

【2次元場でのクイックサンド現象】

(1) 2次元浸透破壊実験によるクイックサンドの観察

図 1 は矢板と呼ぶ仕切り板を砂地盤の中央に立てて、左側の水位だけを上昇させて 2次元浸透場を観察するための装置である。(フローネットの描き方を練習したお馴染みの条件)。矢板を挟んで左右の水位差がそれほど大きくない時は、左から右に流れる浸透場が現れるだけであるが、水位差が開きすぎると、1次元問題と同様に、やがてクイックサンドを起こす。実際に観察した写真を図 2 に示す。

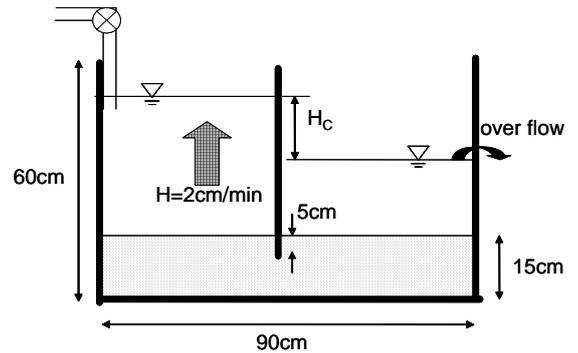


図 1 2次元浸透模型

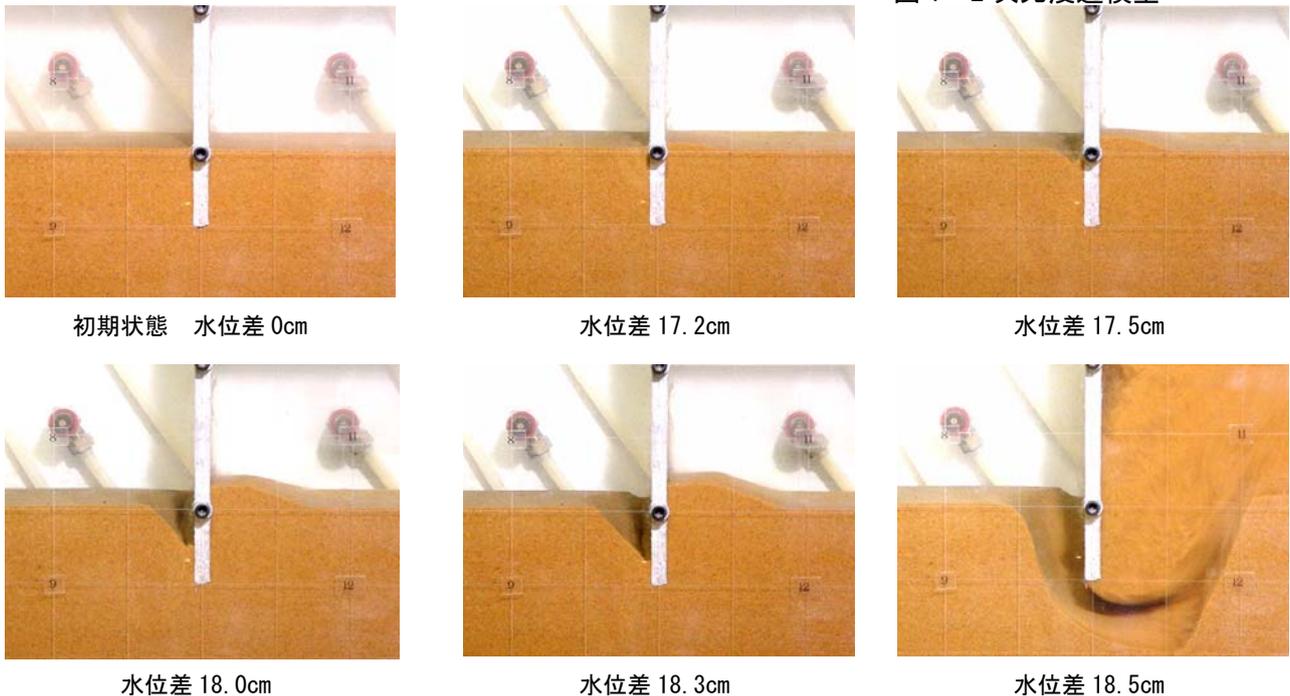


図 2 2次元浸透場での実際のクイックサンド現象

水位差 17.2cm で矢板左側の砂がわずかに隆起しはじめてから、左右の変形が進行し、水位差が 18.5cm になった時に、完全に砂地盤が液体状に破壊してしまった。これが典型的なクイックサンド現象である。また、破壊時には液体状に砂地盤が吹き上がり、水が沸騰するようになるので、ボイリングとも呼ぶ。

