

関東ローム層の化学処理による安定化

渡辺和衛*・竹田栄蔵**・相原輝雄*

**Chemical Stabilization Tests Performed in "Kwantō
Loam Beds" (Recent Volcanic Ashes)**

By

KAZUÉ WATANABE, EIZŌ TAKEDA & TERUO AIHARA

Abstract

Soil stabilization is essentially the process of permanently improving both qualities and behaving characteristics of soils, so as to make soil-mixtures stable under allweather conditions. However "Kwantō loam" soil is said to be difficult to stabilize owing to its abnormal properties concerning soil mechanics. Because this loamy soil generally has the higher content of hygroscopic moisture containing half-combined water in irregular shaped pores, the slightest excessive load provokes structural collapses. Accordingly this soil is said to be unable to compact for engineering works. But now there are a few physical method of improving this soil, principally by welding or admixing other dry soils to reduce water content. Chemical procedures are still in an experimental stage, especially such loamy soils as originated from volcanic ashes have not ever been examined. So the writers have projected a new chemical method for this loamy soil, by using superphosphate of lime (chemical fertilizer) with two additives, i. e., sodium fluosilicate (accelerating cure) and ferrous chloride (water proofer).

At first (1967) they performed this new method in the suburbs of Sawara City, Chiba Prefecture. The surface stratum in this site is mainly composed of upper "Kwantō loam" soil. In comparison with this new stabilizing method, they treated this soil with the commonly used stabilizer such as sodium silicate mixtures. They obtained the results that both stabilizers had nearly the same effect, and the sodium silicate mixtures could not permeate deeply into the subgrade because of rapid coagulation, but the phosphate mixtures spread themselves 3 or 4 meters deep. Both stabilizers showed 2 or 3 times as much increase in strength for "Kwantō loam" soil in the case of suitable concentration.

On the second chance (1968), the writers again performed the acidic phosphorous compounds method to verify its proper concentration (chiefly H_3PO_4) for "Kwantō loam" soils at Iwatsuki City, Saitama Prefecture. They have obtained some results concerning the suitable concentration of this stabilizer and additives.

The example of No. 1 pit at Sawara City shows the tolerably suitable concentration (H_3PO_4) of acidic phosphorous compounds among these stabilization tests in the two localities.

* 応用地質部

** 技術部

Table 1 Stabilizing effect owing to the method using superphosphate of lime added sodium fluosilicate

Locality	Sawara (1967)		Iwatsuki (1968)		
	Pit	No. 1	No. 3	No. 3	No. 4
Concentration of H_3PO_4		11.3%	6.0%	22.6%	14.7%
Effect (expressed by magnifying power of N-value)		1.4~3.5	1.0~10	1.2~1.6	1.0~2.3

Table 2 Stabilizing effect owing to the method using the other chemicals

Locality	Sawara (1967)		Iwatsuki (1968)	
	Pit	No. 2	No. 1	No. 2
Chemicals treated for tests		Sodium silicate together with $FeCl_3$	Slaked lime	Chloric acid
Effect (expressed by magnifying power of N-value)		1.3~3.1	1.2~1.7	<1.00

1. 序 言

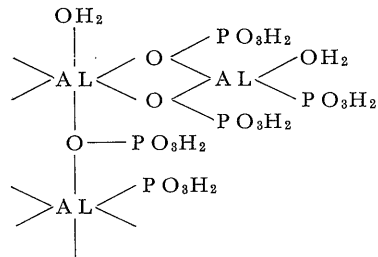
昭和42年度以来軟弱地盤の地質工学的研究の一つとして、化学安定剤により、地盤を安定させる方法を沖・洪積層に適用しており、すでに湖東地区の研究結果が発表された。湖東地区の場合では、守山町付近のボーリングのコアを利用して、燐酸による地盤安定化を試みた^{注1)}。しかしこれは単なる室内実験であり、野外現場においてどのような固結状況を示すかについては、未知であった。

従来の古典的地盤安定法はセメント・珪酸ソーダ・石灰等が主役となっており、これにそれぞれ補助剤を加味して、その目的を果たしてきた。しかし地層の間隙中にうまく浸透させて不溶性の物質をつくり、しかもこれが不可逆反応の形で進行し、反応が逆戻りしないことが必要な条件なのである。地中にうまく薬液を浸透させること自体が甚だむずかしいうえ、また広い地域の地盤を固結させるには、莫大な薬量を要し、経済的な観点から必ずしも万全の方法とはいえず、今後解決を要する問題点を少なからず抱えている。

2. 過燐酸石灰を化学固結剤に利用する試み

燐酸塩が土壌の安定に有効であることは、夙に知られており、燐酸塩のある種のを土壌に加えると、燐酸塩と粘土成分の間に化学反応で結合が生じ、安定化させ

ることができる。この反応は^{注2)}、(1)燐酸塩が粘土中の鉄・アルミニウム原子を抽出してその塩となるか、または吸着によって結合する過程と、(2)生成した縮合燐酸鉄・縮合燐酸アルミニウムが、粘土粒子相互の間隙に溶液から次第に沈降して固化する過程という前後2つの過程を辿るのである。反応の結果できた結合は、燐酸アルミニウムについて示すと、第1図のようになる。反応中に現



