

부산점토 재성형 시료의 압축특성에 관한 연구

The study for compressibility of reconstituted Busan clay

홍성진¹⁾, Sung-Jin Hong, 이문주²⁾, Moon-Joo Lee, 최영민³⁾, Young-Min Choi, 김민태³⁾, Min-Tae Kim, 이우진⁴⁾, Woojin Lee

- 1) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학부, 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.
- 2) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학부, BK 연구교수, BK Researcher, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.
- 3) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학부, 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.
- 4) 고려대학교 건축·사회환경시스템공학부 부교수, Associate professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.

SYNOPSIS : The compressibility of clay has been expressed e-log p' graph. In natural clay, e-log p' graph are changed by deposition condition and chemical cementation as well as Atterberg limits, whereas in reconstituted clay, it is generally known that e-log p' curve is varied with Atterberg limits. However, e-log p' graph is possible to change according to the reconstituting methods and test conditions. In this study, consolidation tests are performed as various test condition for reconstituted Busan clay. Test results show that the relationship e/e_L and $\log p'$ is almost constant with e_L . And the compression index obtained from slurry method sample is larger than one obtained from kneading method sample. Intrinsic compression line (ICL) of Busan clay is identical with ICL suggested by Burland.

Keywords : reconstituted sample, consolidation test, load increment ratio, liquid limits

1. 서론

일반적으로 점토의 압축특성은 e-log p' 그래프에 표현하며, 점성토의 압축성을 나타내는 대표적 물성치인 압축지수는 e-log p' 그래프 정규압밀 구간의 직선 기울기를 의미한다. 자연시료의 경우 압밀시험에서의 e-log p' 그래프는 간극비, 함수비, 연경도 등의 토질정수뿐만 아니라 지반 퇴적 조건, 화학적 고결, 선행압밀하중 등에 따라 서로 달라진다(Burland 1990, Liu & Carter 1999). 반면 재성형 시료의 경우 점토의 연경도에 의해서 e-log p' 그래프가 좌우된다고 알려져 있다. Skempton (1944)이 재성형 시료의 압축지수를 액성한계에 연관시킨 이후 액성한계나 소성지수를 이용하여 재성형 점토의 압축특성을 수식적으로 표현하려는 연구들이 진행되어 왔으며, 몇몇 연구자들은 diffuse double layer 이론 등을 이용하여 연경도와 점성토의 압축특성과의 관계를 이론적으로 연구하였다(Nagaraj & Srinivasa Murthy 1983, Tripathy & Schanz 2007). 일반적인 재성형 시료의 경우 동일한 시료는 동일한 e-log p' 그래프를 나타내는 것으로 가정하나, 시료의 성형방법 및 조건, 시험 방법, 하중 재하 조건 등에 따라 e-log p' 그래프의 차이가 나타나게 된다.

본 연구는 국내의 대표적 점토중 하나인 부산점토 재성형 시료의 압축특성에 관한 것으로, 부산점토

재성형 시료의 간극비와 연경도가 어떠한 관계가 있는지를 파악하였다. 이를 위해 부산신항 지역에서 획득한 액성한계 80%와 50% 시료에 대하여 압밀시험을 실시하여 액성한계와 간극비 그리고 압축지수의 관계를 분석하고 선행연구자들의 결과와 비교하였다. 또한 본 연구에서는 재성형 시료조성 방법과 하중재하가 $e-\log p'$ 그래프에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위하여 2가지 방법으로 재성형 시료를 조성하였으며, 하중재하조건을 변화시키며 압밀시험을 실시하였다.

2. 시험부지 특성

본 연구는 부산신항 북 컨테이너 터미널 현장 지역을 대상으로 시험을 실시하였다. 시험부지는 원래 수심 2m~3m 정도의 바다였으나 신항공사를 위하여 5m~6m 정도 모래 매립을 한 지역으로, 경위도는 E 128°47'56", N 35°04'30"이다. 아래 그림 1은 현장지역의 물성치 조사 자료이며, 물성치 조사는 모래 매립 전/후에 점토지반에 대하여 실시하였다. 함수비 및 연경도는 심도 25m까지 증가하다 감소하는 경향이 나타났으며, 점토의 광물질은 illite 계열로 CH 또는 CL로 분류된다(홍성진 외 2009, 김상균 & 김윤태 2006). 대상지반의 과압밀비는 모래 매립 전 EL-10m 위의 지반을 제외하고는 대부분 정규압밀된 것으로 나타났으며, EL-30 아래의 지반에서는 과압밀비가 약간 증가하는 경향이 나타났다. 모래 매립전에는 EL-10m 위의 지반이 과압밀 되었으나, 매립 후 상재하중 증가로 전체적으로 정규압밀된 지반이 되었는데, 이러한 이유로 매립에 의한 하중 증가가 있었음에도 불구하고 매립 전/후 함수비는 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

