

土質力学を築いた人々

最 上 武 雄*

1. はじめに

“土と基礎”で“土質力学を築いた人々”という企画の下先人達の功を称え、謝恩の意を示すことは非常に結構なことである。学会から指示された“築いた人々”はかなり多くの会員の意見で決められたとのことである。或人が採り上げて欲しくても、他の人が適当と思わない場合があるかも知れないので総説を設け、一人一人ではなく全体としての背景や歴史的移り変わりの中で、できるだけ公平な見方を提供しようとの考えであろう。私が総説解説者に指名されたのは大変光栄なことである。

2. “土質力学”について

初めに“土質力学”という言葉を引きちんとしておかないと混乱をきたす恐れがある。土質力学、土質工学の言葉は現在いくらかあいまいに使われている。土質力学は Soil Mechanics に対しての言葉であろう。Terzaghi は1936年6月に北米 Massachusetts 州 Cambridge で開かれた第1回の土質基礎工学会議の議長あいさつで彼の哲学、抱負を熱っぽく語っている。初めのところで“……この会議は地面の下にかくされている自然の頼りにならない諸力に対する土木技術者の絶え間ない戦いについての国際会議である。過去25年間にわたる散発的な世界的努力によって、いくつかの新しい有効な武器が鍛え上げられた。我々の会合の第一の目的は、このようにして確保されたいくつかの有利な点(the advantages thus secured)をいかに利用するかを論ずるにある。簡単のために、これら最近の進歩の数々は土質力学の名を与えられて来た。

土質力学への戦いより前の世代の古典理論からの遷移は土の性状についての諸問題の純抽象的取扱いから数多くの種類の土の多様で複雑な諸性質の本質的な知識に基づいた取扱いへの移り変わりと同義である。……”(アンダーラインは筆者)として彼の立場を述べ、そのあと土質力学の歴史的背景や彼の考え方が続く。それより10年程前の Erdbaumechanik の序文における Terzaghi 哲学の説き掛けは若かっただけにもっと熱っぽい。

この議長あいさつから“土質力学”という言葉は、多分彼の造語で Erdbaumechanik に対する英語として出て来

たものと分かる。彼が M.I.T. で行った講義稿で Engineering News Record に連載され1926年に McGraw Hill から単行本として出版された本の題も“Principles of Soil Mechanics”となっている。この内容の池原英治・小宅習吉両氏に依って邦訳されたものが“最新土質力学説”(1929)である。

そして第一回の国際会議から Soil Mechanics and Foundation Engineering という字が使われている。これは少し長いので SMFE と略記したいが、この略記法は一般にも使われている。雪氷や岩石に関する力学的取扱いが SMFE の会議にも出て来ることがあったので、1965年の SMFE の Montreal 国際会議の理事会 (Executive Committee) で学会の改名論が出 Geotechnical Society が簡明であろうと言われた。しかし、これでは内容が大分広くなり過ぎるとの議論が多く改名案は消えてしまった。もっとも国によっては現在、Geotechnical の字を使っている。笑い話だがそのとき Society of S.M.F.E. と Society for S.M.F.E. とどちらが良いかとの話が出、座長であった英国の Skempton が、私は英語を知らないからどっちが良いか分からない。Nash は英語に詳しいから調べてもらって決めようと発言したので一同大喜びで大笑いした。そして国際学会では for を採っている。

日本の土質工学会の英訳名は The Japanese Society of S.M.F.E. である。日本では土質力学のほか土質工学の字も用い、学会名では後者を採る。両者の違いは良くは知らないが、土質工学の方が広く技術的なものも含んでいるようである。私は昨年秋(昭和57年、1982)土質工学会九州支部で“土質力学の流れ”と言う講演をした。後で土質工学の字を使わないのはなぜかと言われたことがある。明りようではないが私自身は両者を上述のように使い分けている。最近送られた山内豊聡教授の講義稿にも“……本稿はまた、土質工学ではなく“土質力学”を中心に書き始めたのであるが、後半に至ってどうしても“土質工学”上の問題に立ち入らざるを得なかった。このことは文中で述べたように、力学だけの問題で土質力学は解決できないとする最近の世界的観点によるものである……”と言う文がある。

3. 学会から指示された“土質力学を築いた人々”

学会から指示された資料には Atterberg から Roscoe ま

*東京大学名誉教授

総 説

で14名がある。これらの人々は学会が何人かに問い合わせ、引き受ける書き手がいるかどうかによって決まった人達である。私の役割は、土木や建築のような建設工学に関連した土の問題を“科学的に”考えようとし始めた18世紀ころからの経過をこれらの人々を中心として、落とせないような人があれば加えて、できるだけ公平な歴史的記述をすることで、なかなか難問である。歴史上の位置がある程度定まったと思える人々のことを書くのはやさしいが、比較的新しい人々例えば Bjerrum, Roscoe などは、仮りにその伝記を知っていたとしても業績評価は難しい。

さて、提示された人々の名前と年代とを知る限り書いておこう。安蔵、鷹部屋両先生の生年、没年を知らないのは同国人として恥じている。後の必要上指示された順序を少し変えてある。

Coulomb (Charles Augustin, 1736~1806)
 Darcy (Henry Philibert Gaspard, 1803~1858)
 Rankine (William John Macquorn, 1820~1872)
 Mohr (Otto Christian, 1835~1918)
 Boussinesq (Joseph, 1842~1929)
 Atterberg (Albert Mauritz, 1846~1916)
 Fellenius (Wolmer, 1876~1957)
 Terzaghi (Karl, 1883~1963)
 Proctor (R.R.)
 Taylor (Donald Wood, 1900~1955)
 鷹部屋福平
 安蔵善之輔
 Bjerrum (Laurits, 1918~1973)
 Roscoe (Kenneth Harry, 1914~1970)

4. 時代分け

前述したように“土質力学”は Terzaghi から始まると考えられる。前節終わりに掲げた人々の中 Coulomb, Rankine は明らかに古典派と言うべく Terzaghi から Roscoe までの人々は“土質力学”時代の人々である。Darcy, Mohr, Boussinesq, Atterberg, Fellenius の5名の人々はほかの人々と多少色合いが異なっている。このことは後で述べる。本文では“物理学”が生まれるはるか昔のギリシャ時代の物理学以前のものなどをも含めて簡単に“物理学史”と言っているような言葉の使い方で、将来は“土質力学”になるような土質力学以前のものも一様に土質力学と略称しようと思う。

