

경사진 마이크로파일로 보강된 교량기초의 거동에 관한 수치 해석적 연구 Numerical Evaluation of Behavior on Bridge Foundation Reinforced by Battered Micropiles

정동진¹⁾, Dong-Jin Jung, 박성완²⁾, Seong-Wan Park, 광기석³⁾, Ki-Seok Kwak, 이주형⁴⁾, Ju-Hyung Lee

¹⁾ 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

³⁾ 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Research fellow, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Construction Technology

⁴⁾ 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : The purpose of this study is to evaluate the performance of existing bridge foundation reinforced by battered micropiles. In order to do numerical method using a Finite element program was used to predict the micropile behavior and quantify their reinforcing effect to existing bridge foundations. In addition, effect of battered micropiles on existing foundations was compared with vertically reinforced bridge foundations.

Based on the study performed, it was found that the use of battered micropile is more efficiently reducing displacement of existing foundation than vertically installed micropiles under vertical and horizontal loadings respectively. The batter angle of micropile was also found effective about 15°~20° to reduce the vertical displacement. The horizontal reinforcement effect is continuously larger with an increase in batter angle. So, it is believed that the results presented could give an idea to enhance in-service performance of existing bridge foundations reinforced by micropiles.

Key words : Micropile, Bridge foundation, Reinforcement, Finite element analysis

1. 서 론

교량의 주요 구성부재의 보강주기는 20~25년 정도로 교량의 수명동안 최소한 1번 이상의 주요한 보강이 실시되어야 하며 특히 교량의 하부구조물은 상부구조의 하중을 지지하고 기초를 통하여 지반에 전달하는 매우 중요한 구조물로서 급속한 교량의 증가와 비례해 교량기초의 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 보강 기술이 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 적은 비용으로 교량 거더 아래의 협소한 공간에서도 보강 작업이 가능하며 소구경의 특성상 경사지게 시공이 가능한 장점이 있다. 그

러나 현재까지 마이크로파일로 보강된 교량 기초의 거동에 관한 연구를 살펴보면 현장의 관측 데이터를 바탕으로 한 연구는 전무하다고 할 수 있으며, 경사진 마이크로파일에 대한 모형실험 또한 제한적인 각도에서 이루어지고 있는 등 매우 미미한 실정인 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 경사진 마이크로파일로 보강된 교량기초에 대한 유한요소 수치해석을 실시하여 기존의 교량 기초에 대한 마이크로파일의 보강효과 및 경사효과를 확인하고 그 효과를 정량적으로 파악하고자 한다.

2. 수치해석

마이크로파일의 보강효과를 확인하기 위해서는 실제 현장의 마이크로파일 적용사례를 중심으로 그 보강효과를 살펴보는 것이 바람직하나, 아직 국내 현장의 마이크로파일 보강사례가 미미하고 또한 적용된 사례도 계측 데이터의 부재로 인하여 보강효과에 대한 해석 및 판단이 어려운 실정으로 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.5-1을 활용하여 기초적인 연구를 수행하였다. 수치해석 시 모델은 2차원 선형탄성모형을 적용하였으며, 지반의 변형계수는 일정하다고 가정하고 해석을 실시하였다. 보강이 없는 상태에서 기존말뚝과 말뚝 cap이 있는 교량기초를 reference case라 하고 보강에 따른 효과를 비교하였다.

마이크로파일의 특징 가운데 하나는 경사지게 시공이 가능하다는 것으로 여러 연구자들은 경사지게 시공한 경우 연직으로 시공한 경우에 비해 효과적이라는 연구결과를 제시하고 있다(Ishida 등 2003). 따라서 본 연구에서는 마이크로파일이 기존의 교량기초에 경사각을 달리해서 보강되는 경우의 보강효과를 기존의 교량기초에 연직방향으로 보강되는 경우와 비교하여 경사진 마이크로파일의 보강효과를 확인하였다.

