

부산점토의 압축특성

Compressibility Characteristics of Pusan Clays

장 우 영¹⁾, Woo-Young Chang, 정 성 교²⁾, Sung-Gyo Chung, Pham Huy Giao³⁾,
김 규 종⁴⁾, Gyu-Jong Kim

¹⁾동아대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.

²⁾동아대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.

³⁾동아대학교 토목공학과 계약교수, Visiting Professor, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.

⁴⁾동아대학교 토목공학과 박사과정, Doctoral Student, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.

SYNOPSIS : In order to examine the compressibility characteristics of cohesive soils in the mouth of the Nakdong river, the oedometer tests were performed on undisturbed and reconstituted samples obtained by continuous boring typically at 3 different sites. It is meaningful to compare the consolidation behavior of natural clays with a reference state because the natural clays are depending on the stress history, sedimentary environment and geological history. In this study, the insitu state of the Pusan clays was investigated using the concepts of ISL(Nagaraj, 2000) and ICL and SCL(Burland, 1990). And for the purpose of confirming the existence of the underconsolidated clays, a standpipe type piezometer test and a dissipation test by piezocone were performed at their sites. Consequently, the Pusan clays were evaluated as normally consolidated clays.

Key words : Pusan clay, Intrinsic State Line, Intrinsic Compression Line, natural sedimentation compression curve, Sedimentation Compression Line.

1. 서 론

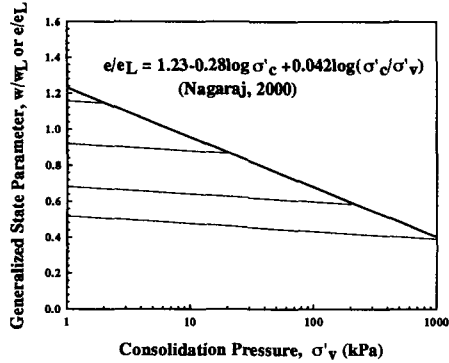
낙동강 하구유역에는 대단위 공단 및 주거지를 조성하기 위하여 매립과 지반개량이 수행되고 있는데, 이를 위하여 수많은 지반조사가 실시되었음에도 불구하고 이 지역의 지반특성을 명확히 규명하지 못하고 있는 실정이다. 예로서, 연약점성토의 퇴적환경 및 연대, 구역 및 깊이별의 토질정수와 그의 변화, 피압수의 존재, 미압밀 점토의 존재 가능성 등으로 들 수 있다. 특히, 자연퇴적 점토의 압축특성을 선명히 규명할 수 있다면, 이 지역에서 야기되었던 침하량 및 소요시간의 과소평가 문제를 해결하는데 크게 도움이 될 것이다.

본 논문에서는 낙동강 하구유역에 분포하고 있는 점성토의 압축특성을 규명하기 위한 일환으로, 대표적인 3위치를 선정하여 연속시료 채취법으로 채취된 불교란시료 및 재구성시료에 대해서 표준압밀시험을 수행하여 구한 결과를 Intrinsic 개념을 이용하여 부산점토의 압축특성을 분석하였다. 또한 standpipe type piezometer에 의한 실험 및 piezocone 소산시험을 수행하여, 자연점토내의 잔류간극수압의 존재를 확인하였다.

2. 기존의 연구 결과

2.1 Intrinsic State Line (Nagaraj, 2000)

Nagaraj(2000)는 응력이력, 시간, 고결작용의 영향이 없는 흙-함수비 체계의 가장 기본적인 상태는 그 흙의 액성한계 상태라고 하였다. 재성형된 시료의 일차원 압축곡선 및 팽창곡선을 액성한계의 간극비로 정규화한 것이 점토의 기준상태가 되는 Intrinsic State Line이라 하였다(그림 1). 그 식은 식(1)과 같다.



$$\left[\frac{e}{e_L} \right] = 1.23 - 0.276 \log \sigma'_c + 0.042 \log \left[\frac{\sigma'_c}{\sigma'_v} \right] \quad (1)$$

여기서, σ'_c = 선행압밀응력

σ'_v = 압밀응력

또한 Nagaraj(2000)는 재성형 점토의 ISL(Intrinsic State Line), 자연점토의 유효과재응력 및 초기간극비의 관계로부터 연약지반의 현상상태를 분류하였다. 분류방법을 요약하면 다음과 같다.

