

薬液注入による固結砂供試体の一軸圧縮強さに与える要因について

熊谷浩二*・所 武彦**・柳澤栄司***

細粒分を含まない標準砂や珪砂を対象にして、供試体の締固め方法を提案し、この方法で作製した供試体にゲルタイムの長い薬液を注入し、浸透注入による固結砂の一軸圧縮試験・透水試験を行った。この作製方法によれば密度の調整が容易にでき、実験が再現性よく行えるため、薬液注入による改良効果と土質条件とを明確に区別でき、薬液注入による固結砂の基本的な性状を確認できた。

Key Words : chemical grouting, sandy soil, laboratory test, relative density, unconfined compressive strength, volume ratio of grout entered in the void

1. ま え が き

薬液注入は、施工性に優れた地盤改良工法であり、止水や地盤強化を目的として用いられている。とくに、最近の都市土木工事においては薬液注入を用いることが多く、薬液注入による改良効果への期待度が大きくなっている。このため、注入方式、注入条件および注入材と固結砂の強度との関係については、これまで多くの研究・開発が行われかなり成果をあげてきた¹⁾。

しかし、注入対象地盤の物性と強度増加・止水性などの改良効果との関係については、まだ十分には検討されていない。とくに強度については、一般に注入材が同一の場合、粒度と填充率がほぼ同程度であれば密度の大きい砂層ほど固結体は強くなり、また、密度が一定であれば填充率の上昇で強度も大きくなるとされている²⁾。しかし、地盤の密度が大きいほど薬液が浸透しにくいので填充率が小さくなり、強度も小さくなるとする考え方³⁾もあり、土質条件と強度との関係を評価・予測する手法にはまだ定まった考え方がない。したがって、固結砂の強度と土質条件等について、事前の目標値の設定あるいは事後の測定データに基づく効果確認を行うためには、このような基本的な関係を明確にしておく必要がある。

また、室内実験において、注入条件と填充率や圧縮強さとの関係、土の種類と薬液の浸透性との関係等を定量的に調べようとする際、そのデータのばらつきが多く、明確な傾向が見いだせない場合が多い。

筆者らは、その原因のひとつは、試料土の密度が一定でないことにあると考え、土の投入や締固め方法について砂を用いた種々の実験を行った結果、密度の調整が比

較的容易にできる供試体作製方法を考案した。また、この方法で作成した供試体を用いて、浸透注入による固結砂の密度と強度との関係を比較的高い精度で求める実験を行い、固結砂の強度について知見を得たのでここに報告する。

2. 供試体の作製方法についての実験

従来の供試体の締固め方法⁴⁾では、2 mm 程度の粒径の比較的大きな砂の間隙率を変えるのが困難なばかりでなく、密度分布が一樣な供試体を数多く作製することが困難であった。このため、目標とする間隙率で再現性よく締固める方法が必要となっている。ここでは、標準砂を用いて行った一定の密度を得るための砂の投入方法や締固め方法についての実験結果を述べる。なお、この実験では薬液注入による固結砂の基本的な性状を見るために、標準砂や珪砂などの細粒分を含まないきれいな砂を対象にしている。

(1) 実験概要

a) 締固め方法

モールド ($\phi 5 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$, アクリルパイプ) に密度が一定となるように、豊浦標準砂 (粒度曲線を図-1 に示す) を詰め、砂の締固めは、次の方法 A, および方法 B の 2 つについて行った。

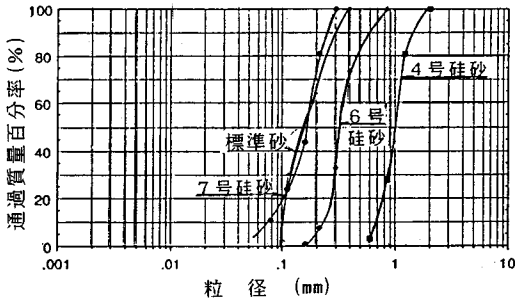
①方法 A : 砂を 3 層に分けて投入し、モールドをハンマーで叩きながら締固める。この方法では、一定量の砂を投入し、所定の高さになるようモールドの側部を軽くハンマーで振動を与える。このため、層数が多くなると、投入砂の計量誤差も増えモールド内のばらつきが大きくなると考えて 3 層としている。

