

## PVD 설치 및 지반교란의 분석을 위한 2차원 모형실험 시스템

## Two-dimensional Model Testing System for Analysis of PVD Installation and Soil Disturbance

김재현\* · 추연욱\*\* · 박현일\*\*\* · 김동수\*\*\*\*

Kim, Jae Hyun · Choo, Yun Wook · Park, Hyun-Il · Kim, Dong-Soo

## Abstract

In order to investigate the soil disturbance induced by anchor-shoe for PVD installation and the anchoring mechanism, a new two dimensional testing system was developed. By using the developed testing system, 1g and centrifuge model tests were performed, simulating the driving-retrieval process of both conventional symmetric anchor shoe and new asymmetric anchor shoe. Various size anchor-shoes were simulated and the results were compared. The images recorded during the installation were analyzed by image processing technique. The results of the image analysis presented the clay disturbance depending on the size and type of anchor shoe. In addition, from the retrieval process, the anchoring mechanism was revealed and the holding capacity was measured. As results, the size of anchor shoe influences the soil disturbance and holding capacity. The new asymmetric anchor shoe reduces the soil disturbance and improves anchoring performance.

**Keywords :** PVD, anchor shoe, asymmetric anchor shoe, smear zone, centrifuge test, anchoring mechanism

## 요 지

본 논문에서는 PVD의 설치를 위하여 사용되는 앵커슈에 의한 지반교란과 정착 메커니즘을 연구하기 위하여, 맨드렐-앵커슈의 관입과정과 인발과정을 모사하고, 시각화 할 수 있는 2차원 모형실험 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 활용하여, 기존 사각관형 앵커슈와 썸이 달린 비대칭 앵커슈의 관입과 인발 과정을 모사하는 1g 모형실험과 원심모형실험을 수행하였다. 앵커슈 크기 및 종류에 따라 지반교란과 앵커슈 정착 성능을 확인하기 위해 크기가 다른 기존 사각관형 앵커슈와 썸이 달린 비대칭 앵커슈의 설치과정을 모사하였다. 관입과정에서 촬영된 영상을 이미지 분석하여, 앵커슈의 크기 및 형태에 따른 점토의 교란을 시각화하고 분석하였다. 또한, 인발과정 모사를 통하여 앵커슈의 정착 메커니즘을 밝히고 인발시 정착력을 측정하여 정착 성능을 비교하였다. 그 결과, 앵커슈의 크기는 지반교란과 인발저항력 모두에 영향을 미치며, 비대칭 앵커슈가 기존의 앵커슈에 비해 지반교란 및 배수재 정착 성능을 향상시키는 것을 확인하였다.

**핵심용어 :** PVD, 앵커슈, 비대칭 앵커슈, 스미어 존, 원심모형실험, 정착

## 1. 서 론

PVD(Prefabricated Vertical Drain) 공법은 국·내외에서 널리 활용되는 연직배수공법 중 하나이며, 점성토 지반에 연직 방향으로 통수능이 높은 배수재를 설치해 토체내 간극수를 외부로 신속히 배출시켜 압밀을 촉진시키는 공법이다. 이때, 일반적으로 원지반의 수평압밀계수가 수직압밀계수에 비해 크기 때문에, 수평방향으로 간극수를 연직배수재를 통해 신속히 배출시켜 압밀을 촉진시킨다. PVD공법을 위한 배수재는 주로 통수능이 크면서, 유연한 소재를 사용하며, 맨드렐과 앵커슈를 이용하여 연직방향으로 지표면으로부터 목표 심도까지 일정속도로 관입시켜 설치한다. 이때, 맨드렐은 배

수재의 굽힘, 끊어짐과 같은 손상 없이 목표 심도까지 보호하여 역할을 한다. 앵커슈는 맨드렐이 지중으로 관입 될 때, 내부로 흙이 유입되어 발생하는 배수재의 파손을 막고, 설치 심도까지 도달 후, 인발하여 제거 할 때, 배수재를 연약지반 내에 적절하게 정착시키는 역할을 한다(그림 1).

맨드렐과 앵커슈를 이용한 배수재의 설치시 주변지반을 교란시킨다. 지반의 교란메커니즘은 그림 1과 같이, 맨드렐이 관입되면서 유발되는 주변지반의 압축 및 전단 파괴와, 맨드렐이 인발 될 때, 주변지반이 빈 공간으로 되메워지는 것에 기인한다고 보고된 바 있다(Hird 등, 2000). 이때, 교란된 영역을 스미어존(Smear zone)이라고 하며, 이 영역에서 원지반 대비 수평투수계수가 저하되어 압밀촉진을 지연시킨다

\*한국과학기술원 건설및환경공학과 박사과정 (E-mail : zlawogus@kaist.ac.kr)

\*\*정희원 · 교신저자 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 연구교수 (E-mail : ywchoo@kaist.ac.kr)

\*\*\*정희원 · (주)삼성물산 기술연구소 선임연구원 (E-mail : hyunil77.park@samsung.com)

\*\*\*\*정희원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과 교수 (E-mail : dskim@kaist.ac.kr)

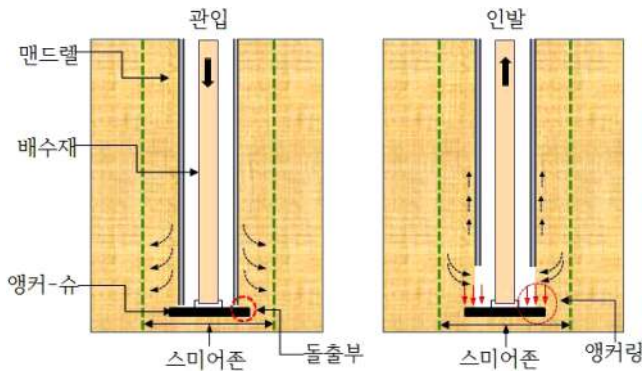


그림 1. 맨드렐과 앵커슈를 이용한 배수재의 설치 모식도

(Bergado 등, 1991; Hird와 Moseley, 2000; Sharma와 Xiao, 2000; Sathananthan 등, 2008; Weber 등, 2010). 따라서 스미어존(Smear zone)을 최소화 하는 것이 배수재를 설치한 지반의 압밀지연을 최소화하여, 연직배수공법의 성능을 향상시키는 방법이 된다.

스미어존은 맨드렐의 관입단면적, 관입속도 등에 영향을 받는다고 보고된 바 있다(Bergado 등, 1991; Hird 등, 2000). 따라서, 현업에서는 배수재 설치 중 발생하는 스미어존을 최소화하기 위해 배수재와 유사한 직사각형 맨드렐을 사용하고 있으며, 앵커슈도 맨드렐과 동일한 형태를 가지면서 크기가 맨드렐보다 약간 큰 단면적을 가지도록 제작되어 사용되고 있다(그림 2a). 그림 2a에 나타난 바와 같이 맨드렐 인발시, 앵커슈의 맨드렐 외부로 돌출된 부분이 점토지반 내부에서 앵커 역할을 하여 배수재를 원하는 설치 위치에 정착시키게 된다. 이 경우, 앵커슈의 크기가 전술한 바와 같이 항상 맨드렐에 비해 크기 때문에, 맨드렐 자체에 의한 교란

외에도 앵커슈에 의한 추가적인 교란이 예상된다. 그러나, 앵커슈로 인한 점토지반의 교란 원리 및 효과가 아직 명확히 밝혀져 있지 않아, 이에 대한 심도있는 연구가 필요한 실정이다.

