

단일 록 앵커(Rock Anchor) 인발시험에 관한 연구

The Experimental Study on the Uplift Capacity Test of Circular Anchors in Rock Mass

이 경 진* 나 환 선* 박 동 수* 김 강 식* 김 우 범**
Lee, Kyung-Jin Nah, Hwan-Seon Park, Dong-Su Kim, Kang-Sik Kim, Woo-Bum

ABSTRACT

There is an increasing demand for using rock anchors as foundations in many geotechnical engineering structures such as transmission towers, dams, etc.

For investigate the behavior and strength of rock anchors, in-situ pull-out tests were carried out. From the tests, various forms of failure of rock anchors were observed. Ultimate capacity of each failure modes of 1) Tendon failure, 2) Interface failure(tendon-grout interface, sheath-grout interface and grout-rock interface), 3) Combined interface failure, was obtained by varying the parameters such as diameter and length of tendon, grout strength, and quality of rock.

1. 서 론

국내에서는 송전철탑 송변전선이 산악암반지역을 여러구간에 걸쳐 통과하고 있고, 지질학적, 암반역학적 관점에서 살펴볼 때 국내 산악지역의 암반은 역학적 특성이 매우 양호한 암석으로 구성되어 있는 경우가 많으므로, 송전철탑 기초건설에 이와 같은 암반조건을 철탑기초로 활용할 수 있는 방안이 요구되고 있다.

기존의 송전철탑기초로는 역T형 철근콘크리트 기초가 선호되고 있어, 대부분이 암반으로 구성된 산악지역에서도 넓은 기초굴착지역을 필요로 하는 역T형 기초가 시공되고 있어 불필요한 암반절취에 많은 노력과 시간을 소모하고 있는 실정이다. 국내에 다수 분포하고 있는 암반지역에서는 시공이 간편하고 굴착면적이 소량인 록 앵커(Rock Anchor) 기초를 도입하는 것이 시공성 향상과 경제성제고에 유리하므로, 이에 대한 설계/시공기준을 개발하기 위하여 암반지역에서 단일 록 앵커 시험을 수행하여 암반의 인발저항력을 평가하고 시험결과를 철탑기초설계에 활용하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

록 앵커란 암반위에 시공되는 구조물의 기초로써, 구조물이 지하수위의 상승에 의한 부력과 풍하중 등의 외부하중에 의해 기초 축방향으로 압축력 및 인장력, 횡하중, 모멘트 등의 반복하중을 지속적으로 받을 경우, 이런 하중들을 앵커가 지지함으로써 구조물을 안전하게 유지시켜 주는 역할을 한다.

국내의 연구동향으로는 터널이나 암반사면에서 암반 자체의 안정을 위해 길이 3~5m 정도의 짧은 강봉을 암반에 삽입하는 록 볼트(Rock Bolt) 공법 외에 철탑과 같이 외부 하중을 지지하기 위해 강선이나 철

* 한전 전력연구원 선임연구원

** 한전 전력연구원 책임연구원, 공학박사

근을 시공하는 공법은 연구예가 거의 없는 상태이며 콘크리트 댐에서 정적 하중을 지지하기 위해 시공된 예는 있으나, 반복적이고 동적인 외부 하중을 지지하기 위한 록 앵커는 거의 시공된 예가 없고, 설계 방법과 시공 방법도 체계적으로 연구된 적이 없는 실정이다. 일본, 미국, 캐나다 등에서는 록 앵커 거동에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고, 실제로 철탐 기초에 시공된 사례도 다수 있지만 암반은 지역에 따라서 외부 하중에 대한 거동응답이 많이 변화하는 특성을 가지고 있으므로 외국의 연구결과와 국내의 실험결과와 비교, 검토하는 것이 필요하다.

록 앵커의 구조거동은 암반의 RQD, 불연속면의 유무, 절리의 방향, 기울기, 지하수의 유무에 따라 많은 차이를 나타내고, 앵커 텐돈(Tendon)과 그라우트(Grout)재, 그라우트 재와 암반, 암반 자체의 파괴 모드가 제대로 규명이 안된 상황으로서, 본 연구에서는 야외 단일 록앵커 인발시험을 수행하여 앵커 심도에 따른 암반의 인발저항력과 앵커기초의 파괴모드, 암의 종류에 따른 콘 파괴(Cone Failure) 각도, 정적인발하중(Static Cyclic Pull-Out Force)에 따른 앵커의 구조거동을 파악하고자 한다.

