

쐐기수평력을 도입한 무그라우팅 선단압축 마이크로파일의 지지력 특성에 관한 연구

A Study on the Bearing Characteristics of No-grouted and End-compressed Micropile Adopting Wedge Horizontal Force

황 규 철¹ Hwang, Gyu-Cheol 안 우 종² Ahn, U-Jong
이 정 섭³ Lee, Jeong-Seob 하 익 수⁴ Ha, Ik-Soo

Abstract

In this study, we developed a micropile equipped with ground fixing wedge device which is able to ensure the bearing capacity early before grouting by expanding the tip and exerting the tip surface friction while compressing and expanding the tip of the micropile during loading. The purpose of this study is to verify the applicability of the developed micropile to the ground with various kinds of strength and to compare its characteristics with those of the simple tip expansion micropile. A new test system including a model soil box which can measure the tip resistance and the tip skin friction separately was devised. The loading test was carried out according to the changes of the ground strength and the tip cross section using the devised test systems. As a result of the test, it was found that the developed micropile increased the tip skin friction due to the wedge horizontal force as the soil strength increased and could be applied more effectively to the ground with the strength not lower than the strength of the weathered rock. In addition, it was found that additional bearing capacity could be obtained due to the tip cross section expansion and the wedge horizontal force exertion even in the ground with the strength below the weathered rock strength.

요 지

본 연구에서는 상부하중 재하 시 마이크로파일 선단부가 팽창하면서 확대되어 단부 주변 지반을 압축하고, 이에 따라 주변마찰력이 발휘되어 그라우팅 이전 단계에서도 지지력을 확보할 수 있는 고정지압구가 장착된 마이크로파일을 개발하였다. 본 연구의 목적은 개발된 고정지압구형 마이크로파일의 지반강도에 따른 적용성을 확인하고, 기존의 단순 선단확장형 마이크로파일 대비 지지거동 특성을 비교하는 데에 있다. 이를 위하여 선단저항과 주변저항을 분리하여 측정할 수 있는 모형토조를 포함한 새로운 시험장치를 고안하였으며, 고안된 시험장치를 이용한 지반강도 및 파일의 선단단면 변화에 따른 모형 재하시험을 수행하였다. 시험결과, 개발된 마이크로파일은 지반강도가 클수록 쐐기수평력에 의한 단부 주변마찰력이 더 증가하며, 풍화암 강도 이상 지반에서 더 효과적으로 적용될 수 있는 것으로 확인되었다. 그리고 풍화암 강도 이하의 지반강도 지반에서도 쐐기수평력 발휘에 따른 단부 확장으로 인해 추가적인 지지력 확보 효과가 나타날 수 있음을 확인하였다.

Keywords : Micropile, Ground fixing wedge device, Wedge horizontal force, Bearing capacity

1 정회원, 경남대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungnam Univ.)

2 정회원, (주)세진이엔시 상무 (Member, Managing Director, SeJin E&C Co. Ltd.)

3 비회원, (주)세진이엔시 대리 (Assistant Manager, SeJin E&C Co. Ltd.)

4 정회원, 경남대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg. Kyungnam Univ., Tel: +82-55-249-2669, Fax: +82-505-999-2165, geotech@kyungnam.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2018 by the Korean Geotechnical Society

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.

1. 서론

마이크로파일의 역사는 1950년 이탈리아에서 건물기초 보강용으로 개발된 것이 시초다(Fig. 1 참조). 당시 ‘Pali radice’라는 명칭으로 사용되었으며 주로 소규모 구조물 기초에 강봉에 콘크리트를 타설하여 사용하였으며 X형으로 많이 설치한 것으로 보인다. 특허공법으로 사용되던 ‘Pali radice’가 1971년대에 특허가 만료되면서 여러 가지 유사한 공법들이 많이 출현하였고 이러한 공법들을 통칭하여 ‘Micro-Pile’이라 불리며 현재 전세계적으로 다양하게 적용되고 있다.

국내에 도입된 마이크로파일은 꾸준한 연구와 발전으로 다양한 기술이 개발되었으며 현재 여러 방법으로 적용되고 있으나, 대부분 소규모 천공장비인 크롤러드릴(crawler drill) 등을 이용하여 지중에 소정의 깊이까지 천공한 후 말뚝체(소구경 pipe 또는 thread bar)를 조립 설치하고, 저압(0.7~2.1MPa)으로 그라우팅(grouting)을 실시하여 소구경 현장타설 말뚝을 형성하는 방식을 적용하고 있다. 이러한 마이크로파일은 작은 직경으로 높은 지지력을 발휘하여, 큰 장비의 진입이 어려운 경우 기존 구조물의 기초보강, 연약지반의 가교 등에 많이 적용되며 그 효과도 우수한 것으로 인정되고 있다(Son, 2004; Lee, 2006; Han et al., 2013).

건설산업정보연구원(CISI, 2000)의 ‘국내 말뚝시장 현황 및 분석’에 따르면 국내 건설시장 자체는 0~2%의 성장이 예상되지만 주택 리모델링 시장 확대, 건축물 유지관리 시장 확대, 녹색건축 시장 확대, 근접시공의 증가 등으로 마이크로파일 분야는 시장규모 확대가 예상되며, 신규 건축보다는 기존 건축물에 대한 내진성능 향

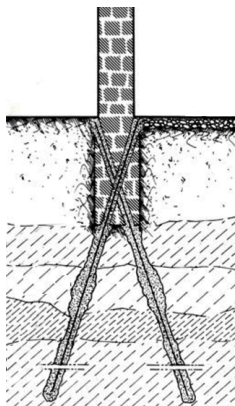


Fig. 1. Early application example of micropile called ‘Pali radice’ in Italian

상, 건축물 기초 보강 등과 같은 유지관리에 대한 필요성이 높아짐에 따라 마이크로파일의 수요도 급속하게 늘어날 것으로 전망되고 있다(CISI, 2011).

