

시화지구 연약점토의 광물학적 특성과 공학적 특성의 상관관계

The Correlations between Mineralogy and Engineering Characteristics of Soft Clay in Sihwa Area

김 낙 경¹ Kim, Nak-Kyung

박 중 식² Park, Jong-Sik

주 용 선³ Joo, Yong-Sun

Abstract

The characteristics of soft clays are very important for the land development plan. This study is to investigate correlations between the engineering properties and the characteristics of clay minerals of the undisturbed clay samples obtained from Sihwa area. This study included X-Ray diffraction analysis, X-Ray fluorescence spectrometer analysis, scanning electron microscopy analysis and energy dispersive X-Ray spectrometer analysis. The correlations between the clay mineral properties and the laboratory and field testing results were investigated. The characteristics of soft clay in Sihwa area were compared with those in Yangsan and Kunsan area.

요 지

국내 연약지반 활용을 위한 효율적이고 경제적인 안정처리 공법의 선정과 설계 및 시공을 위해서는 대상지반의 특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다. 본 연구는 시화지구 연약점토의 물리적, 역학적 특성과 광물학적 특성을 파악하여 연약점토의 물리적, 역학적 특성과 광물학적 특성과의 상관관계를 알아보는 데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 연약점토의 광물학적 특성을 파악하기 위하여 X선 형광분석, X선 회절분석, 주사전자현미경분석과 에너지분산분석 실험을 실시하였으며 시화지구 연약지반의 시추조사결과, 실내시험 및 현장시험결과와의 상관관계를 알아보았다. 또한 시화지구 연약점토의 특성을 양산과 군산 지역 연약점토의 특성과 비교하였다.

Keywords : Energy dispersive X-Ray spectrometer analysis, Scanning electron microscopy analysis, X-Ray diffraction analysis, X-Ray fluorescence spectrometer analysis

1. 서 론

최근 우리나라는 급속한 산업발달과 인구증가로 인하여 국토확장의 필요성이 대두되고 있으며 산업발달에 따른 부지조성과 인구분산을 위한 종합적인 국토개발이 절실히 필요한 실정이다. 국토의 삼면이 바다로 둘러 쌓여있는 지형적인 특성으로 인하여 국토확장의

대상지역이 주로 해안 연약지반으로 집중되어 있기 때문에 각종 국토개발 사업과정에서 연약지반 문제가 중요사안으로 대두되기 시작하였으며 효율적이고 경제적인 연약지반 처리공법에 대한 요구가 높아지기 시작하였다. 이와 함께 국내 연약지반의 공학적 특성이나 광물학적 특성을 파악하기 위한 연구들이 수행되어 왔다(최진용, 1991 ; 이연규 등, 1996 ; 이우진 등, 1998;

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ., nkkim@skku.edu)

2 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

3 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

김낙경 등, 2001 ; 김길수 등, 2001 ; 주용선, 2001 ; 주종진 등, 2002). 그러나 현재까지 국내의 해안 연약지반에 대한 연구가 미미하였을 뿐만 아니라 서해안과 남해안의 연약지반 조성 및 분포에 관한 연구조차도 단편적으로 수행되어 왔기 때문에 국토개발에 있어서 해안 연약지반에 대한 체계적인 연구가 절실히 필요한 실정이다. 해안 연약지반은 주로 매우 연약한 실트와 점토로 이루어져 있기 때문에 지반의 전단강도와 지지력이 낮고 지반의 침하량이 크기 때문에 기초지반의 조건을 만족시키기 어렵다. 그러므로 이에 따른 해안 연약지반의 공학적 특성과 광물학적 특성을 구체적으로 파악하는 것이 대단히 중요하며 체계적이고 종합적인 지반조사, 실내시험 및 현장시험을 실시하여 경제적이고 효율적인 연약지반 개량공법의 선정, 설계 및 시공이 수행되어야 한다.

본 연구는 시화지구 연약지반 점토의 물리적, 역학적 특성과 광물학적 특성을 파악하여 점토의 공학적 특성과 광물학적 특성의 상관관계를 알아보고 정량적 분석

을 통한 광물학적 특성과 그에 따른 공학적 특성과의 연관성을 정성적으로 평가하는데 그 목적이 있다. 그래서 본 연구에서는 연약점토의 광물학적 특성을 파악하기 위하여 X선 형광분석, X선 회절분석, 주사전자현미경분석과 에너지분산미분석 실험을 실시하였으며 시화지구 연약지반의 시추조사결과, 실내시험 및 현장시험 결과와의 상관관계를 알아보았다.

2. 시화지구 연약점토의 특성

2.1 지반조사

본 연구의 대상지반은 시화 1단계 지역 남측간석지와 시화호 내 일대로서 본 대상지반의 지질은 선 캄브리아기에 해당하는 퇴적기원의 변성암류와 시대미상의 화성암류, 중생대 퇴적암류와 이들 모든지층을 관입한 백악기의 맥암류 및 제4기의 충적층으로 구성된다.

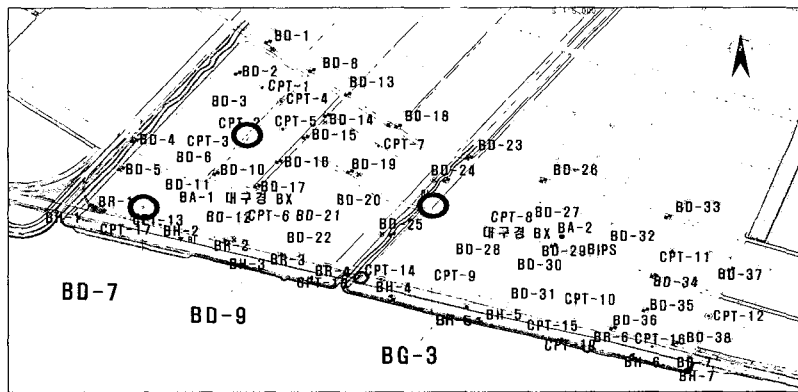


그림 1. 대상지반의 시추평면도

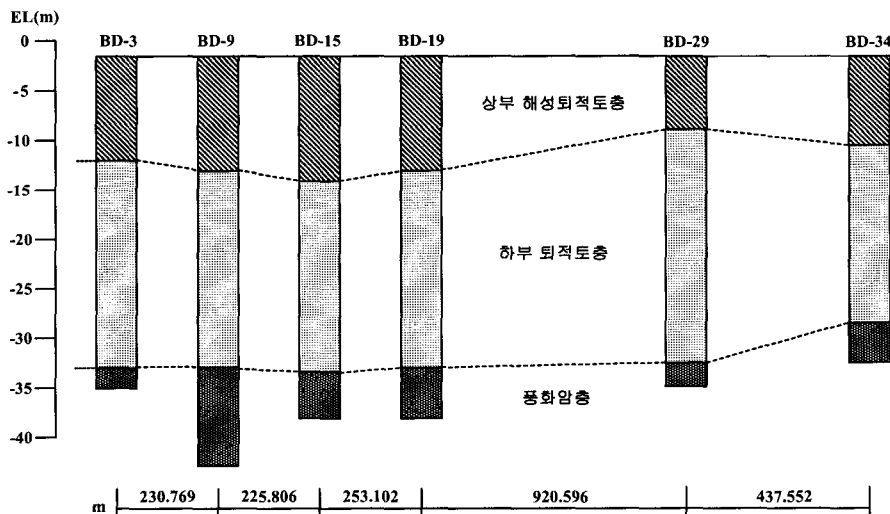


그림 2. 대상지반의 지층분포

대상지반의 시추조사결과를 통하여 연약지반의 지층이 상부 해성퇴적토층, 하부 퇴적토층, 풍화암층 및 기반암층으로 구분되어 있음을 알 수 있었다. 상부 해성퇴적토층은 주로 실트질 점토(CL), 모래질 실트(ML) 층으로 구분되며 표준관입시험 N치가 대부분 6이하이다. 하부 퇴적토층은 주로 실트질 모래(SM)로 분류되며 부분적으로 굳은 점성토층(N>6)이 실트질 모래층과 서로 엇갈려 있고 표준관입시험 N치가 대부분 8이상이다. 풍화암층은 오랜기간 동안의 풍화작용으로 암석조직의 분해는 완료되지 않았으나 심하게 풍화가 진행되어 충격에 의해 쉽게 흩으로 부서지는 특성을 갖고 있으며 퇴적토층 하부에 분포하고 있음을 알 수 있었다. 그림 1-2는 시화지구 대상지반의 시추평면도와 지층분포를 나타낸 것이다.

