

조립식 버팀보로 지지된 흙막이 구조물의 거동 특성에 관한 연구 Characteristics of Walls Supported by Prefabricated Strut

김낙경¹⁾, Nak-Kyung Kim, 박종식²⁾, Jong-Sik Park

¹⁾ 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 조교수, Ass. Prof., Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

SYNOPSIS : From the analytical standpoint, it is advantageous to consider the behavior of supported walls as plane strain condition. But supported walls constitute geotechnical problems which, in strict terms, are not plane strain cases. These represent differences between the measured and the predicted due to the stiffness and spacing of supported walls and the behavior of discontinuous walls such as soldier beams with lagging. This study is to investigate simulations of a system behavior along a horizontal section of walls supported by prefabricated strut. Using a beam column method, relative effects associated with prefabricated strut stiffness and spacing in a systematic behavior were investigated.

Key words : Plane strain condition, Supported walls, Strut spacing, Prefabricated strut

1. 서론

이론적인 측면에서 보면 평면변형을 조건을 전제로 하여 앵커나 스트럿으로 지지된 흙막이벽체의 거동을 해석하는 것이 편리하다. 그러나 흙막이 구조물을 지지하는 앵커나 스트럿의 강성, 설치간격 및 업지말뚝이 시공된 흙막이 구조물의 불연속성 등으로 인하여 실제 거동과 평면변형 조건에서의 거동은 차이를 보인다. 앵커나 스트럿으로 지지된 흙막이 구조물에 평면변형의 조건을 적용시키기 위하여 고려해야 할 사항들은 지반과 벽체의 강성에 대한 영향, 흙막이벽체를 지지하는 앵커나 스트럿의 강성과 설치간격에 대한 영향 등이다. Tsui (1973), Tsui와 Clough (1974)는 모형시험과 유한요소해석을 통한 지반굴착의 시공단계 모사를 통하여 지반과 벽체의 강성, 앵커의 강성 및 설치간격을 고려한 흙막이 구조물의 거동과 평면변형 조건에서의 벽체거동을 비교·분석하였다. 또한 지반과 흙막이벽체의 강성을 고려한 characteristic length를 언급하였으며 characteristic length가 지반과 벽체 간의 상대적 영향과 앵커의 설치간격에 따른 영향을 파악하는데 유용함을 제시하였다. Tsui와 Clough (1974)는 characteristic length와 앵커간격을 고려한 흙막이 구조물의 유한요소해석을 통하여 평면변형 조건에서의 토압분포와 해석에 의한 토압분포의 편차를 비교·분석하였으며 토압분포의 편차를 통하여 흙막이벽체의 평면변형을 해석의 적용여부를 알아보았다. 앵커의 설치간격을 고려한 해석결과에 의하면 흙막이 구조물에서 앵커의 설치간격이 넓어질수록 벽체의 토압분포는 평면변형 조건에서의 해석결과와 큰 차이를 나타낼 수 있었다. 이들의 해석결과를 통하여 알 수 있듯이 흙막이 구조물의 평면변형 조건을 고려한 해석을 수행함에 있어 앵커나 스트럿의 설치간격에 따른 흙막이벽체의 거동을 살펴보는 것이 대단히 중요하다. 특히 축강성이 크고 수평간격이 4~5 m 인 조립식 스트럿으로 지지된 흙막이 구조물의 경우, 스트럿의 설치간격에 대한 벽체의 거동을 파악하여 흙막이 구조물 해석시, 평면변형 조건에서의 적용여부를 결정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 버팀보 설치간격에 의하여 흙막이 구조물의 수평단면을 따라 변화하는 흙막이 구조물의 거동을 알아보았다. 탄소성 보해석(Briaud et al, 1998)을 통하여 지반조건, 굴착깊이 및 띠장강성을 고려한 characteristic length를 산정하고 버팀보 설치간격에 따른 해석결과를 분석하여 평면변형을 조건의 해석결과와 비교·분석을 수행하였다. 또한 평면변형을 조건에서의 토압분포와 스트럿 설치간격을 고려한 토압분포의 최대편차를 비교·분석하여 흙막이 구조물의 해석시, 평면변형을 해석의 적용범위에 대하여 알아보고 기존 버팀보 흙막이 공법보다 축강성이 크고 스트럿 설치간격이 넓은 조립식 버팀보로 지지된 흙막이벽체의 해석시, 평면변형을 해석의 적용여부에 대하여 알아보았다.

