

高含水比火山灰質粘性土における 土中水エネルギー測定の意味

——土の化学的改良に関する研究(第1報)——

喜田大三
中田禮嘉

概 要

土の工学的諸性質は土中水によって著しく影響を受けるので、従来から土の基本的性質として含水比の測定が行なわれている。しかし、特に関東ロームのような高含水比火山灰質粘性土の工学的諸性質に及ぼす土中水の影響を、単に“量”すなわち含水比のみで説明することは困難である。このような土では、土中水の“性質”すなわちエネルギー状態をも考慮しなければならないと考えた。

そこで、本報では、かかる土の化学的改良工法を研究するに先だて、まず土中水のエネルギー状態を表示する指数“pF”について、またpF水分量の測定法について概説した。さらに、土質工学の分野におけるpF水分量測定の有用性を証明した二、三の実験例を紹介した。

1. はじめに

本報で対象とする土は、関東地方一帯に分布する火山灰質粘性土の関東ロームであり、その含水比はきわめて高く、一般に100~200%である。そして、この関東ロームは土工上、非常に特異な挙動を示す。すなわち、この土は練り返さない限りかなりの強度を持っているが(たとえば、許容支持力では 15t/m^2 ¹⁾、一度練り返すと軟弱化し、重機械の土工作業が困難になる。このような現象は、練り返しの過程で、含水比はほとんど変化しなくても、土の構造や密度が変化することによって引き起こされることが推察される。しかし、そのような変化だけで、上述の強度低下を十分説明できない。そこで、強度低下に、土中水の“性質”いいかえれば、土中水の“エネルギー状態”の変化も関与しているのではないかと考えた。

以上の見解に基づいて、練り返しによる土の強度低下を防ぐために、単に物理・化学的に含水比を低下させるだけでなく、土中水のエネルギー状態、つまり土中水の存在形態を好ましい状態に変化させようと考えた。その方法の1つとして、生石灰処理による改良工法を第2報¹⁴⁾に報告する。

第1報では、土中水のエネルギー状態を表示する指数pFの概念を解説し、さらに、pF測定の有用性を証明した二、三の実験結果を示す。

なお、pF概念は農学分野で、植物の水吸収に関連

して活用されてきたが、近年、土質工学の分野でも、土の力学・工学的性質の研究に採用されつつある。^{3~9)}

2. 土中水のエネルギー指数pFと測定法

pF概念の詳細については別の優れた論文^{2,10)}があるので、ここではその概略を述べる。

さて、水を土から除去するためには、土に熱的、機械的、電気的あるいは化学的エネルギーを加える必要がある。このエネルギーの表示にpF指数が使われる(後述)。そして、土中水のエネルギー測定は土から水を取去るに要する力(エネルギー)をいろいろに変えて、後述のpF水分量を測定することによって行なわれている。その結果、表—1に示したように、土中にはエネルギー状態が異なる、すなわち性質の違う各種形態の水が存在し、それに応じて、その測定法もいろいろ考案されている。

そこで、本研究に先だち、これらの測定法のうち、測定法の簡便さおよび土質工学の分野で比較的重要であると推定されるpF範囲(pF値2.0~4.2)を考慮して、遠心分離機による方法を検討し、妥当な測定法を確立した。本測定法の説明は紙数の都合で省略する。

さて、遠心分離法によって測定されるpF水分量とは、ある遠心力(エネルギー)条件下で除去された水分量(pF分離水量)と除去されない水分量(pF非分離水量)とを総称するものである。すなわち、pF分離水量とは、その測定pF値よりも小さい、つまりpF値0まで

pF 値	相当張力		水分形態	水分恒数	測定法
	水柱(cm), 気圧				
7	10 ⁷	10 ⁴	化合水	11) 105°C 炉乾土	↑ 加圧膜法 ↑ テンションメーター法 ↑ 吸引法 ↓ 土柱法
6	10 ⁶	10 ³	吸湿水	11) 風乾土	
5	10 ⁵	10 ²	膨潤水		
4	10 ⁴	10	毛管水		
3	10 ³	1	毛管重力水	PL ⁽¹²⁾	
2	10 ²	10 ⁻¹	毛管重力水	LL ⁽¹²⁾	
1	10	10 ⁻²	重力水		
0	1	10 ⁻³	重力水		

