泥炭の二次圧密係数について

(Coefficient of Secondary Consolidation of Peats)

松 尾 啓* (Kei Matsuo)
山 口 晴 幸** (Hareyuki Yamaguchi)
大 平 至 徳*** (Yoshinori Ohira)

キーワード：圧密／圧密試験／異方性／高有機質土
／室内実験／二次圧密 (IGC: D 5/E 2)

1. ま え が き

泥炭は植物遺体が低温・多湿の環境下で、多年にわたり分解不十分のまま堆積して形成されたものである。我國の泥炭地の堆積速度は1年間に1mm前後と言われている¹⁾、今日では、北海道や東北地方のみならず、小域ながら日本各地に散布していることが明らかとなっている²⁾。

泥炭の相構成は有機質と無機質（土粒子）から成る固体実質部分と水および気体との3相から構成されており、有機質は植物遺体とその腐植物から成っている。植物遺体は互いにかみ合い複雑な海綿状の繊維性構造を形成しており、しかも生育時の細胞構造を反映して多孔質である³⁾。そのため、一般に、植物遺体を母体とした泥炭は土粒子鉱物の集合体から成る無機質粘土等に比較して特異な土構造をなしており、また非常に圧縮性に富んだ地盤材料であると言われている。このようなことから、原位置で遭遇する泥炭では、自然間隙比が10以上、含水比で1000%以上である場合もめずらしくない。そのため、負荷応力の載荷に対して極めて大きな圧密量を呈する一次圧密が比較的短期間で終了する傾向を示すが、引き続き二次圧密が長期にわたって継続し明らかに圧密の収束値を定めることが困難な場合が多い。大平ら⁴⁾は、泥炭では二次圧密量が全圧密量の約50%にも及ぶことがあることを報告している。

泥炭の二次圧密現象は、主に細胞質の有機物自身の圧縮性に起因すると考えられている⁴⁾ことから、細胞質の有機物中の間隙をマイクロポア、有機物間や有機物と土粒子間等の実質間に介在する間隙をマクロポアとすれば⁵⁾、泥炭の二次圧密過程はマイクロポアの経時的減少過程とし

て近似的にとらえることができる。渡辺⁶⁾は泥炭の二重構造モデルを提案し、泥炭の二次圧密現象について上述のような考察を行っている。Adams⁷⁾やDeJong⁸⁾らは二次圧密を考慮した繊維性泥炭のレオロジーモデルを提案している。また、各地の泥炭地盤での原位置計測結果においても、顕著な二次圧密現象が観測⁹⁾され、泥炭地盤上への構造物の築造において、二次圧密挙動の予測が特に重要な課題となっている。しかし泥炭の二次圧密特性については、無機質粘土に比較して未解明な問題が多く、種々の圧密条件下で示す泥炭の二次圧密特性に関する基本的事項についても不明な点が多く残されている。このような問題へのアプローチは室内試験から得られる結果を用いて、原位置での二次圧密挙動を考察する際に、室内と原位置での圧密条件の相違によって生じる二次圧密特性の違いを検討するのに役立つであろう。

本研究は、泥炭地から採取した不攪乱試料を対象として、通常の圧密試験機を用いて実施した室内試験結果に基づき、泥炭の一次元圧密特性、特に、二次圧密領域での圧縮性を規定する二次圧密係数に着目し、泥炭の二次圧密特性に及ぼす圧密荷重、圧密荷重の載荷期間や荷重増加率の諸因子の影響について実験的に検討し、各種圧密条件下で示す泥炭の二次圧密特性に関する基本的事項を明らかにすることを目的としている。更に、泥炭の二次圧密係数に及ぼす構造異方性の効果について明らかにすると共に、土に含まれている有機物量が二次圧密特性にどのような影響を及ぼしているのかを明白にするために、有機物含有量の異なる試料間の結果に基づき、有機物含有量を尺度として、無機質粘土から高有機質土（泥炭）にわたる各種土質の二次圧密係数を整理した結果について考察する。

2. 試料と実験方法

2.1 試験に用いた泥炭試料

北海道岩見沢市郊外の石狩川流域と札幌市郊外の紅葉山周辺に分布する泥炭地と埼玉県大宮市郊外の利根川流域に分布する泥炭地から、採取した3種類の不攪乱泥炭試料を用いた。それらの試料は、それぞれ、岩見沢泥

* 防衛庁技術研究本部第4研究所 研究員（相模原市瀬野辺 2-9-54）

** 防衛大学校土木工学教室 助教授（横須賀市走水 1-10-20）

*** 防衛大学校土木工学教室 教授（横須賀市走水 1-10-20）
（1985.5.9 原稿受付・討議期限 1986.10.1、要請があれば1か月の
期限延長可能）

表-1 各試料の物理的諸性質

Properties	Iwamizawa peat	Momijiyama peat	Ohmiya peat	Iwamizawa sample
Types of soil	fibrous peat	fibrous peat	fibrous peat	clay, organic clay, organic silt, peat, etc.
Sampling depth h (m)	9—11	0.5—1	0.7—1.5	0.5—9
Natural water content w_n (%)	363—422	885—1320	928—1180	32—425
Natural void ratio e_n	5.15—5.82	10.5—12.3	12.9—17.6	1.12—6.53
Specific gravity G_s	1.95—2.05	1.48—1.52	1.55—1.63	1.97—2.68
Ignition loss Lig (%)	50—55	90—95	70—80	3—58
Carbon content C (%)	25—30	50—52	38—46	2—32
Degree of saturation S_r (%)	100	99—100	100	98—100
Degree of decomposition D (%)	35—38	28—33	45—53	36—100
Preconsolidation pressure p_c (kPa)	90—120	40—50	10—20	10—100

