

제 5 장 성토사면에 설치된 억지말뚝의 사면안정효과

5.1 개요

그림 5.1의 해석단면은 수정된 해석프로그램에 대한 특성분석을 실시하기 위하여 일반적인 성토사면의 형태를 가상적으로 작성되었다. 해석단면에 대한 물성치는 일반적으로 현장사면에 적용되는 내용을 기준으로 작성하였다. 그림 5.1에서 보는 바와 같이 지표면 매립층하부에 약 20m 심도의 연약층이 존재하는 대상지반에 6M 성토가 실시될 경우, 사면경사부분에 억지말뚝을 설치하여 성토사면의 활동에 대한 안정 및 성토체의 상재하중으로 인한 연약층의 측방유동을 방지하기 위한 억지말뚝의 거동을 분석한다.

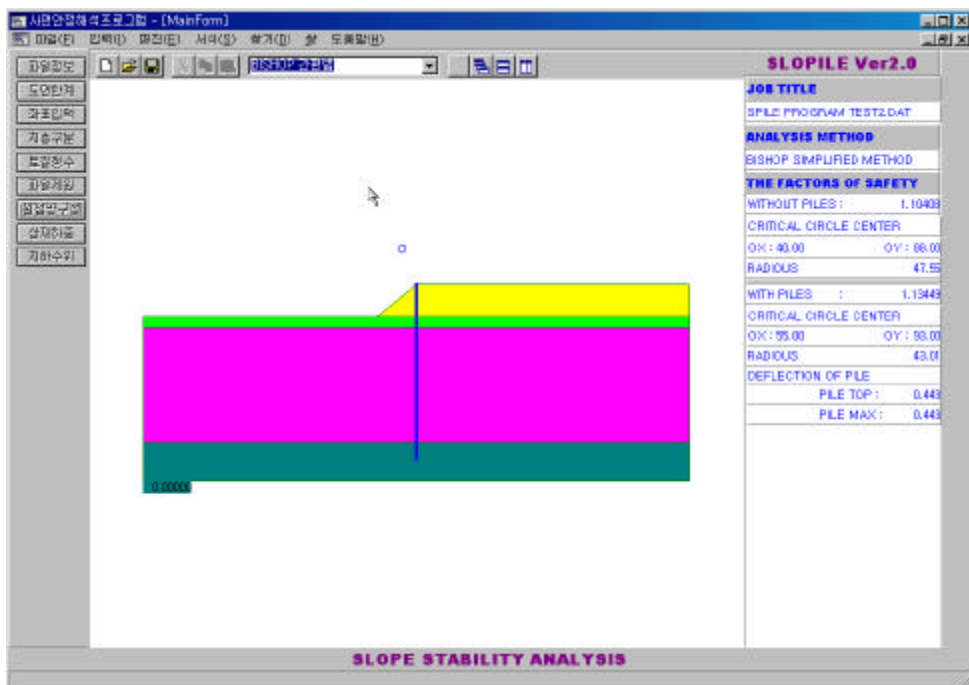


그림 5.1 해석대상 사면도

그림 5.1에서 보는 바와 같은 토층에 대한 토질정수는 상부 성토층에 대하여는 내부마찰각이 27° , 습윤단위중량과 포화단위중량이 각각 1.8 t/m^3 과 1.9 t/m^3 이다.

또한, 매립층은 내부마찰각이 25° , 습윤단위중량과 포화단위중량이 각각 1.7

t/m^3 과 $1.8 t/m^3$, 하부의 연약층의 경우는 비배수 전단강도가 $2.5 t/m^2$ 이며, 습윤단위중량과 포화단위중량은 각각 $1.65 t/m^3$ 과 $1.75 t/m^3$ 이다. 한편 연약층 하부의 풍화토에 대해서는 내부마찰각을 35° 로 하고 습윤단위중량은 $2.0 t/m^3$ 로 포화단위중량은 $2.1 t/m^3$ 을 사용한다.

이와 같은 성토사면의 경우에는 일반적인 파괴형태는 성토체의 상부지역에서 파괴가 발생하는 경우가 일반적이며 연약층의 심도가 깊을 경우에는 파괴면의 심도가 대단히 깊게 발생한다. 본 장에서는 성토사면의 파괴면이 연약층내에서 일어나는 것으로 가정하였으며, 또한 기존에 사용된 해석법과 비교·연구(Fellenius 법과 Bishop 간편법)를 실시하기 위하여 동일한 파괴원에 대해서 특성분석을 실시하였다.

억지말뚝으로는 H-Pile($H-300 \times 300 \times 10 \times 15$)을 사용하였고 말뚝해석에 적용되는 직경은 420mm로 선정하고 하부 풍화토층 이하까지 근입시켜 사용하기로 하고 말뚝의 설치간격은 1.25m로 하여 말뚝의 간격비 D_2/D_1 을 0.65으로 한다. 안정해석을 실시하기 위한 그밖의 사항에 대하여는 다음과 같이 결정하기로 한다.

