# 矢板周りの浸透破壊を対象とした模型実験における地盤材料が プレ破壊からポスト破壊現象へ及ぼす影響

矢上英里香<sup>1</sup>,松田達也<sup>2</sup>,三浦均也<sup>2</sup>,内藤直人<sup>2</sup>,藤井湧大<sup>1</sup>

1 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 建築・都市システム学専攻

2 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 建築・都市システム学系

## 概 要

洗堀・侵食現象において,実現象を定量的に再現しうる数値モデルの構築が課題となっている.モデルを 構築するために模型実験がよく行われるが,実物と模型の相互関係において,幾何学的相似性や力学的相 似性を満足しなければ,実現象を再現することはできない.現状における洗堀・侵食現象を対象に実施さ れる移動床実験では,移動床として使用する地盤材料の取扱いに関する相似則の検討が不十分であり,得 られた結果の妥当性を評価することが難しい.本研究では水理模型実験における地盤材料の取扱い方法を 明確にするため,矢板周りの浸透破壊現象を対象に,プレ破壊〜ポスト破壊に至るまでの現象を定性的・ 定量的に評価し,地盤材料による現象への影響を分析した.限界動水勾配と統一した実験から地盤材料に よって破壊までの時間,破壊状態,土粒子速度の挙動などで差異が見られた.材料形状や粒度,透水性な どの要因により変化することを確認した.

キーワード:水理模型実験,地盤材料,相似則,浸透破壊

## 1. はじめに

洪水による河床変動や波浪・津波による海底床変動は構 造物の安定性を喪失させる可能性が高い. このような底床 移動は、表面流れによる底面せん断力と地盤内の有効応力 変動が複雑に影響し合う現象と考える1,2).現象を解明す る手法として模型実験があるが,実物と模型の相互関係に おいて幾何学的相似性や力学的相似性を満足しなければ, 模型実験において実現象を再現することはできない<sup>3)</sup>.し かしながら,現状では上述のような現象を対象として実施 される移動床実験において,底床として使用する地盤材料 に対して実験条件に従う幾何学的縮尺比を適用すると,非 常に小さな粒径の材料を使用しなければいけなくなり,実 際には実物と同等の材料を使うか, 粒径は同程度で比重が 軽い材料を使うなどの工夫が取られている.しかし,地盤 材料の取扱いについてはこれまで十分な議論がなく,相似 則に関する検討は不十分である. そのため, 今後は各々の 現象をもとに相似則を考察し、基準化を図る必要がある。

一方で,地盤工学分野ではこれまでピーク時での破壊判 定が主な議論の対象であり,模型実験においても破壊に至 るまでの力学挙動に着目した相似則に則って検討が行わ れてきた.しかし今後は,模型実験における崩壊挙動を積 極的に評価し,破壊過程全体を捉えることが重要と考える.

本研究では、上記に示す水理-地盤工学が融合する問題 に対し、地盤工学分野において古典的でかつ基礎的な矢板 周りの浸透破壊現象を対象とすることにした. その理由と して,破壊に至るまで(プレ破壊と称す)は,地盤工学に おける典型的な問題であり,これまでの知見<sup>4),5)の</sup>を踏ま えて現象を観察することができること,また,破壊後(ポ スト破壊と称す)は,土粒子の移動を伴う大変形が生じる ため,地盤工学の知見に加え,水工学の知見が重要となる 問題であり,かつ,地盤材料による土砂移動への影響が適 切に評価できると考えたためである.

本実験では地盤材料の粒径を変化させた際のプレ破壊 からポスト破壊までの現象を定性的・定量的に評価し、地 盤材料による現象の違いについて分析した.

#### 2. 矢板周りの浸透破壊現象を対象とした模型実験

#### 2.1 実験概要

図1に示す通り,縦200mm×横600mm×高さ600mmの 模型装置を使用した.矢板の長さは装置天端から500mm であり,底面まで100mmのクリアランスがある.

地盤模型を作製するため,底部から 150mm まで水を注 水し,矢板根入れ深さが 50mm となるよう,水中落下法に より高さ 150mm の地盤を作製した.すべての実験におい て,間隙比が一定となるように調整した.詳細の次節で示 す.

