

억지말뚝을 이용한 자립식 흙막이 공법의 해석기법 개발

Development of the Analyzing Method for Earth Retaining Cantilever Walls using Stabilizing Piles

김창영¹⁾, Chang-Young Kim, 임종철²⁾, Jong-Chul Im, 박이근³⁾, Lee-Keun Park

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University E-mail : changyounga@dreamwiz.com

²⁾ 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University

³⁾ 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원, Doctor, Researcher of RIIT, Pusan National University

SYNOPSIS : In former times, It is obvious that the earth retaining cantilever wall using stabilizing piles is definitely superior to the other methods due to economical efficiency and the efficiency of construction through model tests using a soil tank and practical application(Kim, 2006). However, this method was not proved in theoretical basis from the viewpoint of geotechnical engineering. Accordingly, a variety of model experiments in order to analyze the behavior of the earth retaining cantilever wall and stabilizing piles according to excavation step and earth pressure and stress acting on stabilizing piles according to excavation step were performed. On the basis of analyzing the result of model tests using a soil tank, this study suggests failure mechanism of clods and a method calculating virtual supported point. In addition, this study contributes to developing the analyzing method of retaining piles, stabilizing piles and beams connecting two piles and, this study helps this method to be established as a new design method through analyzing the results of model tests using a soil tank.

Key words : The earth retaining cantilever wall, Stabilizing piles, Failure mechanism of clods, Connected beam

1. 서 론

토조모형실험과 시공현장에서의 적용에서 억지말뚝을 이용한 흙막이 공법이 기존의 가시설공법에 비해 경제성과 시공성에서 아주 우수하다는 것을 알 수 있었다(김, 2006). 그러나 객관적으로 이를 증명할만한 지반공학적 접근이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 억지말뚝을 이용한 흙막이 공법에 대한 모형실험을 실시하고, 본 공법의 해석기법을 개발하였다. 본 연구에서는 단계굴착에 따른 흙막이 벽체 및 억지말뚝의 거동과, 단계굴착에 따른 흙막이 벽체와 억지말뚝에 작용하는 토압과 응력을 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 지반의 파괴 메카니즘을 제안하였으며 연결부, 염지말뚝, 억지말뚝의 해석기법을 개발하였다.

2. 실내모형실험

2.1 지반재료 및 실험장치

본 연구에서는 지반재료로서 주문진표준사를 사용하였으며, 낙하고 1.2m를 유지하여 강사법(降砂法)으로 지반을 제작하였다(박, 2003).

2.2 실험장치

본 모형실험에 사용된 평면변형률토조는 전면과 후면에 두께 30mm의 투명 아크릴 판을 설치하여 지반 제작시 2cm×2cm 격자로 설치한 타겟의 움직임을 사진관측하여 굴착에 따른 지반의 거동을 분석할 수 있다(박, 2003). 흙막이판과 억지말뚝에는 스트레인게이지를 부착하여 각각 수평토압 및 응력을 측정할 수 있다(그림 1).

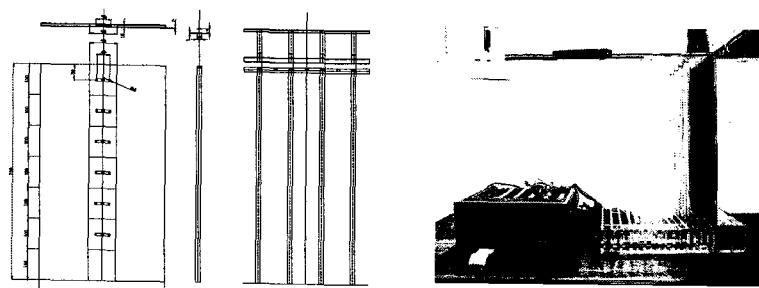


그림 1. 토압측정 시스템(좌로부터 흙막이판, 억지말뚝, UCAM10A)

2.3 실험의 종류 및 방법

억지말뚝의 유무에 따라 흙막이벽체에 작용하는 토압을 측정하고, 흙막이벽체 변위에 따른 지반거동을 관찰하였다. 굴착과정은 1단계에 5cm씩 총 10단계에 걸쳐 이뤄졌으며, 각 단계마다 지표변위 및 지반거동, 토압, 억지말뚝의 응력 등을 계측하였다. 억지말뚝을 설치하지 않은 자립식 흙막이를 ‘무보강’으로 표기하였고, Sheet pile벽체와 억지말뚝을 설치한 실험을 ‘S-S0.27H(Sheet Pile-Span0.27H)’로, H-pile벽체와 억지말뚝을 설치한 실험은 H-S0.27H(H-Pile-Span0.27H)로 표기하였다. 그리고 각각의 실험에 대해서 벽체와 말뚝을 바닥판의 소켓에 삽입하여 단부를 고정한 경우와 단부를 소켓에 삽입하지 않고 힌지와 같이 거동하도록 한 경우로 나누어 실험이 진행되었다.

