

# 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

## THE INJECTED SHAPES BY LONG GEL TIME GROUTS IN SANDY GROUND AND THE GOVERNING CONDITION

森 麟\*・田村昌仁\*\*・平野 学\*\*\*

By Akira MORI, Masahito TAMURA and Manabu HIRANO

In order to clarify the injected shapes by the long gel time grouts in the sandy ground, we investigated the relation among the inject rate, the inject pressure and the permeability of sands. The injection tests on several kinds of sands of which permeability was  $10^{-2} \sim 10^{-5}$  (cm/s) were performed through the triaxial injection apparatus (the diameter of specimen  $D=470$  mm). The main conclusions are summarized as follows: 1) the allowable inject rate depends upon the confining pressure as well as the permeability of sands. 2) the critical inject rate that enables the permeation grouting can be determined by the relation between the inject rate and the inject pressure in the steady flow condition.

*Keywords*: grouting, hydraulic fracture, permeation, allowable inject rate

### 1. ま え が き

砂質地盤の改良を目的とする薬液注入では、砂粒子骨格が変化せず、間隙が薬液で置き換えられる、いわゆる浸透注入があくまでも前提であり、その結果として止水や強度増加が期待できる。しかし、砂質地盤においても、砂の透水係数や注入量および拘束圧によっては、粘性土地盤を対象とした場合と同様に、注入圧で地盤が割裂し、均等な浸透が困難となる場合も少なくない。

したがって、実際の注入工事において、できるだけ浸透注入形態を確保し、薬液注入の効果を確実なものにするためには、注入量や砂の粒度・透水係数、地盤の拘束圧等の地盤条件を考慮して、浸透注入が可能になり得る限界を調べる必要がある。

現場で使用される薬液の種類は、ゲル化時間が数十分と長い緩結性のものから、数秒の瞬結性のものまでさまざまであるが、浸透注入をはかるためには注入時間よりゲル化時間の長い緩結性薬液を使用するのが基本的であり、この場合について調査することにした。緩結性薬

液を用いた注入では、地下水による薬液の希釈等が生じるため浸透領域がすべて固結するわけではない。また緩結性薬液の粘性が水よりわずかに大きいため、注入圧・注入量関係が水による注入と若干異なる。しかし、注入形態に最も密接に関係しているのは、割裂の発生であり、浸透状況に及ぼす割裂の影響を明らかにする点については、薬液のかわりに水を用いた注入実験を行うことで十分理解することができる。したがって、ここでは薬液のかわりに水を用いて注入実験を行うことにした。

本研究は、緩結性薬液による注入形態とそれに密接にかかわる注入圧・注入量関係を明らかにすることを目的とし、透水係数  $k$  が  $10^{-2} \sim 10^{-5}$  (cm/s) の範囲にある砂質地盤を対象とした注入実験を行い、浸透注入になり得る条件を明らかにしたものである。

### 2. 従来の研究

注入量と注入圧の関係を決定する浸透理論は、Magg, Thiem, Karolら<sup>1)</sup>により提案されている。そして、浸透注入が可能になり得る限界は、管に詰めた砂質土に対する浸透状況が調査され、単に対象とする砂の透水性や粒度分布のみで評価される場合が多い<sup>2), 3)</sup>。しかし、砂の透水性のみによる浸透注入可能限界は、必ずしも実状と一致せず、注入圧で地盤に割裂が発生し、注入

\* 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 早稲田大学助手 土木工学科(同上)

\*\*\* 学生会員 同大学院博士前期課程(現東京電力(株))

液が脈状に逸走する場合も少なくない。

薬液の浸透を考慮するうえで重要となるのは、割裂の発生がプラスかマイナスかという点にある。砂質地盤における割裂現象に関する研究は少ないが、Morgenstern<sup>4)</sup>は、注入による孔壁周りの間隙水圧の上昇を考慮に入れて、割裂が生じない許容注入圧を調べた。Horsrud<sup>5)</sup>も、液の浸透に伴う注入孔周りの塑性域の発達を考慮に入れ、三次元応力状態のもとでの割裂現象を理論的に調べている。

長くて大きい割裂が生じると、注入管よりの均等な浸透が困難となるので、浸透注入の効果としては低下する。Maggらの浸透理論を適用し、割裂の発生条件として、孔壁の引張破壊に基づく割裂理論<sup>6)~8)</sup>を用いると、現行の注入量(最大20リットル/分程度)のもとでは、これを完全浸透させる注入圧は大きくなって、それ以下の注入圧で地盤が割裂する場合が多く、割裂が発生しないことを前提にした浸透注入可能限界は、かなり限定されたものになる。また、注入孔壁周りのせん断破壊を考慮したMorgenstern<sup>4),5)</sup>の理論を用いると、割裂の発生は、注入圧が地盤の拘束圧以下で生じることになり、浸透注入可能限界は、さらに限定される。しかし、著者らは、砂質地盤の割裂現象が、単に孔壁周りの応力状態だけでなく、透水性に強く依存しており、透水性が大きいと割裂圧は拘束圧に比較して著しく大きくなるという結果を得た<sup>9)</sup>。したがって、薬液の浸透状況と地盤の割裂現象との関係を明らかにするうえで、砂の透水性の影響を考慮しなければならない。

割裂が生じると、注入管よりの均等な浸透が困難となるが、割裂脈の両側面からの浸透を考慮すると、割裂は浸透面積の拡大につながるので、割裂脈が所定の区間に止まるかぎり、浸透注入には効果的である。この割裂脈の長さは、砂の透水係数が小さく、注入量が多いほど長くなるが、拘束圧にも大きく左右される。脈を維持するためには、割裂脈内の水圧は、最低でも拘束圧は必要となるので、拘束圧の大きい場合には、注入管周りの浸透量および脈からの浸透量が拘束圧が小さい場合に比してかなり大きくなる。このため、高拘束圧の条件下では、一定の注入量のもとで、割裂脈を通過して予定区域外に逸走する量が少なくなり、実質上浸透注入が容易と考えられる。Cambefort<sup>10)</sup>も、深度の大きい地点の注入では、望むがままの注入圧でも十分な効果が期待できると述べており、浸透状況は、かなり拘束圧に依存していると思われる。

ここでは、実際の注入現場に合わせた最大20リットル/分の定量注入が可能となる大型三軸セルを用いた注入実験を行い、浸透状況と砂の粒度、透水係数、拘束圧、注入量等の関係を調べた。

