

맨드렐 관입에 기인하는 스미어 존의 평가

An Evaluation of Smeared Zone Due to Mandrel Penetration

박 영 목* Park, Yeong-Mog

Abstract

An experimental study was conducted to evaluate the smeared effect due to mandrel penetration into soft ground for a vertical drain installation. Laboratory tests were performed to investigate the formation of a smear zone, the variations of strength, and the consolidation characteristics in the disturbed zone using two types(CL at Yangsan site and OH at Pohang site) of soft clayey soils. The smear zone effect was evaluated focusing on mandrel shape, mandrel size, penetration speed, and ground condition. Based on laboratory test results, the diameter of the smear zone(d_s) ranged from 3.08 and 3.92 times that of mandrel(d_m). It was also found that the d_s/d_m value of the circular shape of the mandrel is smaller than those of square and rectangular shapes. The value of d_s/d_m decreased with larger mandrel size, lower penetration speed in the CL soil, and higher penetration speed in the OH soil. However, natural water content was minimally affected by d_s/d_m . Respectively, the coefficients of horizontal consolidation(c_{hs}) and horizontal permeability(k_s) of smear zone ranged from 0.81 to 0.87 times, and 0.73 to 0.83 times those of the undisturbed zone. Based on this study, the values of c_{hs} , k_s and unconfined compressive strength(q_{us}) in the smear zone were the lowest at close vicinity of the mandrel and increased linearly with distance from the mandrel. Further, the q_{us} varied from 0.5 to 0.9 times that of the undisturbed zone strength.

요 지

연약한 점토 지반에 버티컬 드레인 타설을 위한 맨드렐관입에 의하여 스미어 존이 형성되며 이는 지반개량기간을 지연시키는 중요한 인자로 작용한다. 본 연구에서는 2종의 불교란 점토시료를 대상으로 맨드렐관입에 따른 스미어 존을 실내시험을 통하여 직접 측정하였고, 맨드렐로부터 떨어진 거리별 점토시료를 대상으로 압밀시험 및 일축압축시험을 통하여 스미어 존 내의 강도와 압밀특성의 변화를 파악하였다. 연구결과, 맨드렐 사이즈가 클수록 맨드렐 환산 직경에 대한 스미어 존의 직경비(d_s/d_m)가 감소하였다. 맨드렐 형상은 원형, 직사각형, 정사각형 순으로 적은 스미어 존을 나타냈다. 또한, 양산지구의 저소성점토(CL)지반의 경우는 관입속도가 느릴수록, 포항지구의 고소성 유기질토(OH)지반의 경우는 빠를수록 스미어 존이 작게 형성되었으며, 점토지반의 d_s/d_m 은 3.08~3.92의 범위를 나타냈다. 아울러, 스미어 존의 강도, 압밀계수 및 투수계수는 맨드렐로부터 거리가 증가할수록 거의 직선적으로 증가하였으며, 스미어 존의 일축압축강도(q_{us})는 불교란 존의 약 50~90%를, 이 범위에서의 k_s/k_h 의 평균치는 0.73~0.83을 나타냈다.

Keywords : Consolidation and strength characteristics, Laboratory test, Mandrel penetration, Smear zone, Soft ground, Vertical drain method

* 정희원, 영남대학교 공과대학 토목도시환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Urban and Environmental Engrg., Yeungnam Univ., ympark@yumail.ac.kr)

1. 서론

최근 연약한 점성토지반의 개량을 위해서 연직배수(vertical drain)공법이 활발하게 적용되고있다. 연직배수공법에 의한 지반개량을 수행할 경우에 드레인 타설을 위한 맨드렐(mandrel)의 관입·인발에 기인하여 드레인 주위 지반에 교란영역(이하 스미어 존(smear zone)이라 함)이 형성되어 압밀촉진 효과를 크게 저하시키는 요인으로 작용한다. 지금까지 스미어 존을 고려한 엄밀압밀 해석법은 Onoue(1988), Madhav et al.(1993) 등을 대표로 다양하게 수행되었으나, 시험성토나 실내시험에 의해 스미어 존을 규명하기 위하여 시도한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다. Onoue(1991)등이 Boston blue clay에 대한 실내모형실험을 통해 간극비와 투수실험으로부터 구한 것이 있으며, Bergado et al.(1991)이 Bangkok clay에 대하여 현장시험을 실시하고 스미어 존의 범위가 맨드렐 직경의 2배가 된다고 하였다. 그러나, 맨드렐의 관입·인발에 따른 주위지반의 변위거동을 실측하여 스미어 존의 규명과 특성을 파악한 연구는 三浦 등(1993)에 의하여 처음으로 수행되었다. 박(1994)은 일본 아리아케(有明) 지반을 대상으로 맨드렐 타입에 의한 스미어 존의 범위를 국수(noodle)를 이용한 2차원과 3차원의 실내시험을 통하여, 재압밀점토의 경우에는 맨드렐 직경의 2.0~2.5배, 불교란시료의 경우 2.5~3.0배의 범위를 제시한바 있다. 한편, 국내지반을 대상으로 김수삼 등(1997)은 박(1994)의 시험법을 이용하여 재성형점토시료를 대상으로 맨드렐 크기의 변화에 따른 스미어 존의 범위를 산정한 결과 2.3~3.9배까지 교란된다고 하였고, 맨드렐 직경이 커질수록 스미어 존의 범위가 증가하며, 시료가 단단할수록 스미어 존의 범위가 커진다고 하였다. 또한, 맨드렐의 형태에 있어서 원형보다는 직사각형이나, 마름모형태의 맨드렐이 스미어 영향이 적어진다고 하였다. 그러나, 재성형시료와 불교란시료의 스미어 존에는 차이가 발생함에도 불구하고 국내의 불교란 연약점토지반을 대상으로 실측에 의한 스미어 존의 형성을 파악하고, 투수성변화에 미치는 맨드렐의 영향에 관한 연구를 종합적으로 수행한 예는 보고되지 않고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 양산물금지구와 포항양덕지구의 연약지반을 대상으로 불교란 시료에 대한 실내시험을 실시하여 지반의 함수비, 맨드렐의 형상과 규격 및 관입속도 등에 따른 스미어 존의 형성특성과 교란에 의

