한국지반공학회논문집 제25권 7호 2009년 7월 pp. 5 ~ 10 / 특별논문집 제6호 /

펄스방전 그라운드 앵커의 확공특성 및 극한인발력에 관한 연구

Expansion Ratio and Ultimate Load of Pulse-Discharge Bulbed Anchors

김 낙 경[1] Kim, Nak-Kyung
김 성 규[2] Kim, Sung-Kyu
주 용 선[3] Joo, Yong-Sun
서 효 균[4] Seo, Hyo-Kyun
김 선 주[5] Kim, Sun-Ju

Abstract

The ground anchor is not usually used in soft clay and loose sand, because the pullout resistance of anchors can not be guaranteed. However, there is a method to increase the capacity of anchors using electric discharge geotechnical technologies, which are also known as pulse discharge and electric-spark technologies. The pulse-discharge anchor has a bulbed (or underreamed) bond length that is expanded by high voltage electrokinetic pulse energy. 24 anchors were installed in the weathered soil and sandy clay at the Geotechnical Experimentation Site at Sungkyunkwan University in Suwon, Korea. In this study, in order to define a relation between expansion rate of the anchor diameter and ultimate load, anchor load tests were carried out in accordance with testing procedures by AASHTO (AASHTO 1990) and FHWA (Weatheb 1998). And then several anchors were exhumed to measure the diameter of the pulse discharge anchors.

요 지

느슨한 사질토나 연약 점토층에서는 큰 앵커 극한인발력 확보가 어렵기 때문에 앵커공법이 잘 적용되지 않는다. 그러나 앵커 천공 홀을 다양한 방법으로 확공시키는 기술이 개발되어 있으며 이러한 기술로 인하여 느슨한 사질토 및 연약 점토에서 비교적 큰 극한인발력을 확보할 수 있게 되었다. 특히, 축적된 전기에너지를 짧은 시간에 방전시키는 펄스방전 공법은 앵커 정착장을 천공 케이싱 또는 비트 직경보다 크게 확공시키는 공법이다. 총 24공의 앵커를 성균관대학교 지반시험장 풍화토 및 모래질 점토층에 시공하였다. 극한인발력과 앵커 확공비와의 관계를 확인하기 위해 AASHTO에서 규정하고 있는 시험방법으로 인발시험이 수행되었으며 펄스방전에 의해 확공된 앵커의 직경을 확인하기 위해 7공의 앵커를 굴착하였다.

Keywords : Bulbed anchor, Electric discharge, Expansion Ratio, Field test, Pullout load test, Pulse discharge, Ultimate load, Underreamed anchor

1. 서 론

그라운드앵커 공법은 토목이나 건축 구조물을 지반에 정착시키기 위하여 고강도의 인장재를 지반에 고정하여 높은 긴장력으로 도입함으로써 지반의 변형을 억제하는 공법이다. 그라운드앵커는 인발력을 확보할 수

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ., nkkim@skku.edu, 교신저자)
2 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan, Univ.)
3 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan, Univ.)
4 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan, Univ.)
5 대우건설기술연구소 연구원 (Research Engineer, Daewoo Research Institute of Technology)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

있는 암반이나 조밀한 지반에 주로 시공되며 느슨한 사질토 및 연약 점토 지반에서는 큰 극한인발력을 얻지 못하므로 이를 증대시키기 위하여 앵커 정착장에 구근을 형성하는 구근형 앵커가 주로 사용된다. 펄스방전 확공형 앵커는 최근 개발된 앵커공법으로 축적된 전기에너지를 짧은 시간에 방전하여 천공 주변 지반을 다짐으로써 천공에 의해 느슨해진 지반을 보다 조밀하게 다지고 천공 직경보다 큰 여러 개의 구근을 형성함으로써 지반과 그라우트 사이 주면 마찰저항뿐만 아니라 구근에 의한 수동저항을 동시에 발현시켜 느슨한 사질토 지반 및 연약 점토 지반에서의 앵커 인발력을 증대시킬 수 있는 경제적인 앵커공법이다. 본 연구에서는 펄스방전 확공형 앵커의 현장시험을 통하여 지반에 따른 방전 횟수와 구근의 확공계수의 관계를 분석하고 확공계수에 따른 앵커의 극한인발력의 증가 경향을 분석하였다.

