J. Korean Soc. Hazard Mitig.
Vol. 22, No. 2 (Apr. 2022), pp.153~162
https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2022.22.2.153

ISSN 1738-2424(Print)
ISSN 2287-6723(Online)
www.kosham.or.kr

시설물방재

강관말뚝과 콘크리트말뚝을 혼용하는 흙막이 벽체의 토압분담효과에 관한 연구

Earth Pressure Reduction Effect of Earth Retaining Walls Composed of Concrete Piles and Steel Piles

이강근* · 박연준**
Lee, Ganggeun*, and Park, Yeonjun**

Abstract

Recently, earth retaining walls composed of ready-made piles have been studied for improving the structural safety of the wall and restricting adjacent ground deformation. However, these walls have been used in a limited manner as temporary retaining walls, without considering the earth pressure reduction effect, which interacts with the building structure. Hence, in this study, the behavior characteristics of earth retaining walls with ready-made concrete and steel piles are analyzed. The earth pressure reduction effect is estimated by quantitatively considering the interaction between the pile retaining wall and building structure. A laboratory model test is carried out to determine the earth pressure reduction effect based on the steel pile installation interval; numerical analysis is conducted for effect analysis based on the retaining wall height and ground condition. The earth pressure at the building structure decreases 15%-49.7% due to the interaction between the pile retaining wall and building structure.

Key words : Concrete Pile, Earth Pressure, Earth Retaining Wall, Steel Pile

요 지

최근 흙막이 구조물의 안전성 향상 및 인접지반의 변형억제를 위해 기성말뚝을 흙막이 구조물 벽체로 활용하는 연구가 증가하고 있지만 가설 흙막이 구조물로서만 제한적으로 활용하고 있을 뿐 건축구조물 벽체와의 상호작용에 의한 토압분담효과는 고려되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 콘크리트말뚝 및 강관말뚝과 같은 기성말뚝을 이용하는 흙막이 구조물의 거동특성을 확인하고 건축물벽체의 상호작용을 고려해 토압분담효과를 정량적으로 분석하고자 하였다. 실내모형실험을 통해 강관말뚝의 설치간격에 따른 토압분담효과를 확인하였으며, 수치해석을 통해 흙막이 벽체의 높이와 지반조건에 따른 토압분담효과를 분석하였다. 기성말뚝을 사용하는 흙막이 벽체와 건축물 벽체의 상호작용으로 인해 건축물 벽체에 작용하는 토압은 15%~49.7%의 감소효과가 확인되었다.

핵심용어 : 강관말뚝, 콘크리트말뚝, 토압, 흙막이벽체

1. 서 론

최근 도심지에서의 지반굴착공사는 지상공간의 포화 그리고 인접구조물의 존재 등으로 인해 제한적인 공간에서 이루어지는 경우가 빈번해 지고 있어 이전보다 더욱 안전하게 지반굴착이 요구됨에 따라서 가설 흙막이 구조물 자체의 안전성을 보다 강화할 수 있는 기술이 요구되고 있다.

이러한 요구를 충족시키기 위해 도심지에서의 지하굴착에 이용되는 연직벽체는 강성이 큰 콘크리트 구조물을 연직벽체로 활용하는 흙막이 구조물의 사용이 크게 증가하고

*정회원, 수원대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: june1026@hanmail.net)
Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Suwon University
**교신저자, 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-31-203-6717, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: yjpark@suwon.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Suwon University

있으며, 최근에는 기성 콘크리트 말뚝을 이용하여 흙막이 구조물을 조성하는 등 개량된 흙막이 구조물이 개발 적용되고 있는 실정이지만 가설벽체로서만 사용되고 있는 등 사용성이 제한적이고 건축물벽체와 함께 영구벽체로서 적용되는 조건에서는 토압분담효과가 규명되지 않은 실정이다.

콘크리트말뚝이나 강관말뚝과 같은 기성말뚝을 가설 흙막이 구조물로 활용하는 많은 선행연구가 시행되었으며, You et al. (2005)은 억지말뚝을 이용하여 지보재가 설치되지 않는 자립식 흙막이 벽체의 현장 적용성을 제안하였다. Han et al. (2005), Han et al. (2006)은 기성 PHC말뚝을 흙막이 벽체로 활용하는 경우 흙막이 벽체의 거동특성을 보고하고 적용사례를 분석하여 가설벽체로서의 적용성을 보고하였다.

기성콘크리트 말뚝을 이용하여 흙막이 벽체를 조성하는 경우에 발생할 수 있는 문제인 말뚝의 수직도 유지 및 연속성 문제로 인해 자립식 흙막이 벽체로 제한되는 문제를 개선하기 위해 Choi et al. (2017)은 PHC 말뚝의 형상 자체를 개량하여 시공성과 지지체의 설치가 용이하도록 개선한 개량형 PHC-W파일의 거동을 수치해석 기법으로 분석하였다. Kim et al. (2017)은 개량형 PHC-W파일을 이용한 흙막이 벽체의 거동과 말뚝의 지지력 특성을 보고하였다.

Yoon (2019)은 기성 PHC말뚝을 이용하는 흙막이 벽체를 합벽으로 영구벽체로 활용 가능여부를 보고하는 등 최근까지 기성 콘크리트 말뚝을 이용한 PHC 말뚝을 이용하는 흙막이 벽체에 관한 연구가 수행되고 있다.

이와 함께 기존 흙막이 벽체가 가지는 기술적 문제를 개선하는 연구 또한 지속적으로 수행되고 있으며, Jang et al. (2012)은 기존 C.I.P공법이 가지는 단점인 차수성능 그리고 연속성을 개선하기 위하여 원형케이싱의 내부 양쪽에 삼각형 형태의 조인트를 설치하는 개량형 C.I.P 공법을 개발하여 현장 적용성을 확인하였고, Do et al. (2016)은 계면활성제계 그라우트를 활용하여 C.I.P벽체를 개선할 수 있는 개량형 공법의 적용성을 보고하였다.

Lee et al. (2021)은 C.I.P공법에 사용되는 H-형강을 개선할 수 있도록 오각형의 판과 두꺼운 플랜지 판으로 구성하고 콘크리트로 채워진 복합 단면을 갖는 신형상의 합성파일을 제안하였다.