炭、紅葉山泥炭および大宮泥炭と呼ぶことにする。ここで、岩見沢泥炭は内径 75mm、長さ 1000mm の固定ピストン式シンウォールサンプラーで、また紅葉山および大宮泥炭は内径 75mm、長さ 500mm のシンウォールチューブを人力で地表面に鉛直に押込み試料を採取した。いずれの試料も多量の未分解の繊維性有機物を含んでおり、日本統一土質分類法に従えば泥炭 (Pt) として分類される。表-1 に各試料の代表的諸性質を示す。一般に、泥炭層は地表面下数m付近までに堆積している場合が多く、紅葉山泥炭および大宮泥炭は地表面下それぞれ 0.5~1m と 0.7~1.5m から採取したものである。これに対して、岩見沢泥炭は9~11m とかなり深い泥炭層から採取したものである。試料中に含まれている有機物量は試料の乾燥質量に対する有機物の乾燥質量の比を百分率で表した強熱減量値 (Lig) で表示してある。岩見沢泥炭、紅葉山泥炭、大宮泥炭での Lig 値はそれぞれ 50~55%、90~95%、70~80% であった。特に、岩見沢泥炭と大宮泥炭は部分的に腐植した根や葉等の植物質の繊維性有機物からほとんど構成されていた。いずれの泥炭試料も地下水面下に位置し飽和状態にあり、原位置での有効土かぶり圧の下で正規圧密されていた。なお大宮泥炭では、二次圧密特性に及ぼす繊維性構造の異方性の効果を調べるために、地表面に対して鉛直方向にサンプリングチューブを貫入して採取したもの (V試料) に加え、それとサンプリング軸が 90° 異なる地表面に対して平行にサンプリングチューブを貫入して採取したものの (H試料) についても試験を実施した。また岩見沢泥炭地では、深さ 9~11m の泥炭層から採取した岩見沢泥炭 (Lig=50~55%) に加え、深さ 9m 付近までから有機物含有量 (Lig) が数%~数十% 範囲にある有機質粘土やシルトおよび泥炭混じり粘土等の各種土質 (岩見沢試料、表-1 参照) を採取しているので、それらの試料についての結果を有機物含有量を尺度として整理し、土の二次圧密係数と有機物含有量の度合との関係について検討を加えた。

試料の保存は、まずサンプラーカッターで約 20cm の長さにサンプリングチューブを切断し、両端面をパラフィンで密封した後、ビニールで包み大型ポリ容器に水浸させて行われた。供試体の成形は、試料を所要の寸法よりかなり大きめに油圧ジャッキでサンプラー内から静かに押し出し、サンプラー端面に沿ってワイヤーソーと薄刃型ナイフで切断した後、供試体カッター¹⁰⁾を一挙に圧入して圧密リング内に設置し、圧密リングの両端面に沿ってトリミングして行われた。成形の際に、薄刃型ナイフを用いたのは、未分解の繊維性有機物が試料中に多量に含まれている場合、ワイヤーソーだけでは試料を乱す恐れがあるためである。なお、サンプラー切断時の振動による試料の乱れを考慮して、切断位置の両側約 3cm の試料は供試体として使用しなかった。

2.2 実験方法

泥炭の二次圧密特性に及ぼす諸圧密条件、すなわち、圧密荷重、荷重載荷期間、荷重増加率等の影響を検討するために、通常の圧密試験機を用いて下記に示す 4 種類の一次元圧密試験を実施した。試験においては、周面摩擦の軽減を図るために、内壁をテフロンコーティングした圧密リングを用いた。

(1)SO 試験：通常の圧密試験で、荷重増加率 ($n=4p/p$) は 1 に、各荷重段階での荷重載荷期間 (t) は 1 日あるいは 2 日に規定されている。

(2)L 試験：荷重の載荷手法は SO 試験と同様であるが、各圧密段階での荷重を長期にわたって持続載荷した長期圧密試験。ここでは、一荷重段階での載荷期間 (t) を岩見沢泥炭では 30 日、紅葉山泥炭では 20 日として累積載荷した試験。

(3)NT 試験：荷重増加率 (n) と荷重載荷期間 (t) を各種組合せた圧密試験。

(4)SIL 試験：各種の大きさの所定の荷重を一挙に載荷して圧密する単一荷重圧密試験。

上記のすべての試験は $20\pm1^\circ\text{C}$ での恒温室で、内径 75mm、厚さ 20mm の圧密リングを用いて両面排水の

図-1 間隙比～対数時間曲線（各荷重載荷期間 30 日）

表-2 圧密試験条件

Types of test	Testing conditons	
	load increment ratio n	loading duration $T(\text{day})$
SO Test	1	1
	1	2
L Test	1	20
	1	30
NT Test	0.3—0.5	2
	1	5, 114
	1	7
	2	1, 2
	3	1, 2
SIL Test	127	114
	—	2

