

# 앵커지지 흙막이 벽체의 합리적인 3차원 수치해석기법 적용에 관한 연구

## A Study on the Rational Application of 3D Numerical Analysis for Anchored Earth Retaining Wall

정 상 섬<sup>1</sup> Jeong, Sang-Seom

심 재 옥<sup>2</sup> Sim, Jae-Uk

이 성 준<sup>3</sup> Lee, Sung-June

### Abstract

This paper presents the results of 2D and 3D finite element simulations conducted to analyze the effects of excavation depth (H), excavation width (L), and ground condition on the behavior of anchored earth retaining wall in inclined ground layers. The results of numerical analyses are compared with those of the site instrumentation analyses. Based on the results obtained, it appeared that 2D numerical analysis tends to overestimate the horizontal displacement of retaining wall compared to the 3D numerical analysis. When the excavation depth is deeper than 20m, it is found that 2D and 3D numerical analysis results of excavation work in soil ground condition are more different from the results in rock ground condition. For an accurate 3D numerical analysis, applying 3D mesh which has an excavation width twice longer than excavation depth is recommended. Consequently, 3D numerical analysis may be able to offer significantly better predictions of movement than 2D analysis.

### 요 지

본 연구에서는 경사지층에 설치된 앵커지지 흙막이 벽체의 거동분석에 있어서 2차원 및 3차원 유한요소해석을 이용하여 굴착심도(H), 굴착폭(L) 및 지반조건의 영향에 따른 수치해석방법의 정확성 및 적용성에 대하여 비교분석하였다. 폐합단면이 아닌 선형방향으로 설치된 흙막이 벽체의 굴착면을 따라서 지층의 변화가 급격한 구간에서 2개의 단면을 선정하여 2차원 유한요소해석을 수행하였으며, 이 2개의 단면을 포함하는 전체 구간의 3차원 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 현장계측결과 및 탄소성해석결과와 비교분석하였다. 또한, 3차원 유한요소해석시 굴착심도(H)와 굴착폭(L)의 변화가 흙막이 벽체의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 굴착심도와 굴착폭을 변화시켜 해석을 수행하였다. 경사지층에 설치된 앵커지지 흙막이 벽체의 거동분석을 위한 2차원 및 3차원 유한요소 해석 결과, 굴착면을 따라서 길이방향 지반조건 변화의 영향을 3차원 수치해석을 통하여 확인할 수 있었으며, 2차원 해석과 3차원 해석은 지반조건 및 굴착심도에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다. 해석대상 지반이 암반이 지배적인 조건인 경우 2차원

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사후연구원 (Member, Post-Doc., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-6641, Fax: +82-2-2123-8378, ssims@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, 청주대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Cheongju Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

및 3차원 수치해석 결과는 모두 실측값과 유사한 결과를 나타냈다. 그러나 암반에 비해 강성이 낮은 토사지반이 지배적인 조건에 있어서 일정심도(20m) 이상의 고심도 지반굴착에 따른 흠막이 벽체의 거동분석 시 2차원 해석결과와 3차원 해석결과는 큰 차이를 나타내고 있었다. 또한 굴착폭(L)의 변화에 따른 거동분석 결과, 보다 정확한 3차원 수치해석을 위해서 굴착폭(L)의 해석영역을 일정범위(굴착심도의 2배) 이상으로 설정하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 이와 같이 흠막이 벽체의 거동분석 및 안정성 검토시에는 지반의 기하학적인 비대칭성과 3차원 구조로 설치되는 흠막이 벽체 및 지보재의 특성을 고려한 3차원 수치해석 기법의 적용이 적절함을 알 수 있었다.

**Keywords** : Anchored earth retaining wall, Inclined ground, 2D FE analysis, 3D FE Analysis

## 1. 서론

모든 건설현장에서 진행되는 지반굴착 공정에서 사용되는 흠막이 가시설은 전체 공사비와 비교하여 그 비중은 작지만 인접구조물의 영향, 전체 공사기간, 최종 구조물의 시공성 및 품질 확보 측면에서 중요한 공정이라고 할 수 있다. 그러나 굴착 및 가시설 공사의 안전성을 확보하기 위한 비용 투자는 다소 부족하여 지반굴착에 따른 흠막이 가시설의 붕괴 및 인접 구조물의 손상이 빈번하게 발생하고 있다. 또한, 흠막이 공법의 설계 및 해석을 위해서는 우선 대상현장의 지층조건 및 지반 강도정수의 정확한 분석이 필요하다. 그러나 대상현장의 규모와 비교하여 제한된 시추공수 및 시추심도의 조사로 인하여 실제 지반조건에 대한 정확한 파악이 어려우며, 이에 따라 설계시와 시공시의 차이가 발생하고 있다. 따라서 지반굴착 공사에서 사용되는 흠막이 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 대상지반의 정확한 지반조사와 그에 따른 합리적인 흠막이 공법의 선정 및 거동 예측이 필요하다.

지반굴착을 위한 흠막이 구조물의 설계 및 해석방법에는 간편해석법, 탄소성법, 유한요소법 및 유한차분법의 수치해석방법 등이 있으며, 현재 국내에서는 탄소성법과 수치해석방법을 일반적으로 사용하고 있다(Jang, 2002). 탄소성법에서 흠막이 벽체는 탄성보, 지보재는 탄성 스프링, 그리고 지반은 탄소성 스프링으로 모델링하여 탄성보에 초기토압을 가하여 발생하는 변위를 계산하고 그 변위에 상응하는 지반의 탄소성 상태를 판단한 후 토압을 보정하여 다시 변위를 계산하는 반복 과정을 통하여 흠막이 벽체의 변위, 응력 및 지보재의 반력을 계산한다. 유한요소법 및 유한차분법과 같은 수치해석방법은 흠막이 벽체의 응력, 변형뿐만 아니라 주변의 지반과 구조물의 변형도 동시에 해석되므로 주변지반

이나 인접구조물에 대한 영향이 큰 문제가 되는 대규모, 대심도의 흠막이 벽체 설계 및 주변지반의 거동분석에 많이 적용된다. 이 방법에서는 별도의 토압을 입력시키지 않고도 응력-변형률 구성방정식에 의하여 지반의 탄소성 거동과 흠막이 벽체 및 지지구조의 상호작용에 따라 변위 및 응력이 구해진다. 그러나 기하학적 비대칭으로 구성되는 굴착부지 특성이나 3차원 구조로 설치되는 흠막이 벽체 및 지보공의 역학적 특성과 비교하여 평면 변형률 조건으로 모델링하는 2차원 수치해석의 경우, 전체 구성 부재의 각각에 대한 부재력이 정확하게 산출되지 못하고 표준구간의 산출값으로만 설계되며, 표준구간의 부재력과 실제 부재력은 상당한 차이가 있다. 또한 해석결과는 입력되는 지반의 물성에 크게 좌우되며, 잘못 평가된 지반 데이터는 다른 계산방법에 비하여 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

