

Ⅲ－４

砂地盤の浸透破壊に関する解析

東北学院大学大学院 学生会員 ○日野 田育子

東北学院大学工学部 学生会員 白石 雅人

東北学院大学工学部 学生会員 鶴本 貴子

1. はじめに

砂地盤では、地下水の水位差によって生じる浸透流が原因で地盤が破壊するクイックサンド現象が発生することがある。この現象に対して一般的に用いられている予測手法のひとつに、古典的な Taylor の限界動水勾配の式が挙げられる。しかし、この理論が実験結果と一致しないことはすでに明らかにされている。従来より、この不一致の原因に関する研究が行われているが、正確に解明されていないのが現状である。そこで本研究では、この原因は地盤材料の特性であるダイレタンシーによるものであると考え、この問題を解くために必要な 2 相混合体理論に基づいた基礎方程式を確立するとともに、砂地盤を弾性体として扱い、非排水状態を想定した場合にダイレタンシーが破壊に与える影響について数値解析を行った。

2. 混合体理論による基礎方程式

古典的な Taylor の限界動水勾配理論では、水位差によって生じる上向きの浸透力が土の水中単位体積重量と等しくなったときにクイックサンド現象が発生し、このときの動水勾配を限界動水勾配 ($i_c = (G_s - 1)/1 + e$) としている。この式は、浸透力と土骨格との力の釣り合いのみにより導かれたものである。しかし、実際の現象では、間隙水の流れが土骨格に影響を及ぼし、その反作用として間隙水も影響を受けるような現象が生じ、この連成作用により土骨格が変形し、ダイレタンシーが発生する。さらに、変形がもたらす間隙水圧の変化が有効応力の変化をもたらし、土骨格の挙動が決定される一という複雑なことが起こっている。

このような土骨格と間隙水の複雑な連成挙動の問題は、飽和土を対象とした 2 相混合体理論に基づいて解かなければならない。2 相混合体理論において、土粒子自身の非圧縮性と間隙流体の非圧縮性を仮定すると、質量平衡則と運動量平衡則より、固相と液相それぞれに対する連続の式と力の釣り合い式を有効応力と間隙水圧を用いて次式のように表わせる（詳しくは、Vardoulakis, I. And Sulem, J. (1995)）。

$$\langle \text{連続の式} \rangle \quad \text{固相:} \quad \Delta n = (1 - n) \partial_k \Delta u_k \quad (1)$$

$$\text{液相:} \quad -\partial_k \Delta q_k = \partial_i \partial_k \Delta u_k \quad (2)$$

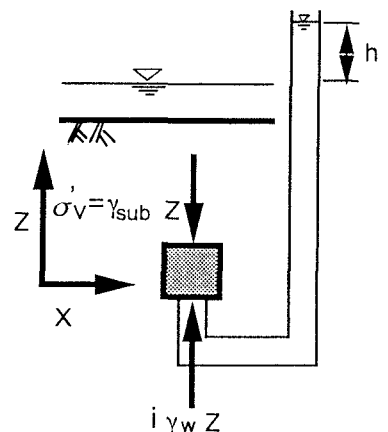
$$\langle \text{力の釣り合い式} \rangle \quad \text{固相:} \quad \partial_k \sigma_{ki} + f \Delta q_i = 0 \quad (3)$$

$$\text{液相:} \quad -\partial_i \Delta P_w - f \Delta q_i = 0 \quad (4)$$

この 4 つの式と、ダイレタンシー特性を表現できる適切な構成モデルを組み合わせることにより浸透破壊の問題を解くことができる。

3. 解析手法

図－1 に示すような 2 次元砂地盤モデルを考える。地盤の内部では、浸透力の増加により鉛直有効応力が低下し、土骨格が変形する、そして、その土骨格の変形によってさらに間隙水圧が変化していく、といった複雑な現象が起きていると考えられ、各層の過剰間隙水圧の分布と土骨格の変形の様子



