

조밀한 모래지반의 기초 인접에 설치된 마이크로파일 보강효과에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Reinforcement Effect of Installed Micropiles in the Surround of Footing on Dense Sand

이 태 형¹ Lee, Tae-Hyung

임 종 철² Im, Jong-Chul

Abstract

The micropile, which is a kind of the in-situ manufactured pile with small diameter of 150~300 mm, is constructed by installing a steel bar or pipe and injecting grout into a borehole. The application fields of micropile are being gradually expanded in a limited space of down-town area, because the micropile has various advantages with low vibration and noise in method and compact size in machine, etc. Mostly, the micropile has been applied to secure the safety of structures, depending on the increment of bearing capacity and the restraint of displacement. The micropile is expected to be used in various fields due to its effectiveness and potentiality in the future. The model test, focused on the interaction between micropile and soil in this study, was carried out. The micropile is installed in a soil adjacent to footing (concept of "soil reinforcement"). With the test results and soil deformation analysis, the reinforcement effect (relating to bearing capacity and settlement) was analysed in a qualitative and quantitative manner, respectively. Consequently, it is expected that we may demonstrate the improvement of an efficiency and application in the design and construction of micropile.

요 지

직경 150~300mm 정도의 보링공에 강봉 또는 강관을 삽입하여 그라우팅 재료로 주입·압력을 가하는 소구경 현장 타설 말뚝의 일종인 마이크로파일 공법은 기계의 소형화, 저진동, 저소음 등의 장점으로 도심지의 협소한 공간에서의 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 마이크로파일은 지지력 증가, 지반 변위억제를 통한 구조물 안정성 확보 등에 주로 적용되어져 왔고, 향후 공법의 유효성과 잠재성으로 다양한 방면에 활용될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 마이크로파일과 지반과의 상호작용에 초점을 두고 기초의 인접지반(지반보강 개념) 보강을 실시하였으며, 실험 결과 및 지반 변형 분석을 통해서 보강 효과(지지력 증가효과 및 침하억제 효과)를 정성적·정량적으로 분석하여 설계 및 시공에서의 효율성과 적용성을 높이고자 한다.

Keywords : Footing, Interaction, Micropile, Model test, Reinforcement effect

1. 서 론

마이크로파일 공법은 기계의 소형화, 저진동, 저소

음 등의 장점으로 환경 문제를 야기하는 기존 항타 장비나 대형 굴착장비로 시공할 수 없는 도심지의 협소한 공간에서의 지반보강, 사면굴착의 안정화, 흙

1 정희원, 한국시설안전기술공단 지하시설실, 부산대학교 토목공학과 박사수료 (Member, Dept. of Underground Structure, KISTEC, Ph.D. candidate, Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ., tahlee@kistec.or.kr, 교신저자)

2 정희원, 부산대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Pusan National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 11월 30일까지 그 내용을 학회에 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

막이 옹벽의 안정화, 근접시공시의 부등침하억제, 도심지 터널 굴착시 주변지반의 변형억제, 구조물 신축이나 증축 시 지반 지지력 강화, 지반 및 교량기초 내진성능 향상 등의 목적으로 그 적용범위가 점차 확대되고 있다.

국내에서는 울진 원자력 발전소, 서울 영등포 선상역사(민윤식 1990), 부산지하철의 인접 아파트(부산교통공단 1999), 부산 광안대로 현수교 구간의 앵커블록(부산광역시 2003), 안산터널 등의 지반 및 기초보강에 마이크로파일 공법이 적용되었다. 이러한 마이크로파일의 광범위한 적용 및 활용범위(박이근 2003)에도 불구하고 지반과의 상호작용과 역학적 거동에 있어서 미 해명된 부분이 많으며, 마이크로파일 공법 적용시 명확한 설계기준이 없어 기존 말뚝개념을 준용하거나, 경험에 의존하고 있는 것이 일반적이다.

미국 도로연방국의 마이크로파일 분류기준(FHWA 2000)에 의하면, 설계 개념의 말뚝 거동과 지반과의 마찰에 근거한 그라우트 주입방식에 따라 분류되고 있으며, 말뚝 거동에서 하중을 직접 지지하는 방식(Case 1)과 그물식의 보강 형태를 이용하여 지반을 보강하는 방식(Case 2)으로 크게 나누어져 있다. 그러나 마이크로파일의 거동은 상기의 분류와 같이 거동이 명확하게 구분된다고는 할 수 없으며 양쪽의 개념을 모두 포함하고 있다고 보는 것이 일반적이다.

국내에서 대부분의 마이크로파일 적용 예들은 기초 하부에 파일이 설치되어 하중을 직접 지지하는 경우(Case 1)로 지반 보강을 목적(Case 2)으로 적용한 예는 그렇게 흔하지 않다. 그러나 점점 지하화, 복잡화되어 가고 있는 현대의 도심지에서 중요 구조물 신축, 기존 기초의 보강, 지하 구조물 존재 및 계획 등의 제약 조건으로 기초 하부 보강이 쉽게 적용될 수 없을 경우도 점차 많아질 것이다. 이러한 환경에서 기초 인접지반 보강을 통해서 소정의 목적을 달성할 수 있다면 환경 및 시공성, 경제성에서 합리적인 대안이 될 수 있다고 생각된다.

이에 본 연구에서는 마이크로파일을 기초 인접에 설치하였을 때, 파일과 지반과의 상호작용에 초점을 두고 여러 요인(factor)을 달리하여 파일이 설치된 지반에서의 보강효과를 알기 위해 실내 모형실험을 실시하였다.

2. 종래의 연구

2.1 Lizzi 등의 연구

Lizzi 등(1979)은 무리지어 시공되는 마이크로파일의 무리효과에 대해서 실험을 통하여 연구하였다. 지반재료로 균질한 모래를 사용하였으며, 표면을 거칠게 할 목적으로 직경 8mm의 강봉에 모래를 입힌 직경 10mm의 모형말뚝을 이용하여 원형기초 하부에 말뚝을 설치하여 실험하였다. 말뚝 길이는 직경(D)의 50, 100, 150, 200배의 4종류에 대하여 말뚝 간격을 변화시켜 실험하였으며, 실험결과 Fig. 1은 말뚝 간격이 말뚝 직경의 2~7배 범위일 때 무리말뚝의 지지력은 단말뚝의 지지력 합보다 큰 값, 즉 무리효율이 1.0이상이 됨을 나타내고 있다.

2.2 이의 연구

이원택(1991)은 사질토에서 그물식 뿌리말뚝에 의한 기초 보강시, 효과적인 말뚝의 배치방법에 대해 실험을 통하여 연구하였다. 지반재료로 2mm의 체를 통과한 자연 건조사를 사용하였으며, 표면을 거칠게 할 목적으로 직경 4mm의 강봉에 모래를 입혀서 만든 직경 6.25mm의 모형말뚝을 이용하여 띠기초(L=25cm, B=5cm)의 인접지반에 모형말뚝을 설치하여 실험하였다. 실험은 R.H. Bassett과 N.C. Last(1978)가 기초 인접지반 보강패턴으로 제안한 말뚝의 배치 형태를 적용하였으며, 말뚝 길이는 기초폭(B)의 2.5, 5, 10, 15배의 4종류, 기초의 길이방향으로 말뚝 간격을 달리하여 실험하였다. Fig. 2는 말뚝 길이가 기초폭의 약 5배 이상이면 지지력 증가 효과에 대한 길이의 영향은 거의 없음을 나타내며, Fig. 3은 말뚝 간격이 말뚝 직경의 약 8배일 때 최적의 말뚝 효율을 나타내고 있음을 뜻한다.

