

## 非等方透水係数を考慮した堤防基盤における浸透流のモデル化と 堤防法先地盤の緩みの影響評価

堤防基盤、空隙構造のモデル化、透水係数の非等方性、  
基盤漏水・噴砂、地盤の緩み

中央大学大学院 学生会員 ○栗原 克幸  
中央大学研究開発機構 正会員 田端 幸輔  
中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二

### 1. 序論

基盤漏水は、噴砂やパイピングを発生させ、堤防の安定性を低下させる場合があり、その危険性を評価するためには、法先付近の地盤構造に対する浸透流の三次元機構を明らかにすることが重要である。

一般に、基盤浸透流解析では、Richards式が用いられ、式中に透水係数の非等方性は含まれているものの、実際には等方性を仮定し解析する場合が多い。しかし、自然堆積物からなる堤防基盤層は、非等方的であり、特に、堤防法先付近の基盤層の緩み発生箇所では、透水係数の非等方性が重要になると考えられ、これが、基盤層全体の浸透流場に影響を及ぼし、堤防の安定性を損なう場合もある。このため、粒子配置と空隙構造を考慮した基盤浸透流をモデル化し、緩みの影響評価の解析が必要であると考えられる。

本研究では、地盤構造の非等方性に伴う基盤浸透流と堤防裏法先近傍の水利特性が十分解明されていないことに鑑み、透水係数の非等方性を考慮した三次元基盤浸透流解析モデルを構築する。そして、本手法を堤防基盤漏水実験に適用することで、裏法先付近の地盤の緩み箇所での非等方性、流れ場と堤防安定性に及ぼす影響を解析的に検討し、実験結果との対照を行う。

### 2. 透水係数の非等方性を考慮した基盤浸透流のモデル化

#### (1) 基礎方程式

多孔質体の液相領域について体積平均した三次元の連続式と運動方程式は、式(1)、式(2)で表せる。

$$\frac{\partial \lambda u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \lambda u_i u_j}{\partial x_j} = \lambda g_i - \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \lambda \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{F_i}{\rho} \quad (2)$$

ここに、 $u_i$  :  $i$ 方向の流速、 $g$  : 重力加速度、 $\rho$  : 水の密度、 $p$  : 圧力、 $\tau_{ij}$  : 粘性によるせん断応力テンソル、 $F$  : 粒子群が水に及ぼす力である。 $F_i$ は、図-1に示すように、各方向の流速成分を合成した方向(以下、主流方向 $s$ と呼ぶ。)に対する抵抗力 $F_s$ を用いて、式(3)で表現

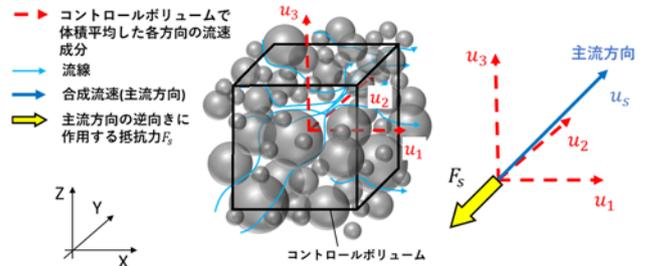


図-1 各方向の主流速成分と合成ベクトル図のイメージ

する。ここに $F_s$ は、主流方向 $s$ について、局所的にDarcy則が成り立つと仮定することで導いている。

$$F_i = F_s \frac{u_i}{u_s}, F_s = \rho g \lambda^2 \frac{u_s}{k_s}, u_s = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (3)$$

ここに、 $k$  : 透水係数、添え字 $s$ は主流方向を意味する。以上の基礎式によって、多孔質体内の空隙構造に応じた浸透流速、圧力分布を解析することが可能となる。ただし、多孔質体の透水係数を適切に評価することが重要になる。よって本研究では、粒子群の配置、空隙構造を考慮することで透水係数の非等方性を評価し、三次元基盤浸透流を解析する。