表一 pF値と水分形態およびその測定法

の水量であり、また pF 非分離水量とは、その測定 pF 値よりも大きい、つまり pF 値 7 (105°C 乾燥に相当する) までの水量である。そして、その結果は乾土あたりの水量 (%) として表示される。

ところで、上述のように、土中水のエネルギーの表示は、pF で普通行なわれている。そして、表一に示すように、pF とはそのエネルギーに相当する水柱の高さ (cm) の常用対数で表わされる。たとえば、pF 値 3 とは 1000cm の水柱と等しい圧力 (すなわちほぼ 1 気圧) をいうのである。

また、理論的には、pF は次式で定義されている。

$$pF = \log P, \quad P = \mu_0 - \mu \dots \dots \dots (1)$$

上式において μ は問題とする土中水の化学ポテンシャル (土中水単位質量当りの部分自由エネルギー) であり、重力場に対してなされる仕事を水頭の単位で表わしたものである。 μ_0 は規準状態 (1 気圧、常温) にある純水の化学ポテンシャルである。したがって、P は規準状態に対する化学ポテンシャルの低下量であり、内容的に前述の水柱高と同じものである。

さらに、pF に影響を与える諸要因のうち重要なものを取り出すならば、P は次式で表わされる。

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_0 \dots \dots \dots (2)$$

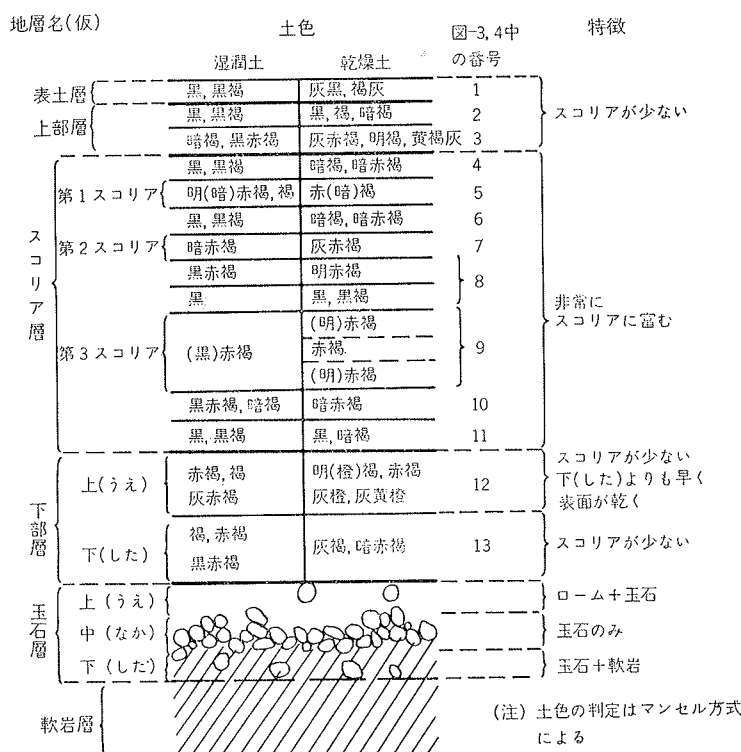
ここで、 P_1 は毛管作用に関する項で、水と空気との界面張力に基づく化学ポテンシャルの低下量。 P_2 は浸透圧作用に関する項で、無機塩類のような溶質の存在による化学ポテンシャルの低下量。 P_3 は土粒子との相互作用に関する項で、土粒子界面に近い水分子が土粒子の静電気力とファンデルワールス力の影響を受けるために起こる化学ポテンシャルの低下量。 P_0 は相圧で Nerpin, Derjaguin の定義した間ゲキ水圧に相当する。熱平衡にある水はすべて同じ化学ポテンシャルをもたなければならないから、 $(P_1 + P_2 + P_3)$ に P_0 を加えた和は場所によらず一定となる。つまり、 P_0 は $(P_1 + P_2 + P_3)$ と相補的な意味をもつ項である。

