

제지회계 지반개량제로 처리된 연약점토의 물리적 특성

Physical Characteristics of Soft Clay Improved by PFA Stabilization Agent

김광빈¹⁾, Kwang-Bin Kim, 이용안²⁾, Yong-An Lee, 김유성³⁾, You-Seong Kim

¹⁾ 전북대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

²⁾ 전북대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

³⁾ 전북대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

SYNOPSIS : PFA(Paper Fly Ash) are reclaimed mainly or used in cement industry field as mixture agent in terms of materials recycling. Recently, research for recycling PFA as embankment materials or soil stabilization agent are undergoing in geotechnical engineering field. In this study, physical characteristics of PFA stabilization agent-soil admixtures are examined in change of water content, void ratio, consistency, grain distribution, specific gravity and density. Furthermore, the physical characteristics are compared with unconfined strength as engineering characteristics. Test results showed that unconfined strength and density are increased with increasing of PFA stabilization agent mixed ratio. On the other hand, specific gravity, void ratio and water content are decreased with increasing of PFA stabilization agent mixed ratio. It would be concluded that natural high water content ratio weak soil could be highly improved engineering and physical characteristics with PFA stabilization agent

Key words : Paper fly ash(PFA), admixture, physical characteristics, stabilization agent.

1. 서 론

제지폐기물 중 PFA(Paper Fly Ash ; 제지회)는 대부분 매립처분 또는 폐기물 재활용 측면에서 시멘트, 콘크리트 산업에서 혼화제로 사용되고 있다. 제지회는 그 특성상 수화열의 감소, 건조수축감소, 알칼리 골재반응의 억제, Workability 개선 등에 탁월한 효과를 발휘하여 폐기물 재활용 면에서 시멘트, 콘크리트 산업에 주로 활용되고 있고, 최근 지반공학분야에서도 지반개량시 개량재로서의 제지회 활용에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 제지회계 혼합토의 지반공학적 개량효과를 나타내는 중요한 요소인 물리적 특성 변화를 분석하여 공학적 특성의 변화를 검토하였고, 또한 일축압축강도시험을 실시하여 강도증가 경향의 검토를 통하여 혼합토의 연경도와 강도와의 관계를 분석하였다. 이를 위해 모든 시험은 함수비, 혼합비에 따라 7일 양생 후 기본물성시험과 일축압축시험을 수행하였으며, 그 결과를 통해 제지회를 사용하여 연약점토의 안정처리를 위한 개량재로서의 활용성을 규명하는데 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 제지회계 지반개량재와 대상토의 물리적 특성

2.1 제지회계 지반개량재의 구성성분

본 연구에서의 제지회계 지반개량재는 강도발현을 목적으로 하여 플라이애쉬에 2차 첨가재로써 시멘트와 소량의 무기질 성분을 첨가함으로써 양호한 포졸란 반응성과 함께, 양호한 강도발현과 내구성의 증대를 모색하였다. 표 1에 나타난 화학적 성분 비율은 시멘트의 첨가에 따라 CaO의 양이 증가되어 플라이애쉬 자체보다 강도발현에 유리할 것으로 나타나고 있다. 무기질 성분은 에트링자이트(ettringite)라고 하는 수화물을 생성하는데 도움이 되는 것으로, 즉 인공적인 SO₃ 성분으로, 유기질을 함유한 토질에서도 반응특성이 우수하고 침상결정으로서 혼합토의 간극을 보충하도록 결정화가 이루어진다. 인위적으로 첨가한 두 가지의 무기질 성분은 모두 흙과의 반응성 향상을 위한 소량 첨가제이다.

