

波浪による海底地盤中の浸透流と液状化現象

善 功 企*・山 崎 浩 之**

1. 緒 言

海底地盤が波浪により液状化する可能性があることは、最近の理論的研究や室内実験等により指摘されており、この液状化の現象は、海底地盤の洗掘、漂砂、基礎地盤の破壊、異形ブロック等のもぐり込みなども密接な関連があると考えられている。しかしながら、これまで、液状化現象を実海域において観測した例はほとんどなく、はたして実際の海底地盤で液状化が発生するか否かは未確認の状況である。このような背景から、著者らは、液状化現象を実際に確認することを目的として、過去2年間にわたり現地観測を実施してきた。その結果の一部については既に報告しているが(善ら, 1989a; 1989b; 1990)、それによると、海底地盤中の有効応力は、波浪の進行により生じる“過剰”間隙水圧によって周期的に変動すること、また、この過剰間隙水圧が有効土被り圧よりも大きくなると液状化が発生することなどが確認されている。

今回の報告は、主として、地盤中に発生する浸透流と液状化という観点から、これまでの室内実験および現地観測データを再整理した結果について述べるもので、浸透流と液状化現象の関連を明らかにしたものである。

2. 浸透流と液状化

著者らは、波浪の作用を受ける海底地盤中の有効土被り圧 σ'_v が、次式で表されることを明らかにしている(善ら, 1987)。

$$\sigma'_v = \sigma'_{v0} + (p_b - p_m) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 σ'_{v0} : 静穏時の地盤中の有効土被り圧、 p_b, p_m : それぞれ、海底地盤表面および地盤中の水圧の変動量で、静穏時の静水圧からの増分を正とする。式(1)において、 $(p_b - p_m)$ は、有効土被り圧の波浪による変動量を表し、この変動は、 $-(p_b - p_m)$ で定義される過剰間隙水圧により引き起こされる。したがって、液状化の規準として、海底地盤中の有効土被り圧がゼロ以下にな

った場合 ($\sigma'_v \leq 0$) を考えると、

$$\sigma'_{v0} \leq -(p_b - p_m) \quad \dots\dots\dots(2)$$

が得られる。

また、過剰間隙水圧の発生により海底地盤中には浸透流が発生し、土粒子骨格に浸透力が作用する。このとき、有効土被り圧の深さ方向の増分は、Darcyの法則が成立つと仮定すると、下向き浸透流を正として、

$$\frac{\partial \sigma'_v}{\partial z} = j + \gamma' \quad \dots\dots\dots(3)$$

で与えられるから、有効土被り圧は、式(3)を積分して、

$$\sigma'_v = \int_0^z j dz + \gamma' z \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。

地盤中の浸透水圧 j および浸透流速 v は、式(1)、式(3)から、 $\partial \sigma'_{v0} / \partial z = \gamma'$ 、 $\partial p_b / \partial z = 0$ および $i = j / \gamma_w$ を考慮して、

$$j = \frac{\partial p_m}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$v = \frac{k j}{\gamma_w} \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。ここに、 k : 透水係数、 i : 動水勾配、 γ_w : 水の密度である。したがって、変動間隙水圧 p_m の深度分布および地盤の透水係数が得られれば、式(5)、(6)により、浸透水圧、浸透流速が求められる。本研究では、上記理論に基づいて、室内実験および現地観測の結果から浸透流と液状化の関連を調べている。

3. 室内実験および現地観測

(1) 室内実験

室内実験では、波長の比較的長い波を想定して、海底地盤を一次元的にモデル化した。初期相対密度が50%の砂層(厚さ1.9m)を図-1に示す装置模式図のシリンダー内に作成し、1.0 kgf/cm² (98 kPa)の静水圧を加えたのち、正弦波形の周期的な変動水圧を500波載荷した。したがって、本実験では流れ等により地盤に作用するせん断力については考慮していない。測定項目は、水圧、土圧、地盤沈下、変位、密度、飽和度等であ

* 正会員 港湾技術研究所土質部動土質研究室室長
 ** 正会員 港湾技術研究所土質部動土質研究室研究員

るが、本文では、間隙水圧に関するデータについて述べる。間隙水圧計は、容量 2 kgf/cm^2 (196 kPa) のストレンゲージタイプを用いており、図-1 に示すようにシリンダーの側壁に9個取り付けられている。計測では、代表的な波数ごとに波の1周期分を連続してデータレコーダーに記録している。室内実験に用いた試料は、豊浦標準砂である。なお、実験方法の詳細は別途報告されている(善ら, 1987)。

