

저배합 흙-시멘트의 역학적 특성

Mechanical Properties of Soil-Cement with Mixed Low

공길용¹⁾, Kil-Yong Kong, 이득원²⁾, Deuk-Won, Lee, 전상옥³⁾, Sang-Ok Jeon, 김석열⁴⁾, Seog-Yeol, Kim

¹⁾³⁾농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원, Senior Researcher, Rural Research Institute, KARICO

²⁾⁴⁾농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Chief Researcher, Rural Research Institute, KARICO

SYNOPSIS : In order to expand agricultural lands in the western and southern coasts of Korean Peninsula, coarse soils excavated from hillsides have been used as fill materials for reclamation. In order to tackle with the problems and to confirm availability, research on soil improvement involve mixing cement to the fine wet soils.

Required undrained shear strength(c_u) for fill material was analyzed to be $0.34 \sim 1.2 \text{ kg/cm}^2$. It has been known that when cement is added to high water content marine clay, its unconfined compression strength increased to 2 kg/cm^2 . Consolidation results show that pre-consolidation pressure increased to 1.8 kg/cm^2 and 3.4 kg/cm^2 with the addition of 3% and 5% of cement respectively. This result shows that low-height embankments could be constructed without significant compression.

Since the effectiveness of improvement may be different site by site, the mix design for each site is necessary in order to optimize it. The process is first to determine aimed shear strength and then optimum mix ratio of cement after carrying out a series of tests.

Key words : Mixed low, Fill material, Fine soils, Shear strength, Compressibility, Soil-cement

1. 서론

우리나라 서남해안 간척지에서 농경지조성을 위한 도로, 방수제, 용배수로 등의 성토공사에 필요한 재료는 현재 육상토취장을 개발하여 사용하고 있으나, 토취장개발에 따른 환경파괴 문제와 산업화에 따른 건설사업의 번창과 더불어 육상 토취장의 개발이 점점 어려워지고 있다.

시멘트계 제품에 의한 개량은 그 효과는 크지만, 지금까지의 연구는 주로 고강도, 고내구성에 초점을 맞추어 배합비를 결정하였으며, Brom(1984), Balasubramanian(1988) 등은 시멘트를 건조단위중량의 6~25% 이상, 생석회는 10~30%를 혼합하여 해안개발이나 연약지반처리, 구조물 기초처리 등에 활용하는 방안에 대하여 연구하였다.

지금까지 연구되어 왔던 배합비로 처리된 흙은 일반적인 제체 성토재료로 이용하기에는 경제성이 없으며, 이를 해결하기 위하여 성토단면에 필요한 개량효과만을 얻을 수 있는 경제적인 저배합비에 대한 연구가 필요하다.

그러나 이들 연약지반토는 현장함수비가 높고, 전단강도가 작으며, 압축성이 크기 때문에 성토재료로 쉽게 활용되지 못하고 있다. 그러므로 성토재료로 이용하기 위하여 현장함수비를 크게 낮추거나 성토재

료로서의 특성을 개량 또는 보강하는 공법의 개발이 필요하다.

Soil-cement 공법은 농어촌 용배수시설 또는 사면의 붕괴가 용이한 지역에 적용하고 있을 뿐 아니라 최근에는 연약지반 처리공법에 광범위하게 적용되고 있다. 그러나 이와 같은 흙시멘트 처리공법의 적용에 있어 간척지토를 성토재료로 활용하는 연구는 거의 이루어져 있지 않아 일선에서는 실제 적용을 꺼려하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 간척지 연약지반토를 대상으로 저배합비(5% 이하) 조건으로 함수비와 시멘트의 첨가량을 정량적으로 변화시킨 공시체에 대하여 실내시험을 통하여 개량토의 강도특성변화를 고찰하였다. 성토시 시멘트혼합처리에 의한 압축특성의 변화를 보기 위하여 표준압밀시험을 수행하였다. 또한 혼합 후 지연다짐에 따른 다짐밀도의 증가와 일축압축강도특성 변화를 확인하기 위하여 시간별로 다짐하여 일축압축시험 및 압밀시험을 하였으며, 궁극적으로 성토재료로 사용하기 위한 저장도(0.5~2kg/cm²)만을 얻기 위한 저배합비의 흙-시멘트의 역학특성을 규명하는데 본 연구의 목적을 두었다.

