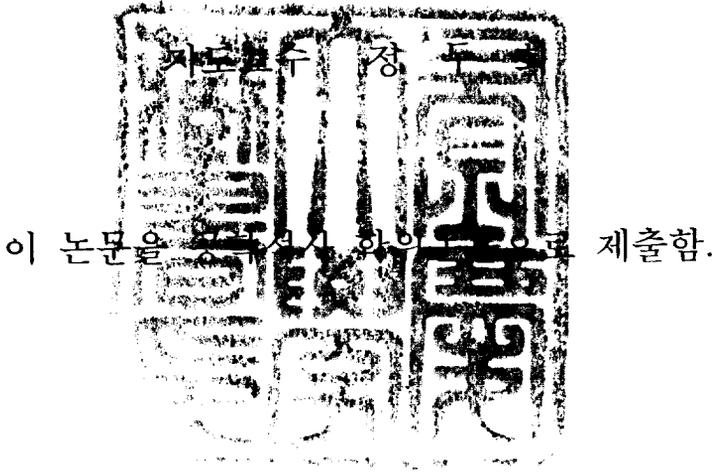


공학석사 학위논문

수치해석을 이용한 지반 굴착에 따른  
흙막이 벽체의 거동 분석



2006년 2월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

이 용 덕

이 논문을 이용덕의 공학석사  
학위논문으로 인준함

2005년 11월 일

주 심 공학박사 정진호



위 원 농공학박사 이영대



위 원 공학박사 정두희



# 목 차

	page
표 목 차 .....	i
그림 목 차 .....	ii
기 호 .....	iv
Abstract .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이론적 배경 .....	2
2.1 흙막이 구조물의 해석 .....	2
2.2 버팀식 흙막이 벽체 .....	2
2.2.1 굴착 완료후 벽체 해석방법 .....	3
2.2.2 굴착단계별 벽체 해석방법 .....	5
2.2.3 유한요소법 및 유한차분법에 의한 해석 .....	7
제 3 장 연구 대상 지역 현황 .....	12
3.1 현장 조건과 시공 개요 .....	12
3.1.1 지질 .....	12
3.1.2 시공 현황 .....	12
3.1.3 해석 단면 및 지질구조 .....	13
3.2 현장 계측 .....	13
3.2.1 계측 계획 .....	13
3.2.2 계측기 설치 계획 .....	14
3.2.3 측정 결과 .....	15
제 4 장 계측치와 수치해석 결과의 비교 .....	18
4.1 수치해석 개요 .....	18

4.2 유한요소해석 .....	19
4.2.1 적용 프로그램 .....	19
4.2.2 수치해석 모델링 .....	19
4.2.3 유한요소해석에 의한 변위 벡터 .....	21
4.3 탄소성해석 결과(SUNEX) .....	27
4.4 계측결과와 수치해석 결과의 비교 .....	30
제 5 장 결론 .....	36
참고문헌 .....	37

# 표 목 차

	page
표 3.1 시공 개요 .....	12
표 3.2 계측기 설치 항목 .....	14
표 3.3 흙막이 벽체 수평변위에 대한 단계별 현장계측 결과 .....	16
표 4.1 수치해석에 적용한 토질정수 .....	18

# 그림 목 차

	page
그림 2.1 단순보 해석 모식도 .....	3
그림 2.2 연속보 해석 모식도 .....	4
그림 2.3 굴착지반의 탄소성 거동 .....	6
그림 2.4 탄소성 지반상 연속보 해석모델 .....	6
그림 2.5 굴착 증가하중의 작용 .....	10
그림 2.6 유한요소법에 의한 해석 과정 .....	11
그림 3.1 연구대상 단면 및 지질구조 .....	13
그림 3.2 굴착 단계별 최대 수평변위 .....	15
그림 3.3 굴착 단계별 계측 결과(흙막이 벽체 변위) .....	17
그림 4.1 해석 모델링 .....	19
그림 4.2 유한요소망과 경계조건 .....	20
그림 4.3 모델링 초기화 .....	20
그림 4.4 1단계 굴착 및 1단 Anchor 설치시 변위 .....	21
그림 4.5 2단계 굴착 및 2단 Anchor 설치시 변위 .....	22
그림 4.6 3단계 굴착 및 3단 Anchor 설치시 변위 .....	23
그림 4.7 4단계 굴착 및 4단 Anchor 설치시 변위 .....	24
그림 4.8 최종 굴착시 변위 .....	25
그림 4.9 굴착 단계별 유한요소해석 결과(흙막이 벽체의 변위) .....	26
그림 4.10 STEP 1 흙막이 변위형상(최대 5.5mm) .....	27
그림 4.11 STEP 2 흙막이 변위형상(최대 9.2mm) .....	28
그림 4.12 STEP 3 흙막이 변위형상(최대 21.5mm) .....	28
그림 4.13 STEP 4 흙막이 변위형상(최대 30.2mm) .....	29
그림 4.14 STEP 5 흙막이 변위형상(최대 29.5mm) .....	29

## 그림 목 차 (계 속)

	page
그림 4.15 1단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교 .....	31
그림 4.16 2단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교 .....	32
그림 4.17 3단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교 .....	33
그림 4.18 4단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교 .....	34
그림 4.19 최종 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교 .....	35

## 기 호

$A$	:	지보공의 단면적
$d_s$	:	경계면
$E$	:	흙막이 벽체의 탄성계수
$E'$	:	지보공의 단면적
$[F]$	:	굴착 등가하중
$h$	:	각 층의 두께
$k_o$	:	정지토압계수
$K_s$	:	지반의 수평방향 지반반력계수
$I$	:	흙막이 벽체의 단면 2차 Moment
$L$	:	지보공의 길이
$[N]$	:	형상함수
$P_A$	:	주동토압
$P_P$	:	수동토압
$P_i$	:	초기토압 (주로 정지토압이 사용됨)
$x$	:	깊이 $y$ 지점에서의 벽체의 $x$ 방향변위
$[\sigma]$	:	굴착되는 부재의 굴착직전 단계에서의 응력
$r$	:	각 토층의 유효단위중량
$\mu$	:	지반의 포아송비

# A Study On Retain Wall Behavior due to Deep Excavation

Yong-Duck Lee

*Department of Civil Engineering, Graduate School*

*Pukyong National University*

## **Abstract**

There exist several methods to analyze earth retaining walls to support excavation works. These methods are mostly incorporated in computer programs to facilitate the design of earth retaining walls. Various types of commercial softwares have been developed and used in the design of an earth retaining wall to support excavation works. The objective of this study is to evaluate the suitability of commercial softwares for the design of earth retaining walls. Numerical analyses have been performed on the braced excavation wall supported by H-Pile and earth anchor by using two different commercial softwares. One is based on a finite element method, the other is based on an elasto-plastic analysis. The results obtained from numerical analyses were compared to field measurements and then their suitability was evaluated. Generally, the finite element analysis provided a better agreement with field measurement than the elasto-plastic analysis. The elasto-plastic analysis cannot predict the ground movement whereas the finite element analysis can provide a comparatively reasonable settlement profile of ground behind the wall.

*Keywords* : Earth retaining wall, Excavation, Finite element method, Elasto-plastic analysis, Field measurement, Ground movement, Settlement profile

# 제1장 서론

도시의 발달에 따라 지하 구조물에 대한 수요가 더욱 더 증가하고 있는 실정이다. 한정된 용지를 효과적으로 이용할 수 있는 방법으로 지하 구조물의 시공이 증가하고 있으며 또한, 대형화·대심도화 되고 있는 추세이다. 따라서 흠막이 구조물에 대한 안정성에 대한 검토는 매우 중요하다.

대규모 지하 구조물 시공에 따른 흠막이 벽체 및 인접지반의 변형은 경우에 따라서 주변 구조물에 손상을 미칠 수 있으며, 굴착공사의 안정성 확보해야 한다. 지하 굴착에 따른 지반 변형을 해석하기 위해서는 현장 상황에 적합한 모델링을 수립해야 한다. 흠막이 공법의 해석 방법은 벽체를 보로 취급하는 관용적인 해석법과 벽체의 거동을 고려한 고전토압 및 겹보기 토압을 적용한 탄성, 탄소성 지반상 연속보 해석법과 흠 구조물 상호작용을 고려한 유한요소법과 유한차분법이 있다. 흠막이 설계용 소프트웨어의 적합성에 대한 검토가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 Earth-Anchor로 지지된 H Pile 흠막이 구조물에서 시공 및 계측 결과를 수치해석 결과와 비교 분석함으로써 기존 소프트웨어에 대한 검증 및 수치해석 방법에 대해서 검토하였다.

## 제2장 이론적 고찰

### 2.1 흙막이 구조물의 해석

흙막이 구조물에 대한 해석방법은 여러 가지 방법이 제안되어 있다. 벽체를 보로 취급하는 관용적인 해석법과 흙-구조물간 상호작용을 고려하여 벽체와 지반을 동시에 해석하는 방법이 있다.

벽체를 보로 취급하는 해석법은 벽체를 단순보 또는 연속보의 구조를 이룬다고 보고, 배면에 작용하는 토압을 하중으로 가정한다. 이러한 경우, 지반의 지지력과 벽체의 변형에 따라 변화하는 토압을 파악할 수 없어서 만족할 만한 결과를 얻기 어렵다. 이 방법은 수작업으로도 해석 가능한 관용적인 해석법이지만 현재에는 컴퓨터의 발달과 수치해석 기법의 발달로 해석과정에서 지반의 지지력계수와 벽체의 변화까지도 고려하여 토압을 산정하는 방법으로 발전되었다.

흙-구조물간 상호작용을 고려하는 해석법은 주로 유한요소법이나 유한차분법을 말하는 것으로 컴퓨터에 의하여 수작업으로 불가능한 벽체의 변형과 지반거동의 상호작용을 고려하여 해석할 수 있어서 관용적인 해석법보다 실제의 거동을 파악하는데 보다 합리적이며, 굴착 현장 주변의 지반이나 인접구조물의 거동을 파악할 수 있다.

### 2.2 버팀식 흙막이 벽체

버팀식 흙막이 벽체를 설치하면서 지반굴착을 하는 경우에는 굴착진행에 따라 토압의 변화를 단계별로 해석하고 다음 단계 굴착 및 지보재 설치가 완료되어 경험토압과 같이 재 분포된 경우에 대하여 해석하여야 한다. 이를 위하여 벽체를 보로 가정하고 굴착 및 지보재 설치가 완료된 후의 실측치를 토대로 경험적인 토압분포를 추정하여 해석하는 방법으로 단순보 해석법, 연속보

해석법 및 탄성지반상 연속보 해석법 등이 있다. 최근에는 컴퓨터의 발달로 벽체-지반 상호작용에 따라 굴착 진행단계별로 지보재 설치 전, 후의 지반, 벽체, 지보재 및 주변지반이나 구조물의 거동까지 해석이 가능한 유한요소법과 유한차분법이 많이 이용되고 있는 데, 횡토압을 사용하지 않는다는 것이 특징이다. 한편, 굴착단계별로 변화하는 횡토압을 고려하여 해석하는 방법으로는 탄소성 지반상 연속보 해석법을 들 수 있지만, 흠막이 구조물의 해석에만 한정되고 주변지반이나 인접구조물의 거동을 해석할 수 없는 것이 단점이다. 버팀식 흠막이 벽체의 해석방법은 토압이론이나 경험토압을 적용한 굴착 완료후의 벽체해석방법과 굴착단계별 벽체해석방법으로 구분하여 기술된다.

### 2.2.1 굴착 완료후 벽체 해석방법

굴착이 완료되고 지보재를 설치한 이후 지보재에 작용하는 하중을 계측하여 제안된 경험적 토압분포를 하중으로 이용한다. 그러나 이러한 경험적 토압분포는 대상지반이 균질한 토층이며, 모래지반은 간극수가 없고 점토지반은 간극수압을 무시한 조건으로 가정한 것이다.