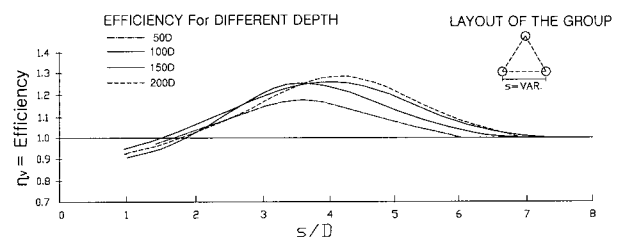


Fig. 1. Group efficiency for the installation spacing of micropiles

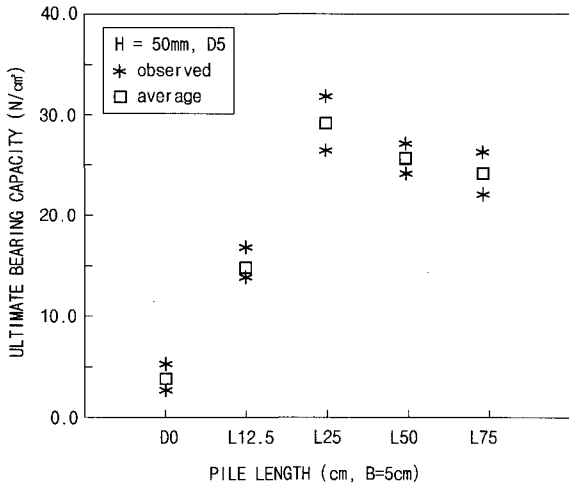


Fig. 2. Relationship of ultimate bearing capacity-pile length

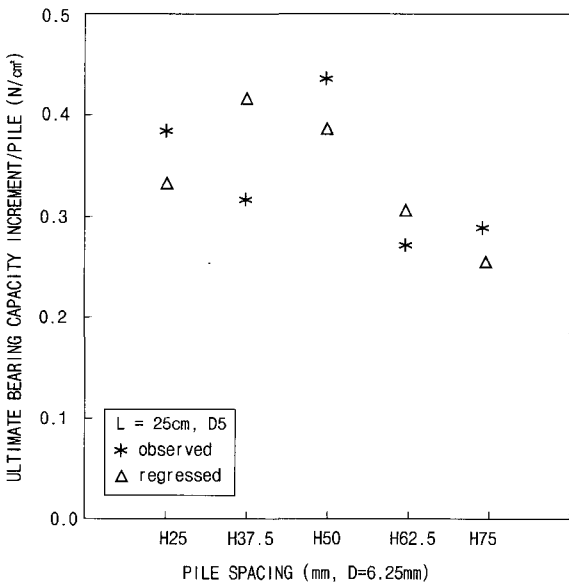


Fig. 3. Relationship of ultimate bearing capacity per pile-horizontal spacing

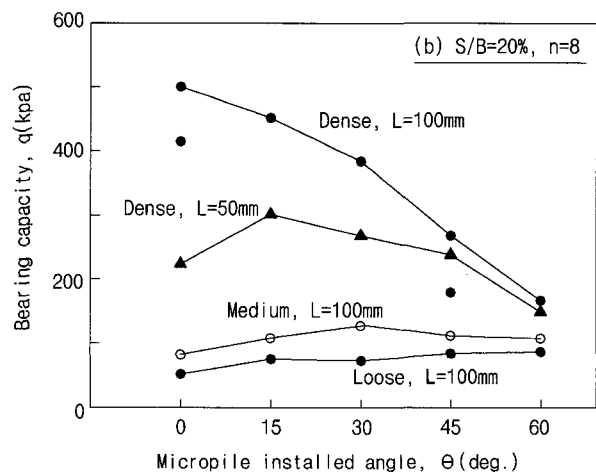
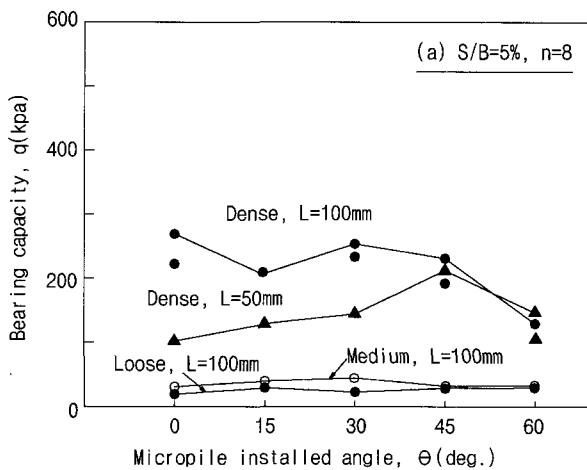


Fig. 4. Bearing capacity by installed angle of piles

2.3 塚田(Tsukata) 등의 연구

塚田 등(1999)은 마이크로파일에 의한 지지력 보강 메커니즘을 명확히 파악하고자 모형실험을 실시하였다. 지반재료로 건조된 규사(珪砂)를 사용하였으며, 표면을 거칠게 할 목적으로 직경 1.8mm의 강봉에 모래를 입혀서 만든 직경 2.0mm의 모형말뚝을 사용하였다. 마이크로파일을 원형의 재하판(B=4cm)과 일체화시켜 실험하고, 지반의 상대밀도 95%(조밀), 68%(중간), 50%(느슨)의 3종류에 대해 파일의 설치 각도와 길이를 달리하여 실험하였다.

피크시와 잔류시에 대하여 파일의 설치각도에 따른 지지력을 나타내는 Fig. 4로부터 파일의 구속효과와 휨강성을 종합하여 연직에서 약 30도일 때, 효과적이라 기술하고 있다.

3. 연구 실험

본 연구에서는 우선 지반 재료의 물리적, 역학적 특성을 파악하고, 실험을 통해 무보강 지반에서의 파괴메커니즘과 기초인접 지반에서의 파일 보강에 의한 효과를 파악하고자 하였다.

3.1 지반 재료의 물리적, 역학적 특성

지반 재료인 주문진 표준사에 대한 물리적 및 역학적 성질을 알기 위해 여러 시험을 실시하였으며, 이에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

3.1.1 지반 재료의 물리적 성질

본 실험에서는 강사(降砂)기를 이용하여 낙하고 1.2m를 유지하면서 지반을 조성하였으며, 주문진사의 물리적 성질은 Table 1과 같다. 여기서 최대 및 최소 건조밀도 시험은 국내에서는 이에 대한 규정이 없기 때문에, JSF T161-1990의 규정(日本土質工学会 1991)에 따라 실시하였다. 시험은 용적 113.1cm³, 중량 813.8 gf의 몰드에 시료를 10층으로 나누어 고무망치로 100회씩 타격하여 10층을 완성할 때를 가장 조밀한 상태(dense state)라 보고, 이때의 건조밀도를 최대건조밀도라 한다. 그리고 직경 12mm의 구멍이 뚫려 있고, 30°의 각도를 이루는 콘(cone)장치를 이용하여 상기의 몰드 내에 위치시켜 낙하고 없이 중앙하부에서부터 모래를 쌓아 올린 상태를 가장 느슨한 상태(loose state)라 보고, 이때의 건조밀도를 최소건조밀도라 한다.

실험 지반의 평균 건조밀도가 1.623g/cm³로서 상대밀도(Dr)는 91%(e=0.633) 정도에 해당하여 상당히 조밀한 상태이다. 모래의 입경은 0.42~0.85mm의 범위가 전체의 90% 정도이고, 균등 계수(C_u) 1.4인 균등한 입도이다.

3.1.2 지반 재료의 역학적 성질

주문진사의 역학적 특성을 파악하기 위해 직접전단(DS, direct shear), 삼축압축(TC, triaxial compression), 평면변형률압축(PSC, plane strain compression) 시험을 각각 실시하였다.

1) 상대밀도(Dr)와 전단저항각의 관계

시료의 건조밀도(ρ_d)를 다양하게 하여 직접 전단(DS)은 건조밀도 8종류에 대해서 수직응력을 달리하였으며, 삼축 압축(TC)은 건조밀도 4종류에 대해서 구속압(σ₃)을 100, 150, 200kPa, 평면변형률 압축(PSC)은 건조밀도 6종류에 대해서 구속압을 80, 100, 150, 200kPa로 달리

하여 시험을 실시하였다. 각 시험에 따른 상대밀도(Dr)와 전단저항각(φ_{DS}, φ_{TC}, φ_{PSC})의 관계는 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$\phi_{DS} = 0.15Dr + 27.1 \quad (\text{Dr의 범위 : } 35 \sim 98\%) \quad (1)$$

$$\phi_{TC} = 0.11Dr + 30.6 \quad (\text{Dr의 범위 : } 7 \sim 87\%) \quad (2)$$

$$\phi_{PSC} = 0.17Dr + 34.0 \quad (\text{Dr의 범위 : } 11 \sim 98\%) \quad (3)$$

여기서, φ_{DS}, φ_{TC}, φ_{PSC} : 직접전단, 삼축압축, 평면변형률 시험에 의한 전단저항각(°)

Dr : 상대밀도(%)

