

흙막이벽체의 변형해석에 관한 연구

A Study on Deformation Analysis of the Earth Retaining Wall

이 송¹ Lee, Song

김 성 구² Kim, Seong-Koo

Abstract

This paper analyzed the effects related to the difference of the geometrical shape of the ground excavation by comparing the displacements of the earth retaining wall of the strut resulting from the change of the excavation breadth B and the excavation length L, adopting the three dimensional FDM analysis. It appeared that the displacement of the earth retaining wall of the strut increases in accordance with the increase of L/B and it decreases as it becomes nearer from the center to the corner where the temporary structural system forms, and the wale member is closed because of the effects of the confining effect by the closure of the earth retaining wall and the wale member. This paper proposed a formula in which the results of three dimensional FDM analysis which considers the shape of the excavation plane can be obtained from those of two dimensional FDM analysis which does not consider the shape of the excavation plane. And the results of the formula were compared with those of the site instrumentation analysis.

요 지

3차원 수치해석에 의해 굴착면적비(L/B)인 굴착 폭 B와 굴착면의 길이 L의 변화에 따른 흙막이벽체의 변위를 비교하여 지반굴착의 기하학적 형상의 차이와 관련된 영향성을 분석하였다. 흙막이벽체의 변위는 동일한 굴착 폭을 기준으로 굴착면의 길이 L이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타나며, 굴착단면의 중앙부에서 띠장부재가 폐합되는 가설 구조체계가 형성되는 모서리부로 갈수록 흙막이벽체와 띠장부재의 폐합에 의한 구속효과의 영향으로 인하여 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 흙막이벽체의 변형해석을 굴착평면의 형상을 고려하지 못하는 2차원 수치해석과 굴착평면의 형상을 고려할 수 있는 3차원 수치해석에 영향을 미치는 인자들 중 굴착면적비와 지반변형계수를 고려하여, 두 해석이 일치하는 상관관계를 흙막이벽체의 최대변위를 기준으로 2차원 수치해석 결과로부터 3차원 수치해석 결과로 도출할 수 있는 관계식을 제안하여 현장계측결과와 비교 하였다.

Keywords : Confining effect of the corner, Deformation coefficient, Excavation area ratio, Three dimensional FDM analysis, Two dimensional FDM analysis

1. 서 론

최근 지하공간을 활용하기 위한 지반굴착시 평형상

태를 유지하고 있던 지반이 흐트러지면서 지반내의 균형이 붕괴되고 흙막이벽체의 변형을 유발할 뿐만 아니라 인접 구조물에도 영향을 미치게 되므로 지반굴착에

1 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Ph.D. Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul, scugeo@uos.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

따른 안정성 확보 문제가 사회적으로 중요시 되고 있다.

지반굴착에 따라 발생하는 흙막이벽체의 변형 및 인접 구조물의 안정성 해석시 3차원해석을 수행하여야 하나 일반적으로 2차원 해석에 의해 흙막이벽체의 변형 및 안정성을 예측하여 설계에 반영하고 있다. 또한 흙막이벽체의 변형에 의한 지반변형은 굴착평면의 형상이 2차원 또는 3차원 굴착평면의 기하학적 형상 차이로 구분되며, 변형영역은 2차원 굴착이 3차원 굴착보다 크게 발생되는 것으로 발표되고 있다. 이와 같이 굴착평면의 기하학적 형상이 흙막이벽체의 변형해석에 민감한 영향을 미치므로 굴착평면의 기하학적 형상과 관련된 흙막이벽체의 거동을 단순히 2차원 해석만으로 흙막이벽체의 거동을 정확히 예측하는 데는 어려움이 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 굴착평면의 기하학적 형상의 차이, 즉 굴착 폭 B와 굴착면의 길이 L의 변화가 흙막이벽체의 수평변위에 미치는 영향을 평가하기 위하여 직사각형 굴착평면을 대상으로 굴착면의 길이 L을 1.0, 1.4, 1.8, 2.2배로 증가시키면서 3차원 수치해석을 수행하여 비교, 분석하였다. 유한차분해석 프로그램인 FLAC을 사용한 2차원 수치해석과 3차원 수치해석의 상관관계에 영향을 미치는 영향인자들 중 지반변형계수를 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0배로 변화시켜 흙막이벽체의 최대변위를 기준으로 해석을 수행하여 두 해석이 일치하는 결과를 통해 굴착면적비를 고려한 3차원 수치해석결과가 도출될 수 있는 관계식을 제안하였다.

또한 흙막이벽체공법 및 지지공법이 같은 서울지역 12개 현장의 계측자료를 분석하고 굴착면적비를 고려한 3차원 해석결과와 비교하여 모서리부에서 흙막이벽체와 락부재의 폐합에 의한 구속효과의 영향 및 2차원과 3차원 해석결과와의 상관 제안식을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 흙막이벽체의 최대 수평변위

Clough & O'Rourke(1990)는 굴착공사에서 굴착, 버팀부재 설치 등 가장 기본적인 시공 과정만으로 인하여 발생하는 변위를 현장 계측결과를 통하여 정리하였다. 흙막이벽체의 최대 수평변위는 굴착 깊이 H의 0.2%, 최대 침하량은 0.15%H 정도였으며 이때 침하량보다 수평변위가 훨씬 큰 데이터의 분산을 보였다. 또한 흙막이벽체의 형태가 상이해도 최대변위에는 큰 차이가 보이지

않았다. 단단한 흙을 대상으로 지반의 탄성거동을 가정하고 지반의 강성, 흙막이벽체의 강성, 버팀부재의 간격, 측압계수 등을 변화시켜 유한요소해석을 수행하였는데 흙막이벽체의 최대 수평변위는 굴착 깊이에 따라 0.2%H 정도의 선형적인 거동을 보여 관측된 결과와 일치하는 것으로 나타났다.

