

대규모 지하굴착시 썩기파괴로 인하여 발생하는 토압에 관한 연구

A Study on the Rock Pressure Wedge Failure During Ground Excavation

이 승 호 (Seung Ho Lee)

상지대학교 토목공학과

요약 / ABSTRACT

우리나라 지질의 특성은 토층의 두께가 얇아서 보통 10m이상만 굴착해도 암반층이 나타나므로 대규모 지하굴착 공사시 암반층에서의 토압분포 산정방법이 절실하게 요구되고 있는 실정이다.

그러나, 암반층 암압산정시 기존의 경험식인 Terzaghi-Peck, Tschobotarioff식 등을 그대로 적용하는 것은 암반층의 점착력을 대부분 무시하게 되므로 실제 강도를 과소 평가하게 된다. 따라서 암반에서의 절리경사각, 절리면 전단강도, 지반 상재하중 등을 고려한 썩기형 블록(Wedge Block)의 수평활동력을 산정하는 것이 실제 암반층 토류구조물에 작용하는 암압과 근접할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 뒷채움 흙이 점착력을 갖는 흙인 경우 썩기형상으로 파괴가 일어난다고 가정하여 Coulomb 토압이론을 확장하여 힘의 평형 조건을 이용해 Prakash-Saran(1963)이론과 절리면의 전단강도 결정공식 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 를 적용해서 암반층에 작용하는 암압을 산정하였다. 산정된 이론식을 이용하여 절리면 충진물의 상태 변화에 따른 절리면 전단 강도와 절리경사각을 바꿔가면서 해석해 본 결과, 암반층은 자체의 점착력과 내부마찰각이 크므로 절리방향과 경사각이 굴착면을 향해 어떻게 정해지느냐에 따라서 토압이 작용하기도 하고 작용하지 않을 수도 있다. 본 연구에서 산정된 이론식은 향후 절리면 전단강도 산정시 필요한 강도정수, 절리면의 방위와 상태, 과잉측압, 동적하중, 지진을 비롯한 많은 지반정수(Parameter)들을 보다 엄밀히 산정하고, 특히 암반층에 작용하는 지하수위 효과등을 고려하여, 실제 현장에서 계측된 많은 자료와의 분석을 통해 그 적용성이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 썩기파괴, 절리방향, 절리경사각, 과잉측압, 동적하중, 암압

The geological characteristics of Korea are that we can encounter the rock layer only after 10m of excavation, methods to presume the rock pressure distribution of the rock layer is urgently needed.

When using the existing empiric science of Terzaghi-Peck, Tschobotarioff to measure the rock

pressure of the rock layer, underestimate the real strength because of the cohesion is ignored. Therefore calculating the horizontal sliding force of wedge block, which includes the dips and shear strength of discontinuities and surcharge load etc., think to be to getting a closer rock stress of the real rock pressure acting upon the earth structure in rock mass.

This research use Coulomb soil pressure theory assuming that the backfill soil will yield wedge failure when it has cohesion, applying Prakash-Saran(1963), and then it uses equilibrium of force and shear strength $\tau = c + \sigma \tan \phi$ of the discontinuities.

Analyzing shear strength and dips of discontinuities using calculated theory according to the status of discontinuities aperture, we were able to find out that because the cohesion and friction angle of the rock layer itself is large enough, how the dip directions and dips facing the excavation face is the only factor deciding whether or not the rock stress is applied.

The evaluated theory of this research should be strictly estimated, so that the many parameters such as c , ϕ value, types and structures of rock class, excessive lateral pressure, dynamic load, earthquake, needed later when calculating shear strength of discontinuities and especially the ground water effect acting on rock layer should be coumpted with many measuring data achieve at the insite to study the application.

Key Words : wedge failure, dip direction, dips facing, excessive lateral pressure, rock pressure

서 론

최근 도시 용지 면적의 부족현상은 대규모 터널, 지하철, 지하주차장 등의 지하공간 이용을 요구하게 되었고, 근년에 와서 건물내에 주차장 확보에 대한 법규가 강화되면서 지하층수가 늘어나서 굴착 깊이도 30m 이상까지 되는 건물들도 많아지게 되었다. 또한 현재 대도시에서 건설되는 지하철 공사 현장에서도 도심지에서 30m 이상 굴착하는 경우가 많다. 그러므로 현재 이로 인한 대규모 지하굴착 공사시 굴착깊이 증가로 인한 많은 문제가 대두되게 되었다.

특히 우리나라 지질의 특성은 토층의 두께가 얇아서 보통 10~15m 이상만 굴착이 진행되어도 암반층이 나타나므로 암반층에서의 토압분포 산정 방법이 절실하게 요구되고 있는 실정이다. 그러나 현재까지 암반층에서의 토압분포 산정방법이 토사지반층에서와 동일한지에 대한 명확한 연구가 없는 실정이고, 기존의 Peck(1948)이나 Tschbotarioff(1949)등의 경험토압 공식을 이용하여 토압을 산정하는데, 이는 다층토 지반을 대부분 사질토지반으로 가정하므로 암반층의 점착력을 무시하게 되고 이로 인한 과대한 토압분포가 추정될 수 있다.

일반적으로 암반층 토류구조물에 작용하는 토압을 산정하기 위해서는 암석의 특성보다는 암반전체로서 굴착면을 향해 작용하는 활동의 가능성을 고려하는 것이 보다 합리적이다. 따라서, 본 연구의 목적은 암반층 불연속면을 따라 활동하는 쉐기형 블록(Wedge Block)의 활동력(수평력)을 이를 지지하기 위한 버팀보의 후행하중의 개념으로 산정할 수 있는 이론식을 제시하는데 있다.

