

火山灰土の土工上の諸問題

— 関東ロームを中心として —

安 富 六 郎*

1. はじめに

関東ロームは工学的に多くの問題をもつ代表的な火山灰土といえる。関東ロームは自然含水比がいちじるしく大きいにもかかわらず、構造性が強いので地耐力または強度、耐食性が強い。しかし一旦構造をこわすと強度は極端に低下し、水にも分散しやすくなる。くずされた土の盛土時の転圧効果も小さい。このため関東ロームを土工材料に用いる場合、施工過程におけるねり返しによる強度低下や、粘着性増大などによる作業困難が生ずる。また構造性をこわされた土は侵食を受けやすく、造成後の維持管理にも難点が多い。今後十分な対策を考えることが必要である。とくに盛土ノリ面保護は今後にこのされた課題といえる**。

ここでは主に関東ロームの工学的性質に関する東大山崎研究室の研究を紹介する。このことにより実際問題への解決の手がかりが示されれば幸である。

2. 地層的特徴

1) 地層分類 関東ロームの地層分類は関東ローム研究グループ*** などの考えに従っておこない、立川ローム層、武蔵野ローム層、多摩ローム層の物理性、工学性をしらべた。試料採取は東京三鷹天文台南西の段丘のガケ、神奈川県生田、鶴川、および東京都多摩町の多摩丘陵などで行なった。粘土鉱物判定に電子顕微鏡を補助的に用いた。

立川ローム層：アロフェンを主とする関東ロームで、時代的にもっとも新しいものに属する。

武蔵野ローム層：立川ローム層より時代の古いもので、アロフェンからやや結晶化の進んだ（加水）ハロイサイトを主成分とする。

多摩ローム層：以上の二層とくらべ、もっとも地質的

に古く、結晶化の進んだハロイサイトを主成分とする。一部は海成ともいわれている。

三層の関係は通常は表層に立川ローム層、最下層に多摩ローム層がある。各層は関東平野の各段丘で表面に露出しているが、侵食によって必ずしも共存しない。

2) 粒度分析、充填状態 表-1に示すように、生田の立川ローム層は固相率%がもっとも低く、多摩ローム層はもっとも高い。気相率は逆の傾向を示す。pF 3 水

表-1 関東ロームの物理性（生田の関東ローム）

	立川ローム層 (85cm)	武蔵野ローム層 (350cm)	多摩ローム層 (780cm)	
真 比 重	2,790	2,760	2,808	
仮 比 重	0.480	0.650	0.690	
透 水 係 数 cm/sec	1.1×10^{-2}	8.4×10^{-3}	4.1×10^{-4}	
現 場 含 水 比	136.6%	86.5	98.6	
固 相 %	17.2%	34.5	36.0	
液 相	52.1	50.0	62.3	
気 相	30.7	19.5	1.9	
粒 度 分 析	粗 砂	2.2%	3.9	8.5
	細 砂	18.6	13.9	19.5
	微 砂	45.4	28.7	36.0
	粘 土	33.8	53.5	36.0

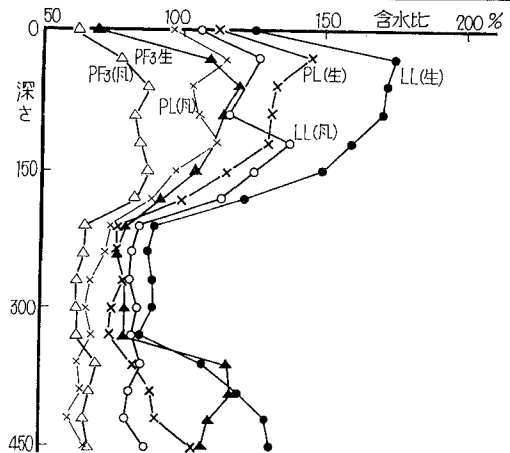


図-1 関東ロームの深さ (cm) による物理性の変化 (鶴川の関東ローム)

* 東大農学部

** 青柳, 的場, 滋賀, 長島, 百瀬, 関東ロームの盛土ノリ面の研究 東大農学部農業工学科 昭和42年度卒論

*** 関東ローム研究会編 関東ローム 築地書館 (1964)

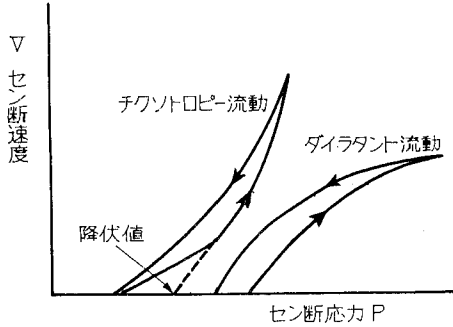


図-2 流動曲線(コンシステンシ曲線) 関東ロームベースト(立川ローム)