그림 1. Intrinsic State Line

- ① 정규압밀 미고결점토 (Normally Consolidation Uncemented Clays): ($e_0/e_L, \sigma'_{vo}$) 가 ISL에 따라 놓여있고, 비배수전단강도가 5~10kPa로 초연약점토로 분류.
- ② 고결 및 미고결 과압밀점토(Overconsolidated Clays with or without Cementation): ($e_0/e_L, \sigma'_{vo}$) 가 ISL 아래에 위치 할 때.
- ③ 자연고결 점토(Naturally Cemented Clays): ($e_0/e_L, \sigma'_{vo}$) 가 ISL 오른쪽에 위치 할 때.

2.2 Intrinsic Compression Line, Sedimentation Compression Line (Burland, 1990)

2.2.1 Intrinsic Compression Line

Burland(1990)는 재성형된 점토의 압축특성을 자연퇴적점토의 특성을 규명하는 지표로 사용하였다. 재성형된 점토의 특성은 구조적 영향(fabric and bonding)을 받은 자연상태의 흙과 다르게 그 흙의 고유한 것이므로 Intrinsic이라 표현하였다.

ICL(Intrinsic Compression Line)은 액성한계의 1.0~1.5배 함수비로 재성형된 점토의 압축곡선이다. 재성형된 점토의 압밀시험 결과에서 하중 100kPa일 때의 간극비와 압축지수를 각각 e^*_{100} 및 Cc^* 로 표현하였다. 이 상수들을 식(2)와 같이 정규화하여 간극비지수 I_v 로 나타내었다(그림 2).

$$I_v = \frac{e - e^*_{100}}{e^*_{100} - e^*_{1000}} = \frac{e - e^*_{100}}{Cc^*} \quad (2)$$

또한 재성형된 점토에 대한 실험이 수행되지 않은 경우 액성한계시의 간극비 e_L 과의 상관관계를 이용하여 e^*_{100} 및 Cc^* 를 구할 수 있다. 식(3)과 식(4)는 소성도표의 A선 위에 위치하는 점토에 대해서 잘 일치한다고 하였다.

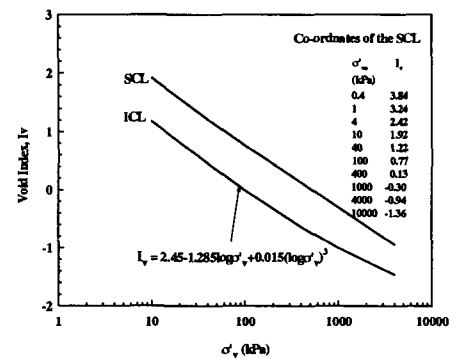


그림 2. ICL과 SCL (Burland, 1990)

$$e_{100}^* = 0.109 + 0.679e_L - 0.089e_L^2 + 0.016e_L^3 \quad (3)$$

$$Cc^* = 0.256e_L - 0.04 \quad (4)$$

Burland(1990)는 여러 재성형된 점토의 압축곡선을 정규화된 간극비지수 I_v 로 나타내어 ICL(Intrinsic Compression Line)을 하나의 곡선인 식(5)로 나타내었다.

$$I_v = 2.45 - 1.285x + 0.015x^3 \quad (5)$$

여기서, $x = \log \sigma_v'$ (kPa).

2.2.2 Sedimentation Compression Line

연속적인 초기간극비와 유효과재응력을 이용하여 정규압밀점토의 퇴적압축곡선을 나타낼 수 있다. Burland(1990)는 이를 I_{v0} 로 정규화 하여 퇴적압축곡선을 ICL(Intrinsic Compression Line)과 직접적으로 비교하였다. I_{v0} 는 식(6)과 같다.

$$I_{v0} = \frac{e_0 - e_{100}^*}{Cc^*} \quad (6)$$

여기서 e_0 = 초기간극비.