이러한 조건에서 지반은 강성이 충분히 커서 구조부재에 대한 요구가 최소화되기 때문에 흙막이벽체의 강성과 버팀부재의 간격은 흙막이벽체의 변위에 작은 영향만을 줄 뿐이며 오히려 지반의 탄성계수와 측압계수가 훨씬 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

Chang-Yu Ou 등(1993)은 실트질 모래와 실트질 점토층이 교호하며 지반을 형성하는 10개소의 현장을 대상으로 현장 측정결과를 이용하여 굴착에 의한 흙막이벽체의 변형특성을 분석하였다. 분석결과 굴착평면 중 모서리 부분이 아닌 굴착 단면의 중앙부 즉, 평면 변형을 조건에서 굴착 내부 흙의 제거로 인하여 힘의 재 평형이 이루어질 때까지 발생하는 흙막이벽체의 최대 수평변위가 발생하는 위치 및 크기는 굴착 바닥면 부근에서 0.2%H~0.5%H의 범위로 나타났다.

2.2 지반굴착에 따른 3차원 지반거동

흙막이공사에서 굴착되는 주변지반에서는 지반 이완에 따른 변위가 발생하며, 발생하는 양상은 지반조건, 흙막이공법, 시공순서, 시공시간 등의 영향으로 크게 좌우되므로 고려해야 되는 조건이 많아 정확히 예측하는 것을 어렵게 하는 요인이 된다.

Shigehiko 등(1999)은 연약지반을 대상으로 하는 대규모 굴착사례에서 여러 종류의 지반조건 및 시공조건을 해석 모델로 하는 3차원 연성 FEM해석을 실시하여 흙막이벽체와 지반거동을 검증하였다. 그 결과 지반모델을 비선형 탄소성 모델로 해석 시 지반과 흙막이벽체의 거동이 잘 재현될 수 있을 것을 확인하였다. 흙막이벽체의 변형거동 해석을 흙막이벽체의 변형에 영향을 미치는 영향인자로 모래층의 변형계수 E를 고려하였으며, 변형계수 E를 변형시켜 해석한 결과에서 굴착단계별 흙막이벽체의 수평변위는 모래층의 PS검층에서 구해진 모래층의 변형계수 E_{ps} 를 그대로 사용한 $1E_{ps}$ 경우의 해석결과와 E_{ps} 를 변형시켜 해석한 결과에서 $1E_{ps}$ 와 $0.5E_{ps}$ 를 사용하여 해석한 흙막이벽체의 변위가 실측값과 잘 일치하였으며, 모래층의 변형계수를 $0.5E_{ps}$ 이상의 값을 적

용한 해석결과가 예측정보로서 활용가능하다고 하였다.

2.3 지반굴착에 따른 굴착 폭의 영향

Takeuchi 등(1992)은 유한요소해석을 이용하여 흙막이벽체의 탄소성해석 도입을 위한 굴착 폭의 영향도를 수평지반반력계수 K_h 를 매개변수로 하여 발표하였다. 매개변수 K_h 를 $0.1K_h \sim 4K_h$ 의 범위에서 변화시켜 수치해석에 적용하여 흙막이벽체의 최대모멘트 M_{max} 및 최대 수평변위 δ_{max} 의 관계에서 두 해석이 일치하는 등가 K_h 를 제안하였다. 그림 1과 같이 유한요소해석에서는 굴착 폭 B와 M_{max} , δ_{max} 의 관계는 M보다는 δ 에 대해서 크게 나타나고 있으며 그림 2와 같이 탄소성해석에서는 K_h 의 변화 비 n과 M, δ 의 관계는 n이 감소함에 따라 M, δ 는 쌍곡선 함수로 증가하며, n의 영향이 δ 에 대해서는 크게 나타나고 있는 것을 확인하였다.

유한요소해석의 $\log B - \delta_{max}$ 의 관계와 탄소성해석의 $\log n - \log \delta_{max}$ 의 관계는 직선 경향을 나타냈으며 두 해석의 δ_{max} 를 일치시켜 $n = (a \log B - b)^c$ 의 관계식을 제안하였다. 여기서 a, b, c는 회귀분석법에 의한 상수이다. 이 관계식을 이용한 유한요소해석과 탄소성해석의 비교 분석에서 모멘트는 약 10% 정도 차이가 있으며 변위는 차이가 작은 것을 확인할 수 있었다.

이창호(1997)는 엄지말뚝으로 이루어진 굴착지반의 3차원 유한요소해석을 통하여 2차원과 3차원 해석에서 흙막이벽체의 변위와 부재력의 차이를 분석하였다. 엄지말뚝의 횡방향 최대변위는 2차원 해석에서 굴착면의 길이를 무한대로 가정한 3차원 해석에 비해 굴착 깊이가 10m인 경우에 13%, 20m인 경우에는 6% 정도 증가하며 모서리에서 중앙부로 갈수록 변위가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 굴착 깊이가 20m~60m인 경우에

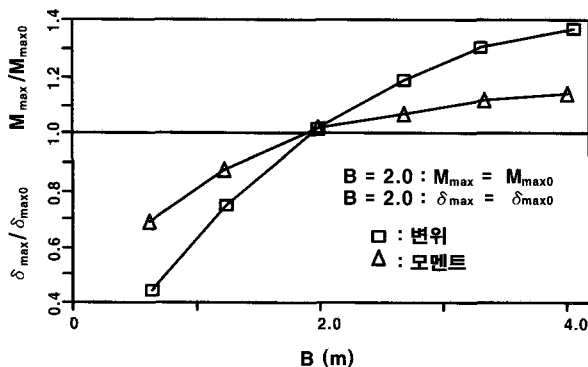


그림 1. 유한요소해석의 B와 M, δ 관계

모서리 부근에서의 변위는 중앙부의 29%~39% 정도로 감소하며 40m 이상인 경우에는 중앙부에서 굴착면의 길이를 무한대로 가정한 경우에 비해 최대 2.5% 정도의 차이만을 보여 거의 일치하는 것으로 나타났다.

이진구(2000)의 흙막이벽체의 3차원 해석을 통한 흙막이벽체의 변위에 대하여 분석한 결과에서도 굴착형상이 굴착 폭과 굴착면의 길이비가 비교적 작은 직사각형일 때 3차원 해석결과가 중앙에서 모서리로 갈수록 흙막이벽체의 변위는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Chang-Yu Ou 등(1993)의 연구결과와 일치하고 있다.