표 1. 제지회와 제지회계 지반개량재의 화학적 구성성분 (%)

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Ig-Loss
제지회	37.06	19.67	0.58	26.23	12.42	-	1.38	0.18	1.22	1.26
E20	31.13	17.06	1.01	33.26	9.05	4.52	1.21	0.58	1.39	0.79

2.2 개량 대상토의 물리적 특성

연약지반을 개량하는데 있어서, 함수비의 영향은 개량효과를 결정하는 중요한 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 고함수비 상태인 세립질의 해성점토를 광양만 준설매립지역에서 채취하였으며, 대상토의 자연함수비는 73%~118% 정도로 전단강도를 거의 기대할 수 없는 상태이며, 채취장소에 따라 함수비의 차이를 나타내고 있으나, 물리적 성질이 거의 같은 것으로 분석되어 대상토의 기본 물성시험을 다수 실시하여 그 평균치를 표 2에 나타내었고, 그림 1과 그림 2에 개량 대상토의 입도분포와 액성한계 시험결과를 나타내었다.

표 2. 대상토의 기본시험 결과

G _s	D ₅₀ (mm)	Clay fraction(%)	Silt fraction(%)	Sand fraction(%)
2.675	0.03	40	58	2
w _n (%)	Liquid Limit(%)	Plastic Limit(%)	Plastic Index, PI	USCS
89.65	37.66	23.87	13.79	CL

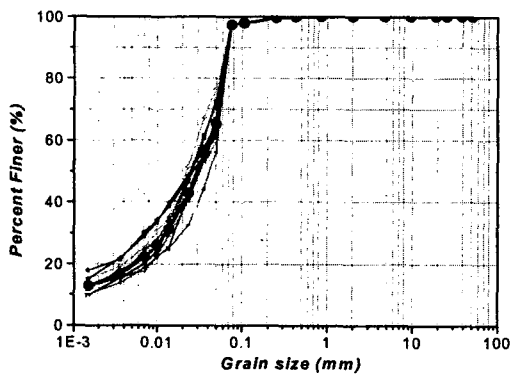


그림 1. 개량 대상토의 입도분포 곡선

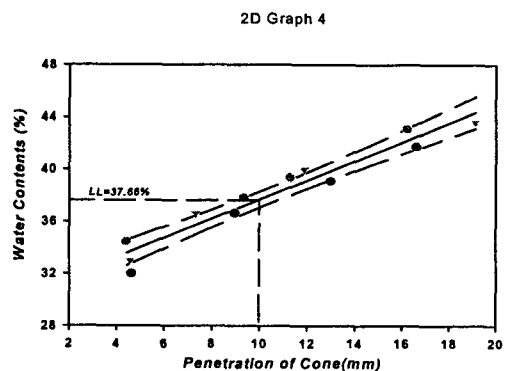


그림 2. 개량 대상토의 액성한계 시험 결과

3. 제지회계 지반개량재 혼합토의 물리적 특성

자연상태의 함수비 변화를 고려하여 함수비를 60%, 80%, 100%, 120% 상태로 각각 만든 후 이들 함수비에 따른 원토에 제지회계 지반개량재를 7%, 9%, 12% 혼합하고 혼합믹서를 사용하여 2분간 균일하게 혼합한 후 5×10cm 강제몰드에 간극이 없이 잘 다져 넣어 시료를 성형한 후 평균 23℃의 항온양생 장치에서 7일 동안 각각 습윤양생을 실시한 후 각 조건별로 실내시험을 수행하였다.

