

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

SOLIDIFIED SHAPES BY SHORT GEL TIME GROUTS IN SANDY GROUND AND THE GOVERNING CONDITION

森 麟*・田村昌仁**・原口賢一***

By Akira MORI, Masahito TAMURA and Ken-ichi HARAGUCHI

In order to elucidate the mechanism of permeation by short gel time grouts, we investigated the effects of injection pressure P' , injection rate q , injection time t , and gel time Gt on the solidified shapes. Through a lot of injection tests using the large injection apparatus, we obtained the following conclusions. 1) Permeation without fracturing is possible as long as P' is increasing during injection. 2) If the permeability of sand is large enough, the successive grout can permeate spherically by perforation in the pore gel at the solidified part.

Keywords : grouting, short gel time grout, sandy soil, solidified shape

1. ま え が き

砂質地盤を対象とする薬液注入では、注入時間よりもゲル化時間が長い緩結性の薬液を用いて浸透注入を目指すことが基本であるが、工法の簡単なゲル化時間の短い急結性・瞬結性の薬液が使用される場合も少なくない。緩結性薬液についての注入形態を支配する条件については文献1)で明らかにしたが、急結・瞬結性薬液については不明な部分が多く、土質条件や薬液ゲル化時間に応じた注入方法の確立が急務とされている^{2),3)}。

ゲル化時間が注入時間よりかなり短い瞬結性、急結性薬液の場合は、先行薬液による浸透部分が薬液のゲル化により固結すると後続薬液はその部分を突き破って割裂的に注入せざるを得ない^{4)~7)}。このため、ゲル化時間の短い薬液による注入状況は、先行薬液を絶えず遠方に押し出していく緩結性薬液の場合と大きく異なると考えられるが、薬液の浸透メカニズムや注入が可能な条件についてはほとんど明らかでない。

本研究の目的は、急結・瞬結性薬液における注入のあり方を明確にすることにあり、大型土槽を用いた注入実験により、注入固結形態の支配条件や浸透注入可能限界を調査研究したものである。

2. 実験方法および試料

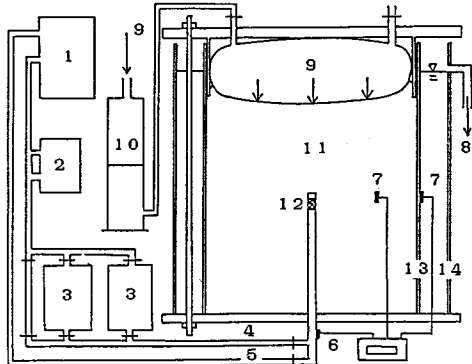
写真-1および図-1には、実験装置の概要を示す。実験土槽は、内径80 cm、高さ100 cmの鋼製多孔質円筒で側面からの排水が可能のように3 mmの孔が多数あり、内壁には0.1 mmの金属メッシュが全周に張り付けてある。その内円筒の外側を内径100 cm、高さ100 cmのアクリル円筒で囲み、この中を水で満たすことができる。試料砂は内円筒内にベルトコンベアを用いて自由落下させ水締めした。このようにして作製した土槽の上表面にゴム風船を入れ内円筒の上盤をボルトで固定し、ゴム風船を水で満たしコンプレッサーで加圧して試料に上載圧を与える。上載圧 σ_v は、すべて1 kgf/cm²とした。

注入圧 P' は、注入管下端に取り付けた圧力計による実測値から地下水圧と管内抵抗の値を減じたものとした。管内抵抗は注入実験の場合と等しい注入速度で薬液を空の土槽内に放出した場合の圧力計の読みである。また、注入中の割裂状況を調べるため加圧用ゴム風船内の

* 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
(〒305 つくば市立原1)

*** 正会員 工修 大成建設(株)(元・早稲田大学大学院生)
(〒160-91 新宿区西新宿1-25-1)



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: 注入圧 7: 土圧 8: 越流量
9: 上載圧 10: 水タンク 11: 砂試料 12: 注入管
13: 鋼製内円筒 (φ800mm) 14: 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 砂の種類

試料	摘要	間隙比 e	透水係数 k (cm/sec)	摩擦角 ϕ_d (°)
A	市販ケイ砂3号	1.09	1.1×10^0	34.7
B	市販ケイ砂5号	0.88	1.3×10^{-1}	34.3
C	市販ケイ砂6号	1.00	5.3×10^{-2}	34.8
D	B : E = 5 : 5	1.00	2.0×10^{-2}	33.4
E	市販ケイ砂7号	1.00	5.1×10^{-3}	38.1
F	市販ケイ砂8号	1.00	1.6×10^{-3}	38.4
G	E : I = 9 : 1	1.00	2.4×10^{-3}	36.1
H	E : I = 3 : 1	1.00	7.8×10^{-4}	37.6

試料Dは、試料Bと試料Eを 5 : 5 の重量比で混合したものの試料G、Hは、試料Eと試料I (木節粘土) を 9 : 1, 3 : 1 の重量比で混合したものの

