

薬液注入による粘性土の改良のメカニズムとその支配条件

MECHANISM FOR THE IMPROVEMENT OF COHESIVE SOILS BY CHEMICAL GROUTING AND THE GOVERNING CONDITION

森 麟*・田村昌仁**・小峯秀雄***

By Akira MORI, Masahito TAMURA and Hideo KOMINE

In the chemical grouting for the improvement of the cohesive soils, the hydrofracture occurs in all cases. The object of this study is to investigate the mechanism of strength increase of cohesive soils by grouting. The increase of strength by grouting depends upon the formation of solidified grout, the consolidation by the injection pressure and moreover the cementing action between the cohesive soil and the liquid dehydrated from the solidified grout. These factors are influenced by the grout itself and the ground condition, such as the strength of cohesive soils before grouting, the exchangeable cation, and the buffer capacity of soil.

Keywords: grouting, cohesive soils, hydraulic fracture, strength

1. まえがき

粘性土地盤を対象とする薬液注入では、砂質地盤と異なって薬液の浸透が困難で、薬液は注入圧で割裂した地盤内に脈状に入りそのまま硬化して、土中には脈状のホモゲルが形成されることになる。これは割裂注入とよばれている。粘性土地盤に対する注入の目的は、止水よりもむしろ強度増加であり、割裂注入による地盤の強度変化を考えるうえでは次の2点が問題となる。

- ① 硬化した脈状のホモゲルと粘性土により構成される複合土としての強度特性
- ② 脈状ホモゲルの発生に伴う粘性土自身の強度変化そして、これらは注入圧、脈状ホモゲルの分布状態、注入薬液の性状、および粘性土の性状に左右される。

注入による粘性土の改良効果を調査した研究は少ないが^{1),2)}、林ら^{3),4)}は、室内実験において粘性土に割裂を発生させてその改良効果を調べた。粘性土の注入では、注入材が地盤を押し広げる際に割裂脈周辺の粘土を圧縮・

圧密させることが考えられるが、注入前後の粘性土の含水比を調べた結果注入前後で差がなく注入による圧密効果は生じないことが指摘されている。また、日向ら⁵⁾は、硬化した注入材と粘性土より構成される土の強度特性を一軸圧縮試験および三軸圧縮試験で調べたが、改良効果はほとんど認められない結果を得ている。これらの研究からみても、現時点では粘性土地盤の注入に対する工学的な信頼性が確立しているとはいえず、注入による粘性土の改良メカニズムを解明して改良が可能な薬液性状や粘性土の性状を明らかにすることが必要となる。

本研究は、注入による粘性土の強度変化を室内実験および注入現場から採取した試料を用いて調査研究したもので、改良のメカニズムやその支配条件を明らかにしている。

2. 脈状ホモゲルと粘性土より構成される複合土としての強度特性

(1) 実験方法および試料

注入による粘性土自身の強度変化については次章で述べるため、粘性土自身の強度は割裂現象で変化がないとして、まずはじめに割裂脈と粘性土より構成される複合土としての強度特性を調べることにした。この複合土の強度特性を考えるうえでは、割裂により生じた脈状ホモ

* 正会員 工博 早稲田大学教授 土木工学科
(〒160 新宿区大久保 3-4-1)

** 正会員 工博 建設省建築研究所基礎研究室研究員
(〒305 つくば市立原 1)

*** 正会員 工修 (財)電力中央研究所立地部研究員
(〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

ゲルの強度が大きい懸濁型薬液の使用がまず前提となるので、ここでは懸濁型薬液としてLW薬液（セメント＋水ガラス）を用いた。表一には、LW薬液のホモゲルの強度特性を示す。薬液配合については、表五に示す。

試料の作製方法は、次のとおりである。モールド（直径15 cm、高さ20 cm）に、液性限界程度の含水比で練り返した市販カオリン粘土を詰めて1週間以上所定の圧力で圧密させる。その後、圧密完了後の試料をワイヤソーで所定の間隔で輪切りにし、その間にLW薬液を流し込んでゲル化させ、そのままさらに同一の圧力で1か月間再圧密させた。

硬化したホモゲルを含む粘性土の強度は、一軸、三軸圧縮試験で調べたが、せん断面の方向と割裂脈の方向との関係については、一面せん断試験により調べた。一軸、三軸圧縮試験（供試体直径5 cm、高さ10 cm）および一面せん断試験（供試体直径6 cm、高さ2 cm）における供試体は、上記のように作製した試料から切り出したものであり、形状と割裂脈の関係については、図一に示す。ただし、一軸、三軸圧縮試験の供試体の切り出しは、LWホモゲルの強度が大きい場合ホモゲルの間隔を密にすることが困難であり、高さ10 cmにつき5 mmのLW脈を2枚挟んだものとした。また、ホモゲルのかわりにアクリル円板を挿入してこれと類似の状態とし、粘性土に剛板を挿入した場合の補強効果を調査した。

複合土の強度特性を考えるうえで問題となる粘性土と割裂脈との付着性状については、一面せん断試験で求め

た。試料は、練り返し市販カオリン粘土を圧密リングに詰めて所定の圧力で1週間圧密し、その下部にLW薬液（ゲル化時間1分）を流し込んでゲル化させ、同じ圧力で1か月圧密させて作製した。市販カオリン粘土の透水係数、粒度分布は、表六、図六に試料Hとして示す。LWホモゲルとカオリン粘土との境界面のせん断強度（ $\tau=1.89 \text{ kgf/cm}^2$ 、上載圧 $\sigma_v=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ）は、粘土自身のせん断強度（ $\tau=0.75 \text{ kgf/cm}^2$ ）より大きくなった。これは、LWホモゲルが圧密して離しょう液（圧密脱水液）が粘土に浸透して境界付近の粘土が固化したためと考えられ、現実問題としての境界面のせん断強度は粘土自身のせん断強度程度になろう。

(2) せん断面の方向と割裂脈の方向との関係

図一に示したような状態の強度を一軸圧縮試験で調べた結果、LWホモゲルを挟んだ場合の一軸圧縮強度 q_u は 0.35 kgf/cm^2 となり、粘性土自身の強度（ $q_u=0.34 \text{ kgf/cm}^2$ 、上載圧 $\sigma_v=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ）と等しく強度増加は認められず文献5)と同様な結果となった。また、三軸圧縮試験でLWホモゲルを挟んだ場合も摩擦角 ϕ はゼロとなり、強度増加はみられなかった。

