

# 지반의 팽창성을 고려한 터널의 테르자기 토압공식 수정

## Modification of Terzaghi's Earth Pressure Formula on Tunnel Considering Dilatancy of Soil

한 희 수<sup>†</sup> · 조 재 호<sup>1)</sup> · 양 남 용<sup>2)</sup> · 신 백 철<sup>3)</sup>

Han, Heui-Soo · Cho, Jae-Ho · Yang, Nam-Yong · Shin, Baek-Chul

**ABSTRACT** : In this study, Terzaghi's formula was modified to solve problems considering the dilatancy effect of the soil for estimating the earth pressure acting on tunnel. It is performed for the comparison with Terzaghi's formula and modified Terzaghi's formula, tunnel model test result of Kobe University Rock Mechanics Laboratory. From comparison results of the earth pressure acting on tunnel, the earth pressure calculated by the Terzaghi's formula was estimated largest value. The earth pressure measured through the tunnel model test was least value. The difference between the earth pressure derived from Terzaghi's original formula and that derived from the modified formula was caused by the dilation effect, which was caused by the soil volume change. The difference between the earth pressure derived from the modified formula and the earth pressure measured through the tunnel model test, earth pressure results from the energy making failure surface. The results of FEM analysis were almost consistent with the results of mathematical analysis.

**Keywords** : Shallow tunnel, Terzaghi's earth pressure formula, Arching effect, Finite element method

**요 지** : 본 연구에서는 터널의 상부에 작용하는 토압을 평가하는데 있어서 기존의 Terzaghi 공식이 가지는 문제점을 해결하기 위해 흙의 팽창성(Dilatancy)을 고려하여 Terzaghi 공식을 수정하였다. Terzaghi 공식과 수정식에 대한 수학적 해석결과, 터널의 토압은 수정식이 Terzaghi 공식에 비해 작게 나타났으며 토피고도가 커질수록 그 차이는 증가하였다. 터널모형실험 결과와 비교해 본 결과, Terzaghi 공식에 의해 계산된 상부토압은 굴착 전 토압의 약 70%이며, 수정식에 의하면 약 60% 정도로 나타났고, 터널모형실험에 의해 측정된 토압은 약 40% 정도임을 볼 수 있었다. 또한 유한요소해석을 이용하여 Terzaghi 공식과 수정식에 의해 산정된 터널 상부토압과 전단변형률을 비교해본 결과 수학적 해석결과와 동일하게 수정식이 Terzaghi 공식보다 작게 나타났다.

**주요어** : 저토피 터널, 테르자기 토압공식, 팽창성, 아칭효과, 유한요소해석

## 1. 서 론

최근 들어 인구 증가로 인한 산업기반시설 확충의 필요성으로 도로, 철도, 지하철, 고속전철 등의 교통시설에 필요한 많은 터널이 시공되고 있다. 도로, 철도 등의 선형구조물 설계에서 터널의 적용은 지역 간 연결뿐만 아니라 많은 시간의 단축을 가져다주고 있어 현실적으로 많은 경비를 감소시키는 장점이 있다. 더욱이 우리나라는 국토가 좁고 그나마도 이용 가능한 토지가 많지 않아서 지하공간에 대한 수요가 증가하여 다양한 형태의 지하구조물 건설이 활발하게 이루어지고 있다. 최근에는 터널 시공이 양질의 암반 지반에서 뿐만 아니라 연약한 토사지반에서도 터널을 굴착하는 사례가 증가하고 있다.

토사나 연약한 암반 내에서 터널을 굴착할 때에 터널의

안정성은 굴진면의 안정성과 직접적인 관련이 있으므로 굴진면 전방 지반의 안정성과 주변지반의 응력분포를 연계하여 검토해야 한다. 터널 굴착으로 인한 터널 상부의 토압은 상부 흙의 무게로부터 계산된 값보다 보통 작게 나타나는 것으로 이미 잘 알려져 있다. 이것은 굴착된 흙의 상부 지반이 느슨해졌기 때문인데 이 수직토압은 Terzaghi(1959)에 의해 계산되게 되었으며 현재에도 터널 설계 시 이 공식을 적용하고 있다. 이러한 이론들은 미소 흙의 정역학적 평형 방정식을 이용하여 토체를 부피의 변화가 없는 강체로 가정하여 제안된 공식들이다.

흙의 아칭현상(Arching Effect)은 많은 연구자들에 의해 이론적 그리고 실험적으로 연구되어졌다. Terzaghi(1936)는 실험 장치로써 트랩 도어(Trap Door) 장치를 이용하여 흙의 아칭현상을 설명하였다. 이 후 Terzaghi의 실험을 기초로 Murayama(1968)가 모래를 이용하여 2차원 실험을 수행하

† 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 교수(E-mail : hanhs@kumoh.ac.kr)

1) 비희원, 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정

2) 정희원, 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정

3) 비희원, 금오공과대학교 대학원 토목공학과 박사과정

였다. 이 후 Ladanyi 와 Hayaux(1969)가 알루미늄 봉을 이용하여 지반을 재현하였고 Tarumi(1992)가 여러 종류의 트랩 도어를 이용하여 쉴드터널의 라이닝에 작용하는 토압을 계산하였다.

본 연구에서는 터널의 상부에 작용하는 토압을 평가하는데 있어서 기존의 Terzaghi 공식이 가지는 문제점을 해결하기 위해 흙의 팽창성(Dilatancy)을 고려하여 Terzaghi 공식을 수정하였다. Terzaghi 공식과 수정식에 대한 수학적 해석 결과를 비교·검토하였으며, 터널모형실험 결과와 비교하였다. 또한 유한요소해석을 이용하여 원형터널을 모델링하여 Terzaghi 공식과 수정식에 의해 산정된 터널 상부토압과 전단변형률을 비교·검토하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 아칭효과(Arching Effect)

터널을 굴착하기 이전 정역학적 평형상태로 작용하고 있던 응력, 즉 초기응력(초기압)이 굴착으로 인해 교란되어 2차 응력(유도응력)으로 변하게 되며 동시에 굴착부에는 변형을 일으키게 된다(Walter, 1990).