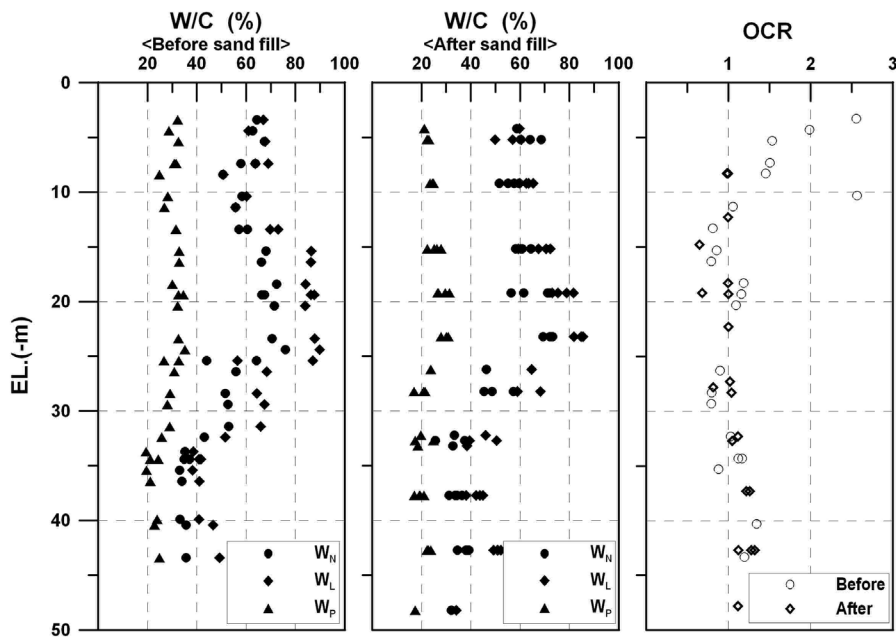


그림 1. 대상지반의 물성치

3. 시험내용

부산점토는 심도 20m~30m 사이를 기준으로 퇴적환경이 다른 2개의 점토층으로 구분되는데, 상부 점토층이 하부 점토층에 비해 함수비와 액성한계가 높게 나타나며, 지역에 따라 상·하부 점토층 사이에 모래/실트 층이 존재한다(김상균 & 김윤태 2006). 그림 1을 보면 본 현장 역시 EL-28m를 기준으로 층을 구분할 수 있으며, 상·하부 점토를 구분하는 모래/실트층은 존재하지 않는다. 본 연구에서는 상·하부 점토층 각 1개 위치에 대하여 재성형 시료를 성형하고 압밀시험을 실시하였으며, 상·하부 점토의 액성한계는 각각 80%와 50% 이다.

재성형 혹은 교란시료는 일반적으로 재성형 시료는 soil structure의 영향이 최소화되고 연경도 등의 고유정수에 따라 거동특성이 결정되는 시료를 의미한다. 본 연구에서는 structure 효과를 최소화 하면서 균질한 점토를 만들기 위해 2가지 방법을 이용하여 교란시료를 조성하였다. 첫 번째는 교란된 시료를 일정함수비로 반죽한 후 성형하는 방법이고, 두 번째는 slurry로 교반한 후 가압하여 성형하는 방법이다. 첫 번째 방법은 선행연구자들이 교란시료 압밀시험에 많이 사용한 방법으로 일반적으로 액성한계 정도의 함수비로 시료를 성형하는데, 성형 함수비는 압축성에 영향을 준다. 성형 함수비가 액성한계보다 클 경우 시료가 흐르는 문제점 있으며, 성형 함수비가 너무 낮으면 $e-\log p'$ 그래프의 외곡이 발생할 수 있다(Sridharan & Nagaraj 2000). Burland (1990)는 성형 함수비가 $1.0\omega_L \sim 1.5\omega_L$ 이면 p' 가 100kPa보다 클 경우 간극비에 큰 영향을 미치지 않으므로 시료조성 시 액성한계보다 약간 높은 함수비로 하는 것이 적합하다고 하였으며, 본 연구에서도 액성한계보다 약간 높은 함수비로 반죽하여 압밀링에 채운 후 시험을 실시하였다. 두 번째는 일명 slurry method로 불리는 방법으로, 점토 chamber 시험에 많이 사용되는 방법이다(Krizek and Sheeran 1970, Kim 2005). 이 방법은 점토시료를 액성한계의 150%~200% 정도의 초기함수비로 교반한 후, consolidometer에 시료를 넣고 가압하여 성형하는 방법으로, 균질하며 동일한 시료를 재성형하기 쉬운 방법이다. 본 연구에서는 액성한계의 170% 정도로 시료를 교반한 후 직경 7cm의 consolidometer에 넣고 가압하여 시료를 성형하였다. 시료의 가압은 초기 6kPa에서 road incremental ratio 1로 96kPa까지 가압하였으며, 각 하중 단계별 압밀시간은 2일 이었다.

