

実務における標準的な圧密試験—その目的・役割と今後—

Standard Consolidation Tests in Practice—Their Purpose, Role, and Future—

今井五郎 (いまい ごろう)

横浜国立大学大学院教授

1. はじめに

建設現場で圧密沈下予測が必要な場合、私達はまず現場から不攪乱土を採取して標準的な圧密試験を実施する。そして、ある判断の下に決定した圧密定数 (C_c または m_v , および c_v) の値を圧密理論に当てはめて、沈下予測の計算を行う。ところが、その予測が実際に一致することはまれである。供用開始までの間に、沈下量の差が10%以内に納まれば私達はほぼ一致したと喜ぶし、圧密速度が2倍違っていても仕方ないと思う。供用開始後の残留沈下予測に至っては、その意義に疑問を持つ場合すらある。粘土層がほぼ均一でかつ一次元荷重と見なせる場合ですらこうであって、鉛直ドレーン打設地盤の場合や狭い荷重の場合にはなおさらである。かくして、当初予測に用いた圧密定数の値を沈下の実測値に基づいて修正し、再予測するということが当然のこととして行われる。

それでは圧密試験などやらなくても良いのかという、決してそうではない。情報ゼロで予測することなど誰にもできないからである。したがって大切なのは、より確度の高い圧密予測を可能にする情報が得られる圧密試験とすることにある。そのためにはまず、私達が現在持っている圧密に対する知見に基づいて、現行試験方法の問題点を再検討する必要がある。その上でさらに、コンピューターを高度に利用できる現在の時勢を踏まえて、新しい提案をすることが要求されよう。以下、限られた紙数の中でその流れに沿った検討を行い、私案を示してみたい。

2. 圧密予測が不完全である理由

話を簡明に進めるために、一次元圧密に対する Terzaghi (テルツァーギ) の予測方法を例にとろう。彼が導いた理論解である $U-T$ 関係は、圧密予測において2度使われる。最初は圧密試験結果を整理して圧密定数の値を求める時であり、2度目はそれらの値を用いて沈下 $S-t$ 関係を予測する時である。1度目は現場のある位置から採取した小さな供試体を対象にしているが、2度目は現場の厚い粘土層を対象にしている。

2.1 部分と全体の違い

このように考えるとまず第1の疑問が生じる。“1度目の「部分」(供試体)は2度目の「全体」(粘土層)を代表しているか”, という疑問がそれである。粘土層

が均一かつ均質であれば、地盤条件に関するこの疑問はさて置いて良い。しかし現実にはそうでないので、予測と実際との間に乖離が生じる。これは圧密予測だけに限った問題ではなく、「土質力学は精密科学たり得ない」と Terzaghi に言わせしめた地盤工学に共通の問題である。

2.2 荷重条件の違い

第2の問題は荷重条件の違いである。圧倒的に広く採用されている段階荷重圧密試験においては、瞬間的に荷重された定荷重の下で一次元圧密が生じる。そしてその荷重条件は Terzaghi 理論の前提と全く同じであるから、試験結果をその理論に基づいて解析して圧密定数を算出するという点で問題はない。しかし、実際の現場で瞬間荷重はあり得ないし、一次元圧密と見なして良いケースは例外に属する。この荷重条件の違いがもたらす予測と実際の乖離は、地盤条件の違いによるそれと絡み合って事態をいっそう複雑にしている。

2.3 粘土骨格が弾性体ではないこと

このような地盤や荷重といった条件とは全く違う、もう一つ別の第3の問題がある。“理論が仮定している粘土骨格の圧縮特性が実際のそれと一致しているのか”, という疑問がそれである。地盤条件や荷重条件の違いを外在的な問題とするならば、この第3の問題は圧密予測につきまとう内在的な問題である。それを突き詰めると、粘土骨格に備わっている粘性が Terzaghi 理論では考慮されていない、ということに尽きる。このことは、定荷重荷重の圧密の後半において理論に従わない「二次圧密」が出現する、という挙動に典型的に現れているのだが、それを理論で説明できていない。またその粘性効果が供試体あるいは現場粘土層の一次圧密挙動にそれぞれどう現れるかも、説明できない。とすると、Terzaghi 理論に基づく圧密予測の全体系の足元自体があやふやだということになり、予測と実際の乖離を云々する以前の問題になる。

2.4 本論の進め方

以上の観点を踏まえて以下の議論を進めていくのだが、「精密科学たり得ない」原因である地盤条件(第1の問題)については、ここで議論する必要はない。第2の荷重条件については、一次元圧密試験(オエドメター型)をここで論じるので、荷重の加え方のみを考える。そして第3の内在的な問題に対しては、予測体系の全体を視野に入れて検討することにした。すなわち、オエドメター型の標準的な圧密試験方法をどのように定めると、