지반굴착에 따른 흠막이 벽체의 부재력과 변위에 관한 Terzaghi & Peck(1969)의 수정토압과 Clough & O'Rourke(1990) 등이 제시한 연구결과는 굴착지반이 단일지층이거나 각 지층이 평행하다는 전제하에 토압에 대한 식을 제안하였으며, 널리 적용되고 있는 탄소성법 및 이를 이용한 해석 프로그램(Shin and Kim, 2004)은 경사지층의 영향을 고려하지 못하므로 벽체와 지반을 단순하게 모델링하여 근사적으로 해석하고 있다. 이와 같은 이론은 벽체와 지지구조를 정확히 알 수 있더라도 지반의 지지력 계수와 벽체의 변형에 따라 변화하는 토압과 지층경사를 정확히 모사하여 지층 형태에 따른 거동 영향을 파악할 수 없으므로 만족할 만한 해석이 될 수 없다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 경사지층에 설치된 앵커지지 흠막이 벽체의 거동을 분석하기 위하여 2차원 및 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 굴착면을 따라서 지층의 변화가 급격한 구간에서 2개의 단면을

선정하여 2차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 이 2개의 단면을 포함하는 전체 구간의 3차원 유한요소 해석을 수행하여 결과를 비교분석하였다. 또한, 3차원 유한요소분 해석시 굴착심도(H)와 굴착폭(L)의 변화가 흙막이 벽체의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 굴착심도(H)를 10m, 20m, 30m, 그리고 굴착폭(L)을 40m, 60m로 변화시켜 해석을 수행하였다. 마지막으로 현장에서 계측된 값과 예측 값을 비교분석하여 2차원 및 3차원 유한요소해석방법의 정확도 및 적용성을 살펴보고자 한다.

## 2. 흙막이 벽체의 해석기법 비교

### 2.1 탄소성법과 수치해석법

흙막이 벽체의 안정성 해석 방법 중 탄소성법은 입력 자료가 간단하고 해석이 간편하여 흙막이 벽체 설계시 가장 많이 사용되고 있는 해석방법이다. 이 방법은 겉보기 토압이 아닌 Rankine-Resal 또는 Coulomb이 제안한 토압을 사용하는 해석 방법(구조물 기초설계기준, 2015)이며, 지보공의 축력과 흙막이 벽체의 응력 및 변위를 구할 수 있는 방법이다. 그러나 기존 연구결과에 따르면 탄소성 해석법은 각 해석 절점의 구조물과 지반의 저항력을 동시에 고려할 수 없어서 해석의 연속성 및 지반-구조물의 상호작용을 고려할 수 없는 단점이 있는 것으로 나타났다(Jeong et al., 2003; Jeong and Kim, 2009).

유한요소법 및 유한차분법의 수치해석방법은 토압을 사용하는 대신에 응력-변형률 구성방정식을 이용하여 지반의 탄소성 강도특성과 흙막이 벽체 및 지지구조의 탄소성 강성을 고려함으로써 응력-변형 거동을 구한다. 벽체와 흙과의 거동을 나타내기 위해서는 대상지반 및 흙막이 벽체의 거동을 정확히 나타낼 수 있는 응력-변형률 관계가 필수적으로 요구되며, 지반 및 흙막이 구조물의 합리적인 모델링 및 해석에 필요한 제반 정수들의 정확한 추정이 해석결과의 타당성에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 유한요소법이나 유한차분법을 이용하여 흙막이 구조물의 거동을 해석하고자 할 때 그 결과에 영향을 미치는 주요한 요소들은 지반굴착 진행과정을 모사하는 방법, 지반 자체의 거동 모델화, 지반거동 모델에서 사용된 모델 계수값, 그 외 실제 시공 당시에 발생한 예상치 못했던 변화 등이 있다. 탄소성법과 함께 흙막이 벽체의 거동분석에 있어서 일반적으로 사용되

는 평면 변형률 조건의 2차원 수치해석방법은 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어져 왔다(Clarke and Wroth, 1984; Hubbard et al., 1984; Potts and Fourie, 1984; Finno et al., 1991; Powrie and Li, 1991; Simpson, 1992; Whittle et al., 1993; Hashash and Whittle, 1996). 그러나 지반굴착에 따라 발생하는 흙막이 벽체의 변형 및 인접 구조물의 안정성 해석시에는 대상지반의 기하학적 비대칭성과 3차원 구조로 설치되는 흙막이 구조물의 역학적 특성상 3차원 해석을 수행하여야 하지만, 일반적으로 표준단면의 선정을 통한 2차원 해석에 의해 흙막이 벽체의 변형 및 안정성을 예측하여 설계에 반영하고 있다.

### 2.2 유한요소법의 3차원 해석 효과

최근 하드웨어 및 소프트웨어의 발달로 인하여 수치해석방법이 간편화됨에 따라 3차원 수치해석방법을 이용한 지반-구조물 거동분석에 관한 연구가 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 해석대상 지반 및 구조물과 인접 구조물 등의 전체 안정성을 평가함과 함께 각각의 구성부재의 변형 및 부재력을 보다 간편하게 검토할 수 있게 되었다. 표준구간을 평면 변형률 조건으로 모델화하여 해석하는 2차원 수치해석방법은 지층의 변화, 흙막이 벽체 및 지지구조를 표준화하여 해석하므로 전체 구성 부재의 각각에 대한 부재력이 정확하게 산출되지 못하며, 표준구간의 산출값으로만 흙막이 벽체를 설계하게 된다. 특히 폐합단면 구조의 흙막이 구조에서 벽체의 모서리 구간과 중앙부의 변위 및 지반변형에는 큰 차이가 있으며, 이에 따라 평면 변형률 조건의 2차원 수치해석을 통한 흙막이 벽체의 변위 및 지반변형은 3차원 해석결과와 비교하여 크게 나타나고 있다(Bono et al., 1992; Ou et al., 1996; Lee et al., 1998; Finno et al., 2007). 이와 같은 2차원 수치해석 결과를 이용한 흙막이 구조물의 설계는 비경제적인 과다설계의 원인일 될 수 있다.

Finno et al.(2007)은 점성토 지반에 설치된 흙막이 벽체에 있어서 굴착부의 길이, 폭, 심도 및 흙막이 벽체의 강성의 변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 2차원 및 3차원 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 1에서와 같이 3차원 유한요소해석 결과를 평면 변형률 조건의 2차원 해석결과와 비교하여 정규화한 평면 변형률비(PSR)로 나타내었다. 연구결과에 따르면, 굴착심도와 비교하여

굴착폭(L)이 일정값 이상이 될 경우 2차원 해석과 3차원 해석결과가 유사하게 나타났으며, 이는 굴착부의 형상비와 흙막이 벽체의 강성에도 영향을 받는 것으로 나타났다.