최근에는 흙막이 벽체의 휨강성을 증대시키기 위해 An et al. (2021)은 흙막이 벽체로 활용할 수 있는 강관철근망을 제안하였고, Lee et al. (2019)은 섬유보강재를 흙막이 벽체로서 활용하기 위해 섬유보강재의 공학적 특성을 평가한 바 있다.

Lee and Park (2021a)은 PHC 말뚝을 흙막이 벽체로서 활용하기 위해 말뚝의 자립도를 유지할 수 있는 기술을 보고하였고, Lee and Park (2021b)은 PHC 말뚝과 강관말뚝을 혼용하는 흙막이 벽체를 건축물의 영구벽체로 활용하는 제작 및 시공기술에 대해 보고하여 강관말뚝과 콘크리트말뚝을 혼용하는 기술을 제안하였다.

기성말뚝 또는 개량형 연직벽체로 강성이 큰 흙막이 구조물을 조성하는 많은 선행 연구가 진행되었음에도 불구하고 모두 가설 구조물로서만 활용하고 영구벽체로서 활용하고자 하는 시도는 매우 낮으며 특히 건축벽체와 융합하여 영구벽체로 사용하는 합벽구조물 설계기법이나 효과에 대한 연구는 전무한 실정이다.

이에 본 연구에서는 콘크리트말뚝 또는 강관말뚝과 같은 기성말뚝을 이용하여 흙막이 구조물을 활용하는 경우에 대해 건축벽체와 융합할 수 있는 합벽 구조물로서의 거동을 규명함으로써 기성말뚝 흙막이 벽체의 영구벽체 활용성을 확인하고자 한다. 이를 위해 기성말뚝 흙막이 구조물과 건축벽체가 동시에 설치된 조건에서 기성말뚝 흙막이 구조물의 토압분담효과로 인해 건축벽체에 작용하는 토압의 저감효과를 정량적으로 규명하고자 하였다.

본 연구에서는 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 사용하는 흙막이 벽체의 토압지지효과를 확인하기 위하여 실내모형실험을 통해 흙막이 벽체의 최대지지하중을 산정하였으며, 강관말뚝의 설치조건에 따른 지지하중의 변화를 통해 말뚝 흙막이 벽체의 토압지지 효과를 확인하였다. 또한 실내모형실험을 통해서 지반조건 그리고 말뚝 흙막이 벽체의 높이변화에 따른 거동을 분석함으로써 기성 말뚝 흙막이 벽체의 토압분담효과를 정량적으로 분석하였다.

2. 콘크리트말뚝과 강관말뚝 혼용 흙막이 벽체

2.1 기성 말뚝 흙막이 벽체 구성

콘크리트말뚝과 강관말뚝을 혼용하는 흙막이 벽체는 기존 콘크리트 말뚝만을 이용해 흙막이 벽체를 구성하는 선행연구의 기술적 한계점을 개선하기 위한 방법으로 기존 기술은 띠장과 같은 흙막이 구조물의 부재를 연직벽체와 연결하기 위해서는 말뚝의 단면손실이 불가피한 기술적 한계를 가지고 있다. 이러한 기술적 한계를 개선하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 본 연구에서는 강관말뚝을 엄지말뚝으로 활용하고 콘크리트말뚝으로 토류벽을 형성하는 것으로 구성하고 있다.

기성 말뚝 흙막이 벽체는 흙막이 공사가 완료된 이후 건축물 벽체 외부로 존치되어 건축물 벽체와는 직접적으로

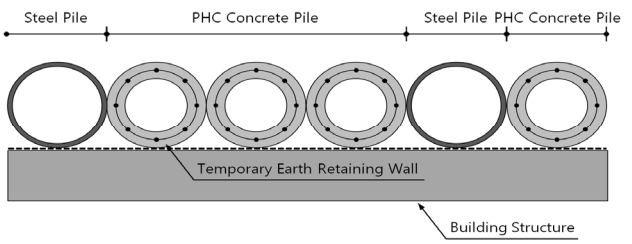


Fig. 1. Composition of Earth Retaining Wall Mixed Concrete Pile and Steel Pile

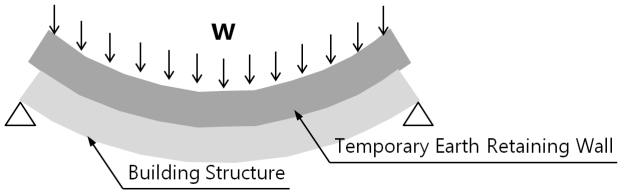


Fig. 2. Schematic Diagram of Earth Pressure on Double Wall

연결되지 않아 2개의 벽체가 토압에 지지하는 2중 벽체를 형성하고, 외부의 말뚝 흙막이벽체와 내부의 건축물 벽체가 각각 토압을 지지하는 것으로 구성된다.

2.2 말뚝 흙막이 및 건축물 벽체의 토압지지 메커니즘

말뚝 흙막이 벽체 그리고건축물 벽체의 2중 벽체가 구성되는 경우의 토압지지 메커니즘은 Fig. 2에 도시되어 있다. 이러한 경우 건축물 벽체에 작용하는 토압은 두 개의 벽체가 합성벽체로서 토압을 지지하는 것이 아닌 2중 벽체로서 토압을 지지한다고 보고하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 두 개 이상의 부재를 사용하여 벽체를 조성하는 경우 합성 또는 비합성 효과에 의한 구조적 평형이 발생하고 건축물과 흙막이 벽체가 서로 연결되지 않는 경우 흙막이 벽체가 1차로 토압에 저항하고 후면의 건축물 벽체가 2차로 토압에 저항하게 된다.

또한 Gässler (1988)가 쏘일네일로 보강된 벽체에서 제안한 'Two-Body Translation Mechanism (TBTM)'에 따르면, 토압에 의한 활동면에 보강재가 설치되어 있는 경우 보강재의 토압분담효과에 의해 벽체에 작용하는 토압은 저감되는 것을 고려하면 기성말뚝 흙막이 벽체는 억지말뚝으로서 활동에 저항하게 되고 이러한 특징을 고려하면 본 연구에서 제안한 기성말뚝 흙막이 벽체는 영구벽체에 작용하는 토압을 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 흙막이 벽체의 1차토압 분담효과로 인해 건축물 영구벽체의 작용토압은 감소하게 된다.