2.1 Reference case의 선정

해석대상 교량기초는 일반국도에 건설되어 공용중인 교량 중 지반조사 자료가 가용한 7개의 말뚝기초 교량을 분석하여 기존 말뚝의 개수(3×3), 직경(400mm)과 지반조건(사질토)을 선정하였다. Reference case의 말뚝 cap 크기는 기존 말뚝의 폭을 고려하여 6m로 높이는 1.8m로 각각 정하였다. 기존말뚝의 간격은 말뚝직경(0.4m)의 3배인 1.2m이며, 말뚝의 근입 깊이는 15m로 말뚝의 두부 0.9m는 cap에 묻힌 상태로 모델링 하였다. 하중의 종류는 교각의 하중을 모사하기 위하여 수직, 수평하중 각각 집중하중으로 결정하였고, 하중의 작용점은 교각의 하중이 cap 상단 중앙부에 작용하는 것으로 가정하여 모델링 하였으며, 또한 하중의 크기는 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 수치해석에서는 cap과 지반의 상호작용에 의한 영향을 무시하기 위하여 cap과 지반이 분리되어 있는 off-ground 조건으로 해석을 실시하나, 본 연구에서는 실제 기초와 근접한 모델링을 위하여 cap과 지반이 붙어있는 on-ground 상태로 모형화 하였다. 2차원 선형탄성의 특성상 cap과 지반은 완전부착(perfect bonding)상태로 합성거동 한다고 가정하였다. 유한요소망의 크기는 좌·우의 경우 cap으로부터 말뚝길이의 1.5배(22.5m)이며, 높이는 말뚝의 선단부에서부터 말뚝길이의 1.5배(22.5m)이다. 유한요소해석 모델링에 있어 구조물과 요소망의 크기는 주로 중심부 말뚝 직경의 50배 정도(50D)에서 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타나 본 연구의 경우 말뚝 직경을 고려하여 22.5m(>50D)를 요소망의 크기로 정하였다. 또한 경계조건은 좌·우가 roller이며, 하단은 hinge로 설정하였다. 그림 1은 reference case의 개요도이다.

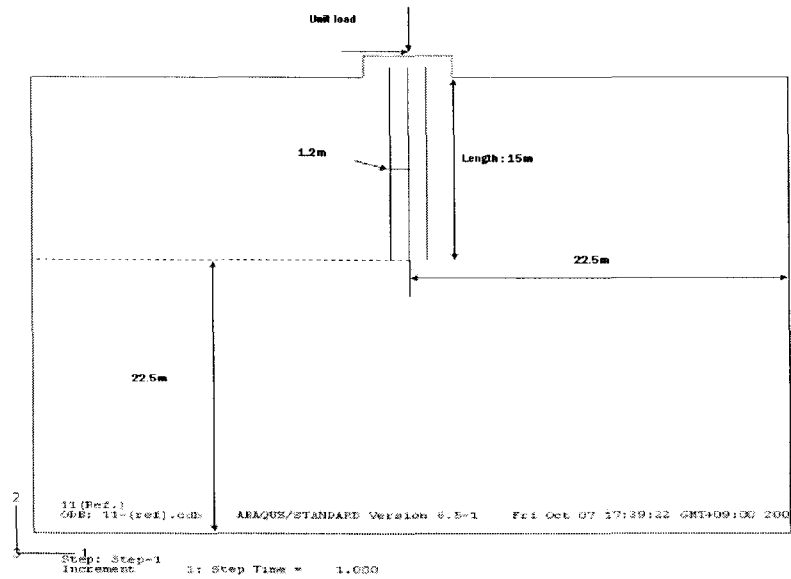


그림 1. Reference case 개요도

2.2 모델링 및 입력 물성치

해석대상 교량기초가 cap, 기존말뚝 그리고 보강 마이크로파일로 이루어진 복합 구조물이라는 특성 상 수치해석 시에는 구조물의 상호작용을 고려해야 한다. 그러나 그 복합거동이 매우 복잡하고 현재까지 정확하게 구명된 바가 없기 때문에 본 연구에서는 상호작용을 고려하지 않은 선형탄성(isotropic)의 조건을 사용하였다. 기초 지반의 탄성계수 및 Poisson's ratio의 값은 해석 지반의 표준관입시험 N치에 근거하여, Stroud(1989)와 Bowles(1997)가 제안한 값의 평균을 사용하였다. Cap은 콘크리트 물성치의 평균값을 사용하였으며, 말뚝기초는 교량 자료를 참고하여 강관파일(D=400mm, t=9mm)로 선정하고 강재의 물성치로 사용하였다. 마이크로파일은 강관, 보강철근, 그라우트로 구성되어 있으나 아직까지 국내에서 마이크로파일 복합체에 대한 구조실험이 수행된 바가 없어 본 연구에서는 환산단면적을 등가적으로 적용하였다. 표 1은 해석에 적용한 요소 및 물성이다.

표 1. 해석에 적용한 요소 및 물성

	적용 요소	탄성계수(kN)	전단탄성계수(kN)	Poisson's Ratio
지반(사질토)	Solid	13500	-	0.35
말뚝 cap	Solid	3×10^7	-	0.15
기존 말뚝	Beam	2×10^8	8×10^7	0.3
마이크로파일	Beam	8.5×10^7	3.27×10^7	0.3

2.3 해석 Case

말뚝의 상대길이 비를 1(마이크로파일의 길이 15m)로 선정하고, 말뚝의 상대직경 비를 0.375~0.75까지, 마이크로파일의 경사도를 5°~45°까지 각각 달리하여 해석을 실시하였다. 표 2는 해석 case의 조건이다. 연직으로 보강한 경우는 상대길이 비, 하중조건 및 말뚝의 상대직경 비는 동일하며 마이크로파일의 경사도가 0°인 case이다.

