

土 質 力 学

正員 工学博士 最 上 武 雄*

I. 土質力学はいわゆる近代になつてから発達したものである。19世紀の後半までは土質力学的に問題とされたものは擁壁がおもなものであり、土圧についてはかなり古くから論ぜられていたのである。時代的にみて19世紀前半には土質力学が育つべき素地がなかつたわけではないが、理論偏重の気風があり、測定よりは思索を重んじたのが、斯学の発達を妨げた。Harding は言っている。19世紀後半に至り産業革命以来大きな建築物がたくさん建造されるに至り、ようやく基礎地盤の支持力が問題とされ、許容支持力と言う概念もこの時代に生れた。深い基礎もこの頃から考えられ、一方道路も交通量の増大とともに土質的考察を要するに至つた。C.M. Strahan が砂利道について土の粒子配合のことを研究し初めた(1906)のも、このような歴史的背景を考えるとその必然性が感ぜられるのである。その後 Fellenius, Terzaghi 等のすぐれた人々によつて現在の土質力学の基礎が作られ、方向が定められ、今日の盛観をみるに至つたが年代的に通観すればやはり生れるべきものが生れたと言えるのである。Terzaghi がトルコで書いた *Erdbaumechanik* は世界中に大きな波紋を投げた。彼の圧密理論も画期的なものであつたが *Erdbaumechanik* の副題 *auf boden physikalischer Grundlage* と言う言葉も土圧論で固まつていた当時の斯界に対し十分魅惑的な若々しいものであつたに違いない。おそらく Terzaghi 自身、当時わずかに42歳であり、革新の氣に燃えていたのであろう。*Erdbaumechanik* を開いてみると同じく当時画期的な仕事として喧伝されていて、日本でも理研の人々により紹介されていた Hardy の摩擦の実験等がかなりくわしく載せてあつたりして革新初頭の本らしくもあり、Terzaghi の若さを示してもいと思われる。わが国における土質力学の研究開始も、*Erdbaumechanik* の刺戟によるものと思われる。昭和5年鉄道省に土質調査委員会が設置されて土の研究が始められ、それに続いて各所で実験室が設けられたのである。当時第一線で活躍していたのは、山口昇、安藏善之輔、石本巳四雄、等の諸先生であり、渡辺貫博士のごときは若手の方であつた。なお鷹部屋福平先生も当時北海道にあり、土の研究をされていたのである。しかも前記諸先生といえども40歳前後であり元

氣一杯であつた。これがさらに若い人々にあたえた影響ははなはだ大きかつたし、また当時の諸先生の研究は輝かしいものであつた。公平にみて世界的水準かまたはこれを抜くものである。土質調査委員会で考案製作され、そしてついでこの間まに全国で用いられていた三箱剪断試験器のごときも、特にドイツでは高く買われている。近刊の Schultze-Muhs の *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten*(1950)にもわれわれの機械の図を掲げ、すでに20年前から日本の土質調査委員会で使われていると書いており、Jakyのごときも同委員会報告を引用している。1934年に山口先生がヨーロッパに行かれたときドイツのある研究所で新着のこの報告を読んでいて質問を受けたとのことである。諸先生の業績については報告にもあるし、僕もかつて土木技術に若干書いたから省略する。日本にとつて、そして諸先生に続くわれわれにとつて不幸なことであつたが、安藏先生、石本先生が亡くなり、鷹部屋先生も他の研究に転ぜられ、山口先生また病臥されるに至つたこと等は斯学の進歩にとつて大損失であつた。わずかに松尾春雄先生が地震時の土圧の研究を続けておられた。間もなく日本は戦争時代に入つたが、その頃石井靖丸、星埜和両君等がラテライト、黄土等に関して仕事をした。星埜君はこの頃土の締固めの研究を始めていた。斎藤、福岡両君は軍隊に行つていたが、卒業論文には宮地卓藏、柴原孝太郎君等と土の切削抵抗の研究をした。戦時中には軍隊に行かない人達の間で共同の研究が若干行われた。

