

마이크로파일로 보강된 교량기초의 정규화 거동 평가

Evaluation of Normalized Behaviors of Bridge Foundations Reinforced by Micropiles

박 성 완¹ Park, Seong-Wan

정 동 진² Jung, Dong-Jin

곽 기 석³ Kwak, Ki-Seok

이 주 형⁴ Lee, Ju-Hyung

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the normalized behaviors of existing bridge foundations reinforced by micropiles. In order to do numerical method a finite element program was used to predict the micropile behavior and quantify their reinforcing effects on existing bridge foundations. In addition, the installation effects of battered micropiles on existing foundations were compared with vertically reinforced bridge foundations. Based on the study performed, it was found that the use of battered micropiles more efficiently reduces displacement of existing foundations than vertically installed micropiles under vertical and horizontal loadings, respectively. The batter angle of micropiles was also found to be most effective at about $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ in reducing the vertical displacement. The horizontal reinforcing effect continues to be larger with an increase in batter angles. So, it is believed that the results presented could give an idea to enhance in-service performance of existing bridge foundations reinforced by micropiles.

요 지

본 연구에서는 마이크로파일로 보강된 기존 교량기초에 대한 정규화 거동을 평가하였다. 기존 교량기초에 대한 보강효과를 정량화하고 마이크로파일의 거동을 예측하기 위하여 유한요소해석에 의한 수치해석을 실시하였다. 또한 경사지게 보강된 마이크로파일의 설치효과를 수직으로 보강된 경우에 대하여 비교하였다. 해석결과 경사진 마이크로파일이 기존교량 기초에 보강한 경우 수직의 경우 수직, 수평하중에 대하여 각각 변위를 저감시켜 효과적인 보강이 되고 있으며 효과가 큼을 확인하였다. 한편 마이크로파일의 보강 각도는 수직하중이 작용하는 경우 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 에서 가장 큰 효율을 나타냈으며, 수평하중이 작용하는 경우 마이크로파일의 보강 각도가 증가함에 따라 그 효과가 나타났다. 따라서 마이크로파일에 의한 기존 교량기초에 대한 보강은 기초의 공용성능을 향상시킬 수 있는 하나의 방법이 되고 있음을 잘 보여주고 있다.

Keywords : Bridge foundation, Finite element analysis, Micropile, Performance

1. 서 론

교량의 주요 구성부재의 보강주기는 20~25년 정도

로 교량의 수명동안 최소 1번 이상의 주요한 보강이 실시되어야 하며 특히 교량의 하부구조물은 상부구조의 하중을 지지하고 기초를 통하여 지반에 전달하는 매우

1 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environment Engrg., Dankook Univ., spark@dankook.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 단국대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Engrg., Dankook Univ.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원 (Member, Research fellow, Dept. of Geotechnical Engrg. Research, Korea Institute of Construction Technology)

4 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg. Research, Korea Institute of Construction Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

중요한 구조물로서 급속한 교량의 증가와 비례해 교량 기초의 유지보수비 또한 상당한 부분 증가하는 추세에 있다. 그러나 전통적인 교량 기초의 보강 공법은 협소한 작업공간과 막대한 비용 때문에 실제 적용은 매우 제한적이다.

최근 안전성과 실용성을 겸비한 마이크로파일에 의한 교량기초 보강기술이 개발됨으로써 손상된 기존 교량기초의 안정성 및 성능을 개선하거나 지진 및 충격하중 그리고 세굴 등에 대한 저항성 증가를 위해 마이크로파일의 적용성 및 보강 효과에 대한 연구가 요구되고 있다. 마이크로파일을 이용한 방법은 기존의 교량기초 보강공법에 비하여 작은 비용으로 교량 거더 아래의 협소한 공간에서도 보강 작업이 가능하며 소구경의 특성상 경사지게 시공이 가능한 장점이 있다. 그러나 현재까지 마이크로파일로 보강된 교량 기초의 거동에 관한 연구를 살펴보면 현장의 관측 데이터를 바탕으로 한 연구는 전무하다고 할 수 있으며, 마이크로파일에 대한 모형 실험 또한 제한적인 범위에서 이루어지고 있는 등 매우 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 마이크로파일로 보강된 교량기초시스템에 대한 유한요소 수치해석을 실시하고 그 공용성을 정규화하여 기존의 교량 기초에 대한 마이크로파일의 보강효과 및 경사효과를 정량적으로 파악하고자 한다.

2. 수치 모형 및 해석

마이크로파일의 보강효과를 확인하기 위해서는 실제 현장의 마이크로파일 적용사례를 중심으로 그 보강효과를 살펴보는 것이 바람직하다. 그러나 아직 국내 현장의 마이크로파일 보강사례가 적고 적용된 사례 또한 계측 데이터의 부재로 인하여 보강효과에 대한 해석 및 판단이 어려운 실정으로, 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2004)을 활용하였다. 또한 구조물-기초-마이크로파일-지반 간의 비선형 상호작용을 단순화하고 하중의 중첩이 가능한 2차원 선형탄성모형을 적용하였으며, 지반의 변형계수는 일정하다고 가정하였다. 보강이 없는 상태에서 기존말뚝과 말뚝 캡이 있는 교량기초를 reference 경우라 하여 보강효과를 비교하였다.

마이크로파일의 특징 가운데 하나는 경사지게 시공이 가능하다는 것으로 여러 연구자들은 이 경우 연직으로 시공한 경우에 비해 효과적이라는 연구결과를 제시하고 있다(Ishida 등, 2002; 이태형 등, 2006). 따라서 본

연구에서는 마이크로파일이 기존의 교량기초에 경사각을 달리해서 보강되는 경우의 보강효과를 기존의 교량기초에 연직방향으로 보강되는 경우와 비교하여 경사진 마이크로파일의 보강효과를 정규화 거동을 통하여 평가하였다.