한 강도 및 압밀특성저하에 관하여 다양하게 검토하여 과학적인 연직배수공법에 의한 지반개량기간의 산정에 참고가 되게 한다.

2. 스미어 존 실험

2.1 시험용 시료의 성질

국내연약점토의 스미어 존 및 존 내의 압밀특성을 실내에서 규명하기 위하여 양산 물금지구 및 포항 양덕지구 현장의 지표면으로부터 2m의 심도에서 채취한 점토시료를 대상으로 실험을 실시했다. 표 1에는 실험에 사용한 점토시료의 물리적인 특성을 나타낸다.

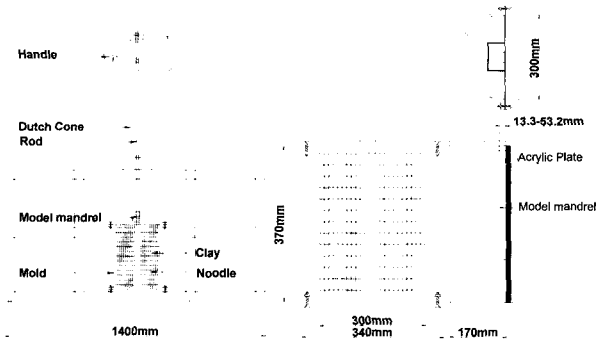
양산 물금지구와 포항 양덕지구에서 각각 채취된 양산시료와 포항시료의 자연함수비의 평균치는 각각 44.1%, 160.6%였다. 즉, 포항시료는 양산시료에 비하여 약 4배의 높은 자연함수비를 나타냈다. 액성한계는 양산시료와 포항시료가 각각 37%, 71.7%를 나타냈으며, 통일분류법상 흙은 저소성 점토(CL)와 고소성 유기질토(OH)로 각각 분류되었다.

2.2 시험장치 및 조건

현장에서의 드레인 타입방식을 모형화 하여 그림 1과 같은 스미어 존 모형 시험장치를 제작하여 시험을 실시하였다. 장치의 상부에는 맨드렐의 관입·인발을 위하여 화란식 이중관 원추관입 시험장치의 본체를 부착하였고, 하부의 몰드는 직경 30cm, 높이 37cm의 반원통형 철제몰드를 사용하여 2차원 스미어 존 시험을 실시하였다. 그림 2는 시험에 사용된 모형 맨드렐의 종류와 규격을 나타냈다. 맨드렐 하단부는 폐쇄되어 있고, 형태로는 원형, 직사각형, 정사각형의 3종이며, 맨드렐의 크기에 의한 영향을 비교하기 위하여 소형 및 대형을 제작하였다. 직사각형 및 정사각형 맨드렐의 경우에는 원형의 동

표 1. 실험에 사용한 점토시료의 물리적인 성질

토질특성	양산시료		포항시료
	분포범위	평균	평균
w_n , (%)	36.2~51.0	44.1	160.6
w_L , (%)	35.7~38.3	37.0	71.7
w_p , (%)	20.1~21.2	20.6	40.6
G_s	2.65~2.68	2.67	2.42
USBS	CL		OH



(a) 전체 시험장치도 (b) 본체의 개략도

그림 1. 시험장치 개략도

원형	단면형상 및 사이즈					
	원형		직사각형		정사각형	
	소형	대형	소형	대형	소형	대형
단면도						
	3.0cm	6.0cm	2.3cm	4.6cm	1.33cm	2.66cm
평면도						
상단부 상	1.5cm	3.0cm	1.0cm 1.54cm	3.07cm	2.66cm	5.32cm

그림 2. 맨드렐 형상 및 규격

표 2. 실내시험종류 및 조건

맨드렐 형상		관입속도 (mm/sec)	맨드렐규격 (cm)
원형	소형	150	φ 3cm
	대형	150	φ 6cm
		2	
직사각형	소형	150	2.3cm × 1.5cm
	대형	150	4.6cm × 3cm
		2	
정사각형	소형	150	1.3cm × 2.6cm
	대형	150	2.6cm × 5.3cm
		2	

일한 단면적으로 환산하여 장, 단변의 비율을 달리하여 제작하였다. 그리고, 본 실험을 하기 위한 조건은 표 2에 나타내는 바와 같으며, 총 18종의 실험을 실시하였다.

