

연직 마이크로파일이 설치된 조밀한 모래지반의 지지력 증가에 관한 연구 A Study on Increase of Bearing Capacity of Dense Sandy Ground installed by Vertical Micropiles

최상민¹⁾, Sang-Min Choi, 임중철²⁾, Jong-Chul Im, 이태형³⁾, Tae-Hyung Lee, 공영주⁴⁾, Young-Ju Gong

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Eng., Pusan National University.

²⁾ 부산대학교 공대 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng. Pusan National Univ.

³⁾ 부산대학교 토목공학과 박사수료, Graduate student, Ph.D.Candidate, Dept. of Civil Eng., Pusan National University.

⁴⁾ (주) SSC 컨설턴트 상무, Managing Director, SSC Consultant Co., Ltd.

SYNOPSIS : Since micropiles were conceived in Italy in the early 1950s, which have been widely used for in-situ reinforcement, bearing pile or the concept of combination in the world-wide. The meaning of micropiles usually differs from that of a general deep foundation. Because the load capacity of it was mainly affected by skin friction. Also, it could be obtained the improvement effects of load capacity or ground's rigidity by the unitary behavior of ground and micropiles. In this study, The model tests were performed on the dense sand where micropiles are set to the vertical direction. Strip footing was used in it. Steel bars of dia. 2 and 4mm were used in model tests of which the sand was attached on the surface, and the length of it was changed as 2B to 6B(where, B is width of strip footing). Through this process, the load capacity were analyzed from the test results in the relationship between load and displacement.

Key words : micropile, skin friction, improvement effect, strip footing, ground's rigidity

1. 서론

마이크로파일 공법은 50여년 전 이탈리아에서 개발된 이래 세계 각국에서 지반보강이나 지지말뚝 또는 그 혼용의 개념으로 널리 사용되어 왔다. 마이크로파일은 일반적인 깊은 기초와는 달리 주변 마찰력이 지지특성의 주요인이 되고, 또한 지반과 일체로 거동하여 지반지지력이나 지반 강성을 개량하는 효과도 얻을 수 있다. 마이크로파일의 이러한 다양하고 광범위한 적용특성 때문에 멀지 않은 장래에 국내에서도 보편적인 공법이 될 것으로 예상된다. 마이크로파일은 직경 30cm 정도의 보오링공에 직경이 다른 강재를 설치하고, 시멘트 밀크와 시멘트 모르터를 그라우팅 재료로서 주입하여 조성한 소구경 현장 타설 말뚝의 일종(塚田 등, 1999)으로서, 구조물이나 인접구조물에 영향을 끼치지 않으면서 지반 변위를 최소화하고 작업공간과 다양한 지반에 적용할 수 있는 방법으로 고안된 이래, 이에 관한 관심과 기술 발전이 급속히 이루어져 왔다. 그러나, 마이크로파일과 지반의 역학적 거동이나 마이크로파일과 기초판

의 상호작용에 관해서는 명확히 밝혀지지 않은 부분이 많고, 설계기준이 없이 경험에 의존하고 있는 실정이다. 따라서, 합리적인 설계법을 확립하기 위해서는 이러한 불확실한 요소들의 해명이 필요하다.

본 연구는 마이크로파일에 의한 기초지반 보강시, 지지력에 영향을 주는 여러 요인(이상호, 2000)중에서 파일의 길이와 직경 그리고 위치를 달리하여 실험하였다. 이들 결과를 이용하여 지반의 지지력 증대, 무리효과 등을 관찰하고 파일이 설치된 지반 거동을 분석하고자 한다.

2. 모형지반의 요소시험

2.1 지반재료의 물성치

본 연구에서의 모형지반은 주문진 표준사를 이용하여 제작하였다. 주문진 표준사의 물성치와 입도분포곡선은 표 1과 그림 1에 나타내었다. 실험결과 평균상대밀도(D_r)가 92%로 보아 아주 조밀한 상태를 알 수 있다.