2) 역학적 특성의 비교·분석

시험 결과를 종합해서 상대밀도(Dr)에 따른 전단저항각(φ)을 기존의 다른 연구실험결과들과 비교하여 나타낸 Fig. 5로부터 φ_{TC}는 φ_{DS}보다 약 1°~2°정도 크지만, 유사한 값(토질공학회 편집부역 1998)을 나타내고 있으며, φ_{PSC}는 φ_{TC}보다 약 5°~7°정도 큰 값을 나타냈다. 또한, Miura(1981)의 토요우라사(豊浦砂)를 이용한 φ_{TC}와 본 시험의 φ_{TC}는 유사하였다. 그리고 φ_{DS}와 φ_{PSC}의 관계를 나타내는 Jewell 등(1987)의 식 tanφ_{DS}=tanφ_{PSC}/a(여기서, a=1.2)에서 주문진사는 계수 a가 1.3일 때 상

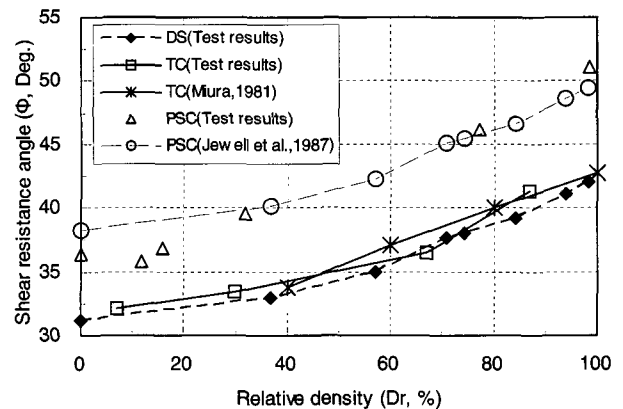


Fig. 5. Shear test results of Jumunjin standard sand

Table 1. Physical properties of Jumunjin standard sand

Physical properties	Symbols	Values	Physical properties	Symbols	Values
Max. void ratio	e_{max}	0.930	Max. Dia.	D_{max} (mm)	0.850
Min. void ratio	e_{min}	0.609	Dia. of 60%	D_{60} (mm)	0.621
Specific gravity	G_s	2.65	Average Dia.	D_{50} (mm)	0.595
Max. dry density	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.652	Effective Dia.	D_{10} (mm)	0.443
Min. dry density	ρ_{dmin} (g/cm)	1.377	Uniformity coefficient	C_u	1.402
Water content	w (%)	0.3	Curvature coefficient	C_g	0.912

관성이 매우 양호한 결과를 나타냈다.

3.2 실내 모형실험

실험은 무보강 지반과 기초인접의 파일보강에 대한 재하실험을 각각 수행하였다. 무보강 재하실험은 지반의 상대밀도(Dr)를 4종류로 달리하였으며, 기초인접에 대한 실험은 보강 범위(W), 파일 간격(S), 보강 각도(θ), 파일 길이(L) 등을 달리하여 각각에 대한 보강 효과, 즉 지지력 증가 및 침하억제 효과를 각 보강 형식별로 파악하고자 하였다. Table 2는 모형실험의 종류 및 내용을 요약 정리한 것이며, 실험명에 대한 설명도 함께 기술하였다.

3.3 실험의 조건 및 순서

3.3.1 실험의 조건

본 실험에서 사용한 평면변형률 토조(soil tank)는 Fig. 6과 같으며, 토조의 전·후면은 비교적 마찰이 작고 두꺼운 투명 아크릴판을 사용하여 한 방향의 변형률을 고정시킴으로써 평면변형률 상태를 재현하였고, 실험 중 이를 통해 육안으로 지반의 거동을 관찰할 수 있다. 그리고 재하중에 의한 토조 변형을 억제하기 위해서 아크릴판의 외부에 충분한 강성을 가진 강재(ㄷ형강)로 보강하였다.

본 실험에서의 조건을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 평면변형률 상태에서 실험이 실시되었으며, 강성 재하판(plate, 폭(B)=10.0cm)의 표면은 샌드페이퍼를 부착하여 거칠게 하였다.
- 2) 지반은 주문진사를 이용하여 강사(降砂)법에 의해 조성되었고 모형 마이크로파일은 주문진사를 부착시켜 표면을 거칠게 하였다.
- 3) 토조(soil tank) 아크릴면에 실리콘 그리스를 도포한 후, 격자 모양이 그려진 멤브레인(membrane)을 부착하여 지반과의 마찰을 감소시켰으며, 재하는 분당 1.0mm의 변형률 제어를 실시하였다. 그리고 지반 변형분석을 위해서 침하 1.0mm마다 지반 거동을 나타내는 멤브레인을 사진촬영하였다.

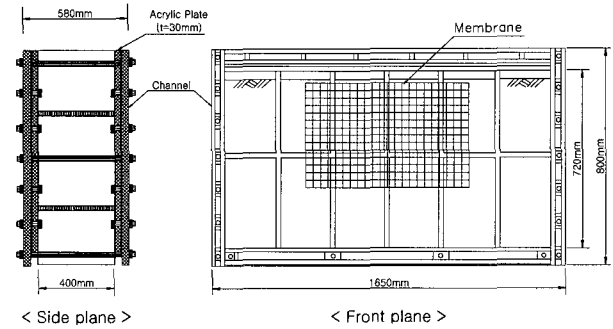
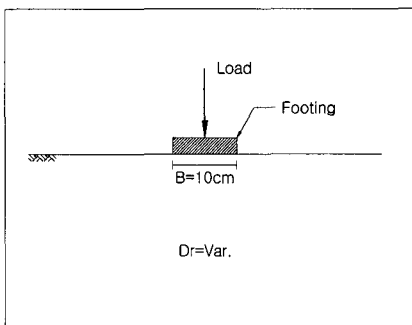


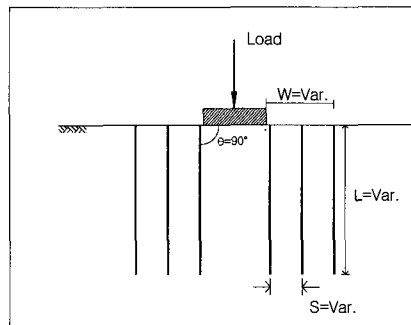
Fig. 6. Soil tank model for experiments

Table 2. Description for test types and objectives (Footing width, B=10cm)

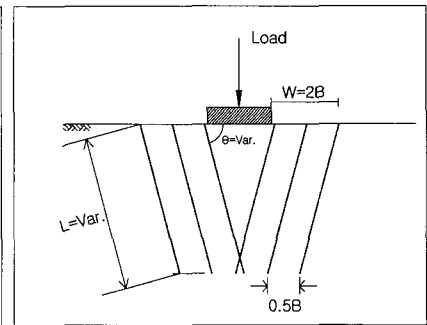
Symbol	Test types	Variable factor	Objectives	Remarks
(a)	Unreinforced	Relative density(Dr)	Mechanism of the unreinforced ground	Description of test name
(b)	Reinforcement of surround-footing, when $\theta=90^\circ$	Reinforced range (W) Pile spacing (S) Pile length (L)	Reinforcement effect to surround-footing	Ex) SF90 - 5B - 1B - 0.5B
(c)	Reinforcement of surround-footing, when W=2B	Pile spacing (S) Reinforced angle (θ) Pile length (L)		SF : Surround-Footing 90 : Installed angle of micropile (θ) 5B : Pile length (L) 1B : Reinforced range (W) 0.5B : Pile spacing (S)



(a) Unreinforced



(b) Re. of surround-footing, $\theta=90^\circ$



(c) Re. of surround-footing

3.3.2 실험 순서

본 실험에서 하중은 변형률 제어방식으로 실시되었으며, 실험 순서는 다음과 같다.

