

원심모형실험을 활용한 선단확장형 마이크로파일의 설치 메커니즘 평가

Evaluation of the Installation Mechanism of the Micropile with the Base Expansion Structure Using a Centrifuge Model Test

김 재 현¹ Kim, Jae-Hyun 김 석 중² Kim, Seok-Jung
한 진 태³ Han, Jin-Tae 이 석 형⁴ Lee, Seokhyung

Abstract

Micropiles are widely used in construction field to enhance bearing capacity and reduce settlement of existing foundation. It has various benefits such as low construction expense, simple installation process, and small construction equipment. Recently, new micropile equipped with the base expansion structure at the end has been developed to improve the foundation bearing capacity. The improvement of load capacity can be conceptually achieved by expanding the base expansion structure when a load is applied to the micropile. However, the expansion mechanism of the base expansion structure and the improvement of load capacity of the micropile were not yet experimentally validated. Therefore, in this study, a series of centrifuge model tests was performed to evaluate the effect of the base expansion structure on the improvement of load capacity. Two types of soil, sand and weathered rock, were prepared and the loading tests were performed using the real micropile with the base expansion structure. During the tests, the earth pressures surrounding the base expansion structure were monitored. As a result, when a load of 30 kN was applied to the micropile, the increase in the ratio of the horizontal to vertical pressure increment ($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$) ranged from 0.4 to 0.58 in sand and $\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v = 0.19$ in weathered rock, respectively. Therefore, it can be concluded that the increase in the horizontal earth pressure adjacent to the base expansion structure will improve the bearing capacity of the micropile.

요 지

마이크로파일은 기초의 지지력 증대와 침하량 저감을 위해 건설분야에서 널리 활용되는 기초이다. 본 기초는 낮은 건설비용, 단순한 시공 프로세스와 비교적 작은 장비로 시공이 가능하다는 장점이 있다. 최근 지지력을 효과적으로 증대시킬 수 있는 선단확장형 마이크로파일이 개발되었다. 본 기초는 수직하중이 재하될 때 마이크로파일 선단부에 설치된 지압구가 팽창하여 주변지반에 작용하는 수평토압을 증가시키며, 이로 인해 기초의 지지력이 향상된다. 하지만, 현재까지 지압구 확장 메커니즘과 지지력 증대효과가 실험적으로 명확히 검증되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 지압구의 설치효과를 검증하기 위해 원심모형실험이 수행되었다. 이를 위해, 모래지반과 풍화암으로 구성된 지반

1 정회원, 강원대학교 문화예술·공과대학 건축토목환경공학부 토목공학전공, 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engr., The College of Art, Culture and Engr., Kangwon National Univ.)

2 정회원, 한국건설기술연구원 기획조정본부, 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Planning and Coordination Dept., Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부, 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)

4 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부, 박사후연구원 (Member, Post-doctoral Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology, Tel: +82-31-995-0955, Fax: +82-31-910-0561, seokhyung@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 각각 조성하고, 실제 선단확장형 마이크로파일에 대한 하중재하실험을 수행하였으며, 기초에 수직하중이 작용할 때 지압구 주변에 설치된 토압계를 통해 지압구의 팽창거동을 관찰하였다. 실험 결과, 30kN의 하중이 기초에 작용할 때 모래지반에서는 수직토압대비 수평토압의 증가량($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$)이 0.4 - 0.58의 범위를 보였으며, 풍화암지반에서는 $\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v = 0.19$ 로 확인되었다. 본 결과를 통해 지압구 확장에 따른 수평토압 증가가 실험적으로 확인되었으며, 이로 인해 마이크로파일의 지지력이 증가될 것으로 판단된다.

Keywords : Base expansion type micropile, Bearing capacity, Centrifuge test, Sand, Weathered rock

1. 서론

마이크로파일(micropile)은 직경 300mm 이하의 소구경 말뚝으로 1950년대 초반 건축물 기초 보강용으로 이탈리아에서 최초로 개발되었으며, 간단한 시공법과 저렴한 공사비용으로 현재까지도 각종 구조물의 보수보강 및 증축 기초에 활용되고 있다(Han et al., 2013). 초반에는 주로 소규모 구조물에 적용되었으며 강봉에 콘크리트를 타설하여 ‘X’자 형태로 설치하였으나, 공법의 발전을 통해 여러 형태의 마이크로파일로 변모하였다. 국내에서는 주로 크롤러 드릴(crawler drill)을 이용하여 지반을 일정 깊이로 천공하고 말뚝체를 삽입 후 그 주변에 그라우트제를 주입하여 지반과 결합하는 방식이 활용되고 있다. 이러한 방식의 마이크로파일은 작은 직경으로 높은 지지력을 발휘할 수 있으므로 큰 장비가 진입하기 어려운 기존 구조물 기초보강이나 연약지반에 설치되는 가교 등에 많이 활용되고 있다(Lee and Im, 2006; Hwang et al., 2018). 뿐만 아니라 시공 중 진동이나 소음이 적어 민원문제에도 비교적 자유로워 도심지에서

널리 활용되고 있다. 하지만, 지반천공 및 그라우팅 주입과 같은 마이크로파일의 시공과정은 지반조건에 크게 영향을 받는데 연약지반에서는 그라우트제 침투저하, 사질토 지반에서는 지하수에 따른 그라우트제 고결 시간 장기화, 균열이 많은 암반에서는 공벽 붕괴 가능성 등의 문제가 발생할 수 있다(Lee et al., 2021).

최근 기존의 마이크로파일의 단점을 극복하고자 말뚝 선단에 고정 지압구 구조체를 장착한 선단확장형 마이크로파일이 개발되었다(Lee et al., 2021). 선단확장형 마이크로파일은 지반 천공 후 설치되는 말뚝에 수직하중을 재하 할 때, 말뚝 선단부에 위치한 지압구가 압축 팽창하면서 선단 면적이 확대되고 공벽에 썩기 수평력이 발휘되어 그라우팅 이전에 조기에 안착될 뿐만 아니라 지지력을 증대시킬 수 있는 공법이다(Fig. 1).

선단확장형 마이크로파일에 압축하중 재하시 발생하는 지압구의 팽창 메커니즘과 지지력 증대효과는 기존 연구에서도 확인된 바 있다(Hwang et al., 2018; Lee et al., 2021). 하지만, 기존 연구는 축소모형실험이나 수치 해석기법을 활용한 연구결과로 실제 현장과 유사한 구

