

강성매설관에 작용하는 되메움토 연직토압

Vertical Earth Pressure on Buried Pipes in Ditches due to Fills

박 상 원¹⁾ · 도 종 남²⁾ · 정 종 주²⁾ · 천 병 식[†]

Park, Sangwon · Do, Jongnam · Jung, Jongju · Chun, Byungsik

ABSTRACT : In this paper, vertical earth pressure by CANDE program is compared with that by some equations such as the equation by Janssen, Marston, Spangler, and Handy to calculate vertical earth pressure with respect to several factors acting on a rigid buried-pipe filled cohesionless soil. As a result of comparative analysis of vertical earth pressure with each equation, primary factors are affected by backfill width, backfill depth and wall friction. Moreover, vertical earth pressure is linearly increased with backfill depth and width from results of the finite element method. Handy's Equation is reasonable for finite element method while Marston equation is overestimated in case of the design of buried-pipe and box.

Keywords : CANDE, Ditches due to Fills, Buried-Pipe, Vertical Earth Pressure

요 지 : 본 연구에서는 조밀하게 조성된 되메움 지반에서 강성매설관에 작용하는 연직토압에 대하여 Janssen, Marston, Spangler, Handy 이론식과 수치해석 프로그램인 CANDE를 통해 되메움 공간의 저부폭과 되메움 깊이에 대한 영향, 벽면마찰각, 기타 다른 영향인자들에 대하여 비교·분석하였다. 각 이론식들의 비교·점분식결과, 되메움 지반에서의 연직토압에 대한 이론식들은 되메움 저부폭, 매설깊이, 벽면내부마찰각이 주요영향인자로 작용하게 되었다. 또한 CANDE에 의한 해석 결과와 각 이론식들을 비교·분석 하면, 동일한 되메움 깊이에서 되메움 저부폭에 따른 연직토압의 크기는 모든 결과에서 동일하게 직선적으로 증가하였으며, 일정한 되메움 저부폭에서 연직토압의 크기는 매설관의 깊이에 따라 증가하였다. CANDE에 의한 해석 결과와 Handy의 제안식이 좋은 접근성을 보였으며, 각종 매설관 및 박스형 구조물의 토압산정에 널리 사용되는 Marston이론은 설계시 상당히 안전측으로 설계되고 있었다.

주요어 : CANDE, 되메움 지반, 강성매설관, 연직토압

1. 서 론

인류의 발달과 함께 지하에 매설되는 매설관은 그 사용 범위가 다양해졌으며, 그 사용 빈도 역시 높아지고 있는 추세이다. 과거에는 주로 농업용수관, 상·하수도관 등이 고작이었으나 근래에 이르러 통신관, 전력관, 가스관, 지하 운송수단을 위한 지하 매설물 등 그 사용범위가 확대되었으며, 이를 위한 굴착과 되메움이 수행되고 있다. 또한 근래에 들어 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 되메움에 의한 연직하중에 대한 영향을 정확히 산출하는 것이 무엇보다 중요한 문제이다(Spangler et al., 1982).

본 연구에서는 조밀하게 조성된 되메움 지반에서 도랑형

강성매설관에 작용하는 연직토압에 대하여 Janssen, Marston, Spangler, Handy 이론식을 수치해석 프로그램인 CANDE를 통하여 되메움 공간의 저부폭과 되메움 깊이에 대한 영향 그리고 벽면마찰각과 기타 다른 영향인자들에 대하여 비교·분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 개요

매설관에 작용하는 토압의 산출방법은 매설유형 및 상재 하중의 전달방식에 따라 여러 가지 식이 제안되고 있으며, 그 크기도 상당한 차가 있다. Janssen, Spangler, Marston, Anderson, Handy 등의 제안식이 있으나, 이 중에 Marston-Spangler 식이 가장 많이 쓰이고 있다(천병식, 1998).

현재 매설관 설계에 많이 사용되고 있는 Marston-Spangler의 연직토압은 흙채움으로 인한 침하와 트렌치 양벽면의

1) 정회원, ㈜태조엔지니어링 대리

2) 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

† 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

마찰저항이 매설관에 전달된다는 가정하에 미소요소에 작용하는 수직력의 평형(상항으로 연직력+측면전단력=하항으로의 연직력+요소중량)을 이용하여 계산하고 있다. 그러나, Marston-Spangler 토압은 연직토압을 단순히 등분포 상재하중으로만 고려하여 흙의 점착력은 고려하지 않고 있으며 마찰계수를 깊이 방향으로 동일하게 가정하는 등 오늘날의 적용성이나 설계 계산시에도 많은 재론의 여지를 포함하고 있다(홍원표 등, 2002).