Lee and Kim(2008)은 지반굴착의 기하학적 형상의 차이와 관련된 흙막이 벽체의 거동특성을 굴착면적비에 따른 3차원 유한차분해석에 의해 흙막이 벽체의 변위를 비교하여 굴착면적비의 영향 및 모서리부에서 폐합구조의 영향을 분석하였다. 또한 2차원 및 3차원 유한차분해석에 영향을 미치는 인자를 지반변형계수 및 굴착면적비로 고려하여 각각의 해석이 일치하는 영향인자의 상관관계를 흙막이 벽체의 최대변위를 기준으로 하여 제안하였다. 현장계측자료와 수치해석결과를 비교 분석한 결과 최대수평변위는 중앙부에서 모서리부로 근접할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이와 같은 흙막이 벽체의 실제 거동특성을 3차원 수치해석방법이 보다 정확하게 예측하고 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 3차원 수치해석기법을 이용한 흙막이 벽체의 거동분석에 관한 연구는 대부분 폐합단면에 있어서

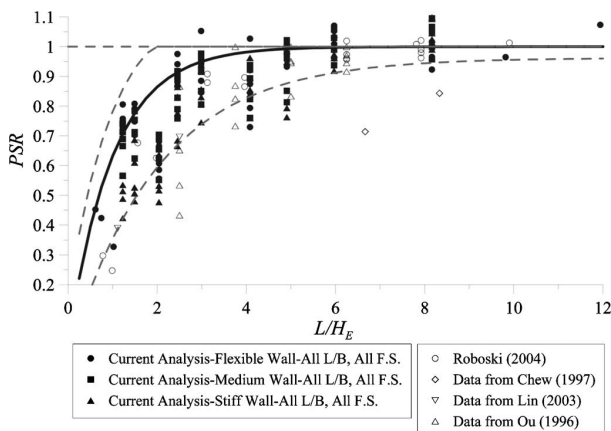


Fig. 1. Correlation between 2D and 3D analysis (Finno et al., 2007)

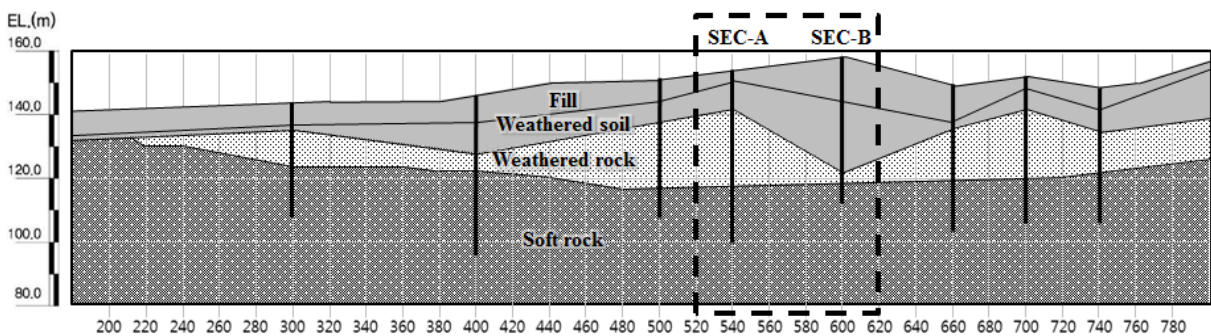


Fig. 2. Longitudinal section

굴착부의 형상비 및 모서리부의 구속효과 분석과 이를 이용하여 2차원 해석과 3차원 해석결과와의 상관관계를 제안하는 연구에 국한되어 있다. 그러나 일반 건축물의 시공 시에는 대부분의 경우 폐합형태의 지반굴착 및 흙막이 벽체의 시공이 수행되지만, 지하철, 철도, 도로 및 각종 관로 구조물의 경우, 선형 방향의 지반굴착 및 흙막이 벽체의 설치가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 폐합되지 않은 일자형의 흙막이 벽체에 있어서 길이방향 지층경사의 영향을 고려한 3차원 유한요소해석의 수행을 통해 실제 흙막이 벽체의 거동을 분석하고자 하였다.

### 3. 수치해석

#### 3.1 해석 대상 구간

본 연구의 해석 대상 구간은 OO지역 고속철도 건설 공사 현장으로, 대상 현장의 지형은 구릉성 산지로 이루어져 있으며, 시점부 동측에서 남북방향, 종점부 동측에서 북서방향으로 비교적 높은 지형의 산계가 발달하여 있다. 본 지역은 추가령 구조대에 속하는 신갈 단층대에 해당하며 이로부터 파생된 단층 및 망상의 2차 단열들에 의해 파쇄가 심한 연약대에 해당하는 지역이다. 현장 지반조사 결과 해석구간의 지층은 매립층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층이 연속적으로 분포하고 있으며, Fig. 2의 전개도에서 보는 바와 같이 SEC-A에서 SEC-B 사이의 지반조건의 변화가 급격하게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 지층의 변화가 급격하게 나타나고 있는 SEC-A에서 SEC-B 사이의 구간을 대상으로 2차원 및 3차원 유한요소해석을 통해 안정성 검토를 수행하였으며, 검토된 결과를 계측결과와 비교분석하였다.

### 3.2 지반조건 및 지반정수

대상현장의 지반조건을 분석하기 위하여 표준관입시험, 공내전단시험 및 공내재하시험의 현장시험과 직접전단시험, 일축압축강도시험 및 삼축압축강도시험 등의 실내시험이 수행되었다. 흙막이 벽체의 안정성 검토를 위한 지반정수 산정을 위하여 대표적인 토성치를 현장조사, 실내시험 및 각종 자료로부터 산정하였으며, 산정된 지반정수는 Table 1과 같다. 해석대상 구간에서의 지하수위는 지표면 하부 약 30m 가량의 굴착바닥면 부근에 분포하고 있다.

### 3.3 2차원 수치해석 모델링

본 연구에서는 경사지층에 설치된 앵커지지 흙막이 벽체의 거동분석에 있어서 지반 및 흙막이 구조체의 3차원 효과를 분석하기에 앞서 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 흙막이 벽체는 H-300×305×15×15 규격의 H-pile을 사용한 CIP 공법을 적용하였다. 또한 흙막이 벽체를 지지하기 위한 지지체로는 지반을 천공하여 강선을 삽입한 후 그라우트하고 프리스트레스를 주어 벽체를 지지하게 하는 앵커 공법을 적용하였다. 흙막이 벽

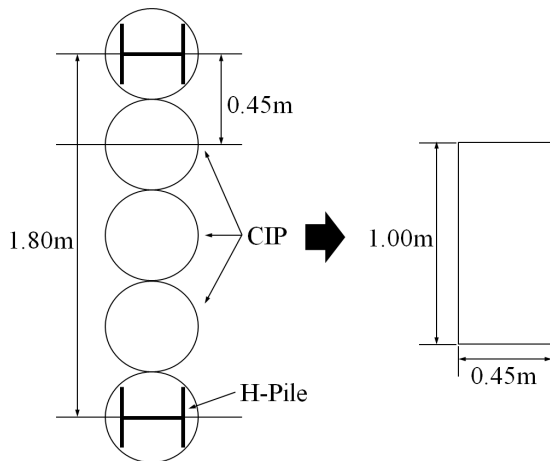


Fig. 3. Equivalent retaining wall

Table 1. Soil properties

Soil Condition	Unit weight $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	Friction angle $\phi$ (°)	Poisson's ratio $\nu$	Young's modulus $E$ (kPa)	SPT N (number/cm)
Fill	18.0	10.0	26	0.35	10,000	5/30
Weathered soil	21.0	29.0	27	0.32	17,000	10/30~20/30
Weathered rock	21.0	34.0	34	0.30	200,000	50/20~50/5
Soft rock	23.0	100.0	36	0.25	350,000	-