3. 실내모형실험

3.1 개요

본 연구에서는 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 혼용하여 가시설 흙막이 구조물의 연직벽체로 활용하는 구조체의 토압지지효과를 확인하고자 실내모형실험을 수행하였으며, 실내모형실험은 토압 및 수압을 주로 지지하게 되는 주 부재인 강관말뚝의 간격을 영향인자로 설정하여 배면지반에 연직하중이 증가하는 동안 흙막이 구조물의 변위를 중점적으로 분석함으로써 하중-변위 관계를 확인하고 지반의 항복하중을 최대 지지하중으로 설정하였다.

실내모형실험은 흙막이 구조물의 조건에 따른 거동특성

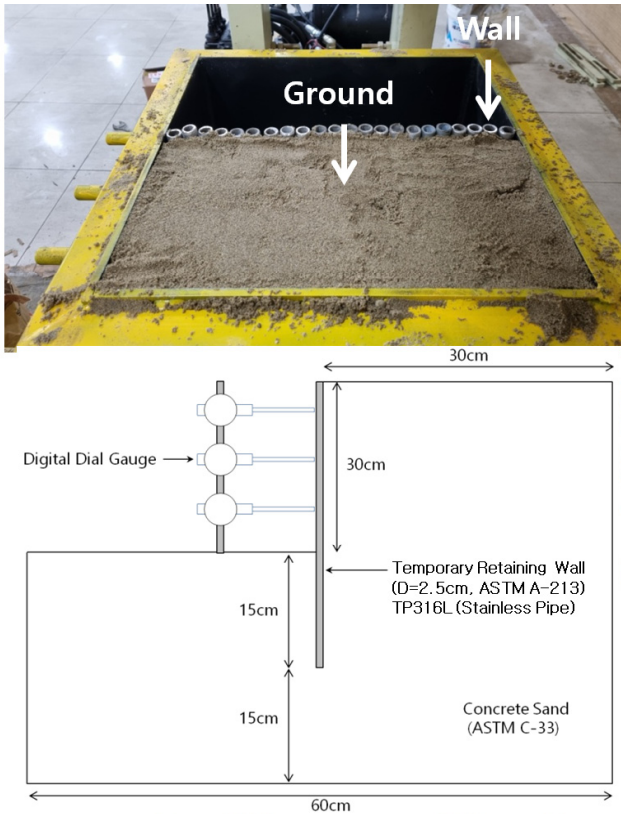


Fig. 3. Schematic Diagram of Model Test

차이를 확인하기 위하여 흙막이 구조물을 제외하고 모형지반의 조성상태 및 모형지반의 크기 등은 고정하여 흙막이 구조물 이외에 영향은 발생하기 않도록 설정하였다.

3.2 실험방법

실내모형실험은 모형지반을 조성하고 배면지반에 재하판을 설치하여 2 mm/min의 재하속도로 변위제어 실험을 수행하였으며, 하중계를 이용하여 재하되는 하중을 측정하였다. 모형벽체 전면에는 디지털 다이얼 게이지를 설치하여 하중이 작용하는 동안의 수평변위를 측정하였다. 실내모형실험이 수행된 모형지반의 전경 및 모식도는 Fig. 3에 나타내었다.

모형지반은 American Society for Testing and Materials (ASTM) C33의 콘크리트 샌드를 이용하여 조성하였으며 이는 200번체 통과량이 3% 이하인 통일분류상 SP에 해당된다. 모형실험이 진행되는 동안 동일한 조건의 지반을 조성하기 위해 지반 조성에 필요한 흙의 중량과 물의 중량을 이용해 일정한 함수비를 유도하는 중량-체적 할당법(Alfaro et al., 1995)을 적용하여 함수비 11%, 최대건조밀도 18.4 kN/m^{3}의 모형지반을 조성하였다.

모형지반은 60 cm (w) × 60 cm (b) × 60 cm (h) 크기의 모형토조 내부에 조성하고, 모형벽체는 높이 30 cm, 근입 15 cm의 자립식 벽체로 조성하여 크기 상사율 1/20로 설정하

였다. 모형벽체는 말뚝의 강성을 모사하기 위하여 ASTM A213 스테인레스 강관을 이용하여 강도상사율 1/500로 모형

(a) Model Ground

(b) Loading Plate

(c) Loading

(d) Failure

Fig. 4. Process of Model Test

지반을 조성하였으며(Fig. 4), 실제 콘크리트말뚝과 강관말뚝의 탄성계수 차이를 모사하기 위해서 모형말뚝 재료의 탄성계수 차이를 고려해 모형말뚝으로 적용하였다.

3.3 실험조건

실내모형실험은 콘크리트말뚝과 강관말뚝의 설치조건에 따른 토압지지효과를 확인하기 위해 강관말뚝의 설치간격을 변수로 하여 총 6회를 수행하였으며, 실내모형실험이 수행된 조건은 Table 1에 요약, 정리하여 나타내었다.

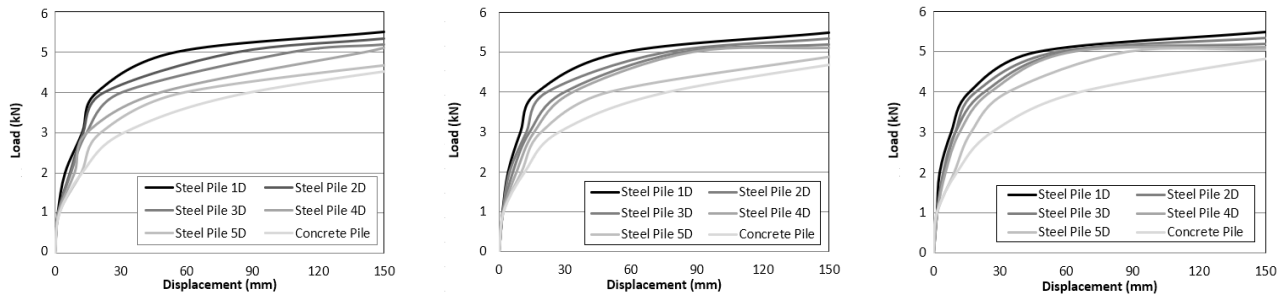
3.4 분석결과

실내모형실험을 통해 모형벽체의 토압지지효과를 확인하기 위해 연직하중-수평변위를 중점적으로 분석하였으며, 모형실험을 통해 확인된 하중-수평변위 곡선은 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에 나타낸 하중-수평변위 곡선을 이용하여 초기 탄성구간과 소성구간을 이용해 항복하중을 산출하였으며 항복하중을 흙막이 벽체의 최대지지 하중으로 산정하였다. 산출된 결과는 Table 2에 요약, 정리하여 나타내었다.

