

스미어존 형성과 투수성 변화에 미치는 멘드럴의 영향에 관한 연구

Study of the Influence of Mandrels on the Smear Zone and the
Variation of Permeability

김 수 삼*¹
Kim, Soo-Sam
장 연 수*²
Jang, Yeon-Soo
고 경 환*³
Koh, Kyung-Hwan

Abstract

In this paper the factors developing ground disturbance with the penetration of PDB mandrels are analysed by using field reconnaissance and laboratory test. In the laboratory test, the amount of smear zones around the PDB mandrels is compared with respect to the shape and the size of mandrels by penetrating model mandrels of various shapes into the reconstituted clay. The shapes of mandrels selected are circular, oval and rectangular. It was recognized from the field reconnaissance that the size and shape, driving techniques of mandrels, as well as the size and shape of anchor shoe could develop ground disturbance. The mandrels that would reduce the smear effect of clay is oval and rectangular shapes rather than circular one. It was found that the smear effect becomes smaller as the ratio of the long and short edge of the rectangular shape mandrel becomes larger.

요 지

본 논문에서는 국내 드레인재 타설현장조사와 모형 멘드럴 실내 타입시험을 통하여 배수재의 타입시 지반교란을 일으키는 영향요소에 대하여 분석하였다. 실내 시험에서는 재성형된 시료에 타입된 멘드럴에 의하여 발생한 스미어량을 멘드럴의 형태 등 지반조건을 달리하여 비교하였다. 사용된 모형멘드럴의 형태는 원형, 마름모형, 직사각형이었으며 직사각형의 경우는 장단변의 비율을 달리하여 실험하였다.

*1 정희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정희원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 조교수
*3 정희원, (주)삼성불산 기술연구소

현장 조사로부터는 멘드럴의 형태와 크기뿐만 아니라 앵커슈의 형태와 크기도 지반교란의 큰 요소임을 알 수 있었다. 멘드럴 타입에 의하여 발생하는 지반교란은 원형보다 마름모와 직사각형의 경우 적은 것으로 나타났고 직사각형 멘드럴의 경우 장단변의 비율이 클수록 지반교란효과가 더 줄어드는 것으로 나타났다.

Keywords : Plastic drain board, Mandrel, Smear zone, Disturbance

1. 서론

국내에 광범위하게 분포하고 있는 해성점토 연약지반과 최근 활발히 진행되고 있는 준설, 매립공사가 점차 대규모화되면서 연약·매립지반의 개량 및 강도증진을 위하여 연직드레인공법이 널리 사용되고 있다. 이러한 연직배수공법의 재료로서 샌드드레인, 팩드레인, 페이퍼 드레인 등의 배수재가 널리 적용되고 있는데, 그 동안 주류를 이루어 왔던 샌드드레인의 사용은 주재료인 모래의 한정된 공급량과 비용문제 등에 의해 최근에는 플라스틱 코어를 직물섬유로 감싼 밴드 형태의 PD (Plastic-Board Drain)로서 점차 대체되고 있다.

PD재를 현장지반 내로 타설하기 위해서는 멘드럴에 의한 강제 관입방법이 일반적으로 사용되고 있는데 관입시 멘드럴의 주변지반에 교란과 전단의 영향을 미치게 되므로써, 강도의 저하, 투수계수의 감소 등 그 구조적인 특성과 함께 배수특성이 현저히 달라지게 된다.

국내에서는 아직까지는 이러한 교란영역을 고려하여 설계에 반영하지 않고 있으며, 따라서 설계시의 압밀시간 예측치와 실측치간에 차이가 발생하는 등의 문제가 발생하게 된다. 또한 관련분야의 연구성과를 볼 때 지금까지는 실제의 교란범위나 정도를 파악하기 위한 연구보다는 단지 경험적이거나, 기하학적인 예측방법에 의해 지반교란 특성을 고려하는 식을 제시하는 것들이 대부분이었다. 국외의 경우는 스미어존의 범위와 스미어존내에서의 투수성 및 압밀특성의 변화 등을 조사하는 등의 연구가 최근에 들어서 진행되고 있다.

본 논문에서는 국내 드레인재 타설현장조사와 모형 멘드럴 실내 타입시험을 통하여 배수재의 타입시 지반교란을 일으키는 영향요소에 대하여 분석하였다. 실내 시험에서는 재성형된 시료에 타입된 멘드럴에 의하여 발생한 스미어량을 멘드럴의 형태 등 지반조건을 달리하여 비교하였다. 사용된 모형멘드럴의 형태는 원형, 마름모형, 직사각형이었으며 직사각형의 경우는 장단변의 비율을 달리하여 실험하였다. 또한, 표준압밀시험을 통하여 교란의 영향을 조사하였고 교란 및 비교란 시료에 대한 투수시험을 실시하여 스미어존에서의 투수계수변화를 파악하였다.

2. 이론 및 국내 현장 현황조사

2.1 스미어존의 발생범위 및 투수계수에 미치는 영향에 관한 이론 고찰

Jamiolkowski (1981)는 교란지역의 직경을 cone 타입시 나타나는 유효연직응력과 이에 의해 발생하는 초기과잉간극수압이 같게 나타나는 수평거리를 잠정적으로 식(1)과 같이 규정하였다.

$$d_s = \frac{(5 \sim 6)d_m}{2} \quad (1)$$

여기서, d_s = 스미어존의 직경, d_m = 멘드럴 직경

Hansbo(1979)는 압밀침하의 예측값과 측정값을 비교하고, Holtz 등 (1991)의 연구에 기초하여 교란지역의 직경을 멘드럴 직경의 2배로 사용하는 것이 보다 나은 예측값을 보임을 나타내고, 다음 식과 같이 제안하였다

$$d_s = 2d_m \quad (2)$$

이러한 제안식은 Bergado 등(1991)이 재구성시료에 대하여 실시한 시험에 의해 확인된 바 있고, 이로부터 멘드럴 또는 Sand Drain의 직경이 커질 수록 스미어존의 영향이 증가하는 것으로 보고하고 있다. Bergado 등(1991)은 Full Scale 현장 멘드럴 관입시험을 실시하여 소형 멘드럴 사용지역과 대형 멘드럴 사용지역 중 대형 멘드럴 사용지역의 침하량이 소형에 비해 적은 것으로 나타나 이를 스미어의 영향으로 보고한 바 있다.