연구 방법

암반은 단단한 암석과 상대적으로 변형성이 큰 층리, 절리, 습곡 등의 불연속면으로 구성되어 있으며, 암반의 거동은 암층의 생성원인, 절리상태, 풍화정도, 지하수, 초기응력 상태 등에 따라 영향을 받는다.

일반적으로 암반내 구조물에서의 불연속성은 두 가지로 구분되는데, 하나는 응력 또는 변형률 상태에 대응해서 발생하는 국소파괴면이나 그것으로부터 진전되는 순차 파괴면과 같이 불연속의 위치나 방향이 명백하지 않는 것이고, 다른 하나는 암반과 구조물 사이의 접촉면이나 암반내 절리, 단층 등과 같이 불연속면이 명확한 것이다.

본 연구에서는 후자의 경우인 압괴크기가 상대적으로 큰 연암에서 경암으로 이루어진 암반굴착면에서의 불연속면으로 구분된 썰기형 블럭(Wedge Block)의 활동 거동으로 인한 발생 하중을 추정하기 위해서, 뒷채움 흙이 점착력을 갖는 일반토를 가지고 상재하중을 고려하고 이를 Coulomb의 썰기 이론을 확장해서 토압식을 산정한 Prakash-Saran(1966)이론을 도입하였다. 그리고, 불연속면을 따라 활동하려고 하는 썰기형 블럭(Wedge Block)에 저항하는 힘 즉, 불연속면의 전단강도 특성을 산정하기 위해 Mohr-Coulomb식, Ladanyi & Archambault식(1970), Barton & Bandis(1971)식 등을 살펴보았다. 그런데 Ladanyi & Archambault식, Barton & Bandis식 등은 암반층의 여러 가지 지질특성을 도입하여 전단강도를 추정하기 위한 경험식을 제시하였지만 국내 현장 여건상 이들 지질자료를 모두 구하기에는 현실적인 어려움이 많기 때문에 본 연구에서는 절리면의 c, ϕ 값만으로 불연속면의 전단강도를 추정할 수 있는 Mohr-Coulomb의 $\tau = c_p + \sigma \tan \phi_p$ (여기서, 첨자 p는 최대치를 나타냄)를 적용하였다.

한편, 암반층의 토압을 고려하지 않아서 굴착도중에 파괴가 발생한 외국 현장사례를 통해 파괴원인 및 절리의 경사와 내부마찰각 ϕ 의 상관관계를 이용한 암반층 절리면의 토압발생 개념에 관해서 살펴보았다. 또, 암반층에 토압으로 작용하는 요소들을 검토해 보고, 이들 중 토압증가에 가장 큰 영향을 미치는 지반자체의 하중과, 불연속면의 경사, 불연속면의 전단강도 등의 관계를 고려해서 이론식을 산정 하였다.

본 연구에서 제안된 식을 이용하여 예제단면을 선정하여 기존의 Terzaghi-Peck 이나 Taschebotarioff등의 경험식을 암반층 토압산정에 적용하는 것에 대한 불합리성을 살펴보고, 지반정수(절리경사각, 절리면 강도정수 c, ϕ 상부지반의 환산하중, 암반층 굴착면 깊이변화)에 따른 토압분포도 살펴보았다.

Prakash-Saran 이론

대부분의 토압이론(Terzaghi-Peck)을 뒷채움 흙

이 사질토인 경우를 대상으로 하고 있으며, 점착력을 갖고 있는 일반토를 대상으로 한 경우는 거의 없다.

Prakash-Saran(1966)은 Coulomb 이론을 확장하여 벽체가 경사지고 재하중이 작용하는 경우에 점착고를 고려하여 힘의 평형조건으로부터 지진시의 주동토압과 정적 주동토압을 구하였는데, 여기서는 정적주동토압에 관해서만 살펴보았다.

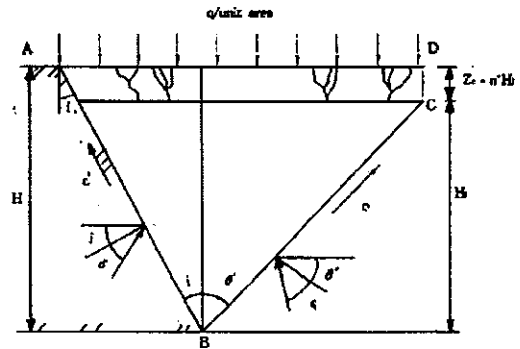


Fig. 1. 뒷채움 흙이 $c-\phi$ 값을 갖는 경우 작용하는 힘

정적주동토압은 $\Sigma V = 0$ 에서

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \gamma H^2 (\tan i + \tan \theta) - \gamma n' H_1^2 (\tan i + \tan \theta') \\ & + \frac{1}{2} \gamma n' H_1^2 \tan i - c H_1 - c' H_1 \\ & + q h_1 (\tan i + \tan \theta' + n' \tan i) - \\ & P_A \sin(i + \delta) - F \sin(\theta + \psi) = 0 \quad (1) \end{aligned}$$

$\Sigma H = 0$ 에서

$$\begin{aligned} & -c H_1 \tan \theta' + c' H_1 \tan i - P \cos(i + \delta) \\ & + F \cos(\theta' + \psi) = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

(1)식과 (2)식을 연립하여 풀면,

$$P_A = \gamma H_1^2 (N_{ar}) + q H_1 (N_{aq}) - c H_1 (N_{ac}) \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} (N_{ar}) &= \frac{\left\{ \left(n' + \frac{1}{2} \right) (\tan i + \tan \theta') + n'^2 \tan i \right\} \cos(\theta' + \psi)}{\sin(i + \theta' + \psi + \delta)} \\ (N_{aq}) &= \frac{\left\{ (n' + 1) (\tan i + \tan \theta') \right\} \cos(\theta' + \psi)}{\sin(i + \theta' + \psi + \delta)} \end{aligned}$$

$$(N_{\infty}) = \frac{\cos(i + \theta + \psi) \sec i + \cos \psi \sec \theta}{\sin(i + \theta + \psi + \delta)}$$

식(3)에서 보는 바와 같이 전주동토압은 흙의 자중, 재하중 그리고 점착력에 의한 토압효과를 하나씩 중첩시켜 구하였다.

