

土質力學

ツテ
アキ
ル
土質力學 1
石井靖丸
譯

D03.02

T

20920

東京書房版

25



テ ル ツ ァ キ ー

土 質 力 學

1

—土性論に就て—

石 井 靖 丸 譯

名著100選図書 55. 1. 25

登 録	昭 和 年 月 日
番 号	第 20920 号
社 団 法 人	土 木 学 会
附 属	土 木 図 書 館

東 京

常 磐 書 房 版

譯 者 の こ と ば

本書は Terzaghi: Erdbaumechanik auf bodenphysikalische Grundlage の前半を譯したものである。原著は1編、2編に別れて居るわけではないが、第I章から第III章迄は主として、土の材料としての物理性、力學性を取扱つて居り、第IV章は Terzaghi の不朽の功績たる土壤層の沈下の理論を敘述してある。第V章、第VI章は以上を基礎として、土壓理論、地盤の支持力、洗掘等に對する独自の理論を展開させて居る。譯者は先づ第I章～第IV章を土の基本的性質(土性)を取扱ふ部分と看做しこれを1編とし、第V章～第VI章は土性を基礎とした土の力學理論と考へて2編とすることにした。

地盤の問題及び土壓理論は非常に古くから論ぜられて居た問題であり土木、建築の分野に於て最も重要な問題なのであるが、現在一番未開拓な問題が残されて居るのも此の分野である。擁壁に加はる土壓の問題には無數に多くの理論が提出されて居るにも拘らず未だ何等信頼するに足る結論に到達して居ない。之は何に依るか。「土の力學」が樹立されて居ない爲であると明言しうる。即ち土は粉狀であり、剛體であり、塑性物質であり又液狀物質である。従つて彈性理論なり、又は粉體の力學を應用してもその適用範圍は極めて限られたものとなり、且これら土の状態變化を律すべき何等の規準も見出されて居ないのである。即ち土の物理性と力學的性質を關聯させて行くといふ研究方法を採る人は極めて稀であつた。従つて Terzaghi こそは土の研究の正統派であると言ひうるのである。

土の問題には昔から築城主として擁壁、石垣等の建築には非常に困つて居たらしく、バビロン時代には擁壁を設計建造した請負師は、永久に自分

の造つた擁壁の安全性に對して責任を採らなければならなかつたらしい。従つて築造後20年後でもその擁壁が倒れたら、出掛けて行つて自辨で修理しなければならない。随分つらい話である。1600年代になつて Vauban 等が廣い築城の経験を基礎として擁壁の安定性に就て擁壁の高さ、天端及び底幅、傾斜などの關係を提出したが、古典土壓論の始祖は何と言つても Coulomb (1773年) の Wedge Theory であらう。Coulomb がこの理論を提出した際には、堂々たる大定理のつもりでもなかつたと思ふが後世の人が祭り上げてしまひ、やれ Coulomb の理論は實際とは合はないと悪口を言はれても彼は迷惑すると思ふ。恐らく苦しまぎれにこんな風に考へたらまあ一時はしのげると思つて提出したものであらう。色々の假定を述べて自分の理論の適用限界を規制して居るのである。彼に續いて Coulomb の思想を展開して行つたのは、衆知の通り Rankine であり、又近世有名な Krey である。併しこの流儀の考へ方には限界があることは當然であり、殊に粘着質の土壤に關しては行詰りであらうと思ふ。まだ駈出しの譯者がこの様なことを書くのは Coulomb, Rankine 先生達に對して誠に生意氣千萬な言ひ方であるが、まあ以上の様に考へるのも悪くはないだらう。以上の Coulomb 流の考へ方とは別個に経験を基礎として廣く土に關する問題を整理し、これから考へ方を提出して行つたのは Fellenius, Terzaghi, Kögler, Scheidig 等であるが何と言つても土を物理的基礎に立つてこれを理論的に把握したのは、Terzaghi である。1925年“土質力學 (Erdbaumechanik)”, が彼に依つて樹立されたと言つてもよい。

其の後 20 年を経た今日殆ど進歩して居ない。勿論 20 年間には細目に關しての改良、前進はあるけれども、眞の實用性を持つ迄には彼の理論は展開されて居ないのである。併も此の研究の行き方に特有な記述科學的性格、

土の性質の廣汎な多岐性の爲に、尙物理常數を力學的常數に結び付けることの困難さ等に依つて實に進歩は遅々たるものである。その上、現場で實際に仕事に従事して居る技術者達に對して本當に役立つに至つてゐない爲殆ど技術者達の注目を惹かないのである。日本に於ては、未だに Coulomb, Rankine 一點張りである。

