

물유리系 藥液固結土의 剪斷抵抗特性

The Characteristics of Shearing Resistance of Silicate-Grouted Soils

鄭 亨 植*

Chung, Hyung-Sik

柳 在 逸**

Ryu, Jae-Il

Abstract

Chemical grouting is one of the ground-improvement methods for the purpose of cutting off water and increasing the strength of soil. It has been reported that the effect of strength increment of grouted soils is due to increase of cohesion.

In this study, the effect of cohesion on the shearing resistance of grouted soil was investigated through triaxial compression test.

According to the result of this research, it is found that the improved cohesion increases rapidly up to the maximum value at a small strain and subsequent decrease of cohesion is due to the breaking of grout chemical at a larger strain.

要 旨

藥液注入工法은 遮水 및 強度增大를 목적으로 하는 地盤改良工法의 하나로, 藥液注入에 의한 地盤의 強度增大效果는 점착력의 증대에 기인하는 것으로 보고 된 바 있다.

따라서 본 연구에서는 3축압축실험을 행하여 固結土의 點착력이 剪斷抵抗에 미치는 영향에 대해 考察하였다.

본 연구결과로 약액에 의한 점착력은 적은 변형율에서 급격하게 증가하여 최대치에 도달하며 그 후 감소하는 것이 발견되었다. 그리고 큰 변형율에서의 점착력의 감소는 固結된 약액자체의 파괴와 관련된 것으로 사료된다.

1. 序 論

化學藥液에 의한 固結工法이 軟弱地盤의 安定化에 널리 이용되고 있으며, 앞으로 서·남해안 개발이 본격적으로 착수되면 연약지반처리문제가 대두될 것으로 예상되는데, 이에 본 공법의

필요성이 증대될 것이다.

약액주입공법은 유럽에서 개발^{1,2,3)}되어 미국 특히, 일본에서 크게 발전되었으며, 國內에는 70년대에 도입되어 80년대에 들어서 지하철공사 및 도심지에서의 기초굴착현장에 주로 적용되어 施工面에서는 어느 정도 성과가 있었으나, 학문적인 체계는 아직도 미흡한 상태에 있어 앞으로

* 正會員, 漢陽大學校 工科學 教授

** 正會員, 漢陽大學校 大學院 博士課程

본 공법의 연구·개발에 주력해야 할 것으로 생각된다.

본 공법은 시간이 경과함에 따라 不透水性 Gel 을 형성하는 화학약액을 地盤內의 空隙에 充填·固結시킴으로서 地盤의 透水性을 감소시키거나 地盤의 強度를 增大시키는 데^{4,5,6)} 주 목적이 있다. 따라서 構造物 築造時의 遮水 및 基礎補強으로 지하철공사, Dam 공사, Tunnel 공사 등에서 널리 이용되고 있으며 다른 공법에 비해 工期가 짧고 시공장비가 소규모이고 소음·진동이 작아 복잡한 都市地나 인구밀집지역에서도 본 공법의 적용이 가능할 것이다.

본 공법에 의한 強度增大效果는 地盤土가 固結됨으로 인해 마찰성분보다는 주로 점착력성분의 증가에 좌우된다는 많은 연구보고^{7,8,9)}가 있다.

따라서 본 연구에서는 排水三軸壓縮實驗結果에 의해 固結土의 剪斷變形에 따른 마찰성분과 점착력성분을 조사·검토하여 固結土의 剪斷抵抗을 지배하는 요소에 대해 고찰하고자 한다.

2. 固結化 機構

물유리系藥液의 固結化는 일반적으로 다음과 같은 2 단계로 이루어진다.

제 1 단계에서는 물유리용액이 重合하여 Colloid 粒자를 형성하고, 제 2 단계에서는 이 粒자들이 서로 集合·結合現象을 일으켜 덩어리를 만들어 물이 溶媒作用을 야기함으로써 固結化에 이르게 된다.

