

흙막이 벽체와 그라우트 특성에 따른 구조 · 수리상호 작용

Mechanical and hydraulic interaction between braced wall and groundwater

남택수¹⁾, Teak-Soo Nam, 윤재웅²⁾, Jau-ung Yoon, 권오엽³⁾, Oh-Yeob Kwon, 신종호⁴⁾, Jong-ho Shin

¹⁾ 포스코건설 토목환경사업본부 기사, Engineer. Posco Engineering & Construction Co., Ltd.

²⁾ 건국대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering Konkuk University

³⁾ 건국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

⁴⁾ 건국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk University

SYNOPSIS : For the deep excavation in urban area, the braced-cut method is mainly adopted. In this case, inadequate consideration of ground water level may result in wrong prediction of structural behavior. In this study, the effects of hydraulic interaction between wall and grout were investigated using the finite element method. The maximum stress in case of confined ground water condition is obtained at the final excavation stage in the range of 70~80% of excavation depth. The stress of impermeable case is about 50% larger than that of permeable case. When the relative permeability of wall-grout become smaller, the stress is getting bigger. And the stress tends to converge in case of 1/100 or less of the relative permeability.

Keywords : Hydraulic interaction, Braced-cut, Deep excavation, Grout, FEM

1. 서 론

흙막이 벽체를 이용한 굴착공사는 평형 상태를 이루고 있는 굴착 주변지반의 응력상태를 이완시키며, 주변의 지반 침하 및 흙막이 벽체의 변형을 유발시킨다. 이러한 변형은 응력의 재분배와 지하수위를 변화 시켜 새로운 평형상태에 놓이게 되며, 이 과정에서 여러 가지 안정성 및 지반공학적인 문제를 발생시킨다. 이와 같이 흙막이 벽체에 발생하는 여러 가지 문제는 토압 및 지반조건, 굴착 깊이, 시공방법, 벽체 지지구조 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받으며 값을 정확히 산정하는데 있어 어려움이 있다. 이러한 어려움을 해소하기 위해 Terzaghi-Peck(1967), Tschebotarioff(1973) 및 NAVFAC(1982)은 버팀보로 지지되는 흙막이벽체를 대상으로 현장계측을 통한 경험적 토압분포를 제안하였으며, 흙막이 벽과 굴착배면지반의 변형예측에 대한 연구로써 Mana와 Clough(1981) 그리고 Clough와 O'Rourke(1990) 등은 흙막이 벽의 최대 변위량으로부터 배면지반의 최대 침하량을 예측하는 기법에 대하여 연구를 제시하였다. 하지만 굴착 시공 현장의 깊이나 지하수 존재 유무 등 여러 가지 조건에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 토압 및 수압에 대한 정량적인 분석은 제시되지 않은 상태이며 굴착공사시 명확한 설계 및 해석에 있어 어려움을 겪고 있는 상황이다. 본 연구에서는 흙막이 벽체와 그라우트 특성에 따른 수리상호작용을 조사하여 흙막이 벽체의 거동 특성을 확인하였다.

2. 깊은 굴착의 수치해석모델링

본 연구에서 지반-구조물 상호작용 문제에서 이미 신뢰할 수 있는 결과를 보여준 (Potts and Zdravkovic, 1999) ICFEP(Imperial College Finite Element Program)을 사용하여 연계 FEM 해석을 실시하였다. D.M. Potts(2001)는 깊은 굴착 수치해석에서 흙막이 벽체와 주변 지반의 상대투수성을 고려

해야 한다고 했다. 일부 흙막이 벽체는 지반의 투수성보다 투수성이 좋은 경우도 있으며 벽체의 투수성에 따라 흙막이 벽체는 차수성 벽체 또는 개수성 벽체의 특성을 지닐 수 있다고 하였다. 또한 홍원표 et al.(1996)은 흙막이벽 배면 지반의 지하수위 또는 지반개량 공법에 따라 그라우트재의 투수성이 다름을 확인하였다.