Table 1. Case of Laboratory Model Test

Classification	Wall Height (cm)	Wall Type	Composition	Steel Pile Interval	Remark
Case 1	30	Self-Supporting (Embedment Depth : 15 cm)	Concrete Pile	None	Pile Diameter : 2.5 cm Pile Length : 45 cm
Case 2	30	Self-Supporting (Embedment Depth : 15 cm)	Concrete Pile + Steel Pile	5D	
Case 3	30	Self-Supporting (Embedment Depth : 15 cm)	Concrete Pile + Steel Pile	4D	
Case 4	30	Self-Supporting (Embedment Depth : 15 cm)	Concrete Pile + Steel Pile	3D	
Case 5	30	Self-Supporting (Embedment Depth : 15 cm)	Concrete Pile + Steel Pile	2D	
Case 6	30	Self-Supporting (Embedment Depth : 15 cm)	Steel Pile	1D	

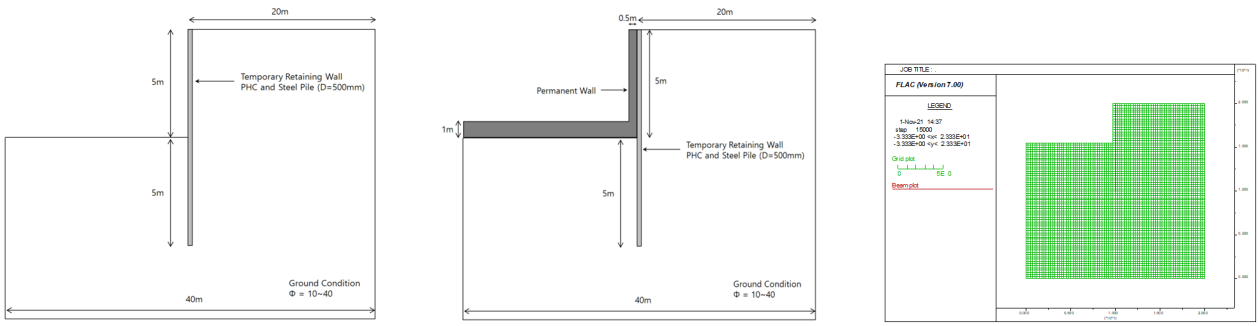


(a) Measure Point : 2H/3 (b) Measure Point : H/2 (c) Measure Point : H/3

Fig. 5. Load-Displacement Curve

Table 2. Maximum Retaining Load

Classification	Steel Pile Interval	Max. Load (2H/3) (kN)	Max. Load (H/2) (kN)	Max. Load (H/3) (kN)
Case 1	None	2.90	3.30	3.05
Case 2	5D	3.10	3.50	3.50
Case 3	4D	3.30	3.60	3.40
Case 4	3D	3.70	3.75	3.60
Case 5	2D	3.80	3.90	3.70
Case 6	1D	3.90	3.95	3.90



(a) Model for temporary wall (b) Model for permanent wall (c) Numerical analysis model

Fig. 6. Schematic Model for Numerical Analysis

모형실험 결과분석은 모형지반의 높이 2H/3, H/2 및 H/3지점에 설치된 수평변위 측정결과를 모두 활용하여 분석하였다. Fig. 5 및 Table 2의 결과를 살펴보면 강관말뚝의 설치간격이 줄어들수록 흙막이 벽체의 지지하중이 증가하는 것으로 확인되었다. 수평변위 측정 위치 모두에서 동일하게 흙막이 벽체의 강성이 증가하는 만큼 최대 지지하중 역시 증가하는 것으로 확인되었다. 동일한 비교를 위하여 Table 2를 이용해 콘크리트말뚝만 설치된 조건을 기준으로 정규화하여 분석하면 토압지지효과는 8.6%~27.9% 증가하는 것으로 분석되었다.

4. 수치해석

4.1 개요

수치해석은 모형실험으로 확인된 말뚝 흙막이 벽체의 토압지지 효과를 검증하고 실제 규모의 흙막이 벽체에서도 토압지지 효과를 발휘하는지 검증하기 위한 목적으로 수행하였다. 본 연구에서는 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 혼용하는 흙막이 벽체를 대표단면으로 구성하고, 콘크리트말뚝 및 강관말뚝의 설치조건에 따른 토압분담효과의 변화를 확인하였다.

흙막이 벽체의 토압분담효과 분석을 위해 지보재가 없는 자립형 벽체조건으로 수치해석을 수행하였으며, 단계별 시공과정을 모사하여 실제 거동과 동일하게 수치모의를 수행하였다.

4.2 해석방법

수치해석은 범용 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D프로그램을 이용하였으며, 지반은 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 강관말뚝 및 콘크리트 말뚝은 beam 요소로 적용하였으며, 지반의 초기응력을 구현한 이후 흙막이 벽체가 시공된 이후 영구 건축물이 합벽으로 설치되는 조건으로 수치해석을 수행하여 흙막이벽체에 작용하는 토압과 영구건축물에 작용하는 토압을 각각 산정함으로써 말뚝 흙막이벽체의 토압분담효과를 산정하였다.

수치해석에 적용된 단계별 모식도 및 격자요소망은 Fig. 6에 나타내었다.

4.3 해석조건

수치해석은 실제 규모에서 기성말뚝 흙막이 벽체의 토압분담효과를 분석하기 위해 벽체의 높이를 기성말뚝 흙막이 벽체가 보편적으로 사용되는 3 m, 5 m 및 7 m의 조건으로 수행하였다.