②方法 B : バネ付きのロートに砂を入れ、一定高さより空中落下させて締固める (図-2)。この方法の特徴は、砂の排出につれバネに加わる重量が減るに従い、バネの働きでロートが自動的に上昇して、砂の面との高さが常

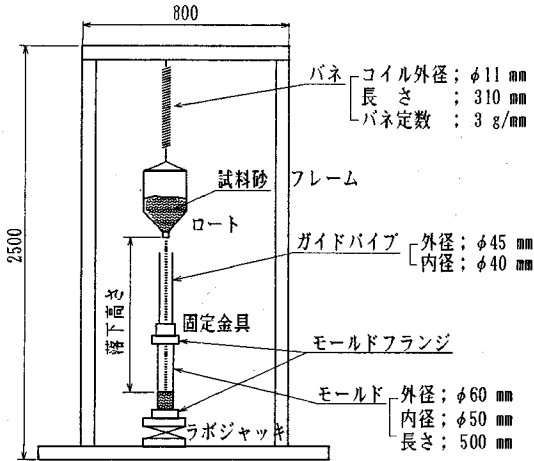
* 正会員 前田建設工業 (株) 技術研究所
(〒179 東京都練馬区旭町 1-39-16)

** 正会員 日本綜合防水 (株) 研究室

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科



図一 使用砂の粒度分布



図二 方法 B の概要 (バネを用いた空中落下法)

に一定に保たれるようにバネ定数を選定することにある。そして、密度の大小は、ロート先端のノズル径および落下高さを調整して行う。

b) 密度の測定⁵⁾

方法 A, B で作製したモールドを湯煎で 80℃ に保温しておく。そして、80℃ で液状になった寒天を 0.5 kgf/cm² でモールド下方から注入する。冷却後固結体を 4 本 (φ5 cm × L 10 cm) に分け、それぞれについて湿潤密度を測定した後、再度加熱しながら寒天のみ除去し、砂の密度を求めた。使用した寒天の性質を表一に示す。

c) 薬液の注入

方法 A, B で締り固めた供試体に、学会基準⁶⁾に準拠した装置を用いて薬液を注入した。水で飽和させた後、ゲルタイム約 15 分の水ガラス系薬液 (表二) を注入した。注入圧は、0.5 kgf/cm² とした。また、全注入量は間隙の 1.2 倍とした。

なお、今回の実験では、全注入量 Q を式 (1) のように表現している。

$$Q = A \cdot Q_0$$

ここで $A : 1.2$

$$Q_0 = (\text{供試体の体積 } V) \times (\text{供試体の間隙率 } n) \times (\text{注入填充率 } \alpha = 100\%) \dots (1)$$

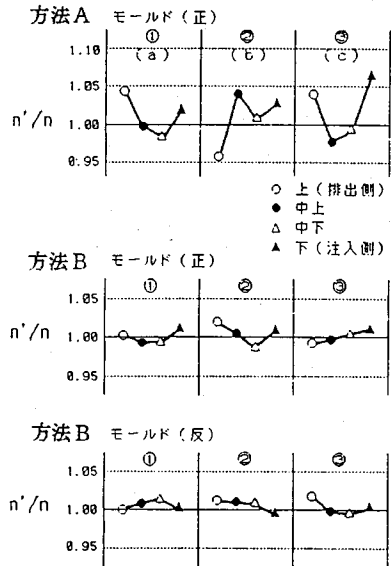
表一 寒天の物性

寒天濃度	温度	粘度
1.0%	80℃	6.7 cps

表二 使用薬液の配合

	A 瓶 (1000 cc)		B 瓶 (1000 cc)			モールドの一方に砂を注ぎ (kgf/cm ²)
	水ガラス	水	硬化剤①	硬化剤②	水	
薬液 I	500 cc	500 cc	30 g	25 g	残	0.8
薬液 II	500 cc	500 cc	50 g	-	残	0.8

硬化剤①: エチレンカーボネイト 硬化剤②: 炭酸水素ナトリウム



図三 間隙率の比 (n'/n)

d) 一軸圧縮試験

薬液注入した長尺モールドの供試体を、1 日後脱型して固結体を 4 本 (φ5 cm × L 10 cm) に分けた。そして、一軸圧縮試験をひずみ速度 1%/min で行った。