현재 국내에서 개발 적용되고 있는 다양한 마이크로파일은 각종 토목, 건축현장에서 다양한 용도로 시공되고 있으나 아직까지 관련 설계기준이 명확히 정립되어 있지 않아, 대부분 미연방도로국(FHWA)의 기준(FHWA, 2005)을 준용하여 설계하고 있는 실정이다.

마이크로파일 설계에 있어서 기본적 설계개념은 일반적인 말뚝과 동일하나, 말뚝의 단면이 작아 선단지지력은 무시할 정도로 작아 그라우팅체와 지반의 주면지지력에 의해 마이크로파일의 지지력이 결정되며, 말뚝의 길이에 비해 직경이 작아 말뚝 길이가 증가하는 경우 좌굴에 대한 검토가 필요하다는 점이 일반적인 말뚝과 다르다. 이러한 특성으로 FHWA는 마이크로파일의 기본적 설계개념, 즉 선단지지력을 고려하지 않는 설계법을 그라우팅 방법과 대상 토질별로 분류하여 제안하고 있다(FHWA, 2005).

상기에 기술된 바와 같이, 그라우트에 의존적인 마이크로파일의 지지거동은 지반 특성에 큰 영향을 받는다. 연약지반에 설치되는 경우, 지반이완과 주입재의 지반 침투력 저하 등에 따른 말뚝 주변의 마찰력 감소로 정착장이 길어져야 하며, 지하수위가 높은 지역에 설치되는 경우, 그라우트의 고결 소요시간이 길며 지하수의 용해 작용은 시간경과에 따른 마찰력 감소를 초래한다. 그리고 균열과 절리가 발달한 지반 및 공벽의 함몰이 큰 붕적층, 주변 진동이 큰 지역에 설치되는 경우, 그라우트와 말뚝체의 분리 및 부착력의 감소가 발생할 수도 있다.

본 연구에서는 그라우트에 의존적인 마이크로파일의 지지거동 한계를 보완하고자, 상부하중 재하 시 마이크로파일 선단부가 압축·팽창하면서 선단부의 확대와 단부 주면마찰력이 발휘되어 그라우팅 이전 조기에 지지력을 확보할 수 있는 고정지압구가 장착된 마이크로파일을 개발하였다. 본 연구의 목적은 개발된 고정지압구형 마이크로파일의 지반강도에 따른 적용성을 확인하고, 기존의 단순 선단확장형 마이크로파일 대비 지지거동 특성을 비교하는 데에 있다. 이를 위하여 선단저항과 주면저항을 분리하여 측정할 수 있는 모형토조를 포함한 새로운 시험장치를 고안하였으며, 고안된 시험장치를 이용한 지반강도 및 선단단면 변화에 따른 모형 재하 시험을 수행하였다.

2. 쐐기수평력이 발휘되는 마이크로파일의 개발

마이크로파일이 선단부에서 쐐기수평력(wedge horizontal force)을 발휘하기 위해서는 쐐기형으로 작동되는 별도의 장치가 필요하며, 이 장치는 재하 하중이 가해지지 않을 경우 천공홀보다 작은 단면이었다가 재하 하중이 가해질 때 천공홀보다 큰 단면으로 확장되어야 한다.

본 연구에서는 세 조각의 쐐기형으로 분리될 수 있는 쐐기수평력 발휘 장치를 고안하였고, Fig. 2는 이 고안된 장치의 프로토타입(prototype) 도면을 나타낸 것이다. 고안된 장치는 지반에 압력이 가해지면 선단에서 지반에 고정된다는 점을 고려하여, 본 연구에서는 고정지압구(ground fixing wedge device)라고 칭하였다. 고정지압구의 작동원리는 Fig. 3에 도식적으로 나타냈는데, 마이크로파일 선단에 부착된 고정지압구에 압축력이 가