現在カッチン棒と俗称される貫入試験器は当時の産物であつた。三木五三郎君は当時学生として一緒にやつた仲間である。北海道の真井、板倉両先生も当時は土の研究仲間であつた。真井先生は当ても凍土の研究をされ、板倉さんは泥炭地に関する仕事をされていた。自分のことは書きにくい、僕が弾性力学の勉強から土の研究に入つたのは星埜君と相前後しており、砂の剪断の研究から初めた。戦争中には前記の貫入試験だとか粘性地盤の載荷試験の理論等をやつてみた。また戦争も終り頃になつて土工機械のことが注目されだし、堀武男君等が切削抵抗等の研究をやつていたが、戦後もまもなく切削抵抗の研究は一時鉄道、内務省においても若干行われた。

戦後しばらくは学問的にも大休止があり、実験的研

* 東京大学教授、工学部土木教室

究はほとんど行われなかつたのであろうと思つている。ただ飛行場建設に関し C.B.R. 試験等が米軍を通じて伝えられ注目をあび、これらによつて現場土質試験の気風が促進された。若手研究者は外国の、ことに米国の文献入手に奔走し、旧幕時代のオランダ書のごとく珍重されたのであつたが、戦争中の土質力学の外国での発達が正しく理解されたのははるかに後であつたと思われる。

昭和 23 年頃岩沢忠恭氏が建設次官、土木学会長の頃、当時日本にいたケーシー少将を通じ、今回国際土質学会が作られるが日本も参加してはどうか、それには日本の国内委員会を作る要ありと云うことが伝えられた。当時僕が土木学会の理事をしていたので会長よりその事務を委嘱された。早速、星埜、齋藤、福岡、石井、谷藤、南、巻内等の諸氏に相談するとともに地方の関係者にも連絡し定款作製その他国内的事務を開始すると同時に国際学会の当時の幹事 D.W. Taylor 教授に連絡した。昭和 24 年岩沢氏を会長として国内委員会を結成するに至り、昭和 25 年には日本委員会が国際学会の一員として認められる運びとなつた。これよりさらに、昭和 23 年国際土質基礎工学に関する第 2 回国際会議が Rotterdam で開かれるに当り、やはりケーシー少将より阿部美樹志氏、吉田徳次郎先生を通じ日本国内研究者の論文を出してはとの話があり、関係方面に連絡したところ星埜、最上、水野の 3 氏より 5 編の論文提出があつた。これらの論文はほとんどが戦争中のわが国の研究であつて当時の模様を知らしめるものである。この頃日本においても土質試験に関する標準規格を作る必要があることが痛感され、土質委員会の常任委員が中心となり、土の物理試験法等の JIS を作つた。戦後間もなく有能な研究者が軍隊より帰つてきたことから、例えば齋藤、福岡、巻内、松尾(新)等の人々が活躍を初めるし、村山君が鉄道から京都大学に移つて土の研究を初める等、にぎやかになつた。石井靖丸君はあの困難の最中に大阪の地盤沈下の問題にとり組み、運輸省の土質研究室の基礎を作る等、各人涙ぐましいほどの苦心をしたものである。しかし、外国の文献は思うように入らず、また文献で知る範囲には限りがあつて、それぞれの人達の苦心の割りに一人相撲の感があつた。そのうち D.W. Taylor, K. Terzaghi, Terzaghi-Peck 等の教科書、第 2 回国際会議の議事録、A.S.T.M. の Manual 等が入り初め、その他の雑誌も入手できるようになつたが、戦後の建て直しは急速には運ばなかつた。

そのうち昭和 25 年に至り石井靖丸君が渡米し、谷藤、最上、齋藤、都、渡辺、白石の諸君等が渡米し親

しく外地を見るに及び、次第に情勢も明らかになり、かつた文献も多く導入されるようになり、日本の土質力学も建て直しの目標がついてきたように思われる。この間において試験器メーカー業者諸氏、ボーリング業者諸氏が協力されたことは土質力学の発達に大いに力があつた。そのうちに全国的に本格的な仕事が行われるようになり、土質力学に関する関心は次第に高まつてきた。土質基礎委員会でも単に国際的な面のみの仕事をし、JIS の制定、ときどきの講演会の開催等の行事のみでは追いつかなくなつてきて、国際学会と国内学会とを分離し、国内的の仕事を活発化する必要に迫られてきた。そこで昭和 28 年よりいよいよ手始めとして国際学会がまづ季刊雑誌「土と基礎」を刊行し会員を募つた。幸い多数賛同者を得て、国鉄、建設省、各県、農林省、各学校研究所その他の協力により、わづか 1 年ばかりの間に 2 千数百に及ぶ会員をうるに至つたので、昭和 29 年に至つて当山道三先生を会長として土質工学会として発足したのである。