국내의 경우 박병기 등(1985)은 $D_s/D_m=1.5$ 로 가정하여 Barron식에 Modified Cam Clay 모델을 결합한 유한요소프로그램을 사용하여 Sand Drain 공법에서 스미어존을 고려했을 경우와 고려치 않았을 경우의 결과를 비교, 교란의 영향을 고려한 경우가 그렇지 않을 경우에 비해 압밀이 지연되고, 측방변위가 스미어의 정도가 클 수록 증가함을 보여 멘드럴 타입 등에 의하여 형성된 지반교란의 정도가 Sand Drain의 지반변형거동에 큰 영향을 미치는 중요한 요소임을 제안하였다.

이상의 연구는 스미어존의 범위를 멘드럴의 직경과의 기하학적 관계로부터 유추하는 방법을 사용하고 있으며 실제 멘드럴 타입에 의한 스미어존의 범위를 직접적이고 정량적인 방법으로 구하는 방법은 아니다. 따라서 현장에서의 스미어존의 범위가 이와 다를 경우 설계치와 실측치가 상이해지는 결과를 초래할 수 있다.

이에 대하여 朴永穆(1994)은 일본 Ariake 점토의 불교란시료와 재압밀시료를 대상으로 원형 멘드럴의 타입에 의한 스미어존의 범위를 2차원과 3차원적인 실내시험을 실시하여 스미어존의 범위를 육안관측하고 재압밀시료의 경우 스미어존의 직경(d_s)과 멘드럴의 직경(d_m)과의 관계로 $d_s=2.0\sim 2.5d_m$, 불교란시료의 경우 $d_s=2.5\sim 3.0d_m$ 의 범위를 제시하였다. 또한 소형 포켓 콘을 사용하여 교란영역과 교란의

영향이 없는 부분의 콘지수에 대한 비(q_{cs}/q_{co})가 0.75이하인 경우를 스미어존으로 구분하는 방법을 제안하고 이를 현장시험을 통하여 확인한 바 있으나, 멘드럴 형태에 의한 영향은 고려하지 않았다.

기존의 제시된 토층구조의 연구에 의하면 흙형성당시의 조건 또는 입자배열 및 결합 등의 특성 때문에 비교란 상태 지반의 수평투수계수와 수직투수계수의 비(k_h/k_v)는 매우 큰 것으로 조사되고 있다.

그러나 멘드럴이 타입되면서 멘드럴에 의한 마찰력과 물리적인 원지반에 관입된 멘드럴의 면적만큼 지반토의 수평방향의 이동 또는 변위가 발생하고, 이에 따라 교란된 지반의 투수계수는 상당한 변화를 겪게 되고, 배수의 역할을 담당하는 지반의 투수성이 현저히 감소하게 된다.

Bergado 등 (1991)은 멘드럴을 재구성시료에 타입시킨 후 멘드럴 부근에서 외측으로 수개의 샘플을 채취하여 표준압밀시험을 통하여

\sqrt{t} 법에 의한 투수계수를 구하고, 유효연직압력에 따른 수직투수계수와 스미어존의 투수계수 비 k_v/k_v 의 관계를 나타내었으며 유효연직압력 증가에 따라 교란지역의 투수계수는 수직투수계수에 접근한다는 Hansbo (1979)의 연구와 유사한 결론을 얻은 바 있다.

2.2 멘드럴의 국내 적용 현황조사

지반교란에 영향을 미치는 멘드럴의 영향조사를 위하여 실제로 PD재를 이용한 연직배수 공법이 시공되고 있는 현장을 방문하여 멘드럴의 국내 현장 적용상황을 조사하였다. 국내 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 멘드럴의 형태는 주로 원형, 직사각형, 마름모형의 형태를 채택하고 있으며(Fig. 1 참조), 멘드럴 선단부에 붙이는 앵커 슈는 멘드럴보다 단면적이 다소 큰 직사각형 플레이트를 많이 사용하고 있다(Fig. 2).

일반적으로 앵커슈의 단면적을 적게할 경우는 배수재를 저부에 고정시키기 어렵고 멘드럴을 인발할때 함께 따라 올라오거나, 멘드럴이 폐색되는 문제가 발생하므로 어느 정도의 앵커슈 단면적이 확보되어 배수재가 지반에 견고히 고정되어야 제대로 역할을 수행할 수 있다. 그러나 직사각형 플레이트 앵커의 경우 멘드럴보다 크기가 큰 경우가 많아 지반 교란을 많이 일으키게 되므로 교란효과와 경비를 최소화하

