

III-4 軟弱粘土の圧密計算における一提案

大阪市立大学 正員 竹中 準之介

I) まえがき

A) 先行圧密荷重 (preconsolidation load or quasi-preconsolidation load)

粘土層が過去にうけた圧密荷重と圧密試験によって求められる先行圧密荷重が一致しない場合のあることが最近問題になってきた。最初チエボタリオフ(1958)は土質工学のテキストブック中に化学作用の先行荷重におよぼす影響をのべている。その一例として粘土中にある藍鉄鉱(vivianite)の膠結作用が先行荷重を非常に大きくしたことを報告している。一方(Leonards and Ramiah 1959)(Hansbo 1960)は長時間の2次圧密やチキソトロピーの作用により先行圧密荷重が有効土かぶり荷重より大きくなることを指摘している。また森 麟氏は石膏の固結による実験を行い、筆者は大阪附近の洪積粘土層の研究においてその事実を認めた。

以上のことは日本のように沖積粘土層の深く堆積している地域の沈下計算において極めて重大な意義をもっていることを強調したい。

B) 圧密沈下—時間 関係について (とくに粘土のレオロジー的モデルの問題)

粘土層の圧密に関しては(Taylor)が2次圧密を考えた理論を発表して以来、各種のレオロジー的モデルが考えられるようになった。しかしこれらのモデルに関する実験はすべて圧密試験機により行われてきたが、最近圧密試験機のリングに作用するフリクションの影響が予想外に大きくて、圧密試験の方法により圧密理論の実験を行うことは余り意味がないことが分ってきた。したがって粘土の圧密現象に関してはマクロ的レオロジーすら明らかにできていないといっても過言ではあるまい。ましてミクロレオロジー例えは「レートプロセス理論、ディスプレイン理論」などの方法論による粘土のクリープとか圧密に関する説明は立脚点のあいまいな架空の想像になるおそれがないともいえない。

すなわち粘土の圧密に関してのレオロジー的研究は先づマクロレオロジーの問題を解決すること、粘土の構造的研究としてコロイド化学の研究が目下の解決すべき第一歩ではないだろうか。

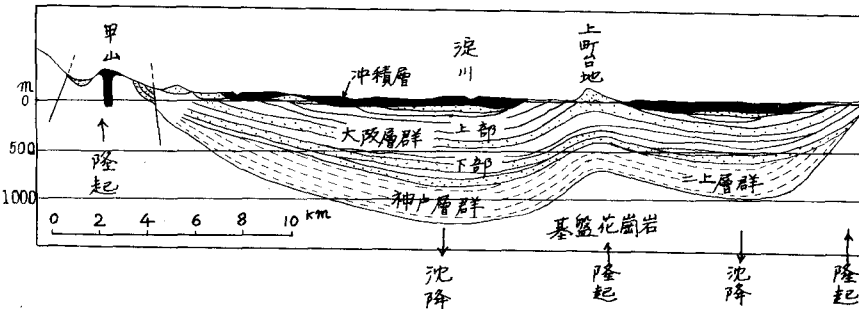
この点につき筆者はフリクションレスの圧密試験機を試作し(1959)、圧密試験を行った結果、従来の試験機による圧密時間曲線において、2次圧密のようにみえる部分はリングのフリクションによるクリープ現象であることを示しておいた。この現象は現場圧密曲線と比較し、かなり正確性が認められるようになった。調査の対照とした現場の現場圧密曲線は、ほとんど沈下終了状態に近くなったので、これらの結果を総合し、圧密沈下計算に対し一提案を行いたい。

