

堤内地漏水孔（ガマ）への浸透現象に関する研究

Study on Seepage Flow to a Hole in the Top Stratum Landward of the Dyke

丹羽 崇哲*
Takanori NIWA*

木村 勝行†
Katsuyuki KIMURA†

ABSTRACT: A phenomenon of spouting a seepage water with soil particles out from a hole, perforating a top stratum landward of a dyke, was studied in this paper. Approaches of three steps to accomplish this study were adopted, such as laboratory tests, 3-dimensional FEM analyses and 2-dimensional theoretical solutions to well problems. The laboratory tests were performed in order to investigate the critical difference of the water-level between the river and the hole against the spouting phenomenon. The FEM analyses were applied to the critical states as mentioned above to search the critical hydraulic gradient taking the soil particles into the hole, and the velocity taking the soil particles out of the hole. Measured pressure heads in the laboratory tests showed a good agreement with the calculated results by FEM analyses. The theoretical solutions were compared with the ones obtained by FEM analyses for the purposes of finding out of the relations between both. It was concluded that 2-dimensional theoretical solution to a well problem can be available to evaluating the possibility of occurring of spouting out phenomenon from the practical hole in the top stratum landward of the dyke.

1. はじめに

通常河川堤防は図-1に示すとおり、透水性地盤上にあり、堤内地の表面は難透水層で覆われている。この難透水層に上下に連続する孔、すなわちガマがある場合、河川水位の上昇に伴いこの孔から土粒子の流亡を伴った漏水が発生することがある。土粒子の流亡が長く続くと、透水層内の砂が大量に排除され、その部分での流速が増大する悪循環により、基礎地盤内の流亡部が拡大し、やがては堤防の破壊を招く恐れがある。土粒子の噴出現象は、漏水を含む基礎地盤内の浸透流の境界の条件と形状によるものであると推測できる。しかし、この漏水に伴う基礎地盤内の浸透流は、3次元流としての取り扱いが必要であり、境界条件や透水層の形状を単純化した場合でも、理論解が得られていないのが現状である。従って、検討は実験あるいは数値解析によらざるを得ない。一方、2次元流に類似の問題を求めるとすれば、井戸(well)を含む流れを挙げる事ができる。

この場合には理論解¹⁾が得られているので、種々の境界条件に対する解を容易に得ることができる。本研究では、上述した漏水孔への浸透に関して、

1. 室内実験により、漏水孔への土粒子の流入から噴出にいたるまでの過程を明らかにする。
2. 3次元有限要素法解析を行い、実験結果との対比から、噴出現象に対する有限要素法解析の有用性について検討する。
3. 2次元理論解と3次元有限要素法解析との関係を求め、2次元理論解を用いてガマからの噴出現象に対する安全性を評価することの可能性について検討する。

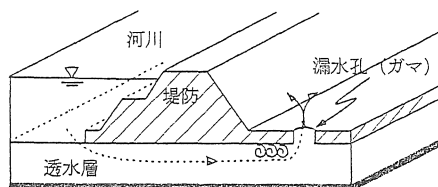


図-1: 河川堤防概略図

*愛知工業大学大学院

†愛知工業大学 土木工学科 (豊田市)

2. 実験

実験に用いた透水層を構成する試料は, 表-1 に示す条件の標準砂を用いた. また, 実験は, 同一条件下で3回以上繰り返し行った.

表 1: 試料条件一覧

比重	2.645
粒径	0.106 ~ 0.297

2.1 漏水孔からの土粒子噴出実験

2.1.1 噴出現象実験装置

噴出現象の原因を解明するために, 図-1 をもとに条件を単純化した, 図-2 に示す装置を用いて実験を行った. 装置の各諸元のうち, 最短浸透路長 s , 漏水孔の間隔の半分に相当する幅 B , 透水層の厚さ Z を変化させて, 噴出現象に与える影響を調べた.

