

## 인장력을 받는 락앵커의 최적 설계법

### An Optimum Design Method for Rock Anchors Subjected to Tension

함희원<sup>1)</sup>, Hee-Won Ham, 김현기<sup>2)</sup>, Hyun-Ki Kim, 조남준<sup>3)</sup>, Nam-Jun Cho

<sup>1)</sup> 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정, Master Student, School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.

<sup>2)</sup> 국민대학교 건설시스템공학부 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.

<sup>3)</sup> 국민대학교 건설시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.

**SYNOPSIS** : The failure modes of rock anchors subjected to tension can be defined as follows: tensile failure of tendon, shear failure on tendon-grout interface, shear failure on grout-rock interface and tensile failure of rock. This study proposes a design method to induce the rock anchor systems to avoid the brittle failure by ensuring the minimum embedded length of rock anchors. Pull-out test results of full-scale rock anchors show that the proposed method is effective in predicting the design conditions expecting the ductile tendon failure.

**Keywords** : rock anchor, design method, ductile failure

## 1. 서론

인발 하중을 받는 락 앵커의 파괴는 a) 텐던의 인장 파괴, b) 텐던-그라우트 경계면의 전단파괴, c) 그라우트-암 경계면의 전단파괴, d) 암의 썩기형 인장 파괴와 같은 파괴 양상을 보인다. 텐던의 파괴는 작용하중의 인장 파괴에 기인하여 발생하는 연성(ductile)파괴이다. 텐던의 파괴 외의 다른 세 가지의 파괴는 취성(brittle)파괴 양상을 갖게 된다. 본 연구는 다른 세 가지의 취성파괴가 일어나기 전에 텐던의 연성파괴가 가장 먼저 일어나도록 유도하는 설계법을 제안하고자 한다.

## 2. 인발하중을 받는 락앵커의 파괴양상

인발 하중을 받는 락앵커는 그림 1과 같이 a) 텐던의 파괴, b) 텐던-그라우트 경계면의 부착파괴, c) 그라우트-암 경계면의 부착파괴, d) 암반의 파괴와 같은 파괴 양상을 보인다.

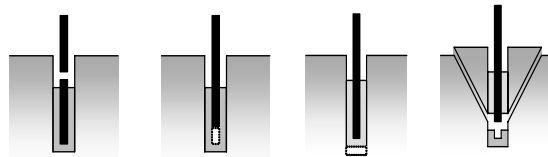


그림 1. 락 앵커의 파괴 형태 (Littlejohn과 Bruce, 1977)

전술한 네 가지 파괴 형태 중 하나가 먼저 파괴에 이르게 되면 다른 세 가지의 파괴 강도가 아무리

크더라도 락 앵커는 이미 파괴된 것으로 간주되어야 한다. 따라서 네 가지 파괴 형태에 대한 각각의 지지력을 계산하여 그중 최소가 되는 지지력이 락 앵커의 인발지지력이 된다. 즉, 락 앵커의 극한 인발지지력은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_u = \min[Q_{tu}, Q_{tgu}, Q_{gru}, Q_{ru}] \quad (1)$$

여기서,  $Q_{tu}$  = 락 앵커의 극한 지지력,  $Q_{tgu}$  = 텐던의 극한 인장력,  $Q_{gru}$  = 텐던-그라우트 경계면의 극한 부착지지력,  $Q_{ru}$  = 그라우트-암 경계면의 극한 부착지지력,  $Q_u$  = 암의 극한 인발지지력이다.

## 2.1 텐던의 인장지지력

락 앵커의 파괴 형태 중 텐던이 파괴되는 경우 락 앵커의 극한 지지력은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{tu} = \sigma_{tu} A_t \quad (2)$$

여기서,  $Q_{tu}$  = 텐던의 극한 지지력,  $A_t$  = 텐던의 단면적,  $\sigma_{tu}$  = 텐던의 극한 강도이다.

