

薬液注入条件の違いによる填充率の分布に関する室内実験

熊谷浩二*・須藤良清**・柳澤栄司***

薬液注入工法において、填充率は注入量算出や改良効果判断の基準になっている。この填充率の分布を検討するため、注入条件を変えて浸透注入および割裂注入を生じさせて、固結砂内部および未固結部から採取した試料について、化学分析により非晶質シリカを測定した。その結果、完全に浸透固結した場合は、填充率が80~120%と均質であり、未固結部分に薬液成分は見られなかった。しかし、割裂注入が卓越すると填充率分布がばらつき、かつ未固結部にも薬液成分が逸散しているのが見られた。

Key Words: chemical grout, sandy soil, volum ratio of grout entered in the void, unconfined compressive strength

1. ま え が き

砂質土を対象とした薬液注入では、薬液のゲルタイムの長短、注入速度の大小などによって、浸透注入だけでなく割裂注入になる可能性がある。実際の注入現場でも掘削時に脈状ホモゲルの観察されることがある。最近では、割裂が発生したとしても注入管からあまり離れずに塊状に固結した場合は割裂浸透と呼んで、注入効果が発揮されているという判断をしている¹⁾。

また、注入管理の方法として、圧管理と量管理のふたつがあり、一般に量管理で注入されている²⁾。圧管理は、注入ステップ(地盤内での薬液の吐出位置)ごとに、注入条件を変えながら設定した注入圧まで注入を続ける方法であり、砂質土の場合には薬液が際限なく注入される可能性がある。一方、量管理は、事前に設定した注入対象範囲内の間隙に薬液を置換することを基本としており、規定量を注入ステップごとに一定注入速度で加圧注入する方法がとられている。しかし、土層内の間隙の不均質さ、サンプリングの困難さ、および注入効果のばらつきなどを考えると、注入対象範囲内の地盤の間隙量および必要な注入量を事前に精度よく把握することは困難と考えられる。

砂質土への薬液注入では、一般に量管理の方法が多用されている。しかし、浸透注入になっているか、あるいは注入完了後に期待される範囲で改良効果が十分得られているかを評価する確立した方法はまだないのが現状である³⁾。このため、改良効果を評価する方法のひとつとして、固結砂への注入薬液の入り具合、すなわち填充率の分布と、浸透・割裂注入での固結砂の形状との関係

表—1 使用薬液の配合

種 類		緩結性薬液 (ゲルタイム5分)	瞬結性薬液 (ゲルタイム5秒)
A 液 (2,000cc)	JIS3号水ガラス 水	1,400cc 600cc	1,400cc 600cc
B 液 (2,000cc)	硬化剤 急結剤 水	120g 50g 残	60g 200g 残

注) 硬化剤: エチルカーボネート
急結剤: 炭酸水素ナトリウム

について室内実験をもとに考察を加えた。今回の実験は、径300mm×高300mmモールド内の砂質土に対し注入し、薬液のゲルタイムを瞬結・緩結と変えることによって、浸透注入と割裂注入(割裂浸透注入のケースもある)おのおのの形状をつくりだして、注入圧の傾向について検討するとともに、填充率の分布、固結砂の形状、一軸圧縮強さの分布などの注入効果の違いについて検討した。なお、上載圧による注入圧への影響が考えられるが、今回は上載圧一定で実験している。

2. 実験概要

(1) 実験装置

装置の概要を図—1に示す。上部のゴム袋に水を注入することによって供試体に1.0kgf/cm²の上載圧(深度10mの有効上載圧を想定)をかけ、供試体を飽和させた後に薬液を注入した。注入速度は、500, 1,000および2,000cc/minである。注入中の排水は、モールド上部の排水管から大気中に流れる構造である。

注入圧変化はインテリジェント・レコーダで記録した。なお、記録された注入圧は注入管先端での注入圧の値とは異なるが、その変化傾向は同一と考えて考察している。

(2) 使用砂の物性

実験には、土粒子の密度 $\rho_s=2.633\text{g/cm}^3$ 、20%粒径

* 正会員 前田建設工業(株)技術研究所土質研究室
(〒179 東京都練馬区旭町1-39-16)