압밀지연을 최소화하기 위해 현장 엔지니어의 판단에 의존하여 앵커슈의 크기를 가능한 최소화 하여 사용하고 있으나, 앵커슈의 크기를 축소하는 경우, 필요 정착력을 감소시켜 배수재가 목표심도에 설치되지 못하는 공상현상의 가능성이 높아진다. 따라서, 효과적으로 앵커슈의 크기를 축소하면서 공상현상을 없애기 위하여, 현업에서는 다양한 형상을 지닌 개량형 앵커슈가 개발되어 오고 있다. 하지만, 넓은 부지에 다량의 앵커슈를 적용해야 할 경우, 배수재 정착의 신뢰성, 경제성 및 시공용이성의 문제로 보편화 되지는 못하고 있는 실정이다.

최근 이러한 문제의 대안으로 비대칭 형태의 앵커슈를 개발하여 경제성 및 사용 편의성을 개선하는 앵커슈가 개발된 바 있다(박현일, 2010). 비대칭 앵커슈는 기존의 직사각형 앵커슈(그림 2a)와 달리, 그림 2b의 좌측 그림 같이 ①-①면과 ②-②면 중 3면에 맨드렐 외부로 돌출부를 제거하고, ③-③면에 쐐기형의 돌출부를 부착한 형태의 앵커슈이다. 비대칭 앵커슈는 맨드렐이 점토로 관입될 때 기존 앵커슈에 비해 맨드렐의 3면의 관입단면적을 줄이고, 특히 직사각형의 길이가 긴 두 변의 돌출부를 제거하여 교란효과를 최소화한 반면, 맨드렐의 인발 시, 쐐기형 돌출부가 점토지반 내에서 회전하여(그림 2b의 우측그림), 관입 당시의 단면적보다 큰 저항 단면적이 확보가 되는 원리로 배수재를 정착시킬 정도의 충분한 정착력을 확보하게 된다. 그러나, 개발된 비대칭 앵커슈의 현장적용 사례가 적어, 원리에 대한 검증이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 첫째로 1g 조건과 원심가속 조건에서 배수재의 설치·인발과정을 모사하여, 기존 관형 앵커슈와 비대칭슈가 지반을 교란시키는 원리와 영향을 밝히고, 둘째로 앵커슈에 따른 정착 메커니즘을 분석하는 것을 목표로 하였다. 이를 위하여 맨드렐-2차원 모형실험 시스템을 개발하였고, 모형실험을 통하여 실험적인 분석을 수행하였다. 개발된 2차원 모형실험 시스템에서는 맨드렐-앵커슈의 설치 과정과 인발·정착 과정을 모사할 수 있으며, 관입되는 과정을 실시간으로 촬영할 수 있도록 하여 맨드렐-앵커슈의 설치·인발 과정을 시각화하였다. 촬영된 이미지들에 대하여 White 등(2003)에 의해 개발된 GeoPIV를 적용하여 이미지 해석을 수행하고, 설치 과정 중 지반의 교란원리와 인발시 정착원리 및 정착력을 평가하였다.

## 2. 2차원 모형실험 시스템 개발

본 연구를 위해 점토지반에 맨드렐과 앵커슈의 설치과정과 인발과정을 2차원으로 모사하고, 이 과정을 정확히 담아 낼 수 있는 영상화 시스템을 개발하였다. 개발된 실험 시스템은 2차원 토조, 선행압밀장비, 원격 관입인발 장비와 원격촬영 시스템으로 구성된다. 개발된 시스템을 활용하여, 점토지반의 조성과 조성 후 맨드렐-앵커슈의 관입과 인발을 2차원 토조에서 순차적으로 수행할 수 있다.

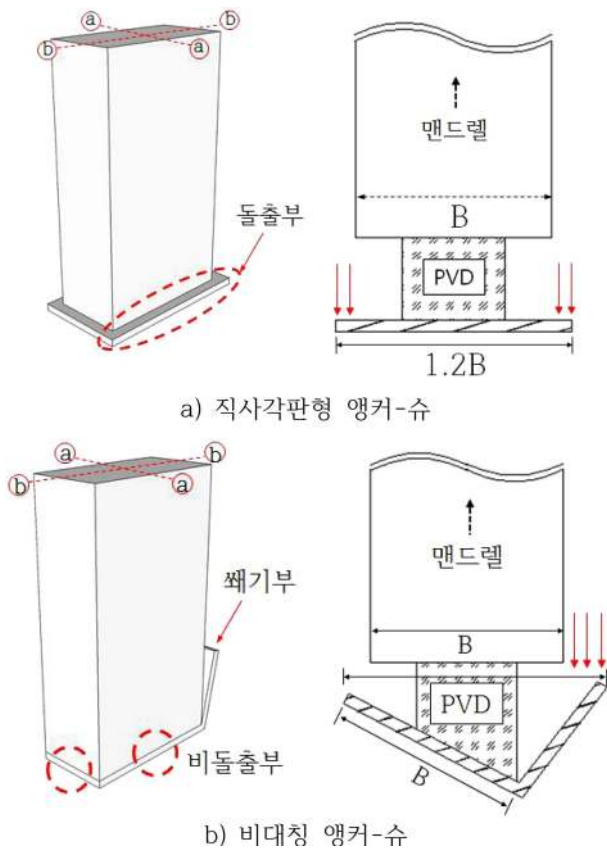


그림 2. 직사각관형 앵커슈 및 비대칭 앵커슈 모식도

2차원 토조는 내부 치수가 폭 140mm, 길이 580mm, 높이 650mm로 설계되었으며, 토조 전면은 맨드렐의 관입·인발을 그대로 담아내기 위하여 투명 아크릴로 제작되었다(그림 3a). 아크릴 창을 통하여, 모형 점토지반 조성 후 탈착이 가능한 구조를 가지도록 설계되었고, 후면에는 점토지반에 발생하는 간극수압의 변화를 측정하기 위하여 간극수압 측정 시스템이 설치되었다(그림 3b). 맨드렐-앵커슈의 관입·인발 과정이 2차원 평면변형을 조건으로 모사되고, 점토지반의 거동이 전면의 아크릴판과 후면의 간극수압 측정 시스템에 투영되도록 하기 위하여 가능한 토조의 폭을 좁게 설계하였다. 간극수압 측정 시스템은, 토조 후면 벽면을 관통하여 외부에서 내부로 수압계가 연결되는 구조를 가지도록 하여, 토조 내부에서 발생하는 간극수압을 측정 할 수 있도록 하였다. 이때, 점토지반과 접하는 면에는 다공판을 설치하여 점토 입자가 수압계로 유입되는 것을 막았다(그림 3c).