本譯書は従つて實際にはあまり役に立たないと思ふが、土を取扱ふ際に土の性質をよく呑込み、土の性質に應じた工法を採用することの重要性は勿論のことであり、この際、土の性質の變化を一應系統的に、科學的に整理して居る本書に依つて、現象を理解する際の一規準とされることが望ましい。實際、土の力學の進歩は、現場に立つ人々の廣汎な経験を整理して行つて始めて達せられるのである。研究者が實驗室で研究しうる事項には限界があり、又模型實驗の殆ど不可能な此の分野に於ては、この學問を眞に進歩させるものは第一線たる現場の技術者の科學的思索以外にはないのである。

譯者は経験もなく、又研究に就てもまだほんの駈出しである。従つて不朽の名著たる Terzaghi のこの原書を翻譯する資格はなかつた筈である。併しこの原書を読み易く日本語に書き改め出来るだけ多くの人々に読んで戴きたいと思ひ、敢へて無暴と知りつゝ實行した。學力の不足の爲、誤謬もあるだらうし、譯語の不適當な爲意味のよく通じない所もあると思ふ。殊に原著者は非常に癖のある文章を書く人であり、又術語も殆ど獨斷で勝手だと思ふ程自己流の命名をして居るから相當譯すとき困難を感じた。

2 編の部は大分理論も古く、訂正の必要な個所もあるが、その理論の嚴密性よりも彼の努力の跡をたどりその考へ方を學ぶことが重要であると考へ續行して發表することとした。

尙本書翻譯に當り種々激勵を賜つた内務技師松尾春雄氏に深く感謝すると共に、若輩の爲に勞を厭はず出版に種々便宜を計つて下さつた常磐書房の後藤典二氏、後藤專一氏、及び校正を引受られた渡邊勲氏に深く御禮申上げる。

(2608. 9. 10 於赤羽)

譯者 識

原 著 序

現今材料學及び彈性學の知識なしには、高層建築も橋梁架設も考へられない。併し基礎工技術者の科學的武器となつて居るものは、土質力學であるがこれは殆ど技術土壤學への傾向を持つて居ないし、又その内容は單に凝集力のない砂の力學の内の特に簡單な特殊な場合に對する理論から成立つて居るにすぎない。重要な分野である膠質分の多い水を含んだ土壤の力學は未だ全く研究されて居ない。技術の分野に於ける以上二つの同程度に重要な分科の現在の狀態の間に、この様に不釣合な事があるといふことは、實に奇妙なことであるが、基礎工法の研究には實際的にも理論的にもがっかりする程難しいことが多いのが此の原因なのである。命題の定立といふことが既に難しい。土質力學は先づ最初に土壤材料の多種多様な物理的性質に應じた計算を行つて初めて、その目的を達することが出来るのであり、又土質力學の樹立は技術土壤學(土性論)の創造と共に行はれねばならないことも世人は極く最近になつて初めて認識する様になつたのである。

土性論の歴史のうちで僅か20年にも達しない間に二つの注目すべき事件があつた。1918年アメリカ土木學會(A. S. C. E)は“地耐力實用値決定委員會”(基礎工委員會)を創立し、此の年の末にスエーデンの鐵道事務所はストックホルムに於て地沈りの技術地質學的研究の委員會を作つた。

アメリカの委員會は主として許容係數値を見出すことに努力し、このために大學及びワシントンの標準規格局と協力した。併し残念なことには土壤物理學(土性論)に於ける係數値を支配するところの種々の隠された要素を現象の本質に迄立入つて、分析することを中斷したので、十餘年間の努力にも拘らず何等決定的な觀念に到達するに至らなかつた。併し重要な

經濟的意義を持つ之等未解決の問題に多くの人々の注意を向けさせたことは委員会の功績である。人々は全體の問題の中に“國家的な重要性”を認識し、此の認識は多額の費用と時間を消耗したが、組織的な觀點からすると理想的と考へてもよい程の、價值ある色々の研究へと移つて行つたのである。

スウェーデンの委員会はプログラム通りに基礎工學の一部分を取扱つたにすぎないのであるが、そのプログラム内で非常に立派な仕事をした。此の研究は全スウェーデンの鐵道網に亘つて行はれ、物理的土壤學(土性論)を用ひて遂行された。