3. pF水分量測定による愛鷹ロームの地層区分

3.1. はじめに

東名高速道路のうち、当社は愛鷹山麓の愛鷹西工区 (Sta. 508+86, 静岡県駿東郡原町大字石川から Sta. 586+29, 静岡県沼津市大字東熊堂まで、延長 7,743m) を施工している。

本工区の地質は、第四紀になってから、愛鷹山、古富士について富士山の火山灰が、逐次、堆積してできたものであり、通称「愛鷹ローム」と呼ばれる関東ロ



図一 愛鷹ロームの層序 (模式図)

ームである。愛鷹ロームの全層の厚さは約10~20mであるが、堆積当時から今日までの間に、種々の地殻変動や風化作用を受けてその層序は非常に複雑である。

また、愛鷹ロームは、関東ロームのうちで最も自然含水比は高く(100~280%)、しかも、練り返しによるトラフイカビリティーの低下もきわめて大きいことを現場で経験している。

ところで、本工区内の数ヶ所で、主として土色によって地層を区分した結果、図一1のように、土層断面を模式的に表わすことができた¹³⁾。

この土色による地層区分の妥当性を確認する一手段として、pF 水分量を測定した。その結果、本文に述べるように、pF 非分離水量による地層区分は上述の土色によるものとよく一致することが判明した。

以上の成果に基づいて、当工事現場においては、これまで同一に扱っていた各層を、A層(表土層および上部層) B層(スコリア層)、C層(下部層)、D層(玉石層以下)と命名し、各層について施工法を検討しながら工事を進めている。

