

純水の場合の土中水の熱力学的取り扱いについて

正員 工学博士 村山 朔 郎*
准員 植下 協**

ON THE THERMODYNAMIC TREATMENT OF SOIL-MOISTURE IN THE CASE OF PURE WATER

(JSCE Feb. 1956)

Dr. Eng., Sakurō Murayama, C.E. Member, Kanō Ueshita, C.E. Assoc. Member

Synopsis In this paper, a method estimating moisture distribution in the semi-infinite isothermal soil layer which is covered with the perfect pavement and in the state of thermodynamic equilibrium has been studied thermodynamically, and it has been known that Schofield's suction fits for this purpose.

Though Schofield's "suction" has been frequently confused with Croney and others' "suction" which corresponds to pressure, we could point out that Schofield's "suction" is not the pressure head, but the elevation head in the soil layer above mentioned.

要旨 道路などの舗装板下の土層に出現する含水分布を推定する目的で、無限広さをもつ理想的舗装によつて覆われた等温土層を対象としてその中の含水分布を熱力学的に考察した。この土層を理想平衡土層と呼ぶことにしたが、このような立場には Schofield のいう suction を利用すればよいことがわかった。Schofield の suction に対しては従来正しい解釈のなされていないことがしばしばあつたが、ここに利用される理想平衡土層の概念によつて、Schofield のいう suction の概念をさらに明確にすることができた。

1. 緒言

建設後における道路などの舗装板下の含水分布をあらかじめ推定することは、舗装板の合理的設計とからんで、最近英国でやかましくいわれだした問題である。

すでに報告されている英国の Croney 等の含水比推定理論は地下水面に連つた水柱の水面からの高さとその高さにおける水圧の関係を利用するものである。このような理論で扱うる範囲は毛管上昇水、すなわち重力の場にある間隙水でしかも単に液相としての水の範囲にかぎられる。しかしさらに異なつた相の水を扱うためには水圧からのみ判断することはできないので熱力学の立場から含水比の推定法を検討することを試みた。このような立場は結果的にみれば Schofield のいう suction¹⁾ を利用すればよいことがわかった。従来この Schofield の suction が諸文献に引用されているが、その解釈はしばしば Schofield の意図したも

のと異なつていることがある。現在までに "suction" と呼ばれている概念に2つがあり、一つは Schofield の名づけたエネルギー的なもので他は Croney 等²⁾ の名づけた圧力的なものであり、この2つは明確に区別されなければならない。われわれはここに導入した理想平衡土層を用い、それぞれの概念を明確に示すことができた。

2. 舗装板下含水分布の推定法

舗装板が完全なものであつて、上方からの雨水の浸入が完全に遮断されたものであり、まれそれに覆われた土中の温度や地下水面の位置の変化が無視できる程度に微小であるとすれば、土中水のエネルギー的平衡を乱そうとするおもな要因がなくなるから、舗装板下では終局には時間によつて変らない土中水の定常状態になる。このとき呈する各位置のエネルギー的状态を求めることができれば、そのときの土試料の含水状態が推定され、この推定値をもつて将来その土が有するであろう含水比を予定することができるわけである。そのためにはまず舗装板下土層内各位置の有すべき土中水のエネルギー（ここでは熱力学において一般に用いられている Gibbs の自由エネルギーを用いる）の分布状態と、エネルギー・含水比関係を求めるため種々のエネルギー状態を試料土に与えるための実験理論を求める必要がある。これらの理論的取り扱いの便宜のために、実際の舗装土層の条件をさらに理想化した次に述べる理想平衡土層を考え、これにより諸相にまたがる土中水を熱力学的に考察することとした。

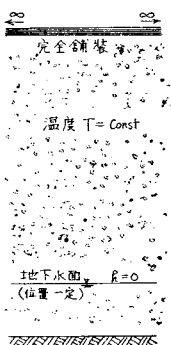
3. 理想平衡土層

* 京都大学教授，工学部土木工学教室

** 京都大学大学院学生

図-1 に示されるごとく完全舗装された自然土層を考える。ここに完全舗装とは半無限の地盤の表面を覆い、かつ水分の出入を全然許さない理想的な舗装である。またこの自然土層では地下水面は一定の位置に保たれ、舗装板と地下水面との領域の温度は一定であると仮定する。以上の条件が保たれて平衡に達している土層を理想平衡土層と名づける。

