

마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 최적보강형태에 관한 연구

A Study on Optimal Reinforcing Type of Precast Retaining Wall Reinforced by Micropiles

김 홍 택¹ Kim, Hong-Taek
박 준 용² Park, Jun-Yong
유 찬 호³ Yoo, Chan-Ho

Abstract

The PCRW (Precast Concrete Retaining Wall) has many advantages compared with cast in place concrete retaining wall : shorter construction period, excellency of quality and minimum interference with the adjacent structure and traffics. However, shallow foundation type of PCRW, which has comparatively better ground condition, has some disadvantages such as difficulty in transportation and higher cost due to the size of PCRW being expanded by resisting only with self-weight if there is no other supplementary reinforcement. The presented study, in order to complement such disadvantages of PCRW, have applied the micropile method. The micropile method has advantages like low-cost and high-efficiency and does not require huge space, because it can be executed with small size equipment. However, the mechanical behavior characteristics of the PCRW reinforced by micropile, which is installed to improve the reinforcement effect, is not yet clearly identified and there is no suggested standard as to the length, diameter, install angle and install position of micropiles. Hence, this method is yet being designed depend on engineer's experience. In this study, various laboratory model tests as to sliding and overturning were performed in order to identify and present the optimum type of reinforcement and reinforcement effect of the PCRW reinforced by micropiles. In addition, it also executed numerical analysis for the purpose of verifying the optimum type of reinforcement for micropiles based on the results of laboratory model tests. The optimum reinforcement type of micropiles was estimated by model test and numerical analysis. The length of micropiles is 0.4 times wall height and the diameter is 0.04 times wall length.

요 지

프리캐스트 콘크리트 옹벽은 현장타설 콘크리트 옹벽에 비해 공기 단축효과, 품질의 우수성, 교통 및 인접구조물과의 간섭 최소화 등 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 지반조건이 비교적 양호한 직접기초형태의 경우에는 별도의 보강조치를 고려하지 않으면 자중만으로 저항하게 됨에 따라 옹벽의 단면이 증가하게 되고 그에 따른 운반상의 어려움 및 공사비 증가 등의 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 마이크로파일공법의 적용성을 평가해 보았다. 마이크로파일공법은 소형장비로 시공이 가능하므로 작업공간의 제약이 없고, 저비용 및 고효율의 장점을 가지고 있으나 보강효과를 높이기 위해 설치한 마이크로파일의 역학적 거동특성이 명확히 규명되지

1 홍익대학교 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ., htaek@hongik.ac.kr, 교신저자)

2 GS건설(주) 토목사업부 T/K설계팀 과장 (Manager, GS Construction Co., Ltd.)

3 한국농촌공사 농어촌연구원 연구원 (Researcher, K.R.C.A.C)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

않은 상태이며, 마이크로파일의 길이, 직경, 설치각도 및 설치위치 등에 대한 설치기준이 없고 경험에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 옹벽에 보강된 마이크로파일의 최적보강형태 및 보강효과를 규명·제시하기 위하여 활동 및 전도거동에 대한 실내모형실험을 각각 시행하였다. 또한 실내모형실험 결과를 토대로 제시된 마이크로파일의 최적보강형태를 검증하기 위한 목적으로 유한요소해석 및 한계평형해석 등의 수치해석을 수행하여 마이크로파일의 최적 보강형태를 제시하였다. 실내모형실험과 수치해석으로 프리캐스트 콘크리트 옹벽에 보강되는 마이크로파일의 최적보강형태를 평가한 결과, 마이크로파일은 옹벽높이의 0.4배 저판길이의 0.04배 일 때가, 최적의 보강효율을 보이는 것으로 평가되었다.

Keywords : Laboratory model test, Micropiles, Precast concrete retaining wall

1. 서론

일반적인 옹벽은 토압에 저항하여 활동 및 전도파괴를 예방하는 벽체구조물로서 토지의 유용도를 높이기 위하여 토목, 건축 및 플랜트 공사 등 모든 건설공사에 필수적인 구조물로 사용되어지고 있다. 그러나 기존의 현장타설 콘크리트 옹벽은 현장에서 철근 및 거푸집 조립 후 콘크리트를 타설하여 양생을 요하는 일련의 공정을 통하게 되므로 토공작업 및 구조물 시공에 많은 공기가 소요된다. 또한 도심지 공사로 인해 교통 및 인접구조물과의 간섭 최소화 등의 사유로 인해 공기단축이 절실히 요구되어지고 있으며 또한 구조물의 품질확보를 통한 안전성 높은 구조물의 시공이 요구되어지고 있다. 따라서 현장타설 콘크리트 옹벽의 이러한 단점을 보완하기 위하여 품질관리가 용이하고 공기단축 효과를 가질 수 있는 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 적용사례가 높아지고 있다. 프리캐스트 콘크리트 옹벽은 현장타설 콘크리트 옹벽에 비해 공기 단축효과, 품질의 우수성 확보, 교통 및 인접구조물과의 간섭 최소화 등의 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 지반조건이 비교적 양호한 직접기초형태의 경우에는 별도의 보강조치를 고려하지 않으면 자중만으로 저항하게 됨에 따라 옹벽의 단면이 증가하게 되며 그에 따른 운반상의 어려움 및 공사비 증가 등이 단점으로 나타났다.

이러한 문제점을 보완하기 위해 소형장비로 시공이 가능하고 작업공간의 제약이 없으며 저비용, 고효율의 특징을 가진 마이크로파일공법을 적용하는 것이 매우 효과적일 것으로 판단된다. 마이크로파일과 같은 보강재를 프리캐스트 옹벽 저판에 추가 설치하여 마이크로파일의 횡방향 저항에 의해 옹벽의 활동에 대한 안정성을 확보할 뿐 아니라 동시에 마이크로파일의 인발저항

력에 의해 전도에 대한 안전성 증대를 가져올 수 있다. 하지만 보강효과 증대를 위해 설치한 마이크로파일은 김정환(1994), 김 등(2005), 박 등(2005) 및 이 등(2006)에 의해 활발한 연구가 진행되었으나, 옹벽과 같이 벽체구조물에 설치되는 마이크로파일은 길이, 직경, 설치각도 및 설치위치 등에 대한 설치기준이 없고 경험에 의존하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 옹벽에 보강된 마이크로파일의 길이, 직경, 설치각도 및 설치위치 등에 대한 최적보강형태와 보강효과를 규명·제시하였다. 이를 위하여 활동 및 전도에 대한 실내모형실험 및 수치해석을 각각 시행하였다.

