

不均一地盤における薬液の注入形態とその支配条件

SOLIDIFIED SHAPES IN STRATIFIED DEPOSITS BY CHEMICAL GROUTING
AND THE GOVERNING CONDITION

森 麟*・田村昌仁**・佐藤洋一***

By Akira MORI, Masahito TAMURA and Youichi SATOH

This paper investigates the relation between solidified shape and gel time of grout in the stratified deposits. Through the injection tests with the large injection apparatus, the main conclusions are summarized as follows; 1) In the stratified sandy deposits, the long gel time grout tends to permeate into the layer of which permeability is the largest. On the other hand, the short gel time grout generally permeates uniformly. 2) If the soft clay layer is contained in the stratified deposit, the injected grout tends to penetrate into the border between the clay and the sand or into the clay. Especially, in the case of short gel time grout, the most part of injected grout penetrates into the border or the clay, even if the injection point is in a sand layer. Therefore the permeated grout in sand layer is very little.

Keywords: grouting, gel time, stratified deposit, solidified shape

1. ま え が き

薬液注入による地盤の改良を考えるうえで最も重要なのは、いかにして所定の領域を固結させるかという点である。砂質土地盤を対象とした注入では、砂粒子間隙を薬液で置換する浸透注入があくまでも前提であるため、地盤条件（透水性、深度）や注入条件（注入速度、注入圧、薬液ゲル化時間）に応じた浸透注入の可能限界を明らかにすることが必要となる。

著者らは、これまで注入による地盤の改良機構^{1)~3)}や注入形態（浸透注入、割裂注入、境界注入の別）に及ぼす薬液ゲル化時間、注入圧および注入速度の影響を調査し浸透注入が可能となる条件^{4),5)}を明らかにしてきたが、これらは均一地盤を対象としたものであり、実際に対象となることの多い不均一地盤^{6)~8)}に対してそのまま適用することはできない。注入による地盤の改良理論を確立してその信頼性を高めていくうえで、不均一地盤における注入の問題点や注入形態の特徴を把握することがどうしても必要となる。

不均一地盤といってもその種類や形態は限りなく、これを一般化して論じることは困難であるが、不均一な砂質土地盤における注入を考えるうえでは、対象地盤の主体を占める層を基準砂層とすると、基準砂層のみの均一層であれば浸透注入が可能なのが前提である。したがって、不均一地盤は基準砂層以外の層が浸透注入が可能の場合（Aタイプ）とそうでない場合（Bタイプ）の2つに大別され次のようになる。

Aタイプ：異なる砂層からなる不均一地盤

Bタイプ：砂層中に粘性土などを挟む不均一地盤
つまり、地盤中のどの層も単一地盤として注入した場合にはほぼ浸透注入が可能で、各層の透水性のみが異なっている場合がAタイプに、単独で注入した場合に浸透注入が困難となる粘性土のような層を一部含んでいる場合がBタイプに相当する。透水性が小さい粘性土に注入した場合には、注入圧で地盤が割裂して薬液が地盤中を脈状に逸走する割裂注入となるので、Bタイプの場合は粘性土層の部分で割裂が生じると薬液のロスが大きく、砂層への浸透が妨げられることが予想される。

不均一地盤に対するこれまでの注入の考え方としては、Aタイプに相当する透水性の大小のみを扱いゲル化時間の短い薬液を使用して薬液を所定の領域内にとどまらせることができるとする考え方があるが⁷⁾、ゲル化時

* 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 第三研究部

*** 学生会員 工修 西武建設(株)(元・早稲田大学大学院生)

間の特に短い瞬結性薬液を使用した場合でも薬液が所定の領域にほとんど存在しない場合も起こり得る。さらにBタイプの状況については薬液のゲル化時間が注入形態にどのような影響をもたらすのか現時点では全く不明である。

本研究の目的は、上述のように2つに大別した不均一地盤における注入形態と地盤条件、注入条件の関係を明らかにすることであり、大型土槽を用いた注入実験より固結形状と注入圧、ゲル化時間の関係を調査研究している。

2. 均一地盤における注入形態と固結状況

不均一地盤における注入形態と固結状況を考えるうえで基本となる均一砂地盤の場合についてはすでに研究を行っており、次のようにまとめられる^{4),5)}。

(1) 砂質地盤の場合

1) 注入速度が緩結性薬液による地盤の限界注入速度⁴⁾を超えると、ゲル化時間によらずどの薬液でも地盤が割裂し、固結効果が大きく低減する。したがって、砂地盤で良好な固結形状を得るためにはゲル化時間にかかわらず限界注入速度以下で行う必要がある。

2) ゲル化時間の短い急結、瞬結性薬液では注入圧が注入時間とともに増加している限り良好な固結形状で成長する。そして、同一のゲル化時間の薬液では、砂の透水性が大きいほど注入中の注入圧の増加が長時間継続し、より大きい注入圧がかかり得る。

3) 砂の透水性が大きいほどゲル化時間の短い薬液の使用が望ましく、透水性が特に大きい砂礫土では瞬結性薬液が適している。透水性の小さい砂質土では浸透性のよい緩結性薬液が優れている。

