

# 강성매설관에 작용하는 연직토압에 관한 수치적 연구

## A study on the Vertical Earth Pressure in rigid buried pipe by numerical approach

박상원\* Park, Sang-Won 한명식\*\* Han, Myung-Sik

### Abstract

In this Paper, to calculate vertical earth pressure affected from several factors in case of rigid buried pipe with cohesionless backfill soil. The result from PENTAGON 3D is compared with several equation's result such as the Janssen, Marston, Spangler, Handy's equation.

Result of study shows that vertical earth pressure of each equation is affected by backfill width, backfill depth and wall friction. And vertical earth pressure is linearly increased with backfill depth and backfill width. Marston's equation and Handy's equation are overestimated and FEM(Finite Element method) analysis and Janssen's Silo equation are affected by more backfill depth than backfill width.

### 1. 서론

관곽에 들어 철도 및 도로를 횡단하는 매설관의 크기와 규모가 커짐에 따라서 굴착 깊이가 증가하고 매설관의 크기가 증가함에 따라 교량이나 건물을 설계할 경우만큼이나 매설관의 설계에 있어서도 정확성이 요구되고 있다. 따라서 매설구조물을 설계할 때에 있어서 매설구조물에 작용하는 퇴폐음에 의한 연직하중을 정확히 산출하는 것이 무엇보다 중요한 문제이다. 또한 도심지에서의 매설관 시공 과정에서 인접구조물의 지표 상재하중에 의한 매설관의 안정성 문제 또한 중요한 설계 요인이 된다. 이와 같이 좁은 공간을 퇴폐음 하는 경우에 발생하는 연직토압에 관한 연구는 1895년 Janssen 이 토압이론식을 유도한 이래로 Marston, Spangler, Handy 등에 의해 연구되었다.

따라서, 본 연구에서는 조밀하게 조성된 퇴폐음 지반에서 도랑형 강성매설관에 작용하는 연직토압에 대한 Janssen, Marston, Spangler, Handy 이론식을 수치해석을 통하여 퇴폐음 공간의 바닥폭과 퇴폐음 깊이에 대한 영향 그리고 벽면마찰각과 기타 다른 영향인자들에 대하여 비교 분석함으로써 기존 이론식의 타당성을 검증 하였다.

연구방법은 기존 이론식의 역학적 거동 영향인자를 동일한 매설 깊이에서 퇴폐음 저부폭의 변화에 따른 매설관에 작용하는 연직토압 그리고 동일한 퇴폐음 저부폭에서 매설깊이의 변화에 따른 매설관에 작용하는 연직토압을 Janssen의 Silo이론, Marston, Spangler, Handy 이론식과 수치해석프로그램(PENTAGON-3D)과 비교 분석을 통한 기존이론식의 이론적 고찰을 실시하였다.

\* (주)태조엔지니어링 대리, 비회원

\*\* (주)태조엔지니어링 대표이사, 정회원

## 2. 이론적 배경

### 2.1 개요

매설관에 적용하는 토압의 산출방법은 매설유형 및 잠재하중의 전달방식에 따라 여러 가지 식이 제안되고 있으며 그 크기도 상당한 차가 있다. Janssen, Spangler, Marston, Anderson 및 Handy 등의 제안식이 있으며, 이 중에 Marston-Spangler식이 가장 많이 쓰이고 있다.

### 2.2 기존 지지력 이론

#### 2.2.1 Silo 이론

Janssen(1895)에 의하여 제안된 이론으로서 시멘트 및 곡물의 지장을 위한 사일로의 벽면 및 바닥면에 작용하는 수평 및 연직압력은 지장물권의 함수비 및 단위용적당 중량에 따른 지장물권의 내부마찰각, 벽면마찰각 등을 이용하여 매설관의 단위길이당 작용하는 연직토압( $W_c$ )을 산출하였다.

$$W_c = \frac{B\gamma_s}{2\mu K_a} \left(1 - e^{-\frac{2\mu K_a h}{B}}\right)$$

여기서,  $\gamma_s$  : 흙의 단위체적중량( $t/m^3$ )