### 3. 実験方法および試料

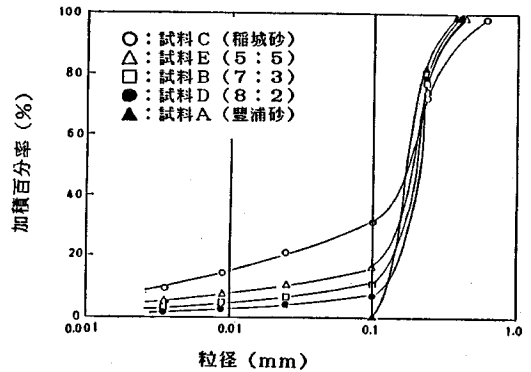
使用した砂は、豊浦標準砂、稲城砂とこれを混合したものであり、表—1、図—1に透水係数 $k$ と粒度分布等を示す。なお、透水係数 $k$ は、 $10^{-2} \sim 10^{-5}$  (cm/s)の範囲にあるため、三軸透水試験と変水位透水試験の2つの方法により求めた。

図—2、写真—1には、試験装置の概要を示す。供試体の直径は、470 mm、高さ500 mmとなる三軸装置であり、側方から、注入液の排水が可能となるように、ドレーン材(相馬砂、粒径1.00~2.00 mm、透水係数 $k$ )

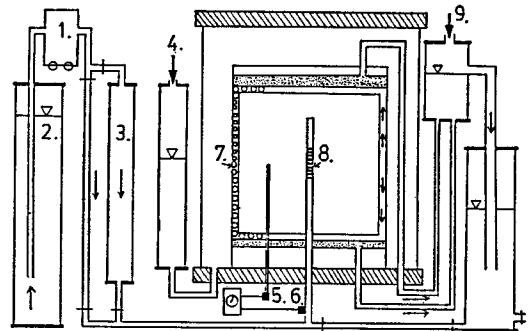
表—1 砂の種類

試料	密度 $\gamma_s$ (gf/cm <sup>3</sup> )	透水係数 $k$ (cm/sec)	透水係数 $k_a$ (cm/sec)	摩擦角 $\phi$ (°)
A(豊浦砂)	1.60	$6 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$	38
B(7:3)	1.54	$8 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-3}$	42
C(稲城砂)	1.45	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	43
D(8:2)	1.54	$2 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$	42
E(5:5)	1.56	$8 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	44

透水係数 $k$ 、 $k_a$ は、それぞれ三軸透水試験、変水位透水試験による値である。試料B、D、Eは、豊浦砂と稲城砂の混合砂であり、(5:5)等はその重量比を示す。



図—1 試料の粒度分布曲線



- 1. 定量ポンプ
- 2. 注入液用タンク
- 3. 着色液用タンク
- 4. 側圧
- 5. 間隙水圧計
- 6. 注入圧
- 7. 排水層
- 8. 注入管(φ=10mm)
- 9. 背圧

図—2 三軸注入試験装置

$= 5 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$  を 2~3 cm の厚さで試料の外周を覆った。試料の上下端より内径 10 mm の硬質ビニール管を合計 16 か所設けて、背圧用の水タンクに接続させた。この水タンクの水位は、注入過程において常に一定になるように中央部にパイプを設けてオーバーフローした水を下部のタンクに排水し、背圧用タンクの水圧が変化しないようにタンク外に流出させた。側面のドレーン材の排水能力を調べるため、ドレーン材内部に鉄パイプを立て、注入過程における間隙水圧を測定した結果、20 リットル/分までの注入量では、ドレーン材内部の間隙水圧はほとんど変化せず、十分な排水が可能であることを確認している。注入量  $q$  (リットル/分) は、電磁流量計を用いて測定した。また、注入過程における供試体の体積変化量は、三軸セル内の水の出入りにより求めた。注入管 (外径 10 mm) には、高さ 9 cm にわたり、内径 2~5 mm 程度の孔を多数あけ、0.10~0.20 mm の金属メッシュを巻き付けたものを標準として用いた。

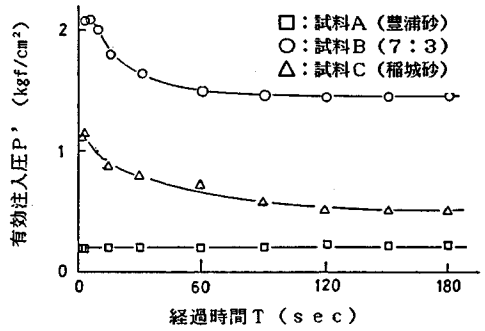
注入圧の大きさは、注入管の底部で測定したが、実測される圧力から管内抵抗を引いた値を注入圧とした。注入管の管内部および流出部による管内抵抗は、所定の注入量を空气中に放出させ、この場合の圧力計の読みを測定して求めた。供試体内部には、注入管よりそれぞれ 10, 60 mm 離れた位置に 2 個ずつ合計 4 個の鉄パイプを立て、間隙水圧 ( $u_{10}$ ,  $u_{60}$ ) を測定した。

実用の緩結性薬液は、水に比して粘性がわずかに大きい (粘性係数  $\eta = 1.4 \sim 2.5 \text{ cp}$ )、ここでは薬液のかわりに水を用いて実験を行った。

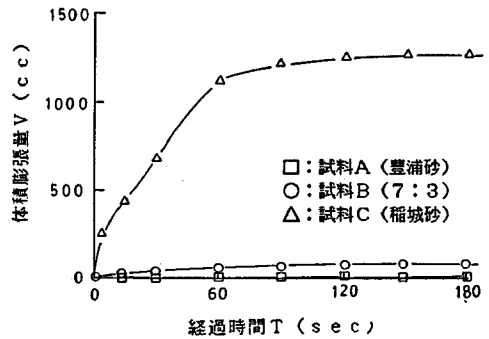
#### 4. 注入圧・注入量関係に及ぼす砂の透水性と拘束圧の影響

図—3 には、試料 A (豊浦砂)、試料 B (7:3)、試料 C (稲城砂) において、5 リットル/分の定量注入を行った場合 (拘束圧  $\sigma_3 = 1.00 \text{ kgf/cm}^2$ 、背圧  $u_{BP} = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$ ) の有効注入圧  $P'$  (= 注入圧  $P$  - 背圧  $u_{BP}$ ) と経過時間  $T$  の関係を示す。写真—2、写真—3、および写真—4 には、注入後にセルより取り出して調べた着色水の浸透状況を示す。写真—2 の豊浦砂の場合には、ローダミン (赤)、オーラミン (黄)、ニグロシン (黒) で着色した液を順次注入して浸透状況を調べたが、着色水が同心円上に広がっていることより、完全な浸透注入であると考えられる。写真—3 の試料 B (7:3) の場合も、ほとんど浸透注入であるが、透水性が小さい試料 C (稲城砂) では、水平割裂が発生していた。有効注入圧の値は、いずれの試料も注入開始後 2~3 分ではぼ一定値になり、定常状態になった。