分は立川ローム層が最大で、武蔵野ローム層が最小である。鶴川の例では pF 3 水分アッターベルグ試験などについても図-1にみられるように深さ別の大きなグループに別けられる*。

3. 工学的性質

1) 流動特性 関東ロームを水に分散させたサスペンションの流動特性の基本形は図-2に示される。立川ローム層の生土の場合、外力Pの増加と共に(流動性を示す)ずり速度Vが増大するチクソトロピー流動を示す。風乾土は外力増加と共に流動性が減少するダイラタント流動を示す**。このことから関東ローム生土は外力を加えると流動性が増すようないわゆる軟化現象があり、風乾土では硬化現象のあることがわかる。

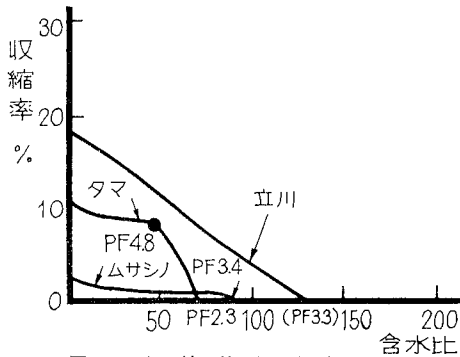


図-3 収縮特性(竹中)

2) 収縮特性*** 収縮率と pF の関係が図-3に示されている。立川ローム層生土は高 pF まで一様な収縮率の増大を示すが武蔵野ローム層は収縮率は低く平坦な曲線を示す。多摩ローム層は pF 4.8 に至るまでは一様な収縮率の増大があるが、それ以上の pF では平坦とな

* 扇原, 相馬, 山中, 山崎 関東ロームの練り返しによる強度変化 東大農業工学科昭和41年度卒論

** 須藤清次他農研別冊 No. 7 関東ロームの工学的特性 (I) p. 92 (1963)

*** 竹中肇 農研別冊 No. 14 収縮挙動より見た土の工学的性質 p. 32 (1965)

る。これらの収縮挙動はつきかためにおいても特徴的に表われるものと予想される。

3) アッターベルグ限界* 液性限界 LL の変化は関東ローム各層の特徴をよく現わしている。鶴川の例では(図-1), 表面0から180cmまで立川ローム層でそれ以下に武蔵野ローム層, 多摩ローム層がある。LL は浅い所で大きく, 深い所は小さい。しかしごく表面は風乾を受けたため値は小さい。生田の例では各層のもっとも平均的な LL を示す(図-4)と, 立川ローム層は170%, 武蔵野ローム層は107%, 多摩ローム層は108%である。風乾によって立川ローム層は120%, 武蔵野は92%, 多摩は105%といずれも減少する。

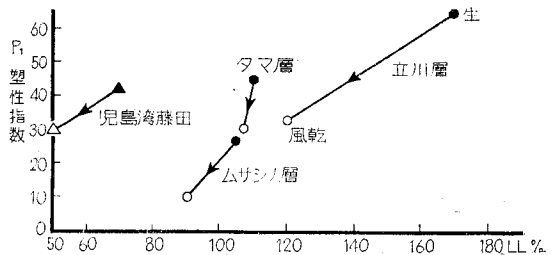


図-4 関東ローム塑性図(生田の関東ローム)

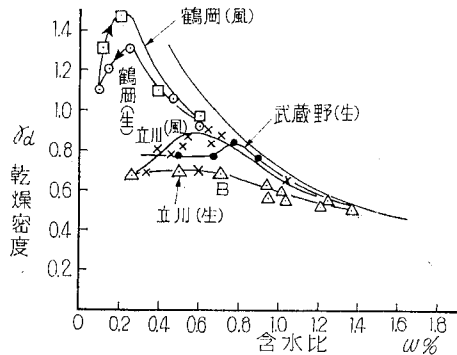


図-5 つきかため曲線

塑性限界 PL についても LL の変化と同様な傾向がみられる。

4) 突固め** 関東ローム生土の突固め曲線は乾燥密度 γ_d の明瞭な極大値のないことが特徴である。立川ローム層については生土から次第に乾燥させてゆくと, γ_d はゼロ空けき曲線に添って増大するがやがて減少しはじめる。さらに乾燥して塑性限界付近になると再び γ_d の増加がみられる。しかし, 図5に示すように生土の γ_d の変化は小さく乾燥土の場合にみられる明瞭なピークはない。武蔵野ローム層については立川ローム層とやや異

* 山崎不二夫他 農研別冊 No. 14 風乾がアッターベルグ限界に及ぼす影響 p. 46 (1965)