모형 맨드렐과 앵커슈는 토조의 폭(140mm)과 일치하도록 하여, 지중 관입될 때, 전면의 투명아크릴을 통해 지반, 맨드렐과 앵커슈의 거동을 2차원으로 모사하여 관측할 수 있다. 본 연구의 핵심적인 계측항목인 영상화를 위하여 2차원 토조의 투명 창을 통하여 지반의 측면 거동이 연속적으로 촬영되었으며, White 등(2003)에 의해 개발된 GeoPIV를 적용하여 이미지해석이 수행되었다. 이때, 촬영된 이미지의 왜곡현상으로 발생하는 오차를 제거하기 위하여, 전면 아크릴 창에 고정기준점(Reference point)을 수평·수직으로 100mm 간격으로 격자망을 이루며 표시하였다(그림 3c, 토조 전면 아크릴 창에 설치). 고정기준점은 아크릴 내벽에 4mm 깊이의 홈을 내고 검은색 본드를 채워 만들어졌다.

압밀장비와 관입장비는 토조 상부에 각각 연결하여 지반조성과 맨드렐 관입모사를 순차적으로 할 수 있도록 구성하였다(그림 4). 압밀장비는 내경이 160mm인 공압실린더로 구성되어 2차원 토조에서 최대 240kPa까지 선행압밀수직응력 재하가 가능하다(그림 4a). 관입장비는 맨드렐 관입깊이와 관입 속도(최대 1.2mm/sec)를 조절할 수 있도록 제작되었으며, 맨드렐 상부에 와이어센서를 설치하여 실시간으로 맨드렐의 위치를 측정할 수 있도록 하였다(그림 4b).

본 연구에서는 맨드렐과 앵커슈가 관입되고 인발시 정착되

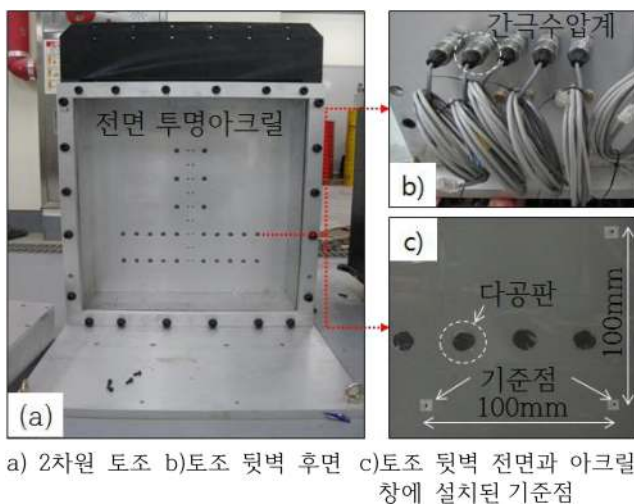


그림 3. 2차원화 토조 세부구성

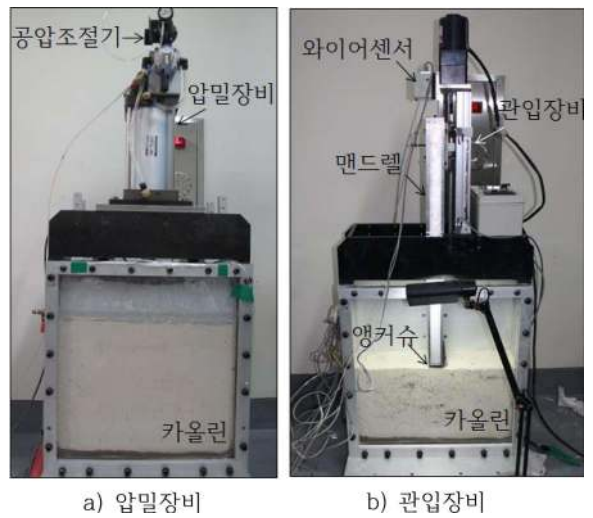


그림 4. 압밀장비 및 관입장비

는 과정을 모사하고 이를 영상화하는 것을 목표로 하였기 때문에, 맨드렐과 앵커슈 사이에 실제 배수재를 사용하지 않고, 강선으로 연결하여 모사하였다(그림 5). 강선은 맨드렐 길이보다 10cm 가량의 여유장을 두고 맨드렐 상부에 설치



그림 5. 맨드렐과 앵커슈의 모사



그림 6. 카메라 셔터 시스템

된 인장형 로드셀과 연결하여 맨드렐이 인발되는 시점부터 앵커슈의 정착과 이후 나타나는 인발저항력이 측정될 수 있도록 하였다.

원격카메라 셔터 시스템은 그림 6과 같이 소형 공압실린더와 슬레노이드 밸브를 이용해 카메라 셔터스위치를 작동시킬 수 있도록 구성하였으며, 원심모형 실험기에 설치되는 경우에도, 원심 가속상에서 원격 촬영이 가능하도록 하였다.

### 3. 실험방법 및 조건

제작된 시스템을 이용하여 연직배수재 설치과정 중 맨드렐과 앵커슈에 의해 발생하는 점토지반의 교란과 인발과정 중 앵커슈가 정착되는 과정을 2차원적으로 모사하였다. 개발된 시스템을 활용하여, 1g 모형실험 3회와 원심모형실험 3회가 수행되어 총 6회의 모형실험이 수행되었으며, 각 실험 조건은 표 1과 같다.

1g 모형실험의 실험과정은 ① 센서 포화 ② 점토 슬러리 준비 ③ 점토지반 조성 ④ 맨드렐-앵커슈 설치·인발 모사 네 부분으로 나누어진다.

① 센서포화 단계에서는 토조 벽면에 설치되어 있는 간극수압계와 다공판을 포화시키기 위해 토조 내부를 물로 채운 상태에서 토조의 상부에 O-ring이 설치되어 있는 PC판으로 덮어 밀폐 한 뒤, 12시간 이상 진공압을 가해 포화를 유도하였다.

② 점토 슬러리 준비단계에서는 정제된 카올린 분말을 120%의 함수비로 물과 혼합하고, 점토교반기에서 시료 내부의 공기를 제거하기 위해 진공압을 가하면서 교반한 후, 토조에 물과 혼합된 카올린 슬러리를 채웠다. 이때, 양면배수를 유도하기 위해 지오텍스타일과 주문진 표준사로 토조 바닥면에 배수층을 조성하였다.