図—4 には、図—3 の注入実験において、三軸セル内の水の出入りより求めた供試体の体積変化量  $V$  と経



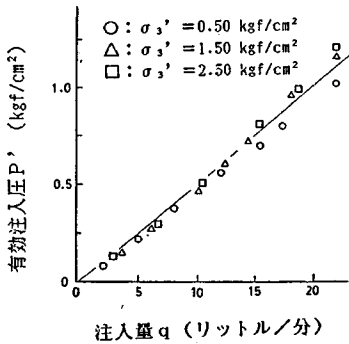
図—3 試料 A, B, C の経過時間  $T$  と注入圧  $P'$  の関係 ( $q = 5$  (リットル/分))



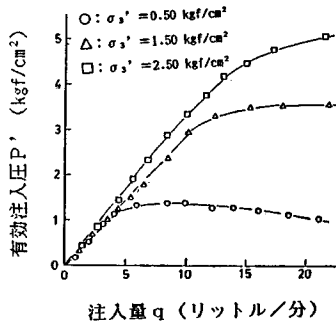
図—4 試料 A, B, C の経過時間  $T$  と体積膨張量  $V$  の関係 ( $q = 5$  (リットル/分))

過時間  $T$  の関係を示す。試料の透水性が小さいものほど膨張量が多くなった。体積膨張量が大きいくほど幅の大きい割裂が生じたことになり、試料 C (稲城砂) の場合、注入量の大部分が割裂した部分を通過したものと考えられる。浸透注入が得られる状況では、透水性が小さいほど注入圧が大きくなるはずであるが、試料 C では、割裂が主体で大きい幅の亀裂が生じたことより、割裂脈内の圧力が注入圧と同程度になり、有効注入圧が有効拘束圧  $\sigma_3'$  (=  $0.50 \text{ kgf/cm}^2$ ) 程度で亀裂を押し拡げていくことが可能となり<sup>11)</sup>、試料 B (7:3) の場合より小さくなったものと考えられる。

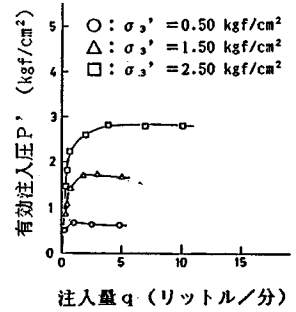
図—3、図—4 は、定量注入の結果であるが、図—5、図—6、および図—7 には、注入圧が約  $0.20 \sim 0.30 \text{ kgf/cm}^2$  ずつ増加するように注入量を増していったときの各段階の定常状態における有効注入圧と注入量の関係を示す。なお、ここでいう定常状態とは、各注入量のもとで 1 分間の注入圧の変化が  $0.01 \text{ kgf/cm}^2$  以下となった状態とした。図—5、図—6、および図—7 に示した  $\sigma_3' = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$  で 5 リットル/分における有効注入圧  $P'$  の大きさは、図—3 の 5 リットル/分の定量注入での定常状態における注入圧の大きさとほぼ一致した。図—8 には、試料 B (7:3) の 2, 10 リットル/分の定量



図—5 試料 A (豊浦砂) の注入圧と注入量の関係



図—6 試料 B (7:3) の注入圧と注入量の関係



図—7 試料 C (稲城砂) の注入圧と注入量の関係

注入における有効注入圧  $P'$  と経過時間の関係を示すが、この場合の定常状態における有効注入圧も、図—6の結果とほぼ一致した。したがって、注入量を徐々に増加させて行う 1 回の実験で、各定量注入における注入圧を推定することが可能と思われる。図—5 の試料 A (豊浦砂) の場合には、20 リットル/分までの注入においても、有効注入圧と注入量の関係は有効拘束圧にほとんど左右されず、正比例していることよりほぼ完全な浸透注入であるといえる。ただし、拘束圧  $\sigma_3' = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$  の場合、有効注入圧  $P'$  が有効拘束圧  $\sigma_3'$  以上になると、有効拘束圧が大きい場合に比較して、有効注入圧がやや低下する。

一方、図—6、図—7 の試料 B (7:3)、試料 C (稲城砂) では、有効注入圧と注入量の関係は、有効拘束圧に強く影響を受ける。試料 C (稲城砂) の場合、有効注入圧は、注入量を増しても増加せず、拘束圧よりわずかに大きい程度となった。

著者らは、砂質地盤の有効割裂圧  $P'_e$  が式 (1) で表わされることを示した<sup>9)</sup>。

$$P'_e = m\sigma_3' + \sigma_t + R \dots\dots\dots (1)$$

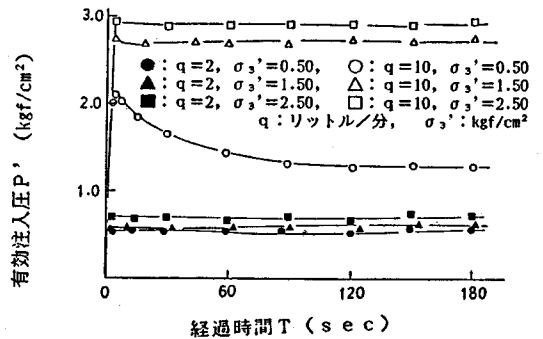
$m$  : 定数、 $\sigma_3'$  : 有効拘束圧

$\sigma_t$  : 引張強度、 $R$  : 亀裂進展抵抗圧

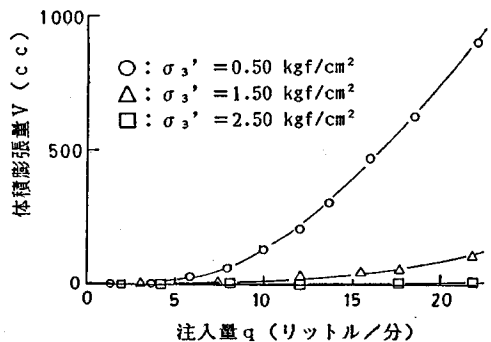
ここに、 $m$  は、1~2 の範囲にあり、本実験のように注入管周りの定常浸透が得られ内部の間隙水圧が増加した状態で順次注入圧を上げていく場合は  $m=1$  となり、急速に注入圧を上げる場合で間隙水圧の増加が無視できる状態では、最大 2 となる。引張強度  $\sigma_t$  は、未固結砂であるため本実験ではゼロとなる。亀裂進展抵抗圧  $R$  を正確に決定することは困難であるが、砂の透水性が大きいほど大きくなり、透水係数  $k=10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ (cm/s)}$  の砂で、 $R$  は  $2 \sim 1 \text{ kgf/cm}^2$  となる<sup>9)</sup>。