2.4 실험결과 및 분석

그림 2와 그림 3의 굴착단계에 따른 배면침하량의 결과를 살펴보면, 억지말뚝으로 보강 시 무보강의 경우에 비하여 배면침하량과 벽체변위는 각각 24%, 19%정도로 현저하게 줄어들었다. 하부고정의 경우가 하부자유의 경우(근입깊이:0.2H, H:총굴착고)보다 20% 정도 효과적이었으며, 말뚝의 근입깊이를 크게 하여야 더욱 효과적이라는 결론을 얻을 수 있다.

그림 2와 그림 3을 볼 때 무보강시 배면침하량과 벽체변위는 ‘굴착고/최종굴착고’가 0.5이상인 경우에 급격히 증가하는 것으로 나타난다. 그러나 억지말뚝을 설치하였을 경우에는 ‘굴착고/최종굴착고’가 0.8 이상인 경우에 변위의 증가량이 커지는 경향을 보인다. 그러나 무보강에 비해서는 아주 적은 양이다.

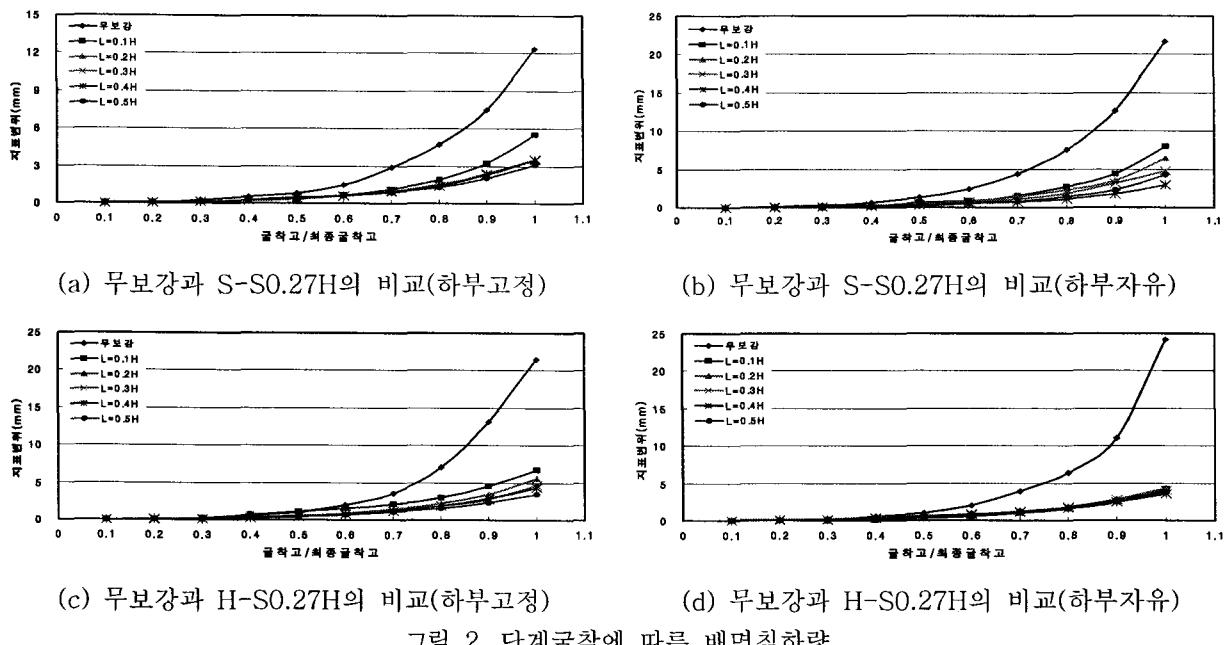


