

米国に於ける土質力学研究の現況

正員 工学博士 最上 武雄*

RECENT RESEARCH ON SOIL MECHANICS IN U.S.A.

(JSCE March 1952)

Dr. Eng., Takeo Mogami, C.E. Member

Synopsis The author presents in this paper an abridged report of his trip in U.S.A. which shows the aspects of studies on soil mechanics at the leading universities and institutes.

幸い機会を得て北米合衆国（米国と略称）に行き大学、研究所の若干を見る事が出来た。何分短期間の事であり、しかも夏休みにかかったので十分な視察は出来なかつたが、一方各所で種々の便益を与えられ、特に約6ヶ月前から滞米していた石井靖丸君から色々聞く事が出来たので、主観的ではあるが、或る程度、土質力学の現状を窺知出来た。現在米国には多くの有能な土質力学者がいる。この現象はこの分野に限らず学問のどこでも見られる事かも知れない。研究並びに生活に便利が多い事も米国の魅力の一つであろう。殊にヨーロッパ系の人達にとっては米国の生活は、その様式にしても、生活感情にしても、言語にしても、大した開きがないのであるから、彼等が米国に集まると云う事には首肯し得るのである。土質力学界で言うと、L. Casagrande が英国から来ており、Tschebotarioff も白系露人であるがエジプトを経て Princeton に落ちついている。Seed と言う若い研究者も英国から来た人である。そのような事情のため現在米国は土質力学界の世界的な一大中心である。一方土関係の仕事も大変多く、例えば New-Jersey turnpike の如き、Garrison dam の如き仕事を初めとして相当の工事があつて土質技術者 (Soil Engineer) の需要が大いにある。A. Casagrande の語る所によれば Harvard 大学には土の講座が7つもある。そしてこれだけの講座で養成した Soil Engineers だけでは到底需要を満し切れないで、Harvard の卒業生がそれぞれの職場で更に教育をすと言つた有様である。M. I. T. (Massachusetts Institute of Technology) でも夏に Army Engineers を集めて講習をすと言つた調子である。各大学、研究所でも立派な研究室を設けてどん

研究をする。その様に基だ土質工学は盛大である。

私が見る事の出来た大学の研究室では土質力学、水理学のものが特に立派であつた。たまたま見た構造やコンクリートの研究室は案外貧弱であつた。勿論これは特例であろうと思うが一驚した。なおコンクリートの研究が土木材料の研究室で行われていた事は面白いと思つた。

又土質力学が学問として若く未解決の分野が多い一面、一応初期の摸索時代を脱しかけていて焦点がかなりはつきりして来た事が微妙に反映して、野心ある若い秀才を集めつつある事も看取された。

米国では土質力学が相当現場に浸透しているに反し日本では然らざる事を述べた所 Denver の Bureau of Reclamation の研究所の Hilf はいささか昂然として、いや米国でも嘗つてはそうであつたが、我々が努力して現在の状態を作つたのであると答えた。

それには例えば Bureau of Reclamation で標準的な書物を編集して啓蒙宣伝に努めたり、Terzaghi の様な人を迎えて指導を求める様な開放的な米国の持つ明るい伝統、それには米国の富力が相当物を言つているが、又、米国の役所の制度、その他多くの事柄が陰に陽に關係しているが、土質力学者自身の努力も買つて良いのであろう。一方 Terzaghi について考えて見ても彼が Wien にいた頃と米国に来てからの学風を比べて見ると見掛け上は相当の開きがある。これは米国の伝統的な実用的と言う風潮のためと思われる。現在土関係の仕事が多いと云う事は更に米国の土質力学に実的な色彩を加えしめているが、これは一面開拓期にある土質力学にとつて甚だ喜ぶべき事であるがヨーロッパの雰囲気学問に取つて大きな役割をする事は疑いない事実であるから、旧大陸、新大陸の結合によつて如何なる進展が見られるかと言う事は殊に土

* 東京大学教授、工学部土木教室

質力学においては興味ある問題である。

現在土質力学において指導的な役をしているのは、石井君によれば、Harvard, M.I.T., Illinois, Northwestern, Princeton の諸大学の由である。3つの古い大学、Harvard, Princeton, Yale の中 Yale を欠くのは同大学のために惜しむが、先頃までいた Krynine が加州大学に去つて Yale の土質力学はその中心を失つた観がある。白石俊太君の話によると、Yale は甚だ保守的で Hardy Cross は新しい土質力学をあまり買っていない由である。老 Cross の見る所も或る意味では首肯される点無くもないがやはり結論は保守的と言う事であろう。