2.2 시화지구 연약점토의 광물학적 특성

2.2.1 실험개요

점토의 광물학적 특성은 점토를 구성하고 있는 광물의 조성, 조직, 입자 배열 및 퇴적 환경 등에 의존하므로 점토의 광물학적 특성을 규명하기 위해서는 X선 형광분석(XRF), X선 회절분석(XRD), 주사전자현미경분석(SEM) 및 에너지분산분석(EDS)을 실시하여야 한다. 본 연구에서는 시화지구 연약점토의 광물학적 특성을 파악하기 위하여 시추공 BD-7의 심도 2.0 - 2.8m 와 3.0 - 3.8m, 시추공 BD-9의 심도 2.0 - 2.8m 와 3.0 - 3.8m, 그리고 시추공 BG-3의 심도 2.5 - 3.3m 와 5.0 - 5.8m 에서 채취한 대상지반 점토시료 총 144 점을 이용하여 연약점토의 광물학적 특성을 파악하였다.

2.2.2 실험방법

2.2.2.1 X선 형광분석(XRF)

X선 형광분석(XRF)은 점토의 주요 구성성분을 알아보기 위한 실험이다. 30 - 100kV의 전압에서 X선관에 의해 발생된 X선이 2 μ m의 분말제나 용융시킨 시료그릇에 조사되어 시료를 구성하고 있는 원소의 궤도전자를 여기시키고 재배열되는 동안에 방출되는 형광 X선을 분광 결정에 의해 검출기로 측정하여 표준시료의 그것과 비교하여 원소를 분석한다. Sample은 시료내 염분을 제거시키기 위해 증류수와 혼합한 후, 원심분리기를 이용하여 혼탁액을 침전시켜 침전물을 제외한 혼탁액을 제거한다. 그리고 과산화수소(H₂O₂)를 이용하여 유기물

을 제거하며 패각편은 10%의 염화수소를 이용하여 제거한 후 120 $^{\circ}$ C로 건조시킨다. 그 후 분쇄시켜 200번 체를 통과한 시료를 용융하여 실험을 실시한다.

2.2.2.2 X선 회절분석(XRD)

X선 회절분석(XRD)은 점토의 구성광물을 알아보기 위한 실험이다(사진 1). 준비된 시료에 X선을 가하여 투과되지 않은 X선이 단위셀 상에서 회절되어 나오는 것을 이용하여 전자를 고속으로 대음적극(크롬, 철, 코발트, 구리)에 충돌시켜 발생시킨다. 이것들을 전자검출기에서 카운팅하여 전자선들의 상대적 크기인 회절강도로 나타내게 된다. 점토광물분석을 위한 시료처리는 다음과 같다. 점토시료처리는 Gibbs(1970)의 표준 분석방법을 이용하였으며 2 μ m 보다 세립한 점토 크기의 물질을 Stokes' Law에 근거하여 피펫방법으로 채취하였고 원심분리기를 이용하여 혼탁액을 침전·농축시킨 후, 침전물은 채취하여 과산화수소를 이용한 유기물 제거 및 10% 염화수소를 이용한 패각편 제거를 실시하였다. 이렇게 준비된 시료는 노건조를 통하여 분말로 만들어지고 고해상도 X선 회절분석기(High Resolution Multi Purpose XRD)를 통하여 점토광물의 회절분석이 시작된다. 점토광물의 회절분석을 위한 회절각 범위는 5 $^{\circ}$ - 40 $^{\circ}$ 이었으며 주사속도는 2 $^{\circ}$ (2 θ)/min으로 하였다. 점토광물의 감정을 위한 X선 회절분석의 2 θ 값은 6.2 $^{\circ}$ (14 Å), 8.8 $^{\circ}$ (10 Å), 12.4 $^{\circ}$ (7.1 Å), 17.8 $^{\circ}$ (5.0 Å), 18.7 $^{\circ}$ (4.7 Å), 20.85 $^{\circ}$ (4.3 Å), 25.2 $^{\circ}$ (3.5 Å), 26.8 $^{\circ}$ (3.3 Å), 28 $^{\circ}$ (3.2 Å), 29.5 $^{\circ}$ (3.0 Å) 및 31.6 $^{\circ}$ (2.8 Å)이며 이들 Peak를 이용한 점토광물의 감정은 Griffin(1970)의 방법을 따랐다. X선 회절분석 결과, 모든 시료에서 주요 점토광물인 Illite, Chlorite, Kaolinite 및 Smectite가 검출되었다. Illite는 일반적으로 10 Å(001), 5 Å(002), 3.3 Å(003)과 2.5 Å(004)의 Peak를

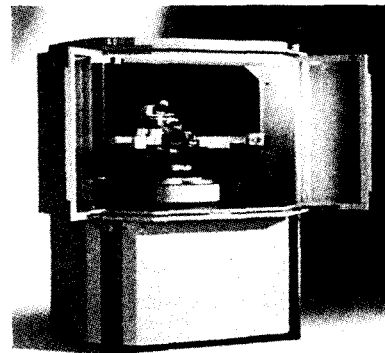


사진 1. X선 회절분석 실험기

감정하며 이중 10 Å(001), 5 Å(002)의 Peak는 매우 뚜렷하고 다른 점토광물의 Peak과 중복되지 않기 때문에 점토광물의 상대적 함량을 산정하는데 이용하였다. 본 실험에서는 2θ 값이 8.8°에서 나타나는 Peak를 이용하여 정량적 분석을 실시하였다. Chlorite는 14.2 Å(001), 7.1 Å(002), 4.73 Å(003) 및 3.55 Å(004)의 Peak를 감정하여 파악하며 이중 7.1 Å(002)과 3.55 Å(004)의 Peak를 이용하여 정량적 분석을 시도한다. 한편 Kaolinite는 7.15 Å(001)와 3.57 Å(002)의 Peak로 감정하는데 Chlorite의 002 결정면과 Kaolinite의 001 결정면은 거의 일치하여 두 Peak는 2θ 값이 12.4°인 영역에서 중복되어 나타난다. Biscaye(1964)는 2θ 값이 24° - 26°범위에 나타나는 Kaolinite의 002 결정면(3.57 Å)과 Chlorite의 004 결정면(3.55 Å)의 Peak를 이용하여 두 점토광물의 상대적 함량을 산정하였다. 본 실험의 경우, Kaolinite와 Chlorite의 각각의 상대적 함량을 파악하기 위하여 2θ, 24° - 26.5° 사이의 회절선에 대한 주사속도를 0.25°(2θ)/min으로 정하여 재차 실험을 실시한 후, 분리된 두 점토광물에 대한 회절선 면적을 파악하여 상대적 함량을 계산하였다. Smectite의 Peak는 2θ 값이 5.2°의 영역에서 나타나며 석영(Quartz)의 경우, 26.8°(3.34 Å)에서 뚜렷한 Peak가 나타난다. 한편 X선 회절분석 자료를 통하여 점토광물의 상대적 함량을 파악하는 방법은 누적 Peak 면적계산법, 누적 Peak 고도계산법, 삼각도형 계산방법, Planimeter 방법 및 눈금산정방법이 있다(Biscaye, 1965 ; Pierce and Siegel, 1969 ; Gibbs, 1971 ; Devine 등, 1972). 본 실험에서는 점토광물의 상대적 함량을 측정하기 위하여 Planimeter 방법을 이용하였다(최진용, 1991). 또한 점토광물의 상대적 함량을 계산하는데 이용되는 Peak들은 각 광물의 특성에 따라 Peak 강도의 차이를 나타내기 때문에 이러한 차이를 보정하기 위하여 계산된 Peak 면적에 일정한 가중치를 곱하여 점토광물의 정량적 함량을 계산하여야 한다. 각각 점토광물의 가중치는 점토광물의 조성에 따라 변하며 Smectite : Illite : Chlorite + Kaolinite의 경우, Biscaye(1965)는 1 : 4 : 2의 비율을 적용시켰다. 본 실험에서도 Biscaye(1965)의 방법에 의한 가중치를 고려하여 점토광물의 상대적 함량을 산정하였다.

