

# 실규모 현장시험을 통한 부착형 암반앵커의 인발저항력 평가

## Uplift Capacity Estimation of Bond-type Rock Anchors Based on Full Scale Field Tests

김 대 홍<sup>1</sup> Kim, Dae-Hong

오 기 대<sup>2</sup> Oh, Gi-Dae

### Abstract

This paper presents the results of full-scale uplift load tests performed on 24 passive anchors grouted to various lengths at Okchun and Changnyong site. Rock anchors were installed over a wide range of rock types and qualities with a fixed anchored depth of 1~6 m. The majority of installations used D51 mm high grade steel rebar to induce rock failure prior to rod failure. However, a few installations included the use of D32 mm rebar at relatively deeper anchored depth so as to induce rod failure. In many tests, rock failure was reached and the ultimate loads were recorded along with observations of the shape and extent of the failure surface. In addition to field tests, laboratory pullout tests were conducted to determine bond strength and bond stress-shear slip relation at the tendon/grout interface when a corrosion protection sheath is installed in the cement-based grout. The test results show that the ultimate tendon-grout bond strength is measured from 18~25% of unconfined compressive strength of grout. One of the important results from these tests is that the measured strains along the corrosion protection sheath were so small that practically the reduction of bond strength by the presence of sheath would be negligible.

### 요 지

본 논문에서는 옥천 및 창녕지역에서 총 24회 수행한 암반앵커 현장인발시험의 결과를 나타내었다. 시험앵커의 정착깊이는 1~6m로 서로다른 암반내에 설치하였다. 앵커의 대부분은 고강도 이형철근인 SD40-D51mm를 사용함으로써 다른 파괴가 일어나기 전에 암반파괴가 먼저 일어나도록 유도하여 암반의 인발저항력을 파악하고자 하였으며, 일부에서는 SD40-D32mm앵커를 설치하여 앵커의 파괴도 아울러 살펴보았다. 많은 시험에서 파괴는 항복에 이르는 극한하중까지 관찰할 수 있었으며, 암반파괴형상은 암반이 들어올리지면서 방사상으로 균열이 발달하는 형태를 나타내었다. 또한 시멘트그라우트와 텐던사이의 부착강도를 평가하고자 방식쉬이스가 설치된 앵커에 대해 실내시험을 실시하였다. 시험결과 텐던-그라우트 사이의 부착강도는 그라우트 일축압축강도의 18~25%로 나타났으며, 방식쉬이스에 의한 부착력 감소는 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다.

**Keywords :** Bond strength, Failure mechanism, Rock anchor, Rock mass, Transmission tower foundation, Uplift capacity

1 정희원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 (Member, KEPRI / KEPCO, dhkim@kepcoco.kr, 교신저자)

2 정희원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 (Member, KEPRI / KEPCO)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

부착형 암반앵커(bonded rock anchor)는 텐던의 부착 저항력을 통해 외부하중을 주변암반에 전달하고 주변 지반의 강도를 이용하여 인발력에 저항하는 하중전이 메커니즘을 가지고 있다. 본 앵커공법은 암반내 부력이 작용하는 구조물이나, 토압 또는 수압에 의한 전도, 응력개방에 따른 이완하중의 지지, 또는 송전철탑과 같이 풍하중의 영향을 크게 받는 기초 등 인발력에 대한 안정성 확보를 위해 효과적이며, 기존구조물의 강도증가 또는 복구(rehabilitation) 등 특수한 분야에도 사용이 증대되고 있다(Hinks 등, 1990; Bruce, 1993).

국내의 경우 송전철탑이 비교적 양호한 암반의 산간 지역을 통과하고 있는 경우가 많으나, 넓고 깊은 굴착을 필요로 하는 역T형기초, 심형기초(深形基礎) 등으로 시공되고 있는 실정이다. 따라서 양호한 암반지역에 앵커기초를 도입하면 인발하중의 대부분을 암반이 부담하기 때문에 굴착량 및 기초의 크기를 획기적으로 줄일 수 있어 시공성 및 경제성 향상을 도모할 수 있다.

인발하중을 받는 암반앵커의 파괴 형태는 크게 텐던의 인장파괴, 텐던-그라우트 경계면의 부착파괴, 그라우트-암반 경계면의 부착파괴, 암반 파괴 등으로 구분할 수 있다(Xanthakos, 1991). 이들 중 텐던의 파괴는 다른 세 가지의 파괴가 일어나기 전에 텐던의 인장파괴에 기인하여 발생하는 연성(ductile)파괴이다. 텐던의 파괴 외의 다른 세 가지는 취성(brittle)파괴형태를 갖게 된다. 텐던-그라우트 경계면의 부착 파괴도 마찬가지로 다른 세 가지의 파괴 발생 전에 텐던-그라우트 경계면에서 전단 응력이 부착 강도를 초과할 때에 발생한다. 텐던-그라우트 경계면에서의 전단 파괴강도는 텐던의 표면 형태 및 그라우트의 품질에 의해 결정되는 것으로서 일반적으로 그라우트의 압축강도와 관련 있는 것으로 알려져 있다(Benmokrane 등, 1995). 그라우트-암반 경계면의 부착 파괴강도는 그라우트와 암반의 압축강도, 그리고 천공표면의 거칠기에 따라 결정된다. 마지막으로 암반의 파괴는 다른 세 가지의 파괴 형태보다 훨씬 복잡한 양상을 나타낸다. 즉 암반의 강도, 절리의 유무, 절리의 방향과 인발하중 방향과의 관계, 텐던의 정착깊이 등에 따라 달라질 수 있다. 이와 같은 네 가지 파괴 형태 중 하나가 먼저 파괴에 이르게 되면 다른 세 가지의 파괴강도가 아무리 크더라도 암반앵커는 이미 파괴된 것으로 간주되어야 한다. 따라서 네 가지 파괴 형태에 대한

각각의 저항력을 계산하여 그중 최소가 되는 저항력이 앵커의 인발저항력이 된다.

암반의 인발파괴형태와 관련하여 인발저항력을 산정할 때 흔히 쓰이는 방법은 암반의 인발 각도를 60~120°로 보고 암반조건 및 앵커형태, 매입깊이 등에 따라 부착 길이의 중간 또는 선단부분부터 역원뿔형태로 파괴된다고 가정하는 것으로서 암반 파괴면의 전단저항력은 무시하고 그 원뿔의 무게만을 저항력으로 산정하는 것이다(U.S. Army Corps of Engineers, 1994). 이와 같이 원뿔의 자중만으로 계산하는 방법은 불연속면의 발달이 현저하거나 풍화가 심한 암반의 경우 비교적 잘 일치하나 연구결과(Saliman과 Schaefer, 1968; Littlejohn과 Bruce, 1977), 일부 암반의 경우에는 지나치게 보수적인 결과를 나타냈다. Saliman과 Schaefer(1968)는 최대 인발저항력이 실제로 콘 무게의 최대 56배까지 된다는 것을 보인바 있으며, 최근 국내의 연구결과(김대홍 등, 2006)에 의하면 태안지역 편마암의 경우 최대인발저항력은 콘 무게의 3~35배 범위임이 보고된 바 있다. 또한, Littlejohn과 Bruce(1977)는 세계각국의 20개 현장을 조사한 결과 인발 각도가 암반이 연약하거나 풍화가 심한 경우 60°, 그 외의 암반은 90°정도라고 보고하였다. 한편 Ismael 등(1980)의 연구 결과에 의하면 경암에서는 인발각도가 120°까지도 가능하다고 보고하고 있어, 현재 국내현장에서 실증시험자료 없이 약 60~90°정도로 보고 설계하는 것은 합리적이지 않다. 따라서 암반의 저항력을 정확하게 평가하기 위해서는 다양한 암반에 대해 현장시험을 실시하여 4가지 형태의 파괴모드를 분석한 후 인발 저항력 산정시 이를 반영하여야 한다.