Leonard & Altschaeffl (1964)에 따르면 점토의 $e-\log p'$ 그래프는 load incremental ratio(LI)에 의해 영향을 받는다고 하였다. 본 연구에서는 LI가 재성형 부산점토 $e-\log p'$ 그래프에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 각각의 압밀시험에 대하여 LI가 2인 시험을 실시하여 표준시험과 비교하여 보았다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 압밀시험 결과

4.1.2 반죽시료 결과

자연시료의 경우 soil structure, 응력이력 등 다양한 요소의 의해 압밀시험의 $e-\log p'$ 그래프가 결정되는 반면, 재성형 시료의 $e-\log p'$ 그래프는 연경도와 밀접한 관계를 가진 것으로 알려져 있다(Sridharan & Nagaraj 2000). 특히 Nagaraj & Srinivasa Murthy (1983)는 재성형 시료의 $e-\log p'$ 그래프가 액성한계에서 간극비(e_L)에 따라 (1)과 같은 관계를 나타낸다고 하였다.

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

여기서, p' 는 연직유효응력이며, A와 B는 상수로 Nagaraj & Srinivasa Murthy (1983)는 A와 B를 각각 1.099, 0.2237, Nagaraj & Miura (2001)는 1.23과 0.28이라고 하였다. 그리고 Burland (1990)는 clay mineral에 따라 차이가 나타난다고 하였다.

그럼 2는 부산점토의 $e/e_L-\log p'$ 그래프로, 왼쪽 그래프는 $IL=1$ 인 시험결과이며 오른쪽 그래프는 $IL=2$ 인 시험결과이다. 시험결과 상·하부 점토층의 $e/e_L-\log p'$ 그래프는 일치하였으며, e/e_L 은 시험응력 범위 내에서는 $\log p'$ 와 거의 선형적인 관계가 나타났다. $IL=1$ 시험과 $IL=2$ 시험을 비교해 보면, 낮은 응력에서는 e/e_L 이 일치하였으며 높은 응력에서는 $IL=2$ 시험이 약간 작게 나타났다. 즉 $IL=2$ 시험의 $e/e_L-\log p'$ 그래프의 기울기가 조금 더 크게 나타났다. $IL=1$ 인 경우, 부산점토에서 식 (1)의 A와 B는 각각 1.224와 0.256으로 나타났으며, $IL=2$ 인 경우는 A와 B가 각각 1.227과 0.264로 나타났다.

