

마이크로 파일을 이용한 가설 벽체 인접 구조물의 침하 억제에 관한 연구

Reduction of Differential Settlements due to Deep Excavation Using the Micro-piling Method

허 인 구¹ Huh, In-Goo 황 태 현² Hwang, Tae-Hyun
이 상 령³ Lee, Sang-Ryeong 신 종 호⁴ Shin, Jong-Ho
권 오 엽⁵ Kwon, Oh-Yeob

Abstract

Wall displacements caused by earth pressure, rainfalls, rise in ground water level, inappropriate deep excavation and structural defects of the wall may produce differential settlements to existing buildings, which often result in damages and/or collapses of the building structures. In this case, measures to protect the walls and nearby structures would be required. One of the recent measures to reduce differential settlements and protecting walls is to reinforce the ground using micro-piles. In this study physical model tests were carried out to evaluate the performance of the micro-pile method. It is revealed that reduction of the settlement was maximized when the length of micro-pile is twice of the foundation width, distance between piles is twice of the pile diameter and the distance to wall is one tenth of the foundation width. Based on the test results some design recommendations were made.

요 지

토압, 지하수위 상승, 집중호우, 구조적 결함 등 여러 요인들로 인해 발생한 흠막이 벽체의 변위는 배면지반에 변위를 발생시키고, 과도한 지반의 변위로 인해 발생한 구조물의 부등침하하는 구조물의 파손이나 파괴를 일으킨다. 이러한 경우, 벽체와 구조물의 보강대책이 강구되어야 한다. 최근 이러한 문제를 최소화하거나, 억제하기 위한 보강대책 중 하나는 마이크로 파일을 이용하는 방법이다. 본 연구는 벽체의 변위로 인해 발생할 인접구조물의 부등침하를 억제시키기 위해 설치한 마이크로 파일의 보강효과의 경향을 파악하고자 실시한 모형실험을 다루고 있다. 실험결과, 마이크로 파일의 설치길이는 2B(B:기초 폭), 간격은 2D(D:파일직경)로 설치하는 경우가 가장 발생한 침하율이 작았다. 또한 이 경우(L=2B, s=2D), 구조물에서 이격거리 0.1B 이내에서 지표면에 수직방향으로 설치할 때가 침하율이 가장 작게 발생하는 것으로 나타났다.

Keywords : Differential settlement, Micro-pile, Model test, Reinforcement, Temporary wall

1 정회원, G&S 건설 대표이사 (Member, Chairman, G&S Construction Co., Ltd.)

2 정회원, 건국대 토목공학과 대학원 박사과정 수료 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

3 정회원, 한미파슨스(주) 엔지니어링 (Member, Sr. Engineer, Engrg. Team of Hanmiparsons)

4 정회원, 건국대 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ., jhshin@konkuk.ac.kr, 교신저자)

5 정회원, 건국대 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Konkuk Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 도심지 개발과 구조물의 대형화에 따른 공간적 제약으로 기존의 구조물에 인접되게 시공하는 사례가 증가하고 있다. 그러나 굴착공사가 증가함에 따라 가설 벽체의 변형 또는 파괴에 의해 발생한 피해사례 역시 증가하고 있는 추세이다. 벽체의 변위를 발생시키는 요인으로는 설계 및 시공 불량, 지보재의 구조적 결함, 지하수위의 상승, 집중호우 등과 같은 요인을 들 수 있다. 벽체에 발생한 변위는 배면 지반의 변위를 유발하게 되며, 이 변위로 인해 발생한 구조물의 부등침하가 큰 경우에는 구조적 손상을 야기한다. 그러므로 가설 벽체의 철저한 설계, 시공, 시공 후 관리도 중요하지만, 필요시 즉각적으로 적용할 수 있는 보강대책 역시 중요하다. 최근 들어, 터널 굴착, 가설 벽체의 변형 등과 같은 외부 요인으로 인해 구조물에 손상이 발생할 경우, 이러한 발생 원인을 최소화 또는 억제하기 위한 여러 보강 대책이 연구·개발 중에 있다. 보강대책 중의 하나는 마이크로 파일을 이용하는 방안으로 이에 대한 연구 역시 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 마이크로 파일은 1950년대 개발된 이후, 기초의 지지력 보강, 추가적 침하 억제 등 목적에 따라 널리 사용해 왔으며, 국내에서도 최근에 활용하는 사례가 점차 늘고 있다. 그러나 다양한 활용 조건에 따른 설계방안이 아직까지 마련되지 않은 상태이며, 시공에 있어서도 경험을 토대로 이루어지고 있는 것이 현실이다.

본 연구에서는 가설 벽체의 횡 방향 변위로 인해 발생할 구조물의 부등침하를 마이크로 파일로 보강할 경우, 그에 대한 보강효과를 모형실험을 통해 평가하고, 적절한 설치방법을 제안하고자 하였다. 이를 위해 설치 길이, 간격, 구조물에서 설치 이격거리, 파일의 경사 등 마이크로 파일의 설치 조건을 달리하여 실험하였다.

2. 문헌연구

마이크로파일은 무리지어 시공되며, 그 때의 말뚝 지지력은 단말뚝 지지력의 합과 같지 않기 때문에 무리효과를 고려해야 한다고 생각하여 Lizzi(1983)는 실험을 통하여 연구한 바 있다. 지반 상태, 말뚝의 배치 형태 그리고 사용 파일에 따라 보강효과는 달라지지만, 모형 실험을 통해 파일의 설치간격을 상대밀도가 느슨한 지반에서는 2D, 중간정도와 조밀한 지반에서는 2D~4D로

설치할 것을 제안하였다. 또한 현장 실험 결과를 통해 말뚝 환산 직경의 3배 이상 간격으로 설치할 것을 제안하였다.

Tsukada(2006)은 실내 모형실험을 통해 마이크로 파일의 지지력 보강효과에 관해 연구하였다. 모형 마이크로 파일은 철선과 플라스틱 바(Plastic Bar)에 모래를 접촉시켜 지반 내에서 최대한 주면 마찰력이 발휘되도록 하였다. 파일의 설치 각도에 따라 보강효과가 다르게 나타나지만, 얇은 기초를 보강하는 경우에는 군말뚝 효과를 고려하여 파일의 각도를 약 30°로 설치하는 것이 효과적이라 제안하였다. 또한 상대밀도를 달리하여 지반을 조성하고 재하시험을 통해 마이크로 파일의 지지력 보강효과에 관해 실험한 결과, 조밀한 지반이 느슨한 지반에 설치한 경우보다 마이크로 파일의 뿌리효과(Network effect)가 증가하여 지지력이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 마이크로 파일의 주면 마찰력이나 휨 강성이 파일 주위의 구속력에 의해 좌우되는 것으로 판단된다. 따라서 파일 주변 지반의 느슨하고 조밀한 정도에 따라 마이크로 보강 효과가 좌우된다고 할 수 있다.