** 正会員 東北大学教務技官 工学部土木工学科

*** 正会員 東北大学教授 工学部土木工学科

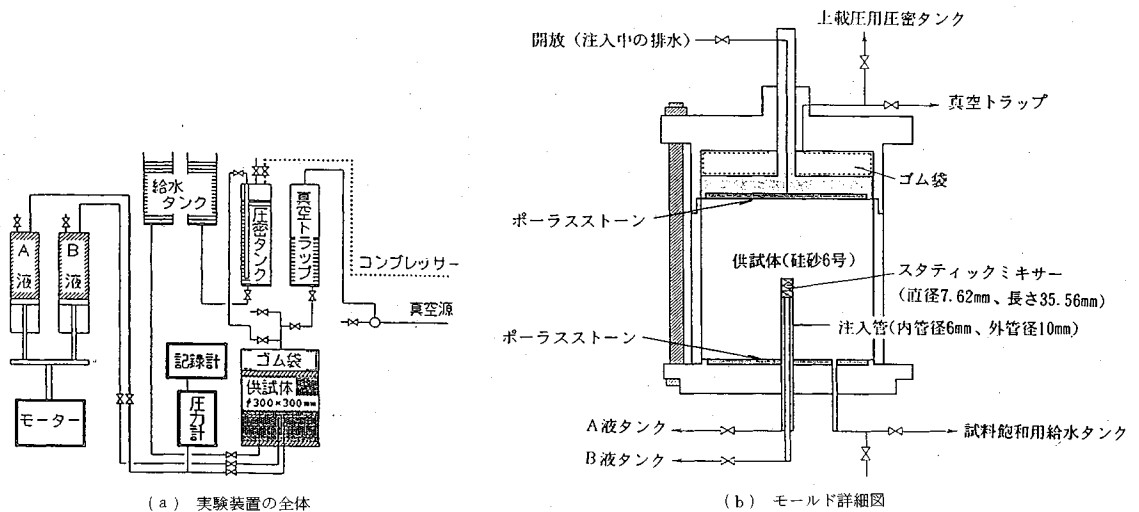


図-1 実験装置の概要

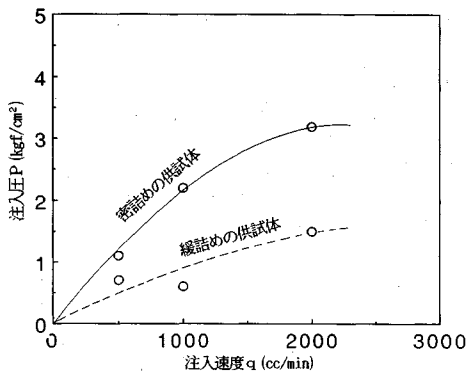


図-2 $p-q$ 曲線 (緩結性薬液)

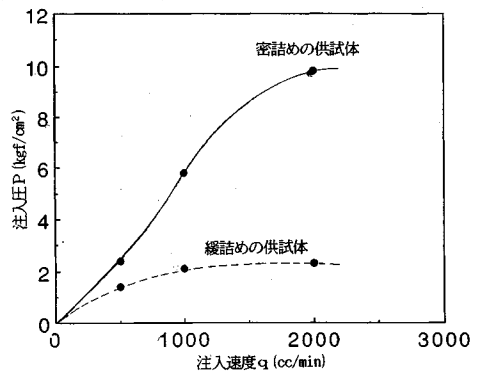


図-3 $p-q$ 曲線 (瞬結性薬液)

$D_{20}=0.4$ mm, 均等係数 $U_c=2$ の珪砂 6 号を用いた。また, 最大密度 $\rho_{dmax}=1.608$ g/cm³, 最小密度 $\rho_{dmin}=1.279$ g/cm³ であり, 相対密度 65% の時の透水係数は $k=1.0 \times 10^{-2}$ cm/s である。

(3) 使用薬液の配合 (表-1 参照)

薬液には水ガラス系溶液型薬液 (有機硬化剤使用, アロン SR-Hi) を用いた。ゲルタイムは 5 秒および 5 分とし, 注入時間 (約 30 秒~2 分) の間のゲル化の有無によって注入形態に差がでるようにした。なお, 全注入量 Q は, すべて 1,200 cc としている。