5. 土質力学の始まり

土構造物は歴史以前から造られている。種類や規模はいろいろであり規模の小さいものはとにかく、大きいものがそれ程簡単に造り得たとは思えない。恐らく試行錯誤によって得られた秘伝のようなものがあつたのではないと思われる。この種の知識が親から子、先輩から後輩に伝えら

れて古代、中世の土構造物は造られて来たと思われる。Vauban (Sébastien Le Prestre de, 1633~1707) は Galileo Galilei より100年程後、Newton (Issac, 1642~1727) と同時代のフランスの大土木技師である。この時代には技術者には Military Engineer と Civil Engineer の2種類しかなかったし、特にフランスでは軍の技師が Civil の仕事をした。Louis XIV世は1643年に即位し1715年に死んだから Vauban 元帥はこの時代の工兵の大立者であった訳である。フランス国内を東奔西走して活躍し築城に大きい功績を残した。後人が彼を評して、Vauban は数学や物理の教養をわずかししか持たなかったが簡単な算術、幾何、初歩の測量を駆使し築城術に熟達した実際のな人であった。なにかんづく、精神の幅が広く柔軟で常識に富み、長い経験から来る機転と洞察力とを持っていたと言っている。科学史や技術史の専門家が語るところによると、優れた科学者や技術者に欠くべからざる資質は大きな洞察力であると言うから Vauban は長い経験と努力とによって、この資質を鍛え上げていたのであろう。土構造物建設に対する科学的手段開発を刺激したものとしては彼の考案による防禦要さいがある。これは深い掘削と高い擁壁を伴うもので、当然擁壁の設計が問題となる。Vauban は多くの経験から擁壁厚の規準を与えた。この規準の合理性の論議が土圧論を引き出すこととなる。土質力学にとって大変重要なもう一つの事柄が Vauban によって観察されている。1699年に書かれた野外での観察報告の中で、彼は擁壁の後の粘土の中に一つのすべり面が存在していることを記している。昔の日本では立派な城を造った技術者はその完成時に殺されたと聞く。これは当時の政治状況や人々の精神構造によるのであろうが、Vauban の遺産が土質力学に発展したのに対し、日本の築城家の遺産が何も残していないことは一考に値する。Coulomb は1773年のあの有名な報告 (Essais) の中で、実験に基づいて壁の破壊はほぼ平面に沿ったせん断によると言っている。粘土斜面中の深い曲面すべり面は A.W. Skempton によれば、1804年 l'Ourcq 運河の Bois de St. Denis 切取りで観察されたのが最も早いということである。

6. 力学

Galilei (Galileo Galilei, 1564~1642) あたりから力学(一般力学のこと)が次第にまとまって来たのだが、そのころから既に今日見るような力学ができて来たと考えるのは当たらない。建設技術史 (Die Geschichte der Bauingenieurkunst, Hans Straub, 藤本一郎訳, 鹿島出版会)によると現在では基本的原理として直観的に許容されている力の平行四辺形の原理、静力学的モーメントの原理などを今日の形にまで錬り上げるのに約100年を要している。この間研究者達は、これらの原理を正しいものと仮定し、それから導かれる結果が諸々の経験と一致するか否かを確かめると言う今日的な方法ではなく、何か先験的に正しいと

される事柄から Euclid 幾何に見るような方法でこれらの原理を証明しようと苦心していたのである。したがって、これらの研究は往々にして煩瑣な思考や論理過程であった。完成された姿では静力学や強度学は建設技術と密接な関係があり、かつ当時の大技術者は経験による一種の幾何学的構造規則を持っていたものの静力学の創造に携わったのは物理学者、数学者で技師ではなかったのは興味がある。過渡期においては常にこのようなことがあるようである。学問のある時期にはそのときの一般の技術者には鬼面人を驚かすに見える道具が使われることがある。そのような新兵器に2種ある。第1種はそれを使うことが必然で、その使用により学問が発展し、したがって技術が大きく進められる。これに反し第2種のものは必ずしもその道具を使わねばならぬ必然性はないが術学的に使われているのである。これら2種を見分けることは大切である。第1種の道具に対しては必ず適当な解説者が現れて、その道具は一般技術者に普及するようになる。弾性体の力学も Lamé や Saint-Venant の時代にはもちろん Love のころでも一般技術者にとって厄介なものだったのである。Timoschenko 等が現れて、これをかみくだいてその気になれば普通の技術者の道具となり得るようにしたのである。現在技術者にとって不可欠と思われる応用力学でさえ Rankine の時代にはまだ生硬であったのである。歴史を見ると時に応じて優れた解説者が現れて、その学問の必要度になかった程度までの消化が行われているようである。したがって、少し余談にわたるが、昔から今までよく問題にされる話題つまり学会誌の論文が難し過ぎるという永遠の話題は性急に取り扱うべきでないと思われる。一方研究者の方は彼ら独自の言葉を普通の技術者に理解できるように解説、翻訳する労をいとわぬ必要があると思われる。

閑話休題、やはり Straub によると Vauban の時代は静力学が構造物についての問題に利用され始めたときに当たっていたようである。はんの木は湿地における基礎杭に対しては卓絶しているが、空気中や日光にさらされていると耐久性がないとか、煉瓦を造るにはほとんど砂気のない白または赤味粘土が良いと言うような材料についての認識が深まった結果17世紀の初めころから材料の強度試験が始まったのである。一方、力学は物理学者、数学者など技師よりは、高級学校教師、大学の教授など君主から俸給を受けとっていた研究者によって鍛えられ、Newton (Issac, 1642~1727) に至って明確な形をとるに至る。これは Newton、ほぼ同時代の Leibnitz (Gottfried Wilhelm, 1646~1716) による微積分学の発見によるところが大きい。この数学の一分科は非常に有力なので、これによって Euler (Leonhard, 1707~1783) や Bernouilli 一家の人々が弾性曲線などを研究したのであるが、この研究から Daniel Bernouilli (1700~1782) において最小仕事定理の片鱗が現れることは興味深い。

