

# 薬液注入条件による砂の固結形状の変化

崔 亢吉<sup>1</sup>・風間基樹<sup>2</sup>・柳澤栄司<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 東北大学 大学院 工学研究科 土木工学専攻  
(〒980-77 仙台市 青葉区 荒巻字青葉)

<sup>2</sup> 正会員 工博 東北大学助教授 大学院 工学研究科 土木工学専攻

<sup>3</sup> 正会員 工博 東北大学教授 大学院 工学研究科 土木工学専攻

薬液注入工法の信頼性を高めるためには、注入固結体が注入条件及び深度によって、どのような形状になるのかは検討すべき重要な点である。本研究では直径と高さ、300mmモールド内の砂質土に対する薬液注入実験を行った。薬液注入により固結体は、上載圧が大きくなると注入材のゲルタイムにかかわらず、浸透注入のように注入が進行でき、球状に近い形になるがそれに伴い完全な浸透注入形態の場合約14%、割裂・浸透注入形態の場合は約25%程度体積が小さくなることが判明された。

*Key Words : permeation grouting, grouting by hemispheric permeation, grouting by fracturing-impregnation, fracture grouting*

## 1. まえがき

薬液注入工法は簡便かつ速効性がある地盤改良工法として、現在では土木施設物工事で欠かすことのできないものになっている。薬液注入による地盤改良では、注入材が地盤を構成する砂の間隙にまんべんなく均等に浸透して、間隙水が注入材で完全に置換された状態を理想的な浸透注入形態と考えている。したがって、地盤が均一な砂質土からなる場合は、流体力学上の理論通りの浸透注入形態をとり、注入固結体は、注入管先端を中心として全方向でほぼ同じ半径で浸透され、球状の固結体を得られる<sup>1)</sup>はずである。しかし、実際の自然地盤は不均質かつ複雑なため、固結体の形状は地盤条件や注入条件によって複雑に変化すると考えられる。

また、地盤及び注入条件によっては、注入初期から割裂あるいは割裂・浸透注入形態<sup>2)</sup>になって、注入材が脈状あるいは板状の形で地中に不均一に入る場合もある。このような理由で注入固結体が所定の球状にならない場合には、固結体の連続体が不完全になるので、設計改良範囲に未改良部が残留し、それが原因で大事故につながることもある。

一方、薬液注入による注入地盤の粘着力、内部摩擦角、強度、透水性等の変化については、

既にかんりの知見が得られているのが現状である<sup>3)-7)</sup>。しかし地盤中に薬液が浸透され形成される固結体の注入形態や形状に対する研究は比較的少ない。Karolら<sup>8)</sup>は、上部が開放された箱型の木製水槽の中に供試体を置いて、一方から水を流して反対側に設置したスクリーンから通過あるいは越流させる試験装置を用いて、薬液のゲルタイムによる固結形状の変化を調べた。また、注入した薬液の地下水流に対する影響を調査する目的で、薬液濃度やゲルタイムなどを変化させて希釈現象を調べた。Cambefort<sup>9)</sup>は、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いる。このことは浸透状況はかなり拘束圧に依存することを示唆している。森らは<sup>10)-13)</sup>、緩結性薬液及び急結・瞬結性薬液による注入形態を調べる目的で注入実験を行い、砂の透水性による固結形状の変化差異を調べた。また実地盤で注入速度や薬液のゲル化時間を変化させて緩結性薬液を注入した場合の固結形状を掘り出し試験により調査した。

これまでの研究では、注入固結体の性状に大きな影響を及ぼすと思われる地盤の拘束圧は無視あるいはほとんど一定値の状態で行われたのが大部分である。このような研究結果を踏まえ、本研究では、固結体の形成に直接大きな影響を

及ぼす地盤条件や注入条件による影響を明らかにする目的で、まず地盤の密度の影響を考慮し、緩詰め供試体と密詰め供試体について、ゲルタイムが注入時間より長い緩結性薬液とゲルタイムが注入時間より短い瞬結性薬液を用いて実験を行った。また、地盤の隙間に浸透する注入材の分布状態を調べるため、化学分析法により填充率分布を調べた。特に注入深度を考慮して上載圧を変化させながら、各々地盤及び注入条件の違いによる固結形状を調べ、注入メカニズムと固結体の性状との関係を明らかにすることを目的としている。

## 2. 実験装置及び試料

本実験では、浸透注入が可能な砂質地盤を想定して、粒度分布が異なる3種類の砂を用いた。使用した試料砂は、市販の珪砂6号が主であり、比較のため珪砂7号、自然の阿武隈川砂についても実験を行っている。Table 1に各試料の物理諸量を、またそれぞれの試料の粒度分布曲線をFig. 1に示す。実験に用いた薬液は、主剤として3号けい酸ソーダで有機反応剤の硬化剤としてアロンSR-HI、急結材としてアロンSR-Bを用いた。注入量は毎回1200 ccを定量注入した。

本実験に用いた中型土槽モールド及び注入実験装置の概要をFig. 2に示す。実験装置は直径300mmのモールドに試料砂を詰め、その中心に設けたパイプの先端から薬液を注入する仕組みになっている。供試体はモールド底部中央に注入管(内径D=6mm, 外径D=10mm, 二重管ロッド)を差し込んで固定した後、最適含水比の状態の砂を締固めて作製する。注入管先端にはスタティックミキサー(D=7.62mm, L=35.56mm)が付けられている。供試体には内側に鉄制定規を接着し、締固めときの各層試料の量と締固め後の高さが同一になって、毎回設定した供試体の密度が得られるように作成した。供試体試料の密度は緩詰め・密詰めの2種類とし緩詰めの供試体は2.5kgランマーを用いて5層にわたって各層50回、密詰めの供試体は同じ2.5kgランマーを用いて10層にわけて各層80回で突固めた。試料の密度は緩詰め、密詰めの2種類とし、珪砂6号での相対密度は緩詰めの場合35%、密詰め供試体の場合70%を目標とした。供試体は締固めにより作製したが、緩詰め供試

Table 1 Types of samples

| Property                       | Units             | Silica sand No 6  | Silica sand No 7      | Natural sand          |                       |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Specific gravity               |                   | 2.637             | 2.640                 | 2.715                 |                       |
| Optimum moisture content       | %                 | 14                | 19                    | 14.5                  |                       |
| Maximum dry density            | g/cm <sup>3</sup> | 1.573             | 1.483                 | 1.654                 |                       |
| Maximum density                | g/cm <sup>3</sup> | 1.608             | 1.512                 | 1.686                 |                       |
| Minimum density                | g/cm <sup>3</sup> | 1.279             | 1.171                 | 1.379                 |                       |
| Dry density (Relative density) | Loose             | g/cm <sup>3</sup> | 1.3(35%)              | 1.4(65%)              | 1.6(78%)              |
|                                | Dense             | g/cm <sup>3</sup> | 1.5(70%)              | 1.6(92%)              | 1.7(96%)              |
| Coefficient permeability       | Loose             | cm/sec            | $6.52 \times 10^{-3}$ | $2.91 \times 10^{-3}$ | $1.56 \times 10^{-3}$ |
|                                | Dense             | cm/sec            | $3.72 \times 10^{-3}$ | $2.02 \times 10^{-3}$ | $1.22 \times 10^{-3}$ |