- 1) 멤브레인의 부착 : 알코올로 아크릴면을 깨끗이 닦고 지반과 아크릴면의 마찰을 줄이기 위해 0.2mm 두께로 실리콘 그리스를 아크릴 안쪽에 바르고 멤브레인을 부착한다. 멤브레인에 표시되어 있는 격자를 통해 지반의 변형을 연속적으로 관찰하고 이들의 움직임을 사진촬영하여 지반 변형을 분석한다(임종철 1992).
- 2) 지반 조성 및 마이크로파일 설치 : 슬롯(Slot)형 모래 뿌리기로 어느 정도 지반을 조성한 후 마이크로파일의 설치간격 5.0cm×5.0cm의 격자들로 이루어진 셋팅폼(setting former)을 파일의 설치 각도에 대해 4 종류를 제작하여 파일을 관입·설치할 수 있도록 하였다. 셋팅폼을 이용하여 각도(θ)에 따라 관입·설치하고 깊이별로 밀도 측정용 캔을 위치시킨다(Photo 1 참조). 다시 모래를 낙하시켜 지반을 조성한 후, 표면 고르기로 실험 계획고까지 지표면을 정리한다.
- 3) 재하장치 및 변위계 설치 : 하중을 가할 수 있도록 플래이트를 지표면에 위치시키고, 침하량 측정을 위해 변위계(dial gage, 1/100mm 측정가능)를 설치한다(Photo 2 참조).
- 4) 하중재하 및 사진촬영 : 분당 1.0mm의 변위속도를 일정하게 유지하면서, 변위(침하량) 1.0mm마다 지반 변형분석을 위해 아크릴 정면에서 사진촬영을 실시한다(Photo 2 참조).
- 5) 지반 거동관찰 및 밀도 측정 : 재하 종료 후, 육안

에 의한 멤브레인 변형 형상을 관찰·기록하고 모형 지반의 건조밀도(ρ_d) 및 함수비(w)를 측정한다(Photo 2 참조).

4. 실내 모형실험의 결과 분석 및 고찰

4.1 무보강 지반의 지지특성

Fig. 7은 무보강 지반에 대하여 상대밀도(Dr)를 달리 하였을 때의 실험 결과이다. 실험 결과로부터 상대밀도에 따라 전반전단과 국부전단의 파괴형태를 확인할 수 있으며, 극한 지지력(q_{ur})과 극한 침하량(S_{ur}/B)을 나타내는 Fig. 8에서 상대밀도가 클수록 극한 지지력이 증가하지만, 반면에 극한 침하량은 감소함을 알 수 있다. 이것은 지반의 상대밀도에 따른 하중-침하 경향의 전형적인 결과라고 할 수 있다.

Meyerhof, Vesic 및 DIN 4017(독일 공업규정) 등의 지지력 이론식(Bowles 1996)을 이용하여 지지력을 산정하는 경우, 본 실험과 같이 점착력(c), 근입 깊이(D)가 없는

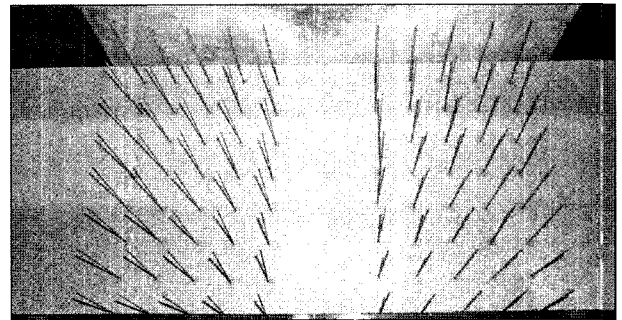


Photo 1. Installation of micropiles in a soil



Photo 2. Loading on the soil and taking a picture

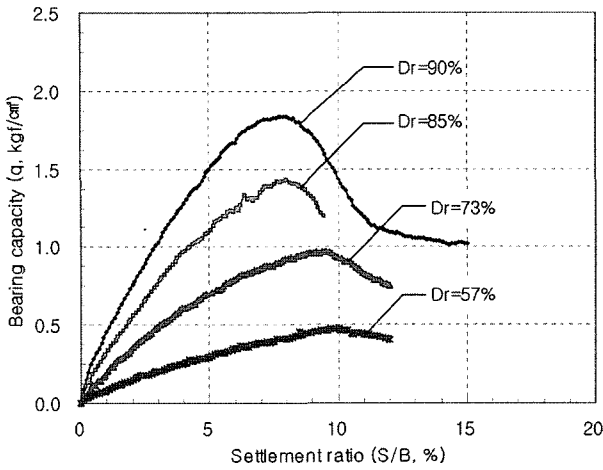


Fig. 7. Relationship of bearing capacity(q)-settlement(S/B)

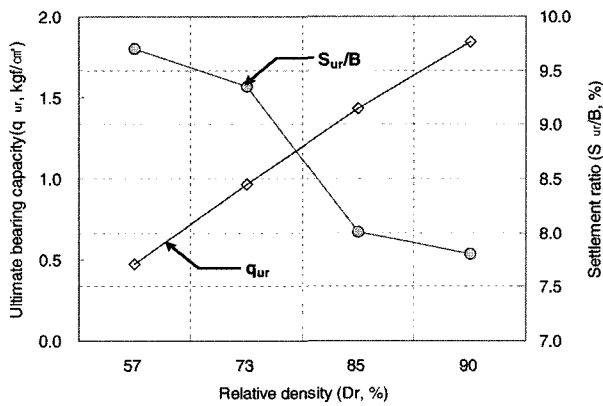


Fig. 8. Relationship of bearing capacity and settlement(S/B) for relative density(Dr)

모래 지반의 지지력(q_u)은 내부마찰각(ϕ)만의 함수인 지지력 계수 N_γ 에 의해 결정된다. 이들 이론식과 실험결과를 이용하여 $N_\gamma - \phi$ 관계를 나타내면 Fig. 9와 같다. 실험 결과로부터 지지력 계수 N_γ 를 구하고, 주문진사의 역학 시험 결과인 식 (1), (3)을 이용하여 무보강 지반의 ϕ_{TC} , ϕ_{PSC} 를 각각 구하여 그림에 나타냈다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 어떤 상관식을 적용하느냐에 따라 이론과 실험 결과는 많은 차이를 나타내고 있는데, ϕ_{PSC} 를 적용한 경우는 실험 결과는 이론식보다 매우 과소하게 평가되었다. 이것은 얇은 기초에서의 파괴의 진행성, 활동면상을 따른 주응력의 방향이 변화하는 지반의 이방성, 구속압 의존성 등의 요인(Tatsuoka 1984)에 기인하는 것으로 판단된다. 한편, ϕ_{TC} 를 적용한 경우는 이론식과 다소 차이를 나타내지만 정성적, 정량적으로 거의 일치하는 결과를 나타냈다.

위의 결과로부터 ϕ_{PSC} 를 이론식에 적용하여 극한 지지력은 산정하는 경우, 얇은 기초(한국지반공학회 2003)의 지지력 산정에서 일반적으로 적용되는 안전율($F_s=3$)을 고

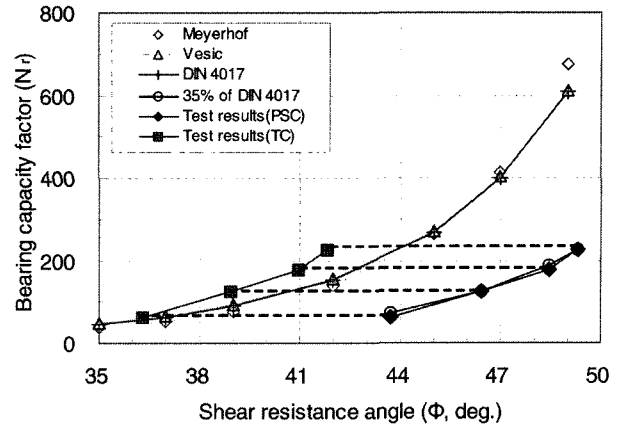


Fig. 9. Relationship of bearing capacity factor(N_r)-shear resistance angle(ϕ)

려한다면 실제 지반의 극한 지지력과 유사하여 공학적인 측면에서의 안전율 의미를 상실할 수 있을 것으로 판단되며, 한편 Fig. 9에서 알 수 있듯이 $\phi_{TC}(= \phi_{DS})$ 를 적용한다면 다소 보수적인 관점에서의 설계가 될 수 있을 것이다.

4.2 마이크로파일에 의한 보강효과

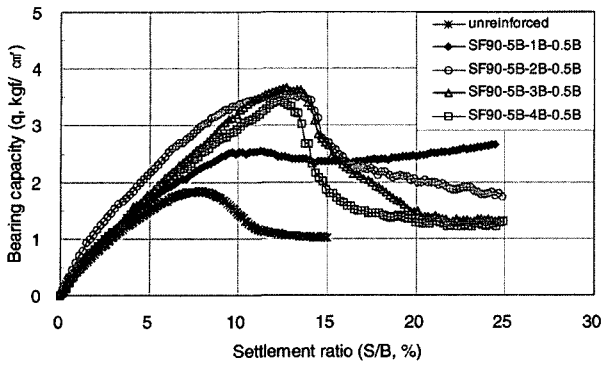
지반 보강을 통해서 얻고자 하는 바는 지지력과 침하억제를 소기의 목적으로 하는 경우가 대부분으로 기초 인접 보강은 하중을 직접 지지하는 것이 아니라, 지반의 구속을 통해서 지지력 증가 및 침하억제와 같은 보강 효과를 발휘한다. 보강 효과에 미치는 영향 요인은 파일 보강범위(W), 파일 강성(EI), 직경(D), 길이(L), 간격(S), 각도(θ) 등의 여러 가지를 들 수 있으며, 이들의 복합적인 상호작용에 의해서 보강 효과가 발휘된다.