下で実施された。各試験での圧密条件を表-2 にまとめている。

3. 実験結果と考察

3.1 二次圧密係数

一般に、土の二次圧密性を表示するパラメーターとして二次圧密係数が用いられる。これは二次圧密領域でのひずみや間隙比等の経時変化の度合を示すパラメーターで、対数時間に伴う土骨格の圧密量として定義される。粘土等の無機質土では、二次圧密は経過時間の対数 ($\log t$) に対して比例的に進行し、ある圧密荷重下では一定の二次圧密係数の値が定義できるという報告が多い^{(11)~(13)}。ここでは、圧密中の土骨格の変化を間隙比 (e) あるいは鉛直ひずみ (ε_v) で表示し、圧密後半部での $e \sim \log t$ 曲線あるいは $\varepsilon_v \sim \log t$ 曲線の勾配 ($\Delta e / \Delta \log t$ と $\Delta \varepsilon_v / \Delta \log t$) として求めた二次圧密係数 $C_a = \Delta e / \Delta \log t$ と $\varepsilon_a = \Delta \varepsilon_v / \Delta \log t$ を用いて、泥炭の二次圧密係数に及

ぼす圧密時の諸因子の影響および有機物含有量 (Lig) の効果等について考察する。なお、 C_a と ε_a との間には次式の関係が存在する。

$$\varepsilon_a = \frac{C_a}{1 + e_0} \quad (1)$$

ここに、 e_0 は各圧密段階での荷重載荷時の間隙比 (e)

図-2 間隙比～対数時間曲線（各荷重載荷期間 20 日）

図-3 間隙比～対数時間曲線（載荷期間 114 日）

図-4 鉛直ひずみ～対数時間曲線（載荷期間7日）

である。

まず、繊維性有機物を母体として土骨格が構成されている泥炭の二次圧密領域で示す沈下～時間曲線が上述した無機質粘土に類似した直線的傾向を示すのか否かについて検討する必要がある。

図-1 は岩見沢泥炭 (Lig=50～55%)、図-2 は紅葉山泥炭 (Lig=90～95%) について、荷重載荷期間 (t) をそれぞれ 30 日と 20 日に固定して累積載荷した場合の長期圧密試験 (L 試験) から得られた間隙比 (e)～対数時間 ($\log t$) 曲線を示す。図-3 は岩見沢泥炭 (Lig=50～55%) についての荷重増加率 $n=1$ と $n=127$ の場合で、圧密荷重 $t=1254.4$ kPa 下で 114 日間持続載荷した時の $e \sim \log t$ 曲線である。更に、図-4 は有機物含有量 (Lig) が 5～54% 範囲にある各供試体 (岩見沢試料) についての鉛直ひずみ (ε_v) を対数時間に対してプロットしたものである。通常の圧密試験機を用いているため間隙水圧の測定を行っていないので、圧密中の過剰間隙水圧の消散過程から一次圧密終了状態を判定することはできないが、これらの図に示す長期圧密試験での $e \sim \log t$ 曲線あるいは $\varepsilon_v \sim \log t$ 曲線で、圧密後半部においてかなり長期にわたって圧密量が時間の対数に対して直線的に減少し続ける傾向が認められる。そこで、無機質粘土と同様に、かなりの繊維性有機物を含んでいる泥炭においても、圧密後半部で観測される $e \sim \log t$ あるいは $\varepsilon_v \sim \log t$ 関係を直線近似し、その勾配として各荷重段階に対応する一定の二次圧密係数 ($C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ あるいは $\varepsilon_\alpha = \Delta \varepsilon_v / \Delta \log t$) の値が定義できようである。本結果と同様に、泥炭において二次圧密領域での $e \sim \log t$ 関係が直線近似できるとする結果が、Muskeg (カナダ) について Mac Farlane¹⁴⁾、大宮泥炭 (埼玉県) について著者ら¹⁵⁾、石狩泥炭 (北海道) について及川¹⁶⁾によっ

て報告されている。なお著者¹⁷⁾らは初期厚さ 2～9 cm の供試体を用いた大宮泥炭 (Lig=70～80%) について、バックプレッシャーを載荷し間隙水圧を計測した一次元圧密試験結果から、過剰間隙水圧が実質的に消散したと見なせる時間と最大排水長との間に近似的に 2 乗則が成立し、初期厚さ 2 cm 供試体 (最大排水長 1 cm) では、各荷重段階での過剰間隙水圧の消散時間は約 1000 分程度であるが、引き続きかなりの圧密が進行することを示している。そこで、ここでは、図-1～4 に示したように、圧密後半部で観測される沈下～時間曲線を直線近似し、その勾配として二次圧密係数を定義することにする。後節で詳述するが、図-4 より、このように定義される二次圧密係数は有機物含有量 (Lig) によって大きく左右され、有機物含有量の増大に伴って二次圧密係数の値がかなり増加することが予想される。

3.2 圧密に伴う二次圧密係数の変化

紅葉山泥炭 (Lig=90～95%) と岩見沢泥炭 (Lig=50～55%) について、SO 試験による各荷重段階での間隙比

図-5 圧密に伴う二次圧密係数 C_α の変化状況

～対数時間曲線から求めた二次圧密係数 $C_a = \Delta e / \Delta \log t$ を圧密荷重 p との関係でプロットしたのが図-5である。 C_a 値は泥炭要素の圧縮の進行に伴って変化し、圧密荷重の影響をかなり受けることがわかる。特に、この傾向は有機物含有量 (Lig) が90～95%と極めて大きい紅葉山泥炭において顕著に認められる。すなわち、紅葉山泥炭の圧密降伏応力は40～50kPa (表-1 参照) であるが、その約2倍付近の圧密荷重 ($p \approx 100$ kPa) で C_a は最大値を示し、圧縮に伴って処女圧密領域での C_a 値は急激に減少する傾向にある。圧密降伏応力より低い圧力域での C_a 値は圧縮に伴い増大し、この領域から処女圧密領域にわたる $C_a \sim p$ 関係は上に凸の山形の形状を呈している。二次圧密係数の圧密荷重依存性は圧密量と密接に関連していると考えられる。図-6は図-5の結果の $e \sim \log p$ 曲線を示したものである。紅葉山泥炭の結果から明りょうにわかるように、対数荷重増分に伴う間隙比の減少割合 $\Delta e / \Delta \log p$ は p の増大に伴って漸次増加し、 $p \approx 100$ kPa 付近で最も大きく、以後また漸次低下する傾向にある。そこで、各圧密荷重での $e \sim \log p$ 曲線の勾配 $C_c = \Delta e / \Delta \log p$ (便宜上圧縮指数と呼ぶ) を $\log p$

