

二次元地盤浸透破壊に対する限界水頭差の無次元化に関する研究 Non-dimensional formularization of hydraulic head differences in 2D seepage failure of soil

○三木 昂史・田中 勉・永井 茂・参鍋 漱祐・井上 一哉
Miki Takashi, Tanaka Tsutomu, Nagai Shigeru, Sannabe Sosuke and Inoue Kazuya

1. 序論

河川近傍など地下水位の高い地点における掘削工事では、浸透流に対する安全性を考慮する必要がある。しかしながら、実際には、上昇浸透流による地盤の破壊、すなわち浸透破壊が起こることがある。また、Terzaghi の方法などによって所定の安全率を満たしていても浸透破壊が発生する事例が報告されている¹⁾。本研究では、Prismatic failure の考え方²⁾を用いて理論限界水頭差を求め、その無次元化式を提案する。無次元化によって、掘削工事を施工する際、現場の限られた情報から容易に限界水頭差を算定することができる。

2. 限界水頭差と無次元化式

2.1 浸透破壊に対する理論限界水頭差

Prismatic failure の考え方では、矢板壁に接した任意の幅、任意の深さのプリズムを考え、その力の釣合いについて考える。矢板に接したプリズムにはプリズム自体の水中重量 W' 、プリズムの左右側面において摩擦力 F_L , F_R 、及び、下端面において過剰間隙水圧の合力 U_e が作用する。このとき、プリズムの上昇破壊に対する安全率 F_s は、

$$F_s = \frac{W' + F_L + F_R}{U_e} \quad (1)$$

と定義できる。矢板前後の水頭差 H を徐々に増加させていったとき、すべてのプリズムについて破壊に対する安全率 F_s を計算し、最小値 $F_{s\min}$ がちょうど 1.0 になったときのプリズムを限界プリズムと呼び、その時の水頭差 H_c を限界水頭差と呼ぶ。 H が H_c に達すると、限界プリズムが上昇し地盤が破壊すると考える。

2.2 厳密解

二次元締切り矢板のある半無限地盤について、浸透流理論から流線と等ポテンシャル線は次式で表される³⁾。

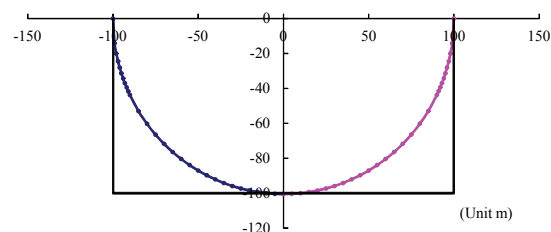


Fig.1 流線及び流線形状に近似した四角形領域
(地盤表面中央に $D=10\text{m}$ の矢板がある場合)

$$\frac{x^2}{d^2 \sinh^2 \psi'} + \frac{y^2}{d^2 \cosh^2 \psi'} = 1$$

$$-\frac{x^2}{d^2 \sin^2 \phi'} + \frac{y^2}{d^2 \cos^2 \phi'} = 1 \quad (2)$$

ここに、 x, y は座標、 $d = D$ は矢板の根入れ深さを表す。流れ関数 ψ 及びポテンシャル関数 ϕ は、(1), (2)式の ψ' , ϕ' と次式で関係づけられる。

$$\psi' = \frac{\pi}{kH} \psi, \quad \phi' = \frac{\pi}{kH} \phi \quad (3)$$

ここに、 k は透水係数である。

矢板の根入れ深さ D が 10m の場合を考える。Fig.1 に $\sinh \psi' = 10$ の場合の流線及びそれに近似した四角形領域を示す。定義から流線を横切る流れはないので、厳密解では流線と合致した浸透領域を考えることで解析結果は深さ方向に無限地盤と同一となる。FEM 浸透流解析では上述の四角形領域を無限地盤と考えた。

2.3 H_c の無次元化式

Terzaghi の考え方²⁾から深さ方向に無限地盤を想定すると、 H_c の無次元化式は次のように表すことができる。

$$H_c \gamma_w / D \gamma' = 1/C_0 \quad (\text{無限地盤}) \quad (4)$$

ここに、 γ' は土の水中単位体積重量、 γ_w は水の単位体積重量、 C_0 は定数を表す。次に、深さ方向に有限地盤を考え、地盤の下部不透水性境界が地盤表面から深さ T にあるとすると、 H_c の無次元化式は次のように表すことができる。

$$H_c \gamma_w / T \gamma' = 1/C_0 \cdot D/T \quad (\text{有限地盤}) \quad (5)$$

ここに、 C_0 は D/T によって変化する値である。

有限地盤の場合には、 H_c の無次元化式は D/T と $H_c\gamma_w/T\gamma'$ の関係式として得られる。

3. 二次元地盤の浸透破壊安定解析と無次元化

3.1 無限地盤の場合

FEM 浸透流解析は、流れ場においてポテンシャル関数や流れ関数、動水勾配などを近似的に求めるものである。FEM 浸透流解析(数値解)及び(2)式の解(厳密解)から、限界水頭差を求めた。無限地盤の場合、数値解から計算した H_c は、 $1/C_0=2.8466$ となり、(4)式は、

$$H_c\gamma_w/D\gamma' = 2.8466 \quad (6)$$

と一定値となる。数値解は厳密解に対して、相対誤差が-1.21%であった。相対誤差は数値解と厳密解の差を厳密解で除して表す。誤差の原因として、厳密解の解析対象領域がほぼ半径 100m の円であるのに対し、数値解析の領域(円に外接する 100×200m の長方形)が下方で広いためであると考えられる。厳密解とほぼ等しいことから、FEM 浸透流解析による数値解には妥当性があると考えた。

