

- b) 浮上り量が大きいほどレールの沈下は大きくなり浮上り量が大きければ浮上りのないときに比べて2倍近くになる。しかしレールの曲げモーメントも増加するがその増加率は2,3割程度である。
- c) レールの沈下量は浮上り枕木より離れるに従って少なくなり3本目以後はほとんど0である。
- d) レールの曲げモーメントは隣の枕木でほとん

ど0になりその後は負の曲げモーメントがあらわれてこれも数本後にはほとんどなくなる。

終りにのぞみ満鉄保線課勤務当時本問題について松尾義人工学士及び山梨大学学生山田一君に計算その他に多大の御協力を賜わつたことと有益なる御指導を頂いた近藤繁人教授に対して厚く感謝致します。

(昭.28.6.15)

## 電氣的逆性土の添加による土の性質の変化について

准員 森

麟\*\*

### ON THE VARIATION OF PROPERTIES OF SOIL WHEN POSITIVELY CHARGED SOIL MIXED IN NEGATIVELY CHARGED SOIL

(JSCE Oct. 1953)

Akira Mori, C.E. Assoc. Member

**Synopsis** Physical and mechanical properties of soil are influenced by Coulomb's force between particles. Coulomb's force is repulsive force in generally, but this force acts attractive or small repulsive effect by mixing positively charged soil in negatively charged soil. Compressive, tensile strengths and water stability of mixed soil were larger than both single soil, the largest strength and stability existed in region that  $\zeta$ -potential of soil is about zero.

**要旨** 土は水液中で帯電しているため土粒子相互間には電氣的な力であるクーロン力が働らく。土粒子は一般にどれも負に帯電しているためクーロン力としては斥力であるので土の凝集力としては毛管圧力, van der Waals 力及びその他の要素によるがこのクーロン力は土の総合凝集力に相当影響すると思われる。負帯電土に電氣的異種の正帯電土を混合した場合両者間のクーロン力に相当の変化が予想できるのでこのクーロン力の影響の程度を混合土の物理, 力学的性質の変化から調査してみた。なお本研究ではクーロン力の定量的測定が困難なので, 定性的に代用になる  $\zeta$ -電位について取扱つた。

#### 1. 正帯電土について

土の水液中における帯電の正負は主として土の化学的組成 ( $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ ) 及び水液の性質 (pH, イオンの種類濃度) によつて定まる。自然状態ではほとんど負帯電であるためこの負帯電土のみが取上げられて研究され, 正帯電土は問題にされなかつた。筆者は埼玉県土を調査した際関東ローム中に正帯電土が相当量分

布していることを知つた。また関東及びその他の地方の火山灰土の中にも相当の存在量が予想される。土の帯電の正負の測定は電気泳動法と電気滲透法によるが本実験では後者によつた。帯電の大きさは  $\zeta$ -電位で表わすことができる。表-1 は数種の土の  $\zeta$ -電位,

表-1

土の名称	土の種類	原土の $\zeta$ -電位 (volt)	水液の pH (水/土=3の(200番篩通過液))	$\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ (200番篩通過土)
ベントナイト (市販品)	残留土	-0.038	8.0	5.07
南吉見土 (埼玉)	沖積土	-0.031	6.3	2.90
荒川砂質ローム (東京)	沖積土	-0.026	6.3	3.03
蒲生土 (埼玉)	沖積土	-0.015	5.8	2.08
飛鳥山土 (東京)	関東ローム	-0.016	6.5	1.08
練馬土 (東京)	関東ローム	-0.007	6.5	0.82
赤山土 (埼玉)	関東ローム	-0.003	6.1	0.95
片山土 (埼玉)	関東ローム	+0.003	6.1	0.91
太田窪土 (埼玉)	関東ローム	+0.005	6.2	0.98
松山土 (埼玉)	関東ローム	+0.007	6.1	1.04

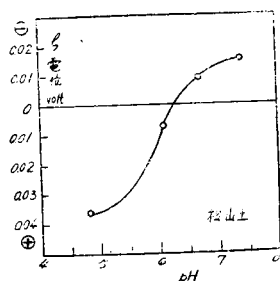
水液の pH と  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$  について調査したものである。土は一般にある pH (等電点) を境としてそれ以上の pH では負, それ以下では正に帯電する。大体等