よりよい予測のための情報が得られるのか？、この点を探っていきたい。

なお実際には、鉛直排水工を施して圧密促進するのが実務の一般である。その場合には Barron (バロン) の理論解 U_h-T_h を用いて予測するが、その際に用いる圧密係数 c_v は標準的な試験で得られた c_v を補正することで決められる。鉛直排水工の実施によるドレーン材周辺の透水性の低下 (スミア効果) や中間排水層の存在による圧密促進を考慮した標準的な試験方法が考えつかないからである。その意味でもオエドメーター型の標準的な圧密試験の実務的意義は逆に大きいのである。現場の状況にピタリ適合した圧密定数は求まらなくても、それをベースとしてアレコレ考え得る情報を提供してくれれば良いとするのである。

3. 段階載荷圧密試験方法の変遷

3.1 学会基準と JIS の関係

圧密特性に関する基本情報を提供してくれる試験方法として現在圧倒的に利用されているのは、段階載荷圧密試験 (JIS A 1217 : 2000, JGS 0411 - 2000) である。その他の方法については次節で述べるとして、ここでは段階載荷圧密試験方法の変遷を振り返ることにしたい。

試験方法が標準的なものとして機能するためには、作業方法および定数の求め方の両者が共に明確に規定されていることが必要である。そのために学会では学会基準 JGS の見直しを不断に行い、国際的にも通用する内容として確立できたものを国家規格 JIS として制定することになっている。ただし学会に基準部が創設された1988年以前には、学会基準改訂の必要性を認めた当該委員会が JIS 改訂のための「委員会案」を作製して試行することが一般的で、そのために未改訂の従来 JIS と新基準案の両者のどちらを使って良いのか迷うことがあった。圧密試験は残念ながらその場合に該当していたが、現在では JIS と JGS の内容はほぼ同一となっており、迷うことはない。

3.2 不変の載荷方式

まず作業方法についてだが、圧密特性の理解の深まりに基づく細かい変化は、当然のこととして多々あった。しかし、最初の JIS (1960) 以来現在の JIS まで一貫して変化していないのは載荷方法である。瞬間載荷した定荷重を24時間保持し、倍々荷重の段階載荷とする方式で、Terzaghi が彼の理論を構築し、かつその結果をチェックするために採用した方法そのままと言われている。委員会案や JGS もこの載荷方式に異を唱えたことはない。

3.3 若干の変化があった p_c と C_c の決定方法

不変であった載荷方式に対して、圧密定数の求め方は特に c_v について変転した。そのことは、圧密現象の解釈が一筋縄でないことを示している。先に述べたように、圧密予測では圧密理論を2度使う。そして1度目で得た圧密定数と2度目の予測に使うべき圧密定数を同じ大きさとして良いのかと、両者の関係に思いを至すから、

ことがなかなかむづかしいのである。

まず圧縮曲線 $e-\log p$ 上で読みとる圧密降伏応力 p_c と圧縮指数 C_c について振り返る。前者の決定は長らく Casagrande (キャサグランデ) 法によっていたが、1990年のJISで三笠法を用いても良い (並存) となり、2000年JISでは普遍性の高い三笠法を優先して従来法を備考扱いとすることになった。他方、 C_c 値の決定方法については基本的に変わるところはなかった。

3.4 不変の m_v 決定方法

体積圧縮係数 m_v の決定方法については全く変わっていない。24時間圧縮ひずみに対して求めた m_v 値をそのまま現場の一次圧密終了に対応する沈下量予測に使う、という考えが一貫している。なぜ24時間ひずみを採用するのかという議論はなかったのである。まったく不思議なことである。

3.5 混乱のあった c_v 決定方法

圧密係数 c_v については異なる2面から振り返る必要がある。まず c_v 値の決定に用いるフィッティング方法という面でも振り返る。JIS (1960) では Taylor (テイラー) の \sqrt{t} 法と Casagrande の $\log t$ 法が同格で並存していたが、1969年の委員会案で理論的根拠のない $\log t$ 法に代わって三笠の曲線定規法が \sqrt{t} 法と同格のものとして採択された。その後両者の並存状態が長く続いたが、JIS (2000) で \sqrt{t} 法を主とし曲線定規法は代替方法とすることになった。同格手法の並存を許さないという JIS の制約、および国際的通用性の配慮による。