2.1 Reference 경우의 선정

해석대상은 일반국도에 공용중인 교량에서 지반조사 자료가 가용한 7개의 말뚝기초 교량을 분석하여 대표적인 조건으로 직경(400mm) 3열의 강재 군말뚝과 사질토 지반으로 선정하였다(박성완 등, 2005). Reference 경우 말뚝 캡의 크기는 기존자료의 말뚝 폭을 고려하여 6m로 높이는 1.8m로 각각 정하였다. 기존말뚝의 간격은 말뚝 직경(0.4m)의 3배인 1.2m이며, 말뚝의 근입 깊이는 15m로 말뚝의 두부 0.9m는 캡에 근입된 상태로 하였다.

하중의 종류는 교각의 하중을 모사하기 위하여 수직, 수평하중 모두 집중하중으로 결정하였고, 하중의 작용점은 교각의 하중이 캡 상단 중앙부에 작용시켰다. 또한 하중의 크기는 보강공용성의 정량화가 용이하게 단위하중을 사용하여 해석하였다. 하중조건을 수직하중인 경우와 수평하중인 경우로 분리하여 고려하는 경우 수직하중이 지배적인 경우와 수평하중이 지배적인 경우에 대한 보강 시 각 변수들이 미치는 영향을 분명하게 알 수 있다는 장점이 있다. 이는 필요시 중첩이론을 적용할 수 있어 수직하중과 수평하중이 동시에 작용하는 경우의 결과로도 활용할 수 있다.

대부분 말뚝기초의 수치해석에서 캡과 지반의 상호작용에 의한 영향을 무시하기 위하여 캡과 지반이 분리되어 있는 조건으로 해석을 실시하나, 본 연구에서는 실제 기초와 근접한 모델링을 위하여 캡과 지반이 붙어있는 상태로 모형화 하였다. 2차원 선형탄성의 특성상 캡과 지반은 완전부착 상태로 합성 거동을 한다고 가정하였다. 유한요소망의 크기는 좌·우의 경우 캡으로부터 말뚝 길이의 1.5배(22.5m)이며, 높이는 말뚝의 선단부에서부터 말뚝길이의 1.5배(22.5m)이다. 유한요소해석 모델링에 있어 구조물과 요소망의 크기는 선형 해석 결과 중심부 말뚝 직경의 50배 정도(50D)에서 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 말뚝 직경을 고려하여 22.5m(>50D)를 요소망의 크기로 정하였다. 또한 경계조건은 좌·우가 롤러이며, 하단은 힌지로 설정하였다. 그림 1은 reference 경우의 개요도이다.

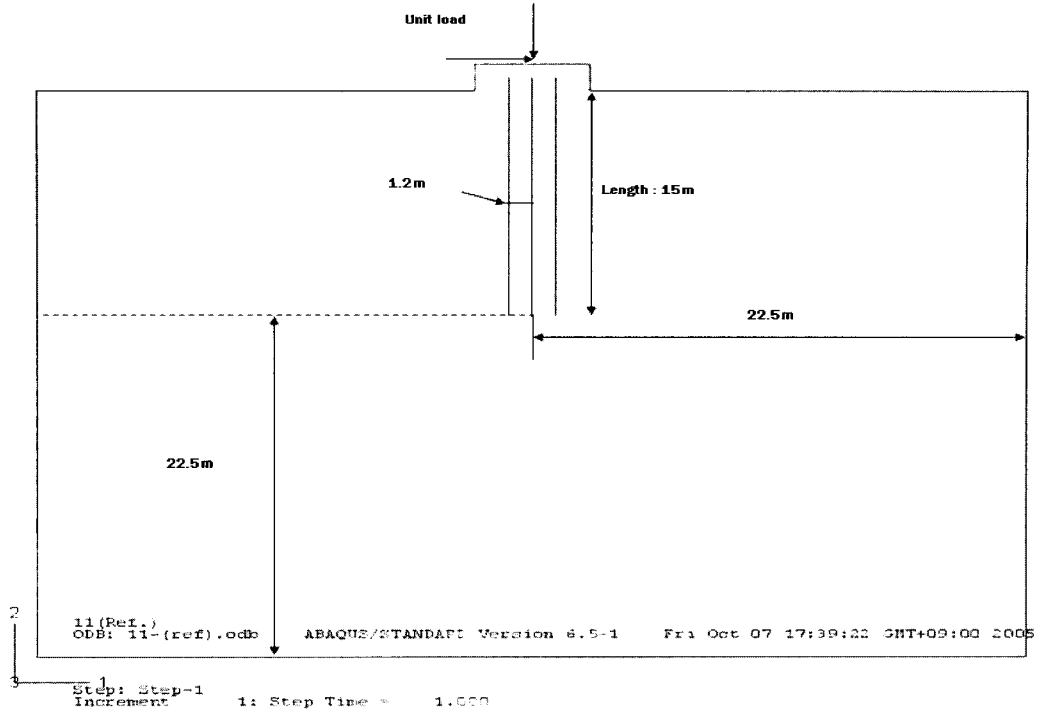


그림 1. Reference 경우 개요도

표 1. 해석에 적용한 요소 및 물성

	적용 요소	탄성계수(kN)	전단탄성계수(kN)	포아송비
지반(사질토)	고체(solid)	13500	-	0.35
말뚝 cap	고체(solid)	3.00×10^7	-	0.15
기존 말뚝	빔(beam)	2.00×10^8	8.00×10^7	0.30
마이크로파일	빔(beam)	8.50×10^7	3.27×10^7	0.30

2.2 지반 및 기초시스템의 재료물성

해석대상 교량기초가 캡, 기존말뚝 그리고 보강 마이크로파일로 이루어진 복합 구조물이라는 특성 상 해석 시에는 구조물의 상호작용을 고려해야 한다. 그러나 그 복합거동이 매우 복잡하고 현재까지 정확하게 규명된 바가 없기 때문에 본 연구에서는 상호작용을 고려하지 않았다. 교량기초 지반의 탄성계수 및 포아송비는 실제 지반의 표준관입시험 N치에 근거하여, Stroud(1989)와 Bowles(1997)가 제안한 방식으로 값을 구하고 평균으로 사용하였다. 캡은 콘크리트 물성치의 평균값을 사용하였으며, 말뚝기초는 강관파일(D=400mm, t=9mm)로 선정하고 강재의 물성치를 사용하였다. 마이크로파일은 강관, 보강철근, 그라우트로 구성되어 있으나 아직까지 국내에서 마이크로파일 복합체에 대한 구조실험이 수행된 바가 없는 관계로 환산단면적을 등가적으로 적용하였다. 표 1은 해석에 적용한 요소 및 물성이다.

