

실모형실험을 통한 지압형 앵커의 지압력 평가

The Evaluation of Bearing Resistance of Underreamed Ground Anchor through Realistic Model Experiments

민 경 남[†] · 이 재 원¹⁾ · 이 중 관¹⁾ · 이 동 원¹⁾ · 정 찬 목²⁾

Kyongnam Min · Jaewon Lee · Jungwan Lee · Dongwon Lee · Chanmuk Jung

Received: June 26th, 2014; Revised: July 16th, 2014; Accepted: August 11th, 2014

ABSTRACT : The Ground anchor is reinforcement to resist pull-out through ground that is used supports structure. The pull-out resistance of anchor is constructed by skin friction resistance from compression borehole wall in expanded wings and bearing pressure from the ground. Especially, underreamed ground anchor is reinforcement that adopts active reinforcement to prevent deformation of ground using bearing resistance generated reaming anchorage. This study is conducted to calculate bearing resistance of underreamed ground anchor. Realistic model tests were fulfilled to determine bearing resistance of anchor, and correlate results of tests to Uniaxial Compressive Strengths (UCS) of ground models that assumed weathered rock condition in 8 case. In a comprehensive series of the tests, the bearing resistances were measured by pull-out tests. The bearing resistances derived from tests have a linear correlation with UCS. We also suggest empirical equation between bearing resistance and UCS of rocks by single linear regression analyses. In test results of this study, the bearing resistances were evaluated approximately 13 times higher than UCS of the grounds, and it is qualitatively similar to numerical values of pull-out force derived from theory.

Keywords : Enlarged borehole, Bearing anchor, Realistic model experiments, Bearing resistance

요 지 : 지압형 앵커는 지반 자체를 지지기둥으로 활용하여 인발에 저항하는 구조이며 앵커의 인발저항력은 지반의 지압저항력과 확장날개의 확공부 공벽 압착에 의한 마찰저항력으로 구성된다. 특히 확공 지압형 앵커는 정착장 확공부에서 발생하는 지압저항력으로 인발에 저항하여 지반변형을 억제하기 위한 주동보강 방식의 구조이다. 본 연구는 확공 지압형 앵커의 지압저항력 산정을 위해 수행되었으며, 실모형실험으로 지압저항력을 산정하고 그 결과를 지반의 일축압축강도와 비교하였다. 실모형실험에서는 모형 지반들의 일축압축강도를 8개의 풍화암 조건으로 모사하여 앵커 인장시험을 수행해 지압저항력을 측정하였다. 실험에서 도출된 지압저항력은 모사된 지반강도와 일련의 선형적 관계를 보였으며, 선형회귀분석을 통해 경험식을 제시하였다. 지압저항력은 실모형 실험 결과 일축압축강도 대비 약 13배로 산정되었고, 이론식에서 제시하고 있는 수치와 상당히 일치하였다.

주요어 : 확공, 지압형 앵커, 실모형실험, 지압저항력

1. 서 론

지압형 앵커의 가장 큰 특징은 지반 자체의 지압력으로 인발에 저항하는 구조로 지반에서 발휘되는 지압력 증가로 안정성은 커지고, 마찰형 앵커에 비해 정착장이 감소하는 장점이 있다. 확공 지압형 앵커의 인발저항력은 주면마찰저항 뿐만 아니라 확공된 정착부의 구근에서 발현되는 수동저항에 의한 지압력이 동시에 발현되므로 앵커력이 커지게 된다. 또한 지압력 발휘를 위한 확공 정착부에 앵커체가 거치 되므로 그라우팅 전에 인장이 가능해지며 강연선의 긴장력 유지로 그라우트체의 진행성 파괴를 저감시킬 수 있다.

기존 지압형 앵커의 연구에서는 인장시험을 일축압축강도가 85 MPa 이상의 연·경암에서 수행하여 그라우팅 수행 전의 프리스트레스에 대해서도 충분한 인발저항력을 발휘할 수 있었다(Kim et al., 2013; Min et al., 2014). Kim et al.(2009)은 느슨한 사질토와 연약점토에서 확공형 앵커의 현장시험을 통하여 확공계수에 따른 앵커의 극한인발력 경향분석을 수행하고 확공경이 증가함에 따라 극한인발력이 증가함을 확인하였다.