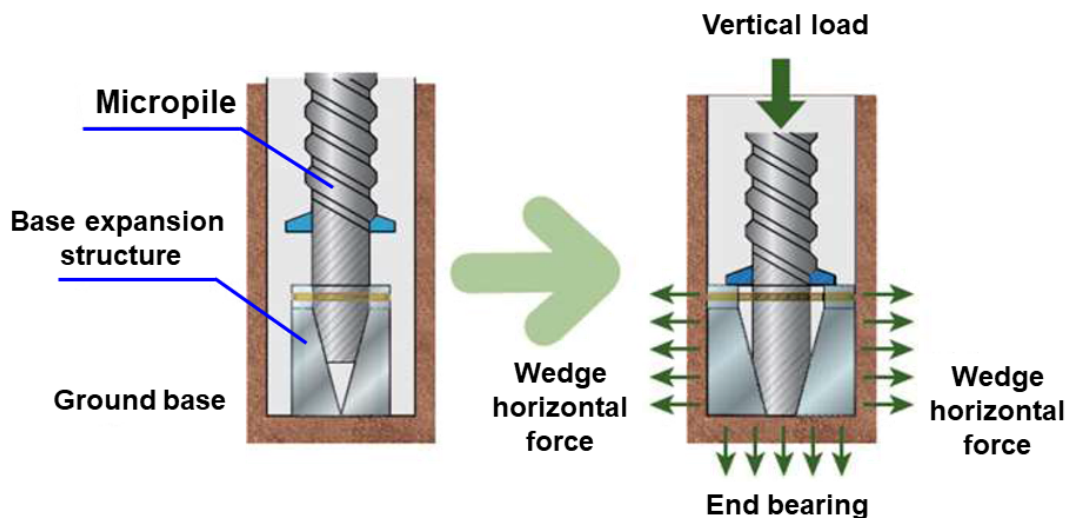


Fig. 1. Conceptual diagram for the installation of base expansion type micropile

속응력 조건에서 선단확장형 마이크로파일의 설치 메커니즘과 지지력 증대효과를 확인할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 원심모형실험기법을 통해 실제 현장의 구속응력과 유사한 조건에서 선단확장형 마이크로파일의 지지성능을 평가하였다. 이때, 지압구의 팽창 거동과 선단확장형 마이크로파일의 지지력 증대효과를 분석하기 위해 다양한 구속응력(지반 관입깊이), 지반 조건(토사 및 풍화암)에서 원심모형실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 선단확장형 마이크로파일에 압축력이 재하 될 때 지압구의 팽창 거동을 확인하였으며, 각 지압구에 작용하는 수직 및 수평력을 측정하여 하중 전달 메커니즘과 지지력 증대효과를 검증하였다.

2. 원심모형실험

2.1 실험장비

2.1.1 원심모형실험기

본 연구에서는 Korea Institute of Science and Technology(KAIST)에 구축된 KOrea Construction Engineering Development(KOCED) 원심모형실험기를 활용하여 모형실험이 수행되었다. KOCED 원심모형실험기는 프랑스 ACTIDYN SYSTEMES SA의 C72-2 빙형 원심모형 실험기 모델로, 회전반경 5m, 최대 용량 240g-tons의 용량이다. 최대 2,400kg의 모형체를 적재한 상태에서 100g(여기서, g는 중력가속도)까지 구현이 가능하다. 또한, 실험 중 공기압과 물, 유압 등을 제공하기 위한 로터리 조인트(rotary joint)와 원심모형실험기 내 계측기 및 전자장비 통신을 위한 Fiber Optic Rotary Joint(FORJ)가 설치되어 있다. 계측장치(data acquisition system)는 National Instruments社의 PXI/SCXI 시스템으로 구성되어 있으며, 원심모형실험기 중앙 상부에 탑재되어 원심모형 실험기와 함께 회전하면서 계측을 실시할 수 있다. 상세한 원심모형실험장비의 제원은 Kim et al.(2013)에서 확인할 수 있다.

2.1.2 모형 말뚝

본 연구에서는 주물(casting)로 제작된 실규모의 마이크로파일을 상사법칙(*scaling law*)을 고려하지 않고 그대로 원심모형실험에 활용하였다. 이는 1) 실제 지압구의 현상을 상사법칙 고려없이 관측할 수 있으며, 2) 지반과 구조물간의 마찰거동을 현실적으로 모사할 수

있고, 3) 높은 상사비(*scaling ratio*)로 축소시 모형구조물 제작상의 어려움을 해소할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 하지만 축소하지 않은 모형구조물을 활용하여 Ng에서 원심모형실험을 실시하므로 지압구의 깊이별로 작용하는 응력과 구조물의 자중(*self-weight*)이 현장 조건과는 다소 차이가 있다. 따라서, 원심모형실험 결과분석에서는 지압구의 위치별 응력조건과 자중을 고려하여 선단확장형 마이크로파일의 설치 메커니즘을 평가하였다.

실험에 사용된 선단확장형 마이크로파일은 강봉과 지압구로 구성된다. 강봉의 선단부는 쐐기(*wedge*)로 구성되어 있으며, 선단부로 갈수록 좁아지는 테이퍼드 형상(*tapered shape*)으로 제작되었다(Fig. 2). 지압구는 마이크로파일의 선단부 쐐기를 중심으로 120° 각도에 3개가 결합되는 구조이다(Fig. 3). 강봉 선단부의 테이퍼드 형상은 마이크로파일에 수직하중이 재하되면서 쐐기가 지압구를 측면방향(관입축의 90° 방향)으로 밀어내는 역할을 한다. 지압구는 마이크로파일이 케이싱 내부로 삽입될 때는 천공홀보다 단면이 작아 삽입이 용이하며, 천공홀 저면에 안착 후 재하 하중이 작용되면 천공홀보다 큰 단면으로 확장되어 공벽을 밀어낸다(Fig. 4). 확장된 지압구는 선단부로 하중을 전달시키는 역할을 할 뿐만 아니라 공벽에 압축력을 가하는 역할을 한다. 또한,