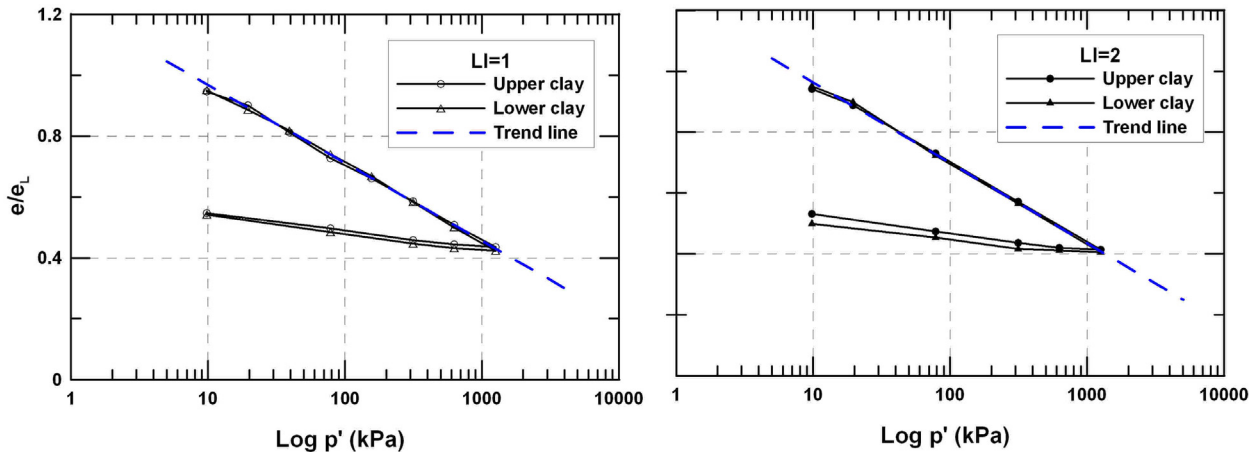


그림 2. 반죽시료 시험의 e/e_L - $\log p'$ 그래프

4.1.2 Slurry 시료 결과

그림 3은 slurry 방법으로 조성한 시료의 e/e_L - $\log p'$ 그래프로, 왼쪽 그래프는 $IL=1$ 인 시험결과이며 오른쪽 그래프는 $IL=2$ 인 시험결과이다. 시험결과 상·하부 점토의 e/e_L - $\log p'$ 그래프는 일치하였으며, 그래프의 형상은 자연시료와 유사한 형태로 나타났다. 이것은 반죽시료와는 다르게 시료를 하중에 의해 조성하였기 때문에 시료조성 하중이 선행압밀하중이 역학을 하여, 시료조성 하중 전후의 e/e_L - $\log p'$ 그래프의 기울기가 다르게 나타난다. 시험결과를 보면 $LI=1$ 에서 상·하부 점토층 시료의 초기 응력부분에서 그래프가 약간 다르게 나타났는데, 이것은 시료 조성 시 압밀도 차이에 의해서 나타난 것으로 판단된다. 즉, 반죽시료의 경우 성형 함수비가 e/e_L - $\log p'$ 그래프의 초기 형상에 중요한 영향을 미치는 것처럼, slurry 방법의 경우 시료 조성 시 하중이 e/e_L - $\log p'$ 그래프에 큰 영향을 미치게 된다.

Slurry 방법으로 조성한 시료의 압밀시험은 자연시료와 마찬가지로 조성된 시료를 trimming하여 압밀링에 설치하므로 시험 시 교란이 발생하고, e - $\log p'$ 그래프의 재압축 구간에서 간극비 감소가 발생한다. 이러한 교란효과를 보정하기 위해 초기 간극비와 선행압밀하중으로 그래프를 보정한 결과, $IL=1$ 인 경우, A와 B는 각각 1.738과 0.43으로 나타났으며, $IL=2$ 인 경우는 A와 B가 각각 1.779와 0.45로 나타났다. 이는 반죽시료 시험의 결과보다 A는 40% B는 경우 70%정도 높은 값이다. 반죽시료 시험결과는 구속응력에 상관없이 e/e_L - $\log p'$ 그래프가 일정한 기울기를 나타내는 반면, slurry 시료는 고압력 부분에서 기울기가 감소하는 경향이 나타났다. 이상을 종합하여 볼 때 slurry 시료에서 제안된 A, B는 선행압밀하중부터 시험하중 미만의 응력조건에서만 적합할 것이라 판단된다.