2. 펄스방전기술

펄스방전(Pulse discharge)이란 전기방전 현상을 이용한 에너지 압축 기술로서 단위시간당 에너지 변화량을 나타내는 물리량(dE/dt, 여기서 E와 t는 각각 에너지 및 시간)으로 그 크기는 주어진 에너지를 얼마나 짧은 시간 내에 방출하느냐에 의해 결정된다. 그림 1(a)과 같이 1J(joule)의 에너지를 1초 동안에 방출하면 1W(watt)의 파워가 되지만 1㎲(10-6초)의 짧은 시간에 방출하면 단위 시간당의 에너지변화량이 아주 큰 1MW(10^6Watt)에 이르는 큰 파워를 가지게 된다. 따라서 펄스파워 기술은 에너지 보존 법칙의 원리에 의한 것으로 에너지 저장장치를 통하여 전력변환 혹은 에너지 압축을 이용하는 기술이다. 펄스방전 확공 원리는 다음과 같다. 콘덴서에 축적된 고전압이 천공홀 그라우트 내에 삽입되어 있는 방전장치의 양전극에 인가되면 작은 버블이 성형된다. 이 버블은 내부에 높은 온도와 압력에 의해 수 ㎲의 빠른 속도로 확장되어 충격파로 변환된다. 이때 형성된 충격파는 유체역학적 작용에 의해 그라우트를 통해 지반에 전달되어 지반이 다져지면서 천공홀이 확공된다. 기존 확공공법 및 펄스방전 확공공법의 특징은 표 1과 같다.

3. 그라운드앵커 현장시험

3.1 지반조건 및 현장시험 앵커

펄스방전 앵커의 지반에 따른 확공계수와 극한인발력의 관계를 분석하기 위하여 현장에 펄스방전 확공형 앵커를 시공하여 현장 인발시험을 수행하고 구근의 직경을 측정하여 펄스방전에 의한 확공계수를 구하였다. 앵커 현장시험이 수행된 지반은 지표면으로부터 약 4.5m까지 매립층, 약 8.0m까지 모래질 점토층, 약 14.0m까지 풍화토 및 풍화암층으로 구성되어 있으며 주상도 및 표준관입시험 N치는 그림 2와 같다. 모래질 점토층에 정착된 앵커는 8.0m, 풍화토 지반에 정착된 앵커는 11.0m 깊이로 시공되었으며 펄스 방전은 각각 0회, 5회, 10회,

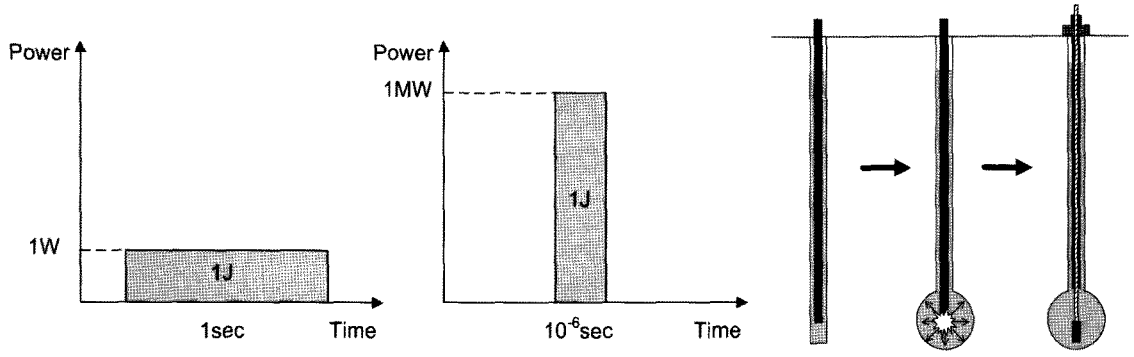

그림 1. 펄스방전 확공형 앵커의 원리

표 1. 확공공법의 특징

확 공 공 법	특징 및 장단점	비 고
팩 가압그리우팅 공법	그라우트 유실방지 등 장점이 있으나 팩에 고압을 가하기 어렵다.	
확공 커터 공법	단단한 점토지반에서 가능하며 소구경 천공이 어렵다.	
펄스방전 확공 공법	펄스방전 공정이 추가되고 고압의 전력을 사용하므로 안전에 주의해야 한다.	

