

海成粘土의 Creep 特性에 關한 研究

A Study on the Creep Characteristics of Marine Clay

정 형 식*¹

Chung, Hyung-Sik

안 상 로*²

Ahn, Sang-Ro

이 승 호*³

Lee, Seung-Ho

Abstract

Earth structures which located on the weak foundation settle for the long time due to the their own weight(embankment) simultaneously. Because of the consolidation and creep which are time-dependent behaviour. This paper is presented creep test processes using triaxial apparatus, and investigated creep characteristics of marine clay by creep test according to stress level. And required and appropriate creep parameters of soil used in the creep equation are investigated by the creep test.

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 creep이 동시에 작용하여 발생된다.^{1, 2, 8)}

본 연구에서는 삼축압축실험기를 사용한 creep 실험 과정을 제안하고 creep 실험을 실시하여 應力水準에 따른 해성점토의 creep 특성을 구명하였다. 또한 시료에 적합한 creep 방정식에 필요한 creep 정수를 creep 실험 결과를 사용하여 구하였다.

1. 서 론

점토에 어떤 일정한 剪斷力을 가하고 그대로 유지하면 시간이 경과함에 따라서 전단변형이 증가하는 현상이 있다. 이것은 일종의 creep이라고 할 수 있는데 creep은 예를 들면 압밀현상, 산사태, 법면의 안정 혹은 지지력의 解明에 영향이 커서 그 연구가 필요하다. 이러한 거동

은 빠른 속도로 일어나기도 하고 매우 느린 속도로 일어나기도 하는데 이는 흙의 종류, 응력 이력, 배수조건 등에 따라 다를 뿐 아니라 특히 함수비 및 應力水準(stress level)에 크게 영향을 받기 때문이다.^{1, 2)}

한편 creep 거동은 해석방법에 따라 여러 뜻으로 설명되는데 일반적으로 토질역학에서 creep이라 함은 배수조건에 있어서는 1차압밀과 2차압밀을 제외한 時間依存變形을 뜻하고

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*3 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

비배수조건에 있어서는 時間依存變形을 creep으로 간주한다.

본 연구에서는 해안을 매립하거나 방조제와 같은 토공 구조물을 건설할 때 기초지반에 해당하는 해성점토의 creep특성을 연구하고, 시료에 적합한 유변학적 모델식에서 필요한 creep 정수를 구하고자 한다.

2. 흙의 Creep 특성

2.1 Creep의 메카니즘

일반적으로 흙에서 creep은 응력, 공극률, 함수비, 온도, 밀도 등에 따라 영향을 받는다. creep은 減衰 creep과 非減衰 creep으로 나눌 수 있으며 그림 1(b)와 같이 非減衰 creep은 1차 creep(선분 AB), 2차 creep(선분 BC), 3차 creep(선분 CD)으로 세분한다. 흙의 변형은 하중 적용후에 즉시 발생하는 瞬間變形 ϵ_0 와 시간이 경과함에 따라 발생하는 변형 $\epsilon(t)$ 의 합으로 표시된다.

I 단계(non-steady flow: 선분AB): 변형률이 감소율로 진행되는 감쇠 creep 변형구간으로 이때의 변형은 점탄성변형이다.

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

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

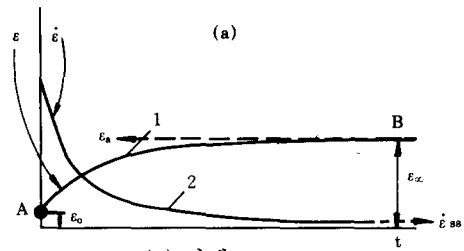
Creep변형은 식 (1)과 같이 각 단계에서 발생하는 변형의 합으로서 총체적인 변형으로 나타내는 것이 일반적이다.

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

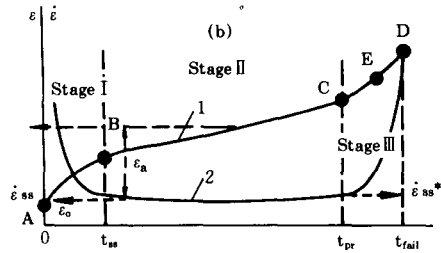
즉 총체적인 변형은 creep 곡선의 縱座標의 합으로 나타낸다.