(2) 供試体の間隙率の分布

図一3は、砂詰め後のモールド全体の計算上の間隙率 n に対する寒天注入法によって得られた 10 cm ごとの実測間隙率 n' との比 (n'/n) を示したものである。図に示すように、方法 A において人為的な要因を調べるため、3 名が別個に締り固め作業を行ったところ、人間 a, b, c 間で個人差が大きいこと、一本のモールドの上下間でも間隙率のバラつきが 7~9% と大きいことが判った。

一方、図一3の方法 B をみると、モールドの上下間のバラつきは小さく、モールドの上下に密度差が生じることはほとんどない。なお、図中の (反) は、作製したモールドの上下を反転させて下方から寒天注入を行った例を示している。この場合でも誤差が極めて小さいこと

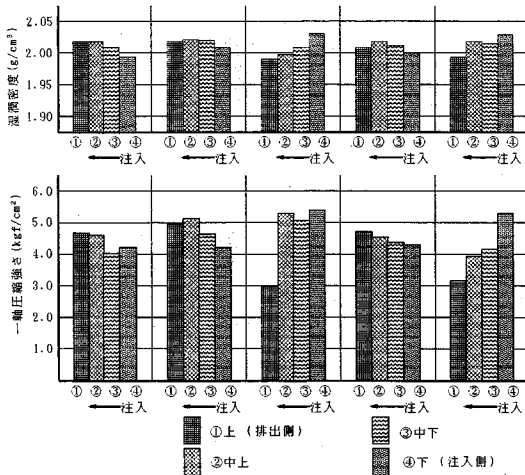


図-4 固結砂の位置と一軸圧縮強さ(方法A)

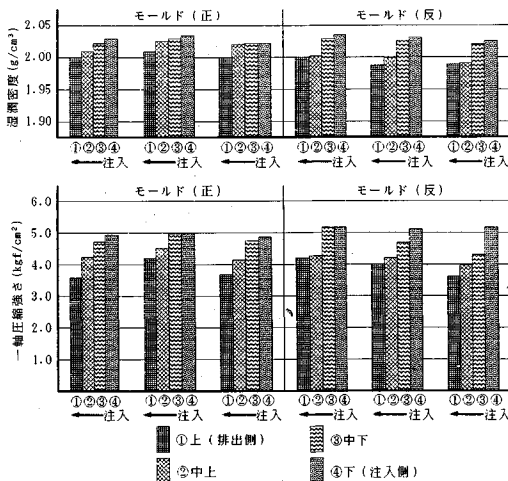


図-5 固結砂の位置と一軸圧縮強さ(方法B)

がわかる。

(3) 注入後の供試体の湿潤密度および一軸圧縮強さ

図-4に方法Aによって作製した供試体に薬液を下方から注入した後の固結砂の湿潤密度と一軸圧縮強さを示す。図中の①~④の数字は4等分して得た供試体の採取位置の上からの順番を示している。この図によれば、供試体の採取位置と一軸圧縮強さとの間には一定の傾向が認められず、再現性が良くない。これは、主にモールド中の砂が均一に締固められていないためと考えられた。

図-5に方法Bによって作製した供試体について、同様な方法で得た固結砂の位置と一軸圧縮強さとの関係を示す。薬液注入後の湿潤密度の値は、注入側で大きくなるが、方法Aに比べると方法Bによるほうが傾向が一致しており、再現性がよいことがわかる。なお、図中の(反)は、作製したモールドの上下を反転して下方

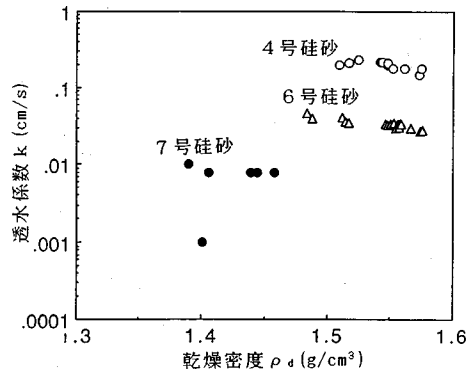


図-6 乾燥密度と透水係数(注入前)

から注入した結果である。薬液の注入による固結砂の湿潤密度および一軸圧縮強さはともに注入側ほど高い値を示す傾向が明確に見られた。

寒天による密度の測定結果によれば、密度はほぼ一定であるので、このような傾向は締固めのバラツキによるものではないことは明かである。この原因としては主として填充率等による影響が考えられる。

