

3차원 유한요소해석에 의한 흙막이 벽체의 거동특성

The Behavior of Retention Wall by 3-D Finite Element Method

이진구¹⁾, Jin-gu Lee, 장서만²⁾, Seo-man Chang, 전성곤³⁾, Seong-kon Jeon, 이종규⁴⁾, Chong-kyu Lee

- 1) 부경컨설팅 토질부 대리, Assist Engineer, Bukyung Consultant Co. Ltd.
- 2) 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University
- 3) 여주대학 토목과 부교수, Associate Prof., Yejoo Institute of Technology.
- 4) 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

SYNOPSIS : In this study, 3-D FEM analysis are carried out to investigate the effect of the corners and re-entrant corners which can't be analysed by 2-D analysis. The excavation shape is re-entrant type conditions. The wall displacement, earth pressure and effectiveness of the corner struts are investigated in the re-entrant case. The 3D analysis are performed to evaluate the effect of various factors, such as re-entrant corner size, excavation depth, and presence of struts. The wall displacement and earth pressures are influenced the size of re-entrant corner. Therefore, the effect of re-entrant corner should be considered in the evaluation of the earth pressure and displacement of the corners. Finally, strut-support systems are not effective at the re-entrant corner.

Key words : 3D analysis, retention wall, re-entrant corner, strut-support systems

1. 서 론

일반적으로 굴착형상이 직사각형과 같이 정형적인 경우에는 평면변형을 조건을 이용한 2차원 해석방법이 해석의 간편성 및 보수적인 해석결과로 인하여 많이 사용되고 있지만 굴착면적이 비교적 작거나, 모서리부 및 돌출부의 복잡한 굴착평면에서의 해석은 평면변형을 조건의 2차원 해석만으로는 벽체 거동 및 토압을 정확히 예측하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 해석지반 및 굴착조건에 따라 3차원 수치해석을 수행하여 기존에 구명되지 못했던 토압 및 부재력을 중심으로 흙막이 벽체의 거동을 분석하였다. 2차원적인 방법으로는 해석이 불가능한 직사각형 평면상에 돌출부가 존재하는 경우에 대하여 3차원 수치해석을 실시하여 돌출부의 벽체변위 및 토압 분포를 기존의 연구결과와 비교함과 동시에 그 특성을 구명하였다. 특히, 돌출부의 벽체변위를 억제하기 위하여 경사버팀대를 설치한 경우에 발생하는 문제점 및 경사버팀대의 효과에 대하여 고찰하였다.

2. 해석 조건

2.1 해석단면 및 지반정수

본 연구에서 사용된 굴착형상은 직사각형 평면상에 돌출부가 있을 때로 가정하였다. 직사각형 평면상에 돌출부가 있을 때 돌출부의 폭대 굴착깊이비(b/L)를 5가지로 나누어 해석하였다. 해석평면 및 해석단

면은 그림 1과 2와 같다.

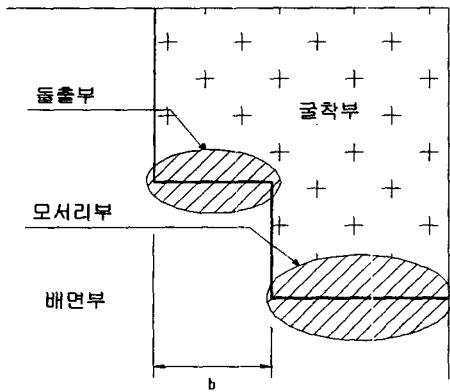


그림 1. 해석평면

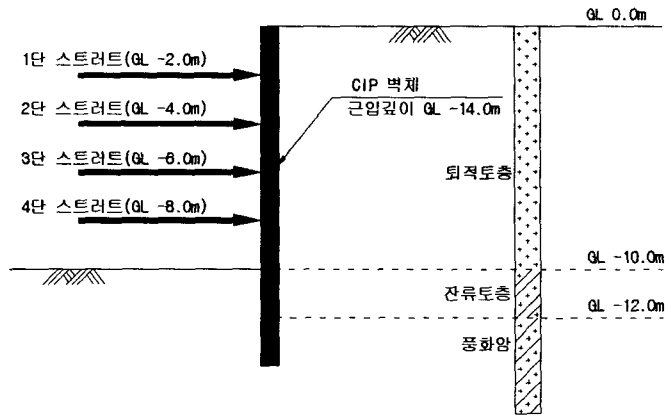


그림 2. 버팀대 위치 및 해석 대표단면

일반적으로 해석범위는 굴착폭 및 깊이의 1.5배에서 3배 정도가 적절하다고 보고 있는데, 본 해석에서는 경계까지의 거리를 수평방향으로는 굴착폭의 2배, 수직방향으로는 최종굴토심도의 2배까지 해석범위로 정하였다. 그리고 요소망의 수를 줄이기 위하여 굴착평면의 1/4만을 해석하였다.