c_v 値決定に関する別の面での変化は、その補正に関するものである。1969年の委員会案で、供試体から求めた圧密係数を c_v' とし、それに一次圧密比 r を乗じたものを $c_v (=rc_v')$ として報告するとの考えが示された。ところが1979年の修正委員会案では、供試体から求めたものを c_v とし、現場に適用するものを $c_v' (=rc_v)$ とすることになった。しかしその間一貫して、JIS ではこのような補正方法を採用せず、供試体から求まる c_v 値をそのまま報告することにしたので、 c_v と c_v' に関する混乱は JIS においては生じなかった。ここで一次圧密比 r とは、24時間圧縮量の内の一次圧密量の割合である。それを用いた c_v の補正の必要性は、現場の一次圧密量を供試体24時間ひずみ相当とするのに対して、供試体の c_v は一次圧密過程に対応するから、現場の一次圧密過程に適用すべき c_v は r で補正せよ、という考えに基づいている。

この考え方に基づくと、現場に適用すべき c_v の値は供試体に対して求めた c_v より小さい ($r < 1$)。しかし、異なる層厚の供試体に対する実験によると、層厚大なるほど c_v 値は大きい。また二次圧密の主原因である粘土骨格の粘性を考慮した計算結果も、室内試験と同じ結果を与える。粘土骨格を弾性体と考える Terzaghi 理論に基づく論理的な結論としての r 補正が、現実の粘土の挙動と整合しないのである。粘土骨格が Terzaghi の仮定したような弾性体ではなくて粘性効果も発揮するので、このようなことになったわけであるから、補正するなら

論文

ば粘性効果を考慮した議論が必要となる。

3.6 透水係数

最後に透水係数 k について触れる。段階荷重圧密試験で k 値を直接求めることは出来ない。直接的に得られた m_v と c_v を用いて、間接的に $k = \gamma_w m_v c_v$ で算定することになる。JIS 1960 では k の算定を義務づけていたが、1980年以降の JIS では算定しないことになった。骨格粘性の効果を考えると算定 k 値の正当な評価 ($k = \gamma_w m_v c_v$ なのか $\gamma_w m_v c_v$ なのか) が困難だからである。圧密は圧縮性と透水性の組み合わせによって決まる現象であるから、本来は m_v と k を直接求める試験の結果から c_v を算定するのが道理である。その点に限っては、段階荷重試験はその道理からはずれた試験方法だとも言えるのである。

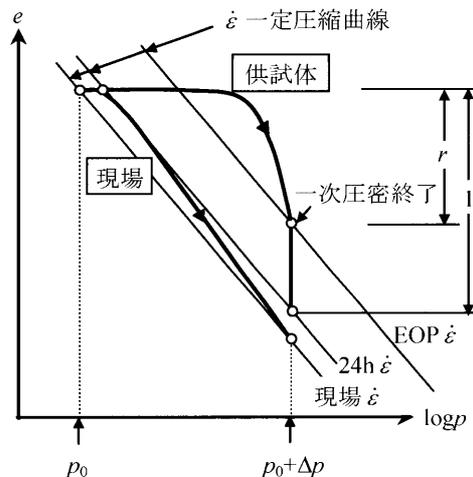


図-1 室内の挙動と現場挙動の比較

4. 圧縮性と透水性を求める圧密試験方法

圧縮性と透水性の両方を同時にかつ独立に求め得る試験方法として現在実用化されているものに、定ひずみ速度圧密試験 (JIS A1227:2000) と浸透圧密試験がある。後者は超軟弱粘土の低応力下での圧密係数を求めるやや特殊な方法なので割愛し、ここでは前者について述べる。

4.1 定ひずみ速度圧密試験の概要

「土の定ひずみ速度圧密試験方法」が JGS として制定されたのが1993年、それが多少修正された上で、JIS として新規制定されたのが2000年である。この試験方法では、変位速度 (≒ひずみ速度) が常に一定となるように連続的に荷重を増して供試体を圧縮し、非排水面での間隙水圧の変化を測定する。そして得られる連続的な $e - \log p$ 曲線から p_c と C_c 、および m_v と p の関係を、そして荷重と間隙水圧の関係から c_v と p の関係を求めるものである。また参考として、 k 値を算出することができるとしている。この方法によると試験を1日で終了させることが出来ると共に、 p_c 値を正確に求めることが出来る。またコンピューターと連動させた装置の制御や、データの収録と処理も可能なことから、実施例が徐々に増えている。

