

砂質土의 粒徑이 물유리계 藥液注入固結土의 強度 및 剛性に 미치는 영향

The Influence of Grain Size of Sandy Soil on the Strength and Stiffness of Silicate-Grouted Soil.

鄭 亨 植*
Chung, Hyung-Sik
千 柄 植**
Chun, Byung-Sik
柳 在 逸***
Ryu, Jae-Il

Abstract

One of the main objectives of researches for the chemical grouting is to assess the changes in soil properties caused by injection of chemical grout.

Especially the changes in the strength properties of soils, such as elastic modulus, shear modulus of ground due to injection of chemical grout has drawn our attention. Since the specific surface changes with variation in the grain size of sandy soil, the influence of grain size of sandy soil on the strength and stiffness of silicate-grouted soil was investigated in this study by carrying out uniaxial and triaxial compression tests.

It was found that the strength and stiffness of grouted soil increased as the grain size of sandy soil decreases, the possibility of estimating the strength of grouted soil was confirmed through the study of relationship between specific surface of sandy soil and the strength of chemical gel.

要 旨

藥液注入固結土에 대한 연구의 주 목적중 하나는 약액주입으로 인한 土性變化를 연구하는 것이다. 특히 약액주입으로 인한 흙의 彈性係數나 剪斷係數와 強度特性的 변화는 우리의 관심을 끌었다. 본 연구에서는 粒徑에 따라 比表面積이 변화하므로 이에 의한 영향을 究明하고자 未固結土와 固結土에 대한 일축압축 및 삼축압축시험을 실시하여 砂質土의 粒徑이 물유리계약액고결토의 強度 및 剛性に 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

연구결과 試料土의 粒徑이 작을수록 고결토의 強度 및 剛성이 증대되는 것이 발견되었으며, 모래의 比表面積과 약액겔강도와와의 相關성을 究明함으로써 고결토의 強度推定の 가능성을 확인하였다.

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學 土木工學科, 教授

** 正會員, 漢陽大學校 工科大學 土木工學科, 副教授

*** 正會員, 漢陽大學校 大學院 土木工學科, 博士課程

1. 序 論

물유리계현탁액형약액은 浸透注入이 어려우므로 脈狀注入이 되어 地盤隆起 및 地盤局部破壞를 야기시키는등 여러 문제점을 안고 있음에도 불구하고, 國內에서는 諸外國에서 처럼 地盤補強用으로 용액형약액을 많이 사용하지 않고 시멘트를 병용한 현탁액형약액을 注入材로 주로 사용하고 있다.

약액주입공법^{1,2,3,4)}의 경제면으로 보아도 앞으로 용액형약액주입공결토에 대한 연구가 많이 이루어 져야 할 것이다.

약액주입공법은 약액의 浸透注入이 용이한 砂質地盤을 대상으로 하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서 砂質土를 시료토로 사용하여 砂質土의 粒徑이 물유리계용액형약액으로 고결된 모래의 強度舉動特性에 미치는 영향을 검토하기 위하여 모래의 粒徑을 변화시켜서 일축압축 및 삼축압축시험을 하였다.

지금까지의 연구결과에 의하면 물유리계약액으로 고결된 모래의 強度舉動은 內部摩擦角은 거의 변화가 없으나 粘着力이 증가되므로 고결토의 강도가 增大되는 것^{5,6,7,8,9)}으로 알려져 있다.

그런데 고결토의 점착력증가는 주로 약액의 겔강도 및 시료토의 粒徑, 密度 등에 따라 좌우되는데, 본 연구에서는 이들과 고결토강도와의 상관성을 검토하여 시료토의 입경이 고결토의 강도 및 강성에 미치는 영향에 대해 고찰하고자 한다. 또한 시료토의 比表面積과 약액겔 강도와의 상관성을 究明함으로써 C. Caron의 제안식^{10,11)}에 의한 고결토의 強度推定의 가능성을 모색하고자 한다.

물유리계 약액주입공법은 遮水 및 強度增大를 목적으로 하는 地盤改良工法으로, 이러한 목적을 위해 많은 연구를 해왔음에도 強度特性 또는 固結地盤舉動에 대한 자료가 실용적인 면에서 볼 때 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 약액주입공법의 설계 및 시공에 필요한 자료의 제공에 연구의 주목적을 두었다.

2. 注入材로서의 기본적인 성질

地盤注入材는 地盤強化 및 遮수에 필요한 粘性, 遮水性 및 固結性등의 다음과 같은 기본적인 성질을 구비해야 한다.

