

不飽和土の膨潤とコラプス

Swelling and Collapsing of Unsaturated Soil

阿 部 廣 史 (あべ ひろふみ)

(同)USS 研究所 代表

1. 不飽和土とサクシオン

不飽和土では間隙流体として水と空気が存在するため、その表現としてサクシオン s の用語が用いられ、間隙空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差として、

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

で示される。

不飽和土の有効応力 σ' は、Bishop の提案した次式；

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

が1960年に London で開催された国際会議の討論で、最も普遍的な式であるとされた。ここで、全応力 σ 、実験で決まるパラメータ χ である。後述するように不飽和土のコラプス（沈下）が有効応力の原理に反する挙動として議論されたこともある。

なお、一般的に、不飽和地盤では間隙空気圧は大気圧にあり、間隙水圧は負圧を示す。サクシオンは負の間隙水圧の符号を変えたものと考えると理解しやすい。パラメータ χ はサクシオンが土の有効応力に寄与する割合（0～1の範囲）を示し、乾燥とともに有効応力への寄与率は低下する。一方、 $\chi \cong 1$ が適用できる範囲は水分特性曲線の最初の折れ曲り点（空気浸入値ともいう）付近までと考えられている。

2. 膨 潤

乾燥した気候の国々では、膨張性地盤の地表面を建物あるいは舗装などの構造物で覆うことを起因とする膨潤被害が多数報告されている。その要因は、地盤からの蒸発散を遮ったために地盤中の湿度が上昇（サクシオンが低下）したことによる膨潤である。対策としては、構造物下部が閉塞しないようにすることが重要であり、杭基礎の場合、先端支持のみで、周面摩擦が働かないような対策も考えられている¹⁾。

我が国では、モンモリロナイトを含む泥岩の尾根を切り、布基礎の木造家屋を建てたところ、床面が膨潤被害を受けた報告がある²⁾。この土は、乾燥・湿潤の繰返しを受けると、膨潤変位が累積する傾向を示した。床下の乾燥に伴い風化が進行し、建屋外から水分を引き込み、その結果として東石が持ち上げられている。屋外の舗装などでは被害がないことから、乾燥を防ぐ目的で床下をコンクリートで覆うことにより、膨潤を抑えている。

圧密試験においては、浸水飽和時に特に注意を払う必要がある。図-1は飽和土を前提とした圧密試験である

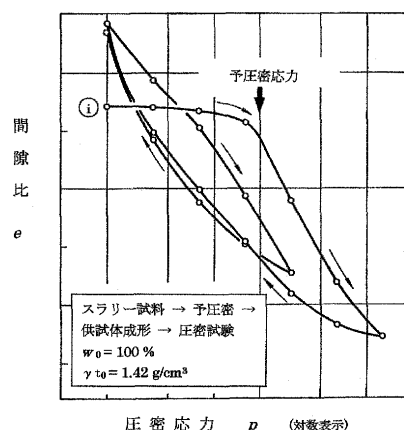


図-1 膨潤が圧密特性に及ぼす影響

が、極端な膨張傾向を示すことにより圧密特性に著しい影響を及ぼした例である。ここでは、モンモリロナイトを含む地すべり粘土のスラリー試料を作り、図中に示す手順で圧密試験を実施している。(i)からスタートし、浸水飽和時に膨張傾向を示した場合は速やかに荷重を増加する手法を取ると、ほぼ予圧密応力に近い圧密降伏応力が得られる。一方、除荷過程に入ると、次第に顕著な膨潤傾向を示し、再載荷においては、初期載荷とは異なる圧密特性を示している。図-1は極端な例ではあるが、不飽和土を飽和する場合にも注意すべきことである。

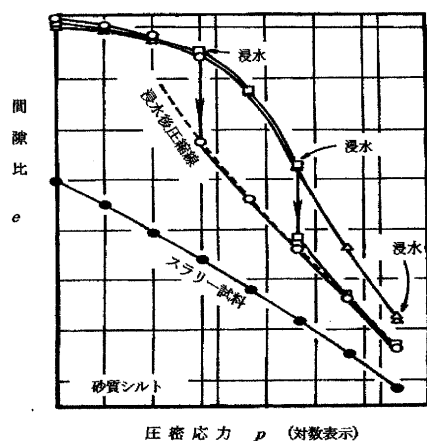
膨潤圧は、それを調べる試験装置の提案もあるが、圧密試験の浸水飽和時に、膨張傾向を示さなくなる圧密応力を知ることにより、類推可能である。

3. コラプス沈下

浸水に伴う地盤の沈下は、古くから認められており、コラプス沈下、浸水沈下 (Subsidence due to Soaking), あるいはハイドロコンパクションなどと呼ばれている。風積土であるレス地盤で、灌漑目的の水路からの漏水が原因で数 m に及ぶ著しい沈下を生じた例も報告されている。

不飽和地盤への浸水は土中サクシオンの減少を意味し、式(2)によれば有効応力も減少する。浸水を受けた地盤が有効応力の減少にもかかわらず、(コラプス)沈下を生ずる場合があるため、この沈下は「有効応力の原理」に反する挙動と指摘された³⁾。