체 및 어스 앵커는 실제로 3차원 모델링이 필요하지만, 2차원 수치해석시 등가의 물성치를 입력하여 이를 2차원 평면 변형률 조건으로 해석하였다. 등가의 물성치 산정은 다음의 식 (1)을 이용하여 Fig. 3과 같이 연속벽체의 탄성계수(E)와 단면이차모멘트를 단위폭 1m의 흙막이 벽체로 치환하여 적용하였으며, 어스 앵커의 경우도 구조물 기초설계기준(2015)에 의거하여 설계된 각 어스 앵커의 강선 개수 및 긴장력을 토대로 등가 치환하여 적용하였다. 실제 현장에 시공된 흙막이 벽체 및 어스 앵커의 구조물 물성 및 설계조건을 반영한 해석 입력값은 Table 2에 정리하였다.

$$E_p I_p \times N_p + E_c I_c \times N_c = E_a I_a \quad (1)$$

여기서,  $E_p$  = H-pile의 탄성계수(kPa)

$I_p$  = H-pile의 단면이차모멘트(m<sup>4</sup>)

$N_p$  = 단위폭 1m 당 H-pile의 개수

$E_c$  = 콘크리트 벽체의 탄성계수(kPa)

$I_c$  = 콘크리트 벽체의 단면이차모멘트(m<sup>4</sup>)

$N_c$  = 단위폭 1m 당 콘크리트 벽체의 개수

$E_a$  = 치환된 흙막이 벽체의 탄성계수(kPa)

$I_a$  = 치환된 흙막이 벽체의 단면이차모멘트(m<sup>4</sup>)

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS 2D와 3D를 사용하였고, 지반은 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다(Brinkgrave et al., 2005).

유한요소해석에 있어 최적의 유한요소망은 지반-구조물 상호작용 문제에 있어 중요한 영향을 미친다(Potts and Zdravkovic, 1999). 흙막이 구조물의 경우, 유한요소망은 수평하중형태와 벽체의 종류 및 제원(벽체 길이, 벽체 강성, 벽체 경계조건)에 주로 의존한다. 이를 바탕으로 본 연구대상인 흙막이 벽체의 모델링에서는 최적의 유한요소망을 설정하기 위하여 유한요소해석에 필요한 경계조건 및 범위를 각각 전면 굴착부는 40m, 굴착부 후면은 최대 굴착깊이의 2배인 60m로 하였으며,

저면부는 30m 깊이까지로 경계 범위를 설정하였다. 경계조건은 수직면에 대해서는 수평방향 변위 구속을 하였고, 저면부는 수직방향 변위 구속을 하여 모델링하였다. 또한 실제 시공조건의 정확한 해석을 위하여 흙막이

벽체의 시공을 시작으로 어스앵커 시공의 단계별 굴착 (16단계)을 해석단계별로 모사하였다. 완성된 2차원 유한요소 모델링의 단면은 Fig. 4에 나타냈었다.

Table 2. Material properties of structural members

Member	Properties																																																																				
CIP wall	Diameter, $D = 0.45$ m Young's modulus, $E = 25,000$ MPa Moment of inertia, $I_c = 0.003269$ m <sup>4</sup>																																																																				
	Horizontal spacing, $S_{EA} = 1.8$ m Young's modulus, $E = 204,000$ MPa Angle, $\theta = 30^\circ$																																																																				
Earth Anchor	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Anchor</th> <th>Fixed length (m)</th> <th>Free length (m)</th> <th>Size (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>5.0</td><td>21.5</td><td><math>\phi 12.7 \times 4</math></td></tr> <tr><td>2</td><td>6.0</td><td>20.5</td><td><math>\phi 12.7 \times 4</math></td></tr> <tr><td>3</td><td>6.0</td><td>20.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 4</math></td></tr> <tr><td>4</td><td>7.0</td><td>19.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 4</math></td></tr> <tr><td>5</td><td>7.0</td><td>18.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 4</math></td></tr> <tr><td>6</td><td>8.0</td><td>17.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 4</math></td></tr> <tr><td>7</td><td>8.0</td><td>16.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 6</math></td></tr> <tr><td>8</td><td>9.5</td><td>15.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 6</math></td></tr> <tr><td>9</td><td>9.5</td><td>14.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 6</math></td></tr> <tr><td>10</td><td>10.0</td><td>13.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 6</math></td></tr> <tr><td>11</td><td>10.0</td><td>12.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 8</math></td></tr> <tr><td>12</td><td>10.0</td><td>11.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 8</math></td></tr> <tr><td>13</td><td>10.0</td><td>10.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 8</math></td></tr> <tr><td>14</td><td>10.0</td><td>9.5</td><td><math>\phi 12.7 \times 8</math></td></tr> <tr><td>15</td><td>10.0</td><td>8.5</td><td><math>\phi 12.7 \times 8</math></td></tr> <tr><td>16</td><td>10.0</td><td>8.0</td><td><math>\phi 12.7 \times 8</math></td></tr> </tbody> </table>	Anchor	Fixed length (m)	Free length (m)	Size (mm)	1	5.0	21.5	$\phi 12.7 \times 4$	2	6.0	20.5	$\phi 12.7 \times 4$	3	6.0	20.0	$\phi 12.7 \times 4$	4	7.0	19.0	$\phi 12.7 \times 4$	5	7.0	18.0	$\phi 12.7 \times 4$	6	8.0	17.0	$\phi 12.7 \times 4$	7	8.0	16.0	$\phi 12.7 \times 6$	8	9.5	15.0	$\phi 12.7 \times 6$	9	9.5	14.0	$\phi 12.7 \times 6$	10	10.0	13.0	$\phi 12.7 \times 6$	11	10.0	12.0	$\phi 12.7 \times 8$	12	10.0	11.0	$\phi 12.7 \times 8$	13	10.0	10.0	$\phi 12.7 \times 8$	14	10.0	9.5	$\phi 12.7 \times 8$	15	10.0	8.5	$\phi 12.7 \times 8$	16	10.0	8.0	$\phi 12.7 \times 8$
	Anchor	Fixed length (m)	Free length (m)	Size (mm)																																																																	
	1	5.0	21.5	$\phi 12.7 \times 4$																																																																	
	2	6.0	20.5	$\phi 12.7 \times 4$																																																																	
	3	6.0	20.0	$\phi 12.7 \times 4$																																																																	
	4	7.0	19.0	$\phi 12.7 \times 4$																																																																	
	5	7.0	18.0	$\phi 12.7 \times 4$																																																																	
	6	8.0	17.0	$\phi 12.7 \times 4$																																																																	
	7	8.0	16.0	$\phi 12.7 \times 6$																																																																	
	8	9.5	15.0	$\phi 12.7 \times 6$																																																																	
	9	9.5	14.0	$\phi 12.7 \times 6$																																																																	
	10	10.0	13.0	$\phi 12.7 \times 6$																																																																	
	11	10.0	12.0	$\phi 12.7 \times 8$																																																																	
	12	10.0	11.0	$\phi 12.7 \times 8$																																																																	
	13	10.0	10.0	$\phi 12.7 \times 8$																																																																	
	14	10.0	9.5	$\phi 12.7 \times 8$																																																																	
	15	10.0	8.5	$\phi 12.7 \times 8$																																																																	
16	10.0	8.0	$\phi 12.7 \times 8$																																																																		
H-Pile	Type, H-300×305×15×15 Horizontal spacing, $S_H = 1.8$ m Young's modulus, $E = 210,000$ MPa Moment of inertia, $I_c = 0.000215$ m <sup>4</sup>																																																																				

