한국지반공학회논문집 제28권 6호 2012년 6월 pp. 71 ~ 79

해수가 고결모래의 양생 및 강도에 미치는 영향

Effect of Sea Water on Curing and Strength of Cemented Sand

박 성 식[1] Park, Sung-Sik
이 준 우[2] Lee, Jun-Woo

Abstract

Sand compaction pile and stone column replacement methods have been commonly used for improving soft ground in the nearshore. Recently, DCM (Deep cement mixing) method, which can harden soft clays by mixing with cement, is more popularly used in such soft ground improvement. Sandy soils also exist in the seashore. Therefore, in this study, the effect of salinity in sea water and curing methods on the strength of cemented sand was evaluated in terms of unconfined compressive strength (UCS). The sand was mixed with five different cement ratios and distilled water or sea water, and then compacted into a cylindrical specimen. They were cured for 3 days under sea water for DCM construction condition and air cured for onshore curing condition. When a specimen was cured under sea water without confinement, it was easily collapsed due to initiation of cracks. When the cement ratio and curing method were the same, the UCS of the specimen without sea water was at maximum 3.5 times higher than those with sea water. The sea water used for mixing sand had more influence on strength reduction than the sea water used for curing. When the cement ratio was the same, the UCS of air-cured specimen was at average 2 times higher than those of water-cured specimen, regardless of water used.

요 지

해안지역의 연약지반을 개량하기 위한 지반개량공법으로 가장 많이 사용되었던 모래다짐말뚝공법이나 사석치환공법은 최근 거의 사용되지 않으며, 대신 시멘트로 연약점토를 강제 교반시켜 고형화시키는 DCM(Deep Cement Mixing) 공법이 많이 사용되고 있다. DCM공법이 주로 적용되는 해안지역에는 점토 이외에 모래와 같은 사질토도 존재하므로 본 연구에서는 해수에 포함된 염분과 양생방법이 시멘트로 고결된 모래의 일축압축강도에 어떤 영향을 미치는 지 연구하였다. 다섯 종류의 시멘트비를 사용하여 다짐방법으로 공시체를 제작한 다음 3일 동안 양생시켜 일축압축시험을 실시하였다. 혼합수로 해수 또는 증류수를 사용한 다음 해상에서 이루어지는 DCM공법을 고려하여 공시체를 해수에 수침시켜 양생하였다. 또한 육상조건과 비교하기 위하여 증류수로 수중양생하거나 대기중 양생도 실시하였다. 혼합수로 해수를 사용한 다음 구속압이 없는 상태로 해수에서 수중양생할 경우 공시체에 여러 균열이 발생하여 고결력이 발현되지 않았다. 시멘트비와 양생방법이 동일한 경우, 혼합수와 양생수로 해수를 사용한 공시체의 일축압축강도는 해수를 사용하지 않은 공시체보다 최대 3.5배 정도 낮게 나타났다. 또한 공시체의 수중양생 시 사용한 양생수보다는 공시체 제작 시 사용한 혼합수에 염분이 포함될 경우 강도 저하에 더 큰 영향을 미쳤다. 시멘트비가 동일한 경우, 사용한 물에 관계없이 대기중 양생한 공시체의 강도가 수중양생한 공시체보다 평균 2배 정도 높게 나타났다.

Keywords : Cemented sand, Curing, Sea water, Unconfined compressive strength

1 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 조교수(Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., Tel: +82-53-950-7544, Fax: +82-53-950-6564, sungpark@knu.ac.kr, 교신저자)
2 비회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 석사과정(Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

해안 항만시설공사나 연안지역 개발 시 연약지반처리공법으로 주로 모래다짐말뚝공법(Sand Compaction Pile, SCP)이 많이 사용되었으나, 최근에는 모래 가격 상승과 모래채취에 따른 환경문제로 인해 시멘트를 사용하는 심층혼합처리공법(DCM공법: Deep Cement Mixing Method)이 주로 사용되고 있다(Jung et al.,, 2006; Jeong, 2010). DCM공법은 시공과정 중 시멘트가 해상으로 유출될 수 있으므로 시멘트로 인한 환경 영향 평가를 비롯하여 현장 흙의 균등한 혼합이 어려우므로 높은 설계강도를 얻기 위한 높은 시멘트비 설정이 반드시 필요하다. Lee 등(2007)은 소형 DCM 타설장비를 이용한 모형실험을 실시하여 분사방식, 교반속도, 날개각도 등에 대한 최적의 교반조건을 제시하고자 하였다. 해상에서 시공되는 DCM공법에는 혼합수로 담수가 아닌 해수를 주로 사용하며 담수를 사용하더라도 슬러리 상태의 시멘트가 염분이 포함된 해안 흙과 같이 교반되거나 해수가 시멘트로 개량된 지반 내로 유입되면서 해수에 포함된 염분이 시멘트 수화작용과 고결토의 강도 발현에 어떠한 영향을 미칠 수 있다.

