

연약점토의 자중압밀특성 연구

유남재* · 유건선** · 이종호***

A Characteristic Study on Selfweight Consolidation of Soft Clay

Nam-Jae Yoo* · Gun-sun Yoo** · Jong-Ho Lee***

ABSTRACT

This research is the experimental and numerical study of investigating the characteristics of consolidation due to selfweight of soft marine clay. Column tests and centrifuge tests were carried out to simulate the selfweight consolidations in field. Tests were conducted with changing drain boundary conditions and initial void ratios corresponding to four and five times of liquid limits. The RI meter was used to measure void ratio during consolidation of sample in column tests. Test results were analyzed by using the Terzaghi's infinitesimal strain theory and the finite strain theory.

1. 서 론

경제성장과 더불어 가용국토확장에 따른 매립지 확보가 활발히 진행되고 있으며, 비교적 우리나라에서 구하기 쉬운 해저 퇴적토를 이용한 준설매립공법에 대한 관심이 증가하고 있는데, 이러한 매립의 기초단체인 침전 및 압밀에 관한 연구는 아직도

많은 과제로 남아있다.

액상상태의 흙은 자중하에 침강시 평형상태에 도달할때까지 액체상태를 유지하며 떠있으며, 흙입자의 현탁액은 중력에 의해 침전되며 하부에서는 침전물의 누적에 따른 압밀이 진행된다. 따라서, 본 연구에서는 일반적으로 액성한계의 4 - 5배의 고함수비를 갖는 Slurry상태의 해성점토에 대해 일면 및 양면배수 조건을 갖는 Column실험을 실시하고, 동일조건으로 원심모형실험을

* 강원대학교 토목공학과 부교수

** 한라공진 토목공학과 부교수

*** 강원대학교 토목공학과 박사과정

실시하여 침강과 압밀에 대한 제반 현상등을 비교관찰하고, 침강과 압밀이 동시에 일어나는 지역침전 및 압밀침전에 관해 조사하였다. 한편, 자중압밀이 일어나는 동안 간극비의 분포를 알아보기 위해 RI Meter를 사용하여 밀도를 측정하였으며, 유한변형을 압밀이론¹⁾과 Terzaghi미소변형을 압밀이론을 이용하여 그 결과를 비교분석하여 차이점에 관하여 조명하고자 한다.

2. 실험내용

본 연구에 사용한 시료는 $G_s=2.65$, $LL=43.51$, $PL=27.41$, $PI=16.1$ 인 부산 인근에서 채취하여 재성형한 해성점토로서, 펌프 준설선으로 준설·매립할 경우 토립자의 함유율은 10% - 20% 정도이므로 이를 재현하기 위하여 Column에 투입될 시료의 양은 평균 15%(중량비)의 토립자 함유율을 갖도록 하였다. 시험장치는 <Fig. 1>에서 보는바와 같이 2m 높이와 21cm의 지름을 갖는 자중 Settling Column을 Plexiglas로 제작하였으며, 실험중 압밀침하량은 시간경과에 따라 Column계면을 측정하였고, Column 측면에 일정한 간격으로 1.2cm의 구멍을 뚫고 Connect Valve에 수위변화를

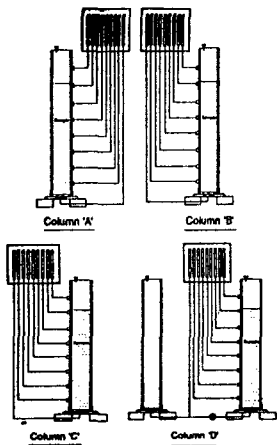
정확하게 측정하기 위하여 염료를 투입한 Standpipe를 연결하여 간극수압을 측정하였다.