- 1) 지하수위면은 지표면과 평행하게 존재한다.
- 2) H-Pile의 탄성계수는 $2.1 \times 10^6 kg/cm^2$ 로 한다.
- 3) H-Pile의 허용휨응력과 허용전단응력은 각각 $1400 kg/cm^2$ 와 $800 kg/cm^2$ 로 한다.
- 4) 말뚝의 구속조건에 대하여는 말뚝머리를 회전구속으로 하고 말뚝선단은 소켓형태로 설치된 것으로 하여 힌지로 간주한다.
- 5) 지반계수 E_s 에 대하여는 사면활동면 상부 매립층의 지반계수 E_{s1} 은 $91 t/m^2$ 로 하고 연약층에 대하여는 사면활동면의 상부에 존재하는 경우와 하부에 존재하는 경우로 구분하여 각각 $37.5 t/m^2 (= 15c_u)$ 와 $100 t/m^2 (= 40c_u)$ 로 한다. 한편 사면활동면 하부의 풍화토층의 지반계수는 $350 t/m^2$ 로 한다.

5.2 사면 안정에 영향을 미치는 요소

5.2.1 지반계수의 영향

사면의 안정에 기여하는 말뚝의 효과에 대한 고찰에서 사면안전율에 관계하는 지반계수의 영향은 그림 5.2에서 보는 바와 같이 가장 큰 변수로 작용함을 볼 수 있다. 또한 해석단면에 사용되는 지반계수는 앞에서 제안되었던 이론을 기준으로 적용한다. 즉 파괴 활동면을 기준으로 활동면 상하의 지반계수를 E_{s1} , E_{s2} 로 구별하여 그 비를 함수로 놓고 사면의 안전율을 구하면 지반계수비 E_{s1}/E_{s2} 의 증가에 따라 사면안전율은 급격히 증가한다. 활동면 상부 지반계수 E_{s1} 의 값이 E_{s2} 에 접근하면, 즉 사면 활동면 상하의 지반반력계수가 같아지면 사면안전율은 소요안전율을 만족할 정도로 크게 된다.

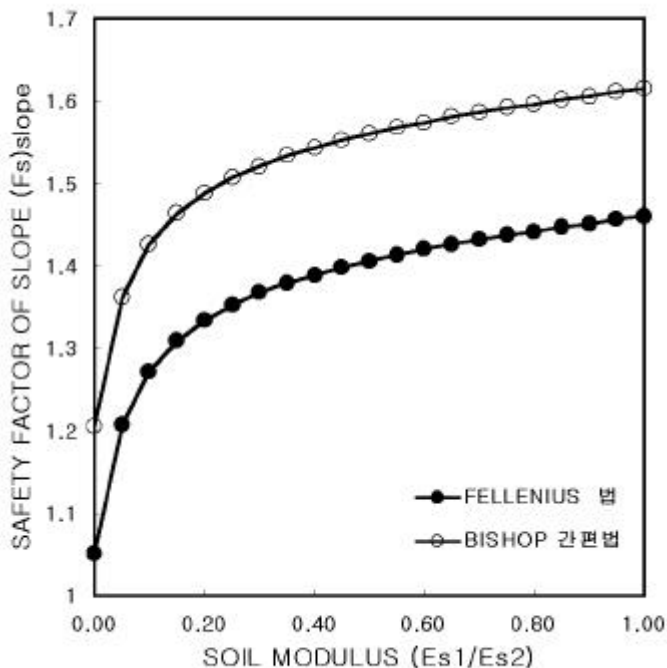


그림 5.2 지반계수에 따른 사면안전율 변화

이때 적용된 지반계수는 사면활동면 상부지반의 지반저항효과를 March & Lacroix가 제시한 값 중 매립층에서는 E_{s1} 을 느슨한 상태의 모래에 대한 최소값인 91 t/m^2 로 하였고, 연약층에서는 $15 c_u$ 에 해당하는 37.5 t/m^2 로 하였다.

그림 5.2에서 보는 바와 같이, 말뚝의 지반저항을 무시한 경우 사면의 최소안전율은 Fellenius 방법의 경우 1.05, Bishop 간편법의 경우 1.21으로서 말뚝이 설치되지 않은 경우 사면의 안전율 각각 1.04, 1.19에 비해 저항효과가 적다. 그러나, 지반효과를 고려한 경우, 억지말뚝이 설치된 사면의 안전율은 초기 E_{s1} 의 값의 증가에 따라 급격히 증가를 나타낸 후 E_{s1} 값이 일정한 지반저항효과를 가지는 값에 도달한 경우 부터는 증가량이 점차 완화되는 경향을 볼 수 있다.

또한 말뚝이 설치된 사면의 안정성은 활동면 상부의 말뚝이 배면지반으로부터 지반저항력의 받는 정도의 크기에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 지반계수의 결정은 안정해석에 중요한 영향을 미치게 되므로 신중을 기하여야 할 것이다.

이상에서 검토한 바와 같이 지반계수를 고려하여 사면안정을 검토시에는 지반계수값을 March & Lacroix 및 Poulos의 제시값 범위내에서 사면자체의 안정성을 감안하여 결정함이 바람직하다.

5.2.2 말뚝간격비의 영향

말뚝의 간격비에 대한 영향은 간격비(D_2/D_1)을 변수로 하여 살펴보면 그림 5.3과 같다. 즉, D_2/D_1 을 0.1에서 0.99까지 변화시킬 때 두부 회전구속과 선단한지의 경우에 말뚝간격비에 따른 사면안전율의 영향을 고려하기 위해 말뚝간격비를 일정하게 증가시켜 사면안전율을 구하면 그림 5.3와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 말뚝의 간격비가 증가할수록 즉, 말뚝과 말뚝사이의 간격이 넓어지면 사면안전율이 일정한 간격비에 도달할 때까지 증가하다가 이후 급격히 감소하고 있음을 보여주고 있다.