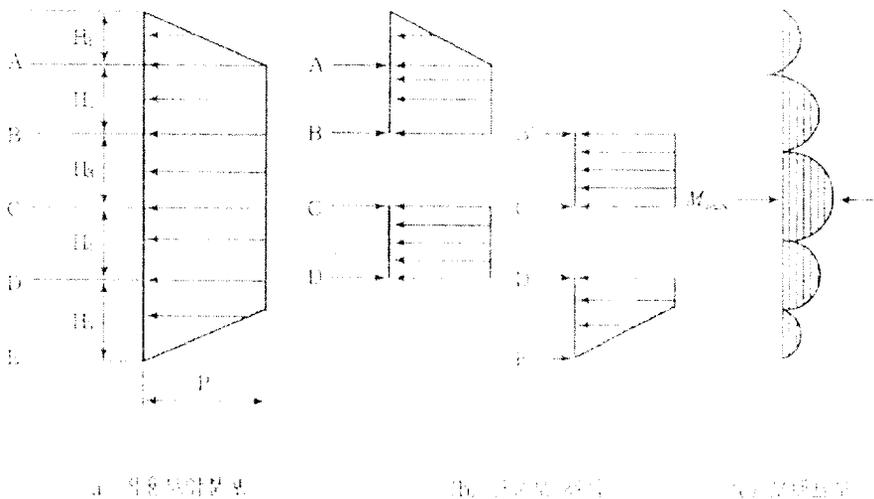


그림 2.1 단순보 해석 모식도

1) 단순보 해석법

단순보 해석법은 그림 2.1과 같이 벽체의 지보재 사이를 단순보로 가정하고 경험적 토압을 적용하여 해석하는 방법으로 매우 간단하나 굴착 및 지보재 설치 완료된 경우에만 해석이 가능하고 벽체의 거동을 무시하므로 흙-구조물 상호작용이 반영되지 않는다. 또한, 굴착단계별로 벽체 및 지보재의 안정성을 검토할 수 없고 굴착심도가 깊은 경우 신뢰도가 떨어진다. 특히, 연약지반일 때 공사 도중에 더 큰 지보공 반력과 벽체의 응력이 작용할 경우가 있다.

2) 연속보 해석법

연속보 해석법은 그림 2.2와 같이 벽체를 앵커나 버팀대로 지지된 연속보로 가정하고 경험적 토압을 적용하여 해석하는 방법이다. 휨모멘트나 전단력은 단순보로 해석하고 경험적인 토압을 적용하여 해석하는 방법으로 휨 모멘트나 전단력은 단순보 해석법 보다 정도가 높으나, 벽체 배면지반의 변형을 해석에 반영할 수 없다. 단순보 해석법과 같이 굴착단계별로 벽체 및 지지구조에 대하여 검토할 수 없고 굴착고가 깊은 경우 신뢰도가 떨어진다. 연약지반에서 변위가 누적될 경우 계산치보다 더 큰 지보공 반력과 벽체응력이 작용할 수 있다.

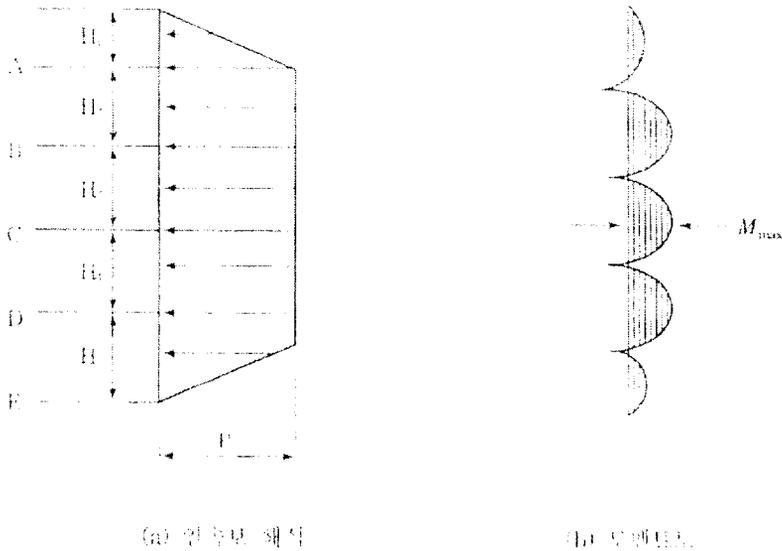


그림 2.2 연속보 해석 모식도

### 3) 탄소성 지반상 연속보 해석법

탄소성 지반상 연속보 해석법은 캔틸레버식 또는 앵커식 널말뚝 벽체 및 버팀식 굴착 등 모든 흙막이 벽체에 적용할 수 있는 방법으로 벽체를 적당한 절점으로 분할하여 벽체의 횡방향 변위, 벽체 전면 수동영역의 절점토압, 각 절점에서의 휨 모멘트 및 지보력 등을 구할 수 있다. 그러나 이 방법도 벽체와 버팀보 설치에 따른 벽체 배면토압을 고전적 토압이론으로 구하므로 배면지반에 대한 거동분석은 불가능하다.

## 2.2.2 굴착단계별 벽체 해석방법

단계별로 굴착 및 지보재 설치후의 토압분포는 흙막이 벽체의 안정에 필수적인 것이지만, 다음 단계의 지보재를 설치하기 위하여 굴착을 진행하는 과정이 더 불리한 조건이 된다. 이러한 경우의 토압분포는 추정하기가 어려울 뿐만 아니라, 벽체의 변위에 따라 결정된다. 이처럼 횡토압을 고려하여 굴착단계별로 해석하는 방법은 탄소성 지반상 연속보 해석법이 대표적이다. 이 방법은 주변지반 및 인접구조물의 거동을 해석하는 것은 불가능하지만, 지반을 굴착함에 따라 단계적으로 변하는 응력이나 변위 및 토압 등을 비교적 충실하게 계산할 수 있어 많은 전산 프로그램이 이 원리에 따라 개발되어 설계에 적용되고 있다. 또한, 흙-구조물 상호작용을 고려할 수 있는 방법으로는 유한요소법과 유한차분법이 있다.

### 1) 탄소성 지반상 연속보 해석법

탄소성 지반상 연속보 해석법은 흙막이 벽체에 작용하는 토압이 벽체의 변형에 따라 그림 2.3과 같이 탄소성 거동을 하며, 지반과 토류벽 및 지보재의 상호작용을 고려하여 굴착단계별로 변형과 토압 및 지보재의 반력을 구한다.

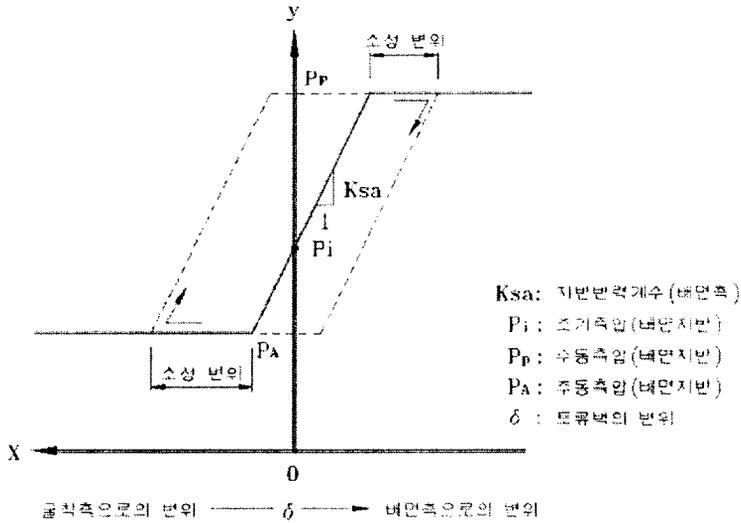


그림 2.3 굴착지반의 탄소성 거동

그림 2.4는 대표적인 탄소성 해석모델로 지반은 탄소성 스프링, 지보재는 탄성스프링 그리고 벽체는 탄소성보 요소로 모델화하여 식 (2.1)과 같이 유도된다.

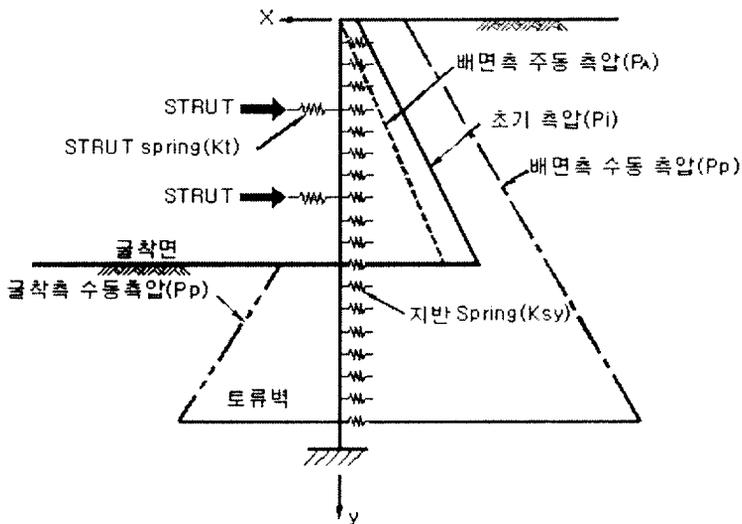


그림 2.4 탄소성 지반상 연속보 해석모델

탄소성 지반상 연속보해석 모델에서 하중과 변형에 대한 기본식은 식 (2.1)과 같이 표시된다.

$$EI \frac{d^4 x}{dy^4} + \frac{AE'}{L} x = P_i - K_s x \quad (2.1)$$

- 여기서, E : 흙막이 벽체의 탄성계수  
 I : 흙막이 벽체의 단면 2차 Moment  
 A : 지보공의 단면적  
 E' : 지보공의 단면적  
 L : 지보공의 길이  
 P<sub>i</sub> : 초기토압 (주로 정지토압이 사용됨)  
 K<sub>s</sub> : 지반의 수평방향 지반반력계수  
 x : 깊이 y 지점에서의 벽체의 x 방향변위이다.

해석시 초기토압은 정지토압(P<sub>0</sub>)을 적용하고, 계산결과인 벽체의 변위에 비례하여 증감된다. 그러나 이러한 토압은 그림 2.5와 같은 한계를 넘지 않으며, 계산된 토압의 보정치가 설정된 오차범위 내에 들 때까지 반복한다.

### 2.2.3 유한요소법 및 유한차분법에 의한 해석

유한요소법과 유한차분법은 횡토압을 이용하는 대신에 지반의 탄소성 강도 특성, 흙막이 벽체 및 지보재의 탄성 강도특성을 고려함으로써 응력-변형 거동을 구한다. 벽체와 지보재는 각각 보요소와 탄성 봉(bar)요소로 모델링되며, 벽체와 흙과의 거동을 나타내기 위하여 Interface 요소를 도입하였다. 이 방법을 이용하기 위해서는 대상지반 및 흙막이 구조물의 거동을 정확히 나타낼 수 있는 응력-변형을 관계가 필수적으로 요구되며, 이에 필요한 제반 정수들의 정확한 추정이 해석결과에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로

로 유한요소법이나 유한차분법을 이용하여 흙막이 구조물의 거동을 해석하는 경우 주된 영향요소는 굴착 과정을 재현하는 방법, 지반자체의 거동 모델화 방법, 지반거동 모델에서 사용된 입력치, 그밖에 실제 시공당시에 발생한 예상치 못했던 변수 등을 들 수 있다.

지반의 역학적 특성을 산정할 경우에는 입력값에 따라 해석결과가 어떤 영향을 미치는지 알아보는 민감도 해석을 실시하면 판단에 많은 도움을 줄 수 있다. 한편 해석방법을 결정할 때, 굴착 후 즉시 배수가 되는 사질지반의 경우는 유효응력해석이 적합하며, 점성토와 같이 굴착공사에 비하여 배수속도가 느릴 경우에는 전응력해석이 적합하다. 비배수 해석시 지반의 변형이 발생하는 경우라도 전체 체적에는 변화가 없으므로 체적탄성계수를 매우 큰 값으로 입력한다. 지반굴착 문제에서 흙막이 벽체 주변지반내 응력은 대부분의 경우 지반의 항복응력에 접근하여 비선형 거동을 함으로 탄소성 해석을 수행하여야 한다. 단, 지중연속벽과 같이 두꺼운 콘크리트이거나 소일시멘트 및 석회공법 등으로 개량된 강도가 큰 지반은 탄성해석을 하여도 무방하다.

일반적으로 유한요소법을 이용하여 토류구조물의 거동을 해석하고자 할 때 등가하중을 고려한 해석방법이 주로 이용된다. 이 등가하중은 보간법이나 경계면에서의 평형상태등을 고려하여 구하므로 전체 평형관계와 일치하지 않을 수 있다. 이를 위하여 전체 평형방정식에 입각한 굴착해석방법이 여러 학자에 의해 제안되어 있다. 해석방법은 다음과 같다.

