

# 薬液注入固結砂の粘着力の 評価方法に関する研究

森川義人

正会員 (株)青木建設 土木本部 土木設計部 (〒150 東京都渋谷区渋谷2-17-3)

薬液注入後の固結砂の強度に関しては、砂の密度や粒径等により定性的に評価されているが、本研究では浸透注入された固結砂の粘着力を、注入された砂地盤の動水半径とホモゲルの引張り強度を用いて定量的かつ客観的に評価する方法を提案した。その結果、ホモゲルの強度特性と砂の粒度特性から固結砂粘着力を簡易に精度よく推定することが可能となった。

**Key Words:** chemical grouting, grouted sand, hydraulic mean radius, cohesion, tensile strength

## 1. まえがき

薬液注入工法は、他の地盤改良工法に比べ施工の簡便性、迅速性に優れているため、都市部のシールド工事や地下構造物工事において、止水性の向上と強度増加による地盤の安定性確保を目的として頻りに利用されている。しかし、この工法は注入後の改良範囲や改良効果を確認することが困難であるという問題点を有している。これはこの工法の特徴である薬液の浸透形態が、地盤性状に左右されるものであり、期待どおりの注入改良体が存在しているとは限らないからである。そこで、注入後の改良効果を評価する場合には、薬液が浸透した領域と浸透していない領域を明確にし、浸透固結した領域の改良物性値を適正に評価した上で、注入対象領域全体の改良効果を判定するべきであると考えられる。本研究では、砂質地盤を対象とし、均一浸透注入された固結体の改良強度を推定する方法として、土質ボーリング調査の粒度分析データを有効に利用し、注入固結砂の粘着力を定量的に評価する方法を提案した。

薬液注入固結砂の強度は、経験的にホモゲルの強度と砂の密度が大きい程、さらには砂の粒径が小さい程、その固結強度は大きいことが知られている。これは定性的な指標にはなるが、定量的指標としては満足されない。注入固結砂の強度について一軸圧縮強度の推定に関する研究<sup>1) 2)</sup>が報告されているが、筆者は浸透注入された固結砂の粘着力を、ホモゲルマトリックスの大きさを表す動水半径<sup>3)</sup>と、ホモゲルの引張り強度を用いて定量的に評価する方法を提案した。その結果、ホモゲルの圧縮、引張り強度と注入地盤の粒度特性値および間隙比から、固結砂粘着力の推定を簡易に行えることが可能となった。

## 2. 注入固結砂粘着力の評価方法

### (1) 砂の間隙と動水半径について

一般に砂質土に浸透注入された固結砂の強度発現は注入により地盤の間隙水が薬液と置換され、粘着力が付与されることによるものであり、注入前の砂の内部摩擦角は注入前後では、薬液の種類にかかわらずほとんど変化しないことが報告<sup>4)</sup>されている。また固結砂の強度は、同じ排水条件で試験を行った場合、強度発現の大きな支配因子は、砂の相対密度、粒径、及びホモゲルの強度であることが経験的に知られている。

薬液注入固結砂の強度発現は、砂の摩擦角によるインターロッキング効果とホモゲルの引張り抵抗力や砂との付着力等による粘着力効果が考えられる。従って同じ応力状態にある固結砂でも、砂の相対密度が大きいならば内部摩擦角は大きくなりインターロッキング効果が発揮され、さらに砂粒子に接している間隙中のホモゲルの表面積(砂の表面積)が大きくなるためにホモゲルが受け持つ応力状態は小さくなり破壊には到らないと考えられる。また、同じ相対密度でも砂の粒径が小さい場合には砂の表面積が大きくなり、同様にホモゲルが受け持つ応力状態は小さくなる。従って砂の相対密度が大きく砂の粒径が小さい程、さらにホモゲルの強度が大きい程、固結砂の粘着力は大きくなる。

注入固結砂の試験条件と粘着力の発現機構に関して報告したもの<sup>5)</sup>や、破壊強度や残留強度について適正な破壊規準の検討について報告したもの<sup>6)</sup>が見られるがこれらの報告からも砂の相対密度(間隙比)と粒径が重要な支配因子であることが示されている。

しかし、砂の相対密度はある砂の間隙変化量の最大値に対する尺度を示したものであり、同じ相対密度でも様々な粒度分布を持つ砂が存在する。従って、粒度

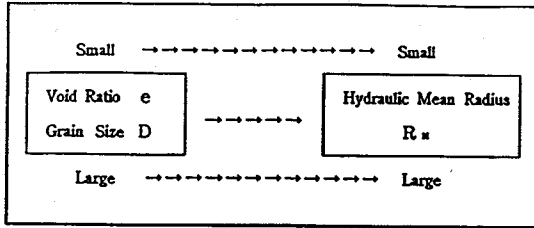


Fig.1 Relationship between  $e$ ,  $D$  and  $R_H$

分布が異なれば、当然砂の表面積が異なるので、前述の考察より固結砂の粘着力が異なってくる。また、砂の粒径について、通常砂は粒度分布を持っているので、特定の代表粒径を選んで同じ代表粒径を持つ様々な粒度分布の砂が存在し、また様々な相対密度の砂が存在するので、同様に固結砂の粘着力が異なる。従って、砂の相対密度と砂の粒径は、互いの要素を包含しているため、注入固結砂の評価をするには定性的には示すことができるが、定量的評価を行うことは困難である。

そこで、前述の考察より砂の表面積は砂の相対密度や砂の粒径、粒度分布を総合的に考慮し、絶対値として表したものであり定量的評価が可能であると考えられる。ところが、砂の表面積を求めるには、粒度分布から計算された比表面積と砂の密度から算出しなければならず煩雑となる。

そこで、注入固結砂の粘着力は砂地盤の間隙を満たすホモゲルの応力状態が大きな要因となることに着目すると、注入中の薬液が土粒子間隙を移動する粘性流であることから、砂地盤の間隙の大きさを表した動水半径について考えてみる。動水半径は式(1)に示されるように、間隙の体積を砂の表面積で除したものであり、変形すると間隙比と粒径の積に比例する。

$$R_H = (e \cdot V_s) / A_s = (e/6) \cdot D \quad (1)$$

ここに  $R_H$ : 動水半径  $A_s$ : 砂の表面積  
 $e$ : 間隙比  $D$ : 粒径  $V_s$ : 土粒子の体積

動水半径は、間隙比と砂の表面積をパラメータとすることで、注入固結砂の粘着力評価の指標値として理論的に整合している。また、結果として砂の間隙比と粒径のみの関係で表される (Fig.1) ことから、通常のボーリング調査より得られる粒度分析データから簡易に求められることも、大きな利点であるといえる。

## (2) 固結砂の強度とホモゲルの強度について

一方、注入固結砂の粘着力の発現に関して実験による考察と検討を行った結果、薬液の配合によりホモゲルの強度特性が脆性を示すものと延性を示すものがあることが分かった。そして圧縮試験の結果、脆性を示

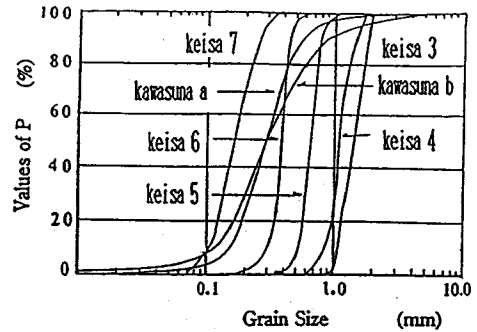


Fig.2 Grain Size Distribution Curve of Sand

Table1 Physical properties of Sands.