제 1 단계에서 물유리는 Sinanole 基(SiOH)가 脫水되어 重合하고, Sirokian bond[-Si-O-Si-]를 만들어서 粒狀의 1次粒자로 성장하게 된다. 다음에 이들 1次粒子 사이에 集合·結合作用이 거듭되어 Colloid 集合體를 형성한다. 이 집합체인 흙덩어리가 점점 그 범위를 넓혀 입자 서로가 견고하게 結合·接合되어 3次元的 網狀의 固結體(固結土)를 형성하게 되어 비로소 地盤의 強度가 증대된다.

3. 實 驗

3.1 試料土 및 사용藥液

본 연구를 위해 깨끗한 漢江砂를 체분석하여 (0.25~0.42 mm) 사용하였다.

사용약액은 물유리계 용액형으로 약액농도를 15%, 25%, 35%로 약액의 Gel time 은 시료토와의 혼합공시체 제작이 가능하도록 하기 위해 4분으로 하였다.

약액의 配合示方例는 Table 1 과 같으며 물유리水溶液과 硬化劑水溶液의 용적배합비는 1:1로 하였다.

Table 1 약액의 配合示方例

구 분	성분	약액농도(%)		
		15	25	35
물유리수용액	물유리 3호(cc)	60	100	140
	물 (cc)	140	100	60
경화제수용액	경화 주제 (g)	14	15	16
	경화 조제 (g)	10	9	8
	물 (cc)	190	191	192

3.2 공시체제작 및 양생

공시체제작은 P.V.C mold(ϕ 3.5 cm×H 7.0 cm)內에 所定의 약액을 넣고나서 시료토를 mold 에 넣고 조밀한 상태와 느슨한 상태로 구분하여 Table 2 와 같은 相對密度로 하여 제작하였다. 이때 조밀한 공시체는 PVC 몰드 밑부분에 약액이 새지 않도록 접착테프를 붙이고 유리갈대기로 시료토 115 g 을 3 층으로 구분하여 넣으면서 각층 10 회씩 철판에 2 cm 높이에서 몰드자체를 자유낙하시켜서 제작하였으며, 느슨한 공시체는 밑부분에 접착테프를 붙인 PVC 몰드에 유리갈대기로 시료토 100 g 을 살살 넣어서 제작하였다.

Table 2 공시체 제작 조건

구분	상대밀도 (%)	공극비 (e)	점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)
시료토				
느슨한	30	0.85±0.02	0	31.0
조밀한	80	0.65±0.02	0	36.0

양생조건은 地下水位아래의 상태를 재현시키기 위해서 水中養生方法으로 하였으며 水温은 18~20°C로 하였다.

3.3 實驗方法

실험방법은 응력제어(Strain control)방식의 압밀배수 3축압축실험으로 하였다. 실험중 변형속도는 0.5%/min로 하였고 구속응력은 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm²로 하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 固結土의 强度經時變化

養生時間에 따른 강도증대는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 養生 3日內에 주로 발휘됨을 알 수 있다.

그리고 양생시간이 경과되어 장기화 되어도 강도의 감소는 없는 것으로 보아 60日間의 强度經時變化에 의하면 본 연구에 사용한 약액고결토의 而久性에 큰 문제는 없는 것으로 일단 추정된다.

Fig. 1은 약액농도 25%의 조밀한 경우로서 고결토의 강도가 양생 3일 동안에 급격한 증대를 보였으며 이는 60日間의 經時强度의 약 90% 정도로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 양생 3일의 고결토(공시체)를 대상으로 배수 3축압축실험을 하였다.

