

不飽和土への挑戦

Applications of Unsaturated Soil Mechanics to Geotechnical Issues

向 後 雄 二 (こうご ゆうじ)

東京農工大学大学院 教授 農学研究院

1. はじめに

本特集号の総説の原稿依頼を受け、タイトル「不飽和土への挑戦」をお聞きした時、なんとも勇ましいタイトルに少々驚きを感じた。不飽和土の研究に長く携わっている者としては、まだまだこの分野が何か特殊な分野であるような印象を、他の分野の方は持っているのかと思っている。ここでは、まず不飽和現象に関するいくつかの事例を紹介することから始め、不飽和土が決して特殊な土でなく、本来土が持っている姿であることを述べたい。

地下水位は地形地質の影響を受け一概にはその水位を特定できないが、洪積台地では 10 m 以深にあることも珍しくない。このような状態では地表面付近はほとんどの場合不飽和状態にある。不飽和状態では、間隙水圧は常に大気圧より低いので負圧状態にある。実用上最も不飽和土と馴染みのある事例は締固めである。子供の砂遊びでは、皆さんも経験あると思うが、土質力学の知識などなくても、土に水を適度に加えて手で叩いて締固めると、高く丈夫な砂山を造ることができた。締固めエネルギーが同じ場合、土の密度（正確には乾燥密度）は含水比（つまり水分量）に依存する。この現象は先の例のように子供でも知っているわけであるが、それを科学する、つまりなぜそのような現象が生じるのかはなかなか難しい訳である。また、次節で述べるように、不飽和土に水を加えると、収縮も膨張も生じる。水を加えることは、サクシヨン（正確にはマトリクスサクシヨン $s = u_a - u_w$, u_a : 間隙空気圧, u_w : 間隙水圧）を減少させる現象である。応力の減少では通常物質は膨張だけが生じるが、土では収縮も生じる。このような事象が、なぜ生じるのかも理解し、それらを定量化するには、不飽和土の土質力学が必要である。

ここでは、上述したような不飽和現象の簡単な考え方を提供できればと思う。より研究的で詳細な事項についてはこの特集号のそれぞれや参考文献 1) を参考にされたい。

2. 「雨降って地固まる」と「雨降って地盤が緩む」

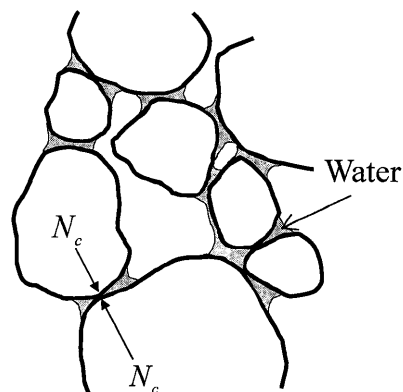
2.1 雨降って地固まる

この章の表題のはじめの「雨降って地固まる」から話を始めよう。広辞苑によれば、「変事があってかえって

前よりよく基礎が固まることのたとえ」の慣用句である。このような言葉は、自然現象から生じ、古くから認知された現象である。つまり、不飽和地盤に水を加えると沈下が生じ、土が締まる現象である。この現象は、飽和コラプスと呼ばれ、不飽和土特有の現象である。まだ締固め機械が未発達な時代に、フィルダムで用いられた水締め工法はこの現象を利用し、フィル材の締固めを行った。サンフェルナンド地震で液状化した下サンフェルナンドダムはこの工法で築造された²⁾。水締め工法は後述するように、締固め後の密度は正規圧密での密度であるから、飽和土の最も緩い状態までしか密度は増加しない。したがって、砂質系の土では液状化の可能性が高くなる。

飽和土においては土の力学的挙動は有効応力によって支配され、Terzaghi (テルツァーギ) の有効応力式が有効である。一方、不飽和土でも有効応力を定義しその力学的挙動を解釈する試みが、1950年代後半から1960年代初頭に行われた。Bishop (ビショップ) の有効応力式³⁾がその代表である。しかし、この有効応力式では飽和コラプス現象を説明できない。つまり、Bishop などの有効応力式はサクシヨンが減少（加水）すると、有効応力が減少する。したがって、加水時には膨張のみが生じることになる。

飽和コラプス現象は、有効応力つまり間隙水圧が等方的に作用する現象に起因していない。飽和度が低くなると、図一1に示すように水は土粒子の接触点の周りにメニスカスをつくりその中に保持される。このとき間隙水圧は負圧で、土粒子の接触点に毛管力と言う吸引力を生む。つまり、毛管力が糊のような働きをし、土粒子と土



図一1 低い飽和度における土中水の保持状態、 N_c は毛管力

総 説

粒子を接着し土粒子骨格を強くする。そのため、たとえ緩い構造でも外力を支えることができる。毛管力は水溶性の接着力であるから、水が浸入すると消滅する。そのため、構造が緩い場合には、圧縮し土粒子接触点の数を増やして外力を支えようとする。これが飽和コラプスのメカニズムである。