2.2.2.3 주사전자현미경분석(SEM)

시화지구 연약점토의 구조적 형태를 파악하기 위하여 주사전자현미경분석(SEM) 실험을 실시하였다(사진 2). 본 실험을 수행하기 위하여 전계방사주사전자현미

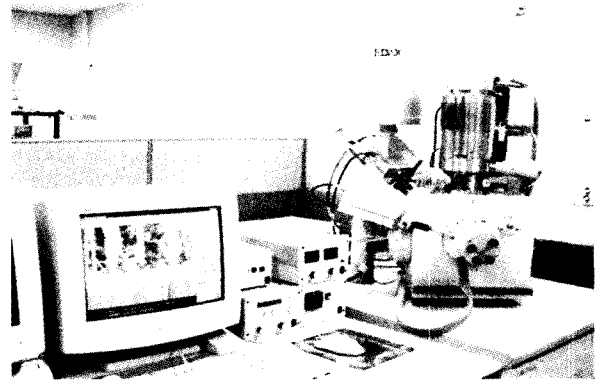


사진 2. 주사전자현미경 실험기

경(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 사용하였다. 점토시료는 계획된 깊이에서 채취한 불교란 시료를 동결건조시킨 후 0.5cm의 정육면체로 절단하거나 시료를 분쇄하여 금(Au)으로 코팅한다. 점토광물이 갖고 있는 형태적 특징에 의해 SEM 사진으로부터 일부 광물들을 용이하게 식별해낼 수 있다. 이 가운데 식별이 가장 용이한 광물은 결정도가 양호한 Kaolinite로서 육각판상 또는 이들의 집합체로 산출되는 경우이다. 잘 발달된 Kaolinite의 집합체는 책구조를 이루고 있으며 이는 Kaolinite의 전형적인 구조이다. 그러나 모든 Kaolinite가 이러한 결정구조를 갖는 것은 아니며 육각형의 외형이 분명치 않는 경우가 많다. 한편 Smectite의 전형적인 형태는 벌집모양의 구조이며 Illite는 얇은 판상 혹은 필라멘트와 같은 형태로 산출된다. Illite는 대부분 Illite/ Smectite 혼합층을 이루는 광물의 결정형을 갖는다(McHardy 등, 1982). Chlorite의 경우는 결정형이 엉켜있는 집합체로서 산출되며 비교적 쉽게 식별이 가능하다. 혹은 엽상의 집합체로도 산출된다.

2.2.3 X선 형광분석(XRF) 실험결과

시화지구 연약지반 점토에 대한 X선 형광분석결과는 표 1과 같다. X선 형광분석 결과에 의하면 시화지구 해성점토는 SiO₂ 68.0 - 71.2%, Al₂O₃ 13.0 - 14.3%, Fe₂O₃+ 3.9 - 4.7%, K₂O 2.9 - 3.0%, Na₂O 1.8 - 1.9%, MgO 1.5 - 1.8% 순으로 상대적 함량을 나타냈다. 시화지구 해성 점토의 화학적 주요성분은 SiO₂와 Al₂O₃로 나타났으며 전체 함량 중 약 83.08%를 차지하였다. 구성 화학성분을 살펴보면 석영(Quartz, SiO₂)이 가장 많은 비율을 차지하고 있으며 장석류와 알바이트 등이 함유되어 있는 것으로 판단된다.

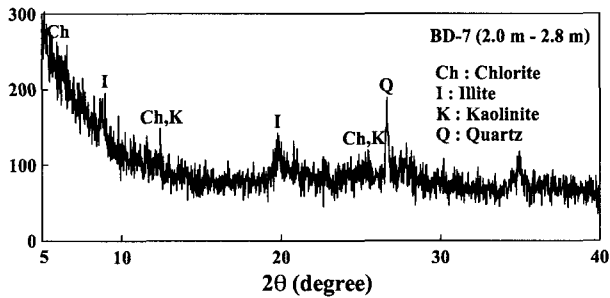
표 1. 시화지구 해성점토의 X선 형광분석 결과

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃₊	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Sum
BD-7 2.0-2.8	68.30	14.26	4.34	2.96	1.82	1.80	0.94	0.70	0.09	0.06	99.35
BD-7 3.0-3.8	68.60	14.31	4.53	2.99	1.75	1.84	1.00	0.75	0.10	0.06	100.05
BD-9 2.0-2.8	70.24	13.30	4.05	2.95	1.86	1.61	1.07	0.76	0.10	0.05	99.43
BD-9 3.0-3.8	69.77	13.47	4.21	2.99	1.85	1.69	1.13	0.72	0.09	0.05	99.69
BG-3 2.5-3.3	71.18	12.98	3.89	2.91	1.91	1.48	1.10	0.63	0.09	0.05	99.60
BG-3 5.0-5.8	68.08	14.00	4.65	3.02	1.83	1.73	1.10	0.74	0.09	0.06	99.50
평균	69.36	13.72	4.28	2.97	1.84	1.69	1.06	0.72	0.09	0.06	99.60

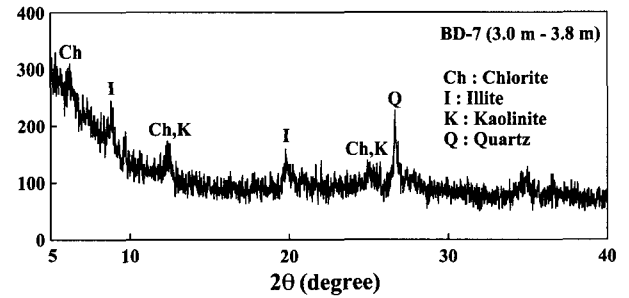
2.2.4 X선 회절분석(XRD) 실험결과

시화지구 점토광물의 X선 회절분석 결과는 다음과 같다. 그림 3은 BD-7 지역에서 채취한 점토시료에 대한 회절분석 결과이다. 실험결과를 통하여 파악할 수 있는 점토광물은 Illite, Chlorite, Kaolinite 및 Quartz 등이었으며 주요 점토광물의 상대적 함량을 계산하면 Illite의 상대적 함량은 66.03 - 67.85%이었으며 Chlorite의 상대적 함량은 17.41 - 17.77%, Kaolinite는 12.46 - 12.71%, Smectite의 상대적 함량은 2.28 - 3.49%로 나타났다. 그림 4는 BD-9 지역에서 채취된 점토시료로서 X선 회절분석에