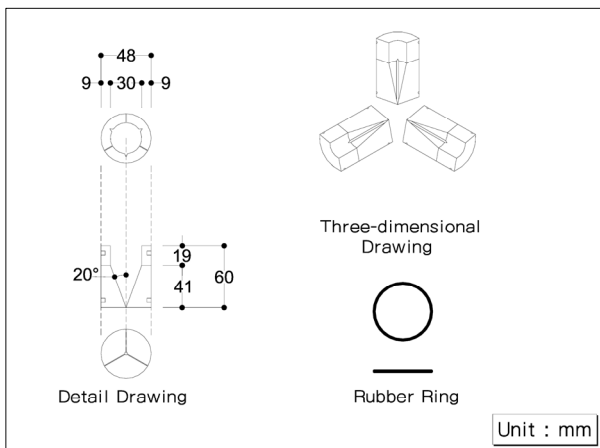


Fig. 2. Prototype drawings of ground fixing wedge device

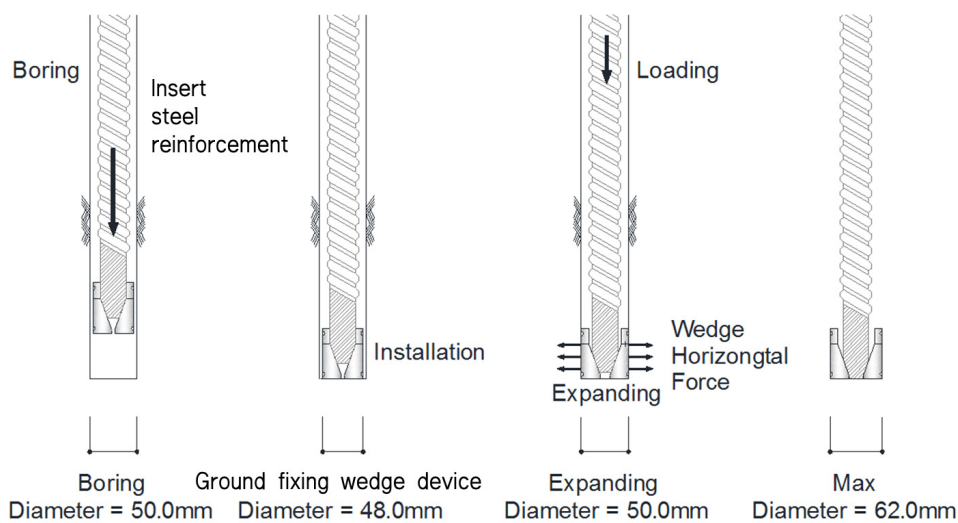


Fig. 3. Operating principle of ground fixing wedge device

해질 때 정착지반 천공홀 벽면을 고정지압구가 누르면서 쐐기수평력이 발휘되어 지지되는 방식이다.

고정지압구의 이론적 쐐기수평력은 하중(P_a)에 의해 발생하는 쐐기력(W)의 수평분력(W_h)과 마찰저항력(R)의 관계식으로 산정될 수 있다(Sin, 1998).

프로토타입 모형체에 대하여 초기 연직하중에 의한 측벽에 작용하는 쐐기수평력을 Fig. 4와 같이 근사적으로 도식화할 수 있다. 고정지압구와 지반과의 마찰계수를 f 라 하면, 마찰저항력, R (Fig. 4 참조)은 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$R = f \cdot W_h = f \cdot \left[\frac{P_a}{2} \cot(\theta + \delta) \right] \quad (1)$$

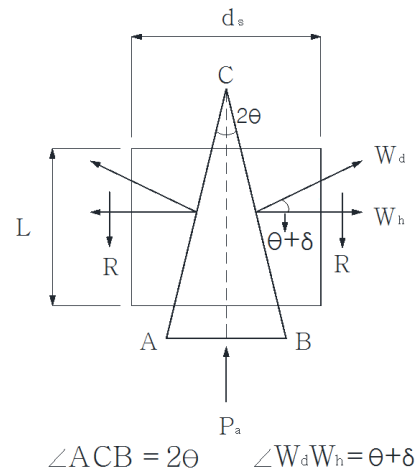


Fig. 4. Wedge horizontal force acting on the side wall by initial vertical load

여기서, 썩기각을 θ , 썩기부마찰각(썩기부와 지압고정 부와의 마찰각으로 정의)을 δ 라 하면 썩기력(W_d)과 썩기 수평력(W_h)은 식 (2)와 식 (3)과 같이 각각 구할 수 있다.

$$W_d = \frac{P_a}{2 \sin(\theta + \delta)} \quad (2)$$

$$W_h = W_d \cos(\theta + \delta) = \frac{P_a}{2} \cot(\theta + \delta) \quad (3)$$

썩기수평력은 썩기각 θ , 썩기부마찰각 δ , 재하하중 P_a 에 의해 그 크기가 좌우된다. 본 연구에서 제작한 고정지압구의 썩기각 θ 는 20° 이며, 재하시험기의 최대 재하하중 P_a 는 30kN이다. 식 (3)으로 산정되는 썩기수평력(W_h)이 일정하다면, 마찰저항력(R)은 지압구와 지반과의 마찰계수(f), 즉 지압구와 지반과의 벽면마찰각의 영향을 받게 된다. 벽면마찰각은 지반의 강도와 직접적인 관련을 갖기 때문에, 이론식을 통해 살펴보더라도 썩기수평력이 발휘됨에 따른 반력분담률(본 연구에서는 이를 재하하중 대비 썩기수평력에 의해 발휘된 지압구 선단 주면의 마찰저항력의 백분율로 정의함)은 지반강도의 영향을 받게 됨을 예상할 수 있다.

3. 재하시험을 이용한 썩기수평력 분석

3.1 썩기수평력 분석을 위한 재하시험 개요

Fig. 5는 재하시험장치 개요도이며 마이크로파일에

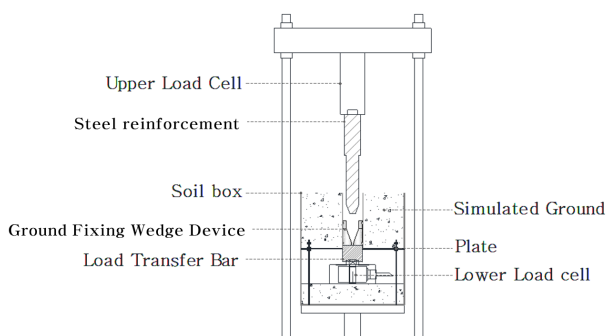


Fig. 5. Schematic diagram of loading test

썩기수평력을 도입하기 위해 썩기형으로 작동되는 별도의 장치인 고정지압구를 제작하였으며, 측벽에 작용하는 썩기수평력을 정량적으로 분석하기 위해 시험장치를 고안하였다.

