

# 부분보강 엄지말뚝을 이용한 굴착시공방법의 수치해석적 타당성검토

## A Numerical Analysis of Excavation Method Using Partially Reinforced Soldier Pile

김 준 석\*<sup>1</sup> Kim, Joon-Seok

김 주 용\*<sup>2</sup> Kim, Ju-Yong

이 승 래\*<sup>3</sup> Lee, Seung-Rae

### Abstract

The hazard of excavation may be very high until a supporting system is completely installed. In this paper, an excavation method which uses partially reinforced soldier pile(□- shape) inserted by a short length steel bar was proposed and simulated by the finite element method. The reinforcing steel bar is moved down along the stage of excavation to reinforce the stiffness of the supporting system. The result of analysis showed that the risk of failure by bending moment or shear stress could be significantly reduced by the reinforcing effect of the steel bar. The proposed method could be applied to the strut-supporting wall or the diaphragm wall.

### 요 지

굴착의 위험성은 지지기구의 설치가 완료되기 전까지가 일반적으로 매우 높다고 할 수 있다. 일반적으로 엄지말뚝으로 사용되는 H-형강(beam) 대신에 □-형강(각관)을 엄지말뚝으로 사용하고 길이가 짧은 강보강재를 □-형강 엄지말뚝 내부에 삽입하여 굴착 단계에 따라 아래로 이동시키면서 엄지말뚝의 강성을 보강시키므로써 시공상의 문제점을 보완할 수 있는 방법을 제안하였다. 유한요소법을 이용한 수치해석을 실시한 결과 시공중 휨 및 전단파괴의 위험성이 있는 경우 이를 보강하는 효과가 확인되었으며 지지기구가 완전히 설치되기 전까지의 굴착기간 동안의 위험을 상당히 경감시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 스트러트 또는 Diaphragm 으로 지지된 벽체의 경우에 대하여 본 논문에서 제안한 방법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords** : Excavation, Partially reinforced soldier pile, Strut-supporting wall, Diaphragm wall, Finite element method

\*1 정회원, 청운대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

\*2 정회원, 대우엔지니어링(주) 과장

\*3 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

## 1. 서론

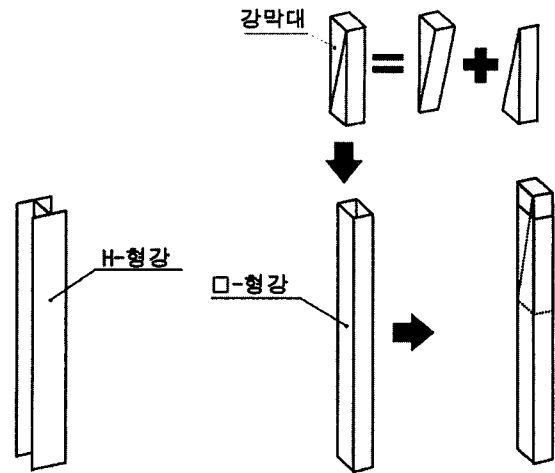
최근 용지의 부족으로 인하여 대규모 지하굴착 공사가 많이 시공되고 있으며 지하 굴착공사의 깊이 증가로 인한 주변지반의 침하, 수평변위등 여러 가지 문제점이 발생되고 있다. [ 이종규, 전성근(1993), 홍원표, 이기준(1992) ] 이러한 문제들을 해결하기 위하여 많은 공법이 개발되어 왔으며 공법은 가시설 구조물로 주로 사용되는 연성벽체와 영구구조물로도 사용되는 강성 벽체로 크게 구분될 수 있다. 일반적으로 굴토공법은 어스앵커(earth - anchor), 지반네일(soil nail), 지지보(strut), 슬래브(slab) 등의 지지기구에 의하여 토압 및 수평변위를 억제하게 된다.

어스앵커를 적용할 경우 정착장이 경화될 때까지 굴착을 중지하여야 하며 지지보나 슬래브를 적용할 경우에도 지지기구가 설치될 때까지 역시 굴착을 중지하여야 하는 시공상의 문제점이 있다. 또한, 굴착을 시작한 후 지지기구의 설치가 완료되는 동안까지의 기간이 시공상 위험이 가장 높아진다. 이러한 시공상의 문제점을 보완하는 한가지 방법으로서 가설벽체(또는 영구벽체)의 강성을 크게 하는 방법이 있으나, 공사비 때문에 현실적으로 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 일반적으로 임시말뚝으로 사용되는 H-형강(beam) 대신에 사각형 형강(□-형강)을 임시말뚝으로 사용하여 시공을 진행하면서 길이가 짧은 강보강재를 □-형강 임시말뚝 내부에 삽입하여 단계별 굴착에 따라 아래로 이동시키면서 임시말뚝의 강성을 보강시키므로써 앞에서 논술한 시공상의 문제점을 보완할 수 있는 방법(본 논문에서는 부분보강 임시말뚝 방법이라 한다)을 제안하였으며, 수치해석적 방법을 통한 적용 타당성을 분석하였다.

