

풍화암에 시공된 부력저항 앵커의 거동특성

Characteristics of Anchor Behavior Resisting Buoyancy Forces in the Weathered Rock

유남재¹⁾, Nam-Jae Yoo, 이근착²⁾, Gun-Chag Lee, 정길수³⁾, Gil-Soo Jeong, 박병수⁴⁾, Byung-Soo Park

1) 강원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

2) 지완테크 대표이사, President, G-1 Tech Co.

3) 강원대학교 토목공학과 연구원, Researcher, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

4) 지완테크 이사, Director, G-1 Tech Co.

SYNOPSIS : This study contains actual scaled site experiments on mediation factors affecting ultimate pulling force of the buoyancy resisting anchor which is installed underground water level suffering buoyancy force and breaking mechanism. Site buoyancy test selected the buoyancy acting site where acting buoyancy to the station structure since the stream and reservoir is neighbored to the vicinity ground and executed site experiments leading to variation of anchoring length, drilling diameter and tendon diameter at the weathered rock ground.

The test result showed that pulling force getting increased more and more proportionate to increase of anchoring length, drilling diameter and tendon diameter, and as a result of analysis for correlations between anchoring length-ultimate limited load and drilling diameter-ultimate load (on the basis of 254mm settlement), modulus of correlation showed very high relation 0.9 and 0.99 respectively and correlation formular showed the limited load is increasing proportionate to cubic meters of anchoring length as well as the ultimate load proportionate to alignment of drilling diameter. It is also showed that limited load increased about 42.5% from 392kN to 559kN as a result of change the tendon diameter to 36mm and 50mm.

Keywords : ultimate pulling force, buoyancy resisting anchor, tendon,

1. 서 론

지하수위 아래에 축조되는 지하구조물은 상향의 정수압인 부력이 작용하게 되며, 구조물의 용도와 지반성상에 따라 일시적으로 큰 양압력이 발생할 수 있다. 이러한 상향력을 억제하기 위해 부력앵커의 사용이 증가되고 있는 추세이지만 구조물 형태에 따른 부력앵커의 배치형태 및 설치기준이 명확하지 않아 과다설계 내지는 과소설계의 위험성을 안고 있다.

1980년대 들어 세계 각국에서는 앵커에 관한 기준화가 진행되었고 특히 영구앵커에 관한 조사, 유지관리 등에 역점을 두게 되었다. 외국의 경우 독일 DIN4125(Deutsche Industrie Normen, 1990), 미국 PTI(Post Tensioning Institute, 1996), 영국 BSI(British Standard Institution, 1989) 이외에도 일본 JSF D1-77 & JSF D1-88, 스위스 SN533-91등과 같이 그라운드 앵커에 대한 시방기준들이 제정되어 있으나 국내의 경우에는 앵커의 설계, 시공, 관리, 해석에 대한 적절한 기준이 아직 없어 이에 대한 기준마련 등이 시급한 실정이다.

한편, 최근 우리나라에는 송진탑, 교대구조물 등의 안정 및 양압력을 받는 기초구조물의 대책공법으로 앵커가 사용되고 있는 등 그 적용 범위가 확대되고 있는 추세이다. 이러한 지하수위 영향을 받는 구조물의 기초와 연약 지반 상에 설치된 송진탑 등에 앵커를 사용할 경우 앵커의 인발저항 메카니즘에 따라 구조물의 안정성이 우려되며, 이에 대한 규명작업은 현장 인발실험을 토대로 실시되는 것이 바람직하나 현장실험을 위한 접근이 용이하지 않고 흙의 교란정도가 심하여 현장 실험 결과에 대한 신뢰성에 문제점을 내포하고 있다.

따라서 본 논문에서는 풍화암에 부력방지용 앵커를 근입시킨 실규모 현장시험에서 앵커의 정착깊이, 천공직경을 변화시킨 실험을 수행하여 부력앵커의 설치에 따른 하중-변위 특성 및 지반거동 양상에 대해 알아보려고 하였다.

