

물유리系 藥液固結土의 粘·塑性特性에 관한 實驗的 研究

Experimental Study on Visco-Plastic Characteristics of Silicate-Grouted Soil

鄭 亨 植*
Chung, Hyung-Sik
柳 在 逸**
Ryu, Jae-Il

Abstract

When a ground soil is under the constant continuous stress less than the failure strength of that soil, its deformation, in some cases, will increase continuously as time goes on due to creep phenomena. Deformation of soil caused by creep behavior will appear in various types depending on the elastic, plastic, viscous properties of soil.

Therefore in this study, visco-plastic characteristics of grouted soil was studied by analysing the result of uniaxial creep test on the grouted soil.

As a result of this research, it was found that the rheological model of grouted soil can be decided as Vyalov model and the visco-plastic properties of grouted soil is influenced by the content of silicate in grout.

要 旨

地盤土가 長時間에 걸쳐서 파괴강도보다 작은 一定持續應力下에 있게 되면 시간의 경과와 더불어 크리프(Creep)현상에 의해 변형이 지속적으로 증가되어 파괴에 이르기도 한다. 이러한 creep 거동에 의한 地盤變形은 지반의 탄성·점성·소성특성에 따라 다양하게 나타난다.

따라서 본 연구에서는 固結土에 대한 일축 크리프실험결과로부터 고결토의 점·소성특성에 대해 고찰하였다.

연구결과 물유리계약액고결토의 流變學的 모델(Rheological Model)은 Vyalov의 모델로 결정할 수 있으며, 고결토의 점·소성특성은 硅酸鹽(Silicate) 농도와 밀접한 관계가 있음이 발견되었다.

1. 序 論

地盤이 오랜 시간동안 단기파괴강도(Short-term strength)보다 작은 一定應力下에 있게 되

면 시간의 경과와 더불어 변형이 연속적으로 증가되어 결국은 파괴에 이르지만, 일정한도 이하의 應力下에서는 변형의 진행이 중지되어 파괴에 이르지 않는 경우도 있다. 이들 거동은 흙의 종류, 구조, 응력이력, 응력상태, 배수조건 등

* 正會員, 漢陽大學校 工科學 土木工學科 教授

** 正會員, 漢陽大學校 大學院 博士課程

기타 많은 요소들에 의해 지배되며 시간적으로도 완·급 등 다양하게 진행되는 복잡하고 예측하기 어렵다.

이러한 시간의존성거동은 크리이프 현상에 기인하며^{1,2,3,4)} 흙의 전단저항 및 응력-변형응답의 시간의존성요소에 따라 그의 크리이프곡선은 다양하게 나타난다. 시간의존거동(Time-dependent behavior) 특성은 댐공사, 터널공사 등 연약지반위에 구조물을 축조할 때 또는 斜面의 安定解析⁵⁾에 아주 중요하며 앞으로 연구하여야 할 문제점 중의 하나로 사료된다.

시간의존성거동은 흙의 탄성적·점성적·소성적 성분에 따라 그 특성을 갖게 되며, 이들의 성분을 구분하여 표시하기 위한 여러 가지 流變學的 모델이 제안되었다. 流變學的 모델은 스프링(Spring), 데쉬포트(Dashpot), 슬라이더(Slider)를 조합하여 재료의 탄성적, 점성적, 소성적 성분을 구분하여 표시할 수 있다.

약액주입공법은 시간이 경과함에 따라 불투수성 겔(Gel)을 형성하는 화학약액을 地盤內의 空隙에 充填·固結시킴으로서 지반의 투수성을 감소시키거나 지반강도를 증대시키는데 주 목적이 있는 공법이다.

구조물 축조시 遮水 및 基礎補強으로 댐공사, 터널공사 등의 현장지반이 砂質土인 경우에 약액주입공법이 많이 이용된다. 일반적으로 크리이프현상이 별로 나타나지 않는 사질토에 약액을 주입함으로써 고결토는 크리이프현상이 큰 점탄성, 점소성의 특성^{10,11,13)}으로 변하게 된다. 이러한 점탄성, 점소성의 고결토가 단기파괴하중보다 작은 하중에서도 오랜 시간이 경과하면 크리이프 변형이 증대되어 파괴에 이르게 되는 심각한 위험이 초래될 수 있다. 따라서 약액 주입공법의 설계 및 시공에 고결토의 점탄성, 점소성특성이 반드시 고려되어야 할 것이다.