말뚝의 직경은 강관말뚝과 콘크리트 말뚝이 혼용되기 용이하도록 직경 500 mm로 가정하였으며, 강관말뚝만으로 흙막이 벽체를 설치하는 설치간격 1 D에서 5 D까지 강관말

뚝과 콘크리트말뚝을 혼용하는 조건 그리고 강관말뚝 없이 콘크리트 말뚝만으로 흙막이 벽체가 설치되는 조건을 해석 조건으로 설정하였다.

아울러 지반의 조건에 따라 흙막이 벽체의 토압분담효과의 변화를 알아보기 위하여 배면지반의 조건을 내부마찰각 10°, 20°, 30° 및 40° 조건으로 변화하여 수치해석을 수행하였다.

지반의 내부마찰각을 변수로 적용할 때에는 지반의 강성에 따라 단위중량과 점착력 그리고 탄성계수 역시 내부마찰각의 크기를 고려해 지반 강성에 적합하게 적용하였다.

본 연구에서 수행한 해석 조건은 Table 3에 요약, 정리하여 나타내었으며, 수치해석에 적용된 지반의 강도정수 그리고 흙막이 벽체로 사용된 말뚝의 강도정수는 Table 4에 요약, 정리하여 나타내었다.

4.4 해석결과

4.4.1 흙막이 벽체 높이조건에 따른 수치해석 결과

흙막이 벽체의 높이가 3 m~5 m이고, 지반의 구성조건인 내부마찰각이 10°에서 40°로 변화할 때 흙막이 벽체의 발생 수평변위와 벽체에 작용하는 수평응력(토압)은 Figs. 7 및 8에 나타내었다.

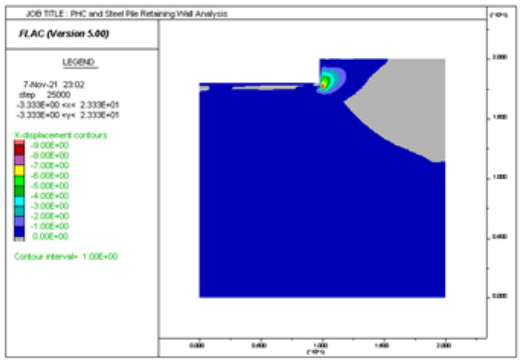
Figs. 7 및 8의 결과를 살펴보면, 지반의 내부마찰각이 10°로 느슨한 경우, 작용토압이 커 최대수평변위가 굴착하부

Table 3. Numerical Analysis Case

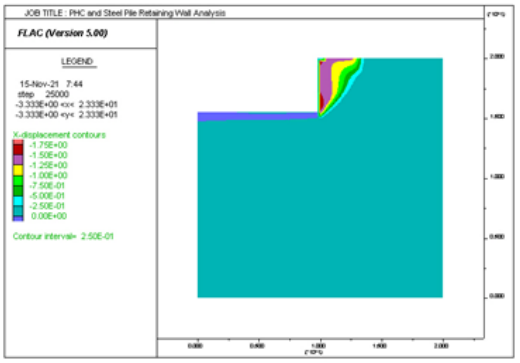
Classification	Wall Height (m)	Retaining Wall Condition	Steel Pile Installation Interval		Remark
Case 1	3	PHC concrete pile	None	0 m	Ground condition friction : 10°, 20°, 30°, 40° Total 48 times Variable Analysis
Case 2	3	PHC concrete pile + Steel Pile	5D	2.5 m	
Case 3	3	PHC concrete pile + Steel Pile	4D	2.0 m	
Case 4	3	PHC concrete pile + Steel Pile	3D	1.5 m	
Case 5	3	PHC concrete pile + Steel Pile	2D	1.0 m	
Case 6	3	Steel pile	1D	0.5 m	
Case 7	5	PHC concrete pile	None	0 m	
Case 8	5	PHC concrete pile + Steel Pile	5D	2.5 m	
Case 9	5	PHC concrete pile + Steel Pile	4D	2.0 m	
Case 10	5	PHC concrete pile + Steel Pile	3D	1.5 m	
Case 11	5	PHC concrete pile + Steel Pile	2D	1.0 m	
Case 12	5	Steel pile	1D	0.5 m	
Case 7	7	PHC concrete pile	None	0 m	
Case 8	7	PHC concrete pile + Steel Pile	5D	2.5 m	
Case 9	7	PHC concrete pile + Steel Pile	4D	2.0 m	
Case 10	7	PHC concrete pile + Steel Pile	3D	1.5 m	
Case 11	7	PHC concrete pile + Steel Pile	2D	1.0 m	
Case 12	7	Steel pile	1D	0.5 m	

Table 4. Material Properties for Numerical Analysis

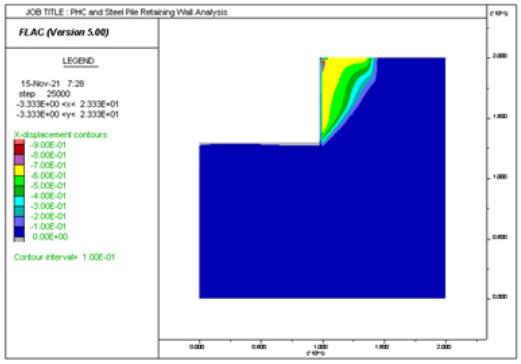
Classification	Unit Weight (kN/m^3)	Cohesion (kPa)	Friction (°)	Elastic Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Remark
Ground 1	17	5	10	15	0.38	Friction 10°
Ground 2	18	10	20	30	0.37	Friction 20°
Ground 3	19	15	30	50	0.35	Friction 30°
Ground 4	20	40	40	100	0.33	Friction 40°
Classification	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Area (cm^2)	Inertia Moment (cm^4)	Elastic Modulus (MPa)	Remark
Concrete	500	80	1,056	247,749	20,000	Pile
Steel	508	12	184	54,800	210,000	Pile



