

준설풀토의 친환경 재활용을 위한 시멘트계 처리토의 장단기 역학거동

Mechanical Properties of Lean-mixed Cement-treated Soil for Effective Reuse of Dredged Clay

권영철¹⁾ · 이봉직[†]

Kwon, Youngcheul · Lee, Bongjik

ABSTRACT : Cement treating technique, such as deep mixing method, has been used widely to stabilize the dredged clayey soil for many years. Despite of its effectiveness in treating soil by cement, several efforts have also been made to try to reduce the side effect of the cement that used to stabilize the dredged clay. However, authors considered that more detailed study on the physical and mechanical properties of lean-mixed soil-cement has been required to establish the design procedure to apply the practical problems. Therefore, in this study, the curing time and mixing ratio was used as key parameters to estimate the physical and mechanical properties including long-term behavior. The unconfined strength of lean-mixed soil-cement increase continuously during curing period, 270 days, while increasing rate becomes low in ordinary cement-treated dredged clay. We also concluded that cement-treated dredging clay shows apparent quasi overconsolidation behavior even in low cement proportion. By this study, fundamental approach was carried out for effective reuse of very soft dredged clayey soil both in mechanical and environmental aspect. It can be also expected that this study can propose a basic design data to use the lean-mixed soil cement.

Keywords : Cement-treated dredged Clay, Shear, Consolidation, Long-term consolidation test

요지 : 최근 준설풀토 고화처리과정에서 환경에의 부하를 고려하여 시멘트와 같은 지반 고화재를 최소화 하고자 하는 노력이 시도되고 있다. 그러나 적절한 지반 고화재의 비율이나 각 비율에 따른 물리/역학적 특성과 재료적 특성에 대한 충분한 연구가 수행되지 않아 설계에 반영되는 단계에까지는 이르지 못하고 있는 것이 현실이다. 이에 본 연구는 준설풀토의 유효한 활용과 친환경적 접근이라는 두 가지 문제를 동시에 극복하기 위하여 고화재를 최소화할 수 있는 방안과 고화재 비율에 따른 혼합토의 물리/역학적 특성 및 재료특성을 장단기적 관점에서 규명하고자 하였다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 지반 고화재로서 시멘트를 활용하여 혼합 지반의 역학적 성능을 충분히 발휘하는 범위에서 고화재의 투입량을 최소화할 수 있는 최적의 설계방안에 대해 알아봄과 동시에 각 고화재 투입량에 따른 혼합토의 물리/역학적 특성과 재료적 특성을 평가하여 정리하였다. 강도 측면에서는 빈배합 혼합점토는 본 연구에서 상정한 최대 양생기간인 270일 동안 지속적인 강도증가를 보이고 있었으나 혼합비가 상대적으로 높은 증가 추세가 현격하게 떨어지고 있었다. 압밀측면에서는 시멘트 혼합에 의한 의사과압밀현상이 낮은 배합비에서도 충분히 발휘된다는 점을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 준설풀토를 조기에 안정화시키고 동시에 친환경적으로 재활용할 수 있는 방안이 구체적으로 모색되었으며, 본 연구에서 수행되는 다양한 시험 및 해석적 연구 자료는 향후 관련 공법을 실제 현장에 적용할 경우에 설계를 위한 기초 설계자료로서 제공될 수 있으리라 기대된다.

주요어 : 시멘트 혼합처리공법, 준설풀토, 전단, 압밀, 장기압밀시험

1. 서론

우리나라는 산업의 고도화와 국민 생활수준의 향상에 따른 대단위 주거단지, 도로, 항만, 철도 등으로 사회간접자본에 대한 투자가 지속적으로 이루어져 토지를 효율적으로 이용하려는 노력이 지속되고 있다. 또한, 산지가 전 국토의 70% 이상을 차지하고 있어 토지 활용을 극대화하기 위해서는 공학적으로 불리한 연약지반 개발이 불가피한 실정이다.

특히, 바다를 매립한 부지 조성을 통해 항만이나 공항 또는 공업단지를 건설하는 경우, 다량의 준설풀토가 발생하게

되고 이러한 준설풀토의 처리 및 조기 안정화는 매우 중요한 과제로 다루어져 왔다. 현재까지는 준설풀토의 처리는 주로 연약 준설풀토를 개량하여 이용을 하는 경우와 육상 매립 및 외해 투기 등의 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 유효 이용의 경우에도 준설풀토의 처리 방법과 처리비용 및 환경적, 경제적인 사회문제로 거론되고 있는 실정이며, 외해 투기는 생태계 파괴문제가 발생하여 국제협약의 결의로 인해 점차 감소되고 있다(윤길림 등, 2004). 육상매립 또한 투기장의 부지 확보와 같은 문제점들이 발생하여 준설풀토의 효율적 처리가 어려워지고 있는 것이 현실이다.

1) 정희원, 한국사이버대학교 소방방재학과 교수

† 정희원, 충주대학교 토목공학과 교수(E-mail: bilee@cjnu.ac.kr)

이러한 측면을 고려하여 매립지반의 표층이나 심층부에 시멘트 고화재를 공급하여 매립지반을 개량하는 공법이 많이 사용되고 있으며, 단기간에 소정의 강도를 가진 개량지반으로 바꿀 수 있다는 점에서 매우 유리한 공법으로 평가되고 있다(신희식, 2007; 정경환, 2006). 하지만 시멘트를 고화재로 사용함에 있어서 유해중금속인 수은(Hg)과 6가크롬(Cr^{6+})이 현장주변에서 용출되는 문제점이 발생하다는 단점 역시 동시에 지적되고 있다(김경태, 2005).

