

송도 지역 실트질 점성토 고화처리를 위한 최적 배합 조건

The Optimum Mixture Condition for Stabilization of Songdo Silty Clay

김 준 영¹ Kim, Jun-Young

장 의 룡² Jang, Eui-Ryong

정 충 기³ Chung, Choong-Ki

장 순 호⁴ Jang, Soon-Ho

Abstract

Recent increase of large scale construction near costal area has also increased the application of soft ground treatment. As a result, solidification with cement and lime which increases stability and durability of soils, is frequently used for surface layer stabilization in soft ground site. While stabilization of very soft clay with high plasticity and compressibility has widely been studied, studies on silty clay with low plasticity and compressibility are relatively rare. In this study, after stabilizing low plasticity silty clay of Songdo area with cement and lime under various water contents, mixing ratio, and curing time, uniaxial compression test and plate load test were performed. Strength properties from both tests were considerably consistent. And trackability of construction equipment on the treated surface layer of dredged land was estimated. Finally, optimum mixing condition for Songdo silty clay was proposed.

요 지

최근 연안지역에서의 대형건설공사 증가로 인해 대규모의 연약지반처리 공사가 많이 이루어지고 있다. 이로 인해, 흙에 시멘트나 석회를 첨가하여 안정성과 내구성을 증대시키는 고화안정처리공법이 연약지반 현장의 표층처리에 빈번히 사용되고 있다. 고소성, 고압축성의 초연약 점성토를 대상으로 한 고화처리 연구는 그 동안 많이 이루어져 왔으나 상대적으로 낮은 소성성과 압축성을 가진 실트질 점성토를 대상으로 한 고화처리 연구는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 송도 지역의 저소성 실트질 점성토를 배합 함수비, 개량재 배합비, 양생 기간을 변화시키며 시멘트와 생석회로 고화처리하고, 일축압축 시험 및 평판재하시험을 통하여 강도 특성을 파악하였다. 일축 압축 시험과 평판재하 시험으로부터 상당히 일치하는 강도 특성 결과를 얻었으며, 이를 바탕으로 개량토를 매립지 표토층으로 이용하였을 경우 건설 장비의 주행성을 평가하였다. 이상의 결과로부터 송도 지역 점성토를 고화 처리하는 최적의 조건을 얻을 수 있었다.

Keywords : Cement, Lime, Plate bearing test, Songdo silty clay, Treated soil, Uniaxial compression test

1. 서 론

최근 연안지역 및 하천의 대규모 공사가 이루어짐에

따라, 연약지반 굴착 및 하천 준설로부터 배출되는 점성토의 효율적인 처리에 대한 필요성이 크게 증가하고 있다. 배출되는 잔토는 사토, 미처리 활용, 개량 후 활용

1 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D Course Student, Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ., doom666@snu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 서울대학교 공학연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Seoul National Univ. Eng. Research Institute)

3 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ.)

4 정회원, (주)포스코건설 R&D센터 기술연구소 토목연구그룹 대리 (Member, POSCO Engrg. & Construction, R&D Center, Research&Eng. Division, Civil eng. Research group, Assistant Manager)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

과 같이 크게 세가지 방법으로 처리될 수 있다. 사토를 할 경우에는 많은 비용이 발생하며, 사토장 확보가 점점 어려워지고 있다. 잔토를 미처리된 상태로 매립 처리 할 경우에는 선행재하 등의 추가적인 연약지반처리 공사가 수반되어야 하며, 특히 표층이 연약하여 건설 장비의 주행이 불가능할 수 있다. 또한, 미처리 잔토는 낮은 다짐 효율과 투수성으로 인하여 건축물의 되메우기 토사로의 사용도 적절하지 않다. 이러한 사토와 미처리 활용 방법의 한계로 인하여 배출된 점성토의 특성을 개량한 후 시공재료로 활용하는 방법이 대두되고 있다.

고화안정처리공법은 연약한 점성토에 시멘트나 석회 등의 고화재를 첨가하여 흙의 역학적 특성, 즉 강도와 변형 특성을 개선하는 공법이다. 80년대 초부터 고화재 중량비, 양생기간, 양생 방법, 온도 등과 강도 및 변형 특성에 대한 연구가 이루어져 왔다(김완성 등, 1980; 조성정, 1980).

연약지반 굴착 및 준설 현장에서 배출되는 점성토가 고화처리를 통해 역학적 특성이 개선된다면 매립지의 성토체, 뒷채움이나 노반 재료 등의 다양한 건설재료로 활용이 가능하다. 그러나 해안 매립지에 배출 점성토가 활용될 경우, 모든 잔토를 개량 처리하는 것은 경제성 및 효율성이 떨어지므로 미개량 매립과 함께 표토층의 안정 처리를 위하여 개량하는 시도가 이루어지고 있다.

안정처리재료로서 활용 범위가 넓어짐에 따라 소일 시멘트, 석회혼합토의 강도특성에 관한 연구도 활발히 진행되었다. 남정만과 윤중만 등(2004)은 광양 지역 점토를 대상으로 실내 시험과 현장 시험을 수행하여 시멘트 혼합 처리된 흙의 특성을 연구하였다. 그 결과, 압축 강도는 양생 시간, 온도, 물-시멘트 비율에 의해 영향을 받으며 양생 온도가 높을수록, 양생 시간이 길수록 강도가 높아지는 반면, 물-시멘트 비가 높아지면 강도가 감소함을 확인하였다. 또한 강도 증가는 양생 후 14일 안에 대부분 발현되었으며, 현장의 압축 강도도 실내 시험과 유사하였다. 천병식 등(2002)은 경남 진해지역의 해성 점성토(LL: 55.8 %, PI: 26.4 %)에 대해 일축압축시험과 평판재하시험을 통하여 시멘트뿐 아니라 슬래그 분말, 석고, 아원 등의 고화재를 이용하여 초연약 해성 점토를 개량하는 최적 배합비를 산정하였다.

위에 언급된 연구들은 소성지수가 60% 이상인 고소성, 고압축성의 초연약 점성토가 대상이며, 고화 첨가물을 원지반의 10% 이상의 중량비로 준설 매립 지반의 표토층을 개량하여 공사 장비 주행성 확보에 중점을 두었다. 하지만, 본 연구의 대상인 송도 실트질 점성토는 자연함수비가 23~25%, 소성지수가 5~13%로 상대적으로 낮아 기존 연구들이 대상으로 하는 함수비가 60%를 상회하는 고소성의 점토와는 차별된다. 대상 시료에 따라 개량토의 강도 특성 등이 상이하게 나타나므로 송도 실트질 점성토의 혼합·개량에 알맞게 특화된 최적의 개량 조건(개량재의 종류와 혼합 비율 및 함수비, 혼합 후 양생기간)에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 송도 지역 여러 지점에서 시료를 채취하여 송도 실트질 점성토의 물성을 파악하고 이를 바탕으로 배합 함수비, 개량재, 중량비, 그리고 양생기간을 변화시키며 다양한 조건의 실내시험 계획을 수립하였다. 각 조건에 대하여 송도 실트질 점성토를 시멘트와 생석회로 고화처리하고, 일축압축 시험을 수행하여 강도 특성을 파악하였다. 실내 시험 결과로부터 적절한 조건을 선정하고, 이를 현장에 적용하여 평판재하시험을 수행하였으며, 최종적으로 표토층으로서의 활용을 위한 건설 장비 주행성을 평가하였다. 본 연구 결과는 송도 지역 이외의 실트질 비율이 높은 해양성 점성토 및 4대강 개발에 의한 준설 토사의 개량 및 활용에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 송도 지역 원지반 기본 물성

