간극수의 pH가 점성토의 강도와 압밀특성에 미치는 영향
The Characteristics of Strength and Consolidation of Clayey Soil Dependent on pH of Soil Pore Water

이호진[1], Ho-Jin Lee, 김병일[2], Byung-Il Kim, 박상규[3], Sang-Kyu Park, 김수삼[4], Soo-Sam Kim

[1] 한양대학교 토목환경공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University
[2] 한양대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D Candidate, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University
[3] 한양대학교 토목환경공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University
[4] 한양대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering , Hanyang University

SYNOPSIS : The purpose of this study is the understanding to changes in the characteristic of soil structure and classification, atterberg limits, undrained shear strength and consolidation of clayey soil dependent on pH of soil pore water. A series of tests including consistency tests, uniaxial compressive tests, vane tests and oedometer tests are performed on. The test results indicated that pH changes in the soil pH resulted in changes in the soil structure and classification, stress-strain behavior. Specially, when pH is conditioned to 7, liquid limit, undrained shear strength and preconsolidation pressure are the largest.

Key words : pH, soil structure, soil classification, shear strength, consolidation

1. 서론

흙의 액성한계, 소성한계, 소성지수와 같은 아터버그 한계는 흙의 성질을 규정지어주는 값으로 흙의 분류에 이용되는데 만약 그 값이 변하게 되면 흙의 분류 뿐 아니라 흙의 성질도 따라 변할 것이다. 아터버그 한계는 물리적인 변화보다는 화학적인 변화들을 겪게 됨으로써 변하게 된다. 여러 화학적인 변화중에서도 간극수의 pH 변화는 액성한계와 소성한계, 소성지수의 변화와 밀접한 연관이 있다. 중요한 것은 pH의 변화가 단순히 아터버그 한계만 변화시키는 것이 아니라, 흙의 구조, 강도, 그리고 압밀특성 등 다양한 물리, 화학적 성질에도 영향을 미친다는 점이다(Esrig and Gemeinhardt, 1967; 한 상재, 2000).

이러한 지반에서의 pH변화가 토질 특성을 변화시키는 중요한 요인임에도 불구하고, 이에 대한 고려가 미미하다. 따라서, 본 연구에서는 간극수의 pH가 점성토의 구조, 강도 및 압밀특성에 미치는 영향을 규명하고자 동일한 조건에서 pH만을 다르게 조성한 시료에 대해 액성한계, 소성한계, 일축압축 실험을 실시하였고, 또한 pH에 따른 압밀특성을 파악하고자 여러 pH별로 압밀시험을 실시하였다.

2. pH에 따른 점성토의 특성 변화

일반적으로 낮은 pH조건에서는 수소이온, 즉 H^+가 다량 존재하여 양의 제타포텐셜을 갖게 되고 이로 인해 확산이중층의 두께가 감소하고 입자간 인력이 증가하게 된다. 이에 따라 점토는 면모구조를 띠게 된다. 반대로, 높은 pH에서는 수산기 이온, OH^-가 많기 때문에 음의 제타포텐셜을 갖게 되고, 이는 확산이중층 두께를 증가시켜 입자간 반발력이 증가되므로, 점토는 분산구조를 띠게 된다(Michell, 1993). 점토의 이러한 구조적 차이는 강도 및 투수성의 차이를 발생시키는데, 면모구조일 경우 강도 및 투수성이 더 크게 나타난다.

pH의 변화는 점성토의 아터버그 한계와 구조의 변화에 영향을 미치고, 결과적으로 점성토의 비배수 전단강도를 변화시키게 된다. 흙의 구조가 강도에 미치는 영향은 앞서 설명한 면모, 분산구조의 차이에서 설명할 수 있고, 식 (1)과 같이 액성한계와 소성한계의 차이인 소성지수와의 관계에서도 추정할 수 있다.

$$\frac{c_u}{p'} = 0.11 + 0.0037PI \ (PI \geq 10) \ \text{(Skempton, 1957)} \qquad (1)$$

pH는 또한 선행압밀하중, 압밀계수, 압축지수 등 압밀특성을 변화시키는 액성한계, 점성토의 구조 등에 영향을 미치기 때문에, 압밀특성을 변화시킬 수 있는 원인이라 할 수 있다. 식 (2)는 불교란 점토의 압축지수와 액성한계의 관계를 설명하고 있다(Terzaghi and Peck, 1967).

$$C_c = 0.009(LL - 10) \qquad (2)$$

압밀계수와 선행압밀하중 또한 흙 구조의 변화에 따라 변한다. 흙이 면모구조일 경우 투수성이 높고 체적압축계수가 작으므로 상대적으로 큰 압밀계수 값을 갖는다.

