

$c-\phi$ 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압: I. 이론

김도훈¹, 이대수², 김경렬³, 이용희⁴, 이인모^{5*}

Earth pressures acting on vertical circular shafts considering arching effects in $c-\phi$ soils: I. Theory

Do-Hoon Kim, Dea-Su Lee, Kyung-Ryeol Kim, Yong-Hee Lee, In-Mo Lee

Abstract Several researches have been done to estimate the earth pressure on a vertical circular shaft considering three dimensional arching effect and verified them by conducting model tests. However, any equation suggested so far is not applicable in case of multi-layered soils and/or $c-\phi$ soils. In this study, new equation for estimating the earth pressure acting on the vertical shaft in $c-\phi$ soils is proposed. A parametric study is performed to investigate the significance of the cohesion when estimating the coefficient of earth pressure in $c-\phi$ soils and estimating earth pressures in vertical shafts. A method which can estimate the earth pressure on vertical shafts in layered soils is also proposed by assuming a failure surface in layered soils and using the modified equation. This paper is Part I of companion papers focusing on the theoretical aspect of model developments; the experimental verification will be made in Part II.

Keywords: Vertical shaft, coefficient of earth pressure, earth pressure, arching effect, $c-\phi$ soil, multi-layered soils

요 지 원형수직터널에서 3차원적인 아칭효과를 고려한 토압산정을 위해 여러 연구가 수행되었고 실내시험 및 수치해석을 통해 이를 검증하였으나, 다층지반과 $c-\phi$ 지반에서의 적용이 어려웠다. 본 연구에서는 $c-\phi$ 지반에서의 토압 산정을 위해 $c-\phi$ 지반에서 적용 가능한 토압계수 산정식을 구하였으며, 기존 토압식을 수정 제안하였다. 점착력이 토압에 미치는 영향을 파악하기 위해 지반을 가정하여 각 경우별로 토압을 산정하여 비교하였으며, 다층지반에서 파괴면을 가정하는 방법으로 토압을 구하였다. 이 논문은 두 개의 연속된 논문(Companion paper)의 첫 번째로서 모델개발을 위한 이론전개를 다루고 있으며, 대형 모형실험에 의한 실증은 두 번째 논문에서 다룰 것이다.

주요어: 수직터널, 토압계수, 토압, 아칭 현상, $c-\phi$ 지반, 다층지반

1. 서 론

국토개발에서 지하 공간 개발의 비율이 증가함에 따라 기계화시공기법 적용 증가 및 터널의 장대화로 인한 환기 설비의 설치로 수직터널의 적용 빈도가 증가하고 있는 추세이다. 대부분의 수직터널은 다른 형태의 단면에 비해 상대적으로 공간의 효율에서는 떨어지지만, 수직터널에 작용되는 토압이 유리한 원형으로 계획 및 시공되고 있다. 원형수직터널에서는 횡방향으로 발생하는 위로 볼록한 아치(Convex arch)인 수평아칭과 굴착에 의해 발생한 소성영역이 중력에

의해 중력방향으로 작용하는 하중을 저항하며 발생하게 되는 수직아칭에 의해 2차원적인 일반 흙막이벽에 작용하는 토압보다 작은 토압이 작용하게 된다. 하지만 대부분의 원형수직터널에서는 보수적인 설계와 적용 경험의 부족으로 인하여 3차원적인 효과인 아칭현상을 고려하지 않은 일반적인 2차원적인 토압을 설계 및 시공에 사용하여 과도한 토압을 이용하여 적용하고 있다. 이러한 아칭현상을 적절히 반영하기 위해 Handy(1985)와 Paik과 Salgado(2003) 등은 아칭 현상을 고려한 주동토압계수를 산정하는 방법을 제안하였으며, Prater(1977)는 원형수직터널의 파괴면을 깔때기형으로 가정하고 파괴면의 각도를 내부마찰각 및 원형수직터널의 단면과 높이의 형상비(H/R)로 구하여 토압을 산정하는 방법을 제안하였다. Wong과 Kaiser(1988)는 원형수직터널에서 수직아칭과 수평아칭 현상을 각각 고려하여 원형수직터널의 내공면위-제

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

²한국전력공사 전력연구원 책임연구원

³정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

⁴정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

* 교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

어법을 제시하였으며, 천병식 등(2003), 이인모 등(2007)은 원형수직터널 배면의 미소토체에서 수직방향 힘과 수평방향 힘의 평형을 이용하여 원형수직터널에 작용하는 토압식을 산정하였다. 이러한 연구들은 원형수직터널의 지반을 건조한 사질토(ϕ soil)로 가정하여 수행되어 마찰력(ϕ)과 점착력(c)을 동시에 가지는 지반($c-\phi$ soil)에 적용하기 어렵다.

본 논문은 $c-\phi$ 지반에서 원형수직터널에 작용하는 아칭현상을 고려하여 토압을 산정하기 위한 이론적인 연구로 $c-\phi$ 지반에 적용 가능한 토압계수를 산정하기 위해 기존의 연구를 고찰하고 수정하였으며, 이를 적용하여 $c-\phi$ 지반에 대한 토압식을 산정하였다. 산정된 토압식은 원형수직터널의 파괴면을 깔때기형으로 가정하고, 파괴면에서 점착력을 고려한 힘의 평형을 적용하였다. 산정된 토압식의 검토를 수행하기 위해 지반을 가정하여 각 경우의 토압을 산정하고 비교를 수행하였으며, 다층지반에서 토압식의 검증을 위해 파괴면을 가정하고 토압을 산정하였다. 이러한 원형수직터널의 토압산정을 위한 이론적인 연구는 연속된 두 논문(Companion Paper)의 전반부에 해당하며, 두 번째 논문에서는 실규모 현장 시험 및 대형 실내 모형 시험을 통하여 적용성을 검토할 것이다.

2. 원형수직터널 토압산정

2.1 원형수직터널의 파괴형태

초기상태의 지반에 수직터널을 시공함에 따라 배면 지반의 응력 해방이 이루어져 응력체계에 변화를 일으키게 된다. 이러한 굴착으로 인한 응력 해방은 초기

지반의 응력을 수직방향, 반경방향, 접선방향의 응력으로 변화시키게 된다. 이때에 원형수직터널의 파괴형상은 배면을 지배하는 세가지 응력에 따라 변화하고 결정되게 된다. Wong과 Kaiser(1988)는 k_0 (정지토압계수)와 수직방향, 반경방향, 접선방향으로 구성되는 세가지 응력의 비로써 파괴모드 A, B, C를 구분하였으며, 파괴모드에 따른 파괴형태를 그림 1과 같이 표현하였다.

