지압형 앵커의 지압력 산정에 관한 실험적 연구

민경남^{1*} · 이재원¹ · 이종관¹ · 정찬목²

¹(주)세종이엔씨 지반부, ²우송대학교 철도물류대학

A Study for the Applicable Bearing-Resistance of Bearing Anchor in the Enlarged-Borehole

Kyoung-Nam Min^{1*}, Jae-Won Lee¹, Jung-Gwan Lee¹, Chan-Muk Jung²

¹Department of Geotechnical, Sejong E&C, Daejeon, Korea

²College of Railroad and Transportation, Woosong University, Daejeon, Korea

Received 1 June 2014; received in revised form 16 June 2014; accepted 20 June 2014

일반적인 영구앵커(마찰형 앵커)는 정착장에서 지반과 그라우트의 마찰력으로 인발에 저항하는 구조이지만, 지압형 앵커는 확공부에서 발생하는 지압력으로 인발에 저항하여 지반변형을 억제하는 방식이다. 본 연구는 확공을 이용한 지압형 앵커 활용 시 합리적인 지압력 산정을 위해 수행되었으며, 지압력 산정 시 도해법, 실내실험, 수치해석적 방법을 수행하고 그 결과를 지반의 일축압축강도와 비교, 분석하였다. 도해법에서는 앵커의 지압력을 천공경(r_i), 확장되는 천공경(r_e), 일축압축강도(σ_c)의 함수로 정의하였다. 실내실험을 통한 연구에서는 실내 모형을 제작하여 앵커 인장시험을 수행하여 지압력을 확인하였고, Flac 3D를 이용한 3차원 유한차분해석을 통해 지반조건별 지압력을 확인하였다. 실내실험 및 수치해석에서 도출된 지압력은 회귀분석을 통해 지압력 산정식을 제시하였다. 지압력은 실내실험에서 일축압축강도 대비 약 28.5배로 가장 큰 결과를 나타내었는데, 이는 순수 지압력 뿐만 아니라 앵커체 확장에 따른 주변마찰저항력이 함께 작용했기 때문인 것으로 판단된다. 도해법과 수치해석에서 확인된 지압력은 일축압축강도의 13.3배, 9.9배로 확인되었으며, 향후 현장실험을 통한 지압력 산정결과와 비교, 분석하여 산정식에 대한 신뢰성 향상이 필요하다.

주요어 : 영구앵커, 확공, 지압력, 지압형 앵커

An almost permanent anchor (friction type) is resistant to ground deformation due to the friction between the soil and grout at a fixed length from the anchor body. The purpose of this study is to calculate the force of bearing resistance for a bearing anchor in enlarged boreholes. We conducted analytical and numerical analyses, along with laboratory testing, to find the quantities of bearing resistance prior to grouting in EBA (Enlarged Bearing Anchor) construction. The force of bearing resistance from the analytical method was defined as a function of general borehole diameter, expanded borehole diameter, and soil unconfined compressive strength. We also employed the Flac 3D finite difference numerical modeling code to analyze the bearing resistance of the soil conditions. We then created a laboratory experimental model to measure bearing resistance and carried out a pull-out test. The results of these three analyses are presented here, and a regression analysis was performed between bearing resistance and uniaxial compression strength. The laboratory results yield the strongest bearing resistance, with reinforcement 28.5 times greater than the uniaxial compression strength; the analytical and numerical analyses yielded values of 13.3 and 9.9, respectively. This results means that bearing resistance of laboratory test appears to be affected by skin friction resistance. To improve the reliability of these results, a comparison field study is needed to verify which results (analytical, numerical, or laboratory) best represent field observations.

Key words : permanent anchor, enlarged borehole, bearing resistance, bearing anchor

*Corresponding author: knmin4183@naver.com

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

지압형 앵커는 연약지반이 깊은 일본과 유럽 등에서 1950년대부터 안정성 및 경제성 측면에서 우수함이 인식되어 왔다. 토사지반이나 연약지반에서 앵커력을 유지하기 위해서는 소요정착장이 길어야만 했고 이것을 해결하기 위해 정착부를 확공하여 주면 마찰저항뿐만 아니라 구근에 의한 수동저항을 동시에 발현시켜 앵커 인발력을 키우게 되었다.

