

# 남해안 모래의 장기 크리프 침하 특성에 관한 실험적 연구

## The Experimental Study on the Long-term Creep Settlements of Nam-Hae Sands

박 언 상<sup>†</sup>  
Eonsang Park

Received: July 23<sup>rd</sup>, 2018; Revised: August 2<sup>nd</sup>, 2018; Accepted: August 23<sup>rd</sup>, 2018

**ABSTRACT** : In this study, a standard consolidation test (Oedometer) was performed on the relative density of sand in the south coast to evaluate long-term creep settlement characteristics. Experimental results show that the cumulative settlement at the final loading stage decreases as the relative density increases and the variation of the void ratio decreases. As a result of analyzing the settlement rate of long-term creep of sand, creep settlement of 4.7~11.0% occurred depending on relative density with respect to total settlement. The creep parameter, Beta, of Schmertmann et al. (1978) was estimated to be 0.17~0.40 (average 0.21), and it tended to converge to a certain value when the load step becomes more than a certain level. It was found that there is no significant difference in the creep parameter depending on the layer thickness, and it was confirmed that the creep parameter could be applied regardless of the field layer thickness.

**Keywords** : Creep, Long-term settlement, Creep parameter, Sand oedometer, Settlement of sand

**요 지** : 본 연구에서는 남해안 모래의 장기 크리프 침하 특성을 평가하고자 상대밀도별로 표준압밀시험을 수행하였다. 실험 결과 최종 하중 단계에서의 누적 침하량은 상대밀도가 증가할수록 감소하였고, 간극비의 변화량도 감소하였다. 모래의 장기 크리프 침하 비율을 분석한 결과, 전체 침하량에 대해서 상대밀도에 따라 4.7~11.0%의 크리프 침하가 발생하였다. 또한, Schmertmann et al. (1978)의 크리프 계수, Beta는 0.17~0.40(평균 0.21)로 평가되었고, 일정 하중단계 이상이 되면 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 층두께에 따른 크리프 계수가 큰 차이가 없는 것으로 평가되어 실제 현장 층두께와 무관하게 크리프 계수를 적용할 수 있는 것으로 확인되었다.

**주요어** : 크리프, 장기 침하, 크리프 계수, 사질토 압밀시험, 사질토 침하량

## 1. 서 론

사질토 지반의 침하량은 즉시침하가 지배적이라 간주되어 왔다. 이는 대상지반이 지하수위 아래 존재하거나 포화되어 있다고 하여도 과잉간극수압이 재하기간 동안 매우 빠르게 소멸되기 때문이다. 그러나 과잉간극수압이 소산된 이후에도 사질토 지반에서 장기적인 크리프 침하가 발생할 수 있다는 것이 국내외 연구자들에 의해 제시되어 왔다(Nam et al., 2007). 따라서 사질토 지반의 층두께가 두껍거나 설 계수명이 긴 구조물의 경우 사질토 지반이라도 크리프 침하량을 고려한 설계가 되어야 한다. 또 다른 측면에서도 지하수위가 높은 느슨한 모래지반 상에 폭이 좁은 얇은 기초가 설치되어 있을 경우, 기초의 허용지지력이 지반의 전단강도 보다는 침하에 의하여 결정되기 때문이다. 따라서 사질토

지반상의 구조물에 관한 정확한 침하예측이 매우 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 사질토 지반은 투수성이 큰 관계로 건설공사가 끝난 이후는 크리프에 의한 침하만 발생된다. 국내외에서 점성토의 크리프 침하 특성 등 장기적인 거동에 대한 연구는 비교적 많이 수행되었다고 할 수 있다. 그러나, 국내의 경우 사질토 지반의 두께가 두꺼운 지역에서의 구조물 축조 사례가 적고, 시간 의존적인 거동은 점성토 지반에 비하여 두드러지지 않으므로 시간에 따른 변형에 대하여 안정하다는 인식과 함께 현장이나 기초조사에서 중요하게 인식되지 않으며 이에 대한 많은 연구가 이루어지지 않았다(Bong et al., 2012).

