

응력-간극수압 연계해석을 이용한 흙막이 굴착시 지하수저하에 따른 지반침하에 관한 연구

Urban Excavation - Induced Ground Movement in Water Bearing Ground Using Stress-pore Pressure Coupled Analysis

최 고 니¹ Choi, Go-Ny

유 충 식² Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the results of a numerical investigation on the behavior of earth retaining wall system with emphasis on the groundwater lowering. Using the 2D stress-pore pressure coupled analysis, the effects of ground excavation and groundwater interaction were examined using wall horizontal deformation, ground surface movement, plastic strain pattern, effective stress distribution and axial stress of strut. In addition, based on the results from a parametric study on a wide range of soil profile and initial ground water table level, the ranges of wall displacement and ground deformation were suggested quantitatively.

요 지

본 연구에서는 흙막이 굴착 공사시 지하수저하에 의한 주변 지반의 공학적 거동에 관한 수치해석 연구내용을 다루었다. 먼저 2차원 간극수압-응력 연계해석을 통하여 굴착공사가 지반침하 거동에 미치는 영향을 알아보았으며 그 결과를 토대로 벽체 수평변형, 벽체매변 변형, 소성변형률 분포, 유효응력분포 및 버팀보 축력분포 등을 분석을 수행하였다. 한편 다양한 지층조건과 초기 지하수위 조건에 대한 매개변수 연구를 통하여 주변지반 및 버팀보의 거동을 분석하였으며 해석 결과를 토대로 특정조건에 대한 최대 지반변형범위를 제안하였다.

Keywords : Finite element analysis, Stress-pore pressure coupled analysis, Urban excavation

1. 서 론

최근 우리나라는 지상공간의 활용이 한계에 달하고 지상부 구조물의 시공에 따른 소음 및 진동, 지하수 고갈 등의 각종 환경민원이 사회적인 문제로 크게 대두되고 있다. 따라서 이러한 민원을 최소화하며 안정적이고 효율적인 국토 개발을 위한 대안으로 지하 대공간 활용의 중요성이 대두되어 굴착을 통한 지하공간 활용이

활발하게 진행되고 있다. 지하공간 건설을 위한 가설 흙막이 구조물이나 터널의 시공 등으로 지반이 굴착될 경우 굴착 공법, 주변 건물의 배치 및 굴착면의 지반조건 및 지하수의 상태 등에 의하여 굴착 안정성 및 주변 구조물 손상정도가 결정된다. 특히 지하수의 거동은 굴착이 진행되는 경우 지반의 응력해방으로 인한 평형상태 도달에 있어서 유효응력의 변화를 가져오기 때문에 굴착으로 인한 지반 변형에 결정적인 영향을 끼친다.

1 성균관대학교 초고층·장대교량학과 석사과정 (Graduate Student, Dept of Mega Buildings and Bridges, Sungkyunkwan Univ.)

2 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dep of Civil and Environmental Engrg., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이와 같이 굴착안정성에 결정적인 요인인 지하수 유동은 굴착면에 형성된 토사층의 두께 및 포화된 토사층의 비율, 초기 지하수위의 위치에 의하여 결정된다. 지하수 위 아래 영역을 굴착하는 경우 굴착면의 간극수압 변화에 의하여 지반내 유효응력장이 변화하고 이는 지반의 하중지지 능력을 감소시킴과 동시에 흙의 체적변화를 일으켜 지반 변형을 증가시킨다. 이러한 굴착에 대한 지하수 유동의 영향은 매우 결정적이나 기존 연구에 있어서 유효응력과 흙의 체적변화를 고려한 굴착 메카니즘 연구는 주로 터널굴착에만 국한되어 왔다. 또한 기존의 흙막이 굴착에 관련된 연구는 응력해석과 침투해석을 분리하여 수행한 후 침투력을 응력에 반영시키는 부분적 유효응력 해석이 대부분이며 유효응력과 흙의 체적변화를 고려한 연계해석을 굴착에 적용한 연구 또한 일부가 진행되었으나 적용사례를 소개하는 수준에서 이루어졌다.

따라서 본 연구에서는 2차원 평면 변형을 유한요소해석을 통하여 흙막이 굴착시 지하수저하에 따른 지반침하를 유효응력의 개념으로 접근하는 응력-간극수압 연계해석(이하 연계해석)을 적용하여 검토하였다. 다양한 지반 조건과 초기 지하수위 위치 조건을 적용하여 굴착시 지반 거동에 영향을 끼치는 요인들에 대한 매개변수 연구를 수행하였으며 벽체 수평변위, 벽체배면 수평변위 및 침하, 항복영역 분포, 유효응력 분포, 버팀보 축력 분포 등을 분석하여 지하수 유동과 지반변형과의 관계를 분석하였다.

2. 관련 연구 동향

지금까지 다수의 연구자에 의하여 지하수거동과 굴착 메카니즘에 대한 연구가 수행되었으며 1970년대에 들어서면서 현장계측과 수치해석이 적용되면서 지반굴착에 따른 주변 지반변형에 대한 연구가 본격화되었다. 지하수 변동을 고려한 연구를 집중적으로 살펴보면 유효응력을 적용하여 해석이 이루어지는 연계해석에 관련된 His와 Small(1992), Yang 외(2003), Yang 외(2007) 등의 연구가 있다.

His와 Small(1992)은 단일 조건의 점토지반에 대하여 가설 흙막이 시공시 응력해방과 지하수유동에 의하여 발생하는 지반변위에 대한 연계해석 방법(a fully coupled method)를 제시하였다. 연계해석시 적용되는 강도행렬을 소개하고 예제를 통하여 유효응력에 의하여 지배되는 간극수압 분포, 유속벡터, 지반변형 등 연계해석 결과를 분석한 바 있다. 한편 기존의 연계해석에 관련된

연구는 터널 및 옹벽에도 적용되었는데 Yang 외(2003)는 지하수 유동의 영향을 받는 옹벽설계시 연계해석을 적용시키는데 해석방법을 연구하였고 Yang 외(2007)는 석회 대수층에 터널시공시 모델링 방법과 CASE Study를 통한 수치해석결과를 제시하였다.

국내 연구는 대부분 가설 흙막이 시설 시공에 대한 흙막이 벽체나 주변 지반의 응력해석에 관한 연구가 주를 이루며 지하수 유동을 고려한 연계해석 연구는 터널 관련이나 현장실험에 관련된 연구가 주를 이룬다. 대표적인 연구로는 유충식과 김연정(1997), 유충식(2004), 신방웅과 이홍길(2005), 김형목 외(2008) 등의 연구가 있다.

기존의 가설 흙막이 시설 시공에 관한 지반 및 벽체 변위에 관련된 연구는 유충식과 김연정(1997), 안종필과 박경호(2002), 김학문과 황의석(2007) 등 체계적인 연구가 이루어졌으나 지하수위는 고려되지 않은 전응력 해석이 적용되었으며 지하수위가 고려된 유충식(2004)의 연구는 3차원 터널굴착 유한요소해석을 실시하여 터널시공과 지하수 유동 및 지반 변형에 관한 연구를 수행한 바 있다. 또한 신방웅과 이홍길(2005)는 해안 매립지반 대심도 토사에 대하여 함수특성 시험을 실시하고 침투류 해석을 실시하여 부정류 침투해석의 필요성을 강조한 바 있으며 김형목 외(2008)은 암반에 공동을 굴착하고 현장수리시험을 실시하여 굴착영향영역의 투수특성을 평가한 바 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 국내외 기존 연구는 연계해석을 소개하거나 전응력해석을 통한 매개변수 연구, 굴착과 지하수 유동에 대한 시공현장의 현장실험이 주를 이루었다. 한편 전응력해석보다 실제 지반의 거동이 정밀하게 묘사되는 연계해석이 적용된 흙막이 굴착 시공에 관한 지하수 영향에 대한 매개변수 연구는 매우 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 지반조건과 초기 지하수위 위치 조건을 적용하여 굴착시 지하수 유동 및 지반거동을 분석하고 이러한 분석에 근거하여 특정 지반조건과 초기 지하수위 위치에 의하여 결정되는 최대 벽체 변위 및 최대 침하 범위를 제안하였다. 또한 추후 시공현장에서의 계측자료를 활용하여 연계해석 결과와 현장 시공 결과의 비교 및 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3. 매개변수 연구

본 연구는 흙막이 굴착시 지하수저하에 따른 지반침하

변화 경향을 분석하기 위하여 풍화토(H_S), 풍화암(H_{WR}), 연암 층으로 구성된 지반 조건에 대한 2차원 평면변형률을 적용한 유한요소 모델을 구축하였고 토사층 두께와 초기 지하수위 위치를 변화시키며 해석을 수행하였다. 굴착단계별로 2m씩 11단계에 걸쳐 굴착이 모사되었으며 굴착단계별 지반변위와 응력분포, 간극수압 분포 및 버팀보 축력 분포 등을 분석하여 특정 지반조건에서 지하수위를 고려한 연계해석의 지반침하 경향을 분석하였다.

3.1 대상조건

본 연구에서는 그림 1과 같이 풍화토(H_S), 풍화암(H_{WR}), 연암 층으로 구성된 지반 조건에 대하여 11단계에 걸쳐 총 21.3m를 굴착하는 형태로 모델링하였으며 풍화토층

내 지하수에 의하여 포화된 층을 $H_{W,S}$, 풍화암층 내 지하수에 의한 포화된 층을 $H_{W,WR}$ 로 정의하였다. 본 해석에서 채택한 각 단계별 굴착과정 개요도는 그림 2에 나타나 있듯이 1단계 2m씩 총 10단계 굴착 후 마지막 11단계에는 1.3m로 굴착이 이루어진다. 버팀보는 굴착단계에 맞추어 $GL-1(m)$ 에서 2m간격으로 총 10개가 모델링 되며 벽체의 총 길이는 연암에 1m 근입되어 22.3m이다. 또한 표 1과 같이 토사층의 두께를 0.53H, 0.67H, 0.77H, 0.86H로, 초기 지하수위의 위치를 GL-1, 3, 5, 7(m)로 변화시키며 굴착 조건에 대한 매개 변수 연구를 실시하였다.

