

岡山大学工学部	正 員	前野 詩朗
岡山大学工学部	正 員	名合 宏之
ニュージェック(株)	正 員	與田 敏昭
岡山大学大学院	学生員	曾根 照人

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が砂地盤上に作用することにより、地盤内の間隙水圧が時間的に変化し、地盤の有効応力が減少するのみならず、変動水圧や地盤の条件によっては、液状化が発生することを明らかにしている。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含まれる微量の空気存在があることを示した。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設定する上で重要な課題である。ところが、現地地盤内における空気含有率の測定方法は確立されていないのが現状である。本研究は、音波を用いて現地の水中砂地盤内の空気含有率を求めるための基礎として、Altan ら¹⁾により誘導された多孔質弾性体中を伝わる音波の速度を表す基礎式に、地盤中に含まれる空気の影響を取り入れ、空気が存在する場合の音波の速度について理論的に検討し、また、1次元円筒砂層模型を用いて音波の伝播計測を行い、音波による空気量測定の可能性について検討する。

2. 理論解析法および実験方法 多孔質弾性体中を伝わる音波の速度 V は次式で与えられる。

$$V^2 = \text{Re}[(Hm' + Mp - 2C\rho_f)/(\rho m' - \rho_f^2)]$$

ここに、 $H = (K_r - K_s)2/(D_r - K_s) + 4/3\mu$, $M = K_r^2/(D_r - K_s)$, $C = K_r(K_r - K_s)/(D_r - K_s)$, $D_r = K_r[1 + \lambda(K_r/K_f - 1)]$, K_r : 土粒子の体積弾性係数, K_s : 構造骨格の体積弾性係数, K_f : 間隙流体の見かけの体積弾性係数, μ : せん断弾性係数, ν : ポアソン比, λ : 間隙率, m' : 仮想質量密度, ρ および ρ_f 土水混合体および水の密度である。非線形性を考慮しているため、 K_s と μ は複素数となり、それぞれの虚数部は粒子間摩擦などのエネルギー減衰を表す。また、 K_f は地盤内に含まれる微量な空気を考慮すると、水の圧縮率 β , 空気含有率 λ_a および飽和度 S を用いて次式のように表される。

$$1/K_f = S\beta + (1-S)/P, \quad 1-S = \lambda_a/\lambda$$

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音響伝播実験を行った。音源と受信機2台を設置し、音源より周波数1KHz～3KHzの正弦波を一波から数波発生させ受信機により音波を受信し、デジタルレコーダにサンプリング周波数20KHzで記録した。また、コンプレッサーにより、空気タンク内の圧力を約9気圧まで上昇させ、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。空気含有率は、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。砂層中の音波の速度は、受信機間の距離を周波数解析より得られるコヒーレンス、フェイズアングルより求まる伝播時間 τ で割って求めた。

3. 結果および考察 図2から図5は、それぞれ音波の周波数、構造骨格の弾性係数、圧力および間隙率を変化させて伝播速度の違いについて空気含有率を

パラメーターとして図示したものである。図中に示される以外の計算条件として、 $\nu = 0.3$, $k = 1.5 \times 10^{-4}(\text{m/s})$, $\beta = 4.5 \times 10^{-10}(\text{N/m}^2)$ とした。これらの図より、地盤内に含まれる極わずかの空気量が伝播速度に大きく影響していることがわかる。とくに、空気含有率1%以内で伝播速度は大きく変化し、空気含有率が1%以上になると空気含有率の影響は小さくなるがわかる。周波数についてみると、周波数が大きくなるほど伝播速度は

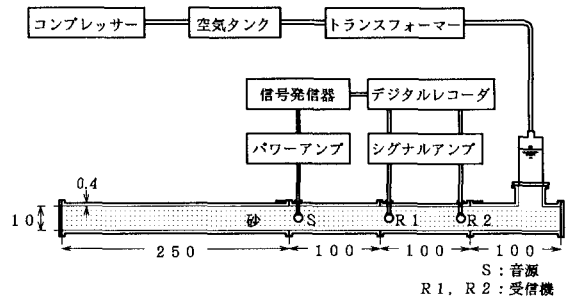


図1 実験装置 単位 (cm)