현재까지는 약액주입에 의한 토질구조물의 설계 및 시공에 고결토의 점탄성, 점소성특성을 무시해 왔으나, 앞으로는 고결토의 이들 특성을 고려한 안전설계 및 안전시공에 대한 대책이 강구되어야 하며 이에 대한 표준적인 기준설정을 위해 많은 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 砂質土에 약액을 주입한 고결토의 점탄성, 점소성특성을 구명함으로써 약액주입에 의한 토질구조물의 안전설계 및 시공에 필요한 자료의 제공과 고결토의 流變學的 모델을 결정하는데 연구의 주목적을 두었다.

2. 流變學的 모델(Rheological Model)

일반적으로 사용되는 流變學的 모델을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

流變學的 모델은 Hook 법칙에 따르는 스프링을 사용한 탄성요소("H"로 표시), Newton 법칙에 따르는 데쉬포트를 사용한 점성요소(N) 그리고 Saint-Venant 법칙에 따르는 Dry-friction 요소에 의한 소성요소(SV)들을 조합하여 재료의 특성에 알맞은 모델을 결정할 수 있다.

2.1 점탄성모델

점탄성모델은 탄성요소와 점성요소들을 조합하는 방법에 따라 재료의 특성을 나타내는 모델이다.

(4) Kelvin-Voigt 모델

탄성요소와 점성요소가 수평으로 연결된 모델로서 일반적으로 이 모델을 Kelvin 모델이라 하며 K 로 표시한다(Fig. -1(a)).

$$K = H \parallel N$$

Kelvin-Voigt 모델의 일반적인 식은 다음과 같다.

$$\tau = \tau^H + \tau^N$$

τ^H : 탄성요소에 의한 응력

τ^N : 점성요소에 의한 응력

(2) Maxwell 모델

탄성요소와 점성요소가 수직으로 연결된 모델로서 M 으로 표시한다(Fig. 1(b)).

$$M = H - N$$

Maxwell 모델의 일반적인 식은 아래와 같다.

$$r^M = r^H + r^N$$

r^H : 탄성요소에 의한 변형

r^N : 점성요소에 의한 변형

(3) 일반적인 점성모델

Maxwell 모델과 Kelvin 모델을 조합한 것으로 탄성요소를 Kelvin 모델에 연결시킨 형태로 된

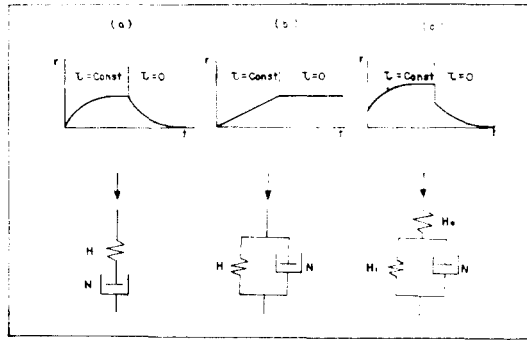


Fig. 1 Models of viscoelastic bodies : (a) Kelvin-Voigt body (b) Maxwell body (c) Generalized viscoelastic body

모델이다(Fig. 1(c)). 이 모델은 Hohenemser-Prager 모델이라고도 하며 HP 로 표시한다.

$$HP = H_0 - (H_1 | N) = H - K$$

2.2 탄소성 및 점소성모델

탄소성의 Prandtl 모델은 탄소성요소와 Saint-Venant 요소를 연결시킨 모델(Fig. 2(a))로서 $\tau < \tau_y$ (항복응력) 일 때 탄성변형이 일어난다.

