

부산점토와 인천점토의 압축지수 분석

Study of the compression index for Busan and Incheon clays

홍성진¹⁾, Sung-Jin Hong, 최영민²⁾, Yung-Min Choi, 이주형²⁾, Joo-Hyung Lee,
이문주³⁾, Moo-Joo Lee, 이우진⁴⁾, Woojin Lee

¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경 공학부 박사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University

²⁾ 고려대학교 건축·사회환경 공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University

³⁾ 고려대학교 건축·사회환경 공학부 박사후과정, Researcher, School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University

⁴⁾ 고려대학교 건축·사회환경 공학부 교수, Professor, School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University

SYNOPSIS : The compression index is one of the geotechnical properties which represent the compressibility of clay. The compression index are generally obtained from consolidation tests, otherwise it has been predicted by soil properties due to the efficiency time and cost. In this study, consolidation tests result for Busan and Incheon clays are analyzed to suggest the correlations between the compression index and soil properties. It is found that the compression index is well correlated with the void ratio and natural water contents. The prediction errors, which is difference of compression indices between measured from consolidation test and predicted by liquid limits, decrease with $\Delta e_0/e_L$.

Keywords : compression index, liquid limits, void ratio, consolidation test, reconstituted clay

1. 서 론

항만, 해안도로 등이 해안 연약지반이 개발되면서, 해성점토지반의 침하가 중요한 문제로 대두되고 있다. 일반적으로 점토의 압밀침하는 압축지수를 이용하여 산정하는데, 압축지수는 $e-\log p'$ 그래프에서 정규압밀영역의 직선의 기울기이다. 자연점토의 압축지수는 압밀시험을 통해 산정하나 비교란 시료의 채취와 시험에 시간과 비용이 많이 소비되므로 물성치와 압축지수의 관계를 이용하여 압축지수를 추정한다. 이러한 경험적 제안식은 Skempton (1944)이 재성형 시료의 압축지수를 액성한계에 연관시킨 이후 액성한계, 함수비, 간극비, 소성지수, 수축지수, 간극률 등의 다양한 물성치와 압축지수의 관계가 제안되었다. 그러나 기본물성치와 압축지수와의 관계는 현장에 따라 차이가 발생하므로, 지역별로 적합한 경험식을 사용하여 추정하여야 한다.

본 연구는 부산 및 인천송도 점토의 압축지수와 물성치 관계에 관한 것으로, 기존 제안식과 비교하고 물성치에 따른 추정식을 제안하였다. 그리고 제안한 추정식으로 오차분석을 통해 물성치별 추정식의 정확성을 파악하였으며, 추정오차와 지반의 상태특성을 나타내는 $\Delta e_0/e_L$ 과 비교하여 보았다. 이를 위해 본 연구에서는 부산지역 101개, 인천송도지역 51개 압밀시험결과를 분석하였다.

2. 기본물성 시험결과

본 연구는 부산신항 및 양산지역과 인천송도지역을 대상으로 실시하였다. 부산신항과 양산현장이 포함되어 있는 부산점토는 낙동강 하구에 퇴적된 점토로 최대 심도 55m까지 분포한다. 부산점토는 심도 10m~30m를 경계로 2개 층으로 구분되며, 공간적으로 균질한 특성을 가지며 점토의 주요성분은 illite이다(홍성진 등 2009, 김상균 & 김윤태 2006). 인천송도지역은 원지반에 8m 내외의 매립을 한 지반으로 원지반은 심도에 따라 모래/실트/점토가 복잡하게 분포하며, 점성토층은 대부분 심도 20m~30m까지 분포한다(김동휘 등 2009). 그림 1은 대상지반의 물성치를 나타낸 것으로, 부산지반의 함수비 및 액성한계는 35%~85%, 소성한계는 20%~40%에 분포하였다. 인천지반의 경우 함수비 및 액성한계는 30%~50%, 소성한계는 20%~30%에 분포하였다. 부산신항의 함수비 및 액·소성한계는 EL-22m정도까지 증가하다 감소하는 경향이 나타난 반면, 인천지반의 경우 명확한 경향이 나타나지 않았다. 통일분류법으로 분류하면 부산점토의 경우 EL-30m 까지는 CH로, EL-30m 이하의 심도에서 CL로 분류되고, 인천점토의 경우 CL또는 ML로 분류된다.