$B$  : 관 상단에서의 굴착폭(m)

$K_a$  : 주동토압계수 =  $\tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)$

$\mu$  : 흙과 silo 벽면에 작용하는 마찰계수 =  $\tan\phi$

$\phi$  : 흙의 내부마찰각

$h$  : 지표에서 관 상단까지의 거리(m)

#### 2.2.2 Marston이론

Marston과 Anderson(1913)은 박스 컬버트, 삼하수관 및 가스 파이프 등의 설치에 있어 원지반상에 설치된 구조물의 상부에 상토와 경우와 원지반을 줄게 굴착한 후 되매울 하는 경우의 토압 산정식을 고려대상 단면의 평면요소에 대한 힘의 평형을 위하여 제안하였다.

$$W_c = \frac{\gamma_s B_s^2}{2K_a t} \left(1 - e^{-\frac{2K_a h}{B_s}}\right)$$

#### 2.2.3 Spangler 이론

Spangler는 Marston이론을 확장하여 박스 컬버트, 삼하수관, 가스관 등의 매설 시공조건, 매설물의 강성 및 되매울 또는 성토지반의 취하 등의 조건에 따라 달라지는 응력의 상태를 정리하였다.

Spangler는 관의 매설형식을 도랑형 매설관, 정돌층형 매설관, 부돌층형 매설관, 불완전 도랑형 매설관 등의 형태로 분류하였으며 이 중 가장 일반적인 도랑형 매설관의 경우에 관이 받는 토압을 pipe의 외경, 굴착폭과 매설깊이, 흙의 단위체적중량, 토압계수 등에 따라 유도하였다.

$$W_c = C_d B_s^2$$

여기서,  $C_d$  : 하중계수 =  $1 - e^{-\frac{2K_a h}{B_s}}$

## 2.2.4 Handy 이론

Handy는 고강형태의 좁게 골짜린 공간에서의 외베을 토압에 관한 연구에서 외베을 흙이 활동되어 보이는 평면까지 형태에 주목하여 최소주응력의 궤적을 연결하는 최소주응력 아치로서 밝힌 바 있으며 기존의 Maston(1913), Spangler등(1938)들이 채택한 Rankine의 토압계수  $K_a$ 의 이론적 오류를 지적하고 수정을 기하여 새로운 제안하였고 평균연직응력을 사용할 것을 주장하여 평면 아칭효과에 의한 수평응력 평균 연직응력비를  $K_c = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ 로서 사용할 것을 제안하였다.

$$W_c = \frac{\gamma B^2}{2k_c \mu} \left( 1 - e^{-2K_c \frac{h}{B}} \right)$$

여기서,  $K_c = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = 1.06 (\cos^2 \theta + K_a \cdot \sin^2 \theta)$

## 3. 수치해석

### 3.1 수치해석 개요

본 연구에서는 지반요소별 고려한 3차원 유한요소 해석을 수행하기 위하여 3차원 해석 프로그램인 PENTAGON-3D를 이용하였으며 해석 결과와 Marston, Spangler, Handy, Janssen의 silo 이론식에 의한 연직토압과 비교 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 사용된 수치해석 프로그램인 PENTAGON-3D는 3차원 연속체로 이루어진 구조물이나 지반에 외적인 경계조건이 주어지면 그에 해당하는 내부 변수들 계산하는 유한요소해석 프로그램으로 흙-구조물 합성 구조체를 탄소성적으로 모델링 하였다. 이 때, 외베을 흙의 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

그림 3.1에서 해석 단면 및 경계조건을 보여주고 있다. 수치해석 조건은 지반의 하부는 현지조건이며 지반의 연직부분은 분리조건으로 설정하여 배설관의 단면을 모델링 하였으며 배설관은 20개의 요소로 그리고 외베을 지반은 절결 425개, 요소 388개로 이루어진 유한요소망으로 해석모델링 하였다.