해석을 위해 지반조건에 대해서 최종 굴착심도인 G.L -10m 까지는 퇴적토층, 그 아래로 2m 두께의 잔류토층과 풍화암층의 순으로 지층을 가정하였고, 해석에 사용된 지반정수는 표 1과 같다.

표 1. 해석에 사용된 지반정수

	층두께 (m)	단위중량 (t/m ³)	내부마찰각 (도)	점착력 (t/m ²)	변형계수 (t/m ²)	포아송비
퇴적토층	10	1.7	0	2.5	500	0.38
잔류토층	2	1.8	32	1.0	3,500	0.30
풍 화 암	-	2.0	36	1.0	6,500	0.30

본 해석에서 사용한 흙막이 벽체는 CIP벽체를 사용하였고 CIP의 근입심도는 풍화암층 2m까지, 즉 굴착바닥면 아래부터 4m까지 근입하였다(그림 2. 참조). 2차원 요소망 작업시에는 Frame요소를 이용하여 작성하고 3차원 요소망 작업시에는 Shell요소로 변환하여 해석을 수행하였다. 지보재로는 버팀대를 사용하였고 규격은 300x300을 사용하였으며 축력만 받는 부재로 해석하기 위하여 2절점 Truss요소로 모델링 하였다.

표 2. 구조부재의 물성치

CIP 벽체		버팀대	
단위중량(t/m ³)	2.5	단위중량(t/m ³)	7.85
탄성계수(t/m ²)	2.1×10 ⁴	탄성계수(t/m ²)	2.1×10 ⁴
포아송비	0.25	단면적(m ²)	0.01198

2.2 경계조건 및 매개변수

본 해석에서 사용한 프로그램은 먼저 2차원 요소망을 작성하고 z방향의 좌표를 입력해 줌으로써 3차원 요소망이 생성되는 특징을 가지고 있다. 따라서 본 해석시에도 마찬가지로 2차원 요소망을 먼저 작성한 다음 z좌표를 입력함으로써 3차원 요소망을 생성하였다. 그림 3.에서와 같이 x-y의 평면이 굴착지반의 평면이 되도록 모델링 하였으며 z방향이 심도가 되도록 요소망을 작성하였다.

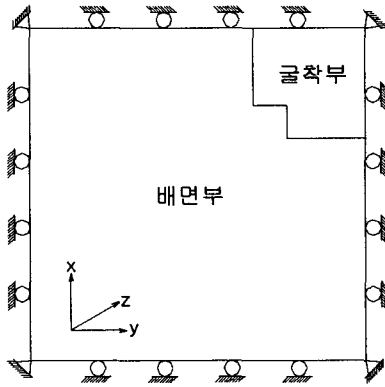


그림 3. 경계조건

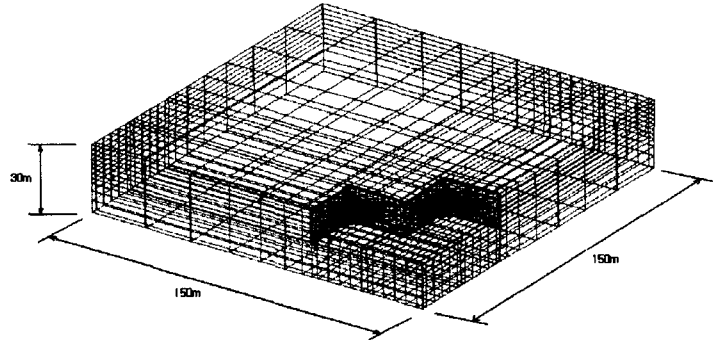


그림 4. 3차원 유한요소망

굴착전의 응력상태를 재현하기 위하여 심도방향의 응력 σ_z 는 γh 로 계산하고 나머지 두 방향의 응력 즉, σ_x , σ_y 는 심도방향 응력인 σ_z 에 토압계수를 곱하였다. 토압계수는 Jaky의 공식을 사용하였으며, 본 해석에서 사용된 3차원 유한요소망은 그림 4.와 같고, 각 굴착단계는 표3과 같다.