さて米国の土質力学を大観するには以上に述べた指導的の大学に於ける諸研究が一応重要視されねばならない。

私は不幸にして Illinois, Northwestern の2大学を見る事は出来なかつたが、これは石井君から聞いた所で補う事としよう。全体的に言えば、米国の土質力学は土質力学の正統派だと云う事である。土圧、剪断、圧密等が主題であると言える。突き固め試験の如きはどこにも道具はあつたがあまり“研究”していないようであつた。恐らくは一つの“現場試験”と見ているのであろう。日本の突き固め大流行の空気を知つていと奇異の感に打たれる。Vicksburg の研究所で長年行つている事は知つていたが、どうも我々の狙いとは異つているようであつた。渡辺隆君が我々の研究室の突き固めの研究を M.I.T. に持つて行つた所 Lambe²⁾ が注目していたと言う事であるが、M.I.T. の主題は粘土の剪断、土壌安定であるから、どこまで我々の狙いが理解されたかは、疑問だと思ふのである。Harvard の Wilson は我々の考え方に若干の興味を感じたかに思えたが、それは彼の研究といくらか共通点があつたからである。A. Casagrande はなかなか大胆に最適含水比なるものは一つの神話であると言つていた。彼の言う所を誤解ないようにするためには相当の註釈を必要とするが、面白い表現だと思つた。Harvard の土質実験室は土質力学に関して7つの講座を持つてゐる所だけに流石に立派であつた。Wilson が案内してくれたが、彼は長期圧縮等、速さを変えた圧縮試験³⁾をやつていた。応力歪図の最高点を連ねた線を作る時歪軸に平行な漸近線があるかどうかを求めるのだと言う事だつた。Terzaghi は漸近線のある事を予想し、これを Fundamental Strength of Soil と呼ぼうとしているとの事である。これはなかなか面白い研究であると思つた。例の A. Casagrande の Piezometer もあつた。Piezometer は土の中

の間隙水圧を測定するのに用いられるもので、軟弱地盤上の築堤等の場合に利用されているものだが、A. Casagrande, J. P. Gould によつて Logan Airport の工事において研究されたもの⁴⁾で将来相当に利用価値が増す事が予想される。

これは私見であるが hydraulic fill dam 工法の科学的根拠等に利用出来るであろうと思われる。Piezometer は土質力学の実用的な応用の一つとして注目すべきものと言へる。さきにも述べた通り M.I.T. での Taylor の研究は圧密、法面安定⁵⁾を経て現在は粘土の剪断である。排水せる剪断 (drained shear) が一段落して目下は排水せざる剪断 (undrained shear) の研究が続行されている。排水せる剪断において、粘土の間隙比と破壊時の諸応力の対数とが比例関係にある事を利用して、precompress されぬ場合、precompress されている場合を論じて、見掛けの粘着力が precompress されている場合に現われる事を示し、これを彼の神祕性豊かな intrinsic pressure なる概念によつて説明したが⁶⁾排水せざる剪断においては間隙水圧測定を行う事の重要性を認め、この測定を実施したのである。昨年度の研究報告を借りて読んだが、時間が少なかつたので十分の理解は得られなかつた。要領は3軸圧縮において s/σ_1 (s : 剪断応力) が Precompression なき場合に比較的狭い範囲に入る事を認め、Precompression ある場合には圧密試験を同時に行ふ事によつて土圧問題を解き得る事を示しているように感じられた。

要するに Taylor の粘土剪断の研究は排水せざる時の剪断の研究に至つて寧ろ現象の研究よりも実用問題の解決法に入つたかに思えた。Hilf の批評によれば、Taylor の研究は克明であるが、実用的に見れば寧ろ間隙水圧測定の方が直截であるとあつたが、このような見方も存在するのである。私は見掛けの粘着力を、Precompression に、又は彼の intrinsic pressure と結びつけて考える Taylor の思想に academical な興味を感じず。しかし間隙比と破壊時応力の対数との比例関係 Precompression ある場合の膨脹等に批判的な人もあるし、この様な“思想”は米国的でないだろう。少くとも現在の Taylor 理論は定性的色彩が濃いのであるから、その正否は今後の発展によつて決せられるであろう。圧密における2次圧密も Taylor, Merchant⁷⁾ に大に関係する石井靖丸君も大阪地盤の沈下の研究に於てその重要性を認め彼自身も研究した⁸⁾。Merchant の最近の研究を Taylor から借りて見てみたが彼の研究とはほぼ同一であるとの事であつた。2次圧密について私の知る所は少ないが、想像す