3.2. 試料

試料採取は、図一2に示す本工区内の4ヶ所を選んで、昭和42年2月におこなった。

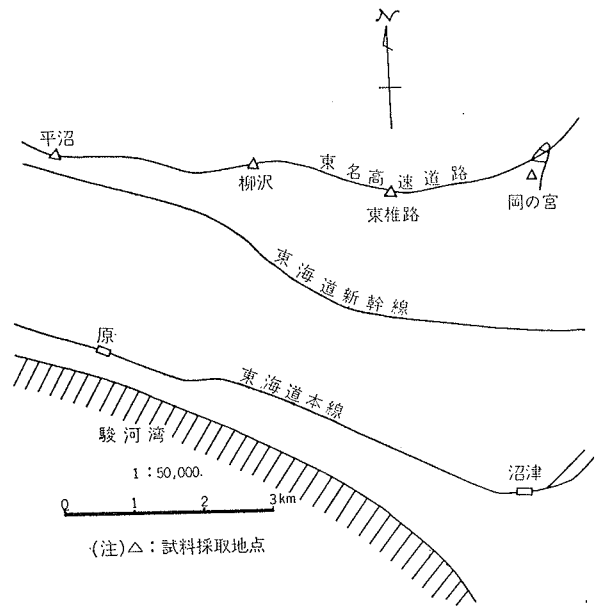
3.3. 測定法

遠心分離法にて、pF 値 4.2, 3.3, 3.0, 2.5 における乱さない試料のpF水分量(2.参照)を測定した。

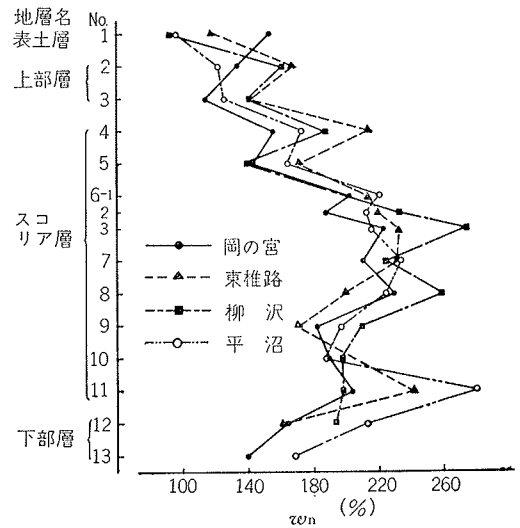
3.4. 結果と考察

土色によって分類した同一地層の含水比を各地点と比較し、図一3に示した。同図から、土色によって分類した同一地層の含水比は、各地点間でかなりのバラツキがみられた。

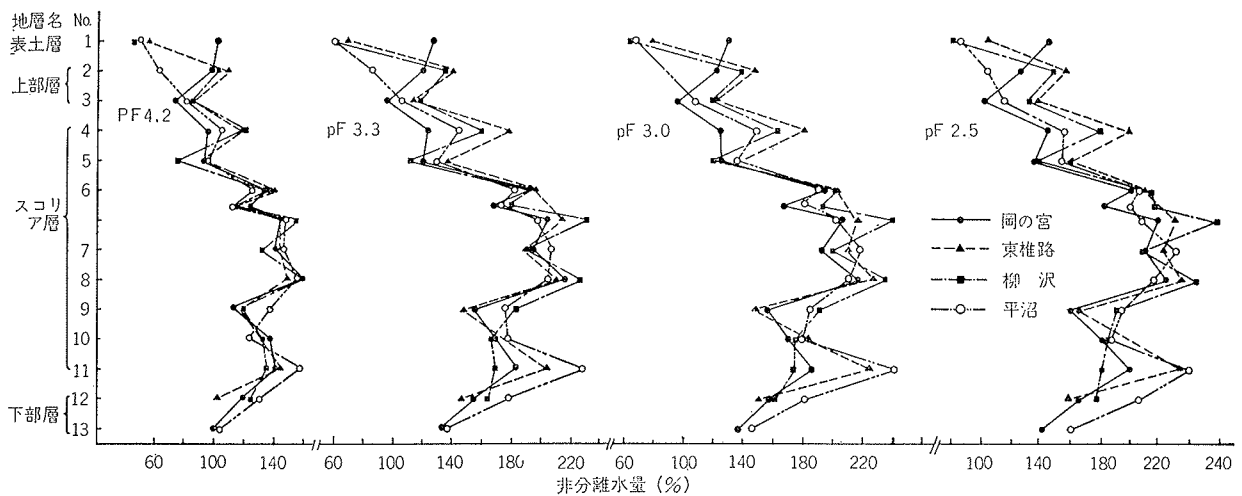
次に、pF 非分離水量を測定し、その結果を図一4に



図一2 試料採取地点



図一3 愛鷹ロームの自然含水比 w_n



図一4 愛鷹ロームの pF 非分離水量

示した。含水比の場合と比較して、同一地層における pF 非分離水量は、pF 値が大きくなるほど、そのバラツキが小さくなっていた。しかも、層序として検討すると、採取地点とは無関係に pF 非分離水量は一様に変動する傾向が認められた。すなわち、非分離水量はスコリア層 > 下部層 > 上部層・表土層の順で少なくなった。この傾向は前述 (図-3) の含水比の場合よりも明瞭であった。

また、各層において、一般に pF 非分離水量は黒色土に多く、赤、茶、黄色土に少ない傾向が認められた。これは、黒色土が有機物を含み、より親水性であることに基因すると推定される。

以上の諸結果を次のように解析した。すなわち、土の含水比は内的要因としての土の種類、構造などに影響を受けるだけでなく、外的要因としての気候によっても大きく影響される。しかるに、pF 非分離水量は、測定条件を考慮すれば、土の内的要因のうち、特に土の種類によって最も影響を受けているものである。その場合、大きい pF 値の非分離水量に、この影響が顕著に見られるはずである。事実、図-4 で明らかなように、各地層において、採取地点間のバラツキは pF 値が大きくなるほど、小さくなっている。このようにして、pF 非分離水量の測定結果から、土色による地層区分の妥当性を裏付けることができた。

一方、pF 分離水量では地層を区分することができなかった。これは、pF 分離水量が含水比と同じように外的条件から大きな影響を受けるので、当然のことである。

なお、昭和42年8月、地質関係者 (愛鷹ローム研究会) によって、愛鷹ロームの地質調査が行なわれた結果、図-1 の地層区分が妥当であることが立証された。

さて、施工と関連して愛鷹ロームの工学的性質、特にコーン指数 q_c と各地層との関係を簡単に説明する。

表-2 に、各地層の q_c 値を示した。同表において、乱さない土 (地山) の q_c 値は、B 層 (スコリア層) > C 層 (下部層) > A 層 (表土層, 上部層) の順であった。注目すべきことに、この順位は上述の非分離水量の場合の順位と同じである。

