

고강도 결합 매입말뚝 흠막이 공법의 현장적용성 검토에 관한 연구

이광남¹ · 김대현^{2*}

¹조선대학교 토목공학과 박사과정, ²조선대학교 토목공학과 교수

A Study on the Field Application of High Strength Joint Buried Pile Retaining Wall Method

Gwangnam Lee¹ · Daehyeon Kim^{2*}

¹Graduated Student, Department of Civil Engineering, Chosun University

²Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

Abstract

This study verified the stability of a high-strength combined buried pile retaining wall and its applicability in the field. A cast-in-place (C.I.P) retaining wall and the high-strength combined embedded pile retaining wall were compared and analyzed numerically. The numerical analysis assessed the ground behavior and stability (and thus field applicability) of a high-strength combined buried pile retaining wall using data measured in the field. The experimental results showed that the cross-sectional force and displacement of the high-strength bonded pile retaining wall were reduced by 13.6~19.7%, the shear force increased by 0.7~4.7%, and the bending moment increased by 4.5~8.8% relative to the values for the C.I.P retaining wall. Examination of the amount of subsidence in the ground around the excavation showed that the maximum settlement of the C.I.P retaining wall was 46.89 mm and that at the high-strength combined buried pile retaining wall was 39.37 mm. Overall, designing a high-strength combined embedded pile retaining wall by applying the maximum bending moment and shear force calculated using the elastic beam method to the site ground was shown to achieve the safety of all members, as member forces were generated within the elastic region.

Keywords: retaining wall method, settlement, high strength, bending moment, shear force

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Daehyeon Kim
E-mail: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received: 24 October, 2022

Revised: 16 December, 2022

Accepted: 16 December, 2022

© 2022 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

본 연구에서는 고강도 결합 매입말뚝 흠막이 공법의 안정성을 검증하고 그에 따른 현장 적용성을 확인하고자 하였다. 따라서 C.I.P 흠막이 공법과 고강도 결합 매입말뚝 흠막이 공법을 수치해석으로 비교·분석하였으며, 고강도 결합 매입말뚝 흠막이 공법이 적용된 현장의 계측 Data와 수치해석 결과를 비교·분석하여 지반거동 및 고강도 결합 매입말뚝 흠막이 공법의 안정성 및 현장 적용성을 검증하고자 하였다. 실험결과, 단면력의 경우 고강도 결합 매입말뚝 흠막이벽이 C.I.P 흠막이벽보다 변위는 최소 13.6%~최대 19.7%가 감소하였고, 전단력은 최소 0.7%~최대 4.7% 정도 증가하였다. 또한 휨모멘트의 경우 최소 4.5%~최대 8.8%정도 증가하는 경향을 보였다. 굴착주변 지반의 침하량을 검토한 결과, C.I.P 흠막이벽이 최대 46.89 mm, 고강도 결합 매입말뚝 흠막이벽이 39.37 mm로 산정되었으며, 고강도 결합 매입말뚝

이 C.I.P. 흙막이벽에 비해 최대 침하량이 약 17% 정도 작게 산정되었다. 현장지반을 대상으로 탄소성보법에 의해 산정된 최대 휨모멘트와 전단력을 적용하여 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽체를 설계한 결과, 모두 탄성영역 내에서 부재력이 발생되어 안전한 것으로 나타났다.

주요어: 흙막이공법, 침하량, 고강도, 휨모멘트, 전단력

서론

연구의 배경 및 목적

상대적으로 국토가 좁은 우리나라의 경우 도시개발에 따른 토지 이용률이 점차적으로 증가되고 있으며, 특히, 문화, 경제 및 생활 거점이 되는 도심지와 같은 경우 토지의 효율적 이용을 위한 다각적인 노력이 행해지고 있다. 이에 따라 최근 도심지의 빌딩 및 여러 가지 편의 시설은 지상과 지하공간으로 확장되고 있어 이를 확보하기 위해 도심지에서의 고심도 굴착공사는 점점 깊어지고 있다.

일반적으로, 지하 가시설공사의 대상 지반은 형상과 지층조건이 매우 복잡하고 다양한 특성을 지닌다. 이러한 이유로 공사 중 가시설 흙막이벽체의 안정성과 주변 구조물 혹은 지하매설물 등에 피해가 없도록 신중한 굴착설계계획, 시공 및 공법 선정 등이 선행되어야 한다. 특히, 원지반 조건과 현장특성을 반영하지 않은 설계 및 공법선정은 흙막이공사에서 어려움을 가져올 뿐만 아니라 경제적 및 인명 피해와 안전사고까지 발생시킬 수 있다. 또한, 추가적으로 시공 중·후에도 설계상 오류를 보완하고 안전시공을 위해 실시간 계측을 병행하여 흙막이벽체의 경미한 변형까지 측정할 수 있어야 한다. 따라서, 안전하고 효율적인 시공을 위해 지반, 흙막이 벽체의 변형, 거동과 주변 지반침하 등을 효과적으로 예측하고 관리해야 한다.

흙막이벽체의 안정성 관리 및 해석을 위해 기존의 국내외 많은 연구자들에 의해 벽체 수평변위, 지보재 종류에 따른 흙막이 거동, 연약지반 및 다층지반에 설치된 흙막이벽체 변위변화, 굴착에 따른 인접침하 등에 관한 일반적인 연구와 특히, 흙막이벽체 설계 시 주요적용정수인 수평지반반력계수에 관한 연구는 말뚝 연구만이 거의 이뤄졌다. 즉, 수평방향의 지반 반력계수는 벽체의 수평변위에 따라 생기는 굴착면 측의 지반반력을 평가하는 스프링이라 가정함으로써 벽체의 변위량, 스트럿 적용시기 및 설치면 형상 등에 다양한 영향을 받는 대단히 복잡한 성질을 가지고 있다.