2.1 Column Test

침강특성 및 자중압밀이 시작되는 시점을 분석하기 위하여 <Table 1>에 나타나 있는 준설토의 초기조건에 따라 Column 'A', Column 'B'의 실험을 먼저 실시하고, Column 'A', 'B'의 시간 - 침강 및 자중압밀 곡선으로 부터 자중압밀이 시작된다고 판단되는 준설슬러리의 물성치를 추정하여, 이를 재현하기 위하여 Column 'B'에 자연 시료를 추가로 투입한 후, Airation시켜 충분히 교반시킨뒤 일면배수 조건의 Column 'C'와 양면배수조건의 Column 'D'의 자중압밀실험을 실시하였다. 한편, 방사능 동위원소(Radio Isotope, RI)를 사용하는 측정기(RI 시험기)를 Column 바닥으로부터 20cm, 40cm, 60cm, 80cm, 96cm, 114cm, 134cm 등의 여러 위치에서 각각 측정하여, 침강 및 자중압밀 중인 Column내의 준설토를 교란시키지 않은채 필요할 때마다 현장단위 중량을 수시로 측정하므로써 시간경과에 따른 준설토의 깊이별 현장단위중량의 변화를 측정하였다.

<Table 1> Experiment Conditions of Settling Column Tests

		초기단위중량 (t/m^2)	초기 간극비	초기 함수비
침강 및 자중압밀	'A'	1.133	14.69	553
	'B'	1.136	14.33	540
자중압밀실험 'C'		1.271	5.891	225
자중압밀실험 'D'		1.271	5.891	225



2.2 원심모형실험

원심모형 실험은 실내에서 축소된 모형을 사용하여 인위적으로 모형을 가속시킴

에 따라 토립자의 자중을 증가시켜 현장상태의 응력을 재현시킴으로써, 현장 응력상태에서 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 효율적인 실험기법이다. 따라서, 강원대학교에 설치되어 있는 원심모형기를 사용하여 <Table 2>에 나타난 바와 같이 Column실험과 동일한 조건으로 실험을 실시하여 비교분석을 실시하였다.

<Table 2> Experimental Condition of Centrifuge Model Tests

경계조건	일면, 양면배수
초기간극비	5.891
초기함수비 (%)	222.3
중력수준	30G
시료높이 (cm)	6.67

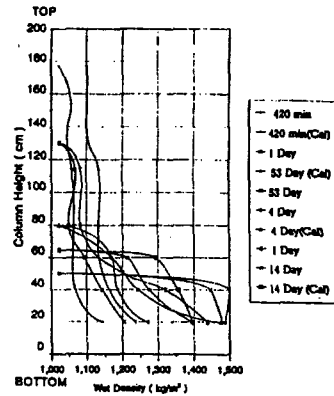
중력수준 30G-Level에서의 시료높이의 결정은 상사법칙($t_p = \lambda t_m$)에 의해 Column높이 200cm는 $200/30 = 6.67\text{cm}$ 로 결정하였으며, 투입될 시료양의 결정은 Column Test에서 실시했던 방법과 동일한 간극비와 함수비로 조절하여 양을 결정하였다.

3. 실험결과 및 분석

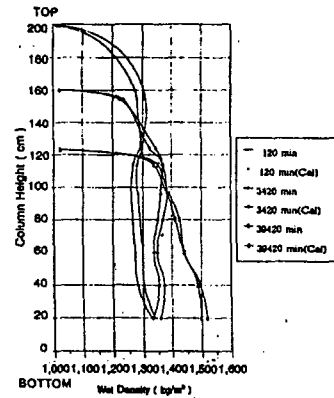
3.1 현장단위중량 측정

단위중량을 측정하기 위한 RI meter의 사용은, Plexiglass 자체 생산과정에서 이물질의 첨가와 Column 벽체에 과잉간극수압 측정을 위한 Stand Pipe 구멍등이 v선에 영향을 줄 수 있으므로 보정작업이 요구되는데, 보정은 측정시간마다 구해진 단위중량 분포곡선에서 적분값을 취하여, 초기 토립자의 투입량과 비교하여 보정치를 획득하고 그 보정치를 각 측정위치에서 구한 단위중량에 곱해주었다. <Fig. 2>는 실험 A에서의 단위중량 분포를 보정한 값과 비교하여 나타낸 것이다. 밀도가 커질수록

보정치와 근사해집을 볼 수 있지만, 전반적으로 초기에는 밀도가 작고 침전상태라 측정치와 보정치와의 차이가 심한것을 볼 수 있다. 반면에 <Fig. 3>에서 보는바와 같이 실험 C에서는 자중압밀단계로 밀도가 크기 때문에 비교적 측정치와 보정치가 근사함을 볼 수 있다.