4) 地盤の透水性が小さいほど限界注入速度は小さく、また割裂圧も小さくなる。割裂注入になる場合の注入圧は薬液のゲル化時間に無関係となる。

(2) 粘性土地盤の場合

1) 粘性土地盤の限界注入速度はきわめて小さいので、浸透注入にはなり得ずすべて割裂注入になる。割裂脈のホモゲルによりある程度の強度増加を生じ得る。

2) 粘性土の割裂圧は、一般に砂質土より小さく次式で与えられる。

$$P_f = \sigma_3 + q_u$$

ここに、 P_f ：割裂圧、 σ_3 ：注入地盤の最小主応力

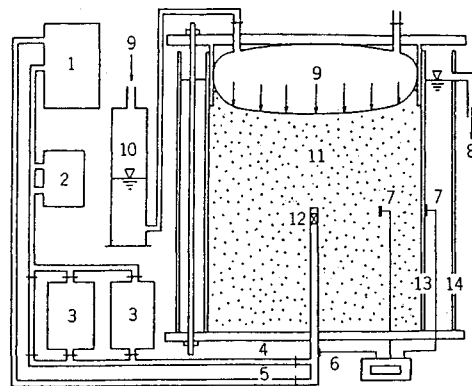
q_u ：一軸圧縮強度

以上は、均一地盤の場合であるが、不均一地盤においても各層のみの注入固結状況を考えれば上記の傾向に従うものと思われる。

3. 実験方法および試料

図—1には、実験装置の概要を示す。実験土槽は、内径80 cm、高さ100 cmの鋼製円筒で側面からの排水が可能なように3 mmの孔が多数あいており、内壁には0.1 mmの金属メッシュが全周に張り付けてある。その内円筒の外側を内径100 cm、高さ100 cmの亚克力円筒で囲み、この中を水で満たすことができる。試料砂は内円筒内にベルトコンベアを用いて自由落下させ水締めした。このようにして作製した土槽の上表面にゴム風船を入れコンプレッサーで加圧して試料に上載圧を与える。上載圧 σ_v は、すべて1 kgf/cm²とした。これは、土被り深さにすると地下水位によって異なるが、薬液注入で一般的な6~12 mに相当する。なお、装置の詳細については文献5)を参照されたい。

表—1、図—2には、使用した土の種類や粒度分布曲線を示す。表—2、表—3には、Aタイプ、Bタイプに



1：定速ポンプ 2：電磁流量計 3：着色B液用タンク 4：B液 5：A液 6：圧力計（注入圧） 7：土圧計 8：オーバーフロー 9：上載圧 10：水タンク 11：砂試料 12：注入管（φ40mm） 13：鋼製内円筒（φ800mm） 14：亚克力製外円筒（φ1000mm）

図—1 注入実験土槽（供試体直径800 mm、高さ800 mm）

表—1 試料土

試料	摘 要	間隙比 e	透水係数 k (cm/sec)
A	市販ケイ砂3号	1.09	1.1×10^{-9}
B	市販ケイ砂5号	0.99	1.3×10^{-1}
C	市販ケイ砂7号	1.00	5.1×10^{-3}
D	C : G = 9 : 1	0.88	2.4×10^{-3}
E	C : G = 3 : 1	0.89	7.8×10^{-4}
F	C : G = 1 : 1	0.89	$< 10^{-5}$

試料D, E, Fは、試料Cと試料G（木節粘土）をそれぞれ、9:1, 3:1, 1:1の重量比で混合したもの

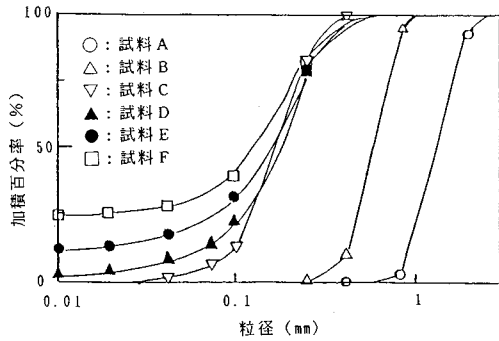


図-2 粒度分布曲線

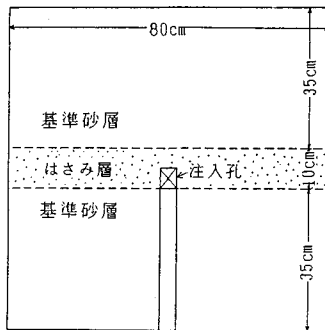
表-2 砂質土からなる不均一土層 (Aタイプ) の種類

タイプ A の種類	成層状態	基準砂層	はさみ層 (砂)
A 1	ケース 2	試料 C	試料 A
A 2	ケース 2	試料 B	試料 C
A 3	ケース 1	試料 C	試料 B
A 4	ケース 2	試料 C	試料 A
A 5	ケース 2	試料 A	試料 C

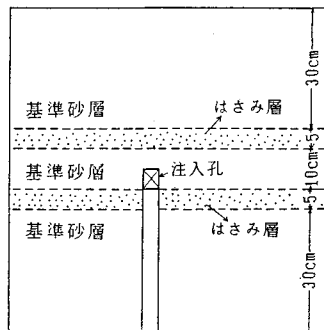
表-3 粘性土を挟む不均一土層 (Bタイプ) の種類

タイプ B の種類	成層状態	基準砂層	はさみ層 (粘土)
B 1	ケース 2	試料 C	試料 F (層厚 2 cm)
B 2	ケース 1	試料 C	試料 F
B 3	ケース 3	試料 D	試料 F