3.2 해석 모델링

본 연구의 유한 요소 해석은 응력-간극수압 연계해석

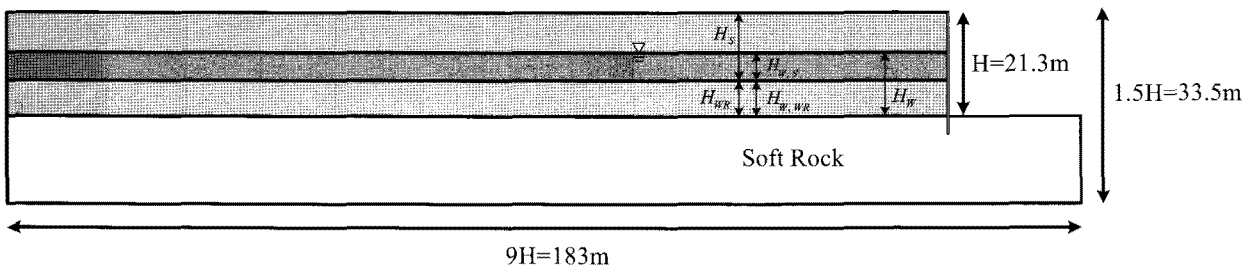


그림 1. 해석에 사용된 모델조건

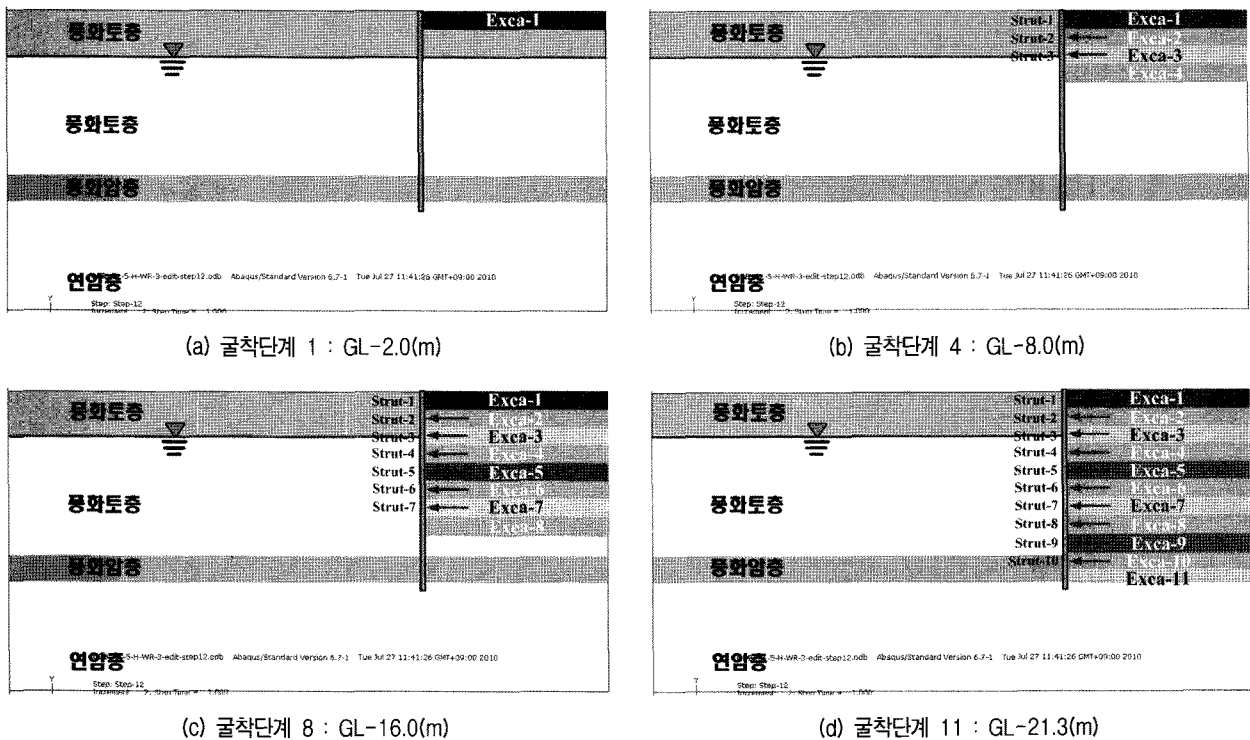


그림 2. 시공과정 모델링

으로 효용성이 검증된 범용 유한요소 해석 프로그램 Abaqus 6.7을 사용하여 수행하였다. Abaqus 6.7은 다양한 지반 구성모델을 제공하여 지반의 탄소성 거동을 효율적으로 모사하며 굴착 시공과정의 모델링에 필수적인 요소의 제거 및 추가 기능이 탁월하고 구조부재의 모델링에 있어서 다양한 종류의 요소를 제공한다.

해석 단면의 경우 단면이 좌우 대칭인 점을 감안하여 반단면 해석을 수행하였으며 총 11467개의 절점과 3750개의 요소로 구성되었다. 또한 그림 3과 같이 경계면 설

치로 인한 지표 침하의 오차를 최소화 할 수 있도록 세로 방향으로 약 1.5H(H=굴착깊이), 가로방향으로 9H의 크기로 모델을 결정하였고 경계조건 설정에 있어 하부에 연직 및 수평변위가 구속된 힌지 및 양 수직경계면에는 경계면의 수평방향 변위를 구속하는 롤러를 설치하였다.

해석 영역의 이산화에 있어 지반 및 벽체는 8절점 가감 적분 응력-간극수압 연계 고체요소(CPE8RP)를 이용하여 모델링하였으며 버팀보는 1절점 스프링요소(SPRING1)를 이용하여 모델링 하였다. 한편, 지반과 가시설 벽체

표 1. 매개변수 지반조건

CASE	지하수위위치(GL-m)	$H_s(m)$	$H_{WR} = H_{W,WR}(m)$	$H_{W,S}(m)$	$H_{W,S}/H_s$	H_w/H
1	1	18.33	3	17.33	0.95	0.95
2		16.33	5	15.33	0.94	
3		14.33	7	13.33	0.93	
4		11.33	10	10.33	0.91	
5	3	18.33	3	15.33	0.84	0.86
6		16.33	5	13.33	0.82	
7		14.33	7	11.33	0.79	
8		11.33	10	8.33	0.74	
9	5	18.33	3	13.33	0.73	0.76
10		16.33	5	11.33	0.69	
11		14.33	7	9.33	0.65	
12		11.33	10	6.33	0.56	
13	7	18.33	3	11.33	0.62	0.67
14		16.33	5	9.33	0.57	
15		14.33	7	7.33	0.51	
16		11.33	10	4.33	0.38	

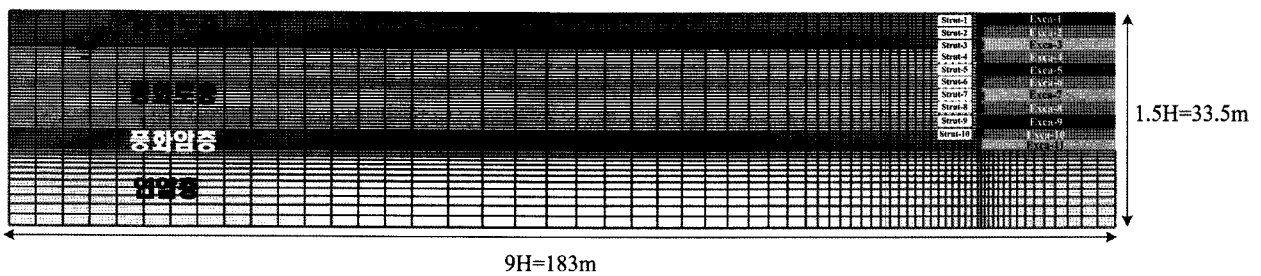


그림 3. 해석에 사용된 유한요소망

표 2. 해석에 적용된 지반 및 지보재의 역학적·수리학적 특성

구 분	습윤 단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	프라이승비	투수계수 (cm/sec)	초기 축압계수
풍화토	20	5	30	20	0.3	1×10^{-3}	0.56
풍화암	22	50	32	70	0.3	1×10^{-4}	0.47
연암	25	500	35	200	0.3	1×10^{-5}	0.5
벽체				21,000	0.3	5×10^{-6}	
Int	User Material						
버팀보	H- 350×350×12×19, 수평간격 2.5m						

사이의 인터페이스 영역은 약 50kN/m 정도의 전단강성을 부여하여 벽체와 지반 사이의 미끄러짐 거동이 발생할 수 있도록 하였다.

재료 모델링에 있어 해석 대상 지반은 Mohr-Coulomb 파괴규준과 비관련흐름 법칙을 따르는 탄소성 재료로 간주하였으며 벽체는 탄성재료로 가정하였다. 또한 해석에 필요한 지반의 강도 정수 및 지보재의 역학적·수리학적 특성은 구체적 수치에 대한 수집이 불가능하여 설계회사에서 일반적으로 통용되는 수치를 적용하였으며 적용된 물성치는 표 2와 같다.

4. 지하수 저하에 따른 지반침하 결과분석

해석결과는 토사층 두께와 초기 지하수위 변화에 따른 굴착면 벽체의 수평변위 및 벽체 배면의 수평·연직 변위, 버팀보 축력분포, 굴착과정에 따른 간극수압 분포, 지하수 유속벡터 변화경향을 평가할 수 있도록 굴착 과정에 따른 분석을 수행하였다. 또한 토사층 두께와 초기 지하수위 위치가 상기 항목에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 고찰이 가능하도록 해석결과를 정리·분석하여 토사층 두께와 초기 지하수위 위치와 굴착시 지반변형에 대한 관계를 정량적으로 평가하였다.