현재 지하 터파기 배면 지반침하, 인접 구조물의 영향에 대한 연구는 주로 모형실험, 사례 계측자료 분석을 통한 연구는 있는 실정이나 가설 흙막이 공사를 설계 단계에서부터 지반 침하 양상을 예측하고, 시공단계에서 현장 계측자료를 비교, 분석하여 설계에서 예측한 데이터와 실제 거동에 관한 연구는 부족한 상황이다. 또한, 기존의 사용되어온 현장타설말뚝 흙막이 공법(Cast in Place Prepacked Pile, 이하 C.I.P. 흙막이 공법)은 현장타설에 따른 품질 불량, 양생기간에 따른 공기의 불리한 단점이 있으며, 기성말뚝 흙막이 공법인 PHC말뚝공법은 띠장을 매립볼트로 연결하는 구조적인 불안한 단점이 있다.

본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법의 안정성을 검증하고 그에 따른 현장 적용성을 확인하고자 하였다. 따라서 C.I.P. 흙막이 공법과 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법을 수치해석으로 비교·분석하였으며, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법이 적용된 현장의 계측 Data와 수치해석 결과를 비교·분석하여 지반거동 및 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법의 안정성 및 현장 적용성을 검증하고자 하였다.

선행연구 분석

인접구조물 및 장애물이 많은 도심지와 깊은 굴착을 필요로 하는 공사에서는 비교적 강성이 큰 가시설 흙막이벽이 필요

하다. 현재까지 가장 많이 적용되고 있는 공법은 현장타설공법인 C.I.P 흠막이 공법과 기성제품인 PHC말뚝공법이다. 국내에서 적용되고 있는 강성 증대를 통한 단면성능 향상을 위한 콘크리트파일 벽체 공법은 Continuous Pile Wall, Tangent Pile Wall, Secant Pile Wall 등이 있으며 강성 증대를 위한 보강재를 별도로 설치해야 하는 등으로 공정이 복잡하여 공사기간이 길고, 공사비가 높은 단점이 제기되었다.

또한, 차수성능향상을 위한 콘크리트파일 벽체 공법은 일반 C.I.P 흠막이 공법+그라우팅, e-PHC 공법 등이 있으며 C.I.P 흠막이 공법에 그라우팅을 시공하거나 차수성 증대를 위한 별도의 그라우팅 또는 특수 케이싱을 이용한 공법을 적용하여 공정이 복잡하여 공사기간이 길고, 공사비가 높은 단점이 지속적으로 제기되었다.

더불어 주열식 굴착벽체의 경우 채움재의 강성 확보가 매우 중요하나 이와 관련된 연구는 미흡하여 시공 후 재료 분리 및 차수효과가 저하되는 등의 문제가 보고되고 있다.

국외의 흠막이 공법에서 벽체에 작용되는 토압에 대한 연구는 Coulomb(1776)와 Rankine(1857) 등이 강성벽체에 작용되는 토압에 대해 연구하였고, 그 후 Terzaghi(1936)는 버팀보식 흠막이 굴착 시 활동 파괴면 및 벽체 수평변위에 따른 이론적 토압을 근사해석법으로 제안하였다.

Terzaghi and Peck(1967)과 Tschebotarioff(1973)는 지반굴착현장에서 버팀보에 발생하는 하중을 역토압으로 환산하여 연성 벽체에 작용되는 경험토압을 구하는 방법을 제안하였다. 실제 벽체의 강성이 작고, 깊은 굴착에는 아칭 효과에 의해 토압 재분배가 발생되므로 벽체변형에 따라 토압 크기와 분포 예측에는 어려움이 있었다. 그 이후 많은 연구로 수정경험토압이 제시되었지만, 이 결과도 굴착단계별 토압을 규명하지 못하였다. Bowles(1988)는 단계굴착 시 이상화된 벽체 수평변위와 토압분포 변화를 설명하였다.

Cole and Burland(1972)는 유한요소법으로 흠막이벽체의 거동 분석을 수행하여 보고한바 있으며, Egger(1972)는 사질토지반에서 연성벽체와 강성벽체의 거동에 관하여 유한요소법을 이용하여 비교·분석을 하였다.

Clough and Tsui(1974)는 타이-백 벽체와 버팀벽체의 거동에 대해서 비교·설명하고 타이-백 벽체의 장점 중의 하나가 벽체배면의 침하가 버팀벽체 배면의 침하보다 작다고 하였다. 또한, 실제 타이-백 벽체의 해석에 유한요소해석기법을 이용하였고, 계산치와 계측치의 거동에 대한 비교도 일치됨을 나타내었다. Simo and Taylor(1985)는 효율적인 방법으로 탄소성 매트릭스를 구하는 알고리즘을 제안하였으며, Lee et al.(1989)은 이와같은 알고리즘을 여러 탄소성모델에 적용하였다.

Clough and Tsui(1997)는 버팀 흠막이벽이나 앵커 흠막이벽의 2차원 해석에 있어서 엄지말뚝, 버팀부재, 앵커등의 불연속적 벽체요소를 이상화시키기 위해서는 엄지말뚝의 침강성과 버팀부재 혹은 앵커의 축방향 강성을 단위폭당으로 기준하여 계산하는 것이 가장 효과적이라고 하였다.

Murphy et al.(1975)은 타이-백과 버팀지지 구조의 거동에 대한 유한요소법의 실용성을 평가할 목적으로 Clough and Tsui(1974)가 개발한 SOIL-STRUCT라는 프로그램을 이용하여 흠-구조 상호작용에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

Ghaboussi and Pecknold(1984), Brown and Booker(1986), Borja et al.(1989)은 전체평형의 개념에 근거를 두고 탄성지반의 경우에 이론적으로 정확하게 적용할 수 있는 굴착 시물레이션 방법을 제안하였으며, 특히 Borja and Lee(1990)는 다양한 탄소성 지반의 굴착해석까지 확장하였다.

이후, Liu et al.(2015)은 관련 이론과 현장시험 및 계측자료 등을 이용해 Secant Pile Wall의 응력 특성에 관하여 연구한 바 있으며, Liao et al.(2014)은 모형시험을 통해 Secant Pile Wall 단면의 특성을 실험적으로 연구한 바 있다.