3. 固結砂の形状

(1) $p-q$ 曲線からの推定

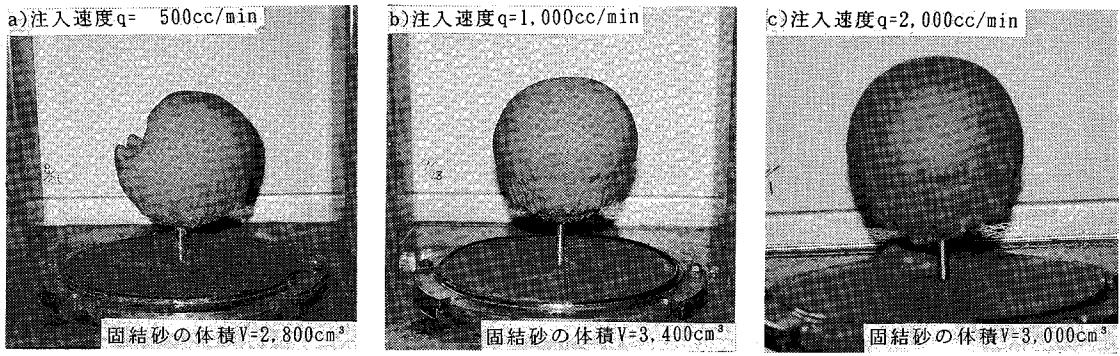
図-2 および図-3 に, 緩結性薬液および瞬結性薬液による注入によって得られた $p-q$ 曲線⁴⁾ (注入速度 q と注入圧 p の関係) を示す。ここで用いている注入圧は, そのケースでの注入中の最高値 P_{max} である。図-2 の緩結性薬液の注入においては, 緩詰め・密詰めの両供試

体とも注入速度の増加に伴い注入圧は, ならかに上昇しており, 浸透注入になっていると考えられる。

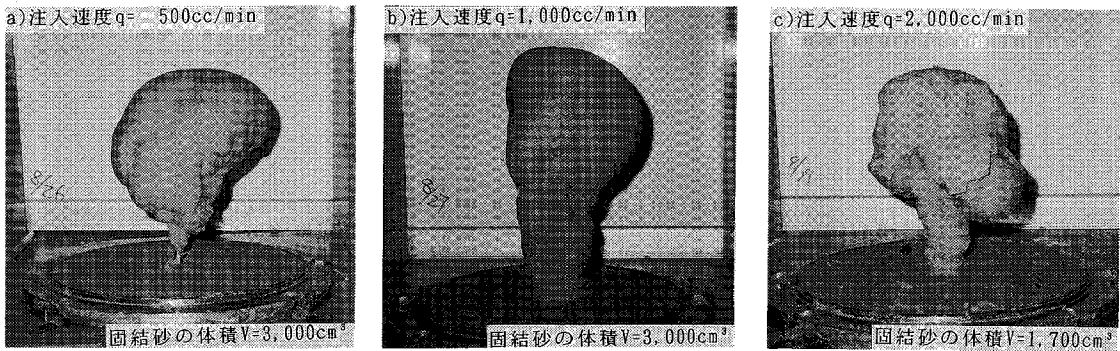
しかし, 図-3 の瞬結性薬液の注入においては, 緩詰めの供試体では, 注入速度 1,000 cc/min のあたりから注入圧が増加せず, 割裂注入の状態になっているものと想定される。また, 密詰めの供試体では, 注入速度 2,000 cc/min で線形関係からの逸脱が著しい。

(2) 目視観察

注入後 1 日養生して, 未固結部分の砂を水洗いで固結砂をとりだした。写真-1 および写真-2 に, 固結砂の形状を示す。緩結性薬液を注入速度 1,000 cc/min および 2,000 cc/min で注入した結果は, 完全な球状になっており, 写真-1 (b) および (c) のように理想的な浸透注入になっている。なお, 写真-1 (a) の注入速度 500 cc/min では固結砂の一部にくびれが見られた。これは, A 液と B 液との混合が不十分のため, 一部分が固結していないためと思われる。これらのことは, 密詰めの供試体でも同様であった。また, 瞬結性薬液によ



写真一 固結砂の形状 (緩結性薬液, 緩詰めめの供試体)



写真二 固結砂の形状 (瞬結性薬液, 密詰めめの供試体)

る注入では、注入速度によって、固結砂の形状が異なる。写真二(a)のような楕円球状になっているものから、写真二(c)のように著しく不規則な形状となるものまでがあり、割裂の程度および固結砂内部の填充率の分布や固結程度にも差があると考えられる。

4. 注入中の注入圧変化

(1) 注入圧 p の変化

図-4は、緩結性薬液を緩詰めめの供試体に注入した時の注入圧の経時変化である。注入速度にあまり関わらず、注入開始後早い時期に注入圧が上昇し、その後は漸増しているのみである。注入中にゲル化が生じない場合、最初は静止状態の地盤の間隙水と置換するためある程度の注入圧が必要であるが、そのあとは圧上昇が小さくても十分浸透が可能のためと考えられる。