여러종류의 정규압밀 점토의 퇴적압축곡선(Skemton, 1970)을 I_{v0} 와 $\log \sigma'_{v0}$ 의 함수로 나타낸 결과, 연속되는 하나의 선으로 나타났다(그림 2). Burland(1990)는 이 선을 Sedimentation Compression Line(SCL)이라 하였다.

3. 지반특성 및 토질시험

3.1 지반특성

본 연구의 대상지반은 김해 국제공항 2단계 확장공사가 진행 중인 김해지역, 낙동강 최하구부에 위치한 을숙도지역 그리고 부산·경남권 경마장 조성공사가 실시되고 있는 장유지역이다. 그림 3은 대상지반의 위치를 나타내고 있다. 그림 4는 각각 지반의 토질 주상도를 나타낸 것이다. 그리고 그림 5는 대상지반의 토질특성을 나타낸 것이다. 비배수전단강도는 깊이에 따라 증가하는 정규압밀 점토의 특성(Bjerrum, 1967)을 가진다. 3지역에 대하여 표준압밀시험에 의한 과압밀비 OCR은 0.7~1.3이다.

3.2 토질시험

(1) 시 료

본 연구에 사용된 시료는 각 대상지반에서 1.0m 간격으로 NX규격의 샘플러를 이용하여 연속시료를 채취하였다. 그림 4에서 빗금친 부분이 시료가 채취된 층이다