第1図 縮合リン酸アルミニウムの推定結合図

われる変化は、土壌のpHの変化、水溶性燐酸の減少、可溶性アルミニウムの変化などで認められ、これは土壌の強度変化としても測定し得る。粘土の種類によって異なるが、この反応は1カ月またはそれ以上持続する。また最高の強度を得るためには、最適の水量で実施する必要がある。そしてこのような強度変化の効果は、長い年月の経過後において、はじめて判定され得るものである。燐酸塩は従来の他の種類の安定剤に較べて安価であることも、将来大いに期待される利点であろう。

2.1 燐酸塩および過燐酸石灰の試用と原理

前述の実験によって、燐酸塩を安定剤として利用する

注1) 渡辺和衛(1968): 滋賀県琵琶湖岸野洲川デルタの地盤に関する産業地質学的研究, 一冊章, 地調月報, vol. 19, no. 1, p. 34~37
 渡辺和衛(1969): 地盤改良とは, 産業公害対策への一つのアプローチ, 地質ニュース, no. 173

注2) 堀省一郎・村上恵一(1965): リン酸, 誠文堂新光社刊, 309 p.

有利性が認められたが、これを実際に野外で使用するに際しての仕様とその添加剤について触れておく必要がある。

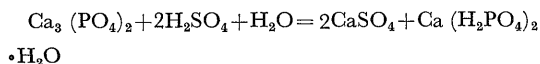
正磷酸 (H_3PO_4) と
その補助添加剤

正磷酸 H_3PO_4 を地盤改良に使用する方法については、マサチューセッツ工科大学における一連の実験^{注3)}によって示されている。すなわち乾燥試料の重量に対して

正磷酸…2%, 純硫酸…4%, 珪弗化ソーダ…0.5% を所定の順序に土壤に添加すると、硫酸4%の中約1.4%は遊離硫酸となって、磷酸とともにアルミナゲルの生成に役立ち、珪弗化ソーダはアルミナ上に生ずる無益な磷酸皮膜を除去して、磷酸とアルミナとの反応を促進する効果が顕著である。このほか耐水剤としてオクテラミンまたはアルミーンDを添加すれば、一層効果がある。これらの代わりに耐水剤として鉄やアルミニウムの塩化物を使用することも有効である。そしてこの形が磷酸塩を安定剤として使用する基本の方式とされている。

過磷酸石灰の
安定剤としての
試用

地盤安定化について磷酸塩が有効なことが判ったので、磷酸の比較得易い供給源を考えねばならない。磷酸石灰 (apatite… $Ca_3(PO_4)_2$) はその一つであり、このものは過磷酸石灰製造の原料でもあり、なおかつ弗素を含むので、これを粉末化して用いるのも一法であるが、一般には入手が容易でない。却って過磷酸石灰を使用する方が便利である。過磷酸石灰中の磷酸の含有量は、17~20%である。過磷酸石灰の組成は、その製造の際の反応式から、磷酸石灰と石膏との混合物であることがわかる。



過磷酸石灰は可溶性の磷酸分を多量に含有し、価格も低廉である。これをどのようにして安定剤として利用すべきかを種々検討を加えてみた。基本の原理は結局正磷酸による前述のような固結方法である。

さて利用の原理とプロセスについて述べてみよう。過磷酸石灰の磷酸は、硫酸によって正磷酸 (H_3PO_4) として溶出させ、土壤中のアルミナと反応を起こさせる。このものは比較的容易に土中に滲透するが、石膏は $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ となり、一部は硫酸に溶解して (少量であるが) 地中に滲透する。単に正磷酸による固結では、磷酸による腐食作用が烈しい筈だが、石膏の存在で緩和される。さらにまた石膏と土中の水分との間の反応も加わって、

かなり水分を調整する作用があると思われる。そのうえ磷酸と石灰の再結合によって二磷酸石灰、さらに進んで三磷酸石灰 (apatite…モース硬度5°) を生ずる可能性もある。ことに石灰分の少ない関東ロームのような地盤の改良には、石灰分添加は必要である。過磷酸石灰の利用は本調査の場合、この意味でも有効であろう。

ただ過磷酸石灰は製造の際に弗素分 (磷酸石灰中には、3%もあるものがある) を揮発させ、鉄分を極度に少なくしてあるので、これら F, Fe を添加剤として使用する必要がある。さて過磷酸石灰に硫酸を加え、他の添加剤とともに地中に流入させた際におこるとと思われる反応を、化学反応の立場から推定すると、まず硫酸が地中の鉄分と反応し $Fe_2(SO_4)_3$ を生じ、これに過磷酸が加わって、 $Fe_2(SO_4)_3 + CaH_4(PO_4)_2 \cdot H_2O + 5H_2O = 2FePO_4 \cdot 2H_2O + CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2H_2SO_4$ となって硫酸が遊離し、一方磷酸は土中のアルミナと反応して、これをゲル化し、珪弗化ソーダの助けによって一層ゲル化が促進される。そして過剰の硫酸は脱水作用をおこして、 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ が $CaSO_4$ となる。この $CaSO_4$ (石膏) は $FeSO_4 \cdot 2H_2O$ と反応して

$FeSO_4 \cdot 2H_2O + CaSO_4 = CaSO_4 \cdot 2H_2O + FePO_4$ となり藍鉄鈦 (vivianite… $FePO_4$) ができる。そして土中に石灰が存在すると

$FeSO_4 \cdot 2H_2O + CaO = Ca_3(PO_4)_2 + Fe_2O_3$ となって、不溶性の著しい磷酸三石灰 [$Ca_3(PO_4)_2$ …apatite] を生ずる。