なおこれらの粘土は日本における沖積粘土層の代表的性質を示すものと考えてよい。すなわち沖積層粘土はそれが海岸三角州の粘土層、あるいは海底粘土層であれば

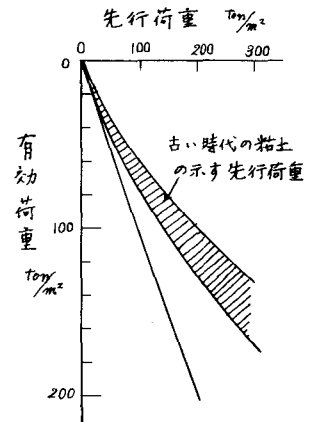
地域的により粘土層の特性が変わるということとは考えられない。これらの沖積粘土層の成因ならびに土性論は別の機会に発表する予定であるが、すくなくとも実用上は粘土の土性の地域的区別は考える必要がないので、筆者の研究結果に対し各種の資料を比較し即批判を述べたい。

II) 先行圧密荷重

(a)



(b)



第一圖 (大阪市大市原原因)

粘土層の先行圧密荷重に及ぼす長時間の物理的・化学的作用の影響の研究は堆積物の地質学的方法でなければ簡単決できない。この方法の根拠は第一図により説明される。第一図(a)は大阪盆地全体の構造概略図であるが、盆地中心部においては、大阪層群以後の地質時代堆積物は堆積→侵蝕→堆積という過程ではなく堆積→沈降→堆積という過程で生成された。従ってこれらの地層の有効土かぶり荷重が現在の有効土かぶり荷重以上になったことはありえない。しかしこの粘土層の先行圧密荷重を調べてみると第一図(b)のような結果となった。第一図(b)に示したように地層は時代の古いものほど現在の有効土かぶり荷重よりも先行圧密荷重のほうが大きいう現象を呈している。時代がさらに古くなると神戸層群(明石海底ボーリング試料約1500万年～2000万年前)においては肉眼観察によっても、明らかに化学的変化、恐らく珪化作用類似の変化により著しく強度、先行圧密荷重の増大していることを認めた。

同様に沖積軟弱粘土層においても時代の新舊により、先行圧密荷重の有効土かぶり荷重より大きいものが存在する。沖積層の古いもの(約1万年～2万年)は3～6 ton/m^2 ほどの過圧密粘土となっている。このような過圧密粘土が地表下深いところに存在すれば圧密試験の結果より正規荷重粘土が過圧密粘土かを判定することは困難である。とくに試料採取時のかくはんの影響がある場合はさらに判定は穴の数々少なくなってくる。その結果沈下計算の結果が実測沈下

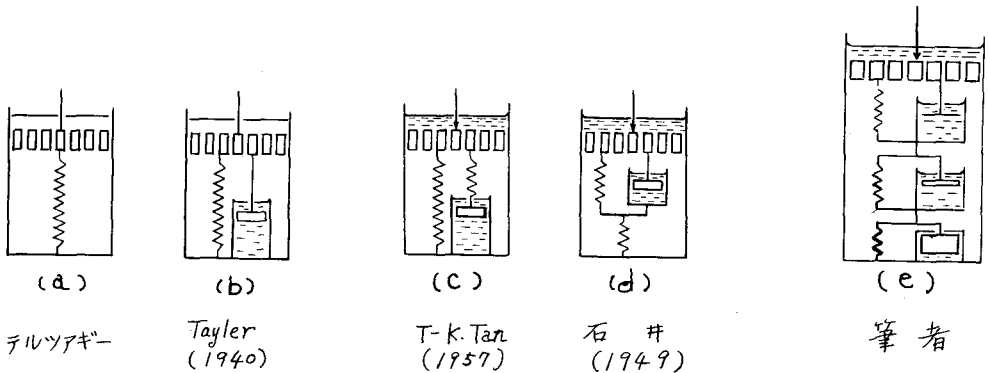
量よりも非常に大きい結果をあたえた実例も存在する。

これらの誤りを防止する方法として沖積層、洪積層の定義に関する再検討を行う必要があろう。それと同時に古い時代の沖積層に關しては C_{14} アイトーブによる絶対年代の測定と、現場沈下観測および現場間隙水圧の測定結果が問題の解答をあたえてくれる。