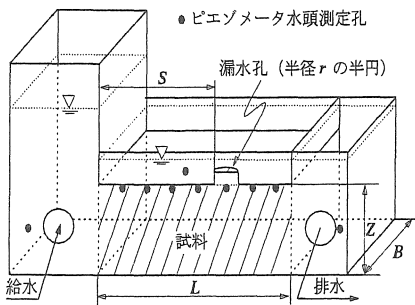


図-2: 噴出実験装置概略図

2.1.2 噴出実験結果および考察

次に, 透水層の幅を B , 最短浸透路長を s , 透水層の厚さを Z , 噴出現象発生直前の流入面と流出面の限界水位差を Hw , 試料長を L , Hw を s で除したものを限界平均動水勾配 Hw/s として実験結果を示す.

(1) 最短浸透路長 s の影響 図-3 は, s を 10cm , 20cm , 30cm と変化させて実験を行った際の, Hw と s の関係を示したものである. この結果から, s が長くなるにつれて, 噴出現象発生時の河川水位が上昇するため, 噴出現象が起りにくくなることがわかる. また, このときの Hw/s の値は, 概ね 0.3 程

度をとることが読み取れる. 以上から, Hw/s の値によって噴出現象の推定が可能であることがわかった. この $Hw/s \approx 0.3$ は, B, Z を変化させたすべての実験条件でも同一の結果が得られている.

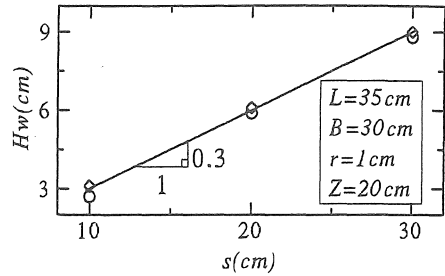


図-3: $Hw \sim s$

(2) 幅 B 及び透水層の厚さ Z の影響 図-4 は, L, r, s, Z は一定とし, $B = 15, 30, 45\text{cm}$ と変化させたときの幅 B と Hw/s の関係を示したものである. 図から, $B \geq 15\text{cm}$ では, $Hw/L \approx 0.3$ とみなせ, 今回実験に用いた実験装置では, 幅 B の異なる実験装置によっても, 噴出現象に関しては同一の結果が得られることが確認できる. すなわち, 漏水孔の直径の10倍程度以上の幅の実験装置を用いれば, 噴出現象には幅の差を考慮しなくても良いことがわかる.

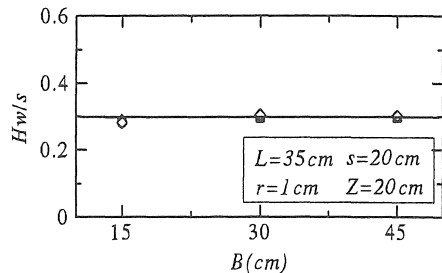


図-4: $Hw/s \sim B$

一方, 図-5 は, L, B, r, s を一定とし, $Z = 10, 20\text{cm}$ と変化させたときの, $Hw/s \sim Z$ の関係を示した図である. 先ほどと同様に, 図から, $Z \geq 10\text{cm}$ では, $Hw/s \approx 0.3$ の一定値とみなせ, 漏水孔の直径の5倍程度以上の厚さの実験装置を用いれば, 厚さの影響を考慮しなくても良いことがわかる.

以上のことを整理すると, 噴出現象は, B, Z の影響に比べて, s の影響が支配的であるといえる.

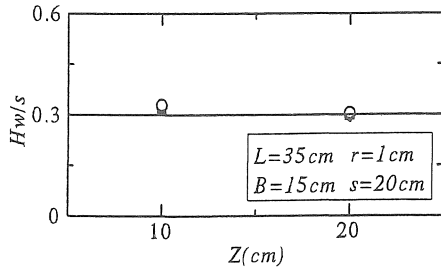


図-5: $H_w/s \sim Z$

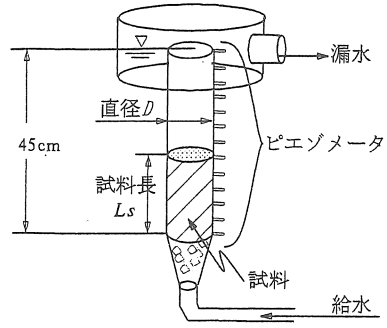


図-7: 漏水孔実験装置概略図

(3) 流亡部形状 図-6に、同一条件下の5回の実験における噴出現象終了後の流亡部形状を示す。この図から、流入面の流亡部幅の値が12~14cm付近で収束しているのがわかる。一方、流入面から漏水孔に向かう鉛直面上の流亡部形状であるが、こちらに関しては、流入面の流亡部幅とは異なり、ほぼ1本の曲線で示される。先ほど検討した B, Z の結果と同様に、透水層にある程度の厚さがあれば、噴出現象に影響を及ぼさないことを裏付ける結果である。