2. 록 앵커의 구조거동

록 앵커의 파괴거동은 일반적으로 1) 텐돈의 파괴, 2) 텐돈-그라우트의 부착파괴, 3) 그라우트-암의 부착 파괴, 4) 암반의 파괴 등으로 나타낼 수 있다.

2.1 텐돈의 파괴

록 앵커의 텐돈이 파괴되는 경우 록 앵커의 지지력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \sigma_0 \cdot A_t \quad (1)$$

여기서, Q : 앵커의 지지력

σ_0 : 앵커 두부의 수직응력

A_t : 텐돈의 단면적

2.2 텐돈-그라우트 사이의 부착파괴

텐돈과 그라우트 사이의 부착응력과 텐돈의 전부착길이를 알 경우에 록 앵커의 지지력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \pi B_t \sigma_0 \int_0^{l_b} \tau_x dx \quad (2)$$

여기서, B_t : 텐돈의 직경

τ_x : 길이 x에서 발생하는 텐돈과 그라우트 사이의 부착응력

l_b : 텐돈과 그라우트 사이의 부착길이

$$\tau_x = \frac{1}{2} a \sigma_0 e^{-ax} \quad (3)$$

여기서, $R-a < a$ 인 경우

$$a^2 = \frac{K}{a(R-a)} \quad (4)$$

$R-a > a$ 인 경우

$$a^2 = \frac{K}{a \ln \frac{R}{a}} \quad (5)$$

여기서, $a = r$: 앵커 텐던의 반경

$$K = \frac{E_g}{E_t}$$

E_g : 그라우트의 탄성계수

E_t : 텐던의 탄성계수

R : 천공홀의 반경

식 (4), (5)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = -\frac{1}{2} a \pi B_t \sigma_0 (e^{-a l_b} - 1) \quad (6)$$

2.3 그라우트-암 사이의 부착파괴

그라우트-암의 부착파괴시 록 앵커의 지지력은 텐던-그라우트 사이의 파괴와 마찬가지로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{gru} = \pi B_g \int_0^{l_b} \tau_{gr} dz \quad (7)$$

여기서, Q_{gru} : 그라우트-암사이의 극한 부착력

B_g : 그라우트의 직경

τ_{gr} : 깊이 z 에서 발생하는 그라우트와 암사이의 부착응력

l_b : 그라우트와 암사이의 부착길이

2.4 암의 파괴

암 파괴는 일반적으로 그림 1에 나타난 콘 모양 파괴를 가정한다. 암의 파괴가 일어나는 경우의 지지력은 파괴가 예상되는 암 콘의 무게와 콘의 표면에서 발생하는 인장력의 합을 일정한 안전율로 나눈 값으로 구하는데 Wyllie는 록 앵커의 지지력을 다음 식으로 제안하였다.

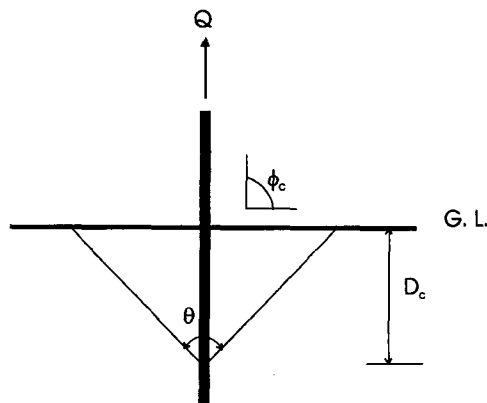


그림 1. 암의 콘 파괴형상

$$Q = \frac{f_r + W_c \cos \phi_c}{F} \quad (8)$$

$$f_r = \frac{\sigma_{t(cone)} \pi D_c^2 \tan \frac{\theta}{2}}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad (9)$$

여기서, Q : 앵커의 허용지지력

f_r : 콘의 표면에서 발생하는 인장력

W_c : 암 콘의 무게

ϕ_c : 수직방향과 하중방향이 이루는 각도

$\sigma_{t(cone)}$: 콘의 표면에서 발생하는 인장응력

D_c : 지표면으로부터 콘의 꼭지점까지의 거리

θ : 콘의 꼭지각

F : 안전율

3. 시험 계획

3.1 실험회수

실험회수는 표 1에 표시한 바와 같다.