국내에서는 Hong(1985)이 흠막이 공법에 관한 연구를 수행하였으며, 2000년대 초 Jang(2006)은 해안 매립지의 연약지반에서 깊은 굴착에 따른 주열식 흠막이 벽체의 거동에 관한 연구를 수행하였으며, Choi and Yoon(2007)은 차수성과

연직연속천공기능을 개선한 C.I.P 공법시공 적용성에 관한 연구를 수행하였다. Shim et al.(2008)은 EJ-Pile의 강도 및 차수특성에 관한 연구를 수행하였고, Choi(2010)는 개량형 흙막이 벽체의 차수 및 구조적 특성을 분석하고 현장 적용성에 대하여 검토하였다.

최근 국내 흙막이 벽체에 관한 연구는 Lee(2019)가 대심도 지반 굴착시 주열식 흙막이 벽체의 안정성에 관한 연구를 수행하였고, Yang(2019)은 벽체와 버팀보 강성에 따른 흙막이 구조물의 내진특성에 대한 연구를 수행하였다. Jin(2020)은 고강도 콘크리트 말뚝을 흙막이 가시설에 적용하는 연구를 수행하였다.

이처럼 가시설 흙막이공법에 대한 연구는 꾸준히 수행되어 왔으며, 대부분의 연구는 C.I.P 흙막이 공법과 기성말뚝 흙막이공법을 토대로 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 기존 흙막이 공법인 C.I.P 흙막이 공법 및 기성말뚝 흙막이 공법의 단점을 보완한 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법의 안정성을 검증하고자 흙막이 벽체에 대하여 수치해석을 통한 비교·분석을 수행하였으며, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법의 현장 시공 중 측정된 계측 Data와 수치해석 결과를 비교·분석하여 현장 적용성을 규명하고자 하였다.

공법의 개요

고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법

고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법은 C.I.P 흙막이 공법과 유사하게 지지되지만, Fig. 1과 같이 1열은 H형강이 삽입된 현장타설말뚝을 시공하며 2, 3, 4열은 기성말뚝을 매입말뚝으로 시공하고 5열은 1열과 같이 H형강이 삽입된 현장타설말뚝을 반복시공함으로써 현장타설말뚝과 기성말뚝의 장단점을 획기적으로 보완한 공법이다.

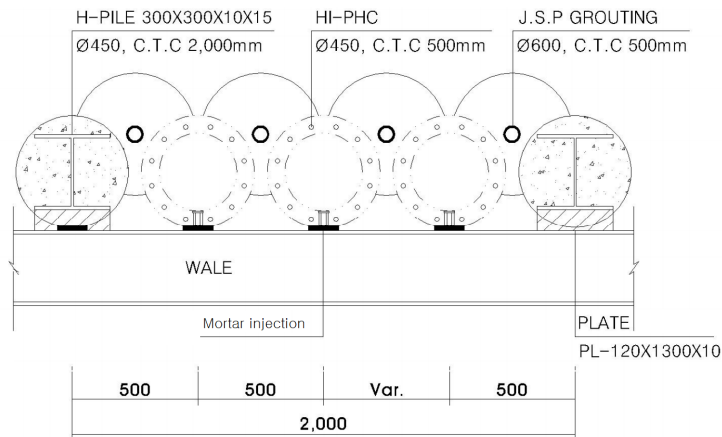


Fig. 1. Cross-sectional view of high strength joint buried pile retaining wall method.

고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법은 현장타설말뚝의 콘크리트 양생에 따른 공사기간 증가, 품질저하와 기성말뚝 흙막이 공법의 고장력 볼트 체결에 따른 구조적 불안정에 대한 문제점을 해결함으로써 벽체의 구조적 안정성을 높일 수 있고 흙막이 벽체의 강성이 증대되므로 수평변위를 감소시킬 수 있어 이로 인해 인접 지반의 침하를 최소화할 수 있다.

그러나 단점으로는 현장시공시 기성말뚝의 경우 길이조절이 용이하지 않으므로 길이를 조절하기 위해서는 이음부를 시공하여야 하며, 지하수위가 높을 경우 차수성이 부족하여 별도의 차수대책이 필요하다.

Fig. 1은 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법의 흙막이벽 단면도를 상세히 나타내었다.

탄소성보법에 의한 흠막이 가시설의 안정성 검토

개요

본고강도 결합 매입말뚝 흠막이 공법 및 C.I.P 흠막이벽을 탄소성보법으로 구조해석을 수행하였으며, 해석결과를 토대로 흠막이 가시설의 안정성과 성능을 비교 검증하였다. 구조해석과 설계는 경상북도 ○○군 일원의 흠막이 가시설 공사를 대상으로 하였다.

Fig. 2는 경상북도 ○○군에 위치한 흠막이 가시설 공사의 계획평면도이며, 굴착 면적은 1,181.019 m²으로 고강도 강관 버팀보 공법으로 지지하면서 굴착하였다. 또한, 지보구성은 스트럿으로 지지하며, 흠막이벽 구성은 고강도 결합 매입말뚝을 0.5 m 간격으로 천공 삽입하여 근입장까지 벽체를 형성하고 후열에 지반보강으로 Jumbo Special Pattern(이하, J.S.P) Grouting을 병행하여 단계적으로 굴착 시공하였다.