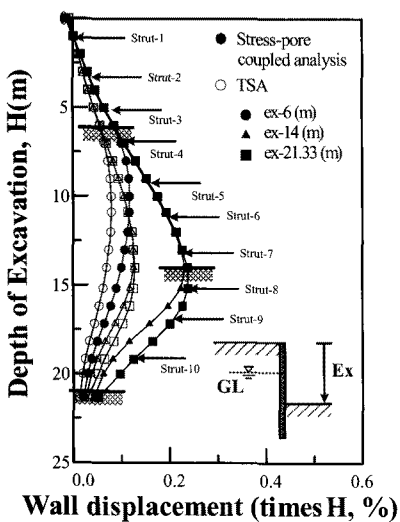
4.1 연계해석 VS 전응력해석

본 절에서는 지하수저하에 따른 지반침하의 영향을

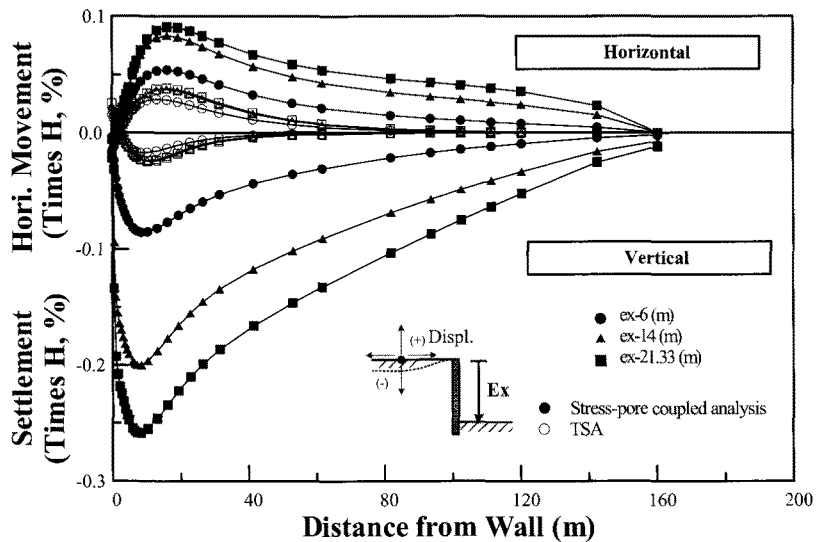
분석하기 위하여 그림 4~9와 같이 굴착단계별 벽체 수평변위 및 벽체배면 수평·연직변위 변화 경향 등을 토대로 응력-간극수압 연계해석(Stress-pore pressure coupled analysis)과 전응력해석(total stress analysis, TSA) 결과를 비교하였다.

앞서 언급한 바와 같이 굴착에 따른 지하수위 저하는 지반내 간극수압의 감소를 가져오며 이는 곧 유효응력의 증가로 이어지고 TSA 해석결과와 비교해 볼 때 추가적인 지반침하가 발생한다. 즉, 본 절에서는 지하수의 영향을 극대화시킨 조건인 초기 지하수위의 위치가 가장 높고 토사층의 두께가 두꺼운 CASE($GL-1(m)$, $H_{WR}-3(m)$)의 연계해석 결과를 전응력해석과 비교분석하고 다음 절에서 각각적인 매개변수 분석을 다루도록 한다.

그림 4는 굴착단계별 벽체 수평변위와 벽체 배면지반의 수평변위 및 침하 발생 경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 연계해석의 경우 최종 굴착단계에서 벽체 저부의 변위가 최대 48mm, 벽체의 배면지반의 수평변위는 최대 18mm, 침하량은 최대 52mm 정도가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 전응력해석시 지반의 변위를 과소평가하는 결과를 보여주며 전응력해석과 비교해 볼 경우 연계해석은 침투수압에 의한 벽체 좌측의 외력 증가와 벽체 후측에서의 상향 침투로 인한 지반의 유효응력 감소에 따른 전단강도 감소가 발생하여 이에 의한 지반의 저항력 감소가 발생한 결과이다. 그림 5와 같이 굴착단계별 지하수 저하에 따른 간극수압 분포도와 지하수 유속벡터를 보면 이와 같은 경향을



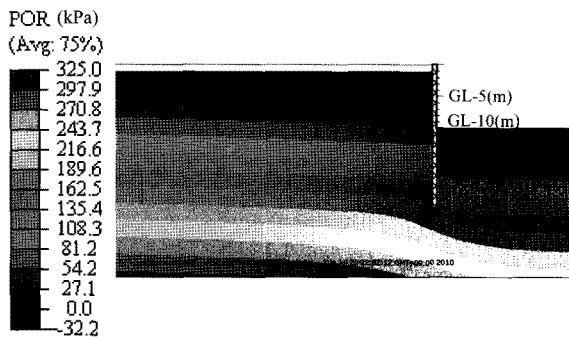
(a) 벽체 수평변위



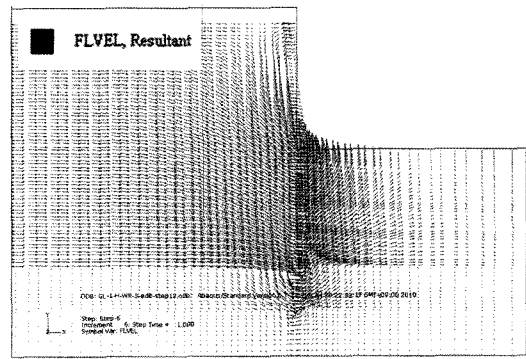
(b) 벽체 배면 수평변위 및 침하

그림 4. 굴착단계별 벽체 수평변위 및 벽체배면 수평변위, 침하

굴착 깊이 : $GL-10(m)$

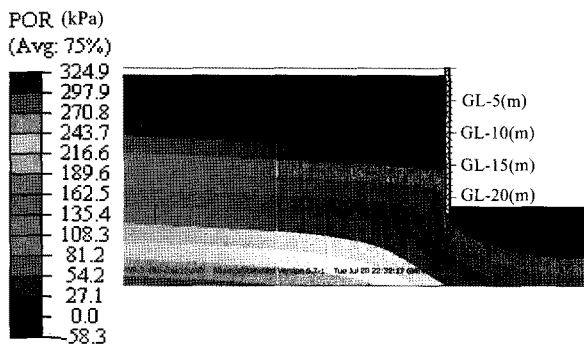


(a) 간극수압 분포도

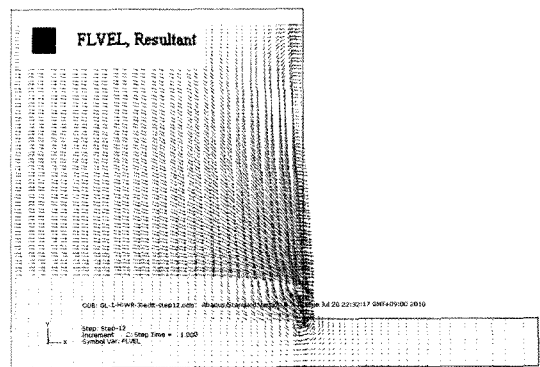


(b) 지하수 유속벡터

굴착 깊이 : $GL-21.33(m)$



(c) 간극수압 분포도



(d) 지하수 유속벡터

그림 5. $GL-1(m)$, $H_{WR}-3(m)$ 의 굴착단계별 간극수압 분포도 및 지하수 유속벡터

확연히 관찰할 수 있다.

표 3에서 보이는 바와 같이 연계해석의 결과가 전반적으로 전응력해석 결과에 비해 2~10배 큰 것으로 나타났다으며 이는 지하수위가 존재하는 굴착조건에 대하여 전응력해석만을 실시할 경우 해석결과의 신뢰성에 문제를 일으킬 수 있을 것으로 판단된다. 전응력해석의

경우 최종 굴착단계의 벽체 수평변위가 연계 해석결과의 54% 및 벽체 배면지반의 수평변위는 42%, 침하량은 10% 정도로 나타났으며 이는 지하수 저하를 허용할 경우 과도한 지반침하로 인해 주변 구조물에 막대한 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다.

그림 6은 굴착 최종단계시 벽체의 최대 수평변위가 발

표 3. 굴착단계별 벽체 최대 수평변위

굴착깊이(m)	연계해석(mm)	전응력해석(mm)
2	7.62	5.70
4	15.94	11.13
6	23.46	15.79
8	31.12	19.53
10	37.87	22.35
12	43.05	24.06
14	46.52	25.17
16	46.96	25.72
18	47.06	25.72
20	46.99	25.70
21.33	47.67	25.70

