

고화준설토의 역학적 특성에 대한 염분의 영향

Effect of Salinity on Mechanical Characteristics of Stabilized Dredged Soil

김 윤 태¹ Kim, Yun-Tae

Abstract

Marine dredged soils taken from navigation channels or construction sites of coastal area usually have a lot of salt in pores of clayey soils. This paper investigates effect of salt on mechanical characteristics of non-salt and salt-rich stabilized dredged soil. The stabilized dredged soil (SDS) consisted of dredged soil and cement. Several pairs of SDS with non-salt and salt-rich dredged soils, noted as N-SDS and S-SDS, respectively, were prepared to compare their strengths and compressibility characteristics. The microstructures, strength and compressibility characteristics of N-SDS and S-SDS specimens at 7 and 28 days of curing time were evaluated using scanning electronic microscope (SEM), unconfined compression test, and oedometer test. It was found that salt concentration of clayey soil affected not only the formation of soil structure but also the strength development of mixture. The compression index and swelling index of S-SDS were also greater than those of N-SDS, which indicated that the compressibility of mixture increased due to salt concentration. Salinity in clayey soil had a negative effect on the strength development and compressibility characteristics of stabilized dredged soils.

요 지

항로유지 준설과 해안건설 현장에서 채취된 해양준설토는 일반적으로 점토 성분 내에 다량의 염분을 함유하고 있다. 본 논문은 염분이 포함된 고화준설토(S-SDS)와 염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS)의 역학적 특성에 대한 염분의 영향을 분석하였다. 이를 위해 염분이 포함된 준설토와 염분이 포함되지 않은 준설토에 각각 동일한 양의 시멘트를 혼합하여 여러 개의 시편을 제작하였다. 7일 혹은 28일 양생된 N-SDS와 S-SDS 시편에 대하여 전자현미경 분석, 일축압축시험 및 구속압축시험을 수행함으로써 고화준설토의 미세 흡구조, 강도 및 압축 특성을 비교 및 분석하였다. 실험결과 점토에 포함된 염분은 고화준설토의 미세 흡구조 형성 뿐만 아니라 고화토의 강도발현에 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 S-SDS의 압축지수와 팽창지수는 N-SDS 보다 크게 나왔다. 이것으로부터 염분은 고화토의 압축성을 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 염분은 고결화된 준설토의 강도발현 및 압축성에 악영향을 주었다.

Keywords : Compressibility, Dredged soil, Salinity, Strength development

1. 서 론

항만 건설 및 항만 리모델링 등의 대규모 산업시설이 확충 및 재정비됨에 따라 매년 대량의 해양준설토가 발생하고 있고 앞으로도 지속적인 항로유지 준설과 오

염해역 준설로 인하여 준설량이 꾸준히 증가할 것으로 전망되고 있다(Kim 등, 2008). 현재 준설토 처리는 일반적으로 단순 외해투기 및 육상매립에 의존하고 있는 실정이며, 이로 인해 주변 환경의 오염, 매립을 하기 위한 투기장 건설비용 증대, 부지확보 어려움 등과 같은 문

¹ 정회원, 부경대학교 해양공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ., yuntkim@pknu.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

제점들이 발생할 수 있다. 따라서 지속가능한 친환경적인 사회건설을 위해 꾸준히 발생하는 준설토를 효율적으로 이용하고 재활용할 수 있는 기술이 필요하다.

최근까지 국내·외에서는 준설토를 단순 매립하기 보다는 해양환경복원 및 인공 서식지 조성, 친환경적인 친수공간 개발 등에 적극적으로 재활용하기 위해 많은 연구가 진행되었다(Tsuchida, 1995; Tsuchida 등, 1996; 2000; Otani 등 2002; Tsuchida와 Kang 2002; 2003; Watabe 등, 2004; 김주철 등, 2002; 윤길림 등, 2002; 2004; Kim 등, 2010; 2011). 준설토 재활용에 관한 기존 연구를 살펴보면 Tsuchida 등(1996)은 성토재료로서 사용되는 경량혼합토(lightweight treated soil)에 대한 연구와 수중에서 타설된 경량혼합토의 거동을 연구하였다. Otani 등(2002)은 X-ray CT scanner를 통하여 SGM(Super Geo-Material)에 대한 특성을 연구한 바 있다. 한편 국내에서는 2000년도 초반부터 건설재료로서 준설토가 재활용될 수 있도록 경량혼합토에 대한 연구를 수행하고 있다. 국내에서 수행된 경량혼합토에 대한 연구를 살펴보면 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구(김주철 등, 2002), 준설토 재활용을 위한 무보강 및 보강경량토의 압축거동 특성 비교에 관한 연구(김운태 등, 2005; 2006a), 폐어망을 이용한 보강 경량토의 압축거동 특성 연구(김운태 등, 2006b) 등이 수행되었다.