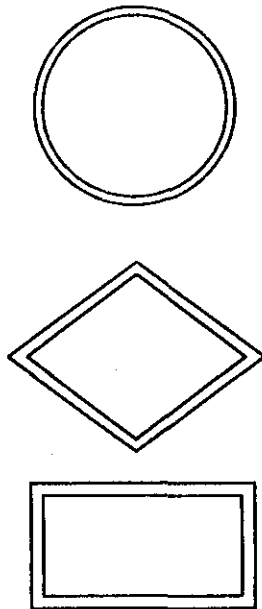


그림 1. 대표적인 멘드럴의 단면형태

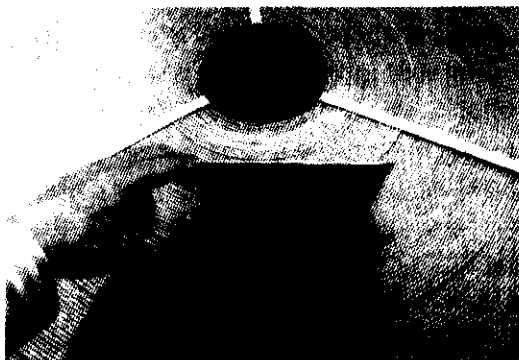


그림 2. 현장에서 사용되는 앵커슈

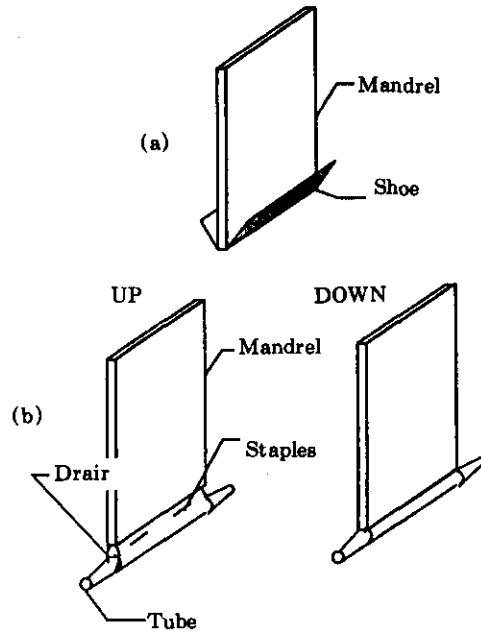


그림 3. 멘드럴에 사용되는 탈착식 shoe

면서 앵커능이 좋은 형태의 앵커로 교체할 필요가 있다. 국외의 경우 사용되는 앵커 슈는 Fig. 3과 같은 형태로 선단폐색을 막기위해 선단부에 waterjet를 사용하기도 한다.

지반교란에 영향을 미치는 또 하나의 인자로 멘드럴 타입장비의 종류를 들 수가 있는데 한국 배수재 타설 현장의 경우 진동 해머 방식(상하 진동 방식)으로 원형 멘드럴을 타입하는 경우(Fig. 4)와 유압 모타식(등속 타입 방식)으로 마름모형 멘드럴을 삽입하는 방식(Fig. 5)을 채택하고 있었다.

이러한 타설장비는 대부분 크레인 방식의 트랙에 실려서 현장에 투입되며 일반적으로 한번에 같은 속도로 삽입하는 유압 모타식이 시공속도가 빠르고 진동이 적어 교란이 적으나 시공 중에 장애물이 있으면 쉽게 처리하기 어려운 단점이 있다. 반면에 진동 해머 방식은 시공속도가 느리고 지반교란을 많이 일으키는 편이지만 장애물이 있어도 어느 정도 확실히 목표지점까지 배수재를 설치할 수 있는 장점이 있

었다. 이러한 멘드럴을 타입하는 장비는 수직으로 높게 뻗어 있어서 이것을 고정시키는 것이 매우 중요하다.

국내 현장에서 원형 멘드럴은 진동을 이용한 시공장비와 함께 많이 사용하고 유압식에서는 3가지 형태의 멘드럴을 모두 사용할 수 있으나

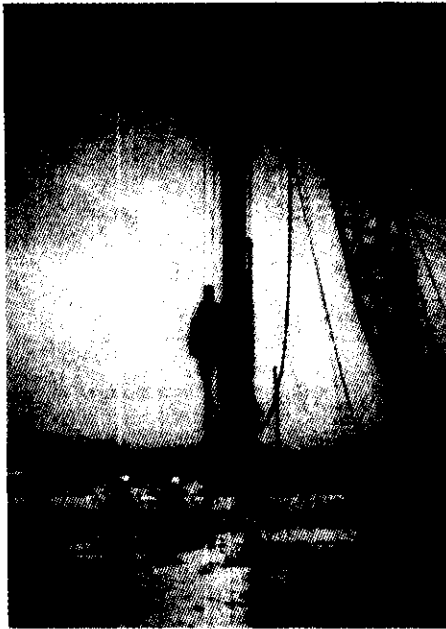


그림 4. 진동 해머식 (원형 멘드럴)

주로 직사각형과 마름모형을 사용하고 있다. 조사결과 교란의 대부분이 멘드럴의 크기와 형상, 타입방식, 앵커슈 등에 의해 영향을 받으며, 이상적인 멘드럴은 멘드럴의 단면이 최소화되면서 동시에 멘드럴 자체의 충분한 강도가 요구되는 문제를 해결할 필요가 있었다.



그림 5. 유압 모터식 드레인 타설장면

3. 실험

3.1 스미어존 범위산정시험

3.1.1 실험기 개요

현장의 배수재 타입방식을 모형화하기 위하여 Fig. 6과 같은 스미어존 모형시험기를 제작하여 시험을 시행하였다. 본 장비는 스미어존 범위산정시험기, 멘드럴타입기기, 멘드럴의 세부분으로 구성되고, 멘드럴 타입기기의 타입속도는 $1\text{mm}/\text{sec} \sim 6.5\text{mm}/\text{sec}$ 의 범위로 조절가

능하고, 전동모터에 의해 구동된다(Fig. 7 참조).

멘드럴의 형태는 멘드럴의 크기에 의한 영향을 비교하기 위한 직경 1, 3, 5cm의 원통형으로 된 단부가 막혀있는 Closed Type의 3가지의 멘드럴과 마름모꼴형태와 직사각형 형태 각 3가지로 모두 7가지의 형태로 제작하여 시험에 사용하였는데 본 시험에서 사용되는 멘드럴의 크기와 형상은 현장에서 사용되는 실제 멘드럴의 형태를 참고하여 단순화함으로서 결정한 것

이다. 마름모형과 직사각형 멘드럴은 각각 그 환산단면적이 3cm 원형 멘드럴의 단면적과 동일하게 제작함으로써 형태상의 비교가 가능하도록 제작하였고, 직사각형 멘드럴의 경우 3cm 원형 멘드럴과 같은 단면적인 35mm×20mm 것과 35mm×14mm의 단면적을 갖는 멘드럴과 중장비가 투입될 수 없는 초연약지반에서 주로 사용되는 나타입방식의 경우를 고려하여 35mm×3mm의 멘드럴을 제작, 시험에 사용함으로써 두께의 변화에 따른 교란발생의 정도를 조사하고자 하였다.