以上述べたようないくつかの問題点はあるものの、方法Bによれば供試体を比較的再現性よく締固めができることが判明したので、以降の固結砂の実験は、方法Bによって行うこととした。

なお、注入前の密度および薬液配合を同一にして、填充率の違う固結砂を数多く得ることが、このように長いモールドを用いることによって可能である。なお、注入側からの距離の影響を避けるときは、短いモールドでの注入が適している。

3. 固結砂供試体の一軸圧縮強さに与える要因についての実験

上記の方法Bによって、φ5cm×50cmの長尺モールドに、珪砂4, 6, 7号(各号の粒度曲線を図-1に示す)の供試体を作製した。

そして、供試体を水で飽和させたあと、ゲルタイムが約10分の水ガラス系溶液型薬液(有機硬化剤使用;表-2)を下部から注入した。

そして、養生1日後にこのφ5cm×L50cmの固結砂から、4本のφ5cm×L10cm供試体を取り、透水試験および一軸圧縮試験を行った。なお、全注入量Qは前式(1)で、A=1.0, 1.2, および2.0と設定した。

また、この供試体全体を水で飽和し、供試体下部から通水することにより、透水係数を求めた。図-6はモールド全長の平均密度と透水係数の関係を示している。透水係数kの値は珪砂の種類ごとにオーダが明確に分かれているが、ρ_dの値とはほぼ無関係に一定である。なお、透水係数の値は、珪砂4号では3×10⁻¹cm/s、珪砂6

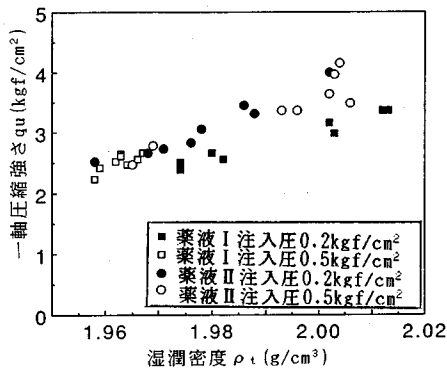


図-7 湿潤密度と一軸圧縮強さ (全注入量 1.2 Q₀)

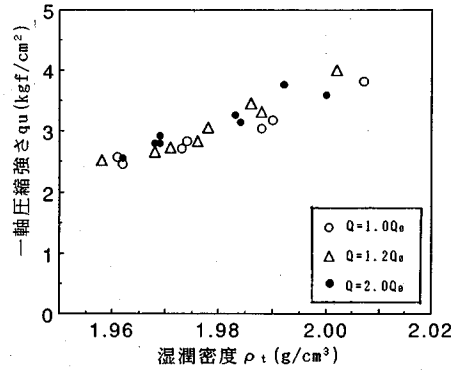


図-8 湿潤密度と一軸圧縮強さ

表-3 実験結果の例

モールド No.	締め(方法B)		注 入 前			薬 液 注 入 後 (1日養生) : 注入圧 0.2kgf/cm ² , 全注入量 1.2Q ₀										備 考
	径φ (mm)	高さ H (cm)	間隙率 n (%)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	相対密度 Dr (%)	供試体 No.	透水性係数 k (cm/s)	湿潤密度 (g/cm ³)	測定値 ρ _t	平均値 ρ _t	一軸圧縮強さ (kg/cm ²)	測定値 qu	平均値 qu	薬液含有量 (mg/100g)	非晶質珪酸含有量の測定	
1	φ3.0	110	40.4	1.555	80	3.0 × 10 ⁻²	1-1	1.972	1.997		3.0	3.3		0.164	77	78
							1-2	1.971			3.2			0.160	76	
							1-3	1.978			3.2			0.188	87	
							1-4	1.986			3.6			0.149	72	
2	φ3.0	120	40.4	1.556	80	3.2 × 10 ⁻²	2-1	1.970	1.983		2.9	3.2		0.145	70	76
							2-2	1.981			2.9			0.131	64	
							2-3	1.984			3.0			0.157	75	
							2-4	1.997			3.8			0.199	91	
3	φ3.0	120	40.3	1.557	81	3.1 × 10 ⁻²	3-1	1.974	1.985		2.9	3.1		0.189	87	87
							3-2	1.984			2.8			0.167	79	
							3-3	1.990			3.0			0.196	90	
							3-4	1.993			3.9			0.203	92	
4	φ4.0	50	42.0	1.514	69	3.6 × 10 ⁻²	4-1	1.934	1.945		2.3	2.7		0.192	85	85
							4-2	1.939			2.5			0.176	80	
							4-3	1.948			2.7			0.187	84	
							4-4	1.959			3.2			0.208	91	
5	φ4.0	50	41.9	1.519	70	3.5 × 10 ⁻²	5-1	1.929	1.942		2.3	2.6		0.159	74	78
							5-2	1.929			2.3			0.176	80	
							5-3	1.943			2.7			0.180	81	
							5-4	1.966			3.1			0.170	78	
6	φ4.0	50	42.1	1.512	68	4.1 × 10 ⁻²	6-1	1.931	1.941		2.1	2.6		0.198	87	85
							6-2	1.940			2.5			0.196	87	
							6-3	1.943			2.7			0.193	86	
							6-4	1.951			3.1			0.174	79	