지압형 앵커의 가장 큰 장점은 지반 자체의 지압력에 의해 인발에 저항하는 구조로 지반에서 발휘되는 지압력만큼 마찰저항장이 줄어들게 되므로 정착장 길이를 감소시켜 경제성을 확보할 수 있다는 것이다. 또한, 그라우팅 전에 인장이 가능하며 그라우팅 전 인장은 강연선의 처짐 등을 방지하여 앵커의 자유장과 정착장의 경계부에서 발생하는 진행성 파괴를 미연에 방지할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 지압형 앵커의 장점을 최대한 활용하기 위해서는 정확한 지압력이 산정이 선행되어야 한다. 국내에도 지압형 앵커가 많이 적용되고 있지만 정착부를 확공하는 대신에 앵커 정착체가 쐐기작용으로 확장되고 공벽에 거치되어 인장하는 방법을 많이 사용하고 있으며 앵커 정착부를 공벽에 밀착하는 방법이 마땅하지 않아 지압력을 확인하기가 상당히 어려운 실정이다.

지압력 산정을 위한 기존 연구에서는 지압력 확인을 위한 시험방법과 시험결과를 제시하고 있는 실정이다 (Yoo et al., 2006; Yun and Song, 2009; Min et al., 2010). 펄스방전을 이용한 그라운드 앵커의 확공특성 연구 등이 Kim et al. (2009)에 이루어 졌고, 가압그라우팅에 의한 앵커의 인발저항력 증대효과를 Kim et al. (2010)이 진행하였다. 그리고 앵커 정착체의 확장에 의한 인발특성 연구 등이 Lee et al. (2012)에 의해 이루어 졌다. 하지만 이러한 연구는 정착장을 확공하는 대신

앵커체의 확장에 의한 인발저항력만을 연구하였다. 최근 Min et al. (2009)에 의해 연암 이상의 지반에서 확공을 이용한 영구앵커의 지압력 산정에 관한 연구가 활발히 진행되었지만 파쇄대 및 풍화암 지반에서의 지압력 확인을 위한 연구는 아직 미진한 실정이다.

본 연구에서는 지압형 앵커의 기본 개념을 토대로 확공부에서 발휘되는 지압력 산정을 위하여 도해법, 실내 실험, 수치해석을 통해 지압력 산정방법을 제시하였다. 도해법에서는 지압저항과 마찰저항의 합으로 앵커력을 산정하였고, 실내실험에서는 대상 지반을 풍화암으로 선정하고, 지반강도별 앵커력을 산정하기 위해 실내에서 콘크리트 배합을 통해 12가지 강도의 모형지반을 조성하여 인발시험을 수행하였다. 실내실험용 콘크리트 배합에서는 일정 수준 이상의 강도를 구현하는데 어려움이 있어 20~70 MPa 강도에 대해서는 수치해석을 수행하여 앵커력을 산정하였다.

지반앵커

지반앵커 보강원리

지반앵커는 지지방식에 따라 마찰형, 지압형 앵커와 이 두 가지 앵커의 장점을 접목시킨 복합형 앵커로 분류되며, 지반앵커의 보강원리는 Fig. 1과 같고, 힘의 평형관계는 식 (1)로 정의된다.

$$F_a = \int f_s = \int f_g \quad (1)$$

마찰형 앵커는 천공 후 앵커체를 삽입하고, 정착부에 그라우팅을 실시한 후, 앵커두부에서 강연선을 긴장하여 지반 변형을 억제하는 적극적인 보강방법이다. 이때 작용하는 앵커력은 앵커가 정착된 지반과 그라우트 사이의 마찰저항력과 평형을 이루게 된다(Fig. 2(a)).

지반앵커에서 그라우팅은 정착장 형성을 위한 1차 그

Fig. 1. Reinforcement principles of ground anchor.

Fig. 2. Schematic diagram of anchor resistance.

Fig. 3. Types of bearing anchor.

라우팅, 자유장 공벽유지를 목적으로 하는 2차 그라우팅이 수행되는데, 2차 그라우팅은 1차 그라우팅 양생이 완료되고, 앵커체를 긴장한 후 실시하며, 이때 자유장의 강연선은 쉬스관으로 보호되어 지반과 상호작용을 하지 않으므로 앵커력에 영향을 주지 않는다.

마찰형 앵커의 정착부 길이는 6.0~7.0m가 가장 효율적이며 정착장이 길어질수록 평균 주변마찰저항은 오히려 줄어들어 진행성 파괴 위험이 증가하게 된다 (Ostermayer, 1975). 특히 이암지반에서는 앵커체의 슬립으로 인한 앵커력 손실이 자주 발생하는 것으로 알려져 있다.