표 2. 수치해석 case의 해석조건

말뚝의 상대길이 비 (Lm/Le)	하중조건	말뚝의 상대직경 비 (Dm / De)	마이크로파일의 경사도(°)
1.0	수직하중	0.375	5
		0.5	10
		0.62	15
		0.75	20
		0.75	30
	수평하중	0.375	5
		0.5	10
		0.625	15
		0.75	20
		0.75	30

여기서, Lm=마이크로파일의 길이, Le=기존말뚝의 길이
Dm=마이크로파일의 직경, De=기존말뚝의 직경

3. 결과 및 분석

결과분석 시 마이크로파일의 경사도에 따른 보강효과를 확인하기 위하여 동일한 조건의 연직보강결과로 cap 상단 중앙의 변위로 정규화 시켰으며, 수직하중의 경우에는 수직변위를, 수평하중의 경우에는 수평변위를 각각 정규화 하였다.

3.1 경사각도

그림 3은 마이크로파일의 연직보강 효과와 경사보강 효과를 보여주고 있다. 수직하중이 작용시 reference case의 수직변위를 기준으로 보강각도가 0°(연직보강)에서부터 45°까지 변화할 때의 수직변위를 정규화 하였다. 보강각도가 0°인 경우 약 5%의 보강효율을 나타냈으나 경사각도가 20°인 경우 보강효율은 약 26%로 크게 증가함을 알 수 있었다. 이는 경사지게 마이크로파일을 시공한 경우에 보다 더 효과적이라는 Ishida(2002)와 Plumelle(1984) 등의 실험적 연구와 일치하는 결과임을 알 수 있다.

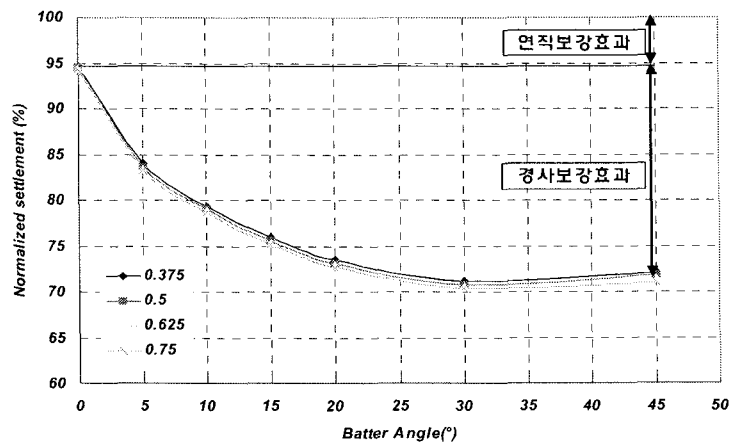


그림 2. 마이크로파일의 연직보강 효과와 경사보강효과

3.2 수직하중

그림 3은 마이크로파일의 경사도에 대한 cap 상단 중앙의 정규화 된 수직변위를 나타내고 있다. 말뚝의 상대직경 비(Dm/De)에 대한 영향은 거의 나타나지 않았으며, 보강효율은 일정하게 증가하다 보강각도가 20°를 넘게 되면 보강효율의 증가가 완만해지고 보강각도가 계속 증가하면 보강효율이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 그림 4는 상대직경 비에 따른 정규화 된 수직변위이다. 그림에서 보강각도가 동일한 경우 상대직경비가 증가함에 따라 보강효율의 변화는 1% 미만으로 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 수직하중에 대한 마이크로파일의 보강 직경이 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있다. 또한 그림에서 굵은 선으로 나타낸 보강각도가 30°인 경우가 45°에 비해 정규화 된 수직변위의 감소가 더 큰 것을 알 수 있다.

