

## 堤防の内部浸食・表面侵食機構に関する研究-浸透破壊と越流侵食-

工学研究科建設工学専攻 TC19005 森 聖智

### 1. はじめに

堤体基礎地盤でのパイピング発生トリガーとして、裏法尻先直下の鉛直方向の局所動水勾配が影響している。しかし、現場における水位上昇時のリアルタイムの危険度評価には、数値解析が必要となる。著者らは、透水性基礎地盤上の不透水堤体において定常解析の過程で、水位差を堤体敷幅で除した平均動水勾配から裏法尻先直下の鉛直方向の局所動水勾配を容易に推定する方法を見出した<sup>1)</sup>。また、越流時の裏法尻の洗堀現象において、地表面流れと地盤内流れが生じる際に、両者の流速差から地表面で揚力が発生しているのではないかと仮説を立てた。本報告は、堤体と堤体基礎地盤の双方が透水性を有した法勾配の異なる場合のモデルスケールとリアルスケールの局所動水勾配の推定について言及するとともに、詳細点検の実堤防データを用いて検証を行い、実務を考慮した簡便法の提案を目的としている。また、越水破壊時の地表面流れと地盤内流れの流速差での揚力の発生確認や耐越流性能の検証を目的とする

### 2. 解析条件

今回の解析は、外水位の上昇のみを考慮し、定常流解析を汎用浸透流解析ソフト 2D-Flow により実施した。図 1 に示すように堤体裏法尻先直下の鉛直方向の局所動水勾配を各種条件により求めることとした。解析モデルが室内モデルスケールの場合においても無次元化しているため、実スケールに対応可能である。

### 3. 鉛直方向の流速成分の定義

河川堤防の構造検討の手引き<sup>2)</sup>には、鉛直方向のメッシュ幅が堤防高の 1/10 程度以下になると局所動水

勾配はほぼ一定の値になると記載されている。しかし、1/10 以下の場合において増加傾向が続くため、安全側を取り鉛直方向のメッシュ幅を変更した場合で解析を行った。

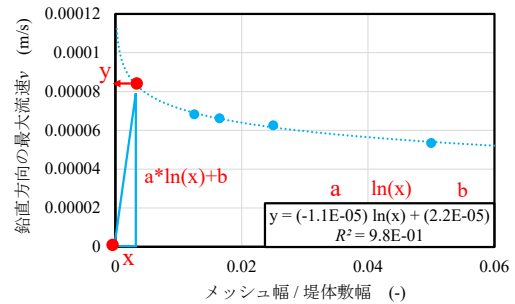


図 2 メッシュ幅と鉛直方向の最大流速の関係

図 2 を見るとメッシュ幅が小さくなる程、鉛直方向の最大流速は際限なく上昇する。本研究では、図 2 に示す任意のメッシュ幅で解析しても同一の結果が得られるような原点との距離が最小となる勾配を変更する点の鉛直成分を鉛直方向の流速成分と定義した<sup>3)</sup>。なお、前述の手引き<sup>2)</sup>の条件を満たした値となっている。

### 4. モデルスケールでの裏法尻先直下の局所動水勾配<sup>4)</sup>

表 1, 表 2 の各種パラメータの場合で解析し、解析結果の裏法尻先直下の鉛直方向の最大流速が急変する点で鉛直方向の流速成分( $v_v$ )を算出した。なお、縦軸は、裏法尻先直下の鉛直方向の流速成分( $v_v$ )を堤体基礎地盤の透水係数( $k_f$ )で除した裏法尻先直下の局所動水勾配( $v_v/k_f$ )を、横軸は、水位差( $\Delta H$ )を堤体敷幅( $L$ )で除した平均動水勾配( $\Delta H/L$ )を取り、 $v_v/k_f - \Delta H/L$  のグラフとして全てのケースを透水係数毎にまとめた。また、データ整理のフローチャートを図 3 に示す。

透水係数毎にまとめたもので、2 割勾配の結果を図 4 に、1 割 5 分勾配の結果を図 5 に示す。

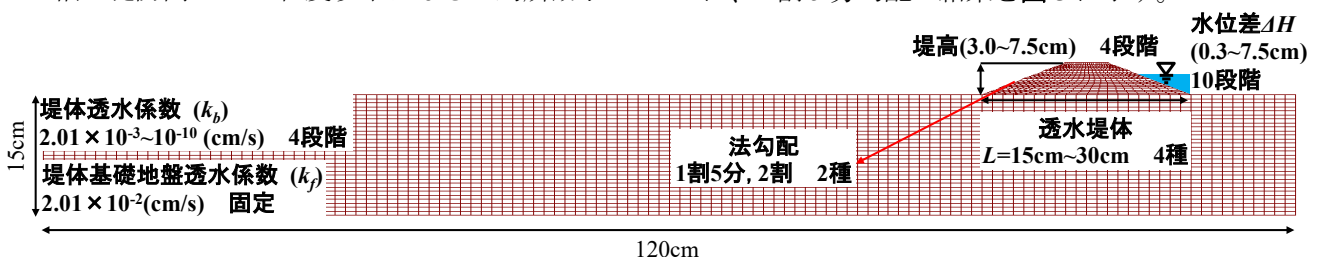


図 1 解析モデル (メッシュ図 : 2 割勾配,  $L=20\text{cm}$ ,  $k_b=2.01 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ , メッシュ幅 :  $0.5\text{cm}$ )

表1 2割勾配の解析パラメータ

L 堤体数幅=15(cm),堤高=3.0(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
L 堤体数幅=20(cm),堤高=4.0(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0
L 堤体数幅=25(cm),堤高=5.0(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
L 堤体数幅=30(cm),堤高=6.0(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0

表2 1割5分勾配の解析パラメータ

L 堤体数幅=15(cm),堤高=3.75(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.375	0.75	1.125	1.50	1.875	2.25	2.625	3.00	3.375	3.75
L 堤体数幅=20(cm),堤高=5.0(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
L 堤体数幅=25(cm),堤高=6.25(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.625	1.25	1.875	2.50	3.125	3.75	4.375	5.00	5.625	6.25
L 堤体数幅=30(cm),堤高=7.5(cm),2割勾配, \$k_f\$ 堤体基礎透水係数=2.01e-02(cm/s)										
\$k_b\$ 堤体透水係数	2.01e-03(cm/s), 2.01e-04(cm/s), 2.01e-05(cm/s), 2.01e-10(cm/s)									
AH 水位差 (cm)	0.75	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50	5.25	6.00	6.75	7.50

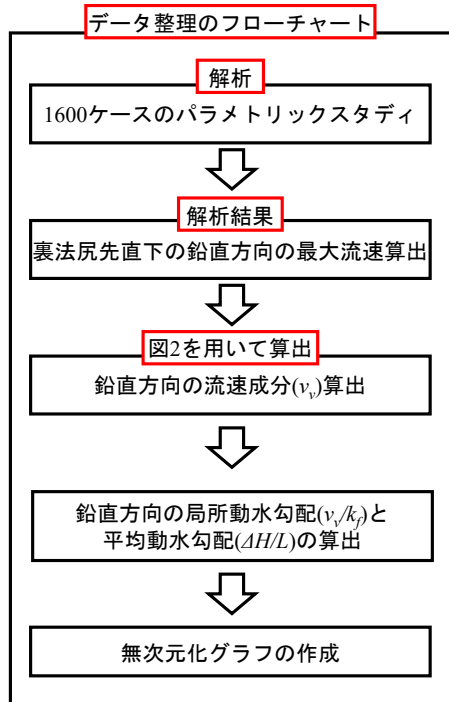


図3 データ整理のフローチャート

図4, 図5の双方ともに、堤体の透水係数(\$k\_b\$)が堤体基礎地盤の透水係数(\$k\_f\$)より小さくなる程(透水係数比(\$k\_b/k\_f\$)が小さくなる程)、鉛直方向の局所動水勾配(\$v\_v/k\_f\$)は小さくなる事がわかる。