최근 준설풍토 고화처리과정에서 환경에의 부하를 고려하여 시멘트와 같은 지반 고화재를 최소화 하고자 하는 노력이 시도되고 있다(정애숙, 2008; 이종민 등, 2010). 그러나 적절한 지반 고화재의 비율이나 각 비율에 따른 물리/역학적 특성과 재료적 특성에 대한 충분한 연구가 수행되지 않아 설계에 반영되는 단계에까지는 이르지 못하고 있는 것이 현실이다(신은철, 2009).

이에 본 연구는 준설풍토의 유효한 활용과 친환경적 접근이라는 두 가지 문제를 동시에 극복하기 위하여 고화재를 최소화할 수 있는 방안과 고화재 비율에 따른 혼합토의 물리/역학적 특성 및 재료특성을 장단기적 관점에서 규명하고자 하였다.

이를 위해 본 연구에서는 먼저 지반 고화재로써 시멘트를 활용하여 혼합 지반의 역학적 성능을 충분히 발휘하는 범위에서 고화재의 투입량을 최소화할 수 있는 최적의 설계방안에 대해 알아봄과 동시에 각 고화재 투입량에 따른 혼합토의 물리/역학적 특성과 재료적 특성을 평가하여 정리하였다. 또한, 강도 변화와 압밀특성에 입각한 혼합토의 장기적인 거동특성을 규명하여 자연 노출 환경에서의 혼합토의 열화특성을 검토하였다.

2. 시멘트 혼합점토의 제작

2.1 점토시료

본 연구에서는 시료의 일관성을 유지하며 결과의 편차를 최대한 줄이고 동시에 거동관찰의 용이성을 확보하기 위하여 카올리나이트와 벤토나이트를 9:1의 비율로 혼합한 점토시료를 주요 재료로 사용하였다. 벤토나이트는 수축 및 팽창성이 낮은 카올리나이트의 불리한 성질을 보완하기 위해 첨가되었으며, 본 연구에서는 점토시료에 대비한 중량비에 따른 시멘트를 혼합하여 예압밀을 통해 최종적인 공시체를 얻는 방법을 사용하였다.

표 1은 본 연구에서 사용한 점토시료의 물리적 성질을 나타내고 있다.

표 1. 혼합점토의 물리적 성질

| 통일분류법 | 비중 | 액성한계(%) | 소성한계(%) | 소성지수(%) |
|-------|------|---------|---------|---------|
| CH | 2.65 | 66.06 | 31.24 | 34.82 |



그림 1. 점토시료 제작을 위한 예압밀 시료 제작 장치

2.2 예압밀 점토시료의 제작

앞서 언급한 바와 같이 각 시멘트 혼합량을 기준으로 한 제작 조건에 따라 시료를 제작하였다. 시멘트와 점토시료를 혼합한 혼합체에 액성한계의 2배의 함수비를 유지하여 교반기에 넣어 시료가 충분히 섞일 수 있도록 5시간 이상 교반하였다.

교반 후에는 불순물 제거를 위해 눈금크기 2mm 체로 걸러냈으며 슬러리 상태의 시료를 높이 50cm, 직경 10cm의 예압밀 시료 제작 장치(그림1)에 넣고 200kPa의 압력으로 압밀하여 시료를 작성하였다. 시료 투입 시에는 측면 마찰을 최대한 줄이고 동시에 시료 탈형 시 내부 부착을 방지하기 위해서 시료 제작 장치의 측벽과 재하판에는 그리스를 충분히 도포하였으며 공압으로 압밀 압력을 유지하였다. 압밀 압력을 재하하고 시료의 상하부를 통해 배수를 실시하며 침하량을 목측하여 일차압밀 종료 시까지 방치하였다.

3. 시멘트 혼합점토의 거동평가를 위한 실내 시험

본 연구에서는 빈배합으로 조성된 시멘트 혼합점토의 강도특성을 밝히기 위해 일축압축시험, 삼축압축시험을 실시하였으며 압밀특성을 밝히기 위해 일정변형률속도(CRS) 압밀시험을 실시하였다. 특히 혼합점토의 장기 압밀 특성을 규명하기 위하여 장기압밀시험을 실시하였다.

강도특성 규명을 위한 일축압축시험은 KS F 2314에 의거하여 실시하였으며, 지름 45mm, 높이 90mm 크기의 공시체를 이용하였다. 시험은 시료의 시멘트 혼합비와 양생 일별로 나누어 실시하였으며 재하 시 변형률속도는 1%/min를 유지하였다. 시험은 시료가 파괴되었다고 인정되는 시점이나 압축변형에 의한 변형률이 15%에 도달할 때 종료하였다.

또한 삼축압축시험은 혼합점토의 강도정수에 관한 특성변화를 고찰할 목적으로 제작하여 실시하였다. 공시체는 직경 35mm, 높이 70mm로 트리밍하여 준비하였으며 압밀 비배수 시험 조건에서 강도정수를 파악하였다. 구속압은 200kPa, 300kPa, 400kPa로 변화시켜 진행하였으며, 삼축압축시험 역시 변형률 속도는 1%/min를 적용하였다. 최종적으로 시료의 파괴 시나 압축변형 15%까지 시험을 진행하여 결과를 산정하였다.

압밀 특성을 고찰하기 위한 시험으로는 CRS 압밀시험과 장기압밀시험을 실시하였다. CRS 압밀시험에서는 공시체의 포화도를 높이기 위하여 100kPa 정도의 배압을 재하한 이후에 하부 간극수압이 셀실에 재하한 배압과 거의 유사한 값을 갖게 될 때까지 방치하였다. 변형률 속도는 ASTM(1989)에 규정된 변형률 속도에 의거하여 결정하였으며, 포화과정이 종료되면 추천된 변형률 속도로 재하를 실시하였다. 본 연구에서는 액성한계와 소성지수를 고려하여 0.004mm/min으로 적용하였으며, 변형률 기준 최대 50%까지 재하하며 압밀특성을 얻어냈다.