그림에서 나타난 것과 같이 말뚝의 효과를 최대화하기 위해서는 말뚝간격비는 0.70에서 사면안전율이 최대임을 알 수 있다. 즉 이는 말뚝의 간격이 좁아짐에 따라 사면의 안정효과가 큼을 알 수 있고 특히 말뚝을 너무 좁은 간격으로

설치할 경우 사면안정효과가 오히려 감소할 수도 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 말뚝간격이 좁아짐으로 인해 말뚝에 작용하는 토압이 과다하게 커짐으로 인해 다소 떨어지게 되기 때문이다. 따라서, 소요안전율을 만족하고 말뚝효과를 극대화 하기 위해서는 말뚝간격비는 0.60 ~ 0.80 사이의 값을 적용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

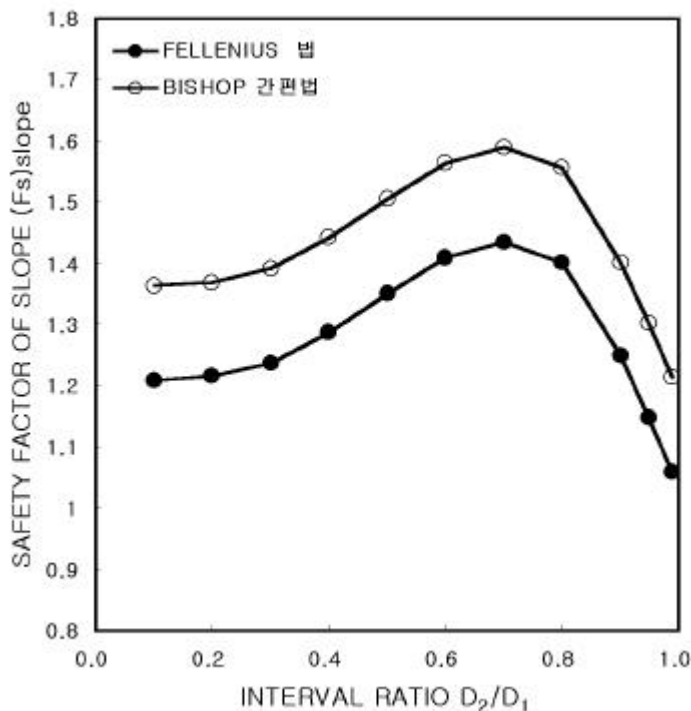


그림 5.3 말뚝의 간격비에 따른 사면안전율 변화

5.2.3 말뚝 열수의 영향

그림 5.4은 그림 5.1의 해석대상지반에 성토사면에 역지말뚝을 설치하는 경우 말뚝이 없는 경우부터 5열의 말뚝을 설치하였을 경우의 사면안전율을 도시한 것이다. 여기에서 말뚝의 열수를 증가시킴에 따라 사면안전율은 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 여기서 일정한 선형을 나타내지 않는 것은 말뚝의 설치위치의

변화에 따라 사면 파괴면 상부의 Pile의 길이가 다르게 적용되기 때문이다.

설계시 적용한 말뚝의 열수는 첫 번째 말뚝의 위치를 조정하면서 말뚝이 최대효과를 나타내는 위치를 선정한 후 이것이 소요안전율을 만족하지 못할 경우에 말뚝의 열수를 증가시키면서 사면안전율이 소요안전율을 만족하도록 반복 수행한다. 그림에서 보는 바와 같이 소요안전율 1.3을 만족하려면 보강되는 말뚝열을 2열이상 설치하여야함을 알 수 있다.

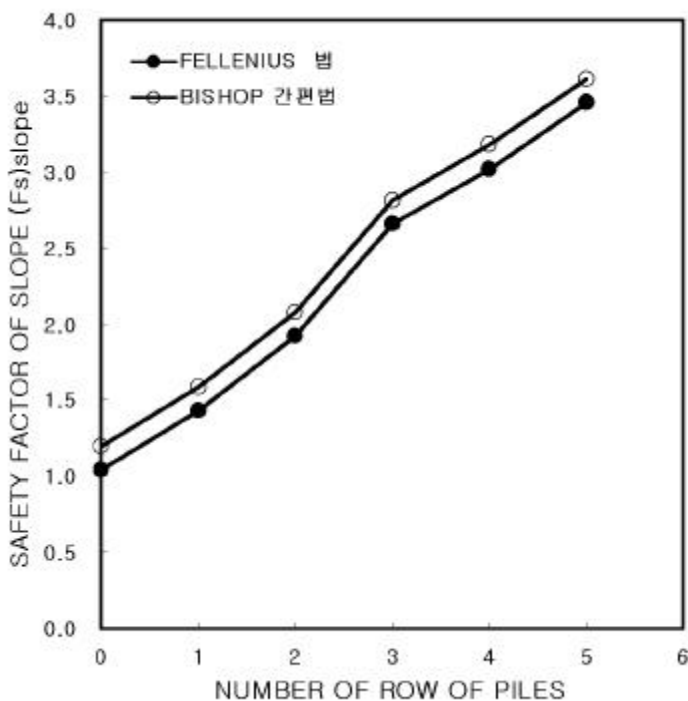


그림 5.4 말뚝열수에 의한 사면안전율 변화

5.2.4 말뚝 강성의 영향

말뚝의 강성에 대한 사면의 안정효과 영향은 그림 5.5과 그림 5.6와 같이 나타난다. 동일말뚝의 직경을 가지는 말뚝에 대하여 두께를 증가시키는 방법으로 말뚝 강성을 증가시켰다. 이 그림으로부터 말뚝의 강성이 다른 두 종류의 말뚝(대표치수는 H-300 X 300과 H-350 X 350)을 선택하여 말뚝의 위치를 사면선단부

