

## 諏訪湖周辺の地盤沈下と地盤土の特性

川上 浩\*・阿部 広史\*\*

Ground Subsidence and Soil Properties around the Suwa Lake

Hiroshi KAWAKAMI\*, Hirofumi ABE\*\*

**ABSTRACT:** Ground subsidence around the Suwa Lake has been widely known for a long time. Road surface has nonuniformly settled to become wavy. Most properties on new fills around buildings suffer continuous settlement. The area around the Suwa Lake is covered by a soil layer of 15 meters thick of very compressible organic soil which contains a lot of Diatomaceae. Physical properties and consolidation characteristics of the soils are depend on the organic material content. Local settlements are caused by the consolidation of the soil layers due to the additional overburden loads of the roadways or fills on them. Moreover, small settlements are observed over the whole basin, which are considered due to pumping up of hot spring water.

### 緒 言

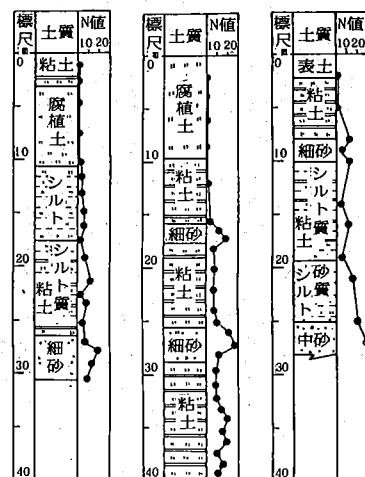
諏訪盆地では、以前からいたるところで地盤沈下現象が報告されているが、特に普門寺付近では底無し沼と呼ばれる所もあり、諏訪の七不思議の一つに挙げられている。道路・鉄道は波うち、建物周辺のわずかな盛土も沈下を続けている。特に、中央東線の上諏訪一茅野間では、明治38年の開業以来70年を経ても沈下がつづいているといわれる。昭和56年には、諏訪盆地も新たな地盤沈下地域として環境白書に登場している。沈下のみられる諏訪湖南東に広がる三角形の沖積平野には、この地方で「すくも層」と呼ばれる有機質軟弱粘土が厚く堆積している。これらの粘土層は、周囲の山地からの流出土砂と湖内の生物の残滓より成り、地表面下0~15mに広く分布しており、所によっては40mの厚さにも達している。

地盤沈下の素因はこの有機質粘土にあるとみられるが、その沈下被害の実情と地盤土の性状について報告する。

### 沈下被害の状況

**諏訪実業高校:** この地盤は、図1(a)に示すように、地表面下0~10mは有機質土、10~18mはシルト質土、18~27mにシルト質粘土、27m以下砂層という構成である。昭和40年校舎および体育館の新築に際し、地盤の安定処理として $\phi 0.43m \times 10m$ のサンドパイルを1.8m間隔に打設し、高さ3.5mの盛土によるプレロードを1年間行っている。そして、布基礎の上に鉄骨ブロック2階建の校舎が建築された。その後10年間に、棟長80mの中央

部で30cmの不等沈下を生じ、建物の各所に亀裂・開口部を見せている。また、体育館の上屋は長さ26mのPC杭で支持されたが、床面は地盤に直接支持されている。このため床面のみ沈下を続け、毎年補修に追われてきている。沈下は10年間で最大90cm、平均70cmに達している(写真1参照)。また、運動場は昭和41年に0.8~1.2m盛土して造成されたが、昭和48年5月までに0.9mの相対沈下を生じている。平均1mの盛土で0.9m以上の沈下を生じたわけで、盛土したと同じ大きさの沈下を生じ



(a) 諏訪実業高校 (b) 諏訪警察署 (c) 砂田架道橋

図1.

\*信州大学工学部 Fac. Eng., Shinshu Univ.  
 \*\*信州大学工学部 Fac. Eng., Shinshu Univ.

るといふ、文字通り底無し沼の状況が示されている。  
**諏訪警察署**：警察署の建物は昭和46年杭基礎の上に建てられた。建物周囲の敷地内には高さ1mの盛土が行われたが、盛土部分は沈下を続け、4年間に75cmの沈下を示している（写真2参照）。このため車庫は盛土のかさ上げに、建物周囲ではガス・水道管の補修に追われている。  
**卸売市場**：写真3に見られるように、ここでも警察署と同様な建物周辺敷地の沈下が生じている。沈下することはわかっているが、安価な対策工法が見当たらないままに敷地の造成が行われているとみられる。  
**鉄道**：中央東線上諏訪一茅野間は、開業以来地盤沈下のために線路保守に苦勞している区間である。井浦(1970)によれば、昭和44年11月に実施された水準測量による普門寺信号所付近の沈下量は、図2に見られるように、最大45cmに達している。上諏訪一茅野間でも普門寺信号所付近は、特に有機質土が厚く、かつ高含水比で軟弱であ