III) 沈下速度の計算

A) 従来のモデルの問題点について。

第 = 圖



テルツァギーのモデルは二次圧密に対して考慮していないので、(Taylor 1940) は (b) のようなフォイト作を考えた。しかしこのフォイト作は薄い試料の圧密度-時間曲線における一次圧密と二次圧密の分離の説明がつかないので、石井氏 (1949)、T-K Tan (1957) は (c) (d) のようなモデルを提案した。(c) (d) 何れのモデルも原理的には同じことで、速度の速い歪が加わるとき、フォイト作の歪抵抗が大きいのでスプリングだけが歪を生じて、この歪速度は透水の抵抗だけにより時間遅れを生ずる。歪の進行が遅くなると、フォイト作の歪抵抗は小さくなるので、このフォイト作の歪が徐々に進行する。これを圧密の場合二次圧密と考えるのである。

石井氏の理論を言葉をかえて要約すると次のようになる。粘土の圧密試料の厚さを適当な薄さに選ぶと一次圧密と二次圧密が分離してあらわれその圧密度 U は下式で示される。

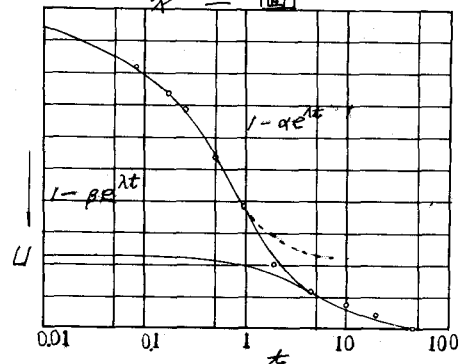
$$U = 1 - \alpha e^{-\lambda t} - \beta e^{-\lambda_1 t}$$

ここで $\alpha e^{-\lambda t}$: テルツァギー的圧密 (一次圧密)

$\beta e^{-\lambda_1 t}$: フォイト作の圧密 (= 二次圧密)

上記の關係と實際の圧密試験の比較は右図に示すようになる。そして圧密の初期曲線は $\beta e^{-\lambda_1 t}$ の影響がないので初期曲線により

第三圖



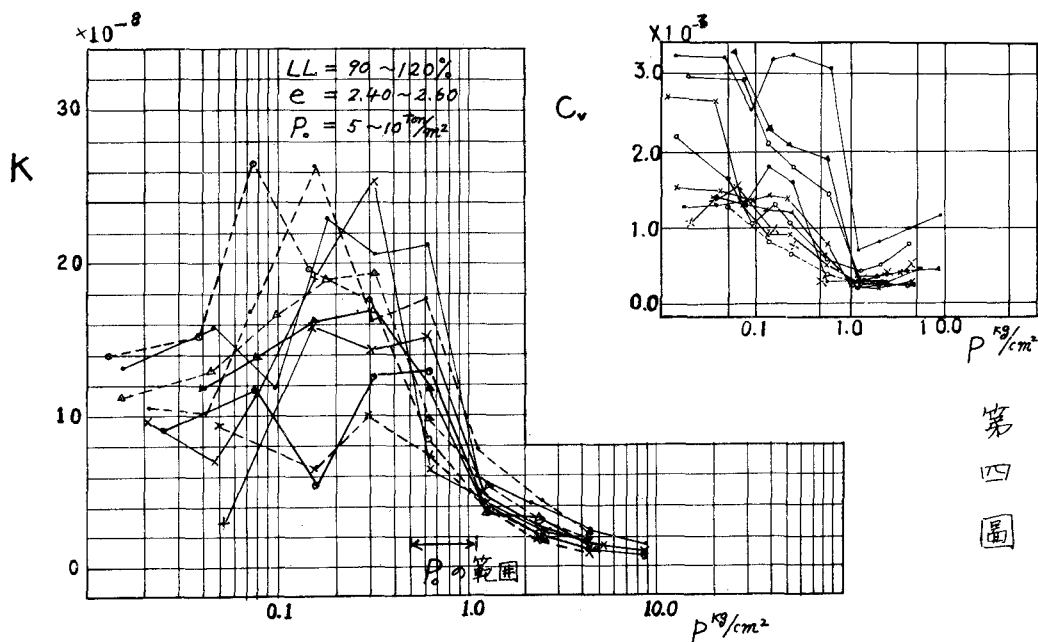
透水係数 K , 体積弾性率 m_v を解析しようとするものである。従つて体積弾性率に関する考え方が少し違う程度で、それ以外はキヤサグランドの方法と原理的には変らない。しかし石井氏および Tan のモデルは以下の点で粘土の本質上重大な誤りをしている