Han과 Ye(2006)는 현장에서 마이크로 파일을 설치한 후 재하시험을 통해서 추가적인 하중에 대한 보강효과에 대해 분석하고, 설계방안을 제시하였다. 현장실험을 통해 마이크로 파일로 기초를 보강한 경우, 기존의 지지력보다 70~86%의 지지력 증대 효과를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구는 벽체의 변위로 인해 영향을 받는 구조물을 마이크로 파일로 보강하는 경우, 파일의 보강효과를 평가하고 설치 방법을 제안하는 데 목적이 있다. 이를 위해 그림 1과 같이 두 조건에서 발생한 부등침하량을 비교 분석하고, 파일의 부등침하 감소효과를 평가하였다.

파일의 보강효과를 수치적으로 나타내기 위해 부등침하 감소율(DS_r)을 식 (1)과 같이 정의하였다. 식 (1)

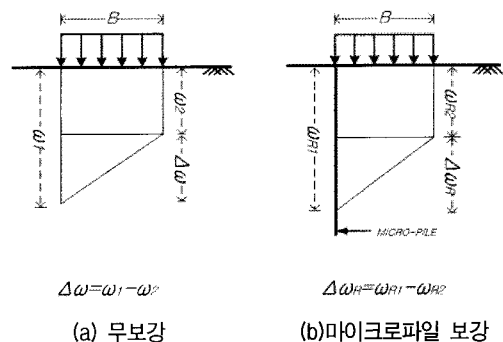


그림 1. 구조물의 부등침하량

은 본 연구 결과를 도출하는 데 있어 중요한 자료로 활용되고 있다.

$$(DS)_r = \frac{\Delta\omega - \Delta\omega_R}{\Delta\omega} \quad (1)$$

여기서, $(DS)_r$: 부등침하 감소율(Differential settlement reducing ratio)

$\Delta\omega$: 무보강인 경우, 부등침하량($\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$)

$\Delta\omega_R$: 보강한 경우, 부등침하량($\Delta\omega_R = \omega_{R1} - \omega_{R2}$)

3. 모형실험 및 실험조건

본 연구에서 사용한 토조시험 장치의 규격은 1200mm(길이) × 800mm(높이) × 500mm(폭)이다. 보강에 따른 효과를 비교 분석하기 위해 강성이 작은 아크릴 판을 모형 벽체로 사용하였다. 벽체로 사용한 아크릴 판의 크

표 1. 조성 지반의 물성치

비중(Gs)	2.64
단위중량($\gamma_d, kN/m^3$)	15.50
상대밀도(%)	60
내부마찰각(ϕ)	36°
점착력(c, kN/m^2)	0
탄성계수(E, kN/cm^2)	2.158×10^3

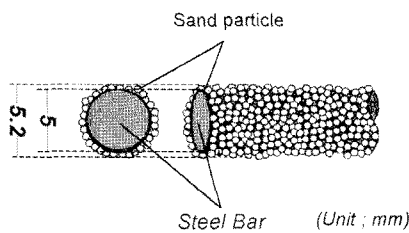


그림 2. 모형 마이크로 파일모형

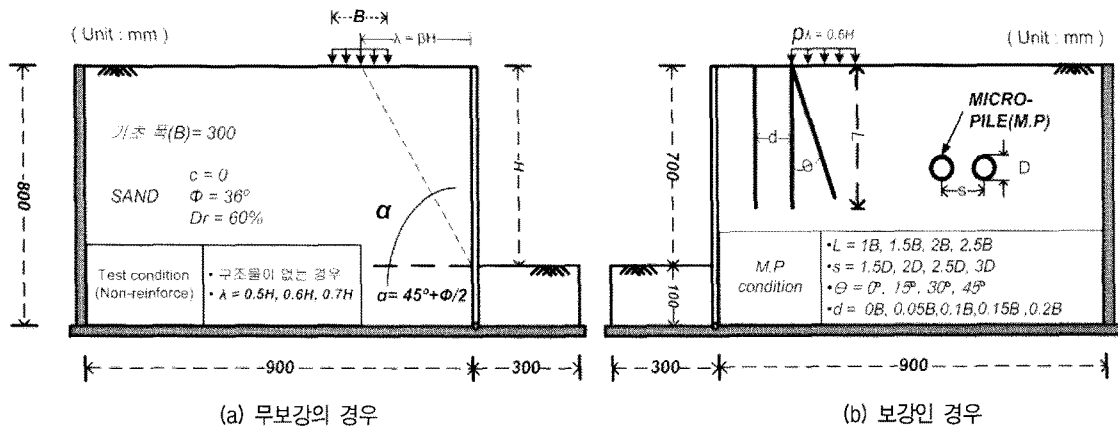


그림 3. 모형 실험기의 크기 및 실험 방법

기는 500mm × 800mm × 3mm(폭× 길이 × 두께)이며, 휨 강성 시험결과 탄성계수(E)는 $3.21 \times 10^5 kN/cm^2$ 로 나타났다. 모형 벽체의 바닥면은 회전이 용이하도록 힌지를 두어 토조 바닥면에 고정시켰다. 토조 실험은 지반을 균질하게 조성하는 것이 무엇보다도 중요하므로 토조 내의 지반이 균질하게 조성되도록 강사장치를 고정시킨 후 강사 시켰다. 지반을 조성하는 데 사용한 재료는 주문진 표준사로 물성 값은 표 1과 같다.

모형 마이크로 파일의 직경은 국내에서 구조물 증축, 보강하는 경우의 시공사례를 토대로 하여 결정하였다. 일반적으로 줄기초를 보강하는 경우, 기초 폭(B)과 파일 직경(D)의 길이 비(D/B)는 0.013~0.017의 범위 내에서 시공하고 있다. 본 연구에서 사용한 모형파일 직경은 길이 비 0.016에 해당 것이다.

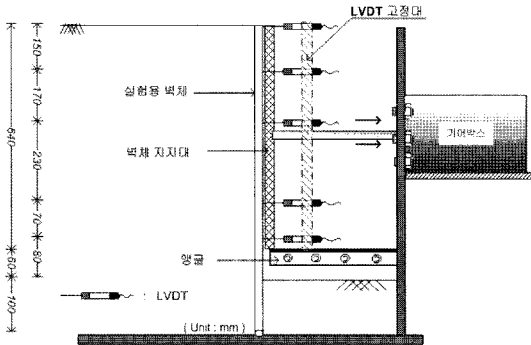
모형 파일의 표면은 Tsukada(2006)가 실험 시 사용한 것과 같이, 파일의 표면에 모래를 부착하여 주변마찰력이 최대한 발휘되도록 제작하였다. 실험에 사용한 마이크로 파일의 크기와 형태는 그림 2와 같다.