Mateos와 Davidson(1961)은 Ottawa모래에 석회와 플라이애쉬 그리고 염분 1%를 섞은 혼합토의 일축압축강도가 염분을 섞지 않은 경우보다 증가한다는 결과를 얻었다. Marks와 Haliburton(1972), Drake와 Haliburton(1972)은 석회로 처리한 점토질 흙의 강도는 염분의 양이 증가함에 따라 강도가 증가하지만 적정치를 넘으면 강도는 오히려 감소한다고 하였다. Ozier와 Moore(1977)도 석회로 처리한 점토에서 염분이 1% 포함된 경우보다 3% 포함된 경우의 강도가 낮아 적정치 이상의 염분은 강도를 저하시킨다는 기존 연구 결과와 유사한 결론을 얻었다. 이들 연구자는 그 이유로 과도한 양의 염분은 시멘트질의 겔에서 재결정되면서 포졸란반응으로 생성된 결정구조를 교란시키기 때문으로 판단하였다. Kim(2011)은 염분이 포함된 고화준설토에 대한 일축압축시험을 실시하여 염분이 포졸란 반응에 영향을 미쳐 일축압축강도를 저하시킨다는 연구결과를 발표하였다. 그리고 염분이 점토나 혼합토의 강도에 미치는 영향은 단기간 양생에서는 큰 변화가 없지만 장기간 양생하였을 경우 큰 영향을 미친다는 연구 결과도 발표되었다(Jung and Lee, 1991). 한편 일본 DCM 기술 매뉴얼(연안기술연구센터 2008)에는 연안 점토를 시멘트로 고화시킬 경우 혼합수로 담수나 해수를 사용하여도 강도에는 별차이가 없기 때문에 해수를 사용하는 것이 경제적이라고 언급하고 있다. Ahn(1997)은 염수로 포화된 모래와 벤토나이트에 대한 삼축압축시험을 실시하였으며, 실험결과 점착력은 증가하지만 내부마찰각은 변하지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 흙에 염분이 포함될 경우 흙의 종류, 염분 함량, 고결제 종류 등에 따라 흙의 강도가 증가하거나 또는 감소한다는 서로 다른 연구결과가 발표되었다.

해수가 시멘트 고결토의 강도에 미치는 영향은 대부분 점토에 관한 실험 연구이다. 하지만 해안지역에는 점토질 흙뿐 아니라 사질토로 된 지반도 많이 존재하므로 이에 대한 연구도 필요하다. 또한 일본 DCM 기술 매뉴얼에서는 양생방법으로 습윤양생을 표준으로 제시하고 있지만, 실제 해상공사에서 시멘트 고결토의 양생조건은 수중양생과 유사하다. 따라서 본 연구에서는 소량의 시멘트를 혼합한 모래에 혼합수로 해수를 사용하여 다짐방법으로 공시체를 제작한 다음 해수에 3일 동안 수침시켜 수중양생하였다. 육상조건과 비교하기 위하여 혼합수와 양생수로 증류수를 사용한 다음 대기중 양생도 실시하였다. 양생이 완료되면 일축압축시험을 실시하여 해수에 포함된 염분과 양생방법이 시멘트 고결모래의 일축압축강도에 미치는 영향에 대하여 비교, 분석하였다. 한편 양생시간에 따른 시멘트 고결토의 강도 변화는 본 연구에서 고려하지 않았다.

2. 공시체 제작 및 양생방법

2.1 실험 재료

콘크리트와 같이 서로 다른 재료를 혼합하여 고결시킨 복합재료의 품질을 평가하는 가장 일반적인 방법은 복합재료의 일축압축강도를 평가하는 것이다. 일축압축시험은 간단하고 빠를 뿐 아니라 저렴하고 신뢰할만한 실험방법으로 시멘트 혼합토에 대한 많은 연구결과가 축적되어 있기도 하다(Consoli et al., 2007). 본 연구에서는 낙동강모래에 고결제로 초속경시멘트를 사용하여 일축압축시험용 공시체를 제작하였다. Figure 1과 같이 약간 모난 형태를 하고 있는 낙동강모래는 대구시 달성군 인근 낙동강 유역에서 채취하였으며, 0.85-0.25mm 사이의 비교적 균등한 입도를 가지도록 체가름하여 입도분포곡선은 Figure 2와 같다. 낙동강모래의 최대건조밀도와 최적함수비는 1.61g/cm3과 14%이다. 해수가 고

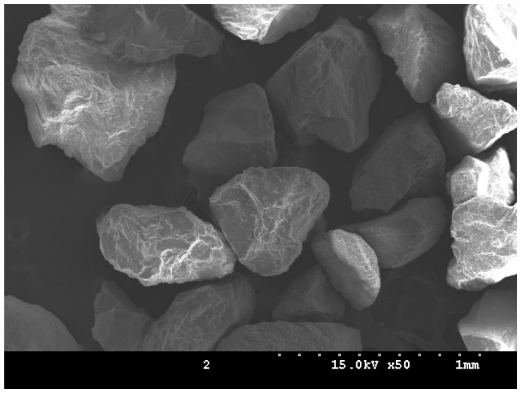


Fig. 1. SEM photo of Nakdong River sand

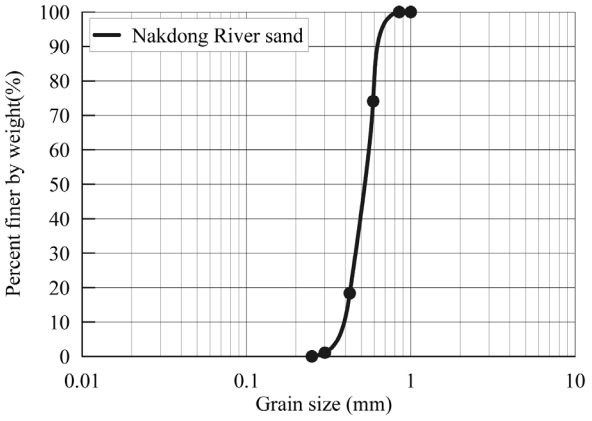


Fig. 2. Grain size distribution curve of Nakdong River sand

결모래의 강도에 미치는 영향을 비교적 빠른 시간 내에 분석하기 위하여 도로, 교량 긴급보수에 사용되는 비중이 3.14이고 3시간에 7일 강도 발현이 가능한 국내 S사의 초속경시멘트를 사용하였다.