2. 현장 앵커시험

2.1 지반조건 및 실험내용

그림 1에 나타낸 바와 같이 현장시험을 실시한 지반조건은 국내의 대표적인 암종인 풍화암 지반으로 본 지역의 좌측에는 항상 만수위 상태의 저수지가 위치하고 있어 지반굴착시 지하 5m 깊이에서 지하수면이 발생하는 구간이다. 시험지반의 지층은 매립토와 퇴적토, 풍화토, 풍화암층으로 구성되어 있으나 시험시 그림에 붉은 실선으로 표시한 바와 같이 풍화토 등의 상부 지층을 굴착하고 풍화암층에서 시험을 실시하였다.

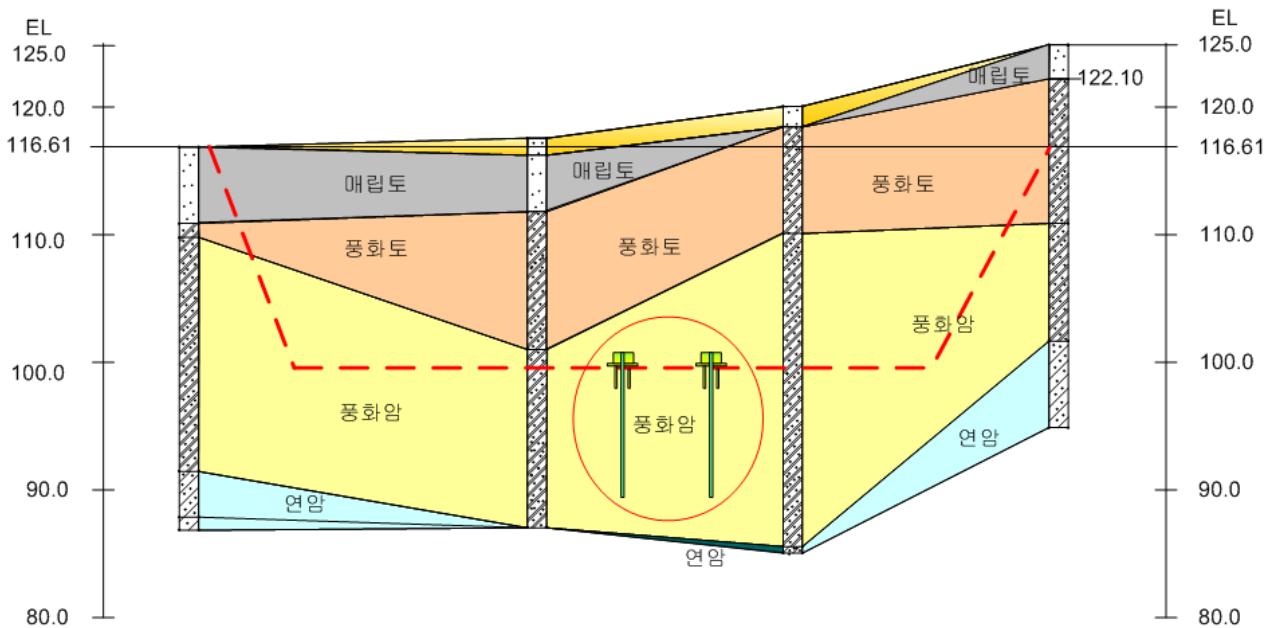


그림 1. 시험구간의 지질 주상도

한편, 현장시험은 그림 2와 표 1에 정리한 바와 같이 정착깊이, 천공직경 등을 변화시키는 매개변수 시험으로 진행되었으며 각 시험에서는 단계별 반복 인발하중 시험방법으로 실시하였다.