그림 2. 단계굴착에 따른 배면침하량

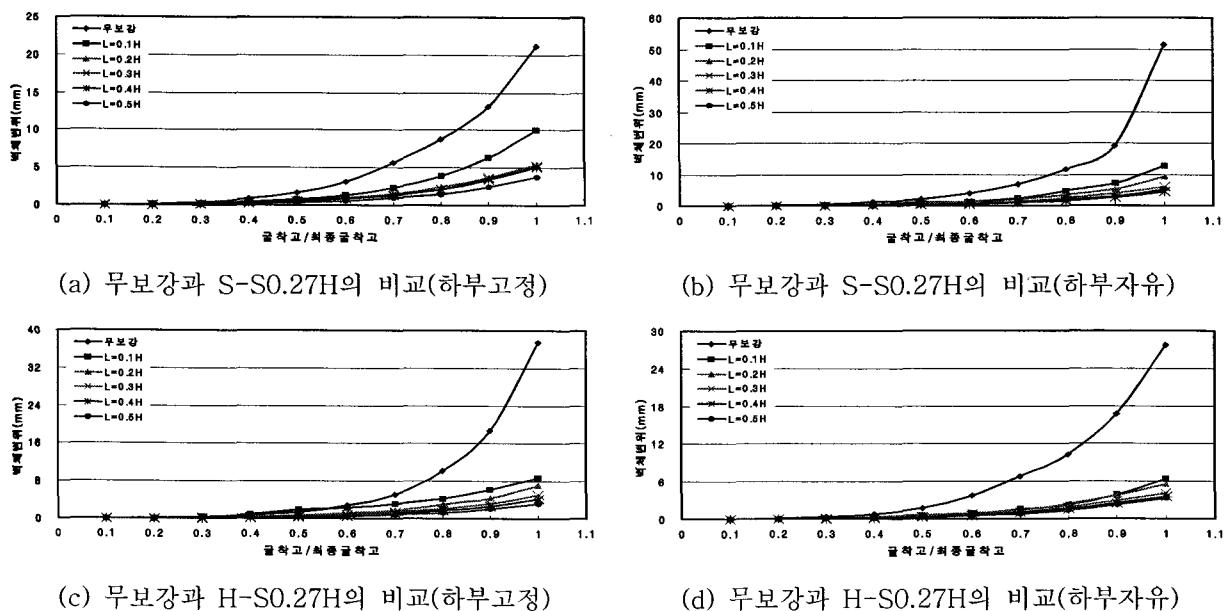
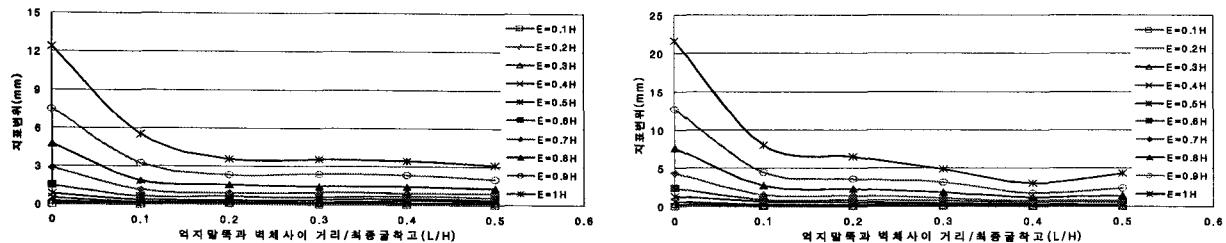
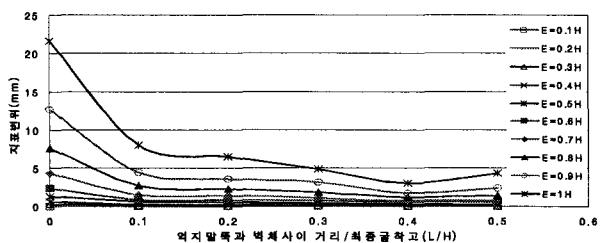


그림 3. 단계굴착에 따른 벽체 변위

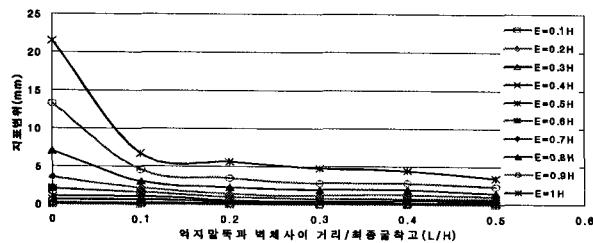
그림 4와 그림 5는 벽체와 억지말뚝의 간격을 달리하여 실험을 수행한 결과 설치간격을 멀리할수록 보강효과가 큰 것으로 나타나며, 설치간격 0.1H 이내에서는 그 효과가 급격히 감소하는 것으로 나타난다. 억지말뚝의 설치간격을 0.2H 이상으로 할 경우에는 그 효과가 크게 개선되지 않은 것으로 나타난다. 따라서 최종굴착고에 따른 벽체와 억지말뚝사이의 설치간격비는 0.1~0.2일 때 가장 경제적이다.