次に、表-2 で、いずれの地層も練り返しによって q_c 値は著しく低下していた。ところで、 q_c からトラフィカビリティーを論議する際、練り返しによる q_c 値の低下の経過およびその最低値が問題になる。本実験結果によれば、B 層のトラフィカビリティーが A 層、C 層よりまさっているといえる。

このように各地層間で力学的諸性質が異なるという

* 練返し回数	A 層 (表土層, 上部層)	B 層 (スコリア層)	C 層 (下部層)
0 (地山)	kg/cm ² 11.0	kg/cm ² 17.7	kg/cm ² 14.9
1	6.5	9.1	6.4
2	4.7	8.5	4.5
3	3.8	6.7	3.2
4	3.1	6.0	2.8
5	2.4	5.1	2.2
6	2.1	5.1	2.1
自然含水比	167%	229%	173%

*KODAN A 1210 の突固めによる練返し、すなわち、1 回目の練返しは CBR 用モールドに試料土を 3 層に分けて入れ、各層について 55 回突固める。2 回目以後は前回の試料をほぐして再び 3 層 55 回に突固める。

表-2 愛鷹ロームの練り返しがコーン指数 q_c に及ぼす影響

ことは、施工に際して、あらかじめ地層区分を行ない、各層の力学・工学的諸性質を把握する必要があることを示唆している。

なお、含水比が変化しないのに、練り返しによって q_c 値が著しく低下するのは、土の構造、密度などの変化以外に、水のエネルギー状態の変化が関与していると考えられる。しかし、本実験の都合上、pF 水分量は測定できなかった。次章では、これに関連して練り返しによる土中水のエネルギー状態の変化について説明する。

3.5. まとめ

東名高速道路愛鷹西工区の土工に先だて、複雑な層序を示す愛鷹ロームの地層区分を、主として土色によって行なった。そして、この分類の妥当性を土中水のエネルギー状態すなわち pF 非分離水量を測定することによって証明した。

また、この地層区分の妥当性が、後日、地質調査からも証明された。かくして、pF 水分量測定が地層区分の一手段として有効であることを明らかにすることができた。

なお、層序を考慮した施工が非常に重要であることを、土の力学的性質と関連して示唆した。

4. 立川、愛鷹ロームの練り返しについての pF 的考察

4.1. はじめに

前章で説明したように、一般に、関東ロームは、その含水比がきわめて高いにもかかわらず、練り返しがないとかなりの強度をもっている。しかし、一度練り返すと軟弱化し、土木施工において、そのトラフィカビリティーが著しく悪くなる。この事象に、土の構造

や密度の変化以外に、土中水のエネルギー状態の変化も関与していると考え、本章では、練り返しによる pF 水分量の変化を検討した。

4.2. 試料および測定方法

(1) 試料 立川ローム(当技研内で採取)および愛鷹ローム(沼津市東椎路で採取, 図一1の下部層の上に相当するローム)を供試した(それぞれの自然含水比は135, 163%であった)。

練り返しは次のようにして行なった。自然含水比の供試土150gをビニール袋にとり, 土中水が蒸発しないように密栓し, 両手で土を板の上に押しつけて, ころがすようにした。その練り返し回数は0, 750, 1500, 3000回であった。