水の出入りを調べて供試体の体積変化を求めた。水の出入りは、図-1の水タンクの水位差で読み取った。

表-1には、試料の透水係数と摩擦角を示す。また、図-2には試料の粒度分布曲線を示す。使用した砂は主に市販のケイ砂を用いたが、透水係数を変えるため木節粘土との混合土も用いた。透水係数 k は定水位試験法により、摩擦角 ϕ_d は三軸排水試験により求めた。

薬液はゲル化時間の異なる3種類(瞬結性、急結性、緩結性)を使用することにし、表-2には、薬液の配合とゲル化時間 Gt を示す。ゲル化時間 Gt は、注入実験に先立って実際に使用する注入管(管の先端で薬液の混合が可能な二重管式)と同一なものを使用して求めることとし、注入管より流出した薬液がゲル化するまでの時間とした。また、注入ポンプと注入管までの間にウォーターブルー(青色)およびローダミン(赤色)で着色したB液を満たした2つのタンク(図-1参照)を設置しており、バルブを切り替えることにより着色B液を時間差注入して薬液の浸透状況を調査した。

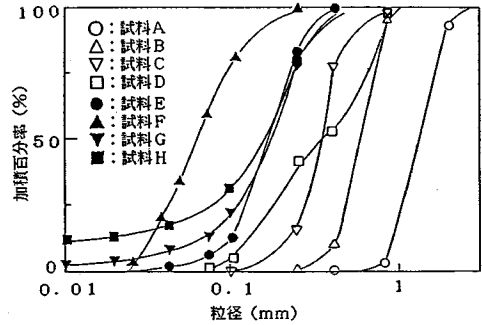


図-2 粒度分布曲線

表-2 薬液の種類

種類	配 合		ゲル化時間 Gt
	A液 500 cc	B液 500 cc	
瞬結性薬液 a	3号水ガラス 250 cc リン酸 250 cc 水 250 cc	硬化材 50 cc リン酸 25 cc 水 425 cc	5~10 (秒)
急結性薬液 b	3号水ガラス 250 cc リン酸 250 cc 水 250 cc	硬化材 50 cc リン酸 18 cc 水 432 cc	50~70 (秒)
緩結性薬液 c	3号水ガラス 250 cc リン酸 250 cc 水 250 cc	硬化材 50 cc リン酸 14 cc 水 436 cc	20~30 (分)

3号水ガラス: $Na_2O \cdot 3SiO_2 \cdot aq$, リン酸: H_3PO_4 (75%)
硬化材(グリオキザール): [(CHO)₂35%] と [酢酸CH₃COOH 5%]

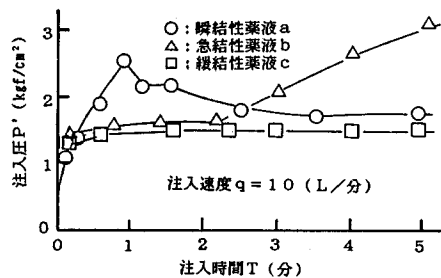


図-3 試料Eの注入圧 P' と注入時間 T の関係

3. ゲル化時間の短い薬液の注入圧

(1) 注入圧に及ぼすゲル化時間の影響

薬液注入における注入管理は注入圧で行われることが多いが、注入圧に及ぼす薬液ゲル化時間、注入速度、砂の透水性の影響については現時点においてもほとんど不明で注入圧の意味するところが明らかでない。この章では、この注入圧の特徴について調査した。

図-3は、試料E(ケイ砂7号)に、全注入量 $Q=50$ (L), 注入速度 $q=10$ (L/分), 全注入時間 $t=5$ (分間) で薬液 a, b, c を注入した場合の注入圧 P' と注入時間 T の関係を示す。図-4は供試体の体積膨張量 V と注入時間 T の関係である。

緩結性薬液 c では、注入圧は注入中ほとんど変化せず

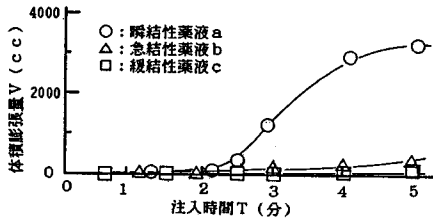


図-4 注入過程における試料Eの体積変化

一定値を示している。一方、注入中に薬液がゲル化する薬液 a, b では注入圧の増加が認められるが、これは先行薬液がゲル化して透水性がより低下した部分を後続薬液が突き破っているためと考えられる。瞬結性薬液 a では、注入直後から注入圧が増加しているがその後減少して一定値となる。急結性薬液 b では、ゲル化するまでは緩結性薬液 a とほぼ等しい注入圧であり、その後ゲル化とともに注入圧は増加している。写真-2には、それぞれの固結形状を示しているが、瞬結性薬液 a では垂直な厚板状、薬液 c では完全な球形状、薬液 b はその中間の形状であることがわかる。