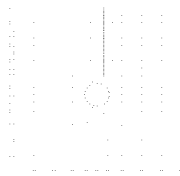


그림 3.1 해석 단면 및 경계조건

본 해석에 사용된 외베을 지반의 물성치는 사질토 지반으로서 지반의 상대밀도(D<sub>r</sub>)에 따른 내부마찰각( $\phi$ )의 산정에 의하여 조밀하게  $D_r=80$ ,  $\phi=30^\circ$ 조성된 지반을 가정하였으며 탄성계수 $=2.6 \times 10^7$ Pa, 프아송비 $=0.33$  단위중량 $=2.0t/m^3$ 이고 매질 구조물은  $D=1.5m$ ,  $t=0.5m$ 로서 입력 물성치는 탄성계수 $=1.8 \times 10^{10}$  Pa, 프아송비 $=0.2$  단위중량 $=2.3t/m^3$ 를 입력 물성치로 가정하였다.

### 3.2 수치해석 결과분석

그림 3.2는 퇴비용 바닥폭이 3.0m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 5.0m인 경우 대실관 벽체에 작용하는 대실깊이별(H=0.5→5.0m) 연직도압에 대하여 수치해석결과를 분석하였으며 각각의 경우에 대한 연직도압의 변화에 대하여 수치해석 결과를 보여주고 있다.

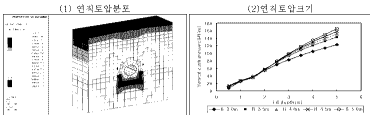


그림 3.2 유한요소해석에 의한 퇴비용특별별 연직도압의 크기

퇴비용 바닥폭 B=3.0, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 5.0m 각각 5가지 Case에 대하여 대실깊이(H=0.5→5.0m)에 대한 유한요소해석 결과를 볼 때 퇴비용 지반에서 지하대실관 벽체에 작용하는 연직도압의 크기 및 분포형상은 퇴비용 바닥폭이 증가함에 따라 대실깊이가 5.0m의 경우 최대 약 40kN/m 정도의 연직도압의 크기의 차이가 나타났으며 또한 퇴비용 깊이가 증가할수록 직선적으로 증가하는 경향을 보였다.

## 4. 이론치와 수치해석 결과 비교

### 4.1 퇴비용 지반의 바닥폭의 영향

연직도압에 미치는 영향인자를 고찰한다면 연직도압에 미치는 주된 영향인자는 퇴비용 지반의 바닥폭과 대실깊이, 퇴비용 높이 및 지반과의 벽면 마찰각이 연직도압에 영향을 미친다.

그림 4.1에서는 퇴비용 지반에서 바닥폭의 영향으로 바닥폭 B에 따른 연직도압크기를 보여주고 있다. 퇴비용 지반의 바닥폭 B의 영향은 퇴비용 깊이 H가 동일할 경우 바닥폭의 증가에 따른 연직도압의 크기는 Marston, Spangler, Handy, Silo, 수치해석 모두 증가 경향을 보이며 그 크기는 Marston, Spangler, Handy, 수치해석프로그램(PENTAGON-3D), Janssen의 Silo이론식의 순으로 연직도압의 크기가 나타났다. 또한, Marston과 Handy이론의 결과값은 바닥폭에 증가에 대해 민감하게 증가하는 경향을 보이며 일차원 직선으로 증가하는 것으로 나타났으며 수치해석결과와 Janssen의 Silo이론 결과 값 보다 과도하게 평가되는 것을 알 수 있었으며 수치해석결과와 Janssen의 Silo이론의 결과값은 바닥폭의 증가에 따라 미세한 증가를 보이며 민감하게 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있었다. 분석 결과 퇴비용 지반의 대실깊이가 일정한 경우 퇴비용 지반의 바닥폭 증가에 따른 연직도압의 증가는 원지반과 퇴비용 지반과의 벽면마찰 저항력에 의한 영향의 감소에 의한 결과로 판단된다.