표 1. 실험회수

지역 심도(m)	태안화력발전소 변성암 부지			합계
	풍화암	연암	경암	
1.0	3	4	3	10
2.0	4	4	3	11
3.0	4	4	3	11
합 계	11	12	9	32

3.2 앵커 인발시험 적용규정

가. ASTM D3689 : 인발시험

나. BS 8081 : 앵커 인발시험

다. KS F2445 : 말뚝 제하시험

3.3 시험장치

가. 하중재하대 : H Beam

나. 반력 패드 : 2 세트

다. 유압 잭(Hydraulic Jack) : 용량 250 Tonf

라. 유압 펌프 : 2 세트

마. LVDT : 1 세트, 1/100 mm

바. 로드 셀(Load Cell) : 1 세트

사. 레퍼런스 빔(Reference Beam) : 2 세트

아. 사용한 텐던 : D51 ($\sigma_y = 4,000 \text{ kg/cm}^2$, $f_y = 81.08 \text{ tonf}$)

자. 사용한 그라우트 재 : 매직콘 알파(7일 압축강도 : 450 kg/cm^2)

이상과 같은 시험장치를 이용하여 구성된 시험장비는 그림 2와 같다.

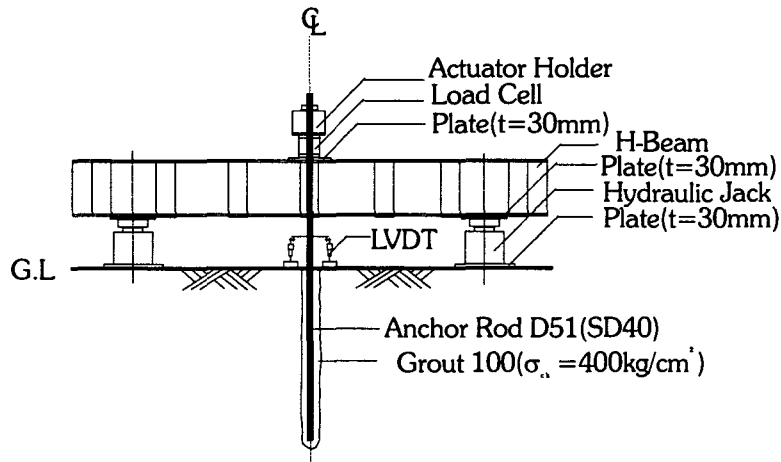


그림 2. 단일 록 앵커 인발시험장치 구성도

3.4 재하하중 및 지속시간

인발시험에 사용한 재하하중 및 하중 지속시간은 BS 8081을 기준으로 하여 표 2에 표시되어 있다.

표 2. 재하하중 및 지속시간

재하 단계							하 중 지속시간 (분)
1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차, 8차	
% 인발하중	% 인발하중	% 인발하중	% 인발하중	% 인발하중	% 인발하중	% 인발하중	
5	5	5	5	5	5	5	1
10	20	30	40	50	60	70	1
15	25	35	45	55	65	75	1
20	30	40	50	60	70	80	15
15	25	35	45	55	65	75	1
10	20	30	40	50	60	70	1
5	5	5	5	5	5	5	1

4. 단일 록 앵커 인발시험

4.1 풍화암

단일 앵커 인발시험이 수행된 부지조건은 편마암(Gneiss)이 분포한 야산지역으로서 지표면 이하에 절리면이 다양하게 존재하고 있다. 표 3은 풍화암에서의 단일 록 앵커 인발시험결과를 정리한 것이고, 그림 3~그림 8은 앵커 심도를 다르게 하여 시험한 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 표 3에서 시험위치별 RQD는 심도에 관계없이 0~15 범위 값으로서 암반이 좋지 않은 상태이다.