2. 흙시료의 특성 및 시험방법

2.1 흙시료의 물리적 특성

본 시험에 사용한 흙은 자연함수비 51%의 충남 태안 이원지구 간척지 해성점토(CH)를 사용하였으며, 흙의 물리성은 표 1과 같다.

표 1. 사용시료의 물리적 특성

지구명	시료종류	입도분포(%)				LL(%)	PI	자연함수비(%)	통일분류(USCS)
		자갈	모래	실트	점토				
태안	해성점토	0	3.2	65.8	31	52.1	27.5	51.0	CH

2.2 흙-시멘트 혼합 및 양생

사용시료에 시멘트 첨가량을 건중량 대비 1, 2, 3, 5%로 변화시키면서 혼합하였으며, 이 혼합토를 직경 3.5cm, 높이 7cm의 원통형 몰드에 단위중량이 균일하도록 공시체를 3개씩 제작하였다. 혼합후 10~20분 내에 제작이 완료되도록 하였으며, 3, 7, 28일 양생 후 일축압축강도시험을 하였다. 이때 양생실의 온도는 21±2℃, 상대습도는 95% 이상으로 유지되도록 하였으며, 모든 공시체는 24시간 수침시킨 후에 시험하였다.

삼축압축시험은 저배합비의 흙시멘트(무처리, 2%, 3%, 5%)에 대해 압밀비배수조건(CU)으로 시험을 하였으며¹⁰⁾ 압밀특성의 변화를 알기 위하여 흙의 건중량비 1, 2, 3, 5%를 첨가혼합하여 6일간 양생후 1일간 수침시킨 공시체에 대하여 표준압밀시험을 실시하였다. 삼축압축시험의 무처리토는 현장 관입시험시 채취한 불교란시료로 수행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 성토사면 안정해석

연약지반 또는 경지반 위에 연약지반토로 성토할 때 사면활동 파괴를 일으키지 않는 성토재료의 소요 전단강도를 결정하기 위하여 그림 1과 같이 기초지반의 연약심도 10m, 단위중량 $\gamma_a=1.75\text{g/cm}^3$, 비배수전단강도를 ① $c_u=0.08+0.02d$, ② $c_u=0.3$, ③ $c_u=0.5\text{kg/cm}^2$ 의 3가지 기초지반조건에 대하여 성토고 2, 4, 6, 8 및 10m로 하여 성토재의 비배수 전단강도별 사면안정해석을 실시하였다. 사면안정해석은 기술전산프로그램 SLOPE-W를 이용하여 전응력해석방법으로 실시하였다.

사면안정해석결과 그림 1과 같이 연약지반위에 성토하는 경우 매우 큰 성토재료의 전단강도가 요구되며, 기초지반이 경지반인 경우 낮은 전단강도의 성토재료로도 높은 성토고까지 성토할 수 있는 것으로 분석되었다.

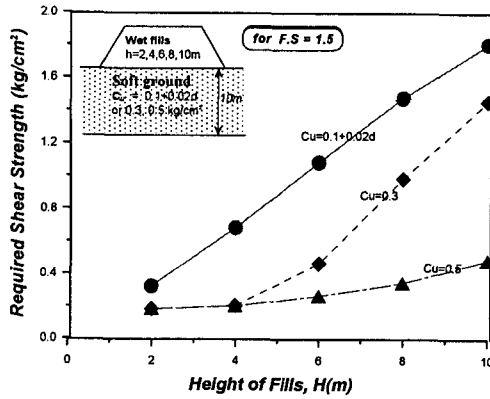


그림 1. 성토재료의 소요 전단강도

연약지반위에 성토할 때 성토고별 성토재료의 소요강도는 표 2에서 보는 바와 같이 기초지반이 연약지반일 경우($c_u=0.1+0.02d$ kg/cm²) 2m 이하의 낮은 성토고에서는 비배수전단강도 $c_u=0.16$ kg/cm² 정도면 성토가 가능하지만, 성토고가 증가하면 소요 전단강도도 증가하여 성토고 10m의 경우 $c_u=1.2$ kg/cm² 정도의 강도가 필요한 것으로 해석되었다.