また、図6に両者のグラフの勾配(\$m\_T\$)を算出したものを示す。図6において、双方ともに堤体の透水係数(\$k\_b\$)が堤体基礎の透水係数(\$k\_f\$)の1/100以下になるとグラフの勾配は約3.0に収束することがわかる。

また、法勾配が2割勾配から1割分勾配に急になるほど最大の鉛直方向の局所動水勾配(\$v\_v/k\_f\$)が大きくなるため、勾配が緩い2割勾配の方がより安全性の照

査基準を満たす結果となった。

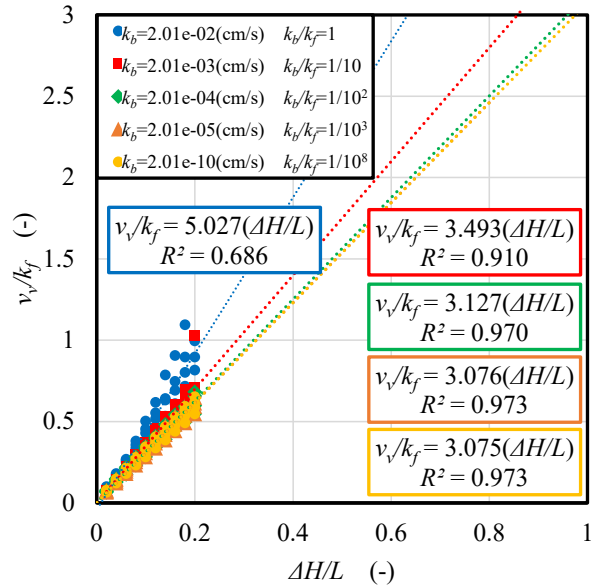


図4 \$v\_v/k\_f\$-\$\Delta H/L\$ (2割勾配, 透水係数毎)

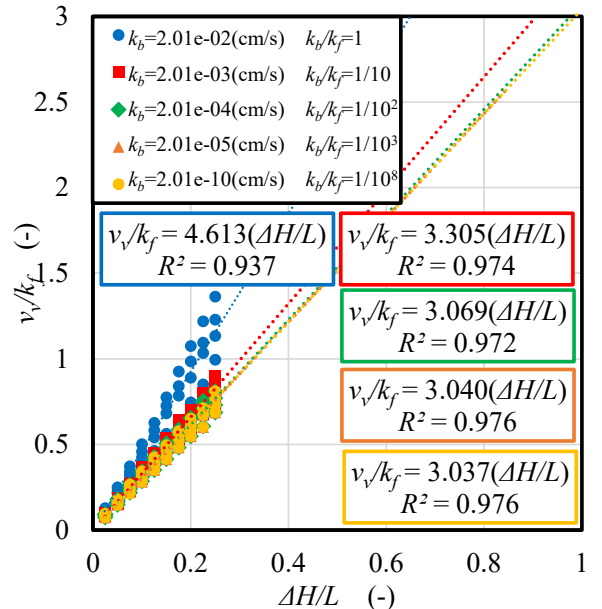


図5 \$v\_v/k\_f\$-\$\Delta H/L\$ (1割5分勾配, 透水係数毎)

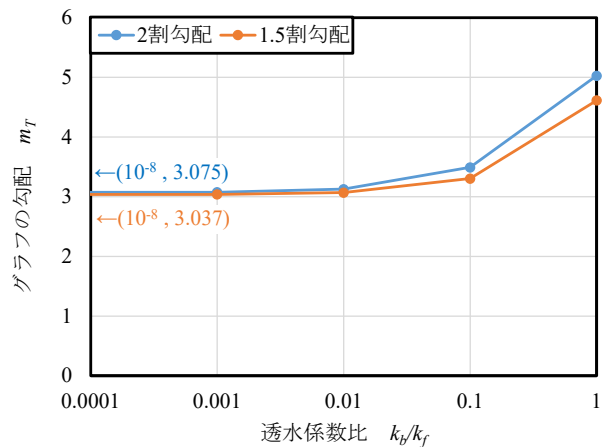


図6 透水係数比とグラフの勾配

次に、国土技術研究センターが示す被災時に対応する敷幅(D)を用いた被災時平均動水勾配(H/D)<sup>4)</sup>との関係について述べる。図7に被災時動水勾配のイメージ図を示す。国土技術研究センターでは比高(H)を被災時に対応する敷幅(D)で除したものを被災時平均動水勾配(H/D)としているが、本研究では、比高(H)を水位差(ΔH)に変更して被災時平均動水勾配(ΔH/D)として算出しており、被災時に対応する敷幅(D)のは、式(1)により算出している。

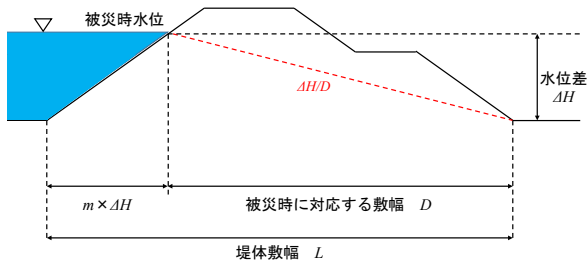


図7 被災時平均動水勾配(ΔH/D)のイメージ図

$$D \text{ の算出法} \quad D = L - m \cdot \Delta H \quad (1)$$

ここに、D: 被災時に対応する敷幅(cm), L: 堤体敷幅(cm), m: 法勾配(-), ΔH: 水位差(cm)である。

また、前述同様に無次元化したグラフを作成し、縦軸に鉛直方向の流速成分(v<sub>v</sub>)を堤体基礎の透水係数(k<sub>f</sub>)で除した鉛直方向の局所動水勾配(v<sub>v</sub>/k<sub>f</sub>)を、横軸には、水位差(ΔH)を被災時に対応する敷幅(D)で除した被災時平均動水勾配(ΔH/D)を取り、v<sub>v</sub>/k<sub>f</sub>-ΔH/Dのグラフとしてすべてのケースを透水係数毎にまとめた。