4.2 固結土의 응력-변형

4.2.1 느슨한 고결토의 응력-변형

약액농도에 따른 응력-변형특성을 검토하기 위해 약액농도를 15%, 25%, 35%로 변화시켰

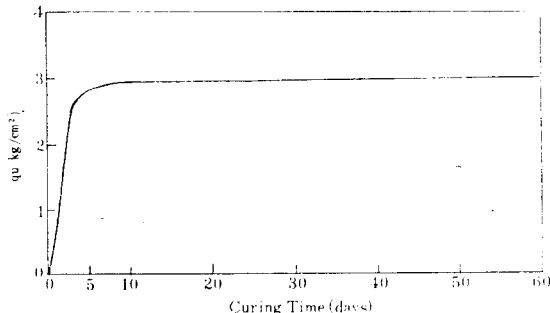


Fig. 1 Variation of unconfined compression(q_u) with curing times for grouted soils

Loose Specimen	Curing Days	3
	Chemical Liquid Content(%)	N

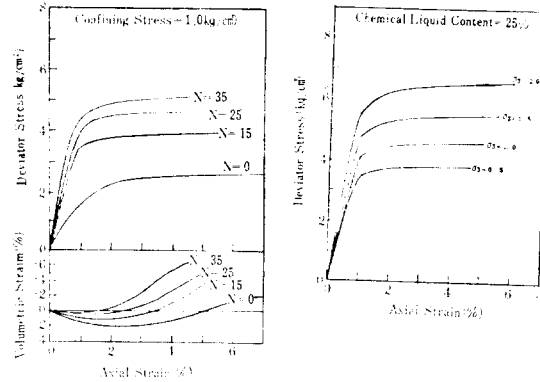


Fig. 2 Stress-strain curves for grouted loose specimens

으며 이의 관계는 Fig. 2에서와 같이 약액농도가 클수록 축차응력($\sigma_1 - \sigma_3$)은 커져서 강도증대 효과를 보였으며 파괴시의 축변형(E_f)은 약액농도가 커짐에 따라 감소하는 경향을 보였다.

축차응력이 $\epsilon_a = 1\%$ 부근에서 경사가 급격한 변화를 하고 그 이후부터는 점점 둔화되는데, 이 변형에서부터 공극의 Gel이 부스러지는 것으로 생각되며 이때 체적변화도 증가단계로 들어가는 경향을 보였다.

구속응력의 변화에 대한 응력-변형곡선은 Fig. 2와 같이 구속응력이 커짐에 따라 고결토의 파

Dense Specimen	Curing Days	3
	Chemical Liquid Content(%)	N

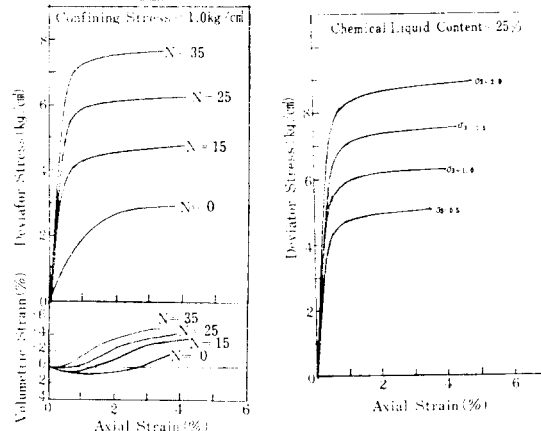


Fig. 3 Stress-strain curves for grouted dense specimens.

파괴 축차응력 및 축변형이 증가하는 경향으로 나타났다.

4.2.2 조밀한 고결토의 응력-변형

느슨한 고결토에서와 같이 약액농도, 구속응력을 동일하게 변화시켜서 실험하였으며 응력-변형곡선은 Fig. 3과 같다.

그의 경향은 느슨한 고결토에서와 거의 유사하다.

파괴시의 축변형은 조밀한 경우가 느슨한 고결토에서 보다 작게 나타났다.

4.3 점착력 및 내부마찰각의 변화

파괴시의 축변형(E_f)보다 작은 변형레벨에서 발생된 응력으로 Mohr 원을 작성하여 이에 접하는 포락선을 작도하면 그 변형레벨에서 나타난 전단저항의 점착력성분과 마찰성분 즉, c 와 ϕ 를 알 수 있으며 이들을 각 변형레벨에서 구하면 축변형에 따른 구동된(Mobilized) c 와 ϕ 값을 나타낼 수 있다(Fig. 4 및 Fig. 5).