** 須藤清次他 農研別冊 No. 7 関東ロームの工学的性質 p. 98 (1963)

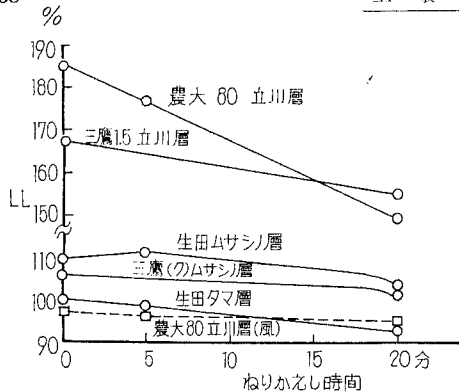


図-6 ねりかえしによる液性限界の変化

なり、ピークを示す傾向がある*。

以上は関東ロームが自然状態で多量の水をもつことが原因と考えられるが、各層の粘土鉱物アロフェンの結晶化の程度と密接な関係があると思われる。風乾によってこれらの特徴は失なわれる。

5) ねり返しによる力学的特性の変化 関東ロームではねり返しによる力学的特性の変化は非火山灰土と比べいちじるしく大きい。ねり返しは約 500gr の土をビニール袋につめ、足で踏みつけて行なう。時間は0, 5, 10, 20分と4段階である。

アッターベルク限界は一種の強度の指標であると考えられるから、ねり返しによる LL, PL の変化は土の力学的変化を示すものといえる。立川ローム層の LL は、0分ねりの180%が20分ねりでは150%へ低下する。多摩ローム層でも同様な低下の傾向がみられる。武蔵野ローム層ではねり返し時間を増してゆく過程で一旦 LL が高まるが、充分時間をかけてねると低下する。風乾土では、ねり返しによる LL 低下は生土に比べいちじるしく少ない。表土の LL がねり返しによりむしろ増大の傾向を示すことも関東ロームの工学的特徴の一つといえる。

表土のように風乾効果を受けたものでは、突き固め**によって pF 曲線は上方に移行する***。心土生土では

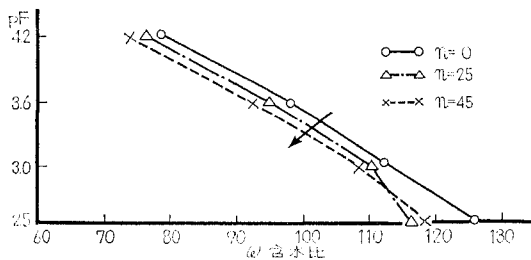


図-7 心土の突固め (n: 突固回数)

* 荒井, 須貝早川, 洪 関東ロームにおける表土・心土の物理的・工学的性質の比較検討 東大農業工学科 昭和43年卒論

** 突固めはねり返しと同様の効果をもつ

*** 宮内定基 東大農工43年度修士論文

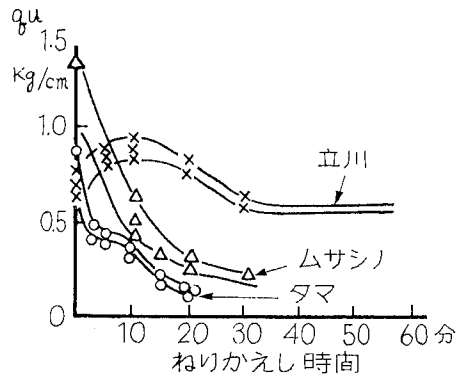


図-8 ねりかえし時間と一軸圧縮強度 (生田の関東ローム)

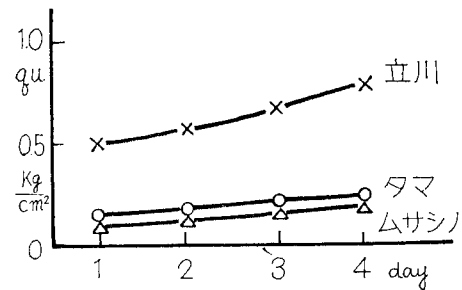


図-9 ねりかえし後の強度回復

pF 曲線は下方に移行する (図-7)。

自然含水比付近でねり返した試料について一軸圧縮試験器で強度 q_u を求めると、図-8 のようになる。立川ローム層の q_u は短時間のねり返しでは増大するが、長時間のねり返しでは低下する。武蔵野、多摩ローム層では短時間のねり返しによっても q_u は急激に低下する。

ねり返し後の強度 q_u の回復はかなり長時間にわたって続く、立川ローム層についてねり返し後1~2日の q_u 変化を追ってみると、かなりの回復がみられる。

4. 土工における軟化現象について

以上に示ような関東ロームのねり返しによる工学的性質的变化は機械施工過程でみることができる。

生田における盛土のブル転圧 (NTK 4 による) でコーン指数は転圧後むしろ低下して $1/2 \sim 1/3$ になった。この低下は土がねり返しを受けたための軟化とみなせよう (図-10)。