지압형 앵커는 크게 확공형과 켜기형으로 분류되며 국내에서는 암반 확공 기술의 한계로 켜기형만을 적용하는 실정이었다. 하지만 최근 Min, et al. (2010)에 따르면 암반에서 사용 가능한 확공 지압형 앵커가 적용되고 있다.

마찰형 앵커와 지압형 앵커의 앵커력 작용 시 정착장의 저항 개념도를 Fig. 2에 나타내었다.

마찰형 앵커는 지반과 그라우트의 마찰력으로 인발에 저항하는 방식이므로 식 (2)에서와 같이 지반의 강성과 정착장(\$L_{fix}\$)이 앵커력 산정의 주요 요소이다.

$$F_A = \int_0^{L_{fix}} \tau_i dx \quad (2)$$

지압형 앵커는 지반과 그라우트의 마찰력과 지반의 지압력으로 인발에 저항하는 방식으로 식 (3)에서와 같이 지반의 지압응력(\$R_B\$)과 탄성계수(\$E_b\$), 확공경(\$d_e\$)이 앵커력 산정에 주요 요소로 작용한다.

$$F_A = \min(\mu R_B^{\max}, 0.5 \alpha E_b d_e) \quad (3)$$

지압형 앵커

지압형 앵커는 1970년대 일본에서 개발된 SSL (Special Support Latched) 앵커를 시초로 볼 수 있으며, 보강원리는 지반과 앵커체의 지압저항으로 앵커력을 발휘하도록 제작된 앵커이다(Fig. 3a). Fig. 3b는 Alexander (1989)에 의해 제안된 앵커체 마찰형의 압축형과 유사한 형태의 앵커이며, Fig. 3c와 3d는 연약지반에 사용되는 지압형 앵커로 각각 Rupiper (1999)와 Zubeke (1975)에 의해 제안되었다.

Fig. 3a와 같은 지압형 앵커는 현재 국내에서도 여러 가지 형태로 적용되고 있으며, 공벽을 압착하는 형태로 지압력을 발휘하는 구조이며, 이러한 구조적 특징으로 인해 1차 그라우팅이 반드시 수행되어야 한다. 또한 앵커체 정착 시 지반의 이방성 및 불균질성으로 인해 편심이 발생하게 되고 긴장력이 일부 강연선에 집중되어 설게 앵커력 이하에서 강연선의 파단이 발생할 수 있다.

(a) enlarged borehole

(b) Schematic diagram of EBA Setting

Fig. 4. Enlarged-borehole overview. **Fig. 5.** Structure of an enlarged borehole anchor.

금번 연구에서 사용된 확공을 이용한 지압형 앵커는 Fig. 4(a), 4(b)와 같이 정착장을 확공하고 앵커체를 설치하기 때문에 지반의 강성에 따라 1차 그라우팅 없이 인장을 수행할 수 있다. 확장날개가 확공부 전면에 압착되어 지압력뿐만 아니라 주면마찰력까지 발휘할 수 있어 낮은 탄성계수를 가지는 풍화암 또는 연암과쇄대에서도 적용 가능하게 되었다.

실내실험에 사용된 지압형 앵커체는 타격바와 확장췌기, 확장날개로 구성되며, Fig. 5에서와 같이 앵커체가 확장되기 전에는 타격바가 확장날개 외부로 돌출되어 있으나, 확장 후에는 확장날개 내부로 삽입되면서 확공된 정착부의 공벽에 압착하게 된다. 지압형 앵커체의 확장 원리는 앵커체를 천공홀에 삽입하면 타격바가 천공홀 바닥면에 맞는 것과 동시에 타격췌기가 앵커 두부 쪽으로 밀려올라가면서 확장날개를 1차 확장하게 되고, 이때 강연선을 인장하게 되면 1차, 2차 확장췌기가 앵커 두부 쪽으로 이동하면서 확장날개를 완전히 확장하여 확공 벽면에 압착되는 원리이다.