4.2 定ひずみ速度圧密試験が成り立つ根拠

この試験方法が成り立つ根拠は、ひずみ速度一定の圧

縮曲線 $e - \log p$ が24時間段階荷重圧密試験で得られるものとはほぼ平行であるために、得られる C_c 値がほぼ一致するという点にある。なぜ両方の $e - \log p$ 曲線が平行なのかについては、最近になって理解できるようになった。段階荷重の24時間時点での ϵ 値を求めると、荷重レベルによらずにすべてほぼ同じ大きさになっている。したがって24時間段階荷重の $e - \log p$ 曲線は ϵ 一定下のものなのである。したがって、その ϵ の下で定ひずみ速度圧密試験を実施すれば、同じ $e - \log p$ 曲線が得られることになる。実際には異なる ϵ で定ひずみ試験を実施することになるが、 ϵ 値の違いがわずかであればほぼ一致した C_c 値が得られる。

なぜこのようなことになっているのか、その本質的なところでの理由はわからないのだが、“ $p > p_c$ 範囲での $e - p$ 関係は ϵ の大きさごとに定まっている”という経験則 (アイソタック則) を認めるとすっきり理解できる。さらにこのアイソタック則に、 ϵ 一定の $e - \log p$ 曲線群はすべて正規圧密領域で平行 (並行) というもう一つの経験則を加えることによって、圧密降伏応力 p_c の大きさが ϵ 依存であるという実験事実も説明でき、段階荷重試験で求まる p_c 値が絶対的なものではないということも理解できるようになった。こうして定ひずみ速度試験はアイソタック則と結びついて、圧密特性の本質を明確にする上で大いに役立ってきたのである。

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が粘土骨格の圧縮特性を本質的なところで支配しているわけだが、それはとりも直さず、“粘土骨格の粘性を考慮しないと圧密特性は理解できない”ということに他ならない。しかし、この粘性効果は定ひずみ速度試験においては全く顔を出さない。 ϵ 一定で粘性効果を一定にしているからである。ところが段階荷重試験において粘性効果は三つの顔として発現する。第一は瞬間荷重の直後暫くの間である。この時には $\dot{\epsilon}$ 値が極めて大きいために骨格の粘性による圧縮抵抗が大きいから、実質的な圧密降伏応力 p_c の値がはるかに大きく現れる。したがって、本当の $e - \log p$ 曲線は24時間 $e - \log p$ 曲線 (図示の24 h $\dot{\epsilon}$ 線) の右側に強く張り出す。次の第二の顔は、実質的な降伏をした後で C_c よりもはるかに大きな勾配 (大きな m_v) で圧密して、一次圧密終了 (EOP) を迎えるということである。そして最後の顔が、EOP後の p 一定下で ϵ が徐々に低下していくという、いわゆる二次圧密過程である。

実際の厚い粘土層ではこのような三つの顔が明確には出現しない。粘土層全体の平均的な $\dot{\epsilon}$ 値の変動が段階荷重試験に比べて極めて小さく、相対的には $\dot{\epsilon}$ はほぼ一定のまま圧密が進むと考えても良い位だからである。すなわち、現場の厚い粘土層の圧密は、定ひずみ速度試験に近い過程で進み、決して段階荷重試験のそれとは対応しない、ということである。この意味でも瞬間荷重の段階荷重試験は特殊であり過ぎる。

4.3 m_v と k をどう算定するか

そうであるならば、定ひずみ試験から求まる m_v 値と段階荷重試験の24時間圧縮量から求まるそれとはどう

いう関係になるのだろうか。現場の最終沈下量の算定で m_v 法を用いる時にこれが問題になる。 m_v と C_c の関係は $m_v = 0.43[C_c/(1+e)]/p$ であるから、同じ大きさの C_c であるにもかかわらず、ある p に対応する m_v 値は e の差に応じた $(1+e)$ 値の違いだけ違うことになる。段階荷重試験に基づく予測法で24時間内の e の平均値を用いることにしていることと関連させて、現場に適用する m_v 値を両試験からどうやって求めるのかももう一度考え直すべきであろう。

もう一つの課題は k 値にまつわるものである。現行 JIS では c_v 値を求めて k 値を $\gamma_w m_v c_v$ で算定してよいと「参考」で示している。しかし、定ひずみ速度試験では、Terzaghi が採用したのと同じ弾性骨格を仮定しても、 c_v を媒介せずに k 値を測定値から直接的に決定できる。すなわち、定ひずみ速度試験からは圧縮特性と透水特性とが独立にかつ同時に求まるのである。したがってむしろ、Terzaghi の c_v を求めたい場合には、 m_v と k を使って $c_v = k/(\gamma_w m_v)$ で算定しても良いとするのが本道であろう。

