測による海底地盤の液状化発生の確認が必要とされた。そこで、善ら(1989)は、運輸省港湾技術研究所波崎観測施設にて、海底地盤砂層中の間隙水圧および土圧を測定した。また、酒井ら(1991)も、京都大学防災研究所大渦観測施設にて海底地盤砂層中の間隙水圧の測定を行った。また、鶴谷ら(1990)は、地盤の液状化が発生すると考えられる

間隙水圧の上昇した状態で浮遊砂の濃度が上昇することを観測により確認した。これらの観測を通じて、冬期風浪・暴風波浪により沿岸の砂層が液状化する可能性が指摘された。海底地盤が大規模に流動化するのを観測するためには、観測時に暴風波浪に遭遇する必要があること。また、流動化を確認するためには、間隙水圧の測定と同時に変動土圧を測定する必要があることが問題点として指摘できる。表層の砂が移動し、海底地盤表層が侵食堆積を繰り返す状態で正確に土被り圧を測定するには、従来の土圧計による測定には問題があり、新たに動的な土圧を精度良く測定するための装置の開発が望まれた。前野ら(1992)は、このような目的から水中土被り圧の測定のための有効土圧計と任意水深で変動間隙水圧を測定するための動間隙水圧計を開発し、運輸省波崎海洋観測施設にて暴風波浪作用下の海底地盤内の有効土圧変動の測定に用いている。そこで、本研究では、前野ら(1992)が開発した有効土圧計と動間隙水圧計を用いて、暴風波浪作用下の海底地盤表層の間隙水圧変動と有効土圧変動および水面変動を現地観測することにより、暴風波浪時の砂の移動と海底地盤の液状化との関連を検討した。

2. 現地観測の概要

現地観測は、運輸省港湾技術研究所波崎海洋観測施設の棧橋を利用して、1992年6月24日から7月1日の8日間に渡って行った。その間の6月24日に低気圧の通過による時化に、6月30日夜には台風の接近に遭遇した。測定地点は、図-1に示す棧橋の計測室から320m沖合いとした。それは、この位置に超音波式波高計が設置されていることと、過去の定常観測結果によれば比較的砂移動が激しいことに基づく選択である。この地点の水深は、観測装置設置時点で6.15mである。2つの動間隙水圧計と有効土圧計を含む観測装置を図-2に示すように配置し、海底地盤中の間隙水圧変動と有効土圧変動を測定し、海面変動と海底地形変化の波崎海洋観測施設における定常観測項目と併せて、海底地盤の液状化と底質移動を検討した。計器の埋設深度は、観測期間と同じ時期の過去の暴風波浪による海底地形変化の履歴に基づいて0.75mとした。また、超音波式波高計は波が砕けて空気

* 正会員 農博 日本大学助教授 短期大学部建設学科
 ** (株)共和電業主任 計測エンジニアリング部
 *** (株)共和電業係長 計測エンジニアリング部
 **** (株)共和電業部長 計測エンジニアリング部