Wong과 Kaiser(1988)는 그림 1에서 Mode A는 최대주응력이 접선방향응력이고 최소주응력이 반경방향응력인 상태에서 발생하고, Mode B는 최대주응력이 수직방향응력이고 최소주응력이 반경방향응력인 경우 발생하며, 마지막으로 Mode C는 최대주응력이 접선방향응력이고 최소주응력이 수직방향응력인 상태에서 발생한다고 설명하였다. 또한, Wong과 Kaiser(1988)는 파괴형태의 설명에서 Mode A의 파괴형태는 도심도 및 견고한 지반층의 원형수직터널에서 주로 발생하며, 파괴형태 B는 비교적 얇은 심도와 연약한 지반의 경우에 발생하고, 파괴형태 C는 일반적으로 잘 일어나지 않은 파괴형태라고 하였다.

신영완 등(2007, 2008)은 토사지반에 연성벽체가 설치될 때를 가정하고 원형수직터널의 형상비(H/R)에 따른 파괴형태를 실내시험을 통해 산정하였다. 산정결과 파괴형태는 낮은 형상비에서 파괴면의 경사가 $45^\circ + \phi/2$ 인 깔때기형이며, 형상비가 증가함에 따라 깔때기형에서 원기둥형으로 변화하고, 이때의 전체 파괴 영역의 크기는 깔때기형보다 작은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 가시설이 설치되는 지반이 비교적 심도가 얇고 연약한 지반이며, 형상비 변화에 따른 파괴면

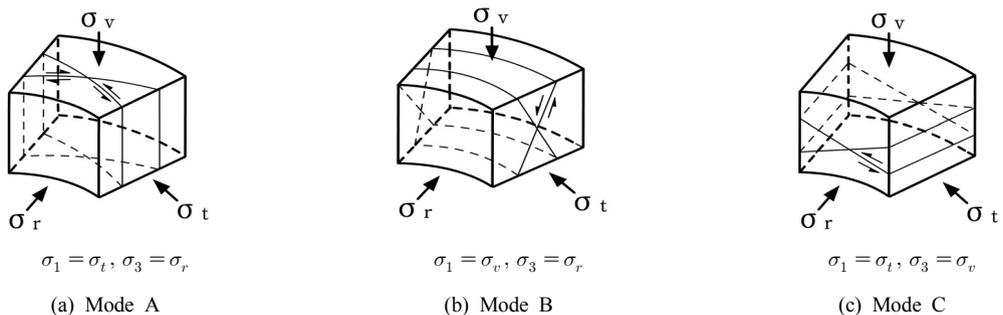


그림 1. 원형수직터널의 파괴형태(Wong과 Kaiser, 1988)

의 변화를 충분히 확보할 수 있도록 원형수직터널의 파괴형태를 Mode B인 깔대기형으로 가정하여 토압식을 산정하였다.

2.2 접선방향 토압계수

접선방향 토압계수(λ)는 수직방향응력(σ_v)과 접선방향응력(σ_t)에 대한 응력비로 나타나며, 접선방향 토압계수가 커질수록 토체의 활동면에 저항하는 힘이 커져 원형수직터널에 작용하는 토압은 작아지게 된다. Wong과 Kaiser(1988)는 파괴형태에 따른 응력변화를 설명하면서 접선방향 토압계수는 초기지반상태인 탄성상태에서는 λ=1이 아니지만, 소성영역에 도달 후 λ=1에 도달한다고 하였다. Prater(1977)는 원형수직터널 배면지반에서 정지토압계수(k_o)는 항상 1보다 작으므로 극한평형상태에서 λ=1까지 증가하지 않는 것으로 판단하였다. 따라서 Prater(1977)는 접선방향 토압계수가 주동토압계수(k_a)와 k_o 사이에서 존재하며 λ=1인 경우는 토압을 과소평가하는 것이고, λ=0인 경우에는 토압을 과대평가하는 것으로 설명하였다. 그러므로 λ=1-sinφ를 적용하는 것이 λ=1을 적용하는 것보다 합리적인 것으로 보였다. 이인모 등(2007)은 원형수직터널의 토압산정을 위한 실내시험을 통하여 λ값을 산정하였다. 실시된 실내시험 토압 산정 결과가 λ=1과 λ=1-sinφ의 사이에서 산출됨에 따라 λ=1-sinφ를 적용하여 산정된 토압이 충분히 안정성을 확보하는 것으로 판단하였다. 본 연구에서도 Prater(1977) 및 이인모 등(2007)이 제안한 것과 같이 λ=1-sinφ인 경우를 적용하여 접선방향 응력을 고려하였다.

2.3 반경방향 토압계수

반경방향 토압계수(k_{wa})는 수직방향응력(σ_v)과 반경방향응력(σ_r)의 비로 표현된다. 흙막이 벽면과 지반에서 발생하는 마찰각에 대한 고려 여부에서 Rankine(1857)은 벽면 마찰각을 고려하지 않은 주동토압계수를 제안하였으며, 이후 Handy(1985), Harrop-Williams(1989), Paik과 Salgado(2003)등이 벽면과의 마찰각을 고려한 주동토압계수를 제안하였다. 벽면 마찰각을 고려한 연구자들은 벽체에서 마찰력에 의해 사일로 토압과 같은 형식으로 원형수직터널의 벽체와 지반의 파괴면에서 발생하는 마찰에 의해 최소주응력방향의 형상이 수평방향

에서 원형, 현수선, 포물선, 타원 등의 형태로 형성된다고 하였다. Paik과 Salgado(2003)는 Handy(1985)의 토압계수의 경우 φ(내부마찰각)=0일 때 k_w=1.06이 되어 1.0을 초과하는 문제점이 있으며, φ≠δ인 경우에는 적용할 수 없으므로 그 적용성이 매우 제한되며, Harrop-Williams(1989)의 주동토압계수의 경우는 주동토압계수와 토압의 산정에서 서로 상이한 수직응력을 적용함으로써 모순이 발생하게 된다고 설명하였다. 이에 따라서 Paik과 Salgado(2003)는 벽체의 배면지반에서 발생하는 응력상태의 변화를 정확히 고려하기 위하여 뒷채움 흙의 내부마찰각(φ)과 벽면마찰각(δ)에 따라 미소수평요소에 작용하는 연직응력의 변화를 고려한 새로운 주동토압계수 산정식을 식 (1)과 같이 제안하였다. 이 제안식의 토압계수는 φ=0, δ=0 일 때 반경방향 토압계수 k_{wa}는 1.0이 되며, δ=0 인 경우 Rankine(1857)의 주동토압계수와 같은 값을 가지게 된다.

$$k_{wa} = \frac{3(N \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}{3N - (N-1)\cos^2 \theta} \quad (1)$$

여기서, $N = \tan^2(45^\circ + \frac{\phi}{2})$ 이고,

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{(N-1) \pm \sqrt{(N-1)^2 - 4N \tan^2 \delta}}{2 \tan \delta} \right] \text{이다.}$$

2.3.1 c-φ 지반의 반경방향 토압계수 산정

Rankine(1857)의 주동토압계수는 Mohr 원에서 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 이용하여 c-φ 지반에 적용 가능한 토압계수이지만, 벽체와 배면지반의 벽면 마찰저항을 고려할 수 없고, Coulomb(1776), Handy(1985), Paik과 Salgado(2003)가 제안한 토압계수는 벽면 마찰저항을 고려할 수 있지만, 건조한 지반을 가정하여 산정되었기 때문에 c-φ 지반에서의 적용이 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 c-φ 지반에서 벽면마찰각에 의한 아칭현상을 고려하기 위해 Paik과 Salgado(2003)가 제안한 토압계수 공식을 수정하였다.