본 연구에서는 기초인접 지반에 마이크로파일을 설치하였을 때, 범위·간격·각도·길이의 변화를 통해서 이에 따른 보강 효과를 파악하고자 하며, 이들 결과를 비교분석함으로써 설치 형식(Pattern)에 따른 효과를 알아보하고자 한다. 덧붙여, 실험 결과에서 극한 지지력이 명확하지 않은 경우는 극한 지지력의 산정 방법 중 하중-침하곡선의 직선부 시작점을 극한 지지력으로 취하는 Terzaghi/Yelinek 방법(이원택 1991)을 적용하여 결정하였다.

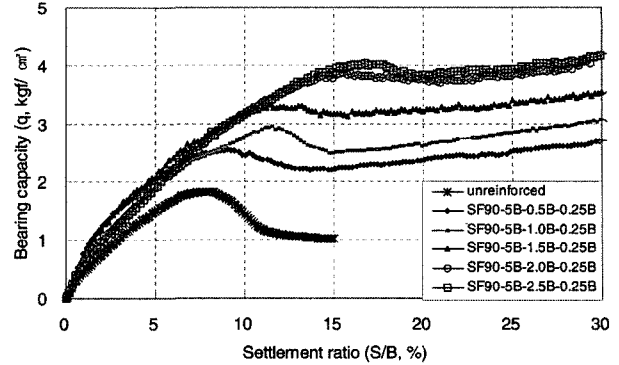
4.2.1 지지력 증가효과

1) 보강 범위(W) 및 파일 간격(S)의 변화

파일 길이(L) 5B, 수직 보강 조건에서 파일 간격(S) 0.5B, 0.25B(B=10cm) 각각에 대해서 보강 범위(W)를 0.5B~4B로 달리하여 실험을 수행하였고, 그 결과 하중-침하곡선은 Fig. 10(a), (b)와 같다. 파일 간격 0.5B의



(a) pile spacing = 0.5B



(b) pile spacing = 0.25B

Fig. 10. Relationship of bearing capacity(q)-settlement ratio(S/B)

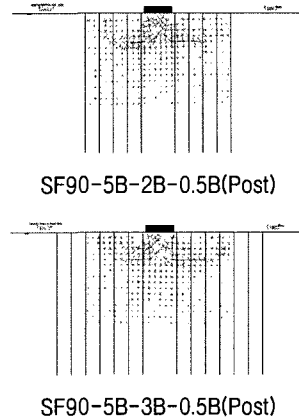
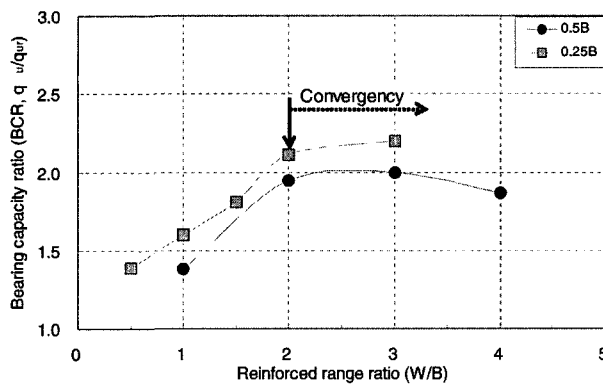


Fig. 11. Relationship of reinforced range(W/B)-bearing capacity ratio($BCR, q_u/q_{ur}$)

Fig. 10(a)에서는 피크 이후 강도가 감소하는 현상, 파일 간격 0.25B의 Fig. 10(b)는 강도가 증가하는 현상을 나타내며, Fig. 11은 보강 범위(W)에 따른 지지력비(BCR , Bearing Capacity Ratio)를 나타낸 것으로, 파일 간격에 따라 무보강에 비해 간격 0.5B는 1.4~2.0배, 간격 0.25B는 1.6~2.2배의 지지력 증가를 나타냈다.

결과로부터 파일 간격에 따른 지지력은 0.25B가 0.5B에 비해 1.2배 정도의 지지력 증가를 나타내어 지지력 차이는 현저하지 않지만, 피크 이후의 하중-침하거동이 상당한 차이를 나타냈다. 이는 본 실험지반과 같이 조밀한 모래지반에서 기초인접 파일 보강시 하중에 대한 지지특성은 인접지반의 구속효과와 파일사이의 마찰저항(아칭 효과, arching effect)에 의해 좌우된다고 할 때, 간격 0.25B는 0.5B에 비해 구속효과와 마찰저항의 증가로 인해 지지력이 증가하였으며, 이로 인해 보강 지반에 일체감을 더해 주어 피크 이후의 급격한 파괴에 대하여 안정한 하중-침하거동을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 11의 실험결과에서 파일 간격에 관계없이 보강 범위 약 2B이상에서 지지력이 수렴 경향을 나타내는 것

에 주목할 만 하다. Fig. 11의 우측에 나타난 무신축 방향의 지반 변형 분석결과에서도 알 수 있듯이 보강 범위가 2B이상이라도 피크 이후의 지반 변형영역은 제한되고 있는 것으로 분석되었다.

2) 보강 각도(θ)의 변화

상기의 실험 결과로부터 적절한 보강 범위(W) 2B, 파일 길이(L) 5B의 조건에서 각도(θ)를 수평으로부터 각

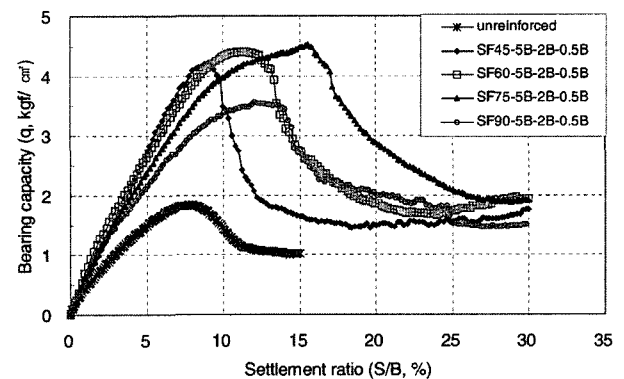


Fig. 12. Relationship of bearing capacity(q)-settlement ratio(S/B)

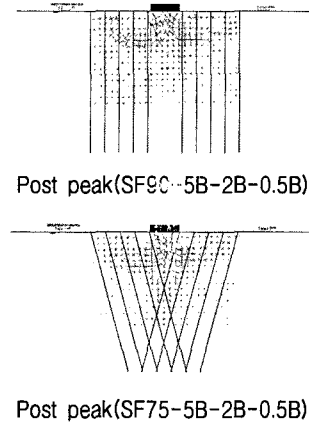
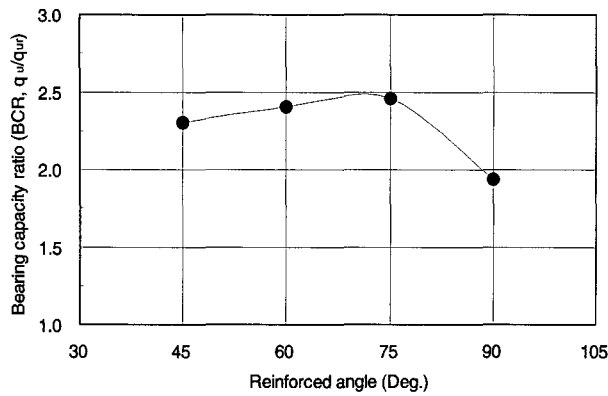


Fig. 13. Relationship of bearing capacity ratio(BCR, q_u/q_{ur})-reinforced angle(θ)

각 45, 60, 75, 90°로 달리하여 실험을 수행하였고, 그에 따른 하중-침하곡선 결과는 Fig. 12이다. 결과로부터 보강 각도에 따른 지지력의 증가효과는 뚜렷하며, 피크 이후는 강도가 감소하는 현상을 나타낸다. Fig. 13은 보강 각도에 따른 지지력비(BCR)를 나타낸 것으로, 각도 45, 60, 75°의 모두가 무보강에 비해 약 1.9~2.5배의 지지력 증가 효과가 나타났지만, 그 중 각도 75°가 가장 큰 것으로 분석되었다. 한편 그림 우측의 무신축 방향의 지반 변형 분석결과에서 45°이상의 보강 각도에서는 피크 시 기초 하부의 썩기 형상은 파일 각도를 따라 길어지는 모양을 취하고 있다. 즉, 파일의 설치 각도로 인해 기초 하부의 파괴 형상에 영향을 미쳐 무보강의 파괴 형상과는 다른 형태를 나타냄으로서 보강 효과를 발휘하는 것으로 판단된다. 그러나 최종의 지반 파괴는 각도 90°의 경우와 동일한 양상을 나타내고, 지표면의 변형 영역은 2B를 넘지 않는 것으로 분석되었다.