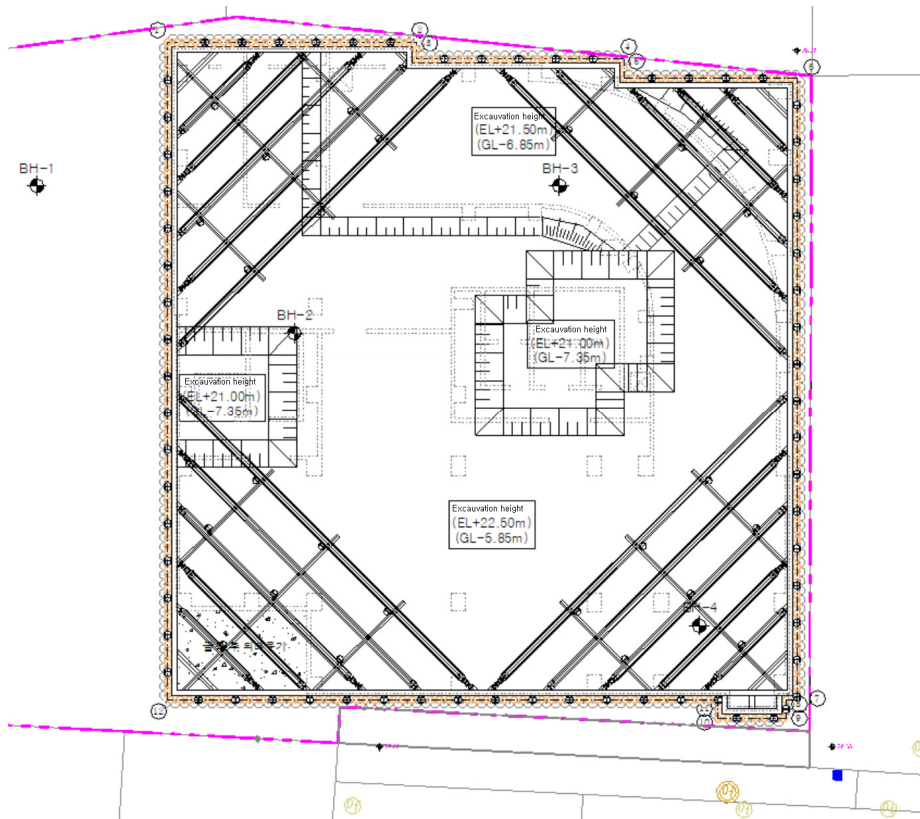


Fig. 2. Planned floor plan for construction of earth retaining facilities.

지층조건 및 설계 지반정수 산정

신축부지에 대한 지반조사는 Fig. 2와 같이 부지내 BH-4개소를 수행하였으며, 흠막이 구조검토에 사용된 설계정수인 지반정수는 실내시험 결과값 중 가장 불리한 값을 선정하여 안전측으로 검토하였다.

Table 1은 해석에 적용된 지반정수 산정결과이다.

Table 1. Results of calculation of the ground constant by stratum

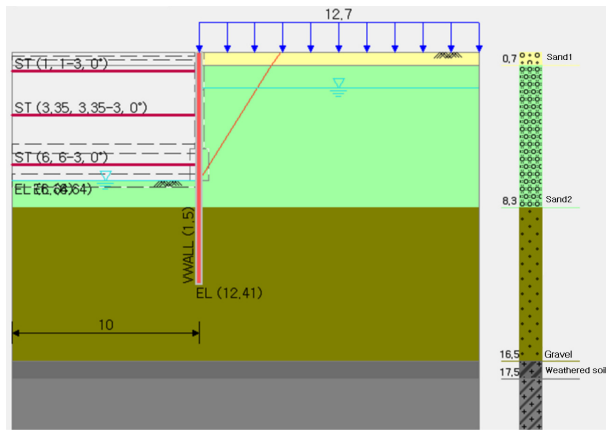
Classification	γ_t (kN/m ³)	γ_{sub} (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (deg)	k_h (kN/m ³)	Remarks
Sand 1	17.0	8.0	-	22.0	13,000	
Sand 2	17.0	8.0	-	25.0	16,500	
Gravel	18.0	9.0	-	32.0	25,500	
Weathered soil	19.0	10.0	-	33.0	27,000	
Weathered rock	20.0	11.0	30.0	35.0	45,000	

탄소성법 해석모델

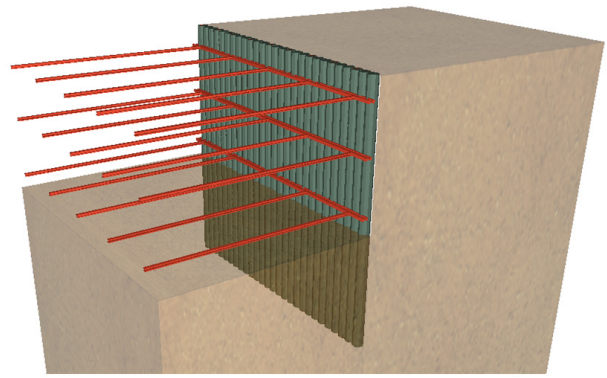
흙막이벽 모델

산정된 대표단면에 대하여 MIDAS사의 GEO-X(ver.4.6) 프로그램을 적용하여 해석을 수행하였다. GEO-X는 탄소성 보법 해석을 위한 프로그램으로 유한요소해석법이 아닌 굴착단계별 지반의 응력변화에 따른 단면력을 확인할 수 있다.

Fig. 3a는 흙막이 가시시설의 구조해석을 위한 해석단면을 나타낸 것이며, Fig. 3b는 해석단면을 3차원으로 나타낸 개념도이다. 현장의 설계조건에 따라 지층분포와 흙막이 가시시설 부재를 배치하였다. 배면 폭은 15 m, 굴착폭은 10 m, 최대 굴착깊이는 6.85 m, 전모델의 높이는 30 m이다.



(a) Numerical analysis cross-sectional view



(b) 3D conceptual diagram of the analysis section

Fig. 3. Interpretation section.

흙막이 가시시설 모델

흙막이벽

고강도 결합 매입말뚝 흙막이 벽은 기본적으로 C.I.P 흙막이벽과 동일하게 입력한다. 흙막이벽의 형상은 C.I.P 흙막이 벽으로 선택하고 H형강은 재질과 단면을 설계조건에 맞게 입력한다. 다음으로 C.I.P(현장타설말뚝) 사이에 시공되는 PHC(기성말뚝)에 대한 특성을 입력한다. 환산단면적용을 클릭하여 직경과 재질 그리고 탄성계수비(E_s/E_c)창을 활성화시킨다. 여기서, 직경은 설계조건에 맞게 입력한다.

C.I.P 흙막이벽으로 설계시 현장타설이므로 콘크리트의 설계강도 f_{ck} 에 맞춰 산정하나, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이

공법으로 설계할 때는 C.I.P 대신에 PHC말뚝로 시공되므로 PHC말뚝의 탄성계수를 적용하여야 한다.

C.I.P말뚝 콘크리트의 재료특성에서 탄성계수 E_c 를 35,000,000 kN/m²으로 입력하고, 기성말뚝의 탄성계수는 Table 2에 제시된 프리스트레싱 도입 후의 탄성계수를 적용하였다.