2. 배경이론

벽체의 수평단면을 따라 시공된 앵거나 스트럿으로 인하여 흙막이 구조물의 거동은 지반굴착 과정에서 실제로 평면변형을 조건으로 볼 수 없으나 해석의 편의로 인하여 앵거나 스트럿으로 지지된 흙막이벽체의 거동을 평면변형을 조건으로 가정한다. 그러나 평면변형을 조건의 해석결과와 앵거나 스트럿 설치간격을 고려한 해석결과와는 상당한 차이를 보인다.

스트럿으로 지지된 흙막이벽체의 평면변형을 해석과 벽체의 시스템 거동에 대한 비교·검토를 수행하고 지반과 벽체강성을 고려한 characteristic length(l_0)를 통하여 앵커의 설치간격에 대한 벽체의 거동특성을 파악함에 있어 흙막이벽체의 characteristic length(l_0)는 식 1과 같이 정의된다(Hetenyi 1946). characteristic length(l_0)는 수평지반반력계수와 벽체의 휨강성으로 정의되며 지반조건 및 벽체조건에 따라 산정된다.

$$l_0 = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (1)$$

여기서 k = 수평지반반력계수 (t/m^3), EI = 벽체 휨강성 ($t \cdot m^3$)

식 1의 characteristic length(l_0)을 고려하여 다양한 앵커의 설치간격을 결정하고 각각의 설치간격에 대한 해석을 수행하여 얻은 접촉압과 앵커의 선행하중의 비는 I_p 로 표현한다. I_p 의 값이 클수록 흙막이벽체의 거동은 평면변형을 해석결과와 큰 차이를 보이며 Tsui와 Clough (1974)는 $6l_0$ 의 스트럿 간격이 흙막이벽체의 거동을 평면변형을 거동으로 볼 수 있는 최대간격으로 제안하였으며 이때의 스트럿 설치간격에 따른 토압분포와 평면변형을 조건의 토압분포와의 최대 토압편차가 약 200%에 이른다. 식 2는 앵커의 설치간격에 따른 흙막이벽체의 토압과 앵커의 선행하중의 비를 나타낸 것이다.

$$I_p = \frac{l_0^2 p}{P} \quad (2)$$

여기서 l_0 = characteristic length (m), p = contact pressure (t/m^2), P = prestress load (ton)

3. 스트럿의 설치간격을 고려한 흙막이벽체의 해석

3.1 해석조건

본 연구에서는 흙막이벽체의 수평단면을 따라 시공된 스트럿의 설치간격에 따른 벽체의 거동특성을 예측하기 위하여 탄소성 보해석을 수행하였다. 지반과 벽체의 강성, 지반조건 및 굴착깊이를 고려하여 characteristic length(l_0)를 산정하였으며 characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배의 스트럿 설치간격

에 대한 벽체의 토압분포 및 변위특성을 파악하여 평면변형을 조건에서의 흙막이벽체의 거동과 스트럿 설치간격에 대한 벽체의 거동과의 비교·분석을 실시하였다. 표 1-2는 해석을 위한 지반조건과 띠장조건을 나타낸 것이다.