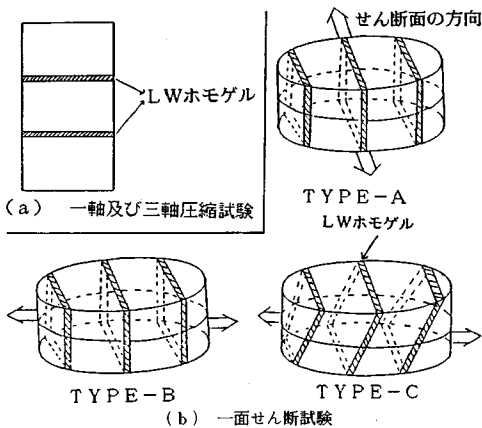
しかし、ホモゲルの割裂脈が直接にせん断される場合には、当然その強度は粘土自身のものより大きくなると思われるので、一面せん断試験により脈を挟んだ試料のせん断強度を調べることにした。

一面せん断試験における供試体の切り出し方向とせん断面の関係は図一に示してある。斜め方向の脈をせん断する場合、Type-Cのと逆方向の場合もあるが、この場合の強度は、Type-Cの場合とほぼ等しいため特に考

表一 LW薬液のホモゲルの一面せん断試験

$\sigma_v(\text{kgf/cm}^2)$	$\tau(\text{kgf/cm}^2)$	$\sigma_v(\text{kgf/cm}^2)$	$\tau(\text{kgf/cm}^2)$
0.30	2.90	0.50	3.47
1.00	4.34	2.00	6.32

σ_v : 上載圧 (kgf/cm²) τ : せん断強度 (kgf/cm²)

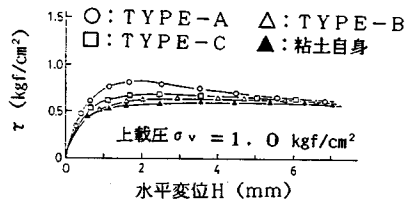


図一 供試体の形状

表二 一面せん断試験における供試体の種類

試料	上載圧 σ_v (kgf/cm ²)	LWのホモゲル		含水比 ω (%)
		厚さ (mm)	枚数	
A	1.000	2	3	25
B	1.000	2	3	34
C	1.000	2	6	34
D	1.000	5	3	34
E	0.500	2	3	38
F	0.300	2	3	39

試料Aは、豊浜砂50%市販カオリン粘土50%の混合土であるが、他は全て市販カオリン粘土100%である。



図二 試料Aの一面せん断試験の結果

慮していない。表一2には、供試体の種類を示す。

図一2には、試料Aにおけるせん断応力 τ と水平変位 H との関係を示したものである。Type-A の場合の強度は粘土自身の強度より大きくなっているが、他の場合では粘土自身の強度と大差がなく、残留強度はせん断面の方向に無関係となり粘土自身の強度に等しくなっている。

表一3には、一面せん断試験の結果を示しているが、最大強度は Type-A の場合に得られ、他の場合では粘土自身の強度とあまり変わらないことが明らかとなった。最大強度が発揮されている Type-A の場合において、単純な重ね合わせが成立すると仮定すると、せん断強度は、次式で表わすことができる。

$$\tau_f' = \frac{\tau_{rc} \cdot A_c + \tau_{rlw} \cdot A_{LW}}{A} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 τ_f' : せん断強度の計算値、 A : 全断面積、 τ_{rc} : 粘土のせん断強度、 A_c : 粘土部分の断面積、 τ_{rlw} : LW のせん断強度、 A_{LW} : LW 部分の断面積

式(1)を用いて計算したせん断強度 τ_f' と最大強度が発揮された Type-A の強度 ($=\tau_A$) との比 $R_A (= \tau_A / \tau_f' \%)$ を表一3に示す。 R_A は、80% 前後であり Type-A の場合には LW ホモゲルの強度が比較的有効に発揮されているが、他の場合では LW ホモゲルの強度があまり発揮されていないといえる。実際の注入では、仮想したすべり面と割裂脈の方向が図一1の Type-A のように生じる場合が最も効果的であると考えられる。しかし、現場で観察される脈の方向は水平方向の場合が多く、すべり面と割裂脈の方向としては、Type-B, C を考慮しなければならないので、割裂脈自身の強度が特に大きくなる限り、割裂脈が粘性土に大きな強度増加をもたらすことは困難と考えられる。

(3) 粘性土にアクリル板を挿入した場合の補強効果

図一1に示した状況は、粘性土中にいわば硬い板を挿入した場合に相当する。そこで脈状ホモゲルのかわりにアクリル円板を所定の枚数だけ挟んだ試料を用いてその補強効果を調べることにした。

表一3 一面せん断試験の結果

試料	せん断強度 τ (kgf/cm ²)			τ_{rc} (kgf/cm ²)	τ_f' (kgf/cm ²)	R_A (%)
	TYPE-A	TYPE-B	TYPE-C			
A	0.82	0.67	0.69	0.63	1.03	80
B	0.92	0.78	0.82	0.75	1.13	81
C	1.31	0.81	0.76	0.75	1.50	87
D	1.35	0.83	—	0.75	1.71	79
E	0.62	0.51	0.53	0.48	0.80	78
F	0.32	0.23	—	0.18	0.41	78

τ_{rc} : 粘性土のせん断強度 τ_f' : (1) 式の値
 τ_A : TYPE-A の強度 $R_A = (\tau_A / \tau_f')$

二つ割れモールド (直径 5 cm, 高さ 15 cm) に所定の含水比 ($W=35\%$) で繰り返した市販カオリン粘土およびアクリル板 (厚さ 2 mm, 直径 5 cm) を詰め、プランジャーで圧力成形してから押し出した。アクリル板は、試料長さ 10 cm につき 2~4 枚とした。アクリル板の表面は、標準砂を接着剤で張り付け摩擦を大きくしたもの (Type-1)、および油を塗布してすべりをよくしたもの (Type-2) の 2通りとした。表一4に示した結果より、粘性土の一軸圧縮強度は、挟んだ板の枚数やアクリル板の表面性状に無関係となり、粘性土自身の強度とほとんど差がないことがわかる。

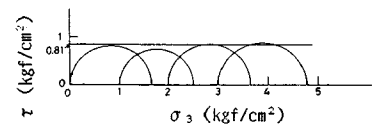
同様な結果は、UU 試験においても生じている。図一3には、市販カオリン粘土のかわりに、擬似地盤粘土 (木節粘土 2400, ベントナイト 300, 石膏 1000, 水 1800 グラムよりなるやや固結した混合土) を用いた UU 試験の結果を示す。アクリル板の表面は、標準砂を張り付けており、供試体長さ 10 cm につき 2 枚の円板を挿入した。UU 試験の摩擦角 ϕ_u はアクリル板を有したもので、そうでないものいずれも 0° で、粘着力 c もほぼ等しくなっている。