3. 수치해석방법 및 해석조건

3.1 해석방법 및 해석조건

해석영역은 굴착 폭 및 굴착 깊이의 영향을 고려하여 수평방향은 굴착 폭의 3배, 수직방향은 굴착 깊이의 3배까지로 하였으며 반단면 해석을 실시하였다. 본 해석에 적용한 지반구성 모델은 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 모델로 고려하였으며 흙막이벽체공법은 연성벽체인 H-Pile 공법을 대상으로 하였다. 3차원 수치해석에서 측벽파일 및 버팀부재는 H-300×200, H-300×300 강재를 2절점 Beam 요소로 모델링하여 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 경계요소는 X-Y 평면상에서 좌우측 변형을 구속하였으며, 측벽 및 중앙파일의 Z방향 회전을 그림 3, 그림 4와 같이 구속하는 조건으로 해석하였다.

굴착 해석은 표 1과 같이 초기응력상태를 구현한 후 총 6단계의 굴착 및 버팀보를 설치하는 공정으로 구분하여 해석하였으며, 버팀보의 선행하중은 굴착 시 발생하는 누적변위를 고려하여 적용하지 않았다.

굴착면적비인 L/B에 따른 흙막이벽체의 거동을 분석

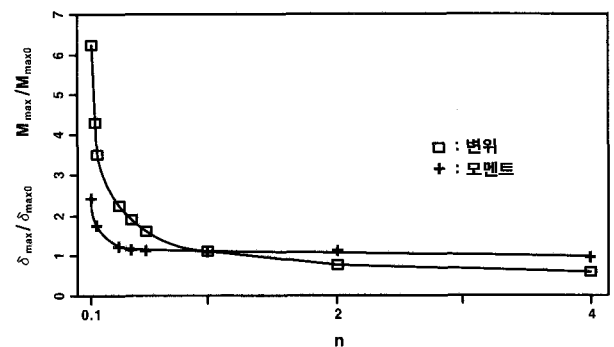


그림 2. 탄소성해석의 n과 M, δ 관계

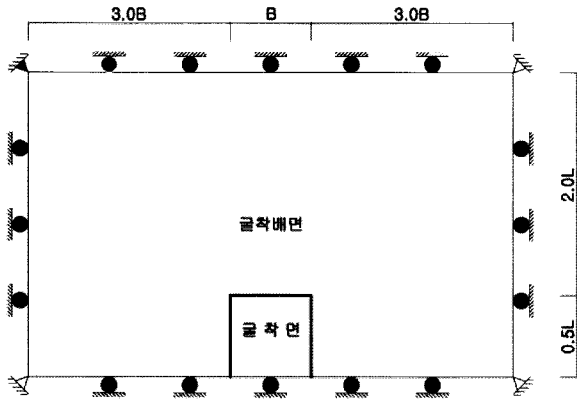


그림 3. 경계조건 개요도

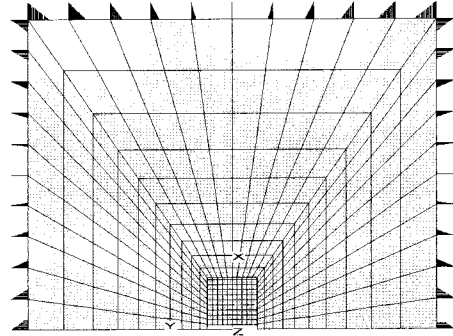


그림 4. 3차원 수치해석 평면도

표 1. 단계별 굴착 시공순서

Stage 0	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 5	Stage 6
초기응력 조건	흙막이벽체 설치	1단 굴착	1단 버팀 2단 굴착	2단 버팀 3단 굴착	3단 버팀 4단 굴착	4단 버팀 최종 굴착

하기 위하여 최종 굴착면까지 단계별로 굴착해석을 수행하였으며, 버팀보 설치에 따른 흙막이벽체의 거동을 분석하였고, X-Y 평면상에서 띠장부재가 직교되어 폐합되는 가설구조체계로 형성되는 모서리부의 구속효과의 영향에 대하여 연구하였다.

상으로 하여 B:L를 1:1.0, 1:1.4, 1:1.8, 1:2.2의 네 가지 경우로 구분하여 해석하였으며, 해석평면과 단면은 그림 5와 같다. 여기서, L은 굴착면의 길이의 1/2, B는 굴착 폭, H는 굴착깊이이며 B와 H는 각각 10m를 기준으로 하였다.

3.2 해석단면 및 토질정수

3.2.2 토질정수

3.2.1 해석단면

본 해석에 적용된 굴착형상은 직사각형 굴착평면을 대

해석을 위한 지반조건은 매립층, 풍화토층, 풍화암층으로 구성된 지반으로 가정하였으며, 각 지반에 해당하는 토질정수는 표준관입시험 N값을 이용하여 관련자료 및 경험식에 의해 표 2와 같이 적용하였다.