図-1
理想平衡土層



4. 理想平衡土層内土中水の熱力学的取り扱い

土層中の水分が平衡状態にあれば、熱力学からいかなる場所の、いかなる相の水についても、次に定義されるような単位質量あたりの総ポテンシャル ϕ が等しくなっているはずである。すなわち、

$$\phi = \bar{G} + \sum_q \phi_q = \text{const.} \dots\dots\dots (1)$$

である。ここで \bar{G} は水の化学ポテンシャルで、 ϕ_q は考えている単位質量の水が力の場にある場合その有する位置のポテンシャルで、添字 q は力の場の種類を示し、 \sum_q をそれらの水に働らく各力についての合計を示す。

いま簡単のために土中水が溶質を含まない純水であると仮定し、土粒子の吸着空間外にある水に着目して取り扱いをすすめることにする。すなわちこの仮定は土中の毛管水、または吸着空間外の水蒸気のみに着目して土の含水時のエネルギーを規定しようとする立場である。

このような着目による取り扱いでは、理想平衡土層内の (1) 式は、 ϕ_q の項が重力の場のポテンシャルだけと考えればよいから、

$$\phi = G + hg = \text{const.} \dots\dots\dots (2)$$

と書ける。ここに、 h は理想平衡土層内の一点の地下水面からの高さ、すなわち地下水面を基準としたその位置の水頭、 g は重力の加速度、 G は純水に対する \bar{G} で、純水単位質量あたりの Gibbs の自由エネルギーである。

地下水面 ($h=0$) における水の自由エネルギー (以後、自由エネルギーといえば Gibbs の自由エネルギーをさす) は、自由水面の自由エネルギーに等しく、そのときの気圧と温度のみで決まる値である。これを G_0 であらわせばこの値によつて (2) 式の const. はおきかえられ、

$$G = G_0 - hg \dots\dots\dots (3)$$

と書かれる。 h について解けば、

$$h = \frac{1}{g} (G_0 - G) \dots\dots\dots (4)$$

となる。

(3) 式は理想平衡土層内で地下水面より高さ h の土の塊に含まれている土中水は、自由水面の自由エネルギーよりも $hg(\text{erg})$ だけ低い自由エネルギーになっていることを示すものである。またその自由エネルギーの減少高を重力の加速度で割れば、理想平衡土層内の土中水の高さ (位置の水頭) を示していることが (4) 式でわかる。すなわち理想平衡土層内の考察試料土中水の自由水面より測つた位置の水頭 h と、その土中水の自由水を基準とした自由エネルギーの減少高とは、土粒子吸着空間外の水 (各相のものを含む) に着目するかぎり一義的關係となり、考察試料中の土中水の自由エネルギー減少高が理想平衡土層という場をかりれば、われわれに知覚されやすい位置の水頭の大小で表現できることになる。次にこの位置の水頭と吸着空間外土中水 (液相と気相の場合) の圧力状態との関係及びさらに同様にして氷点降下度 (液相の場合) との関係に次に考察しよう。

5. 理想平衡土層内における毛管水

理想平衡土層内は温度が一定であるから、毛管水の自由エネルギー変化は水圧の変化のみによつて起る。すなわち

$$dG_w = v_w dP_w$$

である。ここに w は液相を示す添字である。 v_w は純水の比容積で厳密には水圧とともに変るが、きわめて微小で無視できるから毛管水存在の範囲では一定値 v_{w0} とみなせるものとし、地下水面のうけている圧力を P_{w0} 、高さ h の点の毛管水の圧力を P_w とすれば、

$$G_w - G_{w0} = v_{w0} (P_w - P_{w0})$$

のように積分できる。これを (4) 式に代入すれば、

$$h = \frac{1}{g} v_{w0} (P_{w0} - P_w) \dots\dots\dots (5)$$

となる。理想平衡土層内での毛管水における地下水面からの高さ h と土中水 (液相) の圧力 P_w との関係を示している。

したがつて考察試料土の土中水の圧力を (5) 式の関係で示された P_w に変化させることによつて、適当な理想平衡土層内の位置の水頭 h をもつたエネルギー状態を実験的に作ることができる。