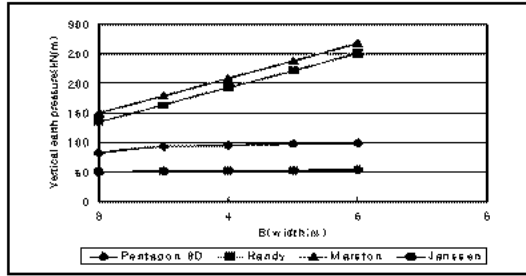


그림 4.1 바닥폭 B에 따른 연직토압

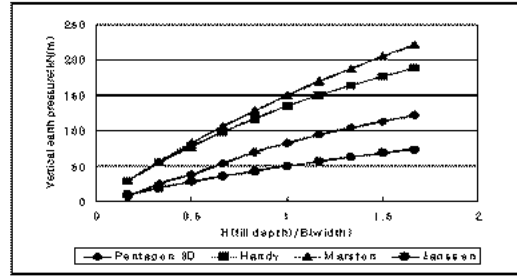


그림 4.2 H/B에 따른 연직토압

#### 4.2 퇴매음 저반의 매설깊이의 영향

그림 4.2에서는 퇴매음 저반의 매설깊이의 영향으로 H/B에 따른 연직토압 분포를 보여주고 있다. 퇴매음 저반의 매설깊이 H의 영향으로서 퇴매음 저반의 바닥폭을 일정하게 유지한 경우 연직토압의 크기는 매설깊이가 증가함에 따라서 증가한다. Marston과 Handy의 이론식에 의한 결과값은 거의 일차원 직선으로 증가함을 보이며 추세선에 의한 해석결과 바닥폭의 영향과 거의 동일하게 증가 하는 것으로 나타났다. 그리고 Silo이론과 수치해석결과 는 퇴매음 저부폭에 의한 증가율보다는 매설깊이의 증가에 따라 더 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 퇴매음 매설깊이의 증가에 따라 Marston, Handy, Silo 이론에 의한 결과값과 수치해석프로그램(PENTAGON-3D)결과 모두 직선적으로 증가하는 경향을 보이다가 퇴매음 매설 깊이가 커짐에 따라 연직토압의 증가율이 둔화됨을 알 수 있었다. 분석결과 Marston, Handy, Silo이론식과 수치해석결과 모두 퇴매음 저반의 매설깊이에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 갖으며 각각의 이론값의 크기는 Marston식, Handy식, PENTAGON-3D, Janssen의 Silo식의 순으로 연직토압의 크기가 나타났으며 그 차이가 H/B의 비에 따라 다르게 나타났다. 또한, Handy이론식이 Marston식보다 연직토압의 크기가 작게 발생하는 이유는 퇴매음 저반의 평면아치 형태에 주목하여 최소주응력의 제약을 연결하는 최소주응력 아치로서 평면 아칭효과(arching effect)에 의한 수평응력 평균 연직응력비의 사용에 의한 것이다.

#### 4.3 퇴매음 저반의 벽면마찰각의 영향

굴락면과 퇴매음 흙과의 벽면마찰각의 영향은 퇴매음 깊이에 대한 영향이나 퇴매음 바닥폭에 대한 영향에 비하여 작은 것으로 나타났다. 아칭현상에 의해서 벽면 마찰각이 증가할수록 토압경감효과가 나타났으며 Handy의 이론식의 경우 주동토압계수의 이론적 오류를 지적하고 평균연직응력비의 제안으로 벽면마찰각에 따라서 토압경감효과가 가장 크게 나타나는 것으로 나타났다.