いわゆる最大最小の問題、Isoperimeter problem (等周問題) が Euler によって変分学として発展させられたことは記憶されて良い。Vauban は先に述べたように、数学や物理の特別な教養は持たなかったが、円満な常識と柔軟な精神を備えた大技術者とも言うべき人であった。そうかと言って、例えこれらの教養を豊富に持っていたとしても、それらが技術に対し直接有効になると言うものでもない時代であった。

7. Ingénieur (Engineer)

Ingénieur という名称は中世においてイタリア、フランス、イギリスにおいて戦争機械、城さい施設を造る人々に対して使われていたのであるが、今日使われているような意味ではフランスの工兵将校の中にその起源が見いだされる。彼らは軍事のほか民間の目的で使われる国の仕事をも持っていた。今日フランスで土木を Génie civil と言っているのはこれによる。そのころ学問的教養があり国家的仕事に従事する技術者の身分を表すものとして Ingénieur という言葉が使われるようになったのである。

1675年には陸軍に工兵隊 (Corps des ingénieurs du génie militaire) ができ、1689年海軍に海軍造船技師 (Ingénieur-constructeur de la marine) が、1720年に土木技師団 (Corps des ingénieurs des ponts et chaussées) が設立された。これは軍事的に組織され、数学の教育を受けた土木技師より成っていた。Traudaine によりパリに土木学校 (École des ponts et chaussées) が1747年に設立され、それは1760年に Perronet (Jean Rodolph, 1708~1794) により再編され、技師の卵達は数学によって教導された教育を受けたのである。

また1749年開校した Mézière や La Fère らの工兵学校、砲兵学校も多数の技術者を卒業させた。このような教育を受けた彼らは、構造物やその他の重要な建造部材の設計に際して、数学や力学を活用した方法を樹立し強度試験によって建設材料の力学的性質の知識を深めようとしたのであった。

8. Coulomb

17, 8世紀には“現代の難問”と言う形で建設の問題が論じられたと言うが、17世紀までには難問の中に現れていなかった土圧、擁壁の問題が18世紀に至り難問の中に初めて顔を出したと言う。これは Vauban が建設した多くの防禦要さいに高い擁壁が使われて注目を引いたからであろうと言われている。この問題はほかの難問とともにフランスの理論家達の良い研究問題となったが1773年に Coulomb (Charles Augustin) が有名な“Essais”を提出するのである。この論文の詳細な説明は個別担当の書き手にまかせるが、フランスの技術が数学的教養を持った工兵将校に支えられて来たことから Coulomb のような研究者が生まれ

総 説

ヨーロッパ、土地とゆかりの人							
AGDE	BOUSSINESQ	HOLSTEIN	MOHR	MONTPELLIER	COULOMB BOUSSINESQ	STUTTART	MOHR
BELFAST	REYNOLDS	KALMER	ATTERBERG	PARIS	CAUCHY PONCELET BOUSSINESQ COULOMB	UPPSALA	ATTERBERG
CAMBRIDG	MOSELEY REYNOLDS	KARLSRUHE	CULMANN	RHEINPFALZ	CULMANN	VIGAN	BOUSSINESQ
CHERBOURG	CAUCHY	LAFÈRE		STOCKHOLM	FELLENUS ATTERBERG	ZÜRICH	CULMANN BITTER
DIJON	NAVIER DARCY	LILLE	BOUSSINESQ				
DRESDEN	MOHR	LONDON	HODGKINSON MOSELEY				
EDINBURGH	RANKINE	MANCHESTER	REYNOLDS				
GAP	BOUSSINESQ	METZ	PONCELET				
GLASGOW	GORDON RANKINE	MEZIÈRE	COULOMB				
GÖTEBORG	SWEDISH COMMISSION FELLENUS HULTIN PETTERSSON OLSSON						
GRAZ	TERZAGHI						
HANNOVER	MOHR						
HÄRNÖSAND	ATTERBERG						



たことは自然の勢として理解されよう。Coulomb 家は Charles の前、数代にわたって Montpellier に住んでいた。Charles が幼いころ、父は Paris に移り Charles も彼に従った。Charles は Collège Mazarin で若干の数学教育を受けたがそれは多分10才から15才の間であろうと言う。Collège Royal de France で数学について Le Monnier の講義を聞き数学者になりたいと思ったが、父がMontpellier に帰ったので経済的理由から従わざるを得なかった。Montpellier で更に学校教育を受けたかどうかは分からないと言う。1760年には Mézière の学校に入り2年後に卒業したのである。私が担当することになっている Boussinesq は、l'Hérault 県の St.-André-de-Sangonis で生まれたとある。手持ちの地図にはこの場所は出ていないが l'Hérault 県の大都会は Montpellier である。そこで Boussinesq より約1世紀先輩の Coulomb と Boussinesq との間に因縁らしいものを感じたのである。Coulomb の“Essais”には土圧も論じられているが、その他の“難問”についても論じられている。

これは Coulomb が英国に対する要さいを Martinique 島で建造している間に研究したもののようである。この論文の題目は“Essais sur une application des règles de maximis et minimis à quelque problèmes de statique relatifs à l'architecture”(建築に関するいくつかの静力学の問題に最大最小の規則を応用することについての試み)とある。Coulomb が Mézière で学んでいたところ Bossut の個人的影響を大変受けたと言うが Bossut もまだ若かったから La Hire や Bérard などの仕事を祖述していたに過ぎぬであろう。したがって Coulomb が Mézière を卒業したころには曲げの問題が解かれていることは知らなかったろうと言われる。そこで Coulomb は一方で Galileo の理論、他方では Bérard や La Hire の実用式を知っていたとともに Gregory, Bernoulli, Euler などの科学的業績をいくらか知っていたのだろうと考えられている。前にも述べたように Daniel Bernoulli は弾性曲線の研究に最大最小の規則を用いようとし、これが Euler を経て変分学に発展したのである。この最大最小の規則において神学的な宇宙の原理のようなものが現れていると Straub は見ている。Coulomb の標題も最大最小規則を表に出している。このことは、Bernoulli, Euler あたりの影響が感じられぬこともない。