2.2 雨降って地盤が緩む

天気予報では、豪雨の度に地盤が緩み斜面崩壊の危険があると警告がなされる。確かに、雨が降ると地盤は緩み、斜面では地下水の上昇と見かけの粘着力の喪失のために斜面は不安定となる。不飽和土に加水すると膨張が起こることは、膨張性粘土と呼ばれる特殊な粘土で顕著である。日本ではそれほど問題にはならないが、世界的にはこのような膨張性粘土が広く分布している地域もあり、この膨張により道路や家屋などに多くの被害が生じることが報告されている。1995年から不飽和土の種々の問題を議論する国際会議（UNSAT シリーズとして定着）が4年ごとに開催されているが、そのシリーズの前身は膨張土の国際会議であり、古くからこの膨張の問題は議論されてきた。膨張性粘土はスメクタイト系のモンモリロナイトを含み、ベントナイトと呼ばれ浸透を抑制するためのシール材として広く現場で用いられている。

前述したように、この問題では不飽和土の有効応力、例えば Bishop の式などを用いれば、膨張については理論的な取り扱いが可能である。

2.3 どうして地盤は収縮も膨張もするのか？

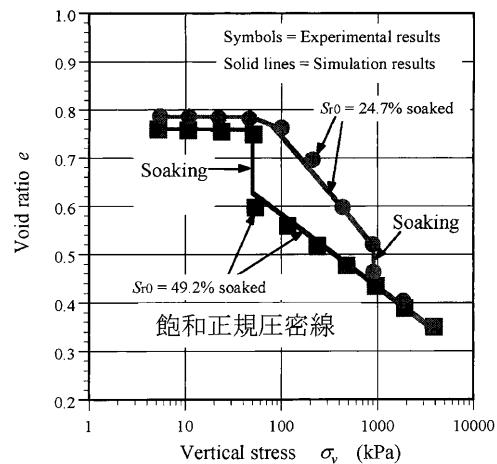
図—2 に飽和コラプスに関する典型的な圧密試験結果を示す。土が構造を持たなければ、飽和土では正規圧密線が限界状態となり、その線より外側には土は行くことができない。しかし、この図から分かるように不飽和土ではこの飽和正規圧密線の外側に行くことができる。つまり、不飽和土では飽和土より緩く詰まった状態でも前述したように外力を支えることができる。この状態で加水がなされると収縮が生じ、飽和正規圧密線上まで応力点は移動する。加水後の圧密は飽和正規圧密線上を移動する。このように応力点が図—2 のような飽和正規圧密線の外側にある場合には、飽和コラプスが生じる。

それでは膨張はどのような状態で生じるのであろうか。通常斜面表層部では土は過圧密状態にあると考えられる。つまり締まった状態にある。そのような状態では加水されることによって膨潤が生じる。つまり、土がある程度密に締まった状態で加水すると膨張が生じる。

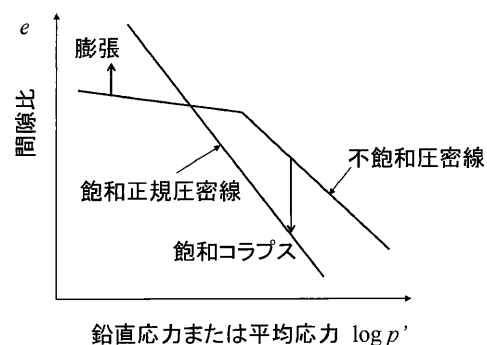
以上のことを図示すれば図—3 のようになる。つまり、現在の応力点が飽和正規圧密線の外側にある場合には加水にともなって収縮（「雨降って地固まる」又は飽和コラプス）が生じ、内側にある場合には膨張（「雨降って地盤が緩む」）が生じる。このように応力状態の位置によって不飽和土は収縮も膨張も引き起こす。

3. 不飽和土質力学の重要性

土が不飽和状態にあるのは、盛土、切土、自然斜面及び地表面付近であり、我々が通常の生活で遭遇する土は



図—2 飽和コラプスに関する典型的な試験結果とシミュレーション S_r は初期飽和度（ロック材）^{4),5)}



図—3 浸水による収縮と膨張の起こる領域

不飽和土であると言っても過言でない。不飽和土は飽和土に比べて、大きな強度と高い剛性を持つために土質工学上安全な土と見なされてきた。しかし、現実問題では、前述したように粘土の膨張による家屋等への被害やコラプス土と呼ばれる土の沈下は古くから問題視されてきた。コラプス土は特に中国の黄土や欧米のレスと呼ばれる土を指す風化残積土である。このような土では自然状態で飽和コラプスを起こすのでそのように呼ばれてきた。図—3 に基づく向後⁶⁾の議論によれば、飽和コラプスは不飽和土特有の現象で、土が不飽和状態にあれば、どのような土でも生じる。ロック材でも浸水に伴う沈下はロックフィルダムで初期湛水時に見られる現象である。