Xing 등(2009)은 염분을 함유한 점토는 시멘트 등과 같은 고화재를 사용하여 고결시킬 경우 염분 때문에 강도발현(strength development)에 부정적인 영향을 준다고 보고하였다. 정두영 등(1991)은 카올리나이트 해성 점토에서 염분의 함량이 2%~4% 범위 내에서는 처리토의 일축압축강도에 큰 영향을 주지 않으나, 8%인 경우에는 강도발현이 저하된다고 보고하였다.

대부분의 해양준설토는 큰 함수비를 가진 점토이며, 해양준설토에 포함된 물이 탈수, 증발됨에 따라 준설토에 다량의 염분이 포함되게 된다. 이와 같은 준설토는 적절한 처리과정을 거치지 않으면 뒤채움재 등으로 사용되기 어렵다. 현재까지 준설토를 재활용하기 위해 시멘트 등과 같은 고화재를 혼합하여 고화시키는 방법을 사용하였다. 그러나 해양준설토에 포함된 염분이 고화

준설토(Stabilized Dredged Soil, SDS)의 강도발현에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 연구가 아직 미약한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 염분이 포함된 준설토(salt-rich dredged soil)와 염분이 포함되지 않은 준설토(non-salt dredged soil)를 동일한 조건의 배합조건으로 배합·양생하여 염분이 고화준설토의 물리적 특성 및 역학적 특성에 어떤 영향을 미치는 지에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 염분이 포함된 준설토와 염분이 포함되지 않은 준설토를 각각 준비하여 동일한 배합비로 교반한 후 7일 및 28일간 양생하였다. 양생된 시편에 대하여 일축압축시험과 압축시험을 각각 수행하여 역학적 특성을 비교 분석하였다. 또한 전자현미경(scanning electronic microscopy, SEM)을 이용하여 양생된 시편의 입자구조를 비교하였다.

2. 실험 방법

2.1 혼합재료

고화준설토(stabilized dredged soil)는 준설토의 전단 강도를 증가시키기 위해 준설토에 시멘트 등과 같은 고화재를 혼합해서 고결화된 재료이다. 실험에 사용된 준설토는 염분이 포함된 준설토와 염분이 포함되지 않은 준설토를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 준설토 시료는 부산신항 배후부지에서 채취된 시료로서 준설토의 기본적인 물리적 특성은 실내 물성실험을 통하여 파악되었다. 그 결과는 표 1에 나타낸 바와 같이 준설토의 현장함수비 57.5%, 액성한계는 39.2%, 비중은 2.62, 소성지수는 18.5%로서 준설토를 통일분류법(USCS)으로 분류하면 CL로 나타났다. 준설토에 포함된 염분은 30g/l로 나타났다. 준설토에 포함된 염분을 용탈시키기 위해 염분이 포함된 준설토에 맑은 물을 섞어 세척하는 방법(soil-washing method)을 여러 번 반복함으로써 염분이 포함되지 않은 준설토를 만들었다.

표 2는 준설토와 시멘트에 대한 X선 형광분석(X-Ray Fluorescence) 시험 결과를 나타내고 있다. 시멘트에 포함된 CaO, SiO₂, Al₂O₃ 등과 같은 화학적 성분은 물, 수산화

표 1. 염분이 포함된 준설토의 공학적 특성

Water content (%)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Specific gravity	Percent Passing No 200 sieve (%)	USCS	Salinity (g/l)
57.5	39.2	18.5	2.62	81.2	CL	30

표 2. 혼합물의 화학적 구성

Oxide compound (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Dredged soil	33.25	10.98	5.22	1.85	4.76	0.85	4.77	8.12	5.15
Portland cement	20.9	5.67	2.74	62.5	3.36	0.5	1.05	0.14	2.34

표 3. 배합조건과 양생기간

Mixtures	Notation	Salinity (g/l)	W/C ratio	W (%)	Curing time (days)
Salt-rich stabilized dredged soil	S-SDS	30	6.5	130	7, 28
Non-salt stabilized dredged soil	N-SDS	≈0	6.5	130	7, 28

석회(hydrated lime), 점토광물 등과 수화반응(hydration reaction) 혹은 포졸란 반응(pozzolanic reaction)을 하여 고결화된다.