(1) 粘 性

일반적으로 注入材를 砂質土에 浸透시키는 경우, 주입제의 粘性이 浸透성을 좌우하게 된다. 주입제의 粘性에 기대되는 것은 初期粘度가 낮고 겔화(gelation) 직전에 低粘度를 유지하며 겔화 時에 粘度가 급격하게 상승하는 성질을 갖는 것이 유리하며, 보통 표준배합시 초기점도는 2~3cps 정도가 좋다.¹²⁾

(2) 遮 水 性

설계조건으로 配合한 注入材는 注入管을 통하여 地盤內에 주입되면 겔화하기까지는 地下水 등에 의하여 주입제가 希釋되어 겔化時間이 지연되는데, 그 지연정도는 硬化劑의 종류에 따라 다르다.

알칼리계에서는 酸性反應劑가 더욱 많은 영향을 받기 쉬운데, 그 중에서도 重炭酸鹽보다 작은 소량으로 겔시간이 길어지는 酸도가 강한 磷酸 및 重硫酸鹽쪽이 더욱 현저하며, 1.4배 정도의 희석으로 전혀 겔화가 이루어 지지 않는 것도 있다. 그러나 酸性反應劑에 有機硬化劑를 가하면 겔시간의 지연을 줄일 수 있다.

비알칼리계는 活性실리카졸로서 겔시간이 지연되기 어려우나 5~6배 정도로 희석되어도 화학반응능력을 잃어버리지 않는 성질을 갖고 있다.

(3) 固 結 性

주입제의 固結상태는 약액겔(homo gel)과 固結砂(sand gel)가 있는데, 전자는 현탁액형약액을 粘性土에 割裂注入^{13,14)}하는 경우 그리고 후자는 용액형약액을 砂質土에 浸透固結^{13,14)}시키는 경우로 구분된다.

일반적으로 용액형약액주입공결토에서 Homogel 강도가 클수록 Sand-gel은 증가하는 상관관

Table 1. Remolding method physical properties of ungrouted specimen

sample				loose specimen ($e=0.74$)			dense specimen ($e=0.65$)		
				r_d (g/cm^3)	r_t (g/cm^3)	$e_{avr.}$	r_d (g/cm^3)	r_t (g/cm^3)	$e_{avr.}$
No. I	0.84~2.00	2.65	3.0	1.52	1.57	0.74	1.60	1.65	0.65
No. II	0.42~0.84	2.65	3.0	1.52	1.57	0.74	1.60	1.65	0.65
No. III	0.25~0.42	2.65	3.0	1.52	1.57	0.74	1.60	1.65	0.65

계를 보이고 있다. 그리고 무기계약액에 비해 유기계약액의 Sand-gel 강도가 더 크며, 강도가 클수록 變形係數는 크게 되고 變形은 작아지는 성질을 갖고 있다.

3. 實 驗

3.1 시료토 및 사용약액

본 연구에 사용한 시료토는 깨끗한 한강모래를 체분석하여 시료토의 粒徑을 Table. 1과 같이 3종류(No. I, No. II, No. III)로 구분하여 사용하였다.

사용약액은 물유리계용액형으로 矽酸鹽(silicate)농도를 30%, 50%, 70%로 하고 固化時間은 4분내외로서 동일하게 하였다. 그리고 약액의 配合示方例는 Table 2와 같으며 물유리수용액과 硬化劑水溶液의 용적배합비는 1:1로 하였다.

3.2 공시체제작 및 양생

공시체제작은 P.V.C 몰드($\phi 3.5cm \times H7.0cm$) 內에 所定의 약액을 넣고 시료토를 몰드에 Table 1과 같이 느슨한 상태($e=0.74$)와 조밀한 상태($e=0.65$)로 구분하여 제작하였다. 이때, P.V.

C몰드 밑부분에 접착테프를 붙여서 사용하였으며 조밀한 공시체는 유리칼대기로 시료토 108g을 넣으면서 몰드자체를 철판에 낙하시켜서 제작하였고, 느슨한 공시체는 102g을 유리칼대기로 몰드에 서서히 넣어서 제작하였다.

공시체養生은 水中養生으로 하였으며 水溫은 18~20°C로 하였다.

3.3 실험방법

실험은 변형제어(strain control) 방식의 壓密排水三軸壓縮軸시험 및 삼축시험기를 이용하여 배수조건의 일축압축시험을 하였다. 실험중 변형속도는 0.2%/min로 하였고 구속응력은 0.5, 1.0, 1.5 kg/cm^2 로 하였다.

