

地盤改良工法(6)

特殊地盤改良工法(2)

松尾 新一郎*

3. 化学的処理(土質安定剤)¹⁾

3.1 概 説

土質安定剤の使命は、土を建設部門における、よりよき材料とするため、安定剤の散布、塗布、混合、浸透、注入などの処置によって、土の力学的(主として土の力学的強度の増進、ごくまれに低下)、水理的(主として透水性の減少、まれに増進)性質を改善することである。

できるだけ少量の安定剤で土質安定を期することが、現在の土質安定の大きい課題の一つである。現在、有望視され、あるいは将来性のあるものは、ほとんどいずれも1kg当り数百円というところであり、ポルトランドセメントやアスファルトの1kg当り数円というものにくらべてきわめて高価である。これは量産につれて低廉となることもあろうが、また一方、価格がそれほど重要でない場合もある。たとえば、わき水になやむトンネル掘削現場において、安定剤を利用することにより、そのわき水を有効適切に防止することができれば、単にその部分の工事だけの問題でなく、トンネル全体の開通がそれだけ早くなり、トンネルの経済的価値が早く発生するから、工事費全体が生きていることになり、金利その他の面からでも安定剤の高価ということはあまり問題でなくなることもある。さらに、問題が保安に関する場合には金額が第二義の問題となる。

今日まではかろうじて問題のある土や地盤を避けることによって工事が行なわれてきたのであるが、今後はこのような余裕ある立場に立つことができなくなり、むしろどの土に対しても好ましい工学的特性を付与することが必要になってきている。これは世界共通の傾向である。このような方法が重要さを加えつつあることは、多くの文献や研究課題によってうかがい知りうるところで、土質工学の数多い課題のうちでも、もっとも重要なものの一つであろう。この課題が理想的に近い発達をしたとき、土質工学の他の課題も解決されることが多い。

以下に記するところは、現在の先端的な土質安定剤ないしは土質安定工法はしばらくおき、それらが立脚する根拠といったものについてであって、他の分野の協力を

うる便宜ともなれば幸いである。

土の安定化をはかる方法は、原理的には物理的、化学的手段に分けられる。物理的、化学的処理を適用する方法は変転しつつあり、物理的、すなわち、機械的方法是広く用いられており、今後も大いに用いられるであろう。しかし、物理的な方法は土の本来の性質を少しも変えない。他方、化学的方法是、土の本来の性質を変えてしまう。このことが化学的安定法の将来大いに有望である理由である。たんに化学的処理によって土の性質が変化するだけでなく、さらに引張り強度や、たわみ性などの新しい性質を付与することができる。

化学的土質安定法における一般事項をその基礎的な面から分けると、次のようである。

- (1) 土の系において作用する力と安定剤の適用によって変換される性状
- (2) 安定剤が土性を変化せしめる機構
- (3) 土の組成と安定剤の組成とが安定化される土の性質におよぼす効果
- (4) 土粒子表面上における安定剤形成の方法
- (5) 現在の有力な安定方法の再検討

3.2 基礎的考察

粘結せる塊は3次元的な力の網に結合されている。これらの力を2種類、すなわち仮に化学的(第1次的)、物理的(第2次的)に大別することができる。化学的な力は原子間に存在する力であり、結合が強固であるから、それを破壊するのにいちじるしいエネルギーが必要である。化学的結合の二つの種類は土質安定において、もっとも関心の深いものとされている。すなわち、イオン結合と共有結合である。

土塊において粒子内の力は化学的であるに反し、粒子間の力は物理的力である。これらの第2次的力は砂の場合の実際上0から、粘土の場合のかなりの量にまで変化する。上述のように、第2次的力は本質的には表面力であるから、その大きさは表面の量ならびに質に支配されている。

究極の土質安定、あるいはもっと一般的にいって土の性質の変換は、個々の土粒子を結合させる力を変えることによって達せられ、いいかえれば、その第1次的、あるいは第2次的力によって作用する新しい材料、すなわち土質安定剤を導入することによって達成せられる。

化学的土質安定剤は次の3群に分類される²⁾。

- a) 安定剤の効果が本質的に土との相互作用にもとづき、その物理的性質そのものはほとんど、あるいは全然役割を演じないようなもの。
- b) 付加する安定剤の効果が土との相互作用とその物理的性質との双方によるようなもの。
- c) 安定剤の効果が安定剤そのものの性質に本質的に起因するものであって、土との相互作用がほとんど、あ

* 正員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

るいは全然ないようなもの。

3.3 土質安定剤の種類

前節では土の系に作用する力の質と、化学的方法でそれらの土の性質を変える可能性につき述べた。ここでは安定剤が作用する機構を考察すると二つの可能性がある。すなわち、a) 安定剤が連続マトリックスを形成するもの、b) 安定剤が連続マトリックスを形成しないものである。

a) 連続マトリックス 安定剤が連続のマトリックスを形成し、土粒子はその内部の充てん材として埋め込まれてしまうか、あるいは土粒子が安定剤と相互に組み合わさって、土粒子は組織の一部分を形成する。いずれの場合にも、系の特性は本質的には安定剤の特性である。土が安定剤の内部充てん材とみなされる場合には、処理土の強度のような性質は安定剤の性質そのものである。いいかえれば、作用荷重による破壊は安定剤を通じて起こる。

これには、④土質安定結合が安定剤自身の結合より強いとき、⑥土質安定結合が安定剤自身の結合より弱いとき、の2種がある。弱いほうの結合がまず破壊するから④の場合、安定剤を通じて破壊が起こる。⑥の場合、土と安定剤との結合が最初に破壊するといっても、土粒子がマトリックス中で個々に孤立しているから、内部充てんの場合に相応する系を有し、ふたたびマトリックス中で破壊が起こる。

b) 不連続マトリックス 安定剤が連続マトリックスを形成しないとき、次の三とおりの作用が見られる。①土の表面の特性の変換、②土の間げきの充てん、③土粒子の相互結合。

