스미어 영역 겹침이 점성토 지반의 압밀에 미치는 영향

Effect of the Overlapping Smear Zone on the Consolidation of Clayey Soil

윤 찬 영¹ Yune, Chan-Young김 범 준² Kim, Beom-Jun강 희 웅³ Kang, Hee-Woong

Abstract

To simulate the soft ground improved by vertical drain method and to investigate the effect of overlapping smear on subsequent consolidation behavior, a series of consolidation tests with a large consolidation chamber and mandrel insertion device were conducted. Based on the test result, numerical analysis was also performed to analyze the efficiency of the vertical drain method. Laboratory test and numerical analysis results showed that the effect of smear zone increased consolidation settlement but the overlapping smear zone decreased the consolidation settlement. In addition, vertical drain accelerated consolidation rate but narrowing the drain spacing did not affect the consolidation rate because of the effect of smear. The efficiency of consolidation rather decreased substantially when the smear zone was overlapped.

요 지

본 연구에서는 스미어가 발생한 지반을 모사하고 배수재 간격비에 따른 스미어 영역 겹침 유·무가 차후의 압밀거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 대형압밀챔버와 맨드렐 관입시험기를 이용하여 다양한 실내모형실험을 수행하였다. 또한, 이를 바탕으로 유한요소해석을 실시하였고 연직배수공법의 효율성을 분석하였다. 실험 및 해석결과 스미어 발생은 침하량을 증가시키지만 스미어 겹침은 반대로 침하량을 감소시키는 경향을 보였다. 또한 연직배수재를 설치하면 압밀이 촉진되지만 배수재 간격을 줄여도 스미어의 영향으로 압밀속도는 크게 빨라지지 않았으며, 오히려 스미어 영역이 겹칠 정도로 배수재 간격을 줄이면 압밀효율이 급격히 떨어지는 것으로 나타났다.

Keywords : Overlapping smear, Drain spacing ratio, Consolidation, Consolidation rate, Numerical analysis

1. 서 론

연약한 점성토 지반을 개량하기 위하여 일반적으로 사용되는 연직배수(vertical drain)공법은 배수재 설치를 위한 맨드렐의 관입·인발 과정에서 배수재 주변 지반을 교란시키며 스미어 영역(smear zone)을 형성한다. 스미

어 영역에서는 특히 투수성이 크게 저하되어 압밀속도가 느려지고 지반개량 시간이 현저히 증가하게 된다. 스미어 영역은 일반적으로 배수재 직경의 2~6배 정도로 보고되고 있는데(Hansbo, 1981; Bergado et al., 1991; Indraratan and Redana, 1998; Sharma and Xiao, 2000; Sathananthan et al., 2008) 연직배수공법에서 압밀시간

1 정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ., Tel: +82-33-640-2423, Fax: +82-33-646-1391, yune@gwnu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student., Dept. of Civil Engrg., Gangneung-Wonju National Univ.)

3 정회원, 다산이엔지 지반사업팀 주임 (Member, Assistant Manager., Dept. II Geotechnical Division., DASAN Engineering Co, Ltd)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 단축시키기 위하여 배수재 간격을 좁히는 경우 스미어 영역이 겹치게 될 수도 있다. 이를 스미어 영역 겹침(overlapping smear zone)이라고 하며(Fig. 1), 스미어 영역 겹침은 먼저 연직배수재 설치에 따라 주변지반의 교란이 발생하는 스미어 영향 그리고 배수재 간격 감소로 인해 이러한 상호간의 영향이 더욱 심화되어 결과적으로 압밀속도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 하지만 현재의 연약지반 개량 설계에서 스미어 겹침 영역으로 인한 압밀지체는 전혀 고려되고 있지 않으며, 따라서 연직배수재가 설치된 지반의 압밀거동 파악과 방사배수조건에서 발생하는 스미어 영역 겹침 유·무에 따른 지반의 압밀거동에 대한 연구가 필요하다.

