



Received: 2023/01/17
Revised: 2023/01/28
Accepted: 2023/02/24
Published: 2023/03/31

***Corresponding Author:**

Chul-Min Lim

Navy/Marine Corps Management Division, Defense Installations Agency

54-99, Duteopbawi-ro, Yongsan-gu, Seoul, 04353, Republic of Korea

Tel: +82-55-907-6964

Fax: +82-55-907-6964

E-mail: chulminn@snu.ac.kr

사질토 성토체의 장기 침하거동 분석에 따른 해군 부두건설 기준 연구

Study on Naval Harbor Standards Based on Long-term Creep Behavior Analysis of Sandy Soil Embankments

임철민^{1*}, 임슬기²

¹해군소령/국방부 국방시설본부 해군/해병대사업관리과 대형사업/특수시설담당

²해군소령/해군 작전사령부 소양함 기관장

Chul-Min Lim^{1*}, Seul-Ki Lim²

¹LCDR, ROK Navy/Business Manager, Navy/Marine Corps Management Division, Defense Installations Agency

²LCDR/Chief Engineer Officer, AOE Soyang, ROK Navy

Abstract

성토체는 침하관리가 중요한 부분을 차지하며, 목표한도 이내의 허용잔류침하량을 기준으로 관리하는 경우 장기 크리프 거동으로 인한 침하량 평가가 중요하다. 이에 따라 본 연구에서는 크리프 거동에 대한 영향인자를 성토 성토재료의 세립분 함유량, 성토체의 다짐도 및 전단응력비(q/p')로 선정하고 각 영향인자에 따른 크리프 거동을 분석하여 산출한 크리프 계수를 바탕으로 해군 항만 건설부지에 대한 연구자료를 활용하여 허용잔류 침하량을 유지하기 위해 어떠한 기준을 적용해야 하는지 분석해보았다.

Settlement management is important to the embankment and long-term creep settlement is more important in the structure. In this study, the effect of the fine contents, the relative compaction and the stress ratio(q/p') on the creep behavior of the soils was experimentally evaluated based on triaxial tests. The creep coefficient was determined through the vertical strain-log(time) relationship. Using the data of the harbor construction site conducted by the Navy, we analyzed what criteria should be formed in order to maintain the allowable residual settlement.

Keywords

항만 기준(Harbor Standard), 크리프 거동(Creep Behavior), 성토체(Embankment), 세립분(Fine Contents), 다짐도(Compaction)

Acknowledgement

이 논문은 2022년도 한국해군과학기술학회 동계학술대회 발표 논문임.

1. 서론

성토체는 항만, 철도, 도로 등 주요 기반시설의 일정한 지반고를 유지하기 위해 시공된다. 성토체는 침하관리가 중요한 부분을 차지하며, 목표한도 이내의 허용잔류침하량을 기준으로 관리하는 경우 1차 침하 이후에 나타나는 장기 크리프 거동으로 인한 침하량 평가가 중요하다. 풍화토의 시간에 따른 거동은 재료의 특성, 전단응력비 및 상대밀도에 영향을 받는다.

이에 따라 본 연구에서는 크리프 거동에 대한 영향인자를 성토 성토재료의 세립분 함유량, 성토체의 다짐도 및 전단응력비(q/p')로 선정하고 각 영향인자에 따른 크리프 거동을 실험적으로 분석하여 산출한 크리프 계수를 바탕으로 해군에서 실시하는 항만 건설부지에 대한 지반조사 등 설계자료를 활용하여 어떤 부분에 가중치를 두어 부두건설을 해야 하며, 허용잔류침하량을 유지하기 위해 어떠한 기준으로 성토체를 조성해야 하는지에 대하여 분석해보았다.

2. 크리프 압축시험

성토체의 크리프 침하 영향인자로 성토재료의 세립분 함유량, 다짐도, 성토체의 전단응력비(q/p')를 결정하여 이를 시험조건으로 정하였다(Table 1 참조). 다짐도와 세립분 함유량 조건은 국내의 설계기준

(건설교통부, 2004[6]; 일본 국토교통성, 2007[2])을 참고하여 결정하였으며, 전단응력비(q/p')는 10 m 성토체의 단계성토를 모사한 수치해석결과를 바탕으로 성토체 내부 응력상태를 대표하는 두 가지 조건으로 결정하였다.

