

徳島大学工学部	正会員	北野	利一
徳島大学工学部	正会員	中野	晋
徳島大学大学院	学生員	○重岡	典昭
徳島大学大学院	学生員	溜本	弘樹

研究目的

海底地盤内では波浪による変動波圧により、鉛直方向深さに従って間隙水圧は変動し位相遅れを伴う。位相遅れが生じることによって地盤内に過剰間隙水圧が発生し、それが上昇すると土粒子の有効応力が減少し、有効応力がゼロになると液状化が発生する事が分かっているため、間隙水圧の変動を把握する事は液状化に至るまでの過程を知る上で重要である。

従来の間隙水圧の解と、現地観測や実験による間隙水圧の結果が異なることがある。これは解析解を導く際に海底地盤の性質を均質性としている為である。実際の海底地盤は互層構造を有する堆積性地盤であり、堆積過程における自重による圧密、および粒径や密度が異なる土粒子によって形成されている。本研究では海底地盤を不均質性と捉え、Biot の圧密方程式から透水係数が鉛直不均質性を有する場合の間隙水圧変動の解析解を導き、不均質性の場合の間隙水圧変動と位相について考察する。

研究内容

海底地盤を多孔質弾性体、即ち土粒子と流体で構成される混合二相体とする。ただし土粒子そのものは非圧縮で、間隙中の流体はわずかな空気を含むため圧縮性流体と考えている。海底地盤表面から鉛直下向きの深さ z 、流体の変位速度 u 、土粒子の変位速度 v 、間隙率 n 、せん断弾性係数 G 、鉛直透水係数 $k(z)$ 、間隙水圧 P 、ポアソン比 ν 、間隙水の見かけの容積率 β とすると貯留方程式、ダルシー則、及び釣り合い方程式から Biot の支配方程式は次のように与えられる。

$$n\nabla(\ddot{u} - \ddot{v}) + \nabla \cdot \ddot{v} = -\frac{n}{\beta} \frac{\partial P}{\partial t} \quad G\left(\nabla^2 v + \frac{1}{1-2\nu} \nabla \nabla \cdot \ddot{v}\right) = \nabla \frac{\partial P}{\partial t} \quad \nabla(k(z) \nabla P) = \nabla \ddot{v} + \frac{n}{\beta} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

これらに Mei の境界層近似理論¹⁾を用いると境界層内の支配方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial}{\partial z} P \right) = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)において $k(z)$ が定数であれば Terzhagi の圧密方程式である。本研究では上式を用いて $k(z)$ が鉛直下向きに指数関数的に減少すると仮定して間隙水圧変動を調べる。

$$k(z) = \exp(-2\alpha z) \quad (3)$$

α は地盤の不均質性を表す定数で $\alpha > 0$ であり、 $\alpha = 0$ であれば均質性である。

主な結論

不均質性の間隙水圧の変動解は変形ベッセル関数の微分方程式で表され、その解は一位のベッセル関数 K_1 、 I_1 により構成される。間隙水圧の境界条件は $z \rightarrow \infty$ で収束であるので解に関数 I_1 は含まれない。ここで変数が複素数を含んでいる場合のベッセル関数には特別な表記法があるのでそれを用い、間隙水圧の変動解を実部と虚部を区別して表現する。境界層では間隙水圧の減衰率が大きく、また位相遅れも生じる。そこで次式のように実部と虚部に区別することによって、境界層内の間隙水圧の位相遅れを考察する。

$$P = \frac{kei\left(\frac{e^{\alpha z}}{a}\right)kei\left(\frac{l}{\alpha}\right) + ker\left(\frac{e^{\alpha z}}{\alpha}\right)ker\left(\frac{l}{\alpha}\right)}{kei^2\left(\frac{l}{\alpha}\right) + ker^2\left(\frac{l}{\alpha}\right)} - i \frac{kei\left(\frac{e^{\alpha z}}{\alpha}\right)ker\left(\frac{l}{\alpha}\right) - kei\left(\frac{l}{\alpha}\right)ker\left(\frac{e^{\alpha z}}{\alpha}\right)}{kei^2\left(\frac{l}{\alpha}\right) + ker^2\left(\frac{l}{\alpha}\right)} \quad (4)$$

ker , kei はケルビン関数²⁾と呼ばれ, これらは全て実数 z を変数に持つ実数値関数である. $\alpha = 0.0$, $\alpha = 0.1$, $\alpha = 1.0$ の場合において式(4)で表される間隙水圧変動を実部, 虚部, 絶対値に分けてグラフ化したのが図-1である.