표 3은 염분이 포함된 고화준설토(S-SDS)와 염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS)의 배합비와 양생일을 나타낸다. 물-시멘트 비(W/C ratio)는 6.5이며, 배합시의 초기함수비는 130%로 동일하다. S-SDS 시료와 N-SDS 시료는 염분함유량을 제외하면 동일한 조건으로 배합되었으며, 동일한 대기 양생조건에서 각각 7일간 혹은 28일간 양생되었다.

3. 실험결과

3.1 물리적 특성

그림 1은 염분이 포함된 고화준설토(S-SDS)와 염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS)의 28일 양생된 시편에 대한 함수비(post-curing water content)를 나타낸 그림이다. S-SDS와 N-SDS의 28일 양생후 함수비는 각각 96.1%와 92.6%이다. N-SDS의 함수비는 S-SDS의 함수비보다 약 4% 정도 적었다. 염분이 포함되지 않은 고화준설토는 염분이 포함된 고화준설토보다 수화반응이 활발이 일어났기 때문에 보다 많은 물이 소비된 것으로 사료된다. 일반적으로 양생후 함수비는 시멘트 함량이 증가할수록 감소하는 것으로 알려져 있으며, 이것은 시멘트의 수화반응으로 혼합된 시멘트가 많을수록 보다 많은 물을 소비하는 것에 기인한다(Lorenzo와 Bergado, 2004).

그림 2는 28일 양생된 S-SDS와 N-SDS 시편에 대한 단위중량을 나타낸 그림이다. 염분이 포함된 고화준설토(S-SDS)와 염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS)의 단위중량은 각각 15.6kN/m³ 및 16.2kN/m³로서 N-SDS의 단위중량이 S-SDS의 단위중량보다 약 4% 정도 크

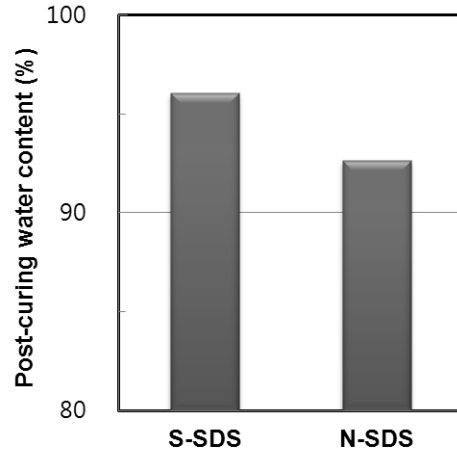


그림 1. S-SDS와 N-SDS에 대한 28일 양생후 함수비 비교

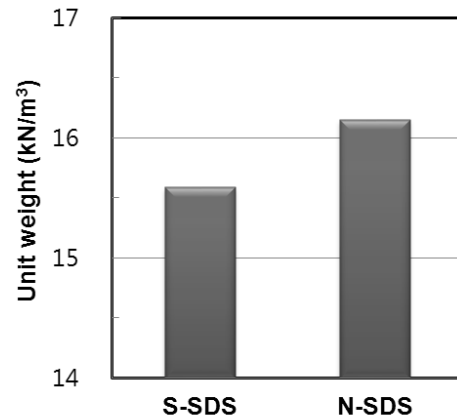


그림 2. S-SDS와 N-SDS에 대한 단위중량 비교

다. 염분함량을 제외한 동일한 배합조건을 가지는 S-SDS와 N-SDS 시편을 비교한 결과, 고결화 작용(cementation)이 활발이 일어나서 물이 많이 소비한 N-SDS 시편에서 함수비는 적게 나타났다. 즉 고결화 작용에 의해 흡구조는 N-SDS 시편에서 더욱 치밀하게 생성되었음을 알 수 있다.