また、図-5は瞬結性薬液を密詰めめの供試体に注入した時の注入圧の経時変化である。この場合は、注入速度が大きいほど圧上昇は急激である。注入中にゲル化が生じる場合、固結した部分を貫入して薬液は進む。割裂が始まる時点で注入圧は低下するが、この割裂によって生み出された新しい表面から浸透注入が起きるため、注入圧は再び上昇傾向が続き塊状に固結し、いわゆる割裂浸透注入になると考えられる。

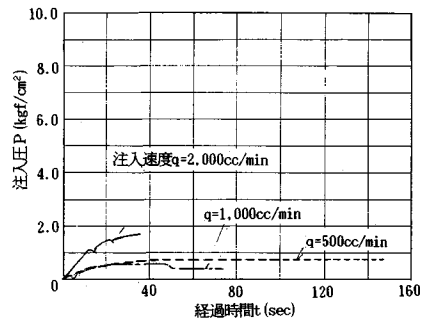


図-4 注入圧の経時変化: $p-t$ チャート (緩結性薬液, 緩詰めめの供試体)

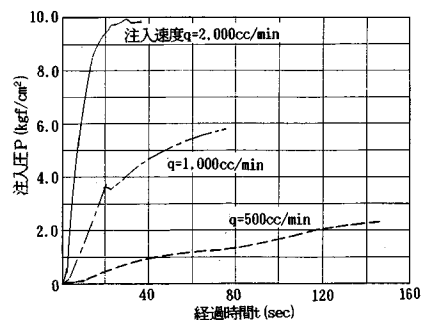


図-5 注入圧の経時変化: $p-t$ チャート (瞬結性薬液, 密詰めめの供試体)

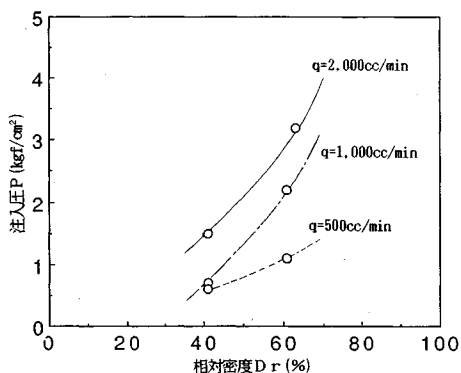


図-6 相対密度と注入圧（緩結性薬液）

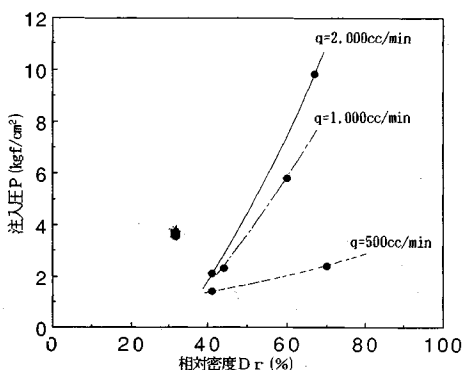


図-7 相対密度と注入圧（瞬結性薬液）

(2) 供試体の相対密度と注入圧

緩結性薬液を注入した時の供試体の相対密度と注入終了時の注入圧との関係を図-6に示す。注入速度が小さいときは、相対密度が大きくなるにつれ、注入圧が比較的ならかに上昇するが、注入速度が大きくなると注入圧の上昇が著しくなる傾向を示している。

瞬結性薬液を注入した時の注入圧を、図-7に示す。緩結めに比べ、注入圧の値が2倍以上になっている。この場合も、注入速度が大きい場合に、相対密度の増加によって注入圧が急上昇している。相対密度での20%程度の違いは、間隙率では2%程度の違いであるが、注入圧の値が大きく変化していることについては、今後研究していく必要がある。なお、この程度の相対密度の増加による透水係数の低下はほとんど見られないが、透水係数と注入条件との関係についても別途検討が必要と思われる。