본 연구에서는 남해안 OO 지역에 건설되는 방파제 공사 에서 사질토 층의 두께가 두껍고, 상부 구조물의 장기적인

<sup>†</sup> Department of Civil Engineering, Bucheon University (Corresponding Author : pes6971@naver.com)

침하가 중요하여 현장에서 채취한 사질토를 사용하여 장기 침하 특성을 실험적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 실내 시험에서 결정된 사질토의 장기 침하 특성에 관한 크리프 계수를 기존 이론과 경험적 방법을 이용하여 산정하고 분석하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 사질토의 침하량 산정 이론

사질토 지반의 침하량(즉시 및 크리프 침하)을 정확하게 예측할 수 있는 합리적인 이론은 아직 미비한 실정이며 또한 침하량 계산에 필요한 계수를 얻기 위한 사질토 지반에서의 불교란 시료의 채취 역시 매우 어렵다. 따라서 사질토 지반의 침하량은 즉시침하량에 대하여 현장시험에서 얻은 경험에 의거하는 경우가 많으며 현재 활용되고 있는 현장시험으로는 평판재하시험, 표준관입시험, 콘관입시험, 프레스미터시험 등이 있다. 그러나, 위의 방법 대부분이 즉시침하량을 산정하기 위해서 도입된 경험적 방법들이다.

사질토 지반의 침하량을 산정할 수 있는 방법은 탄성론에 의한 방법과 경험적인 방법으로 구분할 수 있다. 탄성론에 의한 방법은 사질토 지반을 이상적인 탄성체(균질, 등방, 반무한)로 가정하여 탄성론에 의거 지표면의 즉시변형, 즉 즉시침하를 계산하는 방법이나 실제 지반은 이상적 탄성체라 간주할 수 없어서 해석값에 경험에 의해 보정하는 방법이 제안되었다.

기존 침하량 산정법은 Timoshenko(1951), Schmertmann et al.(1978), Hooke(1678) 등이 제안한 방법이 있다. 각 방법에 대하여 설명하면 다음과 같다.

#### 2.1.1 탄성론에 의한 방법(Timoshenko, 1951)

$$S_i = q_{\neq t} \cdot B \cdot \frac{1-\nu^2}{E_s} \cdot I_s \quad (1)$$

여기서,  $q_{\neq t}$ =기초에 작용하는 순하중,  $B$ =기초 폭,  $\nu$ =포아송비,  $E_s$ =지반의 탄성계수,  $I_s$ =영향계수

#### 2.1.2 변형률 영향계수에 의한 방법(Schmertmann et al., 1978)

$$S_i = C_1 \cdot C_2 \cdot q_{net} \cdot \sum_0^{2B} \left( \frac{I_z}{E_s} \cdot \Delta z \right) \quad (2)$$

여기서,  $C_1=1-0.5 \frac{q'}{q_{net}}$ ,  $q_{net}$ =순하중 $= (q-q')$ ,  $q$ =하중,  $q'$ =

토포압,  $I_z$ =변형률 영향계수,  $C_2$ =Creep에 의한 보정계수 $= 1+0.2 \log(\text{year}/0.1)$ ,  $E_s$ =지반의 탄성계수,  $\Delta z$ =층 두께

변형률 영향계수에 의한 방법은 사질토 지반상에 계획되는 토목 구조물의 설계 시 가장 일반적으로 이용되고 있는 방법이다. 본 방법을 표준압밀시험(Oedometer test) 조건에 대하여 적용하면, 시료 전체의 두께가 작아 심도효과를 고려할 필요가 없고, 탄성계수가 균일하고, K0조건이 응력이 전체에 걸쳐 동일하므로 Eq. (3)과 같이 단순하게 정리할 수 있다.

$$S = C_2 \frac{q}{E_s} L \quad (3)$$

여기서,  $C_2$ =Creep에 의한 보정계수,  $E_s$ =지반의 탄성계수,  $q$ =하중,  $L$ =층두께

기타 다른 방법과 달리 본 방법은 크리프에 의한 사질토의 장기 침하를 고려할 수 있고, 실제 발생된 침하량에 가장 근접한 평가 방법이라 알려져 있다.

#### 2.1.3 Hooke(1678)의 탄성법칙에 의한 방법

본 이론에서는  $S_i = \frac{PL}{E} = \frac{qL}{E}$  이므로 위의 변형률 영향계수법(Eq. (3))과 비교하여 Eq. (4)와 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$S = C_2 S_i = (1 + 0.2 \log \frac{t}{t_{01}}) S_i = S_i + S_i (0.2 \log \frac{t}{t_{01}}) \\ = \text{탄성침하량} + \text{탄성침하량} \times \text{creep 보정계수} = S_i + S_{creep} \quad (4)$$

Eq. (4)를 일반화하면 Nonveiller(1963) 식과 동일하다.

$$S = S_i (1 + \beta \frac{t}{t_0}) \quad (5)$$

여기서,  $S_i$ 는 기준시간  $t_0$ 에서의 침하량 또는 탄성침하량,  $\beta$ 는 Creep 보정계수로 Nonveiller(1963)는 0.2~0.3, Schmertmann et al.(1978)은 0.2를 제안하였다.