의한 동정을 살펴보면 역시 Illite, Chlorite, Kaolinite 및 Quartz 등의 광물이 검출되었다. 점토광물의 상대적 함량은 Illite의 경우, 68.73 - 69.30%으로 산정되었으며 Chlorite의 상대적 함량은 15.58 - 16.63%, Kaolinite는 11.15 - 11.89%로 파악되었으며 Smectite의 상대적 함량은 2.75 - 3.96%로 산정되었다. BG-3 지역의 경우, Illite는 61.24%, Chlorite는 19.52%, Kaolinite는 13.97%, Smectite는 약 5.26%로 산정되었다(그림 5). 전체적으로 살펴보면 시화지구 연약지반 점토에 대한 Illite의 상대적 함량은 61.24 - 69.30%, Chlorite는 15.58 - 19.52%, Kao-

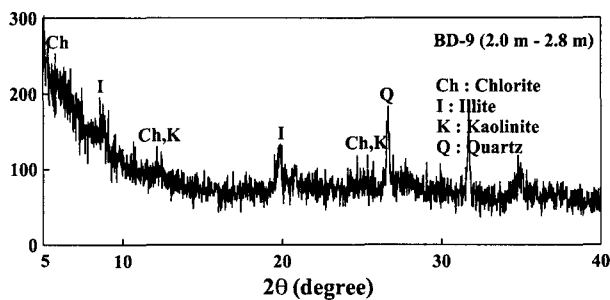


(a) 심도 2.0 - 2.8m

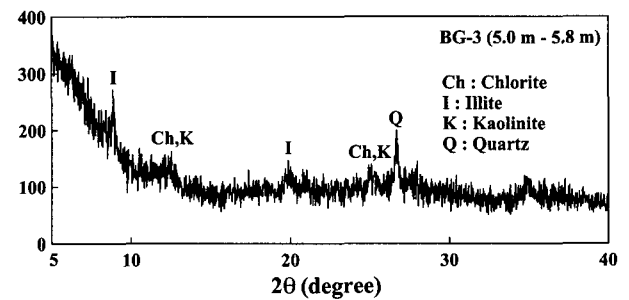


(b) 심도 3.0 - 3.8m

그림 3. BD-7의 XRD 실험 결과

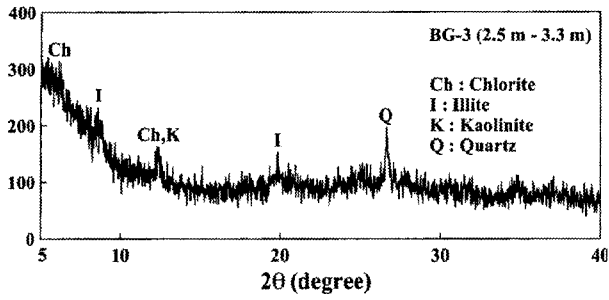


(a) 심도 2.0 - 2.8m

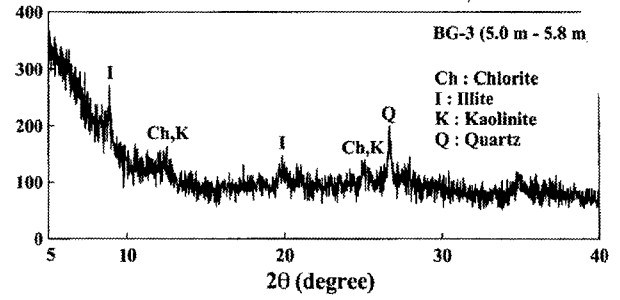


(b) 심도 3.0 - 3.8m

그림 4. BD - 9의 XRD 실험 결과



(a) 심도 2.5 - 3.3 m



(b) 심도 5.0 - 5.8 m

그림 5. BG-3의 XRD 실험 결과

illite는 11.15 - 13.97%, Smectite는 2.28 - 3.96%을 차지하고 있다.

2.2.5 주사전자현미경분석(SEM) 실험결과

점토광물이 가지고 있는 형태적 특징에 의해 SEM 사진으로부터 점토광물을 용이하게 식별할 수 있다. 시화지구 연약지반 점토의 SEM 분석결과에 의하면 Zone A지역의 BD-7에서 채취한 점토시료와 Zone B지역의 BD-9, BG-3에서 채취된 점토시료에서 Illite로 판단되는 점토광물을 발견할 수 있었다. 발견된 Illite는 석영(Quartz)과 함께 존재하는 것으로 판단되며 매우 복잡한 구조로 엉켜

있다(사진 3). 그리고 육각형의 결정형을 보이는 Kaolinite의 집합체와 길쭉한 염상모양을 보이는 Chlorite 집합체의 예를 관찰할 수 있었다(사진 4-5). 그 밖에도 유기물로는 Cyclotella가 확인되었다(사진 6).

2.2.6 에너지분산분석(EDS) 실험결과

시화지구 연약지반 점토의 에너지분산분석 실험결과는 그림 6-8과 같다. BD-7, BD-9 와 BG-3 시추공에서 채취한 점토에 대한 EDS 실험결과, 점토시료의 구성성분은 Si, O, Al, Fe, K, Mg, Na 등이었으며 이는 XRF 실험결과와 일치한 실험결과를 보인 것이다.

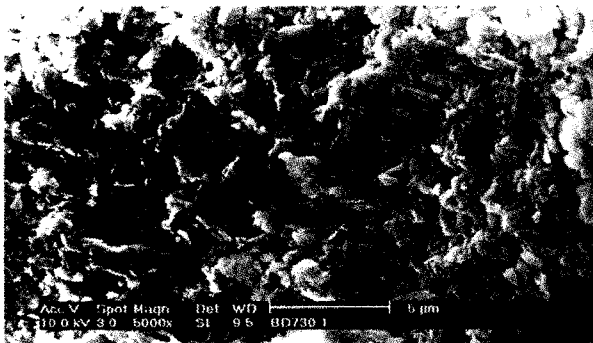


사진 3. Illite

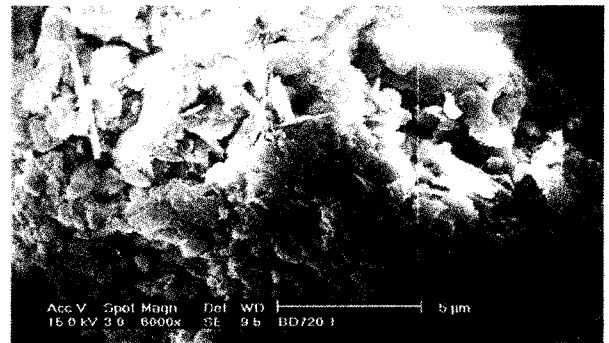


사진 4. Kaolinite



사진 5. Chlorite

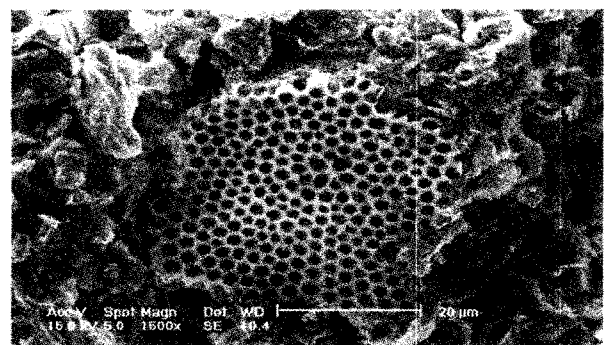
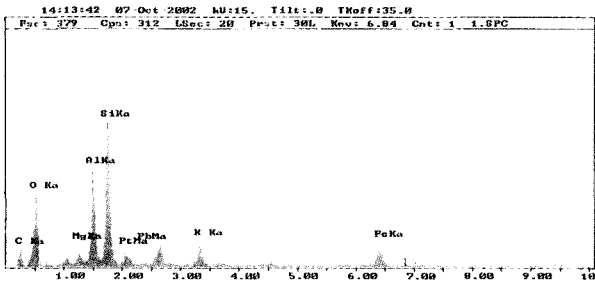
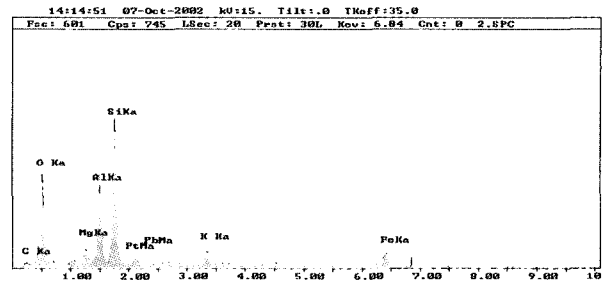