1B~5B로 달리하여, 수직과 각도 75°에 대해서 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 각각 정리하면 다음과 같다.

수직 보강시 파일 길이에 따른 하중-침하곡선은 Fig. 14와 같으며, 결과로부터 파일 길이에 따른 지지력의 증가 및 피크 이후 강도가 감소하는 현상을 확인할 수 있다. Fig. 15는 파일 길이에 따른 지지력비(BCR)를 나타낸 것으로, 파일 길이에 따라 무보강에 비해 약 1.1~1.9배의 지지력 증가효과를 나타내며, 길이 3B에서부터 지

3) 파일 길이(L)의 변화

보강 범위(W) 2B의 조건에서 파일 길이(L)를 각각

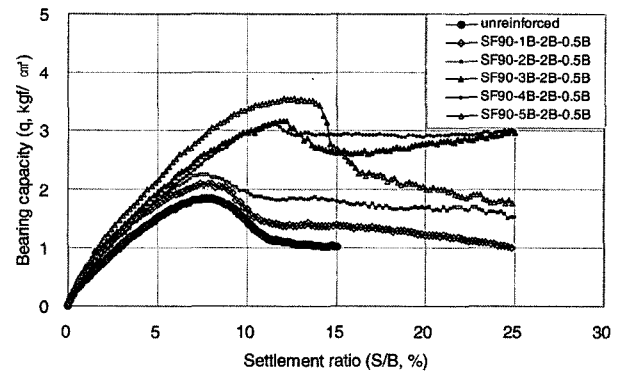


Fig. 14. Relationship of bearing capacity(q)-settlement ratio(S/B)

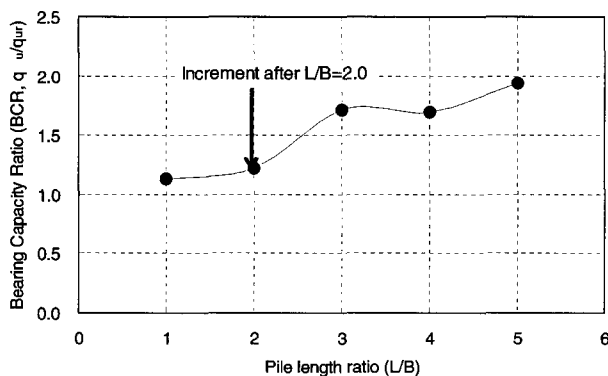
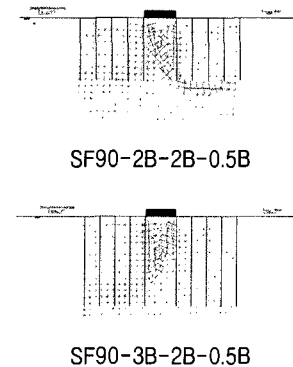


Fig. 15. Relationship of bearing capacity ratio(BCR, q_u/q_{ur})-pile length ratio(B/L)



지력의 증가가 명확함을 알 수 있다. 이것은 그림 우측의 지반 변형 분석결과에서도 알 수 있듯이 파일 길이 2B 이내는 기초 인접지반의 수동 변형영역 내에 포함되어 있어 하중에 대한 저항을 발휘되지 못한 것으로 분석되었다.

보강 각도 75°시 파일 길이에 따른 하중-침하곡선은 Fig. 16과 같으며, 경향은 수직 보강시의 Fig. 14와 유사함을 알 수 있다. Fig. 17은 파일 길이에 따른 지지력비(BCR)로 나타낸 것으로, 길이에 따라 무보강에 비해 약 1.1~2.5배의 지지력 증가가 있었으며, 수직 보강시의 결과(Fig. 15)와 마찬가지로 파일 길이 3B에서부터 지지력의 증가가 명확하다는 것을 알 수 있다. 그리고 본 실험에서는 일정 파일 길이에서 지지력이 수렴 혹은 둔화될 것으로 예상하였으나 길이 5B까지도 계속적인 지지력의 증가를 나타내어 확실한 결론을 내리기에 한계가 있었다.

4.2.2 침하억제 효과

실험 결과에 의한 침하억제 효과를 정리하면 다음과 같다. 그리고 결과 정리에서 종축을, 보강시의 극한 침하

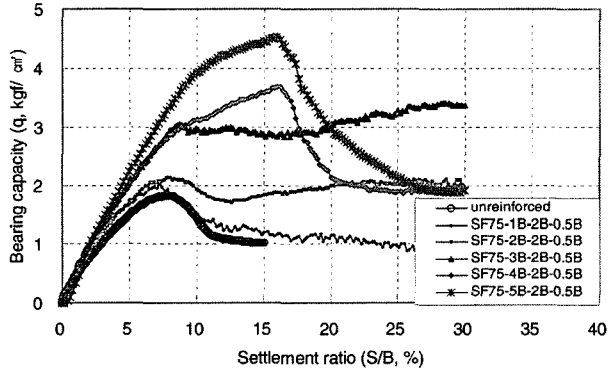


Fig. 16. Relationship of bearing capacity(q)-settlement ratio(S/B)

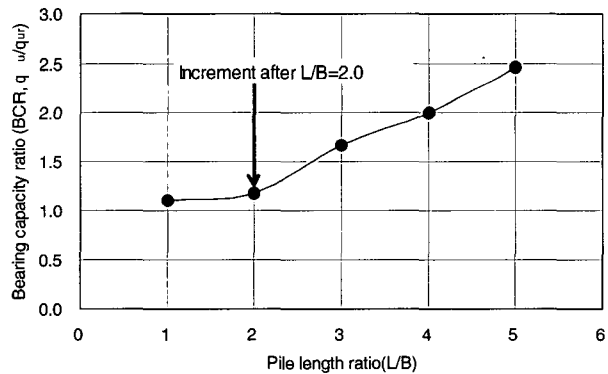


Fig. 17. Relationship of bearing capacity ratio(BCR, q_u/q_{ur})-pile length ratio(L/B)

량(S_f)과 무보강과 같은 크기의 지지력($q_{ur}=1.84\text{kgf/cm}^2$, Fig. 10 참조)에서의 침하량($S_{q=1.84}$)을 무보강시의 극한 지지력에 대응하는 침하량($S_{ur}=7.8\text{mm}$)으로 각각 정규화하여 극한시의 침하거동과 무보강에 대한 침하억제 효과를 나타내고자 하였다.

1) 보강 범위(W) 및 파일 간격(S)의 변화

파일 길이(L) 5B, 수직 보강 조건에서 보강 범위(W) 및 파일 간격(S)의 변화에 따른 침하 거동은 Fig. 18, Fig. 19와 같다. 지반 파괴시의 거동을 나타내는 Fig. 18에서 보강 범위에 따라 증가하는 경향을 나타내지만, 범위 2B이상에서 거의 변화가 없는 것으로부터 Fig. 11의 지지력 증가 경향과 일치하는 결과를 나타내고 있다. 이것은 보강에 따른 지지력의 증가와 함께 그때의 극한 침하량(S_f) 또한 커짐을 의미하며, 극한 침하량과 지지력 사이에는 밀접한 상관성이 있음을 정성적으로 알 수 있다.