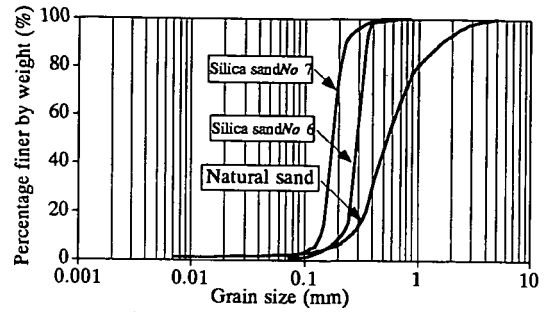


Fig. 1 Grain size distribution curves

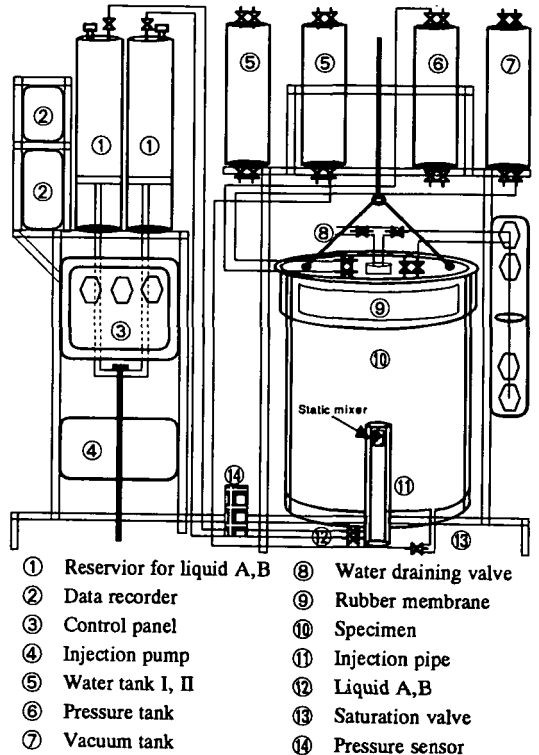


Fig. 2 Schematic diagram of injection apparatus

Table 2 Used chemical grouts

| Grouts   | Injection volume        | Manufacturing |                    |                    |                     |
|----------|-------------------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|          |                         | Total         | Gel time           |                    |                     |
|          |                         |               | 300 seconds        | 5 seconds          |                     |
| Liquid A | 600cc                   | 1000cc        | 700cc + Water300cc | 700cc + Water300cc |                     |
| Liquid B | Hardener<br>Accelerator | 600cc         | 1000cc             | 60g + Water<br>35g | 30g + Water<br>110g |
| Total    | 1200cc                  | 2000cc        | 1000cc             | 1000cc             |                     |

体で、注入前の間隙比は約0.91、注入後は約0.89になった。一方、密詰め供試体で、注入前の間隙比は約0.76、注入後は約0.74になった。この研究では実験結果の信頼性を高めるために一条件について3回の繰り返し実験を行い、地盤及び注入条件による固結体の形状や体積の変化、填充率の分布及び注入形態の区分などを調べた。上載圧はモールド上部の蓋に入っているゴム袋に水で満たし、それを加圧して与えるが本研究での上載圧は49, 98, 147, 196, 245 kN/m<sup>2</sup>の五つの条件で行った。注入薬液はTable 2に示すように、ゲルタイム5分の緩結性薬液とゲルタイム5秒の瞬結性薬液の2種類を用いた。実際に現場で適用されている注入速度は5~20 l/minであるが、本実験では500, 1000, 1500, 2000cc/minの4種類とした。注入圧の変化は、圧力で薬液を注入しながら注入管の底部に取り付けた圧力計センサーで測定する。この場合、注入前に圧力計センサーの調節ピンを開けて一次的に余裕分の薬液を送り、薬液タンクや注入管に残っている空気や水などを排出させた後、圧力を測定することとしている。注入によって押し出された供試体の間隙水は、蓋のバルブを通じて排水させて排水量を測定した。約24時間後、固結体を水洗いして崩壊しない残り部分を固結体と看做し、寸法や形態などを確認した後、水が入らないように約60℃のパラフィンで包んで水中に入れることにより体積を測定した。その後、固結部の試料を採取して填充率の分布を調べるための化学分析などを行った。

### 3. 地盤及び注入条件による固結体の形状

薬液注入工法の目的である地盤の強度増加と止水性を確保するためには、浸透注入形態の固結体が得られることが望ましい。しかし、実際の自然地盤での固結形状は地盤の透水係数、間

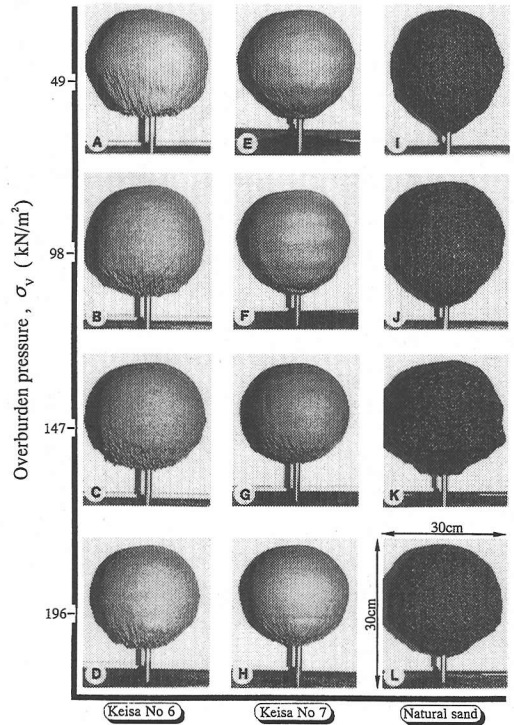


Fig.3 Consolidated shape by different soil on the long gel time grouts (Dense specimens, Injection rate, from q=500 to 2000cc/min)

隙率、空隙の発達、地下水流、注入深度などの地盤条件や注入速度、注入量、注入圧力、ゲルタイム、注入材の経時的な粘度変化などの注入条件が相互に影響して不規則な形状になるのが普通である。本研究では、実地盤での注入メカニズムを把握するために、第1段階では理想的な条件での浸透メカニズムを考えて、ゲルタイムが注入時間より長い緩結性薬液を用いて室内実験を行い、完全な浸透注入形態での固結体を目指した。第2段階では割裂現象による固結体の形状を室内で再現するために、ゲルタイムが注入時間より短い瞬結性薬液を用いて実験を行うことにした。また、透水係数が大きい地盤での固結体の希釈現象による影響を調べる目的で、主剤である水ガラスの濃度を調節して地盤での希釈現象を調べた実験結果についても述べる。

Fig. 3は緩結性薬液を用いて透水性の異なる密詰め状態(Dr=70%)の三つの試料、硅砂6号(写真A~D)、硅砂7号(写真E~H)、自然の阿武隈川砂(写真I~L)に注入したときの固結形状である。図に示すように硅砂6号、7号の固結体は上載圧の変化や注入条件によらず注入管先端を中心として球状の浸透注入形態になっている。

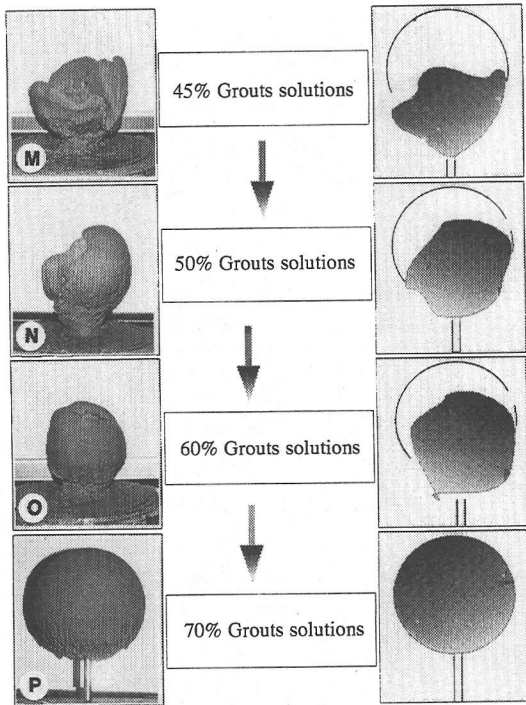


Fig.4 Consolidated shape by grouts solutions

一方、自然の阿武隈川砂の固結体は上載圧が49から98kN/m<sup>2</sup>まで(写真I~J)は完全な球状にならず上下方向に長い楕円形になっているが、上載圧が147から196 kN/m<sup>2</sup>まで(写真K~L)はほぼ球状である。したがって、緩結性薬液を用いた場合には地盤が均一であれば注入条件にかかわらず球状になり、自然砂の場合でもほとんど球状であることが認められる。