## 2.2 사질토의 크리프 계수 산정 방법

사질토의 즉시 침하량 산정 방법으로는 여러 가지가 제안되어 적용되고 있다. 그러나, 장기 크리프 침하량에 대한 산정방법은 기존 점성토의 이론(Singh & Mitchell, 1968)을

응용하여 적용하고 있다.

국내의 경우, Nam et al.(2007)은 제주지역 모래의 실제 압축량이 크리프 특성을 고려한 Schmertmann et al.(1978)의 방법보다 더 크게 나타났다는 것을 제시하였다. Bong et al.(2012)은 실트질 모래에 대하여 비배수 크리프 시험을 수행하여 하중 재하 직후 20~30초 이내의 짧은 시간에 즉시 침하가 완료되었고, 변형률 속도가 일정한 2차 크리프 거동이 국내 모래에서도 나타남을 제시하였다. Bong et al.(2012)은 유변학적 모델인 Generalized 모델의 우수한 적용성을 제시하기도 하였다.

이상에서 제시한 이론과 경험적 방법을 이용하여 본 연구에서는 아래와 같은 절차를 통해 본 연구의 대상 시료에 대한 크리프 계수를 결정하였다.

### 2.2.1 Method 1(탄성침하량법)

$$\text{기본식: } S_s = C_2 S_i$$

여기서,  $S_i$ : 탄성 침하량(이론식),  $S_s$ : 탄성 침하량+크리프 침하량=시험값,  $C_2$ : 흙의 크리프 변형계수,  $E_s$ : 탄성 계수,  $\Delta p$ : 하중 증가량

- ① 탄성침하량,  $S_i = \frac{\Delta p L}{E_s}$  계산
- ② 크리프 변형계수는 이론적인 탄성 침하량과 시험에 의한 침하량 값과의 관계로부터 산정

### 2.2.2 Method 2(계산법)

- ① Oedometer에서 측정된 시험결과를 바탕으로  $E_s$ 를 산정
- ② 탄성침하량,  $S_0 = \frac{\Delta p L}{E_s}$  계산
- ③  $S = S_0 + S_{creep}$ 에서  $S - S_0 = S_{creep}$  계산
- ④  $S_{creep} = S_0 [\beta \log(\frac{t}{t_0})]$ 로부터  $\frac{S_{creep}}{S_0} \times \frac{1}{\log(\frac{t}{t_0})} = \beta$  산정

Table 1. Methods for calculating the creep parameter

Item	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4
Legend	Elastic method	Calculation method	Regression method	Curve fitting method
Formula	$S_s = C_2 S_e$	$\frac{S_{creep}}{S_0} \times \frac{1}{\log(\frac{t}{t_0})} = \beta$	$S = S_0 (1 + \beta \log \frac{t}{t_0})$	$\beta = \frac{S_{creep}}{S_0} \times \frac{1}{\log(\frac{t}{t_0})}$
Creep parameter	$C_2$	$\beta$	$\beta$	$\beta$

Table 2. Sample properties

Initial water content (%)	Specific gravity	USCS	Density (kN/m <sup>3</sup> )		
			Dr=40%	Dr=60%	Dr=80%
26.2	2.66	SP	14.03	14.52	15.05

### ⑤ 압밀하중(Creep 하중) 단계별로 $\beta$ 산정

### 2.2.3 Method 3(회귀분석법)

- ①  $S = S_0 (1 + 0.2 \log \frac{t}{t_0})$ 로부터 실험결과를  $\frac{S}{S_0}$ 를 종축,  $\frac{t}{t_0}$  (log scale)으로 하는 그래프 작도

여기서,  $S_{oi}$ 와  $t_{oi}$ 는 logt 법을 이용하여 Creep 침하 시험을 1차 선정 후 도시

### 2.2.4 Method 4(곡선정규법)

- ①  $\beta = \frac{S_{creep}}{S_0} \times \frac{1}{\log(\frac{t}{t_0})}$ 로부터 시간별  $\beta$ 산정,

여기서,  $t_0$ 는  $s - \log t$ 관계로부터 산정

본 연구에서는 위에 제시된 4가지 방법을 이용하여 하중 단계별 크리프 계수를 산정하여 분석하고 설계하중에 대한 대표 크리프 계수를 결정하였다. 아래의 Table 1은 각 산정 방법을 요약한 것이다.

## 3. 실험

### 3.1 시료 특성

본 연구에서는 국내 남해안 OO 지역의 해저 지반에서 채취된 모래를 사용하였다. 사용된 시료의 특성은 Table 2와 같다. 본 시료의 특성에서 초기 함수비가 높은 것은 해저 지반에서 수위 하부에서 채취되었기 때문이며, 장기 크리프 시험을 실시하기 위해 건조하여 사용하였다. Table 2에는 각 상대밀도(KS F 2345)별 시료 조성 밀도를 함께 제시하였다.