5. 化学分析による填充率の分布

(1) 固結砂の填充率の分布

填充率 α は、対象地山の間隙に入った注入材の間隙に対する体積比率と定義されている⁵⁾。ここでは、非晶質珪酸分含有量を原子吸光法で測定⁶⁾し、填充率=(非

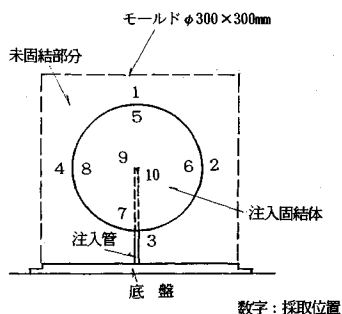


図-8 試料の採取位置

晶質珪酸分含有量から換算した薬液量)÷(供試体の間隙率)として求めている。なお、薬液の組成は表-1のように一定であると仮定して計算しており、薬液が脱水されると、分子の「非晶質珪酸分含有量から換算した薬液量」が大きき算出され、填充率が100%を越すことがある。填充率の分布をみるために、化学分析用の試料(約15g)を、図-8のように固結砂の内部で6箇所、その外側の未固結部分で4箇所から採取した。その結果を、図-9に示す。固結砂の形状にかかわらず、固結砂内部と未固結部分での填充率には著しい差がみられる。また、固結砂内部の填充率について、多少のばらつきがみられる。とくに、図-9(3)および図-9(4)の瞬結性薬液による固結砂では、填充率が150~170%と大きくなっている箇所が部分的に見られた。これらを整理して、図-10および図-11に示す。

図-10のように、固結砂が球形で完全な浸透注入と考えられる緩結めの供試体への緩結性薬液の注入においては、固結砂内部の填充率は80~120%で、その分布のばらつきは小さく既に指摘されている⁷⁾結果が得られた。

しかし、図-11のように、密結めの供試体への瞬結性薬液の注入では、固結砂内部の填充率は、60~170%と大きくばらついているが、これは加圧脱水による濃縮効果などの原因が考えられる。この場合、未固結部分にも薬液がやや多く含まれている。このように、密結めの供試体への瞬結性薬液の注入では、不均質な注入が認められる。

(2) 固結砂の体積と填充率

固結砂の体積 V を水中重量法で測定した。これは、固結砂内部の填充率の分布に差があること、また固結砂の形状が不規則なものもあることから、固結砂の体積を次のように求めている。

$$\text{固結砂の体積 (cm}^3\text{)} = \frac{(\text{気中重量 (g)} - \text{水中重量 (g)})}{(\text{単位体積重量 (g/cm}^3\text{)})}$$