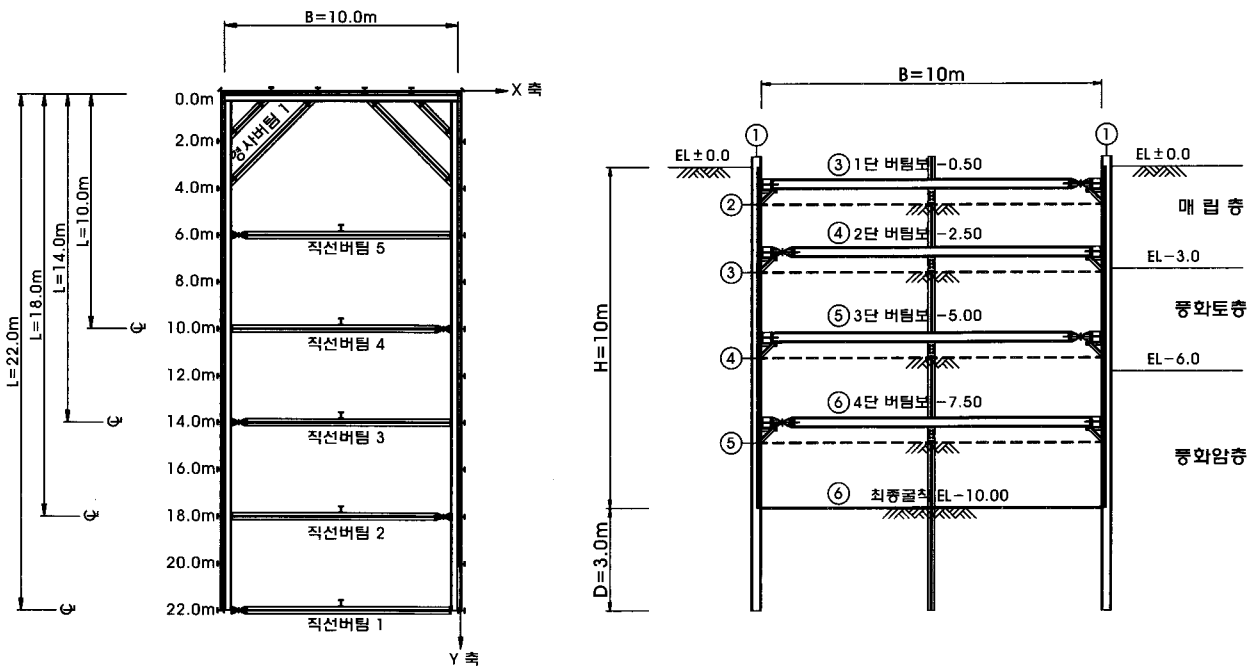


그림 5. 해석평면 및 대표단면도

표 2. 해석에 적용된 토질정수

지층	두께 (m)	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c(kN/m ²)	E(kN/m ²)	ν	Navg.
매립층	3.0	18	25	0	28,000	0.35	10/30
풍화토층	3.0	19	30	10	84,000	0.33	30/30
풍화암층	34.0	21	35	20	140,000	0.30	50

4. 수치해석 결과 및 분석

4.1 3차원 수치해석 결과 및 분석

4.1.1 굴착면적비(L/B)에 따른 흙막이벽체의 수평변위 영향

3차원 수치해석에 의한 굴착면적비 L/B의 변화에 따른 흙막이벽체의 수평변위 δ 의 변화는 표 3 및 그림 6, 7과

표 3. L/B과 흙막이벽체의 수평변위(mm)관계

이격측점	L/B=1.0	L/B=1.4	L/B=1.8	L/B=2.2
22m	-	-	-	4.58(100%)
18m	-	-	4.56(100%)	4.56(100%)
14m	-	4.29(100%)	4.53(99%)	4.55(99%)
10m	3.73(100%)	4.20(98%)	4.40(97%)	4.50(98%)
6m	3.52(95%)	3.78(88%)	3.88(85%)	3.94(86%)
4m	3.31(89%)	3.59(84%)	3.64(80%)	3.66(80%)
2m	2.69(72%)	2.87(67%)	3.00(66%)	3.19(70%)

※ ()는 중앙부 기준 각 측정점 비율임.

같다. 각각의 굴착면적비 L/B에서 중앙부에서 모서리부로 갈수록 수평변위는 L/B이 1.0인 경우 28%, 1.4인 경우 33%, 1.8인 경우 34%, 2.2인 경우 30% 감소하고 있으며 L/B>1.0인 굴착면적이 L/B=1.0인 굴착면적보다 크게 감소하는 것을 알 수 있다. L/B의 변화에 따른 δ 의 변화는 L의 증가에 따라 중앙부에서 100%~123%, 모서리에서 106%~119% 증가하는 것으로 나타나 굴착면적비의 영

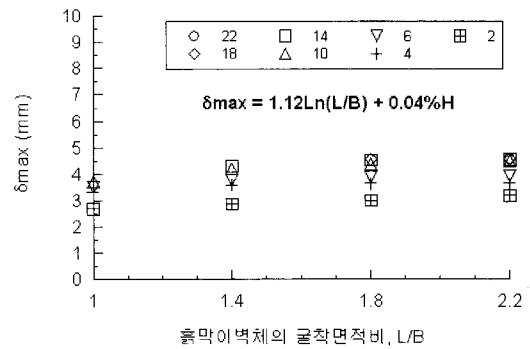
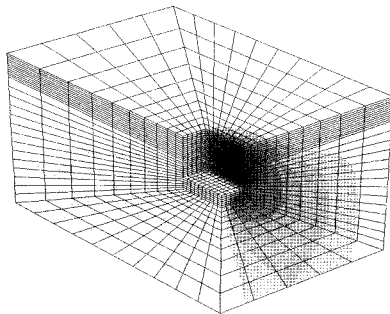
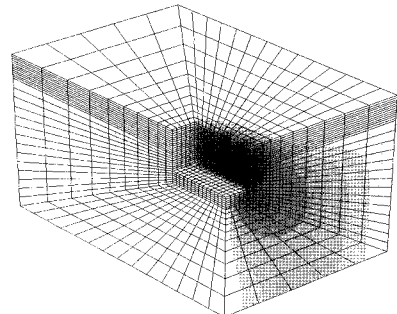


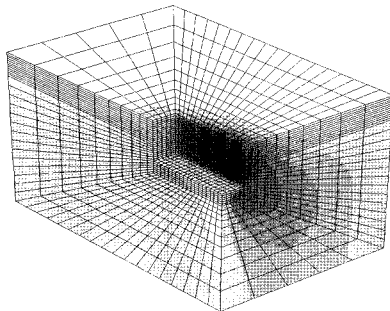
그림 6. L/B과 흙막이벽체의 수평변위 관계



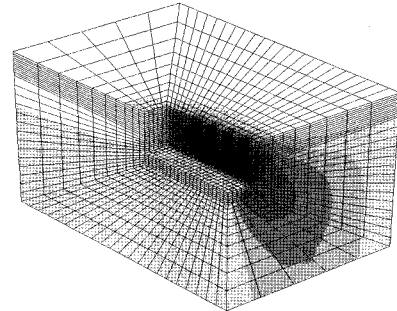
(a) L/B=1.0



(b) L/B=1.4



(c) L/B=1.8



(d) L/B=2.2

그림 7. 3차원 수치해석에 의한 흙막이벽체의 변위 콘타

향은 모서리부보다 중앙부에서 큰 것을 알 수 있었으며 L/B과 δ_{max} 의 관계함수는 $\delta_{max} = 1.12L\ln(L/B) + 0.04\%H$ 으로 나타낼 수 있다.