불연속면의 전단강도 특성

암반에는 여러 가지 종류와 규모의 불연속면이 존재한다. 절리(joint) 및 벽개(cleavage)와 같은 분리면, 편리(schistosity)와 층리(bedding plane) 등 암석 형성과정의 초기에 발생하는 것들과 층리, 단층(fault), 파쇄대(fracture zone)와 같은 대규모의 지질구조와 연관되는 등 그 종류가 매우 다양하다. 이 중에서 절리(joint)는 모든 암반속에 포함되는 틈이며 항상 평행한 틈의 집합체를 형성하면서 나타나며, 같은 방향성에 속하는 절리를 joint set이라고 한다. 암반 내부에는 한 세트의 절리로 구성되어 있는 경우도 있고 혹은 수 세트의 절리로 구성된 경우도 있다. 절리의 중요한 특징중의 하나는 절리면을 사이에 둔 양쪽 암반이 절리면에 평행방향 변위를 거의 동반하지 않는다는 것이다.

한편, 절리와 같은 불연속면의 특성을 나타내는 것으로 다음과 같은 요인들이 있다.

- ① 방향성(orientation)
- ② 불연속면의 간격(spacing)
- ③ 연속성(persistence or continuity)
- ④ 절리면 거칠기(roughness)
- ⑤ 간극(aperture)
- ⑥ 충전물(filling)
- ⑦ 절리군의 수(number of joint set)
- ⑧ 블록의 크기 및 모양(block shape & size)
- ⑨ 절리벽면의 강도(wall strength)

불연속면의 전단강도

절리면의 전단강도는 암반의 안정해석에 있어서 가장 중요한 변수이다. 절리면의 전단특성은 그림 2에서와 같이 거친 절리면은 최대전단강도를 나타내고 더욱 더 전단이 진행되면 일정치의 잔류강도에 수렴한다. 또 매끈한 절리면은 최대값을 나타내

지 않고 최대 강도와 잔류강도가 같게 나타난다. 그러므로 최대강도와 잔류강도가 절리면의 강도 특성치로 된다.

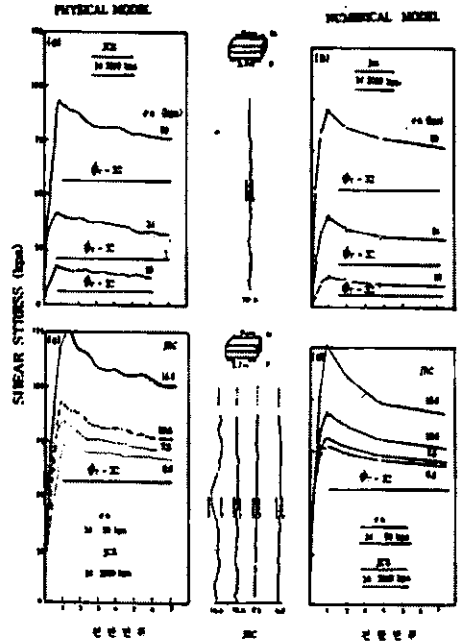


Fig. 2. 절리면의 전단 변형특성

서로 다른 수직응력 수준에서 전단시험이 행해지면 그림 3과 같이 나타난다. 이 곡선은 거의 선형을 나타내며 기울기는 최대마찰각 ψ_p 를, 전단응력 축과의 교점은 절리면 충전물의 최대점착력 c_p 를 나타낸다.

여기서, c_p 는 수직력에 무관하며 ψ_p 만이 수직응력이 증가함에 따라 증가한다.

그러므로 최대 전단 강도(Peak shear strength)는 다음식과 같이 정의된다.

$$\tau = c_p + \sigma \tan \psi_p \tag{4}$$

수직응력에 상응하는 잔류전단강도를 도시하면 다음식에 의해 선형관계가 있음을 알 수 있다.

$$\tau = \sigma \tan \psi_r \tag{5}$$

여기서, ψ_r = 잔류마찰각

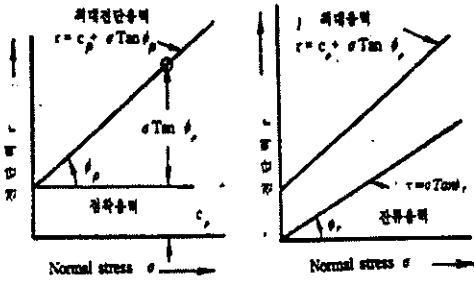


Fig. 3. 절리모델의 전단강도

일반적으로 암반절리의 전단강도 값은 거칠기 정도, 맞물림 상태, 충전물 유무 및 그 성질과 절리면을 구성한 암석의 역학적 성질에 크게 좌우된다. 그림 2은 절리면의 전단변형 특성에 대응하는 것으로 재질강도가 일정하고 거칠기만이 변화한 경우의 최대 전단강도 관계이다. $\phi_b = 32^\circ$ 는 거칠기가 없는 평면의 전단마찰각을 나타낸다. 그림 3으로부터 JRC(Joint Roughness Coefficient)값이 작을수록, 즉 거칠기가 작은 면일수록 접선마찰각이 크다는 사실도 알 수 있다.

이러한 절리 전단강도 관계를 나타내기 위해 Ladanyi와 Archambault(1970), Barton과 Bandis(1971)등은 앞에서 언급한 많은 성질들을 경험적으로 고려하고 실험을 통한 전단강도 모델을 제안하였다.

