

第四章 模擬試料による初期沈下実験

第一節 はじめに

第三章では、排水に伴う泥炭地盤の沈下挙動が、著しい初期沈下、排水を伴う緩慢な沈下、排水終了後の一定速度沈下の3過程から成ることを見出した。本章ではこれら3つの沈下過程のうち、全沈下量に対して大きな割合を占め、かつこれまで沈下解析の対象外とされてきた初期沈下過程の機構を明らかにする。

初期沈下挙動は、沈下量も大きく、また極めて短時間のうちに生ずる現象であると予想され、泥炭土では試料の不均質性による外乱の影響が大きく、解析に至ることが難しいと考えられた。そこで、初期沈下を物理現象として抽出し、かつ、再現性の高い実験結果を得るために、模擬試料を用いることとした。

第二節 模擬試料

模擬試料の選択

泥炭土を模す試料として必要な性質としては、泥炭土が植物遺体の堆積によって生成することから、実験時に層状の供試体となること、繊維質であること、保水性が非常に高いことなどが考えられた。さらに、実験結果の再現性という観点から工業的に一定の品質で供給され得るものであること、加えて、安価で普遍的なもの、といった特徴を備えていることが望まれた。

以上を考慮した上で、ペーパータオル(キムタオル、株式会社クレシア社製品)を、泥炭土の模擬試料として選んだ。

ペーパータオルの物理性

泥炭土の模擬試料として選んだペーパータオルについて、初期沈下挙動に影響を与えられる間隙量や透水性、保水性、水を含んだ際の質量、乾燥重量といった物理性を把握し、泥炭土試料と比較する必要があった。そこで、飽和含水

比、真比重、飽和透水係数、水分特性曲線を、それぞれ以下の手順で測定した。

飽和含水比

まず、適当な深さのバットに水を張り、中でペーパータオルを水に馴染ませた。

続いて、ピンセットでペーパータオルを摘み上げ、滴る水滴の間隔が2秒程度となった頃を見計らい、乾燥質量の既知なアルミ皿に移し、湿潤質量を測定した。

その後、アルミ皿ごと乾燥炉に入れ、105℃で24時間炉乾した。105℃の下でもペーパータオルが燃焼によって消失しないことは予め確認しておいた。

炉乾後に質量測定を行い、求めたペーパータオルの乾燥質量から含水比を算出した。

結果として得られた飽和含水比の値は、877%（測定数 5、標準偏差 77%）であった。泥炭土の飽和含水比は、第二章第四節の Fig.2-5 及び Fig.2-6 から、高位泥炭土の値が 1000%以上、中間泥炭土の値が 400~1000%程度であるから、高位泥炭土よりは小さく、低位泥炭土に近い値といえる。

真比重

手順は、第二章第四節に挙げた、泥炭土試料の真比重測定に準じた。

結果として得られた真比重の値（20℃）は、1.62（測定数 5、標準偏差 0.024）であった。第二章第四節の Fig.2-5 及び Fig.2-6 から、高位泥炭土の真比重は 1.6 程度、中間泥炭土の真比重は 1.5 程度であるから、ペーパータオルの真比重は高位泥炭土に近い値といえる。

飽和透水係数

豊浦砂でペーパータオル層を挟んだカラムを作成して、ペーパータオルを層状に重ね合わせたときの積み重ね方向の飽和透水係数を測定した。

Fig.4-1 のような飽和土層が存在するとき、カラム全体の飽和透水係数と各層の飽和透水係数の関係は次の手順で求められる。

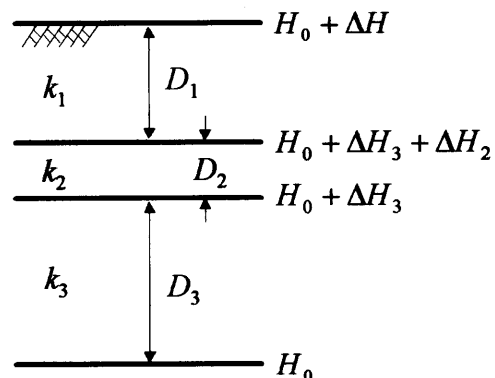


Fig.4-1 飽和土層における各層の透水係数、厚さ及び全水頭。
Permeability values, thickness and total head for each layer.

まず、土層全体を流れる定常フラックス q はDarcy則から次のように表される。

$$q = -k_{\text{total}} \frac{\Delta H}{D} = -k_1 \frac{\Delta H_1}{D_1} = -k_2 \frac{\Delta H_2}{D_2} = -k_3 \frac{\Delta H_3}{D_3} \dots \dots \dots (4-1)$$

各土層の厚さと全水頭差については、それぞれ、

$$D = D_1 + D_2 + D_3 \dots \dots \dots (4-2)$$

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \dots \dots \dots (4-3)$$

という関係がある。式(4-1)、(4-2)、(4-3)から、土層全体の透水係数 k_{total} は各層の透水係数 k_1 、 k_2 、 k_3 を用いて次式のように得られる。

$$k_{\text{total}} = \frac{D}{\frac{D_1}{k_1} + \frac{D_2}{k_2} + \frac{D_3}{k_3}} \dots \dots \dots (4-4)$$

式(4-4)から、飽和透水係数が k_{sand} の豊浦砂によって厚さ d のペーパータオル層を中央に挟んで長さ D のカラムを作成したときに測定されるカラム全体の透水係数 k_{total} と、ペーパータオルの透水係数 k_{towel} との間の関係として次式を得る。

$$k_{\text{total}} = \frac{D}{\frac{d}{k_{\text{towel}}} + \frac{D-d}{k_{\text{sand}}}} \dots \dots \dots (4-5)$$

実験ではまず、豊浦砂の透水係数 k_{sand} を予め求めておき、次にペーパータオル層の厚さ d を3通り与えてカラム全体の飽和透水係数 k_{total} を測定した。そして、得られた d と k_{total} の関係を式(4-5)に最小二乗法で適合させてペーパータオル k_{towel} を求めた。

飽和透水係数の測定には Fig.4-2 のような装置を用いた。カラムは直径 5cm、高さ 2cm のアクリルリングを 3 つ用いて作成した。測定時に与える全水頭差 ΔH は、動水勾配が 2 よりも小さい場合、ドリップポイントにおいて得られるフラックスの大きさが全水頭勾配に依存することを確認していたため、動水勾配が 3.3 となる 20cm とした。

カラムの作成に当たっては、ペーパータオル層を挟む豊浦砂層を乾燥密度が 1.58g/cm^3 程度となるように充填した。Fig.4-2 のカラムに乾燥密度 1.58g/cm^3 で充填した豊浦砂の透水係数 k_{sand} を予め測定したところ、 0.012cm/sec であった。

ペーパータオル層として、ペーパータオル 1 枚、2 枚、そして 4 枚の場合を与えることとした。層の厚さ d の値については、マイクロメータ (Digimatic Micrometer、Mitutoyo 社製) を用いて、十分に水に馴染ませて飽和させたペーパータオルの厚さを計測した結果、1 枚、2 枚、4 枚のそれぞれの場合で、0.15mm、0.30mm、0.60mm となった。

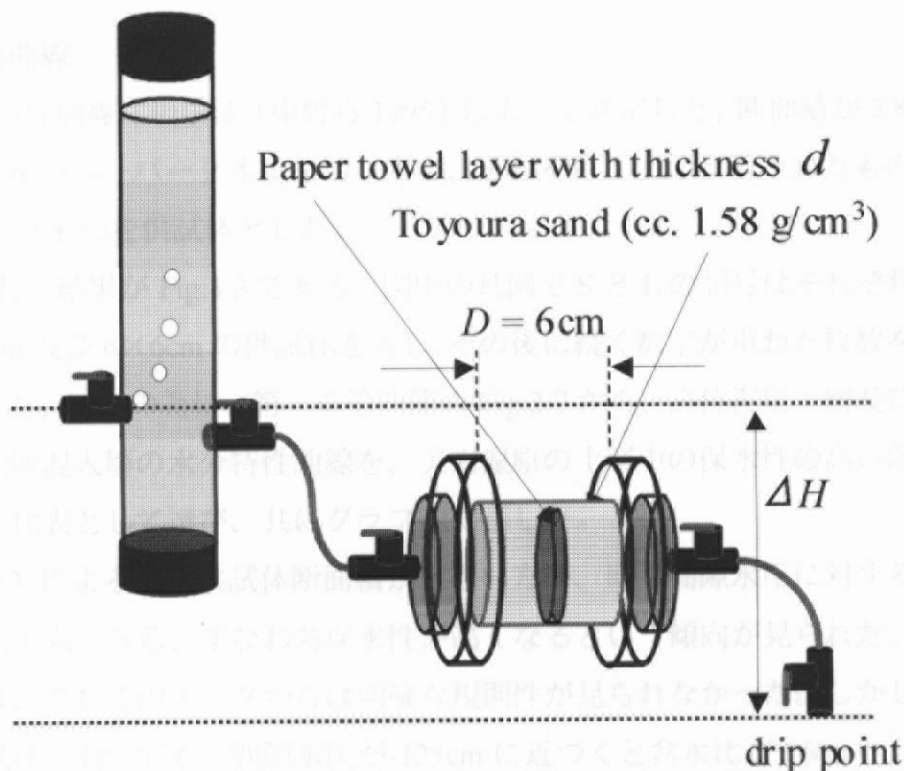


Fig.4-2 飽和透水係数測定装置の概略図.
Schematic diagram of the apparatus for measuring permeability of paper towel sheets.

測定の結果得られたカラム全体の飽和透水係数 k_{total} は、ペーパータオル層が1枚、2枚、4枚の場合で、それぞれ $4.7 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$ 、 $5.2 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$ 、 $5.2 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$ であった。これらの結果を式(4-5)に適合させた結果、ペーパータオルの飽和透水係数として $4 \times 10^{-4} \text{cm/sec.}$ を得た。また、実験終了後にカラムを解体して試料を炉乾し、ペーパータオル層の乾燥密度を求めたところ、 0.5g/cm^3 であった。

室内実験による美唄湿原の高位泥炭土の飽和透水係数は、粕渕ら(1994)によると、 $1.4 \times 10^{-3} \sim 9.6 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$ 、防風林の中間泥炭土の飽和透水係数は、井本ら(1999)によると、 $1 \times 10^{-3} \sim 9 \times 10^{-3} \text{cm/sec.}$ と、いずれも 10^{-3} 乗のオーダーとされる。ペーパータオルの飽和透水係数が泥炭土の10分の1のオーダーとなった主な理由としては、泥炭土の切断面に比べてペーパータオルの表面が緻密であること、また、第二章第四節の Fig.2-5 にあるように高位泥炭土の乾燥密度は 0.1g/cm^3 前後であり、ペーパータオルの乾燥密度の5分の1程度でしかなかったことなどが考えられる。

水分特性曲線

水分特性曲線は吸引法(中野ら,1995)によって測定した。断面積が $3 \times 3 \text{cm}$ 及び $6 \times 6 \text{cm}$ のペーパータオルを切り出し、それぞれ1枚、4枚重ねたもの、及び16枚重ねたものを供試体とした。

得られた結果が Fig.4-3 である。図中の凡例で S と L の記号はそれぞれ、断面積 $3 \times 3 \text{cm}$ 及び $6 \times 6 \text{cm}$ の供試体を表し、その後続く数字が重ねた枚数を示している。また、比較の為に、第二章第四節の Fig.2-7 から、高位泥炭土層及び高位泥炭土火山灰混入層の水分特性曲線を、美唄湿原の土層中の保水性の高い部分と低い部分の代表として選び、共にグラフ上に示した。

Fig.4-3 によると、供試体断面積が大きい方が、同じ間隙水圧に対する含水比の値が若干高くなる、すなわち保水性が高くなるという傾向が見られた。枚数に関しては、これらのデータからは明確な規則性が見られなかった。しかし、いずれの供試体においても、間隙水圧が -125cm に近づくと含水比が 150% へ近づく傾向が見られたことから、ペーパータオルを重ねた層間ではなく、ペーパータオルの繊維そのものが持つ間隙の大きさは -125cm よりも低い間隙水圧領域に対応しており、その最大含水量が含水比 150% 程度であると考えられる。

高位泥炭土の水分特性曲線と比較すると、ペーパータオルの水分特性曲線は、間隙水圧が 0cm から -125cm の領域においていずれも低い含水比を示しており、保水性は劣るという結果となった。また間隙水圧が負となっていくときの保水性の低下も泥炭土より大きかった。この傾向は、0~-25cm の高い間隙水圧領域において特に顕著であった。以上のような結果となった理由は、ペーパータオルの大間隙は重ね合わせた層の間であり、飽和から吸引した場合の大間隙の消失が泥炭土に比べて顕著になりやすいことが挙げられる。ただし、間隙水圧が-100cm となっても、高位泥炭土火山灰混入層と同程度の保水性があった。

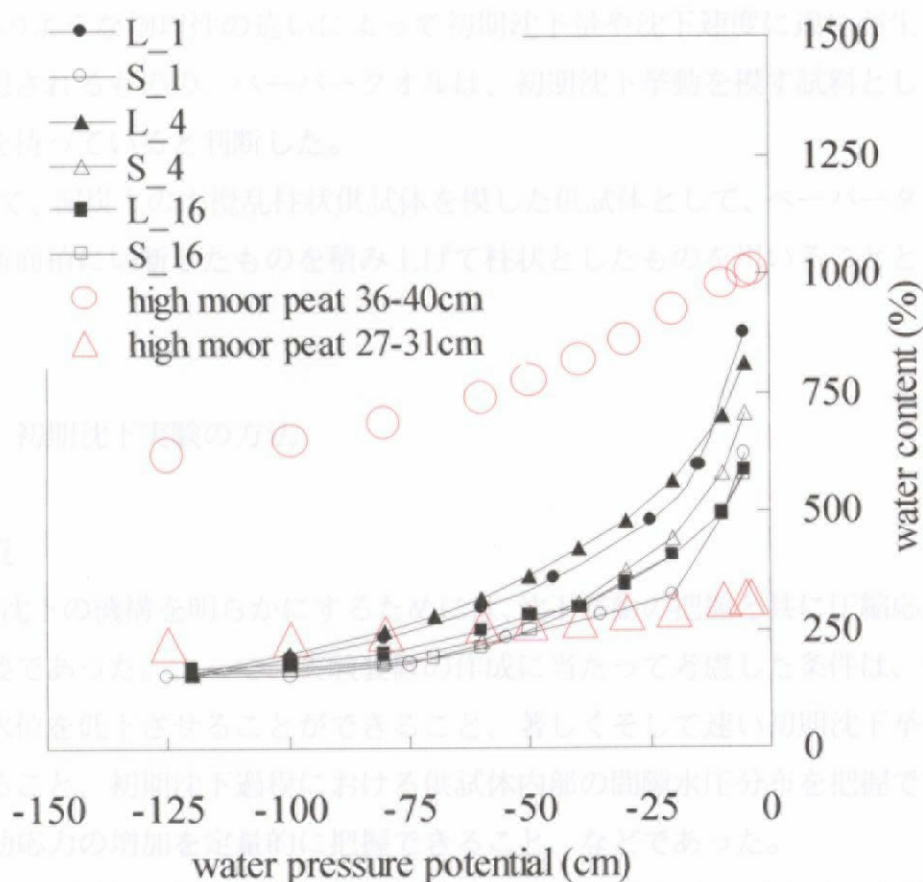


Fig.4-3 ペーパータオルの水分特性曲線。図中の凡例でS及びLはそれぞれ断面積が3×3cm及び6×6cmの供試体を表し、続く数字が重ねたペーパータオルの枚数を示している。赤丸及び赤三角はそれぞれ高位泥炭土層（ツルコケモ・スゲ）及び火山灰混入層の水分特性曲線。

Water characteristic curves of paper towel specimens. In the explanatory notes, S and L are abbreviations for small samples (3×3cm cross section) and large samples (6×6cm cross section), and numbers show number of sheets layered. Red circle and red triangle are for high moor peat and high moor peat with volcanic ash.

以上の物理性の比較をまとめると、以下のようなになる。

ペーパータオル供試体は、飽和含水比の値は高位泥炭土供試体に比べて若干小さいものの 800%以上という大きな値であり、間隙量の点からは顕著な初期沈下を示すことが期待できる。

真比重は 1.62 であり、高位泥炭土の値に近い。

透水係数は 1 オーダーほど低く、水位低下直後の水分移動は遅くなると考えられるが、水分特性曲線の形状から、水位低下時の大間隙からの排水は寧ろ泥炭土供試体よりも速く進行すると考えられる。

上述のような物理性の違いによって初期沈下量や沈下速度に違いが生じることが予想されるものの、ペーパータオルは、初期沈下挙動を模す試料として十分な資質を持っていると判断した。

そして、泥炭土の不攪乱柱状供試体を模した供試体として、ペーパータオルを所定の断面積に切断したものを積み上げて柱状としたものを用いることとした。

第三節 初期沈下実験の方法

実験装置

初期沈下の機構を明らかにするためには、沈下挙動の把握と共に圧縮応力の把握が必要であった。よって、実験装置の作成に当たって考慮した条件は、供試体周囲の水位を低下させることができること、著しくそして速い初期沈下挙動を観測できること、初期沈下過程における供試体内部の間隙水圧分布を把握できること、有効応力の増加を定量的に把握できること、などであった。

こうした条件を満たすために、供試体を飽和させるためのアクリル容器、水位低下のための排水コック、供試体各部の変位を捉えるための変位測定ピン、供試体の沈下挙動を撮影するビデオカメラ、供試体内部の水圧変化測定のためのポラスカップとこれらにつながる圧力変換器、供試体の自重変化を測定するための電子天秤を用意した。ビデオカメラによって得られた映像は、解析対象としたい時刻ごとに画像をファイルとして保存し、ピクセル数で表される画像ファイル上

の位置を実際の長さに対応させることによって、変位測定ピン及び水位の位置を0.5mmの精度で求めた。実験装置の概略図をFig.4-4に示す。

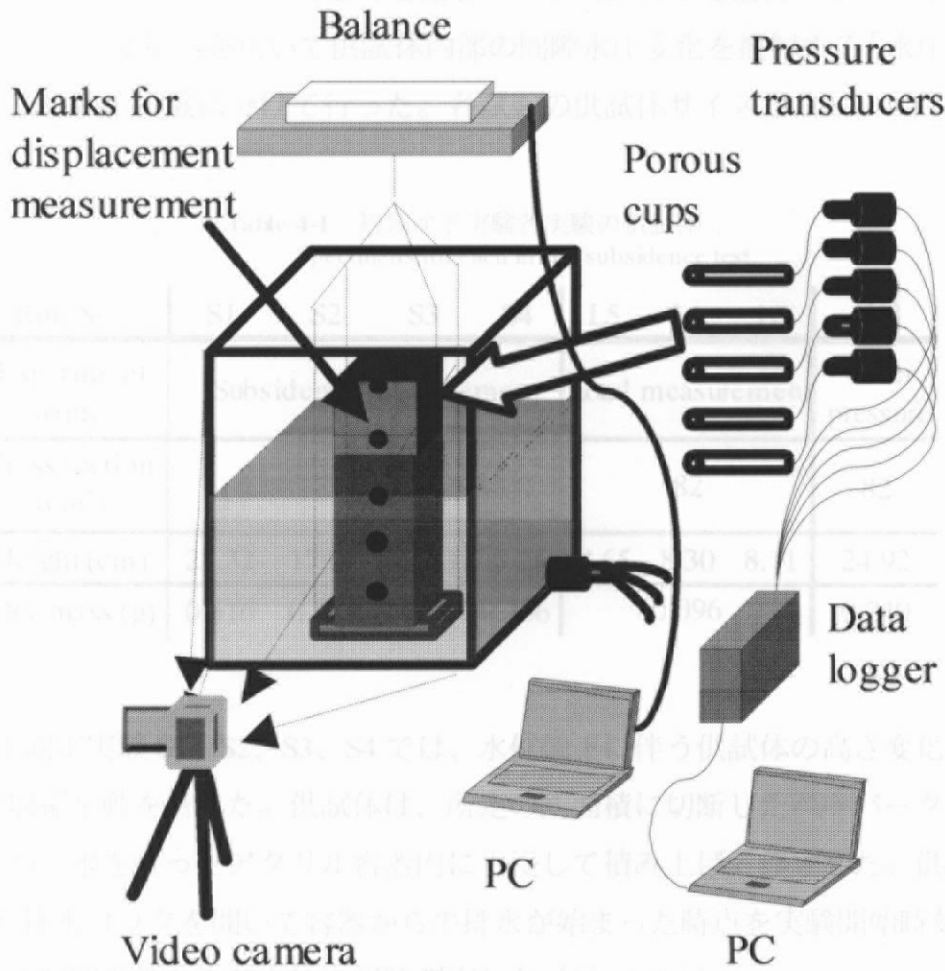


Fig.4-4 初期沈下実験装置図. 行った実験は、沈下挙動のみを測定した沈下測定実験、電子天秤を用いた自重測定実験、圧力変換器を用いた水圧測定実験である。

Equipments for the initial subsidence tests. There are 3 kinds of tests; Subsidence measurement test, Load measurement test and Water pressure measurement test.