Mariupol'skii(1965)와 Niroumand & Kassim(2010)에 의해서도 앵커의 지압저항 산정식이 도해적으로 제안되었지만, 이는 확공부가 연직으로 형성된 상태에서 인발에 저항하는 모델로 실제 20~30° 정도로 시공되는 비탈면에서의

† Department of Geotechnical, Sejong E&C (Corresponding Author : knmin4183@naver.com)

1) Department of Geotechnical, Sejong E&C

2) College of Railroad and Transportation, Woosong University

지압부 형상과는 다소 차이가 있다.

Shin(1998)에 의한 연구도 연암 이상의 암반을 대상으로 하였고, 그라우팅 이후의 인장시험 결과를 분석하여 얻어진 결과이므로 지압형 앵커의 지압저항 예측을 위한 개략적인 검토방법으로는 적용할 수 있으나 풍화대와 파쇄대에 대한 일반적인 지압력 산정방법으로 적용하기에는 보완해야 할 부분이 있는 것으로 보고되고 있다.

Min et al.(2010)은 현장시험을 통하여 확공 지압형 앵커의 지압력을 확인하였으나, 대상지반이 연암 이상이므로 적용성에 한계가 있다.

일반적으로 앵커 정착지반은 삼축상태에서의 구속압에 의해 시료에 의한 일축압축강도보다도 훨씬 큰 암반강도를 갖는다. 하지만 실제 지반에서는 풍화대와 파쇄대 등 불균질한 지반이 출현하는 경우가 빈번하게 발생한다. 이때 지압형 앵커는 압착부에서 슬립이 발생하고 지압부에 응력이 집중되어 압축파괴가 진행되기도 한다. 지반 구속압이 낮은 정착지반에서 인발 시 그라우트체가 파괴되거나 인발되는 약점을 가지고 있어 많은 문제점으로 지적되고 있지만 이에 대한 연구는 아직 미진한 실정이다.

현장에서 접하게 되는 지반강도는 암질, 절리면, 구성광물의 종류, 입자크기, 지하수위, 풍화도 같은 자연적인 요소에 의해 결정되며, 굴착 시 발생하는 공벽의 거칠기, 굴진장, 직경 등은 그라우트체의 마찰저항에 영향을 주게 된다. 하지만 이러한 요소들을 전부 고려하여 시험을 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다.

본 연구에서는 풍화대 지반을 강도에 지배되는 균질한 연속체로 모사하여 실내시험을 수행하였다.

지압형 앵커 적용 시 지반 구속압이 낮은 풍화대와 파쇄대 지반을 모사하기 위하여 콘크리트 블록을 사용하여 풍화암의 다양한 일축압축강도 범위를 모사한 후 인장시험을 실시하였고, 이를 통하여 풍화암 지반에서의 발휘되는 순수 지압력을 측정하고 회귀분석을 통해 산정식을 제안하였다.

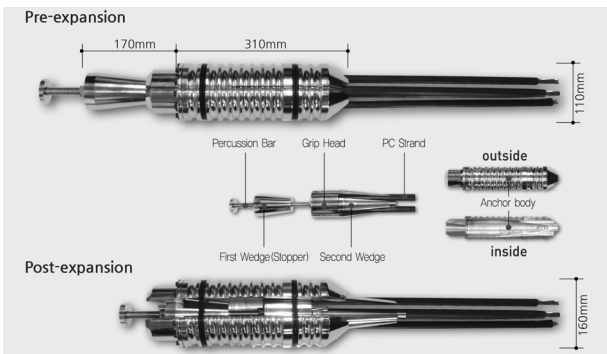


Fig. 1. Structure of an enlarged borehole anchor

2. 확공 지압형 앵커

확공 지압형 앵커는 기존 지압형 앵커에서 발생할 수 있는 접지부의 응력집중에 의한 주변 그라우트체의 압축파괴와 같은 정착부 주변지반의 항복파괴를 보완하기 위해 확장날개 전면이 확공부에 압착되도록 고안되었다.