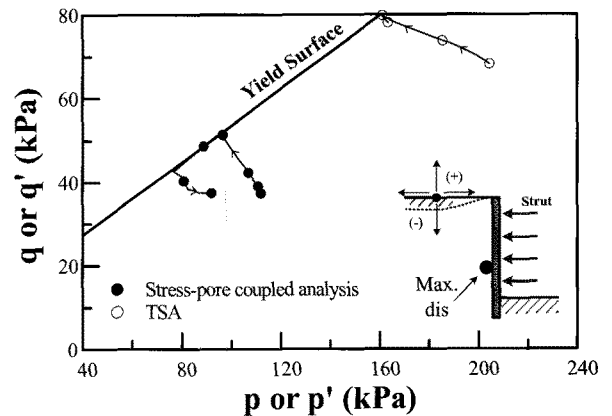
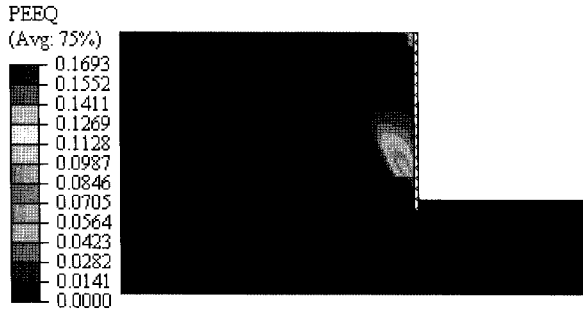
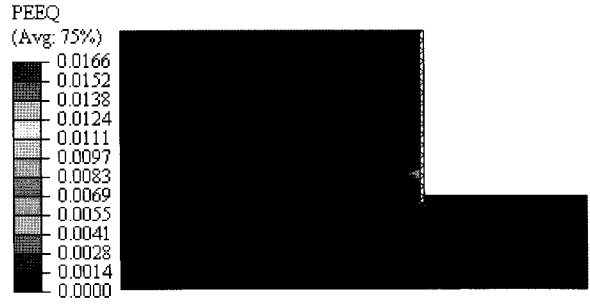


그림 6. 최대 벽체 변위 지점의 응력경로



(a) 연계해석 PEEQ



(b) 전응력해석 PEEQ

그림 7. 최종굴착단계의 PEEQ

생하는 지점의 굴착에 따른 응력경로를 보여주고 있다. 연계해석의 경우 연계해석의 경우 유효응력 및 전응력해석의 경우 전응력으로 표현하였으며 매 굴착단계별로 발생하는 한 지점의 최대주응력(σ_1)과 최소주응력(σ_3)에 의하여 결정되는 p 와 q 는 아래 식과 같이 정의된다.

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (1)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$

그림 6에서 보이는 바와 같이 굴착과 동시에 p 는 감소하고 q 는 증가하여 항복면에 도달한 후 연계해석의 경우 항복면을 따라 p 와 q 가 감소하는 양상을 보이고 있는데 이는 굴착에 의한 응력재분배가 발생하여 평형조건을 만족하지 못하고 풍화토 층에서 항복이 발생함을 의미한다. 연계해석의 경우 $GL-6(m)$ 까지 굴착하였을 때 이미 항복영역이 발생하며 전응력해석의 경우 최종굴착단계에서 항복영역이 발생한다. Abaqus 6.7에서 항복영역은 등가소성변형률(PEEQ, Equivalent plastic strain)이 발생하는 영역으로 판정할 수 있으며 등가소성변형률은 재료의 파괴지표로 사용되며 식 (3)으로 표현할 수 있으며 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따르는 등가소성변형률은 식 (4)로 결정되어진다.

$$PEEQ = \bar{\epsilon}_0^{pl} + \int_0^t \dot{\epsilon}^{pl} dt \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \int \frac{1}{c} \sigma : d\epsilon^{pl} \quad (4)$$

이 때 $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ 는 초기 소성변형률, σ 는 요소에 작용하는 압축응력, c 는 Mohr-Coulomb 파괴규준의 강도정수인 점착력이다.

최종 굴착단계에서의 항복영역의 분포는 그림 7과 같으며 연계해석과 전응력해석에서 발생하는 항복영역의 분포차이가 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 지하수위 아래에서 굴착이 되는 경우 유효응력이 간극수압으로 인해 현저히 낮아지기 때문으로 연계해석을 수행하여야만 정확히 모사할 수 있는 현상이다. 이는 지하수위가 존재하는 지층의 굴착단계를 수행하는 해석에서 연계해석의 도입이 절대적으로 필요함을 의미한다.

그림 8은 굴착단계별 버팀보 축력 분포 경향을 보여주고 있다. 먼저 연계해석과 전응력해석 결과 모두 최대 압축력은 최종굴착단계 최하단 버팀보에서 발생한다. 연계해석 결과 330kN, 전응력해석 결과 240kN의 축력이 발생하며 이는 전응력해석 결과가 연계해석 결과의

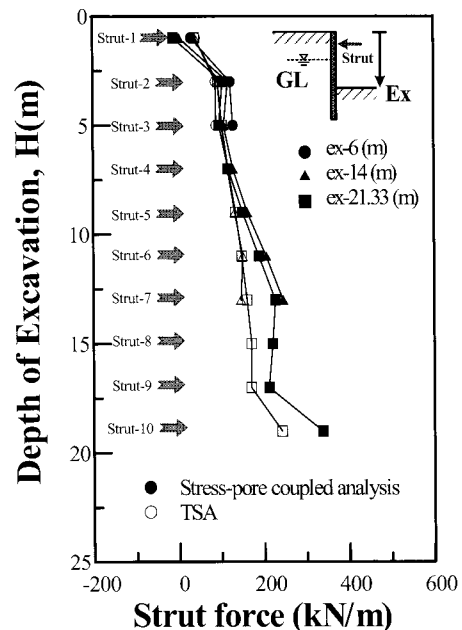


그림 8. 굴착단계별 버팀보 축력 분포도

약 73%에 미치는 크기이다. 또한 전응력해석의 경우 모든 버팀보가 총 굴착단계에서 항상 압축력만 발생하는 반면 연계해석의 경우 최상단 버팀보에서 $GL-16(m)$ 굴착시부터 인장응력이 발생하여 최종단계 굴착시 12kN의 인장력이 발생한다. 이러한 버팀보의 축력 분포 경향은 최종 굴착단계의 주응력 분포를 그린 그림 9를 통하여 분석할 수 있다.

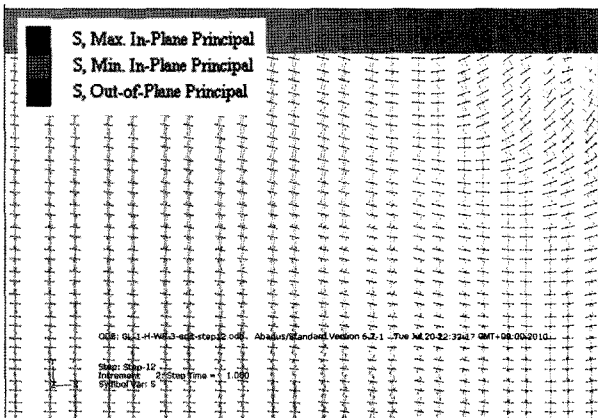
그림 9(a), (b)에서 보이는 바와 같이 굴착면 최상단 우측의 응력분포를 살펴보면 연계해석의 경우 최상단 버팀보가 설치되는 위치의 최소주응력이 전응력해석 결과보다 3배 크게 발생하며 그림 4(b)와 같이 벽체 배면의 침하가 10배 크게 발생하기 때문에 벽면 우측 풍화토가 좌측으로 이동하여 버팀보에 인장력이 발생한다. 또한 그림 9(c), (d)에서 보이는 바와 같이 최하단 버팀보가 설치되는 위치에서의 최대주응력이 연계해석에서는 거의 발생하지 않으나 전응력해석에서는 굴착상부의 분

포와 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이러한 응력 분포의 차이에 의하여 하부 버팀보의 압축력 차이가 발생하며 이는 간극수압을 고려한 연계해석결과와 전응력해석의 굴착시 응력 재분배 결과가 판이하게 다를 것을 의미한다. 즉 간극수압 변화에 의한 유효응력의 개념으로 흙/암반 층의 응력-변형률-강도 관계를 모사하는 연계해석은 전응력해석과 비교할 때 실제 거동을 정확히 모사할 수 있으므로 굴착설계단계에서 수행되는 해석에서 기존의 응력해석과 침투해석을 수행하여 접근하는 방식보다 연계해석 적용의 필요성을 강조하는 부분이다.

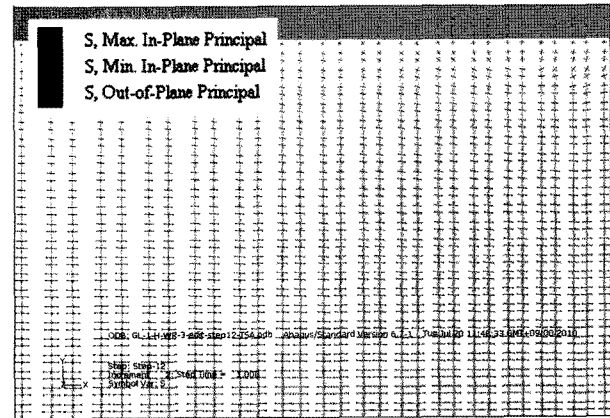
4.2 토사층 두께의 영향

본 절에서는 연계해석시 토사층의 두께가 굴착단계 별 지반침하에 미치는 영향을 분석하기 위하여 토사층

굴착면 최상단

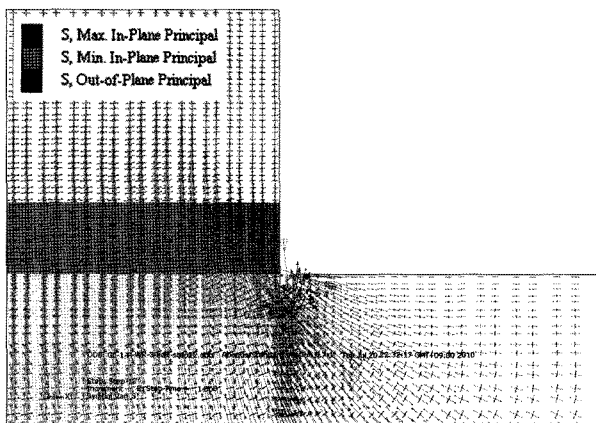


(a) 연계해석 주응력 벡터

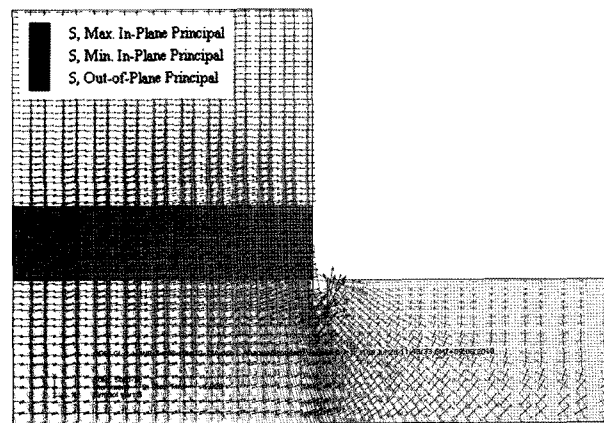


(b) 전응력해석 주응력 벡터

굴착면 최하단



(c) 연계해석 주응력 벡터



(d) 전응력해석 주응력 벡터

그림 9. 최종굴착단계의 주응력 벡터

변화를 극대화 할 수 있는 지하수위가 가장 높게 형성된 CASE($GL-1(m)$) 중 $H_{WR}-3(m)$, $H_{WR}-10(m)$ 인 경우를 대상으로 얻어진 해석결과를 검토하였다.