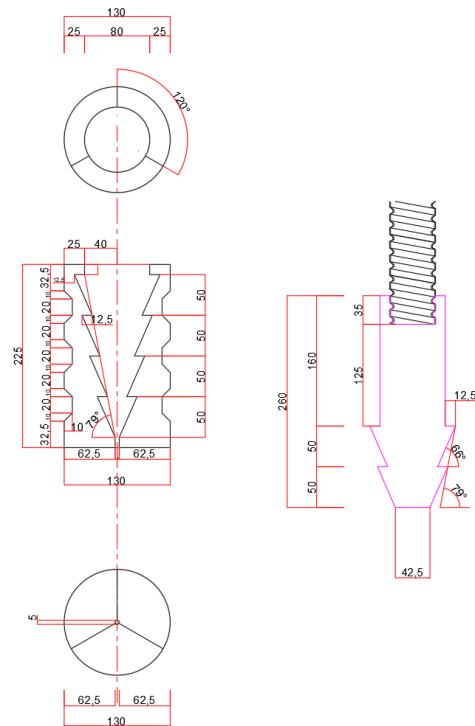


Fig. 2. Dimensions of the micropile with base expansion structure

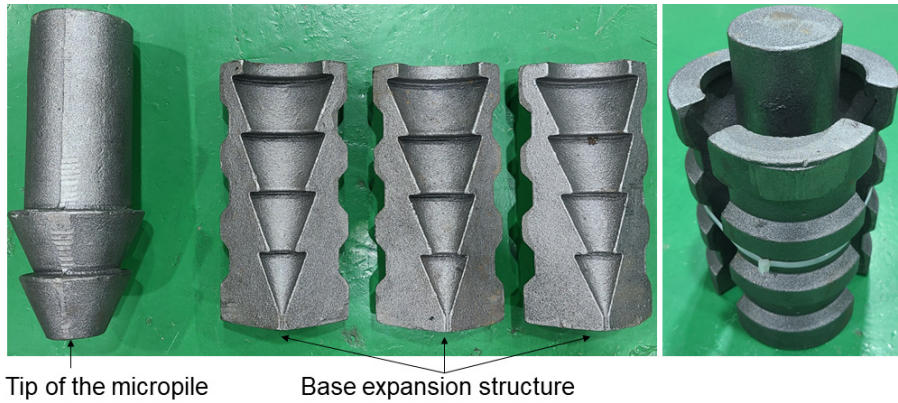


Fig. 3. Micropile with the base expansion structure

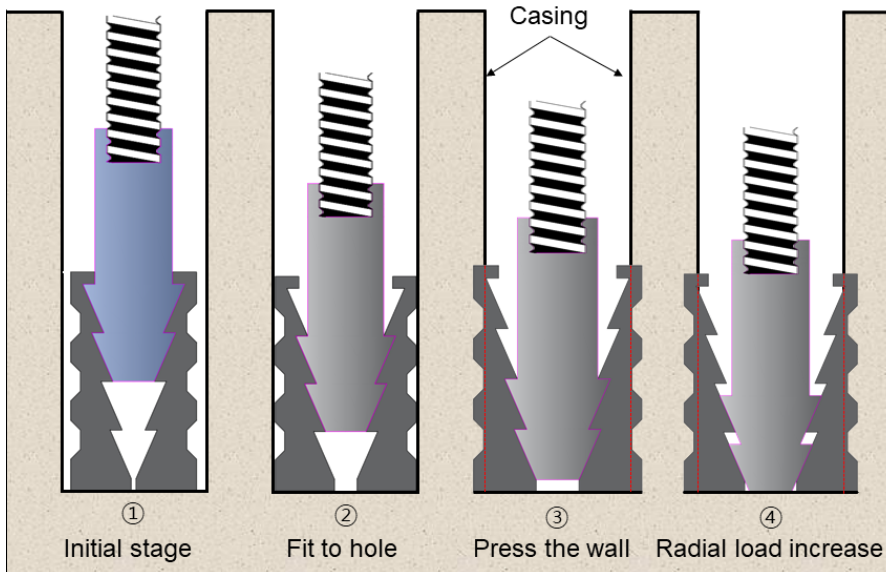


Fig. 4. Installation procedure for base expansion type micropile

마이크로파일과 지압구가 맞닿는 부분을 톱니형태(tooth of a saw)로 제작하여, 강봉에 인발하중이 작용할 때 지압구가 수축되지 않도록 하였다. 주물로 제작된 선단확장형 마이크로파일은 표면상태가 고르지 못하므로 상하부면을 매끄럽게 가공하여 실험에 활용하였다. 제작 완료 후 중량을 측정한 결과 지압구 무게 14.05kg, 강봉은 9.05kg으로 확인되었다.

2.1.3 모형 지반

모래지반을 모사하기 위해 hammer crusher 공정을 통해 원석을 인공적으로 분쇄한 규사(silica sand)를 사용하였다. 제작된 규사는 유효입경(effective particle size, D_{50})이 비교적 작고 균질(homogeneous)하며 표면이 거친 것이 특징이다. 또한 본 연구에 사용된 규사는 상사 법칙에 따른 모래의 입경효과(particle size effect)가 작

으며, 반복적으로 동일한 밀도의 지반을 조성할 수 있다는 장점이 있어 원심모형실험 시 널리 활용되고 있다 (Madabhushi, 2014). 본 실험에서 사용된 규사에 대한 기본 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1. Geotechnical properties of silica sand (Kim et al., 2016)

Item	Properties
Soil classification (USCS)	SP
Maximum dry density, $\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	1,645
Minimum dry density, $\rho_{d,min}$ (g/cm ³)	1,244
Specific gravity (G_s)	2,65
Coefficient of curvature (C_c)	1,11
Coefficient of uniformity (C_u)	1,96
D_{50} (mm)	0,22
Peak friction angle (Φ_p , °)	43,9
Residual friction angle (Φ_r , °)	36,6

모형 풍화암 지반은 규사와 시멘트를 혼합하여 제작하였다. 모형암석은 건설표준품셈에서 제시하고 있는 풍화암의 일축압축강도를 고려하여 $q_u = 10\text{MPa}$ 로 선정하고, 이에 맞춰 제작하였다. Park(2018)은 시멘트, 모래, 물, 지연제를 다양한 배합비로 섞어 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 의 정육면체의 공시체를 만들고, 일축압축강도 시험을 실시하여 배합조건별 공시체의 강도정수를 제시하였다. 본 연구에서는 Park(2018)의 결과를 근거로 배합 중량비를 규사:시멘트:물:지연제 = 1:0.33:0.16:0.0016으로 결정하고, 교반 후 3일간의 양생을 거쳐 모형 풍화암을 조성하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 모형 지반조성

모래지반은 건조 낙사법(dry sand pluviation method)

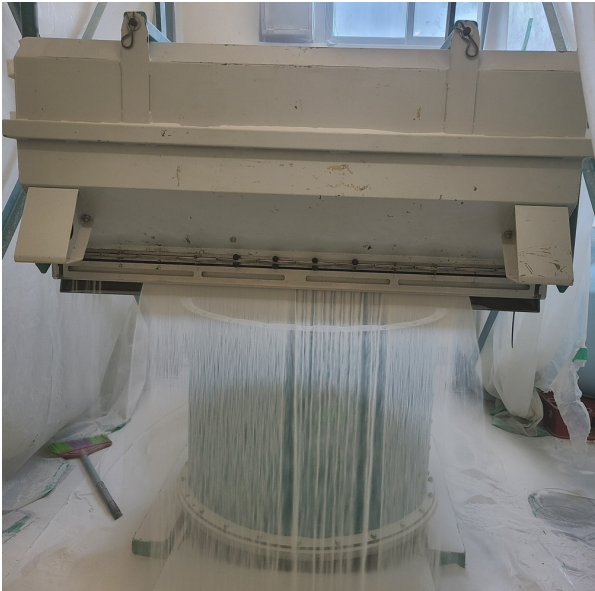


Fig. 5. Raining for the preparation of sand layer

을 이용하여 조성되었다(Miura and Toki, 1982; Lo Presti et al., 1993). KOCED 지오센트리퓨지 실험센터에 보유한 낙사기를 활용하여 낙하높이, 호퍼의 노즐 크기와 이동속도를 조절하여 목표 밀도를 가지는 지반을 조성하였다(Fig. 5). 이때, 지반조성 중 낙하높이를 일정하게 유지하기 위하여 모형지반이 10mm씩 쌓일 때 마다 조성된 지반의 높이를 측정하고 낙사기의 낙하높이를 조절하였다. 목표 두께 이상의 모래층을 조성한 뒤 청소기와 끌개를 이용하여 지표면을 평평하게 하였다. 모형지반 조성이 완료된 후 토조의 중량을 측정하여 밀도 및 상대밀도를 측정하였다.

풍화암 조성을 위해 규사, 초속경 시멘트, 물, 지연제를 적정한 비율로 배합하여 일축압축강도 $q_u = 10\text{MPa}$ 를 만족하는 모형 암석을 제작하였다(Fig. 6). 시멘트 혼합물 교반을 위해 절반으로 절개되는 직경 845mm 높이 450mm의 철제 거푸집을 제작하였으며, 거푸집 내부에 시멘트 혼합물을 넣고 다짐하여 조성하였다. 이때, 균질한 지반을 조성하기 위해 목표 암석 두께인 450mm를 9층으로 나누어 50mm씩 층다짐을 실시하였다. 각 층을 다짐한 후 표면을 긁어 다음 층과의 분리를 최소화하였으며 하부층이 교결되기 전에 상부층 다짐을 실시하였다. 또한, 지압구가 풍화암에 근입된 조건을 모사하기 위해 상부층 조성시 지압구 단면보다 큰 플라스틱 재질의 형틀을 배치시킨 후 모형 암석을 조성하고, 양생이 완료된 후 형틀을 제거하여 지압구가 풍화암에 삽입될 수 있도록 하였다. 조성된 암석은 상온에서 3일 이상의 양생기간을 가진 후 실험을 실시하였다.

2.2.2 모형 말뚝 설치 및 실험절차

상부하중 재하 시 지압구가 압축팽창되어 공벽을 밀



Fig. 6. Preparation of model weathered rock

어내는 메커니즘을 모사하기 위해 지반조성과정에서 지압구와 강봉을 설치하였다. 또한, 지압구 상단에 지압구의 외경과 동일한 강재(steel) 케이싱을 설치하여 실험 중 공벽이 무너지는 것을 방지하였다. 모래지반에서는 지압구가 설치되는 깊이까지 지반을 낙사한 뒤 지압구와 케이싱을 목표위치에 설치하였으며 이후 추가 낙사를 통해 지반을 조성하였다. 지반조성이 완료된 후에는 케이싱 내부의 흙을 진공청소기를 이용하여 제거하였다. 풍화암의 경우 사전에 제작된 모형 풍화암에 마이크로파일을 배치시키고 지압구 상부에 케이싱을 설치한 뒤 낙사를 통해 상부 모래층을 조성하였다.