주요 구성요소는 재하시험기, 마이크로파일, 모형토조, 고정지압구, 로드셀로 구성되어 있으며, 모형토조(Fig. 6 참조)는 250mm(가로)×250mm(세로)×270mm(높이)의 규격으로 제작해 한 측면을 250mm(가로)×85mm(높이)로 절단하여 절단된 틈으로 로드셀의 삽입이 가능하며, 절단면은 상부와 하부로 구분하여 지반을 조성할 수 있도록 2조로 제작되었다.

모형지반의 강도(일축압축강도를 의미함)는 실제 마이크로파일 시공 시 보편적으로 적용되고 있는 풍화암 등급의 지반조건을 적용하기 위해 Table 1과 같이 압편 내압강도에 따른 암종(CRPC, 2002)을 적용하여 풍화암 A, B등급의 강도를 목표로 지반을 조성하였다. 조성지반의 시편에 대해 수행된 일축압축강도시험 결과, 풍화암A 지반은 풍화암 A등급에 해당하는 35MPa, 풍화암B 지반은 풍화암 B등급에 해당하는 17MPa 정도의 강도를 가지는 것으로 확인되었다.

수직변위를 측정하기 위한 변위계를 재하시험장치에 설치하였으며, 재하하중은 재하시험기에 부착된 로드셀, 반력하중은 토조 내부 하부지반위에 설치한 로드셀로 측정하였다. 1mm/min 재하속도(ASTM 3080 standard shearbox test)에 제시된 급속시험(quick test) 시 재하속



Fig. 6. Model soil box and model ground

Table 1. Rock type classified by compressive strength (CRPC, 2002)

Rock type	Weathered rock		Soft rock		Normal rock		Hard rock		Super hard rock
	A ¹⁾	B ²⁾	A	B	A	B	A	B	
Compressive strength (MPa)	30~70	10~20	70~100	20~50	100~130	50~80	130~160	80 이상	160 and over

¹⁾ A : Gneiss, Granite, Diorite, Andesite, Limestone, Sandstone, Basalt, Conglomerate, Schist etc.

²⁾ B : Black Schist, Green Schist, Schalstein, Shale, Mudstone, tuff, Agglomerate etc.

도 채택)로 하중을 가하고 로드셀의 최대용량 30kN까지의 데이터를 기록하였다.

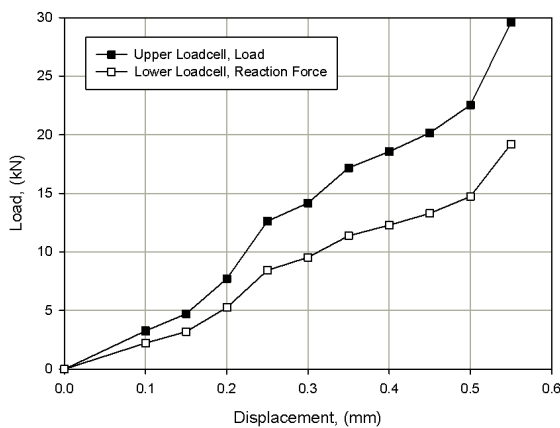
3.2 썩기수평력 분석 재하시험 결과

Fig. 7은 썩기수평력 분석을 위한 재하시험 결과로 나타난 서로 다른 지반강도에서의 변위에 대한 상·하부 로드셀 측정값(재하하중과 반력하중)을 나타낸 것이다. 그림에서 변위가 커질수록 상·하부 로드셀 값의 차이가 증가하는 양상을 확인할 수 있는데, 이는 변위 증가에 따른 고정지압구 주변의 마찰저항 증가가 그 원인이다.

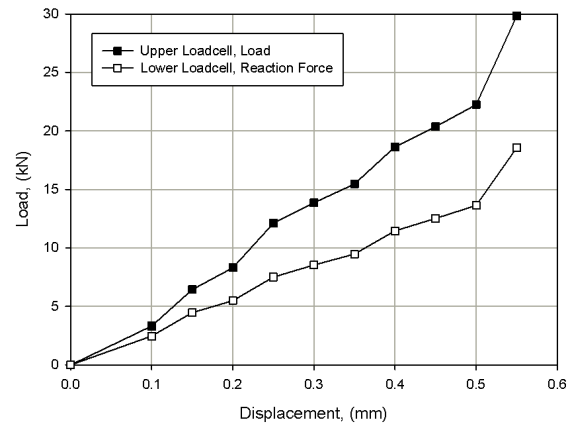
Fig. 8은 상부 로드셀 측정값(재하하중)에 대한 하부 로드셀 측정값(반력하중)을 나타낸 것이다. 고정지압구가 장착되지 않은 일반적인 무그라우팅(보강재만 있고 그라우팅을 하지 않은) 마이크로파일인 경우라면, 상·하부 로드셀 측정값은 이론적으로 Fig. 8에 나타낸 기준선(base line)으로 도시된다. 그러나 고정지압구를 장착

한 마이크로파일은 상부에서 재하되는 하중의 일부가 고정지압구로 인해 썩기수평력으로 전환되어 하부 로드셀 측정값은 상부 로드셀 측정값보다 작게 측정된다. 그러므로 상부 로드셀 측정값과 하부 로드셀 측정값의 차이는 썩기수평력에 의한 주변저항력이 된다. 그리고 그림에서 그래프가 기준선보다 상대적으로 더 아래쪽에 위치해 있는 경우가 이러한 썩기수평력이 더 크게 측정된 경우라고 할 수 있다.