확공 지압형 앵커체는 타격바, 확장썰기와 확장날개 등으로 구성되며, Fig. 1에서와 같이 확장되기 전에는 선단부 1차 썰기가 돌출되어 있지만, 타격바가 공저에 닿는 순간 충격으로 타격썰기가 앵커 두부쪽으로 밀려들어가면서 확장날개를 펼치게 된다. 정착부 확공은 Fig. 2와 같이 병목형의 형상으로 확공부가 형성되고, 확공부에 거치될 수 있도록 개발된 확공 지압형 앵커체가 설치된다.

확공 지압형 앵커에서 발휘되는 인발저항력은 확공부에서 정착지반과 앵커체가 접지되면서 발생하는 지압저항력과 강연선 인장 시 확장날개가 확공부 벽면에 압착되면서 발생하는 마찰저항력으로 구분되며 인발저항력 발생기작은 Fig. 3과 같다.

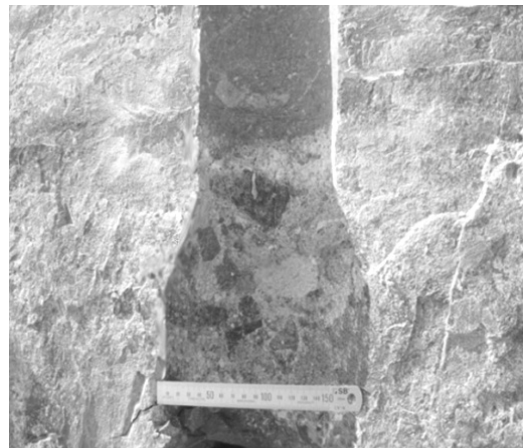


Fig. 2. Enlarged borehole

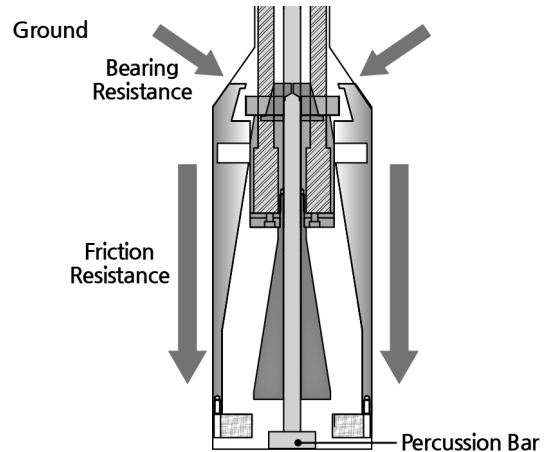


Fig. 3. Bearing & Friction resistance diagram of an anchor

확공 지압형 앵커는 Fig. 2와 같이 정착장을 확공하고 앵커체를 설치하기 때문에 그라우팅 없이 인장을 수행할 수 있고 지압력을 유도하는 확장날개가 확공부 전면에 균등하게 압착되어 지압형 앵커에서 발생하는 응력집중현상을 감소시킬 뿐만 아니라, 접지부의 압착력까지 발휘되어 풍화암 또는 연암파쇄대와 같은 다양한 지반조건에서도 적용이 가능하다.

3. 이론식에 의한 지압력 산정

Min et al.(2014)은 확공면의 형상을 고려하여 한계평형적인 접근으로 앵커의 지압력을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 지압형 앵커는 천공 후 Fig. 3과 같이 지반 내에 정착하게 되고, 앵커력을 작용시키면 지반은 작용된 앵커력에 대해 지압저항력(S_b)과 압착에 의한 마찰저항력(S_f)이 발생하게 된다.