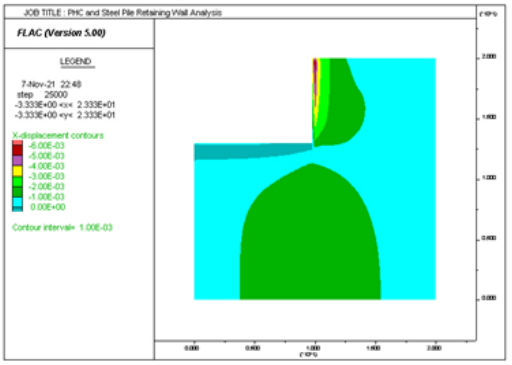
(a) H = 3 m, φ = 10° case



(b) H = 5 m, φ = 20° case

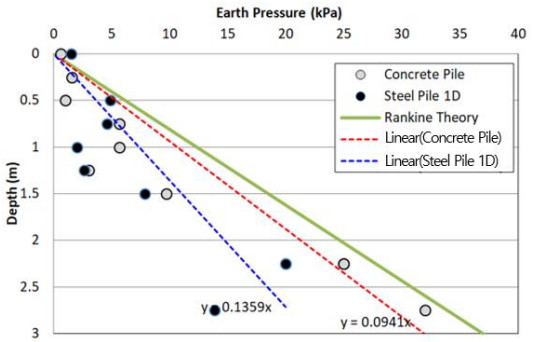


(c) H = 7 m, φ = 30° case

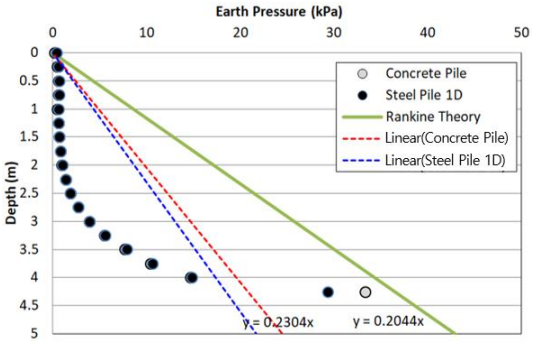


(d) H = 7 m, φ = 40° case

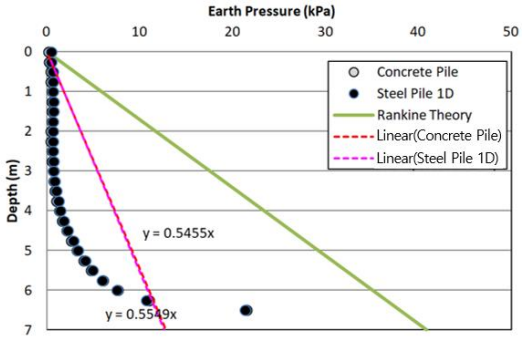
Fig. 7. Results of Horizontal Displacement



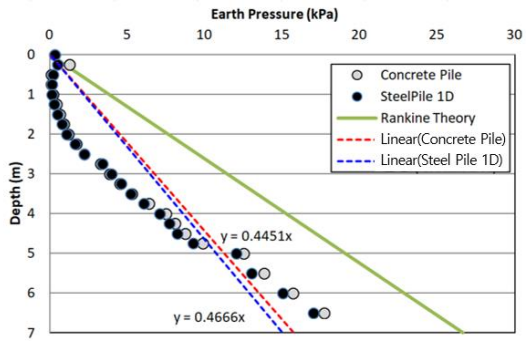
(a) H = 3 m, φ = 10° case



(b) H = 5 m, φ = 20° case



(c) H = 7 m, φ = 30° case



(d) H = 7 m, φ = 40° case

Fig. 8. Earth Pressure on Wall

에서 발생하며, 지반의 내부마찰각이 20°, 30° 및 40°로 증가하면서 발생수평변위가 1 mm까지 감소하는 것으로 분석되었다.

흙막이 벽체의 높이가 5 m 및 7 m로 증가하는 경우에도 동일한 경향의 해석결과를 보이는 것으로 확인되었으며 각각 흙막이 벽체의 수평변위는 2 mm 및 5 mm로 감소하는 것으로 분석되었다. 흙막이 벽체를 강성이 큰 강관말뚝으로 사용하는 경우 벽체에 작용하는 수평응력은 약 13.8%~40.2%의 토압감소효과가 있는 것으로 평가되었으며, 지반의 강성이 클수록 토압분담 효과도 크게 평가되었다.

흙막이 벽체의 높이가 5 m인 조건에의 느슨한 지반에서 콘크리트말뚝을 이용하여 토압을 지지하는 영구벽체로 활용하는 경우 건축물벽체에 작용하는 토압을 42.6% 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 느슨한 지반에서 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 혼용하는 경우 건축물벽체에 작용하는 토압을 45.0%~54.6% 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었고, 콘크리트 말뚝만을 사용하는 경우보다 2.4%~12.0% 정도의 추가 토압분담효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

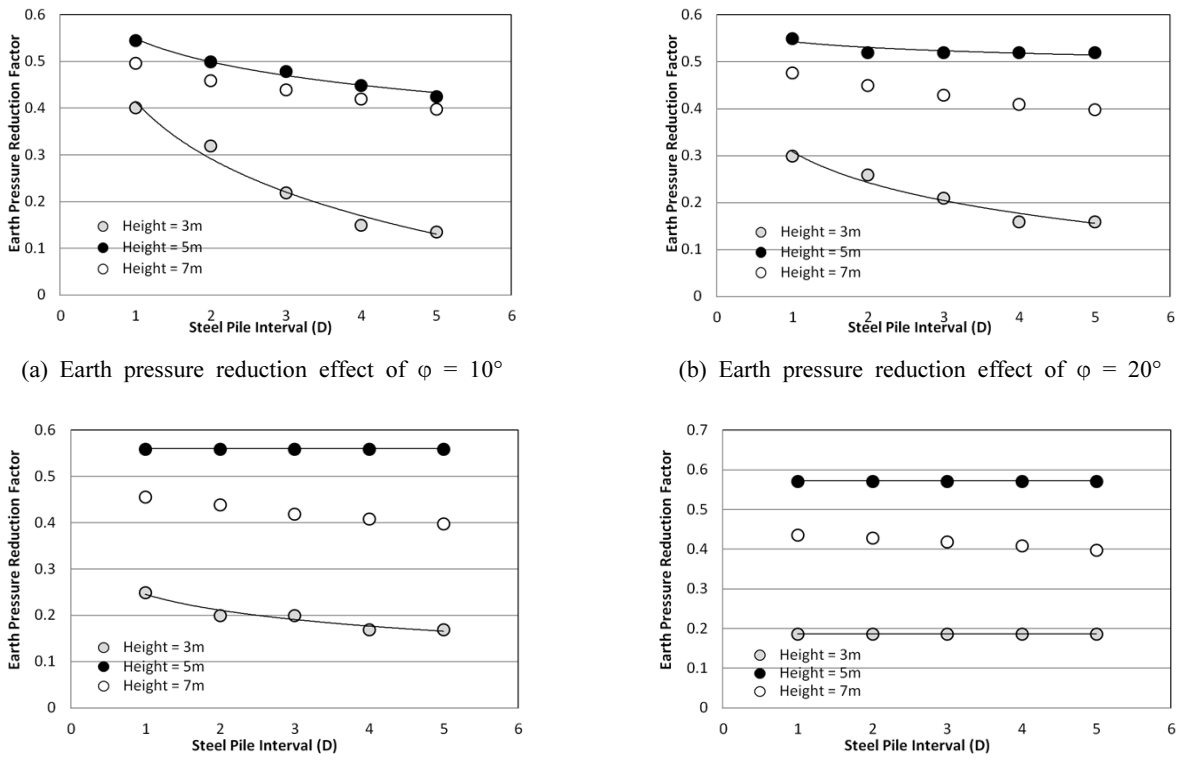
흙막이 벽체의 높이가 7 m 조건에서 느슨한 지반에서는 콘크리트말뚝을 영구벽체로 활용하는 경우 건축물벽체에 작용하는 토압의 39.9% 감소 효과가 기대되며, 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 혼용하는 경우 건축물벽체에 42.0%~49.7% 토압감소 효과가 기대되며 동일하게 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 혼용해 흙막이 벽체의 강성이 증가하는 경우에는 토압감소효과를 추가적으로 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