2.2 점토의 Creep구성식

점토의 應力-變形-時間關係의 creep 거동을 수학적으로 표현하는 데에는 여러 형태의 유변학적 모델이 사용되며 이는 Hook의 법칙,



(a) 감쇄 creep



(b) 비감쇄 creep

그림 1 변형대 시간 특성

Newton의 법칙, Saint-Venant법칙에 의한 彈性, 粘性, 塑性要素를 수학적으로 표시한 것이며 이들 요소들은 다음과 같다.

탄성요소: Hook법칙에 따르는 spring을 사용한 탄성요소, E로 표시한다.

$$\sigma = E\epsilon$$

점성요소: Newton의 법칙에 따르는 dash-pot를 사용한 점성요소, η 으로 표시한다.

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$$

소성요소: Saint-Venant법칙에 따르는 slider를 사용한 마찰요소, SV로 표시한다.

$$\sigma < \sigma_y \text{이면 } \epsilon = 0$$

$$\sigma > \sigma_y \text{이면 } \epsilon = \infty$$

여기서 σ : 적용응력

σ_y : 항복응력

ϵ : 변형률

E: 탄성계수

η : 점성계수

우리나라 서해안에 위치한 안산지역의 海成粘土를 유변학적 모델로 나타내기 위하여 본 연구에 앞서 실험한 결과에 의하면 그림 2와 같은

Vyalov 모델로 나타났다.

이는 점탄성요소와 점소성요소가 직렬로 결합되어 있고 그 위에 탄성요소가 직렬로 구성되어 있는 모델이다.

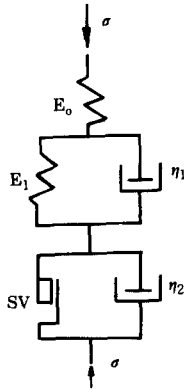


그림 2. Vyalov 모델

이와 같은 모델을 수식으로 나타내는 데에는 경험식에 의존하는 수도 있으나 본 연구에서는 Vyalov Model에 맞는 Senseny(1983)가 제안한 식(2)을 사용하여 응력수준에 따른 creep 정수를 구하였다.

$$\epsilon_c = \dot{\epsilon}_{ss}t + e_a[1 - \exp(-\zeta t)] \dots\dots\dots(2)$$

여기서,

ϵ_c = creep 변형률

$\dot{\epsilon}_{ss}$ = 정상상태 변형속도

e_a = 점근 변형률

ζ = 완화 주기

t = 시간

연구자료에 의하면 토질 정수 $\dot{\epsilon}_{ss}$, e_a , ζ 은 응력에 크게 의존하는 것으로 특히 e_a 와 ζ 은 정상상태 변형률 영역에서 응력 의존성이다.⁴⁾ 限界 정상상태 변형속도, $\dot{\epsilon}_{ss}^*$ 는 정상상태의 영역에서 취성에 이르는 부분을 말하며 $\dot{\epsilon}_{ss}$ 이상에서 전체 변형률 e_a 는 상수 e_a 이다.

완화 주기는 한계변형률 아래에서 정상상태 변형속도에 비례하며 $\zeta = B\dot{\epsilon}_{ss}^*$ 인 관계를 갖는다.

또한 漸近 변형률은 정상상태 변형률에 비례하여 $e_a = \epsilon_a \dot{\epsilon}_{ss} / \dot{\epsilon}_{ss}^*$ 가 된다. 限界變形率을 고려하여 $\dot{\epsilon}_{ss}$, e_a 그리고 ζ 을 응력과 온도 의존성에 의한 관계식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\epsilon_c = \begin{cases} \dot{\epsilon}_{ss}\{t + e_a / \dot{\epsilon}_{ss}[1 - \exp(-B\dot{\epsilon}_{ss}^*t)]\} \\ \dot{\epsilon}_{ss} < \dot{\epsilon}_{ss}^* \text{인 경우} \dots\dots\dots(3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_{ss}t + e_a[1 - \exp(-B\dot{\epsilon}_{ss}t)] \\ \dot{\epsilon}_{ss} \geq \dot{\epsilon}_{ss}^* \text{인 경우} \dots\dots\dots(4) \end{cases}$$

본 연구에서는 일부 시료에 대하여 장시간 creep 시험을 실시한 결과 변형률이 일정한 값에 收斂한 점을 들어 $\dot{\epsilon}_{ss} \geq \dot{\epsilon}_{ss}^*$ 인 경우를 택하였다.