스미어 영역에 대한 실험적 연구는 1990년대 이후에 이르러서야 활발히 이루어지기 시작하였다. Onoue et al.(1992)은 스미어 영역에서 위치별 간극비와 투수계수 변화를 실험적 연구를 통해 평가하였고 Bergado et al.(1991)은 대형압밀실험에서 채취된 시료에 대한 압밀계수를 평가하여 현장의 물성치와 비교, 평가하였다. Indraratna and Redana(1998), Sharma and Xiao(2000)은

실험적 연구를 통해 스미어 영역에서의 공간적 투수계수 변화거동을 확인하였다. 하지만 이러한 기존 연구는 대부분 스미어 영역의 범위를 확인하고 스미어 영역 내에서의 물성치 분포 및 압밀 중 변화특성을 확인하려는 연구들이다. 최근에 와서야 Saye(2001)가 다수의 고속도로 프로젝트의 현장경험을 토대로 배수재 간격이 좁은 경우, 압밀속도가 증가하는 양상이 뚜렷하게 나타나지 않는다는 것을 확인하였고, Sathananthan et al.(2008)은 공동확장이론(cavity expansion theory)을 이용하여 스미어 영역이 배수재 직경의 6.6배까지 나타난다고 하였으며, 이를 현장시험결과와 비교, 분석을 통해 배수재 간격이 감소할수록 스미어 영향이 증가하여 차후 압밀거동에 영향을 미칠 수 있다고 하였다. 또한 최근 Walker and Indraratna(2007)은 배수재 간격이 스미어 영역의 크기보다 작을 경우 스미어 겹침영역이 발생하고 이로 인해 압밀속도가 증가하지 않는다는 것을 이론적 연구를 통해 확인하였지만 아직 실험적 연구를 통해 스미어 영역 겹침을 정량적으로 분석한 사례는 국내·외적으로 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 스미어 영역 겹침에 대한 실험적 연구를 위하여 점성토 지반에 연직배수재를 설치하고 다양한 배수재 간격비를 모사할 수 있는 실험장비를 구축하였다. 개발된 장비를 이용하여 배수재 간격비와 스미어 영역의 겹침 유·무에 따라 다양한 실내모형실험을 수행한뒤, 이를 바탕으로 유한요소 해석을 실시하였고, 지반의 압밀거동을 분석하였다.

2. 연구조건 및 계획

2.1 개발된 시험장비

연직배수공법의 배수재 타설을 위한 맨드릴 관입·인발과정과 스미어 발생을 모사하기 위하여 개발된 맨드릴 관입시험기는 Fig. 2와 같다. 장치의 상부는 프레임 위에 모터 및 기어박스를 장착하여 일정한 속도로 관입할 수 있도록 하였으며, 맨드릴을 일정한 간격으로 최대 7개까지 설치할 수 있도록 하였다. 하부에는 대형압밀 챔버를 프레임 중앙에 위치시키고 맨드릴의 관입·인발과정을 모사할 수 있도록 하였다. 대형압밀챔버는 내경 300mm, 높이 485mm로 제작하였으며, 컴프레서(compressor)와 레귤레이터를 이용하여 일정한 공기압을 챔버내부의 상부 가압판에 가하여 시료가 단계별로

Fig. 1. Conceptual figure of overlapping smear zone

압밀될 수 있도록 하였다. 대형압밀챔버의 하부판은 맨드렐 관입 시 맨드렐이 시료와 하부판을 완전히 관통하여 연직방향으로 일정한 형태를 갖는 연직배수재를 타설할 수 있도록 하였으며, 하부판에 맨드렐이 통과할 수 있도록 7개의 구멍과 탈부착 가능한 구멍막이를 설치하

Fig. 2. Mandrel inserting device

Fig. 3. Mandrel shape

였다. 스미어 발생을 모사하기 위해 사용된 맨드렐은 단부가 막혀있는 원통형 형태로 제작되었고 배수재 간격비에 따른 압밀특성을 비교하기 위해 직경 20mm, 40mm, 60mm인 3가지 형태로 제작되었으며, 그 형태 및 규격은 Fig. 3과 같다.

