

分散材を応用する土の安定処理について*

正員山内豊聰**

FUNDAMENTAL STUDIES ON THE STABILIZATION OF SOILS BY THE ADDITION OF DISPERSION AGENTS

By Toyotoshi Yamanouchi, C.E. Member

Synopsis: A soil stabilization by adding a trace amount of dispersion agent is attempted to increase the dry densities of plain soils and soil-cement mixtures surface chemically under the equal compaction effort, for the purpose of increasing the mechanical and weathering resistances, and the results of screening tests in laboratory are appreciated from the soil engineering point of view as a principle of soil stabilization.

要旨 界面化学的に土粒子に対し、分散効果をあたえる種々のいわゆる分散材の僅少量を、粘性土およびそのソイルセメント混合物に添加混合することにより、高い締固めエネルギーを加えたと同じ乾燥密度をあたえ、力学的および風化の作用に対する抵抗を増大しようとする方法に関する基礎的試験の効果を土質工学的に検討し、土質安定の一原理となることを示した。

1. 緒 言

土に締固めエネルギーを加えると、土粒子の間隔がせまくなり、土粒子相互の付着力が増加し、間げきも減少するので、土の力学的強度や支持力は増大するのみならず、圧縮性、吸水性、透水性なども減少し、耐久性が向上される。このため締固めエネルギーを増加したり、土が砂質であれば振動を併用するなどの努力が払われている。しかし締固めエネルギーの増加には実用上おのずから限度があり、また締固めの必要度の高い粘着性の土ではかえつて振動の効果がおよばないという問題がある。したがつて、ある程度以上の粘着性を持つ土が添加混合の実施の可能な条件にあれば、土の粒子をウォーカブルにするようないわゆる分散材を加えて、界面化学的に同じ締固めエネルギーのもとで締固め効果を増大し、高い乾燥密度を得ようとする手段が考えられる。ただし分散材の添加量はコストのうえから一般に1%程度に制限されるであろう。分散材を土に添加する着想を最初に発表したのは T.W. Lambe¹¹ である。

2. 分散材と土粒子に対する分散作用

もつぱら分散を目的とする分散材としては、電解質塩をはじめ、アニオン性およびカチオン性、並びに非イオン性活性分散材が考えられる。電解質塩には、 NaOH , KOH , LiOH のような一価カチオンの水酸化物も広義の

表-1 有用な分散材とその分類

* 昭.31 年度および昭.32 年度土木学会年次学術講演会において部分的に発表

** 九州大学助教授，工学部土木工学教室

分散材とみなされるが、高度の分散性は多価電解質のナトリウム塩によってのみ得られる。界面活性分散材の主なものはアニオン性活性材であり、その大部分はリグニンスルフォン酸系統のものである。表-1は著者が取扱った分散材をとりまとめて分類したものである。界面活性材のうち、分散効果をともなうものであつても、気泡発生率の高いものは気泡が締固めを妨げるので適当でない。

これら分散材の土粒子に対する分散の機構を詳細に説明することは困難であるが、A.S. Michaels²⁾の説明をもとにして大体図-1に示すように考えられる。電解質の場合、土粒子の表面が負の電荷を持っているので、その表面に一価のカチオンが多量に吸着するほど土粒子間の反撥力が大きくなり、よく分散することが、c) ポテンシャルにより表面化学的に説明される。自然土は二価あるいは三価のカチオンが吸着されていて凝集の状態にある。このような状態の土に対し、四(テトラ)磷酸ナトリウムのような多価磷酸ナトリウムを加えると、負の電荷の磷酸基を媒介して多量のカチオンが吸着されるので分散効果は大きい。アニオン性および非イオン性活性材を加えた場合は、その浸透力によって土粒子が分別され、分散効果を發揮するもののように考えられる。ただしこれらは水量の十分な懸濁液の場合の説明から考察したものである*。