NTK 4 をけん引車とした場合のけん引力 P とスリップ率 V' との関係は、切土部分 (不攪乱土) では10%スリップで最大けん引力に達し、それ以上の力をかけると急に100%スリップになってしまう。盛土部分 (攪乱土) ではスリップ率の増加と共にけん引力は増加する* (図-11)。

* 竹中肇他 農土研別冊 No. 14 関東ロームにおける土工 p. 76 (1965)

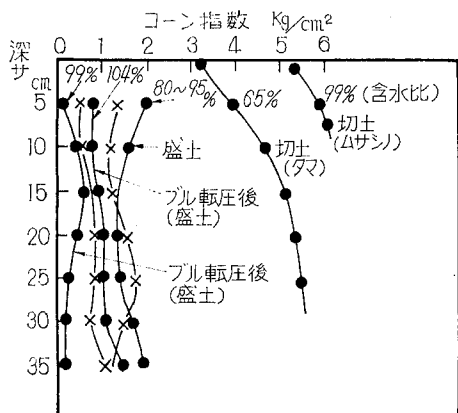


図-10 現場コーン指数のフル転圧による変化(生田の関東ローム)

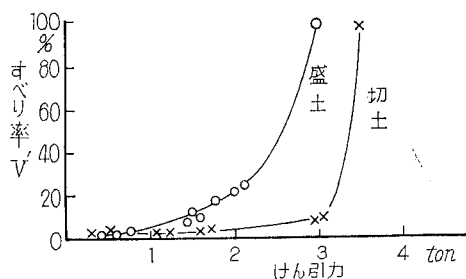


図-11 すべり率 (V) とけん引力 (P) (生田の関東ローム)

ブルトローザのスリップ率 V' はクローラによる土のせん断速度 V に比例するとすれば、このスリップ率とけん引力曲線(図-11)は先に述べた流動曲線(図-2)(コンシステンシー曲線)に対比させることができる。切土部についての曲線は盛土部に比べて降伏値が高いが、いったん土が降伏してしまうとスリップ率の急激な上昇がみられ、軟化することを示す。

5. 風乾効果とねり返し効果についての考察

以上の風乾またはねり返しによる関東ロームの工学的性質の変化は次のように考えることができるであろう。風乾またはねり返し効果は(土・水系としての)土壌が「親水的」から「疎水的」へ変化した結果生ずるのである。ただしここでいう「親水的」という言葉は一定応力下で土を脱水させても通常の土とくらべ多量の水を保持しているという意味である。「疎水的」という言葉は「親水的」という言葉に対して用いた。

風乾またはねり返しを受けた上の LL はねり返しを受けない生土の LL より低い。このことは風乾またはねり返しによって土中水分の強度に寄与する効果が減少したことを意味する。これらの事実は流動特性、一軸試験からも知ることができる。また pF 曲線の下方向への移行は「親水的」なものから「疎水的」なものへの変化を裏がきする。

立川ローム層生土の突固め曲線に明瞭なピークが現れないのは次のように理解できる。突固め作用による土粒子の疎水化によって粒子相互の潤滑性が増大し、粒子充填が高まる。このため図-5におけるB点付近では粒子間の摩擦減少がある。同時に土粒子の収縮量も乾燥に従い増大するので γ_d の増加に寄与するから、明瞭な γ_d の低下は生じない。一方武蔵野ローム層の場合には、立川ローム層の場合よりも突固めによる拘束水の自由化は少なく、乾燥が進むにつれて摩擦抵抗は増大する。同時に土粒子の収縮も立川ローム層の粒子より小さいのでこれらの効果が総合されて γ_d の低下が立川ローム層よりも大きいと理解できる。

非排水状態のねり返しでは土の構造中に含まれている拘束水が解放されて自由水となり(「疎水的」になり)、この自由水が粒子間の潤滑剤になり軟化すると考えられる。これとは逆にねり返しによって土粒子が細かく分かれて新しい吸着面が生ずる場合は、自由水が拘束水に変わり(「親水的」になり)硬化する。LL の増大、 q_u の増大もこのことが原因である。図-8の立川ローム層の q_u が一旦増加後、さらねり返すことにより低下するのは軟化と硬化の競合作用によるものであろう。

関東ロームは一般に強い骨格構造をもち、しかも高い含水比をもつ。山形大の須藤・東山氏のいうように、立川ローム層はアロフェンが多量の水分を拘束し、それがゲル状の蜂巢構造をもち親水性の強い状態にあると考えられる。このような土はねり返しまたは風乾効果が大きい。多摩ローム層では(加水)ハロイサイトの発達が目立ち立川ローム層よりも「疎水的」になっている。したがってねり返し、または風乾効果は立川ローム層よりも小さい。武蔵野ローム層では LL, PL などが立川、多摩ローム層両者の性質を兼ねた場合が多い。粒子表面の活性は立川ローム層より低くハロイサイトの結晶化も未発達であるためと構造的拘束が少なくみなしうる。拘束水も図-1, 図-4, 図-6 からわかるように以上三つの中でもっとも少なく、「疎水的」であり、ねり返しまたは風乾効果は小さい。