표3. 굴착단계

Stage 0	Stage 1	Stage 2	Stage 3
초기화	벽체설치	1단계 굴착	2단계 굴착 및 1단 버팀대 설치
Stage 4	Stage 5	Stage 6	
3단계 굴착 및 2단 버팀대 설치	4단계 굴착 및 3단 버팀대 설치	5단계 굴착 및 4단 버팀대 설치	

한편, 돌출부의 크기는 그림 1과 같이 돌출부의 형상은 정방형이고 한변의 길이를 b라고 하였을 때 표 4와 같다.

굴착에 따른 벽체의 거동을 분석하기 위하여 최종 굴착심도 10m까지 단계별로 해석을 수행하였고 각각의 굴착심도는 2, 4, 6, 8, 10m로 총 5단계 굴착을 시행하였다. 또한 지보재를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우로 해석을 수행하여 지보재의 설치로 인한 벽체의 거동 및 토압을 분석하였고, 돌출부에 설치한 경사버팀대의 설치효과 및 문제점에 대하여 알아보았다.

표 4. 돌출부의 크기

굴착길이(L,m)	50				
돌출부의 크기(b,m)	5	10	15	20	25
b/L	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

3. 돌출부가 존재하는 굴착형상

3.1 벽체변위 특성

직사각형 평면상에 돌출부가 있는 경우에 대하여는 모서리부와 돌출부에서의 거동으로 나누어 분석하였다. 돌출부라 함은 벽체에서부터 돌출부 끝까지의 부분으로 정하였고 모서리부라 함은 돌출된 부분의 끝에서부터 벽체중심까지의 부분으로 모서리를 포함한다(그림 1. 참조).

3.1.1 돌출부의 영향으로 인한 모서리부에서의 벽체변위

그림 5는 돌출부 크기의 변화에 따라 모서리부에서의 벽체변위를 분석하기 위하여 최종굴착시의 최대 변위를 모서리로부터 떨어진 거리별로 나타내었다. 그림 5에서 돌출부의 크기에 따라 모서리로부터 떨어진 최대 거리가 다른 이유는 굴착깊이는 50m로 고정되어 있는 반면에 돌출부 폭의 증가로 인하여 모서리부의 길이는 감소하기 때문이다.

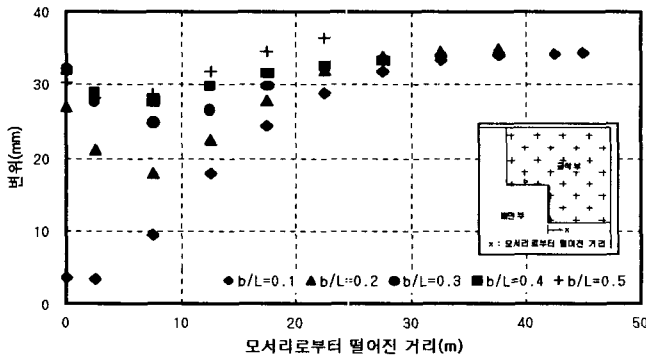


그림 5. 모서리부에서의 돌출부의 크기별 벽체변위

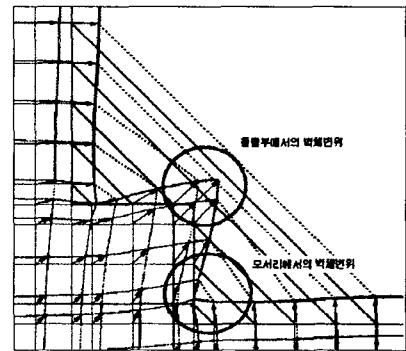


그림 6. 돌출부로 인한 모서리부의 변위

그림 5의 결과와 같이 돌출부의 크기가 증가할수록 각 지점에서의 벽체변위는 증가하였고, 모서리에서의 변위는 모서리로부터 약 15m 이격된 지점에서의 벽체변위보다 많이 발생하였다. 이러한 결과는 그림 6에서와 같이 돌출부에서의 변위로 인하여 모서리부에서의 변위가 증가하기 때문인데, 이는 기존에 연구되었던 굴착형상이 직사각형일 때 모서리부분에서 벽체변위가 현저히 감소하는 결과와 다름을 알 수 있었다. 즉, 굴착형상이 직사각형인 경우 모서리에 가까울수록 변위는 감소하지만 돌출부가 있는 경우는 돌출부의 변위로 인하여 모서리에서의 벽체변위도 돌출부의 변위와 비슷하게 거동하였다.