低めの締固めエネルギーで得られた最適含水比の乾燥側の供試体を用いた圧密試験結果を図-2に示す。試験中の供試体の乾燥を防ぐため、適度に湿らせたポーラス

図一2 圧密試験におけるコラプス沈下⁴⁾

ストーンとろ紙を用い、不飽和土状態のまま圧密試験を開始。引き続き、図中に「浸水」と示した圧密応力状態で供試体を浸水飽和すると圧縮変形（コラプス沈下）が生じた例である⁴⁾。

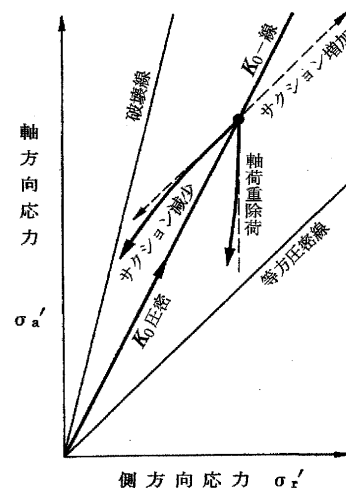
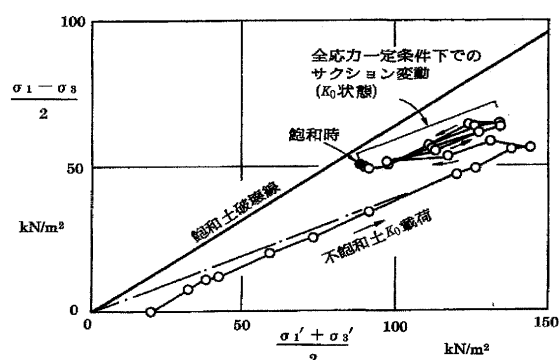
浸水沈下後、さらに圧密試験を継続すると、破線で示す浸水後圧縮線に沿う傾向にあることが認められる。同図中にスラリー試料の圧縮特性をも示しているが、通常適用される応力範囲では、この試料の場合、浸水後圧縮線はスラリー試料に漸近する傾向を示すのみである。

圧密リング内での不飽和土の挙動を三軸 K_0 圧密試験を適用して詳細に調べると、サクシヨンの減少は破壊線方向に向かう挙動であることが明確になる。図一3は圧密リング内の応力状態を模式図として示している⁴⁾。

まず、任意の応力状態まで K_0 圧密を行い、引き続き K_0 状態を保ってサクシヨンを減少すると、その応力径路は等方圧密線に平行な破線に沿って破壊線に近づく傾向を示す。この時、相対的に緩い供試体では圧縮（コラプス沈下）傾向を示し、より密な供試体では膨張傾向を示してくる。このような挙動はせん断変形に伴う体積変化としてとらえるべきである。一方、圧密応力の減少に相当する軸荷重除荷（軸方向応力の減少）とサクシヨンの減少とは直接的な関係はないことが分かる。

緩い供試体のコラプス沈下は、不安定な土粒子の骨格構造が変形（崩壊）したことにより生ずると言える。浸水時にコラプス沈下が生ずる条件は⁵⁾、①土が不安定で大きな間隙構造を持ち、②コラプス沈下を生ずるのに十分な応力が作用し、③浸水により失われる高いサクシオン（あるいは粒子間のセメンテーションなど）で土粒子構造が一時的な剛性を持つこと、が考えられる。

コラプス沈下を予測する場合は、同様の供試体を2個用意する。一方は、乾燥に注意して不飽和土の圧密試験を実施する。もう一方は、浸水飽和時の膨張・収縮が生じないように注意して、図一2の浸水後圧縮線に相当する圧密試験を実施する。浸水後圧縮線が不飽和土の圧縮線の下にある場合、その間隙比の差の分のコラプス沈

図一3 不飽和土三軸 K_0 圧密試験時の応力径路図一4 サクシオン変動が応力径路に及ぼす影響⁴⁾

下を生ずる可能性がある。

原位置での挙動を考慮し、 K_0 状態でサクシオン変動を繰返し与えた時の応力径路が図一4である⁴⁾。 $\chi=1$ として有効応力を算定しているが、サクシオン減少時に飽和土の破壊線に漸近する傾向を示し、破壊に対する余裕が失われることは確かである。このような挙動は、降雨による不飽和土斜面の崩壊メカニズムに関与している可能性が考えられる。

参考文献

- 1) 例えば Lambe, T. W. and Whitman, R. V.: *Soil Mechanics*, John Wiley Sons Inc., p. 7, 1969.
- 2) Kawakami, Hiroshi and Abe, Hirofumi: Upheaval damage to a wooden house by swelling of mudstone due to weathering, *Clay Science for Engineering (IS-Shizuoka)*, Balkema, 2001.
- 3) Jennings, J. E. and Burland, J. B.: Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils, *Geotechnique*, Vol. 12, No. 2, pp. 125~144, 1962.
- 4) 阿部廣史：不飽和土の力学特性の評価手法に関する実験的研究，東京大学学位論文，1992.
- 5) Barden, L., Madador, A. O. and Sides, G. R.: Characteristics of Unsaturated Clays, *Proc. ASCE*, Vol. 95, SM1, pp. 33~51, 1969.

(原稿受理 2011.4.25)