본 연구에서 해석 모델의 좌, 우측 경계 및 모델 바닥의 수리 경계조건은 간극수압의 변화가 없는 것으로 설정하였다. 또한 굴착 경계부의 간극수압을 $0(u=0)$ 으로 설정하여 배수조건을 가정하였다. 4개의 지층으로 이루어진 지반에서 퇴적층과 화강토 지반에 시공되는 깊은 굴착 모델을 모사하였다. 굴착의 폭은 8.0 m, 깊이는 10.0 m로 구성되는 깊은굴착 시공이며, 흙막이벽체는 지표면 아래 12.0 m까지 관입 되도록 설정하였다. 또한 수평지보재로써 2.5m의 수직간격으로 Strut을 설치하였다. 수평경계조건에 의한 영향을 배제하기 위하여 모델링 폭은 굴착 폭의 20배인 160 m, 높이는 깊이의 4.8배인 48 m로 하였다. 퇴적토와 화강토를 적절히 표현하기 위하여 탄소성 해석모델은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 그림 1은 지반 및 지보재의 특성을 보인 것이며, 표 1은 해석에 사용된 지보재의 물성치를 나타낸 것이다.

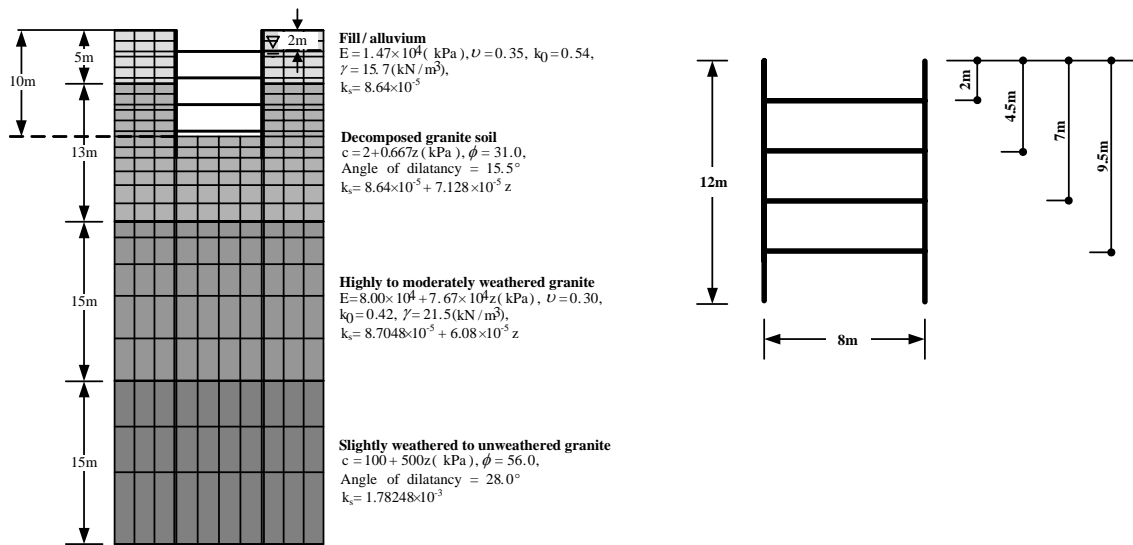


그림 1. 지반 및 지보재 Profile

표 1. 지보재 물성치

종류	Property				
	Area(m ²)	I(m ⁴)	E(kPa)	μ	k(m/s)
H-pile 및 토류관	0.0096	3.060×10^{-4}	2.3×10^6	0.15	-
Strut	0.0088	4.502×10^{-4}	2.6×10^6	0.15	-
L/W grouting	0.5	0.00225	2.2×10^5	0.2	$1.6 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-7}$

3. 해석조건 및 해석케이스

굴착현장에서 지하수의 수위변화 여부에 따라 흙막이벽체의 거동을 달리하므로 지표면 이하에 존재하는 지하수위를 구속상태(Confined condition)와 비구속상태(Unconfined condition)로 구분하여 해석을 실시하였으며, 추가적인 해석으로 지하수 처리 방법에 따른 흙막이 벽체를 차수성과 개수성으로 구분하여 벽체의 거동 및 지하수 흐름의 변화를 비교·검토하였다.