### 3.2 실험 조건 및 전경

상대밀도별로 위에서 제시한 밀도를 얻기 위해 건조된 모래를 표준압밀시험기에 투입하여, 소형 다짐기를 이용하여 다졌고, 재성형된 모래의 장기침하 특성을 파악하기 위한 실내 표준압밀시험을 수행하였다. Table 3에는 시험조건을 정리하였고, Fig. 1은 시료의 준비 및 실험 전경을 보여주고 있다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 실험 결과

Fig. 2~4는 각 상대밀도별 시간-침하 곡선과 각 하중단계별 간극비의 변화 곡선을 제시한 것이다. 사용 시료가 모

레이므로 일반적인 점성토의 압밀 곡선에 비해 매우 빠르게 압축이 진행되는 것을 확인할 수 있었고, 간극비 곡선의 형태는 시간과 무관하므로 유사함을 알 수 있었다.

최종 하중 단계에서의 누적 침하량은 상대밀도가 증가할수록 감소하였고, 간극비의 변화량도 감소하였다. 이는 상대밀도가 증가함에 따라 시료의 밀도가 증가하고, 강성이 증가하기 때문이다.

Fig. 5에서는 저응력 상태(80kPa)와 고응력 상태(320kPa)에서의 하중-침하 곡선의 형태를 상대밀도별로 함께 도시하여 대상 모래의 장기 침하 특성을 제시하였다. 장기 크리프 침하의 시점을 침하가 시간 경과에 따라 일정한 속도로 발생하는 직선의 시점부터 간주하면 그림의 “원”과 같다. 크리프 침하가 발생하는 시점은 고응력상태일 때와 상대밀도가 높은 경우 늦어지는 경향을 보였다.

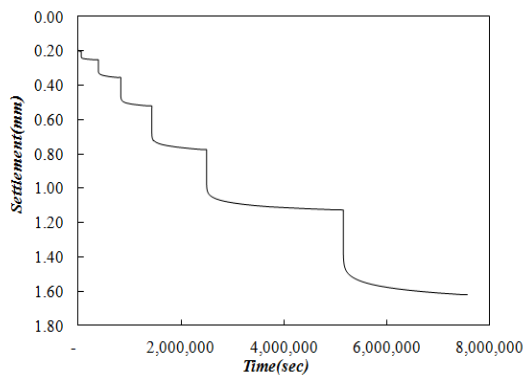


(a) Sample

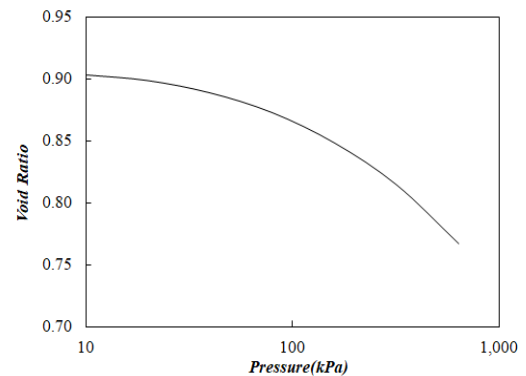


(b) Oedometer

Fig. 1. Test photograph



(a) Settlement-time curve

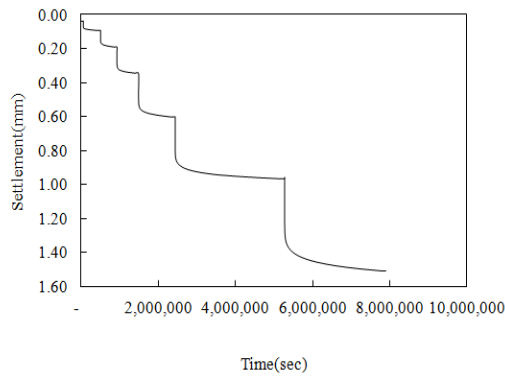


(b) Void ratio-pressure curve

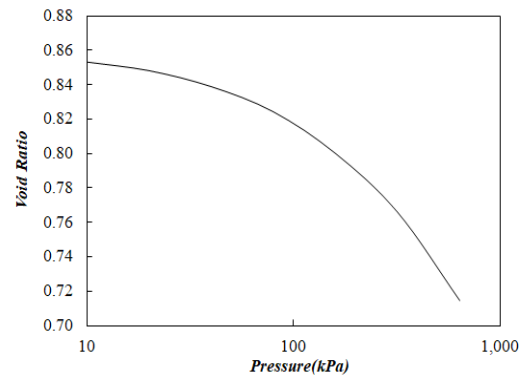
Fig. 2. Test result (Dr=40%)