2.2 실험 및 수치해석 조건

실내모형실험을 실시하기 위해 사용된 시료는 EPK Kaolin으로 KSF 기준에 의해 기본물성실험을 수행하였고 그 결과는 Table 1과 같다.

연약 점성토 지반을 모사하기 위한 모형지반 조성과정은 다음과 같다. EPK Kaolin 분말에 액성한계의 2배인 110%의 물을 첨가하여 진공압을 가하면서 1~2일 정도 교반을 하여 균질한 슬러리(slurry) 상태로 만든다. 내경 300mm 대형압밀챔버에 20kPa의 공기압으로 시료를 안정화시킨 후, 단계적으로 하중을 증가시켜 선행압밀하중 100kPa로 약 10일 정도 시료를 압밀시킨다. 시료 성형 시, 압밀시간의 단축을 위해 시료 상·하부에 여과지를 부착시켜 양면배수조건에서 시료를 성형하였으며, 시료의 압밀이 완료된 후에는 시료 상·하부에 부착된 여과지를 제거하고 대형압밀챔버를 맨드렐 관입시험기 중앙에 위치시킨다. 스미어 영역의 겹침 유·무를 고려할 수 있도록 맨드렐의 크기와 배치형태를 결정하여 관입시험기 내에 설치한다. 기존 실내모형실험에 적용된 배수재 간격비($n = r_e/r_w$)가 2.5~7.5(Lee et al., 2003; Yoo et al., 2006; Joo et al., 2002; Choi et al., 2001) 정도이므로 이를 참고하여 Table 2와 같이 배수재 간격비를 산정하였으며, 스미어 겹침영역을 모사하기 위해 7개의 배수재가 삼각형 배치 조건에서 29mm의 배

Table 1. Material properties of EPK Kaolin

	Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index	Specific gravity	Percentage finer than #200 sieve	Unified soil classification system
EPK Kaolin	56.5%	31%	25.5%	2.513	99.46%	MH

Table 2. Test condition

Test	Mandrel diameter (mm)	Drain spacing ratio (n)	Drainage distance (mm)
Vertical drainage	—	—	201
Smear zone	Ø20 1EA	Ø 20	140
	Ø40 1EA	Ø 40	130
	Ø60 1EA	Ø 60	120
Overlapping smear zone	Ø20 7EA	Ø 20	29

수거리를 갖는 조건을 추가하였다. 맨드릴은 시료교란을 최소화 하고 장비의 가동범위 내에서 안정적으로 재현가능한 속도인 2.14mm/sec로 시료 내 정적관입 시켰다. 맨드릴 관입·인발 후, 중앙부에 연직배수재를 타설하며, 물을 채운 구멍에 주문진 표준사를 느슨하게 부어 차후 압밀과정에서 배수재의 강성증가 및 침하량 감소의 영향을 최소화 할 수 있도록 하였다. 연직배수재 설치 후 시료 상부에 약 30mm두께로 Sand mat를 포설하고 상부 가압판을 시료에 접촉시켰다. 이 후 과압밀비(OCR) 2.5에 해당하는 유효압밀응력 40kPa의 하중을

가하여 시료를 안정화 시킨 후에 두 단계로 하중을 재하하여 시료를 압밀시켰다. 첫 번째 단계인 과압밀 영역(100kPa 재하)을 거친 뒤 두 번째 단계인 정규압밀 영역(200kPa 재하)의 단계로 하중을 재하하면서 각 하중단계에서의 시간에 따른 침하량과 유출량을 계측하였다. 계측된 침하량을 쌍곡선법으로 분석하여 압밀도 95% 이상이 되는 것을 확인한 후, 다음 단계의 하중을 재하하였다. 최종 하중단계까지 압밀이 완료되면 대형압밀챔버를 해체하고 시료 단면의 위치별 함수비와 전단강도를 측정하였다. 총 5회의 실험을 수행하였으며, 각 실험조건에서의 맨드릴 크기와 배수거리 등은 Table 2에 정리된 바와 같다.