Table 2. Physical properties of prestablished piles applied to high-strength coupled pile earth retaining method

Classification	Pile	Remarks
Compression breaking strength (kg/cm ²)	800	
Compression breakdown deformation (%)	0.25	
Flexural tensile strength (kg/cm ²)	75	
Tensile strength (kg/cm ²)	55	
Modulus of elasticity (kg/cm ²)	400,000	
Modulus of elasticity (introducing pre-stress) (kg/cm ²)	350,000	35,000,000 (kN/m ²)
CREEP coefficient	2	
Construction contraction rate	20 × 10 ⁻⁵	

Table 3은 해석시 수행된 C.I.P 흠막이벽과 고강도 결합 매입말뚝 흠막이벽의 제원을 나타낸 것이다. 두 흠막이벽 모두 H빔 300 × 300 × 10 mm, t = 15 mm로 지지되며, 그 사이의 흠막이벽은 현장타설말뚝 콘크리트와 PHC말뚝으로 지지된다. 모두 직경은 0.5 m이고, 근입되는 하단깊이는 12.41 m, 수평간격은 1.5 m이다.

Table 3. The specifications of the retaining wall

Classification	Shape	Cross section (mm)	Material	Installation depth (m)	Horizontal spacing (m)
C.I.P	C.I.P conversion section	H300 × 300 × 10/15	SS400	1.0	3
High-strength joint buried pile	PHC conversion section	H300 × 300 × 10/15	SS400	3.35	3

지보재

Table 4는 지보재의 제원을 나타낸 것이다. 지보재는 H빔 300 × 300 × 10 mm, t = 15 mm이고, 재질은 SS400이다. 설치 깊이는 1단 지보재가 1.0 m, 2단 지보재가 3.35 m, 3단 지보재가 6.0 m이다. C.I.P 흠막이벽과 고강도 결합 매입말뚝 흠막이벽 모두에서 동일하게 적용되었다.

Table 4. The specifications of the strut

No.	Cross section (mm)	Material	Installation depth (m)	Horizontal spacing (m)	Symmetric point length (m)
1 Strut 1	H300 × 300 × 10/15	SS400	1.0	3	6.5
2 Strut 2	H300 × 300 × 10/15	SS400	3.35	3	6.5
3 Strut 3	H300 × 300 × 10/15	SS400	6.0	3	6.5

지하수위

지하수위는 지반조사에서 측정된 수위값을 적용하였다. 지하수 단위중량은 9.807 kN/m³, 초기 지하수위는 1.9 m, 양단의 수위차는 6.85 m이다.

상재하중 및 토압산정

배면 토압의 상재하중은 차량하중은 도로교설계기준해설(KIBSE, 2018)에 명시된 옹벽 배면의 차량하중 12.7 kN/m²을 적용하였다. 토압은 구조물기초설계기준해설(KSGE, 2018)에 명시된 Rankine-Resal의 토압 산정식을 식 (1), (2)와 같이 주동, 수동토압으로 나누어 사용하였다.

- 주동 토압

$$P_a = (q + \gamma h) \cdot \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) - 2 \cdot c \cdot \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \tag{1}$$

- 수동 토압

$$P_p = (q + \gamma h) \cdot \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 2 \cdot c \cdot \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \tag{2}$$

여기서, P_a 는 주동토압(kPa), P_p 는 수동토압(kPa), q 는 과재하중(kPa), γ 는 흙의 단위중량(kN/m³), h 는 지표면에서 토층까지의 깊이(m), c 는 흙의 점착력(kPa), ϕ 는 흙의 내부마찰각(°)이다.

시공단계 및 해석조건

Table 5는 흙막이 가시설의 시공단계를 설정한 것이다. 흙막이벽의 안정성 검토와 성능검증이 목표이므로, 굴착 이후의 구조물 시공단계를 검토하지 않았다.

Table 5. Establishment of construction stage of earth retaining facility

Stage	Excavation depth (m)	Strut		Wall, Slab installation depth (m)	Temporary load		Earth pressure	Water pressure
		Create	Dismant		Action	Release		
1	1.5	-	-	-	Overloading	-	Rankine	○
2	-	Strut 1	-	-	-	-	-	×
3	3.85	-	-	-	-	-	-	×
4	-	Strut 2	-	-	-	-	-	×
5	6.85	-	-	-	-	-	-	×
6	-	Strut 3	-	-	-	-	-	×
7	-	-	-	-	-	-	Empirical earth pressure	×

Table 2에 제시된 흙막이벽을 각각 적용하고 지보재는 총 3개소에 적용하였다. 시공 1단계는 굴착깊이 1.5 m까지의 굴착이며, 과재하중과 수압 그리고 Rankine토압을 적용하였다. 시공 2단계는 1단 지보재의 시공이며, 시공 3단계는 3.85 m

까지의 굴착이다. 시공 4단계는 2단 지보재의 시공이며, 시공 5단계는 6.85 m까지의 최종 굴착단계이다. 마지막으로 3단 지보재를 시공하게 된다. 최종단계에서는 경험토압을 적용하여 근입장에 대한 안전율을 검토하였다.

탄소성보법에 의한 흙막이 가시설의 안정성 검토 결과

탄소성보법 해석결과

Fig. 4a~4c는 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법과 C.I.P 흙막이 공법의 시공단계별 단면력을 비교한 것이다. C.I.P 흙막이 공법대비 휨모멘트의 경우 최소 4.5%~최대 8.8%정도 증가하여였고, 전단력은 최소 0.7%~최대 4.7% 정도 증가하였다. 또한 변위는 최소 13.6%~최대 19.7%가 감소하는 경향을 보였다.

최종굴착 전후인 시공 4~5단계에서 급격한 변화를 보이고 있으며, C.I.P 흙막이 공법 대비 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법에서 휨모멘트와 전단력이 크게 나타남을 알 수 있다.