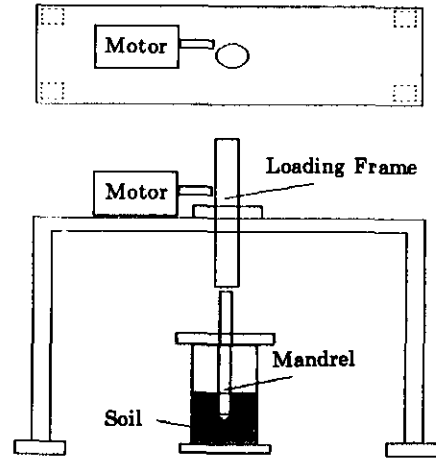


그림 6. 스미어존 시험기

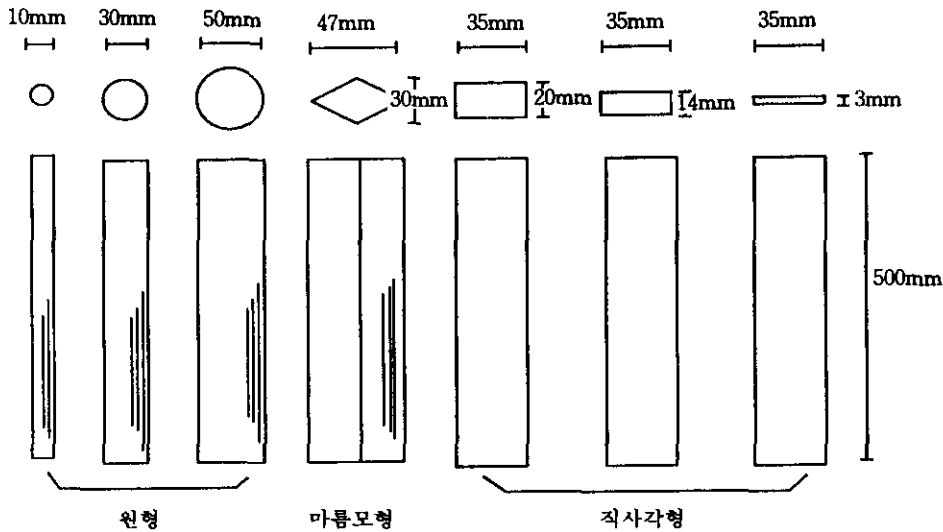


그림 7. 본 실험에서 사용된 멘드럴의 형태

3.1.2 시험 준비 및 방법

멘드럴의 타입에 의한 시료의 소성영역, 즉 교란정도를 육안관측하기 위하여 재조성된 시료를 이용, 공시체를 일정한 두께로 절단하고 각 절단 경계부에 일반적으로 구할 수 있는 흰색의 국수를 깔아서 Fig. 8과 같이 각 경계간의 구분이 가능하도록 하였다. 이때 건조된 상태의 국수가 경계 주변 시료의 물을 흡수함에

따라 함수비가 변하게 될 것에 대비하여 약간의 물을 살포하여 높이 20cm 미만의 공시체를 준비하였다.

시험방법은 스미어존 시험기내에 공시체가 들어있는 원통형 Cell을 위치시킨 후 시험에 사용될 멘드럴의 형태를 결정하여 타입기에 부착시켜 Cell의 중앙에 맞춘 다음 멘드럴을 소정의 관입속도로 시료내에 정적관입시켰다. 관입속도는 실제 현장 타입속도와 현장의 지반조

전에 따라 다르나 본 연구에서는 사용되는 멘드럴 및 시료의 크기 등을 고려하여 1.5~5mm/sec의 속도를 적용하였다. 이렇게 관입된 멘드럴을 공시체 내에 정착시킨 상태에서 Cell을 해체하고 시료의 외곽에서 부터 중앙부로 단면위치를 옮겨가며 시료를 수직으로 절단하여 멘드럴로부터의 거리에 따른 시료의 타입에 의한 교란정도를 육안관찰하고 투명한 플라스틱 필름을 이용하여 시료위에 올려놓고 교란된 영역을 흰 경계부분을 따라서 정확히 그린 후 교란영역 분석에 이용하였다.

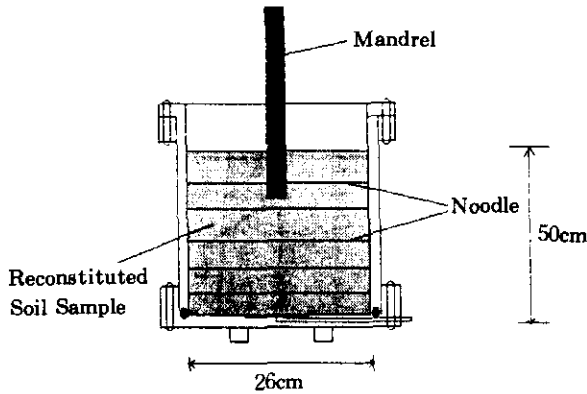


그림 8. 스미어존 범위산정을 위한 시료준비방법

3.1.3 시험 조건

멘드럴의 타입에 따른 스미어존의 특성을 규명하기 위하여 다음의 Table 1과 같이 재성형

Table 1. 시험 조건의 구분

구분 조건		공통 조건	
시료성형 압밀압력	0.5kg/cm ²	타입속도 : 1.5mm/sec 멘드럴 형태 : 3cm 원형 Closed Type	
	0.8kg/cm ²		
	1.2kg/cm ²		
멘드럴 크기	1cm	타입속도 : 1.5mm/sec 멘드럴 형태 : 원형 Closed Type	
	3cm		
	5cm		
멘드럴 형태	마름모꼴 멘드럴	타입속도 : 1.5mm/sec 지반조건 : 0.8kg/cm ²	
	직사각형 멘드럴		두께 3mm
			두께 14mm
			두께 20mm

시료의 압밀압력, 멘드럴 크기, 형태 등의 조건으로 구분하여 시험을 실시하였다.