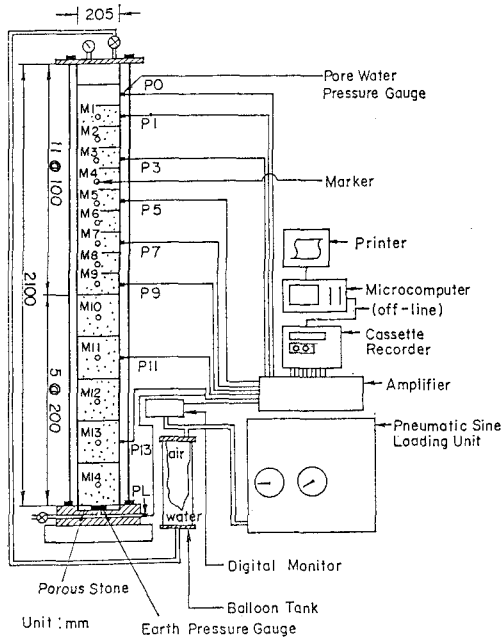


図-1 実験装置模式図

(2) 現地観測

現地観測は、茨城県鹿島郡須田浜地先に建設された港湾技術研究所「波崎海洋研究施設 (HORF)」の先端部、水深約 4 m の地点で実施された。この地点の砂地盤は、表層部に N 値 $6 \sim 8$ 程度の砂が堆積しており、この砂層を観測対象とした。図-2 に観測計器の設置状況を示す。観測項目は、水圧、土圧、砂面移動、流速のほか、波高、潮位等が観測されている。水圧の変動は、5個の間隙水圧計により計測した。これらは、 0.5 m 間隔でステンレスパイプ内に組み込まれ、ステンレスパイプはウォータージェットにより地盤中に埋設された。観測は、荒天時をねらって、2時間ごとに20分間、24時間継続して行った。現地観測の詳細は別途報告されている(善ら, 1989b)。

(3) 砂の物理的特性

室内実験に用いた豊浦標準砂(比重: 2.647 , 均等係数: 1.79 , 50% 粒径: 0.181 mm) および現地観測地点の波崎砂(比重: 2.689 , 均等係数: $1.5 \sim 1.6$, 50% 粒

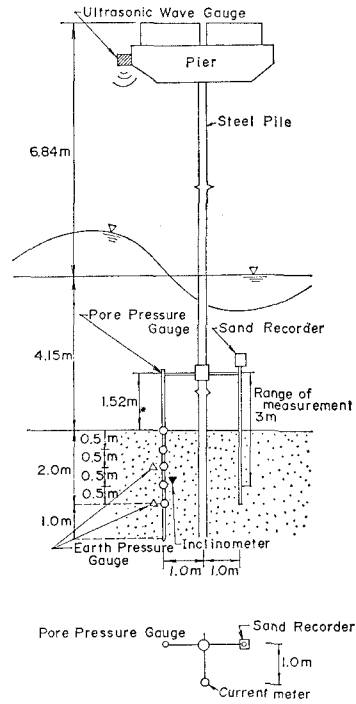


図-2 計器埋設状況

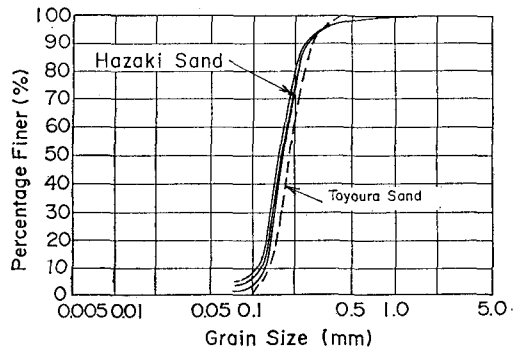


図-3 砂の粒径加積曲線

径: $0.16 \text{ mm} \sim 0.17 \text{ mm}$) の粒径加積曲線を図-3 に示す。両者とも比較的単粒径の均一な砂である。

4. 海底地盤中の変動間隙水圧

海底表面の水圧変動 p_b に対する海底地盤中の間隙水圧の応答 p_m について、既往の室内および現地観測データを取りまとめた結果(善ら, 1987)に今回のデータを追加したものが図-4である。図-4では、無次元深度 $z/l \approx 0.45$ (ここに、 l : 透水層厚、 z : 深度)における水圧比 p_m/p_b を周期 T に対してプロットしている。黒印●は今回の現地観測結果であるが、現地観測では、不透水層までの深さが明確でないので、深度 0.40 m と