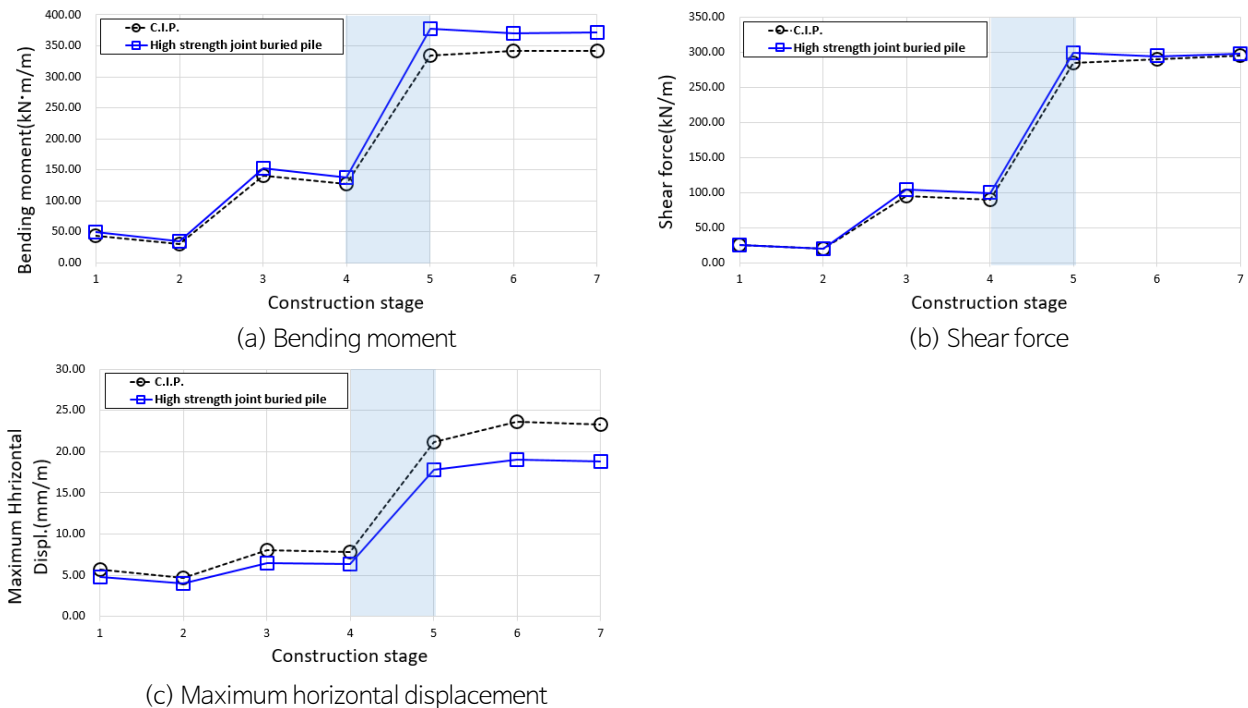


Fig. 4. Comparison of cross-sectional forces by construction stage.

근입장 검토

Table 6은 C.I.P 흙막이벽과 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 근입장을 검토한 것이다. 최종 굴착단계에서의 근입부 안전율은 C.I.P 흙막이벽이 1.506, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽은 1.512로 산정되었다. 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 근입부 안전율이 소폭 크게 산정된 것은 흙막이벽의 강성 증가로 인해 주동토압뿐만 아니라 수동토압도 증가되었기 때문이다.

Table 6. A study on the entrance depth of earth retaining wall

Classification	Applied construction depth (m)	Active earth pressure moment (kN·m)	Passive earth pressure moment (kN·m)	Safety rate	Applied safety rate	Result
C.I.P	Final construction stage	5.56	1,790.0	2,695.2	1.506	1.2
	Pre-final construction stage	8.56	4,477.4	8,282.8	1.850	1.2
High-strength joint buried pile	Final construction stage	5.57	1,790.0	2,706.0	1.512	1.2
	Pre-final construction stage	8.56	4,477.4	8,282.8	1.850	1.2

굴착주변 침하량 검토 결과

굴착주변 침하량은 구조물기초설계기준해설(KSGE, 2018)에 제시된 Caspe(1966) 방법으로 검토하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 굴착주변 침하량은 현장타설말뚝 흙막이벽이 최대 46.89 mm, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽이 39.37 mm로 산정되었으며, 고강도 결합 매입말뚝이 현장타설말뚝 흙막이벽에 비해 최대 침하량이 약 17% 정도 작게 산정되었다. 이는 흙막이벽의 강성이 커서 탄소성보법에 의한 벽체의 횡방향 변위가 작게 산정되었기 때문이다. 이로 인해 전체 수평변위로 인해 발생하는 체적변화(V_s)가 감소되었기 때문이다.

Fig. 5는 Caspe(1966) 방법에 따른 침하량 검토 결과이다.

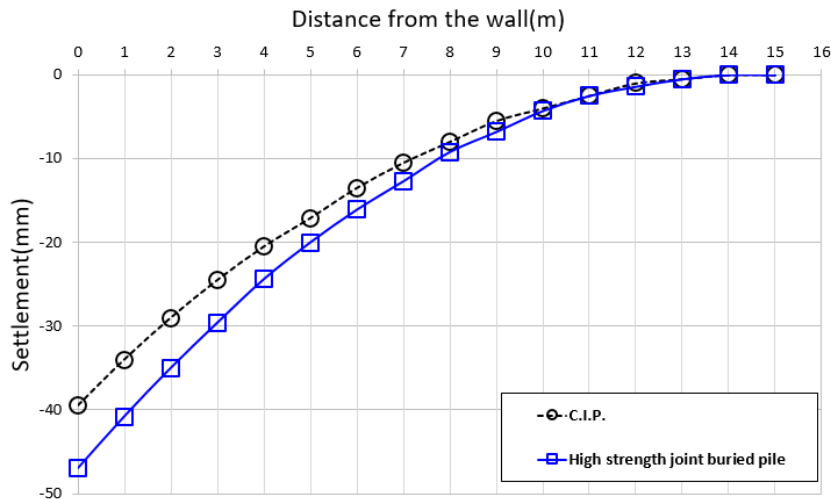


Fig. 5. Results of the settlement review.

고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 설계

힘에 대한 검토

고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 설계를 수행하였으며, 탄소성보법에 의해 산정된 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 단면력을 적용하였다.