<Fig. 2> Wet Density Profile Calibration (Column 'A')

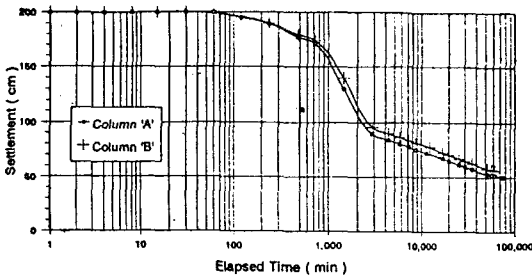


<Fig. 3> Wet Density Profile Calibration (Column 'C')

3.2 침강 및 자중압밀분석을 위한 Column Test 'A', 'B'

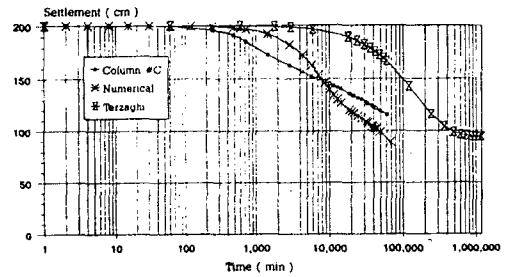
<Fig. 4>의 Column A실험의 시간에 따른 침하량 곡선은 침전 및 압밀실험을 시작한뒤 약 1 시간이 경과할때까지 침하량이 거의 없음을 보이는데 이는 초기에 고함수비를 갖는 Slurry 상태의 점토가 침전은 거의 발생하지 않고 Floc를 형성하는 응

집단계로 판단되며, 1-50시간의 경우는 침하곡선은 급격히 떨어지며 급한 경사를 보이는데 이 상태는 Floc을 형성한 Slurry점토가 침전물로 변하여 상부에서는 침강을 하며 하부에서는 자중하의 압밀이 일어나는 침강단계로 판단된다. 그리고, 50시간이 경과한 후에는 침하곡선이 갑자기 완만해짐을 보이는데 이는 상부의 침강단계는 사라지고 완전히 형성된 점토층이 자중압밀하에 놓인 압밀단계로 판단된다²⁾. 따라서, 침강과 압밀 두단계의 접선의 교점을 자중압밀 시작점으로 추정하여 일면 및 양면배수조건의 자중압밀실험 Column 'C', 'D'를 실시하였다.



<Fig. 4> Time - Settlement Relationship (Column 'A', 'B')

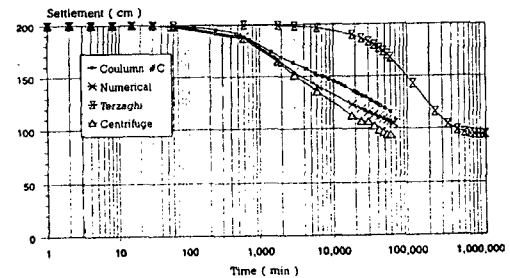
했기 때문에 점토입자의 침강에 의한 빠른 침하현상을 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 초기간극비를 5.0으로 보정하여 수치해석과 원심모형실험을 실시하여 비교해본 결과 <Fig. 6>에서 볼 수 있듯이 Column 실험과 수치해석과는 비교적 유사한 침하경향을 나타내고 있으며, 원심모형실험은 다소 침하가 큰 것을 보이는데, 이는 소정의 G-Level에 도달하는 시간을 압밀에 고려하지 않음으로 인한 차이로 판단되며, 반면, Terzaghi이론은 위의 실험과 수치해석과는 상당한 차이가 나타남을 볼 수가 있다.