암반의 전단응력에 대해서는 Saliman과 Schaefer(1968), Nicholson 등(1982)이 제안한 값이 있으나 암반의 풍화 및 균열의 정도 등에 따라 큰 폭의 차이를 보이는 것으로 나타났다. Hobst와 Zajic(1977)은 층리가 발달한 암반의 경우 원뿔형이 아니고 층을 따라 파괴가 일어난 것에 대해 보고하였다.

Benmokrane 등(1995)은 시멘트로 그라우팅된 암반앵커에 대해 부착강도시험을 수행한 결과 텐던과 그라우트의 부착강도(bond strength)는 그라우트의 압축강도와 밀접한 관계가 있음을 밝혀냈으며, 부착강도의 범위는 그라우트 압축강도의 20~35%인 것으로 보고하였다. 이를 통해 부착면에서의 부착활동(bond-slip) 모델을 제안하였다. 또한 전 정착깊이에 따른 부착응력분포에 관하여 실내 모형 실험(Farmer, 1975)이나 현장 앵커 인발

시험(Kulhawy, 1985), 그리고 수치해석 방법(Coates와 Yu, 1971)에 대한 많은 연구가 수행되었다. 이러한 연구들의 결과는 모두 전단응력 분포가 심한 비선형을 나타내고 작용 하중이 커질수록 부착부 상단에 응력집중이 일어나며 하단으로 갈수록 급격히 감소하였다.

본 연구에서는 암반앵커의 인발저항력 및 거동을 평가하기 위하여 경남 창녕 및 충북 옥천지역 암반에 대해 현장시험을 수행하였다. 현장시험은 수직인발조건에 있

는 단일앵커에 대해 암반조건별 앵커의 정착깊이 및 앵커종류에 따라 시험을 수행하여 각각에 대한 파괴모드 및 인발저항력 특성을 평가하였다. 또한 실내부착강도 시험을 실시하여 텐던-그라우트 사이의 부착거동을 평가하고 방식쉬이스에 의한 부착력의 감소여부도 조사하였다.

## 2. 시험부지 특성 및 인발시험 방법

### 2.1 시험부지 특성

송전철탑 암반앵커기초 실증시험을 위해 다음 2곳을 선정하였다.

- 퇴적암 : 경남 창녕군 영산면 죽사리
- 퇴적암/화성암 : 충북 옥천군 군서면 오동리

선정된 부지 내 암반앵커시험 지역의 지층상태를 파악하고 제반 지반공학적 자료수집을 위하여 시추조사를 실시하였다. 시추기는 유압식 로타리형을 사용하였으며, 시추 공경은 NX 크기로 하였다. 시추작업과 병행하여 지층의 상대밀도 및 연경도와 구성성분을 파악하기 위하여 표준관입시험을 심도 1.0m마다 또는 지층이 변할 때마다 실시하였으며, 이때 교란된 시료도 함께 채취하였다. 조사결과 지층의 분포상태는 상부로부터 매립, 풍화대, 연암, 경암 등의 순으로 되어 있으며, 지층분포상태는 표 1 및 2와 같다.

창녕지역의 암반조건은 경상계 진동(鎭東)퇴적암에 속하는 셰일(shale)으로써 지표면에서 보링조사를 수행한 지하심도 8m 까지 수평방향으로 판상의 벽개(plate cleavage)가 발달되어 있어 이방성이 크고, 노출된 암편들은 손으로도 쉽게 분리되는 특성을 갖고 있다. 코어회

표 1. 시추조사에 의한 지반평가결과

지역	공 번	지 층 분 포 상 태 (m)				
		매립토	풍화대	연 암	경 암	합 계
창녕	CG - 1	2.0	1.7	6.3		10.0
	CG - 2	2.0	1.3	6.7		10.0
	CG - 3	1.5	2.9	5.6		10.0
	CS - 1			10.0		10.0
	CS - 2			10.0		10.0
	CS - 3			8.0		8.0
	CS - 4			8.0		8.0
	CS - 5			8.0		8.0
	CS - 6			8.0		8.0
	CS - 7			8.0		8.0
	CS - 8			8.0		8.0
	CS - 9			8.0		8.0
	CS -10			8.0		8.0
CS -11	1.8		6.2		8.0	
CS -12	2.0		6.0		8.0	
CS -13			8.0		8.0	
옥천	OC - 1	3.0				3.0
	OC - 2	1.2	1.8			3.0
	OC - 3	1.0		6.0		7.0
	OC - 4	0.6		9.4		10.0
	OC - 5	0.6		9.4		10.0
	OC - 6	0.5		9.5		10.0
	OC - 7	0.8		9.2		10.0

표 2. 창녕 및 옥천지역 시험부지 지층분포상태

지역	지층명	분포범위 (m)	T.C.R. (%)	R.Q.D. (%)	비 고
창녕	매립토	1.5~2.0 (평균 : 1.86)	-	-	CG-1, CG-2, CG-3, CS-11, CS-12 공에서만 확인
	풍화암	1.3~2.9 (평균 : 1.97)	21.0~63.0 (평균 : 40.3)	-	CG-1, CG-2, CG-3 공에서만 확인
	연 암	5.6 이상 (평균 : 7.6)	30.0~93.0	0.0~53.0	모든 시추공에서 확인
옥천	매립토	0.5~3.0 (평균 : 1.1)	-	-	모든 시추공에서 확인
	풍화암	1.8	19.0~72.0	-	OC-2호공에서만 확인
	연 암	6.0 이상	62.0~95.0	0.0 ~ 52.0	OC-3~7호공에서 확인

수율은 21~93%로써 비교적 양호하나 R.Q.D는 대부분 0~10%를 나타냈으며, 일부 시추공에서 80~100%으로 측정되어 편차가 매우 큰 것으로 나타났다. 실내암석 시험결과 일축압축강도는 780~1,130(평균 975)kgf/cm<sup>2</sup>의 분포범위를 보이며, 건교부 표준품셈의 암반분류 기준에 의거하여 본 암은 연암으로 분류된다.

