私のプロジェクトX 「能登式」誕生

能　登　繁　幸

はじめに

アルキメデスは風呂から溢れるお湯を見て浮力の原理を思いついた。ガリレイは寺院の燈火の揺れるのを見て振り子の法則を考えついた。ニュートンはリンゴが落ちるのを見て万有引力の法則を考えついた。という具合に、著名な天才たちがちょっとした日常の経験から閃きを得て偉大な真理を発見したとする例は古来希ではない。しかし、彼らはある日突然にひらめいたわけではない。アルキメデスは王冠の問題をいかに解くか、日々頭を悩ましていた。ガリレオは寺院にぶら下がっているいくつもの燈火が風でランダムに揺れるのをボーッと眺めているうちに、どれもこれも同じ周期であることに気がついた。ニュートンは、ケプラーの運動法則や彗星の動き、潮の満ち引きなどに興味を抱いていたときにリンゴが落ちるのを見た。「リンゴは落ちるのになぜ月は落ちてこないのか」と疑問に思い、過去の膨大なデータ、観察、実験、数学、物理学を駆使し、ついに万有引力の法則を導いた。すなわち天才と言われる彼らは、常日頃から「解を求めて」彷徨っていた、のである。

もう一つ書き加えておこう。若き時分、ピタゴラスの定理や球の表面積、体積を求める式に接し、なぜこうもきれいな式になるのか不思議な思いをしたことはないだろうか。質量とエネルギーの等価性を表すアインシュタインの式の簡略さに驚かなかっただろうか。今またホーキングは宇宙のすべてとその起源を説明するための単純で美しい法則を見つけ出そうとしている。ひょっとしたら自然界の諸々の現象もまた意外と簡単な式で表せるのではないだろうか。

1. 泥炭地盤の沈下を予測するということ

北海道の平野部には泥炭地盤というまことにやっかいな地盤が広く分布している。ヨシやスゲなどの湿生植物が枯れて折り重なり、十分に分解しないまま堆積した地盤で、厚さは 3 ～ 5m、まれに 10m を超えるところもある。このような地盤に道路や堤防などの盛土を行うと、地盤が破壊したり、破壊しないまでも大きな沈下が長い間にわたって生じる。盛土工事をする際には、地盤が破壊するか、どれくらい沈下するか、沈下はいつまで続くか、それをあらかじめ予測し、対策を立てて置く必要がある。

地盤工学の分野では Terzaghi という超有名人が居る。地盤工学の教祖のような存在で、この方が 1924 年に圧密理論なるものを発表した。粘土地盤に力が加わるとゆっくりと沈下する（これを専門用語で圧密という）が、これを理論的に明らかにしたのである。この理論はあっと言う間に全世界に広まった。これで粘土地盤の沈下予測が可能になったのである。当然ながら泥炭地盤に対しても Terzaghi の圧密理論を用いた沈下計算が行われてきた。ところが、泥炭地盤の実際の沈下状況が計算値とは大きく異なる。計算値の何倍も沈下するし、予測よりも早く沈下するのだ。しかも、長期にわたりだらだらと沈下が続く。「大半が植物繊維」なのだから、粘土地盤を前提とした圧密理論を適用しても無理があり、当然といえば当然ではある。しかし、別な沈下予測式があるかといえば、「ない」。やむなく泥炭地盤に対しても Terzaghi 理論が用いられてきた。

私は 1969 年、大学卒業後、北海道開発局に採用となった。直ちに研究所（現寒地土木研究所の前身）に配置され、地盤に関する調査・研究に従事することになった。そして 3 年ばかり後には泥炭地盤に関する研究に携わることになった。そこで初めて泥炭の適切な沈下予測式がないことを知った。されど誰も特に悩んでいる様子がない。Terzaghi の圧密理論以外に沈下予測式はないのだから、あきらめるしかないのだ。幸いなことに、私の目の前には泥炭についての膨大な数の室内圧密試験データと、かなりな数の現場実測沈下データがあった。これらのデータから何かが得られないか、暗中模索することにした。