그림 3은 S-SDS와 N-SDS 시편의 28일 양생 후 간극비(e_{0m})를 나타낸 그림이다. 28일 양생된 시편에 대한 간극비(post-curing void ratio)는 다음 식 (1)과 같이 산정

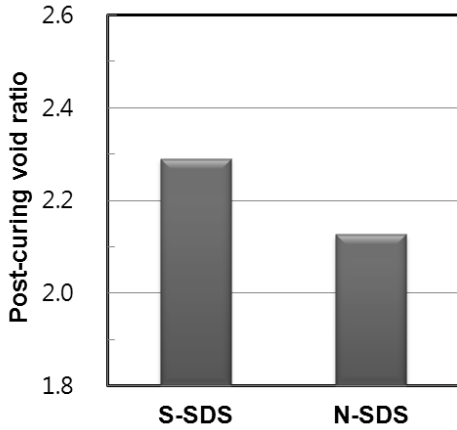


그림 3. S-SDS와 N-SDS에 대한 양생후 간극비

할 수 있다.

$$e_{0m} = \frac{G_{sm}(1+w_m)\gamma_w}{\gamma_m} - 1 \quad (1)$$

여기서 G_{sm} 는 고화준설토의 비중, w_m 는 고화준설토의 함수비, γ_m 는 고화준설토의 단위중량, γ_w 는 물의 단위중량을 나타낸다. S-SDS와 N-SDS의 28일 양생 후 간극비는 그림 3과 같이 각각 2.3, 2.1로서 N-SDS의 간극비는 S-SDS의 간극비 보다 약 7% 정도 감소하였다.

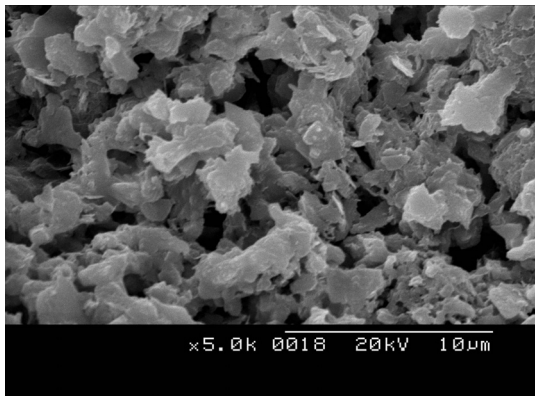
염분이 포함된 고화준설토(S-SDS)와 염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS)에 대한 단위중량, 함수비, 간극비의 특징에서 알 수 있듯이 염분이 포함되지 않을 경우 수화반응과 포졸란 반응에 의해 고결체의 조직이 조밀해 짐을 알 수 있다. 이와 같은 근거는 그림 4와 같은 SEM 분석에서도 나타난다. 염분이 포함되지 않은 N-SDS이 염분이 포함된 S-SDS 보다 에트리나지이

트 형성(ettringite formation)이 치밀하게 생성되어 입자의 조직이 조밀함을 알 수 있다. 그림 4로부터 고화된 준설토의 입자구조는 염분의 영향을 받음을 알 수 있다.