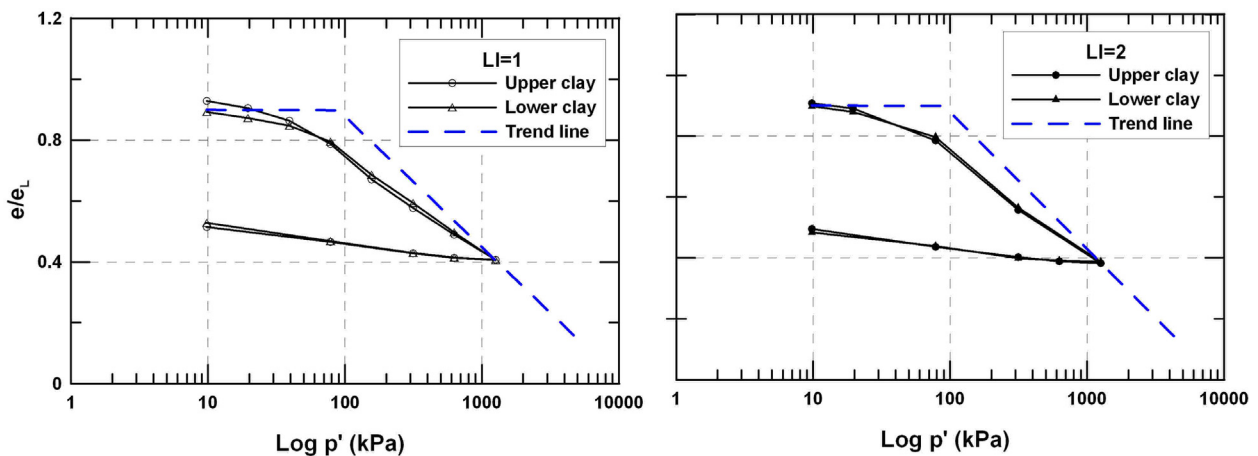


그림 3. Slurry시료 시험의 e/e_L - $\log p'$ 그래프

4.2 부산점토의 ICL과 SCL

Burland (1990)는 점성토의 압축특성을 정규화하여 표시하기 위하여 간극비 대신 식 (2)와 같은 간극지수(I_v : void index)를 제안하였다. 그리고 재성형 시료 압밀시험에서 얻은 I_v -log p' 그래프를 intrinsic compression line (ICL), 자연퇴적 지반의 I_v -log p' 그래프를 sedimentation compression line (SCL)이라고 하였다.

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

여기서, e_{100}^* 과 e_{1000}^* 은 재성형 시료의 100kPa과 1000kPa에서의 간극비이며, C_c^* 는 e_{100}^* 의 e_{1000}^* 차로 constants of intrinsic compressibility라고 한다. 반죽 재성형 시료의 LI=1 시험결과 e_{100}^* 과 C_c^* 는 각각 0.712 e_L 과 0.256 e_L 로 나타났다.

그림 4는 부산점토의 I_v -log p' 그래프로, I_v 는 시험에서 구한 e_L 과 e_{100}^* 및 C_c^* 관계를 이용하여 산정하였다. 반죽 재성형 시료의 ICL은 100kPa 미만의 응력구간에서 약간의 차이를 보이거나 Burland가 제안한 ICL과 일치하는 것으로 나타났다. 현장지반의 액성한계와 간극비를 이용하여 I_v 를 산정한 결과, 매립 전 지반의 I_v 가 모래 매립 후 I_v 보다 아래에 위치하며, 매립 후 I_v 는 Burland가 제시한 SCL과 유사하게 위치하는 것으로 나타났다. 이것은 매립에 따른 연직응력에 증가에도 불구하고 매립 전·후에 간극비 차이가 없기 때문에 매립 후 지반의 I_v 가 위에 위치하는 것이다. Burland (1990)에 따르면 현장지반이 SCL 아래에 위치하면 과압밀된 지반이며, 위에 위치하면 cemented나 highly structured 된 지반이라고 하였다. 부산신항 현장의 경우 모래 매립 전 약간 과압밀된 지반은 SCL 아래쪽에 위치하였으며, 모래 매립 후 정규압밀이 된 지반은 SCL에 위치하였다.