著者は以上二つの委員会に就ては何等の知識を持つて居なかつたが、1917年に、重要な土壤の性質に関する實驗的研究に着手した。アメリカの委員会とは反對に、著者は土壤の内部摩擦、凝集力、收縮、膨脹等最も簡単な且基本的なことゝみられて居た事實を物理的な觀點から深く基礎付けるといふ目的に向つて徹底的に努力した。研究結果は研究假定の解明を與へ之れが又實驗的研究を進行させて行く。こうした方法で研究範圍は一步一步擴げられ研究結果の結論を基礎付けて來た。之れが此の本の對象である。

觀測材料を取扱ふ際に著者は決して土質力學的現象に就ての遺漏のない理論を作るといふ考へで行つたのではない。土質力學の分野に於て純粹な定理といふものは200年に亙る努力にも拘らず大體に於て存在しなかつた。この分野の健全な發展は現象の多面的な條件の媒介に依つて實驗科學的方向に進められるのである。此の本の目的も此處に在る。最初に問題にしたのは、變形と時間といふ二つの要素を特に考慮することゝ共に、現象の生成とその経過を支配する要素の組織的な分析であつた。此の計

畫の困難さの主な原因は、土質力學の分野に於てこれ迄この様なことを企てたことがないといふ事實である。それ故に、一通りの實驗しか出来なかつたといふ缺點は避けられない。既に知つて居ることを基礎として、これから行ふべき研究の輪廓を思ひ浮べてみると、吾々の世代は土質力學の完成迄生きて居ないだらうといふ感情を避けることが出来ない。何故ならばこれ迄基礎工事の際行はれた觀測の價値は、觀測者が此の際の支配的な物理性に精通して居ない爲非常に僅少であり、之れ迄の經驗材料は發見場所もわからない様な古生物學的な蒐集と比較される様なものである。遺漏のない觀測を行ふには今迄の純粹に經驗的なものから土壤物理學的觀測方法へと考へ方を換へる必要がある。併し乍らこの様なことは、例外の場合は別として既に學校の研究室に於ける實驗中に、代表的な土壤の物理學的性質を學び取る機會のあつた技術者に對してのみ期待しうることである。基礎工の講義が土壤物理學的實驗に依つて裏付けされない限りは、基礎工の補助科學の飛躍的發展を望むことは出来ない。

著者の實驗的研究はコンスタンチノーブルのアメリカ系ロバート大學で行つた。大學當局は著者に對して、大規模に基礎工法研究室の整備に必要な材料を自由に與へ、且基礎技術的な土壤學の授業を既に3年前から講義要目の中に入れて居る。それにも拘らず研究結果の大部分は未だ發表されて居ない。擁壁に加はる凝集力のない砂の土壓に関する簡単な報告は、1921年 E. N. R. に發表し、研究の全結果に関する概略の敘述は1922年 O.

I. A. にのせた。第IV章の内容は大體に於て著者が最後の2年間に造り上げたものである。之れ迄物理的な基礎のなかつた粘着性土壤の力學が、凝集力のない砂の力學よりも嚴密に科學的に取扱ひうるといふ研究結果から導いた事實は重要である。此の事實に依つて土質力學はその應用の

分野を著しく擴大したのである。

本書は、現場に立つ技術者及び大學で研究して居る人達に役立つし、又基礎工技術者への科學的な助言者であるところの地質學者に對しても役立つであらう。何故ならば本書の内容は地質學と現場工事の間の連絡の役目を果して居るからである。

本書の目的は基礎工事の設計や報告の中にその効果が現はれて初めて述べられるのである。著者は現場に立つて居る専門技術者達が各自の仕事を報告することに依つて此の分野の發展を支持されんことを切に希望する。

出版者は本書のために忍耐と協力を惜しまなかつたことを深謝する。

1924年4月12日

コンスタンチノープルに於て

著 者

目 次

緒 言	1
a). 地質學と土質力學の間に連絡がないこと	2
b). 古典土壓論の根本的假定	2
c). アメリカ基礎工委員會の研究	4
d). 著者の研究	4
e). 土質力學研究の方法論	6
f). 問題の分類	9