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

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A(\sqrt{3}/2\Delta\sigma)^n \exp(-Q/RT) \dots\dots\dots(5)$$

여기서 $\Delta\sigma$ = 축차응력

T = 절대온도

$A, n, Q/R$ = creep 정수

여기서 creep 정수 Q/R 은 보통 가스를 함유하고 있는 토질에서 변형을 제어하는 것으로 활동에너지의 비이며 온도와 함께 변형속도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 응력수준에 따른 creep의 영향이 가스 및 온도의 영향 보다 상대적으로 큰 효과를 나타낸다는 점을 감안하여 실험 여건상 고려하지 않았으며, 따라서 Q/R 를 0으로 간주한 식(6)을 사용하였다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A(\sqrt{3}/2\Delta\sigma)^n \dots\dots\dots(6)$$

따라서 본 연구에서는 식 6을 식 3에 대입하여 식(7)을 creep 방정식으로 사용하였다.

$$\epsilon_c = A(\sqrt{3}/2\Delta\sigma)^n t + e_a[1 - \exp(-BA t)] \quad 3 \sqrt{3}/2\Delta\sigma^n \dots\dots\dots(7)$$

3. Creep 실험

해성점토는 재료의 복잡성으로 인하여 측정 방법에 따라 서로 다른 거동을 나타내는데 이러한 어려움으로 아직까지 결정적인 연구방법은 확립되어 있지 않은 상태이다. 본 실험에서는 이러한 어려움을 다소나마 극복하고자 1차 압밀을 제외하고 비배수 상태에서 creep 거동만을 연구하였으며 현재 국내에 많이 보급되어 있는 삼축압축시험기를 사용함으로써 시험기기의 활용성을 넓히고 creep 거동을 연구할 수 있는 실험방법을 제시하였다. 또한 creep 실험을 실시하여 해성점토의 creep 특성을 구명하고 creep 실험을 실시하여 식 7에서 필요한 creep 정수를 구하였다.

3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 일본 Marui 사 제품인 삼축압축시험기로 전동재하장치가 0.0006~6mm/min의 변속범위에서 시험할 수 있는 變形制御式과 0~6kg/cm²의 압력범위에서 일정하중을 가할 수 있는 應力制御式의 두 가지 실험방법이 가능하며 배수조건을 조절할 수 있는 실험기이다. 또한 실험결과인 축하중 변형량, 체적변화, 그리고 공극수압이 자동으로 기록되는 기록장치가 부착되어 있다.

3.2 시 료

실험에 사용한 시료는 경기도 안산 앞바다에서 채취한 시료로 이 토질은 해성실트질 점토로서 함수가 많고 압축성이 크며 퇴적도가 10~20m 심도로 분포되어 있다. 시료채취는 현장에서 샘플러를 사용하여 不攪亂試料를 채취하였으며 공시체는 직경 5cm, 높이 12.5cm로 마이터 박스를 사용하여 제작하였다. 표 1은 시료의 물리적 실험 결과이다.

표 1 시료의 물리적 성질

토질정수	액성한계 (%)	소성지수PI (%)	함수비 (%)	공극비 e	포화도 (%)	단위중량 (g/cm ²)	비중	통일분류
안산시료	44.7	22.3	72.3	1.87	99	1.77	2.56	CL

3.3 실험방법

시료에 대하여 구속응력이 각각 다른 상태에서 변형제어실험을 실시함으로써 파괴시 편차응력($\Delta\sigma_r$)을 구하고 이들 값의 50% 이상인 응력을 응력제어실험에서 적용응력수준($\Delta\sigma$)으로 사용하여 creep실험을 실시하였다. 이는 실제로 현장에서 연약지반위에 토체체를 축조할 때 기초지반의 깊이에 따라 creep거동이 각각 다른 점을 들어 각각의 구속응력에 대하여 適用應力水準의 차이에 의한 여러가지 creep정수들의 영향을 구명하고자 하는 것으로 연약지반에서 표토로부터 1m, 10m, 20m 깊이에 해당하는 구속응력($\sigma_{2=3}$)를 결정하여 변형제어실험과 응력제어실험에 적용하였다.