사진 6. Cyclotella

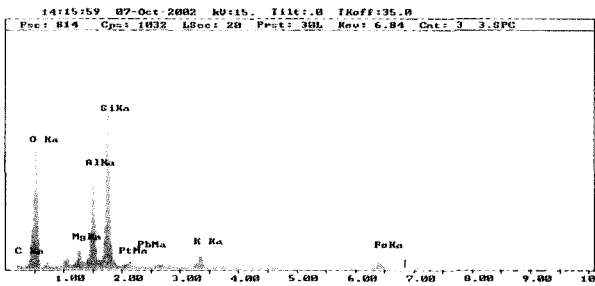


(a) 심도 2.0 - 2.8m

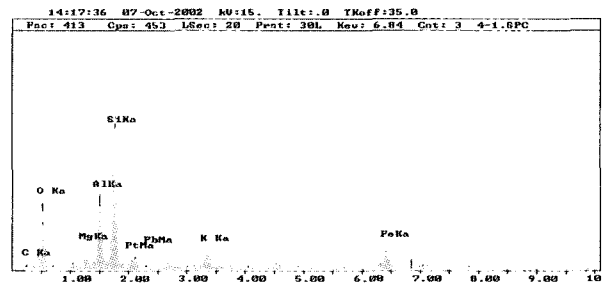


(b) 심도 3.0 - 3.8m

그림 6. BD-7의 EDS 실험 결과

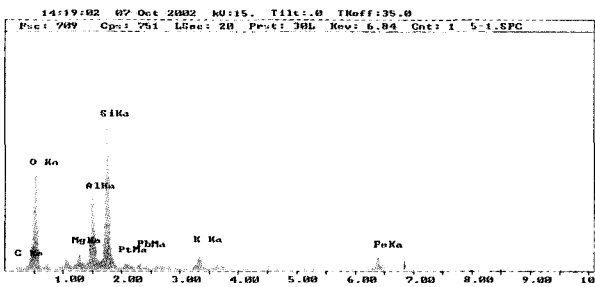


(a) 심도 2.0 - 2.8m

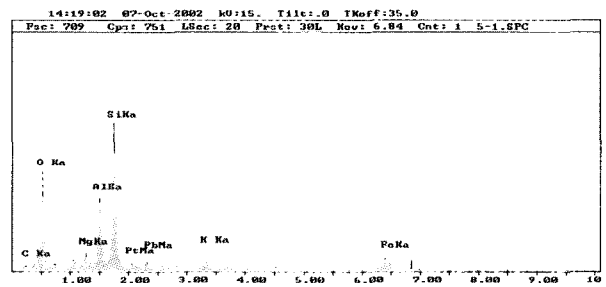


(b) 심도 3.0 - 3.8m

그림 7. BD-9의 EDS 실험 결과



(a) 심도 2.5 - 3.3m



(b) 심도 5.0 - 5.8m

그림 8. BG-3의 EDS 실험 결과

2.3 시화지구 연약점토의 물리적·역학적 특성

시화지구 연약점토의 물리적 특성을 파악하기 위하여 함수비, 애터버그한계, 비중 및 초기간극비 시험결과를 이용하였다. 또한 일축압축시험, 삼축압축시험, 현장배인시험과 표준압밀시험, CRS 압밀시험결과를 통하여 연약점토의 역학적 특성을 알아보았다.

2.3.1 함수비, 애터버그한계, 비중 및 초기간극비

그림 9는 시화지구 연약점토의 함수비, 액성·소성한계 시험결과이다. 대상지반에서 채취한 점토시료의 함수비 시험결과는 약 20 - 50%로 파악되었으며 액성한계의

경우, 약 30 - 40%로 파악되었고 심도 10m 까지는 함수비와 거의 비슷한 범위에 분포하였으며 10m 이후에서는 함수비가 액성한계보다 작은 값을 나타냈다. 소성한계는 약 15 - 25% 사이로 파악되었다. 연약점토의 비중은 약 2.73, 초기간극비는 약 1.03으로 파악되었다.

2.3.2 전단강도 및 압밀특성

그림 10은 시화지구 연약점토의 역학적 특성을 알아보기 위한 일축압축시험과 삼축압축시험 및 현장배인시험결과이다. 또한 연약점토의 압밀특성을 파악하기 위하여 표준압밀시험과 CRS 압밀시험결과를 이용하였다(그림 10). 시화지구 연약점토의 압밀시험결과를 보면 압축