2. √ t 双曲線式

まずは Terzaghi の圧密理論を離れることにした。泥炭の室内圧密試験を行うと、荷重に応じた沈下の時間的変化のデータが得られる。これを図にプロットしたものを時間沈下曲線という。この曲線は、現場の時間沈下曲線とかなり似た形である。この当時すでに、現場における盛土完成後の時間沈下曲線は双曲線に近似することが分かっていた。そこで泥炭の室内圧密試験による時間沈下曲線を双曲線で近似できるか、検討した。すると、かなり双曲線で近似できるが、初期段階と後半で誤差が大きくなることが判明した。これを解決すべく時間 t を√ t とした双曲線を当てはめてみた。その結果、驚くほど一致することが分かった。式で表すと次のようになる。これがまずは出発点であった。

$$\varepsilon = \sqrt{t} / (a + b\sqrt{t}) \qquad (1)$$

現場の時間沈下曲線は√ t とした双曲線でもほぼ近似できる。室内と現場のデータがいずれも√ t 双曲線で表せるとなれば、あとは(1)式の係数 a、b をいかに求めるかだ。この頃すでに泥炭の物理的性質(比重、密度、間隙などに関わる数値)は水分量と大きな相関を持つことが分かっていた。土の水分量の多寡は「含水比」で表される。おそらく係数 a、b も含水比と相関があるに違いない。手元にあるデータをもとに検討を繰り返した。その結果、ややばらつきはあるものの何とか係数 a、b と含水比の関係を導き出すことができた。ただし、工学的に「先行圧密荷重」といわれる荷重の前後で傾向が異なり、2種類の関係式とせざるを得なかった。

さらに作業は続く。長期にわたる沈下を二次圧密と称する。これは時間の対数、すなわち logt に比例した沈下となる。この二次圧密が始まる時間、ならびに比例係数(二次圧密係数という)を圧密試験データから明らかにした。こうして得られた係数を用いて、現場における時間沈下曲線の予測値と実測値を比較し、その予測精度を確認する。結論を言えば、従来よりは信頼できる沈下予測式が得られたのである。これで大いに満足したのは言うまでもない。

3. 奇妙な論文との遭遇

しばらくして、なぜ√ t 双曲線なのか。先行圧密荷重付近で挙動の傾向が異なるのはなぜなのか。それが気になり始めた。たまたま√ t なのか、それとも特別の理由があるのか。時々頭に浮かんでくるそれらの疑問にイラつくことがあった。されど疑問を解決する方法を知らない。時間は流れていく。まだまだ精度は低いながらも、「とりあえず」√ t 双曲線を使えば最終沈下量も沈下の時間的経過も計算できる。それでいいではないか、という気持ちもある。かくしておよそ 2 年の月日が流れたある日のこと…。

研究者ならば研究業務に関係する内外の論文にはほとんど目を通す、という姿勢が大事である。それらの論文は必ずしも役に立つわけではないし、難解で理解に苦しむものも多数あるから、時には無駄に時間を費やした、と思えるときさえある。その日も何らの期待もせずある論文集をめくっていた。すると SYNOPSIS(概要)の終わりに“Nature is simple and beautiful”と書いてある論文にぶつかった。というか、目が止まった。「何だこれは。論文らしくない書き方だな」と思った。著者は Juarez-Badillo とある。聞いたことがない。メキシコの教授らしい。論文タイトルは“General Compressibility Equation for Soils”。土の圧縮性か、まあ何かの参考になるかも知れない。読み始めた。衝撃であった。目から鱗、であった。これは泥炭地盤の沈下予測式に使えるかも知れない。興奮を抱えたまま新たな作業に取りかかった。

4. 新しい沈下予測式

4.1 ある応力下における物体体積の時間的変化

体積が Vo という物体がある。これにある力を加えると、時間の“増加”とともに体積は“減少”し、最終的に Vf という体積になる。一方が「増加」するときもう一方が「減少」というのはややこしいので、時間の増加に対応して増加するという体積の関数を新たに定義する。途中は省略するが、時間を t とし、体積変化量をひずみ ε として整理すると、最終的に次式が得られる。

$$\varepsilon = \varepsilon f / (1 + Cpt^{-\delta}) \quad \text{———} (2)$$

それがどうした、と読者の一部は思うかも知れないが、ここで$\delta = 1/2$、$a = Cp / \varepsilon f$、$b = 1 / \varepsilon f$とすれば、上記の（1）式、何と$\sqrt{t}$双曲線になるではないか！　あの$\sqrt{t}$双曲線は今回得られた（2）式においてδ＝1/2とした特殊な場合に相当するのだ。早速かつてのデータをひっくり返し、δの値を調べた。その結果δは応力や含水比によって0.23～1.29の範囲で変動し、必ずしも1/2の一定値を取らないことが判明した。その後の検討で、（2）式の係数δ、Cpは含水比と応力から推定できることを確かめた。