③ 점토지반 조성단계에서는 양면배수 조건으로 표 1에 나타난 실험별 목표 선행압밀하중까지 25kPa씩 단계적으로 증가시켰으며, 최종 선행압밀하중에서 약 4일간 압밀하였다. 이때, 침하량, 간극수압을 측정하여 압밀도가 95% 이상 완료되었음을 확인하였으며, 최종적으로 30cm 높이의 점토지반을 조성하였다. 시료의 성형이 완료되면 압밀하중을 제거하고, 상부 표면에 휴대용 베인실험기(ELE Torvane Model 26-2261)를 이용하여 베인실험을 실시하였고 그 결과는 표 1에 나타난 바와 같이 대체로 동일하였다. 이후, 전면의 아크릴

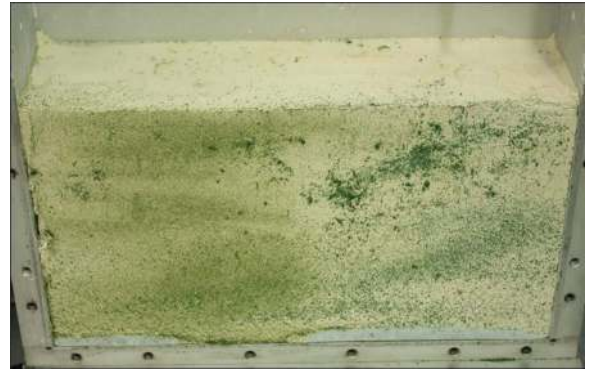


그림 7. 타겟 입자의 포설

을 열고, 그림 7과 같이 조성된 지반의 벽면에 타겟 입자를 살포하였다. 타겟 입자는 맨드렐 관입·인발 과정에서 지반의 변형에 영향을 미치지 않고, 눈에 잘 띄며, 지반과 함께 움직여 지반의 변형을 명확히 관측할 수 있는 가벼운 가루를 선택하였다. 이 후, 전면 아크릴 판을 토조에 재부착하였다.

④ 맨드렐-앵커슈 설치·인발 모사 과정에서는 관입장비를 이용해 맨드렐과 앵커슈를 표면에서부터 약 25cm 관입하고 인발하였다. 모든 과정은 이미지분석을 위해 투명아크릴 벽면을 통해 디지털 카메라(Canon Powershot G10)와 원격셔터 시스템으로 일정한 간격으로 연속촬영 되었다. 또한 간극수압계는 1g 모형실험에서 지표면으로부터 100mm 깊이에서 맨드렐 관입축을 중심으로 40, 80, 120, 160, 200mm의 거리에 설치되어, 맨드렐과 앵커슈에 의해 유발되는 과잉간극수압을 측정하였다. 원심모형실험에서는 지표면으로부터 200mm 깊이에서 1g 모형실험과 동일한 간격으로 설치하여 과잉간극수압을 측정하였다.

원심모형실험은 ① 센서 포화 ② 점토 슬러리 준비 ③ 점토지반 조성과정은 1g 모형실험과 동일하게 실내에서 수행되었으며, 점토지반 조성과정까지 완료된 후, 2차원 모형실험 시스템을 원심모형실험기에 탑재하고, ④ 맨드렐-앵커슈 설치·인발 모사 과정을 수행하였다. 본 연구에서는 KOCED KAIST 원심모형실험기를 활용하였다(Kim 등, 2006; 박진오 등 2009). 2차원 모형실험 시스템을 원심모형실험기에 탑재한 후, 60g 수준으로 4시간 동안 가속하여 지반을 안정화하였다. 이후, 60g 원심 가속상에서 맨드렐-앵커슈 관입과 인발이 모사되었으며, 연속되는 이미지, 맨드렐의 변위, 간극수압분포와 앵커슈의 인발저항력을 각각 계속하였다.

표 1. 실험조건

실험명	앵커-슈 종류	앵커-슈 관입단면적 <sup>1)</sup>	건조단위중량 ( $\gamma_d, t/m^3$ )	함수비 <sup>2)</sup> (%)	간극비 <sup>2)</sup>	비배수 전단강도 <sup>3)</sup> ( $S_u, kPa$ )	선행압밀 하중 (kPa)
T-1	기존-슈	1.20B	1.55	74	1.91	5.9	50
T-2	비대칭-슈	1.17B	1.56	72	1.86	4.8	
T-3	비대칭-슈	1.12B	1.54	75	1.95	5.1	
T-4	기존-슈	1.20B	1.57	65	1.73	9.2	100
T-5	기존-슈	1.50B	1.61	64	1.65	8.8	
T-6	비대칭-슈	1.12B	1.58	65	1.72	8.2	

1) 단위 길이당 폭, 여기서, B; 맨드렐 폭  
 2) 실험 완료 후 측정  
 3) 핸드베인전단시험으로 구한 값임.

1g 모형실험인 T-1, T-2, T-3은 썰기의 길이가 다른 비대칭 앵커슈와 기존 판형 앵커슈가 비교되어, 앵커슈가 지반교란에 미치는 영향을 분석하고, 배수재 정착에 효과적인 비대칭 앵커슈의 썰기부를 결정하였다. 아울러 앵커슈의 정착 메커니즘을 육안으로 관측할 수 있기 때문에 제작된 2차원 모형실험 시스템을 점검하였다.

원심모형실험인 T-4, T-5, T-6에서는 단면적이 다른 기존 판형 앵커슈와 1g모형실험에서 수행된 비대칭슈 중 짧은 썰기슈를 각각 적용하여, 돌출부(또는 썰기부) 크기가 지반교란에 미치는 영향, 앵커슈 정착기작, 인발저항력을 비교하였다. T-1~T-6의 실험에 적용된 모형 앵커슈의 제원은 표 1에 나타내었다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 1g 실험결과 분석

###### 4.1.1 관입시 발생하는 지반교란

맨드렐-앵커슈 관입·인발 중 연속적으로 획득된 이미지들을 이용하여 이미지분석(Image Analysis)을 수행하였다. 본 연구에서는 지반의 변형을 수치화하기 위해 MATLAB기반의 Geo-PIV(Particle Image Velocimetry)를 활용하였다(White 등, 2003; White 등, 2004).

그림 8은 맨드렐이 지표면 110mm 깊이에서 4mm 관입될 때, 앵커슈 선단부 주변지반에 발생하는 점토지반의 위치별 변위벡터를 나타낸다. 모든 실험에서 맨드렐의 관입으로 인해 주변지반이 맨드렐을 중심으로 좌우방향으로 압축되는 현상이 관측되었다. 또한, 지반변위가 관측되지 않는 영역을 연결하여 포물선 형태의 파괴면이 좌우로 형성되는 것을 확인할 수 있다(그림 8의 포물선 점선). 모든 실험에서 전형적인 관입 전단 파괴(punching shear failure)를 보였으며, 앵커슈의 형상에 따라 지반변형 범위가 달리 나타났다. T-1의 경우, 맨드렐을 중심으로 좌우로 형성되는 포물선 형태의 파괴면이 대칭으로 발생하였다. 반면, T-3의 경우, 비대칭 앵커슈에 의해 맨드렐을 중심으로 포물선 파괴면이 좌우가 다르게 형성되었다. T-3의 비돌출부(맨드렐 좌측부)에서 T-1에 비해 상대적으로 작은 포물선 파괴면 영역을 보였으며, T-3의 썰기부(맨드렐 우측부)에서는 T-1의 기존 판형 앵커슈에 의한 변형과 비슷한 크기의 변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