Type of Sand	$G_s$	$D_{10}$	$D_{30}$	$U_c$	$e_{min}$	$e_{max}$
keisa 3	2.640	1.08	1.15	1.39	0.747	1.017
keisa 4	2.635	0.85	0.94	1.32	0.740	1.030
keisa 5	2.637	0.52	0.57	1.27	0.715	1.055
keisa 6	2.636	0.30	0.33	1.30	0.700	1.090
keisa 7	2.635	0.10	0.12	1.70	0.679	1.198
kawasuna a	2.725	0.14	0.19	2.34	0.671	1.063
kawasuna b	2.740	0.11	0.16	3.16	0.747	1.389

すホモゲルの固結砂は小さな軸ひずみと著しいひずみ軟化を示し破壊形態も引張りとせん断による分離破壊を示す脆性的破壊が観察された。また、延性を示すホモゲルの固結砂は塑性ひずみの増加に伴う残留応力を示し、破壊形態もせん断すべり破壊が観察された。これらの現象について後に示すような解析・検討を行った結果、注入固結砂の粘着力は薬液が浸透した砂地盤の動水半径とホモゲルの引張り強度を用いることにより、客観的な評価式で表現できることが分かった。

## 3. 実験方法

本研究は、薬液が均一浸透注入した領域の固結砂強度の推定方法に関するものである。薬液は砂質土の浸透注入を行う場合に頻繁に使用されるものを用いて実験を行った。注入固結砂の強度特性を評価するために、実際に浸透注入が可能な範囲の粒度分布を持つ砂を数種類使用し、実際に行われる配合に則した範囲で明確に強度が異なる配合を選んで実施した。

### (1) 使用した材料の物性

#### a) 試料砂

実験は、5種類の三河珪砂と2種類の川砂を使用し砂の粒度分布を Fig. 2、物理定数を Table 1 に示す。

Table2 Proportion of chemical grouts

Type Grout	Proportion		pure Grout $q_{uH}$ ( $kg/cm^2$ )	Gel time (min)
	Sodium silicate (%)	Glyoxal (%)		
A	35	3	0.609	20
B	45	10	5.102	15
C	50	15	14.799	15

Table3 Average of Test Samples (before grouting)

Type of Sand	$e_{min}$		$e_{mid}$	
	e	$D_r$ (%)	e	$D_r$ (%)
keisa 3	0.754	97.4	0.848	62.6
keisa 4	0.751	96.2	0.872	54.5
keisa 5	0.729	95.9	0.867	55.3
keisa 6	0.781	79.2	0.875	55.1
keisa 7	0.719	92.3	0.883	60.7
kawasuna a	0.696	93.6	0.941	31.1
kawasuna b	0.758	98.3	0.879	79.4

## b) 薬液

薬液は溶液型水ガラス系(有機)を用いた。ゲルタイムは注入中に粘性が変化しないように設定した。種類と配合、ホモゲルの一軸圧縮強度( $quH$ )をTable 2に示す。

## (2) 供試体の作製と養生

注入固結砂の供試体は、アクリル製円筒モールドに各試料砂を密詰めと緩詰め2種類で飽和状態に作製し薬液を注入した。密詰めは各砂の最小間隙比 $e_{min}$ になるように、緩詰めは各砂の中間間隙比 $e_{mid}$ ( $e_{min}$ と $e_{max}$ の平均値)になるように乾燥密度を規定して作製した。砂の投入は水締めにより行い砂投入後 $0.1 \sim 0.2 kgf/cm^2$ ( $9.8 \sim 19.6 kPa$ )で水を500cc通し飽和状態にした。薬液の注入圧力は、密詰めは $0.5 kgf/cm^2$ ( $49 kPa$ )、緩詰めは $0.2 kgf/cm^2$ ( $19.6 kPa$ )で行い、注入後3時間以上静置した後脱型し、密封水浸( $20^\circ C$ )により材令7日間の養生を行った。供試体作成方法等の詳細は文献<sup>7)</sup>を参照されたい。作成された試料砂供試体の諸元等(平均値)をTable 3に示す。

## (3) 試験方法

## a) 一軸圧縮試験

ホモゲル、及び固結砂の供試体は $\phi 5 cm \times 10 cm$ に成形し、ひずみ制御1%の速度で載荷した。

## b) 三軸圧縮試験

固結砂の供試体は $\phi 5 cm \times 10 cm$ に成形し、ひずみ制御1%の載荷速度でUU試験を行った。側方拘束圧

Table4 Typical Angle of Internal Friction

Type of Sand	Angle of Internal Friction	
	$e_{min}$	$e_{mid}$
keisa 3	32	23
keisa 4	32	24
keisa 5	34	24
keisa 6	38	23
keisa 7	37	22
kawasuna a	40	32
kawasuna b	29	25

$\sigma_3$ は $0.5 kgf/cm^2$ ( $49 kPa$ )、 $1.5 kgf/cm^2$ ( $147 kPa$ )、 $2.5 kgf/cm^2$ ( $245 kPa$ )で行った。

## c) Brazilian試験

ホモゲル、及び固結砂の引張り強度を測定するため、Brazilian試験を行った。岩石の引張り強さ試験法(JIS M 030)では供試体の直径:長さ=1:0.8~1.2となっており、本実験では直径:長さ=1:1とした。