본 연구에서는 선단확장형 마이크로파일의 설치 최종단계인 지압구가 상부하중에 의해 공벽을 밀어내는 상태를 모사하기 위해 강봉이 지압구의 최하단 썩기에 위치한 상태를 초기조건으로 설정하였다(Fig. 4③).

실험 중 지압구와 강봉에 재하되는 수직하중은 강봉과 하중재하장치 사이에 설치된 로드셀(Loadcell)을 통해 관측하였다(Fig. 7). 또한, 수직하중에 의해 지압구가 확장되는 메커니즘을 확인하기 위해 지압구 중 1개의 하단에 수직방향으로 토압계를 1개 설치하였으며, 지압구 외면에 수평방향으로 토압계를 3개 설치하였다(Fig. 8). 수평방향으로 설치된 토압계는 지압구가 수직하중에 의해 확장되면서 발생하는 토압을 측정하기 위해 계획되었다. 토압계는 일정한 위치에 설치될 수 있도록 사전

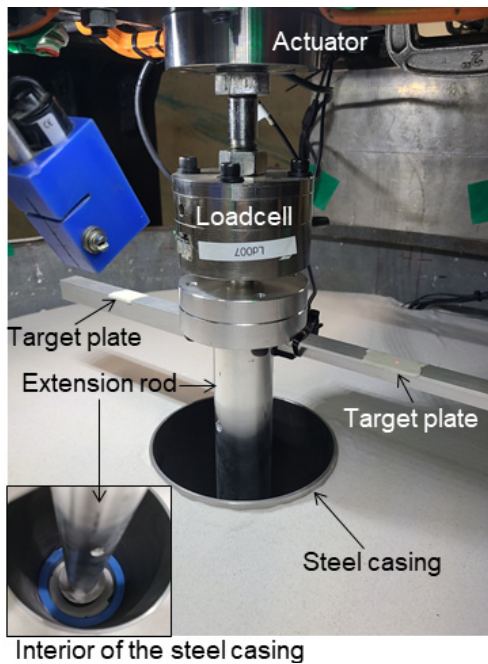


Fig. 7. Setup for centrifuge model test

에 지압구에 6mm 직경의 홈을 내어 플라스틱 봉을 삽입하고 벽면에서 10mm 이격된 상태에서 토압계를 부착했다. 또한, 비접촉식 센서인 레이저 센서(laser sensor)를 이용하여 강봉의 관입량을 측정하였다. 이를 위해 강봉 상단에 알루미늄으로 제작된 타겟판(target plate)을 설치하고 레이저 센서가 타겟의 변위를 측정함으로써 강봉의 관입량을 측정하였다. 레이저 센서는 강봉상단에 180° 방향으로 2개 설치되었으며, 결과해석 시 두 측정값의 평균값을 활용하였다. 이 외 원심모형실험 가속 중 원심가속도 증가로 인해 발생하는 지반 침하를 계측하기 위해 Linear Variable Differential Transformer(LVDT)를 지표면에 설치하였다.

모형지반 조성이 완료된 후 토조 상단에 수직하중재하장치를 설치한 뒤 마이크로파일과 결합하였다. 이때, 전 방향에 대해 마이크로파일의 수직도가 $\pm 0.1^\circ$ 이내가 되도록 조절하여 지압구에 편심하중이 작용하는 것을 최소화하였다. 이후, 실험에 필요한 센서를 설치한 뒤 토조를 원심모형실험기의 바스켓에 거치하였다. 실험준비가 완료된 후, 원심모형실험기를 목표가속도까지 3g/min의 속도로 가속하였으며, 지반 안정화를 위해 목표 원심가속도에서 10분 이상 가속도를 유지하면서 지반 침하를 유도하였다. 이후 0.02mm/s의 등속도로 하중재하실험을 실시하였으며, 전 과정에서 하중, 침하량, 변위, 토압을 계측하였다. 이때, 지압구에 설치된 토압계의 계측값을 실시간으로 확인하면서 허용하는 상한값($\pm 2\text{MPa}$)에 도달 할 때까지 수직하중을 재하하였다.

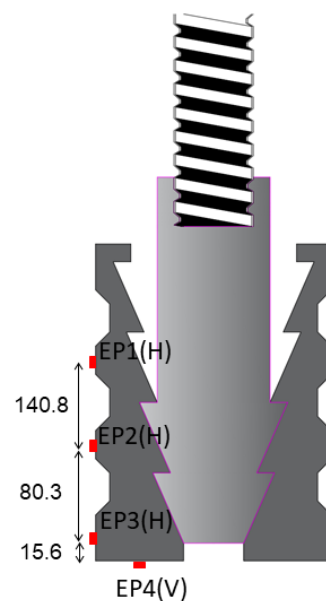


Fig. 8. Location of the earth pressure transducer

2.3 실험 조건

다양한 응력조건(근입깊이) 및 지반조건(모래지반과 풍화암)에서 선단확장형 마이크로파일의 확장 메커니즘을 확인하기 위해 총 4회의 원심모형실험이 수행되었다. 모래지반에서는 다양한 원심가속도 수준(30 - 50g)에서 마이크로파일 하중재하실험(T1 - T3)이 수행되었으며, 암반지반은 40g에서 실험(T4)이 수행되었다. 모든 실험에서 동일한 깊이에 마이크로파일을 설치한 뒤 모형체에 작용하는 원심가속도(centrifugal acceleration)를 조절하여 원형(prototype)으로 다양한 깊이의 응력조건(stress condition)을 모사하였다.

모래지반에서 수행된 실험(T1 - T3)은 원형의 깊이로 환산하면 지표면부터 지압구의 무게중심인 상단에서 2/3

지점까지의 깊이가 9.75m - 16.25m에 해당된다. 이는 일반적으로 마이크로파일의 길이가 10m - 50m 이내임을 감안할 때 일반적인 범위의 관입심도를 모사한다.

풍화암 조건에서는 지압구 전체가 암반에 근입된 조건을 모사하기 위해 지압구 최상단이 암반층보다 깊게 설치되도록 하였으며, 암반층 상부는 규사를 채워 심도 조건을 모사하였다. Table 2와 Fig. 9는 원심모형실험 조건을 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 지압구 표면 토압변화

Figure 10은 마이크로파일에 재하되는 수직하중의

Table 2. Test conditions

No.	Soil type	Soil model dimension (mm)*	Target density	g-level (g)	Penetration depth (m)**	Installation depth of expansion structure (m)***
T1	Silica sand	900(D)×600(H)	$D_r = 68\%$	30	400	5.25–12.0 (9.75)
T2				40		7.0–16.0 (13.0)
T3				50		8.75–20.0 (16.25)
T4	Weathered rock		$q_u^* = 10\text{MPa}$	40		7.0–16.0 (13.0)

* Based on the uniaxial compressive strength of a cubic specimen with a length of 50 mm on one side

** Penetration depth of the end of the micropile from the ground surface in prototype

*** The range of embedded depth from the top to the bottom of the base expansion structure in prototype. The value in bracket is the representative depth where is two-third of the total length of the base expansion structure in prototype.