#### (2) 本研究での透水係数の考え方

室田・佐藤<sup>2)</sup>は、図-2に示す多孔質体の切断面を考え、各粒子を線で結ぶ(図-2の灰色線)ことにより得られる独立空隙と等価な円断面(図-2の赤破線)の直径を独立空隙径 $d^*$ と定義した。そして、この独立した空隙内の流れがHagen-Poiseuille流れに従うとし、透水係数を以下のように表現した。

$$\bar{k} = \frac{\lambda \rho g}{32\mu} \int_{d_{min}^*}^{\infty} d^{*2} P(d^*) dd^* \quad (4)$$

ここに $\mu$  : 粘性係数、 $P$  : 確率密度関数である。式(4)では、対象とする多孔質体の代表長さを、任意の方向に対して作成した切断面より得られる、 $d^*$ の空間平均値を用いて表現している。そのため、透水係数の非等方性や通水断面積の場所的変化を十分表現できていない。そこで本研究では、多孔質体の異なる切断面により流れの透水性の違いを考慮する。図-3に示すように、主流方向に対して直交する切断面の透水係数 $k_{s_m}$ を、切断面内の $\lambda_{s_m}$ 、 $d_{s_m}^*$ 、 $P_{s_m}$ を用いて式(5)で表す。

$$k_{s_m} = \frac{\lambda_{s_m} \rho g}{32\mu} \int_{d_{s_m}^* \min}^{d_{s_m}^* \max} d_{s_m}^*{}^2 P_{s_m}(d_{s_m}^*) dd_{s_m}^* \quad (5)$$

添え字  $m$  は切断面の番号であり、切断面は、主流方向に対して微小距離  $\Delta s$  間隔にとるものとする。切断面毎に透水係数  $k_{s_m}$  が異なることから (図-3)、この影響を考慮し、式(6)によってコントロールボリューム内の透水係数  $k_s$  を表すものとする。

$$k_s = \frac{\sum \Delta s}{\sum \frac{\Delta s}{k_{s_m}}} \quad (6)$$

本解析では、球形粒子を数値的にランダムに充填させ、多孔質体を作成する<sup>2)</sup>。主流方向に直交する切断面を  $\Delta s$  間隔で作成し、 $d_{s_m}^*$  を計測し、 $k_{s_m}$  を求め、式(6)より  $k_s$  を得る。これを、毎計算 step 行い、透水係数の非等方性を考慮した抵抗力  $F$  を式(3)で求め、式(1)と式(2)より流れ場を計算する。

### 3. 非等方透水係数

2. でのモデル化手法を用いて、粒子配置、空隙率が変化した場合の非等方透水係数について調べる。対象とする材料は、小高ら<sup>3)</sup>の堤防模型実験で用いられた空隙率 0.5 の 6 号珪砂とした。次に、6 号珪砂から細粒分を除いた空隙率 0.6 の材料を用いて堤防法先付近の基盤に緩み部を設定し、その影響を検討する。図-4 に解析に用いた粒度分布を示す。図-5 は、球形粒子を数値的にランダム充填することで作成した多孔質体を示す。

図-6 に、 $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸をそれぞれ主流方向と仮定した時の、各方向に直交する切断面毎に計測した  $d^*$  のヒストグラムを示す。また、図-7 に、多孔質体の各方向に対する切断面内の透水係数  $k_{s_m}$  の分布を示す。図-6 より、6 号珪砂のランダム充填により作成した多孔質体の  $d^*$  は、概ね正規分布をとる。また、分布形の切断面のとる方向への依存は小さい。一方、細粒分を除去し空隙率を大きくした場合には、空隙構造の不均質性により、切断面のとる方向によって  $d^*$  の分布形に差が現われる。また、図-7 によると、空隙率の増大により、 $k_{s_m}$  の変動幅が大きくなり、切断面のとる方向によって  $k_{s_m}$  に顕著な違いが表れることが分かる。

以上より、細粒分が抜け出し形成された緩み箇所では、透水係数の非等方性が強く表れることが示された。

### 4. 堤防基盤漏水実験への解析モデルの適用

小高ら<sup>3)</sup>は、堤防基盤層の土質・構造が基盤漏水と堤防破壊危険性に及ぼす影響について、堤防模型を用いて実験を行い、興味ある結果を得ている。

ここでは、小高らの堤防基盤漏水実験を参考に、図-8 に示す不透水性堤体下の基盤層を対象に、堤防法先に設けた緩み箇所の形成に伴う透水係数の非等方性が流れ場に及ぼす影響を調べ、さらに危険箇所発生の可能性について、モデルを用いた検討を行う。