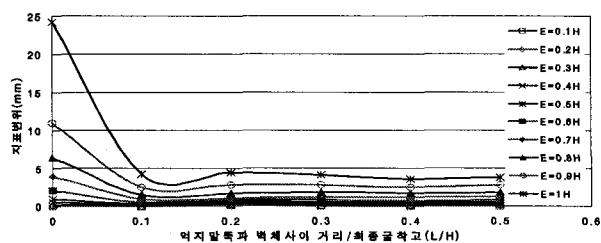
(a) 무보강과 S-S0.27H의 비교(하부고정)



(b) 무보강과 S-S0.27H의 비교(하부자유)

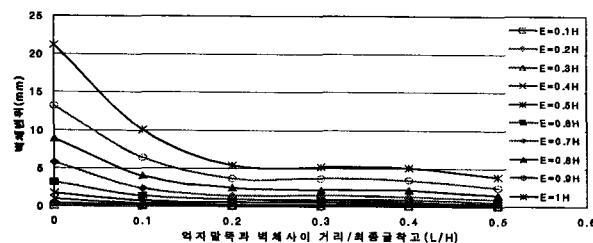


(c) 무보강과 H-S0.27H의 비교(하부고정)

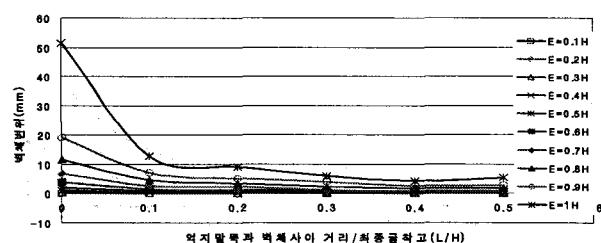


(d) 무보강과 H-S0.27H의 비교(하부자유)

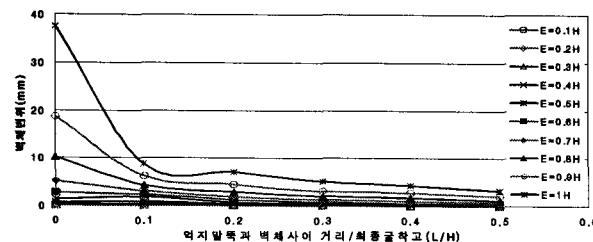
그림 4. 무보강과 보강시의 단계굴착에 따른 배면 침하량



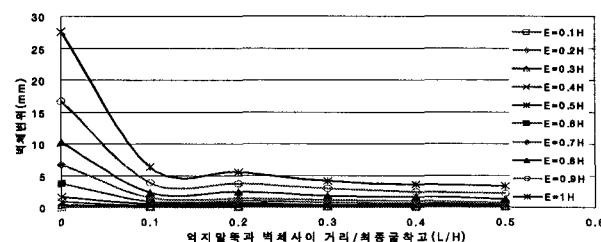
(a) 무보강과 S-S0.27H의 비교(하부고정)



(b) 무보강과 S-S0.27H의 비교(하부자유)



(c) 무보강과 H-S0.27H의 비교(하부고정)

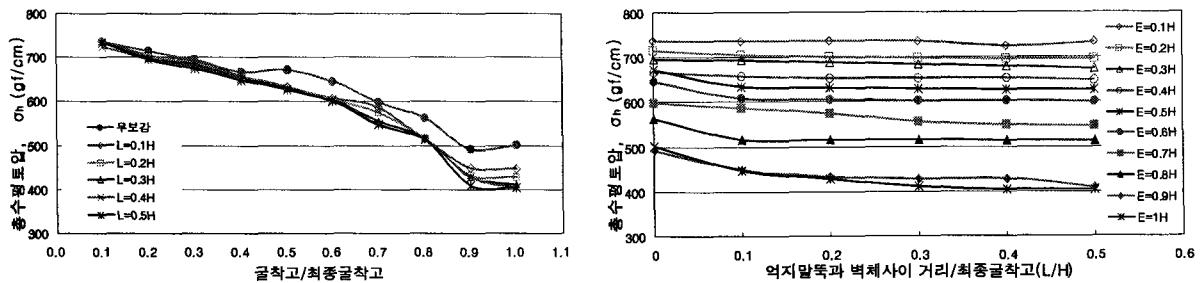


(d) 무보강과 H-S0.27H의 비교(하부자유)

그림 5. 무보강과 보강시의 단계굴착에 따른 벽체 변위

그림 6에는 굴착고가 깊어짐에 따라 총수평토압의 크기가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 9단계와 10단계에서는 거의 수렴하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 굴착깊이가 깊어짐에 따라 활동력은 발생크기에 비해 지반 및 가설구조물의 저항력이 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

