

## 연약지반의 측방유동으로 인하여 매설관에 작용하는 측방토압

Lateral Earth Pressures on Buried Pipes  
due to Lateral Flow of Soft Grounds홍 원 표<sup>1)</sup> · 김 재 흥<sup>†</sup>

Hong, Wonpyo · Kim, Jaehong

**ABSTRACT :** A series of model test as well as numerical analysis by FEM was performed to investigate lateral earth pressure acting on a buried pipe in soft ground undergoing horizontal soil movement. A model test apparatus was manufactured so as to simulate horizontal soil movement in model soft ground, in which a model rigid buried pipe was installed. The velocity of soil deformation could be controlled as wanted during testing. The model test was performed on buried pipes with various diameters and shapes to investigate major factors affected the lateral earth pressure. The result of model tests showed that the larger lateral earth pressure acted on the buried pipes under the faster velocity of soil movement. The result of numerical analysis, which was performed under immediate loading condition, showed a similar behavior with the result of model tests under 0.3mm/min to 1.0mm/min velocity of soil deformation. Most of model tests showed the soil deformation-lateral load behavior, in which the first yielding load developed at small soil deformation and elastic behavior was observed by the yielding load. Then, lateral load was kept constant by the second yielding load, in which plastic behavior was observed between the first yielding load and the second yielding one. Beyond the second yielding load, the compression behavior zone was observed. When the velocity was too fast, however, the lateral load was increased with soil deformation beyond the first yielding load without showing the second yielding load. The buried pipes with the larger diameter was subjected to the larger lateral load and the larger increasing rate of lateral load. At small soil deformation, the influence of diameter and shape of buried pipes on lateral load was small. However, when soil deformation was increased considerably, the influence became more and more.

**Keywords :** Soft ground, Lateral flow, Buried pipe, Lateral earth pressure, Model test, Numerical analysis

**요 지 :** 모형실험과 유한요소법에 의한 수치해석을 통하여 측방변형지반 속에 설치된 매설관에 작용하는 측방토압을 관찰하였다. 모형실험에서는 모형지반 속에 매설관을 설치한 후 모형지반에 측방변형이 발생될 수 있게 모형실험기를 제작하여 실제 지반에서의 상황을 시뮬레이션하였다. 이 모형실험기는 지반의 변형속도를 여러 가지로 조절할 수 있게 제작하였다. 여러 가지 직경과 형상의 매설관에 대하여 실험을 실시함으로써 이들 요인이 측방토압에 미치는 영향을 조사하였다. 모형실험결과 연약지반의 측방유동으로 인하여 매설관에 작용하는 측방하중은 연약지반의 측방변형속도가 빠를수록 크게 작용하였다. 순간재하 조건에 의한 수치해석 결과는 지반변형속도가 중간 정도 빠르기인 0.3mm/min에서 1.0mm/min 사이의 지반변형속도의 조건에서 실시한 모형실험 결과와 유사하였다. 대부분의 모형실험결과 지반변형량이 작은 시점에서 측방하중의 제1항복이 발생하며 이때까지 탄성변형거동을 보이다가 제2항복에 이르기까지 하중이 한 동안 수렴되는 소성거동을 보였다. 지반변형이 계속하여 증가하면 측방하중도 다시 증가하여 압축거동을 보였다. 그러나 빠른 지반변형속도에서의 실험 결과에서는 항복하중에 도달한 후 수렴과정이 없이 계속하여 하중이 증가하였음을 볼 수 있다. 매설관의 직경이 클수록 측방유동 연약지반 속에 설치된 매설관에 작용하는 측방하중의 크기와 하중증가 속도가 컸으며 초기지반변형에서는 측방하중이 매설관의 직경 및 형상의 영향을 적게 받지만 지반변형량이 증가함에 따라 그 영향이 크게 나타났다.

**주요어 :** 연약지반, 측방유동, 매설관, 측방토압, 모형실험, 수치해석

## 1. 서 론

최근까지 여러 가지 목적으로 내륙지역의 부지는 상당 부분 개발이 완료되어 있는 상태인 관계로 새롭게 대단위 공업단지나 주택단지를 마련하기 위한 부지는 해안 연약지

반을 매립하여 조성되는 추세이다.

이와 같이 매립 조성된 연약지반에 수도관, 하수관, 전기통신관, 공동구 등의 지하구조물을 매설하고 그 주변에 도로 등의 구조물을 축조하기 위한 성토를 실시할 경우가 종종 발생한다.

1) 정희원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수

† 정희원, 한국수자원공사 Kwater 연구원 댐안전연구소 책임연구원(E-mail : kjhpmk@kwater.or.kr)

그러나 연약지반 상에 성토 및 뒤채움과 같은 편재하중이 작용하게 되면 연약지반에는 측방유동이나 활동파괴가 종종 발생하게 된다. 특히 성토나 뒤채움을 빠른 속도로 시공할 경우에는 연약지반이 측방으로 유동하고 주변지반의 용기현상이 발생하게 되어 지하매설물과 인접구조물의 안전을 위협하게 된다(홍원표 등, 2006).

해안매립 연약지반 부지에 설치된 지하매설구조물에 가장 보편적으로 변형이 많이 발생하는 예로는 지하 매설구조물의 설치가 완료된 직후 매립 부지에 공동주택, 상가, 학교 등의 건축공사를 시행할 경우이다. 이러한 건축공사에서는 지하 터파기로 발생한 토사를 건축공사 완료 후 되메우기용 토사로 사용하기 위하여 인접부지에 그대로 쌓아놓는 경우가 많다. 그러나 이러한 토사하중도 매립 연약지반에는 상재하중으로 작용하여 연약지반의 측방변형을 유발하게 된다(홍원표 등, 2002; 홍원표 등, 2002).

또한, 지하매설관이 설치된 인접 지역에서 깊은 굴착을 시행하고 굴착배면에 상당량의 토사를 성토해 둘 경우도 연약지반이 측방으로 변형하여 연약지반 속에 측방유동이 발생하게 되어 지하 매설관에 영향을 미치게 된다.

이와 같은 연약지반의 측방유동으로 인한 지하매설관의 변형 및 파손 시에는 사회적으로 많은 불편을 초래하게 된다(Crofts 등, 1977).

따라서 연약지반의 측방유동으로 인한 지하매설관의 손상을 방지하기 위해서는 먼저 측방유동으로 인하여 지하 매설관에 작용하게 되는 측방토압의 메커니즘을 정확히 규명해야 할 필요가 있다(Vesic, 1972).

그러나 이 측방토압은 지반과 지하매설관에 관련된 여러 가지 요인에 의하여 영향을 받으므로 그 메커니즘을 규명하기가 용이하지가 않았다.

이에 본 연구에서는 우선 모형실험을 통하여 측방변형지반 속 매설관에 작용하는 측방토압을 관찰한다. 그런 후 유한요소법에 의한 수치해석을 실시하여 모형실험 결과와 비교 고찰해 본다.

모형실험에서는 모형지반 속에 매설관을 설치한 후 모형지반에 측방변형이 발생될 수 있게 모형실험기를 제작하여 실제 지반에서의 측방유동상황을 시뮬레이션하였다. 이 모형실험기는 지반의 변형속도를 여러 가지로 조절할 수 있게 제작하였다.

또한 모형실험에서는 측방유동지반 속에 매설된 여러 가지 직경과 형상의 매설관에 대하여 실험을 실시함으로써 이들 요인이 측방토압에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

## 2. 모형실험

### 2.1 기존 연구

松尾 등(1975)의 실험에서는 그림 1에 나타낸 것과 같이 토조내의 양측에 습윤모래층을 제작하여 트렌치 내의 모래바닥 위에 소정의 폭으로 유안층(황산암모니아층(硫酸層))을 깔고 매설관을 설치하였다. 그리고 기준선으로 기건사 1cm마다 얇은 색사를 깔면서 되메운 다음 실험토조의 하부를 물에 담구어 유안층을 용해시켜 지반과 매설관에 강제변위를 주었다.

