

현장스미어존 시험에 의한 지반교란특성 분석

Analysis of Ground Disturbance Characteristics by Field Smear Zones Test

진규남¹⁾, Kyu-Nam Jin, 이재식²⁾, Jae-Sik Lee, 박영목³⁾, Yeong-Mog Park, 정하익⁴⁾, Ha-Ik Chung, 진현식⁵⁾, Hyun-Sik Jin

¹⁾ 한국토지공사 연구개발처 부임연구원, Associate Researcher, Korea Land Corporation

²⁾ 한국토지공사 시험연구실 대리, Assistant Manager Korea Land Corporation

³⁾ 영남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep of civil Eng. Yeungnam University

⁴⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, KICT

⁵⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

SYNOPSIS : The installation of vertical drains by using a mandrel causes significant disturbance of the subsoil. Thus a smear zone may be developed with reduced permeability and increased compressibility. In this paper the extent of smear zone developing ground disturbance with the installation of mandrels are analysed by field smear zone test. The extent and the consolidation characteristics of smear zones around the mandrels is compared with the shape, the size of mandrel and penetration speed and is evaluated from the field smear test results. (circular, square, rectangle and oval type)

KEYWORDS : soft clay, vertical drains, mandrel, smear zone, disturbance

1. 서론

연약한 점성토지반 위에 구조물 등이 축조될 경우 지반의 안정성을 증대시키기 위하여 연직배수(vertical drains)공법의 의한 지반개량이 많이 이용되고 있다. 연직배수(vertical drains)공법에 이용하여 지반개량을 할 경우 부분적인 지반교란이 예상되며, 이는 시공중의 증기 주행에 따른 지반표층의 교란과 드레인 타설에 필요한 맨드릴(mandrel)의 관입·인발에 기인된 드레인 주위 지반의 교란으로 대별되며 압밀축진효과를 크게 저하시키는 요인으로 작용하고 있으며, 최근에는 교란영역인 스미어존(smear zone)의 영향이 종래의 개념보다 중요한 것으로 평가되고 있으며, 이에 관한 재검토가 요구되어지고 있다.

그러나 지금까지 연약지반 개량시 압밀의 지연 및 침하량의 증가에 크게 영향을 미치는 스미어존의 특성파악에 대한 연구가 미흡한 실정이고,朴(1994)에 의해서 일본의 아리아케(有明) 지반을 대상으로 실내 및 현장시험을 통하여 실측한 정도이다. 국내에서는 김 등(1997)이 실내에서 맨드릴사이즈, 관입속도 및 지반조건을 변화시키면서 스미어존의 형성을 파악하고, 투수성변화에 미치는 맨드릴의 영향에 관한 연구를 수행하였다.

따라서, 본 연구에서는 연직배수공법 적용시 가장 심각한 압밀지연현상의 발생요인인 지반교란의 발생범위 및 교란영역 투수계수비의 범위를 선정하기 위하여 맨드릴 형상, 맨드릴 타입조건 및 맨드릴 타입속도에 따른 현장시험을 수행하였다.

2. 현장 1차시험에 의한 지반교란 특성분석

2.1 시험위치 및 방법

현장 스미어존 시험은 양산물금 시험시공부지내 메나드 드레인구간과 선행재하(preloading)구간 중간에 위치한 무처리 영역에서 실시하였으며, 시험구간은 가로×세로(30m×30m)의 정방형의 크기로 선정하였다. 시험은 시추장비에 길이 10m의 멘드렐을 설치하여 멘드렐의 형상과 규격 및 관입속도와 방법 등의 시험조건을 변화시켜가며 실시하였으며, 세부적인 시험조건은 표 1에 나타내었다.