표 1. 지반재료의 물성치

| 물성 종류 | 부 호 | 물성치 |
|----------|--------------------------|-------|
| 최대간극비 | e_{max} | 0.843 |
| 최소간극비 | e_{min} | 0.617 |
| 최대건조단위중량 | $\gamma_{dmax}(gf/cm^3)$ | 1.652 |
| 최소건조단위중량 | $\gamma_{dmin}(gf/cm^3)$ | 1.377 |
| 비 중 | G_s | 2.65 |
| 함수비 | w (%) | 0.30 |
| 평균입경 | $D_{50}(mm)$ | 0.595 |
| 유효입경 | $D_{10}(mm)$ | 0.443 |
| 균등계수 | C_u | 1.402 |
| 곡률계수 | C_g | 0.912 |

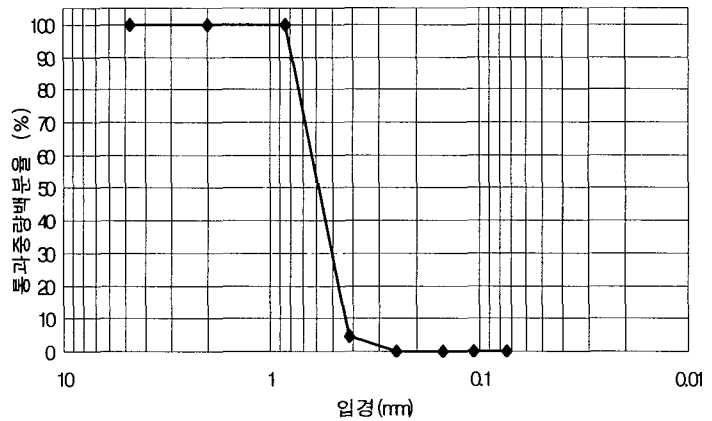


그림 1. 주문진 표준사의 입도분포곡선

2.2 모형지반의 평면변형률 압축시험

모형지반의 평면변형 상태이다. 주문진 표준사로 평면변형률 압축시험한 결과를 표 2와 같이 최소자승법으로 정리하면 $\phi_{psc} = 51.58^\circ$ 이다. 여기서, ϕ_{psc} 는 평면변형률 압축시험에 의한 내부마찰각이다.

표 2. 주문진 표준사 평면변형률 압축시험 결과

| CASE | $(\sigma_3)_f$ (kgf/cm ²) | $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kgf/cm ²) | ϕ_{psc} |
|--------|---------------------------------------|--|--------------|
| 80Kpa | 0.82 | 6.77 | 51.58° |
| 100Kpa | 1.02 | 7.79 | |
| 150Kpa | 1.53 | 11.48 | |
| 200Kpa | 2.04 | 13.89 | |

2.3 낙하고에 따른 밀도시험

본 실험에서는 슬롯형 뿌리기 장치로 모형 지반을 제작하였다. 본 실험에서는 낙하고 0.8m부터 밀도가 수렴하였으나 토조의 높이를 감안하여 낙하고를 1.2m로 유지하여 실험을 실시하였다.