그림 2는 유안층의 설치방법에 따른 3가지 모델에 대해서 변형영역의 전파특성을 나타낸 것이다. 모델A는 매설관 바로 아래 지반이 침하하는 경우이고, 모델B는 관을 포함한 트렌치 바닥 전면에 걸쳐서 침하하는 경우이다. 그리고 모델C는 관의 양측지반이 침하하는 경우이다. 여기서, A와 C는 각각 Marston -Spangler의 관위의 침하가 관측면의 침하보다 더 클 경우와 관측면의 침하가 관위의 침하보다 더 클 경우를 나타낸다. 또한, B는 트렌치형에 해당한다. 이 실험에서 주위 지반의 변형상태는 모래입자가 관이나 지반의 침하와 같은 크기로 이동하는 직접영역, 전혀 이동하지 않는 정지역, 그리고 중간의 간접영역 3가지로 분류하여 설명할 수 있다.

松尾 등은 돌출형설치인 A와 C의 경우는 Marston식의 적용이 합당하지만, 트렌치형설치인 B에서는 상대변위에 관한 Marston식의 가정이 타당하지 않으며, 이 경우는 설계토압으로써 흙의 상재압을 생각하는  $\gamma H$ -법이 적절하다고 말하고 있다. 또한, 모델A와 C인 돌출형에서의 등침하면 높이는 관직경의 0.9~1.8배에 위치한다고 제안하였다.

西尾 등(1974, 1975)은 그림 4에서 보는바와 같이 모래층 내에 연직구를 등간격으로 배치하여 그 움직임을 X선촬영으로 추적하였다. 그림의 X선 사진은 모래층 내부의 밀도차에 의해서 투과율이 다른점을 이용하였다. 이것은 농담(濃

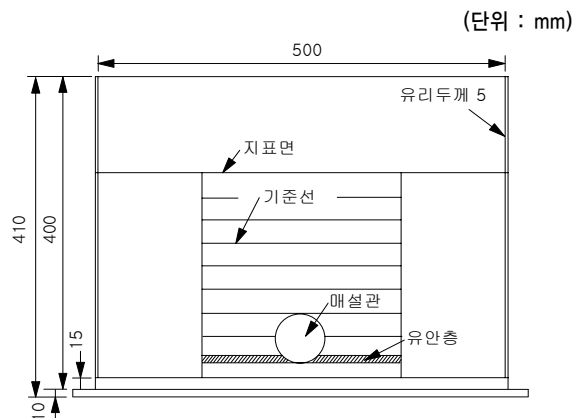
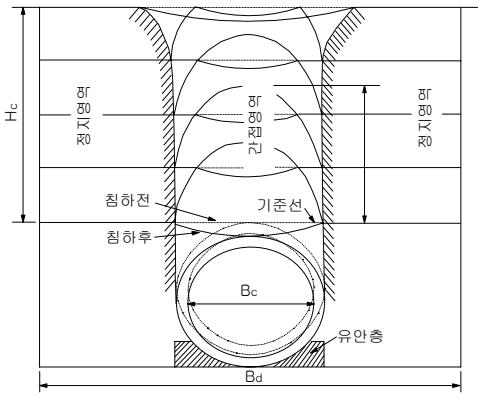
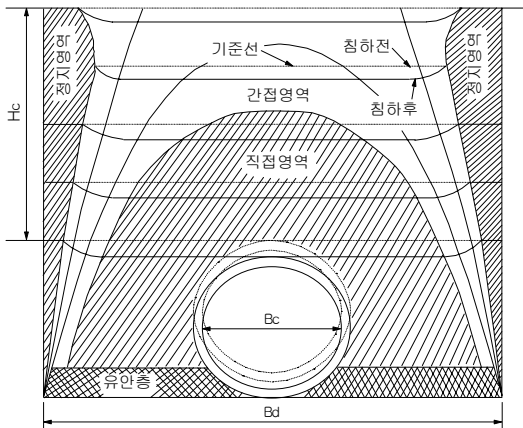


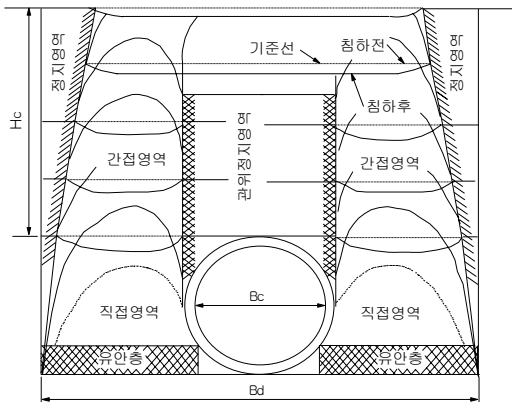
그림 1. 松尾 등의 실험(1975)



(a) 모델 A



(b) 모델 B



(c) 모델 C

그림 2. 변형영역의 전파

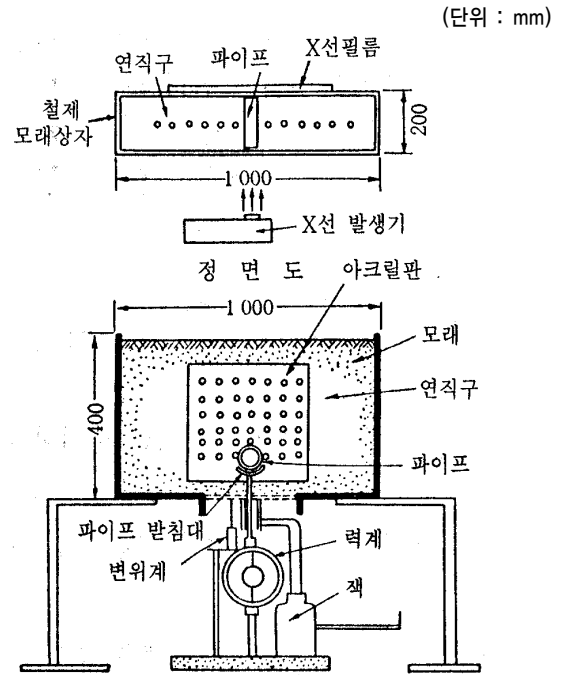


그림 4. 西尾 등의 실험

층에 강제 변위를 주어, 모래층의 변위 및 유선의 발달상황을 살펴본 것이다. 또한, 매설관에 작용하는 토압은 검력계로 측정된 것이다. 여기서, 토압은 바닥의 강하량이 관지름의 5~8%에 달할 때 제1차 피크를 나타내고, 그 후 모래층의 소성화가 진행됨에 따라 토압해방에 의해 저감된다. 그림 3(a)는 피크토압 발생 직후의 상태로 Marston의 가정에 가까운 유선을 보인다. 그림 3(b), 3(c)는 토압이 저감된 단계이며, 강하량이 관지름의 25~45% 이상이 되면 그림 3(d)와 같이 관주변의 전면적인 붕괴로 인하여 토압은 다시 상승하여 다시 제2차 피크값을 나타내게 된다.

## 2.2 모형실험장치

### 2.2.1 모형실험장치 계통도

본 연구에 사용된 모형실험장치는 그림 5에서 보는 바와 같이 모형토조, 기반변형제어장치 및 계측장치의 세 부분으로 구성되어 있다.

모형실험장치 본체의 개략도 및 사진은 그림 6에 도시한 바와 같다. 이 모형실험장치에는 매설관이 내부토조를 수평 방향으로 관통하여 설치될 수 있도록 하였다.

모형토조는 외부토조, 내부토조, 매설관, 변위계이므로 구성되어 있다. 변형제어장치는 스크류잭을 통해 내부토조에 하중을 가하여 이동시키는 하중분배판과 속도조절스위치박스, 인버터, 스크류잭 및 모터로 구성되어 있다. 한편, 계측장치는 하중계, 변위계이, 연결판 및 컴퓨터로 구성되어 있다.

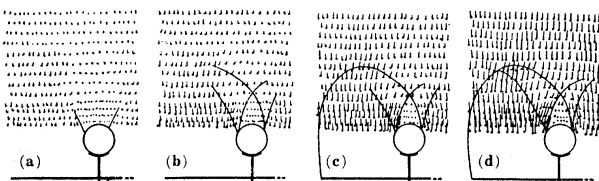


그림 3. 西尾 등의 실험결과(모래층의 변위와 유선)

淡)의 차로 유선의 형상이나 그 발달상황을 나타낸 것이다.