옥천지역의 경우 연암은 OC-3, 4, 5, 6, 7호공에서 확인되었으며, OC-3호공은 화강암이 보통풍화~심한풍화된 상태로 담갈색이며, OC-4, 5, 6, 7호공은 석회암이 신선(fresh)~보통풍화된 상태로 RQD는 0~52%, TCR 19~95%를 나타내었다.

## 2.2 시험방법

### 2.2.1 시험조건

암반의 인발저항력을 산출하기 위한 단일 앵커의 재하시험은 표 3과 같이 총 24회를 실시하였다. 즉 암반조건에 따른 파괴형태 및 전단저항치를 산정하기 위하여 몇몇 암반에 대해 시험을 수행하였으며, 정착깊이에 따른 효과를 파악하기 위하여 앵커의 심도를 1.0~6.0m 까

표 3. 시험앵커의 정착깊이

심도 (m)	세일(창녕)			석회암/화강암(옥천)			계
	풍화암	연암	소계	풍화암	연암	소계	
1.0	-	-	-	-	1	1	1
1.5	-	2	2	-	-	-	2
2.0	-	3	3	-	4	4	7
2.5	-	-	-	-	2	2	2
2.6	-	-	-	-	-	-	-
3.0	-	4	4	-	2	2	6
3.7	-	3	3	-	-	-	3
4.0	-	-	-	-	-	-	-
5.0	-	-	-	-	2	2	2
6.0	-	-	-	-	1	1	1
계	-	12	12	-	12	12	24

표 4. 창녕지역 시험앵커 정착심도

번호	시추공 번호	심도(m)	번호	시추공 번호	심도(m)
1	CS-1	3.70	8	CS-8	3.00
2	CS-2	3.70	9	CS-9	3.00
3	CS-3	3.00	10	CS-10	1.50
4	CS-4	3.70	11	CS-11	2.00
5	CS-5	2.00	12	CS-12	2.00
6	CS-6	3.00	13	CS-13	1.50
7	CS-7	막힘			

지 변화시켜가면서 인발저항력 특성을 조사하였다(표 4).

옥천지역의 경우 시험에 사용한 텐던은 SD40 이형철근 D51 1개, 이형철근 D32( $A_s=7.94\text{cm}^2$ )을 1개 또는 2개를 묶어 사용하였으며, 인발시험을 실시하는 날짜에 측정된 그라우트의 일축압축강도는 340kgf/cm<sup>2</sup>, 앵커정착 깊이는 1.0cm<sup>2</sup>6.0m로 하였다. 본 지역에 앞서 시험을 수행하였던 창녕지역의 경우 텐던파괴에 앞서 암반파괴를 유도하고자 D51mm를 사용하였으나, 옥천지역의 경우 암반앵커의 4가지 파괴모드중 이제까지 볼 수 없었던 텐던의 파괴를 살펴보기 위해 D32mm를 사용하여 부착파괴 및 암반파괴 이전에 텐던의 파괴를 유도하여 그 상태를 확인하고자 시험조건을 다르게 하였다.

한편, 앵커가 인발력에 저항하기 위해서는 텐던-그라우트 및 그라우트-암반 사이의 부착강도가 확보되어야 한다. 현장시험 및 여러 연구결과 등을 종합해보면 그라우트-암반 사이는 접촉면적이 크기 때문에 그라우트의 강도를 일정규모이상 유지하고 암반등급 및 정착깊이를 적절히 조절하면 대단히 큰 부착강도를 확보할 수 있는 것으로 보고 되어있다. 따라서 본 연구에서는 부착강도에 대한 평가를 텐던-그라우트 사이에 대해서만 수행하였다. 텐던은 고강도 이형철근(SD40-D32, D51)과 상업용 앵커재(Macalloy Threadbar, D36mm와 D50mm)가 설치된 강관에 팽창제를 첨가한 시멘트밀크 그라우



사진 1. 만능시험기(UTM)

트를 주입하여 앵커체를 제작, 전력연구원 구조시험동에 있는 만능시험기(UTM : 인장 300톤, 압축 700톤 규모)를 이용하여 총 4회 인발시험을 수행하였다(사진 1). 본 시험에서는 텐던과 그라우트 사이의 부착파괴를 유도하기 위하여 강관내부에는 요철을 주었으며, 실린더의 구속에 의한 영향을 최소화하고자 실린더직경을 텐던직경의 2.5~5.0배로 충분히 이격시켰다. 또한 방식 슈이스(sheath)를 텐던과 실린더사이에 설치하여 인발에 대한 부착상태를 조사하였다.

### 2.2.2 재하방법

앵커의 인장시험은 앵커가 최종적으로 파괴가 발생하고 암반에서 분리되어 나올 때까지 실시해야 되지만, 안전상의 이유로 인장재의 항복강도( $P_y$ )의 95%, 극한강도( $P_u$ )의 80% 중 작은 쪽의 값을 최대하중으로 인발하였다. 본 시험은 단일앵커의 암반에 대한 극한 인발저항력을 파악하는 것이 목적이므로 D51이형철근을 앵커 텐던으로 사용한 경우에는 최대 반복하중을 80톤으로 하고, British Standards 8081(1989)에 제시되어 있는 표준시험방법에 따라 최대반복하중의 1/8을 단계 하중으로 하여 표 5와 같이 각 단계마다 하중을 증가시킨 직후 시간경과에 따른 변위를 측정하였으며, 80톤 이후에는 5톤 간격으로 증분을 두어 파괴될 때 까지 하중을 가하였다.

시험을 진행하는 도중에 25mm 이상의 변위가 발생하거나 시험 앵커에 불안정한 변위가 지속적으로 발생하는 경우에는 하중을 즉시 제거하고 시험을 종료하였다. 한편 앵커의 천공홀은 그라우트 내에서의 파괴를 방지하기 위하여 천공홀과 텐던의 직경비를 약 50% 확보한 100mm로 하였으며, 암반파괴를 유도하기 위해 시험시 그라우트의 강도는 340kgf/cm<sup>2</sup>로 하였다. 또한 그라

표 5. 단계별 재하하중

단계별 하중(tonf)							측정 시간 (min)
1st cycle	2nd cycle	3rd cycle	4th cycle	5th cycle	6th cycle	7th & 8th cycles	
5	5	5	5	5	5	5	3
10	20	30	40	50	60	70	3
15	25	35	45	55	65	75	3
20	30	40	50	60	70	80	15
15	20	30	40	40	50	50	3
10	10	15	20	20	30	30	3
5	5	5	5	5	5	5	3

시험중 불안정 변위 발생시 또는 25mm 이상 변위 발생시 시험 종료.

우트는 자유장 없이 지표까지 주입하여(fully grouted) 시험을 수행하였다. 앵커에 의한 암반의 파괴는 일반적으로 역 원뿔 형태가 되므로 유압잭이 암반의 인발파괴 영향범위내에 존재하면 인발저항력을 제대로 평가할 수 없기 때문에 시험체에서 유압잭까지의 거리는 3.5m로 충분히 이격시켰다.