2.2 매설관에 작용하는 토압 산정 이론

2.2.1 Silo 이론

Janssen(1895)에 의하여 제안된 이론으로서 시멘트 및 곡물의 저장을 위한 사일로 벽면 및 바닥면에 작용하는 수평 및 연직압력은 저장물질의 함수비 및 단위용적당 중량에 따른 저장물질의 내부마찰각, 벽면마찰각 등을 이용하여 매설관의 단위길이당 작용하는 연직토압 (W_c)을 식 (1) 과 같이 산출하였다.

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

여기서, γ_t : 흙의 단위체적중량(t/m^3),

B : 관 상단에서의 굴착폭(m),

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

μ : 흙과 silo 벽면에 작용하는 마찰계수 = $\tan\phi$,

ϕ : 흙의 내부마찰각,

h : 지표에서 관 상단까지의 거리(m)

2.2.2 Marston 이론

Marston과 Anderson(1913)은 박스 컬버트 상하수관 및 가스 파이프 등의 설치에 있어 원지반상에 설치된 구조물의 상부에 성토할 경우와 원지반을 좁게 굴착한 후 되메움하는 경우의 토압 산정식을 고려대상 단면의 평면요소에 대한 힘의 평형을 고려하여 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$W_c = \frac{\gamma_t B_d^2}{2K_w \mu} \left(1 - e^{-\frac{2K_w \mu}{B_d}h} \right) \quad (2)$$

2.2.3 Spangler 이론

Spangler(1982)는 Marston 이론을 확장하여 박스, 컬버트, 상하수관, 가스관 등의 매설 시공조건, 매설물의 강성 및 되메움 또는 성토지반의 침하 등의 조건에 따라 달라지

는 응력의 상태를 정리하였다.

Spangler는 관의 매설형식을 도랑형 매설관, 정돌출형 매설관, 부돌출형 매설관, 불완전 도랑형 매설관 등의 형태로 분류하였으며, 이 중 가장 일반적인 도랑형 매설관의 경우에 관이 받는 토압을 관의 외경, 굴착폭과 매설깊이, 흙의 단위체적중량, 토압계수 등에 따라 식 (3)과 같이 유도하였다.

$$W_c = C_d \gamma_t B_d^2 \quad (3)$$

여기서, C_d : 하중계수 = $\frac{1 - e^{-\frac{2K_w \mu}{B_d}h}}{2K_w \mu}$

2.2.4 Handy 이론

Handy(1985)는 고랑형태의 좁게 굴착된 공간에서의 되메움 토압에 관한 연구에서 되메움 흙이 함몰되어 보이는 평면아치 형태에 주목하여 최소주응력의 궤적을 연결하는 최소주응력 아치로 밝힌 바 있으며 기존의 Marston, Spangler 등이 채택한 Rankine의 토압계수 K_w 의 이론적 오류를 지적하고 수정을 가하여 새롭게 제안하였고 평균연직응력을 사용할 것을 주장하여 평면 아칭효과에 의한 평균연직응력에 대한 수정응력비를 $K_w = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}}$ 로서 사용할 것을 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$W_c = \frac{\gamma B_d^2}{2K_w \mu} \left(1 - e^{-\frac{2K_w \mu}{B_d}h} \right) \quad (4)$$

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

2.2.5 Fröling의 방법

Fröling은 지하 5m까지는 토압이 점차 증가하나 그 이하에서는 불변으로 가정하여 식 (5)를 유도하였다.

$$W_c = \gamma_t B_d H (1 - 0.2H + 0.0133H^2) \quad (5)$$

여기서, W_c : 관에 작용하는 등분포하중(t/m^2),

γ_t : 흙의 단위체적중량(t/m^3),

B_d : 굴착폭(m),

H : 매설깊이(m)