実験条件及び実験手順

ペーパータオル供試体の沈下挙動は、側面からのポーラスカップの挿入や、供試体全体の吊り下げといった外乱に対して敏感であると考えられた。そこで、供試体に対する外乱のない状態で初期沈下挙動を把握する「沈下測定実験」、水位低下に伴う供試体底面での有効応力変化をバランスによって把握する「自重測定実験」、及び圧力変換器を用いて供試体内部の間隙水圧変化を把握する「水圧測定実験」の3種類の実験に分けて行った。各試験の供試体サイズを Table 4-1 に示す。

Table 4-1 初期沈下実験各実験の供試体
Specimens for each initial subsidence test.

| Run No. | S1 | S2 | S3 | S4 | L5 | L6 | L7 | W8 |
|----------------------------------|------------------------|-------|-------|-------|------------------|------|------|----------------|
| Experiment name | Subsidence measurement | | | | Load measurement | | | Water pressure |
| Cross section (cm ²) | 326 | | | | 82 | | | 82 |
| Height (cm) | 21.32 | 17.26 | 13.23 | 9.25 | 8.65 | 8.30 | 8.11 | 24.92 |
| Dry mass (g) | 0.516 | 0.413 | 0.310 | 0.206 | 0.096 | | | 0.240 |

沈下測定実験 S1、S2、S3、S4 では、水位低下に伴う供試体の高さ変化および各部の収縮挙動を調べた。供試体は、所定の断面積に切断したペーパータオルを1枚ずつ、水を張ったアクリル容器内に水浸して積み上げて作成した。供試体の飽和後、排水コックを開いて容器からの排水が始まった時点を実験開始時刻とし、供試体の収縮挙動および水位を経時測定した (Photo 4-1)。

自重測定実験 L5、L6、L7 では、電子天秤に吊り下げた台座に Table 4-1 に示した大きさの試料を載せ、沈下測定実験と同様に飽和状態から水位を低下させた。そして電子天秤によって、供試体に作用する重力から浮力を差し引いて得られる値を経時測定した。

電子天秤による測定値は、以下に述べる理由により、供試体底面における有効応力 σ_v に供試体断面積を乗じて得られる値に等しい。まず、高さ L の供試体に対し水面の高さが h である場合を考える (Fig.4-5)。供試体に作用する重力は供試体底面における全応力 $\gamma(L-h) + \gamma_{sat}h$ に供試体の断面積を乗じたものに等しい。ここで

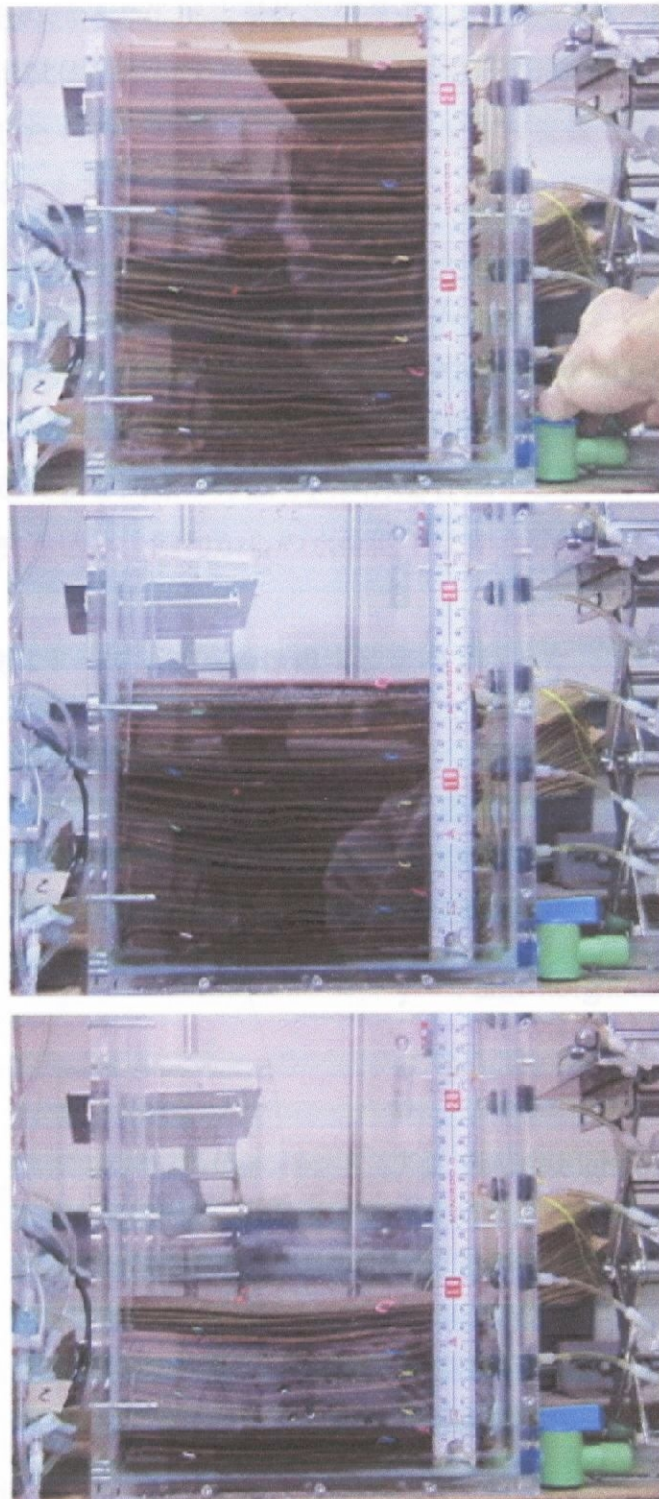


Photo 4-1 ペーパータオルの初期沈下挙動. 実験開始時（上）、水位低下（中）、水位低下ほぼ終了（下）.
Initial subsidence behavior of paper towel specimen. The beginning of a test (top), water table level going down (middle) and the end of water table level reduction (bottom).

γ は水面よりも上の部分の供試体単位体積重量、 γ_{sat} は供試体の飽和単位体積重量である。また、供試体に作用する浮力は供試体底面における間隙水圧 $\gamma_w h$ に供試体の断面積を乗じたものに等しい。 γ_w は水の単位体積重量である。よって、電子天秤によって測定される値は、全応力 $\gamma(L-h) + \gamma_{sat} h$ から間隙水圧 $\gamma_w h$ を差し引いて得られる値、すなわち有効応力に、供試体断面積を乗じた値である。

以上を踏まえ、自重測定実験では電子天秤での測定値を供試体断面積で除することによって供試体底面における有効応力を求め、その時間変化を評価した。

水圧測定実験 W8 では、水位低下中の供試体内部における間隙水圧分布変化を調べた。沈下測定実験と同様の方法で供試体を作成する際に、一定枚数ごとにポラスカップを挟み込み、飽和からの水位低下に伴う間隙水圧分布変化を経時測定した。

これらの実験はすべて、20°Cの恒温実験室内で行った。

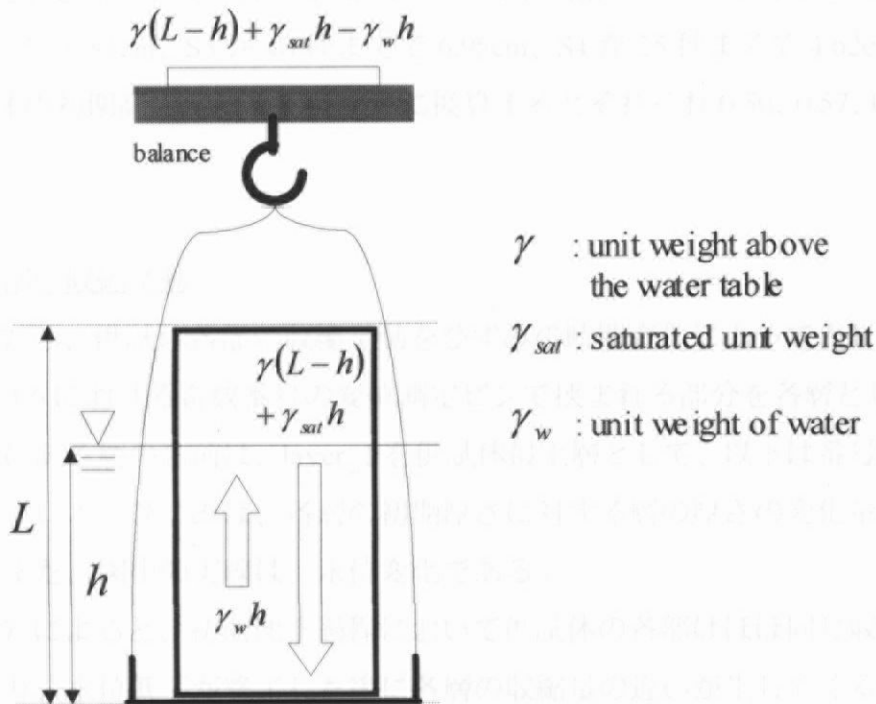


Fig.4-5 自重測定実験L5、L6、L7における供試体底面に作用する有効応力の測定. 電子天秤の測定値は供試体に働く重力から浮力を差し引いたものであり、有効応力に供試体断面積を乗じたものに等しい。

Effective stress measurement in L5,L6,L7. The balance measures the total weight of a specimen from which the buoyant force was subtracted, so that the value measured by the balance is equal to the effective stress multiplied by cross section at the bottom of the specimen.

第四節 結果及び考察

初期沈下の定義

Fig.4-6 は、沈下測定実験 S1、S2、S3、S4 におけるペーパータオル供試体の各部の変位及び水位の時間変化である。凡例中の mark_1 は、ペーパータオル供試体につけた変位測定ピンのうち一番上の、供試体表面につけたものに対応している。以下、番号順に下方の変位測定ピンに対応している。S1、S2、S3、S4 における供試体の初期高さはそれぞれ、21.32cm、17.26cm、13.23cm、9.25cm であった。

いずれの実験においても、水位低下終了の前までは急激な沈下挙動を示し、水位低下終了の後に緩やかな沈下挙動となる傾向が見られた。このような沈下挙動の不連続性は、水位低下終了の前と後とで沈下機構が変化したことを反映している。よって、初期沈下過程とは水位低下中の沈下過程と定義した。

初期沈下過程における沈下量は、S1 が実験開始後 50 秒までで 10.56cm、S2 が 120 秒までで 9.81cm、S3 が 40 秒までで 6.95cm、S4 が 25 秒までで 4.62cm であった。供試体の初期高さに対するひずみに換算するとそれぞれ 0.50、0.57、0.53、0.50 であった。

供試体各部の収縮挙動

Fig.4-7 は、供試体各部の収縮挙動をひずみの時間変化によって表したものである。Fig.4-6 における奇数番号の変位測定ピンで挟まれる部分を各層とし、Fig.4-7 中の凡例にある層の名前は、layer_1 を供試体最上層として、以下は番号順に下の層を表している。ひずみは、各層の初期厚さに対する層の厚さの変化量として計算した。また、図中の実線は、水位変化である。

Fig.4-7 によると、初期沈下過程において供試体の各部はほぼ同じ収縮挙動を示しており、水位低下が終了した後に各層の収縮量の違いが生じてくる傾向が見られた。例えば S2 では水位低下に 120 秒を要したが、最上層である layer_1 の初期沈下挙動は水面が layer_1 を通過した後も続いていた。

初期沈下を生じる圧縮応力は、初期沈下過程の間、供試体全体に作用していたと考えられる。

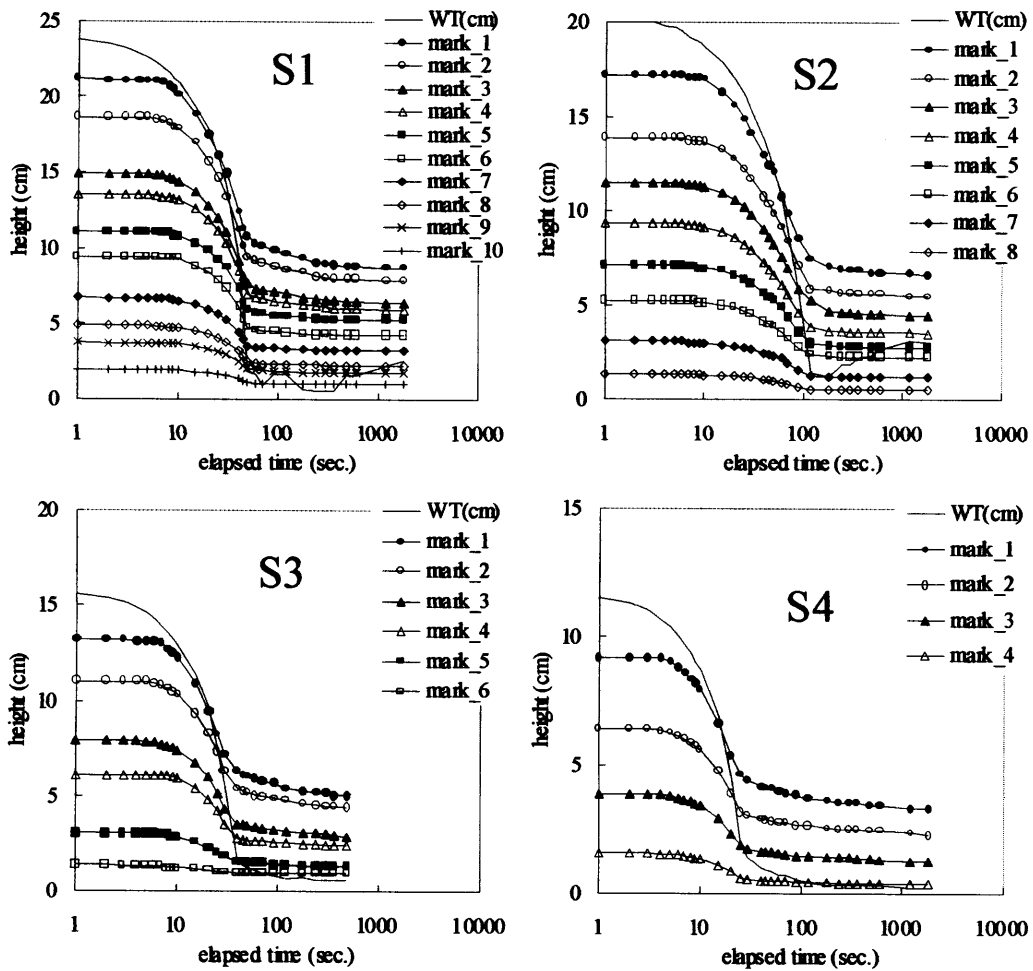


Fig.4-6 沈下測定実験S1、S2、S3、S4における供試体各部の変位及び水位低下。
Subsidence behavior of each part of specimens and water table level down in Subsidence measurement tests S1, S2, S3 and S4.

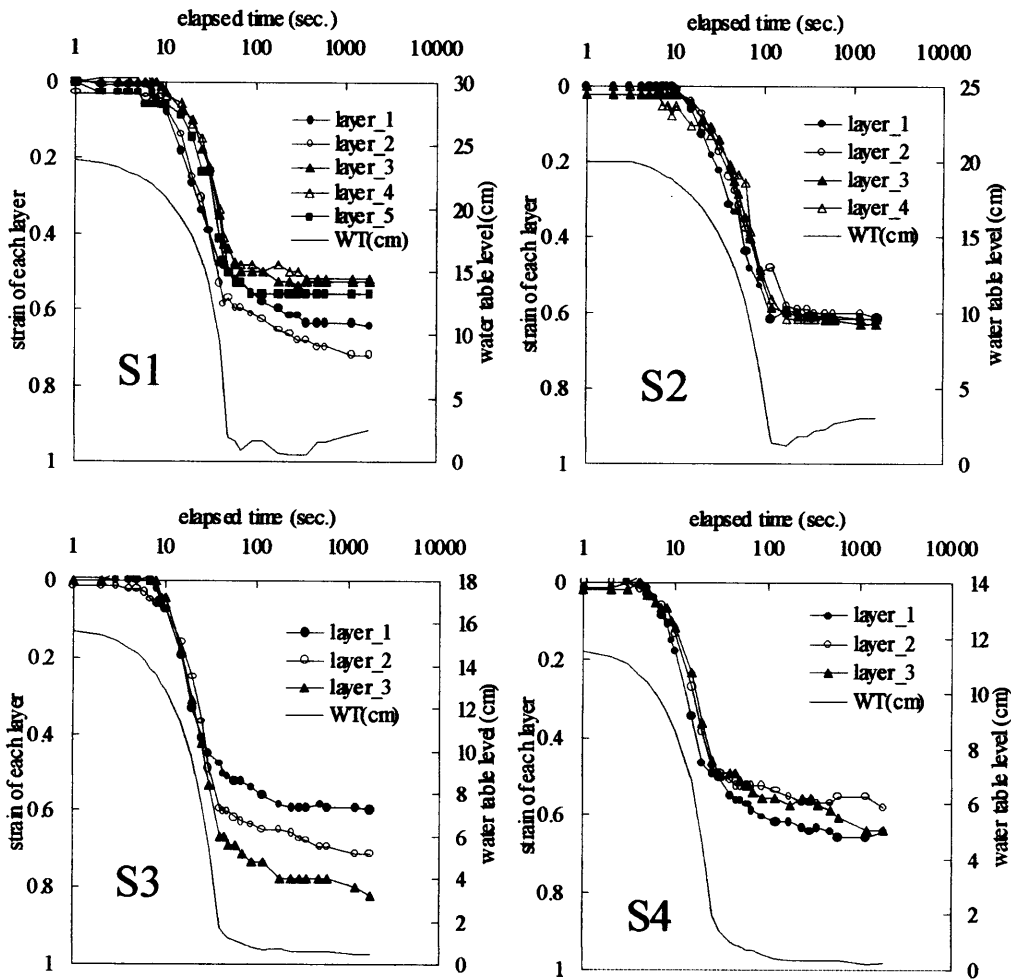


Fig.4-7 沈下測定実験S1、S2、S3、S4における供試体各部のひずみ挙動と水位低下.
Strain behavior of each part of specimens and water table level down in Subsidence measurement tests S1, S2, S3 and S4.