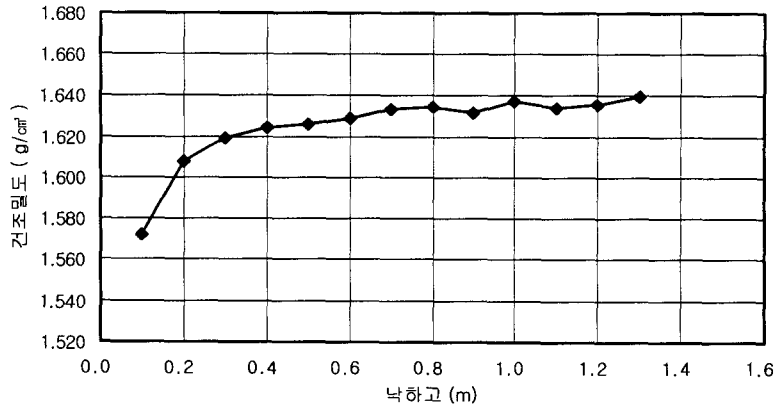


그림 2. 낙하고에 따른 밀도시험

3. 실내 모형실험

3.1 실험장치의 개요

본 연구에서 사용된 평면 변형률 토조의 제원은 그림 3과 같으며, 토조의 앞면과 뒷면에는 아크릴판이 부착되어 있어 지반의 거동을 관찰하는 데 용이하게 하였고, 아크릴 면에는 실리콘 그리스를 0.2mm 두께로 바르고 1cm 간격으로 격자를 그은 라텍스 멤브레인을 부착시켜서, 아크릴 면과의 마찰을 감소시키고 또한 이 면을 통하여 사진법(사진촬영을 통하여 지반과 일체거동을 하는 멤브레인의 거동을 분석하는 방법)을 이용하여 변형해석을 하였다(임종철 등, 1992).

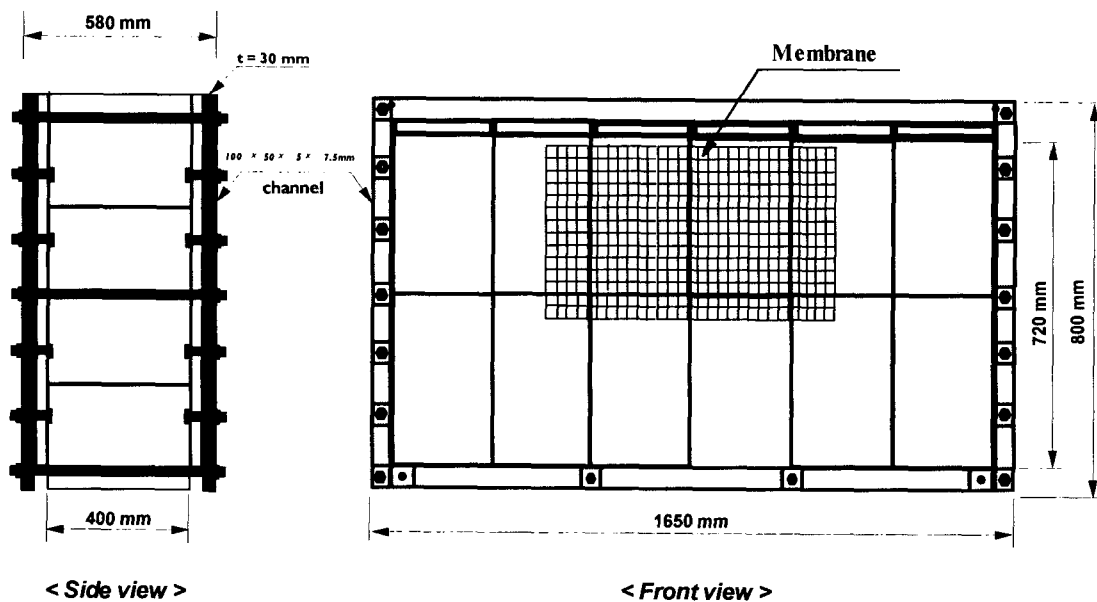


그림 3. 모형 토조

3.2 모형 마이크로파일

모형 마이크로파일의 표면은 그림 4와 같이 지반과의 일체거동을 확보하기 위해 직경 2mm와 4mm의 강봉의 표면에 접착제를 바른 후 지반재료와 동일한 주문진 표준사를 부착하였다.

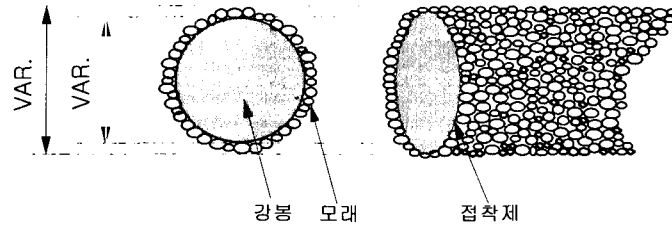


그림 4. 모형 마이크로파일

3.3 실험의 종류

모형실험은 그림 5와 같이 기초지반에 연직 마이크로파일 3열을 간격 0.4B로 설치하고, 길이와 직경을 변화시켜 마이크로파일의 지지력 증대효과를 비교·검토할 수 있도록 실험을 실시하였다. 표 3은 실험의 종류를 나타낸다.

