

## 펄스방전 확공형 앵커의 현장시험

### Pull-out Test of Pulse Powered Underreamed Anchors

김낙경<sup>1)</sup>, Nak-Kyung Kim, 주용선<sup>2)</sup>, Yonh-Sun Ju, 김성규<sup>3)</sup>, Sung-Kyu Kim,  
서효균<sup>4)</sup>, Hyo-Kyun Seo, 김태훈<sup>5)</sup>, Tae-Hun Kim

<sup>1)</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sungkyunkwan

<sup>2)</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, SKK Univ.

<sup>4)</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, SKK Univ.

<sup>5)</sup>대우건설기술연구소 연구원, Research Engineer, Daewoo Reserch Institute of Technology

**SYNOPSIS** : Ground anchor should not be used in soft clay, because anchor resistance can not be guaranteed. However, there is a way to increase the capacity of anchors. The pulse powered anchor is an underreamed anchor by using high voltage electrokinetic pulse energy. In this paper, conceptual introduction of the pulse powered anchor was presented. Anchor pull-out tests were performed at the Geotechnical Experimentation Site at Sungkyunkwan University in Suwon, Korea. Data were analyzed in order to verify the performance of pulse powered anchors.

**Key words** : Pulse discharge, Underreamed anchor, Ultimate pullout load, Field test, Weathered soil

## 1. 서론

그라운드 앵커공법은 인장재, 그라우트, 지반의 복합적인 거동으로 토목 및 건축 구조물을 지반에 정착시키는 공법으로 토류벽, 사면보강 등에 널리 이용된다. 최근 광역 상하수도, 대형 빌딩, 지하철 증설로 인해 대규모 도심굴착공사가 늘어나고 있다. 앵커공법은 넓은 작업환경을 제공하며 시공 후 긴장재 제거가 가능한 제거식 앵커의 등장으로 인접지반 침범으로 인한 분쟁을 최소화 할 수 있는 장점이 있어 활발히 적용되고 있다. 그러나 연약지반에서는 앵커와 지반 사이의 주변마찰저항이 충분히 발휘되지 못하여 앵커의 수를 늘리거나 길이를 늘려 비용이 증가하게 된다. 서해안시대의 개막으로 송도 신도시, 영종도 국제도시 등 연약지반에 고층빌딩을 짓는 공사가 많아지면서 연약지반 굴착에 따른 앵커의 극한인발력 확보가 필요하게 되었다. 그 대안으로 가압그라우트 앵커 공법, JSP 앵커 공법, 블레이드 앵커 공법과 같은 확공형 앵커들이 개발되었으나 주입재강도, 공벽 붕괴 등의 단점이 있다. 최근 연구되고 있는 펄스파워 확공형 앵커는 짧은 시간에 전기에너지를 방전시켜 발생하는 펄스파워를 이용한 확공형 앵커 공법으로 기존 공법에 비해 안정적인 극한인발력 확보가 가능한 공법이다. 본 연구에서는 펄스확공형 앵커의 방전 횟수에 따른 극한인발력 증대효과를 분석하기 위하여 실 대형 현장시험을 수행하여 풍화토와 Sandy Clay에서의 펄스방전 횟수에 따른 극한인발력 증대효과를 계측하였다.