### 2.2.3 실내 부착강도 시험

방식 슈이스(sheathing)을 한 경우와 하지 않은 경우로 나누어 BS 8081(1989)에서 제시한 반복하중을 가해 시험을 실시하였다. 그림 1과 같이 부착강도시험 장치를 제작하여 텐던 양편에는 깊이에 따라 3개씩 변형률 게이지를 부착하여 변형율을 측정하였으며, 그라우트 내부 및 방식 슈이스의 외부에도 각각 3개씩 부착하여 실제 인발력이 작용하였을 경우 슈이스의 상대변형을 측정하여 부착정도를 파악하였다.

## 3. 시험결과 및 분석

### 3.1 창녕지역 시험결과

창녕지역의 시험결과는 상대적으로 정착깊이가 작은 앵커 번호 CS-10 및 CS-12를 제외하고는 모두 70톤 이상의 한계하중을 나타냈으며, 상대적으로 높은 TCR를 나타내는 CS-11과 CS-13의 경우 정착깊이가 작지만 한계하중은 크게 측정되었다. 즉 인발저항력은 앵커의 정착깊이와 암반조건에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 본 지역의 실험결과 중 대표적인 몇몇 앵커에 대한 결과를 그림 2에 나타내었다. 즉 창녕지역 세일과 같이 수평절리가 발달되어 있어 RQD가 매우 작은 값을 나타

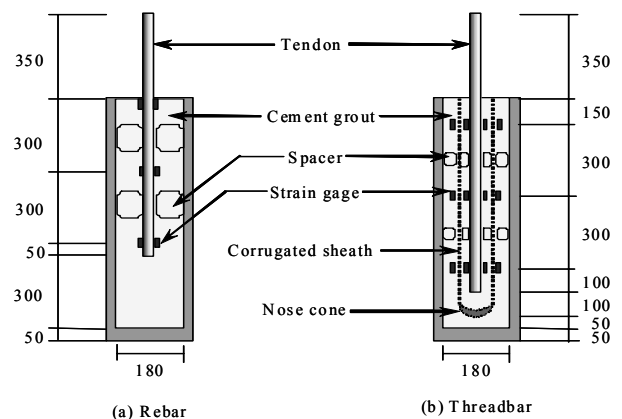
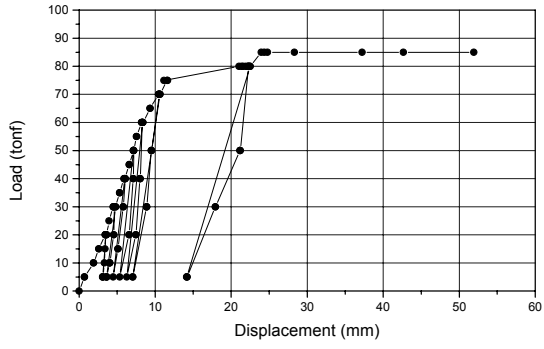
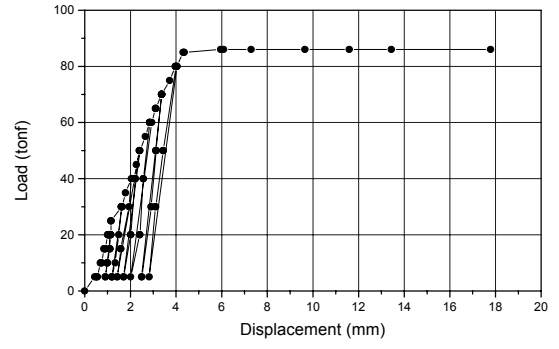


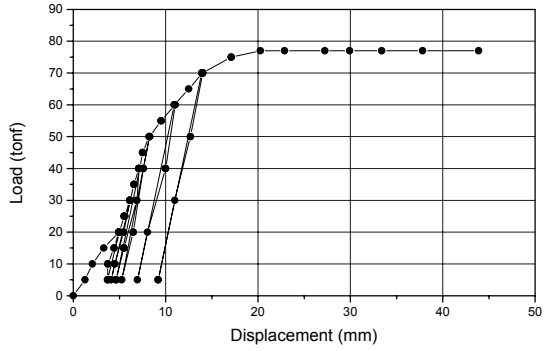
그림 1. 앵커의 부착강도 시험체(단위: mm)