표 2. 기초지반조건에 따른 성토재의 소요 전단강도

비배수전단강도 c_u (kg/cm ²)	성토고(m)					
	안전율	2	4	6	8	10
0.1+0.02d	1.2	0.16	0.4	0.67	0.92	1.2
	1.5	0.32	0.68	1.08	1.47	1.8
0.3	1.2	0.13	0.15	0.25	0.51	0.81
	1.5	0.18	0.2	0.46	0.98	1.45
0.5	1.2	0.13	0.15	0.19	0.26	0.34
	1.5	0.18	0.2	0.26	0.34	0.48

그러나 기초지반이 경지반($c_u=0.5$ kg/cm²) 일 때, 성토고가 낮은 경우 연약지반에서와 같이 비배수전단강도 $c_u=0.16$ kg/cm²의 성토재료가 필요하지만, 성토고가 증가하면 소요 전단강도의 증가폭이 연약지반보다는 현저히 적어, 성토고 10m의 경우 $c_u=0.34$ kg/cm² 정도의 강도이면 성토가 가능한 것으로 해석되었다.

이는 기초지반이 연약하면 기초지반을 통하여 활동과파괴가 발생되기 때문에 성토재가 발휘하여야 하는 전단강도는 연약지반의 강도가 적을수록 상대적으로 크게 요구된다는 것을 의미한다.

3.2 일축압축강도시험

3.2.1 흙시멘트의 응력-변형특성

고함수비 해성점토에 보통 시멘트를 혼합처리하면 그림 2와 같이 시멘트함량이 높을수록 일축압축강도가 증가하고 파괴시의 변위도 적어지는 특성을 보이고 있다.

보통 고함수비 흙의 응력-변형곡선은 뚜렷한 파괴점이 형성되지 않고 변형을 15~20%까지 응력이 증가하거나 같은 값을 보이지만 흙시멘트의 응력-변형곡선은 2% 내외의 변위에서 파괴되어 최대강도를 보이고 있다.

파괴점의 변위는 시멘트함량이 증가할수록 적어지는 경향으로 시멘트 함량이 증가할수록 흙은 단단한(stiff) 특성을 보이고 있으며 분명한 파괴점을 보이고 있다.

3.2.2 양생일수와 일축압축강도

양생일수별 일축압축강도를 보면 그림 3과 같이 양생일수가 경과할수록 증가하는 특성을 보이고 있다. 일반 콘크리트와 같이 양생일수 초기에는 강도증가 속도가 매우 크지만 시간이 경과하면서 증가속도가 감소하는 특성을 보이고 있다.

본 연구의 실내시험에서 함수비 51%의 해성점토에 대한 시험결과 양생일수 7일의 압축강도가 28일 양생일수의 압축강도에 약 60% 정도로 초기강도발현이 크고 후기 강도발현은 매우 느린 증가속도를 보이고 있다.

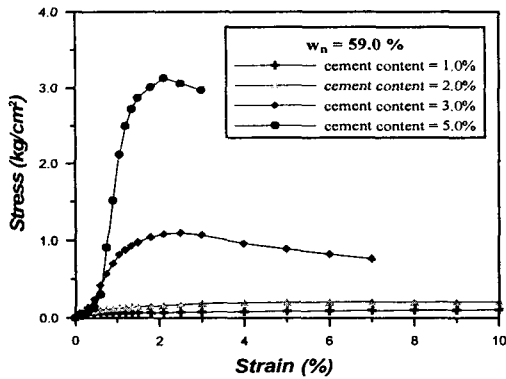


그림 2. 흙-시멘트의 응력-변형곡선(σ_1)