第 I 章 土壤の性質

第 1 節 土粒子の大きさ及び形狀	1
第 2 節 土壤の構造及び空隙量	4
a). 構造の種類	4
b). 砂の空隙量	6
c). 粘着性土壤の空隙量	9
第 3 節 土壤の化學的組成, 水分の取扱ひ方及び比重	11
第 4 節 土壤の熱的性質	13
a). 比熱	13
b). 溫度擴散常數	14
c). 熱傳導能力	14
d). 凍結限界の位置	14
第 5 節 土壤の緊硬性と凝集性	15
a). ロームとクレイの差異	15
b). 緊硬形態	15
c). 緊硬限界の決定方法	19

d). 緊硬限界決定方法に對するアツターベルグの試み	20
e). 收縮限界	21
f). 塑性限界, 又は塑性下限界	23
g). 粘着限界又は陶器業者の正常緊硬限界	23
h). 液性限界	24
i). 濃液性限界	24
k). 限界決定法の妥當性の程度	25
l). 粘着性土壤の相對密度	26
m). 土壤の緊硬度と剛性	28
n). 土壤の性質の批判	32

第 II 章 土壤の摩擦力

第 6 節 膠質浮泥	36
a). 剛性膠質の性質	36
b). 粘着性土壤の膠質浮泥	40
第 7 節 クレイの力學的性質に對する溶解鹽の影響	46
第 8 節 沈澱、沈降速度及び沈澱分析	50
a). 沈澱分析の方法	51
b). 沈澱分析の際の土壤の狀態を基とした土壤の記號法	55
第 9 節 土粒子間の摩擦	56
a). 摩擦法則及び潤滑剤の作用	56
b). 化學的に完全には純粹でない表面間の摩擦	61
c). 潤滑膜の物理的特性	65
d). 壓力及び摩擦抵抗間の比例性の物理的原因	67
e). 粉體塊中に於ける内部摩擦	75
f). 砂中に於ける摩擦	77

g). ロームとクレイの摩擦係數, 及び水の潤滑化作用	82
第 10 節 細粒の目の詰つてゐない沈澱物の蜂窩構造の原因とし ての零摩擦	91

第 III 章 土壤の彈性的性質

第 11 節 粘着性土壤の立方体供試體の剛性	97
a). 實驗材料	98
b). 實驗方法	99
c). 實驗結果	101
d). アメリカ基礎工委員會の彈性實驗	104
e). 土壤立方體の剛性的性質	106
f). “換算歪”の概念	109
g). 彈性係數と土壤の脆性	109
h). 應力-歪曲線及び土壤の彈性度	111
i). 内部摩擦應力の消滅の時間的經過	114
k). 彈性餘効及び履歴環線	117
第 12 節 表面荷重の函數としてのクレイ分の多い空氣を含まな い土壤の含水量	118
a). 實驗方法	119
b). 實驗結果	122
c). 側面伸張を妨げた際の粘着性土壤の彈性係數及び膨脹係數	122
d). 壓力の空隙率圖の主曲線	125
第 13 節 側面伸張を妨げた際の砂の空隙率と荷重の間の關係	125
a). 實驗方法並びに實驗結果	125
b). 側面膨張を妨げた際の砂の彈性係數	128
c). 壓力空隙率圖の主曲線	129

d). 内部摩擦應力の消滅の時間的経過	130
第 14 節 粘着性土壌の凝集力	133
a). 毛細管壓力	136
b). 壓力空隙率圖に於ける主曲線の形狀から毛細管壓力 p_h を見出すこと	138
c). 收縮限界を越した後の毛細管壓力	140
d). 毛細管壓力と摩擦抵抗の相互作用に依る外見上の凝集力	140
e). 粘着性土壌の收縮及び膨脹	141
f). 外見上の凝集力に對する粒子の大きさと粒子形狀の影響	142
g). 總括	144
第 15 節 剛性係數、内壓力及び内部摩擦抵抗間の關係	145
a). 毛細管壓力を除去し、側面膨脹を妨げた際の土の層への最初の載荷に依る形狀變化	145
b). 土壌の弾性の本質	147
c). 消滅しない摩擦應力	148
d). 構造變化に於ける週期性	150
e). 弾性係數 E_s と E の間の關係、及び、弛い塊のポアッソン比	150
f). 内壓、内部摩擦抵抗及び剛性係數間の關係	153