송도국제도시는 인천 서남부 지역 해안에 위치하며, 그 하부 지반은 준설 매립층과 해상퇴적층이 각각 평균 8m와 20m 두께인 연약 점성토층으로 구성되어 있다. (동아건설턴트, 2005) 송도국제도시에는 고층 빌딩의 건설을 위한 수 많은 굴착 터파기 공사가 진행되고 있으며, 이들 터파기 현장에서 나오는 많은 양의 잔토를 개량하여 주변 해양 매립 공사에 사용한다면 매우 높은 시공성과 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

개량 대상인 송도 지역 해양성 점토를 대표하는 평균적 시료를 얻기 위하여 현장에 산재한 8개의 지점에서 시료

표 1. 기본 물성 시험 결과

구분	비중	액성한계(%)	소성한계(%)	소성지수(%)	USCS	자연함수비(%)	200번 체 통과량(%)
결과	2.67	29.1~37.7	21.6~24.1	5.0~13.6	ML/CL	18.4~29.0	73.0~98.0

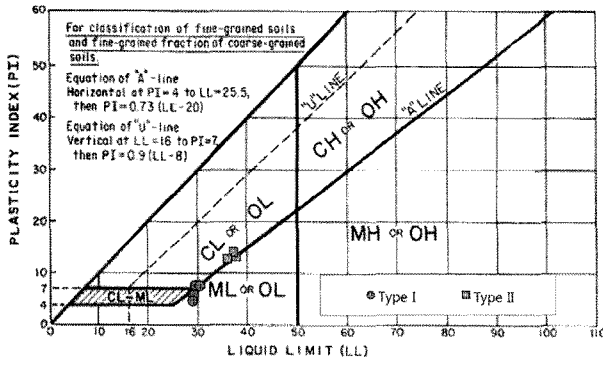


그림 1. 소성도표

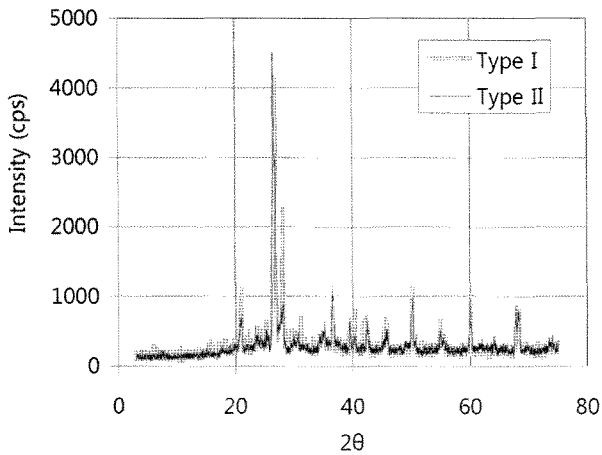


그림 2. XRD 시험 결과

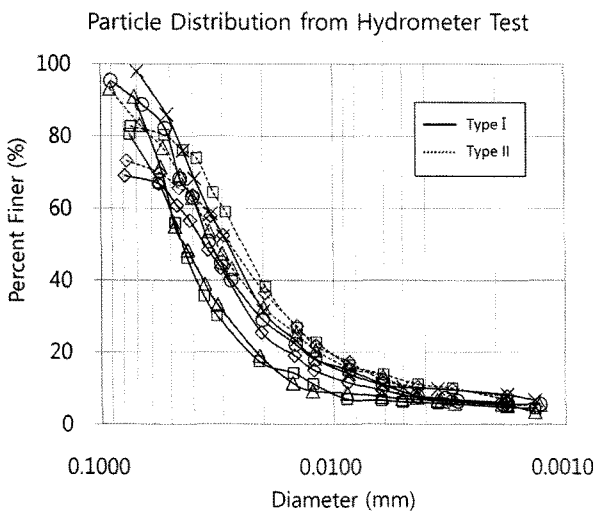


그림 3. 입도분포곡선

를 채취하였다. 각 시료에 대하여 비중, 입도 분포, 그리고 액소성 시험 등의 기본 물성치 시험을 수행하였다.

액소성 시험 결과를 그림 1의 소성 도표 상에 표시하여 보면, 8가지 시료 모두 ML과 CL의 경계에 존재하였다. 비교적 낮은 액성한계와 소성지수를 가지는 Type I 과 비교적 높은 액성한계와 소성지수를 갖는 Type II,

두 그룹의 차이를 확인하기 위하여 X-ray 회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 수행하였다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 두 그룹 XRD 분석 결과, 피크가 나타나는 회절각과 그 강도가 유사하므로 광물학적 성분 및 함유량에 큰 차이가 없다고 할 수 있다. 또한 모든 시료에서 입도분포 시험 결과 실트성분(0.074mm~0.002mm)이 약 60% 이고, 입자 크기가 0.002mm 이하인 점토 함유량은 10% 이하로 균일하게 나타났으며 이를 그림 3에 도시하였다. 이상의 결과로부터 약간의 차이는 있으나 송도 지역 토양은 비교적 균질한 실트질 점토임을 확인하였다.

3. 실내 개량 시험

3.1 실내 개량 시험 계획

본 연구는 실제 현장에 적용할 최적의 개량토 배합조건을 결정하는 것을 목적으로 수행되므로 실내 시험은 현장 시공성, 경제성, 현장 조건이 충분히 반영되도록 계획되었다. 개량제는 고화재로 가장 널리 사용되는 시멘트와 생석회를 선택하였으며, 별도의 첨가제는 사용하지 않았다. 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트인 KS L 5201 1종 시멘트를 사용하였고, 생석회는 지반개량용으로 널리 활용되는 KS L 9501 공업용 석회를 사용하였다. 개량제 배합비(준설토 중량 + 물 중량에 대한 개량제 중량의 비)는 개량제 사용량을 최소화하고, 대상 지반인 실트질 점토의 연약 지반으로서는 양호한 역학적 특성을 고려함과 동시에, 장비 주행성 확보를 위한 매립층 상부 표토층으로의 활용을 고려하여 3%와 5%로 비교적 낮게 설정하였다.

혼합 시 함수비는 개량토의 강도에 중요한 인자이며, 본 연구에서는 시공성을 위하여 현장함수비에 기초하여 설정하였다. 현장 측정 결과, 함수비는 야적 기간에 따라 감소하며 대부분 18% 이상, 액성 한계 미만인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 시료의 함수비를 액성한계에서 시작하여 일정량씩 감소시키며 실험을 수행하여 강도의 변화를 살펴보았다.