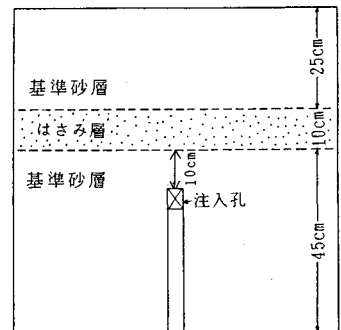
おける不均一地盤の種類をそれぞれ示している。不均一層の成層状況は、図-3 に示しているような 3 ケースを想定している。ケース 2、ケース 3 は、注入孔が対象土の大部分を占める基準砂層にある場合であり、ケース 1 では、基準砂層以外の挟み層中に注入孔が位置している。なお、ケース 3 については、B タイプのみの場合で行っている。表-4 には、用いた薬液の配合およびゲル化時間を示す。薬液は、ゲル化時間が 5 秒程度の瞬結性、1 分程度の急結性、20 分程度の緩結性薬液の 3 種類を使用している。薬液の注入速度 q はすべて 5 l/分としたが、



ケース 1



ケース 2



ケース 3

図-3 不均一地盤の成層状態

表-4 薬液の配合

種類	配合			ゲル化時間 G t
	A 液 500cc	B 液 500cc		
瞬結性薬液	3号水ガラス	グリオキザール	50cc	5 ~ 10 (秒)
	250cc	リン酸	25cc	
	水	水	425cc	
急結性薬液	3号水ガラス	グリオキザール	50cc	50 ~ 70 (秒)
	250cc	リン酸	18cc	
	水	水	432cc	
緩結性薬液	3号水ガラス	グリオキザール	50cc	20 ~ 30 (分)
	250cc	リン酸	14cc	
	水	水	436cc	

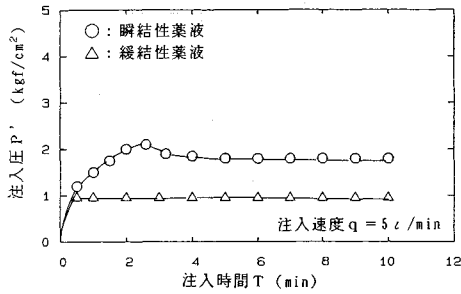
3号水ガラス: $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot a\text{q}$, リン酸: H_3PO_4 (75%)
 グリオキザール: [(CHO)₂35%] と [酢酸 CH_3COOH 5%]

これは実験に用いたすべての砂層 (試料 A~D) に対しては浸透注入になり得る限界注入速度以下の条件を十分に満たしている⁵⁾。また粘性土層として使用した試料 E は限界注入速度がきわめて小さいので、浸透注入にはなり得ない。10 分間注入し、総注入量は 50 l としている。土槽の大きさが直径 80 cm、高さ 80 cm と小さいので、注入状況を調べるためには土槽の大きさと総注入量の関係が重要となり、注入量が土槽の大きさに比べて多すぎると注入状況の把握が困難となる。今回の土槽条件において、50 l の注入量は、薬液の全量が土槽内で固結した場合の体積で考えると土槽の体積の約 1/4 に相当するので、注入量として妥当と考えられる。なお、注入ポンプから注入管までの間に着色 B 液用タンクを設置しているが、これは注入中に着色した注入液をバルブを切り替えることで連続的に薬液を注入して薬液の注入状況を調査するためである。

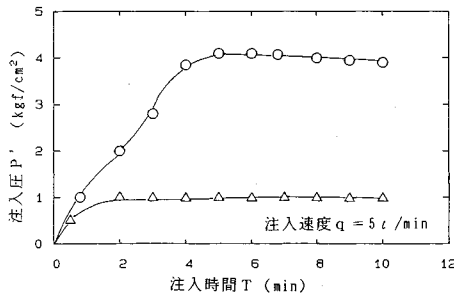
4. 砂質土からなる不均一地盤への注入

(1) 薬液別にみる注入圧と注入時間の関係

図-4 には、ケイ砂 7 号 (基準砂層) とケイ砂 3 号からなる土層 (A 1, 表-2 参照) へ各薬液を注入した場



図—4 A1タイプの注入圧 P' と注入時間 T の関係



図—5 A2タイプの注入圧 P' と注入時間 T の関係

合の注入圧と注入時間の関係を示す。また、図—5には、ケイ砂5号(基準砂層)とケイ砂7号からなる土層(A2)へ注入した場合の注入圧と注入時間の関係を示す。図—4、図—5からわかるように、どちらの場合も瞬結性薬液の方が、注入圧が大きくなっていることがわかる。瞬結性薬液の場合、注入孔付近の浸透ゾーンが固結するので注入圧が増加し割裂が生じるが、それ以降は穿孔注入または、割裂と浸透の繰り返しとなるので、注入圧は緩結性薬液の浸透注入の圧力より高い⁵⁾。また、瞬結性薬液ではA2(図—5)の注入圧がA1(図—4)の値より大きくなっているが、これは、2. で述べたようにA2の基準砂層(ケイ砂5号)の透水性がA1の基準砂層(ケイ砂7号)の値より大きいためと考えられる。