2.3 시험방법

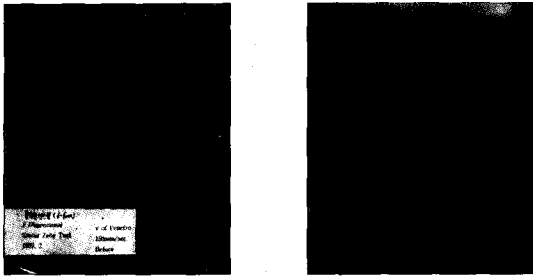
현장에서 채취한 염화플라스틱 샘플러(직경 : 30cm, 높이 : 50cm의 원통형) 속의 불교란 점토시료를 실험용

몰드 속에 이동시킨 후 점토시료의 상, 하단을 와이어로 절단하여 시료의 높이가 37cm 되게 하였다. 원통형의 몰드를 와이어로 양분하여 그 절반시료의 표면에 시료와 동일 함수비를 갖는 국수를 가로×세로=2.5cm×1.0cm의 격자형으로 부착시키고 점토표면의 마찰저감을 위하여 그리스를 얇게 도포한 아크릴 판을 볼트를 이용하여 반원통형의 몰드에 부착시켰다. 그 후, 아크릴 판과 접하는 몰드의 중앙부에 그림 2에 나타난 각종 맨드렐을 정적관입시켜 변형형상을 관찰하였다. 맨드렐의 관입은 수동식의 핸들 조작에 의하였으며, 현장상황을 고려하여 2종류(고속 : 150mm/sec, 저속 : 2mm/sec)의 관입속도를 적용하였으며, 수 회의 예비실험을 거쳐 일정한 속도로 관입이 가능하게 숙련된 인력에 의하여 실시되었다. 각 맨드렐의 관입과정에 스톱워치를 이용하여 일정속도에 의한 관입을 확인하였다. 맨드렐의 관입·인발 시 수직도를 유지하기 위하여 몰드의 상부에 맨드렐보다 각 2mm 씩 큰 규격의 구멍을 가진 상판을 맨드렐의 관입 전에 부착하였다. 스미어 존은 점토시료 표면에 부착된 국수의 변형을 육안 관찰하고 투명필름에 스캔하여 측정하였다. 또한, 스미어 존을 점토시료의 강도분포로서 확인하기 위하여 맨드렐을 인발하고 난 후 맨드렐이 점유한 공간에 소형의 드레인재를 삽입하고 주위의 공간이 없어질 때까지 낮은 상재압력으로 압축시킨 후, 소형 포켓 콘 관입시험기(PCP, 단면적 =0.312cm²)를 이용하여 일정 간격으로 약 300개소에 강도를 측정했다. 아울러 모든 시험조건에 대하여 스미어 존 영역내의 시료와 불교란 시료를 각각 채취하여 표준 압밀시험과 일축압축시험을 실시하여 압밀특성과 강도 특성의 변화를 검토하였다. 압밀시험용 시료는 표준압밀시험장치에 의한 수평방향의 압밀특성을 평가하기 위하여 맨드렐 관입·인발 후 몰드높이의 중간부분에서 맨드렐 중심에 직각이 되게 시료의 외측에서 와이어를 이용하여 연직으로 절단한 뒤 수평방향으로 채취하여 90° 회전시켜 맨드렐의 중심 쪽이 상부가 되게 세팅하였다.

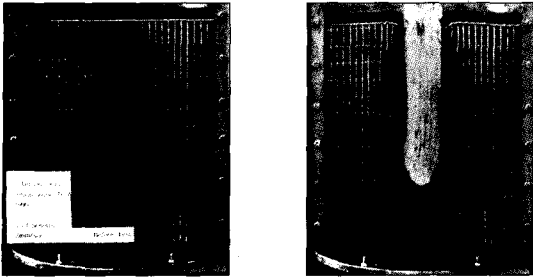
3. 시험결과 및 고찰

3.1 스미어 존 발생범위

그림 3에는 양산시료를 대상으로 본실험에서는 대형인 직경 6cm의 원형맨드렐을 이용하여 2종류(고속:

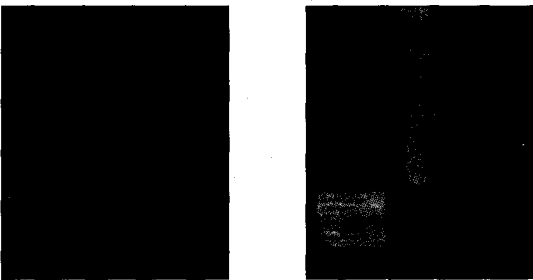


(a) 관입전, 후(150mm/sec)



(b) 관입전, 후(2mm/sec)

그림 3. 맨드렐 관입 전후의 상태(d=6cm, 양산시료)



(a) 관입후(150mm/sec)

(b) 관입후(2mm/sec)

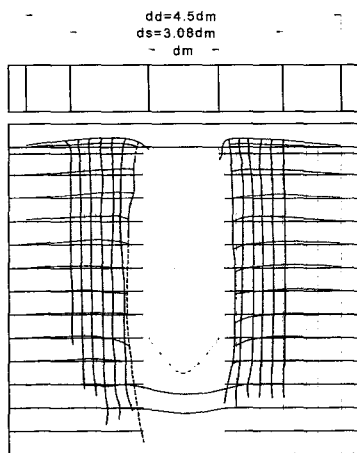
그림 4. 맨드렐 관입속도에 의한 영향(d=6cm, 포항)

