

부산과 인천점토의 퇴적상태를 고려한 압축지수 추정

Prediction of Compression Index of Busan and Incheon Clays Considering Sedimentation State

홍 성 진¹ Hong, Sung-Jin

김 동 휘² Kim, Dong-Hee

최 영 민³ Choi, Young-Min

이 우 진⁴ Lee, Woo-Jin

Abstract

The compression index, which represents the compressibility of clay, is generally obtained from the consolidation test, or has been predicted by empirical correlations with soil properties. In this study, the results of consolidation tests on natural and reconstituted Busan and Incheon clays are analyzed to figure out the sedimentation state and its effect on empirical correlations. Results of analysis show that the void index of Busan clay is higher than SCL while the void index of Incheon clay is lower than SCL. By comparing prediction errors with Δe_r , which represents the sedimentation state of clay, it is shown that errors predicting the compressibility based on the liquid limit and plasticity index decrease as Δe_r increases. Supplemented correlations predicting the compression index of Busan and Incheon clays are suggested using these relationships.

요 지

압축지수는 점토의 압축특성을 나타내는 대표적인 물성치로, 압밀시험을 통해 직접 결정하거나 기본 물성으로부터 경험적으로 추정한다. 본 연구에서는 부산 및 인천점토의 퇴적상태를 파악하고 이것이 압축지수 추정식에 미치는 영향에 분석하였다. 이를 위해 부산 및 인천 점토의 재성형점토 압밀시험을 수행하고 자연점토 압밀시험 결과를 분석하였다. 분석결과 부산점토는 SCL보다 높은 간극지수를, 인천점토는 SCL보다 낮은 간극지수를 나타냈다. 퇴적상태를 나타내는 Δe_r 을 압축지수 추정오차와 비교한 결과 액성한계 및 소성지수로 추정한 압축지수의 추정오차는 Δe_r 이 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 본 연구에서는 이러한 관계를 이용하여 부산 및 인천점토의 압축지수를 보다 정확히 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

Keywords : Compression index, Consolidation test, Natural clay, Reconstituted clay, Settlement

1. 서 론

압축지수(C_c)는 점성토의 압축특성을 나타내는 대표적인 물성치로 점성토의 압밀침하량 산정에 이용된다. 압축지수는 e -log σ'_v 곡선에서 정규압밀 영역의 직선

기울기를 의미하며, 일반적으로 비교란 시료에 대한 압밀시험을 통해 산정한다. 그러나 비교란 시료의 채취와 압밀시험에 많은 시간과 비용이 소모되므로 간편하게 측정할 수 있는 지반 물성치로부터 경험적으로 압축지수를 추정하기도 한다. 표 1은 선행연구자들이 제안한

1 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사 후 연구원 (Member, Researcher, School of Civil, Environmental and Architectural Engr., Korea Univ.)

2 정희원, SK건설 과장 (Member, Manager, SK Engineering and Construction.)

3 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate student, School of Civil, Environ. & Arch. Engr., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Member, Professor, School of Civil, Environ. & Arch. Engr., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

압축지수 추정식이며, 압축지수와 액성한계의 관계식을 제안한 Skempton(1944) 이후로 많은 연구자들이 함수비 (w_n), 간극비(e_0), 간극률(n_0), 단위중량(γ_t), 액성한계(w_L), 소성지수(I_p), 수축지수(I_s) 등의 물성치와 압축지수의 관계를 제안하였다. 이러한 관계식들은 크게 함수비, 간극비, 단위중량 등 지반상태를 나타내는 상태변수(state variable)를 이용하여 제안된 식과 액성한계, 소성지수, 수축지수 등 점토 고유특성을 나타내는 고유변수(intrinsic variable)를 이용하여 제안된 식으로 구분된다(표 1).

선행연구자들은 재성형점토의 압축특성을 그 점토의 고유상태(intrinsic state)로 정의하였고, 이러한 재성형점

토의 압축특성은 점토의 고유변수와 일정한 관계를 갖는다고 하였다(Burland, 1990; Nagaraj와 Srinivasa Murthy, 1983; Nagaraj와 Srinivasa Murthy, 1986). 또한, 이러한 특성을 이용하여 자연점토의 퇴적상태나 압축특성을 분석하였다(정성교 등, 2002; 정성교 등, 2006; Burland, 1990; Liu와 Carter, 1999; Nargarj 등, 1990). Burland(1990)는 자연점토의 퇴적상태가 퇴적환경이나 응력이력 등에 따라 달라지지만 일반적인 경우에는 자연점토의 간극비와 구속응력이 비교적 일정한 관계를 보인다고 하였다. 또한, 이러한 관계를 이용하여 점토의 과압밀 정도나 민감도(sensitivity) 등을 비교할 수 있다고 하였다.

표 1. 선행연구자들의 압축지수 추정식(Modified from Sridharan과 Nagaraj, 2000; Yoon 등, 2004)