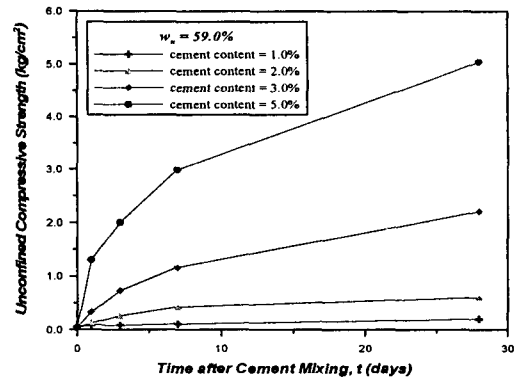


그림 3. 재령에 따른 일축압축강도

3.2.3 시멘트 혼합비, 함수비별 일축압축강도

고함수비 해성점토에 보통 시멘트를 혼합처리한 처리토의 함수비 변화에 따른 일축압축강도는 그림 4와 같이 함수비가 줄어들수록, 시멘트 함량이 증가할수록 강도가 증가하는 특성을 보이고 있다.

시멘트 함량에 따른 강도증가량을 보면 무처리 고함수비 해성점토의 일축압축강도는 함수비 51%의 경우 $q_u=0.04\text{kg/cm}^2$ 으로 거의 강도가 없지만, 3% 시멘트 혼합시 $q_u=1\text{kg/cm}^2$, 5%시멘트 혼합시 $q_u=3.0\text{kg/cm}^2$ 으로 매우 큰 증가를 보이고 있다. 이 강도는 성토재료의 소요강도 $q_u=0.5\sim 1.4\text{kg/cm}^2$ 에 비교하면 충분히 큰 강도이다. 함수비 변화에 따른 강도특성은 함수비가 줄어들수록 강도발현효과가 현저하게 나타나고 있으며, 함수비 29%에서는 낮은 배합비에서도 강도가 크게 증가하는 특성을 보이고 있다.

각 조건별 강도증가특성을 보면, 고함수비 흙에서는 적은 배합비(흙진중량비 2%)에서는 전혀 강도증가효과가 없으나, 강도증가효과를 나타내기 시작하는 배합비에서는 시멘트 첨가량에 거의 직선적으로 비례하여 일축압축강도가 증가하는 특성을 보이고 있다.

3.3 삼축압축(CU)시험결과

응력경로를 보면 그림 5와 같이 무처리 흙은 정규압밀 점토의 전형적인 특성을 보이지만 시멘트 혼합처리토는 조립토 또는 과압밀된 흙의 특성을 보여주고 있다. 응력경로의 k_r 라인의 경사 θ 는 무처리토가 29° 이나 시멘트 함량이 증가할수록 증가하여 시멘트 5%일 때 43° 로 크게 증가하는데 이는 같은 구속압조건일 때 훨씬 큰 전단강도를 갖는다는 것을 의미한다. Mohr-Coulomb곡선을 보면, 그림 6과 같이 무처리 흙은 정규압밀 점토의 전형적인 특성을 보이지만 시멘트 혼합처리토는 낮은 구속압력($\sigma_3=1\sim 1.3\text{kg/cm}^2$ 이하)조건에서 조립토 또는 과압밀된 흙의 특성을 보여주고 있다. 파괴포락선의 내부마찰각을 보면 전응력개념의 θ 는 무처리토가 $\phi=22^\circ$, 시멘트 함량이 증가할수록 증가하여 시멘트 5%일 때 $\phi=31^\circ$ 로 크게 증가되며, 유효응력개념의 ϕ' 은 무처리토가 $\phi'=34^\circ$, 시멘트 함량이 증가할수록 증가하여 시멘트 5%일 때 $\phi'=65^\circ$ 로 크게 증가함을 보여주고 있다.