3.1 혼합토의 물리적 특성 변화

3.1.1 함수비 변화

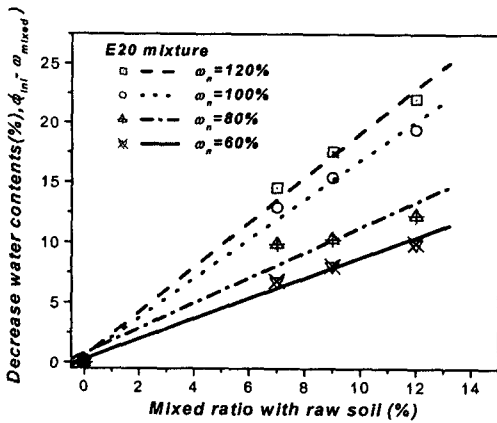


그림 3. 원지반 함수비에 따른 혼합토의 함수비 감소효과

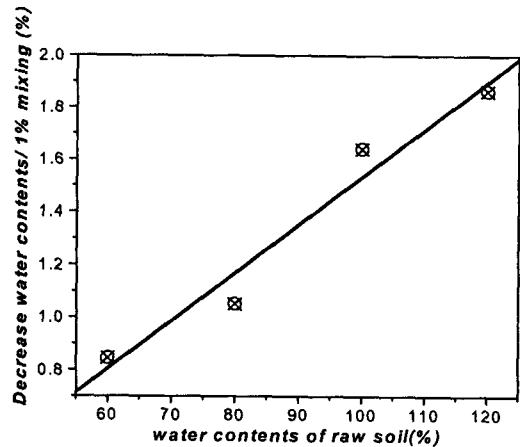


그림 4. 원지반토의 함수비별 지반개량재 1% 혼합에 따른 혼합토의 함수비 감소효과

혼합토의 초기 함수비 감소는 지반개량재 첨가에 의한 물리적인 함수비 감소와 흡수의 간극수(H_2O)와 고화재의 생석회 성분(CaO)이 수화반응에 의하여 간극수를 소화하면서 소석회($Ca(OH)_2$)를 생성하는 소화작용에 따른 함수비 감소로 이루어진다. 따라서 원지반토의 물리적 함수비 저감효과를 포함한, 제지회계 고화재의 성능(주로 화학적 성분)에 의한 함수비 감소효과를 검토하였다. 그림 3은 제지회계 지반개량재 혼합토의 초기 함수비 감소를 나타내고 있다. 지반개량재의 혼합비가 증가함에 따라서 함수비는 감소되고 있으며, 원지반의 함수비가 클수록 지반개량재 혼합에 의한 함수비 감소효과가 더 크게 나타나고 있다. 이와 같은 결과로서 함수비가 높을수록 수화반응이 유리한 환경으로 조성되는 것으로 판단된다. 제지회계 지반개량재 혼합에 따른 함수비 감소효과는 그림 3으로부터 식 (1)로 나타낼 수 있다. 그림 4는 식 (1)을 나타낸 것이며, 그림 4에서 지반개량재 1% 혼합량에 따른 함수비 감소량은 다음 (2) 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \omega_n = 60\% & ; \omega_m = 0.845 \cdot M \\
 \omega_n = 80\% & ; \omega_m = 1.051 \cdot M \\
 \omega_n = 100\% & ; \omega_m = 1.640 \cdot M \\
 \omega_n = 120\% & ; \omega_m = 1.863 \cdot M
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{혼합비} 1\% ; \omega_d = 0.0182 \cdot \omega_n \tag{2}$$

식에서 ω_n : 자연함수비, ω_m : 감소함수비, M : 혼합비, ω_d : 혼합비 1%시의 감소함수비를 나타낸다.