土中に挿入された固い板が土に及ぼす影響としては、次のように説明できる。供試体に軸圧を作用させると、しだいに供試体は横方向に広がることになるが、挿入された固い板は横方向の変形に抵抗することになり、板の上下面で拘束力 F が発生する。この F の大きさは、固い板と土との摩擦角 ϕ_a に左右され、 σ_1 を軸圧とすると

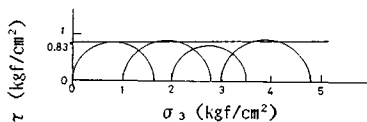
表一4 アクリル板を挟んだ粘土の一軸圧縮強度 q_{ua}

アクリル板の枚数	q_{ua} (kgf/cm ²)		粘土自身の q_u (kgf/cm ²)
	TYPE-1	TYPE-2	
2	0.386	0.389	0.390
3	0.356	0.391	
4	0.393	0.350	

TYPE-1 は、アクリル板に豊浦砂を張り付けている
 TYPE-2 は、油を塗布してすべりをよくしている



(a) 擬似地盤粘土のみの場合



(b) アクリル板を挟んだ場合

供試体高さ 10 cm あたり 2 枚のアクリル板を挟む

図一3 擬似地盤粘土の UU 試験

理論的には最大限に発揮されるとして式(2)となり、軸圧が増すだけ拘束力も増えることになる。

$$F = \tau_a + \sigma_1 \tan \phi_a \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 τ_a :土とアクリル板との付着強度

図-4は、粘性土のかわりに砂質土(豊浦標準砂)に標準砂を張り付けたアクリル板を挿入したものであるが、変形につれてさらに軸差応力が増加しており、アクリル板が引張り補強材⁶⁾として作用していることがわかる。なお、図-4では供試体長さ10cmにつき2枚の円板を挿入している。

粘性土の場合でも、排水条件下では砂質土と同様に大きな ϕ' が存在するので、補強材と土との摩擦角 ϕ_a により、かなりの補強効果が発揮され得る。しかし粘性土の補強については、通常非排水条件を考えなければならない。それゆえに補強材と粘性土との付着力が十分であるとしても、粘性土自身の摩擦角は全応力では、一般にゼロとなるので、 F は粘性土の粘着力を越えることはない。

したがって、粘性土では挿入した板による拘束力の増加分は粘着力に等しくなり、砂質土の場合に比較して大きくなれないことがわかる。このため、砂質シルトのように摩擦角が生じる土では、地盤に脈状ホモゲルが形成

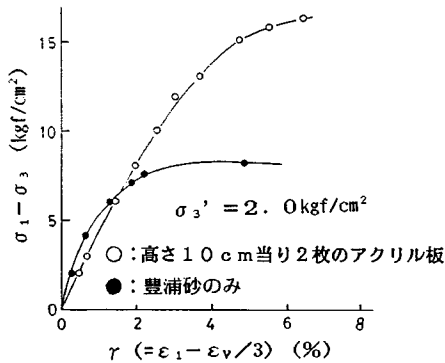


図-4 アクリル板を挟んだ豊浦砂の三軸排水試験における応力～ひずみ曲線

表-5 薬液の配合

薬液の種類	配 合	
	A液 500cc	B液 500cc
薬液a LW	3号水ガラス 250cc 残り 水	セメント 200g 残り 水
薬液b 溶液型水ガラス	3号水ガラス 350cc 残り 水	グリオキザール50cc リン酸12cc 残り水
薬液c アクリルアミド	アクリルアミドモノマー 200g 残り 水	水 495cc 開始剤 5cc

3号水ガラス： $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$ 、リン酸： H_3PO_4 (75%)
グリオキザール：[(CH₂)₂ 35%]と酢酸(CH₃COOH)5%

されるとそのホモゲルが引張り補強材として作用するので注入による強度増加が期待できるが、 $\phi = 0^\circ$ となる軟弱粘性土では、脈状ホモゲルを含む複合土としての改良効果は少ないことが明らかである。

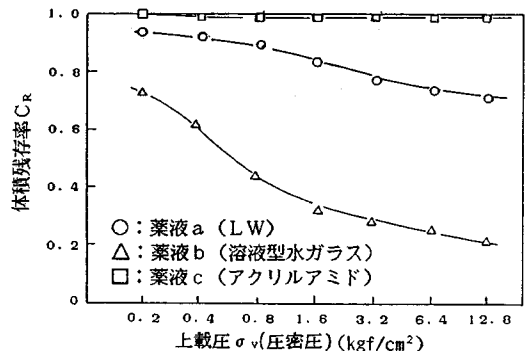
3. 割裂脈の発生に伴う粘性土自身の強度変化

(1) 実験方法および試料

前章では、粘性土自身の強度が注入によって変化しないとして、複合土としての強度を問題にしたが、割裂脈の発生は地盤中に脈状のホモゲルが形成されて脈の厚さに応じた強制変位を地盤に与えたことになり、地盤の押し広げに伴う圧密作用(プラス効果)が考えられる^{7),8)}。したがって、ここでは実際に注入実験を行い粘性土の強度や含水比の変化を調べて、注入による粘性土自身の強度変化を調べた。

使用した薬液の種類は、硬化した後のホモゲル性状の影響を明らかにするため、ホモゲル性状が大きく異なるLW薬液、溶液型水ガラス薬液、およびアクリルアミド薬液の3種を用いることにした。表-5は、それぞれの薬液配合を示す。図-5は、土の標準圧密試験法によるホモゲル自身の圧密試験結果である。圧密収縮はホモゲルからの離しよう液が出るため、薬液bの溶液型水ガラスが最も多くなっている。表-6、図-6には、使用した試料土の透水係数、粘性土試料の粒度分布を示す。

注入過程の土圧・間隙水圧の変化は、図-7に示した



C_R は、初期高さに対する圧密後の試料高さである

図-5 ホモゲルの圧密試験結果

表-6 試料の種類

試料	摘 要	k (cm/s)	試料	摘 要	k (cm/s)
A	混合土	1.2×10^{-6}	K	ケイ砂8号	3.0×10^{-7}
G	市販カオリン粘土	3.5×10^{-7}	L	市販石粉	8.0×10^{-5}
H	水野粘土	5.0×10^{-9}	M	豊浦標準砂	1.2×10^{-7}
I	関東ローム	1.6×10^{-7}	N	混合砂	4.0×10^{-4}
J	小岩粘土	3.0×10^{-9}	O	ケイ砂7号	5.0×10^{-7}

k: 透水係数、試料A(試料G:試料M=5:5)、試料N(試料O:試料H=8:2)