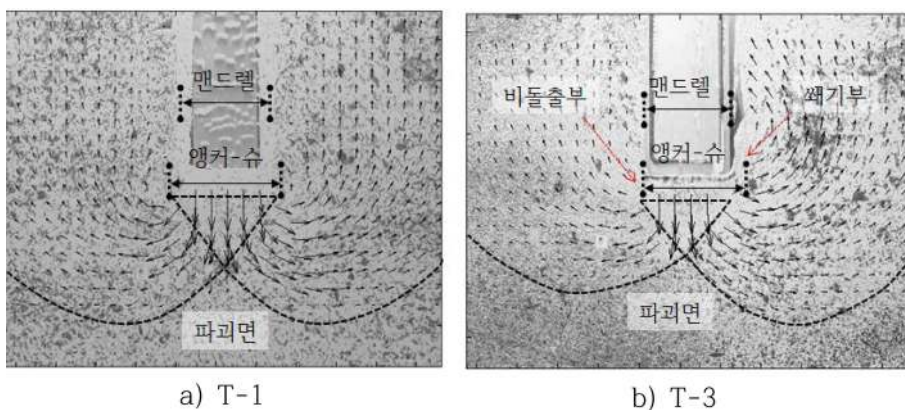


그림 8. 맨드렐 관입에 의해 발생하는 변위벡터(1g 모형실험)

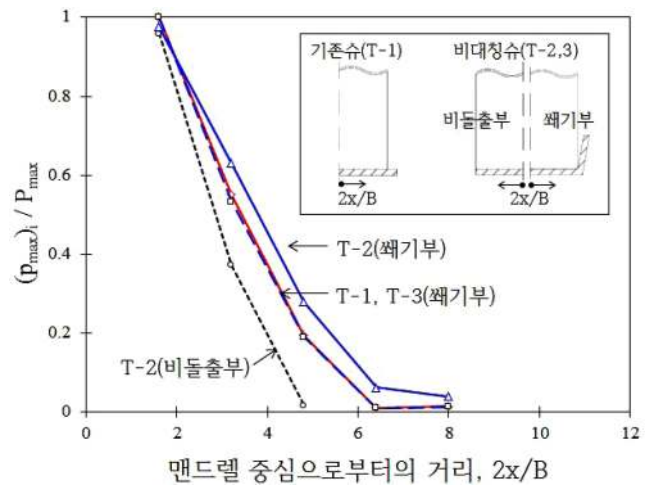


그림 9. 거리에 따른 최대 과잉간극수압 분포(1g 모형실험)

그림 9는 지표면 110mm 깊이에서 맨드렐 중심으로부터 좌우측으로 거리에 따라 발생한 과잉간극수압 결과를 나타낸다. 실험결과에서 1g 모형실험의 특성으로 인해 전체적으로 작은 과잉간극수압이 유발되었기 때문에, 각 지점에서 발생한 최대 과잉간극수압을 각 실험에서 발생한 최대 과잉간극수압으로 정규화하여 나타냈다. 또한, 비교군으로 T-2(비대칭슈) 실험결과를 맨드렐 중심으로부터 좌우 공간으로 나누어 썰기부와 앵커슈 비돌출부에서 발생하는 간극수압을 각각 도시하였다. T-3의 비돌출부는 T-2의 동일한 결과를 나타내어, 중복되므로 비교에서 제외하였다. 그 결과, T-2의 썰기부에서 가장 큰 과잉간극수압이 유발되었으며, T-1과 T-3의 썰기부는 유사한 분포를 보였다. 한편, T-2의 비돌출부에서 상대적으로 가장 작은 간극수압이 유발되었다. 각 실험별 앵커슈의 관입단면적(투영단면적)이 1.2B, 1.17B, 1.12B, B(B; 맨드렐 폭)임을 감안하면, 앵커슈의 관입단면적이 커질수록 발생하는 과잉간극수압의 크기가 커짐을 알 수 있다. 여기서, 지반의 교란은 과잉간극수압으로 나타나기 때문에 앵커슈의 돌출부는 지반교란에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

###### 4.1.2 앵커슈의 정착 메커니즘

그림 10은 앵커슈의 형상별 정착과정을 나타낸다. 기존 판형 앵커슈(T-1)는 맨드렐을 중심으로 좌우 단면에 존재하는 앵커슈의 돌출부에 의해 앵커슈의 정착이 시작되는 것을 확

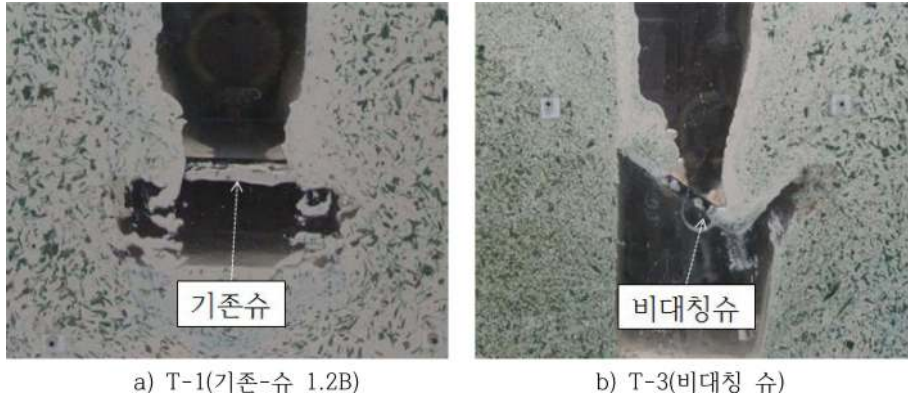


그림 10. 앵커슈 인발시 형상별 정착장면(1g 모형실험)

표 2. 1g 모형 실험의 관입인발시 앵커슈의 단면적 변화와 최대 인발저항력(1g 모형실험)

실험명	관입 단면적*	인발 최대단면적*	단면적 증가율(%)	최대 인발저항력 (kgf)
T-1	1.20B	1.20B	0	10.5
T-2	1.17B	1.51B	29	관측실패
T-3	1.12B	1.32B	18	14.7

\*단위길이당 폭, 여기서, B; 맨드릴 폭

인 할 수 있다. 반면, 비대칭슈(T-3)는 비대칭 썬기부가 지반에 파고들면서 앵커슈가 회전하여 정착이 진행되는 것을 명확히 확인할 수 있다. 표 2는 앵커슈의 관입과 인발시 단면적의 변화와 이에 따른 최대 인발저항력을 나타낸다. 기존 판형 앵커슈(T-1)의 경우, 앵커슈의 관입 대비 인발시 단면적의 변화가 없었으며, 비대칭슈(T-2, T-3)의 경우, 앵커슈의 회전에 의해 관입 대비 인발단면적이 커지는 것이 확인되었다. 또한, 앵커슈의 인발시 단면적 증가로 최대 인발저항력 또한 증가하였다.