4. 실험결과와 分析 및 考察

4.1 고결토의 剛性特性

흙에 대한 Young 계수는 일반적으로 割線係數(second modulus)를 뜻하며 土質工學에서 安全係數를 보통 2~3을 취하므로 이 係數를 취한 응력의 크기가 실제로 적용하는 응력범위이므로 最高應力(peak stress)의 1/3~1/2을 취한 割線係數 E_{50} 을 주로 사용한다.

따라서 본 연구에서도 Fig.1과 같이 시료토의 粒徑·密度 및 矽酸鹽농도에 따른 E_{50} 을 구하여 비교검토했다.

검토크과, 시료토의 입경이 작을수록 고결토의 彈性變形係數 E_{50} 은 증가하는 경향을 보였으며, 시료토 No. III는 No. I 보다 60~80%정도 더 크게 나타났다. 또한 규산염농도 70%의 경우 未固結土에 비해 4~5배의 증가를 보이는 등 약액농도가 클수록 그리고 시료토가 조밀할수록 E_{50} 이 증대되는 경향은 이미 예측된 바와 같다.

Table 2. Example of normal mix proportion of chemical grout

description	silicate content (%)	30	50	70
	component			
water-glass solution	water-glass No. 3 (cc)	60	100	140
	water (cc)	140	100	60
hardener solution	subjectivity(g)	14	15	16
	accelerant (g)	10	9	8
	water (cc)	190	191	192

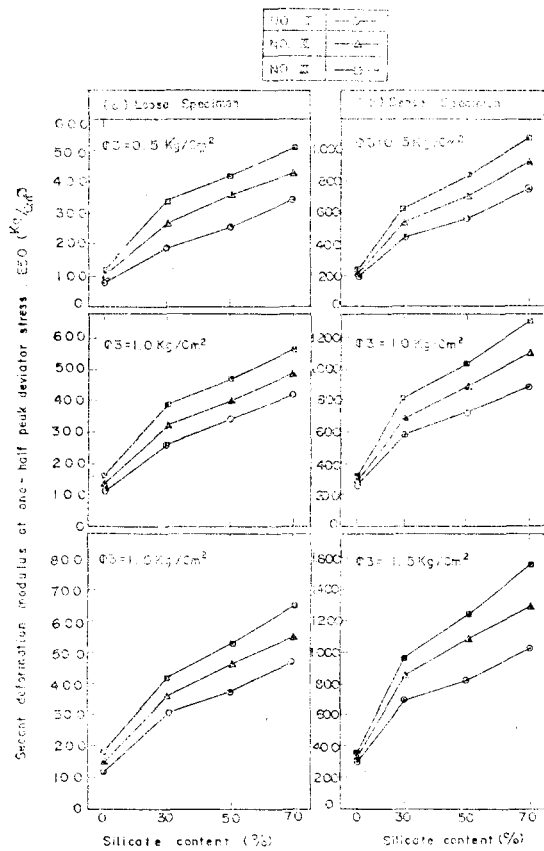


Fig. 1 The relationship between silicate content and elastic modulus of grouted soil with different grain size of sands.

No. Ⅲ 시료의 느슨한 고결토에서 시료토의 포아슨비를 0.3, 고결토의 포아슨비를 0.5로 하여 고결토의 剪斷係數(剛性係數: G)를 (1)式에 의해 구했으며, Fig. 2 와 같다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, G : 剪斷係數(kg/cm²)

E : 彈性變形係數(E_{50}), (kg/cm²)

ν : 포아슨비

구속응력이 1.0kg/cm²인 경우 탄성조건에서 시료토의 입경에 따른 고결토의 전단계수와 탄성변형계수 및 포아슨비는 식 (1)과 같은 관계를 갖게되며, Fig. 2에서의와 같이 固結土의 剪斷係數는 시료토 No. I, No. II, No. III 순으로 크게 나타났다.

