

양생조건에 따른 연대효과의 재현과 재압밀점토의 역학특성

Mechanical Characteristics of Remolded Clay and Simulation of Aging Effect with Curing Condition

*김찬기 · 국현숙 · 박만규 · 홍지웅(대진대)

*Kim, Chan Kee · Kook, Hyoun Sook · Park, Man Gyu · Hong, Zee Woong

Abstract

In this study, the clay samples collected in the area Mokpo carry out laboratory soil test. Under three different curing temperature-20°C, 50°C, 80°C and 4 terms of curing day -1day, 7days, 14days, 40days for each, the remolded and reconsolidated samples had been made. To find out an aging effects and geotechnical characteristics between undisturbed samples and reconsolidated samples, laboratory tests were preformed. In the results, it was found that mechanical properties of undisturbed natural samples were similar to high temperature reconsolidation clay. The curing temperature influence on simulating aging effect more than the curing day does and the best curing condition are 80°C, 27days.

I. 서 론

장기간에 걸쳐 물리적 또는 화학적 작용을 받은 원지반점토는 2차압밀이나 시멘테이션(cementation)효과와 같은 다양한 현상으로 인하여 재성형·재압밀한 신생점토와는 서로 다른 구조를 가지므로 역학적 거동에서 큰 차이를 나타내게 된다(Tavenas and Leroueil, 1977; Jamiolcowski, 1985). 이와 같은 원지반점토의 성질을 연대효과(aging effect)라 하며 연대효과로 인한 점토의 압밀 특성, 전단특성을 밝히기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

Bjerrum(1963,1973)은 최초로 퇴적된 점토의 역학적 특성에 관한 연대효과의 중요성을 지적하였고, Mesri와 Godlewski(1977)는 원지반점토의 Cc와 Ca가 압밀용력이 압밀항복과 거의 동일하게 되었을 때 명확한 피크점을 나타내지만 재성형된 시료에 대해서는 압밀압력과 함께 점차적으로 증가한다고 하였다. Plum과 Esrig(1969)은 고온상태에서 2차압밀이 더 가속화된다고 하였다. Jamiolcowski(1985)은 3축압축시험을 통하여 압밀하중이 선행압밀하중 보다 클 때 점토는 연대효과에 의해 선행압밀하중을 초과하는 하중으로 압밀되어 자연적으로 파괴되기 때문에 연성을 가진다고 하였다.

본 연구는 목포 남악지역의 점토를 사용하여 불교란시료를 대체할 수 있는 시료를 제작하고 양생온도와 양생기간이 연대효과재현에 미치는 영향과 재현 가능한 최적온도·기간을 압축지수비(v_c)와 관련지어 제공하고자 한다.

II. 재성형 점토 제작과정

본 연구에 사용된 시료는 목포 남악지역에서 채취한 해성점토로서 실험실에서 오래된 정규압밀점토의 구조를 재현하기 위하여 Table 1과 같은 기본물성을 가진 시료를 이용하여 양생온도를 20°C, 50°C, 80°C로 달리하고 각각의 온도에서 양생기간을 1일, 7일 14일, 40일로 하여 재성형·재압밀시료를 제작하고 양생온도·양생기간이 연대효과의 재현에 어떤 영향이 있는지를 밝히고, 연대효과특성을 알아보기 위하여 표준압밀 및 삼축압축(CU)시험을 하여 원지반 불교란점토의 시험결과와 함께 비교함으로써 양생조건에 따른 연대효과의 재현을 검토하고자 한다.

Table 1 properties of soil

채취지역	시료제조함수비(%)	비중	액성한계	소성지수	USCS
목포	119.3	2.69	38.87	20.31	CL

시료는 재성형·재압밀 시료의 균일성을 위하여 액성한계의 2배에 해당하는 함수비로 충분히 교

반시킨 후 조립분을 제거하고, 압밀장치에 넣어 자중압밀을 시킨 후 압밀 단계별로 하중을 가한다. 각 하중단계는 24시간씩 지속하고, 최종압밀하중은 불교란점토의 압밀응력과 동일한조건인 0.8kg/cm²로 하여 1차압밀이 종료되면 2차압밀 기간동안 양생온도 및 양생기간을 각각 달리하여 양생하였다. 여기서 1차압밀 종료시점은 3t법(Japan Geotechnical Society, 1990)을 이용하여 결정하였다.