後に St. Venant (Barré de, 1797~1886) も認めていたそうだが、Coulomb 論文は豊富な内容が非常に簡潔な形で書かれていたので40年程度も、そのほとんどが専門分野で見落されていた。もしこれが正當に扱われていたら、“Essais”は建設工学で画期的なものとそのとき既に考えられたであろうと言う。私は Coulomb 土圧が100年も実用されなかったのは、フランスの技術者の経験主義や理論尊重の慎重さによると考えていたことがあったが、それは私

の勉強不足と買いかぶりであったと悟った次第である。Todhunter と Pearson の弾性理論と応用力学の歴史は3冊もの大冊でかなり詳細なものだがなぜか Coulomb のこの業績を小さく扱っている。Boussinesq の粉体力学を大きく採り上げているのと比較すると少しく奇妙である。St. Venant は Boussinesq の仕事を認めて Lille 大学に推薦した人であり、仕事の上では Boussinesq は St. Venant の最大の弟子と言われている。St. Venant の Coulomb 評は公平なものであろう。

9. École Polytechnique, 英国

フランスにおける技術者養成法は1794年画法幾何の創始者 Monge (Gaspard de, 1746~1816), Carnot (Lazare, 1753~1823, 熱力学の Sadi, 1796~1832, の父) などによって創設された École Polytechnique により更に拡充される。1804年の卒業生に応用力学の体系を造り上げて、実務家にそれを構造物設計に適用することを教えた最初の人と言われる Navier (Louis Marie Henri, 1785~1836) がいる。その後も優れた数学者、物理学者、工学者を輩出して École Polytechnique は隆盛の道をたどるのである。フランスのこのような傾向に対し英国では MacAdam (John Laudon, 1756~1836) 道路を産み、Watt (James, 1736~1819) の蒸気機関、またそれによる蒸気機関車を造って産業革命をなし遂げ国の繁栄を築いて行ったのであるが、英国の技術者教育は長い間親方教育であった。英国の工学初期に大きい貢献をした人に Hodgkinson (Eaton, 1789~1861), Fairbairn (William, 1789~1874) があるが、ともに農家の子弟であり独学で材料の力学試験を行ったり柱の挫屈の研究をした先覚である。独学と書いたけれども彼らのころ英国には“工学”を学ぶような大学がなかったのである。しかし、Hodgkinson は有名な科学者の Dalton (John, 1766~1844) に俊敏さを認められ Bernoulli, Euler, Lagrange などの古典的な書を教えられたりした。Fairbairn は1855年のパリ博覧会の陪審員の一人となったが、その報告書の中でフランス人、ドイツ人が主要な産業技術に関する理論ではイギリス人より優っている。これは両国の科学教育の成果によるものである。イギリスは自己発展の衝動に駆られて大いに量的成長をして来たが、他の国はイギリス程恵まれず物資も少ないため、イギリスよりはるかに注意深く材料の利用法を研究して来ているので、多くの面で質的に我々を凌がしていると言っているのはなかなか面白い観察である。ちなみにイギリスでは1840年に初めて Glasgow 大学に Civil Engineering and Mechanics という講座ができた。初代教授は Lewis Gordon である。その2代目の教授が我々の Rankine である。Cambridge や Oxford などの伝統ある大学には当時まだ工学講座はなかったのである。Hodgkinson は1847年に London University College の工業基礎力学の教授 (Professor of the mechanical prin-

総 説

ciples of engineering) になったが、London 大学は工学の講座を持った第2番目の大学であったと思われる。ドイツにおける工学教育は初めはほぼ École Polytechnique にならった学校が設立されたので、ただフランスにおけるように、それを経て École des ponts et chaussée などの専門校に進むのではなく、その中で専門教育が完成されるような仕組みになっていた。いずれにせよヨーロッパでは技術者の卵が学校教育で養成されるようになり、それとともに科学が技術に浸透して行ったのであって、その端緒が仏国において18世紀に始まったのである。古市公威先生は明治8年(1875)フランスに留学、明治の日本に西洋工学を導入した優れた人であったが École Monge で予備教育を受けた後 École centrale を終え Ingénieur des Arts et Manufactureur となった後 Sorbonne で学んで Licencié ès Science Mathématique を得て帰国したのであるが、Sorbonne での理学的勉学は先生の興味によるのだろうか、またはフランスの伝統によるのだろうか。

10. Rankine

さて Rankine だが、16才で University of Edinburgh に入り two sessions だけいて、多分学資の関係と思われる理由で中途退学、1838年より実務につく。当時英国の大学に工学はなかったから、彼は理科を学んだのである。大学中退後指導的土木技師であった Sir John Macneil から現場技術を教えられた。さてフランスの優れた研究者である Navier, Dupin, Poncelet などの影響を受け、英国で応用力学の研究を行って “Treatise on Mechanics Applied to the Arts (1839)” や “The Mechanical Principles of Engineering and Architecture (1843)” を書いたのは Moseley (Henry, 1820~1872) である。彼は New Castle 近くで生まれ Cambridge 大学の St. John's Colleges を 1829年卒業した。

1836年に彼は King's College, London の物理学(Natural Philosophy) と天文学の教授になり、技術に対する応用を含んだ力学課程を受け持って上記2冊の書物を書いたのである。これらには Poncelet の “Mécanique Industrielle” を特に多く引用しているとのことである。Rankine は1838年より実務についているのだから、そして更に理学を学んでいたのだから、Moseley のこれらの本を読み刺激も受けたであろうし、それによって自分も何か研究してみたいと思ったであろうことは想像に難くない。そして多くの論文を書き人々の認めるところとなって 1855年に L. Gordon の後任として Glasgow 大学の2代目の工学教授となる。そして学生への講義の準備に際して “土圧論” が出来来る。

1856年2月18日付の Royal Society の Secretary 宛の手紙の中で “私が講義の準備をしているときに上述の力学分野すなわち Mathematical Theory of the Stability of Earthwork and Masonry の多くの研究をし直す必要を見