Paik과 Salgado(2003)은 벽면마찰저항에 의해 주응력 궤적이 원형으로 회전하는 것으로 가정하여 그림 2와 같은 미소토체에 작용하는 응력을 이용하여 건조한 지반에 대한 주동토압계수 공식을 산정하였다. 지표에서의 깊이(z)에서 미소토체의 폭은 B_z이며 식 (2)로 표현

된다.

$$B_z = R \cos \theta \quad (2)$$

여기서, θ 는 벽면마찰각에 의한 주응력의 회전각, R 은 회전된 주응력 궤적의 반지름이다. 그림 2에서 A 인 삼각형 요소에서 수평방향 힘의 평형은 식 (3)으로 표현되며,

$$\sigma_{hw} = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta \quad (3)$$

식 (3)과 동일하게 그림 2에서 임의의 위치 D 의 수평 응력은 수평방향 힘의 평형을 이용하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_{ah} = \sigma_1 \cos^2 \psi + \sigma_3 \sin^2 \psi \quad (4)$$

벽면에서의 주응력의 회전각(θ)을 구하기 위해 그림 3과 같은 Mohr 원을 작도하였다. 최대주응력(σ_1)은 미소토립체에 작용하는 응력인 γz 이며, 최대주응력(σ_1)과 최소주응력(σ_3)의 관계는 Rankine(1857)의 토압론에 따라 식 (5)로 표시될 수 있다.

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) - 2c \tan(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (5)$$

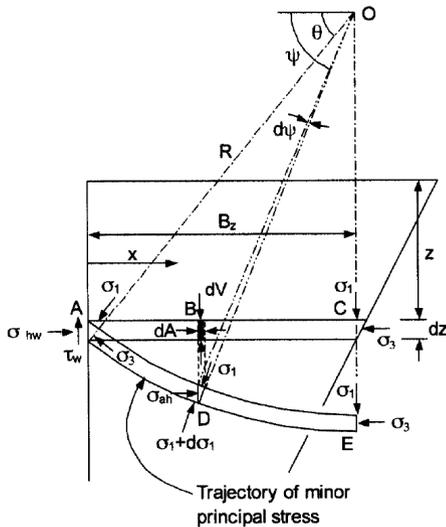


그림 2. 미소토립체에 작용하는 응력형태(Paik과 Salgado, 2003)

σ_1/σ_3 을 K_i 라고 하면 K_i 는 식 (5)를 통해 구할 수 있으며, 식 (6)으로 표현된다.

$$K_i = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1}{\tan^2(45 - \frac{\phi}{2}) - 2 \frac{c}{\sigma_1} \tan(45 - \frac{\phi}{2})} \quad (6)$$

그림 3에서 벽면마찰각(δ)에 의해 벽면 전단강도(τ_w)는 식 (7)로 표현되며, 이를 $\tan \theta$ 로 정리하면 식 (8)을 구할 수 있다.

$$\tau_w = (\sigma_{hw} + \frac{c}{\tan \phi}) \tan \delta = (\sigma_{hw} - \sigma_3) \tan \theta \quad (7)$$

$$\tan \theta = \frac{\left(\frac{\sigma_{hw}}{\sigma_3} + \frac{c}{\sigma_3 \tan \phi} \right) \tan \delta}{\frac{\sigma_{hw}}{\sigma_3} - 1} \quad (8)$$

식 (8)에 식 (3)을 대입하여 $\tan \theta$ 에 대하여 정리하면 식 (9)와 같다.

$$(\sigma_3 \tan \phi + c) \tan \delta \tan^2 \theta - (K_i - 1) \sigma_3 \tan \phi \tan \theta + \tan \delta (K_i \sigma_3 \tan \phi + c) = 0 \quad (9)$$

이차 방정식인 식 (9)에서 θ 를 산정할 수 있으며, 식 (10)으로 표현된다. 여기서 큰 값이 주동상태의 값이며 작은 값이 수동상태의 값이 된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{(K_i - 1) \sigma_3 \tan \phi}{2(\sigma_3 \tan \phi + c)} \tan \delta \pm \sqrt{\left\{ \frac{(K_i - 1) \sigma_3 \tan \phi}{2(\sigma_3 \tan \phi + c)} \right\}^2 - 4 \tan^2 \delta (K_i \sigma_3 \tan \phi + c)(\sigma_3 \tan \phi + c)}}{2(\sigma_3 \tan \phi + c) \tan \delta} \right] \quad (10)$$

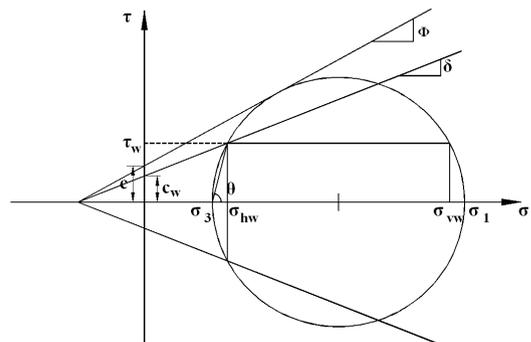


그림 3. 벽면에 작용하는 응력의 Mohr 원

주동토압 계수(k_{wa})는 수직방향 평균응력($\bar{\sigma}_v$)과 벽체에 작용하는 수평응력(σ_{hw})의 비로 정의된다. $\bar{\sigma}_v$ 는 그림 2에서 임의 깊이 z에서 작용하는 전체 수직하중을 B_z 로 나누어 구할 수 있으며, 전체 수직하중은 미소토체에 작용하는 수직하중의 합이다. 따라서, 수직방향 평균응력($\bar{\sigma}_v$)은 전체 수직하중 (V)을 폭 B_z 로 나누어 구할 수 있으며, 식 (11)로 표현된다.

$$\bar{\sigma}_v = \frac{V}{B_z} = \frac{1}{\cos\psi} \int_{\theta}^{\pi/2} \sigma_1 (\sin^2\psi + \frac{1}{K_i} \cos^2\psi) \sin\psi d\psi \quad (11)$$

식 (11)을 적분하면 토체에 작용하는 평균 수직방향 응력을 구할 수 있으며, 식 (12)로 나타난다.

$$\bar{\sigma}_v = \sigma_1 \left(1 - \frac{K_i - 1}{3K_i} \cos^2\theta \right) \quad (12)$$

식 (12)를 식 (3)으로 나누어 이를 통해 c-φ 지반에서의 토압계수 공식을 산정할 수 있으며 식 (13)으로 표현된다.