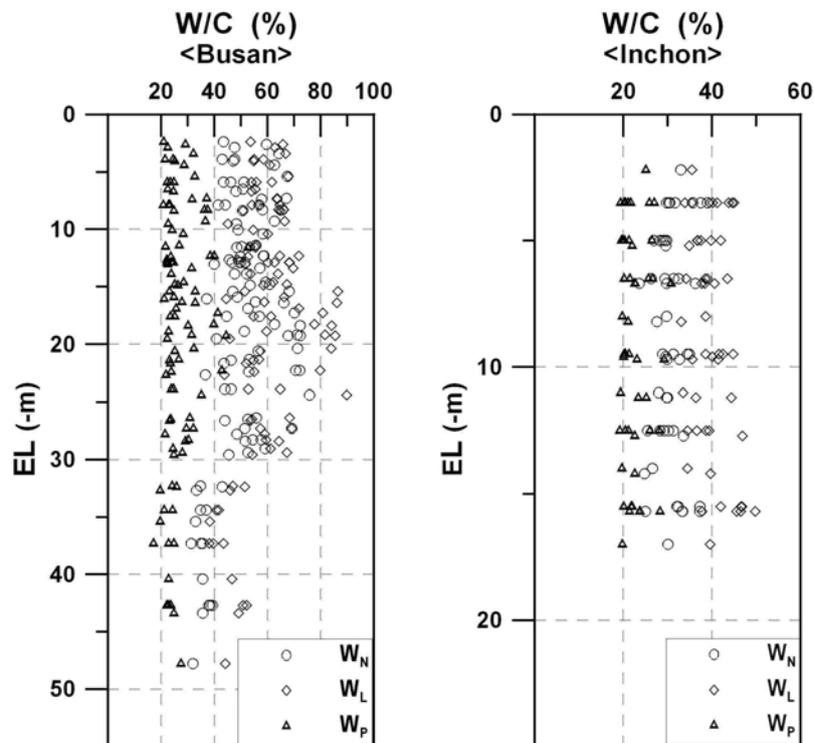


그림 1. 대상지반의 심도에 따른 기본물성

3. 압밀시험 결과

그림 2는 대상지반의 압밀시험 결과를 심도에 따라 나타낸 것으로, 그림 2의 압축지수는 Schmertmann (1955)의 교란효과 보정방법을 이용하여 산정하였다. 부산점토와 인천점토의 압축지수는 각각 0.4~1.6과 0.2~0.5로 분포하였다. 부산점토의 경우 함수비 및 액·소성과 마찬가지로 EL-22m까지 증가하다 감소하는 경향이 나타났으며, 인천점토는 심도에 따라 특별한 경향이 나타나지 않았다. 부산지반의 과압밀비는 상부 EL-10m 이하 심도에서는 대부분 과압밀비가 1.5 이하로 나타났다. 인천지반의 경우 과압밀비가 부산지역에 비해 복잡하게 나타났으나 대부분 1.5 이하로 나타났으므로, 두 지역 모두 정규압밀 지반으로 판단된다.