3.2 수평투수시험

스미어존에 의한 수평방향 투수계수의 변화를 파악하기 위하여, 본 논문에서는 스미어존의 투수계수를 멘드럴이 타입된 공시체로부터 공시체 외곽에서 멘드럴까지 수평방향으로 Fig. 9와 같이 각 3부분으로 나누어 샘플링하여 정수위 투수시험으로 투수계수를 측정하였다. 멘드럴인근의 A시료는 스미어존 시험결과에서 스미어존의 범위내에 있는 교란된 시료이고 이와 반대로 C시료는 스미어존범위에서 충분히 떨어진 교란의 영향을 받지 않은 시료이다. 시료를 수평방향으로 샘플링하여 투수시험을 실시하는 경우 시료를 재조성하여 제작할때의 지반조건과 동일한 상재압으로 24시간동안 압밀시키면서 0.5kg/cm²의 배압을 가하여 포화시킨 후 시료 상부에 0.5kg/cm²의 액압을 가하여 이로 인한 배수량 즉, 유출량과 배수시간을 측정함으로써 수평투수계수를 구하였다.

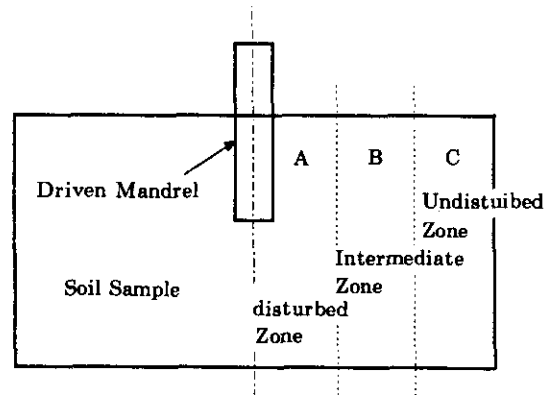


그림 9. 투수시험용 시료채취방법

4. 시험결과 및 분석

4.1 스미어존 시험

4.1.1 멘드럴의 크기

원형 멘드럴의 직경 즉, 크기의 변화에 따른 스미어존의 범위를 측정하기 위하여 각각 1, 3, 5cm의 직경 멘드럴을 사용하여 관입시킨 후 공시체의 중앙부를 절단하였다. 그 결과 멘드럴 주변의 지반은 멘드럴의 관입시 발생하는 마찰력과 관입시 원래 위치에 있던 흙이 밀려나가면서 하향으로 굴곡되는 경향을 보여주며, 상부흙은 인접부에서 횡방향 변위와 시험기의 측면부 구속에 따라 융기되는 성향을 보인다. 직경 5cm 멘드럴의 경우 밀려나가는 면적이 크기 때문에 지반의 융기 현상이 상당히 크게 발생하였다. 특히 공시체 상부면에서 멘드럴 주변 지반이 융기되면서 방사상의 균열 또한

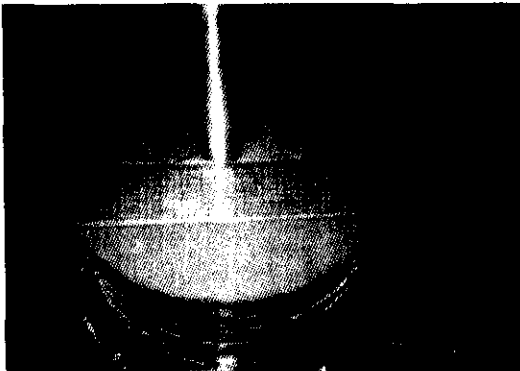


그림 10. 스미어존 시험시 발생된 균열의 예

발생되는 것이 관측되었고, 이러한 균열은 시료내부에서도 발견되었다. (Fig. 10 참조)

지반변위가 발생된 양상 중 멘드럴과 접한 부분의 하향변위와 더불어 상부도 주변부의 상향변위가 발생되는 평균적인 위치에서 영향범위를 측정하여 정리하면 Table 2에 나타낸 바와 같다.

또한 단면 크기에 대한 스미어존의 범위의 관계를 도식화하여 Fig. 11에 보였는데 직경이 커질수록 스미어존의 범위가 증가하여 그 주변지반의 소성변형이 크게 발생되는 것을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

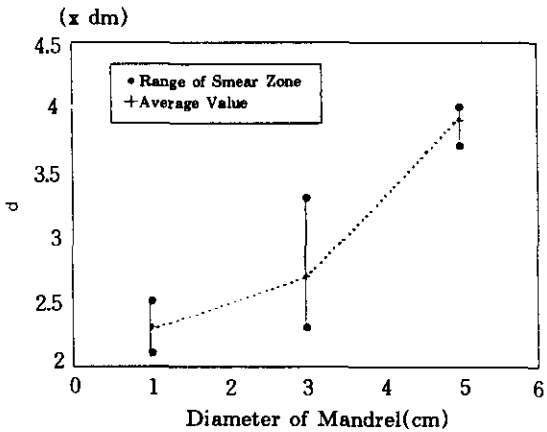


그림 11. 원형멘드럴의 등가직경(d_m)과 스미어존 등가직경(d_s)의 관계

4.1.2 시험시료의 압밀압력

시료의 상부에 가압하는 압력을 조절하여 각각 0.5, 0.8, 1.2kg/cm²의 압밀이력을 받은 시

Table 2. 멘드럴의 크기에 따른 스미어존의 직경(d_s)과 멘드럴 직경의 비(d_m)