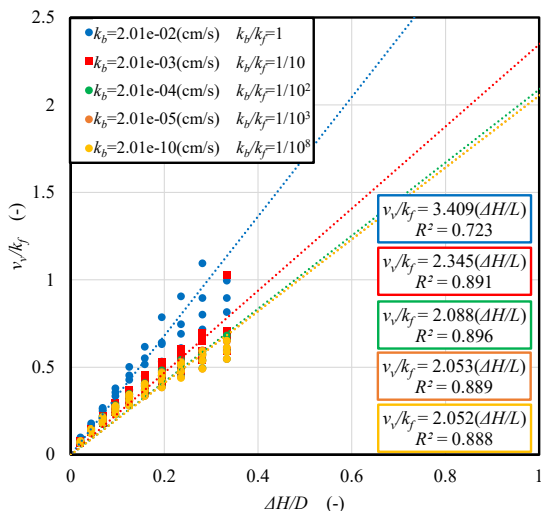


図8 v<sub>v</sub>/k<sub>f</sub>-ΔH/D (2割勾配, 透水係数毎)

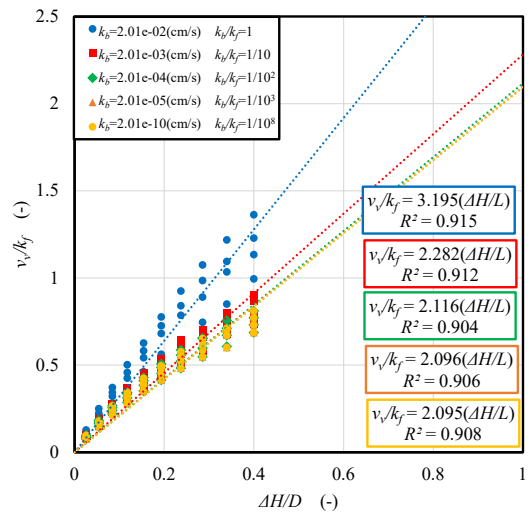


図9 v<sub>v</sub>/k<sub>f</sub>-ΔH/D (1割5分勾配, 透水係数毎)

透水係数毎にまとめたもので、2割勾配の場合を図8に示し、1割5分勾配の場合を図9に示す。図8、図9の双方ともに、堤体の透水係数(k<sub>b</sub>)が堤体基礎の透水係数(k<sub>f</sub>)に比べて小さくなる程(透水係数比(k<sub>b</sub>/k<sub>f</sub>)が小さくなる程)、グラフの勾配が小さくなるのがわかる。

また、図10に両者のグラフの勾配(m<sub>T</sub>)を算出したものを示す。図10において、双方ともに堤体の透水係数(k<sub>b</sub>)が堤体基礎の透水係数(k<sub>f</sub>)の1/100以下になるとグラフの勾配は約2.0に収束することがわかる。

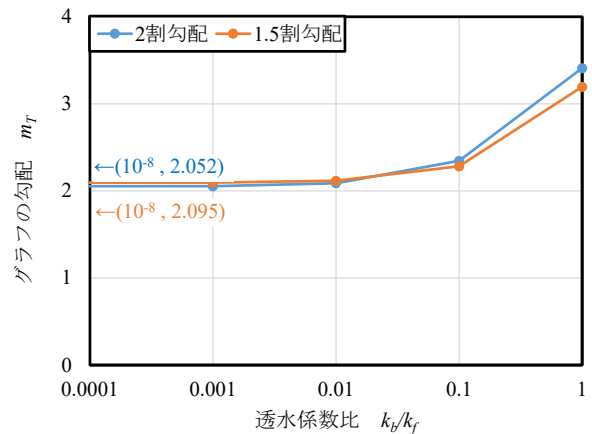


図10 透水係数比とグラフの勾配

### 5. リアルスケールでの裏法尻先直下の局所動水勾配

表3, 表4の各種パラメータの場合で解析し、解析結果の裏法尻先直下の鉛直方向の最大流速が急変する点で鉛直方向の流速成分(v<sub>v</sub>)を算出した。なお、模型スケールと同様に、縦軸は、裏法尻先直下の鉛直方向の流速成分(v<sub>v</sub>)を堤体基礎地盤の透水係数(k<sub>f</sub>)で除した裏法尻先直下の鉛直方向の局所動水勾配(v<sub>v</sub>/k<sub>f</sub>)を、横軸は、水位差(ΔH)を堤体敷幅(L)で除した平均動水勾配(ΔH/L)

を取り、 $v_w/k_f - \Delta H/L$  のグラフとして全てのケースを透水係数毎にまとめた。

表3 2割勾配の解析パラメータ

L 堤体数幅=15(m),堤高=3.0(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3.0
L 堤体数幅=20(m),堤高=4.0(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0
L 堤体数幅=25(m),堤高=5.0(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
L 堤体数幅=30(m),堤高=6.0(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0

表4 1割5分勾配の解析パラメータ

L 堤体数幅=15(m),堤高=3.75(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.375	0.75	1.125	1.50	1.875	2.25	2.625	3.00	3.375	3.75
L 堤体数幅=20(m),堤高=5.0(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
L 堤体数幅=25(m),堤高=6.25(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.625	1.25	1.875	2.50	3.125	3.75	4.375	5.00	5.625	6.25
L 堤体数幅=30(m),堤高=7.5(m),2割勾配 $k_f$ ,堤体基礎透水係数=2.01e-04(m/s)										
$k_b$ 堤体透水係数	2.01e-05(m/s), 2.01e-06(m/s), 2.01e-07(m/s), 2.01e-12(m/s)									
AH水位差(m)	0.75	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50	5.25	6.00	6.75	7.50

透水係数毎にまとめたもので、2割勾配の結果を図11に、1割5分勾配の結果を図12に示す。透水係数毎にまとめたもので、図11、図12の双方ともに、模型スケールと同様に、堤体の透水係数( $k_b$ )が堤体基礎地盤の透水係数( $k_f$ )より小さくなる程(透水係数比( $k_b/k_f$ )が小さくなる程)、鉛直方向の局所動水勾配( $v_w/k_f$ )は小さくなることわかる。また、図13に両者のグラフの勾配( $m_T$ )を算出したものを示す。図13において、模型スケールと同様に、双方ともに堤体の透水係数( $k_b$ )が堤体基礎の透水係数( $k_f$ )の1/100以下になるとグラフの勾配は約3.0に収束することがわかる。

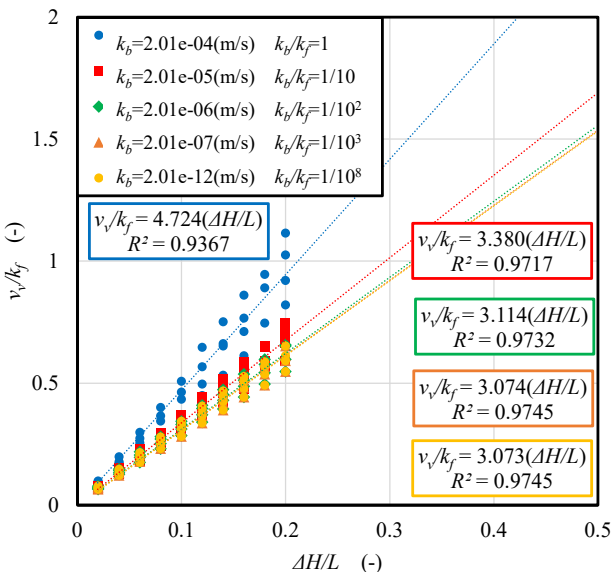


図11  $v_w/k_f - \Delta H/L$  (2割勾配, 透水係数毎)

