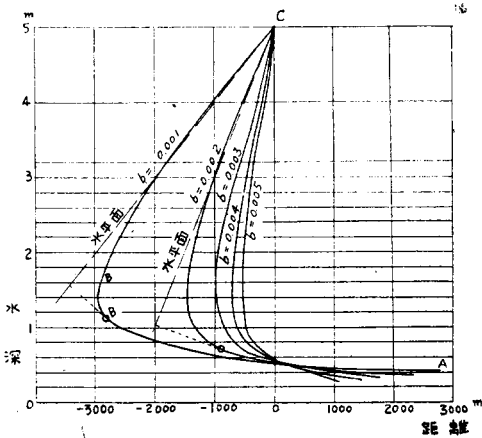


図-4 こんだく水の不等速流
Nonuniform flow of turbid water



点があり、表面波のエネルギーについて考慮しなければ説明し難い多くの問題を含んでいると考えている。

特に河川流に泥土が他より加わつた場合には、その泥土を浮游運搬するためのエネルギーが水流から与えられねばならないので、流速が低下し、水面が逆勾配になろうとする傾向があることも説明せられる。これも表面波のことを考慮すれば容易に説明せられるのであるが、今後の研究によつてその点を更に確めたいと考えている。(例えば山腹の崩壊が乱流効果を収め、

流速を減じ、水面を上昇せしめ、表面波を減衰せしめることが説明されるが、こゝでは省略したい。)¹⁶⁾

参考文献

- 1) 野満隆治, 「河川学」182頁, その他。
- 2) Hogentogler, "Engineering properties of Soil," (宇都宮寿夫訳, 20頁。3) 1)~200頁。4) 松尾新一郎, 片山重夫, 「土粒子分散系の流体学的性質について」, 関西工学連合講演会, 昭和24年10月。
- 5) 久宝保, 「潤濁水の毛管分析について」, 建設工学, 第3巻, 第4号。
- 6) H. A. Einstein, A. G. Anderson, "A distinction between bed-load and suspended load in natural streams," Trans. Am. Geo. Union, 1940, p.628.
- 7) L. G. Straub, "Hydraulic and sedimentary characteristics of rivers," Trans. Am. Geo. Union, 1932, p. 375. 等。
- 8) J. E. Christiansen, "Distribution of silt in open channels," Trans. Am. Geo. Union, 1935, p. 478.
- 9) 合田健, 「開水路における浮游流砂の分布について」, 土木学会誌, 第35巻, 第10号, 17頁。
- 10) Y. L. Chang, "Laboratory investigation of flume traction and transportation," Pro. A.S.C.E., 1937, p. 1701. 等。
- 11) 久宝保, 「開水路における乱流の縦平均流速分布について」, 土木学会誌, 第35巻, 第7号, 9頁。
- 12) 久宝保, 「乱流の流速分布に関する提案(第Ⅱ報)」, 徳島大学研究報告, 第2巻, 第1号。
- 13) 赤木正雄, 「溪流及砂防工学」, 72頁。
- 14) 本間仁, 「不等流の系統的な計算法」, 土木学会第6回年次学術講演会。
- 15) 久宝保, 「堤防の高さについて」, 土木技術。
- 16) 久宝保, 「沖積地の河川流概説」, 徳島大学研究報告, 第2巻, 第2号。

(昭.25.11.21)

DUC 624.131:539 215.9

土質力学体系への一試案

正員 工学博士 最上武雄*

AN APPROACH TO THE SYSTEM OF THE SOIL MECHANICS

(JSCE June 1951)

Dr. Eng. Takeo Mōgami, C.E. Member,

Synopsis A proposal to obtain the systematic views to the soil mechanical phenomena which is based on the principle of thermodynamics was suggested.

It consists in that two types of mechanism of deformation must be recognized, one is due to the change of configuration of particles, the other is due to the change of the internal energy. The mechanism of the former type which is supported by the author's theory of the mechanics of grains is considered to be due to the non-uniform distribution of the porosities or the moisture content in soil.