①土粒子の表面の特性の変換：自然土の個々の粒子は物理的力で互いに結合されている。これらの力は表面力であるから、単位容積中の力の総量は表面の質と量の双方にもとづく。それゆえ、結合力の総量は現実には砂における0から、粘土におけるかなり大きい量にまで変化する。力の一部が土粒子の表面特性に左右されるから、表面特性を変えることによって作用する力の変換がなされる。これが表面と反応する種々の安定剤を用いる理由である。

②内部充てん材：安定剤は単に土の間げき充てん材として働くだけである。この場合は粒度分布が変更されただけである。しかしながら、単に新しい土粒子を加え合わせて混合する普通の機械的粒度調整工法に比較し、この方法は粒度分布の変更が良好である場合もあることが特徴である。

③土粒子相互の連結：安定剤が連続マトリックスを形成せず、単に個々の土粒子を連結する場合である。いわば点溶接である。この系の性質を考えると二つの粘着力——すなわち、土粒子の粘着力と安定剤の粘着力——そ

して土粒子と安定剤との間の一つの付着力がある。

この場合に、破壊には二とおりがあって、安定剤あるいは土粒子（土塊をふくむ）内部における破壊（すなわち付着力は粘着力よりも強い）と、安定剤と土粒子との間における破壊（すなわち粘着力が付着力よりも大きいとき）がある。これに関連していいうことは、重要な物質は結合力をもつ物質であって、他の部分はあまり大した役割を演じていないことである。破壊の性状におけるこの差異は実用上重要であって、土質安定工法を行なう際には、その破壊する性状をよく知ることが必要であるから、もし付着の不足から破壊するときは、その粘着強度を増強しても無価値であるからである。

3.4 土と安定剤との系の性質

土の安定剤との系の性質に影響する因子は種々あるが、それら因子の相対的重要性は、変換される性質に左右される。土本来の透水性、圧縮強度、引張強度、たわみ性、吸水性などの変更はそれぞれ趣を異にする問題であって、ある場合に重要な要素は他の場合には重要でない。土に関する要素と安定剤に関する要素に分けて考えることができる。

a) 土組成の影響 土組成（粒径、粒度分布、鉱物組成、有機物、地質学的履歴など）が安定土の性質におよぼす影響については、強度を問題とする場合には、安定剤としては連続マトリックス、あるいは不連続マトリックスの双方が考慮されるべきであるが、透水性が問題となる場合には、安定剤としては連続マトリックスの場合のみが対象となり、不連続マトリックスは全然あるいはほとんど問題でないことになる。強度が連続マトリックスによる場合には、土の構造は破壊の性状には影響を与えない。しかし破壊に要する荷重の大きさは土の組成によって大巾に変化する。たとえば、粒径、粒度分布、間げき量に影響するからマトリックスを形成する材料の量に関係し、それが応力によって起こる、ひずみの性状に影響する。

土あるいは土のある部分が安定剤の一部を吸収するとき（特に異質安定系るとき）、安定剤の残りの部分は異なる性質を持つであろうから、鉱物組成もまた安定土の性質に大いに影響する。

不連続マトリックスで点溶接の際には、上述の場合よりも土の組成が重要である。土の鉱物組成が、土と安定剤との間の結合強度を支配する要素の一つで（安定剤は、もちろん他の一つの要素である）、粒径は応力のもとにおける土中のひずみの性状におよぼす影響のほか他に重要な役割を演ずる。粒径が減少すると、単位体積当りの表面積が増大し、土中の接点も増大する。強度は個々の結合の強度のみならず、単位体積中の結合の数の関数でもあるから、粒径が減ると強度が増大する。他方、粒径が減ると、表面積が増大し、それにつれてよ

り多くの材料が表面で吸収されるから、ある一定量の安定剤に対しては粒子間の結合に有効な量が少なくなることになる。連続マトリックス安定剤の場合に土の透水性を減ずるためには、粒度および粒度分布が安定剤の満たされるべき間げきを支配するから、粒度および粒度分布、特に後者が重要な要素である。

b) 安定剤構造の影響 安定剤が物質の力の網を変更することによって作用し、その変更は安定剤そのものか、あるいは安定剤と土粒子との合体に左右される。これらの力は化学的あるいは物理的であり、またはその両者の組合せである。安定土の性質は種々の力の正確な平衡状態に依存し、安定剤の化学的組成によって支配される。種々の化学的組成が存在するから、処理しようとする土の性質を大巾に変化せしめることが可能となるわけである。

処理土の性質におよぼす化学的組成の影響は、次の例でもってよく示すことができる（これらは現在、土質安定剤としてはほとんど、あるいは全然用いられていないものであるが、特性を示すには好つごうである）。

①パラフィン：パラフィンを形成する力は物理的で本質的には等方質である。低い温度で処理された土は固いが、あまり強くはない。安定剤中の結合は熱によって破壊されるから、温度が高くなると材料は軟弱になり、ついに流動化する。しかし水で影響されないから処理土は不透水性、耐水性である。

②ニカワ：ニカワを形成する力は物理的性質であり、結合はファンデル・ワール力型であり、結合は極性をもっている。処理土は強く、パラフィンよりも強固である。パラフィンとは異なり、ニカワ内部の結合は温度によってあまり左右されないが、水の存在によって非常に影響され、ニカワは溶けて液化する。

③石炭酸樹脂：熱硬化性の石炭酸樹脂を形成する力は、1次的には共有結合であり、力の網は等方質である。処理土は強固で、温度や水の影響を受けない。

④ゴム：ゴムの個々の分子を保持する力はファンデル・ワール力であり、ゴムにおいてはそれぞれが高分子量であるという点でパラフィンとは異なっている。熱にはあまり支配されず、ゴムで処理された土は強度、たわみ性が大きく、熱や水に影響されない。

