

土質工学にみる最近の話題

福岡 正 巳*

1. はじめに

土質工学の基礎がテルツァギーによって築かれてから50年余の歳月を経過した。この間、理論、実験、工事による経験の積み重ねによって、土質工学の内容はますます豊富になってきた。圧密とせん断の2つが土の最も基本的な性質であるが、昔はこれらに比較的密接に関連した問題を取り扱っていたので、土質工学を学んだり、これを利用するのは割合に容易であった。現在は細分化が著しく、専門家であっても全般が見とおせなくなってきた。誰々は何々の部門のことは詳しいが、何々の部門のことは知らないというようなことになっている。土質工学会では、土に関する情報を集中管理して、最新の情報を提供しようという企画がなされている。この仕事が完成した暁には今より便利になることは事実であり、それだけ専門家も楽になるであろう。

土に関する仕事をする際には、まず調査によって土の性質を調べ、これを土の定数という形で表わし、それを使って設計計算を行う。もし、土の定数が正確に求められ、土を含めた構造系の解析理論がわかっておれば、設計計算もまた信頼すべきものになるであろうが、土の定数も構造系の理論も完全ではないために、実際にはなんらかの方法で、この欠陥を補わなければならない。テルツァギーは、工事中に測定を行って、設計に際して仮定したことが正しいかどうかを確かめるべきことを強調している。測定によって仮定が誤りであることが発見されれば設計変更を行うべきである。工事が小規模な場合、観測測定ができない場合、あるいは途中での設計変更が不可能または著しく困難な場合には、当初から安全率を大きくとって設計をすることになる。

専門家以外の一般の技術者が土に関する知識をどの程度もっており、どの程度理解できればよいのかという質

問に答えるのは非常に難しい。まず、圧密とせん断についての概略の知識が必要であろう。その次は、ボーリングをしてサンプルを採取し、実験室に持ち込んで圧密とせん断の試験を自らの手でやってみることを勧めたい。そうすれば数多くの本を読むよりも、はるかに多くのことが学びとられよう。もしボーリング機械や土質試験機械がなければ、棒で突いたり手でこねたりしてもよい。直接手にし、目で確かめたものと他人が提供した土質試験のデータを比較してみるとよい。このようにして次第に土に親しみ、場数を踏めば、やがては土に対する理解が深まっていくであろう。

2. 土質調査と試験

工事を始めるには、まず土質調査からスタートする。土は基礎となり、また工事用材料になるからである。自然のままの土の性質を調べる場合、まずサウンディングやボーリングの位置を決定しなければならない。あらかじめ土層の生成過程、成層状況などを調べておく。代表的なサンプルをとって試験をすればよいのか、弱点を見付け出してその性質を調べればよいのか、あるいは支持層になるようなしっかりした層の性質を徹底的に調べべきか、というようなことを十分検討する。水平方向に均一な層では、比較的少数のサンプルで全体の性質がわかるが、成層していない著しく乱れた土の場合には、小さなサンプルをどれだけ数多く試験しても全く無駄であって、土塊全体の性質はわからない。したがって、破壊や変形についての知識は得られない。

土のなかには自然状態における性質を調べるのが著しく困難なものが多い。軟弱な粘土はシンウォールサンプラーでサンプリングをしているが、サンプラー自体の持つ欠陥と、サンプリング技術の未熟あるいは粗雑なために乱れを生じ、強度が低下する。洪積層の土についても同様なことがある。砂に至ってはまた自然状態とみなし

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

うるサンプルさえも採取できない。そこで、標準貫入試験のように、現場で直接試験するような方法が用いられている。昭和 30 年ころにアメリカ合衆国から輸入されたこの試験法は確かに簡便であり、試験によって土の貫入抵抗を測るとともに、乱れたものではあるがサンプルを採取することができるという非常に優れた特長をもっている。しかしながら、この優れた方法も粘土分の混じった砂、大きな石礫を含んだ土、粘土などには使用できない。無理に試験をした場合、無神経あるいは無知な設計者がその結果を使って、とんでもない失敗を起こした例がある。機械的にみても、同じ土で地表面に近いものと、深さ 50 m のものとは貫入抵抗が違ふ。貫入抵抗 N 値は、砂の相対密度を介して、内部摩擦角と関連性がつけられている。内部摩擦角はテルツァギー、マイヤーホフらの支持力公式あるいは図表によって基礎の設計と結び付けられている。標準貫入試験はボーリング孔底のサンプラーハンマーで動的にたたき込むものであるがこれに対して、ボーリングをしないでコーンを地中に押し込む方法がヨーロッパ、とくにオランダやドイツで盛んに用いられている。このなかでは、ダッチコーンが最も有名である。ダッチコーンは従来先端の貫入抵抗のみを測定していたが、近年周面摩擦力も測定するようになってきた。コーンは砂と粘土に共用できるという利点がある。最近直径 10~30 cm の大型のコーンが試用されているが、将来性のあるものと思われる。