인접구조물은 소규모 건물에 해당하는 6층의 건물을 모델로, 적용한 비율(Scale Effect=1/33)만큼의 무게가 되도록 강판의 두께를 조정하여 제작하였다. 실험에 사용한 강판의 크기는 300mm × 500mm × 20.5mm(폭× 길이× 두께)이며 강판의 무게는 215.82kN이다. 모형 건물의 바닥부에는 5mm두께의 고무를 부착시켜 가능한 접지압이 고르게 발생되도록 하였다.

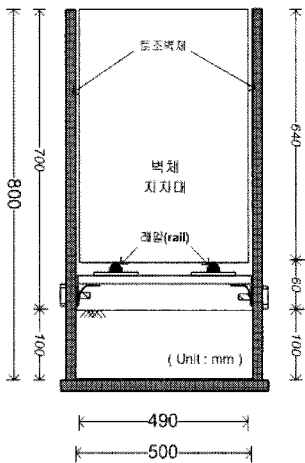
그림 3과 표 2는 본 연구에서 적용한 실험한 방법 및 조건을 개략적으로 나타낸 것이며, 그림과 같이 무보강 조건과 보강 조건으로 구분하여 실험을 행하였다. 무보강 조건에서는 구조물 위치에 따라 배면지반의 발생한 변위와 지반 거동이 달라지므로 구조물의 위치를 벽체에

표 2. 마이크로 파일 침하역제 효과에 관한 실험 조건

실험 종류	실험 명	고정조건	변경조건
Non-reinforced Condition (NT)	(NT)	벽체+배면지반	무 하 중
	$(NT)_{\lambda=0.5H}$	벽체+배면지반	이격거리(λ) \div 0.5H
	$(NT)_{\lambda=0.6H}$	벽체+배면지반	이격거리(λ) \div 0.6H
	$(NT)_{\lambda=0.7H}$	벽체+배면지반	이격거리(λ) \div 0.7H
Reinforced Condition (RT)	$(RT)_L$	<ul style="list-style-type: none"> 구조물 ($\lambda=0.5H$) 고정 Micro pile: $s=2D, \theta=0^\circ, d=0$ 	L= 1.0B, 1.5B, 2.0B, 2.5B
	$(RT)_s$	<ul style="list-style-type: none"> 구조물 ($\lambda=0.5H$) 고정 Micro pile: L=2B, $\theta=0^\circ, d=0$ 	s= 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D
	$(RT)_\theta$	<ul style="list-style-type: none"> 구조물 ($\lambda=0.5H$) 고정 Micro pile: L=2B, s= 2D, d=0 	$\theta= 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
	$(RT)_d$	<ul style="list-style-type: none"> 구조물 ($\lambda=0.5H$) 고정 Micro pile: L=2B, s=2D, $\theta=0^\circ$ 	d=0.05B, 0.10B, 0.15B, 0.20B



(a) 벽체 지지대 및 벽체 변위측정 장치



(b) 벽체 지지대 크기 및 구조

그림 4. 벽체 지지대 및 계측기 설치

서 일정 거리만큼 이격시켜 고정하고, 실험을 진행하였다. 벽체와 구조물의 이격거리는 파괴선($45^\circ + \phi/2$)을 기준으로 환산한 수평 이격거리(λ)로, 약 0.5H, 0.6H, 0.7H 이다.

무 보강시의 실험결과, 인접 구조물의 존재 여부와 위치에 따라 지반의 파괴 거동은 달라지나, 지반 거동은 파

괴선($45^\circ + \phi/2$)을 넘지 않는 범위에서 발생하는 것으로 나타났다. 구조물에 발생한 부등침하량은 예상과 달리 허용치(일반 건물의 허용 각변위(Angular distortion)=1/150)를 모두 벗어났다. 그러나 벽체에서의 이격거리(λ)가 0.6H인 경우($(NT)_{\lambda=0.6H}$)와 0.7H인 경우($(NT)_{\lambda=0.7H}$)에 발생한 구조물의 부등침하량은 이격거리 0.5H($(NT)_{\lambda=0.5H}$)에 비해 상대적으로 적게 발생하여 보강효과를 판단하는데 문제가 생길 수 있다. 따라서 이격거리를 0.5H로 고정하고 파일 보강효과에 관한 실험을 행하였다. 마이크로 파일로 보강하는 경우는 지반을 조성한 다음 모형 케이싱 장치를 활용하여 지반 내에 설치하고 정해진 위치에 모형 구조물을 설치하였다. 모든 설치작업이 완료된 후, 무보강 실험과 동일하게 그림 4와 같이 벽체 지지대와 연결된 기어박스를 이용하여 지반 내의 변형이 균 질하게 발생되도록 저속(1mm/min)으로 벽체 지지대를 이동시켜 벽체 변위량(δ_h/H)이 4%이상 발생하도록 하였다.

4. 실험결과의 분석 및 고찰

4.1 인접 구조물을 보강하지 않은 경우

그림 5는 최대 수직변위량($\delta_{vmax}/H, \%$)과 최대 수평 변위량($\delta_{hmax}/H, \%$)의 관계를 나타낸 것으로, 구조물의 존재 여부와는 관계없이 각 경우별 최대 수평 변위량에 대한 발생한 최대 수직 변위량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 실험 결과 그래프를 토대로 관계를 정리하면 식 (2), (3)과 같다.

$$\delta_{vmax}/H = (1.0)\delta_{hmax}/H \quad (2)$$

; ($\delta_{hmax}/H < 1.5\%$ 경우)

$$\delta_{vmax}/H \approx (1.6)\delta_{hmax}/H \quad (3)$$

; ($\delta_{hmax}/H \geq 1.5\%$ 경우)

그림에서 벽체의 최대 수평변위량이 약 1% 미만으로 발생하는 경우, 배면지반에서 발생한 최대 수직변위량은 벽체의 발생한 최대 변위량만큼 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 약 1.0%이상인 경우에는 최대 수평변위량의 약 1.6배정도 증가하여 발생하는 것으로 나타났다. 이는 벽체의 휨 강성에 따라 다르다고 할 수 있는데, 강성이 작은 경우에는 강성이 큰 경우에 비해 벽체 전체에서 발생하는 변위량이 상대적으로 크게 발생하여 배면지반의 변위가 크게 발생하는 것이라 판단할 수 있다. 본 연구결과는 이 등(2004)의 실험 및 현장자료를 통해 얻은 결과와 유사한 반면 Clough 등(1983)의 연구를 통해 얻은 결과와는 상반되는 내용이 때문에 별도의 연구