2.2 공시체 제작방법

시멘트비(cement ratio, CR)는 일반적으로 건조된 모래의 무게에 대한 시멘트의 무게로 다음과 같이 정의하였다.

$$CR = \frac{W_c}{W_s} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 W_c는 시멘트의 무게, W_s는 건조된 모래의 무게이다. 본 실험에 사용한 시멘트비는 4, 8, 12, 16, 20%이다. 모래에 소량의 시멘트를 혼합할 경우 최대건조밀도는 증가하더라도 최적함수비는 크게 변하지 않는다는 Jeong(2006)의 연구결과를 참고하여 낙동강모래로 제작한 시멘트 혼합토의 최적함수비는 모두 14%로 가정하였다. 시멘트비가 16%인 경우의 물/시멘트비는 약 100% 정도이다. 공시체 제작에서 혼합수로 증류수 또는 해수를 사용하여 모래와 시멘트를 비빈 다음 성형몰드와 램머(rammer)를 사용하여 5층으로 나누어 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체를 제작하였다. 다짐에 사용한 램머의 직경은 4.7cm이고 무게는 1kg이며, 저다짐방법(under compaction)(Ladd, 1978)으로 최종적으로 다짐이 완료되었을 시에 층당 높이가 2cm되도록 공시체를 제작하였다.

2.3 양생방법

양생방법으로 초기에는 몰드를 분리한 다음 공시체만 수조에 넣고 양생시킨 결과 증류수에서 양생된 공시체와는 달리 해수에서 양생시킨 공시체는 Figure 3과 같이 균열이 여러 곳에서 발생하면서 공시체가 파괴되었다. 특히 시멘트비가 4%인 경우 고결이 제대로 이루어지지 않아 수중양생 중 붕괴되었다. 하지만 시멘트비가 8%인 공시체는 Figure 3(a)와 같이 3일 수중양생 후 자립이 가능하였으나, 일부 균열이 발생하였다. 상대적으로 시멘트가 많이 포함된 시멘트비 12%와 16%인 공시체는 수화작용에 필요한 물을 더 많이 해수로부터 유입하면서 Figure 3(b) 및 3(c)와 같이 상부에 더 많은 균열이 발생하였으며, 수분이 증발하면서 균열 사이에 백태가 생성되었다. 이와 같은 결과로부터 해안지역에서 구속압이 낮은 상태의 모래를 비교적 높은 시멘트비로 고결시킬 경우에는 균열 발생으로 인한 강도 저하와 변형이 발생할 수 있으므로 이를 충분히 설계에 반영할 필요가 있다.

최종적으로 본 연구에서는 몰드를 분리하지 않고 공시체를 구속한 상태에서 3일 동안 수중양생하는 방법을 선택하였다. 실제 DCM 시공현장에서는 상부 일부 토사를 제외하고는 대부분의 깊이에서 일정한 구속압이 작

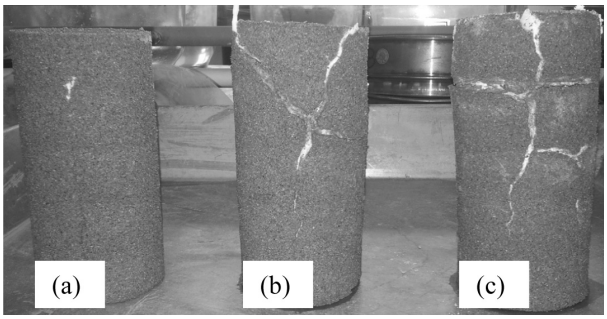


Fig. 3. Cracks generation of underwater cured specimens without mold (cement ratios 8, 12, 16%)

용하고 있으며, 수평방향 변위 또한 발생하지 않는 K_0 상태로 볼 수 있으므로 성형몰드를 체결한 상태로 양생하는 것이 보다 적절할 것으로 판단되었다. 또한 바다와 인접한 연안지역 흙에는 염분이 일부 포함되어 있으며 수중이 아닌 대기중 양생 조건과 유사하므로 증류수와 해수로 고결토를 제작한 다음 대기 중에서 3일 동안 양생시켜 일축압축시험을 실시하였다.

3. 일축압축시험 결과 및 분석

3.1 함수비 및 건조밀도

Table 1과 2는 본 연구에서 제작한 공시체의 종류로 시멘트비, 건조밀도 등 각종 실험조건을 비교하고 있다. Table 1에 있는 실험은 수침상태로 3일 동안 양생시킨 공시체이며, Table 2에 있는 실험은 3일 동안 대기중 양생시킨 공시체이다. 시멘트비 증가에 따라 비중이 높은 시멘트 양이 증가하므로 건조밀도는 각각의 시멘트비에 따라 1.55, 1.60, 1.65, 1.70, 1.75g/cm^{3}로 설정하였지만, 양생 후 건조밀도는 양생방법에 따라 약간 차이가 발생하였다. 수중양생한 공시체의 함수비는 일반적으로 시멘트비가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이것은 시멘트비가 증가할수록 모래입자 사이에 더 많은 수화물이 생성되면서 투수성이 낮아져 공시체 내로 유입되는 물의 양이 감소하였기 때문으로 판단되며, 기존 연구 결과와도 유사하다(Park et al., 2009). 하지만 대기 중에서

