

遅延圧密土の一次元変形における状態径路

STATE PATH DURING THE K_0 -DEFORMATION OF SOIL UNDER
DELAYED CONSOLIDATION赤井 浩一*・佐野 郁雄**
By Koichi AKAI and Ikuo SANO

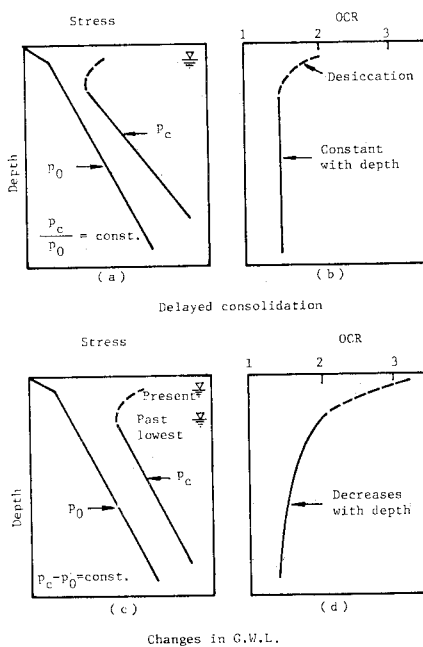
1. 序

近時、構造物の大型化・重量化につれて、その基礎を従来のような沖積地盤上に置くのでは支持力が不足することが多く、したがってさらに深部の段丘層や上部洪積層に支持層を求めねばならない事例が増しつある。しかるに、この種の地層は十分深所にある洪積層に比べて堆積年代が比較的若く、過圧密比(OCR)が小さいうえに、地史的にみて必ずしもその荷重履歴が現在の有効上載圧を越えているとはみなしがたい場合も少なくなく、このような地層上の構造物の沈下性状に問題が生じている¹⁾。本文では、このような問題意識から、上部洪積層粘土などにみられる擬似過圧密特性に関連して、遅延圧密土の一次元変形挙動を状態限界面を通して考察するものである。なお、ここに遅延圧密とは、過剰間隙水圧が実際上消散してしまった後にも継続する圧縮、すなわち地史的なスケールでの二次圧密をいう。

2. 遅延圧密に伴う先行効果

Bjerrum^{2),3)} は、たとえ正規圧密粘土であっても、経時効果によって圧密降伏応力 p_c が有効上載圧 p_0 より大きく出る現象に注意し、このような遅延圧密土の特性を先行効果 (p_c -effect) とよんだ。この先行効果は有効上載圧に比例して増加し、同年代に堆積した層の p_c/p_0 は実在する上載荷重のもとで粘土に生ずる二次圧密の量とともに増加する。また、二次圧密は粘土の塑性とともに増すから、 p_c/p_0 が塑性指数 I_p とともに増大することも知られている。

Wroth⁴⁾ は上載圧不変のままで遅延圧密をした擬



図—1 遅延圧密または地下水位変動による
圧密降伏応力と過圧密比の深度分布
(Wroth-Parry)

似過圧密粘土と、既往の地下水位変動などによる荷重履歴を受けた通常の過圧密粘土との両方で、 p_c と OCR の深度分布に現われる相違を図—1のように説明している。これによると、後者は OCR が深さとともに減少するのに対し前者はその深度分布が一定という特性をもつ。一方、静止土圧係数 K_0 と OCR の間には粘土に固有の関係がある⁵⁾ ので、原位置における K_0 値がわかれば OCR が求まり、これが深さにかかわらず一定ならば、その粘土の過圧密特性が擬似的なものに過ぎないことが知られる。

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学科

** 正会員 京都大学助手 工学部交通土木工学科

3. 状態限界面と状態径路

(1) 状態限界面 (state boundary surface)

状態限界面は、Roscoe ら⁹⁾が「土においては間隙量と応力の組合せが特定の限界内にしか存在できない」という実験事実から、その存在限界に対して名づけたものであって、応力軸としては平均有効主応力 $p = (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3$ と最大・最小主応力差 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ をとり、これらと間隙比 e との直交三軸で作る間隙量-応力空間内に状態限界面を表わした。さらに、この空間曲面の内側に、過圧密比ごとに決まる $e \sim p$ 面に垂直な間隙比-有効応力面 (膨潤壁, swelling wall) が存在することが認められ、この壁面上の上限の $p \sim q$ 面への投影が降伏軌跡 (yield locus) とよばれている。