이와 같이 흙의 pH변화는 여러 화학적, 물리적 특성의 변화를 유발하는데 표. 1은 기존 문헌에 제시되어 있는 결과를 요약해 놓은 것이다.

표 1. 흙의 pH, 아터버그 한계, 비배수 전단강도, 압밀특성간 상호관계

Author	Relationship between soil parameters	Results
Skempton, (1953)	점토함량(CF)과 소성지수(I_p)	선형적 비례
Bjerrum, (1954)	용탈이 강도에 미치는 효과	용탈로 인한 전해질농도 감소가 면모화를 저해하여 강도를 감소시킴
Yong and Warkentin, (1975)	$\frac{M_e^{+m}}{N_e^{+n}} = k\frac{\sqrt[m]{M_o^{+m}}}{\sqrt[n]{N_o^{+n}}}$	교환가능 양이온 증가 시 투수계수 증가
Esrig, M. I. and Gemeinhardt, J. P. (1967)	pH의 변화에 따른 액성한계 변화	pH가 증가함에 따라 액성한계도 증가

표 1(계속). 흙의 pH, 아터버그 한계, 비배수 전단강도, 압밀간 상호관계

Author	Relationship between soil parameters	Results
Mitchell, (1976)	액성지수에 따른 비배수 전단강도의 변화	액성지수가 감소함에 따라 비배수 전단강도가 증가함
Leroueil et al., (1983)	$c_u = \frac{1}{(I_{LC} - 0.21)^2}$	액성지수 감소함에 따라 강도 증가
Fernandez & Quigley, (1985)	유전체 상수와 투수계수와의 관계	유전체상수 증가 시 투수계수 감소
Mitchell, (1993)	양이온교환능(CEC)과 소성지수(I_p)	선형적 비례
Sano et al, (1998)	pH에 따른 액성한계 변화	액성한계는 pH의 제곱에 비례

3. 실험

3.1 시료 특성

본 연구에서 사용된 시료는 EPK 카올리나이트이며, 액성한계 64%, 소성한계 26%, 그리고 활성도가 0.32로써 비활성 점토에 해당한다. 또한 표 2는 본 연구에서 사용된 EPK 카올린의 특성을 나타낸 것이다.

표 2. 시료특성(Coletta et al., 1997)

Parameter	Value
Mineral content(X-ray diffraction)	Kaolinite(Al_2O_3, $2SiO_2$, $2H_2O$)-97%
Specific surface area(m^2/g)	22.1
Specific gravity	2.65
Bulk density(kg/m^3)	Loose, 32.4 Packed, 46.2
Cation exchange capacity(CEC)(meq/100g)	4.5
Liguid limit(%)	64
Plastic limit(%)	26.0
Activity	0.32
pH(10% solids-wt.)	5.8
Optimum water content(%)	31.0

3.2 실험 조건

본 연구에서는 5가지의 pH조건(pH=1, 3, 7, 11, 13)에 대해서 액성한계, 소성한계 실험을 실시하였는데 이때 증류수에 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)을 일정 비율로 적정하여 pH=1, 3, 7, 11, 13의 용액을 만들어 해당 실험에 사용하였다.

일축압축강도 실험 시 시료는 함수비 45%로 일정하게 조성하였으며, 일정한 힘으로 다짐하였는데, 이는 함수비 차이와 불규칙한 다짐으로 인한 강도차를 발생시키지 않기 위해서이다. 그리고 여러 pH로 조성한 시료에 대해 각각 일축압축실험을 실시하였는데, 이때는 변형률 제어방식을 사용하였고, 1 mm/min의 변형률 속도를 유지하면서 실험을 실시하였다.

세 개의 다른 pH조건(pH=1, 7, 13)에서 압밀시험을 실시하였는데, 압밀시험에 들어가기 앞서 시료를

각각의 pH에 대해 함수비 80%로 동일하게 조성한 후 0.5kg/cm^{2}로 48시간 동안 예압밀시켰다. 예압밀이 끝난 시료를 추출하여 표준압밀시험을 실시하였다.