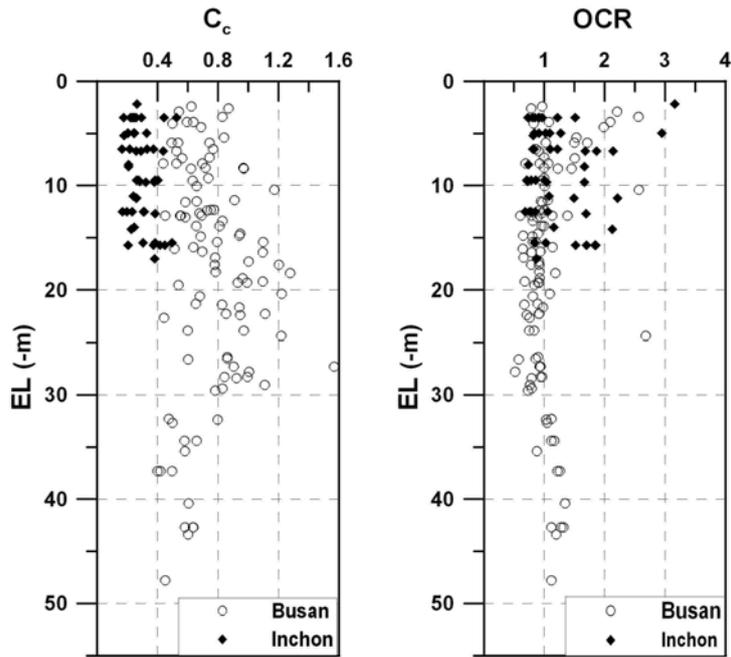


그림 2. 압밀시험 결과

4. 압축지수와 물성치의 관계

그림 3은 압축지수와 물성치의 관계를 나타낸 것으로, 그림의 실선은 기존 제안자들의 추정식을 표현한 것이다. 그림 3을 보면 인천점토의 압축지수와 물성치 관계가 기존 연구자들의 제안식과 유사한 범위를 갖는 반면, 부산점토는 기존 제안식에 비해 높은 압축지수를 나타냈다. 표 1은 부산 및 인천점토의 압축지수와 물성치의 경험적 관계식 및 관계식의 결정계수(R^2)를 나타낸 것이다. 관계식은 액성한계, 함수비, 간극비, 소성지수와 압축지수의 관계를 선형 회기분석하여 구하였다. 표 1을 보면 압축지수와 물성치간의 결정계수는 간극비, 함수비, 액성한계, 소성지수 순으로 나타났는데, 점토의 물리적 특성을 나타내는 액성한계와 소성지수에 비해 상태특성을 나타내는 간극비와 함수비가 압축지수와 높은 결정계수를 나타냈다. 이는 간극비와 액성한계가 부산 및 인천 점토의 압축지수와 높은 상관성을 가짐을 의미하며, Azzouz 등 (1976)과 Yoon 등 (2004)의 결과와 일치한다. 특이한 점은 부산 및 인천 단일지역 추정식의 결정계수 보다 두 지역을 종합한 추정식의 결정계수가 높다는 것이다. 이것은 부산과 인천지역 물성치 범위가 달라서 발생된 현상일 뿐, 동일현장에서 구한 관계식으로 압축지수를 추정할 경우 가장 높은 정확성을 나타냈다.

표 1. 물성치와 압축지수 관계식

물성치	현장	관계식	R^2	물성치	현장	관계식	R^2
액성한계 (%)	부산	$C_c=0.012(w_L+3)$	0.389	간극비	부산	$C_c=0.57(e_0-0.11)$	0.598
	인천	$C_c=0.015(w_L-20)$	0.514		인천	$C_c=0.79(e_0-0.48)$	0.691
	부산+인천	$C_c=0.018(w_L-20)$	0.679		부산+인천	$C_c=0.69(e_0-0.37)$	0.816
함수비 (%)	부산	$C_c=0.015(w_N-1)$	0.546	소성지수 (%)	부산	$C_c=0.013(I_p+26)$	0.272
	인천	$C_c=0.021(w_N-17)$	0.683		인천	$C_c=0.008(I_p+19)$	0.233
	부산+인천	$C_c=0.019(w_N-13)$	0.786		부산+인천	$C_c=0.021(I_p+1)$	0.585