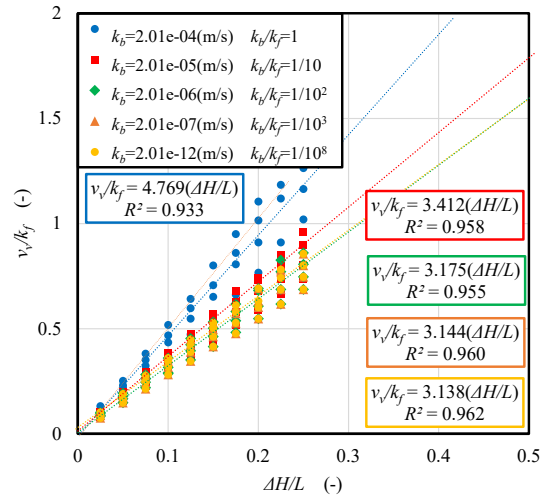


図12  $v_w/k_f - \Delta H/L$  (1割5分勾配, 透水係数毎)

また、法勾配が2割勾配から1割分勾配に急になるほど最大の鉛直方向の局所動水勾配( $v_w/k_f$ )が大きくなるため、勾配が緩い2割勾配の方がより安全性の照査基準を満たす結果となった。

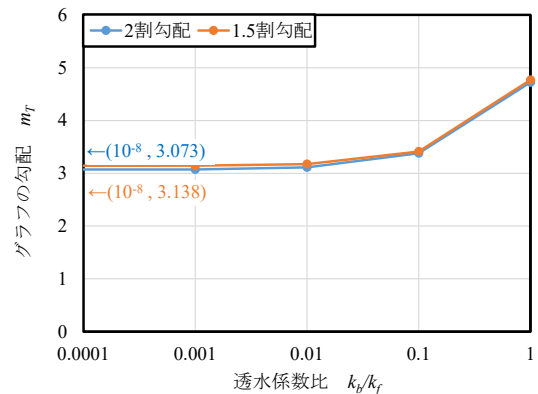
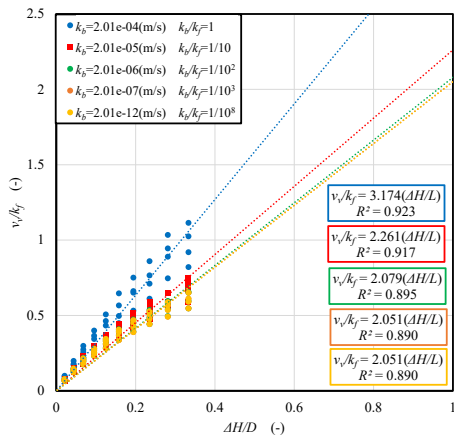


図13 透水係数比とグラフの勾配

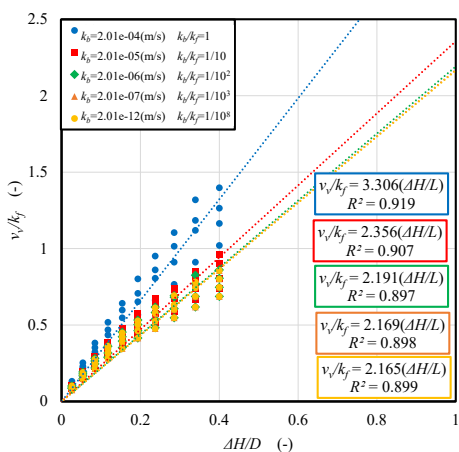
また、被災時平均動水勾配( $\Delta H/D$ )との関係について、模型スケールの場合と同様に無次元化したグラフを作成し、縦軸は、鉛直方向の流速成分( $v_w$ )を堤体基礎の透水係数( $k_f$ )で除した裏法尻先直下の鉛直方向の局所動水勾配( $v_w/k_f$ )を、横軸には、水位差( $\Delta H$ )を被災時に対応する敷幅( $D$ )で除した被災時平均動水勾配( $\Delta H/D$ )を取っており、 $v_w/k_f - \Delta H/D$ のグラフとしてすべてのケースを透水係数毎にまとめた。

透水係数毎にまとめたもので、2割勾配の場合を図14に示し、1割5分勾配の場合を図15に示す。図14、図15の双方ともに、模型スケールと同様に、堤体の透水係数( $k_b$ )が堤体基礎の透水係数( $k_f$ )に比べて小さくなる程(透水係数比( $k_b/k_f$ )が小さくなる程)、グラフの勾配が小さくなることわかる。

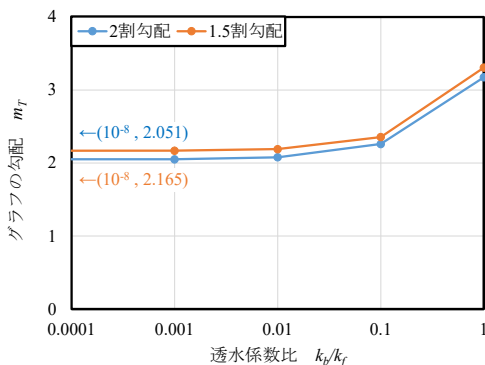
また、**図 16**に両者のグラフの勾配( $m_T$ )を算出したものを示す。**図 16**においても、模型スケールと同様に、双方ともに堤体の透水係数( $k_b$ )が堤体基礎の透水係数( $k_f$ )の1/100以下になるとグラフの勾配は約 2.0 に収束することがわかる。