3. 수치해석

3.1 수치해석 개요

지반요소를 고려한 2차원 유한요소 해석을 수행하기 위하여 매설구조물의 설계와 분석 전용 해석 프로그램인 CANDE

(Culvert ANalysis and DEsign)를 이용하였으며, 해석결과를 이용하여 분석한 후 해석 프로그램 CANDE에 의해 계산된 결과와 Marston, Spangler, Handy, Janssen의 Silo 이론식에 의한 연직토압과 비교·분석하고자 하였다. 본 연구에서는 사용된 수치해석 프로그램은 암거구조물 전용 해석 프로그램인 CANDE-89(version 2.0, 1989)를 이용하여 흙-구조물 합성 구조계를 직접법으로 모델링하였다. 이 때, 되메움 흙의 모델은 등방선형탄성모델(Isotropic linear elastic)을 적용하였으며, 이 모델은 일정한 탄성계수와 프아송비에 의해 정의되며 콘크리트 기초나 암반과 같은 요소에 의해 묘사 될 수 있는 모든 공학적 물질에 대하여 적합하며, 전체 시공 과정을 유한요소해석 모델에 반영하였다.

본 해석에 사용된 되메움 지반의 물성치는 사질토 지반으로서 지반의 상대밀도(D_r)에 따른 내부마찰각(ϕ)의 산정에 의하여 조밀하게 $D_r=85$, $\phi=40^\circ$ 조성된 지반을 가정하였으며, 탄성계수= $2.6 \times 10^7 \text{Pa}$, 프아송비= 0.33 , 단위중량= 19.4kN/m^3 이고, 매설 구조물은 $D=1.5\text{m}$, $t=0.5\text{m}$ 로서 입력 물성치는 탄성계수= $1.8 \times 10^{10} \text{Pa}$, 프아송비= 0.2 , 단위중량= 23.0kN/m^3 를 입력 물성치로 가정하였다(문창열 등, 1997).

그림 1은 본 연구에서 사용한 흙-구조물 합성구조계의 해석 단면 및 해석모델이다. 수치해석 조건은 되메움 지반의 하부는 힌지조건이며 지반의 연직부분은 롤러조건으로 설정하였으며 매설관의 지점부는 롤러조건으로 매설관의 수직중심을 대칭축으로 단면의 우측부분을 모델링하였다. 또한 매설관과 성형지반의 접촉면과 같이 이질적인 물질 사이에서의 상호간에 발생하는 힘의 전달과정을 정확히 묘사하기 위하여 경계요소를 모델링하였다. 경계요소로 연결되어 있는 각 요소를 전단강성과 연직강성을 갖는 스프링으로 모델링하는 방법과 흙의 강도정수(c , ϕ)를 이용하여 경계요소를 모델링하는 방법 등이 일반적으로 적용되고 있다.

해석 모델링에 있어서 해석대상의 해석영역을 이산화하는데 있어서 되메움 흙과 원지반은 4절점 평면변형률 요

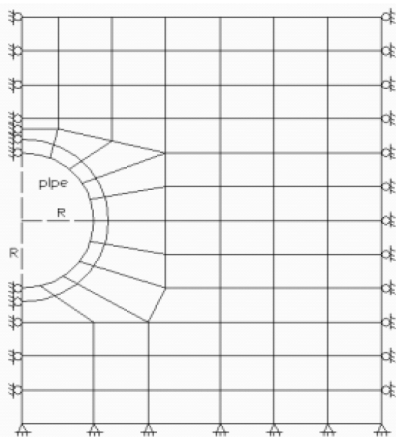


그림 1. 되메움 지반-구조물 합성구조계의 해석 단면 및 해석모델링

소를 사용하였으며 반면에 매설관은 10개의 요소로 그리고 되메움 지반은 절점 110개, 요소 86개로 이루어진 유한요소망을 사용하였다.

그림 1에서 보이는 바와 같이 균질하고 조밀한 지반에 직경 1.5m의 콘크리트 매설관이 포설되는 경우를 다루었다. 해석에서는 되메움 폭과 깊이에 따른 변화를 분석하기 위해 매설깊이를 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m로서 각각의 경우에 대하여 되메움 폭을 3.0m, 2.5m, 2.0m로 변화시키며 매설관에 작용하는 연직토압의 변화를 분석하였다.