また、降雨による斜面崩壊は多くの場合表面から1～2 mの浅いすべりである。したがって、降雨前には地盤は不飽和状態にあり、雨水の浸透にともない地盤内の飽和度の上昇とそれに伴う強度低下（これは見かけの粘着力の低下として現れる）によって崩壊が始まる。我々が行った重力場での模型実験⁷⁾によれば、斜面法先部から間隙水圧の上昇が始まり、そこで局所的な崩壊が起こりさらに大きな崩壊が起こるか、法先での崩壊からさらに崩壊が斜面上部へと進行して行く。

フィルダム、堤防、鉄道、道路、宅造などの盛土構造物は通常締固め土から築造される。前述したように、締固め土は不飽和土である。フィルダムでは築造時に盛土自重により遮水ゾーン内部に間隙水圧が発生し圧密とともに消散する。圧密の終了を待たずに貯水が開始される

から、内部での応力状態を把握し、変形と崩壊に対する安定性を議論することは至難の業である。その後の地震等の検討が加われば尚更である。

今後の設計においては、性能設計の導入が不可欠である。その際変形は重要な検討項目となる。上述した問題においても、崩壊だけでなく変形を考慮することが求められる。不飽和土で問題となるのは、加水によって変形が生じる点である。つまり、上述した飽和コラプスと膨張である。理論的には、飽和コラプスは毛管力による糊の効果、つまりこの糊によって土粒子骨格が固くなる効果である。不飽和土は飽和土より大きな強度と高い剛性を持つこともこの効果による。膨張は有効応力の考慮によって定量化することができる。サクシジョンによる糊の効果は内部拘束の効果とも考えられるので、限界状態ではこの効果はほとんど生じない。したがって、限界状態での強度とサクシジョンの関係から有効応力の効果だけを取り出すことができる。糊の効果は不飽和土の正規圧密線、正確には面となるがこの面を定式化し、圧密降伏応力を見積もれば定式化できる。我々がこの20数年間主張してきた点はこのことに尽きる。

4. おわりに

我々が、不飽和土の研究をはじめて早30年余りの歳月が過ぎ、いろいろ迷走しながらやってきたが、その中で力学的挙動について最も言いたかった点に照準を当てて記述した。つまり、不飽和土の理論的な取扱いでは、サクシジョンによる二つの効果、すなわち有効応力と糊の効果である。この点を考慮すれば不飽和土は飽和土と同じ土俵に上ることができる。浸透の問題は多くの計算実績を重ね現場への応用も進んでいる。大西、西垣両先生による功績が大である。力学の分野でも応用に向けた取

り組みが必要である。

さて、本特集号では、不飽和土研究の重鎮の先生方と若手の方からの論文を掲載できた。内容は構成則1編、力学試験2編、浸透1編、模型実験研究1編、と現場への適用に関するもの2編の計7編である。内容は多岐にわたっているので読者には十分不飽和土に関心を持っていただけたと思う。多くの方がこの分野の研究に従事し、特に応用面での研究に成果を上げることを期待したい。我々もそれに向けた努力を精一杯行いたいと思う。

参 考 文 献

- 1) 不飽和地盤の挙動と評価, 地盤工学会, pp. 1~223 2004.
- 2) Seed, H. B., Lee, K L., Idriss, I. M. and Makdisi, F. I.: The Slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971, ASCE Vol. 101, GT7, pp. 651-688, 1975.
- 3) Bishop, A. W.: The Principal of Effective Stress, Teknisk Ukeblad, Vol. 106, No. 39, pp. 859-863, 1959.
- 4) Kohgo, Y., Asano, I. and Hayashida, Y.: Mechanical Properties of Unsaturated Low Quality Rockfills, Soil-sand Foundations, Vol. 47, No. 5, pp. 947-959, 2007.
- 5) Kohgo, Y., Asano, I. and Hayashida, Y.: An Elastoplastic Model for Unsaturated Rockfills and their Simulations of Laboratory Tests, Soils and Foundations Vol. 47, No. 5, pp. 919-929, 2007.
- 6) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Theoretical Aspects of Constitutive Modelling for Unsaturated Soils, Soils and Foundations, Vol. 33, No. 4, pp. 49-63, 1993.
- 7) Tokoro, N., Tanikawa, K., Saito, H., Kohgo, Y. and Hori, T., On 1G slope failure model tests due to rainfalls: Difference of failure patterns due to difference of densities of a subsurface sand layer-, Proc. 2nd Advances in Transportation Geotechnics, Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-62135-9, pp. 755-760, 2012.

(原稿受理 2014.2.24)