멘드럴의 크기	d_s/d_m		합수비* (%)	비 고
	시험결과치	평균치		
직경 1cm 원형	2.1~2.5	2.3	40.3	-공시체 제작시의 하중조건 0.8kg/cm ² -타입속도 1.5mm/sec
직경 3cm 원형	2.3~3.3	2.7	39.1	-
직경 5cm 원형	3.7~4.0	3.9	39.0	-

* 시험완료 후 공시체로부터 측정된 합수비

료를 대상으로 3cm 원형멘드럴을 타입시키면 비교적 지반조건의 영향을 크게 받는 것으로 나타나고 있으며, 시료가 단단할 수록 스미어존의 범위는 커지는 경향을 보여준다.

Table 3에는 압밀압에 따른 스미어존 직경과 멘드럴 직경의 비율을 나타내었으며 Fig. 12는 시료의 재조성시 가압하중의 변화에 따른 스미어존의 변화 관계를 나타내었다.

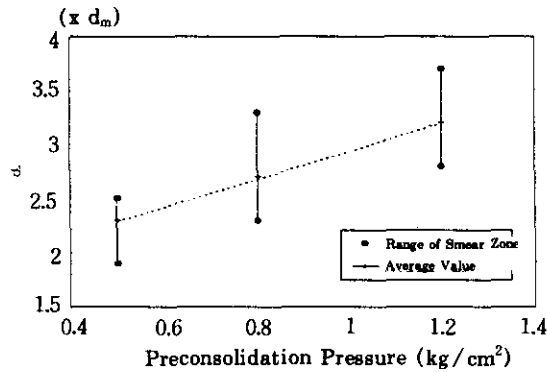


그림 12. 시료의 압밀하중변화에 따른 스미어존 범위의 변화

Table 3. 공시체의 응력이력 따른 스미어존 직경(d_s)과 멘드럴 직경의 비(d_m)

공시체 제작시 의 압밀압력	d_s/d_m		함수비* (%)	비 고
	시험결과치	평균치		
0.5kg/cm ²	1.9~2.5	2.3	44.8	-원형타입 -타입속도 1.5mm/sec
0.8kg/cm ²	2.3~3.3	2.7	39.1	-
1.2kg/cm ²	2.8~3.7	3.2	35.4	-

4.1.3 멘드럴 형태에 따른 스미어존의 영향

단면의 형상 변화에 의한 스미어존의 변위양상을 살펴보기 위하여 마름모꼴의 멘드럴과 직사각형의 멘드럴을 사용하여 스미어존시험을 실시하였다. 직교방향의 넓이가 다른 두 형상의 멘드럴에 의한 시험결과를 비교하기 위하여 긴 쪽을 장변, 짧은 쪽을 단변으로 구분, 스미어존 시험을 실시한 후 장변방향과 단변방향 그리고 장변과 단변의 중간방향을 절단한 뒤 소성변위가 발생한 양상을 측정하였다. 직사각형 멘드럴의 경우 그 단면 비율을 달리하여 멘드럴을 제작 시험한 경우도 장변, 단변, 중간변에 대하여 각 멘드럴 관입 후의 절단면을 관찰

하였다.

장변과 단변의 경우를 비교하면, 단변에 의한 스미어존 영향범위보다 장변의 경우가 크게 나타남을 보여주고, 중간방향은 대체적으로 이 두방향의 중간 값 또는 중간보다 약간 작은 값을 나타내고 있다. Fig. 13에 예시된 바와 같은 멘드럴의 형상, 교란된 타원형의 교란범위를 원형의 환산단면으로 바꾸어 표로 정리하면 Table 4와 같다.

그 결과 3cm원형 멘드럴의 경우보다 직사각형과 마름모형 경우가 적은 교란범위를 보여주며, 직사각형의 경우와 마름모꼴의 경우 서로 그다지 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났

다. 교란영역의 면적은 비교해 보면, 3cm 원형에 비해 마름모형과 직사각형의 경우가 그 교란 면적이 약 30% 정도 감소하는 것으로 나타나 원형의 경우보다 마름모형이나 직사각형의 경우가 드레인 타설시 효과적임을 알 수가 있다.

직사각형멘드럴의 경우 그 두께가 작아질 수록 교란범위는 현저하게 감소하는 것을 알 수 있으며, 그 감소율 또한 멘드럴의 형상을 변화하여 나타난 결과 감소율보다 큰 것을 알 수가 있다.

Table 4. 멘드럴의 형상에 따른 스미어존의 영향원 비교

멘드럴 종류	d_s/d_m	$Ad_s(\text{cm}^2)$	비 고	
3cm 원형	2.7	51.5	-공시체 제작사의 하중조건 $0.8\text{kg}/\text{cm}^2$ -타입속도 $1.5\text{mm}/\text{sec}$	
마름모꼴	2.3	36.5	-	
직사각형	두께 20mm	2.2	35.3	-
	두께 14mm	2.0	19.2	-
	두께 3mm	1.5	2.2	-