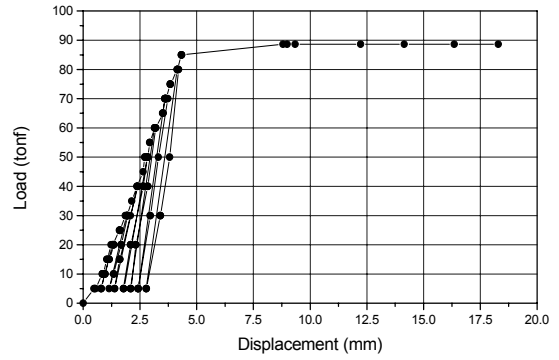
(a) CS-4



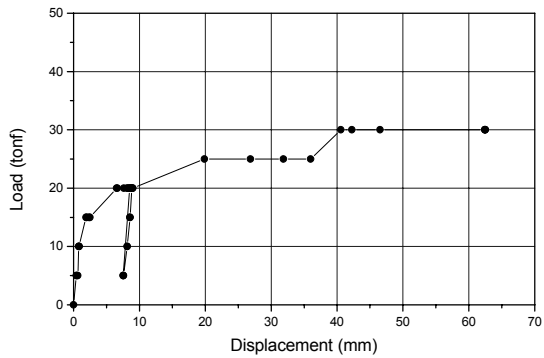
(b) CS-5



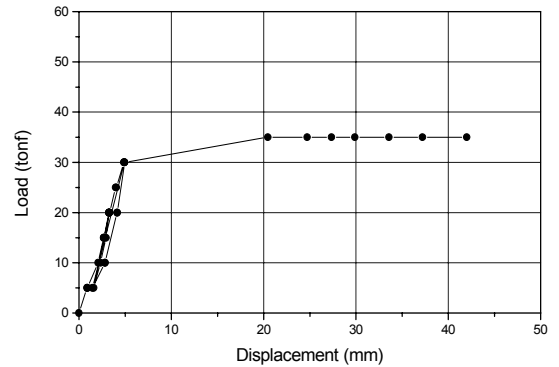
(c) CS-6



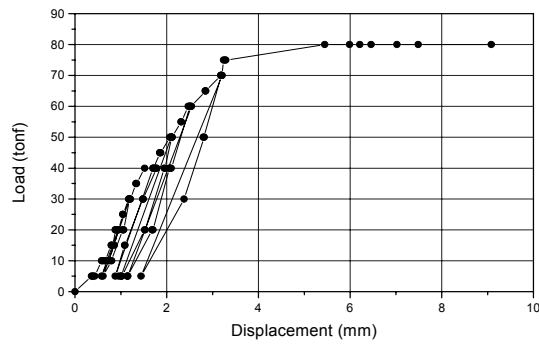
(d) CS-8



(e) CS-10



(f) CS-12



(g) CS-13

그림 2. 창녕지역 단일앵커시험 결과

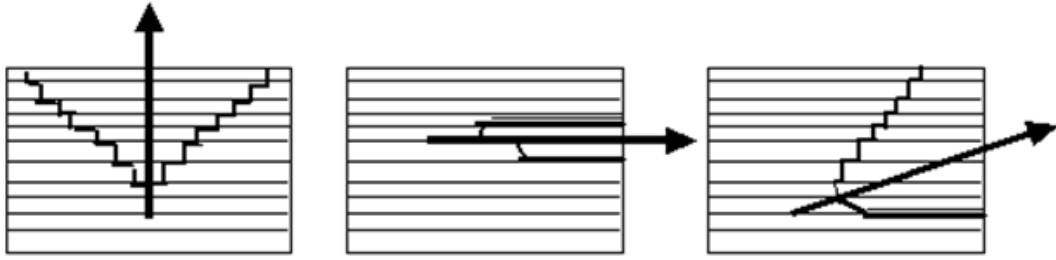


그림 3. 불연속암반에서의 일반적인 앵커파괴형태

내는 암반이라 하더라도 TCR이 크고, 정착깊이를 3.0m 이상 확보하면 절리가 없는 양호한 암반의 연암에 해당하는 인발저항력을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 지표면에 노출된 암편의 경우 손으로도 쉽게 분리되는 매우 불량한 암반이지만 실제 지중에서는 서로 치밀하게 구속되어 있고 앵커를 인발할 때 구속응력은 더욱 증가하게 되며, 절리와 앵커의 방향이 수직이므로 절리를 따른 활동의 영향이 무시할 수 있을 정도로 미소하여 절리가 전체 인발저항력에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 본 실험결과는 앵커와 절리와의 각도가 수직일 때의 결과이며, 각도가 달라질 경우 절리를 따라 파괴가 진행될 가능성이 크므로 어느 정도의 저항력 감소가 예상된다. 절리방향과 앵커가 평행을 이룰 때 인발저항력은 최소가 될 것이며, 절리방향과 앵커 각도크기에 따라 저항력의 변화가 예상되므로 이에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

한편, 앵커의 파괴는 4가지 파괴형태 중 암반의 콘파괴형태로 나타났으며, 시험앵커주변의 암반표면에 작은 균열이 발생하여 방사상으로 진행하는 형태로 나타났다. 시험후 암반면의 굴착이 불가능하여 암반내부의 파괴형상은 정확히 파악하기가 곤란하였으나, 수평절리를 따라 계단식 형태의 콘파괴가 발생한 것으로 추정된다(그림 3). 시험 결과를 살펴보면 RQD가 5%이면서 코어 회수율이 68%인 경우(CS-8) 정착깊이 3m의 앵커에서 90톤의 한계하중을 기록하여 이 지역에서 실험한 앵커 중 최대값을 기록하였다. 따라서 텐던파괴가 아닌 앵커로 인한 암반의 콘파괴가 발생할 경우 암반의 RQD 뿐만 아니라 코어회수율도 암반앵커의 인발저항력에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

한편 창녕지역의 경우 3곳의 텐던에 변형률 게이지를 설치하여 깊이에 따라 변형률을 측정하였으며, 그 중 No. CS-8 앵커시험체의 깊이별 수직변형률은 그림 4와 같다. 그림에서 보는바와 같이 변형형태는 정착깊이의

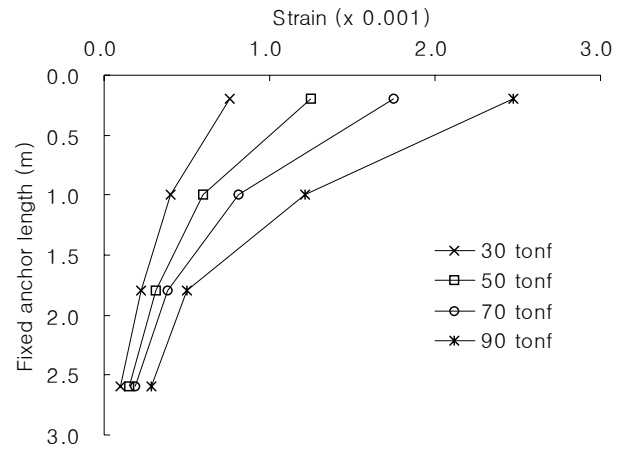


그림 4. 앵커 깊이에 따른 수직변형률 변화

약 1/2~2/3 깊이에서 변형이 급격히 증가하고 70~90톤 사이에서 앵커의 일부분이 분리(debonding) 되는 것으로 나타났다. 또한 하중에 의한 변형률은 일정한 분포가 아니고 하중증가에 따른 비선형성이 뚜렷함을 알 수 있다. 암반이 항복응력에 다다르면 하중증가에 따른 항복응력에 해당되는 변형상태가 하부로 진행되는 과정을 갖게 된다. 본 시험앵커의 경우 암반파괴에 앞서 텐던파괴 및 텐던-그라우트, 그라우트-암반의 부착파괴는 발생하지 않았다.

### 3.2 옥천지역 시험결과

옥천에서 시험한 단일앵커의 경우, 그림 5에서 보는 바와 같이 일부 D51mm텐던을 사용한 곳을 제외한 대부분 앵커가 텐던의 인장파괴로 나타났다. 시험앵커의 한계하중은 D32이형철근 1개를 사용한 경우, 30~35톤, 2개를 사용한 경우에는 약 60~65톤을 나타내고 있다. 이는 암반파괴 및 부착파괴 이전에 텐던이 인장력에 의한 항복에 도달한 경우로 주변지반조건이 양호하고 부착이 완전하다 하더라도 텐던의 항복에 의해 인발저항

력이 결정되어지는 경우이다. 한편 D51 텐던을 사용한 경우는 암반파괴 형태로 나타났으며, 정착깊이를 1.5m

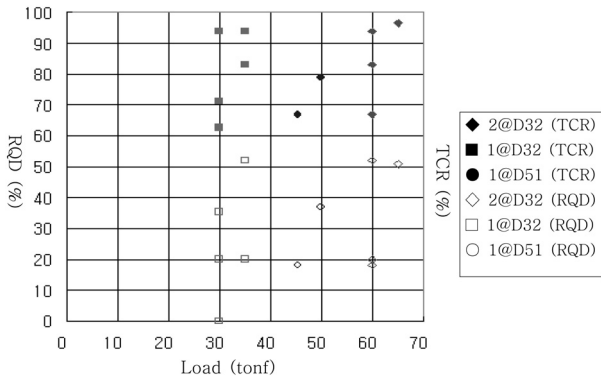


그림 5. 옥천지역 단일앵커 시험결과



그림 6. 텐던의 인장파괴(연암, 심도 6.0m)

로 짧게 설치했기 때문에 한계하중은 45~50 톤으로 작게 나타났다. 즉 D51mm 앵커의 경우 텐던이 파괴되기 이전 암반이 먼저 파괴에 이르므로 RQD나 TCR에 따라 저항력이 증가하나, D32mm의 경우 암반파괴 이전에 텐던이 먼저 파괴를 일으키므로 RQD와 TCR에 무관하게 저항력이 일정함을 알 수 있다. D32mm 2개의 경우도 단면이 2배 증가했으므로 저항력도 약 2배 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 텐던이 먼저 파괴되는 조건일 경우 앵커의 인발저항력은 암반조건과 무관함을 알 수 있다. 그림 6은 텐던이 항복을 일으켜 파괴된 경우로 인발실험을 하지 않은 철근(줄자 옆의 철근)과 비교하여 이형철근의 마디 간격이 신장된 것을 알 수 있다.