도해법에 의한 지압력 산정

지압형 앵커는 그라우팅 전 인장을 위하여 정착부를 확공하고 확공된 천공홀에 밀착하여 지압저항과 마찰저항을 동시에 발휘하여 인발에 저항하는 구조를 갖는다. 앵커의 지압저항에 대해서는 Mariupol'skii (1965)와 Niroumand and Kassim (2010)에 의해 도해적으로 제안된 바가 있지만 이는 연직으로 저항하는 모델로 실제 지압형 앵커의 지압부 형상과는 차이가 있다(Fig. 6).

본 연구에서는 한계평형적인 접근으로 앵커의 지압력을 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 지압형 앵커는 천공 후 Fig. 7과 같이 지반 내에 정착하게 되어 앵커력을 작용시키면 지반은 작용된 앵커력에 대해 지압저항과 마찰저항을 하게 된다.

Fig. 7에서 지압형 앵커에 적용 가능한 앵커력의 크기는 확공 어깨부에서 발휘되는 지압력과 공벽에서 발휘되는 마찰력의 합으로 나타낼 수 있으며 지반의 지압저항력을 S_b , 마찰저항력을 S_f 라 하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 6. Bearing resistance of anchor (Mariupol'skii, 1965).

Fig. 7. Bearing resistance diagram of an anchor.

$$F_{pre} = S_b + S_f \quad (4)$$

여기서, F_{pre} : 적용 가능한 앵커력

지반의 지압저항력(S_b)을 구하기 위하여 지압력을 받는 지반의 자유물체도를 그려보면 그림 Fig. 8과 같이 3개의 연직력과 3개의 전단력으로 저항하게 된다.

Fig. 8에서와 같이 총 6개의 변수를 이용하여 지압력을 산정하는 것은 천공경의 형상이 원형임을 감안할 때 매우 어려운 일이다. 따라서, 본 연구에서는 편의상 사면안정 기법인 한계평형법의 개념을 도입하였다.

Fig. 8. Free body diagram of the bearing of an anchor.

Fig. 9. Failure surface of a bearing anchor.

지반은 점착력만 존재하며 지압저항력(S_b)은 확장된 천공경에 고르게 분포한다고 가정하고 지반의 파괴는 확장된 천공경에서 시작한다고 가정하면 지반 파괴면은 Fig. 9와 같이 표현된다.

Fig. 9에서 천공홀을 완벽한 원형이라 가정할 때 지압력의 분포는 x 축을 기준으로 Axi-symmetric이므로 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 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \sqrt{r_e^2 - x^2} \quad (5)$$

$f(x)$ 를 이용하여 전체 파괴면의 면적(S)을 구하면 회 전체의 면적공식을 이용하여 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (6)에서 d 는 파괴면이 끝나는 점의 x 좌표이다.

$$S = \int_0^d 2\pi f(x) \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx \quad (6)$$

Table 1. Applied material properties for preliminary analysis.

Division	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Uniaxial Compressive Strength (MPa)
Model Ground	3.0	0.17	Variable
Steel Casing	210	0.30	-
Anchor Body	210	0.30	-

Fig. 10. Analysis condition for the preliminary analysis.

여기서, $d = \sqrt{r_e^2 - r_i^2}$

지반의 일축압축강도를 σ_c 라 하면 지압저항력(S_b)은 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_b = \frac{\pi}{2} r_e \sqrt{r_e^2 - r_i^2} \sigma_c \quad (7)$$

실내실험에 의한 지압력 산정

예비해석

지압형 앵커의 실내실험에 사용된 콘크리트 모형 지반의 크기는 인접한 강재 케이싱과의 거리에 따라 파괴형태가 달라져 인발력의 크기에 영향을 미칠 수 있으므로 합리적인 모형지반의 크기를 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 수치해석 기법을 이용하였다.

수치해석에 사용된 프로그램은 지반공학 분야에서 연구와 실무에 널리 쓰이는 유한차분 연속체 해석 프로그램 FLAC 3D이다.

본 해석에 사용된 요소는 강재 케이싱과 콘크리트 모형지반 모사에 Solid element가 사용되었으며 구성모델은 강재 케이싱에 Elastic Model, 콘크리트 모형지반에 Mohr-Coulomb 모델이 각각 적용되었다.

본 해석은 단순히 실내실험용 시편의 크기를 결정하는 해석이므로 해석의 변수는 콘크리트 시편의 지름이며 시편은 원통형이므로 해석 시간을 단축시키기 위해 반단면 모델링을 하였다.

