

무지보 흙막이 트러스 구조물의 안정성 검토

Analysis of the non-supported excavation scrummed by truss tower

주용선¹⁾, Yong-Sun Joo, 조성근²⁾, Sung-Keun Cho, 김낙경³⁾, Soo-Il Kim,
김영석⁴⁾, Young-Suk Kim, 김주형⁵⁾, Ju-Hyung Kim

- 1) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ
- 2) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ
- 3) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Architecture and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ
- 4) 한국건설기술연구원 지방방재·환경연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Disaster & Environment Research, Korea institute of Construction Technology
- 5) 한국건설기술연구원 국토지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engrg., Korea institute of Construction Technology

SYNOPSIS : A finite element analysis was performed for new earth retention system that is a kind of truss tower with non-supported excavation. A 2D finite element model was adopted in this study to investigate the behavior of the earth retention system. Just because this non-supported truss tower system is too complex to model in 2D plain-strain condition to itself, so have to simplify it by the conception of equivalent rigidity. The horizontal displacement of the wall and lateral earth pressure distribution on the wall were computed. And it is compared with NAVFAC design manual.

Keywords : Excavation, Support, Non- supported wall, Plaxis, Finite Element Analysis

1. 서론

기존 흙막이 공사에서 가장 널리 사용되어 왔던 흙막이 공법은 버팀보 공법이다. 강재 스트럿은 굴착으로 인한 토압을 지지하는 압축 부재이다. 버팀보는 흙막이 띠장에 일정한 간격으로 설치되어 벽체로부터 띠장에 전달되는 굴착 토압을 개별적으로 지지한다. 버팀보 공법은 지보재인 강재 스트럿을 설치하기 용이하며 유압잭을 이용하여 부재에 선행 하중을 가하여 흙막이 벽체의 변형을 억제할 수 있다. 그러나 굴착 규모가 큰 현장에서는 많은 강재 스트럿과 부속 강재들이 소요되며 강재의 길이가 길어질 수 있어서 공사비용이 증가할 수 있다. 또한 지보재의 수가 늘어나기 때문에 굴착 현장에서 중장비의 움직임이 용이하지 않으며, 개별적으로 선행 하중을 가하기가 매우 번거롭다. 따라서 넓은 규모의 흙막이 굴착 현장에서는 앵커 공법이 매우 유용하다. 지반 천공 후 천공된 지반에 그라운드 앵커를 설치하고 그라우트를 주입한다. 이후 강선을 선행 긴장하여 흙막이 벽체에 고정시키며 이때 지반에서 유발된 마찰 하중이 활용된다. 최근 도심지에서 빈번하게 흙막이 공사가 진행되고 있는 가운데 매우 다양한 앵커들이 가시설 및 영구 흙막이 구조물에 적용되어 왔지만 도심 굴착 현장에 앵커를 지보재로 적용하게 될 경우에는 몇 가지 문제점들이 발생할 수 있다. 앵커 설치를 위한 지반 천공으로 인하여 도심 내에

복잡하게 분포되어 있는 상수도, 하수도, 전력선 등 지중 매설물들의 손상을 유발할 수도 있으며 사유지 침범 논란이 발생할 수도 있다.

최근 흙막이 공사의 환경은 위에서 언급한 것처럼 도심지 굴착이 많아지면서 기존 흙막이 공법을 적용함에 있어 발생하는 문제점들을 개선하고 보다 효율적이고 경제적이면서 안정적인 흙막이 공사를 수행하기 위한 대안으로 무지보 흙막이 공법을 개발, 제안한다. 무지보 흙막이 공법은 6개의 강관말뚝을 트러스 형태로 연결하여 흙막이 벽체를 지지하는 개념의 흙막이 공법이다. 기존 흙막이 공법에 비교하여 무지보 흙막이 시스템을 흙막이 공사에 적용하면 보다 넓은 작업 공간을 제공받을 수 있으며, 또한 지보의 사용 물량을 줄일 수 있어 보다 효율적이고 경제적인 공사를 유도할 수 있다.