風乾とねり返しによる工学的性質の変化は基本的には粒子が「親水的」なものから「疎水的」なものへ変化することによって生ずる。ねり返し効果は非排水条件下での工学的性質の変化であり、風乾効果は自由水排水条件下でのねり返し効果に対応する。

6. おわりに

以上のように関東ロームの土工上の重要な特性として、風乾による「疎水化」の他にねり返しによるいちじ

しい強度低下と、それに基づく走行性の悪化、および転圧効果の低いことがあげられる。関東ローム地帯の農地造成あるいは農地整備の施工管理において、関東ロームのこの特性は常に十分考慮されなければならない。

なおここで用いた図表の多くは研究室から借用した。またこの報文をまとめるにあたり山崎先生はじめ研究室の多くの人々の援助を受けた。また電子顕微鏡写真については小野田セメント中央研究所内川研究グループ、ブルドーザのスリップ試験については幾久建設の中尾氏、また地質調査については農工大黒部隆氏、資測研松井健氏らのお世話になった。記して謝辞とする。

〔討論〕

土井淳多（東大農） ねり返しについて：ねり返しのあるいはこね返し的基本的概念とその定量的測定法について説明してほしい。

永田慧（鹿島建設） ねり返しによる関東ロームの強度低下は過剰間ゲキ水圧の発生によるとの説がある。ねり返しにより拘束水が自由水に転化するという考えがよく理解できない。

沖積粘土ねり返しによる強度低下と関東ロームのねり返しによる強度低下とは質的に同じものであるかどうか。

横井肇（農技研） ねり返し効果は水の飽和の程度の変化があって起る可能性もある。これについてはどのように考えるか。

中村忠春（愛媛大農） ねり返しによるLLの変化は、生土を試料にもちいた場合には、測定時加水の方向で測定するか減水の方向で測定するかで値に大きく影響があるのではないか。関東ロームのように鋭敏な土ではねり返しの影響よりもこの方の影響が大きくなるだろうか。

永田慧 拘束水と自由水の区別をどう考えるか。また両者を定性的にまたは定量的に確認する方法があるか

岩田進午（農技研） 土粒子が水を保持する力がpFとの関連で数量的にあらわされれば、あるpF以上の水はある力に対して拘束水であるという表現が可能か

美園繁（農技研） 拘束水は音波振動によっても自由化するか。

松井健（資源研） 多摩ローム層中のハロイサイトの層間の水は一種の拘束水と思われるが、外力を加えて自由化することはないか。

美園繁 拘束された水すなわち蜂の巣構造の中の水ということによって、風乾によってLLが減少するというこ

とが説明されるか。

火山灰土壌の固相率は各講師がいろいろにきわめて小さく、水分率は大きい。したがって素朴なモデルでは火山灰土は水の中に固相粒子が浮いているようなものと考えられる。ところが“拘束”されたということになると固相粒子に囲まれた水というモデルになる。このようなモデルを考えねばならなかった実験的根拠はどういうことなのか。

松井健 蜂の巣状構造とは実験的にどの程度のオーダーのものか。

多田敦（農土木試） 拘束水の内容には粒子表面にひかれている水と封じられたPore内の水の両方があると思う。大きなスケールでみると、封じられた水は吸引法と顕微鏡法の差でみとめられるが、これだけでは関東ロームの拘束水全てを説明することはできず、おそらくさらに小さな粒子の構造も関係してくると思う。

佐藤裕一（水資源開発公団） 土の破壊は土一水系の化学ポテンシャルが増加するからであると考えているか、セン断破壊の場合には、土一水系の化学ポテンシャルの増加がセン断面で最大になると考えてよいか。また、セン断面での粒子のオリエンテーションが化学ポテンシャルの増加と結びつけられるのか。

土井淳多 土工の際生ずる応力をequivalentなpFで表現すればどの位か。

佐野文彦（茨城大農） 現場員の一般的な概念として、土中に水が多いとその強度は低いと考えている。安富氏は親水的、疎水的という言葉を用いて説明しているが、水の多い方が強度が大であるような感じを受ける。「疎水的」な土は水は脱水されやすいかもしれないが、工学的性質を問題にする限りにおいては、風乾の場合は別として、ねり返しの場合は水は土そのものからは脱水されずに土中に残っており、土の強度に悪い影響を及ぼす水は多い。「親水的」といっているのは、土粒子が多量の水分を拘束するという意味からは親水的であるが、強度に悪い影響を及ぼす水分が土中には少ないという意味では「疎水的」ではないだろうか。