분에 설치하였을 경우 사면안전율은 강성의 증가와 함께 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 한편, 그림 5.6는 말뚝 강성의 변화에 따른 말뚝의 변위를 표시하고 있다. 이 결과에 의하면 말뚝의 단면계수를 증가시킴에 따라 말뚝의 변위가 증대되고 있음을 보여주고 있다. 이는 모순된 것으로 보일 수도 있으나 단면의 강성을 증대 시킴에 따라 말뚝이 받을 수 있는 측방토압의 값이 커지기 때문에 나타난 결과이다.

즉 말뚝에 작용하는 측방토압은 말뚝의 강성이 담당할 수 있는 최대치로 결정되므로 강성이 낮은 말뚝은 적은 측방토압 밖에 받을 수 없으며 강성이 큰 말뚝은 큰 측방토압을 받게되어 사면의 안정에는 큰 기여를 하게되나 말뚝의 변위는 많이 발생하게 된다.

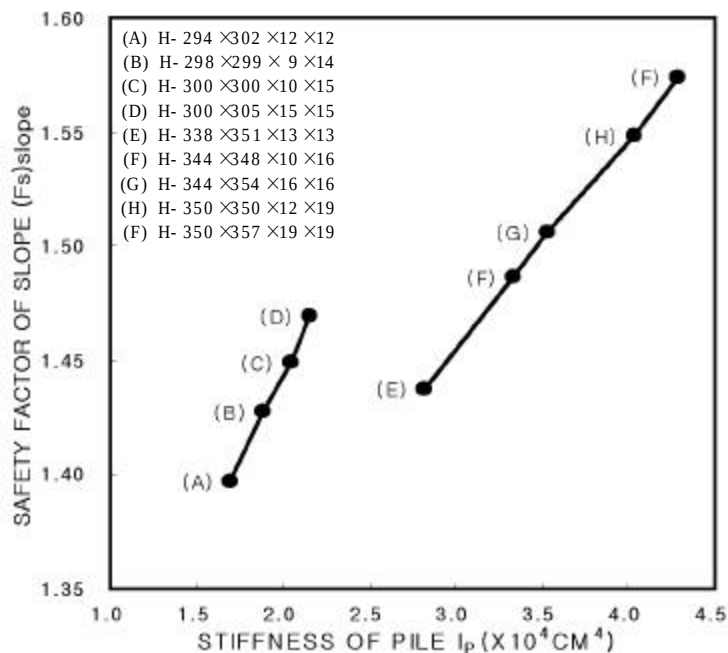


그림 5.5 말뚝 강성의 변화에 따른 사면안전율 변화

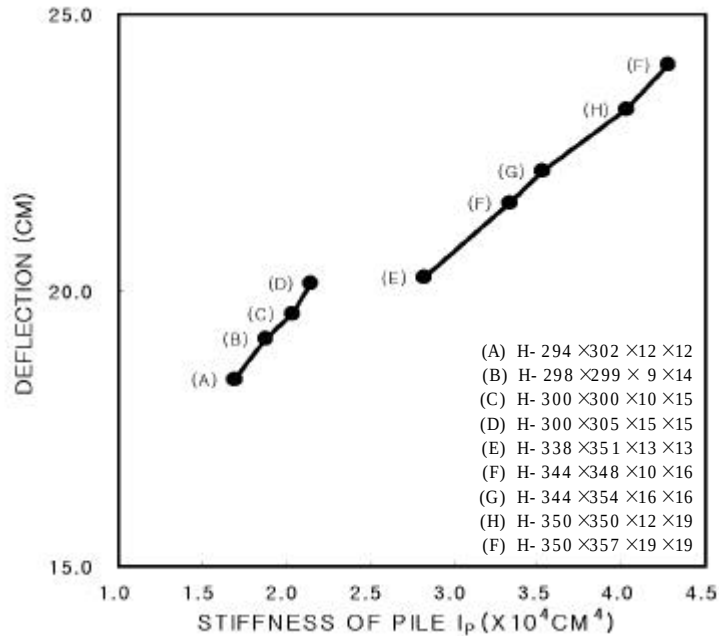


그림 5.6 말뚝 강성의 변화와 말뚝변위와의 관계

5.2.5 말뚝두부의 구속조건에 의한 영향

말뚝두부의 구속조건은 말뚝의 시공상태에 따라 자유, 힌지, 회전구속 및 고정 등의 구속조건으로 분류할 수 있다. 예를 들어 말뚝을 설치시 말뚝의 머리를 지중보로 연결하게 되면 이것은 말뚝의 두부가 회전이 구속되어 두부의 구속조건을 회전구속으로 볼 수 있게 되고 말뚝 두부에서의 변화가 구속되게 되어 힌지의 조건으로 간주할 수 있다. 또한 상기 두가지를 복합하여 말뚝의 두부를 지중보로 연결하고 또한 앵커를 설치하게 되면 말뚝두부는 변위와 회전이 모두 구속되게 되어 고정의 조건으로 생각할 수 있게 된다. 그림 5.7은 Bishop 간편법, 그림 5.8은 Fellenius법에 대한 말뚝의 간격비에 따른 말뚝두부의 구속조건을 고려한 사면안전을 변화를 도식한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사면의 안전율은 힌지인 경우에 안전율이 가장 크게 나타나고 있으며 성토사면의 역지말뚝에서 말뚝의 구속조건에 의한 사면안전율은 힌지인 경우에 말뚝이 사면안전율에 가장 많은 기여를 하고 회전구속, 고정 순으로 기여도가 작아지며 자유인 경우에 기여도가 아주 작아진다.