본 연구는 무지보 흙막이 트러스 구조물의 안정성을 평가하기 위해 유한요소법을 이용하여 안정성 분석을 수행하였으며, 용이한 설계를 위한 평면 변형률 조건으로 해석 및 분석을 수행하였다.

2. 무지보 흙막이 트러스 구조물의 개요 와 평면변형률 조건으로 변환

2.1 무지보 흙막이 트러스 구조물의 개요

무지보 흙막이 트러스 구조물은 오거 굴착 후 수직부재인 6개의 강관말뚝을 매입한다. 6개의 강관 말뚝을 매입한 뒤 soil cement wall을 굴착배면에 시공하고 1단계 굴착을 실시한다. 이후 트러스 설치를 위해 트렌치 굴착을 실시하고 트렌치 굴착이 완료 되면 타워트러스 설치하는 방법으로 무지보 흙막이 트러스 구조물을 시공한다.

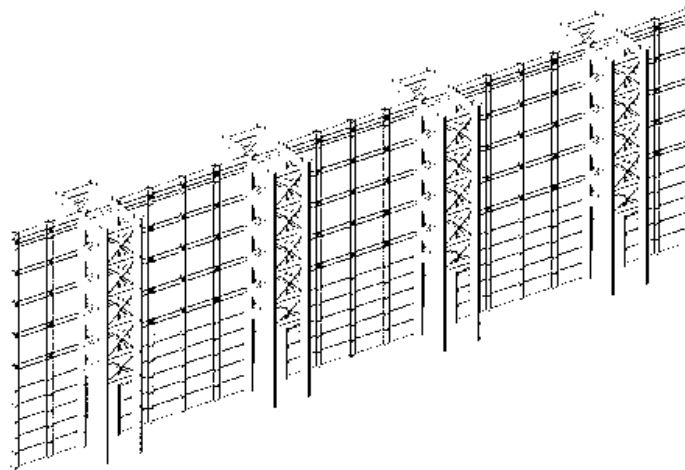


그림 1. 무지보 흙막이 트러스 구조물

무지보 흙막이 트러스 구조물은 굴착배면에 작용하는 측방토압을 수평 저항 말뚝과 트러스부재의 복합 구조로써 지지하는 구조물이다.

2.2 평면 변형률 조건의 등가 EI 흙막이 벽체 산정 방법

무지보 흙막이 시스템의 굴착 안정 분석을 위하여 복잡한 부재의 복합체로 구성된 흙막이 시스템을 단순화하여 구조적 안정 분석을 수행하였다. 복잡한 단면을 직사각형 단면의 벽체로 단순화 하여 유한 요소해석을 실시하는데 이를 위해서 무지보 흙막이 트러스 구조물을 등가 휨 강성(EI)의 단순 흙막이 벽체로 환산한다. 그림 2에서처럼 양단이 각각 힌지와 롤러로 구속된 단순보에서 임의의 지점(x)에 하중(P)을 가하여 생기는 변위(δ)는 식(1)과 같다.

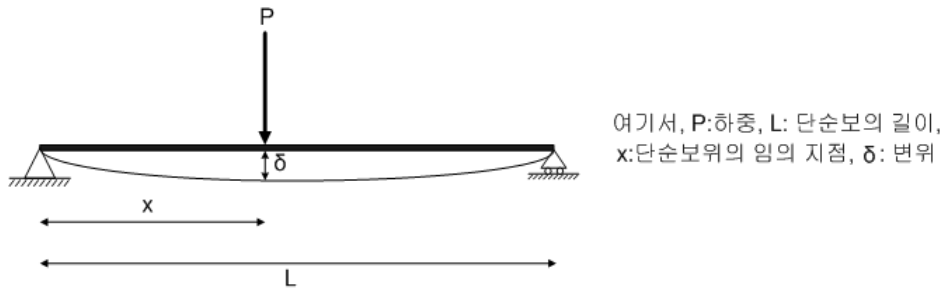


그림 2. 단순보에서의 하중과 변위

$$\delta = \frac{px}{48EI}(3L^2 - 4x^2), 0 \leq x \leq \frac{L}{2} \quad (1)$$

여기서, 식(1)을 하중(P)과 변위(delta)관계로 다시 나타내면 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{48EI}{x(3L^2 - 4x^2)}\delta \quad (2)$$