표 1. 현장 스미어존 시험조건

멘드렐 형상	시험 조건	멘드렐 규격 (cm)	타입속도 (m/sec)	피에조콘 조사위치*(m)	채취시료
원형	무진동	φ 18	0.4	0.2, 0.4, 0.7	수평시료, 블럭시료
	무진동	φ 9	0.4	0.1, 0.2, 0.7	수평시료
	진동	φ 18	0.4	0.2, 0.3, 0.7	수평시료
직사각형	무진동	19.5×13	0.4	0.2, 0.3, 0.7	수평시료, 블럭시료
	무진동		0.1	0.2, 0.3, 0.7	수평시료
	진동		0.4	0.2, 0.3, 0.7	수평시료, 블럭시료
정사각형	무진동	16×16	0.4	0.2, 0.7, 2.0	수평시료
마름모	무진동	28×18	0.4	0.2, 0.3, 0.7	수평시료

* 위치: 멘드렐 끝단으로부터 바깥방향으로 떨어진 거리임.

2.2 일축압축시험 결과

그림 1은 멘드렐을 관입한 위치에서 채취한 수평 및 연직방향 시료에 대한 거리별에 대한 응력-변형률 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 멘드렐 끝단에서 멀어질수록 일축압축강도가 증가하고, 초기접선의 기울기가 증가하는 경향을 보인다. 또한 멘드렐 끝단 부근의 시험결과와 경우 멘드렐 관입에 의한 교란의 영향으로 인하여 변형율이 증가함에 따라 하중이 일정하게 증가하는 응력-변형률 특성을 보이고 있으며, 멘드렐 끝단부로부터 거리가 멀어질수록 응력-변형률 특성은 궁극하중강도로 수렴해가는 변형을 경화현상(hardening)을 보이거나 비교적 완만한 상태로 최대하중강도를 보이는 경향을 나타낸다.

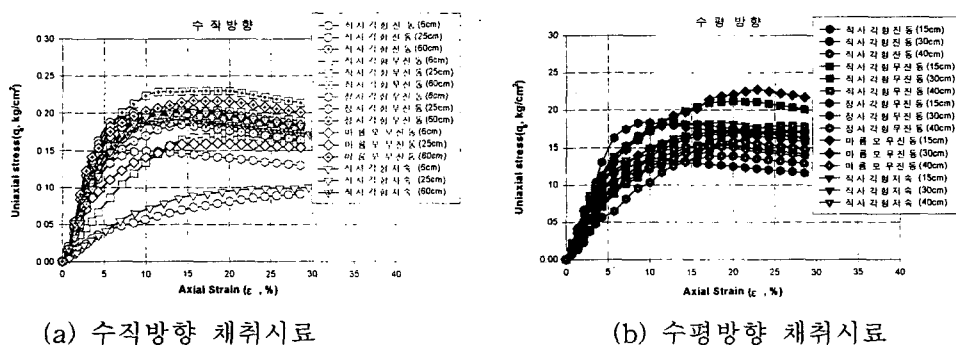


그림 1. 일축압축시험결과(응력-변형률 관계)

그림 2는 멘드렐에서 떨어진 위치별에 따른 일축압축강도(q_u)의 분포를 나타내고 있다. 스미어 영향 범위 산정은 멘드렐 관입후 멘드렐 선단부를 기준하여 거리별에 따른 강도분포를 나타내고 있다. 멘드

렐에 가까울수록 낮은 강도특성을 가지며, 반경방향으로 거리가 증가할수록 강도가 증가하는 경향을 보인다. 박(1994)이 제시한 불교란 시료의 일축압축강도의 75%만큼 강도가 저하한 위치를 기준으로 스미어 존을 평가하기 위하여 교란범위의 직경(d_s)과 멘드렐의 직경(d_m)의 비를 이용하여 나타내면 d_s/d_m 은 직사각형 무진동 1.9, 정사각형 무진동 2.5, 마름모 무진동 1.8, 직사각형 진동 2.6, 직사각형 저속 1.8로 각각 나타났다.