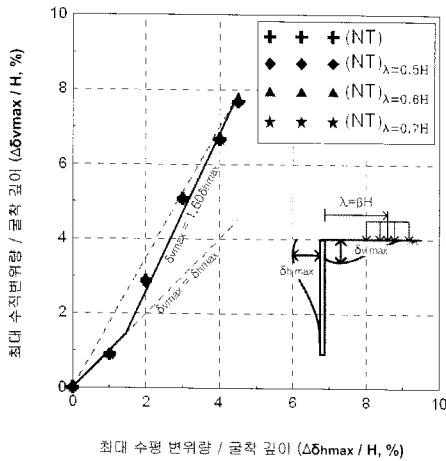


그림 5. 무보강인 경우, 각 경우 별 $\delta_{hmax}/H - \delta_{vmax}/H$ 관계

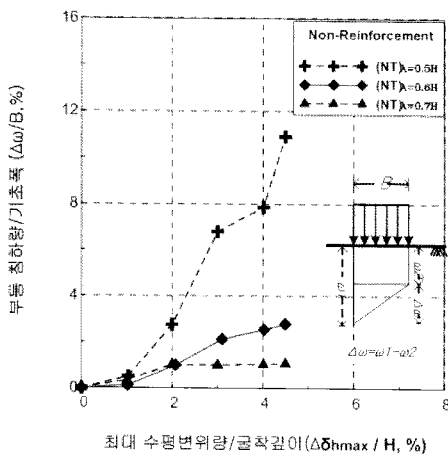


그림 6. 벽체 변위량에 따른 부등침하량

가 요망된다.

그림 6은 인접구조물에 발생한 부등침하량을 나타낸 것이다. 벽체변위 $\delta_{hmax}/H = 1\%$ 이내의 경우에는 각 변위 허용치를 벗 어나지 않았으나, 변위량이 1%를 초과하는 경우에는 발생한 부등침하량이 상당히 크게 발생하는 것으로 나타났다. 특히 이격거리가 0.5H인 경우에 발생한 부등침하량은 이격거리가 0.6H, 0.7H인 경우보다 약 3배정도 크게 발생하는 것으로 나타났다.

4.2 인접 구조물을 보강한 경우

(1) 파일 길이, 간격에 대한 보강효과

파일의 설치 간격은 문헌에 의하면 점착력이 없는 느슨한 지반의 경우 설치간격(s)을 2D로, 조밀한 경우에는 2D~4D로 제안하고 있다(Lizzi, 1982).

횡 방향으로 지반의 변위가 발생하는 경우, 지반은 지지력을 상실하게 되며 기초 밑의 지반은 느슨해지는 경향을 보이게 된다. 그리하여 파일 길이에 대한 실험을 하는 경우에는 파일 설치간격을 2D로 고정하고 실험을 행하였다. 실험 시, 파일의 길이가 부족한 경우에는 그림 7과 같이 파일의 두부에서 밀리는 현상이 나타났다. 이는 파일을 설치함으로써 배면지반의 상부 침하에 대한 보강 효과는 있으나, 그 효과는 적정 길이로 설치한 경우에 비해 떨어지는 것이라 할 수 있다. 이러한 현상의 원인은 토압관계에서 찾을 수 있는데, 파일 길이의 부족으로 그림에서 보는 것과 같이 활동에 저항하는 토압(P_2)보다 파괴영역에서 발생하는 토압(P_1)이 크기 때문이라 할 수 있다.

그림 8, 9는 설치 길이와 간격을 달리한 경우, 수평변위에 따라 발생된 배면지반의 수직 변위량을 나타낸 것이다. 그림 8에서 설치 길이 $L=1B$ 의 경우(그림 8(a)참조), 파일의 설치 길이 부족으로 인해 배면 지반의 침하영향 범위가 넓게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 파일의 길이를 1.5B이상으로 설치한 경우, 배면 지반의 침

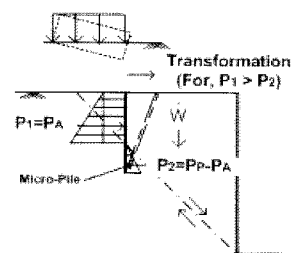
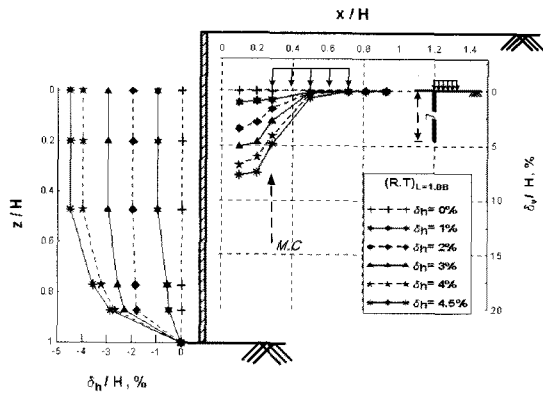
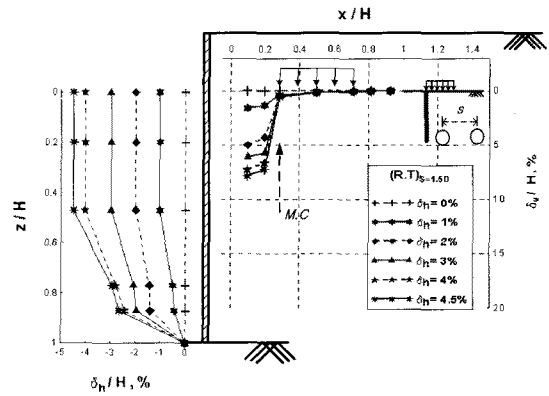


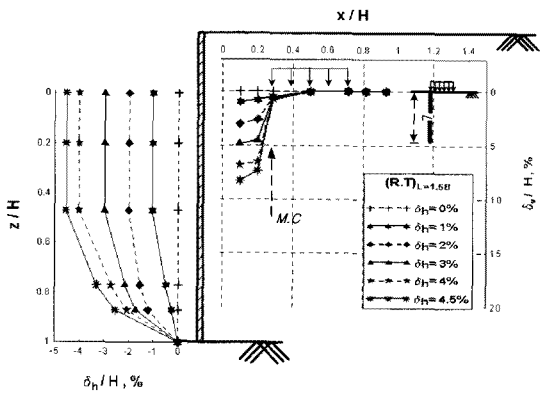
그림 7. $L=1B$ 인 경우, 파일 두부 밀림 현상과 지반 파괴 거동