注入中の体積膨張量の大部分は、割裂注入が発生した場合に制裂脈が土を押し上げた量に相当するので、膨張量が著しく大きい薬液 a の場合は最も大きな脈が発生していることになる。薬液 c では体積膨張が認められず、固結形状が球状で浸透注入が得られた結果と一致する。

図-5 は、試料 E より透水係数が著しく大きい試料 A (ケイ砂 3号) に対して、 $Q=50$ (L), $q=5$ (L/分), $t=10$ (分間) の注入における注入圧 P' と注入時間 T の関係を示す。写真-3には、瞬結性薬液 a による固結状況を示しており、割裂脈の存在は全く認められず球形状の固結体が得られていることがわかる。また、この場合供試体の体積変化はどの薬液の場合でも装置上の最小の計量単位である 50 cc 以下であった。瞬結性薬液では、後続薬液は先行薬液によるゲル化領域を突き破らざるを得ないので注入圧は中昇するが、固結形状と供試体の体積変化がほとんど認められなかった点からみて、事実上割裂が生じなかったといえる。これは、砂の透水性が大きくなるにつれて割裂圧が増加し割裂しにくい条件を有していることに加えて、試料 A のように透水性が特に大きい砂では割裂圧が弾塑性体中の空洞を押し上げるのに必要な極限空洞内圧程度となり、特定方向の割裂でなく空洞周辺全体が破壊することが原因と考えられる⁹⁾。

写真-2の試料 E の場合、薬液のゲル化時間が長いほど固結形状が良好であったが、試料 A ではゲル化時間が長い薬液ほど固結形状が悪くなった。特に、割裂が最も発生しにくい緩結性薬液 c では、注入孔周りに球形状の固結が得られず土槽の下部に厚さ 10 cm 程度にわたって固結した。これは、試料 A は透水性が非常に大きいた

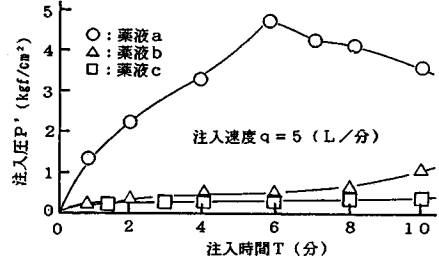


図-5 試料Aの注入圧 P' と注入時間 T の関係

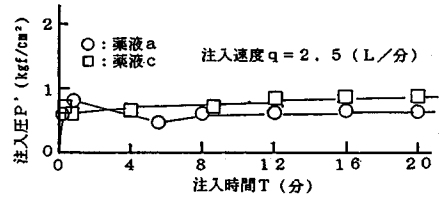


図-6 試料Hの注入圧 P' と注入時間 T の関係

め間隙中の薬液がゲル化するまでの間に水との比重差で沈降したためである。したがって、透水性が非常に大きい地盤ではゲル化時間が短いほど固結形状は良好になると考えられる。

図-6には、透水性が試料 E より小さい試料 H の結果を示している。注入速度 $q=2.5$ (L/分)、全注入時間 $t=20$ (分間) である。この場合、注入圧は薬液 a と薬液 c でほとんど差がなく、瞬結性薬液 a の場合でも注入中における注入圧の増加は認められなかった。注入管周りで薬液の浸透領域が形成されると、ゲル化によって浸透部分の透水性が低下するため注入を続けると注入圧は上昇しなければならないが注入圧の増加が認められない事実より注入孔周りでは浸透領域がほとんど存在していないと考えられる。注入圧が瞬結性と緩結性で一致していることは、薬液がゲル化時間に無関係に同じ状況で注入されていることになり、これが可能なのは薬液が常に前方に割裂していく割裂注入状態以外考えられない。写真-4には、薬液 c の注入状況を示しているが、注入孔周りの固結がほとんどなく、薬液は数本の割裂脈に沿って供試体側方から外部へ流出していることがわかる。

注入圧に及ぼすゲル化時間の影響を明確にするため、瞬結性薬液 a の注入圧とゲル化が生じない水による注入圧の大きさを比較することにし、図-7にその結果を示す。縦軸の R_a は、水による注入圧 P_w に対する瞬結性薬液の注入圧 P_a の割合である。 R_a は砂の透水性が大きくなるにつれて増加しており、 R_a が大きいほど固結形状はより球形状になる。したがって、試験注入時における水による注入圧と実際の注入圧の大きさを比較することが浸透注入か割裂注入かを推定する 1 つの簡易な方

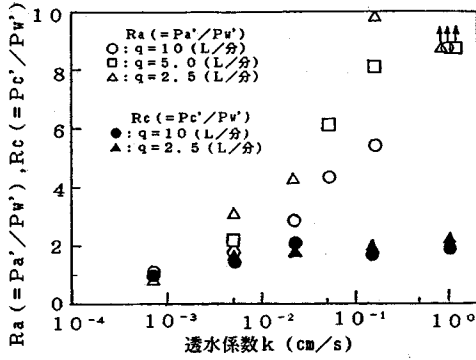


図-7 薬液 a, c の注入圧 P'_a, P'_c と水の注入圧 P'_w

法と思われる。また、図中には、緩結性薬液 c の注入圧 P'_c と P'_w の比 R_c も示しているが、この値は砂の透水性によらず薬液と水の粘性比程度である。なお、 P'_a, P'_c は注入中の終値である。