This proposition explains reasonably the effects of the compaction of soil, the behaviour of the motion of sand which has been studied by the author and the change of the mechanical properties of soil due to that of the moisture content.

1. 現在の土質力学は力学と云う言葉であらわされる内容とは可成り隔りがある事は多くの人に言われている所である。土質力学と言うよりは土質物理学又は土質工学と呼ばれた方が適切なのである。我々が土質力学の教科書を読んだ場合に痛感する事は、この学問に包括されている諸内容が統一的な内容となつていな

い事である。例えば粘土は透水性が悪い事及び粘土は粘着力に富んでいる事は知られているけれども、この二つの現象を統合して説明する原理を欠いている。恐らくは粘土粒子の大きさ小さく且つ鱗片状である事から両方の性質が導き出されるのであろうけれども、現在の処は一種の予想に止つている。このような統一原

* 東京大学教授, 工学部土木教室

理を欠いていると言う事は未だこの学問が発達の初期の段階にあると言う事の証拠である。

このような統一原理を発見して行く事はこの学問の発達に寄与する所以であるが、一面から考えると現場に於ける土の状態が複雑な事から、正統な学問の方向は現場に於ける諸現象の観察にあると言う声が出るのも当然の事である。勿論、この方向も軽視すべきではなく、大いに推進せしむべきであるが、一方統一原理を発見せんとする方向をも無視すべきではないと考える。

統一原理を見出さんとする努力はそれ自身としても大きな意義を持つているが、恐らくはこの難事業はそれ程簡単には成し遂げられないであろう。たゞこの努力の間に於て土に対しての認識を深め、現場観察をなす場合に対しても有力な指導精神を与える事になると思われる。実験室内での種々の研究も夫々重要な諸現象に対する探究であろうけれども、指導原理を欠いた研究は一般に力弱いものである。単なる一片の思い付きに終る場合も少くないのである。この場合についても統一原理に対する予想は指導原理として役立つものである。土の力学的性質、例えば塑性変形についての研究は現在までに相当の数行われている。これらは夫々重要なものであるけれども、多くは数理的展開に主眼を置く結果、その物理的意味が明らかでない欠点がある。即ち、成程力学の一特性をとらえる事が出来たととしても、他の特性の解明とは無縁となつて了う恐れがある。

それならばどの様な考え方を発展させて行くべきであろうかと言えば私は今迄の広言に拘らず、これであると言つて自信を以つて提案すべきものは持つていない事を遺憾とする。

たゞ最後の形ではないけれども、そして十分な実験的根拠に恵れている訳ではないが、今迄に行われた我々の研究室での実験等には矛盾しない一試案を提出する事は出来る。

本文の目的はこれを説明する事である。

2. 弾性体の力学に親しみの深い土木技術者には弾性体の力学から考察を始める事が自然と考えられるであろう。弾性体の力学では内部エネルギーを U 、外力を X 、その力の方向への変位を s とすれば、周知のカスチリアノ定理の示す所は、

$$\frac{dU}{dX} = s \text{ 又は } \frac{dU}{ds} = X \dots\dots\dots(1)$$

と書かれるが、又

$$dU - s dX = 0 \text{ 又は } dU - X ds = 0 \dots\dots\dots(2)$$

とも書く事が出来るであろう。

一般にある系の内部エネルギー U 、その系に働く外力 X 、その方向への変位を s 、又この系に外より入つて来る熱量を Q とすれば、熱力学第一法則(エネルギー不減則)に依れば

$$dQ = dU - X ds \dots\dots\dots(3)$$

(2)、(3)を比較して見れば、カスチリアノ定理では $dQ=0$ としている事が明らかである。尚ほ弾性体での変位は可逆変化であるから $dQ=TdS$ である。但し T は温度で S はエントロピーである。従つて $dQ=0$ とした事は $dS=0$ とおいたものと同じ意味である。つまり、我々が通常親しんでいる様な弾性体の力学では系に入つて来たり系から出て行く熱量は無親出来ると考えているのに他ならない。換言すればエントロピー変化を無視しているのである。