Table 1. Test conditions

Test no.	Specimen name	Fine contents (%)**	Compaction (%)***	Stress ratio q/p' (σ'_h/σ'_v)	Axial eff. stress σ'_v (kPa)
1	SM0.8_F15_C98*		98		
2	SM0.8_F15_C93	15	93	0.8(0.48)	100****
3	SM0.8_F15_C86		86		
4	SM0.8_F25_C93	25	93		
5	SM0.98_F15_C93	15	93	0.98(0.41)	

*SM: USCS, 0.8: shear stress ratio(q/p'), F15: fine content 15 %, C98: compaction rate 98 %

**F15: upper limit based on Japanese criteria, F25: upper limit based on domestic criteria

***C98: 95 % satisfied with the criteria of the upper roadbed, C93: 90 % satisfied with the criteria of the lower roadbed, C86: under the criteria of the compaction

****Vertical effective stress acting on the center of a 10 m soil block

2.1 시험장비

실험을 진행하기 위해 GDS사에서 제작한 3축 시험장비를 사용하였다. 장비의 구성은 하중을 재하하는 로딩 프레임, 시료를 탑재하는 셀에 대하여 변위를 측정하기 위한 LVDT(linear variable differential transformer) 및 8채널 데이터 로거를 사용하였다. Fig. 1은 크리프 압축시험을 위한 셀 탑재 시편 및 3축 시험장비이다. 크리프 압축시험은 조성 및 하중재하, 측정 단계로 나누어 수행하였다.

먼저 조성 단계에서는 실험기준인 세립분에 맞는 사질토를 준비하여 다짐기준에 맞는 다짐도로 시편을 조성하였다. 시편은 직경과 높이 비율을 2:1로 조성하였으며, 풍화토를 사용하였다. 미세변형을 측정할 수 있는 LDVT를 설치한 후, 연직유효응력 조건을 시뮬레이션할 수 있는 GDS의 3축 압축 테스트 응력 조건 및 응력 경로로 하중을 재하하였다. 수직 및 수평 응력을 점진적으로 재하하여 순간하중재하가 아닌 30분에 걸쳐 목표 응

력조건에 도달하도록 하였다. LDVT를 통해 시편의 수직 변위를 측정하면서 크리프 현상이 충분히 발현될 수 있도록 test별로 최소 20일 이상 측정하였다. 이 과정에서 일정한 응력조건이 적용될 수 있도록 지속적인 관리를 유지하였다.

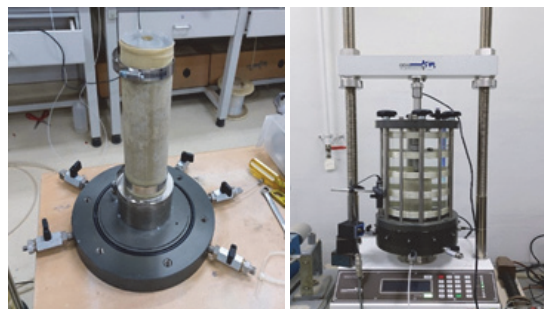


Fig. 1. Triaxial testing system and specimen

2.2 시험결과

크리프 압축시험을 통해 평가된 연직 변형률을 Fig. 2에 도시하였으며, 선형구간을 회귀분석한 뒤 Charles (2008)[3]가 제안한 크리프 침하량 공식을 적용하여 크리프 계수(α)를 결정하였다(식 (1) 및 Table 2 참조). 일정한 시간이 경과한 후 연직 변형률이 일정한 값으로 나타나는 경우 실험 측정을 중단하였다. 상대적으로 변위가 많이 발생하는 세립분 함유량 25 % 시편에 대한 실험 및 전단응력비 $q/p' = 0.98$ 조건의 실험의 경우 일정한 크리프 계수가 측정될 때까지 실험 측정을 실시하였다. 장기간의 시간이 필요한 만큼 일정한 크리프 계수가 측정될 수 있도록 하였다.