3.2 수치해석 결과분석

그림 2는 되메움 저부폭이 3.0m, 2.5m, 2.0m인 경우, 매설관 벽체에 작용하는 매설깊이별(1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m) 연직토압의 변화에 대하여 수치해석 결과를 보여주고 있다.

되메움 저부폭 $B=3.0, 2.5, 2.0\text{m}$ 각각 3가지 Case에 대하여 매설깊이($H=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\text{m}$)에 대한 유한요소해석 결과를 볼 때 되메움 지반에서 지하매설관 벽체에 작용하는 연직토압의 크기 및 분포형상은 되메움 저부폭이 증가함에 따라 연직토압의 크기가 증가하며 또한 되메움 깊이가 증가할수록 직선적으로 증가하는 경향을 보였다. 따라서 전반적인 연직토압 분포는 되메움 저부폭이 작아질수록 토압은 벽마찰에 의한 영향이 증가하여 연직토압의 작용에 영향을 주어 값이 감소함을 알 수 있었다.

4. 이론치와 수치해석 결과 비교

4.1 연직토압에 작용하는 영향인자에 대한 고찰

이론식에서 연직력에 미치는 영향인자를 고찰한다면 되메움 지반의 바닥폭과 되메움 흙과 원지반과의 벽면마찰각, 되메움 지반의 기하학적 형상이 연직토압에 영향을 미친다. 그러나 본 연구에서는 되메움 지반의 형상은 연직굴착으로 한정하여 되메움 굴착면의 경사각의 고려는 검토에서는 제외하였다. 그리고 각각의 영향인자들에 대하여

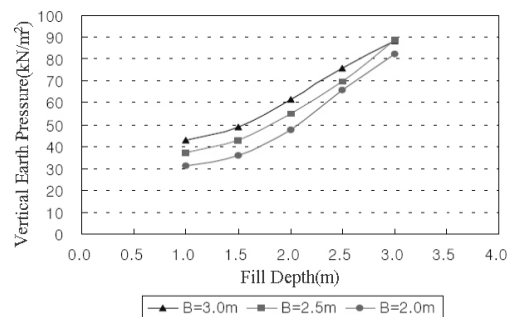


그림 2. 유한요소해석에 의한 되메움폭별연직토압의 크기

비교를 위해 Janssen, Marston, Handy, Spangler 이론에 의한 연직토압을 계산하였다(정성교 등, 1995).

4.1.1 되메움 지반의 저부폭(B)의 영향

그림 3에서는 굴착바닥의 저부폭에 따른 연직토압을 보여주고 있으며 세로축은 연직토압을 가로축은 되메움 지반의 저부폭의 크기를 나타내고 있다. 또한 Janssen, Marston, Handy, Spangler 이론, 수치해석 프로그램(CANDE)에 의한 분석결과 매설관에 작용하는 연직토압은 굴착면이 연직일 경우 거의 직선형태로 증가추세를 보이며 저부폭 크기와 비례하여 직선적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

되메움 깊이가 동일할 경우 되메움 저부폭에 따른 연직토압의 크기는 Marston, Spangler, Handy, Janssen, CANDE 모두 동일 직선적 증가 경향을 보이며 그 크기는 Marston, Spangler, Handy, CANDE, Janssen의 이론식의 순으로 연직토압의 크기가 나타난다. 또한 Marston은 과대하게 평가되며 Handy에 의한 해석결과와 연직토압의 크기가 유사하며 증가 추세 또한 유사하게 나타나고 있다. 그러나 Janssen의 경우 약간의 증가 추세를 보이고 거의 일정하게 유지되며 과소평가되는 경향이 있으며 되메움 굴착폭에 대하여 다른 이론식들에 비하여 작게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. CANDE에 의한 해석결과는 Handy의 이론식과 다른 이론식들에 비해 유사한 결과를 얻었다. 이러한 해석결과는 되메움 지반의 매설깊이가 일정한 경우 되메움 지반의 저부폭이 커짐에 따라서 벽면마찰각의 영향의 감소로 연직토압의 크기가 커지는 아칭현상에 의한 결과로 판단된다. 결론적으로 되메움 지반에서 매설관에 작용하는 연직토압에 대한 각 이론치는 되메움 저부폭이 증가함에 따라서 함께 연직토압은 직선적으로 증가하게 된다.