### 1) 해석모델링

대상지반은 삼각형 또는 사각형 탄소성 요소로 분할하는데 보통 등방성 평면변형 탄소성 요소로 표현한다. 토류벽은 보요소로 표현하여 압축과 인장을 전달하는 외에 모멘트도 전달하므로 축력과 모멘트 모두 계산할 수 있다. 스트러트와 앵커 등 주로 축력에 지향하는 부재는 봉 또는 트러스 요소로 표현하고 양단을 힌지로 취급하므로 축방향의 압축과 인장만 전달한다. 암반의

절리, 단층 등의 불연속면을 표현하기 위해서 절점요소로 표현하는 연속체 요소에서 표현할 수 없는 거동을 해석한다.

## 2) 하중적용

고려하는 하중에는 과재하중, 자중에 의한 초기하중, 굴착에 의한 굴착등가하중 등이 있다. 과재하중은 지표면에서의 등분포하중을 가하는 경우가 많으며, 초기응력은 자중에 의한 응력을 계산하여 입력한다. 임의의 요소 중앙에서의 수직 및 수평방향 초기응력은 다음과 같이 산정한다.

$$\begin{aligned}
 \text{수직} : \sigma_y &= \sum r \cdot h \\
 \text{수평} : \sigma_x &= K_o \cdot \sigma_y \\
 \text{수평} : \sigma_z &= \mu(\sigma_x + \sigma_y)
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

여기서,  $r$  : 각 토층의 유효단위중량  
 $h$  : 각 층의 두께  
 $k_o$  : 정지토압계수  
 $\mu$  : 지반의 포아송비

굴착 등가하중은 다음과 같이 산정한다.

$$[F] = -[N] \cdot [\sigma] d_s \tag{2.3}$$

여기서,  $[F]$  : 굴착 등가하중  
 $[N]$  : 형상함수  
 $[\sigma]$  : 굴착되는 부재의 굴착직전 단계에서의 응력  
 $d_s$  : 깊계면

### 3) 굴착재현 기법

굴착 단계를 재현하기 위하여 그림 2.6에 나타낸 바와 같이 간접적인 방법을 적용한다. 굴착 단계는 다음과 같은 순서로 재현된다.

- (1) 흙의 자중에 의한 연직토압, 수평토압 및 과재하중에 의한 초기 변위, 변형률, 응력 등을 산정한다.
- (2) 굴착하고자 하는 부분에 의해서 발생되어 원지반에 전달되는 증가하중을 계산한다.
- (3) 굴착부에 관련되는 부분의 강성도 행렬을 제거한다.
- (4) 굴착경계면에 (2)에서 구한 증가하중을 반대 방향으로 작용시킨다.
- (5) 변위, 변형률 및 응력증분을 전 단계에서 구한 변위, 변형률 및 응력을 더하여 굴착지반 굴착에 의한 결과로 산출한다.

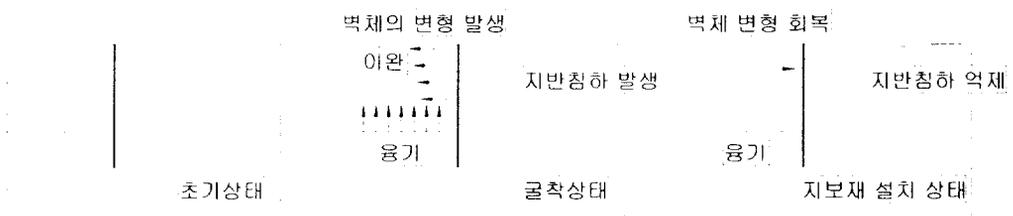


그림 2.5 굴착 증가하중의 작용(수정)

### 4) 해석과정

이상의 유한요소 모델과 하중에 따라 그림 2.6과 같은 과정으로 단계별 계산을 수행한다. 지반중의 어떤 요소가 탄성한계 이내일 때 탄성해석을 수행

하여, 탄성한계를 벗어나면 소성체로 취급한다.

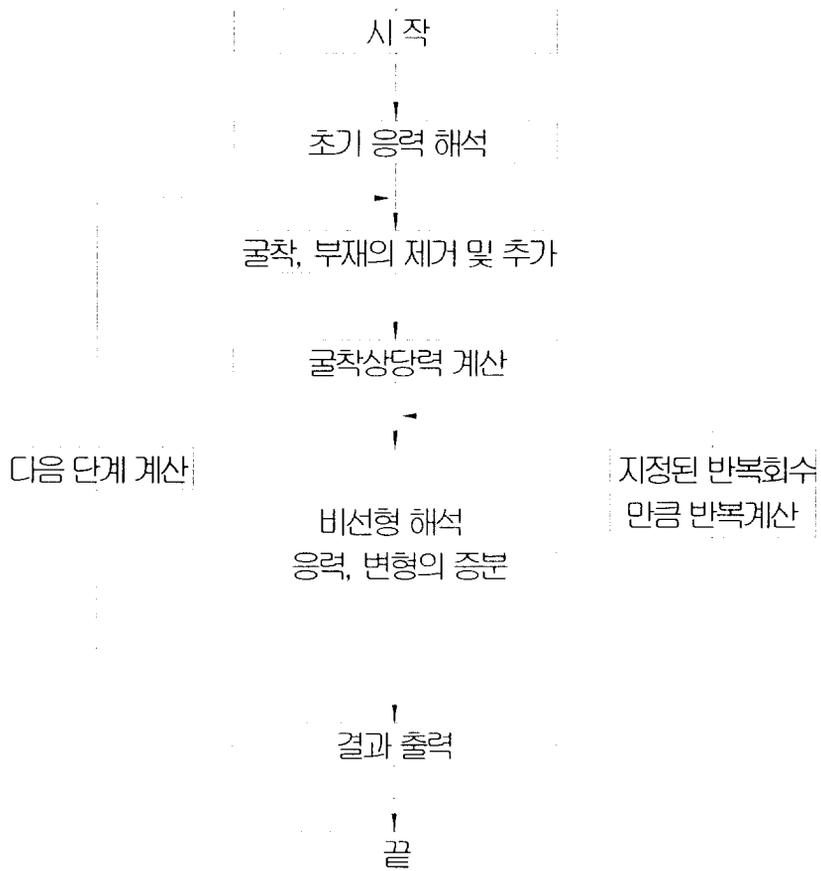


그림 2.6 유한요소법에 의한 해석 과정

## 제3장 연구 대상 지역 현황

### 3.1 현장 조건과 시공 개요

#### 3.1.1 지질

본 연구 대상 지역이 되는 현장의 지질은 상부로부터 표토층, 점성토층, 모래층, 자갈모래층, 자갈층, 풍화토층, 풍화암층, 연암의 순으로 이루어진 다층 지반이다. 지하수위는 지표하 1.5m에 존재하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 적용한 토질 정수는 표준관입시험의 N치를 이용하여 기존 문헌 및 제안식에 의해서 산정하였다.

#### 3.1.2 시공 현황

본 현장은 굴착면에 인접하여 10M폭의 도로와 주택가가 동일 횡단에 위치하고 있다. 본 현장의 시공 개요는 표 3.1에 나타난 바와 같다. 흙막이 벽체는 H-Pile + 토류판으로 시공 하였으며, 지지공법으로는 제거식 Ground-Anchor를 4단 설치하는 것으로 계획하였다.

표 3.1 시공 개요

구분	공 법	비고
흙막이 벽체	H-Pile + 토류판	H-300×300×10×15, c.t.c 1.2m
지보공	Ground-Anchor	φ12.7mm x 5EA, 4단

### 3.1.3 해석 단면 및 지질구조

본 연구 대상이 되는 해석 단면 및 지질 주상도는 그림 3.1에 나타난 바와 같다. 지반조사결과에 의한면 연구대상지역에 분포하는 토층은 지표면으로부터 표토층, 점토층, 자갈층, 풍화토층, 풍화토층, 풍화암층의 다층지반으로 구성되어 있다. 지하수위는 지표면에서 1.5m 지점에 위치하는 것으로 나타났다.

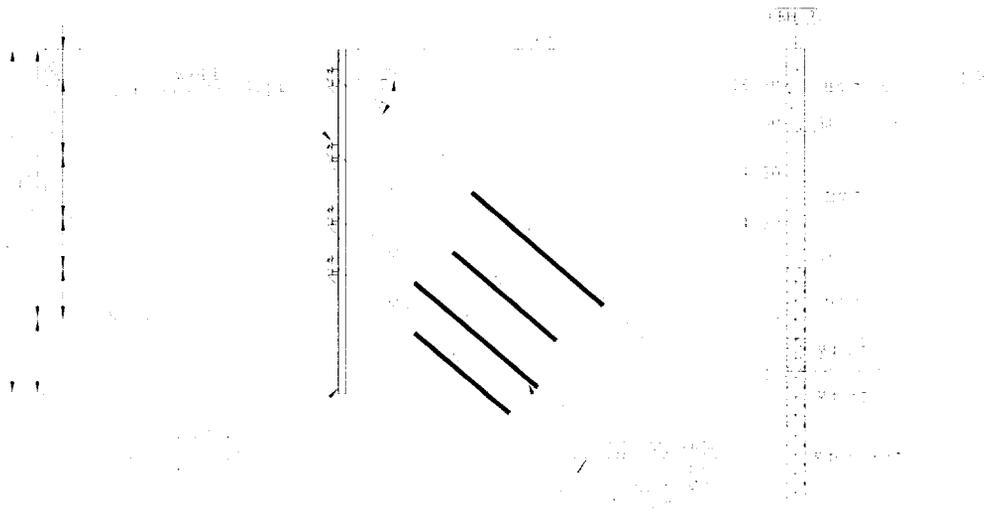


그림 3.1 연구대상 단면 및 지질구조

## 3.2 현장 계측

### 3.2.1 계측 계획

흙막이 공사를 하는 경우에는 사전에 토질 조사를 근거로하여 설계하고 공사를 진행하지만 여러 가지의 불확실한 요인들이 잠재하게 된다. 따라서 공사 중에 현장의 지반과 가설 구조물의 실제 기동을 측정하여 설계 시에 예측된 값과 다른 경우에는 적절히 시공법을 수정하여 공사를 진행하는 것이 일반적이다.

본 연구 대상 지역에서도 시공관리를 위하여 경사계, 하중계, 변형률계, 지하수위계, 기울기계 등의 현장계측기기를 설치하여 시공 관리를 하였다.

계측기 설치계획은 다음과 같은 조건을 만족하는 지점에 설치하였다.

- ① 원위치 서험 등에 의해서 지반조건이 충분히 파악되어 있는 곳
- ② 토류구조물의 전체를 대표할 수 있는 곳
- ③ 중요구조물이 인접하여 있는 곳
- ④ 토류구조물이나 지반에 특수한 조건이 있어서 공사에 영향을 미칠 것으로 예상되는 곳
- ⑤ 교통량이 많은 곳으로서 교통 흐름의 장애가 되지 않는 곳
- ⑥ 가능한 한 시공에 따른 계측기의 훼손이 적은 곳

### 3.2.2 계측기 설치 계획

본 연구를 위한 계측기는 표 3.2에 나타낸 바와 같이 지중경사계를 설치하였다.

표 3.2 계측기 설치 항목

계측기 종류	설치위치	측 정 목 적
지중경사계	흙막이벽 배면지반	지하연속벽 배면지반에 굴착심도보다 깊게 부동층까지 설치하여 굴토진행시 각 단계의 인접지반 수평변위량과 방향 및 크기의 실측과 이를 이용한 토류구조물 각 지점의 응력상태 판단이 가능함.

### 3.2.3 측정 결과

본 연구 대상 현장에서는 측정된 경사계의 굴착 단계별 계측 결과는 표 3.3과 그림 3.3에 나타내었다. 계측결과 흙막이 벽체의 최대 수평 변위는 굴착최종단계에서 약 40mm 정도 발생하였으며, 최대 수평 변위가 발생하는 위치는 지표면 G.L -4.0m, 점토층(G.L-3.3 ~ -8.7m)에서 최대변위 발생하였다. 수평 변위 양상은 3단계 굴착, 최종 굴착시 변위 증가율 최대 발생하는 것으로 나타났다. 굴착 단계별 최대 수평 변위 양상은 그림 3.2에 나타낸 바와 같다.