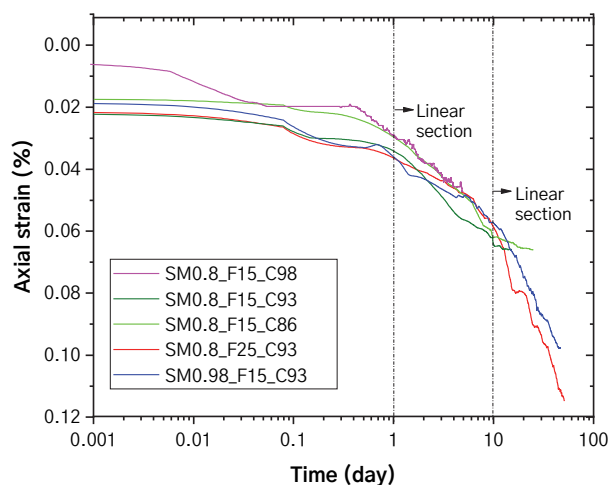


Fig. 2. Creep compression test result (log time-strain)

Table 2. Creep coefficient

Test no.	Specimen name	α	R^2
1	SM0.8_F15_C98	0.02674	0.97
2	SM0.8_F15_C93	0.02868	0.98
3	SM0.8_F15_C86	0.02897	0.96
4	SM0.8_F25_C93	0.07516	0.95
5	SM0.98_F15_C93	0.06527	0.92

분석 결과, 다짐도가 증가할수록 연직 변형률은 작게 발생했으며 크리프 계수는 감소하였다 (86 %: 0.02897; 93 %: 0.02868; 98 %: 0.02674). 세립분 함유량 25 % 시료의 경우 세립분 함유량 15 %에 비해 큰 연직 변형률이 발생하였으며, 크리프 계수는 0.02868에서 0.07516으로 약 2.6배 증가하였다. 전단응력비의 경우 $q/p' = 0.98$ 조건에서 $q/p' = 0.8$ 조건에 비해 연직 변형률이 크게 발생하였고, 크리프 계수는 0.02868에서 0.06527로 약 2.3배 증가하였다.

$$\Delta s = \alpha H \log(t_2/t_1) \quad (1)$$

여기서, Δs : 크리프 침하량, α : 크리프 계수, H : 성토고, t_1 : 크리프 기준 시간, t_2 : 크리프 경과 시간.

크리프 계수를 활용하여 3개월 및 10년 단위로 발생 가능한 변형률 및 침하량을 계산해보았다. 세립분 함유량 25 % 시료의 경우에는 세립분 함유량 15 %에 비해 큰 연직 변형률 및 예상 침하량이 발생하였으며(10년 기준 세립분 25 % 침하량 26.77 mm, 세립분 15 % 침하량 10.22 mm), 시공 후 짧은 시간이 흐른 것으로 가정한 3개월 안에 총 10년 동안 발생 가능한 크리프 침하량의 반절 가까이가 발생하는 것을 예상할 수 있었다(세립분 25 % 기준 10년간 총 침하량 26.77 mm, 3개월 침하량 14.69 mm, 3개월에서 10년간 발생 침하량 12.09 mm).

전단응력비의 경우에도 $q/p' = 0.98$ 조건에서 $q/p' = 0.8$ 조건에 비해 연직 변형률이 크게 발생하였고, 크리프 침하량에 대해서도 10.22 mm에서 23.25 mm로 약 2.3배 증가하였다. 또한, 3개월 안에 총 10년간 발생 가능한 크리프 침하량의 반절 가까이가 발생하는 것을 예상할 수 있었다(전단응력비 $q/p' = 0.98$ 기준 10년간 총 침하량 23.25 mm, 3개월 침하량 12.76 mm, 3개월에서 10년간 발생 침하량 10.50 mm).

다짐도에 대해서도 세립분 함유량 조건과 전단응력비의 경우보다는 미약하지만 다짐도가 낮을수록 침하량이 크게 발생하는 경향이 나타났다(10년 기준 다짐도 86 % 침하량 10.32 mm, 다짐도 93 % 침하량 10.22 mm, 다짐도 98 % 침하량 9.53 mm). 또한 3개월 안에 총 10년간 발생 가능한 크리프 침하량의 반절 가까이가 발생하는 것을 예상할 수 있었다(다짐도 86 % 기준 10년간 총 침하량 10.32 mm, 3개월 침하량 5.66 mm, 3개월에서 10년간 발생 침하량 4.66 mm).