그림 3은 모래상자 중앙부의 강하상을 강하시켜서 모래

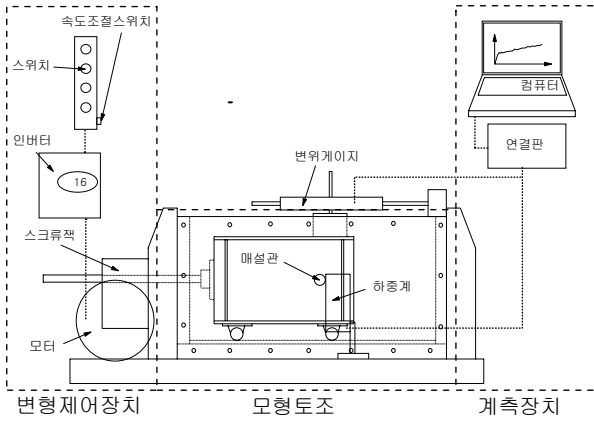
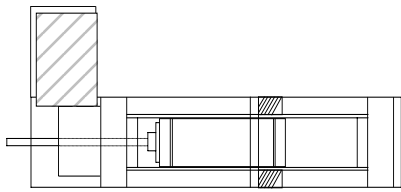
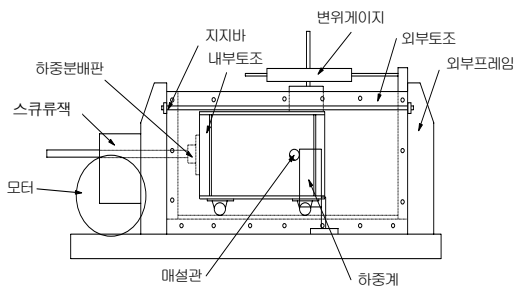


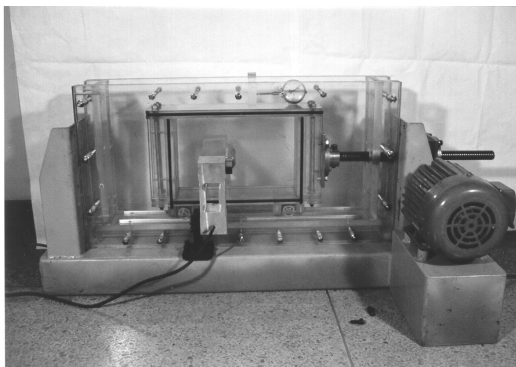
그림 5. 모형실험장치 계통도



(a) 평면도



(b) 측면도



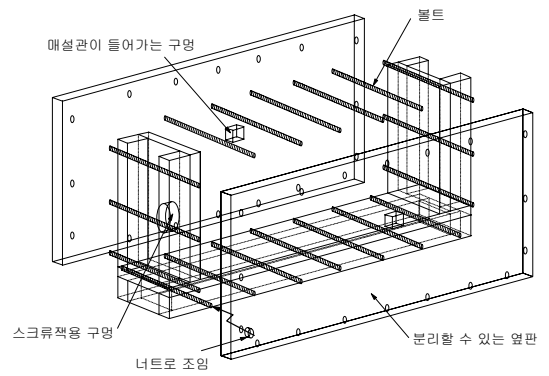
(c) 사진

그림 6. 모형실험장치 본체

### 2.2.2 모형토조

#### (1) 외부토조와 내부토조

모형토조는 그림 7과 그림 8에서 보는 바와 같이 외부토조와 내부토조로 구성되어 있다. 이 모형토조는 토조 내의 지반변형거동을 육안으로 직접 관찰할 수 있도록 그림 3(b) 및 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 투명아크릴판으로 제작하

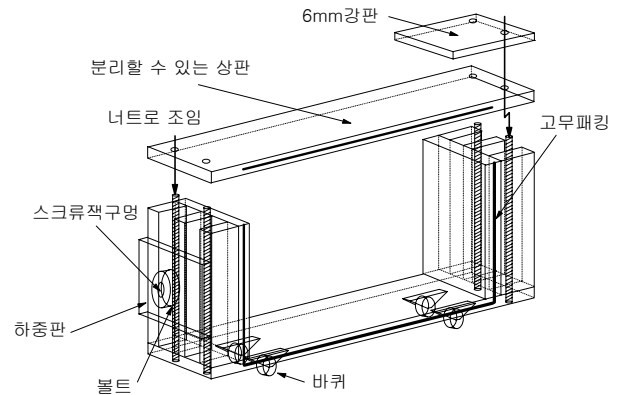


(a) 개략도



(b) 사진

그림 7. 외부토조



(a)개략도



(b) 사진

그림 8. 내부토조

었다. 이들 토조의 벽체가 충분한 강성을 가지도록 투명아크릴판의 두께를 20mm로 하였다.

지반이 전체적으로 균일하게 변형할 수 있도록 내부토조와 외부토조를 분리 제작하였다. 즉, 외부토조를 고정시킨 상태에서 내부토조를 일정한 속도로 수평으로 이동시킴으로서 매설관에 대하여 지반의 측방변형이 발생한 상태의 시뮬레이션이 가능하도록 하였다.

외부토조는 직경이 다른 여러 종류의 매설관을 설치할 수 있게 하기 위해 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 한 쌍의 판을 각각 볼트를 사용하여 교체할 수 있게 하였다. 이때 내부토조와 함께 매설관도 설치할 수 있게 하였다.

수평방향으로 이동하는 내부토조가 원활하게 움직일 수 있도록 외부토조를 하부에 레일을 설치하고 그 위에 내부토조를 안치시켰다. 또한, 지반의 균일한 변형을 일으키기 위하여 그림 8과 같이 내부토조를 제작하였다.

모형실험은 지반변형방향에 직각방향으로 즉, 매설관의 중심축 방향으로 평면변형률 상태가 되도록 하였다.

또한, 외부토조 옆판의 안쪽 면에 접착아스티지를 기포가 생기지 않게 조심스럽게 붙이고 오일을 발라 블럭샘플시료와 외부토조 옆판의 마찰을 제거하였다.

내외부 토조의 규격은 표 1에서 보는 바와 같이 내부토조가 외부토조 내부보다 여유 있게 설치하였다. 또한, 내부토조를 관통하여 매설관을 고정시키므로써 이 변형의 영향을 매설관이 평면변형률 상태로 받는 상황을 시뮬레이션하였다.

## (2) 매설관

본 연구에서 적용한 매설관은 상수도용 강관을 가정하였고 측방토압으로 인한 휨을 방지함으로써 매설관의 변형으로 인한 영향을 고려하지 않기 위해 그림 9에서와 같이 강

표 1. 외부토조 및 내부토조의 규격

구분	규격(cm)	길이	높이	폭
외부토조	내부치수	60	35	10.2
	외부치수	77	41	14
내부토조	내부치수	30	20	10
	외부치수	42	24	10

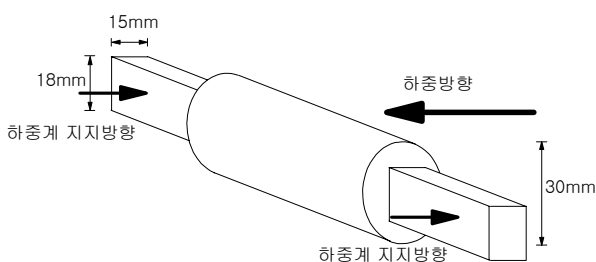


그림 9. 모형강성매설관

봉을 사용하였다. 따라서 강성매설관이 균일한 지반변형의 영향만을 받는 평면변형률상태로 가정할 수 있었다.

그림 9에서 보는 바와 같이 모형 매설관 중 중앙부의 원형 부분은 내부토조내를 관통하는 부분이고 양단부는 토조의 외부프레임에 고정 설치된 하중계(그림 10 참조)에 접하도록 하여 지반변형을 받을 때 발생하는 측방토압을 측정할 수 있게 하였다.