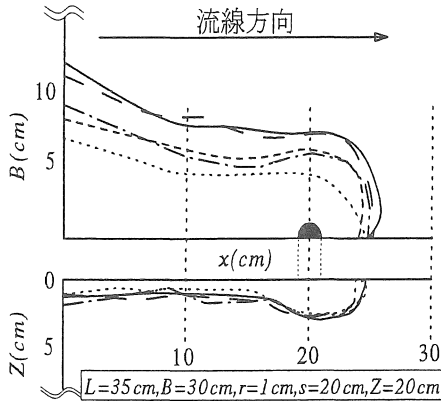


図-6: 堤内地流亡部形状

2.2 漏水孔流入土粒子の循環挙動実験

2.2.1 漏水孔実験装置

漏水孔内での流入土粒子混じりの流れの挙動を明確にするために、漏水孔を円筒に見立てた、図-7に示す漏水孔実験装置を用いて、漏水孔の直径に相当する D 、漏水孔内に流入した土粒子量の高さ L_s を変化させて、土粒子噴出現象に与える影響を調べた²⁾。また、噴出実験と同様に、試料には標準砂を用いた。

2.2.2 漏水孔実験結果および考察

漏水孔内流入土粒子の循環流実験の結果を、水位差を H_b 、漏水孔内に流入した土粒子量の高さである初期試料長を L_s 、漏水孔の直径を D 、漏水孔からの漏水の平均流速を V 、として、以下を整理する。ここで述べる土粒子循環流とは、実験装置内の試料が、流入する水によって一定の高さまで盛り上がり、循環流となる現象のことを指す。

(1) 漏水孔の直径 D の影響 図-8は、 $L_s = 5\text{cm}$ 一定とし、漏水孔の直径 D を $3\text{cm}, 5\text{cm}, 8\text{cm}$ と変化させて実験を行った際の、土粒子循環流発生直前までの $D \sim V$ の関係を示したものである。土粒子循環流の V は概ね $0.035 \sim 0.04(\text{cm/s})$ 付近で発生していることが読み取れる。また、直径 D を一定とし、 L_s を $5\text{cm}, 10\text{cm}, 20\text{cm}$ と変化させた実験においても同様に、 V が $0.035 \sim 0.04(\text{cm/s})$ 付近であった。以上から、漏水孔内に流入した土粒子の盛り上がり循環流が発生するのは、直径が異なる、あるいは流入土粒子量が異なる場合であっても、漏水孔内の平均流速 $V \approx 0.04(\text{cm/s})$ となった時点であることがわかる。

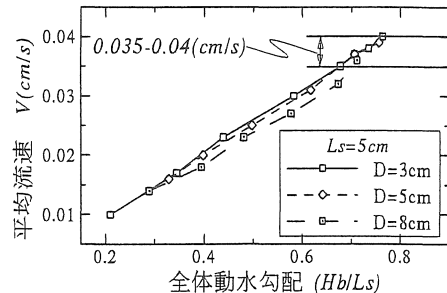


図-8: $D \sim V$

(2) 試料長増加と水位上昇の関係 実験経過の一例を図-9に示す. この実験経過を見ると, 土粒子循環流発生後は, 水位差の上昇がわずかであるにも関わらず, V の上昇や, L_s の増大が著しいことが見て取れる. このことから, 土粒子循環流が発生した後は, 発生前に比べて, わずかな水位上昇により, 土粒子の排出が行われることを示している. すなわち, 漏水孔内に土粒子の盛り上がりが発生した時点で, ほとんど噴出現象が発生していることを示している.