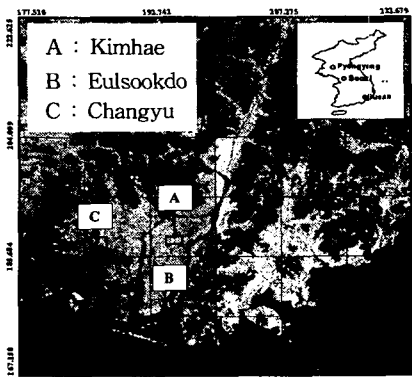


그림 3. 대상지반의 위치

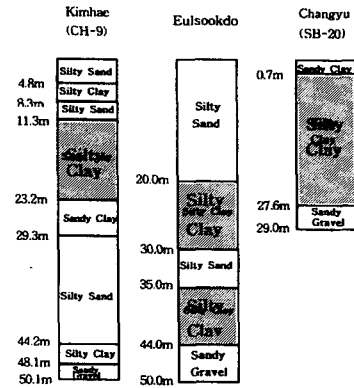


그림 4. 토질 주상도

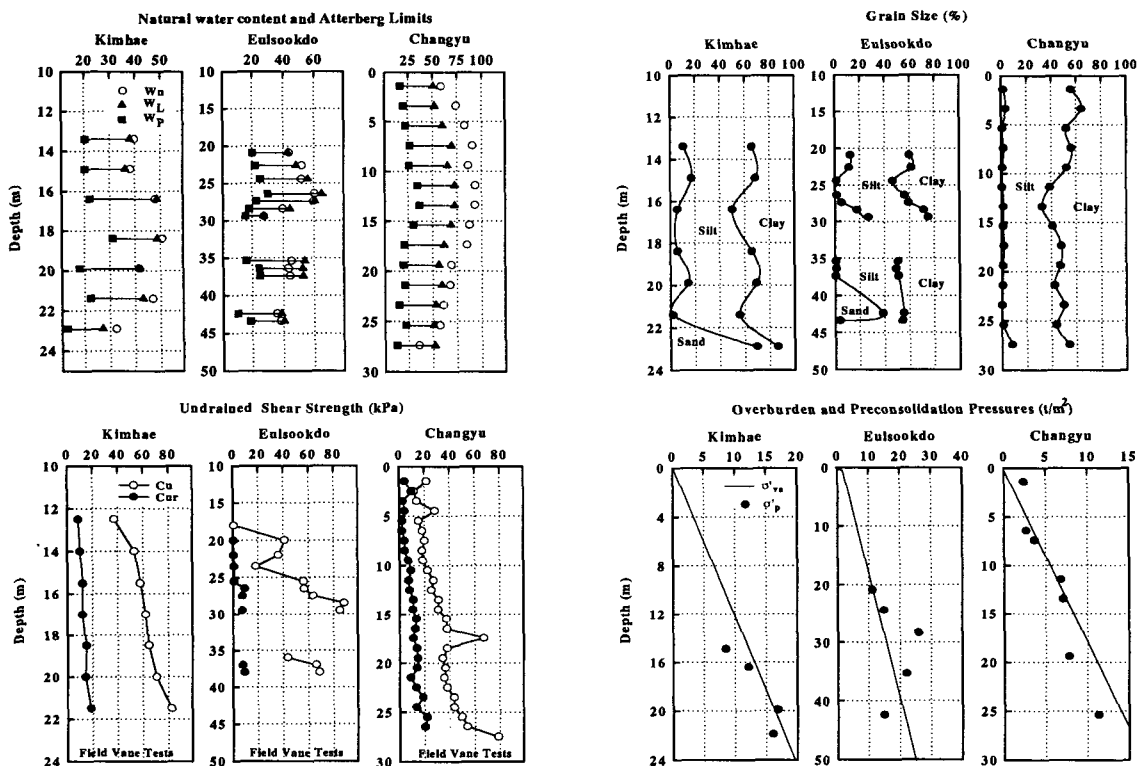


그림 5. 토질 특성

(2) 실험종류 및 방법

본 연구에서는 불교란시료와 재성형시료에 대해서 표준압밀시험을 수행하였다. 불교란시료는 연직 방향으로 tube에서 추출하였으며, 재성형 시료는 액성한계시 함수비의 1.0~1.5배의 함수비로 교란시켰다. 시료의 직경은 6.0cm, 높이는 2.0cm이며, 하중증가비를 1로 하여 24시간동안 재하였다.

4. 재성형점토의 압축특성

4.1 ISL의 분석

그림 6은 재성형점토의 표준압밀시험 결과이다. 전체적으로 액성한계가 클수록 더 급한 기울기를 가지며, 압밀하중이 증가함에 따라 점차 수렴하는 경향을 가진다. 그림 7은 그림 6의 결과를 액성한계 시의 간극비로 정규화시킨 Intrinsic State Line을 나타낸 것이다. Nagaraj(2000)가 제시한 선보다 완만한 기울기로 약간 위에 위치하였으나 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 실험결과로부터 구한 Intrinsic State Line의 식은 식 (7)과 같다.