III. 양생조건에 따른 재성형 점토의 역학특성

i. 강도특성

fig 1(a)는 양생온도에 따른 재압밀점토의 강도특성을 검토하기 위하여 구속응력 0.5, 1.0 및 2.0kg/cm²로 등방압밀후 축변형률속도가 0.1%/min인 조건으로 압밀비배수 삼축압축시험 결과를 나타낸 것으로 양생온도가 저온일 경우 응력-변형을 곡선은 일경화현상(work hardening)을 나타내고 양생온도가 높을 수록 응력-변형을 곡선의 일연화현상(work softening)을 나타내었다. 일축압축시험에서도 이와 같은 결과를 얻을 수 있었으며 양생온도가 높은 경우 강도가 크게 나타나고 파괴시 축변형률은 작아지는 경향을 나타내고있다. 구속응력이 낮은 경우 양생온도에 따른 축차응력의 차는 비교적 작지만 구속응력이 증가하면 양생온도에 따른 축차응력의 차는 증가하는 경향을 나타내고 있다. fig 1(b)는 점토에 대한 응력경로를 p'-q'면에 나타낸 것으로 양생온도가 증가할수록 기울기가 크게 나타나고 불교란점토의 특성과 일치하는 경향을 나타낸다. 이와 같이 삼축압축 시험결과도 양생온도에 따른 연대효과의 재현성이 나타나며 특히 80℃부근에 이룰수록 불교란 시료의 특성과 일치되는 경향이 나타나고 있음을 알 수 있다. fig 1(c)는 양생온도에 따른 탄성계수변화를 나타낸 것으로 양생온도가 낮은 경우 탄성계수의 차가 적지만 양생온도가 증가할수록 탄성계수의 차가 증가하며 불교란 시료의 탄성계수 영역에 나타난다.

위의 결과와 같이 고온에서 양생된 시료일수록 불교란시료의 전단거동과 비슷한 형상을 보여주고 있는데 이는 고온에서 양생한 시료가 불교란 시료의 실험결과에 더 근접되며 고온재압밀 방법으로 점토의 연대효과에 관한 재현성에 유효성이 있음을 나타내고 있다.

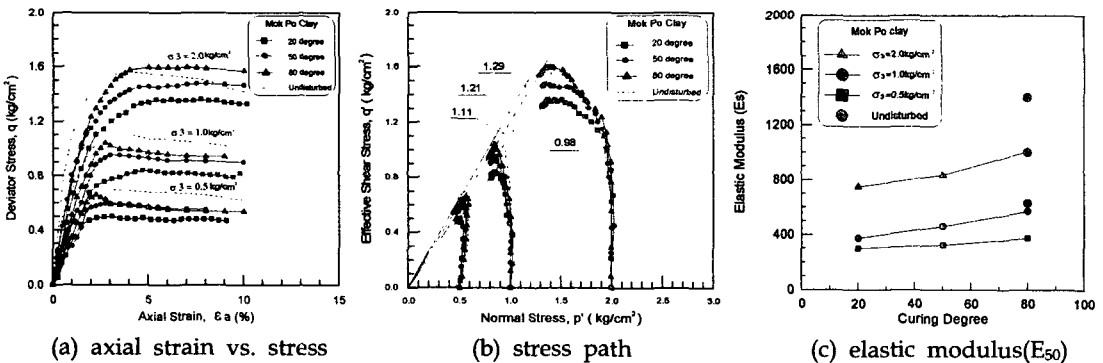


fig 1. strength properties for curing temperature

ii. 압밀특성

재압밀점토의 양생온도에 따른 압밀특성을 밝히기 위하여 20℃, 50℃, 80℃로 각각 양생한 시료를 이용하여 표준압밀시험을 실시하였다. fig 2는 양생기간이 14일인 경우의 온도변화에 대한 간극비-하중 관계를 나타낸 것으로 불교란시료에 대한 시험결과와 함께 나타내었다. 재압밀 시 양생온도가 저온에서 고온으로 갈수록 간극비-하중 곡선의 형상이 불교란시료의 곡선과 유사한 경향을 보이고, 선행압밀하중도 증가하며 과압밀과 정규압밀의 영역이 명확하게 구분된다. 오래된 정규압밀점토는 2차 압밀의 영향으로 인하여 간극비가 감소하고 선행압밀하중이 증가하는 경향을 보인다고 한 Bjerrum 연구내용과 같이 80℃에서 양생된 재압밀점토는 오래된 정규압밀점토와 유사한 거동을 나타낸다는 것을 알 수 있고 온도가 증가할수록 재압밀 된 점토의 선행압밀하중이 커지는 경향을 보이고 있다. 또한 온도가 20℃, 50℃의 경우에는 불교란시료의 팽창지수와 초기간극비의 차이가 크게 나타나지만