	Equation	Applicability	Reference
Intrinsic variable	$C_c = 0.007(w_L - 10)$	Remolded clays	Skempton, 1944
	$C_c = 0.0046(w_L - 9)$	Brazilian clays	Cozzolino, 1961
	$C_c = 0.017(w_L - 20)$	All clays	Shouka, 1964
	$C_c = 0.009(w_L - 10)$	NC clay	Terzaghi & Peck, 1967
	$C_c = 0.006(w_L - 9)$	All clays	Azzouz et al., 1976
	$C_c = (w_L - 13)/109$	All clays	Mayne, 1980
	$C_c = 0.011(w_L - 6.36)$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = 0.014I_p + 0.02$	North Atlantic clay	Nacci et al., 1975
	$C_c = 0.0104I_p + 0.046$	Best for $I_p < 50\%$	Nakase et al., 1988
	$C_c = 0.014I_p + 0.165$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = 0.274e_L$	Clay-sand mixes	Nagaraj et al., 1995
	$C_c = 0.007(I_s - 18)$	Remolded clays	Sridharan & Nagaraj, 2000
State variable	$C_c = 0.01(w_n - 5)$	All clays	Azzouz et al., 1976
	$C_c = 0.01w_n$	All clays	Koppula, 1981
	$C_c = 0.01(w_n - 7.549)$	All clays	Herrero, 1983
	$C_c = 0.0115w_n$	Organic silt and clays	Bowles, 1989
	$C_c = 0.01(w_n + 2.83)$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = 0.54(e_0 - 0.35)$	All clays	Nishida, 1956
	$C_c = 0.29(e_0 - 0.27)$	Inorganic soils	Hough, 1957
	$C_c = 0.35(e_0 - 0.5)$	Organic soils	Hough, 1957
	$C_c = 0.246 + 0.43(e_0 - 0.25)$	Motley clays, Brazil	Cozzolino, 1961
	$C_c = 0.75(e_0 - 0.5)$	Soils (low plasticity)	Sowers, 1970
	$C_c = 0.208e_0 + 0.0083$	Chicago clays	Bowles, 1989
	$C_c = 0.156e_0 + 0.0107$	All clays	Bowles, 1989
	$C_c = 0.39(e_0 - 0.13)$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004
	$C_c = \frac{n_0}{371.747 - 4.275n_0}$	Ariake clay	Park & Koumoto, 2004
Multiple variable	$C_c = 0.37(e_0 + 0.003w_L - 0.0004w_N - 0.34)$	All clays	Azzouz et al., 1976
	$C_c = 0.009w_n + 0.005w_L$	All clays	Koppula, 1981
	$C_c = 0.194e_0 + 0.0098w_L - 0.0025I_p - 0.256$	Busan clay, Korea	Yoon et al., 2004

본 연구에서는 부산과 인천 지역의 비교란 및 재성형 점토에 대한 압밀시험 결과를 이용하여 부산과 인천점토의 고유상태와 퇴적상태를 분석하였다. 또한, 이러한 퇴적상태 분석결과를 이용하여 퇴적상태를 고려한 부산 및 인천점토의 압축지수 추정방법을 제안하였다.

2. 연구지역

본 연구는 부산지역인 부산신항만 및 양산과 인천지역인 송도신도시를 대상으로 하였으며, 그 위치는 그림 1과 같다. 부산점토는 낙동강 하구에 퇴적된 점토로 최대 70m 심도까지 분포하며, 심도 10m~30m를 경계로 2개 층으로 구분된다(김상규와 김윤태, 2006; Chung 등, 2002). 부산신항만 지역은 EL-40m~EL-50m까지 점토층이 퇴적되어 있으며, 상부에는 5m~6m 정도의 모래 매립층이 존재한다. 양산은 부산광역시 북쪽의 내륙에 위치한 지역으로 상부 2m~6m 두께의 매립층 하부에 EL-25m~EL-35m까지 점토가 퇴적되어 있다. 부산신항만 및 양산지역은 각각 EL-25m~EL-30m와 EL-10m~EL-15m 심도를 경계로 상·하부 점토층이 구분된다. 인천 송도신도시 지역은 신도시 개발을 위해 EL+7m~8m까지 매립이 수행되었으며, 20m~30m 두께의 실트질 점토층에는 점토와 실트가 복잡하게 분포하고 있다(김동휘 등, 2009).



그림 1. 연구지역 위치

3. 시험 결과

3.1 기본물성

그림 2는 대상 지반의 함수비 및 액·소성한계를 심도에 따라 나타낸 것으로 평균값과 범위를 표시하였다. 부산지역인 부산신항만과 양산점토의 함수비는 각각 30%~75%와 35%~60%, 액성한계는 각각 40%~90%와 40%~70%, 그리고 소성한계는 각각 20%~35%와 20%~30%로 나타났다. 인천 송도신도시 점토의 함수비 및 액성한계는 25%~40%와 35%~50%로 부산점토에 비해 작으며, 소성한계는 20%~30%로 유사하게 나타났다. 부산신항만 지역은 함수비 및 액·소성한계가 EL-25m까지 증가하다가 이후에는 감소하는 경향이 명확하였다. 반면 양산지역과 인천 송도 신도시 지역은 심도에 따라 함수비 및 액·소성한계의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 관찰되었다. 그림 2에 의하면 부산신항만 지역의 경우 기본물성의 편차가 작은 반면, 양산 및 송도신도시 지역은 기본물성의 편차가 큰 것으로 나타났다. 이는 부산신항만 자료의 경우 좁은 지역의 시험 결과인 반면, 양산 및 송도 자료는 비교적 넓은 지역의 시험결과이기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 남동 해안지역인 부산신항만의 경우 비교적 균질한 퇴적이 이루어진 반면, 내륙지역인 양산과 서해안 지역인 송도신도시의 경우는 계절과 조수간만 등의 영향으로 퇴적환경이 복잡하여 동일심도에서 기본물성의 편차가 큰 것으로 판단된다.

그림 3의 소성도표에 의하면 부산지역의 점토는 소성도표상 A-line 위에 위치하고 있으며, 이로부터 부산신항만과 양산지역 점토의 주성분이 illite 임을 간접적으로 알 수 있다. 이는 XRD 분석으로 부산점토는 illite 계

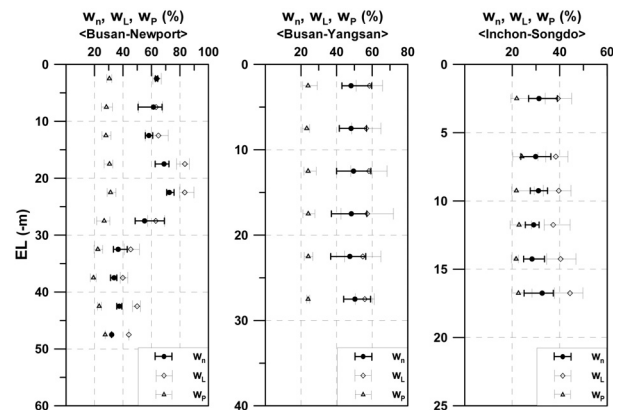


그림 2. 심도에 따른 함수비 및 액·소성한계

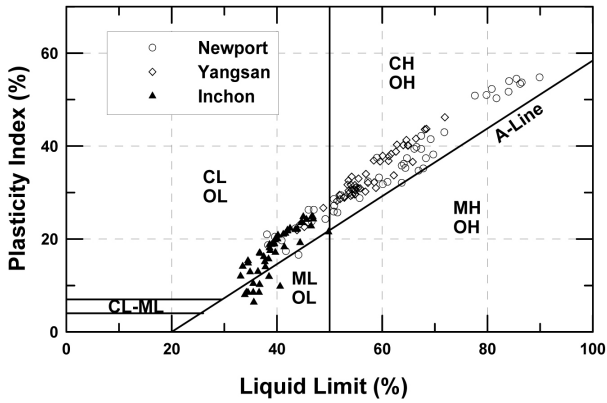


그림 3. 소성도표

열의 점토임을 밝힌 Locat과 Tanaka(1999)와 홍성진 등 (2009)의 연구결과와 일치한다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 부산점토는 CH와 CL로 분류된다. 인천점토의 경우 주로 CL로 분류되나 일부는 ML로 분류된다.