2. 실내모형실험

2.1 개요

프리캐스트 콘크리트 옹벽의 저판에 마이크로파일과 같은 보강재를 설치할 경우, 마이크로파일의 횡방향 저항력에 의해서 옹벽의 활동에 대한 안정성이 증대될 뿐 아니라 동시에 마이크로파일의 인발시 주면 마찰저항력에 의해 전도에 대한 안전성 증대를 가져올 수 있다. 그러나 마이크로파일의 길이, 직경, 보강각도 및 보강위치 등의 설치기준이 없고 경험에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 최적보강형태와 보강효과를 분석하기 위하여 다양한 실내모형실험을 수행하였다. 본 실험에서 모형옹벽의 크기는 고정시키고 마이크로파일의 직경, 길이, 설치각도, 설치위치 및 수평간격 등을 변화시켜가며 각각의 경우에 대한 활동 및 전도에 대한 보강효과를 분석하였다.

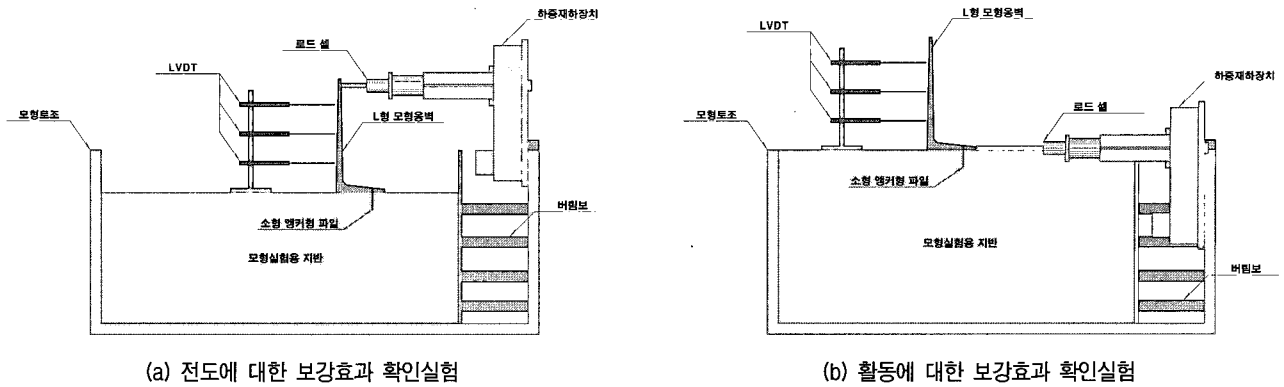


그림 1. 실내모형실험 개요도

표 1. 실내모형실험지반의 특성치

구 분	시료종류	Concrete Sand(SP)
강도정수	점착력(t/m^2)	0.8
	내부마찰각($^{\circ}$)	35
입 도	$D_{10}(mm)$	0.25
	$D_{30}(mm)$	0.45
	$D_{60}(mm)$	0.80
다짐특성	최적함수비(%)	11
	최대건조밀도(t/m^3)	1.84

옹벽의 모형실험은 일반적으로 옹벽 배면지반에 하중을 작용시켜 옹벽의 파괴를 유도하나, 본 연구에서는 마이크로파일의 전도 및 활동 각각에 대한 보강효과 확인을 위해 본 연구에서는 옹벽의 전도와 활동에 대하여 각각 실시한 전도에 대한 실험은 옹벽의 최상단에 하중이 작용하도록 하였으며, 활동에 대한 실험은 옹벽의 저판에 하중이 작용하도록 하였다(그림 1 참조).

2.2 실내모형실험 장비 및 제원

2.2.1 모형토조

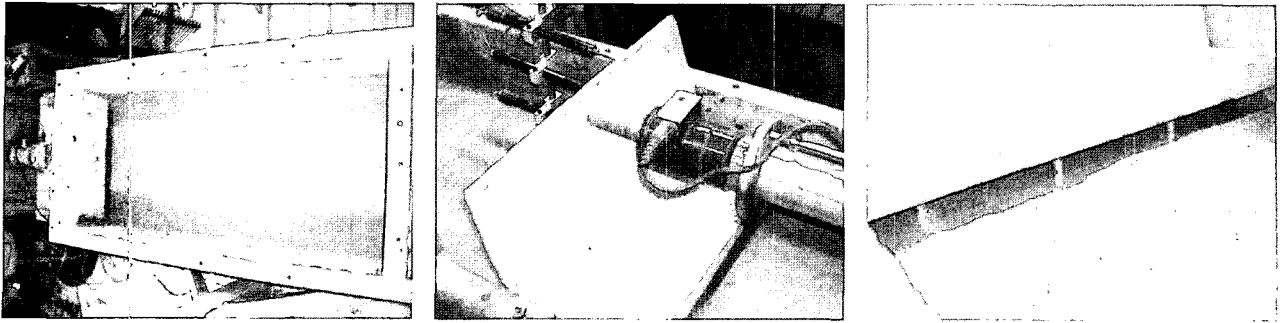
본 실험에서는 횡하중 및 인발하중을 받는 마이크로파일을 설치한 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 실내모형 실험을 위해서 600mm(W)×600mm(H)×1300mm(L)의 모형토조를 사용하였다. 본 실내모형실험에서는 토조 상부에 하중재하장치를 장착 후 모형 옹벽의 상단 및 저판에 하중을 직접 재하하여 옹벽의 전도 및 활동에 대한 각각의 보강효과를 확인하였다. 하중 재하시 모형 옹벽의 수평변위를 측정하기 위해 옹벽 전면에 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였다. 본 실내모형실험에서 사용된 모형토조와 실험장치의 개요도는 그림 1에 나타내었다.

2.2.2 모형지반

본 실험에서 사용한 지반재료는 Concrete Sand(ASTM C-33)로, 100번체(입경 0.15mm) 통과율이 2%정도이다. Concrete Sand는 통일분류법에 의해 SP로 분류되며, 모형지반으로 사용된 시료의 물리적, 역학적 특성 등을 파악하기 위하여 실내시험을 수행하였다. 실내모형실험지반의 물리적, 역학적 특성을 요약, 정리하면 표 1과 같다.

