

安山地域 海成粘土의 크리프 定數에 관한 研究

A Study on the Creep Parameters of Ansan Marine Clay

정 형 식*¹

Chung, Hyung - Sik

안 상 로*²

Ahn, Sang - Ro

Abstract

Soil structures which are constructed over the soft ground settle continuously by the self-weight of embankment for a long time. It is because of time-dependent behaviours: consolidation and creep occurring simultaneously.

This paper tries to determine the required parameters for analysis of the creep behaviour in marine clays and studied the effect of the confining stress and stress level on the creep parameters.

As a result, it presents an equation for the determination of creep parameters according to stress level considering that elastic modulus E_1 and creep parameter η are found to be affected by the applied stress level.

요 지

연약 지반위에 축조된 토질 구조물은 제체의 자중으로 인하여 오랜 기간 동안 침하가 계속되는데 이는 時間依存的 舉動인 압밀과 크리프(creep)가 동시에 작용하여 발생된다.

본 연구에서는 안산의 해성점토에 대하여 크리프거동 해석에서 필요한 정수를 구하고 수치해석시 중요시되고 있는 구속응력과 응력수준에 따른 크리프정수의 영향 특성에 대하여 연구하였다.

그 결과 탄성계수 E_1 과 크리프정수 η 는 적용응력 수준에 영향을 받는 것으로 나타나 응력수준에 따른 크리프정수 결정식을 제시하였다.

1. 서 론

점토에 어떤 일정한 剪斷力을 가하고 그대로 유지하면 시간이 경과함에 따라서 전단변형이 증가하는 현상이 있다. 이것은 일종의 크

리프라고 할 수 있는데 크리프는 예를 들면 압밀현상, 산사태, 법면의 안정, 혹은 지지력의 解明에 영향이 커서 그 연구가 필요하다. 이러한 거동은 빠른 속도로 일어나기도 하고 매우 느린 속도로 일어나기도 하는데 이는 흙의 종류, 응력이력, 배수조건 등에 따라 다를 뿐 아

*¹ 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

나라 특히 함수비 및 應力水準(stress level)에 크게 영향을 받기 때문이다.^{1),2)}

한편 크리프거동에 대한 정의는 해석방법에 따라 몇가지로 설명되는데 일반적으로 점성토에서 크리프라 함은 포화점도에서는 1차 압밀을 제외한 時間依存變形만을 의미하고 불포화점도에서는 모든 시간의존변형을 뜻한다.^{3),11),12)}

본 연구에서는 해안을 매립하거나 방조제와 같은 토공 구조물을 건설할 때 일반적으로 기초지반에 분포되어 있는 해성점도의 크리프거동을 해석하는데 필요한 크리프정수를 실험을 통하여 구하고 각각의 크리프정수들이 구속응력과 적용 응력수준에 미치는 영향을 분석, 검토하였다.

2. 흙의 크리프 특성

2.1 크리프의 메카니즘

흙에서 크리프는 응력, 간극률, 함수비, 온도, 밀도 등에 영향을 받는다. 크리프는 減衰 크리프와 非減衰 크리프로 나눌 수 있으며, 그림 1(b)와 같이 非減衰 크리프는 1차 크리프(선분 AB), 2차 크리프(선분 BC), 3차 크리프(선분 CD)로 세분된다. 흙의 변형은 하중 적용 후에 즉시 발생하는 瞬間變形 ϵ_0 와 시간이 경과함에 따라 발생하는 변형 $\epsilon(t)$ 의 합으로 표시된다.^{4),5),6)}

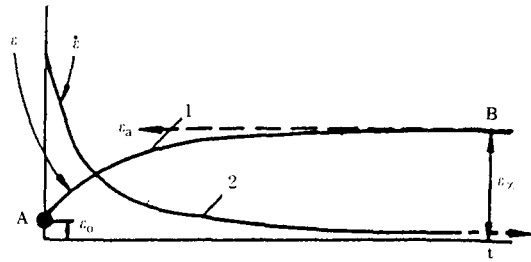
I 단계(non-steady flow : 선분AB) : 변형률이 감소율로 진행되는 감쇠크리프 변형구간으로 변형은 점탄성이다.

II 단계(steady flow : 선분BC) : 변형률이 최소에 도달한 후 일정하게 되며, 이 단계를 점소성 흐름단계라고 한다.

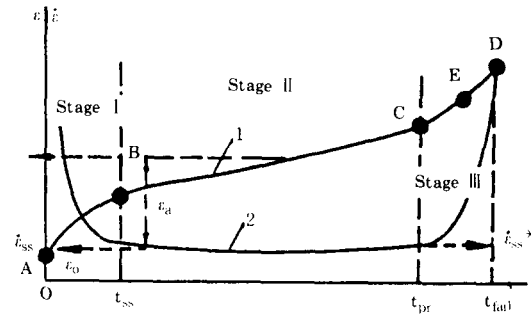
III 단계(progressive flow : 선분CD) : 변형률이 급속히 증가하여 점성 또는 취성에 도달하며, 이 과정을 파쇄단계라 한다.