점소성의 Bingham 모델(Fig. 2(b))은 탄성요소 H 와 점성요소 N 그리고 Saint-Venant 요소 SV 로 이루어진 모델로서 B 로 표시한다.

$$B = H - (N | SV)$$

점소성의 Schwedoff 모델을 탄성요소 H_0 와 H_1 이 점성요소 N 과 Saint-Venant 요소 SV 가 연결된 모델(Fig. 3(c))로서 SW 로 표시한다.

$$SW = H_0 [(H_1 | N) | SV] \\ = H_0 - (M | SV)$$

M : Maxwell 모델

2.3 조합모델

이상에서 설명한 각 모델을 재료의 탄성·점성·소성특성에 맞도록 조합한 모델이다. 이들 조합모델에는 여러 형태의 많은 모델이 있으나, 대표적인 몇 가지 모델은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3(a)의 모델은 Vyalov가 1959년에 제안한 모델이다. 이 모델은 Hohenemser-Prager 모델에 Bingham 모델을 연결한 것으로 일반적인 식은 다음과 같다.

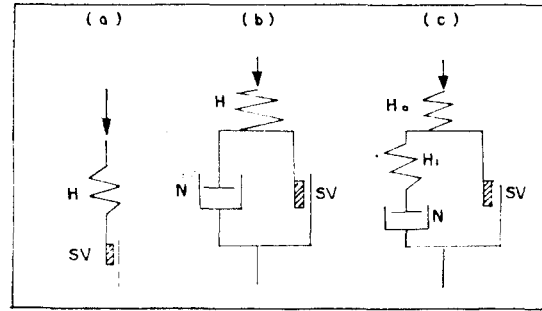


Fig. 2 Models of elastoplastic and viscoplastic bodies : (a) Prandtl body (b) Bingham body (c) Schwedoff body

$$r^V = r^{HP} + r^B$$

r^{HP} : Hohenemser-Prager 모델의 변형

r^B : Bingham 모델의 변형

Fig. 3(b)는 Goldstein이 1979년에 제안한 모델로서 이 모델은 Vyalov 모델에 또 다른 Saint-Venant 요소를 추가한 모델이다.

이 모델은 극한응력이 두곳(SV_1, SV_2)에서 생기는 특징을 갖고 있다.

Fig. 3(c)는 1966년에 Kisiel-Lysk에 의해 제안된 모델로 Schwedoff 모델에 점성요소를 연결시킨 것과 같은 모델이다.

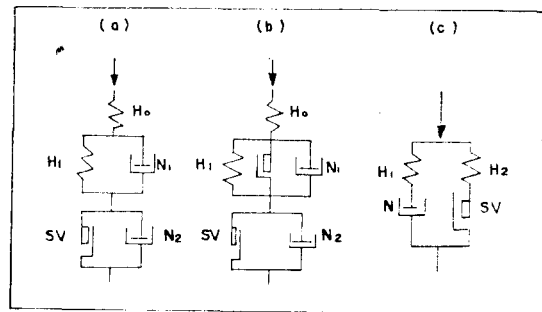


Fig. 3 (a) Vyalov model (b) Godstein model (c) Kisiel-Folque model

3. 實 驗

3.1 試料土 및 사용약액

본 연구에 사용한 시료토는 깨끗한 한강모래를 체분석하여 (0.25~0.42 mm) 사용하였다.

사용약액은 물유리계용액형약액으로 규산염농

도를 30%, 50%, 70%로, 겔시간(Gel time)을 시료토와 혼합공시체 제작이 가능하도록 하기 위해 4분으로 하였다.

약액의 배합시방에는 table 1과 같으며 물유리수용액과 경화제수용액의 용적배합비를 1:1로 하여 사용하였다.

Table 1. 약액의 配合示方例

구분	Silicate 농도(%)			
	성분	30	50	70
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 밑 부분에 집착테프를 붙인 PVC 몰드($\phi 3.5 \text{ cm} \times H 7 \text{ cm}$)내에 소정의 약액을 넣고 유리 깔대기로 시료토 102g을 살살 넣어서(공극비: $e=0.75 \pm 0.01$) 느슨하게 제작하였다.

양생방법은 水中養生으로 하였으며, 水溫은 20°C 내외로 하였다.

3.3 실험방법

본 연구를 위해 일축압축실험과 일축크리이프 실험을 하였다.

일축압축실험 삼축압축실험기를 사용하여 排水조건의 변형제어 방식으로 변형속도는 $0.2\%/min$ 로 하여 실험하였다.