원형 매설관의 직경에 대한 영향을 조사하기 위하여 모형매설관의 직경은 1.5cm, 3.0cm 및 5.0cm의 세 가지로 하였다. 또한 매설관 형상의 영향을 살펴 보기 위하여 한 변의 길이가 3cm인 정사각형 매설관에 대한 실험도 실시하였다.

## 2.2.3 변형제어장치

변형제어장치는 내부토조에 수평방향으로 하중을 가하여 모형지반을 수평방향으로 이동시키고 이동지반 속에 설치된 모형 매설관에 측방토압이 작용할 수 있도록 하였다.

변형제어장치는 압축공기(Compressed air)로 가동되는 실린더에 의해 작동되며 레귤레이터(Regulator)를 부착하여 일정한 공기압이 공급되도록 하였다.

일정한 측방변형은 변형제어장치내 속도조절 스위치박스로 조절되어진다. 변형제어장치를 이용하여 지반의 변형을 유발시킬 때 지반변형속도는 0.1mm/min에서 5.0mm/min 까지 다양하게 가할 수 있도록 하여 지반변형속도에 의한 영향도 살펴볼 수 있게 하였다.

## 2.2.4 계측장치

본 모형실험에서의 측정사항은 연약점성토지반의 변형량과 모형매설관에 작용하는 측방토압의 두 가지로 크게 구분할 수 있다. 지반의 변형은 변위게이지를 사용하여 측정하고, 모형매설관에 작용하게 하는 측방토압은 하중계를 사용하여 측정하였다.



그림 10. 하중계

(1) 하중 측정장치

하중은 매설관의 양단에서 측정하였다. 하중 측정장치는 하중계(Load Cell), 스위치박스 및 컴퓨터로 구성되어 있다.

지반의 거동을 관찰하기 위해 하중계를 외부프레임에 탈착할 수 있게 제작하였다. 또한, 그림 10에서 보는 바와 같이 하중계의 흰부분은 하중계의 방수와 양쪽면에 붙어있는 변형률게이지(strain gauge)의 리드선을 보호하기 위해 실리콘으로 코팅한 상태이다.

그림 11과 같이 토조의 외부프레임 저판 상면에 하중계를 고정시키고 내부토조의 양쪽면에 돌출되어있는 매설관의 양끝단이 밀착되도록 설치하여 측정하였다. 하중계로 측정된 하중값은 컴퓨터에 입력·저장하였다.

(2) 지반변형 측정장치

그림 12에서 보는 마그네틱 지지바를 내부토조 상부에 고정시키고 변위게이지의 한쪽 끝이 외부토조의 외부프레임에 닿게 변위게이지를 설치하여 지반변형을 측정하였다.

즉 내부토조가 수평방향으로 이동하면 외부토조의 변위

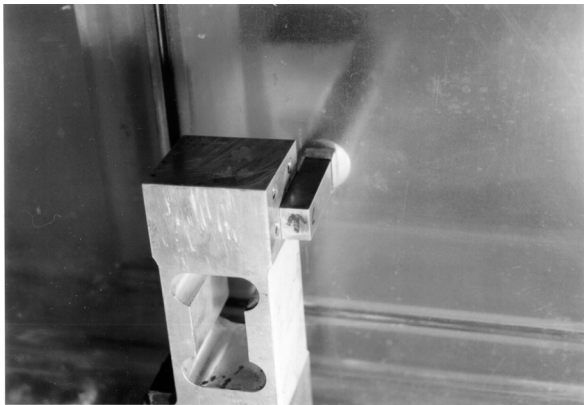


그림 11. 매설관과 하중계의 밀착설치 모습

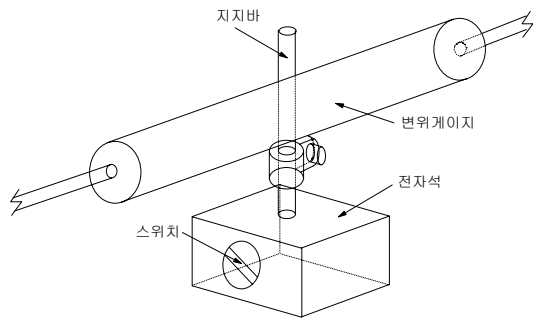


그림 12. 변위게이지

게이지 설치지점과 내부토조 사이가 벌어지게 되므로 이 벌어지는 간격을 변위게이지로 측정하는 원리에 의하여 지반 변형량을 측정하였다. 최대 10cm까지 측정이 가능한 변위 게이지(displacement gauge)를 사용하였다.

2.3 시험 시료

실험에 사용된 점토시료는 영종도의 인천국제공항 부근에서 채취한 해성점토이다. 자연상태의 불교란시료를 채취하기 위하여 지표면으로부터 5m 깊이에서 블록샘플채취기를 정적으로 조심스럽게 관입시켜 시료를 채취한 후 상하판을 대고 볼트로 고정하여 시료의 교란과 함수비의 변화를 방지하였다.

본 점토시료의 토질특성을 알아보기 위하여 KS F 기준에 따라 물성시험 및 역학실험을 실시하였다. 실내토질시험 결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2에서 보는 바와 같이 본 실험에 사용된 점토시료는 액성한계가 29.4%이고 소성지수는 9.73%이므로 통일분류법을 이용하여 분류하면 저압축성점토(CL)의 토질특성을 가지는 것으로 나타났다. 자연함수비가 34.08%이므로 이 점토는 액성한계보다 높은 함수비 상태에 있었음을 알 수 있다. 또한, 삼축압축시험(CU시험)에 의하여 토질정수  $c, \phi$ 를 구하여본 결과 각각 32kPa와 17°이었다.

2.4 실험계획

연약지반의 측방유동이 발생하는 경우의 지반변형속도는 아주 느린 속도에서 빠른 속도에 걸쳐 다양하게 발생하는 것이 일반적이다.

따라서 실내에서 지반의 변형을 현장조건과 유사하게 재현하기 위하여 지반변형속도를 0.1mm/min에서 0.5mm/min까지는 0.1mm/min씩 증가시켜 실험을 실시하고, 광범위한 지반측방유동을 위해서는 0.5mm/min에서 3.0mm/min까지는 0.5mm/min씩 증가시켜 지반의 변형속도를 조절하여 실시하였다.

원형 매설관의 직경에 대한 영향을 조사하기 위해서는 직경 1.5cm, 3.0cm 및 5.0cm의 세 종류의 원형 매설관에 대한 실험을 실시한다. 또한 매설관 형상에 대한 영향을 조사하기 위해 가로 세로가 3.0cm인 정사각형 매설관에 대한 실험도 실시한다.

표 2. 시료의 물리적특성

토질특성	깊이 (m)	W (%)	Atterberg			Gs	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)
			LL(%)	PL(%)	PI(%)			
CL	5	34.08	29.40	19.67	9.73	2.64	17	32

1.5cm 직경 원형 매설관에 대하여는 지반변형속도를 0.1 mm/min에서 0.5mm/min까지 다섯 가지 경우에 대하여 실험을 실시한다.

한편 3.0cm 직경 매설관에 대하여는 0.1mm/min에서 3.0 cm/min까지 열 가지 경우에 대한 실험을 실시한다.

그러나 5.0cm 직경의 원형 매설관과 정사각형 매설관의 경우에는 지반의 변형속도를 0.4mm/min 한 가지 경우에 대하여만 실험을 실시한다.

### 3. 수치해석

모형실험에서 측정된 결과를 유한요소해석에 의한 수치 해석으로 예측치를 구하여 비교 검토하고자 한다.

모형실험에 의한 모형지반의 응력과 변형 거동을 수치해석으로 예측하기 위해서는 현재 많이 사용되고 있는 유한요소해석 프로그램 Plaxis 8.2를 이용하였다(PLAXIS, 2002).

Plaxis 8.2는 네덜란드 PLAXIS사에서 개발한 2차원 지반공학 전용 유한요소해석 프로그램이다. Plaxis 8.2는 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀 점토 그리고 사질토 및 압반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료모형을 갖고 있다.