마지막으로 함수비 변화에 따른 비배수 전단강도의 변화를 결정하기 위한 실내베인실험을 실시하였다. EPK카올린의 소성한계가 26%, 액성한계가 64%임을 감안하여 함수비 30%부터 80%까지 10%씩 증가시키면서 실험을 실시하였으며, pH변화를 방지하기 위해 비이온수를 사용하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 pH에 따른 아터버그 한계 변화

그림 1은 pH변화에 따른 아터버그 한계의 변화를 나타낸 것으로 pH=7을 기준으로 pH가 감소하거나 증가했을 경우 액성한계와 소성지수가 감소하였다. 그리고 소성한계의 경우는 36~38%정도로 액성한계보다 상대적으로 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 따라서 액성한계와 소성한계의 차이로 나타나게 되는 소성지수의 값이 액성한계값의 경향과 비슷하게 나타난다. pH값이 낮아지게 되면 수소이온의 증가로 점토의 표면전하는 양으로 바뀌게 되고 인력이 우세하게 되어 면모화 구조를 띠게 되는데, 이는 강도와 투수계수의 증가, 그리고 압축성의 감소 등 강도 및 압밀 특성의 변화로 이어진다. 그러나, 실험 결과, pH=7인 지점에서 액성한계가 가장 크고 시료가 산성화 또는 염기성화 될수록 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 pH가 매우 낮은 지역에서는 과다한 수소이온이 교환가능 이온(예: Na^+)을 치환함으로 인한 수소점토화와 더불어 용탈현상이 발생하기 때문에 확산이중층내 전해질 농도가 감소하게 되고, 이는 확산이중층의 두께를 팽창시키는 결과를 초래하게 되어, 결국 면모화를 저해하는 요인으로 작용하게 된다(Yong, 2001). 또한 카올리나이트의 영전하점이 pH=4.2 정도에서 형성되는 것을 감안해 볼 때, pH=4.2를 중심으로 그 부근의 pH범위에서는 면모화의 영향권이거나, pH가 그보다 커질 경우 면모화에서 분산화로 옮겨가는 단계에 있을 것이라 판단된다. 이와 같은 결과로 미루어 볼 때 카올린의 경우 낮은 pH지역에서는 액성한계 증가 요인도 있지만, 과다한 수소이온으로 인한 용탈과 같은 액성한계 감소 요인도 함께 작용하므로 그림 1과 같이 pH=7인 지점에서 오히려 액성한계가 가장 높아지는 결과를 초래한 것으로 판단된다.

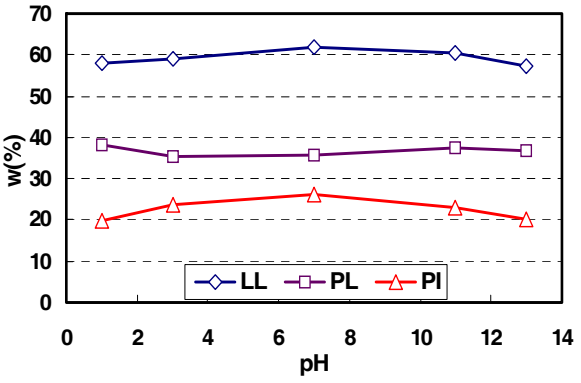

그림 1. pH에 따른 EPK 카올린의 아터버그 한계변화

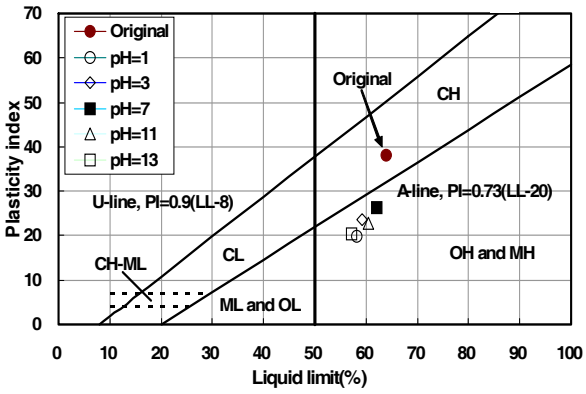

그림 2. pH에 따른 EPK 카올린의 토질분류

4.2 pH에 따른 토질분류의 변화

pH가 아터버그 한계를 변화시키는 것으로부터 흙의 분류에도 역시 영향을 미칠것으로 예상되는 바, Casagrande의 소성도표를 이용하여 확인해보고자 하였다(그림 2). 순수 EPK 카올린의 경우 64%의 액

성한계와 38%의 소성지수를 갖고 있기 때문에, CH로 분류되지만, pH를 다르게 조성했을 때(pH=1, 3, 7, 11, 13) 변화된 아터버그 한계에 의해 그 분류도 달라짐을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 EPK 카올린의 경우 실험한 모든 pH에 대해 MH로 바뀌었다.