시험조건에 따른 교란영역비를 분석한 결과, 동일한 관입조건(무진동, 4m/sec)에서 원형, 마름모, 직사각형, 정사각형으로 갈수록 교란영역비(d_s/d_m)가 증가하는 것으로 나타났으며, 진동에 의한 멘드렐 관입시 무진동 조건보다 1.5~1.6배 가량 교란영역이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 직사각형 멘드렐을 이용하여 관입속도를 변화시켜가며 실험을 실시한 결과 저속으로 관입하는 경우 교란이 적은 것으로 나타났다. 위와 같이 일축압축시험결과를 이용하여 교란영역비(d_s/d_m)를 산정한 결과 원형 멘드렐을 저속과 무진동 조건으로 멘드렐을 관입하는 경우 주변지반 교란발생을 최소화할 수 있는 것으로 분석되었다.

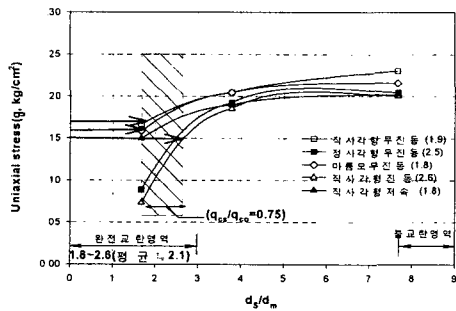


그림 2. 거리 위치별에 따른 강도의 영향

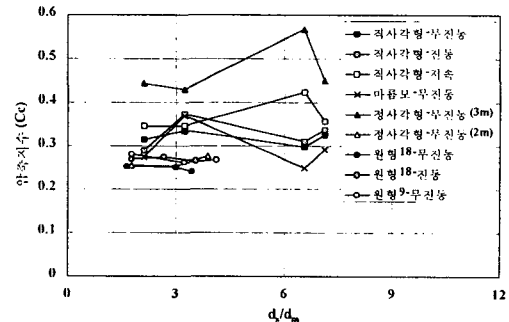


그림 3. 멘드렐 끝단으로부터의 거리별 압축지수 변화

2.3 압밀시험 결과

그림 3에 멘드렐 끝단으로부터의 거리별 압축지수 분포를 나타내었다. 그림에서 보듯이 압축지수는 시료채취 및 운반과정에서 발생된 것으로 추정되는 교란의 영향으로 인해 뚜렷한 경향성은 나타나지 않으나, 부분적으로 직사각형 저속, 정사각형 무진동 조건 등과 같은 시험조건에서 멘드렐 끝단에서 바깥으로 갈수록 압축지수가 증가하는 경향을 확인할 수가 있다.

그림 4는 등가환산직경에 따른 스미어존의 영향범위에 멘드렐 형상에 따른 압밀계수(c_h)와의 관계를 나타내고 있다. 멘드렐을 타설함에 의한 인접 부분의 점토는 교란의 영향을 받아 불교란 점토의 c_h 에 비하여 크게 저하한 값을 나타내며 멘드렐로부터 거리의 증가에 따라 거의 직선적으로 c_h 가 증가됨을 알 수 있다. 본 결과는 시험시료 채취심도가 매립지반에 해당하므로 교란에 의한 c_h 의 감소가 아리아케 점토지반을 대상으로 한 연구결과 박(1994)에 비하여 상대적으로 적게 나타나고 있음을 알 수 있다.

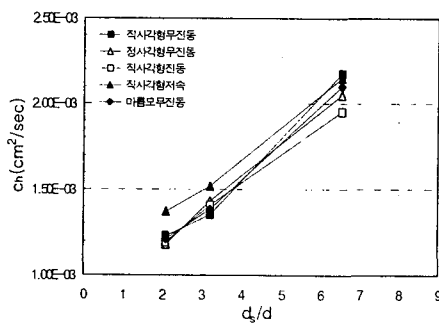


그림 4. d_s/d_m 및 c_h 와의 관계(현장 1차시료)