일반적으로 2차원 해석은 굴착단면을 기준으로 흙막이벽체의 변위는 각 단의 버팀보를 지점으로 하는 연속보 개념의 구조부재로 해석하므로 굴착평면의 형상과 상관없이 중앙부나 모서리부나 흙막이벽체의 수평변위가 동일하게 해석된다. 반면, 3차원 해석은 굴착평면에서 버팀보의 각 단 위치와 양단부인 모서리를 구속지점으로 하는 연속보 개념의 구조부재로 해석하므로 굴착면의 길이가 증가할수록 즉, L/B이 증가할수록 모서리 양단부의 구속지점에서 전체 굴착면의 길이가 증가하게 되어 흙막이벽체의 수평변위가 증가하며 구속지점인 모서리보다 중앙부에서의 변위가 증가하게 되는 것을 알 수 있다.

이와 같이 중앙부에서 모서리로 갈수록 흙막이벽체의 변위가 감소하는 것은 Chang-Yu Ou 등(1993), 이진구(2000)의 연구결과에서도 확인되고 있다. 또한, 본 해석에서 최대수평변위 4.58mm는 굴착 깊이의 0.05%H로 Clough & O'Rourke(1990) 등이 유한요소해석을 수행하여 제시한 0.2%H 보다는 10^{-1} 레벨만큼 작게 나타나고 있는 것을 확인하였다.

4.1.2 모서리부의 폐합효과에 대한 영향분석

굴착평면의 모서리부에서 흙막이벽체의 변위에 미치는 영향을 분석하기 위하여 중앙부의 해석값과 비교하여 모서리부에서 흙막이벽체와 락 부재의 폐합에 의한 구속효과의 영향에 대하여 분석하였다.

모서리부에서의 이격거리 L에 따른 흙막이벽체의 수평변위 δ 은 중앙부를 기준으로 표 4, 그림 8과 같이 각각의 L/B에서 중앙부에서 모서리부로 갈수록 감소되는

표 4. 모서리부에서의 이격거리별 흙막이벽체의 수평변위(mm)의 관계

이격거리	L/B			
	L/B=1.0	L/B=1.4	L/B=1.8	L/B=2.2
0.000L (모서리)	1.28	1.33	1.35	1.36
0.125L	2.69	3.39	3.64	3.84
0.250L	3.31	3.78	4.26	4.48
0.375L	3.52	4.20	4.53	4.56
0.500L	3.73	4.29	4.56	4.58

경향이 굴착면적비(L/B)가 1.0인 경우에서 0.18L, 1.4인 경우에서 0.16L, 1.8인 경우에서 0.13L, 2.2인 경우에서 0.12L까지는 완만한 변화를 나타내고 있으나, 모서리부로 갈수록 급격히 감소하여 모서리부에서는 수평변위가 억제되는 것을 알 수 있으며 굴착면의 길이가 증가할수록 즉, L/B이 증가할수록 흙막이벽체의 수평변위가 증가하는 것을 알 수 있다.

이는 흙막이벽체와 락 부재가 폐합되는 가설구조를 형성하는 양단부의 모서리부에서 폐합 가설구조체계의 영향이 크게 작용되어 나타는 것이며, 모서리부에서 가설부재의 폐합에 의한 구속효과의 영향범위는 모서리부에서 굴착면의 길이 L을 기준으로 평균 0.15L까지 미치고 있다.

4.2 2차원 수치해석과 3차원 수치해석의 상관관계 분석

2차원 수치해석과 3차원 수치해석의 상관관계를 분석하기 위하여 지반변형계수 E를 도로교설계기준에 의해 산정된 E_0 와 변화시킨 E의 비(m)를 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0배로 적용하여 2차원 유한차분해석 FLAC 프로그램에 의해 해석을 수행하였으며, 지반변형계수비 m의 변화에 따른 흙막이벽체의 최대수평변위 δ_{max} 는 표 5와 그림 9와 같다.

두 해석에서 흙막이벽체의 수평변위는 m=1.0인 2차원 수치해석 결과가 L/B=1.0인 굴착평면의 3차원 수치해석보다 크게 발생되며, 일반적인 흙막이벽체의 연구결과에서와 같이 최대 수평변위는 2차원 해석이 3차원 수치해석보다 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그러나 L/B>1.0인 굴착평면에서는 굴착면의 길이가 증가할수록 즉 굴착면적비의 영향으로 3차원 수치해석이 11%~19% 정도 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또

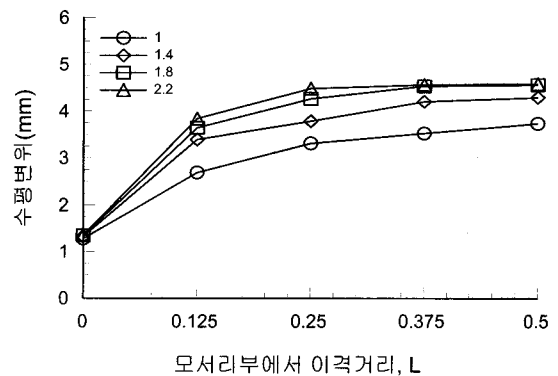


그림 8. 모서리부에서의 이격거리별 흙막이벽체의 수평변위의 관계

표 5. 변형계수비와 굴착면적비의 변화에 따른 흙막이벽체의 최대수평변위(mm)

2차원 수치해석		3차원 수치해석	
m=0.5	5.37	L/B=1.0	3.73
m=0.75	4.29		
m=1.0	3.86	L/B=1.4	4.29
m=1.25	3.47		
m=1.5	3.15	L/B=1.8	4.56
m=1.75	2.82		
m=2.0	2.58	L/B=2.2	4.58