흙을 고화 처리할 경우 개량토의 강도는 혼합 후 시간에 따라서 증가한다. 반면, 대부분의 굴착 및 준설토 현장은 나오는 많은 양의 잔토를 야적할 공간이 마땅치 않은 상황으로, 개량 처리 시간을 최소화하여 가능한 한 빨리 활용하는 것이 중요하다. 따라서 본 실험에서는 고화처리 개량 후 기준 강도를 만족하는 양생 기간을 구하

기 위하여 배합 후 3시간, 1일, 3일, 그리고 7일에 강도를 측정하여, 시간에 따른 개량토의 강도 변화를 분석, 평가하였다.

이상 실내 강도 시험의 인자들을 모두 고려하여 제작

표 2. 실내 시험 계획표

함수비(%)	개량재	배합비율(%)	양생기간	시료 수
33.9	시멘트 생석회 (2)	3% 5% (2)	3 시간	96
32.1			1일	
29.9			3일	
24.5			7일	
19.2			(4)	
10.7 (6)				

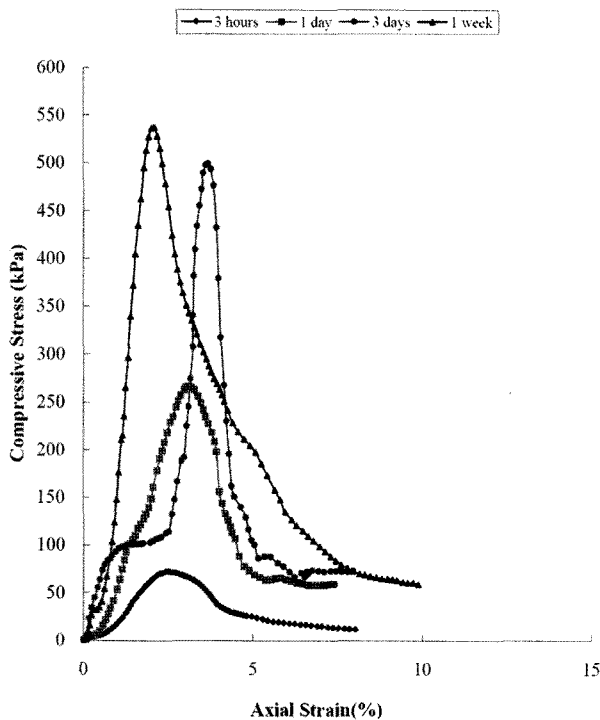
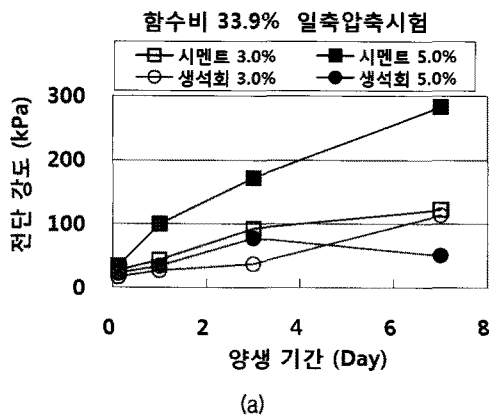


그림 4. 함수비 24.5%, 시멘트 5% 배합 공시체의 일축 압축 시험 응력-변형률 곡선



된 시료는 총 96 종류로 표 2에 정리하였다.

위와 같이 배합된 시료를 배합 직후 지름 5cm, 높이 10cm 몰드에 일정량의 개량토를 여러 층으로 다져 넣어 1.8g/cm³의 습윤 밀도로 균질하게 성형하고, 주어진 양생기간에 몰드를 해체한 후 각 공시체에 대해 KS F 2314 규정에 따라 일축 압축 시험을 수행하여 강도 특성을 파악하였다.

3.2 실내 제작 시료에 대한 일축 압축 시험 결과 및 분석

일축 압축 시험 결과로부터 함수비, 개량재 종류 및 배합비, 양생 기간에 따른 전단 강도를 분석하였으며 일부 응력-변형률 곡선을 그림 4에 첨부하였다.

먼저, 각 함수비에서 양생기간에 따라 변화하는 강도 양상을 그림 5에 나타내었다. 전체적으로 시멘트가 생석회보다 큰 전단 강도를 가지며 시멘트의 배합비가 5%인 개량토의 강도가 3%인 것보다 발현강도가 큰 것으로 나타났다. 반면, 생석회는 배합비에 따른 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 시멘트와 생석회 모두 배합비에 상관없이 양생 기간에 따라 전단강도가 증가하였다. 그러나 그림 5(e)와 (f)에서 나타나듯이 20% 이하의 낮은 함수비에서는 양생기간에 따른 증가 경향이 높은 함수비에서의 강도 증가 경향보다 뚜렷하지 않다.

함수비 변화에 따른 강도 변화를 보다 자세히 살펴보기 위해 그림 6과 같이 각 조건 별 전단강도와 함수비 관계를 도시하였다. 그림 6(a)와 (b)로부터 시멘트에서는 1일 이상 양생하더라도 20% 함수비에 도달하기까지는 강도의 증가가 나타나지 않으며, 이후 25%에서 급격히 증가한 후, 30% 이후에서 약간 감소하는 경향이 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 개량재가 반응, 고