したがってその固結作用は次記4階梯を経過して進行すると思われる。

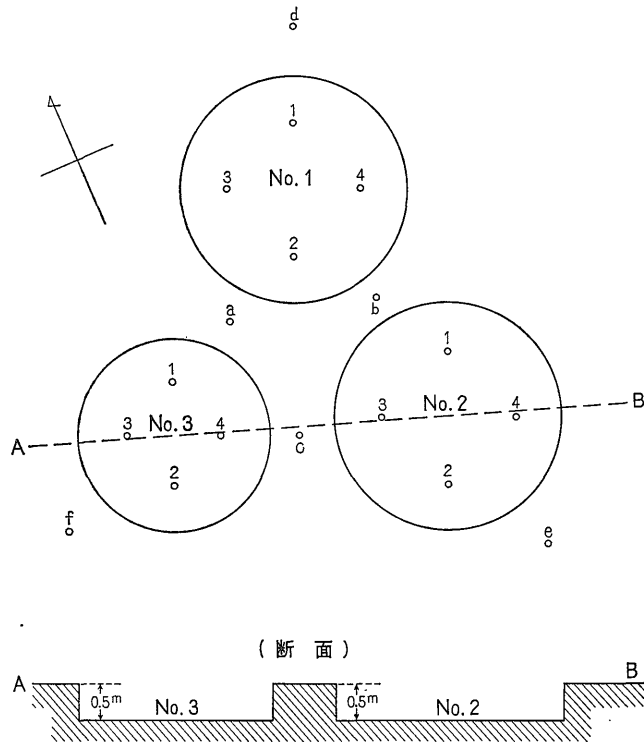
- 1) 磷酸と硫酸によってゲル化したアルミニウムおよび鉄の塩類の固結
- 2) 石灰および石膏による脱水および土中の反応珪素 (モンモリロナイトに多く含まれる) との結合
- 3) 生成する藍鉄鈦 (vivianite) によって起こる地盤の安定化
- 4) 不溶性磷酸石灰の生成等

このようにきわめて複雑な反応の群であって、その過程についてはなお不明な点が多い。

3. 関東ローム層の地盤改良について

関東ローム層のように土が無極性に近く、イオン吸着量 (界面過剰イオン量) が少なく、かつまた水分量がきわめて大で、含水比にして100%を超えており、しかもその水分も半分近くが半結合性のものであるとすると、薬剤注入による強化作用は、きわめて困難なものと考えられている。ただ鉄分とかアロフェーンを含むことは、

注3) Massachusetts Institute of Technology (1961): Soil Stabilization by Chemical methods. *Final reports*, XIII, p. 5~17.



第2図 固結化試験配置図 (与倉団地)

これを手掛りとして固結化の工夫を進める一つの方向性が与えられよう。またローム層中に石灰分が少ないことは、過磷酸石灰を用いることによって補うことができると思われる。

3.1 関東ローム層に対する実施例

昭和41年度からはじめられた産業開発のための地質調査は、粘土・シルトの水成軟弱地盤(泉州・湖南)から漸次風成の火山灰層の特質の究明に移った。すなわち昭和42年度には下総台地、昭和43年度には大宮台地の続きの岩槻地区に調査地を設定し、これらの調査に附随して、地盤改良の試験をも実施することとし、下総台地では佐原市与倉団地計画地内、岩槻台地では岩槻市内城趾公園で、それぞれ化学安定剤による地盤改良を試みた。

3.2 千葉県佐原市与倉団地の地盤改良試験

過磷酸石灰を用いる地盤改良法を実施した最初の地点がこの与倉団地である。そこではこの新方法と従来から用いられている方法との比較検討をする必要があった。後者で使用した安定剤は、もっとも古くから一般に知られている珪酸ソーダ(水ガラス)を主剤とする工法であり、前者は過磷酸石灰法のほかに同じ磷酸を主剤としながらも、磷酸アンモン塩(T. C. B)という固結剤⁴⁾を

使用する新しい工法も適用し、この3つの方法を比較してみることにした。

第2図に示すように、与倉工業団地予定地内に直径3m、深さ0.4mの円形の穴を3個つくり、No. 1, No. 2, No. 3と正三角形に配置した。なお、No. 1の北東4~5mの所に深さ25mの標準地質ボーリングを実施したが、この地質状況については、固結成果の説明の際に述べることにする。

A) 佐原市与倉 No. 1, No. 2, No. 3 各試験孔の安定剤

[No.1 試験孔]

過磷酸石灰 (磷酸20%)	… 6袋	180 kg/(H ₃ PO ₄ …11.3%)
珪弗化ソーダ Na ₂ SiF ₆	3 kg (F…0.55%)	
硫酸 (比重1.84) H ₂ SO ₄	12l (H ₂ SO ₄ …4.1%)	
塩化第一鉄 FeCl ₃ · 6H ₂ O	1.5 kg (FeCl ₃ · 6H ₂ O…0.3%)	
水	420 l	

注4) H. H. Bawny がアメリカで考察適用しているもの。
Soil Stabilization by Chemical methods, Final Report phase
XI M.I.T., November, 1959.