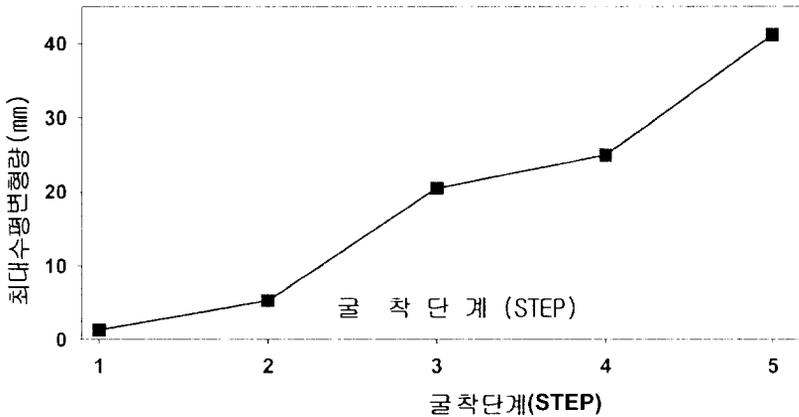


그림 3.2 굴착 단계별 최대 수평변위

표 3.3 흙막이 벽체 수평변위에 대한 단계별 현장계측 결과

심 도 (G.L(-)m)	지중경사계(mm)				
	1단굴착	2단굴착	3단굴착	4단굴착	최종굴착
1.00	1.18	5.30	10.18	12.30	15.00
2.00	1.16	5.08	11.14	13.50	21.62
3.00	1.32	5.22	17.38	20.82	35.24
4.00	1.32	4.60	20.48	25.02	41.24
5.00	1.26	3.54	15.00	21.00	36.50
6.00	1.22	3.60	10.00	14.20	31.02
7.00	1.10	3.10	6.70	10.66	26.00
8.00	0.56	1.64	2.48	5.46	20.32
9.00	0.18	0.26	1.04	2.50	8.04
10.00	0.30	0.58	0.78	1.60	4.86
11.00	0.14	0.24	0.12	0.74	2.78
12.00	0.16	0.28	0.06	0.56	1.88
13.00	0.02	-0.06	0.20	0.06	0.58
14.00	0.14	0.34	0.36	0.36	0.48

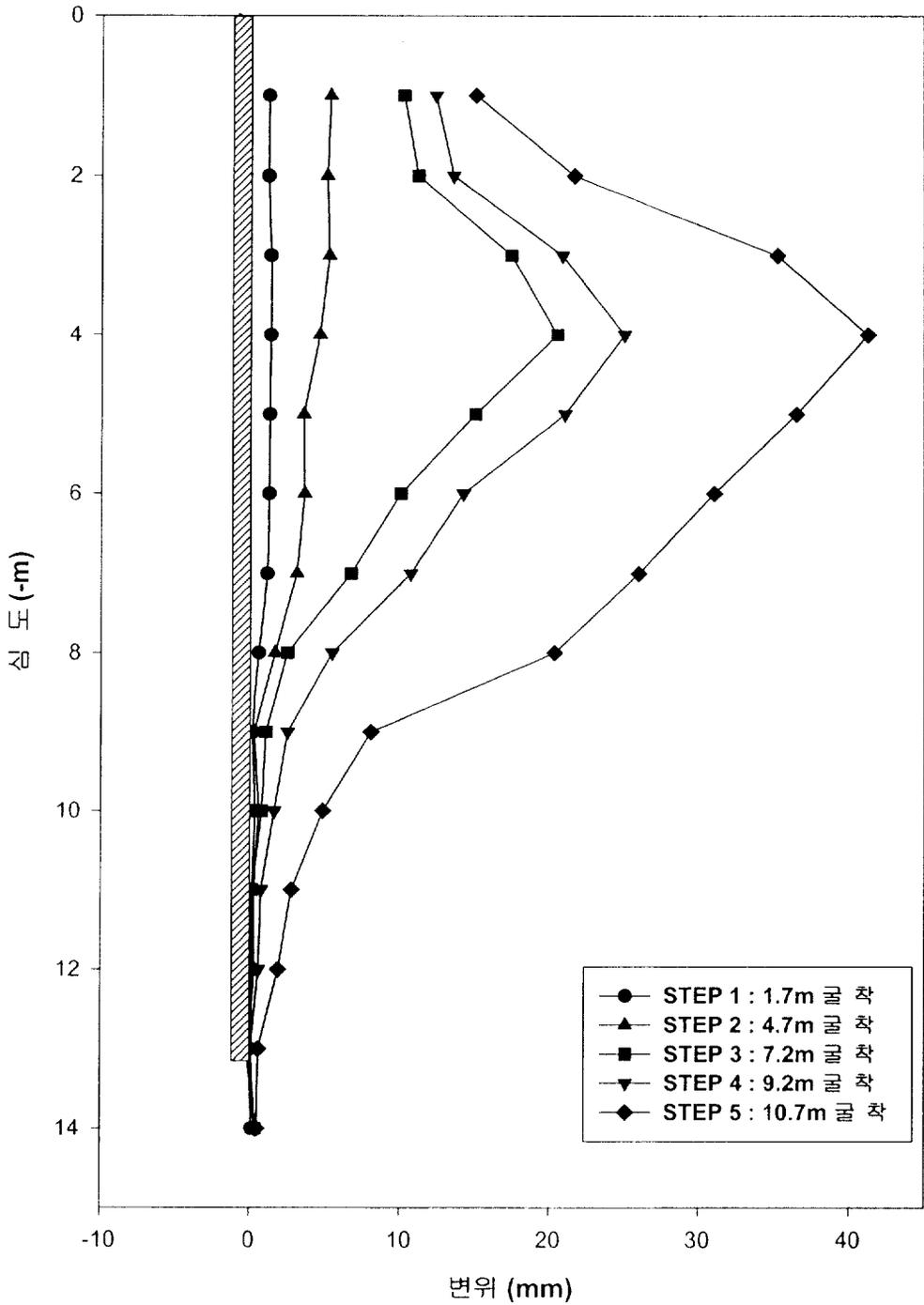


그림 3.3 굴착 단계별 계측 결과(흙막이 벽체 변위)

## 제4장 계측치와 수치해석 결과의 비교

### 4.1 수치해석 개요

토층은 수평으로 균질, 등방으로 가정하며 평면 변형률 조건으로 해석한다. 지반은 Mohr-Coulomb 항복 기준을 따르는 탄소성재료로 흙막이벽은 보 요소를 적용하고 Anchor는 인장요소를 이용하였다. 수치해석은 탄소성해석(SUNEX), 유한요소해석(PLAXIS) 프로그램을 사용하였다.

지반의 지질학적인 이력과 재료적인 특성에 기인하는 현장의 지반 응력 상태는 명확히 표현하기 어렵다. 그러나, 대부분의 수치해석에서는 수평토압은 단위체적중량에 의한 연직응력에 정지토압계수의 곱으로 사용한다. 표 4.1에서는 표준관입시험치로부터 본 연구에 적용한 토질정수를 나타내었다.

표 4.1 수치해석에 적용한 토질정수

구 분 지 층	단위중량 ( $\text{tf/m}^3$ )	강도 정수		지반반력계수 ( $\text{tf/m}^3$ )	지반변형계수 ( $\text{tf/m}^2$ )
		점착력 ( $\text{tf/m}^2$ )	내부마찰각 ( $^\circ$ )		
표토층	1.8	0.5	25	1800	3000
점토층	1.7	2.5	5	1200	2000
자갈층	1.9	0	35	2700	5000
풍화토층	1.9	2.0	30	3000	6000
풍화암	2.0	3.0	33	4500	15000
연 암	2.2	5.0	35	10000	50000

## 4.2 유한요소해석

### 4.2.1 적용 프로그램

본 연구를 위해 사용된 유한요소 프로그램은 네델란드의 Delft University에서 개발한 PLAXIS Ver.7.2로써 지반 및 해석조건에 따라 선형모델, 비선형모델, Mohr-Coulomb 모델, Cam Clay 모델 등의 해석이 가능하다. 흙의 배수조건은 배수, 비배수, 비간극제의 조건을 고려할 수 있고 단계성토, 침투해석, 연약지반의 압밀, 연약지반의 보강제, 단계 굴착 등을 해석할 수 있다.

### 4.2.2 수치해석 모델링

수치해석 모델링도는 그림 4.1에 나타난 바와 같다. 경계조건은 최하단을 X, Y의 양방향으로 고정 절점, 양끝 측면은 X방향 고정 절점으로 처리하였다. 흙막이 벽체와 흙과의 상대변위를 고려하기 위해서 인터페이스 요소를 사용하였다. 또한, 흙막이 배면의 차량하중을 고려하기 위해서 1.5 tonf/m 적용하였다.

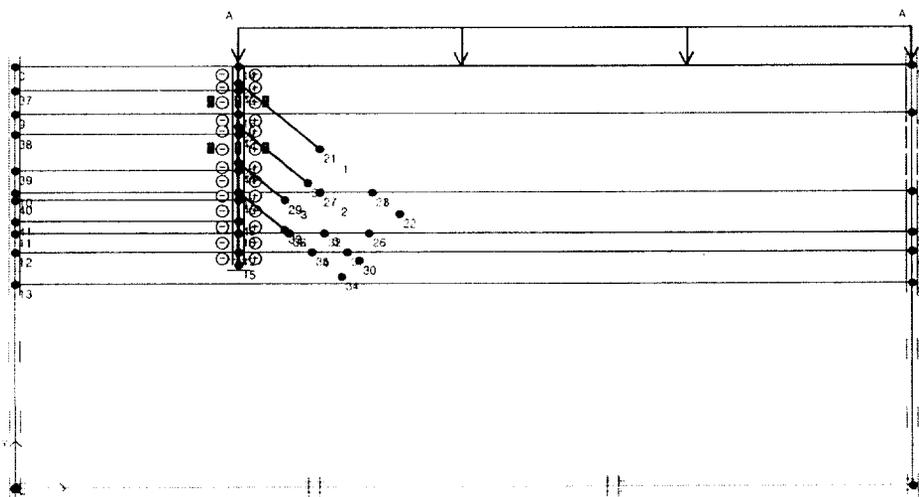


그림 4.1 해석 모델링

유한요소망과 경계조건은 그림 4.2에 나타낸 바와 같다. 요소망은 삼각형 6절점 요소를 사용하였다.

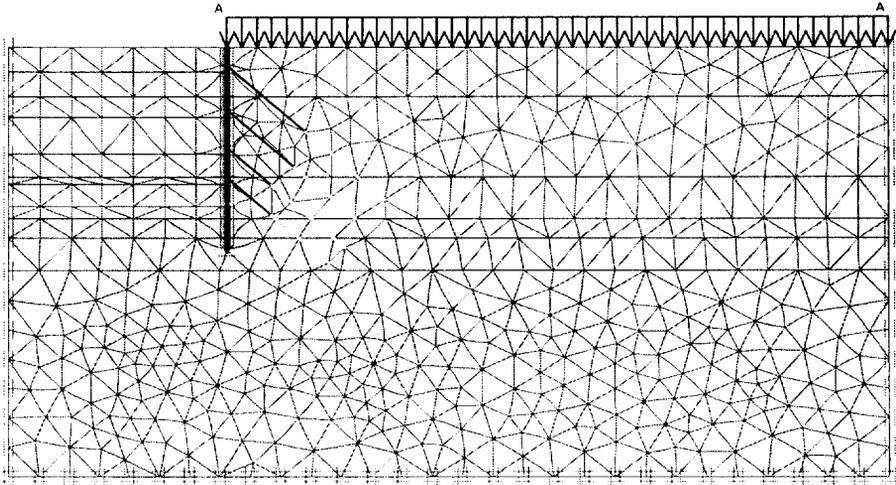


그림 4.2 유한요소망과 경계조건

유한요소해석에서 지반의 초기응력 및 변형률 조건에 대한 모델링 초기화는 그림 4.3에 나타내었다.

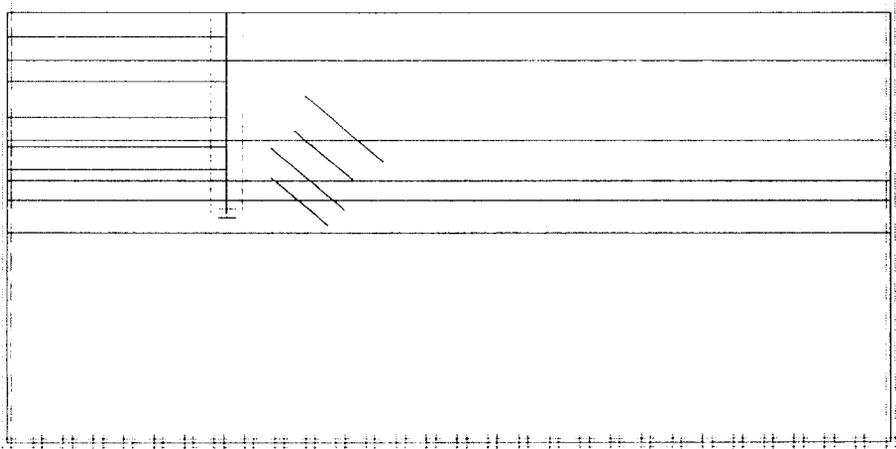


그림 4.3 모델링 초기화

### 4.2.3 유한요소해석에 의한 변위 벡터

유한요소해석상에 나타난 단계별 굴착에 따른 지반의 변형을 전체 요소망의 절점의 변위량을 나타내었다. 초기 굴착시에는 흙막이 벽체의 변형에 비해서 굴착 바닥면의 Rebound량이 크게 발생하였다. 흙막이 벽체의 최대 수평 변위는 최대 약 1.9mm 발생(G.L- 6.5 m) 하였으며, 배면지반의 침하는 최대 약 0.2mm가 발생하는 것으로 해석되었다.