以上の結果から、砂の透水性が小さくなるにつれて注入圧に及ぼすゲル化時間の影響は小さくなり、注入圧が瞬結性と緩結性でほぼ一致するような場合には割裂注入が主体となり注入管周りの固結はほとんど期待できないことがわかった。また、瞬結性薬液の場合でも、砂の透水性が大きいと割裂脈は発生せず良好な固結形状が期待できることが明らかとなった。

(2) 注入圧に及ぼす注入速度、経過時間、砂の透水性の影響

ゲル化時間の長い薬液を注入する場合に注入形態が浸透注入になるか、割裂注入になるかを判断するうえで、注入圧 $P' \sim$ 注入速度 q 関係が基本となるので¹⁾、ここでも注入圧 \sim 注入速度関係を調べた。

図-8には、薬液のかわりに水を用いた場合の $P' \sim q$ 関係を示す。図-9には、実際の緩結性薬液 c を使用した場合の結果を示す。この場合、薬液の粘性が水より大きいので、注入圧が水の場合より若干大きくなるが全体の傾向としては両者の差異が認められない。文献1)では、緩結性薬液の浸透注入条件は q を増加したとき P' が増加する段階の注入速度であることを示した。そして緩結性薬液が浸透注入になり得る最大の注入速度を限界注入速度 q_{CR} とすると q_{CR} は、 $P' \sim q$ 関係において最大の注入圧が得られる時点の注入速度であり、 q が q_{CR} を超えると割裂注入が主体となる。

写真-5には、試料Eに対して薬液 c を $q=10$ (L/分) で注入した場合の浸透状況を示している。なお、赤い着色液は注入の最終段階で用いている。図-8の試料Eの $P' \sim q$ 関係において $q=10$ (L/分) では浸透注入が可能な段階であり、赤い着色域が注入孔周りに同心円状にみられた結果と一致している。写真-6には、透水性が

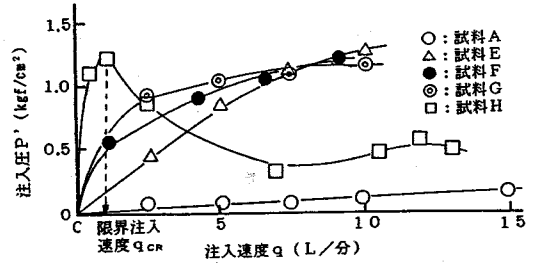


図-8 水の注入圧 P' と注入速度 q の関係

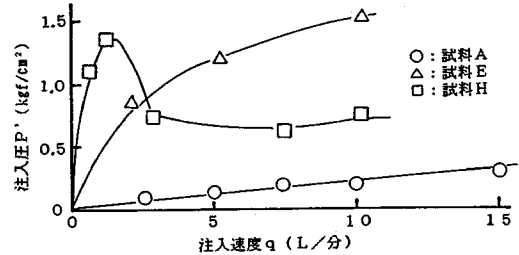


図-9 薬液 c の注入圧 P' と注入速度 q の関係

試料Eより小さい試料Gに薬液 c を $q=10$ (L/分) で注入した場合の浸透状況を示す。この場合、図-8の $P' \sim q$ 関係において $q=10$ (L/分) では注入圧の減少段階にはまだ達していない。固結形状は、写真-5に示した試料Eの場合よりくずれのものの実質的には浸透注入が可能であることを示している。透水性がさらに小さい試料Hで $q=2.5$ (L/分) の場合は、 $P' \sim q$ 関係において注入圧の減少段階なので割裂注入を意味し、薬液 c、薬液 a とともに固結領域がほとんど存在しなかった図-6の結果とも一致する。しかし、試料Eに q_{CR} 以下の注入速度 10(L/分) で注入した場合では瞬結性薬液 a において、緩結性薬液の場合と異なり鉛直厚板状の固結体(写真-2参照)となったことより、緩結性薬液の浸透注入条件を瞬結性薬液にそのまま適用することは困難となる。

図-10、図-11には、試料A、試料Eの注入圧に及ぼす注入速度の関係を示す。ただし、瞬結性薬液では図-5に示したように注入過程においてピーク値に達した後減少する場合もあるので、ピーク値と終値の両者を示すことにした。薬液 a では試料Aにおいて注入速度によらずすべて球形状の固結体を得られ、試料Eではどの注入速度でも鉛直厚板状の固結体を得られた。ゲル化時間の長い緩結性薬液では、注入圧 P' と注入速度 q の関係から注入形態を推定することができ、注入速度が増すにつれて注入圧 P' が増加する限り浸透注入が可能である。しかし、瞬結性薬液の場合には、緩結性薬液の場合にみられるような注入形態と $P' \sim q$ の関係は成立せず、瞬結性薬液の $P' \sim q$ から注入形態を推定することは困