## 2.2 텐던 - 그라우트 경계면의 부착지지력

텐던-그라우트의 부착응력은 부착(adhesion), 마찰(friction), 그리고 맞물림(interlocking) 등의 조합으로 이루어진다. 텐던과 그라우트의 상대변위가 발생하기 전에는 텐던-그라우트의 부착력과 맞물림의 힘이 인장재의 저항을 지배하고 미끄러짐 발생 후에는 마찰에 의해 지배를 받는다. 텐던-그라우트 경계면이 파괴되는 경우 텐던-그라우트 경계면의 전단응력을 안다면 락 앵커의 지지력은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{tgu} = \pi B_t \int_0^{l_{btg}} \tau_{tgu}(z) dz \quad (3)$$

여기서,  $Q_{tgu}$  = 텐던-그라우트 경계면의 극한 지지력,  $B_t$  = 텐던의 직경,  $\tau_{tgu}(z)$  = 깊이  $z$ 에서의 텐던-그라우트 경계면 극한 전단응력,  $l_{btg}$  = 텐던-그라우트 사이의 부착 길이이다.

인장력이 락 앵커의 텐던에 작용하면 텐던-그라우트 경계면을 따라 전단응력이 발한다. 텐던, 그라우트, 암이 모두 탄성 거동을 하고 텐던-그라우트, 그라우트-암 경계면에서 미끄러짐, 즉 소성 거동이 없다는 가정 하에 전단응력 분포를 다음의 식으로 구할 수 있다(Farmer, 1975).

$$\tau_{ztg} = \frac{1}{2} r \alpha \sigma_{to} e^{-\alpha z} \quad (4)$$

여기서,  $\tau_{ztg}$  = 임의 깊이  $z$ 에서의 텐던-그라우트 경계면의 전단응력,  $r$  = 텐던의 반경,  $R$  = 천공의 반경,  $\sigma_{to}$  = 텐던 상단의 인장응력, 그리고  $z$  = 앵커 상단에서 깊이방향으로의 거리이다. 또한  $\alpha$ 는 식 (5)와 (6)과 같이 정의된다.

$R < 2r$  인 경우

$$\alpha^2 = \frac{K}{r(R-r)} \quad (5)$$

$R > 2r$  인 경우,

$$\alpha^2 = \frac{K}{r^2 \ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (6)$$

여기서,  $K$  는 그라우트의 탄성계수( $E_g$ )와 텐던의 탄성계수( $E_t$ )의 비율로써 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{E_g}{E_t} \quad (7)$$

식 (4)의 전단응력 식을 락앵커의 극한지지력에 관한 식으로 표현하면 전 부착길이에 따라 발생하는 따르는 락앵커의 극한지지력은 다음과 같이 된다.

$$Q_{tgu} = \pi B_t \int_0^{l_{btg}} \tau_{tgu} dz = A_t \sigma_{tuo} [1 - e^{-\alpha l_{btg}}] \quad (8)$$

여기서,  $Q_{tgu}$  = 텐던-그라우트 경계면의 극한 지지력,  $B_t$  = 텐던의 직경,  $l_{btg}$  = 텐던-그라우트 사이의 부착길이,  $A_t$  = 텐던의 단면적,  $\tau_{tgu}$  = 텐던-그라우트 경계면의 극한 전단응력,  $\sigma_{tuo}$  = 텐던 상단의 극한 인장응력이다.

### 2.3 그라우트-암 경계면의 부착지지력

락 앵커에서 그라우트의 인발저항은 텐던의 인발저항과 유사하게 그라우트와 암의 부착(adhesion), 마찰(friction), 그리고 맞물림(interlocking) 등의 조합으로 이루어진다. 그라우트-암 경계면의 전단응력을 안다면 락 앵커의 지지력은 식 9와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{gru} = \pi B_g \int_0^{l_{bgr}} \tau_{gru}(z) dz \quad (9)$$

여기서,  $Q_{gru}$  = 그라우트-암 경계면의 극한 지지력,  $B_g$  = 그라우트의 직경,  $l_{bgr}$  = 그라우트-암 사이의 부착길이,  $\tau_{gru}(z)$  = 깊이  $z$  에서의 그라우트-암 경계면 극한 전단응력이다.