図-1 土粒子に対する分散材の働きの模型

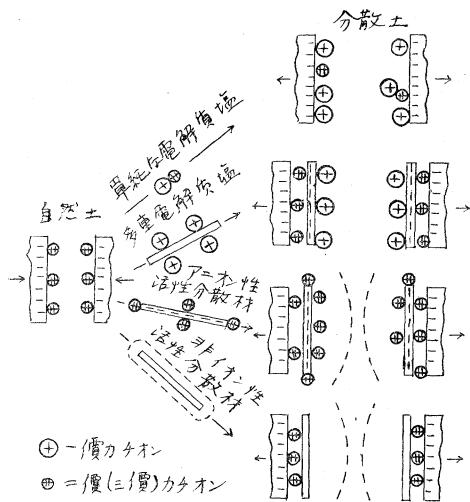
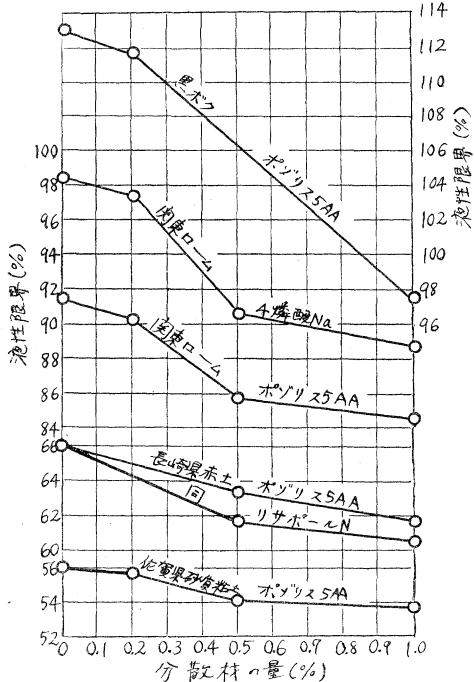


図-2 分散材の添加による液性限界の変化



乾燥密度はより大きい締固めエネルギーを適用したのと同じように増大される。そのうえ土粒子が扁平なときは、分散材によつて土粒子をウォーカブルにして締固めると、図-5のような粒子の配向(orientation)をともない、密度増加が助長される。わが国火山灰土の締固め密度がきわめて低いことはよく知られているが、その原因が粒子の比重の小さいことによるものもあるが、また有機物の存在によつて締固めが妨げられ、高い

3. 土のコンシスティンシーに対する分散材の効果

四種の土に対し、土の乾燥重量に対して1%までの分散材を加え、JISの規定による液性限界を測定したのが図-2であり、土の種類によつて液性限界変化の程度に差異があつた。分散材の効果は界面現象によるものであるから、粒度の細かいものほど、また有機物の量の高いものほど効果が大きい。したがつて、黒ボクや関東ロームのような有機質火山灰土において、分散材が土のコンシスティンシーにおよぼす影響が大きい。分散材の添加によつて液性限界が低下することは、分散材の添加により、ある一定の流動変形をおこすに必要な外力のエネルギーが、より小さくてすむことを意味する。したがつて図-2の試験で得た半対数紙上の打撃回数と含水比の関係から、土のみの場合の液性限界に相当する点の打撃回数をしらべると図-3に示すようになり、25回より少ない回数で、規定する一定の変形流動が得られることがわかる。

4. 分散材による土の締固め密度の増大

突固め試験において、土の最大乾燥密度は図-4のよう に、含水比-乾燥密度の図についてゼロ空積曲線(飽和曲線)にそつて移動するのであるから、より高い最大乾燥密度を得ようとするには、より低い含水比のもとでより大きい締固めエネルギーを加えるほかに手段がなかつた。分散材によつて土粒子を界面化学的にウォーカブルにすると、より低い含水比において最適含水比が得られるので、最大