여지말뚝과 벽체사이의 거리에 따른 총수평토압은 거리가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 가로축의 값이 0인 무보강에 비하여 여지말뚝을 설치하였을 때 토압이 크게 감소하였고, 여지말뚝의 설치간격이 0.2H이후부터 총수평토압이 수렴하는 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

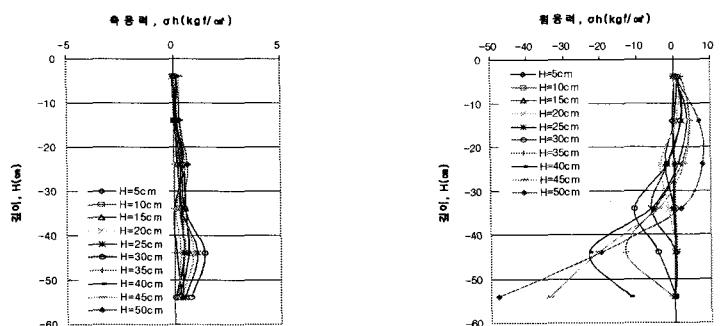


(a) 굴착에 따른 벽체에 작용하는 총 수평토압

(b) 얹지말뚝과 벽체사이 거리에 따른 벽체에 작용하는 총 수평토압

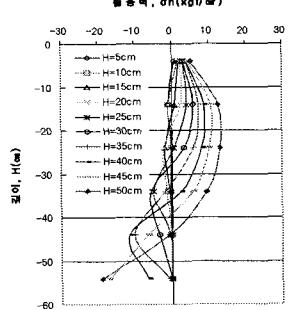
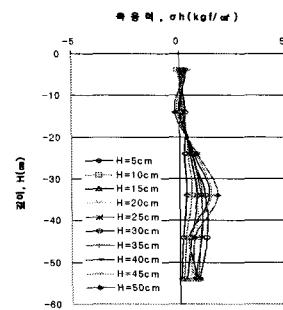
그림 6. 굴착과 얹지말뚝 벽체사이 거리에 따른 벽체에 작용하는 총 수평토압

또, 흙막이 벽체를 염지말뚝흙막이공법으로 하여 얹지말뚝의 효과를 판단하기 위하여 H-NR(염지말뚝흙막이)과 H-S0.27HLO.4H(염지말뚝흙막이+ 얹지말뚝)의 모형실험을 실시하였다. 총 10단계의 굴착에 따른 염지말뚝과 얹지말뚝에 발생하는 축응력과 휨응력을 측정하였다. 염지말뚝과 얹지말뚝은 상호일체 거동을 하여 굴착측으로 휨을 일으키는 구조체로써 축응력보다 휨응력이 주로 발생하였으며 얹지말뚝으로 보강을 하지 않은 벽체에 비하여 보강을 한 벽체가 42%정도로 현저하게 줄었다.



(a) H-NR - 축응력

(b) H-NR - 휨응력



(c) H-S0.27H-L0.4H - 축응력

(d) H-S0.27H-L0.4H - 휨응력

그림 7. 단계굴착(10단계)에 따른 흙막이벽체 H-pile의 축응력 및 휨응력분포

3. 해석기법의 도입

3.1 파괴 메카니즘

파괴 메카니즘은 Coulomb의 흙쐐기 이론을 이용하여 규명하였다.

3.1.1 지반의 거동분석

본 연구에서는 평면변형률토조에서 모형실험한 후, 사진촬영을 실시하여 사진판독법을 이용하였다(임 등, 1992). 지반의 변형을 관찰하기 위해 격자망으로 타겟을 설치하여 이를 절점변위로 지반의 파괴형상을 추정하여, 단계 굴착 완료시 흙막이 벽체 배면의 지반 거동을 분석하였다.

그림 8(a)에서는 염지말뚝에 삼각형 쇄기 모양으로 배면지반이 파괴되었고, 그림 8(b)를 보면 억지말뚝이 함께 설치된 경우에는 염지말뚝과 억지말뚝 사이의 지반은 사다리꼴 쇄기모양으로 파괴되고 억지말뚝 배면지반은 삼각형 쇄기모양으로 지반이 거동하였다.