3.1.2 연경도 변화

점성토의 콘시스턴시(consistency)는 강도특성과 매우 밀접한 연관성을 가지고 있다. 액성한계는 흙이 소성상태에서 액체상태로 변하는 한계의 함수비로써, 일반적으로 다량의 수분을 포함한 흙이 액상체로서 최소의 전단강도를 나타내는 상태일 때의 함수비를 말한다. 한편, 소성한계는 액성한계시의 전단강도에 비해 100배 정도의 전단강도를 나타낼 때의 함수비를 의미한다. 소성지수(PI)는 $PI=LL-PL$ 이고, 흙의 가소성 범위를 나타낸다. 이 값의 물리적 의미는 구체적으로 도자기를 빚을 수 있는 함수비의 범위라고 말할 수 있고, 강도가 100배로 되기 위한 함수비 감소량으로 정의할 수 있다. 따라서 흙의 고유 값인 consistency 측정에 의하여 흙의 공학적 개선정도를 추정할 수 있다. 이에 따라, 제지회계 지반개량재 혼합비 및 원시료토의 함수비에 따른 혼합토의 액성한계 및 소성한계를 측정하여 Atterberg's 한계의 변화와 그 결과로부터 얻어지는 지수들의 변화를 나타내어 함수비, 혼합비 변화에 따른 혼합토의 공학적 특성의 변화를 검토하였다. 그림 5의 결과에서 나타난 바와 같이 액성한계, 소성한계, 수축한계는 혼합비가 증가할수록, 원시료토의 함수비가 높을수록, 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이와 같이 최소의 전단강도를 나타내는 함수비인 액성한계가 증가한다는 것은, 최소의 전단강도를 나타낼 수 있는 함수비가 증가한다는 의미이며, 소성한계가 증가한다는 것 또한 균열이 발생하지 않는 범위 내에서, 최대의 전단강도를 나타내는 함수비가 증가한다는 의미로 해석할 수 있다. 그림 6에서 나타난 바와 같이 소성지수(PI)는 혼합비가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보이기는 하나 변화정도는 작으며, 배합비 9% 이상부터는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또 콘시스턴시지수는 증가하고, 액성지수는 감소하고 있다. 이것은 흙의 상태가 매우 불안정한 상태에서 안정한 상태로 변화하고 있음을 보여주고 있다. 또 함수비가 낮을수록 콘시스턴시지수는 커지고, 액성지수는 작아져 함수비가 낮을수록 흙이 안정하다는 것을 그림 6을 통해 알 수 있다. 이와같이 혼합비가 증가할수록, 원시료토의 함수비가 높을수록 최소의 전단강도와 최대의 전단강도를 가질 수 있는 함수비, 즉 액성한계와 소성한계가 증가함으로써 고함수비 상태에서도 소정의 강도를 발현할 수 있는 상태가 되어 공학적인 성질이 개선되는 것으로 판단된다.

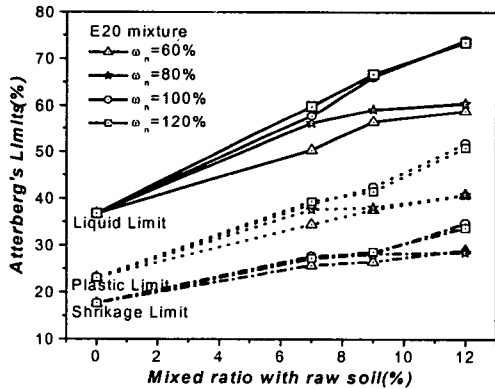


그림 5. 혼합비에 따른 Atterberg's Limits 변화

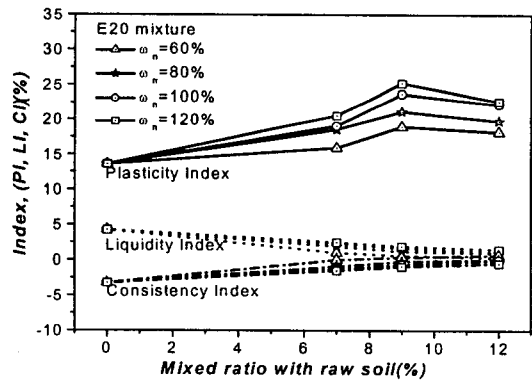


그림 6. 혼합비에 따른 PI, LI, CI 변화

3.1.3 단위중량 및 간극비의 변화

자연상태 점성토의 함수비, 간극비, 단위중량은 기본적 물리특성이고, 압밀, 강도와 밀접한 상관관계에 있다. 그림 7의 결과와 같이 제지회계 지반개량재 혼합비가 증가할수록, 함수비가 감소할수록 단위중량은 증가하고 있다. 이와 같은 경향은 원시료토가 다짐에 의한 영향을 받지 않는 고함수비를 가질 때 나타나고 있는데, 예로써, 흙의 다짐곡선에서 최대건조단위중량을 나타내는 침두를 기준으로 습윤측에서 나타나는 경향으로, 함수비가 증가할수록 단위중량이 감소하는 함수비에서의 경향을 나타내고 있다. 즉, 혼합토의 함수비가 습윤측의 범위에 속해 있으므로 혼합비가 증가하여 함수비가 감소하면, 단위중량은