표 3. 풍화암에서의 단일 앵커 인발시험 결과

앵커 No.	W1	W2	W3	W4	W5	W6
앵커 심도(m)	1.0	2.0	2.0	3.0	3.0	4.0
RQD	0	0	15	10	0	0
정착부 파단하중(tonf)	6	15~16	40	45	60	80~85
탄성한계하중(tonf)	-	5.0	-	20.4	-	27.6
파괴 형상	절리면 파단	절리면 파단	절리면 파단	절리면 파단	절리면 파단	절리면 파단

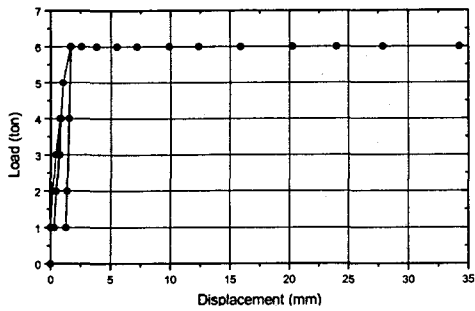


그림 3. 심도 1m의 록 앵커 하중-변위곡선(W1)

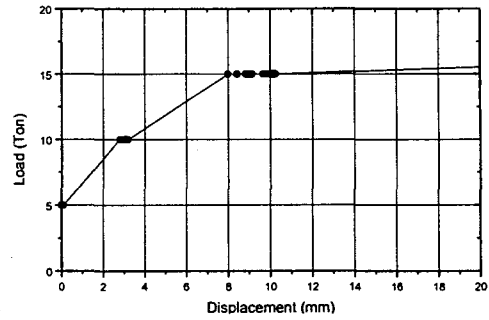


그림 4. 심도 2m의 록 앵커 하중-변위곡선(W2)

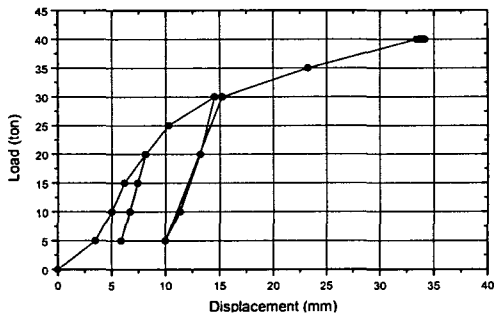


그림 5. 심도 2m의 록 앵커 하중-변위곡선(W3)

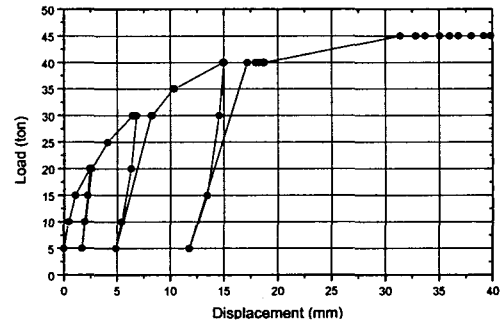


그림 6. 심도 3m의 록 앵커 하중-변위곡선(W4)

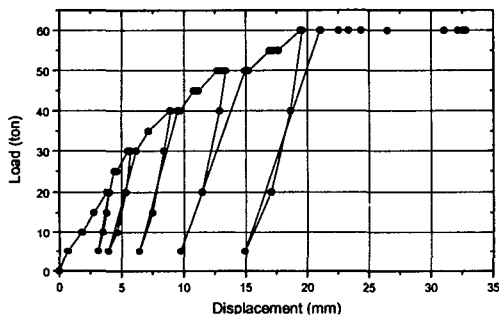


그림 7. 심도 3m의 록 앵커 하중-변위곡선(W5)

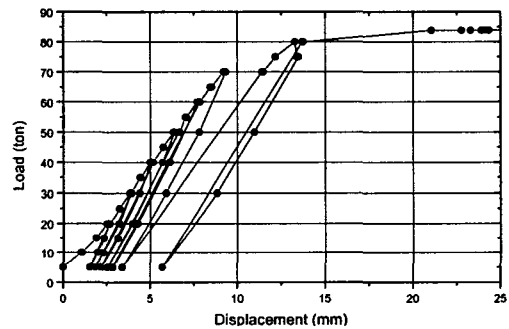


그림 8. 심도 4m의 록 앵커 하중-변위곡선(W6)