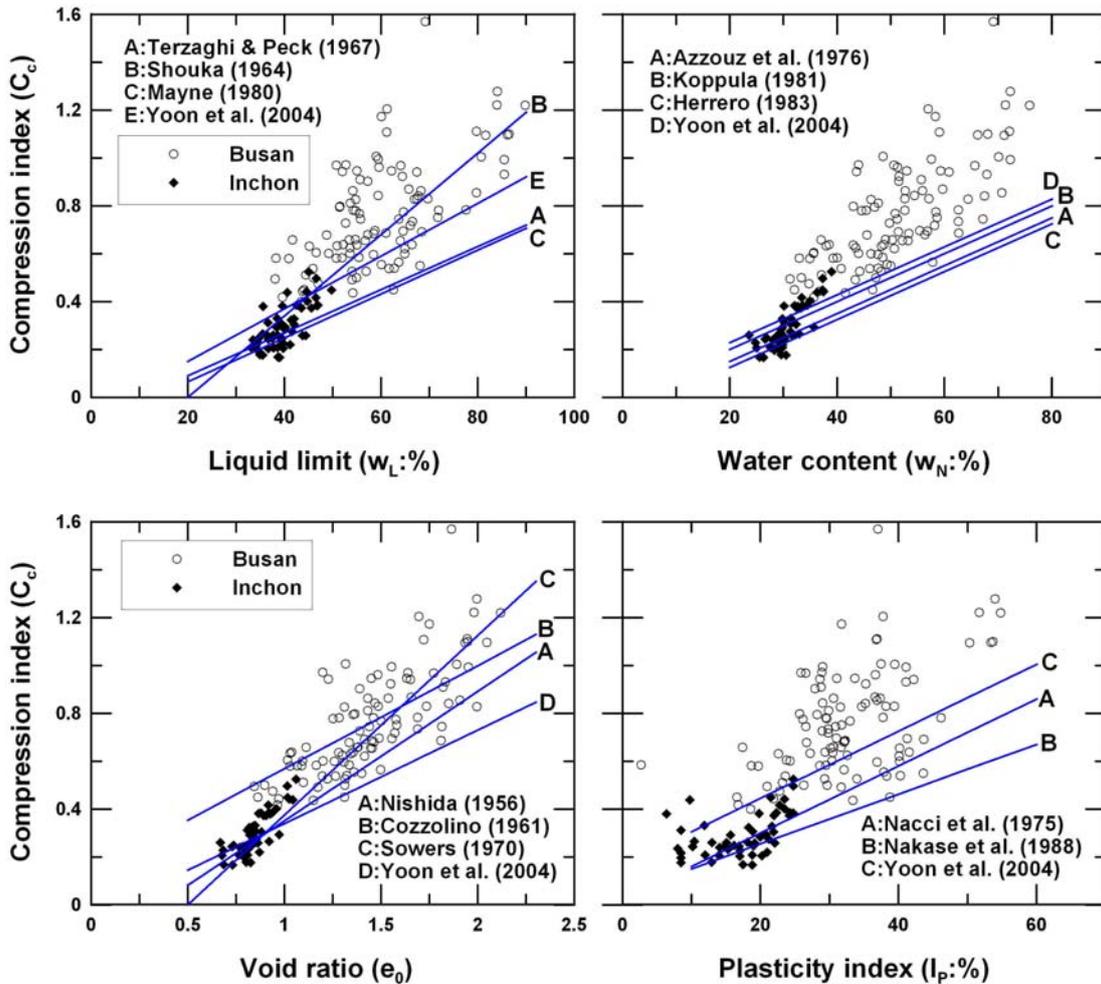


그림 3. 물성치에 따른 압축지수

5. 오차원인 분석

본 연구에서는 추정오차를 분석하기 위해 재성형점토의 압축특성과 오차율을 비교하였다. 다양한 환경에 영향을 받는 자연점토의 압축특성과 달리 재성형점토의 압축특성은 액성한계나 소성지수 등의 점토의 물리적 특성과 일정한 관계를 가진다(Wroth & Wood 1978, Nagarj & Srinvasa Murthy 1983). Nagarj & Srinvasa Murthy (1983)는 재성형점토의 간극비, 액성한계, 구속응력의 관계를 식 (1)과 같다고 제안하였으며, Burland (1990)은 간극지수(I_v) 개념을 도입하여 재성형점토의 압축특성을 나타냈다. 재성형점토의 e - $\log p'$ 그래프는 퇴적특성이 나타나지 않기 때문에 동일한 간극비에서 자연점토에 비해 항복응력이 작으며, 동일한 응력에서 자연점토에 비해 낮은 간극비를 나타낸다. Hong (2006)은 재성형점토와 비교하여 자연점토의 특성을 나타내는 stress sensitivity (S_{ts})를 이용하여 자연점토의 압축성을 분석하였다. 본 연구에서는 재성형점토와 자연점토의 간극비 차($\Delta e/e_L$)를 이용하여 압축지수 추정오차를 분석하고자 하며, 이는 식 (2)와 같이 표현된다. 식 (1)과 (2)에서 e_L 은 액성한계에서 간극비이며 C_r 는 재압축지수 그리고 A와 B는 재성형점토의 압축특성을 나타내는 계수로 부산과 인천점토는 각각 1.224와 1.17 그리고 0.256과 0.211로 나타났다.

