

## II-367

## 高飽和砂層中の音響伝播計測による空気含有率の測定

|             |     |        |
|-------------|-----|--------|
| 岡山大学環境理工学部  | 正員  | 名合 宏之  |
| 岡山大学環境理工学部  | 正員  | 前野 詩朗  |
| (株) ニュージェック | 正員  | 曾根 照人  |
| 岡山大学大学院     | 学生員 | ○平井 康隆 |

## 1. はじめに

著者らは、洪水時や波浪時に発生する変動水圧の作用により砂地盤の液状化現象が発生することを明らかにしている<sup>1)</sup>。また、この液状化に影響する最も重要な因子として地盤内にごくわずかに存在する空気を挙げている。したがって、現地地盤における空気含有量を知ることは液状化予測あるいはその防止対策を立てるうえで重要な課題である。しかし、現地地盤内における空気含有量の測定方法は未だ確立されていない。本研究は、音響伝播実験(模型実験)により高飽和砂層中の音波の伝播速度および固有減衰を測定することにより、砂層中の空気含有率を解析的に求めようとするものである。

## 2. 実験方法

音響伝播実験は、図1に示すような内径10cmの鉄管に豊浦標準砂を詰めた実験装置を用いて行った。音源(S)と受信機2台(R1, R2)を設置し、音源より周波数1~8 kHzの正弦波を1波発生させ、受信機により音波を受信した。圧力調整用のトランスフォーマーにより水タンクの水面上に1~6気圧の空気圧を作用させ、砂層内の空気含有率を変化させた実験を行った。実験結果の一例を図2に示す。空気含有率 $\lambda_{aE}$ (実験値)は、それぞれの実験における加圧量と空気の圧縮量からボイルの法則を用いることにより算出した。音波の伝播速度 $V_E$ (実験値)は、データ列をスペクトル解析することにより得られる2台の受信機間の相互相関の最大値が発生する時間を時間遅れ $\tau$ とすることにより求めた。また、固有減衰 $Q_E^{-1}$ (実験値)は、

$$Q_E^{-1} = V_E \left[ \ln(A_1/A_2) \right] / \pi f (R_2 - R_1) \quad (1)$$

により求めた。ここに、 $f$ :周波数、 $R_1, R_2$ :音源から受信機までの距離、 $A_1/A_2$ :振幅比(スペクトル解析により得られる各レシーバーのパワースペクトルのピークの値の比の2乗根)である。

## 3. 音響伝播の基礎式および解析方法

多孔質弾性体中を伝わる音波の伝播速度 $V$ および固有減衰 $Q^{-1}$ は次式のように与えられる<sup>2)</sup>。

$$V^2 = (2\pi f)^2 / \text{Re}(l^2), \quad Q^{-1} = -\text{Im}(l^2) / \text{Re}(l^2) \quad (2)$$

式(1)の $l$ は音波の波数であり、 $l^2 = (2\pi f)^2 (\rho m' - \rho f^2) / (Hm' + Mp - 2C\rho f)$ と表される。

ここに、 $m' = (1 + \alpha)\rho_f / \lambda - i(\rho_f g / 2\pi f k)$ ,  $\rho = (1 - \lambda)\rho_r + \lambda\rho_f$ ,  $H = (K_r - K_s)^2 / (D_r - K_s) + K_s + (4/3)\mu$ ,  $C = K_r(K_r - K_s) / (D_r - K_s)$ ,  $M = K_r^2 / (D_r - K_s)$ ,  $D_r = K_r [1 + \lambda(K_r / K_f - 1)]$

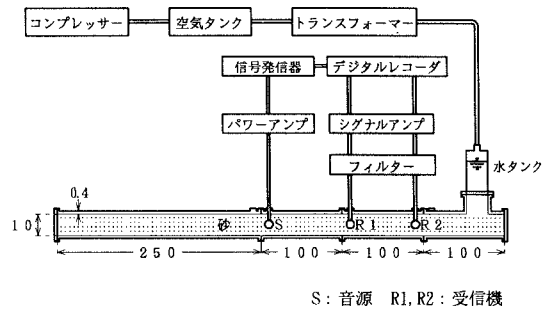


図1 模型実験装置 単位(cm)

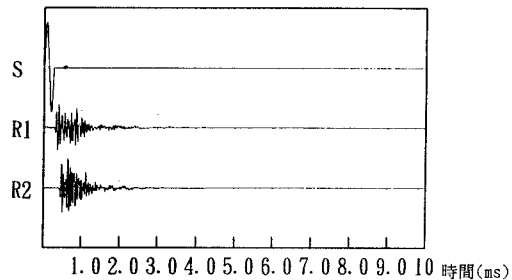
2.3 気圧 空気含有率: 0.294% 周波数: 4kHz  
S-R1: 100cm S-R2: 180cm