준설편토와 시멘트가 혼합되는 경우를 상정하며, 동시에 배합비를 낮추어 가급적 환경적 부하를 줄이고자 하는 본 연구에서는 이런 조건을 갖는 혼합점토가 장기간 하중에 노출되어 압밀되는 상황에 대한 검토가 중요하다고 판단하였다. 따라서 혼합점토의 장기압밀특성을 파악하는 일은 매우 의미 있는 접근이 될 것이며, 이를 위해 본 연구에서는 혼합점토를 이용하여 장기압밀시험을 실시하였다. 장기압밀시험은 CRS 압밀시험을 통해 얻어진 각 배합조건의 혼합점토의 선형압밀하중의 1.5배의 하중에 장기간 노출하는 방법으로 실시되었으며, 해당하중까지는 단계재하를 실시하였다. 정규압밀영역에서 얻어진 압축지수 C_c 값과 2차압축지수 C_{α} 를 산출하여 기존 제안된 값에 대비한 혼합점토의 특성을 파악하였다.

표 2에 본 연구에서 실시한 혼합점토의 배합조건과 양생 일, 시험방법 등에 관해 요약 정리하였다.

표 2. 배합조건 및 양생기간과 역학시험

| 중량대비 시멘트 함유량(%) | 양생기간(days) | 시험종류 | | 배합방식 |
|---------------------------|--------------|----------------|-------------------|------------|
| | | 강도시험 | 압밀시험 | |
| 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 | 90, 180, 270 | 일축압축시험, 삼축압축시험 | 일정변형률압밀시험, 장기압밀시험 | Dry mixing |

4. 시험결과 분석

환경 부하를 줄일 수 있는 친환경적 접근의 실현과 동시에 경제적인 준설편토의 처리를 위해 기존 시멘트 혼합 처리 공법에 비해 시멘트의 혼합량을 대폭 줄인 빈배합 혼합 처리 공법의 장기적인 공학적 특성을 분석하기 위해 역학시험을 실시하였으며 그 결과를 분석하면 다음과 같다.

4.1 빈배합 혼합점토의 장기적인 강도특성

4.1.1 일축압축시험 결과

그림 2~4는 시멘트 혼합점토의 장기적인 압축강도의 변화를 파악하기 위해 실시한 시멘트 함유량 및 양생 기간별 일축압축 강도 변화를 도시한 그림이다. 먼저 그림 2를 통해 알 수 있듯이 시멘트를 고화재로 사용하는 경우, 시멘트 혼합량이 증가할수록 장단기 일축압축강도는 증가하고 있으며 이는 선행연구(이종민 등, 2010)를 통해 충분히 설명된 바 있다.

실제 준설편장에서 요구하는 적절한 수준의 강도를 합리적으로 결정할 필요가 있으며 본 연구를 통해 얻어진 결과를 이용하여 시멘트 혼합비율이 낮은 준설편토를 안정화하는 경우, 사용할 수 있는 시험 및 연구 자료가 제공된 점에 의미를 부여할 수 있다. 실제 선행연구와 마찬가지로 본 연구에서도 동일하게 나타나고 있지만 시멘트 혼합비가 5% 정도를 넘어가면서 일축압축강도의 증가 폭이 급격하게 늘어나고 있으며 따라서 경제성과 목표 강도를 설정하여 최소

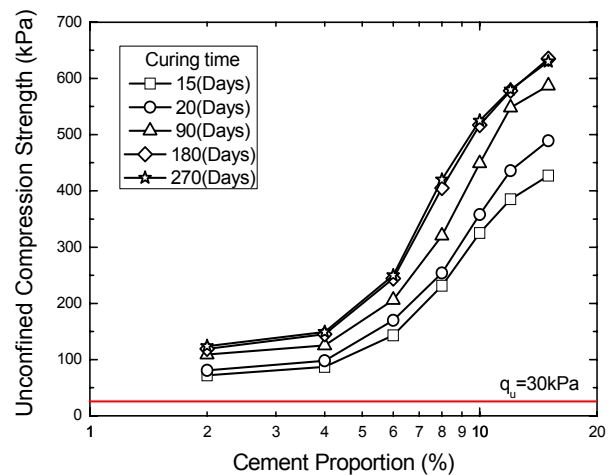


그림 2. 시멘트 함유량에 따른 일축압축 강도의 변화

량의 시멘트를 사용하여 합리적인 시공과 준설점토의 안정을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

실제 빈배합 시멘트 혼합점토로 판단되는 4~6%의 혼합비를 가진 점토의 양생 기간별 강도 증가를 살펴보면 혼합처리를 하지 않은 원점토의 일축압축강도(약 30kPa)에 비하면 15일의 양생에 의해서도 2~3배의 강도 증가 효과를 얻을 수 있어 빈배합 시멘트 고화처리토의 효과는 매우 우수한 것으로 판단된다. 또한, 대부분의 경우에서 180일 이전 강도는 뚜렷한 증가추세를 보였으나 이후에는 강도 증가 측면에서는 효과가 크지 않음을 알 수 있었다.

본 연구에서 목표로 하고 있는 시간의 관점에서 일축압축강도 데이터를 분석한 것이 그림 3과 4이다. 그림 3은 빈배합으로 상정한 4%와 6%의 시멘트 혼합점토, 그림 4는 일반적인 혼합점토를 상정하여 12%와 15%의 혼합점토의 시험 결과를 양생기간별로 도시한 그림이다. 그림을 통해 양생기간(log scale)이 늘어날수록 거의 직선적으로 일축압축강도의 증가가 관찰되어 양생기간이 시멘트 혼합점토에 미치는 영향이 장기간에 걸쳐 일어나고 있음을 확인할 수 있었다.