## 2. 확공형 앵커

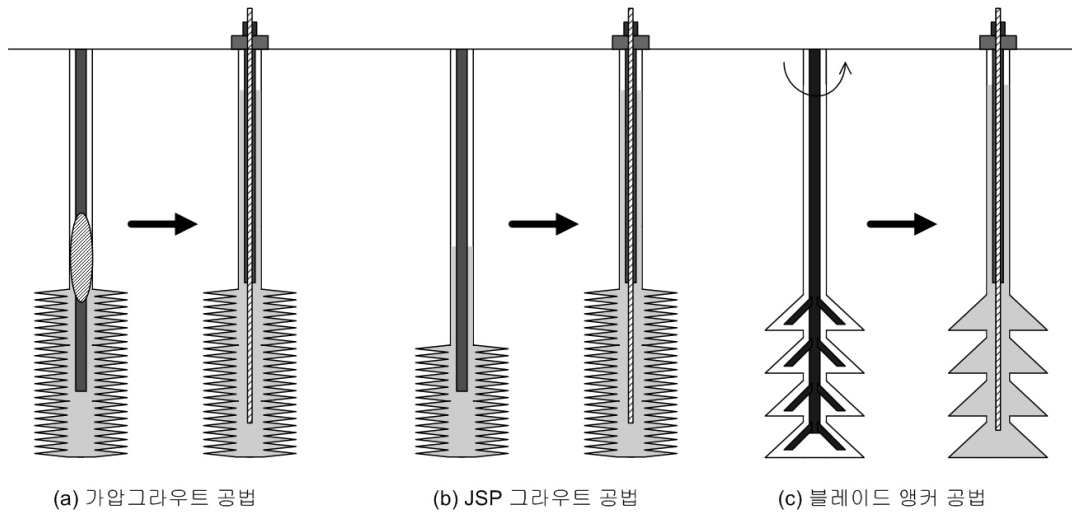


그림 1. 확공형 앵커의 종류

확공형 앵커는 앵커의 정착장에 구근을 형성하여 마찰면적을 넓히고 구근상부에서 지지력을 발생시킴으로서 일반적인 앵커공법으로 목표한 극한인발력을 확보할 수 없거나 앵커의 수평간격을 넓혀 개수를 줄여 비용을 절감하기 위한 목적으로 개발되었다. 확공형 앵커 공법은 확공 방식에 따라 팩커를 이용한 가압 그라우트식 앵커공법, JSP 그라우팅 앵커공법, 블레이드앵커공법 등으로 구분할 수 있다. 그림 1은 공법에 따른 확공형 앵커의 형상 및 확공원리를 나타낸 그림이다. (a)는 팩커를 이용한 가압그라우트 공법으로 천공 후 그라우트를 주입하고 팩커로 입구를 막아 압력을 가하여 주입재를 지반으로 침투시키는 방식이다. 극한인발력이 증가하지만 세립질 연약지반의 경우 침투가 가능한 주입재의 강도가 약하여 극한인발력 증대효과가 떨어지는 단점이 있다. (b)는 JSP 그라우팅 공법으로 그라우트를 압력을 가하여 분사 후 앵커체를 삽입하는 공법이며 그라우트의 강도가 떨어진다는 단점이 있다. (c)는 블레이드 앵커 공법으로 천공벽을 회전하는 날로 굴착하여 확공을 하는 공법이다. 이 공법은 공벽을 유지할 수 있는 단단한 점토지반에 적합하며 공벽 붕괴 우려가 있는 연약 점토지반이나 사질토 지반에서는 적용에 제한이 있다.

## 3. 펄스방전 앵커의 원리

펄스방전 앵커는 에너지 보존법칙에 의한 전기에너지의 변환을 기본 원리로 하는 공법이다. 같은 양의 전기에너지라도 방출 시간에 따라 파워가 달라진다(그림 2). 앵커 시공 시 그라우트를 주입한 상태에서 방전 전극을 삽입하고 수십  $\mu s$ 의 짧은 시간 내에 저장된 전기에너지를 방전시키면 양 전극 사이에서 큰 에너지가 발생하게 된다. 이로 인해 그라우트 내부에 고온의 열에너지가 생성되고 그라우트의 내부는 열에 의한 부피팽창을 하게 된다. 부피가 팽창한 그라우트는 외부의 차가운 매질과 만나면서 그 경계에서 높은 압력차가 발생하여 충격파(Shock Wave)가 생성되어 공벽을 타격한다. 이러한 원리로 확공된 공벽은 그라우트로 채워져 구근이 형성된다. 구근이 형성된 앵커는 마찰면적의 증가와 구근 상부의 지지력 발현으로 극한인발력이 증가하며 충격파에 의해 주변지반이 다져지는 효과도 있다. 또한 기존 확공형 앵커에서 문제가 되었던 주입재의 강도나 공벽 붕괴의 위험이 적다. 그림 3은 펄스방전에 의해 확공된 구근의 모습이며 그림 4는 펄스방전 확공형 앵커의 시공과정이다.

