

## 약액주입 사질고결토의 크리프 예측

### Creep Prediction of Chemical Grouted Sands

강 희 복\* 김 종 렬\*\* 강 권 수\*\*\* 김 태 훈\*\*\*\* 황 성 원 \*\*\*\*\*

Kang, Hee-Bog Kim, Jong-Ryeol Kang, Kwon-Soo Kim, Tae-Hoon Hwang, Soung-Won

#### Abstract

A series of constant creep and repeated creep tests are performed to investigate the behavior of visco-elasto-plastic materials of chemical grouted sands. In the result of constant creep test, the material exhibits three types of shear strain : elastic, plastic, viscoelastic. The elastic, plastic and viscoelastic strains are linear, i.e., the strains are proportional to the stresses for loading. Good agreement is found between the predicted viscoelastic and test results by the power law and the generalized model. In the repeated creep test, the instantaneous recoverable strain is time-independent and the magnitude of accumulated plastic strain increases with number of cycles. Also it is seen that the accumulated plastic strains are approximately proportional to stress. There are no significant differences between test results predicted values for first cycle, and the differences increase relatively insignificantly with number of cycles.

#### 요 지

본 연구에서는 약액주입 사질고결토에 대해 일정재하크리프시험과 반복재하크리프시험을 실시하여 점·탄소성 거동 규명과 크리프예측을 수행하였다. 일정재하크리프 시험결과 총 변형률은 탄성, 소성 그리고 점탄성변형률로 구분되었으며 이러한 변형률은 응력의 증가에 비례하여 증가하였고 회복된 변형률은 제하시간에 무관함을 알았다. 일정재하크리프시험 예측결과 일반화된 모델과 지수함수모델은 시험결과와 잘 일치하였다. 반복재하크리프시험에서 순간회복변형률은 반복횟수에 무관하였고 누적소성 변형률은 반복횟수에 따라 증가하였으며 응력레벨에 비례함을 알 수 있었다. 반복재하크리프시험의 예측결과 첫 사이클에서는 잘 일치하였으나 반복횟수가 증가함에 따라 약간의 오차가 발생되었다.

**Keywords :** Creep, Creep Compliance, Viscoelastic Strain, Generalized Model

**핵심 용어 :** 크리프, 크리프 컴플라이언스, 점탄성변형률, 일반화된 모델

\* 정회원, 한양대학 토목환경과 조교수,공학박사

\*\* 정회원, 전남대 토목공학과 교수,공학박사

\*\*\* 정회원, 서남대 토목공학과 조교수,공학박사

\*\*\*\* 정회원, 전남대 토목공학과 시간강사,공학박사

\*\*\*\*\* 정회원, 전남대 토목공학과 박사과정

E-mail : kang4104@hanmail.net 061-650-4104

•본 논문에 대한 토의를 2004년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2004년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다

## 1. 서론

현대에 들어서 용지의 부족, 지가상승, 환경적 요인 등의 복합적인 여건으로 인하여 지반조건이 좋지 않은 곳에서도 이를 개선하여 토목구조물을 건설하는 경우가 빈번하게 되었다. 이러한 연약지반개량이나 Underpinning시공, 기초의 지지력보강 또는 지반강화 목적으로 통상적으로 사용되고 있는 공법중 하나가 약액주입공법이며 대표적인 공법으로는 LW, JSP, SGR, JET공법 등이 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 지반을 보강한 후에도 일정한 하중이 지속적으로 재하 되면 시간의 경과와 더불어 변형이 증가되며 이러한 시간의존 거동은 크리프 현상에 기인된다고 할 수 있다. 지금까지 약액주입공법의 사용빈도에 비해 내구성이나 크리프에 대한 연구는 아직 미흡한 편이다.

약액을 이용한 사질고결토의 크리프 거동에 대한 국외의 연구는 주로 물유리계약액을 주입한 사질고결토의 크리프 파괴에 주안점을 두고 연구가 이루어졌다.(Waner, 1972; Clough등, 1979; Borden등, 1982) 국내에서는 유재일(1988)이 삼축 크리프 시험을 실시하여 물유리계 약액을 주입한 고결토는 현저한 점탄성, 점소성의 성질을 나타내어 토질구조물의 설계 및 시공시 이러한 성질을 고려하여야 하며 고결토의 유변학적 모델은 Vyalov모델로 표현됨을 밝혔다. 그러나 지금까지의 연구는 일반적으로 적용응력 비 40%이상에서 시험이 주로 이루어져 크리프 변형이 비선형적인 거동을 보임에 따라 시험에서 구한 총변형률(탄성, 소성, 점탄성, 점소성)의 각 성분을 알기에는 어려움이 있는 것으로 판단되며 또한 하중이 반복적으로 재하 되는 경우에 대한 크리프 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 물유리계 약액을 주입한 사질고결토에 대해 30%이하의 적용응력 하에서 일정재하크리프 시험을 실시하여 점·탄소성 거동을 규명하고 일반화된 모델과 지수함수모델을 적용하여 크리프예측을 수행하였으며 모델을 확장하여 반복재하크리프시험에도 적용하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1 크리프/회복 변형률