### 2.4 암의 인발지지력

일반적으로 설계자들은 인발된 암의 형상을 그림 2와 같이 역 원뿔(inverted cone) 모양으로 가정한다. 락 앵커의 파괴형태 중 암반의 취성 파괴는 매우 위험한 결과를 초래하게 된다. 따라서 락 앵커의 설계에 있어서 암반의 파괴가 일어나지 않도록 하는 것이 요구된다. 그리고 극한 인발지지력은 식 (10)과 같이 콘의 무게와 콘의 표면에서 발생하는 인장력을 합하여 산정한다. 원뿔의 무게를 산정할 때에 지하수위를 고려하여 암의 유효 단위중량을 사용하여야 한다.

$$Q_{ru} = f_r + \overline{W}_c \cos \Psi_c \quad (10)$$

여기서,  $Q_{ru}$  = 암의 극한 인발지지력,  $\overline{W}_c$  = 암 원뿔의 유효 무게,  $f_r$  = 원뿔의 표면에서 발생하는 인장력,  $\Psi_c$  = 앵커와 하중방향이 이루는 각도이다.

Saliman과 Schaefer(1968)는 락 앵커 인발 시험을 통해 최대 인발하중이 실제로 콘 무게의 최소 7배에서 최대 56배까지 된다는 것을 보였다. 따라서 원뿔의 무게만을 앵커의 허용지지력으로 가정하는 것은 매우 안전측의 설계이다. 원뿔의 인장 파괴면에서 발생하는 인장력은 식 (11)과 같다(Coates와 Yu, 1971).

$$f_r = \frac{\sigma_{tr} \pi D_c^2 \tan(\theta/2)}{\cos(\theta/2)} \quad (11)$$

여기서,  $D_c$  = 앵커 상단에서 원뿔의 꼭지점까지의 거리,  $\theta$  = 원뿔의 꼭지각,  $\sigma_{tr}$  = 암의 인장강도이다.

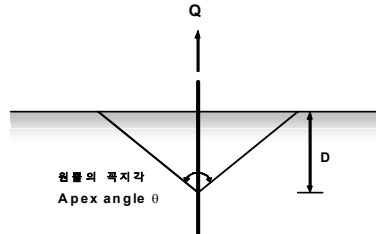


그림 2. 암 원뿔의 파괴형상

무결암의 인장강도는 실내실험을 통하여 측정할 수 있지만 불연속면이 존재하는 암인 경우에는 실험실에서 이러한 불연속면들을 재현하기 어렵기 때문에 현장 재하시험의 결과에 의해 구하는 것이 가장 좋은 방법이다. Lama와 Vutukuri(1978)은 무결암에 대한 인장강도 시험을 통해 인장강도와 압축강도의 비율( $\sigma_{tr}/\sigma_{cr}$ )의 편차가 크지 않다는 사실을 밝혔다. 실험에 사용된 대부분의 암은 인장 강도와 압축 강도의 비율이 4~7%이고, 몇몇 퇴적암인 경우  $\sigma_{tr}/\sigma_{cr}$ 이 14~16%이다(Lama와 Vutukuri, 1978). 또한 Hoek(1983)은 불연속면이 존재하는 암반의 인장강도를 다양한 암의 삼축 압축 실험결과를 바탕으로 식 12와 같이 제안하였다(Hoek, 1983).

$$\sigma_{tr} = \frac{1}{2} \sigma_{cr} [m - (m^2 + 4s)^{1/2}] \quad (12)$$

여기서,  $\sigma_{cr}$  = 무결암의 일축압축강도, 그리고 m과 s는 암의 강도 정수이다.