표 1. 현장시험의 종류

번호	총길이 (m)	잭길이, L_j (m)	정착길이, L_b (m)	앵커직경 (mm)	천공직경 (mm)
D-1	5	0.15	2	50	165
D-2	5	0.15	3	50	165
D-3	5	0.15	5	50	165
D-4	5	0.15	7	50	165
D-5	5	0.15	3	36	165
D-6	7	0.15	3	50	125
D-7	9	0.15	3	50	108

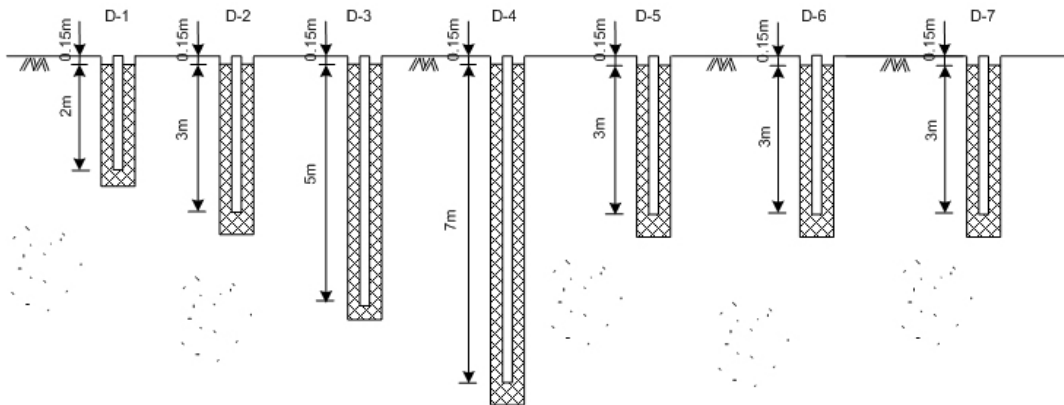


그림 2. 앵커시험별 정착길이

2.2 장비구성 및 하중조건

본 앵커 시험에 대한 전체적인 개요를 그림 3에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 지표면에 Support Beam을 대칭되게 설치한 후 Support Beam 상부에 Main Beam을 설치하였고, Main Beam 상부에 인발력을 가하기 위한 Hydraulic Center Hole Jack을 설치하고 인발하중 측정을 위해 250ton Load Cell을 설치하였다. 또한, Load Cell 상하에 Bearing Plate를 설치한 후 상부에 Nut 를 체결하여 고정하고 텐던에 LVDT 측정을 위한 Jig를 부착하고 양쪽에 Reference Beam을 설치하여 0.01mm정도를 갖는 LVDT로 텐던의 변위를 측정하였다.

한편, 앵커의 시험은 최종적인 파괴를 유도할 때까지 실시해야 하지만 일반적으로 안전 등의 이유로 인장재 항복강도의 95% 또는 극한강도의 80% 중 작은 값을 한도로 하고 경우에 따라서는 비례한계 강도를 상한으로 한다. 따라서 본 시험은 표 3에 나타낸 바와 같이 현장조건 및 앵커의 조건에 따라 항복강도 및 극한강도, 안전하중에 의해 계획 최대시험하중을 산정한 결과 계획 최대시험하중을 1303kN (133ton)으로 결정하였다.

3. 결과 분석

본 시험은 앵커의 극한인발력과 파괴메카니즘에 영향을 미치는 인자중 앵커의 정착길이, 천공직경 등을 변화시키는 매개변수적 시험으로, 앵커의 정착길이는 2, 3, 5, 7m로 4회 변화시켰으며 천공직경은 108, 125, 165mm로 3회 변화시켜 총 7회에 걸친 시험을 실시하였다.