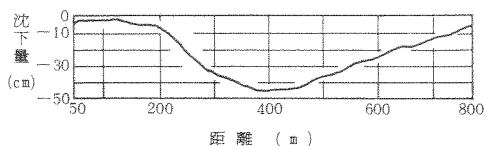


図2. 国鉄普門寺信号付近の沈下（昭和43年11月）



図3. 諏訪盆地の地盤沈下状況  
 （長野県諏訪建設事務所資料）

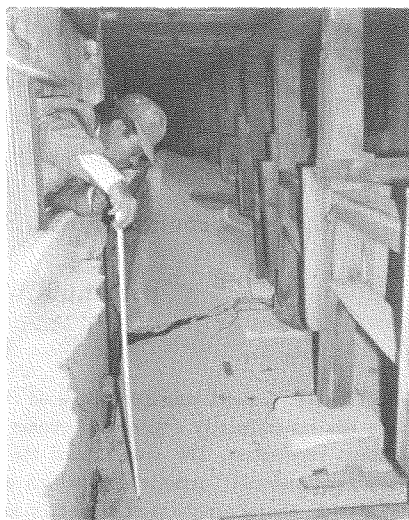


写真1 諏訪実業高校体育館床下の沈下（昭和49年）  
 外壁下の基礎梁は杭に支持され沈下しないが、直接地盤に支持された床面は沈下している。床下の木材を継ぎ足して補修している。



写真2 諏訪警察署敷地の沈下（昭和49年）  
 車が出入りできるよう、毎年舗装のかさ上げが行われている。

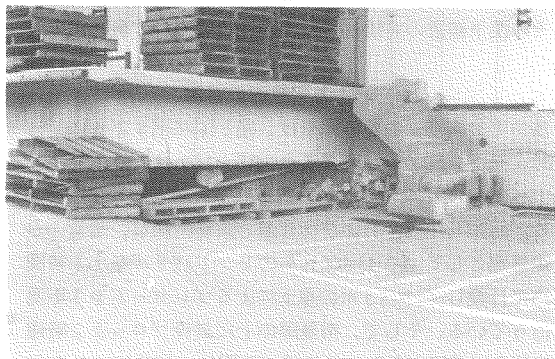


写真3 諏訪卸売市場の沈下（昭和58年）  
 敷地の沈下により、基礎梁が露出している。階段を継ぎ足して出入りしている。

る。柱状図の一例を図1(c)に示しているが、地表面下7mまでの有機質土が問題とされている。その含水比は500~800%に達し、諏訪湖周辺でもこれほどのものは珍しい。通常、自然含水比は300~400%以下である。図2に示された沈下状況は、有機質土の厚さの分布と相似していると報告されているが、このことは沈下の主原因が有機質土層にあることを示している。

昭和44年1月よりこの区間の線増工事が開始されたが、普門寺信号所付近では高さ4.5mの腹付け盛土が行われた。盛土工事による沈下量は、昭和45年10月までに1.35mに及んでいる。沈下状況からこの間に一次圧密は終了していると見られる。しかし、45年10月の運転開始から49年3月までにわづかながら沈下を続け、その間の沈下量は1.08mに達している。その原因としては、地盤沈下のためのかさ上げによる路盤荷重の増大、列車荷重の影響が考えられるが、地盤土の二次圧密による効果が大きいと推察される。盛土による一次圧密量が1年6箇月の間に1.35m、その後の二次圧密量が3年半に1.08mと、二次圧密が大きいことが注目される。

**諏訪盆地全域：**上述の沈下は盆地内の局所的沈下で、盛土等沈下の原因がはっきりしている。しかし、近年盆地全域の調査が進められた結果、盆地全域で沈下が進行していることが認められている。昭和53年2月から昭和56年11月にかけて、長野県が盆地内に80箇の測点を設置して計測した結果によると、図3のごとく、年間1cm以上の沈下域が盆地の大部分を占めるに至っている。沈下量の特に大きい所は、普門寺及び食肉センター付近で年間最大4.5cmを記録しているが、この付近で有機質土が特に軟弱と考えられる。広い沈下域は、盆地東北の端に沿っていると見ることができ、この盆地東北端に沿って温泉源が並んでいる。諏訪盆地では諏訪湖の水位が一定に保たれていることもあって、浅層地下水の水位が低下している状況はみられない。したがって、盆地全域にわたる沈下については、温泉のくみあげによる深層地下水の圧力低下が影響しているのではないかと考えられている。