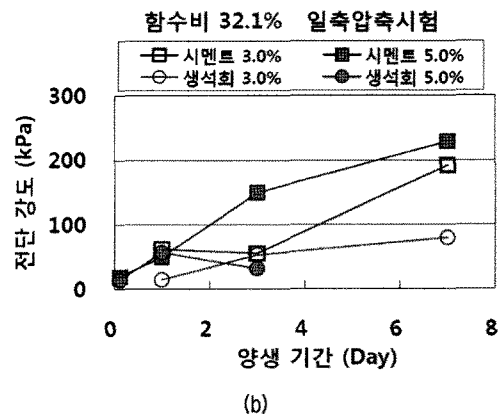


그림 5. 양생 기간에 따른 실내 제작 공시체의 일축 압축 시험 결과

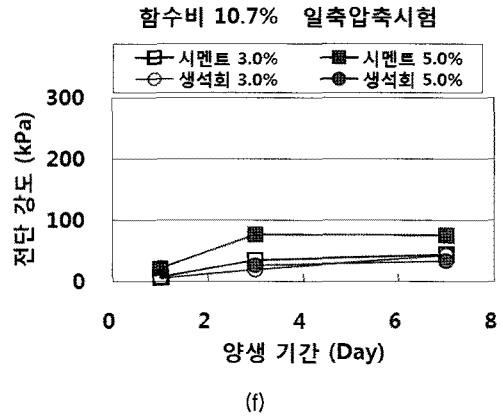
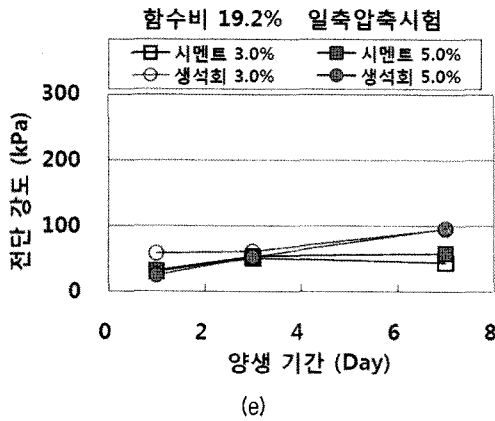
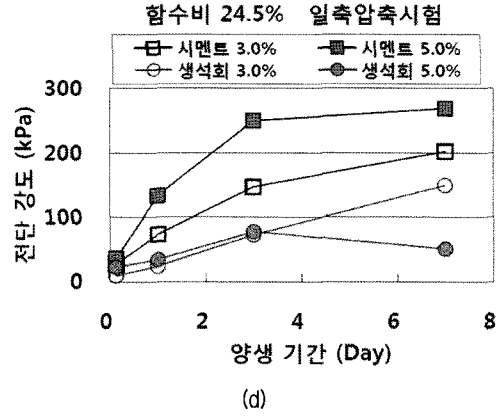
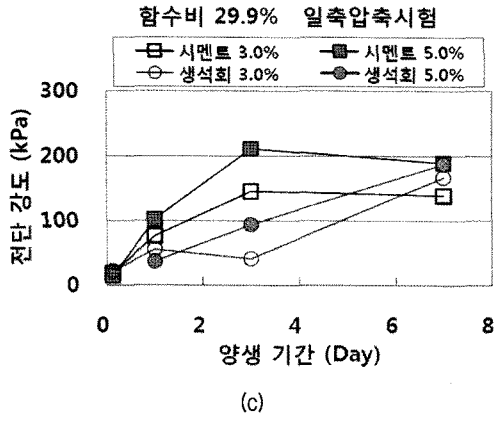


그림 5. 양생 기간에 따른 실내 제작 공시체의 일축압축 시험 결과 (계속)

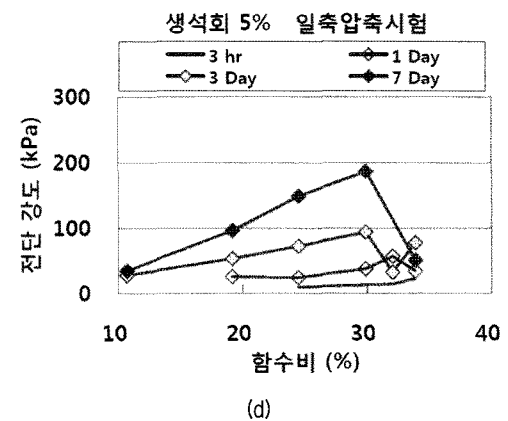
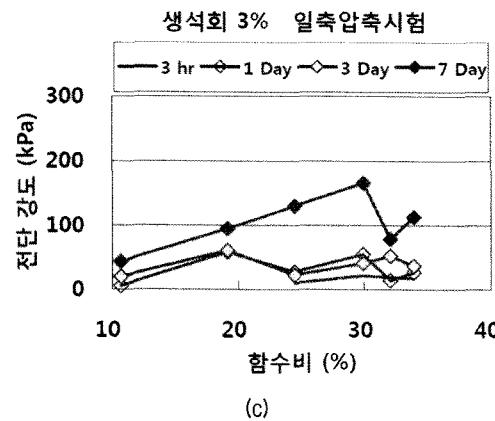
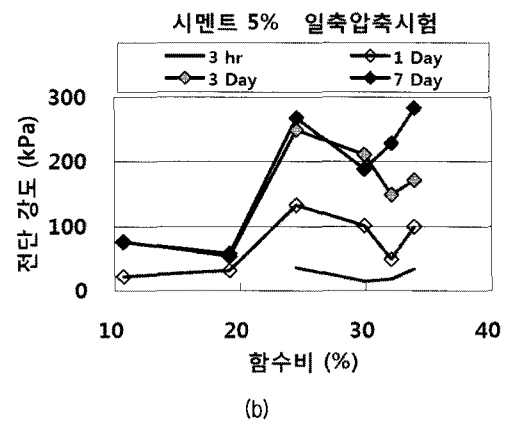
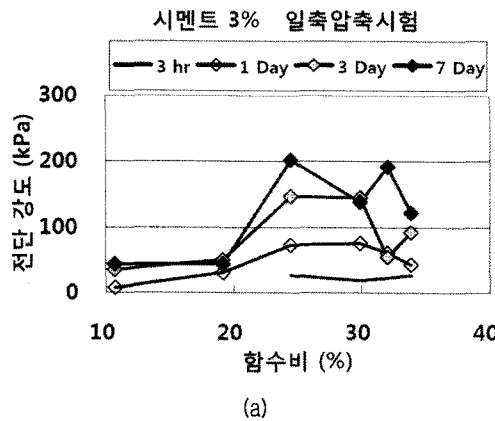


그림 6. 합수비에 따른 실내 제작 공시체의 일축 압축강도

화하여 충분한 강도를 발현하기 위해서는 대략 25%의 함수비가 필요하며, 30% 이상의 함수비를 사용할 경우 물의 양이 과도하게 많아서 강도가 오히려 감소하는 것으로 판단할 수 있다.

그림 6(c)와 (d)에 도시된 생석회의 결과를 살펴보면, 특히 3일 이상 양생하였을 경우 30%의 함수비에서 최대강도를 보이며, 이후 함수비 증가에 따라 강도가 감소하는 것으로 관찰된다. 최대 강도를 내기 위해서는 생석회가 시멘트의 경우보다 약간 더 큰 함수비를 가져야 하는 것으로 판단된다. 또한 양생 기간에 따른 영향을 살펴보면 시멘트의 경우에는 1일과 3일 사이에서 강도 값이 급격히 증가하는데 반하여, 생석회는 3일과 7일 사이에서 강도가 급증한다. 이로부터 생석회가 강도를 발현하는데 시멘트에 비하여 양생 시간이 더 길게 소요된다고 할 수 있다.

4. 현장 개량 시험

실내 강도 측정에 활용되는 시료는 현장과 다른 조건에서 교반, 성형, 양생되고, 실내 시험에서 선택된 밀도는 다짐 방법 및 효율에 따라 현장 밀도와 다를 수 있기 때문에 실내 시험 결과를 실제 현장에 적용하였을 경우 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 실내 시험의 개량 강도에 대한 적절성을 검증하고, 현장 적용성 및 현장에서 사용되는 장비 및 배합 방법의 적절성을 판단하기 위해 현장시험을 수행하였다.