図—5、図—6 および図—7 の  $P' \sim q$  関係において、初期部において拘束圧  $\sigma_3'$  に無関係に 1 つの直線上にあるが拘束圧  $\sigma_3'$  の小さい順に直線から下側にずれている。

このずれは、割裂して浸透面積が増したことを意味すると考えられる。したがって、このずれの始まる点の圧力を割裂圧とみなすことができる。透水性の小さい図—7 の場合は、ずれの始まる点における注入圧  $P'$  は、ほぼ拘束圧程度になっており、 $R$  の値はきわめて小さいことがわかる。図—5、図—6 では、ずれの始まる点の確認が難しいので、割裂圧  $P'_e$  と拘束圧  $\sigma_3'$  の関係を明確に求められないが、全体的にみてもずれの始まる点の注入圧は、透水性が大きいものほど大きいことがわかる。これは、亀裂進展抵抗圧  $R$  が透水性が大きいものほど大きいことに起因していると考えられる。したがって、試



図—8 試料 B (7:3) の経過時間 T と注入圧 P' の関係



図—9 試料 B (7:3) の注入量 q と体積膨張量 V の関係

料C(稲城砂)に比較して透水性が大きい試料A(豊浦砂), 試料B(7:3)では,  $P'_2 = \sigma'_3$  程度では割裂が発生せず, 注入圧が拘束圧より大きくなっても, 浸透注入が可能になったと考えられる。

図-9には, 試料B(7:3)の定常状態における体積膨張量  $V$  と注入量の関係を示す。有効拘束圧  $\sigma'_3$  が, 1.50, 2.50 kgf/cm<sup>2</sup> の場合の膨張量は, きわめて少ないが,  $\sigma'_3$  が 0.50 kgf/cm<sup>2</sup> では, 体積膨張が著しい。一定の注入量のもとでは, 拘束圧が小さく注入量が多い場合ほど, 割裂した部分を通過して逸走せざるを得ない量が多くなるので, 幅の大きい割裂が生じやすく, その分だけ膨張量も多くなっていく。

図-10, 図-11には, 試料A(豊浦砂), 試料B(7:3)において定常状態で測定した内部の間隙水圧と注入量の関係を示す。完全な浸透が得られている限り, 有効注入圧  $P'$  に対する間隙水圧の増加分  $u'$  の割合 ( $=u'/P'$ ) は一定でなければならず, 事実, 試料A(豊浦砂)の場合には,  $u'/P'$  は, 注入量, 拘束圧にほとんど無関係に一定となっている。 $u'/P'$  の増加は, 不均質な浸透つまりは割裂の発生を意味する。試料B(7:3)では, 拘束圧が小さいと注入量が増加するにつれて  $P'/U$  の増加傾向が大きく, 割裂の発生を示すものであるが, これは図-6, 図-9からも裏付けられる。

図-12には, 種々の砂における定常状態の有効注入圧と注入量の関係を示す。どの場合もすべて拘束圧  $\sigma'_3 = 1.00$  kgf/cm<sup>2</sup>, 背圧  $u_{BP} = 0.50$  kgf/cm<sup>2</sup> である。この図から, 注入圧が最も高くなるのは, 透水性が最も大きい砂の場合であることがわかる。写真-5には, 試料D(8:2)において, 20リットル/分の定量注入における浸透状況を示しているが, ほぼ完全な浸透注入となっている。したがって, 有効拘束圧よりかなり大きい有効注入圧が作用している場合でも, 浸透注入が十分可能であることがわかる。

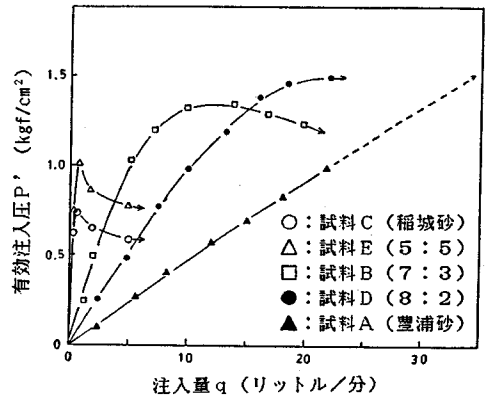


図-12 試料A, B, C, D, Eの注入圧と注入量の関係

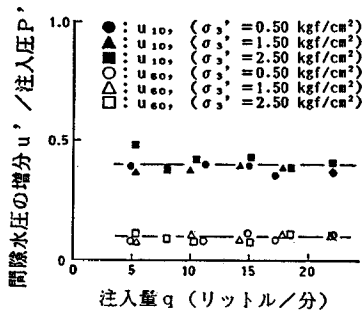
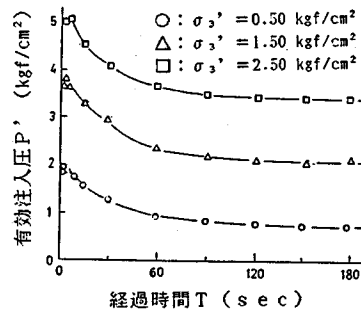
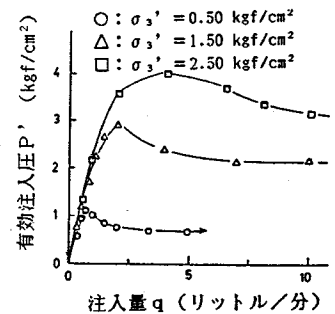


図-10 試料A(豊浦砂)の注入圧, 間隙水圧と注入量の関係



(a) 経過時間 T と注入圧 P' の関係



(a) 注入量 q と注入圧 P' の関係

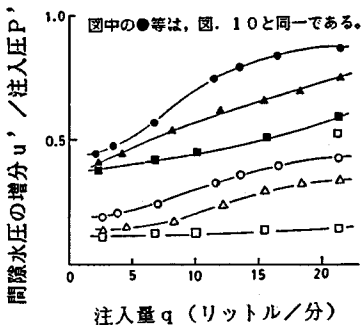
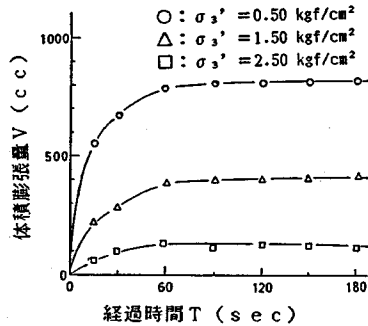
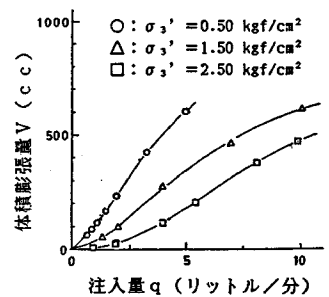


