확공형 마이크로 파일의 지지력 해석

A Bearing Capacity Analysis of Micropile with Expanded Drill Hole

이재민* · 김두환**

Lee, Jae-Min* and Kim, Doo-Hwan**

Abstract

The load-carrying capacity of a conventional micropile is determined by the adhesion between the rolled screw thread and the grout, and the skin friction force between the grout and the ground. One of the disadvantage of the conventional micropiles is that the boring depth can be deeper because of low load-carrying capacity and the brittle failure behavior between rolled screw thread and grout. Therefore, it is necessary to develop an advanced feature of a micropile system which efficiently increases load-carrying capacity with a reasonable cost. This study proposes an advanced type of a micropile system. The proposed micropile system consists of perfobond ribs installed steel rod to improve shear capacity between the thread and the grout, and partially expanded drill holes to increase resistance capacity between the grout and the ground. Through on-site pullout tests, it was found that load-carrying capacity increased significantly in the proposed micropile system, due to the shear keys created by the partially expanded drill hole. The proposed micropile system was also evaluated to be much more economical in a case study.

Key words : Micropile, Perfobond rib, Shear keys, Skin friction force, Brittle failure behavior

요 지

기존 마이크로 파일의 경우 전조나사 강봉과 그라우트와의 부착력 및 그라우트와 지반과의 주면마찰력에 의해 내하성능이 결정된다. 그러나 강봉과 그라우트 간의 부착성능이 가지는 취성파괴 특성과 낮은 내하성능에 의해 천공 깊이가 깊어지는 문제점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 마이크로 파일의 지지성능을 개선하고 경제성을 향상시키기 위하여 perfobond rib를 구비한 강봉과 그라우트와 지반간의 주면마찰력을 증가시키기 위해 부분확공부를 설치하는 마이크로 파일을 제안하고, 저동 및 파괴특성에 대한 평가를 수행하였다. 현장 인발시험 결과 부분 확공하여 시공된 지반부 전단기에 의한 내하성능은 상당히 증가된 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 마이크로파일, Perfobond rib, 전단기, 주면마찰력, 취성파괴저동

1. 서 론

최근 적용되고 있는 마이크로 파일은 120~200 mm 내외의 소구경으로 지반을 천공한 후 강봉을 삽입하고 그라우트를 채워서 시공한다.

사용되는 강봉은 설계 정착장 만큼의 전조나사 강봉을 사용하여 그라우트와 강봉 사이의 마찰력을 확보하고 그라우트와 지반의 마찰력으로 강봉이 지지하는 외부하중을 지반으로 전달한다.

이 때 마이크로 파일의 선단지지력은 직경이 작으므로 보통 무시되며 그라우트/지반의 마찰력은 주로 지반조건이나 그라

우팅 방법 및 천공방법에 따라 좌우된다.

그러나 기존에 사용되고 있는 전조나사 강봉은 강봉과 그라우트의 점착력에 대한 불확실성이 크며 마찰력이 적용길이에 비례하기 때문에 높은 설계지지력이 요구될 경우, 마이크로 파일의 길이가 길어지게 된다.

이는 지반 천공에 따른 부수적인 작업 및 파일의 경제성을 저감시키게 된다. 이러한 문제점들 때문에 강봉과 그라우트 및 그라우트와 지반의 마찰력을 증대시킬 수 있는 새로운 형태의 마이크로 파일이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 마이크로 파일을 개선할 수 있는 perfobond rib를 구비한 부분 확공형 마이크로 파일의 지

*정회원. 삼호씨일텍(주) 대표이사(E-mail: ljm4819@hanmail.net)
Member. President, SAMHO Soil Tech co., LTD

**교신저자. 정회원. 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수(Tel: +82-2-970-6504, Fax: +82-2-948-0043, E-mail: kdh6504@seoultech.ac.kr)
Corresponding Author: Member. Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

지력 평가를 위하여 대상 지역을 선정한 후, 본 연구에서 제안하는 공법을 적용한 경우에 대해서 기초시공을 실시하였다.

기초시공을 완료한 후 확공부 지반 전단키의 길이에 따른 지지력을 평가하기 위한 인발시험을 수행하였고, 부분 확공시 생성되는 지반부의 전단키의 돌출높이와 길이의 비에 따른 지지력을 평가하였다.