복잡한 트러스 구조물을 단순보의 방법에서처럼 각 단에 힌지와 롤러 절점을 설치하고 그림 3처럼 각 위치마다 하중(P)을 가하여 나타나는 변위(delta)를 이용하여 하중(P)-변위(delta) 관계를 구하였다.

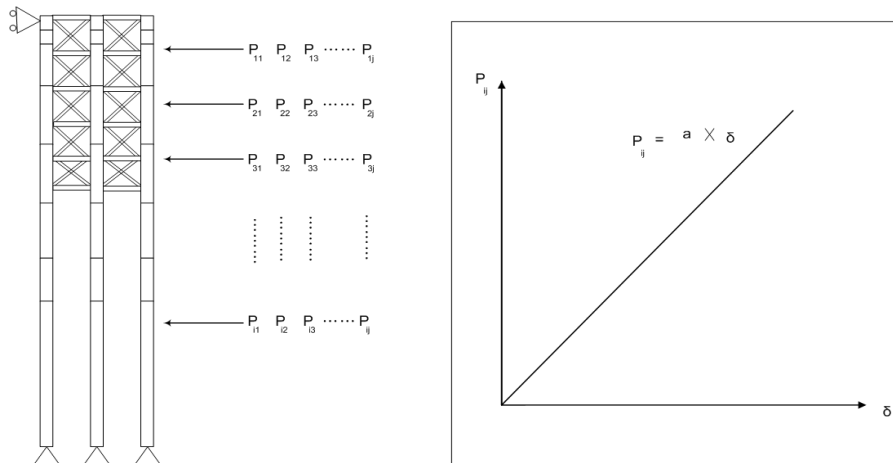


그림 3. 무지보 흠막이 트러스 구조물에서의 하중과 변위

2.3 범용 FEM 프로그램을 이용한 평면변형률 조건의 흠막이 벽체 산정 결과

트러스수평지지말뚝은 트러스와 기둥의 복합 구조이므로 단순한 수계산으로는 환산 EI를 산정하기 난해하므로 트러스 구조물의 거동을 유한요소해석법(FEM)을 이용한 수치해석을 이용하여 산정하였다. 휨을 받는 트러스 부재가 탄성거동을 한다는 가정 하에 휨모멘트가 최대가 되는 위치에서의 변위를 구한 후 하중과 변위의 관계를 이용하여 등가 환산 EI를 산정하였고 상용 FEM 프로그램인 Midas Civil을 이용하였다. 위의 과정을 거쳐 무지보 흠막이 트러스 구조물의 평면변형률 조건의 유한요소 해석할 단면 두께는 각 위치 단면두께의 평균값을 사용하였다.