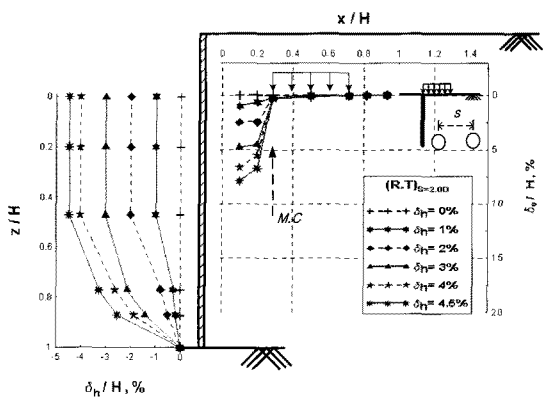
(a) L=1.0B



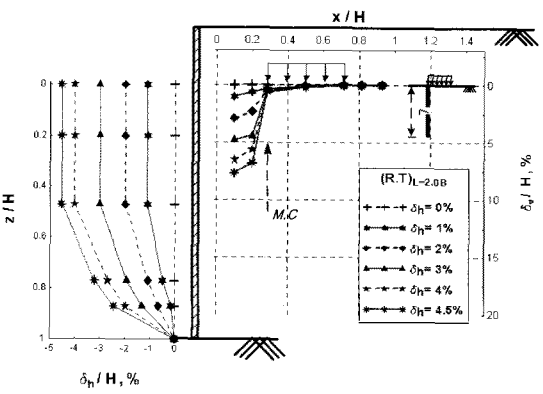
(a) s=1.5D



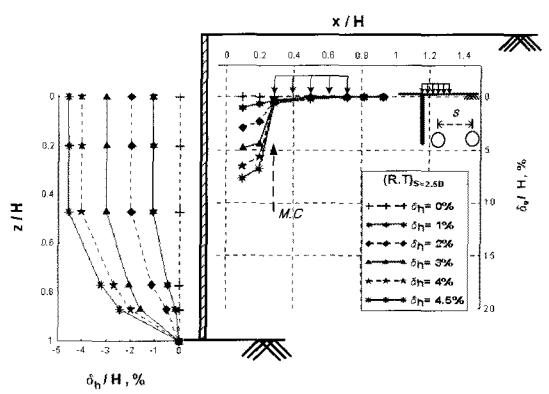
(b) L=1.5B



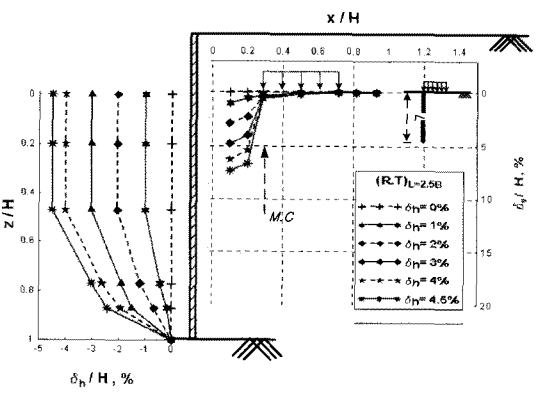
(b) s=2.0D



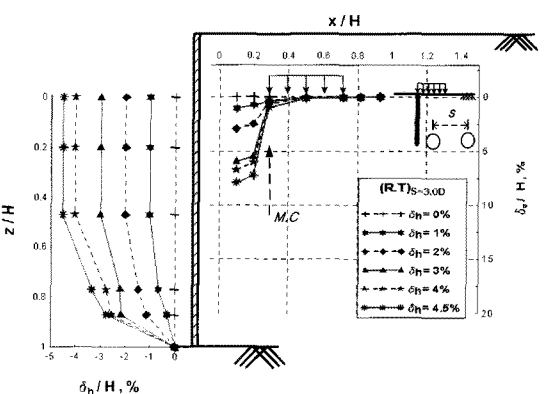
(c) L=2.0B



(c) s=2.5D



(d) L=2.5B



(d) s=3.0D

그림 8. 설치길이를 달리 한 경우, 발생한 변위량

그림 9. 설치 간격을 달리 한 경우, 발생한 변위량

하 영향 범위는 상당히 줄어드는 경향을 보이고 있다.

그림 9와 같이 설치 간격을 달리 한 경우는 설치 길이와 달리 뚜렷한 경향의 차이를 보이지 않았다. 그러나 간격을 넓게 하여 설치한 경우($s=3.0D$, 그림 8(d)참조), 파일 부근에서 발생하는 침하량이 설치간격을 $(1.5\sim 2.5)D$ 로 한 경우에 비해 증가하는 것으로 나타났다.

그림 10은 파일 길이를 달리하여 설치한 경우, 최대 수평변위에 따른 발생된 부등침하량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 설치길이가 증가함에 따라 구조물에 발생하는 부등침하량이 상당히 감소하는 것을 알 수 있다. 설치길이를 $1.5B$ 이상으로 설치한 경우, $1B$ 로 설치한 경우에 비해 약 83%정도의 부등침하 감소 효과를 보이는 것으로 나타났다.

그림 11은 설치길이에 따른 부등침하 감소율을 나타낸 것으로, 파일 길이가 증가함에 따라 침하감소율이 역

시 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 $2.0B$ 이상 설치한 경우에는 그 효과가 약 90%정도에서 일정해지는 것으로 나타났다.

그림 12는 설치 간격을 달리 한 경우, 구조물에 발생한 부등침하량을 나타낸 것이다. 설치간격을 $1.5D$ 와 $2.5D$ 에 발생한 부등 침하량은 거의 유사하게 나타났다. 그러나 상대적으로 간격을 $2D$ 로 한 경우보다 약 2배정도 부등침하 발생량이 큰 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 간격이 $2D$ 보다 좁은 경우($s=1.5D$)와 넓은 경우($s=3.0D$)에는 파일 주변지반의 구속력이 감소하여 상대적으로 부등침하가 다소 증가하는 것으로 판단된다.

그림 12는 설치 간격에 따른 부등침하 감소율을 나타낸 것으로, 설치 간격을 $1.5D\sim 2.5D$ 로 설치한 경우는 평균적으로 약 85%정도의 보강효과를 보이는 것으로 나타났다. 설치 간격을 $2D$ 로 한 경우, 보강효과가 90%