これらの例から、安定剤の化学的性質と処理土の性質との相関性、および化学的安定工法の可能性を知ることができる。

3.5 安定反応

a) 物理的反應 安定剤を土に加えたときから、それが安定化をはたすまでに形をかえる物理的反應がある。温度変化、水和、蒸発、吸収などである。これらのうち、最初の三つは現在の土質安定工法に用いられており、最後の一つは現在用いられていないが、窯業で粘土

の性質を変えるのに使われている。土木方面でも将来用いられることになるかもしれない。

温度変化の例は、れき青による土の処理である。高温のれき青剤を加えて、それが冷えることによって土質安定が達せられる。また、カットバックアスファルトやアスファルトエマルジョンは蒸発によって液相から固相に変化する。ポルトランドセメントは水和によって変化する。

b) 化学的反應 化学反応の場合には、相の変換ではなく化学反応により、最初に用いた物質から異なる性質をもつ新しい物質が生成せられることによるものである。種々の化学反応があるが、安定剤の形成に用いられる見込みのあるものはきわめて少ない。

これらは、イオン交換、沈殿、濃縮、付加重合、酸化などである。

①イオン交換：土粒子のまわりのイオンを他のイオンで置きかえることで、粘土の性質がその交換性イオンに関係するから、土性の改良に用いる可能性がある。

②沈殿：液体の形で作用して沈殿を形成する性質があり、この沈殿が安定剤として有効な特性を持っているとき、たとえば、ケイ酸ソーダと塩化カルシウムとによりできるケイ酸カルシウムなどである。

③重合：アクリル酸カルシウム（付加重合）やフルラールアニリン（縮合重合）のようなものである。

④酸化：安定剤を生成するのに酸化を用いる方法はクロームリグニン法である。

安定剤の生成の種々の方法を列記すると、表-1のようである。

表-1 種々な安定剤の生成方法

物 理 的		化 学 的	
反 応	例	反 応	例
温度変化	れき青	沈 殿	ケイ酸カルシウム
水和	ポルトランドセメント	縮合重合	フルラール アニリン
蒸 発	カットバックれき青 れき青エマルジョン	付加重合	アクリル酸 カルシウム
		酸 化	クロームリグニン

3.6 実地応用

安定化された土において作用する種々の力、これらの力の作用の機構、土と安定剤の組合せの効果や安定剤形成の方法を検討したから、次に、現在および将来の土質安定剤について表記すると、表-2のようである。

土の性質は土質力学の技術によって決定され、さらに、どのような性質が望まれるかも決定されるので、変更する性質の種類と量を知ることができる。さらに安定土の使用状況を徹底的に考慮する必要がある。考慮すべき重要な要素には作用応力の量と種類、荷重の様相、時間の影響、風化作用などがある。凍結融解の影響、温度変化、バクテリア、地下水による安定剤の化学的分解など

表-2 現在および将来の土質安定剤

処 理 剤	反応原因	マトリックス	土粒子と安定剤の結合	安定剤自身の結合	性 質
ポルトランドセメント	水和	不連続	イオン, 極性	イオン, 共有結合	強剛
れき青(加熱)	温度	不連続	ファンデルワール, 極性	ファンデルワール, 極性	弱剛
れき青(カットバック)	蒸発	不連続	ファンデルワール, 極性	ファンデルワール, 極性	弱剛
れき青(乳剤)	蒸発	不連続	ファンデルワール, 極性	ファンデルワール, 極性	弱剛
ケイ酸カルシウム	沈殿	不連続	イオン, 極性	イオン, 共有	強剛
フルフラールアニリン	縮合	不連続	ファンデルワール, 極性	共有	強剛
リグニンクロム	酸化	?	?	?	強剛
アクリル酸カルシウム	付加重合	連続	イオン, 極性	共有, イオン	強剛ないし強

表-3 土質安定工法の問題において考慮すべき諸問題

自然土の性質	変換されるべき性質	使用に影響するところの状態
粒度分布	透水性	作用する荷重
粘土量	引張強度	種類(引張り, 圧縮性, 水理力)
粘土の種類	圧縮強度	量
粘土の変換性塩基	たわみ性	荷重の様相
塑性	突き固め	風化作用
圧縮性	圧密	乾 湿
透水性	耐浸食性	凍結融解
強度	水との関係	温度変化
		酸 化
		バクテリア
		地下水(化学的)
		薬 品

も考慮せねばならない。表-3 は土質安定工法の問題において考慮すべき種々の要素を示す。

4. 界面活性剤による埋立地の土質安定工法³⁾

4.1 概 説

ここで解説する方法は前項の土質安定剤の一例であって、本講座(1)総説の表-1(46巻4号p.42~34)中に「界面作用——凝固剤の添加」の項に示されるものである。最近の工業用地造成に関連して埋立地の急速な安定化に利用されるものである。

従来、サンドポンプを利用せる埋立地造成法は、海底または河底の土をしゅんせつし、これを海水または河水とともにサンドポンプにより埋立地域内に排流して、その土を沈殿させて埋立を行なうものであるが、その際、しゅんせつされる土がシルトまたは粘土などの微粒子を多く含む場合は、細砂その他の比較的粗粒子は、吐出口近くに沈殿し吐出口から遠ざかるに従い、微粒子のシルトや粘土が堆積し、均一な地盤の埋立を行なうことができない憾みがあった。この傾向のいちじるしい場合には埋立後数年を経るも、人の歩行すら困難な程度の軟弱な地盤であり、埋立後の土地利用上のいちじるしい障害となり、また不同沈下などの悪い影響の原因となっている。