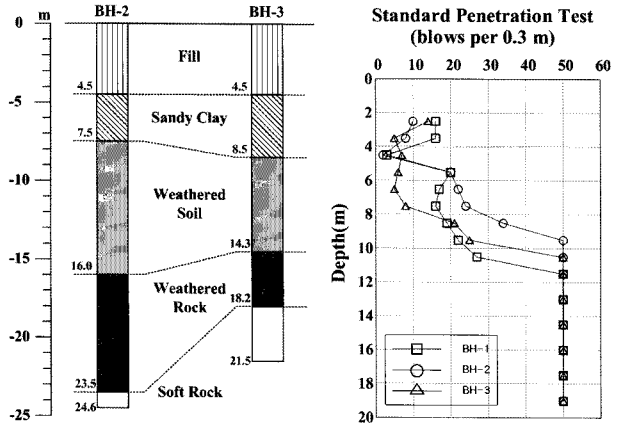

그림 2. 현장시험 대상 지반 주상도 및 표준관입시험 N치

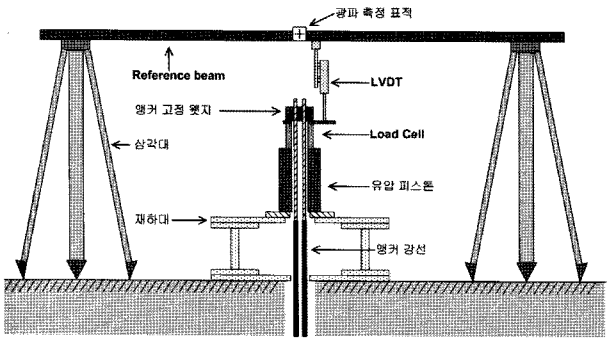

그림 3. 앵커 현장 시험

20회, 40회로 하였다. 지반 천공은 수세식 천공장비인 유압장비를 사용하였으며 시공 순서는 지반천공, 1차 그라우팅, 정착장 케이싱 인발, 펄스방전, 앵커체 삽입, 자유장 케이싱 인발, 2차 그라우팅 및 그라우트 양생 순으로 이루어졌다. 앵커 현장 인발시험은 AASHTO(AASHTO, 1990) 규정에 따른 Performance Test 절차로 수행되었으며 인발시험 개요도는 그림 3과 같으며 앵커 두부에 재하되는 하중은 로드셀(load cell), 두부에 발생되는 변위는 LVDT를 이용하여 계측하였다. 또 과도한 지반 침하를 방지하기 위해 재하대를 설치하였고 앵커 두부에 발생되는 절대변위를 측정하기 위해 레퍼런스 빔을 설치하였다.

3.2 앵커의 극한인발력 산정

앵커 현장 인발시험은 반복 재하시험으로 하중-변위 관계는 그림 4와 같다. 앵커 두부에 발생된 총 변형(δ_{ti}, Total movement)은 그림 5에서와 같이 앵커 자유장에서 발생한 강연선의 탄성변형(δ_{ei}, Elastic movement)과 각 하중단계의 최종하중 재하 후 초기하중으로 돌아왔을

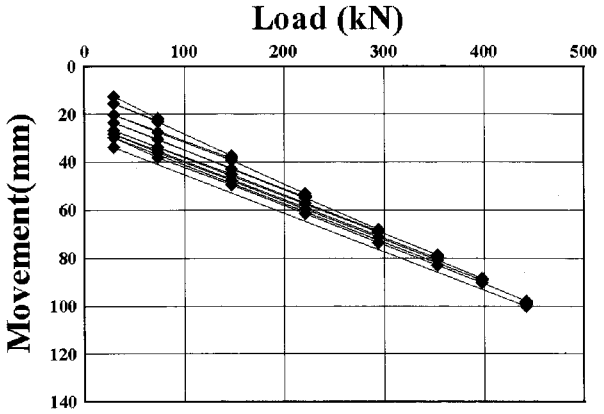

그림 4. 하중-변위곡선(모래질 점토, 방전5회)