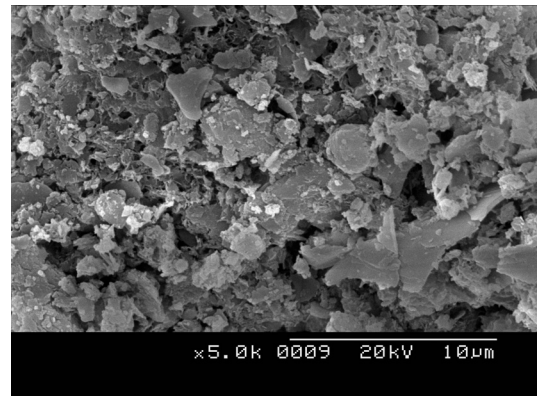
3.2 응력-변형특성과 강도특성

그림 5는 7일 양생된 염분이 포함된 고화준설토(S-SDS)와 염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS) 시편에 대한 일축압축강도시험의 결과를 나타낸다. 일축압축강도시험으로부터 구한 S-SDS와 N-SDS의 일반적인 응력-변형 곡선으로부터 시멘트로 고결화된 고화준설토는 변형이 증가함에 따라 응력이 증가하다가 최대 강도에 도달한 후에 응력완하(strain softening) 현상이 발생함을 알 수 있다. 또한 N-SDS의 강도가 S-SDS의 강도보다 훨씬 크다. 이와 같은 특징은 그림 6에서도 알 수 있다. 그림 6은 S-SDS와 N-SDS의 7일 및 28일 양생된 시편에 대한 일축압축강도를 나타낸다. S-SDS와 N-SDS의 7일 강도는 각각 210kPa, 340kPa로서 N-SDS의 7일 강도가 S-SDS의 7일 강도보다 약 63% 정도 크다. S-SDS와 N-SDS의 28일 강도는 각각 393kPa, 557kPa로서 N-SDS의 28일 강도가 S-SDS의 28일 강도보다 약 42% 정도 크게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 준설토에 포함된 염분은 고화준설토의 강도발현에 부정적인 영향을 줄 수 있다.

준설토를 재활용하기 위해 시멘트 등과 같은 고화재를 혼합하여 고화시킬 때 유발되는 강도발현은 수화반응(hydration reaction)과 포졸란 반응(pozzolanic reaction)으로 설명된다. 시멘트에 포함된 주성분($3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot$



(a) S-SDS



(b) N-SDS

그림 4. 28일 양생된 S-SDS와 N-SDS의 SEM 해석

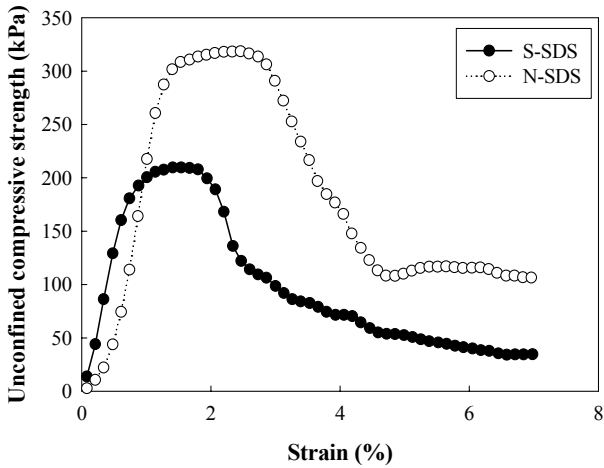


그림 5. S-SDS와 N-SDS에 대한 응력변형 곡선

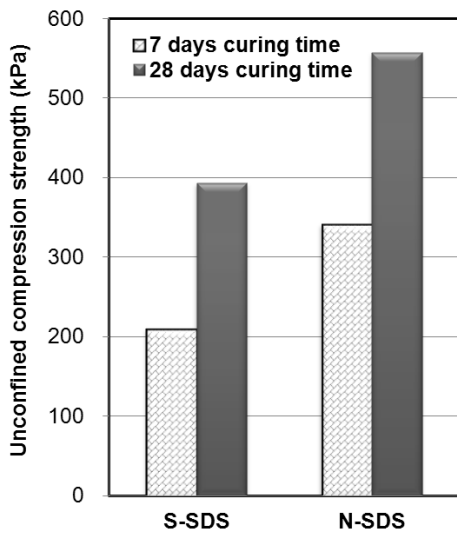


그림 6. S-SDS와 N-SDS에 대한 일축압축강도 비교

SiO₂)과 물은 식 (2)와 같은 수화반응(hydration reaction)을 일으키는 것으로 알려져 있다(Xing et al., 2009). 수화반응을 위한 화학적 과정은 보통 24시간 정도 소요되며, 3CaO·2SiO₂·3H₂O나 3CaO·Al₂O₃·Ca(OH)₂·12H₂O와 같은 C-S-H gel 및 C-A-H gel이 생성되어 흙입자를 결합 혹은 구속시키는 구조를 형성한다. 또한 이들 수산화석회(hydrated lime)와 점토광물의 실리카(SiO₂, silica)나 알루미늄(Al₂O₃, alumina)은 식 (3)과 같은 포졸란 반응을 일으켜, 추가적인 C-S-H gel 및 C-A-H gel을 발생한다(Zhu et al., 2007). 더 많은 실리카나 알루미늄을 혼합토에 추가하면 혼합토의 강도는 증가한다(Xing et al., 2009). Kim 등(2010)도 준설토, 저회, 시멘트로 구성된 복합지반재료(composite geomaterial)에 대한 실험에서 약 50% SiO₂, 18% Al₂O₃, 14% CaO를 포함하는 저회를 복합지반재료에 혼합할 경우 포졸란 반응 등으로 강도