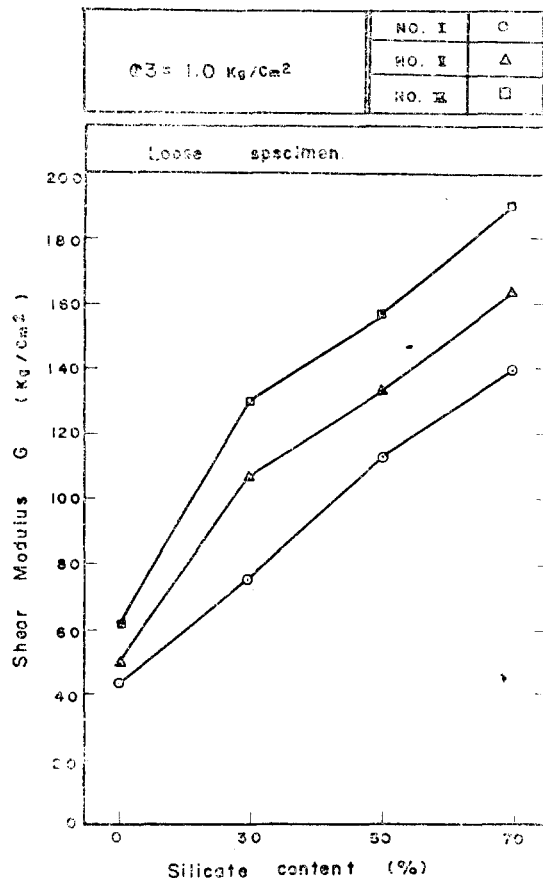


Fig. 2 The relationship between silicate content and shear modulus of grouted soil with different grain size of sands.

이상으로 부터 시료토가 細粒일수록 고결토의 變形係數 및 剪斷係數가 증가되어 剛性이 증대됨을 알 수 있다.

Fig. 1에서 구속응력이 증가될수록 E_{50} 은 크게 나타났는데, 이의 관계를 Fig. 3에서 더욱 잘 보여주고 있으며, 구속응력에 따른 E_{50} 의 증가는 다음의 설명과 같다.

變形係數가 커질수록 식(1)과 같이 剪斷係數는 크게 되고 有效應力은 拘束應力이 커짐에 따라 증가된다. 따라서 剪斷係數는 有效應力과 函數關係에 있기 때문에 결국 구속응력이 커짐에 따라 변형계수가 증가되는 것으로 판단된다.

4.2 고결토의 強度特性

Fig. 4는 구속응력 및 약액농도에 따른 고결

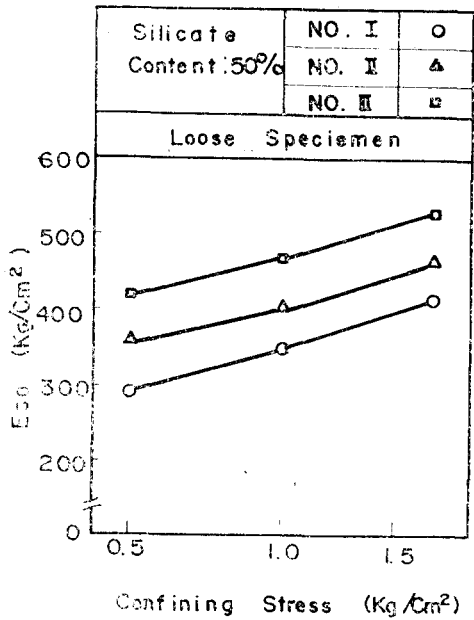


Fig. 3 The relationship between confining stress and elastic modulus of grouted soil with different grain size of sands.

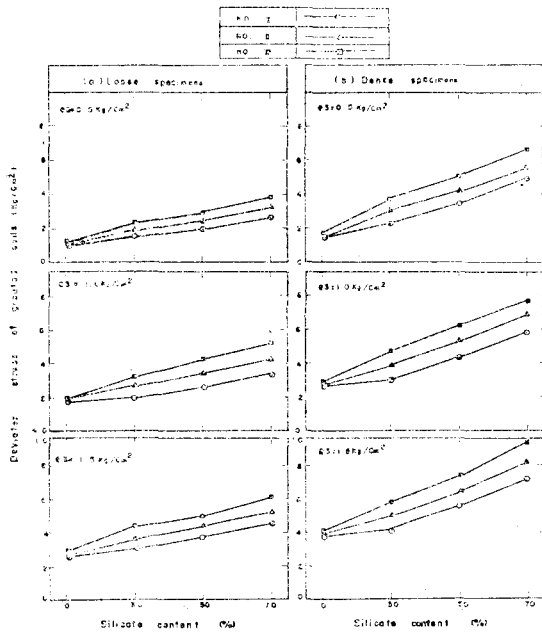


Fig. 4 The relationship between silicate content and deviator stress at failure of grouted soil with different grain size of sands.

토의 파괴시 축차응력을 시료토의 입경별로 나타낸 것이며, 시료토의 입경이 작을수록 파괴시 축차응력이 크게 나타나는 경향을 보였다. 따라서 시료토의 입경이 고결토의 강도에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

그리고 고결토의 강도에 대한 약액농도의 효과는 Fig. 4 에서와 같이 약액농도에 좌우되는데 그의 증가비는 사용약액의 규산염 함유량에 의한 약액의 化學反應性에 달려있는 것으로 판단된다.