증가하는 경향을 보이고 있는 것으로 생각할 수 있다. 또한 형태가 서로 다른 재료의 혼합으로 배열구조가 변하여 밀한 상태로 변화하여 단위중량의 증가를 가져온 것으로도 생각할 수 있다.

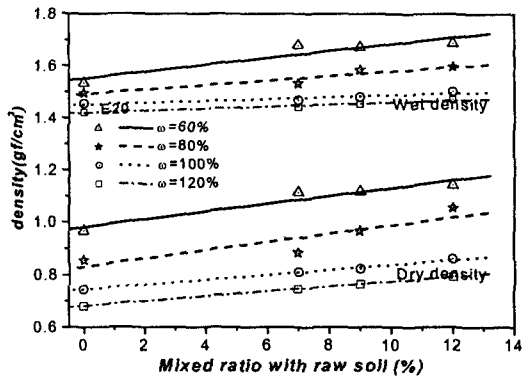


그림 7. 혼합비에 따른 단위중량의 변화

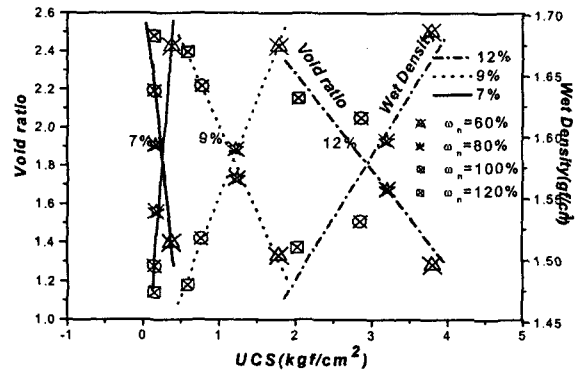


그림 8. 혼합토의 일축압축강도와 e 와 γ_t 의 관계

그림 8에 함수비 변화에 따른 일축압축강도와 간극비, 습윤단위중량과의 관계를 혼합비별로 도시하였다. 그림에서 함수비 감소에 따라 강도는 증가하며, 간극비는 감소하고, 단위중량은 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 다시 말하자면, 혼합비가 증가할수록 강도의 증가경향이 커지며, 단위중량은 증가하고 간극비는 감소되는 것을 알 수 있다. 즉 단위중량과 간극비는 반비례관계로 나타난다. 이들 결과로부터 혼합토는 혼합비의 증가에 따라 함수비 및 간극비의 감소경향이 크게 되어 연성의 점성토에서 강성의 점성토로 변화하며, 강도와 단위중량은 커지고 압축성이 작아져 혼합토의 공학적 성질이 개선되는 것으로 판단할 수 있다.

3.1.4 비중 및 입도분포 변화

제지회계 지반개량재 혼합토의 비중은 그림 9에서 보는 바와 같이 혼합비에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않으나 원지반토의 비중보다는 대체적으로 감소되는 경향을 확인할 수 있으며, 이와 같은 경향은 지반개량재의 주구성요소인 제지회의 비중(2.322)이 시멘트, 원지반토보다 작기 때문에 혼합토의 비중이 감소하는 경향을 보이고 있는 것으로 판단된다.