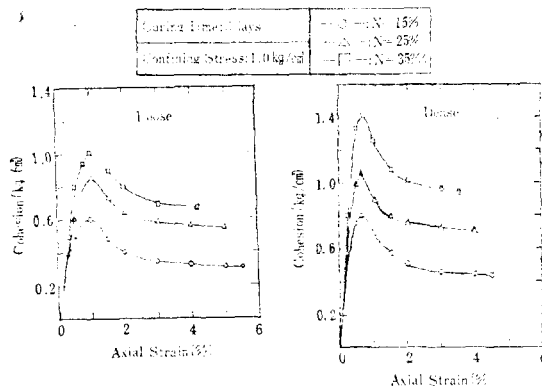


Fig. 4 Variation of cohesion with axial strain

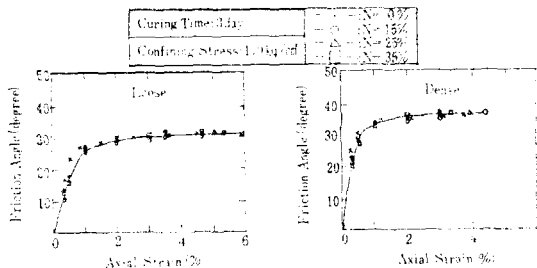


Fig. 5 Variation of friction angle with axial strain

축변형에 따른 점착력은 약액농도가 클수록 크게 되며, 파괴전의 작은 변형율에서 최대에 도달하여 그 후 빠르게 감소되어 파괴시의 측정된 값과 같이 된다. 변형에 따른 내부마찰각은 Fig. 5와 같이 축변형이 증가함에 따라 점차적으로 증가하여 파괴변형에서는 未固結土의 값과 거의 비슷한 값에 도달된다.

5. 考 察

5.1 固結土의 응력-변형특성

Fig. 2, 3의 응력-변형곡선에서 약액농도가 증가됨에 따라 축차응력 및 체적변화가 증대되고, 파괴변형(E_f)은 작아지는 경향을 보였다.

약액농도가 고결토의 강도에 미치는 영향은 약액농도가 커짐에 따라 약액중의 Silicate 함유량이 늘어나게 되므로 化學反應이 활발해지게 된다. 따라서 Silicate의 分子構造가 견고하게 되며 고결토의 점착력이 커지게 되어 결국 고결토의 강도가 증대된다.

剪斷應力이 土體에 작용하면 土粒子의 이동은 Interlocking 이나 점착력에 의해 저지되는 경향^{11,12)}이 있다. 그러나 전단응력이 커짐에 따라 土粒子는 이동되어 입자구조가 느슨하게 됨으로 체적이 팽창된다.^{13,14)} 그리고 응력-변형곡선에서 최대점이 나타나는 데 이는 Interlocking 이 극복되려 할 때 발생하는 체적팽창^{19,20)}과 Interlocking 을 극복하려는 저항력에 기인된 것임을 알 수 있다. 따라서 약액농도가 클수록 약액자체의 점착력이 크게 되어 固結土粒子의 이동을 저지시키려는 저항성이 커지게 되므로 약액농도가 클수록 固結土의 파괴강도 및 체적변화가 커지게 되는 것으로 판단된다.

약액농도가 클수록 파괴변형이 작아지는 것은 Fig. 3에서와 같이 변형에 따른 고결토의 점착력이 작은 변형율에서 갑작스런 감소로 즉, 전단저항성이 갑자기 저하되기 때문으로 설명할 수 있으며 이러한 현상으로 固結土에서 취성적인 파괴경향이 나타나는 것으로 생각된다.

Mitchell¹⁵⁾은 구속응력이 증가할수록 토질상태에 관계없이 강도가 증가한다고 지적하였고, Krizek 등¹⁶⁾은 약액고결토의 강도는 구속응력이

클수록 강도는 증가되는데 그의 증가정도는 固結土에 함유된 Silicate 量과 밀접한 관계가 있다고 보고한 바 있다. 본 연구에서도 구속응력이 클수록 약액농도에 의해 강도가 증가하는 것으로 Mitchell 이나 Krizek 의 연구결과와 같은 경향을 보였다.