크리프변형은 식(1)과 같이 각 단계에서 발생하는 변형의 합으로 총체적인 변형을 나타내는 것이 일반적이다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \dots \dots \dots (1)$$



(a) Attenuated Creep



(b) Non-attenuated Creep

Fig. 1 Creep behavior with time

2.2 점토의 크리프구성식

점토의 應力-變形-時間關係의 크리프거동을 수학적으로 표현하는 데에는 여러 형태의 流變學의 모델이 사용되며, 이는 Hook의 법칙, Newton의 법칙 및 Saint-Venant법칙에 의한 彈性, 粘性, 塑性要素를 삼축압축시험기에 의하여 제하와 재하시험을 거쳐 선정된 유변학적 모델에 맞도록 조합된 관계식으로 나타내는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 크리프의 메카니즘에서 일반적으로 표현되는 비감쇠크리프 중 1단계와 2단계를 보다 간편한 수식으로 나타낸 Senseny가 제안한 크리프 방정식 (2)에서 필요한 크리프정수를 구하였다.^{8),9),10)}

$$\epsilon_c = \dot{\epsilon}_{ss}t + \epsilon_a \{1 - \exp(-\eta t)\} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 ϵ_c = 크리프 변형률

$\dot{\epsilon}_{ss}$ = 정상상태 변형속도

ϵ_a = 점근 변형률

η = 점성계수
 t = 시간

연구자료에 의하면 크리프정수 $\dot{\epsilon}_{ss}$, e_0 , η 는 응력에 크게 의존하는 것으로 특히 e_0 와 η 는 정상상태 변형률 영역에서 응력 의존성이다. 한계 변형률 $\dot{\epsilon}_{ss}^*$ 는 정상상태의 영역이 종료하는 지점에서의 정상상태 변형속도로 이 지점을 경과하면 변형속도가 급격히 증가하면서 파괴에 이르게 되며, 정상상태 변형률 영역에서 전체 변형률 e_t 는 상수 ϵ_0 로 간주된다.

한편 파쇄지점에서 정상상태 변형속도를 $\dot{\epsilon}_{ss}$ 라 하면 점근 변형률은 $e_0 = \epsilon_0 (\dot{\epsilon}_{ss} / \dot{\epsilon}_{ss}^*)$ 가 되므로 한계 변형률 기준을 고려하여 $\dot{\epsilon}_{ss}$, e_0 그리고 η 를 응력 의존성에 의한 관계식으로 다시 쓰면 식(3)과 식(4)와 같다.

$$\epsilon_0 = \dot{\epsilon}_{ss} \{ t + \epsilon_0 / \dot{\epsilon}_{ss}^* [1 - \exp(-\eta t)] \};$$

$$\dot{\epsilon}_{ss} < \dot{\epsilon}_{ss}^* \text{인 경우} \dots \dots \dots (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{ss} \cdot t + \epsilon_0 [1 - \exp(-\eta t)] \};$$

$$\dot{\epsilon}_{ss} \geq \dot{\epsilon}_{ss}^* \text{인 경우} \dots \dots \dots (4)$$

본 연구에서는 장시간 크리프 시험을 실시한 결과 변형률은 시간이 경과함에 따라 일정한 비율로 감소하는 경향을 보였으며, 파쇄단계가 나타나지 않아 $\dot{\epsilon}_{ss} \geq \dot{\epsilon}_{ss}^*$ 인 경우를 택하였다.

다음은 $\dot{\epsilon}_{ss} = f(\sigma, T)$ 인 관계식을 나타낸 것이다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \cdot (3J_2)^{n/2} \exp[(-Q/R) \cdot T] \dots \dots (5)$$

$$J_2 = 1/6 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

$$= 1/2 \Delta\sigma^2$$

따라서 위의 식을 다시 정리하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \cdot (\sqrt{3}/2 J_2)^{n/2} \exp[(-Q/R) \cdot T] \dots (6)$$

여기서 $\Delta\sigma$ = 축차응력

T = 절대온도

$A, n, Q/R$ = 크리프 정수

여기서 크리프 정수 Q/R 은 보통 가스를 함유하고 있는 토질에서 변형을 제어하는 것으로 활동에너지의 비이며, 온도와 함께 변형속도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 응력수준에 따

른 크리프의 영향이 가스 및 온도의 영향보다 상대적으로 큰 효과를 나타낸다는 점을 감안하여 실험 여건상 고려하지 않았다. 따라서 Q/R 을 0으로 간주한 식(7)을 사용하였다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \cdot (\sqrt{3}/2 \Delta\sigma)^n \dots \dots \dots (7)$$

따라서 본 연구에서는 식(7)을 식(4)에 대입하고 $\epsilon = \Delta\sigma/E$ 를 대입하여 식(8)을 크리프 방정식으로 사용하였다.