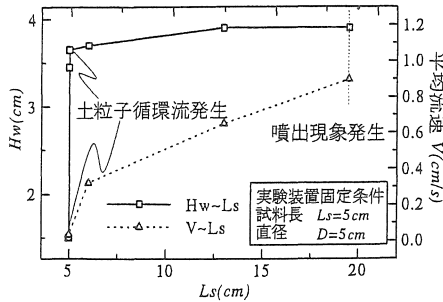


図-9: 実験経過 ($L_s = 5\text{cm}, D = 5\text{cm}$)

2.2.3 沈降速度式との比較

土粒子循環流発生後, さらに水位を上昇させ, 土粒子循環流がある高さで安定したときの, 土粒子と上向きに流れる水の関係は, 粒子が静水中を沈降する際に, 流体抵抗と粒子に働く重力が平衡に達し等速運動を行うにいたった場合と同様であると考えられる. 多粒子の沈降を表す式³⁾は体積率 β を含んだ関数である. ここでは, 今回の実験と粒子の沈降の場合とを比較検討した.

多粒子の沈降を表す式は, 式(1)である.

$$w' = \alpha \cdot w \tag{1}$$

ここで, w' : 多粒子沈降速度, w : 単粒子沈降速度, α : 速度補正係数である. このうち, 単粒子沈降速度は, 式(2)で示されるものである.

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g}{C_D} \cdot \frac{\rho' - \rho}{\rho} \cdot d} \tag{2}$$

ここで, w : 単粒子沈降速度 (cm/s), g : 重力加速度 (cm/s^2), C_D : 粒子の抵抗係数 (無次元), ρ' : 粒子の密度 (g/cm^3), ρ : 媒体の密度 (g/cm^3), d : 粒子の

直径 (cm), である. 抵抗係数と, 粒子 Reynolds 数 ($w d / \nu$) との間には, $C_D = \Phi(Re) = K / Re^n$ なる一般式を得る関係がある. 粒子に対して各粒子 Reynolds 数領域での C_D の一般式中の K, n の値を実験的あるいは理論的に定めると, 表-2に挙げる代表的な沈降速度式を得る. 今回の実験範囲では, Reynolds 数は 1 ~ 100 の範囲に含まれるので, 表-2の Allen の式を用いて計算を行った. 式中の文字は, 式(2)と同様である.

表 2: 代表的な沈降速度式

Re 数の範囲	沈降速度式	名称
< 1	$\frac{g(\rho' - \rho)d^2}{18\mu}$	Stokes
1 ~ 100	$0.233 \left[\frac{(\rho' - \rho)}{\mu\rho} \cdot g^2 \right]^{\frac{1}{3}} d$	Allen

一方, 補正係数は, 表-3に挙げるものが得られている. 粒子数が多くなってくると, 沈降時に粒子同士が相互に干渉合って, 沈降速度にその影響が現れてくるので, 表-3に示す補正係数が必要になる. 今回の実験も同様にこの補正係数が必要になる. 今回の実験範囲では, 表-3の Steinour 及び Maude の式のうち, $(1 - \beta)^m$ ($m = 2.30 \sim 4.60$) の 2本の曲線で囲まれる範囲を用いることとした.

表 3: 多粒子沈降速度補正係数

補正係数 α	備考	名称
$(1 - \beta)^2 \cdot 10^{-1.82(\beta)}$	$\beta = 0.30 \sim 0.70$	Steinour
$(1 - \beta)^m$	$m = 2.30 \sim 4.60$	Maude

以下に, 単粒子沈降速度を w , 多粒子沈降速度を w' , 体積率を β として, 沈降速度式により検討した結果を示す.

図-10は, 土粒子循環流発生後の, 多粒子沈降速度を単粒子沈降速度で除したもの (w'/w) を, 空隙率 $(1 - \beta)$ で整理したものである. 単粒子沈降速度の計算には Allen の式を, 計算中に用いる粒径 d は, 平均粒径 D_{50} を用いて算出した. その結果, 平均粒径が小さい細砂, 細砂配合については, Maude の補正係数 $(1 - \beta)^{4.60}$ の線に非常に近い値を示した. さらに, 前述の Steinour の補正係数 $(1 - \beta)^2 \cdot 10^{-1.82(\beta)}$ をあわせて見ると, この式を用いた結果のほうがよ