또한, 지반과 그라우팅의 상대투수성에 따른 거동을 확인하기 위하여 그라우트의 투수성을 지반의

1/10, 1/100, 1/1000으로 각각 감소시켜 해석을 수행하였다. 그라우팅 투수계수 산정은 지반의 그라우팅이 실시되는 지반의 평균 투수계수를 기준으로 설정하였으며 그 값은 $1.6 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 이다. 표 2는 본 연구에서 사용된 해석 케이스이다.

표 2. 해석 케이스

구분	세부조건	비고
지하수위 변화	구속조건(Confined)	• 구속조건: 수위 일정
	비구속조건(Unconfined)	• 비구속조건: 수위 저하
지하수 처리 방법	차수성 벽체	• 구속조건 • 차수성: $u=0, q \neq 0$, 그라우트 투수성= $0.001k_s$
	개수성 벽체	
그라우팅 투수성 (k_g/k_s)	free drain	• k_s : 지반
	0.1	• k_g : 그라우트
	0.01	• $k_s = 1.6 \times 10^{-5} \text{m/s}$
	0.001	

3. 해석 결과

3.1 구속 흐름조건과 비구속 흐름조건에 따른 흙막이 벽체의 거동

그림 2와 3은 구속 흐름조건과 비구속 흐름조건에 따른 전응력과 간극수압을 나타낸 것이다. 최대응력은 약 -7.5m 깊이에서 발생하였고 굴착 상부쪽에서 흙막이 벽체에 작용하는 응력은 구속, 비구속 조건에 상관없이 유사한 값을 나타내었으나, 굴착 깊이가 증가함에 따라 값의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 최대응력을 기준으로 구속조건의 작용응력이 비구속조건의 작용응력보다 약 30% 크게 발생하였다. 또한, 비구속조건의 경우 수위저하로 인해 최종 수위 깊이인 -5m 기준으로 수위면 상부에서의 Strut이 설치되어 있는 부분의 전응력 크기는 유사한 값을 나타내었으나, 최종 수위면 하부에 위치한 3번째 Strut의 전응력은 2번째 Strut에 비해 약 38% 증가하는 것으로 확인되었다. 또한, 수위 조건과 상관없이 두 케이스 모두 간극수압의 영향으로 인해 깊이가 깊어짐에 따라 작용응력의 크기가 점점 증가하는 것으로 나타났다.