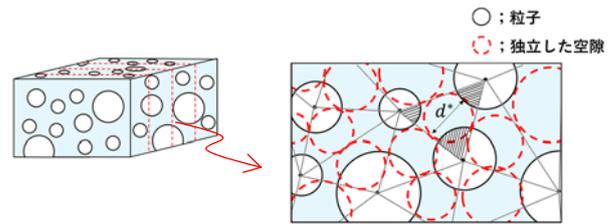


図-2 多孔質体のある切断面

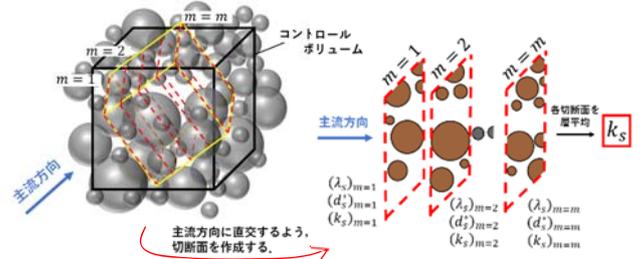


図-3 主流方向に対する切断面のイメージ

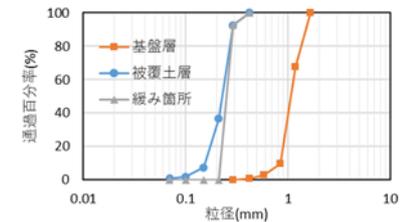
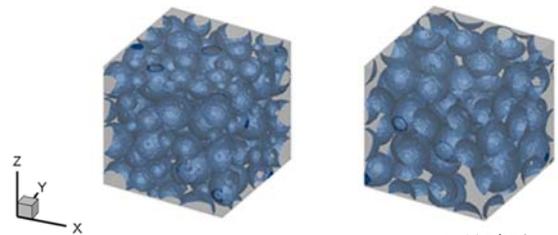
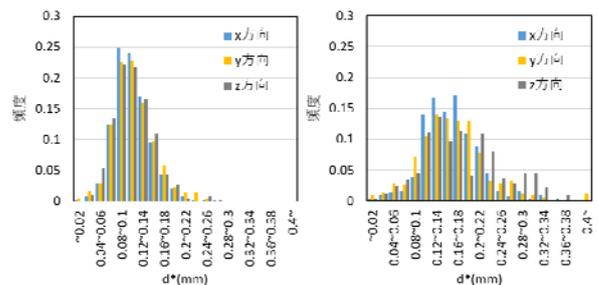


図-4 対象とした粒度分布



(a) 6号珪砂 ( $\lambda=0.5$ ) (b) 6号珪砂 (細粒分除去,  $\lambda=0.6$ )

図-5 ランダム充填により作成した多孔質体



(a) 6号珪砂 ( $\lambda=0.5$ ) (b) 6号珪砂 (細粒分除去,  $\lambda=0.6$ )

図-6  $d^*$  のヒストグラム

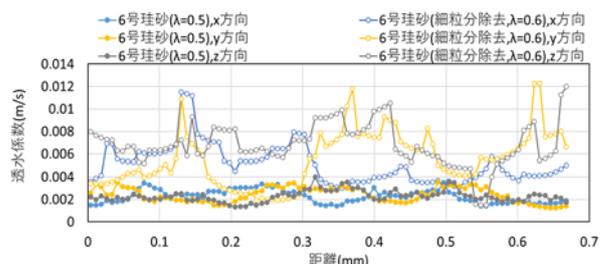


図-7 透水係数の分布

#### 4.1. 解析条件

基盤は互層構造をなし、被覆土層と透水層の全厚さは 0.15m で、被覆土層に比べ基盤透水層の透水性は大きい。被覆土層の厚さは、0.03m, 0.05m の 2 パターンとし、それぞれ case1, case2 とした。また、緩みの形成による流れ場の発達、透水係数の非等方性の影響を検討するため、緩みが無い場合と、緩みの大きさが 8mm の場合を検討対象とした。図-8 に各層の平均粒径、空隙率と緩み箇所の平均粒径、空隙率を示す。各層と緩み箇所の粒度分布は 3 章で検討したものをを用いた。解析領域は、法先緩み箇所を含む図-8 の水色破線の領域とし、2mm 間隔で三次元計算メッシュを作成した。外力となる河川水位は、実験での動水勾配 0.46 となる高さまで上昇させた後、水位を固定した。法先より堤内地側の水位は、基盤層表層に相当する高さで維持した。刻み時間は  $10^{-3}$ sec とした