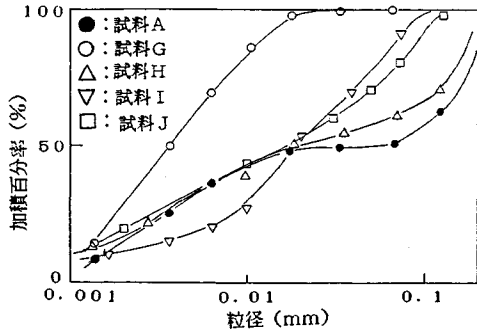
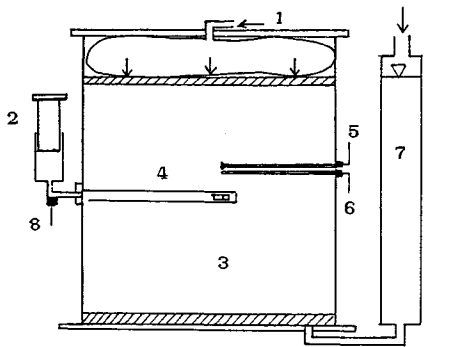


図-6 粘性土の粒度分布曲線

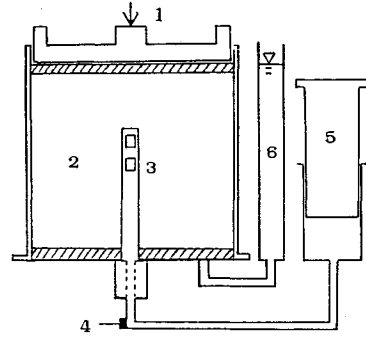


1:上載圧 2:注入ポンプ 3:試料 4:注入管
5:土圧 6:間隙圧 7:背圧用タンク 8:注入圧

図-7 注入実験土槽

実験土槽を用いて調べた。実験土槽は、直径 30 cm、高さ 50 cm であり、上面の固定したゴム風船で上載圧を与えることができる。供試体内には、あらかじめ土圧計や間隙水圧計を挿入しており、注入による土圧や間隙水圧の変化を調べた。所定の上載圧と背圧を与えて、試料を 1 か月以上圧密させた後、ゲル化時間に近づき粘性の増加した段階の薬液を 1 ショット 400 cc の定量注入で計 3 回行った。注入圧 P は、注入管の下端で測定した。注入前の粘土試料の一軸圧縮強度 q_u は、 0.20 kgf/cm^2 であったので、注入時の薬液の粘性が特に大きくならない限り、上載圧 σ_v よりわずかに大きい程度で十分割裂注入が可能である。ここでは注入圧が各ケースで異なると薬液の違いを比較することができないため、ハンドル式の手動注入ポンプで注入圧 P が一定値 ($=\sigma_v + 0.5 \text{ kgf/cm}^2$) になるように調整している。

注入による粘性土の強度変化については、図-8 の注入実験装置を用いて調べた。直径 150 mm、高さ 200 mm のアクリル製のモールドに液性限界程度の含水比で練り返した試料を詰め、所定の上載圧を与えて 1 週間以上圧密させる。注入管はモールド底部に固定しており、管の閉塞を避けるため 2 重管構造となっている。注入時



1:上載圧 2:試料 3:注入管 4:注入圧
5:ハンドル式注入ポンプ 6:飽和用水タンク

図-8 注入実験装置

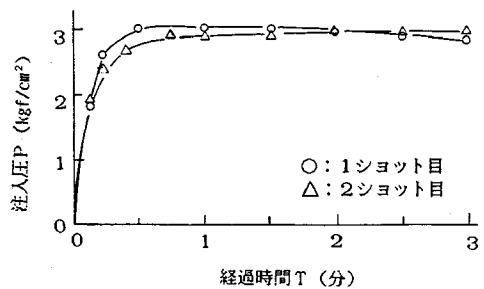


図-9 注入圧 P と経過時間 T の関係

(試料 A, 上載圧 $\sigma_v = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $q_u = 0.87 \text{ kgf/cm}^2$)

には、内管を回転させることによりスリットを開いて注入する。ゲル化時間に近づき粘性の増加した薬液を 1 ショット 400 cc の定量注入で計 2 回注入して、注入後の一軸圧縮強度と含水比の変化に及ぼす経過時間の関係を調べた。合計 800 cc の注入量では、注入率としては約 25% となる。この場合の注入圧 P は、粘土試料の一軸強度がやや高いがすべてのケースにおいて ($=$ 上載圧 $\sigma_v + 1 \text{ kgf/cm}^2$) 程度で注入が可能であった。図-9 には、注入圧と経過時間の一例を示す。

粘性土に対する注入時の割裂圧を調べた研究では⁹⁾、割裂圧 P_f は全応力表示として次式で与えられる。

$$P_f = \sigma_3 + q_u \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 σ_3 :側方土圧, q_u :一軸圧縮強度

割裂時に薬液がくさび状に進展せず、注入管の周りで球状に固結する場合には、注入圧が式 (3) で与えたものよりかなり大きくなるが、薬液がくさび状に割裂進展する通常のケースでは注入圧は式 (3) 程度になると考えられ、本実験で用いた注入圧 P ($=$ 上載圧 $\sigma_v + 1 \text{ kgf/cm}^2$) は、式 (3) の割裂圧と比較しても大差ない。1 ショットの注入に要した時間は、薬液の種類により若干異なるが、2~3 分である。

以上の実験は、主に割裂注入による圧密効果を調べる

ためであったが、注入に伴うその他の現象としては、ホモゲルの圧密により生じる離しょう液が粘性土にしたいに浸透していくことが考えられる。離しょう液の浸透により発生する強度変化を調査するため試料土に図-10の装置を用いて離しょう液を浸透させた。まず、直径150 mm、高さ200 mmの亚克力製のモールドに練り返し粘土を詰めて圧密する。圧密が終了した粘性土をゲル化直後のホモゲルの上に詰め直して、離しょう液がほぼ浸透し終わるまで同一の圧力で再圧密する。ホモゲルの量は、注入率にして25~33%に相当する。

(2) 注入実験による粘性土の圧密効果と一軸圧縮強度の変化

図-11には、図-7の土槽による実験結果を示す。薬液 a (LW) の場合は、注入後に土中の有効圧 σ'_v (=土圧-間隙水圧) が増加しており圧密効果が認められる。一方、ホモゲル自身の圧密による離しょう液が多い薬液 b (溶液型水ガラス) の場合には、有効圧が注入直後に低下しその後回復するものの注入以前よりは大きくなり、圧密効果が期待できないことがわかる。

図-12、図-13、図-14には、図-8の装置による試料 A の実験結果を示す。なお、注入による粘性土自身の強度変化を調べるため、一軸圧縮試験の供試体は脈状ホモゲルをほとんど含まない部分で測定した。図-15には、含水比の変化を調べた結果を示す。含水比 ω の値は、