2. Perfobond rib를 구비한 부분확공형 마이크로파일 이론

마이크로 파일은 강봉으로 전단된 하중이 그라우트와 지반의 마찰력에 의해 지반으로 전달되는 형식이다. 그러나 마이크로 파일의 경우 선단지지력을 고려하지 않기 때문에 요구되는 지지력이 클 경우에는 정착장이 길어져 파일 시공의 경제성 및 시공성을 떨어트리는 문제가 있다.

따라서 마이크로 파일의 지지력을 증대시켜 요구 정착장을 줄일 수 있고 파일 시공의 경제성 및 시공성을 향상시킬 수 있는 공법이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 경제적이고 합리적인 마이크로 파일 시공을 위하여 perfobond rib를 구비한 부분 확공형 마이크로 파일을 제안하고자 한다. Fig. 1은 본 연구에서 제안하고자 하는 perfobond rib를 구비한 부분 확공형 마이크로 파일의 개요를 나타낸 것이다.

본 연구에서 강봉에 적용한 perfobond rib는 합성구조에서 강재와 콘크리트를 합성하기위한 전단연결재로 사용되는 부재이다.

현재까지 가장 많이 사용되고 있는 스티드 전단연결재의 피로 및 용접부 균열의 문제점을 해결하기 위하여 1987년 독일

의 설계회사에서 개발된 perfobond rib 전단연결재는 높은 전단강도 및 제작의 용이성 때문에 세계적으로 주목을 받고 있다. Fig. 2는 일반적인 perfobond rib 전단연결재의 형상 및 거동 특성을 나타낸 것으로 perfobond rib 전단연결재의 전단강도에 영향을 미치는 주요 변수들이다.

Perfobond rib의 전단강도는 콘크리트 선단부의 지압저항 (Fig. 2(a)), perfobond rib 홈의 다웰작용에 의한 전단저항 (Fig. 2(b)), 홈에 배근되는 횡방향 철근의 전단강도(Fig. 2(c))에 의해 결정된다.

Perfobond rib를 구비한 강봉은 다양한 형식이 적용될 수 있다. Fig. 3은 적용 가능한 다양한 형식의 perfobond rib를 구비한 강봉의 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 3(a) 가장 기본적인 배치형태로서 perfobond rib를 일렬로 배치한 형태로서 perfobond rib가 강봉의 지지력을 그라우트로 전달하는 형태이다.

Fig. 3(b)는 perfobond rib를 교차 배치함으로써 perfobond rib 사이에 충전되는 그라우트가 증가하도록 한 것으로 이를 통한 그라우트의 저항력을 키우고자한 형태이다.

Fig. 3(c)는 절곡된 perfobond rib를 배치하여 perfobond rib의 지압저항 면적을 확대시켜 강봉의 지지력이 그라우트로 효과적으로 전달되도록 한 형태이다. 이 외에도 다양한 형태의 perfobond rib를 구비한 강봉이 제시될 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 3(a)와 같은 직판 형태의 perfobond rib를 일렬로 배치한 형태를 대상으로 연구를 수행하였다.

Fig. 2. Mechanical Behavior of Perfobond rib Shear Connectors.

Fig. 1. Perfobond Rib Installed Micropile with Partially Expanded Drill Hole.

Fig. 3. Perfobond Rib Installed Steel Bar of Various Shape.

Fig. 4. Comparison of Partially Expanded Drill Hole and Existing Micropile Grout.

부분 확공된 그라우트부의 경우에는 기존 마이크로 파일 그라우트부와 달리 균일한 지반천공 직경을 갖는 것이 아닌 부분적으로 확공된 직경을 갖는 형식이다.

기존 마이크로파일 그라우트부는 지반과 그라우트의 주면 마찰력을 이용하여 하중을 전달하는 형태이다.

그러나 본 연구에서 제안하는 부분 확공형의 경우에는 지반 천공시 확공비트를 이용하여 지반을 부분적으로 확공하고 그라우팅을 실시하여 확공부에 그라우트가 충전되어 전단키를 형성한다. 따라서 기존 마이크로 파일 처럼 주면 마찰력에 의한 하중 전달과 확공부에 형성된 전단키가 지반과 그라우트 사이의 전단저항을 통한 하중 전달을 동시에 확보할 수 있다.

이러한 증대된 지지성능을 통해 기존 마이크로 파일 보다 설계 정착장을 줄일 수 있다. Fig. 4는 기존 마이크로 파일 그라우트부와 부분 확공형 그라우트부의 차이를 나타낸 그림이다.