4.3 pH에 따른 점성토의 전단강도의 변화

그림 4의 경우 pH=7에서 가장 높은 비배수 전단강도를 보여주고 있고, pH=1, 3 그리고 pH=11, 13 순으로 강도가 높은 것으로 나타났다. 이는 앞서 4.1절에서 설명한 바와 같이 낮은 pH범위에서는 면모화 저해요인으로 인해 높은 pH범위에서의 분산화된 구조에 비해 더 높은 강도가 발현되기는 했으나, 면모화에 방해를 받지 않을 것이라 판단되는 pH=7 부근에서의 강도보다는 낮게 발현된 것이다. 또한 응력-변형률 곡선의 기울기로 정의되는 할선탄성계수 E_{50}을 구하여 도시해본 결과 일축압축강도의 변화양상과 비슷하게 나타났다. 이와 같은 결과들로 미루어 볼 때 pH는 흙의 구조와 액성한계 및 소성지수 등의 아터버그 한계에 변화를 유발시키고, 이는 또한 흙의 강도정수에도 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

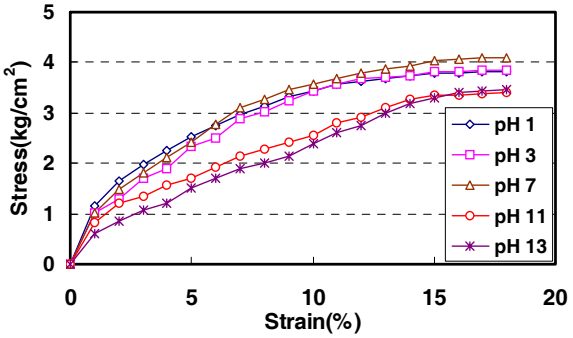

그림 3. pH에 따른 EPK 카올린의 응력-변형률 곡선

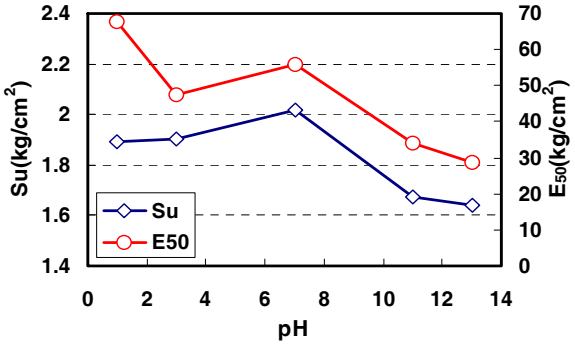

그림 4. pH에 따른 EPK 카올린의 비배수 전단강도와 E_{50}

4.4 pH가 점성토의 전단강도에 미치는 영향에 대한 정량적 평가

점성토의 전단강도는 함수비, 압밀하중, 압밀시간, 전단속도 등에 영향을 받는다. 그 중에서도 함수비의 변화는 간극의 변화를 유발하기 때문에, 함수비 변화는 흙의 강도에 있어 매우 중요한 부분이다. 따라서 pH의 변화에 의한 강도증가를 정확히 산정하기 위해서 본 연구에서는 비이온수로 함수비를 달리하여 조성한 시료에 대한 실내베인실험의 결과와 pH를 변화시키면서 수행된 일축압축시험의 결과를 비교함으로써 pH의 영향에 의한 강도 증가분을 정량적으로 산정해 보았다. 함수비 감소에 의한 강도 증가 효과를 확인하기 위해 다른 조건들(pH, 단위중량 등)은 변화시키지 않은 채 함수비별로 실내베인 실험을 실시하였고 그 결과는 그림 5에서 보여지는 바와 같이 함수비의 감소에 따라 점성토의 전단강도가 증가함을 확인할 수 있다. pH에 의한 전단강도 증가율을 산정하기 위해, 같은 함수비 조건, 즉 함수비 45%에 대한 전단강도를 대조군으로 정하고, pH변화에 따른 전단강도와 비교하여 보았다(그림 6). 