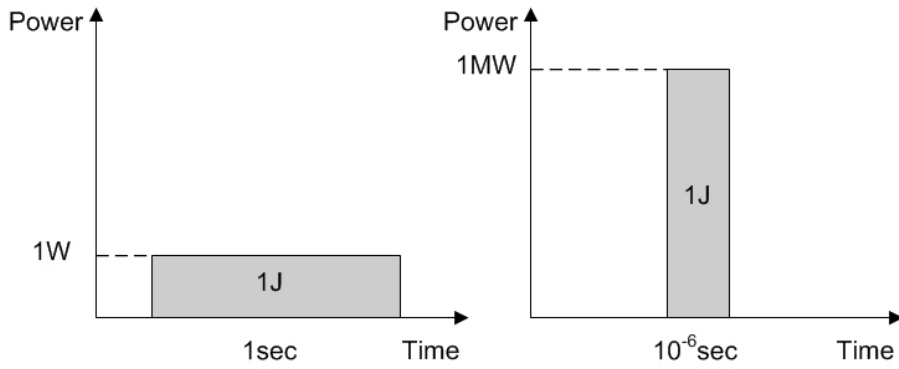


그림 2. 펄스 방전의 원리



그림 3. 확공된 구근

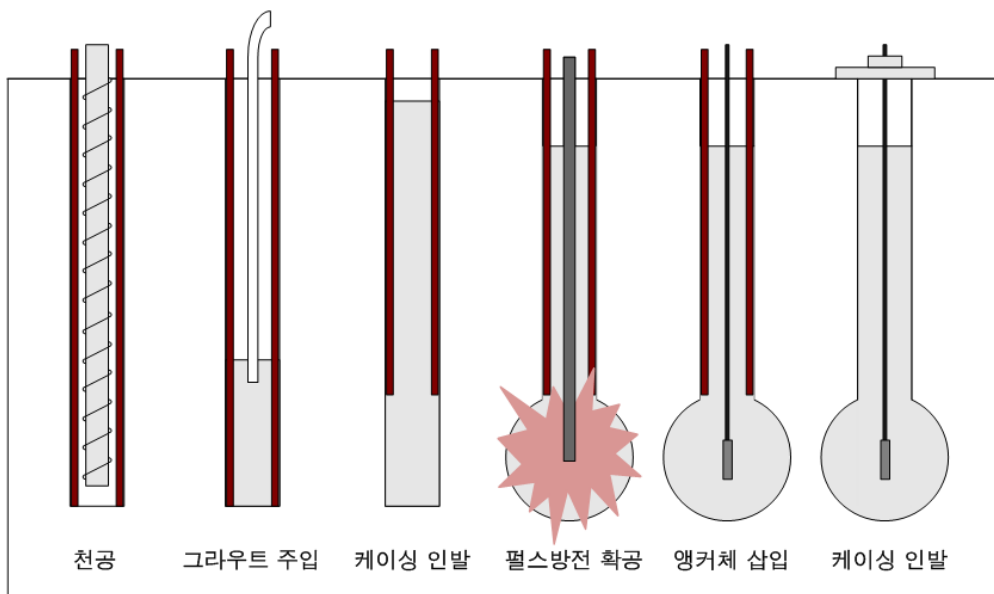


그림 4. 펄스방전 확공형 앵커의 시공 과정

## 4. 현장시험

### 4.1 지반조건 및 시험 조건

본 시험이 수행된 성균관대학교 지반시험장의 지반은 선캄브리아기에 속하는 경기 변성암 복합체와 중생대 쥐라기에 관입한 화강암류가 지반암으로 분포하고 있으며 지반주상도와 표준관입시험 결과는 그림 5~6과 같다. 시공된 앵커의 길이는 8m, 11m로, 4.5m~8m에 분포하는 Sandy Clay와 8m~15m에 분포하는 풍화토층에 시공되었다.