3. 지반부 전단키의 길이에 따른 지지력 시험

Perfobond rib를 구비한 부분 확공형 마이크로 파일의 지지력 평가를 위하여, 대상 지역(강원도 철원군)을 선정한 후, 본 연구에서 제안하는 공법을 적용한 경우에 대해서 기초시공을 실시하였다.

기초시공을 완료한 후 확공부 지반 전단키의 길이에 따른 지지력을 평가하기 위한 인발시험을 수행하였다. 지반부 전단키의 길이에 따른 지지력 평가 시험에서는 부분 확공 시 생성되는 지반부의 전단키의 돌출높이와 길이의 비에 따른 지지력을 인발시험으로 평가하였다.

3.1 시험개요 및 시험파일 제원

지반부 전단키의 길이에 따른 지지력 향상을 평가하기 위하여 Fig. 5와 같이 전단키의 돌출 높이(d_s)와 길이(h_s)의 비에 따라서 시험파일을 구분하였다.

Fig. 5. Height (d_s) and Length (h_s) of Shear Key.

Table 1. Compressive Strength of Grout Materials

Time	Compressive Strength (MPa)
Design Strength	60.0
5-Day Strength	52.0
Before Test	63.5

Fig. 6. Evaluation of Bearing Capacity for Soil Shear Keys Length (unit: mm).

Table 2. Soil Research Result of Test Field

Division	Material Property
Cohesion (MPa)	0.32
Friction Angle (°)	34

또한 고려한 변수는 형상비는 $d_s:h_s$ 가 1:4, 1:6, 1:8인 경우와 지반부 전단기를 갖지 않는 경우에 대해서 고려하였다. 지반부 전단기를 갖지 않는 경우에 대해서 인발시험을 실시한 후, 그라우트와 지반의 점착력에 대해 평가하고, 이를 지반부 전단기 시험파일과 비교하였다.

이를 통하여 각 전단기의 길이에 대해서 지지력에 대한 기여도를 분석하였다. Table 1은 본 시험에 적용한 그라우트제의 압축강도를 정리한 것이다.

Fig. 6은 지반부 전단기의 길이에 따른 시험파일의 제원을 나타낸 것이다. Table 2는 시험현장의 지반조사 결과이다.

3.2 시험파일 제작 및 시공

시험파일은 perfobond rib가 설치된 강봉을 사전제작하고,

(a) Clean of Surface

(b) Boring of Ground

(c) Before Reaming

(d) After Reaming

(e) Perfobond rib
Micropile

(f) Grout Mix

(g) Placing Grout

(h) Test Preparation

Fig. 7. Construction Process of Specimen.

Fig. 8. Measurement Locations of Test.

시험공을 천공한 후 현장에서 그라우트제를 타설하여 시공을 완료하였다. Fig. 7은 시험체 제작 과정을 나타낸 것이다.

3.3 시험방법

본 연구에서 수행한 인발시험은 KSF-2445 표준재하방법에 따라 실시하였다. 하중 재하는 유압잭을 사용하였다. 재하에 따른 시험파일 상단에서의 변위량 측정을 위해서 2개의 변위계를 설치하였다.

변위계는 삼발이를 이용하여 시험파일 외부지점에 고정하여 시험파일의 순수 변위량을 측정할 수 있도록 하였다. 하중 재하는 최종 시험하중을 2,000 kN으로 정하고, 최종 시험하중의 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%로 나누어 재하하였다. Fig. 8은 시험파일의 가력방법 및 계측위치를 나타낸 것이다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 정착부의 내하성능에 대한 기여도

본 연구에서 부분 확공형 마이크로파일 지반부 전단기의 내하성능 평가에 앞서 전체 확공된 시험파일의 정착에 의한 내하성능에 대한 평가를 실시하였다.

Fig. 9는 전체 확공한 정착장 725 mm 시험파일(H0-L725)의 하중-인발량 관계를 그래프로 도시한 것이고, Table 3은 초기강성과 항복하중을 정리한 것이다.

전체 확공한 정착장 725 mm 시험파일(H0-L725)의 초기 탄성구간에서의 강성은 59.92 kN/mm로 나타났다. 또한 항복하중의 경우 1,312kN으로 나타났다.

내하성능 평가를 통하여 얻은 정착부의 단위면적당 항복하중은 Table 4와 같으며, 직경 264 mm 천공부의 정착길이에

다른 항복하중은 Fig. 10과 같은 관계를 가짐을 알 수 있다.