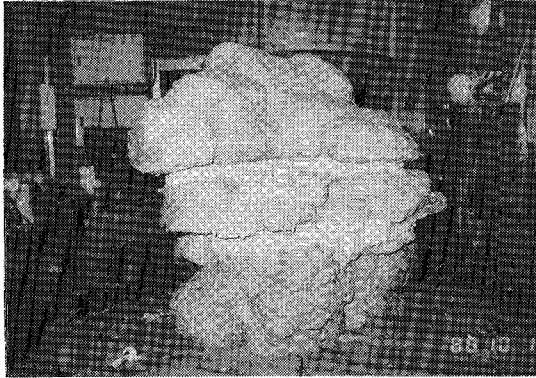
なお、注入中に薬液が土槽外に流出する場合もあるが、注入圧の大きさは薬液の流出に影響されず注入中の変化は少ない。

(2) 薬液別にみる固結形状

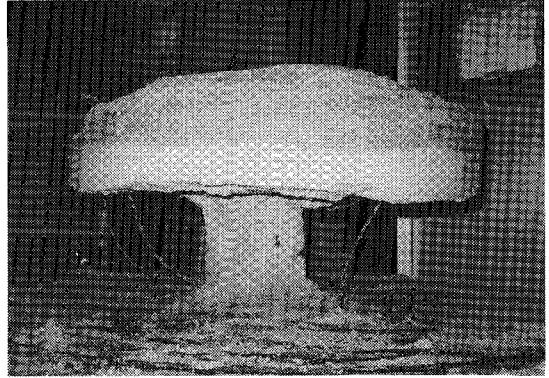
図—6に各薬液による50 l注入後の固結形状の断面スケッチを、A2、A4、A5タイプについて示す。写真—1~6には、その固結状況を示す。固結形状はゲル化時

タイプAの種類	瞬結性薬液	急結性薬液	緩結性薬液	試料
A2				試料B
				試料C
				試料B
固結率(%)	115.0	100.3	63.2	
A4				試料C
				試料B
				試料C
固結率(%)	110.8	86.4	70.6	
A5				試料C
				試料A
				試料A
固結率(%)	101.6	58.3	45.6	試料C

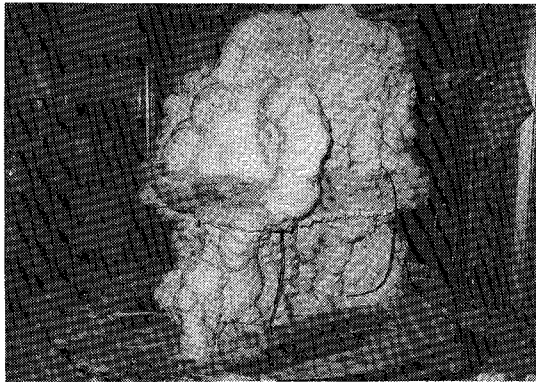
図—6 不均一土層(Aタイプ)の固結状況(注入量50 l)