図2 音響伝播図

$K_r$ :土粒子の体積弾性係数、 $K_s$ :骨格構造の体積弾性係数、 $K_f$ :間隙流体の体積弾性係数、 $\mu$ :せん断弾性係数、 $\lambda$ :間隙率、 $m'$ :仮想質量、 $\rho$ :土水混合体の密度、 $\rho_r$ :土粒子の密度、 $\rho_f$ :水の密度、 $k$ :透水係数、 $g$ :重力加速度、 $\alpha$ :骨格構造の付加質量係数である。また、地盤内に含まれる微量な空気を考慮すると $K_f$ は、 $1/K_f = S\beta + (1-S)/P$ と表される。ただし、 $S$ は飽和度であり、 $S = 1 - \lambda_a/\lambda$ と表される( $\beta$ :水の圧縮率、 $\lambda_a$ :空気含有率、 $P$ :間隙圧であり、 $\mu$ は $K_s$ とポアソン比 $n$ を用いて、 $\mu = K_s/[2n/(1-2n)+2/3]$ と表される)。

伝播速度および固有減衰の実験値をそれぞれ $V_E$ 、 $Q_E^{-1}$ とし、解析値をそれぞれ $V$ 、 $Q^{-1}$ とする。解析値においては、空気含有率 $\lambda_a$ および骨格構造の体積弾性係数 $K_s$ を未知数とする。これは、図3および4に示すように、伝播速度に著しく影響を与え、現地実験では得られないパラメータだからである。実験結果と解析結果を等しいと置くことにより、式(3)で示される連立非線形方程式が得られる。式(3)をNewton-Raphson法を用いて解くことにより、未知数である空気含有率 $\lambda_a$ および骨格構造の体積弾性係数 $K_s$ を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} F(K_s, \lambda_a) &= V(K_s, \lambda_a) - V_E = 0 \\ G(K_s, \lambda_a) &= Q^{-1}(K_s, \lambda_a) - Q_E^{-1} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

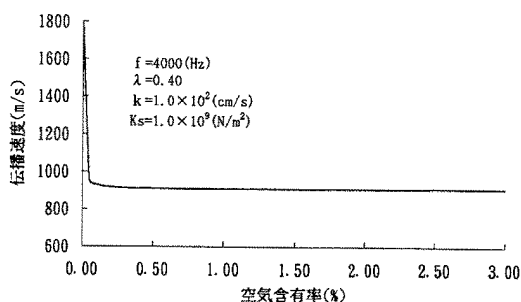


図3 伝播速度と空気含有率

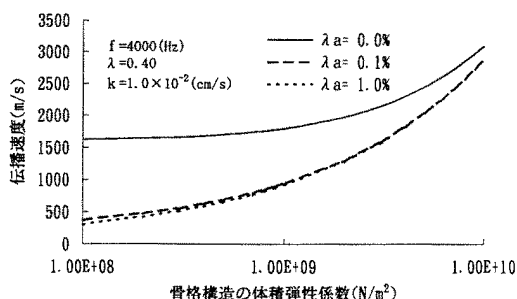


図4 伝播速度と骨格構造の体積弾性係数

#### 4. 結果および考察

図5は、ボイルの法則により求めた空気含有率 $\lambda_{aE}$ (実験値)と式(3)により求めた空気含有率 $\lambda_a$ (解析値)を比較したものである。この図より、解析値は得られるものの得られた値にはばらつきがみられる。これは、実験データにかなりノイズが含まれており、伝播速度および固有減衰が正確に得られなかったことが原因ではないかと考えられる。今後は、ノイズを防ぐなどして正確な空気量が得られるようにしていく必要がある。

**謝辞** 本研究は、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)の一環として行われたことを付記する。

**【参考文献】** 1)名合宏之: 砂層内水圧変動と液状化, 水工学シリーズ 82-A-9, 1982.

2)A. Turgut and T. Yamamoto: Measurements of acoustic wave velocities and attenuation in marine sediments, J. Acous. Soc. Am. 87, pp. 2376-2383, 1990.

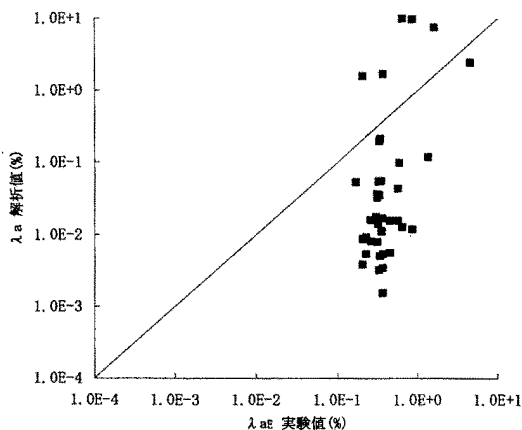


図5 空気含有率の実験値と解析値