$$\frac{e}{e_L} = 1.28 - 0.26 \log \sigma'_v \quad (7)$$

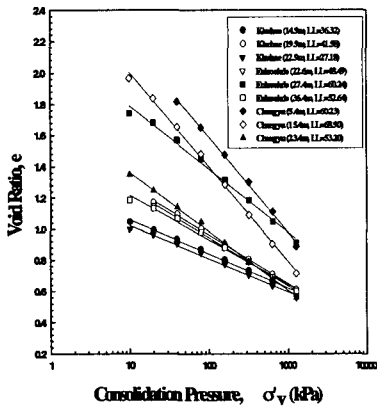


그림 6. 재성형 점토의 압축곡선

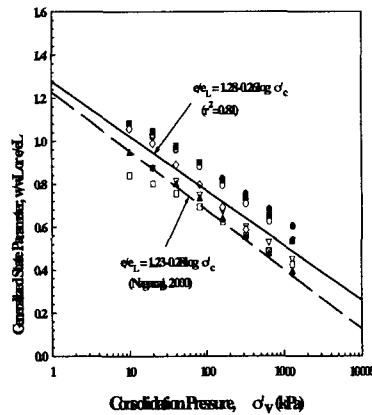


그림 7. 부산점토의 ISL

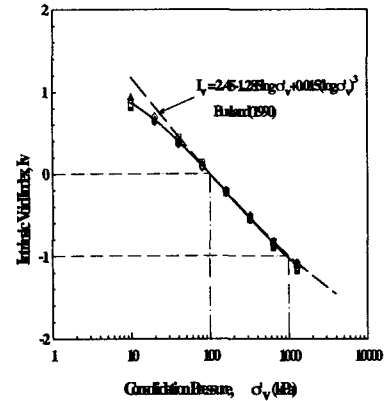


그림 8. 부산점토의 ICL

4.2 ICL의 분석

그림 8은 그림 6의 결과를 간극비지수 I_v 로 표현한 Intrinsic Compression Line을 나타낸 것이다. 부산점토를 이용한 실험결과로부터 구한 Intrinsic Compression Line과 Burland(1990)가 제안한 선과 비교할 때, 낮은 하중에서는 다소 차이가 있으나 높은 하중 즉, 50kPa 이상일 때는 아주 좋은 일치를 보이고 있다. 실험결과로부터 구한 Intrinsic Compression Line은 식 (8)과 같다. 표 1은 실험결과로부터 구한 e^*_{100} 과 Cc^* 를 나타낸 것이다.

$$I_v = 0.957 + 0.529 \log \sigma'_v - 0.270 (\log \sigma'_v)^2 + 0.108 (\log \sigma'_v)^3 \quad (8)$$

표 1. 재성형점토의 e^*_{100} 과 Cc^*

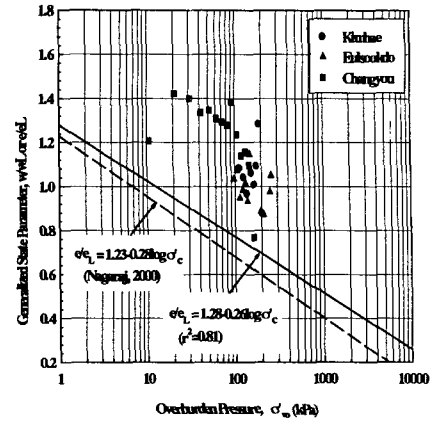
지역	심도 (m)	e^*_{100}	Cc^*	지역	심도 (m)	e^*_{100}	Cc^*	지역	심도 (m)	e^*_{100}	Cc^*
김해	14.9	0.841	0.219	울속도	22.6	0.950	0.310	장유	5.4	1.600	0.584
	19.9	0.962	0.315		27.4	1.410	0.407		15.4	1.420	0.600
	22.9	0.820	0.214		36.4	0.940	0.287		23.4	1.000	0.376

5. 자연점토의 압축특성

5.1 자연점토의 분류

Nagaraj(2000)는 ISL과 유효과재응력(σ'_{vo}) 및 초기간극비(e_0)의 관계로부터 연약점토지반을 분류하였다. 그림 9는 부산점토의 ISL과 유효과재응력 및 초기간극비의 관계를 나타낸 것이다. 대상지반의 현

장상태는 ISL 위에 위치하고 있다. 따라서 연구대상 지역에서 얻어진 부산점토는 고결점토(cemented clay)로 분류할 수 있다.



5.2 압축특성

자연점토의 압축특성을 ICL과 SCL상에서 분석하였다. 간극비를 간극비지수, I_{v0} 또는 I_v 의 향으로 나타내기 위해서는 재성형된 점토의 압축곡선에서 얻을 수 있는 e^*_{100} 과 Cc^* 의 값들이 필요하다. 재성형점토의 압밀시험이 수행되지 못한 심도의 시료에 대해서는 e^*_{100} 과 Cc^* 를 액성한계시의 간극비 e_L 과의 상관관계로부터 결정할 수 있다(Burland, 1990).

그림 10은 e^*_{100} 과 e_L 과의 상관관계, 그림 11은 Cc^* 와 e_L 과의 상관관계를 나타낸 것이다. e^*_{100} 과 Cc^* 는 모두 e_L 에 비례하며, Burland(1990)가 제안한 경험식에 근접하고 있으나 분산되는 경향을 보이고 있다. 그래서, e^*_{100} 과 Cc^* 를 결정하는데 있어 새로운 상관관계식을 다음과 같이 적용하였다.