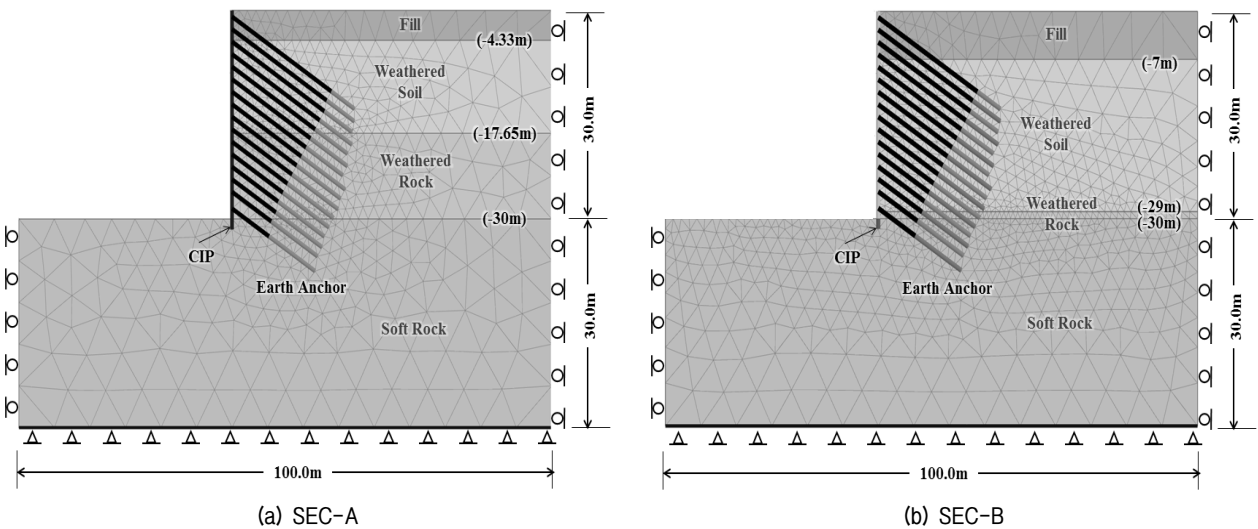


Fig. 4. 2D Mesh configuration and boundary conditions

### 3.4 3차원 수치해석 모델링

본 연구에서는 2차원 및 3차원 유한요소해석 결과의 비교분석을 위하여 2차원 수치해석 모델링시 적용하였던 지반조건, 구조물 요소망의 경계조건 및 범위를 동일

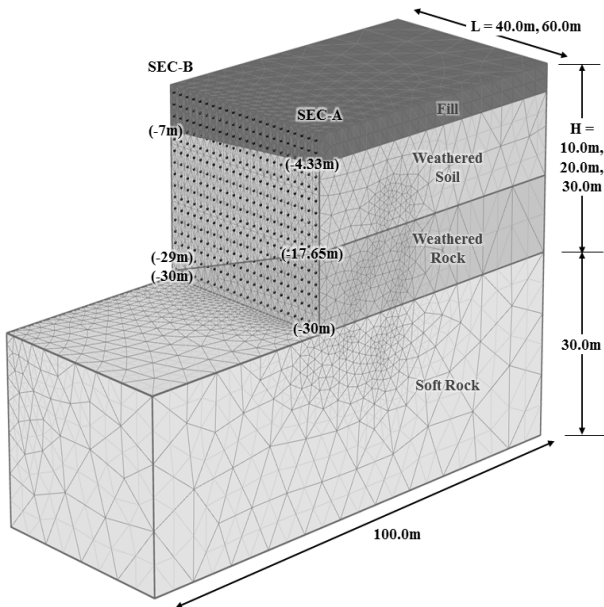


Fig. 5. 3D Mesh configuration

하게 적용하였으며, 2차원 해석과 동일하게 단계별 굴착(16단계)을 해석단계별로 모사하였다. 굴착폭의 변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 굴착폭의 길이를 40m와 60m로 각각 적용하였으며, 2차원 수치해석 모델링에서와 같이 굴착폭 방향의 양단에서 수평방향 변위구속을 하였다. 완성된 3차원 유한요소 모델링의 요소망은 Fig. 5에 나타냈었다.

### 4. 해석 결과 및 분석

본 연구에서는 경사지층에 설치된 앵커지지 흙막이 벽체의 거동분석을 위하여 2차원 및 3차원 유한요소해석을 수행하여 실제 현장의 계측변위와 비교 분석하였다. Table 3은 2차원 및 3차원 유한요소해석에 있어서 굴착심도 및 굴착폭의 변화에 따른 흙막이 벽체의 최대 수평변위를 나타낸 것이다. Table 3에 있어서 ( )안의 값은 해석방법에 따라 산정된 최대 수평변위와 실제 현장의 계측변위와의 편차를 나타낸 값이다.

지반굴착에 따른 흙막이 벽체의 거동에 대한 수치해석 기법의 차이를 분석하기 위하여 본 현장의 지반굴착 및 가시설 설계시 수행된 탄소성해석 프로그램(EXCAV/W)

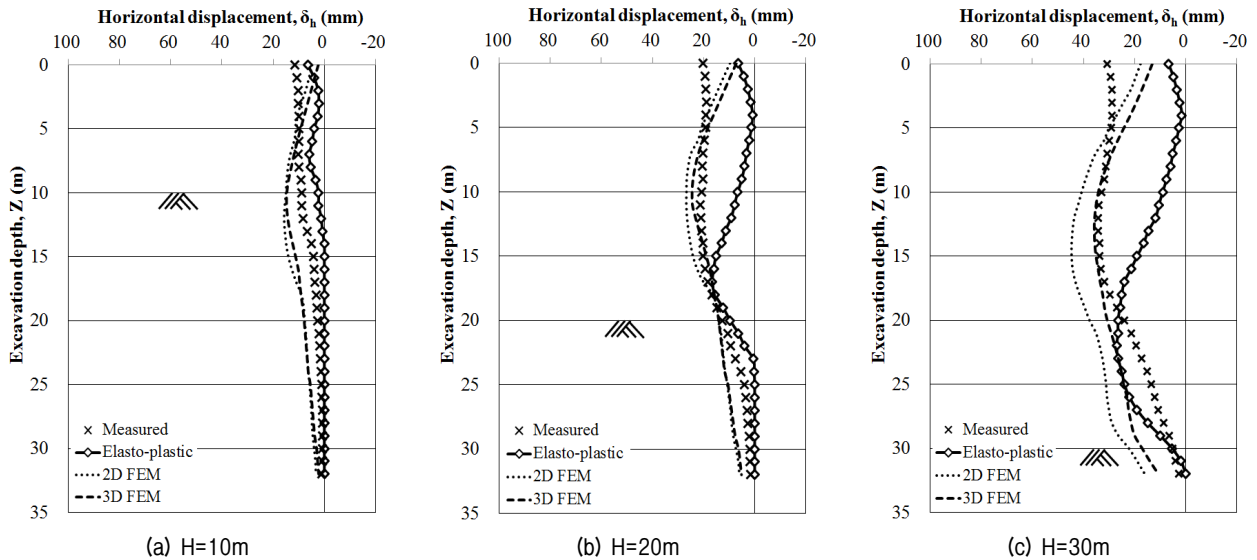


Fig. 6. Comparison of elasto-plastic and FE analyzed horizontal displacement at SEC-A