표 1 지반조건

Case	단위중량(t/m ³)	내부마찰각(°)	수평지반반력계수(t/m ²)	굴착깊이(m)
1	1.8	28	2500	10
2	2.1	32	3200	10
3	1.9	30	2800	10
4	1.9	30	2800	5
5	1.9	30	2800	15

표 2 띠장조건

Case	H Beam 규격	탄성계수(t/m ²)	단면2차모멘트(t·m ²)
1	300×300×10×15	21000000	0.000204
2	350×350×12×19	21000000	0.000403

지반조건은 느슨한 지반(단위중량 1.8 t/m³, 내부마찰각 28°), 중간 조밀(단위중량 1.9 t/m³, 내부마찰각 30°) 및 조밀한 지반(단위중량 2.1 t/m³, 내부마찰각 32°)을 선택하여 characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배의 스트럿 설치간격에 대한 각각의 벽체 토압분포 및 변위특성을 파악하였으며 굴착조건은 굴착깊이 5m, 10m 및 15m로 결정하여 각 조건에 대한 해석결과를 비교·분석하였다. 띠장조건은 H 300×300×10×15와 H 350×350×12×19 규격을 선택하여 각각의 조건에 대한 해석결과를 비교·분석하였다. 그림 1은 해석을 수행하기 위한 스트럿 설치간격 및 선행하중 크기를 나타낸 것이다. 먼저 characteristic length(l_0)의 길이를 산정하여 길이의 1, 2, 3 및 6배에 해당하는 길이를 스트럿 설치간격으로 결정하고 지반조건 및 굴착깊이에 따른 버팀보 하중을 산정하여 버팀보 하중의 약 70%를 선행하중으로 결정하여 해석을 수행하였다.

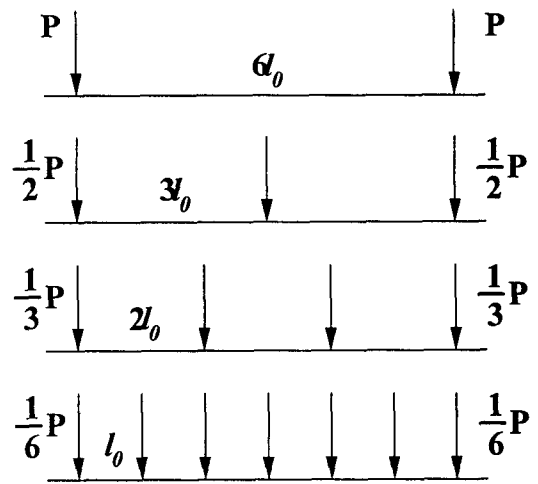


그림 1 스트럿 설치간격 및 선행하중

3.2 지반조건에 따른 흙막이벽체의 거동특성

서로 다른 지반조건에 대하여 흙막이벽체의 스트럿 설치간격에 따른 벽체의 거동특성을 예측하기 위하여 탄소성 보해석을 수행하였다. 지반조건이 느슨하거나 중간 조밀 및 조밀한 경우, 흙막이벽체의 수평단면을 따라 시공된 스트럿의 설치간격과 선행하중을 고려한 흙막이벽체의 해석결과는 그림 2-3 및 표 3과 같다.

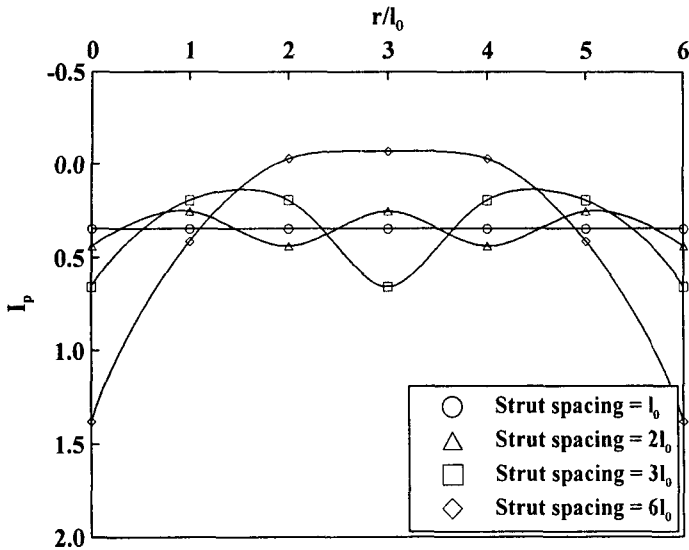


그림 2 스트럿 간격 및 선형하중에 따른 토압분포(중간조밀)