Fig. 3에서와같이 그라우팅 전에 작용할 수 있는 인발저항력의 크기는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{pre} = S_b + S_f \quad (1)$$

여기서 F_{pre} : 적용 가능 앵커력

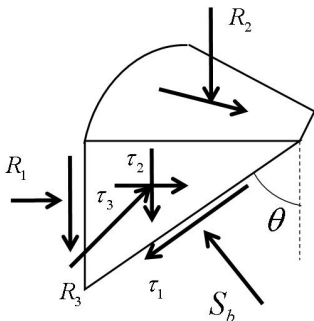


Fig. 4. Free body diagram of bearing anchor

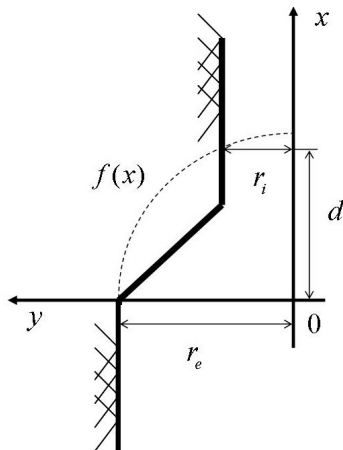


Fig. 5. Failure surface of bearing anchor

지반의 지압저항력(S_b)을 구하기 위하여 지압력을 받는 지반의 자유물체도를 그려보면 Fig. 4와 같고, 지압저항력은 3개의 연직력과 3개의 전단력으로 인발에 저항하게 된다.

Fig. 4에서와같이 총 6개의 변수를 이용하여 지압저항력을 산정하는 것은 천공경의 형상이 원형임을 감안할 때 매우 어려우므로 사면안정 기법인 한계평형법의 개념을 도입하였다. 또한 지반은 점착력만 존재하며 지압저항력은 확장된 천공경에 고르게 분포한다고 가정하고 지반의 파괴는 확장된 천공경에서 시작한다고 가정하면 지반 파괴면은 Fig. 5와 같이 표현된다.

Fig. 5에서 천공홀을 완벽한 원형이라 가정할 때 지압력의 분포는 x 축을 기준으로 축대칭이므로 지반의 지압저항력이 고르게 분포하게 된다. 그러므로 파괴면은 천공홀의 원점을 지나는 구의 일부분이 되며 파괴면 $f(x)$ 는 원점을 지나고 반지름이 확장된 천공경(r_e)에 대한 원의 방정식으로 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \sqrt{r_e^2 - x^2} \quad (2)$$

$f(x)$ 를 이용하여 전체 파괴면의 면적(S)을 구하면 회전체의 면적공식을 이용하여 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. Eq. (3)에서 d 는 파괴면이 끝나는 점의 x 좌표이다.

$$S = \int_0^d 2\pi f(x) \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx \quad (3)$$

$$\text{여기서 } d = \sqrt{r_e^2 - r_i^2}$$

지반의 일축압축강도를 σ_c 라 하면 지압저항력(S_b)은 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있으며 일축압축강도별 지압저항력 산정결과는 Table 1과 같다.

$$S_b = \frac{\pi}{2} r_e \sqrt{r_e^2 - r_i^2} \sigma_c \quad (4)$$

4. 확공 지압형 앵커의 실모형실험

4.1 실험 개요

본 연구에서는 확공 지압형 앵커의 지압저항력 산정을

Table 1. Results of analysis

σ_c (MPa)	S_b (kN)	σ_c (MPa)	S_b (kN)
20	266	50	665
30	399	60	798
40	532	70	931

위하여 풍화암 지반을 모사한 실모형실험을 수행하였다. 일반적인 풍화암 지반의 일축압축강도는 Table 2와 같으며, 일반 콘크리트와 고강도 콘크리트를 사용하여 풍화암의 강도 범위 내에서 모형지반을 조성한 후 인발시험을 수행하고 앵커의 인발거동 특성을 분석하였다.

