

## 河川堤防の遠心模型パイピング実験：粒度分布の影響

愛媛大学 学生会員 ○楠部寧々 愛媛大学 フェロー 岡村未対  
 愛媛大学 非会員 露口祐輔 愛媛大学 正会員 小野耕平

### 1. 目的

河川堤防の破壊形態の一つにパイピング破壊がある。パイピング破壊の詳細なメカニズム解明のため、これまで多くの研究が行われ、そこでは基礎地盤材料を変化させた実験も行われており、粒度分布がパイピングを発生させる外水位に影響を及ぼすことが報告されている<sup>1)</sup>。そこで本研究では、粒度分布、特に均等係数の異なる砂で作成した模型地盤のパイピング実験を遠心場で行い、パイピング進展時の外水位に及ぼす影響を調べた。

### 2. 実験方法

全ての実験では図 1 に示すように剛な土槽内に基礎地盤を層厚 60mm、相対密度 60%となるよう空中落下法で作成し、その上に敷幅 190mm のアクリル製堤体を設置した。基礎地盤を支持する河川側の擁壁は十分な透水性を有するものとした。この模型を遠心加速度 40g 場で浸潤させた後、段階的に水位を上昇させてパイピングを発生させた。パイピング発生後は一度水位を下げ、再度上昇させることを繰り返し、パイピング進展時の外水位とパイプ長の変化を調べた。実験中の基礎地盤表面の様子はアクリル堤体上に設置したカメラで観察した。基礎地盤材料は図 2、表 1 に示すように同一平均粒径で異なる均等係数  $U_c$  を持つ 3 試料と、均等係数は  $U_{c-2}$  と同じで平均粒径  $D_{50}$  が異なる試料( $U_{c-D_{50}}$ )を用いた。

### 3. 結果と考察

実験結果の一例として図 3 に  $U_{c-2}$  試料を用いた実験における堤体敷幅  $L(=190\text{mm})$  で正規化した外水位  $H$  と裏法尻からパイピング部先端までの距離  $l$  の時刻歴を示す。外水位を 10mm ずつ上昇させたところ、 $t=791\text{s}$  (平均動水勾配  $H/L=0.32$ ) でパイピングが発生し、 $l/L=0.09$  まで進展した。その後パイピング部進展時の外水位を計測するため、一旦水位を低下した後に再度段階的に水位を上昇させたところ、 $t=1967\text{s}$  ( $H/L=0.28$ ) で  $l/L=0.12$  まで進展した。同様に水位を変化させてパイプを進展させ、進展時の外水位をパイピング部が表法尻に貫通するまで繰り返した。

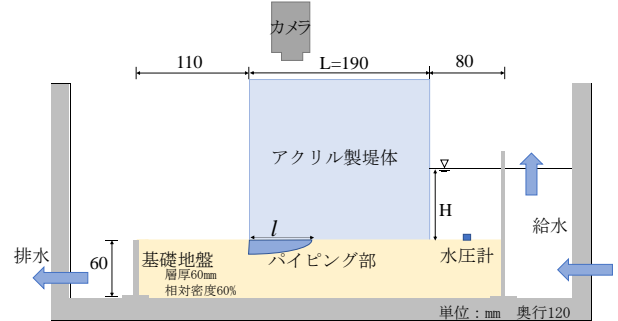


図 1 実験模型

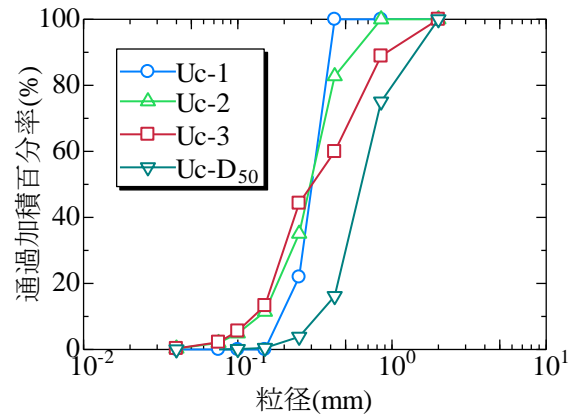


図 2 実験試料粒度分布

表 1 実験試料

実験試料	$D_{50}(\text{mm})$	$U_c=D_{60}/D_{10}$	$k(\text{m}/\text{sec})$
$U_{c-1}$	0.30	1.73	$3.2 \times 10^{-4}$
$U_{c-2}$	0.30	2.49	$2.4 \times 10^{-4}$
$U_{c-3}$	0.31	3.31	
$U_{c-D_{50}}$	0.67	2.19	