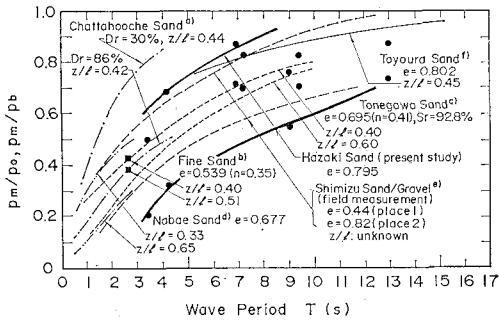


図-4 周期と水圧比

1.40 m のデータをそのままプロットしている。図-4によると、水圧比は周期が短くなるにしたがって小さくなる傾向にあり、周期が短いほど海底表面と地盤中の間隙水圧の勾配が大きくなることを意味している。別な表現をすると、周期が短いほど過剰間隙水圧の発生量が大きくなることになる。

5. 室内実験における浸透流と液状化

(1) 水圧比

図-5に図-1の装置を用いて行った室内実験から得られた水圧比 p_m/p_0 の深度分布を示している。●は波の峰、○は波の谷における値である。加えた水圧波形は、周期 7s の正弦波であるが、水圧制御上の問題から水圧変動振幅 p_0 は、波の峰と波の谷ではやや異なっている。ただし、水圧比としてみると、両者はほぼ等しい分布形を示している。図-5によると、水圧比の深度に対する勾配は浅層で大きく、深くなるにつれて一定となる。

(2) 浸透流と液状化

図-5に示した測定結果から、それぞれ式(5)、式(6)を用いて浸透水圧 j および浸透流速 v ならびに動水勾配 i を求めたものが図-6の左側である。図-6では、波の谷における結果を示しているが、このときの浸透水圧 j (地盤の上向きが負) は、地盤表面で最も大きく $-2 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$ (-19.6 kN/m^2)、動水勾配 i は2程度となっている。また、浸透流速 v は、 $-5.6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 程度であり、それほど大きな値ではないが、地盤下方向からの非定常流が存在することがわかる。図-6の右側は、式(4)から得られる地盤中の有効土被り圧 σ'_v (○: 浸透圧より得られた結果) と式(1)により得られる有効土被り圧 σ'_v (実線: 過剰間隙水圧より得られた結果) もあわせて描かれているが、両結果は、互によく一致しており、浸透圧による有効土被り圧の変化と過剰間隙水圧による有効土被り圧の変化は表裏一体をなすことが明らかである。また、波のない静穏な

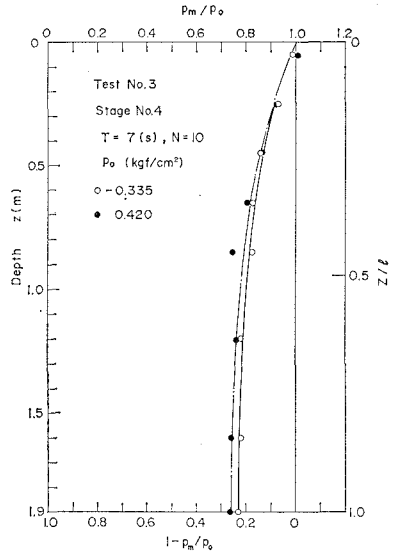


図-5 水圧比 (1 kgf/cm² = 98 kPa)

状態での有効土被り圧 σ'_{v0} (破線) に比較して両結果は著しく小さくなっており、深度 0.54 m 以浅では、 σ'_v はゼロ以下となっている。このことは、その深度以浅において、液状化現象が発生していることを意味する。浸透流による液状化現象は、砂地盤がクイックサンド状態になった現象と同じで、同様な現象に、砂地盤のボイリングやパイピングなどがある。これらは地盤中の定常浸透流により引き起こされる点で波浪による液状化現象とは異なるが、現象的にはほぼ同じものと考えられる。地盤が液状化すると、砂粒子相互のかみあいがはずれ地盤は液体状となり、かつ地盤中には上向きの流れが存在していることから、微細な砂粒子は水中に浮遊することになる。図-6の実験では、浸透流速 v はかなり小さいので顕著ではなかったが、別途に行った周期のさらに短い ($T=3\text{s}$) 同様な実験において、上述のことが確認されている。なお、ここには示していないが、海底地盤の挙動を理解するうえでは、波の峰付近で地盤下向きの浸透流が発生し、地盤を締め固めようとする力が作用することにも留意すべきであろう。