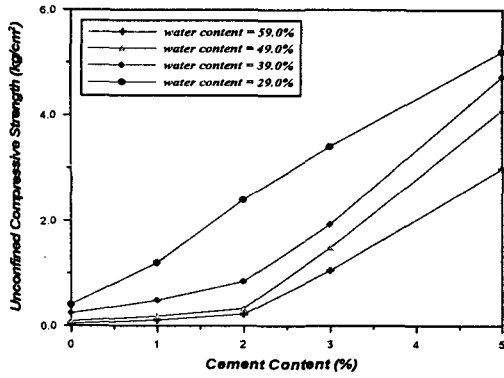


그림 4. 함수비에 따른 일축압축강도

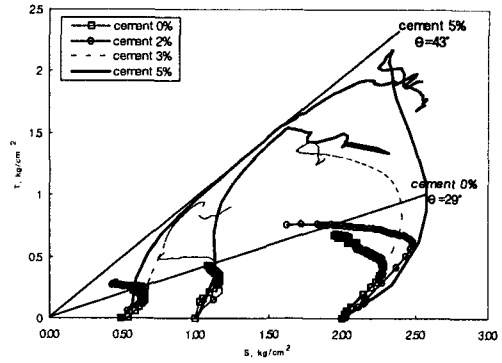
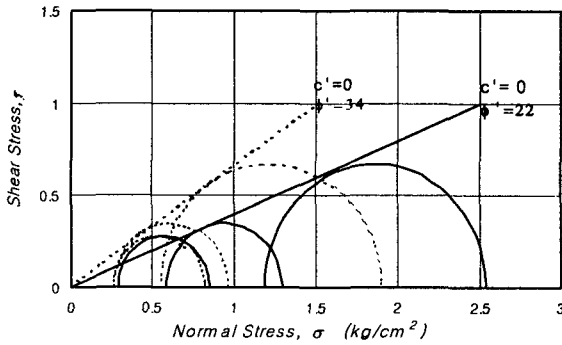
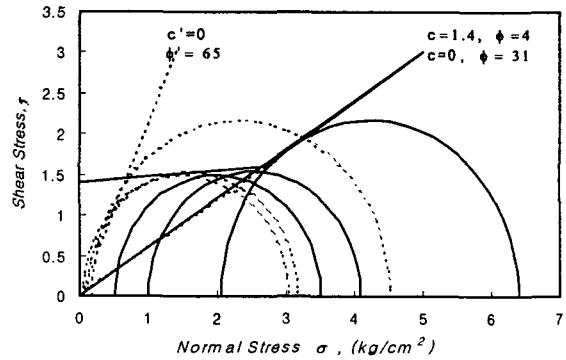


그림 5. 흙-시멘트의 삼축압축시험결과



a) cement 0%



b) cement 5%

그림 6. 흙-시멘트의 삼축압축시험결과

3.4 압밀시험결과

압밀시험결과 압축특성은 그림 7과 같이 시멘트함량이 적은 흙은 압축성이 크고 시멘트함량이 증가할수록 압축성이 적어지는 특성을 보이고 있다. 그러나 정규압밀영역의 압축지수 C_c 는 반대로 시멘트함량이 적은 흙은 작고 시멘트함량이 증가할수록 커지는 경향을 보이고 있다.

그 이유는 시멘트 혼합처리된 흙은 고형화(cementation)에 의해 선행압밀하중이 크게 증가하여 이 하중 이하의 상재하중에서는 침하가 거의 발생되지 않지만 이 값 이상에서는 즉 고형화를 파괴시키는 큰 하중에서는 같은 하중증가량에서 더 큰 침하가 발생된다는 것을 보여주고 있다.

그러므로 연약지반토를 시멘트 혼합처리로 개량하여 높은 성토를 할 경우는 개량토의 선행압밀하중이 성토고의 상재하중보다 큰 조건이 되도록 배합비를 결정할 필요가 있다.

여기서 더욱 중요한 것은 흙시멘트에서 흙의 선행압밀하중보다 큰 상재하중을 받아 고형화가 파괴된 후의 전단강도는 크게 감소하는 특성이 있다.

시멘트 처리토의 압밀계수 c_v 의 변화를 보면 그림 7. b)와 같이 시멘트 1%처리토의 압밀계수는 무처리토의 교란조건에서의 압밀계수와 거의 같은 값을 보이지만 시멘트 함량이 증가하면 압밀압력-압밀계수 관계가 불교란 해성점토와 같은 경향을 갖으며 시멘트함량이 많을수록 압밀계수가 증가하는 특성을 보인다.

이 압밀계수의 증가는 투수계수가 약간 커지는 효과도 있지만, 시멘트 함량이 많은 흙시멘트의 압축지수가 더 적기 때문에 c_v 의 값이 크게 계산되는 것이다. 결국 압밀계수가 크기 때문에 압밀침하시간은 시멘트함량이 많을수록 빨리 완료된다는 것을 알 수 있다.