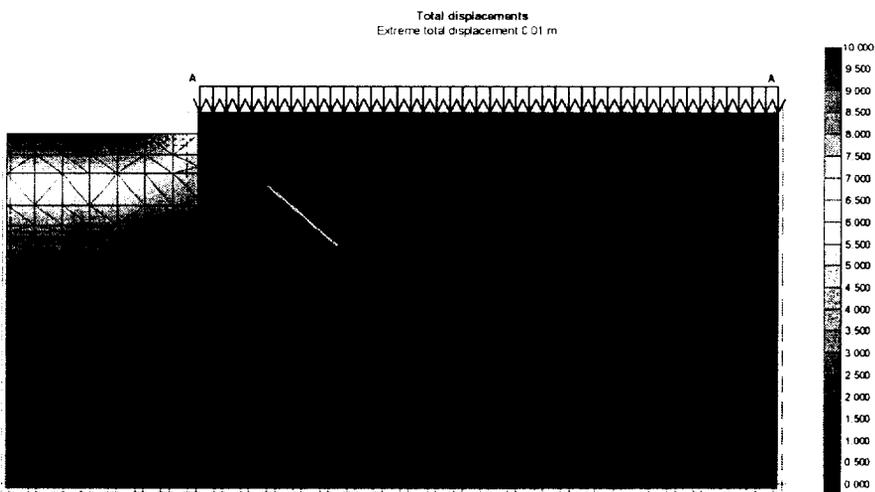
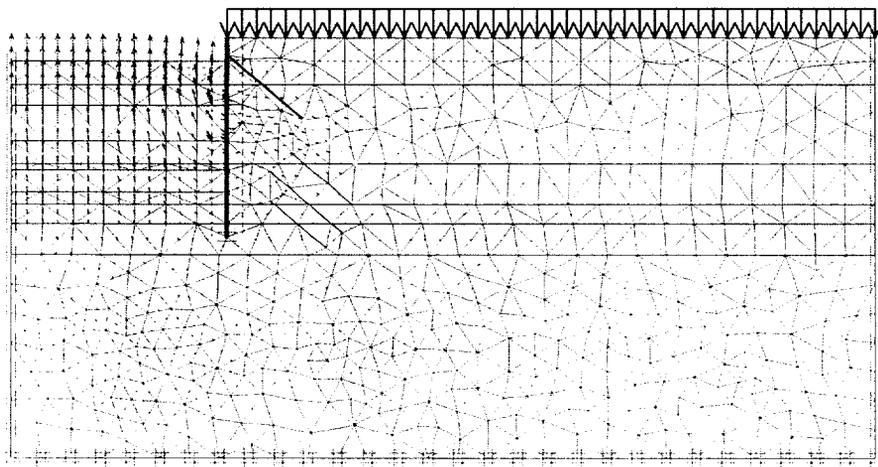


그림 4.4 1단계 굴착 및 1단 Anchor 설치시 변위

2단계 굴착에서는 흙막이 벽체의 최대 수평 변위는 9.9mm 발생(G.L- 8.2m, 점토층) 하였으며, 배면 지반 침하: 최대 약 4.5mm 침하가 발생하는 것으로 해석되었다.

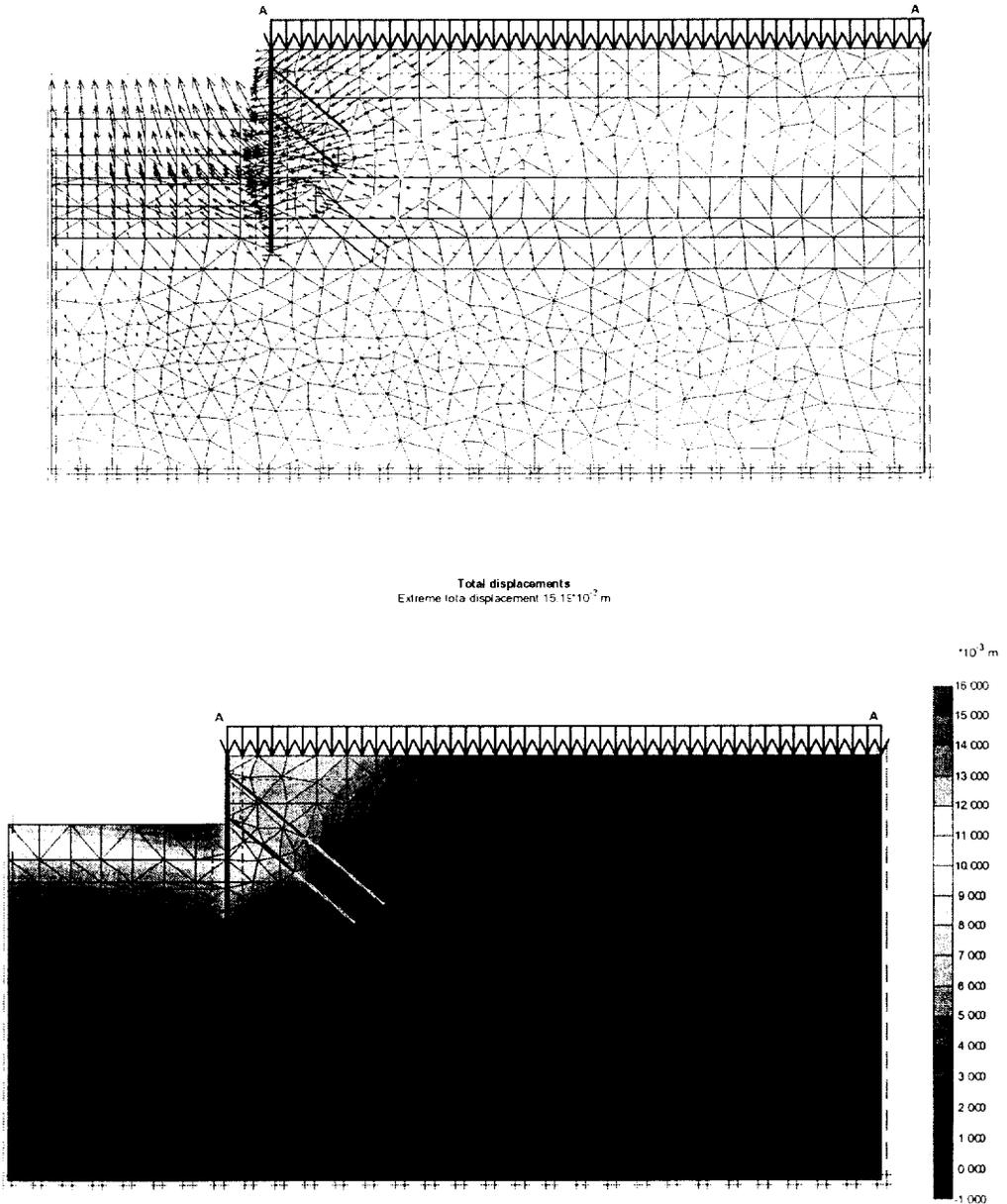


그림 4.5 2단계 굴착 및 2단 Anchor 설치시 변위

3단계 굴착에서는 흙막이 벽체의 최대 수평 변위는 13.7mm 발생(G.L-9.8m, 점토층과 자갈층의 경계지점) 하였으며, 배면지반의 침하는 최대 약 5.6mm 가 발생하는 것으로 해석되었다.

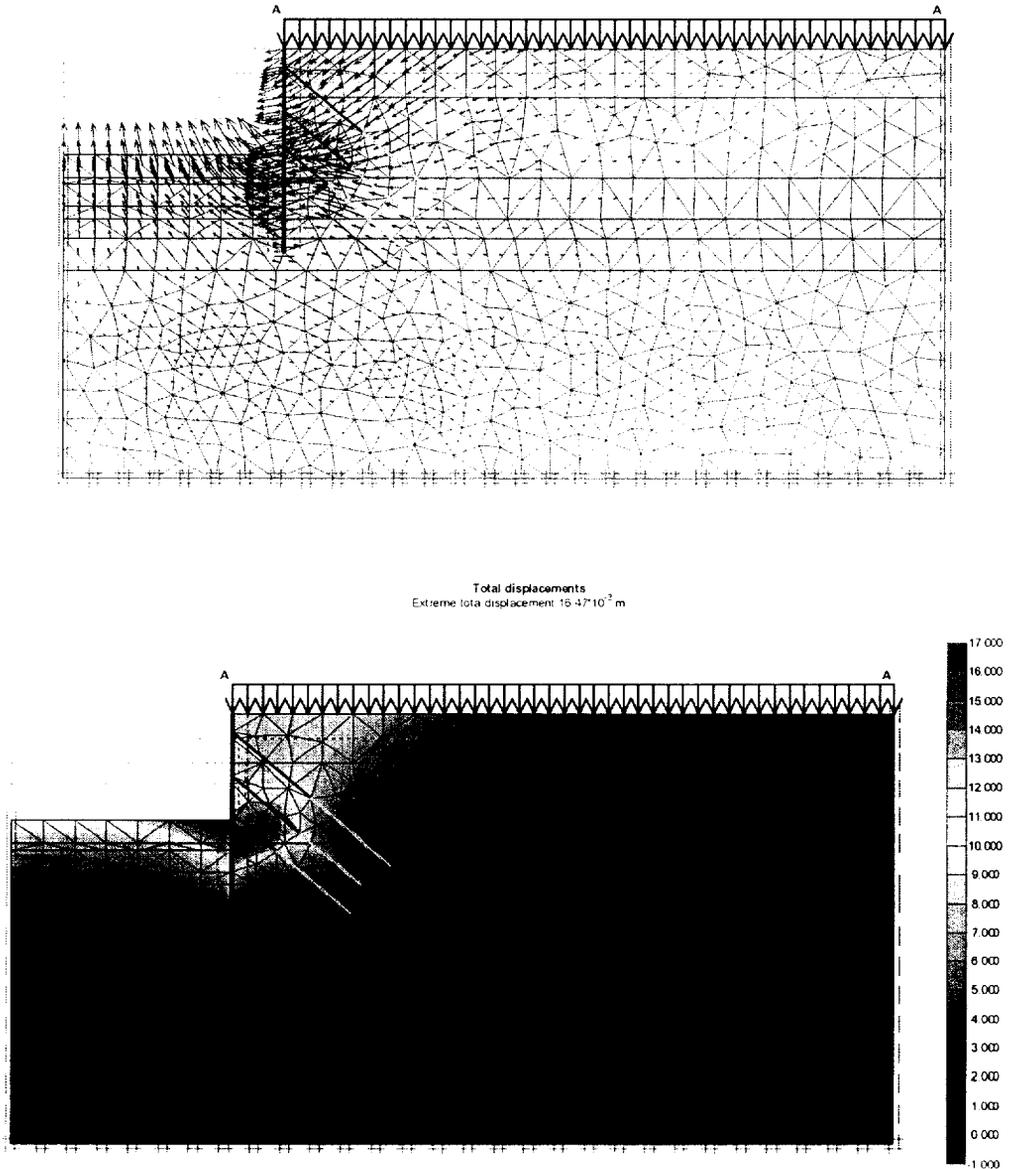


그림 4.6 3단계 굴착 및 3단 Anchor 설치시 변위

4단계 굴착에서는 흙막이 벽체의 최대 수평 변위는 27.3mm 발생(G.L-10.2m, 점토층과 자갈층 경계지점) 하였으며, 배면지반의 침하가 최대 약 11.8mm가 발생하는 것으로 해석되었다.