6. 現地観測における浸透流と液状化

(1) 変動間隙水圧

図-7に現地観測記録の一例を示しているが、図-7の最上段は砂面計の記録、最下段は超音波波高計による記録である。 p_0 の記録は必ずしも海底地盤表面に対応しておらず、海底表面から 35 cm 上側に位置している。ただし、静水圧を除いた変動水圧成分のみを検討する場合には、この差は無視しうる程度であることから、観測値をそのまま p_0 として用いている。観測記録の整理で

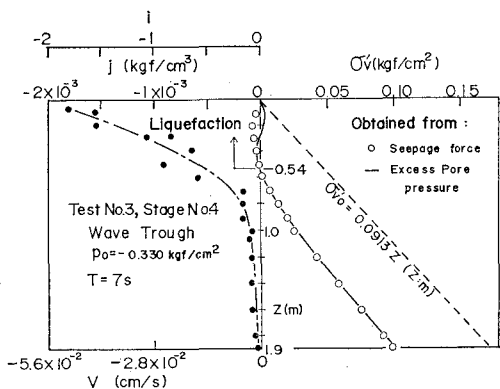


図-6 浸透流と液状化 (室内実験: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$, $1 \text{ kgf/cm}^3 = 9.8 \text{ MN/m}^3$)

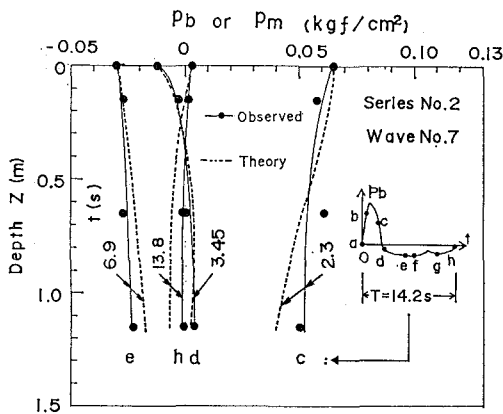


図-8 海底地盤中の水圧変動 ($1 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$)

は、 p_b の1波ごとに波の整理番号 (Wave: No.) をつけ、各波ごとに時系列的に変動間隙水圧 p_m を追跡している。

図-8 は、図-7 に示した観測シリーズ2の波の番号7の1周期分の変動間隙水圧 p_m および海底面の水圧変動 p_b (深さ $z=0$ における p_m) を描いたものである。図-8 の $c \sim h$ は、それぞれ図-8 中の時間 t と p_b の関係を表す波形上の各点 $c \sim h$ に対応している。図-8 から明らかなように、 p_b の変化速度が小さな e, h においては p_b と p_m を結んだ線は直線的であり、海底面の水圧変動量と地盤中の水圧変動量がほぼ等しくなっている。一方、 p_b の変化速度が大きな c, d では、海底面の水圧変動量と地盤中の水圧変動量の間にかかなりの差があり、 $(p_b - p_m) \neq 0$ となっている。したがって、式 (1) を参照すると、この差分だけ地盤中の有効土被

り圧が変動することが理解される。また、図-4 に周期 T と水圧比 p_m/p_b の関係を取りまとめたが、砕波帯などにおける不規則な波に対しては、 p_m/p_b は周期に依存するのではなく、敵密には海底面に作用する水圧の変動速度に依存すると考えられる。

(2) 浸透流と液状化

図-9 は、図-8 の d (すなわち、 p_b の波の峰から谷へ急激な変化が生じたところ) の分布から、図-6 と同様にして浸透水圧 j 、浸透流速 v 、動水勾配 i および有効土被り圧 σ'_v を求めたものである。現地観測結果では、室内実験結果に比較して液状化深さは小さくなっているものの 0.15 m 以浅において液状化が発生していると考えられる。また、海底地盤表層部の浸透流速 v は、 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 程度と室内実験結果と同様それほど大きくはない。ただし、浸透流速そのものは小さくと