Table 3. Maximum horizontal displacements

Excavation depth, H	SEC-A			SEC-B		
	2D	3D (L=40m)	3D (L=60m)	2D	3D (L=40m)	3D (L=60m)
10m	15.7mm (37%)	14.8mm (29%)	15.1mm (31%)	43.1mm (92%)	26.4mm (18%)	23.8mm (6%)
20m	26.8mm (26%)	24.5mm (15%)	24.7mm (16%)	67.0mm (70%)	46.5mm (18%)	42.1mm (7%)
30m	44.7mm (30%)	35.8mm (4%)	36.2mm (5%)	91.1mm (63%)	64.1mm (15%)	61.7mm (10%)

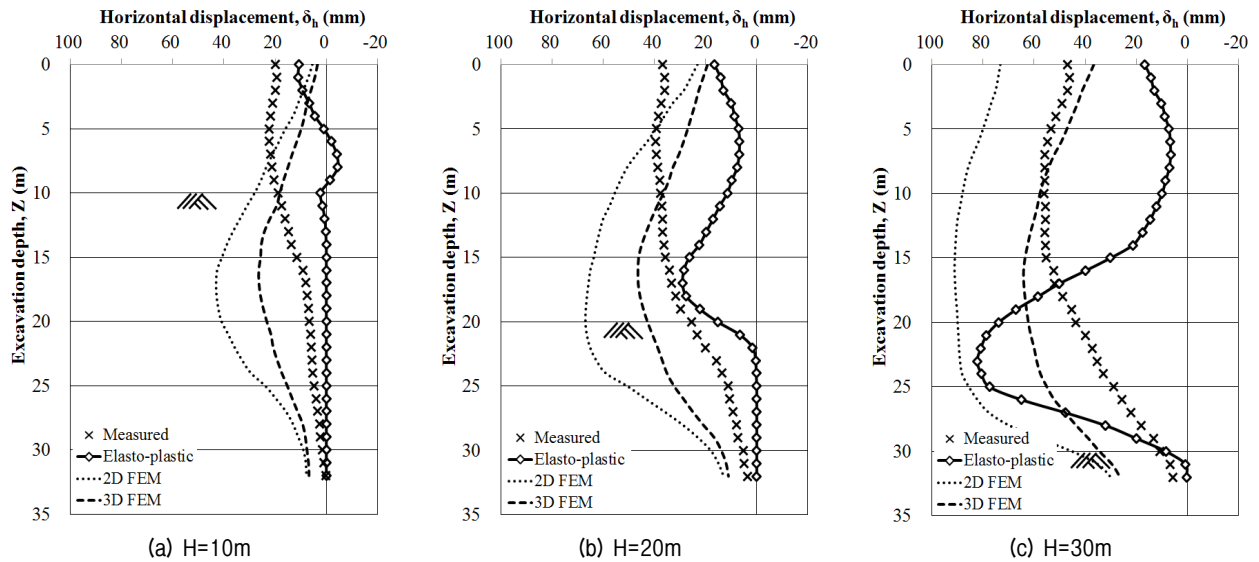


Fig. 7. Comparison of elasto-plastic and FE analyzed horizontal displacement at SEC-B

을 이용한 수치해석결과(Korea Rail Network Authority, 2013)와 본 연구에서 수행한 2차원, 3차원 유한요소해석 결과 및 계측결과를 비교분석하였다. 이 때, 3차원 유한요소해석결과는 굴착폭 40m 일 때의 해석결과를 사용하였다. Fig. 6과 7에서 보는바와 같이 흙막이 벽체 상부의 변위는 해석 방법에 따라 큰 차이를 나타냈다. 흙막이 벽체의 상부에서의 수평변위는 굴착심도가 증가함에 따라 계측결과와 유한요소해석결과는 지속적으로 증가하는 반면, 탄소성 해석결과는 굴착부 배면에 근접하는 경향을 나타냈으며, 전체 수평변위의 형상 또한 실제 계측결과 및 유한요소해석결과와 상이함을 알 수 있다. 이러한 탄소성 해석결과는 현장의 실측 변위와도 부합하지 않는 결과로, 탄소성 해석 자체가 지반과 구조물의 상호작용을 고려한 연속체 해석이 아닌 1차원적인 해석이기 때문에 굴착단계가 진행됨에 따라 벽체 상부 해석 지점에 걸리는 Anchor force가 과다하게 배면측으로 작용한 것으로 판단된다.

#### 4.1 경사지층에 따른 영향 분석

굴착대상 현장에 있어서 급격한 지층의 변화에 따라 흙막이 벽체에는 지반굴착에 따른 토압이 불균형하게 작용되며, 이로 인하여 어스 앵커의 부분적인 응력집중 및 벽체의 뒤틀림 등의 문제가 발생한다.

경사지층에 설치된 앵커지 지 흙막이 벽체의 3차원 유한요소해석 결과, Fig. 8과 같이 지반굴착에 따른 수평변위는 굴착폭을 따라서 변화하는 지반조건에 영향을

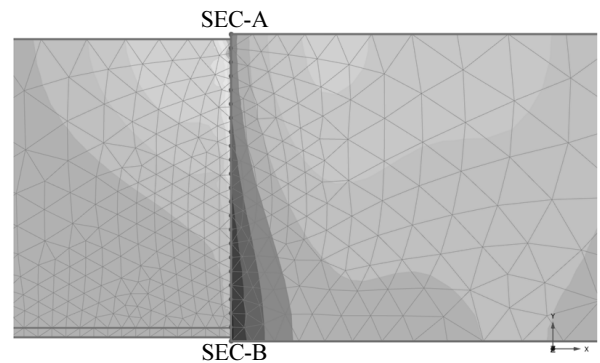


Fig. 8. Distribution of horizontal deformation

받는 것으로 나타났다. 암반지반이 지배적인 SEC-A와 비교하여 토사지반에 지배적인 SEC-B에 근접할수록 발생하는 수평변위량은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 지층의 변화가 급격한 구간에서 일부 표준단면의 선정을 통한 2차원 수치해석의 결과는 지반굴착에 따른 실제 흙막이 구조물의 거동을 정확하게 예측하기 어려우며, 이에 따라 흙막이 구조물의 안정성과 경제성을 고려한 합리적인 설계에는 한계가 있을 것으로 판단된다.