<Fig. 5> Time - Settlement Relationship (Column 'C' : Numerical : Terzaghi Comparison)

3.3 자중압밀 실험분석

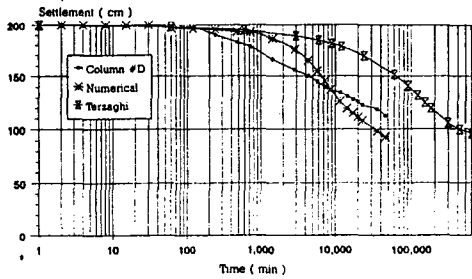
<Fig. 5>의 Column 'C'의 일면배수일 경우 압밀-침하곡선은 수치해석에 비해 Column실험 결과는 압밀시작 후 7일까지는 침하량이 크다가 7일 이후 침하량이 상대적으로 작아짐을 볼 수 있는데, 원심모형실험의 결과와 수치해석과는 90% 압밀도달시간 및 침하경향이 유사한것을 볼 수 있다. Column결과가 초기에 침하량이 큰 것은 Column 'A'실험에서 자중압밀의 시작점의 물성치를 추정함에 있어 5.891의 초기간극비를 산정하였으나, RI Meter의 보정으로 산정된 초기간극비는 5.0으로 즉, 초기간극비 5.891은 자중압밀단계 이전단계인 침강과정이 끝나지 않은 상태에서 실험을 실시



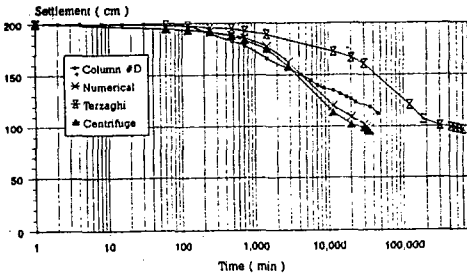
<Fig. 6> Time - Settlement Relationship (Column 'C' : Numerical : Centrifuge : Terzaghi Comparison)

<Fig. 7>에서의 Column 'D'의 양면배수일 경우에도 일면배수일때와 거의 유사한 경향의 압밀-침하곡선을 나타내며 원심모형실험과 수치해석과는 거의 일치하지만,

Column실험 결과와는 다소 차이를 보이고 있으며, Terzaghi이론과는 상당한 차이가 나타남을 볼 수가 있다. 그러나, RI Meter의 보정으로 산정된 초기간극비 5.0으로 수치해석과 원심모형실험을 실시하였을 때 <Fig. 8>에서 볼 수 있듯이, Column실험과 수치해석과는 비교적 유사한 침하경향을 나타내고 있으며, 원심모형실험은 다소 침하가 큰 것을 보이는데 이는 일면배수일때와 동일한 원인에 기인한 것으로 판단된다.



<Fig. 7> Time - Settlement Relationship
(Column 'D' : Numerical : Terzaghi Comparison)



<Fig. 8> Time - Settlement Relationship
(Column 'D' : Numerical : Centrifuge : Terzaghi Comparison)

4. 결 론

본 실험을 통하여, 현장단위중량 측정으로 점토층의 깊이별 간극비 분포를 알기 위한 RI Meter의 사용은 고함수비의 Slurry상태의 점토질 흙에서는 신뢰성을 갖지 못하고, 밀도가 큰 경우에 비교적 신뢰

성 있는 자료를 획득함을 알 수 있었다. 고함수비를 갖는 Slurry 상태의 점토에서는 응집과 침강, 그리고 압밀층의 형성등의 세 단계를 거치는 것을 확연히 관측할 수 있었으며, 침강과 압밀이 동시에 일어나는 지역침전 및 압밀침전은 자중압밀이 시작되는 시점의 간극비 분포가 향후 자중압밀 특성에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, Column실험과 원심모형실험결과를 Terzaghi의 미소변형률 압밀이론과 유한변형률 압밀이론을 사용하여 분석한 결과, 유한변형률 압밀이론에 의한 산정결과는 실험결과와 매우 근접하나 미소변형률 압밀이론과는 상당한 차이를 나타냄을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 (주)삼성중공업의 지원에 의해 『해안매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발에 관한 연구』의 일부로 수행되어졌으며, 이에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- [1] Gibson, R. E., England, G. L. and Hussey, M. J. L.(1967). "The Theory of One - Dimensional Consolidation of Saturated Clay 1. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous layers", *Geotechnique*, 17, pp. 261 - 273.
- [2] Goro Imai(1981), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Material", *Soils and Foundations*, Vol. 21, No. 1, pp. 7~20