한편 D51 텐던을 사용한 일부구간에서 텐던파괴가 아닌 암반파괴가 관찰되었는데, 파괴후 균열을 측정할 결과 정착깊이의 약 1/2로 나타났다. 이와 같은 결과는 연암에서 앵커에 의한 암반의 파괴가 역원뿔 형태로써 파괴깊이는 정착깊이의 약 1/2이고, 파괴각도는 90도를 나타냈던 창녕 및 선형연구결과(Kim and Lee, 2005; 김대홍 등, 2006)와 매우 유사한 값을 보여주고 있다(그림 7).

### 3.3 실내 부착강도시험 결과

표 6은 본 시험에서 사용된 두 가지 서로 다른 형태의 앵커재 특성을 나타내었다. 즉, 앵커는 SD40 고강도 철

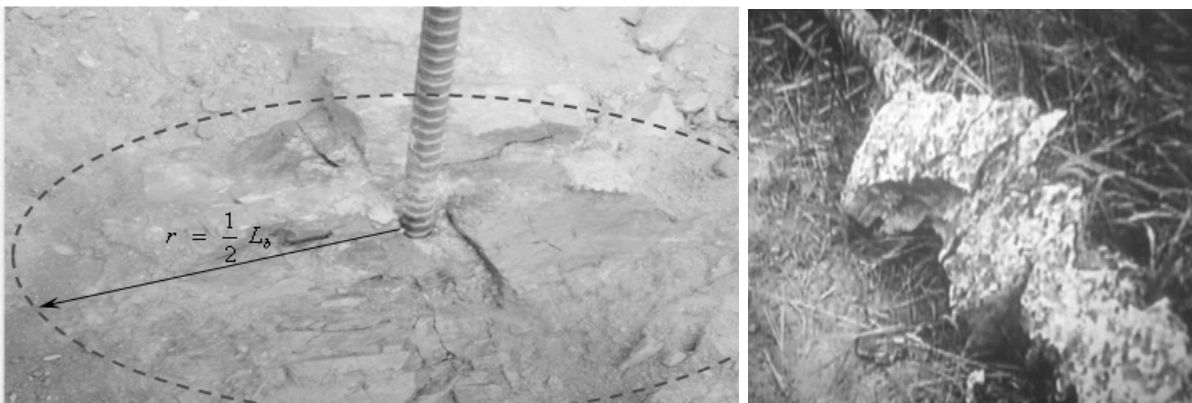
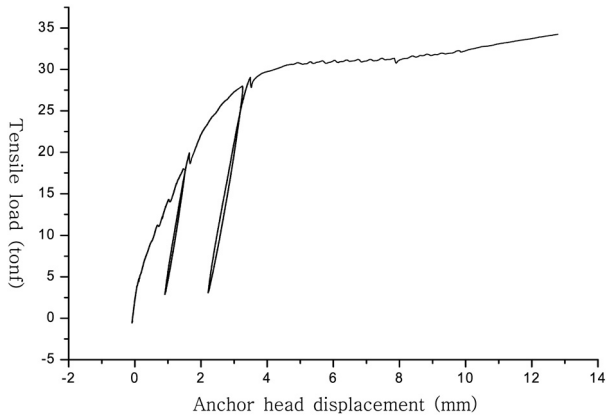


그림 7. 암반의 인발파괴 형상(연암, 심도 2.0m)

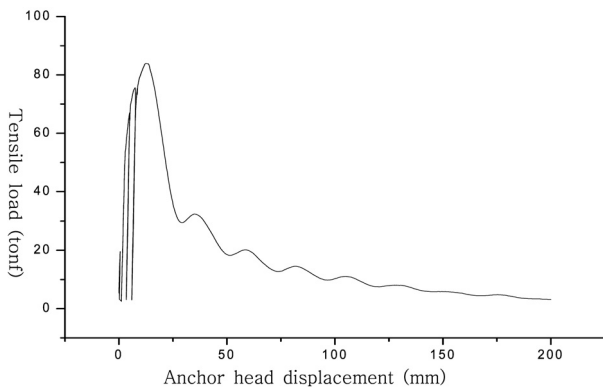
표 6. 앵커 및 시멘트 그라우트의 역학적 특성

앵커종류			인발항복 하중 (tonf)	그라우트의 일축압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
보강형 철근 (Reinforcing bar)	SD40-D32	A	30.5~33.0	340
	SD40-D51	B	77.0~83.0	340
고강도 앵커재 (Strong steel thread-bar)	φ36mm	C	60.3~64.0	340
	φ50mm	D	111.5~118.5	340

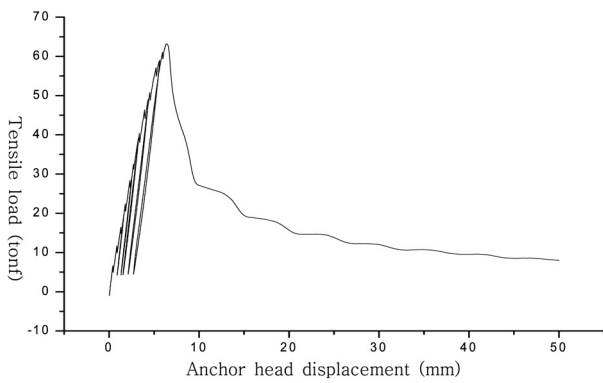




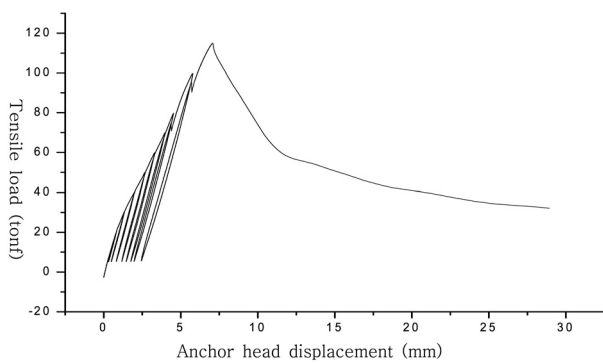
(a) Anchor A



(b) Anchor B



(c) Anchor C



(d) Anchor D

그림 8. 앵커의 부착강도 시험결과

근과 상업용 앵커재이며, 부식방지 스위스 유무에 따른 시험결과는 그림 8과 같다.