그림 10에서 보여주는 굴착단계별 벽체 수평변위와 벽체 배면지반의 수평변위 및 침하 발생 경향을 살펴보면 토사층 두께에 따라 굴착시 흠압반의 거동이 크게 변화함을 확인할 수 있다. 표 4에서 마찬가지로 볼 수 있듯이 최종 굴착 단계시 $H_{WR}-3(m)$ 인 CASE에서 벽체의 수평변위가 약 48mm가 발생하는 한편 $H_{WR}-10(m)$ 인 CASE에서는 약 21mm가 발생하여 $H_{WR}-3(m)$ 인 CASE의 44% 정도의 변위가 발생하였다. 벽체 배면의 수평변위 및 침하 또한 토사층이 얇게 분포할수록 변위가 줄어드는 경향을 보이는데 수평변위의 경우 73% 및 침하량

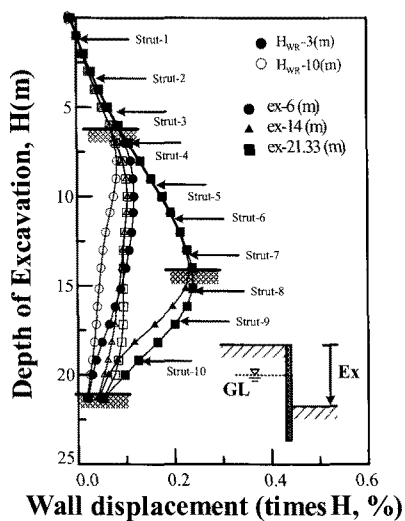
의 경우 71% 수준으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 지반형성 조건에 따라 지층별로 투수계수 차이가 존재하기 때문으로 그림 11의 유속벡터를 통한 지하수 흐름 변화 경향을 통하여 분석할 수 있다.

그림 5와 11을 비교해 보면 투수계수가 비교적 큰 풍화토층을 굴착하는 단계에서 풍화암층을 굴착하는 단계보다 벽체 우측면에서의 상향침투가 크게 발생하여 풍화토층의 전단강도 감소에 의하여 벽체의 수평변위가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 $H_{WR}-3(m)$ 인 CASE는 풍화토층의 약 3/4지점인 $GL-16(m)$ 에서 최대 수평변위가 발생하는 반면 $H_{WR}-10(m)$ 인 CASE는 $GL-14(m)$ 에서 발생하는데 이는 벽체 좌측에서의 침투수압이 투수계수가 큰 풍화토층에서 보다 크게 작용하므로 토사층 두께에 따라 최대 수평변위가 발생하는 위치도 변화하는 것으로 나타났다. 이러한 경향으로부터 토사층 두께는 주변 지반의 변위와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 최종굴착단계의 지반 변위 분포는 그림 12와 같다.

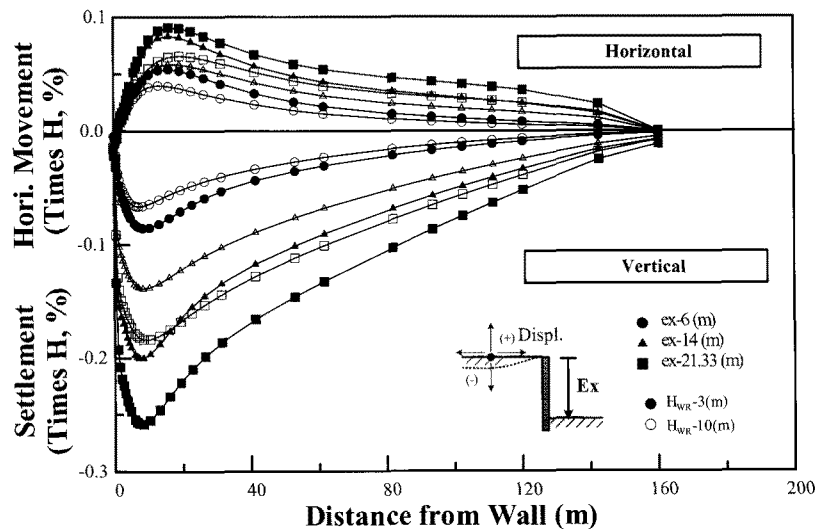
그림 13은 굴착단계별 버팀보의 축력 분포경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 $H_{WR}-10(m)$ 인 CASE가 $H_{WR}-3(m)$ 인 CASE의 평균 87%의 버팀보 축력이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 토사층 두께에 따른 유속벡터 거동 차이로 인하여 그림 14와 같이 유효응력 분포에 차이가 발생하기 때문으로 사료된다. 즉, 토사층이 얇게 분포할수록 벽체 좌측에서 우측으로의 침투수압이 낮아지고 벽체 주변의 히빙에

표 4. 굴착단계별 벽체 최대 수평변위

굴착깊이(m)	$GL-1(m)$, $H_{WR}-3(m)$	$GL-1(m)$, $H_{WR}-10(m)$
2	7.62	5.94
4	15.94	11.84
6	23.46	16.41
8	31.12	19.34
10	37.87	20.41
12	43.05	20.85
14	46.52	20.85
16	46.96	20.82
18	47.06	20.79
20	46.99	20.77
21.33	47.67	20.75



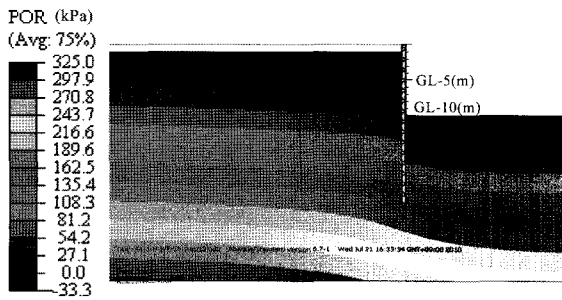
(a) 벽체 수평변위



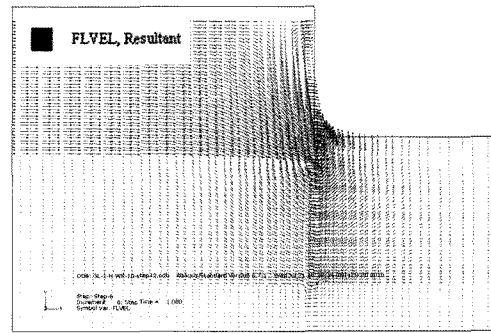
(b) 벽체 배면 수평변위 및 침하

그림 10. 굴착단계별 벽체 수평변위 및 벽체배면 수평변위, 침하

굴착 깊이 : $GL-10(m)$

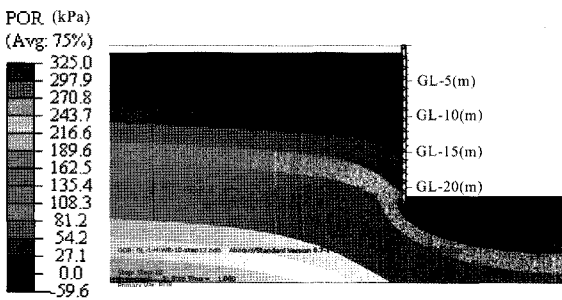


(a) 간극수압 분포도

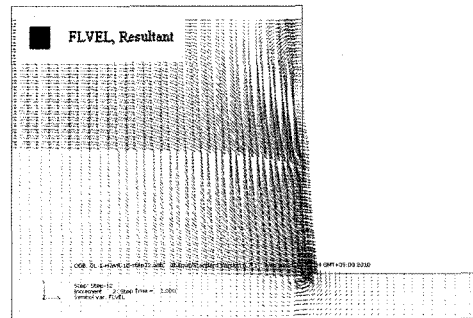


(b) 지하수 유속벡터

굴착 깊이 : $GL-21.33(m)$



(c) 간극수압 분포도

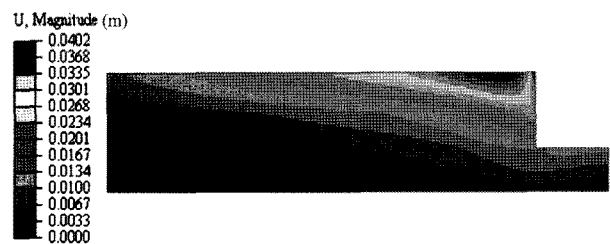


(d) 지하수 유속벡터

그림 11. $GL-1(m)$, $H_{WR}-10(m)$ 의 굴착단계별 간극수압 분포도 및 지하수 유속벡터



(a) $H_{WR}-3(m)$ 지반 변위



(b) $H_{WR}-10(m)$ 지반 변위

그림 12. 최종굴착단계 지반 변위 분포도

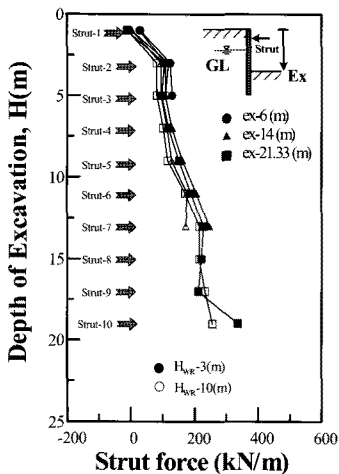


그림 13. $GL-1(m)$ 굴착단계별 버팀보 축력 분포도

대한 안정성이 증가하기 때문에 버팀보 축력도 줄어드는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 토사층의 두께는 지하수 저하에 따른 지반 변위 발생에 있어서 지하수 흐름을 결정하는 중요한 요소로서 지반의 응력-변형률-강도에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 지반 변위에 미치는 영향을 분석하기 위하여 토사층의 두께를 $0.47H \sim 0.94H$ 로 변화시켜 경향을 분석한 매개변수 해석결과가 그림 15와 같다. 먼저 그림 15(a)는 토사층 두께변화에 대한 최대 벽체 수평변위를 나타내고 있는데 벽체 배면변위보다 토사층 두께변화에 대하여 가장 민감하게 변화하는 경향을 보이며 토사층 두께변화에 대하여 최대 2배 이상