본 연구에서는 불교란시료를 사용하였으며 현장 채취시 또는 실험실에서 몰드제작 과정중 함수비 및 應力履歷의 변화를 가져옴으로 주의 를 기울여야 하며 이 때문에 변형제어실험과 응력제어실험 공히 실험전에 배수상태에서 구속응력을 24시간동안 주어 시료의 安定化를 꾀하였다.

3.3.1 破壞強度실험

파괴시 축차응력($\Delta\sigma_r$)을 결정하기 위하여 변형제어실험을 실시하였으며 변형속도는 0.5%/min과 2.0%/min의 2가지를 각각의 시료에 적용하여 실험하였다.

파괴강도는 변형제어실험중 축방향응력이 최대가 되는 값으로 본 시험 조건중에서 구속응력이 1.505kg/cm²인 시료에서는 축방향응력이 상승 후 하강하는 경향을 보여 파괴강도를 찾을 수 있었으나 그 외의 시료에서는 시료 높이의 20% 이상이 변형되어도 응력이 서서히 증가하는 경향을 보였으며 이러한 경우에는 변형률이 15%일 때의 응력을 破壞強度에 이른 것으로 간주하였다.

파괴시 축차응력은 전단강도가 최대인 시점에서의 단면적을 고려하여 결정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

표 2 각각의 시료에 대한 구속응력과 파괴시 편차응력(kg/cm²)

시료 No	응력		
	σ_3	σ_1	$\Delta\sigma_r$
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	1.505	1.660	0.155

No 20~0.5(20: 깊이, 0.5: 변형속도)

3.3.2 creep 실험

creep거동은 剪斷強度의 50% 이상을 일정한 축하중으로 적용할 때 발생하는 것으로 간주하였으며¹⁾ 본 연구에서는 각각의 구속응력을 고려한 파괴시 축차응력의 50%, 70%, 90%의 값을 일정하중으로 하여 각각의 시료에 적용함으로써 creep실험을 실시하고 시간의 경과에 따른 변형량을 측정하였다.

표 3 각각의 시료에 대한 응력수준

시료번호 \ 적용응력	$\Delta\sigma_t$ 의 비율		
	50%	70%	90%
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

4. Creep정수 결정방법

creep정수를 결정하는 데에는 creep실험결과에 의해 구해지는 변형률에서 초기변형률을 제외한 즉 시간의 경과에 의한 변형률을 사용하여 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다.

4.1 漸近變形率($\dot{\epsilon}_a$)의 결정

일반적으로 점근변형률은 그림 1에서와 같이 변형률과 시간의 관계곡선에서 변곡점에서의 변형률의 값을 나타내는 것으로 감쇄 creep에서는 최종변형률로 나타낸다.

4.2 正常狀態 變形速度($\dot{\epsilon}_{ss}$)의 결정

변형률과 시간과의 관계도에서 回歸曲線에 의하여 관계식을 구할 수 있으며 이 방정식을 시간에 대하여 미분함으로써 각각의 시간에 대한 변형속도를 구할 수 있다. 따라서 계산 결과를 그림 3과 같이 변형속도와 시간의 관계곡선을 그려 정상상태 즉, creep 2단계 상태의 시작점에서 변형속도를 읽어 결정할 수 있다.

본 연구에서 사용한 시간과 변형률의 관계곡

선을 그림 3에, 변형속도와 시간과의 관계곡선은 그림 4에 나타냈다.