Table 1. Test conditions and results of underwater cured specimens

Test ID	Cement ratio (%)	Mixing water	Curing water	Dry density (g/cm^3)	Water content(%)	Unconfined compressive strength (kPa)	Axial strain at Peak strength (%)
CR4-W-1	4	Distilled water	Distilled water	1.54	15.7	341	0.62
CR4-W-2		Distilled water	Sea water	1.52	17.3	405	0.73
CR4-W-3		Sea water	Sea water	1.53	17.6	407	0.77
CR8-W-1	8	Distilled water	Distilled water	1.6	15.7	1515	0.96
CR8-W-2		Distilled water	Sea water	1.59	16.3	1251	1.46
CR8-W-3		Sea water	Sea water	1.59	15.0	428	1.10
CR12-W-1	12	Distilled water	Distilled water	1.66	13.8	3130	1.24
CR12-W-2		Distilled water	Sea water	1.72	12.6	2421	1.62
CR12-W-3		Sea water	Sea water	1.65	14.7	1095	2.13
CR16-W-1	16	Distilled water	Distilled water	1.70	13.9	5722	1.14
CR16-W-2		Distilled water	Sea water	1.69	12.0	5223	1.70
CR16-W-3		Sea water	Sea water	1.71	14.2	2336	2.50
CR20-W-1	20	Distilled water	Distilled water	1.71	14.1	10123	1.56
CR20-W-2		Distilled water	Sea water	1.68	13.8	8881	1.37
CR20-W-3		Sea water	Sea water	1.75	12.0	6700	1.97

Table 2. Test conditions and results of air cured specimens

Test ID	Cement ratio (%)	Mixing water	Dry density (g/cm^3)	Water content(%)	Unconfined compressive strength(kPa)	Axial strain at Peak strength(%)
CR4-A-1	4	Distilled water	1.54	1.9	927	0.82
CR4-A-2		Sea water	1.57	2.1	629	0.70
CR8-A-1	8	Distilled water	1.63	2.6	2832	1.08
CR8-A-2		Sea water	1.63	2.5	1693	1.50
CR12-A-1	12	Distilled water	1.66	3.36	4556	1.30
CR12-A-2		Sea water	1.67	2.99	2580	1.75
CR16-A-1	16	Distilled water	1.71	4.26	7989	1.58
CR16-A-2		Sea water	1.72	4.3	4986	1.50
CR20-A-1	20	Distilled water	1.76	4.9	11434	1.75
CR20-A-2		Sea water	1.76	4.7	6438	1.86

양생한 경우에는 이와 반대로 시멘트비가 증가할수록 함수비가 증가하는 경향을 보였다(Park et al., 2009).

3.2 일축압축강도

Figure 4는 Table 1에 있는 수중양생한 공시체의 일축압축시험 결과이며, 표에서 Mixing water는 혼합수이고 Curing water는 수중양생에 사용한 물인 양생수이다. 동일한 시멘트비를 가진 공시체의 종류는 (i) 혼합수와 양생수 모두 증류수를 사용한 경우, (ii) 혼합수는 증류수이고 양생수는 해수인 경우, (iii) 혼합수와 양생수 모두 해수를 사용한 경우로 세 종류이다. Figure 4(a)와 4(b)는 증류수를 혼합수로 사용한 공시체의 결과로 Figure 4(b)의 해수에서 양생한 공시체의 일축압축강도가 Figure 4(a)의 증류수에서 양생한 공시체의 일축압축강도보다 시멘트비 4%를 제외하고 모두 낮게 나타났다. 하지만 일축압축강도의 감소 정도는 크지 않았으며 시멘트비가 8%에서 20%로 증가함에 따라 각각 17, 23, 9, 12% 정도 감소하였다. Figure 4(c)는 혼합수와 양생수 모두 해수를 사용한 공시체의 실험결과로 시멘트비가 4%일 때는 다른 공시체와 강도 차이가 거의 나타나지 않았다. 하지만 Figure 4(c)에서 시멘트비 8, 12, 16, 20%인 공시체의 일축압축강도는 수중양생한 세 종류의 공시체 중에서 가장 낮게 나타났으며, 특히 양생수는 해수로 동일하지만 혼합수가 증류수인 공시체의 강도(Figure 4(b))보다 66, 55, 55, 25% 정도로 비교적 크게 감소하였다. 이것은 혼합수에 포함된 염분이 시멘트 수화작용을 지연 또는 방해시키기 때문으로 판단되며(Mindess et al., 2003), 4%를 제외하면 시멘트비가 증가할수록 강도 감소율은 낮아지는 경향을 보였다.

Figure 5는 Table 2에 있는 대기중에서 양생한 공시체의 일축압축시험 결과이다. 수중양생한 공시체와 유사하게 시멘트비에 관계없이 혼합수로 해수를 사용한 공시체의 일축압축강도가 증류수를 사용한 경우보다 상당히 낮게 나타났으며, 각각의 시멘트비에 대하여 증류수를 사용한 공시체 보다 각각 32, 40, 43, 38, 44% 정도 감소하였다. 한편, Figure 4와 5를 비교하면 혼합수가 동일한 경우 대기중 양생한 공시체의 일축압축강도가 수중양생한 공시체보다 전반적으로 높게 나타났으나, 시멘트비가 증가함에 따라 그 증가율은 점점 감소하는 경향을 보였다(예: 혼합수로 증류수를 사용한 경우 증가율은 172, 87, 46, 40, 13%이고, 혼합수로 해수를 사용한