図-6 $e \sim \log p$ 曲線

図-7 圧密に伴う圧縮指数 C_c の変化状況

図-8 二次圧密係数と圧縮指数との関係

図-9 有機物含有量の異なる土質における C_c と C_a の圧密に伴う変化状況

に対してプロットしたのが図-7である。 $C_c \sim \log p$ 関係は図-5で示した $C_a \sim \log p$ 関係と極めて類似していることがわかる。このことは、図-8に示すように、二次圧密係数 C_a が圧縮指数 C_c と比例的関係にあり、各荷重段階での圧密量に密接に依存していることを意味している。また図-9は有機物含有量 (Lig) の異なる各種土質 (岩見沢試料) についての結果を示したものである。有機物含有量の少ない土質では、 C_a の圧密荷重依存性は明りょうに認められないが、Ligの大きい土質になるに従って極めて著しく現れ、有機物含有量の異なる土質間での $C_a \sim \log p$ 関係と $C_c \sim \log p$ 関係はいずれも互に関連した結果を示している。Mesri ら^{12), 18) ~ 20)}は無機質粘土と低有機質粘土を対象とした一次元圧密試験結果から、上記と同様に、 C_a の圧密荷重依存性について報告しており、 C_a と C_c との間に比例的関係が存在することを指摘している。そこで、図-8と9で示した本結果を加味すれば、Mesri らの指摘は、無機質粘土、低有機質粘土、高有機質土 (泥炭) に至る各種土質に適用

図-10 荷重増加率 n の異なる試験での $C_\alpha \sim \log p$ 関係 図-11 SO と SIL 試験での $C_\alpha \sim \log p$ 関係 図-12 SO と SIL 試験での $e \sim \log p$ 関係

できるものと考えられる。特に、繊維性有機物を多量に含んでいる高有機質土である泥炭について、このことが極めて明確に確認できるものと言えよう。

3.3 荷重増加率と荷重載荷期間の影響

粘土等の無機質土においては、圧密荷重の載荷手法、すなわち、荷重増加率 ($n = \Delta p / p$) や段階載荷時における荷重載荷期間 (t) の相違が土の圧密挙動にかなりの影響を及ぼすかということについての報告は多くなされている^{12), 21)~23)}。ここでは、繊維性有機物 (Lig) を 90~95% と 50~55% 含む高有機質土である紅葉山泥炭と岩見沢泥炭を用いて、泥炭の二次圧密係数に及ぼす荷重増加率 (n) と荷重載荷期間 (t) との影響について記述する。

図-10 は、紅葉山泥炭について、一荷重段階での載荷期間 (t) を 2 日に固定し、荷重増加率 (n) を $n=0.3$ ~ 0.5 , 1 , 3 の 3 種類の場合の試験結果から得られた二次圧密係数 $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log p$ を $\log p$ との関係でプロッ

としたものである。また、図-11 には、単一荷重圧密試験 (SIL 試験) の結果を $n=1$ の SO 試験結果と併記して示してある。図-12 に示すように、SIL 試験では SO 試験とほぼ等しい初期間隙比 ($e_i=9.5 \sim 11.5$) の試料について、 $p=19.6 \text{ kPa} \sim 627.2 \text{ kPa}$ の範囲の 6 種類の荷重をそれぞれ一挙に載荷しており、明確な荷重増加率は定義できないが、かなり大きな荷重増加率に相当しているものと考えられる。図-10 での $n=0.3 \sim 0.5$ と 3 の場合および図-11 での SIL 試験の $C_\alpha \sim \log p$ 関係は $n=1$ の SO 試験による結果と極めて類似した関係を示している。同様に、図-4 で示した、 $n=1$ と 127 での n が 100 倍以上異なる岩見沢泥炭における $e \sim \log t$ 曲線が圧密後半部で互いに平行な位置関係にある。本結果はすべて初期厚さ (H_i) 2 cm の供試体についてのものであるが、著者ら¹⁵⁾は供試体厚さ ($H_i=2 \sim 6 \text{ cm}$, 直径 75 mm) と荷重増加率 ($n=1/3 \sim 4$) とを各種組合せた試験結果から、いずれの供試体厚さにおいても二次圧密係数の値は荷重増加率にほとんど依存しないことを報告している。このようなことから、荷重増加率の大小は泥炭の二次圧密係数を大きく左右する要因とはなり得ないものと考えられる。同様の指摘が粘土について Mesri ら^{12), 21)~23)}によってなされている。なお図-10 での C_α を圧縮指数 $C_c = \Delta e / \Delta \log p$ との関係でプロットしたのが図-13 である。当然予想されることであるが、 C_α / C_c 値は荷重増加率 (n) に依存しないと見なせ、各 n での結果に基づいて直線近似された $C_\alpha \sim C_c$ 関係の直線の勾配は約 0.062 であった。また著者らの既存資料であるが、荷重増加率 $n=1, 2, 3$ の場合の袋井泥炭 (静岡県袋井市より採取, Lig=50~80%, $e_n=11.2 \sim 23.1$) についての $C_\alpha \sim C_c$ 関係を図-14 に、 $n=2$ の場合の C_α と C_c の $\log p$ に伴う変化を図-15 に示す。図-13 に示した紅葉山泥炭 (北海道札幌市) と同様に、袋井泥炭においても C_α と C_c との間に近似的に比例的関係が存在し、その関係を示す直線の勾配は約 0.04 であり、荷重増加率の大小に依存しないものと考えられる。このことから、荷重増加率の相違は泥炭の二次圧密係数のみならず、圧縮指数特性にも重要な影響をもたらすものではないものと言える。