1) 粘土の間隙水は、含水比が液性限界以下において、すべて吸着水であつて重力水ではない。そのため粘土中の間隙水は Pseudo-Plastic Liquid であるといわれる。したがつて脱水の時間的ラターションは、圧密初期といへども、透水抵抗によるものだけでなく吸着水離脱に關する粘性的抵抗によるものがある。むしろ圧速度の異がらみれば粘性抵抗は初期ほど大きいものでなければならぬ。しかし前記のモデルにおいては圧速度が速いときは圧密初期に粘性抵抗は作用しないという矛盾した假定から出發している。

2) 以前は圧密試験における時間曲線の最後の直線的部分は二次圧密であると考えられていた。この点に關しては現在でもその誤謬に氣付いていない論文を見ることがある。この直線部分は筆者はフリクションレス圧密試験において、大部分がリングのフリクションによるものであることを指摘しておいた。石井氏は後に(1955)リングのフリクションの実測結果より圧密試験残による時間曲線より二次圧密を論ずることを全面的に訂正している。したがつて圧密試験残による時間曲線によく合致するようなモデルを考えることは粘土の構造的本質から外れているといわなければならぬ。

B) 筆者の考え方

筆者のモデルは前頁に示した通りであつて、3重のフォイト体によつて構成される。このモデル



第四圖

の下部フオクト体は地質学的時間のような長時間のクリープに関係するもので、実用的には無視しうるものとする。下部フオクト体を無視すれば単に二重フオクト体になるが、圧密試料の厚さが極端に薄くなければ ($2H = 60\text{cm}$ 以上)、この二つのフオクト体の歪は分離して発生しないので (Tagler) のモデルと同一であると考えてよい。圧密試料の厚さが $2H = 60\text{cm}$ 以上になると圧密度 U は $U = 1 - p^{\lambda t}$ という型であらわれるため圧密-時間曲線はテルファギ-の理論曲線と同一に見える。在来の圧密試験機による圧密-時間曲線においても、一次圧密に関する圧密は初期に上部フオクト体、末期に中間フオクト体の歪が進行しているものと推定される。そこで見かけ上テルファギ-理論曲線に似ている場合でも、粘性の影響が存在していることを実証するため第四図に圧密荷重-圧密係数、

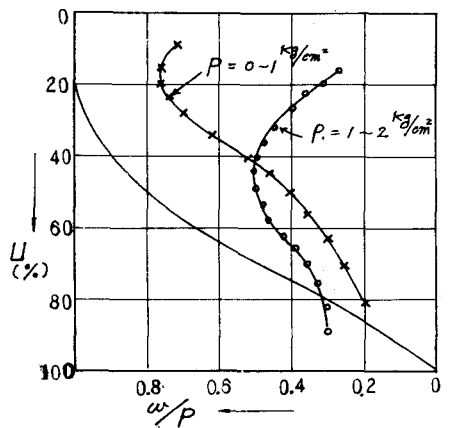
圧密荷重-透水係数の関係を図示した。

これらの関係は在来の圧密試験機による圧密試験結果をキャサグランドの方法によつて計算した結果である。その結果によれば粘土の透水係数は先荷圧密荷重附近において不連続的に変化している。この現象は先行圧密荷重までの荷重においては粘土の脱水は粘性の作用しないテルファギ-的モデルにより圧密が行われるが、それ以上の荷重においては粘性の影響を非常にうけていることを示すものである。