4.1.2 되메움 지반의 매설깊이(H)의 영향

되메움 지반의 저부폭을 일정하게 유지한 경우 매설관

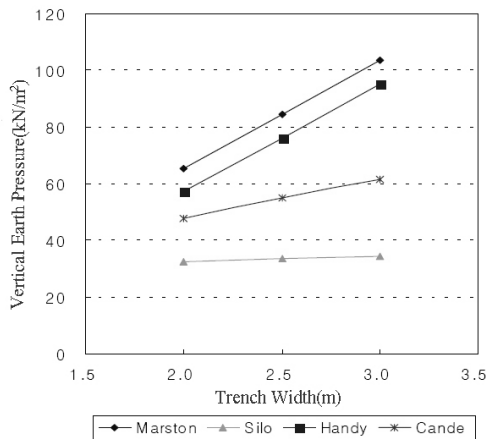


그림 3. 동일한 깊이(H=2.0m)하에서 저부폭별(2.0m, 2.5m, 3.0m) 연직토압

에 작용하는 매설깊이의 영향에 대하여 분석한 결과 연직토압의 크기는 매설깊이가 증가함에 따라서 증가하게 된다. Marston이론식의 경우 CANDE에 의한 수치해석과 다른 이론식에 비해 과대하게 평가되며 되메움 저면 폭이 작은 경우에는 Janssen의 이론식의 경우를 제외하고 다른 이론치들 모두가 일치하는 경향을 보이며 직선적으로 증가하는 경향을 보인다. 그리고 Handy의 이론값과 수치해석 프로그램(CANDE)에 의한 유한요소해석결과와 상당히 유사한 결과를 가져왔으며 이론식 대부분이 되메움 저면의 폭에 따라 연직토압이 크게 좌우되었다.

그림 4, 5, 6에서는 되메움 저부폭이 각각 2.0m, 2.5m,

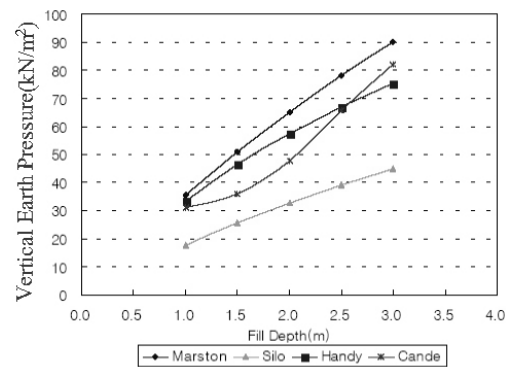


그림 4. 동일한 되메움폭(Bc=2.0m)하에서 되메움 깊이별 연직토압

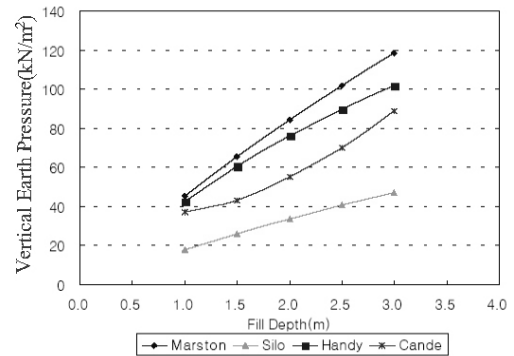


그림 5. 동일한 되메움폭(Bc=2.5m)하에서 되메움 깊이별 연직토압

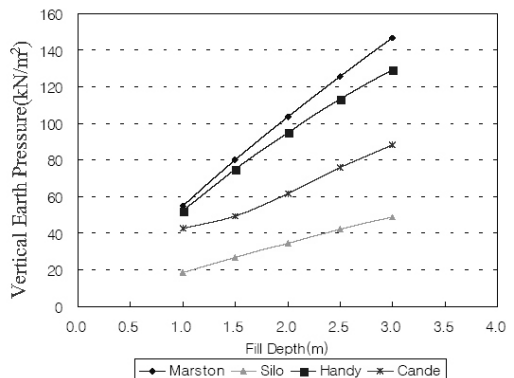


그림 6. 동일한 되메움폭(Bc=3.0m)하에서 되메움 깊이별 연직토압

3.0m일 경우 되메움 깊이의 증가에 따른 연직토압 분포를 보여주고 있으며 분석결과 되메움 지반의 매설깊이에 따른 연직토압의 분포는 직선적으로 증가하는 경향을 갖고 있다. 각각의 이론값의 크기는 되메움 저부폭을 2.0m, 2.5m, 3.0m의 3가지 경우에 대해서 모두가 Marston식, Handy식, Janssen식의 순으로 연직토압의 크기가 나타났지만 그 차이가 H/B의 비에 따라 다르게 나타나게 된다(정성교 등, 1996).