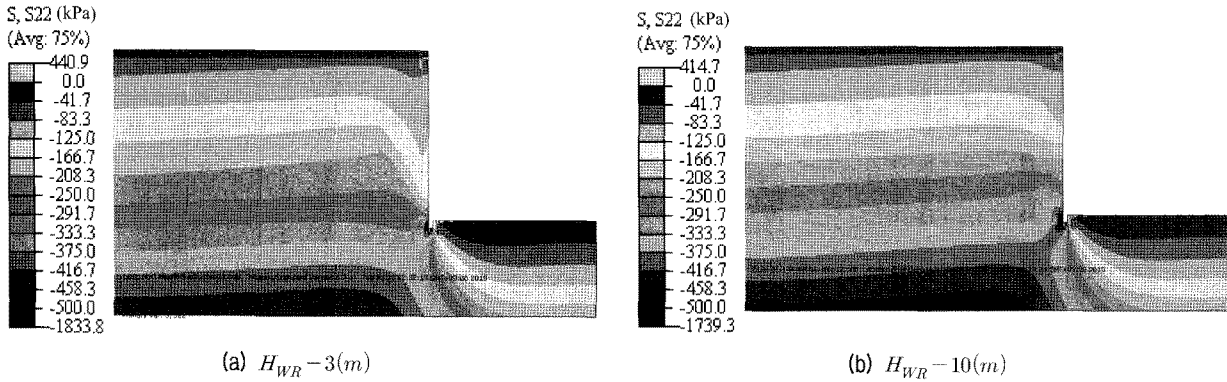


그림 14. 최종굴착단계 유효응력 분포도

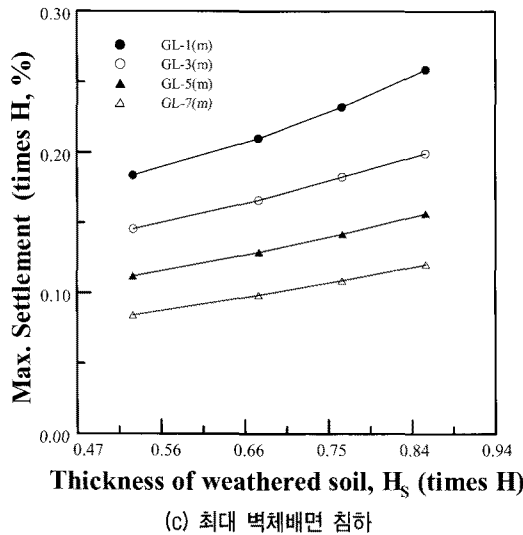
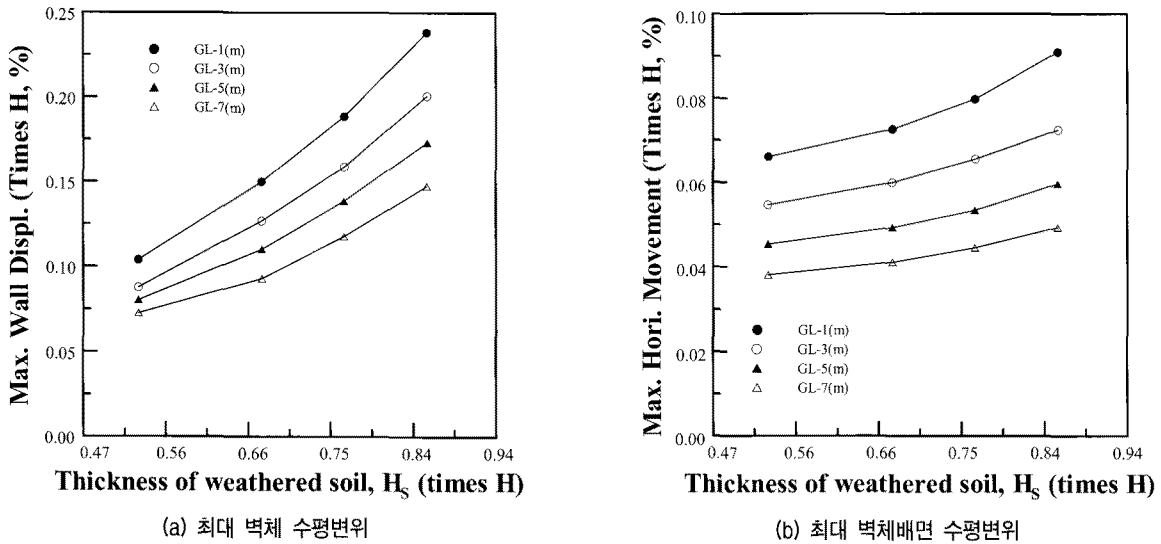


그림 15. 토사층두께와 최대 벽체수평변위 및 벽체배면 수평변위·침하 관계

의 최대 벽체 수평변위가 발생할 수 있음을 보여주고 있다. 그리고 그림 15(b), (c)는 벽체배면의 변위경향을 살펴볼 수 있으며 동일한 지층구조일 경우 초기 지하수위의 위치변화에 따라 벽체배면의 변위가 크게 발생하

는 것으로 보아 이에 대한 언급은 다음 5.3절에서 다루도록 한다. 종합적으로 볼 때 압반층보다 투수계수가 큰 토사층이 두껍게 분포할수록 유효응력증가하고 이에 따라 벽체 및 벽체배면의 변위가 크게 발생하여 굴착

안정성을 저해하기 때문에 굴착공법에는 불리한 조건으로 작용한다. 또한 굴착단면에 대한 정확한 지층구조 분석이 굴착 안정성 검토에 있어서 절대적으로 중요하다고 하겠다.

4.3 초기 지하수위 위치의 영향

본 절에서는 연계해석시 초기 지하수위의 위치가 굴착 단계별 지반침하에 미치는 영향을 분석하기 위하여 초기 지하수위의 위치 변화 영향을 극대화 할 수 있도록 토사층이 가장 넓게 형성된 CASE($H_{WR}-3(m)$) 중 $GL-1(m)$, $GL-7(m)$ 인 경우를 대상으로 얻어진 해석결과를 검토하였다.

그림 16은 초기 지하수위 위치 변화에 따른 굴착단계별 벽체의 수평변위와 벽체배면의 수평변위 및 침하를 보여주고 있다. 그림 16(a)를 보면 $GL-1(m)$ 의 경우 최대 벽체수평변위가 48mm 발생하는 반면 지하수위가 상대적으로 낮은 $GL-7(m)$ 의 경우 $GL-1(m)$ 의 62%에 해당하는 약 30mm의 수평변위가 발생하며 굴착단계별 벽체 최대 수평변위 결과는 표 5와 같다. 또한 그림 16(b)에서 보이는 바와 같이 벽체배면의 수평변위 및 침하량은 $GL-1(m)$ 의 경우 18mm, 52mm가 발생한 반면 $GL-7(m)$ 의 경우 약 50%의 크기인 10mm, 24mm가 발생하여 초기 지하수위가 낮을수록 지반침하에 작게 발생하는 것으로 나타났다.

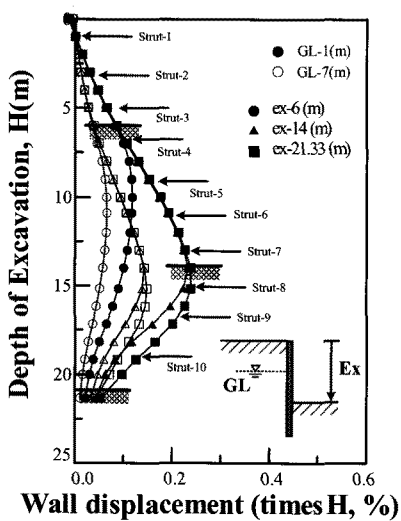
굴착단계별 간극수압 분포와 지하수 유속벡터의 방

향을 살펴보면 초기 지하수위 위치에 따라 지하수 거동에 큰 변화가 있음을 확인할 수 있다. 그림 17에서 보이는 바와 같이 $GL-1(m)$ 인 경우 최종굴착단계에서 지하수위 저하가 6m 발생하는 반면 $GL-7(m)$ 인 경우 최종굴착단계에서 4m의 지하수위 저하가 발생한다. 이러한 벽체 우측면에서의 지하수위 저하는 두 CASE 해석 결과에 있어서 초기 지하수위 구간이 낮은 CASE의 벽체의 수평변위 형상이 초기 지하수위 구간이 높은 CASE의 형상을 변위가 작게 발생하는 방향으로 평행이동시킨 꼴로 발생하도록 만든다고 할 수 있다.