이를 통하여 본 절에서 수행한 지반부 전단키를 갖는 시험 파일의 경우, 하부 확공부의 정착장이 525 mm 이므로, 하부 확공부 점착력의 항복하중에 대한 기여는 약 950 kN임을 산출할 수 있다.

Fig. 9. Loading-Pullout Relationship of 725 mm Specimen (H0-L725).

Table 3. Load Carrying Capacity of 725 mm Specimen (H0-L725)

Division	Stiffness (kN/mm)	P_y (kN)
Reaming (725mm)	59.92	1,312

Table 4. Yield Load Per Unit Area of 725 mm Specimen (H0-L725)

Division	P_y (kN)	Anchorage Area (mm ²)	Yield Load Per Unit Area (kN/mm ²)
Reaming (725mm)	1,312	600,996	2.183E-3

Fig. 10. Yield Load-Bond Length Relationship of Diameter 264mm Micropile.

4.2 지반부 전단키의 지지력 평가

부분 확공형 마이크로 파일 지반부 전단키의 길이에 따른 내하성능을 평가하기 위하여, 전단키의 돌출높이와 길이의 비가 1:4인 경우(H100), 1:6인 경우(H150)와 1:8인 경우(H200)에 대한 결과를 분석하였다.

시험파일의 정착부의 점착력에 의한 항복하중 기여효과를 구분하기 위해서, Fig. 11~13과 같이 시험파일의 하중-인발량 관계를 도시한 후, 정착장(525 mm)의 항복하중 기여효과와 각 시험파일의 평균 항복하중을 도시하였다. Table 5는 초기 강성과 항복하중을 정리한 것이다.

지반부 전단키의 길이에 따른 거동 차이를 살펴보면, 전단키의 길이가 길어짐에 따라 초기 강성과 항복하중이 비례하여 증가함을 알 수 있다.

Fig. 11. Loading-Pullout Relationship of Soil Shear Keys ($d_s:h_s=1:4$ (H100)).

Fig. 12. Loading-Pullout Relationship of Soil Shear Keys ($d_s:h_s=1:6$ (H150)).

Fig. 13. Loading-Pullout Relationship of Soil Shear Keys ($d_s:h_s=1:8(H200)$).

Table 5. Load Carrying Capacity of Soil Shear Keys Specimen

Division		Stiffness (kN/mm)	P_y (kN)	Yield Load of Shear Key (kN)
$d_s:h_s=1:4$ (H100)	A	55.66	1,050	100
	B	57.84	1,080	130
	C	62.77	1,150	200
	Avg.	58.76	1,093	143
$d_s:h_s=1:6$ (H150)	A	82.10	1,330	380
	B	75.68	1,220	250
	C	69.37	1,305	355
	Avg.	75.72	1,278	328
$d_s:h_s=1:8$ (H200)	A	91.27	1,620	670
	B	96.20	1,790	840
	C	95.67	1,580	630
	Avg.	94.38	1,663	713

강성의 경우 전단키 길이가 1.5배와 2배로 늘어날 때 각각 1.29배와 1.6배 증가함을 확인하였다. 또한 앞 절에서 산출한 정착장 525 mm의 점착력에 대한 영향을 배제하여 전단키의 항복하중에 대한 순수한 기여효과를 검토한 결과, H100의 경우 전단키의 항복하중 기여효과는 평균 143 kN, H150은 328 kN, 그리고 H200은 713 kN으로 나타났다.

이러한 전단키의 기여효과가 전체 항복하중 중 차지하는 비율을 산출해 보면, H100의 경우 13.1%로 다소 작은 값을 나타내었으나, H200의 경우에는 42.9%를 나타내어 전단키의 유효성을 확인할 수 있었다. 따라서 기존 마이크로 파일에 부분 확공 시공을 통하여 전단키를 적용할 경우 파일의 침하량에 대한 강성과 우수한 내하성능을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

지반부 전단키의 길이와 항복하중의 기여효과에 관계에 대

Table 6. Change of Load Carrying Capacity by Shear Key Length

Division	Stiffness (kN/mm)		P_y (kN)		Yield Load of Shear Key (kN)	
	Avg.	Ratio	Avg.	Ratio	Avg.	Ratio
$d_s:h_s=1:4$ (H100)	58.76	1.000	1,093	1.000	143	1.000
$d_s:h_s=1:6$ (H150)	75.72	1.288	1,278	1.169	328	2.294
$d_s:h_s=1:8$ (H200)	94.38	1.606	1,663	1.522	713	4.986

*Ratio = Proportion about H100 Result

Fig. 14. Effect of Yield Load Per Unit Length in Shear Key.