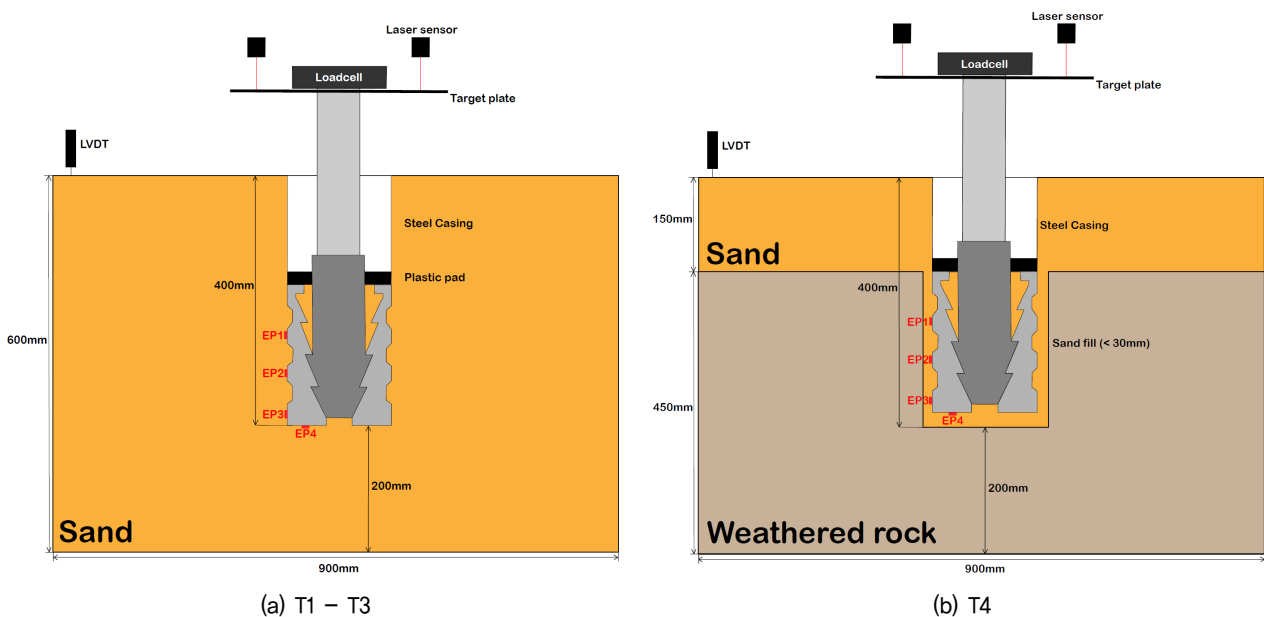
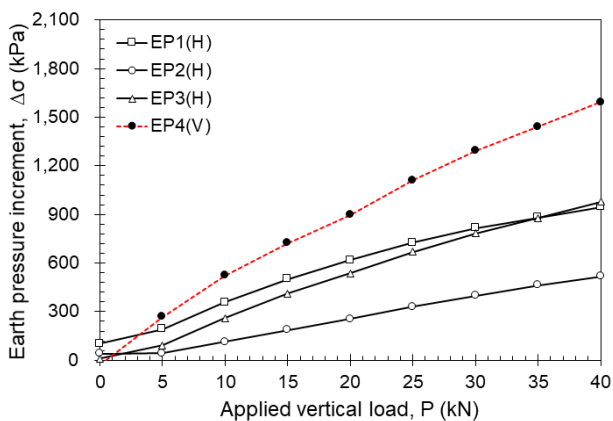


Fig. 9. Schematics of testing setup

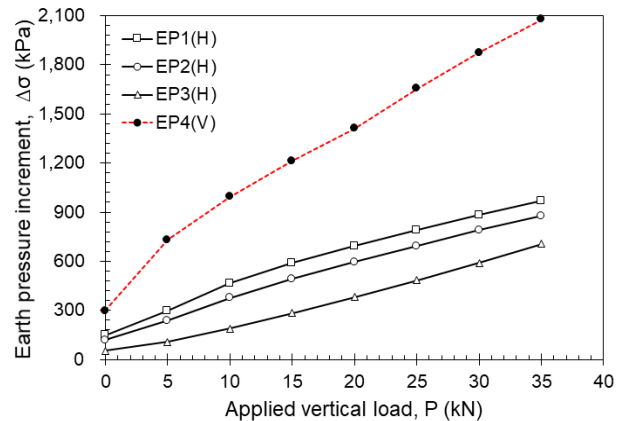
크기에 따른 위치별 토압의 증가량을 나타낸다. 여기서, 토압계의 설치 위치와 명칭은 Fig. 8과 같으며, 범례에 표시된 기호 중 “H”와 “V”는 각각 토압계가 설치된 방향(H; 수평방향, V; 수직방향)을 의미한다. 하중의 크기는 수직하중재하장치로 마이크로파일에 재하된 하중과 기초의 전체 자중을 합한 값을 나타낸다. Figure 10에서 수직하중이 0kN일 때에도 수직 및 수평토압 증가량이 0(zero)이 아닌 것은 목표 중력가속도까지 가속하는 동안 증가되는 마이크로파일의 자중이 하중재하장치에 의해 지지되다가 관입이 시작되면서 기초의 자중(self-weight)이 토체에 즉시 전달되었기 때문이다. 이러한 현상은 중력가속도가 커질수록(또는 깊이가 깊어질수록) 기초의 중량이 증가하여 두드러지게 나타났다. 또한 이를 통해 기초가 지반에 정착되는 과정에서 지압구 하단과 측방향의 토압이 기초의 자중을 부담하는 것을 알 수 있다.

이후, 수직하중이 증가됨에 따라 지압구 하단에 설치된 EP4(V)가 선형적으로 증가하였으며, 지압구 외주면

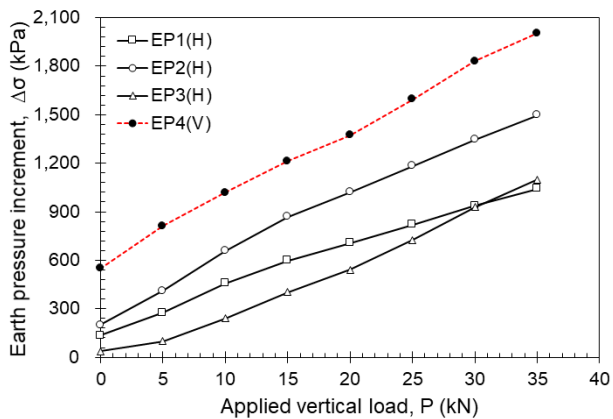
에 설치된 EP1(H) - EP3(H)도 함께 증가되는 것을 확인하였다. T2와 T3에서 수평방향으로 작용하는 토압증가량은 동일한 하중수준에서 비교적 상단(EP1, EP2)의 관측값이 상대적으로 낮은 위치(EP3)에 비해 큰 값을 나타냈다. 이를 통해 지압구 바닥면으로부터 높은 위치에 위치할수록 토압의 증가량이 커지는 경향을 알 수 있다. 강봉에 수직하중이 재하되면 수직하중이 지압구에 전달되어 하단의 수직토압이 증가됨과 동시에 췌기력에 의해 하중 재하방향에 수직한 방향으로 토압(수평토압)이 증가되는 것이 확인되었다. 다만, 지압구 외주면에 발생하는 토압이 위치에 따라 달리 발생하고 있고, 특히 비교적 상단부분(EP1, EP2)에서 토압이 크게 증가한 것을 볼 때 지압구 하단을 중심으로 회전거동이 함께 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 지압구 하단부에서 상단부에 비해 상대적으로 큰 상대하중(토압)이 작용하고 있으며, 지압구 바닥과 지반사이의 마찰력이 지압구 확장을 저해하므로 상단부가 회전하는 거동을 나타내는 것으로 판단된다. 이러한 회전거동은 지압구 내 강봉의 위



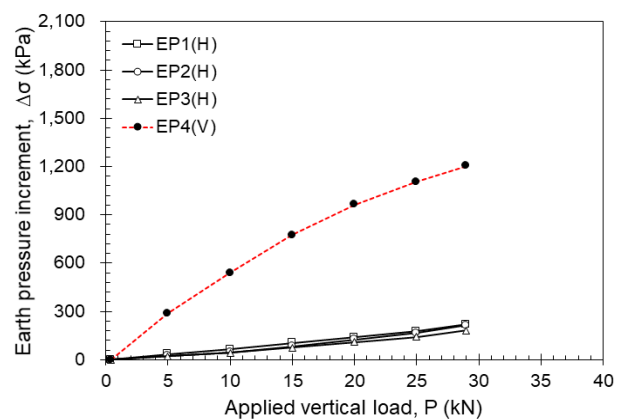
(a) T1



(b) T2



(c) T3



(d) T4

Fig. 10. Vertical and horizontal earth pressure increment with applied load

치, 수직하중 크기, 썬기 형상 등에 영향을 받을 것으로 예상된다. 한편, T1의 경우 EP3(H)의 값이 EP2(H)의 값에 비해 크게 나타났는데, 이는 낮은 구속압 조건(낮은 중력가속도)에서 강봉의 관입량이 커져 썬기력의 합력이 작용하는 지점이 하단부로 상당부분 이동했기 때문으로 판단된다. T1, T2와 T3에서 30kN의 수직하중이 재하될 때 지압구 하단에 작용하는 연직토압 증가량($\Delta\sigma_v$)은 1,292 - 1,830kPa이었으며, 수평토압 증가량($\Delta\sigma_h$)은 355 kPa - 1,251kPa의 범위를 보였다.