供試体底面における有効応力の増加

Fig.4-8 は、自重測定実験 L5、L6、L7 の結果である。上図は水位低下曲線とこれに伴う供試体底面における有効応力増加曲線であり、凡例の WT は水位低下曲線、ES は有効応力増加曲線をそれぞれ示している。下図は有効応力の増加に対する供試体高さの変化である。

Fig.4-8 上図によると、水位低下と共に有効応力が増加し、その増加量は L5 が 30 秒で 5.83gf/cm^2 、L6 が 150 秒で 5.32gf/cm^2 、L7 が 600 秒で 5.19gf/cm^2 であった。水位低下が終了した後は、有効応力は減少していった。これは、供試体からの排水によって供試体の単位体積重量が減少していったことによるものと考えられる。また、有効応力増加曲線は、水位低下に要した時間に関わらず一定の値に収束する傾向が見られた。これは、供試体の初期高さが L5、L6、L7 の場合で 8.65cm、8.30cm、8.11cm とほぼ変わらず、水位低下後に供試体の保持する水分量にあまり差がなかったことが理由として考えられる。

Fig.4-8 下図によると、有効応力の増加に対する供試体高さの減少はほぼ線形であり、その勾配は L5、L6、L7 の順に $-0.35\text{cm}^3/\text{gf}$ ($R^2 = 0.93$)、 $-0.38\text{cm}^3/\text{gf}$ ($R^2 = 0.91$)、 $-0.36\text{cm}^3/\text{gf}$ ($R^2 = 0.89$) と、いずれの場合にもほぼ同じであった。よって、初期沈下過程においては、供試体底面に作用する有効応力の増加量に供試体の収縮量はほぼ比例すると考えられる。

圧縮応力と沈下挙動との関係については、Fig.4-7 で得られた実験結果から、初期沈下過程における圧縮応力は供試体全体に作用していると考えられた。しかし、ここで実測した有効応力の増加量は供試体底面における値のみである。供試体各部における圧縮応力と収縮挙動との関係を求めて初期沈下の機構を明らかにするためには、初期沈下過程における供試体各部での有効応力変化を把握する必要がある。よって、これを明らかにするために、次節では有効応力の概念を用いて、水位低下に伴う有効応力の増加を供試体全体について定式化する。

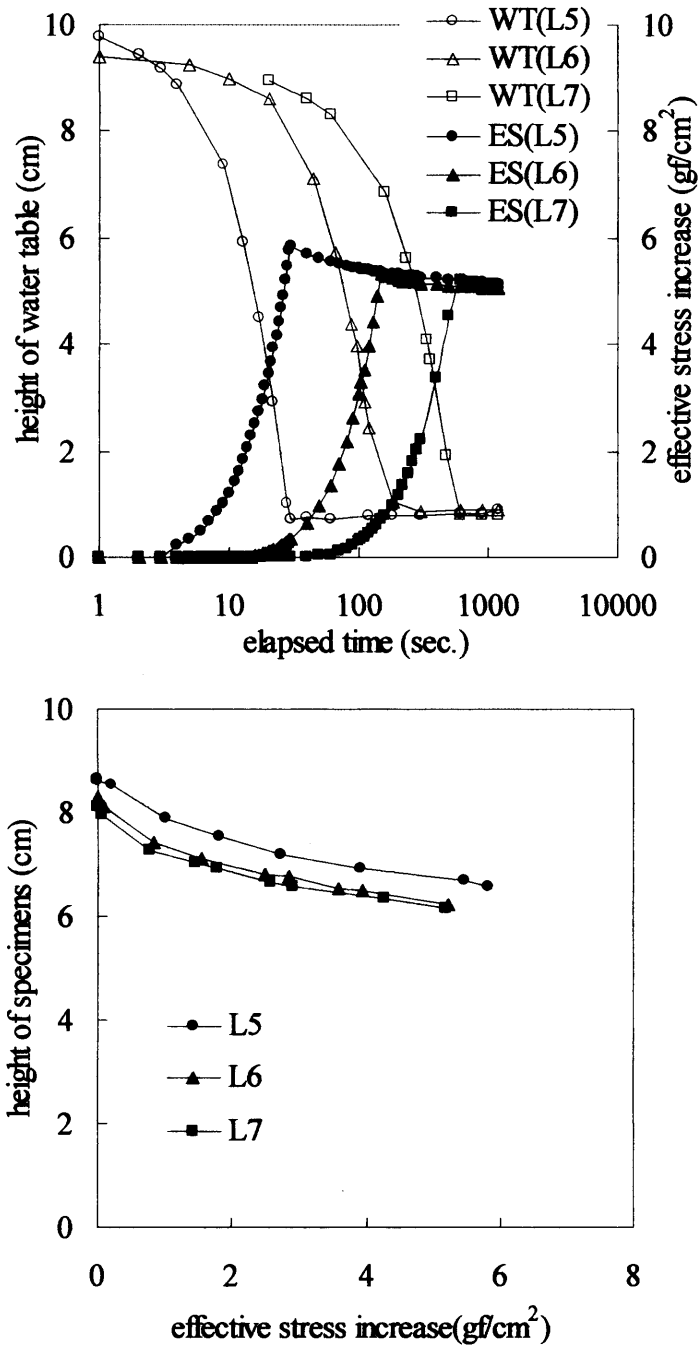


Fig.4-8 水位低下に伴う供試体底面における有効応力の増加（上）及び有効応力増加と供試体高さ変化（下）. 凡例のWTは水位、ESは有効応力を表す.L5、L6、L7は実験名.

Effective stress increase at the bottom of a specimen with water table level down (above) and change of height of specimens with effective stress increase (below). In explanatory notes, WT means water table, and ES means effective stress, respectively. L5, L6 and L7 means run numbers.

初期沈下過程における間隙水圧分布の変化

Fig.4-9 は、水圧測定実験 W8 の結果得られた、実験開始から 1800 秒までの間隙水圧分布の変化である。

間隙水圧が 0cm よりも大きい領域においては、間隙水圧分布は傾きが -1 の直線であった。また、各時刻において間隙水圧が 0cm となる高さは、低下していく水面の高さに一致していた。よって、水位が低下している間であっても、水面よりも下の部分の間隙水圧は静水圧に等しかったといえる。

Fig.4-9 では、実験開始後 40 秒の時点で一番上の圧力測定点の間隙水圧が負の値となっており、水面上に現われていたことがわかる。このとき、上から 2 番目の圧力測定点と一番上の圧力測定点を結んでできる直線の勾配は -0.56 ($R^2 = 1$) であり、間隙水圧分布の勾配が水面よりも上の部分で -1 よりも小さくなっていた。続いて、実験開始後 60 秒および 70 秒では上から 3 番目の圧力測定点までの間隙水圧の値が 0cm 未満となっており、これらよりも上の部分における間隙水圧分布の勾配はそれぞれ、 -0.44 ($R^2 = 0.98$)、 -0.49 ($R^2 = 0.99$) であった。そして、水位低下がほぼ終了した実験開始後 90 秒の時点における間隙水圧勾配は -0.40 ($R^2 = 0.95$) であった。

以上より、初期沈下過程における供試体内部の間隙水圧分布変化についてまとめると、各時点において、水面よりも下の部分では間隙水圧勾配は -1 に等しく、水面よりも上の部分では間隙水圧勾配は -0.4 から -0.6 の間の値をとっていた。また、水位低下が終了した後は、実験開始後 90 秒以降の間隙水圧分布変化に見られるように、間隙水圧勾配を -1 に戻すように排水が進んでいった。そして、1800 秒までで、間隙水圧勾配はほぼ -1 となった。

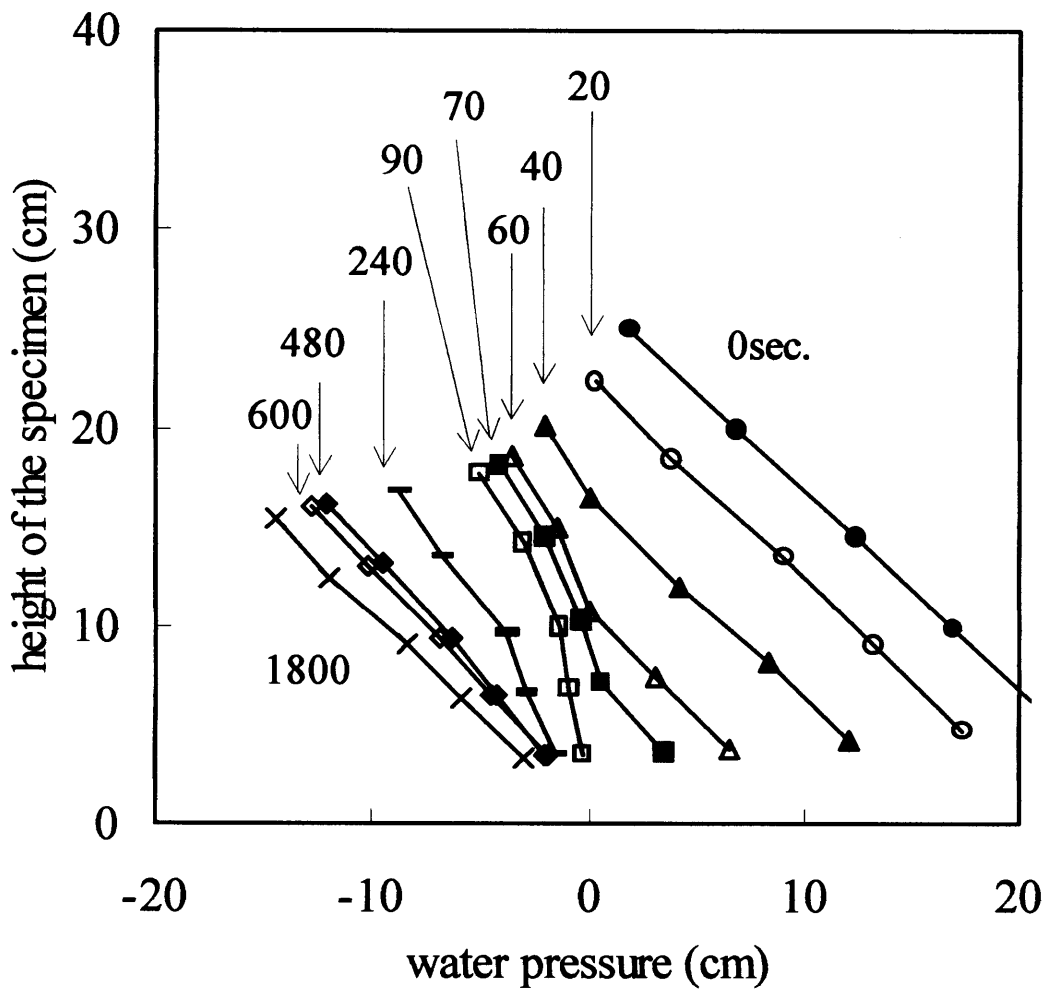


Fig.4-9 水圧測定実験W8での間隙水圧分布変化. 図中の数字は、各分布曲線に対応する実験経過時間で単位は秒.

Pore water pressure distribution change in water pressure measurement test W8.
Numbers in the graph means elapsed time (sec.) for each curves.

第五節 水位低下に伴う有効応力変化の定式化

間隙水圧分布のモデル化

前節の Fig.4-8 下図に表された結果から、初期沈下過程では、供試体底面における有効応力の増加に供試体の高さの変化がほぼ比例していることを見出したが、供試体の各部における有効応力増加とひずみ増加の関係を明らかにするためには、供試体各部における有効応力変化を知る必要がある。

有効応力の増加を把握するためには、有効応力の原理により、間隙水圧分布の変化を知る必要がある。初期沈下過程における実測の間隙水圧分布変化は、水圧測定実験 W8 によって得られた Fig.4-9 のとおりであるが、Fig.4-9 について行った考察を基に、初期沈下過程における間隙水圧分布変化を以下の近似によってモデル化する。

初期沈下過程における間隙水圧分布の勾配は、

1. 水面よりも上の部分において、-1 と 0 の間の値で一定である。
2. 水面よりも下の部分において、-1 である。

これらの近似を用いると、間隙水圧 φ の高さ z に対する勾配 $\frac{\partial \varphi}{\partial z}$ は、

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -c \quad \begin{cases} c = 1 & (z \leq h) \\ 0 < c < 1 & (z > h) \end{cases} \dots \dots \dots (4-6)$$

で与えられ、式(4-6)を高さ z について積分することによって、間隙水圧分布

$$\varphi = -c(z - h) \quad \begin{cases} c = 1 & (z \leq h) \\ 0 < c < 1 & (z > h) \end{cases} \dots \dots \dots (4-7)$$

が得られる。定数 c は、水面より下では 1、水面より上では 1 より小さい正の値を取る。また、 h は時刻 t における水面の高さである。また、初期沈下過程にお

ける供試体内部の排水フラックスは、透水係数 k を用いて次式で表される。

$$q = -ki = -k\left(\frac{\partial\phi}{\partial z} + 1\right) = -k(-c+1) \quad \begin{cases} c=1 & (z \leq h) \\ 0 < c < 1 & (z > h) \end{cases} \dots\dots(4-8)$$

式(4-7)を図示すれば、Fig.4-9 に示した各時刻における実測の間隙水圧分布は、水面において折れ点を持つ直線によってモデル化される (Fig.4-10)。

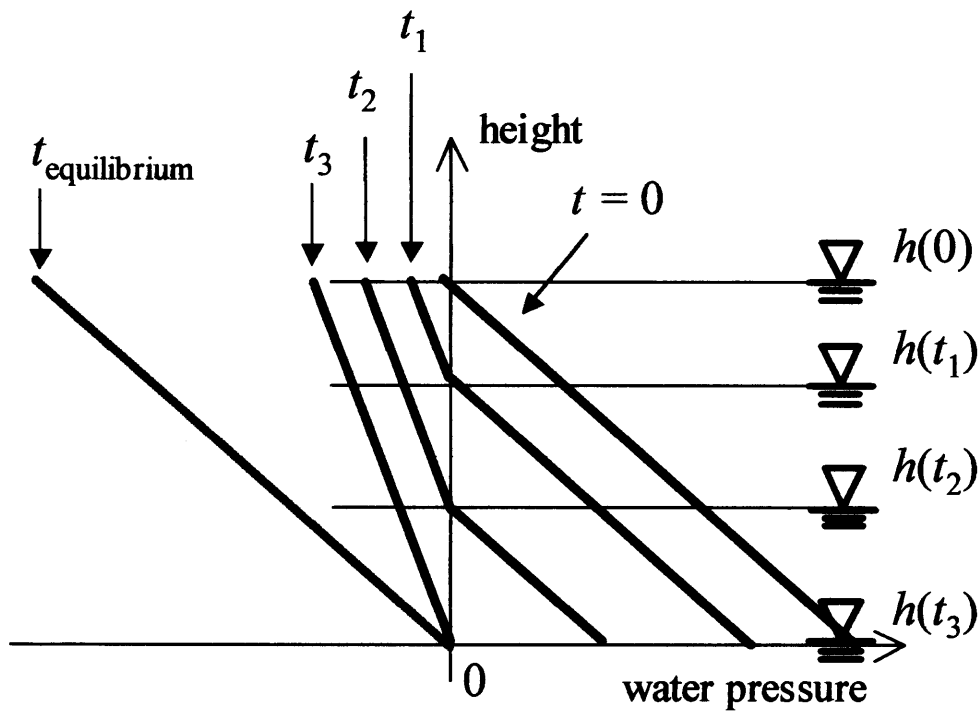


Fig.4-10 モデル化された間隙水圧分布変化. 時刻 t_1, t_2, t_3 において間隙水圧が負の領域では、間隙水圧勾配は $-1 < -c < 0$ であり、間隙水圧が正の領域では $-c = -1$ である。

Model of pore water pressure distribution change. At time t_1, t_2, t_3 , pore water pressure gradient in negative pore water pressure region can be expressed as $-c$ ($-1 < -c < 0$), and in positive pore water pressure region, $-c = -1$.

間隙水圧の時間変化

次に、間隙水圧の時間変化について考察する。式(4-7)を時間 t で微分すると式(4-9)が得られる。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = c \left(\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} \right) = -c(v_w - v_s) \dots \dots \dots (4-9)$$

v_w および v_s はそれぞれ、水位低下速度及び間隙水圧 φ を与える点の低下速度である。式(4-9)で与えられる間隙水圧変化率の性質を調べるために Fig.4-9 を、横軸を経過時間、縦軸を間隙水圧に直して描いた図が Fig.4-11 である。黒の実線は供試体初期高さに対する水位低下曲線である。また、pressure_1 は一番上に位置する圧力変換器による間隙水圧低下曲線であり、以下番号の若い順に供試体下方の間隙水圧低下曲線を表している。赤線はそれぞれ、水位低下曲線の勾配、及び水面よりも上の部分における間隙水圧低下曲線の勾配を求めるために線形回帰した直線であり、これらに付した赤数字がそれぞれ、水位低下速度および間隙水圧の時間変化率を与えている。

Fig.4-11 によると、水位低下速度 v_w は 0.30 cm/sec. ($R^2 = 0.99$) であり、一方、式(4-9)の $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ に相当する、水面よりも上の部分における間隙水圧の時間変化率は、pressure_1、pressure_2、pressure_3 の順に、-0.064 cm/sec. ($R^2 = 0.98$)、-0.059 cm/sec. ($R^2 = 0.98$)、-0.044 cm/sec. ($R^2 = 0.99$) であった。式(4-6)で与えられた c は、Fig.4-9 より 0.4~0.6 程度の値であったことから一定値としてこれを 0.5 とおくと、水圧測定実験 W8 における相対水位低下速度 $v_w - v_s$ の値は、式(4-9)より、pressure_1、pressure_2、pressure_3 の順に、0.13cm/sec.、0.12cm/sec.、0.09cm/sec. と見積もられ、水位低下速度 v_w の実測値である 0.30 cm/sec. のおよそ 1/3 程度であったことがわかる。以上の実験結果より、式(4-9)は次のように書き直すことができる。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -c(1 - c)v_w \dots \dots \dots (4-10)$$

定数 c' の性質

Fig.4-12 は式(4-7)を、ある時刻 t にて、 z の値を変えて図示したものである。時刻 t における $c'=1$ であるという c' は、間隙水圧勾配が -1 であり、

$$c' = \frac{v_s}{v_w} \dots \dots \dots (4-11)$$

平衡状態のまま準静的に水位低下が生じた場合に対応している。一方、 $c'=0$ は、

水圧測定実験 W8 では、式(4-11)で与えられる c' が、位置 z によって異なるものの概ね 2/3 程度であり、供試体各部の変位速度である v_s の大きさが水位低下速度 v_w に比べて無視できない、大変形現象であったといえる。

低下速度 $v_w \rightarrow -v_w$ に等しく、 $c'=0$ のときには間隙水圧低下速度は 0 であることから

も分かる。また、 $c'=1$ のときは、 v_w の大きさが増える。

の大きさが増える。

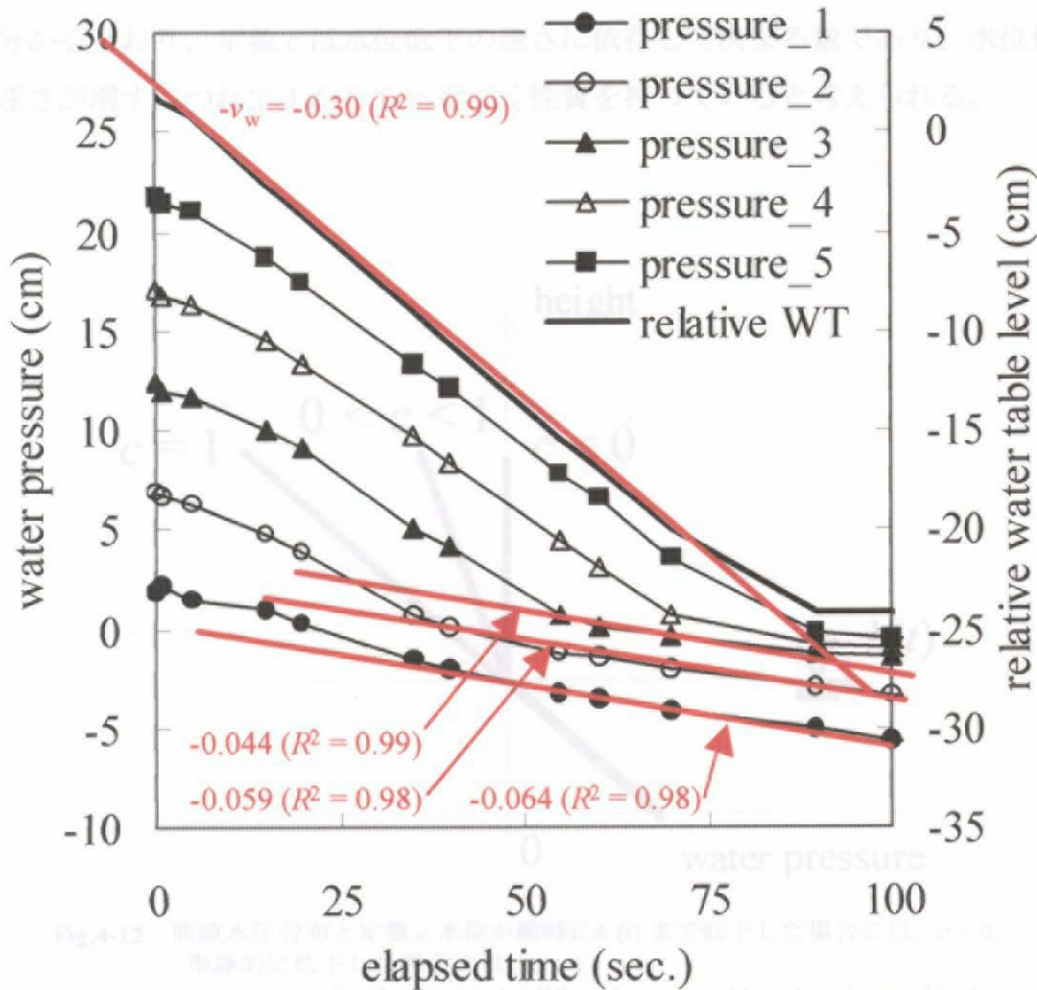


Fig.4-11 実測の間隙水圧変化とその勾配。凡例のpressure_1は一番上の圧力測定点を表し、以下順に下方の圧力測定点。実線は供試体初期高さに対する水位低下量。赤線に付した数字はそれぞれの勾配および決定係数である。

Rates of mesured pore water pressure change. In the explainer notes, pressure_1 means the pressure measurement point which was set at the highest plance of all. The higher the pressure point was, the younger the number of pressure measurement point is. Thick black line shows relative water table level down. The number for each red line indicates the rate of water pressure change and its determination coefficient.