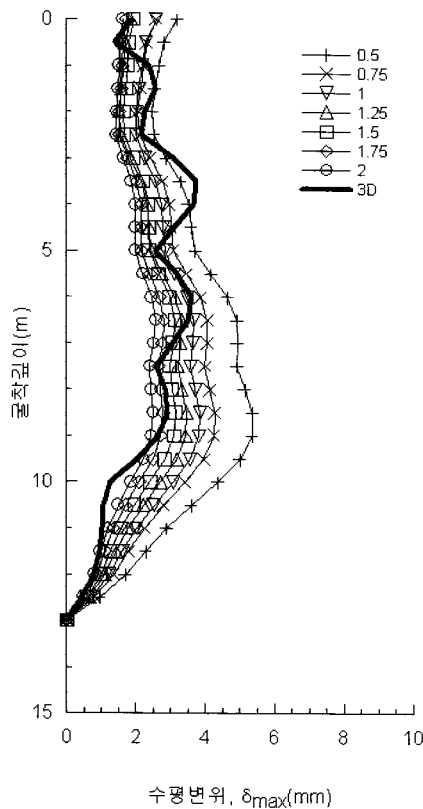


그림 9. 2차원 수치해석의 수평변위(mm)

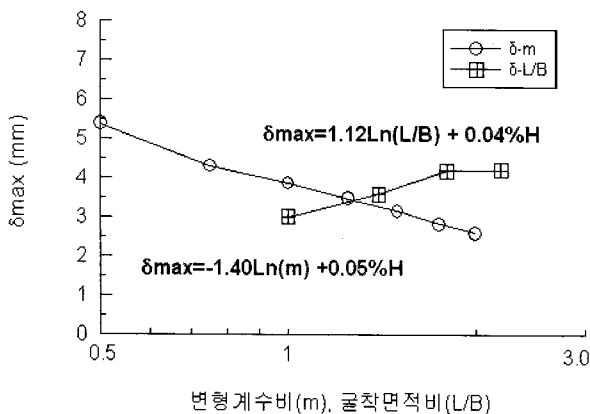


그림 10. m과 L/B비의 변화에 따른 흙막이벽체의 최대수평변위 관계

한, 2차원 수치해석에서 E가 증가할수록 δ_{max} 는 감소하는 것으로 나타나며, m=1.25의 범위에서 두 해석값이 비슷한 것을 확인할 수 있다.

그림 10과 같이 2차원 수치해석과 3차원 수치해석에서 δ_{max} 에 영향을 미치는 인자인 m과 L/B은 2차원 해석에서 $\delta_{max} = -1.40\ln(m) + 0.05\%H$, 3차원 수치해석에서 $\delta_{max} = 1.12\ln(L/B) + 0.04\%H$ 와 같은 상관관계로 나타낼 수 있으며, 2차원 수치해석과 3차원 수치해석의 관계식에서 제안된 동일한 δ_{max} 를 나타내는 교점의 상관관계는 $m = \exp^{-0.80\ln(L/B)+1.10}$ 로 나타낼 수 있다.

4.3 현장계측 자료에 의한 수치해석결과 비교 분석

흙막이벽체공법 및 지지공법이 같은 서울지역 12개 현장의 계측자료를 분석하여 굴착면적비를 고려한 3차원 해석결과와 모서리부에서 폐합 가설구조체계의 영향 범위 및 2차원 수치해석 결과로부터 제안한 결과와 3차원 해석결과와의 상관관계식을 검증하였다.

4.3.1 현장개요 및 지반조건

본 연구에서는 도심지 굴착공사 중 굴착심도 및 지반조건이 본 연구와 유사한 현장을 대상으로 흙막이벽체공법이 H-Pile공법을 적용한 12개소를 선정하여 현장계측 자료 중 지중수평변위를 분석하였다. 그림 11은 12개소 현장 중 2개소의 대표현장의 주변현황 및 경사계 설치위치에 대한 개략도를 나타낸 것으로 굴착현장 주변에는 인접건물 및 인접도로가 위치하고 있는 대표적인 도심지 근접 굴착공사 현장이며 그림 11에서 (1)~(5)는 경사계 설치위치이다.

그림 12는 대표현장의 지층현황 및 버팀보 설치위치를 나타낸 것으로 대부분 지층조건은 본 연구에 적용한 지반조건과 유사한 매립층, 퇴적층, 풍화대층 및 기반암층으로 구성되어 있다. 각 현장의 대표 단면도에서 매립층 및 퇴적층은 실트 섞인 모래와 자갈로 구성되어 있으며 N값은 4/30~23/30으로 느슨한 상태 내지 보통 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내고 있다. 풍화대층은 실트 섞인 모래층으로 구성되어 있으며 N값은 35/30~2/50으로 조밀한 상태 내지 매우 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내고 있다. 또한 각 12개소 현장의 지하수위는 굴착심도 이하이거나 EL-3.7m~EL-6.7m이하에서 나타나고 있다.