전술한 결과들을 종합하면, 맨드릴의 4면 중 3면에 앵커슈의 돌출부를 제거한 비대칭 앵커슈가 기존슈에 비해 맨드릴 관입 중 지반의 변형을 줄이는 반면, 맨드릴 인발시에는 비대칭 형상에 의한 앵커슈의 회전에 의해 기존 판형 앵커슈보다 유사하거나 큰 인발저항력을 보일 것으로 판단된다. 그러나, 1g 모형실험 결과에서는 맨드릴이 관입 되는 동안 적은 과잉간극수압의 발현되었고, 그림 8과 같이 주변지반이 상대적으로 크게 용기하는 현상이 나타났다. 또한, 맨드릴의 인발 과정에서 발생하는 공동이 맨드릴이 제거된 이후에도 되메

워지지 않고 실제 현장에서 나타날 수 없는 현상들도 관측되었다. 이는 1g 모형실험의 한계점으로 확인되었으나, 1g 모형실험을 통하여 앵커슈에 의한 지반교란과 정착 메커니즘의 현상을 육안으로 확인할 수 있었다. 한편, 비대칭 앵커슈의 경우 썬기부가 0.7B(B; 맨드릴 폭)로 작은 경우에도 기존슈에 비해 지반교란을 적게 유발시키며, 정착이 잘 되는 결과를 주고 있어, 원심모형실험에서는 썬기부 길이가 0.7B 인 비대칭 앵커슈를 적용하여 실험하였다.

#### 4.2 원심모형실험

##### 4.2.1 관입시 발생하는 지반교란

그림 11은 맨드릴이 지표면 210mm 깊이에서 4mm관입 될 때의 지반의 변위벡터를 나타낸다. 1g 모형실험에서 관측되었던 바와 마찬가지로, 맨드릴 관입으로 인해 주변지반이 좌우면으로 압축되며, 맨드릴의 선단부에서 관입선단파괴가 나타났다. 또한, 맨드릴 선단에 설치된 앵커슈가 맨드릴에 비해 큰 단면적을 가지고 있어, 주변지반의 변형에 영향을 미치는 것이 확인되었다. 1g 모형실험과 비교해 원심모형실험에서는 맨드릴 선단부에서 큰 지반 변형이 유발되었으며, 맨드릴 주변부 부근에서 지반이 작게 용기하였다. 기존 판형 앵커슈(T-4)는 맨드릴 중심으로 좌우면에 돌출부가 대칭적으로 존재하여, 맨드릴 선단부에서 발생하는 지반의 변형이 대칭적으로 발생하였다. 한편, 비대칭슈(T-6)는 앵커슈의 썬기부(맨드릴 중심으로부터 우측단면)에서 발생하는 지반의 변형이 기존 판형 앵커슈와 유사하게 유발되었지만, 비돌출부(맨드릴 중심에서 좌측단면)에서는 앵커슈의 돌출부가 존재하지 않아 상대적으로 적은 변형이 유발되었고, 1g 모형실험

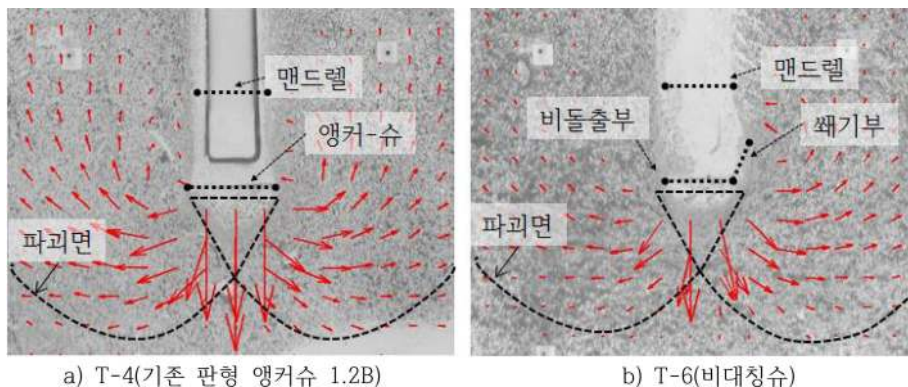


그림 11. 맨드릴 관입에 의해 발생하는 변위벡터(원심모형실험)

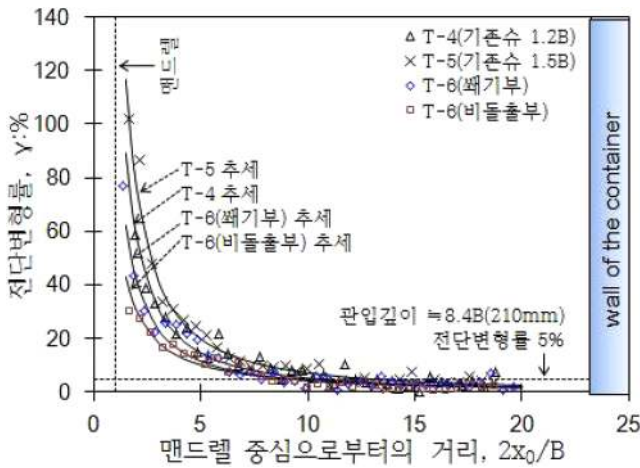


그림 12. 원심모형실험에서 앵커슈에 의해 유발되는 전단변형률

에서 나타난 동일한 현상을 관측할 수 있었다. 또한, 원심모형실험의 구속응력의 영향으로, 점토지반의 용기 변위는 줄어들고, 돌출부 크기로 인한 지반변위의 차이가 1g 모형실험에 비해 매우 뚜렷하게 관측되었다.

그림 12는 지표면에서 210mm 지점을 통과할 때, 획득된 이미지로부터 GeoPIV를 이용해 측정된 전단변형률을 나타낸다. 이때, 앵커슈의 돌출부 크기에 의해 유발되는 전단변형률을 비교하기 위하여, 만드렐을 중심으로 좌우측을 분리하여 이미지분석을 실시하였다. 각 실험의 상대적인 비교를 위해 전단변형률이 구해지는 지점의 위치를 만드렐 중심으로부터의 거리로 환산하여 가로축에 표시하였으며, 만드렐 폭의 절반(B/2)으로 정규화하여 나타내었다. 또한, 앵커슈의 돌출부에 의한 지반교란을 확인하기 위해 T-6의 비돌출부(그림 11b 좌측면)를 비교군으로 함께 도시하였다. 그 결과, 만드렐 중심부 부근에서 가장 큰 전단변형률이 유발되었으며, 유발된 전단변형률은 만드렐로부터 멀어짐에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 전단변형률의 크기는 앵커슈의 돌출부 길이에 비례함을 확인할 수 있었다.

Baligh(1985)는 말뚝기초의 관입에 의해 발생하는 소성변형은 전단변형률의 약 5%에서 발생한다고 제시한 바 있다. 이 기준을 적용하여 만드렐 관입에 의해 유발되는 스미어존을 판단하면, 이미지분석으로 측정된 스미어영역은 앵커슈의 돌출부 크기와 상관없이 3.5B~4B까지 발생하는 것으로 나타났다. 이는 앵커슈의 돌출부 크기가 스미어존의 크기에 미치는 영향이 크지 않음을 의미한다. 반면, 스미어존 내에 발생하는 전단변형률의 크기는 앵커슈의 돌출부에 따라 명확한 차이가 나타나고 있어, 앵커슈의 돌출부 크기가 압밀지연에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 한편, 선행연구 결과들(Jamiolkowski 등, 1983; Indraratna 등; 1998)에서 제시된 스미어존의 범위는  $d_s = 2.5 \sim 3d_m$  ( $d_s$ : 스미어존 직경,  $d_m$ : 만드렐 유효직경)으로, 본 연구의 이미지분석 결과가 상당히 넓은 범위를 보이고 있다. White(2001)는 평면 변형 조건으로 수행되는 모형실험의 경우, 말뚝 형태의 관입 모델링은 실제 3차원으로 모사되는 경우에 비해 변형이 과다하게 발생할 수 있음을 제시하고 있어, 본 연구결과의 경향이 평면변형률 조건에서 기인한 것으로 판단된다.