150mm/sec, 저속 : 2mm/sec)의 관입속도로 실험을 수행한 맨드렐의 관입 전·후의 상태를 나타낸다. 그림 4에

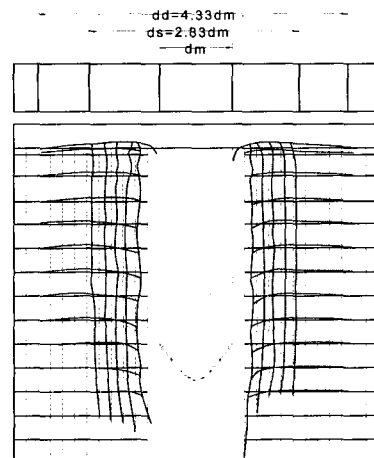
는 포항시료를 대상으로 양산시료와 동일한 조건의 시험을 수행하고 2종류의 관입속도에 대한 관입 후의 상태를 나타낸다. 양 그림에서 알 수 있는 바와 같이 맨드렐 관입 후에 점토의 소성변형에 의한 스미어 존이 형성됨을 확인할 수 있었다. 아울러 고함수비의 유기질토인 포항시료는 자유표면을 가진 상부에서 횡방향 변위 및 시험기의 측면부 구속에 의해 용기되는 현상이 일반점토인 양산시료보다 크게 나타났다.

그림 5는 그림 3의 변형형상을 스캐치한 결과를 나타낸다. 그림 5에서 알 수 있는바와 같이 국수의 소성변형 거동을 점토의 변형거동으로 판단 할 경우, 자유표면과 저판의 영향을 각각 받는 것으로 판단되는 상, 하부시료의 변위를 제외하고 시료높이의 중간부분을 중심으로 측정된 결과, 동일 단면적을 갖는 맨드렐의 관입속도를 고속인 150mm/sec, 저속인 2mm/sec로 한 경우 스미어 존의 직경(d_s)은 맨드렐 직경(d_m)의 약 3.1배, 약 2.8배로 각각 나타났다. 따라서 맨드렐의 관입속도가 빠를수록 스미어 존의 범위가 크게 발생하였다.

그림 6에는 그림 4의 변형형상을 스캐치한 결과를 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있는바와 같이 국수의 소성변형 거동을 점토의 변형거동으로 판단 할 경우 동일 단면적을 갖는 맨드렐을 고속관입한 경우 스미어 존의 직경은 맨드렐 직경의 약 3.1배가 되고, 저속관입한 경우 스미어 존은 맨드렐 직경의 약 3.4배를 나타내었다. 따라서, 자연함수비가 160.6%인 고소성 유기질토의 경우는 자연함수비가 상대적으로 낮은 저소성 점토인 양산시료의 경우와는 반대로 관입속도가 빠를수록 스미어 존의 범위가 적게 나타났다.

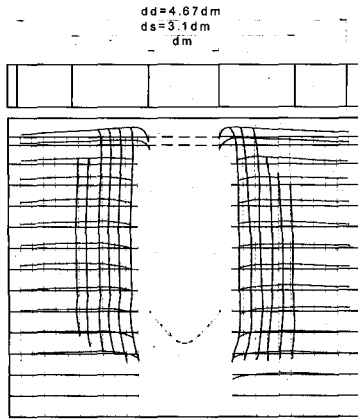


(a) 고속관입(150mm/sec)

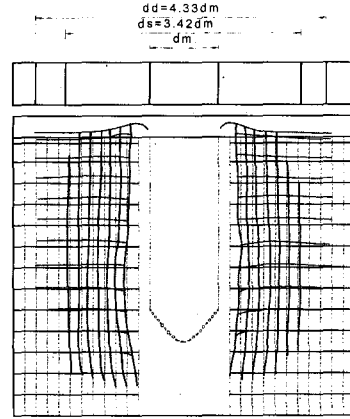


(b) 저속관입(2mm/sec)

그림 5. 맨드렐 관입후의 스미어 존 발생범위(원형, d=6cm, 양산시료)



(a) 고속관입(관입속도 : 150mm/sec)



(b) 저속관입(관입속도 : 2mm/sec)

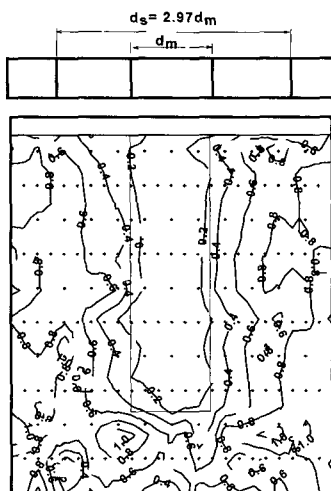
그림 6. 맨드렐 관입 후의 스미어 존 발생범위(원형, $d=6\text{cm}$, 포함시료)

그림 7에는 그림 5에 양산시료를 대상으로 국수를 부착하여 맨드렐관입에 따른 점토변형을 스케치하여 스미어 존을 측정된 결과를 강도측정으로 재확인하기 위하여 소형포켓콘을 이용하여 시험종료 후의 시료에 대하여 일정간격으로 약 300개소에 깊이 약 1cm의 관입강도를 측정하고 측정된 맨드렐 주위의 등강도 분포곡선을 나타낸다. 불교란 점토의 75% 강도에 해당하는 부분이 스미어 존(朴, 1994)이라 인정할 경우, 고속관입과 저속관입의 d_s/d_m 은 모두 약 3.0을 나타내어 육안관찰로 확인된 소성변형 부분과 유사함이 인정되었다.