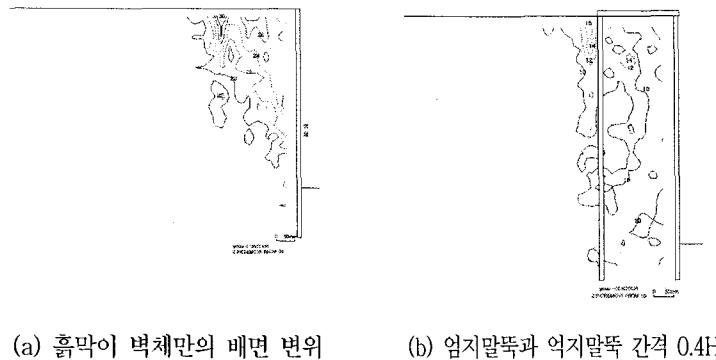
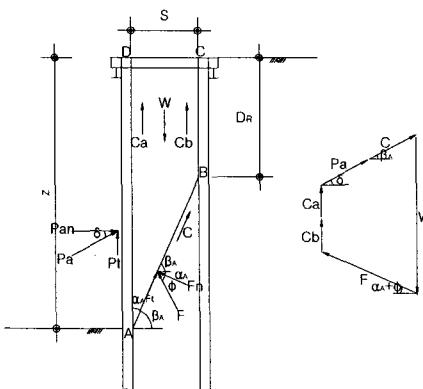


그림 8. 지반의 최대전단변형률 등고선도

3.1.2 사다리꼴 흙쐐기에서의 파괴 메카니즘

(1) 주동토압



(a) 흙쐐기

(b) 힘 다각형

그림 9. 사다리꼴 흙쐐기의 파괴 메카니즘(주동토압)

$$C = c_2 \overline{AB} = c_2 \frac{Z - D}{\cos \alpha_A}, \quad C_a = c_1 Z, \quad C_b = c_3 \overline{BC} = c_3 D_R, \quad C = c_2 \overline{AB} = c_2 \frac{Z - D_R}{\cos \alpha_A}$$

$$P_{an} = \frac{W - \frac{c_2(Z - D_R)\cos \beta_A \tan(\alpha_A + \phi)}{\cos \alpha_A} - c_1 Z - c_3 D_R - \frac{c_2(Z - D_R)\sin \beta_A}{\cos \alpha_A}}{\cos \delta \tan(\alpha_A + \phi) + \sin \delta} \cos \delta \quad (1)$$

Z : 굴착깊이(m), c_1 , c_3 : 염지말뚝과 지반, 억지말뚝과 지반에 작용하는 점착력(tf/m^2),
 c_2 : \overline{AB} 에 작용하는 점착력(tf/m^2), δ : 벽면 마찰각($^\circ$), k_h : 수평방향 지반반력계수(kgf/cm^3),

(2) 수동토압

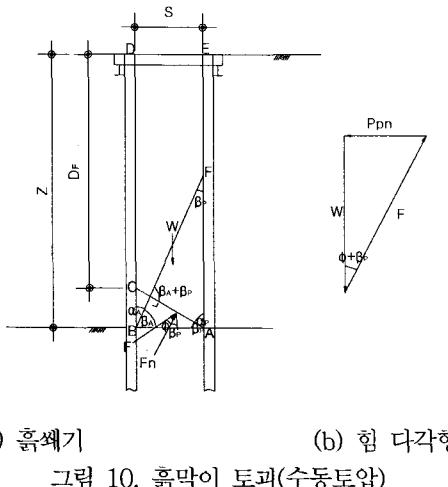


그림 10. 흙막이 토괴(수동토압)

$$P_{pn} = W \tan(\phi + \beta_p) \quad (2)$$

3.2 가상지지점

본 연구에서는 염지말뚝과 억지말뚝의 두부를 연결하는 연결보에 작용하는 축응력을 알 수 없고, 점착력이 있는 지반을 고려할 수 있도록 Chang이 제안한 아래 식을 이용하여 가상지지점을 구하였다.

$$X \doteq \frac{1}{\beta}, \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{k_h B}{4EI}} \quad (3)$$

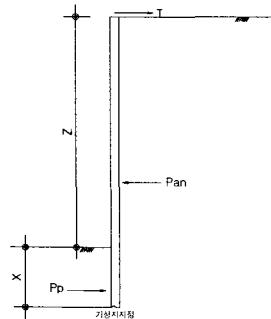


그림 11. 가상지지점 위치

3.3 연결부 해석

$$T = \frac{P_{an} L \left(\frac{Z}{3} + X \right) - P_p N B \left(\frac{X}{3} \right)}{Z + X} \quad (4)$$

T : 연결보에 작용하는 축력(tf), Z : 굴착깊이(m), X : 굴착바닥에서 가상지지점까지의 거리(m)

P_{an} : 주동토압(tf/m), P_p : 수동토압(tf/m), N : 수동토압 작용시 토압 작용폭(말뚝폭의 배수)

L : 염지말뚝 사이의 횡방향 간격(m)

3.4 염지말뚝 해석

본 연구에서는 그림 9의 흙쐐기의 수평력(P_{na})이 Rankine토압처럼 염지말뚝의 굴착지면에서 $(1/3)Z$ 지점에 작용한다고 가정하여 그림 12와 같이 삼각형분포하중으로 변환하여 토압을 나타내었다(홍, 1983).