2.3 시스템 해석

2.3.1 연직보강

마이크로파일을 기존말뚝과 동일하게 연직으로 보강하는 경우를 연직보강이라 하고 하중의 방향과, 말뚝의 상대직경 비, 말뚝의 상대길이 비로 나누어 해석을 실시하였다. 마이크로파일을 연직으로 보강한 후 수직하중을 받는 경우 말뚝의 상대직경 비를 0.375~0.75(마이크로파일의 직경 : 150mm~300mm)까지 다르게 하고, 말뚝

표 2. 마이크로파일을 연직으로 보강한 경우

하중조건	말뚝의 상대직경 비 (D_m / D_e)	말뚝의 상대길이 비 (L_m / L_e)
수직하중, 수평하중	0.375	0.6
	0.5	0.8
	0.625	1
	0.75	1.2

주) 여기서, D_m : 마이크로파일의 직경, D_e : 기존 말뚝의 직경
 L_m : 마이크로파일의 길이, L_e : 기존 말뚝의 길이

의 상대길이 비를 0.6~1.2(마이크로파일의 길이 : 12 m~18m)까지 해석을 실시하였다. 연직보강의 조건은 표 2와 같다.

표 3은 마이크로파일을 연직으로 보강한 개요도이다. 이차원의 조건으로 해석을 수행하였기 때문에 개요도 상에서는 직경의 변화는 볼 수 없다.

2.3.2 경사보강

마이크로파일을 경사지게 보강한 경우 연직보다 효과가 양호한 것은 기존 실험 연구들에서 잘 알려져 있다 (Itani et al., 2002; Plumelle, 1984). 따라서 본 연구에서는 마이크로파일을 지표면과 경사지게 시공하는 경우를 경사보강이라 하고 연직보강의 경우와 동일한 상대 직경비와 마이크로파일의 보강각도를 연직선으로부터 5°~45°까지 달리하여 최적의 기초시스템 보강각도를

산정하기 위하여 해석을 실시하였다.

마이크로파일의 길이는 세 가지 경우로 나누어 해석을 실시하였는데, 상대 길이에 따라 기존말뚝의 길이보다 짧게 보강한 경우, 같게 보강한 경우, 길게 보강한 경우에 대하여 실시하였다. 각 마이크로파일의 길이를 12m($L_m/L_e=0.8$), 15m($L_m/L_e=1.0$) 18m($L_m/L_e=1.2$)로 선정하고, 말뚝의 상대직경 비를 0.375~0.75까지 변화시키고 마이크로파일의 경사도를 5°~45°까지 달리하여 해석을 실시하였다. 표 4는 경사보강의 해석조건을 나타내고 있다.

2.3.3 말뚝 캡 및 지반의 상대적 강성도

본 연구에서는 말뚝 캡만 있는 경우와 $L_m/L_e=1$, $D_m/D_e=0.5$ 인 연직보강 경우에 대해 캡이 지반에 붙어있는 경우와 캡과 지반이 분리되어 있는 조건으로 해석을 실시

표 3. 마이크로파일의 연직보강 개요도

L_m/L_e	0.6	0.8	1.0	1.2
개요도				

표 4. 경사보강 case의 해석조건

말뚝의 상대길이 비 (L_m/L_e)	하중조건	말뚝의 상대직경 비 (D_m / D_e)	마이크로파일의 경사도(°)
0.8(case 1) 1.0(case 2) 1.2(case 3)	수직하중	0.375	5
			10
		0.5	15
		0.62	20
		0.75	30
	수평하중	0.375	45
			5
		0.5	10
		0.625	15
		0.75	20
		30	
		45	

하여 캡과 말뚝이 각각 말뚝기초의 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 상대직경비가 0.5인 경우에 대하여 상대길이비가 0.6~1.2까지 변화하는 경우 마이크로파일과 지반의 상대강성도 ($\frac{E_p}{E_s}$)를 10^1 (연성 말뚝)~ 10^6 (강성 말뚝)까지, 말뚝 캡과 지반의 상대강성도 ($\frac{E_C}{E_s}$)를 10^1 (연성 캡)~ 10^6 (강성 캡)까지 해석을 실시한 후 각각의 상대적 강성도에 따른 정규화 거동을 분석하였다.

3. 정규화 거동 분석

본 논문에서는 기존 기초시스템에 대한 마이크로파일의 보강효과를 정규화 된 침하량인 효율을 통하여 분석하였다. 연직보강효율은 식 (1)과 같이 무보강한 기존 기초시스템의 수직, 수평 변위를 마이크로파일을 연직으로 보강한 경우의 변위로 정규화 하였으며, 경사보강효율은 식 (2)와 같이 마이크로파일을 연직 보강한 기초시스템의 수직, 수평변위를 마이크로파일을 경사지게 보강한 경우의 변위로 정규화하여 산정하였다.

$$\text{연직보강효율} = \frac{\text{마이크로파일 연직보강시의 변위}}{\text{무보강한 기초시스템의 변위}} \quad (1)$$

$$\text{경사보강효율} = \frac{\text{마이크로파일을 경사보강한 기초시스템의 변위}}{\text{마이크로파일을 연직보강한 기초시스템의 변위}} \quad (2)$$

3.1 연직보강

마이크로파일을 연직으로 보강하여 수직하중을 받는 경우 캡 상단 중앙의 수직변위의 감소를 무보강한 경우(reference)의 변위로 정규화 하여 보강효율을 분석하였으며, 수평하중을 받는 경우 캡상단 중앙의 수평변위의 감소를 무보강한 경우의 변위로 정규화 하여 보강효율을 분석하였다.