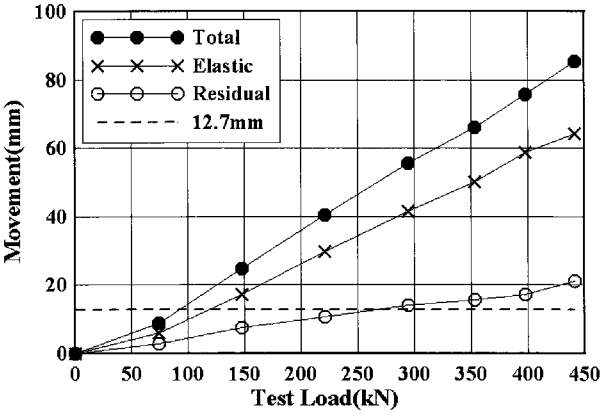

그림 5. 모래질 점토에서의 극한하중 산정

때 회복 되지 않는 잔류변형(δ_{ri}, Residual movement)으로 이 잔류변형이 앵커 직경의 1/10이 되는 때의 하중을 극한인발력으로 가정한다(Briaud et al., 1998).

4. 지반에 따른 펄스방전 확공계수

4.1 풍화토에서의 확공계수

풍화토에 설치된 펄스방전 확공형 앵커의 방전 횟수에 따른 확공계수는 선행 연구(김태훈 등, 2007)에서 수행되었던 방전시험의 데이터를 이용하였다. 그림 6은 김태훈 등이 2007년에 사질토 지반에서 펄스방전 횟수에 따른 확공계수를 측정한 것으로 표준관입시험 N치에 따라 지반의 조밀도를 나누어 각각의 데이터를 최소자승법으로 근사화한 곡선을 만들어 해당 방전 횟수에서의 확공계수를 결정하였다. 최소자승법으로 결정된 곡선의 식은 식 (1)과 같으며 상관지수 R은 0.75이다.

$$C = 1 + \lambda_p \ln(N_p + 1) \quad (1)$$

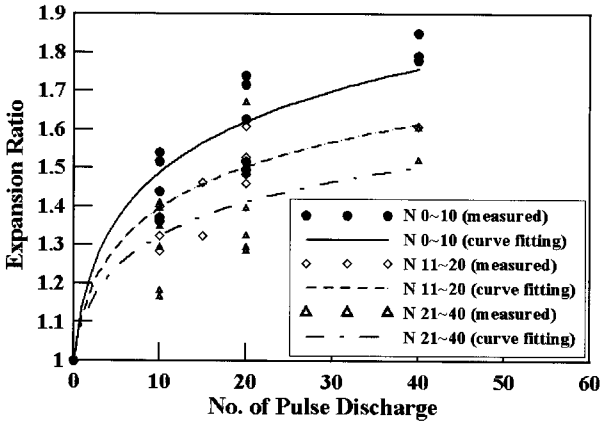

그림 6. 풍화토의 펄스방전 횟수에 따른 확공계수

여기서, N_p = 펄스방전 횟수, λ_p = 0.1355(풍화토), λ_p = 0.253(모래질 점토)

4.2 모래질 점토에서의 확공계수

모래질 점토에서의 방전 횟수에 따른 확공계수를 산정하기 위하여 시험앵커를 시공하고 양생 후 지반을 굴착하여 확공된 구근의 직경을 측정하였다(그림 8). 측정