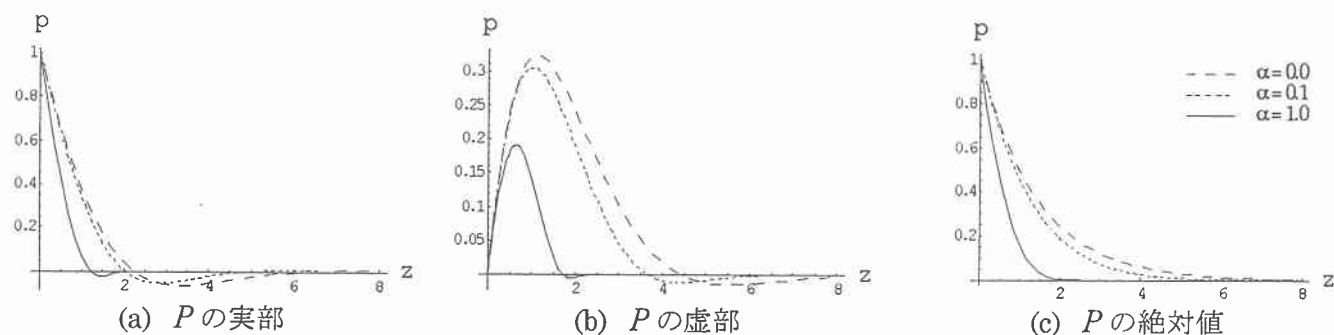


図-1 間隙水圧 P の鉛直分布

以上の事から境界層における間隙水圧の変動解は, 透水係数の鉛直不均質性が強まるにつれて不均質性海底地盤の間隙水圧変動の減衰率が均質性に比べて急であることが分かる. 即ち, 境界層厚が均質性の場合と比べて薄くなると言える.

鉛直下向き深さ z を 0.1 ずつ変化させた場合の間隙水圧変動の位相遅れを, 図-2 のように横軸に実部, 縦軸に虚部を取り間隙水圧変動の位相を見る.

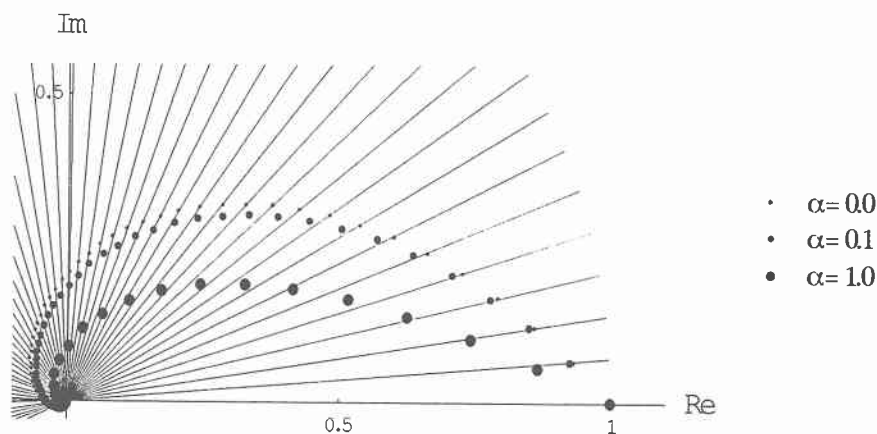


図-2 位相遅れの図

均質地盤における位相の間隔は原点を中心に深さのステップに対して等角であり, それと不均質地盤の位相を比較するために図-2 では原点と均質性の間隙水圧変動をプロットした点を半直線で結んでいる. これより透水係数の鉛直不均質性が増すごとに位相遅れが大きくなる事が分かる.

参考文献

- 1) C.C.Meï & M.A. Meï : Boundary layer theory of waves in a poro-elastie seabed, Int Sympo on Soils under Cyclic and Transient Loading, pp.609-616, 1980
- 2) M.Abramowitz & I.A.Stegun : Hand book of mathematica functions, Dover, pp.358-383