#### 地盤土の物理的特性

これまでに長野県関係の土質調査資料を収集すると共に、土質試料の採取を行って土質性状を調べてきている。収集した資料は、下諏訪より北諏訪を経て豊田に至る間の湖岸に沿う地域のもので、一部鉄道に沿う資料が含まれている。いまだ盆地内部にはおよんでいないが、資料数は土質試験結果で300余にのぼる。これらより有機質土の圧縮特性を中心に検討している。

**有機物含有量と他の性質との関係：**土中の有機物含有量を測定する方法はいろいろあるが、ここでは最も簡便な

強熱減量法を用いている。

強熱減量と真比重との関係を示すと図4の通りである。有機物と土粒子との混合物として測定される土の真比重は、有機物含有量と反比例の関係にある。 $G_H$ を有機物の真比重、 $G_M$ を土粒子そのものの真比重、 $h_C$ を有機物含有量とすれば、測定された真比重 $G_S$ は

$$G_S = \frac{G_H \cdot G_M}{G_H + h_C (G_M - G_H)} \quad (1)$$

と表される。いま、 $G_M=2.80$ 、 $G_H=1.50$ の値を仮定して得られる結果は、図中の破線のようにになる。諏訪湖有機質土の場合、かかる仮定値で代表できるとみられる。

強熱減量と自然含水比との関係を、有機質土の堆積深度で区分して、図5に示している。5m以内の浅層に、有機物が多くかつ高含水比の有機質土が存在する。また、10m以深では、強熱減量及び自然含水比が小さくなっている。深さ5~10mの測定値が広い範囲に分布している

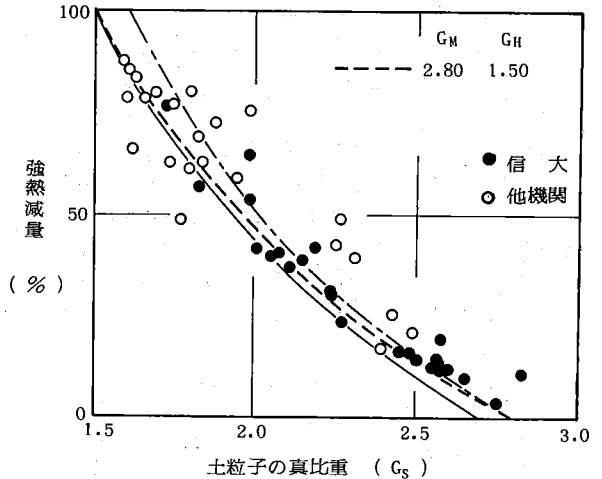


図4. 強熱減量と真比重の関係

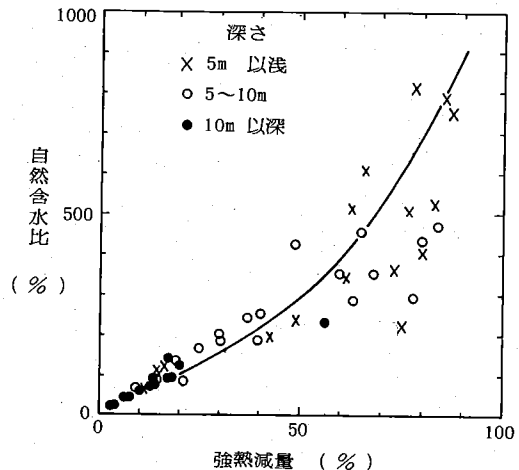


図5. 強熱減量と自然含水比の関係

のは、有機質土の性質が場所によってかなり異なっていることを示している。強熱減量が50%を越した所で測定値がばらついているのは、含水比が高くその測定に誤差を伴うためとみられる。試料採取時に多少とも土中水のしぼりだしがあることを考えると、ばらつきの中でも含水比の高いものの方が信頼性が高いといえよう。したがって、図5では図中の曲線の関係が想定される。

**有機質土の湿潤密度とコンシステンシー**：自然含水比と湿潤密度の関係を図6に示す。先に有機質土の真比重は含有する有機物の量により変化し、(1)式で表わしうことを示したが、これに図5の関係を組み合わせると、含水比と飽和時の湿潤密度の関係を求めると、図6の曲線の関係が得られる。密度の大きい所では、この計算曲線と測定値はおおよそ一致しているとみられる。湿潤密度の小さい所では、測定値は密度が1以下のものがある。有機物のみの真比重でも1.50と考えられることからすれば、有機質土の湿潤密度が水の密度以下になることは不合理である。含水比の高い有機質土では、試料採取中に水がしぼりだされ、密度の測定に誤差を伴いがちであるから、計算曲線の方が妥当な関係を与えていると見られる。