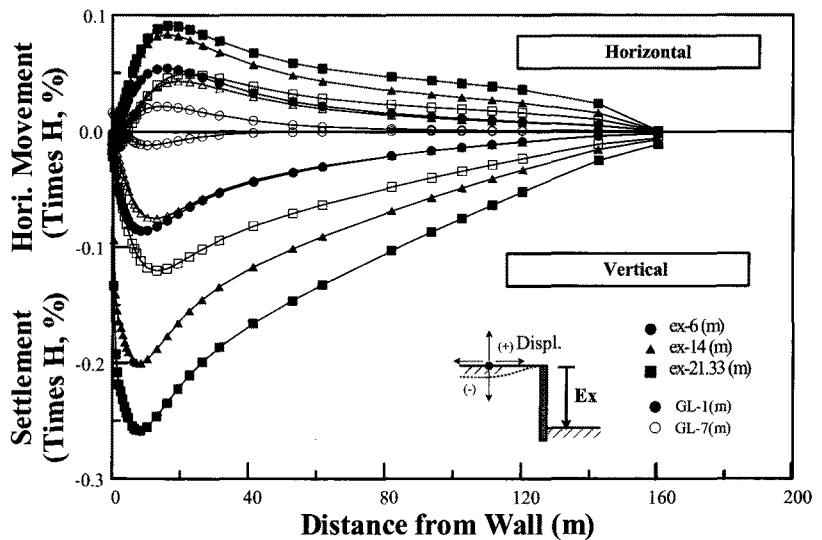
그림 18은 굴착단계별 버팀보의 축력 분포를 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 $GL-1(m)$ 와 $GL-7(m)$ 인 CASE의 버팀보의 축력 분포는 $GL-7(m)$ 인 CASE의

표 5. 굴착단계별 벽체 최대 수평변위

굴착깊이(m)	$GL-1(m)$, $H_{WR}-3(m)$	$GL-7(m)$, $H_{WR}-3(m)$
2	7.62	5.19
4	15.94	9.46
6	23.46	13.00
8	31.12	17.08
10	37.87	21.76
12	43.05	25.31
14	46.52	28.25
16	46.96	29.51
18	47.06	29.62
20	46.99	29.55
21.33	47.67	29.52



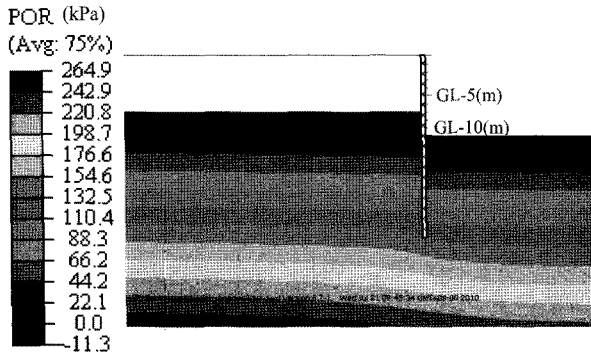
(a) 벽체 수평변위



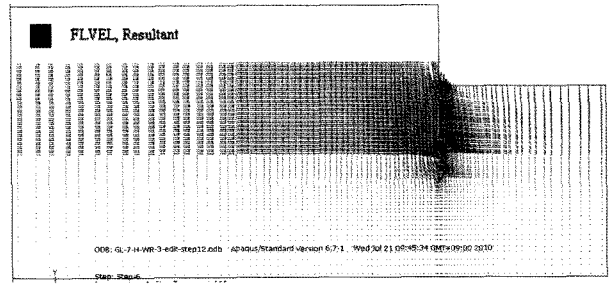
(b) 벽체 배면 수평변위 및 침하

그림 16. 굴착단계별 벽체 수평변위 및 벽체배면 수평변위, 침하

굴착 깊이 : $GL-10(m)$

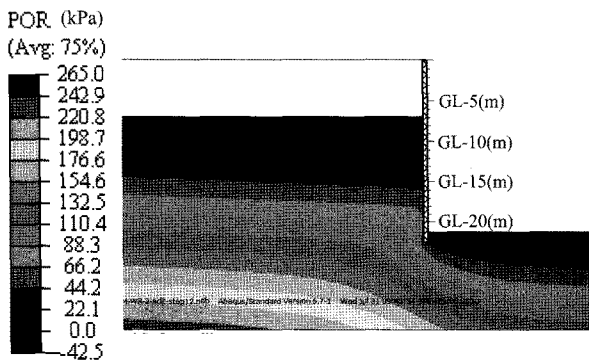


(a) 간극수압 분포도

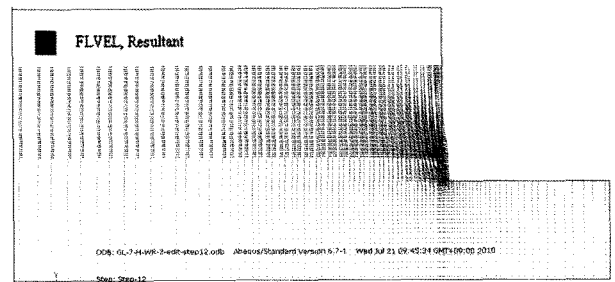


(b) 지하수 유속벡터

굴착 깊이 : $GL-21.33(m)$



(c) 간극수압 분포도



(d) 지하수 유속벡터

그림 17. $GL-7(m)$, $H_{WR}-3(m)$ 의 굴착단계별 간극수압 분포도 및 지하수 유속벡터

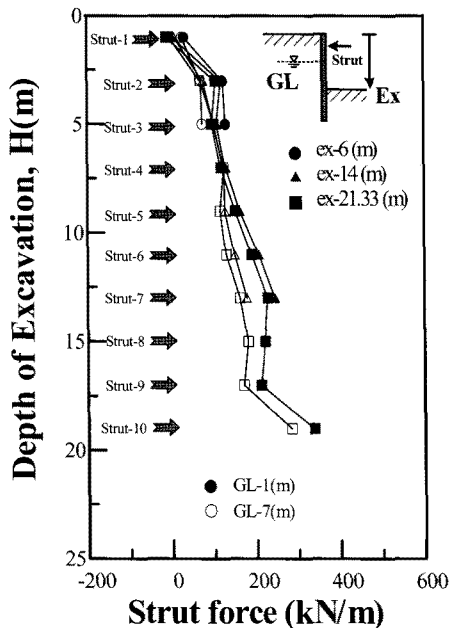


그림 18. $H_{WR}-3(m)$ 굴착단계별 버팀보 축력 분포도

지하수위면을 경계로 분리하여 분석할 수 있다. 지하수 위 상부 버팀보 3과 4가 $GL-1(m)$ 인 CASE의 버팀보 축력과 거의 같은 크기로 발생하며 지하수위 아래에 위

치하는 버팀보 5~10는 $GL-1(m)$ 인 CASE의 버팀보 축력의 평균 77%로 감소하여 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 14(a)와 그림 19(b)의 유효응력분포를 볼 때 초기 지하수위를 경계로 유효응력의 재분배가 발생하여 $GL-7(m)$ 인 CASE의 지하수위 아래 굴착면의 유효응력이 크기 때문에 지반의 강도가 더 크게 발휘되어 버팀보의 축력이 다소 적게 발생하는 것으로 판단된다. 그림 19(a)를 통하여 확인할 수 있듯이 항복영역 또한 $GL-7(m)$ 인 CASE가 더 작은 영역에서 발생하는 것으로 나타났다.

그림 20은 지하수 저하에 의한 지반침하가 발생하는 조건에서 초기 지하수위 위치가 미치는 영향을 분석하기 위하여 지하수위의 위치를 $GL-1, 3, 5, 7(m)$ 로 변화시킨 매개변수 해석결과를 보여주고 있다. 이 그림에서는 초기 지하수위 위치 변화에 따른 지반침하의 경향을 뚜렷하게 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 초기 지하수위가 깊은 심도에 위치할수록 지반침하에 미치는 지하수 저하의 영향이 감소하여 지반변위가 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림 20(a)에서 보이는 바와 같이 벽

체의 최대 수평변위는 토사층이 넓게 분포할수록 초기 지하수위의 영향이 크며 토사층두께가 전체 굴착깊이의 약 50%이하일 경우 초기 지하수위의 영향이 거의 발생하지 않는 것으로 판단된다. 또한 그림 20(b), (c)를

보면 벽체 배면의 변위가 벽체의 수평변위보다 초기 지하수위 위치에 대하여 더욱 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있으며 지하수위 위치변화에 대하여 최대 약 2배까지 변위 크기의 차이가 발생하는 것으로 나타났