乾燥密度はより大きい締固めエネルギーを適用したのと同じように増大される。そのうえ土粒子が扁平なときは、分散材によつて土粒子をウォーカブルにして締固めると、図-5のような粒子の配向(orientation)をともない、密度増加が助長される。わが国火山灰土の締固め密度がきわめて低いことはよく知られているが、その原因が粒子の比重の小さいことによるものもあるが、また有機物の存在によつて締固めが妨げられ、高い

* これらの分散材は、細粒土分析における凝集防止の分散材として、珪酸ソーダ溶液や荷性ソーダ溶液が有效地に働くとき、しばしば効果的である(別に報告)。

図-3 分散材の添加による正常な液性限界に相当する打撃回数の減少

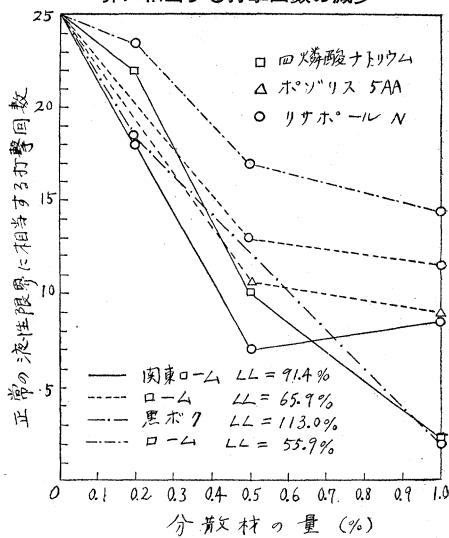


図-4

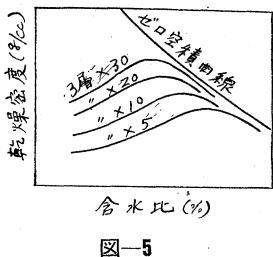
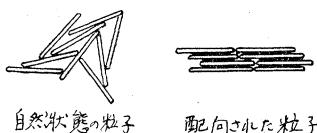


図-5



間げき比をつくることが大きな原因であると考える。最大乾燥密度のハーバード式の突固め試料について計算する間げき比と、有機物の含有量との関係を示した図-6から、それがよく説明される。したがつて締固めの乾燥密度を高めることができ、とくに火山灰土に対する土質安定処理の基本的な一方方法であると考えられる。

四種の土について、1%の分散材を添加混合したものと、しないものとについて、ハーバート式の突固め試料について含水比-乾燥密度の関係をしらべたのが図-7であり、いずれも分散材により確実に乾燥密度が増大する。最適含水比が低くなることは、含水量の調節上不利であるが、高い乾燥密度を得るためにには、いかなる方法であつても締固めの原理上やむを得ないことがある。また最適含水比を下げるることは、高い含水比でおきる過度締固め(over compaction)の現象を避ける方向にある。過剰水分