定数 c の性質

Fig.4-12 は式(4-7)を、ある時刻 t について、 c の値を変えて図示したものである。時刻 t において $c=1$ であるということは、間隙水圧勾配が -1 であり、ほぼ平衡状態のまま準静的に水位低下が生じた場合に対応している。一方、 $c=0$ は、水位が瞬間的に $z=h$ まで移動した場合に対応しているといえる。また、式(4-9)で与えられる間隙水圧低下速度 $-\frac{\partial \phi}{\partial t}$ の値がそれぞれ、 $c=1$ のときには相対水位低下速度 $v_w - v_s$ に等しく、 $c=0$ のときには間隙水圧低下速度は 0 であることから分かるとおり、定数 c は水位低下の速さに依存して決まる数であり、水位低下の速さが増すにつれて 1 から 0 へ近づく性質を持っていると考えられる。

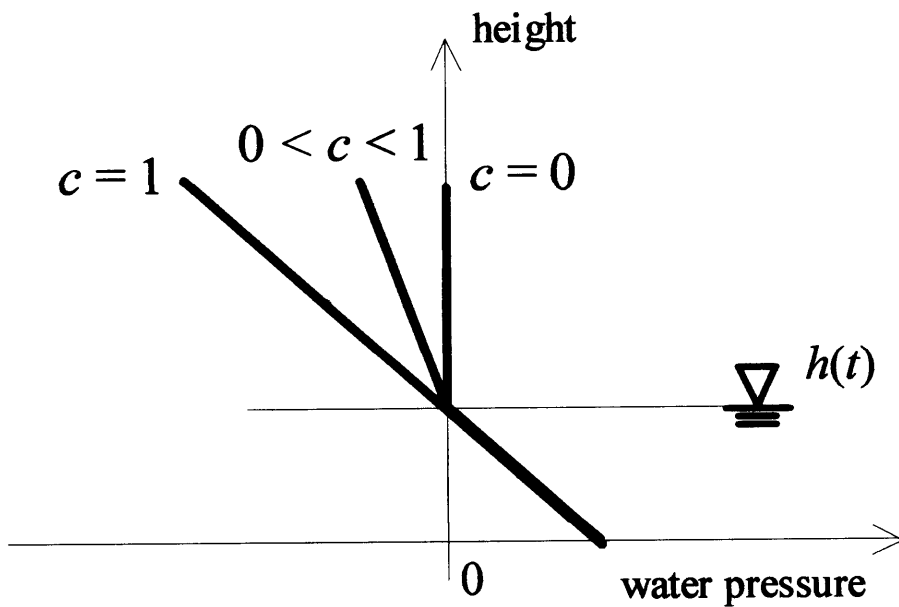


Fig.4-12 間隙水圧分布と定数 c . 水位が瞬時に $h(t)$ まで低下した場合には、 $c=0$ 、準静的に低下した場合には、 $c=1$.

Pore water pressure distributions and c . When the water table reduced immediately to $h(t)$, $c=0$, while the water table reduced in a quasi-equilibrium way, $c=1$.

有効応力分布

飽和土における鉛直一次元方向の応力については、Terzaghi の有効応力の定義から、次式のような関係がある。

$$\sigma = \sigma' + u_w \dots \dots \dots (4-12)$$

ここで、 σ は全応力、 u_w は間隙水圧、 σ' は有効応力である。

式(4-12)を不飽和土に対して適用するためには、間隙水圧 u_w の全応力 σ への貢献の度合いを如何にして評価するか、が焦点となる。これについて、Bishop and Blight(1963)は次式を提案した。

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \dots \dots \dots (4-13)$$

ここで、 u_a は間隙空気圧である。

式(4-13)の関係は、以下のように説明できる (土質工学会, 1993)。不飽和土中に面積 S_{total} のある水平断面を考える。このうち液相の占める断面積を S_w 、固相の占める断面積を S_s とすると、この水平断面に対して垂直方向の応力の釣り合いは全応力 σ 、間隙水圧 u_w 、間隙空気圧 u_a 、そして有効応力 σ' を用いて次式のように表される。

$$\sigma S_{total} = \sigma' S_{total} + u_a (S_{total} - S_w - S_s) + u_w S_w \dots \dots \dots (4-14)$$

ここで、 $s = \frac{S_s}{S_{total}}$ 、 $\chi = \frac{S_w}{S_{total}}$ とおき、式(4-14)の両辺を S_{total} で割ると次式が得られる。

$$\sigma = \sigma' + u_a (1 - \chi - s) + u_w \chi \dots \dots \dots (4-15)$$

通常、固相の占める断面積は無視できる大きさであることから、式(4-15)において s は 0 とできる。よって、式(4-15)に $s = 0$ を代入し、 σ' について整理すると式(4-13)が導かれる。

式(4-13)の間隙空気圧 u_a については、初期沈下過程における不飽和部分の間隙空気圧を大気圧に等しいと考えれば、大気圧を圧力の基準とすることによって 0 とおくことができる。よって、式(4-13)は次式のように簡略化できる。

$$\sigma' = \sigma - \chi u_w \dots \dots \dots (4-16)$$

χ は、 $\chi = \frac{S_w}{S_{total}}$ という定義から飽和度に強く依存する係数であり、飽和の場合に 1、含水率が 0% の場合に 0 をとる。初期沈下過程では供試体内部は飽和に近い状態であることから、式(4-16)の χ を 1 とおくと次式を得る。

$$\sigma' = \sigma - u_w \dots \dots \dots (4-17)$$

また、応力の次元を持つ間隙水圧 u_w は、式(4-7)の間隙水圧 φ に水の単位体積重量 γ_w を乗じたものであるから、式(4-17)は、

$$\sigma' = \sigma + \gamma_w c(z-h) \quad \begin{cases} c=1 & (z \leq h) \\ 0 < c < 1 & (z > h) \end{cases} \dots \dots \dots (4-18)$$

として表される。

式(4-18)より、有効応力の分布は、水面の高さ h において折れ点を持つ分布としてモデル化される。Fig.4-13 は、時刻 $t=0$ 及び時刻 t における応力分布のモデル図である。ここで、全応力勾配は、水面よりも下の部分では飽和単位体積重量 γ_{sat} 、水面よりも上の部分では γ_{sat} よりも小さい値である単位体積重量 γ として与えた。図中、灰色線群は時刻 $t=0$ 、赤色線群は時刻 t における応力分布を表しており、点線が全応力、細実線が間隙水圧、太実線が有効応力を表している。水位が $h(0)$ から $h(t)$ に低下する際の、有効応力の増加を示している。

式(4-18)に伴う有効応力の時間変化

式(4-18)を時間 t で微分し、式(4-9)、(4-10)、(4-11)を用いると、式(4-19)が得られる。

$$\frac{d\sigma_e}{dt} = -\frac{\sigma_e}{h} \frac{dh}{dt} \quad (4-19)$$

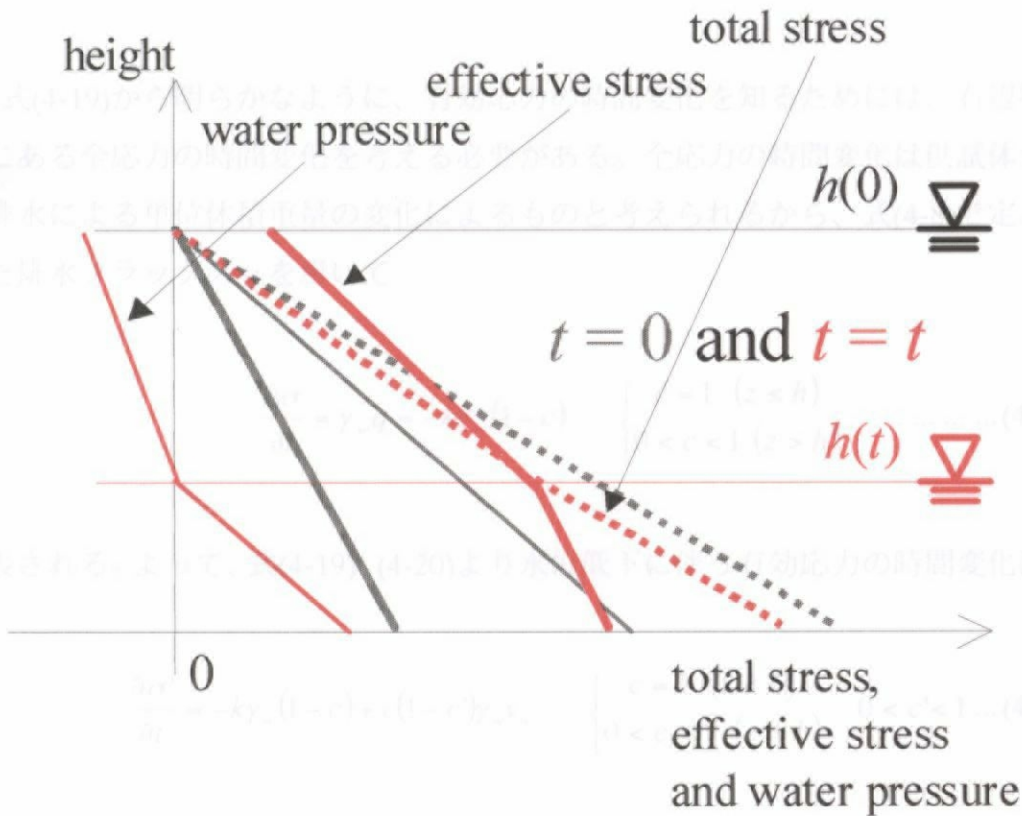


Fig.4-13 式(4-18)から得られる応力分布. 灰色は初期状態、赤が時刻 t の分布を表し、それぞれ点線が全応力、細線が間隙水圧、太線が有効応力を表す。
 Stress distribution determined from Eq. (4-18). Gray lines and red lines indicates the initial condition and a condition at time t , respectively. In each condition, dotted line means total stress, thin line means pore water pressure and thick line means effective stress.

水位低下に伴う有効応力の時間変化

式(4-18)を時間で微分し、式(4-9)、(4-10)、(4-11)を用いると、次式が得られる。

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + c(c'-1)\gamma_w v_w \dots \dots \dots (4-19)$$

式(4-19)から明らかなように、有効応力の時間変化を知るためには、右辺第1項にある全応力の時間変化を考える必要がある。全応力の時間変化は供試体からの排水による単位体積重量の変化によるものと考えられるから、式(4-8)で定義された排水フラックス q を用いて

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \gamma_w q = -k\gamma_w(1-c) \begin{cases} c=1 & (z \leq h) \\ 0 < c < 1 & (z > h) \end{cases} \dots \dots \dots (4-20)$$

と表される。よって、式(4-19)、(4-20)より水位低下に伴う有効応力の時間変化は、

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = -k\gamma_w(1-c) + c(1-c')\gamma_w v_w \begin{cases} c=1 & (z \leq h) \\ 0 < c < 1 & (z > h) \end{cases} \quad 0 < c' < 1 \dots (4-21)$$

として、透水係数 k と水位低下速度 v_w を用いて定式化することができた。

第六節 まとめ

泥炭土の初期沈下挙動を模するための試料としてペーパータオルを選んだ。そして飽和含水比、真比重、飽和透水係数、及び水分特性曲線を測定し、初期沈下実験の模擬試料としての適性を確認した。

そして、初期沈下過程の機構を明らかにするために、ペーパータオルを積み上げて作成した供試体を用いて、沈下測定実験、自重測定実験、及び水圧測定実験を行った。

沈下測定実験の結果、初期沈下過程を水位低下中の沈下過程と定義できることを明らかにした。また、自重測定実験の結果、水位低下に伴う浮力の喪失により、有効応力が増加することを確認した。

さらに、初期沈下過程における時間ひずみ曲線は、供試体各部でほぼ同じであることを確認した。このことから、水位低下中の有効応力の増加が供試体全体において生じていることを予想した。

そこで、水圧測定実験の結果を基に間隙水圧分布の変化をモデル化して、供試体の各部における有効応力分布の変化を把握することを試みた。その結果、有効応力分布の時間変化を、透水係数及び水位低下速度を用いて定式化することができた。

第五章 初期沈下挙動のモデル

第一節 はじめに

本章では、第四章で明らかになった初期沈下の機構を基に初期沈下挙動のモデルを導出し、モデルが第四章の初期沈下実験の結果である実測の初期沈下曲線に適合することを確認する。

さらに、モデルを実際規模の沈下に対して適用するためのスケール効果について考察し、モデルの泥炭地盤への適用可能性を検討する。

第二節 初期沈下挙動のモデル化

有効応力の時間増加率について

第四章において、初期沈下過程における有効応力の時間変化を

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = -k\gamma_w(1-c) + c(1-c')\gamma_w v_w \quad \begin{cases} c=1 & (z \leq h) \\ 0 < c < 1 & (z > h) \end{cases} \quad 0 < c' < 1 \dots (4-21)$$

として定式化した。この、式(4-21)において、透水係数 k の水位低下の速さ v_w に対する比を、

$$c'' = \frac{k}{v_w} \dots \dots \dots (5-1)$$

とすると、次式、

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = [-c''(1-c) + c(1-c')]\gamma_w v_w \dots \dots \dots (5-2)$$

が得られる。

式(5-2)の右辺における c' 、 c'' は、それぞれの定義式(4-11)、(5-1)より、供試体における位置によって変化する値と考えられ、供試体各部の有効応力-ひずみ関係を考えることは容易ではない。しかし、供試体全体の有効応力-ひずみ関係は、式(5-2)の両辺を供試体の底面 $z=0$ からある時刻の供試体最上部 $z=L$ まで積分することによって、以下のように導くことができる。まず、

$$\int_0^L \frac{\partial \sigma'}{\partial t} dz = \gamma_w v_w \int_0^L [-c''(1-c) + c(1-c')] dz \dots \dots \dots (5-3)$$

が得られる。ここで、有効応力は時間、場所に対してともに連続であるから、式(5-3)の左辺は、

$$\int_0^L \frac{\partial \sigma'}{\partial t} dz = \frac{d}{dt} \int_0^L \sigma' dz \dots \dots \dots (5-4)$$

とできる。式(5-4)右辺の積分を供試体高さ L で除したものは、供試体全体にかかる平均の有効応力である。これを $\Delta \sigma'$ とおくと、式(5-3)の両辺を供試体高さ L で除して、次式が得られる。

$$\frac{d\Delta \sigma'}{dt} = A v_w \dots \dots \dots (5-5)$$

ここで、 A を次式のようにおいた。

$$A = \frac{\gamma_w}{L} \int_0^L [-c''(1-c) + c(1-c')] dz \dots \dots \dots (5-6)$$

初期沈下モデルの原型

第四章第四節の Fig.4-8 下図に表された結果から、初期沈下過程において、有効応力の増加にひずみの増加は比例すると近似することができ、次式で表される。

$$-B \frac{dL}{L} = d\Delta\sigma' \dots \dots \dots (5-7)$$

ここで、 L は時刻 t における供試体の高さである。

式(5-5)及び(5-7)から $\Delta\sigma'$ を消去して得られる微分方程式を解くことにより、

$$L = L_0 e^{-\int_0^t \frac{B}{A} v_w dt} \dots \dots \dots (5-8)$$

のように、供試体の初期高さ L_0 を用いて、初期沈下過程中の時刻 t における供試体の高さ L を与える式が導かれた。式(5-8)を、初期沈下モデルの原型とする。

第三節 模擬試料による試験結果との比較

式(5-8)を検証するために、第四章第四節の Fig.4-6 で与えられた S1、S2、S3 及び S4 の初期沈下挙動に適用したものが Fig.5-1 である。適用に際しては、

$$E = \frac{B}{A} \dots \dots \dots (5-9)$$

として、 E が時間に関して一定である、という仮定をおいた。この仮定の下で式(5-8)は、

$$L = L_0 e^{-\frac{1}{E_0} \int_0^t v_w dt} \dots \dots \dots (5-10)$$

と表すことができ、 E がフィッティングパラメータとなる。以降、式(5-9)の E を変形係数と呼ぶ。Fig.5-1では E の値を、S1、S2、S3、S4のそれぞれに対して25.5、20.9、16.4、12.7として、それぞれ実測の初期沈下曲線に合致した。以降、式(5-10)を初期沈下モデルと呼ぶ。

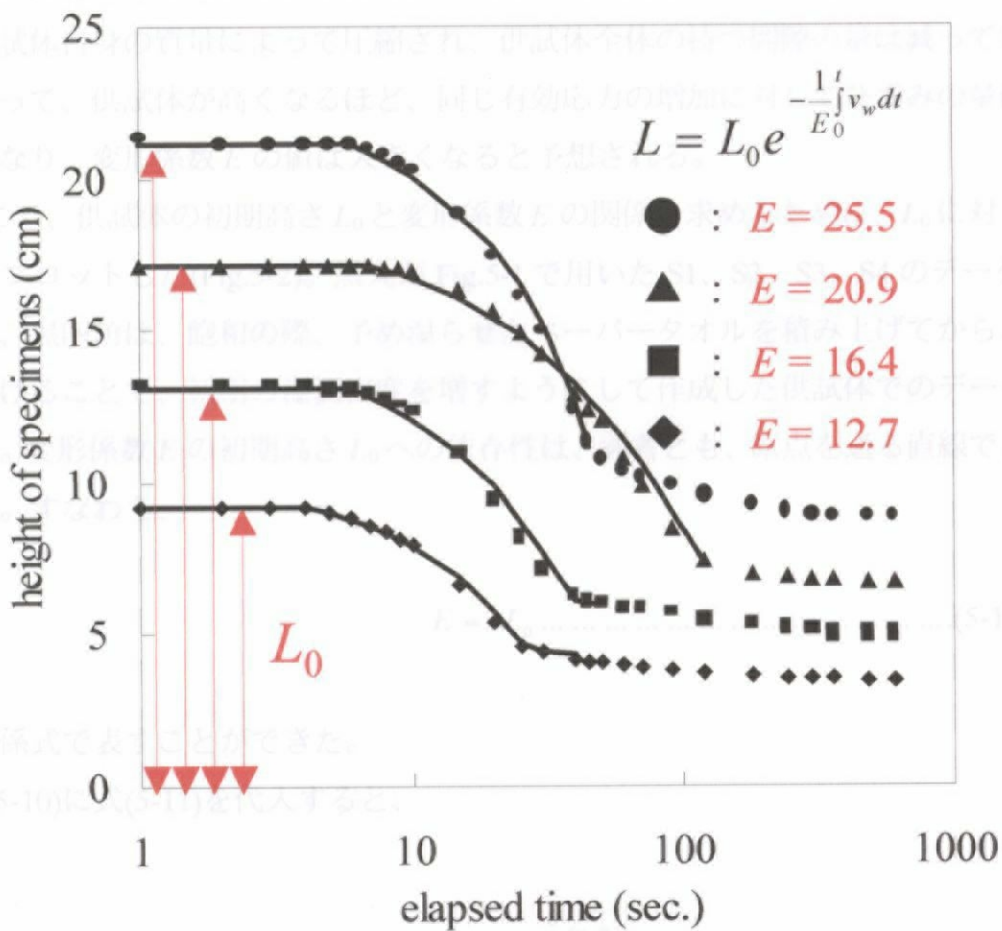


Fig.5-1 初期沈下モデルと実測の初期沈下挙動S1(●)、S2(▲)、S3(■)、S4(◆) (第四章第四節のFig.4-5より)。それぞれの E は、初期沈下モデル式の中の変形係数 E の適合値。

Initial subsidence model and measured data S1(●), S2(▲), S3(■), S4(◆) (from Fig.4-5 in Chap.4 Section 4). Each E value is a deformation coefficient value to fit the model equation to a measured data set.