(a) 装置の概要



(b) アクリル外円筒と鋼製内円筒

写真一 注入実験土槽



(a) 瞬結性薬液 a



(b) 急結性薬液 b



(c) 緩結性薬液 c



(d) 緩結性薬液 c (真上から)

写真二 試料Eの注入固結形態 ($q=10$ (L/分), 全注入時間 $t=5$ (分))



(a) 真上から



(b) 浸透状況

写真-3 試料A(ケイ砂3号)の瞬結性薬液aによる注入固結形態 ($q=10$ (L/分), $t=5$ (分))



$q=10$ (L/分), $t=5$ (分)
(固結部分はほとんど存在しない)

写真-4 試料Hの緩結性薬液cによる注入形態



試料E(ケイ砂7号)
 $q=10$ (L/分), $t=5$ (分)

写真-5 緩結性薬液cの浸透状況



試料G(ケイ砂7号+木節粘土)
 $q=10$ (L/分), $t=5$ (分)

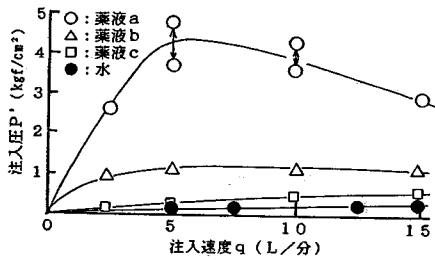
写真-6 緩結性薬液cの浸透状況



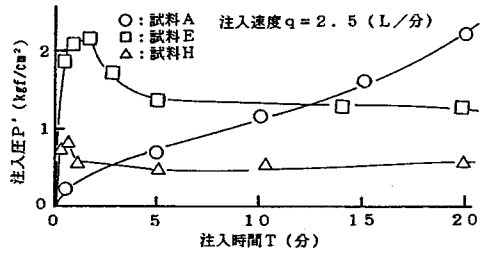
試料A(ケイ砂3号)
 $q=5$ (L/分), $t=10$ (分)

写真-7 瞬結性薬液aの浸透状況

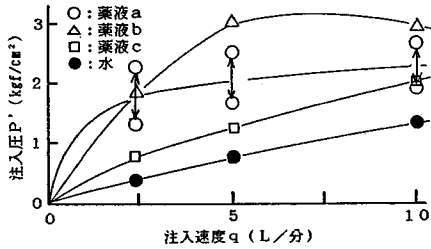
10%
注入
上載圧 1kg/cm²
注入速度 5L/min
注入量 50ml
ゲルタイム



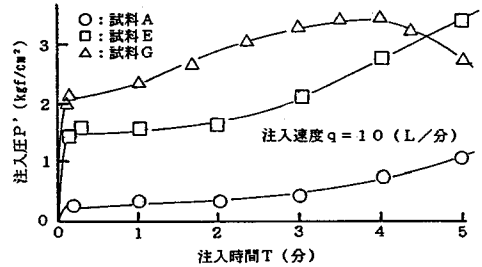
図一10 試料Aの注入圧 P' と注入速度 q の関係



図一12 瞬結性薬液 a の注入圧 P'



図一11 試料Eの注入圧 P' と注入速度 q の関係



図一13 急結性薬液 b の注入圧 P'

難となる。また、緩結性薬液の場合、注入速度 q が小さいほど浸透注入が得られやすいが、ゲル化時間の短い急結・瞬結性薬液では、 q の減少は固結形状にとってむしろマイナスとなる。これは、 q の低下は所定量を注入するまでの注入時間を長くするため、ゲル化までに浸透注入できる薬液量が減少するためである。事実、試料Eで $q=2.5$ (L/分) の固結形状は、 q が大きい場合に比較してより偏平な板状となった。

図一12には、瞬結性薬液を用いた場合の試料A, E, Hの注入圧と注入時間の関係を示す。注入速度 $q=2.5$ (L/分) である。注入の初期では三者とも注入圧が増加しているが、透水性が小さい試料ほど注入圧は速い段階から減少傾向となっていることがわかる。図一13には、急結性薬液の結果を示している。試料A, Eでは注入圧は注入中増加しつつあるが、透水性が小さい試料Gでは注入圧は注入の終期において減少し始めている。したがって急結性薬液でも透水性が小さい試料では注入圧が注入中に減少し始めることがわかる。図一12, 13において砂の透水性が大きいものほど、注入圧はゲル化後も増加し続ける傾向にあり、この場合に限って瞬結・急結性薬液でも固結が良好であったことより、注入圧と注入時間の関係がゲル化時間の短い薬液の固結形状を考えるうえで重要と思われる。

固結重量としては、どの薬液の場合でも注入速度 q が緩結性薬液についての限界注入速度 q_{CR} より小さい限り 200 kg 前後となった。これは、全注入量が間隙を 100% 填充すると仮定して求めた固結重量とほぼ同程度