배수재 간격비와 스미어 영역의 겹침 유·무에 따라 다양한 조건에서 실시한 실내실험결과를 검증하고, 스미어 영역이 겹치는 경우의 압밀거동을 정량적으로 분석하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 수행된 유한요소프로그램은 CRISP 2D(ver. 5.2)를 사용하였고 구성된 유한요소망의 대표적 형태는 Fig. 4와 같다. 실내모형실험에서와 동일한 조건에서 해석하기 위해 원통형 시료단면의 절반을 축대칭 조건으로 모사하였고 과압밀 영역(100kPa 재하)과 정규압밀 영역(200kPa 재하)의 단계로 해석하였다.

해석지반은 축대칭 조건(axisymmetric)에서 반경(r) 150mm, 점성토 지반의 높이(h_{clay}) 200mm, 샌드매트(sand mat)의 높이($h_{sandmat}$) 30mm, 가압판의 높이($h_{rigid\ platen}$) 50mm로 해석망 총 높이 280mm로 실내모형실험과 동일하게 결정하였다. 스미어 겹침 영역이 발생하는 Ø20 7EA($n=3.94$)의 경우는 배수재의 간격(S)이 75mm인 삼각형 배치를 갖게 되므로 유효반경(r_e)을 39mm로 결정하였다. 입력물성치 산정을 위하여 대형압밀챔버에서 스미어를 발생시키고 시료의 단면에서 위치별 시료를

Fig. 4. Conditions of laboratory test and finite element analysis

Table 3. Input parameters for numerical analysis

Designation		Constitutive model	k_h (m/sec)	k_v (m/sec)	κ	λ	E (kN/m ³)	ϕ
Rigid plate		Isotropic elastic	1.0E-15	1.0E-15	-	-	1.0E+07	30
Sand drain and sand mat		Original Mohr-Coulomb elastic perfectly plastic	1.0E-04	1.0E-04			1.5E+04	30
Undisturbed soil (no smear)	OC	Modified Cam-Clay	8.0E-10	4.0E-10	0.012	0.12	-	-
	NC		6.0E-10	2.0E-10	0.042	0.21		
Smear zone	OC		2.4E-09	4.0E-10	0.022	0.22		
	NC		4.0E-10	2.0E-10	0.042	0.21		
Overlapping smear zone	OC		1.0E-10	1.0E-10	0.027	0.27		
	NC		5.0E-11	5.0E-11	0.045	0.225		

채취한 후, 표준압밀실험을 실시하여 연직방향과 횡방향의 입력 물성치를 각각 산정하였다. 이와 같이 결정된 입력물성치를 바탕으로 기존의 연구에서 제안된 스미어 영역의 범위인 배수재 반경의 2~6배(Hansbo, 1981; Bergado et al., 1991; Indraratana and Redana, 1998; Sharma and Xiao, 2000; Sathananthan et al., 2008)를 고려하여 스미어 영역의 크기를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 실내모형실험과 비교 및 분석 결과 스미어 영역의 크기는 배수재 반경(r_w)의 6배($r_s=6r_w$)로 최종 결정하였다. 또한 스미어 영역이 겹치는 경우의 물성치 변화에 대한 것은 기존에 연구된 바가 없어 스미어 겹침 영역의 물성치를 변화시켜가면서 실제 실험결과를 가장 잘 묘사하는 물성치를 선정하였다. 적용된 지반의 모델은 Modified Cam-Clay 모델을 적용하였고 시료상부에서 하중을 재하하는 가압판(rigid platen)은 Isotropic elastic, 배수재로 사용된 샌드 드레인(sand drain) 및 샌드 매트(sand mat)는 Original Mohr-Coulomb elastic perfectly plastic 모델을 각각 사용하였다. 적용된 세부적인 입력 물성은 Table 3과 같다.