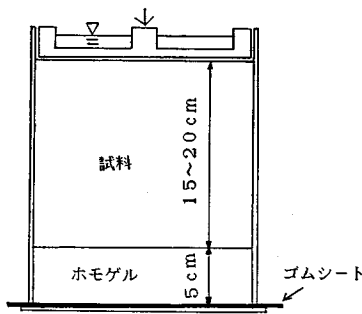


図-10 離しょう液浸透用試験装置

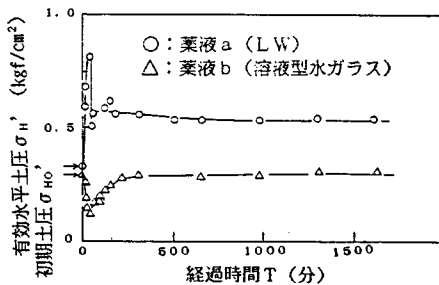


図-11 注入後の土中応力の変化 (試料 A)
(上載圧 $\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, 背圧 $u_0 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$)

10 個以上のデータの平均値である。

経過日数と一軸圧縮強度との関係において、薬液 b (溶液型水ガラス) では注入直後 (2 時間経過) で著し

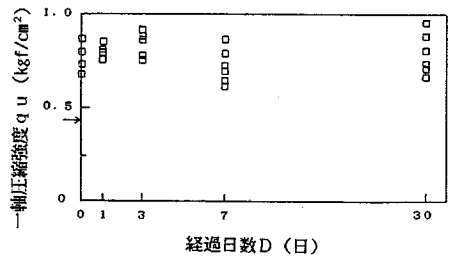


図-12 注入後の粘性土の一軸圧縮強度と経過日数
[薬液 c (アクリルアミド), 試料 A]

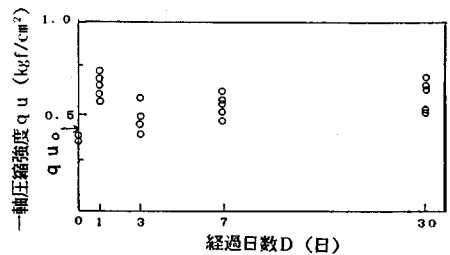


図-13 注入後の粘性土の一軸圧縮強度と経過日数
[薬液 a (LW), 試料 A]

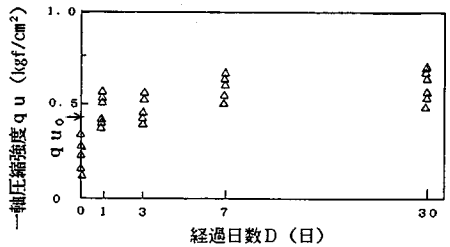


図-14 注入後の粘性土の一軸圧縮強度と経過日数
[薬液 b (溶液型水ガラス), 試料 A]

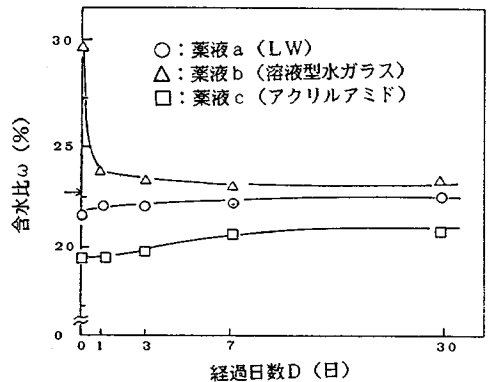


図-15 注入後の粘性土の含水比と経過日数の関係
(含水比のプロットは、10 個以上の平均値)

い強度低下が認められるが、これは含水比の増加が原因と思われる。一方、薬液c（アクリルアミド）の場合は、注入による強度増加が大きい。薬液cは、ホモゲルからの離しよう液が生じないので、図—15で示したように含水比の低下が認められて圧密効果により強度増加が生じたといえる。

割裂脈が発生した現場の注入で採取された粘性土の含水比を調べた結果では、必ずしも注入による圧密効果は認められなかった。表—7には、四谷、および新小岩の注入現場で採取した試料の含水比測定の結果を示す。注入薬液の種類は、四谷、および新小岩においてそれぞれ溶液型水ガラス溶液、LW薬液であり、注入後の経過日数は、それぞれ1週間、1か月程度である。いずれの場合も注入による圧密効果（含水比の低下）は生じておらず、溶液型の注入材を用いた場合には、逆に含水比がかなり増加し強度低下が認められる。溶液型水ガラスの場合には、注入材が硬化した後に、ホモゲル自身がかなり圧密脱水する。この際、脈周辺の粘性土の間隙水圧は、脈自身の有する高い水圧により増加して有効応力が低下するので、注入後の経過日数が1週間程度と短いような場合には、周辺の粘性土の含水比が増加して強度が低下したものと考えられる。そして、この結果は図—14、図—15で示した結果と一致していることがわかる。

以上の結果は、注入前の粘性土の一軸圧縮強度が0.40 kgf/cm²程度の場合であるが、注入による改良効果は、注入前の粘性土の一軸圧縮強度 q_{u0} の大きさにも関係があると考えられる。図—16、図—17、図—18には、注入による粘性土の強度変化と q_{u0} の関係を示す。

薬液c（アクリルアミド）では、 q_{u0} が大きくなるにつれて注入による強度増加の傾向は低下し、 q_{u0} が約1.00 kgf/cm²以上では強度増加は認められない。薬液a（LW）でも同様であるが、 q_{u0} が1.00 kgf/cm²を超えると逆に強度低下が認められる。割裂注入による粘性土の圧密効果を考えると、土が割裂して乱れが生じてこの乱れにより粘土自身の強度低下現象も考慮しなければならぬ。この現象は割裂後の圧密作用でしだいに減少すると思われるが、問題とする時点の圧密によるプラス効果と乱れによるマイナス効果が総合されて注入後の

表—7 現地採取試料の含水比 ω と一軸圧縮強度 q_u

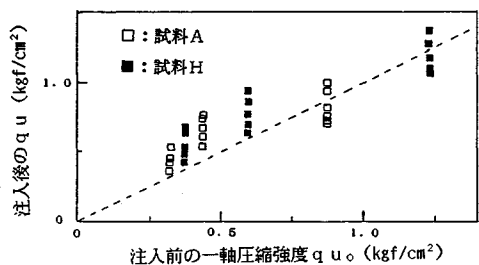
試料採取地点	注 入 前		注 入 後	
	ω (%)	q_{u0} (kgf/cm ²)	ω (%)	q_u (kgf/cm ²)
四 谷	69.8, 70.3, 70.3	0.85, 1.70, 0.78	98.3, 91.0, 96.3	0.92, 0.33, 0.64
	74.2, 71.1	1.83, 0.82	91.6, 89.3, 100.4	0.54, 0.55, 0.82
	Av. = 71.1	Av. = 1.20	Av. = 94.5	Av. = 0.63
新小岩	38.5, 38.8, 36.1	1.55, 1.70, 2.25	38.3, 38.8, 43.5	1.50, 1.85, 2.05
	41.3, 36.0, 42.9		38.1, 43.6, 34.5	
	Av. = 39.3	Av. = 1.83	36.5 Av. = 39.5	Av. = 1.80