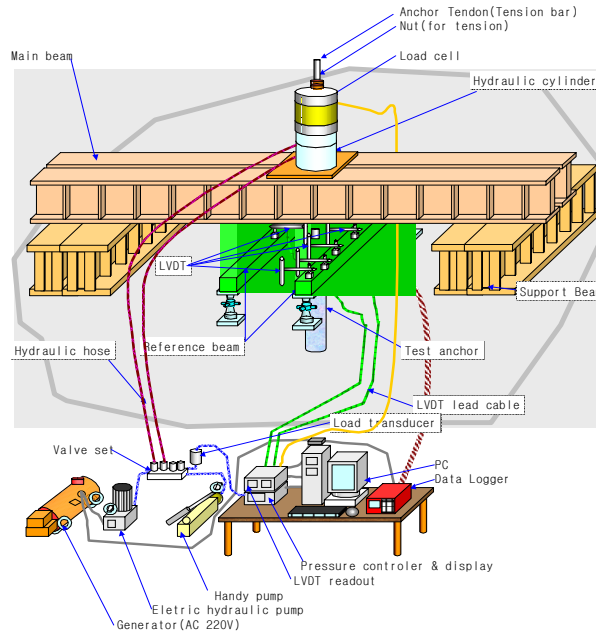


그림 3. 앵커시험 개요도

표 2. Bar Type 앵커의 특성

항 목	규 격
Bar 가닥수(N)	1
Bar 외경(ϕ , mm)	50.0
Bar 단면적(A , cm^2)	19.6
탄성계수(E , MPa)	17.014×10^3
항복강도(P_y , MPa)	83.6
극한강도(P_u , MPa)	103.1

표 3. 계획최대시험하중

구 분	내 용
하 중 조 건	최대시험하중
설계하중	980.07 kN/본 (100tonf/본)
최대 시험 하중	안전하중 조건 $1.33 \times \text{설계하중} = 1.33 \times 980.07 = 1304.28 \text{ kN/본 (133tonf/본)}$
	항복강도 조건 $0.95 \times P_y \times A \times N = 0.95 \times 83.553 \times 19.635 \times 1 = 1558.53 \text{ kN/본 (160tonf/본)}$
	극한강도 조건 $0.8 \times P_u \times A \times N = 0.8 \times 103.068 \times 19.635 \times 1 = 1618.99 \text{ kN/본 (165tonf/본)}$
여기서, A=앵커단면적, N=앵커갯수	

3.1 앵커 정착길이 영향

천공직경 165mm, 앵커직경 50mm 조건에서 앵커의 정착길이를 2, 4, 7, 9m 로 4회 변화시킨 앵커 인발시험을 실시하여 앵커의 정착길이가 한계하중 및 파괴 메카니즘에 미치는 영향을 검토하여 그림 4에 하중-변위 곡선을 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 앵커의 정착길이가 2, 3, 5, 7m로 증가함에 따라 하중-변위 곡선의 초기 기울기가 급해지는 것으로 나타났으며 한계하중도 각각 196, 559, 588, 1569 kN으로 증가하였다. 또한, 단계별 하중의 증가에 따라 탄성 신장량으로 부터 유효 자유길이를 역산하여 앵커 정착부의 기능을 검토한 결과, 앵커 정착부의 길이가 2, 3, 5, 7m로 증가함에 따라 정착부가 50% 파단에 이르는 하중은 각각 216, 558, 588, 1569 kN으로 증가함을 나타내었으며 정착길이가 5, 7m 인 경우는 한계하중에서 정착부가 100% 소실되는 것으로 나타났다.

한편, 앵커정착길이 변화에 대한 현장인발시험 결과로 부터 앵커 정착길이-한계하중의 상관관계를 알아보고자 회귀분석을 실시하여 그림 5에 도시하였다. 회귀분석은 앵커헤드부가 25.4mm(=1inch.) 침하하

였을때 ($L_{tt} > 25.4\text{mm}$)와 Creep 계수 K_d 가 2 이상일때 ($K_d > 2$)의 조건에 대하여 한계 하중-앵커 정착길이의 상관성을 알아보았다. 그림에 나타난 바와 같이 앵커 정착길이-한계하중의 관계는 다음식 (1), (2)로 $L_{tt} > 25.4\text{mm}$ 인 경우 $R^2=0.945$, $K_d > 2$ 인 경우 $R^2=0.980$ 로 나타나 매우 높은 상관성을 나타내었으며 앵커 그라우트체의 한계내에서는 앵커 정착길이의 3제곱에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다.

$$P_{lim} = 1.4342 \times L^3 - 12.201 \times L^2 + 37.774 \times L \quad (K_d > 2 \text{인 경우}) \quad (1)$$

$$P_{lim} = 1.7377 \times L^3 - 15.876 \times L^2 + 48.722 \times L \quad (L_{tt} > 25.4\text{mm인 경우}) \quad (2)$$

이러한 결과는 앵커의 파괴메카니즘이 그라우트와 지반의 마찰 파괴 일때는 한계하중이 선형적으로 증가하지만, 본 시험과 같은 비교적 짧은 앵커로 시험한 경우 부분적인 앵커 주변의 파괴와 정착부 지반의 파괴를 동반하는 즉, Cone 형태의 파괴가 일어나므로 이러한 경우 설계시 마찰 파괴 개념보다는 지반의 파괴부분이 정착길이의 지수함수에 비례하여 나타나는 것으로 하여야 함을 나타낸다고 할 수 있다.