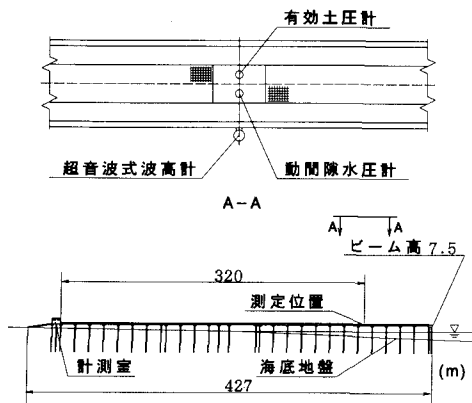


図-1 波崎海洋観測施設における測定位置

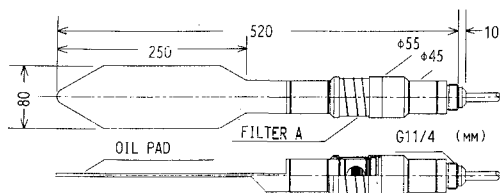


図-3 有効土圧計の構造

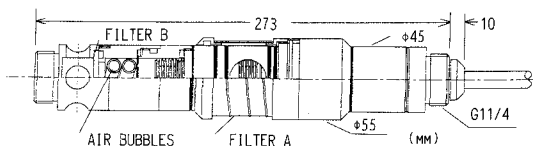


図-4 動間隙水圧計の構造

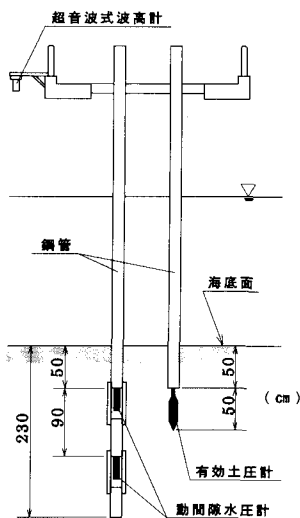


図-2 計測器の設置状況

が混入した場合に波高を大きく計測する傾向を有しているので、海底地盤表面で圧力式波高計を設置した。

これらの測定には、前野ら (1992) が開発した水中土被り圧 (有効土圧) 変動の測定を目的とした図-3 に示す有効土圧計と任意の水深下にある海底地盤中の間隙水圧変動を測定するための図-4 に示す動間隙水圧計を用いた。これらの圧力変換器は共に同じ原理に基づく差圧計により成っている。その原理は、前野ら (1992) に詳しいので、ここでは言及を避けることにする。

3. 海底表層の液状化層厚と浮遊砂量

海底地盤の液状化状態における有効応力および間隙水圧について、図-5 を用いて以下に説明する。図-5 では静水圧による間隙水圧と静的な土圧のみを記述しているが、実際には波浪により砂層表層に振幅 P_0 の波圧変動が作用しており、それに対応して間隙水圧変動 P_z が砂

層中に発生している。

砂層が液状化していない状態では、図-5(a) に示す状態に動的な成分を加えることにより、有効土圧 σ' は次式で表される。

$$\sigma' = (1-n)(\rho_s - \rho_w)gz + (P_b - P_z) \dots (1)$$

ここで、 n は間隙率、 g は重力の加速度、 z は地盤深度、 ρ_s と ρ_w はそれぞれ土粒子と海水の密度である。一方、間隙水圧は次式により表される。

$$u = \rho_w g(z+h) + P_z \dots (2)$$

また、砂層表層の一部が液状化した場合には、図-5(b) に示す状態から、有効応力 σ' と間隙水圧 u は次のように求まる。

$$\sigma' = (1-n)(\rho_s - \rho_w)g(z-z_l) + (P_b - P_z) \dots (3)$$

$$u = (1-n)(\rho_s - \rho_w)gz_l + \rho_w g(z+h) + P_z \dots (4)$$

ここで、 z_l は液状化層厚である。また、(3)・(4)式では、流動化した砂層とそうでない砂層の間隙率を n と区別していないが、実際には流動化する過程において間隙率は変化している。流動化した層とそうでない層の間は不連続というよりは連続的に間隙率が変化していると考えられる。ここでは、問題を単純化するため間隙率を一定として式を誘導した。さらに、液状化した砂層が波により持ち去られた場合には、図-5(c) に示す状態から、有効応力 σ' は (3) 式により、 u は (2) 式により求まる。

したがって、砂と海水の密度 ρ_s 、 ρ_w と間隙率 n が求めれば、 $(P_b - P_z)$ の項が変動成分であるので、有効応力変動の最小値から液状化層厚 z_l を求めることができる。また、砂の移動量は図-5(b) の砂層の液状化状態から図-5(c) の砂が持ち去られた状態へのシフト、つまり (4) 式と (2) 式の差 $(1-n)(\rho_s - \rho_w)gz_l$ を観測から得ることにより求められる。

しかしながら、波の作用を受けて砂層表層は液状化と

高密度化を繰り返していると考えられることから(善ら, 1987), 実際には砂層表層の平均締固め密度を全層に渡って一定とすることには問題がある. 波の条件により液状化する砂層厚は異なり, 液状化した後海水中に浮遊し再堆積する. 底質表層の締固め特性について検討した研究としては, Fukue *et al.* (1987) のベントナイト・カオ