\* 昭 27.11.5. 日本土質基礎工学委員会秋季講演会で一部報告

\*\* 早稲田大学大学院研究奨学生, 理工学部土木教室

電点の pH は  $SiO_2/R_2O_3$  の小なるほど大きくなる。自然状態の pH で正帯電しているものは  $SiO_2/R_2O_3$  が約 1 以下でなければならぬことは表-1 に示している。この表では pH が大体等しいとき必ずしも  $SiO_2/R_2O_3$  の小さいものが正帯電でないのは  $R_2O_3$  中の  $Al_2O_3$  の含有量が少ないためと考えられる ( $Al_2O_3$  の方が  $Fe_2O_3$  より等電点の pH が高く正の  $\zeta$ -電位も大きい)。関東ロームならば自然状態で負帯電でも少し pH を下げれば正帯電になる。 $SiO_2/R_2O_3$  の大

図-1 pH- $\zeta$ -potential



きい土は pH を下げても実際には正帯電にならない<sup>2)</sup>。表-1 の松山土の pH と  $\zeta$ -電位との関係は図-1 のように等電点を境として正および負に帯電する。正帯電土は自然状態のままでは帯電の程度が小さいので実験に

2. 負帯電土に正帯電を添加した場合土粒子間の相互作用について

水液中では電荷をもつ 2 箇の土粒子間にはクーロン力が働らく。この力は定性的に (1) 式 (この式は点電荷間の力である) で示される。

$$f = 1/D \cdot q_1 q_2 / r^2 \dots \dots \dots (1)$$

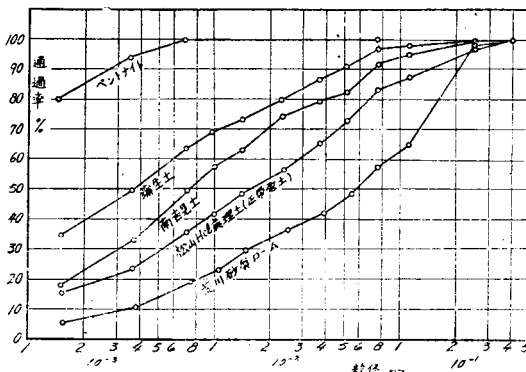
ここに  $D$  は液の電媒常数,  $q_1, q_2$  は各土粒子の電荷,  $r$  は粒子の間隔である。この 2 箇の粒子がそれぞれ異種の電荷を持っていればクーロン力は引力であるので、これ等の粒子は結合する。この結合によつて電荷は相殺されるので土としてはどちらか優位の方の電荷のみになる。負帯電に添加した正帯電土が電氣的に当量であれば無電荷の状態になる。土粒子の電荷が減少すれば (2) 式で示されるように土の  $\zeta$ -電位も低下する。

$$\zeta = 4 \pi \delta q / D \dots \dots \dots (2)$$

ここに  $\delta$  は電気 2 重層の厚さ,  $q$  は粒子単位表面積当りの電荷である。負帯電土に正帯電土を添加してゆけば土の  $\zeta$ -電位の低下が測定される。これはすなわち土粒子の電荷の減少であるから土粒子間のクーロン斥力も (1) 式で示されるように小さくなる。それゆえ“土の真の凝集力”は増加するわけである。実際には異種の帯電土を混合した場合、電荷の相殺が完全に行われずそれぞれ若干の電荷がそのまま残つていることが考えられ、クーロン引力もある程度働らき“真

の凝集力”としてはさらにプラスになるものと思われる。電氣的な力は土粒子の界面間に生ずるものであるから、重量に対して表面積の大きい細粒土ほどいちじるしいわけであるが、実際上土を混合する場合粘土粒子は大きな塊状に集合しているから、細かく砕いて混合しなければ電氣的な力の影響は少なくなる。本実験では正負両帯電土とも 40 番篩を通して土を充分に混合して使用した。図-2 に使用土の粒度を示す。