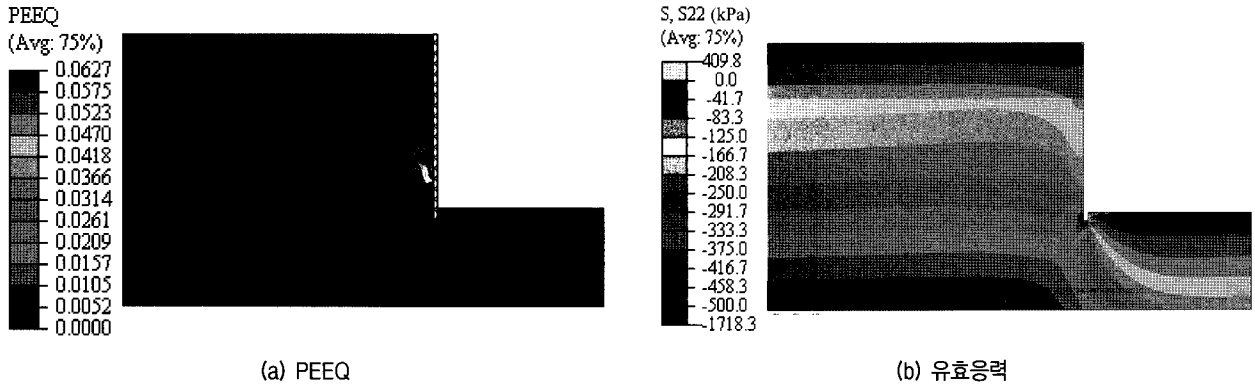


그림 19. GL-7(m), $H_{WR}-3(m)$ 인 CASE의 최종굴착단계 PEEQ 및 유효응력 분포도

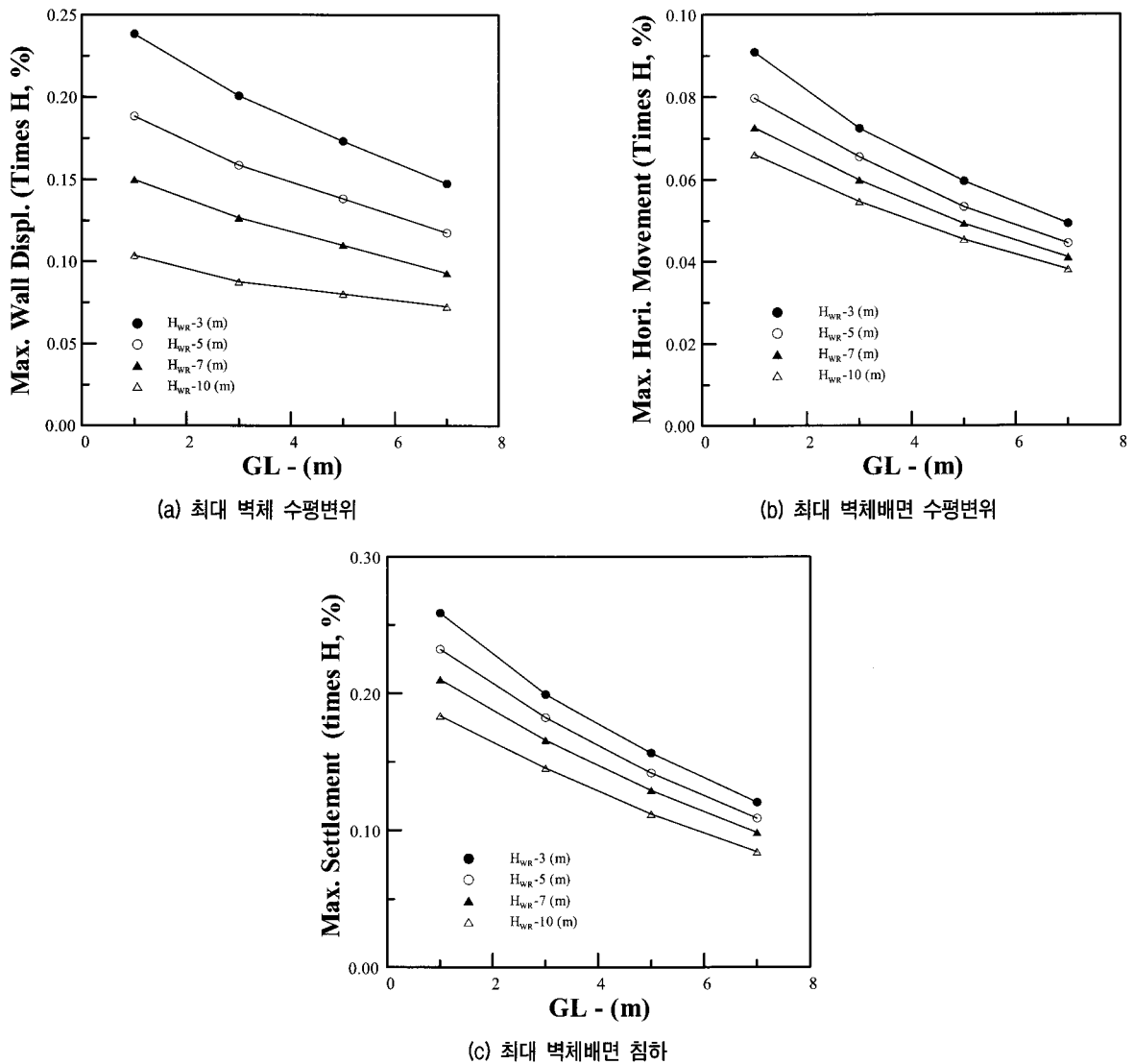


그림 20. 초기 지하수위 위치와 최대 벽체수평변위 및 벽체배면 수평변위·침하 관계

다. 즉, 초기 지하수위의 위치 또한 토사층 두께와 마찬가지로 지반내 응력-변형률-강도 관계를 결정짓는 결정적인 인자이며 초기 지하수위 위치가 높을수록 굴착 안정성을 저해하는 경향을 보인다. 따라서 굴착 안정성 평가시 초기 지하수위의 위치 검토가 굴착 안정성에 결정적인 역할을 하므로 이에 대한 정확한 시추조사가 이루어져야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 2차원 탄소성 유한요소해석을 통하여 흙막이 굴착시 지하수 저하에 따른 지반침하의 변화경향을 분석하였다. 토사층의 두께와 초기 지하수위의 위치를 변화시키며 매개변수 연구를 수행하고 그 해석결과를 토대로 기존 전응력해석결과와 연계해석결과를 비교분석하였으며 특정 지반 조건과 초기 지하수위의 위치변화에 따른 최대 벽체 변위 및 최대 침하관계를 평가하였다.

- (1) 기존의 연구와 비교해 볼 때 가설 흙막이 굴착시 전 응력해석의 벽체 수평변위 결과는 연계해석결과와 54%, 벽체 배면지반의 수평변위는 42%, 침하량은 10% 정도로 나타나 굴착시 지반변위를 과소평가할 수 있으며 연계해석 결과가 지하수 저하에 따른 지반변위에 대한 평가를 현실적으로 수행하는 것으로 나타났다.
- (2) 암반층에 비해 투수계수가 큰 토사층의 두께가 얇게 분포할수록 벽체 좌측에서 우측으로의 침투수압이 낮아지고 히빙에 대한 안정성이 증가하여 굴착 안정성이 증가하고 벽체 배면의 변위보다 벽체의 수평변위가 토사층 두께의 영향에 민감하게 변화한다. 또한 초기 지하수위가 낮게 형성될수록 지하수 저하량이 줄어들어 이에 따르는 굴착시 지반 및 벽체 안정성이 증가하는 것으로 나타났으며 벽체 수평변위보다 벽체 배면의 수평변위 및 침하가 초기 지하수위 위치의 영향에 민감하게 변화하는 것으로 나타났다.
- (3) 위와 같은 매개변수 연구를 통하여 특성 지층구조와 초기 지하수위 조건에 의하여 흙막이 굴착시 지반 거동의 메카니즘이 크게 변화하며 연계해석 결과 토사층 두께변화에 대하여 벽체의 수평변위는 0.10H~0.23H%(H=굴착깊이), 벽체배면의 수평변위

는 0.06H~0.09H%, 벽체배면의 연직변위는 0.17H~0.24H%가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 초기 지하수위 변화에 대하여 벽체의 수평변위는 0.14H~0.22H%, 벽체배면의 수평변위는 0.05H~0.09H%, 벽체배면의 연직변위는 0.11H~0.24H%가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 지하수위를 고려한 가설 흙막이 공법 설계 및 시공 적정성 검토나 보강공법 필요성 검토에 있어서 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김학문과 황의석 (2007), 흙막이 굴착에 따른 인접건물의 손상평가에 대한 모형실험연구, *한국지반공학회 논문집*, 제 23권 10호, pp.121-131.
2. 김형목, 류동우, 신중호 (2008), 굴착영향영역(EDZ) 투수특성의 실험적 평가기술, *한국암반공학회 논문집*, 제 18권, 2호, pp.91-97.
3. 안종필과 박경호 (2002), 깊은굴착에 의한 지반변위의 예측방법에 관한 연구, *대한지질공학회 학술발표회지*, pp.1-21.
4. 유충식과 김연정 (1997), 국내 도심지 깊은굴착에 따른 흙막이벽체의 거동, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 제 3권, pp.407-410.
5. 유충식 (2004), 응력-간극수압 3차원 연계해석을 통한 터널굴착과 지하수의 상호작용 고찰, *한국지반공학회 논문집*, 제 20권, 3호, pp.33-46.
6. 신방웅과 이홍길 (2005), 해안매립지 대심도 굴착지역의 불포화함수특성에 따른 침투류 거동, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 6권, 4호, pp.47-58.
7. Biot, M.A. (1941), "General theory of three dimensional consolidation", *J. Appl. Phys.*, Vol.12, pp.155-164.
8. Biot, M.A. (1955), "Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid", *J. Appl. Phys.*, Vol.26, No.2, pp.182-185.
9. His, J.P. and Small, J.C. (1992), Analysis of excavation in an elasto-plastic soil involving drawdown of the water table, *Computers and Geotechnics*, Vol.13, No.1, pp.1~19.
10. Yang Yuwen, Yin Jian-Hua, Yuan Jian-Xin, Schulyer, Jeff N. (2003), An expert system for selection of retaining walls and groundwater controls in deep excavation, *Computers and Geotechnics*, Vol.30, No.8, pp.707-719.
11. Yang, T.H., Liu, J., Zhu, W.C., Elsworth, D., Tham, L.G., Tang, C.A. (2007), A coupled flow-stress-damage model for groundwater outbursts from an underlying aquifer into mining excavation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.44, No.1, pp.87-97.
12. Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T. (1984), "Dynamic behavior of saturated porous media: The generalized Biot formulation and its numerical solution", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, Vol.8, pp.71-96.
13. Pagano, L. (1997), "Steady State and Transient Unconfined Seepage Analyses for Earthfill Dams", *ABAQUS Users' Conference*, Milan, 557-585.

(접수일자 2010. 9. 27, 심사완료일 2011. 5. 9)