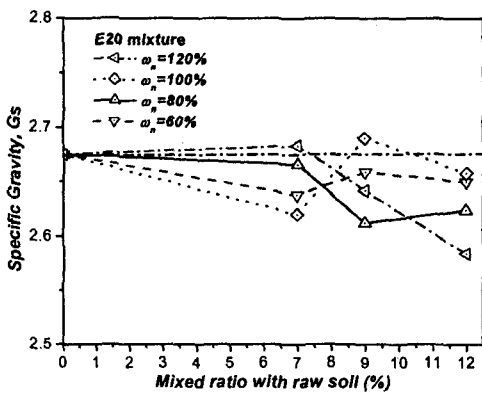


그림 9. 혼합비에 따른 함수비별 비중변화

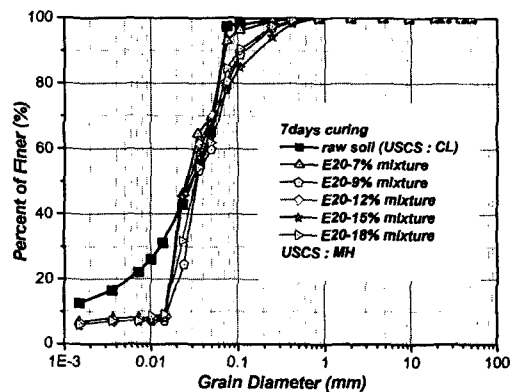


그림 10. 혼합비에 따른 입도분포 변화

제지회계 지반개량재 혼합토는 화학적 고결반응과 함께 입자의 면모화 또는 집합체(aggragate)를 이루어 공학적 특성을 개선하는 특징이 있다. 그림 10에서와 같이 원토의 입도분포에 비하여 혼합토의 입도분포가 통과율이 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

즉, 혼합토의 입경이 커지고 있음을 보여주고 있다. 원시료토의 입자 통과량이 감소되고 있는 것은, 고화재의 혼합에 의하여 미세한 원시료토의 입자와 입자가 결합하여 집합체를 이루는 입자를 이루기 때문인 것으로 판단된다. 더욱이, 입경이 0.03mm 미만인 아주 미세한 원시료토의 입자들의 통과량이 현저하게 감소되고 있어, 미세립자의 응집효과가 우수한 것으로 판단된다. 입도분석과 연경도 분석 결과, 원시료토는 CL(소성이 작은 실트질 점토)로 분류되는데 반하여, 혼합토는 토질공학적으로 MH(탄성이 큰 무기질 실트)로 분류된다. 이와 같이, 혼합토는 토질공학적으로 분류만으로 판단하기에 오히려 불량한 결과로 받아들일 수 있으나, 입도분포 및 액·소성 결과를 종합하면, 같은 분류라 하더라도 혼합토의 공학적 성질은 일반적인 흙의 공학적 성질과는 다소 다른 특성을 갖는 것으로 판단된다.

3.2 일축압축강도와 연경도와의 관계

지반개량에 있어서 일축압축강도는 고화효과를 나타내는 기준으로 널리 사용되고 있다. 그림 11은 함수비에 따른 일축압축강도를 나타낸 것이다. 함수비가 증가함에 따라 일축압축강도는 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 혼합비가 증가함에 따라 강도가 증가되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 혼합토의 강도는 원시료의 함수비 및 흙과의 혼합비에 따라서 크게 좌우된다. 마찬가지로 혼합토의 물리적 특성도 함수비와 혼합비에 따라 큰 영향을 받는다. 이에 강도와 밀접한 연경도와 일축압축강도의 상관관계를 검토하여 개량효과를 확인하고자 하였다.