埋立地域内の場所による粒度の相違の一例として、大阪港桜島埠頭埋立地の例を示す。この埋立地は、図-1に示すように台形であり、送土はEからAの方向に向かってなされた。A-12、C-12の箇所の粒度分析の結果を図-2に示す。これによると、C-12がほとんど砂地に

図-1

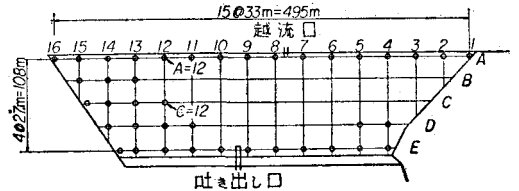
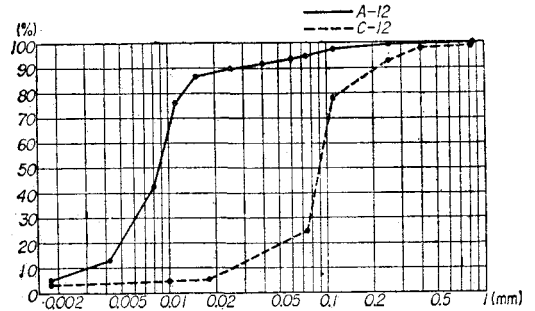


図-2



なっているのに反して、A-12ではシルトおよび粘土が主成分になっている。これは送土水が埋立地内をEからAにゆっくりと流れる結果、粒径の大きい砂は比較的吐出口に近いところに沈殿し、細粒子は速くに沈殿した結果である。

また従来の方で越流口から微粒子が泥水となって越流することが、漁業補償の対象として問題になる場合もあった。

ここにおいて、サンドポンプによる送泥中に凝結性を有する界面活性剤その他を混入し、サンドポンプの吐出口付近においてシルトや粘土などの微粒子を細砂その他の比較的粗粒子と同時に沈殿堆積させ、粒子組成の均一なる埋立地を造成する。

4.2 方 法

この工法を有効かつ経済的に実現する界面活性剤の一つとして、アクリルアミドをグラフトさせたカルボキシメチルセルローズが見出されている。この界面活性剤(以下簡単のためパンフロック-Xと記すことにする)を土の懸濁液に0.0005%程度添加することにより土粒子は相互に凝集して沈殿速度をいちじるしく増し、土粒子集合体と水とを分離することができ、均一かつ硬度の埋立地を造成することができる。

4.3 実施例

この例は大阪市此花区の大阪ガスKKの埋立工場現場の実際工事（面積44000m²，埋立土量111000m³）において行なったものである（図-3）。

a) パンフロッカーXの注入ノズルの位置の選定

パンフロッカーX注入ノズルより送泥管吐出口までの距離が近すぎる場合は、パンフロッカーXが懸濁液と均等に混合せず、パンフロッカーXのむだな分が存在し、また逆に両者の距離が遠すぎる場合には一たん生成したフロックが破壊されるおそれがある。したがって両者間の距離は送泥管の径、その中を流れる懸濁液の流速、土砂含有量に応じて、最適距離が存在するはずであり、パンフロッカーXの性能を十分に発揮せしめるための重要なファクターである。よってノズルと吐出口との距離を1.8, 5.4, 9.0, 16.2, 20.0, 30.0, 45.0, 70.0mに変えて、各方向に流れるスラリーのフロックの生成状態を観察する定性的な実験によって、吐出口より30m付近が適当な注入箇所であることがわかった。適当にパンフロッカーXを添加されたスラリーは吐出口より吐き出され、ただちに沈殿する。

注入装置は低馬力のギャーポンプで十分である。注入ノズルは図-4に示すごとくで、きわめて簡単なもので、取りつけも容易である。

図-3に示す現場の各地点で、パンフロッカーXの添

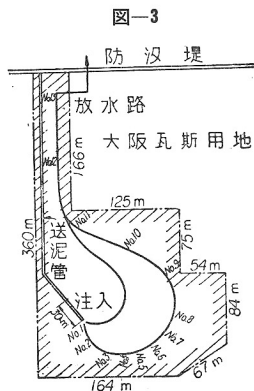


図-3

図-4

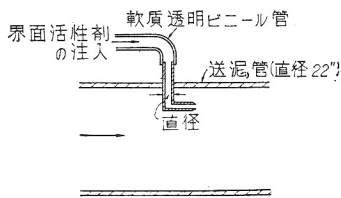


写真-1



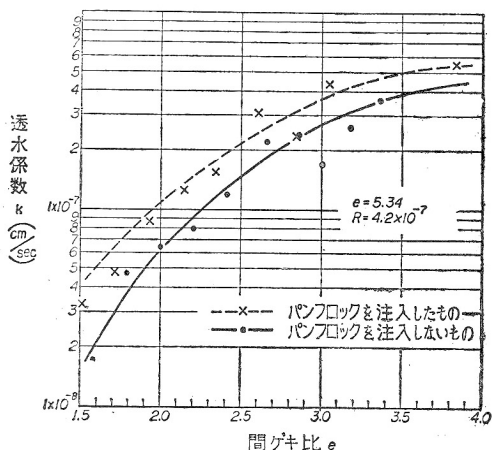
加の有無による排出土の沈降状況は、写真-1のようであって顕著な効果がみられる。

4.4 透水性，圧密性，その他におよぼす効果

パンフロッカーXの含有により、土の透水性，圧密性その他の性質がいかに変わるかを知ることは重要であるので、大阪湾海底粘土について、この問題を研究した。

a) 透水係数 間げき比を変えて透水試験を行なった結果を、図-5に示した。パンフロッカーを含有するものが、どの間げき比においても、含有しないものに比して透水性が高い値を示しているが、これは、粒度分布の均一化、およびパンフロッカーXのもつ凝集作用の結果生じた二次的な固粒が間げき中の透水路の断面を大きくした結果である。