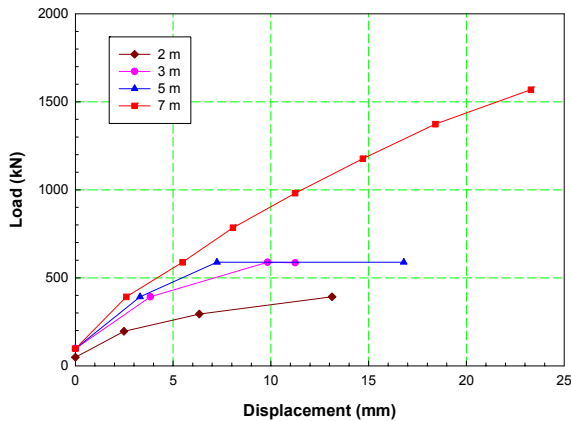


그림 4. 정착길이에 따른 하중-변위 곡선

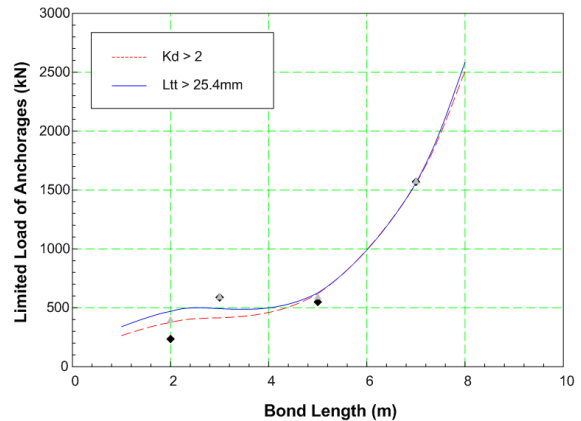


그림 5. 정착길이-한계하중의 상관관계

3.2 앵커 천공직경의 영향

앵커 천공직경의 변화가 한계하중에 미치는 영향을 알아보기 위하여 앵커직경 50mm, 앵커의 정착길이 3m의 조건에서 앵커의 천공직경을 108, 125, 165mm로 3회 변화시킨 앵커 시험을 실시하였다. 그림 6은 천공직경 변화에 따른 하중-변위 곡선을 도시한 것으로 천공직경이 증가함에 따라 극한하중이 증가하였으며 하중-변위 곡선의 초기접선 기울기도 증가함을 볼 수 있다.

한편, 앵커 헤드부에서의 변위량 25.4mm(=1inch.)일때와 Creep 계수 K_d 가 2 이상일때의 한계하중을 검토하여 그림 7에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 천공직경 125mm와 108mm에서 $K_d > 2$ 일 때의 한계하중에 대한 자료가 분산은 다소 있으나 전체적으로 천공직경이 증가함에 따라 한계하중도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 천공직경별 극한 하중곡선을 선형회귀 분석한 결과 상관식은 다음 식 (3), (4)와 같으며 $K_d > 2$ 일때는 $R^2=0.78$ 의 상관성을 나타내었으나 $L_{tt} > 25.4\text{mm}$ 일때는 $R^2=0.99$ 의 아주 높은 상관성을 나타내어 천공직경에 비례하여 극한하중이 증가함을 나타내었다. 이는 그라우트와 지반과의 주변마찰력이 선형적으로 증가함을 의미하는 것으로 본 앵커의 그라우트는 지반보다 강성이 상대적으로 크고 균질한 풍화암 지반에 설치되었음을 고려할 때 일정한 단위 주변마찰력을 갖는 지반에서의 앵커의 극한하중은 유효 그라우트 천공직경에 선형 비례하여 증가함을 확인 할 수 있었다.