풍화암지역에서 심도에 따른 록 앵커의 하중-변위곡선은 심도가 증가함에 따라 정착부 파단하중이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 예상되는 것이지만, 앵커 정착길이가 2m인 그림 4, 5의 경우 같은 심도임에도 파단하중은 2배 이상의 차이(W2 : 15ton, W3 : 40ton)를 나타내고 있고, 앵커 정착길이가 3m인 그림 6, 7의 W4, W5는 정착부 파단하중이 45ton, 60ton으로 33%의 차이를 나타내고 있어, 시험위치에 따른 앵커의 인발지력이 많은 차이를 보이고 있다. 실험위치에 따른 앵커 파단하중의 차이는 앵커가 매입

된 암반내 불연속면의 위치, 방향 등에 영향을 받은 것으로 보이며, 지질조사결과에 의하면 이 지역의 암반은 불연속면의 심도가 위치별로 변화를 보이고 있어, 같은 심도에서도 앵커 거동에 차이가 발생한 것으로 판단된다.

4.2 연암

시험을 수행한 부지는 야산구릉지역으로 표토층을 걷어내어 조성된 곳으로 부지 면적은 20m×20m 로서, 지질조사결과 좁은 범위내에서도 불연속면이 여러방향으로 발달해 있는 지역이다. 이러한 지하암반특성을 가진 결과 그림 9, 그림 10에서 앵커 심도가 차이가 있음에도 파단하중은 비슷한 값(30~35 ton)을 보이고, 그림 10, 그림 11의 심도 2m에서 정착부 파단하중이 2배 이상 차이를 나타내고 있다.

표 4. 연암에서의 단일 앵커 인발시험 결과

앵커 No.	S1	S2	S3	S4
앵커 심도(m)	1.0	2.0	2.0	3.0
RQD	22	31	30	49
정착부 파단하중(tonf)	30	30~35	75	85
탄성한계하중(tonf)	-	-	25.2	74.6
파괴 형상	절리면 파단	절리면 파단	절리면 파단	절리면 파단

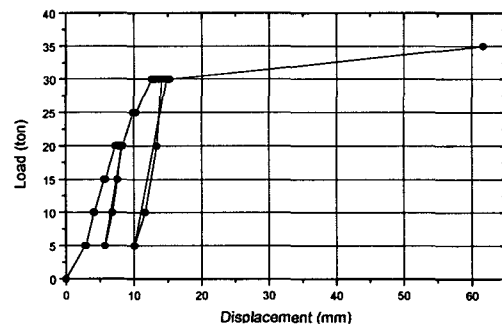
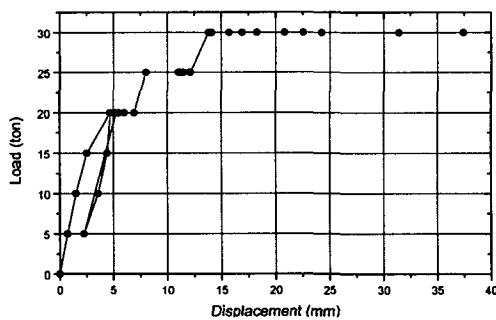


그림 9. 심도 1m의 록 앵커 하중-변위곡선(S1) 그림 10. 심도 2m의 록 앵커 하중-변위곡선(S2)

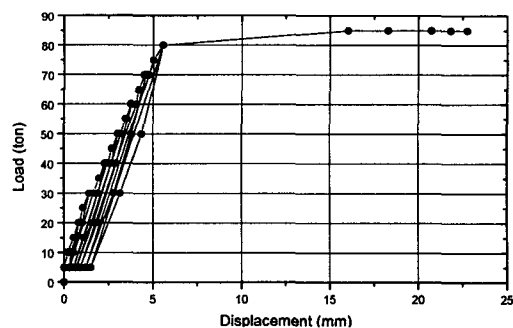
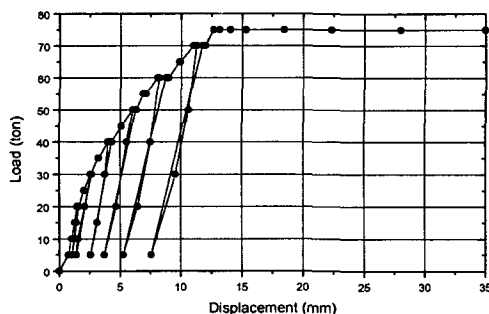