그림 6은 각각의 pH값에서 결정된 전단강도값을 함수비만의 영향으로 발현된 전단강도값(대조군)으로 나눈 후의 전단강도 증가율이므로, 이 양이 pH의 영향에 의한 전단강도 증가율이라 할 수 있다. 전단강도 증가율 1을 기준으로 1보다 큰 경우 pH를 변화시키기 전의 시료인 대조군의 강도보다 큰 것이고, 1보다 작은 경우는 대조군의 강도보다 작은 것이다. 산성의 pH 적정시 사용된 H^+와 Cl^-이온 중 H^+이온의 활동이 지배적인 영향을 미쳤기 때문에, 4.1절에 제시된 바와 같이 수소점토화와 용탈현상 등으로 인한 면모화 저해요인이 발생하여 오히려 대조군보다 낮은 전단강도 증가율을 보여주었고, 염기성의 pH적정시 사용된 Na^+와 OH^-이온 중 OH^-이온의 지배적인 활동이 구조의 분산화를 초래함으로써 대조군보다 낮은 전단강도 증가율을 보여주게 된 것으로 판단된다.

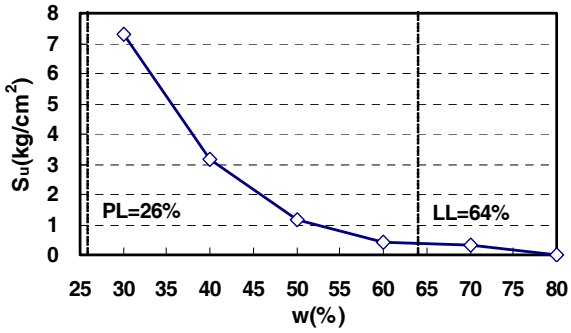

그림 5. 함수비와 EPK 카올린의 전단강도와의 관계

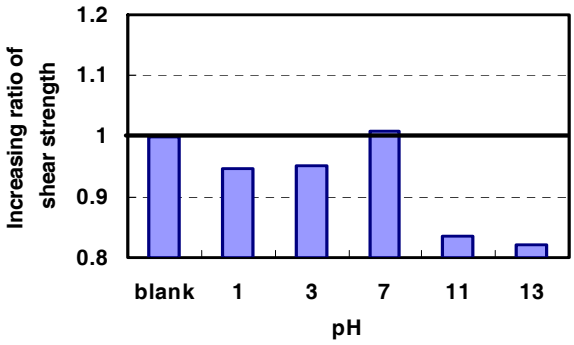

그림 6. pH변화에 따른 EPK 카올린의 강도변화

4.5 pH에 따른 점성토의 압밀특성 변화

본 연구에서 실시한 압밀시험 분석 시 선행압밀하중의 경우, Casagrande법과 Strain-Energy method(Senol, 1997)를 사용하여 그 값을 결정하였는데, 두 방법이 정량적인 값에는 차이가 있었지만 정성적 경향은 동일하게 나타났기 때문에, 본 논문에서는 Casagrande법으로 산정한 선행압밀하중만을 채택하여 분석에 사용하였다. 압밀계수의 경우 Root t법(Taylor, 1942), Log t법(Casagrande and Fedum, 1940), 압밀속도법(Parkin et al., 1978)을 비교해본 결과를 통해, 과압밀영역과 정규압밀영역이 확연히 구분되고, 정규압밀영역에서 그 값이 수렴하는 Root t법에서의 결과만을 제시하였다.