土中水分の強度に寄与する効果をのべているが、この意味ははっきりしない。水を拘束できる構造そのものが強度に寄与するものであろうが、土中水分のある程度の存在がその構造形成に寄与しているのであろうか。現場的なセンスからいうと、土中から水を抜くことは土の強度を増大するために有効な対策であると思っている。風乾も水を抜くための手段の一つである。しかし本論では風乾が有利であるのか不利なのか判定がつかない。もし有利であるとすれば、どの程度の脱水で効果があるの

か。土を取扱う前にハロー掛けのような方法で土層表面から逐次乾燥させることは効果があるだろうか。

各種の強度指標を用いているが、その結果を比較してみると、必ずしも対応関係がない。試験方法については、土に対する実際の挙動になるべく近い方法で行なうことが必要で、特殊な土には特殊な試験方法が開発されるべきであろう。

こまかい点についてみると、立川ローム層の q_u の変化(図-8, 9)で「長時間のねり返しでは一旦上昇したものが低下する」といっているが、図-8でみる q_u とほぼ元の値に戻っている、低下はみられない。同じように、 q_u の回復について「かなりの回復がみられる」といっているが、ほぼ完全に回復している。またブル転圧についてみると(図-10)、貫入深さをもっと深くまで測定すれば、変化のない深さがわかるだろうか。もしわかれば機械の走行による影響深度が知れると思うが、切土の場合の変化はどうか。

国分欣一(農事試) ブルドーザ走行の際のスベリ率とけん引力の関係(図-11)で、切土部と盛土部でスベリ率に対応するけん引力の増大に差がみられるが、この場合走行部の沈下の差はどうか。

切土部ではスベリ率10%ぐらいから大きくなると「けん引力」の増大が頭打ちになっているが、走行部が沈下しないで滑っているならばもう少し荷重が加わって沈下がともなえばけん引力も増すとと思われるがどうか。

佐野文彦 スリップ率とけん引力の関係はむずかしい問題で、単純には割り切れないと思う。走行装置の接地部と土層との各種の変化に着目しなければならず、土中反力が発生する時の土の拘束状態の実態をまず知る必要がある。

土井淳多 付着しない条件がけん引力(Soil thrust)を増加させる方向であり、ねり返しなどでけん引力が低下する方向が付着を小さくする傾向と思われる。作業機側と原動機側では同一性質の両側面を問題にしている。安富・藍両氏の逆の立場からみた意見をききたい。

徳永光一(岩手大農) 筆者は火山灰地帯における開田工法を研究し、その過大な透水性を克服するために、水田地盤の切土部を耕起破碎(約40cm)してから転圧すると顕著な浸透抑制を示す土層(耕盤)が得られることを確認して来た。この“破碎転圧工法”は、地盤を自然状態のまま転圧する“普通床締め”との対比の中で発展してきたものである。普通床締めよりなぜ浸透抑制効果が高いか、地盤破碎の意義についての知見は、報告者の強調する“ねり返し効果”とも関連が深いので若干の資料を提供したい。

図に示すように火山灰地の貫入抵抗値は、 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ を越えることが多く、標準型ペネトロメーターをそのまま用いては人力貫入が困難または検力計がスケールアウトとなることが普通といつてよい。このように強固な骨格構造をもつ地盤に含まれた粗大孔隙を、地表面からの転

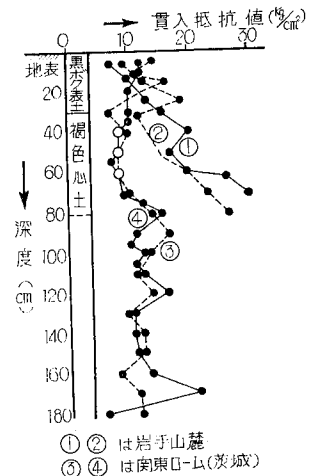


図-12 火山灰地盤のコーン支持力

ことは容易ではない。室内実験によると、JIS 標準突固めエネルギー下で自然構造内の孔げき変形は、直径収縮率で最大20%程度にすぎず、その連続性に関しては原状を変えることはほとんどできないといつてよい(突固め面より-5cmの深度についての実験)。JIS エネルギーを床締めなどの現場転圧に対比すれば、標準的仕様を超える高い仕事量である。しかし、浸透抑制のためにはこれらの粗大孔げきを圧潰し水みちを絶たねばならない。孔げき圧潰のためには骨格の破壊すなわち地盤の降伏が必要となる。