$$\epsilon_0 = A \cdot (\sqrt{3}/2 \Delta\sigma)^n \cdot t + (\Delta\sigma/E_0)$$

$$[1 - \exp(-\eta \cdot t)] \dots \dots \dots (8)$$

3. 크리프실험 및 결과

3.1 실험장치

해성점토에 대한 크리프실험은 재료의 복잡성과 실험수행의 어려움으로 현재까지 표준적인 실험방법이 수립되지 못하고 있는 실정이다. 크리프 실험은 적용응력이 일정하도록 하기 위하여 시료의 단면적을 고려한 하중을 재하하는 것으로 이러한 원리는 삼축압축시험기에서 응력제어 시험에 해당한다. 본 연구에서 사용한 시험장치는 일본 Marui 사 제품인 삼축압축시험기로 전동재하장치가 0.0006-6mm/min의 변속범위에서 시험할 수 있는 變形制御式과 0-6kg/cm²의 압력범위에서 일정 하중을 가할 수 있는 應力制御式의 두가지 시험방법이 가능하며, 배수조건을 조절할 수 있는 시험기로서 실험 결과인 축하중, 변형량, 체적 변화 및 간극수압이 자동으로 기록되는 기록장치가 부착되어 있다.

3.2 시료

실험에 사용한 시료는 경기도 안산 앞바다에서 채취한 시료로 이 토질은 해성 실트질 점토로서 함수비가 높고 압축성이 크며, 퇴적토가 20m 심도까지 분포되어 있다. 시료채취는 현장에서 표토를 약 50cm 제거한 후 직경이 15cm이고 길이가 1m인 PVC통으로 제작한 샘플

Table 1 Physical properties

구분	액성한계 (%)	소성지수 PI(%)	함수비 (%)	간극비 e	포화도 %	단위중량 (g/cm ³)	비중	통일분류
실험치	42.3-	20.7-	70.1-	1.72-	98.3-	1.76-	2.55-	CL
	46.8	23.2	73.8	1.91	99.4	1.78	2.80	

플러를 압입하여 1m깊이에서의 不攪亂試料를 채취하였으며, 공시체는 직경 5cm, 높이 12.5cm로 마이터 박스를 사용하여 제작하였다. Table 1은 시료의 물리적 실험 결과이다.

3.3 실험방법

본 연구에서는 실제현장에서 공시체 제작을 위한 불교란 시료를 채취하는데 어려움이 있어 심도별로 동일한 토질특성을 갖는다고 가정하고 1m 깊이에서 채취한 시료로 제작된 공시체를 사용하여 48시간 동안 깊이를 고려한 구속 응력을 주어 현장조건과 같도록 안정화시킨 후 크리프시험을 실시하였다.

우선 구속응력이 각각 다른 상태에서 변형제어 실험을 실시하여 파괴시 축차응력($\Delta\sigma$)을 구하고 이들 값의 50%, 70%, 90%인 응력을 응력제어실험에서 적용응력수준($\Delta\sigma$)으로 택하여 크리프시험을 실시하였다. 이에 대하여 일부 연구자료에 의하면 크리프 실험시 적용응력 수준은 파괴강도의 30%에서 90%까지를 적용하고 있다.

한편 현장에서 연약지반위에 토공 구조물을 축조할 때 기초지반의 깊이에 따라 크리프거동이 상이하기 때문에 각각의 구속응력에 따른 適用 應力水準의 차이에 의한 여러가지 크리프 정수들의 영향을 구명하고자 연약지반에서 표토로부터 1m, 10m, 20m 깊이에 해당하는 구속응력(σ_v)을 결정하여 변형제어시험과 응력제어시험에 적용하였다.

Table 2는 파괴시 시료의 강도를 구하기 위한 것으로 각각의 시료에 대한 구속응력과 변형제어시험에서 결정된 파괴시 축차응력을 나

타내며, Table 3은 크리프 실험시 각각의 시료에 적용된 응력수준을 나타낸다.

Table 2 Deviator stresses at the failure point (kg/cm²)

Stress	σ_3	σ_1	$\Delta\sigma$
Sample No.			
No. 1-0.5	0.075	0.117	0.042
No. 10-0.5	0.753	0.862	0.109
No. 20-0.5	1.505	1.643	0.138
No. 1-2	0.075	0.146	0.071
No. 10-2	0.753	0.902	0.149
No. 20-2	0.505	1.660	0.155

* No. 20-0.5(20 : 깊이(m), 0.5 : 일축의 변형속도(mm/min))

Table 3 Stress levels determined from deviator stresses at the failure point (kg/cm²)

Stress	$\Delta\sigma$		
	$\Delta\sigma$ 의 50%	$\Delta\sigma$ 의 70%	$\Delta\sigma$ 의 90%
Sample No.			
No. 1-0.5	0.021	0.029	0.038
No. 10-0.5	0.055	0.076	0.098
No. 20-0.5	0.069	0.097	0.124
No. 1-2	0.036	0.050	0.064
No. 10-2	0.075	0.104	0.134
No. 20-2	0.078	0.109	0.139

3.4 크리프정수 결정방법

3.4.1 점근변형률(ϵ_a)

크리프시험에서 얻은 결과를 Fig. 1에서와 같이 변형률과 시간의 관계곡선에서 변곡점에

해당하는 변형률의 값을 나타내는 것으로 크리프 메카니즘의 2단계 영역에 존재한다.