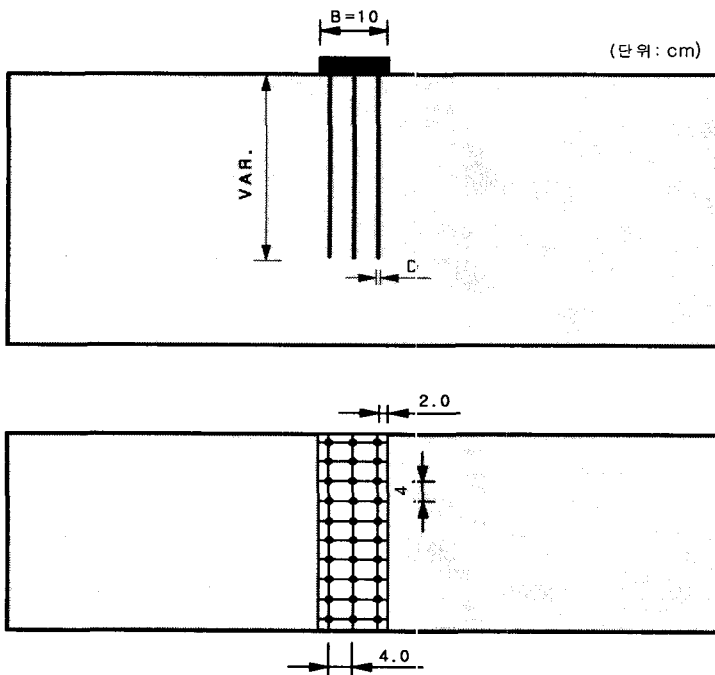


그림 5. 모형실험의 개략도

표 3. 실험의 종류

| 실험명 | 설치개수 |
|----------------------|------|
| UR | 0 |
| MP90-2B-0.4B-D2 | 30 |
| MP90-3B-0.4B-D2 | 30 |
| MP90-4B-0.4B-D2 | 30 |
| MP90-5B-0.4B-D2 | 30 |
| MP90-6B-0.4B-D2 | 30 |
| MP90-2B-0.4B-D4 | 30 |
| MP90-3B-0.4B-D4 | 30 |
| MP90-4B-0.4B-D4 | 30 |
| MP90-5B-0.4B-D4 | 30 |
| MP90-6B-0.4B-D4 | 30 |
| MP90-4B-0.4B-CL10-D2 | 10 |
| MP90-4B-0.4B-CL10-D4 | 10 |
| MP90-4B-0.4B-SL20-D2 | 20 |
| MP90-4B-0.4B-SL20-D4 | 20 |

본 실험에서는 실험명을 아래의 예와 같이 정의하였다(그림 5 참조).

예) **MP90 - 4B - 0.4B - CL10 - D4**

MP90 : MicroPile을 90° 로 설치

0.4B : 마이크로파일 배치 간격 0.4B(B=10cm)

CL10 : 마이크로파일 설치 위치(Center Line) 및 개수(10개)

2B : 마이크로파일 길이 4B(B=40cm)

D4 : 마이크로 파일의 직경 (=4mm)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 하중강도~침하 곡선

모형재하실험의 하중강도~침하 곡선을 나타내면 그림 6, 그림 7과 같다.