処で、粉体や土に関して以上のような考察過程を進めようとする場合には弾性体の力学の場合の様に(2)式に基礎を置く事は出来ないのであつて(3)式をその基礎にしなければならない。(3)を書き直す

$$X ds = dU - dQ \dots\dots\dots(4)$$

となるが、我々が観測するのは通常は $X ds$ である。 Q の方は現在までは、観測された事を聞いていない。

粉体、土の様な場合の変形過程は必ずしも可逆過程でないから $dQ=TdS$ とおく事には疑問がある。 U や Q が土の特性を示す量を用いて具体的に書く事が出来れば(3)式は丁度弾性体の力学に於けるカスチリアノ定理の後をして我々に甚だ有用なものとなる筈である。

残念な事には現在はこの段階に来ていない。しかし、粉体、土の変形に対しては内部エネルギー的なものと熱量的な両機構が存在すると言う事を認識するだけでも非常に有用な指導原理を与えるものなのである。

3. 粒子の力学

(4)式中の Q の部分を実測して見る事も重要な手掛りを与えるではあろうけれども、実測困難な Q を他の量で置き換える事が出来ればそれでも良い訳である。

私は嘗つて粒子の力学について小論を発表した事がある。理工学研究所報告に発表した論文には、つまらぬ計算の誤りがあり、後に講演会で訂正した。尤もその結論には影響しない程度のものであつた。この理論の実験的検証の多くは金沢大学の松尾剛君の手をわづらわしたが、大体に於て理論の正しい事を結論して良さそうであつた。この理論の主要を述べれば次の如くである。一様な大いさの粒子よりなる砂を箱に入れて側方膨脹を妨げつゝ圧縮する場合には、その初期の変形機構と中期と後期の変形機構とはその性格を異にする。即ち初期に於ては粒子の相対的変位が大きく、

粒子の位置変化に依つて全体の変形が生ずる。中期に於ては粒子の弾性変形が変形機構の主段であり、後期では粒子の破砕及び粒子の位置変化を生ずる。但し後期の機構についての理論は未完成である。

圧力を p 、容積変化を ΔV 、その過程での熱損を ΔQ 、内部エネルギーの増加を ΔU とすれば、容積は収縮するから負号をつけると(4)式は(この場合には ΔQ は外へ出るのを正としている)

$$-p\Delta V = \Delta U + \Delta Q \dots\dots\dots(5)$$

となる。変形初期に於ては $\Delta U \neq 0$ であり、変形中期では $\Delta Q \neq 0$ なのである。この様に(5)の右辺が一つづきの項となつて実験的検証に便利であるのが、狙い所である。

さて粒子同士がその位置を相対的に大きく変えないで互いに支え合っているならば変形は主として粒子の弾性変形に依つて生ずると思われる。この場合には熱としてエネルギーの失われる事は少い。即ち中期に於ける変形機構はかくの如きものである。

処で粒子の相対的変位が大きいならば、その移動に際して粒子はこすれ合つてエネルギーは熱となつて失われるが、この様な変位に当つては粒子が弾性的変形を生ずる程押し合わない。これが初期の機構である。

この種の大きな粒子の相対変位が生ずるためには、全容積中での間隙の不等が必要である。つまり大きな間隙が粒子の変位に依つて小さくなつて行く過程である。処で不等を数式的にあらわすには次ぎの様に考えれば良い。不等が存在し得るためには、十分つめられるだけ粒子をつめたときの容積(これを V_0 とおく)よりも容器(これを V とおく)が大きくなければならぬ。若し容器がそのような大きさであつたとすれば、その容積中に一定数の粒子を入れる入れ方は可成りに大きい数(これを N とおく)だけあり、現実に今つまつている粒子のつまり方は N 個のつまり方の中のどれか1つである。 V と V_0 との差が小さくなるにつれて N なる数は次第に小さくなつて来る。