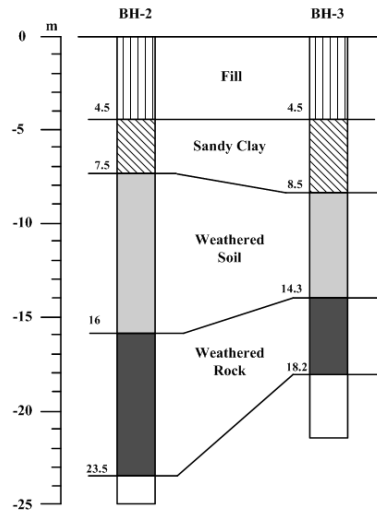


그림 5. 현장시험장 주상도

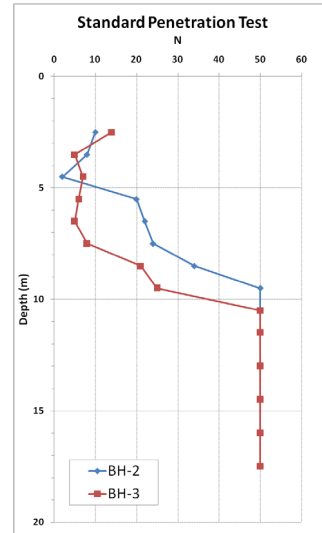


그림 6. 지반의 N치

시험앵커는 11m, 8m 길이로 풍화토층과 Sandy Clay 층에 시공되었으며 지반별로 펄스방전 횟수에 따른 극한인발력을 계측하기 위하여 방전횟수를 0회, 5회, 10회, 20회, 40회로 달리하여 각 2공씩 시공하였다. 앵커 시공 조건은 표 1과 같다.

표 1. 앵커 시공 조건

No.	지반 종류	앵커 길이	앵커 공 수	방전횟수
1,2	풍화토	11	2	0
3,4	Sandy Clay	8	2	
5,6	풍화토	11	2	5
7,8	Sandy Clay	8	2	
9,10	풍화토	11	2	10
11,12	Sandy Clay	8	2	
13,14	풍화토	11	2	20
15,16	Sandy Clay	8	2	
21,22	풍화토	11	2	40
23,24	Sandy Clay	8	2	

## 4.2 현장인발시험

풍화토 지반과 Sandy Clay 지반에 설치된 직선형 및 확공형 앵커의 극한인발력을 산정하기 위하여 AASHTO(AASHTO,1990)에서 규정한 Performance Test를 수행하였다. Performance Test는 시공된 앵커의 적합성을 판단하는 시험으로 하중재하 단계 및 절차는 표 2와 같다. 각 하중단계별 최고하중에서 하중을 유지하며 잔류변형을 측정하여 기록한다. 하중 재하는 유압실린더로 하였으며 하중계측은 Load Cell을 이용하였다. 앵커두부의 변위는 LVDT로 측정하여 기록하였으며 인발시험에 따른 재하대 침하에 따른 오차를 보정하기 위하여 광과측정 표적을 부착하여 절대변위를 측정하였다. 그림 7은 앵커 시험 개요도이다.

표 2. Performance Test 절차

로딩 사이클	하중단계	최종하중에서 변위 측정 시간 (분)
1	AL, 0.25DL	1,2,3,4,5,6,10
2	AL, 0.25DL, 0.5DL	1,2,3,4,5,6,10
3	AL, 0.25DL, 0.5DL, 0.75DL	1,2,3,4,5,6,10
4	AL, 0.25DL, 0.5DL, 0.75DL, 1.00DL	1,2,3,4,5,6,10
5	AL, 0.25DL, 0.5DL, 0.75DL, 1.00DL, 1.20DL	1,2,3,4,5,6,10
6	AL, 0.25DL, 0.5DL, 0.75DL, 1.00DL, 1.20DL, 1.33DL	1,2,3,4,5,6,10