図-5



b) 乾燥性 パンフロッカーXを含有せる場合、乾燥に影響をあたえるものとしては、透水性のほかに薬品の持つ保水性がある。実験の結果は、保水性は問題にならないことを示している。図-6に両者の乾燥状況を示した。なお実験は、面積、深さとも等しい2つの容器の一方にパンフロッカーを含有せるものを、他の一方に含有しないものを入れ、乾燥条件を双方全く同じにして行なった。

c) 圧密性 両試料の間げき比-荷重曲線，間げき比-圧縮係数曲線をそれぞれ、図-7,8に示す。圧密性においても両者の間に大差はなく、パンフロッカーを含有せる土の方が、わずかに好ましい傾向をとる。

d) 収縮限界 とともに24.5を示し、差は認められなかった。

e) せん断抵抗 パンフロッカーXを含有せる土のせん断抵抗の変化を、図-9に示した。同じ間げき比において、パンフロッカーXを含有した土は、含有しない土に比して一様に強度を増していることがわかる。

以上に示すように、パンフロッカーXは土そのものの性質にはなんらの悪影響もおよぼさず、むしろ好ましい傾向を生じ、本工法主眼の粒度配合の均一化に有効な作

図-6

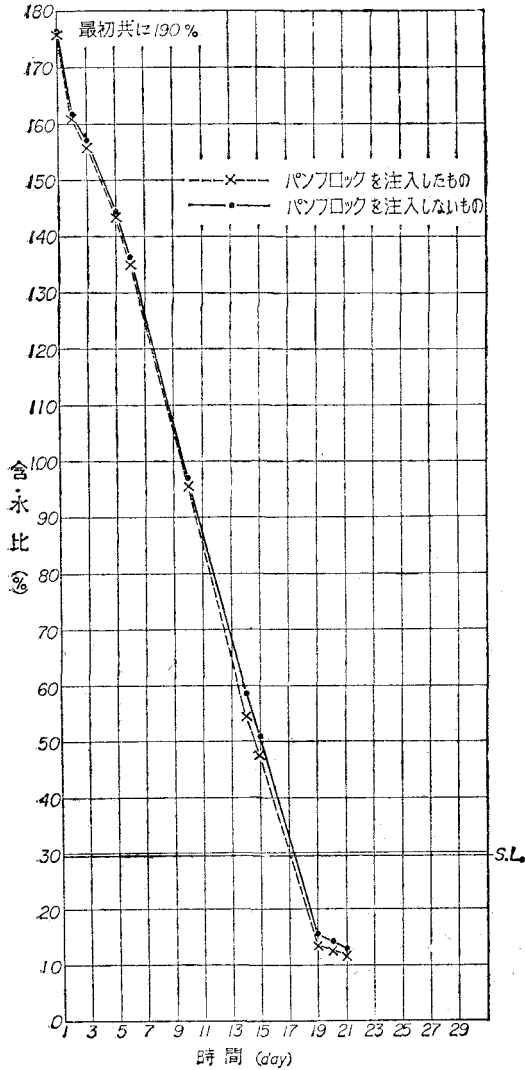
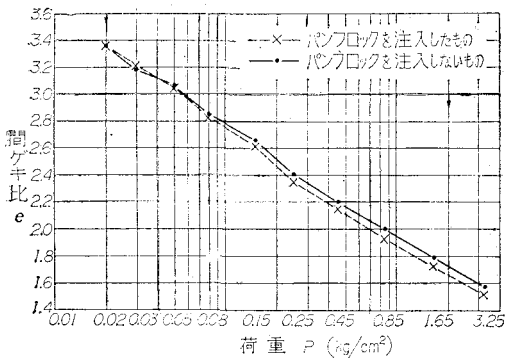


図-7



用をすることが判明した。

5. 注入工法⁹⁾

5.1 概 説

地盤の性質を変えて、その力学的強度を増し、あるい

図-8

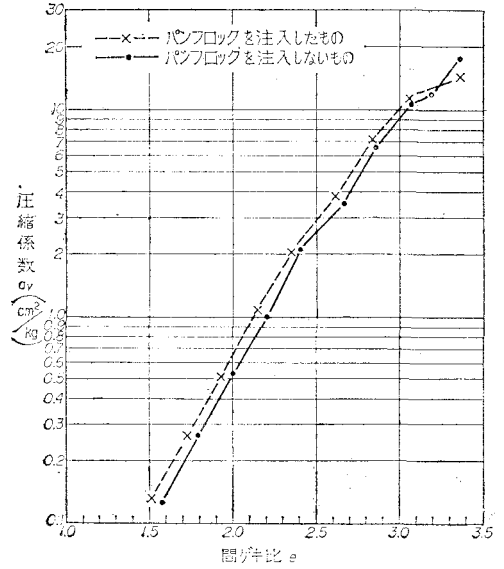
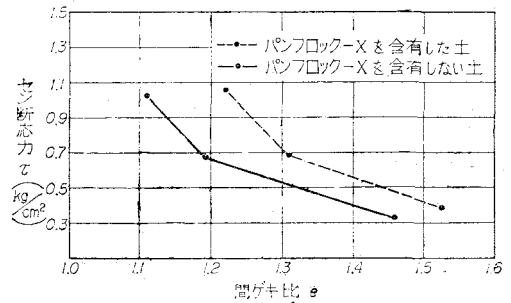


図-9



はろう水を防ぐことができると、軟弱な地盤のところでも各種の基礎工事・締切工事、あるいはトンネル工事が可能となり、またその施工が容易となる。このような軟弱地盤の改良をめざした工法はこれまで種々試みられ、また実際ヨーロッパなどではかなり早くから施工されてきた。このような工法として、セメント注入法および薬液注入法などがある。これらは後述するような欠点があり、それぞれ施工すべき地盤によって適当に使われるべきものであるが、その施工に当っては改良すべき多くの問題が残されている。特に薬液注入法には種々改良すべき欠点と十分でない信頼性のため、その工法の発達是非常にさまたげられている（総表参照）。