$$\frac{\sigma_{hw}}{\bar{\sigma}_v} = k_{wa(Proposed)} = \frac{3(K_i \cos^2\theta + \sin^2\theta)}{3K_i - (K_i - 1)\cos^2\theta} \quad (13)$$

산정된 토압계수 공식인 식 (13)은 단위중량(γ), 점착력(c), 내부마찰각(ϕ), 벽면마찰각(δ), 깊이(z)의 함수이다. 그림 3에서 벽면에 작용하는 전단강도(τ_w)는 식 (14)로 표현되며, $c_w = c \tan\delta / \tan\phi$ 이다.

$$\tau_w = c_w + k_{wa(Proposed)} \bar{\sigma}_v \tan\delta \quad (14)$$

2.3.2 c-φ 지반 토압계수 검토

c-φ 지반을 가정하고 산정된 토압계수 공식에 대한 검토를 위해 표 1과 같은 조건으로 주동토압계수를 산정하였다. 본 연구에서 제안된 토압계수 공식이 Mohr 원과 Mohr-Coulomb 파괴기준을 조건으로 하여 산정되었기 때문에 비교를 위해 Rankine(1857) 및 Paik과 Salgado(2003)의 토압계수를 같은 조건에서 산정하여 비교를 수행하였다.

표 1에 따른 주동토압계수는 그림 4와 같이 나타난다. 제안식에서 점착력과 벽면 마찰각이 0.0인 Case 3의 결과는 Rankine(1857)의 토압계수인 Case 1의 결과와 동일하며, 벽면 마찰각을 고려한 경우 점착력이 0.0인 Case 4의 결과가 Case 2의 결과와 동일하다. 이는 제안식이 점착력이 0.0인 경우 벽면마찰각의 고려 여부에 따라 Rankine(1857) 또는 Paik과 Salgado(2003)과 같은 결과를 보이므로 점착력이 없는 경우에도 적용 가능성을 알 수 있다. Case 5, 6의 결과 점착력이 존재하는

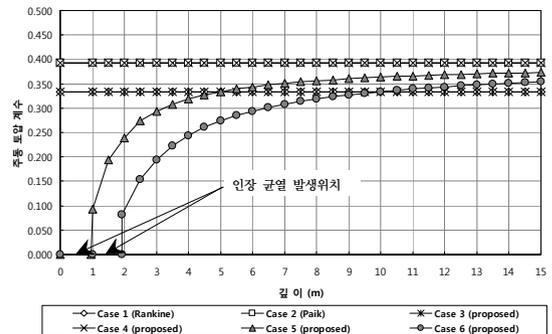


그림 4. 주동 토압계수 검토 결과

표 1. 토압계수 산정 조건

	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	δ (°)	인장균열 깊이 (m)	반경방향 토압계수
Case 1	-	-	30.0	-	-	Rankine
Case 2	-	-	30.0	25.0	-	Paik과 Salgado
Case 3	18	0.0	30.0	0.0	0.00	제안식
Case 4	18	0.0	30.0	25.0	0.00	제안식
Case 5	18	5.0	30.0	25.0	0.96	제안식
Case 6	18	10.0	30.0	25.0	1.92	제안식

※ '-'는 고려할 수 없는 항목을 뜻함.

지반에서는 토압계수가 깊이에 의한 함수기 때문에 깊이에 따라 변화하게 되며, 점착력이 증가할수록 토압계수가 작아지는 경향을 보인다. 또한, 일반적으로 인장균열에서는 토압이 발생하지 않음에 따라 인장균열이 발생하는 깊이에서의 주동 토압 계수는 0.0으로 가정하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 토압식은 $c-\phi$ 지반에서 점착력에 따라 적절한 토압계수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 원형수직터널 토압식 산정

반경방향 토압계수에 따라 미소토체에서 고려되는 힘의 평형이 다르므로 각 경우에 따라 토압식을 산정하였다. Rankine(1857)의 토압계수를 적용할 경우에는 벽체와 배면지반에 작용하는 벽면 마찰저항을 고려할 수 없으며, Coulomb(1776) 및 Paik과 Salgado(2003)의 토압계수는 벽면 마찰각을 고려할 수 있으나, 점착력이 없는 지반을 가정하고 산정되어 적용에 한계가 있다. 본 연구

에서 수정 제안된 $c-\phi$ 지반 토압계수는 벽체와 배면지반의 마찰저항에 따른 응력의 회전과 $c-\phi$ 지반을 가정하고 산정되어 벽면마찰저항 및 지반에서의 점착력을 고려할 수 있다. 이러한 주동토압계수는 원형수직터널의 토압식 산정에서 반경방향 토압계수로 사용되며, 각 경우를 정리하면 표 2로 나타난다.

표 2에서 Rankine(1857)의 토압계수를 사용한 수평 응력(σ_h)과 다른 경우와의 차이는 Rankine(1857)은 주동토압이 발생하는 경우 흙입자의 응력상태를 수평력이 감소하여 Mohr 원이 Mohr-Coulomb의 파괴포락선과 만나는 것으로 가정하여 산정한 것이고, 다른 경우들은 토압계수를 수직방향응력과 수평방향응력의 비로 산정하였기 때문에 발생한다. 본 연구에서 제안된 토압계수 산정식을 제외한 토압계수식은 벽면 마찰각을 고려하지 못하거나 $c-\phi$ 지반의 적용에 어려움이 있지만, 비교 검토를 수행하기 위해 각각의 토압계수를 적용하여 원형수직터널 토압식을 유도하였다.

그림 5는 원형수직터널에 작용하는 토압을 산정하기

표 2. $c-\phi$ 지반에서 반경방향 토압계수에 따른 고려사항

반경방향 토압계수	벽면 마찰각 고려 여부	$c-\phi$ 지반 적용 여부	수평 응력 (σ_h)	벽면 전단 강도 (τ_w)
Rankine	×	○	$k_{wa(Rankine)}\sigma_v - 2c\sqrt{k_{wa(Rankine)}}$	-
Coulomb	○	×	$k_{wa(Coulomb)}\sigma_v$	$k_{wa(Coulomb)}\sigma_v \tan\delta$
Paik과 Salgado	○	×	$k_{wa(Paik)}\sigma_v$	$k_{wa(Paik)}\sigma_v \tan\delta$
$c-\phi$ 지반 토압계수	○	○	$k_{wa(proposed)}\sigma_v$	$c_w + k_{wa(proposed)}\sigma_v \tan\delta$