図－1 2次元砂地盤モデル

を随時追う必要がある。しかし、浸透流によって、時々刻々と変化し続ける全層の間隙水圧の変化を捉えることは容易ではないため、本研究では、浸透流を一瞬静止させ、水が自由に移動することができないような非排水状態を仮定した。そして、地盤材料を最も単純な等方弾性体と仮定し、任意の深さ Z の微小な砂地盤要素のみを考えた。ここで、境界条件として、水平方向に無限に広がった地盤を想定しているため、水平方向のひずみは生じないという仮定を用いた。

水の流れがなく、非排水状態であると仮定した場合、上述の基礎方程式のうち (3) 式と (4) 式を適用することになる。従って、計算過程において浸透力の増分はすべて有効応力の低下量となり、さらに、生じた体積ひずみによる間隙水圧の変化も、非排水の条件より有効応力の変化として各ステップ毎に加算していった。

以上の設定のもとで、体積圧縮が生じる範囲で地盤材料のせん断弾性係数と体積弾性係数の比 α ($=K/G$) を変化させ、有効応力 P がゼロとなるとき動水勾配の値を求め、体積変化が浸透破壊に与える影響を調べた。また、解析結果においては、 α を横ひずみと縦ひずみの比を示すポアソン比 ν に換算して ($\nu = (\alpha - 1)/2$) α) グラフに表わした。なお、体積膨張を示す範囲では、有効応力が増加し続け、クイックサンド現象が生じないという計算結果となった。

4. 解析結果

図-2 は、砂地盤を等方弾性体で非排水状態にあると仮定したときの、体積圧縮が浸透破壊に与える影響を調べた結果をグラフに表わしたものであり、ポアソン比 ν を 0.55~0.95 まで変化させ、有効応力がゼロとなるときそれぞれの動水勾配の値をプロットしたものである。このグラフより、ポアソン比 ν の値が大きくなるほど、つまり、圧縮性が卓越するほど有効応力がゼロとなるとき動水勾配の値は小さくなっていくことが読み取れる。これは、体積圧縮の程度が大きいくほど、間隙水圧の上昇率も高くなり、有効応力の低下を促進させるためである。その結果、ダイレタンスーがクイックサンド現象に少なくとも何らかの影響を与えているということが

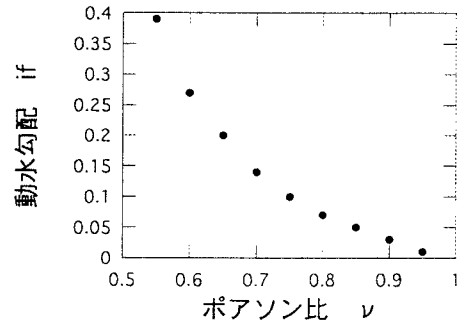


図-2 体積圧縮が浸透破壊に与える影響

が言える。実験により明らかにされているように、Taylor の限界動水勾配の式により求められる浸透破壊が起きるときの動水勾配の値と比較して、実験で得られた値が密な砂供試体ほど大きくなり、緩い砂供試体ほど小さくなるという傾向は、正のダイレタンスーが生じれば浸透破壊の発生を遅らせ、逆に負のダイレタンスーが生じれば浸透破壊を促進させるような働きをしているためではないかと考えられる。また、水の流れをきちんと考えると、クイックサンド現象が生じるときの動水勾配は、非排水状態を仮定した場合と比較して、体積膨張を示す場合は小さくなり、体積圧縮を示す場合は大きくなることは容易に想像できる。

本研究は、Taylor の限界動水勾配理論が実験結果と一致しない原因が、地盤材料の特性であるダイレタンスーにあるのではないかという想定に基づいて行った解析の第一歩として、砂地盤を等方弾性体と仮定し、非排水条件に限定して、問題の設定を極端に簡単にした。今後の課題としては、地盤材料の異方性を考慮に入れ、極低圧下でのダイレタンスー挙動を表現することができるよう構成モデルの定式化を行い、砂地盤が破壊に至るまでの浸透流による間隙水圧の変化、動水勾配による水の流れ、砂骨格の変化、すなわち砂骨格と水の流れの連成挙動を正確に捉えられるような解法を確立することが挙げられる。

参考文献

1) Vardoulakis, I. And Sulem, J. (1995) : Bifurcation Analysis in Geomechanics.

Blackie Academic & Professional.