また薄い圧密試料の圧密脱水のときに

作用する粘性の影響は第五図の実験結果において

示される。第五図は $2H = 60\text{cm}$ のフリクションレス圧密試験における圧密度と中立面間隙水圧の測定結果を示したものである。この試験機はフリクションレスであるのでも粘土の構造モデルがテルファギ-的のものであるば



第五図

$$P = p + w$$

P : 圧密荷重

p : 有効応力

w : 間隙水圧

でなければならぬ。しかし第五図の実験結果は

$$P = p + w + \mu \frac{dw}{dt}$$

$\mu \frac{dw}{dt}$: ニュートン粘性抵抗

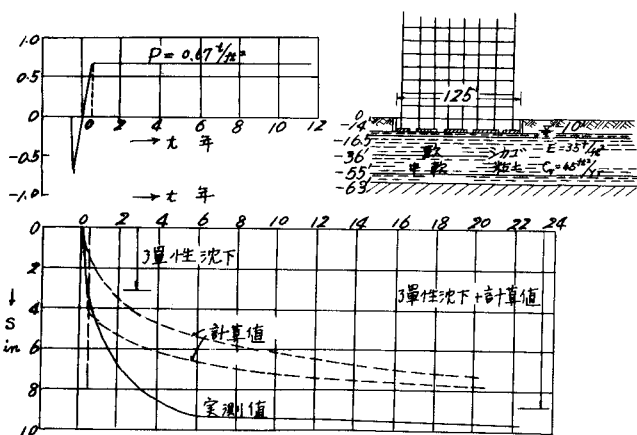
という関係を実証するものであつて、圧密の初期においても充分粘性抵抗の大きいことを物語っている。この場合 w/p は圧密の全期間中一定ではなくてとくに初期の排水面近くにおいては非常に大きいものであることが予想される。この事実からみても圧密時間曲線の初期曲線より透水係数を計算することの無意味さ分かる。

以上の実験結果より圧密試験結果より求めた m_v , C_u , K を実際の現場沈下計算に使用する場合に生ずる誤りを要約すると

「圧密試験においてはリングのフリクションが一次圧密終了近くになって急に増大するので m_v が小さくなる傾向がある。この量は 30~40% ほどであって、この分の沈下が見かけ上二次圧密となってあらわれる。そして C_u , K の計算においては、二次圧密の影響の全うないと思われる圧密-時間曲線の初期の曲線より求める方法がとられている。圧密初期の曲線はリングのフリクションが全う影響しないので、見かけ上テルファガーの理論曲線によく一致する。しかしそれは粘土のモデルがテルファガーのモデルあるいは石井氏らのモデルによる脱水メカニズムを示すものではなく、粘性の影響を非常にうけていることが分かった。したがって実際の現場沈下曲線は計算値よりもずっと早く沈下が終了することを示している。」

これらの実験結果は次頁オセ国オ八図に示した。この図における現場沈下曲線の圧密度は現場における間隙水圧計（水銀マノメーター式、電気式2種）により決定したものである。