## 4. 実験結果

## (1) 圧縮試験の結果

注入固結砂の強度特性は、ホモゲルによる見かけの粘着力の増加と砂の内部摩擦角 $\phi$ による摩擦抵抗力によるものである。そこで、固結砂の粘着力 $c$ は一軸圧縮強度 $q_u$ と三軸圧縮試験(UU)より得られた摩擦角 $\phi$ から $c = (qu / 2) \tan(45 - \phi / 2)$ から求めた。そして摩擦角 $\phi$ は、ホモゲルの強度が異なっても同一相対密度における本研究に使用した薬液の配合の範囲では同じような値を示した。各固結砂の $\phi$ の平均値をTable 4に示す。ここで、ホモゲル強度の小さい場合には、三軸UU試験による粘着力は、一軸圧縮強度 $q_u$ より計算される粘着力より大きくなると報告されている<sup>9)</sup>が、本実験に使用した薬液の配合では、珪砂7号を除いた薬液Aの場合には同様な傾向が見られたが、薬液Cに関しては、一軸圧縮強度 $q_u$ より計算される粘着力の方が少し大きめの値を示した。

## (2) 注入固結砂の動水半径について

注入固結砂の粘着力の評価に動水半径を用いれば、前述のように砂の間隙比と粒径のみを求めればよく、簡易で便利な指標値である。しかし、式(1)は粒径が均一な粒子の集合体によるモデルを理論的に求めたものであり、実際の砂は様々な粒度分布が存在する。代表となる粒径は、透水係数の推定に用いられる $D_{10}$ (Hazenの方法)や $D_{20}$ (Creagerの方法)が適していると考えられる。そこで代表径が同じであっても粒度分布により砂の比表面積は異なるので、代表径のモデルを比表面積による補正をする必要がある。粒度

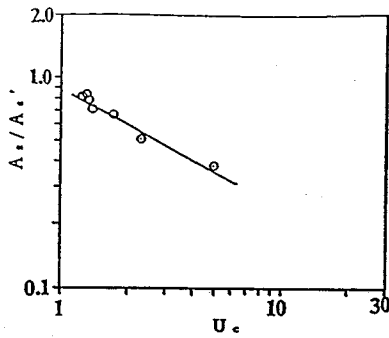


Fig. 3 Relationship between  $U_c$  and  $A_s / A_s'$

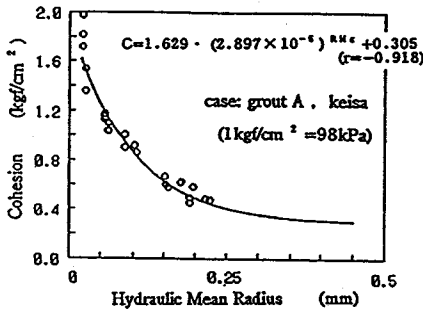


Fig. 4 Relationship between Cohesion and Hydraulic Mean Radius

分析から砂の比表面積  $A_s$  を求める。一方  $D_{10}$  以上全て  $D_{10}$  の均一径とした砂の比表面積  $A_s'$  を求める。その比  $A_s / A_s'$  は Fig. 3 のように均等係数  $U_c$  と相関性があり、砂の比表面積の補正係数を均等係数  $U_c$  の関数で求められる  $\lambda (=A_s / A_s')$  とした。また、代表径を  $D_{10}$  とすると細粒分の状態により多少の誤差を生じる場合もあり、20% 粒径  $D_{20}$  で整理した。注入固結砂の動水半径を  $R_{Hg}$  と表すと式 (2) になる。

$$R_{Hg} = (1/\lambda) \cdot (e_s/6) \cdot D_{20} \quad (2)$$

ここで、  
 $R_{Hg}$ : 注入固結砂の動水半径  
 $\lambda$ : 補正係数 ( $\lambda = 0.897 \cdot U_c^{-0.649}$ )  
 $e_s$ : 固結砂の間隙比  
 $D_{20}$ : 20% 粒径

### (3) 注入固結砂の動水半径と粘着力の関係

薬液 A を注入した珪砂による固結砂の粘着力  $c$  と、動水半径  $R_{Hg}$  の関係を Fig. 4 に示す。ここで固結砂の動水半径  $R_{Hg}$  が大きくなり、ホモゲルの占める割合が大きくなるに従い、固結砂の粘着力  $c$  はホモゲルの粘着力に近づくと考えられるので、 $c = c_H$  を漸近線とする指数曲線を最小自乗法により求めた。ホモゲル粘着力  $c_H$  は摩擦角  $\phi = 0$  であり  $c_H = q_{uH}/2$  で求められる。薬液 A の粘着力は Table 2 で示す一軸圧縮強度  $q_{uH}$  より  $c_H = 0.305 \text{ kgf/cm}^2$  (29.89kPa) である。

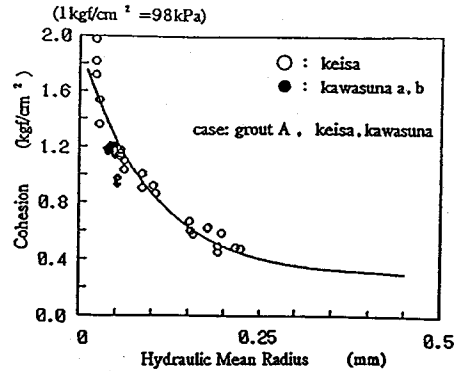


Fig. 5 Relationship between Cohesion and Hydraulic Mean Radius

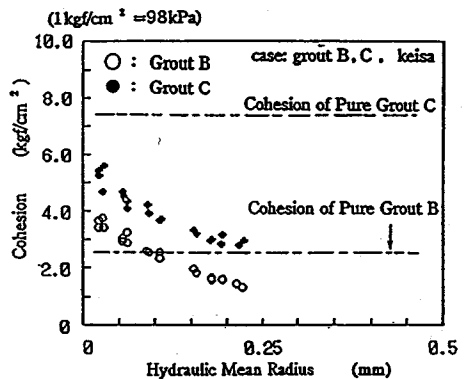


Fig. 6 Relationship between Cohesion and Hydraulic Mean Radius

図より注入固結砂の粘着力  $c$  は固結砂の動水半径  $R_{Hg}$  とホモゲル粘着力により評価できることが分かった。

### (4) 粒度分布の異なる砂に対する検討

砂の粒度分布が異なる場合について、薬液 A を用い同様に整理してみると Fig. 5 のようになる。これより、粒度分布の異なる砂に対しても、前述の式 (2) に示したように均等係数  $U_c$  により計算される補正係数  $\lambda$  を考慮すれば、十分適用し得ることが分かった。