5.2 適用範囲

注入処理をその応用面によって分類すれば、次のようになる⁹⁾。

- a) 一般基礎工事 ①地下水流動防止、②揚圧力問題の処理、③鋼矢板割目の補修、④薬液固結杭（深い杭打ち基礎において、杭長を節約するため、および電信柱や高圧線鉄塔の定着のため）、⑤ダム岩盤基礎のクラックの薬液注入、⑥ダム、配管坑、導水路の防水、⑦掘削時における隣接基礎の保護、⑧掘削を危険にするクィッ

ク サンドの固結，⑨ 岩盤上のケーソン底面の封かん，
⑩不安定地盤におけるシャフトの降下。

b) 建築工事 ①過剰荷重を受ける建物基礎の沈下防止，②基礎の支持能力の向上，③アンダー ピンニング，④建築物の支持，定着，⑤ろう水地下室の防水。

c) 鉄道工事 ①擁壁，橋台，橋脚などの洗掘防止，あるいは支持力の増大，②砂質地盤中の架構の安定化，不安定地盤中のトンネル掘削の簡便化（また，トンネル工事中の圧搾空気の漏洩防止），振動に対する絶縁，③トンネル，陸橋，地下道の防水，④鉄道路線を横切る工事（上下水道管，電信電話ケーブル，人孔）のトンネル掘削の便宜助長。

d) 都市工事 ①狭い街路における下水管や水道管のトンネル掘削の簡便化，②掘削工事に隣接する基礎の保護，③機械基礎の振動の消去，④下水管，地下鉄，トンネル，貯水槽，沈殿池，ろ過池，ポンプ室，管坑，擁壁のろう水防止，⑤河底中のトンネル掘削の簡便化，洗掘に対し，あるいは河床しゅんせつ中の橋脚の保護，⑥クイック サンド中の井戸の掘進。

e) 河海工事 ①浸食に対する保護（河岸の保全），②現存の埠頭，岸，防波堤，囲堰，捨石工の補修，強化，③建設中の囲堰の安定化，④運河，河川，港湾のしゅんせつ中，既設の橋脚の保護，⑤破堤に対する防護，洪水中の堤防の強化（土のう壁の固結），⑥河川湾曲部における既設堤防の強化のため心壁の固結。

f) 鉱業 ①不安定な地盤中における立坑掘削，②廃棄坑の酸汚染の防止，ろう水性立坑の防水，既設坑上構造物基礎の強化。

5.3 注入剤の種類と特性

注入剤のおもなるものを整理すれば，表-4 のようになる。これら注入剤のうち懸濁液，乳濁液はともに粒子を含有し，これらの粒子径よりも小さい間げきにおいてはろ過作用を受け，それ以上粒子は浸透しない。ろ過理論によれば，懸濁液の粒子はその粒径の約10倍の粒径の粒子によりろ過されるものといわれている。いまニートセメント注入の場合を考え，セメントの粒径を 0.1 mm

とすると，粒径 1.0~1.5 mm の砂によりセメント粒子はろ過され，相当大なる圧力のもとでも粒径 0.589 mm 以下では浸透しにくいとされている。したがって，このような砂層に対してはセメント注入工法は不適當である。またこの工法においてはセメントの凝固時間を適宜現場の状況に応じて調節できないため，たとえば激しいわき水または流砂がある場合などには，注入硬化は不可能となってくる。

薬液注入のうちケイ化法はすべてケイ酸ソーダを主薬液とし，これに塩酸を加えることによって生ずるケイ酸ゲルの硬化によって，土質硬化やろう水防止の目的を達するのであるが，使用されるケイ酸ソーダの濃度は大なることが必要なため，この反応は一瞬にして起こり，また粘性も相当大きいため，No. 125 フルイ以下の微粒砂の地層においては事実上注入できないとされている。したがって一つの注入孔により硬化される範囲は小さく，その施工はなかなか手数を要する。また土のもつ化学的性質や温度，含水量の多少によっても，浸透・凝固が不確実となり，特に2液を別々に注入する際には薬液の均一な接触反応によって凝固が完全に起こるかどうかが，2液を同時に注入する場合にくらべていっそう疑わしいと考えられる。また実際の注入操作においてもポンプ，ホースおよびノズルなどの掃除に手数を要する。

理想的な薬液注入材料としては，前述の欠点を改善しうるものでなければならない。要望される事項は次のようである。

- (a) 施工時の取扱いが容易で，反応または凝固開始まで 30 分以上のもの。
- (b) 岩盤・土・砂などとの付着力が大きいこと。
- (c) 価格の低廉なこと。
- (d) 強度が 24 時間後だいたい 5 kg/cm² 以上であること。
- (e) 毒薬または劇薬でないこと。
- (f) 反応生成物が安定であって耐久性，耐水性であること。

アクリル酸カルシウムその他の重合工法は，次のような利点を有する。

(a) 粘性がケイ化法の主剤たるケイ酸ソーダよりもはるかに小さいから，微細な砂層にも注入浸透が可能である。

(b) 凝固時間の調節が容易である。

(c) 重合反応によるから，2液が必ずしも完全に混合されなくても反応は進行し，全面的凝固が期待できる。

(d) 2液を混合し，あるいは別

表-4 注入剤の分類

注入剤	懸濁液	ニートセメント	—ポルトランドセメント+水+分散剤
		モルタル	—ポルトランドセメント+砂+水+分散剤
		プレバクト コンクリート	—ポルトランドセメント+砂+水+分散剤
		粘土 (ベントナイト)	—粘土+水
	乳濁液	れき膏	—れき膏+水+分散剤
薬液	ケイ化法	1回注入法	{ ケイ酸ソーダ+アルミン酸ソーダ+水 ケイ酸ソーダ+重炭酸ソーダ+水 ケイ酸ソーダ+塩化カルシウム溶液
		2回注入法	{ ケイ酸ソーダ，ついで塩化カルシウム溶液 ケイ酸ソーダ，ついで炭酸ガス ケイ酸ソーダ+炭酸ソーダ，ついで塩化カルシウム溶液
			重合法