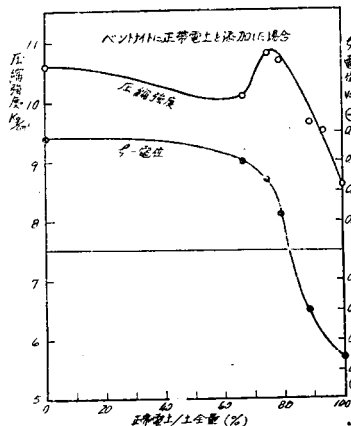
図-2 粒度加積曲線



3. 圧縮強度および圧裂強度

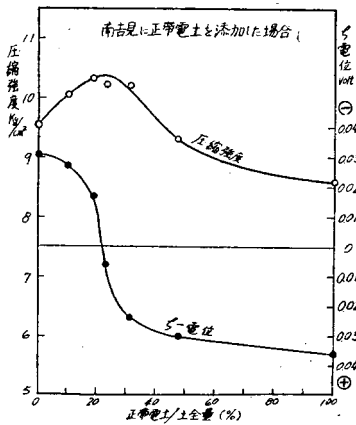
図-3, 4 は負帯電土として表-1, 図-2 中のベントナイトと南吉見土を用い、これに正帯電 (松山塩酸処理土) を添加して行つた場合の圧縮強度と  $\zeta$ -電位 (クーロン力の定性的代用) について調査したものである。ここに示している圧縮強度のカーブは各混合率についての含水比-圧縮強度曲線の最大強度値を結んだものである。この最大強度値は最適含水比より 4~8% 少なくないところに存在した。供試体は径 7.5 cm, 高さ 7.5 cm で締固め方法は落下高 18 in, 5 lb のランマーで 2 層詰各 30 回である。図-3, 4 によると圧縮

図-3



強度の最高値と  $\zeta=0$  の位置がほぼ一致している。 $\zeta=0$  付近では前節において述べたようにクーロン斥力は最小となり、また相殺されずに残っている電荷によるクーロン引力は逆に大きくなる。それ故土の凝集力としてはこの  $\zeta=0$  付近で最大になるので、土の強度の最高値がこの付近に存在するのも当然であると思われる。しかし圧縮強度の増加率としてはあまり大きなものではない。これは両帯電土の混合が完全には行われないので、クーロン力に影響を与えるものが全体の一部にとどまることと、水液の電媒常数  $D$  が大きいゆえクーロン力があまり大きくなり得ないためと考えられる。図-5 は負帯電土の荒川砂質ロームに正帯

図-4



電土を添加した場合の圧裂強度と  $\zeta$ -電位について測定したものであるが、結果としては圧縮強度の場合とほとんど同様である。

なお負帯電土相互を混合した場合、その混合比と圧縮強度及び圧裂強度との関係は調査しなかつたが混合土の強度は両者の中間にくるようである。

4. 水に対する安定性

土塊を水に Soaking すると“見掛けの凝集力”は消失し“真の凝集力”のみになる。この真の凝集力が浸入水の破壊作用に抵抗してある大きさを保持している間は土は Slake しないが、真の凝集力がある限界に達すれば土は Slake するわけである。異種の電荷を持つ土を混合した場合増加するのは真の凝集力であるから水に対する安定性の増加は圧縮強度の場合よりいちじるしいはずである。前節と同様に締め固めて作った供試体を製作後ただちにまたは一定期間含水量不変に保存した後水槽中で Soaking した場合、水に対する安定性（一定期間 Soaking 後の圧縮強度）と  $\zeta$ -電位について調査した結果を図-6,7 に示す。また締め固め含水量により水に対する安定性が異なるのでこ

図-5

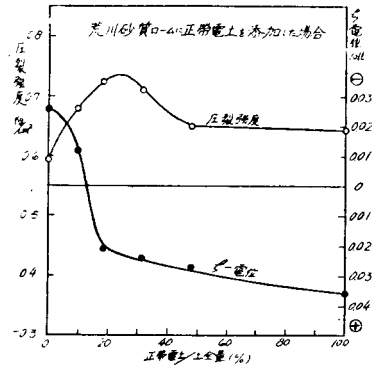
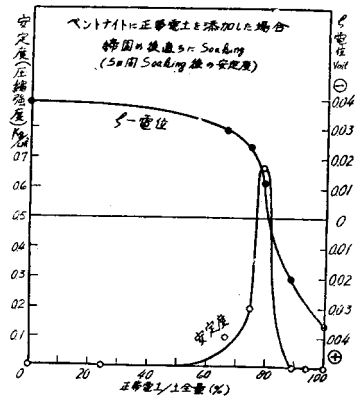


図-6



れ等の図の結果はすべて最適含水比より 5~6% 多いところのものについて行つたものである。図-6,7 によるとやはり  $\zeta=0$  付近に最大の安定度が存在し圧縮強度の場合より正帯電土添加の影響が大きいことを示している。