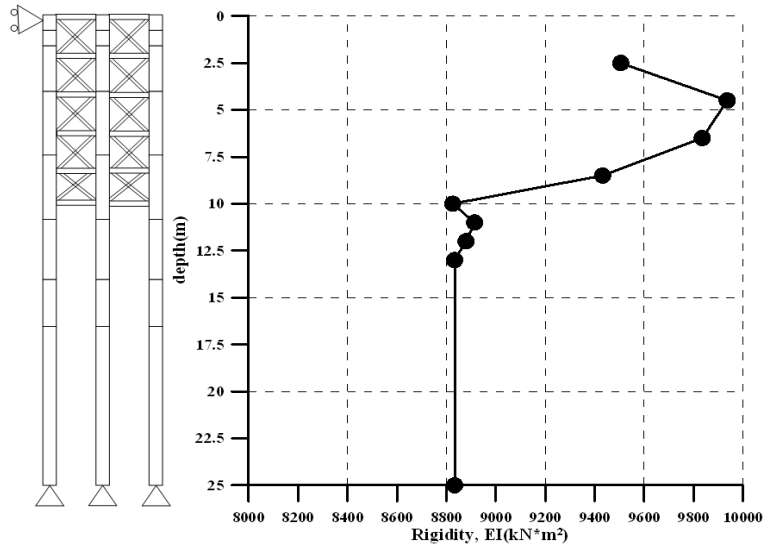


그림 4. 무지보 흙막이 트러스 구조물의 강성(EI)

3. 무지보 흙막이 트러스 구조물의 평면변형을 조건에서의 유한요소 해석

3.1 지반모델 및 흙막이 벽체 모델링

본 연구에서 사용한 유한요소프로그램은 네덜란드에서 개발된 지반공학전용 유한요소 프로그램인 Plaxis 8.5를 이용하였다. 유한요소 해석시 지반은 2차원 평면변형률 조건이며 15절점 삼각형 요소의 Mohr-coulomb 파괴규준을 적용한 탄소성 모델을 사용하였다. Mohr-coulomb 모델은 지반의 점착력(C), 내부마찰각(ϕ), 탄성계수(E), 포아송비(ν), 단위중량(γ) 및 팽창각(ψ)의 총 6가지 지반 정수가 필요하다. 유한요소 해석에 가정한 지반은 다음과 같은 물성치를 가지고 있는 지반으로 가정하였다.

표 1. 유한요소해석시 가정한 지반정수와 흙막이 벽체 물성치

굴착대상지반 토질정수	$E_s(kN/m^2)$	$\gamma(kN/m^3)$	$c(kN/m^2)$	$\phi(\text{degree})$	ν	$\psi(\text{degree})$	$k(m/day)$
	2000	18	0	30	0.3	0	
흙막이 벽체의 물성치	$EA(kN/m)$	$EI(kN \cdot m^2/m)$	$c(kN/m^2)$	$w(kN/m/m)$	ν	$\psi(\text{degree})$	$k(m/day)$
	7.88E+08	9.27E+06	-	0	0.33	-	-

3.2 굴착 단계를 고려한 해석

Plaxis 8.5를 이용한 2차원 평면변형률 조건에서 단계별 굴착 모사는 다음과 같은 과정으로 해석을 진행 하였다. 횡방향 토압을 받는 말뚝을 트러스 형으로 결합시키는 시공과정을 고려하여 단계별 굴착 깊이는 트러스 결합 위치와 동일한 위치로 가정 하였다.

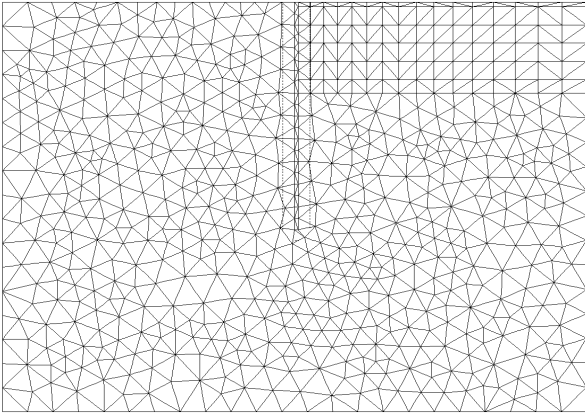


그림 5. 유한요소 망

표 2. 굴착단계와 깊이

굴착단계	깊이
1단계	0.5m
2단계	2.5m
3단계	4.5m
4단계	6.5m
5단계	8.5m
6단계	10m

4. 유한요소 해석 결과

굴착단계별 해석한 결과 각각 굴착 깊이에 따른 수평변위는 다음과 같다.

