

스미어 발생지반에서 배수재 간격비에 따른 압밀거동 분석 Analysis on the Consolidation Behavior of the Smeared Soil Considering Vertical Drain Spacing

강희웅¹⁾, Hee-Woong Kang, 윤찬영²⁾, Chan-Young Yune, 정영훈³⁾, Young-Hoon Jung

- 1) 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University
- 2) 강릉원주대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University
- 3) 경희대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University

SYNOPSIS : To investigate the effect of drainage spacing and smear on the rate of consolidation, a large consolidation chamber and mandrel insertion device were developed. After the occurrence of smear by installation of sand drain, model ground was consolidated in either overconsolidated or normally consolidated state. As smear effect increases and thus drain spacing decreases, total settlement increase in overconsolidated state but has no effect in normally consolidated state. Efficiency of vertical drain decreases and consequently consolidation time increases in all tests as smear effect becomes significant.

Key words : smear, vertical drain, drain spacing, consolidation, mandrel

1. 서 론

일반적으로 연약지반을 개량하기 위하여 연직배수(vertical drain)공법을 많이 이용하고 있다. 연직배수공법의 적용을 위한 연직배수재 타설 시 맨드렐의 관입과 인발과정에서 주변지반의 교란이 발생하는데 이를 스미어(smear)라고 한다. 맨드렐을 관입할 때 주변의 지반은 맨드렐 단면적만큼 방사방향으로 밀려나면서 소성변형이 발생하게 되고, 인발할 때에는 맨드렐과 배수재 사이에 빈 공간이 생겨 흩어 다 시 섞이는 과정에서 재차 교란이 발생하게 된다. 이러한 여러 가지 요인으로 인하여 맨드렐에 인접한 지반의 투수계수는 원지반의 투수계수 보다 현저히 저하되어 결과적으로 압밀속도에 큰 영향을 미치게 된다.

지금까지 스미어에 대한 연구는 Hansbo(1979), Hansbo(1981), Bergado et al.(1991) 등에 의하여 실시되었고, 국내에서도 김수삼 등(1997), 박영목(2003), 김홍택 등(2006), 김경오와 김유석(2007), 박영목 등(2007)에 의하여 활발한 연구가 진행되어지고 있으나, 배수재 간격이나 스미어 효과가 차후의 압밀거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 많지 않다. 실내에서 스미어가 발생한 지반을 모사하고 배수재 간격에 따른 스미어의 영향이 차후의 압밀거동에 미치는 효과를 분석하기 위하여 본 연구에서는 대형압밀챔버와 모형 맨드렐 관입 장비를 개발하였다. 개발된 장비를 이용하여 다양한 배수재 간격에 따른 압밀속도와 스미어의 영향을 비교하였고 연직배수공법의 효율을 분석하였다.

2. 실내모형실험

2.1 개발된 시험장비

현장의 배수재 타입방식을 모형화하기 위하여 개발된 맨드렐 관입시스템은 그림 1과 같다. 내경 300 mm인 압밀챔버를 프레임 중앙부에 위치시키고 일정한 속도로 맨드렐을 관입할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 프레임 위에 모터 및 기어박스를 장착하였으며, 맨드렐 관입속도는 0~5.75 mm/sec의 범위 내에서 자유롭게 변화시킬 수 있도록 하였다. 시료를 성형하고 연직배수재가 설치된 지반을 일정한 연직하중 하에서 압밀시킬 수 있는 대형압밀챔버는 그림 2와 같으며, 다양한 직경 및 배치형상을 갖는 맨드렐을 관입시킬 수 있도록 하부판은 7개의 구멍을 막고 있는 부분의 탈부착이 가능하도록 제작하였다. 맨드렐의 형태는 그림 3과 같이 모두 단부가 막혀있는 원통형으로 배수재 간격비(n값)에 따른 영향을 비교하기 위해 직경 20mm, 40mm, 60mm인 3가지 형태로 제작하였다.