5. 土の粒度分布に及ぼす影響

負帯電土に正帯電土を添加した場合両者が電氣的に結合し、懸濁していた土粒子は凝固して沈澱するので

図-7

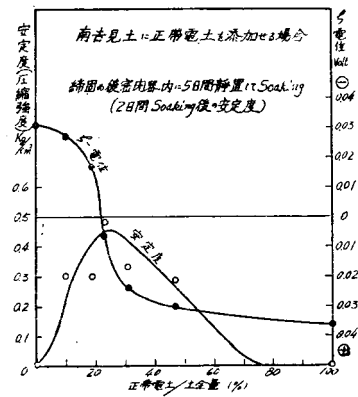
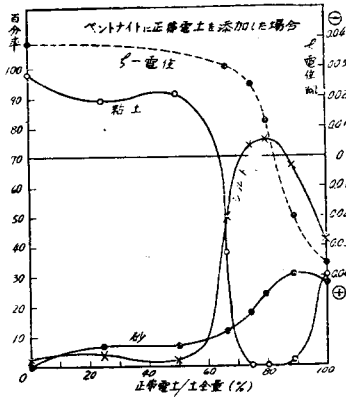
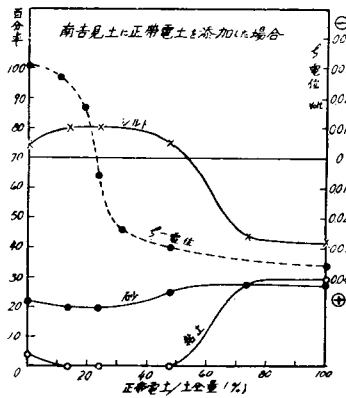


図-8



見掛けの粒度分布に大きな影響をする。図-8.9 はベントナイトと南吉見土に正帯電土を添加した場合の砂、シルト、粘土の分布状態について調査したものである。方法は JIS に準拠したが珪酸ソーダは入れてない。これ等の図によれば  $\zeta=0$  附近においてクーロン斥力が小さくなるため粘土は凝固してシルト程度の大きになつてしまうことを示している。珪酸ソーダを加えると負側の  $\zeta$ -電位が優勢になり  $\zeta=0$  の点が負帯電土側にずれるので粒度分布も異なってくる。

図-9



6. P.L. 及び L.L.

異種の帯電土を混合すれば 2. において述べたように  $\zeta$ -電位の低下によるクーロン斥力の減少のためと、相殺されずに残っている電荷によるクーロン引力のために土が凝固して団粒状になり空隙が増す。またこの電氣的結合のため土粒子間の凝集力が増加して同一軟かきにするのに水膜を厚くせねばならない。以上のような理由によつて P.L. L.L. はともに大きくなることが考えられる。図-10 は南吉見土に正帯電土を添加した場合の P.L., L.L. である。このカーブはともに上方に凸であるが、南吉見土に負帯電土の蒲生土を

図-10

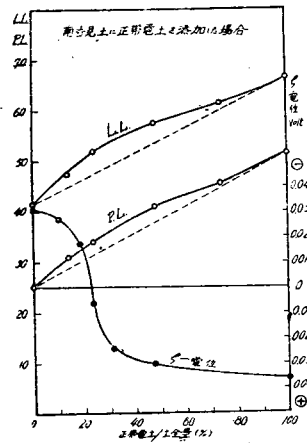


図-11

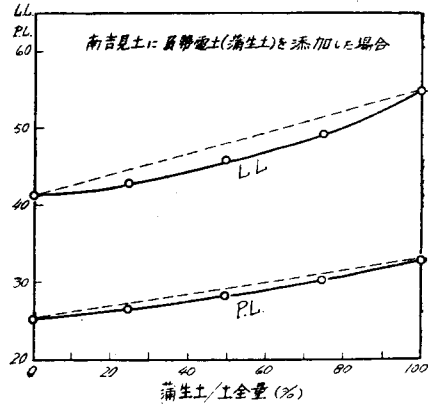
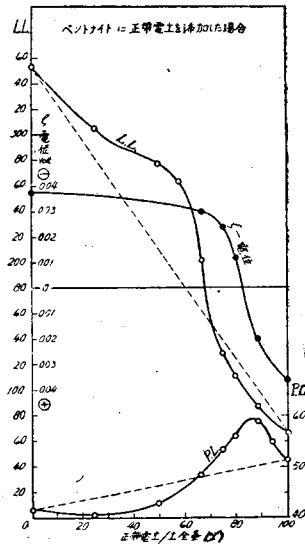