일축 Creep 실험은 일축압축실험과 같은 배수 조건으로하여 一定應力상태로 실험하였다. 적용 응력비는 일축압축강도의 75% 및 50%로 하였다.

그리고 일축압축실험 및 일축크리이프실험은 3日間 水中養生한 공시체를 사용하였다.

4. 실험결과 분석 및 고찰

4.1 고결토의 응력-변형거동

고결토의 일축압축실험에 의한 대표적인 응력-변형곡선은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서와 같이

규산염농도가 증가되면 고결토의 파괴는 더욱 취성적으로 되고 파괴변형은 더욱 작게 나타났으며, 최대강도와 剛性(Stiffness)은 증가하는 경향을 보였다.

고결토의 강도와 剛性(Stiffness)의 거동에 대한 규산염농도의 효과^{6,7)}는 Fig. 5와 같이 규산염농도가 커짐에 따라 강도와 剛性(Stiffness)은 증가하였다.

파괴시의 탄성계수와 규산염농도의 관계는 일축압축강도의 경우와 매우 비슷한 양상을 보였으며, 剛性(Stiffness)의 실제적인 증가는 물유리계 약액의 규산염 함유량의 증가에 좌우된다.

이상에서와 같이 규산염 함유량은 고결토의 거동에 지대한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

물유리계 약액에 의한 고결공법을 지반지지공에 적용할 때 강도보다는 지반에 전달되는 剛性(Stiffness)이 지반거동에 미치는 영향⁸⁾이 크기 때문에 고결토의 응력-변형거동은 매우 중요한 것으로 생각된다.

4.2 고결토의 시간의존성거동 특성

적용응력의 크기에 따라 크리이프 변형은 감쇠크리이프(Attenuating creep)와 비감쇠크리이프 나눌 수 있으며 다시 비감쇠크리이프는 1

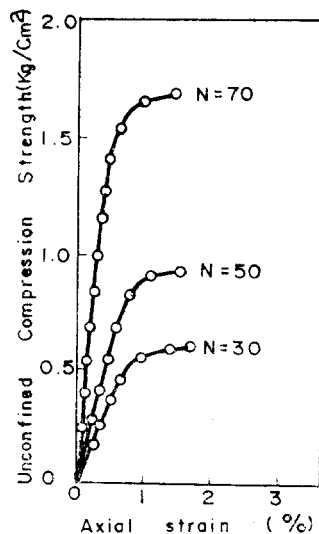


Fig. 4 Typical stress-strain curves in unconfined compression of grouted soils(N: Silicate content(%))

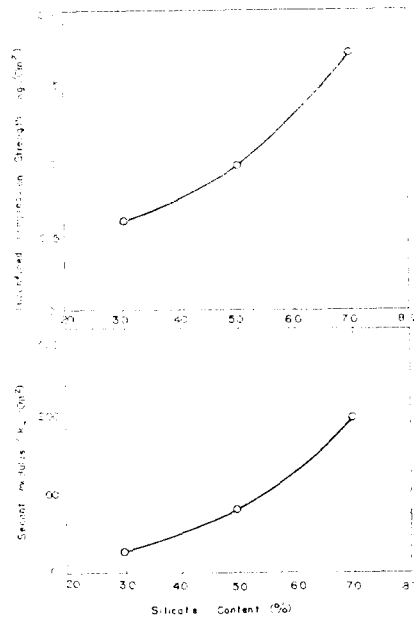


Fig. 5 Effect of silicate content strength and modulus

차 creep(AB 구간), 2차 creep(BC 구간), 3차 크리이프(CD 구간)으로 세분된다(Fig. 6)

고결토의 시간의존거동(Time-dependent behavior) 특성을 조사·검토하기 위하여 일축크리이프시험을 하였는데, 일축압축시험에서 결정환 단기 강도(Short-term strength: $\dot{\epsilon}=0.2\%/min$)의 75%와 50%에 해당하는 크리이프응력을 적용하여 규산염농도 별로 水中 3日養生한 공시체를 대상으로 실험하였다.

