

# 三次元浸透破壊に関する実験と解析

Experiments and theoretical analyses on seepage failure of soil in three dimensions

○廣瀬 大輔・田中 勉・橋本和樹・井上一哉

Hirose Daisuke, Tanaka Tsutomu, Hashimoto Kazuki and Inoue Kazuya

## 1. 序論

近年、大深度掘削に伴い、浸透破壊に関して、二次元状態と仮定したときの限界水頭差よりも小さな水頭差で破壊が起こることがわかってきた<sup>1)</sup>。このような場合、二次元ではなく、三次元問題として考えなければならない。ここでは、三次元浸透破壊問題について、27 節点アイソパラメトリック要素を用いた FEM 浸透流解析及び安定解析プログラムの開発と解析、及び、浸透破壊実験を行い、三次元浸透破壊現象について考察した。

## 2. 三次元浸透破壊実験

(1) 実験装置 三次元浸透破壊実験装置の概略図を Fig.1 に示す。実験水槽本体は横幅 1,000mm, 奥行き 1,000mm, 高さ 1,300mm の直方体型のステンレス水槽である。矢板は、内側平面が 400mm×200mm の長方形で、実験装置本体の角部に位置している。水頭差は、矢板内部の水槽背面にある排水口の位置で一定に保たれる矢板内部下流側水面と、定水頭装置で与えられる上流側水面の差によって与えられる。

(2) 実験試料 実験に用いた試料は、琵琶湖砂 3 であり 850 $\mu$ m ふりを通過した均一な細砂である。物理的性質は、比重  $G_s=2.668$ , 均等係数  $U_e=1.404$ , 50% 粒径  $D_{50}=0.283$ mm, 最大間隙比  $e_{max}=1.115$ , 最小間隙比  $e_{min}=0.761$  である。

(3) 実験条件 ここでは、Table 1 に示す 3 種類の実験 E0301 ~E0303 を行った。記号は Fig.2 に示すように、 $T$ ,  $D$ : 地盤層厚, 矢板の根入れ深さ,  $D_r$ : 相対密度である。

## 3. 三次元地盤の浸透破壊実験の結果と考察

### 3.1 $H \sim Q_{15}$ 曲線と地盤形状の変化

実験では、水頭差  $H$  を段階的に上げていき、各段階において定常状態に達した時点で、流量  $Q$ , 地盤表面形状, 間隙水圧等を測定する。Fig.3 に、水頭差  $H$  と 15 $^{\circ}$ C 時の値に換算した流量  $Q_{15}$  の関係を示す。 $H \sim Q_{15}$  曲線は  $H$  の増加と共に最初直線的に増加していくが、 $H$  がある値  $H_d$ (流量急増時水頭差)になると流量が急増する。ちょうどこのあたりで、地盤形状の変化(下流側隆起, 上流側沈下)が生じる。この時点における水頭差  $H_y(=H_d)$  を変形開始時水頭差と呼ぶ。上流側地盤の沈下形状は矢板角点を中心としたすり鉢状である。Fig.4 に上流側地盤沈下形状(近接写真)を示す。水頭差が破壊時水頭差  $H_f$  に達すると、下流側矢板内の砂粒子が吹き上がり、その伝達を受けたかのように、上流側の砂粒子が一気に矢板下端を回って下流側に移動し破壊する。

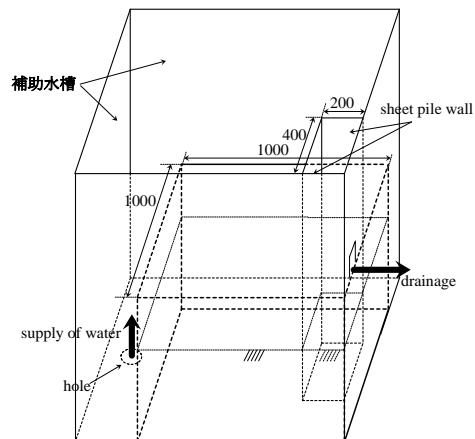


Fig.1 三次元浸透破壊実験装置の概略図

Table 1 実験地盤の条件

実験 No	$T=T_1$ (cm)	$D=D_1$ (cm)	$D_r$ (%)
E0301	29.9	10.2	49.4
E0302	34.8	15.1	51.7
E0303	35.0	15.2	49.2

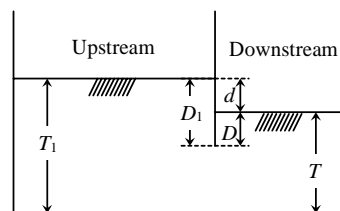


Fig.2 Notation

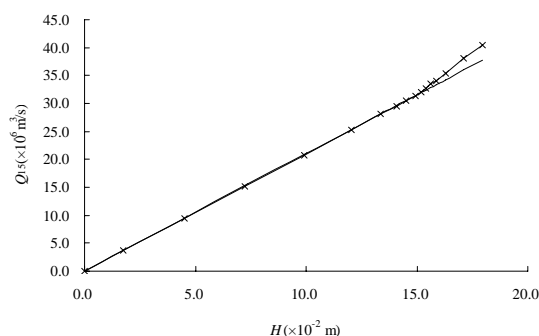


Fig.3  $H \sim Q_{15}$  曲線

### 3.2 理論限界水頭差 $H_c$ と実験による変形開始時水頭差 $H_y$ の比較

矢板の根入れ比  $D/T$  と Prismatic failure concept 3D による理論限界水頭差  $H_c$  を無次元化した値  $H_c\gamma_w/T\gamma'$  の関係を示すと Fig.5 となる。Fig.5 には、実験による変形開始時水頭差の値  $H_y(=H_d)$  を同時に示している。Fig.5 から、実験から得られた変形開始時水頭差  $H_y$  は理論限界水頭差  $H_c$  と概ね一致していることがわかる。したがって、Prismatic failure concept 3D を用いると、三次元地盤の浸透破壊に対する限界水頭差を正確に算定できる。