次に、一荷重段階での載荷期間 (t) が次荷重段階で

図-13 荷重増加率 n の異なる試験での $C_\alpha \sim C_c$ 関係

図-14 荷重増加率 n の異なる試験での $C_\alpha \sim C_c$ 関係

図-15 C_α と C_c の圧密に伴う変化状況

の二次圧密係数に及ぼす影響を示したのが図-16である。この結果は、荷重増加率を $n=1$ に固定して各荷重段階での荷重期間 (t) を紅葉山泥炭では5日と20日、岩見沢泥炭では7日と30日の場合で、SO試験 ($n=1$, $t=1$ 日) 結果との比較で示してある。同図における $(\Delta e)_p$ は各荷重段階で荷重増後24時間経過時の間隙比の減少量を意味する。 $(\Delta e)_p \sim \log p$ 関係は荷重期間 (t) の長短によって異なり、一荷重段階での荷重期間が長期になるに従って、次荷重段階での $(\Delta e)_p$ 値はかなり低下する。この傾向は有機物含有量の大きい紅葉山泥炭において顕著である。また、 $(\Delta e)_p \sim \log p$ 関係は $(\Delta e)_p$ の値が圧密降伏応力付近の2~3倍付近で最大値を取る山形の形状を示し、図-7等で示した $C_c \sim \log p$ 関係に対応している。このように、圧縮量に及ぼす荷重増荷期間の長短の影響を反映して、各荷重段階での二次圧密係数 C_α と圧密荷重 p との関係は $\log p$ 軸に対して $(\Delta e)_p \sim \log p$ 関係とはほぼ対称な位置関係を示し、一荷

図-16 荷重増加率 n の異なる試験での $(\Delta e)_p \sim C_\alpha \sim \log p$ 関係

重段階での荷重期間が長期にわたるに従って C_α の圧密荷重依存性が軽減される傾向にある。二次圧密係数が各荷重段階での荷重期間の長短に依存し、荷重期間が増大するに従って減少するのは、当然その間に二次圧密が進行し、Bjerrum²⁴⁾ や村上²⁵⁾ が指摘しているように、土要素が擬似先行圧密荷重を受けて過圧密領域に移行したためと考えられる。荷重期間の長短の影響については、粘土について、Graham ら²⁶⁾ や Leonards ら²⁷⁾ によって同様の報告がなされている。そこで、一般に、高圧縮性である泥炭は無機質粘土に比較して極めて二次圧密性に富んでいることから、著者らは荷重増荷期間は泥炭の二次圧密係数値を左右する重要な因子であると考えている。なお、任意の荷重段階での C_α 値は前荷重段階での荷重期間 (t) の増大に伴って減少するが、図-16で示したように、圧縮性も低下するため C_α を $C_c = \Delta e / \Delta \log p$ との関係でプロットすると、図-17に示すように、荷重期間の異なる試験結果において、 C_α / C_c 値には明瞭な差異は認められないことがわかる。

図-17 荷重増加率 n の異なる試験での $C_\alpha \sim C_c$ 関係

3.4 構造異方性の影響

土粒子や繊維性有機物等の集合体として構成されている無機質粘土や有機質土等の各種の地盤材料は、一般に、一次元応力下の異方応力 (K_0) 状態の下で堆積しているため、当然異方構造を有している。特に、部分的に腐植した根や葉等の植物質の繊維性有機物を母体として土骨格が形成されている高有機質土である泥炭は、堆積状況から判断しても極めて構造異方性に卓越している最たる地盤材料と言える²⁸⁾。ここでは、大宮泥炭地において、地表面に対して鉛直方向から採取した試料 (V試料) に加え、水平方向から採取した試料 (H試料) を用い、採取方向が互いに 90° 異なる両試料についての圧密試験結果に基づき、泥炭の二次圧密係数におよぼす構造異方性の影響について記述する。

図-18 と 19 は、それぞれ、VとH試料についての $e \sim \log p$ 曲線と圧縮指数 $C_c = \Delta e / \Delta \log p$ および二次圧密係数 $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ の圧密に伴う変化を示したものである。図-18 から明らかなように、構造異方性の効果が圧縮特性に明瞭に反映されているのが認められる。H試料の圧密開始付近の間隙比がV試料のそれに比較して数