Figure 10(d)는 일축압축강도 10MPa 수준의 모형 풍화암에 지압구가 완전히 근입된 조건에서 수직하중에 따른 토압증가량을 나타낸다. 모래지반에서의 결과와 달리 수직하중이 0kN인 시점에서 수직 및 수평토압 증가량이 0에 가까운 것은 모형 풍화암이 모래지반에 비해 단단하여 원심모형실험기 가속 중 토체에 침하가 발생하지 않고 기초의 자중을 모형 풍화암이 저항하고 있었기 때문으로 판단된다. 즉, 하중을 재하하는 시점에서 마이크로파일의 자중이 이미 토압(EP1 - EP4)에 반영되어 있었기 때문에 급격한 증가가 발생하지 않은 것으로 판단된다. 실험결과, 모래지반에서 수행된 실험과 유사하게 수직하중이 증가됨에 따라 지압구 하단에 설치된 EP4(V)가 크게 증가하였으며, 이와 함께 지압구 외주면에 설치된 EP1(H) - EP3(H)도 증가되는 것을 확인하였다. 하지만, 모래지반의 실험결과에 비해 수평토압 증가량($\Delta\sigma_h$)의 값이 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 지압구 하단이 단단한 암석으로 이루어져 수직하중이 재하되더라도 관입량이 모래지반에 비해 작아 지압구가 썬기력에 의해 크게 팽창되지 않기 때문으로 판단된다. 또한 모래지반과 마찬가지로, 지압구 상단부에 설치된 EP1(H)와 EP2(H)에 비해 하단부에 설치된 EP3(H)의 크기가 작게 나타났으며, 이를 통해 수직하중이 재하될 때 지압구가 좌우로 펼쳐지면서 회전하는 거동을 보인다는 것을 알 수 있다. 수직하중 30kN이 재하될 때 지압구 하단에 작용하는 연직토압 증가량($\Delta\sigma_v$)은 1,202 kPa이었으며, 동일한 하중수준에서 수평토압 증가량($\Delta\sigma_h$)은 180kPa - 210kPa의 범위를 보였다.

3.2 침하량에 따른 토압변화

Figure 11은 침하량에 따른 지압구 표면의 토압 변화량을 나타낸다. Figure 11에서 하중재하 후 수직토압 증가량 EP4(V)가 급격히 증가하다가 꺾이는 거동을 보이

나 이는 강봉의 선단부가 지압구의 선단부와 동일한 위치까지 관입(Fig. 4④)되면서 지압구에 집중되어 있던 수직응력을 강봉의 선단부가 일부 분담(sharing)하기 때문인 것으로 판단된다.

모래지반에서는 수직하중 30kN작용 시 4.89mm - 6.20mm의 침하가 발생하였으며, 설치 깊이가 깊어짐에 따라(중력가속도가 높아짐에 따라) 동일하중에서 침하량이 작았다. 풍화암에서는 30kN의 수직하중이 작용할 때 2.69mm의 침하가 발생하였다. 토압증가량은 침하량이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 패턴을 보였다. 특히, 지압구 하단과 외주면의 토압이 동시에 증가하는 것을 통해 지압구의 썬기력이 지압구를 팽창시키게 함을 알 수 있다.

3.3 토압비

Figure 12는 하중이 재하될 때 발생하는 수평방향과 수직방향의 토압증가량 비($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$)를 하중의 크기에 따라 도시하였다. 그 결과, 전반적으로 수직토압 대비 수평토압의 비($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$)는 모래지반에서 0.16 - 0.74, 풍화암에서 0.09 - 0.19의 분포를 보였다. 또한, 모래지반에서 토압증가량 비($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$)는 하중이 커짐에 따라 증가하다가 일정한 값에 수렴하였으며, 지압구 하단에 비해 상단부의 토압증가량 비가 크게 나타났다.

한편, 모래지반에 비해 풍화암 지반에서 수평토압 비가 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 풍화암지반에서는 하중재하에 따라 발생하는 침하량이 작아 지압구가 확장하는데 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다. 반면 모래지반의 경우 수직하중이 재하됨에 따라 지압구 선단부의 지반침하가 상대적으로 크게 유발되며 지압구의 팽창거동이 두드러지게 나타난다. 따라서, 지압구의 암반 근입조건 유무 또는 정착지반의 강성조건에 따라 지압구의 팽창거동과 토압증가량 비가 다르게 나타남을 알 수 있으며, 모래지반에서 지압구의 팽창에 의한 수평토압의 증가량이 크므로 지지력 증대효과가 상대적으로 클 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실험 초기단계를 강봉이 지압구의 최하단 썬기에 위치한 상태(Fig. 4③)로 설정하였으며, 지압구의 특정 위치에 수직하중이 집중되어 지압구가 회전하는 거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 말뚝에 작용하는 수직하중이 비교적 작다는 점에서 본 연구결과는 특정 실험조건에 국한된다고 할 수 있으며, 강봉과