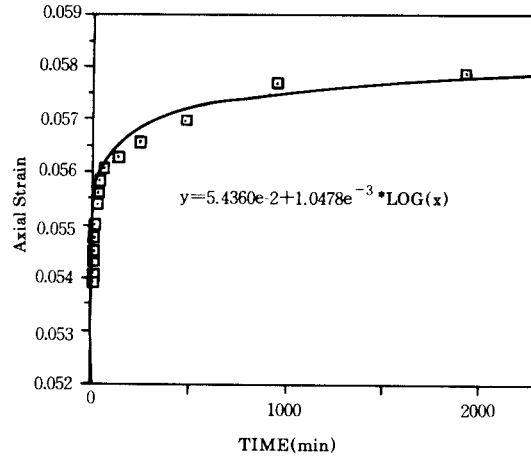


그림 3. 시간과 변형률의 관계도

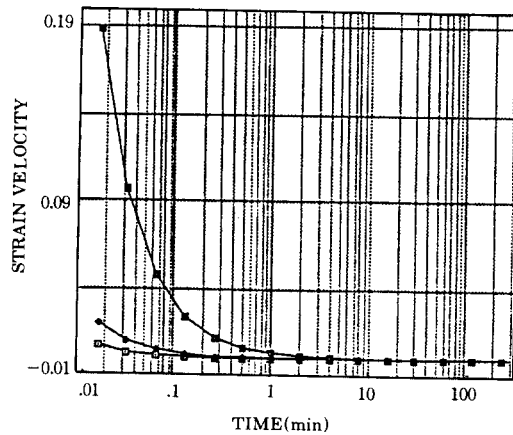


그림 4. 시간과 변형속도의 관계도

4.3 Creep정수 A, n의 결정

정상상태에서의 변형속도와 편차응력과의 관계식인 $\dot{\epsilon}_{ss} = A(\sqrt{3}/2\Delta\sigma)^n$ 에서 양쪽을 log로 취하여 정리하면 식6과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\log \dot{\epsilon}_{ss} = \log A + n \log(\sqrt{3}/2\Delta\sigma) \dots\dots\dots(6)$$

한편 $\Delta\sigma$ 인 같은 시료와 같은 구속응력하에서 응력수준이 다른 3종류 즉, 파괴시 축차응력의 50%, 70%, 90%값과 이 조건에서 구한 각 $\dot{\epsilon}_{ss}$ 값의 관계곡선을 그림 5와 같이 代數紙에

나타내고 回歸關係線으로 나타냄으로서 절편과 기울기를 결정하여 A와 n을 구할 수 있다.

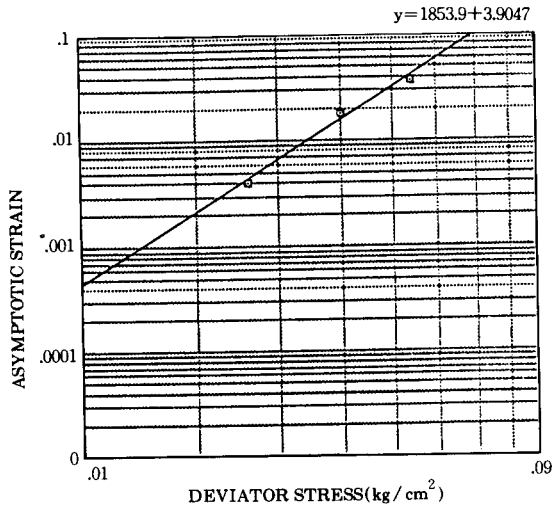


그림 5. 축차응력과 변형속도의 관계도

4.4 Creep 정수 B의 결정

$\dot{\epsilon}_{ss} \geq \dot{\epsilon}_{ss}$ 인 경우의 creep 관계식인 $\epsilon_c = \dot{\epsilon}_{ss}t + \epsilon_a[1 - \exp(-B\dot{\epsilon}_{ss}t)]$ 에서 기지의 ϵ_c , $\dot{\epsilon}_{ss}$, ϵ_a 과 t를 대입하여 B값을 구하였다. 여기 ϵ_c 는 시간 t가 21,600분(15일) 경과한 상태에서의 변형률을 사용하였으며 이는 실험결과 그림 1(a)와 같은 減衰 creep 현상을 보임으로써 그림 5에서 구한 回歸關係式을 사용하여 실제로 실험한 변형률보다 최종변형률에 보다 근접한 변형률을 구하여 적용하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 Creep 특성

실험결과 변형률과 시간과의 관계 데이터를 얻었다. 일반적으로 creep곡선은 모눈지에 나타내지만 이것을 半代數紙(시간을 대수로 취함)상에 나타내면 creep특성을 명료하게 알 수 있다.