#### 4.2 굴착심도에 따른 영향 분석

Fig. 9와 Fig. 10은 굴착단계에 따른 흙막이 벽체의 깊이별 수평변위 분포를 2차원 및 3차원 유한요소해석 값과 실측값을 비교한 것이다. 전반적으로 2차원 및 3차원 유한요소해석 결과는 모두 실측값과 유사하게 굴착



심도가 깊어짐에 따라 벽체의 최대 변위량이 증가하는 경향을 나타내었으며, 변위발생량은 3차원 해석 결과가 2차원 해석 결과보다 작게 나타났다. 그러나 굴착심도의 증가에 따른 벽체의 변위는 해석대상의 지반조건에 따라 큰 차이를 나타냈다. Table 3과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 굴착부가 풍화암 등의 암반지반이 지배적인 SEC-A의 경우 2차원 및 3차원 유한요소해석값과 실측값은 유사한 결과를 나타냈으나, Fig. 10과 같이 굴착부가 매립토 및 풍화토 등의 토사지반이 지배적인 SEC-B의 경우, 굴착심도가 깊어짐에 따라 2차원 해석 결과는 3차원 해석 결과 및 실측값과 비교하여 큰 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 2차원 수치해석 결과

가 3차원 해석결과와 비교하여 과도한 변형이 산정되고 있다는 기존의 연구결과(Ou et al., 1996; Lee et al., 1998; Finno et al., 2007)와 일치하고 있다.

#### 4.3 굴착폭의 변화에 따른 영향 분석

Table 3에서 나타낸 바와 같이 3차원 수치해석시 지반굴착에 따른 흙막이 벽체의 수평변위값은 굴착폭의 변화에도 영향을 받는다. Fig. 9와 Fig. 10에서 나타낸 바와 같이 암반지반이 우세한 SEC-A의 경우, 굴착폭의 변화에 따른 최대수평변위 및 수평변위 형태의 차이는 미비하였으나, 토사지반이 지배적인 SEC-B에서는 차이

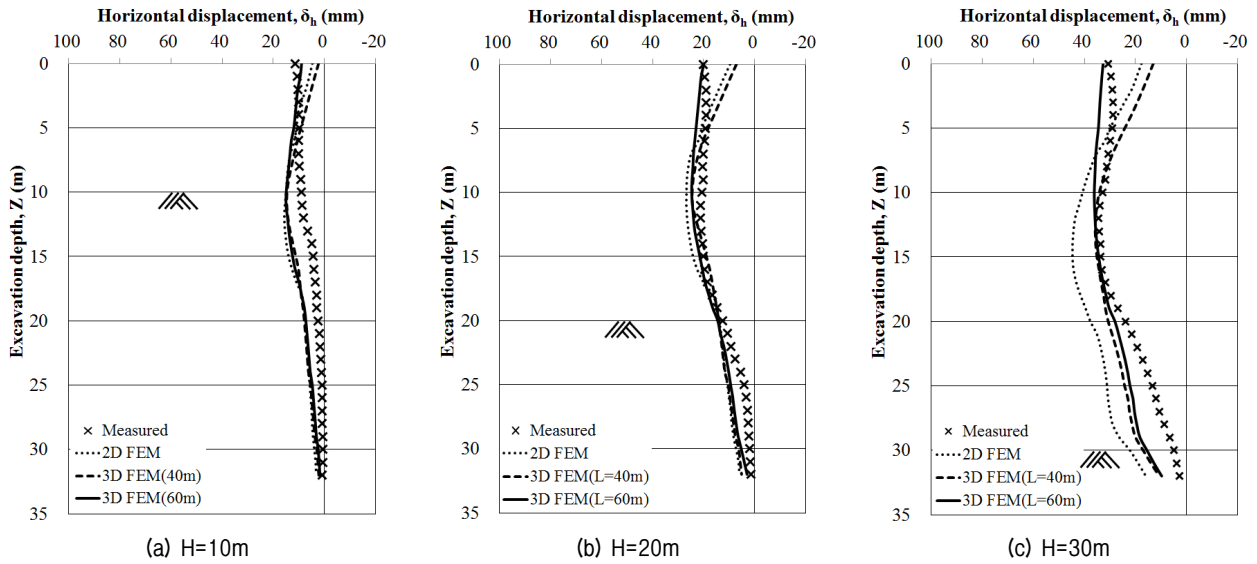


Fig. 9. Comparison of 2D and 3D analyzed horizontal displacement at SEC-A

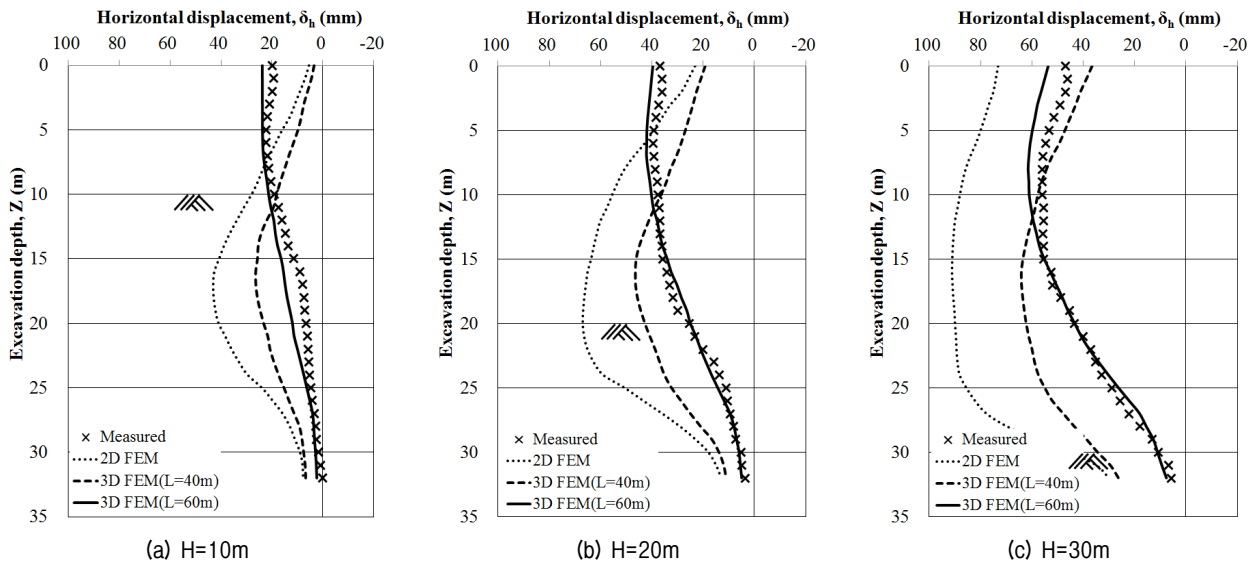


Fig. 10. Comparison of 2D and 3D analyzed horizontal displacement at SEC-B

가 크게 발생함을 알 수 있었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 굴착폭이 40m 일 때보다 60m 일 때 3차원 해석결과는 굴착심도에 관계없이 실제 계측값을 보다 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 경사지층에 설치된 앵커지지 흙막이 벽체의 거동분석에 있어서 2차원 및 3차원 유한요소해석을 이용하여 굴착심도(H), 굴착폭(L) 및 지반조건의 영향에 따른 수치해석방법의 정확성 및 적용성에 대하여 비교분석하였다.