## 2. 부분 보강 임시말뚝을 이용한 굴착 시공방법

### 2.1 부분 보강 임시말뚝의 구성

부분 보강 임시말뚝은 □(사각형) - 형태(그림 1)의 임시말뚝과 임시말뚝을 부분 보강할 수 있는 직육면체의 강재로 구성된다. 직육면체의 부분 보강용 강재는 통로 구실을 하는 임시말뚝이 변형될 경우에 이동의 어려움을 극복하기 위하여 그림 1(b)과 같이 삼각 썸기 모양으로 나누어져 있다. 즉, 부분 보강용 강보강재의 이동은 삼각 썸기 모양의 강재를 차례로 이동시키므로써 □-형태의 임시말뚝이 변형되었을 경우에도 이동이 가능하게 된다.



(a) 일반적인 임시말뚝

(b) 부분보강 임시말뚝

그림 1. 부분보강 임시말뚝의 개요도

### 2.2 시공 방법

본 논문에서 제안한 부분 보강 임시말뚝 방법은 임시말뚝+토류판공법, soil - cement wall 등 대부분의 굴토 공법에 적용 가능하기 때문에 본 논문에서는 개념적인 방법에 대하여 논술하며 특히 soil - cement wall과 지지보(strut 또는 slab)를 사용한 경우에 대하여 논술하였다. 그러므로, 실제 적용에서는 본 개념을 이용하여 다양한 응용이 가능하다. 시공방법은 그림 2와 같이 soil - cement wall을 시공한 후 soil - cement wall 안쪽에 대구경 천공을 실시하여 □-모양의 임시말뚝을 건입한다. 이때, 임시말뚝의 위치고정을 위하여 임시말뚝 하단부를 그라우팅으로 보강하여 고정하고 임시말뚝 상단외부를 세굴제로 충전한다(시공방법은 현장에 따라 달라질 수 있다). 다음은 임시말뚝 내부에 강보강재를 삽입한다. 최상단에 지지보를 설치한 후 1단계 굴착을 실시한다. 1단계 굴착이 완료되면 2단계 지지보를 설치한 후 부분 보강용 강보강재를 아래로 이동시킨 다음 2단계 굴착을 진행하고, 2단계 굴착이 완성되면 3단계 지지보를 설치한다. 다음 시공순서는 상기 시공순서를 반복한다. 굴착이 완료된 후 부분 보강용 강보강재는 상부로 인발하여 재사용한다. 이때, 강보강재의 이동시키는 강보강재의 길이와 지반의 상태, 지지보(strut 또는 slab)의 지지능력, 노출된 임시말뚝의 그라우팅 보강 여부 등 여러 가지 요인의 영향을 받는다. 그러므로, 본 절에서는 개념적으로 설명하였다.