$$e^*_{100} = 0.749e_L - 0.092 \quad (9)$$

$$Cc^* = 0.359e_L - 0.116 \quad (10)$$

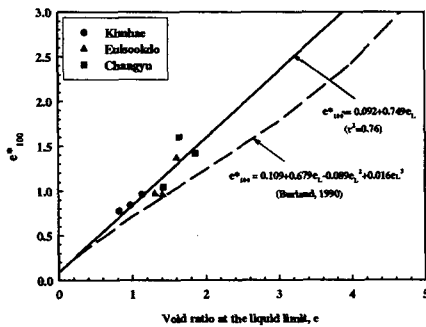


그림 10. e^*_{100} 과 e_L 의 상관관계

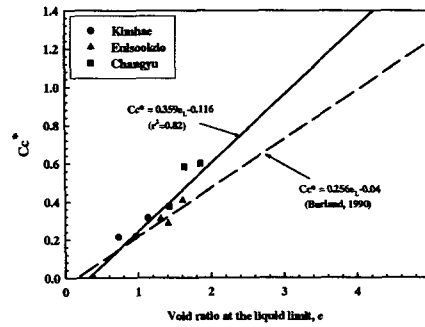


그림 11. Cc^* 과 e_L 의 상관관계

그림 12는 김해점토의 자연퇴적압축곡선이다. 점토입자들의 고결로 인해 자연퇴적압축곡선이 SCL보다 위에 위치하지만 SCL에 거의 근접하므로 정규압밀점토의 특성을 가진다. 또한 곡선의 모양이 톱니 모양을 가지는 것은 지반이 불균질하기 때문이라 생각된다. 그림 13은 김해점토에 대한 표준압밀시험 결과이다. 4개의 압축곡선이 모두 항복응력(선행압밀응력) 이후에 SCL 보다 급한 기울기로 ICL에 수렴하는 특성을 보인다. 이러한 사실은 이 점토가 정규압밀점토라는 것을 뒷받침하고 있다.

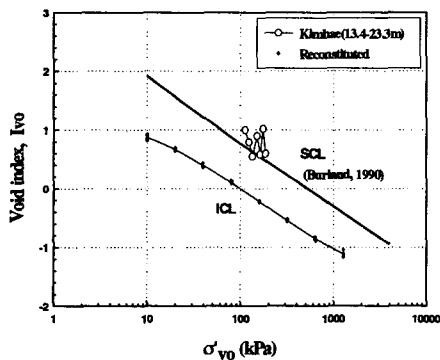


그림 12. 김해점토의 자연퇴적압축곡선

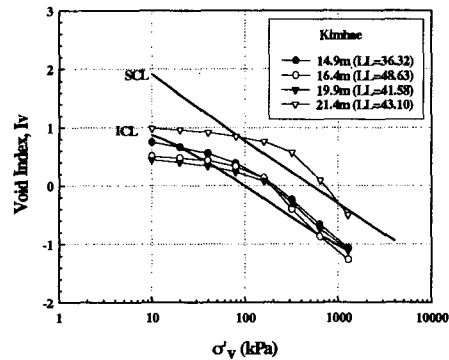


그림 13. 김해점토의 표준압밀시험 결과

그림 14는 을숙도 지역의 상부 점토층과 하부 점토층에 대하여 자연퇴적압축곡선을 나타낸 것이다. 을숙도점토는 상부사질토층 그리고 점토층 상·하부에 사질토층의 존재로 자연퇴적압축곡선의 변화 폭이 상당히 크다. 또한 점토입자들의 고결로 SCL보다 위쪽에 위치하지만 대체로 SCL에 근접하는 정규압밀점토의 특성을 가진다. 그림 15는 을숙도점토의 표준압밀시험 결과로써, 김해점토와 마찬가지로 항복응력(선행압밀응력) 이후 SCL 보다 급한 기울기로 ICL에 수렴하는 특성을 가진다. 이러한 사실들을 미루어 보아 본 점토도 역시 정규압밀상태에 있다고 판단된다.