Fig.4は、同じ珪砂6号の密詰め供試体について、注入薬液の主剤である水ガラスの濃度を45%、50%、60%、70%としたときの固結形状である。図の右側は、左側の写真を図式化したものであるが濃度が45%、50%、60%の薬液では内部や片側の部分はほとんど固結せず、所定の形が形成されない固結体となっている。しかし、水ガラス濃度が70%ときは理論上の体積(○内)とほとんど同じ球状の固結体が形成され浸透注入が行われたと考えられる。したがって透水係数が大きい、地下水流が存在する地盤では、ゲルタイムが注入時間より長い薬液を用いて注入すると薬液が希釈されて所定の固結体ができず、所定の効果が得られない場合もあると考えられる。

Fig.5は緩結性薬液を密詰め供試体に注入したときの固結形状の実験結果である。実験結果の固結体の形状からみると、上載圧の変化(49から245kN/m<sup>2</sup>)や注入速度の変化にかかわらず、固結体は注入管先端を中心とした球状(写真1~20)になっている。固結体の体積を上載圧が49から245 kN/m<sup>2</sup>のときで比較するとそれぞれ平均でV=2562cm<sup>3</sup>(写真1~4), V=2272cm<sup>3</sup>(写真17~20)であり、かなりの体積減少が見られる。密詰め供試体の場合、1200 ccの薬液で改良される固結体の体積は理論上2623cm<sup>3</sup>であるので、固結体の体積変化は上載圧が大きくなるほど次第に減少し、平均で最大約14%程度小さくなった。これは、地盤で注入深度が大きくなると地盤の拘束圧や静水圧が大きくなるので地盤内の土粒子間に薬液が浸透する際の流体抵抗が大きくなり、体積が小さくなる可能性があることを示唆している。したがって均一な砂地盤で地下水流の影響がない理想的な地盤に、注入中にゲル化が生じない緩結性薬液を注入した場合には、浸透注入形態の球状の固結体が得られるが、注入深度が深いほど固結体の体積は減少していくものと考えられる。

Fig.6は緩結性薬液を緩詰め供試体に注入したときの固結形状を示したものである。実験結果の固結体の形状からみると、上載圧や注入条件によらず固結体の上部は球状のようにになっているが、下部には凹凸がありほとんど未固結に近い状態(写真21~40)になっている。固結体の体積は、上載圧が49と245 kN/m<sup>2</sup>のときで平均V=1914cm<sup>3</sup>(写真21~24), V=1809cm<sup>3</sup>(写真37~40)である。この場合も固結体の体積は、上載圧が大きくなるほど減少して平均で最大約25%程度小さくなっている。緩詰め供試体の場合、1200ccの薬液で改良される固結体の体積は理論上2407cm<sup>3</sup>であるので、全体積は各々の条件で、密詰め供試体より約20%以上小さくなることが認められ、理論上予測される減少量8%よりかなり大きいことが知られた。これは注入材が注入中に間隙水により希釈されて沈降したためと考えられる。このため、固結体は本来の固結すべき部分が消滅し、固結体の下部はFig.6に示すように半球状の固結体になったと考えられる。また緩い地盤の場合には地盤の拘束圧の影響は少なくなり、完全な球状の固結体は得られにくくなると考えられる。したがって同じ注入条件でも間隙比が大きい地盤と小さい地盤に注入したときには、注入効果が異なり、

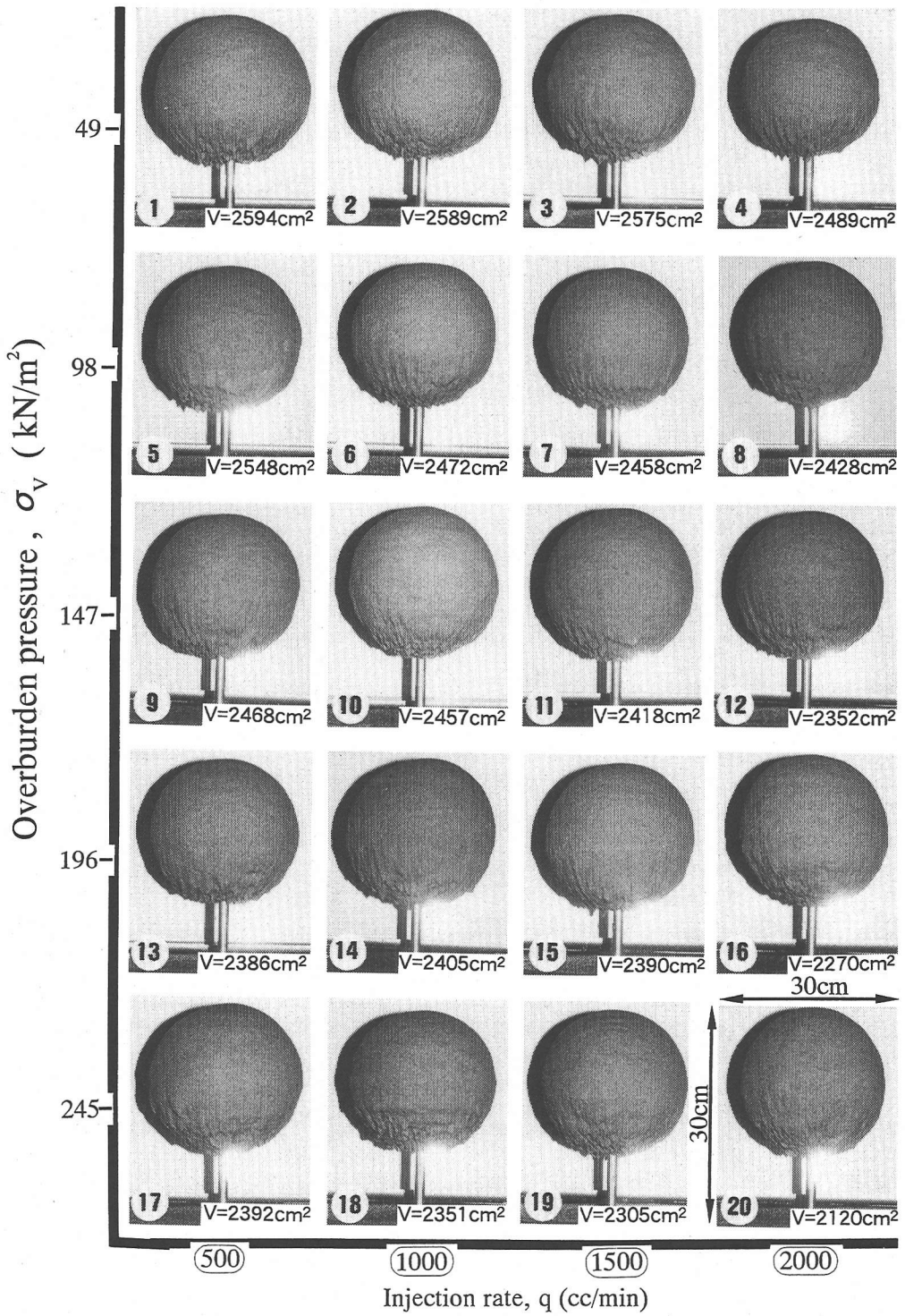


Fig.5 Consolidated shape by grouting conditions on the long gel time grouts(Dense specimens)