본 연구에서와 같이 단독 앵커만을 고려할 때 대부분의 엔지니어들은 인발된 암의 형상을 그림 2와 같은 원뿔 모양으로 가정하였다. 인발된 암의 원뿔 파괴 시 발생위치와 원뿔의 꼭지각의 크기는 매우 다양하다. 암의 인발지지력 산정에 있어 인발된 암의 형상과 그 크기는 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 그동안 수행되어온 암의 인발 파괴 시 암의 형상에 관한 연구의 자료가 많이 부족하고, 암의 형상에 관한 근거 자료도 많이 부족하여 추후 이에 관한 체계적인 연구와, 자료의 축적이 필요하다. 본 연구에서는 Littlejohn(1977)이 제시한 바처럼, 풍화되지 않은 암반에서 앵커 플레이트를 사용하지 않은 조건을 사용하여 꼭지각의 크기는 90°, 꼭지각의 위치는 앵커길이의 중간지점에서 발생한다고 가정하여 암의 인발 지지력을 구해보았다.

### 3. 락앵커 최적설계의 예

#### 3.1 신옥천 전력소

신옥천은 변성암-석회암이 분포된 지역으로 암반 분류상 역시 연암 지역이라 할 수 있다. 텐던은 SD40 이형철근 D32(7.94cm<sup>2</sup>)를 사용하였다. RMR 값의 측정 자료가 없어서 신옥천 지역 12공에서 측정한 RQD 값을 사전에 실험이 수행된 타 지역과의 RQD 평균값과 비교하여 평균 RMR 값을 48점으로 유추하였고, 암의 일축압축 강도는 51.2MPa였다. 총 12공의 락 앵커 중에서 7개의 앵커가 텐던의 인장

파괴가 일어났고, 4개의 앵커에서 300kN미만의 상대적으로 낮은 지지력에 암 및 그라우트의 파괴양상이 나타났다.

앵커	매입깊이 (m)	극한하중 (kN)	파괴양상
1	1	245	암 및 그라우트 파괴
2	1	445	텐던의 인장파괴
3	1	490	텐던의 인장파괴
4	2	539	텐던의 인장파괴
5	2	539	텐던의 인장파괴
6	2	294	그라우트 파괴
7	2	294	그라우트 파괴
8	2.5	539	텐던의 인장파괴
9	2.5	539	텐던의 인장파괴
10	3	539	텐던의 인장파괴
11	3	294	그라우트 파괴
12	6	242	부착부족

표 1 현장 앵커의 극한하중 측정(신옥천 지역)

### 3.1.1 신옥천 지역의 락앵커 극한 지지력 산정

신옥천 지역의 암반 특성 값을 이용해 그림 3와 같이 근입 깊이와 극한 인발지지력에 대한 관계를 계산하였다. 신옥천 지역의 RMR값은 약 48로, 태안 지역과 창녕 지역보다는 RMR로 추정할 수 있는 암의 인발 지지력이 조금 더 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나 텐던의 굽기가 태안, 창녕 지역보다 상대적으로 얇아지니까 텐던-그라우트 사이 극한 전단력에 의한 부착지지력과 텐던 상단의 인장력에 의한 텐던-그라우트의 부착지지력의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

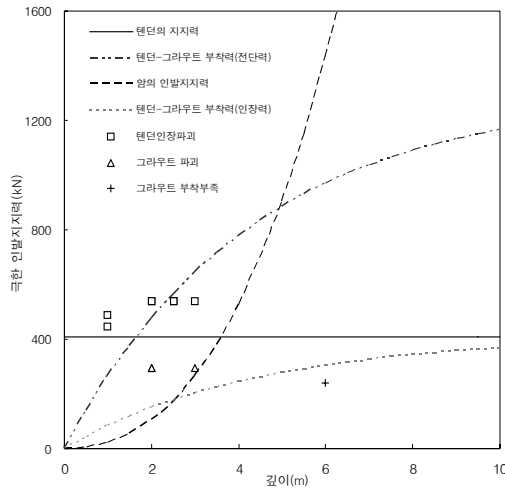


그림 3. 파괴유형에 따른 락앵커의 극한지지력 산정 (신옥천 지역)