이 때 굴착 진행 방향(Longitudinal Direction)과 횡방향(Transverse Direction)으로 지반의 초기응력 일부가 전이되며 남은 응력이 터널 주변에 재분배된다. 굴착에 의해 굴진면에서는 변형이 크게 발생하나 주변지반은 변형이 작게 발생할 때, 변위가 크게 발생한 지반에 존재하던 토압이 변위가 작게 발생한 주변지반 쪽으로 전이되는 현상을 아칭현상이라 한다(Terzaghi, 1943).

### 2.2 터널 주변의 Terzaghi 응력

터널 상부의 토압을 산정하는 Terzaghi의 방법은 슬라이딩면을 그림 1(b)에서처럼 수직이라고 가정하고, 라인 ac와 bd로 나타내어진다. 미소요소(폭 2B, 높이 dz)에 작용하는 연직 방향의 힘의 평형은 이 요소의 자중이 상단과 하단면에 작용하는 수직력과 전단 저항의 합에 의해 상쇄된다. 이 요소는 체적변화가 없는 강체로 가정하고 아칭효과는 이 요소의 움직임으로부터 유도된다. 흙의 전단저항은 식 (1)에 의해 결정된다.

$$\tau = c + \sigma_h \tan \phi \quad (1)$$

여기서,  $c$ 는 점착력을 나타내고  $\phi$ 는 흙의 내부마찰각,  $\sigma_h$ 는 슬라이딩 면에 작용하는 수평응력을 나타낸다.

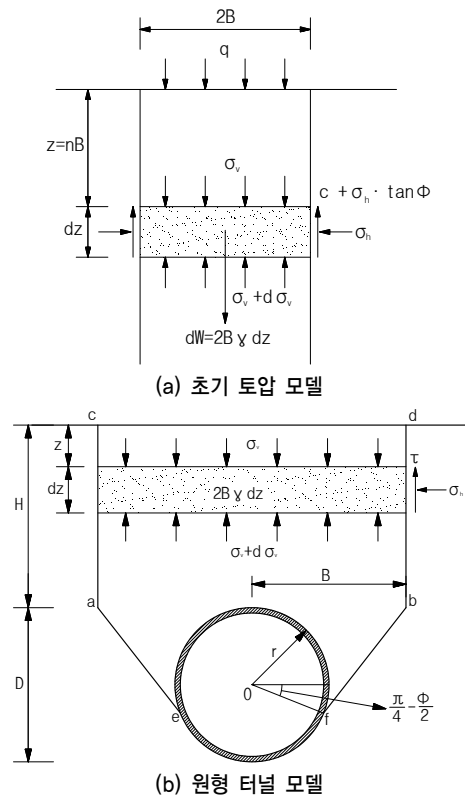


그림 1. Terzaghi 이론에 의한 터널 라이닝에 작용하는 토압 모델(1959)

지표 아래의 깊이  $z$ 에서 두께  $dz$ 를 가진 미소요소의 자중은 이 요소에 대한 연직방향의 힘의 평형에서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$2B\gamma dz = 2B(\sigma_v + d\sigma_v) - 2B\sigma_v + 2cdz + 2K\sigma_v dz \tan \phi \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$ 는 단위중량,  $\sigma_v$ 는 슬라이딩 면에 작용하는 수직 응력,  $c$ 는 점착력,  $dz$ 는 미소요소의 높이,  $B$ 는 터널의 넓이,  $K$ 는 수평토압계수를 나타낸다.

경계조건은  $z=0$ 에서  $d\sigma_v = 0$ 이므로 식 (2)를 풀면, 깊이  $z$ 에서의 연직응력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - \frac{c}{B})}{K \tan \phi} (1 - e^{-K \tan \phi \frac{z}{B}}) \quad (3)$$

## 3. 터널에 작용하는 토압의 수정

### 3.1 Terzaghi 토압 공식의 수정 배경

전 세계적으로 터널설계 시에 식 (3)이 널리 사용되었을 지라도, Terzaghi가 과하중 지반의 전단변형과 점진적인 소성변형을 고려하지 않았기 때문에, 굴착되는 동안 터널의

변형과 라이닝 상부의 토압사이의 관계가 설명이 되지 않는 근본적인 문제가 있다. 문제는 다음과 같이 요약된다.

- 1) Terzaghi 공식은 과하중 지반의 내부의 부피변화(점진적인 전단변형)으로 부터 생기는 흙의 팽창성(Dilatancy)을 고려하지 않았다.
- 2) 가정된 파괴면이 실제의 경우보다 더 크고, 파괴면 형성에 필요한 과도한 전단변형은 무시되었다.

### 3.2 저토피 터널에 작용하는 토압의 수정

터널이 굴착되면, 굴착 상부 흙은 체적증가에 따라 아래쪽으로 치환되고, 양쪽에서 전단응력이 유발되는데 이러한 현상을 지반의 팽창성(Dilatancy)이라 부른다. 그러나 Terzaghi는 흙의 변형으로 인해 발생된 체적 변화에 의한 응력을 고려하지 않았다. 그러므로 Terzaghi 공식의 결과는 항상 현장 측정토압과 실험 결과보다 높게 나타난다. 흙의 팽창성(Dilatancy)은 전단강도를 증가시키고, 그림 2의  $\overline{OBC}$ 에 의해 설명된 것처럼 곡선으로 이루어진 Mohr-Coulomb의 파괴 포락선이 생긴다.  $\phi' = \phi_{cv}'$ 이면  $\overline{OA}$ 와 유사한 형태의 직선이 그려진다(하점자  $cv$ 는 Constant Volume을 의미함). 유효 연직응력이 더 작을수록, 팽창각(Dilatation Angle)  $\psi$ 의 값이 더 커진다(Budhu, 2000).