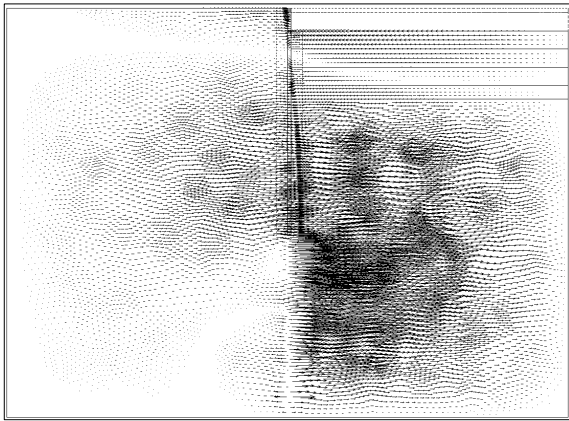


그림 7. 굴착으로 인한 수평변위(2.5m굴착)

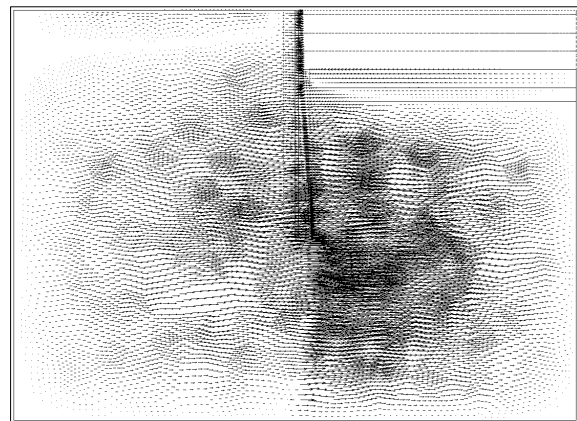


그림 6. 굴착으로 인한 수평변위(6.5m굴착)

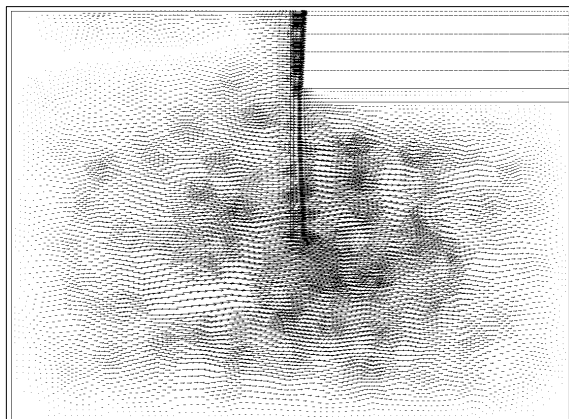


그림 9. 굴착으로 인한 수평변위(8.5m 굴착)

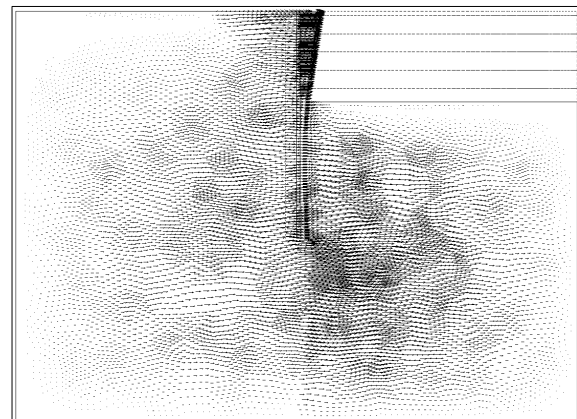


그림 8. 굴착으로 인한 수평변위(10m 굴착)