구속응력은 固結體土粒子的 이동을 저지시키는 요소로 작용하기 때문에 구속응력이 클수록 전단저항이 커지게 되어 강도가 증대되고 체적 팽창성은 감소되며 아울러 점착력의 급격한 저하를 둔화시키려는 요소로 작용되기 때문에 파괴변형이 커지게 되는 것으로 생각된다.

5.2 고결토의 전단저항특성

剪斷強度는 점착력과 내부마찰각의 요소로 결정되는데, 약액고결토의 강도증대는 주로 점착력의 증가로 비롯되며 내부마찰각의 변화는 별 영향을 미치지 않는다는 많은 보고가 있다.

본 연구에서도 Fig. 3, 4 에서와 같이 약액농도가 커짐에 따라 未固結土에 비해 점착력은 매우 증가된 반면에 내부마찰각의 변화는 거의 없는 것으로 나타나 약액에 의한 고결토의 강도증대는 주로 점착력의 증가에 의한 것임을 알 수 있다. 그런데 고결토의 전단저항에 점착력성분이 주 요소로 작용하는 것은 검토해 보아야 할 것이다.

Fig. 4 에서 축변형에 따른 점착력(C_c)은 파괴전의 작은 변형율에서 급격하게 증가한 직후 급감소하여 파괴변형에서 점착력(C_c)이 작게 되는 경향을 보였다. 이는 파괴전의 작은 변형율에서 고결토의 공극의 약액이 부스러지기 때문에 점착력이 발휘되지 못하므로 즉, 약액 Gel 강도의 연속성이 저하되므로 점착력이 급감소되기 때문이며, 그 변형율 이후부터는 점착력성분이 감소되기 때문에 강도증대가 아주 완만하게 되는 것으로 판단된다.

전단저항의 마찰성분은 Fig. 5 에서와 같이 축변형이 증가함에 따라 점차로 증가하여 未固結土의 값과 비슷한 경향을 보였다.

점착력과 마찰성분이 고결토의 전단저항에 미치는 영향은 변형에 따라 크게 변화됨을 알 수 있다. 즉, 작은 변형율에서는 점착력이 매우 중

요한 요소가 되며 큰 변형율에서는 마찰성분이 커져서 점착력성분과 같이 작용하는 것으로 생각된다.

Fig. 5 에서 C_c 의 최대치의 변형율까지는 고결토보다 未固結土의 ϕ_c 이 크게 나타나는 경향은 C_c 의 최대치에 있는 축변형에서 고결토의 공극 Gel 이 부스러지기 때문에 변형이 커짐에 따라 점점 점착력 성분이 줄어들게 되어 즉, 공극 Gel 의 土粒자를 부드럽게 하는 성질이 점차 없어지므로 인해 土粒子間의 interlocking 현상이 크게 되어 ϕ_c 값이 커지게 되기 때문으로 판단된다.

작은 변형율에서의 Yielding 현상은 고결토의 空隙內의 약액의 거동 때문에 생기는 것으로 Yielding 이 발생하는 축변형까지는 약액의 성질과 土粒자의 결합에 의해 지배되나, 전단응력이 증가함에 따라 약액의 성질이 변하게 되고 土粒자의 결합이 깨지는 현상^{17,18)}이 나타나 점착력이 감소하게 되며 아울러 마찰력은 점점 크게 된다.

이상에서와 같이 약액에 의한 고결토의 점착력은 작은 변형율에서 급격하게 증가하여 최대치에 도달하며 그 후 감소하는데, 큰 변형율에서의 점착력의 감소는 고결된 약액자체의 파괴와 관련된 것임을 알 수 있다.

6. 結 論

(1) 固結土의 양생기간에 따른 強度經時變化는 養生 3 H 內에 長期(60 日) 強度의 약 90% 정도 發現된다.