### 3.3 현장시험의 결과와 락앵커의 최적 설계

각각의 파괴 유형을 고려한 락 앵커의 극한 지지력은 텐던의 파괴를 제외하면 모두 근입 깊이에 관한 함수로 표현되므로 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 락앵커의 극한지지력의 산정은 앞에서 언급한바 있듯이 각 파괴 형태에서의 극한하중 가운데서 가장 낮은 것을 취해야 한다. 본 설계법의 목적은 락앵커의 4가지 파괴 유형 중에서 텐던의 인장파괴가 가장 먼저 일어나게 함으로써 암반이나 접합부에서의 취성파괴보다 텐던부의 연성파괴로 유도하고자 함에 있다. 그림 3에서 암의 인발지지력 곡선과 텐던-그라우트의 부착지지력 곡선의 만나는 점이 주어진 락앵커의 취성파괴와 연성파괴를 구분하는 텐던의 길이가 되고 이보다 더 긴 텐던을 이용하여 설계할 때 연성파괴를 유도할 수 있을 것이다. 그러므로 텐던의 직경, 텐던 상단의 극한 인장력값을 식 (13)에 대입하면 그림 4와 같이 기반암의 RMR값에 따라 락앵커의 연성파괴를 유도하는 텐던의 최단 길이를 계산할 수 있다.

$$Q_{tgu} \leq Q_{ru}$$

$$A_t \sigma_{tuo} (1 - e^{-\alpha l_{btg}}) \leq f_r + \overline{W}_c \cos \Psi_c \quad (13)$$

$$A_t \sigma_{tuo} (1 - e^{-\alpha l_{btg}}) \leq \frac{\sigma_{tr} \pi D_c^2 \tan(\frac{\theta}{2})}{\cos(\frac{\theta}{2})} + \frac{1}{3} \pi \left( D_c \tan \frac{\theta}{2} \right)^2 D_c \gamma_R$$

여기서,  $Q_{tgu}$  = 텐던-그라우트 경계면의 극한 지지력,  $Q_{ru}$  = 암의 극한 인발지지력,  $A_t$  = 텐던의 단면적,  $l_{btg}$  = 텐던-그라우트 사이의 부착길이,  $\sigma_{tuo}$  = 텐던 상단의 극한 인장응력,  $D_c$  = 앵커 상단에서 원뿔의 꼭짓점까지의 거리,  $\theta$  = 원뿔의 꼭지각,  $\sigma_{tr}$  = 암의 인장강도,  $\overline{W}_c$  = 암 원뿔의 유효 무게,  $f_r$  = 원뿔의 표면에서 발생하는 인장력,  $\Psi_c$  = 앵커와 하중방향이 이루는 각도,  $\gamma_R$  = 암의 단위중량이다.

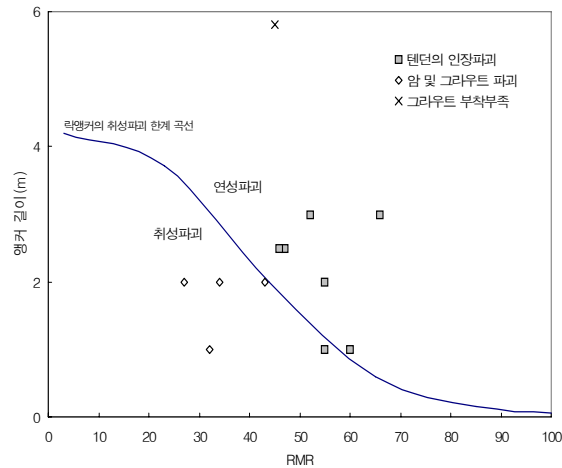


그림 4 RMR 값에 따른 텐던의 최단 길이 산출 (신옥천 지역)

### 4. 결론

암반에 근입된 앵커는 과도한 인장력을 받게 되었을 때, 철근의 인장파괴, 철근과 그라우트 접합면의 전단파괴, 그라우트와 암반 접합면의 전단파괴, 암반의 인발파괴 등 이상 네 가지 조건에 의해 파괴가 일어난다고 가정할 수 있다.