4.1.3 굴착면과 되메움 흙과의 벽면마찰각의 영향

굴착면과 되메움 흙과의 벽면마찰각의 영향은 그림 7에서 보여주듯이 되메움 지반의 굴착면과 되메움 흙과의 벽면마찰각의 연직토압에 대한 영향은 되메움 깊이에 대한 영향이나 되메움 저부폭에 대한 영향에 비하여 작은 것으로 나타났다. 또한 각 이론식들을 비교한 결과 Janssen의 Silo이론의 경우 지반의 벽면마찰이 연직토압에 대하여 다른 이론식들에 비해 작게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 Marston과 Handy의 이론식의 경우는 그림 7에서와 같이 흙의 아칭현상에 의해서 벽면 마찰각이 증가할수록 토압경감효과가 크게 발생하는 것으로 나타났으며 특히 Handy의 이론식의 경우 벽면마찰각에 따라서 토압경감효과가 가장 크게 나타나는 것으로 나타났다.

4.1.4 되메움 지반에서 흙의 내부마찰각과 접촉면 요소

매설관의 설계와 분석에 있어서 매설관에 작용하는 토압이외에도 고려되어야 할 다른 요소들에는 매설관 상부에 위치한 지하수위와 매설관의 침하 그리고 지반의 다짐 여부이다. 특히 지반의 다짐은 만일 매설관의 주변과 상부 지반이 조밀하게 다짐이 되었다면 지반이 조밀해져 입자

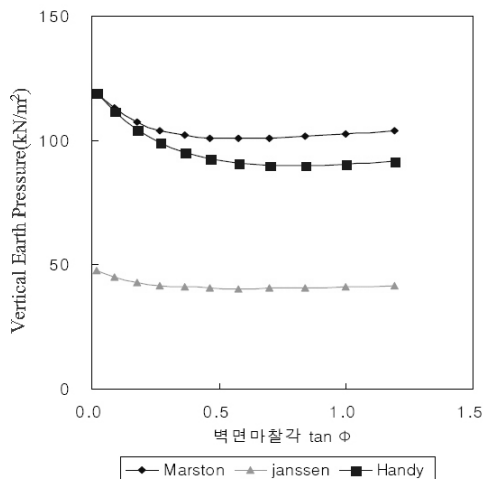


그림 7. H/B=1.0일 경우 벽면마찰각의 영향

간의 역물림효과(interlocking)에 의하여 아치의 처짐은 보다 완만함을 보이는 경향을 나타내게 되며 흙의 아칭거동에 의해서 매설관의 하중지지를 도와주게 될 것이다. 그러나 이러한 지반 다짐에 의한 아칭거동은 설계의 안전율의 확보를 위한 것으로 본 논문에서는 고려하지 않았으며 매설관과 흙사이의 접촉면 요소인 마찰각은 토압하중의 변화는 강성관의 경우 전체적으로 큰 영향을 미치지 못하므로 역시 고려하지 않았다.

4.2 연직토압 산정 이론치와 수치해석 결과

표 1에서는 매설관에 작용하는 연직토압의 해석결과를 보여주고 있다. 되메움폭 2.0m, 2.5m, 3.0m일 경우 매설깊이 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m에서의 연직토압의 크기를 보여주고 있으며 매설깊이가 증가함에 따라 각 이론식들의 편차가 커지는 결과를 보여주고 있다. 또한 되메움 저부폭이 증가됨에 따라 Marston과 Handy의 이론치 증가량이 크게 나타나며, Janssen의 silo이론식과 수치해석 프로그램(CANDE)에 의한 결과값은 연직토압과 증분율이 작게 나타나고 있다. Janssen의 silo이론식과 수치해석 프로그램(CANDE)에 의한 결과 값은 증가폭이 Marston과 Handy의 이론식보다 작게 나타나고 있다.