Table 3. Test conditions

Case	Legend	Dr	Load	Load increasing ratio	Loading time
Case 01	Dr=40%	40%	10 ~ 640 kN/m <sup>2</sup>	1	24hrs
Case 02	Dr=60%	60%			
Case 03	Dr=80%	80%			

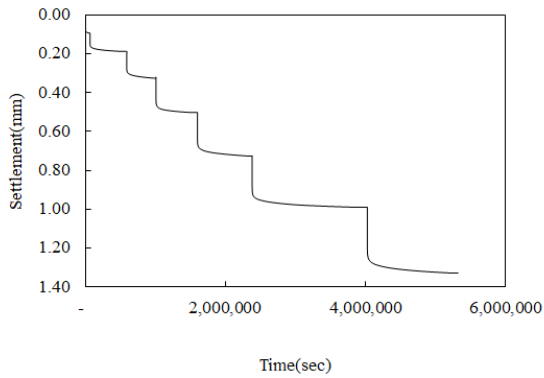


(a) Settlement-time curve

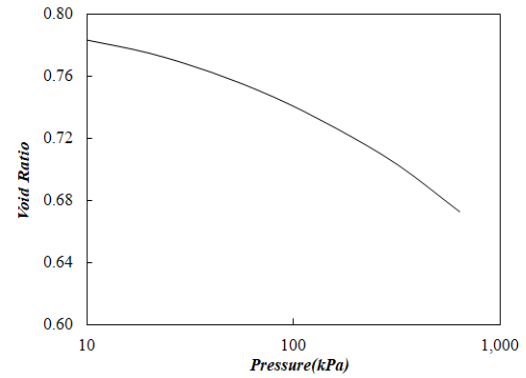


(b) Void ratio-pressure curve

Fig. 3. Test result (Dr=60%)

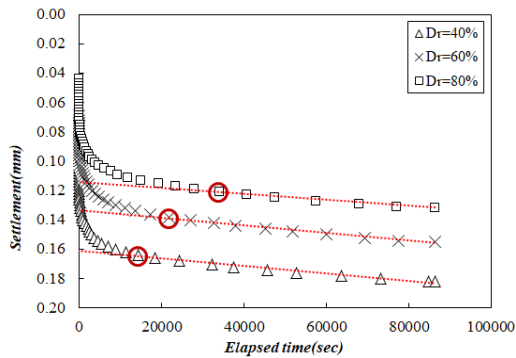


(a) Settlement-time curve

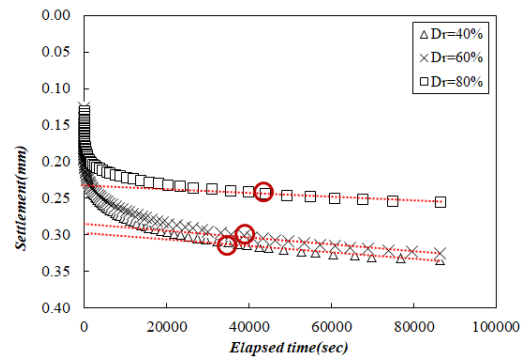


(b) Void ratio-pressure curve

Fig. 4. Test result (Dr=80%)



(a) Low pressure (80 kPa)



(b) High pressure (320 kPa)

Fig. 5. Settlement curve with pressure

## 4.2 결과 분석

Table 4는 전 절에서 제시한 저응력과 고응력 상태에서의 침하 곡선과 크리프 침하 발생 시점을 추정하여 침하량의 구성 비율을 분석한 것이다. 본 표는 본 연구에서 고려하는 사질토의 장기 크리프 침하 특성이 1차 침하에 비해 약 4.9~12.3%에 해당하고, 전체 침하량에 대해서는 상대밀도에 따라 4.7~11.0%에 해당함을 보였다.

Fig. 6~8에는 본 연구에서 사용된 시료의 상대밀도에 따른 하중 단계별 크리프 계수를 제시하였다. 해당 그래프에

서 C2는 상기 2.2절에서 설명된 방법 1에서의 파라미터이고, 방법 2는 계산법, 방법 3은 회귀분석법, 방법 4는 곡선 정규법을 나타낸다. 또한, 그림에 제시된 최소, 최대, 평균은 초기 저응력(10kPa, 초기 시료 세팅 압력)에서의 값을 제외한 값들에 대한 통계치이다.