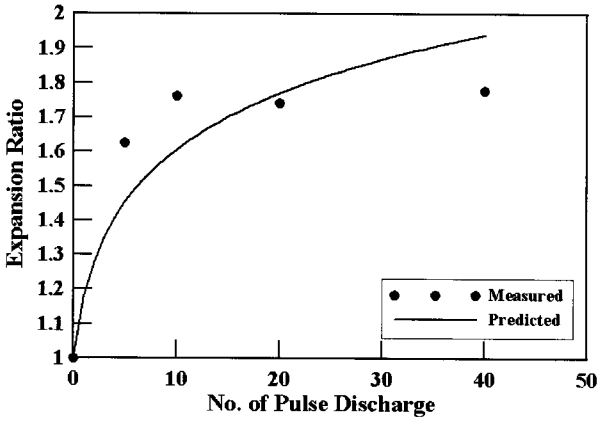

그림 7. 모래질 점토에서의 확공계수 C

표 2. 풍화토 및 모래질 점토에서의 펄스방전 횟수에 따른 앵커의 확공계수

방전 횟수	확공계수			
	Weathered Soil			Sandy Clay
	SPT N-Value 0~10	SPT N-Value 11~20	SPT N-Value 21~40	
0	1	1	1	1
5	1.37	1.30	1.24	1.45
10	1.49	1.40	1.32	1.60
20	1.62	1.50	1.41	1.77
40	1.76	1.62	1.50	1.94

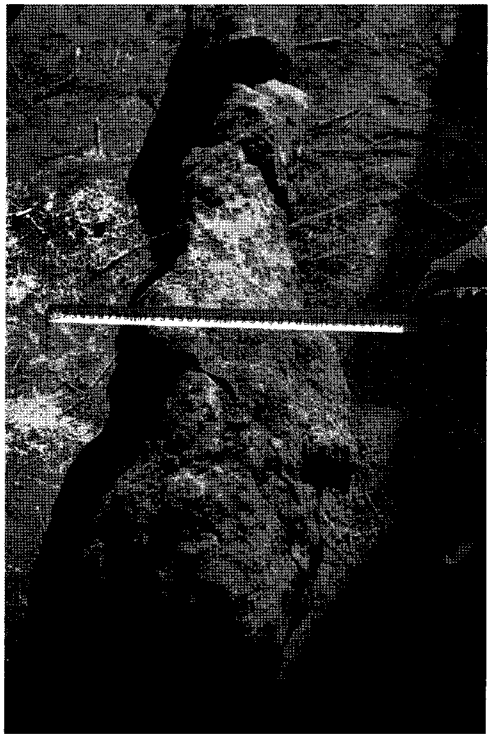

그림 8. 시험앵커의 구근

된 시험앵커 구근의 직경과 확공되지 않은 직선부의 직경과의 비를 확공계수로 하였으며 방전횟수에 따른 구근의 확공계수는 표 2와 같다. 모래질 점토에서의 확공계수는 그림 7과 같이 급격히 증가하는 추세를 보이다가 5회 방전 이후에 그 증가량이 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. 확공계수와 극한인발력과의 관계를 최소자승법을 이용하여 근사화한 곡선은 그림 7과 같으며 최소자승법으로 결정된 곡선에서 상관지수 R은 0.76이다.

5. 현장시험 결과 분석

펄스방전에 의한 구근의 확공계수와 앵커의 극한인발력의 관계를 알아보기 위하여 풍화토 및 모래질 점토층에 방전횟수를 달리하여 앵커를 시공한 후 AASHTO (AASHTO, 1990)에서 규정하고 있는 Performance Test 절차로 인발시험을 수행하여 펄스방전에 의한 확공형 앵커의 극한인발력을 산정하였다. 또한 시험시공을 통해 풍화토 및 모래질 점토층에 각각 펄스방전 횟수에 따른 구근의 확공계수를 산정하였다. 풍화토 및 모래질 점토층에 시공된 펄스방전에 의한 확공형 앵커의 펄스방전 횟수에 따른 구근의 확공계수 및 앵커의 극한인발력은 표 3과 같다. 풍화토의 경우 N치 21~40에 해당하는 사질토의 데이터를 사용하였으며 그 값은 표 1의

표 3. 방전 횟수에 따른 극한인발력과 증가율

지반 종류	방전 횟수	평균 극한인발력 (kN)	구근의 확공계수	지반 종류	방전 횟수	평균 극한인발력 (kN)	구근의 확공 계수
풍화토	0	246.9	1	모래질 점 토	0	180.4	1
	5	310.7	1.24		5	239.0	1.45
	10	371.3	1.32		10	254.0	1.60
	20	390.5	1.41		20	251.7	1.77
	40	434.7	1.50		40	255.8	1.94