고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 힘에 대한 검토는 기성말뚝에 작용되는 발생 최대 휨모멘트(M_{max})와 균열 휨모멘트(M_{cr})를 비교하여 검토하였다. 이는 일반적인 ePHC 흙막이벽의 설계와 동일하다. 발생 최대 휨모멘트는 시공단계에서 검토된 최대 휨모멘트에서 PHC말뚝의 중심간(C.T.C)의 간격을 나누어 식 (3)과 같이 산정하였다.

$$M_{\max} = \text{최대 휨모멘트} \times \text{C.T.C} \quad (3)$$

균열모멘트(M_{cr})는 Table 7에 제시된 기성말뚝의 균열휨모멘트에서 도로교설계기준해설(KIBSE, 2018)과 흠막이 가시설 세부설계기준(KEC, 2005)에 제시된 가설구조물에 대한 허용응력증가계수 1.5를 적용하여 검토하였다.

$$M_{cr} = \text{균열모멘트} \times \text{가설시할증계수} \quad (4)$$

Table 7. Crack bending moment and shear strength of PHC pile

External diameter (mm)	Classification	Crack bending moment (kN·m (tf·m))	Shear strength (kN (tf))
400	A	54.0 (5.5)	148.1 (14.8)
	B	73.6 (7.5)	187.4 (18.7)
	C	88.3 (9.0)	204.0 (20.4)
450	A	73.6 (7.5)	180.5 (18.0)
	B	107.9 (11.0)	227.6 (22.8)
	C	122.6 (12.5)	248.2 (24.8)
500	A	103.0 (10.5)	228.6 (22.9)
	B	147.2 (15.0)	288.4 (28.8)
	C	166.8 (17.0)	313.9 (31.4)
600	A	166.8 (17.0)	311.0 (31.1)
	B	245.2 (25.0)	392.4 (39.2)
	C	284.5 (29.0)	427.7 (42.8)

Table 8은 고강도 결합 매입말뚝 흠막이벽의 PHC말뚝의 휨에 대한 검토 결과를 나타낸 것이다. 발생 최대모멘트 (M_{\max})는 183.0 kN·m로 산정되었으며, 균열 휨모멘트(M_{cr})는 228.8 kN·m로 산정되었다. 따라서 기성말뚝은 탄성영역내에서 최대 휨모멘트가 발생되므로 안전한 것으로 나타났다.

Table 8. A study on the bending of PHC pile in high strength coupled pile earth retaining wall

C.T.C (m)	Maximum moment M_{\max} (kN·m/m)	Maximum moment of occurrence M_{\max} / CTC (kN·m)	Crack bending moment M_{cr} (kN·m/m)	Crack bending moment $M_{cr} \times 1.5$ (kN·m)	Result
0.50	366.0	183.0	147.2	228.8	Safety

전단에 대한 검토

고강도 결합 매입말뚝 흠막이벽의 전단에 대한 검토는 휨에 대한 검토와 동일한 방법으로 검토한다. 기성말뚝에 작용되는 발생 최대 전단력(S_{\max})와 전단강도(S_{cr})를 비교하여 검토한다. 이는 일반적인 ePHC 흠막이벽의 설계와 동일하다.

발생 최대 전단력은 시공단계에서 검토된 최대 전단력에서 PHC말뚝의 중심간(C.T.C)의 간격을 나누어 식 (5)와 같이 산정한다.

$$S_{\max} = \text{최대 전단력} \times \text{C.T.C} \quad (5)$$

전단강도(S_{cr})는 Table 9에 제시된 PHC말뚝의 전단강도에서 도로교설계기준해설(KIBSE, 2018)에 제시된 가설구조물에 대한 허용응력증가계수 1.5를 적용하여 검토한다.

$$S_{cr} = \text{균열모멘트} \times \text{가설시할증계수} \quad (6)$$

Table 9는 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 PHC말뚝의 전단에 대한 검토 결과를 나타낸 것이다. 발생 최대전단력(S_{\max})는 147.0 kN로 산정되었으며, 전단강도(S_{cr})는 432.60 kN로 산정되었다. 따라서 PHC말뚝은 탄성영역내에서 최대 전단력이 발생되므로 안전한 것으로 나타났다.

Table 9. A study on the shear of PHC pile in high strength coupled pile earth retaining wall

C.T.C (m)	Maximum shear strength M_{\max} S_{\max} (kN/m)	Maximum shear strength of occurrence S_{\max} / CTC (kN)	Shear strength V_u (kN/m)	Shear strength $S_{cr} \times 1.5$ (kN)	Result
0.50	294.0	147.0	288.40	432.60	Safety

탄소성보법에 의한 흙막이 가시설의 안정성 검토결과

휨 강도가 검증된 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽, C.I.P 흙막이벽을 탄소성보법으로 구조해석을 수행하고 흙막이 가시설의 안정성과 성능을 비교하였다.

흙막이벽의 단면력을 비교한 결과, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽이 C.I.P 흙막이벽보다 부재력은 크게 산정되고 변위는 작게 산정되었다. 이는 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 휨 강성이 C.I.P 흙막이벽보다 크기 때문이다.

굴착주변 지반의 침하량을 검토한 결과, C.I.P 흙막이벽이 최대 46.89 mm, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽이 39.37 mm로 산정되었으며, 고강도 결합 매입말뚝이 C.I.P 흙막이벽에 비해 최대 침하량이 약 17% 정도 작게 산정되었다. 이는 흙막이벽의 휨 강성이 커서 벽체의 횡방향 변위가 작게 산정되었기 때문이다. 이로 인해 배면 지반의 체적변화(V_s)가 감소되었기 때문이다.

현장지반을 대상으로 탄소성보법에 의해 산정된 최대 휨모멘트와 전단력을 적용하여 부재를 설계한 결과, 고강도 결합 매입말뚝은 모두 탄성영역 내에서 부재력이 발생되어 안전한 것으로 나타났다.

결론

본 연구에서는 기존의 C.I.P 흙막이 공법과 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법의 비교를 통한 안정성을 검증하고, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이 공법의 현장 적용성을 검토하고자 하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 흙막이벽의 단면력을 비교한 결과, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽이 C.I.P 흙막이벽보다 변위는 최소 13.6%~최대 19.7%가 감소하였고, 전단력은 최소 0.7%~최대 4.7% 정도 증가하였다. 또한 휨모멘트의 경우 최소 4.5%~최대 8.8%정도 증가하는 경향을 보였다. 이는 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽의 휨 강성이 C.I.P 흙막이벽보다 크게 나

타난 것으로 판단된다.