昨 28 年には第 3 回国際会議が Zürich で開かれるに当つて、日本からも代表を派遣すべく努力した。学術会議からは 1 人しか出せないのので心配したが、各方面の力強い御援助により、またちよつど時期を同じくして Sweden に留学する福岡君、欧米を巡られた国鉄藤井技師長を加え得て、星埜、村山両教授とも 4 名が出席できたのは幸いであつた。提出論文も 7 編を数えた。論文は第 2 回の実績から定められたので日本としてはさらに多くを提出できた実情であつたのである。会議中星埜君はアジア地区の Vice-president に選ばれた。これは同君個人としても、また日本としてもはなはだ結構なことであつた。

戦後、やむを得ぬとは言ひながら、米国からの文献が圧倒的であり、米国に多くの人が赴いたので、日本の土質力学は米国の影響を大きく受けた。もつとも国際会議の動向からヨーロッパ的なものも知り得、これも影響があつたものの比較的少なかつた。星埜、村山両君がヨーロッパを見、福岡君も Sweden に 1 年とどまつて研究し、今後ヨーロッパ的なものを導入され、それが打つて一丸となり日本的なものが生れるに至るであろうことは期待しているところである。

II. 土質委員会、土質工学会並びに土木学会その他の講演会に、ここ 10 年ほどに現われた報告、各会誌に掲載された論文の数は相当数になる。従つてそれ等についてすべて紹介論評することは、とおてい 1 人の力のできるものでもないし、ことに僕のような微力の企て得べきものでもない。従つてここに述べるもの

は“特に改めて調べずに記憶によつて”と言う岡本前編集委員長の特別号企画時の趣旨に100%沿つた印象記である。

現在日本の土質力学の研究は、大学、各省の研究、国鉄の研究所、業者、現場においてそれぞれ機関に応じた特長を持つて行はれている。土質力学の発達経過を考えると、理論的研究とこれを現場に応用した結果から理論に対する確信を深め、また現場の問題を抽象して理論的研究を進めるといふように相互扶助的に進歩をしているのであるから、研究所、現場ともに進まなくては土質力学の発展は期されない。また土質力学の性格上かなり統計的な結論を出す必要があるから、相当数の現場の知見が得られねばならない。従つて戦後数年間に於いて本格的な仕事現場なく、戦争中はまたいわゆる突貫工事が多く、当時土質試験に対する認識がまだ熟していないことと相まつて、わが国土質力学の進歩を遅らせたことになつたと思われる。

さて前述のように戦後しばらくは休止の状態であつたが、石井靖丸君が大坂の地盤沈下に取り組み、これに関連して Taylor-Merchant の理論を拡張し、谷藤君は福岡君とともに路床土の研究を始めた。福岡正巳君は茶臼山地のり調査研究に着手し、はなはだ困難な仕事ではあつたが彼独特の克明さで立派な仕事をし、斎藤迪孝君もまた鉄道関係の地り調査、現地実験を行つていた。能生の実験所の開設も彼に負うところが大きいのだと思う。針生氏は地味ではあるが重要な土圧計その他の製作研究に従事した。星埜君はあの頃は支持力の問題や塑性論をやつていたのであろうと思う。水野高明教授も安蔵先生の玄鉢について支持力論をやられていたようである。水野教授の表は Otto Mund の Handbuch に転載されている。僕のところでは粘弾性の計算や土の電気伝導、突固め等を初め、その頃の地山の強さと俗称していたものに興味を持つていた。かなり急速に米国の事情が明らかになりつつあつた昭和 24,5 年頃からは、研究も本格的になり、活潑になつてきた。また新しい若手の研究家が続々現れてきたことも活況を来すもとなつた。現場と直結する研究も多くなつてわが国の土質力学も軌道に乗つてきた感があつた。