るにこの問題の将来性は大きい。ただ現在の処研究の方向が甚だ類型的である様な気がする。Denverの研究所にいた若い人で土粒子分析の際粘土については粘土鉱物の種類を区別すべきであると言っていた人がいたが、第2回国際会議の議事録で見ても⁹⁾、微粒土に関する認識は深まりつつあると思われる。2次圧密についてもこの方面からの突込んだ研究が将来行われるに違いない。土壌安定法の研究はこの方向に更に拍車をかけるであろう。従つてこの分野は注目に値すると思われる。なお徒らに飛躍せず足が地についていると思われる。これに関連した研究方向として、Terzaghiの鋭敏度なる量の提案¹⁰⁾があることは思い出されてよい。Tschebotarioffによつて多少の修正がなされて居り¹¹⁾、又かなり漠然たる量ではあるけれども、土質力学のお家芸的性格を持つている点魅力がある。

Tschebotarioffは有名な大規模な土圧実験¹²⁾を一先づ終つた所であつた。矢板に及ぼす土圧を考える場合に、どの様に施工したかと言う事が甚しく大きな影響を持つ事、Terzaghiが擁壁の後に所謂アーチ作用¹³⁾を生ずるとして土圧分布を説明しているが、このようなアーチ作用は認められないで寧ろ底面の摩擦が効く事、粘土の場合壁が外方に動く時土圧は寧ろ増加する事¹⁴⁾等が主な結論であつた。彼はこれを応力歪図から説明せんとし、土の大きな3軸圧縮及び引張試験を計画していた。Tschebotarioffはエヂプトからついでこの間移つたばかりで、土質力学では一步を先んじているBostonian schoolからは少し外れた存在と云う感じがしたが、勤勉細心な快男子であり既に大家の風貌があつた。Princetonには彼と共にWinterkornがいる。やはり五十がらみの学者であり、農業土壌学出身であるが今は土壌安定法をやつている。私はこの方面の事に暗いが、土壌安定法関係の第一人者の由である。私が会つた人々の中最も理解的であり、Terzaghiとは違つた意味で視野が広い人と思われた。

私が見なかつた大学の中IllinoisはWestergaardの流れを汲み弾性論的方向を持ち、Northwesternはどちらかと云うと物理的精密派だと云うTaylorの話であつた。この大学のRutledgeはremoldingの問題に興味を持つている人である。

以上土質力学界に於て指導的役割をなしている大学の仕事について述べ来つたが前にも述べたように米国の土質力学のお家芸は実用性にある。石井君は米国の学者の偉さはそれぞれsystemを持つている事だと言つていた。彼の意味する処が奈辺にあるかは聞きもしたが、大学に於ける諸学者は米国の実用性と共に

西欧的な処を持つていて、それぞれ一流の指導精神を持つている様に思えた。

さて私見を附加すれば、intrinsic pressure, pre-compression effect, remolding effect, sensitivity, secondary compression, flow, stress-strain, 等と並べ来ると彼の学者達の脳裏に浮んでいるimageには皆共通のものがあるように思われる。古典的な土圧論に發した剪断抵抗の理論がcohesionless soilsに於てはA. Casagrandeの限界密度¹⁵⁾の概念に至つてReynoldsのdilatancy¹⁶⁾に歸つた事はReynoldsの“この概念は将来の土圧論に於て必ずや重要な役目を果たせよう”と言ふ予言を適中させているが、cohesive soilsに於てはTerzaghiの間隙水圧の概念¹⁷⁾で整理されて来たものの、それだけで済まない事が分かつて来て未だ歸する処なく宙を迷つている形である。技術的に打解しようとする方向が採用される結果、多くの中間的概念を生みそれぞれがそれぞれの使命を果しつつあるのであるが、これを統一的に把握する原理は何であろう。ここに将来の一つの課題があると考えられる。解決の方向に2つあると思われる。1つはacademicな方面からの道、1つは技術面からの道である。技術面からの道は土木技術から見ると甚だ健全なものであるが、或る意味では割り切れぬ面が残ると思われる。Terzaghiの鋭敏度等はこの方面からのattackである。他の1つの道はコロイド化学等からのattackであろう。この方から行けば或る程度割り切れるであろうが、実用的見地から考えると、本当に実用化されるまで行くには相当の時間がかかる事と思われる。

日本の現状から見て余程進んでいると思われる1つはサンプリングの方法である。undisturbed samplerについての研究はHvolslewを中心として行われている。研究の中心はVicksburgのWaterways experiment stationである。