**図 14**  $v_v/k_f - \Delta H/D$  (2 割勾配 , 透水係数毎)



**図 15**  $v_v/k_f - \Delta H/D$  (1 割 5 分勾配 , 透水係数毎)

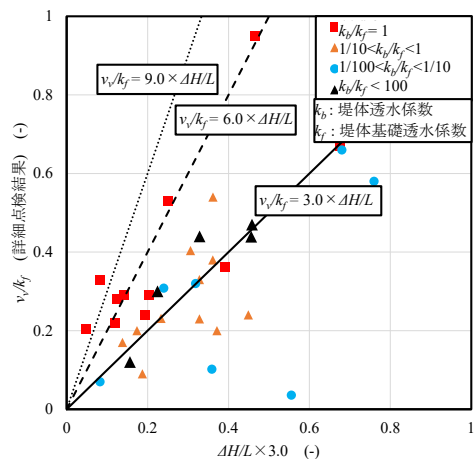


**図 16** 透水係数比とグラフの勾配

## 6.実堤防での検証

ここまで解析による検証を行ってきたが、ここでは実堤防データを用いて検証していく。検証に用いる実堤防データは、河川堤防データベース 2008 を使用

して中部地方整備局管内の代表河川プラス長良川と揖斐川を対象にデータを収集した。収集したデータは、①平均動水勾配と鉛直方向の局所動水勾配の双方のデータがあり、②堤体基礎地盤が砂質土である地点とし、③堤体透水係数( $k_b$ )と堤体基礎透水係数( $k_f$ )のデータから透水係数比( $k_b/k_f$ )が 1 以下の地点を対象に検証を行った。透水係数比( $k_b/k_f$ )が 1 以上の地点は堤体透水係数よりも堤体基礎地盤透水係数の方が小さく、解析条件に合わないため除外している。しかし、平均動水勾配の値( $\Delta H/D$ )が本研究で使用している条件と異なっていたので、上記の条件を満たしているデータのみ平均動水勾配( $\Delta H/L$ )の値を水位差( $\Delta H$ )と堤体敷幅( $L$ )のデータから算出した。検証方法として、鉛直方向の局所動水勾配のデータと本研究の解析結果から求められた  $v_v/k_f = 3.0 \times \Delta H/L$  という結果を用いて概略点検から算出した平均動水勾配( $\Delta H/D$ )を 3 倍した鉛直方向の局所動水勾配( $v_v/k_f$ )の値で比較を行ったものを**図 17**に示す。なお、鉛直方向の局所動水勾配の値が 1 以上のデータについては、イレギュラーである地点とし、ここでは鉛直方向の局所動水勾配が 1 以内の場合において比較検証している。**図 17**より概ね鉛直方向の局所動水勾配が平均動水勾配の約 3 倍に収束することが確認された。また、透水係数比が大きくなるにつれて 3 倍以上になることも確認された。また  $\Delta H/L$  と  $\Delta H/D$  の関係を**図 18**に示す。解析結果から、 $\Delta H/D = 1.5 \times \Delta H/L$  の関係を得ることができたため、詳細点検データでの検証を行ったところ、詳細点検結果においても解析結果と同様に被災時平均動水勾配は平均動水勾配の約 1.5 倍に収束する結果を得た。



**図 17** 詳細点検データへの適用

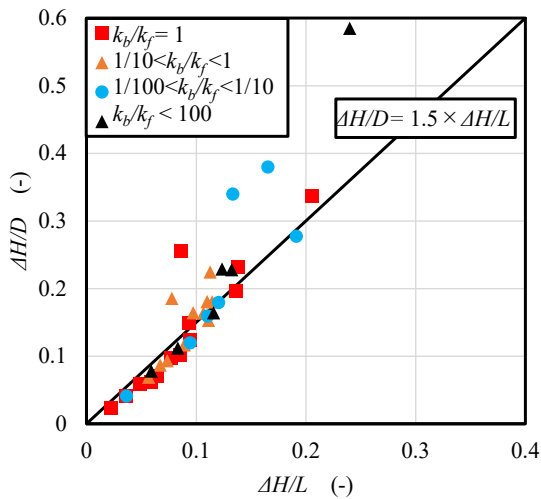


図 18  $\Delta H/L$  と  $\Delta H/D$  の関係

### 7.揚力発生実験

越流侵食に伴う堤防決壊の主な原因はせん断力が働くことにより起きている。しかし、せん断力に加えて土中に揚力が発生していると考え模型実験にて揚力の発生確認実験を行った。

揚力とは、図 19 に示すように飛行機の翼やヘリコプターのプロペラなどで下を流れる流速よりも上を流れる流速の方が大きいため機体が持ち上がる現象である。これを地盤で考えたときに地盤内を流れる流速よりも地表面を流れる流速の方が速いため、土粒子が揚力によって持ち上がる現象が起きると推測した。なお、揚力の算出にはベルヌーイの定理を用いる。

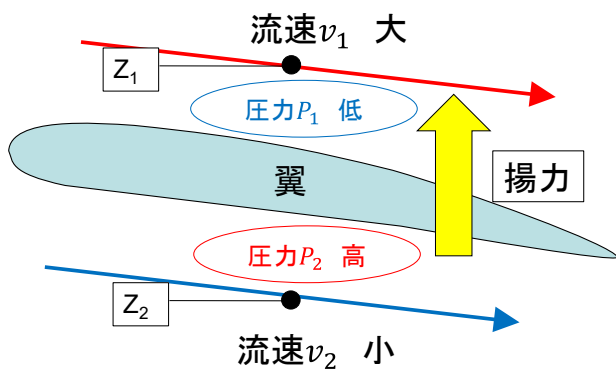


図 19 揚力のイメージ図

本実験は、図 20 に示すアクリル製の実験水槽を用いて実験を行った。実際の試料を用いる前に BB 弾（プラスチック製の遊戯銃用弾丸）を用いて実験を行った。実験では全体の流量を計測し、簡易的に地表面流れと地盤内流れの流速を算出し、揚力を推定した。

次に、珪砂 6 号とまさ土の 2 種類の試料を用いて実

験を行った。試料は水中落下法で単一層として締固め、粒径が異なる試料での地表面流れと地盤内流れの流速差による揚力の発生確認を行うとともに地盤内流れの発生の有無について確認を行った。昇降機の給水機を用いて、任意の高さで水位差を 3 段階変更し、各ケースの全体の流量( $Q$ )、地盤内の動水勾配( $i_s$ )、水槽の水位( $H$ )を計測した。計測結果からダルシー則を用いて地盤内流れの流量( $Q_s$ )を算出し、全体の計測流量( $Q$ )から地表面流れの流量を求めた。全体の流量( $Q$ )は水槽からの流出量が一定になった段階での 10 秒間の流量を各ケース 3 回計測した。地盤内の動水勾配は、地盤の中央深さでの動水勾配となっている。なお、土粒子密度や粒度分布は JIS 規格に基づいた試験から得られた結果である。なお、実験に用いたまさ土は 9.5mm 以下のものを使用している。

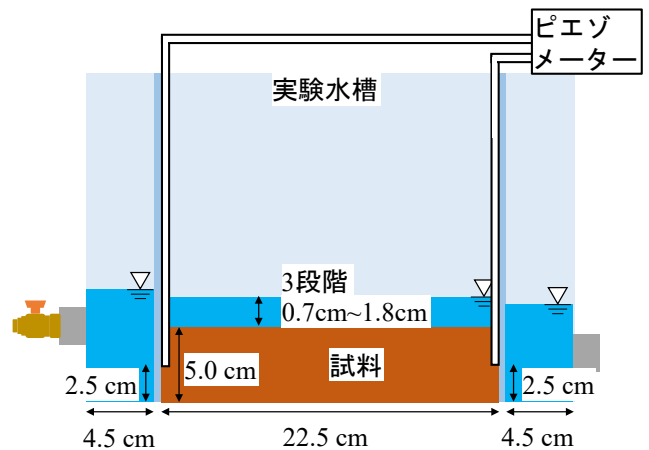


図 20 実験装置

実験結果からダルシー則に用いる透水係数を実験試料(珪砂 6 号)の乾燥密度から式(2)の間隙比関数を用いて算出し、まさ土の透水係数は KSAT 飽和透水係数測定装置を用いて定水位透水試験から算出した。

$$k_s = 0.06143 \times \frac{e}{1+e^3} \quad (2)$$

計測した地盤内の動水勾配( $i_s$ )と算出した透水係数( $k_s$ )から、ダルシー則により地盤内流れの流速を算出し、地盤の断面積を掛けることによって地盤内の流量を算出する。計測した全体の流量と地盤内の流量から地表面の流量を算出し、地表面流れの流速を算出する。地盤内流れの流速及び地表面流れの流速は間隙率で除することにより実流速の値となっている。地盤内流れと地表面流れの実流速の関係のうち珪砂 6 号の場合を図 21 に示し、まさ土の場合を図 22 に示す。図 21、図 22 より、実流速で比べると地表面流れと地盤内流れの流