3.4.2 초기 탄성계수(E_0)

초기 탄성계수는 초기 변형률과 축차응력과 관계로 부터 구할 수 있으며, 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E_0 = \frac{\Delta\sigma}{\epsilon_0} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 $\Delta\sigma$: 축차응력
 E_0 : 초기 탄성계수
 ϵ_0 : 초기 변형률

3.4.3 탄성계수(E_1)

탄성계수 E_1 은 점탄성 변형률에 해당하는 크리프 1단계 거동에서 점성에 의한 변형률을 제외시킨 순수한 탄성 변형률만을 이용하여 구할 수 있으며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$E_1 = \frac{\Delta\sigma}{\epsilon_1} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $\epsilon_1 = \epsilon_{ve} - \dot{\epsilon}_{ss} \cdot t$
 ϵ_1 : 점탄성요소에서 순수한 탄성요소에 의한 크리프 변형률
 ϵ_{ve} : 점탄성요소에 의한 크리프 변형률
 $\dot{\epsilon}_{ss}$: 정상상태 변형속도
 t : 크리프 메카니즘에서 1단계가 완료된 시점까지의 경과시간

3.4.4 정상상태 변형속도($\dot{\epsilon}_{ss}$)

변형률과 시간과의 관계도에서 회귀곡선에 의하여 관계식을 구할 수 있으며 이 방정식을 시간에 대하여 미분함으로써 각각의 시간에 대한 변형속도를 구할 수 있다. 따라서 계산된 결과를 이용하여 변형속도와 시간과의 관계곡선을 그려 정상상태 즉, 크리프 2단계 상태의 시작점에서 변형속도를 읽어 결정한다.

3.4.5 크리프 정수 A, n

정상상태에서의 변형속도와 축차응력과의 관계식인 식(7)에서 양쪽변에 log를 취하여 정리하면 식(11)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\log \dot{\epsilon}_{ss} = \log A + n \cdot \log(\sqrt{3}/2\Delta\sigma) \dots\dots (11)$$

여기에서 $\Delta\sigma$ 는 같은 구속응력조건에서 다른 3종류 즉, 파괴시 축차응력의 50%, 70%, 90% 값으로 결정한 축차응력($\Delta\sigma$)과 이 조건에서 구한 각각의 정상상태 변형속도($\dot{\epsilon}_{ss}$)와의 관계도를 그리고 回歸關係線으로 나타냄으로써 절편과 기울기를 이용하여 크리프 정수 A와 n값을 결정할 수 있다.

3.4.6 크리프 정수 η

$\dot{\epsilon}_{ss} \geq \dot{\epsilon}_{ss}^*$ 인 경우의 크리프 관계식인 $\epsilon_t = \dot{\epsilon}_{ss} \cdot t + \epsilon_i [1 - \exp(-\eta t)]$ 에서 기지의 ϵ_0 , $\dot{\epsilon}_{ss}$, ϵ_i 와 t 를 대입함으로써 η 값을 구할 수 있다. 본 연구에서는 ϵ_t 는 시간 t 가 21,600분(15일) 경과한 상태에서의 변형률로 간주하였으며, 이는 실험 결과 減衰크리프현상을 보임으로써 시간과 변형률과의 관계도에서 구한 回歸關係式에 21,600분(15일)을 대입함으로써 연장된 시간에서의 최종변형률(ϵ_0)을 구하여 적용하였다.

3.5 크리프 실험결과

본 크리프 실험결과 Table 4와 같이 크리프 정수를 얻었다.

Table 4에서 알 수 있듯이 彈性係數 E_1 은 파괴강도 실험시 적용한 일축의 변형속도가 0.5mm/min의 경우 최대 77.89kg/cm²에서 최소 1.89kg/cm²의 범위로 나타났으며, 변형속도가 2mm/min의 경우에는 최대 55.08kg/cm²에서 최소 2.54kg/cm²로 나타났다. 또한 크리프 정수 A는 변형속도와 축차응력의 관계에서 절편의 값을 나타내는 것으로 일축의 변형속도가 0.5mm/min의 경우 최대 8.968x10⁻⁵에서 최소 1.775x10⁻⁵로 나타났으며, 변형속도가 2mm/min의

Table 4 Creep parameter assembled from these analyses

Parameter Sample No.	E _i (kg/cm ²)			A	n	η		
	Δσ _i 의 50%	Δσ _i 의 70%	Δσ _i 의 90%			Δσ _i 의 50%	Δσ _i 의 70%	Δσ _i 의 90%
No. 1-0.5	77.89	10.56	1.89	8.968x10 ⁻⁵	9.9435	2.75x10 ⁻⁵	4.69x10 ⁻⁵	5.23x10 ⁻⁵
No. 10-0.5	23.53	12.82	4.43	1.775x10 ⁻⁵	11.2943	5.44x10 ⁻⁵	4.86x10 ⁻⁵	5.42x10 ⁻⁵
No. 20-0.5	29.37	4.94	5.49	6.002x10 ⁻⁵	3.8000	4.23x10 ⁻⁵	3.85x10 ⁻⁵	4.63x10 ⁻⁵
No. 1-2	55.08	4.55	2.54	1.282x10 ⁻⁵	3.6893	2.78x10 ⁻⁵	5.55x10 ⁻⁵	6.01x10 ⁻⁵
No. 10-2	18.47	3.15	5.87	1.372x10 ⁻⁵	3.5646	4.61x10 ⁻⁵	3.42x10 ⁻⁵	3.09x10 ⁻⁵
No. 20-2	13.46	3.30	3.90	1.036x10 ⁻⁵	3.9846	4.97x10 ⁻⁵	4.77x10 ⁻⁵	2.13x10 ⁻⁵