(2) 遅延圧密における状態径路

遅延圧密による先行効果 (時間効果) を受けた土が、荷重履歴のある過圧密土と同じ間隙量にあるとき、果たして両者がまったく同一の応力状態にあり、したがって次に訪れる再載荷に際して同一の径路をたどるか否かについて、状態限界面を用いて検討を行うことにする。ただし、変形の姿はあらゆる時点において完全側方拘束状態 (K_0 状態) であり、この制約のもとで遅延圧密も過圧密 (K_0 載荷と K_0 除荷) も生ずるという状況を逸脱するものではない。

Wroth⁵⁾ が描いた遅延圧密による状態の変化は図-2である。これによると、地表面下ある深さにある土要素の有効応力状態は図-2(a)のG点で示される。これに対応する圧密曲線 (図-2(b)) では、G点は土かぶり圧による一次圧密完了直後の間隙比を与える。その時点と現在までの間にこの土要素は二次圧密を続け、現在の状態はH点になっているが、その間有効応力は不変と考

えている。

その後、この土要素が一次元的載荷を受けると、再圧縮曲線 HI に沿って正規圧密曲線上のI点に至ると考える。このI点における鉛直方向応力が圧密降伏応力であって、これを逆にみれば、H点では土要素は過圧密土のように挙動すると考えられる。しかし、二次圧密の期間のGからHまでの間に有効応力が変化して

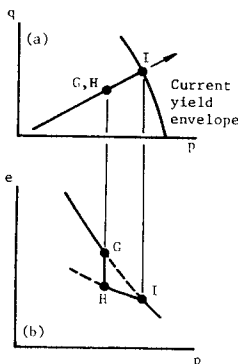


図-2 遅延圧密による状態の変化 (Wroth)

いないとすれば、H点における K_0 値はG点のものと同じであり、これは元の正規圧密時のものと一致する。このことは土要素の深さには無関係であり、したがってOCRと K_0 値がいずれも一定であるとして、さきの図-1(b)の説明がなされている。

しかし、このWrothの記述には、二次圧密期間中有効応力が不変とするところに誤りがある。不変なのは鉛直方向の有効応力 σ_v' であって、図-2の横軸にとった平均有効応力 p ではない。以前、 K_0 圧密において、一次圧密期間中の主応力の時間的推移を定量的に明らかにした⁷⁾が、それによると、全応力で表わした土中の側圧 σ_h は時間的に減少して、最終的には $\sigma_h = K_0 \sigma_v$ (σ_v :一定の鉛直方向全応力) となるが、正規圧密土の静止土圧係数 $K_0^{NC} = \sigma_h' / \sigma_v'$ は圧密期間中一定に保たれる。ところで二次圧密では、排水クリープによる土要素の形状変化が時間的に進行するが、側方変位が拘束されているので、鉛直ひずみ ϵ_v がそのまま体積ひずみ ϵ_{vol} となる。この ϵ_{vol} の時間的な増大は当然平均有効応力 $\sigma_m' (= p)$ の増大をもたらすが、鉛直方向応力 $\sigma_v' (= \sigma_v)$ は一定であるから水平方向応力 $\sigma_h' (= \sigma_h)$ が増加し、主応力差 $\sigma_v - \sigma_h (= q)$ は減少する。結局、二次圧密期間中は p が増加、 q が減少し、これにより K_0 値および (擬似) OCR の増大が起こると考えられる。

このような考察に基づいて、遅延圧密土の一次元変形挙動を状態限界面を用いて表現するのであるが、前述したように、荷重履歴のある過圧密土の挙動との比較という観点から、図-3のように間隙比-有効鉛直応力面 (普通 $e \sim \log p$ 面といわれているが、正確には $e \sim \log \sigma_v'$ 面) 上で同一の点Dにある遅延圧密土と過圧密土を考える。前者 (QOC) は現在の有効上載圧において、正規圧密状態を示す処女圧縮線 (K_0^{NC} 線) 上のB点で有していた間隙比 e_b が、時間とともに次第に減少してD点で