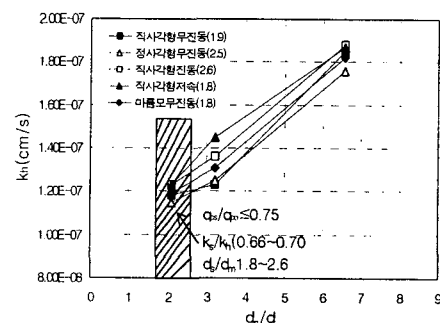


그림 5. d_s/d_m 및 k_h 와의 관계(현장 1차시료)

그림 5는 스미어 영향에 따른 투수계수(k_s)의 변화를 나타내고 있다. 불교란 영역의 투수계수(k_h)를 1로 기준하였을 때 교란영역에 따른 k_s/k_h 비는 0.66~0.70이고, d_s/d_m 의 범위는 $q_{cs}/q_{co} \leq 0.75$ 일 때 1.8~2.6으로 나타났다. 이 결과를 참고로 타입방법별 및 맨드렐 형상별 지반교란 영향을 검토하면 직사각형, 정사각형 및 마름모 중에서 직사각형 형상의 맨드렐 및 저속관입이 유리한 것으로 판단된다.

2.4 삼축압축시험(UU test) 결과

그림 6은 맨드렐 관입 전, 후에 지표면으로부터 2m 심도에서 채취한 시료를 대상으로 삼축압축시험으로부터 얻은 비배수 전단강도를 나타내고 있다. 불교란 점토의 비배수전단강도 $c_{uu}=0.20\text{kg/cm}^2$ 으로 나타났고, 교란 점토의 비배수전단강도는 $c_{us}=0.15\text{kg/cm}^2$ 를 나타내어 c_{uu} 의 약 75%이며, 맨드렐 관입에 의해 주위 점토지반에 스미어 존이 형성됨을 알 수 있다. 이 결과는 불럭시료의 일축압축강도시험 결과와 유사한 값이다.

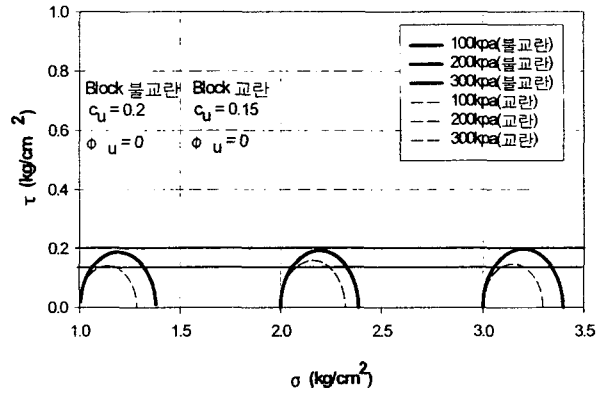


그림 6. 맨드렐 관입 전, 후 시료의 삼축압축시험 결과(UU 시험)

2.5 직접전단시험 결과

채취된 불교란시료에 대해서 삼축시험 결과와 비교하기 위해서 직접전단시험을 실시하고 그림 7에 직접전단시험의 결과를 나타내었다. 그림 7에서 수평축의 변위가 증가할수록 전단응력은 응력경화 현상이 일어나며, 나머지는 수직응력과는 무관하게 변형을 경화-일정현상이 보인다. 그리고, 체적변화율은 연직응력과는 무관하게 압축발생이 일어났다. 이시료는 정규압밀상태이기 때문에 설계상태의 전단강도 정수 $c'=0$, $\phi'=26^\circ$, $\tau_f=0.22\text{kg/cm}^2$ 를 나타내어 삼축시험 결과 보다 약 10% 과대한 상태임을 알 수 있다. 이는 전단과정중 시료내부에 압밀이 진행되어 간극수가 외부로 배출됨에 따라 기인되는 현상인 것으로 판단된다.