Fig. 5 는 森, 佐藤이 고결토의 점착력(C)과 약액의 점착력(C₀)의 관계를 나타낸 것으로, C₀는 土粒子의 형상과 밀도등에 영향을 받는 構造性粘着力^{17,18)}이며 C'는 약액겔의 粘着力의 크기와 농도에 의해 增減되는 薄膜粘着力^{17,18)}이다. 따라서 고결토의 점착력(C)은 구조성점착력(C₀)과 막막점착력(C')

의 합으로 나타난다. 시료토의 입경이 작을수록 그리고 조밀할수록 평균입경은 작아지므로 式 (2)에서 膜의 두께指數(H)¹⁶⁾는 작아지게 된다.

$$H = \frac{D \cdot a}{6} \times \frac{r_1}{r_2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, H: 膜의 두께指數(mm)

D: 시료토의 평균입경(mm)

a: 固結土의 약액의 시료토에 대한 중량비(%)

r₁: 시료토 날입자의 단위체적중량(g/cm³)

r₂: 약액의 단위체적중량(g/cm³)

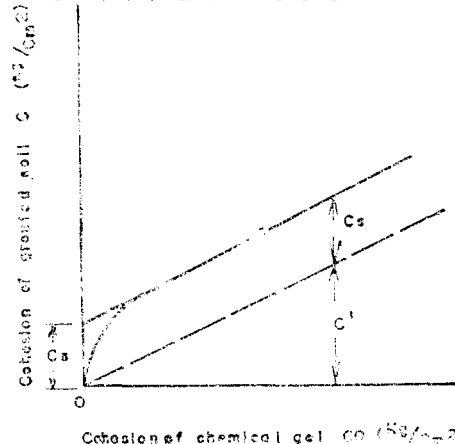


Fig. 5 The relationship between cohesion of chemical gel (C₀) and cohesion of grouted soil (C).

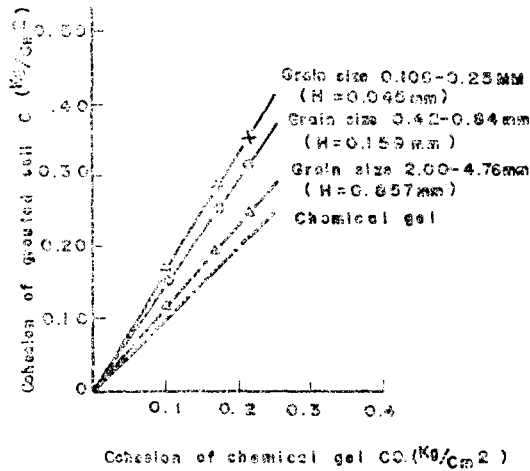


Fig. 6 The relationship between cohesion of chemical gel (C_0) and cohesion of grouted soil (C) with different grand size of sands.

膜의 두께지수가 작아지면 약액겔의 점착력 (C_0)에 대한 고결토의 점착력배율(C/C_0)은 커지게 되므로(Fig. 5, 6) 고결토의 점착력(C)은 증가되어 결국, 고결토의 강도가 증대된다.

固結土의 강도에 미치는 시료토의 입경과 밀도의 영향은 시료토의 입경이 작을수록 그리고 시료토가 조밀할수록 Fig. 4 에서와 같이 고결토의 강도가 증대되었는데, 이는 이상의 설명으로부터 알 수 있다.

Fig. 7은 시료토별 약액농도에 따른 고결토의 점착력을 나타낸 것으로, 시료토의 입경이 작을수록 그리고 조밀할수록 고결토의 점착력이 크게 나타났는데, 그 이유는 다음과 같다.

시료토의 입경이 작을수록 고결토의 薄膜粘着力이 커지기 때문에 고결토의 강도가 증대되는 것으로 판단된다. 또한 시료토가 조밀한 경우가 느슨한 경우보다 강도가 더 크게 나타난 것은 조밀한 경우가 土粒子的 構造性粘着力이 느슨한 경우보다 더 크기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 고결토의 파괴시의 다이러턴시係數^{19, 20)} ($D_f = \epsilon_c / \epsilon_a$)를 나타낸 것으로, 시료토의 입경이 작을수록 그리고 약액농도가 클수록 파괴시의 다이러턴시係數가 큰 경향으로 나타났다.

4.3 固結土의 變形係數 및 強度의 추정

4.3.1 變形係數의 추정.