号では 5×10^{-2} cm/s, および 7 号では $k = 7 \times 10^{-3}$ cm/s 程度になっている。

(1) 薬液の種類および注入圧と一軸圧縮試験結果

方法 B で 7 号で φ5 cm × 50 cm モールドに充填した。そして、表-2 に示す薬液 I および薬液 II を注入圧 0.2, 0.5 kgf/cm² で注入した。図-7 は、湿潤密度の違いによる一軸圧縮強さの差異を注入圧を変えて検討した結果である。注入圧が大きくなると、薬液がモールド内を通過する速度も大きくなる。この図から高強度の薬液 II の方が強度がやや高い傾向がみられるが、注入圧による違いは認められない。注入圧が大きい場合には、乱れや割裂を発生させ強度を低下させる場合も考えられるので、以下の実験では 0.2 kgf/cm² の一定の注入圧で行うこととした。また、薬液については、ゲルタイムが比較的安定し、高強度が得られる薬液 II を用いることとした。

(2) 全注入量 Q と一軸圧縮強さ

今回の実験で全注入量と注入効果を把握するため、7 号の供試体に、薬液 II を全注入量を変えて注入した。

供試体の間隙が薬液で充填されるのに必要な注入量を Q₀ としたとき、全注入量 Q を式(1)の 1.0 Q₀, 1.2 Q₀, 2.0 Q₀ と変え、注入圧 0.2 kgf/cm² で注入した。この時の湿潤密度と一軸圧縮強さの関係を図-8 に示す。この結果によれば、全注入量を大きくしても、qu の値に大きな変化は現れない。充填率 100% と考えられる全注入量 1.0 Q₀ 以上の量の薬液を注入しても、充填率が変わらないことなどが考えられ、必ずしも一軸圧縮強さが増加しないことを示している。

ただし、注入開始の直後に注入配管内の水による希釈が生じるため、1.0 Q₀ の場合は供試体上端部に未固結部のできる場合もあったので、以下の実験では全注入量

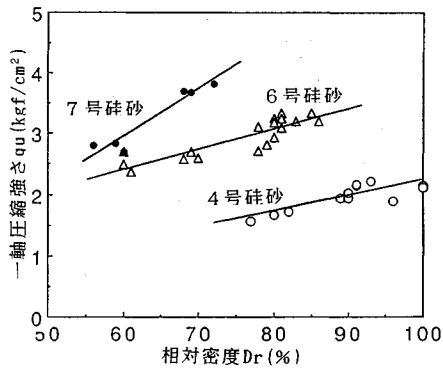


図-9 相対密度と一軸圧縮強さ

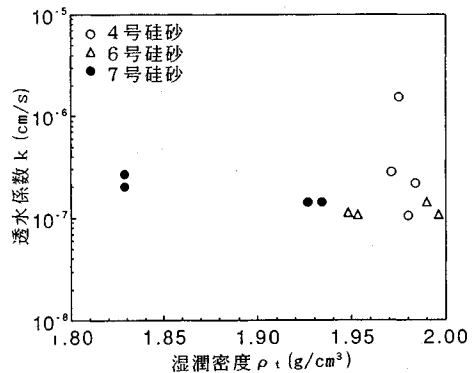


図-11 湿潤密度と透水係数 (注入後)