각 이론식의 비교·분석결과 설계시 상당히 안전측으로 설계되는 Marston이론에 의한 연직토압산정보다는 흙의 아칭현상을 적절하게 적용한 Handy의 이론식에 의한 연직토압산정이 더욱 합리적인 것으로 판단된다.

표 1. 연직토압 해석결과 비교

식	B (m)	연직토압(kN/m ²)				
		H=1.0	H=1.5	H=2.0	H=2.5	H=3.0
Janssen	2.0	17.7	25.5	32.6	39.1	45.0
Marston		35.5	51.0	65.2	78.1	90.0
Handy		33.2	46.3	57.5	67.0	75.1
CANDE		31.2	35.9	47.8	65.6	82.2
Janssen	2.5	18.0	26.1	33.7	40.7	47.2
Marston		45.1	65.4	84.3	101.8	118.2
Handy		42.8	60.5	76.1	89.8	101.9
CANDE		37.4	43.0	55.0	69.8	88.8
Janssen	3.0	18.2	26.6	34.5	41.9	48.9
Marston		54.8	79.9	103.5	125.7	146.7
Handy		52.4	84.8	94.9	113.0	129.3
CANDE		42.7	49.1	61.4	75.8	88.2

5. 결 론

본 연구에서는 퇴매움 지반에서 매설관에 작용하는 연직토압을 산정하기 위한 이론식들과 수치해석을 통한 주요요소해석결과와의 비교를 통해 퇴매움 지반의 저부폭, 퇴매움 깊이, 지반의 마찰각에 따른 연직토압의 분포를 비교·분석하였다. 이와 같은 비교 검토에 의하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 퇴매움 깊이가 동일할 경우 퇴매움 저부폭에 따른 연직토압의 크기는 Marston, Handy, Janssen의 Silo이론, 수치해석 프로그램(CANDE)에 의한 결과 모두 동일하게 직선적으로 증가 경향을 보이며, 그 크기는 Marston, Handy, CANDE, Janssen의 Silo이론식 순으로 연직토압의 크기가 나타났다.
- (2) 퇴매움 지반의 저부폭을 일정하게 유지한 경우 매설관에 작용하는 연직토압의 크기는 매설깊이가 증가함에 따라서 직선적으로 증가하는 경향을 갖으며 각각의 이론값의 크기는 Marston, Handy, CANDE, Janssen의 Silo식 순으로 연직토압의 크기가 나타났다.
- (3) CANDE에 의한 해석 결과, Handy의 이론식이 Marston, Janssen의 Silo이론식에 비해 좋은 접근성을 보였으며 Marston이론에 의한 연직토압은 상당히 안전측으로 산정되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 문창열, 이종규(1997), 좁은 공간 퇴매움 지반에서의 상재하중 영향에 의한 토압, *한국지반공학회지*, Vol. 13, No. 6, pp. 165~177.
 2. 정성교, 조기영, 권준안, 정진교, 이만렬(1995), 도랑의 퇴매움으로 유발되는 연직력, *대한토목학회논문집*, Vol. 15, No. 2, pp. 491~499.
 3. 정성교, 조기영, 윤치관, 이대명(1996), 퇴매움(굴착)의 형상에 따라 매설박스에 유발되는 토압, *한국지반공학회지*, Vol. 12, No. 5, pp. 27~40.
 4. 천병식(1998), 지반공학 -이론과 실제-, 도서출판 구미서관, pp. 285~295.
 5. 홍원표, 한중근, 배태수(2002), 측방유동지반속 지중매설관에 작용하는 토압식 산정, *한국지반공학회논문집*, Vol. 18, No. 5, pp. 55~65.
 6. Handy, R. L.(1985), The arch in soil arching, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 302~318.
 7. Janssen, H. A.(1985), Versuche uber Getreidedruck, *Partial English Translation in Proceeding of Institute of Civil Engineers*, London, England, Vol. 39, pp. 1045~1049.
 8. Marston, A. and Anderson, A. O.(1913), Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe, Bul. 31, Iowa Engineering, Experiment Station, Ames, Iowa., pp. 598~601
 9. Spangler, M.G. and Handy, R.L.(1982), *Soil Engineering*, 4th Ed, Harport and Row, Publishers, Inc. New York, pp. 727~740.
- (접수일: 2007. 11. 13 심사일: 2007. 11. 14 심사완료일: 2007. 12. 18)