흙의 변형이 없을 때, 그림 3(a)는 초기응력 상태를 보여준다. 그러나, 터널이 굴착되면, 흙의 팽창성으로 인한 응력은 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 흙의 변위 때문에 상부 흙 슬라이스에 작용한다. 따라서 흙의 팽창 효과에 의한 응력이 추가되므로 연직응력식은 식 (4)와 같다.

$$\sigma_N = \sigma_v + \sigma_d = K_d \sigma_v \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_v$ 는 일정한 체적에서의 수직응력이고,  $\sigma_d$ 는 흙의 팽창에 의한 응력이다. 이 식에서  $K_d$ 는 증가된 수직 응력을 흙의 팽창에 의한 응력으로 변화시키는 계수이다.

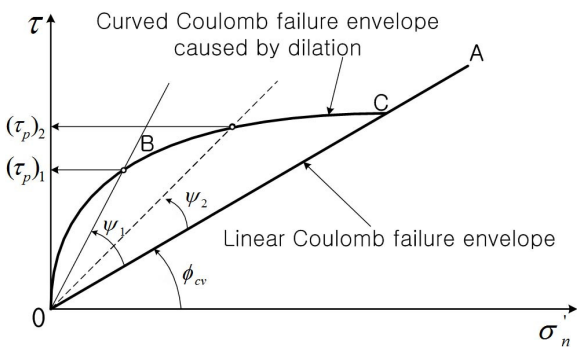


그림 2. Mohr-Coulomb 파괴포락선상의 다일레이턴시 효과

내부마찰각은 식 (5)에 나타난 바와 같이 팽창각(Dilatation Angle)에 의해 증가된다.

$$\phi_{cv} + \psi = \phi_d \quad (5)$$

여기서,  $\phi_{cv}$ 는 일정한 체적에서의 내부마찰각이고,  $\psi$ 가 팽창각에 의해 증가되어진 부분이다.

흙의 팽창성을 고려하기 위해, 그림 1은 수정되어야 하며, 그림 4는 흙의 팽창성을 고려한 수정된 자유물체도를 보여준다. 아칭에 의한 전단응력과 팽창효과는 식 (6)과 같이 나타난다.

$$\tau = c + K_0 \sigma_N \tan \phi_d \quad (6)$$

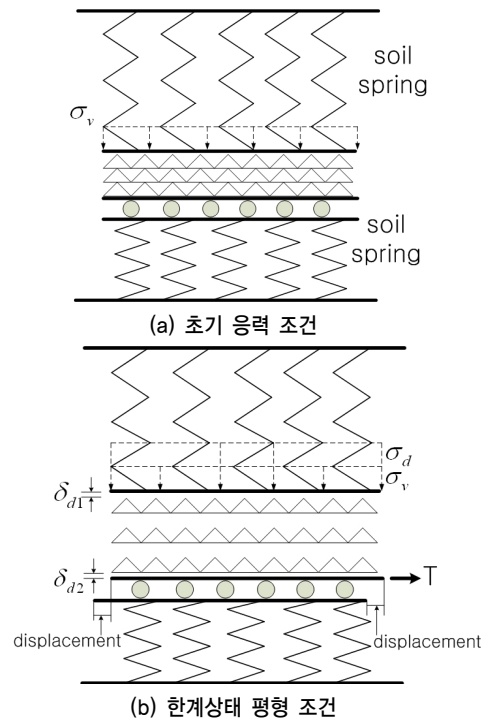


그림 3. 흙의 변위에 의한 다일레이턴시

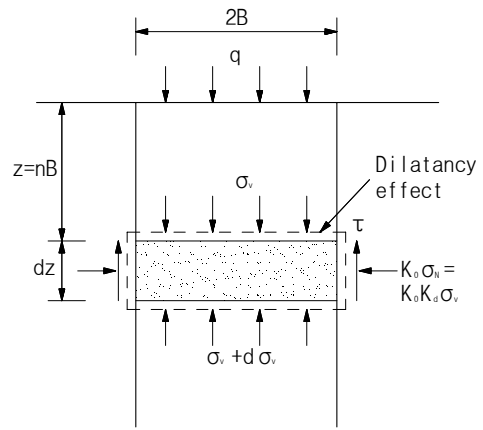


그림 4. 수정된 자유물체도

여기서,  $\tau$ 는 흙의 팽창효과를 고려한 전단응력이다. 수정된 자유물체도에 따르면 슬라이스에 작용하는 수직 요소의 합계는 식 (7)에 나타난다.

$$2B\gamma dz + 2B\sigma_v = 2B(\sigma_v + d\sigma_v) + 2cdz + 2K_0K_d\sigma_v \tan\Phi_d dz \quad (7)$$

여기서,  $\gamma$ 는 단위중량,  $\sigma_v$ 는 슬라이딩 면에 작용하는 수직 응력,  $c$ 는 점착력,  $B$ 는 터널의 너비,  $K_0$ 는 수평토압계수,  $K_d$ 는 팽창(Dilation)계수를 나타낸다.

식 (7)를 정리하면, 식 (8)과 같다.

$$z = \frac{B}{-K_0K_d \tan\Phi_d} \ln(B\gamma - c - K_0K_d\sigma_v \tan\Phi_d) + C' \quad (8)$$

여기서,  $C'$ 는 적분상수이다.

초기조건이 있다면,  $C'$ 은 식 (9)에서 결정할 수 있다(초기조건 :  $z=0, \sigma_v=0$ ).

$$\therefore C' = \frac{B}{K_0K_d \tan\Phi_d} \ln(B\gamma - c) \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입하면 식 (10)과 같이 된다.

$$\text{수정공식 : } \sigma_v = \frac{B\left(\gamma - \frac{c}{B}\right)}{K_0K_d \tan\Phi_d} \left(1 - e^{-\frac{zK_0K_d \tan\Phi_d}{B}}\right) \quad (10)$$

식 (10)에서 보는 바와 같이,  $K_d$ 와  $\Phi_d$ 는 Terzaghi에 의해 유도된 식 (3)과 비교하여 새로운 구성요소이다.