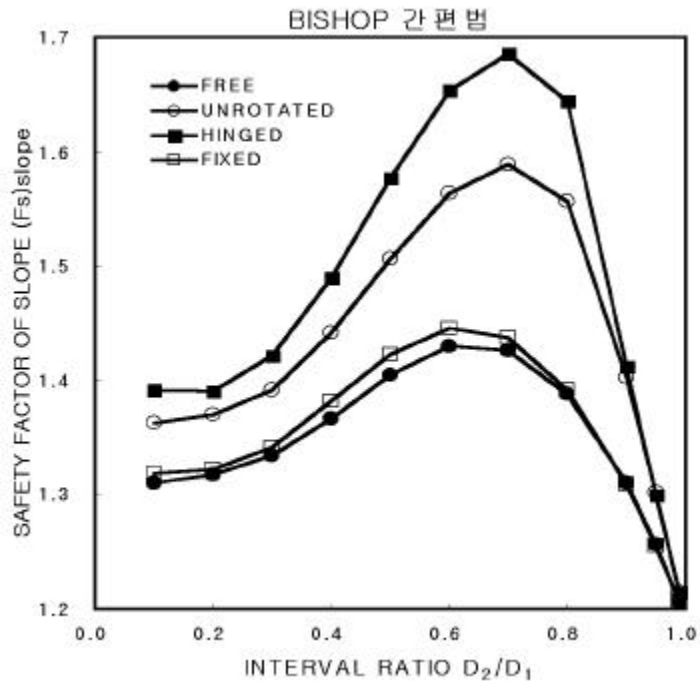


그림 5.7 말뚝의 구속조건에 따른 사면안전을 변화

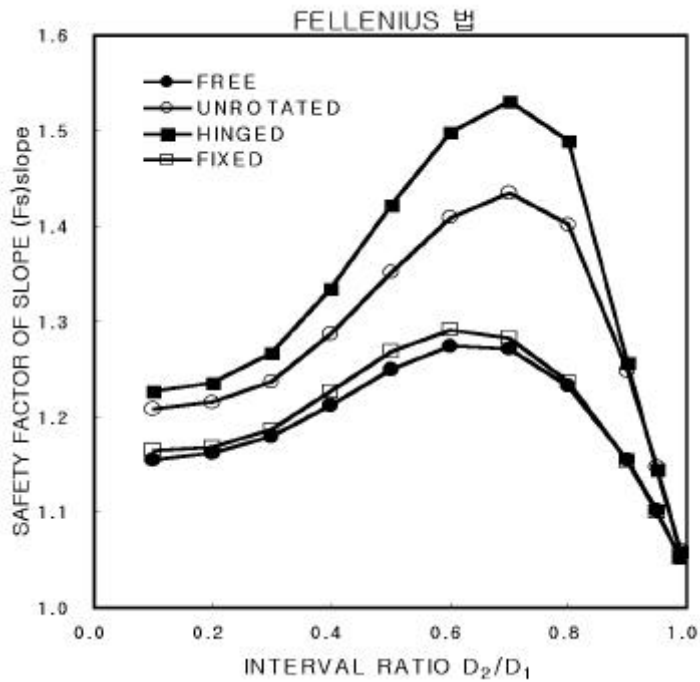


그림 5.8 말뚝의 구속조건에 따른 사면안전을 변화

5.2.2절에서 회전구속의 경우 말뚝간격비에 따른 사면의 안전율변화가 말뚝간격비가 0.7인 경우 최대의 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 여기서 말뚝 두부의 구속조건에 따른 변화를 살펴보면 힌지와 회전구속의 경우 말뚝간격비가 0.7에서 고정과 자유의 경우에는 이보다 적은 0.6에서 최대의 말뚝효과를 나타내는 것으로 나타났다. 이것으로부터 힌지와 회전구속의 경우는 0.6 ~ 0.8의 범위 고정과 자유의 경우는 0.5 ~ 0.7의 범위에서 소요안전율을 만족하고 말뚝효과를 극대화 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fellenius 방법과 Bishop 간편법 둘 다 동일하게 나타났다.

5.3 말뚝의 거동에 영향을 미치는 요소

5.3.1 지반계수의 영향

그림 5.9는 지반계수비 변화에 따른 말뚝의 최대수평변위(말뚝 두부의 수평변위와 동일)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지반계수비가 증가함에 따라 말뚝의 변위는 급격히 감소하지만 지반계수비가 일정한 단계를 지나면 말뚝의 변위 감소율은 일정하게 된다.

따라서 성토사면 억지용 말뚝 설계시에는 사면의 안전율을 어느 정도 확보하여야만 말뚝의 변위도 감소시키고 말뚝에 의한 사면안전율 효과도 증대된다.