### (5) ホモゲル強度の異なる固結砂の検討

#### a) ホモゲル及び固結砂の脆性破壊

薬液 B, C により注入された固結砂の粘着力  $c$  を、各々動水半径  $R_{Hg}$  - 粘着力  $c$  座標にプロットする。また各々ホモゲルの粘着力  $c_H$  を、 $c_H = q_{uH}/2$  により求め一点鎖線で示すと Fig. 6 のようになる。図より薬液 B の場合は動水半径  $R_{Hg}$  が約 0.1mm より大きな範囲では、固結砂の粘着力  $c$  の方がホモゲルの粘着力  $c_H$  よりも小さくなった。薬液 C の場合は、実験し

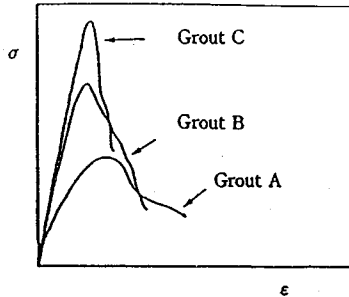


Fig.7 Typical Stress-Strain Curve (grouted sand)

た全ての固結砂の粘着力 $c$ が、ホモゲルの粘着力 $c_H$ よりも小さくなった。これらの結果から、薬液B、Cにおいては、 $c = c_H$ を漸近線とする指数曲線は適用できないことになる。

そこで、これらの供試体の破壊状態と応力-ひずみ曲線を観察してみると次のようになった。

<破壊状態>

- ① 薬液Aによる固結砂は、薬液B、Cの場合に比べて、せん断破壊面と最小主応力作用面のなす角が大きく、リュダース線<sup>9)</sup>が見られる。また軸方向ひずみ、側方向ひずみ共に大きい。
- ② 薬液Bによる固結砂は、薬液Cほどではないが粒径の小さな砂の場合、せん断破壊面と最小主応力作用面のなす角が小さく、軸方向ひずみ、側方向ひずみ共に薬液Aに比べて小さい。
- ③ 薬液Cによる固結砂は、粒径の小さな砂の場合には縦割れを、粒径の大きな砂の場合には細かい縦割れが多数現れる軸方向の分離破壊を示した。また軸方向ひずみ、側方向ひずみ共最も小さい。

<応力-ひずみ曲線>

- ① 薬液Aによる固結砂は、薬液B、Cの場合に比べて弾性係数が小さく、最大応力の手前から塑性ひずみが見られる。最大応力を過ぎると緩やかなひずみ軟化を示し、残留応力が見られる。
- ② 薬液Bによる固結砂は、薬液AとCの中間的な弾性係数を示し、最大応力直後はやや急激なひずみ軟化を示すが、しだいに緩やかになる。
- ③ 薬液Cによる固結砂は、最も大きな弾性係数を示し、最大応力を過ぎると急激なひずみ軟化を示し、残留応力はほとんど見られない。

それぞれの薬液を用いた固結砂の応力-ひずみ曲線の例を Fig. 7 に示す。

これらの観察結果から、薬液Cにより注入された固結砂は、引張り応力による破断や分離をきたし、急激に破壊に到る脆性破壊を示す。それに対して薬液Aにより注入された固結砂はせん断応力によりせん断面が形成され、残留応力に伴う塑性ひずみを生じて破壊す

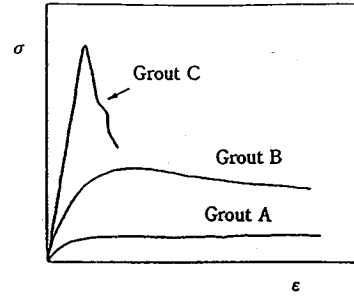


Fig.8 Typical Stress-Strain Curve (Pure Grout)

る準脆性破壊（脆性と延性の中間的な特徴）<sup>10)</sup>を示す。また、薬液Bにより注入された固結砂は、薬液Aによるものよりは、脆性的特徴が強いようである。

一方、各薬液のホモゲルの一軸圧縮試験の状態を示すと次のようになる。

- ① 薬液Aは、軸方向ひずみ、側方向ひずみ共に大きく増大し、破壊面が生じることなく変形していく。また、塑性ひずみに伴い、ある軸圧縮応力に達した後は、ほとんど一定応力のまま塑性ひずみが増大していく。
- ② 薬液Bは、薬液Aと同様な変形を示すが、ある軸圧縮応力に達した後は、非常に緩やかなひずみ軟化を示すが、破壊面が生ずることはない。
- ③ 薬液Cは、縦方向のクラックがいくつか発生し破断片が周囲に飛散して最終的に破壊する。また、小さな軸ひずみによる最大応力の後は、急激なひずみ軟化を示し、破壊に到る。

それぞれの薬液によるホモゲルの応力-ひずみ曲線を Fig. 8 に示す。

以上より、薬液Aは塑性ひずみのみが増大し、破壊に到らないことより延性材料である。また、薬液Cは引張り応力による瞬時の破壊を示すことから脆性材料であり薬液Bは、延性に近い性質を示している。

b) 注入固結砂の引張り破壊の検討

注入固結砂の一軸圧縮試験、及び三軸圧縮試験の結果から、注入固結砂の破壊形態は、注入されたホモゲルの破壊特性により大きく異なることが分かった。ホモゲルが脆性を示す場合には、固結砂の破壊は脆性的な破壊形態を示し、ホモゲルが延性を示す場合には、固結砂の破壊形態は準脆性を示す。ここで、注入固結砂はゲルマトリックスと砂粒子の複合材料であるからホモゲルのみの破壊特性と、砂地盤自身が持つせん断特性（ $\phi$ によるせん断抵抗力）のうち、より強い支配力を持つ方が固結砂の破壊特性を示すと考えられる。これは、固結砂の相対密度とホモゲル強度の大きさにより支配力の差が現れると考えられる。

そこで、前述の Fig. 6 の結果について考えてみる。

Table5 Compressive Strength and Tensile Strength (Pure Grout)

Type of Grout	$q_{UH}$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\sigma_{UH}$ kgf/cm <sup>2</sup>	Brittle coefficient $\frac{B}{\sigma_{UH}}$
A	0.609	0.286	2.13
B	5.102	0.563	9.06
C	14.799	1.217	12.16

Table6 Compressive Strength and Tensile Strength (Grouted Sand)

Type of Sand	Type of Grout	$q_u$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\sigma_t$ kgf/cm <sup>2</sup>	Brittle coefficient $\frac{B}{\sigma_t}$
keisa 3	A	1.833	0.361	5.078
	C	10.817	1.471	7.354
keisa 5	A	3.645	0.570	6.395
	C	15.561	1.781	8.737
keisa 7	A	7.365	1.155	6.377
	C	21.842	2.990	7.305