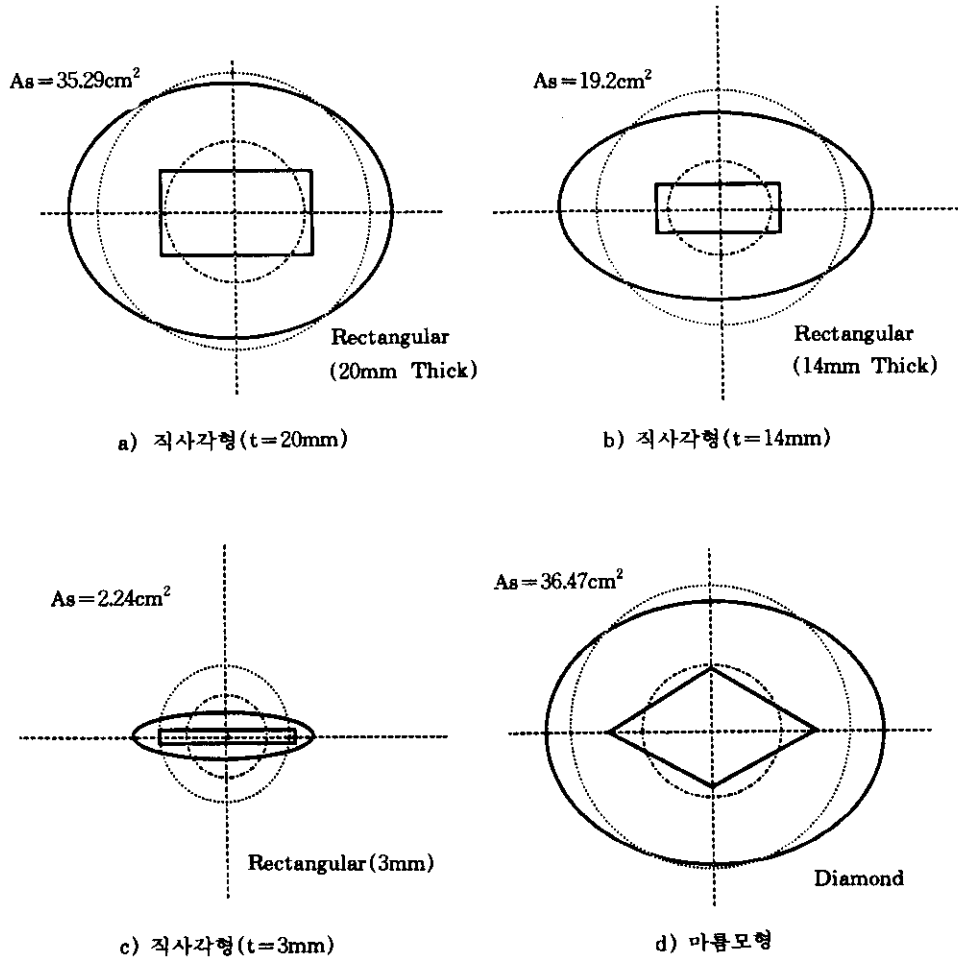


그림 13. 교란범위 및 환산결과

이를 원형멘드럴의 경우와 함께 Fig. 14에 나타내었는데 그림에서 점선은 직사각형 장단 변의 비율을 3으로 일정하게 한 상태에서 멘드럴 면적을 변화시켰을 경우 스미어존의 변화를 추측한 것이며, 직사각형 두께변화의 경우 두께를 변화시키며 면적을 줄여가며 스미어존 형성비율을 알아본 것이다. 이 세가지 곡선을 비교해 볼 때 멘드럴의 형상 뿐만 아니라 멘드럴의 폭을 줄임으로서도 그 스미어존의 영향범위를 줄일 수 있다는 사실을 알 수 있다.

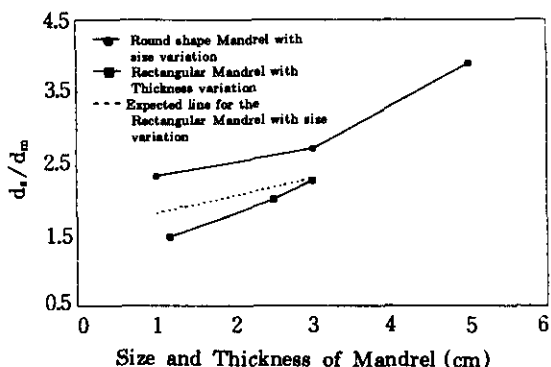


그림 14. 멘드럴의 형상 크기에 의한 스미어존의 변화

4.2 표준압밀시험결과

공시체내에 타입된 멘드럴의 측면부를 0으로 하였을 때 멘드럴에서 부터의 거리 0~2.5cm에서 수평방향으로 표준압밀시험으로 성형하고, 또 각각 2.5~5cm, 6.5~9cm에서 1개씩 성형하여 3개의 시험에 대하여 표준압밀시험을 실시한 결과 멘드럴에 인접한 시험을 A, 중간의 시험을 B, 그리고 외측의 교란의 영향을 받지 않은 것으로 판단되는 시험을 C 라고 할 때 이 3가지 시험의 시간에 따른 압축량은 Fig. 15에, $e-\log p'$ 곡선은 Fig. 16에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 교란지역의 시험은 비교란시험에 비하여 그 압축량이 크게 증가하며, 멘드럴로부터의 거리에 비례하여 압축량이 크게 감소하는 것을 알 수가 있다.

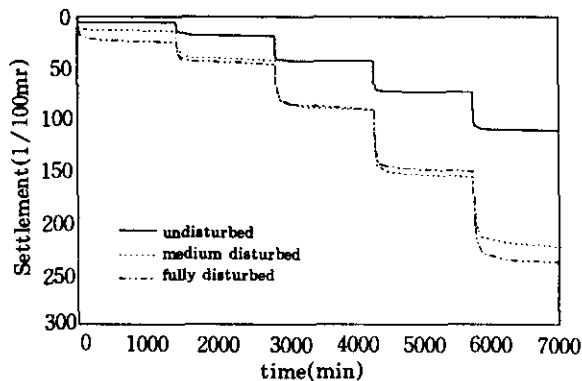


Fig 15. 멘드럴 주변과 비교란 지역의 압밀시험 결과 나타난 시간-압축량곡선

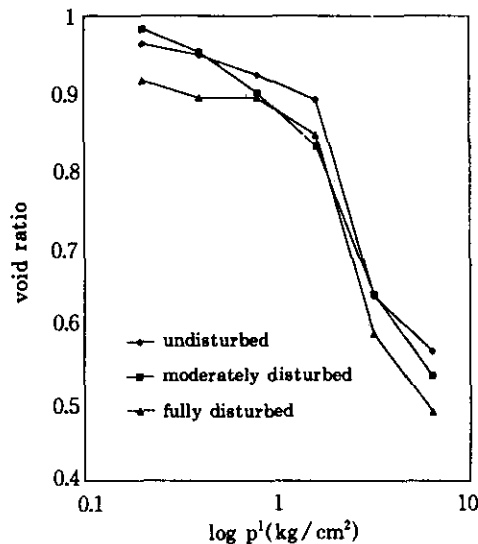


Fig 16. 멘드럴 주변과 비교란 지역의 압밀시험 결과 ($e-\log p'$ 곡선)