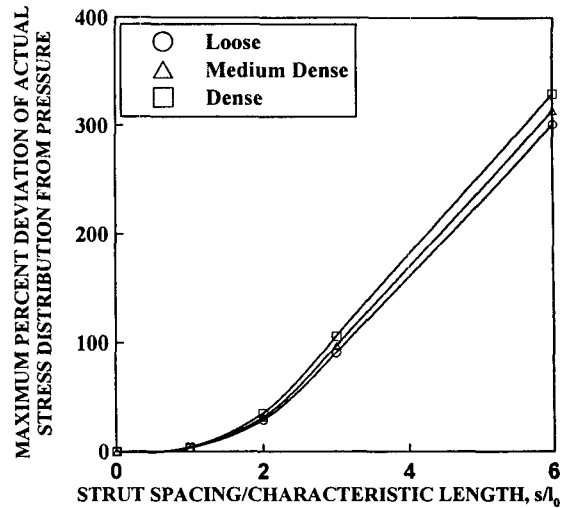


그림 3 지반조건에 따른 최대토압편차

표 3 지반조건별 스트럿 설치간격에 따른 흙막이벽체의 최대토압편차

	l_0	$2l_0$	$3l_0$	$6l_0$
느슨한 지반	3.8%	29.3%	91%	301.1%
중간조밀 지반	3.9%	31.7%	97.1%	313.9%
조밀 지반	4.2%	35.6%	105.9%	329.3%

굴착깊이가 10 m이고 단위중량이 1.8 t/m³, 내부마찰각이 28° 인 느슨한 상태의 지반에 대하여 characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배의 스트럿 설치간격에 대한 해석결과와 평면변형을 조건의 토압과의 최대편차는 characteristic length(l_0)의 1배에 해당되는 스트럿 간격의 경우, 약 3.8%의 최대편차를 보였으며 characteristic length(l_0)의 2배, 3배 및 6배의 경우, 각각 29.3%, 91%와 301.1%의 토압 최대편차를 나타냈다. 굴착깊이 10 m, 중간조밀 지반(단위중량 1.9 t/m³, 내부마찰각 30°)의 경우, 스트럿 설치간격에 대한 해석결과와 평면변형을 조건의 토압과의 최대편차는 characteristic length(l_0)의 1배, 2배, 3배 및 6배의 스트럿 간격에서 각각 3.9%, 31.7%, 97.1%와 313.9%를 나타냈다. 마지막으로 굴착깊이가 10 m이고 조밀 지반의 경우, characteristic length(l_0)가 고려된 각각의 스트럿 간격에 따라 4.2%, 35.6%, 105.9%와 329.3%의 토압최대편차를 나타냈다. 위 해석결과를 통하여 흙막이벽체의 수평단면을 따라 지지된 스트럿의 설치간격이 characteristic length(l_0)의 1배, 2배, 3배 및 6배로 증가할수록 평면변형을 조건의 토압과 상당한 토압편차를 나타냄을 확인하였으며 characteristic length(l_0)의 5배에 해당하는 스트럿 설치간격을 넘어서면 토압 최대편차가 200%를 초과함을 알 수 있었다. 그러므로 지반조건과 스트럿 설치간격을 고려한 흙막이벽체의 거동에서 characteristic length(l_0)의 5배에 해당하는 스트럿 설치간격을 넘어서면 스트럿으로 지지된 흙막이벽체의 거동을 평면변형을 조건으로 가정하여 해석할 수 없을 것으로 판단된다.

3.3 굴착깊이에 따른 흙막이벽체의 거동특성

지반의 굴착깊이와 스트럿의 설치간격에 따른 흙막이벽체의 거동특성을 예측하기 위하여 탄소성 보해석을 수행하였다. 지반의 굴착깊이가 5 m, 10 m와 15 m에 대하여 characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배의 스트럿 설치간격에 따른 흙막이벽체의 해석결과를 비교한 내용이 그림 4-5와 표 4에 나타나 있다.