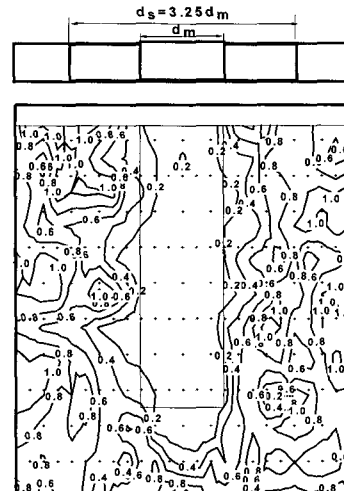
다른 모든 조건의 강도측정에 의한 평가에서도 유사한 경향을 나타냈다. 또한, 스미어 존은 맨드렐의 형상, 규격에 따라서도 상이한 결과를 나타냈으며, 표 3에는 본 연구에서 실측한 모든 조건의 스미어 존을 요약하여

나타냈다.

표 3에서 알 수 있듯이 동일한 단면적인 경우 본 실험에서 수행한 대형($d=6\text{cm}$)의 고속관입 맨드렐에 대한 원형, 직사각형 및 정사각형의 맨드렐에 대한 각 d_s/d_m 값의 평균치는 양산시료에서 각각 3.08, 3.62, 3.92를 나타냈으며, 포함시료는 각각 3.10, 3.18, 3.36을 나타냈다. 따라서, 원형이 상대적으로 적은 스미어 존을 나타내어 가장 유리한 맨드렐 형상임을 알 수 있다. 또한, 자연함수비가 높은 지반의 경우에는 맨드렐 형상이 상대적으로 작게 영향을 미침을 알았다. 그림 8의 (a), (b)는 맨드렐단면 크기에 대한 스미어 존의 범위(d_s/d_m)의 관계를 도식화하여 나타내며 맨드렐 직경이 클수록 그 주변지반의 소성변형이 작게 발생되어 맨드렐 직경과 스미어 존의 비(d_s/d_m)가 감소하는 것을



(a) 관입속도 : 150mm/sec

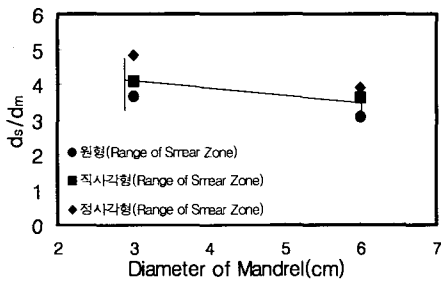


(b) 관입속도 : 2mm/sec

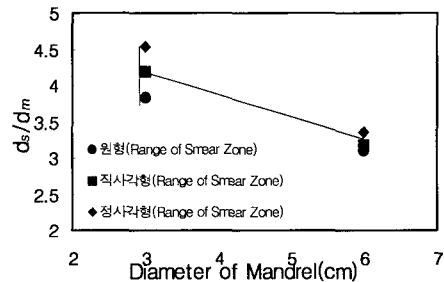
그림 7. 맨드렐 주위의 등강도 곡선(원형, $d=6\text{cm}$, 양산시료)

표 3. 맨드릴 형상, 규격 및 관입속도에 따른 스미어 존

맨드릴 형상		속도	양산시료		포항시료	
			$d_m(cm)$	d_s/d_m	$d_m(cm)$	d_s/d_m
원형	소형	고속	3	3.67	3	3.83
	대형	고속	6	3.08	6	3.10
저속		2.83		3.42		
직사각형	소형	고속	2.3	4.10	2.3	4.20
	대형	고속	4.6	3.62	4.6	3.18
저속		3.45		3.47		
정사각형	소형	고속	1.33	4.63	1.33	4.54
	대형	고속	2.66	3.92	2.66	3.36
저속		3.68		3.52		



(a) 양산시료



(b) 포항시료

그림 8. 맨드릴 환산직경(d_m)과 스미어 존 직경의 비(d_s/d_m)

알 수가 있다.

이 결과는 김(1997)등에 의해 수행된 시험결과와 상반되는 경향을 나타내는 것이 주목된다. 이는 맨드릴의 직경이 클수록 상대적으로 큰 주장을 가지고 지반의 변위가 발생하기 때문에 상대적인 측방구속이 증가함에 기인하여 맨드릴 직경에 대한 교란범위의 비가 다소 감소하는 현상으로 판단된다. 맨드릴 직경이 증가할수록 d_s/d_m 이 감소하는 본 결과는 소형맨드릴에 의한 관측결과이므로 Bangkok 현장의 압밀기간 실측치를 역해석하여 $d_s/d_m=2$ 가 합당하다는 Bergado et al.(1991)의 주장에 더욱 합리적으로 근접할 것으로 사료된다. 맨드릴 직경과 스미어 존의 직경의 비에 관한 구체적인 내용은 향후 현장시험결과의 보고 시에 실내 시험과 현장시험결과를 비교하여 구체적으로 제시할 예정이다.