6. 理想平衡土層内における水蒸気

理想平衡土層内のある高さに存在する吸着空間外水蒸気の自由エネルギーは、温度が一定であるとしているから、蒸気圧の変化のみにより、

$$G_a - G_{a_0} = \int_{P_s + \Delta P_s}^{P_a} v_a dP_a$$

である。ここで G_a はある高さに存在する吸着空間外の水蒸気の自由エネルギーで、 G_{a_0} は地下水面と接している水蒸気の自由エネルギーである。 P_a は G_a に対応する水蒸気圧で、 $P_s + \Delta P_s$ は地下水面と接している水蒸気圧で、 P_s は同一温度で水蒸気とのみ共存している自由水面に接する蒸気圧（飽和蒸気圧と呼ばれる）を示し、 ΔP_s は大気圧が自由水面に加わつたため飽和蒸気圧よりふえた水蒸気の増分を示している。 v_a は水蒸気の比容積で、水蒸気が理想気体とみなせるとして、

$$v_a = \frac{RT}{M} \cdot \frac{1}{P_a}$$

と表わせるから、

$$G_a - G_{a_0} = \frac{RT}{M} \ln \frac{P_a}{P_s + \Delta P_s}$$

が得られる。ここで R は気体常数、 M は気相の水の分子量、 T は理想平衡土層内の絶対温度である。これを(4)式に代入すれば、

$$h = \frac{RT}{gM} \ln \frac{P_s + \Delta P_s}{P_a} \dots\dots\dots (6)$$

が得られる。

(6)式は理想平衡土層内での地下水面からの高さ h と土中の水蒸気圧 P_a との関係を示している。したがつて土中任意の点の水蒸気圧は(6)式の関係为满足する P_a によつて与えられ、この P_a の下においてつり合う土の含水比状態は理想平衡土層内の位置の水頭 h をもつたエネルギー状態となる。

7. 理想平衡土層内土中水の氷との共存条件

地下水面では温度が 0°C ($T_0 = 273.16^\circ\text{K}$) に保たれると、水と氷の共存が出現する。この場合、

$$[G_{w_0}]_{T_0} = [G_{i_0}]_{T_0} \dots\dots\dots (7)$$

である。ここに $[G_{w_0}]_{T_0}$ 、 $[G_{i_0}]_{T_0}$ はそれぞれ水、氷の大気圧下 0°C ($= T_0$) における自由エネルギーを示す。

理想平衡土層で温度 0°C の地下水面の水頭 h で平衡している液相の水の自由エネルギーは、その位置でも温度 0°C であり、かつ液相の水が吸着空間外にあるかぎり(3)式が成立し、

$$[G_w]_{T_0} = [G_{w_0}]_{T_0} - hg$$

である。地下水面より h だけ高いこの位置で土中水が氷と共存できるための温度がかりに $T^\circ\text{K}$ であるとすれば、氷と共存しているときのこの位置の土中水の自由エネルギー $[G_w]_T$ は、

$$[G_w]_T = [G_w]_{T_0} - \int_{T_0}^T S_w dT$$

$$= [G_{w_0}]_{T_0} - hg - \int_{T_0}^T S_w dT \dots\dots\dots (3)$$

である。ここで S_w は純水の比エントロピーである。

土中水にはその位置のために生じている負圧があるが、一方共存すべき氷について考えてみると土中水で氷が生成すると、それはすぐ毛管水外の大気と接して存在するようになり、氷はそのような負圧を受けないと考える。そうすれば氷の自由エネルギーはその位置が h にあつても地下水面にあつても圧力によつては影響されていない。従つて、地下水面より h の高度で $T^\circ\text{K}$ のもとに生ずる自由エネルギー $[G_i]_T$ は、