第1表 佐原市与倉団地試験箇所地盤強度 (N値)

孔 深 度	No. 1		No. 2		No. 3	
	自然強度*	強度比**	自然強度	強度比	自然強度	強度比
40 cm	—	—	—	—	—	—
65	0	3.5	1	5.5	0	2.2
90	1	3.7	3	3.1	1.3	1.4
115	2	2.0	3	1.1	2.8	1.3
140	2.5	1.5	3.4	1.0	3.0	0.9
165	3	1.3	3.5	1.0	3.5	1.0
190	3	1.4	4.0	1.3	4.0	1.1
215	3.5	1.5	3.5	1.1	4.3	1.1
240	4.3	1.2	4.3	1.7	4.3	0.8
265	4.5	0.9	4.3	1.3	5.0	1.3
290	5	0.9	3.5	1.2	3.8	1.4
315	3.5	1.7	4.8	1.9	3.8	1.4
340	4.8	1.9	7.3	2.1	5.5	1.1
365	6.8	2.3	13.8	1.0	8.8	—
390	12.0	—	—	—	—	—
平均強度比		1.8		1.8		1.2

薬液種 過燐酸石灰 180kg 水ガラス+塩化マグネシヤ T.C.B+過燐酸石灰

薬液流下前のN値 (スウェーデン式サウンディング測定N値のN値換算値)

薬液流下後の地盤強度 (N値) と流下前の自然強度 (N値) との比

以上の各薬剤の混合比は、正燐酸を主剤とする基本方式に準拠して、補助添加剤を加えた。

[No. 2 試験孔]

珪酸ソーダ $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$	60kg (19.2%)
塩化マグネシヤ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	60 kg (19.2%)
苛性ソーダ NaOH	2 kg (0.6%)
水	240 l

これは、最も古典的な方法^{注6)}で、水ガラスと塩化物との瞬間凝結現象を利用したものである。

[No. 3 試験孔]

T. C. B という名称の安定剤は下記のような組成の粗結晶物である。

P_2O_5	48.5%
Fe_2O_3	13.2%
Al_2O_3	4.1%
F	3.8%
CaO	3.6%

これは細砂質の地盤には有効であるが、粘土質の地盤にはあまり効果がないとされており、むしろ正燐酸法の補

注6) Joosten (東独) によって開発された方法。

樋口芳朗・吉田迪雄「セメント・薬液注入工法」, 昭和36年, 技報堂

助添加剤として用いると効果があるともいう。さてこの第3試験孔に対しては、

過燐酸石灰 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{CaSO}_4$	30 kg
五酸化燐 P_2O_5	2.5kg
塩化第一鉄 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	4 kg
塩化アルミニウム $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	4.5kg
珪弗化ソーダ Na_2SiF_6	1 kg
水	240 l
硫酸 H_2SO_4 (比重1.84)	5 l

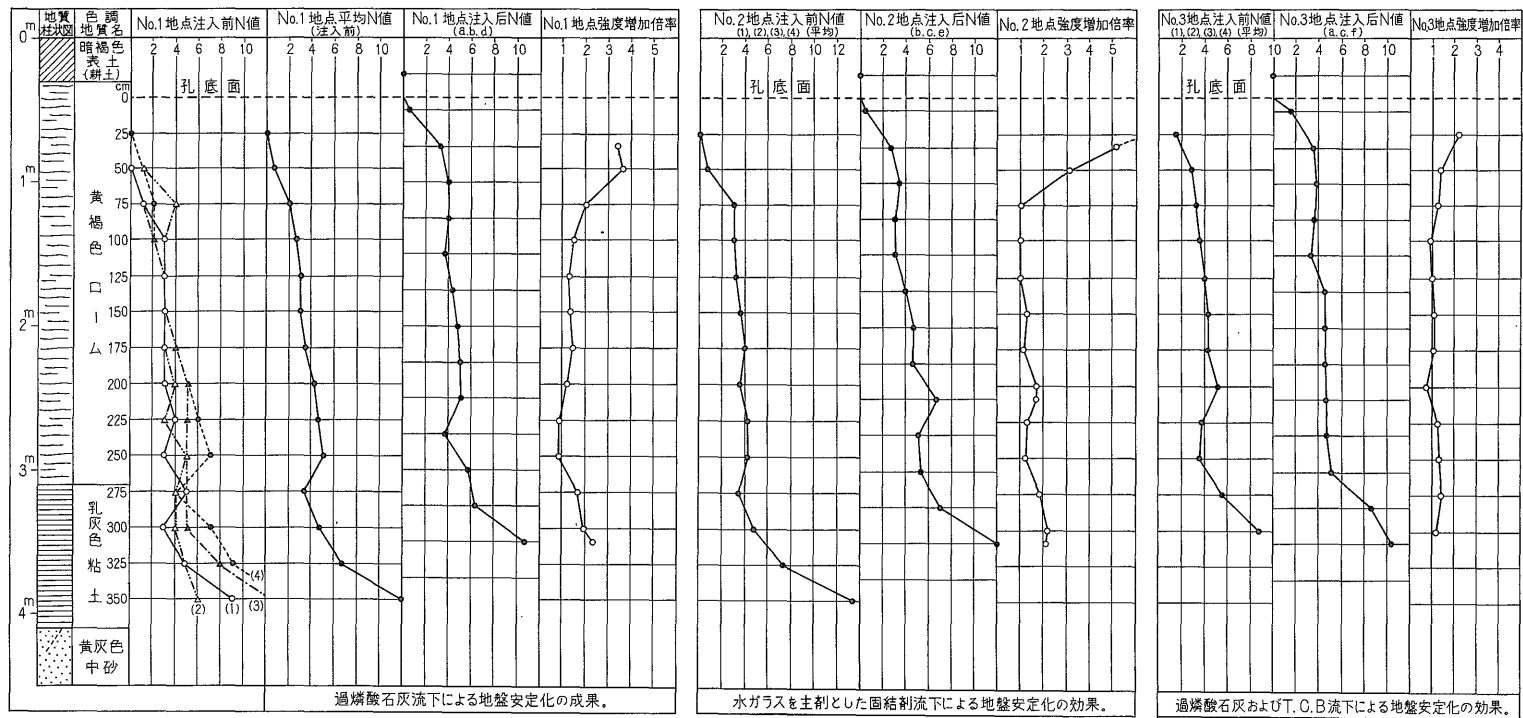
というきわめて複雑な配剤にして、T. C. B と正燐酸法の混合工法を実施してみた。