경우에는 최대 1.282x10⁻⁵에서 최소 1.036x10⁻⁵으로 나타났다. 한편 크리프 정수 n은 변형속도와 축차응력의 관계에서 기울기를 나타내는 것으로 일축의 변형속도가 0.5mm/min의 경우 최대 11.2943에서 최소 3.800으로 나타났으며, 변형속도가 2mm/min인 경우에는 최대 3.6893에서 최소 3.5646의 값을 나타내었다.

한편 크리프 정수 η는 일축의 변형속도가 0.5 mm/min의 경우 최대 5.44x10⁻⁵에서 최소 2.75x10⁻⁵으로 나타났으며, 변형속도가 2mm/min인 경우 최대 6.01x10⁻⁵에서 최소 2.13x10⁻⁵으로 나타났다.

위의 실험결과로부터 각각의 크리프정수는 일축의 변형속도가 0.5mm/min에서의 값보다 2mm/min에서의 값이 구속응력에 대한 변화 폭이 적은것으로 나타났으며, 이는 크리프실험시 적용응력 수준이 높을수록 상대적으로 구속응력의 영향이 적음을 의미한다고 볼 수 있다.

4. 크리프정수에 대한 고찰

Fig. 2-Fig. 9는 앞의 3.4절에서 구한 크리프정수들을 구속응력과 응력수준에 따른 영향을 분석하기 위하여 나타낸 것으로 일부 이상치로 간주되는 크리프 정수는 제외하였다.

4.1 初期彈性係數 E₀

Fig. 2와 Fig. 3은 본 실험에서 하중 재하즉시 발생된 변형률과 적용응력에서 구한 초기

탄성계수 E₀값을 구속응력과 응력수준과의 관계를 나타낸 것이다.

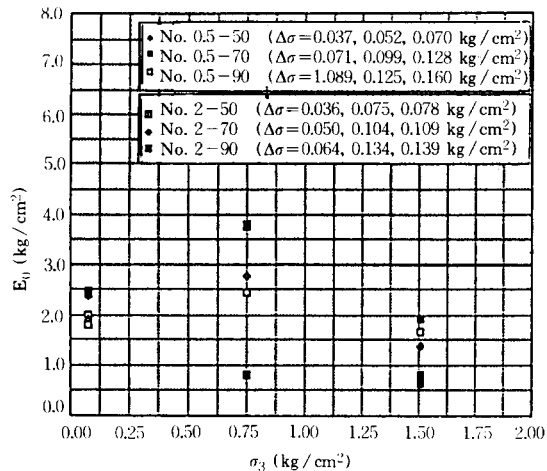


Fig. 2 Relationship of stress and initial Young's modulus

Fig. 2에서와 같이 각각의 응력수준에 따른 초기탄성계수(E₀)는 구속응력 σ₃=0.753kg/cm²인 경우에서만 0.68-3.80의 값으로 분산되어 나타났고 그외의 구속응력에서는 거의 변화가 없는 것으로 나타나 초기탄성계수는 구속응력에 무관함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 초기탄성계수와 응력수준과의 관계를 나타낸 것으로 초기탄성계수는 응력수준의 변화에 영향이 없음을 보여주고 있다.

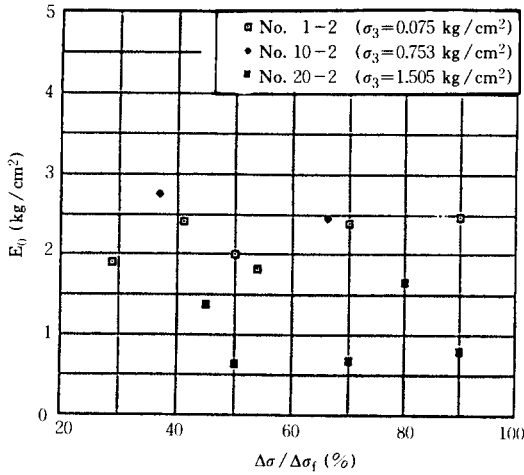


Fig. 3 Relationship of stress level and initial Young's modulus

4.2 탄성계수 E_1

Fig. 4와 Fig. 5는 탄성계수 E_1 이 구속응력과 응력수준에 어떠한 영향을 받는가를 알아보기 위한 그림이다.