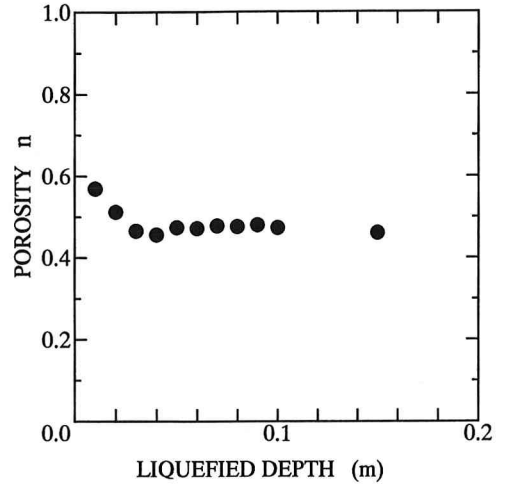
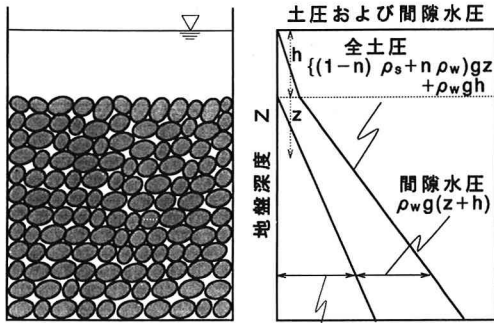
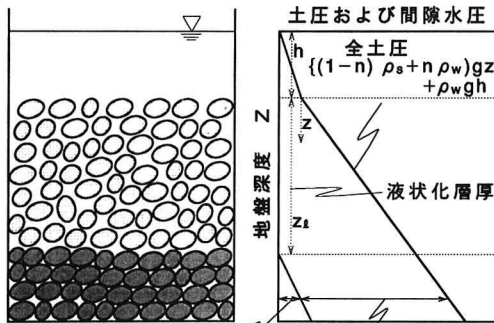


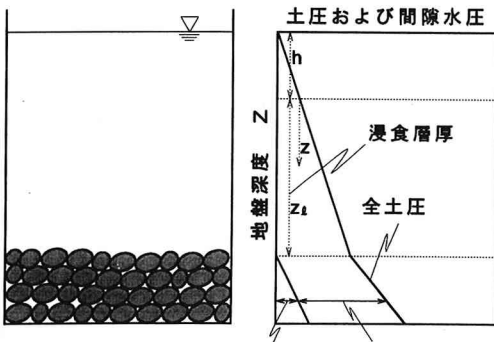
図-6 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測



(a) 砂層が液状化していない状態



(b) 砂層の表層が液状化した状態



(c) 液状化した層が持ち去られた場合

図-5 砂層内の有効応力と間隙水圧

リン, 砂質シルトやシルト質砂の海洋底質についてのものである. 彼らの室内実験結果によれば, 5 cm 以上の層厚では平均間隙比が一定値にほぼ漸近するのが認められる. その傾向は粘土質から砂質に向かうに従って顕著である. 本研究では砂を対象としているので, 層厚に関係なく間隙比が一定と仮定した. この仮定を検証するために, 現地観測を行った波崎の砂について液状化層厚と再堆積後の液状化層の平均間隙率の関係を図-6 に示した. その結果によれば, 液状化層厚 3 cm 程度で平均間隙率が一定となっているのが認められる. したがって仮定は妥当なものとする.

以上述べた液状化時の海底地盤内の有効応力および間隙水圧と液状化層厚および砂移動量の関係を, 実際の観測結果を想定して図-7 により説明する. 波高が大きく波形勾配の大きな波が海底地盤上を通過する場合, 海面が急上昇することにより海底砂層表面に波圧が作用する. この場合波圧変動の変化が急激であるため圧力の大部分を砂層骨格が受け持つことになり有効土圧は波圧に対応して急激に増加することになる. 一方, 海底砂層内の間隙水圧変動は, 波圧変動に対して位相が遅れることから, 波圧変動の上昇に遅れて上昇しピークも遅れることになる. 有効土圧計はこの間隙水圧の変動にも追隨しているため, 間隙水圧変動のピークで有効土圧の最小値を示す. この最小有効土圧に対応して砂層が流動化し, その一部は海水中に浮遊することになる. 流動化した砂が浮遊した状態にあるか, または波により持ち去られた場合には, 有効土圧は波の通過前の値に復することなく減少することになる. この減少量が持ち去られた砂の量に対応していることから, 砂の移動量を求めることができる. この時, 砂が浮遊状態であれば海水の見かけの密度が上昇することになり, 砂層中の間隙水圧はそれに対