3.1.1 수직하중이 작용하는 경우

그림 2는 말뚝의 길이에 따른 정규화된 수직변위를 나타내고 있다. 그림에서 말뚝의 상대 길이 비가 0.8보다 커지면 기울기가 급격히 커져서 1.0~1.2 구간에서 가장 큰 것을 알 수 있다. 따라서 연직으로 보강한 경우 수직하중에 대한 효율은 기존 말뚝의 길이와 같거나 약간 길어진 경우 효율이 좋아짐을 알 수 있다. 또한 그림 3은 마이크로파일의 직경에 따른 정규화 된 침하량이다. 그림에서 말뚝의 상대직경비가 증가함에도 정규화

된 침하량들이 거의 수평을 이루고 있는데, 수직하중에 대한 마이크로파일의 직경변화가 길이의 영향에 비해 매우 작음을 알 수 있다.

3.1.2 수평하중이 작용하는 경우

그림 4는 정규화된 말뚝의 상대길이에 대하여 정규화된 수평변위를 나타내고 있는데 그림을 보면 말뚝의 상대 길이비가 증가함에 따라 변위가 계속 감소하는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 마이크로파일의 보강시 횡방향 변위의 보강효율이 연직방향에 비하여 매우 높은 것으로 알려져 있으나 마이크로파일의 경사를 0°로 한 경우 연직방향의 효율(최대 18%)보다 작음을 알 수 있

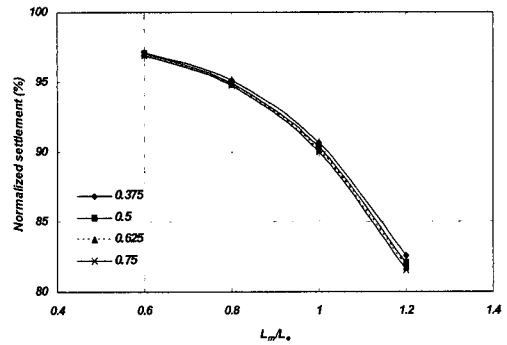


그림 2. 말뚝의 길이에 따른 정규화된 수직변위

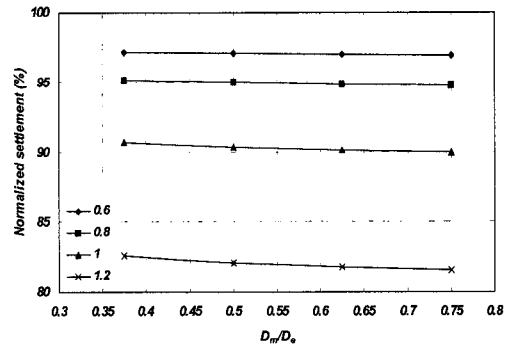


그림 3. 말뚝의 직경에 따른 정규화된 수직변위

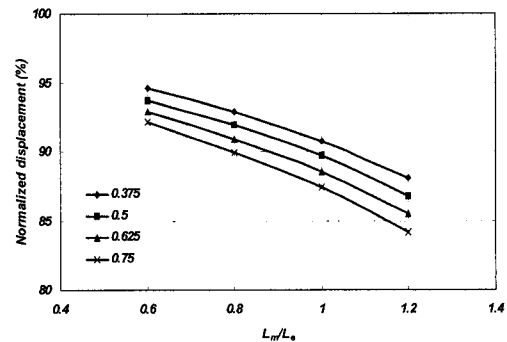


그림 4. 말뚝의 길이에 따른 정규화 된 수평변위

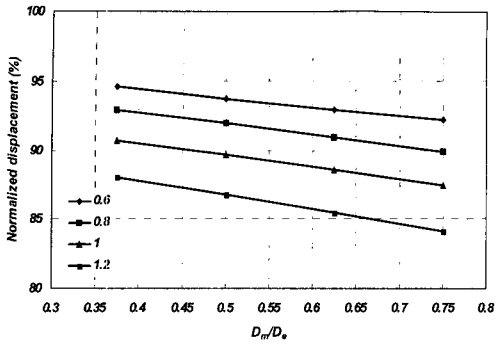


그림 5. 말뚝의 직경에 따른 정규화 된 수평변위

다. 이는 마이크로파일이 대부분 경사지게 시공되는 이유를 반증해 주는 것이다. 또한 그림 5에서 수평하중이 작용하는 경우 말뚝의 상대길이 비뿐만 아니라 말뚝의 상대직경비도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 경사각도

그림 6은 마이크로파일의 연직과 경사보강 효과를 동시에 보여주고 있다. 수직하중이 작용 시 무보강한 기초 시스템의 수직변위를 기준으로 보강각도가 0°에서부터 45°까지 변화할 때의 수직변위를 정규화하였다. 보강각도가 0°인 경우 약 5%의 연직보강효율을 나타냈으나 경사