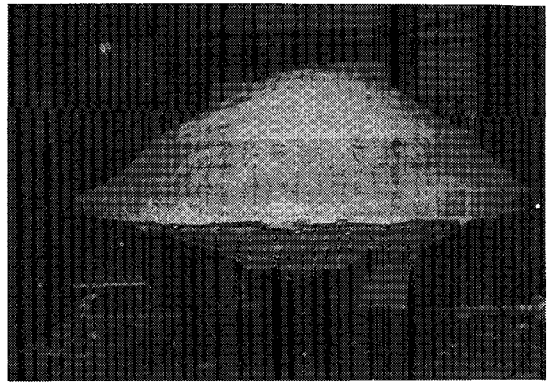
写真一 瞬結性薬液によるA2タイプの固結形状



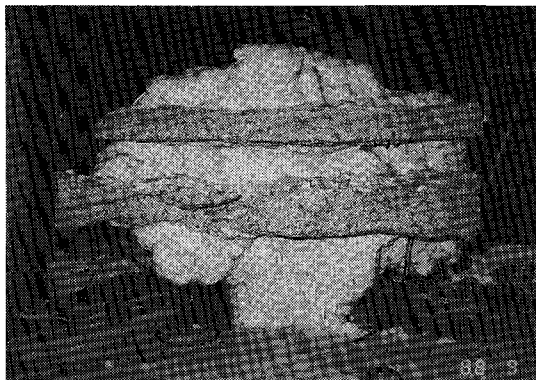
写真二 緩結性薬液によるA2タイプの固結形状



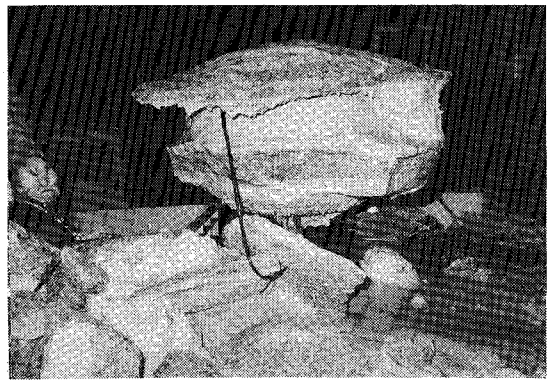
写真三 瞬結性薬液によるA4タイプの固結形状



写真四 緩結性薬液によるA4タイプの固結形状



写真五 瞬結性薬液によるA5タイプの固結形状



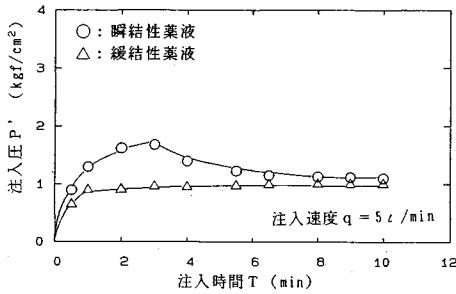
写真六 緩結性薬液によるA2タイプの固結形状

間により大きく異なることがわかる。Aタイプの不均一地盤では図や写真より明らかなように瞬結性薬液を使用した場合に、砂層の透水性の違いなど地盤の不均一の影響は少なく、薬液が上下左右に全体的に行きわたり固結している、この場合の固結率は100%程度またはそれ以上となる。なお、固結率とは、注入薬液のすべてが試料土の間隙を完全に満たして固結するとみなした場合の固結重量に対する実際の固結重量の重量比である。しかし、ゲル化時間が急結、緩結と長くなるにつれて、薬液

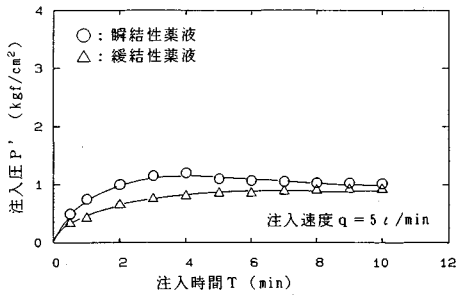
は透水性が大きい層に浸透しやすくなり内円筒の多孔板に到達して外周部に流出している。したがって、砂質土地盤の不均一性を排除して良好な形状に固結させるには、ゲル化時間の短い瞬結性薬液が適しており、透水性の大きい層だけを固結させるにはゲル化時間が長い薬液が適しているといえる。

5. 粘性土を挟む不均一地盤への注入

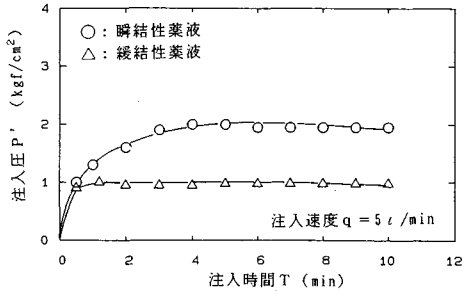
(1) 薬液別にみる注入圧と注入時間の関係



図一七 B1タイプの注入圧 P' と注入時間 T の関係



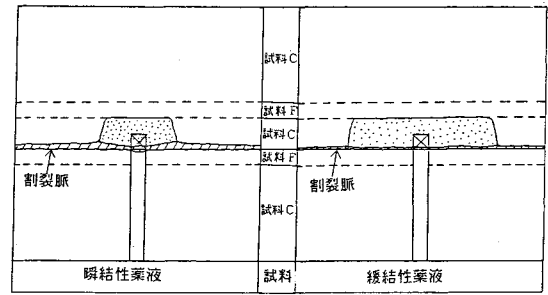
図一八 B2タイプの注入圧 P' と注入時間 T の関係



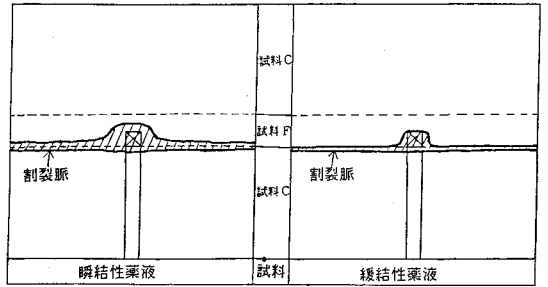
図一九 B3タイプの注入圧 P' と注入時間 T の関係

図一七には、ケイ砂7号(基準層)と粘性土(ケイ砂7号と木節粘土を等量混合したもの)からなる土層(B1)における注入圧と注入時間の関係を示す。図一八には、注入孔が粘性土層内にある土層(B2)に対する注入圧と注入時間の関係である。図一七、図一八からわかるように、注入孔の位置が粘性土層内または境界近くの砂層中であれば、注入圧は瞬結性、緩結性いずれの薬液でも前章で示した砂の互層に対する注入圧より全体的に小さくなっている。これは、次節で述べるような粘性土層中またはその境界部に割裂が生じるためである。

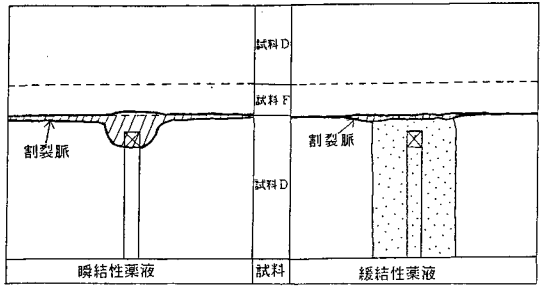
図一九には、土層(B3)における注入圧と注入時間の関係を示している。この場合には、注入孔が粘性土層より10cmとやや離れており、瞬結性薬液を使用した場合の注入圧が図一七、八の瞬結性薬液より大きくなっている。これは、図一十からわかるように瞬結性薬液で注入孔付近の砂層が固結成長し粘性土層に達してから、



B1タイプ



B2タイプ



B3タイプ

図一十 不均一土層(Bタイプ)の固結状況(注入量50 l)