第四節 初期沈下モデルの性質

変形係数 E と供試体初期高さ L_0 の関係

変形係数 E は、式(5-9)における定義から、式(5-7)で与えられた係数 B に比例しており、有効応力が増加したときの供試体のひずみにくさを表す係数であるといえる。初期沈下の量は、供試体が初期状態において抱えている大間隙の量に強く影響されると考えられる。そして、供試体の初期高さを増すほど、供試体の下部は供試体自身の質量によって圧縮され、供試体全体の持つ間隙の量は減っていく。よって、供試体が高くなるほど、同じ有効応力の増加に対してひずみの量は小さくなり、変形係数 E の値は大きくなると予想される。

そこで、供試体の初期高さ L_0 と変形係数 E の関係を求めるために、 L_0 に対して E をプロットした(Fig.5-2)。黒丸が Fig.5-1 で用いた S1、S2、S3、S4 のデータであり、黒四角は、飽和の際、予め湿らせたペーパータオルを積み上げてから水位を上げることで、初期の湿潤密度を増すようにして作成した供試体でのデータである。変形係数 E の初期高さ L_0 への依存性は、両者とも、原点を通る直線で表された。すなわち、

$$E = aL_0 \dots \dots \dots (5-11)$$

なる関係式で表すことができた。

式(5-10)に式(5-11)を代入すると、

$$L = L_0 e^{-\frac{1}{aL_0} \int v_w dt} \dots \dots \dots (5-12)$$

を得る。

供試体の初期高さ L_0 は、実際の地盤においては初期層厚に相当する。よって、変形係数 E と初期層厚 L_0 との間関係が式(5-11)のように与えられれば、初期沈下モデル(5-10)を実際規模の地盤へ適用することができる。

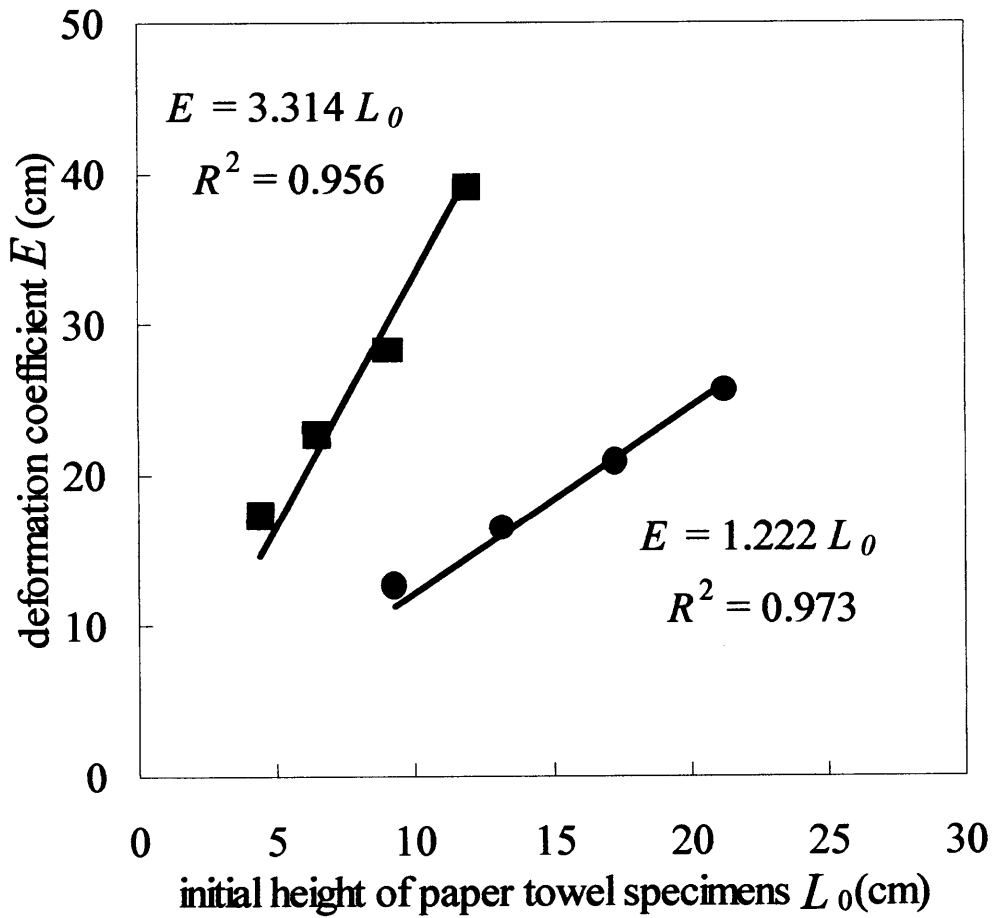


Fig.5-2 変形係数 E の初期高さ L_0 依存性。●はFig.5-1のS1、S2、S3、S4による。
■は供試体作成時に●の場合よりも湿潤密度を増して同様の実験を行った場合。

Relationships between initial height L_0 and deformation coefficient E . Data set of ● is from Fig. 5-1 while data set of ■ is measured using specimens with higher initial wet density than specimens for ●.

初期層厚 L_0 が初期沈下量に与える影響

式(5-12)において、 $\int_0^t v_w dt$ は時刻 t までの水位低下量である。よって、最終的な水位低下量を Δh とすると、このときの層厚は、

$$L' = L_0 e^{-\frac{\Delta h}{aL_0}} \dots \dots \dots (5-13)$$

で与えられ、初期沈下量の最終的な値は、

$$s = L_0 - L' = L_0 \left(1 - e^{-\frac{\Delta h}{aL_0}} \right) \dots \dots \dots (5-14)$$

と表される。式(5-14)は、最終的な初期沈下量 s が、初期層厚 L_0 と水位低下量 Δh から予測できることを示している。

式(5-14)において初期層厚 L_0 を大きくしていくと、初期沈下量は、

$$\lim_{L_0 \rightarrow \infty} s = \frac{\Delta h}{a} \dots \dots \dots (5-15)$$

なる極限值を取ることがわかる。

この式(5-15)については、以下のような解釈ができる。初期層厚 L_0 が大きくなると、水位低下以前の堆積の段階においてすでに、土層の最下部は堆積に伴う圧縮を受けて初期沈下に貢献しうる間隙を失っていると考えられる。よって、初期層厚がある程度より大きくなると、その後の初期層厚の増加は初期沈下に貢献しない下層部を増やすのみで、初期沈下に大きく貢献する部分は土層上部の限られた深さまでとなる。すなわち、初期沈下量はある値に漸近していく (Fig.5-3)。式(5-15)は、この漸近値を与えていると考えられる。

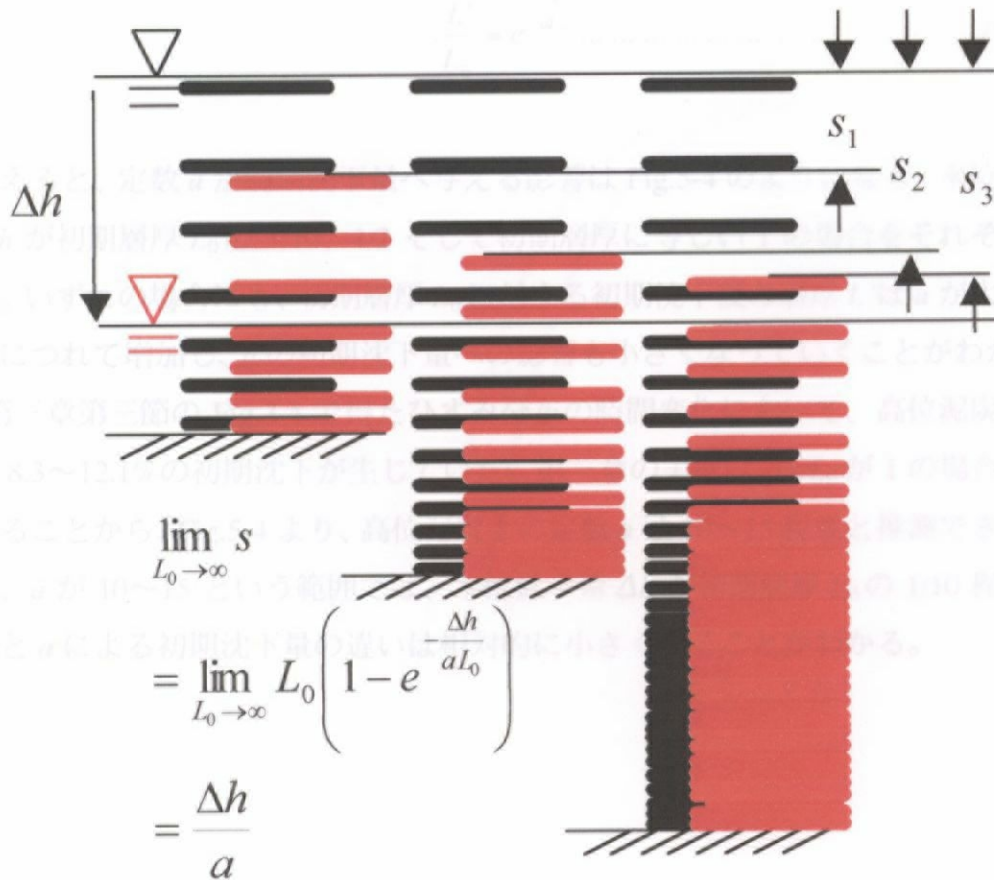


Fig.5-3 初期層厚の初期沈下量への影響の考察. 初期層厚が小さいうちは、初期沈下量に貢献する間隙量が初期層厚の増加と共に増えるために最終的な初期沈下量は増加する（左端図 s_1 から中央の図 s_2 へ）が、ある程度の初期層厚になると大間隙を持たない層の厚さが増え始めて初期沈下量の増加は頭打ちになっていく（中央の図 s_2 から右端 s_3 へ）.

Effect of initial layer thickness on the amount of initial subsidence. Firstly the amount of initial subsidence increases with the increase of initial layer thickness, since large pore space increases (from the left column, s_1 to the center column, s_2). However after initial layer thickness increases to some extent, thickness of layer without large pore space starts to increase (from the center column, s_2 to the right column, s_3) so that the amount of initial subsidence converge to the value $\Delta h/a$.

定数 a が初期沈下量へ与える影響

式(5-13)を変形して、初期層厚 L_0 に対する初期沈下後の層厚 L' の比

$$\frac{L'}{L_0} = e^{-\frac{Nh}{aL_0}} \dots \dots \dots (5-16)$$

を考えると、定数 a が初期沈下量へ与える影響は Fig.5-4 のようになる。水位低下量 Δh が初期層厚 L_0 の 1/10、1/2 そして初期層厚に等しい 1 の場合をそれぞれ示した。いずれの場合にも、初期層厚 L_0 に対する初期沈下後の層厚 L' は a が大きくなるにつれて増加し、 a の初期沈下量への影響も小さくなっていくことがわかる。

第三章第三節の Fig.3-4 で得たひずみ分布の時間変化において、高位泥炭土層では 8.3~12.1%の初期沈下が生じていた。第三章の実験は $\Delta h/L_0$ が 1 の場合に相当することから、Fig.5-4 より、高位泥炭土の定数 a は 10~15 程度と推測できる。また、 a が 10~15 という範囲では、水位低下量 Δh が初期層厚 L_0 の 1/10 程度になると a による初期沈下量の違いは相対的に小さくなることがわかる。

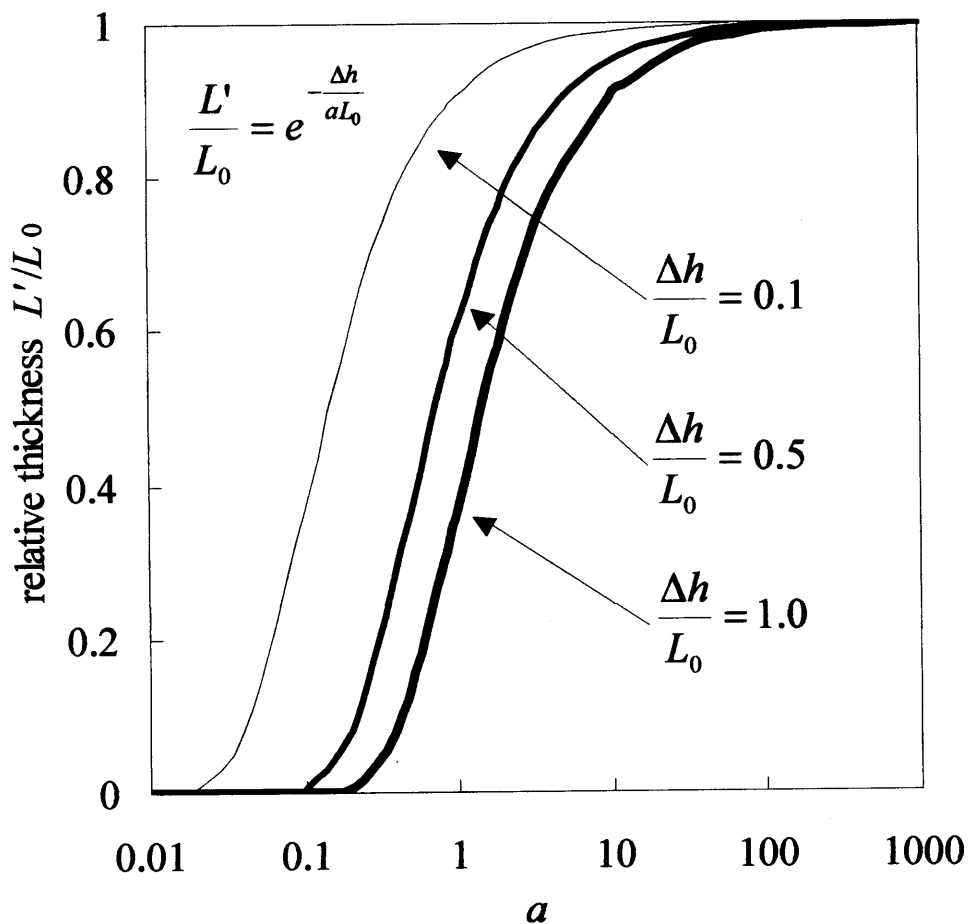


Fig.5-4 定数 a の初期沈下量への影響. 水位低下量 Δh の初期層厚 L_0 に対する比が0.1、0.5、1.0の場合について、 a の変化に対する初期沈下後の相対層厚 L'/L_0 の変化によって表した.

Effects of constant a on the amount of initial subsidence, expressed as the change of L'/L_0 with the change of a for cases of $\Delta h/L_0 = 0.1, 0.5, 1.0$.

第五節 初期沈下モデルの泥炭土供試体への適用

前節までで、ペーパータオル供試体を用いて初期沈下実験を行い、その結果を基にして式(5-10)のように初期沈下モデルを導いた。そこで、泥炭土供試体も同様の初期沈下挙動を示すこと、及び初期沈下モデルが泥炭土に対しても適用できることを確認する必要がある。

そこで、深さ 22~39cm の部分に相当する高位泥炭土の不攪乱柱状供試体を用いて初期沈下実験を行いたところ、Fig.5-5 のような初期沈下曲線を得た。ペーパータオル供試体と同様の形状の時間沈下曲線であることから、高位泥炭土もまた、初期沈下挙動を示すことが明らかとなった。

そこで、高位泥炭土供試体においても式(5-11)が成り立つとして、これらの実測の時間沈下曲線に対して式(5-12)で与えられるモデルを適用したところ、定数 a を 10 及び 12 としてよい適合を示した。2 つの供試体は、共に美唄湿原の深さ 22-39cm から採取した試料であったが、 $a = 10$ を与えた供試体では樽前火山灰層の混入がほとんど見られなかったのに対し、 $a = 12$ を与えた供試体に火山灰の混入がより顕著であった。定数 a は、式(5-6)、(5-8)、(5-10)の一連の式で定義されるように、値が小さいほど供試体がひずみやすいことを示しており、以上の 2 供試体から得られた結果は Fig.3-4 で得られた、火山灰の混入により高位泥炭土層の収縮量は減少する、という結果と一致する。

また、いずれの値も、第三章の沈下実験結果と前節の Fig.5-4 から推測された a の範囲 10~15 に含まれる値であり、妥当な値と考えられる。

第4節 まとめ

第4節で定式化した有効応力分布の時間変化から、初期沈下過程では有効応力の時間増分は水圧伝達係数に比例する、という関係を得き、これを、有効応力増分に供試体のひずみの増分は比例する、という仮定を併せて初期沈下挙動を表すモデルとした。

得られたモデルは、第4章の図5-4に示した高モア泥炭土試体の初期沈下挙動をよよく説明した。

また、モア泥炭土試体の初期沈下挙動の測定結果と、このモデルによる計算結果とを比較し、その一致を見出し、これを実験的に検証した。この実験結果と初期沈下モデルとの関係により、モデルの適用範囲への適用法が明らかになった。初期沈下モデルが、高モア泥炭土試体の初期沈下挙動にも適用できることを実験的に検証し、泥炭土の挙動モデルを定めた。

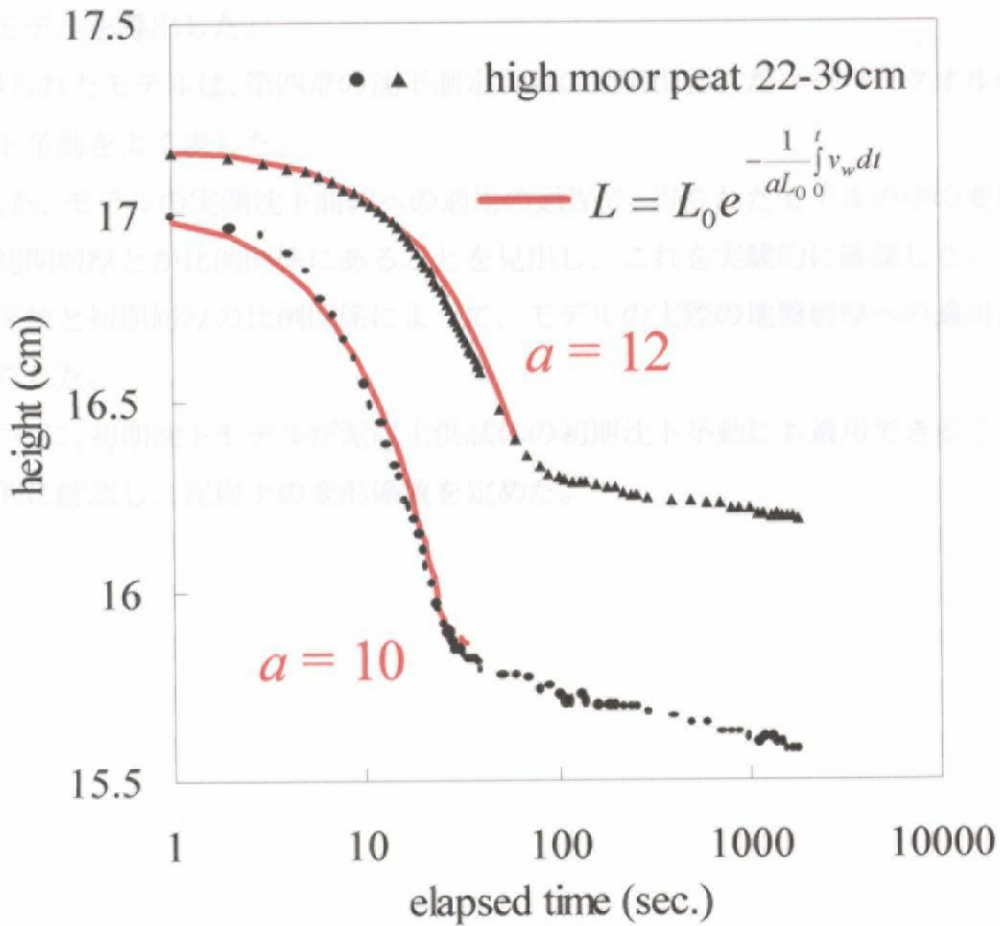


Fig.5-5 高位泥炭土供試体（深さ22-39cm相当）の実測沈下曲線への初期沈下モデルの適用。

Application of the initial subsidence model to measured data for high moor peat specimens (sampled from 22-39cm depth in Bibai mire).