3.2 압밀시험

3.2.1 자연시료의 압밀시험

본 연구에서는 부산신항만, 양산 및 인천 송도신도시 점토의 압밀특성을 분석하기 위해 각각 50개, 51개, 51개의 표준압밀시험 결과를 이용하였으며, 요약된 시험결과는 그림 4와 같다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 부산신항만 및 양산점토(부산점토)는 약간 과압밀된 상부층을 제외하고는 대부분 0.7~1.5 정도의 과압밀비를 보인다. 따라서 부산신항만 및 양산지반은 정규압밀지반으로 판단된다. 인천 송도신도시 점토(인천점토)의 과압밀비는 대부분 0.7~2.0 범위에 분포하고 있으므로 송도신도시 지반은 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반으로 판단된다. 본 연구에서는 표준압밀시험결과에 대해 Schmertmann(1955)의 방법으로 교란효과를 보정하여 압축지수를 결정하였다. 부산신항만 점토의 압축지수는 EL-30m 이내에서는 0.7~1.2, EL-30m 아래에서는 0.4~0.8의 범위에 존재한다. 양산지역 점토의 압축지수는 0.4~1.0 정도로 나타났다. 인천 송도신도시 점토의 압축지수는 대부분 0.2~0.5 정도로 부산점토에 비해 작은 것으로 나타났다. 그림 4에 의하면 부산신항만 지역의 경우 그림 2의 함수비 및 액성한계 분포와 유사하게 EL-25m까지 압축지수가 증가하다 심도가 깊어지면 감소하는 경향을 보인다. 반면, 양산지역과 인천 송도신도시 지역은 심도에 따른 압축지수 변화경향이 명확하게 나타나지 않았다.

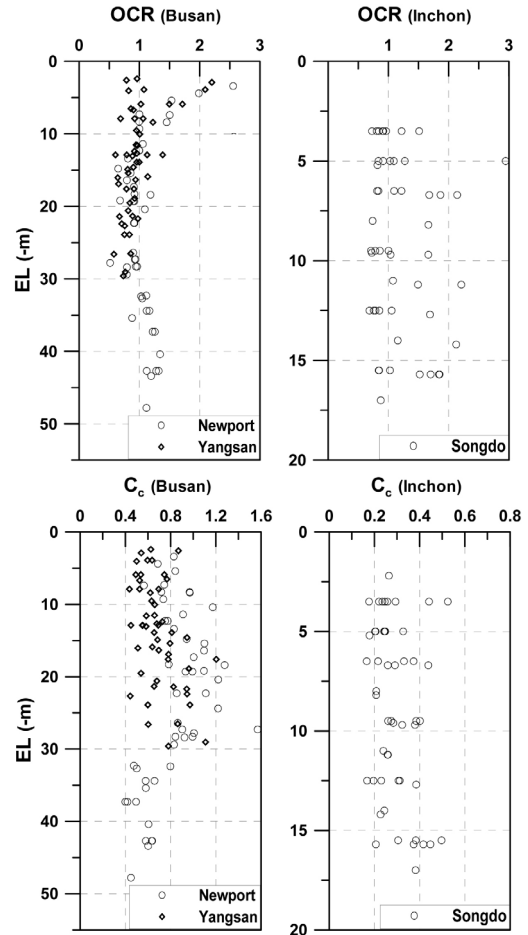


그림 4. 자연시료의 압밀시험 결과

3.2.2 재성형점토의 압밀시험

본 연구에서는 부산 및 인천점토의 퇴적특성 파악과 자연점토의 퇴적상태가 압축지수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 부산 및 인천 재성형점토에 대하여 표준압밀시험을 수행하였다. 재성형점토는 일반적으로 퇴적에 의한 흠구조(soil structure)의 효과가 없어 점토의 이상적 거동연구나 자연점토의 퇴적특성 파악의 기준으로 사용되어 왔다(Roscoe 등, 1958; Parry, 1960; Wroth와 Wood, 1978; Nagaraj와 Srinivasa Murthy, 1983; Nagaraj와 Srinivasa Murthy, 1986; Burland, 1990; Schmertmann, 1955). 재성형점토 압밀시험에서 조성된 시료의 초기 함수비가 액성한계보다 작을 경우 초기응력범위에서 e -log σ'_v 곡선에 왜곡이 발생하며, 액성한계보다 클 경우 시료가 흐르는 문제점이 있으므로 시료를 액성한계 또는 액성한계보다 약간 큰 함수비로 조성하는 것이 적합하다(Sridharan & Nagaraj, 2000; Burland, 1990). 본 연구에서는 액성한계의 약 1.2배의 함수비로 반죽한 시료를 압밀링에 채운 후 압밀시험을 실시하였다.