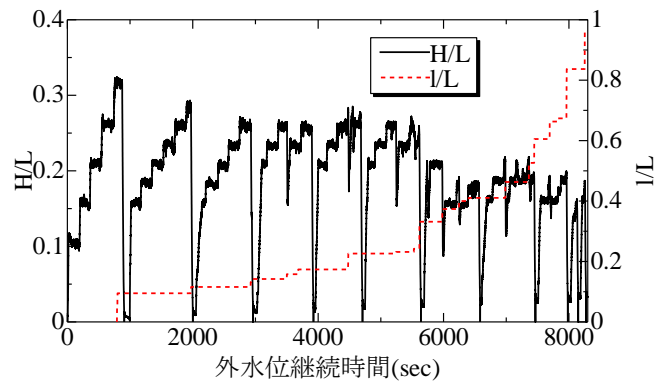


図 3  $U_{c-2}$  試料  $H/L$ ,  $l/L$  の時刻歴

図 4 にパイピング進展再開時の  $l/L$ ,  $H_i/L$  の関係を示す。パイピング進展再開時の  $H_i/L$  は、パイプ長が  $l$  の時点でのパイピング進展に必要な  $H/L$  である。平均粒径同一の均等係数を変えた全ての実験試料において  $l/L$  の増加によりパイピング進展に必要な動水勾配  $H_i/L$  が減少した。また、パイプが  $l/L > 0.9$  と貫通寸前まで進展しても  $H_i/L$  は急激には減少せず、堤防がある程度の止水性能を保持していることがわかる。本研究では各実験における  $H_i/L$  の最大値を限界動水勾配  $H_c/L$  とする。 $H_c/L$  はそれ以上の外水位上昇なしにパイピング部が外水側に進展し、表法尻まで貫通する動水勾配である。図 5 に均等係数  $U_c$  と限界動水勾配  $H_c/L$  の関係を示す。 $D_{50}$  が同じ  $U_{c-1} \sim U_{c-3}$  試料では、 $U_c$  の増加により  $H_c/L$  は上昇した。また、 $U_c$  がほぼ同じである  $U_{c-2}$  と  $U_{c-D_{50}}$  を比較すると、 $D_{50}$  の増加により  $H_c/L$  が増加し、何れも Beek ら<sup>1)</sup>と同様の傾向となった。

露口ら<sup>2)</sup>はパイプ内の流れを考え、パイプの進展すなわちパイプ内の砂粒子が移動する条件が Shields 数  $\theta_c$  で表せることを明らかにした。

$$\theta_c = u_c^*{}^2 / (G_s' g D_{50}) \quad - (1)$$

ここで、分子は流れがパイプ底面の砂に与えるせん断応力、分母は砂の移動に対する摩擦抵抗を表しており、 $u_c^*$  は限界摩擦速度、 $G_s'$  は砂粒子の水中比重、 $g$  は遠心加速度である。式(1)をパイプ内の平均流速  $u_0$  を使って書き直すと、層流の場合には水の動粘性係数  $\nu$ 、パイプ径  $D$  として式(2)となる。

$$\theta_c = (8\nu u_0) / (G_s' g D_{50} D) \quad - (2)$$

なお、今回の実験におけるパイプ内流れは、そのレイノルズ数は約 500 以下であり層流である<sup>2)</sup>。パイプ径が同じであると仮定したとき、式(2)より掃流力はパイプ内流れの平均流速によって決まる。 $U_{c-1}$  と  $U_{c-2}$  試料の粒度分布を比較すると  $D_{50}$  以上の粒子径がほとんど同じであることから、パイプ内の砂の運搬に必要な流速が同じであると考えられる。しかし、地盤内透水係数に影響する小さい粒子径が異なることにより、表 1 で示すように均等係数の増加した  $U_{c-2}$  試料では透水係数が小さい。それによりパイプ内への水の流入が減少するため、パイプ内の流速を上昇させるためには外水位を上昇する必要がある。また、 $U_{c-2}$ ,  $U_{c-3}$  試料の粒度分布は、 $D_{50}$  以下の粒子径がほとんど同じであることから、地盤内透水係数はほとんど同じであると考えられるが、 $D_{50}$  以上の粒子径が異なることにより、砂の運搬に必要な流速が  $U_{c-3}$  試料のほうが大きくなると考えられる。そのため、パイプ進展に必要な外水位が上昇したものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では 4 種の異なる粒度分布の基礎地盤での河川堤防の遠心模型パイピング実験を行った。それより、粒度分布に関わらず、パイピング進展に必要な  $H/L$  はパイピング部が長くなることで減少することが確認できた。また、平均粒径が同じとき均等係数の増加により限界動水勾配が上昇する結果となった。

#### 参考文献

- 1) V.M. van Beek, H.M. van Essen, K. Vandenboer, A. Bezuijen, 2015 : Developments in modeling of backward erosion piping, *Geotechnique* 65 (1), 740-754.
- 2) 露口ら, 2022: 地盤工学研究発表会 (投稿中)

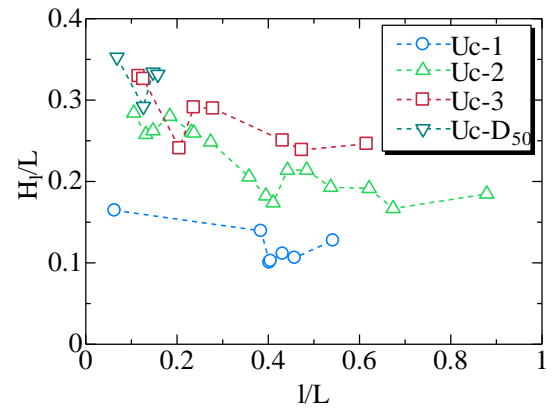


図 4  $l/L$ ,  $H_i/L$  の関係

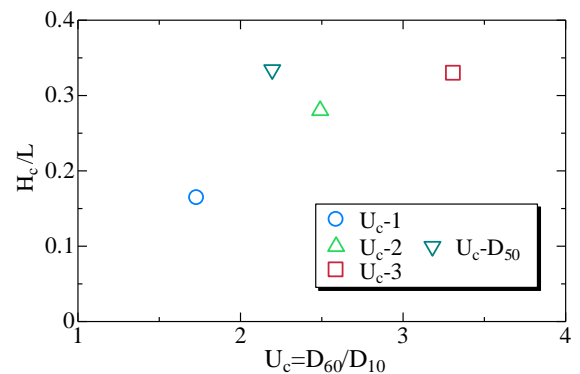


図 5 均等係数と限界動水勾配の関係