본 프로그램은 매우 낮은 전단강도의 지반에 굴착 또는 성토하는 경우에 지반의 붕괴를 포함한 변형해석이 가능할 뿐만 아니라 압밀침하 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있다.

#### 3.1 해석 조건

모형실험에서는 강봉매설관이 고정되어 있고 지반(내부토조)이 수평방향으로 이동하는 수동상태로 되어 있지만, 유한요소해석에서는 모형토조를 고정시키고 매설관을 이동시키는 수동상태로 하여 해석을 실시한다.

사실 현장에서의 매설관 거동은 지반과 매설관의 상호작용에 의하여 측방토압이 결정될 것이다. 이 토압을 엄밀히 산정하기 위해서는 매설관이 설치되어 있는 위치에서 매설관이 없을 경우를 대상으로 하여 연약지반의 측방변형량을 먼저 해석하고 매설관이 있을 경우의 측방변형량을 구하여 두 측방변형량의 차이로부터 환산하여 매설관에 작용하는 측방토압을 구하는 것이 보다 정확할 것이다.

이 경우 어느 만큼의 연약지반의 측방변형량을 대상으로 할지가 중요한 요소가 되나 이에 대한 정보가 없어 예측하기가 매우 어렵다. 또한 해석과정이 복잡할 뿐만 아니라 모형실험의 조건도 실제 현장에서의 상황과 차이가 있을 것이므로 해석상 단순화 작업을 통하여 매설관에 작용하는 측방

토압의 거동을 파악하고자 한다.

원형 매설관 규격은 직경을 각각 1.5cm, 3.0cm, 5.0cm로 하였고, 정사각형 매설관의 경우 한 변의 길이를 3.0cm로 하여 해석하였다.

경계조건으로 상부는 자유면으로 하고 하부는 활동(롤러)으로 하며 양 측면은 연직변위만 발생할 수 있게 경계조건을 설정하였다.

배수조건은 비배수 조건으로 하였고, Mohr-Coulomb의 파괴규준 모델을 사용하였다.

매설관 전면의 응력을 측정하여 하중으로 변환하여 측방하중을 산정하였다. 나머지 지반 조건은 모형실험과 동일하게 가정하였다.

## 4. 모형실험 결과

### 4.1 지반변형속도에 따른 하중거동

그림 13과 그림 14는 직경이 각각 1.5cm와 3.0cm인 원형 모형매설관을 대상으로 실시한 모형실험 결과로 지반변형속도의 변화에 따른 매설관 작용 측방하중 거동을 도시한 결과이다.

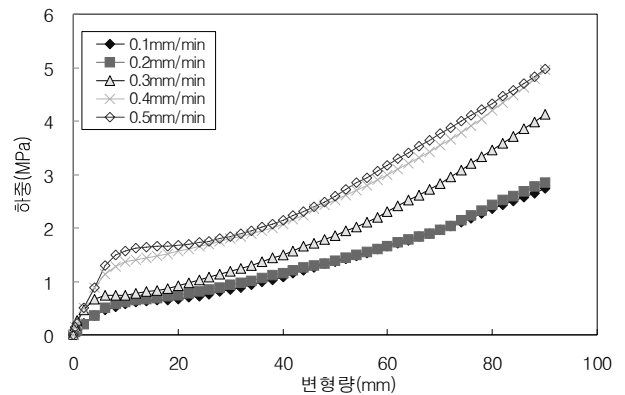


그림 13. 변형량-하중 곡선(직경1.5cm)

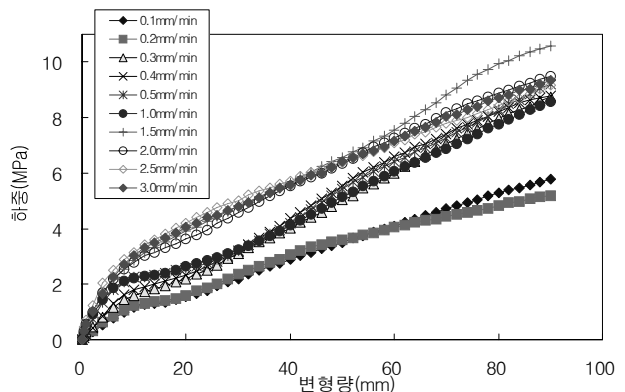


그림 14. 변형량-하중 곡선(직경3.0cm)

우선 그림 13에서는 직경이 1.5cm인 매설관이 설치되어 있는 연약지반에 측방으로 지반변형이 발생되었을 때 연약 지반의 변형량과 모형 매설관에 작용하는 측방하중의 관계를 도시한 결과이다.

이 실험 결과에 의하면 연약지반속의 측방변형속도가 빠를수록 매설관에 작용하는 측방토압은 커짐을 알 수 있다.

다섯 가지의 변형속도에 대한 실험 결과는 대략 세 가지 형태의 거동을 보이고 있다. 즉, 변형속도가 상대적으로 느린 0.1mm/min의 경우와 0.2mm/min의 경우는 서로 유사한 지반변형량-측방하중의 거동을 보이고 있으며 변형속도가 상대적으로 빠른 0.4mm/min의 경우와 0.5mm/min의 경우도 서로 유사한 거동을 보이고 있다.

다섯 번의 실험 모두에서 지반변형량이 5mm와 10mm 사이에서 측방하중의 항복이 발생하였으며 항복 이후에는 하중이 한 동안 수렴되는 경향을 보였다. 그러나 지반변형이 계속하여 증가하면 지반변형량이 대략 30mm에서 40mm 사이에서 부터 측방하중도 다시 증가하는 압축거동을 보이고 있다. 따라서 지반의 측방변형이 계속되면 매설관에 작용하는 하중도 계속적으로 증가하여 상당한 측방하중이 매설관에 작용할 것이 예상된다.

한편 직경 3.0cm 매설관의 경우도 그림 13에서 보는 바와 같이 1.5cm 직경 매설관의 경우와 동일하게 연약지반의 지반변형속도가 빠를수록 매설관에 작용하는 측방하중을 알 수 있다.

3.0cm 직경 매설관에 대한 실험은 지반변형속도가 0.1cm/min에서 3.0cm/min 까지의 열 가지 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 이 경우도 1.5cm 직경의 실험과 유사하게 대략 세 가지 형태의 변형량-측방하중 거동을 보이고 있다. 즉 상대적으로 지반변형속도가 느린 0.1mm/min와 0.2mm/min의 두 경우는 서로 유사한 거동을 보이고 있으며 지반변형속도가 상대적으로 빠른 1.5mm/min에서 3.0mm/min 사이의 네 가지 경우도 서로 유사한 거동을 보이고 있다.

또한, 그림 14에서 보는 바와 같이 열 번의 실험 모두에서 지반변형량이 5mm와 10mm 사이일 때 측방하중이 항복하였음을 보이고 있다. 이는 1.5cm 직경의 실험과 유사한 결과이다. 이 들 실험 중 1.0mm/min이하의 변형속도 실험에서는측방하중이 항복하중에 도달한 후에는 하중이 어느 정도 수렴하였다가 변형이 계속하여 발생하면 지반변형량이 20mm에서부터 하중이 다시 증가하였음을 알 수 있다.

그러나 1.0mm/min보다 빠른 변형속도 실험의 경우에는 항복하중에 도달한 후 수렴과정이 없이 계속하여 하중이 증가하였음을 볼 수 있다.

## 4.2 매설관 직경에 따른 하중거동

지반변형속도가 0.4mm/min인 경우를 대상으로 매설관의 직경이 1.5cm, 3.0cm, 5.0cm인 세 경우에 대한 지반변형량-측방하중 거동을 나타내면 그림 15와 같다.

그림 15와 같이 매설관의 직경이 클수록 매설관에 작용하는 측방하중의 크기와 하중증가율이 커짐을 알 수 있다.