3. 실험 및 해석결과 분석

3.1 압밀 침하량

스미어 영역 겹침 유·무에 따른 지반의 압밀거동 분석을 위해 실내모형실험과 유한요소해석을 수행하였고, 과압밀(100kPa 재하)과 정규압밀(200kPa 재하)영역으로 나누어 시간에 따른 압밀침하량을 Fig. 5와 같이 도시하였다. 실내실험 및 해석결과, 과압밀의 경우에는 연직배수재가 설치된 지반이 그렇지 않은 지반보다 침하량이 증가하였으며, 연직배수재가 설치된 경우에는 맨드렐 직경이 커짐(n 값이 감소함에 따라)에 따라 교란의 범위가 증가(스미어 영향 증가)하고 그에 따라 최종침하량도 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과는 스미어 발생이 시료의 압축성을 증가시킨다는 기존 연구결과(Hansbo, 1981; Indraratna and Redana, 1998; Onoue, 1998)와 동일한 것이다. 그러나 스미어 영역 겹침이 발생하는 경우(Ø20 7EA)에는 n 값이 감소하면서 스미어 영역이 더욱 증가함에도 불구하고 침하량은 오히려 약간 감소하는 경향을 보인다. 반면 정규압밀 영역에서는 각 실험간에 침하량의 차이가 없이 거의 동일한 것으로 나타났다. 수치해석 결과도 유사한 경향을 보였

으며, 시간에 따른 침하거동(Fig. 5) 및 최종침하량(Fig. 6) 모두 실제 실험결과를 잘 묘사하고 있는 것으로 판단된다. 수치적으로 보면, 과압밀의 경우, n 값이 15에서 3.94까지 감소하면서 스미어 영향이 커짐에 따라 침하량은 1.75배 까지 점차적으로 증가하다가 스미어 영역 겹침이 발생하면서 최종침하량이 반대로 Ø60 1EA보다 약 0.9배까지 감소하였다. 정규압밀에서는 n 값 변화와 상관없이 모든 실험에서의 침하량 차이가 10% 내외로 유사한 경향을 보였다. 결론적으로 스미어 발생은 압축성을 증가시키지만 그 영향은 정규압밀 영역으로 가면서 점차 사라지는 것으로 나타났으며, 스미어 겹침이 발생하면 압축성이 반대로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 스미어 영역에 대한 기존의 실험적 연구에서 확인된 것과 같이 정규압밀 영역에서는 소성변형이 발생함에 따라 점토입자구조가 재배열 되면서 스미어의 영향이 사라지기 때문인 것으로 판단된다(Yune et al. 2009).

(a) 100kPa loading (OC state)

(b) 200kPa loading (NC state)

Fig. 5. Comparison of consolidation settlement (LT: Laboratory Test, NA: Numerical Analysis)

Table 4. Comparison of final settlement

Test	Drain spacing ratio (n)	100kPa loading (OC state)				200kPa loading (NC state)			
		Final settlement		Ratio to vertical drainage condition		Final settlement		Ratio to vertical drainage condition	
		LT*	NA*	LT	NA	LT	NA	LT	NA
Vertical drainage	—	2.70	2.81	1.00	1.00	10.82	10.73	1.00	1.00
Ø20 1EA	15	3.21	3.07	1.19	1.09	8.79	9.71	0.81	0.90
Ø40 1EA	7.5	4.00	4.03	1.48	1.43	8.87	9.27	0.82	0.86
Ø60 1EA	5	4.72	5.08	1.75	1.81	7.94	8.92	0.73	0.83
Ø20 7EA	3.94	4.52	4.60	1.67	1.64	8.42	8.52	0.78	0.79

* LT, NA : LT : Laboratory Test, NA : Numerical Analysis

(a) 100kPa loading (OC state)

(b) 200kPa loading (NC state)

Fig. 6. Comparison of final settlement (LT: Laboratory Test, NA: Numerical Analysis)

(a) 100kPa loading (OC state)

(b) 200kPa loading (NC state)