4.1 현장 개량 시험 계획

현장 시험은 실내시험과 달리 넓은 부지와 건설 장비 및 인력을 필요로 하기 때문에 다양한 실험 조건에 대하여 수행하기가 어렵다. 따라서 실내시험 결과를 바탕으로 높은 강도 특성을 나타내는 조건을 선정하여 현장 시험에 적용, 검증하였다. 현장 시험에서는 실내 일축압축시험 결과 거의 모든 조건에서 더 높은 강도 특성을 나타낸 시멘트를 개량재로 사용하였다. 또한 현장에 아

적된 상태의 평균함수비이며 실내 시험에서 시멘트 배합도가 가장 높은 강도를 갖는 함수비 범위인 23~25%를 기본으로 하여 시험을 수행하였다. 현장에서 해안 표토층으로 활용될 때에는 해수에 의해 함수비가 증가할 수 있으므로 함수비를 5% 가량 증가시킨 시험도 수행하였다. 시멘트 5%를 배합한 공시체가 3%를 배합한 공시체보다 더 높은 강도를 가지지만, 3%를 배합한 개량토도 표토층으로 사용되기에 충분한 강도를 가지므로 경제적으로 유리한 3% 배합비만을 사용하여 현장 조성을 한 뒤 1, 2, 5 일 후에 시험을 수행하였다. 실내 시험에서는 소량으로 충분히 균질하게 교반이 가능하기 때문에 시멘트 분체만을 활용하였으나 현장 시험에서는 분체를 바로 원지반에 혼합하는 방법뿐 아니라, 현장 함수비 조절이 보다 용이하고 균질한 배합을 할 수 있을 것으로 예상되는 물-시멘트 슬러리 배합 또한 적용하였다.

이와 같은 조건들을 조합하여 현장 시험을 위한 크기 L 2.5m × W 2.0m × H 0.7m의 PIT를 총 4개 조성하였으며, 이를 아래 표 3에 정리하였다.

현장에서 교반 후 굴삭기의 버킷으로 개량토 지반을 누르면서 다졌으며, 현장 밀도를 측정된 결과 1.8~1.9 g/cm³로서, 이는 실내 일축 압축 시험 공시체 밀도와 비슷한 값이다. 추후 활용될 연약 매립층의 표토층도 유사한 장비로 다질 경우 이와 비슷한 값이 얻어질 것으로 추정된다.

조성된 각 개량토 PIT에 대해서 양생기간에 따라 평판재하 시험을 4회 수행하였다. 이 때 평판재하 시험이 수행되는 위치는 각 시험이 서로 영향을 받지 않도록 재하판의 지름만큼 떨어지도록 설정하였다. 또한 개량이 되지 않은 PIT 외부의 영향을 배제하기 위하여 PIT 경계로부터도 재하판의 지름만큼 떨어지도록 시험 위치를 지정하였다. 재하판의 지름이 40cm이며, 20ton 용량의 유압잭을 이용하여 하중을 가하였다. 침하량 측정을 위한 다이얼 게이지를 재하판에서 충분히 떨어진 위치에서 지지대에 부착하여 재하판 양쪽에서 침하량 측정을 하였다. 평판재하 시험에 추가하여 각 PIT 조성 시에 시료채취용 강관을 삽입하고, 정해진 양생 시간 별로 채취, 추출하여 일축압축 시험을 수행하였다.

4.2 현장에서 제작된 시료의 일축 압축 시험 결과 및 분석

주어진 양생기간이 지난 후 현장에서 양생된 시료를 채취하여 금속관을 절단하고 일축압축 시료를 얻었다.

표 3. PIT별 현장 시험 조건

PIT 번호	개량재	배합상태	개량비율	개량재 양	함수비
1번	시멘트	분체	3%	160kg	22.8%
2번	시멘트	물-시멘트			24.0%
3번	시멘트	분체			29.5%
4번	시멘트	물-시멘트			29.7%

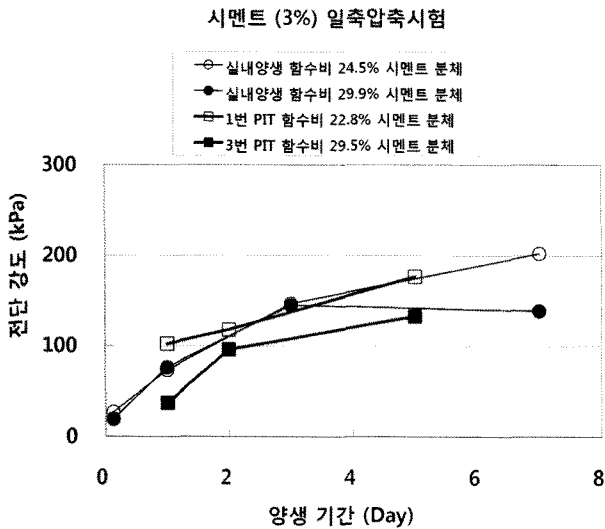


그림 7. 실내 및 현장에서 양생된 일축압축 시험 결과

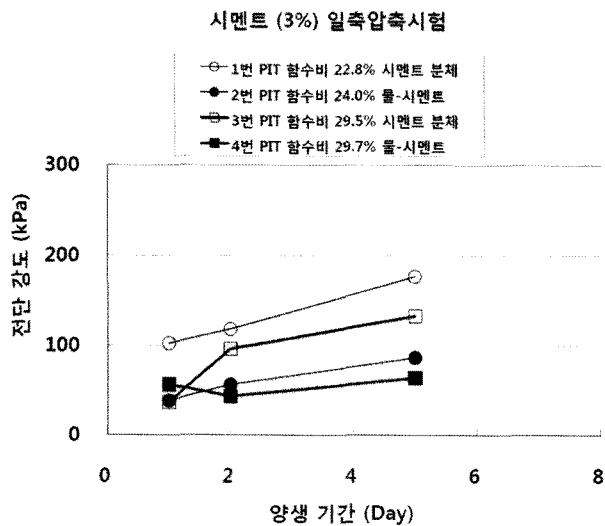


그림 8. 양생 기간에 따른 현장 채취 일축압축강도

실내에서 제작한 일축압축 시료와 동일하게 시멘트 3%를 배합하여 조성된 1, 3번 PIT에서 추출한 일축압축 시료의 시험결과를 그림 7에 함께 도시하여 시험의 적절성을 평가하였다. 동일 함수비 범위에서 수행된 일축압축 시험 결과는 강도 증가 양상과 강도의 크기 모두 유사하게 나타났다. 이로부터 실내 양생 시험 결과 및 현장 시험 결과 모두 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

시멘트를 사용한 현장 개량토의 강도와 양생기간에 따른 변화 양상을 그림 8에 나타내었다. 모든 경우에 양생 기간에 따라서 강도가 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 그리고 물-시멘트 슬러리의 경우는 시멘트 분체보다 강도가 낮게 나왔다. 물-시멘트 슬러리를 이용하여 배합을 할 경우, 예상과는 달리 균일한 교반이 되지 못하여 시멘트 분체를 혼합한 것에 비하여 강도가 낮은 것으로

판단된다. 또한 같은 배합 방법을 사용하였을 경우, 함수비가 낮은 23~24%의 경우가 29~30%의 경우보다 강도가 크게 나타난다.