또한 이 측방하중은 세 직경의 실험 모두에서 지반변형량이 5cm에서 10cm 사이에 항복하중에 도달하였을 알 수 있었다. 직경이 1.5cm와 3.0cm의 경우에는 항복하중에 도달 한 이후에는 하중이 한 동안 수렴된 값을 보였다. 그러나 직경이 큰 경우는 항복하중에 도달한 후에도 하중이 선형적으로 계속 증가하였음을 알 수 있다.

직경이 작은 1.5cm 및 3.0cm의 매설관에서는 지반변형량-측방하중의 거동이 탄성거동과 소성거동으로 확연히 구분된다. 그러나 직경이 5.0cm의 경우는 이 경향이 약하게 나타났다.

## 4.3 매설관 형상에 따른 하중거동

그림 16은 지반변형속도가 0.4mm/min일 때 직경 3.0cm의 원형 매설관과 폭이 3.0cm인 정사각형 매설관의 모형실험 결과 얻은 지반변형에 따른 측방하중의 거동을 도시한

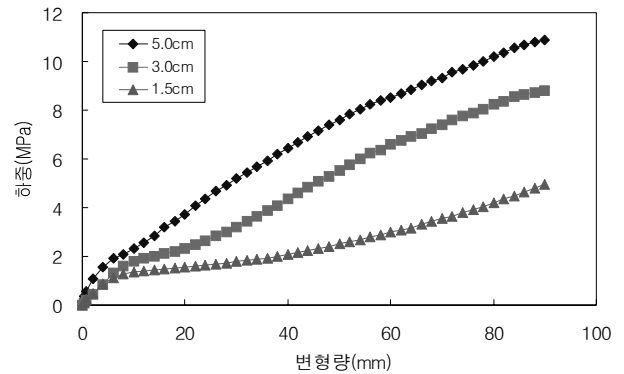


그림 15. 직경에 따른 변형량-하중 곡선(0.4mm/min)

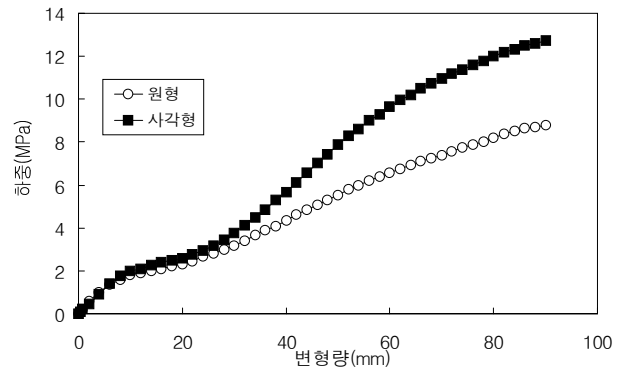


그림 16. 매설관형상에 따른 변형량-하중 곡선(모형실험)



그림이다. 정사각형 매설관의 경우 전기 및 통신, 상수도 공동구로 널리 사용하는 Box 구조물을 가정하여 실험하였다.

이 그림에서 알 수 있듯이 약 30mm 지반변형량이 발생하기 전까지는 두 경우의 지반변형량-측방하중의 거동이 유사하게 나타났다. 즉 10mm 정도의 지반변형량에서의 항복하중에 이르기까지의 거동과 이후 25mm까지의 수렴구간에서의 거동은 원형 매설관이나 정사각형 매설관이나 모두 유사함을 알 수 있다. 그러나 25mm 이후의 지반변형량에서는 원형 매설관에 비해 정사각형 매설관에 가해지는 측방하중이 상당히 크게 나타났다.

## 5. 고찰

### 5.1 지반변형속도의 영향

그림 17은 모형실험 결과와 수치해석의 결과를 비교한 그림이다. 즉 매설관의 직경이 1.5cm인 경우의 지반변형량-측방하중의 거동을 비교한 그림이다.

이 그림 속에 지반의 변형속도를 0.1mm/min에서 0.5mm/min까지 변화시킨 경우의 모형실험에서의 거동을 모두 나타냈다. 그러나 수치해석에서는 전 하중을 순간재하에 의한 조

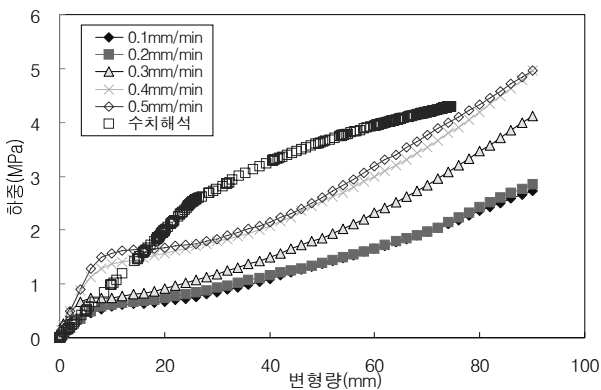


그림 17. 지반변형속도에 따른 수치해석과 모형실험 비교(원형관 1.5cm)

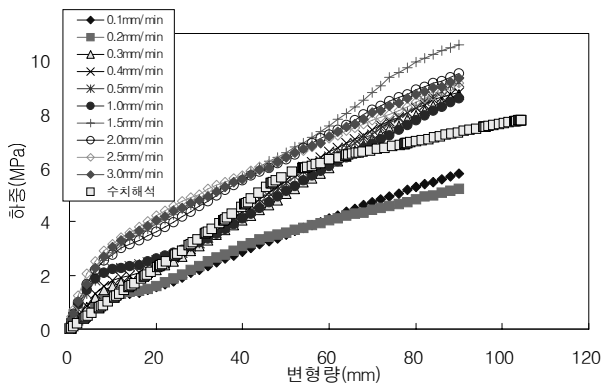


그림 18. 지반변형속도에 따른 수치해석과 모형실험 비교(원형관 3.0cm)

건으로 재하한 상태를 대상으로 해석한 결과이다. 이 비교 결과에 의하면 순간재하에 대한 수치해석에 의한 측방하중은 최대변형속도가 0.5mm/min인 실험에 대한 결과보다도 측방하중이 크게 나타났다.

그림 18은 매설관의 직경이 3.0cm인 경우로 지반의 변형속도를 0.1mm/min에서 3.0mm/min까지 변화시킨 모형실험 결과와 수치해석의 결과를 비교한 그림이다. 이 그림에 의하면 수치해석 결과의 거동은 모형실험에서 지반변형속도가 중간 정도 빠르기인 0.3mm/min에서 1.0mm/min 사이의 조건에서 실시한 모형실험 결과와 유사함을 알 수 있다. 결국 수치해석에 적용한 순간재하의 하중조건은 모형실험에서 0.3mm/min에서 1.0mm/min 사이의 속도로 실시한 실험 결과에 해당한다고 말할 수 있을 것이다.

### 5.2 매설관직경에 대한 영향

그림 19는 원형매설관의 직경에 따른 지반변형량-측방하중과의 관계를 모형실험과 수치해석의 결과로 서로 비교한 그림이다. 실내 모형실험은 그림 15에 도시된바와 같이 지반변형속도가 0.4mm/min인 경우에 해당한다.

그림 19와 같이 직경에 따른 매설관의 항복하중과 지반변형량의 수치해석 결과는 매설관의 직경에 비례하여 매설관에 가해지는 항복하중의 크기가 증가하는 경향을 알 수 있다.

또한, 지반변형 초기에는 측방하중이 매설관의 직경의 영향을 적게 받지만 지반변형량이 증가함에 따라 매설관의 직경에 대한 영향이 커짐을 알 수 있다.

먼저, 수치해석 결과를 분석하면 직경 1.5cm의 경우 항복하중이 25mm 가량의 지반변형량에서 도달하였으며, 직경 3.0cm의 경우는 50mm 가량의 지반변형량에서 항복하중에 도달하였고, 직경 5.0cm의 경우는 70mm 가량의 지반변형량에서 항복하중이 나타났다. 즉 수치해석에서는 매설관 직경이 증가함에 따라 항복하중도 증가하는 것으로 나타났다.