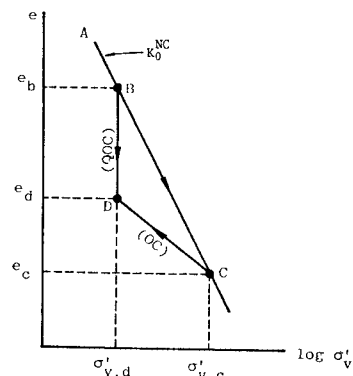


図-3 $e \sim \log \sigma_v'$ 面上における遅延圧密土 (QOC) と過圧密土 (OC) の径路

* σ_m' と ϵ_{vol} の間にクリープや応力緩和などの時間効果がないか、あってもごく小さいことを仮定。

もつ e_a に至ったものである。これに対して、後者 (OC) は K_0^{NC} 線上を $A \rightarrow B \rightarrow C$ まできた後除荷され、膨潤線 CD を経て間隙比を増しながら、同じく D 点に到達したものであり、この土の過圧密比は $OCR = \sigma_{v,c}' / \sigma_{v,d}'$ として定義される。

図-4(a) は間隙量-応力空間 ($e \sim p \sim q$ 空間) 内で上記の両者がたどる径路を示したものである。過圧密土 (OC) については特に問題はなく、最大鉛直応力点 C から現在点 D に至る膨潤径路が前述の膨潤壁 [SW] 内にあることに注意すれば足りるであろう。他方、遅延圧密土 (QOC) が二次圧密開始点 B からたどる空間的な径路を描くには、 epq 軸のほか新たに σ_v' 軸を導入し、 $e \sim \sigma_v'$ 面上で二次圧密期間中の径路 B_3D_3 が e 軸に平行になるという図-3の過程を利用することが必要である。つまり図-4(a)において、 $e \sim p$ 面に垂直な直角三角形

e_bB_3G およびこれと $de = e_b - e_d$ だけ離れたまったく同じ三角形 e_dD_3H の辺 B_3G, D_3H が作る 1つの斜面 (これを aging 面 [AP] とよぶ) 上を、 B 点から出発して p が増し、 q が減ずる向きに移動することになる。その終着点 D^* は、一般に過圧密土の現在点 D とは一致しない。図では D^* が D より $e \sim \sigma_v'$ 面に近い (つまり p が小さく q が大きい) ように描いてあるが、きわめて長期間二次圧密を続けた土ではこれが逆になることもあり得よう。いずれにせよ、この図では BD^* なる径路 (二次圧密径路) は、aging 壁 [AW] の上縁として描かれている。

正規圧密を表わす K_0^{NC} 線が状態限界面上にあることはいうまでもないが、この K_0^{NC} 線を上縁とする鉛直壁を $[K_0W]$ とすると、さきの [SW] もいまの [AW] も $[K_0W]$ より e 軸に近い側にあり、さらに [AW] の上縁としての二次圧密径路 BD^* が過圧密土の膨潤径路 CD と同様に状態限界面の内部に入っていることは明らかである。すなわち、遅延圧密土は過圧密土と同様に変形に関して弾性的成分をもつことになる。図-4(a)において、 $p \sim q$ 面に遅延圧密土の二次圧密径路 $B_1D_1^*$ (直線) と過圧密土の膨潤径路 C_1D_1 (一般には曲線) が