いだしました。そして現在この題目について一つの論文の準備をしています。この論文ができ上がったら Royal Society に提出します。” と言っているのである。そしてこの論文は1857年に “On the Stability of Loose Earth” という題名で Philosophical Transactions に発表されている。Rankine が彼の講義の準備をしていたとき Moseley の The Mechanical Principles of Engineering and Architecture から大きい影響を受けている証拠があり、この本には Coulomb の土楔理論のかなり詳細な説明が載っている由である。Rankine は “この問題の従来の研究は私の知る限り Coulomb の土楔のようなある種の数学的技巧か仮定に基づいている。この種の取扱いにより多くの特殊な問題に対し正しい解が得られるけれども、結論の応用が限られている上、科学的に見ても満足とは言えぬ。私はどんな技巧も仮定の助けも借りず次に述べる唯一つの原理のみにより、粒状体の摩擦による安定について数学的な理論を研究しようと思う” と言っている。

その原理とは “ゆるい粒状体内の与えられた一つの平面に沿った変位に対する抵抗は粒状体のこの面の両側にある二つの部分が働かせ合っている、面に垂直な圧力にある定数を掛けたものに等しい” と言うものである。これを読まれる方々はここに時代を痛烈に感じられるであろうと思う。

Rankine は土圧の論文を書いた1年後 1858年に有名な Manual of Applied Mechanics という応用力学教科書を書いている。これは当時英語で書かれた最良の教科書と言われた。

明治4年岩倉具視を首とする大視察団が欧米に派遣された。元来は不平等条約の改訂を目指したもので、この目的は達せられなかったけれども政府高官達の欧米認識に大いに役立った。この派遣使節の見聞記は岩波文庫で手軽に読める。さて一行の中に副使工部大輔伊藤博文がいた。彼は旧幕時代渡英について世話になった Hugh Mathson に対し、工務省に設けられるべき工部大学の教官として英国の俊秀の幹旋を依頼したのである。Mathson は親しかった Gordon に相談した。Gordon は Rankine に回り Rankine の愛弟子の Dyer (Henry, 1848~1918) が来日することになった。Rankine は1872年(明治5年)心臓病で死んでいるから Dyer が来日した時には彼はいなかったのだけれども、Dyer を通じた Manual of Applied Mechanics を通じて、日本の技術界に大きい影響を与えている。奇しき因縁と申すべきであろう。Rankine は1857年には、G. Cook 教授も理由不明と言っているが、1843年に選ばれた Institution of Civil Engineers の Associateship を退いている。

Institution の full member にならなかった理由も分からないと言う。1848年ころ突然の変化が起き土木技師の実務を続けながら以後多く物理学の論文を書いている。この事情はいくらか Coulomb に似ており、Coulomb も1773年

の Essais 後電気磁気などの物理学の研究に転じたのである。

Rankine とほぼ同時代で学会から指示された人には Darcy (Henri Philibert Gaspard, 1803~1858) がある。Dijon で生まれパリで教育を受けた後 Dijon の給水システムの設計と施工の仕事をしたが、これに関して透水の研究を行い、彼の名の付いている法則を結果として得、1857年に発表した。このいきさつからも Darcy が土の力学を念頭に置いて彼の研究をしたのでないことは明らかである。

Coulomb と Rankine の2人の時代の間に Collin (Alexandre, 1808~1890) という土質力学として注目すべき人がいる。

しかし彼の研究業績である粘土層中の地すべりに関する実験的研究 (Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux, 1846) は長い間埋もれていた。発見され英訳され A.W. Skempton による解説を付けて出版されたのが 1956 年である。Collin は Polytechnician で Corp Royal des ponts et chaussées の技師であった。この研究は Bourgogne 運河工事に関連して行われたもので、この中で素朴ながら粘土のせん断試験を行っており、曲面すべり面を考えている。論文の題目に “accompagnées des considérations sur quelques principes de la mécanique terrestres” という文が付いていて、mécanique terrestre を sol mechanics と英訳している。恐らく Collin の時代にこのような字を使った人はなかったと思われる。ちなみに現在フランスでは土質力学を la mécanique des sols と言っている。この論文の重要さにもかかわらず、埋もれてしまって後の人々に受け継がれず、今になって Collin の顕彰碑を建てたにしても、後人の Collin に対する贖罪碑のようなものではあるまいか。

11. Navier

19世紀のフランス工学界は、École Polytechnique を中心に動いていた観がある。Collin もその卒業生の一人であるが、特筆すべき人としてはまず前にも名を出した Navier (Louis Marie Henri, 1785~1836) がいる。Navier は Coulomb に続いて応用力学の分野を更に発展させた人である。Navier は Dijon の裕福な法律家の家に生まれたが 14才で父を失い、有名な技師でおじの Gauthey (Emiland Marie, 1732~1806) に引きとられた。1802年 École polytechnique に入り、おじが学びかつ数学の教師だった école des ponts et chaussées に進んだ。Navier は工学者、技術者として優れた仕事をしたが、弾性体の力学、流体力学の基本方程式を導いたことでも名高い。Navier はこれらの方程式を求めるために物質は一樣に分散した微小粒子で構成されているとし、粒子は互いに力を働かせ合っているがその力は距離だけの関数であるとした。このようにして

求めた基本式は弾性定数を一つだけ含んでいた。この論文を研究し、液体内に働く圧力の考え方を一般化して応力の概念を作ったのは Cauchy (Augustin, 1789~1857) で、応力解析を展開し主応力の存在を発見した。したがって Coulomb 時代には応力の概念は生まれていなかったことが分かる。Cauchy は応力概念を用いて弾性力学の基本式を導いたが、これは今日等方弾性体の力学基本式と呼んでいるもので弾性定数が二つ出て来る。彼はパリで生まれたが革命時だったのでパリを離れた。当時有名だった科学者や数学者の知遇を得たが、なかならず Lagrange (Joseph Louis, 1736~1813) は Cauchy 少年の数学の才能を認めていたと言う。Cauchy は 1805年 école polytechnique に入り école des ponts et chaussées に 1807 年進学、1810 年卒業して Cherbourg で港湾工事に従事したが 1813 年パリに帰ってからは数学者としての生涯を送った。