일반적으로 압축크리프 시험은 일정한 응력하에서 단일 재하/제하에서부터 반복 재하/제하 등의 시험을 통하여 재료의 시간 의존 거동을 파악하게 된다. Fig. 1(a)는 가장 간단한 재하/제하 프로그램을 나타낸 것으로 하중조건은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} t \leq 0, \sigma_q(t) &= 0 \\ 0 < t \leq t_1, \sigma_q(t) &= \sigma_0 \\ t > t_1, \sigma_q(t) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$\sigma_0$  : 적용응력,  $t_1$  : 재하시간

Fig. 1(b)는 적용응력에 따른 전형적인 변형률 거동을 나타낸 것으로  $t=s$  에 대해 변형률  $\epsilon_{qr}(s)$  와  $\epsilon_{qc}(t)$  가 같다면, 선형 점탄성 재료이며 볼츠만의 선형 중첩의 원리를 적용하여 식(2)와 같이 적분형태로 나타낼 수 있다.(Findley등,1989; 김기석 등,1983)

$$\epsilon(t, \sigma_0) = \int_{-\infty}^t J(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (2)$$

여기서,

$J(t)$  : 크리프 컴플라이언스( $\tau \geq t$ )

### 2.2 예측모델

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 일반화된 모델을 적용하였으며 일정 응력 하에서 발생하는 변형률은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0}\right) + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}\right) \quad (3)$$

여기서,

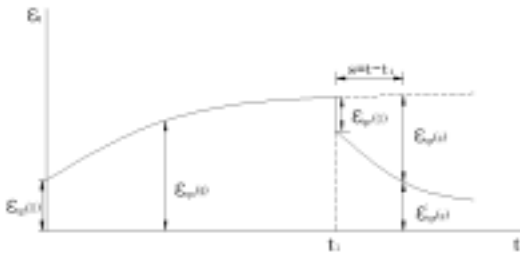
$n$ : Kelvin 모델의 수

$T_0 = \eta_0 / E_0$ ,  $T_i = \eta_i / E_i$

$E_0$ : 탄성계수,  $\eta_0$ : 점성계수



(a) 시간-적용응력 관계



(b) 시간-변형률 관계

Fig. 1 일정재하 크리프 시험

Creep compliance  $J(t)$ 는 탄성계수의 역수로 시간에 대한 응력과 변형률 관계이며 식(3)을 Creep compliance  $J(t)$ 로 나타내면 식(4)와 같다.

$$J(t) = \frac{1}{E_0} \left(1 + \frac{t}{T_0}\right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}\right) \quad (4)$$

또한, 점탄성거동을 예측하는데 있어 자주 이용되는 수학적 모델 중 지수함수가 많이 사용되며 예측과 시험값이 잘 일치하는 것으로 연구된 바 있다.(Drescher 등, 1983; 김종렬,1999) 따라서 일반화된 모델 외에 다음과 같은 지수함수식을 적용하였다.

$$J(t) = a + b t^c \quad (5)$$

여기서,

$a, b, c$  : 재료상수 ( $a>0, b>0, 0<c<1$ )

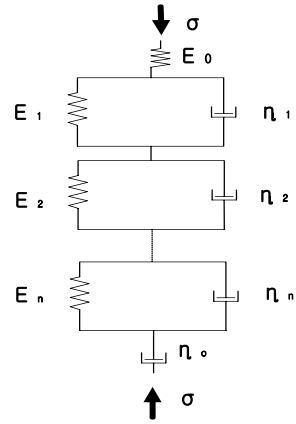


Fig. 2 일반화된 모델

### 3. 시험

#### 3.1 시험재료

본 연구에 사용된 표준사의 물리적 특성은 Table 1과 같으며 여기서 최대 및 최소건조단위중량은 ASTM D4265 규정에 준하여 실험하였다. 또한 물유리는 무기계의 용액형으로, 비중(Gs)은 1.143이고 겔 타입의 조절과 지반의 강도를 증가시킬 목적으로 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다.

Table 1 표준사의 기본물성

입도분포		시료의 물성치
최대 공극비	emax	0.843
최소 공극비	emin	0.617
최대 건조단위 중량	$\gamma_{dmax}(gf/cm^3)$	1.652
최소 건조단위 중량	$\gamma_{dmin}(gf/cm^3)$	1.377
비중	Gs	2.65
함수비	w(%)	0.30
평균 입경	D50(mm)	0.595
유효 입경	D10(mm)	0.443
균등계수	Cu	1.402
통일분류	Unified System ASTM D2487	SP

### 3.2 시편제작

공시체는 사질토 320g에 A액, B액을 혼합하여 낙하고 120mm를 유지해 자유낙하 시켜 PVC mold (직경 51.5mm, 높이 103mm)에 넣은 후 균질한 공시체를 제작하기 위해 cap으로 일정한 하중을 가하였다. 1시간동안 PVC mold 내에서 성형된 공시체는 추출하여 양생하였다(Photo 1참조). 위의 공시체 제작과정에서 혼합 재료의 양, 높이, 자유낙하 높이 등을 일정하게 유지한 것은 균질한 등방성의 물드를 제작하기 위함이다.