이형강봉(threadbar)의 그라우트-앵커사이의 부착강도는 주로 인발이 일어나는 동안 동원되는 역학적 맞물림(mechanical interlock)과 부착 및 마찰저항으로 발생되며, 실험결과 파괴형태는 텐던과 그라우트사이의 부착파괴로 나타났다(그림 9). 이때 부착강도는 SD40 이형철근의 경우 시멘트그라우트 압축강도의  $18.5\pm 4\%$ , 고강도 상업용 앵커 바의 경우  $21.5\pm 4\%$ 로 나타나 이형철근보다 약 16% 부착강도가 더 컸다. 따라서 텐던과 그라우트 사이의 부착강도는 그라우트 압축강도의 약 20% 내외이며, 앵커텐던의 특성에도 다소간의 영향을 받는 것으로 나타났다. 한편 방식 스위스에서의 변위는 대단히 미소하여 스위스 설치에 의한 부착강도의 감소는 무시할 수 있는 정도로 나타났다.

그림 10은 실내에서의 부착강도 인발시험결과로부터 얻은 하중과 변위와의 관계로서 본 곡선은 크게 3단계로 특성화 할 수 있다. 첫 번째 단계는 직선에 의한 근사

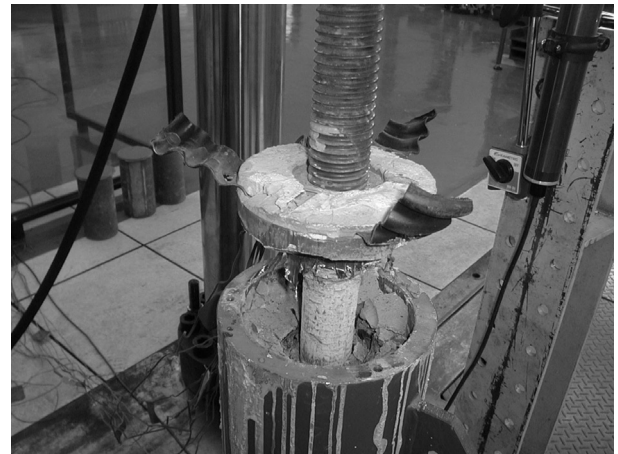


그림 9. 텐던-그라우트의 부착파괴형상

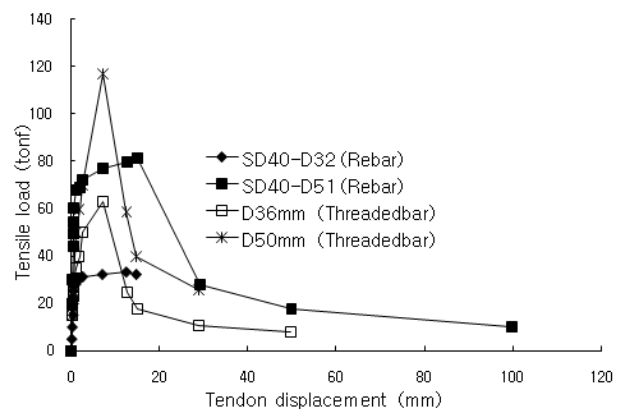


그림 10. 인발시험에 의한 하중-변위곡선

적 탄성거동을 보이며, 두 번째 단계는 극한강도에 이르기까지 탄소성 거동을 나타낸다. 마지막 단계는 진행성 분리(progressive debonding)로 인한 변형률연화(strain softening) 현상을 보여주며, 마지막으로 더 이상의 강도 변화 없이 마찰에 의한 잔류강도상태에 도달하게 된다. 본 하중단계 동안 고강도 앵커텐던은 일반 이형철근에 비해 높은 강도를 나타냄을 알 수 있으며, 분리가 일어난 후 두 앵커재는 유사한 잔류강도에 도달함을 알 수 있다. 본 시험결과는 수치해석에 의한 부착강도평가지 필요한 부착-활동모델(bond-slip model)을 합리적으로 선정하는데 유용할 것으로 판단된다.

### 3.4 시험결과 종합분석

이상에서 살펴본 바와 같이 단일앵커 시험결과를 정리해보면, 창녕의 경우 경상계 진동퇴적암으로 분류되는 세일로써 수평방향의 불연속면이 현저히 발달된 상태로 노출되어 있는 암반은 손으로도 쉽게 분리되는 불량암에 포함되나 정착깊이 3.0m 이상일 때 70톤 이상의 인발저항력을 나타냈다. 파괴는 앵커주변의 암반에 미소균열이 발생하면서 암반표면이 들어올려지는 형태로 나타났는데, 이는 인발에 따른 구속응력의 증가와 암반 표면주위의 응력집중현상에 의한 것으로 판단된다. 또한 수평절리가 발달한 지역이라 하더라도 소요의 정착깊이만 확보하면 무결합 암반의 연암에 해당하는 인발저항력을 나타내는 것을 알 수 있었으며, 이때 암반파괴형상은 절리를 따라 계단식 콘파괴를 일으킨 것으로 추정된다. 즉 절리방향과 앵커의 방향이 서로 수직일 경우 가장 큰 저항력을 발휘하며, 각도가 달라짐에 따라 어느 정도의 저항력 감소가 예상된다.

옥천의 경우 단일앵커 파괴모드는 대부분 텐던의 인장파괴로 나타났다. 그 이유는 앞서 암반파괴를 유도하기 위해 D51mm 텐던을 이용한 것과는 달리 암반파괴 이전에 텐던의 항복파괴를 유도하여 그 거동을 살펴보고자 D32mm 이형철근을 사용했기 때문이며, 옥천지역 역시 D51mm 텐던을 사용한 몇몇 시험앵커에서는 암반파괴가 발생하였다. 즉 암반앵커의 4가지 파괴모드 중 최소값이 인발저항력이기 때문에 가장 경제적인 설계를 위해서는 암반과 텐던의 파괴가 동시에 진행되도록 설계파라미터들을 결정하면 될 것이다. 그 이유는 암반앵커의 4가지 파괴모드중 텐던이 먼저 항복에 도달할 경우 앵커의 심도가 지나치게 클 수 있으며, 암반파괴가

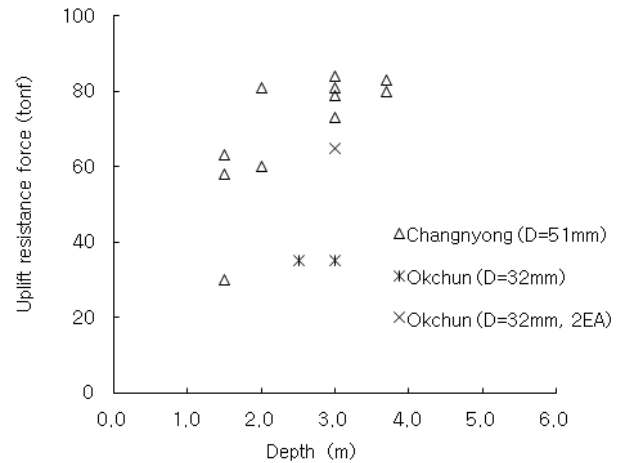


그림 11. 정착깊이에 따른 인발저항력 변화

먼저 발생할 경우는 앵커의 강도 또는 단면이 과도하게 크게 선택되었을 가능성이 있기 때문이다.