12. Poncelet

Navier の後にも école polytechnique は優秀な数学者、物理学者、応用力学者を輩出している。Poncelet (Jean Victor, 1788~1867) もその一人である。彼は Metz の貧しい家に生まれた。

小学校で抜群の成績だったので Metz の中学の奨学生となり、1807年 école polytechnique に入学 Monge の指導を受ける。1810年卒業後 Metz の工兵学校に入った。Mézière の学校は 1794年に Metz に移されていたのである。課業を完了した後 1812年ナポレオンのモスクワ攻めに参加、軍敗退のとき捕えられてボルガ河岸の Saratov で約2年間牢獄生活をする。その間読む書物もない中で考えたのが射影幾何学だったと言う。帰国後 1822年に射影幾何学の有名な書、図形の射影的性質論 (Traité des propriétés projectives des figures) を出したが、当時フランスにおける主流であった解析学でなかったので十分には認められなかった。帰国後彼は Metz の兵器廠に職を得ていたが、そこには重要な応用力学の問題が一杯あったので、彼はそれらの問題を解くことに専念した。彼の名声は高まり 1825年には Metz の工兵学校の工業力学教授になった。1826年機械に応用する力学教程 (Cours de mécanique appliqué aux machines) を出版、次いで 1829年には工業力学入門 (Introduction à la mécanique industrielle) を出す。Poncelet の工業力学の業績が急速に認められ高まり、1834年に Académie des Sciences の会員に選挙されパリに移り、時に Sorbonne で力学を教えた。1848~1850年には école polytechnique の commandant をしたが 1852年には引退した。

Poncelet の “Mécanique Industrielle” が英国の Moseley に影響を与え、Rankine の応用力学や土圧論を生むことは既に述べた。我々が土の力学で知っている Poncelet は実に巧妙な土圧を求める図解法で、射影幾何の創始者 Poncelet の幾何学の至芸とも言うべきものである。概し

総 説

て19世紀には土圧論が研究されたが、ほとんどがCoulomb, Rankine を認めた上で土圧計算を簡易化するとか、これら両理論の数学的内容を論じたもののようである。それはそれなりに評価はできるが“土”の力学と言う見方からはいかにも土の“力学”である。Rankine も Coulomb 土圧論は土楔と言うような“仮定”に基づいた議論で科学的でないとして彼の議論を始めていることは既に述べたが、実際に造られる擁壁やそれが支える土が土圧理論での壁や土と似ていいるかまたは似ていないかを追求することの方が重大であろう。しかしこのような考え方は20世紀のもので、Ponçelet や Rankine のような傑物達もやはり時代の子達であったのである。

13. 図式力学, Culmann, Ritter, Mohr

さて19世紀の応用力学・土圧論には図式力学が大変貢献している。これは Monge の画法幾何, Ponçelet の射影幾何から始まり, Culmann, Ritter, Mohr によって大成豊富にされた。ドイツの橋梁学者 Culmann (Karl, 1821~1881) は Rheinpfalz の Bergzabern に生まれた。牧師の父から基礎課目を十分教えられていたので Karlsruhe Polytechnicum の3年に入学できた。卒業後 Bavarian 鉄道で働いた。当時良く読まれていた Navier の土木学校での講義稿 (Résumé des leçons données à l'école des ponts et chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines) を良く読んだ。Bavarian 鉄道で実際的な仕事をした後1855年に新設の Zürich Polytechnicum で構造理論の教授になった。

彼の講義は図式力学に重点を置いていた。図式解法を系統的にあらゆる種類の構造解析に利用し最初の図式力学の本 Die graphische Statik, Zürich, 1886 を書いた。Ritter は Zürich Polytechnicum に学び1869~1873年の間 Culmann の助手を勤め1882年からはその後継者となった。

Mohr (Otto Christian, 1835~1918) は北海に面した Holstein の Wesselburen で生まれた。16才の時 Hannover Polytechnical Institute に入学し卒業後 Hannover と Oldenburg における鉄道建設で構造技師として働いた。この間にドイツ最初の鋼トラスをいくつか設計し理論研究をも行った。32才のとき Stuttgart Polytechnicum に工業力学の教授として招かれた。1868~1873年にこの学校で工業力学のいろいろの方面の講義をしたが当時彼は図式力学に特に興味を示し構造理論のいろいろの問題を図式で解くことを示し、また図式力学の基礎に対して多くの貢献をした。このときの弟子には C. Bach や August Föppl などがいた。1873年 Mohr は Dresden に移り Dresden Polytechnicum で65才まで教えて引退し Dresden の近くで科学的な生涯を続けながら静かな晩年を送ったのである。Mohr には Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik, 1914 という論文集がある。

私が学生のころには古本屋で容易に手に入れることができたのである。学生としてはやや読みがたいし、専門家として見ると時代のせいであると思うがやや冗長にみえる。

この文章を書くために何十年ぶりかに出して見ると、第1から第4論文までは剛体の力学、図式力学、構造の運動学などがあり第5論文に例の Mohr 円が出て来て破壊論がある。その題目は材料の弾性限界や破壊はいかなる状況が条件づけられているか (いかなる条件下で生ずるか): Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenzen und den Bruch eines Materials? であり第6論文は土圧論、第7~第14論文は現在の応用力学教科書の内容とほぼ同じである。この論文集の内容は現在の応用力学教科書とほぼ同じだが Mohr の個性で貫かれており、特に素晴らしい幾何学的才能が示され、Mohr 円のような創造性豊かな考え方を案出して破壊論に適用、鋼による実験も示している Mohr の偉大さには感歎を惜しまない。