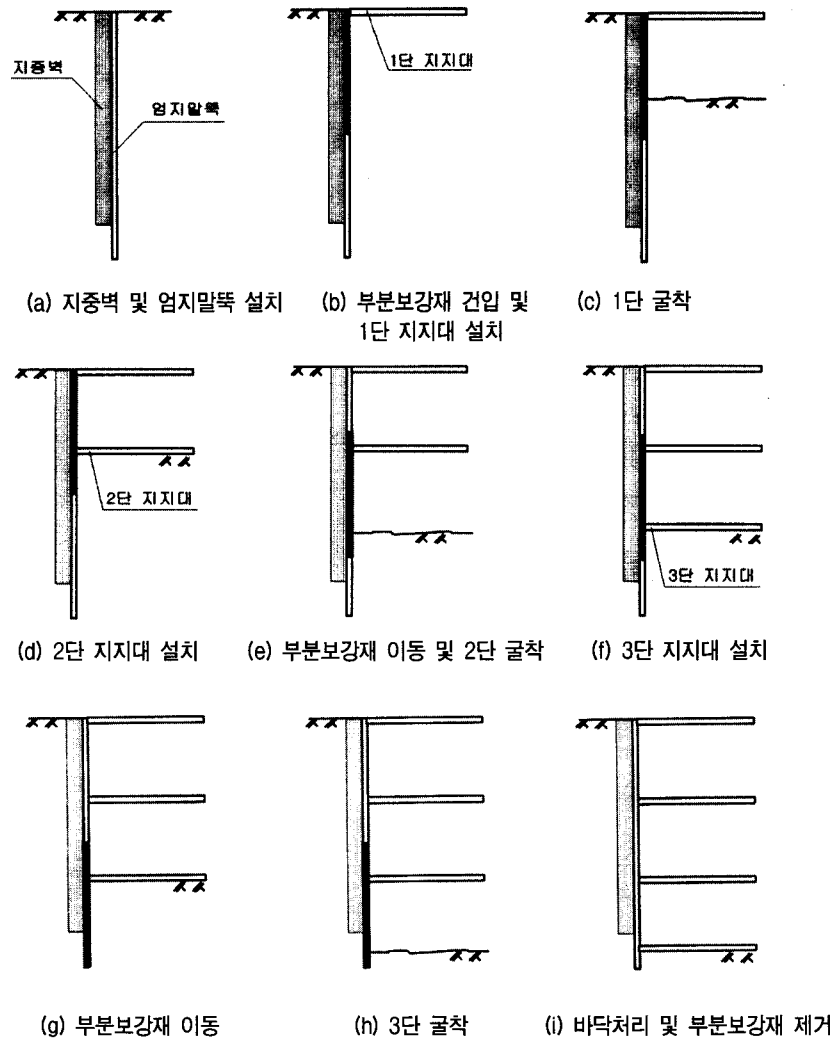


그림 2. 부분보강 임시말뚝의 시공 개요도

### 3. 수치 해석

#### 3.1 유한요소 모델링

굴착으로 인한 보강벽체의 거동에 대한 연구시 유한 요소해석기법을 이용하여 접근할 경우 그 해석결과는 모델링 방법에 따라 상당한 차이를 보일수 있다. 따라서 본 연구에서는 지반과 벽체 및 보강재에 대한 모델링 방법과 굴착 단계에 따른 벽체의 부분보강방법에 대한 수치모델링의 기법에 대하여 상세히 기술하였다. 거동해석은 2차원 탄소성해석이 가능하고 요소의 소멸을 이용한 굴착효과를 구현하며 압밀 및 자유흐름을 해석하기 위하여 개발된 유한요소해석 프로그램인 KAGEO를 사용하였다. 이 프로그램은 기존의 연구결과들 [ 신호성, 김윤태 외(1996), 이승래, 김주용 (1997) ] 에서 이미 성공적으로 사용된 바가 있다. 이 프로그램은 탄소성 구성모델을 사용하여 해석을 수행하는 경우에

수식화된 유한요소식이 비선형 방정식을 구성하므로 그 해를 산정하기 위하여 반복적인 수치해법을 사용한다.

해석시 지반은 Mohr - Coulomb 항복기준 및 관련유동 법칙을 따르는 탄소성 재료로 모델링 하였다. 구속압력에 따른 탄성계수의 증가현상을 구현하기 위하여 Potts & Fourie의 방법처럼 지반의 탄성계수를 깊이에 따라 증가하도록 다음식으로 나타내었다.

$$E = K \cdot z^n \quad (1)$$

여기서 K는 상수, z는 지표면으로부터의 깊이, n은 상수이다.

벽체는 선형 탄성 범요소를 사용하였고 보강재는 스트러트 지지인 경우에는 트러스요소를 사용하였고 Diaphragm 형식의 지지구조인 경우 범요소를 사용하였다. 벽체에 대하여 범요소를 사용하는 경우 지반과 벽체에 대한 유한요소

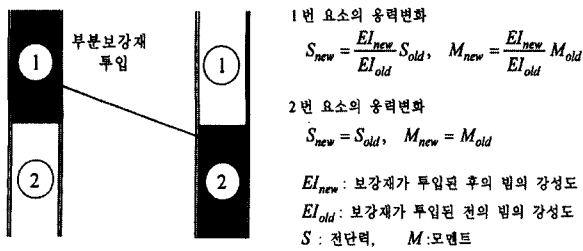


그림 3. 부분보강재의 투입에 따른 응력변화 구현

는 일치된 절점을 사용하므로 빔요소의 인장강성으로 인하여 지반요소가 영향을 받게된다. 그러나 실제 이들 사이에서는 상대적인 미끄러짐 거동을 보이므로 이 효과를 고려하기 위하여 빔의 강성중 인장력에 대한 강성계수  $E \cdot A$  에서 단면적  $A$ 의 양을 실제보다 상당히 작은 값을 사용하였다.

□형말뚝으로 구성된 벽체내부에 보강재가 투입되어 단면의 강성을 증가시키는 경우 및 최종굴착단계 후에 보강재를 제거하는 시공단계는 굴착단계에 따라 보강재의 재료상수를 바꾸어 주도록 하였다. 그리고 굴착등과 같은 외부하중 변경요인이 발생되지 않더라도 벽체내부의 보강재가 이동됨에 따라 빔요소 자체에서는 강성변화에 따른 응력변화가 유발된다. 이에 대한 효과는 그림 3과 같이 구현하였다. 부분 보강재가 아래로 투입되어 강성이 감소하는 경우에는 강성도의 비에 따라 응력값을 갖도록 하였으며 부분 보강재가 투입된 지점에서는 응력변화를 유발시키지는 않고 부착된 경우만을 고려하여 응력변화를 고려하지 않았다.