四谷（溶液型水ガラス薬液、注入後1週間）、新小岩（LW、1ヶ月）

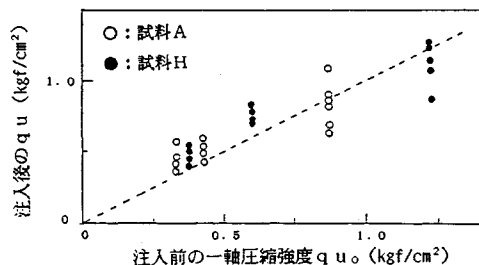
強度変化となると考える必要がある。

q_{u0} の大きい粘性土は上載圧密荷重が大きいが注入圧のオーバークは q_{u0} の大きさにかわらず1 kgf/cm²程度であるので、 q_{u0} が大きいものほど注入圧による圧密効果は少ない。また、割裂に基づく乱れによる強度低下現象は q_{u0} が大きいほど大きくなると考えられるので、この両者の作用を総合すれば q_{u0} が大きいほど強度増加は小さく、マイナスにもなり得ることになる。表—7のLW薬液を使用した現地試料の測定結果においても注入による強度増加は認められないが、これは注入前の q_{u0} が1.80 kgf/cm²と大きいことが原因の1つと思われる。

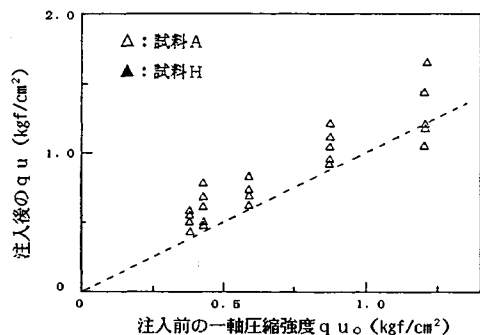
薬液b（溶液型水ガラス）においては、図—18のよう



図—16 注入前の粘性土の一軸圧縮強度 q_{u0} と注入による強度増加の関係（薬液c）



図—17 注入前の粘性土の一軸圧縮強度 q_{u0} と注入による強度増加の関係（薬液a）



図—18 注入前の粘性土の一軸圧縮強度 q_{u0} と注入による強度増加の関係（薬液b）

な強度増加を示し、薬液 a や薬液 c に比較すると q_{u0} が大きくても注入による強度増加が認められた。この薬液では注入によって含水比が減少せず、初期値程度で安定するので、圧密による強度増加は期待できない。注入により生じる現象としては、圧密効果以外では土中のホモゲルから離しょう液が浸透し、土を固結することが考えられる。事実、離しょう液が浸透して強度増加が認められた部分は、含水比こそ注入前とほとんど差がないものの土がバサバサした状態に変化しており、離しょう液の浸透によって粘性土が固結作用を受けたことを示している。特に、薬液 b では図-5 に示したように離しょう液が多いので、この現象が顕著に生じたものと思われる。したがって、この離しょう液浸透による固結現象は薬液注入による粘性土の改良を図るうえで重要であるので、調査した結果を次節に述べる。

(3) 離しょう液による粘性土の固結機構

溶液型水ガラス薬液の場合、圧密効果が認められないにもかかわらず粘性土の強度が増加することが明らかになったが、離しょう液浸透による粘性土の性状変化の状況は、圧密試験によってもみることができる。図-19 には、市販カオリンを用いた結果を示す。離しょう液が浸透して強度が増加した試料の $e \sim \log \sigma$ 関係は、正規圧密粘土の直線の上部にあり、固結により先行圧力¹⁰⁾を

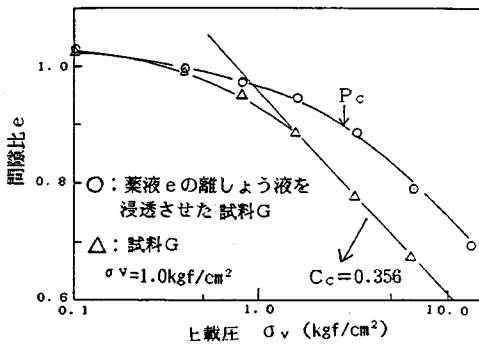


図-19 離しょう液浸透後の粘性土の圧密試験

表-8 薬液の配合、中和度および離しょう液の珪酸濃度

薬液種類	配 合		中和度 No (%)	CR (%)	Ns (ppm × 10 ²)	Rs (%)	離しょう液の pH
	A液 500cc	B液 500cc					
d	W ₀ =150cc	G=50cc, R=12cc	114	42	28	3	7.7
e	W ₀ =350cc	G=50cc, R=12cc	49	27	98	13	11.1
f	W ₀ =350cc	G=10cc, R=26cc	49	42	129	14	11.2
g	W ₀ =350cc	G=90cc, R=12cc	75	75	24	1	8.5
h	W ₀ =250cc	セメント 200g	—	83	77	2	12.7

W₀: 3号水ガラス, G: グリオキザール, R: 75%リン酸 (表. 5 参照)
 CR: 圧密による (比載圧 $\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$) ホモゲルの体積残存率 (%)
 Ns: 離しょう液 ($\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$) のケイ酸濃度 (ppm × 10²)
 Rs: 原液のケイ酸全重量に対する離しょう液中のケイ酸全重量の割合

増加したと同じ効果が生じていることがわかる。

この離しょう液浸透による固結作用を解明するため、砂質土を含めた数種の試料を用いて離しょう液浸透後の強度変化を調べることにした。使用した薬液は、主剤に3号水ガラス、硬化材にグリオキザールとリン酸を使用したもので、その配合は表-8 に示す。

表-9 は、一面せん断試験の結果であるが、この試験の供試体は直径 15 cm モールドのかわりに圧密リング (直径 6 cm, 高さ 4 cm) を用いて、図-10 と同様な方法で作成したものである。

表-10 は、離しょう液の浸透による一軸圧縮強度の変化を示している。ただし、一軸圧縮試験の供試体 (直径 5 cm, 高さ 10 cm) は、図-10 の試料の下半分から水平方向に切り出したものである。ホモゲルからの距離が遠い上半分から切り出したものの強度は、表-10 に示した値より若干小さい。

表-9 離しょう液浸透による粘性土の粘着力の増加 (一面せん断試験)