14. Reynolds, Boussinesq

Reynolds (Osborne, 1842~1912) は Belfast で生まれた。初期の教育は父から受けた。父も Cambridge 大学の卒業で例の数学優等試験 (Mathematical Tripos) の thirteenth Wrangler であった。Osborne も Cambridge に学び彼の方は Seventh Wrangler として卒業したのである。そして1868年に Manchester 大学の工学教授になった。物理学や工学で彼の名前のついた重要な事項を残している。例えばレイノルズ数, レイノルズ方程式, レイノルズ応力, レイノルズ相似律などである。土質力学から言うと我々はダイレイタンス (Dilatancy) の発見を彼に負っている。その論文は1885年の On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact with experimental illustrations と1886年の Experiments showing dilatancy, a property of granular material, possibly connected with gravitation とである。Reynolds 自身は dilatancy の性質で当時光の媒体であると考えられていたエーテルの性質を解明しようとしていたらしい。土質力学に dilatancy 概念が使われるのははるか後年である。1931年に発表された Jenkin, C.F. の土圧の研究, 1940年の Casagrande, A. の Critical density の提言あたりからであろう。

さて年代的にはこのあたりに Boussinesq (Joseph, 1842~1929) が来る。彼のことは別に採り上げて私が書くことになっているからここでは簡単に記すことに止める。Boussinesq は19世紀最大の弾性力学者と言われた Saint-Venant (Barré de, 1797~1886) の学問上の一番弟子と言われていて、彼の本領は数理物理学である。

半無限弾性体, つまり平面境界を持つ無限に続く弾性体の表面に任意の分布を持った垂直圧力が働いたときに弾性体の中に生ずる応力分布を求めた。これは Boussinesq の問題と言われて重要視されている。この解が地盤表面に加

わった力が地中どのように伝わって行くかを考えるとき大変助けになる。また1876年には固体の弾性平衡との比較においての粉体の弾性平衡論および粘着力なき土の圧力論 (Essai théorique sur l'équilibre d'élasticité des massifs pulvérulents comparé à celui de massifs solides et sur la poussée des terres sans cohésion) と言う180ページの大冊の論文がある。この論文はかつて柴田畦作先生が英訳され工学会誌に載せられたことがある。平均圧力と偏差応力とをひずみで展開して係数を粉体の特性と考えられるものを考慮して決めて行くことで、粉体の応力-ひずみ関係、今日で言う構成方程式を求め、それによって土圧についての議論をしている大論文である。しかし粉体の特性と言うものが実験で求められたものでなく推定されたものなので力作の割に今日では忘れられている。

しかし Todhunter-Pearson の歴史ではその手法に興味を持ったのであろうか詳細に紹介している。

15. “土質力学” 前夜

19世紀の終わりに近づくとも産業の発展、交通量の増加などにより土に関する技術問題も多様性を生じて来る。Vauban の擁壁から発生した Coulomb 土圧を主軸とした古典的な土質力学では間に合わなくなる。支持力、すべりに対しての問題は以前よりも重要性を増すが、それは軟弱地盤の利用から出て来る。土質力学における革命的なものが要求されて来ていたのである。スウェーデンで注目すべき動きがあったが Fellenius (Wolmer, 1876~1957) (Geot. Vol. VII, No. 4, 1957), Hultin (Sven, 1889~1952), Petterson (Knut, E.) などが中心であった。スウェーデン南西部にある Aspen 湖における鉄道の大きい地すべりに対して設けられた Statens Järnvägars Geotekniska Kommission (英訳名, Swedish State Railways Geotechnical Commission) の働きは大きかった。この委員会の最終報告は Olsson (John, 1880~1969) が secretary としてまとめたが、系統的に分析されているので知られている。Hultin, Petterson が新しく導入した円弧すべり面法, cone 落下によるコンシステンシー測定法, スウェーデン式サウンディングなどが含まれていた。1916年にGöteborg の Stigberg 岩壁のすべりも円弧すべり面法で論じられた。この方法は更に研究され 1927 年 Fellenius (W.) により “Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen” と言う題目でBerlinで出版され多くの読者を得たのである。

このようにスウェーデン国鉄委員会の活動は19世紀までの土の力学より一歩を進め、抽象され類型化された土ではなくて実際の土の力学的性質を少なくとも考慮に入れようとしている。そのため実験技術をいろいろ開発しているがまだ本格的でないのはやむを得ない。この委員会でも土の effective quantitative soil classification system と称され

るものを案出したと言っているがどんなものか分からない。

円弧すべり面は一般的に考えれば曲線すべり面である。古くは Collin の cycloid すべり面, Frontard のやや理論的な cycloid すべり面がある。また Kötter (F.) は土圧論における一般すべり面の満たすべき方程式を作り(1903), これにより曲面すべり面による主働土圧の方が平面すべり面によるそれよりも大きいことを示した。

Hultin, Petterson のころは試料を得てせん断試験をする方法が明らかでなかったもので、彼らの円弧すべり面法は現在のものに比して複雑であるが土を画一的に考えていないのは近代的である。

さてここで Atterberg (Albert Mauritz, 1846~1916) に軽く触れておこう (Geot. Vol. III, 1952 and 1953)。彼は Bothnia 湾の漁港を持ったスウェーデンの古い都市 Härnösand で 1846 年 3 月 19 日に生まれた。父は棟梁で市参事会員であった。Stockholm の Katarina School で教育を受け 1864 年に卒業した。7 年後 B.A. の学位を得、Uppsala 大学の化学教室の助手となる。1872 年 Ph. D. をもらい 1874 年大学の分析化学の助教授となる。28 才であった。しばらく化学の研究を行った後 1877 年 Uppsala を去り Kalmar に移って農学の研究に投じた。初め穀類の分類などを手がけたが 1900 年から彼の死の 1916 年までは主として土の研究をした。土の分類として初め粒子の大きさに注目したが、粒子の大きさで粘土を分類することは不適當で、塑性が粘土の特別な指標となることを見だし、限界と言う考え方に到達したのであった。Atterberg 自身全く考えてもいなかったと思われる彼の仕事の土質力学における価値を認めたのは Terzaghi であった。

16. “土質力学” の誕生, Terzaghi の時代

第一次世界戦争の直前からスウェーデンを含む多くの国で土に関する理論と実務における経験との不一致は何から起きるかを明らかにしようとして、土について持っていた科学原理を批判することが始まったと Terzaghi は 1935 年に述べている。私が山口昇先生からごくわずかの土質力学の話を聞いたのは 1931 年であった。スウェーデンの円弧すべり面, Erdbaumechanik も既に知られ、鉄道省に土質調査委員会ができた直後であったが、山口先生による世界の土質力学姿勢の受け止め方は上記 Terzaghi の 1935 年の考え方と同様であったと思う。