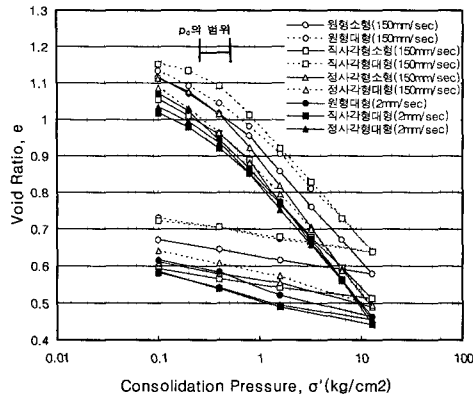
3.2 압밀특성변화

그림 9의 (a), (b)는 양산시료를 대상으로 맨드릴의 관입에 따른 교란의 영향을 받은 부분과 불교란 시료에 대한 $e \sim \log \sigma'$ 관계도를 각각 나타낸다. 교란영역의 시

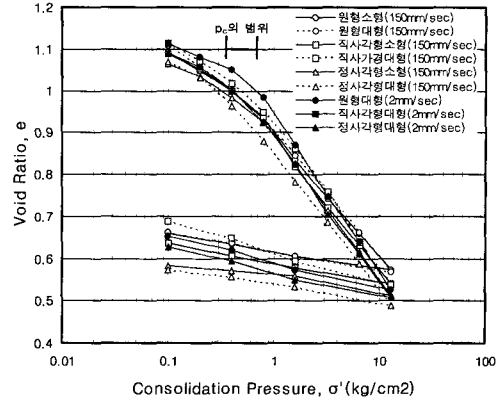
료는 불교란영역에 비하여 선형압밀하중이 감소하고 압축지수도 다소 감소한 경향을 나타냈다.

그림 10의 (a), (b)에는 양산시료를 대상으로 교란영역과 불교란 영역에서 채취한 시료에 대한 압밀계수와 압밀압력의 관계를 각각 나타낸다. 시료채취 심도가 GL-2m인 매립층인 영항 및 불교란 영역의 압밀압력과 압밀계수의 관계곡선이 교란된 특성을 내포하고있어 시료채취 및 운반과정에서의 교란발생에 다소간의 의문이 있었다. 그러나, 일반적인 현장의 상재하중 값인 $0.2 \sim 3.2 \text{kgf/cm}^2$ 의 압밀압력에서 편차가 큰 값을 제거하고 대체적인 값을 평가하면, 불교란시료의 압밀계수가 교란시료에 비하여 약간 큰 값을 나타내고 시료간의 분산의 폭이 상대적으로 좁게 나타났다.

표 4는 양산시료를 대상으로 관입속도 150mm/sec인 경우의 맨드릴의 규격 및 형상별 교란(A)과 불교란(B) 영역의 압밀계수와 투수계수 및 k_v/k_h 비, c_{hv}/c_h 비를 각각 나타냈다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 맨드릴 형상에 대해서는 원형이 $d_s/d_m=3.08$ 로 적은 값을 나타내어 가장 유리하며 정사각형보다는 직사각형이 유리하였다. 교란영역의 압밀계수 및 투수계수가 불교란영역에 비하여 낮고, 이들은 불교란 시료의 약 80%의 값을 나타냈다.

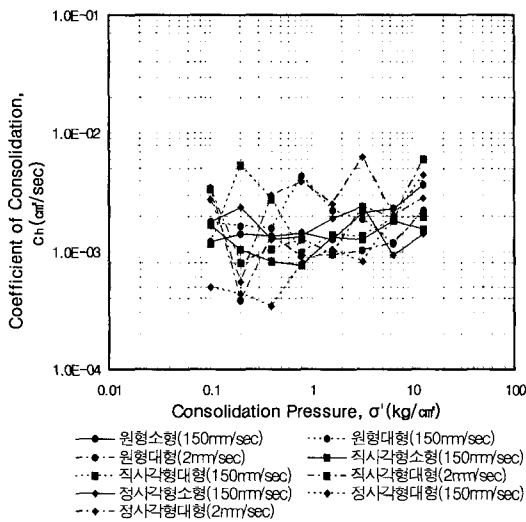


(a) 교란영역

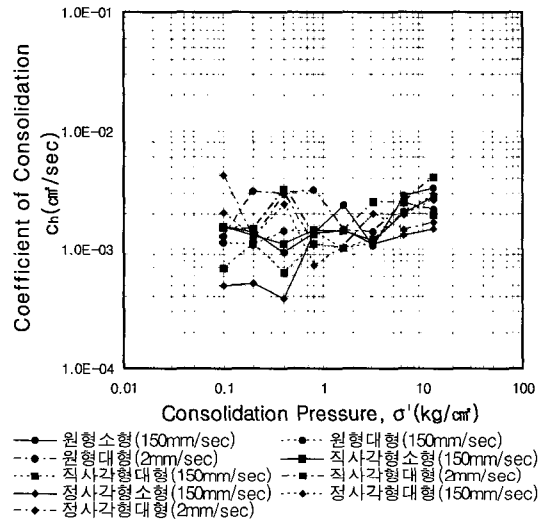


(b) 불교란 영역

그림 9. 압밀시험결과(e-log σ')