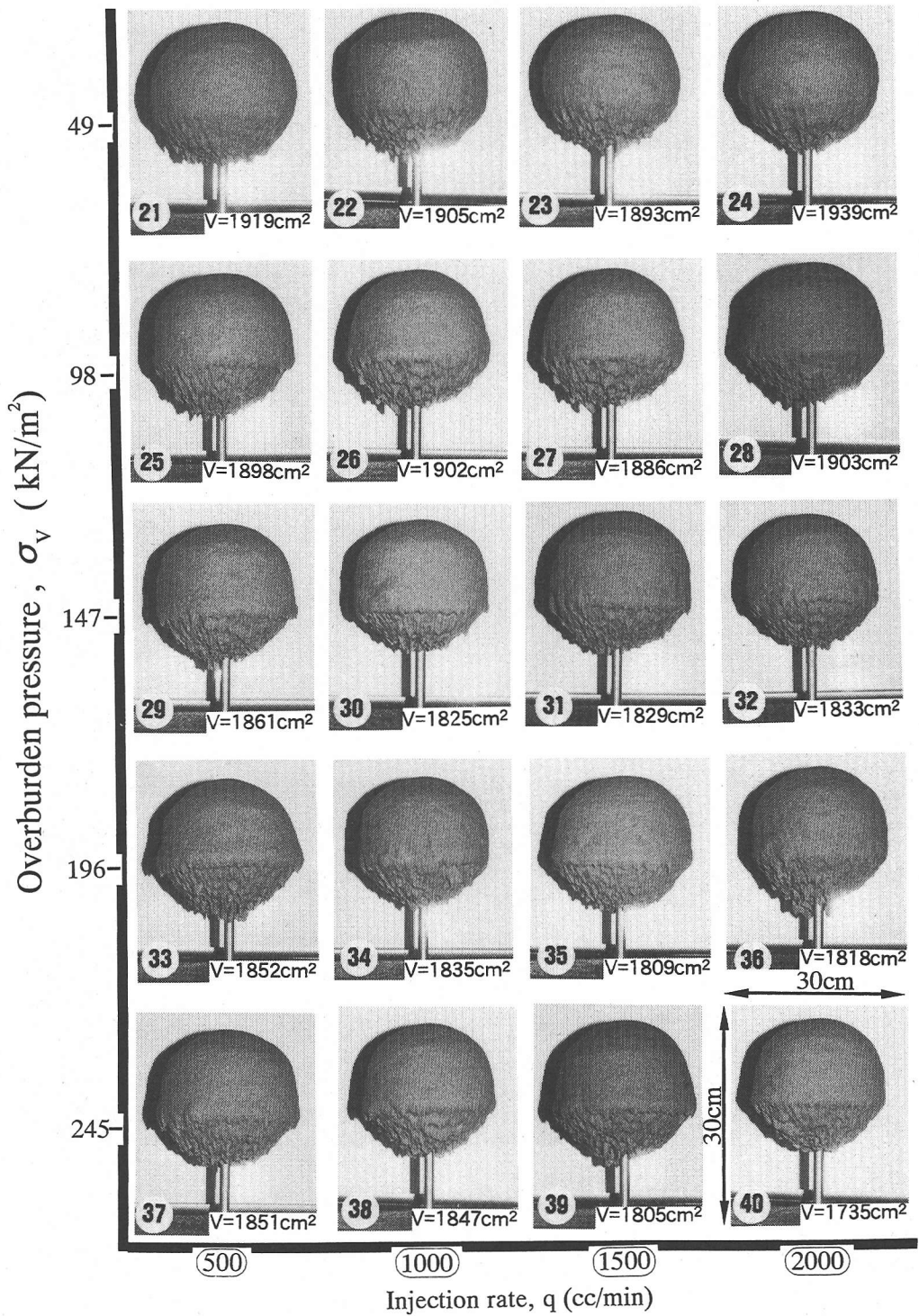


Fig.6 Consolidated shape by grouting conditions on the long gel time grouts (Loose specimens)

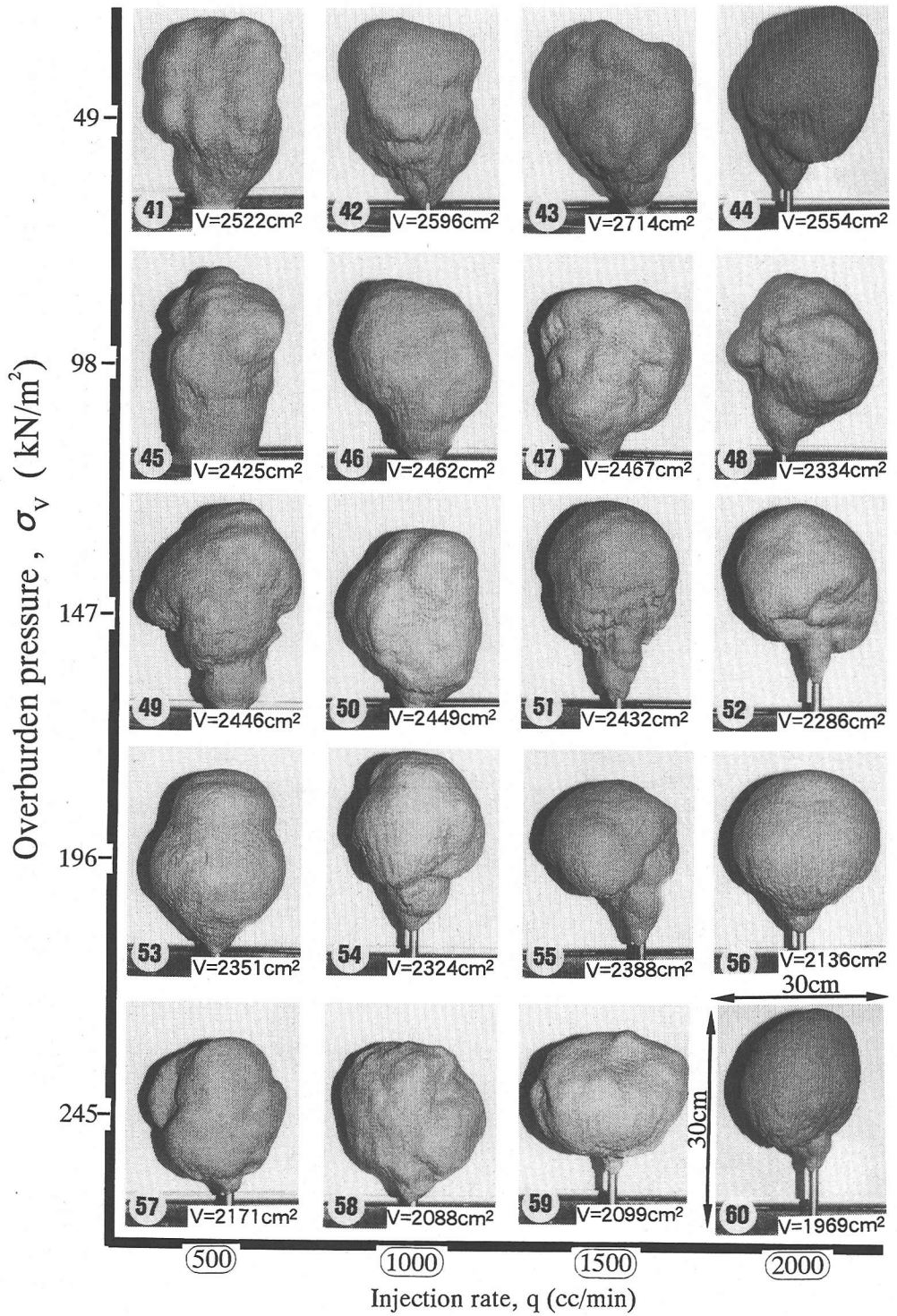


Fig.7 Consolidated shape by grouting conditions on the short gel time grouts (Dense specimens)