図-12



添加した場合は図-11のように上方に凹になるので、上述のことがらが肯定される。

図-13

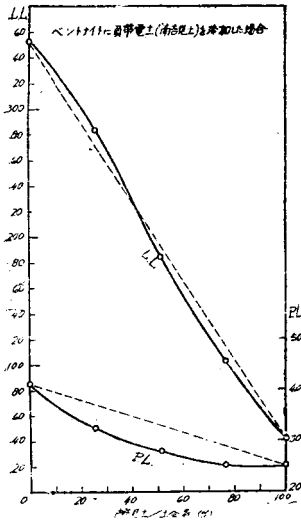


図-12 はベントナイトに正帯電土を添加した場合の P.L. と L.L. である。またベントナイトに負帯電土の南吉見土を添加した場合の P.L. と L.L. は図-13 に示す。図-13 の P.L. のカーブが上方に凹であるのは P.L. の状態の水膜が南吉見土より薄いベントナイトが土を棒状にする

主役を演ずるから混合土中の南吉見土が自身の P.L. の水膜に達しないうちにベントナイトにより土が P.L. の状態になるためである。図-12 の場合もベントナイトの量が多い場合は同様であるが、正帯電土の量が圧倒的になり  $\psi$ -電位が小さくなると本節の最初に述べた理由による要素の方が大なるためカーブは上方に凸になると思われる。

図-13 の L.L. の場合は L.L. の状態の水膜は P.L. とは逆にベントナイトの方が南吉見土より厚いが主役を演ずるのは半々である。そのため南吉見土の量の多い場合はこれが主役を演ずるのでベントナイトが自身の L.L. の水膜に達しないうちに土が L.L. に達し上方に凹になる。ベントナイトの量が多くなり、これが主役を演ずるようになるとカーブは逆になる。図-12 の L.L. の場合はベントナイトの多いときは本節の最初に述べた理由も加わつてさらに上方に凸になるが、 $\psi=0$  附近になるとベントナイトはその特性の膨潤性がいちじるしく小さくなり、これが本節最初

に述べた理由による要素より大なる影響をもつためと考えられる。

7. 結 語

本実験は土の性質を粒子間のクーロン力 ( $\psi$ -電位) の面から眺めてみたわけであるが、得た結果から複雑な土の性質の一端を説明できたように思う。

土粒子間のクーロン力に変化を与える要素としては電気的逆性土の添加のほかには置換性イオン等があるがこのようなものによつても土の性質は影響を受けることが数多く報告されている。

電気的逆性土の添加が土の諸性質に及ぼす影響力は当然この2種の土の混合の均等度によつて大きな変化を受けるから本実験の結果もこれに密接な関係がある。この混合の均等度をさらによくすれば土の性質の変化は一層いちじるしくなると思われる。

土粒子間の電気的な作用には主に粘土の影響が大半を占めるわけであるから  $\psi$ -電位を問題にする場合、土のうちの粘土分についてのみ取扱つた方が合理的と思われるが、本実験のように土全体について取扱つても土の  $\psi$ -電位がその中の粘土によつてほとんど支配されるからさしつかえないと思う。

またこの実験の  $\psi$ -電位の測定は<sup>3)</sup> rough であり、水液の電媒常数を一率に 80 としているので精確に測定した場合と多少異なることも予想されるが、本研究は定性的な面が強いのでさしつかえないと思う。

なおこの研究は終始御援助を受けた兵藤教授と卒業論文として実験して下さいつた渡辺興一、長沼哲夫及び4学年の鈴木敏雄、北中信雄、石沢和男の諸氏に負うところが多い。ここに深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 川村一水：農林土壌学，p. 254
- 2) 芝本武夫：森林土壌学，p. 330
- 3) 例えば Weiser：Colloid Chemistry，p. 235. Wiley 1950
- 4) 森 麟：土の水に対する安定性について，第9回土木学会年次講演会概要
- 5) 森 麟：土の電気伝導について，土木学会誌 37 卷 11 号，p. 16 (昭.28.6.22)

欧州だより

空の旅もつつがなくストックホルム、コペンハーゲンを廻り、14日チューリッヒに入り、翌日から常任委員会、ついで17日より国際会議と、休むひまもなく、22日朝チューリッヒを出発、4日のエキスカッションに参加サンモリツ、ルガノをへて今夕ローザンヌにく予定です。会議はきわめて盛大、参加者は

700名を超え、エキスカッションも大型バス12台の壮观さです。専門の勉強もさることながら、会議から旅行を通じて多数の各国の人達と知合になつたことは最大の収穫です。天候にも恵まれ、アルプスの山、雪、湖の雄大な美しさを満喫しました。藤井、村山、福岡の各氏も元気です。

(8月25日朝 Interlakeu の Hotel にて 屋 埜 和)