### 3.3 시험장치 및 시험방법

크리프 시험은 일정한 하중 재하와 지속적인 하중을 유지하는 것이 중요하기 때문에 모멘트 팔에 의해 하중을 가하는 지반 반력형으로 크리프시험장치를 제작하였다(Fig. 3참조). 시험장치는 크게 3부분으로 재하부, 계측부, 자료수집(Data Logger)부로 구성되어 있으며, 밑판은 40cm x 90cm 높이 50cm 이며 재하판의 길이는 80cm로서 하중 재하비는 1:1~1:3 까지 가능하다.

Table 2 공시체의 성형에 사용된 배합비

구 분	A액(물유리 수용액)		B액 (시멘트 현탁액)		
	물유리	물	시멘트	벤토나이트	물
중량비(g)	60	10	20	2	30
부피비(cm <sup>3</sup> )	53	10	6.35	0.33	30



Photo 1 성형된 공시체

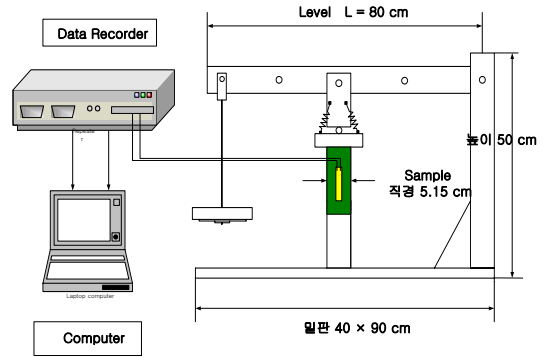


Fig. 3 크리프 시험장치

크리프 시험방법은 ASTM C 512의 기준에 준하였다. 특히, 크리프 시험은 온도와 습도에 따라 큰 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 시험 기간 동안 온도와 습도를 일정하게 유지하였다. 시험에 사용된 공시체는 일축압축강도 시험을 실시한 후 압축강도가 거의 일정하다고 판단되는 양생 7일의 시료를 사용하였다. 변형률 측정은 길이 60mm, 게이지 저항  $120.3 \pm 0.5 \Omega$ 인 콘크리트용 스트레인 게이지를 시편의 길이 방향으로  $120^\circ$ 간격으로 3개를 부착하여 평균값을 취하였다. 재하 하중은 응력/파괴강도의 비가 8%(47.1kPa), 16%(94.2kPa), 24%(141.3kPa)의 3단계로서 재하시간은 30분, 60분의 재하/제하를 실시하였으며 반복재하크리프시험은 적용응력비 8%와 16%에 대해 10분 간격으로 재하와 제하를 4사이클 반복하였다.

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 시간-변형률 관계

Fig. 4(a)는 일축압축강도시험에서 구한 파괴강도(589kPa)의 8%(47.1kPa)와 16%(94.2kPa) 그리고 24%(141.3kPa)의 응력수준에서 재하시간 30분인 일정재하크리프시험의 시간과 평균변형률 관계를 도시한 것이다. 초기변형률 측정은 하중 재하판이 공시체의 물드면에 고르게 분포되는 시간을 감안하여 10초가 지난 후에 측정하였다.

초기 탄성 변형률은 47.1kPa의 경우 0.0095, 94.2kPa는 0.0215이며, 141.3kPa를 재하 했을 경우는 0.0303를 기록하였으며 그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 증가하는 시간의존거동을 보이고 있다. 또한, 재하 후 30분이 지난 후 하중을 제거( $t_1=30$ 분)하였을 경우 즉시 회복되는 변형률은 47.1kPa에서 0.0084, 94.2kPa에서는 0.0189, 141.3kPa에서는 0.0277을 기록하였으며 Fig. 4(b)는 60분 재하를 나타낸 것이다.

Fig. 5는 반복재하크리프시험 결과로 가로축에는 경과시간을 세로축에 평균변형률을 나타내었다. 재하와 재하시간은 1사이클 당 10분 간격으로 80분 동안 반복 재하 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 반복 사이클이 진행됨에 따라 변형률은 증가하는 추세를 보이고 있다.