りよい結果を示すことが見て取れる．一方，平均粒径の大きな粗砂については， $(1-\beta)^{2.30}$ に近い値を示した．このことから，漏水孔内に流入した土粒子の土粒子循環流発生後のある点での流速は，透水層を構成する試料の平均粒径と密度から，多粒子沈降速度式を用いて推定することが可能であるといえる．しかし，平均粒径の違いにより，Maudeの補正係数の m の値が異なる問題もある．ただ，平均粒径の違いにより，この m が，2.30～4.60の範囲をとるものとして，流速の概略値を推定する式としては，利用できよう．

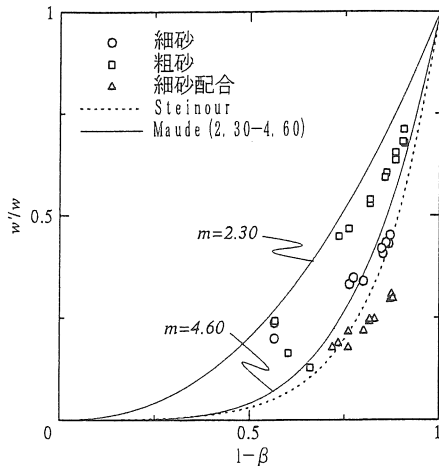


図-10: $w'/w \sim 1-\beta$

以上から，漏水孔内に流入した土粒子の噴出現象に対する検討は，透水層の大きさや境界条件，透水層構成土粒子の条件などではなく，漏水孔内の平均流速で整理するべきであるといえる．このことは，噴出実験や，地盤特性の実験にも同様のことがいえる．多粒子の沈降速度式を利用することにより，さまざまな土粒子の粒径および密度の噴出速度が推定できることがわかる．

3. 解析および理論解

数値解析や理論解によって，噴出現象に対する安全性の評価が可能であれば，時間的な面，労力的な面などで有用である．以下では，まず実験結果と3次元有限要素法解析結果との関連性，対応点などについて検討を行い，ついで3次元有限要素法解析結果と2次元理論解との対応について検討を行う．

3.1 3次元有限要素法解析

3.1.1 3次元有限要素法解析モデル

図-2の透水層領域モデルを図-11に示す． $x=0, L'$ の yz 面が河川側からの流入面，流出面に相当する． $z=0, Z'$ の xy 面と， $y=0, B'$ の xz 面は不透水面である．漏水孔は， $y=B', z=0$ の xy 面上にあり， $y=B', x=s'+r'$ に中心をもつ，半径 r' の半円の面としておかれている．実験と区別するために，解析領域の各諸元には'をつけた．解析領域内の流れは，ダルシー則が成り立ち，等方透水性である．漏水孔と流出面のポテンシャルは等しいとし，流入面のポテンシャルを100%，漏水孔内部および流出面のポテンシャルを0%とした．

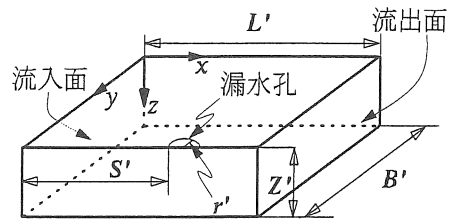


図-11: 3次元有限要素法解析領域

3.1.2 解析結果および考察

(1) xy 面上のポテンシャル分布 図-12は， $L'=100m, B'=60m, Z'=60m, s'=40.5m, r'=1m$ のときの， $z=0$ の xy 面上のポテンシャル分布および流線の図である．この図から，漏水孔からある程度離れた部分の流線は，排水側に向かってほぼ直線になっており，実験結果と同様に漏水孔の直径に対して10倍程度の幅までしか，大きな影響を及ぼしていないことが読み取れる．

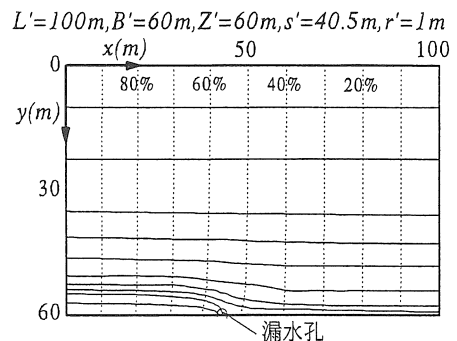


図-12: xy 面上ポテンシャル分布および流線網

また, 図-13 に示したのは, 漏水孔近傍のポテンシャル分布および流線である. この図から, 漏水孔近傍で流線が巻き込まれていることが読み取れる.