그러나 수치해석 결과를 종합적으로 분석한 결과, 지반의 강성이 큰 내부마찰각 40°인 조건에서는 강관말뚝과 콘크리트 말뚝 모두 토압분담효과가 크게 발현되는 것으로 확인되었으며, 콘크리트 말뚝과 강관말뚝의 토압분담효과 차이는 약 2.1%~2.4%로 미미하게 확인되어 흙막이벽체 자체의 강성에 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다.

4.4.2 토압분담효과

본 연구에서는 흙막이 벽체의 높이가 서로 다르기 때문에 벽체의 높이를 기준으로 랭킨토압이론을 기준으로 산정한 이론 토압을 기준으로 수치해석으로 확인된 토압을 정규화하여 토압의 분담효과를 정량적으로 비교하고자 하였으며, 흙막이 벽체의 강성에 따른 토압분담효과의 변화를 확인하기 위해 강관말뚝의 설치간격에 따른 수평토압 저감효과를 분석하였다. 분석된 수평토압 저감효과는 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에 나타낸 바와 같이 강관말뚝의 설치간격 1 D에서 5 D까지 멀어지는 경우에는 토압저감효과가 전반적으로 감소하는 것으로 나타난다. 말뚝 흙막이 벽체가 설치되어 2중 벽체를 형성하는 경우 영구 벽체에 작용하는 토압은 저감되는 것으로 확인되었으며, 약 19%~58%의 토압 저감효



(a) Earth pressure reduction effect of φ = 10°

(b) Earth pressure reduction effect of φ = 20°

(c) Earth pressure reduction effect of φ = 30°

(d) Earth pressure reduction effect of φ = 40°

Fig. 9. Load-Displacement Curve

과를 보이는 것으로 확인되었다.

토압저감효과는 말뚝 흙막이 벽체의 높이가 5 m 인 조건에서 가장 크게 나타났다. 또한 지반의 내부마찰각이 약 10° 정도로 느슨한 경우에는 강관말뚝의 설치간격에 따라 토압의 저감효과도 크게 차이를 보이는 것으로 나타났다. 흙막이 벽체의 높이가 3 m로 비교적 높이가 작을 때는 토압 저감효과가 약 13%~40% 정도로 평가되었으며 강관말뚝으로 흙막이 벽체를 형성하여 강성이 큰 경우 가장 큰 토압저감효과를 보이며 말뚝 흙막이 벽체의 강성에 따라 토압저감효과도 크게 차이를 보이는 것으로 확인되었다.

지반의 내부마찰각이 20°, 30° 및 40°로 증가하여 지반의 강성이 커지는 경우 흙막이 벽체의 토압분담효과는 기대할 수 있지만 강관말뚝을 혼용하여 흙막이 벽체의 강성이 증가하여 토압분담효과가 증가하는 효과의 감소하는 것으로 확인되었다. 내부마찰각이 20° 정도로 보통조밀한 정도의 상대밀도 지반에서는 말뚝 흙막이 벽체의 높이에 따라 다소 차이는 있지만 약 3%~13% 정도의 토압분담효과가 흙막이 벽체의 강성에 의해 좌우되는 것으로 확인되었다. 지반의 내부마찰각이 40°인 매우조밀한 정도의 상대밀도를 갖는 지반에서는 흙막이 벽체 자체만의 토압분담효과로 인해 영구벽체에 작용하는 토압은 약 19%~57%의 저감효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

그러나 말뚝 흙막이 벽체를 구성하는 강관말뚝 및 콘크리트 말뚝의 벽체 강성이 영구벽체에 작용하는 토압에 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 분석되었다.

흙막이 벽체의 높이가 3 m, 5 m 및 7 m 조건 모두에서 강관말뚝의 설치간격이 토압저감효과에는 크게 영향을 주지 못하는 것으로 분석되었다.

이러한 결과를 종합적으로 분석할 때, 강관말뚝과 콘크리트 말뚝을 혼용하는 흙막이 벽체의 토압분담 효과는 지반의 강성이 비교적 작은 지반에서 더 큰 효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 9의 결과를 살펴보면 흙막이 벽체의 높이가 5 m일 때 토압저감 효과가 좋은 것으로 확인되었으며 이는 수치해석의 조건이 별도로 지보재가 설치되지 않은 자립형 형태로 구성되었기 때문으로 생각되며, 추가적인 지보재가 설치되는 경우에는 토압의 분담효과 역시 차이가 있을 것으로 생각된다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 콘크리트말뚝과 강관말뚝을 사용하는 흙막이 벽체가 영구벽체와 함께 활용되어 영구벽체에 작요하는 토압의 감소효과를 확인하기 위하여 실내모형실험 및 수치해석을 수행하였으며, 이를 토대로 토압저감효과를 분석하였다.