고결토의 일축압축실험 및 크리이프실험의 결

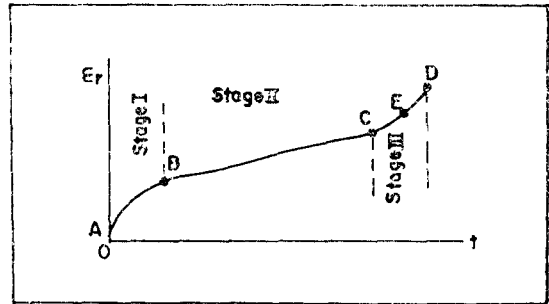


Fig. 6 Attenuating creep curve.

과는 실험치들의 평균값을 사용한 것으로 Table 2와 같다.

여기서,

q_u : 일축압축강도($\dot{\epsilon}=0.2\%/min$)

q_0 : creep 적용응력

SCR : 적용응력비 (Constant stress ratio)

$$=q_0/q_u$$

고결토의 규산염농도에 따른 creep 곡선은 Fig. 7, 8과 같으며 이들 크리이프곡선 및 式(1), 式(2)로부터 구한 초기탄성계수(E_i)와 2차크리이프구간의 粘性係數(η)는 Table 3과 같다.

$$E_i = q_0 / \epsilon_i \dots\dots\dots(1)$$

$$\epsilon = \frac{1}{\eta} \cdot q_0 \cdot t$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{\eta} \cdot q_0 \dots\dots\dots(2)$$

$$\therefore \eta = \frac{1}{\dot{\epsilon}} \cdot q_0$$

Table 2. The results of uniaxial compression test and creep test.

Silicate content (ϵ_c)	Uniaxial comp. test ($\dot{\epsilon}=0.2\%/min$)		Creep test					
	q_u (kg/cm ²)	ϵ_f (%)	CSR=0.75			CSR=0.5		
			q_0 (kg/cm ²)	ϵ_f (%)	t_f (hr)	q_0 (kg/cm ²)	ϵ_f (%)	t_f (hr)
30	0.60	1.7	0.45	3.3	0.46	0.30	2.9	67
50	1.94	1.57	0.71	3.1	0.58	0.47	2.5	83
70	1.60	1.43	1.20	3.0	0.93	0.80	2.2	120

SCR(= q_0/q_u)이 0.75인 때 고결토의 크리이프곡선은 Fig. 7과 같으며 모든 실험공시체는 3.0%~3.3% 변형률에서 파괴되었다. 이때 규산염농도에 따른 파괴변형은 뚜렷하지 않았지만 크리이프지속시간은 뚜렷한 경향을 보였는데, 규산염농도(N)가 30%인 때 지속시간(t_f)은 약 28분, N=50%인 때 약 35분 그리고 N=70%일 때 약 56분으로 나타났다.

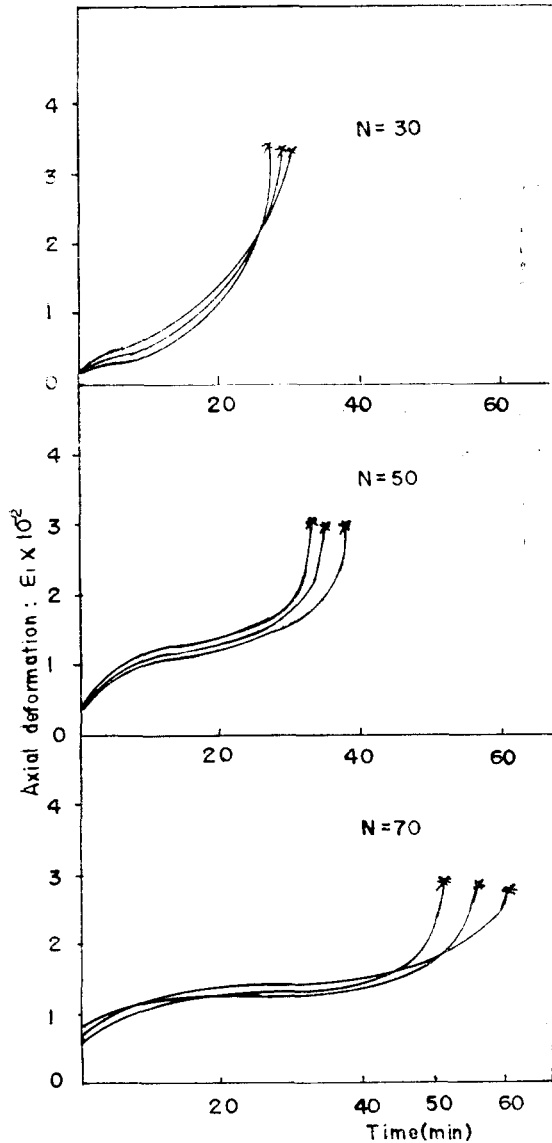


Fig. 7 Creep curves of grouted soils.
(SCR=0.75, N : Silicate content (%))