同様な関係ではあるが、泥炭との違いを示すために図7を示す。この間隙比と含水比の関係は、一定比重のもとでは直線となるが、諏訪湖有機質土では曲線関係が認められる。(1)式と図5の関係をういた計算値は、図中の計算曲線のごとくなり、測定値をほぼ代表しているとみられる。既往の泥炭の結果とは、わづかな違いをみせている。

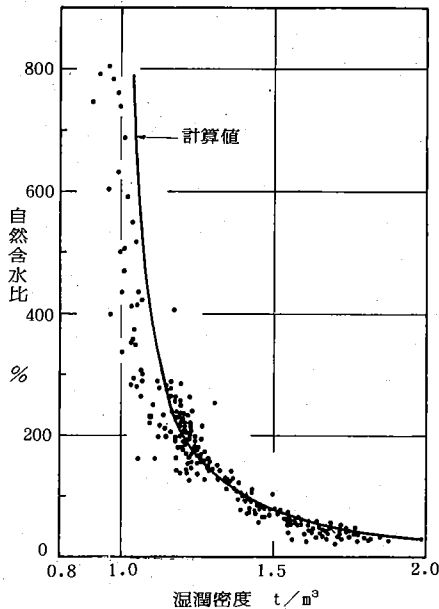


図6. 自然含水比と湿潤密度

諏訪湖有機質土のコンシステンシーを図8に示す。通常の粘土では、ほぼ塑性図のA線上に分布するが、諏訪

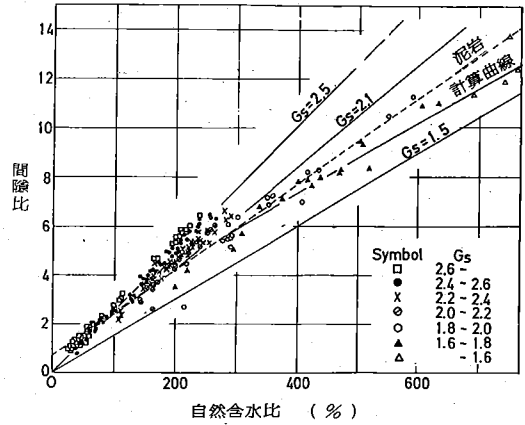


図7. 自然含水比と間隙比

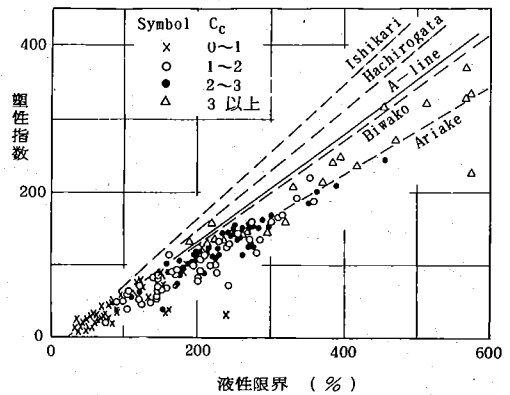


図8. 塑性図

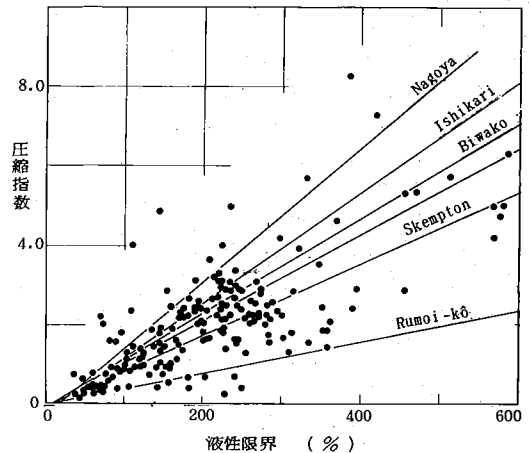


図9. 圧縮指数と液性限界

湖有機質土では、A線の少し下側に分布している。既往の他の粘土の結果と比較すると、ほぼ有明粘土の結果に一致するといえる。図8では、データを圧密試験で得られる圧縮指数  $C_c$  で区分して示している。液性限界の高いものほど圧縮性が高いことは、既往の知識通りである。この関係を明示するために図9を示す。圧縮指数と液性限界の関係は、この有機質土ではかなりばらついたものとなり、他の粘土で見られるような一定の関係は求めがたい。しかし、圧縮指数が3を越すような圧縮性の高いものが多数分布することは留意すべき事項である。