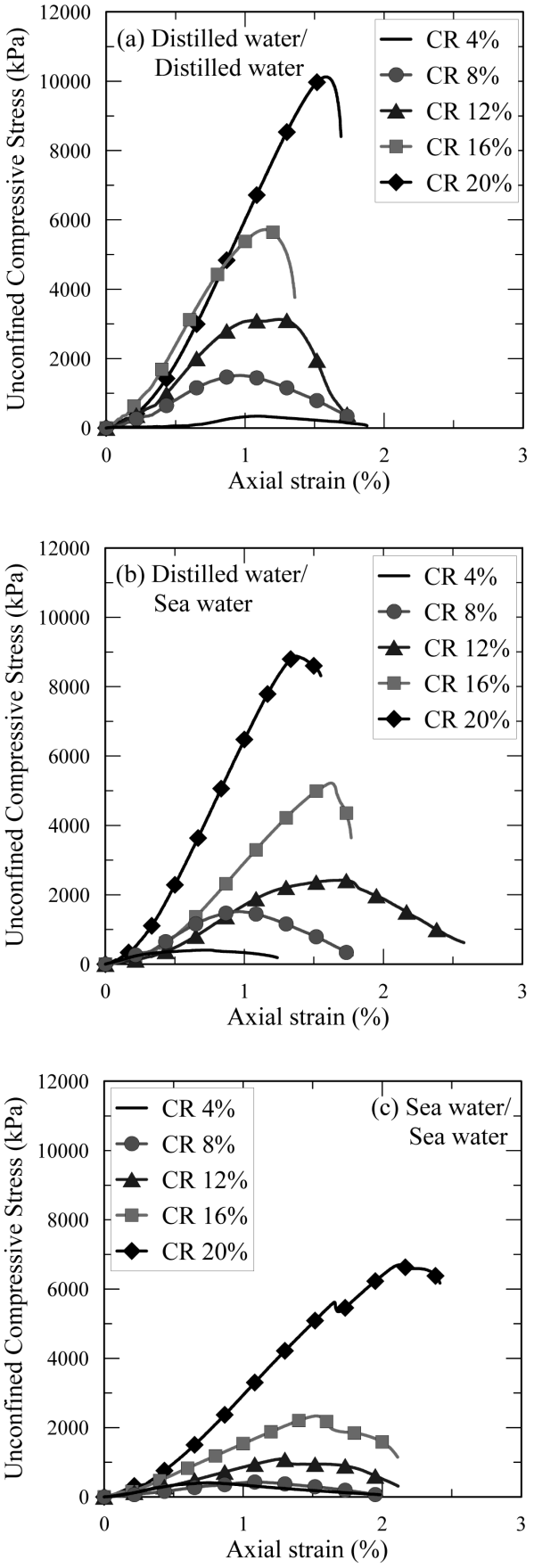


Fig. 4. Result of unconfined compression tests on underwater cured specimens

경우 증가율은 55, 296, 136, 113, -4%이다). 그리고 시멘트비가 증가함에 따라 공시체 제작 및 양생에 사용한 물과 양생방법에 관계없이 일축압축강도는 증가하는 경향을 보였다.

해수에 포함된 염분이 일축압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대기중에서 양생한 공시체의 XRF (X-ray Fluorescence) 성분 분석을 실시하였으며, 결과는 Table 3과 같다. 시멘트의 주성분은 CaO를 비롯하여 Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3이므로 각각의 공시체에 포함된 이들 화합물의 양을 비교할 경우, 증류수를 사용한 공시체에는 85.65%이고 해수를 사용한 경우는 82.62%로 증류수를 사용한 공시체에 3% 정도 더 많이 포함되어 있었다. 해수에 포함된 황산염(SO_4)은 수화반응물질인 에트린자이트(ettringite)의 결정화를 연장시켜 콘크리트 28일 강도를 저하시키는 물질로 알려져 있으며(Mindess et al., 2003), 해수를 사용한 공시체에서 황(S) 성분이 2% 이상 더 많이 포함되어 있으므로 산화물의 일종인 황산염도 많이 존재하여 강도가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

3.3 탄성계수 및 파괴 형상

Figure 6(a) 와 6(b)는 수중양생한 경우와 대기중 양생한 공시체에 대한 탄성계수(Elastic modulus)를 비교하고 있다. 탄성계수의 대략적인 범위는 100-700MPa 정도이며, 혼합수나 양생수 그리고 양생조건에 관계없이 시멘트비에 따라 증가하는 경향을 보였다. 일축압축강도와 마찬가지로 수중양생한 공시체의 경우 혼합수와 양생수 모두 해수를 사용한 경우가 가장 낮은 값을 보였으며, 모두 증류수를 사용한 경우가 가장 높은 값을 보였다. 유사한 조건의 수중양생한 공시체와 대기중양생한 공시체의 탄성계수를 비교하면 다음과 같다. 혼합수로 증류수를 사용하여 대기중 양생한 공시체의 경우 모두 증류수를 사용하여 수중양생한 공시체보다 20-76% 정도 높게 나타났으며, 시멘트비가 증가함에 따라 증가율은 감소하였다. 한편 혼합수로 해수를 사용하여 대기중 양생한 공시체의 경우에도 모두 해수를 사용하여 수중양생한 공시체보다 15-168% 정도 증가하였으나, 시멘트비 증가에 따른 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다.