3.1.2 돌출부에서의 벽체변위

돌출부의 크기에 따른 돌출부에서의 벽체변위를 분석하기 위하여 지보재를 설치하였을 경우의 최종굴착시 최대 벽체변위는 그림 7과 같다.

그림 7에서는 돌출부의 폭대 굴착깊이비(b/L)가 0.3일 때까지 최대변위는 증가하지만 돌출부의 폭대 굴착깊이비의 크기가 더 커짐에 따라 오히려 최대변위는 감소하는 것을 볼 수 있다. 돌출부의 폭대 굴착깊이비가 0.3인 경우는 0.2인 경우에 비하여 최대변위가 약 19% 증가하였지만 돌출부의 폭대 굴착깊이비가 0.4인 경우는 0.3인 경우에 비하여 약 1% 감소하였고 돌출부의 폭대 굴착깊이비가 0.5인 경우는 0.4인 경우에 비하여 약 6% 감소하였다. 이러한 결과는 돌출부 폭의 길이가 굴착깊이의 40%이상이면 돌출부로 인한 영향보다 모서리부에서의 수평방향 구속효과가 더 크기 때문으로 사려된다.

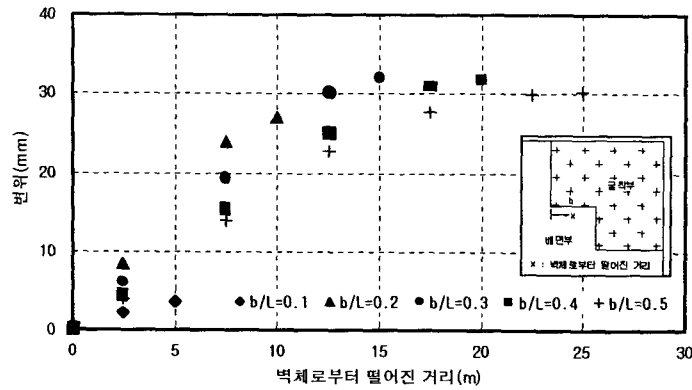


그림 7. 돌출부에서의 벽체변위

한편, 사유지 또는 용지보상 및 시공상의 문제로 인하여 돌출부에 설치된 경사버팀대의 설치효과를 분석하기 위하여 지보재를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우 모두 돌출부 끝에서의 벽체변위를 그림 8에 제시하였다.