第 IV 章 動水學的應力現象

第 16 節 土の透水性	161
a). 砂の透水係數を實驗的に決定すること	162
b). 粘着性土壌の透水係數の直接測定法	163
c). 粘着性土壌の透水係數の間接測定法	163
d). 粒徑及び空隙量から透水係數を計算すること	169
e). 粘着性土壌の空隙率と透水係數の關係	175
f). 非常に狭いスリット内に於ける水の粘性	181

g). 粒子の大きさ、粒子の形狀及び塑性限界の間の關係	182
h). 粘着性土壌を透過する溶液の流れ	184
i). 壓力と透水係數の間の關係	184
k). Darcy の法則の適用限界	185
第 17 節 地下水流の靜力學的作用	186
a). 垂直方向に上昇する地下水流の限界勾配	186
b). 載荷透水の際の砂の限界勾配	190
第 18 節 地下水の毛細管性上昇	193
a). 地下水面の毛細管性上昇	193
b). 毛細管性濕潤化、及び砂層のサイフォン作用	193
第 19 節 粘土層の表面に於ける水の蒸發	200
第 20 節 動水學的應力現象の時間的経過に對する熱力學理論の應用	203
a). 上昇壓力の壓密作用の時間的空間的経過及び熱力學理論の應用	204
b). 重要な動水學的應力現象に對する熱力學理論の應用	213
第 21 節 粘着性土壌中に於ける應力消散の近似的計算	222
a). 壓力上昇に依る壓密の時間的経過	223
b). 一定壓力の際の壓密の増加量からクレイの透水係數を計算すること	226
c). 全壓密量を一定とした場合の應力消散の過程からクレイの透水係數を計算すること	227
d). 乾燥に依る浮泥層の壓密	234
e). 表面流に依る土塊の濕潤化	244
f). 沈澱速度の函數としての浮泥層に於ける壓密過程の時間的経過	246
g). 自重及び蒸發の合成作用に依る浮泥層の壓密	253
h). 砂質中間層のポーリングに依る浮泥層の沈下	261
附錄、略號の説明、文獻	

緒 言

土質力學の使命は地盤上加へられた力學系の作用を豫知すること、擁壁に加はる土壓力を評價することにある。基礎工技術者が計算の際に用ひる土壤に就ての知識は技術地質學に依つて與へられる。土質力學と技術地質學は基礎工法の補助科學と看做されねばならない。此の兩者は充分満足に基礎工技術者に貢獻して居るのではなく、既に知られて居る様に最も緊急に必要として居る場所では役に立たないのである。従つて、基礎工法の本質的な批判は可成り實際の經驗から割出された勘に依つて行はれて居る。

經驗のない技術者達は技術的勘といふものが實際の工事に於て重要な役割を演じて居るといふことには疑問を持つであらう。

技術的勘に基く批判能力といふものは他の人に移しえないし、又代用出来ないものなのである。批判の妥當性は規準の効果に依つて初めて認識しうる。技術的勘は特殊な場合には役に立たず、又大體役に立たぬものである。經驗はそれが一度行はれた事に就ては最もよく技術的勘を深めるやうな作用をし、又基礎工技術者は應用力學が未だ科學として存在しなかつた時代に橋梁技術者が橋梁築造の本質に對して居たと同様に基礎工法に對する何等の準備を有して居ない。吾々の設計は或ときはあまりにも大膽すぎて居つたり、又一方あまりにも用心深すぎて居ることがある。そして經驗の大部分は殆ど一般的な適用性を有する認識に達しないから進歩は緩慢にしか起らない。

此の様な事情があるから吾々は基礎工法の補助科學の缺點を蔽ひ、此の

缺點を揚棄する手段を獲得すべき必要を痛切に感じて居るのである。此の缺點は地質學と土質力學との連絡がないといふことに大きな原因があり、又古典土質力學が非常に獨斷的性格を有する假定の上に立つて居ることに依るのである。

a). 地質學と土質力學の間に連絡がないこと

土壤層の厚さや配列は地質技術者達が在來の又は人爲的な説明方法に依つて勝手に決定することが出来た。併し乍ら既に存在して居る土壤を明確に特徴付けるといふことは非常に困難なことである。吾々が試料を採取した際この試料が風化土から成るか、又はクレイ分の多い沈澱物、細砂、或はシルトから成るかに依つて此の土を地質學、又は基礎工法に於て使用されて居る何等かの體系に入れこまなければならない。

扱つて此の體系は任意の分類法に基いて居るのであつて、力學者が最初に注目する所の物理常數のみを基礎として居るのではない。各分類法に於ては非常に異つた物理性を持つて居る土を一緒にしてしまつて居る。何故ならば同一の土でも壓密の程度、含水量、石灰分、腐蝕土分等に依つて非常に異つた性質を示すからである（第7節参照）。従つて基礎工に於ける土壤の種類に就て地質技術者が今日の科學的立場から行つて居る記述方法は誤謬なのではなく、基礎工法上根本的に異つた土壤を定義して居るのである。

b). 古典土壓論の根本的假定

土壓論は擁壁の設計といふ觀點に立つ實際上の要求に應じたものである。力學の此の分野の發展は18世紀の後半及び19世紀の前半、即ち應用力學が築造技術の分野に導入された頃に始まつた。彈性學に於けると同様に土壓論に於ても計算を簡單にするための或假定から出發して居る。此の假定は