$K_d$ 의 값은 식 (11)과 같이 Jewell과 Wroth(1987)에 의해 쏘일네일링의 팽창 효과(Dilatancy)를 분석한 직접 전단 테스트의 결과로부터 제안된다.

$$K_d = \frac{0.85 + 0.5 \sin\Phi_{ps}' \sin(\Phi_{ps}' + 2\beta)}{\cos^2\Phi_{ps}'} \quad (11)$$

여기서,  $\beta$ 는 파괴면의 연직응력과 네일사이의 각도로, 수평면에서 측정된 사면보강재의 설치 각도를 나타내고,  $\Phi_{ps}'$ 는 유효내부마찰각을 나타낸다.

Bolton(1986)은 17종류의 모래에 대한 실험으로부터 상대밀도와 평균유효응력을 이용하여 팽창각을 식 (12)와 같이 유도하였다.

$$\Phi'_{\max} - \Phi'_{cv} = 0.8\psi_{\max} = 5I_R \quad (12)$$

상대밀도( $I_D$ )는 식 (13)에서 계산되며, 여기서  $\psi_{\max}$ 는 최대 다일레이턴시 각이고,  $I_R$ 은 상대팽창지수이다( $I_R$ 은 0부터 4까지 변화한다).

$$I_R = I_D(Q - \ln P') - R \quad (13)$$

여기서,  $P'$ 은 유효응력( $kN/m^2$ )을 나타내며, 경험적으로  $Q=10$ 일 때,  $R=1$ 이다.

식 (13)을 식 (12)에 대입하여 정리하면 식 (14)와 같다.

$$\psi_{\max} = \frac{5}{0.8} \{I_D(10 - \ln P') - 1\} = 6.25 \{I_D(10 - \ln P') - 6.25\} \quad (14)$$

### 3.3 흙의 팽창성을 고려한 수정식에 대한 결과 분석

#### 3.3.1 Terzaghi 공식과 수정식에 대한 비교

표 1은 Terzaghi 공식을 사용하여 터널 천단부의 토압을 계산하는데 사용된 물성치 자료를 보여주며, 이 물성치는 이재호 등(2007)에 의해 연구된 고베대학교 암반역학실험실의 터널모형실험 물성치를 사용하였다. 표 2는 수정된 식

표 1. Terzaghi 식의 물성치

구 분	H=0.5D	H=1D	H=2D
토 피 고, $H(m)$	0.075	0.15	0.30
터널 직경, $D(m)$	0.15	0.15	0.15
영 향 폭, $B(m)$	0.129	0.129	0.129
단위중량, $\gamma(kN/m^3)$	21.36	21.36	21.36
점 착 력, $c(kPa)$	0.258	0.258	0.258
내부마찰각, $\phi(^{\circ})$	30.7	30.7	30.7
수평토압계수, $K_0$	0.65	0.65	0.65
포아송 비, $\nu$	0.333	0.333	0.333
탄성계수, $E(kPa)$	369.5	529.7	850.2

표 2. 수정된 식에 적용한 추가 데이터

구 분	H=0.5D	H=1D	H=2D
최대 단위 중량, $\gamma_{\max}(kN/m^3)$	22.5	22.5	22.5
최소 단위 중량, $\gamma_{\min}(kN/m^3)$	21.0	21.0	21.0
상대밀도, $D_r$	0.253	0.253	0.253
흙의 팽창에 의한 수평토압계수, $K_d$	1.326	1.326	1.326
팽창각, $\psi_{\max}(^{\circ})$	9.487	8.391	7.296
흙의 팽창성을 고려한 내부마찰각, $\phi_d(^{\circ}) = \phi_{cv}(^{\circ}) + \psi_{\max}(^{\circ})$	40.2	39.1	38.0

에 적용된 추가적인 데이터를 보여준다.

기존에 사용되어진 Terzaghi 공식은 현장에서 측정되어진 토압보다 더 큰 경향을 나타내었고, 본 논문에서는 흙의 팽창성을 고려하여 팽창효과에 의한 수평토압계수  $K_d$ 와 팽창각  $\psi_d$ 를 새롭게 제안하여 수정된 Terzaghi 공식을 제시하였다. 흙의 팽창성을 고려한 수식을 바탕으로 상대밀도에 따른 두 이론의 결과를 표 3에서 비교하였다.

여기서,  $\sigma_T$ 는 Terzaghi 공식에 의한 토압을 나타내고,  $\sigma_{RT}$ 는 수정된 Terzaghi 공식에 의한 토압을 나타낸다.

그림 5은 흙의 상대밀도가 25.3%일 때 터널의  $H/D$ 의 변

표 3. Terzaghi공식과 수정식의 토압 비교

$D_r$ (%)	$H/D$	$\psi_d(^{\circ})$	$\phi_d(^{\circ})$	$\sigma_T$ (kPa)	$\sigma_{RT}$ (kPa)	$\frac{\sigma_{RT}}{\sigma_T}$ (%)
13.5	0.5	2.1	32.8	1.30	1.21	93
	1.0	1.6	32.3	2.34	2.07	88
	2.0	1.0	31.7	3.83	3.13	82
15.8	0.5	3.6	34.3	1.30	1.18	91
	1.0	2.9	33.6	2.34	1.99	85
	2.0	2.2	32.9	3.83	2.93	77
19.4	0.5	5.8	36.5	1.30	1.21	93
	1.0	5.0	35.7	2.34	2.07	88
	2.0	4.1	34.8	3.83	3.12	82
25.3	0.5	9.5	40.2	1.30	1.18	91
	1.0	8.4	39.1	2.34	1.99	85
	2.0	7.3	38.0	3.83	2.93	77
37.1	0.5	16.8	47.5	1.30	1.12	86
	1.0	15.2	45.9	2.34	1.81	77
	2.0	13.6	44.9	3.83	2.55	66