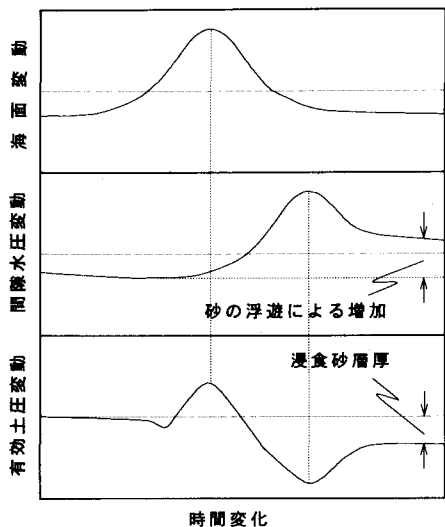


図-7 液状化層厚と浮遊砂量

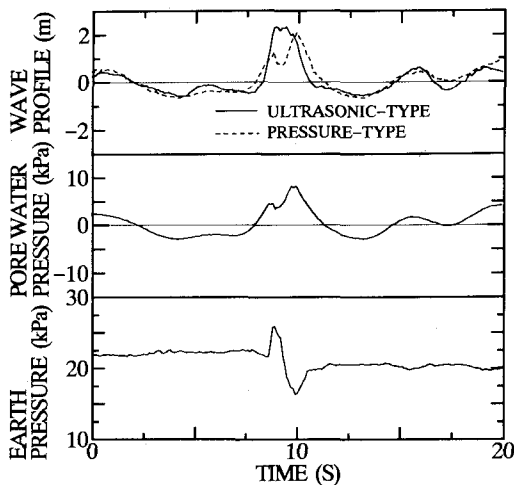


図-8 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測

応じて上昇し、海面変動に対応した値よりも上回ることになる。また、砂が波により持ち去られてしまった場合には、間隙水圧は減少し海面変動に対応したものになる。さらに、浮遊砂が再堆積した場合には有効土圧は波の通過以前の値に復する。逆に隣接する位置で巻き上げられた砂が浮遊し運ばれてきた場合には、間隙水圧は海面変動に対応した値を越えて浮遊砂による上昇を示すことになり、それらが再堆積した場合には有効土圧が上昇することになる。

このように動間隙水圧計、有効土圧計と波高計を組み合わせ測定することにより、砂層の液状化を確認するだけでなく、砂層の液状化層厚や浮遊砂量を求めることができ、さらに海底地盤が堆積過程にあるのか侵食過程にあるのかの判別を行うことが可能である。このような測定を面的に行うことにより、漂砂や洗掘といった砂移動問題を検討することが可能である。

4. 現地観測結果と考察

平成4年6月24日の低気圧の通過による時化の間でも最も大きな波高の波が通過した場合について水面変動・土圧変動・間隙水圧変動を図-8に示した。それによれば、有効土圧は計器設置時に比べて上昇しており、(1)式の右辺第一項により推定すると約83cm砂が堆積したことになる。また、有効土圧変動は波の最初の峰で最大値を示し、間隙水圧変動のピークで最小値を示している。それは、間隙水圧の上昇により有効土圧が減少すると、砂層が液状化し砂が海水中に浮遊することによる。さらに、浮遊砂の比重が海水の比重より大きいことから、それに対応して間隙水圧が上昇するという相乗の効果に

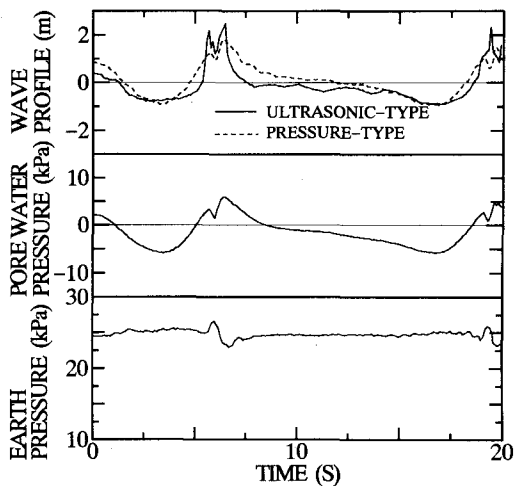


図-9 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測

よる。この場合には砂は波により持ち去られているので土被りが減少しているにもかかわらず間隙水圧は波の通過前と同じ値に戻っている。持ち去られた砂の厚さは(3)式の右辺第一項により推定すると約17cmである。また、有効土圧が最小となる時には約47cmの砂層が瞬間的に流動化したと考えられるが、その大部分は流動化層の下層から順次その場に再堆積したものと考えられる。

次に、図-9に波が碎波した場合で一部の液状化した砂が浮遊している状態の結果を示す。この場合には間隙水圧変動が2つのピークに割れ碎波圧特有の形状を示し、2番目のピークで有効応力変動が最小になり砂層が液状化している。液状化した砂は持ち去られずにその場に浮遊しているのが間隙水圧がその浮遊砂量に対応して