2.3 실내모형실험 방법

모형지반은 흙을 0.15m두께로, 전체토조의 높이를 4층으로 나누어 층다짐을 실시하였으며, 다짐도 95%를 기준으로 하여 각층에 필요한 중량만큼 일정 함수비의 시료를 할당하는 중량-체적 할당법(Alfaro 등, 1995)을 적용하였다. 소형 다짐 장비를 사용하여 할당된 흙이 각층에 채워질 때까지 다짐을 시행하여 모형실험시 최대한 동일한 지반조건이 되도록 하였다. 모형지반 조성 후 미리 제작한 모형옹벽과 마이크로파일을 설치하였다. 모형 옹벽의 모형토조의 크기를 고려하여 실제크기의 1/13에 해당하는 크기로 제작하였으며, 실험용 마이크로파일에는 그라우팅효과를 재현하기 위해 표면에 모래를 부착하여 제작하였다.



(a) 모형지반 다짐 (b) 계측기 설치 및 파괴시 전경 (c) 파괴 후 전경

그림 2. 실내모형실험 전경

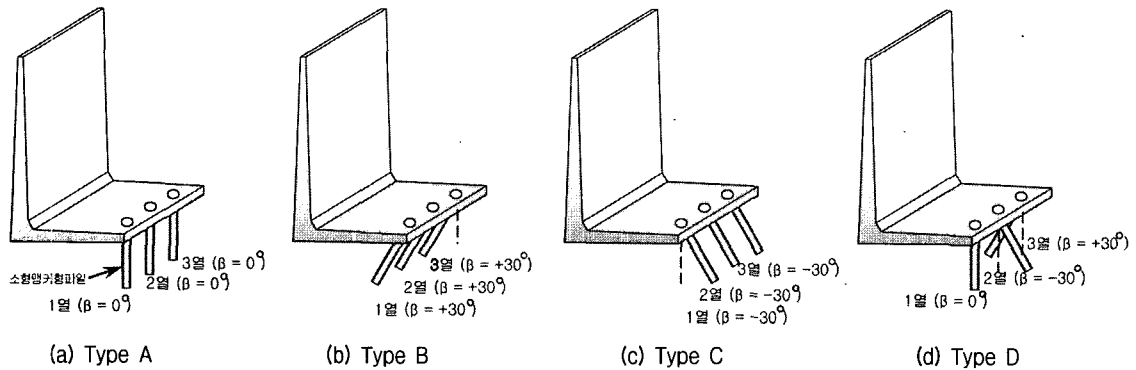


그림 3. 마이크로파일의 3차원적 배치형태(실내모형실험)

실내모형실험은 변형률제어 방식으로 수행하였으며, 전기식 하중재하장치를 이용하여 파괴시까지 재하하였다. 전도 및 활동에 대한 마이크로파일의 저항력을 명확히 확인하기 위하여 전도파괴시 용벽의 최상단에 하중이 작용하도록 하였으며 활동파괴시는 용벽의 저판에 하중이 작용하도록 하였다. 또한 용벽에 가해지는 하중을 측정하기 위해 재하장치와 용벽의 연결지점에 로드셀을 연결시켜 실제로 가해지는 하중을 직접적으로 측정하였다. 모형용벽에 하중을 가하는 동안 모형용벽 전면에 3개의 LVDT를 설치하여 하중이 가해지는 동안 모형용벽의 수평변위를 측정하였다. 전반적인 실내모형실험 절차는 그림 2에 나타내었다.

2.4 실내모형실험 종류

마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 용벽의 경우, 마이크로파일의 직경, 길이, 수평간격 및 설치위치 등에 따라서 보강효과나 거동특성이 서로 상이하게 나타나므로 본 연구에서는 보강재인 마이크로파일의 직경, 길이, 수평간격 및 설치위치 등을 변화시키며 각각의 설계변수에 대한 전도 및 활동에 대한 보강효과

확인을 위한 실내모형실험을 수행하였다. 또한 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 용벽에 적합한 3차원적 배치형태의 변화에 따른 보강효과나 거동특성을 파악하기 위하여 먼저 수행된 실내실험을 통하여 얻어진 최적의 마이크로파일의 직경, 길이 및 설치위치 등을 고정하여 설치각도를 변화시킨 총 4가지 배치형태(그림 3 참조)에 대하여 각각 보강효과를 확인하였다.

본 연구에서 수행된 구체적인 실내모형실험의 종류는 다음 표 2에 요약, 정리되어 있다.

3. 실내모형실험 결과 및 분석

마이크로파일의 설치위치, 직경, 길이 및 배치형태 등의 설계변수 변화에 따른 보강효과를 파악하기 위한 실내모형실험은 하중재하에 따른 변위를 구하는 방식으로 진행되었으며, 결과 분석은 보강형태에 따른 각각의 보강효율의 비교를 통하여 실시하였다. 여기서 보강효율은 무보강시 작용하는 최대하중과 보강시 작용하는 최대하중의 비로 정의하였으며, 최대하중의 추정은 P-S 곡선법으로 곡률이 최소인 점의 하중으로 결정하였다.

표 2. 실내모형실험 종류

구 분		실 험 종 류		비 고
전도 거동 실험	마이크로파일 위치	설치위치	0.25L, 0.40L, 0.60L	설치각도 : 수직을 기준으로 시계방향 H : 옹벽 높이 L : 저판 폭
		설치간격	0.20H, 0.40H, 0.60H, 0.80H, 1.60H	
	마이크로파일 크기	크기	0.03L, 0.06L, 0.07L	
		길이	0.30H, 0.50H, 0.90H	
		각도	0°, 30°, -30°	
활동 거동 실험	마이크로파일 위치	설치위치	0.25L, 0.40L, 0.60L	
		설치간격	0.20H, 0.40H, 0.60H, 0.80H, 1.60H	
	마이크로파일 크기	크기	0.03L, 0.06L, 0.07L	
		길이	0.30H, 0.50H, 0.90H	
		각도	0°, -30°, 30°	
배치 형태	마이크로파일 설치각도 (활동/전도)	Type A	0°, 0°, 0°	
		Type B	-30°, -30°, -30°	
		Type C	30°, 30°, 30°	
		Type D	0°, -30°, 30°	