Fig. 7. Consolidation time ratio to vertical drainage

3.2 압밀효율

압밀속도를 비교하기 위해 연직배수조건에 대한 압밀소요시간의 비율을 정리하여 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 시간 비율(time ratio)은 90% 압밀도를 기준으로 각 실험에서의 압밀소요시간을 연직배수조건에서의 압밀소요시간으로 나눈 것이다. 이 때 90% 압밀도에서의 압밀시간은 시간-침하곡선에서 $\log t$ 방법으로 계산하였다. 대부분의 실험에서 압밀속도가 연직배수와

비교하여 3배 이상 빠른 것으로 나타났으며, 특히 압밀소요시간 비율이 연직배수조건에 비하여 과압밀영역에서는 평균 18.5%, 정규압밀영역에서는 평균 30.0%로 나타나 연직배수재로 인한 압밀촉진 효과가 정규압밀보다 과압밀영역에서 더 큰 것으로 나타났다. 하지만, 배수재 간격을 줄이더라도 그에 따른 압밀촉진효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 과압밀 영역에서는 배수재간격비가 15에서 5까지 줄어들어도 불구하고 압밀소요시간은 오히려 증가하는 것으로 나타났으며, 스미어 영역

Table 5. Time for 90% of consolidation ratio

Test	Drain spacing ratio (n)	Time for 90% of consolidation ratio (min.) and ratio to vertical drainage condition			
		100kPa loading (OC state)	Ratio to vertical drainage condition	200kPa loading (NC state)	Ratio to vertical drainage condition
Vertical drainage	—	3,650	1.00	4,552	1.00
Ø20 1EA	15	638	0.17	1,375	0.30
Ø40 1EA	7.5	785	0.22	1,650	0.36
Ø60 1EA	5	892	0.24	1,492	0.33
Ø20 7EA	3.94	687	0.11	923	0.20

Table 6. Normalized consolidation time and consolidation efficiency

Test	Drain spacing ratio (n)	Normalized time for 90% of consolidation (min/m^2) and ratio to vertical drainage condition							
		100kPa loading (OC state)				200kPa loading (NC state)			
		Normalized time		Ratio to vertical drainage condition		Normalized time		Ratio to vertical drainage condition	
		LT*	NA*	LT	NA	LT	NA	LT	NA
Vertical drainage	—	127,920	103,000	1.00	1.00	182,922	200,500	1.00	1.00
Ø20 1EA	15	48,979	50,765	0.38	0.49	88,776	145,153	0.49	0.72
Ø40 1EA	7.5	66,627	45,562	0.52	0.44	107,120	128,402	0.59	0.64
Ø60 1EA	5	94,305	77,778	0.74	0.75	116,065	145,486	0.63	0.72
Ø20 7EA	3.94	1,296,472	1,331,748	10.13	13.00	1,530,321	1,331,748	8.37	6.64

* LT, NA : LT : Laboratory Test, NA : Numerical Analysis

Fig. 8. Comparison of consolidation efficiency (LT: Laboratory Test, NA: Numerical Analysis)

이 겹칠 정도로 배수재 간격을 줄이고 나서야($n=3.94$) 압밀소요시간이 50%정도로 감소하였다. 정규압밀 영역도 마찬가지로 배수재 간격비 감소에 따른 압밀촉진효과는 나타나지 않았으며, 스미어 영역이 겹칠 정도로 배수재 간격을 좁히고 나서야 압밀소요시간이 60%정도로 감소하였다.

실제 압밀소요시간은 배수거리의 제곱에 비례하므로 단순히 압밀시간을 비교하는 것보다 배수거리를 고려하여 압밀효율을 비교하는 것이 합리적이다. 따라서 압

밀소요시간을 배수거리의 제곱으로 정규화하고, 연직변위도 최종침하량으로 정규화하여 Fig. 8에 결과를 도시하였다. 즉, Fig. 8은 동일한 배수거리를 가질 때의 압밀속도를 나타내는 그래프이며 압밀효율을 직접 비교할 수 있는 결과이다. 과압밀 영역에서 실험한 결과를 보면 (Fig. 8(a)) 연직배수재를 설치하는 경우 압밀속도는 빨라졌음에도 불구하고(Table 6), 실제 압밀효율은 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 오히려 압밀효율은 배수재 간격비가 감소함에 따라 조금씩 감소하다가(정규