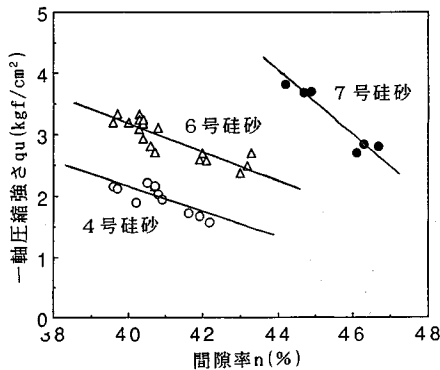


図-10 間隙率と一軸圧縮強さ

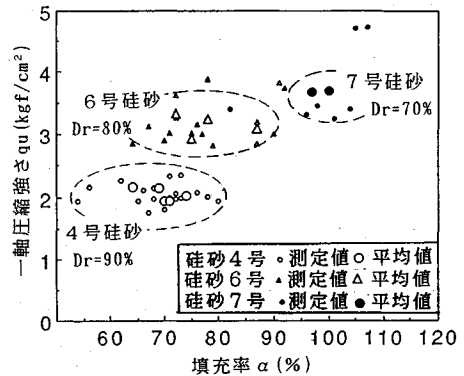


図-12 填充率と一軸圧縮強さ

を $1.2 Q_0$ とすることとした。

(3) 砂の相対密度と一軸圧縮強さ

硅砂 4, 6, 7号それぞれで作成した供試体に、飽和後にゲルタイム約 10 分の薬液 II を一定注入圧 (0.2 kgf/cm^2) で注入した。なお、全注入量 Q は、すべて $1.2 Q_0$ である。硅砂 6号についての実験結果を表-3 に示す。

1 回の注入で 4 本の供試体を取りそれぞれの q_u を求めたが、ここではその平均 q_u で整理し検討した。φ5 cm×50 cm パイプ全長で求めた硅砂の相対密度 D_r (%) と一軸圧縮強さとの関係を図-9 に示す。硅砂の種類ごとにみると、それぞれ D_r に比例して一軸圧縮強さが大きくなる傾向が見られ、その関係はおおのこの硅砂で次のように示される。

- 硅砂 4号 ($D_{10}=0.7 \text{ mm}$)
 $q_u = 0.024 D_r - 0.22$ 相関係数 0.667
- 硅砂 6号 ($D_{10}=0.2 \text{ mm}$)
 $q_u = 0.032 D_r + 0.51$ 相関係数 0.753
- 硅砂 7号 ($D_{10}=0.08 \text{ mm}$)
 $q_u = 0.078 D_r - 1.72$ 相関係数 0.920

砂の種類が同一の場合、 D_r が大きくなるほど一軸圧縮強さは大きい値をとり、粒径の粗いものほどその勾配

はなだらかになる。

相対密度に代わるものとして設計上よく用いられる間隙率 n (%) との関係で示すと図-10 のようになる。この場合、一軸圧縮強さと間隙率との関係は次のようになる。

- 硅砂 4号 ($D_{10}=0.7 \text{ mm}$)
 $q_u = -0.22 n + 10.95$ 相関係数 0.657
- 硅砂 6号 ($D_{10}=0.2 \text{ mm}$)
 $q_u = -0.23 n + 12.29$ 相関係数 0.747
- 硅砂 7号 ($D_{10}=0.08 \text{ mm}$)
 $q_u = -0.50 n + 25.82$ 相関係数 0.917

この結果では、例えば間隙率が 2% 変化すると q_u が大きく異なるばかりでなく、粒径によっても著しく強度が異なるので、実務設計上で砂の間隙率を N 値から推定している現状では、注入後の強度を予測することがかなり難しいことを示唆している。

このため、このような試験によって、砂質土について基本的な性質を把握しておくことが重要になると考えられる。

図-11 には固結砂供試体についての湿潤密度 ρ_w と透水係数 k との関係を示す。試験は、φ5 cm×10 cm の供試体による三軸圧縮試験装置を用いた透水試験⁶⁾を側圧

1.5 kgf/cm²、通水圧 1.0 kgf/cm² で実施した。注入前には前記の図-6 のように砂の種類により透水係数が明確に異なっていたが、注入後は砂の種類に係わらず 10⁻⁷cm オーダでほぼ一定値に低下していることが知られる。