실제로 본 연구에서 실시한 9개월 이상의 양생기간 대부분에서 강도 증가가 확인되었으며, 빈배합으로 상정되는 6%의 경우에도 9개월의 양생기간 동안 원점토에 비해 최대 8배 이상의 일축압축강도 증가효과를 확인할 수 있었다. 특히, 본 연구에서는 양생 초기보다는 상당한 시간이 흐른 뒤의 일축압축강도 변화에 주목하였다.

그림 3의 빈배합 혼합점토에서는 양생기간 270일의 일축압축강도 역시 어느 일정한 추세선 위에 분포하고 있다는 점을 확인할 수 있었다. 반면, 시멘트 혼합비가 상대적으로 높은 12%와 15%의 혼합점토(그림 4)에서는 180일의 양생 시료에서는 일정 범위 추세선을 따라 움직이고 있었으나 270일의 양생 시료에서는 일축압축강도 증가 추세가 현격하게 떨어지고 있었다. 특히 15%의 경우에는 강도가 약간 감소하는 경향까지 보이고 있었다. 본 연구에서는 270일을 최대 양생기간으로 하고 있어 이를 초과하는 기간의 경향을 파악하기는 불가능 하지만, 이 기간만의 데이터로도 일축압축강도 증가 둔화 추세 혹은 감소 추세는 확연하게 관찰되었다.

본 연구에서는 이와 같은 경향이 시멘트 혼합비율이 높은 시료에서 두드러지게 나타나고 있다는 점에 주목하였다. 이는 혼합점토가 수침되는 경우를 상정하여 수중 보관한 보관 환경에 의해 공시체의 용탈현상에 의한 일축압축강도의 감소로 유추할 수 있으며 특히 시멘트 혼합비율이 높은 공시체에서는 고화에 의한 강도증가만큼 일정 시간 이후에는 강도의 증가 혹은 감소 현상도 가능할 것으로 판단되므로 설계강도 설정 시에 충분히 이러한 영향도 충분히 검토되어야 할 것으로 사료된다. 이 부분에 대해서는 향후 더욱 장기

간의 시험결과를 이용한 추가적인 분석이 수행되어야 할 것으로 생각된다.