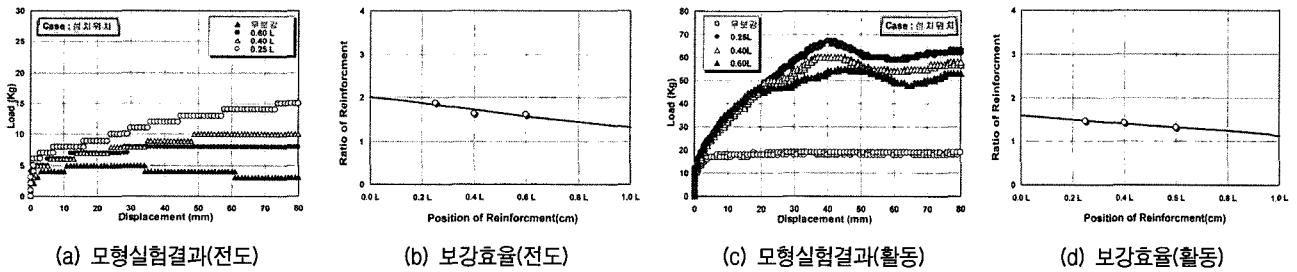


그림 4. 마이크로파일의 설치위치에 대한 모형실험결과

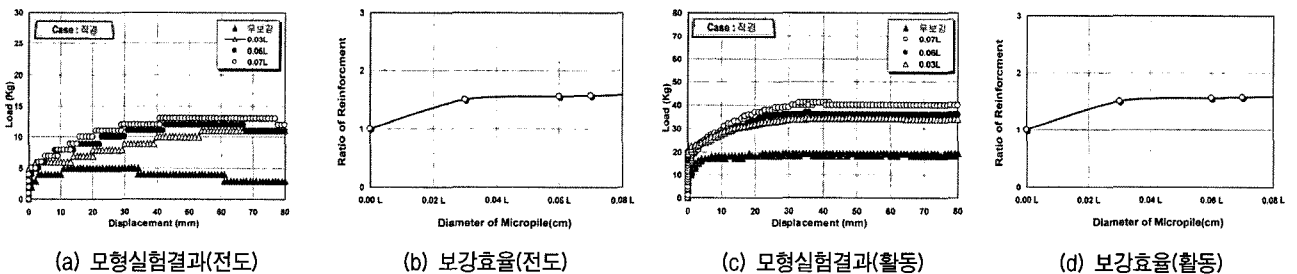


그림 5. 마이크로파일의 직경변화에 대한 모형실험결과

3.1 마이크로파일의 설치위치 변화에 따른 보강효과

본 실험에서는 마이크로파일의 설치위치 변화에 따른 보강효과를 평가하기 위하여 수행하였다. 마이크로파일의 직경, 길이 및 수평설치간격 등 보강효과에 영향을 줄 수 있는 설계변수들은 고정시킨 후, 마이크로파일의 설치위치를 뒷굽판으로부터 거리를 0.25L, 0.40L 및 0.60L 등으로 변화시켜가며 각각의 보강효율을 평가하였다. 시험 결과는 그림 4에 나타내었다. 마이크로파일의 설치위치에 따른 보강효율을 평가한 결과, 전도 및 활동에 대한 보강효율 모두 마이크로파일이 뒷굽판에 가까이 위치할

수록 보강효율이 높은 것으로 평가되었다.

3.2 마이크로파일의 직경변화에 따른 보강효과

본 실험에서는 마이크로파일의 직경변화에 따른 보강효과를 평가하기 위하여 수행하였다. 마이크로파일의 설치위치는 뒷굽판으로부터 0.25L, 수평설치간격은 0.6H 및 길이 0.9H 등으로 고정시킨 후, 마이크로파일 직경을 0.03L, 0.06L 및 0.07L 등으로 변화시켜가며 각각의 보강효율을 평가하였다. 실내모형시험 결과는 그림 5에 나타내었다. 마이크로파일의 직경변화에 따른 보강효율

평가 결과, 전도 및 활동에 대한 보강효율은 마이크로파일의 직경이 커질수록 증가하는 것으로 나타났으며 마이크로파일의 직경이 0.04L 이상에서 보강효율이 수렴하는 것으로 나타났다.

3.3 마이크로파일의 길이변화에 따른 보강효과

본 실험에서는 마이크로파일의 설치 길이변화에 따른 보강효과를 평가하기 위하여 수행하였다. 마이크로파일의 설치위치는 뒷굽판으로부터 0.25L, 수평설치간격은 0.6H 및 직경 0.03L 등으로 고정시킨 후, 마이크로파일 길이를 0.3H, 0.5H 및 0.9H 등으로 변화시켜가며 각각의 보강효율을 평가하였다. 시험 결과는 그림 6에 나타내었다. 마이크로파일의 길이변화에 따른 보강효율을 평가한 결과, 전도 및 활동에 대한 보강효율은 마이크로파일의 길이가 증가할수록 향상되는 것으로 나타났으며 마이크로파일의 길이가 약 0.4H 정도에서 보강효율이 수렴하는 것으로 나타났다.

3.4 마이크로파일의 배치형태에 따른 보강효과

본 실험에서는 마이크로파일의 3차원적 배치형태(그림 2)에 따른 보강효과를 평가하였다. 보강효율에 영향을 줄 수 있는 모든 설계변수들을 고정시킨 후, 마이크로파일을 Type A, Type B, Type C 및 Type D 등으로 변화시켜가며 각각의 보강효율을 평가하였다. 시험 결과가 그림 7에 제시되어 있다. 배치형태에 따른 보강효율을 평가한 결과, 전도 및 활동에 대한 보강효율은 각각 Type C 및 Type B가 가장 높은 것으로 평가되었지만 Type C는 활동, Type B는 전도에 대한 보강효율이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

3.5 실내모형실험 결과분석

마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 최적보강형태를 제시하기 위하여 다양한 실내모형실험을 수행하였으며, 마이크로파일의 설치조건인 설치위치, 설치간격, 직경, 길이 및 배치형태의 변화에 따른 각각의 보강효율을 표 3에 종합적으로 요약, 정리하였다. 실