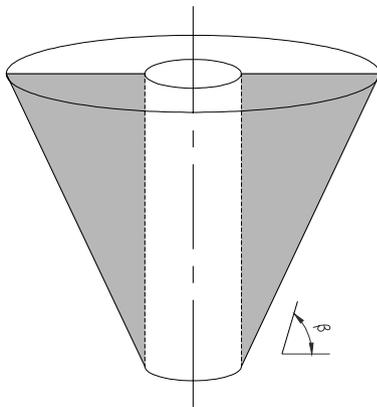


그림 5. 파괴면 가정

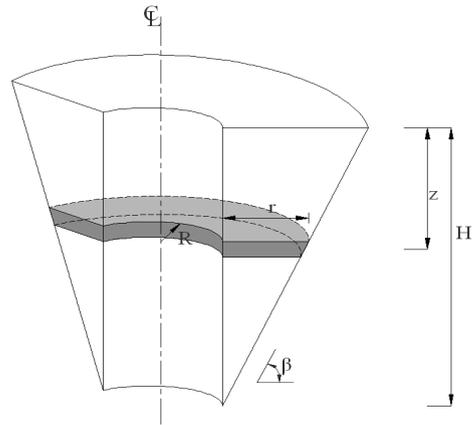


그림 6. 이완영역의 미소토체

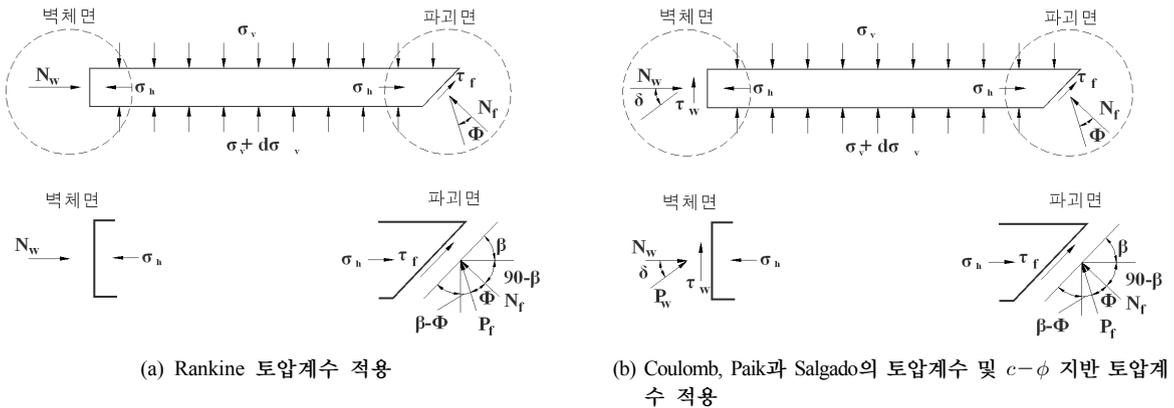


그림 7. 미소토체에서 힘의 평형

위해 본 연구에서 가정한 이완영역의 형태를 보여주는 것이며, 파괴 형태는 갈때기 모형으로 파괴면과 수평면이 이루는 경사각을 $45^\circ + \phi/2$ 로 설정하였다.

마찰력과 점착력이 모두 존재하는 지반에서 토압식을 산정하기 위해 접선방향 응력은 접선방향 토압계수는 '1 - sin φ'를 적용하여 고려하였고, 반경방향 응력은 산정하기 표 2의 조건을 이용하였으며, 극한평형법을 미소토체에 적용하였다.

그림 6에서 R은 원형수직터널 단면의 반지름, r은 이완영역의 크기, z는 지표에서 임의의 미소토체까지 깊이, H는 원형수직터널 높이를 나타낸다. r은 깊이 z와 파괴면의 경사각 β의 함수로 식 (15)로 표현되며, 임의의 깊이 z의 미소토체의 수평 면적(A)는 식 (16)으로 표현된다.

$$r = \frac{(H - z)}{\tan \beta} \quad (15)$$

$$A = \pi (2rR + r^2) \quad (16)$$

미소토체의 힘의 평형은 그림 7과 같이 나타나게 된다. 그림 7(a)는 Rankine(1857)의 주동토압계수를 적용한 경우의 힘의 평형이며, 벽면과 배면지반의 마찰저항을 고려할 수 없어 벽면 전단저항력(τ_w)이 발생하지 않는다. 그림 7(b)는 나머지 토압계수를 적용한 경우의 힘의 평형을 나타내었으며, 벽면 전단저항력(τ_w)가 발생하여 수직방향으로 가해지는 하중에 저항하게 된다. 그림 7의 벽체면에서 N_w는 벽체면에 배면토사가 수평방향으

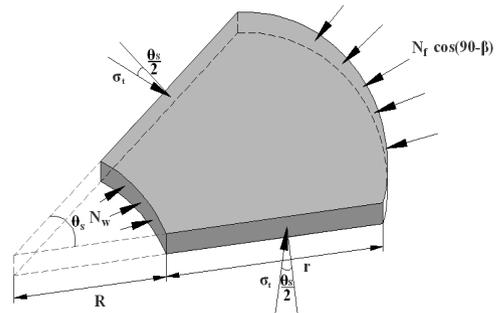


그림 8. 미소토체에서 수평방향 힘의 평형

로 가하는 응력의 반력이며, 파괴면에서 N_f는 파괴면에 작용하는 수직저항력이고, τ_f는 전단저항력이다. 이러한 응력들이 발생하여 힘의 평형을 이루게 된다.

원형수직터널의 토압식은 미소토체의 극한평형상태에서 힘의 평형을 이용하여 산정하게 된다. 그림 8은 미소토체의 수평방향 힘의 평형을 보인 것이다.

그림 7 및 그림 8을 참조하면, 원형수직터널에서 토압식을 산정하기 위한 수평방향 평형방정식은 식 (17)로 정리된다.

$$\int_0^{2\pi} N_w R d\theta_s dz + \int_0^{2\pi} 2\sigma_t \sin\left(\frac{d\theta_s}{2}\right) r dz + \int_0^{2\pi} (\tau_f) \frac{\cos \beta}{\sin \beta} (r + R) d\theta_s dz = \int_0^{2\pi} N_f \frac{\cos(90 - \beta)}{\sin \beta} (r + R) d\theta_s dz \quad (17)$$

N_w 는 벽체에서 발생하는 수평방향 응력으로 토체에서 벽체로 작용되는 σ_h 와 동일한 응력이며, 이 응력은 주동토압계수의 적용에 따라 다르며 이를 표 2에 정리하였다. σ_i 는 접선방향응력으로 $\sigma_i = \lambda \sigma_v$ 이다. 각 경우별로 식 (17)을 정리하여 N_f 로 나타내면 표 3과 같다.

수직방향 힘의 평형은 벽체와 배면지반에 발생하는 벽면마찰저항의 유무에 따라 다르게 된다. Rankine(1857)의 토압계수를 적용할 경우 벽면에서 마찰저항이 존재하지 않으므로 그림 7(a)를 참조하여 수직방향 평형방정식을 구하면 식 (18)로 표현된다.

$$\sigma_v A + A dz \gamma = (\sigma_v + d\sigma_v) A + 2\pi(R+r) \left\{ \tau_f \sin \beta + N_f \sin(90-\beta) \right\} \frac{dz}{\sin \beta} \quad (18)$$

다른 토압계수를 적용하는 경우에는 벽면에서의 마찰

저항을 고려할 수 있어 τ_w 가 벽면에서 작용하게 되고 그림 7(b)를 참조하여 수직방향 평형방정식을 작성하면 식 (19)로 표현된다.

$$\sigma_v A + A dz \gamma = (\sigma_v + d\sigma_v) A + 2\pi R \tau_w dz + 2\pi(R+r) \left\{ \tau_f \sin \beta + N_f \sin(90-\beta) \right\} \frac{dz}{\sin \beta} \quad (19)$$

각 경우별로 표 3에 나타낸 N_f 값을 대입하여 정리하면 식 (20)과 같은 비제차 일계 편미분 방정식으로 정리되며, 이 때에 S , T 는 표 4, 5에 정리하였다.