大きくなり、この傾向は周波数の小さい範囲で顕著である。構造骨格の体積弾性係数についてみると、その値が大きくなるほど伝播速度もかなり大きくなり、今回取り上げた変数の中で最も伝播速度に与える影響が大きいことがわかる。間隙率についてみると、値が大きくなると伝播速度も大きくなるが、その影響は小さい。圧力変化についてみると、空気含有率が小さい場合には圧力の影響を大きく受けるが、空気含有率が大きい場合には影響をほとんど受けないことがわかる。図6は、実験により計測された音響伝播図の一例である。この図に示されるように、鉄管を伝わる小さくて早い音波の後に砂層中を伝わる大きな音波が伝わることをわかる。図7は、実験で得られた伝播速度と空気含有率との関係を示したものである。この図より砂層中の音波の速度は砂層内の空気含有率に大きく依存することが実験においても確認された。また、周波数が大きくなるほど伝播速度が早くなるという理論解析により明らかにされた傾向とも一致している。

以上のことより、地盤内に含まれる極微量の空気により、音波の伝播速度は大きく変化することが明らかにされた。したがって、音響測定を行うことにより、地盤内の空気量測定をすることは可能であることが示された。しかし、音波の伝播速度に大きな影響を与える構造骨格の弾性係数の値は不確定な要素であり、今後さらに検討していく必要がある。

【参考文献】 Altan Turgut and Tokuo Yamamoto : Measurements of acoustic wave velocities and attenuation in marine sediments, J. Acoust. Soc. Am. 87, pp.2376-2383, 1990.

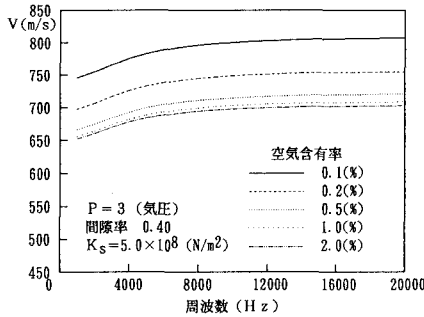


図2 周波数の変化

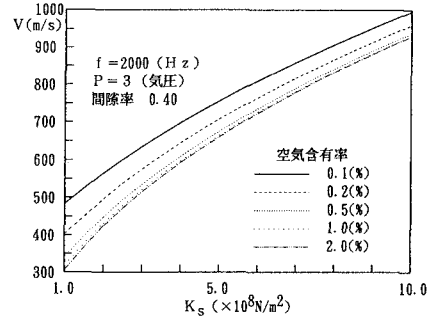


図3 構造骨格の体積弾性係数の変化

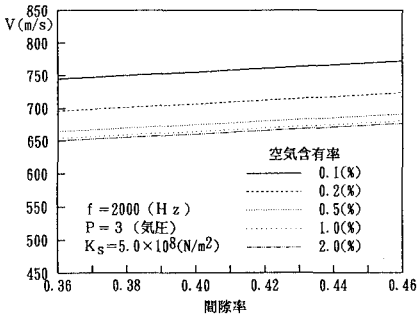


図4 間隙率の変化

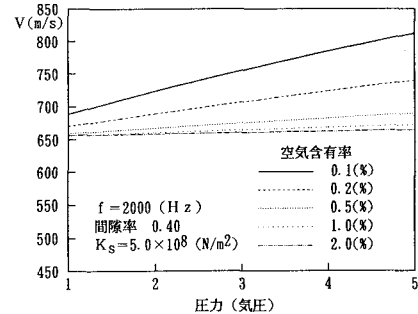


図5 圧力の変化

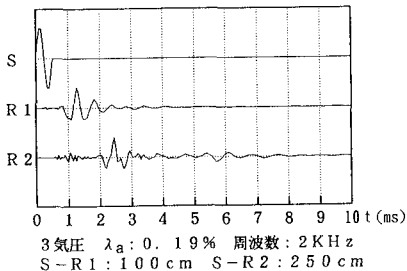


図6 音響伝播図

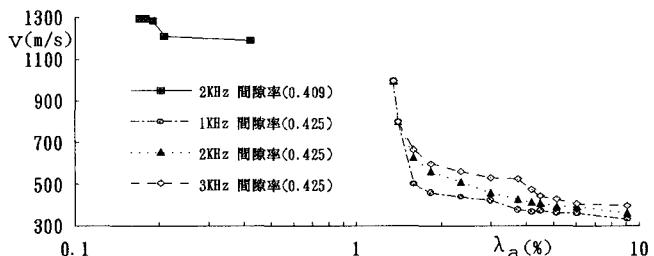


図7 空気含有率と伝播速度