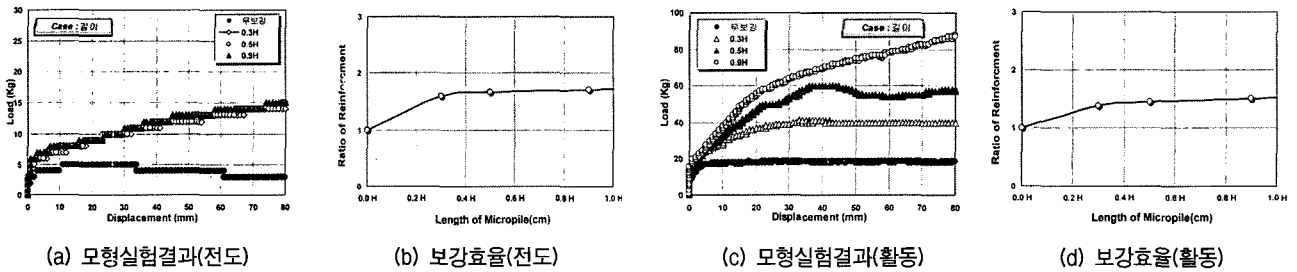


그림 6. 마이크로파일의 길이변화에 대한 모형실험결과

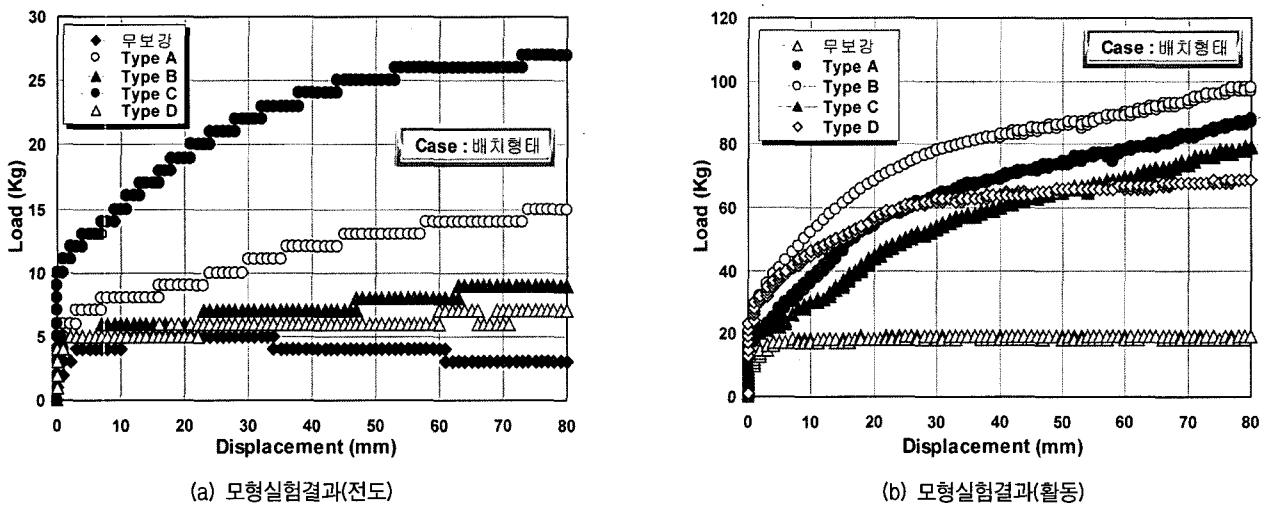


그림 7. 마이크로파일의 길이변화에 대한 모형실험결과

표 3. 실내모형실험 종류별 보강효율

구 분			보강효율		비 고
			전도	활동	
마이크로파일 위치	설치위치	0.25L	1.88	1.46	$\text{보강효율} = \frac{\text{최대하중보강}}{\text{최대하중무보강}}$
		0.40L	1.63	1.42	
		0.60L	1.60	1.31	
	설치간격	0.2H	1.50	1.77	
		0.4H	1.80	1.62	
		0.6H	2.00	1.58	
		0.8H	2.13	1.50	
마이크로파일 크기	직경	0.03L	1.50	1.54	
		0.06L	1.55	1.62	
		0.07L	1.57	1.67	
	길이	0.3H	1.60	1.38	
		0.5H	1.64	1.44	
		0.9H	1.70	1.50	
	배치형태	Type A	1.88	1.69	
		Type B	1.25	1.85	
		Type C	2.50	1.38	
		Type D	1.25	1.77	

표 4. 실내모형실험 결과에 의한 마이크로파일의 최적보강형태

구 분	직경	설치위치	길이	배치형태
최적보강형태 (실내모형실험)	0.04L	1.0×마이크로파일의 직경	0.4H	Type A

(여기서, H : 옹벽의 높이, L : 옹벽 저판의 폭)

내모형실험결과에 의한 마이크로파일의 설치위치는 뒷굽판 끝에 가까이 위치할수록 보강효율이 높은 것으로 나타났으나 말뚝 최소설치기준(도로교표준시방서, 1996)을 고려할 때 마이크로파일 직경의 약 1.0배가 적당한 것으로 생각된다.

마이크로파일의 직경 및 길이는 커질수록 보강효과가 증가하는 것으로 나타났으나 각각 0.04L 및 0.4H 정도에서 보강효율의 증가가 큰 폭으로 작아지는 것으로 나타나므로 적절한 직경 및 길이로 판단된다. 또한, 마이크로파일의 배치형태에 대한 분석결과, 설치각도가 경사진 경우인 Type C 및 Type B에서 각각 활동 및 전도시 최대보강효율을 나타냈으나, 반대의 경우에는 보강효율이 상대적으로 작게 나타났다. 그러므로 활동 및 전도시 모두 상대적으로 높은 보강효율을 나타낸 마이크로파일이 수직으로 설치된 Type A가 가장 적절할 것으로 판단된다. 또한 Hadjian 등(1992), Bollmann(1993) 및 Coduto(1994) 등은 횡하중을 지지하기 위해 경사말뚝 보다는 연직말뚝만으로 구성된 기초 시스템이 보다 시공

성이 뛰어나며, 경제적이고 동적하중에 저항하기에 효과적이라고 제시한 바 있다. 이상의 실내모형실험 결과를 토대로 마이크로파일의 최적보강형태를 표 4에 제시하였다.

4. 수치해석

4.1 개요

본 연구에서는 실내모형실험 결과를 토대로 제시된 마이크로파일의 최적보강형태를 검증, 보완하기 위한 목적으로 수치해석을 수행하였다. 본 수치해석에서는 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 옹벽에 적합한 3차원적 배치형태의 변화에 따른 보강효과 및 거동특성을 파악하기 위하여 설치각도를 변화시킨 Type A, Type B, Type C 및 Type D 등의 4가지 배치형태(그림 3 참조)에 대하여 수행하였다. 본 수치해석에서는 유한요소해석과 한계평형해석을 수행하였으며, 유한요소해석에서는 마

이크로파일의 설치각도에 따른 하중-변위 관계를 통해 보강효율을 검토하였으며, 한계평형해석법에서는 동일 조건에서의 최소안전율을 통해 각각의 배치형태에 대하여 보강효율을 평가하였다.