々に同時に注入できるから取扱い操作が容易である。

(e) アクリル酸カルシウム単独の生成物は膨潤性を持たせることができ、完全なろう水防止が期待できるなどである。

ただ現今ではアクリル酸カルシウムの価格が比較的高いことが欠点であるが、ようやく量産されようとしているから、安くなることも期待できる。

5.4 注入作業

薬液注入において最も重要な項目は、凝固あるいは重合時間である。もし、この凝固時間があまり短かすぎると、処理中の地盤や構造物に圧入される以前にゲルができてしまう。したがって各薬品系統に用いられる成分の割合は試験室条件の下に管理試験を行なって決定しなければならない。一般に反応性薬品の濃度変化に応じた凝固時間を与える1本の曲線を画しておくのである。反応性物質の温度もまた凝固時間すなわちゲルの生成の時間に顕著な影響を有している。薬品の温度が高いほど凝固時間は急速になる。さらに凝固時間に関する各個管理試験は、大規模の作業を企画する前に、その適用地点において遭遇するようなあらゆる温度において行なわねばならない。ケイ酸ソーダが1回圧入法の第1の薬品として用いられる場合には、第2の薬品、たとえば塩化カルシウムなどは、これをケイ酸ソーダに加えるようにし、決してケイ酸ソーダをこれらの塩で作った溶液に加えてはならない。この添加の順序は重要である。それはゲルが生成する速度はケイ酸ソーダのpHが酸またはアルカリのいずれかに向かって変化するに要する時間によって左右されるからである。したがって塩溶液をケイ酸ソーダに加えるようにして、できるだけ凝固時間をおくらせ注入のための時間を与えるようにする。注入作業としては、注入しようとする部分に注入管を打込み注入剤を圧入するのである。注入管を打込みながら第1液を圧入し、引抜きながら第2液を圧入する方法や、第1液と第2液を近接する別々の注入管で圧入する方法がある。また注入範囲が広範なときに、まず上部を処理してからその下方におよぶ方法、あるいはその逆の方法、四周を処理してからその内部を処理する方法などがあるが、いずれがよいかは現場の事情と処理の巧拙によるところが大である。現場の事情をよく検討して試みに注入を行なって、まずい点を直してゆくやり方が順当であろう。注入作業はあまり理屈どおりに行なえるものではない。注入管の考案としては、フランスのソレタンシュ (Soletanche) のものがおもしろい⁷⁾。これは、打込んだ注入管中の任意の深さのところでのみ注入できるよう、特殊のプランジャーをそう入されているから、注入に当たって注入管自体の上下は必要でない。

6. イオン交換法⁸⁾

一般に土粒子はマイナスに荷電されており、その表面

にプライスのイオンを吸着している。また間げき水にもイオンが溶存している。これらのイオンは自然または人為的に交換される。前者のイオンの交換はイオン交換と呼ばれるものである。ところが土性はその呼着イオンおよび間げき水中に溶存しているイオンの種類により大きく影響される。その影響の程度やイオン交換の難易と量は土とイオンの種類によっていちじるしく異なる。

他方、長年安定を保ってきた斜面などが地すべりを起こすことがある。この原因を考えると、地下水水位の変化や降雨などのごとく年々くり返される現象には耐え、しかも相当な風化作用を受けるに足らず短かい年月の後に地すべりが起こるのは、年々の変化と長年月を要する風化用との中間の時期に起こるある現象が原因なのではなからうか。

このような観点から、鹿塩の地すべりについて雨水と地すべり地から浸出する地下水との性質の差異を調査したところ、イオン交換の行なわれていることを知ったのでイオン交換前後の土を人工的に再製して力学的強度を調べたところ、内部摩擦角が 0.45° から 0.06° に、粘着強度が 0.163 kg/cm^2 から 0.088 kg/cm^2 に変化した。これらの値を用いて斜面安定計算を行なうと、最初安定していた斜面が明らかにすべり出すことになった。そこで、積極的に人為的にイオン交換を行えば土質の改善をはかることができるのではないかという示唆をうるわけである。

7. 置換工法

地盤が軟弱であって、そのままでは目的とする工事が実施できない場合には、その軟弱な部分を他の健全な土材料で置きかえることがある。軟弱地盤上に道路、鉄道、河川などの築堤を行なう際にしばしば応用される。

方法によって、つぎの三種にわけられる。

7.1 普通置換工法

軟弱土層が地表に存在し、その厚さが3~4mくらいの場合、軟弱土層全部を掘削またはその他の方法で排除して、そのあとに健全な砂質土その他を入れて、新しい基礎地盤をもうけ、その上に盛土を行なう方法である。排除するとき新しい材料を入れるときにサンドポンプを使用することもある。このときは地下水位が高いことが必要である。ショベルやサンドポンプで掘削した後新しい盛土材料を入れてゆく普通の方法や上方の一部を掘削し、余分の盛土を行ない、その載荷重で下方の軟弱土を排除しながら築堤する方法などがある。また、低くて巾の狭い旧道をまたいで高い巾の広い新道を構築する場合、旧路体の両側の軟弱土を掘削して、そこに新しい材料を投入する。