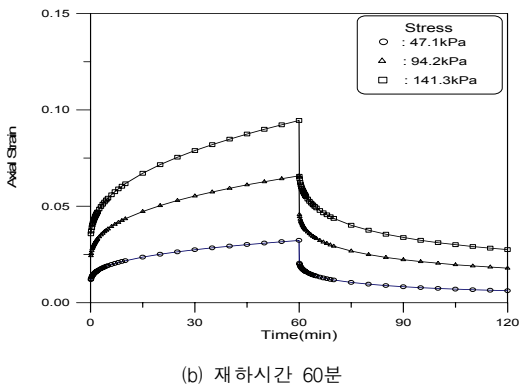
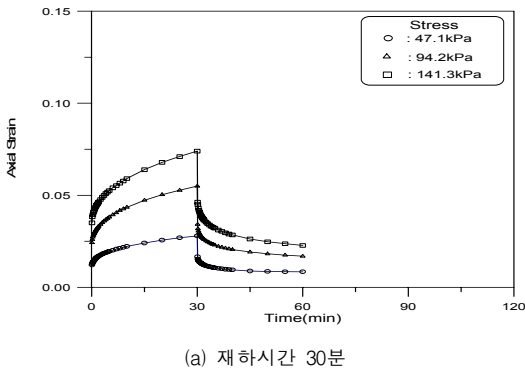


Fig. 4 일정재하크리프 시험결과

## 4.2 재료의 선형성

재료의 거동을 파악하는데 있어 적용되는 모델의 선형과 비선형의 여부는 해석하는데 중요하다. 주어진 조건하에서 변형률이 응력에 비례하게 되면 선형으로 Boltzmann의 중첩의 원리를 적용할 수 있다. 그러나 비선형일 경우는 선형보다 해석이 매우 복잡하게 된다. Fig. 6은 재료의 선형 여부를 파악하기 위하여 Fig. 4(a)의 크리프 변형률에서 10분, 20분, 30분이 경과되는 시점의 크리프 변형률을 도시 한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 응력과 변형률이 직선적인 관계에 있으므로 선형의 재료라 할 수 있으며 Boltzmann의 중첩의 원리를 적용할 수 있다.

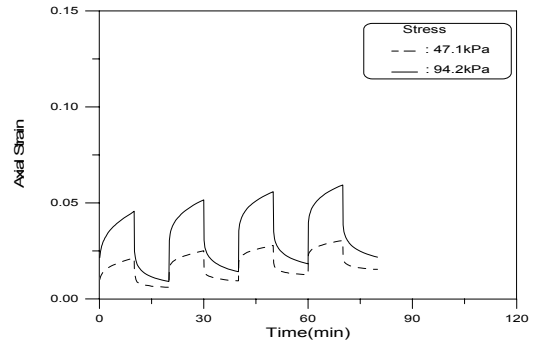


Fig. 5 반복재하크리프 시험결과

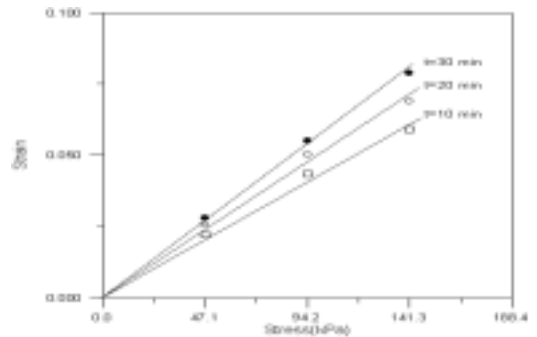


Fig. 6 적용응력과 크리프변형률

### 4.3 재 하 시간/반복 횟수와 순간회복 변형률

Fig. 7은 일정재하크리프시험의 재하시간  $t_1=30, 60$ 분에서의 순간회복변형률  $\epsilon_{qr}(0)$ 을 보여준 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 3단계의 응력수준  $\sigma_0=47.1\text{kPa}$ ,  $\sigma_0=94.2\text{kPa}$ ,  $\sigma_0=141.3\text{kPa}$ 에서의 순간회복 변형률은 하중 제하 시간을 달리하여도 크기가 거의 같게 나타나고 있다. 이는 순간회복변형률이 주어진 응력에 대해 재하시간  $t_1$ 에 무관하다는 것을 말해주고 있다.

Fig. 8은 반복재하크리프시험의 반복횟수에 따른 순간회복변형률 관계를 나타낸 것으로 일정재하크리프 시험과 같이 반복횟수에는 무관하다는 것을 알았다.

### 4.4 탄·소성 변형률/점탄성 변형률

Fig. 9는 응력수준에 따른 재하시 측정된 순간크리프 변형률  $\epsilon_{qc}(0)$ 과 재하시 순간회복변형률  $\epsilon_{qr}(0)$ 과의