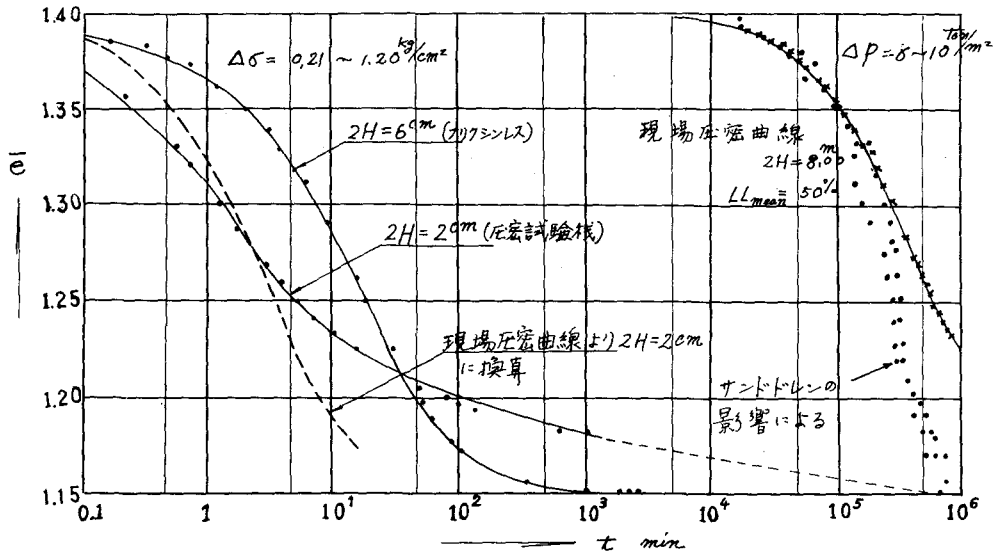
スキャンプトンはシカゴおよびロンドンにおける6地元の構造物沈下の解析を行った結果共通の現象として沈下観測値は計算値よりも沈下量が大きく沈下速度が速いことを認めている。その一例はオ六図に示した。沈下の計算にあたり、粘土層の層厚と建物のディメンジョンの関係より、排水条件は一次元圧密として行ったものとしているが、沈下速度の速い点に関しては觸れていない。しかし筆者の行った実際の沈下との比較を行うと当然この程度の差異が生ずべきであるので参考に記載した。



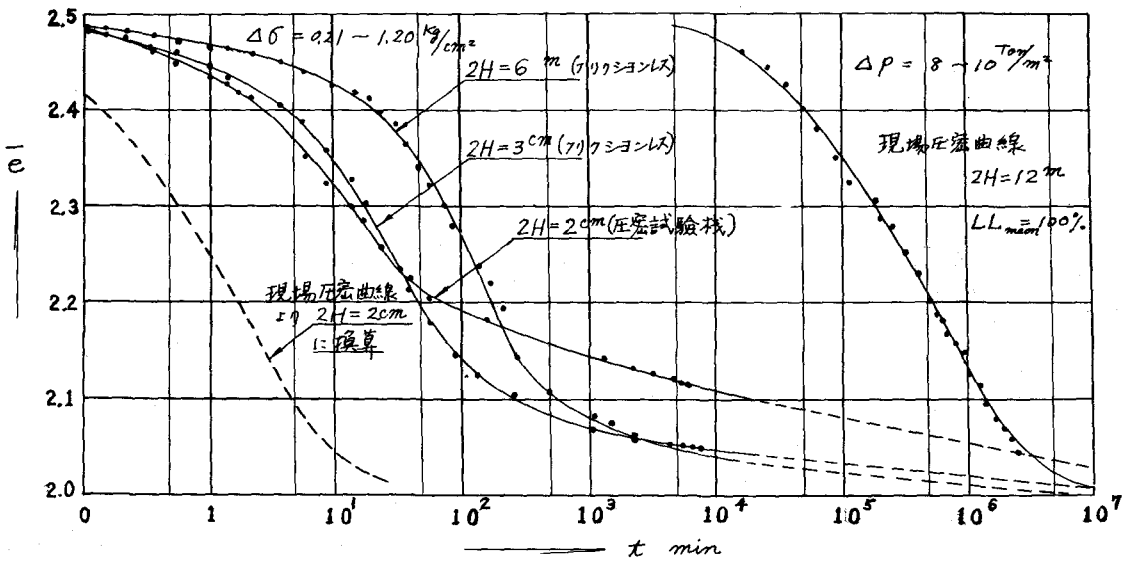
第七図 第八図の2現場における沈下観測値は、平面的に広い埋立地の沈下観測値であるので、スキャンプトンのオ六図の場合以上に一次元圧密に近いことはいうまでもない。そして圧密試験における二次圧密的なものを時間方向に真線のごとく延長すると、現場圧密曲線に漸近してゆく状態がよく分る。また圧密試験をフリクションレスの状態で行えば二次圧密的なものはその量が非常に小であることを示している。