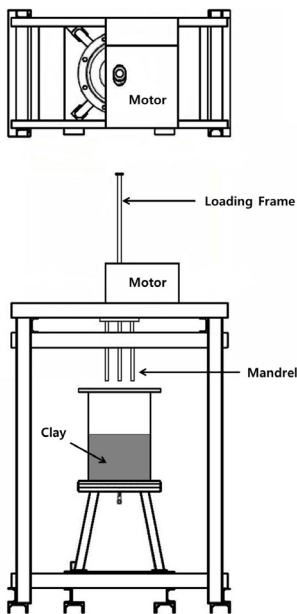


그림 1. 맨드렐 관입시험기

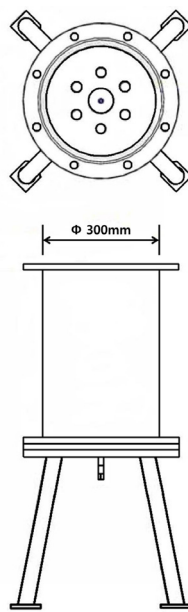


그림 2. 대형압밀챔버

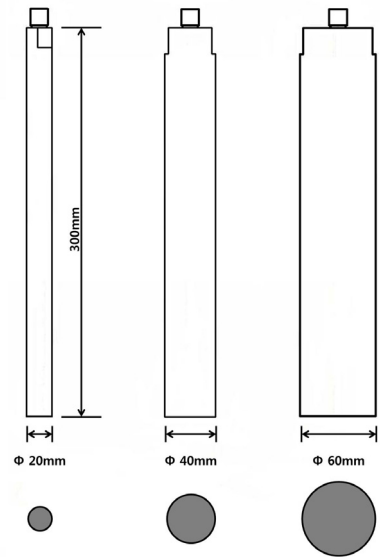


그림 3. 맨드렐 형상

2.2 실험방법 및 계획

실내모형실험을 실시하기 위해 사용된 시료는 EPK Kaolin으로 통일분류법 상 CH로 분류되는 투수성이 낮은 점성토이다. 지반의 물성치 산정을 위하여 EPK Kaolin에 대한 기본물성실험을 수행하였다(표 1).

표 1. EPK Kaolin 시료의 기본 물성치

	액성한계	소성한계	소성지수	비중	200번체 통과율	통일분류법상 분류
EPK Kaolin	56.5%	18.93%	37.78%	2.513	99.46%	CH

시료의 성형을 위하여 EPK Kaolin 분말에 액성한계 2배의 물을 첨가하여 진공압을 가하면서 교반한 후, 내경 300mm의 대형압밀챔버에서 단계적으로 하중을 증가시켜 선행압밀압 100kPa로 시료를 압밀시켰다. 압밀이 완료된 후 대형압밀챔버를 맨드렐 관입시험기 중앙에 위치시키고 시험에 사용될 맨드렐

의 크기와 배치 형태를 결정하여 관입시험기 상부에 맨드렐을 부착시킨 다음 일정한 속도로 시료내에 정적관입시켰다. 관입속도는 2.14mm/sec의 속도를 적용하였으며, 맨드렐을 관입·인발시킨 후 주문진 표준사를 느슨하게 부어 연직배수재로 사용하였다. 시료상부에는 샌드매트를 약 3cm두께로 포설한 후 40, 100, 200 kPa의 하중을 차례로 재하하면서 각 하중단계에서의 시간에 따른 침하량과 유출량을 계측하였다. 압밀완료 후 대형압밀 챔버를 해제하고 시료 단면의 위치별 함수비와 전단강도를 측정하였다. 실험결과의 비교를 위하여 맨드렐 관입시험을 실시하지 않고 연직배수조건에서 동일한 하중 단계로 실험을 추가하여 표 2와 같이 총 5회의 실험을 실시하였으며 각 실험조건에서의 배수재 간격비(n)와 배수거리 등은 표에 정리된 바와 같다.

표 2. 실험 조건

실험명	맨드렐 크기(mm)	맨드렐 관입속도 (mm/sec)	배수재 간격비(n)	배수거리(mm)
연직배수	-	-	-	200.82
Ø20 1EA	Ø 20	2.14	15	140
Ø40 1EA	Ø 40		7.5	130
Ø60 1EA	Ø 60		5	120
Ø20 7EA	Ø 20		3.75	27.5

3. 실험결과

3.1 침하량 변화

전체 5회의 실험결과를 과압밀시료의 결과(100kPa 하중재하)와 정규압밀시료의 결과(200kPa 하중재하)로 나누어 정리하였다. 시간에 따른 침하곡선은 그림 4, 5와 같다. 과압밀의 경우 스미어 영향이 커짐(n값 감소)에 따라 최종 침하량이 증가하는 것으로 나타났고, 정규압밀의 경우 연직배수의 경우를 제외하고는 최종 침하량이 거의 유사하게 나타났다. 침하량의 측면에서 보면 과압밀 영역에서는 스미어의 발생이 침하량을 증가시키는 경향이 있음을 알 수 있으며, 정규압밀 영역에서는 그 효과가 거의 사라지는 것을 확인할 수 있다.