Table 3. Creep parameters (3 months)

Test no.	Specimen name	Strain (%)	Settlement (mm)
1	SM0.8_F15_C98	0.0523	5.23
2	SM0.8_F15_C93	0.0560	5.60
3	SM0.8_F15_C86	0.0566	5.66
4	SM0.8_F25_C93	0.1469	14.69
5	SM0.98_F15_C93	0.1276	12.76

Table 4. Creep parameters (10 years)

Test no.	Specimen name	Strain (%)	Settlement (mm)
1	SM0.8_F15_C98	0.0953	9.53
2	SM0.8_F15_C93	0.1022	10.22
3	SM0.8_F15_C86	0.1032	10.32
4	SM0.8_F25_C93	0.2677	26.77
5	SM0.98_F15_C93	0.2325	23.25

Table 5. Creep parameters (3 months – 10 years)

Test no.	Specimen name	Strain (%)	Settlement (mm)
1	SM0.8_F15_C98	0.0430	4.30
2	SM0.8_F15_C93	0.0461	4.61
3	SM0.8_F15_C86	0.0466	4.66
4	SM0.8_F25_C93	0.1209	12.09
5	SM0.98_F15_C93	0.1050	10.50

2.3 해군 부두건설 기준

지금까지 측정된 성토체의 크리프 계수를 고려하여 부두 건설시 적용할 수 있는 가중치에 대하여 고려해보

았다. 부두 건설시에 성토체는 기존 호안과 새로 건설되는 부두안벽 사이의 공간을 매립하여 성토를 실시한다. 연구대상 지역의 경우, 매립지역 원지반에 연약지반이 평균 11 m 분포되어 있으며 이를 고려하여 재하성토 등의 지반개량 공법을 적용한다. 하지만 연약지반 상부에 7 m 이상의 매립을 통한 성토체 시공도 동반되어야 하며, 그 과정에서 1차 침하 이후 사질토의 크리프 현상으로 인한 장기적인 침하가 발생할 것으로 예상된다. 이를 허용한계 침하량 이내에서 효과적으로 관리하기 위해 성토체에 대하여 효과적인 기준을 수립하여 시공할 필요가 있다.

앞선 실험에서 장기 크리프 침하량에 가장 크게 영향을 미친 인자는 세립분 함유량으로, 국내 기준에 따라 최대 세립분 25 %의 성토체를 사용한다면 성토체 하층의 연약지반을 고려할 때 허용한계 침하량 이상의 침하 발생이 예상된다. 이를 극복하기 위해 매립공사 진행시 성토체에 포함된 세립분 함유량을 정확하게 측정하여 최대한 세립분 함유량을 적게 포함한 재료를 시공기준을 충족하는 충분한 다짐을 통하여 시공할 필요가 있다.

3. 결론

본 연구는 성토체의 크리프 침하 영향인자를 선정하

고 크리프 압축실험을 통하여 연직변형률-시간(log) 관계를 통해 크리프 계수를 결정하고 시간에 따른 침하량을 예상해 보았다. 시료의 다짐도가 낮고 세립분이 높으며 전단응력비가 클수록 연직변형률과 크리프 계수가 크게 나타남을 확인하였다. 이를 해군 항만공사에 적용해 보면, 매립지역에서 전단응력비가 큰 성토체 부분에 대하여 효과적인 침하관리를 위해 세립분의 함유량이 낮은 성토 재료 사용과 충분한 다짐 시공을 실시하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Republic of Korea Navy (2019), "Harbor Expansion Basic Plan Service Report" Republic of Korea Navy, Gyeryong
- [2] Japan Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2007), "Design Standard for Japanese Railway Structures, etc. (Soil Structures)," Japan Ministry of Land
- [3] Charles, J. A. (2008), "The engineering behaviour of fill materials", *Geotechnique*, Vol. 58(7), pp. 541-570.
- [4] Park (2015), "Deformation and stiffness characteristics during creep of weathered residual soil in Korea," Ph.D. dissertation, Dept. of Civil & Environ. Eng, Seoul National Univ.
- [5] Lim (2021), "Experimental study of long-term creep behavior of sandy soil in embankment" Master. dissertation, Dept. of Civil & Environ. Eng, Seoul National Univ.