(2) 測定方法 3.3に前述した同じ方法でpF水分量を測定した。

4.3. 結果と考察

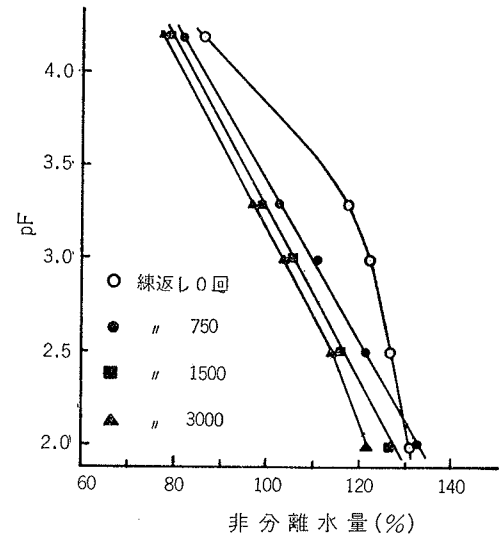
以下に説明するように, 関東ロームは練り返すことによって多量の土中水を分離(自由水化)した。この現象によって練り返しによる土のトラフィカビリティーの低下を間接的に把握することができる。また, 分離水が生ずる程度は, 同じ関東ロームであっても, 立川ロームと愛鷹ロームとは異なることが判明した。

さて, 図一5および図一6において, 立川ロームおよび愛鷹ロームを練り返した際の pF 非分離水量の測定結果を図示した。練り返さない場合(不攪乱土)の非分離水量に比べて, 練り返した場合の非分離水量はいずれも減少している。このことは, 練り返すことによって, 練り返さない場合の非分離水の一部が分離水(自由水)になったことを示す。また練り返し回数が増すにつれて, より多く土中水が分離した。

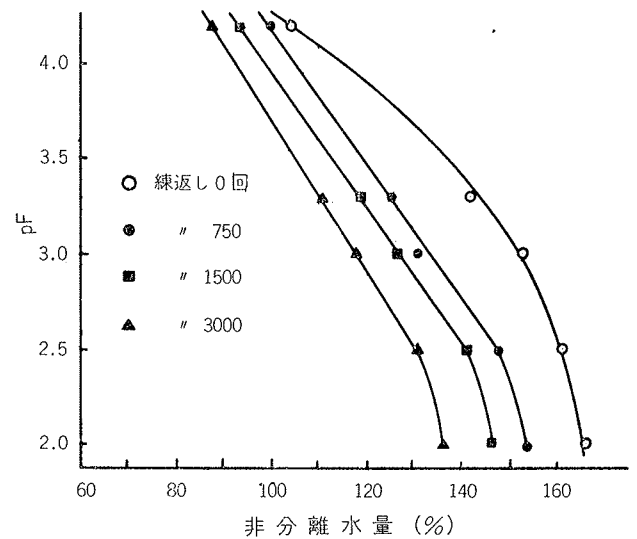
ところで, 立川ロームでは, pF 値 3.5~3.0の範囲で, 最も多く分離水になった。たとえば, 練り返し数3000回, pF 値3.3において, 不攪乱土の非分離水量のうち約18%が分離水になった。さらに, 図一5に示すように, 立川ロームでは, 練り返し1500回と3000回とで, その pF 非分離水量の差が僅少になっている。いいかえれば, かかる練り返し条件下では, さらに練り返し数を増しても分離水が出にくいと判定された。

一方, 図一6に示したように, 愛鷹ロームでは, 立川ロームに比べてpF4.0~2.0の全域にわたり, 練り返しによって, はるかに多量の土中水が分離水になっている。さらに, 愛鷹ロームでは, 練り返し数3000回でもその pF 非分離水量の減少が明らかに認められた。いいかえれば, さらに練り返し回数を増すことによって土中水は分離水になると推定された。

ところで, 3章において説明したように, 愛鷹ロー



図一5 練り返しによるpF非分離水量の変化(立川ローム)



図一6 練り返しによるpF非分離水量の変化(愛鷹ローム)

ムの強度 (q_c) は, 練り返すことによって著しく減少した。その際, その実験の都合上, 練り返したときの pF 水分量を測定することができなかった。しかし, 上述のように, 愛鷹ロームを練り返すことによって, その pF 非分離水量は著しく減少していた。いいかえれば pF 分離水量は著しく増えていた。したがって, 3章における練り返しによる強度低下には, 土中水のエネルギー状態の変化が大いに関与していると推察された。しかも, 現場の経験によれば, トラフィカビリティーの低下は立川ロームよりも愛鷹ロームで顕著であるといわれている。この事象は, 上述のように, 練り返し時の愛鷹ロームの分離水量が立川ロームのそれに比べてきわめて多いことと一致しており, 今後, 現場における研究課題である。