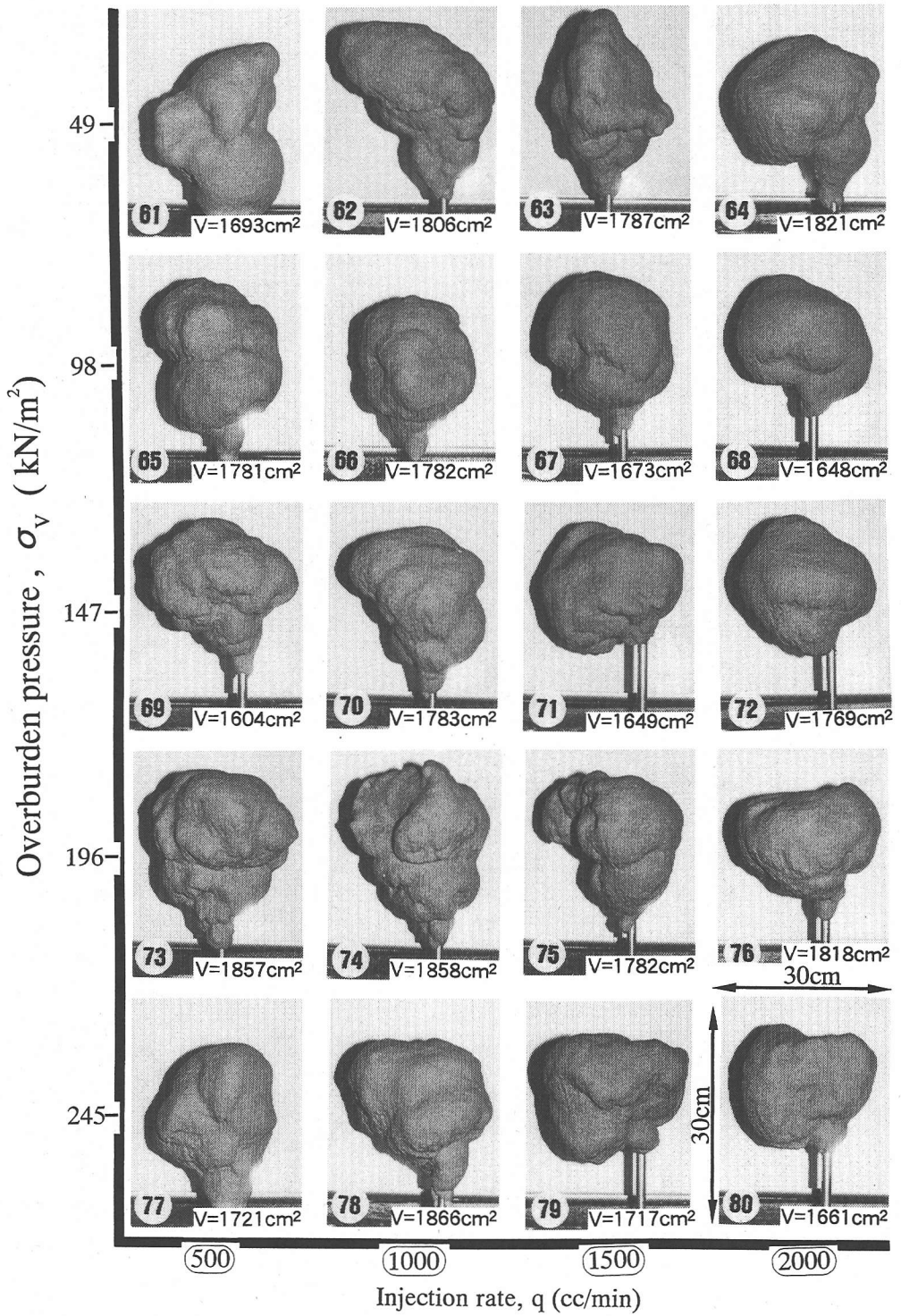


Fig.8 Consolidated shape by grouting conditions on the short gel time grouts (Loose specimens)



注入量の損失係数の再検討などの対策が必要と考えられる。

Fig.7は、瞬結性薬液を密詰め供試体に注入したときの実験結果である。この場合の固結体形状をみると、上載圧が小さい(49から147 kN/m<sup>2</sup>)条件では、比較的不規則な歪んだ形(写真41~写真52)になっている。しかし、上載圧が大きく(196kN/m<sup>2</sup>以上)なると固結形状は完全な球状にはならないが、徐々に球状に近い形(写真53~写真60)になっていることが知られる。固結体の体積を上載圧49と245 kN/m<sup>2</sup>のときで比べると平均でV=2597 cm<sup>3</sup>(写真41~44), V=2081cm<sup>3</sup>(写真57~60)である。上載圧が大きくなるほど固結体は歪んだ形から球状の近い形になるが体積は減少して、平均最大約25%程度小さくなっている<sup>14)</sup>。これは、割裂現象が予想される不均一な実地盤でも、注入深度が大きくなると地盤の拘束圧が大きくなるため、割裂脈は生じにくく、このためほぼ浸透注入のように注入が進行し、固結体は球状に近い形となり、それに伴い体積は小さくなるものと考えられる。

Fig.8は瞬結性薬液を緩詰め供試体に注入したときの固結形状の実験結果である。図からみると固結体の形状は、上載圧の変化(49から245kN/m<sup>2</sup>まで)や注入条件の変化にかかわらず注入初期から終了まで完全に割裂注入形態の非常に歪んだ形(写真61~写真80)になっている。固結体の体積は上載圧が変化してもほぼ一定で、全体的な傾向は不規則な結果になっている。しかも全体積は各々の条件で密詰め供試体よりさらに小さくなることが認められる。

Fig.9は今度の実験から得たさまざまな注入形態での固結体の形状の例である。図の右側は左側の写真を図式化したものである。注入形態の広い意味としては、浸透注入、圧縮注入、包込み注入で区別して考えられるが、一般に注入材の地盤土中への注入はその形態によって、浸透注入、割裂注入と呼ぶことが多い<sup>15)</sup>。Fig.5及びFig.9の写真Qのような注入形態は浸透注入であり、理論上の体積とほとんど同じ体積になっている。割裂注入というのはFig.8及びFig.9の写真Tのような注入形態である。またCaron<sup>16)</sup>は、地盤によっては注入範囲に生じた主割裂脈からその両側に後続の薬液が注入圧によりその割裂脈を中心として浸透注入が行われある程度注入効果が得られるFig.7及びFig.9の写真Sのような注入形態を割裂・浸透注入

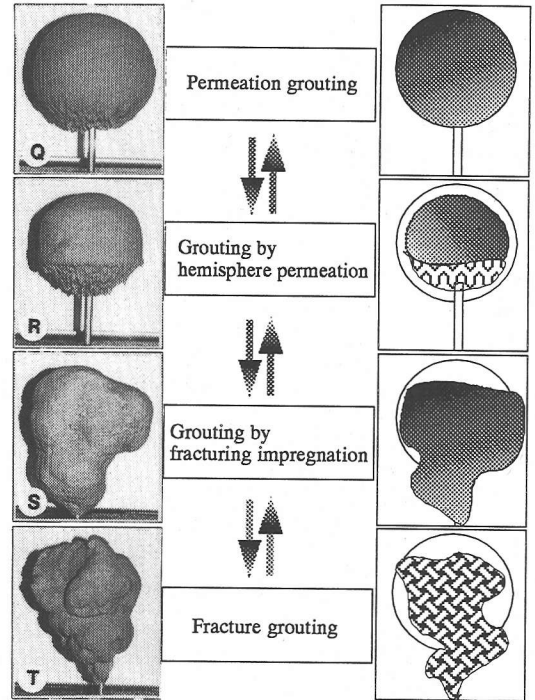
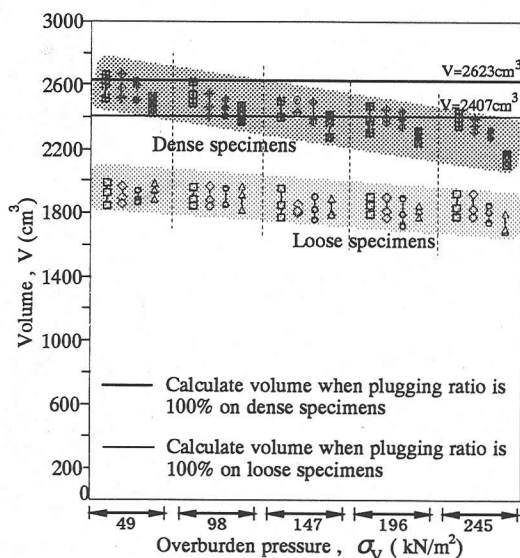


