## 乱れの透水性底質内部への伝播における非線形性の影響

大分高専 正会員 東野 誠

## 1.はじめに

著者は,前報<sup>1)</sup>において,細砂等の透水性材料で構成される底質を対象として,せん断乱流の組織構造 (near-bed coherent motions)に起因する底質直上の乱れが内部へと伝播する過程について検討を行った.本研究 では,解析対象を細砂から粗砂,礫まで拡張して,水・底質境界面近傍での物質移動に及ぼす底質粒子の大径 化,すなわち,浸透流速の増大に伴う,底質表面近傍での流れ場の非線形性の影響について検討した.

2. 底質直上の圧力変動の内部への伝播

せん断乱流においては,底面直上の粘性底層近 傍での乱流の組織構造によって乱れ,すなわち, 乱流渦が形成され,流水中では流速変動を,底面 では圧力変動を引き起こす.細砂(透水係数0.001 ~0.1cm/s)で構成された底質では,上述の底質表 面での圧力変動は内部へと伝播し,底質内部にお いて微弱な流れ場を形成する.前報<sup>1)</sup>では,この 流れ場を Darcy 則と連続式によって表現した.と ころで,粗砂や礫で構成された底質においても, 底質直上の圧力変動は内部へと伝播して流れ場 を形成し,細砂の場合と同様,連続式と Darcy 則 による運動式を用いてこれを表現し得る.すなわ ち,底質内での流速成分(x,z方向)を qj とすれ ば,

$$q_{j} = -k' \frac{g}{v} \frac{\partial h}{\partial x_{j}} = -k \frac{\partial h}{\partial x_{j}}$$
(1)

ここに,g:重力加速度, :動粘性係数,h(=p/ g+z, :水の密度,p:圧力):ピエゾ水頭で ある.底質の透水性は,透水係数 k(cm/s)で表現 され,底質を構成する粒子径 d<sub>s</sub>,および空隙率 の関数である<sup>2)</sup>.

底質表面近傍では,底質を構成する粒子径が大



図-1 粗砂・礫底質での直上の乱れの内部への伝播

きいため,浸透流速も大きくなり,これに起因して流れ場は Darcy 則で表現されるような線形ではなく,非線形性が強くなると考えられる.この非線形性の影響を表現するために,本研究では,Barr(2001)による検討結果<sup>2)</sup>を用いて,前述(式(1))の透水係数 k に代えて,次式で定義される見掛けの透水係数 k<sub>e</sub>を導入する.

$$1 = k_e \left[ \frac{1}{k} + \frac{\sqrt{2}q_j}{\phi^2 g 3m} \right]$$
<sup>(2)</sup>

見掛けの透水係数 k<sub>e</sub> は,非線形性の強い底質表面近傍では小さく,底質表面から遠ざかり,非線形性の影響が小さくなるとともに Darcy 則に漸近する(図-1) .上式(2)において,右辺第1項は粘性抵抗(Darcy 則)を, 第2項は流れ場の非線形性を表している.なお,上式中の長さスケール m は次式で与えられる.

$$m = \frac{\phi \cdot d_s / 2}{3(1 - \phi)} \tag{3}$$

前報<sup>1)</sup>と同様,底質直上の乱流の組織構造に起因して底質表面に圧力変動が生起すると仮定し,次式で表す.  $p(x,0,t) = p_0 \exp(i(\chi x - \sigma t))$  (4)

ここに, $p_0$ :振幅, (= $2\pi/\lambda_x$ ):波数,および (= $2\pi/T_B$ ):角周波数である.なお, $\lambda_x \ge T_B$ は乱流の組織構造のそれぞれ,長さと時間スケールであり,摩擦速度 $U_*(=\sqrt{\tau_0/\rho}, 0$ :底面せん断応力)と動粘性係数 を用いて,次式で表される.

$$T_{B} = 100 \frac{\nu}{U_{*}^{2}} , \ \lambda_{x} = 1000 \frac{\nu}{U_{*}}$$
(5)

なお,(4)式中の振幅 $_{p_0}$ は前報<sup>1)</sup>と同様,摩擦速度 $_{U_*}$ の関数として, $_{p_0/}=\sqrt{2}\cdot(4.0\sim5.0)\cdot U_*^{-2}$ とした.