이들이 제안한 이론에 관해 살펴보면 Ladanyi와 Archambault(1970)는 톱니형 절리모델 그림 4을 사용하여 암석의 강도, 전단면적, 체적팽창(dilation), 마찰각 및 수직응력 등의 영향을 고려하여 여러 실험을 통한 다음과 같은 반경험적인 최대 전단강도식을 제안하였다.

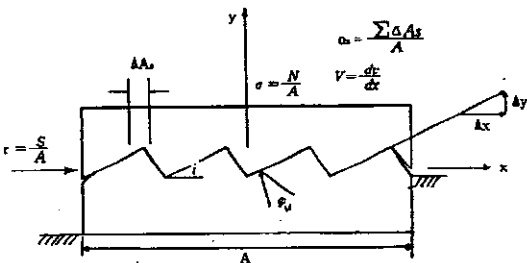


Fig. 4. 체적팽창률과 전단 면적비의 정의

$$\tau_p = \frac{\sigma(1-a_s)(\nu + \tan \phi_u) + a_s S_R}{1 - (1-a_s)\nu \tan \phi_u} \quad (6)$$

여기서, ϕ_u = 매끈한 절리의 마찰각(ϕ_b)

a_s = 전단면적비(shear area ratio)

ν = 체적팽창률(dilation ratio)

S_R = 암석의 전단강도

틈을 이루고 있는 암석의 전단강도 S_R 은 식(7)과 같다.

$$S_R = q_u \frac{\sqrt{1+n}-1}{n} \left(1 - \frac{n\sigma}{q_u}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

여기서, $n = q_u / T_0$

n = 암석의 인장강도와 일축압축강도의 비

T_0 = 암석의 인장강도

q_u = 암석의 일축압축강도

또한, 각종 실험결과로부터 전단면적비(a_s)와 최대전단강도에서의 체적팽창률(dilation ratio, ν)은 다음과 같다.

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma}{q_u}\right)^L \quad (8)$$

$$\nu = \left(1 - \frac{\sigma}{q_u}\right)^K \tan i \quad (9)$$

여기서, $K=4$, $L=1.5$ 로 제안하였다.

식 (6)에 $a=1$ 로 하면 전단강도는 암석만의 파괴 기준으로 표시된다. 천연 절리면의 거칠기는 복잡하기 때문에 단일각도(i)로 표현하는 것은 사실상 어렵다.

Barton(1971)은 몰탈, 기타 재료에 인장파괴면을 인공적으로 만들고 그 전단강도에 관한 일련의 실험적 연구를 수행하여 전단강도식을 제안하였고 후에 Choubey(1977), Barton(1981)등과 함께 크기 효과를 고려한 최대전단 강도, 최대전단강성, 최대 체적팽창각을 나타내는 경험식을 제안하였다. 이 식의 기본 개념은 절리의 역학적 거동은 수직응력의 크기와 블록의 크기의 영향을 받으며 절리길이의 약 1% 전단후에 최대전단강도에 도달하는 것이다. 이런 관계를 나타내는 경험식은 다음과 같다.

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \psi_r \right] \quad (10)$$

여기서,

τ_p = 최대전단강도(peck shear strength)

σ_n = 수직응력

ψ_r = 잔류마찰각

JRC= 절리 거칠기 계수

JCS= 절립면벽의 압축강도

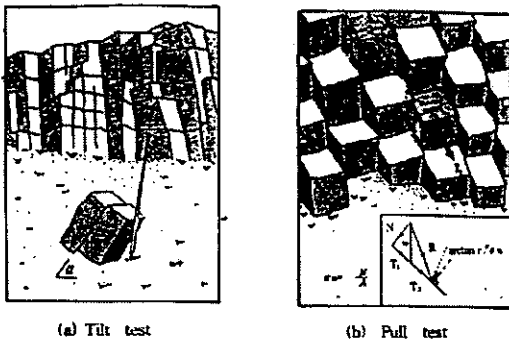


Fig. 5. JRC를 결정하기 위한 간단한 실험방법 (Barton & Choubey, 1977)

JRC는 절리의 거친 정도를 나타내는 무차원 수로서 매끈한 절리에서는 0, 매우 거친 절리에서는 20의 값을 가지며 절리의 크기에 좌우된다. JRC는 간단한 Tilt test나 Pull test에 의하여 구할 수 있다.(그림 5참조)

일반적으로 JRC 8정도까지는 Tilt test로, 그보다 큰 값은 Pull test로 구해야 한다고 제시하였다 (Barton & Choubey, 1977). JRC가 증가함에 따라 전단강도의 포락선의 기울기와 최대 전단강도가 커지게 된다.

JCS는 암반의 강도와 변형 성질을 지배하는 절리면의 인접한 암석의 얇은 층의 압축강도이므로 암반공학에서 중요한 인자이며 풍화정도에 따라 그 크기가 변하게 된다. 풍화되지 않은 단단한 절리면의 JCS는 암석의 일축강도와 같으나 풍화가 진행됨에 따라서 거의 75%정도까지도 작아질 수 있다. JCS는 고전적인 일축압축강도, 암석 코어 또는 불규칙한 덩어리(Irregular lumps)에 대한 점하중 시험, 슈미트해머를 이용한 반발경도 시험 등에 의해

서 개략적으로 구할 수 있는데, 일반적으로 슈미트해머 반발치에 의한 JCS와 잔류마찰각(ψ_r)을 식(11)과 식(12)에 의해 각각 추정할 수 있다(Barton & Choubey, 1977).

$$\log_{10} JCS = 0.00088 \gamma_d R + 1.01 \quad (11)$$

여기서, γ_d = 건조단위중량

R = 슈미트해머 반발치

$$\psi_r = (\psi_b - 20^\circ) + 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad (12)$$

여기서,

ψ_b = 풍화되지 않은 건조한 절리면의 기본 마찰각

R = 풍화되지 않은 건조한 면의 슈미트해머 반발치

r = 물에 젖은 절리면의 슈미트 해머 반발치

그런데, JCS의 전단강도에 대한 영향은 일반적으로 틈간격 전단(asperity shearing) 때문에 JRC보다 더 크다. 한편, 거칠기가 있는 절리면의 압축성, 전단변형성 및 전단강도 등 역학적 성질은 크기에 따라 변하는 성질이 있다.