図-11 試料B(7:3)の注入圧, 間隙水圧と注入量の関係



(b) 経過時間 T と体積膨張量 V の関係



(b) 注入量 q と体積膨張量 V の関係

図-13 試料E(5:5)の経過時間 T, 注入圧 P' と体積膨張量 V の関係

図-14 試料E(5:5)の注入量 q, 注入圧 P' と体積膨張量 V の関係

図一13には、試料E(5:5)に対する定量注入(5リットル/分)の有効注入圧、体積膨張量 $V$ と経過時間 $T$ の関係を示す。体積膨張量は、拘束圧が小さいものほど大きくなり、それだけ大きい割裂脈が発生したことになる。写真一6には、それぞれの浸透状況を示す。有効拘束圧 $\sigma_3$ が $0.50 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には水平割裂、 $\sigma_3$ が $1.50 \text{ kgf/cm}^2$ では垂直割裂が発生している。 $\sigma_3$ が $2.50 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には、浸透に近い状態を示し、明瞭な割裂はみられなかった。これは体積膨張量が小さいことより理解できる。したがって、試料Eのように透水係数が小さい地盤であっても、拘束圧が大きいと十分な浸透が可能であり、浸透状況は、拘束圧に強く依存していることが明らかになった。図一14には、試料E(5:5)における定常状態の注入量 $q$ と有効注入圧 $P'$ 、体積膨張量 $V$ の関係を示す。 $\sigma_3=0.50, 1.50 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、有効注入圧は、注入量の増加につれてむしろ減少し始め、5リットル/分では有効注入圧の減少段階にある。一方、 $\sigma_3=2.50 \text{ kgf/cm}^2$ では、 $q=5$ リットル/分程度では、有効注入圧の低下がまだみられない。図一13、写真一6より、 $\sigma_3=2.50 \text{ kgf/cm}^2$ においては浸透が可能なが明らかになっているので、有効注入圧が注入量の増加に対して減少しない限りは、ほぼ浸透注入が期待できると考えられる。

割裂の方向としては、拘束圧が小さく、砂の透水性が小さいものほど水平割裂が生じやすくなる。写真一7では、試料D(5:5)において、 $\sigma_3=0.50 \text{ kgf/cm}^2$ で、1.2リットル/分の定量注入を行った結果であるが、注入管付近で垂直割裂が発生した後、水平・斜め方向に割裂が進展していることがわかる。5リットル/分の注入量では、写真一6で示したようにほぼ完全な水平割裂となっている。したがって、割裂は、まず垂直方向に発生するが、透水性が小さく、注入量が大きくなるにつれて、斜めおよび水平方向に割裂が進展しやすいと考えられる。

## 5. 割裂の進展と停止

前章までの結果より、砂の透水性が大きい場合、有効拘束圧よりかなり大きい注入圧が作用しても十分な浸透状況が得られることが明らかとなったが、これは、式(1)に示したように割裂圧が透水性に強く依存しているためである。注入管周りの定常浸透が得られて試料内部の間隙水圧が増加した段階では、孔壁面の引張亀裂は、砂の透水性によらず未固結砂の場合、有効注入圧 $P'=\sigma_3$ で生じるが<sup>9)</sup>、割裂圧に達しない限り、その引張亀裂の幅は十分に小さい。

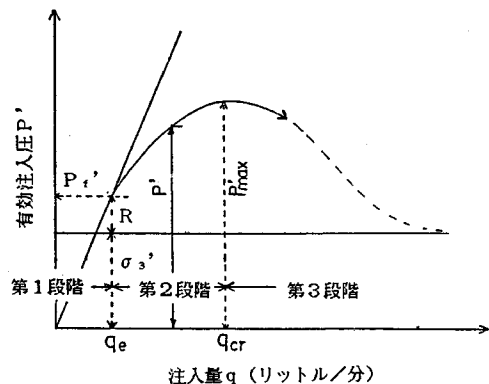
亀裂内の水圧の低下は、亀裂脈の幅に大きく左右されて、幅が小さいほど圧力の低下が著しく大きくなり<sup>12)-14)</sup>、亀裂からの浸透量はきわめて少なくなる。し

たがって、注入圧が割裂圧以下では、注入管周りの同心円状の浸透注入が期待できる。

透水性の小さい試料C(稲城砂)の場合には、図一7のように有効注入圧 $P'=\sigma_3$ 程度で割裂が進行し、体積膨張量が多く、幅の大きい亀裂が発生した。5リットル/分の定量注入の結果である図一4では、定常状態における膨張量が1000cc以上となっている。したがって、透水性が小さい場合には、割裂脈内の圧力低下が少なくなるので、割裂が進展しやすい。一方、図一12の透水性が大きい試料D(8:2)において、有効注入圧が有効拘束圧の3倍程度になった注入量 $q=20$ リットル/分の浸透の状況は、写真一5で示したように割裂はみられず浸透注入となったが、体積膨張量は、わずか30~40ccと小さい。したがって、膨張量が少なく亀裂幅が小さい場合は、亀裂内の水圧の低下が大きくなって亀裂が進展せずに停止して、写真一5に示すように、浸透状況に及ぼす亀裂の影響は少なくなったものと考えられる。

薬液注入における注入管理は、注入圧よりもむしろ注入量で行われている。注入量の大きさは、経験的に決定され、浸透注入になる限界は、砂の透水係数や粒度分布で判定される。しかし、前述したように、割裂の生じる注入量は、単に砂の透水係数だけでなく、拘束圧にも強く影響されるので、地盤条件に応じた浸透注入可能限界を明らかにしなければならない。図一15には、注入量と注入圧の各段階の定常状態における関係の概要を示しており、その関係を3つの段階に分けて考えることにする。

- 第1段階 注入量が小さい場合、注入量と有効注入圧の関係はほぼ比例関係がみられる段階
- 第2段階 注入量と有効注入圧の比例関係は、成立しないが、注入量の増加とともに有効注入圧もまだ増加している段階
- 第3段階 注入量の増加につれて、有効注入圧がむしろ