図-6 土の有機物の自然含有量と突固め試料の最小間げき比の関係

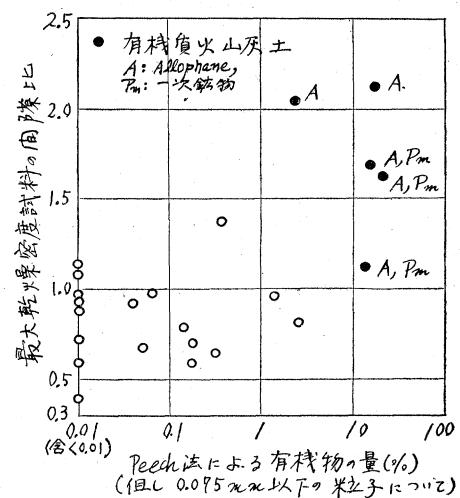


図-7 分散材添加による突固め土の乾燥密度の増大

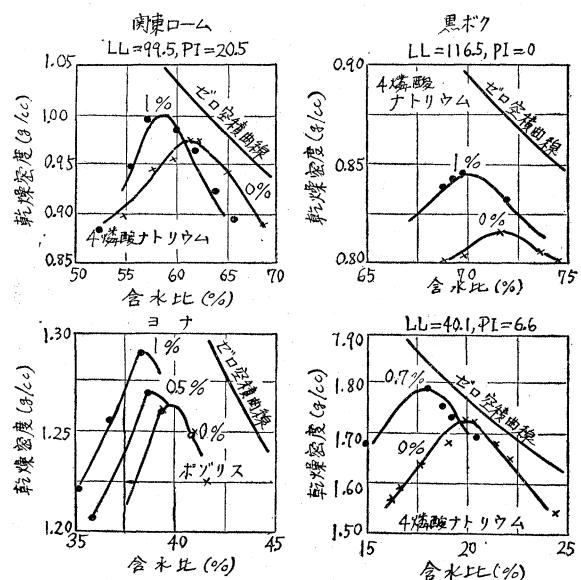


図-8 分散材添加による三軸圧縮せん断強度の変化

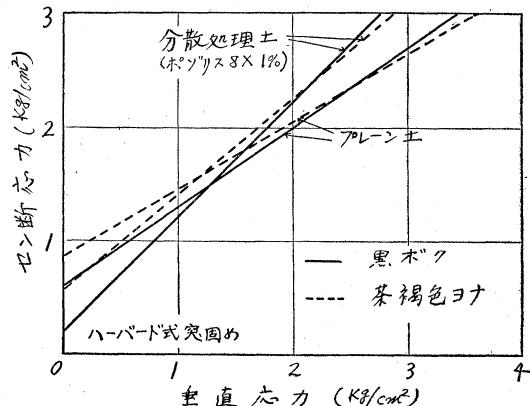


表-2 分散材処理による突固め試料のせん断力および支持力係数の変化

処理土の種類	黒ボク		茶褐色ヨナ		
	プレーン	分散材*1%	プレーン	分散材*1%	
突固め最適条件	最大乾燥密度(g/cc) 最適含水比(%)	0.975 53.2	1.008 53.1	1.129 46.8	1.141 45.7
三軸によるせん断力	内部摩擦角(度) 粘着力(kg/cm²)	35.5 0.58	46.0 0.17	31.5 0.85	40.5 0.55
Terzaghiの支持力係数	N_c N_r N_q	60 42 42	∞ ∞ ∞	38 22 23	∞ ∞ 85

* ポゾリス 8 X

図-9 分散材添加によるスレーキング時間の変化

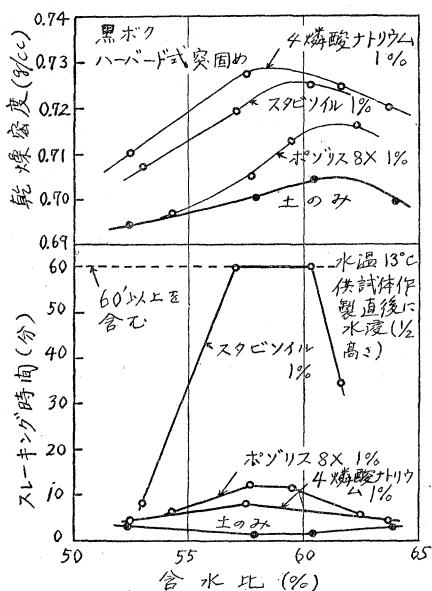


表-3 ニートセメントの圧縮強度に対する分散材の影響

ポルトランドセメントの種類	分散材	1日圧縮強度(kg/cm²)	7日または9日強度	
			圧縮強度(kg/cm²)	日数
A	なし	59	470	7日
	Na ₃ PO ₄	33	350	"
	Na ₄ P ₂ O ₇ ·10H ₂ O	0	175	"
	Na ₅ P ₃ O ₁₀	1	185	"
	Na ₅ P ₄ O ₁₃	0	200	"
	Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	27	180	"
	Lignosol X 2 D	20	88	9日
	Lignosol SF	4	68	"
	Lignosol SFX	14	170	"
	Daxad 21	8	140	"
B	なし	—	460	7日
	Lissapol N	—	415	"