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + S\sigma_v = T \quad (20)$$

수직방향 응력은 식 (20)에 $z = 0$, $\sigma_v = 0$ 인 경계조건을 적용하여 산정되며, 식 (21)로 표현된다.

표 3. 각 경우별 N_f 산정

반경 방향 토압 계수	파괴면에 수직으로 작용하는 수직저항력, N_f
Rankine	$N_f = \frac{(Rk_{wa(Rankine)} + r\lambda)\sigma_v + c \left\{ \frac{(r+R)}{\tan \beta} - 2R\sqrt{k_{wa(Rankine)}} \right\}}{R+r} \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi}$
Coulomb	$N_f = \frac{(Rk_{wa(Coulomb)} + r\lambda)\sigma_v + c \frac{(r+R)}{\tan \beta}}{R+r} \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi}$
Paik과 Salgado	$N_f = \frac{(Rk_{wa(Paik)} + r\lambda)\sigma_v + c \frac{(r+R)}{\tan \beta}}{R+r} \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi}$
$c-\phi$ 지반 토압계수	$N_f = \frac{(Rk_{wa(proposed)} + r\lambda)\sigma_v + c \frac{(r+R)}{\tan \beta}}{R+r} \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \tan \phi}$

표 4. 토압계수별 S 값

반경방향 토압계수	S
Rankine	$\frac{2\pi}{A} \left\{ (k_{wa(Rankine)} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\}$
Coulomb	$\frac{2\pi}{A} \left\{ k_{wa(Coulomb)} R \tan \delta + (k_{wa(Coulomb)} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\}$
Paik과 Salgado	$\frac{2\pi}{A} \left\{ k_{wa(Paik)} R \tan \delta + (k_{wa(Paik)} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\}$
$c-\phi$ 지반 토압계수	$\frac{2\pi}{A} \left\{ k_{wa(proposed)} R \tan \delta + (k_{wa(proposed)} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\}$

표 5. 토압계수별 T 값

반경방향 토압계수	T
Rankine	$\gamma - \frac{2\pi}{A} c \left\{ (R+r) + \left(\frac{R+r}{\tan\beta} - 2R\sqrt{k_{wa}} \right) \frac{1 + \tan\beta \tan\phi}{\tan\beta - \tan\phi} \right\}$
Coulomb	$\gamma - \frac{2\pi}{A} c(R+r) \left\{ 1 + \frac{1 + \tan\beta \tan\phi}{\tan\beta - \tan\phi} \right\}$
Paik과 Salgado	$\gamma - \frac{2\pi}{A} c(R+r) \left\{ 1 + \frac{1 + \tan\beta \tan\phi}{\tan\beta - \tan\phi} \right\}$
c-φ 지반 토압계수	$\gamma - \frac{2\pi}{A} \left\{ c_w R + c(R+r) \left(1 + \frac{1}{\tan\beta} \frac{1 + \tan\beta \tan\phi}{\tan\beta - \tan\phi} \right) \right\}$

표 6. 원형수직터널 토압식

반경방향 토압계수	토압 (p _i)
Rankine	$k_{wa(Rankine)}\sigma_v - 2c\sqrt{k_{wa(Rankine)}}$
Coulomb	$k_{wa(Coulomb)}\sigma_v$
Paik과 Salgado	$k_{wa(Paik)}\sigma_v$
c-φ 지반 토압계수	$k_{wa(proposed)}\sigma_v$

표 7. 검토를 위한 지반 물성

구분	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	δ (°)	반경방향 토압계수
Case 7	18	10.0	30.0	-	Rankine
Case 8	18	10.0	30.0	0.0	Coulomb
Case 9	18	10.0	30.0	0.0	Paik과 Salgado
Case 10	18	10.0	30.0	0.0	c-φ 지반 토압계수

※ '-'는 고려할 수 없는 항을 뜻함.

$$\sigma_v = -\frac{T}{S} e^{-s} + \frac{T}{S} \quad (21)$$

식 (21)에 의한 토압식을 각 토압계수에 따라 표 6에 정리하였다.

4. 원형수직터널 토압식 비교 검토

4.1 반경방향 토압계수에 따른 원형수직터널 토압식 비교

각 반경방향 토압계수에 따른 토압식들을 검토하기 위해 지반을 가정하여 원형수직터널에 작용하는 토압을 산정하였다. 표 7은 가정된 지반 특성치를 정리한 것이며, 원형수직터널의 지름은 4 m, 높이는 15 m로 가정하

였다. 산정된 결과는 그림 9와 같으며 그림 9(a)는 토체의 수직방향 응력(σ_v)을 나타낸 것이며, 그림 8(b)는 수직터널에 작용하는 토압(p_i)을 나타낸 것이다.

그림 9(a)의 수직방향 응력의 산정결과 Case 8, 9의 경우가 동일하게 산정되었는데, 이는 가정 지반 조건이 같아 각 경우의 토압계수가 동일하게 산정되었고, 두 경우의 힘의 평형이 같기 때문이다. Case 10은 점착력에 의해 토압계수가 달라지기 때문에 Case 8, 9와는 힘의 평형조건이 같지만 상이한 결과를 산정하게 된다. Case 7에서 수직방향응력은 벽면에서 벽면마찰저항 및 점착력으로 인한 저항을 고려할 수 없어 상대적으로 작은 아칭현상이 발생하기 때문에 다른 경우의 수직방향응력에 비해 큰 값을 산정하게 되며, 바닥에서 0.0의 값을 산정하게 된다.

그림 9(b)의 토압 산정결과에서 수직응력의 산정 결과와 같이 Case 8, 9의 결과는 동일한 값을 보이며, Case 7은 다른 Case에 비해 매우 작은 값을 산정하였다. Case 10은 지표면의 인장균열 깊이까지 토압이 0.0으로 산정되었으며, 하부에서는 수직응력의 결과에 의해 수직터널의 바닥부 이전에서 0.0의 값이 산정되었다. 이는 점착력에 따라 파괴면과 벽체에서의 저항에 의해 수직방향으로 작용하는 하중이 바닥에 도달하기 전에 0.0의 값을 가지기 때문이다.