$$P_{lim} = 0.4917 \times L \quad (K_d > 2 \text{인 경우}) \quad (3)$$

$$P_{lim} = 0.4788 \times L \quad (L_H > 25.4\text{mm인 경우})$$

(4)

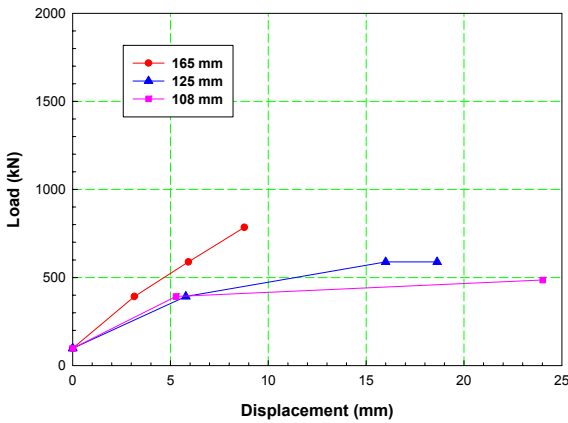


그림 6. 천공직경에 따른 하중-변위 곡선

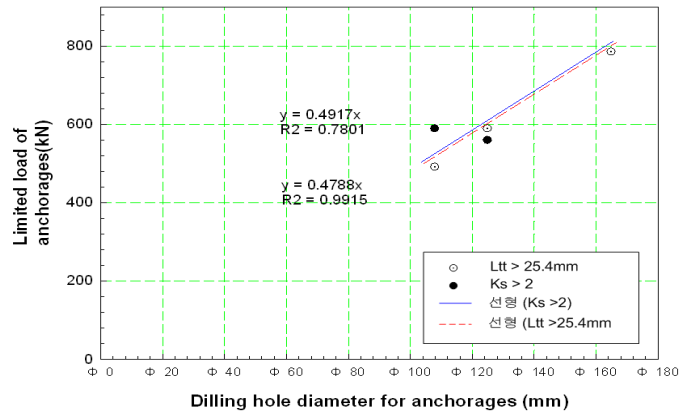


그림 7. 천공직경-극한하중의 상관관계

3.3 파괴메카니즘

현재 앵커의 설계개념은 앵커의 근입깊이를 충분히 확보하여 암반 및 그라우트의 파괴가 일어나기 전에 텐던의 연성파괴가 일어나도록 유도하고 있다. 또한, 단일앵커의 파괴는 암반의 역원뿔 형태로 인발되는 것으로 가정하고 있는데 콘의 깊이는 암반상태 및 앵커의 정착깊이에 따라 앵커의 바닥 및 중간 또는 그 사이에서 발생하는 것으로 하고 파괴각은 60~120°로 다양하게 적용하고 있다(Littlejohn, 1975). 한편, 앵커의 인발지지력은 콘의 무게와 콘 표면의 전단저항력의 합으로 나타내고 있으나 인발지지력을 정확하게 평가하기 위해서는 다양한 앵커의 현장시험을 실시하여 파괴메카니즘을 분석한후 이를 반영하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 앵커의 인발에 따른 지반거동 및 파괴메카니즘을 알아보기 위하여 지표면에 텐던으로 부터 수평으로 30, 60, 90, 120cm 간격으로 다이얼 게이지를 설치하여 인발시 단계별 하중에 대한 지표 지반거동을 측정하였다.

그림 8와 그림 9에 정착깊이에 따른 부착파괴 형상과 그림 10~13는 앵커의 정착깊이 2, 3, 5, 7m 에 대한 각 하중단계별로 측정된 지반변위 결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체적으로 앵커의 인발에 따른 파괴메카니즘은 앵커 주위에 십자형(+) 균열이 발생한 후 균열과 지반의 용기가 방사상으로 진행되면서 파괴에 이르는 것으로 나타났다. 또한, 앵커의 정착깊이가 가장 짧은 2m 앵커에서는 텐던으로 부터 수평방향으로 약 1.2m 까지 지반의 용기가 발생하여 가장 넓게 수평방향으로 진행된 파괴 형태를 나타내었으나 앵커의 정착깊이가 3, 5, 7m에 대한 시험결과는 텐던으로부터 수평방향으로 약 90cm 떨어진 지점까지는 인발하중에 대하여 지표면의 변위가 발생하였으나 앵커체의 연직변위에 비해 현저히 작은 값이 관측되었고 지반의 변위는 앵커체 부근에서 집중되어 발생하였다.