4.2 유한요소해석

유한요소해석에서는 실내모형실험을 통해 제시된 마이크로파일이 적용된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 최적보강형태의 적용성 및 적절성을 검증하기 위하여 시행하였다. 실제 옹벽의 거동을 모사하기 위해 배면지반에 하중이 작용하는 것으로 모델링하여야 하나, 이러한 경우에는 마이크로파일의 보강효율을 전도 및 활동으로 각각 나누어 분석할 수 없는 한계가 있어, 옹벽 시공 완료 후 작용하중을 각각 옹벽의 최상단 및 저판에 작용하는 것으로 모델링하여 전도 및 활동시의 보강효율을 각각 분석하였다. 수치해석에서 지반요소는 일반적으로 가장 많이 사용되는 Mohr-Coulomb Model을 사용하여 모사하였으며, 프리캐스트 콘크리트 옹벽은 Elastic Model을 사용하였다. 기초지반, 뒤채움재 및 옹벽은 8절점 고체요소(Solid Element)를 사용하였으며, 마이크로파일은 프레임 요소(Frame Element)로 사용하였다. 또한 실제 옹벽의 거동을 최대한 모사하기 위하여 프리캐스트 콘크리트 옹벽과 뒤채움재 사이 그리고 옹벽저판과 기초지

반 사이에는 인터페이스 요소(Interface Element)로 처리하였다. 본 수치해석에 적용된 L형 프리캐스트 콘크리트 옹벽은 높이 대 저판폭의 비율이 1:0.5이며 해석에 적용된 지반 특성값은 표 5에 요약, 정리되어 있으며, 해석 격자요소망은 그림 8에 나타내었다. 수치해석에서 옹벽과 지반의 경계조건은 그림 9와 같이 좌우 경계면은 롤러를 두어 x방향의 변위를 구속하였으며, 하단면 역시 롤러를 두어 y방향의 변위를 구속하였다. 또한 하부경계와 좌우경계면이 접하는 곳은 힌지를 두어 x, y방향 변위를 모두 구속하였으며, 3차원 경계조건인 z방향의 경계조건은 모델링 최측면만을 z방향으로 구속하였다. 수치해석에서는 옹벽과 마이크로파일이 시공완료된 시점 이후에 하중을 단계별로 재하하였다.

4.3 한계평형해석

프리캐스트 콘크리트 옹벽에 설치되는 마이크로파일은 옹벽자체의 전도 및 활동 안정성뿐만 아니라 전체구조물의 안정성에도 영향을 주게 된다. 이러한 경우에는 마이크로파일의 배치형태에 따라 영향을 받기 때문에 본 분석에서는 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 전체구조물 시스템의 안정해석을 수행하여 마이크로파일의 설치각도 변화에 따른 보강효율을 비교, 검토하였다. 본 한계평형해석은 프랑스 TERRASOL사

표 5. 수치해석에 입력된 각 요소의 특성값

구 분	단위중량 (tf/m ³)	점착력 (tf/m ²)	내부마찰각 (degree)	탄성계수 (tf/m ²)	포아송 비	구성모델
기초지반	1.84	0.80	35	3,000	0.35	Mohr-Coulomb
뒤채움지반	1.80	0.00	30	2,000	0.35	
옹 벽	2.30	-	-	2,000,000	0.25	Elastic
뒤채움지반 인터페이스	1.80	0.00	20	1,333	0.35	Interface
기초지반 인터페이스	1.80	0.53	23.3	2,000	0.35	

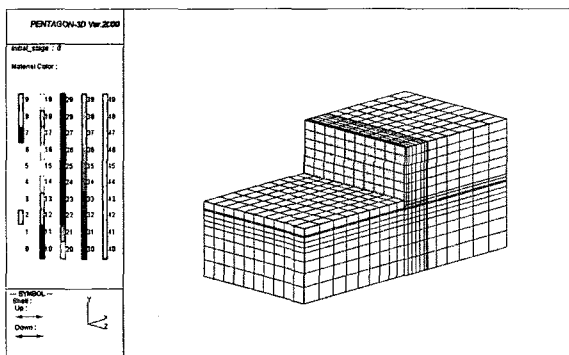


그림 8. 수치해석 격자요소망

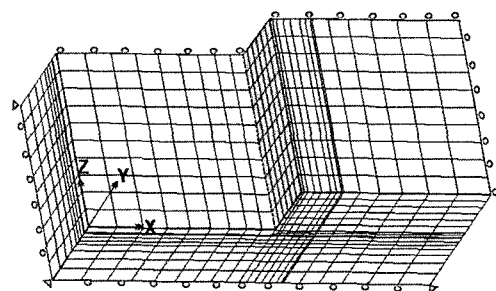


그림 9. 수치해석 경계조건 개요

에서 개발한 한계평형해석 프로그램인 TALREN 97을 이용하여 수행하였다. 본 한계평형해석에서는 Bishop의 절편법을 이용하여 전체구조 시스템의 활동에 대한 안전율을 평가하여 최적의 보강형태를 확인하였다. 마이크로파일의 설치조건인 Type A, Type B 및 Type C 등에 대한 각각의 안정성 평가를 수행하였으며(그림 3 참조), 실내모형실험 결과와 유한요소해석 결과에서 가장 보강효율이 낮게 평가된 Type D는 본 분석에서 제외하였다.

4.4 수치해석 결과분석

4.4.1 유한요소해석 결과분석

본 분석에서는 실규모의 해석단면에 대하여 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 전도 및 활동에 대한 마이크로파일의 보강효율을 평가하였다. 마이크로파일의 배치형태에 따른 유한요소해석 결과는 그림 10에 나타내었다. 본 유한요소해석 결과를 분석한 바, 실내모형실험과 동일하게 옹벽의 전도시에는 배치형태 Type C가 보강효율이 약간 높은 것으로 평가되었으나, 옹벽의 활동시에는 Type B가 보강효율이 약간 높은 것으로 평가되었다. 그러나 각각의 Type간에는 보강효율의 차이가 작은 것으로 나타났다.