흙구조의 영향을 적게 받는 재성형점토의 압축특성은 액성한계나 소성지수 등과 높은 상관성을 보인다. Nagaraj와 Srinivasa Murthy(1983), Burland(1990)는 재성형시료의 $e\text{-log } \sigma'_v$ 곡선은 액성한계에서의 간극비(e_L)와 관계가 있다고 주장하였고, Nagaraj와 Srinivasa Murthy(1983)는 식 (1)과 같은 관계를 제안하였다. A와 B는 상수로 연직유효응력(σ'_v)의 단위가 kPa인 경우 Nagaraj와 Srinivasa Murthy(1983)는 각각 1.099와 0.2237, Nagaraj와 Miura(2001)는 1.23과 0.28이라 하였으며, Burland(1990)는 점토광물에 따라 다르다고 하였다.

$$e = e_L(A - B \log \sigma'_v) \quad (1)$$

본 연구에서는 비교적 넓은 액성한계 분포를 갖는 부산점토에 대해 3개의 재성형 압밀시험을 실시하였으며, 좁은 액성한계 분포를 가지는 인천점토는 2개의 재성형 압밀시험을 수행하였다. 부산신항만점토의 재성형 압밀시험은 부산신항만 현장의 심도 EL-10.5m, EL-20.5m, EL-32.5m의 시료를 사용하였으며, 각 시료의 액성한계는 70.4%, 79.5%, 50.2%이다. 인천점토의 재성형 압밀시험은 심도 EL-2.0m와 EL-9.0m의 시료를 사용하였으며, 액성한계는 각각 44.1%와 34.4%이다. 재성형 시료의 압밀시험 결과를 요약한 그림 5에서 볼 수 있듯이 부산과 인천점토 모두 간극비를 e_L 로 정규화시킬 경우 액성한계에 관계없이 $e/e_L\text{-log } \sigma'_v$ 곡선이 일치함을 알 수 있었다. 재성형 부산점토의 e/e_L 과 $\log \sigma'_v$ 가 전 시험 응력 범위에서 선형관계를 보이는 반면, 재성형 인천점토의 e/e_L 과 $\log \sigma'_v$ 는 50kpa 이하와 500kpa 이상의 응력 범위에서 약간 비선형적인 관계를 보이는 것으로 나타났다. 그림 5의 점선은 100kpa~1000kpa 응력범위를 기준으로 결정한 $e/e_L\text{-log } \sigma'_v$ 곡선의 경향선이다. 이 경향선의 계수 A는 부산 및 인천 재성형점토에 대해 각각 1.224와 1.17, 계수 B는 각각 0.256과 0.211로 결정되었

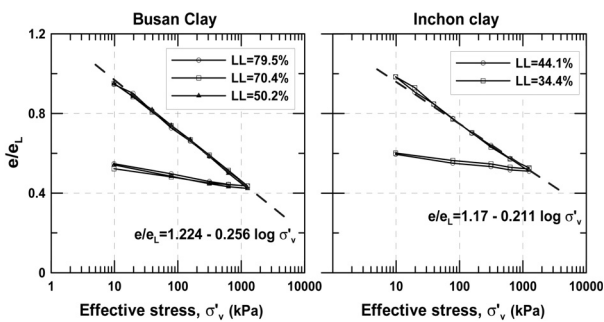


그림 5. 재성형시료의 $e/e_L\text{-log } \sigma'_v$ 곡선

다. 이는 Nagaraj와 Srinivasa Murthy(1983), Nagaraj와 Miura(2001)가 제안한 값과 유사하다.

4. 분석결과

4.1 부산 및 인천점토의 퇴적상태

점토의 압축특성은 $e\text{-log } \sigma'_v$ 곡선으로 표현하며, 곡선의 모양과 위치는 연경도에 따라 차이가 발생한다. 연경도에 의한 압축특성 차이를 보정하기 위하여 Nagaraj와 Srinivasa Murthy(1983)는 간극비를 e_L 로 정규화하여 점토의 압축특성을 분석하였다. Burland(1990)는 간극비 대신에 식 (2)와 같은 간극지수(I_v : void index)를 이용하여 압축특성을 분석하였다.

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

여기서, e^*_{100} 과 e^*_{1000} 은 재성형시료의 $e\text{-log } \sigma'_v$ 곡선에서 유효응력 100kpa과 1000kpa에서의 간극비이며, C^*_c 는 e^*_{100} 과 e^*_{1000} 의 차로 고유압축지수(intrinsic compression index)라고 한다. e^*_{100} 과 C^*_c 는 그림 5의 시험결과로부터 구할 수 있으며, 부산 및 인천점토의 e^*_{100} 은 각각 $0.712e_L$ 과 $0.748e_L$, C^*_c 는 각각 0.256 e_L 과 0.211 e_L 이다. 일반적으로 재성형 및 자연 점토의 연경도와 간극비 그리고 구속응력은 서로 일정한 관계를 보인다. Burland(1990)는 다양한 재성형 압밀시험 결과와 자연 퇴적지반 분석을 통해 고유압축곡선(intrinsic compression line, ICL)과 퇴적압축곡선(sedimentation compression line, SCL)을 제안하였다. 이러한 ICL과 SCL을 이용하여 점토의 퇴적특성과 압축특성에 대한 많은 연구가 수행되었다(정성교 등, 2002; 정성교 등, 2006; Burland, 1990; Chung 등, 2002; Liu와 carter, 1999; Hong, 2006).

그림 6은 부산점토 및 인천점토의 $I_v\text{-log } \sigma'_{v0}$ 관계이며, 간극지수는 현장지반의 액성한계와 간극비를 이용하여 산정하였다. 그림 6에서 σ'_{v0} 는 현장 연직유효응력이며, 실선은 Burland(1990)가 제안한 고유압축곡선(ICL)과 퇴적압축곡선(SCL)이다. 간극지수가 SCL 위에 위치하는 지반은 고결(cemented) 또는 흙구조가 발달된 지반이며, 간극지수가 SCL 아래 위치하는 지반은 과압밀되거나 흙구조가 발달되지 않은 지반이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 부산점토와 인천점토는 약간 다른 분포를