그림 11. 심도 2m의 록 앵커 하중-변위곡선(S3) 그림 12. 심도 3m의 록 앵커 하중-변위곡선(S4)

4.3 경암

경암지역은 지표면에 편마암 노두(Outcrop)가 존재하는 곳으로 다른 시험지역에 비해 암반상태가 비교적 양호한 지역이다. 그림 13, 14에 나타난 인발시험결과는 심도가 얕음(1.0m, 1.5m)에도 파단하중이 비교적 크게 나타났고, 심도 1.5m의 경우는 파단하중이 100ton 정도로서 풍화암이나 연암에 비하여 인발에 대하여 큰 저항력을 나타냈다. 이 지역의 암반은 지표면에서 가까운 상태에서 RQD가 53~58 범위의 값을 가지고 있어 풍화암이나 연암지역에 비해 상대적으로 양호한 암반상태를 유지하고 있다.

표 5. 경암에서의 단일 앵커 인발시험 결과

앵커 No.	H1	H2
앵커 심도(m)	1.0	1.5
RQD	58	53
정착부 파단하중(tonf)	50~55	90~100
탄성한계하중(tonf)	26.1	80
파괴 형상	절리면 파단	절리면 파단

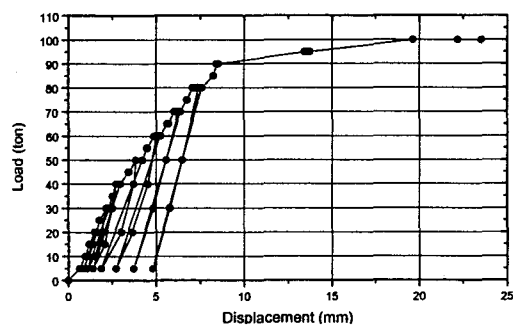
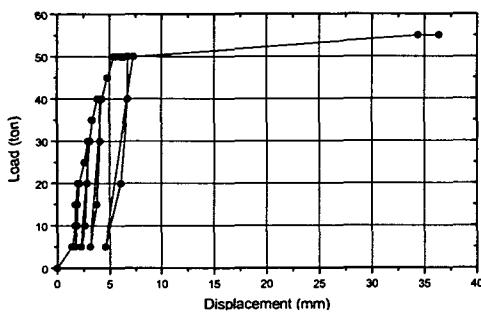


그림 13. 심도 1m의 록 앵커 하중-변위곡선(H1) 그림 14. 심도 1.5m의 록 앵커 하중-변위곡선(H2)

5. 결 론

암반 상태가 서로 다른 편마암 부지에서 수행한 단일 록 앵커 인발시험결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 앵커 매입깊이가 증가함에 따라 록 앵커의 정착부 파단하중은 증가하는 경향을 나타내고 있다.
- 2) 불연속면의 위치, 방향은 앵커의 인발지지력에 큰 영향을 주며, 앵커 매입깊이가 같은 경우에 록 앵커의 정착부 파단하중에 차이가 나는 것은 지하 암반에 위치한 불연속면의 영향때문으로 판단된다.
- 3) 앵커 매입깊이가 3m 이상 되는 경우에 록 앵커의 인발력에 대한 지지력은 60 tonf 이상의 값을 나타내고 있다.

참 고 문 헌

1. 한전 전력연구원, "송전철탑 Rock Anchor 기초 설계기준 수립에 관한 연구(1차년도 중간보고서)", '98 전력연-단806, 1998. 10.
2. I.W. Farmer, "Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol.12, pp.347~351, 1975.
3. W.H. Craig, "Size Effects in Anchor Performance," Can. Geotech. J. Vol. 31, 450~454, 1994.