그림 5는 혼합비와 양생기간에 따라 도시한 변형계수의 변화를 나타낸 그림이다. 최소 혼합 비율인 2%부터 6%까지

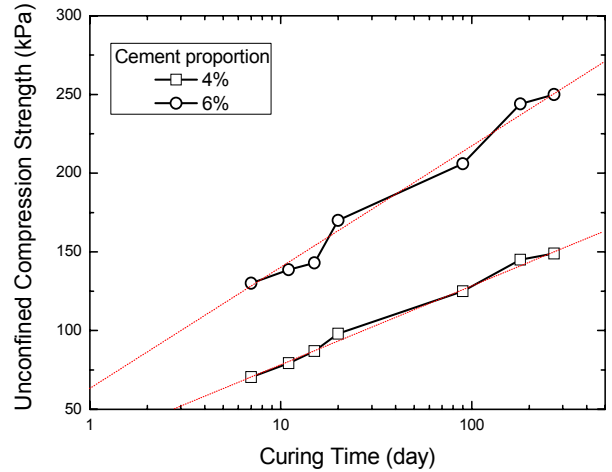


그림 3. 장기 양생에 따른 빈배합 시멘트 혼합점토의 일축압축강도의 변화

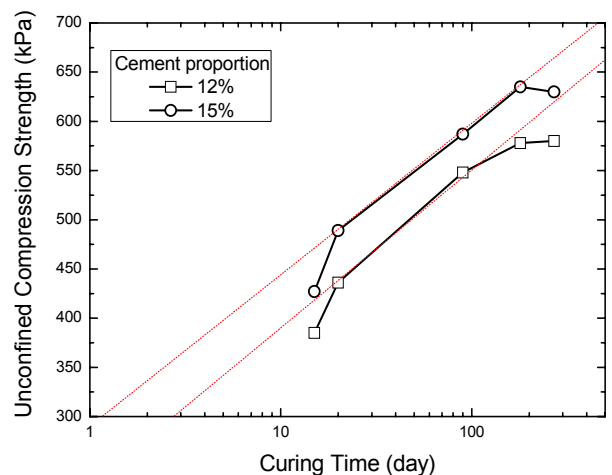


그림 4. 장기 양생에 따른 일반 시멘트 혼합점토의 일축압축강도의 변화

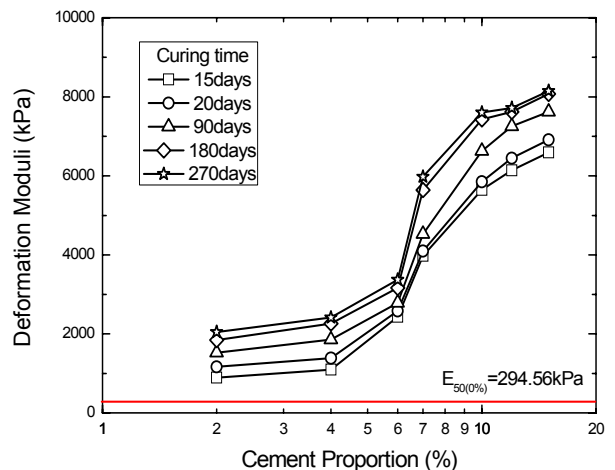


그림 5. 혼합점토의 변형계수 변화 추이

의 낮은 비율로 시멘트로 혼합한 경우에 초점을 맞추면 대체적으로 장기간의 양생을 거쳐 평균적으로 2,000kPa 이상의 강도증가추세를 보이고 있었으며 이는 시멘트를 혼합하지 않은 원점토의 변형계수에 비해 최대 10배 이상의 차이를 보이는 값이다. 따라서 적은 비율로 시멘트가 혼합되더라도 변형에 저항하는 성질은 원점토에 비해 크게 증가되고 있음을 확인할 수 있었다. 물론 시멘트 혼합량이 늘어나게 되면 이러한 증가추세는 더욱 확연하게 발휘되고 있으나 현장에서 요구하는 수준을 만족하는 범위 내에서는 충분히 시멘트 혼합량을 줄여나갈 수 있는 여지가 있음을 동시에 말해주고 있다고 판단된다. 시간에 따른 강성증가율은 초기 양생에 비해 180일과 270일 사이에 가장 작았으며 6%를 전후로 하여 강성 증가 비율 양상은 크게 달라지고 있음을 확인할 수 있었다.

4.1.2 삼축압축시험 결과

그림 6~8은 삼축압축시험 결과를 도시하고 있다. 먼저 그림 6과 그림 7은 강도정수의 변화를 나타내고 있으며 8% 이상의 혼합비에서부터 양생기간이 증가할수록 강도정수가 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다. 점착력의 최대 증가 범위는 혼합비 8% 이상, 양생기간 90일~180일 사이에서 나타났다. 내부마찰각은 혼합비 6% 이하에서는 1° 미만의 차이를 보였지만 혼합비 8% 이상에서는 1° 이상 큰 폭으로 증가하는 내부마찰각을 확인할 수 있었다. 결론적으로 비배수 전단강도를 결정짓는 점착력 및 내부마찰각 역시 양생기간 180일을 이전에 강도발현 현상이 가장 활발하게 나타났으며, 180일 이후에는 안정적인 흐름으로 진행되는 것을 확인하였다.

그림 8은 상기 강도정수를 기반으로 산출한 시멘트 혼합 점토의 비배수 전단강도를 나타내고 있다. 비배수 전단강도 역시 혼합비 8% 이상에서 급격히 증가하는 것으로 나타났으며, 6% 혼합비를 기준으로 6% 이전의 혼합비에서의 증가 폭은 13~18%의 증가가 나타났지만 6% 이후의 혼합비에서는 35~45%의 비배수 전단강도의 증가를 확인하였다. 또한 양생기간별 강도의 변화현상을 확인해 보면 양생기간 180일 이후의 강도 변화는 미세한 것으로 나타났다.

4.2 압밀시험결과

4.2.1 CRS압밀시험 결과

그림 9는 시멘트 배합비가 낮은 4%와 6%의 빈배합 혼합 점토 및 12%와 15%의 혼합점토를 이용한 CRS 압밀시험 결과 얻어진 압밀곡선을 도시하고 있다. 그림에서는 서로 다른 초기 간극비 조건의 영향을 배제하기 위하여 중축을

초기 간극비로 나누어 정규화한 간극비로 표현하였다. 시멘트를 혼합하지 않은 점토를 이용한 CRS 압밀시험 결과 원점토의 선형압밀압력은 약 161kPa 정도의 선형압밀압력을