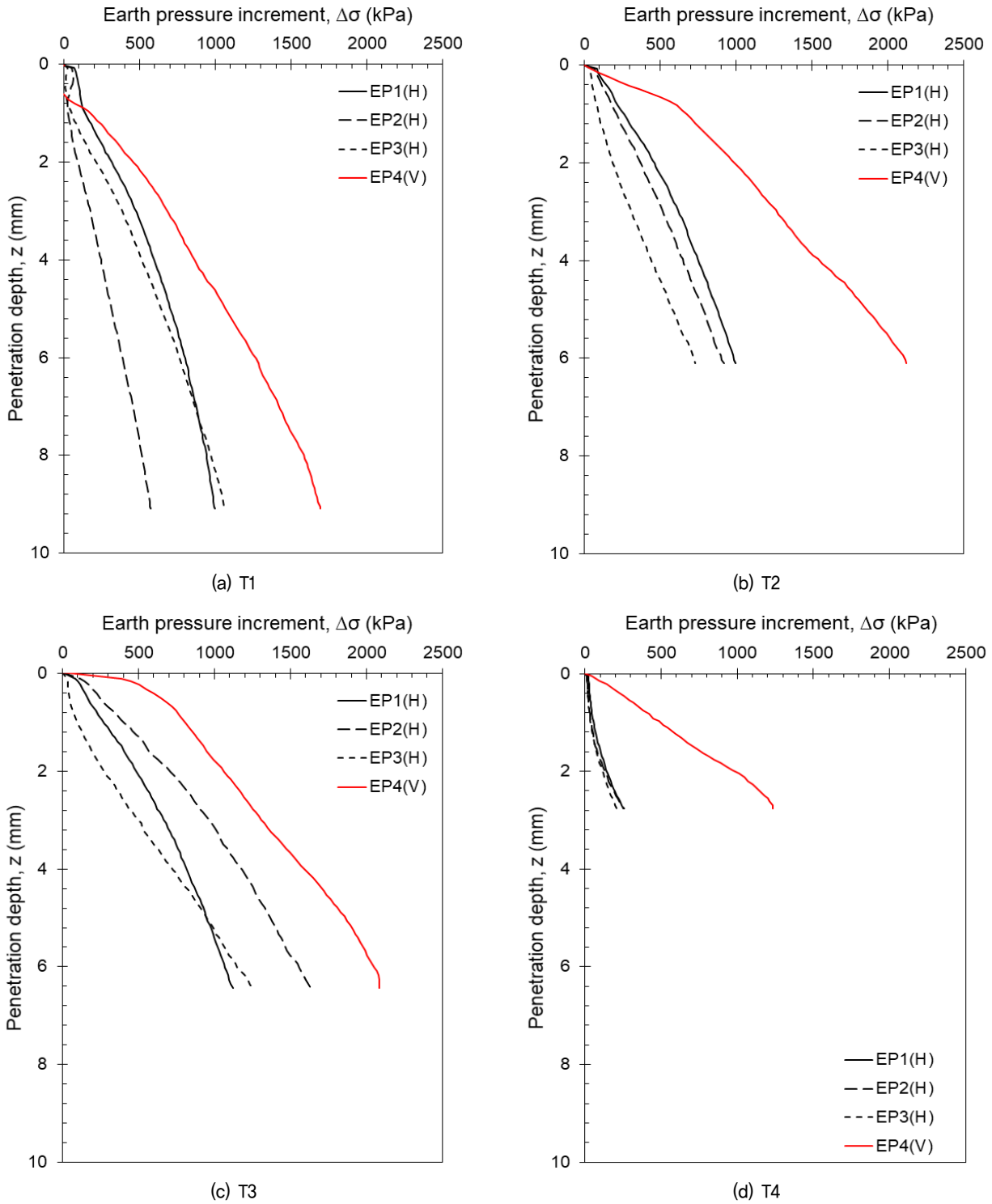


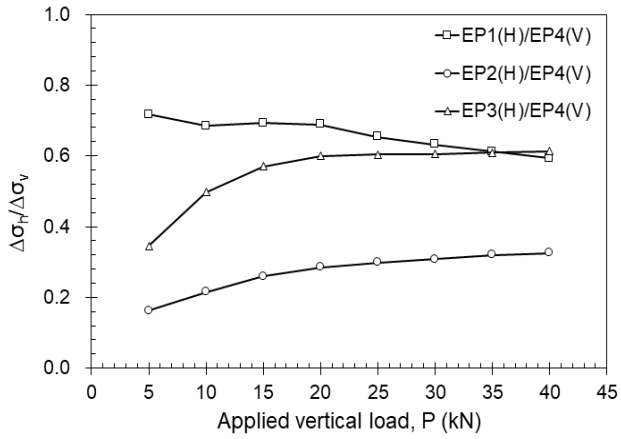
Fig. 11. Vertical and horizontal earth pressure increment with settlement

지압구의 초기 결합조건과 수직하중의 크기에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.

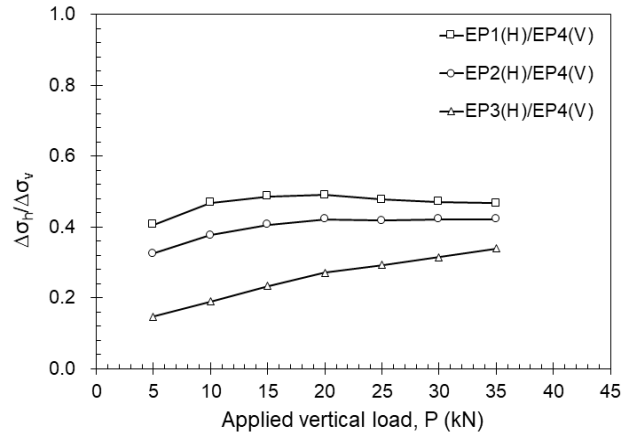
3.4 근입깊이에 따른 수평응력 변화

Figure 13은 30kN의 수직하중이 작용할 때 지압구의

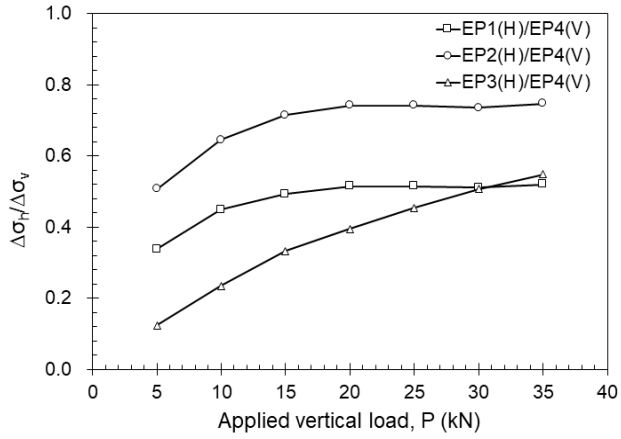
외주면에서 관측된 토압 증가량을 깊이별로 도시하였다. 여기서 깊이는 수평방향의 토압계가 매설된 깊이를 등가의 원형깊이(prototype depth)로 환산한 깊이이다. 그 결과, 지압구의 외면에 설치된 토압계의 위치에 따라 토압의 증가량에 차이가 있지만, 전반적으로 깊이가 증가하면서 수평토압의 증가량이 커졌다. 모래지반에서



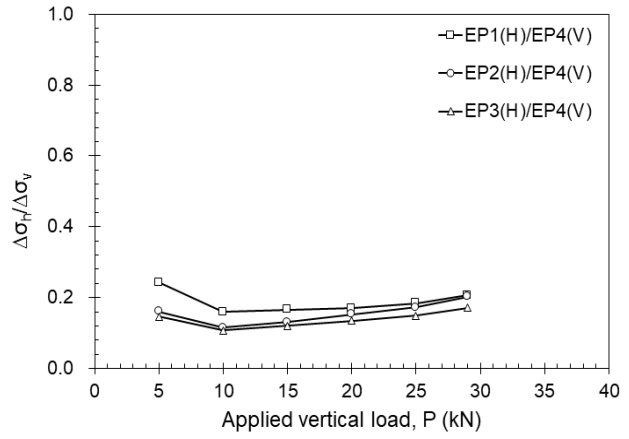
(a) T1



(b) T2



(c) T3



(d) T4

Fig. 12. Ratio of horizontal to vertical earth pressure increment with applied vertical load

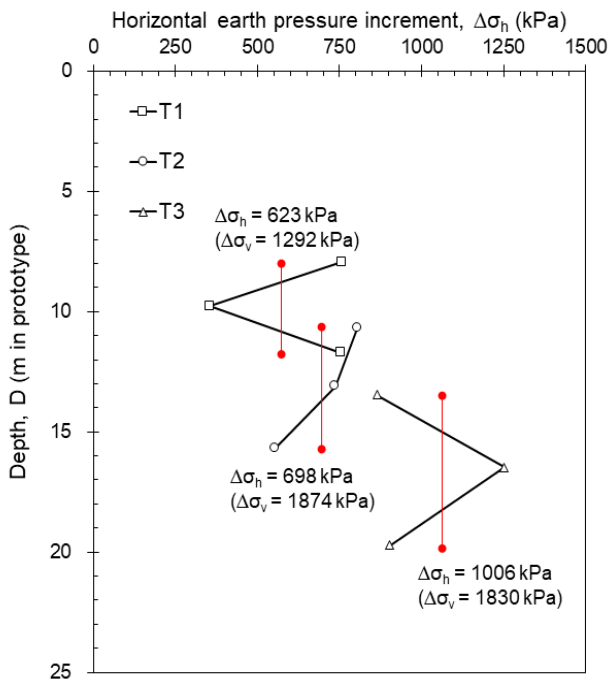


Fig. 13. Horizontal earth pressure increment with embedded depth under 30 kN vertical load

각 실험 별로 측정된 토압의 평균값은 T1에서 $\Delta\sigma_h = 623$ kPa($\Delta\sigma_v = 1,292$ kPa), T2에서 $\Delta\sigma_h = 698$ kPa($\Delta\sigma_v = 1,874$ kPa), T3에서 $\Delta\sigma_h = 1,006$ kPa($\Delta\sigma_v = 1,830$ kPa)으로 확인되었다. 이를 통해 모래지반에서는 지압구의 근입깊이가 깊어질수록 수평토압의 증가량과 분담률($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$)이 커지는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 선단확장형 마이크로파일의 지지력이 향상될 것으로 판단된다. 한편, 풍화암 지반(T4)에서는 수직하중 30kN 수준에서 $\Delta\sigma_h = 202$ kPa ($\Delta\sigma_v = 1,068$ kPa)로 확인되었다.