$c-\phi$ 지반에서 원형수직터널에 작용하는 토압을 산정하기 위해 각각의 반경방향 토압계수에 따른 토압식 유도 결과 Case 7은 벽체면과 배면토사에서 작용하는 벽면 마찰저항을 고려할 수 없으며, Case 8, 9는 ϕ 지반(모래지반)을 가정하고 산정된 토압계수로써 이를 통한 토압산정 결과 $c-\phi$ 지반에서 발생하는 인장 균열을 고

려할 수 없는 단점을 가진다. 따라서, 본 연구에서 $c-\phi$ 지반의 적용을 위해 제안한 토압계수를 이용한 토압식을 $c-\phi$ 지반의 원형수직터널 토압 산정에 적용할 경우 점착력에 의한 수직방향 응력 감소를 반영할 수 있어 $c-\phi$ 지반에 가장 적합한 것으로 판단된다.

4.2 점착력에 따른 영향 검토

Case 10의 경우를 원형수직터널 토압식으로 하고, 이를 검토하기 위해 지반을 가정하고 지반 특성치를 변화하여 원형수직터널에 작용하는 토압을 각 경우별로 산정하였다. 점착력 이외에 지반 특성치는 일정한 것으로 가정하고 점착력을 변수로 점착력이 토압에 미치는 영향을 파악하였다. 표 8은 점착력의 영향을 파악하기 위해 가정된 지반 특성치를 정리한 것이며, 원형수직터널의 지름은 4 m, 높이는 15 m로 가정하여 토압을 산정하

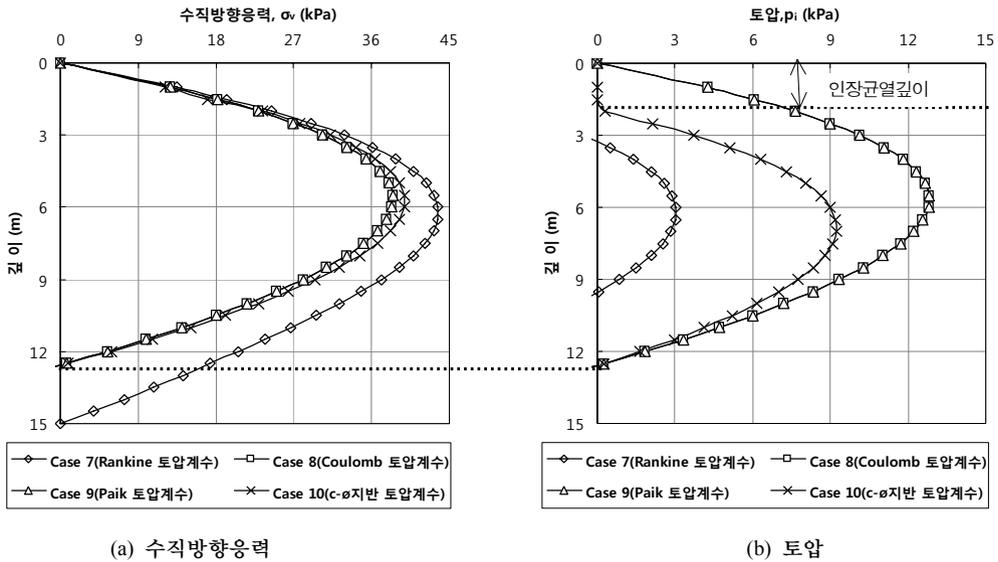


그림 9. Case 별 응력 결과

표 8. 점착력의 영향을 검토하기 위한 지반 물성

	γ (kN/m^3)	c (kPa)	ϕ ($^\circ$)	δ ($^\circ$)	토압산정방법
Case 11	18	0.0	30.0	0.0	Rankine
Case 12	18	0.0	30.0	0.0	제안식
Case 13	18	5.0	30.0	0.0	제안식
Case 14	18	10.0	30.0	0.0	제안식

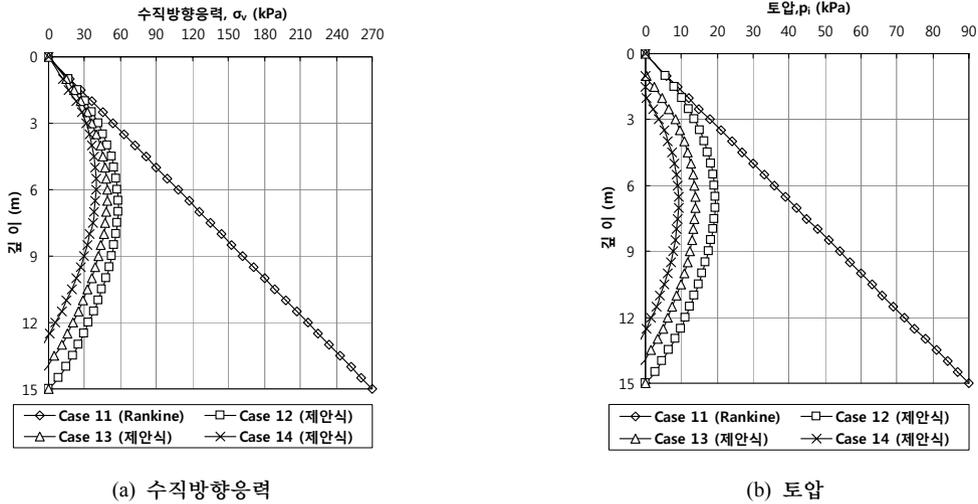


그림 10. 점착력 변화에 따른 응력 산정 결과

였다. 산정된 결과는 그림 10과 같으며 그림 10(a)는 산정된 수직방향응력을 나타낸 것이고 그림 10(b)는 수직터널에 작용하는 토압을 나타낸 것이다.

제안식으로 산정된 수직방향응력 및 토압을 Rankine (1857)의 토압식에 사용되는 수직방향응력 및 토압으로 비교하였다. 그림 10에 나타나듯이 점착력이 증가함에 따라 수직방향으로 저항력이 커지게 되어 아칭현상이 증가하게 되고, 산정되는 수직응에 작용하는 토압은 점착력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

그림 10(b)에서 최대 토압을 비교 하였을 때, 점착력이 5 kPa인 Case 13의 경우는 Case 12의 경우보다 약 28% 감소하였으며, 10 kPa인 Case 14의 경우에는 약 52% 감소하였다. 이는 작은 점착력으로도 토압이 크게 감소하는 것을 보여주는 것으로 완전히 건조한 지반 또는 완전히 포화된 지반을 제외한 흡인력(matric suction)과 모세관력(capillary force)에 의해 겉보기 점착력이 존재하는 습윤 지반과 지하수위 상부에 존재하는 지반에서 점착력을 무시할 경우 실제 작용하는 토압에 비해 큰 토압을 산정하게 됨을 보여준다.