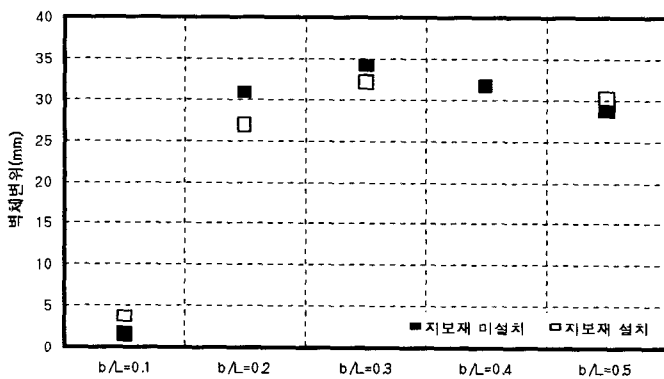


그림 8. 지보재 설치시와 미설치시의 벽체변위 비교

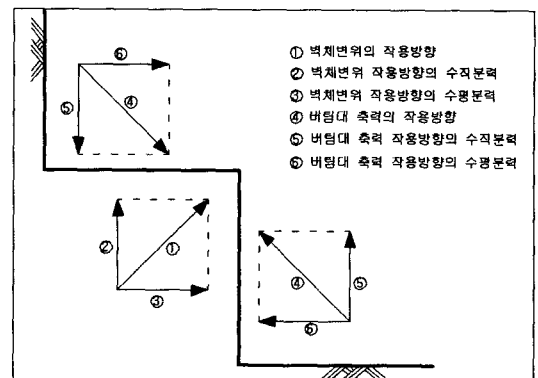


그림 9. 돌출부 평면에서 힘의 작용방향

그림 8에서의 결과에서와 같이 경사버팀대를 설치한 경우 돌출부에서의 벽체변위는 설치하지 않은 경우에 비하여 약 5~13% 정도 감소하거나 오히려 증가하는 것으로 나타나 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 경사버팀대의 설치방향이 벽체변위를 효과적으로 억제하지 못했기 때문으로 판단된다. 즉, 벽체변위 및 토압의 작용방향은 그림 6에서와 같이 굴착길이방향과 약 45° 기울어서 작용하였지만 지보재의 설치방향은 벽체변위 및 토압의 작용방향과 수직으로 설치되었기 때문에 그림 9에서와 같이 경사버팀대 축력의 한방향 분력은 벽체변위를 억제하였지만 다른방향 분력은 오히려 변위를 일으키는 힘으로 작용하였기 때문으로 사려된다. 따라서 돌출부에서의 변위를 억제하기 위해서는 지보형식을 버팀대 대신 다른 공법을 사용하여 벽체변위 방향과 반대로 설치하는 것이 효과적이라 사려된다.

3.2 토압 특성

3.2.1 돌출부의 영향으로 인한 모서리부에서의 수평토압

그림 10은 돌출부 크기의 변화에 따른 모서리부에서의 수평토압 분포를 분석하기 위하여 최종굴착시의 최대토압을 정지토압 및 주동토압과 비교하였다.

그림 10에 제시된 바와 같이 모서리에서의 수평토압은 돌출부의 크기가 커짐에 따라 벽체변위의 증가

로 인하여 토압은 감소하였다. 모서리에서의 토압이 근처의 토압보다 작았는데 이러한 이유 또한 돌출부에서의 변위로 인하여 모서리에서의 변위가 근처의 벽체변위보다 컸기 때문이며, 굴착형상이 직사각형일 때와 같이 모서리로부터 떨어질수록 수평토압이 감소하는 일반적인 경우와는 다르게 나타났다. 또한 이번 해석으로 인하여 돌출부의 폭대 굴착길이비가 0.1인 경우에는 돌출부의 영향이 거의 없었는데, 따라서 돌출부의 한 변의 길이가 굴착길이의 20% 이상이 되면 돌출부의 영향으로 인하여 모서리부에서의 수평방향 구속효과가 현저히 감소됨을 알 수 있었다.

3.2.2 돌출부에서의 수평토압

돌출부 크기의 변화에 따른 돌출부에서의 수평토압을 분석하기 위하여 최종굴착시 최대토압을 그림 11에 제시하였다.

그림 11의 결과로 돌출부에서의 수평토압은 돌출부의 크기가 증가할수록 벽체변위의 증가로 인하여 감소하였다. 그러나 돌출부의 폭대 굴착길이비가 0.3 이상에서는 돌출부의 끝지점으로 갈수록 다시 토압이 증가하였는데, 이러한 결과는 그림 10에서와 같이 돌출부의 끝지점에서 변위가 감소하였기 때문으로 생각된다.

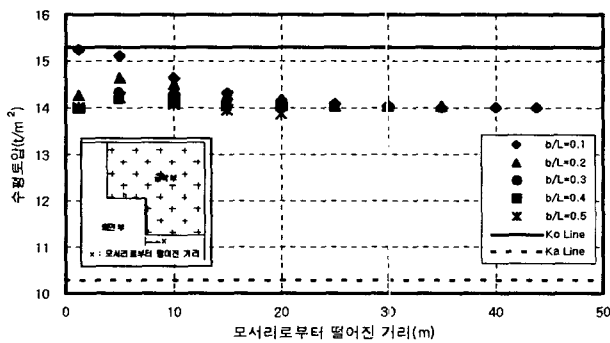


그림 10. 모서리부에서 돌출부의 크기별 수평토압

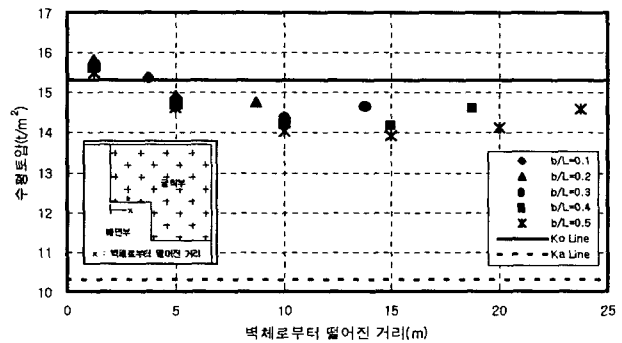


그림 11. 돌출부에서의 수평토압

그림 12는 그림 8과 같이 돌출부에 설치된 경사버팀대의 설치 효과를 분석하기 위하여 지보재를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대하여 최종 굴착시 돌출부 끝지점에서의 토압을 비교한 결과이다.