薬液Cを用いた固結砂は動水半径 $R_{Hs}$ の大きさにかかわらず、粘着力cはホモゲルの粘着力 $c_H$ より常に小さい値を示している。また、この薬液を用いた固結砂は脆性破壊を示す。脆性破壊はある応力状態において微細なクラック先端の引張り応力集中によるクラックの成長が破壊を進行させるという Griffith 理論<sup>11)</sup>によって説明されている。(引張り応力 $\sigma_{UH}$ )/(せん断応力 $\tau_0$ ) << 1 から引張り分離が優先<sup>12)</sup>し最小主応力が材料の引張り強度に達すれば引張り破壊が発生する。最大及び中間主応力は、引張り強度に影響を及ぼさないことから、ホモゲルおよび固結砂の破壊形態と Fig. 6 の結果から判断して、漸近線をホモゲルの粘着力 $c_H$ とするのは誤っており、ホモゲルの引張り強度 $\sigma_{UH}$ で評価の方が良いと考えられる。薬液Bの場合も、動水半径が $R_{Hs}=0.1mm$ を境にして固結砂の粘着力cとホモゲルの粘着力 $c_H$ の大きさが逆転しており、引張り強度で評価の方が良いと考えられる。そこで、ホモゲル及び注入固結砂の引張り強度を求めるため、Brazilian 試験を行った。Table. 5 にホモゲルの結果を示す。Brazilian 試験は供試体の載荷軸方向の破断面に直交する方向には引張り応力の3倍の圧縮応力が生じ、圧縮強度が引張り強度の3倍以下の材料については不適である<sup>13)</sup>ので、薬液Aのような延性を示す材料は行えないが、完全な延性材料ではないので参考値として行った。なお Table. 5 には一軸圧縮強度と脆性度(圧縮と引張り強度の比)<sup>14)</sup>を併記する。また Table. 6 は注入固結砂の結果で、薬液A, Cの珪砂3, 5, 7号について同様に示す。

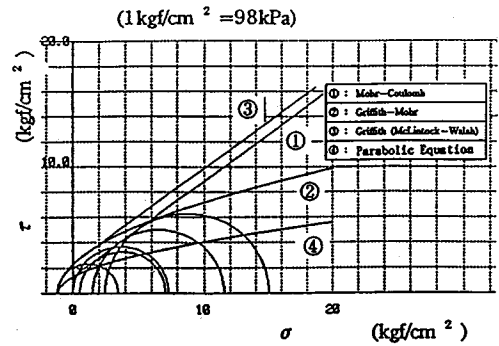


Fig.9 Typical Mohr's circle and various Failure criterion (Grout A,  $e_{min}$ );

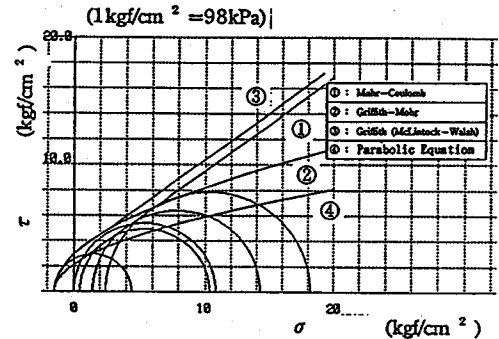


Fig.10 Typical Mohr's circle and various Failure criterion (Grout C,  $e_{min}$ );

c)破壊基準による解析

注入固結砂の破壊形態は、前述の固結砂とホモゲルの破壊特性の考察から、引張りによる破壊、せん断による破壊、あるいは引張りとせん断が組み合わせられた破壊が考えられる。そこで、式(3)~式(6)に示すような、引張り応力から圧縮応力までを考慮した、二次元応力による破壊基準について Mohr 円との関係を検討することとした。

① Mohr-Coulomb の破壊基準

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3)$$

ここで、 $\tau$ :せん断応力  $C$ :粘着力  
 $\sigma$ :垂直応力  $\phi$ :内部摩擦角

② Griffith 基準による Mohr の包絡線<sup>15)</sup>

$$\tau^2 = 4 \sigma_t (\sigma_c - \sigma) \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_c$ :引張り応力

③修正 Griffith の破壊基準<sup>16)</sup>

$$\tau = 2 \sigma_t + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

④放物包絡線<sup>17)</sup>

$$\tau^2 = \tau_0^2 (1 - \sigma / \sigma_t) \quad (6)$$

ここで、 $\tau_0$ :せん断強度(粘着力)

各破壊基準線を式(3)~(6)により求め、薬液Aによる密詰めと緩詰め、薬液Cによる密詰めと緩詰め、薬液Bによる密詰めと緩詰め、薬液Cによる密詰めと緩詰め、薬液A, Cの珪砂3, 5, 7号についてそれぞれ Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示す。

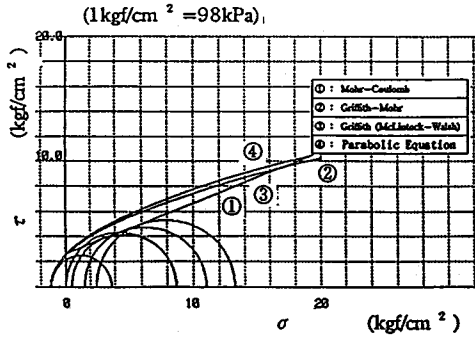


Fig. 11 Typical Mohr's circle and various Failure criterion (Grout C,  $e = 1.4$ )

Fig. 9～Fig.11 について、各破壊基準と Mohr 円との関係についてその特徴を示す次のようになる。

- (1) 薬液 A, C による密詰め固結砂は、放物包絡線が全ての Mohr 円を横切り、Mohr-Coulomb の破壊基準は Brazilian 試験の Mohr 円を横切る。一方、薬液 C による緩詰め固結砂は Griffith-Mohr の包絡線、放物包絡線共に Mohr 円の上方に位置し Mohr-Coulomb の破壊基準でも、Brazilian 試験の Mohr 円の上方に位置し横切ることではない。
- (2) 薬液 A, C による密詰め固結砂は、 $c < 2\sigma_t$  となり、修正 Griffith の破壊基準は成立しないが薬液 C による緩詰め固結砂は  $c = 2\sigma_t$  となり、圧縮側では Mohr-Coulomb の破壊基準となり、修正 Griffith の破壊基準が成立する。
- (3) 引張りから圧縮まで全ての Mohr 円の破壊基準線を想定した場合薬液 C による密詰め固結砂の場合は Griffith-Mohr の包絡線に近く、薬液 C による緩詰め固結砂の場合は 修正 Griffith の破壊基準に近くなる。また粒径の大きな砂の固結砂ほど Griffith-Mohr の破壊基準に近い。