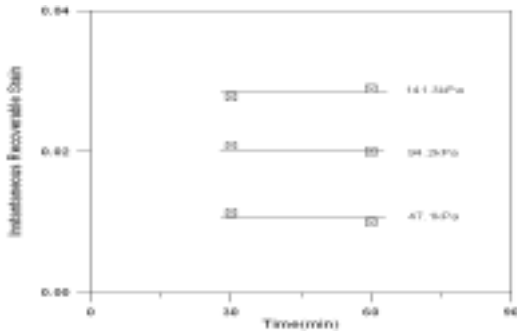


Fig. 7 일정재하크리프시험의 재하시간과 순간회복변형률

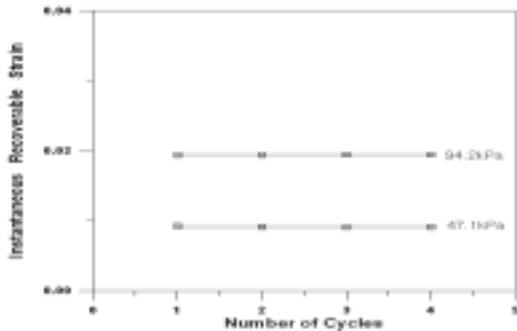


Fig. 8 반복재하크리프시험의 반복횟수와 순간회복변형률

관계를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 응력수준이 증가함에 따라 탄성 변형률과 소성 변형률이 증가하고 있으며 탄성 변형률에 비해 하중 제거 시 완전 회복되지 못하는 소성 변형률은 작은 값을 보였다. 탄성과 소성변형률은 시간에 무관하며 소성변형률은 식 (6)으로 구하였다.

$$\epsilon_p = \epsilon_{qc}(0) - \epsilon_{qr}(0) = \epsilon_{qc}(0) - \epsilon_e \quad (6)$$

여기서,

$\epsilon_p$ : 소성변형률,

$\epsilon_{qc}(0)$ : 응력 제하 직후 순간크리프변형률

$\epsilon_{qr}(0)$ : 응력 제하 직후 순간회복변형률(=  $\epsilon_e$ )

시간의존적인 거동을 파악하기 위하여 30분 재하크리프 시험결과에 대해 식 (7)를 이용하여 점탄성 크리프 변형률을 구하였으며 이를 도시하면 Fig. 10과 같다.

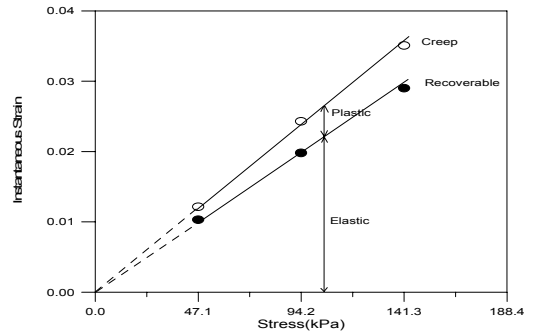


Fig. 9 응력과 순간크리프/회복변형률(재하시간 : 30분)

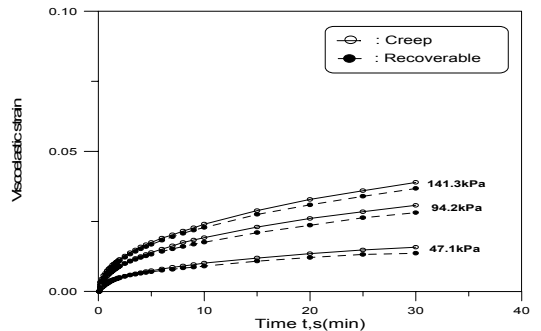


Fig. 10 경과시간과 점탄성 변형률

그림에서 알 수 있듯이 변형률은 시간의 경과와 더불어 증가하고 있으며 시간의존적임을 알 수 있다.

$$\varepsilon_{vec}(t) = \varepsilon_{qc}(t) - \varepsilon_e - \varepsilon_p \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ver}(s) = \varepsilon_{qr}(s) - \varepsilon_e \quad (8)$$

점탄성변형률의 선형성은 크리프컴플라이언스와 회복컴플라이언스를 비교함으로써 알 수 있다. 따라서 점탄성 크리프/회복 컴플라이언스는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J_{vec}(t) = \frac{\varepsilon_{vec}(t)}{\sigma_0} \quad (9)$$

$$J_{ver}(s) = \frac{\varepsilon_{ver}(s)}{\sigma_0} \quad (10)$$

여기서,

$J_{vec}(t)$ : Viscoelastic creep compliance

$J_{ver}(s)$ : Viscoelastic recovery compliance

Fig. 11은 141.3kPa의 응력 재하시 점탄성 크리프/회복컴플라이언스를 도시한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 크리프/회복컴플라이언스 값이 거의 일치한 것으로 보아 선형 점탄성재료이며 점소성 변형률은 존재하지 않음을 알 수 있다.

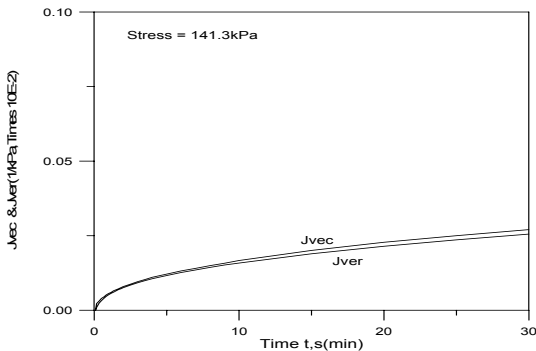
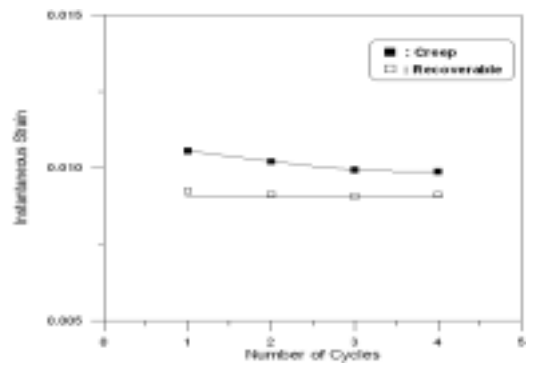