4.3 평판재하 시험 결과 및 분석

표 3과 같이 4개의 PIT에서 제작된 개량토에 대하여 평판재하시험을 수행하여 지지력 값을 분석하였다. 각 PIT에서 양생 일자별 하중-침하 양상을 그림 9에 나타내었다. KS F 2444 규정은 하중-침하 곡선에서 두 선형구간의 교차점을 항복하중으로 결정한다. 하지만 그림 9에서 볼 수 있듯이, 대부분 항복 하중을 구할 수 있는 두 개의 직선 부분이 명확히 관찰되지 않았다. 따라서, 재하시험의 하중-침하 곡선으로부터 외삽법을 이용하여 항복 하중을 추정하였으며, 본 연구에서는 쌍곡선(Hyperbolic)법으로 회귀분석을 수행하였다.

Paikowsky 등(1999)은 외삽 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 회귀곡선의 상관계수(R^2)가 0.8 이상이 될 때까지 초기자료(침하량 0에 가까운 자료)를 제거한 후 계수 a, b를 결정하였는데, 본 연구에서도 이 방법을 따랐으며, 회귀된 곡선을 그림 9에 함께 나타내었다.

전체적으로 동일 하중에서 1, 2, 5일의 양생 기간이 길어짐에 따라 침하량은 감소하는 양상을 보인다. 그렇지 않은 경우도 있지만 회귀 곡선은 양생 기간이 길어짐에 따라 침하량이 작게 나타난다. 이는 회귀곡선에 영향을 크게 미치는 최종 곡물(침하량 변화량)이 양생 기간이 짧은 경우에 작기 때문이다.

외삽법으로 구해진 쌍곡선에서 나타난 두 개의 직선부분을 연결하여 교차점을 항복 하중으로 정하였다. 교차점에서 나타난 파괴 시 침하량은 4mm에서 28 mm까지 발생하였다. 파괴 시 침하량이 크게 발생하는 경우도 있으므로, 침하량 기준도 정의할 필요가 있다. 1, 3, 4번 피트에서 양생 5일된 지반의 경우에는 예측된 초기 침하 곡선이 선형적으로 나타나므로 파괴 시 침하량 및 지지력의 결과를 과도하게 예측할 수 있다. 이렇게 침하량 및 지지력이 과도하게 예측된 것으로 판단되는 데이터를 제외한 침하량 값은 평판 직경의 약 2%에 해당하는 7mm로 나타났고 이를 파괴 침하량 기준으로 선택하였다.

극한 지지력은 안전측으로 산정하기 위하여 앞서 1) 두 직선의 교차점으로 구한 항복하중에 따른 지지력과 2) 침하량 기준 7mm에 해당하는 지지력 값 중 작은 값을

선택하였다. 침하량 기준 7mm에 의해 구해진 극한 지지력이 보수적으로 작게 산정된 경우가 많이 나타났다.

정성준 등(2009)은 깊은 기초의 쌍곡선으로 외삽된 극한 지지력에 대한 실제 지지력의 비(극한 하중 비)와 예측에 사용된 최종 침하량에 대한 예측되는 파괴 침하량 비(침하량 비)의 관계를 평가하였다. 즉, 일부의 데이

터만을 활용하여 외삽을 수행하였고, 그 결과는 표 4와 같다. 예측되는 파괴 또는 항복 시 침하량의 20%에 해당하는 계측 결과까지만 사용하면, 극한 하중, 즉 항복 하중은 실제 값보다 40% 작게 예측된다. 그리고 외삽에 사용된 침하량의 비가 커질수록 항복 하중을 더 정확하게 예측하며, 외삽에 의해 예측된 극한 하중은 실제 값

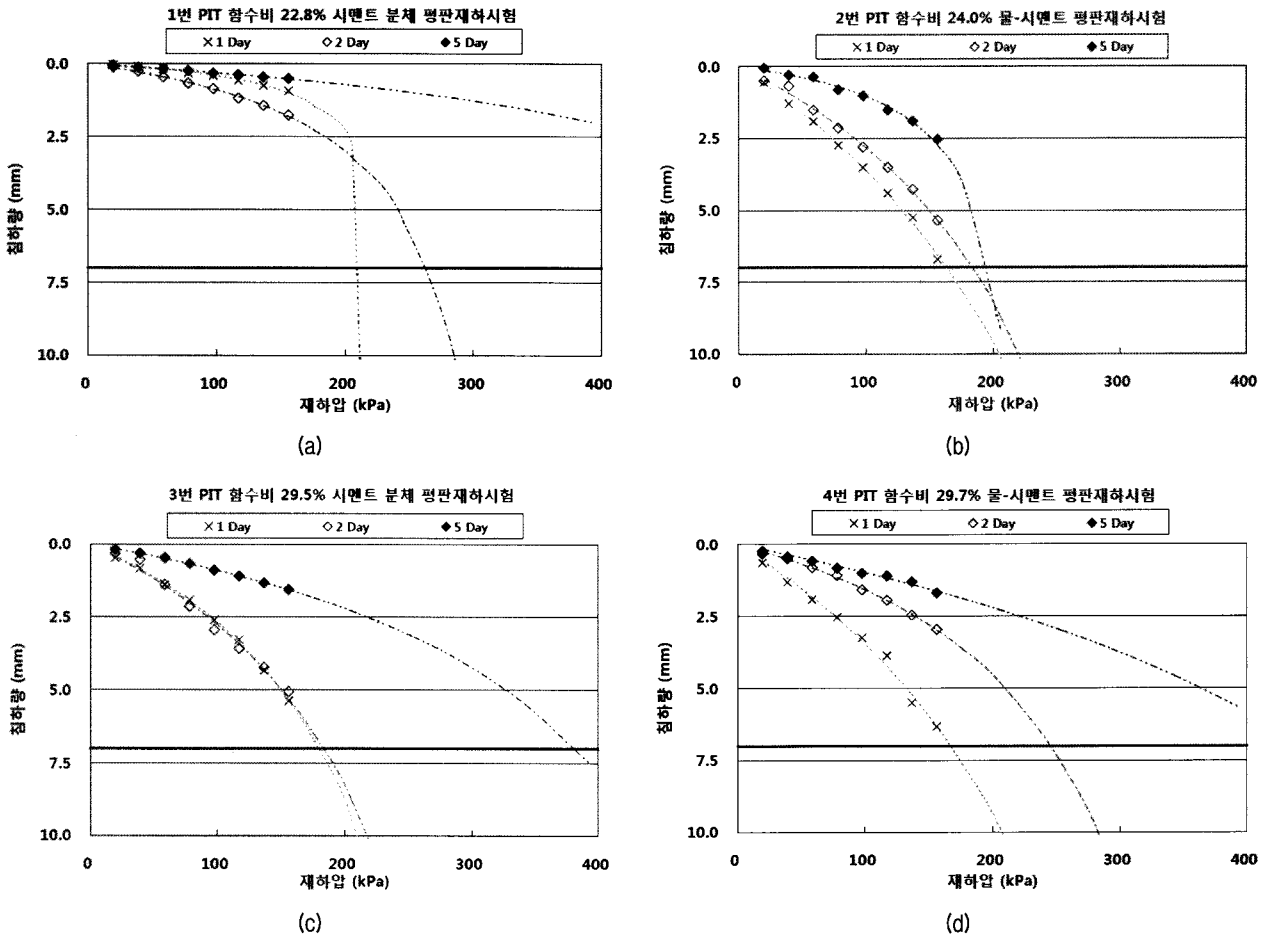


그림 9. 평판재하 시험 결과 및 쌍곡선으로 회귀된 곡선(*굵은 선은 기준침하량 7mm를 나타냄)