注: 1) 分散材はセメントに対し重量 1%, 2) 水/セメント比=1/3,

3) 湿室養生, 4) ハーバード式モールドにより成型

(b) 分散材の好ましくない成分の存在によって、ポルトランドセメントの水和が低下すること。

後者の現象について、ニートセメントについて著者のしらべた結果は表-3のとおりであつた。このように

の除去に関しては別個に工夫しなければならないと考える。1%の分散材添加による乾燥密度の増加が土のせん断強度におよぼす影響をしらべるため、黒ボクおよび茶褐色ヨナについて三軸圧縮試験を行い、Mohr の破壊円からその破壊包絡線を引いたのが図-8 であり、粘着力は減少したが、内部摩擦角は増大した。この変化は粘土質土における圧密急速せん断(Q_c)と圧密緩速せん断(S)の結果の相違によく似ている。表-2 はそれらの値および内部摩擦角に対する Terzaghi の支持力係数(密度の大の場合であるから全般せん断破壊について)を示したものであり、限界支持力は計算上 ∞ となる。

密度の増大による間げきの減少は水の浸透を減少するが、もし過度に親水性の分散材を使用した場合であれば、水浸時に軟化する懸念がある。黒ボクについて分散材添加の締固め土に対して、供試体の高さの半分の水浸によるスレーキング時間をしらべると図-9 に示すように、分散材の種類によって耐水性に大きな相違のあることがわかつた。土質安定のための分散材としては、土粒子に対する分散性が高く、かつ耐水性のものであることが望ましい。

5. 分散材によるソイルセメントの改良

ソイルセメント法はわが国においてすでに実用の域に達した添加混合による安定処理であるが、元来ポルトランドセメントは締固め土の間げきを大きくするので、これがソイルセメントの持つ欠点の主な原因と考えられる。したがつて分散材を土粒子に作用させて締固め密度を高くすれば、セメントによるマトリックス的接着部分の接着面積を大きくして、混合物の強度を増大するとともに、同時に水の浸透や凍結の作用に対する耐久性が改良されることが考えられる。分散材はまた、ソイルセメントの混合にあたつてセメント粒子の分布の均一性を改良することにもなるであろう。ここでは強度の改良についてのみ報告する。

しかし次の理由のため、この試みに関する現象は土のみの場合よりはるかに複雑となる。

(a) ポルトランドセメントの存在によって土粒子の分散効果が低下すること。

図-10 分散材添加によるソイルセメントの強度改良の有効例

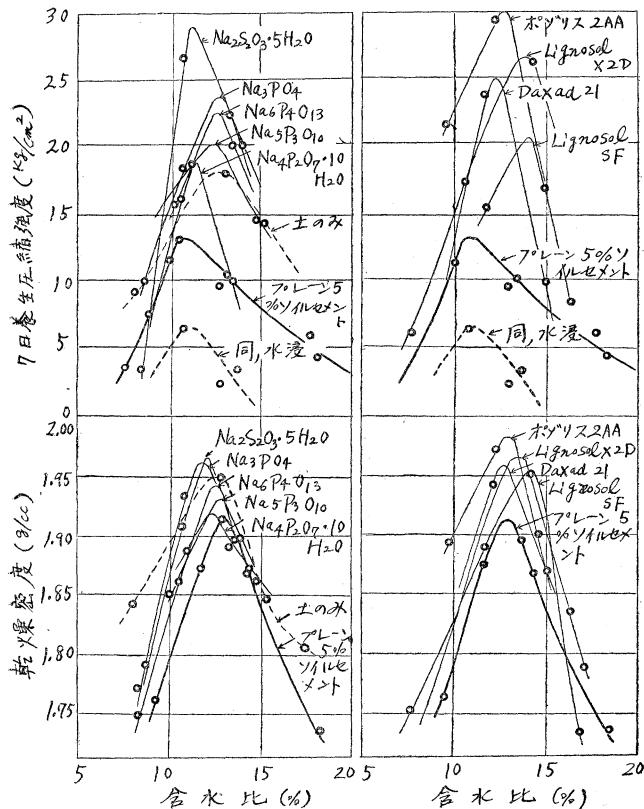
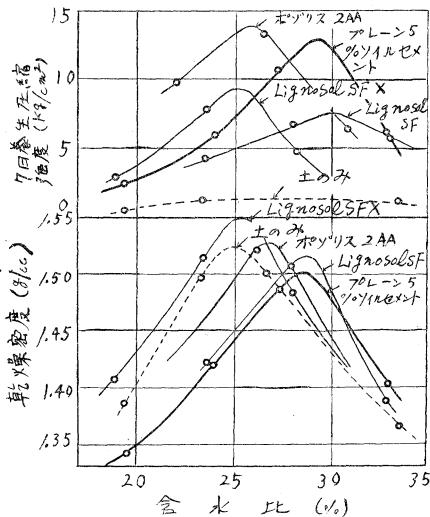