速差は珪砂6号で約2300倍、まさ土で約3000倍の流速差が表れていることから、地表面では水平流れが卓越していることがわかる。また、珪砂6号では模型水槽の奥行が4cmと短いため、摩擦抵抗が働いてしまい揚力の発生を確認できなかった。まさ土では、水中落下法で試料を詰める際に粒子の質量差により粒径ごとに分離してしまい地表面近くに粒径の大きな粒子が堆積していたため、揚力による粒子の上昇を確認できなかった。

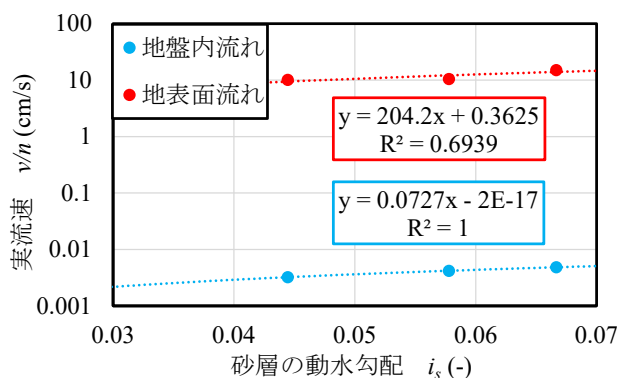


図 21 地表面流れと地盤内流れの関係(珪砂6号)

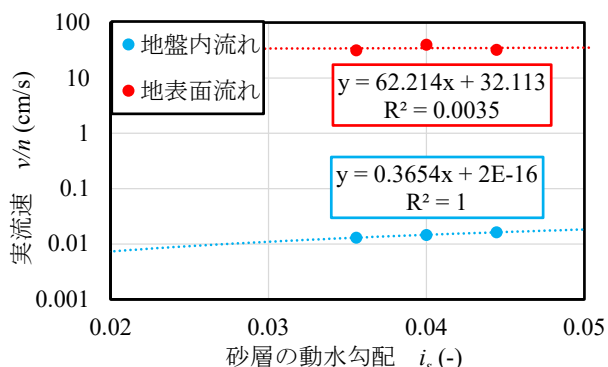


図 22 地表面流れと地盤内流れの関係(まさ土)

しかし、地表面流れの流速と地盤内流れの流速を算出しているため、BB弾、珪砂6号、まさ土のそれぞれの最大粒径での水中重量と揚力を算出し、実際に粒子の浮上が発生していないのか推定する。それぞれの計算結果を表5に示す。表5より、BB弾の圧力差による揚力は水中重量の約3倍程度に達していることがわかった。ただし、BB弾の流速の精度が粗いためあくまでも参考結果である。珪砂6号、まさ土においても揚力は水中重量の約1.7倍であったが、粒子の浮き上がりは確認できなかった。

表 5 水中重量と揚力

	粒径 (mm)	水中密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	V <sub>1</sub> : 上部流速 (水中) (m/s)	V <sub>2</sub> : 下部流速 (土中) (m/s)	揚力 (N)	粒子当たりの水中重量 (N)
BB弾	6	0.87	0.055	0.038	3.32E-3	9.64E-4
珪砂6号	0.425	1.65	0.1186	4.0E-5	1.18E-6	6.58E-7
まさ土	9.5	1.67	0.346	1.5E-4	1.32E-2	7.35E-3

実験結果の地表面流れの流速と同じ土粒子密度の場合の岩垣の式との比較検証を行った。珪砂6号の場合を図23に示し、まさ土の場合を図24に示す。地表面流れの流速を岩垣の式に代入しそれぞれの粒径を算出した。算出した粒径をそれぞれの粒度分布から通過質量百分率を推定した。珪砂の粒度分布を図25に示し、まさ土の粒度分布を図26に示す。図25から珪砂ではどのケースにおいても通過質量百分率が100%であったことから珪砂は流れていくはずであるが試料が流れることはなかった。前述した通り模型の奥行が短く摩擦抵抗が働き揚力が発生しなかったと考えられる。また、図26からまさ土は、Case2において通過質量百分率が100%であったが、Case1, Case3は約96%であった。しかし、実験に用いたまさ土は9.5mm以下であるため、まさ土も流れていくはずであるが試料が流れることはなかった。これも、前述の通り水中落下法で試料を詰める際に質量の差で地表面近くに大きな粒子が堆積したため揚力が発生しなかったと考えられる。

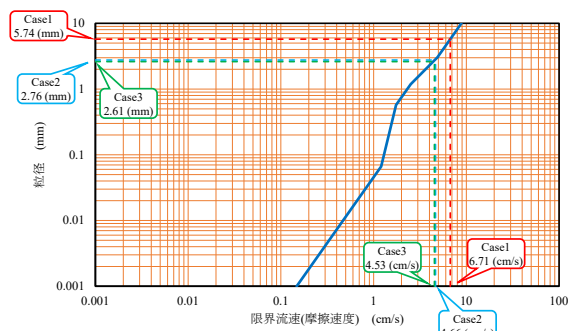


図 23 岩垣の式との比較(珪砂6号)

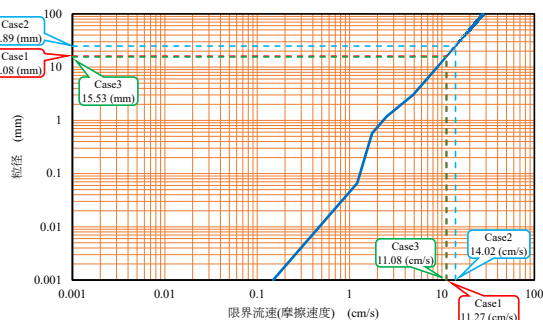


図 24 岩垣の式との比較(まさ土)

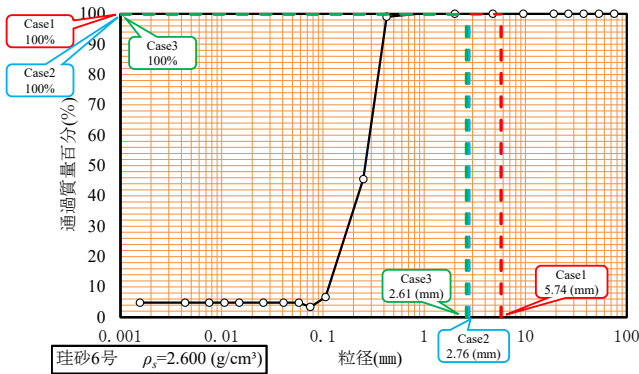


図 25 粒度分布(珪砂 6 号)

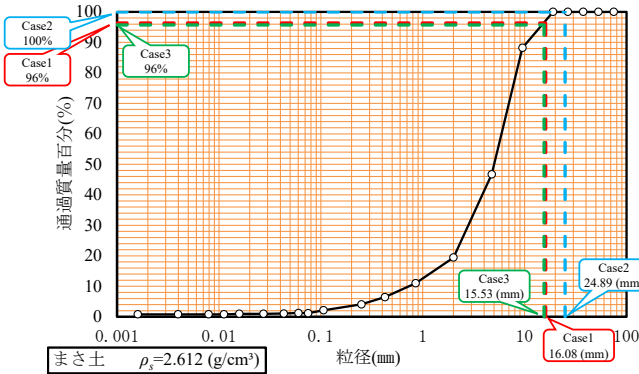


図 26 粒度分布(まさ土)