切土部地盤を10数 ton 級のブル履帯で10回通過(普通床締め)した結果、えられる降伏深度は動沈下計の埋設により実測、解析すると転圧地表面から10cm未満である。しかも地表から数cmは履帯爪による攪乱層となり、不透水層としては無効になるから有効不透水層としては、厚い場合で数cm、多くは0~3cmである。同じ地盤を耕起破碎してから転圧した場合は、破碎層底面付近まで塑性変形を生じ、降伏深度は20~25cmとなり有効不透水層厚さも15~20cmが形成される。

破碎による降伏深度増大の主因は、攪乱による地盤土質の強度低下である。掘削採取した生土を自然構造と同一密度にリモールドした試料の q_u 値は、不攪乱土のそれに比し $1/5 \sim 1/15$ と著しい低下を示す。いわゆる“ねり返し効果”である。さらに破碎の意義としては、地盤土質の強度低下から派生する二次的効果すなわち応力集中による転圧力の増大を考えねばならない。強度の低下は、転圧荷重面両端を通過する鉛直面上でのセン断応力の減少を来し、圧縮応力の増大をもたらす。その増強は15~20%と推算される。

しかし、これらの“ねり返し効果”を期待するために

は、転圧時の土壌水分条件が満されねばならない。破碎土が転圧される過程で“ねり”の作用が生ずるのは、かなりの高含水比を必要とする。

安富六郎 質問の要旨は ①自由化とはどのような概念であるか、②セン断強度と化学ポテンシャルはどのように対応するか、③スリップ率とけん引力についてねり返しがどのように問題になるかの三つになるであろう。総括的に次のように考える。

1. 自由化の概念について 従来からの考えによれば、土は粒子の集合体であり、その間ゲキが水が満していると考えた。したがって保水力はすべて毛管力によって生じ、粒子は常に何らかの形でまわりの粒子と直接に接していた。

関東ロームのように固相率が極めて小さく、含水比の大きい土については強度が大きいことから考えて、なんらかの構造(骨格)があって、その中に空気・水が封入されていると考えるのが自然であろう。この骨格は建物の柱のように相互に水膜やノリ状物質で接着された構造をもち、一定の力まで耐えられる強いものと考えられる。立川ロームの比表面は竹中氏によれば、ベントナイトのそれに匹敵するほど大きい。このことから、一般の関東ロームでは吸着水量がかなり大きいゲル状の構造単位が考えられる。このことは関東ロームが自然状態でも他の沖積土などと比較にならぬほど多量の水分をもつこと、また風乾を受けると非可逆的に「疎水的」になることから裏づけられる。

このような構造をもつ土では水の拘束状態は基本的に二つに別けられる。まず一つは表面に吸着された形で拘束を受けている表面拘束水、一つは上述の構造内に外部とは力学的に独立した水が包まれたような形で拘束を受けている構造拘束水である。この拘束水の二つの形態には質的な差がある。しかし量的に大きな差のある場合には両者が共存しないように見える場合もある。例えば八郎潟ヘドロのように表面拘束が大きいことがある。また関東ロームのように間ゲキ率が80%も占めるときは構造拘束水共に多いこともある。

このような拘束水を含む系が外力を受けた場合、拘束水の自由化が生ずる。構造拘束水の自由化は外力で骨格構造が破壊されるとき生ずる。構造拘束水はいままで拘束を離れて流動を始める。表面拘束水の自由化は表面、または内部の表面に拘束された固体的な拘束水が外力によって液体的になり流動する。これは水和水のような粒子に拘束された水が自由水となる場合である。表面拘束水の自由化はゲル状の物質が外力で液体的に変化するのに相当する。このような表面拘束水の化学ポテンシ

ヤルの上昇が拘束水の自由化の内容の一つである。

自由水は系外に排出されなければ粒子相互の変形抵抗(コンシステンシ)を減ずるように作用するであろう²⁾。反対にこれらの自由化した水が系外に排水されるとき、コンシステンシは一見増大するように見えるが、自由化による減少もあるから一概にはいえない。

このように自由化には拘束条件に相当する二つの形式があり、一つは構造を破壊することによって生ずる非可逆的な自由化である。他は表面拘束水が外から加えられた仕事(音波振動も含む)による自由化である。これは土壌水の平均圧(相圧)の上昇を示す可逆的なものである。内容的にはハロイサイトの層間に含まれる水も表面拘束水と同様の性質のものと考えてよいであろう。層間の拘束水は膨潤の原因となるもので、逆に外力によって膨潤を制御できて、可逆的である。しかし自由化には二つの拘束水の自由化が同時に生ずるのが常であり、特別な場合を除きそれらの分離はむづかしい。さらに実際問題としてはねり返しによる自由化と一次粒子の破壊による新しい分割面への水の吸着、すなわち自由水の拘束化が生ずる結果、自由化の内容を定量化することは困難である。自由化の後に放置した場合に時間経過と共に原状態よりも拘束水が増えるのは新分割面への拘束化の現われである。