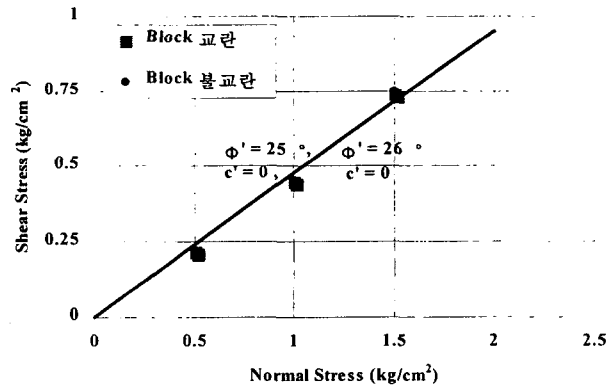
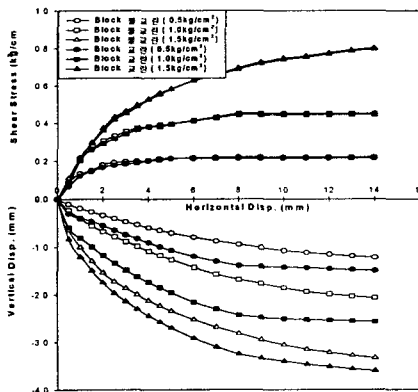


그림 7 직접전단시험의 결과

3. 현장 2차시험에 의한 지반교란 특성분석

양산물금지구 현장에서 실시한 1차 스미어존 시험을 검증하기 위하여 2차 검증 스미어존을 시험을

실시하였다. 시료채취 과정의 문제점을 최소화하는 방안을 강구하여 증장비(백호우)에 의한 방법으로 정사각형 및 직사각형 멘드럴을 정정관입 하였다. 이와 같은 방법으로 시료를 채취하여 각 신월튜브에서 일정한 간격으로 시료를 분할하여 압밀시험 및 일축압축시험을 실시하였다.

그림 8은 2차 현장 스미어존 검증 시험을 한 후 스미어 영향에 따른 압밀계수의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 1차시험과 마찬가지로 멘드럴에 가까울수록 교란의 영향이 증가하고 있으며 $d_s/d_m=1$ 에서의 압밀계수가 $d_s/d_m=5$ 에서의 압밀계수의 1/2을 나타내어 1차 현장시험 결과와 대체로 유사한 값을 나타내고 있다. 직사각형 멘드럴의 경우가 정사각형 멘드럴에 비하여 약 2배 유리한 상태를 알 수 있다.

그림 9는 2차 현장시험과정에서 채취한 시료를 이용하여 일축압축시험 결과를 멘드럴 끝단으로부터 거리별 함수비와 일축압축강도 관계를 나타내고 있다. 그림에서 멘드럴로부터 가까울수록 함수비가 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. 멘드럴의 경우 정사각형에 비해 낮은 교란발생을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 박(1994)이 제안한 $q_{cs}/q_{co} \leq 0.75$ 이하의 스미어존 범위(d_s)는 직사각형의 경우 멘드럴 직경(d_m)의 약 2배, 정사각형인 경우 약 2.3배를 나타내고 있다.

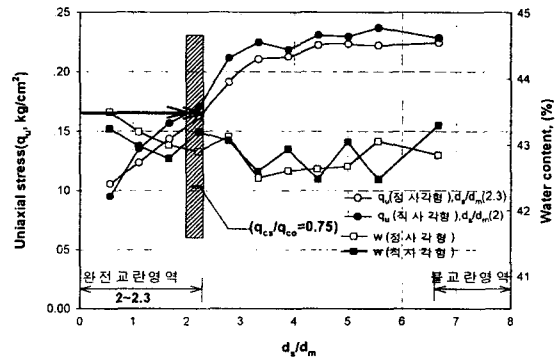
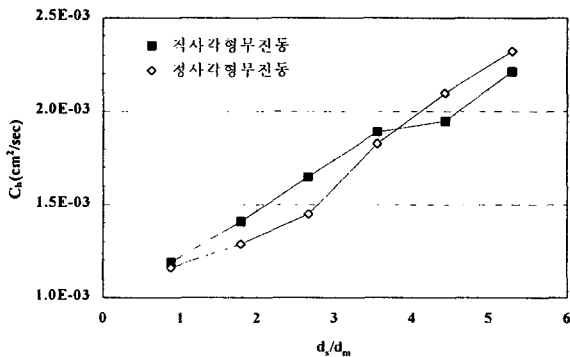