B) 各試験孔の安定剤の自然流下による地盤改良効果

第2図に示すように、各試験孔について、安定剤流下前にそれぞれ各孔周辺に4点づつスウェーデン式サウンディングテスト (地耐力測定) を実施した。この測定結果は第1表にN値^{注7)}で示してある。

No. 1試験孔の地耐力は地表面下0.65mでN値零で、深

注7) このN値はスウェーデン式サウンディング測定によって得られた回転数を換算式によって求めたものである。ローム層のN値については、問題もあるが、自然強度と流下後の強化強度を同一の方法で測定して比較しているため、相対的な意味でその強度比は信頼性があると思われる。



第3図 千葉県佐原市与倉団地における地盤改良成果

度を増すにしたがって、漸次自然地盤強度が増加し、2.90mで $N=5$ となっている。これより以深は粘土層となるが、上部は $N=3$ と低いが、これも深度を増すにしたがって強度を増し、3.90では $N=12$ となっている。No. 2, No. 3地点も多少の変動はあるが、その傾向はほとんど同様である。

各孔とも薬液の流下直前に N 値測定を実施し、薬液流下後30日を経過して、再びサウンディング測定を実施した。その測定位置は、第2図に示すように、各孔に沿って外側にa, b, c, d, e, fと6点測定してある。したがって各孔の流下前測定値との比較は、それぞれ一番近い3点の平均値を用いた。例えば、No. 1はa, b, d, No. 2はb, c, e, No. 3はa, c, fである。その結果は、第3図にグラフ化して示し、測定値は第1表に示す通りである。

次に各孔の固結成果を考察してみよう。第3図には各孔の流下前 N 値、流下後 N 値の次に、強度増加倍率（流下後の N 値を流下前の自然 N 値で除した値）をグラフで示してある。1.0の値は前後に変化のないことを示し、

1.0より小となるのは、地盤が弱化したことを物語り、1.0より大となった所は、地盤が強化されたことを示す。固結効果の基準としては、一般にやや広い範囲に施工し、かつかなり効果のよいとされる物理的^{注8)}または化学的^{注9)}な人工地盤改良でも、改良前の2~3倍の強度になれば成功といえる（第3図参照）。

〔No. 1 試験孔（過磷酸石灰法）〕

固結成果をみると、孔底下-30cm^{注10)}までは強化の度合がはっきりしないが、流下前 $N=0$ であった点からみて、やや強化されているらしいが、 $N=0$ 以上にはなっていない、孔底下-30cmから-60cmまでは、3.5倍の強度となっている。-75cm以下では、-175cmまで1.3~2.0倍の強度となっている。孔底から-225cmの所に、地盤の弱化しているところが、約30cmの厚さにわたって存在するが^{注11)}、弱化の理由ははっきりしない。

以上はローム層中における地盤改良の成果であって、ローム層の直下の乳灰色の粘土層中では1.8~2.3倍の強度増加となっている。したがって過磷酸石灰液の自然流下によって、ロームは地盤強度が3.5倍になる層と、1.4

注8) 例えば、パイプロフローテーション工法とかベイクドレイン工法のようなもの。瀬古新助：「軟弱地盤改良設計」2.p.5 オーム社刊（昭和41年）

注9) 例えば、珪化工法のようなもの。小貫義雄：「土木地質」p.71~75. 森北出版 K.K. 昭和32年。

注10) この試験で表示する深度は孔底下何cmという値で示すが、地質柱状図の深度は地表下何cmという値となっており、両者の差が約40cmあることに留意あたりたい。

注11) この傾向はNo.2の水ガラスによる地盤改良成果の上にも現われている。

倍になる層と、弱化する層とに分かれ、粘土層は約2倍に強化されることがわかった。

〔No. 2 試験孔（珪酸ソーダ法）〕

水ガラスによる化学固結の成果をみると、孔底から-30cmまでは不明であるが、-30cmの所で5.4倍、-50cmで3.1倍、-75cmで1.1倍となって、ローム層の上部は著しく強化されている。しかしこれ以深では余り強度増加はなく、-150cmの所から下部で1.3倍~1.6倍となっている。そして下部の粘土層は、2倍に強化されている。No. 1地点と同じく、粘土層の直上ではやや強度が下がっている。水ガラス工法は瞬間凝固の特性を有するもので、上部ほど強化の度合が強く、深度を増すにしたがって、直線的に強度が急激に減少している。それにもかかわらず、-150cmより下部で強度増加を示しているのは、苛性ソーダを加えて、瞬間凝固を緩和する処理をしたためと思われる。古典的な工法であるが、やはり優秀な効果を持つものであることが実証された。

〔No. 3 試験孔（T. C. B法）〕

No. 3地点の地盤改良成果をみると、No. 1, No. 2に比較して、かなり強化の度合が劣っている。孔底下25cmで2.5倍となり、100cmまでの間は、1.0倍~1.5倍となっている。これ以深ではほとんど強度増加がなく、225cm以下で1.5~1.8倍とやや強化されている。全般的に地盤固結効果の度合が低く、T. C. Bという安定剤は火山灰層の安定化には、余り効果がないように思われる。