%小さいにもかかわらず、圧密荷重 $p \approx 30 \text{ kPa}$ 付近からの処女圧密領域でのH試料の $e \sim \log p$ 曲線はV試料のその上方に位置し、特に、処女圧密開始付近での対数荷重増分に伴う間隙比の減少割合が両試料間においてかなり異なっていることがわかる。しかし、圧密荷重の増大に伴い圧縮が進行するにつれて、構造異方性の効果が軽減され、HとV試料間での対数荷重増分に伴う間隙比の減少割合がほぼ一致する圧縮特性を示していることがわかる。このことは、図-19 の上半分に示す $C_c \sim \log p$ 関係によっても容易に理解できる。すなわち、V試料では泥炭要素を構成している繊維性有機物の配向性が、荷重方向に対して垂直方向に卓越していると考えられる。これに対して、H試料では荷重方向に卓越した繊維性配列構造が形成されていると考えられる。そのため、V試料は鉛直方向に対する圧縮性に富み、特に、処女圧密開始点付近では原位置で形成されていた高間隙比状態にある繊維性構造が破壊されて、極めて大きな圧縮性を呈するものと考えられる。一方、H試料では、繊維性有機物の再配列化を伴い圧密荷重の増大と共に、漸次V試料に類似した繊維性配列構造へと移行する構造変化が起るものと推測される。このようなことから、採取方向が互いに 90° 異なるVとH試料間での $C_c \sim \log p$ 関係における相違と類似性が説明できよう。

次に、二次圧密係数 $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ について見ると、 $C_\alpha \sim \log p$ 関係は前節で記述したように $C_c \sim \log p$ 関係と呼応していることが図-19 から明らかである。 C_c に見られる初期構造の相違の影響と同様に、VとH両試料間での C_α 値は C_c の最大値付近までの荷重域でかなり異なっており、V試料の C_α 値はH試料のそれに比較して 50% 程度大きい。しかし、二次圧密係数に及ぼす初

図-18 VとH供試体の $e \sim \log p$ 曲線

図-19 初期構造の相違が C_α と C_c の圧密に伴う変化状況に及ぼす影響

図-20 $C_\alpha \sim C_c$ 関係に及ぼす初期構造の相違の影響

図-21 各種土質における C_α/C_c 値と C_α 値の範囲

期構造の相違の影響は圧密荷重の増大に伴って漸次軽減される傾向にある。なお、 C_α と C_c との間に比例的關係が存在することは図-19 から予想されることであるが、このことを示したのが図-20 である。多少ばらつきはあるが、初期構造の相違が反映されて、 C_α/C_c 値は V 試料で 0.046, H 試料で 0.059 であった。

3.5 有機物含有量の影響

前述した図-4 と図-9 において、土の二次圧密係数 C_α は含有される有機物量によって大きく支配されるこ

とを示した。ここでは、各種試料について本試験から得られた結果に加え、粘土や有機質粘土等の各種土質について報告している代表的研究者の結果^{19),26),29)~34)}を加味して、粘土、有機質粘土、泥炭に至る各種土質についての二次圧密係数を有機物含有量 (Lig) を尺度として表示し、土に含まれる有機物含有量の割合によって二次圧密係数の値がどの程度変化するかについて記述する。

各種土質についての C_α/C_c 関係を整理したのが図-21 である。これらの結果によると、各土質の C_α/C_c 値は約 0.08~0.02 の範囲にあり、本結果から明らかなように、繊維性有機物を多量に含み自然間隙比 (e_n) の大きい泥炭では、 C_α/C_c はかなり大きな値を取ることがわか

図-22 鉛直ひずみで表示した二次圧密係数 ϵ_a の圧密に伴う変化状況 (岩見沢試料)

図-23 $\epsilon_a \sim \log p$ 関係 (袋井泥炭)

る。しかし、ここで注目すべきことは、 C_a/C_c の比よりも、むしろ、無機質粘土に比較して、泥炭では C_a 値 (C_c) の取り得る範囲が極めて広範囲にわたることである。すなわち、このことは、有機物含有量の増大に伴って土は圧縮性に富み、圧縮に伴って二次圧密係数の値が大きく変化することを意味している。

ところで、今まで用いてきた二次圧密係数 $C_a = \Delta e / \Delta \log t$ をひずみで表示した二次圧密係数 $\epsilon_a = \Delta \epsilon_v / \Delta \log t$ ((1) 式参照) を用いると、 C_a が $C_a \sim \log p$ 関係で最大値を示す荷重付近より大きな荷重領域において圧密荷重依存性が軽減され、 ϵ_a はほぼ定値を取ることから、各種土質間における二次圧密係数の値を有機物含有量 (Lig) を尺度として整理するのに便利である。

図-22 は図-9 で示した深さ 9m 付近までから採取した各種土質から成る岩見沢試料について、有機物含有量 (Lig) で区分して、二次圧密係数 ϵ_a を圧密荷重 ($\log p$) との関係でプロットしたものである。Lig=4~6% のものは粘土、10~12% のものは有機質粘土およびシルト、18~28% のものは泥炭混じり粘土、40~55% のものは泥炭に分類される。同様に、図-23 は図-14 と 15 で示した袋井泥炭 (Lig=53~80%) の結果である。岩見沢試料では $p=100\text{kPa}$ 、袋井泥炭では $p=50\text{kPa}$ より大きい荷重領域では、各土質の二次圧密係数 ϵ_a は定値と見なせる。この荷重領域で示す ϵ_a はいずれも処女圧密状態での値である。そこで、この荷重領域で示す ϵ_a 値を各土質で示す処女圧密領域での二次圧密係数の値として代表させて、有機物含有量 (Lig) との関係で示したのが図-24 である。同図には、本試験結果による岩見