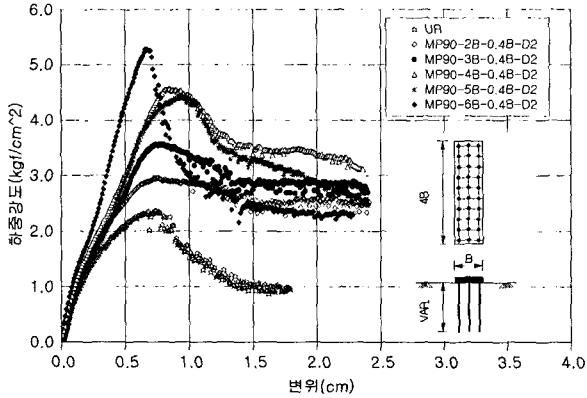


그림 6. 직경2mm의 응력~변위 곡선

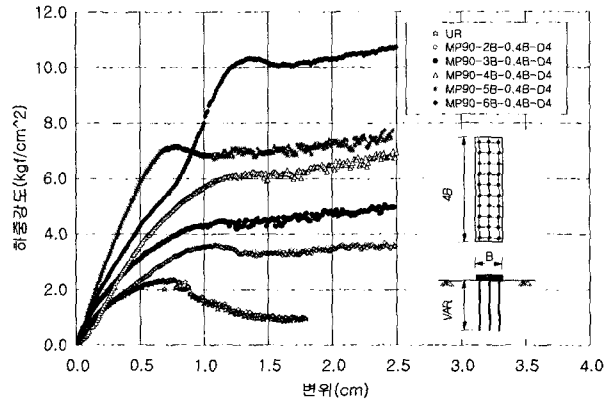


그림 7. 직경4mm의 응력~변위 곡선

4.2 길이 변화에 의한 지지력 증대 효과

마이크로파일의 길이변화에 따른 지지력 증대 효과를 알아보기 위해, 마이크로파일을 간격 0.4B(=4cm)로 설치하고, 길이를 2B~6B로 변화시켜 직경2mm와 직경4mm에 대해 실험을 실시하였다. 직경2mm의 경우 4B에서 수렴하는 경향을 보였으며, 무보강시에 비해 지지력이 최대 2.22배 증가하였고, 직경4mm의 경우는 4.36배 증가하였다(그림 8 참조).

4.3 강성(직경) 변화에 의한 지지력 증대 효과

마이크로파일의 강성(직경)변화에 따라서 지반의 구속에 의한 지지력 증대 효과를 알아보기 위해, 마이크로파일을 간격 0.4B(B=10cm)로 30개를 설치하고, 직경2mm와 4mm에 대해 길이를 2B~6B로 변화시켜 실험을 실시하였다. 실험결과를 (각 길이별 마이크로파일 본당 지지력 × 설치개수)와 비교한 결과, 하중강도는 직경2mm가 최대 170%, 평균 114%의 증가를 보였고, 직경4mm는 최대 115%, 평균 51%의 증가를 보였다. 따라서 직경2mm가 직경4mm보다 지반의 구속효과에 의한 지지력 증대효과가 큼을 알 수 있다(그림 9 참조).