암반의 인발파괴나 그라우트 접합면의 전단파괴가 발생하게 되면 파괴의 양상이 취성파괴의 일종으로 나타나게 되어 파괴가 관측되었을 때 보강 및 보수 대책을 세우기 어렵기 때문에, 연성파괴를 일으키는 철근의 인장항복으로 파괴를 유도하는 설계를 할 필요가 있다.

동일한 조건의 인장력을 받는 락 앵커는 위의 네 가지 파괴 양상 가운데 암반의 인발파괴와 철근과 그라우트 접합면의 전단응력에 의해 발생하는 철근의 인장파괴에 대해 가장 취약한 것으로 나타나며 이 두 가지 파괴조건의 경계가 락 앵커의 취성파괴와 연성파괴의 경계로 볼 수 있다.

이 경계조건이 되는 앵커의 삽입길이는 연성파괴를 유도하기 위한 최소의 길이가 되고, 앵커 삽입을 위한 천공된 구멍의 직경, 삽입되는 철근과 주입되는 그라우트의 종류가 주어진 상황에서 암반의 상태에 따라 결정되는 암반의 인장강도에 의해 결정할 수 있고, 본 연구에서는 그림 4과 같이 암반의 RMR 값에 따라 앵커의 연성파괴를 유도하는 최소철근길이 산정곡선을 제안하였다.

본 연구는 한국전력공사의 “송전철탑 락 앵커기초 설계기준 수립에 관한 연구”의 일환으로 신옥천지역 석회암지대 12공에 대해 약 1~6m의 락 앵커를 암반에 설치하고 파괴 시까지 인발하여 각 앵커의 파괴양상을 관찰하고 락 앵커 파괴시의 인장력을 측정하였다. 일부 앵커가 철근의 인장항복으로 파괴가 발생하는 것을 보였는데, 위의 관계식을 통해 구한 암반조건에 따른 최소 철근길이 곡선이 이 두 가지 파괴양상을 구분함에 있어 효과적임을 확인하였다.

본 연구에서는 인장력을 받는 락 앵커의 파괴양상을 네 가지 형태로 가정하여 분류하였으나, 현장 인발시험 결과 암의 인발파괴와 그라우트 접합면의 전단 파괴가 함께 일어나는 복합적인 파괴양상을 보인 앵커가 상당수 관찰되었고, 암의 인발파괴도 가정조건과는 달리 불규칙적인 모습을 많이 보였기 때문에 이에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 생각한다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(1996), 도로교 표준 시방서, pp. 90~141.
2. 그라운드 앵커 기술협회, (1996), 그라운드 앵커 공법, 구미서관, pp. 199~203.
3. 한국전력공사 전력연구원, (1999), 송전철탑 Rock Anchor기초 설계기준 수립에 관한 연구, 서울, 138pages.
4. Coates, D. F. and Yu, Y. S., (1971), Rock anchor design mechanics, Canada Dept. of Energy Mines and Resource, Research Report No. R233.
5. Farmer, I. W., (1975), "Stress distribution along a resin grouted anchor", Int. J. Rock Mech. & Geomech., Vol. 12, pp. 347~351.
6. Hoek, E., (1983), "Strength of jointed rock masses", Geotechnique, Vol. 33, No.3, pp. 187~223.
7. Lama, R. D. and Vutukuri, V. S., (1978), "Handbook on the Mechanical Properties of Rocks", Vol. I, Trans. Tech. publications, Claustal, Germany, pp. 87~138.
8. Littlejohn, G. S. and Bruce, D. A. (1977), "Rock anchors—design and quality control", Proc. 16th Symp. on Rock Mechanics, U. of Minnesota, pp. 77~88.
9. Littlejohn, G. S. and Bruce, D. A. (1977), "Rock anchors—State of the art", Ground Engineering. Foundation Publications LTD.
10. Sail, R. and Schaefer, R. (1968), "Anchored footings for transmission towers", ASCE Annual Meeting and National Meeting on Structural Engineering, Pittsburg, PA, Sept. 3-Oct. 4, Preprint 753.