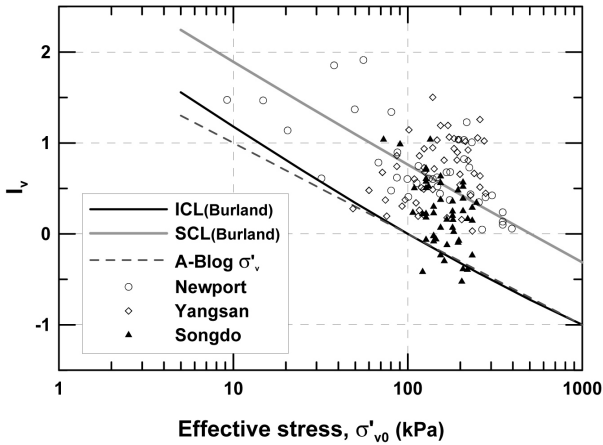


그림 6. 부산 및 인천점토의 I_v - $\log \sigma'_{v0}$

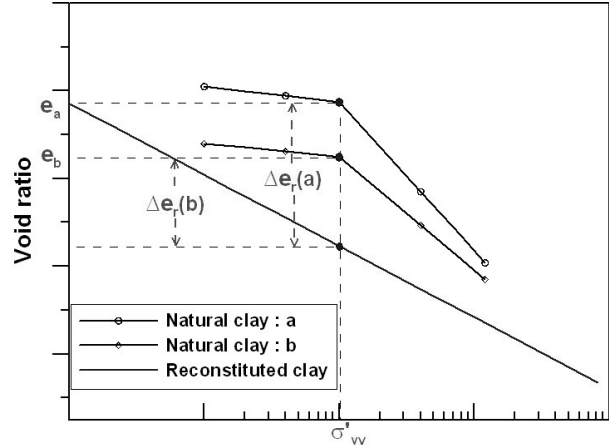


그림 7. Δe_r 모식도

보이는 것으로 나타났다. 즉, 부산점토의 간극지수는 SCL보다 약간 위쪽에 위치하고 있으며, 인천점토의 간극지수는 SCL보다 약간 아래에 위치하고 있다. 전술한 바와 같이 부산과 인천점토 모두 정규압밀 또는 약간 과압밀된 점토이다. 따라서 그림 6에서 두 지역 점토의 분포 차이로 볼 때, 부산점토가 인천점토보다 흠구조가 발달된 지반으로 판단된다. 그림 6의 점선은 재성형점토 압축특성인 식 (1)을 I_v - $\log \sigma'_v$ 로 환산해서 표기한 것이다. Nagaraj와 Srinivasa Murthy(1983)는 재성형점토의 압축특성을 $\log \sigma'_v$ 에 완전선형으로 가정한 반면, Burland(1990)는 완전한 선형이 아니라고 하였기 때문에 식 (1)과 ICL이 약간의 차이를 보이지만 50kpa~1000kpa 범위에서는 큰 차이가 없다.

4.2 퇴적상태가 압축지수에 미치는 영향

Burland(1990)가 간극지수로 재성형점토의 압축특성과 자연점토의 일반적인 퇴적상태를 나타낸 이후로 Chandler(2000)는 응력민감도(stress sensitivity, S_{ts})를 제안하여 자연점토의 퇴적상태를 재성형점토와 비교하여 수치화 하였으며, Hong(2006)은 S_{ts} 를 이용하여 자연점토의 압축지수를 분석하였다. 압축지수는 유효응력에 따른 간극비의 변화이므로 본 연구에서는 간극비 개념인 Δe_r 로 자연점토의 퇴적상태 특성을 표현하였다. Δe_r 은 그림 7에서 볼 수 있듯이 자연점토의 항복응력(σ'_{vy})에서 자연점토와 재성형점토의 간극비 차이이며, 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\Delta e_r = (e_0 - C_r \log(\sigma'_{vy} / \sigma'_{v0})) - e_L (A - B \log(\sigma'_{vy})) \approx e_0 - A e_L + B e_L \log(\sigma'_{vy}) \quad (3)$$

식 (3)에서 재압축지수(C_r)는 C_c 에 비하여 상대적으로 작기 때문에 $\sigma'_{vy} / \sigma'_{v0}$ 가 크지 않으면 $C_r \log(\sigma'_{vy} / \sigma'_{v0})$ 는 Δe_r 에 큰 영향을 미치지 못한다. 또한, Leroueil (1988)에 따르면 현장에서는 재압축침하가 거의 발생하지 않는다고 하였으므로 $C_r \log(\sigma'_{vy} / \sigma'_{v0})$ 은 무시할 수 있다. 퇴적상태 특성을 나타내는 Δe_r 이 클수록 민감도가 높고 흠구조가 발달된 지반이며, Δe_r 이 작으면 지반퇴적 시 흠구조가 발달되지 않은 지반을 의미한다. 자연점토의 e - $\log \sigma'_v$ 곡선은 응력이 항복하중을 초과하면 재성형점토의 e - $\log \sigma'_v$ 곡선으로 접근하게 된다(Burland, 1990; Liu와 Carter, 1999). 따라서 그림 7에 나타난 것처럼 동일한 연정도를 가지는 점토의 경우 Δe_r 이 클수록 압축지수가 크다. 하지만 액성한계나 소성지수 등 고유변수로 압축지수를 추정하면 퇴적상태가 압축지수에 미치는 영향을 고려하지 못하므로, 점토 a의 압축지수는 과소평가되며 점토 b의 압축지수는 과대평가될 가능성이 있다.

그림 8의 실선과 점선은 각각 부산점토와 인천점토의 압축지수와 액성한계 및 소성지수의 관계를 회귀분석하여 얻은 추세선이며, 회귀분석으로 얻은 경험식도 함께 표기하였다. 본 연구에서는 퇴적상태가 고유변수를 이용한 압축지수 추정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 그림 8에 주어진 식으로 추정된 압축지수 추정오차 (Prediction error: $C_{c(\text{predicted})} - C_{c(\text{measured})}$)와 퇴적상태를 나타내는 Δe_r 의 관계를 그림 9와 같이 도시하였다. 그림 9에 의하면 Δe_r 과 추정오차는 명확한 반비례 관계를 보인다. 그림 9에 점선으로 표기된 추세선은 지역별로 차이가 나타났는데, 이것은 지역별로 퇴적특성이 다르기 때문이다. 부산점토가 인천점토에 비해 평균 Δe_r 이 크기