4.4.2 한계평형해석 결과분석

한계평형해석에서는 마이크로파일의 길이 및 직경 등을 변화시켜 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 각각의 보강효율을 평가하였으며, 실내모형실험과 유한요소해석을 통해 제시된 마이크로파일의 최적보강길이 및 최적보강직경에 대하여 옹벽의 크

기변화에 따른 영향여부를 확인하였다. 3가지 배치형태 (Type A, Type B 및 Type C)에 대하여 마이크로파일의 길이를 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m 및 3.0m 등으로 변화시켜, 마이크로파일의 길이변화에 따른 보강효율에 대한 분석을 수행하였으며 해석결과는 그림 11에 나타내었다. 아울러 마이크로파일의 직경을 0.05m, 0.10m, 0.15m, 0.20m, 0.25m 및 0.30m 등으로 변화시켜, 마이크로파일의 직경변화에 따른 보강효율의 영향에 대한 분석을 수행, 그 결과는 그림 12에 나타내었다.

그림 11 및 그림 12의 내용을 분석한 결과, 마이크로파일의 길이는 약 0.4H인 1.80m정도에서 최적의 보강효과를 보이는 것으로 나타났으며, 마이크로파일의 직경은 약 0.04L인 0.10m정도에서 최적의 보강효과를 보이는 것으로 나타나 실내모형실험에서 제시한 값과 동일하게 평가되었다.

또한 본 연구에서는 실내모형실험과 유한요소해석에서 제한적인 옹벽의 높이에 대하여 평가하여 한계평형해석을 통해 옹벽높이변화에 따른 마이크로파일의 보강형태 변화에 대하여 분석하였다. 분석방법은 한계평형해석으로 마이크로파일의 길이를 0.5m, 1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m 및 3.0m 등으로 각각 변화시켜 각 옹벽높이에 대한 최적보강길이를 비교하였다. 마찬가지로 마이크로파일의 직경도 0.05m, 0.10m, 0.15m, 0.20m, 0.25m 및 0.30m 등으로 각각 변화시켜 각 옹벽높이에 대한 최적보강길이를 비교하였다. 옹벽의 크기변화에 따른 마이크로파일의 최적보강형태는 표 6에 요약, 정리되어 있다.

실내모형실험을 통해 제시된 마이크로파일의 최적보강길이 및 최적보강직경에 대하여 옹벽의 크기변화에 따른 영향여부를 파악하기 위하여 분석한 결과 옹벽의 크

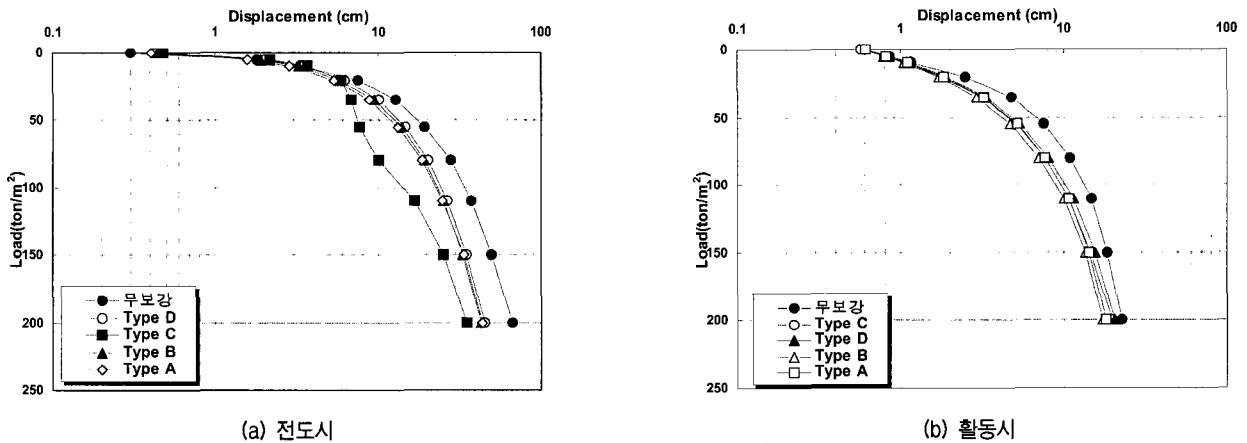


그림 10. 마이크로파일의 배치형태에 대한 유한요소해석 결과(전도)

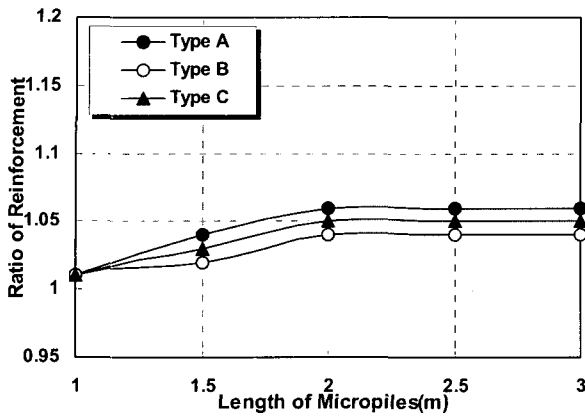


그림 11. 마이크로파일의 길이변화에 보강효율

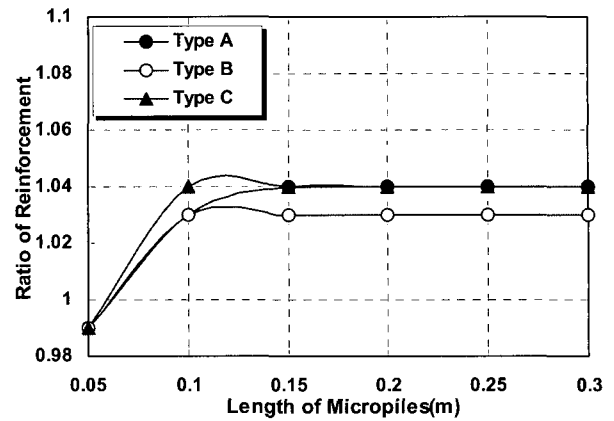


그림 12. 마이크로파일의 길이변화에 보강효율

표 6. 옹벽의 크기변화에 따른 마이크로파일의 최적보강형태

옹벽의 높이(m)	마이크로파일의 길이	최적보강길이	마이크로파일의 직경	최적보강직경
H = 2.5m	1.0m	0.40H	0.06m	0.05L
H = 3.5m	1.4m	0.40H	0.07m	0.04L
H = 4.5m	1.8m	0.40H	0.10m	0.04L
H = 5.5m	2.3m	0.42H	0.12m	0.04L

표 7. 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 옹벽의 최종보강형태

구 분	직경	설치위치	길이	배치형태
최적보강형태	0.04L	1.0×마이크로파일의 직경	0.4H	Type A

(여기서, H : 옹벽의 높이, L : 옹벽 저판의 폭)

기가 변화하더라도 최적보강길이(0.4H) 및 최적보강직경(0.04L)은 영향이 거의 없는 것으로 각각 평가되었다.