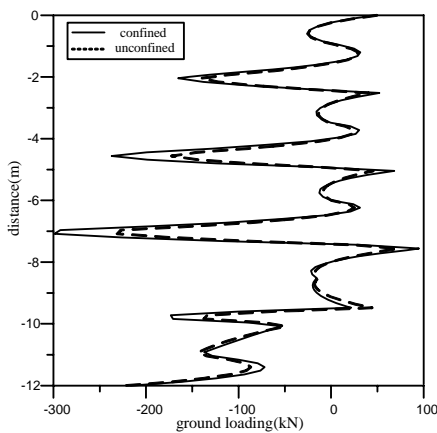


그림 2. 차수벽 흙막이 벽체에 작용하는 전응력

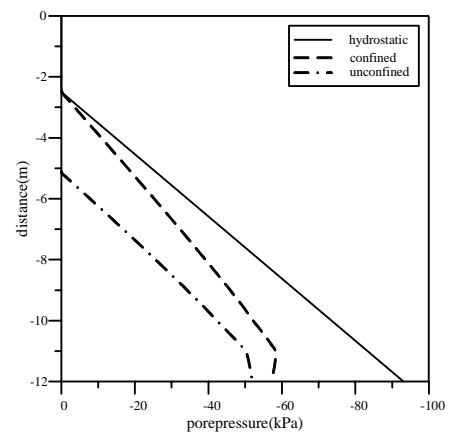


그림 3. 차수벽 흙막이 벽체에 작용하는 간극수압

3.2 지하수처리 방법에 따른 흙막이 벽체의 거동 특성

차수성 벽체의 경우 지표면으로부터 -7m 부근에서 최대 응력값을 나타내었으며, 그림 4에서와 같이 개수성 벽체와 비교하여 최대 응력값이 약 50% 크게 나타나는 것으로 확인되었다. 개수성 벽체의 경우 깊이에 상관없이 흙막이 벽체에 작용하는 응력의 크기가 유사한 값을 나타내는 반면, 차수성 벽체의 경우 깊이에 따라 전응력의 크기가 점점 커지며, 개수성 벽체와의 차이 역시 점점 커지는 것으로 나타났다. 그림 5는 지하수 처리 방법에 따른 벽체에 작용하는 간극수압을 나타낸다. 정수압과 비교해 개수성 벽체는 약 10%, 차수성 벽체는 68%가 수압으로 작용한다.

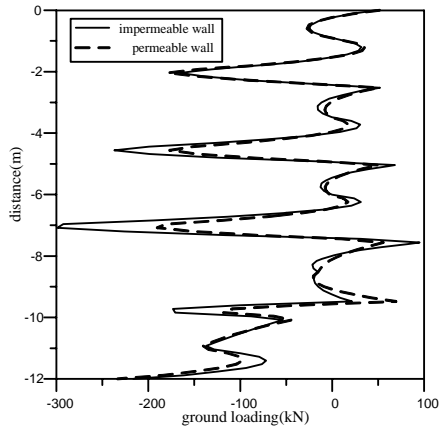


그림 4. 지하수 처리 방법에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 전응력

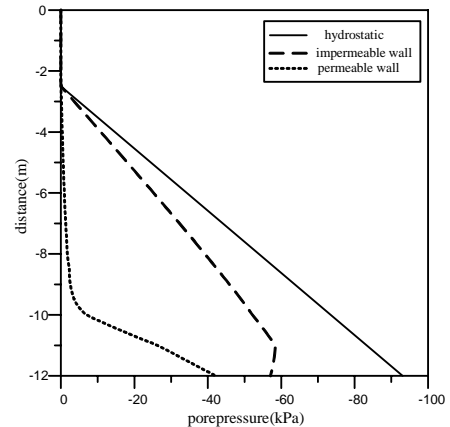
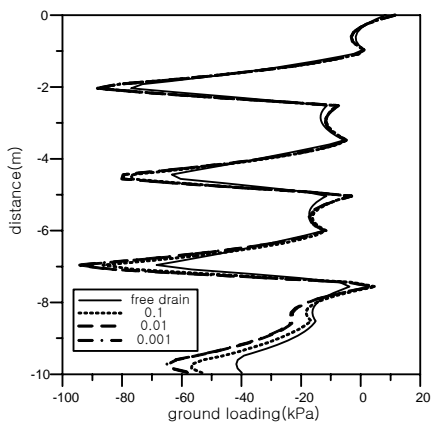


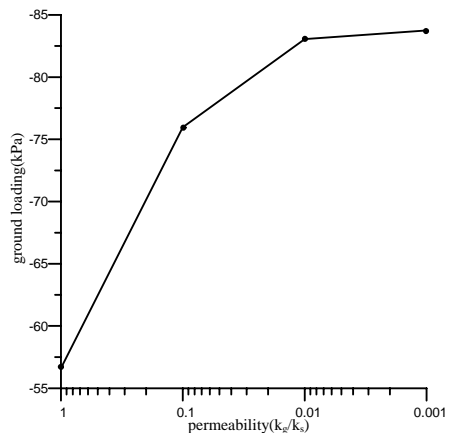
그림 5. 지하수 처리 방법에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 간극수압

3.3 지반-그라우트 상대투수성에 따른 거동 특성

지반-그라우트 상대 투수성에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 전응력은 그림 6에서와 같이 투수계수비가 낮아질수록 작용하는 전응력의 크기는 점점 커진다. 1/100 이하의 투수계수비에서는 일정값으로 수렴하는 경향을 나타내었다. 지반과 그라우팅재의 투수계수가 1/10일 경우 자유배수 상태에 비해 약 20%의 전응력이 전체적으로 더 발생하였으며, 1/1000의 경우 최대 전응력 값을 기준으로 자유배수에 비해 약 40%의 전응력이 더 발생하는 것으로 확인되었다. 또한 그림 7에서와 같이 투수계수비가 낮아질수록 흙막이 벽체에 작용하는 간극수압은 점점 커지는 것으로 나타났다.