4.2 실험 방법

4.2.1 모형지반 제작

모형지반은 폭 1.2 m, 길이 1.2 m, 높이 1.0 m의 콘크리트 블록으로 제작하였으며, 확공된 천공홀은 Fig. 6과 같이 강재거푸집을 사용하여 조성하였다. 모형지반의 강도는 콘크리트의 배합설계를 통해 일반적인 풍화암의 강도범위로 적용하였고 재령 35일까지 대기양생하여 콘크리트의 강도

Table 2. UCS of the weathered rock

Division	Standard estimating of construction	Standard estimating of construction
UCS (MPa)	< 60	30 ~ 70

가 충분히 발현되도록 하였다.

모형지반의 일축압축강도를 측정하기 위하여 각 실험구마다 시험용 시편을 3개씩 제작하여 한국표준협회에서 규정한 KS F 2314 기준에 따라 일축압축강도시험을 수행하였으며, 시험결과는 Table 3과 같다.

모형지반의 일축압축강도는 25.2~56.8 MPa로 국내 기준에서 제시하고 있는 풍화암의 강도범위를 재현하였다.

4.2.2 인장시험

풍화암 지반을 모사한 강도별 모형지반에 Fig. 7과 같이 실제 앵커를 설치하여 두부에서 인장시험을 수행하였다. 확

Table 3. Results of UCS test in ground model

Case	UCS (MPa)	Case	UCS (MPa)
Case-1	25.2	Case-5	41.4
Case-2	29.0	Case-6	44.1
Case-3	34.5	Case-7	50.5
Case-4	36.7	Case-8	56.8



(a) Mold of borehole

(b) Mold of concrete block

(c) Ground model

Fig. 6. Production of ground model

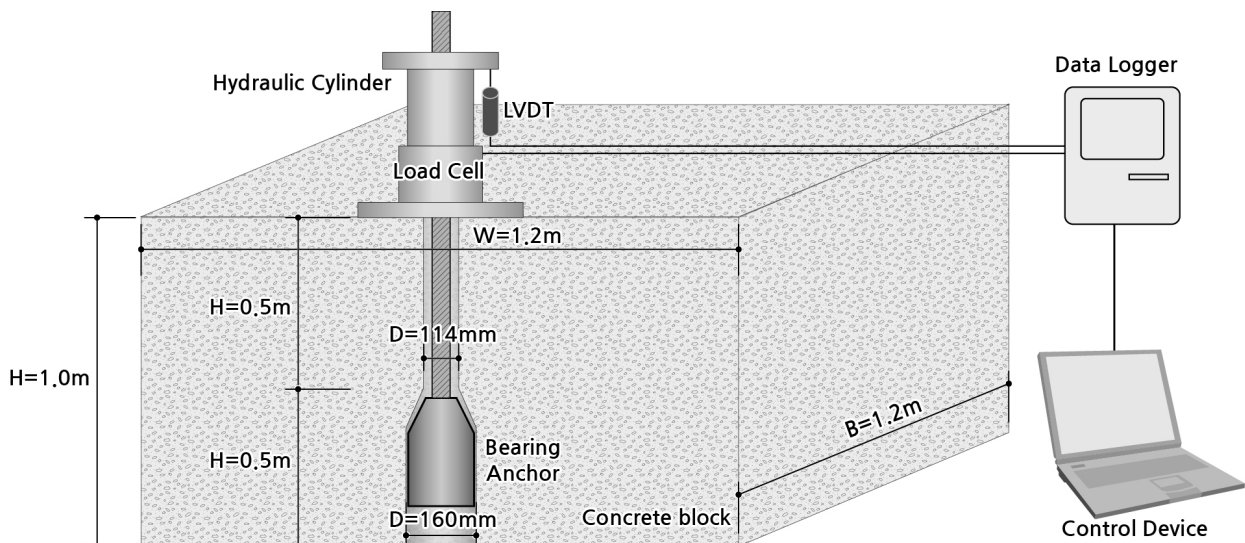


Fig. 7. Overview of test

공 지압형 앵커는 실험의 편의성을 고려하여 자유장은 최소화하였으며 그라우팅 수행 전 가인장 시험을 수행하였다.