화된 압밀소요시간 증가) 스미어 영역이 겹치는 순간 급격히 감소하여 연직배수조건으로만 압밀을 시키는 것보다도 정규화된 압밀시간이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 정규압밀 영역에서의 결과도 유사하게 스미어 영역 겹침이 발생하기 전의 압밀효율은 거의 동일하지만, 스미어 영역 겹침이 발생하면서 압밀효율도 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이를 수치로 정리한 Table 6을 보면 과압밀 영역에서는 정규화된 압밀소요시간이 연직배수 대비 평균 55%에서 스미어 영역이 겹치면서 1,013%까지 증가하며, 정규압밀영역에서는 평균 57%에서 837%까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 연직배수공법을 적용하는 연약지반 개량 설계시 연직배수재를 설치하고 방사배수조건에서 압밀이 진행되도록 하면 압밀시간을 단축시킬 수 있지만, 압밀시간을 더욱 단축시키기 위해 배수재 간격을 줄이는 것은 압밀효율을 감소시켜 기대하는 압밀촉진 효과를 얻을 수 없다는 것을 확인할 수 있다.

3.3 위치별 강도 및 함수비 분포

최종 하중단계까지 압밀이 완료된 시료는 시험기에

서 꺼내어 중앙부 단면에서 위치별 함수비와 강도를 측정하였다. 실험이 끝난 후 절단된 시료의 단면의 형태는 Fig. 9와 같으며, 맨드렐 관입시 맨드렐 주변지반이 맨드렐 단면적 만큼 방사방향으로 밀려나면서 시료 상부까지 밀려올라가는 형태를 확인할 수 있다.

측정된 함수비 및 강도의 공간적 분포형태를 시료 중앙부로부터의 거리에 따라 도시하면 Fig. 10 및 11과 같다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 시료는 배수면 근처에서 더 큰 강도 및 더 작은 함수비의 분포를 갖고 있으며, 깊이에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 함수비보다는 강도의 편차가 크게 나타났는데, 이는 간이 전단강도 측정 장비인 *torvane* 시험기의 한계인 것으로 판단된다. 시료내 물성치 분포에서 특이할 만한 사항은 스미어 겹침이 발생한 시료의 경우 다른 시료에 비하여 더 작은 함수비(약 3~5%) 그리고 더 큰 강도(약 $0.4 \sim 1 \text{ kg/cm}^2$)를 가지며, 스미어 영역 겹침으로 인하여 유발되는 이러한 물성치 차이가 압밀속도나 압밀효율에도 영향을 미치는 것으로 보인다. 하지만 이러한 영향에 대한 정량적 분석을 위해서는 앞으로 더욱 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 9. Cross section of the test

Fig. 10. Water content

Fig. 11. Shear strength

4. 결 론

본 연구에서는 배수재 간격비에 따른 스미어 영역 겹

침 유·무가 지반에 미치는 차후의 압밀거동을 분석하기 위하여 맨드릴 관입시험기와 대형압밀챔버를 이용하여 다양한 배수재 간격에 따라 실험을 실시하였다. 또한 실