표 4. 실제 극한 하중에 대한 쌍곡선 외삽법으로 구한 극한 하중 비

극한 하중 비 (= 실제 극한하중 / 외삽된 극한하중)	침하량 비 (= 예측에 사용된 최종침하량 / 예측되는항복 시 침하량)					
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	1.39	1.33	1.28	1.23	1.18	1.14

표 5. 외삽법을 사용한 침하량 비 및 예측 항복 하중(극한 지지력)

PIT	침하량 비			외삽법으로 구한 항복 하중(kPa)		
	1 Day	2 Day	5 Day	1 Day	2 Day	5 Day
1 번	*0.13	*0.25	*0.07	213	264	644
2 번	0.96	0.76	*0.36	166	187	202
3 번	0.77	0.72	*0.22	183	187	390
4 번	0.90	0.44	*0.24	170	250	455

* 예측된 항복 하중이 30% 이상 과소평가했을 것으로 예상되는 시험

보다 작다.

본 연구에서 사용된 항복 하중 시 침하량에 대한 예측에 사용된 최종침하량의 비 및 항복 하중을 표 5에 정리하였다. 항복 하중 시 침하량은 침하량 기준 7mm에, 예측에 사용된 최종침하량은 계측 최종 침하량에 해당된다. 표 4를 근거로 하여, 항복 하중 시 침하량 비가 0.35 이하일 경우, 실제 항복 하중이 외삽된 하중에 비하여 1.3배 이상 크기 때문에 항복 하중을 30% 이상 과소평가한 것으로 예상되며, 이는 안전측으로 지지력을 예측한 것으로 평가할 수 있다.

양생기간에 따른 극한지지력을 그림 9에 도시하였다. 양생 기간에 따라서 극한지지력이 증가하는 경향이 뚜렷이 관찰된다. 시멘트 분체와 물-시멘트 슬러리를 비교하면 22~24%의 낮은 함수비에서는 시멘트 분체가 더

높은 강도를 보이며, 30% 근처의 높은 함수비에서는 물-시멘트 슬러리가 약간 더 높은 강도를 보이거나 큰 차이는 나타나지 않았다. 물-시멘트 슬러리는 낮은 함수비에서 오히려 균일한 교반이 되지 못하여 강도 발현을 충분히 하지 못하는 것으로 판단된다. 결과적으로 22~24%의 함수비에서 시멘트 분체를 사용한 경우가 최적의 방법이라고 할 수 있다.

5. 장비 주행성 평가

개량토는 매립지 표토층으로 활용하는 것을 주목적으로 하였으므로, 그 적용성은 이에 필요한 장비 주행성을 기준으로 분석하는 것이 적절하다. 건설장비 주행에 필요한 기준 강도 값은 표 6과 같이 콘 관입 저항력으로 장비에 따라 구분할 수 있다. 한편 콘 관입저항력은 아래 식 (2)과 같이 콘 계수 값에 의해 비배수 전단강도와 관계된다. 이때 콘 계수 값은 흙의 종류, 특히 과압밀비와 소성지수에 따라 다르게 나타나므로, 송도 지역의 경우 유사한 특성을 갖는 영종도에서 장인성 등(2001)이 평가한 16.3을 사용하였다. 이로부터 산정된 값을 표 6에 제시하였다.

시공의 경제성과 효율성을 감안하며 대형 도저 이상의 활용이 가능하도록 하는 것이 적절하다고 판단되며, 따라서 최소 60kPa의 비배수전단강도가 확보될 필요가 있다. 채취한 송도 지역 원지반의 경우 예비로 수행한 실내 배인 시험 결과 10kPa의 비배수 전단 강도를 가지며, 따라서 초습지 도저의 진입도 어려운 수준이다.

현장에서 양생된 시료의 일축압축시험에서 구해진

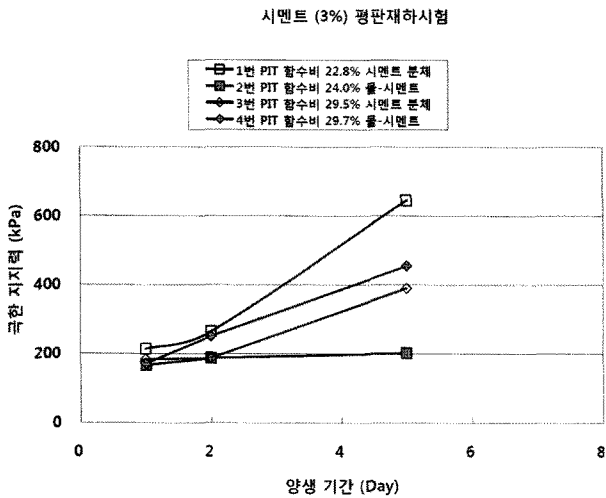


그림 10. 양생기간에 따른 극한지지력

표 6. 건설 장비 주행에 필요한 최소 콘 관입 저항력과 비배수 전단 강도, 지지력

장비의 종류	콘 관입 저항력 q_r (kg/cm ²)	비배수 전단 강도 c_u (kPa)	지지력 (kPa)
초습지 도저	2 이상	12 이상	62 이상
습지 도저 이상	3 이상	18 이상	93 이상
중형 도저(9~20ton)	5~7 이상	30~42 이상	154~216 이상
대형 도저(20~32ton)	7~10 이상	42~60 이상	216~308 이상
견인식 스크레이퍼	7~10 이상	42~60 이상	216~308 이상
자주식 스크레이퍼	10~13 이상	60~78 이상	308~400 이상
덤프 트럭	15 이상	90 이상	462 이상

표 7. 현장에서 채취한 일축압축시험의 비배수 전단 강도에 따른 주행 가능 건설장비

PIT	개량재/배합상태	함수비(%)	1 Day	2 Day	5 Day
1 번	시멘트/분체	22.8	덤프 트럭	덤프 트럭	덤프 트럭
2 번	시멘트/물-시멘트	24.0	중형 도저	대형 도저	스크레이퍼
3 번	시멘트/분체	29.5	중형 도저	덤프 트럭	덤프 트럭
4 번	시멘트/물-시멘트	30.0	대형 도저	대형 도저	스크레이퍼

표 8. 평판재하시험에서의 극한 지지력에 따른 주행 가능 건설장비

PIT	개량재/배합상태	함수비(%)	1 Day	2 Day	5 Day
1 번	시멘트/분체	22.8	중형도저	대형도저	덤프트럭
2 번	시멘트/물-시멘트	24.0	중형도저	중형도저	중형도저
3 번	시멘트/분체	29.5	중형도저	중형도저	스크레이퍼
4 번	시멘트/물-시멘트	30.0	중형도저	대형도저	스크레이퍼

비배수 전단강도 값을 표 6의 건설 장비 주행성 기준과 비교하여 표 7에 정리하였다. 모든 경우에 1일 이후부터 중형 도저 이상의 건설 장비 진입이 가능하며, 시멘트 분체가 사용된 경우에는 2일 이후부터 덤프 트럭의 주행이 가능한 강도가 확보 가능할 것으로 예상된다.