AL : Alignment Load  
DL : Design Load

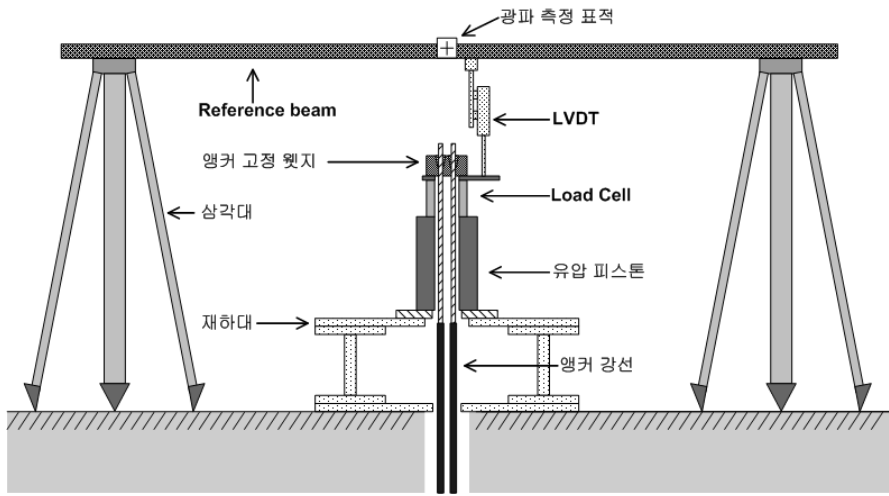


그림 7. 앵커 시험

### 4.3 극한인발력 산정법

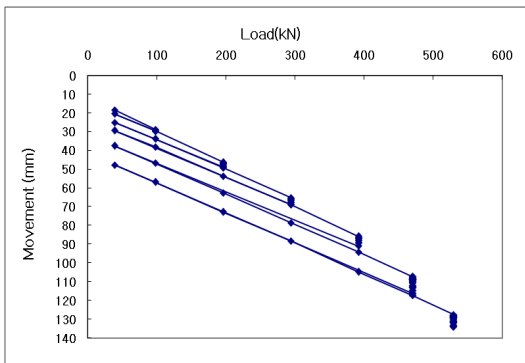


그림 8. 하중-변위곡선 (풍화도 방전40회)

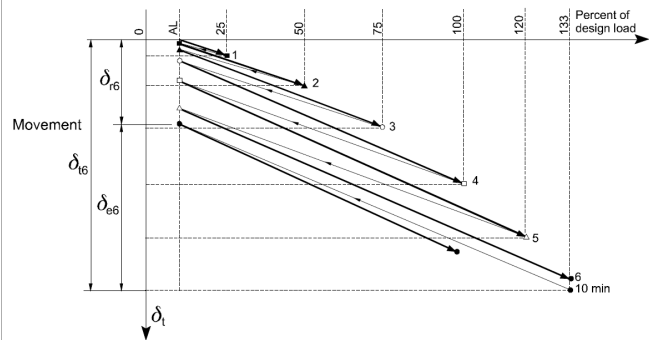


그림 9. 극한인발력 산정법

앵커의 극한인발력은 앵커 두부의 잔류변위가 앵커 직경의 1/10일 때의 하중으로 정의하고(Briaud et al., 1998) 극한인발력을 산정하기 위하여 Performance Test를 수행하였으며, 그 결과로 그림 3과 같은 하중-변위곡선을 작성하였다. 그림 4와 같이 하중-변위곡선에서 하중단계별 앵커두부의 전체변위 ( $\delta_{ti}$ )는 탄성변위( $\delta_{ei}$ )와 잔류변위( $\delta_{ri}$ )의 합으로 나타낼 수 있다(식 1).

## 5. 시험결과 분석

하중-변위 곡선을 통하여 앵커의 극한인발력을 산정하고 각 지반별 펄스방전횟수에 따른 극한인발력의 변화를 그래프로 나타내었다.