Fig. 9는 재하하중에 대한 반력분담률(재하하중 대비 썩기수평력에 의해 발휘된 지압구 선단 주변의 마찰저항력의 백분율)을 지반강도에 따라 나타낸 것이다. 풍화암 B 지반의 반력분담률은 최대값(peak) 35% 이후, 약 33%로 유지되며 풍화암 A 지반의 반력분담률은 최대값(peak) 39% 이후, 약 37%로 유지되는 것으로 나타났다. 반력분담률이 초기에 증가하다 일정값에 수렴하는데, 이는 고정지압구가 고정되는 과정에서 분담률이 급증하며 완전히 고정된 이후에는 일정한 반력분담률을 보이기 때문이다.



(a) Ground strength : 17 MPa



(b) Ground strength : 35 MPa

Fig. 7. Loads and reaction forces obtained by loading tests

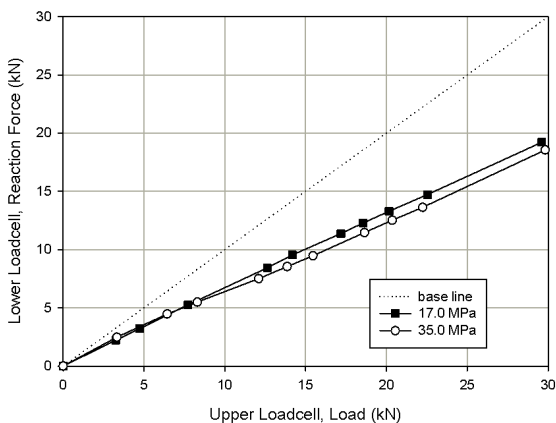


Fig. 8. Upper load versus lower reaction force

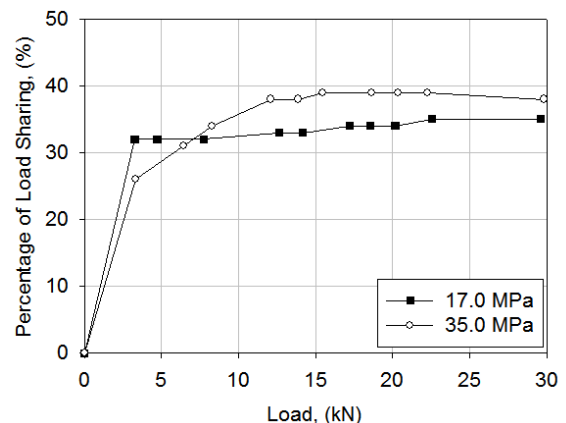


Fig. 9. Percentage of load sharing according to ground strength

4. 선단확장형 마이크로파일과 고정지압구를 장 착한 마이크로파일의 지지특성 비교

4.1 선단확장 마이크로파일과 고정지압구형 마이크로 파일 지지특성 비교 재하시험 개요

최근 들어 마이크로파일의 선단지지력을 증가시키기 위해서 선단확장 및 확공 마이크로파일에 대한 연구가 이루어지고 있다(Lee, 2011; Lee, 2012; Lee et al., 2014).

이에 본 연구에서는 단순히 선단만을 확장한 선단확장 마이크로파일(선단확장형)과 썬기수평력을 도입한 고정지압구 마이크로파일(고정지압구형)의 지지력 특성을 비교하기 위해 Fig. 10과 같이 재하시험 장치를 (a)선 단확장형, (b)고정지압구형으로 각각 구성하였으며, 앞선 3.1절의 썬기수평력 분석을 위한 재하시험과 동일한 방식의 시험을 수행하였다. 시험 시 천공홀의 직경은 50mm 이고, 선단확장형 마이크로파일의 선단직경은 48mm이

다. 고정지압구형 마이크로파일의 선단직경은 시험 초 기에는 선단확장형과 마찬가지로 48mm이나, 지압구에 압축력이 가해지면 50mm에서 60mm까지 선단직경이 증가할 수 있다(Fig. 3 참조).

모형토조의 지반강도는 Table 1과 같이 암편 내압강 도에 따른 암종을 적용하여 풍화암 최하 강도 10MPa, 풍화암보다 조금 약한 강도 5MPa을 목표로 지반을 조 성하고자 계획하였고 조성된 지반에 대한 강도시험결 과, 각각은 9.4MPa과 4.7MPa로 확인되었다. 이러한 강 도를 갖는 지반을 각각 2조씩 조성하여 총 4조의 조성 지반에 대한 재하시험을 실시하였다.