그림 13은 만드렐이 지표면에서 210mm 깊이를 통과할

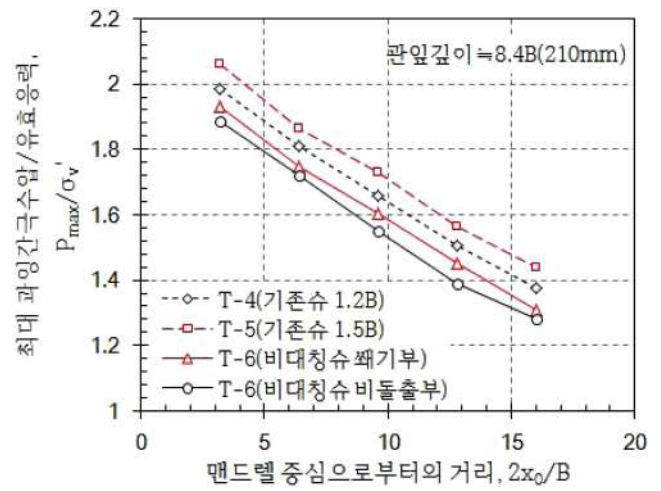


그림 13. 만드렐 중심으로부터 위치별 최대 간극수압비 분포(원심모형실험)

때, 해당 깊이에서 발생하는 과잉간극수압을 만드렐 중심으로부터 좌우측으로 거리에 따라 나타낸 결과이다. 각 실험의 결과를 비교하기 위해 각 지점에서 만드렐 관입에 의해 발생하는 최대 과잉간극수압을 간극수압계가 위치해 있는 지점에서의 유효응력으로 정규화( $P_{max}/\sigma_v'$ )하여 나타냈다. 이때, 앵커슈의 돌출부가 과잉간극수압에 미치는 영향을 확인하기 위해 T-6의 결과를 썰기부(그림 11b 우측면)와 비돌출부(그림 11b 좌측면)로 분리하여 함께 도시하였다. 그 결과, 유발되는 최대 간극수압비는 앵커슈의 돌출부의 길이와 비례하여 이미지분석 결과와 일치하는 결과를 보여주고 있다. 하지만 평면변형조건으로 실험이 수행되어 배수재 설치과정 중 만드렐 중심으로부터 7.5B의 거리에서도 만드렐 관입 중에 과잉간극수압이 유발되었다.

#### 4.2.2 앵커슈의 정착 메커니즘

그림 14는 목표 관입심도에서 만드렐 인발시 앵커슈가 정착되는 순간을 포착한 사진이다. 그 결과, 기존 판형 앵커슈(T-5)의 경우, 만드렐 중심으로부터 좌우측에 존재하는 앵커슈의 돌출부에 의해 앵커링이 시작되고 있으며, 비대칭형(T-6)은 썰기부(만드렐 중심부에서 우측면)가 점토지반에 삽입되어 앵커슈가 회전하면서 앵커링이 유도되고 있음을 확인할 수 있다. 원심모형실험에서는 1g 모형실험과 달리 만드렐이 인발되는 과정에서 공동이 형성되지 않고 점토지반이 빈 공간으로 되메워졌다. 이로 인해 앵커링이 시작된 후에 큰 인발저항력이 발현되었으며, 관입 및 정착과정이 사실적으로 묘사되는 것을 확인하였다. 반면, 그림 15와 같이 크기가 작은 기존 판형 앵커슈(T-4)가 사용된 경우, 배수재 목표 설치지점에서 만드렐 인발시 앵커슈에 의한 앵커링이 유도되지 못하고 공상현상이 발생하였으며, 약 9cm(모형 스케일)정도 만드렐과 함께 인발된 후 정착이 시작되었다. 시공현장에서 사용되는 기존슈의 단면이 T-4와 유사한 것을 감안하면, 이러한 공상현상은 실제로 발생할 수 있는 현상으로 예측하지 못한 압밀지연으로 나타날 수 있기 때문에, 안정적으로 설치가 가능한 앵커슈의 개발이 중요한 의미를 가진다.

원심모형실험의 기존슈와 비대칭슈에 대한 실험결과로부터, 관입단면적, 인발시 단면적, 측정된 저항력을 표 3과 같이

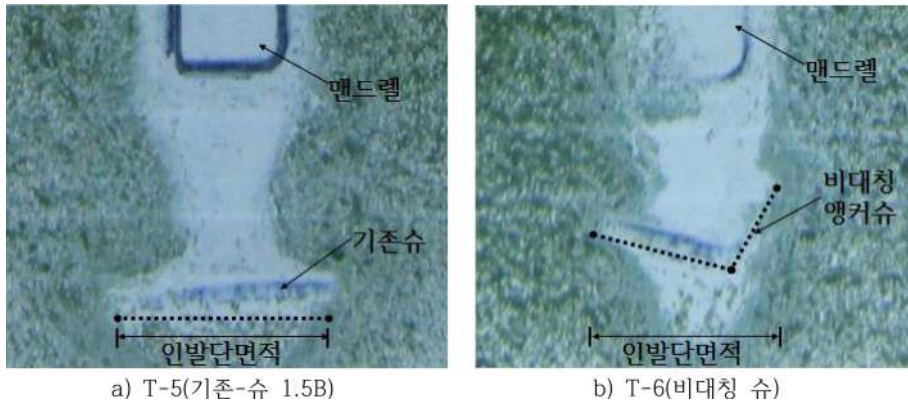


그림 14. 앵커슈의 형상에 따른 정착(원심모형실험)

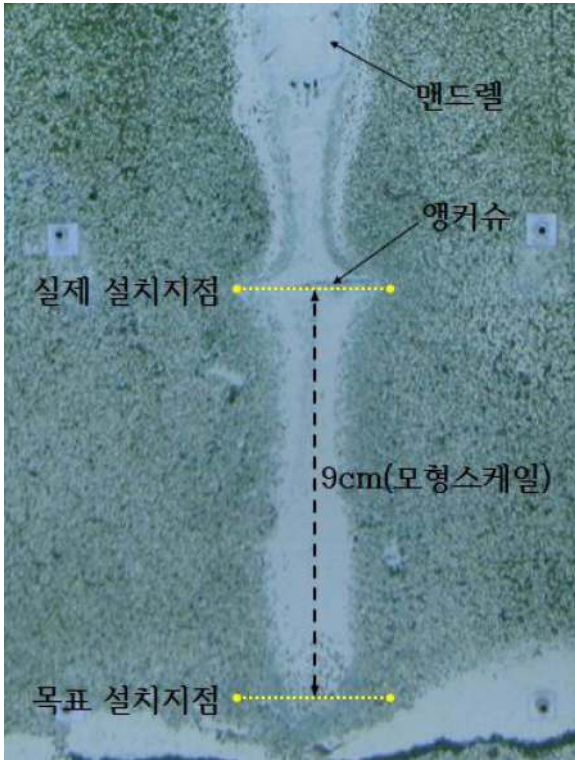


그림 15. T-4의 공사 현상(원심모형실험)