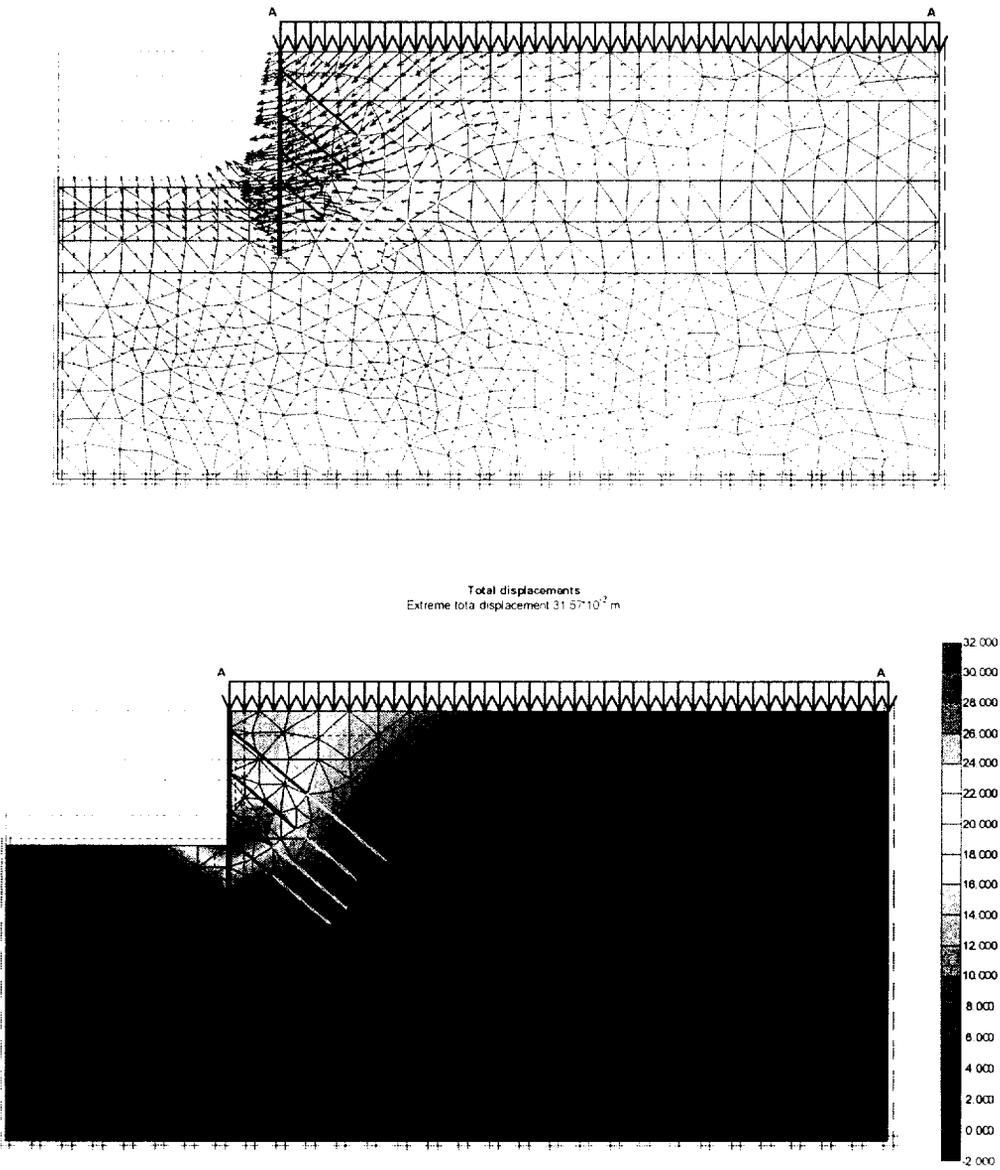


그림 4.7 4단계 굴착 및 4단 Anchor 설치시 변위

5단계 굴착에서는 흙막이 벽체의 최대 수평 변위는 32.4mm 발생(G.L-10.2m, 점토층과 자갈층 경계지점) 하였으며, 배면 지반 침하: 최대 약 13.8mm 침하가 발생하는 것으로 해석되었다.

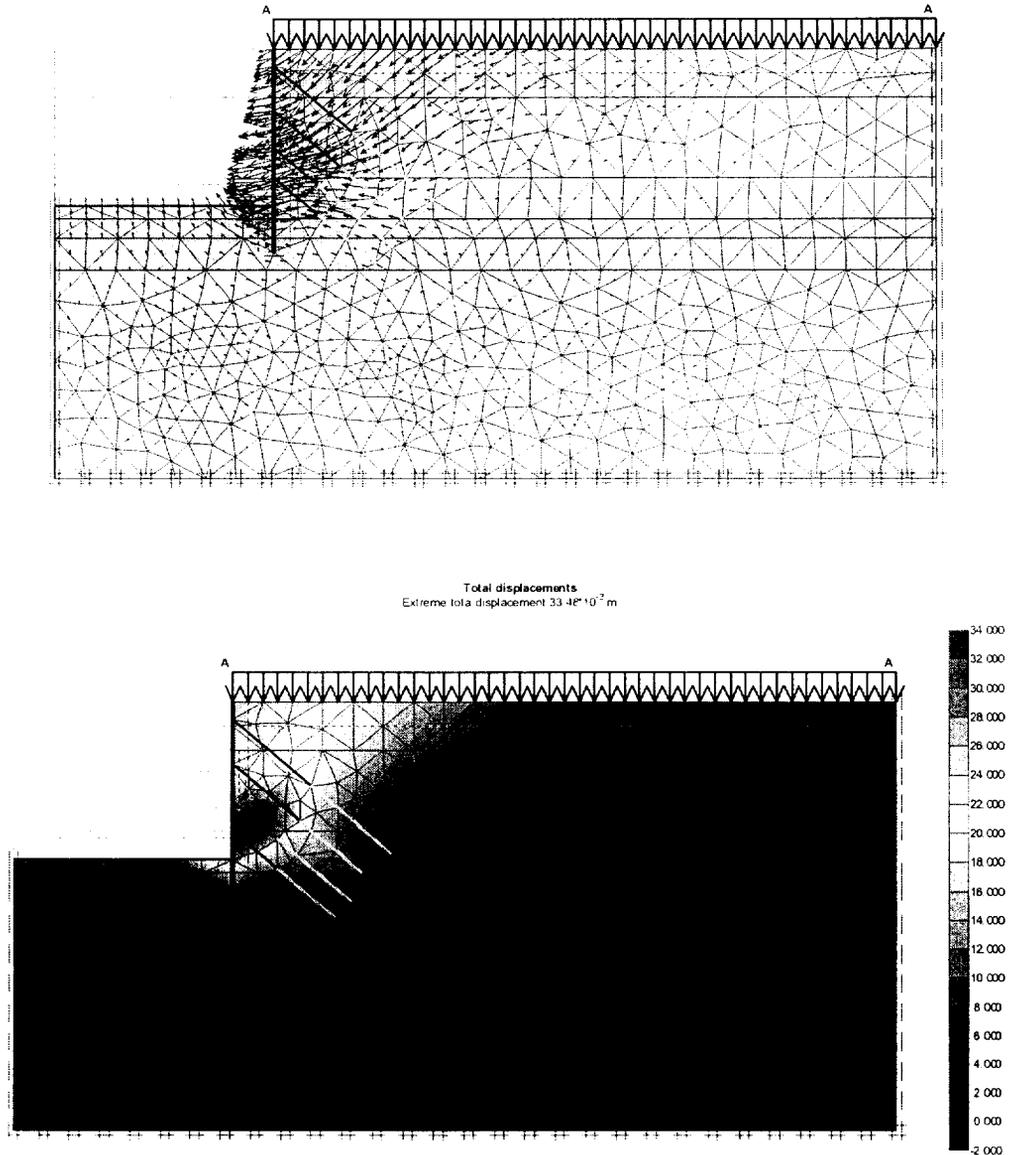


그림 4.8 최종 굴착시 변위

그림 4.9는 유한요소해석 결과인 굴착 단계별 흠막이 벽체의 변위를 나타낸 것이다. 흠막이 벽체의 최대 수평변위는 약 G.L 5.0m(점토층과 자갈층의 경계지점)에서 발생하였으며, 1단계에서 2단계 굴착 단계, 3단계에서 4단계 굴착 단계에서 수평변위 증가율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

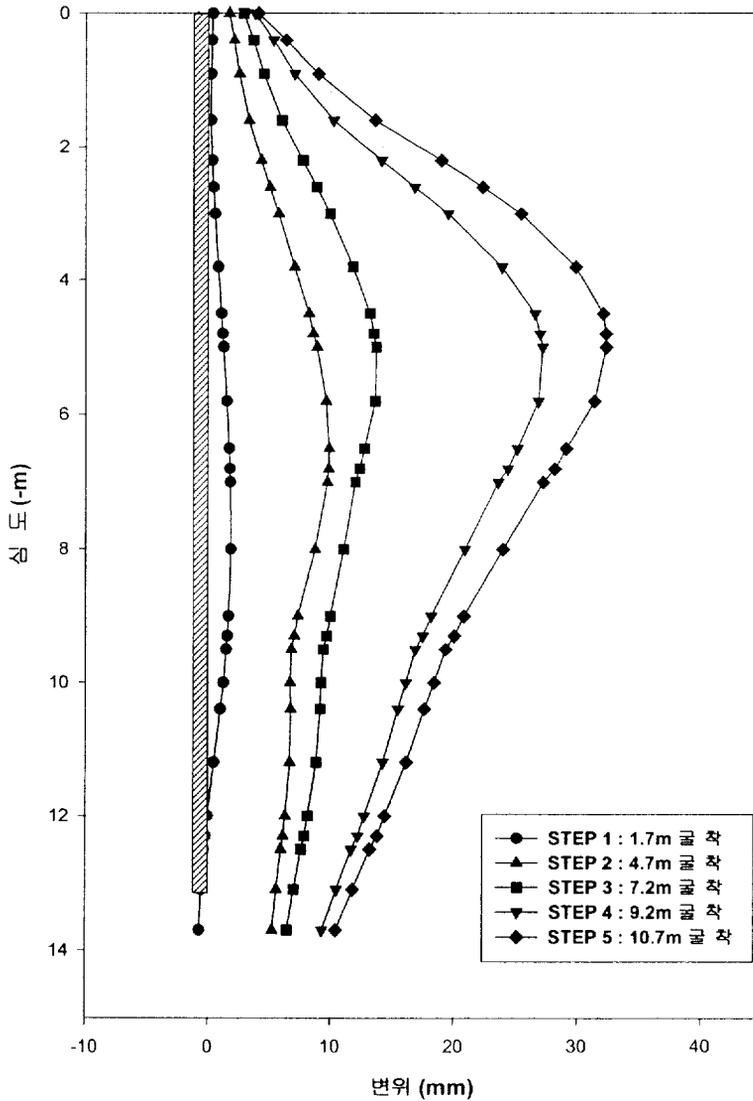


그림 4.9 굴착 단계별 유한요소해석 결과(흠막이 벽체의 변위)

### 4.3 탄소성해석 결과(SUNEX)

탄소성해석을 위해서 SUNEX 프로그램을 사용하였다. 각단계별 흠막이 벽체의 수평변위는 그림 4.10 ~ 그림 4.11에 나타낸 바와 같다. 탄소성해석의 경우 최대 수평변위는 STEP 4에서 30.2mm가 발생하는 것으로 해석 되었다. 최대 변위가 발생하는 위치는 STEP 4 까지는 단계별 굴착 저면에서 발생하였으며, 최종굴착시에는 4단 Anchor 설치지점에서 발생하는 것으로 해석되었다.