以上のように、物体に応力が加わったときの時間的な体積変化の推定がまずは可能になった。次は物体にある応力が加わったときの「終局」の体積εfをいかに求めるかだ。

4.2　ある応力下における終局体積

ここにある物体がある。過去に何らの応力も加わっていないとき（P＝0）、物体は空中に拡散してガス状であったと想定すれば、その体積Vは無限大である（Vo＝∞）。一方応力Pを限りなく大きくしていくと（P＝∞）、体積Vはゼロになると仮定しよう（Vo＝0）。難しい話をしているわけではない。ビッグバンの直後、宇宙はガス状であった。そこに諸々の力が作用して星ができ、銀河が誕生した。一方ブラックホールというのもある。そこでは凄まじい力が作用し、星々は圧縮されてブラックホールの彼方へと消え去っていく。すなわち無限大の力が作用すると物体は消滅する。とはいえ、我々の目の前にある物体は有限の体積を持つ。それらの物体は過去にある程度の応力をすでに受けたものだ。すなわち、ある応力を受ける物体の体積変化を計算する際には、過去に受けた応力（先行圧密荷重）の範囲内か、それを超える応力なのか、分けて考える必要がある。工学的に言えば、それぞれ過圧密領域と正規圧密領域、である。先行圧密荷重の前後で挙動の傾向が異なるのはなぜか、それは過去の応力履歴の範囲内か範囲外かで挙動が異なるからだ。

途中を省略して、最終的な式を示そう。ある荷重Pにおける最終ひずみεfは、正規圧密領域では

$$\varepsilon f = 1 - Kn \cdot P^{-\gamma} \quad \text{———} (3)$$

過圧密領域では

$$\varepsilon f = 1 / (1 + Ko \cdot P^{-\gamma}) \quad \text{———} (4)$$

となる。泥炭地盤の先行圧密荷重は経験的に0.2～0.4kg/cm^{2}であるから、過去の圧密試験データのうち圧密荷重0.4kg/cm^{2}より前を過圧密、後を正規圧密として、KnとKo、それとγについて、過去データを元に逆算して整理した。いずれも含水比と見事な相関を有する結果が得られた。得られた係数を用いて最終沈下量を求めると、既往の成果とよく一致することを確認した。これで一次圧密の作業は終わった。次に二次圧密である。

4.3　二次圧密の挙動

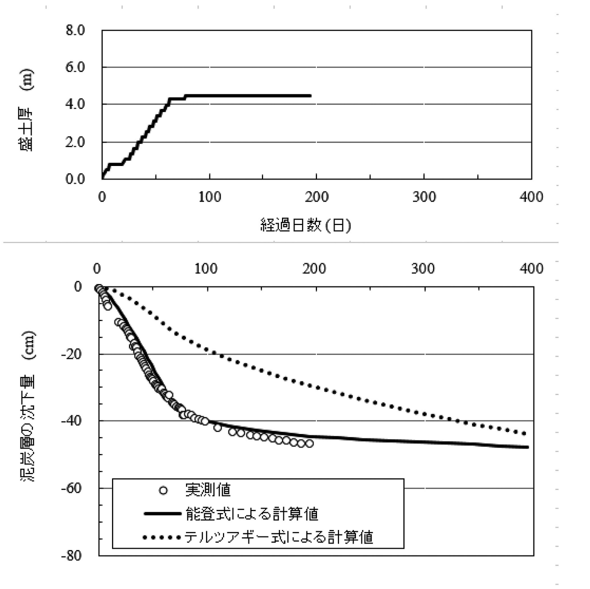
泥炭の沈下挙動はある時間が経過するとlogtに比例する二次圧密となる。ある時間に突然に二次圧密が始まるわけではないが、便宜的にlogtに比例した沈下が始まる時を二次圧密の開始時間tsとし、tsのときのひずみ量εp、logtに比例する直線の傾きCsとすると、二次圧密領域のひずみεsは次式で表される。