### 3.2 수치 해석

#### 3.2.1 벽체 상단에 단일 스트러트(strut)로 지지된 경우

그림 4와 같이 지반에 6m의 엄지말뚝을 타입한 후에 4m를 굴착한 예제로서 굴착은 1m씩 4단계로 나누어 수행하였다. 사용된 지반 정수와 벽체 및 스트러트의 물성치는 표 1에 정리하였다.

본 예제에서는 벽체가 보강이 안된 경우와 부분 보강된 경우로 나누어 그림 5와 같은 굴착단계별로 해석을 수행하였다. 보강되지 않은 경우에는 내부의 보강재가 없는 경우로 단계 6과 단계 7이 동일한 경우이다. 각각의 경우에 휨에 의하여 유발되는 응력에 대한 해석결과를 그림 6에 나타내었다. 단계 6까지의 해석결과 최대휨응력이 부분보강재가 투입된 경우 절반정도까지 감소한 것으로 나타났다. 그러나 최종적으로 투입된 보강재를 제거할 경우에는 보강되

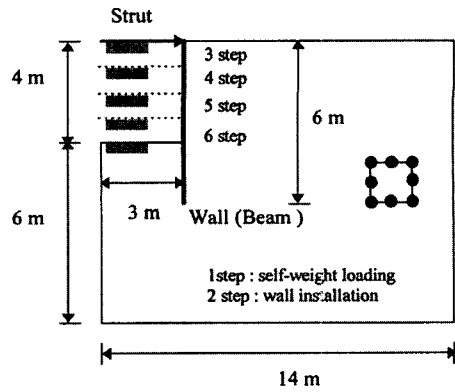
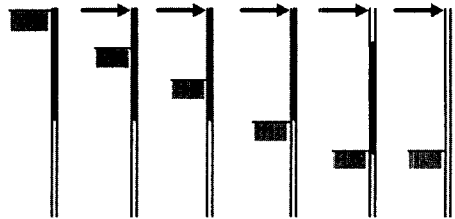
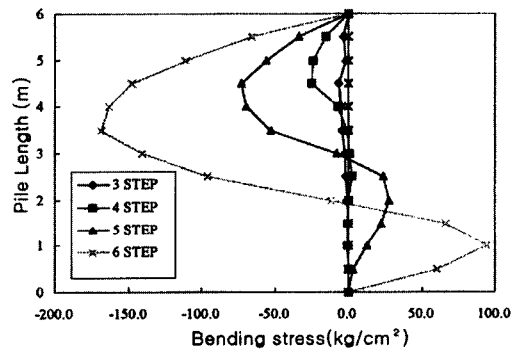


그림 4. 지반과 벽체 및 보강재 모델링

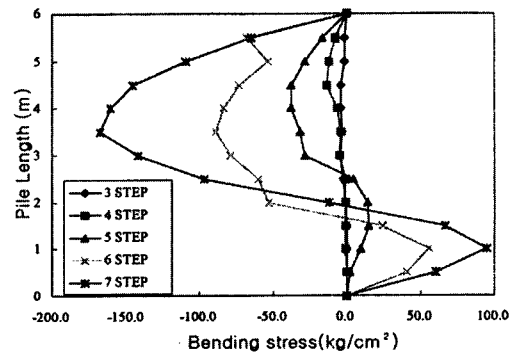


단계 2 단계 3 단계 4 단계 5 단계 6 단계 7

그림 5. 굴착단계 및 말뚝의 강성변화

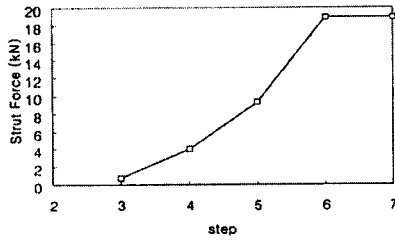


(a) 보강되지 않은 벽체인 경우

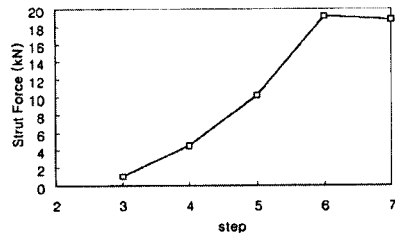


(b) 부분보강된 벽체인 경우

그림 6. 굴착단계에 따라 벽체에 유발되는 휨응력



(a) 보강되지 않은 벽체인 경우



(b) 부분보강된 벽체인 경우

그림 7. 굴착단계에 따라 스트러트에 유발되는 압축력

지 않은 경우와 같은 휨응력이 발생되고 있다. 따라서 단일 스트러트로 지지된 부분 보강벽체를 사용하는 경우에는 보강재가 제거된 최종적인 단면에서는 유리한 면이 없지만 시공도중에 발생될 수 있는 위험을 상당히 감소시킬 수 있다. 그러나 다음 절에서 제시되는 바와 같이 다단계 지지 구조물인 경우에는 또 다른 효과를 기대할 수 있다.