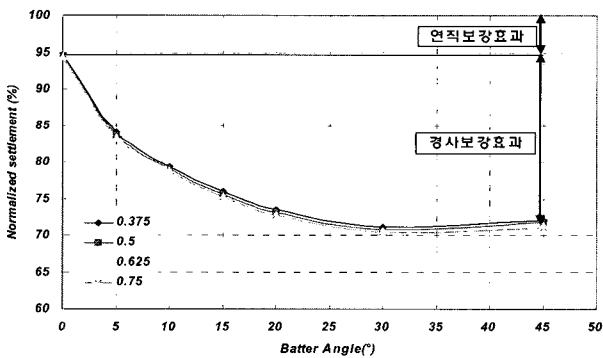
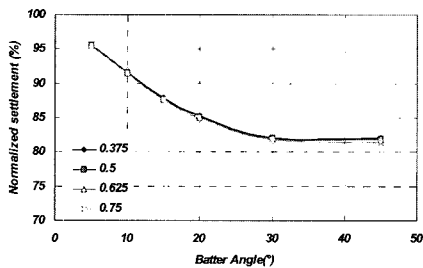
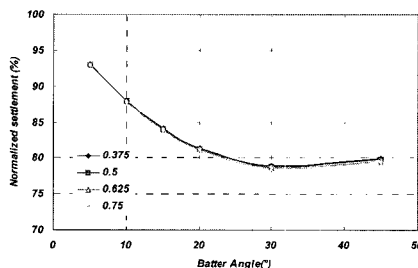


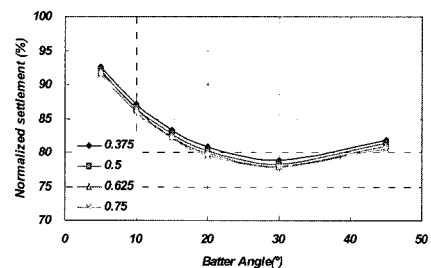
그림 6. 마이크로파일의 연직 및 경사 보강시 침하량(case 1)



case 1



case 2



case 3

그림 7. 마이크로파일의 경사도에 따른 정규화 된 수직변위

각도가 20°인 경우 연직 및 경사에 의한 보강효율은 약 26%로 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 효과적인 각도로 경사지게 마이크로파일을 시공한 경우 연직으로 시공한 경우에 비하여 매우 효율적이라는 Ishida et al.(2002)와 Plumelle(1984) 등의 기존 실험연구와 일치한다.

3.3 경사보강

마이크로파일을 경사지게 보강한 경우는 상대길이비가 0.8, 1.0, 1.2인 경우에 대하여 보강각도와 상대직경비를 다르게 하여 해석을 실시한 후 식 (2)와 같이 경사보강효율을 분석하였다.

3.3.1 수직하중의 경우

그림 7은 마이크로파일의 경사도에 대한 말뚝 캡 상단 중앙의 정규화된 수직변위를 나타내고 있다. 연직보강 결과와 동일하게 상대직경 비(D_m/D_c)에 대한 영향은 거의 나타나지 않았으나 모든 경우에서 보강효율은 일정하게 증가하다 보강각도가 30°를 넘게 되면 더 이상 증가하지 않고 수렴하고 있다. 또한 case 2와 3의 경우 각도가 30° 이상이면 보강효과가 오히려 감소함을 알 수 있다. 따라서 효율적인 측면에서 보강각도는 20°를 넘지 않는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

그림 8은 상대직경 비에 대한 정규화된 수직변위를 나타내고 있다. 그림을 보면 case 1과 2에서 보강각도가 동일한 경우 상대직경비가 증가함에도 보강효율의 변화는 1% 미만으로 거의 변화가 없으나, case 3의 경우 마이크로파일의 직경이 증가함에 따라 보강효율이 약간 증가하는 경향을 보인다. 따라서 마이크로파일의 길이가 긴 경우 직경에 따른 보강효과가 있다고 판단된다. 또한 case 1의 경우 경사도가 30°와 45°에서 거의 같은 보강효율을 보이거나 case 2와 3에서는 차이를 발생하였다.