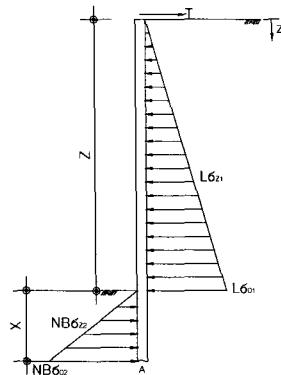
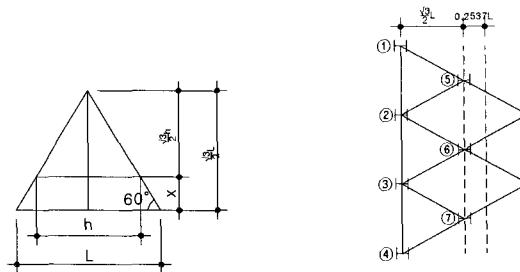


그림 12. 염지말뚝에 작용하는 토압

염지말뚝에는 염지말뚝과 억지말뚝 사이의 흙쐐기만 주동토압으로 작용하는 것이 아니라 억지말뚝 사이에 그림 13(b)처럼 억지말뚝 배면의 토압이 염지말뚝에도 전달된다. 그래서 토압의 작용거리는 그림 13(a)에서 보는 것과 같이 정삼각형의 등가면적중심 개념으로 접근하여 그림 13(b)에서 ②번 염지말뚝에 ⑤번, ⑥번 억지말뚝을 통과하여 작용하는 토압의 작용면적을 정삼각형으로 보았을 때 이 삼각형의 면적중심까지를 억지말뚝에 작용하는 토압의 작용거리로 보고 해석에 반영하였다.



(a) 정삼각형의 등가면적중심

(b) 염지말뚝에 작용하는 토압

그림 13. 억지말뚝의 배면을 통과하여 염지말뚝에 작용하는 토압

$$x = \frac{\sqrt{3}}{2} L - \frac{\sqrt{3}}{2} h = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) L = 0.2537L \quad (5)$$

3.5 억지말뚝 해석

억지말뚝의 경우에도 흙쐐기의 수평력이 Rankine토압에서 수동토압 합력의 작용점인 굴착바닥에서 $(1/3)Z$ 지점에 작용한다고 가정하여 그림 14와 같이 삼각형분포하중으로 변환하여 토압을 나타내었다. 굴착하단부 지점에서의 수동토압은 굴착바닥 상단부에 작용하는 수동토압에 굴착면의 아랫 방향으로 증가하는 Rankine 수동토압의 합과 같다. 억지말뚝에 작용하는 수동토압은 굴착바닥면을 기준으로 상·하부로 나누어 해석하였다. 그림 14와 같이 억지말뚝을 A' 점을 헌지로 보고 전단력과 휨모멘트를 계산하였다.

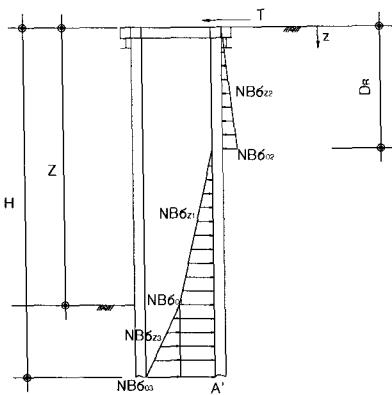


그림 14. 억지말뚝에 작용하는 토압

3.6 해석 기법의 고찰

엄지말뚝과 연결보, 억지말뚝을 일체(라멘구조)로 보고 구조해석 프로그램 SAP2000 이용하여 부정정 구조물로 해석하였을 때 아래와 같은 결과가 나왔다. 굴착면을 기준으로 상부의 토압을 엄지말뚝과 억지말뚝에 분포하중으로 재하하였으며 가상지지점에서 하부경계조건을 헌지로 하였다.