굴착면을 따라서 지층의 변화가 급격한 구간에서 2개의 단면을 선정하여 2차원 유한요소해석을 수행하였으며, 이 2개의 단면을 포함하는 전체 구간의 3차원 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 비교분석하였다. 또한, 3차원 유한요소 해석시 굴착심도(H)와 굴착폭(L)의 변화가 흙막이 벽체의 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 굴착심도(H)와 굴착폭(L)을 변화시켜 해석을 수행하였으며, 이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 경사지층에 설치된 앵커지지 흙막이 벽체의 거동분석을 위한 2차원 및 3차원 유한요소해석 결과, 굴착면을 따라서 길이방향 지반조건 변화의 영향을 3차원 수치해석을 통하여 확인할 수 있었으며, 탄소성 해석과 2차원 해석 및 3차원 해석은 지반조건 및 굴착심도에 따라 차이가 있음을 알 수 있었다.
- (2) 2차원 및 3차원 유한요소해석 결과는 모두 실측값과 유사하게 굴착 심도가 깊어짐에 따라 벽체의 최대 변위량이 증가하는 경향을 나타내었으며, 변위 발생량은 3차원 해석 결과가 2차원 해석 결과보다 작게 나타났다. 해석대상 지반이 암반지반이 지배적인 경우, 2차원 및 3차원 유한요소해석결과는 모두 실측값과 유사한 결과를 나타냈으나, 토사지반이 지배적인 경우 2차원 해석보다는 3차원 유한요소해석이 굴착에 따른 흙막이 벽체의 실제 거동을 보다 정확하게 예측하고 있음을 확인하였다.
- (3) 굴착폭(L)의 변화에 따른 3차원 유한요소해석결과를 분석한 결과, 3차원 유한요소해석에 있어서 정확한 거동분석을 위해서는 굴착대상 지반조건이 암반이 지배적인 경우 3차원 유한요소해석에 있어서

굴착폭(L)은 최소 굴착심도(H) 이상으로 설정하며, 토사가 지배적인 경우 굴착폭(L)은 최소 굴착심도(H)의 2배 이상으로 설정하는 것이 합리적으로 판단된다.

- (4) 이상의 해석결과를 종합하면, 흙막이 벽체의 거동 분석 및 안정성 검토시에는 지반의 기하학적인 비대칭성과 3차원 구조로 설치되는 흙막이 벽체 및 지보재의 특성을 고려한 3차원 수치해석 기법의 적용이 적절함을 알 수 있었다. 해석대상 지반이 암반에 비해 강성이 낮은 토사지반에 있어서 일정심도(20m) 이상의 지반굴착에 따른 흙막이 벽체의 거동 분석을 위해서는 3차원 수치해석이 합리적인 것으로 판단되며, 보다 정확한 3차원 수치해석을 위해서 굴착폭(L)의 해석영역을 일정범위(굴착심도의 2배) 이상으로 설정하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030040, NRF-2014R1A2A1A11054606)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Bono, N. A., Liu, T. K., and Soydemir, C. (1992), "Performance of an Internally Braced Slurry-diaphragm Wall for Excavation Support", *Slurry Walls: Design, Construction, and Quality Control*, ASTM Special Topic Publication, Vol.1129, pp.347-360.
2. Brinkgrave, R. B., Broere, W., and Waterman, D. (2005), "PLAXIS 2D - Version 8", PLAXIS B. V., Netherlands.
3. Clarke, B. G. and Wroth, C. P. (1984), "Analysis of Dunton Green Retaining Wall based on Results of Pressuremeter Tests", *Géotechnique*, Vol.34, pp.549-561.
4. Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990), "Construction Induced Movements of in Situ Walls", *Proceedings of Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Vol.25, pp.439-470.
5. Finno, R. J., Blackburn, J. T., and Roboski, J. F. (2007), "Three-dimensional Effects for Supported Excavations in Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133(1), pp.30-36.
6. Finno, R. J., Harahap, I. S., and Sabatini, P. J. (1991), "Analysis of Braced Excavations with Coupled Finite Element Formulations", *Computers and Geotechnics*, Vol.12(2), pp.91-114.
7. Hashash, Y. M. and Whittle, A. J. (1996), "Ground Movement Prediction for Deep Excavations in Soft Clay", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122(6), pp.474-486.
8. Hubbard, H. W., Potts, D. M., Miller, D., and Burland, J. B.

- (1984), "Design of the Retaining Walls for the M25 Cut and Cover Tunnel at Bell Common", *Géotechnique*, Vol.34(4), pp.495-512.
9. Jang, C. S. (2002), Application of genetic algorithm to the back analysis of the underground excavation system, *PhD thesis*, Chung-Ang University, Korea.
  10. Jeong, S. S. and Kim, Y. H. (2008), "Characteristics of Collapsed Retaining Walls Using Elasto-plastic Method and Finite Element Method", *Korean Geotechnical Society*, Vol.25(4), pp.19-29.
  11. Jeong, S. S., Kim, B. C., Won, J. O., and Lee, J. H. (2003), "Uncoupled Analysis of Stabilizing Piles in Weathered Slopes", *Computers and Geotechnics*, Vol.30(8), pp.671-682.
  12. Korea Rail Network Authority (2013), "Structural Design Report for Suseo High Speed Railway (in Korean language)", Korea.
  13. Korean Geotechnical Society (2015), "Korea Specification for Substructures (in Korean language)", Korea.
  14. Lee, S. and Kim, S. K. (2008), "A Study on Deformation Analysis of the Earth Retaining Wall", *Korean Geotechnical Society*, Vol.24(2), pp.27-36.
  15. Lee, F. H., Yong, K. Y., Quan, K. C., and Chee, K. T. (1998), "Effect of Corners in Struttred Excavations: Field Monitoring and Case Histories", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124(4), pp.339-349.
  16. Ou, C. Y., Chiou, D. C., and Wu, T. S. (1996), "Three-dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122(5), pp.337-345.
  17. Potts, D. M. and Fourie, A. B. (1984), "The behaviour of a Propped Retaining Wall: Results of a Numerical Experiment", *Géotechnique*, Vol.34(3), pp.383-404.
  18. Powrie, W. and Li, E. S. F. (1991), "Finite Element Analyses of an in Situ Wall Propped at Formation Level", *Géotechnique*, Vol.41(4), pp.499-514.
  19. Shin, J. W. and Kim, D. S. (2004), "Comparison of Displacement of the Braced Retaining Wall by Developed Elasto-plastic Analysis", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.19(2), pp.112-118.
  20. Simpson, B. (1992), "Retaining Structures: Displacement and Design", *Géotechnique*, Vol.42(4), pp.541-576.
  21. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", 2nd Ed. John Wiley & Sons Inc. New York.
  22. Whittle, A. J., Hashash, Y. M., and Whitman, R. V. (1993), "Analysis of Deep Excavation in Boston", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119(1), pp.69-90.

Received : February 1<sup>st</sup>, 2016

Revised : March 21<sup>st</sup>, 2016

Accepted : March 28<sup>th</sup>, 2016