図-12に、固結砂の体積の測定結果を示す。薬液が間隙を完全に充填した時の体積の計算値を図中に点線で示している。緩結性薬液では、体積が計算値とほぼ同じ

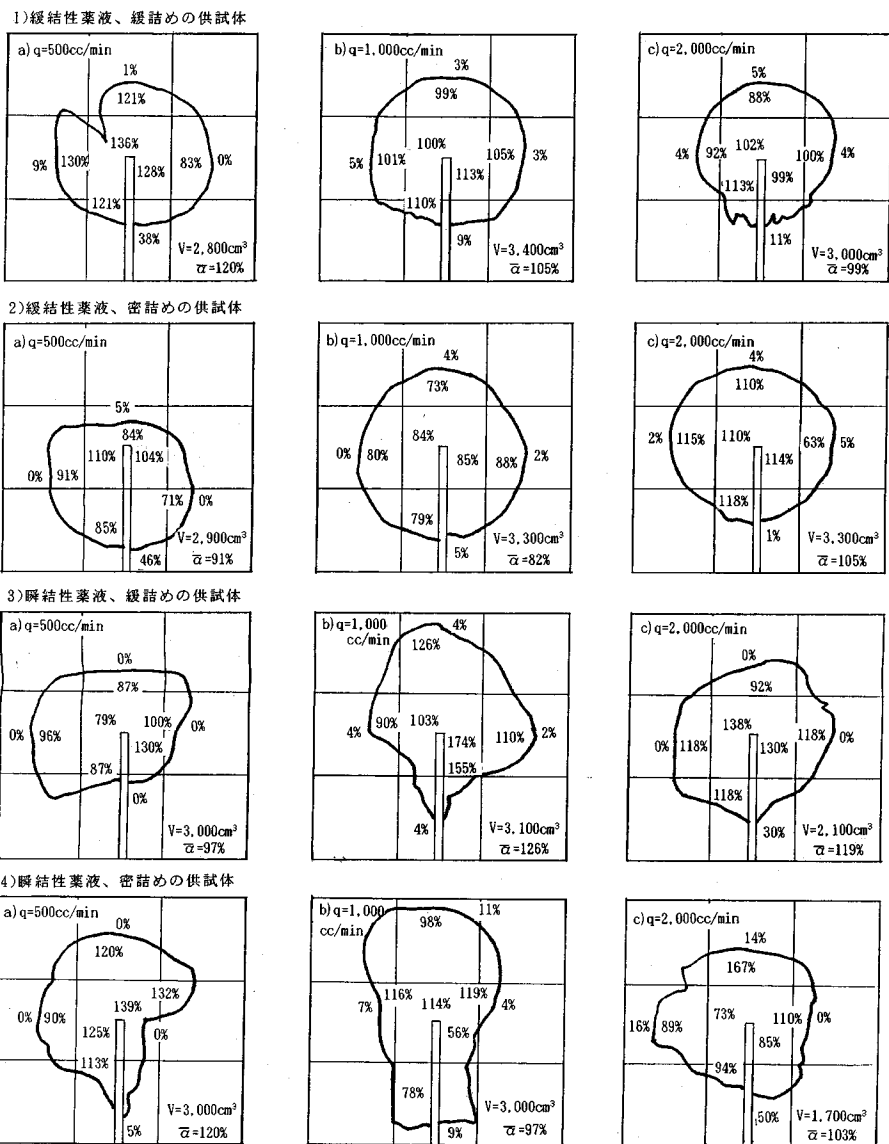


図-9 固結砂の形状および充填率の分布

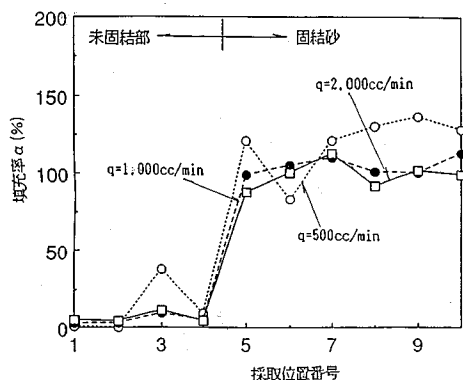


図-10 充填率の分布 (緩結性薬液, 緩結めの供試体)

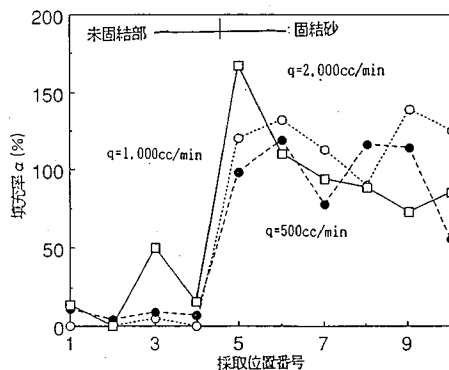


図-11 充填率の分布 (瞬結性薬液, 密結めの供試体)

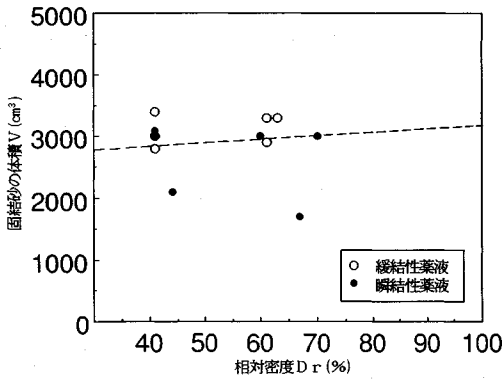


図-12 相対密度と固結砂の体積

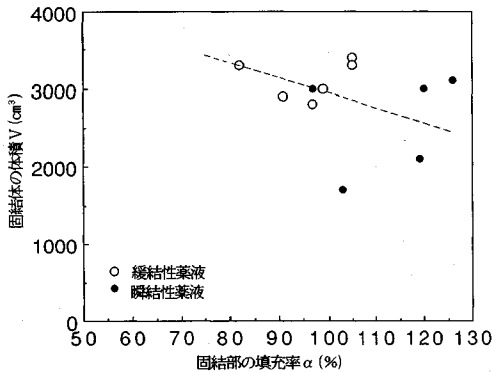


図-13 固結部の充填率と固結砂の体積

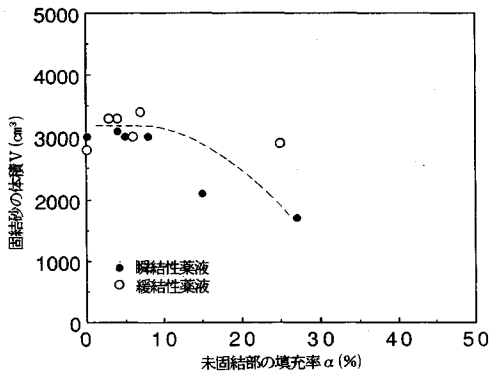


図-14 未固結部の充填率と固結砂の体積

かそれより大きくなっている。しかし、瞬結性薬液では、計算値に近いものと、割裂注入が卓越したことによると思われる極端に体積の小さいものが見られた。

固結砂の体積とその内部の充填率および近接した未固結部分と充填率との関係を図-13、および図-14に示す。図-13からは、固結砂の充填率が大きくなると体積が小さくなる傾向が見られる。これは、加圧脱水による薬液の濃縮のためと思われる。ただし、写真-2(c)のように極端な割裂のケースでは、体積の値が著しく小