後続の薬液が粘性土との境界や粘性土内に注入されるので注入圧が高めになる。

(2) 薬液別にみる固結形状

図一十には、各薬液による固結形状の断面スケッチを示す。写真一七~一十には、その固結状況を示す。これらの図や写真から明らかのように瞬結性薬液を使用した場合には、どの場合でも注入薬液の大部分は、透水性の小さい粘性土と砂層との境界を伝わるかまたは粘性土内部を割裂して土槽外へ流出している。一方、緩結性薬液の場合に、注入ポイントが粘性土内にあるB2のときは、粘性土と砂層との境界や粘性土内部を割裂して土槽外へ流出しているが、ポイントが粘性土外にあるB3の場合には注入薬液のかなりの部分は砂層内に浸透注入していることがわかる。土層B1、B2の場合に、瞬結性薬液を使用すれば薬液の大部分が粘性土に割裂注入されやすいことはわかるが、B3の場合にも瞬結性薬液では粘性土の方へ割裂して注入されており、砂層にはほとんど注

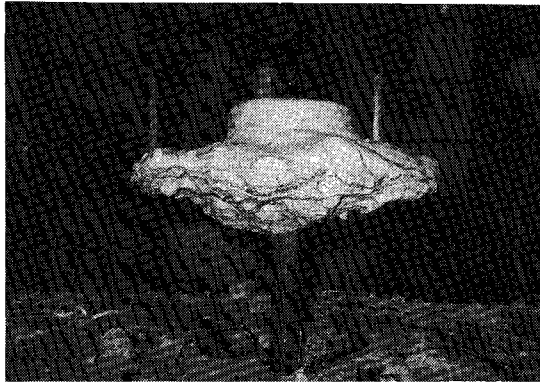


写真-7 瞬結性薬液によるB1タイプの固結形状



写真-8 緩結性薬液によるB1タイプの固結形状

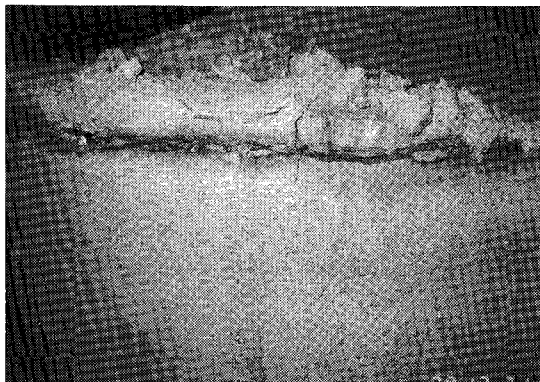


写真-10 緩結性薬液によるB3タイプの固結形状

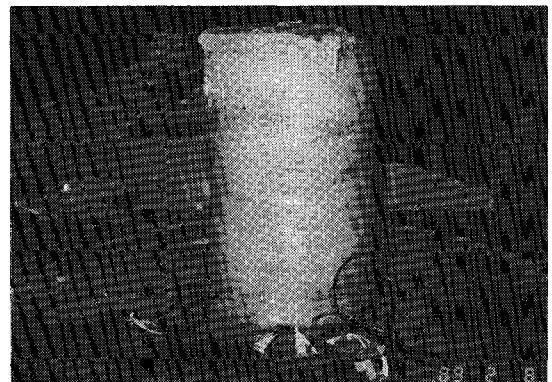


写真-9 瞬結性薬液によるB3タイプの固結形状

入されていない。これらの結果から判断すると、砂層中に粘性土が挟まっているような場合には、ゲル化時間の短い薬液よりゲル化時間が長い薬液の方が薬液のロスが少ないことになる。

6. 注入形態および固結形状の支配条件

不均一地盤における注入形態を考えるうえでは、まず地盤を構成している各層を単一地盤として注入した場合の注入圧、ゲル化時間と固結形状の関係を把握して、これらの関係と不均一地盤における注入実験結果と比較することが必要となる。図-11、図-12には、不均一地盤の作製において使用した代表的な砂試料の単一地盤において注入した場合の各試料の注入圧-注入時間の関係を示す。試料は試料A(ケイ砂3号)、試料C(ケイ砂7号)、試料E(ケイ砂と木節粘土を重量比3:1で混合した土)の3種類である。図-11は緩結性薬液、図-12は瞬結性薬液であり、試料Aでは、薬液のゲル化時間を問わず球形の固結体が得られた。試料Cでは、緩結性薬液で球形状、瞬結性薬液でやや厚板状の固結体を得られた。透水性の最も小さい試料Eでは、いずれの薬液でも割裂注入となり固結部分はほとんど存在しな