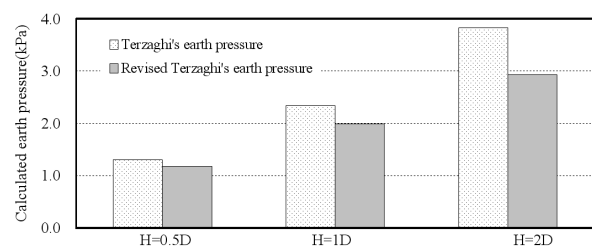


그림 5. 상대밀도 25.3%에서 터널의  $H/D$ 와 토압 사이의 관계

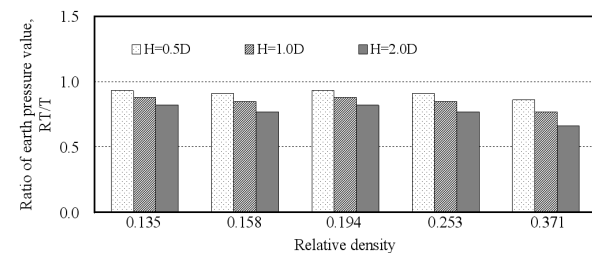


그림 6. 상대밀도에 따른 토압의 비교

화에 따른 토압을 보여준다. 토피고가 증가함에 따라, 수정된 방법의 토압은 흙의 팽창 효과 때문에 기존의 Terzaghi 공식에 의한 결과 보다 작게 나타났다. 또한 토피고가 커질 수록 그 차이는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 터널의 토피가 증가하여 파괴면의 길이가 증가함에 따라 흙의 팽창 효과가 누적되어 짐을 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와 같이 상대밀도가 증가함에 따라 에너지 소비가 증가하여 토압은 감소하는 경향을 나타냈다.

### 3.3.2 Terzaghi 공식과 수정식, 터널모형실험과의 비교

그림 7은 일본 고베대학교 암반역학실험실에서 수행된 터널모형실험결과에 Terzaghi 공식과 흙의 팽창성을 고려한 수정식에 의해 산정된 토압을 비교한 그림이다.  $P_0$ 는 초기 토압을 나타내며,  $P_i$ 는 터널 굴착에 따라 변화된 토압이다. 그림 7에 의하면 상부 높이  $H=1D$ 인 경우, Terzaghi 공식에 의해 계산된 상부토압은 굴착 전 토압의 약 70%이며, 수정식에 의하면 약 60% 정도이다. 그러나 터널모형실험에 의해 측정된 토압은 약 40% 정도임을 볼 수 있다.

그림 8은 Terzaghi공식과 수정식, 터널실험결과를 비교한 그림이다. 이를 살펴보면 초기 토압  $P_0$ 에서 a는 Terzaghi가 고려한 토피의 마찰력에 의한 아칭효과로 인해 소실된 토압을 나타낸다. Terzaghi는 토피를 강체로 가정하여 흙의 팽창에 의한 영향을 무시하였으므로 수정식과의 차이 b는 흙의 팽창에 의해 소실된 토압을 나타낸다. 터널모형실험을 통해 측정된 토압과 수정식과의 차이 c는 파괴면 형성으로 인해 소실된 토압을 나타낸다.

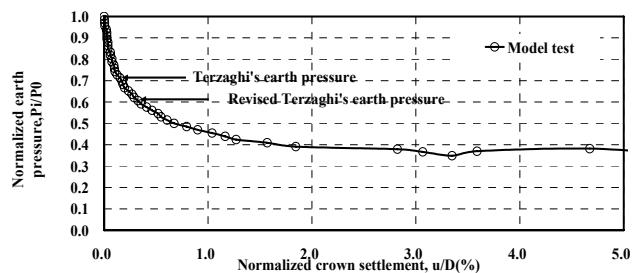


그림 7. 천단침하곡선에서의 Terzaghi 식과 수정식의 토압( $H=1D$ )

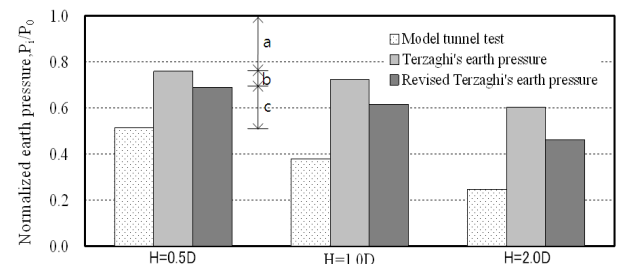


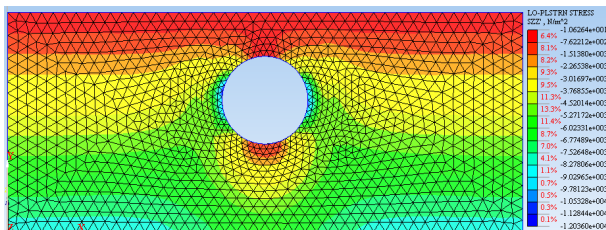
그림 8. Terzaghi공식과 수정식, 모형실험결과와의 비교

## 4. 유한요소해석을 이용한 토압 비교

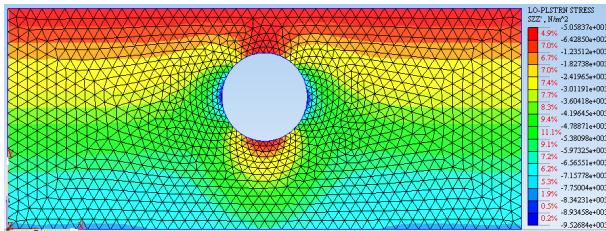
유한요소해석을 위해 MIDAS/GTS 프로그램을 이용한 해석은 터널 직경  $D$ 에 대해 터널 상부의 토피고  $H$ 를 0.5배, 1배, 2배인 경우에 터널 상부에 작용하는 연직응력을 비교하였고, 터널 어깨와 측면에 작용하는 최대전단변형률을 비교하였다.