実験時は、地盤内の間隙水圧を計測するため、矢板周り に沿って地盤面から25mmピッチで上流および下流に6箇



図1 実験装置の概要



図2 間隙水圧計の設置位置



表1 地盤材料の物理的性質

	平均粒径	相対密度(%)	透水係数[m/s]	
	D <sub>50</sub> (mm)			
硅砂8号	0.009	45.5	$6.5 \times 10^{-6}$	
硅砂7号	0.012	30.5	$9.0 \times 10^{-6}$	
硅砂6号	0.017	28.4	$2.6 \times 10^{-5}$	
豊浦砂	0.018	4.7	$3.8 \times 10^{-5}$	

所,さらに矢板下に1箇所,計7箇所に間隙水圧計を設置 した.図2に間隙水圧計の設置場所を示す.また,現象を 視覚的に考察するため,高速度カメラ(200fps)とビデオ カメラを用いて実験の撮影を行った.水の流れを可視化す るために,ウラニン水溶液を上流側の地盤に注入した.そ の後,初期水位(地盤面より+50mm)からポンプを用い て上流側へ一定流量(*Q*=42.9cm<sup>3</sup>/s)で注水した.

#### 2.2 実験条件

地盤材料は硅砂8号, 硅砂7号, 硅砂6号, 豊浦砂を使 用した. 図3に地盤材料の粒径加積曲線を, 表1に地盤材 料の物理的性質をそれぞれ示す.

本実験では、すべての地盤材料において堆積時の初期間 隙比を0.936に統一した.その理由として、浸透破壊が生 じる限界動水勾配は式(1)に示すとおり、土粒子比重 Gs と 間隙比 e のみで決まるため、各々の材料の破壊外力を統一 することができるからである.

$$i_{\rm c} = \frac{G_{\rm s} \cdot 1}{1+e} \tag{1}$$

## 実験結果と考察

## 3.1 地盤内の間隙水圧変化

図4に間隙水圧計により計測された,各地盤材料の間隙 水圧の経時変化を示す.

一定流入条件により,透水係数が小さい硅砂8号では透水量が少ないため,上流側の水位上昇が早くかつ大きくなり,傾きの勾配が急となった.一方で,材料により透水係数が大きくなるに従い,上流側の水位の上昇が小さくなり,傾きは緩やかとなった. 硅砂8号は他の地盤材料に比べ,上流側の間隙水圧値が特に大きくなった.

#### 3.2 プレ破壊に至るまでの水位差変化

本実験結果は各地盤材料で 4 回ずつ浸透破壊実験を実施したうち,各実験で再現性が得られた実験データを採用 して検討する.

浸透破壊に至るまでの変化について,間隙水圧計より得られた間隙水圧値から算出した土粒子の有効応力をもとに,有効応力がゼロになるときの実験経過時間と水位差を動画より抽出した水位差の時系列変化と合わせて考察した.地盤の有効応力 $\sigma$ は式(2)より算出した.

$$\sigma' = \sigma - u = \left(\frac{G_{s-1}}{1+e} \cdot D + h_2\right) \cdot \gamma_w - u \tag{2}$$

ここで, 全応力σ[kN/m<sup>2</sup>], *u*:間隙水圧[kN/m<sup>2</sup>](下流側 G.L.-50mm), γ<sub>sat</sub>:飽和単位体積重量[kN/m<sup>3</sup>], *D*: 根入れ深さ =0.05[m], *h*<sub>2</sub>:下流側の水位差=0.05[m]である. 有効応力 を算出することで, 地盤の不安定状態を考察した.

図5に各地盤材料における水位差の経時変化を,表2に 有効応力がゼロに至った時点,目視により浸透破壊を確認 した時点のそれぞれ示す平均水位差を示す.

地盤の有効応力がゼロに至るまでの経過時間は地盤材 料ごとに若干の違いは見られるものの,大凡同等であるこ とを確認した.ただし, 硅砂8号については経過時間が長 く,さらに水位差が大きくなっている.これは, 硅砂8号 の細粒分の含有量の高さによる,粘性の影響が考えられる が,十分な考察までには至っていない.一方で,最大水位 差に至り,浸透破壊が生じるまでの経過時間及び水位差は 地盤材料によって異なることがわかった.





図5 矢板で隔てられて生じる水位差の経時変化

表 2 各状態時における平均水位差 [mm]

	硅砂8号	硅砂7号	硅砂6号	豊浦砂
有効応力♂=0時	173	128	130	137
浸透破壞時	189	170	180	158





## 3.3 プレ破壊に至るまでの有効応力変化

図 6 は水位差の上昇に伴う有効応力の変化を示してい る.水位差が 125mm までの挙動が地盤材料によらず、概 ね一致している.しかし,硅砂 8 号は地盤が不安定になる 直前に有効応力の減少が緩やかになっている.一方で、他 の地盤材料は地盤が不安定になってから、破壊するまでの 水位差に開きがあり、急激に安定性を失い破壊に至ってい ることがわかる.