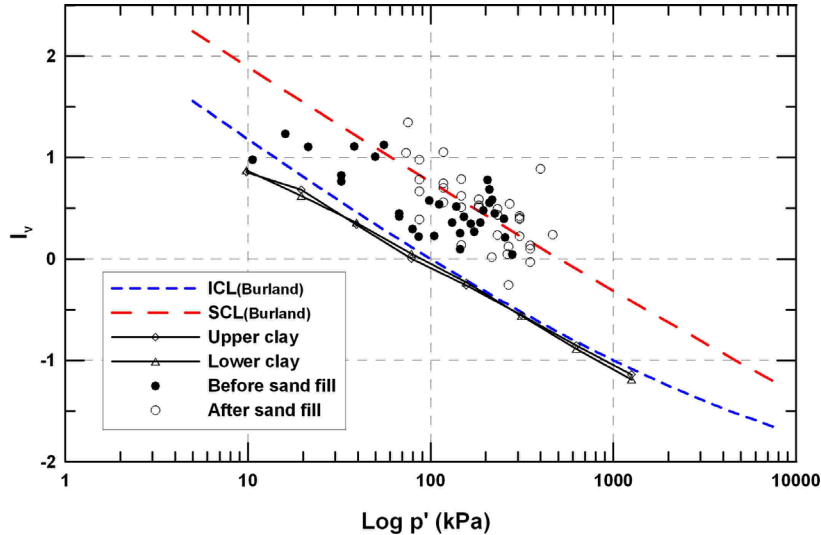


그림 4. I_v -log p' 그래프

5. 결론

본 연구는 재성형 부산점토의 압축특성에 관한 것으로, 부산신항 상·하부 점토층에 대하여 2가지 시료 조성방법과 하중증가비로 압밀시험을 실시하였다. 시험결과로부터 부산점토의 연경도와 e -log p' 그래프 관계를 파악하고, 시료조성 방법과 하중증가비가 e -log p' 그래프에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 그리고 압밀시험 결과를 이용하여 부산점토의 ICL을 결정하고, 현장지반의 I_v -log p' 관계를 파악하

여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 교란 부산점토의 압밀시험 결과 간극비와 구속응력과의 관계는 액성한계에서의 간극비(e_L) 따라 일정한 것으로 나타났다. 반죽시료의 경우 상·하부 점토에서 $e/e_L - \log p'$ 그래프는 일치하였으며, 구속응력과 간극비는 $e = e_L(1.224 + 0.256 \log p')$ 의 관계가 나타났다.
- 2) Slurry 방법으로 조성한 시료 역시 e_L 로 정규화가 가능했으며, 식 (1)의 A 및 B 모두 반죽시료보다 높게 나타났다. 반면 e/e_L 와 $\log p'$ 의 관계는 반죽시료에 비해 선형적이지 않아, 시험응력범위 밖에는 제안된 관계식을 적용하기에 무리가 있는 것으로 판단된다. 하중증가비를 증가시킨 시험에서는 A와 B가 약간씩 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 부산점토의 ICL은 Burland가 제안한 ICL과 유사하다. 부산신항 현장의 $I_v - \log p'$ 그래프를 보면 모래매립 전에는 SCL에 비해 약간 아래에 위치하였으며, 매립 후에는 SCL과 유사하게 위치하였다. 이것은 원래 현장이 약간 과압밀된 지반이었으나 모래매립 후 정규압된 것을 의미한다.

참고문헌

1. 김상규, 김윤태 (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.
2. 홍성진, 이문주, 김태준, 이우진 (2009), “간극수압비를 이용한 부산점토의 CPTu 콘계수 추정”, 한국지반공학회논문집, 제 25권, 1호, pp.77-88.
3. Burland, J. G. (1990), “On compressibility and shear strength of natural clay”, *Geotechnique*, Vol.40, pp.329-378.
4. Kim, T. J. (2005) “Dissipation of porewater pressure due to piezocone penetration in OC clay”, Ph.D. dissertation, Korea university.
5. Krizek, R. J. and Sheeran, D. E. (1970), “Slurry preparation and characteristics of samples consolidation in slurry consolidometer”, Technical report No. 2, Contract No. DACW39-70-C0053, U.S. Army corps of engineers, Waterways experiment station, Vicksburg, MS. pp.1-5.
6. Leonards, G. A. and Altschaeffl, A. G. (1964), “Compressibility of clay”, *J. Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.90, pp.133-155.
7. Liu, M. D. and Carter, J. P. (1999), “Virgin compression of structured soil”, *Geotechnique*, Vol.49, pp.43-57.
8. Nagaraj, T. S. and Miura, N. (2001), “Soft clay behaviour - analysis and assessment”, Balkema, Rotterdam.
9. Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy B. R. (1983), “Rationalization of skempton's compressibility equation”, *Geotechnique*, Vol.33, pp.433-443.
10. 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.
11. Skempton, A. W. (1944), “Notes on the compressibility of clays”, *Q. J. Geol. Soc. Lond.*, Vol.100, pp.119-135.
12. Tripathy, S. and Schanz, T. (2007), “Compressibility behaviour of clays at large pressures”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.44, pp.355-362.