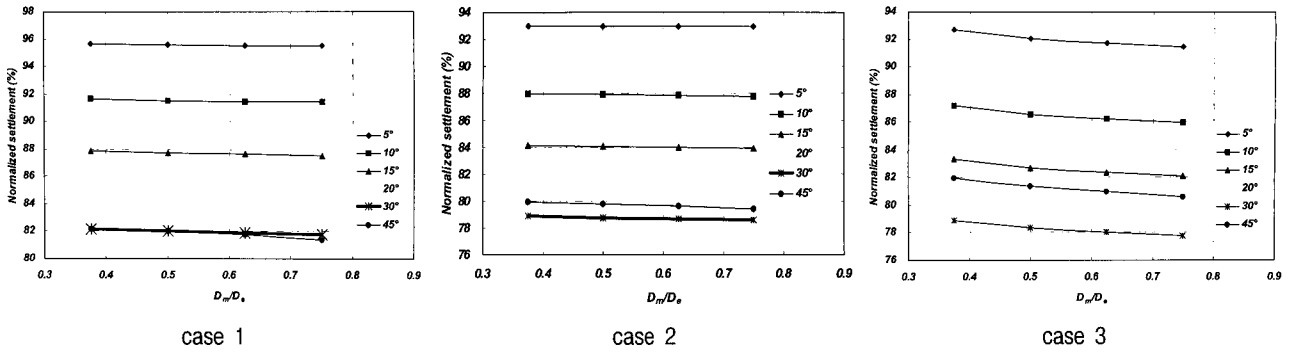


그림 8. 말뚝의 직경에 따른 정규화 된 수직변위

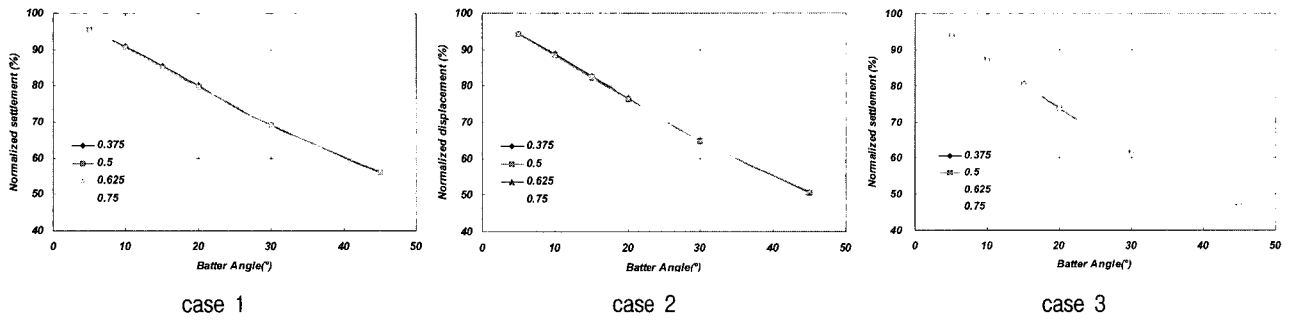


그림 9. 마이크로파일의 경사도에 따른 정규화 된 수평변위

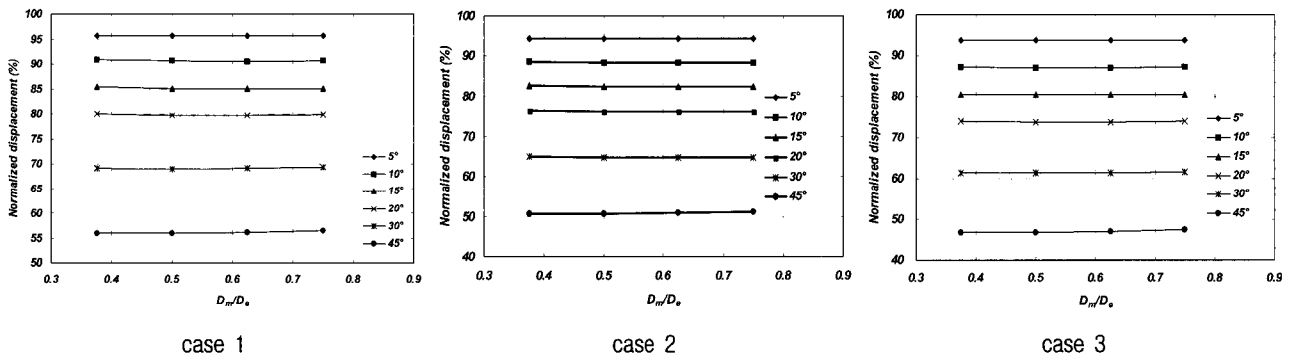


그림 10. 말뚝의 직경에 따른 정규화 된 수평변위

3.3.2 수평하중의 경우

그림 9는 마이크로파일의 경사도에 대한 정규화된 수평변위를 나타내고 있다. 모든 경우에 보강각도가 증가할수록 정규화된 수평변위는 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그러나 동일한 경사에서 말뚝의 상대직경 비가 증가하여도 보강효율에는 거의 영향을 미치지 않아 마이크로파일의 직경보다 마이크로파일의 경사도가 보강시 중요한 설계인자가 될 수 있다. 또한 연직보강 시 상대길이 비 0.8, 상대직경 비 0.75인 경우에 비하여 동일한 조건에서 20° 경사지게 시공한 경우가 20% 보강효율이 나아짐을 알 수 있는데 이는 마이크로파일이 대부분 경사지게 시공되는 이유를 뒷받침해 주는 결과라 할

수 있다.

그림 10은 말뚝의 상대직경 비에 대하여 정규화된 수평변위를 나타내고 있다. 모든 경우에 말뚝의 상대직경 비가 증가하여도 정규화 된 변위는 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 마이크로파일의 횡하중에 대한 보강시 마이크로파일의 보강 직경보다 보강 각도가 더 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

3.3.3 마이크로파일에 발생하는 모멘트

마이크로파일을 경사지게 시공할 경우 수직하중을 받는 경우에도 경사각도에 따라 모멘트가 발생하게 되므로 이러한 모멘트는 마이크로파일의 구조적 안정성

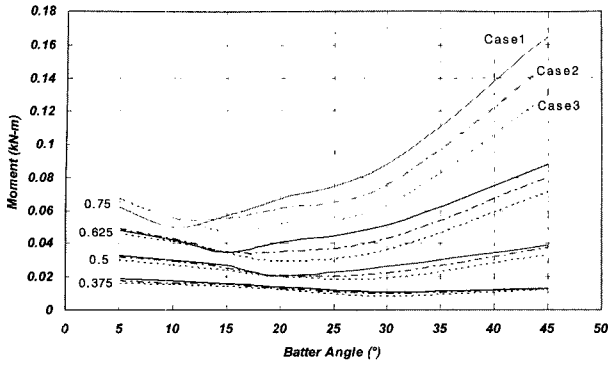


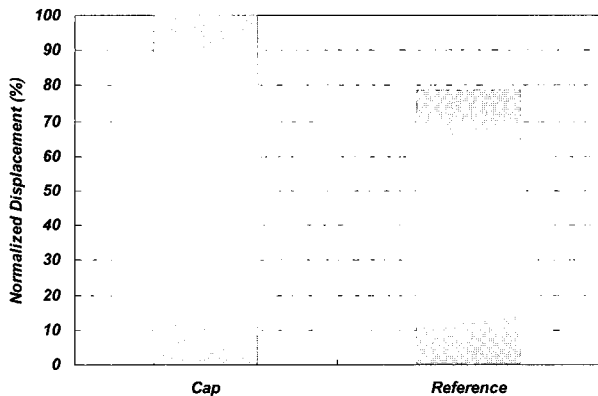
그림 11. 각 Case별 보강 각도에 따른 마이크로파일에 발생하는 모멘트

에 문제를 발생시킬 수 있으므로 설계 시 반드시 고려되어야 할 것이다.