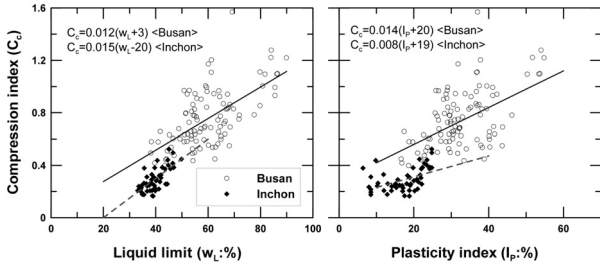


그림 8. 압축지수와 액성한계 및 소성지수의 관계

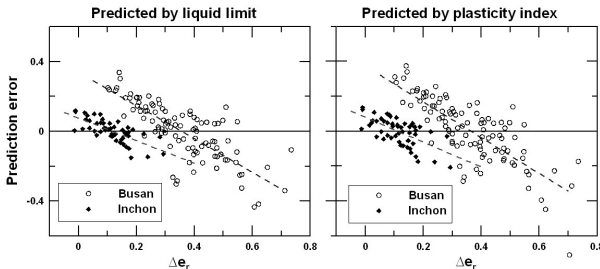


그림 9. Δe_r 과 추정오차 관계

때문에 부산점토의 추세선이 인천점토의 추세선보다 오른쪽에 위치한다.

4.3 퇴적상태를 고려한 압축지수 추정식 제안

고유변수로 압축지수를 추정할 경우 퇴적상태를 고려하지 못하므로 추정식의 정확성이 떨어진다. 본 연구에서는 그림 9의 Δe_r 과 추정오차의 관계를 이용하여 부산과 인천점토의 퇴적상태를 고려할 수 있는 압축지수 추정식을 제안하였다. 그림 9의 추세선을 이용하면 표 2의 액성한계를 이용한 압축지수 추정식을 식 (4) 및 (5)와 같이 보완할 수 있다.

$$C_c = 0.012(w_L + 3) - (0.340 - 0.955\Delta e_r) \\ = 0.012w_L + 0.948e_0 - 1.165e_L + 0.243e_L \log \sigma'_{vy} - 0.295 \\ \text{<Busan clay>} \quad (4)$$

$$C_c = 0.015(w_L - 20) - (0.077 - 0.648\Delta e_r) \\ = 0.015w_L + 0.651e_0 - 0.758e_L + 0.137e_L \log \sigma'_{vy} - 0.379 \\ \text{<Inchon clay>} \quad (5)$$

포화된 점토에서 e_0 와 e_L 는 w_n 과 w_L 로 표현이 가능하고 부산과 인천점토는 정규압밀된 점토이므로, e_0 , e_L , σ'_{vy} 대신 사용하기 쉬운 w_n , w_L , σ'_{v0} 를 이용하여 식 (4) 및 (5)를 식 (6) 및 (7)과 같이 표현하였다.

$$C_c = 0.024w_n - 0.017w_L + 0.006w_L \log \sigma'_{v0} - 0.257 \\ \text{<Busan clay>} \quad (6)$$

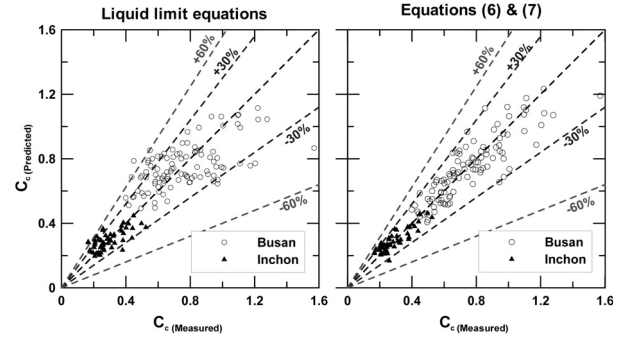


그림 10. 측정 압축지수와 추정 압축지수 비교

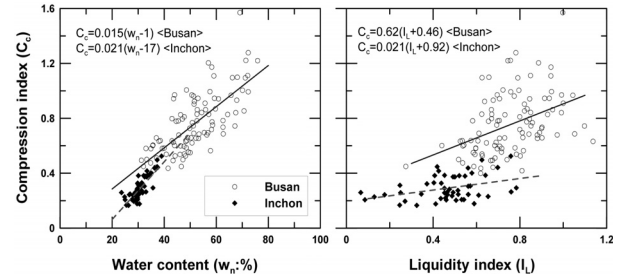


그림 11. 압축지수와 함수비 및 액성지수의 관계

$$C_c = 0.017w_n - 0.005w_L + 0.004w_L \log \sigma'_{v0} - 0.380 \\ \text{<Inchon clay>} \quad (7)$$

여기서, 함수비와 액성한계는 백분을 단위이며, σ'_{v0} 는 kpa 단위이다. 그림 10은 액성한계를 이용한 추정식과 이 식을 보완한 식 (6)과 (7)로 추정한 압축지수를 측정값과 비교한 것이다. 그림 10에서 볼 수 있듯이 액성한계를 이용한 추정식의 최대 오차는 60% 정도인 반면, 보완된 추정식의 최대 오차는 30% 정도로 나타났다. 액성한계를 이용한 압축지수 추정식은 큰 압축지수를 과소평가하고 작은 압축지수를 과대평가하는 경향이 있으나 보완된 추정식은 이러한 경향이 없는 것으로 나타났다. 이것은 액성한계를 이용한 압축지수 추정식과 달리 제안된 식 (6)과 (7)은 퇴적상태를 고려하기 때문으로 판단된다.

4.4 추정식 비교

그림 11은 압축지수와 함수비 및 액성지수(I_L)의 관계를 보이고 있다. 표 2는 그림 8과 11에서 구한 단일변수 압축지수 추정식과 식 (6)과 (7)로 제안된 추정식들의 정확성을 비교한 것이다. 각각의 추정식에 대한 신뢰성을 평가하기 위하여 결정계수(R^2)와 식 (8)로 계산되는 MAPE(mean absolute percentage error)를 사용하였다.