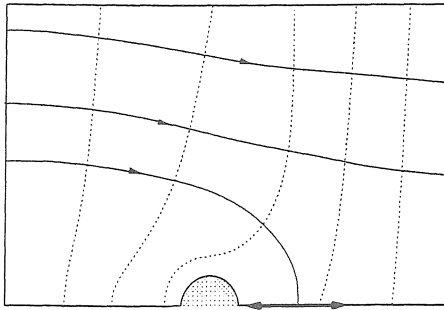


図-13: xy 面上ポテンシャル分布および流線網 (漏水孔近傍拡大図)

(2) x 軸上のポテンシャル分布 図-14 は, $y = B', z = 0$ の漏水孔軸上のポテンシャル分布を, 噴出実験結果 (図中の記号) と 3次元有限要素法解析 (図中の破線) を比較したものである. 解析条件の L', B', r', s', Z' は, 実験装置の条件と同様の条件で解析した. この図から, 土粒子循環流が発生するまでの x 軸上のポテンシャル分布は, 解析結果のそれと一致しているのが読み取れる. しかし, 漏水孔内に土粒子循環流が発生し始めると, この結果が異なってくる. 基礎地盤内に水みちの形成が確認できるほど実験が進行した段階では, さらに異なる. このことは, 漏水孔内に土粒子が流入し, 漏水孔近傍の基礎地盤内のポテンシャルが低下することに起因していると考えられる. この結果に, 水みちの形成が大きく影響していることは明らかである.

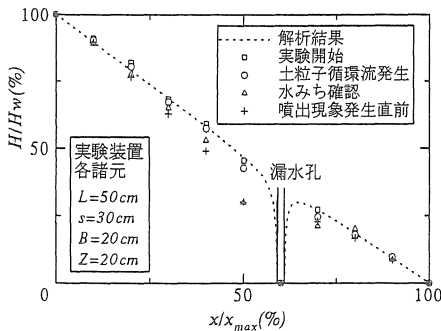


図-14: x 軸上のポテンシャル分布—室内実験と 3次元有限要素法解析の比較

(3) 最大流出動水勾配 i_{max} 平均動水勾配 Hw/s が, どのような実験条件下でも, 概ね 0.3 付近をとるといふ実験結果が得られている. しかし, 図-14 に示すように, 実験結果と解析結果のポテンシャル分布は, 実験の進行に伴って異なってくる. このため, 実験結果と解析結果が一致する, 土粒子循環流が発生する直前までを考慮して検討する必要がある. そこで, 漏水孔近傍の最大流出動水勾配に着目した. 解析結果の, 漏水孔円周部から最も近い点までの距離 ΔL で, 平均動水勾配が土粒子循環流が発生する水位差のときの, 各点での水位差 Δh を除した最大流出動水勾配 i_{max} を算出することとした. この i_{max} となったところで土粒子が漏水孔内に流入し始めることを示している. 図-15 は, 図-11 の各諸元 L', B', r', Z' は一定とし, s' を変化させたときの解析結果から, 漏水孔近傍のポテンシャル分布を示したものである. この図から, 仮に平均動水勾配が同じでも, 漏水孔に流れ込む際の i_{max} は異なってくるのがわかる. 以上のことを整理すると, 漏水孔が河川から離れると, 噴出現象が発生するのに高い河川水位を必要とするため, 噴出現象が起こりにくくなる. その一方で, 漏水孔近傍の i_{max} は増大し, 実際には低い水位差の段階で土粒子の移動が発生していることが確認できた.

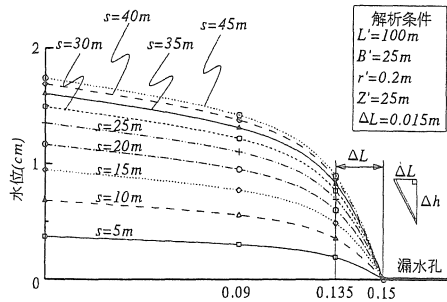


図-15: 漏水孔近傍のポテンシャル分布

(4) 漏水孔の直径 D の影響 図-16 は, D' の違いによる, 3次元有限要素法解析結果の漏水孔からの平均流速を示したものである. 漏水孔の直径 D' が大きくなるに従って, 漏水の平均流速は減少していく傾向にある. また, $D' \leq 0.4m$ までは, V' の減少は急激であるが, $D' > 0.4m$ では緩やかになるのが読み取れる. すなわち, 漏水孔が大きくなると, 漏水孔からの流速が低下し, 噴出現象が起きにくくなることを示している.