그림 8. d_s/d_m 및 C_h 와의 관계그림 그림 9. 멘드럴로부터 거리별 일축압축강도 및 함수비 관계

4. CPT 시험에 의한 지반교란 특성분석

드레인 타설을 위하여 멘드럴 관입 및 인발에 의한 주변지반의 교란에 의한 강도저하 특성을 규명하기 위하여 멘드럴의 종류와 진동조건 그리고 관입속도를 달리하여 멘드럴을 관입 및 인발을 실시한 후 표 2에 나타낸 위치에서 피에조콘 조사를 실시하였다.

표 2. 피에조콘 조사내역 및 스미어존 영향범위 평균값

번호	멘드럴 형상	진동조건	타입속도(m/s)	CPT조사위치(m)	d_s/d_m
1	원형(D18)	무진동	0.4	0.2, 0.3, 0.7	2.9
2	원형(D19)	무진동	0.4	0.1, 0.2, 0.7	3.6
3	정사각형	무진동	0.4	0.2, 0.7, 2.0	8.1
4	직사각형	무진동	0.4	0.2, 0.3, 0.7	3.6
5	마름모형	무진동	0.4	0.2, 0.3, 0.7	3.1
6	원형(D18)	진동	0.4	0.2, 0.3, 0.7	2.6
7	직사각형	진동	0.4	0.2, 0.3, 0.7	5.3
8	직사각형	무진동	0.1	0.2, 0.3, 0.7	3.9

현장 CPT시험결과 콘 관입 저항치는 표층부에서 크게 나타내며 지표하부 2.0m부근에서 최소치를 보이며, 이후 심도가 증가함에 따라 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 또한 멘드렐 끝단에 가까운 위치에서 실시한 시험결과가 동일심도의 바깥쪽 결과에 비해 교란의 영향으로 인해 콘관입 저항치가 작은 것으로 나타났다.

심도 5.0m에서 10.0m사이의 결과를 이용하여 스미어존 영역을 산정한 결과, 멘드렐 관입에 따른 스미어존(d_s/d_m)의 분포는 그림 10과 같다. 그림과 표에서 보는바와 같이 시험조건별로 심도에 따라 2.6~8.1 d_s/d_m 의 분포를 보이며 심도에 따라 비교적 일정한 크기의 스미어존을 갖는 것으로 나타났다.

5. 지반교란 영향 평가

5.1 스미어존의 크기

멘드렐 타설시 주변지반의 교란 정도를 파악하기 위하여 멘드렐의 형상과 관입조건 등을 변화시켜가며 실내 및 현장시험을 실시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 멘드렐 형상에 따라 다양한 크기의 스미어존을 갖으며 그 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3의 원형멘드렐에 대한 스미어존 시험결과에서는 관입속도와 진동조건에 대한 관입조건이 차이가 있으나, 현장 1차시험 수평시료-CPT시험결과 순으로 스미어존이 크게 산정되는 결과를 보이며, 전체적으로 1.6~3.6 d_m 의 범위를 갖는다. 정사각형 멘드렐 시험결과와 직사각형 멘드렐에서도 동일한 경향성을 보이며, 각각 2.3~8.1 d_m , 1.8~5.3 d_m 의 범위를 갖는다. 그리고 마름모형 멘드렐에서는 1.8~3.1 d_m 의 범위를 갖는다.

멘드렐 형상에 따른 스미어존의 크기를 비교한 결과 평균값을 이용하는 경우, 마름모(2.45)-원형(2.45)-직사각형(3.01)-정사각형(4.3)의 순으로 스미어존의 크기가 증가하며, 환산직경 $d_m=18cm$, 관입속도 0.4m/sec, 무진동 조건의 동일시험조건에 대한 결과를 비교한 결과 원형(2.30)-마름모(2.45)-직사각형(3.08)-정사각형(4.3) 순으로 스미어존의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 본 시험결과의 전체평균은 2.98 d_m 으로 나타났으며, 다른 시험방법에 비하여 상대적으로 스미어존의 범위가 큰 CPT시험결과를 제외하면 스미어존의 범위는 2.05 d_m 으로 나타났다.