그림 6-8은 응력수준이 다른 일정하중을 48시간 재하여 얻은 결과를 반대수지상에 나타낸 것이다. 이들 그림으로부터 다음과 같은 현상을

얻을 수 있었다.

(1) 실험결과 응력수준이 크고, 축차응력이 클수록 큰 변형률을 나타내었으며 모든 실험조건에서 변형률은 각각 어떤 값(ϵ_a)에 수렴하였다.

(2) 그림 6은 응력수준이 50%인 경우의 creep 현상을 나타낸 것으로 구속응력에 관계없이 축차응력이 0.069kg/cm^2 까지는 변형률이 매우 작게 나타났으며 그 이상에서는 완만한 경사로 증가함을 보였다.

(3) 그림 7은 응력수준이 70%인 경우의 creep 현상을 나타낸 것으로 구속응력이 0.076kg/cm^2 까지는 매우 작은 변형률을 나타내었고 그 이상에서는 비교적 큰 경사로 증가함을 보였다. 또한 초기 변형률도 응력수준이 50%인 경우보다 대체적으로 큰 값을 나타내었다.

(4) 그림 8은 응력수준이 90%인 경우의 creep 현상을 나타낸 것으로 실험조건에 관계없이 변형률은 시간이 경과함에 따라 증가함을 보였으며 이 경우에 있어서도 구속응력보다는 축차응력에 지배를 받고 있음을 알 수 있다. 또한 초기 변형률도 응력수준이 50%인 경우와 70%인 경우보다 훨씬 큰 값을 나타내었다.

5.2 Creep 정수

본 연구에서 구해진 creep 정수는 표 4와 같다.

표 4의 creep 정수에서 정상상태에서의 creep 변형속도($\dot{\epsilon}_{ss}$)와 점근변형률(ϵ_a)은 응력수준이 클수록 크게 증가하였으며 creep 정수 A, n, B는 축차응력, 정상상태에서의 creep 변형속도 그리고 점근변형률의 관계에서 결정됨을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서 해성 점토의 creep 특성과 필요한 creep 정수를 삼축압축 시험기를 사용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 실험 결과 경기도 안산에 위치한 해성점