土木学会でHvolslewを幹事役としてsamplingの委員会が出来ていて、昨年かなり大冊の報告¹⁸⁾を出している。あらゆる場合undisturbed samplerを使わねばならぬと云うのではないが、圧密沈下等では絶対にこれによる必要があるのだから、日本はこの点大いに学ぶべきであろう。Denverの研究所ではアースダムの建造後のPore pressureの測定¹⁹⁾が何と言つても大きな仕事であろう。Daehnと言ふ人がこの測定をやつている。Hilfも関係し、それ故に彼もpore pressureがお得意なのである。

又Denverで始められる事になつている新しい研究として3軸圧密試験がある。尤も水の流れるのは1

軸的である。Vicksburg にいる Garber は Mississippi の堤防の崩壊を研究していたが、君が来ると聞いたので、君の論文を読んだと言つて砂の3軸試験結果を持ち出して discussion をした。critical density に対し否定的な事を言つていた。私は剪断面附近を考へるべき事を主張し、例の uniformity の理論を述べたが時間が少なくて十分に理解されなかつたようだった。論文が印刷になつたら是非欲しいと言つていた。Garber の話その他によつて判断するに、どうも色々の人の間に Pore pressure の概念に関し未だ混乱があるようであつた。これは今少しく研究をすすめて明確にしなければならぬ点であろう。

その他見る事が出来たもので面白く日本でも有用と考へたものに well point の工法があつた。この要領は本にあるし、私が述べ得るのもその程度であるから説明は略すが、石井君が更に良く見て来る約束になつている。

又最近の動きとして見逃せない一つは地質学者が積極的に加つて来つつある事である。これについて私はよくは分らないが、今年の初め頃米国地質学会で出した書物(名前を忘れ不明)や所謂 sedimentation の理論及び応用に関する新著²⁰⁾が土質力学者に注目されて来ている事はサムブラーの発達と共に注意されてよいと思われる。圧密理論を更に完成する努力に対し地質学的知見がどの様に影響するか興味深い処であろう。土質力学そのもの(A. Casagrande の所謂 just soil mechanics)からの展望を以上に述べたが、米国の土質力学の一大特質は前にも述べた通り斯学の現場への滲透程度にある。具体的にこの状況について私は語る資格がない。石井靖丸君が或る程度見て来ているから、将来彼の書くべき報告に期待したいが、前に述べたような Harvard での土質技術者養成の努力、日本に来て居る技術者の土の知識について聞いた事、各研究所の啓蒙的刊行物等から考えると、現場技術者の土に対する認識は日本の現場技術者のコンクリートに対する認識程度か又はそれ以上である事が想像されるのである。勿論、大学の先生や研究所の人達が考へている事と現場に直接当つている人達のそれとの間にはかなりの開きがある事は看取出来る。例えば Trenton の傍の well point の現場を見に行つた時 More trench cooperation の技師長が語つた所によれば、我々が仕事をする場合には我々自身の経験が物を言う。これらの事は大学の先生例えば Tschebotarioff も知つてはいない。しかし、大学の先生は我々の経験を体系化し、まとまりをつけて行く事が出来る。そしてそれが将来大いに役に立つ事になるのだ。その意味

で自分は Tschebotarioff とともに常に連絡しているのだとあつた。

つまりその処々によつて互いの長所を認め合つて協力しているように思へた。他にも例えば Boston の Logan 飛行場の仕事を行つた際 A. Casagrande が他の1人と共に現場の圧密について良い研究を行つているし、Denver でのアースダム中の間隙水圧測定等も例となり得るであろう²¹⁾。

日本でも九州で松尾教授等が人工島について三井と共同で研究された事を聞き意を強うするものであるが将来この方面が十分に伸びる事を望んで止まない。これが成功するためには問題が適当である事他種々の条件が必要で困難な点も種々あるうがやりたい事の1つである。

何度も書いたが土質力学を滲透させるのに研究所が啓蒙的な書物を出す事も甚だ有用と思われる。各研究所でやられると良いと思う。

又出来るだけ多くの機会に研究者が話し合つてそれぞれの研究を推しすすめるに役立つ事も、全国的な規模で行われれば、大いに役立つ事と思われる。又少くとも1年位づつ適当な人が外国へ行き清新な氣に触れる事は更に望まれる所である。本だけで得られない色々の収穫がある事は確実と思われる。