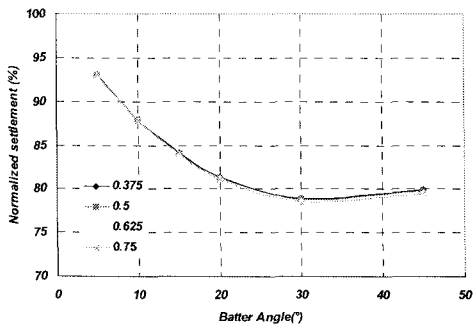


그림 3. 마이크로파일의 경사도에 따른 정규화 된 수직변위

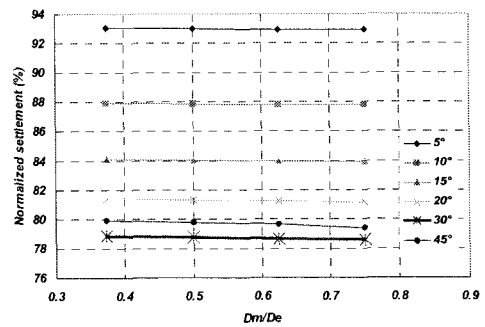


그림 4. 마이크로파일의 직경에 따른 정규화 된 수직변위

3.3 수평하중

그림 5는 마이크로파일의 경사도에 대한 정규화 된 수평변위를 나타내고 있다. 수직하중의 결과와 마찬가지로 동일한 보강각도에 대한 상대직경비의 영향은 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있으며, 보강각도가 증가할수록 정규화 된 수평변위는 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

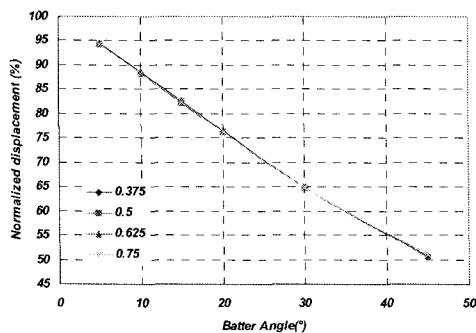


그림 5. 마이크로파일의 경사도에 따른 정규화 된 수평변위

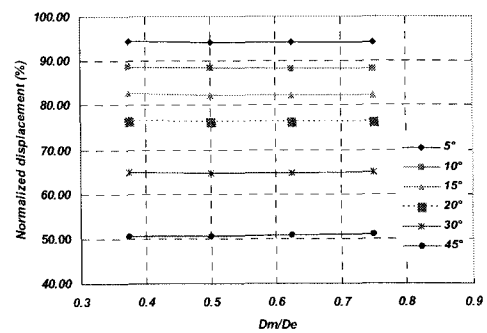


그림 6. 마이크로파일의 직경에 따른 정규화 된 수평변위

그림 6은 말뚝의 상대직경 비에 대한 정규화 된 수평변위이다. 상대직경비가 증가할수록 정규화 된 수평변위는 감소하는 경향을 보이기는 하지만 그 감소량은 5% 미만으로 매우 작음을 알 수 있다. 또한 경사각도가 가장 큰 45°의 경우 상대직경 비에 대한 보강효율이 가장 좋지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

교량기초에 보강된 경사진 마이크로파일의 거동을 수치해석을 통하여 분석한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 경사지게 보강된 마이크로파일은 연직으로 보강하는 경우에 비하여 연직하중 및 횡하중에 대한 저항 효율이 크다. 특히 횡방향 보강효율이 매우 양호하여 내진설계 등에 마이크로파일이 많이 사용될 수 있음을 알 수 있다.
- 2) 보강 각도는 수직변위의 경우 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 에서 가장 큰 효율을 나타냈으며, 수평변위의 경우 각도가 증가함에 따라 보강효과가 증가함을 확인하였다.
- 3) 말뚝의 상대직경 비에 따른 영향은 말뚝의 상대길이 비 및 마이크로파일의 보강각도에 따른 영향에 비하여 매우 작은 것으로 나타났으며, 마이크로파일 보강 시 직경은 시공성을 고려하여 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) 한국지반공학회(2002) 깊은 기초, 지반공학시리즈, No.4, 구미서관
- 2) 한국지반공학회(2003) 구조물기초설계기준해설, 구미서관
- 3) Ishida, M., Umebara, T. and Fukui, J.(2002) "Joint study on seismic retrofitting technologies for existing foundations." *Public Works Research Institute, Japan*
- 4) Public Works Research Institute(2002) "Design and execution manual for seismic retrofitting of existing pile foundations with high capacity micropiles"
- 5) Federal Highway Administration (2000) "Micropile design and construction guidelines", *Report No. FHWA-SA-97-070, US Department of Transportation*
- 6) Juran, I., Bruce, D. A., Dimillio, A. and Benslimane, A.(1999) "Micropiles: the state of practice. Part II: design of single micropiles and groups and networks of micropiles." *Ground Improvement, 3, No. 3, 89-110*
- 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, pp 83-89*
- 8) Srinivasa M. B. R., Sivakumar B. G. L. and Srinivas, A.(2002) "Analysis of bearing capacity improvement using micropiles." *Ground Improvement, 6, No. 3, 121-128*