### 4.1 H=0.5D 조건의 결과 비교

MIDAS/GTS 프로그램 해석결과, Terzaghi 공식에 의한 얻어진 터널 상부에 작용하는 연직응력은  $1.513\text{kN/m}^2$ 으로 나타났고, 수정식에 의한 연직응력은  $1.235\text{kN/m}^2$ 으로 나타났다(그림 9 참조). 본 수정식에 의한 연직응력은 Terzaghi 공식의 결과보다 작게 해석되었다.

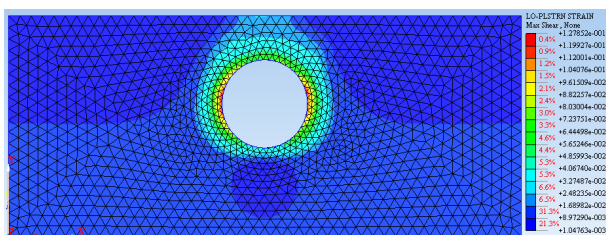


(a) Terzaghi 식을 적용한 경우

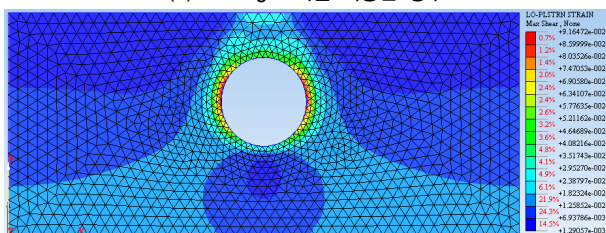


(b) 수정된 Terzaghi 식을 적용한 경우

그림 9. H=0.5D인 경우 연직응력



(a) Terzaghi 식을 적용한 경우



(b) 수정된 Terzaghi 식을 적용한 경우

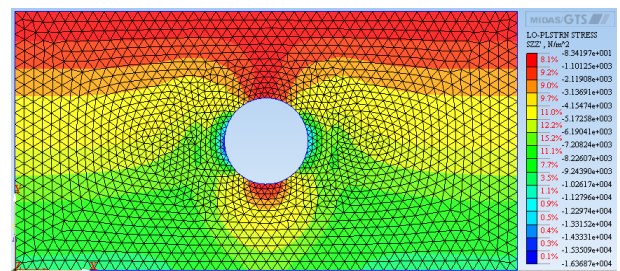
그림 10. H=0.5D인 경우 전단변형률

터널 어깨와 측면에 작용하는 전단응력을 비교해 보면, Terzaghi 공식에 의한 전단변형률은 0.048로 나타났고, 수정식에 의한 전단변형률은 0.035로 나타나, 수정식에 의한 결과가 작게 나타났다(그림 10 참조).

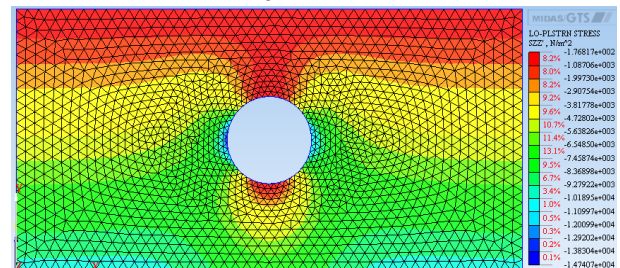
### 4.2 H=1.0D 조건의 결과 비교

MIDAS/GTS 프로그램 해석결과, Terzaghi 공식에 의한 얻어진 터널 상부에 작용하는 연직응력은  $2.129\text{kN/m}^2$ 으로 나타났고, 수정식에 의한 연직응력은  $1.997\text{kN/m}^2$ 으로 나타났다(그림 11 참조).