Fig.9 Types of grouting form

と定義した。今度の地盤条件及び注入条件を変化させた実験から固結体形状について得られた特徴的な点の一つは、間隙比が大きい緩詰め供試体にゲルタイムが注入時間より長い緩結性薬液を注入した場合の固結体が注入管先端部を中心として薬液の進行反対側の部分に所定の固結ができない、Fig.6及びFig.9の写真Rのように半球形の固結体になった点である。このとき固結体は浸透注入形態での形状や体積とは大きな差があることが認められるので、先の三つの注入形態とは区別して準・浸透注入形態と呼ぶことにする。浸透注入以外の注入形態では理論上の体積や形状に対して非常に歪んだ形になって所定の目的に至っていないと考えられる。

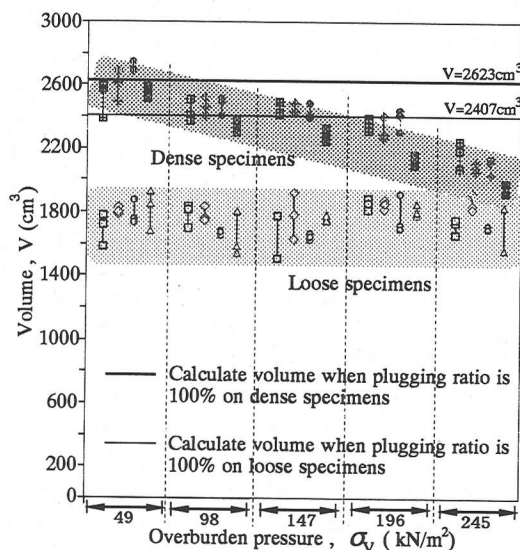
以上の実験結果の固結形状を総合的に観察すれば、ほぼ均一な地盤に理想的な注入条件で注入したときの固結体は球状の浸透注入形態になると考えられる。しかし実地盤のように不均一な土質と複雑な土層構成からなる実地盤では、その不均一性や異方性の程度に左右され、注入条件により浸透注入から準・浸透注入形態、割裂・浸透注入形態、割裂注入形態に亘っての様々な形態で固結体が形成されると考えられる。



Dense specimens  
 ■ q=500cc/min ○ q=1000cc/min △ q=1500cc/min ◇ q=2000cc/min

Loose specimens  
 □ q=500cc/min ◇ q=1000cc/min ○ q=1500cc/min △ q=2000cc/min

Fig.10 The variation of consolidated volume as a function of overburden pressure(The Long gel time grouts)



Dense specimens  
 ■ q=500cc/min ◇ q=1000cc/min △ q=1500cc/min ◇ q=2000cc/min

Loose specimens  
 □ q=500cc/min ◇ q=1000cc/min ○ q=1500cc/min △ q=2000cc/min

Fig.11 The variation of consolidated volume as a function of overburden pressure(The short gel time grouts)

#### 4. 固結体の体積変化と填充率の分布

##### (1) 固結体の体積変化

Fig.10は緩結性薬液を密詰め及び緩詰め供試体に注入したときのFig.5, Fig.6の実験結果を上載圧と体積との関係を表わしたものである。図中の実線は全注入量(毎回Q=1200cc)が間隙を100%填充したと仮定して求めた体積の計算値で、密詰め供試体の場合は $V=2623\text{cm}^3$ 、緩詰め供試体の場合は $V=2407\text{cm}^3$ である。密詰め供試体の場合、固結体の体積変化は上載圧が49から245  $\text{kN/m}^2$ まで大きくなるにつれて平均で約14%程度小さくなって、全般的にみるとほぼ一定の割合で減少しているのが認められる。一方、緩詰め供試体の場合も固結体の体積は平均で約25%小さくなり、上載圧が大きくなるにつれてなだらかに減少している。したがって、理想的な地盤条件及び注入条件でも注入深度が大きくなると固結体の体積は小さくなるのが認められる。全般的にみるとそれぞれの注入速度によりわずかな差はあるが、体積は上載圧にほぼ比例して減少するのが認められる。

Fig.11は瞬結性薬液を密詰め及び緩詰め供試体に注入したときのFig.7, Fig.8の実験結果を上載圧と体積変化との関係を表わしたものである。密詰め供試体の場合、固結体の体積変化は上載圧が49から245  $\text{kN/m}^2$ まで大きくなるにつれて収縮し平均で、最大約25%程度小さくなっている<sup>17)</sup>。全般的にみると、緩結性薬液に比べて拘束圧依存の勾配が急であるが、この場合も体積はほぼ直線的に減少している。一方緩詰め供試体の場合、固結体の体積は上載圧が大きくなるにつれてばらついた分布であるが、体積減少はほぼ一定である。

##### (2) 固結体の填充率の分布

填充率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であり、注入率の計算において非常に重要な位置を占めている。現在の基準では砂質土の場合、浸透あるいは割裂注入形態にかかわらず120%から90%までが推薦されている<sup>18)</sup>。地盤及び注入条件により注入材分布と地盤改良効果との関係を究明するために、化学分析による土中の注入材含有量測定、填充率を求める方法を用いて<sup>19)~21)</sup>填充率を求めた。

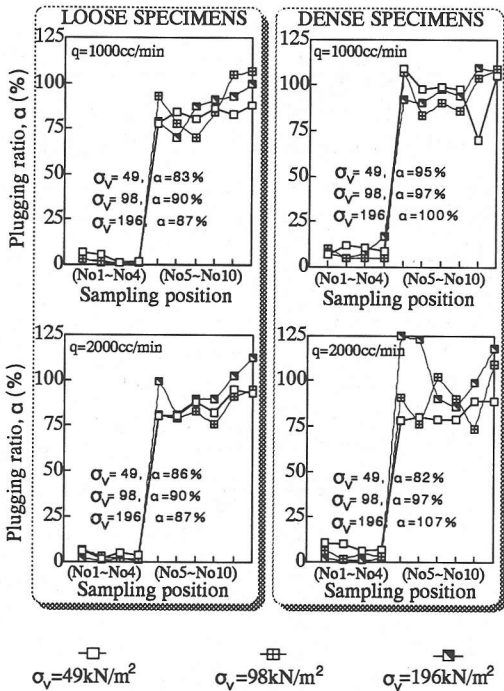


Fig. 12 Plugging ratio of long gel time grouts as a function of overburden pressure

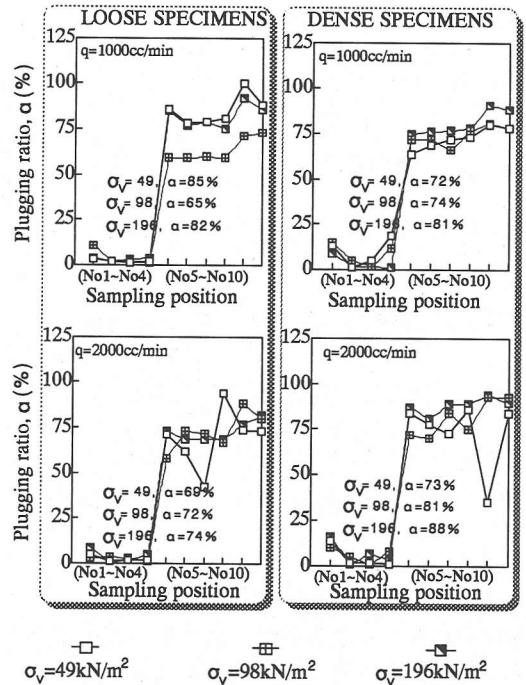


Fig. 14 Plugging ratio of short gel time grouts as a function of overburden pressure