$$e/e_L = A - B \log p' \quad (1)$$

$$\frac{\Delta e}{e_L} = \frac{e_0 - C_r \log(OCR)}{e_L} - A + B \log(OCR \sigma'_v) \quad (2)$$

그림 4는 오차율과 $\Delta e/e_L$ 의 관계를 나타낸 것으로, 왼쪽 그림은 표 1의 액성한계 관계식의 추정오차율을, 오른쪽 그림은 함수비 관계식의 추정오차율을 $\Delta e/e_L$ 와 비교한 것이다. 간극비와 소성지수는 함수비와 액성한계와 유사한 특성을 가지므로 제외하였다. 그림 1을 보면 액성한계 관계식 추정오차율은 $\Delta e/e_L$ 과 반비례 관계를 나타낸 반면, 함수비 관계식 추정오차율은 $\Delta e/e_L$ 과 명확한 관계를 나타내지 않았는데, 이것은 함수비의 경우 $\Delta e/e_L$ 의 효과를 이미 포함하고 있기 때문이다. 앞에서 함수비 관계식이 액성한계 관계식에 비해 압축지수와 높은 결정계수를 나타내는 이유도 함수비가 $\Delta e/e_L$ 의 효과를 포함하고 있기 때문이다. 그림 4 왼쪽 그림의 점선은 부산 및 인천지역 점토의 $\Delta e/e_L$ 과 오차율의 경향을 나타낸 것으로, 부산점토의 $\Delta e/e_L$ 과 오차율의 관계가 인천점토에 비해 높은 상관성을 나타냈다.