일반적으로 절리면의 치수가 증대하면 보다 거칠기가 적은 절리면 성질을 나타내는 것으로 알려지고 있다. 예를 들어 전단 특성에 있어서 작은 치수의 시험체에서 현저한 최대전단강도를 나타낸 경우에도 큰 치수에서는 최대전단강도를 보이지 않고 평활한 절리면과 유사한 전단변형성을 나타낸다. 따라서 전단강도도 동일한 거칠기를 가진 면에 있어서 치수의 증대에 따라 전단 강도 관계가 작은 치수 시험체의 잔류강도에 접근할 경우가 있다.

암반층에 작용하는 토압에 영향을 미치는 요소

암반층에 토류구조물을 설계할 때에는 지질학적인 지식뿐만 아니라, 경험이 있는 기술자의 판단이 필요하다. 그러므로 암반역학에서 이론적인 가정과 복잡한 계산은 단지 보조적인 수단 정도로만 간주되어야 할 것이다.

역학적으로, 암반은 복합체로서 비균질하고 비등방성을 나타낸다(Jumikis,1983). 따라서 암은 연속체가 아니라 불연속체이며, 대부분의 파괴가 구조적으로 불안정한 불연속면에서 일어난다. 지반굴착시, 토압에 영향을 미치는 요소는 위와 같은 암반의 파괴 형상과 밀접한 관계를 갖는데, 이는 주로 다음과 같은 요인들에 의해 좌우된다.

(1) 암의 형태와 구조

불연속면의 빈도 및 분포, 점토 충전물의 저항정도, 암의 풍화정도 등에 따라 토압이 달라진다.

(2) 과잉 측압(Excessive lateral pressure)

불연속면으로 인한 응력집중 또는 손실이 국부적으로 발생하게 된다. 이는 심하게 풍화되었거나 분해된 암반에서 다음과 같은 경우에 상당히 크게 작용하게 된다.

- ① 약한 암층사이에 경암층의 분포 (그림 6)
- ② 동상 압력, 팽창 압력
- ③ 장기적인 Creep 변형등

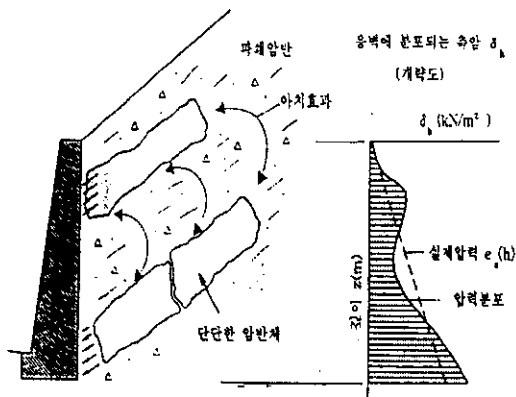


Fig. 6. 분해된 암반층사이에 경암층이 존재할 때 토류구조물에 응력집중으로 인한 국부적인 측방 토압의 증가

(3) 상부하중

상부하중의 증가에 따라서 측방토압도 증가하며 일단 상부하중의 영향은 가능한 파괴면 즉 절리, 벽개, 단층 등과 같은 불연속면과 연관시켜서 고려해야 한다. 일단 암이 심하게 풍화되었거나 절리가 많은 경우라면 흙에서의 토압산정개념과 같게 볼 수 있다.

(4) 수압

침투수압이나 인장균열 사이의 측방수압이 토압에 영향을 미치며, 이런 경우 안전성이 감소되는데 이는 적절한 배수조건으로 해결될 수 있다.

(5) 동적하중, 지진

토류구조물에 작용하는 동적하중은 발파, 동적상부하중, 지진 등에 의해 발생한다. 실제 설계에서 동적인 하중의 효과를 고려하기 위해 암반 불연속면에서의 전단강도 정수 (ϕ)를 감소시켜서 적용하거나, 또는 필요한 안전율을 높이 산정해서 고려한다.

절리경사각에 따른 토압분포

본 연구에서는 지반굴착시 암반층에서 토류구조물에 작용하는 토압은 주로 절리 경사에 따라서 그 크기가 결정되므로 이를 고려한 토압분포를 산정할 수 있는 이론식을 제시하였다. 이론적 고찰에서 이미 살펴본 Prakash-Saran(1961)이론을 적용하였는데, 이는 기존의 토압이론은 거의 다 점착력 c 값은 없다고 보는 사질토인 경우에 한해서 유도되었지만 Prakash-Saran 이론은 Coulomb토압 이론을 확장하여 c, ϕ 값 모두를 갖는 일반토의 경우를 가지고서 토압식을 유도했다는 데에 그 의미가 크다고 볼 수 있겠다. 왜냐하면 암반층에서의 토압산정시에도 c, ϕ 값에 따라 그 차이가 현저하게 나타나므로 이 두 값을 모두 고려할 수 있게 토압이 산정되어야 한다.