(2) 2次元場でのクイックサンド現象の安定性の検討

(a) 一次元的な検討方法

図 2 の問題における安定性を限界動水勾配の概念を用いて検討する。まず単純に、動水勾配が最も大きくなる部分で 1次元的に安定性の検討を行う。

動水勾配は、「全水頭の増分」を「地盤内の流線の長さ」で割って求められる。この問題での最も流線が短い部分は、矢板に沿った部分 (図 3 中の矢印で示したところ) であり、矢板の根入れ長が 5cm、矢板の厚さが 1cm とすれば、最も短い流線の長さは、 $5+1+5=11\text{cm}$  となる。

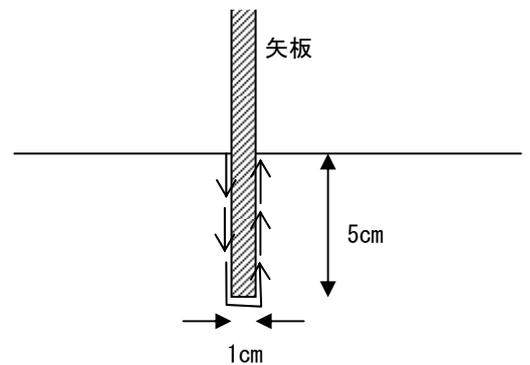


図 3

また、地表面は等ポテンシャル (全水頭) 線であるので、全水頭の増分は、矢板を挟んだ左右の水位差  $\Delta H$

に等しい。したがって、この問題で、最も大きい動水勾配は  $i = \Delta H / 11$  となる。

この動水勾配が限界動水勾配になるときの  $\Delta H$  を具体的に計算してみる。

図 2 に示した実験に用いた砂は、比重  $G_s = 2.7$ 、間隙比  $e = 0.8$  である。したがって、限界動水勾配  $i_c$  は、

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} = \frac{2.7 - 1}{1 + 0.8} = \frac{1.7}{1.8} = 0.94$$

最も大きな限界動水勾配  $i = \Delta H / 11$  が  $i_c$  に等しかったとして、

$$\Delta H / 11 = 9.4 \quad \therefore \Delta H = 10.3 \text{ cm}$$

実際に破壊した水位が約 18cm であったことを考えると、この検討方法はかなり安全側の検討であることがわかる。実際の地盤の条件（間隙比や土の均一性等）はかなり不確実なものであり、かつこの検討法が簡単かつ必ず安全側にあることから、実務では第一の検討法として、この手法が用いられることがある。

### (b) Terzaghi (テルツァギ) の検討方法

(a) で示した方法はいくら安全側とはいえ、現実の限界水位差とはかなり隔たりがあった、その理由は、図 2 の写真でも示されているように、クイックサンドの発生時には、矢板に沿った地盤だけが壊れるのではなく、矢板からある程度の幅を持った塊が変形して破壊するからである。Terzaghi は実際の破壊領域に着目して、破壊の影響範囲を図 4 に示すように、矢板の根入れの半分の幅と定め、その領域の土塊とその下端に働く水圧との釣り合いを検討することにより、2 次元浸透破壊の安定性を検討した。

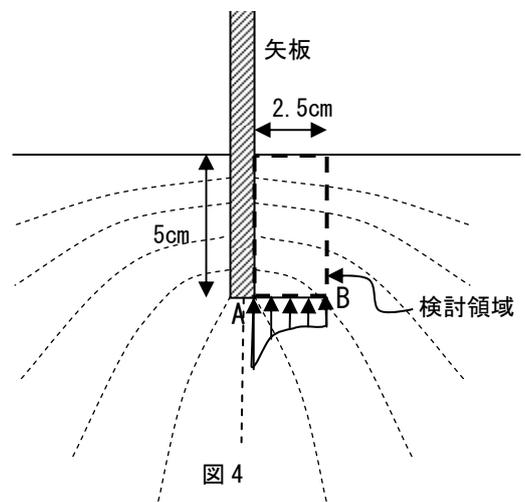


図 4 のように等ポテンシャル線があると仮定する。安定性を検討する領域の下端の A 点および B 点での間隙水圧は、水位差  $\Delta H$  を用いて、それぞれ、

$$\text{A 点: } \frac{5}{12} \Delta H \cdot \gamma_w, \quad \text{B 点: } \frac{4}{12} \Delta H \cdot \gamma_w$$

A 点から B 点へ実際の間隙水圧の分布形は図 4 に示すような曲線になるが、簡単のため直線分布と仮定する。その時、検討領域の下側から作用する間隙水圧の増分<sup>注)</sup>の合力は、

$$\frac{9}{24} \times 2.5 \Delta H \cdot \gamma_w = 0.938 \Delta H \cdot \gamma_w \quad \text{注) 矢板を挟んでの水位差は、静水圧からの増分の水圧となる。}$$

となる。一方、検討領域の水中重量<sup>注)</sup>は、

$$5 \times 2.5 \times \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w = 5 \times 2.5 \times \frac{2.7 - 1}{1 + 0.8} \gamma_w = 11.81 \cdot \gamma_w$$