**一軸圧縮強度：**一軸圧縮強度の分布を図10に示す。図示のごとく、含水比の低い所ではばらつきの多いものとなっている。自然含水比と他の物理的特性とに比較的關係がみられたにもかかわらず、一軸圧縮強度との関係がみられないということは、一軸圧縮強度の試験値が信頼性に乏しいことを示している。有機質土の場合、試料採取の間に試料土が乱される可能性が大きく、また一軸圧縮試験中に非排水条件が満たされている保証はない。このような試料土の正しい強度評価の難しさの一端を示している。

#### 微視的構造

有機質土の圧縮性が大きいこととその土粒子構造との関係性を調べるために、走査電子顕微鏡による観察を行っている。

有機物が多い試料土では、肉眼でみたのみでもその大部分が植物繊維で構成されていることがわかる。肉眼では繊維質が認められない試料土でも、有機物含有量の多い試料土では、比較的簡単に有機物を観察できる。顕微鏡観察のためには、試料土より、溶媒置換法により水分を除き、気乾の後エッチング・金蒸着を行う。

写真4の試料土は、強熱減量13%のものであるが、これでは有機物は見当たらない。写真5は強熱減量56%と

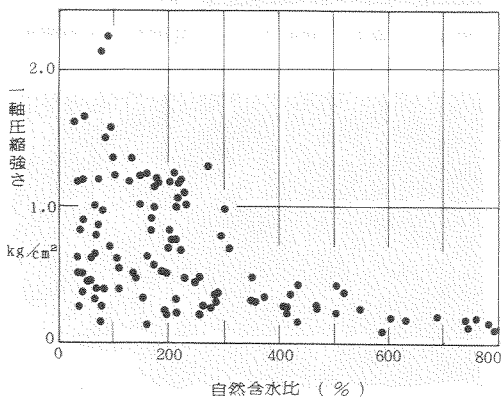


図10. 一軸圧縮強度の分布

有機物が多い部類の土である。写真の右下に、多孔質の有機物がみられる。さらに、拡大した写真を写真6に示すが、ここにはけい藻の殻の破片がいくつか認められた。しかし、通常の有機質土ではその量はわずかであり、顕微鏡像の中で探すには苦勞する程の量である。

またこの写真では、土粒子とみられる塊も多数の薄片状の粒子が集合して団粒をなしている様子がみられる。このことをより明確にするために、試料土を分散させ、細粒分のみを観察を試みている。試料土を通常の粒度試験の場合のごとく、まず有機物を過酸化水素水で処理した後、メスシリンダー内に分散させる。その後、土粒子の粒径と沈降時間の関係より、一定の粒径をもつ粒子をピペットにより採取した。その2  $\mu$ 以下相当の粒子の状態を写真7に示す。土粒子のなかには、けい藻の殻の破

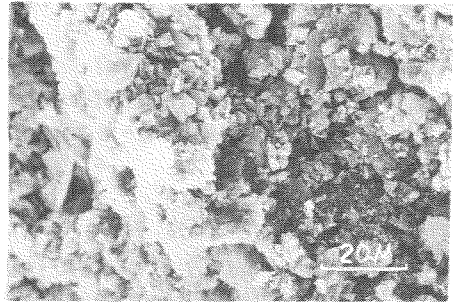


写真4 湖南 深度10.2～11.2 m, 垂直断面

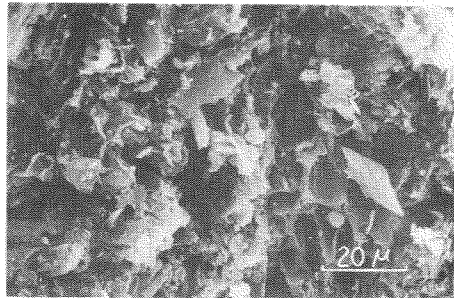


写真5 湖南 深度15.6～16.6 m, 垂直断面

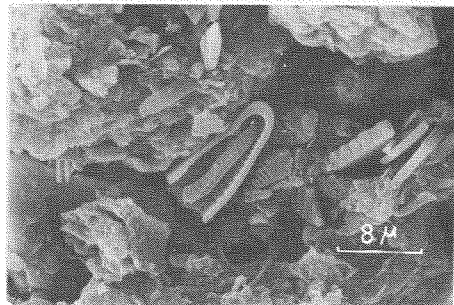


写真6 湖南 深度15.6～16.6 m, 垂直断面

片あり、団粒ありで、粒度試験の処理の仕方では、さらに細粒化し、圧縮されれば変形する可能性のある粒子ばかりである。より粒径の大きなものにおいても同様な状態にあり、写真8にみられる40~74 $\mu$ 相当の粒子像においても、写真中央に薄片粒子の集合体の像がみられる。写真によっては、このような薄片集合体の粒子しかみられないものもある。このような形状は、火山灰質粘性土の像によく類似しており、有機質土の中にはかなりの火山灰が混入していることが推察される。