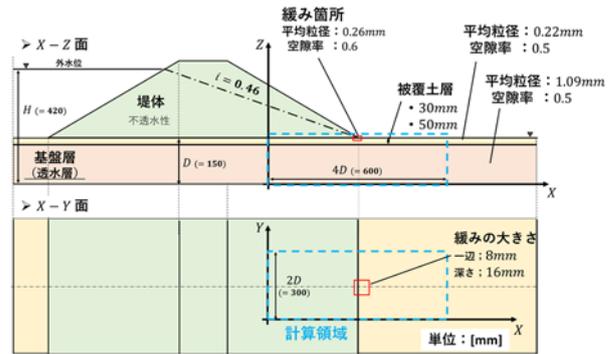


図-8 対象とした堤防基盤層の模式図

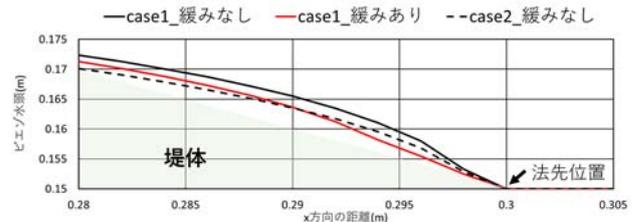


図-9 各ケースの法先付近のピエゾ水頭分布

#### 4.2. 解析結果とその考察

##### (1) 基盤浸透流の発達と堤防安定性に及ぼす影響

図-9 に、奥行方向中央断面( $y=D$ )上における基盤層最上部( $z=D$ )での各 case の法先付近のピエゾ水頭を、図-10 に、法先近傍での  $x$ - $z$  面、 $x$ - $y$  面の流速コンター図を示す。 $x$ - $z$  面は奥行方向中央断面( $y=D$ )での結果を、 $x$ - $y$  面は基盤層最上部( $z=D$ )での結果を示している。

堤体直下では緩やかな圧力低下を伴って川裏方向へと水平方向に流れ、圧力が解放される法先付近では鉛直方向流れが発達する様子が確認できる。また、法先で緩みが形成されると、粒子から受ける抵抗が減少するため主流速は増大する。これに伴ってピエゾ水頭が低減し、その影響は上流まで及んでいる。この結果から、緩みの形成は、法先近傍だけでなく基盤層全体の流れ場、圧力場に影響を及ぼすことが分かる。

次に、浸透流解析結果を用いて、土粒子の重量と水の揚圧力の比  $G/W$  と粒子の移動限界流速の観点から、噴砂に起因する堤防法先付近の安定性を検討する。図-11 に、法先付近の主流速コンターと、 $G/W$  が 1 以下となる範囲を示す。図-11(a)は case1(緩みあり)を、11(b)は、更に緩み箇所が拡大したケースの計算結果を示している。粒子移動限界流速は、簡単のため Justin の方法により算定しており、用いた透水層材料に対しその大きさは約 0.01m/s である。 $G/W$  が 1 以下となる範囲は、土粒子の重量よりも水の揚圧力が高まっているため、もし粒子が抜け出せば、新たな緩み領域となる可能性がある」と解釈できる。被覆土層厚 0.03m の緩み領域が大きくなる図-11(b)を 11(a)と比較すると、 $G/W$  が 1 以下の領域 (図-11 の赤破線) が基盤下層に向かって拡大する様子が確認できる。また、緩みの拡大とともに主流速が増大し、移動限界流速を超える領域も拡大している。以上より、法先の緩み領域は、透水性の高い基盤下層に向かって徐々に進行していく傾向にあることが示された。なお、被覆土層厚 0.05m の場合 (図-11(c)) では、法先に緩みが形成されたとしても、 $G/W$  が 1 以