그림 7의 경우 pH=7에서 가장 높은 선행압밀하중을 보였고, pH=1, 13에서 거의 같은 선행압밀하중 값을 보였다. 이로 미루어 볼 때 점성토의 Pc값은 pH의 영향하에서 유사선행압밀현상으로 큰 차이를 보인다는 사실을 확인할 수 있었다. 그림 7에서 전체 누적변형률의 차이는 pH의 영향으로 형성된 점토의 구조와 그로인한 강도에 의한 체적변형의 차이라고도 생각할 수 있다. 그러나 각 pH마다 예압밀 완료 후의 초기 간극비가 다르게 나타났는데, pH=7에서는 다른 두 경우보다 훨씬 작은 초기 간극비를 갖고 있었기 때문에, 이에 따른 영향으로도 볼 수 있다고 판단되는 바, 본 연구에서는 체적변형과 밀접한 연관을 가진 압축지수에 대해, 그와 관계를 갖고 있는 액성한계(Terzaghi and Peck, 1967)와 그리고 초기 함수비와의 관계(Azzouz et al. 1976)를 분석해 보았다(그림 8). 그 결과 압축지수가 초기간극비에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

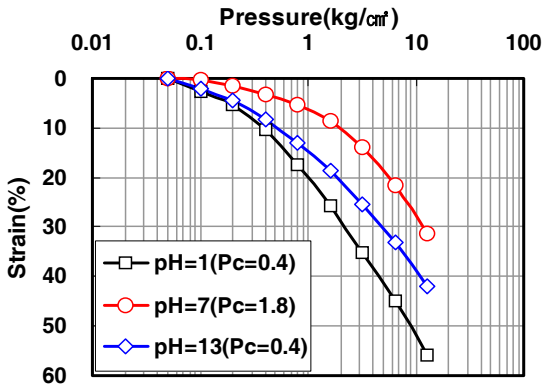

그림 7. pH에 따른 응력-변형률 곡선

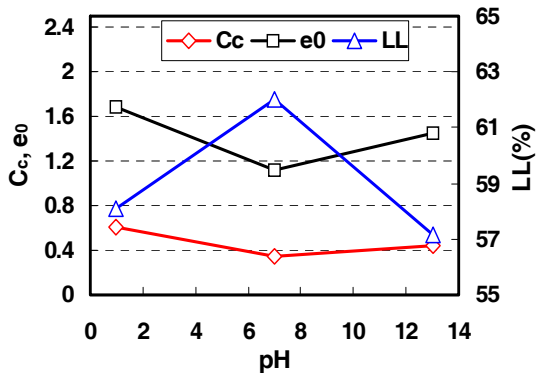

그림 8. pH와 C_c, LL, e_0 관계

그림 9는 pH와 압밀계수와의 관계를 나타낸 것이다. 역시 pH=7에서 압밀이 가장 빨리 발생한 것으로 보아 이는 pH=7지점에서 면모구조가 가장 잘 발달되었다고 판단된다. 이러한 사실은 그림 10에서 확인

해 볼 수 있는데, 압밀 완료시 간극비에서의 투수계수가 pH=7에서 가장 크다는 것과, 각 pH별로 같은 투수계수에 해당하는 간극비가 pH=7에서 가장 작은 것으로 보아, 이는 pH=7지점에서 면모화로 인한 투수계수의 증가가 압밀을 촉진시켰다는 사실을 증명해주는 것이다. 그리고, pH=13에서의 압밀계수가 pH=1에서의 압밀계수보다 크게 나타났는데, 이는 점성토의 구조적 측면보다는 초기간극비의 차이 때문이다. 압밀하중 12.8kg/cm^{2}에서 최종간극비가 세 가지 실험 결과에서 거의 차이가 없고, pH=1의 초기간극비가 가장 크다는 점을 감안한다면, pH=13의 경우와 투수계수는 거의 같아지지만, 가장 큰 초기간극비에 의해 같은 최종간극비로 수렴하기 위해 필연적으로 체적압축계수(m_v)가 커지기 때문에 C_c 값이 pH=1에서 가장 크게 나타난 것이다. 따라서, 투수계수가 같은 조건에서 체적압축계수가 더 클 경우 압밀계수는 더 작게 되므로 pH=1에서의 압밀계수가 pH=13에서의 압밀계수보다 작게 나타난 것이다.