80℃의 경우에는 초기간극비의 차이가 작아지고, 팽창지수와 압축지수가 불교란시료의 경우와 매우 유사한 경향을 보이고있다.

fig 3에 양생온도 80℃일 경우 양생기간 변화에 대한 간극비-하중 관계를 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 압축지수와 팽창지수는 양생기간이 길어질수록 불교란시료와 유사한 경향을 나타내고 있다. 또한 선행압밀하중도 양생기간이 길어질수록 불교란시료와 비슷한 값을 가진다. 양생기간이 27일을 경과한 후에는 초기간극비, 압축지수, 팽창지수, 선행압밀하중이 불교란시료의 값들과 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로 보아 재압밀시료의 양생온도와 양생기간이 증가하면서 압밀하중과 간극비의 관계가 불교란시료와 비슷한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 연대효과를 재현하기 위한 효과적인 양생온도는 80℃이며, 양생기간이 27일 정도를 경과하면 비교적 연대효과재현이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 양생온도가 낮은 경우에는 양생기간 40일 이후에도 연대효과 재현이 다소 미흡하였다.

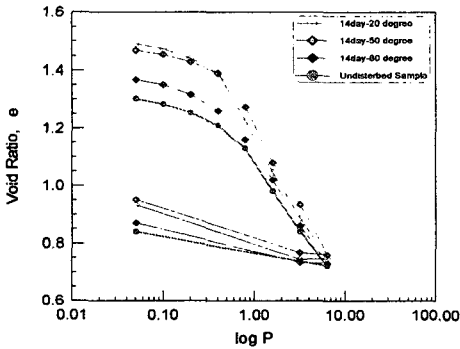


fig 2. e vs. log p for curing temperature

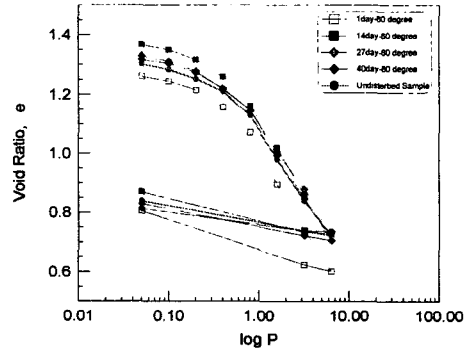


fig 3. e vs. log p for curing day

iii. 압축지수비 특성

上田(1989) 등은 자연점토와 재압밀 점토의 역학특성의 차이(자연점토는 P_c 부근에서 C_c 와 C_α 가 피크값을 나타내지만, 재압밀 점토는 정규압밀 영역에서 C_c , C_α 가 거의 일정하게 되는 점)를 2차압밀이나 교결등 자연 점토의 연대효과에 의한 것으로 생각하여 이 경우를 나타내는 새로운 매개변수인 압축지수비(r_c)를 식(1)과 같이 제안하였다.

$$r_c = \frac{C_{cmax}}{C_c^*} \quad (1)$$

여기서, C_{cmax} 는 e - $\log p$ 곡선에서 C_c 의 최대치이고, C_c^* 은 압밀용력이 P_{cmax} (P_{cmax} 는 $C_c=C_{cmax}$ 일 때 압밀용력임)의 5배 일때의 값이다. 이 압밀용력의 5배의 값은 통상 실시되고 있는 표준압밀시험의 압밀용력의 범위를 고려해서 결정된 것이며, 압축지수비(r_c)는 정규압밀영역에서 압축성의 변화를 나타내는 지표라 할 수 있다.

fig 4(a)는 양생온도에 따른 압축지수의 변화특성을 나타낸 것으로 양생기간 1일일 경우, 고온재압밀인 경우에는 압축지수비가 크게 나타나며 불교란시료와 같이 선행압밀하중에서 최고 값을 가지고 압밀 종료단계에서는 일정한 값에 수렴하는 경향을 보인다. 양생기간이 1일, 14일, 27일인 경우 압축지수비의 분포는 이산되어 있지만 40일의 경우에는 선행압밀하중에서 최고점을 가지며 양생기간이 길어지면 압축지수비가 커지고 양생기간 27일 이후에는 불교란시료의 압축지수비와 거의 일치한다. 따라서 연대효과재현에는 고온양생이 저온양생 보다 적합하다고 판단된다.

fig 4(b)는 압축지수비와 양생온도의 관계를 나타낸 것으로 20℃의 경우 압축지수비가 다소 분산되는 경향이 있지만 고온양생 일수록 압축지수비가 양생기간에 관계없이 수렴하는 경향을 보이고 있다. 따라서 연대효과를 재현하기 위한 양생온도는 80℃일 경우가 가장 적합하다고 판단된다.