터널 어깨와 측면에 작용하는 전단응력을 비교해 보면,

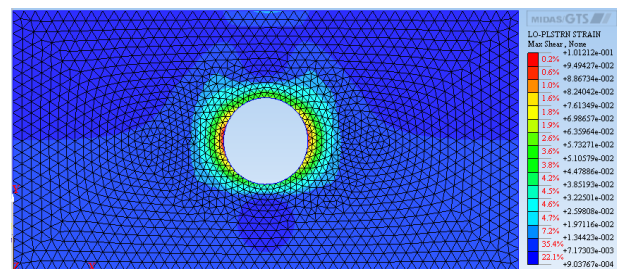


(a) Terzaghi 식을 적용한 경우

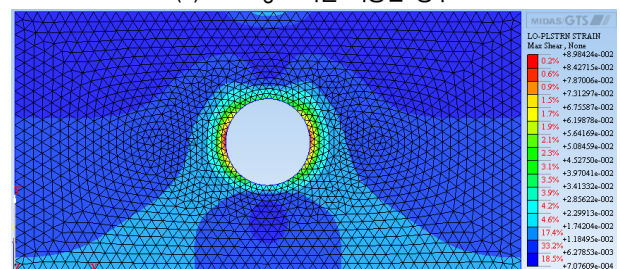


(b) 수정된 Terzaghi 식을 적용한 경우

그림 11. H=1.0D인 경우 연직응력



(a) Terzaghi 식을 적용한 경우



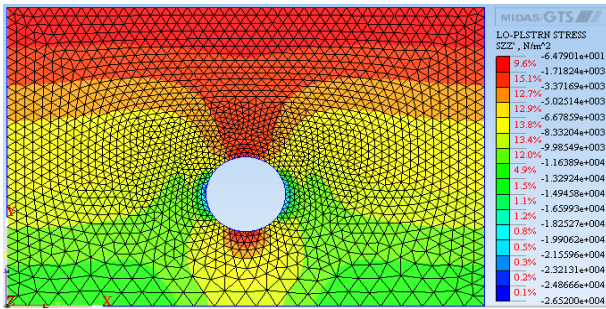
(b) 수정된 Terzaghi 식을 적용한 경우

그림 12. H=1.0D인 경우 전단변형률

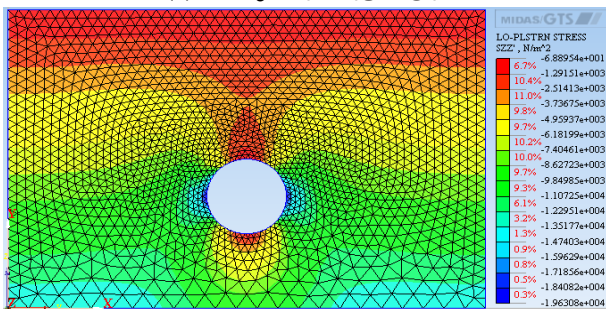
Terzaghi 공식에 의한 전단변형률은 0.039로 나타났고, 수정식에 의한 전단변형률은 0.034로 나타났다(그림 12 참조).

### 4.3 H=2.0D 조건의 결과 비교

MIDAS/GTS 프로그램 해석결과, Terzaghi공식에 의해 얻어진 터널 상부에 작용하는 연직응력은  $3.371kN/m^2$ 으로 나타났고, 수정식에 의한 연직응력은  $2.514kN/m^2$ 으로 나타났다(그림 13 참조).

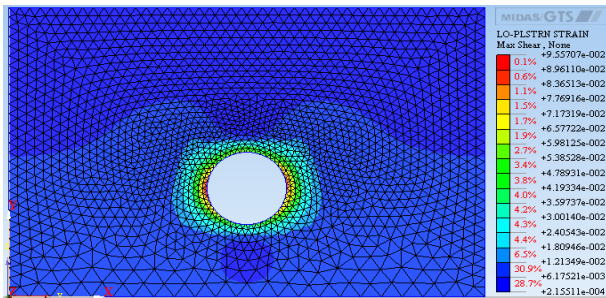


(a) Terzaghi 식을 적용한 경우

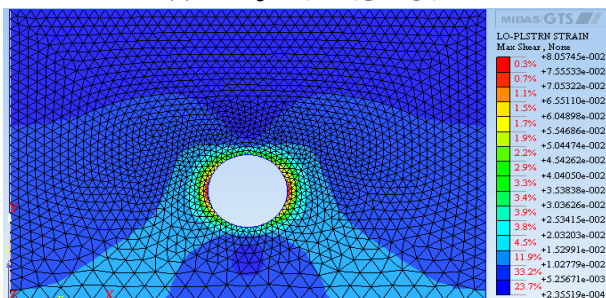


(b) 수정된 Terzaghi 식을 적용한 경우

그림 13. H=2.0D인 경우 연직응력



(a) Terzaghi 식을 적용한 경우



(b) 수정된 Terzaghi 식을 적용한 경우

그림 14. H=2.0D인 경우 전단변형률

터널 어깨와 측면에 작용하는 전단응력을 비교해 보면, Terzaghi 공식에 의한 전단변형률은 0.036로 나타났고, 수정식에 의한 전단변형률은 0.030로 나타났다(그림 14 참조).

### 4.4 유한요소해석을 이용한 연직응력 비교 결과

표 4와 그림 15, 그림 16은 유한요소해석 프로그램인 MIDAS/GTS 프로그램을 이용하여 Terzaghi 공식과 흙의 팽창성을 고려한 수정식에 의해 해석된 연직응력과 전단변형률의 결과를 나타낸 것이다.

이를 살펴보면 수학적 해석결과와 동일하게 기존의 Terzaghi 공식에 의해 산출된 연직응력과 전단변형률이 흙의 팽창성을 고려했을 때보다 크게 산정됨을 알 수 있다. 여기서,  $\sigma_T$ 는 Terzaghi 공식에 의한 연직응력이고,  $\sigma_{RT}$ 는 수정된 Terzaghi 공식에 의한 연직응력을 나타내고,  $\varepsilon_T$ 는 Terzaghi 공식에 의한 전단변형률,  $\varepsilon_{RT}$ 는 수정된 Terzaghi 공식에 의한 전단변형률을 나타낸다.

표 4. Terzaghi 식과 수정식의 유한요소해석 결과 비교

구분	$\sigma_T$ (kPa)	$\sigma_{RT}$ (kPa)	$\frac{\sigma_{RT}}{\sigma_T}$	$\varepsilon_{RT}$	$\varepsilon_T$	$\frac{\varepsilon_{RT}}{\varepsilon_T}$
H=0.5D	1.513	1.235	0.82	0.048	0.035	0.73
H=1.0D	2.219	1.997	0.94	0.039	0.034	0.89
H=2.0D	3.573	2.514	0.70	0.036	0.030	0.85