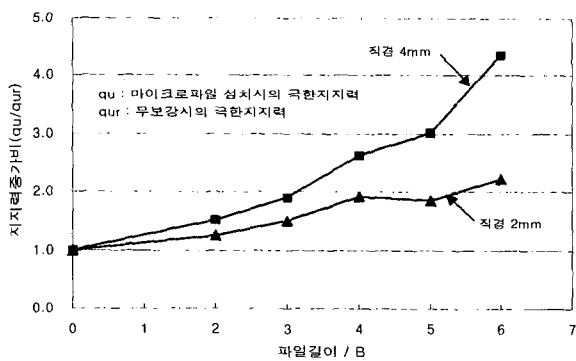


그림 8. 길이 변화에 따른 지지력증가비

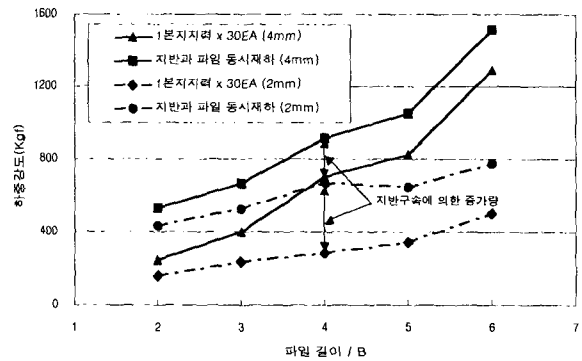


그림 9. 강성(변화)에 의한 강도증가비

4.4 설치 개수에 따른 무리 효과

마이크로파일의 무리 효과(Lizzi 등, 1979)에 의한 지지력 증대의 영향을 알아보기 위해, 마이크로파일 길이 4B에 대해, 파일을 모형지반에서 2cm정도 돌출시켜 연직으로 1개, 4개, 12개를 설치하여 재하 실험을 실시하였다. 여기서, 설치 개수는 기초판내에 로드셀이 설치된 곳의 마이크로파일 개수로 정의했다. 표 4의 결과로부터 무리말뚝의 지지력은 단일말뚝의 지지력의 합보다 큰 값을 보이고 있다. 마이크로파일의 설치개수가 4개인 경우는 1개의 마이크로파일을 연직으로 설치한 경우에 비하여 직경 2mm에서는 61%, 직경4mm에서는 13%가 증가하였고, 설치 개수가 12개인 경우는 각각 166%와 103%가 증가하였다.

표 4. 마이크로파일만 재하시 본당 지지하중에 의한 무리효율

| 항 목 | | 마이크로파일 지지하중(kgf) | | | | 무리효율 ($q_{n\text{본}}/q_{1\text{본}}$) | | |
|-----------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|---|---|------|
| | | 1 | 4 | 8 | 12 | 4 | 8 | 12 |
| 직경 2mm | 1본 지지하중 × 개수 (kgf) | 9.48 (9.48×1개) | 37.92 (9.48×4개) | 75.84 (9.48×8개) | 113.76 (9.48×12개) | 1.61 | - | 2.66 |
| | 무리 말뚝 (kgf) | | 61.02 | - | 303.03 | | | |
| 직경 4mm | 1본 지지하중 × 개수 (kgf) | 23.48 (23.48×1개) | 93.92 (23.48×4개) | 187.84 (23.48×8개) | 281.76 (23.48×12개) | 1.13 | - | 2.03 |
| | 무리 말뚝 (kgf) | | 106.58 | - | 572.47 | | | |