인장시험은 하중-변위 측정을 위해 앵커 두부에 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 인발거동 특성

전면확공 지압형 앵커의 인발시험 결과, 하중-변위 관계는 Fig. 8(a)와 같이 초기에는 비교적 완만하게 증가하는 것으로 평가되었으며, 인발이 진행될수록 인발력이 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 초기구간에서는 인발하중에 의해 지반과 앵커체가 밀착하는 과정에서 발생하는 비선형 구간으로 판단되며, 이후 구간은 확공된 앵커체의 지압력에 의하여 지압저항력이 발현된 결과로 판단된다. 일축압축강도별 최대 지압저항력은 Fig. 8(b)와 같다.

5.2 지압력 산정

실험 결과 모든 Case에 대한 일축압축강도(σ_c)와 인발력

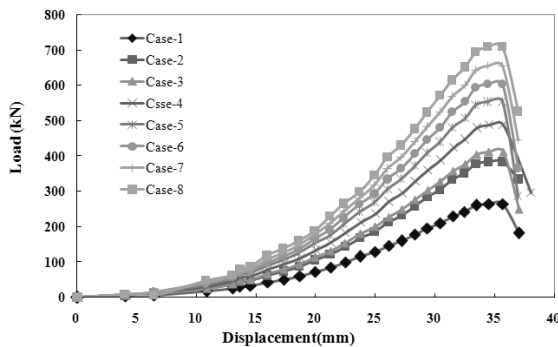
($F_{pullout}$)의 상관관계는 Fig. 9와 같으며, 지압저항력은 풍화암 지반의 일축압축강도와 선형비례 하는 것으로 나타났다. 회귀분석 결과 일축압축강도와 지압저항력의 상관관계는 Eq. (5)와 같이 나타났다.

$$F_{pullout} = 12.86\sigma_c \quad (5)$$

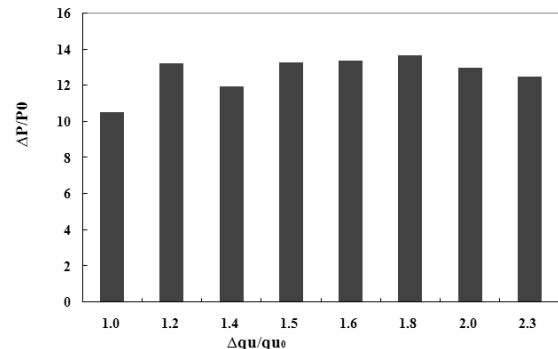
5.3 결과 분석

실모형 실험 결과와 이론식에서 산정된 지압저항력을 비교해 보면 Fig. 10에서와같이 지압저항력은 실모형 실험값이 이론식의 96.8 %로 작게 평가되었다. 이는 이론식의 파괴면과 실제 파괴면의 차이와 실험장비 설치에서 발생한 기계적 오차에서 기인한 것으로 판단되며, 설계 적용 시에는 실내시험을 통하여 보정된 계수값을 사용하여야 할 것으로 판단된다.

그러나 확공 지압형 앵커는 확장 시 지압력뿐만 아니라 주변마찰력에 의해서도 인발에 저항하는 구조이므로 실제 지압형 앵커의 인발저항력은 본 연구에서 확인된 지압저항력과 압착에 의한 마찰저항력이 더해져 더 큰 값을 나타낼 것으로 판단된다.