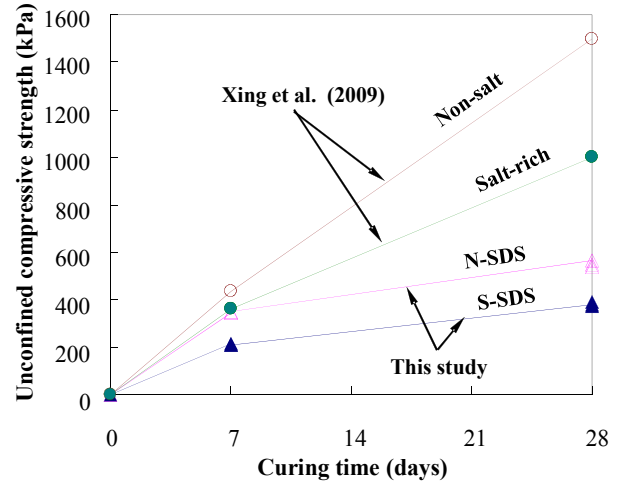
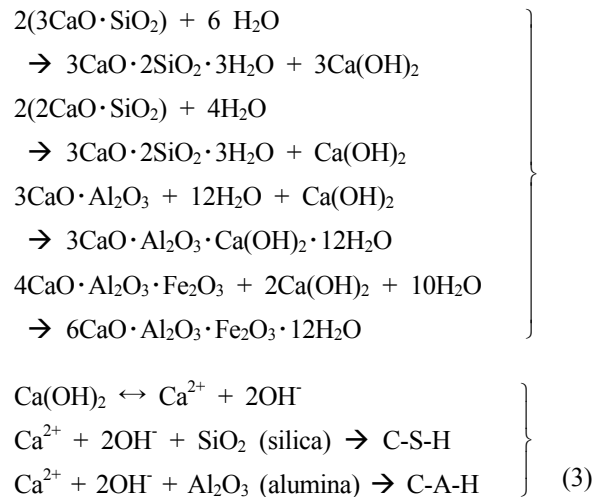


그림 7. S-SDS와 N-SDS에 대한 강도발현(strength development)

가 양생기간이 증가함에 따라 증가한다는 것을 보고하였다.

그림 7은 S-SDS와 N-SDS 시편에 대한 양생기간의 증가에 대한 강도발현 현상을 나타내고 있다. 양생기간이 증가함에 따라 수화반응과 포졸란 반응에 의해 S-SDS와 N-SDS의 일축압축강도는 증가함을 알 수 있다. N-SDS의 일축압축강도는 S-SDS의 일축압축강도보다 크다. Xing 등(2009)도 흙-시멘트(soil-cement) 고결토에서 양생기간이 증가함에 따라 압축강도는 증가하며, 염분이 포함된 흙보다 염분이 포함되지 않은 흙에서 강도증가가 크다고 보고하였다.



3.3 구속압축 특성

S-SDS와 N-SDS의 28일 양생된 시편에 대한 구속압축시험(confined compression test)은 Oedometer 시험기

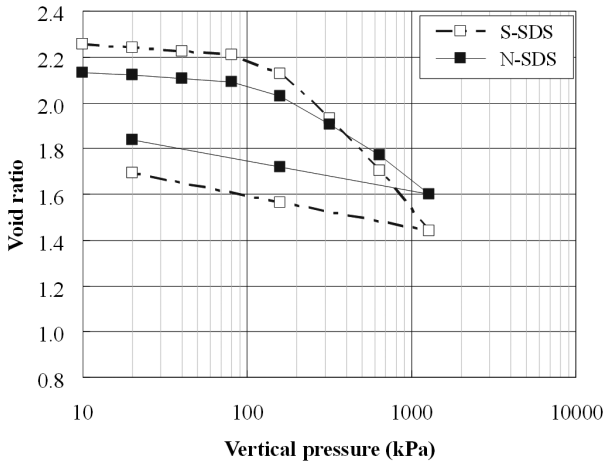


그림 8. S-SDS와 N-SDS 시편에 대한 압축시험결과

를 이용하여 수행하였다. 구속압축재하시 연직하중은 10kPa, 20kPa, 40kPa 등으로 1280kPa까지 응력증가비는 1로 증가시켰으며, 제하시는 320kPa, 20kPa로 감소시켰다. 각각의 하중은 24시간동안 유지된다. 각각의 하중작용시에 유발된 연직변형률은 LVDT를 통해서 컴퓨터에 자동계측 된다.