一般には自由化の速度は拘束化の速度との競合によって決まるから、試料に与える条件、例えば、LL試験における試料の水分変化の方向によるLL値のバラツキも自然現われて来よう。風乾土によるLL値の減少は構造性の減少と疎水化による。

以上から自由化の様子は土の種類、含水量、ねり返し条件によって異なるものであると言える。なお、ここでは拘束水の自由化によって原状態よりも脱水が容易になった場合に「親水的」な系が「疎水的」に変ったと定義する。この場合の逆は自由化の拘束化のときに当る。

2. 剪断の強さについて 土のセン断強度は土・水系の弾性限界強さと考え、クーロン・モールの内部摩擦と粘着力との和として表示できる。粘土のように内部摩擦が粘着力が強度の主要な部分と考えられる。粘着は土・水系での土粒子・水の結合によって生ずるとすれば、土粒子の結合力を示す相圧によって表示できる³⁾。すなわちその対数であるpFによって表わせる。

これについては粘土のセン断強度または降伏値は、その試料のpFと実験的にはほぼ等しいことがわかって⁴⁾。(粘土以外の土については強度が相圧のみで決まらないことはいうまでもない)。関東ロームのように土壌構造が強度にきいてくる場合、ねり返しによる強度低下

が著しい。この構造変化も考りよすれば次のような実験式が得られる⁴⁾。

$$pF = \alpha \cdot \log \theta + \log k$$

ここで α は補正係数で、粘土では $\alpha \approx 1$ となる。 θ はねり返しを受けた状態での降伏値。 k はねり返しによって降伏値変化を示すチクソトローピー係数 $\theta_0/\theta = k$ 。 θ_0 はねり返し前の降伏値。 k は土の構造性を示す係数である。関東ロームでは k は 5~15 で沖積土の 2~3 倍大きい(軟化が大きい)。

このように自由化には土の強度、とくにねり返しによる強度変化の実験的根拠が多くある。土の力学モデルは骨格構造内と粒子表面に拘束されて土の粒子の結合に寄与している水の両者を考えざるを得ない。

粘弾性挙動で土はパーガス体(K-M)に近似される。これがゲルを骨格とするハチの巣構造に対応できる。この構造のスケールは関東ロームでは数 $\mu \sim 10\mu$ のオーダーであろう。しかし緻密には規定されない。パーガス体のフォークト要素 K はハチの巣構造に、マックスウェル要素 M_1 はゲル状物質に対置できる。

ねり返しによる拘束水の自由化も各々の要素の常数が変化するものとして考えられる。構造拘束水の自由化は主として G_K の低下が、表面拘束水の自由化は主として η_M の低下があるとも考えられる。

3. 土工におけるねり返し 土工の際の土に加わる応力状態を正しくとらえるのはむづかしい問題である。ここでは 1, 2 で述べて来たことが、実際の場合にも何らかの形で生じていることをスリップ率とけん引力から見た。土工機械の接地圧(クローラ)は動荷重として静荷重の倍は越えないと考えられている⁵⁾。ここで、接地圧

がクローラで $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ とし、約 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上、すなわち pF 値に換算して 3 以上の力が荷重としてかかる。

水田における二、三の例ではあるがペネトロメータではほぼ $1\text{kg}/\text{cm}^2$ が走行性を保ちうる限界値と考えられる⁶⁾。この動荷重は比較的短時間に除去されるのでスリップの小さい状態では土への影響はそれほど大きくない。しかしスリップが大きくなると荷重の効果はねり返しによる拘束水の自由化を進める。沈下によって、走行性は加速的に悪化する。ブルドーザによる運土作業では、スリップが始まると急激に作業能率低下が生ずる。沈下は盛土締固まり状態によって異なる。通常は 10cm ぐらいであろう。しかしスリップ率が 100% になると沈下は 30cm 程度は生じてくる。関東ロームの多摩ローム層を盛土する作業では沈下してもけん引力の増大はなく、そう難した例は多い。切土では、瞬間的な荷重による影響はおそらくブルのシューにかかる深さ程度であろうか。

ペネトロメータによる実測では不明であった。

引用文献

- 1) 多田敦・竹中肇・相馬恒一・黒部隆・端山好和
関東ロームの構成粒子特性 農土研別冊 7 p. 14-21 (1963)
- 2) 安富六郎・須藤清次：土壌ペーストの流動(1) 農土研別冊 2 p. 71-74 (1961)
- 3) 妹尾学：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) p. 11-15 (1965)
- 4) 安富六郎・竹中肇・須藤清次：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) p. 49-53 (1965)
- 5) 土井淳多 (未発表)
- 6) 田淵俊雄・安富六郎・堤聡・土井淳多・多田敦：粘土質の水田の地耐力に関する研究(Ⅲ) 農土論集(21) 1967