以上より脆性破壊を示すホモゲルの固結砂は、動水半径が大きくなるに従い修正 Griffith の破壊基準(式(5))さらに、Griffith-Mohr の破壊基準(式(4))に適合していくことが分かる。Griffith 理論は引張り応力によるクラック発生の初期の状態を示したものであり、間隙を満たすホモゲルのクラック発生を意味する。間隙中のホモゲルは、砂粒子によって応力を伝達されるため、脆性破壊を示すホモゲルは引張り強度に達する応力状態で瞬時にクラックが発生する。拘束圧の小さな範囲ではすぐ破壊に到るが、拘束圧が大きくなるに従いクラックが圧着し砂粒子の摩擦抵抗力が卓越してせん断破壊の形態を示すようになると考えられる。また動水半径が大きい程ホモゲルの引張り破壊が卓越しホモゲルの引張り強度に近づくと考えられる。

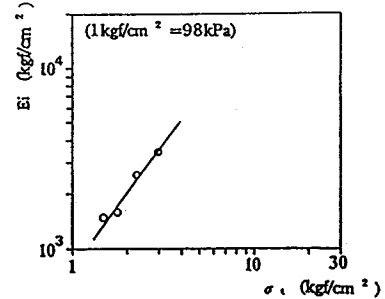


Fig. 12 Relationship between  $E_i$  and  $\sigma_t$

#### d) 初期弾性係数と引張り強度

二次元応力による破壊基準と Mohr 円の関係から薬液 C のようなホモゲルの脆性破壊を示す薬液による固結砂は、拘束圧の小さい範囲ではホモゲルの引張り強度が支配的であることが分かった。そこで Griffith 理論はクラック先端の応力集中による微視的な破壊であり、発生する引張り応力を式(7)のように定義<sup>19)</sup>している。

$$\sigma_t = (2\gamma E / \pi c)^{1/2} \quad (7)$$

ここで、

- $\sigma_t$  : 引張り応力
- $\gamma$  : 表面エネルギー
- $c$  : クラックの長さ
- $E$  : 弾性係数

脆性破壊を示す注入固結砂は、前述のように間隙を満たすホモゲルの引張り破壊が支配的であるが、拘束圧や砂の相対密度が大きくなると砂の内部摩擦角によるせん断変形特性が生じ、破壊に近づくとせん断応力による塑性変形のために非線形弾性を示す。ホモゲルのクラック発生による固結砂の破壊は応力-ひずみ曲線の初期の状態を示していると考えられることから、初期弾性係数について解析してみる。

式(7)より引張り応力  $\sigma_t$  の2乗は弾性係数  $E$  と比例関係にあることから、固結砂について両者の関係を調べることにする。三軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線を Condner により示されている双曲線(式(8))で近似<sup>19)</sup> 初期弾性係数を求めた。

$$\begin{aligned} \epsilon / (\sigma_1 - \sigma_3) &= a + b\epsilon \\ E_i &= 1/b \end{aligned} \quad (8)$$

薬液 C を用いた固結砂の初期弾性係数  $E_i$  と引張り応力  $\sigma_t$  の関係を Fig. 12 に示す。図より、薬液 C による固結砂の引張り応力  $\sigma_t$  と初期弾性係数  $E_i$  は両対数目盛で直線関係となることが分かる。従って、固結砂の応力-ひずみ関係の初期の変形特性は引張り強度による影響が大きいことが分かる。

固結砂全体の破壊は、引張りとせん断の複合した破壊特性を示すようになる。しかし実験結果より、緩詰め砂のように相対密度の小さい場合や、粒径が大き

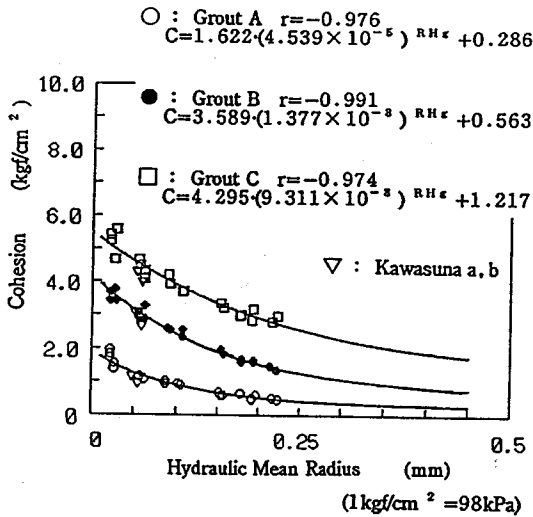


Fig.13 Relationship between Cohesion and Hydraulic Mean Radius

い場合には、固結砂の動水半径 $R_{H\epsilon}$ が大きく（ホモゲル部分の占める割合が多く）なるので、薬液Cのような脆性破壊を示す薬液による固結砂は、ホモゲルの引張り破壊が固結砂全体の破壊を支配するようになると考えられる。さらに、動水半径が大きくなりほとんどホモゲルが占める状態になると、ホモゲルの引張り破壊が全体の破壊に到るようになると考えられる。従って Fig. 6 の場合は  $c = \sigma_{tH}$ （ホモゲルの引張り強度を漸近線とする指数曲線を適用するべきである。

ところで薬液Aを用いた固結砂の場合は、Fig. 9の結果に示されるように、引張り応力を考慮した破壊基準からはずれるので、ホモゲルの粘着力 $c = c_H$ を漸近線とすることに矛盾しない。しかし Table 5 より薬液Aの場合はホモゲルの粘着力 $c_H$ と引張り強度 $\sigma_{tH}$ がほとんど違わないことより、 $c = \sigma_{tH}$ を漸近線としても、問題は無いといえる。

## 5. 注入固結砂粘着力の評価式

### (1) 粘着力の評価式

前述に示した検討の結果から、注入固結砂の動水半径 $R_{H\epsilon}$ が大きくなる（固結砂中のホモゲルの占める割合が大きくなる）に従い、固結砂の粘着力 $C$ はホモゲルの引張り強度 $\sigma_{tH}$ に近づくと考えられるので、各薬液ごとに $c = \sigma_{tH}$ を漸近線（ホモゲルのみの強度）とする指数曲線を最小自乗法により求めると、Fig.13に示す実線のようにになった。実線で示される曲線は各薬液共、図に示すように非常に強い相関性を示した。以上より、注入固結砂の粘着力 $C$ は、ホモゲル強度の