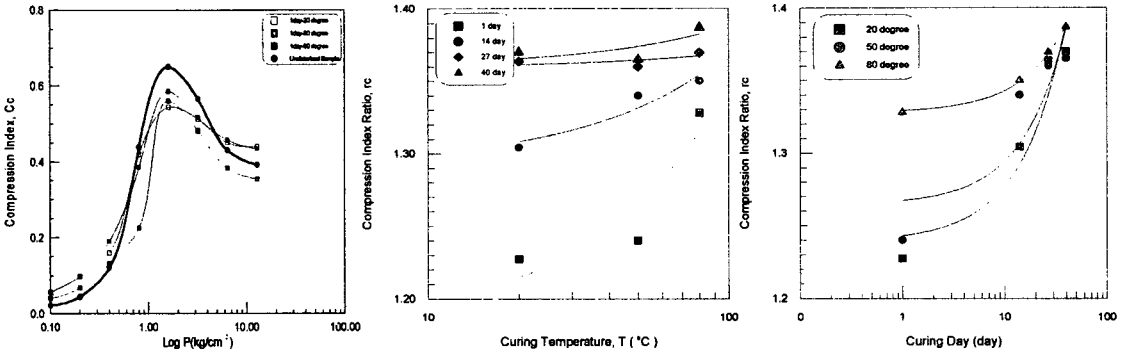
fig 4(c)에서 압축지수비와 양생기간에 따른 특성을 살펴보면 양생기간이 길어지면서 압축지수비도 증가하는 경향을 보이고, 27일 이후에는 압축지수비가 수렴한다. 따라서 양생기간과 압축지수비와의

관계를 살펴보면 양생기간이 27일 이후에 연대효과재현이 효과적이라 판단된다.

목포점토를 사용하여 양생온도와 양생기간이 연대효과재현에 미치는 영향을 검토하기 위하여 양생조건에 따른 재성형·재압밀 시료에 대한 표준압밀시험에서 얻은 압축지수비를 다중회귀분석(multiple regression)하여 압축지수비를 양생온도와 양생기간의 함수식으로 표현하면 식(2)과 같다.

$$v_c = k + \alpha \times C_t + \beta \times C_d \quad (2)$$

여기서 k 는 상수이고, α 는 양생온도계수, β 는 양생기간계수로 정의하며 v_c 는 압축지수비이고 C_t 는 양생온도이며 C_d 는 양생기간이다. 목포점토의 k 는 1.25이고, α 는 0.008, β 는 0.0024이다.



(a) c_c vs. consolidation pressure (b) r_c vs. curing temperature (c) r_c vs. curing day
fig 4. values of compression index and values of compression index ratio for remolded clay

IV. 결 론

본 연구는 양생조건을 변화하여 재성형·재압밀한 점토와 불교란시료의 역학적 특성과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재압밀시료의 양생온도가 증가하면 점토시료의 입자 구조가 면모구조화 되며 양생온도가 낮은 경우에는 신생점토와 비슷한 거동을 하고 양생온도가 높은 경우에는 오래된 정규압밀점토와 유사한 거동을 나타낸다.
2. 재압밀시료의 전단강도 및 압밀특성은 고온양생할 경우 불교란시료의 거동특성과 유사하고 연대효과를 잘 표현하였으며 연대효과 재현은 양생기간보다 양생온도의 영향을 크게 받으며 최적의 양생온도는 80°C이고 양생기간은 27일 이상이다.
3. 목포점토 불교란점토와 재성형·재압밀 점토의 압축지수비를 비교한 결과 고온양생 시료일수록 압축지수비는 불교란점토의 압축지수비와 일치하고 압축지수비가 연대효과를 나타내는데 유용한 지수임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 이강일(2000), "불교란 및 재성형 해성점토의 연대효과 재현", 대한토목학회논문집, 제20권, 제 2-C호, pp.119~128.
2. 土田孝, 小林正樹他(1989), "高温再壓密による海成粘土の年代効果の再現", 港灣技術研究所 報告, 第 28卷, 第1号, pp.121~147.
3. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), "Time and stress-compressibility interrelationship," ASCE, Vol. 103, GT. 5, pp.417~430.
4. Japan Geotechnical Society(1990), "Method and explanation of soil tests", Japan, pp.357.
5. Plum, R.L. and Esrig, M.I. (1969), "Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure," HRB Special Report 103, pp.231-242.
6. Takashi Tsuchida, Masaki Kobayashi and Jun Ichi Mizukami(1991), "Effect of aging of marine clay its duplication by high temperature consolidation", Soils and Foundations, Vol. 31, No. 4, pp.133~147.