한편, 실험후 앵커체의 파괴각을 개략적으로 측정하여 표 7에 나타내었다. 표에 나타낸 바와 같이 앵커의 정착깊이가 2, 3, 5, 7m 로 증가함에 따라 파괴각은 각각 61.9°, 33.4°, 20.4°, 14.6°로 감소하는 것으로 관찰되었다.

따라서, 이상의 결과로 부터 앵커의 정착깊이가 짧아 질수록 콘 파괴 양상이 두드러지며 정착깊이가 길어질수록 앵커체의 파괴각 범위가 점차 작아져 콘 파괴보다는 그라우트와 지반의 경계면에서 마찰 파괴가 발생하는 것으로 판단된다.



그림 8. 정착길이 2m 일때의 콘크리트 손상



그림 9. 정착길이 5m 일때의 부착파괴 형상

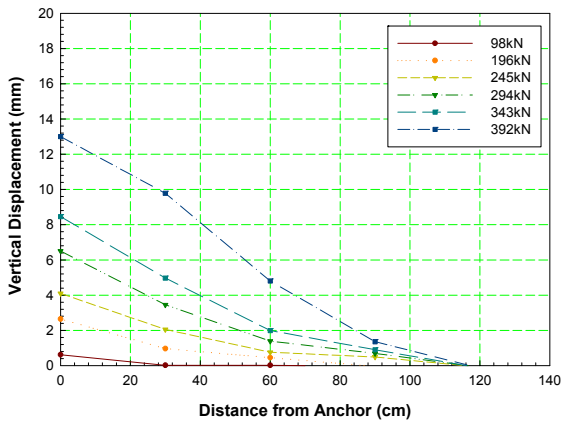


그림 10. 앵커 인발에 따른 지반 변위(정착길이 2m)

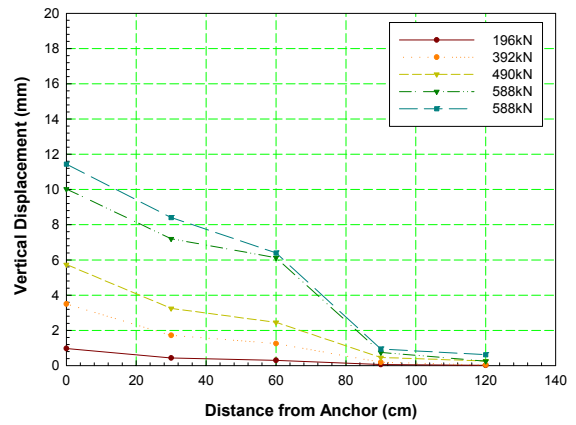


그림 11. 앵커 인발에 따른 지반 변위(정착길이 3m)

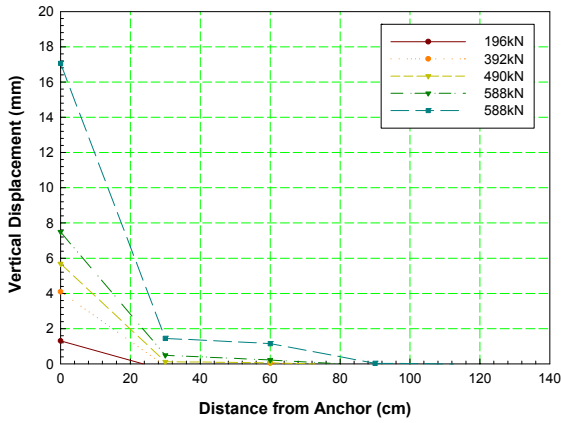


그림 12. 앵커 인발에 따른 지반 변위(정착길이 5m)