그림 8은 S-SDS와 N-SDS의 28일 양생된 시편에 대한 압축시험 결과를 나타낸다. S-SDS와 N-SDS 시편은 염분 함유량을 제외하면 동일한 조건으로 배합되었으나, 염분이 고화준설토의 고화작용(cementation process)에 영향을 미치기 때문에 그림과 같이 염분이 포함되지 않은 N-SDS 시편이 S-SDS 시편보다 초기 간극비가 작다. 항복응력(yielding stress)까지는 간극비의 감소가 작으나, 연직응력이 항복응력을 초과하면 간극비가 감소가 크게 유발되며, 압축비도 커진다.

그림 9는 S-SDS와 N-SDS 시편에 대한 압축지수와 팽창지수 값을 비교하여 나타냈다. N-SDS 시편은 S-SDS

시편보다 약 35% 감소된 압축지수 값을 가진다. 팽창지수의 경우 압축지수만큼 감소하지는 않지만, 약 7% 정도 작은 값을 가졌다. 따라서 준설토에 포함된 염분은 고화준설토의 강도발현 뿐만 아니라 압축성에도 악영향을 줄 수 있다.

4. 결론

염분이 고화준설토의 역학적 특성에 대한 미치는 영향을 분석하기 위해 염분이 포함된 준설토와 염분이 포함되지 않은 준설토에 각각 동일한 양의 시멘트를 혼합하여 시편을 제작하였다. 동일한 배합조건으로 각각 양생된 염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS)와 염분이 포함된 고화준설토(S-SDS) 시편에 대하여 전자현미경 분석, 일축압축시험 및 구속압축시험을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

염분이 포함되지 않은 고화준설토(N-SDS)의 경우 수화반응과 포졸란 반응이 활발이 일어나서 S-SDS 보다 함수비는 적고, 간극비도 작았으며, 고결화 작용에 의해 흙구조는 더욱 조밀하게 생성되었음을 알 수 있다.

N-SDS의 28일 압축강도는 S-SDS의 28일 압축강도보다 약 42% 정도 크게 나타났으며, 이것으로부터 준설토에 포함된 염분은 고화준설토의 강도발현에 악영향을 줄 수 있다.

압축시험 결과로부터 S-SDS의 압축지수와 팽창지수는 N-SDS 보다 크게 나타났으며, 이것으로부터 염분이 포함된 고화준설토에 구조물 하중이 작용시 염분이 포함되지 않은 고화준설토 보다 큰 변형이 유발될 수 있음을 알 수 있다.