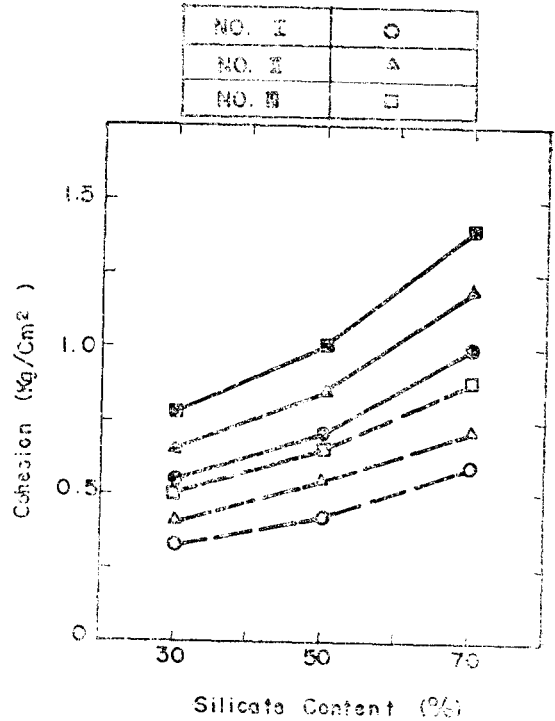


Fig. 7 The relationship between silicate content and cohesion of grouted soil with different grain size of sands.

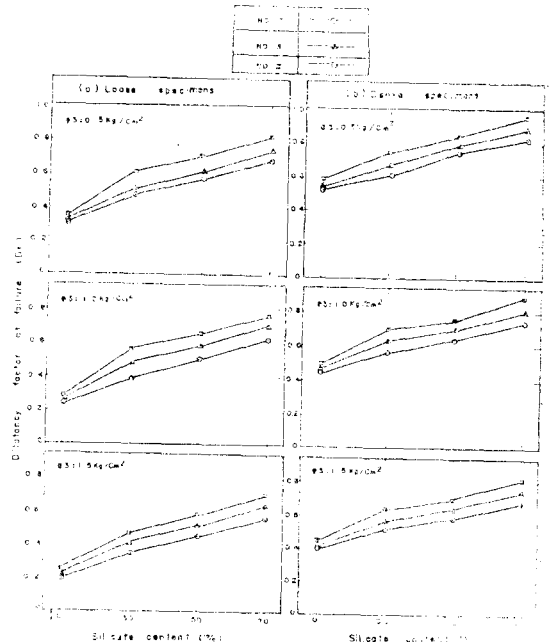


Fig. 8 The relationship between silicate content and dilatancy factor at failure of grouted soil with different grain size of sand.

Fig. 1에서 각 구속응력하의 모든 고결토의 파괴시축차응력과 그에 대응되는 E_{30} 을 나타낸 것이 Fig. 9이다. Fig. 9에서 느슨한 상태와 조밀한 상태를 구별하여 나타낸 것으로, 고결토의 파괴시축차응력이 클수록 변형계수가 더 큰 경향을 보였다.

많은 실내 및 현장시험의 자료를 축적한다면, Fig. 9와 같은 고결토의 강도와 변형계수와의 상관관계로부터 개략적인 고결토의 변형계수를 추정할 수 있을 것이다.

따라서 약액주입의 설계 및 시공에 앞서 미리 이들 값을 추정할 수 있게 된다면 본 공법적용의 타당성검토 및 기본계획등에 유익한 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

4.3.2 일축압축강도의 추정

시료토의 比表面積과 약액겔강도와와의 상관관계로부터 고결토의 강도를 구하기 위한 C. Caron의 실험식^{10,11)}은 식 (3)과 같다.

$$RS = RG(1 + K\sqrt{S}) \dots \dots \dots (3)$$

여기서, RS : 고결토의 일축압축강도(kg/cm²)

RG : 약액겔의 일축압축강도(kg/cm²)

K : 약액겔강도에 좌우되는 係數

S : 시료토의 比表面積(cm²/g)

(3) 式을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$K = \frac{1}{\sqrt{S}}(RS/RG - 1) \dots \dots \dots (4)$$

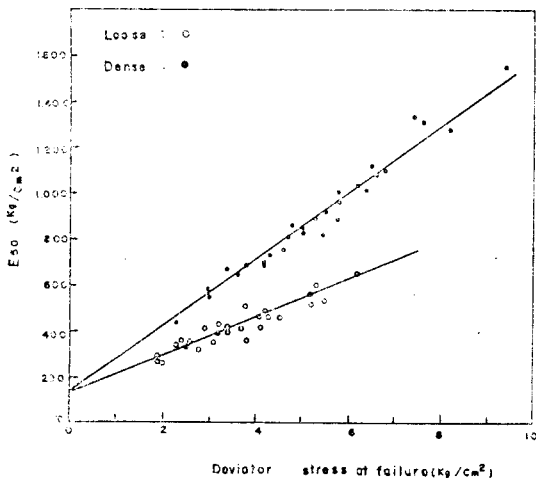


Fig. 9 The relationship between deviator stress at failure and elastic modulus of grouted soil from fig. 1.