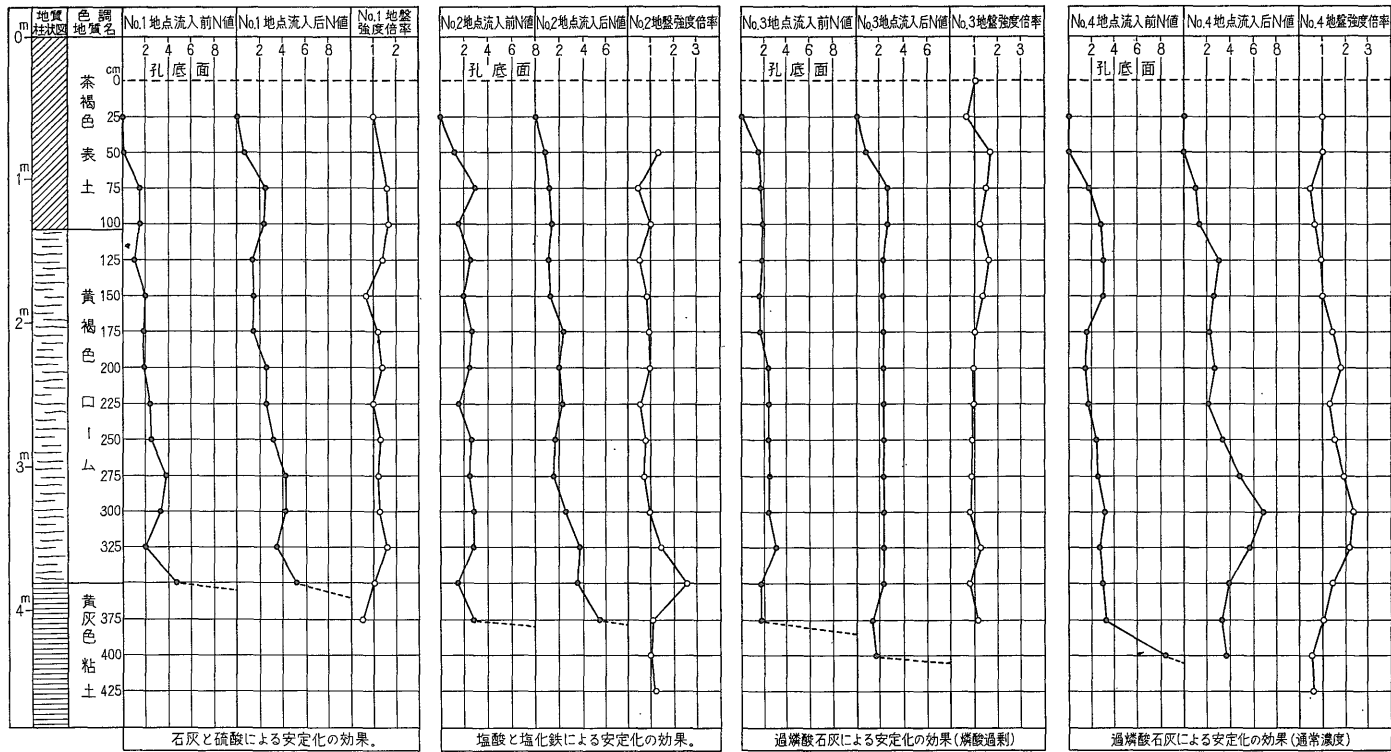
3.3 埼玉県岩槻市公園内における地盤改良

前年度千葉県佐原市において、過磷酸石灰を使用して、地盤改良を試み、水ガラスによる工法との比較を試みた。そして磷酸塩による地盤改良法もかなりの効果のあることがわかった。しかし過磷酸石灰法も、薬剤の濃度によって効果に差異が生ずる筈であり、この点に関する検討の必要がある。そこで、本地区の試験ではこの意味の試験を中心として、このほかに化学課で案出された石灰と硫酸（地中に石膏を形成させる）を使用する方法および塩酸と塩化第一鉄による固結法などを加味して実施することにした。

岩槻市太田町の城趾公園内に、前回と同様に径3m、深さ25cmの円形の穴4個を作り、一列に並べ、その一端に深度25mのボーリングを実施した（第4図参照）。そしてボーリング地点からNo. 4, No. 3, No. 2, No. 1と逆順に配置した。

A) 岩槻公園内 No. 1, No. 2, No. 3, No. 4の各試験孔の安定剤および注入作業

〔No. 1 試験孔〕



第4図 岩槻市太田城趾内公園における試験孔配置図

消石灰 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 40 kg
 硫酸 H_2SO_4 …比重1.84 40 kg
 第1試験孔の底面から0.2mの厚さに亘りよく鍍き起こして、消石灰を十分に土壤中に混和させ、硫酸を適当に稀釈して流下する方式を採った。

[No. 2 試験孔]

塩酸 HCl (conc.) 37.9% 70 kg
 塩化第一鉄 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 10 kg

この方法はローム層中には、鉄分が10%位もあり、これに塩酸を加えて塩化鉄塩をつくり、これに補助剤として $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を加えることにした。この方法は、全く新しい方法で、果して効果があるかどうかを検討してみた。

[No. 3 試験孔]

過磷酸石灰 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{CaSO}_4$
 360 kg (H_3PO_4 …22.6%)
 珪弗化ソーダ Na_2SiF_6 10 kg
 硫酸 H_2SO_4 (比重1.84) 20l
 塩化第一鉄 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 3 kg
 水 420l