である。瞬結性薬液 a では、砂の透水性が小さいと q が q_{CR} 以下であっても写真一2に示したように鉛直厚板状の固結となるが、この場合割裂は固結部に限られ未固結部では浸透注入が得られているので薬液のロスが少ない。 q が q_{CR} より大きいと未固結な砂自体の割裂が生じるため、薬液のロスが大きくなることになる。なお、ここでの固結部分は、注入後1日放置して試料に放水した際に崩壊しない部分とした。

4. 薬液の浸透メカニズム

前章では、ゲル化時間の短い急結性・瞬結性薬液による注入圧と注入形態の関係について述べたが、ここではこれら薬液の浸透メカニズムについて述べる。

瞬結性薬液の注入に際しては、注入時間よりもゲル化時間の方が短いので、ゲル化した領域では継続注入される薬液により割裂の現象が生ぜざるを得ない。しかし、写真一3で示したように試料Aでは割裂的注入は発生せず、球形状の固結形状になっている。

試料Aは、透水性が大きく注入中にゲル化が始まった固結領域内の個々の間隙が大きいため間隙中の小さい強度のゲルは継続注入している薬液で穿孔されやすく、固結領域の透水係数はまだかなり大きい状態に維持されていると思われる。透水性の大きい状態では割裂圧は大きく割裂は生じにくい⁹⁾。このためほぼ浸透注入のように注入が進行でき、固結形状が球状に成長し得る。しかし、ここでは先行薬液を後続薬液が次々と押し出していく本来の浸透注入ではなく、すでにゲル化して移動できない

間隙中の先行薬液を後続薬液が穿孔して前方に進む状況となり、固結領域の外周面から流出浸透して固結することになる。したがって、後続の薬液ほど固結領域の外側境界に近くなる。この状況は2種の着色薬液を時間差注入した結果からも明確である。写真—7には、瞬結性薬液を試料Aに注入した場合の固結部断面を示している。注入速度 $q=5$ (L/分)、全注入時間 $t=10$ (分間) で、青い着色液は注入2分後から1分間、赤い着色液は注入8分後から1分間注入している。赤い着色域は、先に注入した青い着色液の浸透領域の外側の固結部外周にほぼ同心円状に存在し、実質的には浸透注入であり割裂は生じていないといえる。透水係数の最も大きい試料Aで注入圧が一番大きいのは固結領域の間隙中のゲルを穿孔しながら浸透的に注入が進行していくためであり、またこのような注入圧でも割裂が発生しない条件をもっていたことが原因である。

以上の結果より、急結性、瞬結性薬液の注入段階における浸透メカニズムは次のように説明できる。ただし、注入速度が図—8で示した水で求めた限界注入速度 q_{cr} 以上であれば、薬液のゲル化時間に関係なく注入の初期から未固結な砂自体の割裂注入となるので、注入速度はどの薬液でも q_{cr} 以下にすることが必要条件である。

a) 浸透注入段階 薬液がゲル化する以前の浸透注入段階で、注入圧は経過時間に無関係な一定値をとる。瞬結性薬液では、注入直後から注入圧は増加し始めるのでこの段階はない。固結形態は球形状。

b) 穿孔的浸透注入段階 先行薬液のゲル化が始まると、後続薬液は先行薬液による浸透固結部分を貫いて前方に進行するが、しばらくは浸透固結部分の間隙ゲルを薬液が穿孔しながら球形状に浸透する状況が続く段階となる。砂の透水性が大きいと間隙径が大きいので間隙ゲルは穿孔されやすい。この段階では固結部の透水性があまり低下しないので注入圧が大きくなっても割裂は発生しにくい。また、ここでは浸透部分が拡大するにつれ透水性の小さい領域が増大するので、注入圧は時間とともに増加の傾向を示す。

c) 割裂的注入段階 経過時間とともに注入圧が増加し浸透固結部分の透水性も低下してくるので、割裂が生じやすくなり、さらに注入を続けると浸透固結領域において割裂が発生する。割裂が発生すると固結領域を容易に通過してその外側に薬液が浸透しやすくなるので、一定の注入速度のもとでは注入圧が低下する。以後割裂部から外側に浸透して固結領域が生長し、この領域が固結すると次にはここで割裂が生じる。この状況が繰り返されるので固結領域が割裂方向に厚板状に拡大され、固結体の最小有効幅は注入を継続してもほとんど増大しない。

以上のメカニズムをふまえて瞬結性薬液を試料Eに注入した場合を考えると注入のごく初期では図—12のように注入圧の増加が生じているので試料Aのように穿孔的浸透注入により球状に固結体が成長していると考えられる。しかし、球状固結体が少し大きくなると試料Eでは試料Aと異なり、個々の間隙が小さいので間隙中のゲルを後続の薬液が穿孔して通過するために要する圧力が大きくなり割裂が発生する。この場合、鉛直圧(上載圧)よりも水平圧の方が小さいので割裂面は鉛直方向に通常は一平面生じる。割裂面が少ないので割裂脈幅が大きくなり、脈中を通る液圧は注入圧に近い。薬液は固結領域内の割裂面を通り固結体の外側に浸透的に入っていく。このときの浸透形状は写真—2(a)のように鉛直ではぼりリング状になる。この浸透部分はすぐに固結していくので、ある程度の大きさになると注入圧が上がり再び割裂が発生する。このような浸透と割裂が繰り返され、割裂方向は常にはじめの割裂方向をとるので固結体の形状は鉛直な板状のものとなる。注入圧は初めの間は増加してピークに達し、最初の割裂が発生する。以後浸透と割裂が繰り返されるので、この場合の注入圧は次々に形成される固結部分の割裂圧で決まる。