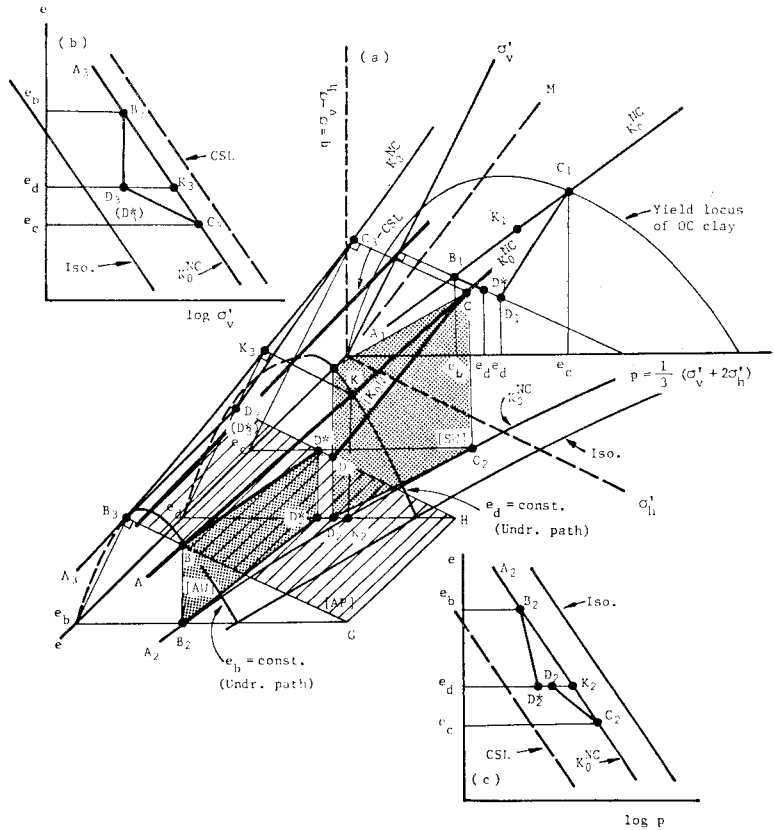
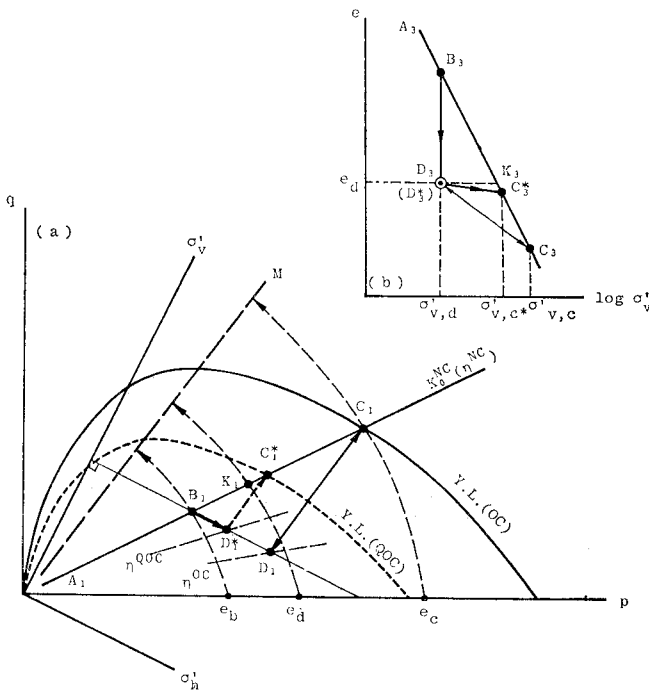


図-4 $e \sim p \sim q$ 空間内における遅延圧密土と過圧密土の径路とその投影図

示されており、前者では鉛直方向応力 σ_v' が一定のまま水平方向応力 σ_h' が增大するという既述の応力変化の様子が自明である。また、図-4(b) は $e \sim \log \sigma_v'$ 関係、(c) は $e \sim \log p$ 関係を示しており、これらの図には両者の土の状態径路とともに、限界状態線 (CSL) と等方応力線 (Iso.) の投影も記入されている。図-4(a)の $p \sim q$ 面や図-4(c)に注目すれば、遅延圧密土と過圧密土が同一の有効鉛直応力 σ_v' と同一の間隙比 e (鉛直ひずみ ϵ_v も同じ) でありながら、互いに異なった有効応力状態にあることがわかる。これより、遅延圧密土が受けた時間効果と過圧密土が受けた载荷効果とは、一般に同一でないことが結論される。

(3) 再载荷における状態径路

上記の結論は、現在点からの再载荷に際して両者の土要素がたどる状態径路が異なるものであることを暗示している点で重要である。図-5(a) は図-4(a)の $p \sim q$ 面を再現したものであるが、加えて $B, C, D(D^*)$ なる各点の間隙比に対応する非排水せん断径路を破線で示してある。このうち D 点に対する径路 e_d が K_0^{NC} 線を切る点 K_1 は、図-4(b),(c)の K_3, K_2 が示す空間点 K