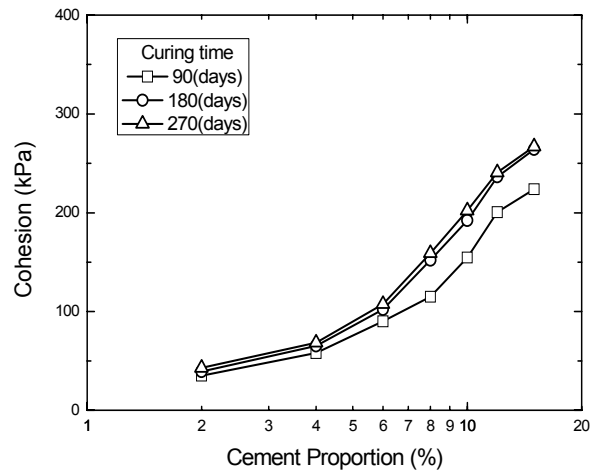


그림 6. 시멘트 혼합점토의 점착력 변화 추이

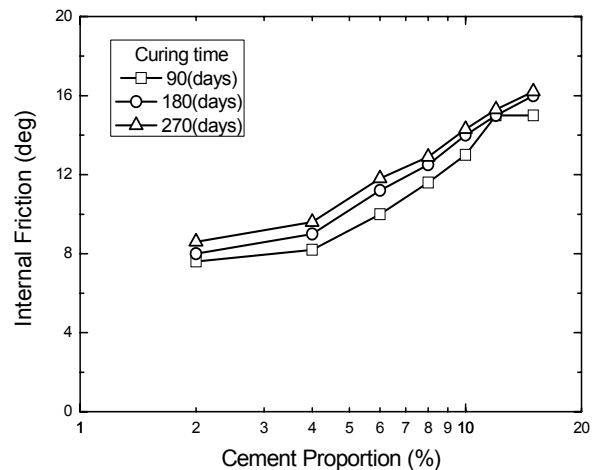


그림 7. 시멘트 혼합점토의 내부마찰각 변화추이

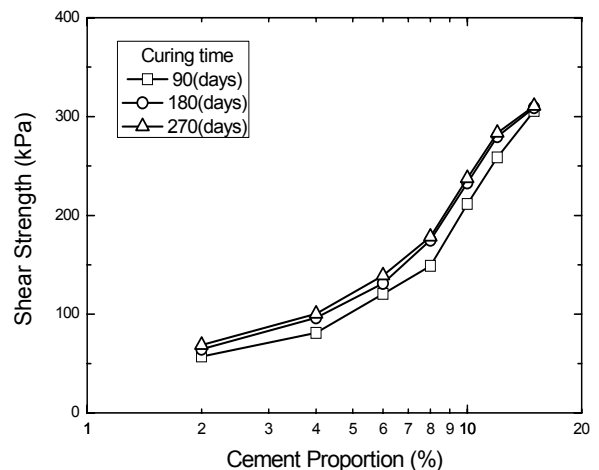


그림 8. 시멘트 혼합점토의 전단강도 변화추이

갖고 있는 것으로 나타났다. 시료 조성 시에는 200kPa의 공압을 유지하여 압력을 유지하도록 하였으나 재하판의 마찰 등의 영향으로 실제 가한 압력보다는 작은 값의 선행압밀압력을 나타내는 것으로 판단된다.

그림에서 알 수 있듯이 시멘트의 고화효과에 의해 점토의 응력이력 이상으로 선행압밀압력이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 증가량 측면에서는 차이가 있으나 빈배합 혼합점토와 일반 혼합점토 모두에서 동일하게 나타났다며 시멘트 혼합비가 늘어날수록 압밀곡선이 오른쪽으로 위치를 옮겨가는 경향을 보인다. 실제로 점토가 이전에 받았던 압밀압력에 비해 더 큰 압밀압력으로 선행 이력을 기억하는 것은 퇴적된 지 오랜 시간이 지난 홍적점토에서 관찰되는 구조(structure)를 갖고 있는 점토의 거동과 매우 유사하며 이렇게 의사적으로 과압밀 상태를 보이는 것은 공학적으로는 상당히 유리한 현상이다.

구체적으로 원점토에 비해 선행압밀압력의 증가가 어느 정도 발생했는지를 정리한 그림이 그림 10이다. 그림을 통

해 알 수 있듯이 6%의 빈배합 시멘트 혼합점토에서도 20일 정도의 양생기간 동안 선행압밀하중의 증가가 2배 정도 관찰되었으며 양생기간이 증가함에 따라 최대 3배에 이르는 선행압밀하중의 증가효과가 나타났다.

이러한 증가는 공학적으로 강도 증가뿐만 아니라 지반 변형을 저감하는데 빈배합 시멘트 혼합점토가 매우 유효한

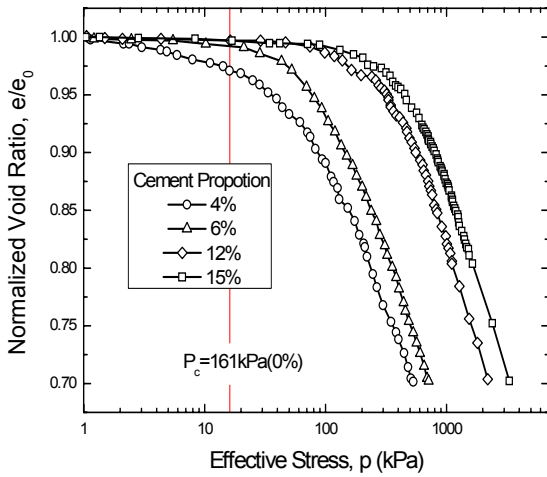


그림 9. 빈배합과 일반 시멘트 혼합점토의 압밀곡선

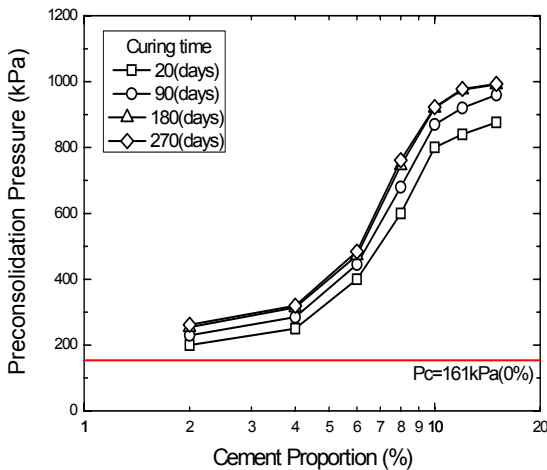
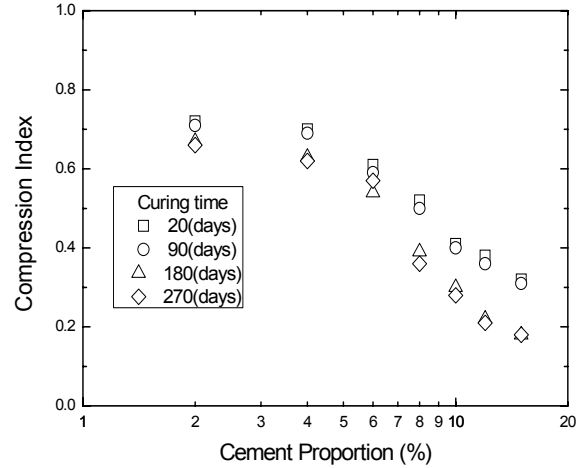
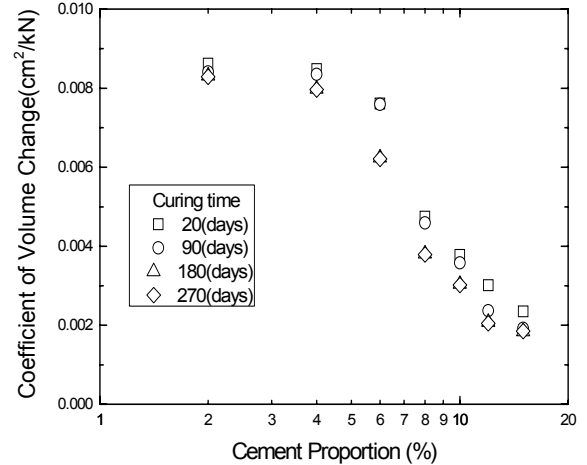