(a) 교란영역



(b) 불교란 영역

그림 10. 압밀계수(c_h)와 압밀압력(σ')의 관계

표 4. 맨드릴 형상별 교란, 불교란 시료의 투수계수 및 압밀계수비

구분	맨드릴 형상, 규격	관입속도 (mm/sec)	d_s/d_m	c_h (cm ² /sec)	k_h (cm/sec)	A/B (c_h)	A/B (k_h)
A (교란점토)	원형, 대형	150	3.08	1.7×10^{-3}	1.5×10^{-7}	0.81	0.83
	직사각형, 대형	150	3.62	1.4×10^{-3}	1.3×10^{-7}	0.82	0.8
	정사각형, 대형	150	3.92	1.3×10^{-3}	1.1×10^{-7}	0.87	0.73
B (불교란 점토)	원형, 대형	150	3.08	2.1×10^{-3}	1.8×10^{-7}	1	1
	직사각형, 대형	150	3.62	1.7×10^{-3}	1.6×10^{-7}	1	1
	정사각형, 대형	150	3.92	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-7}	1	1

그림 11에는 양산시료에 대하여 맨드릴 형상, 규격 및 관입속도 등에 의한 $d_s/d_m \sim c_h$ 의 관계를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 소형맨드릴을 이용한 경우 교란영역의 압밀계수가 상대적으로 크게 저하되며, 관입속도가 빠를수록 스미어 존이 넓어지며 압밀계수의 저하도

크게 나타났다. 그림 12에는 그림 11과 같은 변화요인에 대해서 $d_s/d_m \sim k_h$ 의 관계를 나타내며, 이 특성은 그림 11에서 나타난 압밀계수 특성과 거의 유사한 것을 알 수 있다.

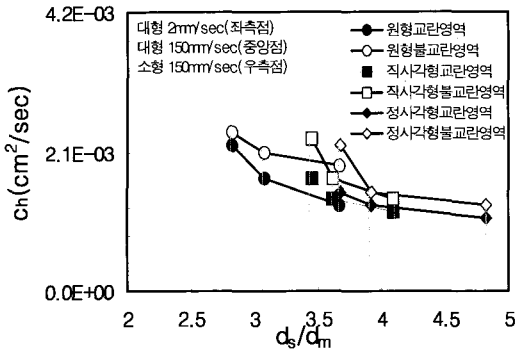


그림 11. 압밀시험에 따른 스미어 영향 및 C_h 와의 관계

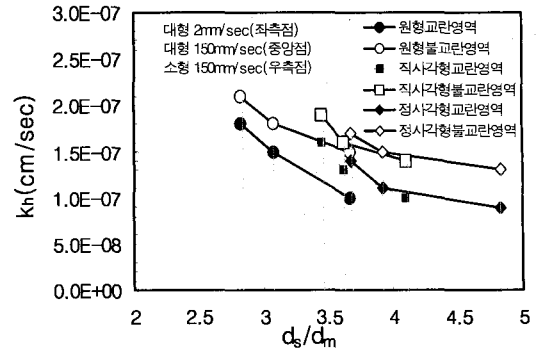


그림 12. 압밀시험에 따른 스미어 영향과 k_h 와의 관계

3.3 강도특성변화

그림 13에는 정사각형($A \times B = 1.33 \times 2.66 \text{cm}$) 및 직사각형($A \times B = 4.6 \text{cm} \times 2.3 \text{cm}$) 맨드렐을 이용하여 실내 스미어 존 시험을 실시한 이후 교란영역과 불교란 영역에서 시료를 채취하여 일축압축강도 시험을 실시한 결과를 나타낸다. 또한, 시험 후 모든 시료를 대상으로 예민비(s_u) 측정을 위한 완전교란 시료의 일축압축 시험 결과를 같이 나타낸다. 두 종류의 시험 결과 교란영역의 일축압축강도(q_{us})는 불교란 영역 값(q_{un})의 약 60~72%를 나타내고, 완전교란 시료의 q_u 치를 축변형율 20%에 대해서 취한 경우 q_{ur} 에 대해서 q_{us} 는 약 3배의 값을 나타냄을 알았다. 교란영역과 불교란 영역간에 압밀특성 및 강도특성이 크게 차이가 나지 않는 주된 이유는 시료를 채취한 지반이 매립지반으로 GL-2m 정도의 상부 토층에 의해 형성된 지반이므로 시간효과(Aging effect)에 의한 고결작용(Cementation)이 충분히 발생되지 않은 것으로 판단된다. 참고로 양산시료의 예민비(q_{ur}/q_{un})는 약 5이다. 포항시료의 자연함수비가 양산시료 보다 약 4배 높으므로 양산시료보다 낮은 강도특성을 나타냈다.