표 3. 멘드렐의 스미어존 산정결과

멘드렐 종 류	구분	시험조건			d_s/d_m	비 고
		$d_m(cm)$	진동조건	관입속도(m/s)		
원형	현장 1차	18	무진동	0.4	1.6	수평
					2.9	CPT
		9	무진동	0.4	1.9	수평
					3.6	CPT
		18	진 동	0.4	2.1	수평
					2.6	CPT
정사각형	현장 1차	18	무진동	0.4	2.5	수평
					8.1	CPT
	현장 2차	18	무진동	0.4	2.	수평
직사각형	현장1차	18	무진동	0.4	1.9	수평
					3.6	CPT
		18	무진동	0.1	1.8	수평
					3.9	CPT
		18	진 동	0.4	2.6	수평
					5.3	CPT
	현장 2차	18	무진동	0.4	2.0	수평
마름모형	현장1차	18	무진동	0.4	1.8	수평
					3.1	CPT

5.2 투수계수 감소비

멘드렐 관입에 의해 발생된 교란영역의 압밀특성 변화와 투수계수 감소비를 분석하기 위하여 표준압밀시험을 실시하였으며, 시험결과 경향성을 보이지 않는 1차 현장시험시 원형 멘드렐에 대한 결과를 제외한 나머지 결과에 대하여 멘드렐 형상별로 표 4에 나타내었다. 이 때 압밀하중은 지반의 유효응력과 성토하중을 고려하여 1.6 kg/cm^2 을 기준으로 압밀계수와 투수계수를 산정하였다. 실내모형시험의 경우 대형 불럭시료를 이용하여 교란영역과 불교란 영역으로 구분하여 압밀계수와 투수계수비를 산정하였으며, 현장시험의 경우 수평시료를 멘드렐 중심에서 일정거리별로 실시한 압밀시험 결과를 상대 비교하여 일축압축강도비 $q_{cs}/q_{co}=0.75$ 인 지점의 압밀계수 및 투수계수 감소비를 산정하였다.

동일심도에서 위치별로 멘드렐 관입에 따른 지반교란의 영향과 정도의 차이로 인하여 멘드렐 중심에 가까울수록 투수계수 감소비가 작아지는 것을 현장시험 결과를 통해 알 수 있었다. 수평시료에 대한 시험결과 일축압축강도비 $q_{cs}/q_{co}=0.75$ 인 위치에서 구한 멘드렐 형상별로 압밀계수 감소비의 평균값은 정사각형 0.64, 직사각형 0.60, 마름모의 경우 0.61로 나타났으며, 투수계수 감소비의 경우 정사각형 0.66, 직사각형 0.64, 마름모 0.65로 나타났다. 또한 모든 시험결과와 평균은 압밀계수 감소비의 경우 0.61, 투수계수 감소비의 경우 0.64로 나타났다.

표 4. 원형 멘드렐의 압밀계수 및 투수계수 감소비

멘드렐 형상	구 분	시험조건			C_s/C_h	k_s/k_h	비 고
		d_m (cm)	진동조건	관입속도 (m/sec)			
정사각형	현장 1차	18	무진동	0.4	0.64	0.66	수평시료 (at $q_{cs}/q_{co}=0.75$)
직사각형	현장 1차	18	무진동	0.4	0.56	0.64	
		18	무진동	0.1	0.58	0.65	
		18	진동	0.4	0.58	0.65	
	현장 2차	18	무진동	0.4	0.67	0.60	
마름모	현장 1차	18	무진동	0.4	0.61	0.65	