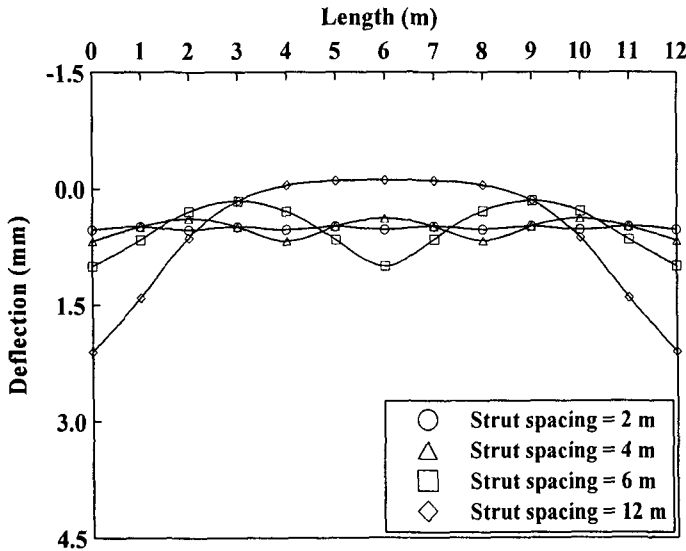


그림 4 굴착깊이와 스트럿 간격에 따른 벽체변위

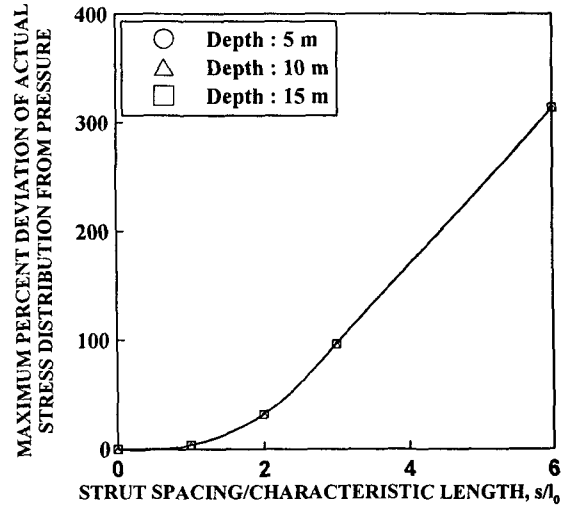


그림 5 굴착깊이별 최대토압편차

표 4 굴착깊이별 스트럿 설치간격에 따른 흙막이벽체의 최대토압편차

	l_0	$2l_0$	$3l_0$	$6l_0$
5 m	3.9%	32.0%	96.5%	313.8%
10 m	3.6%	31.7%	97.1%	313.9%
15 m	3.9%	32.0%	96.9%	313.8%

중간조밀 지반(단위중량 1.9 t/m³, 내부마찰각 30°)의 굴착깊이별, 스트럿 설치간격에 따른 흙막이벽체의 해석결과를 통하여 흙막이벽체의 최대토압편차를 알아보았다. 중간조밀 지반의 굴착깊이가 5m인 경우, characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배에 해당하는 스트럿 설치간격으로 시공된 흙막이벽체의 최대토압편차는 각각 3.9%, 32.0%, 96.5%와 313.8%로 산정되었다. 굴착깊이가 10 m와 15 m의 경우, 굴착깊이 5 m의 해석결과와 유사한 경향을 나타냈다. 위 해석결과를 통하여 흙막이벽체의 스트럿 설치간격이 characteristic length(l_0)의 1배, 2배, 3배 및 6배로 증가할수록 평면변형을 조건의 토압과 상당한 토압편차를 보였음을 알 수 있었으며 characteristic length(l_0)의 5배에 해당하는 스트럿 설치간격을 넘어서면 토압 최대편차가 200%를 초과함을 알 수 있었다. 그러므로 굴착깊이와 스트럿 설치간격을 고려한 흙막이벽체의 거동에서 characteristic length(l_0)의 5배에 해당하는 스트럿 설치간격을 넘어서면 스트럿으로 지지된 흙막이벽체의 거동을 평면변형을 조건으로 가정하여 해석할 수 없을 것으로 판단된다.