그림 14는 포항시료를 대상으로 일축압축시험에 의한 이격거리와 일축압축강도(q_u)의 관계를 정규화시켜

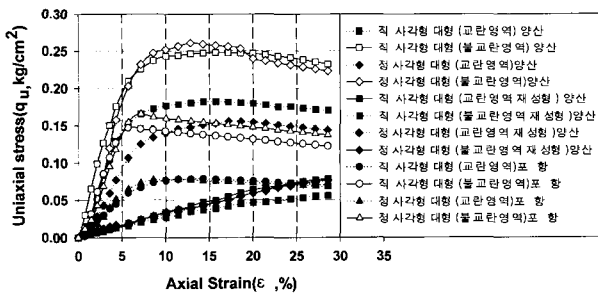


그림 13. 맨드렐 형상에 의한 일축압축강도

나타냈다. 맨드렐로부터 12cm 이격된 곳은 교란의 발생이 없다고 판단하여 이 점의 q_u 를 기준으로 하였다. 전체적으로 볼 때 맨드렐과 인접한 부분의 강도보다 맨드렐로부터 떨어진 거리가 증가할수록 강도의 증가가 명확하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 교란영역의 강도는 불교란 영역의 강도의 약 50~90%의 값을 보이고 있다. 또한, 포항시료는 교란영역과 불교란 영역의 비교에서 강도차이는 명확하게 나타나고 있다.

4. 결론

연약한 점토지반 개량을 위하여 버티컬드레인 타설을 위한 맨드렐관입에 따른 스미어 존의 정확한 값을 측정하는 것은 압밀기간의 정확한 산정을 위하여 매우 중요한 공학적 의미를 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 실내시험을 통하여, 맨드렐의 직경, 형상 및 관입속도에 따른 스미어 존의 범위를 측정하고 스미어 존 내부토의 강도와 압밀특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 양산지구의 저소성 점토(CL)와 포항지역의 고소성 유기질토(OH) 지반을 대상으로 스미어 존을 실내시험으로 파악한 결과, 맨드렐 사이즈가 클수록 맨드

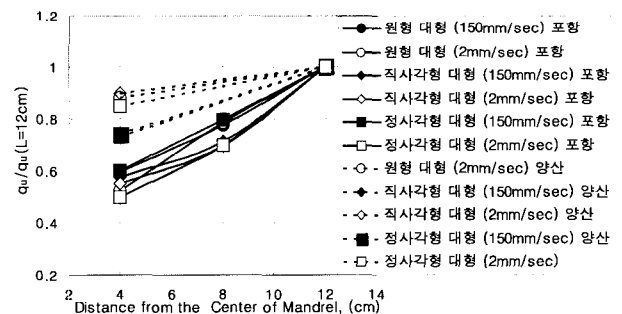


그림 14. 이격거리와 $q_u/q_u(L=12\text{cm})$ 의 관계

렐 환산 직경에 대한 스미어 존의 직경비(d_s/d_m)가 감소하였다. 맨드렐 형상은 원형, 직사각형, 정사각형 순으로 적은 스미어 존을 나타냈으며, OH지반의 경우는 CL지반에 비하여 맨드렐 형상의 영향이 적게 나타났다.

- (2) CL지반의 경우는 관입속도가 느릴수록, OH지반의 경우는 빠를수록 스미어 존이 작게 형성됨을 알았다. 그러나, 스미어 존의 형성에 지반의 자연함수비는 큰 영향을 미치지 않음을 알았다.
- (3) 환산직경($d=6\text{cm}$)인 3종류의 맨드렐에 의하여 관입 속도 150mm/sec로 실내 스미어 존 시험을 수행한 결과, CL, OH지반의 d_s/d_m 은 각각 3.08~3.92, 3.10~3.36을 나타냈다.
- (4) 스미어 존의 강도, 압밀계수 및 투수계수는 맨드렐로부터 거리가 증가할수록 거의 직선적으로 증가하였다. 또한, 스미어 존의 일축압축강도(q_{ur})는 불교란 존의 약 50~90%를 나타냈고, 이 범위에서의 k_s/k_h 의 평균치는 0.76~0.86을 나타냈다.

감사의 글

본 논문의 작성을 위하여 실내실험 수행에 힘써 준 이창훈 군(현재 진성토건(주)근무)에게 심심한 고마움을 표합니다.

참고 문헌

1. 김수삼, 장연수, 고경환(1997), "스미어 존 형성과 투수성변화에 미치는 맨드렐의 영향에 관한 연구", *한국지반공학회지*, 제13권, 제5호, pp.45-57.
2. 尾上篤生(1991), "ドレーンのウェル・レジスタンスに関する基礎的研究", *清水建設研究報告別冊*, 第32号.
3. 三浦哲彦, 朴永穆, Madhav M.R.(1993), "ドレーンの排水性能に関する基礎的研究", *日本土木學會論文集*. No.481. III-25. pp. 31-40.
4. 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.
5. Bergado, D. T., Asakami, H., Alafaro, M. C., and Balasubramaniam, A. S.(1991), "Smear effect of vertical drains on soft Bangkok clay", *J. Soil Mech. Found. Engrg.*, ASCE, Vol.117, No.10, pp.1509-1529.
6. Madhav, M.R., Park Y.M., and Miura, N.(1993), "Modelling and Study of Smear Zones Around Band Shaped Drains", *Soil and Foundation*, Vol.33, No.4, pp.135-147.
7. Onoue, A.(1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.

(접수일자 2003. 7. 21, 심사완료일 2003. 12. 2)