Table 3. Initial Modulus (E_i) and Viscosity Coefficient (η) of grouted soils.

CRS	Silicate Content(%)	E_i (kg/cm ²)	η (kg·sec/cm ²)
0.75	30	195	3.3×10^4
	50	210	2.5×10^5
	70	330	1.0×10^6
0.5	30	260	6.2×10^6
	50	370	2.4×10^7
	70	520	2.3×10^8

Fig. 8은 SCR=0.5인 경우의 크리이프곡선이며 이 때에도 모든 실험공시체는 파괴되었다. Fig. 8에서 규산염농도가 클수록 파괴변형은 작게 나타났으나 creep 지속시간은 규산염농도가 클수록 길어지는 경향을 보였다. 즉, N=30%인 때 파괴변형(ϵ_f)은 약 2.9%, N=50%인 때 $\epsilon_f \approx 2.5\%$, N=70%인 때 $\epsilon_f \approx 2.2\%$ 그리고 creep 지속 시간(t_f)는 N=30%인 때 $t_f \approx 67$ 시간, N=50%인 때 $t_f \approx 83$ 시간, N=70%인 때 $t_f \approx 120$ 시간으로 나타났다.

이상에서와 같이, 규산염농도가 클수록 creep

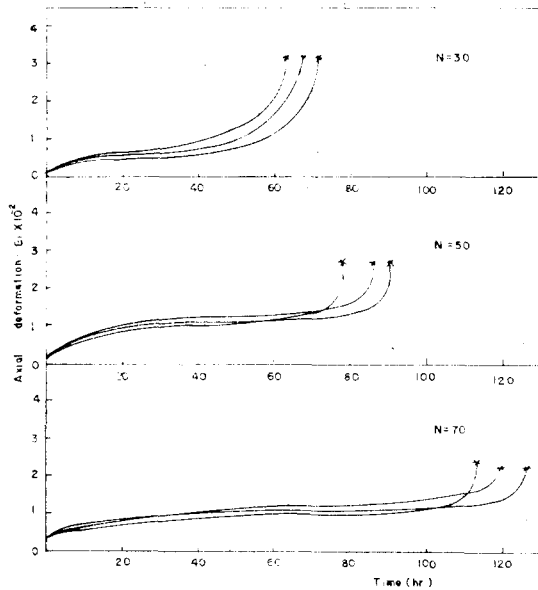


Fig. 8 Creep curves of grouted soils.
(SCR=0.5, N : Silicate Content (%))

지속시간이 길어지는 것은 Table 3에서와 같이 규산염농도가 클수록 점성계수(η)가 커짐으로 인해서 고결토의 粘性抵抗이 커져서 크리이프 변형속도¹³⁾가 감소되기 때문으로 판단된다.

또 규산염농도가 클수록 파괴변형이 작게 되는 경향을 보였는데, 이는 앞에서 언급된 바와 같이 규산염농도가 클수록 剛性(Stiffness)이 증대되기 때문으로 설명된다.

그리고 Table 2에서와 같이 동일농도를 갖는 공시체에서 크리이프지속시간이 길수록 점성계수가 커지는 현상은 점성토의 텍소트로피(Thixotropy)효과^{9,14,15)}와 비슷한 현상으로 설명될 수 있는데, 이는 약액자체가 시간이 경과함에 따라 점성이 회복되는 것으로 보여진다.

크리이프적응능력비(SCR)가 0.75인 물유리계약액의 Homo-Gel에 대한 크리이프곡선(Fig. 9)으로부터 Homo-Gel은 주로 粘性成分을 갖고 있음¹⁶⁾을 알 수 있으며 또한 규산염농도가 클수록 점성이 커지는 경향을 보였다.