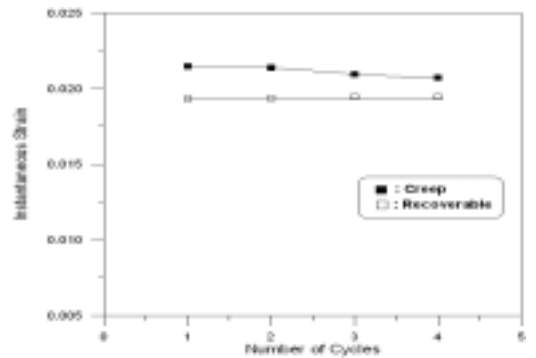
Fig. 11 점탄성 크리프/회복 컴플라이언스

#### 4.5 누적된 소성 변형률

Fig. 12는 반복재하크리프시험에서 반복횟수(N)에 따른 소성 변형률을 구하기 위해서 순간 크리프 변형률  $\varepsilon_{q,c}(N)$ 과 회복변형률  $\varepsilon_{q,r}(N)$ 을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 회복변형률  $\varepsilon_{q,r}(N)$ 은 반복횟수(N)에 무관하게 일정한 값을 보이고 있다. 회복변형률  $\varepsilon_{q,r}(1)$ 이 탄성이고 일정하며, 초기크리프 변형률 보다 작은 값을 보이고 있기 때문에, 이는 소성 변형률이 존재한다는 것을 의미한다. 47.1kPa의 경우 첫 번째 사이클에서 순간 크리프변형률이  $1.056 \times 10^{-3}$ 이고 회복변형률이  $0.925 \times 10^{-3}$ 로서 그 차인  $1.31 \times 10^{-4}$ 이 소성 변형률이다.



(a) 47.1kPa



(b) 94.2kPa

Fig. 12 순간크리프변형률과 회복변형률 비교 (반복재하크리프시험)

두번째 사이클에서 크리프변형률은  $1.021 \times 10^{-3}$ , 세번째 사이클에서는  $0.994 \times 10^{-3}$ , 네번째 사이클에서는  $0.988 \times 10^{-3}$ 이며 소성 변형률은 각각  $1.09 \times 10^{-4}$ ,  $0.87 \times 10^{-4}$ ,  $0.76 \times 10^{-4}$ 로서 반복횟수가 진행됨에 따라 소성 변형률이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 94.2kPa의 경우를 보면 반복횟수가 증가함에 따라 소성변형률은  $2.15 \times 10^{-4}$ ,  $2.03 \times 10^{-4}$ ,  $1.52 \times 10^{-4}$ ,  $1.29 \times 10^{-4}$ 로서 역시 반복횟수가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 소성 변형률을 반복횟수가 증가함에 따라 더하면 누적된 소성 변형률을 얻을 수 있으며 이를 수식으로 나타내면 식(11)과 같다.

$$\epsilon_q^{ap}(N) = \sum \epsilon_q^{p,N} = \sum (\epsilon_{q,c}(N) - \epsilon_{q,r}(N)) \quad (11)$$

여기서,

$\epsilon_q^{ap}(N)$  : Accumulated plastic strain

$\epsilon_{q,c}(N)$  : Instantaneous creep strain

$\epsilon_{q,r}(N)$  : Instantaneous recoverable strain

Fig. 13는 반복횟수에 따른 누적 소성 변형률의 크기를 도시한 것이다. 그림과 같이 누적된 소성 변형률은 반복횟수가 증가함에 따라 증가 하였으며, Fig. 14는 반복횟수에 따른 응력과 누적된 소 성 변형률 관계를 나타낸 것으로 소성 변형률은 응력이 증가함에 따라 비례하여 증가하였다. Fig. 15은 누적된 소성 변형률을 응력으로 나누어 누적소성 컴플라이언스 관계를 도시한 것이