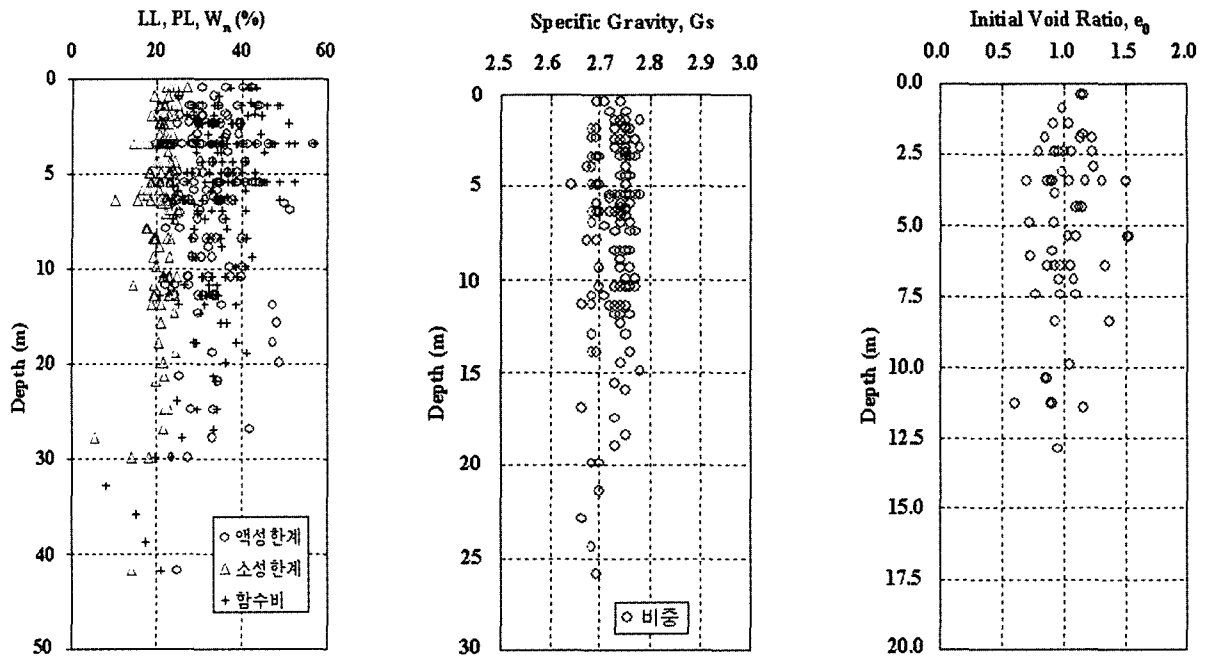


그림 9. 시화지구 연약점토의 함수비, 애터버그한계, 비중 및 초기간극비 시험결과

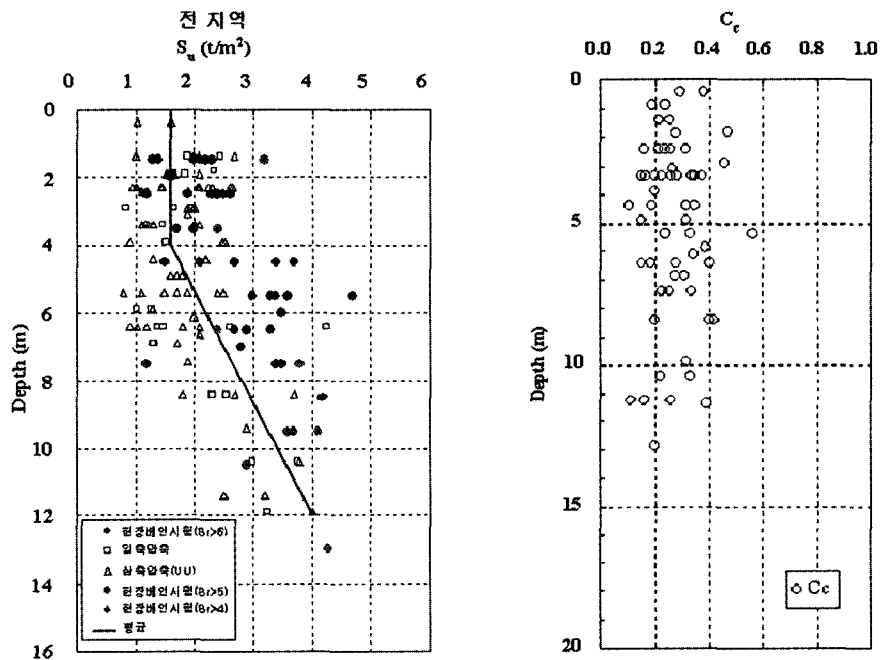


그림 10. 시화지구 연약점토의 전단강도 및 압밀특성

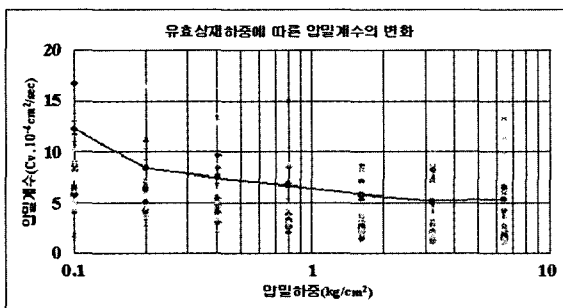


그림 11. 시화지구 연약점토의 수직 압밀계수

지수는 평균 0.27로 파악되었다. CRS 압밀시험결과를 통한 연약점토의 압축지수는 표준압밀시험과 유사한 결과로 파악되었다. 그림 11은 시화지구 연약점토의 수직 압밀계수를 나타낸 것이다. 시험결과를 볼 때, 시화지구 점토의 평균적인 수직 압밀계수는 $5.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 판단된다.

3. 시화지구 연약점토의 광물학적 특성에 따른 공학적 특성

시화지구 연약점토의 광물학적 특성에 따른 공학적 특성을 살펴보기 위하여 대상지반 점토의 주요 구성성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 함량을 파악할 수 있는 XRF 시험결과를 이용하였다. 먼저 시화지구 연약점토의 액성한계는 약 32 - 39%이었으며 X선 형광분석 결과는 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 68.0 - 71.2%, 13.0 - 14.3%, 3.9 - 4.7%로 나타났는데 연약점토의 액성한계와 주요 광물구성성분 결과

를 통하여 파악된 경향은 점토의 광물구성성분인 SiO_2 의 함량이 증가하면 액성한계는 감소하나 Fe_2O_3 의 함량이 증가하면 액성한계는 증가하는 것이다(그림 12). 시화지구 연약점토의 소성지수 약 15 - 25%이었으며 X선 형광분석 결과는 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 68.0 - 72.1%, 13.0 - 14.3%, 3.9 - 4.7%로 나타났는데 연약점토의 소성지수와 주요 광물구성성분 결과를 통하여 파악된 경향은 점토의 광물구성성분인 SiO_2 의 함량이 증가하면 소성지수는 감소하나 Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 함량이 증가하면 소성지수는 증가하는 것으로 나타났다(그림 13). 한편