沢泥炭 (Lig=50~55%)、紅葉山泥炭 (Lig=90~95%) および大宮泥炭 (Lig=70~80%) に加え、 ϵ_a と Lig との関係について記述してある他の研究者らによって報告されたヘドロ²⁹⁾、ソーラ層土³⁰⁾、粘土と混合土³¹⁾ (粘土と無定形有機物) および上水汚泥³²⁾ の結果も併記してある。この図より明らかなように、各土質の二次圧密係数 ϵ_a は有機物含有量によって大きく左右される。特に、有機物含有量 (Lig) が 20% 以下の土質では、 ϵ_a の値は Lig の増大に伴って比例的に増加する傾向にある。これに対して、Lig>20% 範囲にある繊維性有機物を含む各泥炭間の ϵ_a 値は有機物含有量の割合によってそれほど異ならず、ほぼ 5~10% 付近にある。しかし、それらの値は Lig=0% 付近に対応する無機質粘土の約 10~20 倍と極めて大きな値を示している。このことから、海綿状繊維性構造を形成している高有機質土である泥炭は、鉱物質の土粒子集合体から成る無機質土に比較して、極めて二次圧密性に卓越した材料と言える。

なお、Mesri¹²⁾ は多くの研究者によって報告された有機質粘土や泥炭等の各種土質についての結果に基づき、それらの二次圧密係数 ϵ_a を自然含水比 (w_n) との関係で整理している。安原ら³³⁾ もまた、各種有機質土の二次圧密係数の位置づけを示すために、この関係を利用している。そこで、各種泥炭等に関する本結果を彼らの結果と併記して示したのが図-25 である。本結果による各種土質の $\epsilon_a \sim w_n$ 関係は Mesri や安原らが整理した結果と極めて類似した位置関係にあり、両対数紙上で ϵ_a は w_n と比例的関係で分布していることがわかる。すなわち、各種土質に含まれている有機物の平均的寸法

図-24 有機物含有量の異なる各種土質の ϵ_a 値

 図-25 有機物含有量の異なる各種土質の ϵ_α と w_n との相関性

や形状および腐植の度合についての詳細は不明であるが、大略的には、国内外の各種土質の二次圧密係数 (ϵ_α) の値は自然含水比 (w_n) との関係でプロットすると非常に類似した傾向を示し、無機質粘土、低有機質土、泥炭性有機質土、泥炭に至るに従い、 $\log \epsilon_\alpha \sim \log w_n$ 分布は 45° 線上の上方に位置するものと推察される。

4. 結 論

数種類の繊維性泥炭と有機物含有量の異なる各種土質の不攪乱試料を対象として実施した、最大 114 日間にわたる室内圧密試験結果に基づき、泥炭の二次圧密係数に及ぼす圧密試験時の諸因子の影響と試料に含まれる有機物量と二次圧密係数との関係等について考察した結果を要約すると以下のように記述できる。

(1) 繊維性有機物を多量に含む泥炭においても、各圧密荷重段階での沈下は、圧密後半部において時間の対数に対してかなり長期にわたって直線的に減少する傾向を示し、各荷重段階に対応する沈下～対数時間曲線から、それぞれほぼ定値の二次圧密係数を求めることができることを、約 1～3 か月間にわたる長期圧密試験から確認できた。

(2) 間隙比で定義した泥炭の二次圧密係数 $C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$ は圧密荷重 (p) の大きさに極めて依存し、 $C_\alpha \sim \log p$ 関係は圧密降伏応力の 2 倍付近の荷重で C_α が最大値を取る山形の形状を呈する。しかも、 $C_\alpha \sim \log p$ 関係は圧縮指数 $C_c = \Delta e / \Delta \log p \sim \log p$ 関係に呼応してお

り、 C_α と C_c との間には比例的関係が存在する。このような結果は無機質粘土から泥炭に至るに従ってより顕著となることがわかった。

(3) 泥炭における C_α 値は一荷重段階での載荷期間が長期になるに従って次荷重段階で低下し、各荷重段階での荷重載荷期間の長短の影響を受けるが、荷重増加率の大小は (2) で記述した $C_\alpha \sim C_c \sim \log p$ 関係を左右する重要な因子でないことがわかった。

(4) 海綿状繊維性構造の発達している泥炭の $C_\alpha \sim \log p$ 関係には構造異方性の効果が反映される。特に、 C_α が最大値を示す荷重域まで初期構造の相違の影響が顕著に認められることが、採取方向が互いに 90° 異なる試料間の結果から明らかになった。

(5) 各種土質間の処女圧密領域での二次圧密係数 $\epsilon_\alpha = \Delta \epsilon_v / \log t$ を有機物含有量 (Lig) を尺度として整理した結果から、 $Lig = 0 \sim 20\%$ 範囲にある土質間の ϵ_α は有機物含有量に比例して増大する傾向にあるが、 $Lig > 20\%$ の土質間では有機物含有量の度合によってあまり変わらない ϵ_α の値を取る。しかし、泥炭の ϵ_α は無機質粘土の約 10～20 倍という非常に大きな値を示す。なお、本試験から得られた各種土質の ϵ_α を自然含水比 (w_n) との関係でプロットした結果は Mesri の整理した結果と極めて類似した位置関係にあることがわかった。