고결토에서도 Homo-Gel과 같은 이러한 경향으로 나타났는데, 이는 Silicate 농도가 커질수록 점성이 증대되기 때문인 것으로 추정된다.

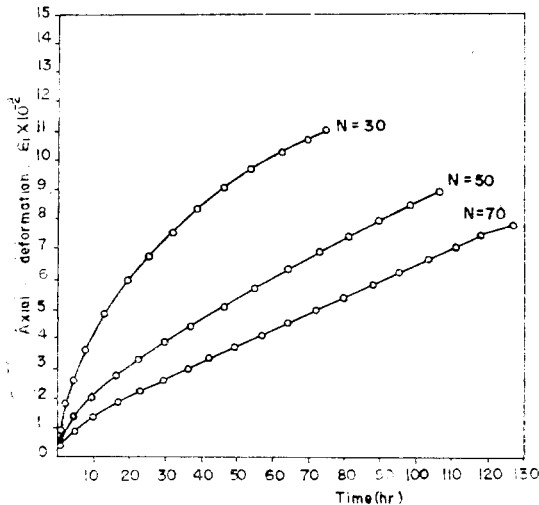


Fig. 9 Creep curves of Homo-Gel. (SCR=0.75, N: Silicate content (%))

4.3 고결토의 流變學的 모델

적응능력비 SCR=0.75, Silicate 농도 70%인 고결토의 재하~제하(Loading~Unloading)시험

결과의 $\epsilon_r \sim t$ 관계는 Fig. 10과 같다.

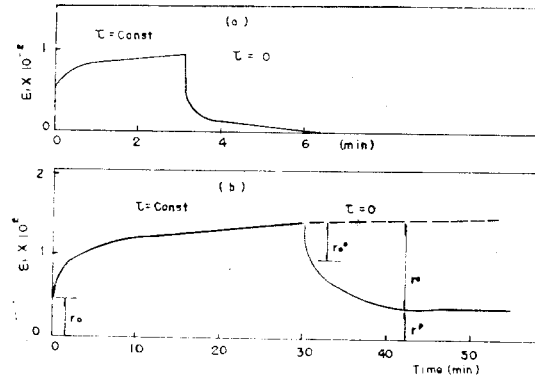


Fig. 10 Loading ($\tau = \text{const}$) and unloading ($\tau = 0$) in: (a) Viscoelastic body (b) Viscoelastic-plastic body

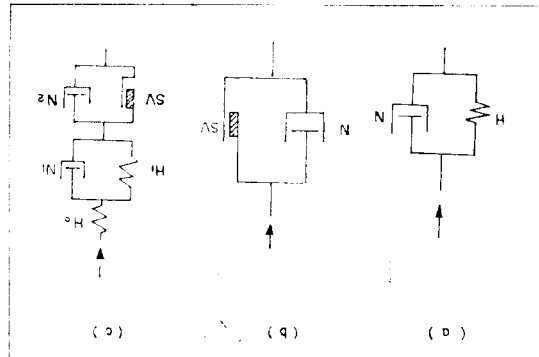


Fig. 11 Mechanical models simulating the process of creep for grouted soils.

Fig. 10(a)는 소정의 크리이프 하중을 3분간 載荷(1차 creep 구간)한 후에 除荷시킨 것으로 荷重除荷 3분 후에 변형은 원 상태로 회복되었는데, 이러한 거동은 점탄성의 특성을 갖는다.¹⁷⁾ 따라서 고결토의 1차 크리이프구간은 Fig. 11(a)와 같은 모델로 됨을 알 수 있다.

그리고 Fig. 10(b)는 30분 載荷(2차 creep 구간)한 후에 除荷시킨 것으로 荷重除荷 25분 후에 변형이 일정하게 되었는데, 이러한 거동은 점소성특성을 갖게되므로¹⁷⁾ 고결토의 2차 creep 구간은 Fig. 11(b)와 같은 모델로 된다.

이상으로부터 초기의 탄성요소와 Fig. 11(a), (b) 모델을 조합하면 물유리계약액 고결토의 流變學的 모델은 Fig. 11(c)와 같은 Vyalov 모델로 될 수 있음을 확인하였다.