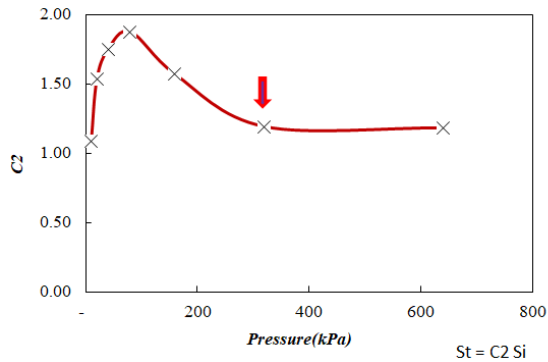
크리프 계수, C2의 경우 하중단계가 낮을 경우 증가하다가 약 100kPa 이상부터 감소하다가 고압력 상태가 되면 수렴하는 경향을 보였다. C2의 값이 수렴하기 시작하는 압력은 상대밀도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. Beta

Table 4. Settlement ratio of sand

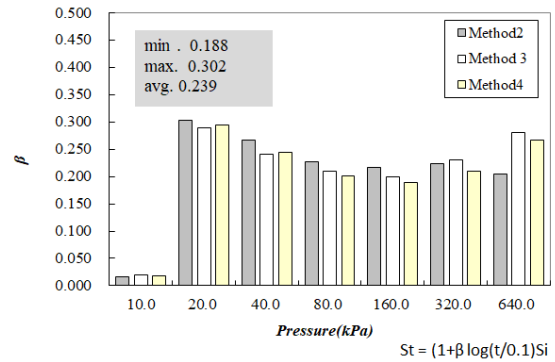
Item		Total settlement (mm)	Primary settlement (mm)	Creep settlement (mm)	Settlement ratio (%)	Creep ratio (%)
Dr=40%	Low pressure (80 kPa)	0.182	0.164	0.018	11.0	9.9
	High pressure (320 kPa)	0.334	0.31	0.024	7.7	7.2
Dr=60%	Low pressure (80 kPa)	0.155	0.138	0.017	12.3	11.0
	High pressure (320 kPa)	0.325	0.301	0.024	8.0	7.4
Dr=80%	Low pressure (80 kPa)	0.132	0.121	0.011	9.1	8.3
	High pressure (320 kPa)	0.255	0.243	0.012	4.9	4.7

Note 1) Settlement ratio (%) = Creep settlement/Primary settlement

Note 2) Creep ratio (%) = Creep settlement/Total settlement

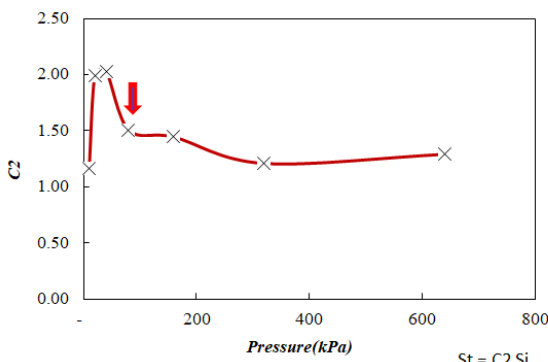


(a) C2

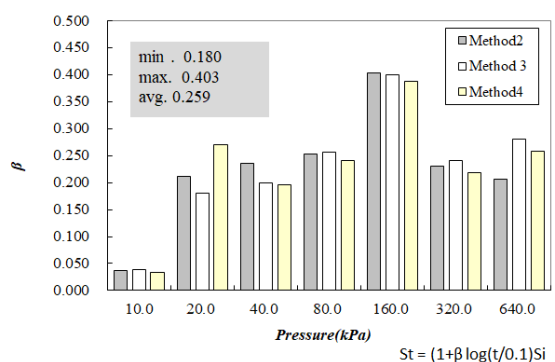


(b) Beta

Fig. 6. Creep parameters with the estimation method (Dr=40%)

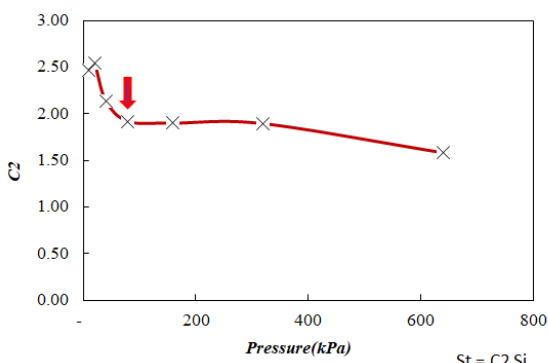


(a) C2

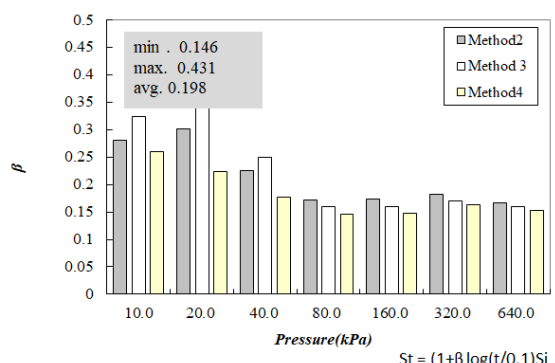


(b) Beta

Fig. 7. Creep parameters with the estimation method (Dr=60%)