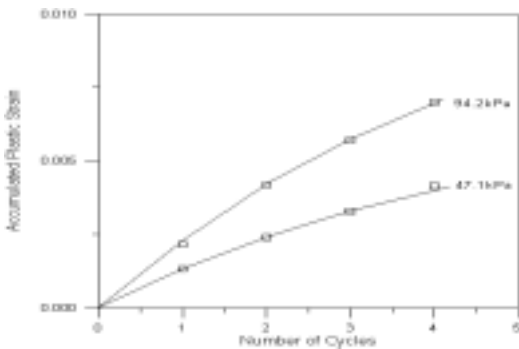


Fig. 13 반복횟수에 따른 누적소성 변형률

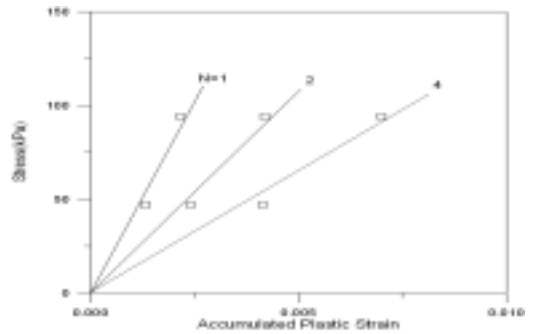


Fig. 14 적용응력과 누적소성 변형률

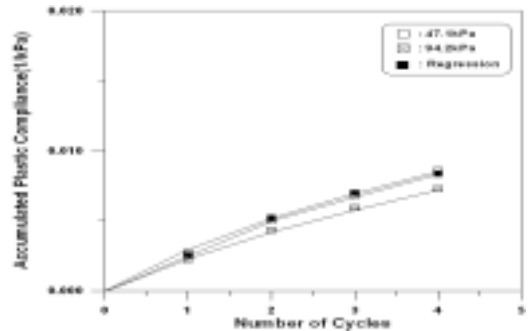


Fig. 15 반복횟수에 따른 누적소성 컴플라이언스

며 식(12)의 지수함수에 의해 예측하였다. 재료상수인 b와 c를 구하면 Table 3에 나타낸 바와 같으며 누적된 소성 변형률은 식(13)으로 구할 수 있다.

$$J_q^{ap}(N) = b N^c \quad (12)$$

여기서,

$J_q^{ap}(N)$  : Accumulated plastic compliance

b, c : Constant of materials

N: Number of cycles

$$\epsilon_q^{ap}(N) = \sigma_q J_q^{ap}(N) \quad (13)$$

Table 3 재료상수(반복재하크리프시험)

재료상수		지수함수
b (MPa <sup>-1</sup> )	c	
$4.33 \times 10^{-3}$	0.2656	$J_q^{ap}(N) = b N^c$



Table 4 일반화된 모델의 점탄성계수(일정재하크리프시험 : 재하시간 30분)

응력 (kPa)	점탄성계수									
	E <sub>0</sub> (Mpa)	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	η <sub>0</sub> (Mpa · min)	η <sub>1</sub>	η <sub>2</sub>	η <sub>3</sub>	η <sub>4</sub>
47.1	5.1	13.8	90.9	45.4	76.9	258.8	70.1	336.4	37.3	26.9
94.2	4.5	10.2	109.8	58.8	62.5	214.7	48.2	203.3	33.5	23.1
141.3	4.7	12.8	76.9	83.3	52.6	214.8	65.5	238.5	109.2	21.6

Table 5 지수함수모델의 재료상수(일정재하크리프시험 : 재하시간 30분)

적용응력(kPa)	J(t) = a + b t <sup>c</sup>			상관계수(R <sup>2</sup> )
	a (Mpa <sup>-1</sup> )	b (Mpa <sup>-1</sup> )	c	
47.1	1.98 x 10 <sup>-2</sup>	7.68 x 10 <sup>-3</sup>	0.3610	0.9986
94.2	2.24 x 10 <sup>-2</sup>	8.93 x 10 <sup>-3</sup>	0.3672	0.9997
141.3	2.10 x 10 <sup>-2</sup>	7.35 x 10 <sup>-3</sup>	0.4015	0.9989

#### 4.6 크리프 예측

일정재하크리프시험에서 점탄성 크리프 컴플라이언스는 시간에 의존하는 함수이기 때문에 Fig. 2와 같은 일반화된 모델을 적용하여 시험결과와 근사화 시켰다. 시험결과와 예측 값의 정확도는 Kelvin 모델의 수를 증가시킴에 따라 정밀도를 높일 수 있다. Table 4에서 알 수 있듯이 Maxwell 모델 1개와 Kelvin 모델 4개를 직렬로 연결한 경우 잘 일치하였다. 점탄성 계수의 산정은 Successive residual method를 이용하였으며 예측 결과와 시험 값은 Fig. 16에 도시하였다. 지수함수에 대한 예측은 앞의 식(5)를 적용하였으며 구한 재료상수는 Table 5와 같다. 응력수준별 각 단계의 상관계수를 보면 0.998 이상으로 시간과 크리프 컴플라이언스 간에 매우 높은 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

반복재하크리프시험에서 크리프예측은 앞에서 언급한 바와 같이 선형 중첩의 원리를 이용하였으며 Fig. 17은 시험결과와 예측치를 비교한 것이다.