해서 Table 6에 정리하였다. Fig. 14는 전단키의 단위길이당 항복하중 기여도를 비교한 것이다.

표와 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 전단키의 길이가 증가함에 따라 전단키의 내하성능이 증가함을 확인할 수 있다. 단위 길이당 항복하중의 기여도로 환산하여 보면 H100의 경우 1.43 kN/mm, H150의 경우 2.19 kN/mm, 그리고 H200의 경우 3.57 kN/mm로 나타났다.

따라서 전단키의 길이가 짧은 경우 효율성이 떨어지기 때문에 단위길이당 효율성이 좋은 H200을 실구조물에 적용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 또한 H200의 경우 실 구조물에 적용하기에 충분한 전단성능을 발휘하고 있기 때문에 H200 보다 길이가 긴 전단키를 적용할 경우, 내하성능의 향상은 기대할 수 있으나, 마이크로 파일의 정착장이 길어지는 단점이 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 마이크로 파일의 그라우트와 지반의 하중전달체계의 효율성 향상을 위한 perfbond rib를 구비한 부분

확공형 마이크로 파일의 현장 인발 시험을 통하여 부분 확공하여 시공된 지반부 전단키의 지지력을 평가하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 부분 확공형 마이크로 파일의 지반부 전단키의 길이에 따른 내하성능평가 시험결과, 전단키를 적용함으로써 마이크로 파일의 초기강성과 항복하중이 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 정착장의 점착력에 의한 저항효과를 배제하고, 전단키의 순수한 기여효과를 검토한 결과, H200 전단키를 통하여 713 kN의 내하성능 향상을 기대할 수 있으며, H100과 H150의 경우에도 각각 143 kN과 328 kN의 내하성능 향상을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 지반부 전단키의 다양한 높이(100~200 mm)에 대한 내하성능평가 시험으로 전단키 설치에 따른 내하성능에 대한 기여효과를 분석하였다. 평가결과 내경 264 mm, 높이 200 mm의 전단키에서 단위높이(mm)당 효율성이 3.57 kN으로 가장 높게 나타났으며, 전체 713 kN의 내하성능 증가를 얻을 수 있어 실구조물에 적용하기에 충분한 내하성능을 가지는 것으로 평가된다.
- 4) 부분 확공형 마이크로 파일 H200의 경우 실 구조물에 적용하기에 충분한 전단성능을 발휘하고 있기 때문에 H200보다 긴 전단키를 적용할 경우 내하성능의 향상은 기대할 수 있으나 마이크로 파일의 정착장이 길어지는 단점이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, J-H., Lee, C-G., Won, J-H., and Kim, S-H. (2010) Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, pp. 1295-1307.
- Davisson, M.T. and Prakash, S. (1965) Bending and Buckling of Partially Embedded Piles, *Proceeding of the 6th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2.
- Eurocode 4 ENV (2007) Design of composite steel and concrete structures, European Committee for Standardisation (CEN).
- Federal Highway Administration (FHWA) (2000) Micropile design and construction guidelines, US Department of Transportation.
- Heo, J-C., Im, J-C., Lee, T-H., and Ko, H-S. (2002) *A Study on the Increase of the Bearing Capacity on the Dense Sandy Ground of Foundations Reinforced with Micropiles*, Conference of KSCE 2002. pp. 2122-2125.
- Kim, J-D. (2003) *An Experimental Study on the Bearing Capacity Increase of the Existing Structure Foundation with Micropile Reinforcement*, Pusan University, Paper of Master's Degree.
- Lee, J-M. (2012) *Experimental Evaluation on the Bond Strength of a Perfobond Rib Installed Micropile with Partially Expanded Drill Hole*, Yonsei University, Paper of Master's Degree.
- Lim, J-C, Yoon, L-H, Park, L-K., and Ko H-S (1999) *An Application of Micropile to Restrain the Settlement of Structure on the Ground Surface caused by Shield Tail Void*, Korean Geotechnical Society, Vol. 1999, No. 1.
- Ministry of Land (2010) Korean highway bridge design code.
- Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1997) *Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors*, Computers & Structures, Vol. 62, No. 4, pp. 617-624.
- PennDOT (2007) Design Manual Part 4, Pennsylvania Department of Transportation, Harrisburg, PA.

Received ■ May 28, 2014

Revised ■ May 29, 2014

Accepted ■ July 17, 2014