본 연구에 사용한 시료토 No. I, No. II, No. III의 比表面積 S (cm²/g)는 S (No. I)=210, S (No. II)=350, S (No. III)=470이며 그리고 약액겔의 일축압축강도(RG)는 30% 농도에서 0.23kg/cm², 50% 농도에서 0.46kg/cm², 70% 농도에서 1.07kg/cm²이다.

그리고 약액겔의 일축압축강도(RG)와 그에

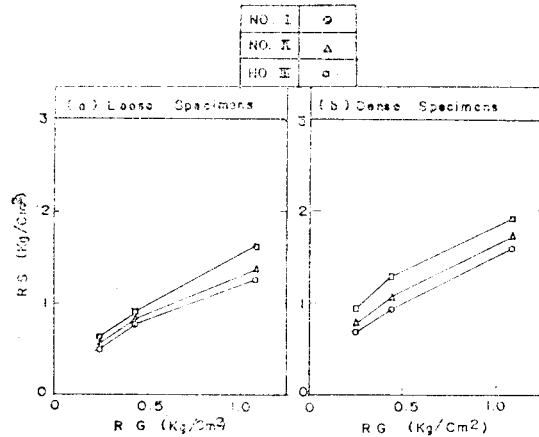


Fig. 10 The relationship between uniaxial strength of chemical gel (RG) and uniaxial strength of grouted soils (RS).

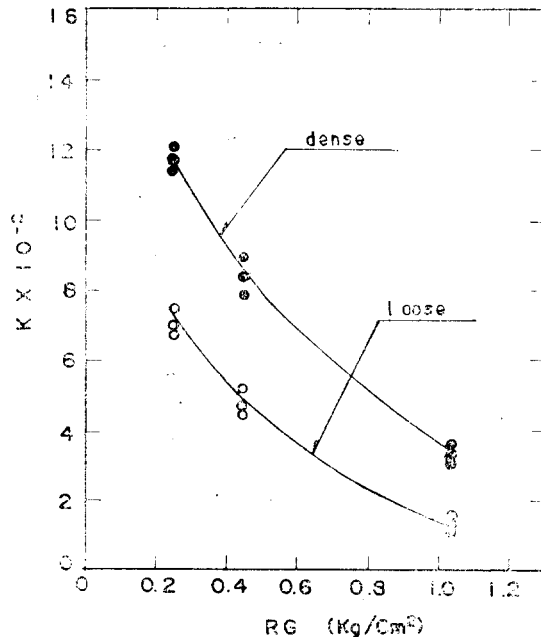


Fig. 11 The relationship between uniaxial strength of chemical gel (RG) and coefficient K .

따른 고결토의 일축압축강도(RS)와의 관계는 Fig. 10 과 같다.

따라서 (4) 式에 Fig. 10 으로 부터 동일조건 의 각각의 값을 代入하여 K 를 구했으며, 이를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 11 이다. Fig. 11 에서 와 같이 약액겔강도에 좌우되는 계수 K 를 표시 하여 보았다.

본 연구 범위의 실험결과에 의해 나타난 Fig. 11 은 실험자료가 적은 편이어서 전반적인 경향 을 파악하기는 어려우나 공시체의 밀도 및 약액 겔의 강도에 따른 계수 K 의 경향은 뚜렷하게 나타났다. 따라서 C. Caron 의 제안식의 이용가 능성의 提高는 고결토에 대한 많은 실험자료의 축적에 달려있음을 알 수 있다.

앞으로 시료토의 입경·밀도 그리고 약액의 종류·농도에 따른 고결토의 강도에 대한 많은 실험자료로 부터 係數 K 를 보완하고 수정한다면 고결토의 강도에 측을 일반화하여 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 結 論

1. 시료토의 粒徑이 작을수록 고결토의 變形 係數와 剪斷係數가 증가되어 고결토의 剛性이 증대되는 것으로 나타났다.