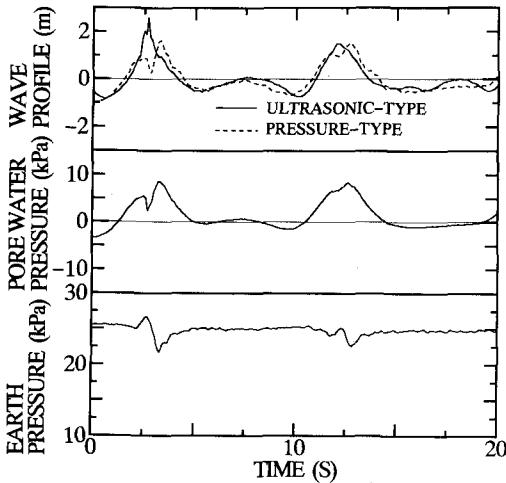


図-10 波浪による海底地盤の液状化と底質浮遊の現地観測

上昇していることから確認できる。この場合の浮遊砂量は 83 kg/m^2 である。ここでは、水圧式波高計を海底付近で用いる場合、浮遊砂による見かけの海水密度の上昇を招いてしまうので、海面変動の波形には問題があるが、超音波式の波高計を用いた。

最後に、図-10 に液状化した砂が波の通過後、その場に堆積して砂移動が認められない場合の例を示す。この場合、間隙水圧変動は海面変動に対応しており、有効土圧は波の通過前後で同じ値である。このように、流動化した砂層がすべて移動するのではなく、流動砂層が巻き上げられた場合にのみ運び去られる。時化の間にあっても個々の波により碎波位置が異なることから、この観測位置において碎波する大きな波により侵食が進行し、この位置よりも浅いところで碎波する波により巻き上げられた砂の一部は運ばれてきて堆積するものと考えられる。

5. 結 論

海底地盤中の有効土圧および間隙水圧変動と海面変動を同時に測定することにより、海底地盤の(1)液状化の発生およびその深度、(2)浮遊砂量、また(3)侵食か堆積かの砂の動態が明らかになる。砂層表層の液状化は、波の繰り返しによるのではなく、一つの波高の大き

い(波形勾配の大きい)波の通過により発生する。海底地盤中の土圧変動は、大きな波の最初の峰の通過時に最大値を示し、間隙水圧変動のピーク時に最小値を示す。また、地盤が流動化すると共に土圧は減少し、浮遊した後波により運び去られた場合には、その層厚に対応した土圧分が復せず、同じ位置に再堆積した場合は元の土圧に復する。一方、砂層が流動化した場合には、その砂の量に対応して間隙水圧が上昇する。流動化後浮遊した場合には海面変動に対応した間隙水圧に復さないが、浮遊砂が運び去られるか堆積した場合には海面変動に対応する。

謝辞：現地観測に際し、運輸省港湾技術研究所波崎海洋研究施設の棧橋およびその附属施設を使用させて頂いたことを記し、関係各位に深謝の意を表す。また、本研究の一部は、文部省科学研究費国際学術研究共同研究(No. 04044121)(代表者名合宏之岡山大学教授)の援助を受けたものであることを付記し謝意を表す。

参 考 文 献

- 酒井哲郎・間瀬 肇・D. T. Cox・上田康浩 (1991): 波浪による海底地盤内間隙水圧変動の現地観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 816-820.
- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 運輸省港湾技術研究所報告, 第26巻, 4号, pp. 125-180.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989): 波浪による海底地盤中の応力変化に関する現地観測, 海洋開発論文集, 第5号, pp. 85-90.
- 鶴谷広一・惟住智昭 (1990): 碎波帯における底質の流動化と浮遊について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 289-293.
- 名合宏之 (1982): 変動水圧による砂層の液状化に関する研究, 第26回水理講演会論文集, pp. 589-594.
- 前野賢彦 (1988): 砂層と水の境界付近のエネルギー損失の間隙水圧発達特性への効果, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 732-736.
- 前野賢彦・内田一徳 (1990): 遠心載荷装置による波浪をうける海底地盤内応力場の再現, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 754-758.
- 前野賢彦・唐内仁司・矢部興一・額瀬和美 (1992): 海底地盤内応力測定のための動間隙水圧計および有効応力計の開発, Proc. of Techno Ocean '92, Vol. 1, pp. 79-85.
- Fukue, M., N. Yoshimoto, and S. Okusa (1987): General characteristics of upper soil sediments, Marine Geotechnology, Vol. 7, pp. 15-36.