## 3.底質内部での流れ場

底質内部の流れ場は,前述(2.)のように運動式と連続式と で表され,連続式を図-1のように流れの方向に *x* 軸,鉛直方 向に *z* 軸を取って示せば,次のようである.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = a \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial z} (a \frac{\partial h}{\partial z})$$
(6)

上式(6)において,変数a(z の関数)は見掛けの透水係数 $k_e$ ,および体積圧縮率 $m_v$ より表わされ, $a=k_e/m_v$ である.

式(6)を式(4)の境界条件の下に解けば、乱れによる圧力変動 によって駆動される底質内部の圧力場が得られ、これより流速 の流れ方向成分(*u*)、および鉛直方向成分(*w*)が式(1)より求ま る.基礎式(6)は流れ方向にフーリエ級数を用いたスペクトル 法、鉛直方向に2次精度の中央差分法を用いて離散化される. 解析領域は鉛直方向に(乱流の浸透深さ)、流れ方向に2 とし、それぞれ100×100の格子点が配置される.初期条件と して底質内部の至る所で一定の透水係数を仮定し、これにより 得られる流れ場と式(2)とによって透水係数を補正する.この ような手順を見掛けの透水係数*k*<sup>*e*</sup>が変化しなくなるまで繰り 返した.

4.考察

図-2 は,透水係数の初期値, すなわち Darcy 透水係数を  $k_0=100$ cm/s として,摩擦速度  $U_*$ を変化させた場合の見掛けの 透水係数  $k_e$  の鉛直分布を示したものである.見掛けの透水係 数  $k_e$  は非線形性の強い底質表面近傍において小さく,底質深 度とともに大きくなり,底質表面から十分に離れると Darcy 透水係数  $k_0$ に漸近する様子が見て取れる.この傾向は,摩擦 速度  $U_*$ が大きいほど顕著である.すなわち, $U^*=1.6$ cm/s では, 見掛けの透水係数  $k_e$  は底質表面近傍では流れ場の非線形性の ため Darcy 透水係数  $k_0$  の約 44%まで低下している.

図-3 に,摩擦速度  $U_{*=1.28 \text{ cm/s}}(-定) \ge 0$ て, Darcy 透水係 数 $k_0$ を変化させた場合の見掛けの透水係数 $k_e$ の鉛直分布を示 した.これより, Darcy 透水係数 $k_0$ の増大とともに,底質表 面近傍において,流れ場の非線形性が強くなり,見掛けの透 水係数 $k_e$ が小さくなる様子が見て取れる.Darcy 透水係数 $k_0$ が 10 cm/s 以下では,底質表面近傍での見掛けの透水係数 $k_e$ の低下は僅かであり,この場合,流れ場は Darcy 則による表現が可能であるが,10 cm/s 以上の $k_0$ に対しては,流れ場の非線形性を考 慮する必要がある.

図-4 は,本モデルによる Darcy 透水係数 k<sub>0</sub> を変化させた場合の,底質表面での無次元物質 移動係数(*D<sub>e</sub>/D<sub>s</sub>*)の予測結果を示している.な お,物質移動係数はモデルにより得られた流れ 場より推定される.この図より,底質内部での 物質移動に及ぼす流れ場の非線形性の影響は 透水係数 k と摩擦速度 *U*\*の両者に依存するこ とが示唆され,今後の検討が必要である. 参考文献

- 東野 誠: 底質直上の乱流構造が内部での流体の流動に及ぼす影響,平成20年度土木学会 西部支部研究発表会,2009.
- 2) Barr, D.W. : Turbulent flow through porous media. *Ground Water*. 39(5): 646-650, 2001.









D\_D