### 8.越流侵食実験

珪砂 6 号と生田木節粘土を用いて配合割合を変更した場合で越流時の越流時間及び堤体の耐侵食性を岩垣の式と多粒子限界流速を用いて比較検証していく。

本実験では、長野県千曲川堤防の左岸 57.5km 地点を 1/50 スケールにし、天端長の半分から堤内地側を小型模型で再現した。図 27 に小型模型実験モデルを示す。堤体には発泡スチロールを使用しており、水槽の寸法と法勾配に誤差が出ない様にやすりを使用し小型模型のサイズを調整した。法勾配は 2 割勾配としている。また、水槽側面にはスケールを設置しており、側面から撮影を行う際に越流水深が計測できるようにした。盛土の自然崩壊を防ぐために天端と裏法面に紙やすりを敷いている。水を流した際に天端以外の側面や底面からの浸水と発泡スチロールの浮上を防ぐ目的でセメダインと両面テープを使用した。また、千曲川で洗堀が起きていたことから、基礎地盤を設置し、土留めのために発泡スチロールを設置した。水の供給は水道から直接行い、排水は水槽内にはんだごてを用いて 5cm×5cm の穴をあけ、そこから排水した。

作成した小型模型の天端と裏法面の部分に厚さ 2cm の盛土を行い、越流侵食実験を行う。盛土に用いる試

料は、珪砂 6 号の配合割合を 50% , 60% , 70% , 80% , 90% の 5 ケースとしている。

実験 Case を表 6 に示す。盛土試料の含水比は珪砂 6 号 50% の配合割合の試料で図 28 に示すように、JIS 規格に基づいた締固め試験を行い得られた最適含水比 :  $w_{opt} = 23.5\%$  を用いてすべての配合割合の場合で試料を作成した。小型模型実験装置に天端と裏法面の盛土厚が 2cm になるように水準器を用いて整地した。許容範囲は、XY 軸ともに  $\pm 1^\circ$  以内、法面は 2 割勾配で  $26.5^\circ \pm 2^\circ$  とした。水道から水を流し始め天端を通過した時点での越流水深をスケールから計測する。

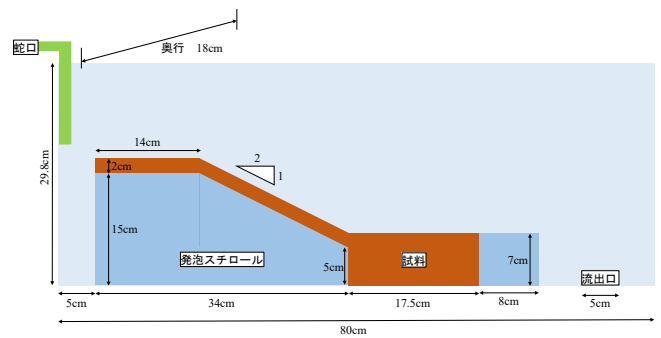


図 27 小型模型モデル図

表 6 実験ケース

	珪砂 6 号の含有量				
	50%	60%	70%	80%	90%
平均水位上昇速度	0.585(cm/s)				
平均水位上昇速度	2.395(cm/s)				

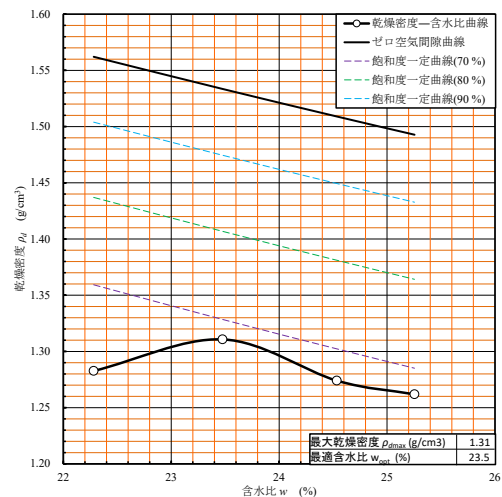


図 28 締固め曲線

実験結果の珪砂 6 号の割合が 80% の平均水位上昇速度が 0.585cm/s のものを図 29 に示し、平均水位上昇速度が 2.395cm/s のものを図 30 に示す。双方ともに侵食が開始された時点の写真である。



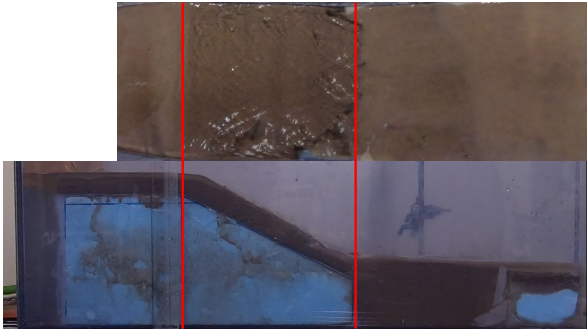


図 29 珪砂 6 号 80%(平均水位上昇速度 0.585cm/s)



図 30 珪砂 6 号 80%(平均水位上昇速度 2.395cm/s)

実験結果として珪砂 6 号の割合が 50%、60%、70% の場合には法面が崩壊に至ることはなかった。しかし、珪砂 6 号が 90%および珪砂 6 号 80%(平均水位上昇速度 2.395cm/s)の場合は法面が完全崩壊に至った。また、図 29 に示す、珪砂 6 号 80%(平均水位上昇速度 0.585cm/s)は越流開始 5 秒後から侵食が始まり法尻部のみ崩壊した。珪砂 6 号 80%(平均水位上昇速度 0.585cm/s)については試料の整地が甘く法勾配と基礎地盤の接続部(法尻部)において崩壊していない場合の他の Case に比べて負荷が大きかったため、法尻部のみ崩壊に至った可能性があると考えられる。珪砂 6 号 80%及び珪砂 6 号 90%の場合は他の配合割合に比べて砂質土の比率が高くなっており、粘着力が弱くなり法面の維持ができずに崩壊に至ったと考えられる。

次に、実験にて得られた越流水深から流速を算出するために、式(3)に示す本間の完全越流公式<sup>9)</sup>を用いた。また、式(3)を式変換したものを式(4)に示す。本検証では、式(4)を使用して検証を行う。

$$Q = 0.35lh_1\sqrt{2gh_1} \quad (3)$$

$$v = 0.35\sqrt{2gh_1} \quad (4)$$

ここに、 $Q$  : 越流量 (cm<sup>3</sup>/s) ,  $h_1$  : 越流水深 (cm) ,  $g$  : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>) ,  $l$  : 縦断方向天端幅 (cm) ,  $v$  : 越流流速 (cm/s) である。

算出した越流流速を式(5)に示すマンニングの平均流速公式から算出したエネルギー勾配より式(6)に示す摩擦速度を求め検証を行った。

$$i_e = \left(\frac{nv}{h^{2/3}}\right)^2 \quad (5)$$

$$u_* = \sqrt{ghi_e} \quad (6)$$

ここに、 $i_e$  : エネルギー勾配 (-) ,  $n$  : マンニングの粗度係数 (cm<sup>-1/3</sup>・s) ,  $h$  : 水深 (cm) ,  $u_*$  : 摩擦速度 (cm/s) である。