같은 방법으로 평판재하시험에서 구해진 지지력 값을 건설 장비 주행성 기준과 비교하여 각 조건에서 제작된 현장 개량토에 대한 주행 가능 장비를 표 8에 정리하였다. 그 결과, 1일 이후에 중형도저의 진입이 가능하며, 낮은 함수비에 시멘트 분체를 사용하였을 경우 5일 이후 덤프트럭 주행이 가능할 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 현장 개량이 장비 주행성을 크게 향상시킴을 확인하였다. 일축압축시험 결과로 평가한 장비주행성이 평판재하시험 결과로 평가한 것보다 더 높은 장비주행성 결과를 주지만 경향은 비슷하였다. 일축압축시험은 작은 시료에서 시험을 수행하기 때문에 현장 대표성이 비교적 떨어지며, 또한 일축압축 시료 채취를 위한 강관 관입 중의 추가적인 다짐 효과로 인해 강도가 높게 나타날 수 있다. 본 연구에서 수행한 평판재하 시험은 하중을 항복하중까지 재하하지 못하여 쌍곡선을 활용한 외삽법으로 극한 지지력을 산정하였다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 강도를 30% 이상 과소평가할 수 있으므로 강도 값에 대한 일축압축시험의 과대평가 및 평판재하시험의 과소평가가 위와 같은 차이를 유발한 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 저소성 송토 점성토의 최적 개량 조건 선정을 위하여 개량재의 종류와 혼합 비율, 함수비, 그리고 혼합 후 양생 기간 등의 개량 조건을 변화시키며 실내 일축압축시험을 수행하였다. 또한, 이를 바탕으로 현장에 개량된 PIT를 조성하여 평판재하시험을 수행하고 현장 일축압축시료를 채취하여 시험을 수행하였다. 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실내에서 양생된 시료를 사용한 일축 압축 시험 결과, 시멘트를 사용하는 경우가 생석회를 사용하는 경우보다 큰 전단 강도를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 시멘트의 경우 배합비가 5%인 개량토가 3%인 것보다 상당히 큰 발현강도를 나타낸 반면, 생석회는 배합비에 따른 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 시멘트와 생석회 모두 배합비에 상관없이 양생 기간에 따라 꾸준히 전단강도가 증가하였다. 또한, 함수비 25~30% 부근에서 가장 높은 전단강도를 보이고, 이 이상 함수비가 높아질 경우 전단강도가 약간 감소하였다. 특히, 함수비가 20% 이하일 경우 전단강도의 감소폭이 컸다.
- (2) 실내에서 시험된 결과를 바탕으로 가장 높은 강도를 나타내는 시료의 함수비 범위와 현장 약적토의 평균함수비, 개량재, 배합비 및 경제성을 고려하여 함수비 24, 29% 흙에 시멘트 3% 배합 조건을 현장에 적용하였다. 또한 분체를 바로 원지반에 혼합하는 방법 뿐 아니라, 현장 함수비 조절이 보다 용이하고 균질한 배합을 할 수 있을 것으로 예상되는 물-시멘트 슬러리 배합도 적용하였다.
- (3) 동일 조건으로 제작한 실내에서 양생된 시료와 현장에서 양생 후 채취한 시료에 대한 일축 압축 시험으로부터 유사한 결과를 얻었다. 이로부터 실내 양생 시험 결과와 현장 시험 결과 모두 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 현장 양생 후 채취한 시료의 일축 압축시험 결과, 모든 경우에 양생 기간에 따라서 강도가 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 물-시멘트 슬러리가 시멘트 분체보다 강도가 낮았다. 같은 배합 방법을 사용한 경우, 함수비가 낮은 23~24%의 경우가 29~30%의 경우보다 강도가 크게 나타난다.
- (4) 평판재하 시험 결과, 양생 기간에 따라서 강도가 증가하는 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 22~24%의 낮은 함수비에서는 분체 배합 지반이 큰 지지력을 가지며, 30% 근처의 함수비에서는 슬러리 배합

지반이 약간 더 큰 지지력을 갖는 것으로 나타났다. 특히 22~24% 시멘트 분체 배합 지반의 지지력이 가장 크게 나타났다.

- (5) 현장에서 양생된 시료의 일축압축시험에서 구해진 비배수 전단강도 값을 건설 장비 주행성 기준과 비교하면, 모든 경우에 1일 이후부터 중형 도저 이상의 건설 장비 진입이 가능하며, 시멘트 분체가 사용된 경우에는 2일 이후부터 덤프 트럭의 주행이 가능한 강도가 확보되는 것으로 분석되었다. 평판재하 시험에서 구해진 지지력 값으로 비교할 경우, 1일 이후에 중형도저의 진입이 가능하며, 낮은 함수비에 시멘트 분체를 사용하였을 경우 5일 이후 덤프 트럭 주행이 가능한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 송도 저소성 실트질 점성토의 매립 지반 표토층 활용 시 최적의 개량 조건으로는 시멘트를 이용하여 3% 중량 배합비와 현장 함수비 부근의 24±2%의 함수비에서 시멘트를 분체로 배합, 교반하는 것이 추천된다. 이 조건 하에서는 개량 1~2일 후 대형도저, 5일 후에는 덤프 트럭 급의 건설 장비 주행이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설) 사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 김완성, 강예목, 조성섭(1980), “석회혼합토의 압축강도에 관한 연구”, *한국농공학회지*, 제14권, 제4호.
2. 남정만, 윤중만 (2004), “준설매립된 해양점성토에서 시멘트계 고화재를 이용한 표층개량”, *한국해양공학회지*, 제 18권, 제4호, pp.46-51.
3. 동아건설턴트 (2005) Primary Subsurface Investigation on “Block 35 Retail”, 지반조사 보고서.
4. 장인성, 이선재, 정충기, 김명모 (2001), “국내 점성토 지반의 피에조콘 계수”, *한국지반공학회논문집*, 제17권, 6호, pp.15-24.
5. 정성준, 이상인, 전종우, 김명모 (2009), “외삽법을 이용한 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 극한하중 예측”, *대한토목학회논문집*, 제 29권, 제4호, pp.145-151.
6. 조성정 (1980), “석회혼합토의 강도특성에 관한 연구”, *한국농공학회지*, 제22권, 제3호.
7. 천병식, 고경환, 김진춘 (2002), “초연약 해성점토의 표층고화처리를 위한 최적배합에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제18권, 제4호, pp.33-43.
8. Pailkowsky, S.G. and Tolosko, T.A. (1999), Extrapolation of Pile Capacity from non-failed load test, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-170, Washington, D.C.

(접수일자 2010. 7. 28, 심사완료일 2011. 4. 14)