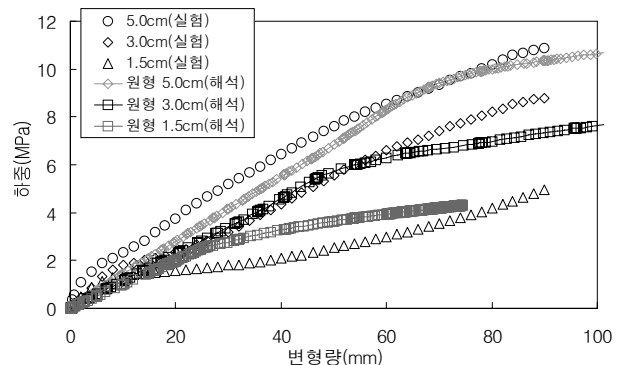


그림 19. 원형관의 모형실험과 수치해석 결과의 비교

모형실험과 수치해석결과를 비교해 보면 모형실험에서는 제 1항복점과 제 2 항복점의 위치가 확연하게 나타났지만 수치해석에서는 제 1 항복점 외에 제 2 항복점이 나타나지 않았다.

직경 1.5cm의 매설관의 경우 지반변형량에 따라 하중 증가가 모형실험보다 수치해석이 다소 크게 나타났으며, 직경 3.0cm의 경우 항복하중이 발생하기 전까지는 유사한 변형량-측방하중 거동을 나타내다 항복하중 이후로는 수치해석 결과가 수렴하는 경향을 보인다.

직경 5.0cm의 매설관은 직경 1.5cm의 매설관과 반대로 지반변형량에 따라 하중증가가 모형실험 결과보다 수치해석결과가 작게 나타나다 항복하중에서 서로 유사한 측방하중을 나타내고 있다.

### 5.3 매설관 형상에 대한 영향

직경 3.0cm의 원형 매설관과 폭이 3.0cm인 정사각형 매설관을 사용하여 실시한 모형실험 결과를 반대수(semi-logarithmic)축을 적용하여 정리하면 그림 20과 같다.

그림 20에서 보는 바와 같이 모형실험에서는 지반의 변

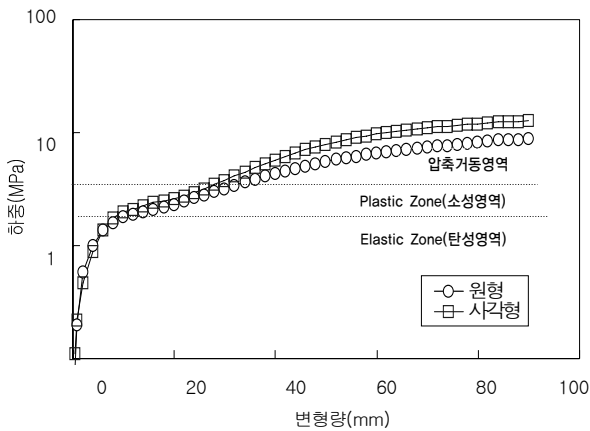


그림 20. 매설관 형상에 따른 변형량-하중 곡선(모형실험)

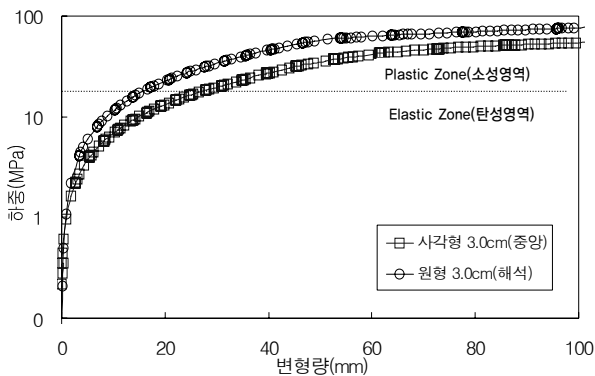


그림 21. 매설관 형상에 따른 변형량-하중 곡선(수치해석)

형량이 작은 경우는 매설관의 형상에 따른 측방하중의 차이가 거의 없으나, 지반변형량이 증가함에 따라 원형 매설관에 비해 정사각형 매설관에 가해지는 측방토압이 크게 나타남을 알 수 있다.

또한, 측방하중은 지반변형이 작은 경우 즉, 지반이 탄성 거동 및 소성변형을 하는 구간에서는 매설관 형상에 대한 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나 압축거동영역에서는 현격한 차이를 보이고 있다.

그림 21은 직경 3.0cm의 원형 매설관과 폭이 3.0cm인 정사각형 매설관을 사용하여 실시한 수치해석 결과를 비교하여 나타낸 그림이다.

이 그림에 의하면 지반변형량이 작은 경우는 매설관의 형상에 따른 측방하중의 차이가 거의 없으나 지반변형량이 증가함에 따라 원형 매설관에 비해 정사각형 매설관에 가해지는 측방하중이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 모형실험의 결과와 일치하지 않는 결과이다. 그 이유는 정사각형의 하중을 매설관의 중앙에 작용하는 하중으로 비교하였기 때문이다. 일반적으로 정사각형의 경우는 모서리부에 토압집중 현상이 발생하므로 중앙부에 작용하는 측방토압은 비교적 작게 작용하게 된다.

그 밖에도 수치해석에서는 모형실험과 달리 탄소성 거동만을 나타내고 있다. 즉, 탄성영역과 소성영역만 존재하고 압축거동영역은 존재하지 않는 것으로 나타났다.

## 6. 지반변형형상

지반에 발생하는 토압분포를 확인하기 위하여 내부토조에 일정한 간격(1.5cm)으로 면봉을 설치하여 30mm 변형 시 지반의 파괴형상을 완만한 곡선으로 연결하여 그림 22와 그림 23에 도시하였다.

그림 22와 그림 23에 나타난 바와 같이 30mm지반변형이 발생 시 지반내의 파괴형상을 살펴보면 원형인 경우에 비해 정사각형매설관인 경우 토압이 가해지는 방향인 매설관 전면에서 토압분포가 넓게 분포한다. 매설관 주위에서의 지반 변형 상태는 매설관이 원형일 경우 관 형상으로 인하여 후면 및 측면 지반에 영향을 미쳐 토압의 영향범위는 그림에 도시한 바와 같이 된다. 또한, 정사각형 매설관의 경우는 매설관 전면에서만 영향을 받으며 후면에는 지반변형영향은 발생하지 않았다.

토조내 변형은 관 후면이 침하되고 전면측이 융기되는 경향을 보였다. 융기위치가 원형매설관에서는 관 전면부에 정사각형관에서는 직상단부에 형성되었다.

이는 원형매설관 측면 형상에 마찰력에 의한 토압분포의

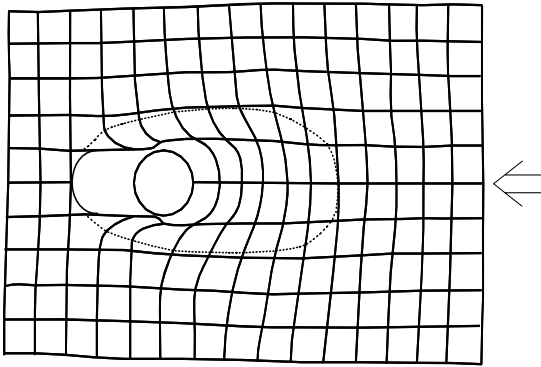


그림 22. 지반변형량 30mm일 때의 지반변형형태(D=3.0cm 원형)

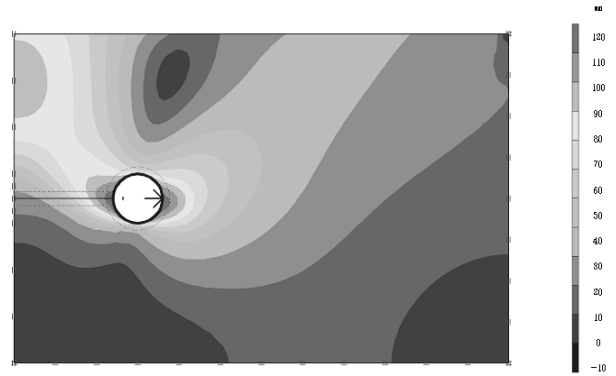


그림 26. 변위 분포도(D=3.0cm 원형)