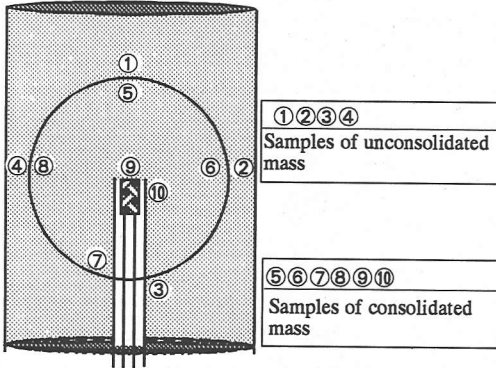


Fig. 13 Sampling position

Fig. 12は緩結性薬液を注入したときの注入材の分布に対する密度と上載圧の影響について調べたものである。図の横軸は試料番号を示し、Fig. 13に示すようにNo1~No4は未固結部、No5~No10は固結体の内部で採取したことを示している。図中の左側の緩結め供試体の場合、固結体内の平均充填率は83%である。充填率の分布はかなりばらついてはいるが全体的にみると上載圧が大きくなるにつれて充填率は高くなる傾向になり、また密結め供試体の場合の方が充填率が高くなる傾向が見られる。

Fig. 14は瞬結性薬液を用いたときの充填率の分布について調べたものである。緩結め供試体の場合、固結体内の充填率の平均値は71%で、この場合も上載圧が大きくなるほど充填率は高くなっている。また密結め供試体の場合、平均充填率は78%であり、緩結め供試体より密結め供試体の方が、また上載圧が大きい方が充填率は高くなる傾向が認められる。

Fig. 15は充填率と固結体の体積を示した実験結果である。図の左側の緩結性薬液の場合、砂の密度により体積や充填率の差はあるが、充填率が大きくなるほど固結体の体積は小さくなる傾向が認められる。図の右側の瞬結性の場合、密結め供試体の場合は緩結性薬液による分布と同じ傾向であるが緩結め供試体の場合、不規則で明瞭な傾向を示さない。以上の実験結果により充填率の分布は、注入深度が大きくなると地盤の拘束圧が大きくなるため、注入材の浸透時の抵抗が大きくなって拡散が起りにくくなり、それに伴い充填率は高くなると思われる。また緩結めの場合には、前にFig. 6で述べた希釈・沈降の影響により、充填率が低くなっているものと考えられる。したがって、注入による固結体の体積は、注入深度が大きくなると地盤内の

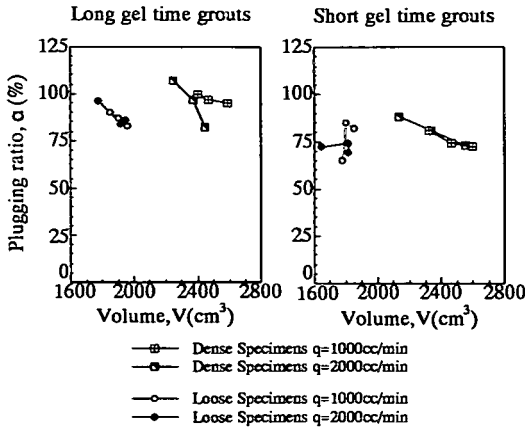


Fig.15 Relation of plugging ratio and consolidated volume

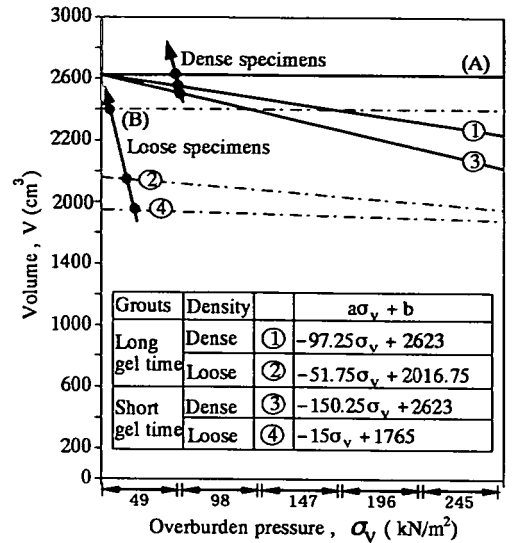


Fig.16 Comparison of consolidated volume with calculation and experiment

拘束圧が大きくなるので、固結部の填充率が高くなるために体積は小さくなると考えられる。

### 5. 注入固結体の体積を求める式の検討

薬液注入による改良地盤での注入固結体の形状とその大きさは、設計範囲をもれなく固結させるために検討すべき重要な点である。現在注入量の計算に用いられる、注入量Qと固結体の体積Vとの関係は次のようになる。

$$Q = n \cdot \alpha \cdot V \quad (1)$$

ここに n は間隙率(%),  $\alpha$  は填充率(% )である。理想的な浸透注入形態で砂の間隙にまんべんなく均等に浸透して間隙水を注入材で完全に置換したと仮定すると、 $\alpha$  は100%になる。式(1)を相対密度で表わすと式(2)になる。

$$V = \frac{100(1 + e_{max}) - (e_{max} - e_{min})Dr}{100e_{max} - (e_{max} - e_{min})Dr} Q \quad (2)$$

Dr=相対密度 (%)

本実験に用いた緩詰め供試体の相対密度は35%、間隙率は47%で、密詰め供試体の相対密度は70%、間隙率は42%である。また注入量は毎回1200ccであった。今度用いた実験条

件により式(2)から体積を計算すると、緩詰め供試体の場合は $V = 2407\text{cm}^3$ で、密詰め供試体の場合は $V = 2623\text{cm}^3$ である。しかし、5章で述べたように注入固結体は注入形態によりある程度差はあるが、上載圧が大きくなると体積は反比例してほぼ一定に小さくなるのが実験を通じて明らかになった。これを勘案すると式(1)は式(3)のように表現できる。

$$V = \frac{Q}{n \cdot \alpha \cdot (a\sigma_v + b)} \quad (3)$$

$\sigma_v = \text{上載圧 (kN/m}^2\text{)}$

Fig.16は式(2)により求めた固結体の体積と今度の実験から得られた体積を比べたものである。図中の横実線(A)及び点線(B)は式(2)により得られた理論上の体積である。図中の直線①と③は、Fig.10, Fig.11の密詰め供試体に、緩結性及び瞬結性薬液を注入したときの固結体の平均的な体積変化である。直線②と④は、Fig.10, Fig.11の緩詰め供試体に緩結性及び瞬結性薬液を注入したときの固結体の体積変化の平均値の線である。密詰め供試体の場合{(A)⇒①③}は上載圧が増加すると体積は一定の勾配で減少し、その勾配は薬液のゲルタイムによって若干異なる。緩詰め供試体の場合{(B)⇒②④}は上載圧が小さい段階から計算で求めた体積と大きな差を見せながらなかなか