図一15 注入量 $q$ と注入圧 $P'$ の関係

ろ減少している段階

第1段階では、割裂が発生せず、浸透面積が注入量によって変化しないので、注入管周りのほぼ完全な浸透注入が得られる。注入圧  $P'$  が  $\sigma_3$  より大きくなると孔壁に引張亀裂が生じるが、微小な亀裂では亀裂内の圧力低下が大きく亀裂からの浸透量はきわめて少ないので、浸透状況は亀裂の影響をほとんど受けない。注入量が  $q_e$  まで増し、 $P'$  が割裂圧  $P'_g (= \sigma_3 + R)$  に達すると、割裂理論から注入孔壁面の割裂が発生して第2段階に入る。第2段階では、注入量を少し上げると割裂脈が少しずつ進展する。割裂脈は、浸透面積を拡大するので、割裂浸透となる。注入量がさらに増して  $q_{cr}$  に達すると、注入圧が低下して第3段階に入る。この段階では、割裂脈がさらに進展して割裂脈の厚さも増加するので、注入圧が低下すると考えられる。割裂脈の厚さがしだいに大きくなり、亀裂内の水圧低下がなくなると、最終的には、有効注入圧は有効拘束圧程度になろう。

第2段階と第3段階における境界の注入量  $q_{cr}$  と最大注入圧  $P'_{max}$  の大きさは、注入の対象となる砂層の大きさに依存しており、割裂長が最大供試体の外側排水層までの実験室の場合に比べて、砂層が広範囲に及んでいる実際の地盤では、 $q_{cr}$ 、 $P'_{max}$  は、かなり大きくなり得る。また、最大注入圧  $P'_{max}$  の大きさは、地盤の拘束圧にも強く依存している。割裂が発生している段階の注入圧は、最低でも拘束圧は必要となるので、拘束圧の大きいものほど、注入孔よりの浸透量および割裂脈よりの浸透量は多くなる。拘束圧が大きいと地盤の弾性係数も大きくなるので、その割裂幅が弾性係数の小さい場合に比較して小さくなる。このため、割裂脈内の圧力低下が大きくなり、注入圧がかなり大きくなっても、割裂は遠方に進展しにくい。したがって、大深度で拘束圧や弾性係数が大きく均質な砂層では、 $P'_{max}$  が著しく大きくなると考えられる。事実、深度 50~100 m にある砂層 (透水係数  $k = 10^{-2} \sim 10^{-3}$  cm/s) を対象とした注入現場において、注入圧が 40 kgf/cm<sup>2</sup> 程度のもので、十分な浸透が得られた場合もある<sup>15)</sup>。

定常状態における有効注入圧が、注入量の増加につれて減少しない限り、割裂の進展はわずかであるので、注入孔壁および割裂面からの浸透注入が効果的に行われる。しかし、有効注入圧が低下していくときは、割裂の進展と脈厚の増加が大となり、浸透注入の効果はマイナスになってくる。したがって、注入量の上限値は、有効注入圧が低下しない第2段階とすべきであり、各注入ケースに対して注入量と注入圧の関係を調べて、浸透注入の効果が大きい適正注入量の限界を知ることが可能である。注入圧が拘束圧程度になっている場合には、注入圧の大きさのみから浸透注入なのか割裂が主体なのか判

断することが非常に困難であるので、図-15 に示した注入圧・注入量関係を調べることに必要である。

6. 注入管周りをシールした場合の変化

これまでは、注入液に水を用い、注入管周りに金属メッシュを巻き付けただけの理想的な条件下での注入量と注入圧の関係について調べた。しかし、実際の注入では、注入管に沿う薬液の境界流れを防ぐために、注入管周りの弱いモルタルを充填し、これを注入圧で破って注入する2重管ストレナー方式、または管の周りを瞬結性薬液で固結させて、その後ゲル化時間の長い緩結性薬液を注入する、いわゆる複合注入が実施される場合も少なくない。

モルタルや瞬結性薬液による注入管周りのシールは、薬液の浸透面積を減少させるため、注入圧がかなり増加することが考えられる。ここでは、注入管周りに厚さ 2 cm 程度透水係数が小さい稲城砂を詰めてシールし、これに類似の状態とした。注入液は、この部分を割裂して浸透するが、その状況を調べることにした。

図-16 には、試料 A (豊浦砂) の注入実験結果を示す。有効注入圧の大きさは、注入管周りに稲城砂がない場合 (図-5) と比較してかなり大きくなっているが、間隙水圧  $u_{e0}$  は、注入管周りに稲城砂を詰めない場合と同様にほとんど変化しなかった。図-16 の場合は、シール部の狭い割裂面を通過する抵抗や、シール外周部から浸透する面積が割裂によりひらいた部分に限られて図-5 の場合より小さくなったために、注入圧が大きくなったと考えられる。なお、図-16 の破線は、シールのない場合に相当する図-5 の注入圧・注入量関係である。体積膨張量はいずれの場合も非常に小さいので、注入圧が拘束圧に比してきわめて大きいにもかかわらず割裂は実質的にはほとんど生じていないと思われる。また、注入

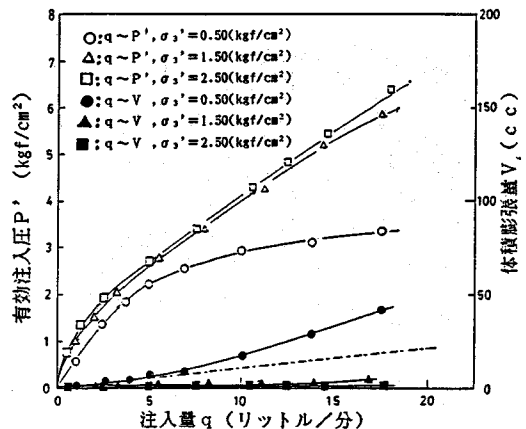
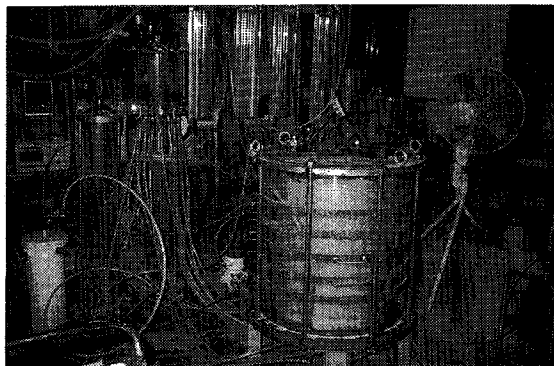
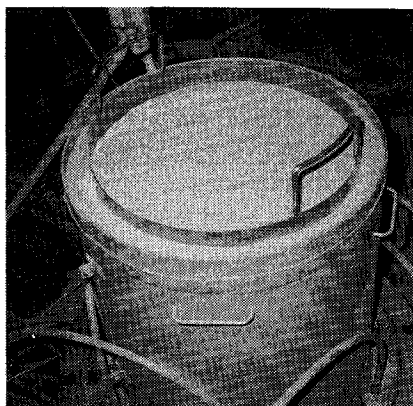