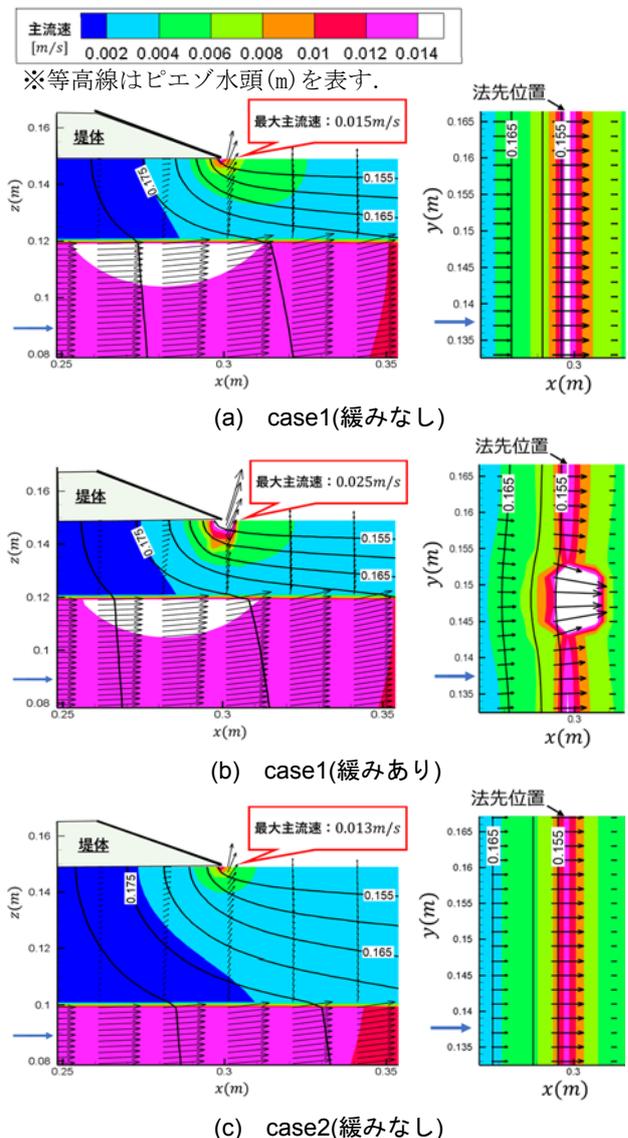


図-10 各ケースの  $x$ - $z$  面、 $x$ - $y$  面の流速コンター図

下の領域と移動限界流速を超える領域がともに小さく、噴砂発生の度合いは軽減されることが分かる。小高らの模型実験は、この傾向を説明している<sup>3)</sup>。

## (2) 透水係数の非等方性の重要性

図-12 に case1 の緩みがある場合における堤防裏法先周辺の $k_s$ と平均透水係数 $\bar{k}$ の比のコンター図を示す。主流方向の透水係数 $k_s$ は、平均的な透水係数 $\bar{k}$ に比べて、場所により大きく異なっていることが確認できる。図-13 は、法先に向かう3本の流線(図-12の白色線)に沿った透水係数 $k_s$ 、流速、ピエゾ水頭変化を示している。これにより、同じ粒度分布の土層であっても、流れの方向に応じて透水係数が変化し、これが流速と動水勾配に影響を及ぼしていることが分かる。よって、法先周辺の浸透流の発達と噴砂発生メカニズムの検討には、透水係数の非等方性の影響を適切に取り込んだ浸透流解析を行うことが必要となる。

## 5. 結論

これまで検討が不十分であった粒子配置と空隙構造の三次元性に着目し、透水係数の非等方性を考慮した堤防基盤浸透流のモデル化を行った。これを、堤防基盤漏水の模型実験データに適用し、法先の緩み形成が浸透流場の発達と、噴砂発生危険性に及ぼす影響を検討した。この結果、模型実験で確認された堤防基盤の浸透破壊の傾向を概ね説明できることを示した。また、法先周辺の緩み箇所では、透水係数の非等方性の影響が大きく表れ、これが基盤層全体の流れ場にも影響を及ぼすことを示した。