註

- 1) 例えば Treatise on Dams 等
- 2) Tschebotarioff はランベトと発音していた
- 3) これの前駆をなすものは A. Casagrande & W. L. Shannon "Research on Stress-Deformation and Strength Characteristics of Soils and Soft Rocks under Transient Loading, 1948" であろう
- 4) J. P. Gould, "Analysis of Pore Pressure and Settlement Observations at Logan International Airport 1949"
- 5) 圧密、法面の研究は "Stability of Earth Slopes 1937, Research on Consolidation of Clays, 1942"
- 6) Fundamentals of Soil Mechanics, 1948
- 7) Taylor 前出及び D. W. Taylor & W. Merchant: A Theory of Clay Consolidation accounting for Secondary Compressions 1940
- 8) 石井 "大阪地盤の沈下"
- 9) 例えば electrochemical properties of soils に関する諸論文
- 10) 提案は 1944, Terzaghi, Perk の教科書(1948)を見よ
- 11) Tschebotarioff & Bayliss, 2nd Int. Conf. S.M. & F.E. vol. I. 1948
- 12) Large Scale Earth Pressure Tests with Model Flexible Bulkheads 1949
- 13) 例えば Theoretical Soil Mechanics

- 14) Chicago の地下鉄工事に関連した測定でも、plastic clay の主動土圧は静止土圧よりも小さくはなかつたのである。そして Tschebotarioff と P. Brown とは plastic clay の土圧の問題は rupture の問題ではなく stress-strain relation によるべきだと主張し、それが彼の今の課題なのである
- 15) Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills, J. Boston Soc. Civ. Engrs. 1936
- 16) The Dilatancy of Media Composed of Rigid Particles in Contact. Phil. Mag. Dec., 1885.
- 17) Terzaghi 圧密理論
- 18) 'Subsurface Exploration and Sampling of Soils
- 19) Walker, F.C. and W.W. Daehn: Ten Years of Pore Pressure Measurements 2nd. Int. Conf. S.M. & F.E. vol. III
Hilf: Estimating construction Pore Pressure in Rolled Earth Dams, 2nd Int. Conf. S.M. & E.F. vol. III
- 20) Twenhofel: Principles of Sedimentation Trask: Applied Sedimentation
- 21) Harvard その他の諸研究が各所の委託によつて多く行われているのはこの事を物語っている

(昭.26.11.28)

UDC 627.213:627.16 (52)

河口港の諸問題について

正員 渡部 彌作*

ON THE PROBLEMS OF ESTUARY HARBOURS

(JSCE March 1952)

Yasaku Watanabe, C.E. Member

Synopsis This paper is the part of studies on the estuary harbours; The author reported the problems important for dealing with the estuary harbours and the results of improving the harbours along the Japan Sea, and explained the characters and the concepts for treating the estuary harbours in Japan.

要旨 本文は河口港研究の一部であつて、河口港処理上の重要問題、日本海沿岸の河口港改良の結果を述べ、日本における河口港処理上の特性と概念を説明した。

1. 日本海沿岸河口港改良の総合結果

日本海沿岸の主要港、伏木(庄川)、富山(神通川)、新潟(信濃川)、酒田(最上川)、秋田(雄物川)、三國(九頭龍川)の諸港は、何れも河口港として発達して来た。

これ等諸港の古い時代における水深変化については詳細を知るに足る資料はないが、帆船時代には、4~7mの如く相当の水深に保たれていたようである。従つて波浪が荒く良湾に乏しい日本海沿岸においては、河口は上流との水運連絡の便もあり、天然の良港として重視され、米穀の積出や地方産業の中心となり、日本海運は日本海時代を出現し、各港共殷振を極めた時代であつたことは史実に徴して明らかである。しかるに流域は開拓が進むにつれて変貌し、河相も亦変化して河床が次第にたかまり、水深は2~3mに減じて来た

が、一方出入船舶は汽船時代となつて港湾利用上は却つて水深の増加を要求されるようになった。そこで各河口には導流堤、護岸、水制等を設けて河口の位置を定め且つ河状を整理縮流して水流を右岸又は左岸に集中し、碇筋の安定と水深の増加とをはかつたが、かかる程度の改良では自然に維持し得る水深は3~4mが限度であつた。更に近代商港として必要な水深7m以上を得るために根本的改良を企てられたが、河口の改良は主に治水を目的とする河川改修に附帯して施行された。この根本的改良の重点は、流下土砂の軽減又は根絶におかれ、河流と分流し、又は本川河口と港域より完全に分離したが、前者には秋田、新潟、伏木の諸港又後者には酒田、富山の諸港がある。これ等諸港の改良効果は、今後の流域、河相等の変貌によつて多少の変化はあるものと思われるが、現況結果を述べれば次の如くである。

新潟港は、明治40年起工の河口より55km上流、大河津分水によつて本川よりの流入量は270m³/secに調節せられる結果、流域面積は洪水の面においては11.5%に縮少し、最大洪水量は21.5%に、排出土砂量は27.5%(内62%は分水点以下各支川の影響によ

* 運輸省第2港湾建設部長