違い、及び相対密度や粒度分布の異なる砂について、式(9)に示す一般式で表現できることが分かった。

$$c = A \cdot B^{RH\epsilon} + \sigma_{tH} \quad (9)$$

ここで、

$$A, B : \text{定数} (A > 0, 0 < B < 1)$$

### (2) ホモゲルの強度特性と定数A, Bの関係

次に式(9)における、定数A, Bの内容について検討してみる。この評価式を変形すると式(10)のようになる。

$$c - \sigma_{tH} = A \cdot B^{RH\epsilon} = f(R_{H\epsilon}) \quad (10)$$

式の左辺は固結砂とホモゲルのみのせん断強度の差を表している。右辺は砂の条件により決定される動水半径による関数の形で表される。動水半径 $R_{H\epsilon}$ は砂の相対密度や粒径、粒度分布といった粘着力発現に関する砂の条件を備えたものであるので、定数A, Bで表される関数 $f$ はホモゲルの強度特性により決定されるものであると推察される。ホモゲルの強度特性については、Table 5に示した通りであるが、この結果と定数A, Bについて検討してみると次のようになる。

式(10)について $\sigma' = c - \sigma_{tH}$ とおき、整理すると式(11)のようになる。

$$\log \sigma' = \log B \cdot RH\epsilon + \log A \quad (11)$$

ここで、動水半径 $R_{H\epsilon}$ が非常に小さい場合（すなわち溶液型水ガラス系薬液の注入限界の状態になる）、

$\log \sigma' \approx \log A$ となる。従って、定数Aはホモゲルの引張り強度と関係があることが考えられる。一方、動水半径 $R_{H\epsilon}$ が大きくなるに従い $\log \sigma'$ に影響を及ぼすようになるが、注入固結砂はホモゲルと砂の複合材料であることから、式(12)に示す複合則に従い検討してみる。注入固結砂中のホモゲルマトリックスと砂が生じるひずみ $\epsilon$ は等しいと考えるならば、等ひずみの複合則<sup>20)</sup>が成立する。

$$\sigma = E_H \cdot \epsilon \cdot V_H + E_S \cdot \epsilon \cdot (1 - V_H) \quad (12)$$

ここで、

$E_H$  : ホモゲルの弾性係数

$E_S$  : 砂の弾性係数

$V_H$  : ホモゲルの体積含有率

ここで式(11)の動水半径 $R_{H\epsilon}$ は、式(12)の体積含有率 $V_H$ を表していると考えられる。まず、ホモゲル強度が小さく延性を示す材料ならば、ホモゲルの弾性係数 $E_H$ は砂の弾性係数 $E_S$ よりも小さいので、複合材の応力 $\sigma$ は相対密度の大きさにより変化する砂の弾性係数 $E_S$ の影響が大きくなる。しかし砂の弾性係数 $E_S$ は砂のインターロッキングとダイレイタンスーからなる摩擦角 $\phi$ の大きさに起因するものである。それに対してホモゲル強度が大きく、脆性を示す材料ならば、ホモゲルの弾性係数 $E_H$ は拘束圧が小さい範囲内では砂の弾性係数 $E_S$ よりも大きくなり、摩擦力によるせん断抵抗力よりも間隙中のホモゲルの引張り



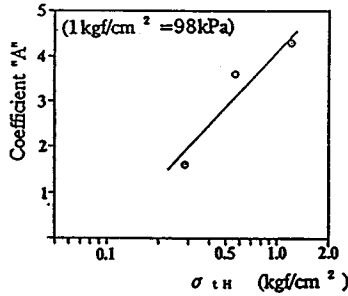


Fig.14 Relationship between A and  $\sigma_{tH}$

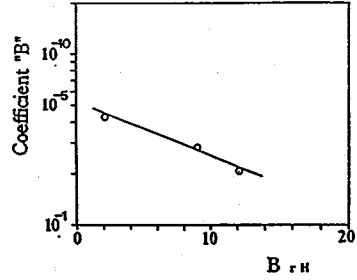


Fig.15 Relationship between B and  $B_{rH}$

ホモゲル強度 $q_{uH}, \sigma_{tH}$	粒度特性値 $D_{20}, U_c$	間隙比 $e_g$
---------------------------------	------------------------	--------------

↓

注入固結砂粘着力  $c$

◇注入固結砂の粘着力  $c$

$$c = A \cdot B^{R_{H\#}} + \sigma_{tH}$$

ただし、 $A = f(\sigma_{tH})$   
 $(A = 4.181 \cdot \log \sigma_{tH} + 4.144)$   
 $B = f(B_{rH})$  ( $B_{rH} = q_{uH} / \sigma_{tH}$ )  
 $(\log B = 0.228 \cdot B_{rH} - 4.851)$

ここで、 $R_{H\#} = (1/\lambda) \cdot (e_g/6) \cdot D_{20}$   
 ただし、 $\lambda = A_s/A_s' = 0.897 \cdot U_c^{-0.549}$

$c$ : 注入固結砂の粘着力 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{tH}$ : ホモゲルの引張り強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $\lambda$ : 補正係数  
 $U_c$ : 均等係数  
 $e_g$ : 固結砂の間隙比  
 $D_{20}$ : 20% 粒径

Fig.16 Means to estimate Cohesion of permeation grouted sand

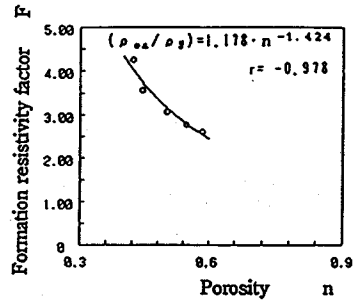


Fig.17 Relationship between F and n

## 6. 注入固結砂の間隙比 $e_g$ について

固結砂の動水半径について、 $\lambda$ は前述のように均等係数  $U_c$  で求めることができ  $D_{20}$  と共に通常の土質調査の粒度分析の結果、容易に求められるものである。ところが  $e_g$  に関しては、注入前のサンプリングで砂の不攪乱試料を採取することは非常に難しく、仮に得られたとしても正確性を欠くものである<sup>21)</sup>。また、間隙比  $e$  を  $N$  値で推定する方法もある<sup>22)</sup> が、いずれも注入される場所の値を表しているとは限らない。一方、薬注される地盤が、関連する工事の掘削・埋戻しや過去の工事において乱されている場合が少なくない。このような場合には、実際に注入されている地盤の相対密度を知るための調査が必要になる。注入された地盤の間隙比  $e_g$  を求める方法として電気比抵抗法の利用が考えられる。電気比抵抗法は注入効果の確認手段として有用性があることは文献<sup>23)</sup> 等で報告されており、本研究でも電気検層利用の可能性が示唆された。