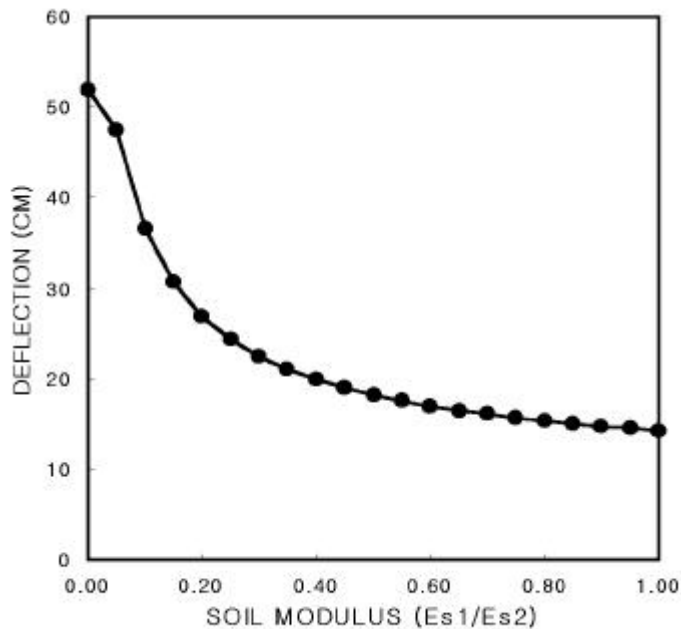
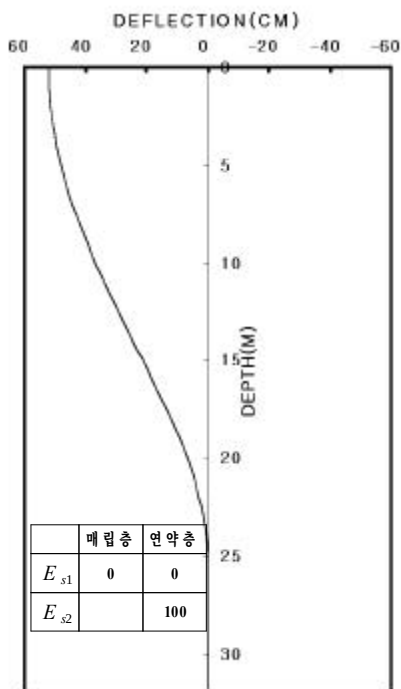


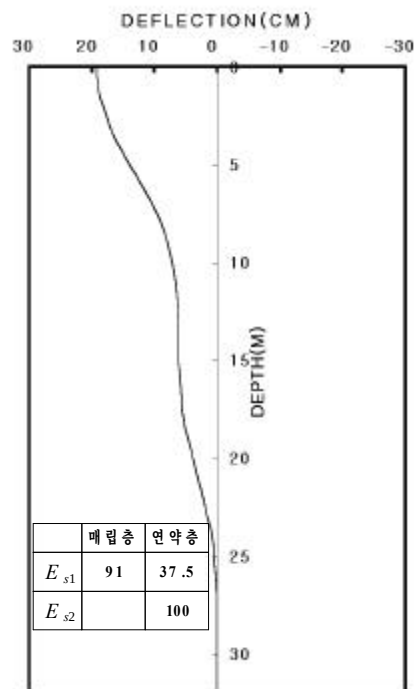
그림 5.9 지반계수에 따른 말뚝두부 및 최대변위

그림 5.10은 지반계수 E_{s1} 의 변화에 따른 말뚝의 변위를 나타낸 것이다. 그림 5.10(a)의 경우는 사면활동면 상부의 지반저항효과를 무시한 경우의 말뚝변위를 나타낸 것으로 말뚝의 최대 변위는 말뚝 두부에서 51.848cm가 발생하였다. 그림 5.10(b)의 경우는 사면활동면 상부의 지반저항효과를 March & Lacroix가 제시

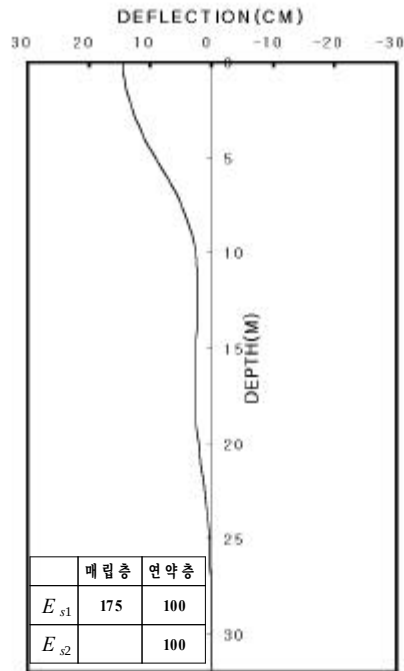
한 값중 매립층에서는 E_{s1} 을 느슨한 상태에 대한 최소값인 91 t/m^2 로 하였고 연약층에서는 비배수 전단강도의 $15C_u$ 에 해당하는 37.5 t/m^2 로 하였을 때 말뚝의 변위를 나타낸 것으로 여기에서 말뚝의 최대변위는 말뚝 두부에서 19.131cm 가 발생하였다. 그림 5.10(c)의 경우는 활동면 상하부의 지반계수 E_{s1} 의 값이 E_{s2} 의 값과 같은 값을 적용할 경우 즉 사면활동면 상부의 지반저항효과를 최대로 적용하였을 경우의 말뚝변위를 나타낸 것이다. 여기서 말뚝의 최대변위는 말뚝 두부에서 14.286cm 가 발생하였다. 그림 5.10에서 보는 바와 같이 말뚝의 변위양상이 말뚝 심도 6 ~ 10M에서 지반계수비에 따른 변위의 감소량이 가장 심하게 나타나는 것은 상부 매립층의 지반에 의한 지반저항의 구속효과가 큼을 의미하며 매립층 상부의 성토체에 대한 상부활동면에 대한 지반계수를 말뚝의 설치위치가 사면선단에 위치하는 것을 고려하여 지반저항 효과를 무시하였기 때문이다.