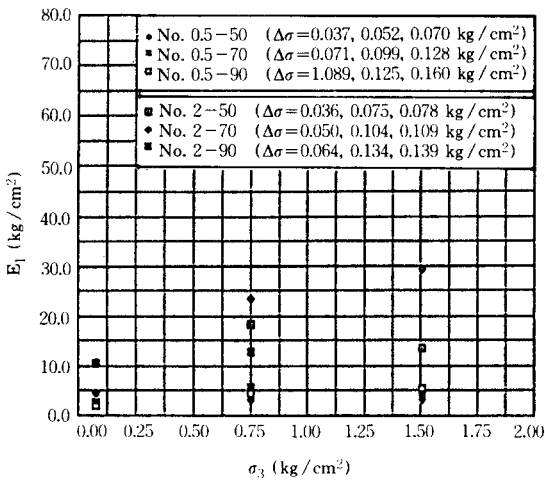


Fig. 4 Relationship of confining stress and Young's modulus E_1

Fig. 4는 탄성계수 E_1 과 구속응력과의 관계를 나타낸 것으로 탄성계수 E_1 은 구속응력 σ_3

$=0.075\text{kg/cm}^2$ 에서 일부 큰 값으로 나타나기도 하였으나 이는 구속응력이 작아서 과압밀의 영향을 받아 나타나는 값으로 간주되며, 이들 값을 제외하고는 구속응력의 변화에 무관하다는 것을 알 수 있다.

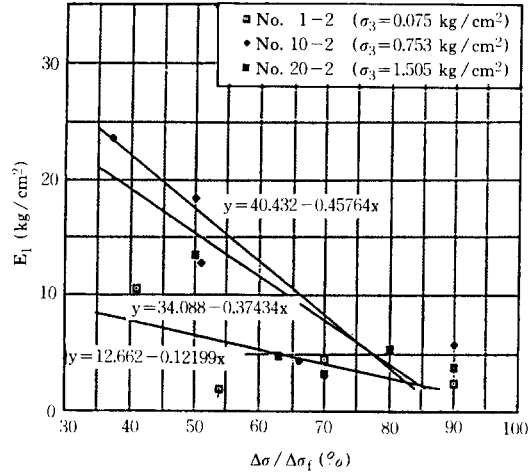


Fig. 5 Relationship of stress level and Young's modulus E_1

Fig. 5는 탄성계수 E_1 과 응력수준과의 관계를 나타낸 것으로 탄성계수 E_1 은 적용응력 수준이 50%에서는 다소 큰 값을 보여주고 있으나 적용응력수준이 70%와 90%에서는 작은 값으로 나타나 응력수준이 높을수록 탄성계수 E_1 은 감소함을 알 수 있었다. 이는 탄성계수 E_1 이 응력수준의 변화에 영향을 받는다는 것을 나타내는 것으로 수치해석에서 탄성계수 E_1 을 입력자료로 사용하기 위해서는 탄성계수 E_1 과 응력수준과의 관계를 그림에서 나타낸 바와 같이 $E_1 = \alpha_A + \alpha_n(\Delta\sigma/\Delta\sigma_1)$ 의 관계식을 도입하여 응력수준의 증가에 따른 탄성계수 E_1 을 결정할 수 있도록 상수 α_A 와 α_n 을 구하여 입력자료로 사용할 수 있으며 본 연구에서는 $\sigma_3 = 0.075\text{kg/cm}^2$ 일때 $\alpha_A = 12.662$, $\alpha_n = -0.12199$ 로 나타났고 $\sigma_3 = 0.075\text{kg/cm}^2$ 에서는 $\alpha_A = 34.088$, $\alpha_n = -0.3743$ 으로 나타났으며, $\sigma_3 = 1.505\text{kg/cm}^2$ 에서는 α_A

=40.432, $x_{11} = -0.45764$ 로 나타났다.

4.3 탄성계수비 E_0/E_1

Fig. 6과 Fig. 7은 탄성계수비가 구속응력과 응력수준에 의한 영향을 알아보기 위한 것이다.