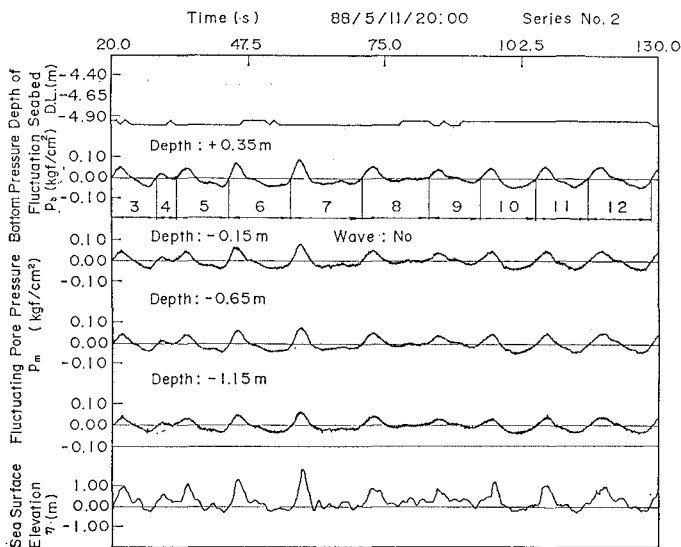


図-7 観測記録例 (観測シリーズ No. 2: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$)

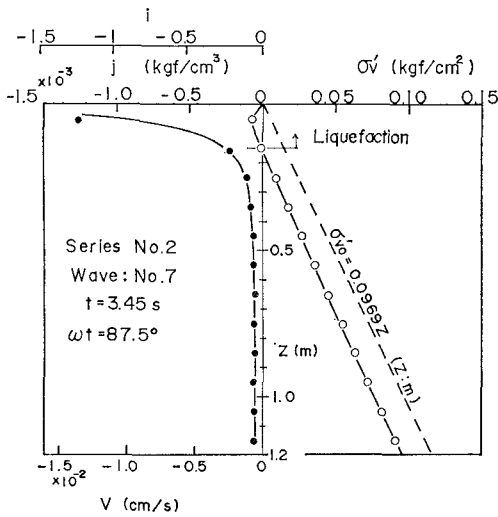


図-9 浸透流と液状化 (現地観測: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$, $1 \text{ kgf/cm}^3 = 9.8 \text{ MN/m}^3$)

も、実際の碎波帯域内の海底地盤表層では、地盤に沿った流れや渦が存在することから、地盤が液状化した場合には、砂の“巻上げ”や“輸送”などが比較的容易に生じるものと考えられる。さらに、地盤が液状化することは、地盤の支持力が消失することを意味し、海底地盤上に設置された構造物の沈下やすべり破壊をもたらす可能性がある。

7. 結 語

(1) 海底地盤中には、波浪による非正常浸透流が発生することが室内実験および現地観測により確認された。浸透流速は、海底地盤表面の水圧変動速度が速くなるにしたがって大きくなるが、これは、海底表面の水圧変動に対する地盤中の変動間隙水圧の応答が低下することによる。

(2) 液状化現象は、見方を変えれば、砂地盤がクイックサンド状態になった現象と考えられ、同様な現象に、ボイリングやパイピングなどがある。これらは、地盤中の定常浸透流によるものであるが、波浪による液状化現象は、非正常浸透流により引き起こされると考えられる。すなわち、浸透力と有効土被り圧の比較から得られるクイックサンド領域と、過剰間隙水圧から得られる液状化領域は完全に一致しており、地盤の液状化現象は、波浪により発生する非正常浸透流もしくは過剰間隙水圧に起因すると考えられる。

(3) したがって、波浪により発生する上向きの浸透流によって地盤の液状化が引き起こされた場合、海底表層部の砂粒子骨格は液体状となり、砂粒子が浮遊状態になると考えられることから、液状化現象は、砂の“巻上げ”や洗掘等を誘引する重要な原因の一つであると考えられる。

最後に、本研究における現地観測は、波崎海洋研究施設 (HORF) を活用して行われたもので、観測にあたり港湾技術研究所漂砂研究室加藤室長はじめ研究室各位には多大なる御協力をいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 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, 港研報告, 第26巻, 第4号, pp. 125~180.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989a): 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, 土木学会, 第5巻, pp. 85~90.
- 善 功企・山崎浩之・佐藤 泰 (1989b): 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—, 港研報告, 第28巻, 第3号, pp. 29~57.
- 善 功企・山崎浩之 (1990): 海底地盤の波浪による液状化現象をとらえる, 土木学会誌, 第75巻, pp. 10~11.