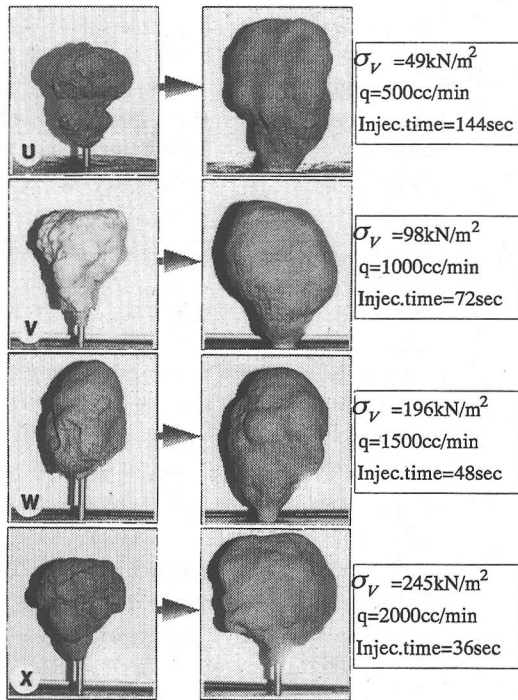


Fig.17 Formation process of consolidated shape  
(Short gel time, Dense specimen)

体積減少を示している。複雑な地盤条件や注入速度などにより多少の差はあると考えられるが、注入により形成される固結体の体積変化を予測する場合、式(3)のような上載圧による補正が必要と考えられる。

## 6. 注入形態による固結形状の変化

注入材が地盤中で地盤及び注入条件によりどのような注入形態になるかは、地盤改良の効果を考えるうえで極めて重要である。第4節で述べたように今度の実験を基づいて注入形態を大別すると浸透、準・浸透、割裂・浸透、割裂注入の4種類に分けることができると考えた。ここでは実地盤での浸透状況を把握するために、浸透注入と割裂・浸透注入形態の違いについて考慮してみた。浸透注入は土粒子の配列構造をほとんど乱さずに注入材が粒子間の間隙に入っていくもので間隙中に存在していた水の大部分は押し出され、ここに注入材が入り固結するの

で均一に強度は増加し、土は不透水化して改良効果は確実に生じる。一方割裂・浸透注入は地盤内の注入範囲に生じた主割裂脈からその両側に後続の薬液が注入圧によりその脈を中心として浸透注入が行われるので不規則な固結形態になる。

Fig.17は瞬結性薬液を密詰め供試体に注入したとき、上載圧が49から245kN/m<sup>2</sup>までの条件で注入時間の途中(注入時間の約1/2時点)で、注入を中止してその固結体の形成過程を調べたものである。図に示すように割裂・浸透注入形態での固結体は、注入開始から先行の薬液が注入管先端部を通じて球状で拡散されず、地盤の抵抗力が小さい部分に集中、不規則に浸透し始める。後続の薬液は注入圧によりその不規則に固結された浸透部分を押し出し、あるいは貫入する状態で浸透される。したがって、この不規則な浸透機構の繰り返しにより固結体の形状は歪んだ形になると考えられる。しかし、この現象は注入深度が大きくなると地盤の拘束圧や抵抗力が大きくなるため、増加している注入圧でも不規則な任意の浸透がしにくくなり、それにより固結体の体積は小さくなりながら浸透注入のような球状に近い形になると考えられる。

## 7. 結論

本研究は薬液注入における室内実験で浸透注入と割裂注入形態を再現して地盤及び注入条件と固結形状との関係を検討したものであり、主な結論は以下のとおりである。

1) 注入形態としては、浸透注入、割裂注入、割裂・浸透注入などがあるが、浸透注入形態を目指した注入条件でも地盤の透水係数が大きい場合、固結体の体積は希釈現象により大きく減少することが確認された。

2) 注入により固結体の体積は本実験条件において上載圧が49から245kN/m<sup>2</sup>まで大きくなるにつれて密詰め供試体に緩結性薬液を注入した場合は最大で約14%程度、瞬結性薬液の場合、最大で約25%程度減少した。また緩詰め供試体の場合は各々条件で密詰め供試体より、さらに20%以上小さくなることが認められる。

3) 砂地盤で薬液注入による固結体は注入深度が大きくなると地盤内の拘束圧が大きくなり、注入材の浸透時の抵抗が大きくなって注入材の拡散がしにくい、固結部の填充率は高くなりな

から体積は大きく減少すると考えられる。

4) 種々の地盤条件及び注入条件に対応する固結体体積を求める経験式を求めることができた。これより、固結体の体積を予測する場合、上載圧の影響を考慮することが可能となった。

#### 参考文献

- 1) Karol,R.H.: Chemical grouting (Second Edition), pp.145~186,1990.
- 2) Caron.C.: The state of grouting in the1980's,Proc.of.Conf.on grouting in geotechnical engineering, pp.346~358,New Orleans, 1982.
- 3) Sowers,G.B.and Sowers,B.F.: Introductory soil mechanics and foundations, Macmillan, New york, 1951.
- 4) 三木五三郎, 斎藤孝夫: 土の工学的分類と其の利用, 鹿島出版会, p.136, 1979.
- 5) 土質工学会: 土質調査法, pp.728 ~738, 1982.
- 6) 森麟, 丸山隆司: 薬液により固結させた砂の強度と変形特性について, 第32回土木学会年次学術講演会概要, III-267, pp.496 ~497, 1977.
- 7) 国土開発技術研究センタ: 薬液等注入材料の研究開発に関する研究報告集, 1978.
- 8) Karol,R.H.and Swift,A.M.:Grouting in flowing water and stratified deposits,J.soilMech.Foundation Div. ASCE, pp125~ 145, April1961.
- 9) Cambefort,H.:Injection Des Soils (translation on Japanese), pp.41~ 208, 1969.
- 10) 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.
- 11) 森麟, 田村昌仁, 小峰秀雄, 小川雄二: 薬液注入において浸透固結形を考慮した限界注入速度の決定方法, 土質工学会論文報告集, Vol.33, No.3, pp.159~169, Sep,1993.
- 12) 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, 1989.
- 13) 森麟, 田村昌仁, 森山健吉, 上澤充, 小峰秀雄: 薬液注入による固結形状の予測に関する現場実験, 土質工学会論文報告集, Vol.34,No.2, pp.131~139, June1994.
- 14) 崔亢吉, 柳澤栄司: 砂質地盤における薬液注入条件と注入効果に関する室内実験, 第30回土質工学研究発表講演集, pp.2315 ~2318,1995.
- 15) 土質工学会: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, pp.65~89, 1990.
- 16) Caron,C.: The state of grouting in the 1980's, proc. of conf.on grouting in geotechnical engineering, pp.346 ~358, New Orleans, 1982.
- 17) Choi,H.G.and E,Yanagisawa: Permeation grouting and fracturing in sandy soil, Proc.of the 2nd international geosystems of JSSMFE and ISSMFE (TC-17), pp.117~122, 1996.
- 18) 日本薬液注入協会, 薬液注入工設計試料, 1993.
- 19) 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.
- 20) 熊谷浩二, 須藤良清, 柳澤栄司: 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, 土木学会論文集, No.499/III-28,pp.69~76,1994.
- 21) Akira Mori, Masahito Tamura and Yoshihiro Fukui: Distribution OF Grouts in Solidified Region on Chemical Grouting, Soils AND Foundation ,Vol.29,No.4, pp. 127 ~134, Dec, 1989.

(1996. 9. 25受付)

## VARIATION OF CONSOLIDATED SHAPE OF SAND DURING CHEMICAL GROUTING

Hang Gill CHOI, Motoki KAJAMA and Eiji YANAGISAWA

In order to determine ideal grouting conditions, one must estimate how different variables such as grouting condition and ground depth affect the shape and volume of chemical grouts. The results presented in this study were drawn from 300 laboratory tests, which included repetitions to ensure accuracy. Both the height and diameter of the test specimens were held constant at 30cm. When both the overburden pressure and injection rate is high, it is possible to obtain a spherical shape similar to permeation grouts. However the overburden pressure is high (irrespective of gel time), the volume of the solidified shapes is decreased about 15% -25%.