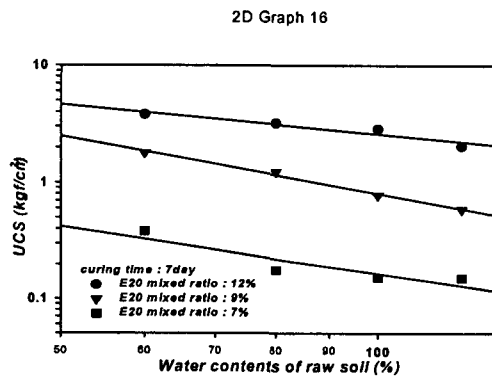


그림 11. 원지반의 함수비에 따른 혼합토의 강도저하

그림 12는 일축압축강도와 소성지수의 관계를 함수비별로 나타낸 것이다. 그림에서 함수비가 감소할수록 소성지수는 감소하고 일축압축강도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그림 12에서 혼합비에 따른 소성지수와 일축압축강도와의 관계를 식(3)으로 나타내었다. 이 식에 따른 소성지수의 변화를 확인하여 제지회계 지반개량재를 사용한 혼합토의 지반개량효과를 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{혼합비 } 7\% & ; PI = 21.88347 - 15.74698 \cdot M \\
 \text{혼합비 } 9\% & ; PI = 27.93523 - 5.20093 \cdot M \\
 \text{혼합비 } 12\% & ; PI = 29.63558 - 2.979613 \cdot M
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 M : $UCS (kgf/cm^2)$