그림 15(a)와 같은 현장조건에서 라멘구조물에 작용하는 토압은 그림 15(b)와 같으며, 이러한 분포하중이 작용하였을 때 휨모멘트는 그림 15(c)와 같다. 휨모멘트의 최대값은 엄지말뚝은 $12.74tf\cdot m$, 억지말뚝은 $33.57tf\cdot m$ 가 작용하였다. 본 연구에서 제시한 방법으로 문제를 풀었을 때 엄지말뚝과 억지말뚝의 휨모멘트는 $19.74tf\cdot m$ 과 $34.972tf\cdot m$ 가 나타났다. 이러한 해석 결과 값에 차이가 있는 이유는 SAP2000에 의한 해석결과는 엄지말뚝과 연결보와 억지말뚝이 강결되어 완전히 일체로 거동하는 경우에 대한 결과인 반면에 본 해석기법에서는 엄지말뚝과 억지말뚝이 시공과정에서 이상적으로 강결되기 어려운 점을 감안하여 해석 모델을 설정하였기 때문이다. 본 연구에서 제안한 방법이 라멘구조로 보았을 때의 결과 값보다 휨모멘트에서 안전 측으로 설계가 된다고 볼 수 있다. 그러나 실제는 억지말뚝과 엄지말뚝의 연결은 강결도 자유도 아닌 것으로 판단되므로, 향후 현장계측을 통해서 해석방법에 보완이 필요하다.

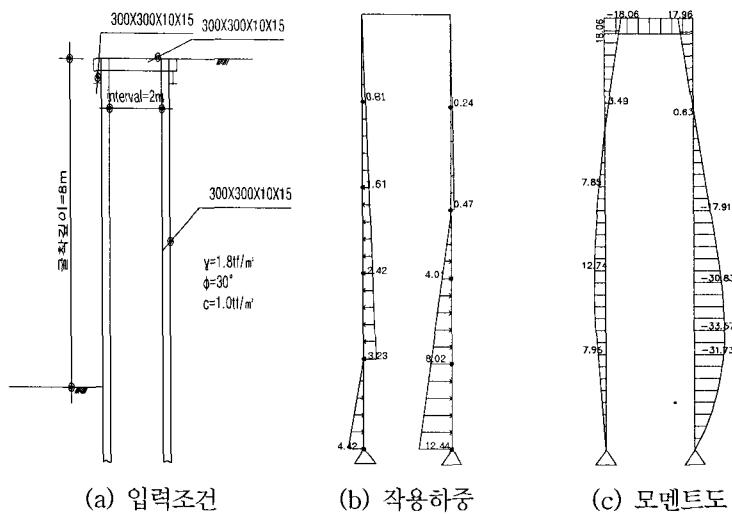


그림 15. 해석 프로그램을 이용한 구조해석 결과

4. 결론

여지말뚝 흙막이공법을 개발하기 위해 여러 조건의 모형실험을 실시하였으며, 그 결과를 바탕으로 여러 가지 해석기법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단계굴착에 따라 흙막이벽체에 발생하는 수평토압은 보강을 한 경우가 무보강인 경우에 비해서 8%정도로 작게 나타났으며, 특히 굴착고의 깊이가 커짐에 따라 그 차이는 커지는 것으로 나타났다. 이는 억지말뚝이 흙막이벽체에 발생하는 수평토압을 분담하기 때문인 것으로 판단된다.
 - 2) 억지말뚝이 설치되었을 경우, 무보강에 비해서 배면침하는 24%, 벽체변위는 19% 밖에 발생하지 않았다. 이로써 억지말뚝과 전면벽체를 연결한 본 흙막이 구조는 변위 억제에 효과가 큰 것을 알 수 있다.
 - 3) 실험결과들을 볼 때 억지말뚝을 이용한 흙막이 공법은 실제에의 적용성이 큰 것으로 판단된다.
 - 4) 실용적인 견지에서 억지말뚝의 설치위치, 설치간격, 근입깊이 등에 관한 모형실험결과를 분석하는 것이 이루어졌으며 3장의 해석 기법연구에 반영되었다.
 - 5) 3장 해석기법의 연구에서 알 수 있는 바와 같이 토압은 염지말뚝과 억지말뚝에 분담하여 작용하였고 이로 인해 얇은 굴착에 상당히 효과적인 가시설 공법이라는 것이 이론적으로 증명되었다.

참고문헌

1. 김대우(2006), “여지말뚝을 이용한 흙막이 공법의 적용성에 관한 연구”, 부산대학교 석사학위논문, pp.46~71.
 2. 박이근(2003), 얇은 토사터널 굴착시의 주변지반거동 특성과 마이크로 파일의 침하역제효과에 관한 연구, 부산대학교 공학박사학위논문, pp.134~146.
 3. 임종철, 박성재, 주인곤, 박용부, 김영인(1992), “平面變形率 狀態에 있는 模型地盤의 變形解析法”, 한국지반공학회지, Vol. 8, No. 1, pp.29~39.
 4. 임종철(2005), “토질공학의 길잡이”, 도서출판 새론, pp.331~364, 379~397.
 5. 홍원표(1983), “수평력을 받는 말뚝” 대한토목학회지, 제31권 제5호, pp.31~36.
 6. Braja M. Das(2002), "Principles of Geotechnical Engineering," pp.397.