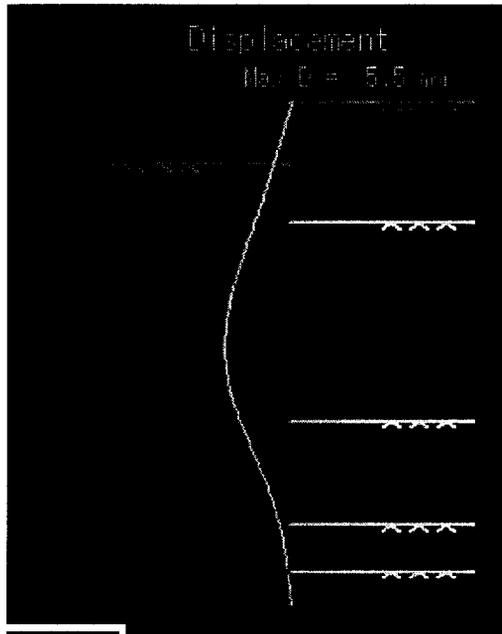


그림 4.10 STEP 1 흠막이 변위형상(최대 5.5mm)

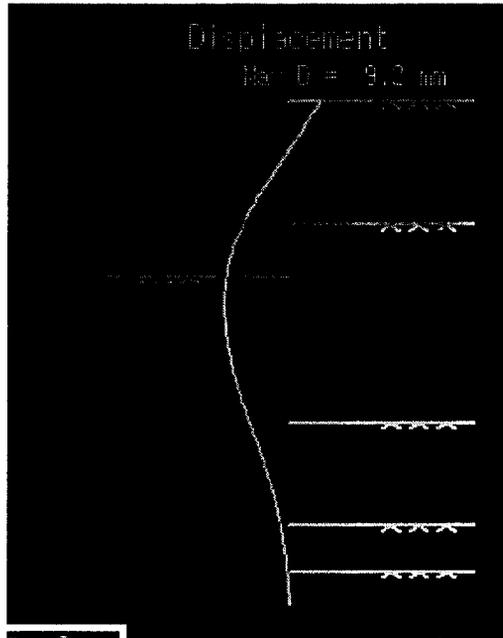


그림 4.11 STEP 2 흡막이 변위형상(최대 9.2mm)

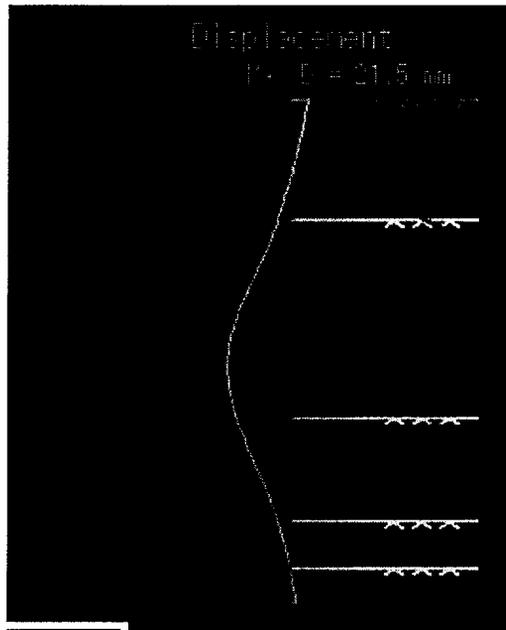


그림 4.12 STEP 3 흡막이 변위형상(최대 21.5mm)

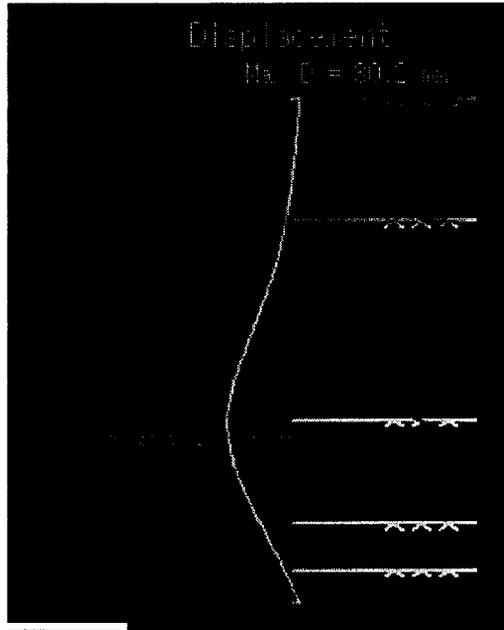


그림 4.13 STEP 4 흡막이 변위형상(최대 30.2mm)

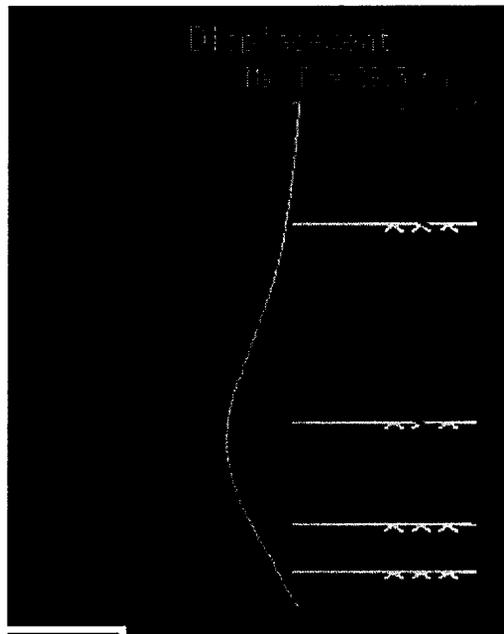


그림 4.13 STEP 5 흡막이 변위형상(최대 29.5m)

#### 4.4 계측결과와 수치해석 결과의 비교

수치해석에 의한 흙막이 벽체의 변위와 현장에서 계측한 흙막이 벽체의 수평 변위량을 굴착단계별로 비교하였다. 유한요소해석에 의한 수평 변위의 증가율이 현장 계측치 보다 약간 크며, 최대 수평변위량의 발생 위치가 비슷하게 나타나는 등 벽체의 거동 형태가 거의 유사함을 보인다.

굴착 초기에는 계측결과가 수치해석 결과에 비해서 크게 나타나고 있다. 3단계 굴착에서는 계측결과와 수치해석 결과가 유사하게 나타났으며, 4단계 굴착이후로는 수치해석 결과값이 크게 나타났다. 또한 최대 수평변위량의 발생 위치는 굴착 깊이의 1/2 ~ 1/3 지점에 위치함을 보였으며, 계측결과값이 수치해석 결과보다 약간 상부에서 최대 수평변위를 보이는 것으로 나타났다. 이는 실제 굴착에서 굴착 및 지보재 설치에 따른 시간경과 효과를 수치해석에 반영할 수 없었기 때문인 것으로 판단된다.