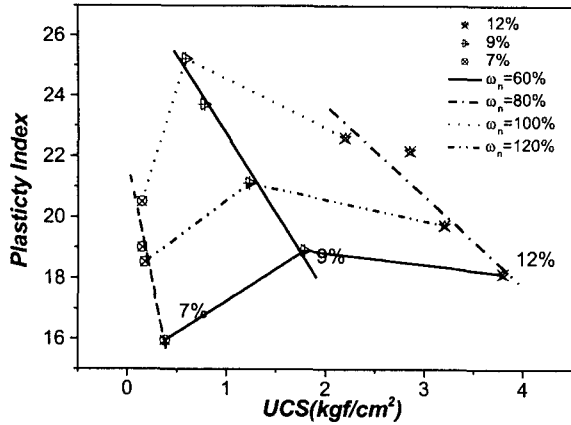


그림 12. 혼합토의 일축압축강도와 소성지수의 관계

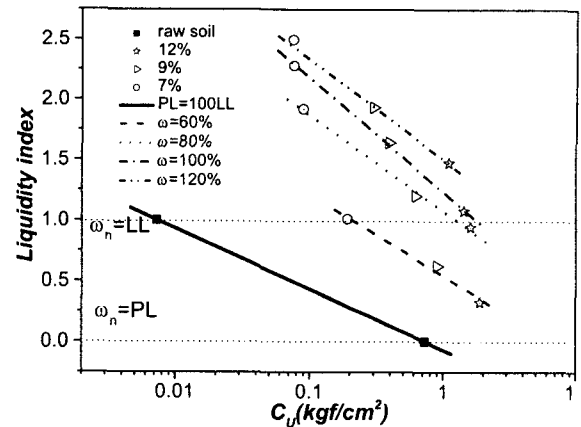


그림 13. 혼합토의 전단강도와 액성지수의 관계

지반의 상태는 자연함수비에 따라 상대적이다. 따라서 자연함수비를 고려하여 흙의 안정상태를 파악할 필요가 있다. 이를 위해 ω_n , LL , PL 을 상대적으로 고려한 것이 액성지수이다. 그림 13은 전단강도와 액성지수 사이의 관계를 나타낸 것인데, 비배수 전단강도 c_u 는 $q_u/2$ 를 사용하여 나타내었다. 그림 13에 나타낸 바와 같이 혼합비가 증가할수록, 함수비가 감소할수록 비배수 전단강도가 증가하고 액성지수는 감소하여 혼합토가 공학적으로 안정화되고 있는 것을 알 수 있으며, 혼합토의 액성지수 감소기율이 원지반토의 액성지수 감소기율기 보다 큰 이유는 단지 함수비 감소에 의한 지반개량 뿐만 아니라 제지회계 지반개량제의 화학반응(포졸란 반응)에 의한 지반개량효과로 판단된다. 이와 같이 연약점성토에 제지회계 지반개량제를 첨가하면 강도발현과 더불어 물리적성질의 개선이 이루어지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 PFA 지반개량제 혼합토에 대해서 기본물성실험 및 일축압축시험을 수행하고, 혼합토의 물리적 특성 변화에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 혼합토의 함수비 감소는 혼합비가 증가할수록, 원지반토의 함수비가 높을수록 활발한 함수비 감소가 이루어지는데 이는 고화제가 물리적 작용 뿐만 아니라 화학적 작용을 할 수 있는 유리한 환경으로 조성되기 때문이다.
2. 혼합토의 연경도 분석에서 원지반토의 함수비와 혼합비의 증가에 따라 액소성한계는 증가하며, 소성지수는 혼합비 9%이상부터 감소하는 경향이 나타나며, 액성지수도 0에 가까워지는 상태로 변화하는 것으로 나타나므로 제지회계 지반개량제 혼합토는 공학적으로 유리하게 개선되어 진다. 단위중량은 혼합비의 증가에 따라 증가하고, 함수비의 증가에 따라서는 감소하는 것으로 나타났으며, 간극비는 단위중량에 반비례하여 나타나고 있다. 지반개량제를 첨가함에 따라 함수비와 간극비가 감소하여 점성토는 연성에서 강성을 나타내며, 단위중량이 커져 압축성은 작게 되어 공학적인 개선이 이루어진다.
3. 혼합토의 비중은 제지회의 영향으로 비중이 약간 감소하는 경향을 띄며, 입도분포는 지반개량제 혼합비에 대한 입도분포 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았으나, 원지반토에 비해 혼합토의 입경이 커짐을 알 수 있는데 이는 혼합토가 화학적 고결반응과 함께 입자의 면모화 또는 집합체(aggregate)를 이루고, 특히 미세립자의 응집효과가 우수하게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.
4. 혼합토에 대한 일축압축강도는 배합비의 증가와 함수비의 감소에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다. 일축압축강도와 소성지수의 관계, 비배수전단강도와 액성지수의 관계로부터 물리적특성 변화에 따른 공학적특성의 개선정도를 쉽게 유추할 수 있다.

5. 제지회계 지반개량재를 사용한 혼합토는 강도특성과 더불어 물리적 특성의 변화도 지반공학적으로 유리하게 변화하는 경향이 뚜렷하게 나타나고 있다.

참 고 문 헌

1. 나영목, 한정수, 홍의, 심동현(1998) “대규모 매립지의 연약지반처리 및 개량효과 평가 사례” 한국지반 공학회, 98 가을학술발표회, pp. 405~412.
2. 이처근, 안광국, 김민호, 허열(2000), “산업폐기물 제지회의 지반공학적 특성 및 활용가능성”, 한국지반 환경공학회 논문집, 제1권 제1호, pp19~26.
3. 이홍주(2002), “제지회 지반안정재 혼합토의 공학적 특성에 관한 연구”, 전북대학교 석사학위논문.
4. 전북대학교 공학연구원 공업기술연구센터(2002), “초연약지반의 표층고화처리공법에 관한 연구”, pp. 34-77
5. D.T. BERGADO, L.R. ANDERSON, N. MIURA, A.S. BALASUBRAMANIAM(1996), “Soft Ground Improvement” ASCE PRESS New York, pp. 234~304.
6. Glen Ferguson(1993) “Use of Self-Cementing Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent” ASCE Geotechnical Special Publication, No. 36, 1~14.
7. M. Saleh Keshawarz and Utpal Dutta “Stabilization of Soil and Fly Ash” ASCE Geotechnical Special Publication, No. 36, 30~43.
8. 세멘트系固化材研究會(1994), “세멘트系固化材による 地盤改良マニュアル” 第二版 社團法人 세멘트協會, pp. 17~190.
9. 土質工學會(1994), “土質試驗法 -第二回改訂版-” 社團法人 土質工學會, pp. 2-1-1~6-3-23.