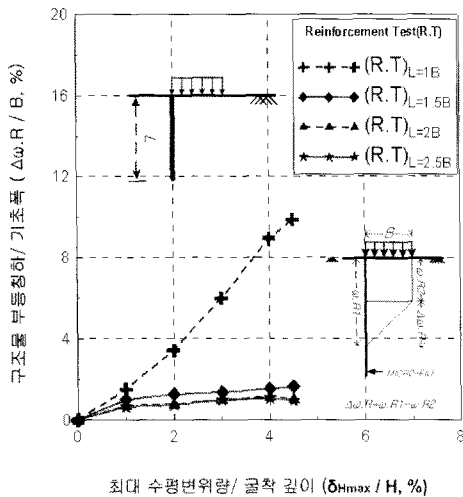


그림 10. 설치 길이를 달리 한 경우, 수평 변위량에 대한 부등침하량

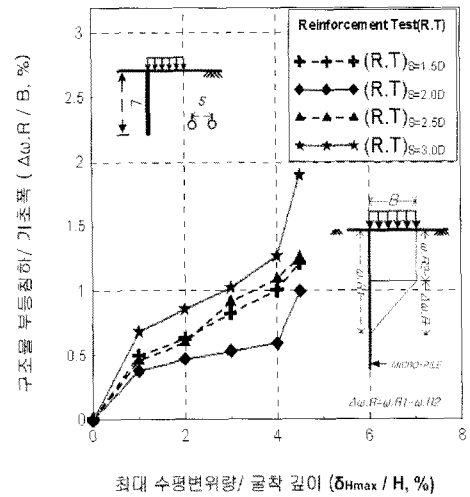


그림 12. 설치 간격을 달리 한 경우, 수평 변위량에 대한 부등침하량

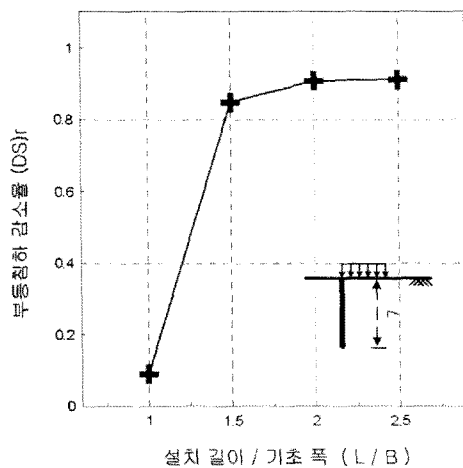


그림 11. 설치 길이에 대한 부등침하 감소율

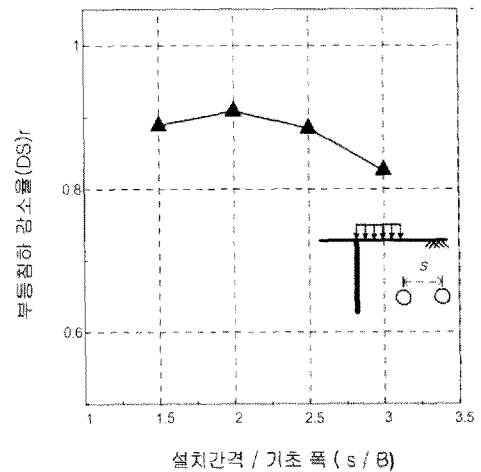


그림 13. 설치 간격에 대한 부등침하 감소율

정도로 가장 보강효과가 큰 것으로 나타났으나, 간격을 1.5D, 2.5D로 한 경우와 비교해서 간격에 대한 효과의 차이는 크지 않았다.

(2) 파일 경사, 이격거리에 대한 보강효과

구조물의 침하를 억제하기 위해 마이크로 파일을 설치하는 경우 수평으로 설치하는 것이 가장 효과적이거나 설치 시 제약성 때문에 파일을 경사지게 설치하는 경우도 있다. Tsukada(2006)는 얇은 기초의 지지력 보강, 침하 억제를 위해, 지반의 상대밀도에 따라 다르지만, 설치각도는 약 30°로 하는 것이 효과가 크다고 제안한 바 있다. 즉 설치 각도에 따라 마이크로 파일의 효과는 다를 수 있다. 또한 앞의 실험은 기초 구조물 저판부와 인접되게 설치한 구조형태를 띠고 있다. 그러나 마이크로 파일 설치 시 인접구조물과 인접되게 설치하는 데는 상당한 공간적 제약을 받을 수 있다. 또한 기초 바닥의 지반 내에 지장물이 설치되어 있는 경우 역시 시공하는데 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통해 얻은 결과(설치길이(L)=2B, 설치간격(s)=2D)를 토대로 설치 경사와 이격거리에 따른 보강효과를 평가하기 위한 실험을 진행하였다.

그림 14, 15는 설치길이(L)=2B, 간격(s)=2D로 고정하고, 설치 각도와 이격거리를 달리한 경우, 발생한 변위량을 나타낸 것이다. 설치 각도를 달리 한 경우에는 기존의 연구 결과와는 다른 결과로 나타났다. 기존의 연구 결과에 따르면 얇은 기초를 보강하는 경우, 30°~45°로 설치할 것을 제안하고 있다. 그러나 그림 14에서 보는 것과 같이 실험결과, 설치 경사를 증가시키는 경우 오히려 배면지반의 영향범위가 점차 넓어지는 경향을 보였다. 또한 그림 15에서 보는 것과 같이 이격거리 역시 증가함에 따라 지반의 영향 범위가 상대적으로 증가하였다. 이격거리 $d=0.20B$ 의 경우 구조물이 놓여 있는 부근에서도 눈에 띄게 배면지반의 변위량이 증가하는 경향을 보였다.

그림 16은 파일을 경사지게 설치한 경우와 수직으로 설치한 경우, 파일 주변에 작용하는 힘의 관계를 개략적으로 나타낸 것으로, 횡 방향으로 지반이 이완됨에 따라 파일 주변 지반의 구속력이 감소하게 된다.

그리고 지반이 이완됨과 동시에 지표면에 설치된 구조물 역시 파일에 직접적으로 하중으로 작용하게 되며, 횡 방향으로 작용하고 있는 주동토압(P_1)과 힘의 합력으로 파일에 작용하게 된다. 그리하여 저항하는 토압