$$[G_i]_T = [G_{i_0}]_{T_0} - \int_{T_0}^T S_i dT \dots\dots\dots (9)$$

であると考えられる。ここで S_i は氷の比エントロピーである。ここで水と氷が h なる位置で共存するためには、

$$[G_w]_T = [G_i]_T$$

でなければならない。すなわち(8)、(9)式を等置し、(7)式の関係を入れ、氷点降下度 Δt を

$$\Delta t = T_0 - T$$

として、 h を Δt で表わす式を導けば、

$$hg = - \int_{T_0}^{T_0 - \Delta t} (S_w - S_i) dT$$

ここで融点 T における融解の潜熱を L とすれば、

$$S_w - S_i = \frac{L}{T}$$

なる関係があるからこれを代入し、 L を T_0 から $T_0 - \Delta t$ の範囲で一定であるとみなして積分すれば、

$$hg = -L \ln \frac{T_0 - \Delta t}{T_0} = -L \ln \left(1 - \frac{\Delta t}{T_0} \right)$$

となり、 $\frac{\Delta t}{T_0}$ が小さいから、上式を Taylor 展開して近似的に、

$$h = \frac{L}{g} \frac{\Delta t}{T_0} \dots\dots\dots (10)$$

が導ける。

(10)式の関係は考察土試料を冷却し、その氷点降下度を測ることにより、その土試料の含水状態が理想平衡土層内のいかなる位置の水頭をもつた土の含水状態と同じものであるかを判定できることを示している。上記は理想平衡土層の温度が 0°C の場合について考察したが、温度が 0°C 以上の場合でも自由水面及び考えた位置の土中水の性質に大差のない範囲では、上述の関係は同様に成立する。

8. Schofield の suction

いままで述べてきた理想平衡土層内の位置の水頭 h は、1935年に土中水の pF 表示法を提案した Scho-

field の論文) 中で “suction” と呼ばれたものと概念において一致している。これを明らかにするため、ここに Schofield 自身が彼の論文の中で触れている定義にかかわる言葉を引用しておく。

「先のページで、“suction” と呼ばれていたものをあらわすためには、私 (Schofield) がさきに pF 表示法と呼んだ新しい尺度を使うのが便利である。Buckingham はそれを「毛管ポテンシャル」と呼び、等値水柱を cm で表わした高さとして定義した。私 (Schofield) は「毛管」なる語が表面張力についての連想を与えるので、わざとこの用語を用いていない。エネルギー関係の大きい長所は、それらが個々独自の機構にかかわらず、保持していることである。

pF とは Buckingham のポテンシャルの対数である。

Sörensen 酸度表示法によるように記号「p」はその対数的性格を示し、これを自由エネルギーを示す記号「F」につけて「pF」を問題になっている suction を与えるに必要な水柱の cm で表わした高さの対数と定義することによつて、われわれが事実上、重力単位で測られた自由エネルギー差の対数を使っているのだということを記憶させようとするものである。」

そして suction の算出法として (6), (10) 式に相当する式を示している。従つて Schofield の “suction” とは理想平衡土層内での位置の水頭に等しいことを明示することができたが、従来の Schofield の suction に対する紹介および引用には、単なる圧力水頭の意とみなしており、ときにはその水頭より生ずる負圧が実在するごとく述べているものもある。その結果として Schofield の suction と Croney らの suction が混同されている。Croney らの suction の定義を彼等の文献²⁾ より示せば、

「地下水面上にある土の小試料が攪乱を与えないように、含水変化が起らないように取り出されて、外力を受けていないときに、その試料の間隙水圧を測れば、大気圧以下の値が与えられる。その無載荷小試料中の水圧と大気圧との差が、moisture suction また

はさらに簡単に土の suction として定義される。」である。これら 2つの suction は同じ水分移動を論ずる目的のために用いられる同名の用語であるために混同されやすいが、この種の研究をなすときに、この区別を明らかにしておくことは大切であると思う。土の pF-含水比曲線は、すでに Schofield が pF を提案してから、土の水に対する性質をよく示す関係曲線であるとして、その測定法が pF 0 から pF 7 までの範囲で発達している。例えば著者らの岡山産粘土で測定した pF-含水比曲線は 図-2 に示すごとくである。