해석에 적용된 물성치 및 경계조건은 Table 1 및 Fig. 10과 같다

수치해석결과 모형지반의 반지름이 30 ~ 100 cm으로 변화하는 동안 앵커체의 인발 하중-변위 관계는 크게 변화가 없었으며, 특히 지압형 앵커의 적용 앵커력 크기를 결정짓는 최대 인발 하중의 크기는 모든 해석사례에서 동일하게 나타났다(Fig. 11).

따라서 실내실험의 규격은 편의성과 경제성을 고려해 모형지반의 반지름은 30 cm를 적용하였다.

실내실험

본 연구에서는 균질한 지반을 모사하기 어려운 현장실험의 한계를 극복하기 위해 다양한 지층조건별로 실험을 수행할 수 있도록 실내실험을 수행하였다. 실험의 편의성을 고려하여 자유장을 축소된 지압형 앵커체를 사용하였고, 모형지반은 콘크리트로 모사하였다(Fig. 12).

모형지반의 강도는 콘크리트의 배합설계를 통해 일반적인 풍화암 강도범위로 적용하였으며 모형지반의 강도를 측정하기 위하여 각 실험구마다 실험용 시편 3개를 제작하여 일축압축실험으로 모형지반의 강도를 측정하였다(Fig. 13).

실내실험은 모형지반의 강도별로 12 Case에 대하여 수행되었으며 해석 Case 및 실험결과를 Table 2와 같다.

Fig. 11. Results of the preliminary analysis.

Fig. 12. Laboratory model and test anchor.

Fig. 13. Uniaxial compressive test.

지압력 산정

실내실험 결과 모형지반의 강도는 2.63 MPa ~ 15.98 MPa로 조성되었으며 최대 인발력은 135 kN ~ 393 kN으로 평가되었다.

실내실험 결과 지압형 앵커의 변위-하중 관계는 초기에는 비교적 완만하게 증가하는 것으로 평가되었으며 인발이 진행될수록 인발력이 급격히 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 14).

Table 2. Results of laboratory test.

Division	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Pull-Out Resistance (kN)	Division	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Pull-Out Resistance (kN)
Case-1	2.63	135	Case-7	8.21	350
Case-2	3.57	150	Case-8	9.06	410
Case-3	4.46	170	Case-9	12.06	370
Case-4	5.57	210	Case-10	14.60	400
Case-5	6.72	240	Case-11	15.87	420
Case-6	7.16	250	Case-12	15.98	393

Fig. 14. Relationship between displacement and pull-out resistance.

Fig. 15. Results of laboratory tests.

Fig. 16. Regression analysis results from the laboratory tests.

이러한 인발력의 급격한 증가는 일정비율 이상 확장이 진행되어야 주면마찰력이 발휘되는 지압형 앵커체의 특성상 초기 지압력만 발휘되는 구간에서는 인발력이 완만한 기울기로 증가하다가 앵커체가 충분히 확장되어 마찰저항이 추가되는 구간부터 인발력이 급격하게 증가하기 때문에 나타나는 양상으로 판단된다.

실내실험 결과 모든 Case에 대한 일축압축강도(σ_c)와 인발력($F_{pullout}$)의 상관관계는 Fig. 15와 같으며, 실험결과 중 전체적인 경향에서 크게 벗어나는 Case-7과 Case-8의 결과를 제외하고 회귀분석을 수행한 결과(Fig. 16) 일축압축강도와 인발력의 상관관계는 다음 식 (8)과 같다.

$$F_{pullout} = 28.53 \sigma_c \quad (8)$$

수치해석에 의한 지압력 산정

실내실험에서 다루지 못한 지반의 일축압축강도 범위에 대해 3차원 수치해석을 통하여 지압력 산정을 위한 분석을 수행하였다.

수치해석 조건

본 해석에 사용된 해석방법은 시간에 따른 힘의 확산성을 이용하여 운동방정식과 구성방정식을 연계하는 준정적해석이며, 하중 조건은 확장된 천공경에 상향 연직으로 작용하도록 하였고, 변위속도는 $5 \times 10^{-8} \text{ m/step}$ 의 변위하중이며 해석은 각 해석 사례 당 500,000 step으로 총 변위 2.5 cm이다.

준정적해석 시 변위하중의 크기를 적용하기 위해서는 시스템 전체의 확산성(diffusion effect)을 고려해야 하며 본 연구에서는 임의의 변위하중을 적용하여 해석을 수행하고 해석 경과를 지켜보면서 결과 변동(fluctuation)이 발생하지 않는 변위하중 크기를 시행착오를 통하여 결정하였다.