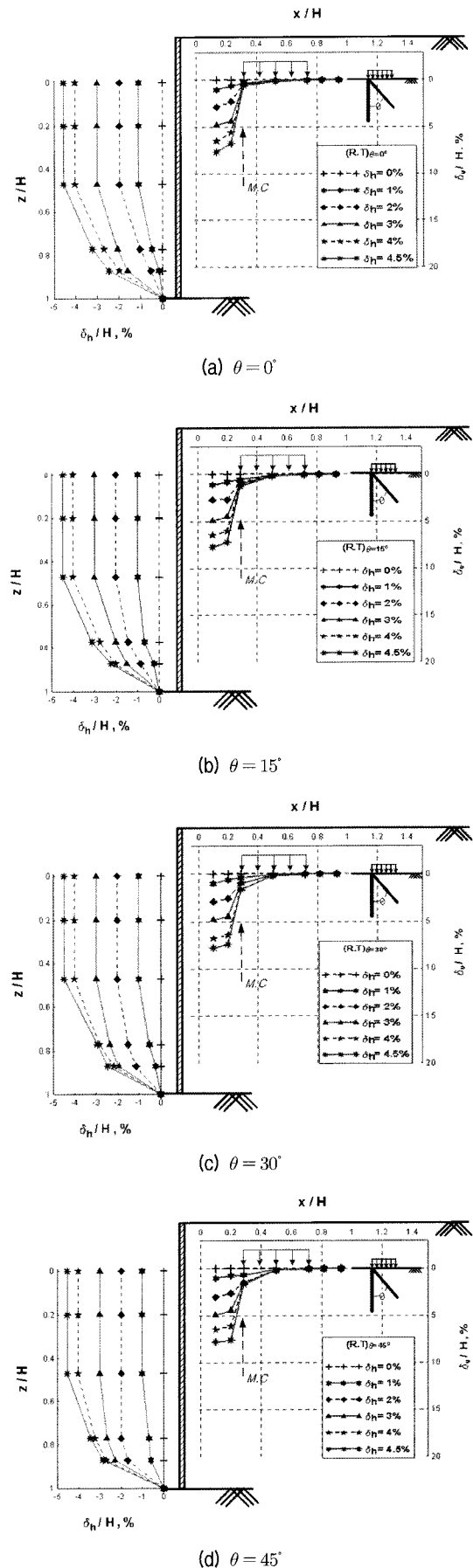
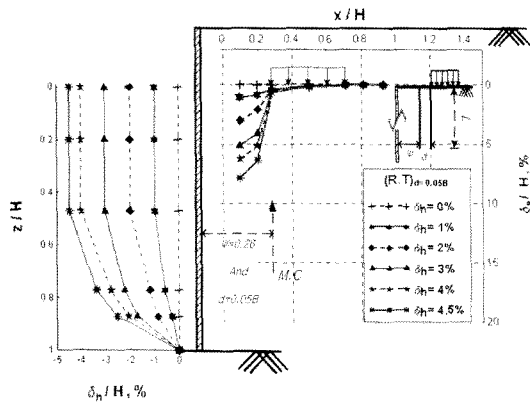
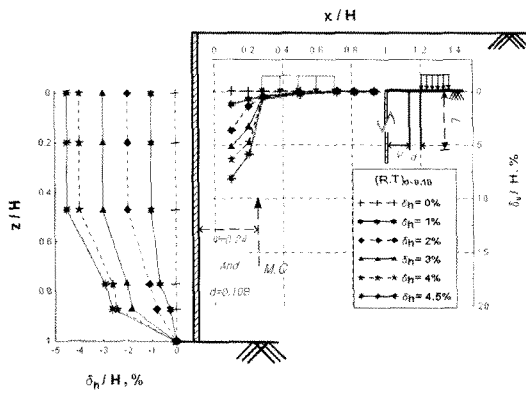


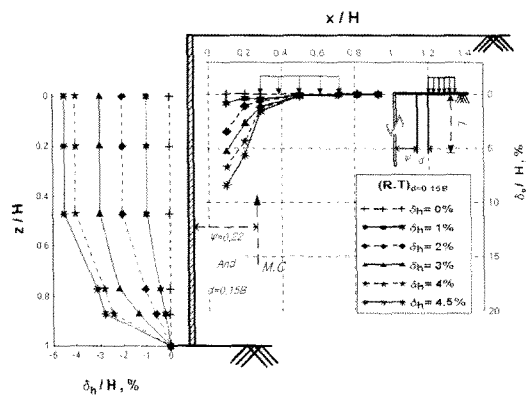
그림 14. 설치 경사를 달리 한 경우, 발생한 변위량



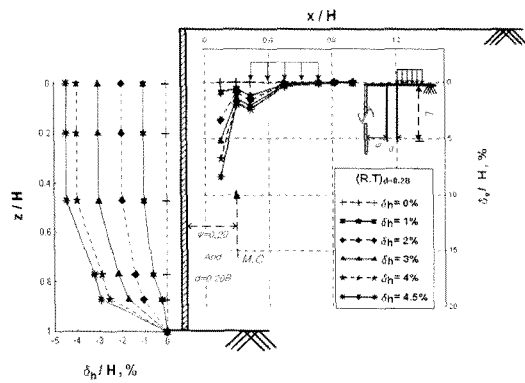
(a) $d=0.05B$



(b) $d=0.10B$



(c) $d=0.15B$



(d) $d=0.20B$

그림 15. 이격 거리를 달리 한 경우, 발생한 변위량

(P_2)보다 상대적으로 커짐에 따라 구조물에 발생된 부등침하량이 증가하는 것으로 판단된다.

그림 17은 설치각도를 달리한 경우, 구조물에 발생된 부등침하량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 파일 설치 각도가 증가함에 따라 구조물의 부등침하량 역시 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 5배의 보강효과 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 18은 설치 각도에 따른 부등침하 감소율을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 설치 각도가 점차 증가함에

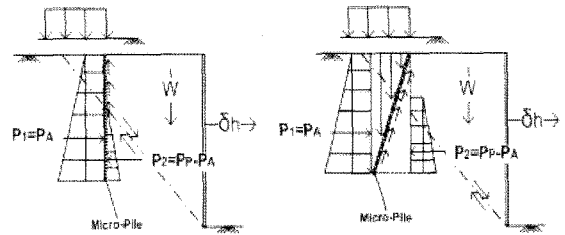


그림 16. 파일 경사에 따라 파일 주변에 발생하는 힘의 관계

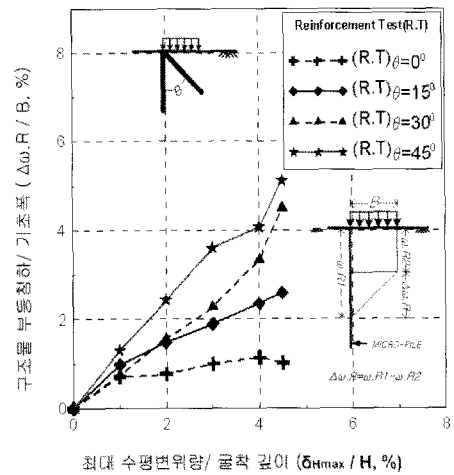


그림 17. 설치 각도를 달리 한 경우, 수평 변위량에 대한 부등침하량

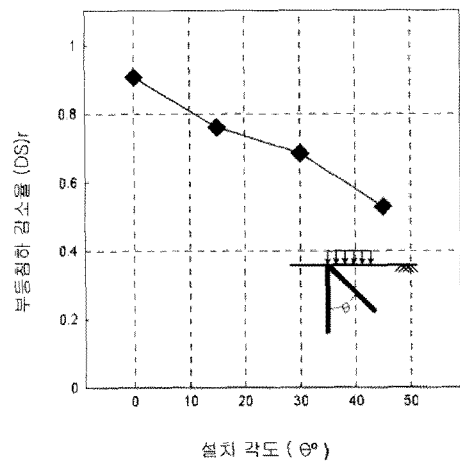


그림 18. 설치 각도에 대한 부등침하 감소율

따라 보강효과는 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 실험 결과, 설치 각도를 40°이상으로 한 경우, 보강효과는 약 50%정도로 수직으로 설치한 경우에 비해 효과가 상당히 감소하는 것으로 나타났다.