5. 結 論

1. 砂質土에 물유리계약액을 주입한 고결토는 현저한 점탄성·점소성의 성질을 나타냈으며 단기파괴하중의 1/2에서도 Creep 후 파괴되었다. 고로, 토질구조물설계 및 시공에 固結土의 점탄성·점소성특성이 반드시 고려되어야 한다.

2. 규산염농도가 클수록 그리고 적용응력이 작을수록 Table 3에서와 같이 초기탄성계수(E_i) 및 점성계수(η)는 증대되는 고결토의 크리이프(Creep) 특성을 나타냈다.

3. 규산염농도가 클수록 크리이프지속시간이 길어진다. 그리고 Table 2에서와 같이 동일농도를 갖는 공시체에서 크리이프(Creep)시간이 길어질수록 점성계수(η)가 커지는 현상은 점성토의 틱소트로피(Thixotropy)효과와 비슷한 현상으로 설명될 수 있다.

4. 고결토는 1차 크리이프(Creep)구간에서 점탄성, 2차 크리이프구간에서는 점소성의 특성을 갖는다.

5. 고결토의 流變學的 모델은 Vyalov 모델로 될 수 있음을 확인하였다.

參 考 文 獻

1. J.P. Koenzen, "Time-Dependent Stress-Strain Behavior of Silicate-Grouted sand," ASCE, vol. 103, no. GT8, 1977, pp. 903~908.
2. A.W. Bishop, H. T. Lovenbury, "Creep Characteristics of TWO Undisturbed clays," 7th International Conference on soil mechanics and Foundation Engineering, Mexico, vol. 2, 1969, pp. 29~37.
3. Awtar Singh, J.K. Michell, "Creep potential and Creep Rupture of soils," "7th International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering," Mexico, vol. 1, 1969, pp. 379~384.
4. R.H. Borden, etc., "creep behavior of silicate-Grouted sand," Pro. of conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 1, 1982, pp. 450~469.
5. Centin Soydemir, W.E. Schmid, "Deformation and Stability of Viscoelastic soil Media," ASCE, vol. 96, NO. SM 6, 1970, pp. 2081~2090.
6. Cumaraswamy Vipulandan, R.J. Krizek, "Mechanical Behavior of Chemically Grouted sand," ASCE, Vol. 112, 1986, pp. 869~887.
7. R.R. Davidson, etc, "Properties of chemically Grouted sand at Locks and Dam NO. 26," Pro. of conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 1, 1982, pp. 433~449.
8. G.W. Clough, etc., "Silicate-Stabilized sands," ASCE, Vol. 105, NO. GT1. 1979, pp. 65~82.
9. 이종규, "粘土의 Creep 學動에 관한 流變學的 研究", 大韓土木學會誌, 第1卷, 第1號, 1981, pp. 53~67.
10. Awtor Singh, J.K. Mitchell, "General Stress-Strain-Time Function for soils," ASCE, Vol. 94, NO. SM1, 1968, pp. 21~45.
11. J. Warner, "Strength Properties of Chemically Solidified Soils," ASCE, Vol. 98, NO. SM11, 1972, pp. 1163~1185.
12. Fujiya Komamura, R.J. Huang, "New Rheological Model for soil Behavior," ASCE, Vol. 100, No. GT7, 1974, pp. 807~824.
13. J.K. Michell, etc, "Soil Creep as a Rate process," ASCE, Vol. 94, NO. SM1, 1968, pp. 231~253.
14. Y.P. Vaid, R.G. Campanella, "Time-Dependent Behavior of Undisturbed Clay," ASCE, Vol. 103, NO. GT. 7 1977, pp. 693~709.
15. M.J. Keedwell, "Rheology and soil Mechanics," Elsevier Applied Science Publishers, London-NewYork, 1984, pp. 72~77.
16. 米倉亮三, 加賀宗彦, "ホモゲルの 工學的 特性," 第20回 土質工學研究發表會講演集, 1985, pp. 1667~1668.
17. S.S. Vyalov, "Rheological Fundament of soil Mechanics," "Elsevier Science Publishers B.C," Amsterdam, 1986, pp. 128~137.

(접수일자 1988. 9. 3)