### 5.1 풍화토에서의 방전횟수에 따른 극한인발력

그림 10은 풍화토 지반에서의 펄스방전 횟수에 따른 앵커의 극한인발력의 변화를 나타낸 그래프이다. 방전횟수 0회인 직선형 앵커에서는 평균 246.9kN으로 측정된 앵커의 극한인발력이 방전횟수가 늘어남에 따라 증가하여 40회 방전에서는 434.7kN으로 76%의 극한인발력 증가를 보였다(표 3). 그러나 20회 방전까지의 급격한 극한인발력 증가에 비해 그 이후에서는 다소 적게 증가하는 경향을 보였다.

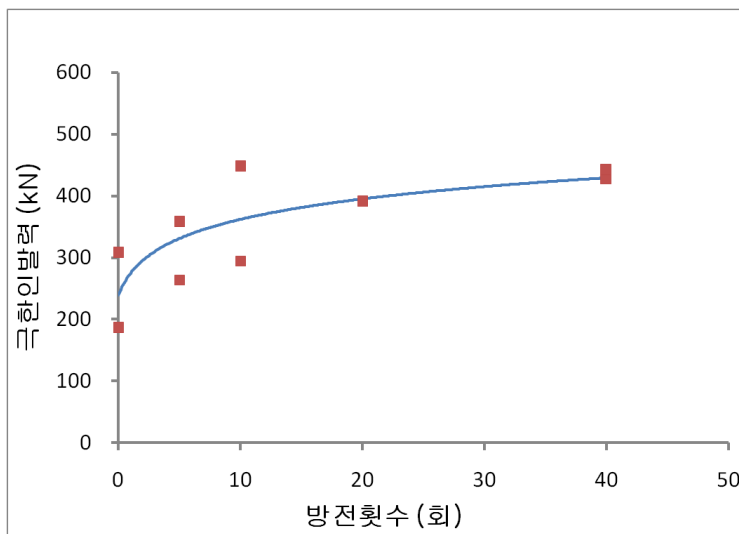


그림 10. 풍화토에서의 펄스방전 횟수에 따른 극한인발력

표 3. 풍화토에서의 펄스방전 횟수에 따른 극한인발력 증가율

방전횟수 (회)	평균 극한인발력 (kN)	극한인발력 증가율 (%)
0	246.9	0
5	310.7	25.8
10	371.3	50.4
20	390.5	58.2
40	434.7	76.1

### 5.2 Sandy Clay에서의 방전횟수에 따른 극한인발력

Sandy Clay층에 시공된 앵커의 방전횟수에 따른 극한인발력 증가경향도 풍화토층에 설치된 앵커의 경향과 유사하였다. 그림 11은 방전횟수에 따른 극한인발력의 그래프이다. 방전을 하지 않은 앵커의 경우 극한인발력은 180.4kN이며 40회 방전을 실시한 앵커의 극한인발력은 직선형 앵커에 비해 41.8% 증가한 255.8kN으로 측정되었다. Sandy Clay에 시공된 앵커에서는 풍화토와 달리 10회방전 이후 확공에 의한 극한인발력 증대 효과가 미미했다(표4).