침하억제 효과($S_{q=1.84}/S_{ur}$)를 나타내는 Fig. 19로부터 파일의 보강 범위에 따라 간격 0.25B는 무보강의 약 52~

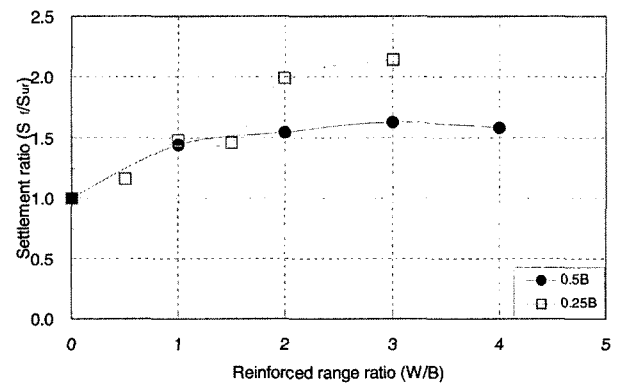


Fig. 18. Relationship of settlement ratio(S_f/S_{ur})-reinforced range ratio(W/B)

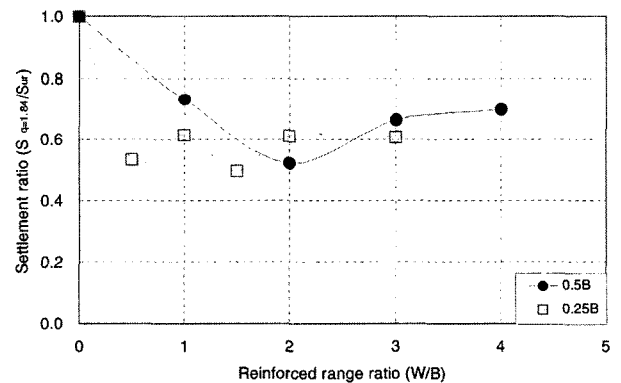


Fig. 19. Relationship of settlement ratio($S_{q=1.84}/S_{ur}$)-reinforced range ratio(W/B)

73%(평균 65%), 간격 0.5B는 약 50~62%(평균 57%)의 침하를 나타낸다. 전반적으로 파일 간격(S) 및 보강 범위(W)에 관계없이 침하량은 대략 무보강에 비해 간격 0.25B는 평균 35%, 0.5B는 평균 43%정도의 침하억제 효과를 나타내고 있어 파일 간격(S) 및 보강 범위(W)는 침하억제의 주요인으로 작용하지는 않는 것으로 판단된다.

2) 보강 각도(θ)의 변화

보강 범위(W) 2B, 파일 길이(L) 5B의 조건에서 보강 각도(θ)의 변화에 따른 침하 거동은 Fig. 20, Fig. 21과 같다. 지반 파괴시의 거동을 나타내는 Fig. 20에서 보강 각도에 따른 극한 침하량(S_f)은 각도 75°에서 무보강 극한 침하량(S_{ur})의 약 2.0배로 가장 큰 것으로 분석되어, Fig. 13의 보강 각도에 따른 지지력의 경향과 일치되는 결과를 나타내고 있다. 침하억제 효과($S_{q=1.84}/S_{ur}$)를 나타내는 Fig. 21로부터 보강 각도에 관계없이 무보강의 약 40~52%(평균 46%)의 침하를 나타내어, 전반적으로 평균 54%정도의 침하억제 효과를 나타내고 있다. 따라

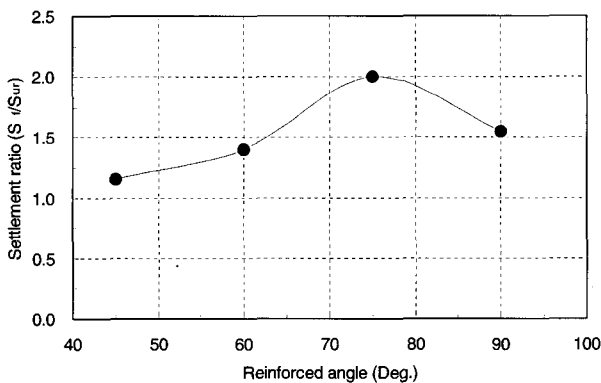


Fig. 20. Relationship of settlement ratio(S_f/S_{ur})-reinforced angle (θ)

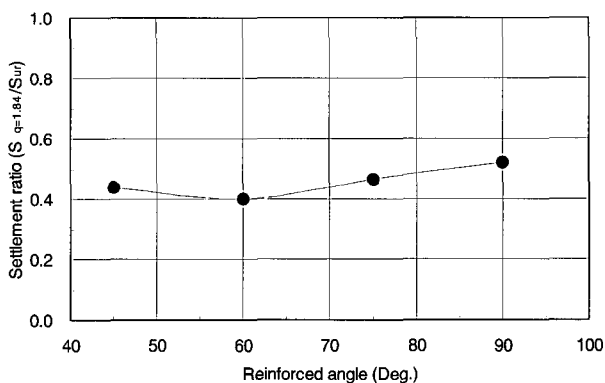


Fig. 21. Relationship of settlement ratio($S_{q=1.84}/S_{ur}$)-reinforced angle (θ)

서 파일 각도에 따른 침하억제는 다른 보강 형식에 비해 상당한 효과를 나타내며, 각도에 따른 효과의 차이는 미소한 것으로 분석되었다.

3) 파일 길이(L)의 변화

보강 범위(W) 2B의 조건에서 파일 길이(L)를 각각 1B~5B로 달리하여, 수직과 각도 75°에 대해서 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

수직과 각도 75° 보강의 파일 길이에 따른 침하 거동은 Fig. 22, Fig. 23과 같다.

지반 파괴시의 거동을 나타내는 Fig. 22에서 모두 극한 침하량(S_f)은 길이 2B까지는 무보강과 유사한 결과를 나타내며, 3B에서부터 극한 침하량이 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 Fig. 15와 Fig. 17의 수직 및 각도 75°보강의 파일 길이(L)에 따른 지지력의 경향과 일치되는 결과를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 23으로부터 파일 길이에 따라 수직 보강은 무보강의 약 52~71%(평균 62%), 각도 75°보강은 무보강의 약 46~72%(평균 61%)에 해당하는 침하를 나타내어, 각각 평균 38%,

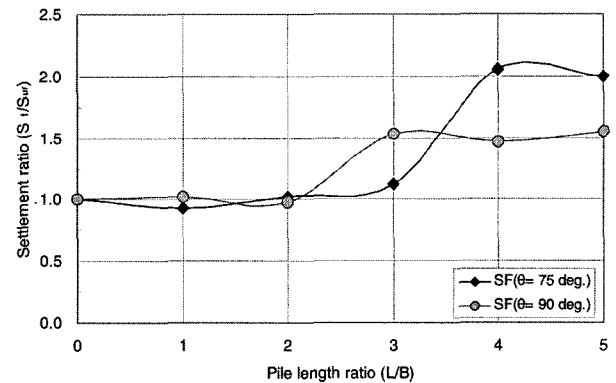


Fig. 22. Relationship of settlement ratio(S_f/S_{ur})-pile length ratio(L/B)

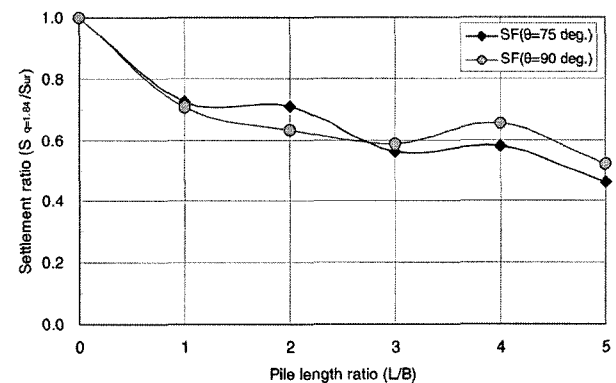


Fig. 23. Relationship of settlement ratio($S_{q=1.84}/S_{ur}$)-pile length ratio(L/B)

39%정도의 침하억제 효과를 나타내고 있다. 따라서 수직 및 각도 75°보강의 파일 길이에 따른 침하억제는 길이에 따라 다소 많은 차이를 나타내며, 다른 보강 형식에 비해 낮은 효과를 나타내는 것으로 분석되었다. 덧붙여, 일정한 파일 길이 이상은 변화가 미소할 것으로 예상하였으나, 지속적으로 침하억제 효과를 나타내어 경향 분석은 곤란하였다.

4.2.3 비교 및 고찰

실험 결과를 종합하여 파일의 간격(S), 보강 범위(W), 각도(θ), 길이(L)를 달리하였을 때, 각 보강 형식(Reinforced pattern)에 따른 지지력(BCR, Bearing Capacity Ratio) 및 침하억제(SRR, Settlement Restraint Ratio)를 비교·분석하여 Fig. 24에 정리하였다.