또한 굴착단계에 따른 벽체 내 보강재의 최적의 위치는 보강되기 전의 해석결과를 바탕으로 최대휨응력을 감소시킬 수 있도록 굴착단계에 따라 그 위치를 결정할 수 있다. 보강재의 길이가 3m인 본 예제의 경우에는 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 굴착단계 5까지는 지표면에서 지하 3m사이에서 최대휨이 유발되었고 단계 6에서 지하 1m에서 지하 4m사이에서 최대 휨이 발생하므로 보강재를 1m만큼 아래로 투입하였다.

그림 6에서 굴착단계에 따른 벽체에 유발되는 휨응력은 보강되지 않은 경우는 시공도중 단계 6에서 최대  $160\text{kg/cm}^2$  정도의 휨응력을 받는 반면 부분보강된 벽체의 경우 시공도

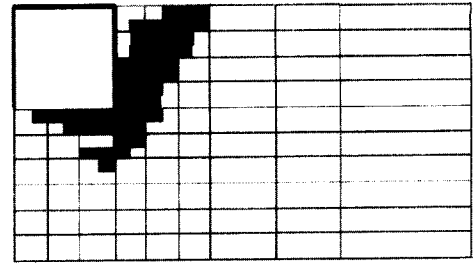


그림 8. 유한요소망과 항복상태에 있는 지반 (검게 칠한 부분이 항복된 영역)

중 부분보강재가 제거되지 않은 경우 최대  $90\text{kg/cm}^2$  정도의 휨응력을 받게 되어 과도한 휨에 의한 파괴의 위험성을 크게 줄일 수 있다.

그림 7에서는 스트러트에 유발되는 압축력을 굴착단계에 따라 나타내었고 그림 8에서는 지반에 발생하는 항복 영역을 나타내었다. 보강재를 제거한 후 스트러트에 약간의 압축력의 감소가 나타났는데 이는 지반의 파괴형태가 회전파괴 형태로 나타남에 기인하는 것으로 판단된다.

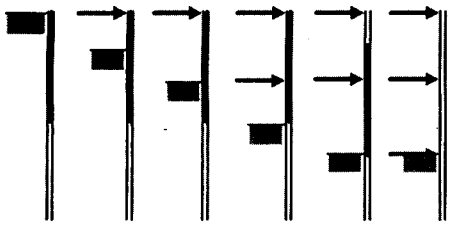
### 3.2.2 스트러트 3개로 벽체를 지지한 경우

앞절과 동일한 재료상수를 갖는 지반과 벽체에 대하여 스트러트 3개로 지지된 경우에 대한 수치해석이다. 굴착 단계에 따른 벽체의 부분보강과 스트러트의 지지는 그림 9와 같다. 해석은 약한 강성인 경우(보강재가 없는 경우)와 강한 강성인 경우(벽체 전길이에 대하여 일체식으로 보강된 경우) 및 부분보강된 경우로 나누어 해석하였다. 해석결과는 그림 10과 그림 11에 각각 나타내었다.

그림 8의 결과와 같이 보강재가 투입되어 부분보강되면 시공도중에 발생될 수 있는 위험을 상당히 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 보강재가 제거되더라도 유발되는 최대휨응력은 3.2.1절의 결과와는 달리 약한 강성인 경우보다 작은 값을 갖는다. 이것은 크리프(creep) 현상 및 굴착하중 이외에 다른 하중조건이 없는 경우, 보강재가 투입되지 않은 벽체인 경우에는 최종 굴착후 가장 아래 밑바닥에 설치