図-11 分散材添加がソイルセメントに有効でない例



いずれの分散材も多少なりともセメントの水和を妨げるのであるが、それによる強度の損失が、前述のような密度の増大とともになつて得られる強度の増大より小さいものであれば、この試みの目的は達せられる。

この試みについて多くの試験を行つたが、このうち有効な例が図-10 であつた。この図は粘土質シルト（マサチューセッツ州）に分散材 1% を添加した、5% ソイルセメントのハーバード式供試体についての乾燥密度および 7 日養生圧縮強度を示したものである。予備試験として行つたので試料の数が十分でないので、個々の曲線は厳密なものではなくしたがつて最大値は絶対的のものでない。土のみにおける最大圧縮強度がプレーンソイルセメントのそれより大きいという一つの矛盾がみえるが、土だけの試料の強度は水浸により完全に失われる。

図-12 図-10 の例における乾燥密度と圧縮強度の関係

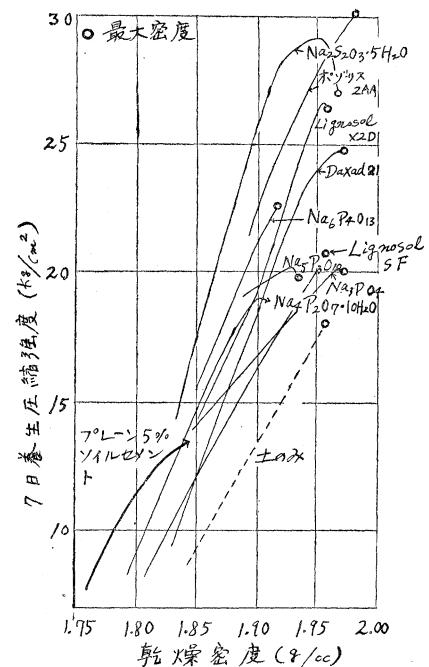
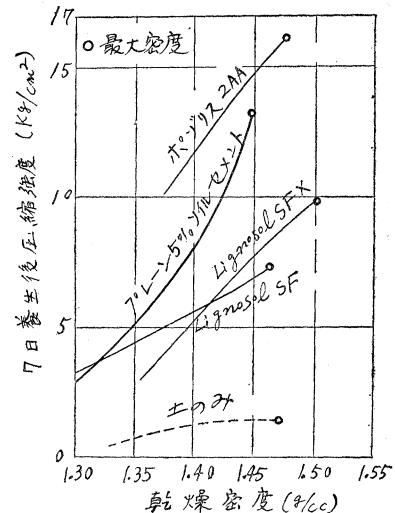