### 4. 三次元浸透破壊問題の軸対称問題への近似

浸透破壊に対する安定性に関して、Fig.6 示すように、実験地盤の条件である短辺:長辺=1:2 の矢板囲いの平面形状端部において短辺に内接する半円を考え、三次元地盤を半円筒形の軸対称地盤として近似する方法について考える。上下左右対称の性質から、三次元浸透破壊実験装置の平面図は、Fig.7 のように近似できる(実線が実験装置である)。ここで、三次元及び軸対称安定解析プログラムによって理論限界水頭差  $H_c$  を求め、 $D/T$  に対して示すと Fig.8 のようになる。Fig.8 から、軸対称及び三次元数値解は、概ね近い値をとることがわかる。三次元数値解に対する軸対称数値解の誤差は約 10%程度である。このことから、三次元浸透破壊問題は軸対称浸透破壊問題にほぼ 1 割の精度で近似できることがわかる。Fig.7 を詳しく見ると次のことが言える。

(1)  $D/T \leq 0.45$  のとき 三次元数値解より軸対称数値解の方が大きくなる(特に、 $D/T < 0.31$  では、誤差が 1 割程度となる)。このとき、三次元問題の軸対称問題への近似は、限界水頭差が大きく算定され不合理であり危険となるので注意が必要である。

(2)  $D/T > 0.45$  のとき 三次元数値解より軸対称数値解の方が小さくなる(誤差は 1 割より小さい)。このとき、三次元問題の軸対称問題への近似は、限界水頭差を小さく算定することになり、安全であるが設計は不経済となる。

### 5. 結論

三次元浸透破壊問題について、理論的、実験的観点から考察を行い次の結論を得た。(1) 三次元地盤の浸透破壊形状について、上流側では矢板角点を中心としたすり鉢状沈下が起こり、下流側では全体的な隆起が起こる。(2) Prismatic failure 3D の考え方をを用いて得られる理論限界水頭差  $H_c$  は、実験によって得られる変形開始時水頭差  $H_y$  に近い値となる。(3) 実験地盤の条件である短辺:長辺=1:2 の矢板囲いの平面形状端部において短辺に内接する半円を考え、三次元地盤を半円筒形の軸対称地盤として近似する方法について考えた。この方法によると、三次元浸透破壊問題は、軸対称問題にほぼ 1 割の精度で近似することができる。

#### 参考文献

1) 日経 BP 社(2001): 土留め壁鋼矢板の根入れが不足, 日経コンストラクション, 2001.9.28, pp.37-38.

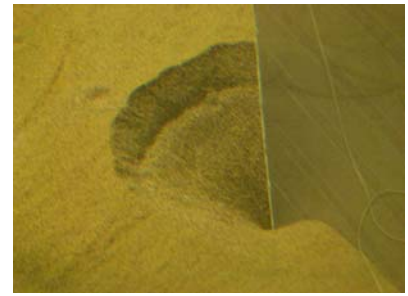


Fig.4 上流側地盤沈下形状(近接写真)

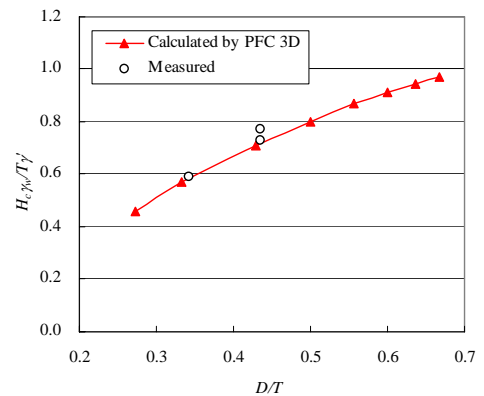


Fig.5  $D/T$  と  $H_c\gamma_w/T\gamma'$  の関係

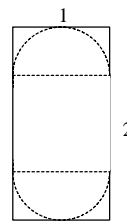


Fig.6 近似の考え方

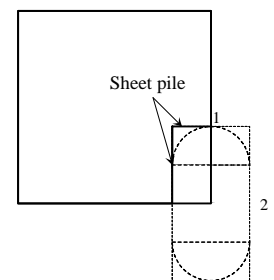


Fig.7 実験装置平面図

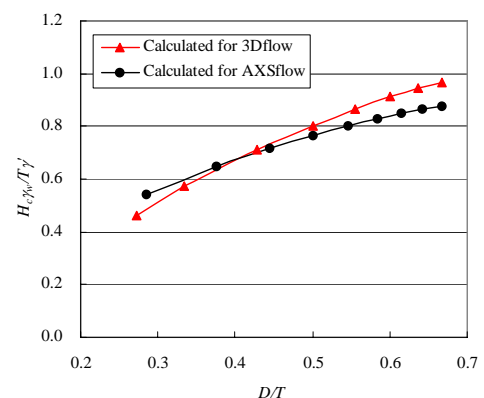


Fig.8 軸対称及び三次元数値解の比較