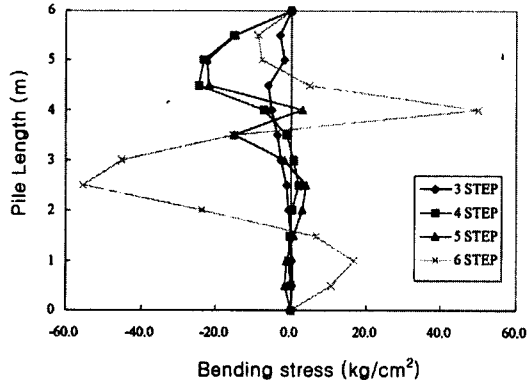
표 1. 지반과 벽체 및 보강재의 재료상수

지반	탄성정수	포아송비( $\nu$ )	점착력	내부마찰각
	$K = 6.0 \times 10^3 \text{ kPa}$ $n = 1.0$	0.3	1.0 kPa	30°
벽체	탄성계수 ( $E$ )	단면적(인장)	단면적(전단)	단면2차모멘트
(보강전)	$2.17 \times 10^7 \text{ kPa}$	$1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	0.012 m	$2.04 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
(보강후)	$2.17 \times 10^7 \text{ kPa}$	$1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$	0.090 m <sup>2</sup>	$4.42 \times 10^{-4} \text{ m}^4$
스트러트	탄성계수 ( $E$ )	단면적(압축)	-	-
	$2.17 \times 10^7 \text{ kPa}$	0.02 m <sup>2</sup>	-	-

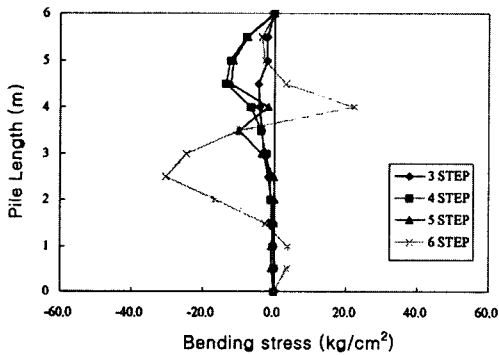


단계 2 단계 3 단계 4 단계 5 단계 6 단계 7

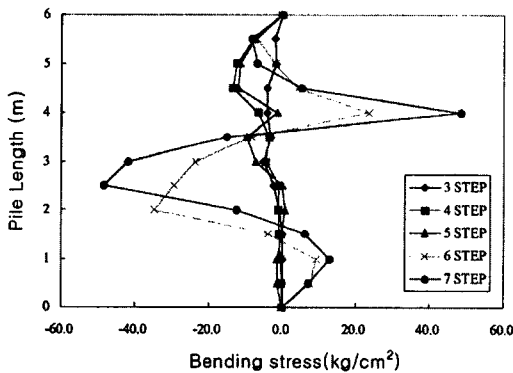
그림 9. 굴착단계 및 벽체의 강성변화



(a) 약한 강성의 벽체인 경우

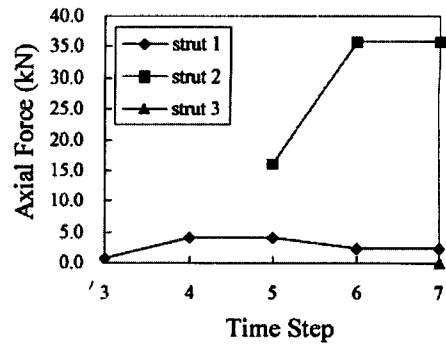


(b) 강한 강성의 벽체인 경우

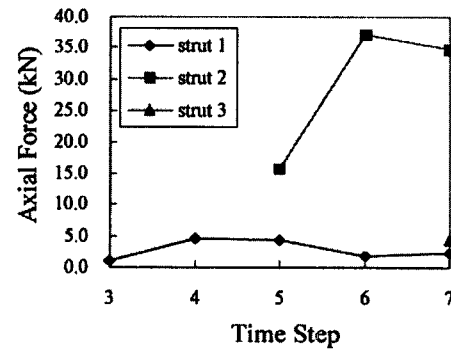


(c) 부분보강된 벽체인 경우

그림 10. 3개의 스트러트로 지지된 벽체인 경우의 휨응력분포



(a) 약한 강성의 벽체인 경우



(b) 부분보강된 벽체인 경우

그림 11. 3개의 스트러트로 지지된 벽체인 경우의 스트러트의 입축력 분포

된 스트러트는 힘을 거의 받지 않는다. 반면 부분 보강된 벽체인 경우에는 최종굴착 후 보강재가 제거되면 이로부터 유발되는 힘이 그림 11과 같이 3개의 스트러트에 나누어 분포하게 된다. 또한 부분 보강된 벽체인 경우 보강재가 제거된 후 발생하는 변위는 그림 12에서와 같이 강한 강성과 약한 강성의 해석결과의 중간정도로 유발되는 변위량을 감소시키는 작용을 한다.

### 3.2.3 Diaphragm으로 지지된 벽체인 경우

버팀역할을 하는 슬래브가 벽체와의 일체된 형식을 고려하여 해석시 지지구조물을 트러스요소 대신 빔요소를 사용하였다. 재료상수는 3.2.1절과 동일하게 사용하였다.