양생과정 중 해수에 포함되어 있는 황산나트륨과 시멘트의 수산화칼슘이 반응하는 과정에서 생성되는 에트린자이트는 공시체의 팽창을 일으켰으며, 특히 해수를 혼합하여 해수에서 양생한 공시체는 상부가 약간 볼록하게 되었다. Figure 7은 혼합수와 양생수로 모두 해수를 사용한 다음 수중양생시킨 공시체의 일축압축시

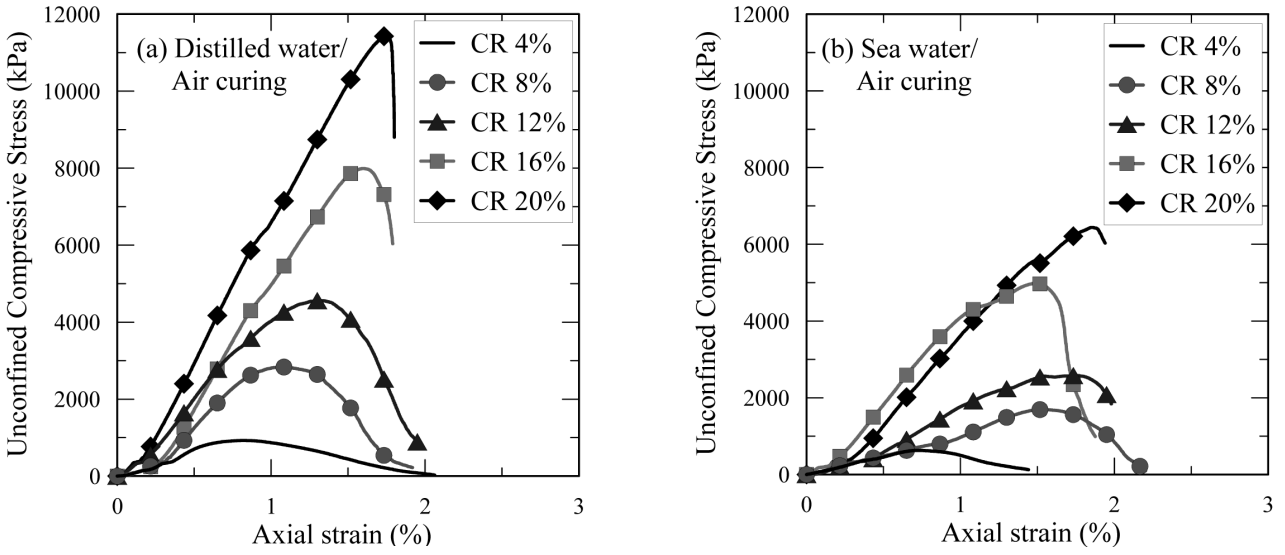


Fig. 5. Result of unconfined compression tests on air cured specimens

Table 3. Results of XRF on air cured specimen with cement ratio 20%

Mixing water	Components (%)									
	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	Cl	P_2O_5
Distilled water	29.6	11.1	41.84	3.11	0	9.10	3.8	0.65	0.53	0.15
Sea water	40.89	9.20	28.50	4.03	0.64	11.48	2.82	0.69	1.42	0.18

험 전과 후의 모습으로 시멘트비가 가장 낮은 4%와 가장 높은 20%를 비교하고 있다. 시멘트비가 낮은 경우에는 모래 색깔로 인하여 공시체가 전체적으로 약간 붉은색을 띠지만 시멘트비가 높은 경우에는 다량의 시멘트로 인하여 진한 푸른색을 띠었다. 공시체의 파괴는 대부분 상부에서 미세균열이 발생하면서 아래쪽으로 전파되는 경향을 보였다. Figure 7(b)의 파괴모습에서 시멘트비가 낮은 경우 응력-변형률이 연성거동을 보이면서 국부적으로 다수의 균열이 발생하였으나, 시멘트비가 높은 경우 공시체가 급작스럽게 파괴되는 취성거동으로 소수의 균열이 공시체의 아래 위로 길게 발달하면서 파괴되는 경향을 보였다.

4. DCM 설계기준강도 고찰

일본 DCM기술 매뉴얼(연안기술연구센터, 2008)에 의하면 DCM공법에서 공시체의 설계기준강도는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{uck} = \gamma \cdot \lambda \cdot q_u \quad (2)$$

여기서 q_{uck}는 설계기준강도(kgf/cm^2), q_{ul}는 실내배합 일축압축강도(kgf/cm^2), γ는 현장강도계수(=2/3), λ는 q_{uf}/q_{ul}(=1.0, 4축 이상의 해상인 경우), q_{uf}는 현장일축압축강도(kgf/cm^2). 여기서 DCM 장비가 4축 이상인 경우 λ가 1이므로 현장 일축압축강도와 실내배합 일축압축강