기존의 연구결과에 의하면 직사각형 형상과 같은 멘드렐에서는 장변방향으로 스미어존의 크기를 측정할 때 단변방향으로 스미어존의 크기를 측정할 때보다 다소 크게 산정된다고 한다. 따라서 위에 제시된 형상별 스미어존의 크기 산정결과는 멘드렐 관입시 장변과 단변 방향에 대한 시료채취와 CPT시험 방향에 따라 스미어존의 크기가 다르게 산정될 수 있는 유동성을 내포하고 있다. 또한 관입속도와 멘드렐의 크기에 따른 스미어존의 크기를 비교 분석한 결과 저속의 무진동 조건이 고속의 진동조건보다 스미어존의 크기가 작게 산정되며, 부분적으로 관입조건에 따라 특별한 경향성은 없는 결과가 나타나는데, 지반의 불균질성으로 인하여 조건별 스미어존의 크기를 산정할 때 절대적 기준보다는 각 시험조건별로 최외곽의 값을 이용한 상대적 평가 방법을 이용할 수 밖에 없는 평가방법의 한계성을 보이는 것도 하나의 원인인 것으로 판단된다.

6. 결론

연약한 점토 지반상에 연직 배수재 시공에 따른 지반교란을 실내 및 현장시험을 통하여 직접 측정하고, 압밀특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 멘드렐 타설 주변지반의 강도 및 압밀특성은 멘드렐로부터 거리가 증가할수록 선형 또는 비선형적으로 증가하였다. 멘드렐 관입은 저속의 정적관입을 실시하는 것이 관입에 따른 주변지반 교란의 영향이 저감되는 것으로 나타났다.
- (2) PBD재의 배수성능에 영향을 미치는 스미어존의 범위(d_s/d_m)는 수평시료인 경우 1.6~2.6으로 나타났다. 또한 CPT시험 결과에서는 2.6~8.1로 나타났다.
- (3) 멘드렐 형상에 따른 스미어존의 크기(d_s/d_m)의 평균값은 원형 2.45, 정사각형 4.3, 직사각형 3.01, 마름모 2.45로서 평균 2.98의 크기를 보이며, 다른 시험방법에 비해 스미어존의 크기가 크게 산정된 CPT시험결과를 제외한 평균값은 원형 1.87, 정사각형 2.4, 직사각형 2.08, 마름모 1.8로서 평균 2.05로 나타났다.
- (4) 지반교란에 의한 투수계수 감소비(k_s/k_h)를 산정한 결과 0.60~0.66으로 나타났다.
- (5) 연직배수공법에 의한 연약지반 개량공사 설계시에 지금까지는 외국에서 제시된 스미어존 크기, 투수계수 감소비 등을 사용하여 개략적인 설계를 수행하였는데, 본 연구에서 제시된 지반교란 영향을 고려한다면 보다 정밀한 해석이 가능할 것이다.
- (6) 연약지반 개량시 연직배수재 타설에 따른 주변지반의 일축압축 특성, 압밀특성, 투수특성 및 전단특성 등을 파악함으로써 배수재 타설에 의한 주변지반의 교란영향과 교란메카니즘이 보다 더 정밀하게 규명되었다.

참고문헌

1. 김수삼, 장영수, 고경환(1997), “스미어존 형성과 투수성변화에 미치는 멘드렐의 영향에 관한 연구”, 한국지반공학회지, 제13권, 제5호, 한국지반공학회.
2. 진규남, 김경호, 정길수, 정하익(1999), “현장 CPT시험에 의한 스미어존의 범위 산정”, 99 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.81~86.
3. 토지연구원(1996), “연약지반의 처리공법과 침하예측에 관한 연구-양산물금 연약지반 시험시공”, No.연구96-7-22, 한국토지공사 토지연구원
4. 한국건설기술연구원(1999), “해안공간개발을 위한 연약지반 처리기술”
5. 한국토지공사(1999), “연약지반의 압밀특성에 관한 연구·I”, pp. 361~464.
6. 朴永穆(1994) : “低平地に堆積する海成粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に関する研究”, 日本佐賀大學 博士學位論文, pp.1~235.