なお、このように練り返しによってpF水分量が変化するの、これら土が主として非晶質の粘土鉱物アロフェンで構成されていることに基因すると推察される。この問題についても、今後の大きな研究課題である。

さらに、以上の実験ならびに考察結果は、関東ロームの強度低下を防ぐためには、なんらかの方法で単に含水比を下げればかりでなく、土中水のエネルギー状態を工学的に好ましい状態にしなければならないことを示唆している。そこで、筆者らは、化学的に土中水のエネルギー状態を改善する方法の1つとして、生石灰処理工法を取り上げ、第2報に報告する。

4.4. まとめ

関東ロームが練り返しによって軟弱化し、トラフィカビリティーが低下する現象に、土中水のエネルギー状態の変化も関与していると考え、土の練り返し時におけるpF水分量について室内実験を行なった。その結果、立川ロームおよび愛鷹ロームのいずれにおいても、練り返しによって土中の非分離水（非自由水）の一部が分離水（自由水）になった。その際、この傾向は愛鷹ロームにおいて著しいことが判明した。この現象は、土工上、トラフィカビリティーの確保が立川ロームよりも愛鷹ロームでむずかしいという現場経験と一致していた。

そして、土の力学・工学的性質を改善するために、土中水のエネルギー状態を、なんらかの方法で変化させることも重要であると判断した。

5. おわりに

関東ロームのような高含水比火山質粘性土の工学的諸性質に及ぼす土中水の影響を、量的にだけでなく性質的にも考察しなければならないと考えた。

本報では、かかる土の化学的改良工法を研究するに先立ち、まず2章で土質工学的見地から土中水の性質つまりエネルギー状態を表示する指数pFについて、また、pF水分量の測定法について概説した。

さらに、関東ロームの立川、愛鷹ロームを用いて、土質工学の分野におけるpF水分量測定の有用性を二、三の室内実験から証明した。すなわち、3章では、道路施工と関連して、複雑な層序を示す愛鷹ロームをpF非分離水量で地層区分した結果について述べた。また4章では、練り返しによるトラフィカビリティーの低下に、土中水のエネルギー状態の変化も関与していると考え、練り返し時にもなるpF水分量の変化について述べた。

同時に、土中水のエネルギー状態をなんらかの方法

で変化させることにより、土の力学・工学的性質を改善することができると判断した。

試料採取、その他において、当社東名沼津工事々務所にお世話になった。記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 関東ローム研究グループ：関東ローム——その起原と性状——，築地書館，(1965)
- 2) 岩田：土壌水のエネルギー概念について，土肥誌32，(1961)，572
- 3) 最上，渡辺：平易なる土質工学，土質工学会，(1961)
- 4) 久野，西堀：関東ロームの含有水分に関する研究（その1，2）土木学会総会，(1966,1967)
- 5) 竹中：土壌水のエネルギー概念pFの工学的検討，土壌の物理性，14，(1966)，21
- 6) 竹中：収縮挙動より見た土の工学的性質，農土論集，14，(1965)，32
- 7) 山崎，竹中：風乾がアッタベルグ限界に及ぼす影響，農土論集，14，(1965)，46
- 8) 安富，竹中，須藤：工学的にみた土の剛性率，降伏値とpFについて，農土論集，14，(1965)，49
- 9) 竹中，安富：pFの軟化と硬化について，農土論集14，(1965)，54
- 10) 妹尾：土壌水エネルギー指数pFによる土壌構造の考察，農土論集，14，(1965)，11
- 11) 寺沢：土壌水の吸引力(pF)の測定法，土壌の物理性11～12，(1965)，69
- 12) 山崎，須藤：土の工学的挙動——関東ロームを中心として——，農土論集，14，(1965)，1
- 13) 喜田，中田：東名高速道路愛鷹西工区 工専用道路の土層断面の層位状況，社内報告66—161，(1967)
- 14) 喜田，中田：高含水比火山灰質粘性土における生石灰処理——土の化学的改良に関する研究（第2報）——，本所報，155