世界中に出ていた新時代への動きの例としては前述スウェーデン国鉄委員会の仕事の方がまず挙げられる。この委員会の出発が地すべり対策であったことから当然かも知れないが、この委員会のすべての業績はこの問題を指向している。これは非常に堅実さを感じさせられるものだが対症療法的とも考えられる。また、そのころのことと思うが米国の道路技師 Strahan は各所で建造された砂利道を比べると、良好なもの良好でないものがあるが、その違いは土によるこ

総 説

とに気付き砂利道に適した土はいかなる分類に属するかを調べたと言うことである。この動きにも旧い土質力学にはなかった新しいものが感じられるのであるがやはり限られた一つの技術問題を指向している。

Terzaghiが土や基礎の問題を“科学的”に考えようと出発したのも20世紀初頭のことであった。粒粒辛苦の末、土質試験による土の分類に突き当たったのは多くの人々と同様であったが粘土の特性としての圧密現象を発見したのは非常に幸運だった。しかも発見当時イスタンブールのある工場建設に当たって実際問題に適用することができ、自分の学問に対する自信を得るとともに、彼の学問について世間の信用を我がものとし得たことは彼の生涯について大きい影響を与えたことと思われる。Terzaghiは力学の一部門として土の力学を考えたり、ある特定の課題についての限られた範囲の研究に限ることなく“土質力学”と言う新しい学問の一体系の樹立を考えていた点で他の同時代人と大きく異なっている。1925年に出した著書にも *Erdbaumechanik* と言うそれまでにない全く新しい字をあててその意気を示している。ほかの優れた人々が古い土質力学の部分的改良を考えていたとき彼は全面的改革を考えていたのである。この書物にはこのような目的から、古典的土質力学や透水のことや彼自身の研究した圧密、圧縮などの土質試験のことなど役に立ちそうに思われたことは何でも盛り込んであると言う有様が整理が十分行き届かず見方によっては気障と思えるものさえ含んでいる。しかし全体として見ると夢があって未完成優良児であることを感じさせる。これが当時の若者を初めとし心ある多くの人々に感動を与え、世界を挙げての大合唱をまき起こして行ったものと思われる。Terzaghiに賛同して未完成だった土質力学の建設に力を貸した人々は Casagrande, A., Peck, R., を初めとして数多く枚挙にいとまない。

Taylor, D.W. もその一人で圧密、斜面安定についての業績もある。石井靖丸君が大阪地盤の沈下を研究したとき Taylor の二次圧密の研究を大変参考にした。しかし何と言っても一段落した土質力学の分かりやすい教科書を書いたこと(1948), ISSMFE の secretary general として働いたことで知られる、温厚な人柄であった。

Bjerrum, L., はデンマーク生まれでスイス、ノルウェーで活躍した才人で ISSMFE の会長をも務めた。

Roscoe, K.H., は同じく Terzaghi 時代の人であるが少し持味が異なっていたようだ。Schofield, Worth, Pooroshasb など少壮の秀才とともに塑性論的土の変形論で一派を開いたが、不幸交通事故で逝ったのである。

初めにも述べたように Taylor, Bjerrum, Roscoe についての評価は現在大変難しいので上に記したのは単なる印象である。なお3人の追悼記はそれぞれ *Geotechnique* Vol. VI, 1956, Vol. XXVIII, No. 3, 1973, Vol. XX, No.

2, 1970 に出ている。

Proctor は以上3人の人々とは大分色合いが異なり、土の締固めの研究をして、アースダム建設に革命をもたらした人である。この研究の影響はダム建設に止まらず多方面に及んでいる。Terzaghi およびその協力者が主として追っていた応用力学的土質と一味違う土質力学開拓の先発隊長の1人と言うべきかと思う。

鷹部屋, 安蔵両先生も Terzaghi 時代の先生方である。鷹部屋先生は土圧実験など安蔵先生は古典的土圧論を統一的に論ずる方法、斜面安定論など独自の優れた研究をされた方々である。

17. 先輩達に感謝のこと

明治初年より相当長い年月、日本は東洋の渺たる一小国であり続けた。その間、世界は即ち西洋であったから日本は世界の中で無きが如き存在であった。諸先輩はそのような状況の下で粒粒辛苦西洋の文物を導入、日本の実力を高めて行った。時に性急の余り武力に頼って名のみ優勢を得ようとしたことはあるが、日本も世界の文化文明の担い手であり、これを推進する一員であることを西洋にも認識さすべく先輩達は自らも努め後輩の育成に力を致したのである。ようやく最近に至って西洋も日本を仲間として考えるに至りつつあるようである。

私は両先生の業績が当時の標準として世界に立派に通用するものであることを確信するものであるが、当時の日本の状態は現在とは異なっていてその業績が世界に見るべき影響を与えたとは思えない。西洋の発表機関を経たものとはにかく、それを経ぬものはほとんど西洋の眼に触れない。つまり世界の眼に触れない訳で、したがって世界の文化向上に役立たせることができないような有様であった。今日 *Soils and Foundations* を世界中の人が読んでいる状況とは雲泥の差があったのである。

したがって私はこの“土と基礎”が国際語に訳されて西洋その他諸外国の学者に読まれたとき、彼らが、我らの真情を解さず、我々が独善的に両先生を“土質力学を築いた人々”と考えているとは思わないであらうかと言うことを恐れる。ソ連ではあらゆる有用な発明発見がソ連人によってなされたと言われていると聞くことがしばしばあるがそのときの私達の気持を思い起こしていただきたいのである。このようなことは我々が鼎の輕重を問われることにもなり、両先生を傷つけることになることを恐れるのである。我々としてはわずか百年余にして世界の一員として活躍できるまでに我々後輩を育成して下さった、両先生を含む諸先輩に改めて感謝の意をあらわす方が、空々しい言葉を弄するよりははるかに潔よいことではあるまいかと思っている。

(原稿受理 1983.5.11)