こゝで現場圧密曲線より、 $T_v = C_u \cdot t / H^2$ が成立するものとして $2H=2\text{cm}$ の圧密に換算すると、それを真線のような圧密時間曲線が求められる。この場合粘性限界が小さくなってゆくほど粘性による時間おくしり度合いが小さくなってゆく。事実はこの圧密における筆者のモデルの真実性を物語るものである。

第七圖



第八圖

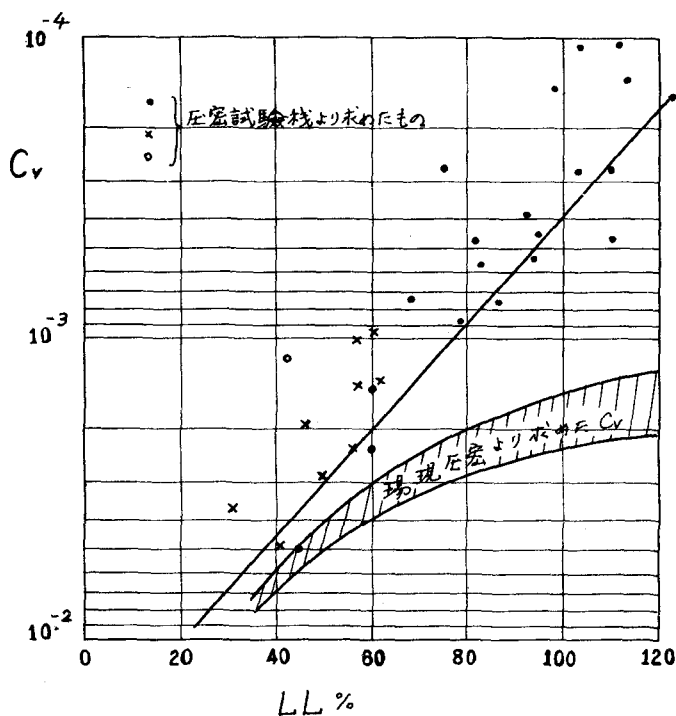


IV) 圧密計算に対する筆者の提案

圧密試験結果の現場沈下解析への応用は現在多くの未知の問題を残したまゝの状態である。それにも拘らず日本の重要都市および工業地帯は軟弱粘土層の土質力学的、土質工学的問題に悩まされていることは世界にその比をみないであらう。しかし最も根本的な粘土の圧密現象においても、先行荷重、圧密係数が実際の応用にあつてあいまいな実が多い。そしてこれらの研究は単に実際の応用というせまい価値しかないものではなくて、土質力学の新しい開拓として重要な意味をもつていと信ずる。また言葉をかえていえば土質力学の粘土の圧密現象に関する新しい分野の開拓は、日本が絶好の土地であるといつても過言であるまい。

しかもこれらの研究は決して一人の力でできるものではなく、多くの人の共同の研究によらねば成果をあげることは期待できないであらう。この意味からも筆者の研究結果を批判のみにとどまらず共同研究として発展できれば、その成果は非常に大きいものであることが期待される。

最後に筆者は具体的な提案の一例として、第九図に示すような従来の圧密試験値により求めた圧密係数 C_v と、現場の沈下観測結果より逆算した C_v を液性限界と比較する関係図をここに示した。圧密試験値による C_v の決定法はキャサグランドの方法により 24 時間の沈下に対する m_v を使用し計算した。計算した結果は第四図に示すように、圧密荷重 - C_v のグラフに整理しその先行圧密荷重に対応する C_v をとつた。現場圧密曲線から C_v を逆算することは圧密層が理想条件でないとき正確を期し得ないのでその数はあづかであつたが、今後各地の沈下観測が



あれば、それにより第九図の関係をさらに正確なものにしたい。

また参考文献は紙面の関係上筆者の分だけあげておいた。

- 1) 竹中淳之介 : 干拓地沖積層の土質について 昭33 土木学会講演会概要
- 2) " : 干拓地沖積粘土の圧密について 昭34 "
- 3) " : 粘土のサンプリングとその信頼性について 昭36 サンプリング自由討論會