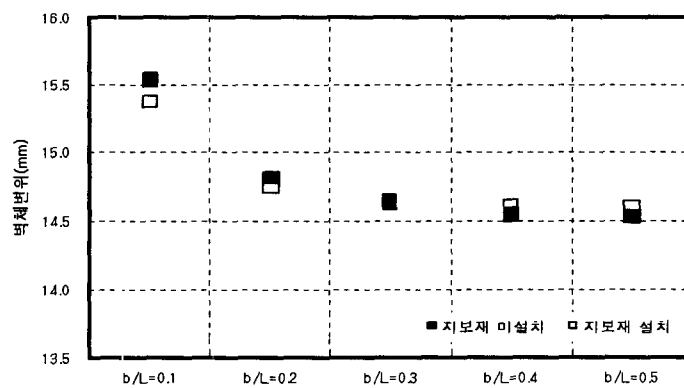


그림 12. 지보재 설치시와 미설치시의 수평토압 비교

그림 12의 결과로 경사버팀대를 설치하였을 경우의 토압은 경사버팀대를 설치하지 않은 경우의 토압에 비하여 약 1% 감소하였거나 거의 차이가 없었고 이러한 결과는 그림 8의 벽체변위를 비교한 결과와 일치하였으며, 마찬가지로 경사버팀대의 설치방향이 돌출부의 변위를 억제하기에 효과적이지 못하다는

것을 알 수 있었다.

4. 돌출부의 벽체변위 억제를 위한 최적의 지보재 설치방법 연구

굴착배면부가 사유지 및 용지보상 등의 문제로 인하여 부득이하게 경사버팀대를 설치한 경우 앞서 언급한대로 효과적으로 벽체변위를 억제시키지 못하였다. 따라서 돌출부 벽체의 변위를 억제하기 위해서는 그라운드앵커(Ground anchor)공법 또는 쏘일네일링(Soil nailing)공법을 적용하여 벽체변위 작용방향의 반대방향으로 설치하는 것이 타당하다고 판단된다.

이러한 공법을 돌출부에 적용하는 경우 그라운드 앵커의 각도 및 길이가 효과적인 벽체변위 억제에 주요한 인자가 되며, 따라서 이번 해석을 위해 어스앵커의 각도 및 길이별로 그림 13과 같이 총 8가지의 경우로 구분하였고, 각각의 경우에 있어서 돌출부에서의 벽체변위를 그림 14에 나타내었다.