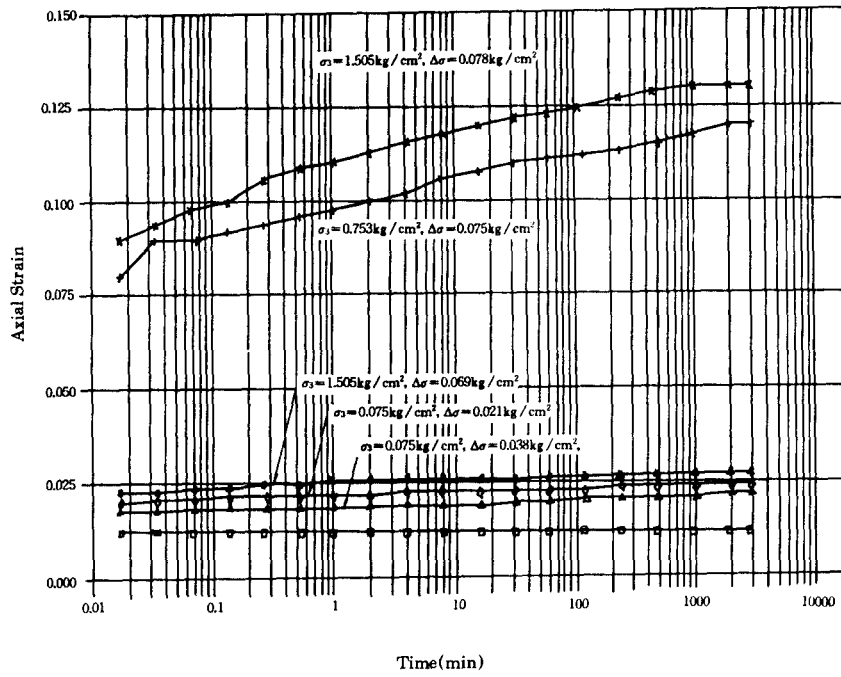


그림 6. 응력수준 50%에서 변형률과 시간과의 관계도

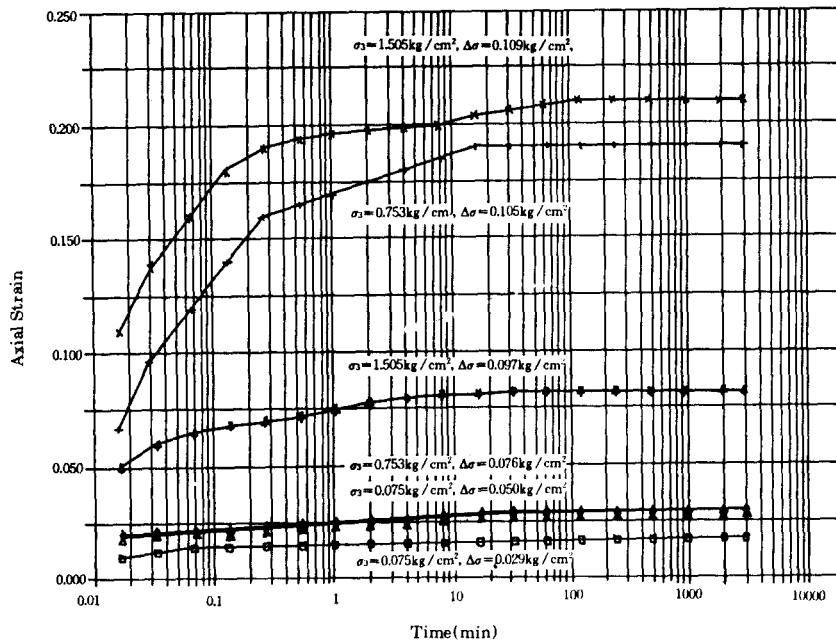


그림 7. 응력수준 70%에서 변형률과 시간과의 관계도

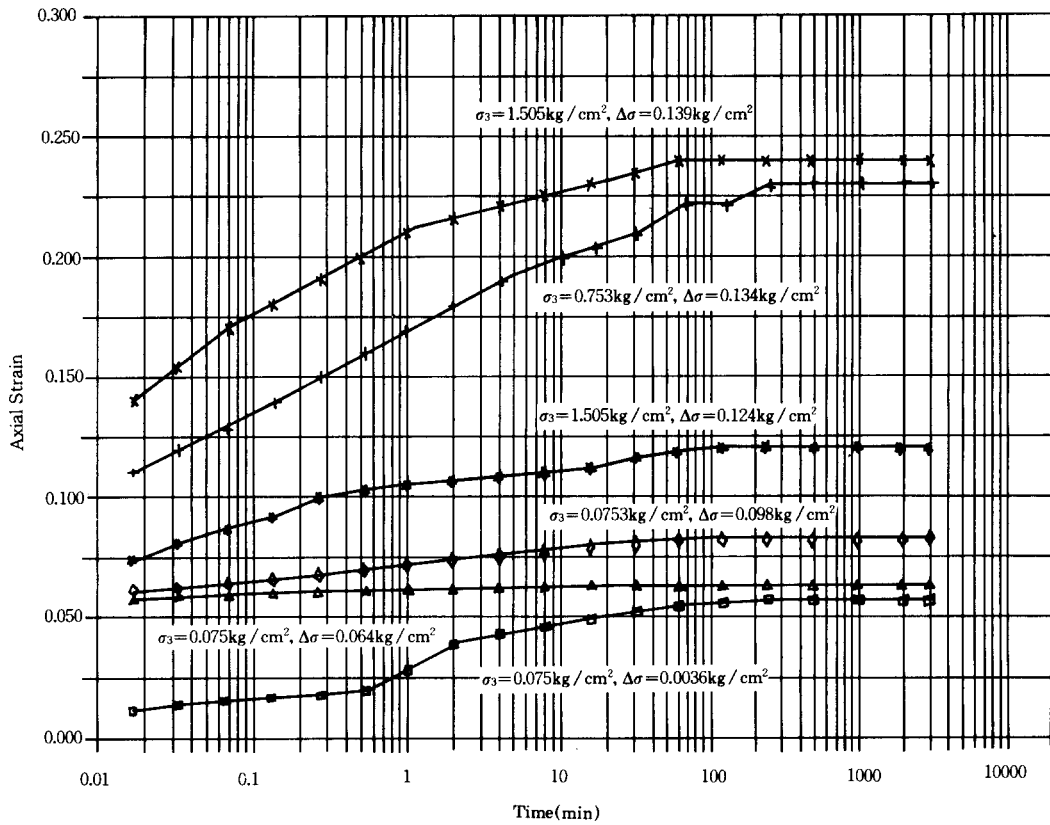


그림 8. 응력수준 90%에서 변형률과 시간의 관계도

표 4 Creep 정수

Creep정수 시료 No.	$\dot{\epsilon}_{95}$			ϵ_a				A	n	B		
	50	70	90	50	70	90	50			50	70	90
No 1-1-0.5	4.50×10^{-6}	1.12×10^{-7}	1.11×10^{-6}	0.001	0.005	0.036	0.021	0.000853	1.793	328	321	319
NO 1-10-0.5	9.10×10^{-6}	3.03×10^{-7}	1.31×10^{-6}	0.004	0.018	0.037	0.055	0.012300	2.421	492	142	150
No 1-20-0.5	1.57×10^{-7}	7.5×10^{-7}	1.53×10^{-6}	0.004	0.011	0.046	0.069	0.019600	3.716	12	25	2
No 1-1-2	3.20×10^{-7}	4.98×10^{-7}	9.73×10^{-7}	0.008	0.052	0.060	0.036	0.007700	2.393	731	269	204
No 1-10-2	2.22×10^{-7}	1.44×10^{-6}	1.62×10^{-6}	0.006	0.033	0.049	0.075	0.012530	2.547	624	52	20
No 1-20-2	2.17×10^{-7}	1.49×10^{-6}	2.13×10^{-6}	0.010	0.056	0.077	0.078	0.013620	2.742	385	221	114

트는 減衰 creep로 나타났으며 변형률의 대부분이 하중재하 초기에 발생하였다.

(2) creep에 의한 변형률은 응력수준이 클수록 증가하는 경향을 나타내었으며 특히 축차응력의 값에 크게 지배를 받고 있음을 알 수 있었다.

(3) creep 실험은 삼축압축실험기를 사용하

여 실시할 수 있으며 온도 및 가스를 고려한 creep 실험도 시험기기의 조작과 일부 시험기 부품을 제작, 활용함으로써 가능하리라 판단된다.

(4) creep 정수 A, n, B는 축차응력, 정상상태에서의 creep 변형속도 그리고 점근변형률의 상관관계에서 결정된다.