ところで、標準貫入試験の結果をうのみにするのははなはだ危険である。支持層の上に載っている砂混じりシルト層で高い N 値が得られたために、この層で杭を打ち止めにする計画を立て、杭を全部現場に運んで杭打ち作業を始めたところ、その層は N 値は大きいがとても支持層にはなり得ないことが判明し、全部の杭を継がなければならなかったという。これとは逆に、コンクリートの杭を打とうとしたが、 N 値の低い層で、杭打ちに際して貫入抵抗が意外に大きく、やむを得ずこの層をボーリングで貫き、杭を建て込んだ例もある。

現場透水試験としては、普通汲上げ試験が行われている。この場合、見掛け上の透水係数を求めることはそう困難ではない。しかしながら、地層の透水係数の分布を求めるのは容易ではない。地層がそれほど複雑ではなく、透水層と半透水層が互層になって数枚重なり合っている場合、各層の透水係数を求めることも相当難しい。透水試験の結果を何に利用するかということで透水試験

の精度でも変わるが、場合によっては最高度の技術を要するものである。地下水で飽和されていない土塊の透水試験をする方法も幾つか提案されているが、この試験も性質の異なった土塊が混じり合ったような地層ではなかなか難しいものである。

土と他の材料との違いはいろいろある。弾性的でないこと、不均一質であることなどのほかに、土の構成材料が固体、液体、気体の 3 つの成分からできていることは大きな特徴である。土塊に圧力が加わると、固体だけではなく、液体も気体も圧力を持つようになる。これらを間げき圧と呼んでいる。この間げき圧が発生すると、せん断抵抗力が低下するという結果になる。外圧と発生する間げき圧の間にはある一定の関係があり、設計の段階で間げき圧が予測できるし、施工時に間げき水圧計でその大きさを測定することもできる。間げき圧のせん断強度に及ぼす影響が大きいので、間げき水圧を測定しながらせん断試験を行う方法が考案された。試験中に間げき水の脱出を許さないものを非排水せん断試験、自由に間げき水の脱出を許し、間げき水圧を発生させないものを排水せん断試験という。さらに、非排水せん断試験のせん断定数をそのまま用い、間げき水圧を無視して設計計算を行う方法を全応力法、間げき水圧を測定しながら非排水せん断試験を行い、有効応力によるせん断定数を求め、設計計算においても別に間げき水圧を考慮する方法を有効応力法という。有効応力法はいかにも理論的に見えるが、実際には必ずしもこれが優れているとは限らない。それは、非排水の三軸圧縮試験が非常に難しく、正確な試験結果が得られないこと、実際に発生する間げき水圧の予測が当たらないこと、圧力によって土が圧密され、強度が変化することなどによるものと思われる。

3. 基礎

基礎の設計は、荷重による破壊と変形あるいは沈下の二方面を考慮して行われるべきである。基礎設計の失敗は、破壊よりも変形あるいは沈下によるものがはるかに多い。これは、変形の予測がいかに難しいかを物語るものである。もっとも、構造物によっては変形は全く問題ではなく、破壊だけを考えればよいものもある。土質調査では、土の強度的性質を求めるものがほとんどで、変形については信用できるものがないので、なるべく実物に近い模型に実際に働く力と同様な力を作用させて変形

を測定するような方法をとっているのが現状である。多数の群杭で支えられた巨大な基礎、井筒やケーソン基礎のようなものは、実際に加わる力と同様な荷重を載荷して試験することは、きわめて困難であるから、設計と実際とがどの程度一致しているかはっきりしないまま施工される。また、実際の基礎に破壊荷重を加えて試験することは、たとえ載荷試験に必要な荷重が十分に用意されたとしても、基礎を破壊することはできないから、不可能なことである。