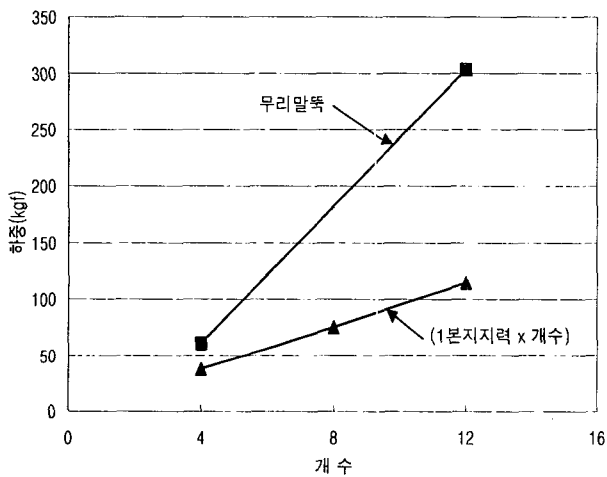


그림 10. 직경2mm일때의 무리 효과

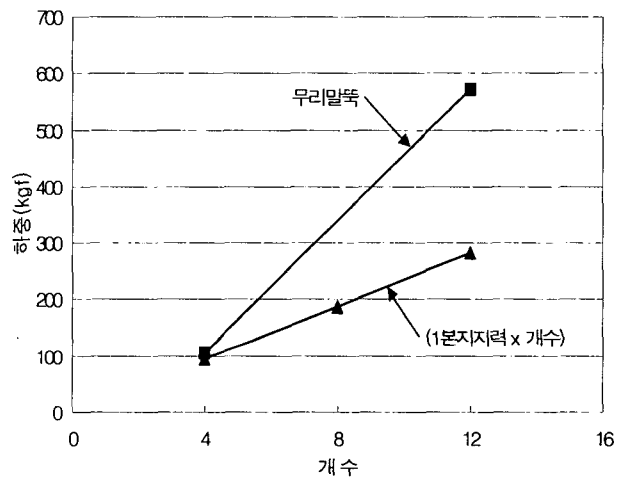


그림 11. 직경4mm일때의 무리 효과

4.5 지반의 거동

그림 12과 그림 13은 무신축방향과 최대 전단변형률 등고선을 나타낸다. 이것을 이용하면 지반의 파괴형상을 추정할 수 있다(임종철 등, 1990). 여기서, 마이크로파일 길이는 직경 2mm에서 수렴하는 경향을 보이는 4B(=40cm)에 대해 무신축방향과 최대 전단변형률 등고선을 나타내었다. 직경 2mm 경우의 지반 파괴 형상은 대변형시 변형률 연화현상을 보여 지반과 일체거동을 하는 것을 알 수 있으며, 직경 4mm의 경우 양쪽 마이크로파일의 바깥면을 따라 파괴가 발생하여 근입깊이(D_f)가 증대되는 효과를 나타내었다.

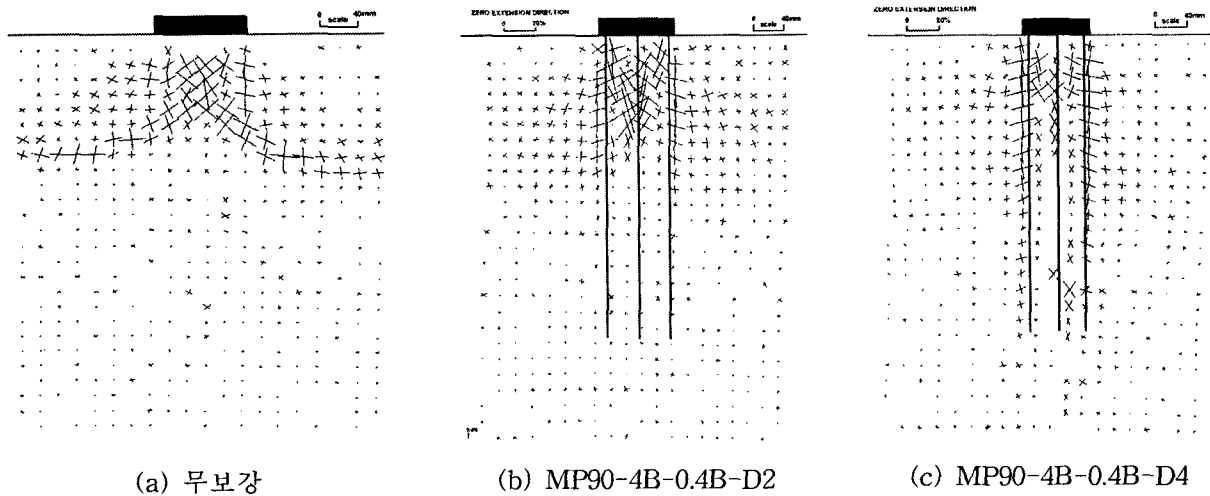


그림 12. 무신축방향(Zero Extension Direction)