4.5 마이크로파일의 최적보강형태

본 연구에서는 실내모형실험과 수치해석을 통해 마이크로파일의 최적보강형태를 결정하였다. 실내모형실험에서 제시된 최적보강형태에 대한 보다 세부적인 검증은 위하여 유한요소해석 및 한계평형해석을 수행한 결과 실내모형실험과 거의 유사한 결과를 나타냈다. 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 전체 시스템의 활동에 대한 안전율을 평가하기 위해 실시한 한계평형해석 결과에서도 마이크로파일의 길이가 약 0.4H에서 보강효율의 증가가 큰 폭으로 줄어들어 0.4H가 적절한 보강길이로 평가되었으며, 옹벽의 크기변화에 따른 마이크로파일의 최적보강길이 및 최적보강직경에 대한 영향여부를 파악한 결과 옹벽의 크기변화에 영향이 없는 것으로 평가되었다. 본 연구를 통해서 결정된 마이크로파일로 보강된 프리캐스트 옹벽의 최종보강형태는 다음 표 7에 정리하였다.

5. 결론

본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 옹벽에 보강된 마이크로파일의 길이, 직경, 설치각도 및 설치위치 등의 설치기준에 대한 최적보강형태와 보강효과를 규명·제시하였다. 프리캐스트 콘크리트 옹벽에 보강된 마이크로파일의 길이, 직경, 설치각도 및 설치위치 등의 설치기준에 대한 최적보강형태와 보강효과를 규명하기 위하여 실내모형실험을 수행하였으며 보다 효과적으로 보강효과를 비교·분석하기 위하여 활동 및 전도거동의 경우로 각각 구분하여 수행하였다. 또한 실내모형실험을 통해 제시된 최적보강형태와 보강효과를 검증하고 보완하기 위해 수치해석을 수행하였으며 유한요소해석과 한계평형해석을 각각 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실내모형실험결과 마이크로파일의 설치위치는 전도 및 활동거동시 모두 뒷굽판 끝에 가까이 위치할수록 보강효율이 높은 경향을 나타냈으나 말뚝 최소설치기준(도로교표준시방서, 1996)을 고려할 때 설치위

치는 마이크로파일 직경의 약 1.0배가 적절한 것으로 평가되었다.

- (2) 실내모형실험 및 한계평형해석결과 마이크로파일의 길이는 길어질수록 전도 및 활동 거동에 대한 보강효율이 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 마이크로파일의 직경이 0.4H정도 이상에서 보강효율이 수렴하는 것으로 나타나므로 마이크로파일의 최적보강 길이는 시공성, 경제성 및 보강효과 등을 고려할 때 약 0.4H정도가 적절한 것으로 평가되었다.
- (3) 실내모형실험결과 마이크로파일의 직경은 커질수록 전도 및 활동거동에 대한 보강효율은 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 마이크로파일의 직경이 0.04L 정도 이상에서 보강효율이 수렴하는 것으로 나타나므로 마이크로파일의 최적보강직경으로 적절한 것으로 평가되었다(여기서 일반적인 L형 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 제작은 높이 및 저판폭의 비가 1:0.5로 저판폭, L의 증가시 옹벽높이도 증가함을 의미).
- (4) 실내모형실험 및 수치해석결과 마이크로파일의 배치형태에 대한 분석은 설치각도가 경사진 경우인 Type C 및 Type B에서 각각 전도 및 활동거동시 최대 보강효율을 나타냈으나, 마이크로파일이 수직으로 설치된 경우인 Type A가 활동 및 전도거동시 모두 상대적으로 높은 보강효율을 나타내었다. 그러므로 시공성이 뛰어나고, 경제적이며 동적하중에 저항하기에 효과적인 Type A가 가장 적절한 배치형태로 평가되었다.
- (5) 본 연구에서는 실내모형실험을 통해 제시된 마이크로파일의 최적보강길이 및 최적보강직경에 대하여 옹벽의 크기변화에 따른 영향여부를 파악하기 위하여 분석한 결과 옹벽의 크기가 변화하더라도 최적

보강길이(0.4H) 및 최적보강직경(0.04L)은 영향이 거의 없는 것으로 각각 평가되었다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 홍익대학교 학술연구조성비에 의하여 연구된 성과임을 밝히며, 이에 대하여 진심으로 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김정환 (1994), *그물식 뿌리말뚝의 극한지지력에 관한 실험연구*, 석사학위 논문, 서울대학교.
2. 김홍택, 박준용, 유용식, 유찬호 (2005), “마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 거동특성에 관한 실험적 연구”, *대한토목학회 2005 학술발표대회 논문집*, 지반 2, pp.1-4.
3. 박준용, 박성원, 유찬호, 김홍택 (2005), “마이크로파일로 보강된 프리캐스트 콘크리트 옹벽의 보강효과에 관한 실험적 연구”, *한국방재학회 2005 학술 발표대회 논문집*, pp.507-512.
4. 이태형, 임종철 (2006), “조밀한 모래지반의 기초 인접에 설치된 마이크로파일 보강효과에 관한 실험적 연구”, *한국지반공학학회 논문집*, Vol.22, No.5, pp.69-81.
5. Alfaro, M. C., Hayashi, S., Miura, N. and Watanabe, K. (1995), “Pull-out Interaction Mechanism of Geogrid Strip Reinforcement” *Geosynthetics International*, Vol.2 No.4, pp.679-698.
6. Brown, D. A. and Bollman, H. T. (1993), *Pile-Supported Bridge Foundations Designed for Impact Loading*, Appended document to Proceedings of Design of Highway Bridges for Extreme Events, Crystal City, VA, pp.265-281.
7. Coduto, Donald P. (2001), *Foundation Design : Principles and practices*. 2nd ed. Prentice-Hall. Inc. Upper Saddle River, New Jersey.
8. Hadjian, A. H., Fallgen, R. B. and Tufenkijian, M. R. (1992). *Dynamic soil-pile-structure interaction, the state of the practice*. Piles Under Dynamic Loads, Prakash, S. (ed.). ASCE, pp.1-26.

(접수일자 2006. 6. 2, 심사완료일 2006. 11. 2)