第六節 まとめ

第四章で定式化した有効応力分布の時間変化から、初期沈下過程では有効応力の時間増加率は水位低下速度に比例する、という関係を導き、これに、有効応力の増加に供試体のひずみの増加は比例する、という仮定を併せて初期沈下挙動を表すモデルを導出した。

得られたモデルは、第四章の沈下測定実験の結果得られたペーパータオルの初期沈下挙動をよく表した。

また、モデルの実測沈下曲線への適用の過程で、得られたモデルの中の変形係数と初期層厚とが比例関係にあることを見出し、これを実験的に確認した。この変形係数と初期層厚の比例関係によって、モデルの実際の地盤層厚への適用法が与えられた。

さらに、初期沈下モデルが泥炭土供試体の初期沈下挙動にも適用できることを実験的に確認し、泥炭土の変形係数を定めた。

第六章 排水に伴う泥炭地盤沈下の予測

第一節 はじめに

本章では、前章までに得られた初期沈下モデルを実際規模の地盤に対して適用するために、泥炭地に排水路を掘削した場合を想定し、生じる初期沈下量を予測する。さらに、予測した初期沈下量に分解消失沈下量を加えて数十年規模での沈下量を予測し、既往の野外試験結果と比較する。

第二節 排水路掘削に伴って生じる初期沈下量

地下水位と初期沈下量

式(5-10)で与えられた初期沈下モデルは、式(5-11)で示される初期層厚 L_0 と変形係数 E の間の線形関係を適用することにより、次式のように表された。

$$L' = L_0 e^{-\frac{\Delta h}{aL_0}} \dots \dots \dots (5-13)$$

式(5-13)によると、初期沈下量は水位低下量 Δh によって予測することができる。よって、実際の泥炭地盤に排水路を掘削した場合に生ずる初期沈下量は、排水路の掘削に伴う水位低下量が分かれば、予測することができる。

泥炭地における排水

泥炭地に排水路を設けた場合、水位低下が一様に生ずることはなく、排水路の間における地下水位が排水路における水位よりも高く盛り上がるのが経験的に知られている。例えば Boelter(1972)は、高位泥炭地に深さ 1.25m、幅 2.0m の明渠を 135m 掘削した結果、明渠から 5m 離れると明渠の影響はほとんどなくなり、排水路から 5m の地点と 50m の地点との水位差はわずかに 0.2m でしかなかった

ことを述べており、Roy et al.(2000)においても同様の地下水面の形が報告されている。

そのため、泥炭地に設ける排水路の間隔について、明渠、暗渠を問わず多くの野外試験が行われてきた。暗渠については北海道農業試験場(1969b)が野外試験などの結果により、60~80cmの深さに暗渠を埋設する場合には間隔は18mでよいことを述べており、明渠については、Hillman(1992)が深さ0.9m、幅1.4mの排水路を様々な間隔で設けた野外試験により、適切な排水路間隔は40~50mであるという結論を導いている。

排水路によって定まる地下水面の形—Dupuit-Forchheimer 仮定—

排水路間隔を予測するための研究としては、上述のような野外試験の繰り返しによる経験的な予測以外にも、多くの理論式が提案されている。最も広く用いられているものは、Dupuit-Forchheimer 仮定による地下水位分布式であろう。

Dupuit-Forchheimer 仮定の原型は、1857年にフランスの土木技術者 Dupuit が提示したもの(DeWiest,1965)であり、以下のような単純化がなされている。

- ・ 土壌は均質で透水係数は一定である。
- ・ 水面下の各点における水頭勾配はその点の直上の自由水面の勾配に等しく、排水路への流れは水平方向への一様な流れである。
- ・ Darcy 則が適用できる。
- ・ 水平な不透水層が存在する。
- ・ 地下水涵養流は一定である。

Dupuit-Forchheimer 仮定を排水設計へ応用した歴史の経緯は van der Ploeg et al.(1997)に詳しく、デンマークの Colding が1872年に Dupuit-Darcy 理論を基に排水設計のための方程式を導いたのが最初と考えられる。後にその形から、楕円公式と呼ばれるようになった(Fig.6-1)。

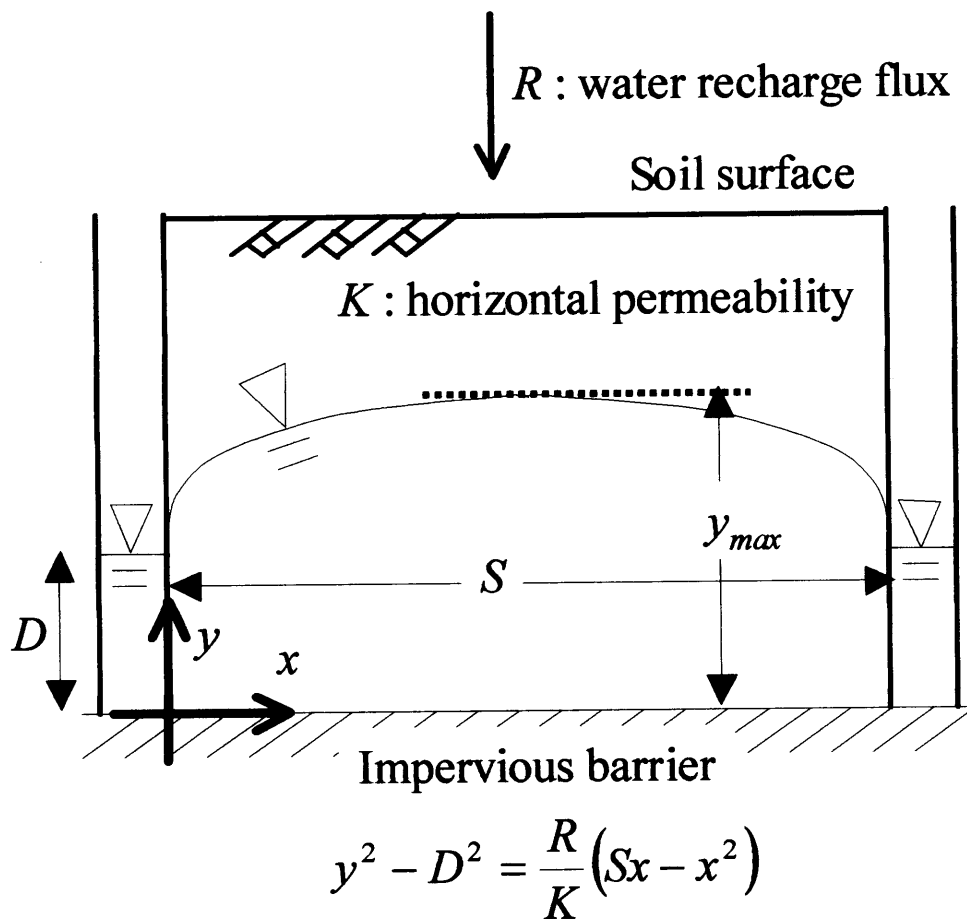


Fig.6-1 Dupuit-Forchheimer仮定による地下水面形(van der Ploeg et al.(1997) after Hooghoudt(1937)).
 Water table shape determined from Dupuit-Forchheimer assumption (van der Ploeg et al.(1997) after Hooghoudt(1937)).

Fig.6-1 に見られる楕円公式の導出は、大略以下のようなになる。

排水路の位置を $x = 0$ 、分水嶺の位置を $x = \frac{S}{2}$ とする。自由水面の不透水層からの高さを $y(x)$ とすると、排水路と分水嶺の間における土中の水平方向フラックス q は Darcy 則を用いて次式で表される。

$$q = -K \frac{dy(x)}{dx} \dots \dots \dots (6-1)$$

一方、湿原に与えられる地下水涵養フラックス R と土中のフラックス q の間には、水量の保存則として次式が成り立つ。

$$Rdx = ydq \dots \dots \dots (6-2)$$

式(6-2)の両辺を積分し、式(6-1)へ代入すると、次の微分方程式が得られる。

$$Rx + Const. = -Ky \frac{dy}{dx} \dots \dots \dots (6-3)$$

式(6-3)を、境界条件 $y(0) = y(S) = D$ の下で解くと、楕円公式が得られる。

$$y^2 - D^2 = \frac{R}{K} (Sx - x^2) \dots \dots \dots (6-4)$$

その後、1924年にドイツの Rothe、1932年にオーストリアの Kozeny、1937年にオランダの Hooghoudt、そして1946年に U.S.A.の Aronovici と Donnan がそれぞれ独立に、同様の排水設計のための式を導出している。よって、Dupuit-Forchheimer 仮定によって得られた楕円公式は、Hooghoudt 式など、別の名前で知られている場合もある。この Dupuit-Forchheimer 仮定を湿原へ適用した例としては、Ingram(1982)の、高位泥炭地における泥炭ドームの表面形状の予測がある。

Dupuit-Forchheimer 仮定の適用上の問題

一方、Dupuit-Forchheimer 仮定はその前提条件の単純さが問題とされることもあり、特に、水平方向への一様な流れ、という仮定が現象にそぐわないとする意見が多い。Bouwer(1965)は、流れが深さ方向に分布をもつ場合には、流れは系の上側に集中して下側では流れが多少なりとも滞る傾向があり、よって、Dupuit-Forchheimer 仮定に基づけば系の深さに流量が比例することになるが、実際にはそうならないことを指摘している。van Schilfgaarde(1965)もまた、非常に簡略化された仮定を用いていることによる長所と短所に言及し、これに留意する必要性を説いている。

泥炭地ではこれに関連して、深さ方向の透水性のばらつきが Dupuit-Forchheimer 仮定の適用の上で問題となってくる。具体的な値としては、Gafni and Brooks(1990)の、深さ 35cm までは 1.4×10^{-4} cm/sec、35cm 以深では 8.3×10^{-6} cm/sec.以下という報告などがある。

こうした問題点に対応した研究例としては塩沢ら(1995)の、北海道美唄市の原生湿原における地下水位分布について、高位泥炭土層と中間泥炭土層に対しては Dupuit-Forchheimer 仮定による楕円公式を2つ重ね合わせた2層モデルを、表層に対してはこれと独立した1層モデルをそれぞれ適用した、という例があり、表層の透水性がそれ以下の泥炭層に比べて非常に高いという湿原特有の透水構造を反映した水面形を得ている。

以上を踏まえて、泥炭地に排水路を掘削した際に生じる初期沈下量の予測に当たっては、楕円公式(6-4)の重ね合わせによって得られる地下水位分布 $y(x)$ から水位低下量の水平方向の分布 $\Delta h(x)$ を求め、式(6-12)から次式のように初期沈下量分布 $s(x)$ を求める、という手順をとった。

$$s(x) = L_0 - L'(x) = L_0 \left(1 - e^{-\frac{\Delta h(x)}{aL_0}} \right) \dots \dots \dots (6-5)$$

第三節 分解消失による沈下速度

泥炭土の分解消失については、宮地ら(1995)が野外調査及び室内試験の結果から合理的な推定を行っている。宮地ら(1995)は、北海道美唄市の原生湿原とこれに隣接する防風林について泥炭土層内の炭素量を比較し、過去40年間で約8割の泥炭土が好気的条件下に曝されることによって分解消失したと推定し、全沈下量への分解の寄与率を約30%と評価した。また、当地における分解消失による沈下速度は年に約2cmとの見積もりを行っている。本研究では、第三章第三節のFig.3-6で得られた、高位泥炭土供試体の一定沈下速度2.5cm/yr.及び3.7cm/yr.も考慮して、分解消失沈下速度を約3cm/yr.とすることとした。

第四節 実際の泥炭地盤における沈下量の予測

予測との比較に用いる野外試験結果

北海道農事試験場(1937b)が、北海道美唄市の高位泥炭地に深さ1.5mの明渠を46m間隔で掘削、開墾した後15年での地表面及び地下水位の形状を報告している(Fig.6-2)。この野外試験結果と、予測によって得られる初期沈下量と分解消失沈下量の和とを比較することで、予測の妥当性を検証する。

楕円公式(6-4)を用いる座標を平行移動させ、原点 $(x, y) = (0, 0)$ を、 $x = 0$ を明渠端、 $y = 0$ を最初の地表面高さとする、式(6-4)は、掘削した明渠の深さを y_0 として次式のように書き換えられる。

$$(y - y_0)^2 = \frac{R}{K}(Sx - x^2) \dots \dots \dots (6-6)$$

式(6-6)によって得られる $y(x)$ と水位低下量 $\Delta h(x)$ の関係は、

$$\Delta h(x) = y_0(x) - y(x) \dots \dots \dots (6-7)$$

で与えられる。ここで y_0 は排水路掘削前の水位である。

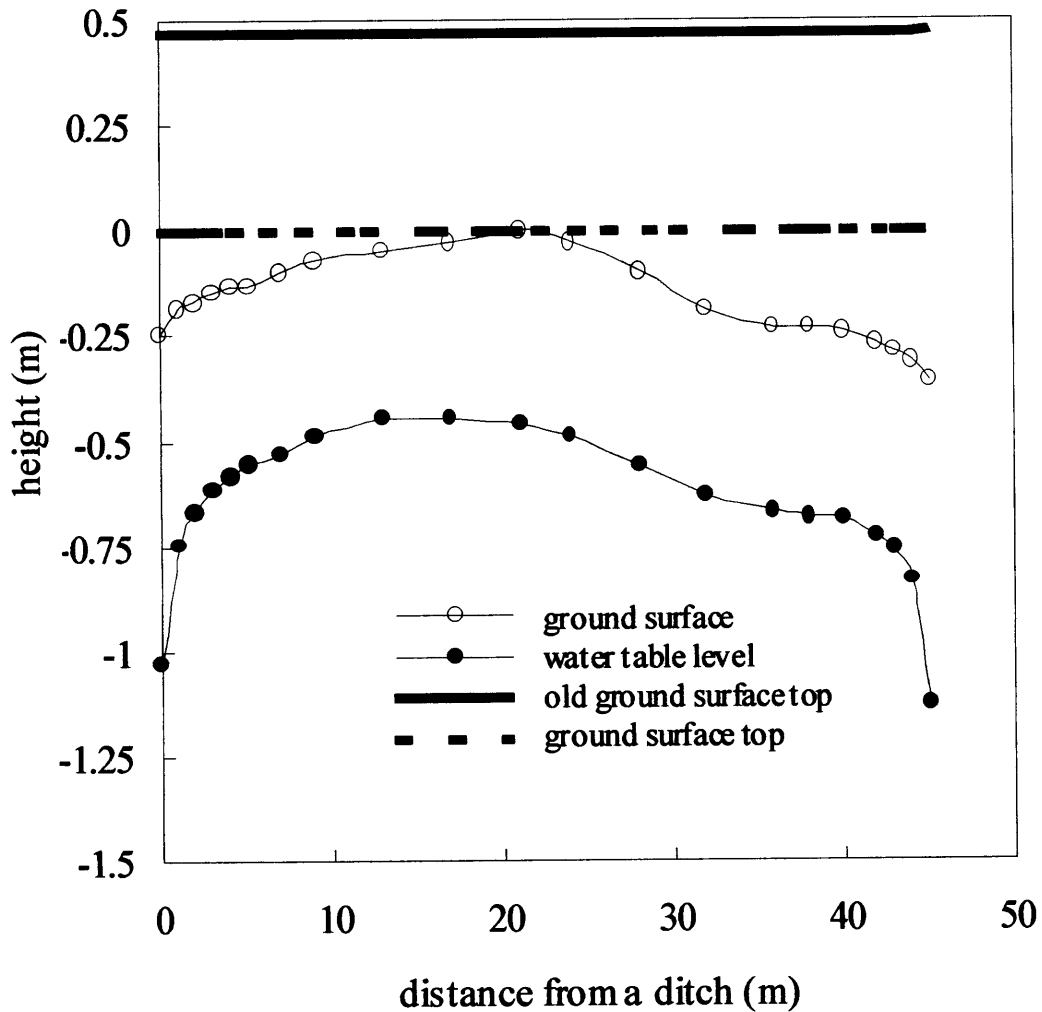


Fig.6-2 大排水溝掘削後十五年の地表面及び地下水位 (北海道農事試験場,1937b)
 Shapes of ground surface and water table 15 years after digging ditches (Hokkaido
 Agric. Res. center, 1937b)

沈下予測に必要な定数(1)―実際の値より

式(6-6)に対して、 y_0 として-1.5m、 S として46mをそれぞれ実際の値として用いた。

また、式(6-2)については、初期層厚 L_0 を、美唄の湿原において粕渕ら(1995)がボーリング調査を行った結果から6.0mとし、 a は、第五章第五節で高位泥炭土について求めた値から10を用いた。

沈下予測に必要な定数(2)―透水係数 K

楢円公式(6-6)を用いる場合には、地下水涵養フラックス R 及び透水係数 K が最も現象を左右する因子と考えられるが、透水係数は層によって大きくばらつく。Kneale(1987)は、逆解析によって求められた透水係数は1オーダー程の誤差を持つであろう、と述べている。

野外測定の場合においても、Chason and Siegel(1986)の、低位泥炭地における現場透水係数が $6.7 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-2} \text{ cm/sec.}$ という報告や、Mulqueen et al.(1997)の $4.63 \times 10^{-5} \text{ cm/sec.} \sim 1.55 \times 10^{-3} \text{ cm/sec.}$ という報告があり、2オーダー程度の違いは普通に見られる。

また、 0.1 g/cm^3 程度の低い乾燥密度にもかかわらず透水性が粘土層並みに低いのは、泥炭土層内に発達するメタンなどのガスによるとされている(Reynolds et al.(1992), 粕渕ら(1995)など)。

以上の事実を考慮すると、透水係数として用いる値は、解析対象地における現場測定によるものが望ましいと考えられる。よってここでは、塩沢ら(1995)が、Fig.6-2 を与えた北海道農事試験場(1937b)と同じ美唄の高位泥炭地である美唄湿原を対象とした野外調査結果から逆解析で求めた値である $1.06 \times 10^{-3} \text{ cm/sec.}$ 、及び粕渕ら(1994)による美唄湿原での現場計測による値である $4.3 \times 10^{-5} \text{ cm/sec.}$ の対数平均値である、 $1.74 \times 10^{-4} \text{ cm/sec.}$ を用いることとした。

沈下予測に必要な値(3)―地下水涵養フラックス R

美唄湿原における地下水涵養フラックスを評価した例としては、粕渕ら(1994)が原生湿原からの浸出量調査の結果を基に得た 0.01 cm/d という値があり、これを用いた。

沈下のシミュレーション

地表面及び地下水位の計算に当たっては、元の地表面で $y=0$ が与えられるようにした。初期状態として、深さ 10cm のミズゴケ表層を想定し、10cm 以深を高位泥炭土層とした。初期の地下水位は深さ 5cm とした (Fig.6-3)。

Fig.6-2 によると明渠掘削深 y_0 は -1.5m であり、この深さまでは高位泥炭層のみであった(浦上ら,1954)ため、地下水位分布は式(6-6)のみで求めることができる。

式(6-6)で与えられる地下水位分布、及び式(6-12)から求められる初期沈下後の地表面分布から見積もられた初期沈下量は、排水路間中央で 8.5cm、排水路近傍で 14.3cm であり、後述する総沈下量の 16.7~24.1% という計算結果であった (Fig.6-4)。

排水路掘削後 15 年での地表面分布を求めるに際しては、好氣的微生物による泥炭土の分解消失沈下速度を 3cm/yr. とした。宮地ら(1995)は、防風林における分解消失沈下量を 2cm/yr. と見積もっていたが、北海道農事試験場(1937b)の場合は排水に加えて農地としての開墾作業を施しており、無機栄養分の供給等による分解の促進があったと推定される。高位泥炭土の分解消失沈下速度についての他の判断材料としては、第三章第三節で述べた、高位泥炭土供試体の一定速度沈下過程における沈下速度である 2.5~3.7cm/yr. が挙げられる。3cm/yr. は以上を考慮したものである。その結果、全沈下量は、排水路間中央で 53.5cm、排水路近傍で 59.3cm となった。また、Fig.6-2 の実測の地表面分布及び地下水位分布と比較したところ、上述の計算結果は実測の地表面分布に対してよい一致を見せた (Fig.6-5)。

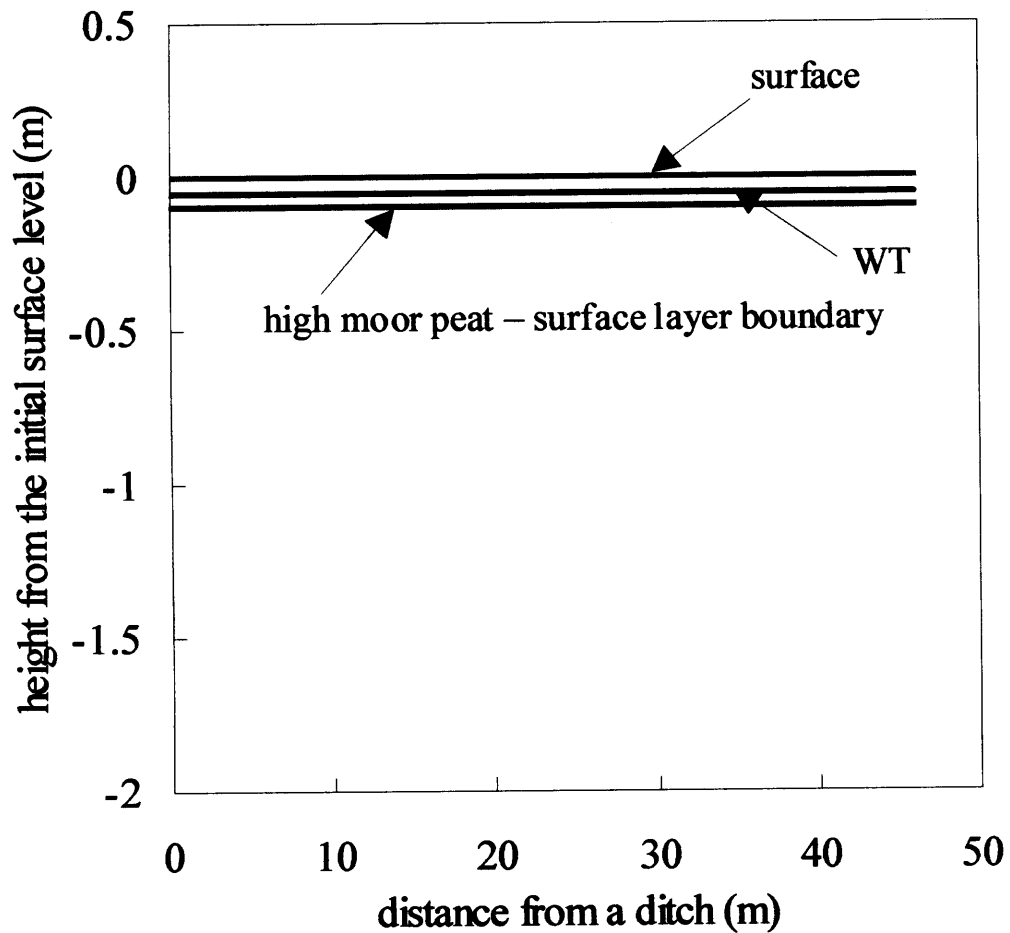


Fig.6-3 明渠掘削前の初期状態. 地表面を $y=0(\text{m})$ 、初期地下水位を $y=-0.05(\text{m})$ 、高位泥炭土層と表層との境界面を $y=-0.1(\text{m})$ とした.