3.4 띠장조건에 따른 흙막이벽체의 거동특성

Characteristic length(l_0)가 고려된 스트럿 설치간격에 대한 흙막이벽체의 거동특성에서 벽체의 띠장조건에 따른 흙막이벽체의 거동해석을 수행하였다. 굴착깊이와 띠장의 휨강성에 따른 흙막이벽체의 해석결과 및 최대토압편차는 그림 6-7과 표 5에 제시되었다.

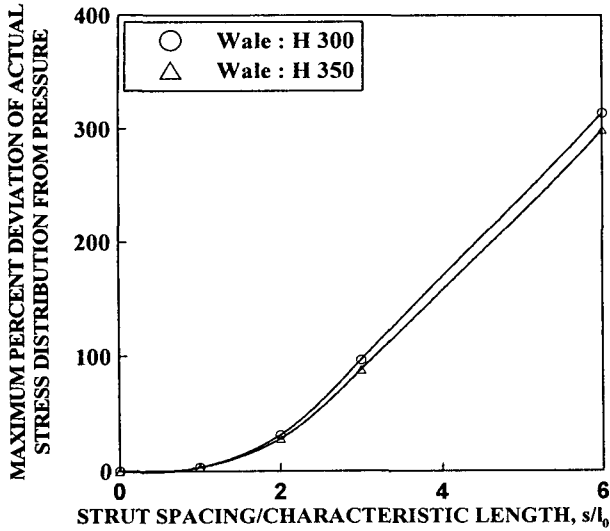


그림 6 굴착깊이 10 m에 대한 띠장별 최대토압편차

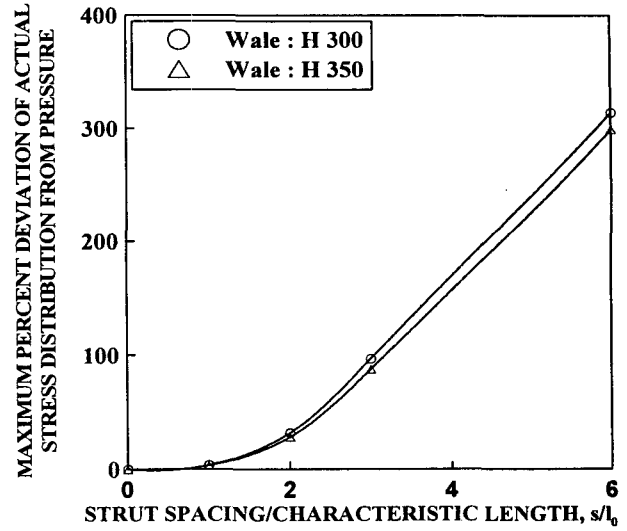


그림 7 굴착깊이 15 m에 대한 띠장별 최대토압편차

표 5 띠장강성과 스트럿 간격에 대한 흙막이벽체의 최대토압편차

굴착깊이 (m)	띠장 규격	l_0	$2l_0$	$3l_0$	$6l_0$
10	H 300×300×10×15	3.6%	31.7%	97.1%	313.9%
10	H 350×350×12×19	3.5%	28.5%	88.6%	298.9%
15	H 300×300×10×15	3.9%	32.0%	96.9%	313.8%
15	H 350×350×12×19	3.5%	28.4%	87.8%	298.8%