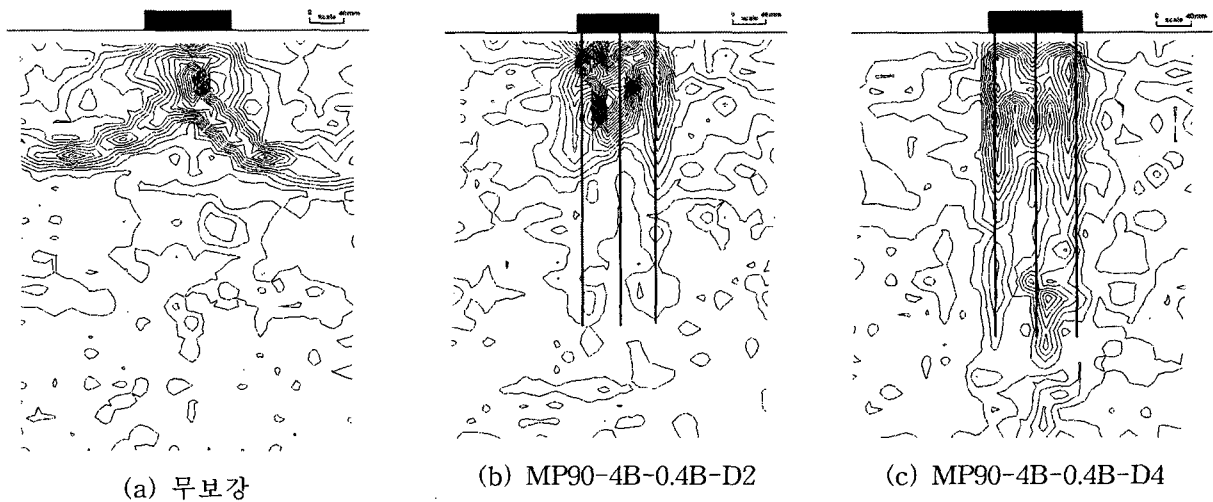


그림 13. 최대 전단변형률 등고선(Contour of Maximum Shear Strain)

5. 결론

연직 마이크로파일의 실내 도형실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 마이크로파일의 길이가 증가할수록 극한지지력도 증가하였으나, 직경 2mm의 경우 4B에서 수렴하는 경향을 보였으며, 무보강시에 비해 지지력이 최대 2.22배 증가하였고, 직경 4mm의 경우는 4.36배 증가하였다.
- (2) 마이크로파일의 강성(직경)변화에 따라서 지반의 구속에 의한 하중강도는 직경 2mm가 최대 170%, 평균 114%의 증가를 보였고, 직경 4mm는 최대 115%, 평균 51%의 증가를 보였다. 따라서, 강성(직경)변화가 지반의 지지력 증가에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서, 마이크로 파일 공법은 현재의 일반적인 말뚝보강 개념과는 달리 지반과의 상호작용에 의한 지지력 증가 효과가 있음을 알 수 있다.
- (3) 직경 2mm 경우의 지반 파괴 형상은 대변형시 변형률 연화현상을 보여 지반과 일체거동을 하는 것을 알 수 있으며, 직경 4mm의 경우 마이크로파일 바깥면을 따라 파괴가 발생하여 근입깊이(D_f)가 증가되는 효과를 나타내었다.
- (4) 마이크로파일의 설치개수가 4개인 경우는 1개의 마이크로파일을 연직으로 설치한 경우에 비하여 직경 2mm에서는 61%, 직경 4mm에서는 13%가 증가하였고, 설치 개수가 12개인 경우는 각각 166%와 103%가 증가하였다. 따라서, 조밀한 모래 지반에서 마이크로파일이 지중에 시공되었을 때 파일 한개당 지지하중이 증가하는 정(+)의 무리효과가 발생함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1.塚田幸廣, 三浦均也, 坪川將才, 西村石敏(1999), “砂地盤のマイクロパイル基礎の 模型實驗”, 土と基礎, 47-1, pp. 35~38
2. 이상호(2000), “연직 마이크로파일의 지반지지력 및 강성 증대 효과에 관한 연구”, 부산대학교 석사논문, pp. 36~50
3. 임종철, 박성재, 주인곤, 박용부, 김영인(1992), “평면변형률 상태에 있는 모형지반의 변형해석법”, 한국지반공학회지, pp.29~39.
4. 임종철, 龍岡 文夫, 박성재(1990), “평면변형률상태에 있는 연직지반 앵커의 파괴 모드”, 대한토질공학회지, 제6권 제1호, pp. 43~56
5. Lizzi, F. and Carnevale, G.(1979), “Les Reseaux de Pieux Racines Pour la cosolidation des sols, Aspects Theoretique et Essais sur Mondile” Proc. Int. Conf., soil Reinforcement, Paris, Vol. 2, pp. 317~324