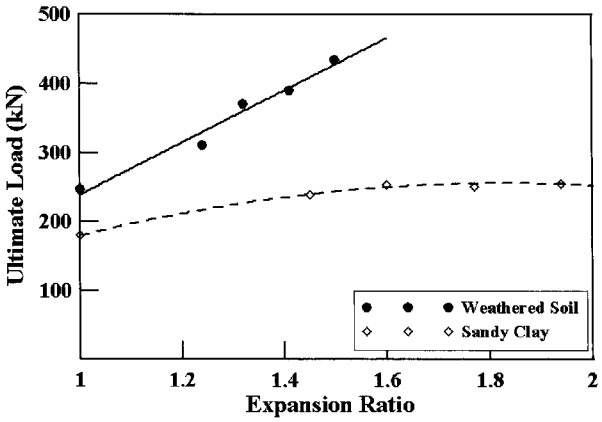

그림 9. 구근의 확공계수에 따른 극한인발력

SPT 21~40에 해당하는 사질토의 값과 같다.

그림 9는 확공계수에 따른 극한인발력을 보여주고 있다. 풍화토 지반에 시공된 앵커에 방전을 40회 수행할 경우 확공계수는 1.5까지 증가하며 확공계수 1.5까지 확공계수가 늘어남에 따라 극한인발력은 선형 증가하는 경향을 보였다. 반면에 모래질 점토에서는 확공계수가 최대 1.94까지 증가하였으며 확공계수가 늘어남에 따라 극한인발력이 증가하다가 확공계수 1.5를 지나면 극한인발력의 증가가 미미하였다. 상대적으로 조밀한 풍화토에 비해 모래질 점토에서 같은 방전횟수에서의 확공계수가 크게 나타났으며, 확공계수가 1.5가 될 때까지 극한인발력은 급격히 증가하였다. 샘플의 수가 적어 정확한 상관관계를 확보하기가 쉽지 않았으며, 풍화토에서는 확공계수 1.5 이상에서 시험이 수행되지 않아 그 이후의 경향은 더 많은 연구와 현장시험 수행되어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 풍화토와 모래질 점토 지반에서의 현장시험 결과를 바탕으로 펄스방전 확공형 앵커의 방전 횟수에 따른 확공계수를 구하고 극한인발력과의 관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 풍화토에서 구근의 확공계수는 방전횟수 40회 실시하였을 때 1.5까지 증가하였으며 극한인발력과 확공계수는 선형적인 관계를 보였다.

(2) 모래질 점토에서는 방전 40회에서 확공계수가 1.94까지 증가하였으며, 확공계수 1.5 이상에서는 극한인발력 증가량가 미미하였다.

(3) 모래질 점토 지반에서의 펄스방전은 확공계수가 약 1.5가 되는 5~10회가 적합한 것으로 판단된다. 풍화토지반에서 극한인발력이 수렴하는 확공계수는 추가적인 연구와 현장시험이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업 건설핵심기술연구개발사업 자유공모과제(C106A1000012 - 06A06001211)의 연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김낙경 (2001), "풍화토 지반에 설치된 앵커의 인발특성", *한국지반공학회지논문집*, 제17권, 4호. pp.231-239.
2. 김성규 (2000), "압축형 그라운드 앵커의 하중전이에 관한 연구" 공학석사 학위논문, 성균관 대학교.
3. 김태훈, 차경섭, 김선주, 김유석, 김경오, 고부현 (2007), "펄스압에 의한 지반의 확공특성", *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp.842-852.
4. AASHTO (1990), "Permanent Ground Anchor Specification In-situ Soil Improvement Technique", AASHTO-AGC-ARTBA TF27 Rep., AASHTO,Washington, D.C.
5. 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
6. FHWA-IF-99-015 (1999), "Ground Anchors and Anchored Systems".
7. Kim, Nak-kyung (2000), "Load Transfer on Ground Anchors in

Weathered Soil", Ground International Conf. On Improvement Technique, Singapore, pp.217-226.

8. 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.
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. Nak-Kyung Kim, Jong-Sik Park, Sung-Kyu Kim (2007), "Numerical simulation of ground anchors", *Journal of Computers and Geotechnics*, Vol.34, pp.498-507.

(접수일자 2009. 6. 5, 심사완료일 2009. 7. 28)