그림 11은 수직하중이 작용하는 경우 각 경우별 보강 각도에 따라서 보강 마이크로파일에 발생하는 최대모멘트를 나타내고 있다. 그림에서 보면 말뚝의 상대직경비가 증가할수록 마이크로파일에 발생하는 모멘트가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 마이크로파일에 발생하는 모멘트의 경향은 경사각도에 따라 다르게 나타났으며 특히 상대직경 비가 0.625와 0.75의 경우 모멘트의 증가가 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

3.4 말뚝 캡 조건 및 지반의 상대강성도에 따른 결과

그림 12의 (a)와 (b)는 횡하중이 작용하는 경우 말뚝의 설치와 캡 조건 변화에 따른 정규화된 수평변위를 나타내고 있다. 그림 (a)에서 캡만 있는 경우에 비해 캡과 말뚝이 설치된 경우가 약 20%의 변위 감소효과를 보이는 것을 알 수 있으며, 그림 (b)에서 캡과 지반의 조건 변화에 따라 약 5%의 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) 캡과 말뚝설치에 따른 정규화된 수평변위

이를 통해 해석 조건상의 제한이 있기는 하나 캡과 말뚝이 각각 약 5%와 20%의 변위 감소효과를 보이는 것을 확인할 수 있으며, 또한 캡과 지반이 분리된 경우와 캡과 지반이 접한 경우의 결과를 통하여 실제 말뚝기초의 거동을 예측하기 위해서는 캡과 지반이 접한 조건으로 해석하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

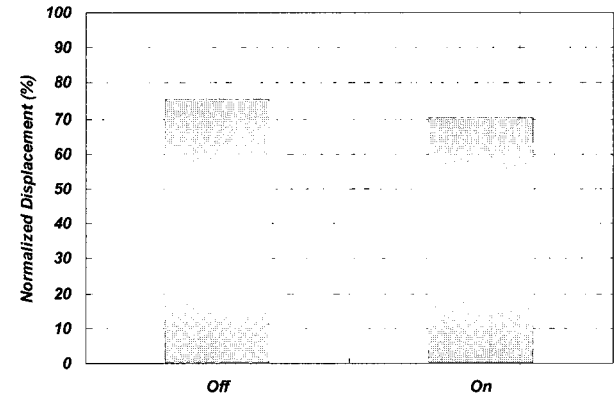
그림 13의 (a)와 (b)는 마이크로파일과 지반의 상대강성비에 따른 정규화된 변위이다. 각각의 길이 비에 대한 결과에서 마이크로파일의 강성이 가장 약한 경우의 캡 중앙 상단의 수직변위 및 수평변위가 가장 크게 나타났으며, 이 경우의 변위로 정규화 하였다.

그림 (a)는 수직하중이 작용하는 경우의 정규화된 수직변위이다. 그림에서 강성비가 10^3 보다 작은 경우 상대길이 비 0.6과 0.8에서 정규화된 변위의 차이는 작게 나타났으나 상대길이비가 증가할수록 정규화된 변위는 감소하였다. 또한 강성비가 10^4 보다 커지게 되면 상대강성비의 증가에 따른 변위 감소효과가 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

그림 (b)는 수평하중이 작용하는 경우의 정규화된 수평변위이다. 수직하중의 경우와는 달리 수평하중의 경우 마이크로파일의 길이가 가장 짧은(상대길이비 0.6) 경우를 제외하고 상대강성이 증가함에 따라 계속해서 정규화된 수평변위가 감소하는 경향이 나타났다.

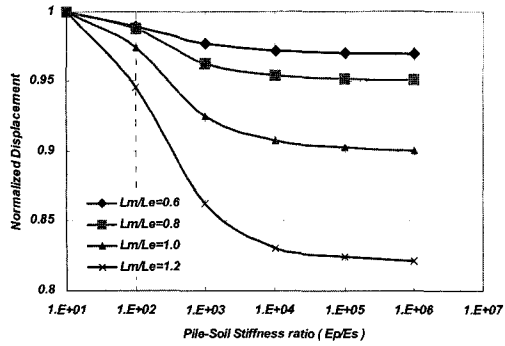
그림 14의 (a)와 (b)는 캡과 지반의 상대강성비에 따른 정규화된 변위이다. 각각의 길이 비에 대한 결과를 보면 캡의 강성이 가장 약한 조건에서 캡 중앙 상단의 수직변위 및 수평변위가 가장 컸으며, 이 경우의 변위로 수직 및 수평변위를 정규화 하였다.