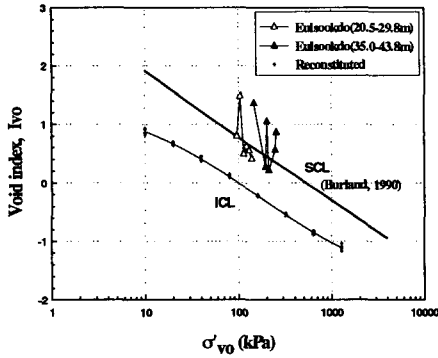


그림 14. 을숙도점토의 자연퇴적압축곡선

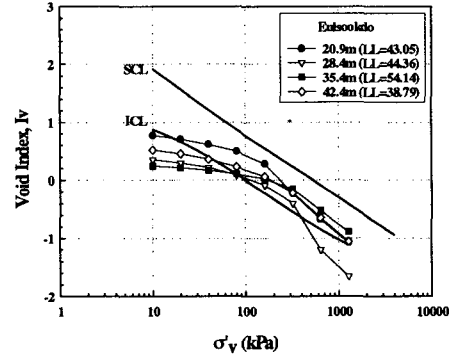


그림 15. 을숙도점토의 표준압밀시험 결과

그림 16은 장유지역의 것으로 지층이 전반적으로 균질함을 알 수 있다. 다른 두 지역과 마찬가지로 점토입자들의 고결로 인해 자연퇴적압축곡선이 SCL보다 위쪽에 있지만, 그것이 SCL과 거의 평행한 경향을 가지는 것으로 보아 정규압밀점토로 생각된다. 그러나 가장 깊은 심도(27.0m)의 현장상태는 ICL 근처에 있음을 알 수 있다. 이곳에서는 조밀한 사질성분을 더 많이 함유하고 있기 때문이다. 그림 17은 장유점토의 압축곡선이다. 장유점토의 압축곡선은 항복점(선행압밀응력)이후 SCL을 지나 다른 두 지역보다 더 급한 기울기로 ICL에 수렴하는 특성을 보인다.

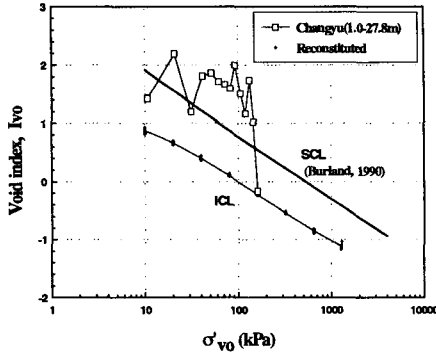


그림 16. 장유점토의 자연퇴적압축곡선

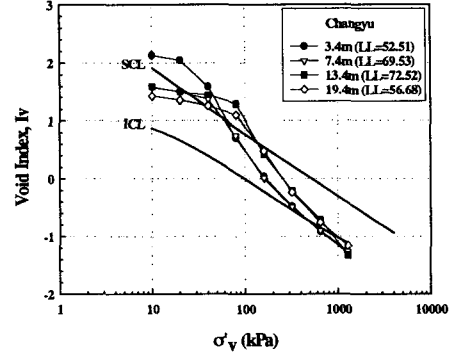


그림 17. 장유점토의 표준압밀시험 결과

결과적으로 세 지역 모두 자연퇴적압축곡선이 SCL의 바로 위에 또는 상부에 위치하였다. 이 경우, 압밀시험에 의한 압축곡선은 항복점 이후 SCL 보다 급한 기울기로 ICL에 수렴하였다. 이는 다른 지역에 존재하는 정규압밀점토의 압축특성과 유사한 압축특성을 나타낸다는 것을 의미한다(Burland, 1990). 그리고 퇴적특성 및 압축특성이 지역별로 다른 것은 자연점토의 고결정도, 점토층 형성시의 퇴적환경 등의 차이에 따른 원인으로 생각된다.

6. 자연점토층내에서 잔류간극수압의 확인 실험

정규압밀 및 과압밀점토에 대한 압축특성을 규명하기 위해서는 앞에서 기술된 두 가지의 방법으로 접근이 가능하였다. 그러나, 현재까지 논란의 여지로 남아있는 미압밀(underconsolidation)점토에 대한

문제는 이러한 방법에 의하여 직접 해결할 수가 없다. 즉, 미압밀점토에 대해서는 잔존하는 과잉간극수압을 구할 수 없으므로 유효연직응력을 직접 계산할 수 없을 것이다. 따라서, 미압밀점토의 존재, 즉 과잉간극수압의 존재를 확인하기 위하여 다음과 같이 standpipe type piezometer 및 piezocone에 의한 소산시험이 수행되었다.