해석결과 그림 13, 14 및 그림 15에서 보는 바와 같이 부분 보강된 벽체인 경우에 약한 강성 벽체인 경우보다 시공중 휨 및 전단파괴의 위험성을 감소시킬 뿐만 아니라 최종굴착 후 보강재가 제거되더라도 가장 아래 밑바닥에 설치된 슬래브도 하중을 분담하여 배면 토압을 효과적으로 분배시킴을 알 수 있다. 특히 슬래브와 벽체가 일체식으로 시공되므로 변위에 대한 구속효과는 크게 나타나 강한 강성을 사용한 경우에 근접한 감소된 수평변위량을 나타내었다.

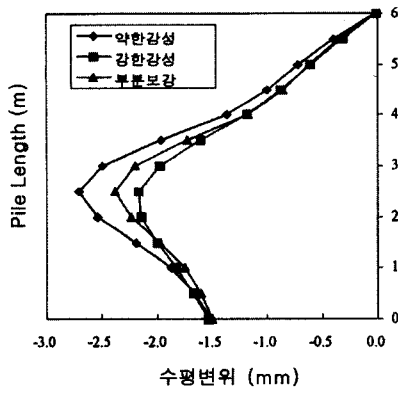
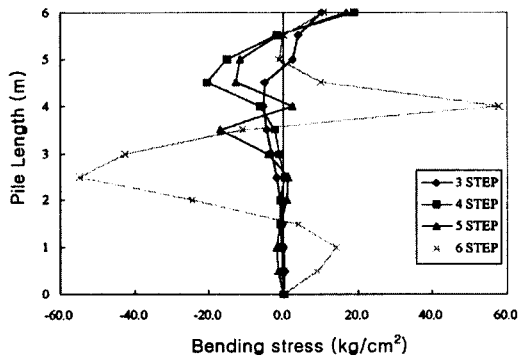
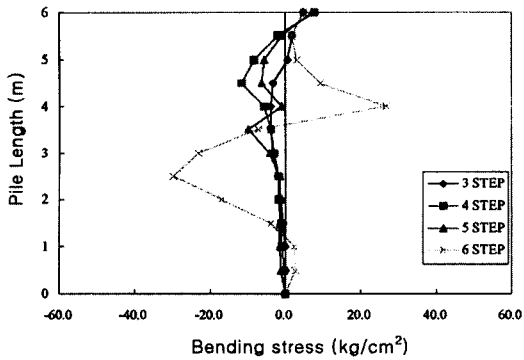