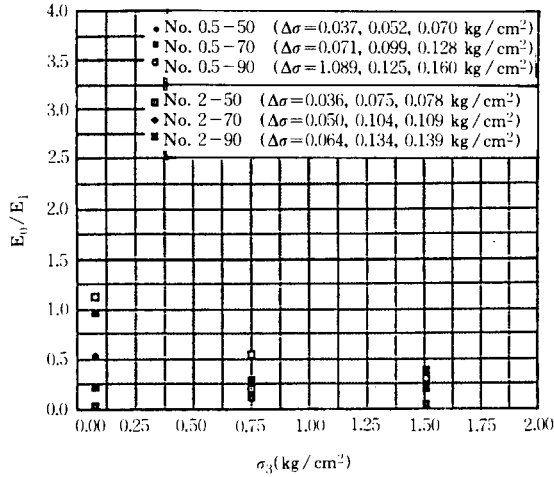


Fig. 6 Relationship of confining stress and Young's modulus ratio E_0/E_1

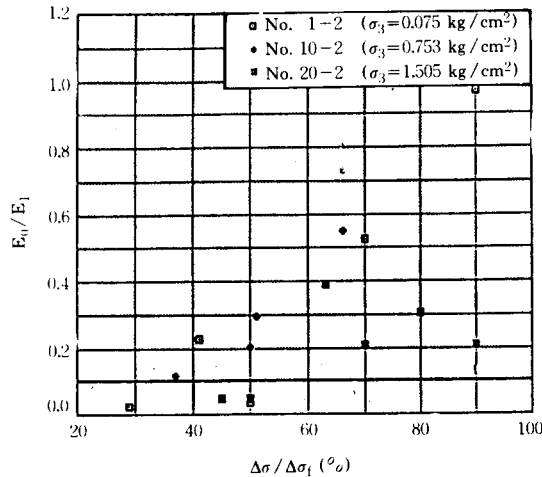


Fig. 7 Relationship of stress level and Young's modulus ratio E_0/E_1

Fig. 6은 탄성계수비와 구속응력과의 관계를 나타낸 것으로 대부분의 탄성계수비의 값이 1보다 작은 값을 나타내고 있어 초기탄성계수 E_0 의 값이 탄성계수 E_1 의 값보다 작게 나타났으며 탄성계수비는 구속응력이 증가함에 따라 일정한 값을 나타내고 있어 구속응력에 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

4.4 크리프 정수 A

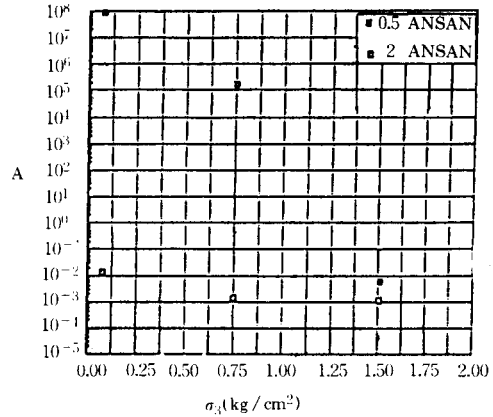


Fig. 8 Relationship of confining stress and creep parameter A

Fig. 8은 크리프정수 A와 구속응력과의 관계를 나타낸 것으로 이들 값은 구속응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 각각의 적용응력에 따라 값의 크기가 다양하게 나타났다. 따라서 수치해석을 위한 입력자료로 사용하기 위해서는 실험에 의하여 결정된 값을 유한요소해석에 각요소별로 적합한 값을 택하여 적용하여야 함을 보여주고 있다.

4.5 크리프 정수 η

Fig. 9와 Fig. 10은 크리프 정수 η 가 구속응력과 응력수준에 영향을 받는가를 알아보기 위한 것이다.

Fig. 9는 크리프 정수 η 와 구속응력과의 관계를 나타낸 것으로 정수 η 는 각각의 응력수준에

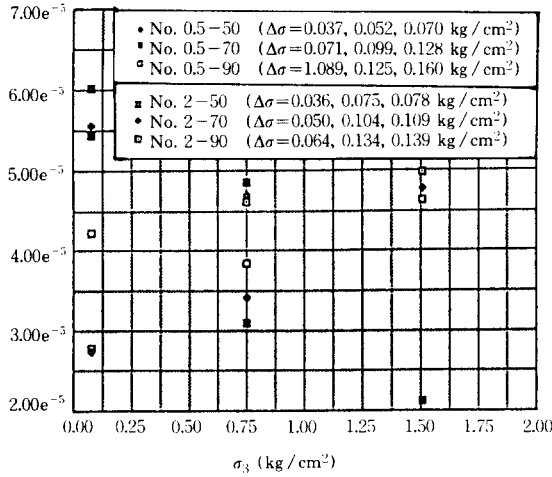


Fig. 9 Relationship of confining stress and creep parameter η

따라 다소 불규칙한 값을 나타내고 있으나 대체적으로 비슷한 값을 나타내고 있어 크리프 정수 η 의 값은 구속응력의 변화에 따른 영향을 받지 않음을 나타내고 있다.

Fig. 10은 크리프 정수 η 와 응력수준과의 관계를 나타낸 그림으로 크리프 정수 η 는 응력수준에 따라 여러가지 값으로 나타났다. 따라서 적용응력수준에 따른 크리프 정수 η 를 결정하기 위해서는 탄성계수 E_1 과 응력수준과의 관계에서와 같은 방법으로 $\eta = \beta_A + \beta_B(\Delta\sigma / \Delta\sigma_1)$ 의

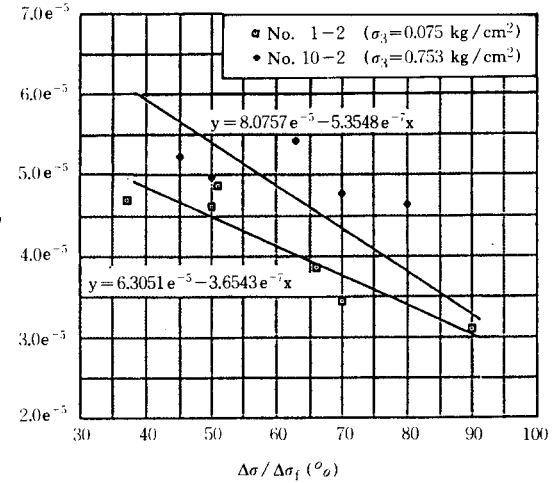


Fig. 10 Relationship of stress level and creep parameter η

관계식을 사용하여 응력수준에 따라 크리프 정수 η 의 값이 결정될 수 있도록 필요한 관계정수를 구하여 적용하여야 한다.