(a)



(b)



(c)

그림 5.10 지반계수에 따른 말뚝의 변위

5.3.2 말뚝의 두부구속 조건의 영향

말뚝의 구속조건에 따른 사면안전율의 영향을 알기 위해 말뚝의 선단 및 두부의 구속상태를 4가지로 변화시키면서 사면안전율에 대한 말뚝의 효과는 5.2.5 절의 그림 5.7 그림5.8과 같이 말뚝 선단부분을 힌지 상태로 하고 말뚝 두부의 조건을 (자유, 회전구속, 변위구속, 고정지지)의 4가지 상태로 변화시켰다. 그림 5.7 그림 5.8에서 보는 바와 같이 사면안정에 대한 말뚝의 효과는 두부가 힌지인 경우가 가장 크며 그 다음으로 회전구속, 고정, 자유지지의 순으로 나타났다. 고정지지의 경우 효과가 적게 나타난 결과는 말뚝의 길이가 길고 사면파괴면이 대단히 깊은 위치에 존재하며 말뚝 머리에서 발생하는 휨 응력이 대단히 크기 때문으로 생각된다.

또한, 자유지지의 경우에는 말뚝의 변위에 따른 지반저항효과를 기존에 선형적으로 증가시키던 것을 본 연구에서 지반의 극한수평반력을 고려하여 극한수평

반력까지 한계치를 적용하였기 때문에 말뚝의 변위는 가장 크게 발생하였으나 말뚝의 효과는 적게 발생하였다.

표 5.1 말뚝의 변위량

구분	회전구속		힌지		자유		고정	
	위치	발생량	위치	발생량	위치	발생량	위치	발생량
두부수평변위 (cm)	0	19.131	0	0	0	24.947	0	0
최대수평변위 (cm)	0	19.131	13	9.043	0	24.947	14	4.9
최대 모멘트 (t · m)	0	17.78	4	17.78	7	17.78	0	17.78
최대전단력 (t/m ²)	6	11.19	21	6.9	6	6.877	0	6.259

그림 5.11은 말뚝 두부의 구속조건에 따른 말뚝의 수평변위, 휨모멘트 및 전단력 분포상태를 나타내고 있다. 말뚝의 선단은 암반에 관입되어 있는 관계로 힌지로 가정하였으며 말뚝의 두부는 말뚝의 시공상태에 따른 구속조건의 변화를 감안하여 이것을 회전구속, 힌지, 자유 및 고정의 4가지 경우로 취급하여 보았다.

말뚝에 작용하는 측방토압은 지중으로 내려 갈수록 증가하는데 반해 이에 저항하는 지반계수는 층마다 일정하게 설정함으로써 말뚝의 최대변위는 측방토압이 크게 작용하는 지중에서 발생하는 것으로 판단된다. 말뚝의 거동을 요약하면 표 5.1와 같다.

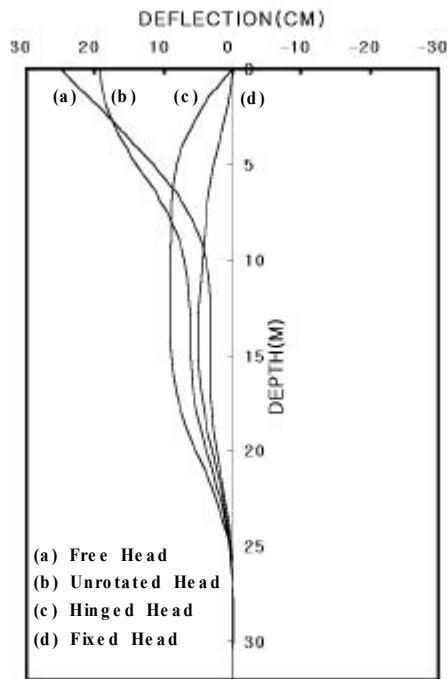
그림 5.11는 말뚝의 두부의 구속조건에 따른 말뚝의 변위, 모멘트 및 전단력의 발생 상태를 도시한 것이다.

먼저 그림 5.11(a)에 나타난 수평변위에 대해서 살펴보면, 말뚝두부가 자유지인 경우 말뚝두부에서 가장 많이 발생하며 다음으로는 회전구속상태에서 많이 발생함을 알 수 있다. 그러나, 힌지와 고정의 경우는 매우 적게 발생되고 있다. 또한 모멘트는 고정상태에서 말뚝 두부에서 가장 많이 발생하고 있으며 자유지

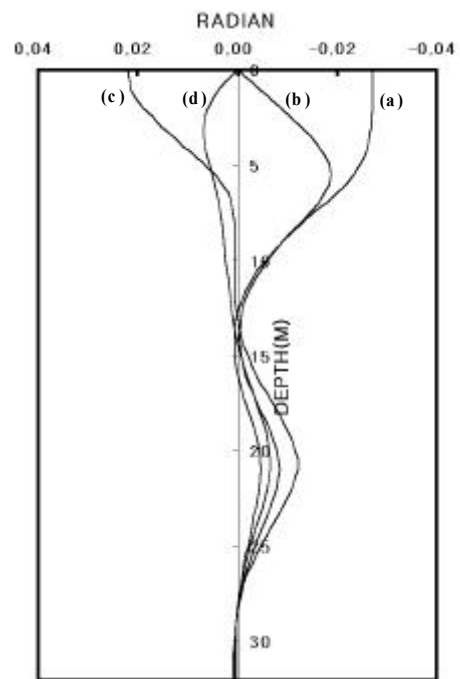
지상태는 매립층과 연약층이 접하는 부분에서 가장 많은 모멘트가 발생하고 있다. 전단력은 회전구속상태 일때 매립층과 연약층이 접하는 부분에서 가장 많이 발생함을 알 수 있다.