通常の有機質土では、けい藻の殻片が見られることは少ないと述べたが、試料によってはけい藻の殻ばかりが見られるものもある。写真9, 10に示す豊田の試料土では、土粒子はみられず、コバンケイソウ、メロシラの殻ばかりである。この試料土の圧密を行った後の像を示すと、写真11, 12の通りである。圧密により、けい藻の殻が圧縮・破碎されていることが認められる。

以上の観察からみられるように、有機質土の高い圧縮性は、その中に保持している多孔質有機質部の圧縮、火山灰土粒子の圧縮性、けい藻殻の圧縮・破碎が大きく影響しているとみられる。

#### 二次圧密特性

圧密特性：圧密試験のために入手した試料土の土性を、表1に示している。諏訪湖有機質土では、自然含水比は100~600%の範囲のものが多いが、自然含水比は有機

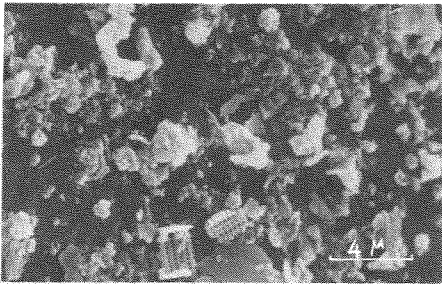


写真7 飛地 深度7.0~7.8m, 粒径2 $\mu$ 以下

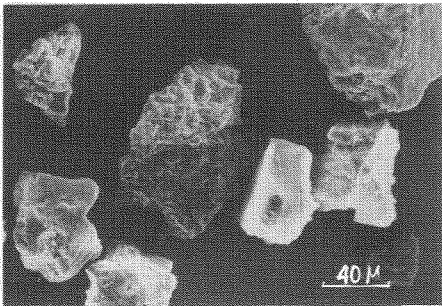


写真8 飛地 深度7.0~7.8m, 粒径40~74 $\mu$

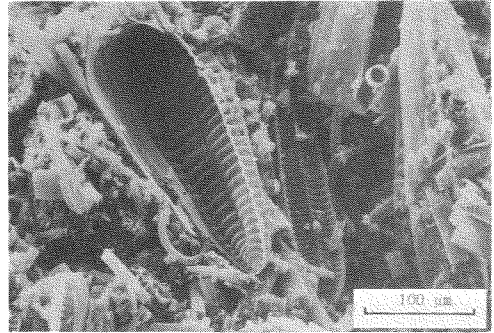


写真9 豊田 深度13.0m, 圧密前, 水平断面

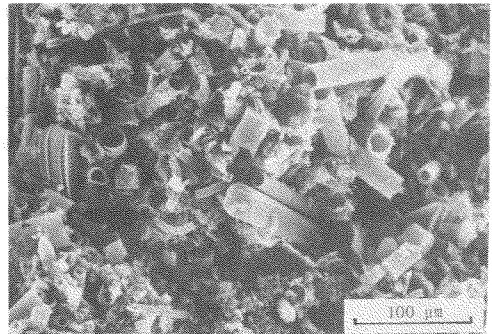


写真10 豊田 深度13.0m, 圧密前, 垂直断面

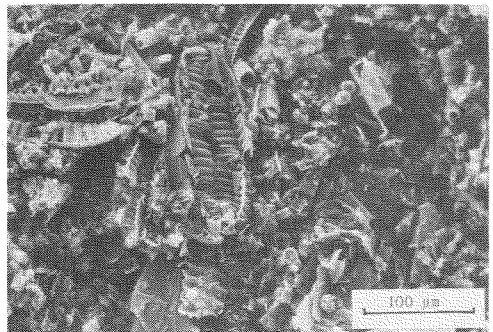


写真11 豊田 深度13.0m, 圧密後, 水平断面

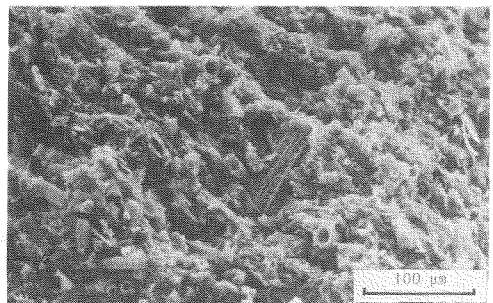


写真12 豊田 深度13.0m, 圧密後, 垂直断面

表 1. 圧密試験試料土の土性

試料・深さ	含水比%	間隙比	飽和度%	真比重	液性限界	塑性限界	塑性指数	強熱減量 %	圧縮指数
湖南 16 m	208	4.02	94.5	1.83	358	241	117	56.0	1.85
飛地 7 m	140	3.64	94.7	2.47	159	91	68	17.1	1.02