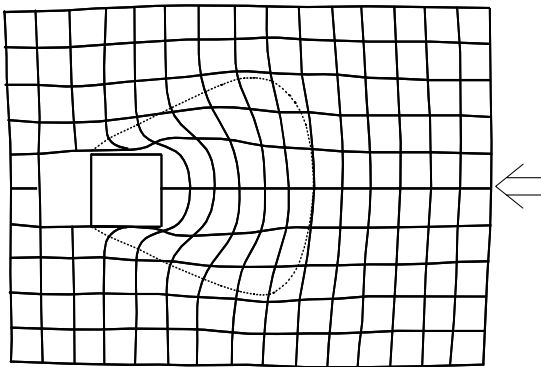


그림 23. 지반변형량 30mm일 때의 지반변형형태(B=3.0cm 사각형)

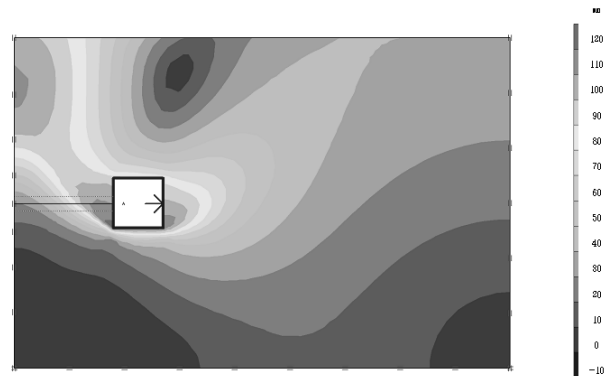


그림 27. 변위 분포도(B=3.0cm 사각형)

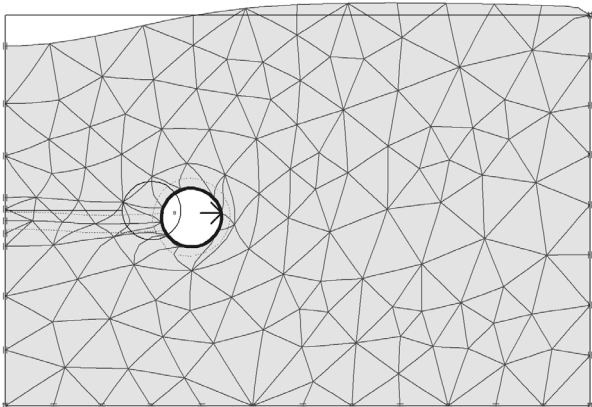


그림 24. 매설관 거동 및 지반응기 형상(D=3.0cm 원형)

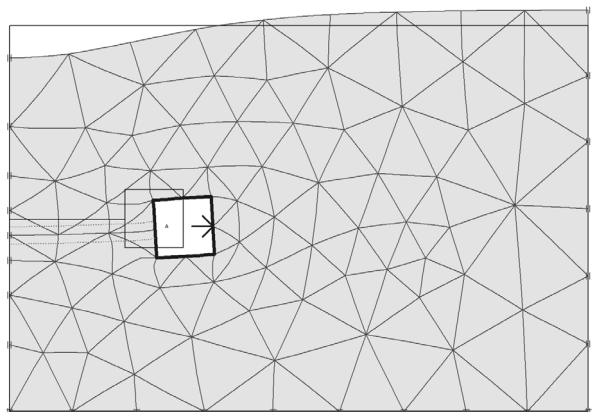


그림 25. 매설관 거동 및 지반응기 형상(B=3.0cm 정사각형)

영향이 나타나는 것으로 추측된다.

그림 24 및 그림 25는 수치해석에 의한 지반변형형태이다. 모형실험과 달리 매설관을 고정시켜 해석하지 않은 관계로 매설관이 하중 방향으로 약간 침하하고 이에 따라 상부 지반도 매설관을 기준으로 매설관 앞까지는 침하하였으나 반대 측은 지반이 융기되는 형상을 나타내고 있다.

이와 같은 이유는 매설관이 하중 작용과 같은 방향으로 침하하면서 매설관 저면에 응력이 집중되었기 때문으로 판단된다.

그림 26과 그림 27은 수치해석에 의한 지반변위분포도를 도시한 결과이다. 이 도면에서 보는 바와 같이 원형 매설관의 경우 비교적 매설관을 중심으로 중간 지점이 변위가 큰 편이며 대칭인 반면 정사각형 매설관의 경우 중간 지점보다 매설관 저면의 모서리부분에 응력이 집중되어 변위분포가 좌우 대칭이 되지 않게 나타났다.

## 7. 결 론

측방유동 연약지반 내에 설치된 모형 매설관에 작용하는 측방토압의 거동을 모형실험과 수치해석을 통하여 관찰하여 보았다. 연약지반의 측방유동으로 인해 지중 매설관에

작용하게 되는 측방토압에 영향을 미치는 요소를 조사하기 위해 연약지반의 변형속도, 매설관의 직경, 매설관의 형상을 변화시키면서 모형실험을 실시하였다. 그런 후 이 모형실험의 결과를 유한요소해석에 의한 해석결과와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연약지반의 측방유동으로 인하여 매설관에 작용하는 측방하중은 연약지반의 측방변형속도가 빠를수록 크게 작용한다.
- (2) 순간재하 조건에 의한 수치해석 결과는 지반변형속도가 중간 정도 빠르기인 0.3mm/min에서 1.0mm/min 사이의 조건에서 실시한 모형실험 결과와 유사하다.
- (3) 대부분의 모형실험결과 지반변형량이 작은 시점에서 측방하중의 제1항복이 발생하며 이때까지 탄성변형거동을 보이다가 제2항복에 이르기까지 하중이 한 동안 수렴되는 소성변형거동을 보인다. 지반변형이 계속하여 증가하면 측방하중도 다시 증가하여 압축거동을 보인다. 그러나 빠른 지반변형속도 실험의 경우에는 항복하중에 도달한 후 수렴과정이 없이 계속하여 하중이 증가하였다. 한편 수치해석에서는 탄성영역 후 소성영역만 존재하였다.
- (4) 매설관의 직경에 비례하여 항복하중이 증가하며, 지반변형 초기에는 매설관의 직경의 영향을 적게 받지만 지반변형량이 증가함에 따라 매설관의 직경에 대한 영향이 커진다.

- (5) 매설관의 직경이 클수록 측방유동 연약지반 속에 설치된 매설관에 작용하는 측방하중의 크기와 하중증가율이 커진다. 지반변형 초기에는 측방하중이 매설관 직경의 영향을 적게 받지만 지반변형량이 증가함에 따라 매설관의 직경에 대한 영향이 커진다.
- (6) 10mm 정도의 지반변형량에서의 항복하중에 이르기까지의 거동과 이후 25mm까지의 수렴구간에서의 거동은 원형 매설관이나 정사각형 매설관이나 모두 유사함을 알 수 있다. 그러나 25mm 이후의 지반변형량에서는 원형 매설관에 비해 정사각형 매설관에 가해지는 측방토압이 상당히 크게 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 홍원표, 한중근, 배태수(2002), 측방유동지반속 지중매설관에 작용하는 토압식 산정, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 18, No. 5, pp. 55~65.
2. 홍원표, 한중근(2002), 측방변형지반속 매설관 주변지반의 파괴 모드, *한국환경복원농학기술학회지*, Vol. 5, No. 5, pp. 11~21.
3. 홍원표, 이광우, 조삼덕, 이재호(2006), 성토하부 연약지반의 측방유동 평가, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 22, No. 10, pp. 93~100.
4. Crofts, J. E., Menzies. B. K. and Tarzi. A. I.(1977), Lateral Displacement Of Shallow Buried Pipelines Due To Adjacent Deep Trench Excavations, *Geotechnique*, Vol. 27, No. 2, pp. 161~179.
5. Aleksandar Sedmak Vesic(1972), Expansion of Cavities In Infinite Soil Mass. *ASCE*, Vol. 98, No. 7, pp. 265~290.

(접수일: 2010. 5. 24 심사일: 2010. 6. 9 심사완료일: 2010. 8. 15)