“土壤中に於ける平衡状態の破綻は滑り面に沿つての土の剪斷と同一であり、且この剪斷に對する土の抵抗は各種の土に就ては内部摩擦係數と滑り面上を支配する面壓力に依つて一義的に決定される、”といふのであつた。加之、時間のたつにつれて“内部摩擦の係數は自然安息角の正切に依つて與へられる、”といふ假定が加つた。この假定を基本として土壓の問題を靜定問題として取扱ひ、土の變形も土壓に依つて應力をうける各構成部分の状態も追求しなかつた。併し乍ら主張されて居る滑り面が全然起らなくても多くの土壓現象は現はれて居る。此の場合内部摩擦角は實驗上平衡の限界を決定するものであるが、これと前に述べた所の面に沿つての摩擦とは一致しない。その上摩擦係數は砂に於ては壓密の程度に依りローム、クレイでは含水量に依り、又載荷過程に依つて變化することが明かにされた。附加荷重の影響に依つてローム又はクレイの含水量が變化しても内部摩擦係數は不變のまゝであるか、或は附加荷重の加はる速度と共に減少する。古典土壓論ではこの重要な事實を無視して居るから、土壓論は多くの基礎工に現はれて來る問題を取扱ふ際に役に立たないのである。此の問題を解決する爲には先づ第一に古典土壓論の根本的假定を捨て去り土の物理的性質を在來よりも深く研究することである。即ち土性論的基礎に立つ所の土質力學の創造が必要なのである。

土の技術的に重要な二三の性質は吾々がこの性質が土質力學に役立つことを知る前に土壤學者達が研究して居た。農業技術上の目的に従つて土壤を分類しようと努力して居る内に、土粒子の大きさと形状、土の塑性と剛性の間に存在する相關々係並びに溶解鹽と或る種の有機酸類の土の性質に及ぼす影響等を知つたのである。特に Atterberg の研究は注目に値する。彼は粘着性土壤の緊硬限界を決定する實驗的な方法を提議しロームや

クレイの塑性及び粘着性の原因となつて居る構成要素を見出した。

c). アメリカ基礎工委員會の研究

基礎技術上の目的に應じて土の物理的性質を計画的に研究すべく、最初に活潑な提議を行つたのはアメリカ土木學會 (A. S. C. E) である。

1913年に此の團體は一つの委員會を作り“基礎地盤の許容地耐力の法規化及び土の技術的に重要な性質の研究の爲の委員會”，と名付けた(簡単に基礎工委員會)。R. A. Cummings を委員長とした。此の委員會の最初の仕事は學會の會員に質問紙を送り基礎工事の失敗例とその原因に関する説明をうることであつた。此の質問は載荷試験の種類と結果、工事場所の氣候及び地質、ボーリングの結果、土壤の性質、基礎の詳細、沈下観測、築造個所の許容支持力等 59 の項目に亘つて居る。併し 9 年間全然満足な解答をうることが出来ずこれは失敗に終つた。

1915 年及び 1916 年の研究報告は實驗装置と試験順序の説明、土壤の粒子の大きさに依る分類に関する報告及び砂の壓縮性に関する資料である。1917 年に Pittsburg, Pennsylvania 於ける Carnegie-Bibliothek の報告には載荷試験、基礎工事の失敗例、搦固め等に関する報告が現はれた。此のうちの大多数の實驗はワシントンの標準規格局で行はれた。1920 年に委員會は載荷試験の標準装置の設計を發表した。又、局部的に載荷した砂の揺り込みの際の壓力分布に関する研究を發表した。これは 1912 年 Strohschneider の求めた結果と一致して居る。1923 年の報告には土壤膠質の物理性及び風化層より採取した供試體に就ての應力歪曲線に関する記述がある。委員會の提案した杭の摩擦及び杭の貫入抵抗に関する模型試験の結果は未だ公表されて居ない。

d). 著者の研究

1917 年著者は土の技術的に重要な性質の研究に着手した。第一段階は球體の揺り込みに對する内部摩擦に関する理論的研究及び擁壁を倒す際の土壓に関する實驗である。試験中に不動壁に對する砂の横壓も亦決定した。之れに依ると内部摩擦は一つの面に沿つての相對運動に對する摩擦抵抗及び空間中の粒子の移動に對する摩擦の二種類に區別しなければならない。此の二つの摩擦係数のどちらも自然安息角の正切とは一致しない。何故ならば兩方共砂の層の密度に依つて變化するからである。其の上擁壁を顛倒させた際の横壓の大きさはその顛倒させた距離の長さと共に減少するといふことがわかつた。擁壁-裏込めといふ系はそれ故靜定ではない。