物含有量とともに増大するものと考えてよい。これに対比すると、圧密試験に用いた試料土は、自然含水比は低く、圧縮性の小さい部類に属する。しかし、かかる試料土でも、圧密試験で長時間荷重を行った場合、その沈下一時間曲線は、図11に示すごとく、沈下の大部分が二次圧密であり、一次圧密の終了がわからない形で沈下が続くのが特徴である。

プレローディングの効果：図12に示す模式図によって荷重の方法を説明すると、 $p$ まで圧密して、その後1箇月荷重状態のまま放置した場合には、図のa点よりb点に至る沈下が発生する。一方、 $p$ の荷重で放置せずに、荷重を $p + \Delta p$ に増やして24時間圧密し、その後 $\Delta p$ だけ除荷して放置した場合、その沈下は1箇月でd点に達する。沈下が一定の間隙状態に達するように生ずるものと考えれば、 $\Delta p$ の除荷後1箇月で生ずる沈下はb点までと予想されるが、実験の結果ではb点を越えてd点に達し、プレロード $\Delta p$ によって荷重 $p$ における二次圧密を軽減する効果は薄くなっている。実験の結果を、図13に示している。各荷重段階24時間および100分の圧密試験の途中で除荷を行い、30日および40時間の放置を行った場合、上述の傾向がみられる。

かかる除荷後の沈下特性は、除荷する荷重ともとの荷重の比率に影響される。その膨張・沈下性状を図14に示す。除荷荷重が大きい場合には、膨張後わずかに沈下するのみであるが、除荷荷重が小さくなると、一定時間後には沈下が著しくなる。これらの傾向は、粘土および泥炭に関する室町・渡辺(1963)の研究に報告されている通りである。図14における除荷後の膨張とその後の圧縮沈下を除荷率に対比して、図15に示した。除荷率が増大するにしたがって、膨張量が増大し、最大膨張に達する