표 2. 제안식과 단일변수 추정식 비교

지반변수	대상지반	추정식	결정계수(R ²)	MAPE (%)
제안식	부산(신항+양산)	식 (6)	0.756	10.8
	인천(송도)	식 (7)	0.782	13.1
액성한계	부산(신항+양산)	$C_c = 0.012(w_L + 3)$	0.389	18.4
	인천(송도)	$C_c = 0.015(w_L - 20)$	0.514	17.3
소성지수	부산(신항+양산)	$C_c = 0.014(I_p + 20)$	0.320	20.3
	인천(송도)	$C_c = 0.008(I_p + 19)$	0.233	21.7
함수비	부산(신항+양산)	$C_c = 0.015(w_n - 1)$	0.546	16.1
	인천(송도)	$C_c = 0.021(w_n - 17)$	0.683	15.5
액성지수	부산(신항+양산)	$C_c = 0.62(I_L + 0.46)$	0.180	21.8
	인천(송도)	$C_c = 0.21(I_L + 0.92)$	0.144	25.0

표 3. 복합변수 추정식

대상지반	추정식	결정계수(R ²)	MAPE (%)
부산(신항+양산)	$C_c = 0.018w_n - 0.003w_L + 0.012$	0.551	15.8
인천(송도)	$C_c = 0.016w_n + 0.007w_L + 0.481$	0.746	13.5

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|C_{c(predicted)} - C_{c(measured)}|}{C_{c(measured)}} \quad (8)$$

여기서, n은 분석에 사용된 데이터 개수이다. MAPE는 추정식의 정확성을 평가하는 지표로 사용되며, 값이 작을수록 추정식의 정확성이 높다는 것을 의미한다. 결정계수는 자료의 범위 및 분포형상에 따라 값이 변화되므로 본 연구에서는 MAPE를 함께 이용하여 추정식의 신뢰성을 평가하였다. 표 2에 의하면 본 연구에서 제시한 경험식이 단일변수 추정식에 비해 우수한 것으로 관찰되었다.

단일변수 추정식 간에 정확성을 비교해 보면 점토의 상태특성을 나타내는 물성치인 함수비를 이용한 추정식이 가장 정확한 것으로 나타났는데, 이는 Azzouz 등(1976)과 Yoon 등(2004)의 결과와 일치한다. 반면 액성지수를 이용한 추정식은 다른 추정식에 비해 정확성이 떨어졌다. 동일한 연경도를 가지는 점토의 압축지수는 퇴적상태에 영향을 받지만, 기본적으로 점토의 압축지수는 연경도에 더 큰 영향을 받는다. 함수비도 기본적으로 연경도와 비례하며 동일 연경도에서는 Δe_c이 클수록 크다. 이러한 면에서 함수비는 다른 물성치에 비해 압축지수와 높은 상관성을 보이는 것이다. 반면, 연경도 효과를 배제하여 정규화한 액성지수는 압축지수와 낮은 상관성을 보인다.

선행연구자들은 여러 지반변수에 대한 중회귀분석을

하여 압축지수에 대한 복합변수 추정식을 제안하기도 했다. 본 연구에서도 중회귀분석을 통해 w_n과 w_L로 표현되는 부산 및 인천점토 압축지수 추정식을 구하여, 이를 식 (6) 및 (7)과 비교하여 보았다. 표 3에 의하면 복합변수 추정식은 퇴적상태를 고려하는 본 연구의 제안식에 비해 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다. 특히, 부산지역의 경우 복합변수 추정식이 제안식에 비해 정확성이 상당히 떨어지며, 중회귀분석 효과도 거의 없어 함수비를 이용한 단일변수 추정식과 정확성이 유사하였다. 이는 두텁게 점토층이 형성된 부산점토의 경우 유효응력의 범위가 넓어 응력효과를 고려하지 않는 복합변수 추정식의 정확성이 떨어지는 것으로 판단된다. 반면, 유효응력 범위가 작은 인천점토의 경우 복합변수 추정식과 제안식의 정확성 차이가 크지 않았으며, 단일변수 추정식에 비해 정확성이 향상되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 부산 및 인천점토 퇴적상태 평가 및 압축지수 추정방법 제안을 위해 재성형 및 자연시료 압밀시험 데이터를 분석하였다. 시험결과를 통해 부산 및 인천점토의 퇴적상태를 파악하였으며, 물성치와 압축지수간의 관계를 이용하여 압축지수 추정식을 구하였다. 추정오차와 Δe_c간의 관계를 분석하여 퇴적상태가 압축지수 추정에 미치는 영향을 파악하였고, 이를 바탕으로

퇴적상태를 고려하는 압축지수 추정식을 제안하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 다양한 액성한계를 가지는 부산 및 인천 재성형점토에 대하여 압밀시험을 실시한 결과, 두 지역의 $e\text{-log } \sigma'_v$ 곡선은 각각 e_L 로 정규화 되었다. 재성형점토의 압축특성을 나타내는 계수 A와 B는 부산점토의 경우 1.224와 0.256, 인천점토의 경우 1.170과 0.211로 나타났다. 재성형점토의 특성을 바탕으로 두 지역의 퇴적상태를 파악해 본 결과 부산점토는 Burland(1990)가 제시한 SCL보다 약간 높은 간극지수를 나타낸 반면, 인천점토는 SCL보다 약간 낮은 간극지수를 나타냈다.
- (2) 자연점토 압밀시험 결과 부산 및 인천점토의 압축지수는 각각 0.5~1.2, 0.2~0.5의 범위를 보였으며, 두 지역 모두 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지반으로 나타났다. 본 연구에서는 Δe_r 을 통해 퇴적상태를 수치화 했으며, 퇴적상태가 압축지수에 미치는 영향을 분석하였다. 액성한계 및 소성지수를 이용한 압축지수 추정식의 추정오차와 Δe_r 을 비교한 결과, Δe_r 이 증가함에 따라 추정오차는 감소하였다. 이는 연경도가 동일한 점토일 경우 Δe_r 이 클수록 압축지수가 크다는 것을 의미한다.
- (3) 본 연구에서는 압축지수 추정오차와 Δe_r 의 관계를 이용하여 퇴적상태를 고려하는 새로운 압축지수 추정식을 제안하였다. 그리고 다양한 물성치를 이용한 압축지수 추정식과 제안식의 정확도를 비교하였다. 제안된 압축지수 추정식은 점토의 퇴적상태를 반영하므로 기존의 단일변수 추정식과 복합변수 추정식에 비해 정확성이 향상되었다.
- (4) 단일변수 추정식 간의 비교 결과 함수비를 이용한 압축지수 추정식이 가장 정확하였다. 대상지반의 유효응력 범위가 좁은 인천점토의 경우 복합변수 추정식이 단일변수 추정식에 비해 정확성이 높았지만, 넓은 유효응력 범위를 가지는 부산점토의 경우 복합변수 추정식과 단일변수 추정식의 정확성이 유사하였다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 ‘대심도 해안 연약지반 개량을 위한 이중코어 PBD 성능 연구’ 및 포스코 건설 ‘송도 매립