次に塑性的な粉狀物質が局所的に應力をうけた場合の應力分布に関する理論的研究である。かゝる物質中に於ては物質の剛性が物體全部に於けるよりも遙かに完全にフツクの法則に従ふ一つの領域が形成される。此の領域は“支持體”と稱せられる。

流動する地下水がその透過する砂層上に及ぼす靜力學的作用の研究は、Forchheimer が展開した等温球殻に依る地下水運動の理論と結合して、圍堰に於ける浸蝕破壊と土壓破壊を區別する爲に行つた。透過する地下水の圍堰の基礎に働く土壓力の計算結果は基礎破壊防禦の爲の築造標準設計に對する基礎となる。

砂の研究からクレイの研究へと移つて行くとき、砂中の水は正常の状態に於ては反潤滑材として作用するのに對し、クレイに於ては反對に潤滑材として作用するといふ事實の研究が重要である。此の研究から水中に存在する沈澱物の内部に於ける接觸面に對して一定の値を有して居る所の零摩擦、即ち初期摩擦の概念が生ずる。粗粒の沈澱物(砂)に於ては單位容積當りの接觸點が尠い爲に非常に小さい。微細砂及びシルトに於ては一つの不

安定な成層状態即ち蜂窩構造を造り浮游砂現象の原因となる。ローム及びクレイでは眞の粘着力が生ずる。併し乍ら此の粘着力は完全に塑性又は剛性的な物質の粘着力と比較して、そう大きくないことが示された。それならば之等の粘着力は何に依るのであらうかといふことが問題になる。計算に依ると此の外見上の粘着力は毛細管壓力の作用に依つて説明されると考へられ、實驗は又その推量の妥當性を證明して居る。クレイの粒子片を合成して居る力の性質と大きさが知られたならば、含水量と應力及び歪との間の研究に入つて行くことが出来る。研究結果に依ると土(砂、ローム、クレイ)の剛性はフツクの法則に従はず固い粉體の剛性と同じである。履歴現象及び弾性餘効に就ても同じである。クレイの剛性的性質を特徴付ける係數に依つて、物體の滑りの危険を批判する手段が認識された。

クレイの透水性は直接法及び間接法に依つて測定される。クレイの透水係數と含水量の間の關係から水の粘性は非常に狭い毛細管内に於てはその直徑の減少と共に著しく増加するといふことが認められた。此の事實から塑性限界の物理的概念が決定される。其の後の觀測結果に依ると、非常に狭い毛細管中に於ける水の粘性の増加は表面張力の増加と蒸發速度の減少に結び付いて居るといふ假定に依つて説明される。

外力に依つてクレイ中に惹起される應力は絞り出される空隙水の流出に対する抵抗に依つて、時間的なおくれを蒙るといふ現象は動水學的應力現象と稱せられる。此の際問題を數學的に公式化するとき動水學的應力現象の時間的経過は一次の非齊次の熱傳導理論の基本式に依つて表はしうることがわかつた。此の種の問題で難しいものには近似解がある。

e). 土質力學研究の方法論

アメリカ基礎工委員會及び著者の上に述べた研究に依つて、土質力學上

の諸問題を實驗上の目的に對して科學的に取扱ふ際の物理的基礎が築かれた。この新しい學問の發展の歴史の中で最近の數年間は實にはほんの束の間である。種々の以前の見解は認識の進歩と共に再考の必要のあることがわかつた。それにも拘らず、土質力學の將來の發展は今日既に大いに期待すべきものがある、基礎工に於ける多くの問題を數學的に取扱ふには土がフツクの法則に従ふ場合でも非常な困難に突當る。併し土の剛性はフツクの法則から非常にはづれて居るから問題を數學的に嚴密に取扱ふことは考へない。即ち土質力學は記述的科學の性格を受諾する必要に迫られて居るわけである。土の物理的性質を認識することに依つて、吾々は土の物理的本性と基礎工技法上の作用(沁り、沈下、基礎破壊)とを因果關係に導くなり、又それが出来ぬときは此の相互關係を絶え間なく數學的形態に表明するといふ立場に立つわけである。この様なことは地質學、生理學、又は他の不正確な科學に於て既に行つて居るのである。