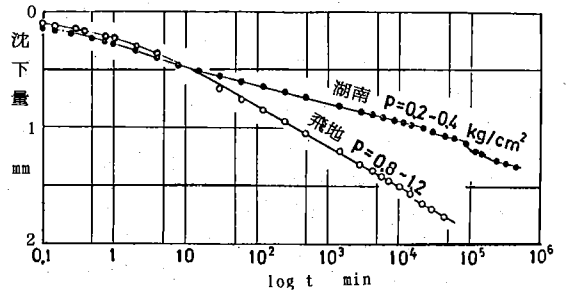


図 11. 圧密試験の一例

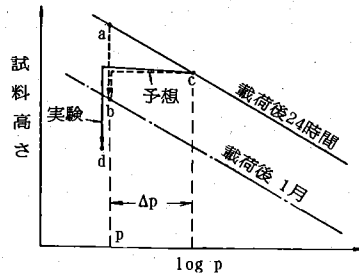


図 12. プレロード後の沈下模式図

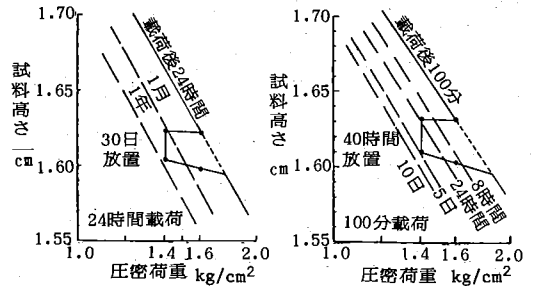


図 13. 圧密試験におけるプレロード後の沈下

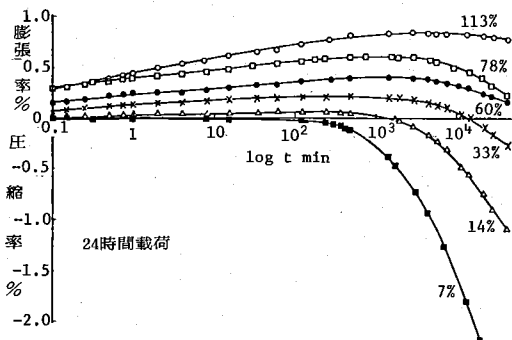


図 14. 除荷後の膨張・沈下一時間曲線

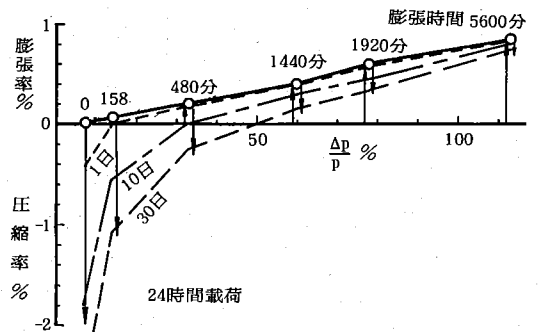


図 15. 除荷率による膨張量と沈下

表 2. 諏訪実業体育館の沈下計算

深 度 $m$	土 質	$\frac{r}{v} / m$	間隙比	圧 縮 指 数	圧密係数 $cm^2 / sec$	厚 さ $H m$	沈下量 $m$
0.50 - 2.50	粘 土	0.31	3.47	0.56	0.148	3.00	0.14
2.50 - 10.00	腐 植 土	0.12	6.92	4.16	0.120	7.50	1.11
10.00 - 18.00	腐植物混シルト	0.17	4.59	2.38	0.112	8.00	0.65
18.00 - 25.00	腐植物混粘土	0.25	3.23	1.89	0.042	7.00	0.40

までの時間も増大する。そして、その後を生ずる一定時間までの沈下は、除荷率の小さい所で急増していることがわかる。このように、除荷率が小さい場合、除荷後も沈下が継続し、沈下の抑制効果がないことは常識的にも推察される。通常  $\Delta p / p$  の値として 30% は必要であるといわれる（持永，1969）。この 30% を図 15 にあてはめると、これは圧密試験における各載荷時間の 5 ~ 10 倍に相当する時間に沈下が発生しないことに相当する。このことは、土質によっても変化すると考えられ一般性に乏しいが、除荷率 30% 以下ではプレロード効果がうすいことは、図 15 の状態からも察せられる。

諏訪実業体育館の沈下解析：沈下被害の項で説明した体育館の沈下量を、残された土質試験結果より計算してみると以下のごとくである。地盤土の土質性状としては、表 2 の値を用いている。これらの常数を用いて得られる全沈下量は 2.30 m となる。現場では深さ 10 m までサンドパイルを打って、高さ 3.5 m の盛土によるプレロードを 1 年間行った後、旧地表面 + 1.0 m まで掘削除荷を行ったとのことである。サンドパイルを打設した地表面下 10 m の層は、計算上数日で 95% 圧密度に達することになる。また、10 m 以深の層を両端排水層として計算すると、80 日余で 90% 圧密度に達することになる。したがって、プレロード期間の 1 年間に一次圧密は終了したものと推察される。盛土による沈下計測が行われていないので、推定の域を出ないが、計算通りの 2.3 m の沈下が生じたものとすれば、除去できる盛土厚さは 0.2 m であり、荷重除荷率は 6% となる。3.5 m の盛土を行って地盤強化には役立っているが、沈下量が大きいため、除荷率がわずかになり、残留沈下防止にはあまり役立たなかったものと推察される。このように沈下量の大きな有機質土地盤で、プレロードの除荷率 30% を確保できるようにするためには、1 m の盛土を目的とする所で 6 ~ 7 m 盛土しなければ

ならないことになる。経済的にみあうかどうか問題となろう。

### 結 論

諏訪盆地における沈下被害の状況とその原因となっている「すくも層」と呼ばれる有機質土の物性・微視的構造・二次圧密特性について調べている。

1) ひとつの敷地内のごとき局所的沈下は、敷地造成のための盛土によって生じており、1 m 盛れば 1 m 近く沈下する所もある。しかも沈下は長期間におよび、二次圧密による沈下が著しい。くわえて最近では、温泉のくみあげの影響とみられる広域的沈下がわずかながら発生している。

2) 有機質土の物性は、含まれる有機物量に応じて変化している。有機物量が増大すると、真比重は減少し、自然含水比・圧縮性は増大する。

3) 微視的観察によれば、有機質土の中には多孔質の有機物・火山灰土・けい藻の殻が認められ、圧密荷重によるこれらの圧縮・破砕が二次圧密を増大させているとみられる。

4) 残留沈下を防止するためのプレロード工法は、沈下量が大きいため、わずかなプレロードではその効果がうすい。十分な荷重除荷率が得られるよう配慮すべきである。

### 参 考 文 献

- 室町忠彦，渡辺進（1963）プレローディング工法に関する基礎的研究，11-6，3~10。
- 持永一郎（1969）新しい軟弱地盤処理工法，近代図書。
- 井浦広美（1970）中央本線茅野・上諏訪間軟弱地盤における盛土施工について，長野鉄道管理局施設部資料。