4.2 선단확장형 마이크로파일과 고정지압구형 마이크 로파일의 재하시험 결과

Fig. 11은 4.7MPa의 지반강도를 가지는 지반에 대한 재하시험 결과로 나타난, 선단확장형 마이크로파일과

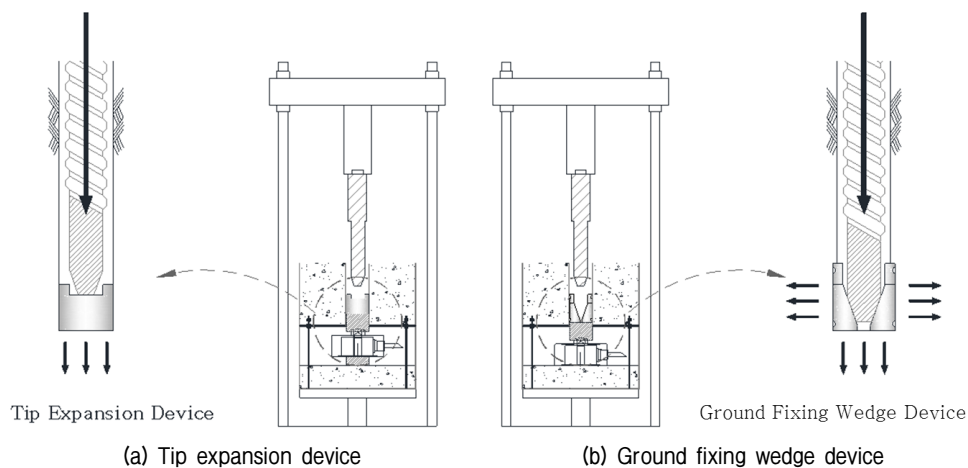


Fig. 10. Two types of loading tests on micropiles

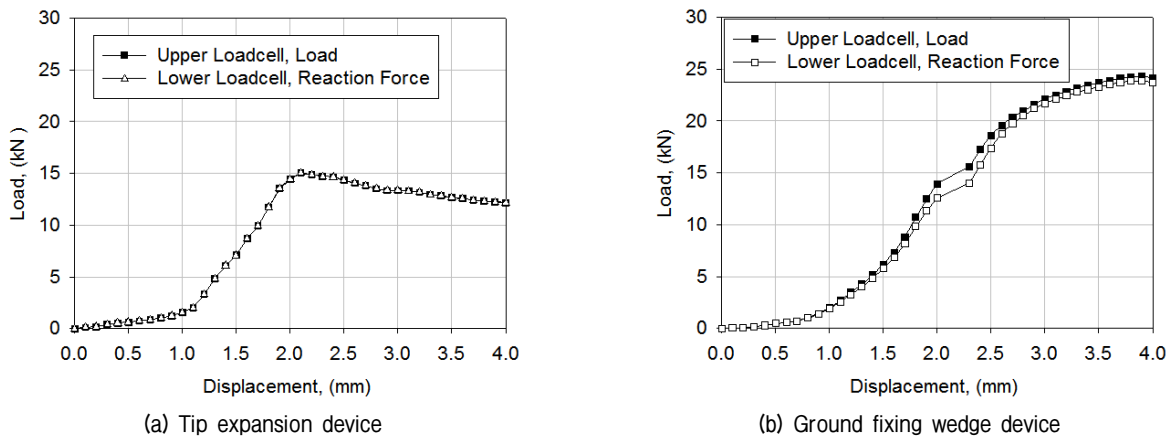


Fig. 11. Loads and reaction forces obtained by loading tests for two different types of micropile devices (ground strength : 4.7 MPa)

고정지압구형 마이크로파일의 변위에 대한 상·하부 로드셀 측정값(재하하중과 반력하중)을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 11의 (a)는 선단확장형 마이크로파일에 대한 재하시험 결과인데, 상·하부 로드셀 측정값이 거의 동일하며 재하하중 15.04kN까지 증가하다 곧 감소하는 양상을 확인할 수 있다. 최대값(peak) 도달 이후 감소 양상은 기초지반이 재하하중에 견디지 못했기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 11의 (b)는 고정지압구형 마이크로파일에 대한 재하시험 결과인데, Fig. 11의 (a)의 선단확장형 마이크로파일의 거동과는 달리 고정지압구형 마이크로파일은 지반이 파괴되는 하중점 15.04kN 이후에도 계속 하중이 증가하는 양상을 보였다.

Fig. 12는 9.4MPa의 지반강도를 가지는 지반에 대한 재하시험 결과로 나타난, 선단확장형 마이크로파일과 고정지압구형 마이크로파일의 변위에 대한 상·하부 로드셀 측정값을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 12의 (a)는 선단확장형 마이크로파일에 대한 재하시험 결과인데, 상·하부 로드셀 측정값이 거의 동일하며 재하하중 18.14kN 까지 증가하다 곧 감소하는 양상을 확인할 수 있다. Fig. 12의 (b)는 고정지압구형 마이크로파일에 대한 재하시험 결과인데, Fig. 12의 (a)의 선단확장형 마이크로파일의 거동과는 달리 고정지압구형 마이크로파일은 지반이 파괴되는 하중점 18.14kN 이후에도 계속 하중이 증가하는 양상을 보였다.

Fig. 11의 (b)와 Fig. 12의 (b)에서 고정지압구형 마이크로파일의 지지거동이 선단확장형 마이크로파일에 대한 시험에서 지반이 파괴되는 하중점이라 여겨지는 하중이후에 변위가 갑자기 증가하는 경향을 보이는데, 이는 풍화암강도 이상의 상대적으로 큰 지반강도를 가지

는 시험지반과는 달리 지반강도가 약한 경우에는 선단확장형 마이크로파일의 거동과 유사하게 기초 지반의 파괴가 원인이 되어 나타난 결과로 판단된다. 다만, 고정지압구형 마이크로파일의 지반파괴 이후의 거동은 지반의 파괴이후 일정 변위 이내에 선단의 확장과 썩기수평력이 다시 발휘되어 그림에서와 같이 지지력이 다시 회복되는 양상을 보인다. 이러한 판단 근거에 대해서는 향후 추가적인 연구를 통한 검토가 요구된다.

Fig. 11과 Fig. 12와 같이 고정지압구형 마이크로파일이 더 큰 지지효과를 보이는 이유는 고정지압구형 마이크로파일의 경우, 선단부 고정지압구의 접지면적이 증가하는 확장과 더불어 재하하중이 썩기수평력으로 분담되어 측벽과의 마찰저항이 증가하기 때문으로 판단된다. 이러한 비교실험 결과로부터 고정지압구형 마이크로파일이 단순 선단확장형 마이크로파일에 비해 지지력의 증대효과가 더 큼을 확인할 수 있었다.