험조건을 고려하여 스미어 영역 겹침 유·무에 따라 유한요소해석을 수행하였으며, 연직배수공법의 지반개량 효과 및 압밀효율을 분석, 평가하였다. 실험 및 해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 과압밀 영역에서는 배수재 간격비가 감소할수록 스미어의 영향범위가 증가하면서 최종 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 배수재 간격비 감소에 따라 스미어 영역겹침이 발생하는 경우 최종 침하량은 약간 감소하였다. 반면 정규압밀 영역은 배수재 간격비와 상관없이 각 실험간에 침하량 차이는 유사하게 나타났다.
- (2) 연직배수재가 설치된 방사배수조건의 압밀속도가 연직배수 조건에 비해 빠른 것으로 나타났다. 대부분의 실험에서 압밀속도가 연직배수와 비교 시 3배 이상 빠른 것으로 나타났으며, 연직배수조건 대비 압밀소요시간은 과압밀 영역에서는 평균 18.5%, 정규압밀영역은 평균 30.0%로 나타났다. 반면에 배수재 간격비를 감소시키더라도 감소한 배수거리 만큼의 압밀촉진효과는 나타나지 않았다. 이는 배수거리가 짧아지더라도 스미어 영향이 증가하기 때문이며, 특히 압밀속도를 배수거리의 제곱으로 정규화하여 압밀효율을 비교한 결과 스미어 영역 겹침이 발생하는 경우 압밀효율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 실내모형실험에서 실험이 완료된 후에 시료의 단면을 잘라 위치별 강도와 함수비를 측정된 결과, 배수면 근처에서 더 큰 강도 및 더 작은 함수비를 갖는 것으로 나타났다. 특히, 스미어 영역 겹침이 발생한 시료의 경우 겹침 영역에서 다른 시료에 비하여 더 작은 함수비와 더 큰 강도를 갖는 것으로 나타났다. 스미어 겹침으로 인하여 유발된 물성치 차이가 압밀속도나 압밀효율에도 영향을 미치는 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C., and Balasubramaniam, A. S. (1991), "Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.117, No.10, pp.1509-1530.
2. Choi, W. J., Kang, M. C., Koo, J. G., and Lee, S. (2001), "The Evaluation of consolidation rate by considering of varying permeability in smear zone", *Proceedings of KSCE National Conference*, pp.2963-2966.
3. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Vol.3, pp.677-682.
4. Indraratna, B. and Redana, I. W. (1998), "Laboratory Determination of Smear Zone due to Vertical Drain Installation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.2, pp.180-184.
5. Joo, J. W., Jung, G. H., Kim, J. Y., and Cho, J. K. (2002), "Horizontal Drainage Consolidation Test by Rowe Cell", *Proceedings of KSCE National Conference*, pp.2355-2358.
6. Lee, S. J., Bae, K. T., Jang, S. M., and Lee, J. G. (2003), "Experimental Study of Smear Effect on Sand Drain methods of Installation", *Proceedings of KSCE National Conference*, pp.3440-3444.
7. Onoue, A., Ting, N., Germain, J. T., and Whitman, V. (1992), "Permeability of Disturbed Zone Around Vertical Drains", *Applied Ground Improvement Techniques*, Vol.2, pp.163-174, Bangkok, Thailand.
8. Onoue, A. (1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.
9. Sharma, J. S. and Xiao, D. (2000), "Characterization of a smear zone around vertical drains by large-scale laboratory tests", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.1265-1271.
10. Saye, S. R. (2001), "Assessment of soil disturbance by the installation of displacement sand drains and prefabricated vertical drains", *Geotechnical Special Publication*, ASCE, Vol.119, pp.325-362.
11. Sathananthan, I., Indraratna, B., and Rujikiatkamjorn, C. (2008), "Evaluation of smear zone extent surrounding mandrel driven vertical drains using the cavity expansion theory", *International Journal of Geomechanics*, Vol.8, No.6, pp.355-365.
12. Walker, R. and Indraratna, B. (2007), "Vertical drain consolidation with overlapping smear zone", *Geotechnique*, Vol.57, No.5, pp.463-467.
13. Yoo, S. J., Kim, J. K., Chae, Y. S., and Park, Y. M. (2006), "A Study on the Soft Ground Disturbance Characteristics by Large Block Sample", *Proceedings of KGS National Fall Conference*, pp.1070-1077.
14. Yune, C. Y., Son, D. J., Chun, S. H., and Chung, C. K. (2009), "Spatial Variation of Void Ratio and Permeability by Smear and Its Changing Behavior during Consolidation : Part I Physical Model Test and Analysis" *Journal of KSCE*, Vol.29, No.4C, pp.137-144.

(접수일자 2012. 5. 17, 심사완료일 2013. 4. 1)