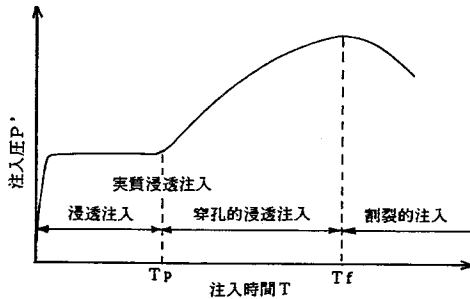
試料Hでは透水係数が小さいので注入速度 $q=2.5$ (L/分) では水を用いても割裂する。したがって、瞬結性薬液では当然はじめから割裂が発生しており、割裂脈からの浸透もごくわずかである。このために固結体はほとんどなく脈状のホモゲルが数本みられるのみである。注入圧は固結の影響を受けない試料H自身の割裂圧で決まることになる。注入圧が試料Hよりも試料Eの方が大きいのは割裂圧の差のためである。

急結性薬液の注入における固結形状は透水係数の著しく大きい試料Aを除き瞬結性のもよりもかなり球形状に近くなり、割裂脈もほとんどみられなかった。急結性薬液は薬液がゲル化するまでの時間が瞬結性薬液よりかなり長いので、砂自体の割裂が生じない場合には浸透注入となる時間が長くなる。また薬液が間隙中でゲル化し始めても初期においては瞬結性薬液のゲルよりも強度が弱いので後続薬液で穿孔されやすいと考えられる。このため固結形態は瞬結性薬液よりも球形状に近づく。

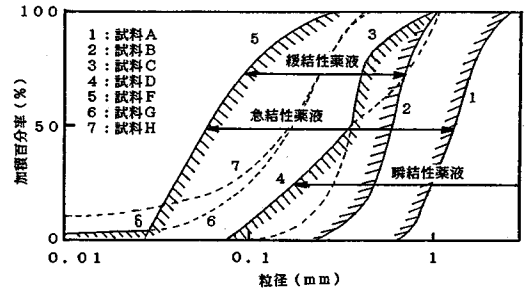
5. 実質浸透注入の条件と限界

ゲル化時間の長い緩結性薬液の注入において、実質浸透注入とするための注入条件¹⁾についてはすでに明らかにしたので、ゲル化時間の短い瞬結・急結性薬液の場合における注入条件を考えることにする。

図—8の注入速度と注入圧の関係において、注入速度が限界注入速度 q_{cr} をこえると未固結部の砂自体の割裂が生じるために薬液のゲル化時間にかかわらず実質浸透



図—14 砂質地盤におけるゲル化時間の短い薬液の注入圧と注入時間の一般的关系
(注入速度が限界注入速度 q_{CR} 以下の場合)



図—15 粒度分布と実質浸透注入限界

注入は望めない。注入速度 q が q_{CR} より小さい場合に、ゲル化時間の短い急結・瞬結性薬液を注入した場合の注入圧・注入時間の一般的な関係は図—14 のようになる。

T_p をこえるとゲル化が始まり、注入圧が増加しはじめるが、瞬結性薬液では図中の T_p はほとんど存在しない。 $P \sim T$ 関係における最大注入圧が得られる注入時間 T_f の値は、砂の透水性、ゲル化時間の影響を受け、透水性が大きくゲル化時間が長いほど T_f は大きくなる。砂の透水性が大きいほど、粒子間隙も大きく間隙中のゲルが穿孔されやすいので長期間にわたってこの穿孔段階が続くことになる。注入形態として考えると T_p から T_f までの間は、前章で述べた穿孔的な注入段階に相当する。 T_f に達するとそれまでの固結領域が割裂するので注入圧は下がり、以降浸透と割裂が繰り返され固結形態は板状になる。

このため実質浸透注入とするためには、 T_f までに行きできるだけ大量の薬液を注入することが望ましく、注入速度を低下させることはむしろ有効固結径を小さくすることになる。注入速度の低下は、所定の注入量を注入する時間を長くすることになり、相対的にゲル化時間を短くすることに相当するためである。したがって、注入速度は固結領域外の砂を割裂しない最大の注入速度である q_{CR} を用いることが最も効果的である。ただし、特に透水性が大きい試料 A では q_{CR} が非常に大きいので、 q_{CR} より小さい実用の注入速度を用いても十分に浸透注入させることができる。瞬結性よりゲル化時間の長い急結性薬液では T_f の値が大きくなるので同じ注入速度でも浸透範囲を大幅に広げることができる。