5. 다층지반에서의 토압 산정

다층지반에서의 산정된 토압식의 적용을 위해 그림 11과 같은 지반을 가정하였고, 토압을 산정하기 위한 지

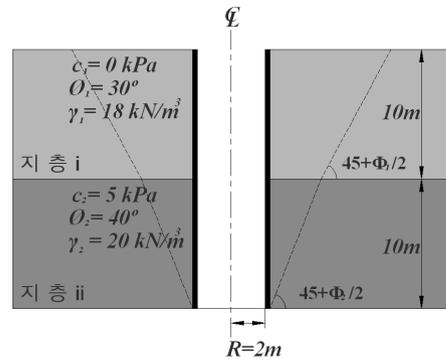


그림 11. 다층 지반 형상 및 지반 특성치

반 특성치는 그림 11에 나타내었다. 지층 i은 점착력이 존재하지 않는 지반으로 가정하였으며, 심도가 깊어짐에 따라 지반이 점차적으로 점착력과 마찰력을 동시에 가지는 것으로 가정하였고 지반은 2개의 층으로 가정하였다. 토압의 산정을 위해 그림 11에서 보인 것과 같이 파괴면을 가정하였으며, $c-\phi$ 지반에서 제안된 토압식의 비교를 위해 이인모 등(2007)이 제안한 토압식 및 Rankine(1857)의 토압식과 비교하였다.

그림 12는 산정된 토압 결과를 나타낸 것으로 토압이 크게 변화하는 10 m지점이 지층이 변화하는 지점이다. 제안식은 점착력이 존재하지 않은 지층 i에서 이인모 등(2007)이 제안한 토압식과 같은 결과를 도출하였으며,

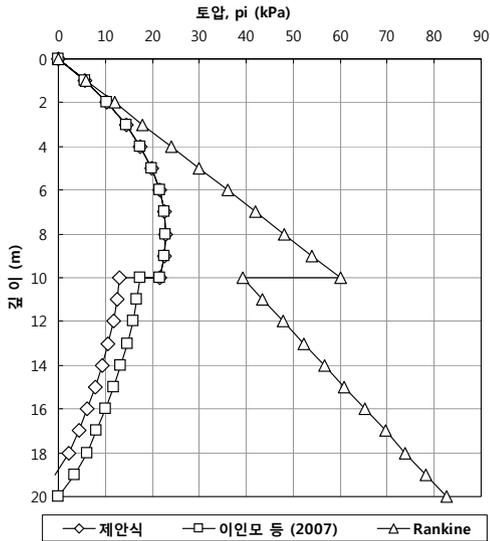


그림 12. 원형수직터널에 작용하는 토압 비교

점착력이 있는 지층 ii에서는 점착력으로 수직 아칭 효과의 증가로 인해 이인모 등(2007)보다 작은 토압을 산정하였다. 따라서 본 연구에서 제안된 토압식은 ϕ 지반 및 $c-\phi$ 지반으로 이루어진 다층지반에서도 적용 가능함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 $c-\phi$ 지반에서 원형수직터널의 토압식을 산정하기 위해 $c-\phi$ 지반 토압계수를 제안하였다. 또한, 파괴면을 가정하고, 미소토체의 파괴면에서 점착력(c)을 포함하여 힘의 평형을 고려하여 토압식을 유도하였다. 지반을 가정하여 점착력에 따른 토압의 변화를 검토하였고, 다층지반에서의 토압식의 적용을 위해 파괴면을 가정하여 토압을 산정하였다. 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. $c-\phi$ 지반을 대상으로 산정된 토압계수 공식은 단위 중량, 점착력, 내부마찰각, 벽면마찰각, 깊이의 함수로 구성된다. 제안된 토압계수 공식을 사용할 경우 벽면에서 발생하는 벽면 마찰저항에 따른 아칭 현상을 고려할 수 있고, 배면에서의 점착력으로 발생하는 인장균열도 고려할 수 있어 $c-\phi$ 지반에서 적절한 토

압계수를 산정하는 것으로 판단된다.

2. 토압식의 검토를 위해 지반의 점착력을 단계별로 증가하여 제안식으로 토압을 산정한 결과에서 점착력의 증가에 의해 배면 미소토체의 전단저항이 증가하게 되며, 이로 인한 수직방향 아칭효과의 증가로 수직방향응력 및 수직터널에 작용하는 토압이 감소됨을 보인다. 토압 산정에 있어 점착력 증가에 따른 토압의 감소효과가 큰 것으로 보이며 이에 따라 점착력을 고려하지 않은 토압 산정은 과도한 토압을 산정하는 것으로 판단된다.
3. 다층지반에서 파괴면을 가정하고 토압을 산정한 결과에서 본 제안식에 의한 토압은 점착력이 없는 지층 i에서 기 토압식과 동일한 결과를 보이므로 마찰력만이 존재하는 지반에서도 적용 가능한 것으로 판단되며, 점착력이 존재하는 지층 ii에서도 적절한 토압을 산정함에 따라 제안식을 사용하는 경우 다양한 지반으로 이루어진 다층지반에서 적절한 토압을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 두 개의 연속 논문(Companion paper)의 전 반부로서 원형수직터널의 토압산정을 위한 이론적인 연구를 담고 있으며, 두 번째 논문에서는 신뢰성 및 적용성 평가를 위한 실내모형시험 및 현장계측 결과와의 비교 검토가 이루어질 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 지원으로 이루어진 연구로써 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신영완, 문경선, 강휴택, 이승호 (2008), “현장계측을 통한 원형수직구 작용하중 분석”, 한국지반환경공학회 논문집, 제9권, 제4호, pp. 63-76.
2. 신영완, 사공명 (2007), “벽체형상비의 영향을 합리적으로 고려한 원형수직구 벽체에 작용하는 토압산정방법”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제2호, pp. 143-155.
3. 이인모, 문홍표, 이대수, 김경렬, 조만섭 (2007), “다층지반에서의 아칭현상에 의한 수직갱 토압”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 49-62.

4. 천병식, 신영완 (2003), “사질토 지반의 원형수직구에 설치된 흙막이벽에 작용하는 토압”, 한국지반공학회 논문집, 제 19권, 5호, pp. 175-187.
5. Coulomb, C. A. (1776), “Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemesde statique relatifs”, a la architecture. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., Vol. 7, pp. 343-387.
6. Handy, R. L. (1985), “The arch in soil arching”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 302-318.
7. Harrop-Williams, K. O. (1989), “Geostatic wall pressure”, J. of Geotech. Engrg., ASCE, Vol. 115, No. 9, pp. 1321-1325.
8. Paik, K. H. and Salgado, R. (2003), “Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects. Geotechnique”, Vol. 53, No. 7, pp. 643-653.
9. Prater, E. G. (1977), “An examination of some theories of earth pressure on shaft linings”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 91-106.
10. Rankine, W. J. M. (1857), “On the stability of loose earth. Phil. Trans. Royal. Society, London”, Vol. 147, No. 1, pp. 9-27.
11. Wong, R. C. K. and Kaiser, P. K. (1988), “Design and performance evaluation of vertical shafts; rational shaft design method and verification of design method”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, No. 2, pp. 320-337.

접수일(2009.4.22), 수정일(1차: 2009.4.27, 2차: 2009.4.30), 게재
확정일(2009.4.30)