前にも述べたように、土質試験と構造解析によって完全な構造設計をすることは容易なことではないので、その代わりに観測、測定をしながら工事を進めることは望ましいことである。変形を設計段階で予測することは困難であるので、工事の進行に伴う荷重の増大と変形の時間的な変化を測定すれば、完成時の変位、変形が予想されもし破壊時の変形が予想できておれば破壊に対する安全率を求めることができる。このようにして、あらかじめ事故を防いだり、設計変更をしたりした例は多い。変位や変形を測定をする場合、構造解析と関連をつけておきなるべく測定点の数を少なくし、ある点の観測測定結果から多くの情報が得られるよう心掛けるべきである。しかしながら、あまりにも測定点の数を減らし過ぎ、しかも測定の結果が信頼できないような場合には、せっかく測定をしても何にもならない。また、施工のじゃまになるように測定点が設けてある場合には、損傷を受けて、途中で測定を中断しなければならないようなことになりかねない。構造解析をする際には、十分に土質工学的知識を身につけておき、正しい方法で実施しなければならない。構造が複雑な場合には、いろいろな構造系を仮定し、それらのおのおのについて計算をしなければならない。構造解析においては、系が簡単な場合には計算ができるが、複雑な場合には容易に計算できない。このようなときでも、各部の応力、変形の伝達経路を明らかにし、解析計算に乗らないところにも測定点を設ける必要がある。

基礎は上部構造を支えるものであるから、上部構造の構造状態を十分理解したうえで設計することが必要である。上部構造が静定構造であるか不静定構造であるかはもちろん重要であり、不静定構造の場合にはとくに基礎の沈下や傾斜は許されない。上部構造が静定であり、部材に基礎の変形による破壊が生じない場合でも、基礎と上部構造の接触点の構造いかんによっては非常に重大な問題が生じることがある。支持地盤にしっかり根入れした支持杭よりは、中間砂層に根を止めた浮き杭基礎の方が経済的であり、上部構造が静定であるから狂いが来たら手直しをしようと考えて設計して失敗した例がある。軟弱な地盤では基礎をしっかりとさせておくように心掛

けていても、予想外のことが起って移動、傾斜、沈下が生じるものである。あまりにも土質基礎の計算に頼り過ぎるのは生兵法に等しく、大傷のもとになる。現在は不必要に長い支持杭を打っている例が多くなっているが、昔は浮き杭による失敗例が実に多かった。これからは、もう一度浮き杭基礎を研究し、浮き杭基礎に見合ったような上部構造を設計すべきではなからうか。

ネガティブ スキン フリクションを無視して設計を行って被害を受けた構造物の例が見られるようになってきた。ネガティブ フリクションというのは、軟弱地盤が圧密沈下を起し、その際、杭に下方へ向う摩擦力を作用させる結果、杭の下部に非常に大きな圧縮力が発生する現象をいう。土は杭の頂部に加わる力を受けとめる役目をするのが普通であるが、この場合には、杭が土の重量の一部まで受け持たされるのである。ネガティブ フリクションの大きさを計算する方法、ネガティブ フリクションを軽減する方法等が考えられるようになってきた。まだ十分とはいえないまでも、これらの知識を活用すべきであろう。

擁壁に加わる土圧を求める方法としては、普通クーロンあるいはランキンの理論がある。これらが実用的ではないとしてテルツァギーが土圧表を提案した。この表では、土を5種類に分類している。1~3群の土は砂質で、4,5群は粘土質である。擁壁が少し移動すれば主働土圧が発生するという。著者らが最近粘性土の土圧を測定したところによると、粘着力を考慮した土圧の大きさよりもはるかに大きな土圧が作用すること、工事中に押し出し、傾斜、沈下が起っても主働土圧よりもはるかに大きな土圧が作用することなどが明らかになってきた。粘着力、内部摩擦角というような強度的性質よりも、変形係数が大きな影響をもつことが明らかになってきた。壁面に働く土圧は壁体の設計に役立つが、実際には壁体が破壊しないでも壁体を含む土塊が全体として滑り破壊を起すことがある。この場合の安定の計算には、やはり滑り面による計算、つまりクーロン系の土圧論の考え方が必要である。安定計算に際しては、安全率を見込んで土圧と抵抗力のバランスをとる。破壊に対して安全率を見込んで設計しても移動量が過大になることがあるため、移動量を制限する必要がある。そこで、移動量の予測が必要になってくる。既存の試験で、確実に移動、変位量を予測することは難しく、したがって、絶対に移動させたくない場合には、大きな安全率をとるより仕方がないのが現状である。軟弱地盤上に杭を打って、その上に擁壁を設ける場合は、裏込土の圧力は単に擁壁部だけではなく、基礎杭の部分にまで及ぶ。この件については目下研究が進行中である。工事中に移動量の観測をし、その結果から最終移動量を予測し、橋台の移動によって橋桁が