그림 6-7과 표 5에서와 같이 굴착깊이별 띠장강성이 고려된 흙막이벽체의 해석결과를 살펴보면 굴착깊이 10 m의 경우, H 300×300×10×15 규격과 H 350×350×12×19 규격으로 시공된 흙막이벽체에서 characteristic length(l_0)의 1배, 2배, 3배 및 6배에 해당하는 스트럿 설치간격에 따른 해석결과가 차이를 보였으며 띠장강성이 큰 경우, 스트럿 설치간격을 고려한 흙막이벽체의 최대토압편차가 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 또한 굴착깊이 15 m의 경우에서도 같은 해석결과를 확인할 수 있었다. 띠장조건에 따른 흙막이벽체의 토압분포 해석결과를 통하여 흙막이벽체의 스트럿 간격이 characteristic length(l_0)의 1배, 2배, 3배 및 6배로 증가할수록 평면변형을 조건의 토압과 상당한 토압편차를 알 수 있었으며 characteristic length(l_0)의 5배에 해당하는 스트럿 설치간격을 넘어서면 토압 최대편차가 200%를 초과함을 확인하였다. 그러므로 앞서 언급하였던 지반조건, 굴착깊이, 띠장조건과 스트럿 설치간격을 고려한 흙막이벽체의 거동에서 characteristic length(l_0)의 5배에 해당되는 스트럿 설치간격을 넘어서면 스트럿으로 지지된 흙막이벽체의 거동을 평면변형을 조건으로 가정하여 해석할 수 없을 것으로 판단된다.

3.5 Characteristic length에 따른 흙막이벽체의 거동특성

Characteristic length(l_0)의 산정에 따른 흙막이벽체의 거동특성을 파악하기 위하여 해석을 수행하였다. 굴착깊이 15 m, 중간조밀의 지반조건에서 띠장강성의 차이에 따른 characteristic length(l_0)을 산정하여 해석을 수행하였다. characteristic length(l_0)는 2 m, 2.4 m와 3 m로 산정되었으며 흙막이벽체의 해석결과는 그림 8과 표 6과 같다.

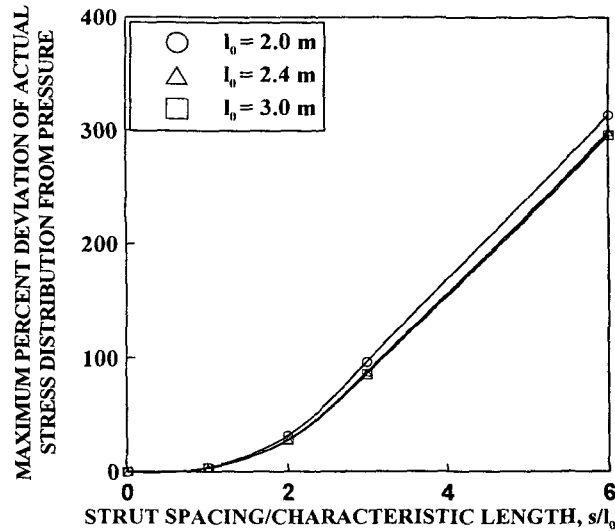


그림 8 Characteristic length에 따른 최대토압편차

표 6 Characteristic length(l_0)에 따른 흙막이벽체의 최대토압편차

	l_0	$2l_0$	$3l_0$	$6l_0$
2.0 m	3.9%	32.0%	96.9%	313.8%
2.4 m	3.5%	28.4%	87.8%	298.8%
3.0 m	3.4%	27.9%	86.3%	296.0%

Characteristic length(l_0)에 따른 스트럿 설치간격별 흙막이벽체의 최대토압편차를 보면 characteristic length(l_0)가 2 m의 경우, characteristic length(l_0)의 1배, 2배, 3배 및 6배의 스트럿 설치간격에서 각각 3.9%, 32.0%, 96.9%와 313.8%의 최대토압편차를 나타내었다. 반면에 characteristic length(l_0)가 길수록 스트럿 설치간격에 따른 최대토압편차가 줄어드는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 띠장강성의 증가로 인하여 흙막이벽체에 유발되는 토압의 편차가 상대적으로 감소하는 것으로 판단된다. 또한 띠장강성의 증가로 인하여 characteristic length(l_0)가 3.0 m일 경우, 흙막이벽체의 평면변형을 해석이 가능한 최대 스트럿 설치간격은 characteristic length(l_0)의 약 5배로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 버팀보 설치간격에 의하여 흙막이 구조물의 수평단면을 따라 변화하는 흙막이 구조물의 거동특성을 알아보았다. 지반조건, 굴착깊이 및 띠장강성을 고려하여 characteristic length를 산정하고 characteristic length가 고려된 버팀보 설치간격에 따른 해석결과를 분석하여 평면변형을 조건의 결과와 비교·분석을 수행하였다. 또한 평면변형을 조건에서의 토압분포와 스트럿 설치간격을 고려한 토압분포의 최대편차를 비교·분석하여 흙막이 구조물의 해석시, 평면변형을 해석의 적용범위에 대하여