5. 지반강도와 고정지압구형 마이크로파일의 썩기수평력과의 관계

Fig. 13은 Fig. 8에서와 마찬가지로 상부 로드셀 측정값(재하하중)에 대한 하부 로드셀 측정값(반력하중)을 나타낸 것이다. 기준선보다 상대적으로 아래에 위치한 9.4MPa 지반강도(풍화암보다 조금 약한 강도) 지반이 4.7MPa 지반강도(풍화암보다 약한 강도) 지반보다 썩기수평력이 다소 크다고 할 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 9에서와 마찬가지로 재하하중에 대한 반력분담률을 지반강도에 따라 나타낸 것이다. 4.7MPa의 지반강도 지반의 반력분담률은 최대값 10% 이후 급

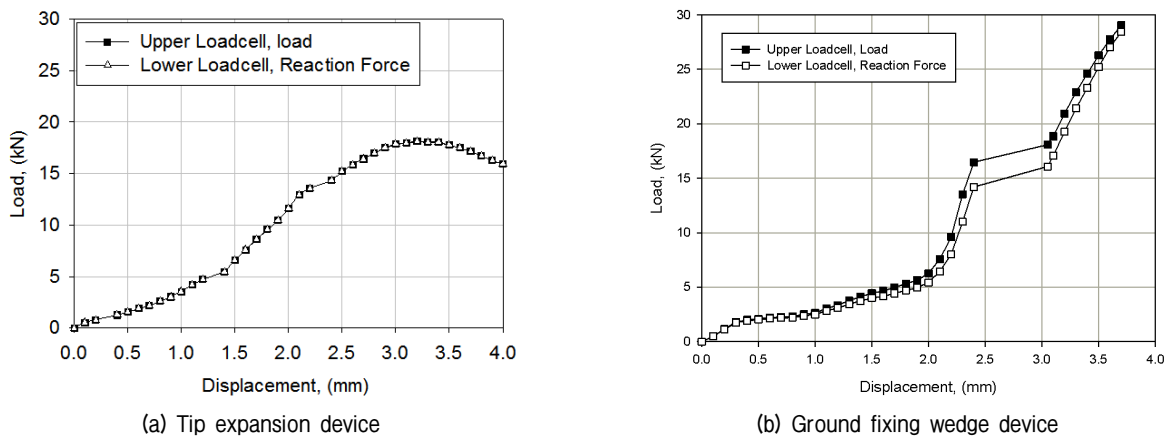


Fig. 12. Loads and reaction forces obtained by loading tests for two different types of micropile devices (ground strength : 9.4 MPa)

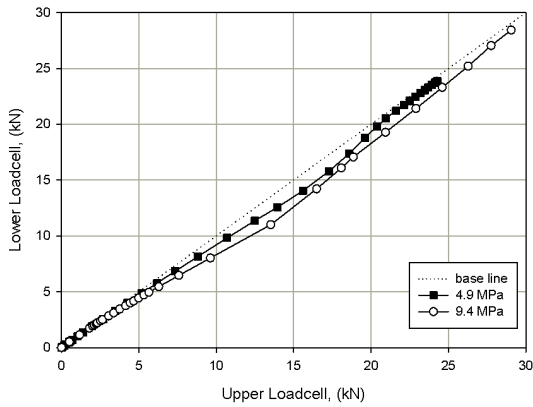


Fig. 13. Upper load versus lower reaction force

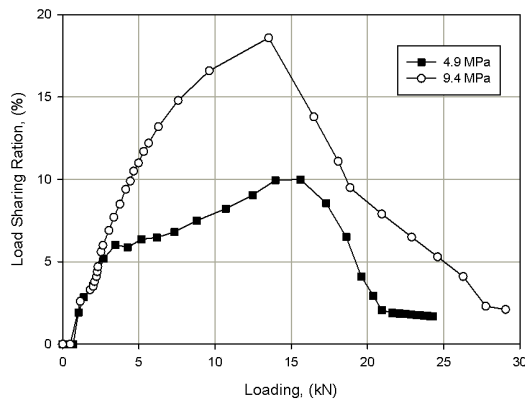


Fig. 14. Percentage of load sharing according to ground strength

격히 감소하며, 9.4MPa의 지반강도 지반에서의 반력분담률은 최대값 14% 이후 급격히 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 8과 Fig. 9에서의 결과와 다르게, 반력분담률이 갑작스럽게 떨어지는 이유는 지반의 강도가 상대적으로 낮아, 재하하중이 작용할 때, 고정지압구 하부 지반의 변위(침하) 저항이 약해(하중을 가하는 보강재의 선단 변위와 고정지압구 하부 지반 침하와의 상대변위 차의 감소율이 낮아), 지반 강도가 큰 경우에 나타났던 반력분담률이 일정한 값에 도달(Fig. 9 참조)하는 단계까지 발전하지 못했거나, 썩기수평력이 전달되었다 하더라도 일정 분담률에 도달되는 과정 중에 주면이 먼저 파괴되어 반력분담률이 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9, Fig. 13과 Fig. 14의 결과를 종합 분석한 결과, 고정지압구형 마이크로파일의 썩기수평력에 의한 반력분담률은 지반강도가 클수록 더 커지되, 풍화암 강도 이상의 지반(Table 1에서 일축압축강도 10MPa 이상의 강도를 가지는 지반)에서 지속적일 것이라 예상할 수 있다. 결과적으로, 고정지압구형 마이크로파일의 썩기수평력 발휘에 의한 선단부 주면 마찰저항과 선단