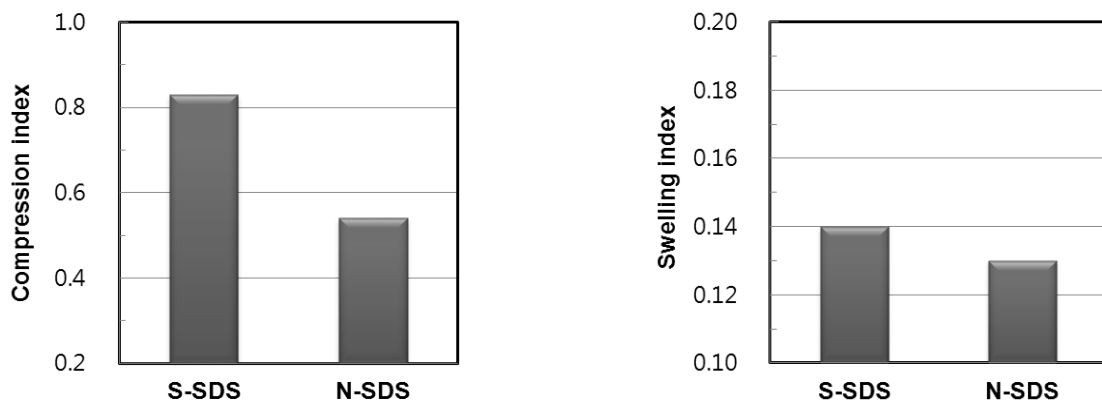


그림 9. 압축지수(compression index)와 팽창지수(swelling index) 비교

감사의 글

이 논문은 2010년도 (재)약수학술진흥회 지원사업과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0086833)의 연구성과물이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김운태, 권용규, 김홍주 (2005), “준설토 재활용을 위한 무보강 및 보강경량토의 압축거동특성 비교”, *한국해양공학회지 논문집*, 제 19권, 제 6호, pp.44-49.
2. 김운태, 권용규, 김홍주 (2006a), “지오그리드 혼합 보강경량토의 압축강도 특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제 22권, 제 7호, pp.37-44.
3. 김운태, 김홍주 (2006b), “폐어망을 이용한 보강경량토의 압축거동 특성”, *한국지반공학회 논문집*, 제 22권, 제 11호, pp.25~34.
4. 김주철, 이종규 (2002), “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제18권 4호 2002년 8월 pp. 309-317.
5. 윤길림, 김병탁 (2002). 준설토를 활용한 경량혼합토의 역학적 특성 연구, *한국지반공학회 논문집*, 제18권, 제4호, pp.75-83.
6. 윤길림, 김병탁 (2004a), “경량기포혼합토의 압축 및 강도 특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제20권 4호 pp.5-13.
7. 정두영 이병석 (1991), 해상점토의 석회 및 시멘트 안정처리에 미치는 염분의 영향, *한국지반공학회지*, Vol.7 No.4, pp.49-64.
8. Kim, Y. T., Kim, H. J., Lee, G. H. (2008), Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net. *Geotextiles and Geomenbranes*, 26(6), 512-518.
9. Kim, Y.T., Ahn, J., Han, W.J., Gabr, M.A. (2010), Experimental evaluation of strength characteristics of stabilized dredged soil. *J. Mat. in Civ. Engrg.*, 22(5), 539-544.
10. Kim, Y.T., Lee, C. and Park, H. I. (2011), Experimental Study on Engineering Characteristics of Composite Geomaterial for Recycling Dredged Soil and Bottom Ash, *Marine Georesources & Geotechnology*, 29 (1) 1-15.
11. Lorenzo, G.A., and Bergado, D.T. (2004), Fundamental parameters of cement-admixed clay-New approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering*, 130 (10), 1042-1050.
12. Otani, J., Mukunoki T., and Kikuchi Y. (2002), Visualization for engineering property of in-situ light weight soils with air foams. *Soils and Foundations*, 4 (3), 93-105.
13. Tsuchida, T. (1995), “Super geo-material project in coastal zone”, *Proceedings of the International Symposium on Ocean Space Utilization COSU'95*, Yokohama, 22-31.
14. Tsuchida, T., and Egashira, K. (2004), *The Lightweight Treated Soil Method-New Geomaterials for Soft Ground Engineering in Coastal Areas*. London: A.A. Balkema Publisher.
15. Tsuchida, T., and Kang, M.S. (2002), “Use of lightweight treated soil method in seaport and airport construction projects”, *Proceedings of the Nakase Memorial Symposium (Soft Ground Engineering in Coastal Areas*, A.A. Balkema), Yokosuka, 353-365.
16. Tsuchida, T., and Kang, M.S. (2003), “Case studies of lightweight treated soil method in seaport and airport construction projects”, *Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Singapore, 249-252.
17. Tsuchida, T., Fujisaki, H, Makibuchi, M., Shinsha, H., Nagasaka, Y., and Hikosaka, K. (2000), “Use of light-weight treated soils made of waste soil in airport extension project”, *J. of Construction Management and Engineering*, JSCE 644 (VI-46), 3-23 (in Japanese).
18. Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okumura, T. and Kishida, T. (1996), “Development of lightweight fill from dredging”, *Proc. of Environmental Geotechnics*, Balkema, 415-420.
19. Xing, H., Yang, X., Xu, C. and Ye, G. (2009), Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement. *Engineering Geology*, 103, 33-38.

(접수일자 2011. 4. 28, 심사완료일 2011. 9. 16)