참고문헌

1. 石井靖丸外 2 人(1955), “沖積粘上の工學的性質に関する研究”, 土木學會論文集, 30號.
2. 材山朔 郎, 柴田 徹(1956), “粘土のレオロレ-的特性について”, 土木學會論文集, 40號.
3. Tom W. Pfeifle, Kirby D. Mellegard, Paul E. Senseny, (1981), “Constitutive Properties of Salt from Four Sites”, ONWI 314, Prepared by RE/SPEC Inc. for office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, Columbus.
4. Thompson. Bruce M, (1983), “VISCOT: 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.
5. Richard Ambler pecquet, (1973), “A Finite Element program for The Analysis of Embankments over Soft Saturated Soils Including Consolidation and Creep Effect”, Ph.D., Louisiana Univ.
6. Owen. D.R.J, Hinton, E. (1980), “Finite Element in Plasticity (Theory and Practice)”, Univ. Collogo of Swansea, U.K.
7. Pusch, R. Felthan, P. (1980) “A Stochastic Model of the Creep of Soils”, Geotechnique 30, No.4
8. Ajaz, A.(1980) “Time-dependent Behaviour of Compacted Clays in Tension and Compression”, Geotechnique 30, No.1.
9. Vyalov, S.S., (1986) “Rheological Fundamentals of Soil Mechanics”, Developments in Geotechnical Eng. Vol. 36, ELSEVER, UK.
10. Keedwell . M.J., (1984) “Rheology and Soil Mechanics”, ELSEVIER, UK.

(접수일자 1991. 10. 4)