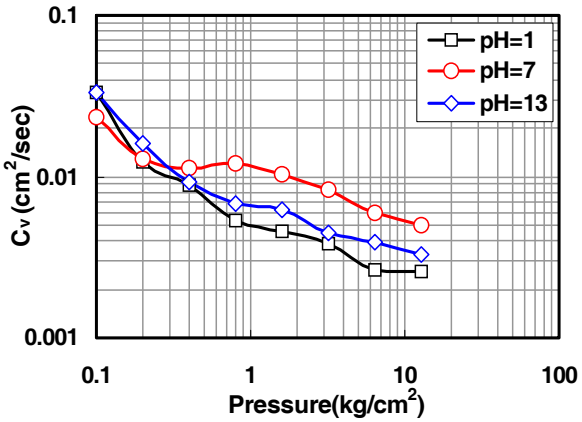

그림 9. pH와 압밀계수와의 관계

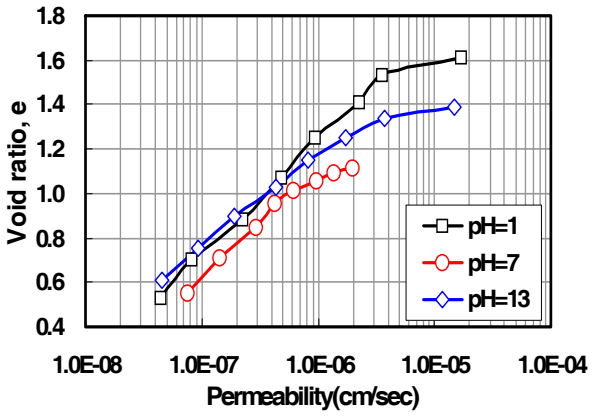

그림 10. pH와 투수계수와의 관계

5. 결론

pH에 따른 점성토의 강도 및 압밀특성을 규명해 보고자, 여러 pH에 대해 아터버그 한계실험, 일축압축강도실험, 실내베인실험 및 압밀실험을 실시하였으며, 그 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. pH의 변화는 점성토의 구조를 변화시키는데, 낮은 pH에서는 면모화 구조, 높은 pH에서는 분산화 구조로 변화시킴으로써, 강도 및 압밀특성에 영향을 미친다.
2. 낮은 pH영역에서 수소이온의 지나친 증가로 야기된 용탈로 인한 이온농도의 감소와 면모화 방해로 오히려 면모화에서 분산화로 진행하는 단계인 pH=7지점에서 가장 높은 액성한계와 소성지수값을 보였다.
3. 순수한 EPK 카올린의 액성한계, 소성지수와 pH에 따라 변한 한계값들을 소성도표에 도시하여 보았고, 그 결과 순수한 EPK 카올린의 토질 분류(CH)와 pH를 변화시킨 EPK 카올린의 토질 분류(MH)가 변하였음을 확인할 수 있었다.
4. 유사선행압밀하중이 발현되어 Pc값이 증가하는 현상이 나타났고, 압축지수의 경우 초기간극비의 영향을 더 지배적으로 받는 것으로 나타났다. 압밀계수의 경우, pH=7에서 점토 구조의 변화로 인해 가장 크게 나타났다.

6. 참고문헌

1. 한상재(2000), “Electrokinetic 기법에 의한 오염토의 전기삼투와 중금속 이동 특성”, **중앙대학교 박사학위논문**
2. Das, B. M.(1997), *Advanced Soil Mechanics, Second Edition,* John Wiley and Sons, Washington,

DC, pp.237~397
3. Esrig, M. I. and Gemeinhardt, J. P.(1967), "Electrokinetic stabilization of an illitic clay", *Journal of the soil mechanics and foundations division*, Vol.93, SM3, 109-128.
4. Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of Soil Behavior,* John Wiley and Sons, New York, pp.111~130.
5. Park, J. H. and Koumoto, T.(2001), "Interrelationship among consistency limits of clays", *Clay Science for Engineering*, pp.173~178.
6. Locat, J., Tanaka, H., Tan, T. S., Dasari, G. R. and Lee, H.(2003), *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils,* Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, pp3~28.
7. Parkin, A. K.(1978), "Coefficient of Consolidation by the Velocity Method", *Geotechnique*, 28:4.
8. Yong, R. N.(2001), "Interactions in clays in relation to geoenvironmental engineering", *Clay Science for Engineering*, pp.13~28.
9. Yong, R. N. and Warkentin, B. P.(1975), *Soil Properties and Behaviour,* Elsevier Scientific Publishing Company, New York, pp21~70.
10. Şenol, A.(1997), "Zeminlerde Ön Konsolidasyon Basıncının Belirlenmesi", I.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, I.T.Ü. *"Determination of Pre-consolidation Pressure," The Institute of Science and Technology,* Ph.D. Dissertation
11. Leroueil, S. and Hight. D. W.(2003), *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils,* Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands, pp193~223