그림 11은 RQD 0~20%범위에 있는 암반에 대해 텐던종류별 앵커의 정착깊이에 따른 인발저항력의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 앵커의 정착깊이가 증가함에 따라 인발저항력이 커짐을 알 수 있다. 또한 옥천의 경우와 같이 정착깊이가 충분히 크면 전술한 바와 같이 다른 파괴모드에 앞서 앵커의 항복에 의한 파괴가 발생하므로 암반의 조건에 인발저항력은 무관함을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 앵커의 파괴형태 및 인발저항력은 암반의 강도특성, 정착깊이, 앵커의 인장강도에 따라 달라진다. 즉 풍화암 이하이면서 정착깊이가 작을 경우 부착파괴가 주류를 이루며, 정착깊이를 증가시킴으로써 암반파괴 및 텐던의 항복파괴를 유도할 수 있다. 또한 암반이 신선하고 강도가 클 경우 정착깊이가 작더라도 암반 파괴형태를 나타내며, 인발저항력이 큰 것으로 나타났다. 따라서 암반앵커를 적용하기 위해서는 일정한 강도이상의 암반에 소요의 정착깊이를 확보하여야 한다.

## 4. 결론

암반내 시공되는 단일앵커의 인발저항력과 변형특성을 평가하고자 창녕지역의 세일, 옥천지역의 화강암 및 석회암에 대한 현장인발시험과 실내 부착강도시험을 실시하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 작용하중에 따라 파괴모드를 분석한 후 지지력을

평가하여 정착깊이 및 앵커재를 선택하면 부착파괴 및 암반파괴 이전에 텐던의 인장파괴를 유도할 수 있기 때문에 텐던의 인장강도를 통해 암반앵커기초의 설계인발저항력을 산정할 수 있다.

- (2) 암반앵커의 파괴형태는 텐던의 종류 및 단면크기에 따라 다르게 나타나나, 일반적으로 연암 이상의 암반에서의 얇은 앵커(1~3.0m)의 경우 암반 파괴가, 정착심도가 큰 앵커(3m 이상)에서는 주로 텐던이 파괴되었다. 따라서 연암이상의 암반에 정착깊이 3m 이상을 확보하면 암반의 저항력을 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 암반의 파괴깊이 및 인발저항각의 크기는 암반조건 및 앵커의 정착깊이에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 연암의 경우 정착깊이의 약 1/2지점에서 역 원뿔(inverted cone) 형태의 파괴가 발생하였고 이때 인발저항각의 각도는 약 90° 이었다.
- (4) 텐던-그라우트 사이의 평균부착강도는 그라우트 일축압축강도의 18~25% 이었으며, 방식 스위스에 의한 부착강도의 감소는 스위스에 의한 영향은 무시할 수 있을 정도로 대단히 작았다.
- (5) 수평방향의 절리가 발달한 암반에 절리의 수직방향으로 앵커를 시공할 경우 앵커의 정착깊이가 3.0m 이상 확보하면 무결함 암반의 연암에 해당하는 인발저항력을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 김대홍, 이대수, 천병식, 김병홍 (2006), “암반에 근입된 부착형 앵커의 거동특성 (I) - 태안지역 편마암”, *한국지반공학회 논문집*, 제22권 제12호, pp.45-55.
2. Benmokrane, B., Chennouf, A. and Mitri, H. S. (1995), “Laboratory Evaluation of Cement-Based Grouts and Grouted Rock Anchors”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.32, No.7, pp.633-642.
3. Bruce, D. A. (1993), *The Stabilization of Concrete Dams by Post-Tensioned Rock Anchorages: The State of American Practice*, Geotech. Spec. Publ. No. 35, Geotech. Practice in Dam Rehabilitation, ASCE, New York, pp.320-332.
4. British Standards Institution (1989), *British Standard Code of Practice for Ground Anchorages*, BS8081, London, England, pp. 115-125.
5. Coates, D. F. and Yu, Y. S. (1970), “Three Dimensional Stress Distributions Around a Cylindrical Hole and Anchor”, *Proc. 2nd Int. Conf. on Rock Mechanics*, Belgrade, pp.175-182.
6. Coates, D. F. and Yu, Y. S. (1971), *Rock Anchor Design Mechanics*, Dept. of Energy Mines and Resource, Research Report No. R233, pp.78-85.
7. Farmer, I. W. (1975), “Stress Distribution along a Resin Grouted Anchor”, *Int. J. Rock Mech. & Geomech. Abstr.*, Vol.12, pp. 347-351.
8. Hinks, J. I., Burton, I. W., Peacock, A. R. and Gosschalk, E. M. (1990), “Post-Tensioning Mullardoch Dam in Scotland”, *Water Power and Dam Constr.*, Nov., pp.12-15.
9. Hobst, L. and Zajic, J. (1977), *Anchoring in Rock*, Development in Geotechnical Engineering, Vol.13, Elsevier Scient. Publ., Amsterdam, pp.25-50.
10. Ismael, N. F., Radhakrishna, H. S. and Klym, T. W. (1980), “Uplift Capacity of Anchors in Transmission Tower Design”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-98, No.5, pp.1653-1658.
11. Ismael, N. F. (1982), “Design of Shallow Rock-Anchored Foundations”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.19, No.2, pp.469-471.
12. Kim, D. H. and Lee, S. R. (2005), “Uplift Capacity of Fixed Shallow Anchors subjected to Vertical Loading in Rock”, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.15, No.4, pp.312-320.
13. Kulhawy, F. H. (1985), “Uplift Behavior of Shallow Anchors”, Proc. of a Session sponsored by the Geotech. Eng. Division of ASCE, pp.238-245.
14. Littlejohn, G. S. and Bruce, D. A. (1977), “Rock Anchors-Design and Quality Control”, *Proc. 16th Symp. on Rock Mechanics, University of Minnesota*, pp.77-88.
15. Littlejohn, G. S. (1970), *Soil Anchors*, I.C.E. Conference on Ground Engineering, London, pp.115-120.
16. Nicholson, P. J., Uranowski, D. D. and Wycliffe-Jones, P. T. (1982), *Permanent Ground Anchors-Nicholson Design Criteria*, Fed. Highway Adm. Office of Research and Development, U.S. Dept. Transp., Report No. FHWA/RD-81/151, Washington, D.C., pp.1-25.
17. Saliman, 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, pp.15-38.
18. U. S. Army Corps of Engineers (1994), *Engineering and Design Rock Foundations*, EM 1110-1-2908, Nov. 30, pp.69-73.
19. Xanthakos, P. P. (1991), *Ground Anchors and Anchored Structures*, John Wiley & Sons, Inc. pp.130-139.

(접수일자 2008. 8. 7, 심사완료일 2009. 10. 12)