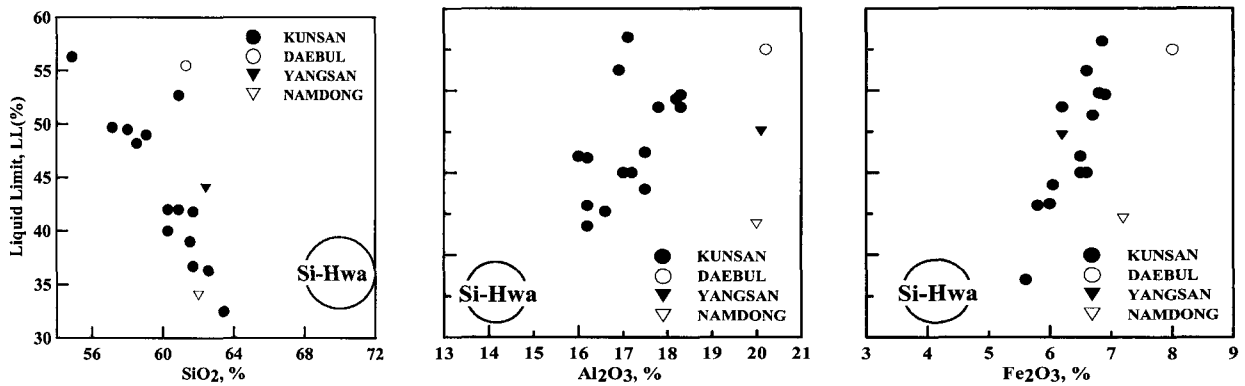


그림 12. 액성한계와 광물구성성분의 상관관계

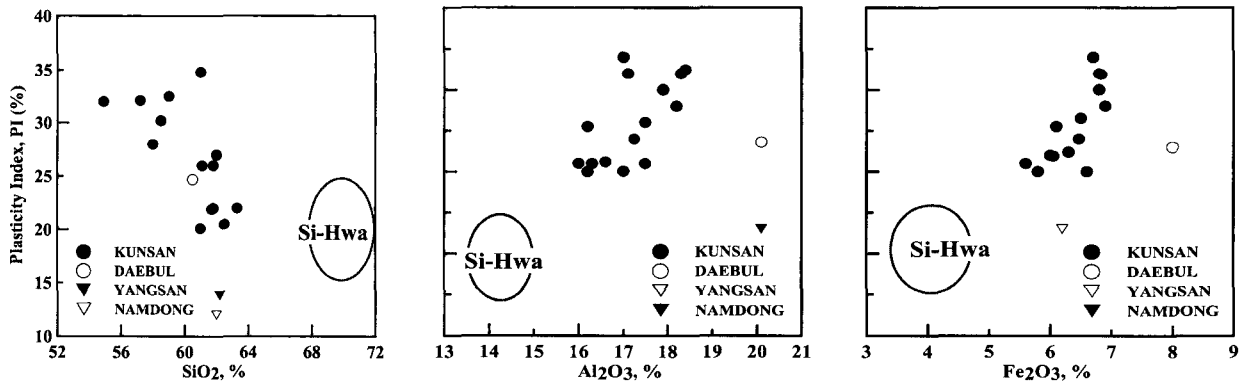


그림 13. 소성지수와 광물구성성분의 상관관계

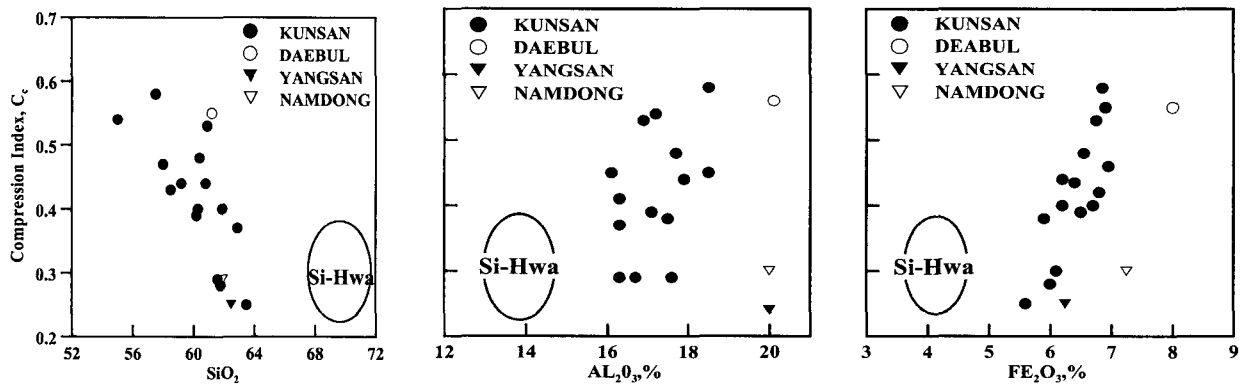


그림 14. 압축지수와 광물구성성분의 상관관계

시화지구 연약점토의 압축지수는 표준압밀시험 및 CRS Test 결과인 평균 0.27이었으며 대상지반 점토광물의 주요 구성성분인 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃의 함량은 68.0 - 71.2%, 13.0 - 14.3%, 3.9 - 4.7%이었으며 연약점토의 압축지수와 주요 광물구성성분 결과의 관계를 분석하면 SiO₂가 증가하면 압축지수가 감소하는 경향을 보이며 반면에 Fe₂O₃가 증가하면 압축지수가 증가하는 경향을 보였다(그림 14).

4. 시화, 양산 및 군산지역 연약점토의 특성 비교

기준에 이미 연구된 국내 해안 연약지반 지역 중 남해안에 위치한 양산 일대(한국토지공사, 1996)와 서해안 지역인 군산 일대(김낙경 등, 2001)의 연약점토의 물리적, 역학적, 광물학적 특성과 본 연구인 시화지구 연약점토의 특성을 비교·평가하였다.

4.1 지역별 연약점토의 물리적 특성 비교

시화, 양산 및 군산지역 연약점토의 물리적 특성을 비교·평가하기 위하여 각 지역의 함수비, 비중, 초기간극비와 애터버그한계 시험결과를 정리하였다. 지역별 연약점토의 함수비를 비교하면 시화지구의 경우, 20 - 50%를 나타냈으며 양산지역의 경우, 연약점토의 함수비가 35 - 55%로 제시되었고 군산지역의 경우, 점토의 함수비가 33.5 - 41.5%로 제시되었다. 각 지역별로 시험결과에 편차가 있지만 대체로 군산과 시화지구 연약지반 점토의 함수비가 양산지역에서 채취된 점토의 함수비에 비해서 다소 적게 나타난 것으로 판단된다(표 2).

시화, 양산 및 군산지역 연약점토의 물리적 특성 중 액·소성한계 시험결과를 비교·평가하면 표 3과 같다. 시화지구 연약점토의 액·소성한계 시험결과를 보면 액성한계의 경우, 30 - 45%, 소성지수의 경우, 15 - 25%로

표 2. 지역별 연약점토의 함수비 비교

	시화	양산	군산
함수비	20 - 50%	35 - 55%	33.5 - 41.5%

표 3. 지역별 연약점토의 애터버그한계 비교

	시화	양산	군산
액성한계	30 - 45%	30 - 55%	30 - 40%
소성지수	15 - 25%	20 - 35%	6 - 15.6%

나타났다. 양산지역 연약점토의 경우, 액성한계와 소성지수가 30 - 55%, 20 - 35%로 제시되었으며 군산지역 연약점토의 경우, 액성한계와 소성지수가 30 - 40%, 6 - 15.6%로 제시되었다. 양산지역 연약점토의 액성한계와 소성지수가 시화, 군산지역 연약점토에 비해서 전반적으로 크게 나타났다.

시화, 양산 및 군산지역 연약점토의 물리적 특성 중 비중 및 초기간극비에 대한 비교는 다음과 같다(표 4). 시화지구 연약점토의 경우, 비중과 초기간극비가 각각 2.62 - 2.79, 0.7 - 1.3으로 나타났다. 양산 지역의 연약점토의 경우, 비중과 초기간극비가 각각 2.65 - 2.73, 1.0 - 1.5로 제시되었으며 군산지역 연약점토의 경우, 비중과 초기간극비가 각각 2.67 - 2.71, 0.85 - 1.07로 제시되었다. 지역별 연약점토의 비중은 대체로 유사한 시험결과를 보였으나 양산지역의 초기간극비가 군산, 시화지구 점토의 초기간극비에 비해서 다소 크게 나타났다.

4.2 지역별 연약점토의 역학적 특성 비교

시화, 양산 및 군산지역 연약점토의 역학적 특성을 비교·평가하기 위하여 지역별로 제시된 연약점토의 압축지수 및 압밀계수를 알아보았다. 시화지구 연약점토의 압축지수는 0.2 - 0.4를 나타냈으며 양산지역 연약점토의 경우, 압축지수가 0.25 - 0.6, 군산지역 연약점토의 경우, 0.2 - 0.35로 제시되었다. 양산지역 연약점토의 압축지수가 시화, 군산지역의 연약점토에 비해서 크게 나타났다(표 5). 한편 지역별 연약점토의 압밀계수를 파악한 결과, 시화지구 연약점토의 경우, $5.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 나타냈으며 양산지역 연약점토의 경우, $10^{-2} - 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$, 군산지역 연약점토는 $3.0 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 제시되었다(표 5).

표 4. 지역별 연약점토의 비중 및 초기간극비 비교

	시화	양산	군산
비중	2.62 - 2.79	2.65 - 2.73	2.67 - 2.71
초기간극비	0.7 - 1.3	1.0 - 1.5	0.85 - 1.07

표 5. 지역별 연약점토의 압밀 특성 비교

	시화	양산	군산
압축지수	0.2 - 0.4	0.25 - 0.6	0.2 - 0.35
압밀계수	$5.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$	$10^{-2} - 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$	$3 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$

표 6. 지역별 연약점토의 광물학적 특성 비교

	Illite	Chlorite	Kaolinite	Smectite
시화	61.24 - 69.30%	15.58 - 19.52%	11.15 - 13.97%	2.28 - 3.96%
양산	45.8 - 56.1%	17.9 - 29.6%	16.0 - 24.7%	1.8 - 10%
군산	65.4 - 78.2%	8 - 25.6%	8.0 - 16.0%	0.5 - 3.9%

4.3 지역별 연약점토의 광물학적 특성 비교

시화, 양산 및 군산지역의 연약점토에 대한 광물학적 특성을 비교·평가하기 위하여 지역별로 밝혀진 연약지반 점토광물의 조성 및 분포를 알아보았다. 시화지구 연약점토의 광물학적 특성을 보면 X선 형광·회절 분석 및 주사전자현미경 분석을 통하여 알 수 있듯이 가장 많은 함량을 차지한 Illite가 약 61.24 - 69.30%를 차지하였으며 Chlorite의 함량은 15.58 - 19.52%, Kaolinite의 함량은 11.15 - 13.97%, Smectite의 경우, 2.28 - 3.96%를 차지하였다. 양산지역 연약점토의 경우, Illite가 약 45.8 - 56.1%를 차지하였으며 Chlorite의 함량은 17.9 - 29.6%, Kaolinite의 함량은 16.0 - 24.7, Smectite의 경우, 1.8 - 10%를 차지하였다. 군산지역 연약점토의 점토광물 함량을 살펴보면 Illite의 함량은 65.4 - 78.2%, Chlorite는 8.0 - 25.6%, Kaolinite는 8.0 - 16.0%, Smectite의 함량은 0.5 - 3.9%로 나타났다. 점토광물 중 상대적으로 많은 함량을 차지하는 Illite의 경우, 양산에 비해 시화, 군산지역에서 상대적으로 많이 검출되었으며 Chlorite와 Kaolinite의 함량은 상대적으로 적게 검출되었다. 한편 시화와 군산지역 연약점토의 광물학적 특성은 유사한 것으로 판단된다(표 6).