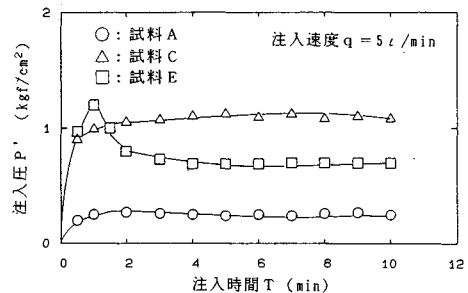


図-11 緩結性薬液による単一砂層地盤の注入圧 P' と注入時間 T の関係

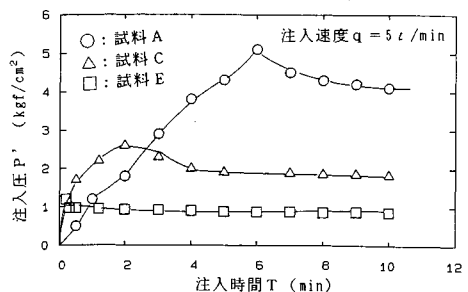


図-12 瞬結性薬液による単一砂層地盤の注入圧 P' と注入時間 T の関係

かった。そして、これらの固結形状と注入圧-注入時間との関係は、2. で述べた均一地盤における固結状況に関する特徴と一致している。

不均一地盤を対象とする注入では、透水性の異なる砂の互層地盤または砂と粘性土の互層地盤においてもゲル化時間の短い薬液を使用することが比較的良好な固結形状を期待できると考える場合が多かった。しかし、本実験に関する限りでは、砂の互層ではゲル化時間が短い方が地盤の不均一による固結形状への影響が少なくなっているものの、粘性土を挟む場合にはむしろゲル化時間の短い薬液の方が薬液が遠方まで逸走しており薬液のロスが大きい結果が得られた。したがって、不均一地盤での固結形状をよくするうえでは、薬液ゲル化時間と不均一地盤の構成との関係を考える必要がある。

砂の互層から構成される地盤の場合、ゲル化時間の長い薬液では当然透水性の大きい層に集中して注入されやすいが、ゲル化時間の短い薬液では透水性の大きい層が固結すると後続の薬液は必然的にその層の上下に位置する透水性がより小さい層に注入されることになる。

図—12 で示したように、透水性の大きい試料 A (ケイ砂 3 号) に対して瞬結性薬液を用いた場合、その透水性の大きい砂層で固結体を拡大していくにはかなり大きな注入圧を必要とする。一方、透水性がより小さい試料 C (ケイ砂 7 号) の場合には固結形状はやや問題があるものの注入圧は試料 A の場合より小さくなっている。このため、瞬結性薬液を砂層の互層地盤に注入した場合には、注入の初期には、注入圧が小さくてすむ透水性の大きい層に注入されやすいが、その層の固結部分を拡大していくには大きな注入圧を必要とするので、注入薬液はしだいに注入圧があまり高くなり得ない透水性の小さい砂層に注入されるようになると考えられる。それゆえ、透水性が大きい層を含む砂の互層地盤では、ゲル化時間の短い薬液を使用した方が地盤の不均一性にあまり左右されず比較的均一な固結が期待できることになる。

一方、粘性土など割裂抵抗がきわめて小さい層を含んだ場合には、瞬結性薬液を使用すると注入孔が砂層内にある場合でも注入孔周りではほとんど固結せず、薬液の大部分が砂層と粘性土との境界部分や粘性土内へ注入されて土槽外に流出している。緩結性薬液では注入孔が砂層にあると境界注入が局所的に生じるものの粘性土中には注入されにくく、薬液のかかなりの部分が砂層内へ浸透注入される。これは砂層に対する緩結性薬液の浸透抵抗が粘性土の割裂抵抗や境界注入が生じる場合の抵抗より小さくてすむためであろう。瞬結性薬液で砂層内の固結領域を拡大するには、前述したように大きい注入圧が必要となるが、粘性土を割裂するには瞬結性薬液でも緩結性薬液でも小さい注入圧で十分である。事実、図—11、

図—12 には透水性の小さい試料 E の結果を示しているが、注入圧の大きさは瞬結性薬液と緩結性薬液で差異は少なく、試料 A (ケイ砂 3 号) や試料 C (ケイ砂 7 号) に瞬結性薬液を注入した場合の注入圧より小さくなっている。緩結性薬液でも、大きい注入圧が粘性土に作用すれば粘性土は割裂するが、注入孔が砂層内にある場合には注入圧の影響は注入孔から離れるにつれ低下するので粘性土の割裂は生じにくく砂層への注入は十分可能となる。瞬結性薬液でも注入直後は注入孔周りの砂層への注入が行われるが、固結体が拡大するにつれ注入圧が増加する。その後、固結体が粘性土にまで到達すると砂層部分で固結体を拡大することなく、薬液のほとんどすべてが粘性土内あるいはその境界部へ注入される。注入孔付近の土圧増加と注入圧の大きさを調査した研究⁹⁾では、瞬結性薬液では緩結性薬液と異なり薬液が先行薬液の固結部分を割裂して注入が進むので、注入孔から離れてもその割裂脈付近では注入圧がほぼそのまま作用し得ることが明らかになっており、注入ポイントが砂層内に位置する場合でも固結部が粘性土付近に達すると粘性土境界における注入圧が大きくなり得るので割裂が生じやすいと考えられる。緩結性薬液でも砂層の透水性が小さい場合は砂層内で割裂が生じるが、透水性が大きく浸透注入となる砂層の場合は注入圧による土圧増分は注入孔からの距離が大きくなるほど小さくなる⁹⁾。