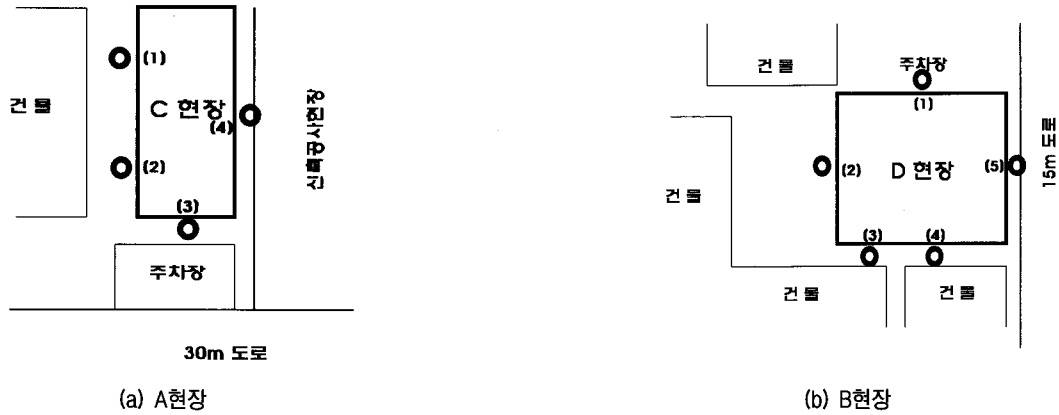


그림 11. 주변현황 및 경사계 설치위치

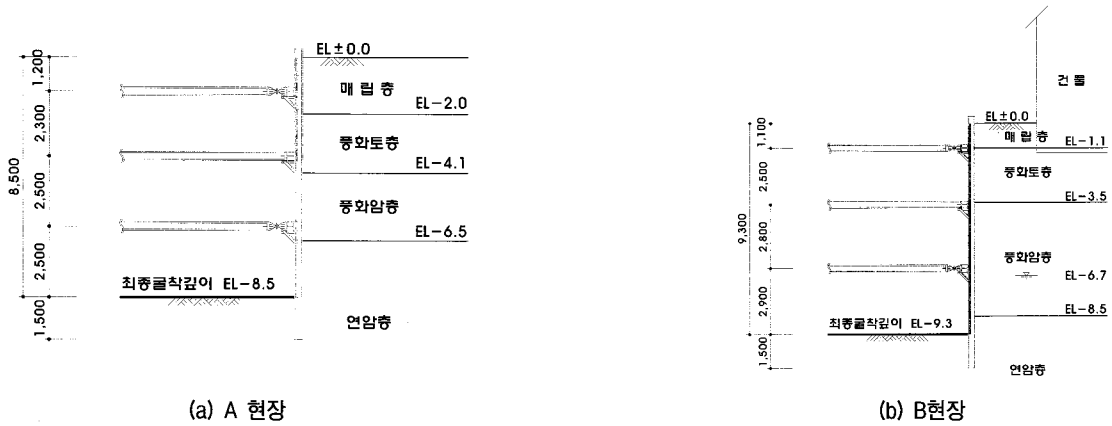


그림 12. 지층현황 및 버팀보 설치 단면도

4.3.2 현장 계측결과와 수치해석결과의 비교·분석

흙막이벽체의 최대 수평변위는 각 현장에 설치한 경사계에서 측정된 자료이며, 본 연구에서는 장변에 위치한 두 개의 경사계를 대상으로 모서리부와 중앙부 두 지점의 최대 수평변위를 분석하여 굴착면적비가 유사한 3차원 해석에서 나타난 모서리부의 폐합 가설구조에 따른 효과 및 영향범위를 비교·분석하였다. 모서리부의 최대 수평변위 계측자료는 본 연구결과에서 제안한 모

서리부로 갈수록 감소하는 영향범위인 0.15L에 근접되어 있는 위치의 자료이다.

표 7은 흙막이벽체의 최대 수평변위를 각 현장별 계측결과와 굴착면적비에 근접한 3차원 수치해석의 나타내고 있다. 각 현장별 계측결과에 의하면 최대 수평변위는 모서리부에서 0.04%H~0.07%H, 중앙부에서 0.07%H~0.08%H로 나타나고 있다. 또한 3차원 수치해석 결과에 의하면 최대 수평변위는 모서리부에서 0.03%H, 중앙부

표 6. 현장계측에 의한 흙막이벽체의 최대 수평변위

구 분		H-Pile 흙막이벽체 A~L(12개소) 현장
굴착 규모		L/B=1.1~2.0
굴착깊이(m)		EL-8.5~EL-17.5
현장계측결과	모서리부	3.61(0.04%)~11.45(0.07%)
	중앙부	5.95(0.07%)~14.10(0.08%)
3차원 해석결과	모서리부	2.69(0.03%)~3.00(0.03%)
	중앙부	3.73(0.04%)~4.56(0.05%)
모서리부에서의 감소비율(%)	현장계측	19~39
	3차원 해석	28~34

※ ()는 흙막이벽체의 최대 수평변위/굴착깊이 비율임.

표 7. 현장계측결과와 기존연구 및 수치해석결과에 의한 최대 수평변위 비교

구 분		H-Pile벽체	
		A~L(12개소) 현장	
굴착 규모		L/B=1.1~2.0	
굴착깊이, H(m)		EL-8.5~EL-17.5	
최대수평변위 (mm)	현장계측	S_{max}	5.95mm~14.10mm
		S_{max}/H	0.07%~0.08%
	기존 연구	S_{max}	17.0mm~87.5mm
		S_{max}/H	0.2%~0.5%
	3차원 수치해석	S_{max}	3.25mm~7.78mm
		S_{max}/H	0.04%

에서 0.04%H~0.05%H로 나타나고 있다. 현장계측 결과에 의한 최대 수평변위는 흙막이벽체의 최대 수평변위에 관한 기존의 연구결과인 Chang-Yu Ou 등(1993)의 0.2%H~0.5%H, Clough & O'Rourke(1990)의 0.2%H, Peck(1969)의 엄지말뚝에서 1.0%H, NAVFAC DM-7.2(1982)에서 제안된 0.2%H~0.5%H의 범위 보다는 10⁻¹ 레벨만큼 작게 나타나고 있으며 본 연구의 3차원 해석결과에서 분석된 결과와 유사한 범위로 확인되고 있다.

또한 표 6은 흙막이벽체의 중앙부와 모서리부에서의 최대 수평변위의 3차원 해석결과와 현장 계측결과와 중앙부를 기준으로 모서리부에서의 최대 수평변위의 감소비율로 나타낸 것이다. 흙막이벽체의 최대 수평변위는 3차원 해석결과가 현장 계측결과의 68%~87%이며 모서리부에서의 최대 수평변위의 감소비율은 3차원 해석결과는 28%~34%이며 현장계측의 경우 19%~39%로 나타나 모서리부의 폐합가설구조에 따른 영향이 본 연구 제안결과와 현장 계측결과가 근접된 것을 확인할 수 있었다.