5. 결론

본 연구는 시화지구 연약점토의 광물학적 특성을 파악하여 그에 따른 공학적 특성과의 연관성을 정성적으로 평가하는 것이다. 시화지구 연약점토의 광물학적 특성을 파악하기 위하여 X선 형광분석, X선 회절분석, 주사전자현미경분석과 에너지분산분석 실험을 실시하였으며 시화지구 연약지반의 시추조사결과, 실내시험 및 현장시험결과와의 상관관계를 알아보았다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 시화지구 연약점토의 X선 형광분석 결과에 의하면, 시화지구 해성점토는 SiO₂ 69.36%, Al₂O₃ 13.72%,

Fe₂O₃ 4.28%, K₂O 2.97%, Na₂O 1.84%, MgO 1.69% 순으로 상대적 함량을 나타냈다. 시화지구 해성점토의 화학적 주요성분은 SiO₂와 Al₂O₃로 나타났으며 전체 함량 중 약 83.08%를 차지하였다. 구성 화학성분을 살펴보면 석영(Quartz, SiO₂)이 가장 많은 비율을 차지하고 있었다.

- (2) 시화지구 연약점토의 X선 회절분석을 수행한 결과, 시화지구 대상지반의 점토광물 함량을 살펴보면, Illite의 함량은 61.24 - 69.30%, Chlorite는 15.58 - 19.52%, Kaolinite는 11.15 - 13.97%, Smectite의 함량은 2.28 - 3.96%으로 나타났다. 전체적으로 Illite가 지배적이었으며 그 밖에도 여러 점토광물이 검출되었다.
- (3) 대상지반 지역의 점토에서 Illite로 판단되는 점토광물을 발견할 수 있었다. 발견된 Illite는 석영(Quartz)과 함께 존재하는 것으로 판단되며 매우 복잡한 구조로 엉켜있다. 그리고 육각형의 결정형을 보이는 Kaolinite와 길쭉한 엽상모양을 보이는 Chlorite의 예를 관찰할 수 있었다. 그 밖에도 유기물로는 cyclotella가 확인되었다.
- (4) 시화지구 연약점토의 물리적 특성을 보면 자연함수비는 약 20 - 50%로 나타났으며 액성한계의 경우, 약 30 - 40% 정도로 파악되었고 심도 10m 까지는 함수비와 거의 비슷한 범위에 분포하였으며 10m 이후에서는 함수비가 액성한계보다 작은 값을 나타냈다. 소성한계는 약 15 - 25% 사이로 파악되었으며 비중은 2.62 - 2.79, 초기간극비는 0.7 - 1.3으로 파악되었다.
- (5) 시화지구 연약점토의 압밀시험결과를 보면 압축지수는 0.2 - 0.4로 파악되었다. CRS 압밀시험결과는 연약점토의 표준압밀시험과 유사한 결과를 나타냈다. 대상지반 점토의 수직 압밀계수를 알아본 결과, 시화지구 연약점토의 평균적인 수직 압밀계수는 $5.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 판단된다.
- (6) 연약점토의 공학적 특성인 액성한계, 소성지수, 압축지수와 점토의 주요구성성분 간의 분석을 통하여 파악된 상관관계는 연약점토의 광물구성성분인 SiO₂

의 함량이 증가하면 액성한계, 소성지수와 압축지수는 감소하나 Fe₂O₃의 함량이 증가하면 액성한계, 소성지수와 압축지수는 증가하는 경향을 보였다.

- (7) 지역별로 연약점토의 물리적, 역학적 특성을 비교해 본 결과, 시화, 군산지역 연약점토의 함수비, 애터버그한계, 비중 및 초기간극비와 압축지수가 양산지역에서 채취된 연약점토의 함수비에 비해서 다소 적게 나타났고 압밀계수는 다소 크게 나타났다.
- (8) 지역별로 연약점토의 광물학적 특성을 비교하면 점토광물인 Illite의 경우는 시화, 군산지역에 비해 양산지역에서 상대적으로 적게 검출되었으며 Chlorite와 Kaolinite의 함량은 상대적으로 많이 검출되었다. 시화지구 연약점토의 광물학적 특성은 군산지역의 연약점토와 유사한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 삼성건설과 (주)삼안건설기술공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김낙경, 주용선, 이우진, 임형덕 (2001), "군산지역의 점토광물에 대한 연구", 대한토목학회 2001학술발표회 논문집.
2. 김길수, 임형덕, 김대규, 이우진 (2001), "양산점토의 비배수 전단강도 특성", 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제4호, pp.259-267.
3. 이연규, 황진연, 정규귀, 최정민 (1996), "광양만 및 여수해만 퇴적환경 변화 - 퇴적물 특성과 점토광물 분포를 중심으로", Jour.

Korean Earth Science Society, Vol.17, No.5, pp.407-416.

4. 이우진, 임형덕, 이원재 (1998), "일정변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성점토의 압밀특성연구", 한국지반공학회 논문집, 제14권, 제4호, pp.47-60.
5. 주용선 (2001), 군산 연약점토의 지반공학적 특성, 성균관대학교 석사논문.
6. 주종진, 임형덕, 이우진, 김대규, 김형주, 김낙경 (2002), "군산점토의 2차압밀 감소를 위한 Surcharging 평가", 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제4호, pp.127-135.
7. 최진용 (1991), "한반도 주변해역 표층퇴적물의 점토광물에 관한 연구", 자연과학연구소 논문집, 군산대학교, Vol.6, pp.131-145.
8. 한국토지공사 (1996), 양산물금지구 택지개발사업조성공사(2단계) 토질조사보고서.
9. Biscaye, P.E. (1964), "Distinction between kaolinite and chlorite in recent sediment by X-ray diffraction", *Am. Mineral.*, 49: pp.1281-1289.
10. Biscaye, P.E. (1965), "Mineralogy and sedimentation of recent deep - sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans", *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76: pp.803-832.
11. Devine, S. B., Ferrell, R. E., Jr., and Billings, G. K. (1972), "A quantitative X-ray diffraction technique applied to the fine-grained sediments of the deep Gulf of Mexico", *Jour. Sed. Petrol.*, 42: pp.468-475.
12. Gibbs, R.J. (1970), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Interscience Pub., pp.531-539.
13. Gibbs, R.J. (1971), "Clay mineral segregation in the marine environment", *Jour. Sed. Petrol.*, Vol.47, pp.237-243.
14. Griffin, G.M. (1970), *Procedures in Sedimentary Petrology*, Interscience Pub., pp.541-569.
15. McHardy, W.J., Wilson, M.J., and Tait, J.M. (1982), "Electron microscope and X-ray diffraction studies of filamentous illitic clay from sandstones of the Magnus field", *Clay Miner.*, Vol.17, pp.23-29.
16. Pierce, J.W. and Siegel, F.R. (1969), "Quantification in clay mineral studies of sediments and sedimentary rocks", *Jour. Sed. Petrol.*, Vol.39, pp.187-193.

(접수일자 2004. 10. 12, 심사완료일 2004. 11. 26)