따라서, 본 제안식에서는 Prakash-Saran이론을 확장해서 암반층의 상부지반 즉, 매립층이나 풍화토 같은 지반을 $q = \gamma \times H$ (여기서, γ 는 상부지반의 평균 단위중량, H 는 상부지반 총 두께)로 환산하여 하중의 개념으로 작용시켰으며, 절리면을 따르는 전단강도는 일반적인 Mohr-Coulomb파괴규준을 적용하여 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 을 사용하였다. 물론 불연속면의 전단강도의 특성에서도 언급한 바와 같이 불연속면의 전단 강도를 나타내기 위해 지금까지 많은 학자들에 의해 반영험적인 식들이 제안되었으나 국내의 현장여건상 기존의 제안식을 적용하기 위한 많은 지반정수를 현장실험을 통해서 구한다는 것이 어렵기 때문에 본 연구에서는 c, ϕ 값만 갖고서 불연속면의 전단강도를 추정할 수 있는

Mohr-Coulomb 식을 사용한 것이다.

그림 7은 쪼개기형블럭(Wedge Block)에 작용하는 힘들을 제시하고 있다. 가상파괴면은 불연속면을 따라서 발생하는 것으로 힘의 평형방정식으로부터 다음과 같이 암반층에 작용하는 토압식을 유도하였다.

$$\Sigma F_{xx}=0;$$

$$F \cdot \cos \phi - P_A \cdot \sin i - q \cdot H \cdot \cot i \cdot \cos i = 0 \quad (13)$$

$$\Sigma F_{yy}=0; W \cdot \sin i - \tau - F \cdot \sin \phi$$

$$+ q \cdot H \cdot \cot i \cdot \sin i - P_A \cdot \cos i = 0 \quad (14)$$

식 (13), (14)에 각각 $\sin \phi$, $\cos \phi$ 을 곱해서 더하면,

$$F \cdot \cos \phi \cdot \sin \phi - P_A \cdot \sin i \cdot \sin \phi$$

$$- q \cdot H \cdot \cot i \cdot \cos i \cdot \sin \phi$$

$$+ W \cdot \sin i \cdot \cos \phi - \tau \cdot \cos \phi$$

$$- F \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi$$

$$+ q \cdot H \cdot \cot i \cdot \sin i \cdot \cos \phi$$

$$- P_A \cdot \cos i \cdot \cos \phi = 0 \quad (15)$$

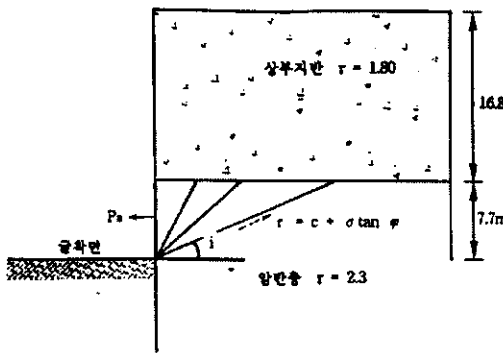


Fig. 7. Wedge Block에 작용하는 힘

P_A 에 관해서 정리하면,

$$P_A = (W \cdot \sin i \cdot \cos \phi$$

$$+ q \cdot H \cdot \cot i \cdot \sin(i - \phi) - \tau \cdot \cot \phi)$$

$$/ \cos(i - \phi) \quad (16)$$

여기서,

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \cot i$$

$$q = \gamma_1 \cdot H_i$$

$$\sigma = W \cdot \cos i$$

$$\tau = \frac{C \cdot H}{\sin i} + \sigma \cdot \tan \phi$$

(15)식을 Prakash-Saran식의 형태로 나타내면

$$P_A = \gamma \cdot H^2 \cdot N_{ar} + q \cdot H \cdot N_{aq} - \tau \cdot N_{ar} \quad (17)$$

여기서,

$$N_{ar} = \frac{\cos \phi \cdot \cos i}{2 \cdot \cos(i - \phi)}$$

$$N_{aq} = \cot i \cdot \tan(i - \phi)$$

$$N_{aar} = \frac{\cos \phi}{\cos(i - \phi)}$$

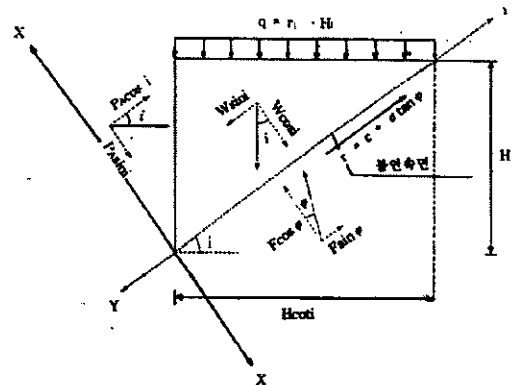


Fig. 8. 적용예제굴착단면

식 16에서 유도한 P_A 는 후행하중의 개념으로 산정된 것으로 계산 프로그램을 작성하였다. P_A 의 값이 양(+)인 경우는 암반 굴착면쪽으로 토압이 작용하는 것이고 P_A 값이 음(-)인 경우는 토압이 작용하지 않는 것으로 볼 수 있다. 또 암반층에서의 쪼개기(Wedge)의 파괴조건은 절리경사각 i 가 마찰각보다 커야만 발생가능성이 있으므로 절리경사각에 따른 토압변화를 살펴 볼 때 ϕ 값 이상인 경우만 살펴보았다.

본 연구에서는 절리면 전단강도에 따른 영향을 고려하기 위해서 위의 결과중 수직절리군에서 실험한 값만을 (실제로 수평절리군에서 실험한 값과 큰 차이를 나타내지 않으므로) 표 1과 같이 요약하였다.

본 제안식을 적용하기 위해 그림 9와 같은 예제 단면을 선정하고 절리면의 상태에 따른 상대적인 절리강도를 대입하여 계산하였다. 계산결과 절리경사에 따른 토압분포는 그림 9와 같이 나타났다.