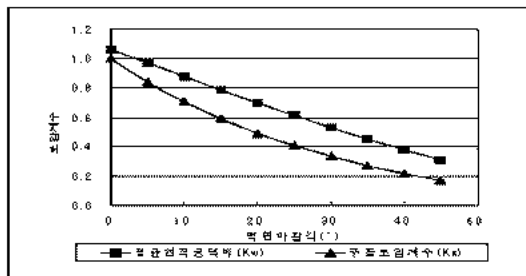


그림 4.3 벽면마찰각에 따른 토압계수

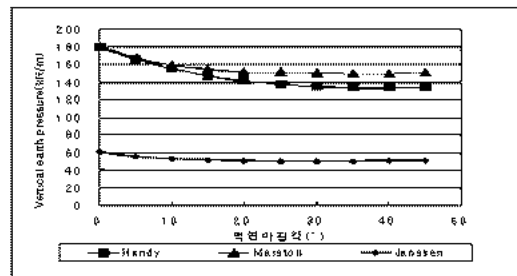


그림 4.4 벽면마찰각에 따른 연직토압

## 5. 결론

퇴매음 지반에서 매설관에 작용하는 연직토압을 구하기 위한 이론식들과 수치해석을 통한 PENTAGON-3D 해석결과와의 비교를 통해 퇴매음 지반의 바닥폭, 매설깊이에 따른 연직토압의 분포를 비교 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 퇴매음 바닥폭의 영향은 퇴매음 바닥폭의 증가에 따라 연직토압의 크기는 Marston, Spangler, Handy, Silo, 수치해석프로그램(PENTAGON-3D) 모두 증가 경향을 보이며 연직토압 크기는 Marston, Spangler, Handy, PENTAGON-3D, Silo이론식의 순으로 나타났다.
- 2) 퇴매음 지반의 매설깊이의 영향은 매설깊이가 증가함에 따라서 Marston, Handy, Silo 이론에 의한 결과값과 수치해석프로그램(PENTAGON-3D)결과 모두 직선적으로 증가하는 경향을 보이다가 퇴매음 매설 깊이가 커짐에 따라 연직토압의 증가율이 달라짐을 알 수 있었으며 Marston 식, Handy식, PENTAGON-3D, Janssen의 Silo식의 순으로 연직토압의 크기가 나타났지만 그 차이가 H/B의 비에 따라 다르게 나타났다.
- 3) Marston, Handy이론에 의한 연직토압산정은 퇴매음 매설깊이와 바닥폭에 대해 모두 동일한 증가율로 민감하게 영향을 주어 일차원직선으로 증가되는 것으로 나타났으며 수치해석프로그램(PENTAGON-3D)결과와 Janssen의 Silo이론의 결과값은 바닥폭 보다는 매설깊이에 대하여 더 민감하게 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 김홍택 (1990), "암 근처에 설치되는 옹벽의 발생토압에 관한 연구", 대한토질공학회지 제6권, 제 4호, pp.7-17
2. 김은섭, 이상덕 (1999), 지하박스구조물에 작용하는 토압에 관한 실험적 연구, 한국지반공학회논문집, Vol. 15-4, No. 8, pp.235-246
3. 문창렬 (1999), 비대칭 좁은 공간에서의 퇴매음 토압에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제 15 권, 제 4 호, pp.261-277
4. 이승래, 백규호, 박현일 (1993), 아칭 효과를 고려한 강성체 옹벽의 주동 토압 산정, 대한토목학회 학술발표회집, pp.457-460
5. 정성교, 조기영, 윤치관, 이대명 (1996), 뒤채움(굴착)의 형상에 따라 매설 박스에 유발하는 토압, 한국지반공학회논문집, Vol. 12-5, No. 10, pp.75-85
6. 천병식(1998), "지반공학 -이론과 실제-", 도서출판 구미서관, pp.285-295
7. 배규필, 이석원, 박시현, 배규진 (2002), 개착식터널구조물의 역학적 거동 영향인자 분석을 위한 수치해석적 연구, 한국지반공학회 학술발표회, pp.703-710
8. Handy, R. L.(1985), The arching in soil arching, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. GT3, pp.302-318
9. Spangler, M.G. and Handy, R.L. (1982), Soil Engineering, 4th Ed. Harper and Row, Publishers, pp. 727-740