図-16 注入管周りに稲城砂を詰めた試料 A (豊浦砂) の注入圧および体積変化量と注入量の関係

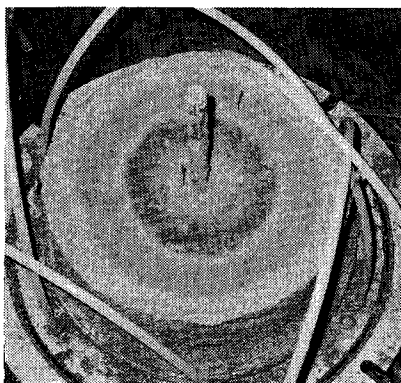


(a) 三軸注入装置



(b) 供試体

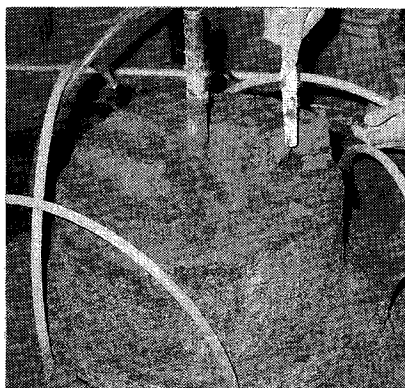
写真一 実験装置



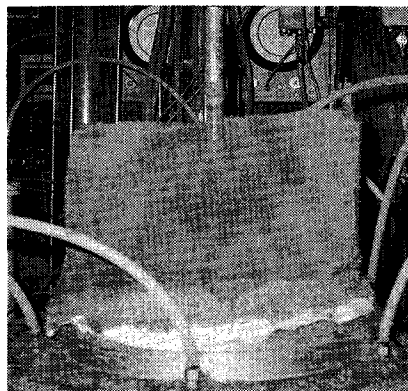
写真二 試料 A (豊浦砂) の浸透状況  
(拘束圧  $\sigma_3 = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$ , 注入量  $q = 5$  リットル/分)



写真三 試料 B (7 : 3) の浸透状況  
(拘束圧  $\sigma_3 = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$ , 注入量  $q = 5$  リットル/分)

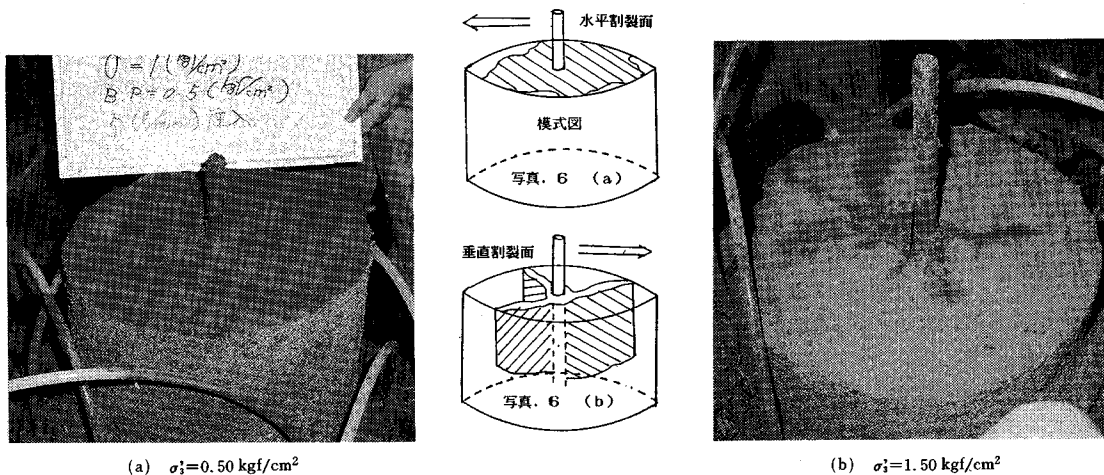


写真四 試料 C (稲城砂) の浸透状況  
(拘束圧  $\sigma_3 = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$ , 注入量  $q = 5$  リットル/分)

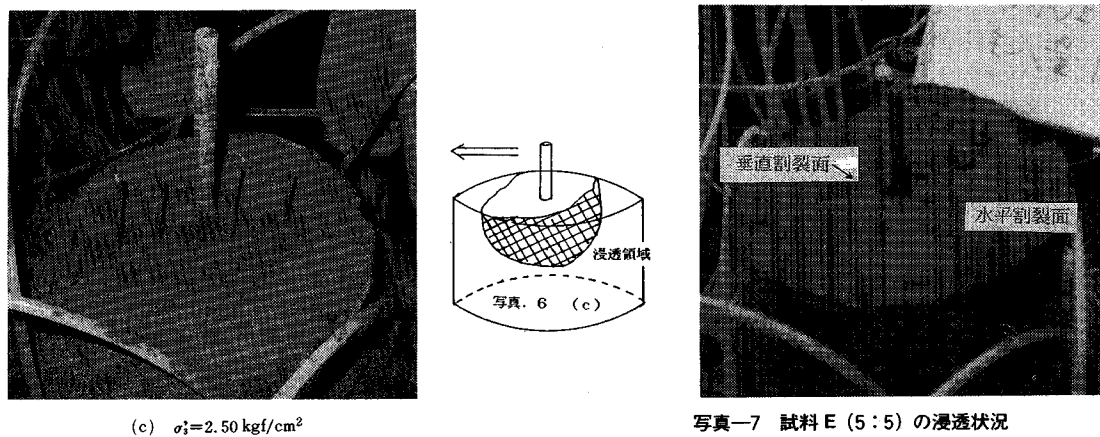


写真五 試料 D (8 : 2) の浸透状況  
(拘束圧  $\sigma_3 = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$ , 注入量  $q = 20$  リットル/分)