Table 1. 절리면 상태에 따른 강도정수 변화

절리면 상태	점착력 $c(t/m^2)$	마찰각 $\phi(^{\circ})$	비 고
충진물이 없는 상태	13	42	실험실
연속성이 없고 절분을 함유한 충진물을 갖는 절리	15	42	실험실
석영물질이 함유된 충진물을 갖는 절리	12	40	실험실
풍화된 절리	8	40	실험실
폭1~6mm 정도의 점토충진물을 갖는 절리	4	25	실험실
폭1~6mm 정도의 점토충진물을 갖는 절리	3	36	현장실험

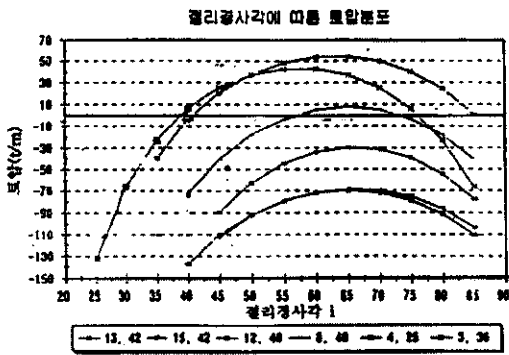


Fig. 9. 절리경사각에 따른 토압분포

그림에서 알 수 있듯이 가장 큰 토압이 발생하는 절리경사각은 대략 50°~70° 부근으로 나타났다. 또 절리면의 거칠기에 따른 전단강도 변화에 따라서 토압의 작용범위가 크게 좌우됨을 알 수 있다. 그 밖에 지방의 환산하중 q 값과 암반층의 깊이 변화에 따른 토압크기를 해석해 본 결과 이 변수들 역시 토압에 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

지금까지 살펴본 지반정수(Parameter)변화에 따른 토압의 크기는 분석 및 고찰에서 각 Case별로 분석하였다.

분석 및 고찰

일반적으로 국내에서 설계시에 암반층에 작용하는 토압을 산정할 때 기존의 경험식인 Terzaghi-Peck, Tschebotrioff 식 등을 이용해서 토압분포를 결정하거나 또는 암반층의 토압은 없다고 보고 설계하는 경우가 대부분이다. 한편 실제 현장에서 측정한 토압보다는 경험식을 이용한 토압이 매우 큰 값을 나타내는데, 이는 기존의 경험식은 암반층을 모래로 가정하여 토압을 산정하는 과정에서 암반의 강도정수 중 마찰각만을 고려하고 점착력에 의한 효과를 무시하였기 때문일 것이다. 따라서 기존의 경험식을 갖고서 암반층의 토압을 산정하는 것은 문제가 크다고 판단된다. 그러므로 본 연구에서 암반층 토압은 주로 절리면을 따르는 쉐기형블럭(wedge block)의 거동에 의해 좌우한다는 점에 주안점을 두었다. 여기서, 지반 상재하중, 절리면 전단강도(c , ϕ 고려) 그리고 절리경사각을 고려한 제안식은 앞장의 암반층에 작용하는 토압에서 이미 살펴본 바와 같이 암반층에 토압으로 작용하는 지반정수(Parameter)에 따라 그 분포가 달라짐을 알 수 있다.

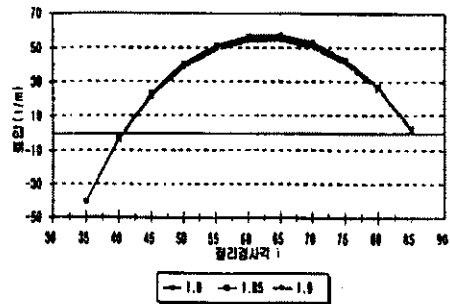


Fig. 10. 상부지반의 평균단위중량 γ_1 의 변화에 따른 토압분포

지반정수(Parameter) 변화에 따른 영향은 본 연구에서 제안한 식을 이용하여 절리면 전단강도가 $c=3t/m^2$, $\phi=36^{\circ}$ 로 일정하다고 가정하고 그림 8의 적용예제 굴착단면을 기준으로 지반 정수(암반층 상부지반의 평균단위중량 γ_1 , 상부지반의 총두께 h , 암반층의 단위중량 γ , 암반층의 굴착면의 깊

이 h)를 각각 변화시키면서 토압의 크기를 계산해 보았다.

각 경우별로 해석한 결과 암반층의 토압은 첫째, 상부지반의 평균단위중량과 총두께로 정해지는 상부지반의 환산하중은 토압에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 둘째, 암반층의 단위중량 변화에 따른 토압분포를 보면 단위중량은 토압에 별 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 셋째, 암반층 굴착면의 깊이 h의 변화에 따른 토압분포는 절리경사각이 45°~75° 사이로 분포할때는 굴착면 깊이가 증가함에 따라 작용토압도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 암반층 굴착면의 깊이는 토압에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