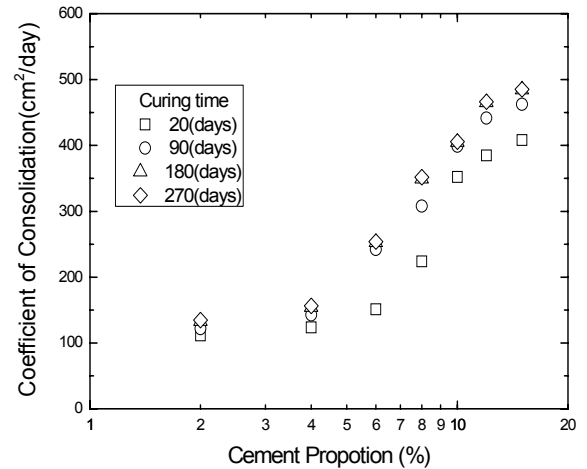
그림 10. 선행압밀압력의 변화



(a) 압축지수



(b) 체적압축계수



(c) 압밀계수

그림 11. 압밀 파라미터의 변화

방법임을 나타내는 하나의 지표라고 생각된다. 물론 이전에 언급한 바와 같이 시멘트 혼합비가 증가한다면 이러한 증가 추세는 더욱 늘어나고 있지만 시멘트 혼합비 증가에 따른 환경 부하 등 추가적인 부작용 역시 증가하게 될 것이다.

따라서 현장에서 요구하는 성능을 결정하고 이에 맞는 최소한의 배합량을 통해서도 충분히 강도발현과 변형 감소에 대한 효과를 얻을 수 있다면 시멘트 함유량의 저감에 적극적으로 대처해야 할 것으로 판단되며, 본 연구에서는 이에 대한 기초 데이터를 제공하였다.

그림 11은 압밀시험 결과 얻어진 각종 압밀 파라미터를 정리하여 도시한 그림이다. 먼저 압축지수는 하중-간극비 곡선에서 처녀압밀곡선의 기울기로 산정된 압축지수는 혼합비의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 혼합점토에 상재하중이 재하 되었을 때 시멘트 고화재의 혼합비가 클수록 압밀 침하량이 적다는 것을 보여주고 있으며, 체적변화계수 역시 혼합점토의 혼합비 4~6% 이후에 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다.

양생기간 역시 압축지수와 체적변화계수의 큰 차이는 나타나고 있지 않지만 가장 강도발현이 크게 나타나는 4~6% 이후의 변화는 180일 이전까지는 급격한 변화를 보이지만 180일과 270일의 차이는 거의 없다. 압밀침하량 산정에 중요한 인자인 압축지수와 체적변화계수의 실내시험 결과 혼합비 4~6%, 양생기간 90일 이전에서의 혼합점토의 압밀 침하량 역제는 크지 않다고 판단된다.

압밀침하속도에 중요 인자인 압밀계수에 대하여 그림 11(c)에 정리하였다. 시멘트 고화재의 혼합비가 증가할수록 고결화 작용에 의한 초기 간극비의 증가로 인해 선형적으로 증가하는 압밀계수를 확인하였으며, 혼합비 4%를 기준으로 4% 이전에 비해 6% 이상에서 약 40%의 압밀계수의 증가를 확인하였다. 양생기간 동안 증가하는 압밀계수 또한, 양생기간에 따른 압밀계수의 변화양상은 90일 이전의 변화에 비해 90일 이후 180일 이전에 시멘트 고화재의 강도발현이 가장 큰 것으로 나타났으며, 180일 이후 변화의 폭이 크지 않다는 점을 바탕으로 판단하면 180일 이후 압밀특성이 어느 정도 값에 수렴한다고 사료된다.

4.2.2 장기압밀특성

일정변형률압밀시험을 혼합점토의 혼합비와 양생기간에 따라 산정된 압축지수와 간극비-시간곡선을 통해 산정된 이차압축지수를 그림 12~13까지 양생기간별로 나타내었다. 그림 12에서는 시멘트 혼합비율에 따른 이차압축지수의 변화를 보이고 있으며 혼합비가 높을수록 낮은 이차압밀 가능성을 보이고 있다고 판단된다. 또한, 양생일수에 따른 특성