今回の薬剤の濃度は、前回の佐原市の試験の約2倍の濃

度である。

[No. 4 試験孔]

過磷酸石灰 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{CaSO}_4$ 240 kg
 硫酸 H_2SO_4 (比重1.84) 15l
 珪弗化ソーダ Na_2SiF_6 5 kg
 塩化第一鉄 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 2 kg
 水 420l

の配合で、佐原市における試験の1.3倍の濃度として、流下を実施した。

Ⓑ) 各試験孔の安定剤の自然流下による地盤改良効果

第4図に示すように、市内の城趾公園内に上記の4個の試験孔を一列にならべ、No. 4の傍に、深度25mの地質ボーリングを実施した。その地質については、固結効果グラフ説明の際触れることにする。

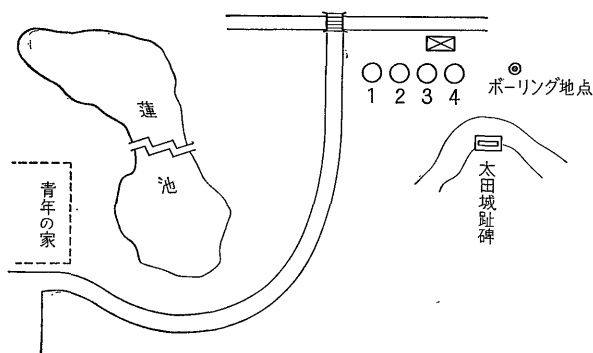
表土が1.30mあり、その下に黄色ローム層が堆積しているが、ローム層自身は変化に乏しく、脆い性質であって、その厚さは2.50mである。この下部には粘土層があり、その厚さは3.80mである。ただ公園内の試験実施区域では、スウェーデン式サウンディングによって各孔地点ご

第2表 岩槻市公園内試験地点の地盤強度 (N値)

孔 深 度 (cm)	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4	
	自然強度*	強度比**	自然強度	強度比	自然強度	強度比	自然強度	強度比
55	0	1.0	0	—	0	1.0	0	1.0
80	0	?	1	1.2	1.4	0.6	0	1.0
105	1.4	1.6	2.9	2.7	1.7	1.6	1.8	0.4
130	1.3	1.7	1.4	1.0	1.8	1.5	2.4	0.6
155	1.0	1.4	2.2	0.5	1.8	1.2	2.9	1.0
180	2.0	0.7	1.8	0.8	1.4	1.6	2.4	0.9
205	1.8	1.2	2.3	0.9	1.7	1.3	1.6	1.4
230	1.8	1.4	2.2	0.9	2.2	1.0	1.4	1.8
255	2.2	1.0	1.3	0.6	2.3	0.9	1.8	1.2
280	2.4	1.3	2.4	0.7	2.3	0.9	2.4	1.4
305	3.7	1.2	2.2	0.7	2.4	0.9	2.5	1.9
330	3.2	1.3	2.6	1.0	2.4	0.9	3.1	2.2
355	2.0	1.6	2.6	1.4	2.9	0.8	2.7	2.1
380	4.6	1.1	1.4	2.6	1.7	1.3	2.9	1.3
405	46.0	0.5	2.6	2.1	1.6	0.8	3.1	1.0
430	—	—	17.2	0.9	7.0	1.1	8.2	0.5
455	—	—	41.0	1.2	—	—	22.0	0.6
平均地盤強度比		1.2		1.2		1.1		1.2
薬液種	消石灰+硫酸		塩酸+塩化鉄		過磷酸石灰 360kg		過磷酸石灰 240kg	

* 薬液流下前のN値 (スウェーデン式サウンディング測定値のN値換算値)

** 薬液流下後の地盤強度 (N値) と流下前の自然強度 (N値) との比



第5図 埼玉県岩槻市公園内における地盤改良成果

とに測定すると、深度4.00m付近に異常に固結した砂質粘土層があり、しかも所によって、その深度にかなりの変動がある。なおこの区域でのN値は宇野沢技官(事前)および安藤技官(事後)によって計測された(第2表参照)。さて各試験孔における流下実施後1カ月を経た時の地盤改良の割合を検討することにする(第2表および第5図参照)。

〔No. 1 試験孔 (消石灰法)〕

ここでは、消石灰の混和と濃硫酸の流下によって操作を終えたが、地盤強化の割合は、孔底面下 - 25 cm から - 125 cm までの間では、1.0~1.7倍にやや強度を増加している。- 150 cm では逆に弱化しており、この傾向は No. 2, No. 4 孔においても同様の状況である。- 175 cm 以下では、再び1.2倍~1.5倍とやや強度を取り戻している。しかし全般的にみると、2倍の強度増加に達した所がなく、余り良好な成果であるとはいえない。しかし薬量の割には、意外に固結したものである。

この試験では、土壌と石灰との緻密な混合物に硫酸を作用させて、ある量の土壌中に、ある量の石膏が均等に生成した場合の固結状況を検討することを目的としたものである。上に述べたように、結果は必ずしも良好でなかった。その第1の原因として考えられることは、はじめの段階で石灰と土壌の混合が理想的に行なわれなかったことである。次の硫酸を添加した段階で石膏だけの団塊が随所に見られ、混合操作が不完全であったことを知らされた。第2に考えられる原因は、石灰と土壌の混合割合が必ずしも適当ではなかったことである。この試験では、経済性ということを念頭に入れて、その重量比が約1:40となるようにしたが、結果から考えると多少低過ぎたように思われる。以上の2点について今後さらに検討の要があろう。