Table 3은 실험조건별 지압구에 작용하는 수평 및 수직토압의 증가량 비를 표로 정리하였다. 모래지반에서 수행된 실험조건인 T1 - T3에서는 지압구에 작용한 평균 토압 증가비($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$)가 0.4 - 0.58의 범위를 보였으며, 풍화암 조건(T4)에서는 평균 $\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$ 가 0.19를 나타냈다. 따라서, 풍화암으로 구성된 지반에 비해 모래지반에서 지압구의 팽창거동이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 3. Ratio of horizontal and vertical stress increment at the different location around the base expansion structure

No.	Initial vertical effective stress* (kPa)	Load (kN)	Ratio of horizontal to vertical stress increment ($\Delta\sigma_h/\Delta\sigma_v$)			
			Top (EP1/EP4)	Middle (EP2/EP4)	Bottom (EP3/EP4)	Average
T1	146.3 (9.75m**)	30	0.63	0.31	0.61	0.52
T2	193.7 (13m)		0.47	0.42	0.32	0.40
T3	243.8 (16.25m**)		0.51	0.74	0.51	0.58
T4	193.7 (13m**)		0.20	0.20	0.17	0.19

* Initial vertical effective stress estimated at the position of two-third of the total length of the base expansion structure.

** The values are converted from the estimated initial vertical stress considering the soil unit density.

4. 결론

본 연구에서는 선단확장형 마이크로파일에 대해 다양한 구속응력(지반 관입 깊이), 지반조건(모래와 풍화암)에서 총 4회의 원심모형실험을 실시하였다. 이를 통해 지압구가 설치된 마이크로파일에 압축력이 재하 될 때 지압구의 팽창거동을 확인하고 각 지압구에 작용하는 수직 및 수평응력을 측정하여 하중 전달 메커니즘과 지지력 증대효과를 확인하였다.

본 연구에서는 실물 지압구와 마이크로파일을 원심 모형실험에 활용하였으며, 원심가속도를 이용해 모형지반에 작용하는 상재하중을 달리하여 다양한 깊이조건에서 하중재하실험을 실시하였다. 또한, 실제 현장과 유사한 조건을 모사하기 위해 지압구 상단에 케이싱을 설치하여 실험중 공벽이 유지될 수 있도록 하였다. 모형 풍화암은 시멘트와 모래 혼합물을 양생하여 목표 일축 압축강도에 부합하도록 제작하였으며, 지압구가 암반 근입된 조건을 만족하도록 실험 단면을 구성하였다.

원심모형실험 결과, 모래지반에서는 수직하중이 증가함에 따라 지압구 하단에 작용하는 수직토압과 지압구 측면에 작용하는 수평토압이 동시에 증가되는 것을 확인하였다. 이는 지압구와 강봉사이의 썸기에 의해 지압구에 수평력이 작용했기 때문이다. 또한, 지압구 상단부의 수평토압 증가량이 하단부의 수평토압에 비해 큰 것으로 확인되었으며, 이를 통해 지압구 하단을 중심으로 회전거동을 하는 것을 알 수 있었다. 이러한 회전거동은 지반조건, 응력조건, 수직하중의 크기와 지압구와 강봉사이의 썸기 형상 등에 영향을 받을 것으로 판단된다. 한편, 깊이별로 지압구 외주면의 토압 증가량을 확인한 결과, 깊이가 깊어질수록 평균 수평토압 증가량이

증가되는 것을 확인하였으며, 이를 통해 지압구가 깊은 깊이에 근입 될수록 지압구 주변의 수평토압의 증가량이 커져 지지력이 향상될 것으로 판단된다. 풍화암 지반에 근입된 선단확장형 마이크로파일의 경우에도 수직하중이 증가됨에 따라 지압구의 외주면에 수평토압이 증가되었으며 지압구가 회전거동을 하는 것을 확인하였다. 다만, 모래지반에 비해 지압구 하단의 지반강성이 커 지압구가 팽창될 만큼 큰 침하를 유발시키지 못하는 것으로 확인되었으며, 이를 통해 지압구의 팽창거동과 지지력 증대효과는 모래지반에서 상대적으로 더 클 것으로 판단된다. 따라서, 토사층이 깊어 마이크로파일이 암반까지 근입되는 것이 불가능하거나 비경제적인 경우 선단확장형 마이크로파일이 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구에서는 실물 선단확장형 마이크로파일을 이용해 원심모형실험을 수행하였으므로 실제 지압구의 거동을 평가하는데 큰 의의가 있으나, 1) 원심가속도 증가에 따른 마이크로파일의 자중증가와 2) 기초에 작용된 최대 수직하중이 실제 기초에 작용되는 하중에 비해 작은 점, 3) 원심모형실험 상사성(scaling law)을 고려하지 않아 지압구 위치별로 작용하는 상재하중의 차이가 큰 것 등은 실험적인 한계로 남아 있으며, 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원과 한국연구재단의 지원(No. NRF-2021R1C1C1011540)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Han, J.T., Kim, S.R., Jang, Y.E., and Lee, S.H. (2013), Evaluation of Bearing Capacity of Waveform Micropile by Numerical Analyses, *Journal of Academia-Industrial Technology*, Vol.14, No.11, pp. 5906-5914.
2. Hwang G.C., Ahn, U.J., Lee, J.S., and Ha, I.S. (2018), A Study on the Bearing Characteristics of No-grouted and End-compressed Micropile Adopting Wedge Horizontal, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.3, pp.67-75.
3. Kim, D.S., Kim, N.R., Choo, Y.W., and Cho, G.C. (2013), A Newly Developed State-of-the-art Geotechnical Centrifuge in Korea, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp.1-8
4. Kim, J.H., Choo, Y.W., Kim, D.J., and Kim, D.S. (2016), Miniature Cone Tip Resistance on Sand in a Centrifuge, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.142, No.3, 04015090.
5. Lee, S.H., Han, J.T., Jin, H.S., and Kim, S.J. (2021), 3-D Numerical Analysis for the Verification of Bearing Mechanism and Bearing Capacity Enhancement Effect on the base Expansion Micropile, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.27, pp. 19-31 (in Korean).
6. Lee, T.H. and Im, J.C. (2006), An Experimental Study on the Reinforcement Effect of Installed Micropiles in the Surround of Footing on Dense Sand, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.5, pp.69-81 (in Korean).
7. Lo Presti, D.C.F, Berardi, R., Pedroni, S., and Crippa, V. (1993), A New Travelling Sand Pluvaitor to Reconstitute Specimens of Well Graded Silty Sands, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.15, No.2, pp.18-26.
8. Madabhushi, G. (2014), *Centrifuge Modeling for Civil Engineers*, CRC Press.
9. Miura, S. and Toki, S. (1982), A Sample Preparation Method and its Effect of Static and Cyclic Deformation-strength Properties of Sand, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.1, pp.61-77.
10. Park, S. (2018), Evaluation of uplift behavior for drilled shaft socketed into rock via centrifuge model tests, Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology.

Received : September 29th, 2021

Revised : November 9th, 2021

Accepted : November 9th, 2021