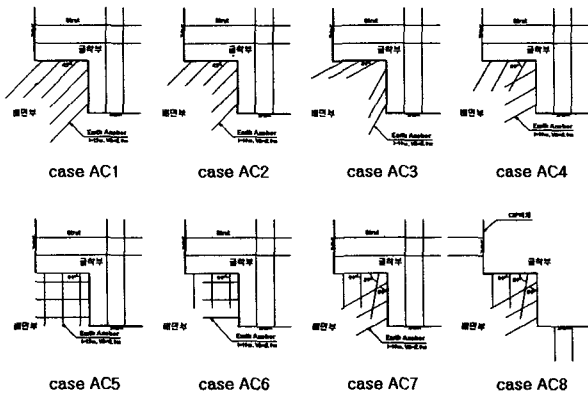


그림 13. 돌출부에서의 앵커각도와 길이

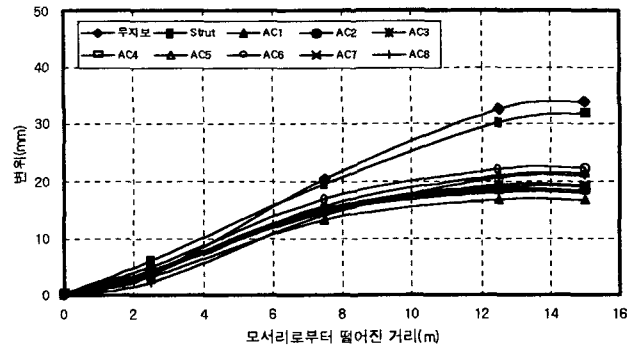


그림 14. 돌출부에서의 지보방법별 벽체변위

그림 14에 제시한 결과와 같이 버팀대를 설치한 경우와 버팀대를 설치하지 않은 경우의 벽체의 변위는 거의 차이가 없음을 알 수 있었고, 이러한 돌출부에서의 버팀대의 설치는 효과적이지 못하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 벽체 변위의 발생방향(그림 6 참조)과 반대방향으로 앵커를 설치한 AC1과 AC2의 경우는 버팀대를 설치하지 않았을 경우에 비하여 약 50%까지 벽체변위를 감소시키는 것으로 나타났다. 반면, 벽체변위의 발생방향과 비스듬히 설치한 나머지 경우(AC3~AC8)는 어느정도 벽체변위를 억제시키지만 AC1과 AC2의 경우 보다는 효과적이지 못한 것으로 나타났으므로, 이러한 돌출부에서의 벽체변위를 억제하기 위해서는 정역학적인 관점에서 미리 벽체변위의 발생방향을 인지하여 앵커를 설치하는 것이 가장 효과적인 방법으로 판단되었다. 또한 부득이하게 앵커의 설치가 허락치 않을 경우에는 효과적이지 못한 버팀대의 설치보다는 다른 방법을 간구하여 설계 및 시공을 수행하여야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 흙막이 벽체의 3차원 해석을 통하여 기존의 2차원 해석으로 구명하기 어려운 돌출부에서의 벽체변위, 토압분포 및 부재력에 대하여 분석하였다. 굴착형상이 직사각형 평면상에 돌출부가 존재할 때의 3차원 해석을 수행하였고 지보재의 설치효과 및 돌출부에 설치된 경사버팀대의 문제점을 파악하기 위하여 지보재를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우로 나누어 해석하였다.

(1) 돌출부의 폭대 굴착깊이비를 변화시켜 해석을 수행한 결과 모서리에서의 벽체변위 및 토압은 돌출부의 크기에 따라 그 거동이 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 돌출부가 존재하는 경우에는 모서리부에서의 벽체변위 및 토압 거동을 추정하는 경우 돌출부의 영향을 충분히 고려하여 해석하여야 할 것

으로 판단된다.

(2) 돌출부에 설치되는 경사버팀대의 효과는 벽체변위 및 수평토압의 거동 모두 설치하지 않은 경우에 비하여 크게 차이가 없는 것으로 해석되었다. 따라서 돌출부의 벽체변위를 억제하기 위해 그 부분에 경사버팀대를 설치하는 것은 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

(3) 돌출부에서 앵커의 길이와 각도를 변화시켜 해석하여 본 결과 벽체변위를 가장 효과적으로 억제시키는 앵커의 방향은 벽체변위 발생방향과 반대방향이 되어야 할 것으로 판단되므로 앞으로의 설계에 있어 이를 반드시 고려하여야 할 것을 제안한다.

참 고 문 헌

1. 김홍택, 고용일, 권영호(1996), "쏘일네일로 보강된 지하굴착벽체의 3차원 거동분석" 지반공학회 가을 학술발표회 논문집 pp.97~106
2. 이창호(1997), "굴착지반 거동의 3차원 해석" 서울대학교 석사학위논문
3. 김광표(1998), "모서리 효과를 고려한 지하연속벽의 거동에 관한 연구" 연세대학교 석사학위논문
4. 최상구(1999), "단계별 굴착시 흙막이 벽체에 작용하는 토압 비교 검토" 단국대학교 석사학위논문
5. 이종규(1994), "흙막이 구조물(IX)" 한국지반공학회지 제10권 제1호
6. Pentagon-3D manual(1999), 에머랄드소프트
7. C. Y. Ou, D. C. Chiou(1993), "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations", Proceedings of 11st Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore pp.769~774
8. F. H. Lee, K. Y. Yong, K. C. N. Quan, and K. T. Chee(1998), "Effect of Corners in Strutted Excavations: Field Monitoring and Case Histories", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4 pp.339~349
9. S. H. Chew, K. Y. Yong, and Y. K. Lim(1997), "Three-Dimensional Finite Element Analysis of a Strutted Excavation", Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, Vol. 3 pp.1915~1920
10. MJ Tomlinson(1995), "Foundation Design and Construction" 6th edition