- (2) 굴착주변 지반의 침하량을 검토한 결과, C.I.P 흙막이벽이 최대 46.89 mm, 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽이 39.37 mm로 산정되었으며, 고강도 결합 매입말뚝이 C.I.P 흙막이벽에 비해 최대 침하량이 약 17% 정도 작게 산정되었다. 이는 흙막이벽의 휨 강성이 커서 벽체의 횡방향 변위가 작게 산정되었기 때문이며, 이로 인해 배면 지반의 체적변화(V_s)가 감소되었다.
- (3) 현장지반을 대상으로 탄소성보법에 의해 산정된 최대 휨모멘트와 전단력을 적용하여 고강도 결합 매입말뚝 흙막이벽체를 설계한 결과, 모두 탄성영역 내에서 부재력이 발생되어 안전한 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 조선대학교 2022년 학술연구비 지원으로 수행되었습니다. (주)더숲이앤씨의 고강도결합매입말뚝 계측 데이터 제공에 깊은 감사드립니다.

References

- Borja, R.L., Lee, S.R., 1990, Cam-Clay plasticity, Part 1: Implicit integration of elasto-plastic constitutive relations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 78(1), 49-72.
- Borja, R.L., Lee, S.R., Seed, R.B., 1989, Numerical simulation of excavation in elastoplastic soils, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13(3), 231-249.
- Bowles, J.E., 1988, *Foundation analysis and design*, 4th edition, McGraw-Hill Book Company, 468-668.
- Brown, P.T., Booker, J.K., 1986, Finite element analysis of excavations, School of Civil and Mining Engineering Research Report No. 532, The University of Sydney, 207-220.
- Caspe, M.S., 1966, Surface settlement adjacent to braced open cuts, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(4), 51-59.
- Choi, J.S., Yoon, E.J., 2007, Application of excellent-joint pile to improve waterproofing and continuous-boring in cast in place pile method, *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Annual Conference & Civil Expo*, Seoul, 850-853.
- Choi, Y.Y., 2010, Practical verifications for the advanced retaining walls of waterproofing and structural characteristics, Master's Thesis, Seokyeong University, 1-76.
- Clough, G.W., Tsui, Y., 1974, Performance of tied-back walls in clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 100, 1259-1273.
- Clough, G.W., Tsui, Y., 1997, Static analysis of earth retaining structures, In: Desai, C.S., Christian, J.T. (Eds.), *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, MGH Book Company, 506-527.
- Cole, K.W., Burland, J.B., 1972, Observation of retaining wall movements associated with a large excavation, *Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Madrid, 45-53.
- Coulomb, C.A., 1776, *Essai sur une application des regles de maximis et minimum a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture*, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Paris, 7, 343-382.
- Egger, P., 1972, Influence of wall stiffness and anchor prestressing on earth pressure distribution, *Proceedings of the 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Madrid, 259-264.
- Ghaboussi, J., Pecknold, D.A., 1984, Incremental finite element analysis of geometrically altered structures, *International*

- Journal for Numerical Methods in Engineering, 20(11), 2051-2064.
- Hong, W.P., 1985, A study on design of earth-retaining structure constructed by a row of bored piles, Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 5(2), 11-18 (in Korean with English abstract).
- Jang, J.S., 2006, Analysis on the earth retaining wall movement caused by deep braced excavation in soft ground, Master's Thesis, Konkuk University, 1-66.
- Jin, H.M., 2020, A study on the applicability of braced wall system using high strength concrete pile by test-bed, Master's Thesis, Keimyung University, 1-83.
- KEC(Korea Expressway Corporation), 2005, Detailed design criteria for Earth retaining facility, 1-27.
- KIBSE (Korean Institute of Bridge and Structural Engineers), 2018, A study on the design criteria of road bridges, 1-312.
- KSGE (Korean Society of Geotechnical Engineering), 2018, A study on the basic design criteria of structure, 1-892.
- Lee, J.H., 2019, Stability of a soil retaining wall to minimize displacement on deep excavation, Doctor's Thesis, Daejin University, 1-152.
- Lee, S.R., Bojja, R.I., Seed, R.B., 1989, Nonlinear elastoplastic finite element analysis of braced excavations in clay, Reserch Report No. SU/GT/89-01, Stanford University, 1-163.
- Liao, S.M., Li, W.L., Fan, Y.Y., Sun, X., 2014, Model test on lateral loading performance of secant pile walls, Journal of Performance of Constructed Facilities, 28, 391-401.
- Liu, G., Tang, L., Wu, Y., Wu, Y., Zhuang, Y., 2015, Study on the stress characteristics of the secant pile wall in the foundation pit support, Proceedings of the Seventh International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Nanchang, 1095-1100.
- Murphy, D.J., Clough, G.W., Woolworth, R.W., 1975, Temporary excavation in varved clay, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 101(3), 279-295.
- Rankine, W.J.M., 1857, On the stability of loose earth, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9-27.
- Shim, J.W., Son, S.G., Choi, J.S., Yoon, E.J., Yoon, S.J., 2008, A study on strength and waterproofing characteristics of excellent-joint pile (new cast in place pile method), Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Annual Conference & Civil Expo, Seoul, 917-920.
- Simo, J.C., Taylor, R.L., 1985, Consistent tangent operators for rate-independent elastoplasticity, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 48(1), 101-118.
- Terzaghi, K., 1936, A fundamental fallacy in earth pressure computations, Boston Society Civil Engineers Journal, 23(2), 71-88.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., 1967, Soil mechanics in engineering practice, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, 394-413.
- Tschebotarioff, G.P., 1973, Foundations, retaining and earth structures, 2nd edition, Mcgraw-Hill Book Company, Inc., New York, NY, 415-432.
- Yang, C.K., 2019, Aseismic characteristics of earth retaining structures by stiffness of wall and strut, Doctor's Thesis, Suwon University, 1-166.