(4) 注入填充率 α と一軸圧縮強さ

填充率と一軸圧縮強さとは関係がある⁷⁾といわれているので、一軸圧縮強さに及ぼす填充率の影響について調べてみた。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であり、理想的な浸透注入では $\alpha=100\%$ になる。砂の各種類について相対密度 D_r が一定の供試体を作り、一軸圧縮試験の終了した供試体の中心部から試料を採取し、原子吸光法による化学分析によって非晶珪酸含有量を測定し、注入填充率 α を求めた⁸⁾。図-12にこの時の填充率 α と一軸圧縮強さ q_u との関係を示す。前記した供試体作成の方法からみても、砂の種類や密度が一定であり、実地盤や模型土槽よりは理想的な注入と考えられるが、表-3に示すように填充率 α は64~90%の値をとっている。

図-12は、填充率 α と一軸圧縮強さ q_u との関係を示したものであるが、一般にいわれる α と q_u の比例的な傾向は認められない。砂の種類毎に、填充率がそれぞれある値以上であれば相対密度が一定のとき、一軸圧縮強さはほぼ一定値と考えて良さそうである。ちなみに、この填充率の値は今回の実験では4号砂で約60%、6号砂で約70%、および7号砂で約90%となっている。

図-9の関係から見れば注入後の一軸圧縮強さは填充率の影響より砂の相対密度により大きく関係していると考えられる。

なお、図-12では粒径が大きいほど填充率が小さくなる結果になっているが、このような傾向が現れる理由については、別途実験を行い検討を加える必要がある。

4. 結 論

以上の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 長尺モールドに砂を締固める場合、一定高さのノズルから砂を落下させる方法Bによれば、現行の試験法

に比べて、均一性が高く、かつ再現性の高い供試体を作製することが可能である。

- 2) 水ガラス系薬液を注入して得られた固結体は、注入口に近い程、その湿潤密度および一軸圧縮強さは高い値を示す傾向が見られた。

- 3) 砂の種類が同一の場合、相対密度が大きくなるほど一軸圧縮強さは大きい値をとる。

- 4) 砂の透水係数は、その粒径によって大きく異なるが、注入後の透水係数はほぼ10⁻⁷のオーダーに減じ、粒径によらずほぼ一定値となる。

- 5) 化学分析による填充率を測定した結果、填充率がある値以上の場合には相対密度が一定であれば、一軸圧縮強さはほぼ一定値となることが知られた。

今回の実験に用いた密度調整の方法によれば、浸透性や強度特性を知るための試験に必要な十分な精度をもつ供試体を作製することができ、固結砂の強度を知るための基本的な実験を行うことが可能となった。

最後に、本研究の実施にあたり多大な協力をいただいた(株)小野田 松井悟氏、日本綜合防水(株)高橋則雄氏、前田建設工業(株)小口深志氏に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) たとえば、建設省土木研究所：薬液注入の評価と開発に関する研究報告書，1979
- 2) 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで，pp.78~84.1985.
- 3) 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，35-5，pp.45~50.1987
- 4) 土質工学会：土質試験の方法と解説，pp.263~270，1990
- 5) 檜垣貫司・C. FRETTI・P. MORABITO：液状寒天注入による乾燥砂の単位体積重量測定，昭和63年度サンプリングシンポジウム，土質工学会，pp.75~82，1989
- 6) 4)と同，p.282
- 7) 北川修三・馬場富雄・瀧永進：注入材のてん充率測定と注入効果に関する室内実験，鉄道技術研究所速報，No. A-85-95，1985
- 8) 3)と同，pp.78~84.

(1992.11.6 受付)

FACTORS AFFECTING THE UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH OF SANDS STABILIZED BY CHEMICAL GROUT

Koji KUMAGAI, Takehiko TOKORO and Eiji YANAGISAWA

A new method of preparing cylindrical specimens for uniaxial compressive strength of sands stabilized were proposed. The method is easy to control the density. Unconfined compression test and permeability test were performed on the specimens prepared by this method and the fundamental characteristics of the sands stabilized by chemical grout were studied. Then the effects of density on the strength were discussed and clear distinction between the effects of chemical grout and the density of sands were confirmed.