試料土	薬液	密度 ρ (g/cm ³)	試料土の pH	粘着力 (kgf/cm ²)		液性・塑性限界 ω (%)			
				c ₀	c	ω_{L0}	ω_{p0}	ω_L	ω_p
G	d	1.81	7.4	0.20	0.21	50	26	48	26
G	e	1.82		0.20	0.70	50	26	48	29
G	g	1.78		0.20	0.35	50	26	50	26
G	h	1.79		0.20	0.33	50	26	49	27
H	e	1.95	7.7	0.48	0.73	63	26	62	31
I	e	1.75	5.7	0.24	0.52	—	—	—	—
J	e	1.93	7.1	0.53	0.82	51	29	50	31

一面せん断試験における摩擦角 ϕ は、離しょう液の浸透により変化しない
 c₀, ω_{L0} , ω_{p0} : 粘性土自身の粘着力, 液性限界, 塑性限界
 c, ω_L , ω_p : 離しょう液浸透後の粘着力, 液性限界, 塑性限界

表-10 離しょう液浸透後の土の一軸圧縮強度

土の種類	薬液の種類	密度 ρ (g/cm ³)	q_{u0} (kgf/cm ²)	q_u (kgf/cm ²)
G	d	1.79	0.35	0.51
G	e	1.75	0.14	0.75
G	e	1.83	0.58	0.97
G	e	1.86	1.25	1.90
G	e	1.80	0.34	1.10
G	f	1.78	0.33	0.95
G	g	1.84	0.35	0.46
G	g	1.74	0.14	0.30
G	h	1.78	0.35	0.41
H	g	1.70	0.18	0.22
J	e	1.75	0.35	0.65
J	g	1.72	0.35	0.45
K	e	1.85	0.42	0.38
L	e	1.95	0.80	0.75
M	e	1.85	0	0
N	e	1.87	0.33	0.35

q_{u0} : 浸透前の粘性土の一軸圧縮強度

表—9, 表—10の結果より, 浸透による強度増加は薬液の配合および土の種類に大きく依存していることがわかった。今回用いた薬液の中で著しい強度増加が期待できるのは薬液 e, 薬液 f であり, 粘性土の試料 G, H, I, J では強度増加が生じている。しかし, 砂質土である試料 K, L, M, N では強度増加は認められず, 粒子が小さく透水性が十分小さい試料 L (市販の粉末珪砂) の場合でも強度増加は生じていない。また, 表—9 には, 離しょう液浸透前後の粘性土の液性・塑性限界を示している。固結により塑性限界の増加がわずかに認められるが, 全体的にみて液性・塑性限界の変化は小さい。

離しょう液が浸透することによる強度増加の原因としては, 離しょう液に含まれる薬液成分と粘性土との間に生じる固結作用が考えられる。薬液成分のうち硬化材のグリオキザールやリン酸の溶液を粘土に混ぜて練り返しても, その強度は純水で練り返したものと等しいので離しょう液に含まれる成分の中で化学反応に関与するのは, 離しょう液中の未反応の水ガラス⁷⁾中のナトリウムイオン (Na⁺) または珪酸イオン (SiO₃²⁻) であろう。このうち, 0.5 N-NaCl 溶液で練り返して圧密させた市販カオリン粘土の強度が純水で練り返したものとほとんど変化しなかったことより, Na イオンが原因とは考えられない。その他, 離しょう液には水ガラスと硬化材であるグリオキザールとの反応生成物であるグリコール酸ソーダ (CH₂OH·COONa) が含まれるが容易に分解されやすいので⁸⁾, 固結作用はないものと思われる。

したがって, 離しょう液中の珪酸が固結要因と考えられるので, この濃度を原子吸光分析法¹¹⁾により調べた結果を表—8 に示す。ただし, 離しょう液中の珪素 (Si) 量から珪酸 (SiO₂) 分に換算した。珪酸の濃度は, 薬液の中和度 N_b が低いほど大きくなっている。表—10 の結果では, 中和度が小さく珪酸濃度が多い薬液の場合ほど, 離しょう液の浸透による強度増加が顕著であるので,

強度増加の原因は離しょう液中の珪酸濃度にあると考えられる。なお, 薬液の中和度 N_b の計算は, B 液, A 液に占める塩基および酸の化学当量¹²⁾を計算してその比とみなし, 式 (4) で求めた。

$$N_b = \frac{\text{グリオキザールの酸当量} + \text{リン酸の酸当量} \dots\dots (4)}{\text{水ガラスの塩基当量}}$$

ただし, リン酸 (H₃PO₄) は, 水ガラスとの中和反応において (Na₂HPO₄) が生成すると仮定しており, 3 号水ガラスの塩基当量は, 0.42 モル/100 cc である。グリオキザールおよびリン酸 (75%) の酸当量は, それぞれ 0.86 モル/100 cc, 2.42 モル/100 cc である。

また, 離しょう液浸透による強度増加は, 粘性土で明らかであるが砂質土では生じておらず, この強度増加は土自身の化学的性質にも左右されることになる。固結作用の原因としては 2 つのことが考えられる。1 つは, 珪酸イオンと土中の交換性陽イオンとの反応であり, 他の 1 つは珪酸イオンから珪酸ゲルへの変化である。土中の交換性陽イオンとしては, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ が主なものと考えられるので¹³⁾, 硫酸アンモニウムで試料土の陽イオンを浸出させて¹³⁾, 蛍光光度法¹⁶⁾で Na⁺, K⁺ を, EDTA 法¹⁴⁾で Ca²⁺, Mg²⁺ を求めた。表—11 に示した測定結果より, 強度増加が認められた粘性土の場合には, いずれもこれら陽イオンの総量が多くしかもカルシウムイオンの含有量が高いが, 一方砂質土ではどの陽イオンもきわめて少ないことがわかる。これは, 粘性土の方が粒子が細かく重量当たりの粒子表面積がはるかに大きく, したがってイオン交換容量 (CEC) も大きいことから当然といえる。

離しょう液の浸透による土の固結としては, 離しょう液中の珪酸イオンが粘性土に多いカルシウムやマグネシウムなどの交換性陽イオンと反応し難溶性あるいは不溶性の珪酸塩 (たとえば, CaSiO₃) を形成する粒子間のセメンテーションがある。また, 粘性土は砂質土と違ってイオン交換容量が大きく, したがって pH の緩衝能が大きい¹⁵⁾ので, pH=5.7~7.7 (表—9 参照) の粘性土に浸透した離しょう液の高い pH (離しょう液浸透による強度増加の著しい薬液 e, 薬液 f において pH=11 程度, 表—8 参照) は, かなり低下する。このため, 離しょう液中の珪酸イオンは不安定となり, 珪酸ゲルとなって析出して土粒子間を結合する。事実, 試料 G, 試料 J において, 薬液 e の離しょう液浸透後の粘性土の pH 値は, それぞれ 9.8, 9.4 となり, 珪酸ゲルの析出は十分可能である。中和度の高い薬液 d, 薬液 g では, 離しょう液の pH は 8 前後と低く, 離しょう液中には珪酸量も微量であるため, これらの場合には, 粘性土に pH 緩衝能があっても珪酸ゲルの析出はきわめて少ないものとなる。