図一5 p - q 面および e - $\log \sigma'_v$ 面上における遅延圧密土と過圧密土の径路

の p - q 面への投影点である。つまり、図一5(a) の K_1 , D_1 , D_1^* はいずれも同一間隔比 e_d にある。また、この図において、原点と D_1 および D_1^* をそれぞれ結ぶ線の傾斜 η^{OC} および η^{QOC} は、 $\eta = q/p = 3(1 - K_0)/(1 + 2K_0)$ より過圧密土 (OC) と遅延圧密土 (QOC) の K_0 値を与えるものであり、この例では $K_0^{OC} > K_0^{QOC} > K_0^{NC}$ ($\eta^{OC} < \eta^{QOC} < \eta^{NC}$) なる関係にある。

さて、過圧密土の再載荷における有効応力径路は図一5(a) の D_1C_1 (ここでは便宜的に直線とした) となり、既往の最大応力点 C_1 で K_0^{NC} 線に達して、以後はこの正規圧密線 (処女圧縮線) 上を進むことは周知であるが、一方、遅延圧密土の載荷においては、 D_1^* 点より D_1C_1 線に平行に進み、 C_1^* 点で K_0^{NC} 線に到達するものと予想される。この C_1^* を通り、過圧密土の降伏軌跡 (実線) に相似の軌跡 (点線) を図中に描いたが、これが D_1^* 点まで二次圧密した遅延圧密土の降伏軌跡である。この C_1^* 点を e - $\log \sigma'_v$ 面に記入すれば、図一5(b) の C_3^* となるから、これより遅延圧密土の (擬似) 過圧密比は $OCR^* = \sigma'_{v,c} / \sigma'_{v,d}$ となっており、図の例では前述の過圧密土のもの ($OCR = \sigma'_{v,c} / \sigma'_{v,d}$) より小さいことがわかる ($K_0^{OC} > K_0^{QOC}$ と同義)。なお、 C_3^* 点の横座標 $\sigma'_{v,c}^*$ は遅延圧密土の (擬似) 圧密降伏応力というべきものであり、これより大きい載荷に際して正

規圧密挙動をすることになる。この C_3^* が過圧密土の C_3 と異なることは、初めに述べた上部洪積層粘土などへの載荷による沈下の算定において留意すべき点であると考えられる。

4. あとがき

側方拘束状態にある粘土供試体の二次圧密期間中に、時間とともに側圧が増大するという実験結果が Thompson⁹⁾ らにより報告されており、これは本文中で述べた遅延圧密土の一次元変形における状態径路に関する理論的考察を支持するものである。また、二次圧密速度に関しては、村山⁹⁾ や Mesri¹⁰⁾ の研究があつて長期沈下に対する設計に有用である。

昭和 55 年・56 年の両年度にわたり、「擬似過圧密土の設計パラメーターに関する研究」なる課題に対して文部省科学研究費補助金 (試験研究) の交付を受けていることを付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 三笠正人：埋立地盤の土質工学的諸問題，土木学会誌，Vol. 63, No. 4, pp. 50~52, 1978.
- 2) Bjerrum, L.: Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings (7th Rankine Lecture), Geotechnique, Vol. 17, No. 2, pp. 83~117, 1967.
- 3) Bjerrum, L.: Embankments on Soft Ground, Proc. ASCE Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, Vol. 2, pp. 1~54, 1972.
- 4) Wroth, C.P. and R.H.C. Parry: Shear Properties of Soft Clay, Report 4, Intern. Symp. on Soft Clay, Bangkok, pp. 6~10, 1977.
- 5) Wroth, C.P.: In Situ Measurement of Initial Stresses and Deformation Characteristics, SOA Report, Proc. ASCE Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, Vol. 2, pp. 181~230, 1975.
- 6) Roscoe, K.H. et al.: On the Yielding of Soils, Geotechnique, Vol. 8, No. 1, pp. 22~53, 1958.
- 7) 赤井浩一・足立紀尚：有効応力よりみた飽和粘土の一次元圧密と強度特性に関する研究，土木学会論文集，No. 113, pp. 11~27, 1965.
- 8) Thompson, W.J.: Lateral Pressures in One-Dimensional Consolidation, Proc. 2nd ARC SMFE, Vol. 1, pp. 26~31, 1963.
- 9) 村山朗郎・柴田 徹：粘土のレオロジー的特性について，土木学会論文集，No. 40, pp. 1~31, 1956.
- 10) Mesri, G. and P.M. Godlewski: Time- and Stress-Compressibility Interrelationship, Proc. ASCE, Vol. 103, GT 5, pp. 417~430, 1977.

(1980.11.20・受付)