그림 18은 piezocone 소산시험과 piezometer 시험결과를 나타낸 것이다. 을숙도 지역에서 piezocone 소산시험을 시행한결과, 본 지반은 잔류간극수압이 존재하고 있지않는 정규압밀지반으로 규명되었다(정 등, 1999). 김해현장(김해 국제공항)과 장유(경마장 조성공사)현장에서 수행된 piezometer 시험결과, 김해 및 장유현장의 경우에 잔류간극수압이 존재하고 있지 않으므로, 앞절에서 이루어진 분석결과와 종합하여 볼 때 이 점토들은 정규압밀점토인 것으로 규정할 수 있다.

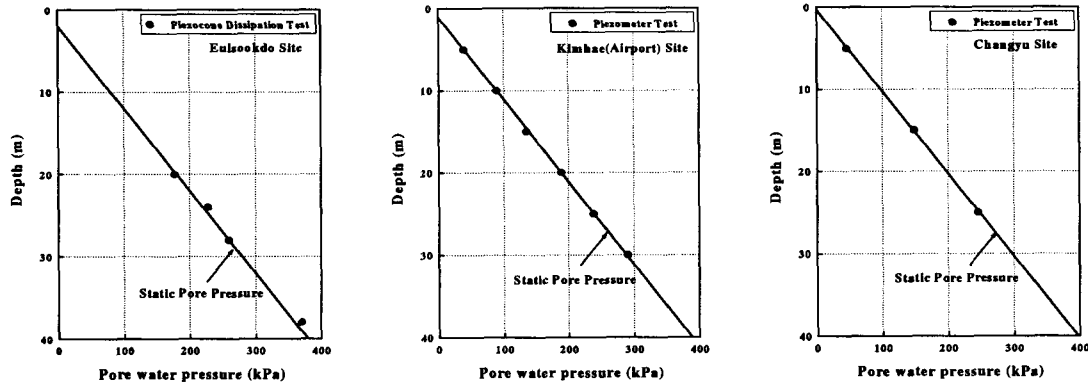


그림 18. 피에조콘 소산시험(정 등, 1999) 및 피에조미터 시험결과

7. 결 론

낙동강 하구지역에 폭넓게 분포하고 있는 점성토의 압축특성을 규명하기 위하여 대표적인 3지역에 대하여 연속시료의 채취 및 압밀시험을 수행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) ISL을 이용하여 점토의 자연퇴적상태를 분석한 결과 3지역의 점토는 모두 자연고결점토로 분류되었다.
- (2) 모든 점토의 자연퇴적압축곡선이 SCL 바로위 또는 위쪽에 위치하며, 표준압밀시험에서 얻은 압축곡선이 항복응력(선행압밀응력) 이후에 SCL보다 급한 기울기로 ICL에 수렴하는 특성을 보이는 것으로 보아 정규압밀점토의 특성을 보였다. 여기서, 자연퇴적압축곡선이 SCL보다 위쪽에 위치하는 이유는 점토입자의 고결 때문으로 생각되었다.
- (3) 피에조콘 소산시험 및 피에조미터 시험결과에 의하면 잔류간극수압이 존재하지 않으므로 이들 지역에서는 미압밀점토가 존재하지 않는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 정성교, 김규중, 이대명, 조기영(1999), “낙동강 삼각주 점토에 대한 과압밀비의 평가”, 한국지반공학회 논문집, 제 15권, 제4호, pp.85~97.
2. Bjerrum, L.(1967), “Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings”, *Geotechnique* 17, No.2, pp.81~118.
3. Burland J. G.(1990), “On compressibility and shear strength of natural clays”, *Geotechnique* 40, No.3, pp.329~378.
4. Nagaraj, T. S.(2000), *Naturally and induced cemented soft clays*, One-day Lecture Note, Dong-A University, April 12.
5. Skempton, A. W.(1970), “The consolidation of clays by gravitational compaction”, *Q. J. Geol. Soc.* 125, pp.373~411.