표 3. 원심모형실험의 관입인발시 앵커슈의 단면적 변화와 최대 인발저항력(원심모형실험)

실험명	관입 단면적*	인발 최대단면적*	단면적 증가율(%)	최대 인발저항력 (kgf, model scale)
T-5	1.20B	1.20B	0	31.5
T-6	1.50B	1.50B	0	72.8
T-7	1.12B	1.26B	12.5	58.9

\*단위길이당 폭, 여기서, B; 맨드렐 폭

비교하였다. 기존 관형 앵커슈(T-4와 T-5)의 경우, 관입단면적 대비 인발단면적의 변화는 없었으나, 비대칭슈(T-6)는 맨드렐이 인발 중 앵커슈의 회전메커니즘 발현으로 관입단면적 대비 인발단면적이 증가하였다. 또한 각 실험별 인발단면적은 최대 인발저항력과 비례하였다. 이때, 비대칭슈(T-6)는 관입 단면적이 기존 관형 앵커슈(T-5, T-6)에 비해 작음에도, 지중에서 맨드렐 인발시 앵커슈의 회전에 의한 정착메커니즘이 성공적으로 발현되어 인발저항력이 증가하였다. 반면, 기존 관형 앵커슈(T-4)의 경우, 목표 설치 심도보다 얇은 깊

이에서 정착되어, 낮은 인발저항력이 측정되었다. T-5의 경우, 현장에서 사용되는 앵커슈에 비해 크게 돌출된 앵커슈로 인발단면적이 타 실험에 비해 크기 때문에 큰 인발저항력이 측정되었지만, 전술한 바와 같이 지반교란에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 압밀을 크게 지연시킬 것으로 보인다. 이를 통해, 맨드렐의 측면 3방면에 앵커슈의 돌출부를 제거한 비대칭 앵커슈는 기존 관형 앵커슈에 비해 지반교란을 줄임과 동시에 효율적으로 배수재를 목표 설치심도에 정착시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 원심모형실험은 1g 모형실험과 달리 모형지반에 현장 응력을 모사함으로써 현실적인 지반 변형을 모사할 수 있었으며, 맨드렐 인발과 동시에 주변지반이 되메워져 앵커슈의 정착 메커니즘을 합리적으로 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

국내외에 주로 사용되고 있는 기존 앵커슈는 배수재 정착을 목적으로 맨드렐 단면적보다 크게 제작되며, 맨드렐 선단에 설치되어 지중 관입된다. 하지만 맨드렐 외부로 돌출되는 앵커슈의 돌출부로 인해 추가적인 지반교란이 예상되어 압밀의 지연을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 맨드렐-앵커슈의 관입으로 인한 지반교란을 분석하고자 하였고, 이를 위하여 배수재의 설치과정과 인발과정을 모사하는 2차원 모형실험 시스템을 개발하였다. 이를 이용하여 1g 모형실험과 원심모형실험을 수행하였고, 기존 관형 앵커슈와 새로운 형식의 비대칭 앵커슈를 비교하여 지반의 교란 및 앵커슈의 정착 메커니즘을 분석하였다. 그 결과로, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 맨드렐-앵커슈의 관입과정과 인발과정을 2차원적으로 모사하고, 시각화 할 수 있는 모형실험 시스템을 개발하고, 이를 이용해 관형 앵커슈와 썬치가 달린 비대칭 앵커슈의 관입시 지반파괴 형상, 정착과정과 인발저항력을 정확히 관측할 수 있었다.
2. 1g 모형실험과 원심모형실험의 이미지분석 결과로, 앵커슈의 형상에 따라 지반의 변형 패턴이 달랐으며, 앵커슈의 돌출부 크기가 지반변형에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히, 원심모형실험의 이미지분석 결과에서 앵커슈 돌출부의 영향을 더욱 뚜렷이 확인할 수 있어, 현장응력 재현의 중요성을 확인하였다.



3. 원심모형실험 결과에서 전단변형률에 근거하여 지반교란을 평가하면, 앵커슈의 돌출부 크기의 차이에 비해 스미어존은  $d_s = 2.5 \sim 3d_m$ 의 비슷한 범위를 보였다. 그러나, 스미어존 내 교란의 크기는 앵커슈의 돌출부의 크기에 비해 하였다.
4. 1g 모형실험과 원심모형실험에서 맨드렐 인발시 기존 판형 앵커슈는 인발저항면적에 변화 없이 정착이 되었으며, 비대칭슈는 인발저항면적을 증가시키며 정착되었다. 이로 인해 상대적으로 작은 관입면적을 가진 비대칭슈가 기존 판형 앵커슈에 비해 큰 인발저항력을 발휘하였다. 따라서, 비대칭 앵커슈는 사각판형 앵커슈에 비해 지중 관입시 교란을 줄이며 동시에 효율적으로 공상현상을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 (주)삼성물산의 연구비 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2011-0000314)이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 박진오, 추연욱, 김동수(2009). 원심모형 실험과 수치해석을 이용한 과압밀 지반에서의 말뚝지지 전면기초의 지지력 평가, **한국지반공학회 특별논문집**, 한국지반공학회, 제25권 제7호, pp. 23-33.
- 박현일(2010). 연직배수재 설치용 측면 비대칭 앵커 및 이를 이용한 연직배수재 설치방법, 대한민국특허, 10-2010-0098866, 대한민국.
- Baligh, M. M. (1985). Strain path method. *Journal of Geotechnical Engineering-ASCE*, Vol. 111, No. 9, pp. 1108-1138.

- Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C., and Balasubramanian, A. S. (1991). Smear effect of vertical drains on soft Bangkok clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 10, pp. 1509-1530.
- D. S. Kim, G. C. Cho, and N. R. Kim (2006) Development of KOCED Geotechnical Centrifuge Facility at KAIST, *Physical Modeling in Geotechnics*, Hongkong, China, pp. 147-150.
- Hird, C. C. and Moseley, V. J. (2000). Model study of seepage in smear zones around vertical drains in layered soil. *Geotechnique*, Vol. 50, No. 1, pp. 89-97.
- 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.
- Jamiolkowski, B., Lancellotta, R., and Woski, W. (1983). General Report : Pre-compression and speeding up consolidation. 8th ECSMFE. City: Helsinki, pp. 1201-1226.
- 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.
- 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, No. 6, pp. 1265-1271.
- Weber, T. M., Plotze, M., Laue, J., Peschke, G., and Springman, S. M. (2010). Smear zone identification and soil properties around stone columns constructed in-flight in centrifuge model tests. *Geotechnique*, Vol. 60, No. 3, pp. 197-206.
- White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique*, Vol. 53, No. 7, pp. 619-631.
- White, D. J. and Bolton, M. D. (2004). Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand. *Geotechnique*, Vol. 54, No. 6, pp. 375-397

(접수일: 2012.1.27/심사일: 2012.3.13/심사완료일: 2012.4.26)