3.2 有限地盤の場合

地盤の幅 L を両側 100m、矢板の根入れ深さ D を 10.0m、地盤層厚 T を 10.5, 11, 12, 13, 15, 17, 20, 30, 50, 70, 100m として解析を行った。 D/T と $H_c\gamma_w/T\gamma'$ の関係を Fig.2 に示す。

(1) 直線近似領域 限界水頭差の許容誤差を 1% に設定すると、 $0.10 \leq D/T \leq 0.28$ のとき直線近似することができ、次のように表せる。

$$y = 2.8575x \quad (0.10 \leq D/T \leq 0.28) \quad (7)$$

ここに、 $x = D/T$, $y = H_c\gamma_w/T\gamma'$ である。限界水頭差 H_c は矢板の根入れ深さのみに依存する。地盤層厚に対して矢板の根入れ深さが相対的に浅く、矢板が地盤に及ぼす影響が小さいと考えられる。この場合、深さ方向に無限地盤とみなすことができ、仮に(6)式の両辺を T/D で割って H_c の無次元化量 $y = H_c\gamma_w/T\gamma'$ を求めると(7)式とおおよそ等しくなる。

(2) 指数近似領域 Fig.2 から、 D/T の増加に伴い、 $H_c\gamma_w/T\gamma'$ は指数関数的に増えることがわかる。 D/T の増加につれて、矢板下部から流れ込む浸透流量が小さくなり、地盤浸透破壊に対する安定性が向上すると考えられる。このように、有限地盤と考えなければならない領域

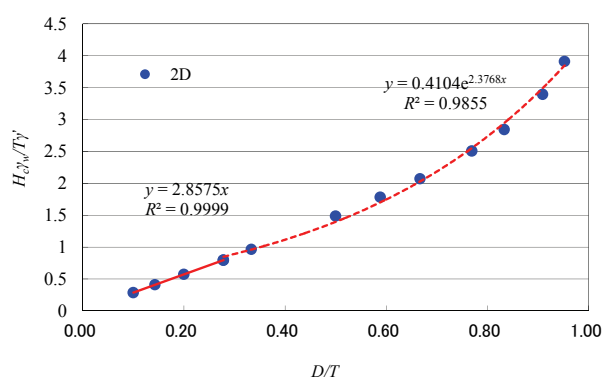


Fig.2 $H_c\gamma_w/T\gamma'$ と D/T の関係

は $0.28 < D/T < 0.95$ であり、 D/T と $H_c\gamma_w/T\gamma'$ の関係に指数近似を採用すると、次のようになる。

$$y = 0.4104e^{2.3768x} \quad (0.28 < D/T < 0.95) \quad (8)$$

4. 無次元化式の妥当性

提案した二次元流の無次元化式の妥当性を評価するため、実験結果とその解析解について、算定式から求めた値と比較した。実験及びその解析解の矢板根入れ比は 0.33, 0.50, 0.60 である。実験結果とその解析解は多くの場合、提案式の無次元化量より小さく算定され、誤差は 1~8%であった。誤差はあるものの、実験結果やその解析解とほぼ等しいことから、提案する無次元化式には十分な精度があり、妥当性があると判断される。

5. 結論

本研究では、二次元流について、浸透流解析及び浸透破壊安定解析を行い、 H_c の無次元化式を提案し、次の事柄を明らかにした。(1) FEM 数値解は厳密解との比較から妥当性を有する、(2) D/T と $H_c\gamma_w/T\gamma'$ の関係は、直線近似領域と指数近似領域に区分され、 $y = 2.8575x$ ($0.10 \leq D/T \leq 0.28$), $y = 0.4104e^{2.3768x}$ ($0.28 < D/T < 0.95$) と表される、(3) 提案した無次元化式は誤差 10%以内で限界水頭差を算定できる。また、本報とは別に、二次元集中流、軸対称流について同様に H_c の無次元化式を求めた。

参考文献

- 1) 中野正則, 石田雅博, 加藤秀章: 掘削形状と二層地盤の影響を考慮したボーリング検討式の提案, 構造工学論文集 Vol.42A, pp.1187-1194, 1996.
- 2) 田中 勉: 上昇浸透流を受ける矢板背後地盤の浸透破壊—Prismatic failure の概念と解析結果—, 農業土木学会論文集第 186 号, pp.969-979, 1996.
- 3) 山村和也, 鈴木音彦: 現場監督者のための土木施工 5 土と水の諸問題, 鹿島出版会, pp.78-81, 1977.