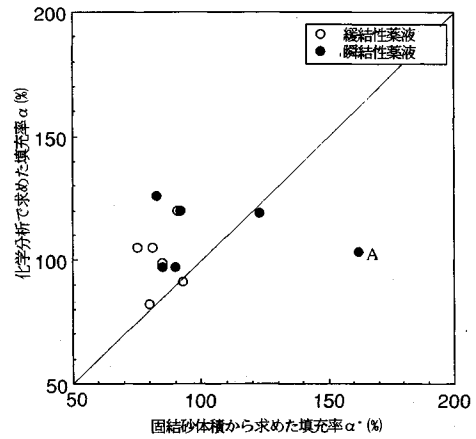


図-15 化学分析で求めた充填率 α^* と固結砂の体積から求めた充填率 α^*

さくなっており、薬液の逸走など他の要因も大きいようである。図-14の未固結部分の充填率と体積との関係では、未固結部分の充填率が10%以下のときは体積の値には影響していないが、未固結部分の充填率がそれ以上に大きくなると体積の小さいものが出来ている。これは、薬液が希釈されたり、A液・B液(表-1参照)が等量でないなどの理由で固結しない薬液が多くなっていることが推測される。

6. 固結砂の体積から求めた充填率

注入量 $Q(\text{cc})$ がすべて固結していると仮定した場合の充填率 $\alpha^*(\%)$ は、次式で表される。

$$\alpha^* = Q / (V \cdot n)$$

V : 固結体の体積 (cm^3)

n : 間隙率 (%)

図-15に、 α^* と5章の化学分析で求めた α との関係を示す。割裂注入が生じている瞬結性薬液では、注入量の一部が固結し、それ以外の薬液は混合不良や希釈等のため固結しないため、その体積は著しく小さい。このため、図中の点Aのように α^* の値は大きくなり、固結砂の充填率を示していない。しかし、緩結性薬液の場合は、薬液の逸走が少ないことが確認されており、また、 α^* は80~100%程度であり、 α とほぼ同様な値になっていることから、固結砂の充填率を示していると言える。実際には、固結に使われた注入量 Q や固結砂の体積 V を把握することは難しいが、土層実験などではその把握が十分可能であり、割裂注入など特異な例を除くと上記の式は成り立つものと考えられる。

7. 注入固結砂の一軸圧縮強さと体積

固結砂の体積を測定したあと、固結砂を分割して供試体に成形して、一軸圧縮試験(ひずみ速度1.0%/min)を行った。図-16に固結砂の体積と一軸圧縮強さとの

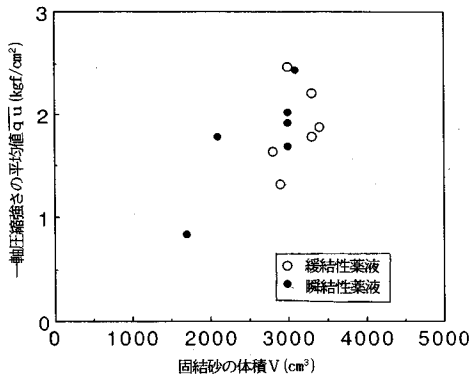


図-16 固結砂の体積と一軸圧縮強さ

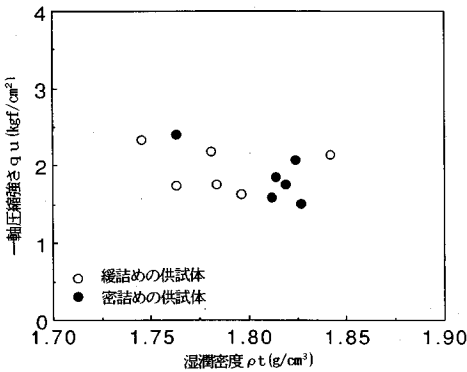


図-17 湿潤密度と一軸圧縮強さ (緩結性薬液)

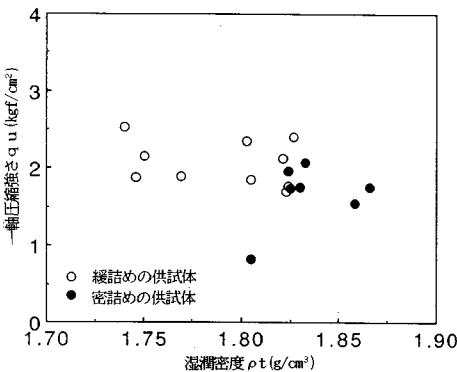


図-18 湿潤密度と一軸圧縮強さ (瞬結性薬液)