그래프에서 80분이 경과한 시점에서 47.1kPa의 경우 변형률은 시험 값이 0.0053이나 예측 값은 0.0060으로 11.6%의 오차가 발생하였고 94.2kPa은 16.5%의 오차로서 초기 첫 사이클은 시험 값과 예측 값이 거의 일치하였으나 재하/제하의 반복 횟수가 진행되면서 오차는 증가하는 추세를 나타내었다.

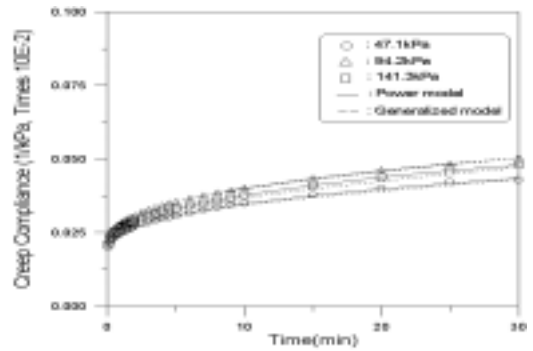


Fig. 16 시험결과와 예측치 비교 (일정재하크리프시험)

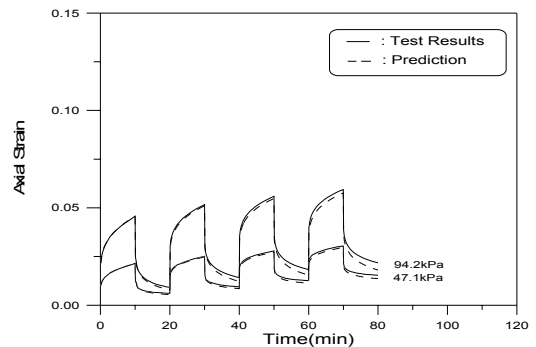


Fig. 17 시험결과와 예측치 비교 (반복재하크리프시험)

## 5. 결 론

물유리계약액을 이용한 사질고결토에 일정재하와 반복재하크리프시험을 수행하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일정재하크리프 시험결과 사질고결토의 크리프 변형률은 적용응력 24%이하에서 시간이 경과함에 따라 증가되는 시간 의존적인 거동을 보였다. 하중 재하 시 발생된 총 크리프 변형률은 탄성과 소성 그리고 점탄성변형률로 구분되었으며 재하 시 회복된 변형률은 탄성 변형률과 점탄성 변형률로 나타낼 수 있었다.
- 2) 탄성과 소성, 그리고 점탄성 변형률은 응력의 증가에 비례하여 증가하였으며 응력재하시간을 달리한 시험에서 응력 재하 시 회복된 변형률은 재하된 시간과 반복횟수에 무관함을 알 수 있었다.
- 3) 일정재하크리프시험에서 크리프 컴플라이언스에 대한 지수함수  $J(t) = a + bt^c$ 의 예측모델은 실측값과 잘 일치하였다. 또한 일반화된 모델 적용 시 Maxwell model 1개와 Kelvin model 4개를 조합할 경우 상관계수가 0.998이상으로 시험결과에 거의 근접하였으며 크리프 컴플라이언스의 회귀분석으로부터 임의시간( $t > t_1$ )에서의 크리프 변형률 예측이 가능하였다.
- 4) 반복재하크리프 시험결과 누적된 소성 변형률은 증가하였고 응력레벨에 비례하여 증가하였으며 시험값과 예측 값 비교 시 첫 번째 사이클에서는 거의 일치하였으나 반복재하의 사이클이 진행되면서 시험값과 예측 값은 11.6%~16.5%범위의 오차가 발생되었다.

## 참고문헌

1. 김종렬, 강희복, “물유리계 약액을 이용한 사질고결토의 점·탄소성적 거동해석”, 대한토목학회논문집, 제22권 제 6-c호, 2002, pp.641-650.
2. 김기석, 김상식, 김근덕, “콘크리트 크리프의 이론해석에 관한 비교 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 1983, pp.111-114.
3. 유재일, “물유리계 약액에 의한 사질고결토의 공학적 특성에 관한 시험적 연구”, 공학박사학위논문, 한양대학교, 1988.
4. Borden, R. H., Krizek, R. J. and Baker, W. H., “Creep Behavior of Silicate-Grouted Sands”, Pro. of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.1, 1982, pp. 450-469.
5. Clough, G.W., Kuck, W. and Kasali, G., “Silicate-Stabilized Sands”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. GT1, 1982, pp. 65-82.
6. Drescher, A. Kim, J. R. and Newcomb, D. E., “Permanent deformation in asphalt concrete”, J. Mat. Civ. Eng., ASCE, 5(1), 1983, pp.112-128.
7. Findley, W. N., Lai, J. S. and Wnaran, K., “Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials”, Dover Pub., New York, 1989.
8. Kim, J. R., “Laboratory development of a constitutive model for visco-elasto-plastic materials”, Journal of Civil Engineering, KSCE, Vol.3, No3, 1999, pp.261-271.
9. Waner, J., “Strength properties of chemically solidified soils”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.103, No. GT8, 1972, pp.903-908

(접수일자 : 2003년 10월 13일)