以上のように, 離しょう液が珪酸イオンを多く含む場

表—11 土の交換性陽イオン

試料	蛍光光度法		EDTA 測定法		合計
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
G	4.8	1.3	20.8	5.4	32.3
H	4.5	1.5	15.0	3.1	24.1
I	3.5	1.2	11.2	3.0	18.9
J	6.2	3.0	18.2	7.8	35.2
K	0.3	0.1	0.3	0.1	0.8
L	0.3	0.2	0.4	0.2	1.1
M	0.6	0.1	0.3	0.3	1.3
N	1.1	0.3	4.0	0.4	5.8

単位は, ミリグラム当量 meq / 100 g である

合、これが粘性土に浸透してカルシウムなどの交換性陽イオンとの化学的結合や粘性土のもつ pH 緩衝能により珪酸ゲルが析出して強度増加が生じるものと考えられる。この現象は実際の注入時間こそ短いが、土中に割裂注入された脈状ホモゲルから離しょう液が長期間にわたって徐々に浸透注入され続けていることに相当し、薬液の配合によってはかなりの強度増加をもたらすことになる。

なお本研究ではグリオキサールを硬化材とする水ガラス薬液を対象としたが、他の水ガラス系薬液においても離しょう液中には同様に未反応水ガラスが含まれることが明らかにされており⁷⁾、これらの場合でもホモゲル離しょう液による粘性土固結は当然生じ得ると思われる。

4. ま と め

本研究は、注入による粘性土の改良メカニズムとその支配条件を室内試験および現場採取試料を用いて調べたものであり、主な結果は、次のとおりである。

(1) 粘性土では、全応力表示の摩擦角が通常ゼロとなるので、割裂注入された脈状ホモゲルは、摩擦角を有する砂質土に対する場合のように引張り補強材として作用しない。また、硬化した割裂脈と粘性土によりなる複合土の強度は、脈の方向とせん断面の方向によりかなり異なるが、強度増加が期待できる方向に割裂脈が発生する場合は実際問題として少ない。したがって、割裂脈自身の強度が特に大きくない限りは、割裂脈と粘性土よりなる複合土としての強度増加はあまり期待できない。

(2) 注入による粘性土自身の強度変化は、注入圧に起因する圧密効果と脈状ホモゲルからの離しょう液の浸透による粘性土の固結の2点が考えられる。注入圧に起因する圧密効果は、硬化したホモゲルからの離しょう液が少ないものほど顕著であるが、注入前の粘性土の強度 q_{uo} が 1 kgf/cm^2 以上になると強度増加は期待できず、むしろ強度低下をもたらす場合があり得る。

(3) 離しょう液の多い溶液型水ガラス薬液では、圧密効果は期待できないが離しょう液の浸透により粘性土の強度が増加する。これは離しょう液中に含まれる珪酸イオンと粘性土中のカルシウムなどの交換性陽イオンの反応により珪酸塩が生じて粒子間にセメンテーションが形成されることや粘性土のもつ pH 緩衝能により珪酸イオンが珪酸ゲルとして析出して粒子間を結合することが原因と考えられる。一般に粘性土には懸濁型の LW 薬液が注入されるが、普通の LW 薬液では離しょう液が少なく、その浸透による強度増加はあまり期待できないが、この現象は薬液配合にも強く影響されるので、薬液の配合によっては溶液型水ガラスと同様強度増加も可能であろう。

また、離しょう液による固結効果を期待するには脈状ホモゲル間隔ができるだけ密になるよう注入し、離しょう液の浸透領域が連結しやすくすることが重要である。粘性土の透水性が特に小さい場合には離しょう液の浸透にかなりの時間経過を要することも注意すべきである。

このような土中で脈状に固結したホモゲルの離しょう液と粘性土の交換性陽イオンとの化学結合に期待するような改良原理は、将来軟弱粘土の改良を考えるうえで有効であり、今後は薬液と離しょう液の関係を含めた薬液自身の研究が重要と考える。

最後に、本研究にあたっては東京電力(株)の援助を受けたことを記し、謝意を表します。なお、交換性陽イオンおよび離しょう液中の珪素の定量においては、早稲田大学化学分析室 遠藤 公氏、修士論文および卒業論文として研究に参加した原口賢一氏、福井義弘氏の協力によるところが多く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) 間片博之：下水道工事における地盤沈下対策(その2)、下水道協会誌、Vol. 17, No. 193, 1980.
- 2) 所 武彦：LAG 工法と粘性土地盤への適用、第6回最近の薬液注入工法技術資料テキスト、総合土木研究所、pp. 47~53, 1979.
- 3) 林 七郎、ほか：水ガラス薬液の室内注入実験(その1)、16回土質工学研究発表会、pp. 1661~1664, 1981.
- 4) 林 七郎、ほか：水ガラス薬液の室内注入実験(その2)、16回土質工学研究発表会、pp. 1665~1668, 1981.
- 5) 日向泰山、ほか：粘性土地盤における薬液注入の効果に関する室内実験、19回土質工学研究発表会、pp. 1529~1532, 1984.
- 6) 龍岡文夫、ほか：引張り補強材による砂の補強に関する基礎的研究、土と基礎、Vol. 31, No. 9, pp. 11~19.
- 7) 柴崎光弘・下田一雄：最新の薬液注入工法の設計と施工、山海堂、pp. 71, pp. 119, 1985.
- 8) 島田俊介：最新の地盤注入工法、理工図書、pp. 50, pp. 237, 1982.
- 9) Mori, A. and Tamura, M. : Hydrofracturing pressure of cohesive soils, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 1, 1987.
- 10) 森 麟：圧密完了後に生じた粘着力が先行圧力に及ぼす影響、土と基礎、Vol. 10, No. 1, pp. 13~18, 1962.
- 11) 川地 武：滞水性地盤の止水法に関する土質化学的研究、京都大学学位論文、1986.
- 12) 理化学辞典、岩波書店(第3版)、pp. 221, 1986.
- 13) 藤貫 正、ほか：粘土の陽イオン交換容量(CEC)の測定と交換性陽イオンの定量、地質ニュース、第156号、pp. 10~14, 1967.
- 14) 水の分析(第3版)、日本分析化学会北海道支部編、化学同人、pp. 186~199, 1981.
- 15) 粘土ハンドブック、技報堂、pp. 507, 1967.

(1987. 11. 12・受付)