圧縮特性・透水特性・質量保存則・運動量保存則を束ねて容易にコンピュータ解析が出来るようになった現在では、Terzaghi の c_v にこだわる必要はない。現実の粘土層の圧密速度が供試体から得た c_v に支配される保証はどこにもないからである。

5. 今後の課題

Terzaghi の c_v を敢えて求めることにこだわる事はないといったが、事前設計の段階で一次圧密過程に目処をつけたい際には、やはり Terzaghi の予測法は大きな役割を果たす。その限りで言うと、段階荷重試験法における m_v と c_v の大きさの選定は大切である。すなわち、 m_v については段階荷重の24時間圧縮量をそのまま基準として良いのが問題になる。また c_v については、段階荷重試験で求めた値をいかに補正すべきかが大きな問題である。前述したとおり、現場での m_v 値は段階荷重の p_c から EOP までに実際に生じている m_v より小さいのだから、現場で用いるべき c_v は供試体 c_v よりも大きくすべきである。

このようなむづかしい判断を強いるのが段階荷重試験だとすると、定ひずみ速度試験から得られる圧密定数ははるかに実用的である。なぜかという、骨格を弾性体と仮定すると定ひずみ速度試験から、Terzaghi 理論でなく質量保存則と運動量保存則を用いて k 値と m_v 値が独立に求まる（現行 JIS はそうなっていないが）からである。

定数を求めるために用いた理論をそのまま予測に使うのは形式的には道理であるが、実際には粘性効果の利いている圧密の世界において粘性を考えていない理論を定数決定と予測の両方に当てはめることはいかがわしい。その理論が実際の圧密特性の本質を反映していないからである。その点定ひずみ速度試験は粘性効果を $\dot{\epsilon}$ 一定で殺しているのが良いのである。

また、圧縮特性と透水特性をどちらも理論と無関係に独立に求め得るという点でも、定ひずみ速度試験が圧倒的に優位である。ただし現場の二次圧密に対応すると思われる過程を定ひずみ速度試験では再現できない。その点においてはむしろ、各段階荷重の下で不十分なからそれを観測できる段階荷重試験が良い。

一体これからどうしたらよいのであろうか。この課題について筆者の試案を述べる。

- ① 段階荷重試験で得られる c_v が特殊な値であることを明確にし、規格・基準の解説の中でその現場適用に向けた補正方法を示せるように努力する。
- ② 定ひずみ速度圧密試験で得られる圧密定数は m_v と k であることを明示し、Terzaghi の c_v 値は $c_v = \gamma_w m_v k$ で算定しても良いとする。
- ③ 長期圧密沈下の予測に対しては、現行の段階荷重試験も定ひずみ速度試験も対応できない。前者において24時間圧縮では短過ぎるし、後者ではクリープ段階がない。したがっていずれの試験においても、必要であるならば最終段階で長期クリープ試験を実施するようにする。

6. おわりに

たった1枚の図面しか配しなかったために、読者は本論を難解に思われたことと思う。これまでに考えてきたことを限られた紙数の範囲内で言い尽くすためには、そうせざるを得なかった（下記の参考文献と合わせて勉強していただきたい）。

最終的には定ひずみ速度試験とクリープ試験を組み合わせれば、良い圧密情報が得られるだろう、という事を言いたかったのだが、現在でも圧倒的に実施されている段階荷重試験に対しても十分に配慮せざるを得なかった。 c_v 中心の圧密予測が今でも圧倒的に支配的だからであるし、それを実務の面で否定できないからである。

粘土の圧密特性は奥深いものであり、アイソタック則といった単純な法則は単に人間が分かったつもりでデッチ上げた代物である。それに代わるもっと複雑な理論もあるが、それはことをことさらむづかしくする代物であって、私には理解できない。できるだけ簡単な自然の法則に素直に従った簡明な論理でよりよい設計が出来れば、その方が工学としてはよい。精度は高くなくてもその方向でより適用性の高い圧密理論が構築できればそれに越したことはないのである。

参考文献

本論の内容をより深めていただく上で最高の良書は、地盤工学会編の「土質試験法」（1969, 同1979）、「土質試験の方法と解説」（1990および2000）である。これらの解説内容を読みくと、圧密のプロになれる。

アイソタック則については「土と基礎」（2004）の「技術手帳」がよい参考になるだろう。また、粘土骨格の粘性効果を考慮した圧密特性の解釈に対する最善の教科書は、地盤工学会編の「圧密沈下予測の新しい考え方と手法講習会」講習会資料（2002, 2003）以外にない。

（原稿受理 2005.8.4）