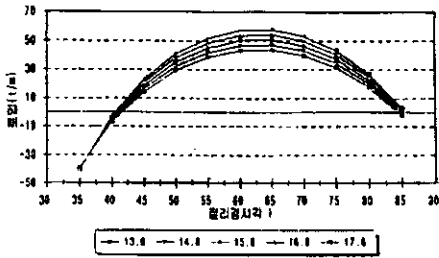


Fig. 10.2. 상부지반의 총두께 h_t 의 변화에 따른 토압분포

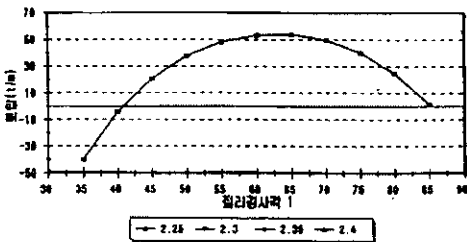


Fig 10.3. 암반층의 단위중량 γ 의 변화에 따른 토압분포

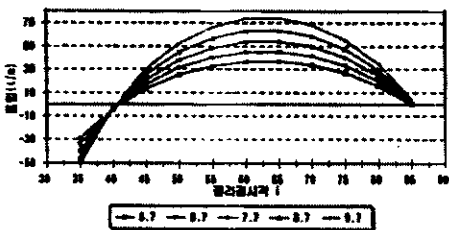


Fig. 10.4. 암반층의 굴착면 깊이 h의 변화에 따른 토압분포

고 찰

본 연구에서 산정된 이론식은 향후 절리면 전단강도 산정시 필요한 강도정수 c , ϕ 값, 암의 형태와 구조, 과잉측압, 동적하중, 지진을 비롯한 많은 지반정수들을 보다 엄밀히 산정하고, 특히 암반층에 작용하는 지하수의 효과등을 고려하여, 실제 현장에서 계측된 많은 자료와의 분석을 통해 그 적용성이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

결 론

이상에서 논의한 바와 같이 Parkash-Saran의 토압이론 개념을 도입하고 이를 암반층에서 적용하기 위해 절리면 전단강도 τ 와 절리의 경사각 i 를 고려한 횡방향 토압산정방법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 암반층 토류구조물에 작용하는 토압을 산정하기 위해서는 암석의 특성보다는 암반전체로서 굴착면을 향해 작용하는 활동의 가능성을 고려하는 것이 보다 합리적이다.

(2) 암반층은 자체의 점착력과 내부마찰각이 크므로 절리방향이 굴착면을 향해 어떻게 정해지느냐에 따라 토압이 작용하거나 작용하지 않을 수 있다.

(3) 암반층 토압산정시 기존의 Terzaghi-Peck, Tschebotrioff등을 그대로 적용하는 것은 암반층 강도정수 중 내부마찰각만 고려하고 점착력은 무시하게 되므로 실제 암반의 강도를 과소평가하는 결과를 갖게 된다.

(4) 절리경사에 따른 토압분포 해석결과 일반적으로 절리의 경사각이 55°~75°일 때 최대치를 나타내며 토압분포는 포물선형태를 나타낸다.

(5) 지반정수(Parameter) 변화에 따른 토압분포 해석결과 암반층의 토압은 상부지반의 환산하중과 절리면 전단강도, 절리경사각 그리고 암반층 굴착면의 깊이에 따라 그 크기가 좌우됨을 알 수 있었다.

(6) 본 연구에서 산정된 이론식은 향후 절리면 전단강도 산정시 필요한 강도 정수 c , ϕ 값, 압의 형태와 구조, 과잉측압, 동적하중, 지진을 비롯한 많은 지반정수(Parameter)들을 보다 엄밀히 산정하고, 특히 암반층에 작용하는 지하수의 효과 등을 고려하여, 실제 현장에서 계측된 많은 자료와의 분석을 통해 그 적용성이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 정형식, 이승호, 2000, 암반역학, 도서출판 새론, 247~325.
- (2) 정형식, 이승호, 1990, 신선한 화강암 절리면에서 약액에 의한 전단강도의 변화에 대한 연구, 대한토목학회지 10권3호, 대한토목학회.
- (3) 이승호, 1993, Tilt Test를 이용한 암반절리면의 전단특성에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회논문집, 대한토목학회.
- (4) 이승호, 1997, 불연속면의 경사와 강성을 고려한 지하구조물 안정성에 관한 연구, 한국암반공학회 논문집 제3집, 한국암반공학회.
- (5) 이승호, 1999, 암반사면의 평면파괴조건 고찰, 한국지반공학회 사면안정 학술발표회 논문집, 한국지반공학회.
- (6) 김상규, 1991, 토질역학, 청문각, 223-273.
- (7) 굴착 및 흩막이 공법, 1992, 지반공학시리즈 3, 사단법인 한국지반공학회, 1-11.
- (8) 이종규, 전성곤, 1993, 다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포, 한국지반공학회지 제 9 권 제 1호.
- (9) 김학문, 이봉열, 1994, 버팀굴착에서 인접 구조물의 영향평가, 94'가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 139-148.
- (10) A.PINTO DA CUNHA, 1990, Scale Effects In Rock Masses, 131-148. Proceeding of the First International Workshop on Scale Effects in Rock Masses/Loen/NORWAY/7~8 JUNE 1990.
- (11) F.G.Bell, 1992, Engineering In Rock Masses, Butterworth-Heinemann, Ltd. U. K, 530-572.
- (12) E. Hoek & J.W. Bray, 1981, Rock Slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 83-120.
- (13) T.D.O'Rourke & A.G. Hobelman, 1992, Excavation and Support for the Urban Infrastructure, Geotechnical Special Publication 33, 163-168.
- (14) N. Barton, S. Bandis, K. Bakhtar, 1985, Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. sci & Geomech. Abstr. 22, 121-140.
- (15) N. Barton, S. Bandis, 1980, Technical Notes - Some Effects of Scale on the Shear Strength of Joints, Int. J. Rock Mech. Min. sci & Geomech. Abstr. 17, 69-73.
- (16) Terzaghi. K & R. B. Peck, 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd edition. John Wiley and Sons, N.Y, 642.
- (17) Hoek. E & Brown. E. T(1980) Underground Excavation in Rock, The Institution of and Metallurgy, London, 131-182.

이승호
 상지대학교 토목공학과
 220-702, 강원도 원주시 우산동 660
 Tel : 033-730-0473
 Fax : 033-730-0403
 E-mail : shlee@mail.sangji.ac.kr