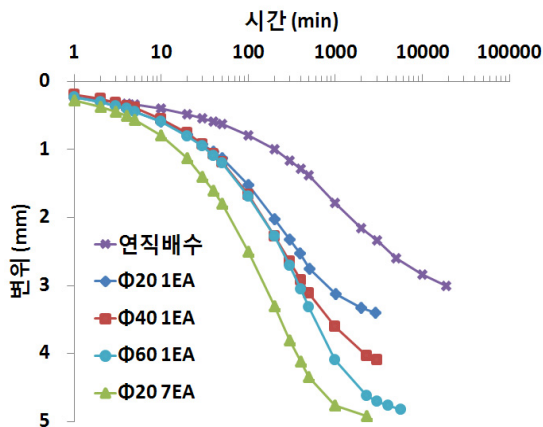


그림 4. 과압밀 침하량곡선

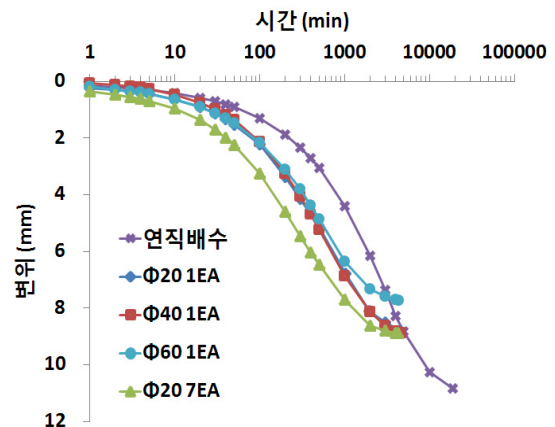


그림 5. 정규압밀 침하량곡선

3.2 압밀속도 및 효율

압밀속도의 비교를 위하여 각 실험에서의 변위를 최종 변위량으로 나누어 그림 6, 7과 같이 도시하였다. 또한 시간을 배수거리의 제곱으로 나누어 정규화한 결과도 그림 8, 9와 같이 도시하였다.