(2) 약액농도가 클수록 固結土의 파괴시 축차응력과 체적변화는 증가하는 반면에 축변형은 감소된다.

(3) 固結土에서 剪斷抵抗의 점착력성분은 작은 변형율에서 최대치에 도달하여 그 후 빠르게 감소하나 파괴시의 剪斷強度에는 도움을 준다.

(4) 큰 변형율에서 고결토의 점착력의 감소는 고결된 약액자체의 파괴에 기인된 것으로 판단된다.

(5) 전단저항의 마찰성분은 축변형이 증가함에 따라 점차로 증가하는데, 작은 변형율에서는

未固結土가 약간 컸으나 파괴변형에서는 거의 같은 경향을 보였다.

參 考 文 獻

1. Glossop, R. "The Invention and Development of injection process," *Geotechnique*, Vol.11, 1961, pp.255~279.
2. Karol, R.H. "Chemical Grouting technology," *ASCE*, Vol.94, SM1, 1968, pp.175~204.
3. 土質工學會 編集委員會, "藥液注入工法の 調査・設計から 施工まで", 土質工學會, 1985, pp.4~9, 東京.
4. Warner, J. "Strength Properties of Chemically Solidified Soils," *ASCE*, Vol.98, SM11, 1972, pp.1163~1185.
5. Diefenthal D.C. etc., "Strength and Stiffness of Silicate Grouted Sand with Different Stress Histories," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 2, No. 4, 1979, pp.200~205.
6. 森麟外, "結合劑による土の 強度増大機構", 第3回 土質工學研究發表會講演集, 1968, pp.175~179.
7. Krizek R.J. etc., "Effective Stress-Strain-Strength Behavior of Silicate-Grouted Sand," *Pro. of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, *ASCE*, Vol. 1, 1982, pp.482~497.
8. Krizek, R.J. "Mechanical Behavior of Chemically Grouted Sand," *ASCE*, Vol.108, 1982.
9. 森麟外, "固結した 土の 構造性 粘着力", 第3回 土質工學研究發表會 講演集, 1968, pp.11~16.
10. Schmertmann, J. Osterberg, J. "An Experimental Study of the Development of Cohesion and Friction with Axial Strain in Saturated Cohesive Soils," *Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, *ASCE*, Boulder, Colorado, 1960, pp.643~694.
11. Koerner, R.M. "Effective of Particle Characteristics on Soil Strength," *ASCE*, Vol.96, SM4, 1970, pp.1221~1233.
12. Lee, Kenneth L. "Drained Strength Characteristics of Sand," *ASCE*, Vol.93, SM6, 1967, pp.117~141.
13. Nasser, S.N. "On Behavior of Granular Materials in Simple Shear," *ASCE*, Vol. 20, SM3, 1980, pp.59~73.
14. 春山元壽, "ミウのような 砂質土の イソクローッキソグについて", 第1回 土質工學研究發表會 講演集, 1966, pp.139~143.
15. Mitchel, James K. "Fundamental of Soil Behavior," John Wiley & Sons, INC., 1976.
16. Krizek, R.J. Borden, R.H. "Creep Behavior of Silicate-Grouted Sand," *Pro. of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, *ASCE*, Vol. 1, 1982, pp.482~497.
17. Stetzler, B.U. "Mechanical Behavior of Silicate-Grouted Soils," *Pro. of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, *ASCE*, Vol.1, 1982, pp.498~513.
18. 赤木實一外, "水がラス系の 藥液で 固結させた砂の 非排水強度特性", 第19回 土質工學研究發表會 講演集, 1984, pp.1603~1604.
19. 森麟外, "水がラス藥液により 固結した 砂の 透水係數と ダイレイタンスー について", 第20回 土質工學研究發表會 講演集, 1985, pp.1669~1672.
20. 平野學外, "水がラス固結砂の 強度と 間隙充填率 について", 土木學會 第41回 年次學術講演會, 1986, pp.187~188.

(접수일자 1988. 6. 14)