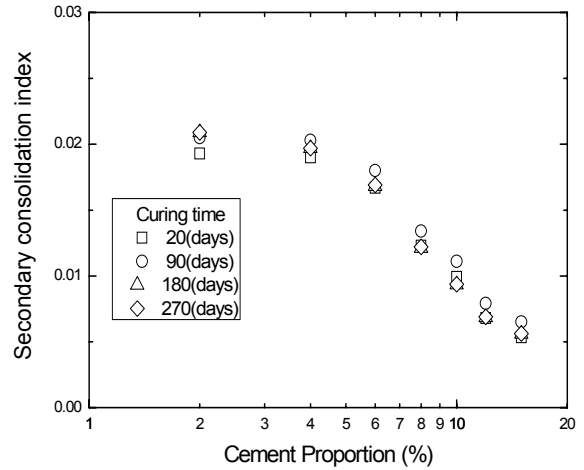


그림 12. 2차압축지수 변화

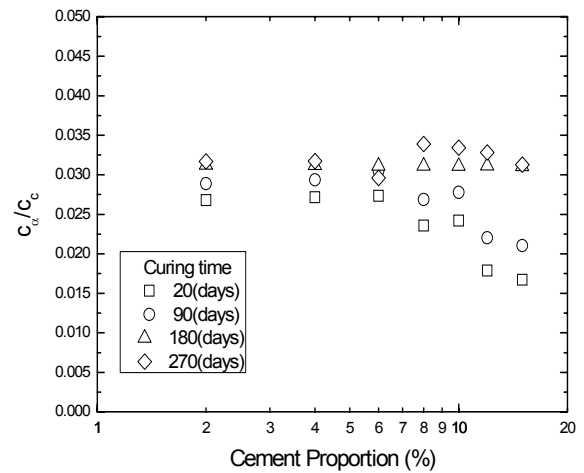


그림 13. Ca/Cc 변화

변화는 일관성을 보이는 데이터의 경향을 파악할 수 없어 본 연구의 결과만으로 판단하기 어려우나 이차압밀특성이 혼합되는 재료의 고유특성이며 양생일수에 크게 영향을 받지 않을 가능성에 대해서는 본 연구 결과만으로도 설명할 수 있으리라 판단된다.

이차압밀량을 판단하는데 있어서 중요한 파라미터로 Ca/Cc를 사용하고 있다(Mesri 등, 1987). 그림 13을 통해 알 수 있듯이 시멘트 혼합점토의 양생 초기단계인 20일에서는 Ca/Cc=0.0381로 나타났으며 신뢰도는 0.891을 나타냈다. 90일에서는 Ca/Cc=0.0355, 180일에서는 Ca/Cc=0.0341, 270일에서는 Ca/Cc =0.0305가 나타났으며, 혼합비와 양생기간이 증가할수록 이차압축지수가 감소하고 있는 결과로 보여 혼합점토의 이차침하는 높지 않은 것으로 알 수 있다. 우리나라 남해안 해성점토의 평균적인 Ca/Cc가 0.397인 점을 고려하면(김규선 등, 1999), 본 연구에서 대상으로 하는 모든 시멘트 혼합점토의 이차압밀침하량은 무처리된 남해안 해성점토에 비해서는 크지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 준설점토의 유효한 활용과 친환경적 접근이라는 두 가지 문제를 동시에 극복하기 위하여 다양한 시험 및 해석적 연구를 수행하였으며, 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 실시한 9개월 이상의 양생기간 대부분에서 강도 증가가 확인되었으며, 빈배합으로 상정되는 6%의 경우에도 9개월의 양생기간 동안 원점토에 비해 최대 8배 이상의 일축압축강도 증가효과를 확인할 수 있었다.
- (2) 빈배합 혼합점토에서는 양생기간 270일의 일축압축강도 역시 어느 일정한 추세선 위에 분포하고 있다는 점을 확인할 수 있는 반면, 시멘트 혼합비가 상대적으로 높은 12%와 15%의 혼합점토에서 270일의 양생기간을 갖는 시료에서는 일축압축강도 증가 추세가 현격하게 떨어짐을 알 수 있다.
- (3) 이러한 감소추세는 혼합점토가 수침되는 경우를 상정하여 수중 보관한 보관 환경에 의해 공시체의 용탈현상에 의한 일축압축강도의 감소로 유추할 수 있으며 특히, 시멘트 혼합비율이 높은 공시체에서는 강도의 증가 혹은 감소 현상도 가능할 것으로 판단되므로 설계 강도 설정 시에 이러한 영향도 충분히 검토되어야 할 것으로 사료된다.
- (4) 우리나라 남해안 해성점토의 평균적인 Ca/Cc가 0.397인 점을 고려하면, 본 연구에서 대상으로 하는 모든 시멘트 혼합점토의 이차압밀침하량은 무처리 된 남해안 해성점토에 비해서는 크지 않을 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구를 통해 준설점토를 조기에 안정화시키는 동시에 친환경적으로 재활용할 수 있는 방안이 구체적으로 모색되었으며, 본 연구에서 수행된 다양한 시험 및 해석

적 연구자료는 향후 관련 공법을 현장에 적용할 경우 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

참 고 문 헌

1. 김정태(2005), 시멘트 고화재 고결공법에 따른 고사장 주변해수의 용존성 중금속 농도 변화, *한국해양환경공학회지*, Vol. 8, No. 2, pp. 74~77.
2. 김규선, 임형덕, 이우진(1999), 실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의 Ca/Cc, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 15, No. 6, pp. 87~98.
3. 신은철(2009), 고화재를 활용한 연약점토의 화학적 개량효과, *2009 성과 및 분 학술 발표회*, 한국지반환경공학회, pp. 427~432.
4. 신희식(2007), *심층혼합처리(DCM) 공법에 의한 항만구조물 사공 사례에 대한 연구*, 석사학위 논문, 한양대학교, pp. 7~17.
5. 윤길림, 김병탁(2004), 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구, *한국지반공학학회 논문집*, Vol. 20, No. 7, pp. 5~13.
6. 이종민, 권영철, 이홍길, 이봉직(2010) 빈배합 시멘트 혼합점토의 압밀특성, *한국지반환경공학회논문집*, Vol. 11, No. 4, pp. 25~31.
7. 정경환(2006), DCM공법의 설계와 환경, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 7, No. 4, pp. 37~48.
8. 정애숙(2008), *점토 시멘트 혼합점토의 강도특성에 영향을 미치는 배합조건에 관한 연구*, 석사학위 논문, 부경대학교, pp. 38~46.
9. ASTM(1989), *Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soil Using Controlled-Strain Loading*, ASTM D4186-89, pp. 3.
10. Mesri, G. and Castro, A.(1987), The Ca/Cc Concept and Ko During Secondary Compression, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. GT3, pp. 230~247.

(접수일: 2011. 7. 5 심사일: 2011. 7. 13 심사완료일: 2011. 8. 10)