Initial condition before digging ditches. Surface top is set at $y=0(\text{m})$, ground water table is set at $y=-0.05(\text{m})$, the boundary between high moor peat layer and surface layer is set at $y=-0.1(\text{m})$,

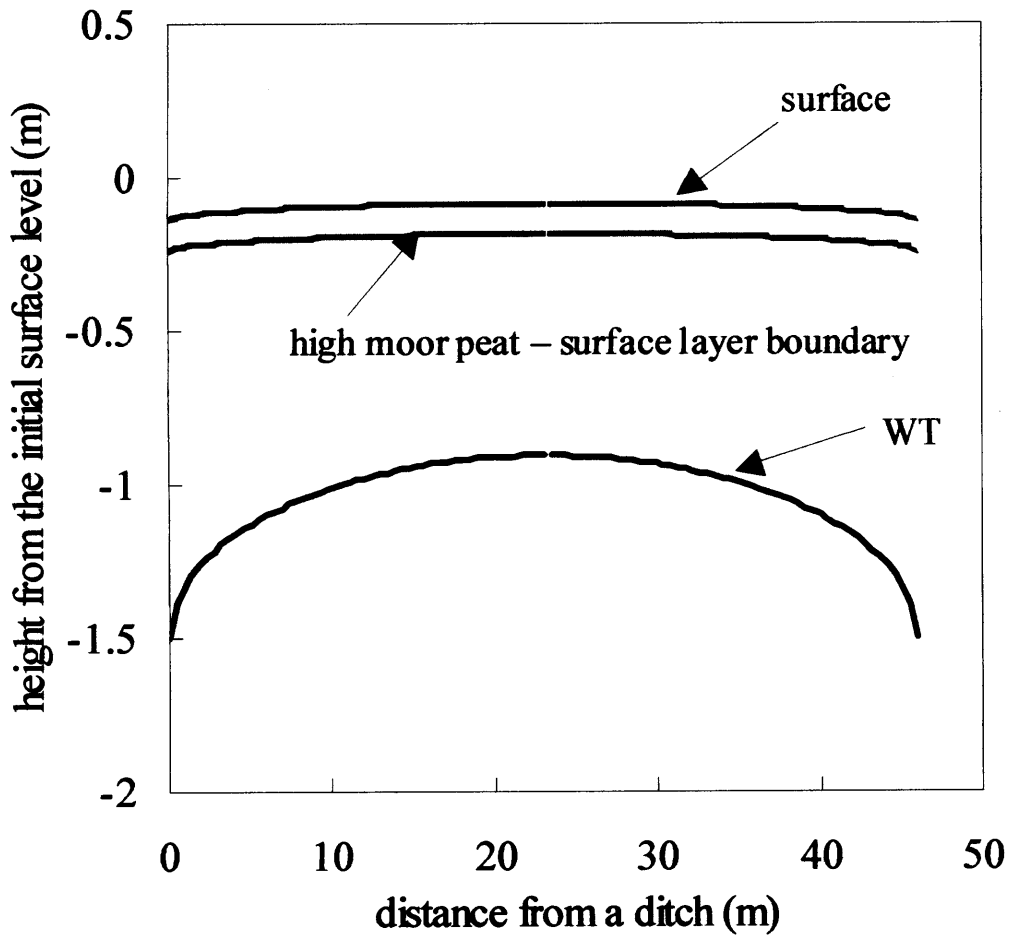


Fig.6-4 排水路掘削後の、Dupuit-Forchheimer仮定による地下水位低下と初期沈下モデルによる初期沈下量の予測。

Ground water table level reduction under Dupuit-Forchheimer assumption and prediction of the amount of initial subsidence using the initial subsidence model after digging ditches.

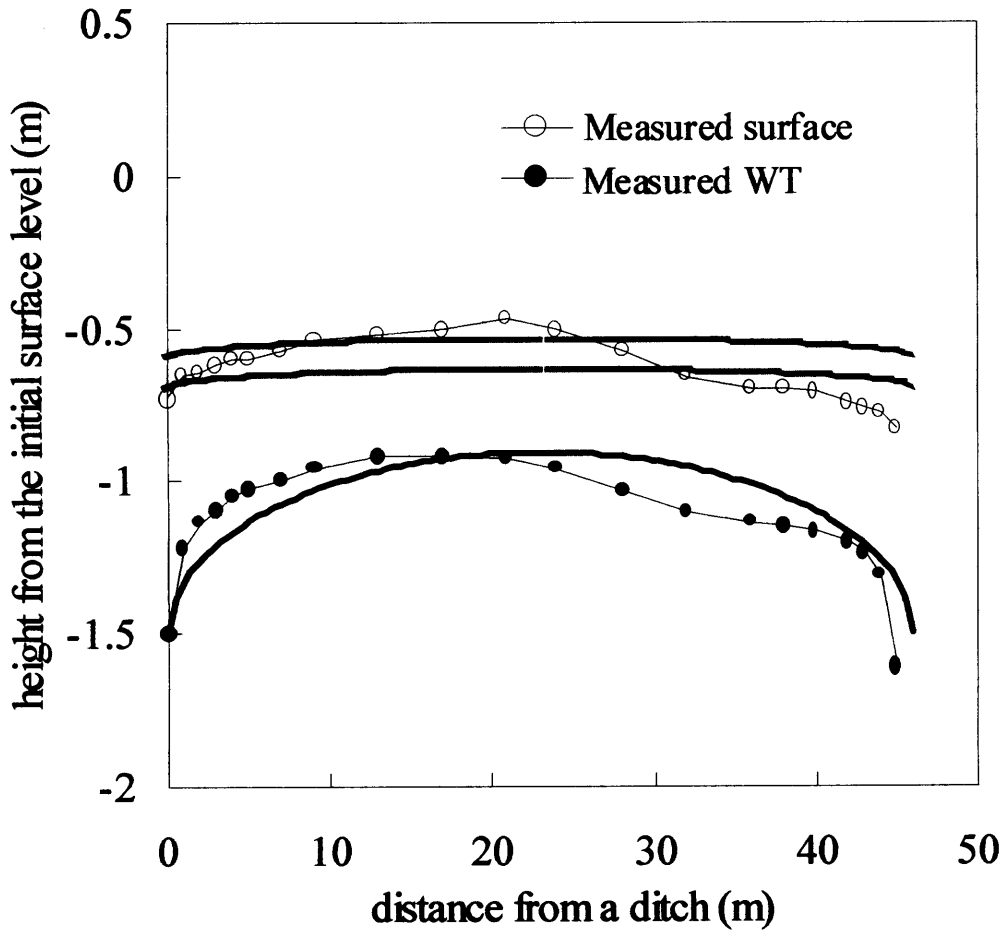


Fig.6-5 排水路掘削後15年での地表面沈下予測と北海道農事試験場(1937b)による実測値の比較. ○が実測地表面、●が実測地下水位.

Comparison between predicted ground surface 15 years after digging ditches and measured data in Hokkaido Agric. Res. Center (1937b). ○ and ● show measured data set of ground surface and ground water table, respectively.

第五節 提案した沈下予測法に関する考察

Fig.6-2 の例では Fig.6-5 に見られるように、計算結果による沈下量が実測沈下量に対して良い一致を得たが、未知の湿原に対する沈下予測を行うためには当然、その湿原の泥炭土層の厚さ L_0 、初期沈下モデルの式(6-12)における定数 a 、その湿原における地下水涵養フラックス R 、泥炭土層の水平方向の透水係数 K を求める必要がある。

これらの値は、 L_0 がボーリング調査、 a が室内実験、 R が現場における水文学的調査、 K が現場における測定を行うことによって得られる。しかし、定数 a に関しては限られた泥炭土試料から得た値を現場に適用しなければならず、また、透水係数 K はすでに述べたように、測定によっては 1 オーダーや 2 オーダーの違いすらあり得る指標である。そこで、これらの各値が予測量にどのように影響するかについて考察しておく必要がある。

初期沈下モデル中の定数 a の違いによる影響

高位泥炭土のひずみ分布変化(Fig.4-4)によると、ミズゴケ生活層を除けば、火山灰混入層にかかっていた layer 2 及び layer 3 のひずみが最も小さく、高位泥炭土層である layer 4、layer 5 のひずみが最も大きかった。

また、初期沈下モデルの式(6-12)中の定数 a は、式(6-6)、(6-8)、(6-10)によって与えられる定義から、値が小さいほど試料のひずみが大きくなる性質を持っている。よって、Fig.6-5 において、同じ深さ 22-39cm から採取した試料であっても、火山灰混入のほとんどなかった試料から $a=10$ が得られ、火山灰混入の著しかった試料からは $a=12$ が得られたことから、高位泥炭土層の中で最もひずみやすい部分の a の値が 10、ひずみにくい部分の値が 12 と判断される。

ここで、Fig.6-2 の例では初期層厚 L_0 が 6.0m、水位低下量 Δh が最大で 1.5m であったから、 L_0 に対する Δh の比は最大で 0.25 である。Fig.6-4 中に $\Delta h/L_0 = 0.25$ の曲線を想定すると、 a が 10 の場合と 12 の場合の初期沈下量の違いは、ひずみに換算して 0.5% と計算される。 a を 10 として得られた Fig.6-4 の初期沈下量は $\Delta h/L_0 = 0.25$ となる排水路近傍で 14.3cm、すなわち 2.4% であったから、高位泥炭土層がすべて火山灰混入層と同等の a を持つ場合には、当該初期沈下量はおよそ

12.0cm と評価されることになり、その差は 2.3cm である。

一方、 L_0 に対する Δh の比が 1.0、すなわち排水路掘削深が泥炭層厚に等しい 6.0m の場合では、1.5% の違いとなる。この場合は、 $a = 10$ のときの排水路近傍での沈下量が 57.1cm であるのに対し、 $a = 12$ のときには 48.0cm と、9.1cm の誤差を生むことになる。

よって、深い明渠を掘るときほど、 a の値の設定が初期沈下量の予測に大きく影響してくる。

飽和透水係数 K の違いによる影響

式(6-6)を用いて地下水面形状の予測を行っている以上、 R に対する K の比を求めることが重要事項であるが、測定によってはオーダー単位で値が異なることも予想される K の影響が大きいと考えられる。そこで、透水係数を 10 倍にした場合と 0.5 倍にした場合とで、Fig.6-4 及び Fig.6-5 に相当する地表面分布を算出したものが Fig.6-6 及び Fig.6-7 である。

Fig.6-4 及び Fig.6-5 ではそれぞれ、初期沈下量が 9.0~14.3cm、最終的な沈下量が 53.5~59.3cm であったが、透水係数を 10 倍にすると、初期沈下量が 12.5~14.3cm、最終的な沈下量が 57.5~59.3cm となった。また、透水係数を半分にした場合は、初期沈下量及び最終的な沈下量はそれぞれ 6.1~14.3cm、51.1~59.3cm となった。

Fig.6-6 及び Fig.6-7 からわかるように、透水係数の違いは地下水面の形状に影響を与える。この水面の高さの違いによる初期沈下量の違いは、排水路間中央において、透水係数が 10 倍のときには 3.5cm の増加、0.5 倍の時には 2.9cm の減少という結果となった。また、地表面の形も、透水性が高いほど平らかになると予想された。

また、Fig.6-7 の代わりに、透水係数を 0.1 倍にすると、地下水面が低下するのは排水路から 7m 程度までの範囲のみとなった。すなわち、排水路中央を中心とした幅 32m ほどの領域では水位がまったく低下せず、初期沈下は生じない、という結果となった。

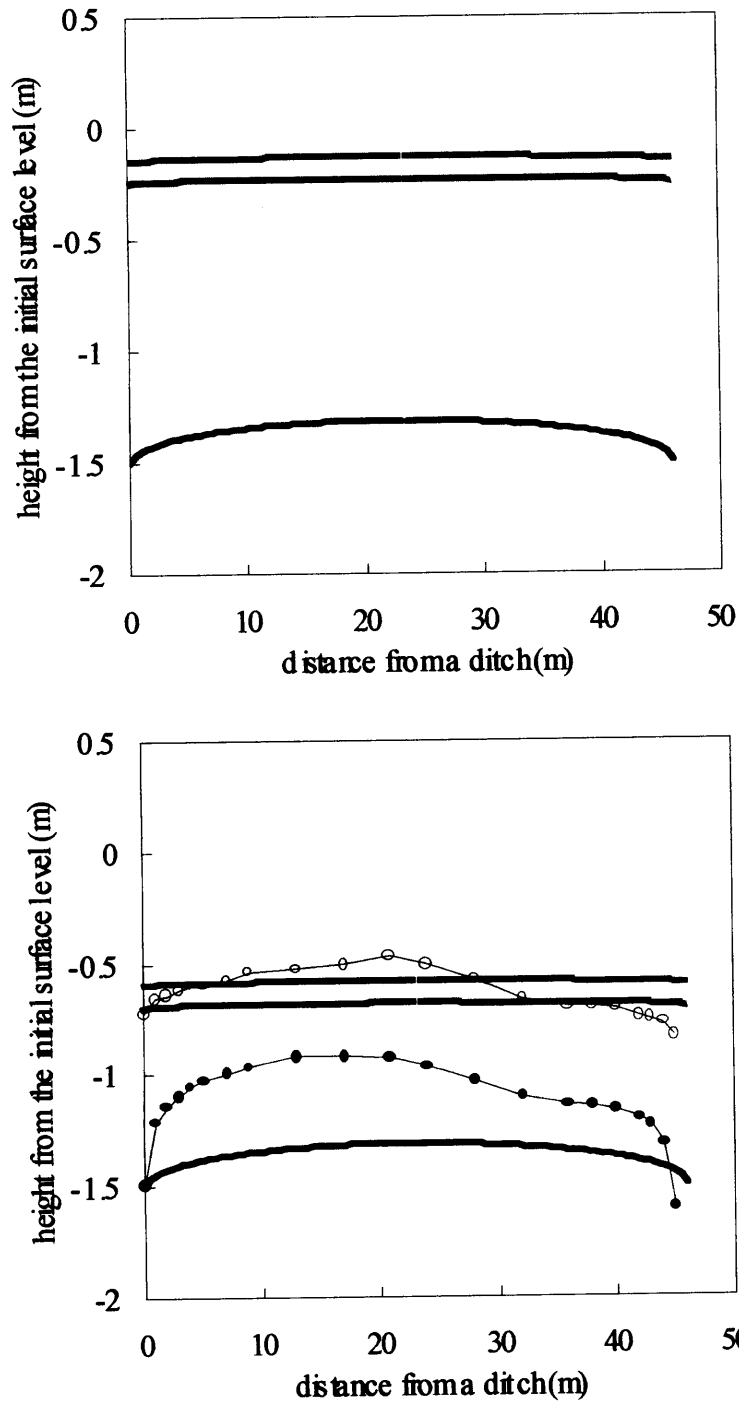


Fig.6-6 透水係数を、Fig.6-5を予測した場合に比べて10倍にした場合の初期沈下量予測（上）と15年後の沈下量予測（下）. 下図中○、●はそれぞれが実測の地表面及び地下水位.

Predicted surface level and water table level after initial subsidence (above) and 15 years after (below) in the case that 10 times larger permeability was applied than in the case of Fig.6-5. ○ and ● in the graph show measured surface and water table level, respectively.

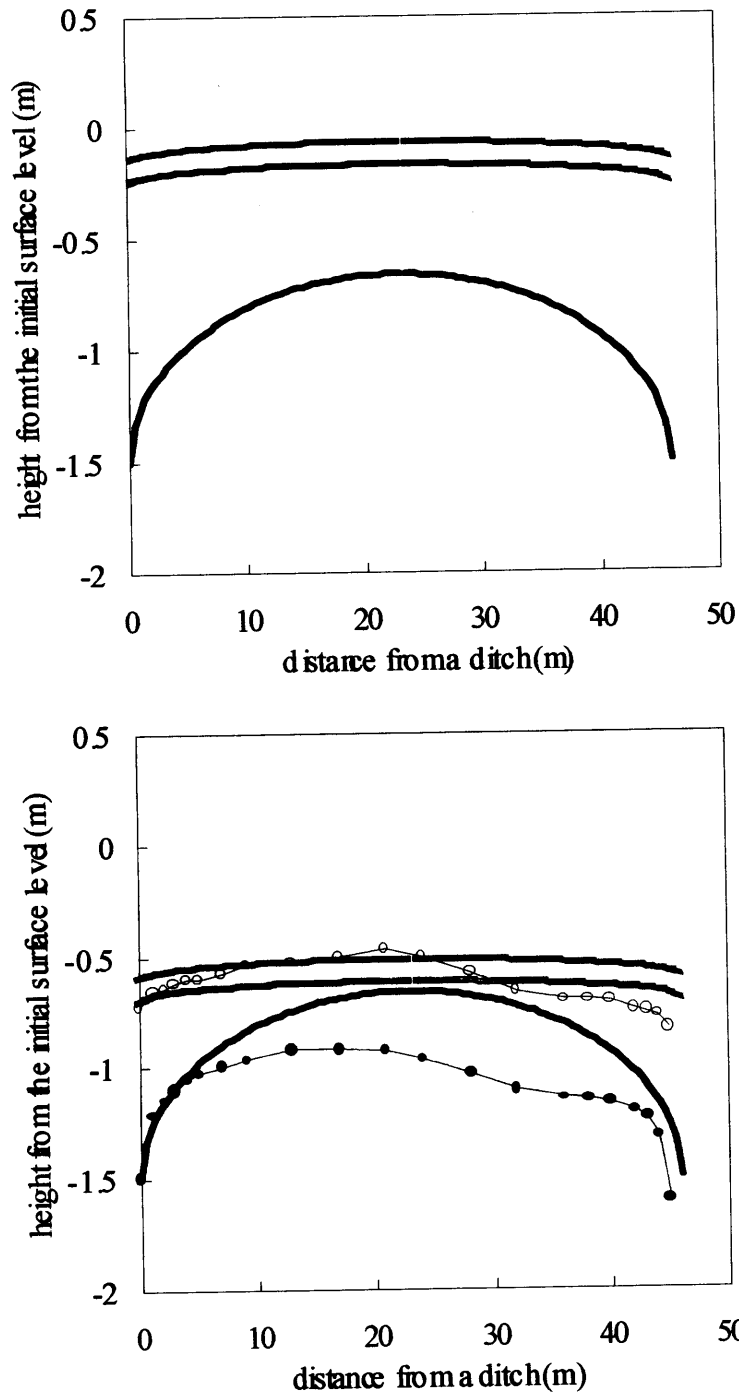


Fig.6-7 透水係数を、Fig.6-5を予測した場合に比べて0.5倍にした場合の初期沈下量予測（上）と15年後の沈下量予測（下）。下図中○、●はそれぞれが実測の地表面及び地下水位。

Predicted surface level and water table level after initial subsidence (above) and 15 years after (below) in the case that 0.5 times larger permeability was applied than in the case of Fig.6-5. ○ and ● in the graph show measured surface and water table level, respectively.