結局、粘性土を挟む場合の注入形態は、粘性土自身の割裂抵抗または境界注入が生じる場合の境界抵抗の大きさと砂層における浸透抵抗の大小関係によって支配されることになる。浸透抵抗が割裂抵抗や境界抵抗より小さい場合には薬液の大部分が粘性土層内の割裂注入や境界注入になる可能性はないが、粘性土を挟む土層に瞬結性薬液を注入する場合のように砂層における浸透抵抗より粘性土の割裂抵抗や境界抵抗が小さいと薬液は砂層に入らずむしろ粘性土内や境界部分に割裂注入されることになる。ここで問題となっている割裂抵抗であるが、割裂圧と土の種類の関係はすでに明らかにしており、透水性の大きい砂試料ほど割裂圧が大きくなりその値は普通の粘性土の割裂圧よりはるかに大きい結果が得られている¹⁰⁾。境界抵抗については、十分明らかでないが上載圧もしくは粘性土の割裂圧に近いものと考えられる。

7. ま と め

本研究は、不均一地盤に対する注入形態とそれに基づく固結形状に及ぼす薬液ゲル化時間や土層構成の影響を実験的に調査研究したもので主な結論は以下のようになる。

(1) 不均一地盤における注入形態は、土層の構成だけでなく薬液のゲル化時間に大きく依存している。砂質

土からなる不均一地盤では、緩結性薬液を使用すると当然透水性の大きい層に集中して注入され透水性の小さい砂層への浸透分は少ない。ゲル化時間の短い瞬結性薬液では初めは透水性の大きい地盤に注入されるが、しだいに浸透抵抗が上がり、その後透水性の小さい層にも注入されるので比較的良好な固結形状が期待できる。

(2) 粘性土を挟むような不均一地盤では、粘性土層と砂層との境界部分や粘性土自身が弱点となり、境界注入や粘性土内で割裂が生じて薬液が遠方まで逸走しやすい傾向にある。注入ポイントが、粘性土層内にあると薬液ゲル化時間を問わず薬液の大部分は砂層に浸透せずロスが大きい。注入ポイントが砂層内にあると、ゲル化時間の長い緩結性薬液では砂層への注入がある程度可能で境界注入や粘性土内での割裂による逸走分は少ない。一方、ゲル化時間の短い薬液では注入孔周辺がまず固結して粘性土層まで固結領域が成長すると、それ以降は砂層部分での固結領域が拡大せず、薬液は粘性土内または境界部分に集中的に注入され大部分は逸走する。従来、ゲル化時間の短い瞬結性薬液は、薬液を所定の部分にとどめる効果が大きく、薬液が遠方まで逸走する可能性が少ないとされているが、地盤中に割裂抵抗の小さい粘性土が存在する場合にはむしろゲル化時間の短い薬液の方が薬液のロスが大きくなり得る。

ただし、以上の結果は、不均一地盤に一点の注入ポイントからのみ注入を行った場合の結果である。実際の注入では、注入ポイントの数が多いので、先行した注入によりこれから注入するポイントの周辺地盤の一部はすでに固結している状況が予想され、その状況下での注入形態は本実験における結果とは異なることも考えられる。たとえば、粘性土地盤を挟む土層に注入を行った場合、先行した注入により粘性土との境界部分に薬液が注入されある程度時間経過後に堅く固結した状態になれば、境界部の弱点が改善され、その後の注入では境界注入や粘性土内で割裂が生じる可能性は少なくなる。また、粘性土が挟まっている地盤であっても、その層厚が薄く強度

が大きい場合には粘性土層が弱点になりにくいと思われる。したがって、1つの注入ポイントでの注入形態と固結形状を考えた本研究の結果は、安全サイドにあることになる。今回の実験結果は、実地盤における注入を考えるうえで重要である注入形態とそれに基づく固結形状に対する注入ポイント付近における土層状況および薬液ゲル化時間の関係であり、実際問題への適用においては上述したような点を踏まえて全体的な評価を下していくことが必要であろう。なお、本実験の遂行にあたっては、東京電力(株)の援助を受けたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 森 麟・田村昌仁：水ガラス系固結砂の強度に関する工学的特性，土木学会論文集，No. 370，pp. 113～122，1986。
- 2) 森 麟・田村昌仁：薬液により固結した砂の粘着力とダイレイタンスーについて，土木学会論文集，No. 370，pp. 123～132，1986。
- 3) 森 麟・田村昌仁・千 柄植：砂質地盤における割裂発生機構，土木学会論文集，No. 388，pp. 61～70，1987。
- 4) 森 麟・田村昌仁・平野 学：ゲル化時間の長い薬液の砂質地盤における注入形態とその支配条件，土木学会論文集，No. 388，pp. 131～140，1987。
- 5) 森 麟・田村昌仁・原口賢一：ゲル化時間の短い急結・瞬結性薬液の砂質地盤における注入固結形態とその支配条件，土木学会論文集，No. 406，pp. 157～166，1989。
- 6) 柴崎光弘・下田一雄：最新・薬液注入工法の設計と施工，pp. 113，1985。
- 7) Karol, R. H. : Chemical Grouting, Dekker, pp. 106～132, 1983.
- 8) 嶋津晃臣・塚田幸広・下坪賢一・川村浩二：薬液注入工法の注入効果判定手法に関する実験的検討，土木研究所資料，pp. 16～23，1988。
- 9) 森 麟・田村昌仁・鹿島昭一・江本佑橘：薬液注入が地中構造物の作用土圧に与える影響，トンネルと地下，No. 1，pp. 23～28，1989。
- 10) 森 麟：圧力注入による地盤のハイドロ・フラクチャリング現象，土と基礎，No. 8，1987。

(1989.11.16・受付)