基礎工技法上の經驗的な事項を取扱ふときには、個々の各注目すべき場合に就て標準的な性質を決定し、又觀測された此の性質を大いに突込んで記述するといふ様に追求しなければならない。理論及び模型實驗は實に因果關係を理解する爲の鍵を與へる筈である。此の學問の完成した形は個々の場合を系統的にならべて記述したものをまとめ上げ且全體としては土の物理的性質とその基礎工技法上の作用との相互關係といふ形になる。重要な基礎工技法上の實驗の企畫及び評價に當つては、先づ第一に實驗室に於て問題となつて居る土の物理的性質を決定し、次いでこれと似た性質の土に就て科學的に整理した經驗に依つて計畫した實驗の豫見的な効果を結論しなければならない。

それ故に土質力學研究の第一の問題は土の試料の實驗に對する研究室の

方法を樹立し物理的係数の記述に對する合理的な公式を見出すに在る。第二の問題は築造現場に於ける觀測結果と實驗室に於ける土の研究の計畫的な綜合である。

研究方法の樹立は、合衆國で既に行つた様に、大學の研究所及び國立研究所で確立しなければならない（ワシントンの標準規格局、大學の基礎工研究室）。土質力學上の經驗を處理するには、現場の技術者と地質研究所の技術地質の分野の人との共同作業が必要である。

技術地質學創立への萌芽は既に多くの文明國家の地質研究所に存在して居る。“Service geologique Belgique”は既に1896年に“Administration des mines”に技術地質の一分科を編入させた。此の分科はボーリングの資料を整理し、重要な公共及び個人の深い基礎工事及び給水設備に對する技術地質的問題に従事した。ボーリング事業者からは、研究所は望ましくない競争相手として劇しく攻撃されたが、非常に大きな功績を残した。イタリーではイタリー鐵道の“Istituto sperimentale”にこれと似た様な研究所を持つて居る。合衆國に於ては灌漑構造物の築造命令は地質研究所聯盟の下に置いた。獨逸では重要な土木構造物の築造監督は地質研究所で重要な説明又は精選した仕事と考へた報告書に依つて行つた。オーストリーでは重要なトンネル築造の建設監督は K. K. Geologischen Anstalt の専門地質家が分擔した。併し乍ら既に述べた様に技術地質學と土質力學との間の共同作業がなかつた爲、研究所がこれ迄試みた技術地質上の多くの觀測結果を土質力學の體系の中に繰り入れなかつた。觀測を行つたときの物理常數もわからず、又多くの資料は極く稀れに後になつて見出されるだけである。それ故土質力學者の立場からすれば、これ迄行はれたことは多くの費用と時間の消耗にも拘らず殆ど價值がないのである。

これと同じ理由で40年に亙る努力にも拘らず未だ技術地質學を創立するに至つて居ないし、又土木技術者の要求に對して中途半端な應じ方をして居るにすぎない。併し公共の研究所がその問題を解決するか否かは別問題である。行ふべき仕事は非常に廣範圍である。併しこれに打勝たねばならない。何故ならば基礎工の補助科學たる土質力學は他の分野より約100年おくれて居り、これに依つて蒙る國家經濟上の損失は適當な範圍の研究組織に要する費用よりも遙かに大きいからである。

f). 問題の分類

本書は土質力學を土性論の立場から取扱ふといふ最初の試みを示した。多くの問題は未だ全然手をつけて居ないし、又辛うじて試験的に答へられる問題もある。此の分科を概觀的に敘述するに當つて、土質力學の本質に關する吾々の見解を如何なる方向に深めて行くかを思慮ある技術者達に示すことは益々重要になつて來た様に思はれる。

第 I 章 土の技術上重要な性質を取扱つた。併しこの物理的本質には觸れない。

第 II 章 土粒子に作用する摩擦力及び水が摩擦係數に及ぼす影響を論じた。

第 III 章 土の剛性及び弾性を應用力學の觀點から敘述し、その物理的本源に立入つて居る。

第 IV 章 土壤中に於ける空隙水の流れに對する大きな抵抗に依つて生ずるロームとクレイ内に於ける力の傳達の時間的な遲滯及びこれに伴つて起る應力變化の時間的經過を取扱つて居る。

第 V 章 土質力學上重要な問題を土の物理性に基いて論及した。

第 VI 章 土質力學と基礎工事の間の關係の簡潔な敘述及び種々の基

礎工技術上重要な現象に對して決定的であると看做さなければならぬ物理的性質を記述した。