$$\varepsilon s = \varepsilon p + Cs \log (t / ts) \quad \text{———} (5)$$

これから先の解析作業を省略するが、いずれの係数も含水比との相関があることを確認した。さらに同様の作業を現場実測沈下データを元に行い、ときには微調整をしながら各係数を求める式を提案した。得られた最終的な沈下予測式を用いて、13カ所の現場を対象に、沈下実測値と予測値の比較検証を行った。ほとんどの現場において実測値と予測値は一致し、予測式の精度が極めて高いことを確認した。

4.4　沈下予測式の簡略化

以上の沈下予測式を提案した後しばらくして、現場技術者及び民間設計担当者から「予測式が煩雑すぎる。もっと簡略化ならないか」という意見が相次いだ。先に示したように正規圧密領域と過圧密領域では理論的に沈下挙動が異なるとして、それぞれ別の式で求めることにしている。しかし、泥炭地盤に



「能登式」の適用(美原バイパス：寒地土研林宏親技術士の提供による)

おける盛土施工の実態はといえば、一挙に数 m も盛ることはあり得ない。一般にせいぜい 2 〜 3m 程度の盛土を行うのが常だ。その程度の盛土荷重であれば過圧密領域の計算式だけで十分ではないか。そこで再度すべてのデータをもとに式の一本化を試みた。その結果、$\gamma = 0.8$、Ko = 700 ／ W となり、最終一次圧密量(ひずみ量)は次式で表すことが可能となった。

$$\varepsilon f = 1 / (1 + 700 / WP^{0.8}) \quad \text{———}(6)$$

ふと、これはどこかで見たような式だと感じた。記憶をたどると、すでに 30 年も前に初代研究室長の宮川勇博士が圧縮ひずみ ε と圧密荷重 P の関係は次式で表されると述べている。

$$\varepsilon = P / (E + P / mo) \quad \text{————}(7)$$

これはほとんど(6)式に近い。(7)式中の E と mo は含水比や強熱減量と対応性があると述べている。残念なことに、宮川博士がこの式を導くに至った経緯は不明であり、泥炭地盤の沈下予測に用いられたことはなかったが、先達の閃きに大いなる敬意を表したものである。この後さらに一次圧密沈下の時間変化ならびに二次圧密の式について再検討し、ほぼ満足できる簡略式を改めて提案した。

4.5　通称「能登式」

上記の成果を発表した直後から、北海道内の泥炭地盤の沈下予測に上記の式が適用され、しかもその後の実測値との対比も行われ、予測精度が極めて高いとの評価を受けた。その一例を図に示す。本人の知らない間にいつしか上記の提案式は「能登式」と通称されるようになり、各所で使われるようになっていた。

あとがき

最初に述べたように、天才と呼ばれる人たちは問題や疑問を抱え、常日頃からその「解を求めて」彷徨っていたのである。天才とまで行かなくとも研究者の多くもまた問題や疑問を目の前にし、錯覚やら先入観に振り回されながら日夜「解を求めて」悩んでいるのである。その姿は妄想にとりつかれたパラノイアにも似ている。私が「能登式」にたどり着いたからと言って「私は天才」というのではない。研究者の端くれとして、懲りもせず一つの思考に専念してきた、あるいは執着してきた結果として、とりあえず満足できる成果を残すことができた。若い時分、自然界は意外と簡単な式で表せるのではないか、すなわち Nature is simple と思ったことさえ味方してくれた。以上「能登式」誕生までを述べたが、一般読者には理解できない記述が多々あるとは思う。ご容赦願いたい。この先、「能登式」以上の精度の高い沈下予測式が出ることを期待して、終わりとする。

(本文は雑誌「基礎工」Vol.44, No.9 2016.9 に掲載した「泥炭地盤の沈下予測式」をもとに書き直したものである)。

能　登　繁　幸(のと　しげゆき)

技術士(建設／総合技術監理部門)
工学博士

日本技術士会北海道本部　特別顧問
株式会社プラテック　取締役顧問