지반 지반조사자료 DATABASE 구축 및 압밀침하량 평가’ 과제의 도움으로 진행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김동휘, 안산환, 김재정, 이우진 (2009), “인천 송도지역 지반의 변동성 분석”, *한국지반공학학회논문집*, 제25권 제6호, pp.73-88.
2. 김상규, 김운태 (2006), “낙동강 하구 델타 퇴적토의 특성과 기초 설계와의 관련”, *낙동강하구 연약지반에서의 중·저층 빌딩의 최적 기초형식에 관한 Workshop 논문집*, ATC-7, Seoul, Korea, pp.19-101.
3. 정성교,곽정민, 장우영, 김덕곤 (2002), “낙동강 하구점토의 압축 특성에 관한 연구”, *한국지반공학학회논문집* 제18권 제4호, pp.295-307.
4. 정성교, 장우영, Ninjarav, E., 류춘길 (2006), “낙동강 하구지역 부산점토의 퇴적환경에 따른 압축특성”, *한국지반공학학회논문집* 제22권 제12호, pp.57-65.
5. 홍성진, 이문주, 김태준, 이우진 (2009), “간극수압비를 이용한 부산점토의 CPTu 콘 계수 추정”, *한국지반공학학회논문집* 제25권 제1호, pp.77-88.
6. Azzouz, A. S., Krizek, R. J. and Corotis, R. B. (1976), “Regression analysis of soil compressibility”, *Soils and Foundations*, Vol.16, pp.19-29.
7. Burland, J. G. (1990), “On compressibility and shear strength of natural clay”, *Geotechnique*, Vol.40, pp.329-378.
8. Chandler, B. J. (2000), “Clay sediments in depositional basins: the geotechnical cycle”, *J. Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.33, No.3, pp.7-39.
9. Chung, S. G., Giao, P. H., Kim, G. J. and Leroueil, S. (2002), “Geotechnical properties of Pusan clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, pp.1050-1060.
10. Cozzolino, V. M. (1961), “Statistical forecasting of compression index”, *Proc. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France*, Vol.1, pp.51-53.
11. Herrero, O. R. (1983), “Universal compression index equation; Closure”, *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.109, No.5, pp.755-761.
12. Hong, Z. (2006), “Correlating compression properties of sensitive clays using void index”, *Geotechnique*, Vol.56, pp.573-577.
13. Koppula, S. D. (1981), “Statistical estimation of compression index”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.4, No.2, pp.68-73.
14. Leroueil, S. (1988), “Tenth Canadian geotechnical colloquium: Recent developments in consolidation of natural clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, pp.85-107.
15. Liu, M. D. and Carter, J. P. (1999), “Virgin compression of structured soil”, *Geotechnique*, Vol.49, pp.43-57.
16. Locat, J. and Tanaka, H. (1999), “Microstructure, mineralogy and physical properties; techniques and application to the Busan clays”, *Proc. KSG'99 Dredging and Geoenvironmental Conference, Seoul*, pp.15-31.
17. Mayne, P. W. (1980), “Cam-clay prediction of undrained strength”, *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.106, No.11, pp.1219-1242.
18. Nacci V. A., Wang, M.C. and Demars, K. R. (1975), “Engineering behavior of calcareous soils”, *Proc. Civil Engineering in the Oceans III*, Newark, Vol.1, pp.380-400.

19. Nagaraj, T. S. and Miura, N. (2001), *Soft clay behaviour - analysis and assessment*, Balkema, Rotterdam.
20. Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy, B. R. (1983), "Rationalization of Skempton's compressibility equation", *Geotechnique*, Vol.33, pp.433-443.
21. Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy, B. R. (1986), "A critical reappraisal of compression index equations", *Geotechnique*, Vol.36, pp.27-32.
22. Nagaraj, T. S., Srinivasa Murthy, B. R., Vatsala, A. and Joshi, R. C. (1990), "Analysis of compressibility of sensitive soils", *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.116, No.1, pp.105-119.
23. Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O. (1988), "Constitutive parameters estimated by plasticity index", *J. Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.7, pp.844-858.
24. Nishida, Y. (1956), "A brief note on Compression index of soil", *J. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.82, No.3, pp.1-14.
25. Park, J. H. and Koumoto, T. (2004), "New compression index equation", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.2, pp.223-226.
26. Parry, R. H. G. (1960), "Triaxial compression and extension tests on remoulded saturated clay", *Geotechnique*, Vol.10, pp.166-180.
27. Roscoe, H. H., Schofield, A. N. and Worth, C. P. (1958), "On yielding of soils", *Geotechnique*, Vol.8, pp.22-53.
28. Shouka, H. (1964), "Relationship of compression index and liquid limit of alluvial clay", *Proc. 19th Japan Civil Engineering Conf., Tohoku*, Vol.4, pp.40.1-40.2.
29. Sridharan, A. and Nagaraj, H. B. (2000), "Compressibility behaviour of remoulded, fine-grained soils and correlation with index properties", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.712-722.
30. Skempton, A. W. (1944), "Notes on the compressibility of clays", *Q. J. Geological Society of London*, Vol.100, pp.119-135.
31. Schmertmann, J. H., (1955), "The undisturbed consolidation behavior of clay", *Trans. ASCE*, Vol.120, pp.1201-1233.
32. Sowers, G. B. (1970), *Introductory soil mechanics and foundation (3rd ed.)*, The Macmillan company, London, UK.
33. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley & Sons Inc., New York.
34. 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.
35. 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.

(접수일자 2011. 3. 7, 심사완료일 2011. 9. 19)