(a) C2



(b) Beta

Fig. 8. Creep parameters with the estimation method (Dr=80%)

역시 유사한 경향을 보이고 있다. 이는 일반적인 크리프 특성은 상재하중의 크기와는 무관하다(Mitchell & Soga, 2005)고 알려져 있는 사실과 매우 유사한 결과라 판단된다. 전체적으로는 상대밀도가 증가할수록 크리프 계수(C2, Beta)의 평균값은 상대적인 강성이 크기 때문에 감소하는 경향을 보였다. 본 결과를 지반공학적인 측면에서 생각해보면 크리프 계수가 작다는 것은 크리프 침하량이 작다는 것을 의미하므로 상대밀도가 증가할수록 크리프 침하량은 감소함을 예측할 수 있다. 따라서, 사질토 지반의 장기 크리프 침하량을 감소시키기 위해서는 점성토와 유사하게 선행하중재하공법(Preloading)을 적용하는 것도 하나의 방법이라 판단된다.

각 방법별 특징을 살펴보면 약 80kPa을 넘어서는 고응력 상태가 되면 방법 4의 곡선정규법이 다소 작은 값을 산정하는 경향을 보이지만, 전체적으로는 방법 2~4가 유사한 것으로 간주할 수 있다.

Fig. 9에는 상대밀도에 따른 모래의 대표 크리프 계수를 도시한 것이다. C2의 경우 동일 상대밀도에서는 하중 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났으나, 상대밀도에 따른 경향은 약간 증가하는 것으로 나타났다. C2의 정량적 수치는 최소 1.18, 최대 2.14, 평균 1.63의 값을 나타내었다. 상대밀도에 따른 Beta(방법 2)는 상대밀도가 증가함에 따라 감소

하는 것으로 나타났다. Beta의 정량적 수치는 최소 0.17, 최대 0.40, 평균 0.23의 범위를 나타내어 Nonveiller(1963)의 0.20~0.30, Schmertmann et al.(1978)의 0.20과 유사한 것으로 평가되었다. 상대밀도 60% 조건의 하중 160kPa에서 이상치라 예상되는 큰 Beta 값이 도출되었고, 이를 배제한 값을 적용하면 평균 0.21로 Schmertmann et al.(1978)의 0.20과 거의 유사한 것으로 나타났다.

크리프 특성은 상재하중과는 무관하다고 알려져 있고, 원지반의 상재하중은 층두께로부터 결정한다. 본 연구에서는 이와 같은 사실을 확인하고자 Fig. 10과 같이 층두께에 대해서 크리프 계수를 도시하였다. 층두께에 따른 C2, Beta는 이상치(Fig. 9의 이상치와 동일)를 제외하고 큰 변화가 나타나지 않았다(Fig. 10). 따라서 모래 지반에서 현장 층두께와 무관하게 본 연구에서 산정된 크리프 계수를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 현장에서 교란된 상태로 채취된 모래에 대하여 실내에서 상대밀도별로 조성된 시료에 대한 실내 표