となる。注) 力の釣り合いを考える際に、間隙水圧が静水圧からの増分で考えているために、ここでは、水中単位体積重量を用いて計算する。

最終的に、上の 2 つの式の釣り合いを考えると、

$$0.938 \Delta H \cdot \gamma_w = 11.81 \gamma_w \quad \therefore \Delta H = 12.59 \text{ cm}$$

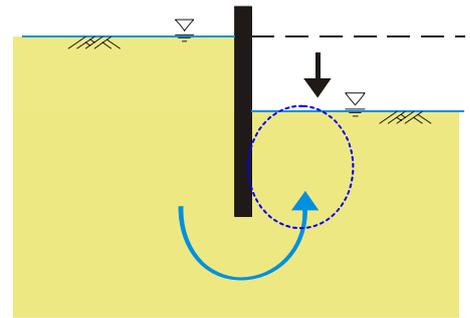
となり、(a) の 1 次元的な検討よりも多少は、実際の値に近づく。

そうであっても、まだまだ現実の値から少し遠いものには、砂の摩擦性材料の性質や、進行性破壊等、様々な複雑な要因がある。数値解析では、ある程度それら複雑な要因を取り入れて解析することができるために、より現実的な値を計算することが可能である。

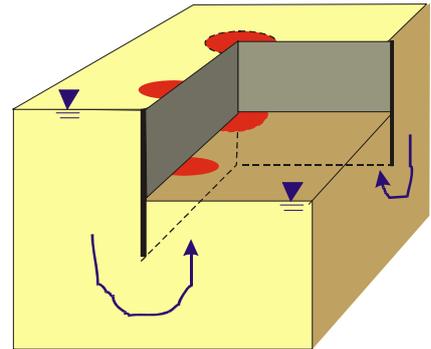
### (3) 実務におけるクイックサンド現象の例

実際の土木施工の現場でクイックサンドが問題になるのは、今までの例と同様に、矢板を挟んで水位差がついてしまうことにより、左右いずれかだけに上向きの浸透流が発生し、土を押し上げて壊してしまうことによる。実務では、その水位差が付く状態は、図 5 のように、矢板を地盤に打ち込んでから、地盤を掘削工事する際によく現れる。図 5(a)に示すように、矢板右側を掘削する場合、掘削面まで地下水を抜いてドライにすることが多い。その際、左右には大きく水位差がつくことになる。

また、実際の施工は、図 5(b)に示すように、3次元であり、建物の基礎を建設するような場合には、図のような掘削をすることが頻繁にある。その場合、2次元のように全体的にクイックサンドが発生する場合ばかりではなく、図に示すような隅角部や局所的に弱い部分だけが浸透破壊することが多い。このような、局所的なクイックサンドをパイピングと呼ぶ。パイピングは、はじめは局所的なものであるが、すぐに地盤全体の破壊も引き起こすことがほとんどで、非常に危険な現象である。



(a) 2次元の掘削



(b) 3次元の掘削

図 5 掘削に伴うクイックサンド

### (4) 実務におけるクイックサンド現象の実例（東京湾アクアライン建設工事中的出水事故）

東京湾アクアライン（当時：東京湾横断道）

工事：1989～1997

川崎人工島（現：風の塔）：直径 193m, 掘削深度海面下 70m（水深 28m, 海底面から 42m）

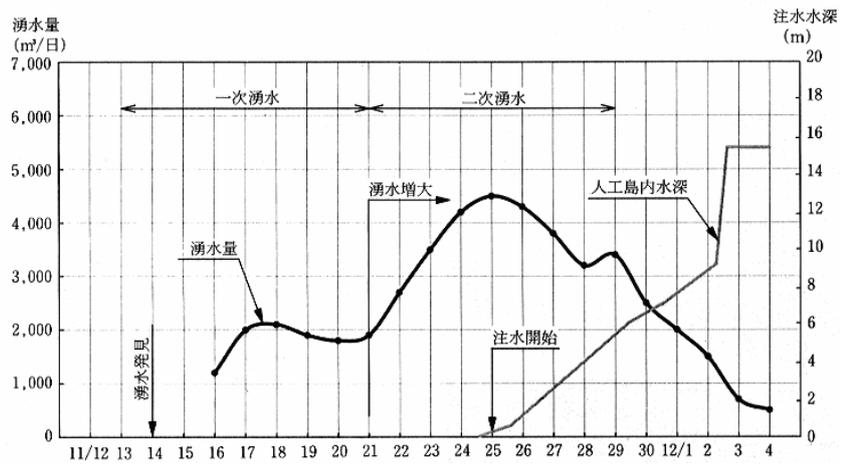
ディープウェルにて 10,000t/日汲み上げ

出水状況：最大約 5,000t/日（1993.11.24）



↑ 出水当初の状況 厚さ 50cm のコンクリート盤の下に通した水抜きパイプから 2,000t/日の湧水

←底面まで掘削が進行したところ



出水と人工島内の水位の状況



海水投入の状況



注水により水位が落ち着いた状況



現在の川崎人工島（風の塔）：海底トンネルの排気口となっている  
（建設時にはシールドの発進基地として使用）