경계면의 강성은 인접한 격자요소망의 강성과 크기를 이용하여 계산할 수 있지만 대체로 그 값은 인접요소 중 가장 약한 요소 강성의 약 8~10배 정도이며, FLAC3D 매뉴얼에서는 10배 값을 쓰는 것을 권장하고 있다.

본 해석 시 적용된 값은 콘크리트 강성의 10배를 적용하였으며 경계면의 강도는 앵커와 지반 사이의 부착이 없고 마찰저항의 발생도 미미할 것으로 판단되어 '0'으로 적용하였다.

일축압축강도별 총 8 Case의 수치해석을 수행하였으며 수치해석 시 적용된 물성치 및 해석 Case는 각각 Table 3, 및 Table 4와 같다.

수치해석 결과

수치해석 결과 일축압축강도에 따른 지압형 앵커의 인발력은 Fig. 17과 같은 것으로 확인되었으며 수치해석

Table 3. Applied material properties for numerical analysis.

Division	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Uniaxial Compressive Strength (MPa)
Model Ground	3.0	0.17	Variable
Steel Casing	210	0.30	-
Anchor Body	210	0.30	-

Table 4. Analysis case of numerical analysis.

Division	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
Uniaxial Compressive Strength (MPa)	1	5	10	20	30	40	50	70

Fig. 17. Results of numerical analysis.

결과를 통한 지반의 일축압축강도와 인발력의 상관관계는 식 (9)과 같다.

$$F_{pull\ out} = 9.93 \sigma_c \quad (9)$$

지압력 산정 결과 및 고찰

본 연구에서는 지압형 앵커의 그라우팅 전 적용 가능한 앵커력의 크기를 산정하고자 도해적 방법, 수치해석적 방법, 실험적 방법을 이용하였다. 도해법의 경우 지압력이 일축압축강도가 10 MPa일 때 133 kN으로 지반강도의 약 13.3배로 확인되었고, 수치해석에서는 동일한 일축압축강도에서 99 kN으로 강도의 9.9배로 산정되었다. 실내실험에서 지압력은 일축압축강도별로 다소 차이가 있지만 회귀분석식에 따르면 지압력이 강도보다 28.5 배 큰 것으로 분석되었다. 지압력 산정결과를 도시하면 Fig. 18과 같이 도해적인 방법과 수치해석적인 방법은 비슷한 값을 나타내는 반면 실험결과는 나머지 두 값을 상회하는 것을 확인할 수 있다.

지압형 앵커는 인발력이 작용되면 먼저 전면에서 지

Fig. 18. Comparison of bearing resistance estimated using different models.

압저항을 발휘하고 이후 앵커체 내부의 켤레가 측면의 지압판에 닿을 만큼의 변위가 발생되면 횡방향 마찰저항이 발생하게 된다.

그러나 본 연구에서 수행된 도해법 및 수치해석은 순수 지압력에 대한 분석결과이며 실내실험의 경우 확공 어깨부에서 발휘되는 지압력과 확장날개와 공벽 사이에서 발생하는 마찰저항력이 복합적으로 작용한 결과이므로 실내실험 결과가 도해법 및 수치해석에 의한 결과보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

또한, 도해적 방법과 수치해석적 방법의 차이는 도해적 방법에 의한 지압력 산정 시 가정된 파괴면과 수치해석 시 나타난 파괴영역의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 따라서 도해적 방법 적용을 위해서는 확공 어깨부 파괴형상에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

그러나 지압형 앵커는 앵커체 확장 시 지압력뿐만 아니라 주변마찰력에 의해서도 인발에 저항하는 구조이므로 실제 지압형 앵커의 인발력은 실내실험 결과와 유사

할 것으로 판단된다.