9. 含水分布推定における pF-含水比曲線利用上の注意

図-2 に示されたように pF-含水比曲線は一つの試料土に対しても湿潤状態から次第に乾燥させた場合と、一たん乾燥状態となつてから次第に湿潤させた場合とで大きいヒステレシスをえがいている。推定に利用すべき曲線は舗装がなされる直前のその位置の suction 状態を起点にして、それが舗装後に出現するとみられる状態へ変化させるときに出現される含水状態を利用しなければならない。

いま一つ注意しなければならないのは、一般に 図-2 のような関係を画くときに試験されている試料土の状態が土層内にある状態と上載荷重の有無による相異があるから、理想平衡土層内と同一の suction 状態をもつ含水比を pF-含水比曲線上から求めても合わない場合がでてくる。これに対しては、Croney²⁾ らの指摘した

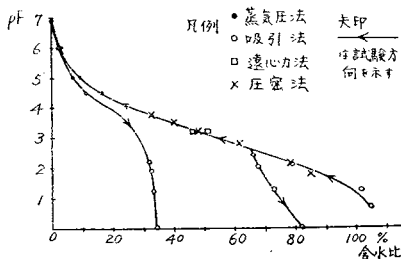
$$S = -u + \alpha l$$

なる関係で補正された S を利用しなければならない。ここに S は試験時の吸水圧で、 $-u$ は (5) 式の ($P_{w0} - P_w$) に相当する土層内での間隙水圧、 l は土層内での上載圧で α は上載圧が土中水に有効に関係する率である。したがつて試験時の上載圧のない条件で土層内と同じ含水状態を出現させようとするには土層内の $h = \frac{1}{g} v_{w0} (P_{w0} - P_w)$ に対して、 $h = \frac{1}{g} v_{w0} (P_{w0} - P_w + \alpha l)$ なる suction 状態としなければならないことになる。 α は 0 から 1 までの値であるが、毛管水の範囲で問題となり、細粒土で飽和しているほど 1 に近い。

10. 結 言

以上理想平衡土層の新たな概念を導入してその土層内の含水分布を熱力学的に推定する考え方を述べた。それは結果的に Schofield の suction を利用するものであることがわかつたが、これと別に最近 Croney らの定義した suction なる用語がある。これら同名の用語はいずれも土中水の移動を論ずる目的で導入さ

図-2 pF 含水比曲線の一例



れているので混同されやすいが、その概念の相違をはつきりさせておくことは今後この方面の研究に大切なことと思う。なお純水以外の土中水の場合についても研究を行っているがこれらについては次の機会に発表するつもりである。この研究を進める上に東京農工大学の高木俊介助教授から文献をお送りいただいたことを感謝する。

参考文献

- 1) Schofield, R.K. : The pF of the Water in Soil. Trans. 3rd Int. Congr. Soil Sci. (Oxford) Vol.2 (1935) pp.37~48.
- 2) Croney, D. and Coleman, J.D. : Soil Moisture Suction Properties and their Bearing on the Moisture Distribution in Soils. Proc. 3rd Int. Con. of Soil Mech. etc. Vol.1(1953) pp.13~18

(昭.30.6.24)

学会誌への御投稿について……いよいよ4月号から土木学会誌の内容を改善し、広く一般会員のすぐ役に立つ記事を満載する予定であり、表紙も2色刷の美しいものになります。このことは本号お知らせにも発表してありますが、これからは現場の方々の声を強く反映した読みやすい雑誌にしたいと思しますので、従来ややもすると固苦しくお考えがちのようであつた学会誌への御投稿も、ごく御気軽にどしどし御寄稿下さいますようお願い申し上げます。

愛される学会誌として、皆様とともに成長して行くよう暖かい御援助と御協力を切望してやみません。

(編 集 部)

高効率!!

古河のエア・コンプレッサー ハンドハンマー



ハンドハンマー

ポータブル
エア・コンプレッサー



古河鋳業 足尾製作所

本社・東京営業所 東京丸の内 TEL (27) 1401~10
 販 売 店 福岡・大阪・名古屋・仙台・札幌
 工 場 高 崎・小 山・足 尾