九州で松尾春雄教授主宰の下で土質研究会が発足したのもこの頃だと思ふ。京都の村山教授、松尾助教授の電気化学的地盤固結法の研究も開始され、九大松尾春雄教授のサンドドレーン、人工島の研究も初まつた。港湾局でも石井靖丸、立石、森本等の諸君が研究室の大整備並びに各地の土質調査を始め、農林省でも手島君等の主唱でアースダム現場の土質試験室の整備

が行われ、山王海のダムに関連して河上君の研究も始まつた。また谷藤、星埜両君を主任格としての全国土性図作製の仕事も始まつた。現在までには関東、中部、東北の三地方は済んでいる。また各地建でも土性図作製の仕事が行われているはずである。ただ費用の関係で現在でき上つた地図を印刷できないのは残念である。このように僕の記憶をたどるとこの頃に土質力学界は急に活況を呈し始めたと言つてよいと思われる。土木学会誌の昭和 25 年以降の目次を見ると土質力学に関する論文が次第に多くなり、土木学会の各講演会の土質力学に関する提出論文の数も年を追つて増加している。土木学会に提出されていない研究も相当あるし、講演会に発表されたのみで印刷にならないもの、研究者の机の中にあつて発表されないものはさらに多いと思われるから近年の研究は一時の比でないと考えられる。

III. 必ずしも妥当なことは思わないが試みに土木学会誌によつて最近 4,5 年の土質力学界を回顧してみよう。昭和 25 年度には、谷藤、丹羽、田中、松尾(新)、星埜の諸兄の論文がある。谷藤君の振動性状で路盤を診断することは、同じような思想は戦争中北大の板倉教授にもとり上げられたが、谷藤君より以後南部君に受け継がれ今後の発展が期待される。神戸の田中氏の土壌浸食は困難な問題への第一着手として興味がある。松尾(新)君の地盤応力の図解法は Newmark の方法に似たもの、星埜君の土の塑性の論文は第 2 回の国際会議に出した同君の論文について Coehnen 氏が Compatibility について discussion したのに対する当時の解答であるが、星埜君は以後の沈思によつて、今年になり、あの理論を Coehnen の討議の線に沿つて改良し、土の塑性に対する一見解を完成したのはめでたいことである。まだほとんど理論らしい理論もないこの方面の貢献として非常に高く買われるべきものと思われる。昭和 26 年には嶋、久保田両兄の透水、谷藤君の路盤排水、村山、赤井両兄のアースダムの応力、村山、片山両兄の混合機構、松尾(新)、片山両兄の土の懸濁液の粘姓、岩井、松尾(新)両兄の加積曲線、竹下君のコンクリート舗装版の亀裂等の論文があり、渡辺 隆君も土の締固めと土の電気伝導の関係について書き、僕も土の均一性、土質力学の体系なる小文を書いた。昭和 27 年には内田君の滲透のほか、松尾(新)、赤井、池田、村山、片山、天野、山内、森等の諸兄が論文を書いている。赤井君はいわゆる理論土質力学に関する一連の論文を書き始め、村山教授、松尾(新)助教授の指導下に次第に仕事を伸ばして行つた。九大の山内君も特色ある仕事を

始めている。早大の森君もまた山内君と同じ方向に出発した。昭和 28 年度には内田、松本、村山、渡辺、久野、篠田、最上(幸)、赤井、森、倉田、松尾(春)山内等の諸氏の論文がある。今年に入ってから道路協会が高野国道課長を中心として土工のマニュアル作製の仕事が始まっている。このうちにはかなり土質力学的なことがとり入れられており、できれば有力な指針となり、大いにこの方面の進歩に役立つと思われる。また建築界において基礎に関する関心が高まってきたことはいじむしいものがある。それらの一端を示す文献が「土と基礎」にも掲載されている。なお昨年第 3 回国際会議があつたことはさきに述べたところであるが、この会議には日本から、村上、三瀬；松尾(新)本町、赤井；星埜；松尾(春)、水野、内田、森田；水野、福岡；最上、久保の 7 編の論文を提出した。それぞれ電気化学的固結、透水係数の現場試験、日活ビルの地盤調査、人工島、地盤支持力、地這り、土の動力学的特性に関するものであつた。