水ガラス系薬液が浸透注入された固結砂の電気比抵抗を測定した結果、G. E. Archie により経験的に求められた地層比抵抗係数  $F$ <sup>24)</sup> と固結砂の間隙率に相関性があることが認められた (Fig.17 に示す)。

応力  $\sigma_{tH}$  の影響が大きくなる。また、ホモゲルの引張り応力  $\sigma_{tH}$  はホモゲルが受ける圧縮応力とホモゲルの脆性度により決定され、ホモゲルが受ける圧縮応力は動水半径  $R_{H\#}$  に依存するため、脆性度が大きいほど動水半径  $R_{H\#}$  の差が固結砂強度へ与える影響は大きい。

以上の考察から調べてみた結果、係数  $A$  については、Fig.14 に示すようにホモゲルの引張り強度  $\sigma_{tH}$  と関係があり、また係数  $B$  については、Fig.15 に示すようにホモゲルの脆性度  $B_{rH}$  との関係が認められた。

### (3) 注入固結砂粘着力評価式の提案

以上より、浸透注入された固結砂の粘着力  $c$  の定量的評価方法を Fig.16 に示す。粘着力の推定に必要な内容は、ホモゲル強度と砂地盤の粒度特性値および間隙比であり、簡易で実用的であると考えられる。

## 7. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

(1) 溶液型水ガラス系薬液で浸透注入された固結砂の粘着力の推定方法として、固結砂の動水半径 $R_{H\&}$ とホモゲルの引張り強度 $\sigma_{tH}$ を用いた評価式を提案した。この評価式により、ホモゲル強度の違いや相対密度、粒度分布の異なる砂について浸透注入が可能な粒度分布を持つ砂について定量的に評価することができた。

(2) 固結砂の動水半径 $R_{H\&}$ と、ホモゲルの引張り強度 $\sigma_{tH}$ を用いることにより、固結砂の破壊モードが異なる場合でも、固結砂の粘着力を同じ評価式の形態で評価することができる。

(3) 固結砂の動水半径 $R_{H\&}$ は補正係数 $\lambda$ 、20%粒径、固結砂の間隙比 $e_{\&}$ より求められるもので、補正係数 $\lambda$ は均等係数 $U$ により求めることができる。また、固結砂の間隙比 $e_{\&}$ は $N$ 値より推定することもできるが電気比抵抗法の利用が可能であることも分かった。

(4) 水ガラス系薬液によるホモゲルの強度特性は薬液の配合により、脆性を示すものと延性を示すものがあり、脆性を示すホモゲルの固結砂は引張り破壊の特性が強くなることが分かった。そして、固結砂の粘着力 $c$ はホモゲルの引張り強度 $\sigma_{tH}$ を漸近線とする指数曲線で表され、評価式の係数はホモゲルの引張り強度 $\sigma_{tH}$ や脆性度 $B_{tH}$ と関係があることが認められた。

従来より、固結砂強度の特性が砂の相対密度、粒径とホモゲルの強度といった、個々の因子で定性的に評価されていたが、動水半径を用いることによりこれらの因子を包括的に表現でき、破壊モードの異なる固結砂の粘着力を定量的かつ客観的に評価することが可能となった。ただし、評価式の係数の決定因子についてはさらに多くの実験ケースを行う必要があり、汎用性を高めることが課題と考えている。

評価式により得られる粘着力は、均一浸透状態の固結砂の粘着力である。実際の注入形態は、薬液が浸透した部分と浸透しない部分が混在しているので、固結

体全体としての粘着力評価は別途検討する必要がある。今後はこの点についても検討することとしている。

謝辞：本研究を行うにあたり東洋大学の米倉亮三教授に有益なご助言を戴いた。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 酒井、島田：ソレタンシュ注入工法、土木技術、Vol. 28, No. 9, pp. 99-100, 1973.
- 2) 加賀、米倉：注入材で充填された砂地盤の固結強度の推定、薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム、pp. 243-250, 1993.
- 3) 鈴木、他：浸透と地下水、土質工学ハンドブック(社)土質工学会、p. 68, 1982.
- 4) 森、丸山：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, 1977.
- 5) 森、田村：水ガラス系固結砂の強度に関する工学的特性、土木学会論文集、No. 370, pp. 113-122, 1986.
- 6) 米倉、加賀：注入薬液による固結砂の強度特性、土木学会論文集、No. 364, pp. 51-60, 1985.
- 7) 森川、他：電気比抵抗法を用いた浸透注入固結砂の改良効果に関する基礎実験、薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム論文集、土質工学会、pp. 303-308, 1993.
- 8) 森、田村：5)と同、pp. 117-119, 1986.
- 9) I. W. フェーマ：岩盤工学の基礎と応用、鹿島出版会、p. 71, 1988.
- 10) 島田、他：岩の力学、日本材料学会、丸善(株)、pp. 127-137, 1993.
- 11) 小野寺、他：岩の工学的性質と設計・施工への応用、土質工学会編、pp. 199-208, 1979.
- 12) 小林、他：破壊と材料、日本材料科学会、裳華房、pp. 1-13, 1993.
- 13) 川本、他：新体系土木工学20、岩盤力学、技報堂出版、pp. 67-68, 1982.
- 14) 谷本、他：8)と同、p. 63.
- 15) 16) 桑原、赤井、他：9)と同、pp. 134-136.
- 17) 草深、他：地盤工学における数値解析の実務、土質工学会、pp. 233-237, 1987.
- 18) 井形：材料強度学、培風館、pp. 147-149, 1993.
- 19) 大本：15)と同、pp. 62-64.
- 20) 井形：16)と同、p. 225.
- 21) 柏、他：土の強さと地盤の破壊入門、土質工学会、pp. 177-190, 1987.
- 22) 今井、他：土質調査と計測、土質工学ハンドブック、土質工学会、pp. 479-480, 1982.
- 23) 小峯：電気比抵抗による薬液注入改良部の充填率の評価方法、土木学会論文集、No. 463, pp. 153-162, 1993.
- 24) 佐々、他：建設・防災技術者のための物理探査、森北出版、pp. 115-116, 1993.

(1994.5.30 受付)

## EVALUATION METHOD OF COHESION OF SANDS GROUTED CHEMICALLY

Yoshito MORIKAWA

It is still difficult to presume the qualities of grouted sands in spite of the fact that chemical grouting is used as an effective method for the underground structure. Regarding a strength of solidified sands by chemical grouting, there are qualitative evaluation methods from relative density and/or grain size. However, this study proposes the quantitative method which can evaluate the cohesion of permeation grouted sands by means of grouted sand's hydraulic mean radius and pure grout's tensile strength. In consequence, it makes possible to estimate more precisely and easily the cohesion of permeation grouted sands.