즉 시멘트 혼합처리한 흙은 압축성도 작고 압밀침하시간도 빠르기 때문에 압밀문제에 대하여 매우 좋은 효과가 있음을 알 수 있다.

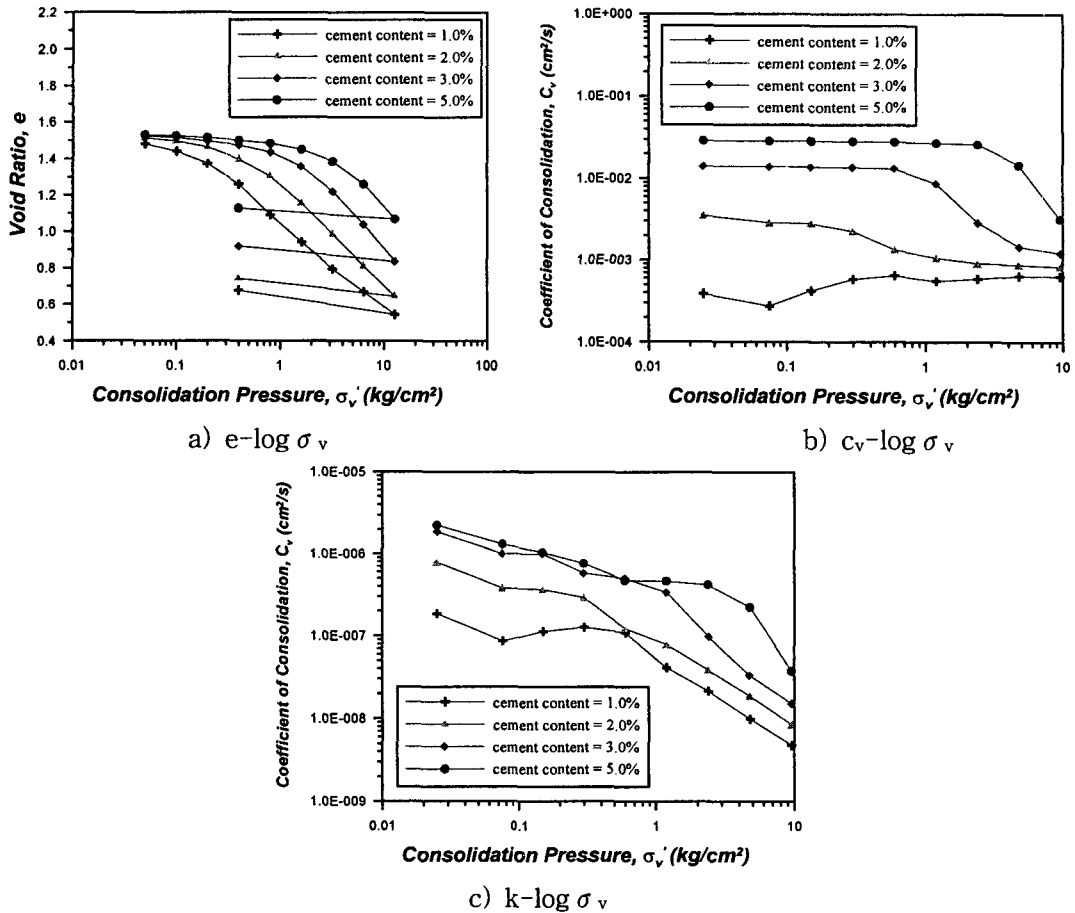


그림 7. 흙-시멘트의 압밀시험 결과

3.5 지연다짐특성

3.5.1 시험목적 및 방법

흙-시멘트의 다짐은 매우 중요한 요소이다. 고풍수비의 흙에 시멘트를 혼합처리하는 조건에서는 흙의 공극이 크기 때문에 경량성토의 효과도 있지만 혼합 후 적절한 시간 안에 흙의 함수비가 대기건조에 의해 감소된 시점에 다짐을 하여 더 높은 밀도로 성토체를 형성하면 압축성과 전단강도면에서 매우 효과적인 공사를 할 수 있다.