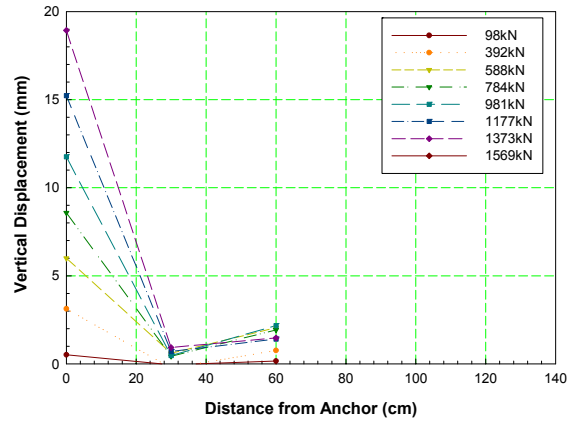


그림 13. 앵커 인발에 따른 지반 변위(정착길이 7m)

표 7. 앵커의 정착길이에 대한 파괴각 및 파괴범위

앵커의 정착길이	2m	3m	5m	7m
파괴각의 범위 (m)	1.2m	0.9m	0.9m	0.9m
파괴각(°)	61.9	33.4	20.4	14.6

4. 결 론

본 연구에서는 지하수위 아래 풍화암 지반에 축조되어 양압력을 받는 구조물에 부력저항용 Bar Type 앵커를 설치하여 앵커의 정착길이 및 천공직경 등을 변화시킨 실규모 현장실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 앵커의 정착길이를 2, 4, 7, 9m로 변화시킨 결과, 하중-변위 곡선의 초기 기울기도 급하게 나타났으며 한계하중도 각각 196, 559, 588, 1569 kN으로 증가하였다.
- 2) 앵커 정착길이 변화에 대한 인발시험 결과로 부터 앵커헤드부가 25.4mm 침하하였을때와 Creep 계수가 2이상일때의 두 경우에 대한 정착길이-한계하중에 대한 상관성을 분석한 결과 R^2 이 각각 0.945, 0.98의 높은 상관성을 나타내었으며 상관식은 앵커 정착길이의 3제곱에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다.
- 3) 앵커 천공직경을 108, 125, 165mm로 변화시킨 결과, 천공직경이 증가함에 따라 극한하중이 증가하였으며 하중-변위곡선의 초기 접선기울기도 증가하였다.
- 4) 앵커헤드부가 25.4mm 침하하였을때 ($L_H > 25.4\text{mm}$)와 Creep 계수가 2이상일때의 두 경우에 대한 천공직경-극한하중에 대한 상관성을 분석한 결과 R^2 이 각각 0.99, 0.78로 나타나 $L_H > 25.4\text{mm}$ 일때는 매우 높은 상관성을 나타내었으며 천공직경에 비례하여 극한하중이 선형적으로 증가함을 나타내었다.
- 5) 앵커의 정착길이 변화에 대한 앵커체의 파괴각과 수평변위 범위를 측정된 결과 앵커의 정착길이가 2, 3, 5, 7m로 증가함에 따라 파괴각은 각각 61.9, 33.4, 20.4, 14.6°로 감소하는 것으로 나타나 앵커의 정착길이가 짧아질수록 큰 파괴 양상이 두드러지며 정착길이가 길어질수록 앵커체의 파괴각 범위가 작아져 큰 파괴보다는 그라우트와 지반의 경계면에서 마찰파괴가 발생하였다.

참고문헌

1. BSI.(1989), "Ground Anchorages", BS 8081, British Standard Code of Practice, pp. 77~84.
2. DIN4125.(1990), "Ground Anchorages Design, Construction and Testing", Deutsche Industrie Norm, pp. 341~389.
3. Littlejohn G. S. and Bruce, D. A.(1975), "Rock Anchor-Design and Quality Control", Proc. 16th Symp. on Rock Mechanics, U. of Minnesota. pp. 77~88.
4. PTI.(1996), "Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors", Post-Tension Institute.