謝 辞

本研究で使用した紅葉山泥炭は防衛庁技術研究本部札幌試験場の内記 護技官に採取していただいたものである。また、技術研究本部第四研究所の菅原敬彦技官と河西 淳技官には研究遂行に当り、種々の便宜を図っていただいた。ここに記して、深甚な謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大平至徳 (1971) : ピート (泥炭), 「土と基礎」, Vol.19, No.11, pp. 56~58.
- 2) 土質学会編 (1974) : 「日本の特殊土」, 土質学会, pp. 147~150.
- 3) Landva, A. O. and Pheeney, P. E. (1980) : "Peat fabric and structure," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, pp. 416~435.
- 4) 大平至徳・佐々木晴美 (1979) : 圧密沈下を考える 6, 泥炭地盤の圧密沈下, 「土と基礎」, Vol.27, No.7, pp. 81~83.
- 5) 山口晴幸・大平至徳・木暮敬二 (1982) : 乱さない有機質土の体積変化について (第2報), 「第17回土質工学研究発表会講演集」, pp. 485~488.
- 6) 渡辺 進 (1977) : 泥炭地盤の工学的性質と対策工法, 「鉄道技術研究資料」, Vol.34, No.12, pp. 445.
- 7) Adams, J. I. (1964) : "A comparison of field and laboratory consolidation measurements in peat," Proc. 9th Muskeg Res. Conf. pp. 117~135.
- 8) De Jong, G. D. J. (1968) : "Consolidation models consisting of an assembly of viscous elements or a cavity channel network," Geotechnique, Vol.18, No.2, pp. 195~228.
- 9) 持永龍一郎 (1981) : 現地計測結果よりみた二次圧密, 「土と基礎」, Vol.29, No.3, pp. 7.
- 10) 土質学会編 : 「土質試験法」, 第2回改訂版, pp. 389.
- 11) Buisman, A. S. K. (1936) : "Results of long duration settlement tests," Proc., ICSMFE, Vol.1, pp. 103~106.
- 12) Mesri, G. (1973) : "Coefficient of secondary compression," Proc., ASCE, Vol.99, No. SM 1, pp. 123~137.
- 13) Adams, J. I. (1965) : "The engineering behaviour of a Canadian Muskeg," Proc., 6th ICSMFE, Vol.1, pp. 3~7.
- 14) Mac Farlane, I. C. (1969) : Muskeg Engineering Handbook, the Muskeg Subcommittee of the NRC, Associate Committee on Geotechnical Research.
- 15) 大平至徳・木暮敬二・山口晴幸・小野 博 (1982) : 泥炭の圧密挙動について, 「第17回土質工学研究発表会講演集」, pp. 205~208.
- 16) 及川 洋 (1978) : 泥炭の圧密試験結果の一整理法について, 「第13回土質工学研究発表会講演集」, pp. 225~228.
- 17) 小野 博・大平至徳・山口晴幸 (1983) : 泥炭の圧密沈下~時間関係に関する一考察, 「第38回土木学会年次学術講演会講演概要集」, 3部, pp. 483~484.
- 18) Mesri, G. and Bohor, B. F. (1975) : "Compression and compressibility of typical samples of Mexico city clay," Geotechnique, Vol.25, No.3, pp. 527~554.
- 19) Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977) : "Time-and stress-compressibility interrelationship," Proc., ASCE, Vol.103, No. GT 5, pp. 417~430.
- 20) Mesri, G. and Choi, Y. K. (1978) : "The rate of swelling of overconsolidated clays subjected to unloading," Geotechnique, Vol.28, No.3, pp. 281~307.
- 21) Leonards, G. A. and Girault, P. (1964) : "Compressibility of clays," Proc., ASCE, Vol.90, No. SM 5, pp. 133~155.
- 22) Newland, P. L. and Allely, B. H. (1960) : "A study of the consolidation characteristics of a clay," Geotechnique, Vol.10, pp. 62~74.
- 23) Wahls, H. E. (1962) : "Analysis of primary and secondary consolidation," Proc., ASCE, Vol.88, No. SM 6, pp. 207~231.
- 24) Bjerrum, L. (1967) : "Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings (7th Ranking Lecture)," Geotechnique, Vol.17, No.2, pp. 83~117.
- 25) Murakami, Y. (1979) : "Excess pore-water pressure and preconsolidation effect developed in normally consolidated clays of some age," Soils and Foundations, Vol.19, No.4, pp. 17~29.
- 26) Grahams, J., Crooks, J. H. A. and Bell, A. L. (1983) : "Time effects on the stress-strain behaviour of natural soft clays," Geotechnique, Vol.33, No.3, pp. 327~340.
- 27) Leonards, G. A. and Ramiah, B. K. (1959) : "Time effects in consolidation of clay," ASTM, STP, No.254~116.
- 28) 山口晴幸・大平至徳・木暮敬二・森 茂 (1984) : 泥炭の非排水せん断特性に及ぼす構造異方性の影響, 「土と基礎」, Vol.32, No.11, pp. 37~44.
- 29) 松尾新一郎・嘉門雅史 (1973) : 物理的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について, 「土木学会論文報告集」, No.209, pp. 103~113.
- 30) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. (1975) : "Secondary compression of organic soils," Soils and Foundations, Vol.15, No.1, pp. 69~79.
- 31) 山内豊聰・安原一哉・平尾和年 (1977) : 粘土の工学的性質に及ぼす有機物量の影響, 「第12回土質工学研究発表会講演集」, pp. 153~156.
- 32) 川口士郎・小林慶夫・山田好一 (1981) : 上水汚泥の二次圧密特性, 「土と基礎」, Vol.29, No.3, pp. 31~36.
- 33) 安原一哉・竹中 肇 (1977) : 有機質土の工学的諸問題, 有機質土の物理的および力学的諸性質 (その2), 「土と基礎」, Vol.25, No.2, pp. 77~83.
- 34) 安川郁夫 (1983) : 粘土の二次圧密特性について (第2報), 「第18回土質工学研究発表会講演集」, pp. 213~216.