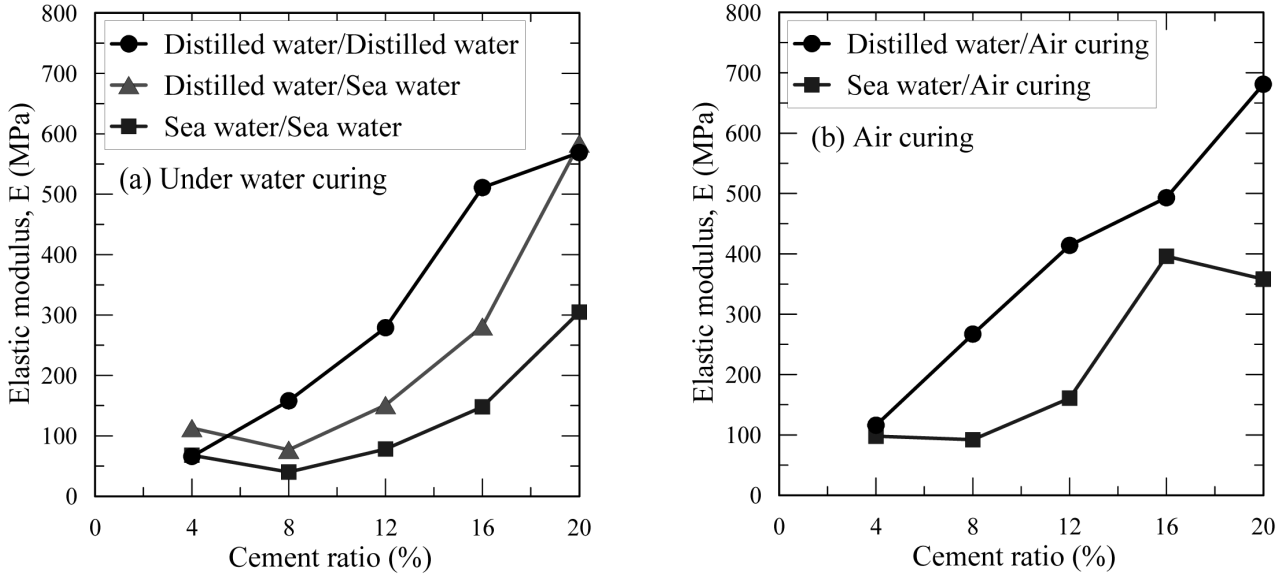
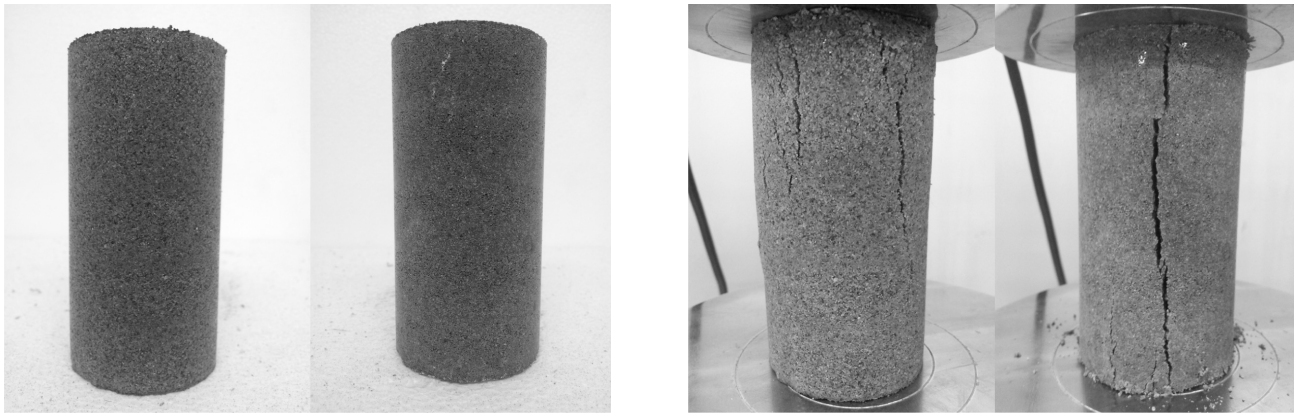


Fig. 6. Comparison of elastic modulus of (a) underwater cured specimen and (b) air cured specimen



(a) Before testing (cement ratio 4% at left specimen, cement ratio 20% at right specimen)

(b) After testing (cement ratio 4% at left specimen, cement ratio 20% at right specimen)

Fig. 7. Specimens before and after testing

도가 같다고 하였다. 하지만 본 연구결과에 의하면 실내배합시험을 어떤 방식으로 실시하느냐에 따라 결정된 일축압축강도가 특히 현장 사질토 지반의 강도와 상당히 차이 날 수 있으므로 아래와 같은 사항을 매뉴얼에 고려할 필요가 있다고 판단된다.

첫째, 해상에는 점토뿐만 아니라 실트나 사질토도 존재하므로 이에 관한 강도실험도 실시하여 현장 지반 종류에 따른 강도 차이를 설계기준에 포함시킬 필요가 있다.

둘째, DCM기술 매뉴얼에서 실내배합시험 시 습윤양생을 제안하고 있지만 실내배합시험 시의 양생조건은 현장 상황과 일치시키는 것이 필요하다. 예를 들면, 해상 DCM에 적용할 경우 습윤양생 조건이 아니라 해수를 이용한 수중양생으로 공시체를 양생할 필요가 있다. 본 연구 결과와 Park 등(2009)에 의하면 시멘트비가 낮을 경우 수중양생한 공시체의 강도가 대기중이나 습윤양생한 공시체보다 낮을 수 있기 때문에 습윤양생으로 구한 실내배합 강도는 현장 강도와 상당한 차이를 보일 수 있다. 예를 들면, 시멘트비가 12%인 경우 해수를 사용하여 수중양생한 공시체와 대기중 양생한 공시체의 강도는 각각 1095kPa와 2580kPa로 2배 이상 차이가 날 수 있으므로 주의가 필요하다.

셋째, 양생 시에 개량지반에 작용하는 구속압에 따른 강도 차이를 충분히 고려할 필요가 있다. 즉, 식 (2)에서 점토와 달리 구속압에 따른 영향을 많이 받는 사질토의 경우 구속압에 따른 영향계수 F_{con}을 추가할 필요가 있다. 예를 들면, 구속압이 낮은 경우 F_{con}은 1보다 작은 값이 되고, 구속압이 높은 경우 F_{con}은 1에 가까운 값이 되는 계수를 제안할 필요가 있다.