그림 (a)는 수직하중이 작용하는 경우의 정규화된 수직변위이다. 강성비가 10^2 보다 작은 경우 상대길이 비

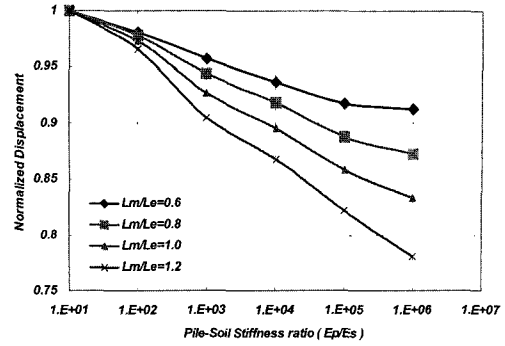


(b) 캡 조건에 따른 정규화된 수평변위

그림 12. 정규화된 수평변위

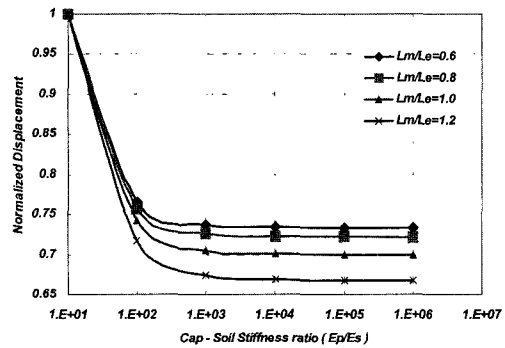


(a) 수직하중이 작용하는 경우

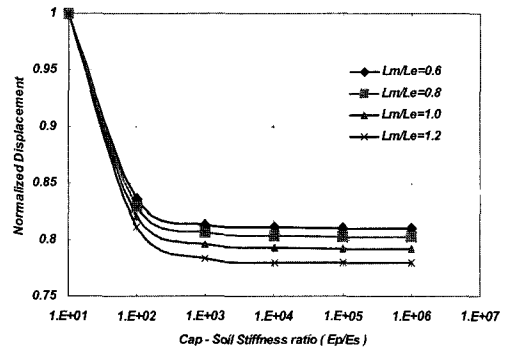


(b) 수평하중이 작용하는 경우

그림 13. 마이크로파일과 지반의 상대강성비에 따라 정규화된 변위



(a) 수직하중이 작용하는 경우



(b) 수평하중이 작용하는 경우

그림 14. 말뚝캡과 지반의 상대적 강성비에 따라 정규화된 변위

에 따른 차이는 거의 나타나지 않으며 강성비가 증가할수록 상대길이 비에 대한 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 강성비가 10^3 보다 커지게 되면 정규화된 수직변위가 일정한 값에 수렴하여 상대 강성비에 대한 영향은 거의 나타나지 않았다.

반면 그림 (b)는 수평하중이 작용하는 경우의 정규화된 수평변위이다. 강성비가 10^3 보다 작은 경우 상대길이 비에 따른 정규화 된 수평변위의 차이는 매우 작았으며, 강성비가 증가하여도 상대길이 비에 대한 정규화 된 수평변위의 차이는 수직하중이 작용하는 경우에 비해 작게 나타났다. 또한 강성비가 10^3 보다 커지게 되면 수직하중이 작용하는 경우와 동일하게 상대 강성비에 대한 영향은 거의 나타나지 않았다.

4. 결론

기존 교량기초에 보강된 마이크로파일의 정규화 거동을 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 기존의 말뚝기초에 마이크로파일을 연직으로 보강

하는 경우 상대직경 비는 침하량(수직변위)에 대한 영향이 작은 것으로 나타났다. 또한 침하량에 대한 보강효율은 연직하중이 지배적인 경우 마이크로파일 보강 시 기존말뚝 길이보다 같거나 약간 크게 보강하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

(2) 횡방향 거동의 경우 상대직경 및 길이 비가 동시에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 마이크로파일의 직경이 커지는 경우 마이크로파일이 동시에 부담하는 모멘트가 커지는 것을 알 수 있었다. 따라서 마이크로파일의 보강 직경은 침하량에 대한 최적의 상대길이 비($D_m/D_e=1.0\sim 1.2$)에서 마이크로파일의 허용응력을 고려하여 결정하는 것이 수직하중과 횡하중을 모두 고려한 보강이라 할 수 있다.

(3) 기존의 말뚝기초에 마이크로파일을 경사지게 보강하는 경우 연직으로 보강하는 경우에 비하여 연직하중 및 횡하중 모두 더 큰 보강효율을 나타냈으며, 특히 횡방향 보강효율의 경우 매우 크게 나타났다. 이는 횡방향 하중 및 내진설계에 기존 구조물에 대한 마이크로파일의 활용이 증가함을 반영하는 결과라 판단된다.

- (4) 경사시 보강 각도는 수직변위의 경우 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 에서 큰 효율을 나타냈으며, 수평변위의 경우 각도가 증가함에 따라 계속해서 보강효과가 나타나는 것을 확인하였다. 또한 마이크로파일의 경사각이 커질수록 마이크로파일에 발생하는 모멘트가 증가함을 알 수 있다. 따라서 적절한 보강각도는 기존말뚝의 보강효율과 보강되는 마이크로파일의 안정성 두 가지 측면을 고려하여 결정해야 한다.
- (5) 경사 보강의 경우 말뚝의 상대직경 비에 따른 영향은 말뚝의 상대길이 비 및 마이크로파일의 보강각도에 따른 영향에 비하여 매우 작은 것이 확인되어 보강 시 마이크로파일의 직경은 시공성을 고려하여 결정하는 것이 바람직할 것이다.
- (6) 본 연구 결과는 상부 구조물과 마이크로파일 기초, 기존 파일 그리고 지반간의 상호작용이 고려되지 않은 초기단계 연구로 마이크로파일로 보강된 경우 정규화 된 거동을 정량화 했으며 추후 상호작용을 고려한 연구를 통하여 마이크로파일로 보강된 기초 시스템에 대한 하중전달 및 분담에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 박성완, 노강구, 정동진 (2005), 손상된 교량기초에 대한 소구경 말뚝 보강효과 연구, 연구보고서, 한국건설기술연구원.
2. 이태형, 임종철 (2006), “조밀한 모래지반의 기초 인접에 설치된 마이크로파일 보강효과에 관한 실험적 연구”, 한국지반공학회는 논문집, Vol.22, No.5, pp.69-81.
3. ABAQUS (2004). ABAQUS User's Manuals, Version 6.5-1, Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Rhode Island, USA.
4. Bowles, J.E. (1992), *Engineering Properties of Soils and Their Measurement*. 4th ed., McGraw-Hill, New York, USA.
5. Ishida, M., Umebara, T. and Fukui, J. (2002), “Joint study on seismic retrofitting technologies for existing foundations”, Technical Paper, Public Works Research Institute, Japan.
6. Itani, M, Kawamura, T., Onodera, S., and Oshita, T. (2002), “Centrifuge model test on pile group effect of pile foundation reinforced by micropile”, Technical Paper, PWRI, Japan.
7. Plumelle, C. (1984), “Improvement of the bearing capacity of soil by inserts of group and reticulated micropiles”, *International Symposium on in-situ reinforcement of soils and rocks*, Paris, ENPC Presses, France, pp.83-89.
8. Stroud, M.A. (1989), “The standard penetration test - Its application and interpretation”, *In Proceedings of an Institution of Civil Engineers Conference on Penetration Testing*, Birmingham, U.K., Thomas Telford, England.

(접수일자 2006. 5. 24, 심사완료일 2007. 4. 25)