一方 V と V_0 の差が大きい程不等は多くあり得るし、小さくなる程不等は少くならざるを得ない訳である。そこで N なる量は不等の程度の一つの目安となる。この様な考え方が基準になるのだが、詳しくは理工研報告の論文を見ていただきたい。この理論をたどる事に依つて(5)式中の Q を

$$Q = K \log W \dots\dots\dots(6)$$

と仮定するのである。 W は $1/N$ つまりある状態が如何なる確率で起るかと言う事を示す量即ち状態の確率である。此処で注意すべき事は W は確率であるから1より小さいため Q が負になつて不思議な感がある

と思われるが、これは系に入る熱量を正とすれば自ら除かれる。即ち $Q = -K \log W$ として系に入るものを正とすれば良い。従つて熱量そのものを考える時は絶対値で考えていけば良い。そうすれば V と V_0 の差が小さくなつて N が小さくなる、つまり不等が少くなれば W は大となり Q が小さくなつて前述の説明に合うのである。しかし科学的には(6)を基礎として実測可能な量の間隙の関係を導きこれを実験で検証すべきである。そして、それを行つた結果、検証が出来たのである。(6)の式は統計力学に於けるエントロピーの関係式と似ている事は面白い事であるが先きにも述べた様に、この場合にエントロピーをこの形に書く事には若干の疑問がある。

従つて、この場合に熱となつて失われるエネルギーは間隙の不等に基因し、それが(6)式であらわされる事が示されたのであるが、粒子の大きさが一様でない場合についての理論は未完成である。しかし、間隙の不等がこの様な型式の変形の基をなしているであろう事は疑いあるまいと思つている。尤もこれは現在の処想像である。

4. 粒体の振動実験

粒体を箱につめる場合、普通の方法では一様なつめ方は出来ないのであつて、それが前節に於ける実験初期に於ける非弾性変形の原因となるものであつた。実際にその様であるか否かは我々の研究室で久保特研究生が行いつゝある粒体の振動に関する研究の一部で示される。粒体(例えば砂)を箱に入れ振動合に乗せ、上下振動を加える。振動の加速度がある大きさ以上であると粒体は流動性を帯び容易に変形し得るようになる。流動性を帯びると言うためには粒の周囲に粒が自由に活動し得る間隙が出来る必要があるのだから、夫々の粒の周囲に若干の間隙が出来れば全体の容積は増加しなければならぬと言う事が常識的に考えられる。しかるに実測に依れば振動時の容積は振動前の容積よりも減少し、振動を止めれば更に容積を減少する。つまり、初めに存在した間隙の不等が振動に依つて平等化されるために粒子の周囲に自由活動範囲を持つても尙且全体としての容積の減少する事を示しているであり、振動を止めれば更に容積は減少するのである。なお久保君が乾燥砂について研究した結果によると、最も大きな容積減少を生ぜしめる加速度がある事が分つている。即ち、相当の加速度を加えても、その加速度以下では十分の間隙の一様化が行われぬのであろう。

5. 土の突き固めについて

前節で述べた如く、砂が振動に依つて締まる場合に

は砂の中の間隙分布が次第に一樣になる。粒子の力学の節で述べた様な砂を箱に入れて静的圧力を加えて締める場合にも砂中の間隙分布は次第に一樣に近づいて行くのである。土は砂よりは複雑であるから簡単には言えないが、一応土を粒子と水より成る粒体と考え、これを締めて行く場合、前2方法の様な効果があるものとすれば、即ち衝撃の効果と静力的効果があるとすれば、締めるにつれて粒子間の間隙は次第に一樣化して行くであろう。そして水は粒子間に張られたと考えられる水膜の表面張力の作用及び若し粒子が小さく、又その形も鱗片状であるとか、コロイド的な性質を持つているならば、それら表面物理的な作用に依つて一樣化を妨げる筈である。従つて丁度水の量が最後に存在する間隙を丁度満して少くとも表面張力に依る妨害がなくなる時が最も一樣化を生ずるに都合が良い時である筈である。尤も前節の実験に依つても分かるように最も締つた状態になるや否やは衝撃数等に依つて変わる筈である事が期待される。