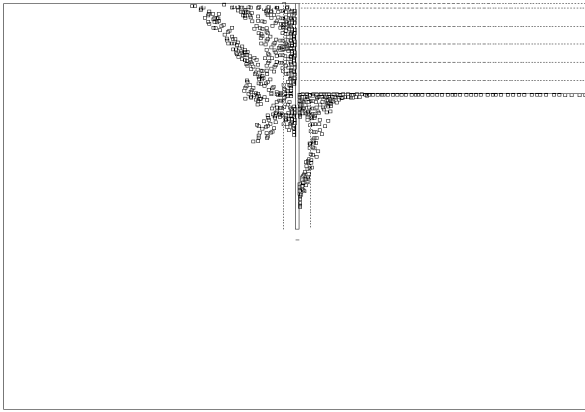


그림 10. 지반의 소성상태의 위치

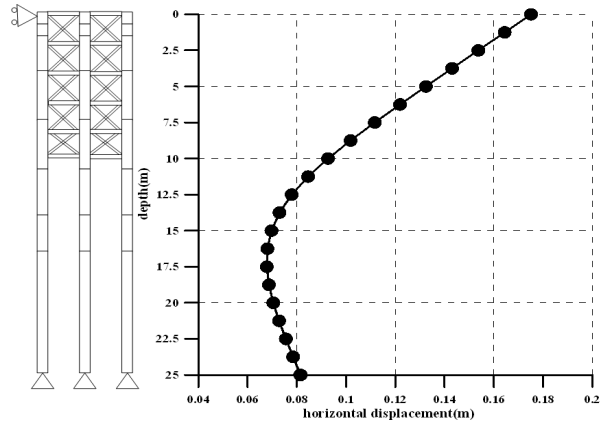


그림 11. 흙막이 벽체의 변형

평면변형률 조건에서 환산 흙막이 벽체의 단계별 굴착 후 벽체의 수평변위를 이용한 안정성 분석은 다음의 표 2를 이용할 수 있다.

표 2. Magnitude of Wall Rotation to Reach Active and Passive State (NAVFAC DM-7.2,1982)

Soil type and condition	Rotation (Y/H) for active state	Rotation (Y/H) for passive state
Dense Cohesionless	0.0005	0.002
Loose Cohesionless	0.002	0.006
Stiff Cohesive	0.01	0.02
Soft Cohesive	0.02	0.04

Note: Y=wall displacement and H= height of wall.

5. 결론

본 연구에서는 무지보 흙막이 트러스 구조물의 안정성 해석을 위해 트러스 형식의 흙막이 벽체를 등가의 휨강성을 갖는 평면변형률 조건의 단순벽체로 변형하여 유한요소 해석을 실시하였다. 단순화된 흙막이 벽체를 유한요소 프로그램인 PLAXIS 8.0을 이용하여 굴착단계를 모사한 해석을 실시하였다. 또한 해석 결과를 미국 해군공병단(NAVFAC) Design Manual-7.2(1982)을 참고하여 수평변위에 대한 안정성 검토를 실시하였다.

(1) 무지보 흙막이 트러스 구조물을 평면변형률 조건의 등가 휨강성을 갖는 단순한 벽체로 환산한 결과 약 0.4m 두께의 벽체로 환산할 수 있었다.

(2) 등가의 휨강성을 갖는 단순벽체를 이용하여 유한요소 해석을 한 결과 10m 굴착 결과 횡토압으로 생기는 벽체의 변위는 벽체의 상부에서 가장 큰 변위가 발생하였고, 이 변위는 미국 해군공병단(NAVFAC) DM에서 제시한 느슨한 사질토의 벽체 높이에 대한 변위비율인 0.002에 해당하는 0.2m 보다 작은 0.175m로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술평가원에서 진행 중인 첨단도시 개발사업과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bowles, J. E.(1988), "Foundation Analysis and Design" , 5th Edition, MGH
2. Foundations and Earth Structures, Design Manual 7.2, NAVFAC DM-7.2, 1982
3. Peck, R. B. (1969). "Deep excavations and tunneling in soft ground." Proc., 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Vol., 225-290.
4. Gregory P. Tschebotarioff(1978) "Foundations, retaining and earth structures" , 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc.
5. Terzaghi, K., and Peck, R. B. (1967). Soil mechanics in engineering practice, 2nd Ed., Wiley, New York.
6. PLAXIS사 "PLAXIS ver.8.0 manual"