4.3 투수시험결과

투수시험을 위하여 멘드럴 측면부에서 시험의 가장 외측까지의 거리를 11cm로 놓고 시험을 멘드럴로부터의 거리 0~3cm, 3.5~6.5cm, 7~11cm 부분에서 채취하여 각각 A, B, C 시험이라고 하였다. 3cm원형 멘드럴의 관입 후 각 부분에서 시험을 수평방향으로 채취하여 투수시험을 실시한 결과 Table 6과 같이 변화됨을 알 수 있었다. 앞의 멘드럴 관입시험 결과에서

Table 5. 맨드럴의 거리에 따른 투수계수의 변화(합수비 $w=38.9\%$)

	연직투수계수 (k_v)	수평투수계수		
		A시료(cm/sec, k_{s1})	B시료(cm/sec)	C시료(cm/sec, k_{s2})
측정투수계수	4.7×10^{-4}	4.94×10^{-8}	6.02×10^{-8}	9.3×10^{-8}

볼 때 3cm원형 맨드럴의 경우 스미어존의 범위는 맨드럴 직경의 약 2.3~3.3(평균 2.7)배 정도였으므로 A 시료의 경우 완전히 교란된 지역의 시료로 간주되고, B시료의 경우 교란의 영향을 부분적으로 받았을 것으로 생각할 수 있으며, C시료의 경우는 교란의 영향이 없는 것으로 볼 때, 교란에 의해 투수계수는 약 1/2 정도 감소하는 것을 알 수가 있다. 또한, Bergado가 밝힌 바와 같이 교란지역의 수평투수계수는 비교란상태의 연직투수계수와 거의 동등한 값을 보여주어 본 연구에서도 그와 같은 경향을 보여줌을 알 수 있었다.

5. 결 론

연직배수재 타설현장 방문 및 여러 가지 맨드럴을 이용한 스미어존 시험과 투수시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 맨드럴을 이용한 연직배수재를 타설하는 국내 현장을 조사한 결과 맨드럴의 형태 이외에도 앵커슈의 크기 및 형태, 맨드럴 타입방식에 의해서도 지반교란에 미치는 영향이 크며, 이상적인 맨드럴은 맨드럴의 단면이 최소화되면서 동시에 맨드럴 자체의 충분한 강도가 요구된다는 것을 알 수 있었다.
2. 재생형점토시료에 대한 스미어존시험에서는 맨드럴 단면의 크기 변화에 따른 스미어존의 변화가 직경이 커질 수록 스미어존의 범위가 증가하며 단면이 증가할수록 그 주변 지반의 소성변형이 선형적으로 증가하는 경향을 보여준다. 또한, 스미어존은 비교적 지반조건의 영향을 크게 받아, 선형압력이 큰 시료일 수록 즉, 시료가 단단할 수록 그 스미어존의 범위는 커지는 것으로 나타났다.

3. 맨드럴의 형태와 스미어존의 크기 관계를 실험으로 규명한 결과 스미어존을 최소화할 수 있는 맨드럴의 형태는 원형보다 마름모형태와 직사각형 맨드럴이며 직사각형 맨드럴의 경우 장변과 단변의 비율이 클수록 스미어 효과가 작아지는 것으로 나타나고 있다.

4. 스미어존시험후 타입된 맨드럴로부터 떨어진 위치에 따라 채취한 시료에 대하여 표준압밀시험을 실시한 결과 교란지역의 시료는 비교란시료에 비하여 그 압축량이 크게 증가하며, 맨드럴로부터의 거리에 비례하여 압축량이 크게 감소함을 보여주었다.

5. 시료를 수평방향으로 샘플링하여 투수시험을 실시한 결과 비교란 지역의 투수계수보다 교란지역의 투수계수는 약 1/2정도 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 교란지역의 투수계수가 연직투수계수와 비슷하게 되어 기존의 스미어존의 수평투수계수를 연직투수계수로 산정하는 것에 유효함이 있음이 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박병기, 정진섭, 강병성, 이진수(1985), "연약지반 개량공법에 이용될 범용프로그램의 Sand Drain 공법에의 적용", 한국지반공학회지, Vol. 1, No. 2, pp. 17~25.
2. Akagi T. (1979), "Consolidation caused by Mandrel-driven Sand Drains", Proc. of 6th Asian Resional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Singapore, pp. 125~128.
3. Bergado, D. T. Asakami Hiroshi, Alfaro M. C.,

- and Balasubramaniam A. S. "A" (1991), "Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 10.
4. Hansbo S. (1979), "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains", Ground Engineering, 12, 5, pp. 16~25.
 5. Holtz, R. D. W., Lancellotta R., Jamiolkowski M. and Pedroni S. (1991), "Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance", CIRIA Ground Engineering Report: Ground Improvement, Butterworth Heinemann, pp. 10~30.
 6. Jamiolkowski, M. and Lancellotta R. (1981), "Consolidation by Vertical Drains-Uncertainties involved in Prediction of Settlement Rates", Panel Discussion, Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.
 7. 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", 博士學位論文, 佐賀大學大學院.

(접수일자 1997. 4. 4)