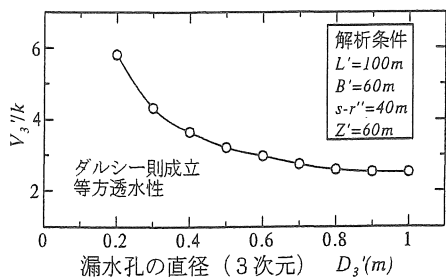


図-16: 3次元解析による単位水頭差あたりの漏水の平均流速

3.2 2次元理論解

3.2.1 2次元理論解の補正

基礎地盤内3次元流の理論解は得られない現状なので、井戸 (well) に向かう流れの理論解の利用の可能性について検討を加えることは意義があるといえる。2次元理論解は、図-11の $z=0$ の xy 面上に適用される。嶋¹⁾は、式(3)に示す理論解を得た。

$$\omega = \frac{Q_0}{\pi} \cdot \log \frac{\vartheta_0 (s+x+iy/2L)}{\vartheta_0 (s-x-iy/2L)} + H \cdot \left(1 - \frac{x+iy}{L}\right) \quad (3)$$

ここで、 ω :複素ポテンシャル、 Q_0 :wellからの漏水量、 $\vartheta()$:楕円テータ関数、 H :流入面と流出面の水頭差、である。wellと流出面の水頭差を0とすると、wellからの漏水量は、 Q_0 に基礎地盤の透水係数およびwellの長さに乗じて得られる。しかし、この式(3)を用いる上で、図-17に示す補正が必要となってくる。xy面上の各諸元のうち、 L' 、 B' 、 r' 、 Z' は固定値とし、(a)図は $s'=2.5m$ 、(b)図は $s'=15m$ としたときの結果である。設定した断面がA、計算による断面がA'である。図から、計算によるwellは、 r' 、 s' ともに設定値と異なる結果となった。

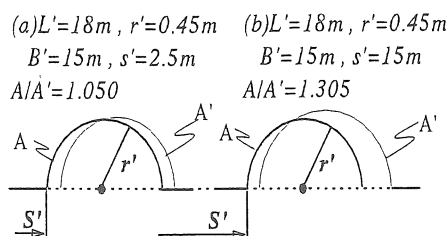


図-17: 2次元理論解によるwellの位置と大きさ

式(3)を用いる際、 A' がAと一致するように、 s' および r' を補正する必要がある⁴⁾。いま、補正値を Δs および Δr とすれば、これらは図-18のように表せられる。今後は、計算には補正した値を、表記には補正前の値を用いることとする。

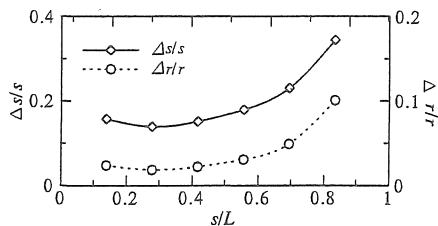


図-18: 2次元理論解の補正量 Δs 、 Δr

3.2.2 3次元有限要素法解析結果との対応

これまで、3次元解析結果が、室内実験の結果に対応しているかどうか検討を行ってきた。その結果、漏水孔に流れ込む前の最大流出動水勾配を考慮すれば、解析結果が実際の噴出現象に対応することがわかった。また、最短浸透路長 s と、漏水孔内の平均流速が、噴出現象に支配的であることがわかってきた。これ以降は、得られた3次元解析結果と、先ほど述べた2次元理論解の計算結果の比較検討を行う。添え字2,3は2次元、3次元の計算結果に対応する。

(1) 最大流出動水勾配 i_{max} 図-11の x 軸上 $s-r$ の位置の最大流出動水勾配の関係は、図-19に示すように、 $s=2.5m$ をのぞき $i_3=5.5 \cdot i_2$ なる関係が得られた。このことから、3次元流の最大流出動水勾配は、2次元理論解から概略の推定が可能であるといえる。