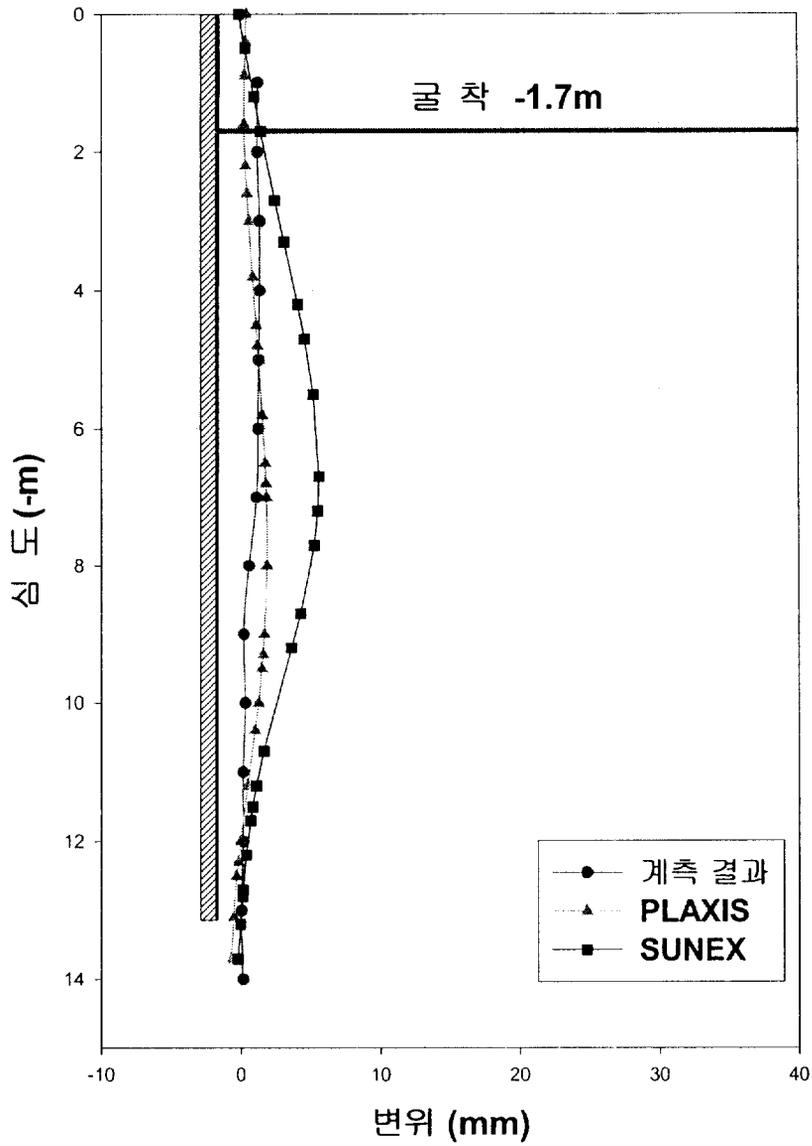


그림 4.14 1단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교

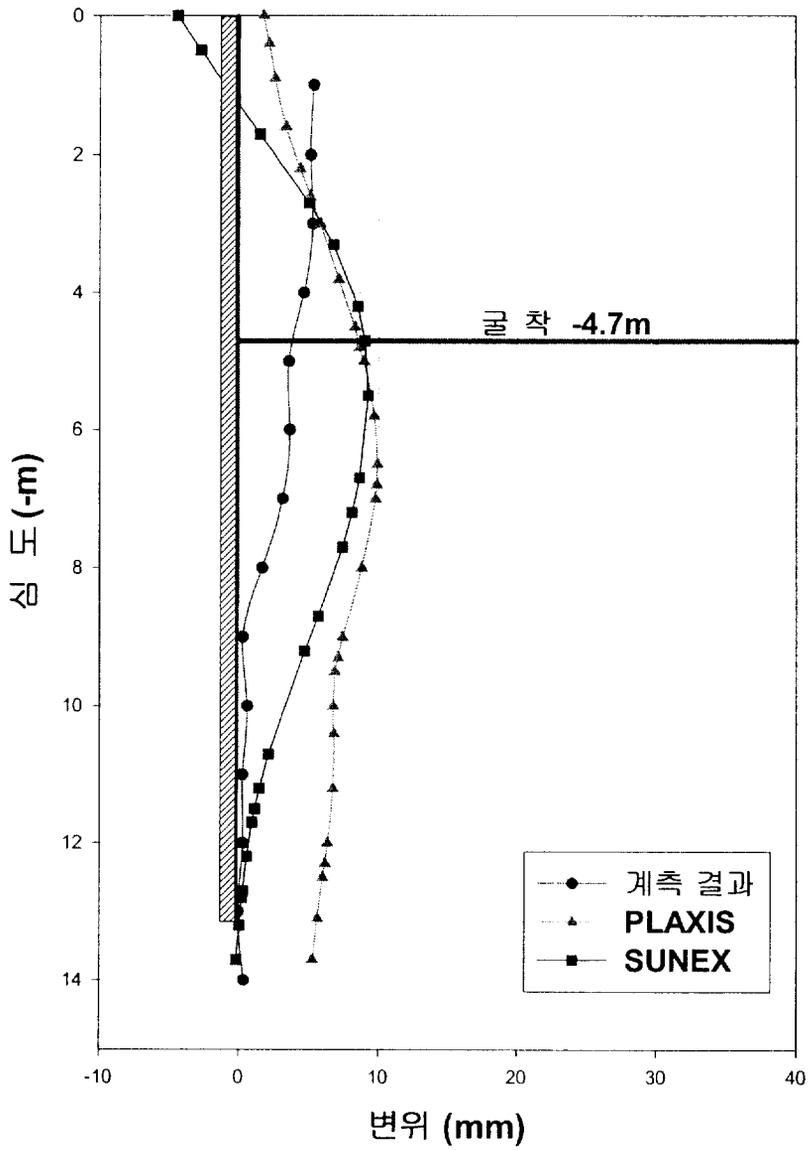


그림 4.15 2단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교

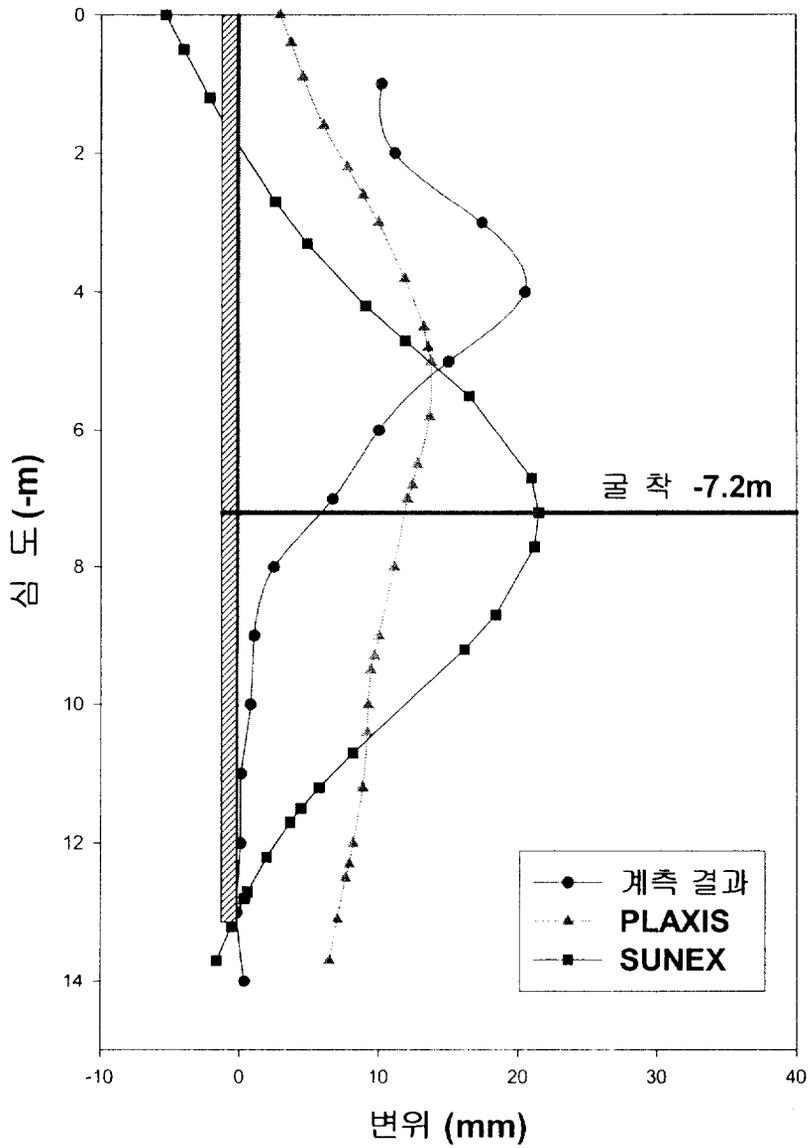


그림 4.16 3단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교

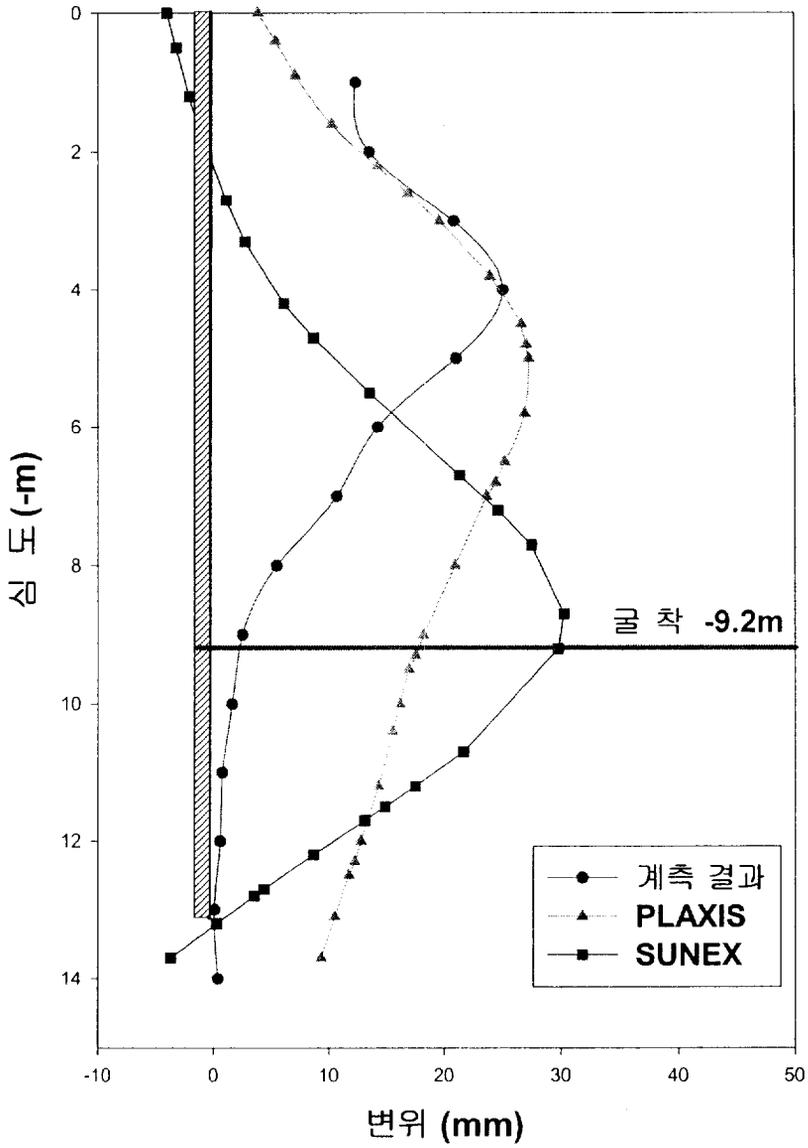


그림 4.17 4단계 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교

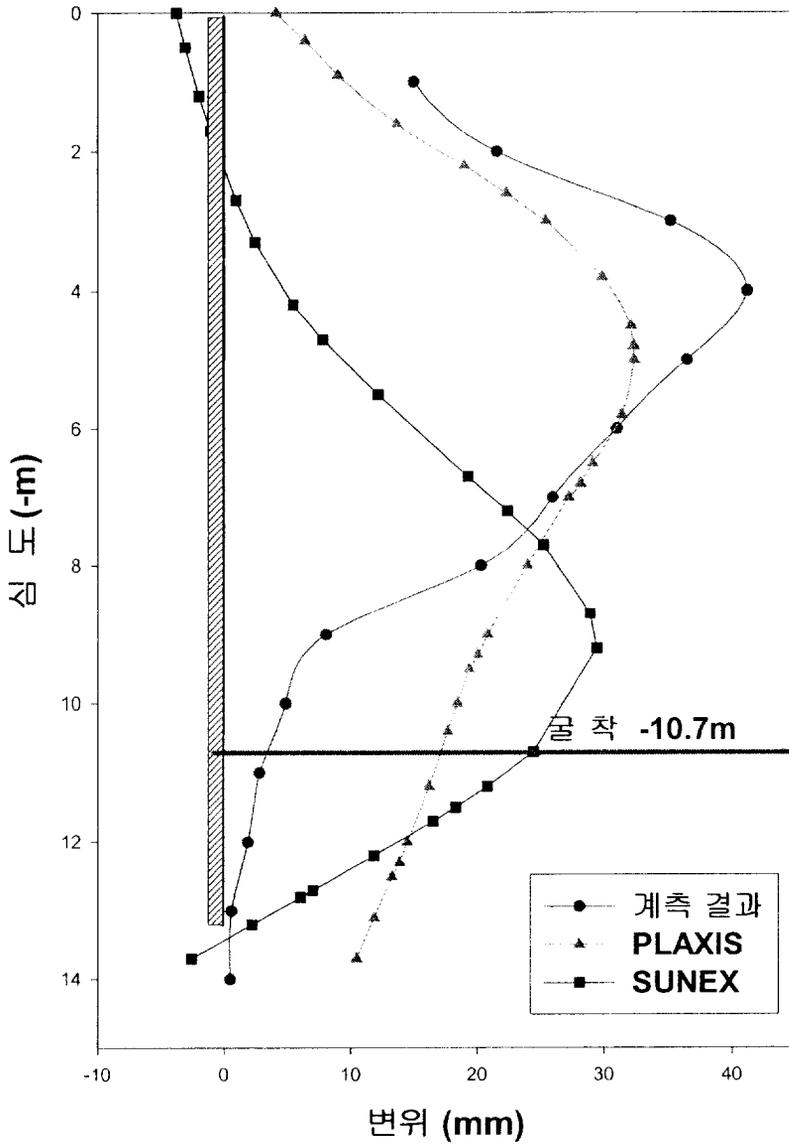


그림 4.18 최종 굴착시 흙막이 벽체 변위 비교

## 제5장 결론

도심지 깊은 굴착에 따른 흙막이 벽체의 변형에 대해서 계측결과, 탄소성해석, 유한요소해석 결과를 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 굴착 초기단계에서는 계측결과에 비해서 수치해석에 의한 벽체의 변형이 더 크게 나타났으나, 굴착 최종단계에서는 계측에 의한 벽체의 변형이 더 크게 나타나는 경향이 있다. 이는 실제 굴착에서 굴착 및 지보재 설치에 따른 시간경과 효과를 수치해석에 반영할 수 없었기 때문인 것으로 판단된다.
2. 탄소성해석에 비해서 유한요소해석에 의한 흙막이 벽체의 거동이 계측결과에 더 근접하게 나타났다. 탄소성해석에서는 배면지반의 거동을 정확하게 묘사할 수 없는 것으로 판단된다.
3. 탄소성해석과 유한요소해석에 의한 벽체의 최대 수평변형량은 유사하게 나타났다. 최대 변형이 발생한 위치는 유한요소해석결과가 계측결과와 일치하는 것으로 나타났다.
4. 배면지반의 침하형상은 Caspe방법에 비해서 유한요소해석결과가 더 합리적으로 나타났다. Caspe방법은 모래 또는 견고한 점토지반에서는 적요이 가능하나 본 연구대상인 현장과 같이 다양한 토층으로 구성된 지반에서는 적용이 어렵다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

김경태, 탄소성지반에서 굴착단계별 토류벽의 거동해석에 관한 연구, 연세대학교 대학원 석사학위논문, pp. 1-27, 1992.

Ou, C.Y., Hsieh, P.G., and Chiou, D.C., "Characteristics of Ground Surface Settlement during excavation", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30. pp. 758-767, 1993.

Terzaghi, K. and Peck, R.B., Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Edition, John Wiley & Sons, pp. 396-413, 1967.

Chen, W.F. and Saleeb, A.F., Constitutive Equations for Engineering Materials, John Wiley & Sons, pp. 150, 1982.

Chen, W.F. and Mizuno, E., Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier, pp. 71, 94-103, 149, 1990.

Chen, W.F. and Baladi, G.Y., Soil Plasticity, Elsevier, 1985, pp. 68-72

Rockey, K.C., Evans, H.R., Griffiths, D.W., and Nethercot, D.A., The Finite Element Method, Crosby Lockwood Staples, pp. 1-34, 1975.

Desai, C.S., Elementary Finite Element Method, Prentice-Hall, Inc., pp. 172-201, 1975.

Microsoft Corporation, Microsoft Fortran Powerstation Language Guide, 1993.

Mesri, G. and Hayat, T.M., "The coefficient of earth pressure at rest", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30, pp. 647-666, 1993.

(주)동아지질, 서면 금융 플라자 신축공사중 흠막이시설 및 지하굴토에 따른 계측관리 종합보고서(보령주상도), 1992.

Bowles, J.E., Foundation Analysis and Design, 4th Edition, McGraw-Hill, pp. 141, 266, 1988.

Liao, S.S.C. and Neff, L., "Estimation lateral Earth Pressures for Design of Excavation Support", Excavation and Support for The Urban Infrastructure, Geotechnical Engineering Division, Geotechnical Special Publication, No. 33, ASCE, pp. 489-509, 1992.

Maruoka, M., Aoki, M., Sato, E., and Ikuta, Y., "Ground Movements Caused by Displacement of Earth Retaining Walls", Retaining structures, Thomas Telford Services Ltd, pp. 121-130, 1993.

Gudhus, G., Finite Elements in Geomechanics, John Wiley & Sons, pp. 209-250, 1977.

## 감 사 의 글

어느덧 또 한해가 저물어가는 이즈음 또하나의 맺음인 본 논문이 완성되기 까지 처음부터 참여하여주신 김도영씨에게 참으로 고맙다는 말씀을 전하며 지반공학회연구실의 김희준군등 여러연구생에게도 감사함을 잊지않겠습니다

대학원생활의 강의를 접하면서 학문의깊이에대한 갈증을느꼈고 몸소 체험하면서그것어무엇을의미하는지 다시한번 성찰하게되었습니다 그러면서 한편으로는 세월을걸코헛되어 보내지않았으며학습과새로운우정 대학원졸업이라는 열매를맺음에 큰보람과 기쁨의희열을가집니다

어려한보람을 가정에는 많은어해심과 협조를 아끼지않은 백년동지 저의아내와 고교교사로 근무하는 첫째와 서울서 대학을다니는 둘째의 응원과 격려가 큰힘이되었다 하겠습니다

끝으로 다시한번 지도교수님과 지반공학회 여러분들에게 심심한감사의말씀을 드리면서

희망찬 새해 병술년에는 여러분의 가정에 행복과만복이 깃들기를진심으로 기원합니다

이 용 덕