以上は注入のあり方であるが、次に実質浸透注入の可能限界について考える。浸透注入の限界は注入速度や深度により異なるが、ここでは一応経済的な注入速度と考えられる 10 (L/分) で全量 50 (L) 注入するときの実質浸透可能限界について調べることにした。また、深度については 10 m 前後を対象とする場合が多いので、上

表—3 透水係数と実質浸透注入限界

薬液の種類	透水係数 k (cm/s)			
	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
瞬結性薬液	—			
急結性薬液	—			
緩結性薬液	—			

載圧は 1.0 (kgf/cm²) とした。

図—15 には、粒径加積曲線による実質浸透注入の可能限界を示す。粒径加積曲線における左側限界線の広がり、瞬結性が最も小さくなり緩結性薬液 c と急結性薬液 b は同じであった。ただし、限界線に近くなると固結形状としては薬液 c の方がより球形状ですぐれている。また、この左側限界線 (5—6) は、瞬結性薬液 a で鉛直厚板状の固結体が得られる限界でもある。このとき、どの薬液も曲線 5 および曲線 6 では、一応注入可能であるのに対して、細粒分を含む破線 7 では、注入不可能であることから注入限界には粘土分、シルト分という細粒分が大きく影響していることがわかる。これは、細粒分が地盤の透水性を低下させるのに大きく影響するためである。なお、左側限界線として曲線 5 から曲線 6 へつながる曲線を用いているが、これは曲線 5 と曲線 6 で注入可能であったことによるものである。一方、右側限界線の広がりもゲル化時間によって大きく異なる。これは、透水性が大きいとゲル化時間が長い薬液では、薬液自体の沈降現象が生じてマイナスになるからである。

また、実質浸透限界を透水係数 k で表わせば、表—3 のようになる。

なお、以上の実質浸透限界は、 $q=10$ (L/分)、 $\sigma_v=1.0$ (kgf/cm²) の場合であり、 σ_v が 1.0 (kgf/cm²) より大きいと割裂しにくくなるので、左側限界線はどの薬液もより左にずれ、適用地盤が広がると考えられる。

6. ま と め

本研究は、砂質地盤におけるゲル化時間の短い瞬結・急結性薬液の浸透メカニズムや注入形態について調査したものであり、主な結果は以下のとおりである。

(1) 瞬結性および急結性薬液でも注入速度 q が緩結性薬液についての限界注入速度 q_{CR} をこえると、地盤が割裂し薬液の固結効果が大きく低減する。注入速度が限界注入速度以下の場合、急結、瞬結性薬液による注入圧 P' と注入時間 q の関係は、図—14 に示した3つの段階に分けて考えることができ、注入時間とともに注入圧が増加している段階では間隙ゲルを後続薬液が穿孔する状況下での実質浸透注入が可能である。この穿孔的浸透注入の段階は、砂の透水性が大きいほど長期間継続されることになるので、瞬結性薬液であっても砂の透水性がかなり大きい場合には球形状の固結体が得られる。注入圧がピーク値を過ぎて低下する段階では、割裂注入になり固結形状が板状に形成するので注入効果は小さくなる。

(2) 浸透注入可能限界は、図—15 および表—3 に示したようになり、砂質地盤の透水性が大きいものほどゲル化時間の短い薬液の使用が適している。透水性がかなり大きな地盤で緩結性薬液を使用すると、薬液と地下水との比重差で薬液が沈降して所定の領域で薬液が固結しないことに注意すべきである。透水性が小さい場合にゲル化時間の短い薬液を使用する場合には、限界注入速度に近い大きな注入速度を用いて短時間にできるだけ多くの薬液を浸透させることが望ましい。

この研究では注入状態を考えるうえで基本となる均一地盤を対象としたが、実際の注入現場では不均一な場合が少なくなく、不均一地盤における薬液の挙動を調査し注入のあり方を解明することが残された今後の課題であ

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。また、注入実験の実施については、卒業論文として研究に参加した佐藤洋一氏、末弘 保氏、福井義弘氏、森 拓雄氏によるところが多く、感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Karol, R. H. : Chemical grouting, Dekker, p.162, 1983.
- 3) 柴崎光弘・下田一雄：最新の薬液注入工法の設計と施工，pp.83~92，1985.
- 4) 三木五三郎・佐藤剛司ほか：瞬結性薬液の地盤注入機構に関するモールド実験，第14回土質工学研究発表会，p.1589，1979.
- 5) 千田昌平・苗村正三・武田節朗：大型加圧モールドにおける薬液注入実験，第14回土質工学研究発表会，p.1593，1979.
- 6) 島田俊介：最新の地盤注入工法，理工図書，p.109，1982.
- 7) 所 武彦：最近のシールド工事における地盤改良工法の実例，日本プロジェクトリサーチ，NS-7，13，1987.
- 8) 薬液注入工法の調査・設計から施工まで，土質工学会編，pp.161~163，1985.
- 9) 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.
- 10) Vesic, A. S. : Expansion of cavities in infinite soil mass, Proc. ASCE, SM3, pp.265~290, 1972.

(1988.8.13・受付)