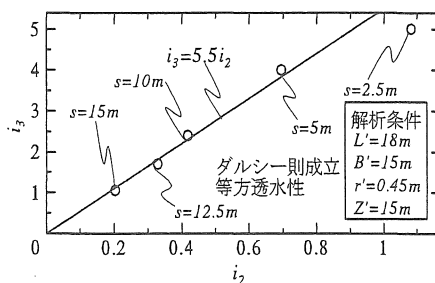


図-19: 単位水頭差あたりの最大流出動水勾配の比較

(2) 平均流速 図-20 は, D の違いによる, 2 次元理論解による平均流速を示したものである. この結果は, 図-16 に示した 3 次元有限要素解析結果と同様に, 漏水孔の直径 D が大きくなるにつれて, 漏水の平均流速は減少していく. この 2 次元と 3 次元の平均流速の相関係数は, 0.99 程度あり, 有相関であるといえる.

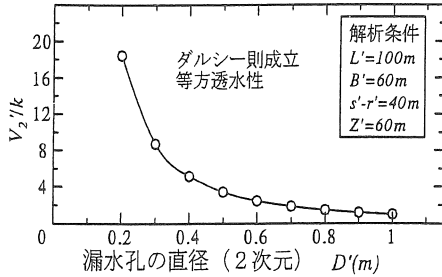


図-20: 2次元理論解による単位水頭差あたりの漏水の平均流速

2次元と3次元の平均流速が有相関であることから, 図-21 に, 2次元の平均流速 V_2' と, 3次元の平均流速 V_3' を比較した結果を示す. この図から, 式(4) に示す近似線を得た.

$$\frac{V_3'}{k} = 0.19 \cdot \frac{V_2'}{k} + 2.45 \quad (4)$$

ここで, V_3' : 3次元解析による平均流速, V_2' : 2次元理論解による平均流速, k : 基礎地盤の透水係数, である. この式は, 2次元理論解の計算結果から, 3次元での平均流速を推定する際の式として利用できよう.

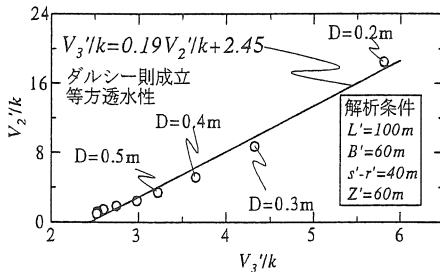


図-21: 単位水頭差あたりの平均流速の比較

4. まとめ

これまで, 堤内地漏水孔からの噴出現象に対する安全性を, 2次元理論解を用いて推定することの可能性について検討を行ってきた. 結果を以下にまとめる.

- 実験結果と 3次元有限要素法解析
漏水孔に土粒子が流れ込む前の段階であれば, 解析結果と実験結果が対応することが確認できた.
- 3次元有限要素法と 2次元理論解
最短浸透路長が漏水孔の直径の 5 倍程度以上あれば, 漏水孔に土粒子が流れ込む最大流出動水勾配の算出が可能であり, 2次元理論解を, 室内実験の結果を推測する手段として用いることが可能である. また, 漏水の平均流速の概略値も推定することが可能であることが確認できた.
- 今後の課題
図-17 に示すような, 2次元理論解を用いる際に必要になる補正值などの問題も含んでいる.

参考文献

- [1] Shima, S. and Ogihara, K.: "The problem of the seepage flow in the rectangular domain including a well", Collected Papers, Dept. of Civil Engineering, University of Tokyo, Vol.3, pp.1-21, 1965.
- [2] 丹羽, 木村: ガマ内に流入した基礎地盤土粒子の噴出について, 平成 10 年度土木学会中部支部, pp.295-296, 1999.
- [3] 土木学会: 水理公式集, pp.416-418, 1971.
- [4] 丹羽, 木村: 堤内地漏水孔 (ガマ) への流れに対する 2次元理論解の利用性, 平成 9 年度土木学会中部支部, pp.429-430, 1997.
- [5] 木村, 丹羽: ガマを有する基礎地盤内 3次元流に対する 2次元理論解の応用, 平成 10 年度土木学会中部支部, pp.297-298, 1999.

(受理 平成11年 3月20日)