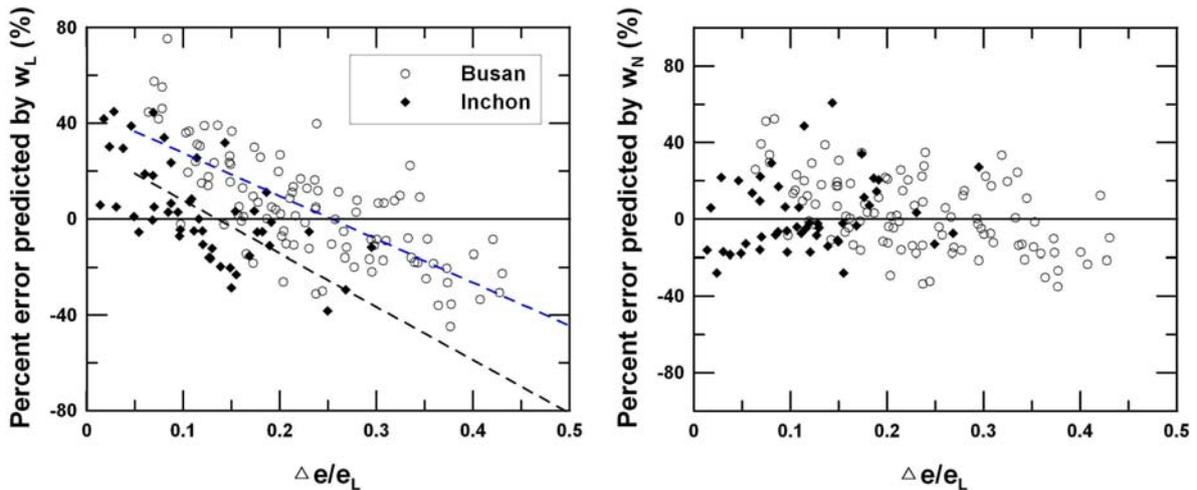


그림 4. 오차율과 $\Delta e/e_L$ 의 관계

6. 결론

본 연구는 액성한계, 함수비, 소성지수 등의 기본물성치로 부산 및 인천점토의 압축지수와 물성치의 관계에 관한 것으로, 이를 위해 부산 및 인천점토 152개의 압밀데이터를 분석하였다. 부산 및 인천점토의 압축지수는 각각 0.4~1.6과 0.2~0.5로 부산점토가 인천점토에 비해 높은 압축성을 나타냈다. 선행 연구자들의 추정식과 비교하여 보면, 선행연구자들의 추정식은 부산점토의 압축성은 과소평가하는 반면, 인천점토의 압축성은 유사하게 예측하였다. 부산 및 인천점토의 압밀시험결과를 이용하여 압축지수와 물성치 관계식을 표 1과 같이 제안하였다. 물성치와 압축지수 관계식의 결정계수는 간극비 관계식이 가장 높게 나타났으며 소성지수 관계식이 가장 작게 나타나, 간극비가 압축지수와 가장 높은 상관성을 나타냈다. 관계식을 이용하여 추정된 압축지수의 오차를 분석하여 추정오차율을 재성형점토와 자연점토의 간극비 차($\Delta e/e_L$)와 비교하여 보았다. 액성한계 관계식 추정오차율은 $\Delta e/e_L$ 이 증가함에 따라 감소하였으며, 함수비 관계식 추정오차율은 $\Delta e/e_L$ 과 명확한 관계를 가지고 있지 않았다. 이는 액성한계에 의한 압축지수 추정은 $\Delta e/e_L$ 효과를 반영하지 못하여 $\Delta e/e_L$ 에 따라 오차가 발생하는 반면, 함수비는 $\Delta e/e_L$ 효과를 이미 포함하고 있어 자연점토의 $\Delta e/e_L$ 이 주요 오차원인이 아니기 때문이다.

참고문헌

1. 김동휘, 안신환, 김재정, 이우진 (2009). “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학회논문집*, 제 25권, 6호, pp.73-88.
2. 김상규, 김운태 (2006), “낙동강 하구 델타 퇴적토의 특성과 기초 설계와의 관련”, *낙동강하구 연약 지반에서의 중·저층 빌딩의 최적 기초형식에 관한 Workshop 논문집*, ATC-7, Seoul, Korea, pp.19-101.
3. 홍성진, 이문주, 김태준, 이우진 (2009), “간극수압비를 이용한 부산점토의 CPTu 콘계수 추정”, *한국지반공학회논문집*, 제 25권, 1호, pp.77-88.
4. Azzouz, A. S., Krizek, R. J. and Corotis R. B. (1976), “Regression analysis of soil compressibility”, *Soils and Foundations*, Vol.16, pp.19-29.
5. Burland, J. G. (1990), “On compressibility and shear strength of natural clay”, *Geotechnique*, Vol.40, pp.329-378.
6. Hong, Z. (2006), “Correlating compression properties of sensitive clays using void index”, *Geotechnique*, Vol.56, pp.573-577.
7. Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy B. R. (1983), “Rationalization of skempton’s compressibility equation”, *Geotechnique*, Vol.33, pp.433-443.
8. Schmertmann, J.H., (1955), “The Undisturbed consolidation behavior of clay”, *America Soc. Civil Eng.*, Vol. 120, pp.1201~1227.
9. Skempton, A. W. (1944), “Notes on the compressibility of clays”, *Q. J. Geol. Soc. Lond.*, Vol.100, pp.119-135.
10. Worth, C. P. and Wood, D.M. (1978), “The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.137-145
11. Yoon, G. L., Kim, B. T. and Jeon, S. S. (2004), “Empirical correlations of compression index for marine clay from regression analysis”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, pp.1213-1221.