以上のことから、透水性の見積もりは、予想される初期沈下後の地表面形状に影響を与えると共に、水位低下については沈下が及ぶ範囲の予測にも影響を与える。地下水涵養フラックス R の値や排水路の深さ y_0 などとの兼ね合いではあるが、特に排水路の深さが浅い場合には、透水係数 K の評価が 1 オーダー小さくなると、排水路間中央部の水位が全く低下せずその部分の沈下量を 0 と予測することもあり得る。泥炭土の透水性というよりもむしろ、湿原全体としての透水性の正確な把握が重要と考えられる。

第六節 まとめ

第五章までに得られた知見を基に、実際の泥炭地盤に明渠を掘削した場合に生ずる沈下を計算した。

まず、Dupuit-Forchheimer 仮定に基づいて排水路掘削時の水位低下量を求め、生じる初期沈下量を予測する方法を提案した。

さらに、既往の研究による値から水位低下後の分解消失沈下量を求め、予測された初期沈下量と合わせて、既往の野外試験結果と比較した。

その結果、15 年間での全沈下量のうち 16.7~24.1% が初期沈下、残りが分解消失沈下という沈下予測を得、実測の地表面分布によく適合した。

さらに、予測沈下量に対して初期沈下モデル中の定数 a 及び泥炭土層の透水係数 K がどのように影響を与えるかを検証し、排水路を深く掘削する場合には a の評価が、浅い排水路深の場合には K の評価が、それぞれ予測値に大きく影響することが明らかになった。

第七章 結論

排水に伴う泥炭地盤の沈下現象を把握し、その沈下機構をモデル化すること、及び実際の地盤沈下現象にモデルを適用し、沈下予測の方法について考察することを目的に、以下の知見を得た。

飽和からの排水に伴って生じる泥炭地盤の沈下挙動を把握することを目的に、高位泥炭土及び中間泥炭土の不攪乱柱状供試体を用いて沈下実験を行った。

その結果、排水に伴う泥炭土の沈下挙動は、著しい初期沈下、供試体からの排水を伴う緩慢な沈下、排水が殆ど見られない極めて緩慢な一定速度での沈下の 3 つの過程からなることを見出した。また、2 週間から 10 週間の実験期間で生じた沈下量は、供試体初期高さに対するひずみに換算して、高位泥炭土供試体で 3.7～11.5%、中間泥炭土供試体で 2.4～2.9%であった。

見出した 3 つの沈下過程のうち、実験期間中に生じた全沈下量の 3 割から 5 割を、開始から数分のうちに生ずる初期沈下が占めていた。

また、排水がほぼ終了した後の一定速度沈下過程における沈下速度は、高位泥炭土供試体で 2.5～3.7cm/yr、中間泥炭土供試体で 1.2～2.9cm/yr.であり、時間に対する線形性の高さ、及び既往の研究に見られる野外調査結果から、有機物の分解消失が主因とする沈下過程であることが示唆された。

さらに、水位履歴を与えた沈下実験により、排水に伴う沈下は非常に不可逆性の顕著な沈下であり、水位履歴に伴って進行する沈下は排水期間において生じていること、沈下は水位の回復により抑制できることを明らかにした。

続いて、全沈下量に対して大きな割合を占め、且つこれまで沈下解析の対象外とされてきた初期沈下過程の機構を明らかにすることを目的に、模擬試料を用いた初期沈下実験を行った。

初期沈下挙動は沈下量が大きく、また極めて短時間のうちに生ずる現象であることが予想されたことから、試料としての均質性や再現性を重視し、ペーパータオルを泥炭土の模擬試料として、物理性を確認した上で用いた。

その結果、初期沈下過程を水位低下中の沈下過程と定義できた。また、水位低下に伴う浮力の喪失による有効応力の増加を把握した。また、初期沈下過程におけるひずみの増加が供試体各部において同時に生じていることを、実験的に確認した。

さらに、実測した初期沈下過程中的間隙水圧分布の変化から、初期沈下過程においては供試体内の透水係数及び間隙水圧勾配が一定である、という近似をおいて間隙水圧分布の変化をモデル化し、有効応力の原理を適用して初期沈下過程における有効応力分布の時間変化を定式化した。

初期沈下実験の結果明らかになった有効応力分布の時間変化に関する知見から、水位低下速度に有効応力の時間増加率は比例するという関係を導き、また、初期沈下実験の結果を基に、有効応力の増加に供試体のひずみの増加は比例する、という仮定をおいて初期沈下挙動を表すモデルを導いた。

得られた初期沈下モデルは、初期沈下実験による実測の沈下曲線によく適合した。また、モデルの実測沈下曲線への適合において、モデルの中の変形係数と初期層厚の間の比例関係を見出し、これを実験的に確認することによって、モデルの実際の地盤層厚への適用法を得た。さらに、初期沈下モデルが泥炭土供試体の初期沈下挙動に対して適用できることを確認し、泥炭土の変形係数を求めた。

続いて、初期沈下モデルを実際規模の地盤沈下量の予測に適用した。

初期沈下モデルは、水位低下量から沈下量を評価するモデルであることから、Dupuit-Forchheimer 仮定による楕円公式を用いて、排水路掘削時の水位低下量を予測して初期沈下量を求める方法を提案した。

さらに、既往の研究による値から水位低下後の分解消失による沈下速度を 3cm/yr.として予測された初期沈下量に加え合わせ、野外試験における 15 年間の沈下量と予測沈下量とを比較した。

その結果、高位泥炭地に 46m 間隔で深さ 1.5m の排水路を掘削した場合の初期沈下量の予測値は、排水路間中央で 8.5cm、排水路近傍で 14.3cm であった。また、排水路掘削後 15 年での全沈下量の予測値は、排水路間中央で 53.5cm、排水路近傍で 59.3cm であったことから、全沈下量のうち 16.7~24.1%が初期沈下、残りが

分解消失沈下であると評価された。また、予測された地表面分布は実測の地表面分布をよく再現した。

さらに、予測沈下量に対して初期沈下モデル中の定数 a 及び泥炭土層の透水係数 K がどのように影響するかを検証し、排水路を深く掘削する場合には a の、浅い排水路の場合には K の評価が、それぞれ沈下量の予測に大きく影響するという留意点を得た。

本研究に続く課題としては、まず、泥炭土の分解消失速度のより精密な定量化が挙げられる。水移動に伴う微小粒子や分解中間生成物としての地下水への流失や、二酸化炭素やメタンとしての大気への発散などを定量的に把握することが必要と考えられる。

また、泥炭湿地内部の透水係数の評価も重要である。第七章における沈下予測では、湿原内のある点における野外測定値を用いたが、湿原全体としての透水性が必要であることから、透水係数の空間変動性を明らかにすることが望まれる。

美唄湿原以外の泥炭湿地における沈下予測及び保全方法への提案を行うために、各湿地における気象、水文、土壌物理環境を把握することもまた、課題として挙げられる。

謝辞

本研究をまとめあげるまでには、多くの方々にご協力を頂いた。ここに記して感謝する次第である。

私の学び舎である環境地水学研究室の宮崎毅教授には、指導教官として私の博士課程における成長を見守っていただいた。

研究室の先代の教授であった中野政詩名誉教授には、泥炭土という研究課題に取り組むきっかけを与えていただいた。

溝口勝助教授には、研究生活を進める上で困難な状況に陥るたびに、幾度も救っていただいた。

井本博美技術官には、地水学研究室における実験技術を、いろはから手ほどきいただいた。

農地環境工学研究室の塩沢昌助教授には、初期沈下現象を力学的に解釈する上で有意義なご指摘を頂いた。

北海道農業研究センター生産環境部水田土壌管理研究室美唄分室の方々には、美唄湿原を現地調査地として使わせていただいた。

環境地水学研究室での日々は、よき先輩、同僚、後輩に恵まれ、良いときも悪いときも、寛大に付き合っていたいただいた。

他にも、私が手本とするの方々、支えとなってくれた友人達など、お世話になった方々は多い。すべての名を記すことはできないが、ここに感謝する。

最後に、常に私に対して期待と信頼をおいてくれた母智子に心から感謝したい。

引用文献

- Berry,P.L. and Poskitt,T.J.(1972), The consolidation of peat, *Geotechnique*, 22(1), 27-52
- Berry,P.L. and Vickers,B.(1975), Consolidation of fibrous peat, *Proc. of ASCE*, 101, GT8, 741-753
- Bishop,A.W. and Blight,G.E.(1963), Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils, *Geotechnique*, 13, 177-197
- Boelter,D.H.(1972), Water table drawdown around an open ditch in organic soils, *Journal of Hydrology*, 15, 329-340
- Bouwer,H.(1965), Limitation of the Dupuit-Forchheimer Assumption in Recharge and Seepage, *Transactions of the ASAE*, 8, 512-515
- Chason,D.B. and Siegel,D.I.(1986), Hydraulic conductivity and related physical properties of peat, Lost River Peatland, northern Minnesota (USA), *Soil Science*, 142(2), 91-99
- Chow,T.L., Rees,H.W., Ghanem,I. and Cormier,R.(1992), Compactibility of cultivated sphagnum peat material and its influence on hydrologic characteristics, *Soil Science*, 53 (4), 300-306
- DeWiest,R.J.M.(1965), History of the Dupuit-Forchheimer Assumptions on Groundwater Hydraulics, *Transactions of the ASAE*, 8, 508-509
- Fox,P.J. and Edil,T.B.(1996), Effect of stress and temperature on secondary compression of peat, *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 405-415
- Gafni,A. and Brooks,K.N.(1990), Hydraulic characteristics of four peatlands in Minnesota (USA), *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 239-254
- Hillman,G.R.(1992), Some hydrological effects of peatland drainage in Alberta's boreal forest, *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 1588-1596
- Ingram,H.A.P.(1982), Size and shape in raised mire ecosystems:a geophysical model, *Nature*, 297, 300-303
- Kneale,P.E.(1987), Sensitivity of The Groundwater Mound Model for Predicting Mire Topography, *Nordic Hydrology*, 18, 193-202

- Lauren, A. and Heiskanen, J. (1997), Physical properties of the mor layer in a Scots pine stand: I. Hydraulic conductivity, *Canadian Journal of Soil Science*, 77(4), 627-634
- Mesri, G. (1973), Coefficient of secondary compression, *Proceedings of ASCE*, 99, SM1, 123-137
- Mesri, G. and Godlewski, P.M. (1977), Time- and Stress-Compressibility Interrelationship, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103, GT5, 417-430
- Mesri, G. and Castro, A. (1987), $C\alpha/Cc$ concept and K_0 during secondary compression, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(3), 230-247
- Mesri, G., Stark, T.D., Ajlouni, M.A. and Chen, C.S. (1997), Secondary Compression of Peat with or without Surcharging, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 411-421
- Mulqueen, J., Rodgers, M. and Killeen, E. (1997), A note on measuring the hydraulic conductivity of peat in the field for land drainage, *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 36 (2), 249-255
- Oikawa, H. (1987), Compression curve of soft soils, *Soils and Foundations*, 27(3), 99-104
- Reynolds, W.D., Brown, D.A., Mathur, S.R. and Overend, R.P. (1992), Effect of in situ gas accumulation on the hydraulic conductivity of peat, *Soil Science*, 153(5), 397-408
- Rothwell, R.L., Silins, U., Hillman, G.R. (1996), The effects of drainage on substrate water content at several forested Alberta peatlands, *Canadian Journal of Forest Research*, 26(1), 53-62
- Roy, V., Plamondon, A.P. and Bernier, P.Y. (2000), Draining forested wetland cutovers to improve seedling root zone conditions, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15(1), 58-67
- Schothorst, C.J. (1977), Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands, *Geoderma*, 17, 265-291
- Silins, U. and Rothwell, R.L. (1998), Forest peatland drainage and subsidence affect soil water retention and transport properties in an Alberta peatland, *Soil Science Society of American Journal*, 62, 1048-1056
- van der Ploeg, R.R., Marquardt, M. and Kirkham, D. (1997), On the history of the ellipse

- equation for soil drainage, Soil Science Society of America Journal, 61, 1604-1606
- van Schilfhaarde, J. (1965), Limitations of Dupuit-Forchheimer Theory in Drainage, Transactions of the ASAE, 8, 515-516, 519
- Wosten, J.H.M. Ismail, A.B. van Wijk, A.L.M. (1997), Peat subsidence and its practical implications; a case study in Malaysia, Geoderma, 78, 253-6
- 井本博美, 宮崎毅, 中野政詩(1999), 泥炭土の不攪乱試料採取法と透水係数測定法の改良, 土壌の物理性, 81, 55-59
- 井本博美, 宮崎毅, 西村拓, 中野政詩(2001), 土壌断面に現れる体積履歴、人為履歴について, 土壌の物理性, 87, 19-26
- 梅田安治, 井上京(1995), 北海道における泥炭地湿原の保全対策, 農業土木学会誌, 63(3), 249-254
- 浦上啓太郎, 飯塚仁四郎, 瀬尾春雄(1954), 石狩国泥炭地土性調査報告, 北海道農業試験場土性調査報告第四編, 35-47
- 大羽裕, 永塚鎮男(1988a), 土壌生成分類学, 養賢堂, 159
- 大羽裕, 永塚鎮男(1988b), 土壌生成分類学, 養賢堂, 190
- 及川洋, 石田正達, 一丸克彦(1989), 泥炭の圧密特性に及ぼす荷重増加率の影響, 高有機質土に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 29-32
- 小田島大, 能登繁幸(1993), 泥炭の長期圧密について, 高有機質土地盤の諸問題に関するシンポジウム発表論文集, 137-140
- 粕淵辰昭, 宮地直道, 神山和則, 柳谷修自(1994), 美唄湿原の水環境の特徴と保全, 日本土壌肥料学雑誌, 65(3), 326-333
- 粕淵辰昭, 宮地直道, 神山和則(1995), 美唄湿原の保全と周辺農用地の管理, 農業土木学会誌, 63(3), 255-260
- 神谷光彦(1979), 標準圧密試験による泥炭の圧密特性, 有機質土の試験方法シンポジウム発表論文集, 土質工学会, 63-66
- 日下部祐基, 能登繁幸, 林宏親(1993), 泥炭の圧密機構に関する研究, 高有機質土地盤の諸問題に関するシンポジウム発表論文集, 147-154
- 斎藤広隆(1997), 美唄湿原の水収支に関する研究, 東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻修士論文
- 阪口豊(1974), 泥炭地の地学, 東京大学出版会, 15-16

塩沢昌, 粕淵辰昭, 宮地直道, 神山和則(1995), 一次元定常地下水流動モデルによる美唄湿原の地下水位分布の解析, 農業土木学会論文集, 176(63-2), 131-142

地盤工学会(1990), 土質試験の方法と解説

関昭彦, 津森優, 伊藤俊裕, 東沢敏(1989), 宅地造成における泥炭の二次圧密特性について, 高有機質土に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, 93-100

田村啓治(2000), 泥炭土壌からの CH_4 と CO_2 の放出に関する研究, 東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻修士論文

土質工学会, 高有機質土の力学的性質および試験方法に関する研究委員会(1990), 高有機質土の工学

土質工学会, 不飽和土編集委員会(1993), 不飽和土, 9-20

中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓(1995), 土壌物環境測定法, 東京大学出版会

中山美佐緒, 山口晴幸, 木暮敬二(1989), 泥炭の圧密に伴う空隙構造の変化, 高有機質土に関するシンポジウム発表論文集, 33-42

能登繁幸(1987), 泥炭地盤の沈下量の予測に関する考察, 土質工学会論文報告集, 27(2), 107-117

北海道泥炭地研究会(1992), 泥炭地用語事典(改訂第2版), 24

北海道農業試験場(1969a), 泥炭地の農業, 泥炭地研究室創立50年記念論文集, 155

北海道農業試験場(1969b), 泥炭地の農業, 泥炭地研究室創立50年記念論文集, 157

北海道農業試験場(1969c), 泥炭地の農業, 泥炭地研究室創立50年記念論文集, 267-271

北海道農業試験場(1969d), 泥炭地の農業, 泥炭地研究室創立50年記念論文集, 278-283

北海道農事試験場(1937a), 泥炭地の特性と其の農業, 北海道農事試験場彙報第六十号, 3-4

北海道農事試験場(1937b), 泥炭地の特性と其の農業, 北海道農事試験場彙報第六十号, 149-172

北海道農事試験場(1937c), 泥炭地の特性と其の農業, 北海道農事試験場彙報第六十号, 附録

松尾啓, 大平至徳, 山口晴幸(1986), 泥炭の二次圧密係数について, 土質工学会論文報告集, 26(1), 139-150

宮地直道, 神山和則, 大塚紘雄, 粕渕辰昭(1995), 美唄泥炭地における地盤沈下, 日本土壌肥科学雑誌, 66(5), 465-473

安川郁夫(1979), 泥炭の圧密試験と圧密特性についての一考察, 有機質土の試験方法シンポジウム発表論文集, 59-62

山口晴幸, 松尾啓, 大平至徳, 木暮敬二(1987), 泥炭の一次元圧密挙動, 防衛大学校理工学研究報告, 25(2), 97-123

図表一覧

第一章 序論

| | | |
|------------------|---------------------------|---|
| Fig. 1-1 | 北海道泥炭地分布図..... | 2 |
| Fig. 1-2 | 大排水溝掘鑿後十五年の地表面及び地下水位..... | 4 |
| Table 1-1 | 国(地域)別の泥炭埋蔵量と泥炭地面積..... | 1 |

第二章 泥炭土試料採取地及び泥炭土

| | | |
|------------------|--|----|
| Fig. 2-1 | 美唄湿原周辺の概略図..... | 15 |
| Fig. 2-2 | 美唄付近の気温の年変化(1920 - 1968, 1999-2000)..... | 17 |
| Fig. 2-3 | 美唄湿原の地表面標高と地下水位の分布..... | 20 |
| Fig. 2-4 | 美唄湿原及び防風林の土壤断面図..... | 22 |
| Fig. 2-5 | 美唄湿原の深さ方向の物理性分布..... | 29 |
| Fig. 2-6 | 防風林の深さ方向の物理性分布..... | 30 |
| Fig. 2-7 | 美唄湿原の各土層の水分特性曲線..... | 33 |
| Fig. 2-8 | 防風林の各土層の水分特性曲線..... | 35 |
| Photo 2-1 | 美唄湿原付近の航空写真(1995)..... | 14 |
| Photo 2-2 | 美唄湿原における測定の立地条件..... | 19 |
| Photo 2-3 | 吸引法:石膏、発泡スチロール型枠と泥炭土ブロック試料..... | 26 |
| Photo 2-4 | 吸引法:石膏枠の乾燥..... | 26 |
| Photo 2-5 | 吸引法:石膏供試体による実験の様子..... | 27 |
| Photo 2-6 | 吸引法:実験終了後の泥炭土試料と石膏枠..... | 27 |

第三章 排水に伴う泥炭土の沈下実験

| | | |
|------------------|---------------------------------|----|
| Fig. 3-1 | 排水沈下実験装置概略図..... | 39 |
| Fig. 3-2 | 高位泥炭土供試体の沈下曲線と排水量曲線..... | 42 |
| Fig. 3-3 | 泥炭土供試体の時間沈下曲線..... | 43 |
| Fig. 3-4 | 高位泥炭土及び中間泥炭土柱状供試体の各層のひずみ..... | 45 |
| Fig. 3-5 | 高位泥炭土及び中間泥炭土柱状供試体の間隙水圧分布変化..... | 47 |
| Fig. 3-6 | 一定速度沈下期間における沈下速度..... | 48 |
| Fig. 3-7 | 水位履歴を与えたときの柱状供試体の沈下・膨張挙動..... | 50 |
| Fig. 3-8 | 水位履歴を与えたときの柱状供試体各部の収縮・膨張挙動..... | 51 |
| Table 3-1 | 各実験における泥炭土供試体..... | 40 |
| Photo 3-1 | 高位泥炭土柱状供試体..... | 38 |
| Photo 3-2 | 中間泥炭土柱状供試体..... | 38 |

第四章 模擬試料による初期沈下実験

| | | |
|------------------|------------------------------|----|
| Fig. 4-1 | モデル土層、各層の透水係数、厚さ及び全水頭..... | 54 |
| Fig. 4-2 | 飽和透水係数測定装置の概略図..... | 56 |
| Fig. 4-3 | ペーパータオルの水分特性曲線..... | 58 |
| Fig. 4-4 | 初期沈下実験装置図..... | 60 |
| Fig. 4-5 | 自重測定実験における供試体底面の有効応力測定..... | 63 |
| Fig. 4-6 | 沈下測定実験における供試体各部の変位..... | 65 |
| Fig. 4-7 | 沈下測定実験における供試体各部のひずみ..... | 66 |
| Fig. 4-8 | 水位低下に伴う供試体底面における有効応力の増加..... | 68 |
| Fig. 4-9 | 水圧測定実験における間隙水圧分布変化..... | 70 |
| Fig. 4-10 | モデル化された間隙水圧分布変化..... | 72 |

| | | |
|------------------|----------------------|----|
| Fig. 4-11 | 実測による間隙水圧の時間変化..... | 74 |
| Fig. 4-12 | 間隙水圧分布と定数 c | 75 |
| Fig. 4-13 | モデルによる応力・間隙水圧分布..... | 78 |
| Table 4-1 | 初期沈下実験各実験の供試体..... | 61 |
| Photo 4-1 | ペーパータオルの初期沈下挙動..... | 62 |

第五章 初期沈下挙動のモデル化

| | | |
|-----------------|----------------------------------|----|
| Fig. 5-1 | 初期沈下モデルと実測の初期沈下挙動..... | 84 |
| Fig. 5-2 | 変形係数 E の初期高さ L_0 依存性..... | 86 |
| Fig. 5-3 | 初期層厚の初期沈下量への影響..... | 88 |
| Fig. 5-4 | 定数 a の初期沈下量への影響..... | 90 |
| Fig. 5-5 | 初期沈下モデルの高位泥炭土供試体による沈下曲線への適用..... | 92 |

第六章 排水に伴う泥炭地盤沈下の予測

| | | |
|-----------------|------------------------------------|-----|
| Fig. 6-1 | Dupuit-Forchheimer 仮定による地下水面形..... | 96 |
| Fig. 6-2 | 大排水溝掘削後十五年の地表面及地下水位..... | 100 |
| Fig. 6-3 | 明渠掘削前の初期状態..... | 103 |
| Fig. 6-4 | 排水路掘削後の地下水位とモデルによる初期沈下量..... | 104 |
| Fig. 6-5 | 排水路掘削後十五年での地表面沈下予測と実測値との比較..... | 105 |
| Fig. 6-6 | 透水係数10倍の場合の初期沈下量及び十五年後の沈下量..... | 108 |
| Fig. 6-7 | 透水係数0.5倍の場合の初期沈下量及び十五年後の沈下量..... | 109 |