특히, 모래로 만들어진 공시체가 해수 중에서 구속압이 없는 상태로 양생될 경우 주변 해수가 침투하면서 공시체 팽창이 발생하고 이로 인한 균열로 강도가 상당히 저하될 수 있다. 하지만 구속압이 작용하거나 수평방향 변위가 발생하지 않을 경우에는 일정 강도를 발휘하였다. 따라서 해저 느슨한 사질토 지반을 개량할 경우 현장조건을 충분히 반영한 상태로 공시체를 양생하여 실내배합 강도를 구한 다음 이를 이용하여 원위치 강도를 추정해야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 해안지역 연약지반 개량에 많이 사용되고 있는 DCM공법에서 해수에 포함된 염분과 양생방법이 고결토의 강도에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다. 해안지역 토사에는 점토 이외에 모래와 같은 사질토도 존재하므로 본 연구에서는 시멘트로 고결된 모래에 대하여 3일 동안 수중양생 및 대기중 양생을 실시한 다음 일축압축시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 완성된 공시체의 몰드를 제거한 다음 해수에서 양생을 실시한 공시체의 경우 공시체에 작용하는 구속압이 낮거나 주변에서 유입되는 염분으로 시멘트 혼합토의 수화현상이 느려지면서 공시체 전반에 많은 균열이 발생하여 붕괴되었다. 공시체의 시멘트비가 높을수록 수화작용에 더 많은 혼합수를 필요로 하면서 수중에서 더 많은 염분이 유입되고, 특히 구속압이 낮은 공시체 상부 쪽에서 많은 균열이 발생하고 팽창하면서 공시체가 붕괴되려는 경향을 보였다.
(2) 혼합수로 증류수를 사용한 시멘트 혼합토를 증류수와 해수에 3일 간의 수중양생시킨 공시체의 일축압축강도는 해수에서 수중양생시킨 공시체의 강도가 10-20% 정도 낮게 나타났다. 혼합수와 양생수 모두 해수를 사용한 경우에 모두 증류수를 사용한 경우의 일축압축강도보다 최대 3.5배 정도 감소하였다. 이것은 해수에 포함된 염분이 시멘트의 수화작용을 지연 또는 방해하기 때문으로 판단된다.
(3) 대기중 양생한 공시체의 강도가 수중양생한 공시체의 강도보다 평균 2배 정도 높게 나타났다. 점토의 경우와 달리 사질토에 혼합수로 해수와 증류수를 사용한 경우 강도차이가 상당히 발생하였다.
(4) 현재 국내에서 사용 중인 DCM매뉴얼에 다음과 같은 사항을 보완할 필요가 있다. 첫째, 지반개량 대상으로 점토뿐만 아니라 사질토에 대한 설계기준강도도 제시되어야 한다. 둘째, 해상조건과 동일한 방법으로 실내배합시험이 실시되어야 한다. 셋째, 구속압에 따른 고결모래의 강도 차이가 충분히 반영되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0023540). 공시체 제작에 많은 도움을 준 황세훈 군에게 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 연안기술연구센터 (2008), “해상공사에서의 심층혼합처리공법 기술 매뉴얼(개정판)” (일본어), 사단법인 연안개발기술센터.
2. Ahn, T. B. (1997), “Effect of Sodium Chloride on Stress - Deformation of Sand Bentonite Mixture”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.13, No.2, pp.17-27.
3. Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L., and Heineck, K. S. (2007). “Key parameters for strength control of artificially cemented soils.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng*, 133(2), pp.197-205.
4. Drake, J. A. and Haliburton, T. A. (1972), “Accelerated cuing of salt-treated and lime-treated cohesive soils”, HRB, *Highway Research Record* 381, pp.10-19.
5. Jeong, S. Y. (2010), “A Study on Improved Soil by Deep Cement Mixing Method”, *Master Thesis*, Korea Maritime University.
6. Jeong, W. S (2006), “The effect of cement content on the strength of cemented Nak-Dong River sand”, *Ph.D Thesis*, Kyungpook National University.
7. Jung, D. Y. and Lee, B. S. (1991), “A Study for Influence of Salt on Stabilized Marin Clay with Lime and Cement”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.7, No.4, pp.17-27.
8. Jung, K. H., Mun, J. B., Sin, M. S., and Hwan, J. S. (2006), “Design and environment of DCM method (Deep Cement Mixing Method)”, *Geoenvironmental Engineering*, Vol.7, No.4, pp.37-48.
9. Kim, Y. T. (2011), “Effect of Salinity on Mechanical Characteristics of Stabilized Dredged Soil”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.9, pp.47-53.
10. Ladd, R. S. (1978), “Preparing test specimens using undercompaction”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
11. Lee, K. Y., Yun, S. T., Kim, S. T., and Han, W. S. (2007), “Special Publication : Strength of Improved Soil on the Work-conditions of Deep Mixing Method”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.7, pp.99-104.
12. Marks, B. D. and Haliburton, T. A. (1972), “Acceleration of lime-clay reactions with salt”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.98, No.SM4, pp.327-339.
13. Mateos, M. and Davidson. D. T. (1961), “Further evaluation of promising chemical additives for accelerating hardening of soil-lime-fly ash mixtures”, HRB, *Bulletin* 304, pp.32-50.
14. Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D. (2003), “Concrete”, Prentice Hall.
15. Ozier, J. M. and Moore, R. K. (1977), “Factors affecting unconfined compressive strength of salt-lime-treated clay”, *Transportation Research Record*, No.641, pp.17-24.
16. Park, S. S., Kim, K. Y., Choi, H. S., and Kim, C. W. (2009), “Effect of Different Curing Methods on the Unconfined Compressive Strength of Cemented Sand”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29 No.5C, pp.207-215.

(접수일자 2012. 4. 18, 심사완료일 2012. 6. 18)