(a) Relationship between displacement and bearing resistance



(b) Bearing resistance

Fig. 8. Result of bearing resistance

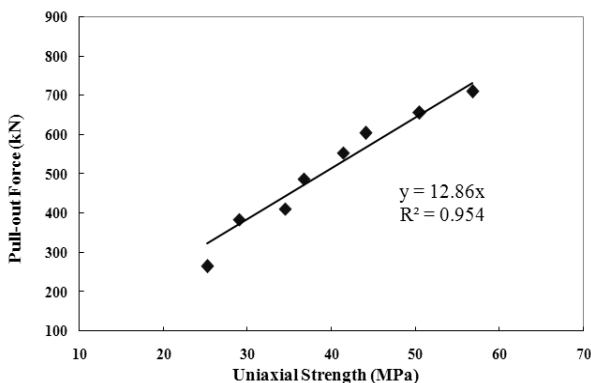


Fig. 9. Regression analysis results from the test

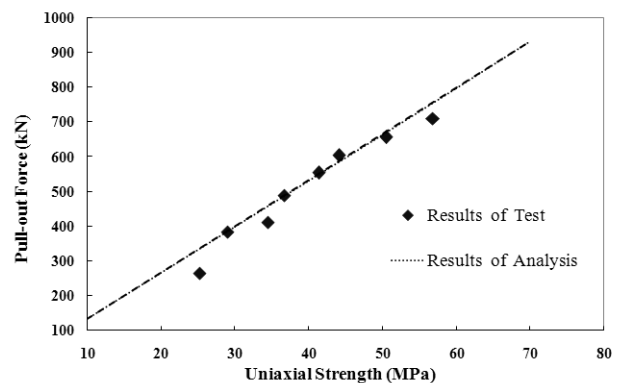


Fig. 10. Comparison of bearing resistance estimated using different methods

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 확공 지압형 앵커에서 적용 가능한 지압 저항력을 산정하기 위해 풍화암 지반의 물성을 모사한 실모형 콘크리트 지반을 제작하였다. 모형지반의 강도는 한국도로공사와 건설표준품셈에서 정하고 있는 풍화암의 강도를 고려하여 25.2~56.8 MPa로 8개 모형을 제작하였으며 그라우팅 전 인장시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 지압력 산정 이론식($F_b = 13.28\sigma_c$)을 이용하여 확공 지압형 앵커의 일축압축강도별 지압력을 산정하면 334.6~784.8 kN으로 확인되었다.
- (2) 확공 지압형 앵커의 인발거동 특성은 지반의 일축압축강도가 증가함에 따라 지압력도 선형적으로 증가하였다.
- (3) 실모형실험 결과 지반의 일축압축강도(σ_c)에 따른 확공 지압형 앵커의 지압력(F_b)은 265.1~779.0 kN으로 일축압축강도와의 상관식은 $F_b = 12.86\sigma_c$ 로 산정되었다.

본 연구는 확공 지압형 앵커에서 발휘되는 지압력 산정식을 실모형실험으로 산정하였고, 그 결과를 이론식과 대비한 결과이다. 향후 현장시험을 통한 인발저항력과 상관관계를 분석하여 지압저항력 발휘 후 압착에 의한 마찰저항력 발생에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설교통기술촉진 연구사업 지원에 의한 것임을 밝히고 이에 감사드립니다.

References

1. Kim, G. W., Ahn, K. K., Min, K. N. and Jung, C. M. (2013), Behavior characteristics of underreamed ground anchor through field test and numerical analysis, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 14, Issue 8, pp. 37~44 (in Korean).
2. Kim, N. K., Kim, S. K., Joo, Y. S., Seo, H. K. and Kim, S. J. (2009), Expansion ratio and ultimate load of pulse-discharge bulb anchors, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 25, No. 7, pp. 5~10 (in Korean).
3. Mariupol'skii, L. G. (1965), The bearing capacity of anchor foundations, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Issue 1, pp. 26~32.
4. Min, K. N., Ahn, K. K., Lee, J. B., Park, H. J., Lee, J. W. and Lee, J. G. (2010), The applicability evaluation on the ground type anchor with field test, KSEG Conference, The Korean Society of Engineering Geology, pp. 59~63 (in Korean).
5. Min, K. N., Lee, J. W., Lee, J. G. and Jung, C. M. (2014), A study for the applicable bearing-resistance of bearing anchor in the enlarged-borehole, The Journal of Engineering Geology, Vol. 24, No. 2, pp. 261~271 (in Korean).
6. Niroumand, H. and Kassim, K. A. (2010), Analytical and numerical study of horizontal anchor plates in cohesionless soils, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 15, Bund. C, pp. 281~291.
7. Shin, Y. S. (1998), Up-to-date topics in landslide engineering, Won gi sul, pp. 528 (in Korean).