〔No. 2 試験孔 (塩化第一鉄法)〕

塩酸と塩化第一鉄とを使用するはじめての試みであっ

て、その成果は期待していなかった。結果をみると、孔底面から - 50 cm の所がやや強度を増加し、それ以深は - 300 cm の所まで全部が地盤が弱化しており、わずかに - 315 cm で1.4倍、- 340 cm で2.6倍となっている。この位置はローム層の下底に当たり、下には粘土層があって、薬液の流下を遮ぎっていると考えられる。したがってこの位置に塩化鉄が多く集積したのではないかと推察される。そして粘土層には何等の影響も与えなかったようである。

〔No. 3 試験孔 (過磷酸石灰法…濃)〕

過磷酸石灰を 360 kg として、濃度を佐原の場合の2倍とした。一般に磷酸濃度が過ぎると、却って地盤強度が弱くなるといわれている。第5図のグラフによれば、孔底から - 25 cm までは薬液によって地盤が弱化し、- 50 cm から - 175 cm までの間で1.2倍~1.6倍に強度が増加している以外は、ほとんど自然の地盤強度に変化を与えていない注12)。

〔No. 4 試験孔 (過磷酸石灰法…淡)〕

過磷酸石灰を 240 kg とした濃度で、佐原市の事例の1.3倍である。この強化結果をみると、孔底面から - 125 cm までは地盤強度が却って弱化し、- 125 cm 以深は - 375 cm まで、1.0~2.3倍まで強度が増加を示している。この方は No. 3 地点よりも、全体的に強度増加の程度が勝れている。

佐原地区の No. 1 地点、岩槻地区の No. 4, No. 3 地点の3ケースを比較すると過磷酸石灰の濃度の増減と強度増減率とが、逆比例しているようである。すなわちこの工法には適正の濃度があって、これより薄くても濃くても、強度が上昇しないという限界があるようである。

注12) このNo. 3孔の孔底面 - 70 cm の所まで掘下げて、載荷試験(新工夫の器械による)が安藤技官によって実施された。地盤改良状態をみると、試験深度付近は0.6倍~1.6倍の複雑な強化状況の位置である。

4. 佐原・岩槻地区のローム層の地盤改良成果の考察

関東ローム層という風化火山灰層は、その特異性によって、土質工学者の間でも、その取扱いに関しては、甚だしく悩まされているのが実情である。含水比は異常に大きく、その水も結合の仕方が複雑であって、半結合水とも見られる部分も多量に存在し、その水を取除くことがむずかしいために締め固め不可能な土となっている。その上破壊強度を過ぎたものは、泥状となって性格が一変する。したがって乾燥土の混和による水分除去とか、極端な方法としては、焼結工法によって窮境を脱する場合すらある。わが国のような湿潤な所では、たとえ石灰を用いても、流失してしまうことが多い。これが効果のあるのは、亜熱帯のラテラリゼーション（紅土化）の進んだ地帯である。また電気脱水のような特殊工法を適用しようとする、表面電導率が低く間隙水も無極性に近く、塩基交換作用がおこりにくいのである。そこで過磷酸石灰使用の試みとなったわけである。

佐原地区の成果をみると、No 1 試験孔が、孔底面から—70 cm の間で地盤強度が3倍近くに改良され、しかもこれ以深220 cm まで1.2倍～1.6倍の強度となっており、はじめての試みとしては、予期以上の成果であった。その上この薬剤を使った場合には、深度—310 cm 以下の粘土層に達して、2倍の強度を示している。

No. 2 の珪酸ソーダ（水ガラス）を主体とする古くからの工法に比較しても、その滲透性の点において優れているといえる。

ただこの過磷酸石灰を使う新工法で注意を要するのは、磷酸塩の土に対する適量の問題である。乾燥土に対

して、正磷酸が4%という基本原則はあくまで守らねばならない。しかし自然流下方式では、これを規制することが困難である。佐原地区 No. 1 地点の過磷酸は正磷酸に換算して、11.3%となっている。これに対し、岩槻地区の No. 3, No. 4 試験孔のように、正磷酸としてそれぞれ22.6%, 14.7%になっているものは、磷酸塩過剰となって、却って地盤が軟弱化する傾向が強くなり、これに反して、佐原地区の No. 3 試験孔のように正磷酸として6%のものもまた、地盤の強化度が低いのである。したがって佐原地区の No. 1 試験孔の薬剤配合率が最も適したものである。

佐原地区の No. 3 試験孔で実施した過磷酸石灰と T.C.B の混合方法は、意外にも余り良い成果を示さなかった。これに反して、岩槻地区の No. 1 試験孔で実施した石灰と硫酸の流下による成果が案外に良好な固結度を示した。ただし土壌と石灰の混和法には、未だ未解決の問題が残されている。

以上この報文では単に流下試験後30日位の地盤固結状況について説明を加え、その中間過程における筆者等の見解を述べたまでに過ぎない。過磷酸石灰を土壌安定剤の主剤に利用する新着想の試行に対して、当面の課題としては、1～2年後に再び両試験箇所へ赴き、何らかの方法を講じて、土質試料を採取して持帰り、果して固結化が進んで、強度を増しているか否か、また化学成分に顕著な変化が生じているかどうかをつぶさに物理計測、もしくは化学分析によって確認し、その結果に充分な検討を加えてのち、最終結論を提出したいと希望している。