알아보고 기존 버팀보 흠막이벽체보다 축강성이 크고 스트럿 설치간격이 넓은 조립식 버팀보로 지지된 흠막이벽체의 해석시, 평면변형을 해석의 적용여부에 대하여 알아보았다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 지반조건에 대하여 흠막이벽체의 스트럿 설치간격에 따른 벽체의 거동특성을 분석한 결과, 조밀한 지반일수록 characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배에 해당하는 스트럿 설치간격으로 시공된 흠막이벽체의 최대토압편차가 점점 증가함을 확인하였다.
- 2) 굴착깊이별 흠막이벽체의 거동특성을 알아본 결과, 굴착깊이에 따른 흠막이벽체의 토압편차는 거의 없는 것으로 나타났으며 characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배에 해당하는 스트럿 간격에 따른 흠막이벽체의 최대토압편차가 점점 증가함을 알 수 있었다.
- 3) 흠막이벽체의 띠장조건에 따른 토압분포의 변화를 알아본 결과, 띠장강성이 증가할수록 characteristic length(l_0)의 1, 2, 3 및 6배에 해당하는 스트럿 간격에 따른 흠막이벽체의 최대토압편차가 줄어들음을 알 수 있었다.
- 4) Characteristic length(l_0)에 따른 흠막이벽체의 토압분포를 알아본 결과, characteristic length(l_0)가 길수록 띠장강성의 증가로 인하여 상대적으로 흠막이벽체의 최대토압편차가 줄어들음을 확인하였다.
- 5) 흠막이벽체의 스트럿 간격이 characteristic length(l_0)의 1배, 2배, 3배 및 6배로 증가할수록 평면변형을 조건의 토압과 상당한 토압편차를 알 수 있었으며 characteristic length(l_0)의 5배에 해당하는 스트럿 설치간격을 넘어서면 토압 최대편차가 200%를 초과함을 확인하였다. 그러므로 지반조건, 굴착깊이, 띠장조건과 스트럿 설치간격을 고려한 흠막이벽체의 거동에서 characteristic length(l_0)의 5배에 해당되는 스트럿 설치간격을 넘어서면 스트럿으로 지지된 흠막이벽체의 거동을 평면변형을 조건으로 가정하여 해석할 수 없을 것으로 판단된다.
- 6) 기존 버팀보 흠막이벽체보다 축강성이 큰 조립식 버팀보로 지지된 흠막이벽체의 경우, 기존 버팀보에 비해 상대적으로 버팀보 설치간격이 넓기 때문에 characteristic length(l_0)를 고려한 흠막이벽체의 수평단면을 따라 변화하는 거동특성을 파악하여 흠막이벽체의 최대토압편차를 알아보고 평면변형을 조건에 따라 해석수행의 여부를 확인할 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Briaud, J.L. and Kim, Nak-Kyung, (1998) "Beam-Column Method for Tieback Walls", ASCE, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124 No.1, pp67-79.
2. Hetenyi. (1946), *Beams on elastic foundation*, University of Michigan Press.
3. Tsui, Y. (1973), *A Fundamental Study of Tied-back Wall Behavior*, Ph.D. Thesis, Duke Univ., Durham, N.C., Dissertation Abstr. Int. Order No. 752435.
4. Tsui, Y. and Clough, G.W. (1974), "Plane strain approximations in finite element analyses of temporary walls", *Proc. ASCE Geotechn. Conf. Austin, Texas.*