かからなくなったような事故を解決したこともある。

4. 仮設物と工事中の土質調査

土質調査は、永久構造物の安定を検討するために行われることが多い。その際、仮設物あるいは施工の途中の段階における安全性を検討するための土質調査が欠如しているか、はなはだ不十分な場合が多い。土質調査は後で行えばよいと思われるかも知れないが、工事と並行して実施すれば、工事費の一部を使えるという利便さはあるかも知れないが、内容が貧弱で、その結果を施工あるいは仮設物の設計に役立たせることは難しい。それでは施工の途中で全然試験調査をしないでよいかという決してそうではない。やはり、土質調査の結果が正しかったかどうか、チェックしなければならない。調査の方法は、ときには簡単なものでもよいこともあるが、ボーリング孔から採取した小さなサンプルではなく、直接人間の手で大きなサンプルがとれるという利点があることを忘れてはならない。数種類のサンプリング機械のうち、どれが最も乱さないサンプルを採取するのに適しているかを調べようということで、東京の軟弱地盤で現場実験をしたことがある。数 m 間隔でボーリングしたが、同じ深さのところでも土質が均一ではなく、サンプラーの性能の違いよりも土質の違いの方がはるかに大きく、試験は完全に失敗に終わった。サウンディング試験も同時に実施したが、その結果も同じであった。また、新潟で各種の砂の乱さないサンプラーの比較試験をしたことがある。その際も、砂の単位体積重量が数 m 離れると大きく違い、相対密度の違いがつかめなかった。大陸ではもっと均一な土があるのかどうか知りたと思っているが、このような不均一な土層しかないわが国の場合、土質調査の解釈には、とくに慎重でなければならない。

さて、仮設物の土質調査について、工事着手前に十分に行うべきことはすでに述べたとおりであるが、仮設物の安全率は経済的観点から低く押えられる。土は変形することによって土圧を生じ、土圧は時間とともに大きくなることが多い。これとは逆に、抵抗は時間とともに減少するから、掘削したときは安定していても、時間がたてば不安定になり崩れることがある。したがって、施工期間をできるだけ短くすることが重要である。しかしながら、どうしても長期間かかるということがあらかじめわかっている場合には、仮設物に対しても本工事なみの土質調査をし、安全率も十分大きくとっておく必要がある。やむを得ず低い安全率を用いる場合には観測管理体制を十分に整え、万一の場合にも人身事故の発生しないように万全の対策を講じておかなければならない。土に対する理解が深まれば深まるだけ余計に用心深くなるも

のである。仮設物あるいは工事中は水の処理も重要である。砂が湧き出してクイックサンド現象を起して工事が進まなくなった例も多い。N値が大きくても、この場合には関係がない。トンネルで高い水圧をもったクイックサンドが起ったことがあるが、泥水シールド、限定圧気シールド、ウエルポイントなどで成功した例がある。

一般に仮設物あるいは施工途中のことを組み入れて土質調査計画を立てることは非常に困難である。計画を立てる技術者は、このほかにも非常に広い範囲の数多くのことを考慮しなければならないので、土質のことに十分精力を注ぐ余裕がない。しかし、この点をおろそかにすることは工事の安全性にかかわる重大な結果になる。この際に重要なことは、調査の細部の計画ではなしに、調査の規模、費用、期間を正しく判断し、計画の中に正しく組み入れておくことである。筆者らは、土質工学会サンプリング委員会の仕事として「土質工学会編：実例による土質調査計画」という本をつくった。この本は計画に携わる人の手引書で、ここにある実例をそのとおり真似すれば正しい計画ができるようになっている。

5. 軟弱地盤上の盛土

軟弱地盤上の盛土が沈下やすべり出しを起した例は実に多い。今はサンドパイルやサンドコンパクションパイルなどを施工して軟弱地盤改良が行われるので、失敗例は減少したようである。しかしながら、その代わりに土質調査の結果に基づいてサンドパイルの設計がなされ、工事にとりかかり、マンドレルを打ち込もうとしたが地盤が硬く、どうしても貫入できなかったというような例がある。さらにまた、工事着工前に軟弱地盤でないことが判明し、地盤改良工事をとりやめた例もある。粘土のサンプルが乱されており、圧密試験に際して先行荷重が低い値になった場合には、このような失敗をすることになる。また、これとは逆に、サンプルを採取してから試験をするまでの間の時間が長すぎ、そのうえ保存の仕方が悪く、水分が失われたために過大な先行荷重が測定され工事の際に圧密沈下が意外に大きく失敗した例もある。

6. む す び

以上は、土質調査と試験あるいはその結果の利用法になんらかの欠陥があったために失敗した例を中心に、土質工学的知識を実際に使用する際の注意事項について述べた。土質工学というのはそんなに難解なものではないが、現在のところ技術常識的な判断が他の工学部門よりもいっそう重きをなしているように思われる。さらに、経験と研究が積み重ねられると、もっと客観的に処理できるようになるであろう。