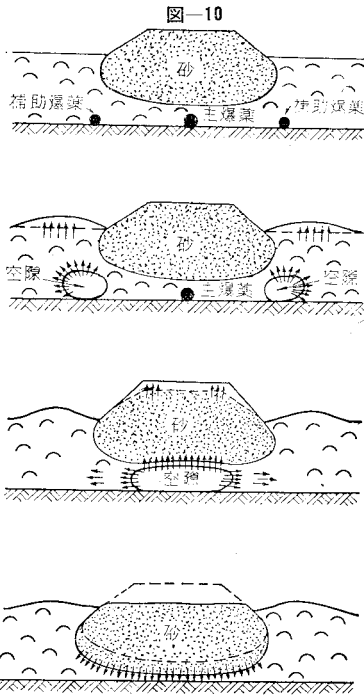
7.2 ジェット工法⁹⁾

2つの方法があり、両者は全く異なる考え方にもとづくものである。その1つはジェットにより軟弱土層を飽水し、液化して、前進する盛土による排除を容易ならしめる方法であり、他は盛土を仮に施工した後、できるだ

け早い時期にジェットにより盛土を飽水せしめて重量を増し、かつクィック サンド状として、落着かせる方法である。ジェットは普通、心々 3m くらいに盛土の両側 1 列ずつ併行して実施する。付近でかなり多量の水が容易に得られることが必要で、ジェッティング後の水の始末につきあらかじめ考えておかねばならない。

7.3 爆破工法

ジェット工法の利用できない泥炭層におもに用いられる。土中でダイナマイトその他を爆破し、その爆破力により土の入れかえを行なう方法で、軟弱土層の厚さに応じていくつかのやり方がある。また爆破薬をそう入する位置によっても異なる(図一10)。



8. 毛管乾燥工法¹⁰⁾

非常に軟弱な地盤や埋立地の上に構造物を築造する場合には、それらの基礎を造るに十分な強さをうるため、含水比の減少をはかり、あるいは圧密を促進する必要がある。また、アースダムや築堤の用土の適切な含水比(最適含水比の前後)を確保するため、土取場の含水状態をある一定値以下に保持せねばならぬ場合がしばしばある。含水量の低減をはかろうとする地盤に適当な間隔で、毛細管現象の大きい数多くの物体を必要な深さまで押込み、その上端を地盤表面に適当に露出させて植立する。地中の水分は毛細管現象により毛細管体を通じて上昇し、その毛細管の地上突出部で空中で自然乾燥する。そして蒸発した水量だけさらに地下より毛細管を通じて補給せられ、揚水ならびに蒸発は連続して進行し、所期の目的を達する。この方法によれば、簡単な設備でなら特別な動力、エネルギーを必要とせず、地盤を経済的に所期の目的に向かって乾燥させることが期待できる。この工法で最も重要なことは、毛細管現象の大きい物体を採用することと、その地上突出部において水分を迅速に蒸発せしめるような材質と形状であることである(総表参照)。

9. 熱処理(焼結)工法¹¹⁾

粘性土、特に粘土の性質がその含水量のわずかな変化によっていちじるしく影響を受けることから、地中に鉛直または水平のボーリング孔をあけ、その中で液体または気体の燃料をバーナーで燃やすことにより、ボーリング孔の周囲の土の固結あるいは安定をはかろうとする方法であって、ソ連で試みられた(総表参照)。また熱風を吹き込んで地氾りを防止した例が、アメリカ・カリフォルニアにある。

10. 凍結工法

わき水が多量で軟弱な地盤に立杭などを掘削するとき、人工的にこれを凍結硬化して後に掘削する方法である。掘り下げようとする立孔の周囲にある間隔で同心円を画いてせん孔し、これに凍結管をそう入し、その中に注入管をさし込み、冷却液を送る(総表参照)。

11. あとがき

一般に地盤改良工法は現地の特性を十分把握して、最も適当な工法を選択して実施すべきである。特に軟弱地盤においては、その特殊性を十分調査、検討してから工法を決定しなければならない。工法を選択が妥当であれば、工事は半ば成功したとみてよい。誤まった工法ないしは不適当な工法は労多くして功少ないという結果になるのみならず、しばしば失敗に終るものである。

参考文献

- 1) 松尾：土壌安定剤について、材料試験, 7巻, 58号, 昭33, p. 2~6
- 2) Murray, G.E. : Soil Stabilization by Chemical Means, Proc. Conference on Soil Stabilization, p. 107(1952)
- 3) 松尾・佐々木：界面活性剤による粒度分布の均一化, 土木学会年次講演会講演概要, 土木学会, 昭35, 第1部, p. 15~16
- 4) 松尾・佐々木：界面活性剤による埋立地の土質安定工法, 土と基礎特集号 No. 4, 昭36, p. 70~75,
- 5) 松尾：深部土質安定工法, 土と基礎の新工法, 土質工学会, 昭35, p. 192~197
- 6) Riedel, C.M. : Chemical Soil Solidification Work in Construction and Emergencies, *idid.* p. 77 (1952)
- 7) Clay Grouting in Alluvial Sand and Gravels: Soletanche, (1957)
- 8) Matsuo, S. : A Study of the Effect of Cation Exchange on the Stability of Slopes, Proc. 4th Intern. Conf. Soil. Mech Found Eng. Vol 2. 1957, p. 330~333.
- 9) Michigan State Highway Department : Field Manual of Soil Engineering, 1952, pp. 102~109.
- 10) 松尾・福田・三野：軟弱地盤の毛管乾燥工法について, 土木学会年次学術講演会講演概要, 昭36, p. 63~66.
- 11) Beles, A.A. : Thermal Treatment as A Means of Improving the Stability of Earth Mases, Geotechnique, Vol. 8, No. 4, 1958, p. 163.

(原稿受付: 1961. 8. 28)