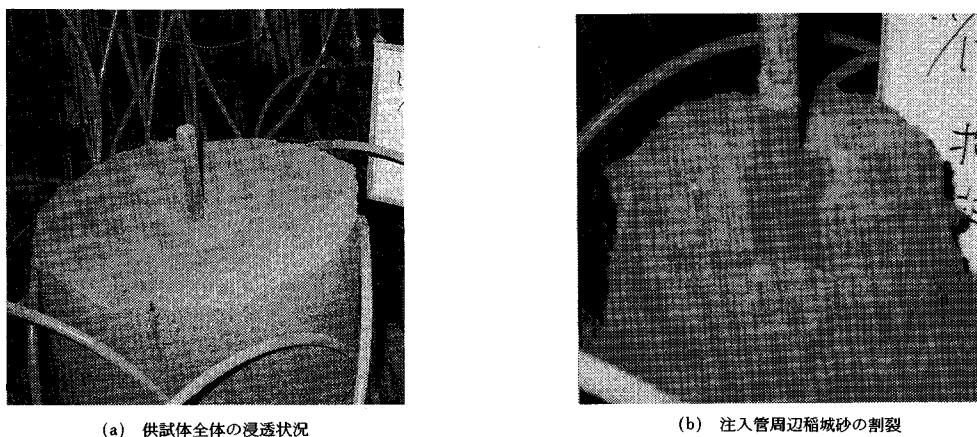




写真—6 試料 E (5 : 5) の浸透状況 (注入量  $q=5$  リットル/分)



写真—7 試料 E (5 : 5) の浸透状況  
(拘束圧  $\sigma_3=0.50$  kgf/cm<sup>2</sup>, 注入量  $q=1.2$  リットル/分)



写真—8 注入管周りに稲城砂を巻き付けた場合の試料 A (豊浦砂) の浸透状況  
(拘束圧  $\sigma_3=0.50$  kgf/cm<sup>2</sup>, 注入量  $q=20$  リットル/分)

量の増加による注入圧の低下はみられず、拘束圧を問わずすべて第1段階または第2段階の注入であり、十分な浸透が可能と考えられる。事実、浸透の状況はすべての場合に注入管からの均等な浸透がみられた。写真—8には、 $\sigma_3=0.50 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $q=20$  リットル/分における浸透状況を示しており、浸透注入であることがわかる。

図—16では、試料A(豊浦砂)の透水性がかなり大きいので、シールの存在は、浸透状況に影響を及ぼさなかった。しかし、シールの存在が注入圧を増加させるので、透水性の小さい砂の場合には、割裂が生じやすい結果が得られた。したがって、シールの存在は、浸透面を小さくし注入圧を大きくさせるので、割裂は生じやすいことに留意すべきである。

透水性の小さい地盤では、割裂が主体となるため、拘束圧に比較して大きな注入圧が生じにくい、透水性が大きいと図—16に示したように浸透注入になるため、むしろ大きな注入圧が必要であることがわかる。大きい注入圧は、シール部の狭い割裂面を通過する抵抗や浸透面が小さいために生じるのであり、周辺構造物に及ぼす注入圧の影響は少ないと考えられる。したがって、許容注入圧の設定においても、図—15のような注入圧・注入量関係を求めることが必要であろう。

## 7. ま と め

薬液注入における砂質地盤の浸透限界を明らかにするため、大型三軸セルによる注入実験を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) 浸透注入になる条件は、砂の透水係数や注入量だけでなく、拘束圧にも強く依存している。

(2) 砂の透水係数が非常に小さい場合、有効注入圧=有効拘束圧程度で割裂が発生してさらに進展するが、これは孔壁周りの引張破壊に基づく割裂理論で説明できる。しかし、砂の透水係数が大きいと、割裂した亀裂面よりの浸透により亀裂内部の水圧が低下し、割裂が容易に進展しないので、有効注入圧が拘束圧よりかなり大きくなっても、事実上十分な浸透が可能である。

(3) 図—15に示したような定常状態における注入圧・注入量関係を求めることにより、浸透注入が可能になる注入量の限界  $q_{cr}$  を知ることができる。

(4) 注入管周りに施すシール部分を割裂させて注入する場合、注入圧は、浸透面積が小さくなるために著しく大きくなり得る。

本研究では、ゲル化時間の長い緩結性薬液を使用した注入形態を支配する砂の透水性、注入量、拘束圧の影響を調べたが、今後、ゲル化時間が注入時間より短い中結性、瞬結性薬液を用いた場合に実質的な浸透注入になり

得る条件を明らかにしたいと考えている。また、ここでは溶液性薬液の粘性が小さいことを考慮して、水を用いて浸透状況を調べたが、粘性の大きい超微粒子を含んだ薬液では、注入圧と注入量関係が複雑になるため、これらの場合の浸透状況の把握も今後の課題であろう。

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、注入実験の実施、データ整理については、卒業論文として研究に参加した池田尚文氏、岩永 信氏によるところが多く、感謝する次第です。

## 参 考 文 献

- 1) 坪井直道：薬液注入工法の実際、鹿島出版会、pp.155~173, 1976.
- 2) 島田俊介・兼松 陽：最新の薬液注入工法、理工図書、pp.142~145, 1977.
- 3) Baker, W. H. : Planning and performing structural chemical grouting, Proc. of conf. on grouting in geotechnical Engineering, New Orleans, pp.515~539, 1982.
- 4) Morgenstern, N. R. and Vaughan, P. R. : Some observations on allowable grouting pressure, Grout and Drilling Muds in Engineering Practice, London, Butterworths, pp.36~42, 1963.
- 5) Horsrud, P., Risnes, R. and Bratli, R. K. : Fracture initiation pressures in permeable poorly consolidated sands, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.19, pp.255~266, 1982.
- 6) Hubbert, M. K. and Willis, B. G. : Mechanics of hydraulic fracturing, Trans. AIME, 210, pp.153~166, 1957.
- 7) Haimson, B. and Fairhurst, C. : Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks, Soc. Petrol. Eng. J., 7, pp.310~318, 1967.
- 8) Vaughan, P. R. : The use of hydraulic fracturing tests to detect crack formation in embankment dam cores, Initial report, Department of Civil Engineering, Imperial College, London, England, 1971.
- 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、投稿中。
- 10) カンプフォール：地盤注入、鹿島出版会、1969.
- 11) 石島洋二・木下重教：日本鉱業会誌, 96, 1113, pp.802~809, 1980.
- 12) Baker, W. J. : Flow in fissured formations, 4<sup>me</sup> Congress mondial du petrole, Rome, Section 2/E, p.9, 1955.
- 13) Perkins, T. K. and Kern, L. R. : Width of hydraulic fracture, Journal of petroleum tech., pp.937~949, 1961.
- 14) Zoback, M. D. and Pollard, D. D. : Hydraulic fracture propagation of pressure-time records for in-situ stress determinations, 19th symp. rock mech., Nevada, pp.14~22, 1978.
- 15) 現地注入試験社内資料、清水建設(株)、昭和61年4月。(1987.3.23・受付)