그림 19는 설치 이격거리를 달리한 경우, 구조물에 발생한 부등침하량을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 이격거리를 0B~0.1B까지 변화시킨 경우, 그리 큰 차이를 보이지 않았으나, 0.1B 이상 증가시킨 경우에는 구조물의 부등침하가 상대적으로 크게 발생하였다. 이격거리를 0.15B로 한 경우에는 0.1B경우보다 약 3배 정도 크게 발생하였으며 0.20B의 경우는 약 5배정도 증가하는 것으로 나타났다.

그림 20은 설치 이격거리에 따른 부등침하 감소율을 나타낸 것으로 설치 이격거리를 증가시킨 경우, 점차 보강효과는 감소하는 것으로 나타났다. 그림에서 보는 것

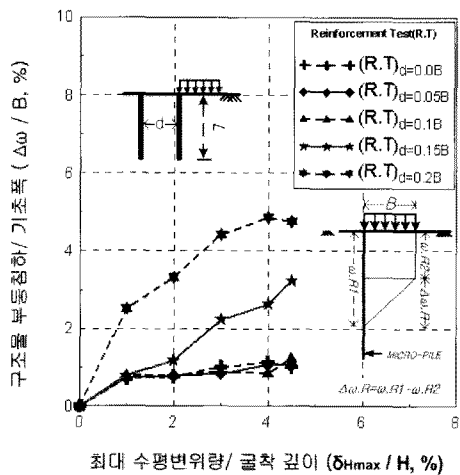


그림 19. 설치 이격거리를 달리 한 경우, 수평변위량에 대한 부등침하량

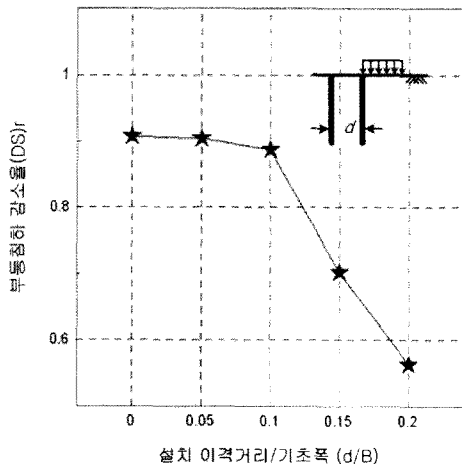


그림 20. 이격거리에 대한 부등침하 감소율

과 같이 구조물에 인접하여 설치한 경우와 0.1B까지 이격시켜 파일을 설치한 경우의 나타난 보강효과는 약 90% 정도로 그리 큰 차이가 나지 않았다. 그러나 0.2B 이상 이격거리를 증가시킨 경우, 보강효과가 60%미만으로 0.1B 이하인 경우보다 발생한 부등침

5. 결론

벽체의 변위로 발생할 구조물의 부등침하를 억제하기 위해 마이크로 파일을 보강할 경우, 설치방법에 따라 보강효과는 달라진다. 본 연구에서는 모형실험을 통해 마이크로 파일을 보강하였을 때의 침하감소 경향을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 벽체의 최대 수평 변위량(δ_{Hmax}/H)과 배면지반의 최대 수직변위량(δ_{Vmax}/H)의 관계는 구조물의 존재여부와는 관계 없이 $\delta_{Hmax}/H < 1.5\%$ 인 경우, $\delta_{Vmax}/H = (1.0)\delta_{Hmax}/H$ 인 것으로 나타났다. 그러나 $\delta_{Hmax}/H \geq 1.5\%$ 인 경우에는 $\delta_{Vmax}/H \approx (1.6)\delta_{Hmax}/H$ 로, 최대 수직 변위량이 크게 증가하였다.
- (2) 벽체와 구조물의 이격거리(λ)가 $0.6H$ 를 초과하는 경우($\lambda > 0.6H$)에는 구조물의 부등침하량이 크게 발생하지는 않았다. 그러나 이격거리(λ)가 $0.6H$ 이하인 경우($\lambda \leq 0.6H$)에는 벽체의 변위 영향으로 구조물의 부등침하량이 상당히 증가하였다.
- (3) 파일의 길이(L)에 대한 침하감소는 기초 폭(B)과 설치길이(L)의 비(L/B)가 1.5이상인 경우($L/B \geq 1.5$)가 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 $L/B < 1.5$ 인 경우, 그 효과가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 파일의 간격(s)에 따른 침하감소량이 가장 큰 것은 기존의 지지력 보강에 관한 연구결과(설치간격(s) = $2D \sim 4D$)와는 다르게 파일 직경(D)과 설치 간격(s)의 비(s/D)를 1.5~2.5의 범위 내로 한 경우($1.5 \leq s/D \leq 2.5$)이다. 그러나 $s/D \geq 3.0$ 인 경우, 오히려 그 효과가 상대적으로 감소하는 것으로 나타났다.
- (5) 파일의 설치경사(θ)는 기존의 지지력 보강에 관한 연구결과(설치각도 $\theta = 30^\circ \sim 45^\circ$)와 달리 지표면에 수직으로 설치하는 경우가 부등침하 발생량이 가장 작은 것으로 나타났다. 파일을 경사지게 설치하면 보강 효과는 있으나, 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

- (6) 설치 이격거리(d)는 기초 폭(B)과 설치 이격거리(d)의 비(d/B)가 0.1이하인 경우($d/B \leq 0.1$), 부등침하가 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 $d/B \geq 0.2$ 인 경우, $d/B \leq 0.1$ 인 경우보다 그 효과가 절반 정도 감소하는 것으로 나타났다.
- (7) 본 연구는 실내 축소모형실험을 통해 마이크로 파일로 보강한 경우와 보강하지 않은 경우에 대한 거동의 경향을 나타내며, 실제 지반과의 거동과는 차이가 있을 수 있다.

참 고 문 헌

1. 이봉열, 김학문 (2004), “상계하중적용에 의한 흙막이 벽체 및 주변지반 거동에 관한 굴착모형실험연구”, *한국토목학회논문집*, 제24권, 제4C호, pp.223-233.
2. 한국지반공학회, “굴착 및 흙막이 공법”, 구미서관, pp.320-321.
3. Jie Han & Shu-Lin Ye (2006), “A Field Study on The Behavior of A Foundation Underpinned by Micoro-Pile”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, pp.30-43.
4. Lizzi, F. (1982), “Satic Restoration of Monument”, Sagep Publisher, Genoa, Italy.
5. Yukihiko Tsukada et al (2006), “Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforced with Micro-piles”, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.3, pp.367-376.

(접수일자 2008. 6. 3, 심사완료일 2008. 9. 17)