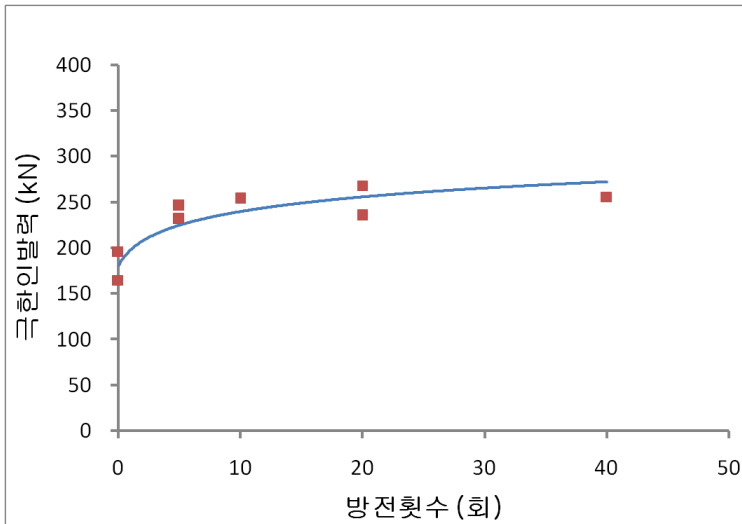


그림 11. Sandy Clay에서의 펄스방전 횟수에 따른 극한인발력

표 4. Sandy Clay에서의 펄스방전 횟수에 따른 극한인발력증가율

방전횟수 (회)	평균 극한 인발력 (kN)	극한인발력 증가율 (%)
0	180.4	0
5	239.0	32.5
10	254.0	40.8
20	251.7	39.5
40	255.8	41.8

## 6. 결론

본 연구에서는 펄스방전에 의한 확공형 앵커의 극한인발력 증대 효과를 분석하기 위하여 현장시험을 수행하여 데이터를 분석하였으며, 그로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 풍화토와 Sandy Clay에 서로 다른 방전횟수의 앵커를 시공하여 극한인발력을 계측한 결과, 방전 횟수가 증가할수록 극한인발력 또한 증가하였다.
2. 풍화토 지반에 시공된 앵커에서 방전횟수 20회까지 극한인발력이 급격히 증가하다가 그 이후에서 증가폭이 감소하였다.
3. Sandy Clay 지반에서는 방전횟수 10회까지 극한인발력이 증가하다가 10회를 넘어서면 극한인발력의 변화가 미미하였다.
4. 20회 방전을 기준으로 풍화토에서는 약 60%, Sandy Clay에서는 약 40% 극한인발력이 증가했으며, 확공에 의한 극한인발력 증대효과는 풍화토지반에서 크게 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업 건설핵심기술연구개발사업 자유공모과제(C106A1000012-06A06 001211)의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김낙경, 박완서 (2000), "Load Transfer of Ground Anchors in Clay", 한국지반공학회논문집, 제 16권, 3호, pp. 145-155
2. 김낙경 (2001), "풍화토 지반에 설치된 앵커의 인발특성", 한국지반공학회지논문집, 제17권, 4호. pp. 231-239
3. 김낙경, 김대규, 김래현, 이기환, 이우진 (2002), "현장시험에 의한 그라운드앵커 시스템의 크리프 및 단기거동 특성 연구", 대한토목학회 논문집, 제22권 6호, pp. 585-594

4. 김성규 (2000), “압축형 그라운드 앵커의 하중전이에 관한 연구” 공학석사 학위논문, 성균관 대학교
5. AASHTO (1990), “Permanent Ground Anchor Specification In-situ Soil Improvement Technique” AASHTO-AGC-ARTBA TF27 Rep., AASHTO, Washington, D.C.
6. Briaud, J. L., Powers, W. F., Weatherby, D. E. (1998), "Should Grouted Anchors Have Short Tendon Bond Length?", ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 2, pp. 110-119
7. FHWA-RD-75-130 (1975), "Lateral Support Systems and Underpinning", v.3 pp.193-204
8. Liao, H. J.; Hsu, S. T. (2003), "Uplift Behavior of Blade-Underreamed Anchors in Silty Sand", ASCE, v.129, n.6, pp. 560-568 (June 2003)
9. Littlejohn, G. S. (1970a), "Soil Anchors", Proceedings of a Conference Organized by the Institution of Civil Engineers in London, pp. 33-44
10. Littlejohn, G. S. (1980), "Design Estimation of the Ultimate Load-Holding Capacity of Ground Anchors", Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section, American Society of Civil Engineers, v.67, no.3, pp. 131-154
11. Kim, Nak-kyung (2000), "Load Transfer on Ground Anchors in Weathered Soil", Ground International Conf. On Improvement Technique, Singapore, pp.217-226.
12. Kim, Nak-Kyung (2003), "Performance of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil", ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No.2, pp. 1138-1150