본 연구에서는 혼합 후 지연다짐에 따른 다짐밀도의 증가와 일축압축강도특성 및 압밀특성의 변화를 확인하기 위하여 시멘트를 혼합처리한 후 대기건조시키면서 0~144시간 후에 다짐을 하여 일축압축시험 및 압밀시험을 실시하였다.

3.5.2 일축압축강도 변화특성

지연다짐에 의해 다짐밀도는 증가하지만 일축압축시험결과를 보면 그림. 8과 같이 시멘트혼합 직후 다짐을 한 조건의 압축강도가 가장 크고 다짐시간이 늦을수록 강도가 감소하는 뚜렷한 경향을 보이고 있다.

이는 초기응결이후 고형화가 진행된 후 다짐을 하면 고형화가 파괴되어 오히려 강도가 떨어지는 것은 당연한 결과라고 판단된다. 그러나 시멘트 함량(2%이하)이 적은 조건은 지연다짐이 오히려 더 큰 강도를 나타내었는데, 이는 시멘트 함량이 흙의 전 표면에 고르게 분포되어 흙 입자를 응집시켜 줄 수 없는 적은 량에서는 흙의 함수비가 감소하여 증가되는 강도증가효과보다 고형화에 의한 강도증가효과가 적다는 것을 보여주고 있다.

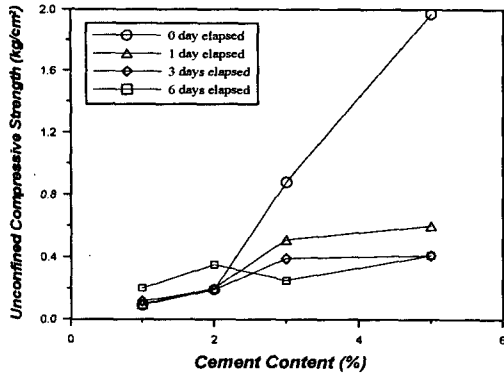


그림 8. 다짐지연시간에 따른 일축압축강도의 변화

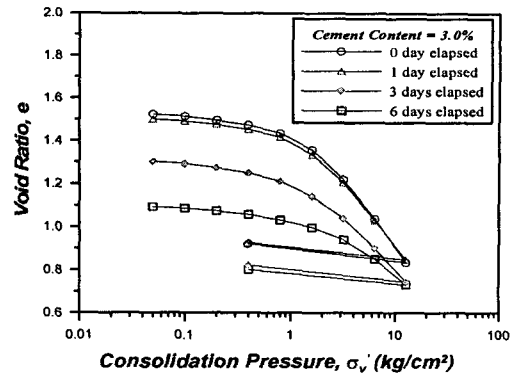


그림 9. 다짐지연시간에 따른 압밀특성

3.5.3 압밀특성 변화

시멘트 혼합처리 후 지연다짐에 따른 압밀특성의 변화를 보면 그림 9와 같이 수화작용과 대기건조에 의해 더 큰 밀도로 다짐을 할 수 있는 다짐시간이 늦을수록 압축성이 감소하는 뚜렷한 경향을 보여주고 있다.

이 효과는 시멘트 함량이 많을수록 더 큰 효과를 보이고 있다. 압밀특성 만을 본다면 혼합후 대기방치시 함수비가 감소하여 다짐밀도를 높일 수 있다면 지연다짐을 할 필요가 있음을 알 수 있다.

3.5.4 지연다짐의 필요성

흙시멘트의 지연다짐은 흙의 일축압축강도가 크게 감소하므로 가능한 초결직후 이전에 펴고르기와 다짐을 완료하는 것이 꼭 필요하다. 그러나 고성토단면에서 압축성이 문제가 되는 경우 지연다짐을 할 필요성이 있는 경우가 있을 수 있지만, 이경우도 시멘트함량을 크게하여 선행압밀하중을 더 크게 조정하는 것이 더 확실한 방법이므로 지연다짐을 하여서는 않된다는 결론을 얻었다.