그림에서 구속응력 $\sigma_3 = 0.075 \text{ kg/cm}^2$ 에서는 $\beta_A = 6.3051 \times 10^{-5}$, $\beta_B = -3.6543 \times 10^{-7}$ 이며, 구속응력 $\sigma_3 = 0.753 \text{ kg/cm}^2$ 에서는 $\beta_A = 8.0757 \times 10^{-5}$, $\beta_B = -5.3548 \times 10^{-7}$ 으로 나타났다.

이상의 크리프 정수에 대한 고찰로부터 탄성계수 E_1 과 크리프 정수 η 를 결정하기 위한 크리프 상수들을 표로 나타내면 Table 5와 같다.

Table 5 Creep parameters α_n and β_A

Sample	Creep Para.	E_1		η	
		α_n	α_m	β_A	β_B
No. 1		12.662	-0.1220	6.3051×10^{-5}	-3.6543×10^{-7}
No. 10		34.088	-0.3743	8.0757×10^{-5}	-5.3548×10^{-7}
No. 20		40.432	-0.4576	-	-

5. 결 론

해성점토에 대한 크리프 연구는 재료의 복잡성과 실험수행의 어려움 등으로 인하여 결정적인 연구성과가 확립되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 해성점토의 크리프거동해석을 위하여 필요한 크리프정수를 삼축압축 실험기를 사용하여 구하고 이들 크리프정수들이拘束應力과 應力水準의 변화에 따른 영향을究明함으로서 수치해석시 입력자료로 사용키 위한 크리프정수의 적용에 기여코자 하였다.

- (1) 본 연구를 수행함으로 삼축압축 실험기에 의한 크리프실험방법과 Senseny가 제안한 간편식을 이용하여 크리프거동해석에서 필요한 크리프정수 결정 방법을 제시하였다.
- (2) 크리프정수는 구속응력과 적용응력수준에 따라 각각 다르게 나타나는 점근변형률과 정상상태 변형속도 그리고 점성계수에 따라 결정되며 모든 크리프정수는 크리프 실험시 적용응력 수준이 높을수록 상대적으로 구속응력의 영향을 적게 받는다.
- (3) 각각의 크리프정수에 대하여 구속응력과 응력수준이 크리프정수에 미치는 영향을 고찰한 결과 크리프정수 E_c 과 n 은 구속응력의 변화에 영향을 받지 않는 반면 응력수준의 변화에 영향을 받음을 알 수 있었으며, 크리프정수 A 와 n 은 구속응력의 변화에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 石井靖丸 (1955), "沖積粘土の工學的 性質に關する研究," 土木學會 論文集, 第30號, pp. 5-20.
2. 材山朔郎, 柴田 徹 (1956), "粘土のレオロジー的特性について," 土木學會 論文集, 第40號, pp. 3-23.
3. 材山朔郎, 要原則夫, 關口秀雄 (1980), "粘土のクリフ 破壊について," 京都大防災 研究所年報, 第301號, pp. 3-23.
4. Murayama, S., Shibata, t.(1961), "Rheological properties of Clays," 5th ICSMFE, Volume 1, Paris, pp. 269-273.
5. Bishop, A., Lovenbury, H.T. (1969), "Creep Characteristics of the Undisturbed Clays," 7th ICSMFE, Vol.1, Mexico, pp. 29-39.
6. Komamura, F., Huang, R.J.(1974), "New Rheological Model for Soil Behavior," Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 100, GT-7, pp. 807-824.
7. Pfeifle, T.W., Mellegard, K.D. & Senseny P.E. (1981), "Constitutive Properties of Salt from Four Sites", ONWI 314, Battelle Memorial Institute, Columbus.
8. Owen, R.J., Hinton, E. (1980), "Finite Element in Plasticity (Theory and Practice)," Univ. Collego of Swansea, U.K..
9. Thompson, B. M. (1983), "VISCOL: A Two-Dimensional and Axisymmetric Nonlinear Transient Thermoviscoelastic and Thermoviscoplastic Finite Element Code for Modeling time-Dependent Viscous Mechanical Behavior of a Rock Mass," ONWI 437, INTERA Environmental Consultants, Inc., Houston.
10. Keedwell, M. J.(1984), "Rheology and Soil Mechanics," ELSEVIER, U.K..
11. Vyalov, S. S. (1986), "Rheological Fundamentals of Soil Mechanics," Developments in Geotechnical Eng., Vol. 36, ELSEVIER, U.K..

(접수일자 1993. 11. 2)