## 3.4 プレ破壊からポスト破壊の破壊モード

地盤材料による浸透破壊挙動の相違を考察するため,撮影画像をもとに,プレ破壊時,ピーク破壊時,ポスト破壊時を対象に土粒子移動の視覚的評価を試みた.

図 7 に比較対象とした 3 つの破壊モードの概略図を示 す. プレ破壊時は上流側と下流側の水位差が最大となり, 浸透破壊が生じた時点と定義している.また,ピーク破壊 時は浸透破壊過程で矢板周りの地盤の洗掘が最大の時点 と定め,ポスト破壊時では上流から下流への土砂移動が落 ち着き,地盤が静止状態になった時点と定めている.

図 8 にビデオカメラより撮影した各地盤材料のピーク 破壊時の破壊モードを示す,赤色のマーキング箇所が地盤



(u) ±.in

図8 各地盤材料のピーク破壊時のモード

の洗掘部分である.他の材料は水平方向の洗掘が大きく, 深さが浅い破壊モードに対し,硅砂8号は深さ方向の洗掘 が大きく,横幅が狭まった破壊モードである.また,上流 側の地盤に注入したインクに着目すると,硅砂8号は上流 側にインクが残留しているが,豊浦砂は下流側の地盤まで インクが浸透している.以上から,地盤材料ごとで破壊モ ードや水の浸透力の違いが確認された.

続いて,各地盤材料のプレ破壊時,ピーク破壊時,ポス ト破壊時の平均洗掘幅を求めた(表 3). 土粒子の粒径が大 きくなるほど,洗掘幅が大きくなっている.しかし,全体 的に洗掘幅が小さい硅砂 8 号は,最大洗掘幅時の矢板下の 洗掘幅が特に大きいことから,他の材料と比較しても洗堀 されにくいことがわかった.

一方で, 硅砂 6 号と豊浦砂では近しい粒度分布にも関わ らず, 洗堀形状等に違いが生じた.この理由については, 地盤材料の特性と合わせ, 今後詳細に考察が必要と考える.

## 4. 結論

本研究では、矢板周りの浸透破壊実験を行い、地盤材料 の粒径を変化させ、地盤材料が矢板周りの浸透破壊挙動に 与える影響評価を行った.以下に主な結論をまとめる.

#### 表 3 地盤材料の平均洗掘幅値[mm]

	硅砂 8	硅砂 7	硅砂 6	豊浦砂
	号	号	号	
プレ破壊時	20	38	55	38
ピーク破壊時(上流側)	45	65	73	60
ピーク破壊時(上流側)	60	93	110	75
ピーク破壊時(矢板下	45	18	23	15
側)				
ポスト破壊時(上流側)	80	10	100	90
ポスト破壊時(下流側)	80	93	70	88

2) 硅砂6号と豊浦砂は粒径加積曲線からみると非常に近い粒度分布を示すが、破壊モードに違いが見られた. 豊浦砂は粒度分布と相対密度が小さいことによる、地盤強度の変化が影響していると考える.また、豊浦砂は天然のシリカサンドで粉砕された人工のものに比べ粒に丸みを帯びており、このような面も結果に作用したと考える.

# 謝辞

本研究は、日本学術振興会学術研究助成基金助成金基盤 研究(c) 17K06553 ならびに日本学術振興会学術研究助成基 金助成金若手研究 20K14824 の助成を受けています. ここ に記して謝意を表します.

#### 参考文献

- 松田達也,三浦均也,佐藤隼可,諌山恭平,澤田弥生: Dean Number を適用した移動床造波水.路実験における地盤内水圧応 答,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I\_1117-I\_1122, 2017.
- 2) 穴井啓太,高柳林太郎,松田達也,三浦均也:波浪により誘発される地盤浸透力と土砂移動に及ぼす地盤の密度の影響に関する 造波水路実験,土木学会論文集 B2(海岸工学),Vol.74, No.2, pp.I\_727-I\_732, 2018.
- 江守一郎,斉藤孝三,関本孝三:模型実験の理論と応用(第3 版),技報堂出版,2000.
- Asaoka, A., and Kodaka, T.: "Seepage failure experiments and their analyses of loose and medium dense sands", Soils and Foundations, Vol.32, No.3, pp117-129,1992.
- Tanaka, T., and Verruijt, A.: "Seepage failure of sand behind sheet ples: The mechanism and practical approach to analyze", Soils and Foundations, Vo.39, No.3, pp.27-35, 1999.
- Veiskarami, M., and Zanj, A.: "Stability of sheet-pile walls subjected to seepage flow by slip lines and finite elements", Geotechnique, Vol.64, No.10, pp.759-775, 2014.