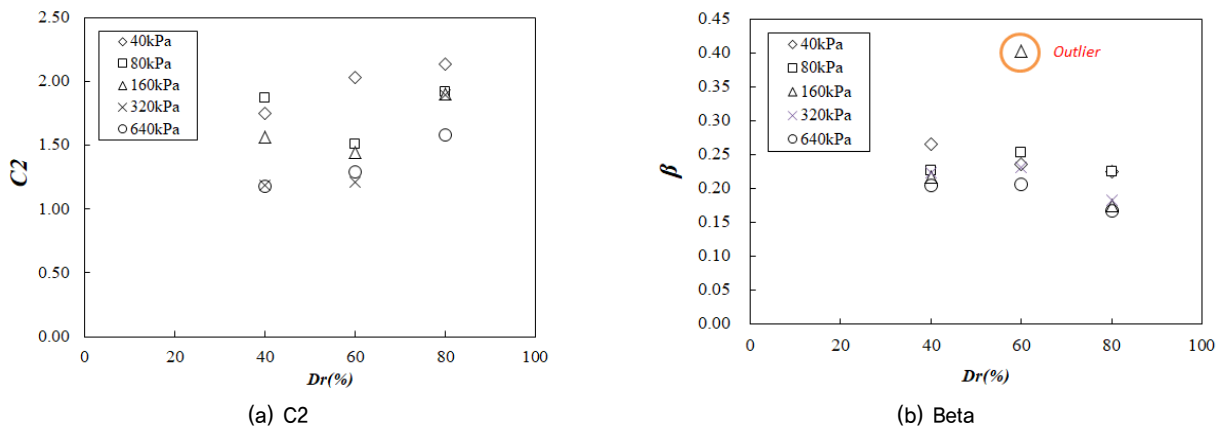


Fig. 9. Creep parameters with relative density

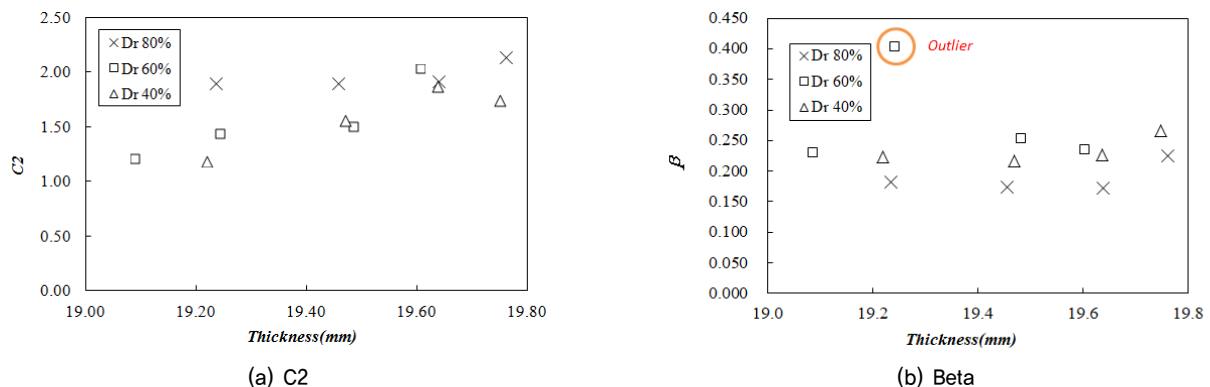


Fig. 10. Creep parameters with sample thickness

준압밀시험을 수행하여 장기 크리프 침하 특성을 평가하였다. 본 연구를 통해 아래와 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 실험 최종 하중 단계까지의 누적 침하량은 상대밀도가 증가할수록 감소하였고, 간극비의 변화량도 감소하였다.
- (2) 장기 크리프 침하량은 1차 침하에 비해 약 4.9~12.3%에 해당하고, 전체 침하량에 대해서는 상대밀도에 따라 4.7~11.0%에 해당함을 보였다. 또한, 크리프 침하가 발생하는 시점은 고응력상태일 때와 상대밀도가 높은 경우 늦어지는 경향을 보였다.
- (3) 본 연구에서 사용한 모래의 크리프 계수 중 C2는 1.18~2.14(평균 1.63), Beta는 0.17~0.40(평균 0.21)로 평가되었다.
- (4) 크리프 계수, C2와 Beta 모두 일정 하중단계 이상이 되면 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였다. C2의 값이 수렴하기 시작하는 압력은 상대밀도가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.
- (5) 층두께에 따른 C2, Beta는 큰 차이가 없는 것으로 평가되어 실제 현장 층두께와 무관하게 실내 크리프 계수를 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 실내 실험 시료의 두께가 매우 작았기 때문에 추가 검증 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## References

1. Bong, T. H., Son, Y. H., Noh, S. G. and Park, J. S. (2012), Comparison study of undrained creep characteristics and creep model of silty sand, Journal of Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 54, No. 1, pp. 19~26 (In Korean).
2. Hooke, R. (1678), Lectures de Potentia Restitutiva, Or, Of Spring. Explaining the Power of Springing Bodies, London.
3. Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005), Fundamentals of Soil Behavior, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
4. Nam, J. M., Joh, S. H. and Kim, T. H. (2007), Compressive characteristics of sand in Jeju coastal area, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 23, No. 6, pp. 103~114 (In Korean).
5. Nonveiller, E. (1963), Settlement of a grain silo on fine sand, European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Proceedins, Vol. 1, pp. 285~294.
6. Schmertmann, J. H., Hartman, J. P. and Brown, P. R. (1978), Improved strain influence factor diagrams, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. 8, pp. 1131~1135.
7. Singh, A. and Mitchell, J. K. (1968), General stress strain-time function for soils, Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE 94(1): 21~46.
8. Timoshenko. (1951), Theory of Elasticity, McGraw-Hill. New York.