(a) 전응력



(b) 투수성에 따른 최대전응력

그림 6. 지반-그라우트 상태 투수성에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 전응력

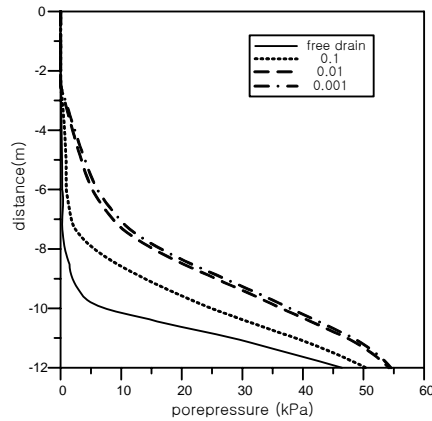


그림 7. 지반-그라우팅 상태 투수성에 따라 흙막이 벽체에 작용하는 간극수압

4. 결론

본 논문에서는 지하수의 영향을 받는 깊은 굴착구조물에서의 특정 조건하에서의 지반-흙막이구조물-지하수 사이의 상호관계를 살펴보고자 하였다. 지하수위 조건 또는 지하수 처리방법 등 지하수 영향에 따른 흙막이 벽체의 거동 특성과 더불어 차수성을 목적으로 시공되는 그라우팅의 지반/그라우팅 상대 투수계수비에 따라 작용하는 유속 백터 및 전응력 특성에 대하여 살펴보았다. 연구 결과 지하수 및 그라우팅 특성에 따른 흙막이 벽체의 거동 특성은 다음과 같이 확인되었다.

- 1) 구속조건의 경우 최종 굴착 깊이의 7~80%의 범위에서 흙막이 벽체에 작용하는 응력값이 가장 크게 나타나므로 설계시 주의가 필요한 것으로 판단된다.
- 2) 차수성 벽체는 자유배수를 실시하는 개수성 벽체에 비해 간극수압의 영향으로 인해 최대전응력 값이 약 50% 크게 나타났으며, 이는 차수성 벽체가 지반유실에는 효과적인 대책이지만 벽체에 근본적 부담을 가중시키는 것으로 판단할 수 있다.
- 3) 흙막이 벽체는 지반-그라우팅의 상대투수성이 작아질수록 차수성 벽체와 유사한 거동을 나타내었다. 그라우트재의 투수성이 지반 투수계수의 1/100이하가 될 경우 일정한 분포로 수렴하는 경향이 나타났다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 지반-구조물-지하수 상호 작용 이론에 기초한 지속가능한 스마트(smart) 지반배수 시스템 연구(R01-2008-000-20109-0)로 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 홍원표, 윤중만, 정형용(1996), "고압분사주입공법에 의한 지반개량사례연구", 한국지반공학회, 제 12권 5호
2. Clough, G. W., O'Rourke, T. D. (1990), "Construction Induced Movements of Insitu Walls", Design and Performance of Earth Retaining Structures, GSP, No. 25, ASCE, pp.439~470
3. D.M Potts and Zdravkovic (1999), "Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory", Thomas Telford, London

4. D.M. Potts and Lidija Zdravkovic(2001), "Finite element analysis in geotechnical engineering: application", pp.104-112, *Thomas Telford*
5. NAVFAC(1982), "*Soil Mechanics design manual*" Department of the Navy, Naval Facilities engineering Command
6. Mana, A. I. and Clough, G.W.(1981). "Prediction of movement for Braced Cuts in Clay", *ASCE*, Vol. 107, No.GT6, June
7. Terzaghi, K., Peck, R, B. (1967), "*Soil Mechanics in Engineering Practice*". 2nd Ed. John Wiley & Sons Inc. New York
8. Teschebotarioff, G.P.(1973), "*Foundation retaining and Earth structure*", 2nd ED. MGH