図-13 図-11 の例における乾燥密度と圧縮強度の関係



次に粒子のとくに細かい粘土(kaolinite粉末)について同じ方法で試験した結果が図-11である。その場合、乾燥密度が増加されても圧縮強度は増加されないことが示された。この理由として、過度に細粒土の場合は、強度の低下は分散材中のセメントの水和に対する好ましくない成分の影響の結果のように思われる。粘土質

表-4 窒固め土の単位乾燥密度の増加による圧縮強度増加分の比較

土の種類	フルイ通過量(%)			粘土鉱物
	2.0 mm	0.42 mm	0.075 mm	
粘土質シルト*	100	83	52	Hydrous mica, illite, bermiculite
シルト質粘土	100	100	100	Illite, chlorite, quartz
砂質粘土	100	93	52	kaolinite, hydrous mica
粘土*	100	100	100	kaolinite
シルト質ローム	100	86	55	—

* それぞれ図-8, 図-10 および 図-9, 図-11 の試料土, ** 最適含水比までの平均的値

ないのは、含有する塩化カルシウムのセメントに対する早強効果と考えられる。細粒粘土とちがつて粘土質シルトの場合には、土のみの供試体の強度に対するセメントによる接着力の比率が小さいので、分散効果による乾燥密度の増加は直接大きな強度をもたらす。このような種類の土では、分散材中の好ましからざる成分によつておきるセメント水和に対する負の効果は、それほど大きいトラブルではないであろう。

土の種類によるような不一致は土の粒度のみならず、粘土鉱物の種類、すなわち粒子の形状にもよるようにみえる。表-4 は単位乾燥密度の増加に対する強度増加分の割合が粒度よりむしろ粘土鉱物の種類によつて変ることを示している。Mica や illite のような扁平な粒子でのその割合は、kaolinite のような bulky な粒子におけるものより大分大きい。したがつて分散材によるソイルセメントの強度の改良は、粒子が扁平な土において有効のようである。もちろん粒度の良いことも必要である。かような土に対しては、分散効果による乾燥密度の増加そのものが最も重要である。他の種類の土に対しては、セメントの水和に対して好ましくない成分が含まれている分散材は慎重に選定されなければならない。あるいは分散効果を低下しない範囲で塩化カルシウムを添加するのも一方法である。非イオン性分散材はこの意味で効果が普遍的と考えられる。

6. 結 語

土粒子に対し分散効果をあたえる材料、すなわち分散材を土や安定材混合土に加え、その緻密化密度を高め、強度および支持力、ならびに耐久性を改良しようとする試みに関し、土およびソイルセメントについて基礎的に検討し、添加混合法における土質安定の一原理としての効果がある程度明らかにされた。本文では、分散材の添加量を土の乾燥重量に対し 1% に制限したが、さらに添加量の増加が許される場合には効果がもつとけん著になるであろう。しかし分散材は過度に親水性のものでないことが必要である。

この試みはわが国の土の特性上、自然土の過剰水分の処理と関連して検討しなければならない。また歴青材による安定処理、とくに混合の改良等に応用すべく引き続き研究中である。

本研究に関して指導を受けた M.I.T., T.W. Lambe 教授に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) T.W. Lambe : The Improvement of Soil Properties with Dispersants, Journals of the Boston Society of Civil Engineers, 1954, p. 184-207.
- 2) A.S. Michaels : Altering Soil-Water Relationships by Chemical Means, Proc. Conference on Soil Stabilization, 1952, p. 59-62.

(昭.34.2.26.)

シルトに対する乾燥密度と圧縮強度との関係は図-12(図-10 の変形)に見るように、ソイルセメントの強度が土のみによる強度と、水和されたセメントの接着力による強度との 2 つの部分から成立つていることを現わしている。細粒粘土の場合は、図-13(図-11 の変形)のようソイルセメント試料の強度はほとんどセメントによる接着力から成立つので、分散材の好ましからざる成分によるセメントの接着力の低下は、密度の増大にもかかわらず、プレーンソイルセメントの強度以下に大きく強度を低下している。ただポリス 2 AA のみがそうで