4. 결론

고함수비 연약지반토에 시멘트를 혼합처리하여 성토재료로서 사용 가능성을 확인하기 위하여, 간척지 흙에 대한 시멘트 혼합처리후 일축압축시험과 삼축압축시험을 실시하여 처리토의 전단강도 개량효과를 확인하였으며, 압밀시험을 통하여 압축성의 개량효과를 확인하였다. 또한 지연다짐의 효과를 알아보기 위하여 배합 후 일정기간이 지난 후 다짐을 실시한 공시체에 대하여 일축압축강도 및 압밀시험을 실시한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기초지반의 상태에 따라 성토재의 요구강도가 달라지며, 기초지반이 연약하면 성토재가 발휘하여야 하는 전단강도는 커야한다.
- 2) 시멘트 혼합처리토의 전단강도 개량효과는 일축압축강도 0.04kg/cm^2 , 함수비 51%의 고함수비 해성 점토에 시멘트 3%첨가시 7일 습윤양생후 일축압축강도가 $q_u=2\text{kg/cm}^2$ 으로 크게 증가하여 성토재료로 충분히 사용할 수 있는 결과를 얻었다.
- 3) 시멘트 처리토의 7일 양생 후 강도는 28일 강도의 약 60%이상이 되고, 낮은 성토고에서는 성토단면의 완성이 7일 정도에 완료된다고 보면 7일 강도를 양생 기준일로 보는 것이 실용적이라고 판단된다.
- 4) 삼축압축시험결과 무처리흙은 정규압밀점토의 전형적인 특성을 보이지만, 시멘트혼합 처리토는 조립토 또는 과입밀토흙의 특성을 보여주고 있다.
- 5) 함수비 51%의 고함수비 연약지반토에 시멘트를 혼합처리하여 7일 양생후 압밀시험결과 시멘트 함량에 따라 선행압밀압력이 크게 증가하여 낮은 성토고 조건에서는 압축성이 거의 없는 흙으로 개량되는 결과를 얻었으며, 시멘트 혼합처리한 흙은 압축성도 적고 압밀침하시간도 빨라지기 때문에 압밀문제에 대하여 매우 좋은 효과가 있음을 알 수 있다.

- 6) 시멘트 혼합처리 후 고형화가 진행된 후에 다짐을 하면 압축성이 감소하는 특성을 나타내고 있으나, 다짐시 고형화가 파괴되어 강도가 크게 감소하므로 가능한 혼합직후에 바로 다짐을 하여야 한다는 결론을 얻었다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 농림부 국고 연구과제 연구비지원에 의해 수행된 결과의 일부로 당 기관에 감사를 드립니다

참고문헌

1. 공길용(1997), "시멘트계 고화재를 이용한 농로의 보조기층 안정처리 공법", 건국대학교 박사학위논문
2. 농이춘진흥공사(1995), "연약점토지반의 표층처리 및 보강공법 실용화연구"
3. 정성모, 도덕현(1985), "석고플라스터 혼합토의 공학적 특성", 한국농공학회지, 27(4), PP.53-60.
4. 한국건설기술연구원, 1988, 연약지반 천층안정처리연구
5. 上 俊二(1993), "セメント系固化材によるカオリン粘土安定処理土の壓密,せん断特性", 第28回土質工學研究發表會, pp.2549-2550
6. 石田 宏(1991), "生石灰 スラグによる高含水比火山灰質粘性土の凍上防止", 土と基礎, 39(8), pp. 5-10
7. 松尾新一郎(1984), "石灰安定處理における添加材量と處理土の強度", 土と基礎, 32(5), pp. 5-9
8. 日本セメント協會(1994), "セメント系固化材による地盤改良マニュアル"
9. Broms, B.B.(1984), "Stabilization of soft clay with lime columns", *Proc. Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground*, Nanyang Technological Institute, Singapore
10. D. T. Bergado, L. R. Anderson, N. Miura and A. S. Balasubramaniam(1996), "Soft Ground Improvement", *ASCE*, pp.234-269
11. Miura, N., Koga, Y., and Nishida, K.(1986), "Application of a deep mixing method with quicklime for the Ariake clay ground", *J. of Japan Soc. Soil Mech. and Found. Eng.*, 34(4), pp. 5-11.