부 단부확대에 따른 선단지지력의 증가 효과는, 마이크로파일이 시공되는 지반이 풍화암 강도 이상의 지반에서 효과적으로 발휘될 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 상부하중 재하 시 선단부의 확대와 단부 주면마찰력이 발휘되어 그라우팅 이전 조기에 지지력을 확보할 수 있는 고정지압구가 장착된 마이크로파일을 개발하였고, 개발된 마이크로파일을 선단저항과 주면저항을 분리 측정할 수 있도록 고안·제작한 모형토조를 이용하여 모형 재하시험을 수행하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서는 하중 재하 시 선단부가 압축·평창되면서 주면마찰력을 발휘하고, 선단부가 확정되어 선단지지력을 증가시킬 수 있는 고정지압구형 마이크로파일을 개발하였다. 그리고 재하시험을 통하여 개발된 마이크로파일의 주면마찰저항의 증가량을 정량적으로 분석할 수 있는 모형토조를 포함한 새로운 시험장치를 고안·제작하였다.
- (2) 고안된 시험장치를 이용하여 지반조건에 따른 고정지압구형 마이크로파일에 대한 실내 재하시험을 수행한 결과, 썩기수평력에 의한 반력분담률(재하하중에 대한 썩기수평력으로 인해 발휘된 선단부 주면저항력의 하중분담률)은 지반강도가 클수록 더 커지되, 풍화암 강도(일축압축강도 10MPa 이상) 이상의 지반에서 효과적으로 발휘(반력분담률 30% 이상)되는 것으로 확인되었다.
- (3) 선단을 확장한 마이크로파일과 고정지압구를 장착한 마이크로파일의 지지특성 비교를 위한 재하시험을 수행한 결과, 동일한 지반조건(풍화암 강도보다 낮은 강도의 지반)에서 선단확장형 마이크로파일은 특정 재하하중에서 지반이 견디지 못하고 파괴되는 양상을 보이지만 고정지압구형 마이크로파일은 지반이 파괴되는 하중점 이후에도 계속 하중이 증가하는 양상을 보였다. 이는 고정지압구형 마이크로파일의 경우, 선단부 고정지압구의 접지면면적이 증가하는 확정효과와 더불어 재하하중이 썩기수평력으로 분담되어 측벽과의 마찰저항이 증가하기 때문으로 판단된다.
- (4) 선단을 확장한 마이크로파일과 고정지압구를 장착

한 마이크로파일의 지지특성 비교실험 결과로부터 고정지압구형 마이크로파일이 단순 선단확장형 마이크로파일에 비해 지지력의 증대효과가 더 큼을 확인할 수 있었다.

본 연구는 마이크로파일의 시공과정 중, 그라우팅 이전에 파일 정착 선단부의 초기 지지력 확보를 위하여 개발한 고정지압구형 마이크로파일의 적용성을 확인하기 위한 연구 결과로, 향후 그라우팅 과정과 최종적인 그라우팅 이후의 지지거동의 특성에 대하여는 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임[MOIS-재난-2015-04].

참고문헌 (References)

1. Construction Information Studies Institute (2011), *Status and Analysis of Domestic Pile Market*, pp.4-22 (in Korean).
2. Construction Research Publishing Co. (2002), *Standard of Construction Estimate*, p.118. (in Korean)
3. FHWA (2000), *Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual*, Report No.FHWA-SA-97-070, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
4. Han, J. T. and Jang, Y. E. (2016), "A Field Study on the Constructability and Performance Evaluation of Waveform Micropile", *Journal of The Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.32, No.10, pp.67-79 (in Korean).
5. 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 (in Korean).
6. Hwang, T. H., Mun, G. R., Sin, Y. S., and Kwon, O. Y. (2012), "Installation of Micro-piles appropriate to Soil Conditions", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.4, pp.55-65 (in Korean).
7. Kim, M. Y. (2005), *Bearing Characteristics of Micro Pile by Field Load Tests*, Master's Thesis, Konkuk University, Korea.
8. Lee, C. M. (2011), *Model Tests on Uplift Capacity of a Micro Pile in Sand*, Master's Thesis, Chung-Ang University, Korea.
9. Lee, J. M. and Kim, D. H. (2014), "A Study on the Strength Evaluation of Micropile with Expanded Drill Hole", *Journal of The Korean Society of Safety*, KOSOS, Vol.29, No.5, pp.74-81. (in Korean)
10. Lee, J. U. (2013), *Model Tests on Pullout Resistance of Micropiles with Enlarged Base in Sand*, Master's Thesis, Chung-Ang University, Korea.
11. Lee, T. H. (2006), *Study on the Reinforcement Effect of Micropile on Dense Sand*, Ph.D. Dissertation, Pusan National University, Korea.
12. 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).
13. Sabatini, P. J. and Burak, T. (2005), *Micropile Design and Construction Reference Manual*, FHWA-NHI-05-039, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
14. Sin, Y. S. (1998), *Up-to-date topics in landslide engineering*, Won-Tech., pp.532-533.
15. Son, J. H. (2004), *A Study on the Micropile's Reinforcement Effect on Soil Bearing Capacity*, Master's Thesis, Pusan National University, Korea.
16. Yu, S. G. (2009), *Numerical Analysis of Reinforcement Effects of Micropile on Soil Bearing Capacity*, Master's Thesis, Konkuk University, Korea.

Received : February 5th, 2018
 Revised : March 1st, 2018
 Accepted : March 7th, 2018