2. 시료토의 粒徑이 작을수록 고결토의 강도 가 증대되는데, 이는 고결토의 薄膜粘着力의 증 가로 인한 때문에 판단된다.

3. 시료토의 粒徑이 작을수록 그리고 약액농 도가 증가될수록 固結土의 彈性變形係數와 剪斷 係數 및 파괴시의 다이러턴시係數가 크게 나타 났다.

4. 고결토의 파괴시 軸差應력과 변형계수와 의 상관관계로 부터 고결토의 개략적인 變形係數추 정의 가능성을 확인하였다.

5. C. Caron 이 제안한 식 (3)에서 계수 K 를 고결토에 대한 많은 실험자료를 축적하여 보완 하고 수정한다면 개략적인 고결토의 일축압축강 도추정을 일반화하여 이용할 수 있을 것으로 사 료된다.

參 考 文 獻

1. 新日本テクノ(株), “스페이스그라우트공법とその 實施例”, 最新の藥液注入工法, No. 5, pp. 68~76.
2. 佐野榮, “MT 工法とその實施例”, 最新の藥液注入 工法, No. 5, pp. 90~97.
3. 三木五三郎外, “セメント系急硬材の CCP 工法へ の應用について”, 第11回土質工學研究講演集, 197 6, pp. 1105~1108.
4. 小川泰平外, “ADG アクアベツカーによる”, 第17 回 土質工學研究講演集, 1982, pp. 2501~2504.
5. Krizek, R.J., et al., “Effective Stress-Strain Str- ength Behavior of Silicate-grouted Sand,” pro. of Conference on Grouting in Geotechnical Eng- ineering, ASCE, Vol. 1, 1982, pp. 482~497.
6. Krizek, R.J., et al., “Mechanical Behavior of Chemically Grouted Sand,” ASCE, Vol. 108, 1982.
7. 加賀宗彦外, “各種水ガラス藥液によるホメゲルと 固結砂強度の關係について”, 第21回 土質工學研究 講演集, 1986, pp. 1823~1824.
8. 森麟外, “藥液による固結砂の力學的特性に及ぼす 粒度密度の影響”, 第14回 土質工學研究講演集, 19 79, pp. 1617~1620.
9. James Warner, “Strength Properties of Chemi- cally Solidified Soils,” ASCE, Vol. 98, No. SM 11, 1972, pp. 1163~1185.
10. 酒井, 島田, “ソレタソッシュ注入工法(その 7)”, 土 木技術, 第28卷, 9號, 1973, pp. 10~19.
11. 加賀宗彦, “水ガラス系藥液による 固結砂の一軸壓 縮強度推定の可能性”, 土と基礎, Vol. 34, No. 8, 1986, pp. 21~26.
12. 下田一雄, “水ガラスを主材とした注入材の種類と 特長”, 最新の藥液注入工法, No. 7, pp. 12~22.
13. Diefenthal, D.C. et al., “Strength and Stiffness of Silicate Grouted Sand with Different Stress Histories”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 2, No. 4, 1979, pp. 200~205.
14. Davidson, R.R, et al., “Properties of Chemically Grouted Sand at Locks and Dam No. 26,” Pro. of Conference on Grouting in Geotechnical Eng- ineering, ASCE, Vol. 1, 1982, pp. 482~497.
15. Clough, G.W., et al., “Silicate-stabilized Sands,” ASCE, Vol. 105, No. GT1, 1979, pp. 65~82.

16. 秦柄益, 千柄植, “藥液注入에 의한 固結土의 工學的 特性”, 大韓土木學會誌, 第28卷, 第6號, 1980 pp. 97~107.
17. 森麟外, “固結土の構造的粘着力”, 第3回土質工學研究講演集, 1968, pp. 11~16.
18. 森麟外, “結合劑による土の強度増加機構”, 第3回土質工學研究講演集, 1968, pp. 175~179.
19. 森麟外, “固結させた土の強度に及ぼすダイレイタンスの役割”, 第6回土質工學研究講演集, 1971, pp. 177~180.
20. 森麟外, “水ガラス藥液により固結した砂の透水係數とダイレイタンスについて”, 第20回土質工學研究講演集, 1985, pp. 1669~1672.
21. 森麟外, “水ガラス藥液による固結砂の強度に及ぼす負壓の影響”, 土木學會 第40回 年次學術講演會, 1985, pp. 619~620.
22. 赤木貫一, “水ガラス系の 藥液で固結させた砂の非排水強度特性”, 第19回 土質工學研究講演集, 1986 pp. 1603~1604.

(접수일자 1988. 9. 23)