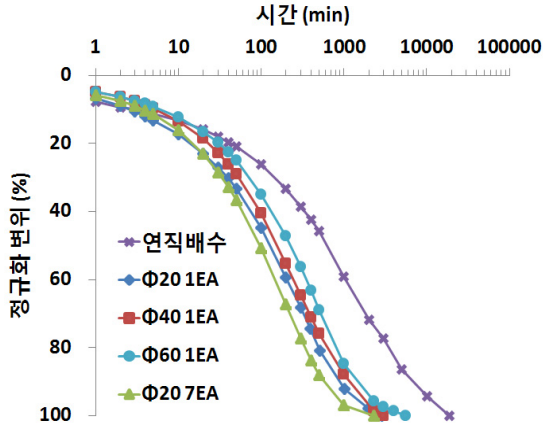


그림 6. 과압밀속도 비교

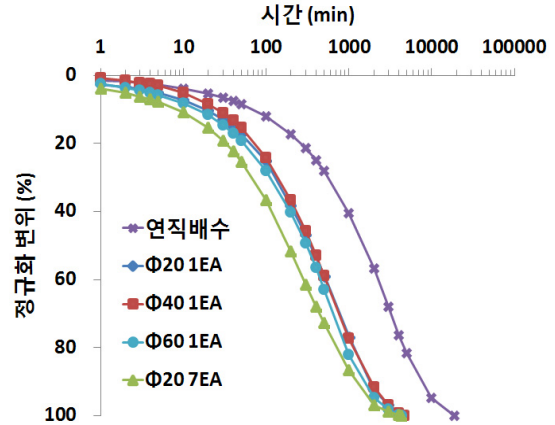


그림 7. 정규압밀속도 비교

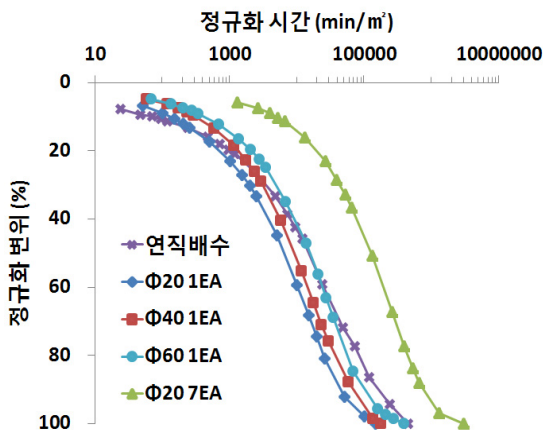


그림 8. 과압밀 효율성 비교

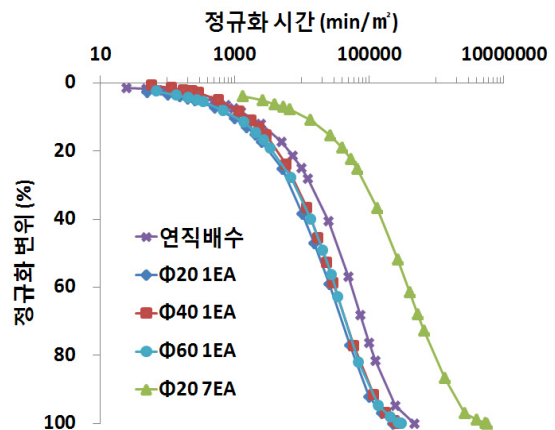


그림 9. 정규압밀 효율성 비교

그림 6, 7에서와 같이 연직배수 조건에 비하여 샌드 드레인이 설치된 지반의 압밀속도가 빠르게 나타났다. 또한 n 값이 가장 작은 Ø20 7EA의 압밀속도가 가장 빨랐지만 n 값이 작아질수록 압밀속도가 빨라지는 않는 것으로 나타났다. 오히려 표 3에서 볼 수 있는 것처럼 n 값이 15에서 7.5와 5로 줄어들면서 압밀속도는 반대로 느려지는 경향을 보이는 것도 확인할 수 있다. 이는 n 값이 감소함에 따라 배수거리는 짧아지지만 스미어의 영향이 증가하여 압밀효율이 감소하기 때문이다. 그림 8, 9와 같이 시간을 배수거리의 제곱으로 나누어 정규화하여 비교한 결과 n 값이 감소함에 따라 스미어의 영향이 증가하면서 압밀효율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 연약지반 개량설계시 연직배수공법을 적용하면 압밀시간을 단축시킬 수 있지만, 압밀시간을 더욱 단축시키기 위하여 배수재 간격을 줄이는 것은 압밀효율을 감소시켜 기대하는 압밀시간 감소를 얻을 수 없다는 결론을 얻었다.

표 3. 압밀속도 및 효율성 비교

실험명	배수재 간격비 (n)	압밀도 90% 도달시간(min)		정규화 시간(min/m ²)	
		과압밀	정규압밀	과압밀	정규압밀
연직배수	-	8240	15527	198331	385011
Ø20 1EA	15	990	2130	50510	108673
Ø40 1EA	7.5	1640	3430	97041	202959
Ø60 1EA	5	2050	2245	142361	155903
Ø20 7EA	3.75	725	1602	958678	2118347

4. 결 론

본 연구에서는 맨드릴 관입으로 인한 스미어 발생지반에서 배수재 간격비에 따른 스미어 영향과 연직 배수공법의 지반개량효과를 연구하기 위하여 단부가 막혀있는 원통형 맨드릴을 이용하여 실내모형실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 과압밀시료에서는 배수재 간격비가 감소할수록 최종 침하량이 증가하는 것으로 나타났으며 정규압밀시료에서는 연직배수의 경우를 제외하고 거의 유사하게 나타났다. 이러한 결과로부터 과압밀 영역에서 스미어의 영향은 침하량을 증가시키지만 정규압밀 영역으로 가면서 그 효과가 거의 사라진다는 것을 확인할 수 있었다.
2. 연직배수 조건에 비해 샌드 드레인이 설치된 지반에서 압밀시간이 단축되는 경향을 보였다. 하지만 n값이 감소하여 배수거리가 짧아지더라도 짧아진 배수거리만큼 압밀속도가 빨라지지는 않았다. 이는 n값이 감소함에 따라 배수거리는 짧아지지만 스미어의 영향이 증가하여 압밀효율이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0064196)

참고문헌

1. 김경오, 김유석(2007), “맨드릴 관입에 의한 연약점토의 교란범위 산정을 위한 원심모형실험”, 대한토목학회지, 제 10호, pp.2140~2143.
2. 김수삼, 장연수, 고경환(1997), “스미어존 형성과 투수성 변화에 미치는 맨드릴의 영향에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제 13권, 제 5호, pp.45~57.
3. 김홍택, 황정순, 김승욱, 한연진, 유찬호(2006), “연직배수재 타설시 발생하는 스미어 존의 평가”, 한국지반환경공학회논문집, pp.43~52.
4. 박영목(2003), “맨드릴 관입에 기인하는 스미어 존의 평가”, 한국지반공학회논문집, 제 19권, 제 6호, pp.217~225.
5. 박영목, 서정유, 김재석, 유연재(2007), “맨드릴 관입길이에 따른 연약지반 스미어 존의 특성에 관한 연구”, 대한토목학회지, 제 10호, pp.2127~2130.
6. Barron, R. A.(1948), “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells”, Trans, ASCE, 2346, 221~228.

7. Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C., and Balasubramamiam, A.S.(1991) "Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay". J. Geotech. Engrg., ASCE 117(10), 1509~1530.
8. Hansbo, S.(1979) "Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains", Ground Engineering, Vol. 12, No. 5, 21~25.
9. Hansbo, S.(1981) "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Sweden Vol. 3, paper 12/22, 677~682.