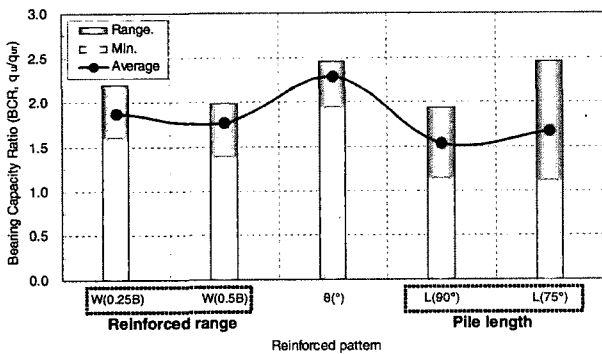
Fig. 24의 횡축은 좌측으로부터 파일 간격(S) 0.25B, 0.5B에 대한 보강 범위(W), 보강 각도(θ), 수직 및 75도로 설치된 파일 길이(L)의 변화에 따른 실험 결과를 구분하여 나타낸 것으로, 각 보강 형식에 따른 효과를 무보강의 결과와 비교하여 최소(Min.)값과 보강 효과의 범위(Range) 및 평균(Average)값을 나타냈다. 결과로부터 각 보강 형식에 따른 보강 효과의 범위와 상대적인

비교가 가능하리라 판단된다. 예를 들어, Fig. 24의 평균값을 참고하면, 보강 각도(θ)에 따른 실험결과가 다른 보강 형식에 비해 지지력 증가 및 침하억제 효과 뛰어난 것을 알 수 있으며, 파일 간격(S) 0.25B가 0.5B에 비해 침하억제 효과는 크지만 지지력 증가는 두드러지지 않은 것을 알 수 있다. 덧붙여, Fig. 26은 각각 보강 조건이 다르기 때문에 직접 비교는 다소 무리가 있지만 보강 형식의 비교를 통해서 효율성 및 적합성 비교는 가능하리라 판단된다.

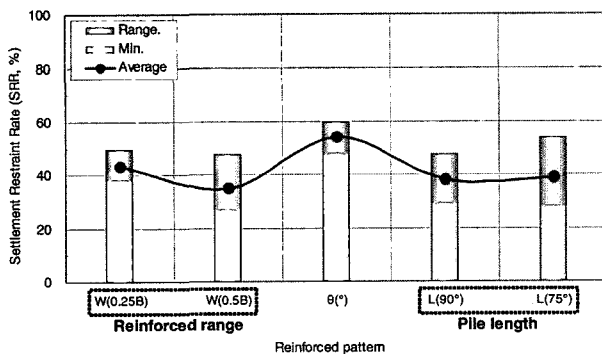
5. 결론

본 연구에서는 기초의 인접지반에 마이크로파일 보강을 통해서 지지력 증가 및 침하 억제효과를 구하고, 각 실험에 대한 지반 변형분석을 실시하여 지반의 파괴 메커니즘을 관찰함으로써 각 보강형식에 따른 효과 및 적용성을 분석하고자 하였으며, 본 연구의 내용을 정리하여 나타내면 다음과 같다.

- (1) 주문진사의 상대밀도(D_r)에 따른 $\phi_{TC} \approx \phi_{DS}$ 는 유사한 값을 나타냈고, Jewell 등(1987)이 제안한 식(5.6)에서 ϕ_{DS} 와 ϕ_{PSC} 관계는 $\alpha=1.3$ 일 때 상관성이 양호하였다. 또한 기존 이론에 의한 얕은 기초 지지력 산정시 ϕ_{PSC} 적용은 다소 위험측이 될 수 있으며, $\phi_{TC} (\approx \phi_{DS})$ 의 적용은 보수적인 관점에서의 설계변수가 될 수 있을 것으로 분석되었다.
- (2) 기초인접지반 보강시, 범위(W)를 달리한 경우는 파일 간격(S)에 무관하게 약 2B이상에서 지지력이 수렴되는 경향을 나타냈으며, 각도(θ)를 달리한 경우는 모든 각도에 대해 지지력 증가 효과 컸지만 그 중에서 각도 75°에서 가장 큰 것으로 분석되었고, 길이(L)를 달리한 경우는 수직 및 각도 75° 모두 길이 3B에서부터 지지력 증가가 명확하였다. 또한, 극한 침하량(S_u)과 지지력 증가 효과와의 밀접한 연관성으로 지지력이 크면 그때의 극한 침하량 또한 커지는 경향을 나타냈다.
- (3) 침하억제 효과에서, 범위(W)를 달리한 경우는 파일 간격(S) 0.25B, 0.5B에 따라 무보강의 약 60%로 큰 차이를 나타내지 않았으며, 각도(θ)를 달리한 경우는 무보강의 약 40~52%(평균 46%), 수직 및 각도 75°에서 길이(L)를 달리한 경우는 무보강의 약 52~71%(평균 62%), 46~72%(평균 61%)를 나타내어



(a) Bearing capacity ratio(BCR)



(b) Settlement restraint ratio(SRR)

Fig. 24. Comparison of reinforcement effect by reinforced pattern

파일의 설치 각도를 45°이상에서 침하억제 효과가 가장 뛰어난 것으로 분석되었다.

- (4) 실험 결과로부터 마이크로파일에 의한 기초인접 보강시 무보강에 비해 충분한 지지력 증가 및 침하억제 효과를 기대할 수 있으며, 범위(W) 2B, 각도(θ) 45~75°, 길이(L) 2B이상에서 최적의 보강 효과가 발휘되는 것으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 민윤식 (1990), *마이크로 파일의 施工 및 載荷試驗에 關한 研究 - Y-驛舍基礎를 中心으로 -*, 석사학위논문, 연세대학교 산업대학원.
2. 부산교통공단 (1999), *터널굴착 보강대책 검토 보고서*, 부경대학교 산업과학기술연구소.
3. 부산광역시 (2003), *광안대로건설 공사건설지*, 행정자료 행534-부52, 부산광역시.
4. 박이근 (2003), *얕은 토사터널 굴착시의 주변지반거동 특성과 마이크로 파일의 침하억제효과에 관한 연구*, 박사학위논문, 부산대학교.
5. (사)한국지반공학회 (2003), *구조물 기초 설계기준 해설*, pp.179-225, 298-305.
6. 이원택 (1991), *얕은 기초에 있어서 그물식 뿌리말뚝의 지반보강 효과에 관한 연구*, 박사논문, 서울대학교.
7. 임중철, 박성재, 주인곤, 박용부, 김영인 (1992), “평면변형을 상 태에 있는 모형지반의 변형해석법”, *한국지반공학회지*, pp.29-30.
8. 최혁남 (1998), *相對密度의 變化에 따른 法文津 標準砂의 剪斷特性*, 碩士學位論文, 順天大學校.
9. 토질공학회 편집부역 (1998), *N치와 강도정수의 관계 및 활용*, 기술경영사, pp.144-145.
10. 塚田幸広, 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実験”, *土と基礎*, Vol.47, No.1, pp.35-38.
11. 日本土質工学会 (1991), *土質試驗の方法と解説*, pp.106-115.
12. FHWA (2000), *Micropile Design and Construction Guidelines: Implementation Manual*, pp.3-1~3-22.
13. Miura, K. (1981), *Stress-strain-dilatancy Relationship of Isotropically Consolidated Sand*, B.thesis, Hokkaido Univ. (in Japanese)
14. Tatsuoka, F. (1984), “On Bearing Capacity of Shallow Foundation on Sand I - What is the problem? -”, *SEISAN-KENKYU*, VOL.36, NO.6.
15. Bassett, R.H. and Last, N.C. (1978), “Reinforcing Earth below Footings and Embankments”, *Proc., ASCE, Symp., Earth Reinforcement*, Pittsburgh, pp.202-231.
16. Bowles, J.E. (1996), *Foundation Analysis and Design -fifth edition-*, The McGraw-Hill Companies, Inc., p.220.
17. Jewell, R.A. and Worth, C.P. (1987), “Direct Shear Tests on Reinforced Sand”, *Geotechnique*, Vol.37, No.1, pp.53-68.
18. Lizzi, F. and Carnevale, G. (1979), “Les Reseaux de Pieux Racines Pour la Consolidation des sols, Aspects Theoretique et Essais sur Mondile”, *Proc. Int. Conf., Soil Reinforcement*, Paris, Vol.2, pp.317-324.

(접수일자 2006. 2. 10, 심사완료일 2006. 5. 2)