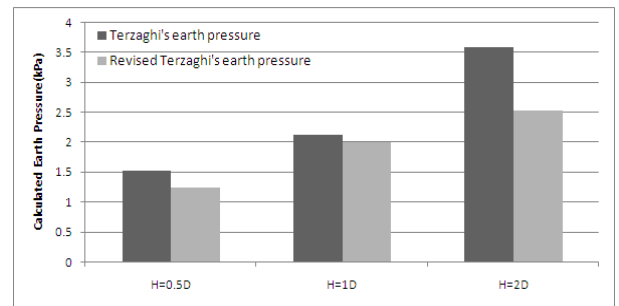


그림 15. 유한요소해석에 의한 Terzaghi 공식과 수정식의 연직응력 비교

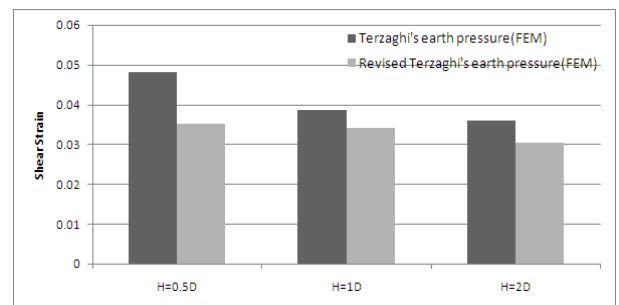


그림 16. 유한요소해석에 의한 Terzaghi 식과 수정식의 전단변형률 비교

## 5. 결 론

본 연구에서는 상부토압에 의한 터널의 변형거동과 토압을 평가하기 위하여 기존에 널리 사용하던 Terzaghi 공식에 흙의 팽창성을 고려한 수정식을 제안하였다. 이에 대한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) Terzaghi 공식은 소성변형에 사용되는 토압을 무시하였고 지반을 강체로 가정하여 아칭효과(Arching Effect)만을 고려하였다. 모형실험과 수치해석결과보다 Terzaghi 토압이 크게 산정되므로 수정이 필요함을 알 수 있었다.
- (2) 본 연구에서는 흙의 팽창성을 고려하여 기존의 Terzaghi 식을 수정하였다. 흙의 팽창성을 고려하여 수직응력을 변경하기 위해 수평토압계수  $K_0$ 를 적용하고, 내부마찰각을 변경하기 위해  $\phi_0$ 를 적용하였다. Terzaghi 공식과 수정식, 터널모형실험(이재호 등, 2007)의 토압 산정 결과, 흙의 팽창에 의한 영향과 파괴면 형성에 의한 토압을 파악할 수 있었다.
- (3) 수정식은 Terzaghi 공식과 비교하여 아칭효과와 흙의 팽창 효과를 같이 고려하였기 때문에 수정식에서 구해진 토압이 조금 더 작게 나타났고 이는 현장측정결과나 실험값에 더 가까운 것으로 나타났다.
- (4) Terzaghi 공식과 수정식, 터널실험결과를 비교한 결과, 상부 흙의 무게에 의한 토압  $P_0$ 와 터널실험에서 측정된 토압  $P_1$ 의 차이는 Terzaghi가 고려한 토피의 마찰력에 의한 아칭효과로 인해 소실된 토압과 흙의 팽창으로 인해 소실된 토압, 파괴면 형성으로 인해 소실된 토압으로 나눌 수 있다.
- (5) Terzaghi 공식과 수정식에서 구해진 물성치로 MIDAS/GTS를 이용하여 유한요소해석을 통해 터널 상부에 작용하는 연직응력과 터널 어깨와 측면에 작용하는 전단변형율을 비교해 본 결과, 수정된 공식이 더 작은 값을 가진 것으로 나타났다.
- (6) 과하중 지반의 파괴면은 여전히 선형으로 가정되고, 심한 전단 변형력은 수정된 공식에서 고려하지 않았다. 심한 전단변형력은 전단대 형성의 원인이 되고 점진적인 전단변형력은 지반의 변형의 원인이 되므로 적절한 파괴면 분석과 전단변형력의 고려는 더욱더 실제적인 토압계산이 가능할 것으로 예측된다.
- (7) 본 연구에서 제안된 수정식을 통해 터널에 작용하는 토압의 특성을 쉽게 이해할 수 있고, 국부적인 소성영역을 확인할 수 있을 뿐만 아니라 터널에 작용하는 토압과 변형 거동의 관계를 고려하여 터널의 지보공을 합리적이

고 경제적으로 설계할 수 있는 토대가 될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국립금오공과대학교의 학술연구 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 대해 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 이재호, 아쿠타가와 신이치, 김영수, 문홍득(2007), 미고결 저토퍼 터널에 작용하는 토압에 관한 연구, *터널과 지하공간*, 한국암반공학회, Vol. 17, No. 6, pp. 453~463
2. 정형래(2006), 이방성 압반의 방향성과 지압을 고려한 터널 변형거동에 관한 연구, 석사학위논문, 고려대학교, pp. 14~22.
3. Bolton, M. D.(1986), The Strength and Dilatancy of Sands, *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65~78
4. Budhu, M.(2000), *Soil Mechanics & Foundations*, John Wiley & Sons, New York, pp. 206~210.
5. Hansmire, W. H. and Cording, E. J.(1985), Soil Tunnel Test Section : Case History Summary, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol. 111, No. 11, pp. 1301~1320.
6. Jewell, R. A. and Wroth, C. P.(1987), Direct Shear Tests on Reinforced Sand, *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp. 53~68.
7. Ladanyi, B., Hayaux, B.(1969), A Study of the Trap-door Problem in a Granular Mass, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 1~14.
8. Murayama, S.(1968), Earth Pressure on Vertically Yields Section in Sand Layer, *Annual Rep. Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, No. 11B, pp. 549~565.
9. Sakurai, S., Akutagawa, S., Takeuchi, K., Shinji, M., Shimizu, N.(2003), Back Analysis for Tunnel Engineering as a Modern Observational Method, *Tunnelling and Underground Space Technology*, pp. 185~196.
10. Sakurai, S., Kaeashima, I., Kawabata, Y., Saragai, A.(1994), Model Tests on Deformation and Loosing Pressure of Shallow Tunnel, *Journal of Geotechnical Engineering*, JSCE, No. 487, III-26, pp. 271~274.
11. Sakurai, S., Takeuchi K.(1983), Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16, pp. 173~180.
12. Sterpi D.(1999), An Analysis of Geotechnical Problems Involving Strain Softening Effect, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 23, No. 13, pp. 1427~1454.
13. Tarumi, H., Yamamoto, Y.(1992), Study on Vertical Earth Pressure Distribution in Sand by Rrap Door Test, *Proc. of Annual Meeting of Tunnel Engineering*, JSCE(2).
14. Terzaghi, K.(1956), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, pp.66~75.
15. Walter, W.(1990), *Rock Mechanics : Theory and Applications with Case Histories*, Springer-Verlag, New York pp. 444~471.

(접수일: 2011. 5. 12 심사일: 2011. 5. 30 심사완료일: 2011. 9. 19)