표 7은 각 현장별 계측결과와 수치해석 결과 및 제안된 관계식으로부터 예측한 흙막이벽체의 최대 수평변위를 나타낸 것으로 최대 수평변위를 기존 연구결과인 Chang-Yu Ou 등(1993)이 제안한 0.2%H~0.5%H를 이용하여 예측한 값과 본 연구에서 굴착면적비를 고려한 2차원 수치해석에서 제안한 관계식인 $\delta_{max} = -1.40Ln(m) + 0.05\%H$ 로부터 최대 수평변위를 예측한 결과를 현장계측 결과와 비교·분석하였다.

굴착 깊이가 8.5m~17.5m인 지하굴토현장의 각 현장별 계측결과에서 흙막이벽체의 최대 수평변위는 5.95mm~14.10mm로 굴착 깊이의 0.07%H~0.08%H 범위로서 기존 연구결과에 제안된 0.2%H~0.5%H의 범위보다는 10⁻¹ 레벨만큼 작게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었

다. 그러나 기존연구 결과는 지반조건과 흙막이벽체의 제한조건이 전제된 결과로 흙막이벽체의 변형에는 차이가 있을 것으로 판단된다. 또한, 굴착면적비를 고려한 3차원 수치해석 결과에 의해 제안된 관계식에 의한 최대 수평변위는 0.04%H로 나타나고 있다.

각 현장별 계측결과와 수치해석 결과에 의해 제안된 관계식으로부터 예측한 흙막이벽체의 최대 수평변위는 기존연구보다 3차원 수치해석에 의해 제안된 관계식의 결과가 현장계측 결과와 더 근접한 값을 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 지반굴착의 기하학적 형상의 차이와 관련된 흙막이벽체의 거동특성을 굴착면적비(L/B)에 따른 3차원 유한차분해석에 의해 흙막이벽체의 변위를 비교하여 굴착면적비의 영향 및 모서리부에서 폐합 가설 구조체계의 영향을 분석하였다. 또한, 2차원 유한차분 해석 및 3차원 유한차분해석에 영향을 미치는 인자를 지반변형계수 및 굴착면적비로 고려하여 각각의 해석이 일치하는 영향인자의 상관관계를 흙막이벽체의 최대변위를 기준으로 하여 제안하였으며, 제안된 관계식을 현장계측 결과와 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 3차원 수치해석으로부터 굴착면적비 L/B의 변화에 따른 흙막이벽체의 최대 수평변위는 모서리부에서 폐합 가설구조체계의 영향으로 인하여 중앙부에서 모서리부로 갈수록 급격히 감소하여 모서리부에서는 수평변위가 억제되는 것을 알 수 있으며, 굴착면의 길이 L이 증가할수록 즉, L/B이 증가할수록 흙막이벽체의 수평변위가 증가하는 것을 알 수 있었다.

또한, 3차원 해석에 의한 모서리부에서 폐합 가설구조체계의 구속효과가 미치는 영향범위는 모서리부에서 굴착면의 길이 L을 기준으로 평균 0.15L까지 미치고 있는 것을 알 수 있었으며 L/B과 최대 수평변위의 관계함수를 나타낼 수 있었다.

- (2) 2차원과 3차원 수치해석에서 흙막이벽체의 수평변위는 지반변형계수비 $m=1.0$ 인 2차원 해석이 굴착면적비 $L/B=1.0$ 인 3차원 해석보다 크게 발생되며, $L/B>1.0$ 인 3차원 해석에서는 굴착면적비에 의한 영향으로 2차원 해석보다 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 2차원과 3차원 수치해석에서 동일한 최대 수평변위를 나타내는 교점을 이용하여 흙막이벽체의 2차원 해석결과로부터 3차원 해석결과를 유추할 수 있는 관계식을 최대 수평변위에 영향을 미치는 인자인 지반변형계수비 m 과 굴착면적비 L/B 을 고려하여 관계식 $\delta_{max} = -1.40Ln(m) + 0.05\%H$ 를 제안하였다.
- (4) 현장 계측자료와 수치해석 결과를 비교·분석한 결과 최대 수평변위 및 발생위치는 중앙부에서 모서리부로 근접할수록 감소하는 경향 및 감소비율은 수치해석결과와 유사하며, 최대 수평변위는 기존 연구결과보다 근접한 결과로 나타나고 있다. 이와 같이 3차원 수치해석 결과로부터 도출한 2차원 수치해석의 제안식을 이용하여 흙막이벽체의 최대 수평변위를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 양구승 (1996), *도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 대한 분석*, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사논문.
2. 이종규, 전성곤 (1993), 다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포, *한국지반공학회지* 3월호.
3. 이진구, 장서만, 전성곤, 이종규 (2001), “3차원 유한요소해석에 의한 흙막이벽체의 거동특성”, *한국지반공학회 2001년 봄 학술 발표회 논문집*, pp.347-354.
4. 이창호, 정충기 (1997), “굴착지반 해석의 3차원 효과”, *대한토목학회 학술발표회 논문집(III)*, pp.351-354.
5. 유충식, 김연정 (1998), “국내 도심지 깊은 굴착에 따른 흙막이벽체의 거동”, *대한토목학회논문집*, pp.195-204.
6. 한국지반공학회 (1992), *굴착 및 흙막이공법*, 지반공학 시리즈 3권, pp.433-466.
7. Shigehiko Sugie, Takayuki Ueno, Noriyuki Akino, Junji Sakimoto (1999), “3-Dimension Soil Water Coupled Finite Element Analysis of Ground Behaviour Adjacent to Braced Cuts”, *土と基礎* 1999년 7호 Vol.47, No.7 Ser. No.498.
8. K. Takeuchi, H. Higemoto, K. Kawamura and K. Tsuji (1992), “土留め弾塑性法に導入る掘削幅の影響度”, *土質工學研究發表會* 1992년 7호, pp.1515-1516.
9. Chang-yu Ou, Pio-Go Hsieh and Dar-Chang Chiou (1993), Characteristics of ground surface settlement during excavation., *Canadian Geotech. J.* 30, pp.758-767.
10. Clough, G. W., and O'Rourke, T. D. (1990), “Construction Induced Movements of In-Situ Walls”, *Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Proceedings of a Specialty Conference at Cornell University, ASCE, New York, pp.439-470.

(접수일자 2007. 5. 30, 심사완료일 2008. 2. 14)