これらの事柄は久野特研生の突き固めの研究その他に依つて確かめられている事である。そしてなお久野君は突き固め後の土中の一樣性を調べ、含水量が最適含水量に近づくにつれて増大する事を認めている。尤もこの一樣性は間隙の一樣性なりや含水量の一樣性なりや遺憾乍ら不明である。なお同君のこの方面の研究にはこの事に関連して興味ある事実があるが、これは同君自身の報告に譲る。

又渡辺隆講師の同じく土の締め固めの研究に依れば土中の空気量即ち間隙より水分をふき去つたものゝ単位量を減少せしめるに必要なエネルギーが空気量に逆比例する項と空気量の何乗かに逆比例する項との和であらわされる事を示しているが、これも以上の見解を發展せしめるための拠り所と考えている。

6. 含水量に対する土の性質変化

嘗つて私は含水量が変る場合に土が砂的、土的、流体的となると言う事についての見解を述べた事がある。この事を本文の趣旨に基いて考えて見たいと思う。

土が砂的、土的、流体的である含水量の領域を簡単のために夫々 A, B, C 領域と名付けておく。

土が砂的、土的、流体的であるのは確かに含水量に依るのではあるけれども、さて本文の趣旨に依れば、その真相はそうではなくて、含水量少く A 領域にある間は土の中に存在する不平等が甚だしいと言う事なのであつて不平等が多いから砂的なのである。B 領域程の含水量になると土中の不平等が比較的に少くなる結果土的となり、C 領域では再び不平等が多くなるた

めに流体的になるのであつて、含水量の多寡は土中の不平等の多寡を支配する要因なのである。この事は突き固めの項でも述べたが、山梨大学の箭内寛治君と試みた実験に於ても確かめられている。

それならば土中の不平等の多寡が何故土の性質を砂的、土的、流体的になるか、言いかえれば砂的、土的、流体的と言う事は如何なる事かと言う事を以下に説明したいと思う。粒子の力学並びに突き固めの節に於て説明した様に土を箱中に入れて締めて行くの間隙は一樣化して行く。水を含んでいれば水が一樣化を若干妨害する。処で砂を通常のつめ方をした時一樣にはつめられぬ事から明らかな様に砂の自由な運動、即ち箱中でしめて行くと言うような拘束あるものと異つた自由な変形は、間隙の不平等をそのままとし、不平等の程度を若干時間と共に変える程度の変形機構に依つて起るものなのである。従つて A 領域に於ける土は不平等性を多分に持つから、それに基く変形は専ら砂的である。

(6) 式を媒介として考えれば (4) 式で $dU \neq 0$ とおける様な性質を持つている。B 領域の土は不平等も小さくすると共に、内部に表面張力も相当作用し、場合に依つては表面物理的な作用も働く。即ち、この様な状態の土の微小変形は (4) 式で $dQ = 0$ に近いと考えて良い如きものであろう。水の表面に蓄えられる表面エネルギー、表面物理的なポテンシャルエネルギーはすべて内部エネルギー的な性格を持つものであるからである。処がこの場合に内部エネルギーに依る変形抵抗は固体に於ける分子引力程大きくないから、外力が十分大きければ変形は大となり、内部エネルギーを蓄えている場の状態を変えると共に、粒子の配列状態をも変えるに至る事があり得る。そうすれば $dQ = 0$ と言う事は言えなくなつて来るのである。この様な複雑な様相が土的の性質であると考えている。土をよく締めて出来るだけ不平等をなくして置けば、少くとも小さな変形に対しては $dQ = 0$ と考えて良いと言う事が、土が安定だと言う意味である。

C 領域に至れば、水膜がなくなるから再び $dU = 0$ の状態が現出し、更に不平等も増すから専ら dQ に基く変形が行われるに至る。これが流体的であると言う意味である。