今後は、基盤漏水や噴砂による堤防破壊危険性の評価に向けて本モデルを発展させ、浸透流による砂粒子の連行に伴う緩み領域の時間発展と、緩み領域がパイピングに進行させないための対策の検討を行う。

## 参考文献

- 1) 室田明, 佐藤邦明: 空隙規模の分布による透水係数の評価について, 水理講演会講演集, pp.73-78, 1969.
- 2) 栗原克幸, 田端幸輔, 福岡捷二: 粒子配置及び空隙構造の三次元性を考慮した堤防基盤浸透流のモデル化と堤防法先周辺の浸透流特性に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76, No.2, I\_311-I\_318, 2020.
- 3) 小高猛司, 李圭太, 崔瑛, 森智彦, 森三史郎, 林愛実: 浸透に伴う基礎地盤の弱化に起因する堤防法すべり崩壊に関する考察, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.55-58, 2017.

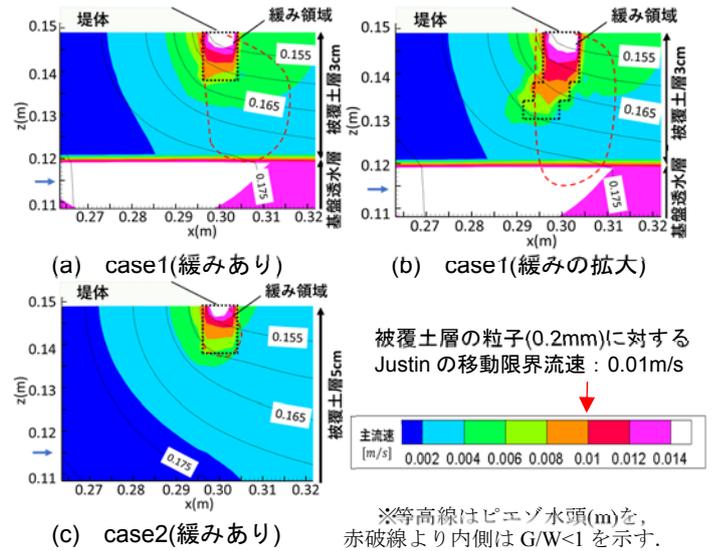
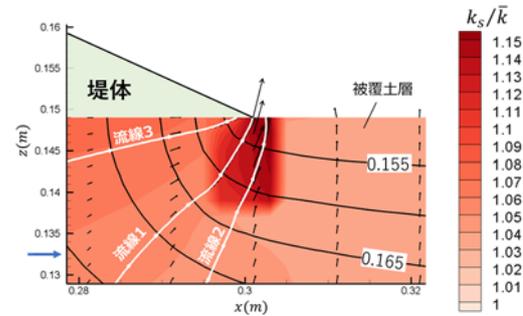
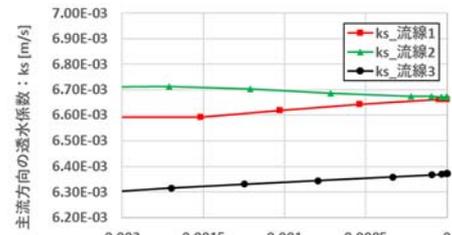


図-11 法先周辺の主流速, G/W, 粒子移動限界流速

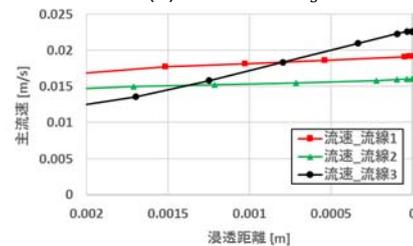


※等高線はピエゾ水頭(m)を表す。

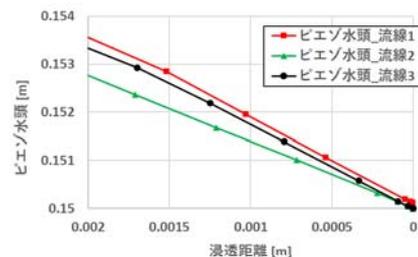
図-12 case1の緩み箇所周辺での $k_s$ と $\bar{k}$ の比



(a) 透水係数 $k_s$



(b) 流速



(c) ピエゾ水頭

図-13 緩み箇所における流線沿いの $k_s$ , 流速, ピエゾ水頭