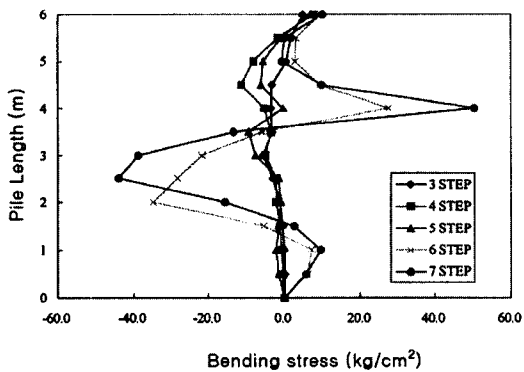
그림 12. 3개의 스트러트로 지지된 벽체인 경우의 수평변위



(a) 약한 강성의 벽체인 경우

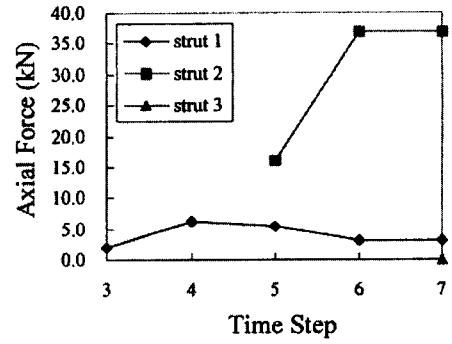


(b) 강한 강성의 벽체인 경우

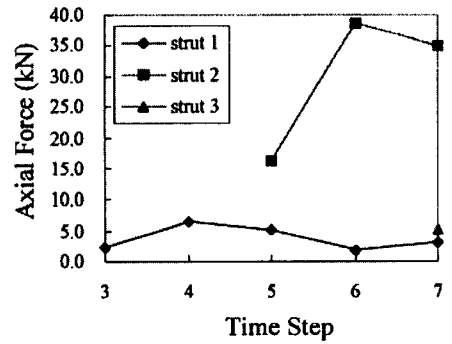


(c) 부분보강된 벽체인 경우

그림 13. Diaphragm 형태로 지지된 벽체인 경우의 휨응력분포



(a) 약한 강성의 벽체인 경우



(b) 부분보강된 벽체인 경우

그림 14. Diaphragm 형태로 지지된 벽체인 경우의 슬라브에 유발되는 압축력

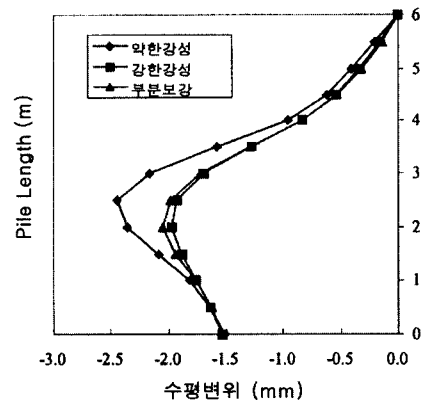


그림 15. Diaphragm 형태로 지지된 벽체인 경우의 수평변위

### 3.2.4 해석결과의 요약

#### (1) 약한 강성을 사용한 경우

- 크리프현상 및 하중 유발요인이 없는 경우 그림 11에서 최종굴착 후 가장 아래 밑바닥에 설치된 스트러트는 힘을 받지 않는다.

#### (2) 강한 강성을 사용한 경우

- 휨강성의 증가로 인하여 휨응력의 값이 약한 강성인 경우의 절반 정도이다.

- 가장 아래 밑바닥에 설치된 스트러트는 힘을 받지

않는다.

- 그림 12에서 수평변위는 가장 적게 발생함을 알 수 있다.

### (3) 부분 강성을 사용한 경우

- 부분보강으로 인하여 최대 휨응력을 감소시킨다.
- 보강재의 제거로 인하여 가장 아래 밑바닥에 설치된 스트러트도 힘을 받으므로 2단 스트러트의 최대 압축력 값을 분담하여 감소시킨다.
- 발생변위는 위의 2경우에 대하여 중간으로 비교적 강한 벽체의 경우에 근접해 있다.

## 4. 결론

굴착을 시작한 후 지지기구의 설치가 완료되는 동안까지의 기간이 시공상 위험이 가장 높아진다. 이러한 시공상의 문제점을 보완하기 위하여 일반적으로 엄지말뚝으로 사용되는 H-형강(beam) 대신에 □-형강을 엄지말뚝으로 사용하여 시공한 후 길이가 짧은 강보강재를 엄지말뚝 내부에 삽입하여 시공 깊이에 따라 아래로 이동시키면서 엄지말뚝의 강성을 보강시키는 방법을 제안하였으며 이 방법에 대한 수치해석연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 시공중 휨 및 전단파괴의 위험성이 있는 경우에 이를 보강하는 효과가 있다.
- 2) 유발되는 수평변위를 감소시킨다.
- 3) 가장 아래 밑바닥에 설치된 스트러트도 하중을 분담하여 배면 토압을 효과적으로 분포시킨다.

- 4) 벽체를 보강시킨 강보강재가 제거된 후에는 스트러트나 슬래브에 그 힘이 재분포된다.
- 5) 수치해석 결과를 종합적으로 판단할 때 부분 보강 굴착 방법은 지지기구가 완전히 설치되기 전까지의 굴착기간 동안의 위험을 상당히 경감시킬 수 있는 방법으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 신호성, 김윤태, 김주용, 이승래(1996), "대변형을 고려한 연약지반 압밀해석", 대한토목학회 학술발표회, pp.519~522.
2. 이승래, 김주용(1997), "유한요소법을 이용한 지하수 흐름을 갖는 사면의 안정성 해석", 사면안정 학술발표회, pp.61-72.
3. 이종규, 전성관(1993), "다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포", 한국지반공학회지, 제 9권, 제 1 호, pp.59~68.
4. 홍원표, 이기준(1992), "앵커지지 굴착흙막이벽에 작용하는 측방토압", 한국지반공학회지, 제 8 권 제 4 호, pp.87~95.
5. Clough, G.W., et. al.(1987), "Movement Control of Excavation Support System by Interactive Design", Foundation Eng., Vol. II., ASCE, Proceeding of Congress.
6. Fang Y.S. & I.Ishibashi(1986), "Static earth pressure with various wall movements", JGE, ASCE, Vol. 112, No. 3, pp.317~333
7. Matsuo, et al.(1978), "Experimental study on earth pressure of retaining wall by field tests" Soils and Foundation, Vol. 18, No. 3, pp.27~41.
8. Peck, R. B.(1996) "Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground", State-of-the-Art Volume 4, Proc., 7th ICSMFE, Mexico.
9. Potts, D.M. and Fourie, A.B. "A numerical study of the effects of wall deformation on earth pressures ", Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 10(3), pp.383~404.
10. Roth, W.H.(1979), "Calculated and measured earth pressures on a deep basement wall," 3rd Intl Conf. on Numerical methods in Geotechnics, Aschen, pp.1179-1191.
11. Sam, S.C., Lia, O. & Thom, L. Neff. (1990). "Design and performance of Earth Retaining Structures", Proceeding of a Conference, ASCE, pp.485-509

(접수일자 1998. 9. 11)