7. 砂の運動

私は嘗つて砂の運動に関して若干の研究をした事があつたが、これを本文の趣旨に基いて考察して見よう。

前節に於て述べた様に砂の自由な運動は専ら不平等に基くものである。古く行つた実験に於て、砂が運動する場合に、密づめの処が粗づめとなり、粗づめが密

になると言ひ調子の現象が見られ、粗密順送り現象と名付けたが、これは運動が不平等に基く事の証と見なす事が出来る。又粒が自由に動くためには粒の周囲に若干の空間がなければならず、しかしこの空間が大きすぎれば不安定となるためにくづれなければならないから、一粒の粒子のまわりの空間は時間的の平均をとれば一定とならねばならぬ事を述べた。処が、当時私は定常的の運動に於ては容積一定となつて言う点だけしか、これから論ずる事が出来なかつたが、本文の立場から見ると今少しく論旨を進め得る様になつた。即ち、3に出て来た V_0 と V との差がこの場合には一定となるから、 N の値は一定、従つて W は一定となる。しかも、本文では述べなかつたが、 W を求める時には W の可能な最大値をもつて (6) 式の W としているのだから、(即ち 1 に出来るだけ近い W) (6) 式の Q は可能な最小値をとるべき事が結論される事が分かる。この事は嘗つてブーシネスクの応力、歪の関係を転用して、砂の定常運動に際しては、エネルギー損失が最小となつて言う法則を見出したが、この法則と一致する。

従つて、この法則が摩擦法則をあらわしていた事を考え合わせると (9) 式は摩擦法則を粒子論的に解釈したものと云う事が出来る。

前には砂の運動を粒子論的に取扱う事を試みて失敗し、流体力学的に取扱つたが、粒子の力学に依れば、

粒子論的に考える事が出来る事が分つたのである。粒子の力学に依れば

$$\Delta Q = KN \left(\frac{\alpha}{Nv_0} - \frac{1}{V} \right) \Delta V$$

である。但し、 N は V 中の粒子の数、 v_0 は 1 ケの粒子の容積、 α はある常数である。定常運動ならば $dQ/dt=0$ (但し t は時間) であるから $dV/dt=0$ となつて (括弧の中は零でない) ダイレイタンシーが効かない事も出て来る。

この線に沿つて剪断現象を考える事は将来行いたいと思うが、砂の運動を粒子論的に扱ひ得る事をこゝでは述べておくに止める。

8. 結 論

以上土の力学を統一的に考察する一つの見解を述べたが、それに依ると可成り定性的ではあるが土の力学的性質について、その特性を考える事が出来るのである。

又土の力学的研究の困難さは、如何なる意味を持つているかと言ふ事についても比較的透明な見通しが得られると思われる。

言うまでもなく以上の理論は序説的であつて将来の研究に依つて、完成に近づけなければならないものであるけれども、一応これに依つて土の力学的性質の研究を行う場合の、一つの指導精神を示し得たのではあるまいかと考へている。 (昭.26.1.18)

UDC 625.034.

脱線係数式の一考察

正員 後藤 宇太郎*

ON THE DERAILMENT-RATIO FORMULA

(JSCE June 1951)

Utaro Goto, C.E. Member

Synopsis As well known, the derailment of running wheel is affected by ratio of lateral and vertical forces acting upon it. We can know the lateral and vertical forces by the accelero-meter respectively. But we can not make sure the relation between those forces and the derailment. Therefore we must know at first the rational and theoretical maximum limiting values permissible on running wheel without derailment. In this paper, the author proposed a derailment-ratio formula, by which one can know the permissible ratio between the above forces on running wheel.

(I) は し が き

車輪が蛇行動その他の原因により、横圧力を受けた場合、その横圧力の垂直荷重に対する比率が大きければ乗上り脱線を起すに至る。この脱線する場合の比率を脱線係数と称している。加速度計の発達に伴い、

* 東京鉄道工業株式会社顧問

運行車輛に働く水平加速度及び上下加速度が測定されるようになっていたが、この実測によつて求め得た比率が脱線迄には程遠き値なるか、程近き値なるかを判断する基準が必要となつて来るのである。現に行われている静力学的脱線係数式ではもの足らなく感じて、茲に一つの理論式を提案する次第である。