실내모형실험을 통해 모형실험을 통해 확인된 하중-수평변위 곡선을 이용하여 모형벽체의 최대 지지하중을 산정하였고 강관말뚝의 설치간격이 줄어들수록 흙막이 벽체의 지지하중은 증가하는 것으로 확인되었다. 콘크리트말뚝만 설치된 조건을 기준으로 정규화하여 분석하면 강관말뚝을 혼용하는 경우 토압지지효과가 8.6%~27.9% 증가하는 것으로 분석되었다.

흙막이 벽체의 높이가 3 m에서 5 m 및 7 m로 증가하는 경우 흙막이 벽체의 수평변위는 감소하는 것으로 분석되어 강관말뚝과 콘크리트말뚝을 혼용하는 경우 벽체의 변위억제효과도 기대할 수 있는 것으로 생각된다.

흙막이 벽체를 강성이 큰 강관말뚝으로 사용하는 경우 벽체에 작용하는 약 13.8%~40.2%의 토압감소효과가 있는 것으로 평가되었으며, 지반의 강성이 클수록 토압분담 효과도 크게 평가되었다.

흙막이 벽체의 높이가 5 m, 7 m로 증가하는 경우에서도 역시 건축물벽체에 작용하는 토압을 39.9%~42.6% 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었고 강관말뚝과 콘크리트말뚝을 혼용하여 사용하는 경우가 콘크리트 말뚝만을 사용하는 경우보다 2.4%~12.0% 정도의 추가 토압분담효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.

그러나 결과를 종합적으로 분석한 결과, 지반의 강성이 큰 내부마찰각 40°인 조건에서는 강관말뚝과 콘크리트 말뚝 모두 토압분담효과가 크게 발현되는 것으로 확인되었으며, 콘크리트 말뚝과 강관말뚝의 토압분담효과 차이는 약 2.1%~2.4%로 미미하게 확인되어 흙막이벽체 자체의 강성에 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다.

이와 같이 흙막이 벽체와 건축물의 벽체가 2중벽체로 구성되는 경우에는 토압의 분담효과가 확인되었으며, 흙막이 벽체의 강성이 증가하는 경우에는 흙막이 벽체가 분담하는 토압이 증가되어 건축물 벽체에 작용하는 토압이 감소되는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 강관말뚝과 콘크리트말뚝을 혼용하는 흙막이 벽체가 가설벽체로서의 기능을 다하고 영구벽체와 함께 토압을 지지하는 기능에 대한 효과를 종합적으로 분석하고자 실내모형실험과 수치해석을 수행하였다. 그러나 수치모의 해석을 통해서 토압저감효과를 정확하게 산정하기에는 한계성을 배제할 수 없는 여건을 감안할 때 추후 실제규모의 현장에서의 계측 등을 통한 거동분석과 함께 토압저감효과를 분석하는 후속연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

References

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.

An, D.W., Lee, D.S., Lee, D.H., Shin, C.Y., and Woo, I.J.

(2021). Steel pipe rebar mesh for earth retaining wall based on STG800 ground improvement steel pipe. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 13-20.

Choi, J.P., Jin, H.M., Kim, C.M., Kim, S.S., and Choi, Y.G. (2017). A study on the behavior of PHC-W retaining wall method based on the numerical analysis results. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 2, pp. 5-15.

Do, J.U., Kim, H.S., Park, B.G., and Lee, J.H. (2016). Evaluation on field applicability of cast-in-place pile using surfactant grout. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 36, No. 1, pp. 75-83.

Gässler, G. (1988). Soil nailing theoretical basis and practical design. *International Geotechniacl Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement*, Balkema, pp. 283-288.

Han, J.G., Cho, Y.R., Kim, S.G., Park, S.C., and Eo, Y.W. (2005). Case study on the design of earth retaining and retention wall using pre-casted concreted pile (PHC). *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 33-42.

Han, J.G., Hong, G.W., Eo, Y.W., and Kim, S.G. (2006). Case study on application of PHC pile to earth retaining and retention wall. *Journal of the Korean Geosyhthetics Society,* Vol. 5, No. 3, pp. 37-44.

Jang, S.Y., Choi, J.S., Song, B.W., Choi, Y.Y., and Yoon, J.S. (2012). Advanced C.I.P method to use the steel-casing with inner joint. *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 13, No. 2, pp. 95-102.

Kim, C.M., Kim, S.S., Jeon, B.H., and Choi, Y.G. (2017). A study on performance improvement of a PHC-W pile for PHC-W retaining wall. *Journal of the Korean Geotechnical Society,* Vol. 33, No. 2, pp. 27-34.

Lee, G.G., and Park, Y.J. (2021a). Construction technology for permanent retaining wall using PHC pile and steel pipe pile. *2021 Annual Conference Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, p. 356.

Lee, G.G., and Park, Y.J. (2021b). Enhancing the self-supported capacity of permanent retaining wall using PHC pile. *2021 Annual Conference Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, p. 357.

Lee, J.H., Lee, K.I., Yu, N.J., and Kim, Y.S. (2019). Evaluation of engineering properties of retaining wall material using fiber reinforcement. *Journal of the Korean Geosyhthetics Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 243-252.

Lee, K.K., Kim, D.H., Joo, E.H., Kim, Y.G., Kim, B.C., and Lee, J.H. (2021). Flexural capacity evaluation of high-strength new-shape composite pile (S-Pile) for the soldier pile in the C.I.P method. *2021 Annual Conference Journal of Korea Institute of Building Construction*, Vol. 21, No. 1, pp. 185-186.

Yoon, W.S. (2019). Behavior of PHC pile connected by bolted rectangular steel tubular. *Journal of The Korean Society of Industry Convergence.* Vol. 22, No. 6, pp. 615-626.

You, J.O., Shin, M.S., Yang, Y.H., Baek, S.K., and Sim, J.U. (2005). Application of new excavation method using stabilizing piles. *2005 Annual Conference Journal of Korea Society of Civil Engineering*, p. 5315.

Received	March 15, 2022
Revised	March 16, 2022
Accepted	March 25, 2022