28 年からは「土と基礎」が発刊されてすでに 7 冊が刊行され、相当数の論文が掲載された。この雑誌にはあまりにアカデミカルなものは避けると言う趣旨で実用に重点をおいた論文が多いが、このような論文をかなり集めうると言うことは土質力学が健全な発達をしつつあることの証拠と思われる。

IV. 日本以外に目を転ずると 1952 年(大正 14 年)に Terzaghi の Erdbaumechanik が出て土質力学に対する関心が世界的に増大したというものの、本当に斯学が土木工学の中に根を下ろしたのは大体 1940 年(昭和 15 年)頃である。1936 年には第 1 回の国際会議があり相当数の論文は集つたのであるが、まだ世界的水準はそれほど高くはなかつたと思われる。アメリカでさえもあの頃は wash boring が土質調査に主として用いられていたという話である。

不攪乱試料採集法が案出されたと言うことは何と言つても土質力学にとつて画期的なできごとであつた。これによつて粘土の剪断強さ、圧密について加え得た事項ははなはだ多く、これ以前の土質力学の教科書は全く書き直されたと言つていい。1930 年代に Casagrande によつて指摘された攪乱された土と不攪乱土との大きな差違に関する見解もこれによつて定量的になつてき、鋭敏比と言う測定法と相俟つて焦点が合つてきたと云える。貫入試験も資料が集まるにつれて発達し有用な武器となつた。また土質力学における知見が sedimentation に関する地質学への寄与ともなり、粘土に関する諸問題は Rheology との親近を來した。このように他の諸学との関連を深めうるに至つたことは土質力学が成長したゆえんでもある。一方砂に関し

ては Jenkin, Casagrande を経て Reynolds の Dilatancy を復興し、Reynolds の夢を実現した。もつとも Reynold の理想にはほど遠いが、その方向への動きは止つてゐない。乱した粘土を圧密したものの剪断強さが間隙比と密接な関係あることはすでに知られ、石井君のところの実験でも間隙比を不攪乱の場合に近づければほぼ同程度の強さが得られることが明らかにされてゐる。一方攪乱土の強さは $L.I$ とある関係があることがわかっている。従つて不攪乱粘土の強度は密度が関係する部分と $L.I$ の関係する部分とに分けられると言つて Rheelogical と言えば、Dilatational part と Thixotropic part より成ると言つてもいい。これは僕の一種の予想であつて決定は将来にまつが、この意味で Reynolds の夢は粘土に及ぶと言つていいと思う。去年 Winterkorn が Critical density なる概念をさらに物理的に解釈しようとしたことはこの点から考えると意味深いと思われる。

さて大まかに言つて 1925 年以後の土質力学は間隙水圧の概念を枢軸として動いてきたと言つても過言ではない。理論面、実用面においてこれが指導原理として果した役割りは実に大きい。しかし現在の土質力学はつぎの新しい指導原理を要求してゐる。これは果して何であらうか。

一方、道路、ダムに関する土質力学は非常に地味ではあるが確実な道をたどつて発展してきた。長期にわたる調査的研究、Proctor の革命的な研究を得て、一路土壌安定、耐荷力、排水等の問題を発展させてきた。実用的試験法がいくつか発案されたことがこの発達を大いに助けたが、要するに粒度、密度、細粒の粘着力、水等の問題に分けられるように思はれる。問題の性質上攪乱土がおもな対象となつたが、結局は基礎関係の土の問題で行きついたところえ同じく行きついていると言つてよい。

さて、土質力学の将来の問題として注目されるものは数多いが、変形に関する問題；力、変形の他に時間の入ってくる問題；応力分布の問題、例へば伝播性破壊もこの中に入るよう粘土鉱物に関連する問題；表面化学的問題；化学的問題；熱学の問題；砂、粘土以外の土の性質；攪乱、不攪乱の問題；土中の空気の問題等々抽象的に述べられたもの及びこれらの応用に関する問題もあり、また古典的ではあるが常に新しい問題の源泉でもある土圧、杭、支持力の問題等も考えられる。これらを思うとき土質力学の前途ますます多難を思はせるが多難はまた多幸でもある。

近い将来でさえも予想困難であると思われるが、日本の新鋭を含めて世界の新鋭が営々として研究に力を尽しているのであるから輝かしい将来を夢みてよいと確信している。