향후 지압형 앵커의 정확한 인발력 평가를 위한 현장 실험을 수행하고 그 결과를 실내실험 결과와 비교 분석하여 지압형 앵커의 거동특성 및 인발력에 대한 평가를 수행하고 이를 통해 설계 시 적용 가능한 지압력 산정식 제시를 위한 추가 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

결 론

본 논문에서는 지압형 앵커에 대하여 도해법, 실내실험, 수치해석적 접근을 통하여 지압형 앵커의 지압력 산정방법에 대한 연구를 수행하였으며 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 지압형 앵커의 그라우팅 전 적용 가능한 앵커력 크기를 알아보기 위해 수행된 연구방법은 한계평형법을 응용한 도해적 방법, 모형지반을 형성하여 인발시험을 실시한 실험적 방법, 지반조건별 인발과정을 모사한 수치해석적 방법을 활용하였다.
2. 도해적 방법으로 연구한 결과 지압형 앵커의 그라우팅 전 적용 가능한 긴장력은 천공경(r_t)과 확장되는 천공경(r_e), 지반의 일축압축강도(σ_c)의 함수이며, 실험 앵커의 제원별 적용 가능한 앵커력은 일축압축강도의 약 13.3배로 나타났다.
3. 실내실험을 통한 연구결과는 도해적 방법과 수치해석을 통한 결과보다 높은 값인 일축압축강도의 약 28.5배로 나타났으며 이는 지압형 앵커의 저항 매커니즘에서 확인할 수 있듯이 도해적 방법이나 수치해석적인 방법에서 생략된 마찰저항이 추가되었기 때문인 것으로 판단된다.
4. 수치해석적 방법을 통한 연구결과 실험 앵커의 제원별 적용 가능한 앵커력은 일축압축강도의 약 9.9배로 나타났다.
5. 향후 현장 시험시공을 수행하고 그 결과를 실내실험 결과와 비교 분석하여 지압형 앵커 설계 시 적용 가능한 지압력 산정식을 제시하기 위한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- Alexsander, W. A., 1989, Post ground anchor and method. U.S. Patent No 4,803,812.
- Kim, N. K., Joo, Y. S., Kim, S. J., Kim, S. K., and Seo, H. K., 2009, Expansion ratio and ultimate load of pulse-discharge bulb anchors, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 25(7), 5-10 (in Korean with English abstract).
- Kim, T. S., Sim, B. K., Lee, S. K., and Lee, I. M., 2010, The effect of pressurized grouting on pullout resistance and the group effect of compression ground anchor, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 26(6), 5-19 (in Korean with English abstract).
- Lee, B. J., Kim, J. S., and Lee, J. K., 2012, The pullout characteristics of MC anchor in shale layer, *Journal of the Korean Geo-environmental Society*, 13(1), 53-61 (in Korean with English abstract).
- Mariupol'skii, L. G., 1965, The bearing capacity of anchor foundations, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2(1), 26-32.
- 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*, November, 59-63 (in Korean).
- Niroumand, H. and Kassim, K. A., 2010, Analytical and numerical study of horizontal anchor plates in cohesionless soils, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1-12.
- Ostermayer, H., 1975, Construction, carrying behavior and creep characteristics of ground anchors, *Diaphragm walls & anchorages*, ICE London, September 1974, 141-151.
- Rupiper, S., 1999, Ground anchor device for penetrating an underground rock formation. U.S. Patent No 5,919,005.
- Yoo, N. J., Park, B. S., Park, C. D., Hong, Y. G., and Lee, J. Y., 2006, Experimental study for the structural stability of permanent anchor, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 10(5), 87-96.
- Yun, J. M. and Song, Y. S., 2009, The behavior of earth retention wall installed in cut slope, *Journal of Engineering Geology*, 19(4), 475-482.
- Zubeke, R. H., 1975, Ground anchor with pivoting fluke. U.S. Patent No 3,888,057.

민경남

(주)세종이엔씨(www.sjenc.co.kr) 대표이사
305-301 대전광역시 유성구 온천북로 23,
내길빌딩 4층
Tel: (042) 828-6262
Fax: (042) 828-6263
E-mail: knmin4183@naver.com

이재원

(주)세종이엔씨(www.sjenc.co.kr) 상무이사
305-301 대전광역시 유성구 온천북로 23,
내길빌딩 4층
Tel: (042) 828-6262
Fax: (042) 828-6263
E-mail: bigljw@naver.com

이중관

(주)세종이엔씨(www.sjenc.co.kr) 기술연구소장
305-301 대전광역시 유성구 온천북로 23,
내길빌딩 4층
Tel: (042) 828-6261
Fax: (042) 828-6263
E-mail: amos4774@hanmail.net

정찬묵

우송대학교 철도물류대학 철도건설시스템학과
300-718 대전광역시 동구 동대전로 171 서캠퍼스
철도물류관 B211호
Tel: (042) 629-6710
Fax: (042) 629-6709
E-mail: cmjung@wsu.ac.kr