関係を示す。

体積が大きいほど強度が大きいという傾向が見られる。なお、形状についてみると、球状に近ければ近いほど固結砂の体積が大きく、かつ均質であり強度が大きいということが観察されている。

なお、割裂注入が卓越していると、固結砂は塊状ではあるものの不均質で局部的に極端な強度差が見られる。このため、固結砂の分割の時や供試体の成形の時に壊れている。

また、図-17および図-18に成形した供試体個々の

湿潤密度と一軸圧縮強さの関係を示す。図-17の緩結性薬液では、 $q_u = 1.5 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ が多く、図-18の瞬結性薬液では、 $q_u = 1.5 \sim 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ であるが、密詰め供試体の場合固結砂の形状が著しく不規則になるとともに、低強度のものも認められている。

8. あとがき

以上の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 注入中にゲル化しない緩結性薬液の注入では、砂の緩詰め・密詰めにかかわりなく、 $p-q$ 曲線はなだらかな上昇傾向であり、浸透注入になっている。
- 2) 注入中にゲル化する瞬結性薬液の注入では、 $p-q$ 曲線の形から割裂注入が生じている。そして、密詰め砂のほうが、割裂注入になる注入速度が大きい。
- 3) 固結砂の観察で球体・長円体・不規則な塊状体の3種類が見られ、それぞれ浸透注入・割裂浸透注入・割裂注入による固結形状と考えられる。そして、割裂注入が卓越する場合は、固結砂の体積が計算値(薬液が間隙を完全に充填したときの体積)の1/2程度と相当に小さくなる。
- 4) 固結砂内部の填充率は、浸透注入では80~120%とほぼ均質であるが、割裂注入では60~170%と大きくばらついている。
- 5) 未固結部の化学分析の結果から考えると、浸透注入の場合は、比較的均質な固結砂が得られるが、割裂注入では薬液の逸走以外に加圧脱水による濃縮の影響も大きいようである。
- 6) 固結砂の中の一軸圧縮強さの分布も、浸透注入の場合は強度が大きく、ばらつきが少ないが、割裂注入による固結砂では差があり、局部的に大きい強度もあるものの、一軸圧縮試験用供試体の成形時に破壊してしまうものも認められた。

以上のように、浸透注入による固結砂は均質であり、割裂浸透注入では塊状に固結してはいるもののその均質さはやや劣る。したがって、均質な固結砂を期待する場合は、出来るだけ浸透注入が可能となる注入方式など注入条件を設定することが必要である。

なお、今回は上載圧が一定の場合で検討しており、上載圧が注入状況に与える影響については今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本薬液注入協会：薬液注入工法の設計・施工指針，pp. 4~5, 1989.
- 2) 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで，pp. 160~163, 1985.
- 3) 森 麟：薬液注入による地盤改良効果と問題点，基礎工，Vol. 19, No. 3, pp. 2~6, 1991.
- 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/Ⅲ-8, pp.131~140, 1987.
- 5) 1) と同, p.5
- 6) 川地 武・喜田大三: 薬液注入地盤における注入材の分布と注入効果, 土と基礎, Vol.35, No.5, pp.45~50, 1987.
- 7) Mori, A., Tamura, M. and Fukui, Y. : Distribution of grouts in solidified region on chemical grouting, Soils and foundations, Vol.29, No.4, pp.127~134, 1989. (1993.6.10 受付)

LABORATORY STUDIES ABOUT THE DISTRIBUTION OF VOLUME RATIO OF GROUT ENTERED IN THE VOID BY THE INJECTION CONDITIONS

Koji KUMAGAI, Yosikiyo SUDO and Eiji YANAGISAWA

The volume ratio of grout entered in the void is a basis for calculating the injection volume and judging the effectiveness of chemical grouting. In order to study the distribution of the volume ratio, the different shapes of stabilized soils during permeation injection and penetrate injection were produced with changing injection conditions. The soluble silica content was measured by chemical analysis in soil samples inside and outside of stabilized area with the following result : In the case of perfectly permeation injection the range of this ratio are found to be 80~120% and distribute homogeneously while inside the stabilized soil, and almost 0% outside of stabilized soil ; in the case that penetrate injection prevails, the range of this ratio varies irregularly and there found considerable amount of grout materials outside the stabilized soil. The ratio measured by chemical analysis can be related to the volume and unconfined compressive strength of stabilized soil.