マンニングの粗度係数は水理公式集に記載されている条件に合わせて本実験では、ライニングなし水路の土、直線、等断面水路の粗度係数  $n=0.022$  を使用した。

式(4)～式(6)を用いて算出した平均水位上昇速度が 0.585cm/s での摩擦速度を表 7 に示し、平均水位上昇速度が 2.395cm/s での摩擦速度を表 8 に示す。表 7、表 8 で得られた摩擦速度を岩垣の式及び多粒子限界流速式と比較していく。珪砂 6 号の配合割合が 80% の場合を図 31 に、90% の場合を図 32 に示す。これらから、越流時の侵食される可能性のある粒径を算出し、算出した粒径をそれぞれの配合割合の粒度分布に当てはめ通過質量百分率を推定した。図 33 に珪砂 6 号 80%の粒度分布を、図 34 に珪砂 6 号 90%の粒度分布を示す。粒度分布よりすべての実験 Case において通過質量百分率が 100%となった。これにより、すべての Case において法面崩壊が起こるはずであるが、実際に法面崩壊が起きたのは配合割合が 80%と 90% だけであった。粒度分布をみると、木節粘土によって粒度分布が変化しているのは 850 $\mu$ m 以下の部分であるため、流出した最小粒径が 1.55mm であることから明らかである。このことから、粒子が流れてしまう速度に達しても締固め具合や粘土含有量によって法面崩壊を防ぐことが可能であると考えられる。

表 7 平均水位上昇速度が 0.585cm/s での摩擦速度

平均水位上昇速度 0.585(cm/s)					
珪砂6号の含有量	50%	60%	70%	80%	90%
摩擦速度 (cm/s)	2.97	4.19	4.19	5.13	4.19

表 8 平均水位上昇速度が 2.395cm/s での摩擦速度

平均水位上昇速度	2.395(cm/s)				
珪砂6号の含有量	50%	60%	70%	80%	90%
摩擦速度 (cm/s)	5.91	5.13	5.91	5.53	4.68

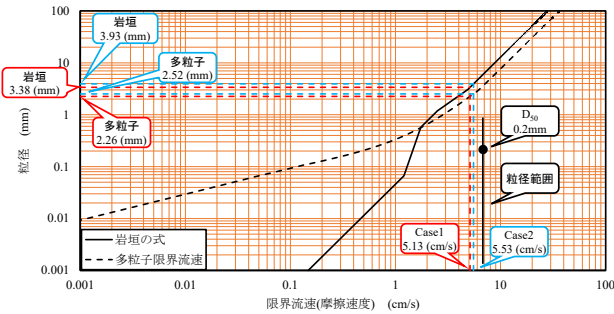


図 31 岩垣、多粒子との比較 (珪砂 6 号 80%)

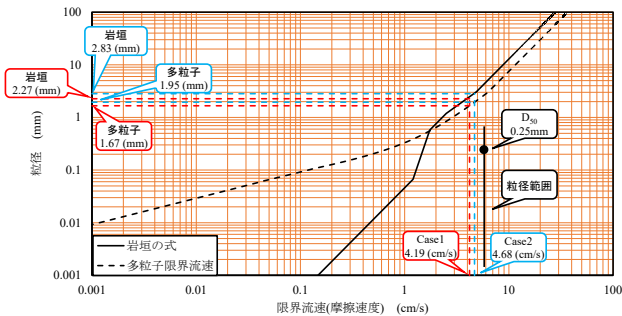


図 32 岩垣、多粒子との比較 (珪砂 6 号 90%)

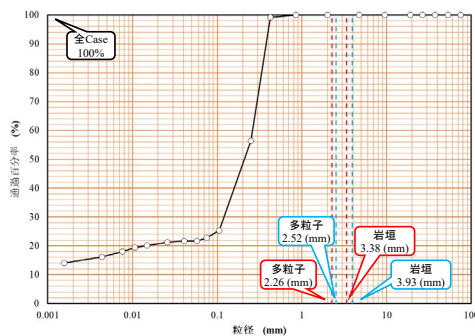


図 33 粒度分布 (珪砂 6 号 80%)

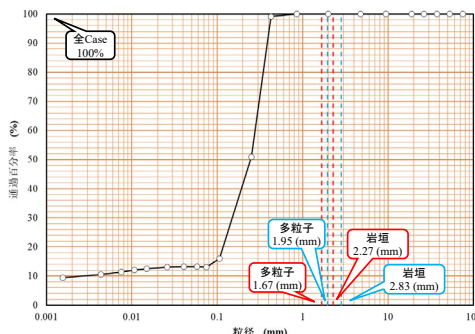


図 34 粒度分布(珪砂 6 号 90%)

## 9.おわりに

本研究で得られた知見を以下に述べる。

- (1)数値解析の依存性について、原点との距離が最小となる点を対数関数上にとりその点の鉛直成分を鉛

直方向の流速成分( $v_v$ )と定義した。

- (2)鉛直方向の流速成分を算出する際に、(cm)表記でなく(m)表記で算出すると模型スケールとリアルスケールの双方において解析結果が一致した。

- (3)透水堤体の場合において法勾配に関係なく堤体透水係数( $k_b$ )が堤体基礎地盤透水係数( $k_f$ )の 1/100 以下の場合において鉛直方向の局所動水勾配( $v_v/k_f$ )は平均動水勾配( $AH/L$ )の約 3 倍となる。

- (4)透水堤体の場合において法勾配に関係なく堤体透水係数( $k_b$ )が堤体基礎地盤透水係数( $k_f$ )の 1/100 以下の場合において鉛直方向の局所動水勾配( $v_v/k_f$ )は被災時平均動水勾配( $AH/D$ )の約 2 倍となる。

- (5)詳細点検データへの適用より、本研究の解析条件と同様の地点において局所動水勾配( $v_v/k_f$ )は平均動水勾配( $AH/L$ )の約 3 倍になることが確認された。

- (6)解析結果と同様に詳細点検データでも被災時平均動水勾配は平均動水勾配の約 1.5 倍に収束する結果を得た。

- (7)揚力実験では BB 弾の揚力は水中重量の約 3 倍、珪砂 6 号、まさ土では約 1.7 倍の速度に達した結果となったが粒子の浮き上がりは見られなかった。

- (8)実験検証により、全ての Case において越流時の質量百分率が 100%であったことから、全ての Case で法面崩壊が起きるはずだが、実験結果からも言えるように締固め具合や粘土含有量によっては法面崩壊を防ぐことが可能であると考えられる。

## 【参考文献】

- 1)森 聖智・寺西剣悟・杉井俊夫：堤体基礎地盤のパイピング発生条件に関する研究，第 6 回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.17-20，2018.
- 2)財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)，pp.46-47，pp.66-67，H24.02.
- 3)森聖智・杉井俊夫・余川弘至・寺西剣悟：堤体基礎の平均動水勾配と鉛直方向の局所動水勾配の関係，第 74 回年次学術講演会講演概要集，III-61，2019.9.
- 4)平成 27 年度第 1 回堤防技術研究委員会：新たな堤防調査の進捗状況と得られた課題について，国土技術研究センター，資料 2-2，pp.1-7，H27.
- 5)本間仁・荻原能男：新版流量計算法，工学図書株式会社版，pp.257-259，1979.