상기에서와 같이 말뚝두부의 변위는 자유, 회전구속, 힌지, 고정의 순으로 발생하고 있으며 말뚝의 최대변위는 자유와 회전구속인 경우 거의 비슷하게 발생하고 힌지, 고정의 순으로 나타나고 있다.

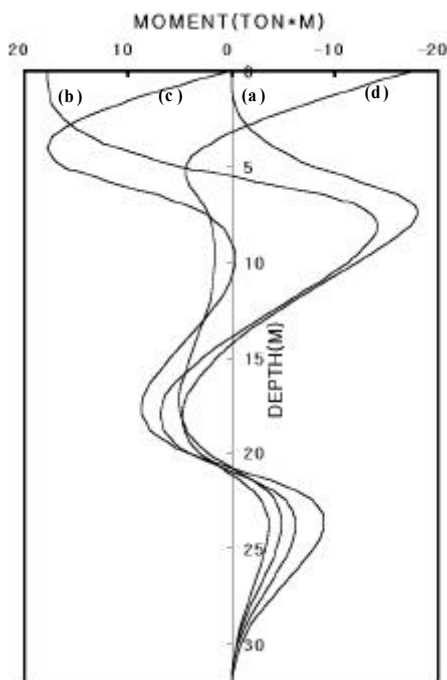
한편, 그림 5.11(c)는 모멘트를 도시한 것으로 말뚝의 최대 휨모멘트는 고정과 회전구속인 경우에는 말뚝두부에서 힌지의 경우는 말뚝두부로부터 4m 지점에서, 자유의 경우에는 7m에서 최대휨모멘트가 발생하고 있다. 그림 5.11(d)는 전단력에 대한 것으로 두부구속조건이 고정인 경우에는 최대전단력이 말뚝두부에서 발생하고 있으며 자유, 회전구속 및 힌지인 경우에는 각각 약 6m, 6m, 21m 지점에서 발생하고 있다.



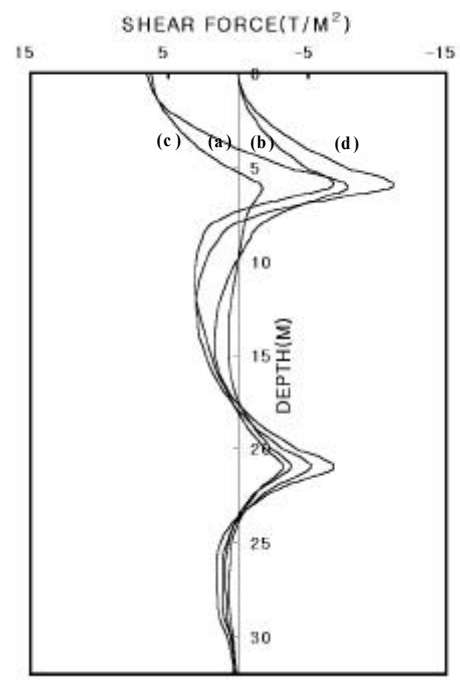
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5.11 말뚝 두부의 구속조건에 따른 말뚝의 거동

5.4 성토사면 억지말뚝의 설계법

앞절에서는 사면안정에 영향을 미치는 요소 및 성토사면에 설치된 억지말뚝의 거동에 영향을 미치는 요소들에 대하여 검토하여 보았다. 이를 토대로 하여 성토사면에 대한 억지말뚝의 설계법을 다음과 같이 제시하여 보고자 한다.

성토사면에 대한 억지말뚝의 설계를 위해서는 우선 대상지반에 대한 지질 및 지형 등 지반에 대한 실내시험 및 현장조사 등에 의한 지반조사가 수행되어 토질 정수와 단면도 등 지반조건을 정확히 결정하여야 한다. 지반조건이 결정되면 그 단면에 대한 사면안정해석을 실시하여 사면에 대한 안정진단을 하여야 한다. 이 안정검토 결과 사면이 소요안전율을 확보하면 문제는 간단하나 그렇지 못한 경우 사면에 대한 안정보강은 필수적이다.

우선 말뚝두부의 구속조건으로는 말뚝을 설치시 말뚝두부는 말뚝을 횡으로 연결시키거나 Tie rod, Anchor 등에 의해 구속을 받게 된다. 그리고, 말뚝의 선단 또한 말뚝의 관입깊이에 따라 선단에서의 조건이 결정되어진다. 따라서, 억지말뚝의 설치를 위해서는 우선 그 말뚝의 설치방법에 따라 말뚝의 두부 및 선단의 구속조건이 결정되어야 한다. 말뚝의 구속 조건으로는 자유, 회전구속, 힌지, 고정 4경우를 생각할 수 있다.

말뚝의 두부 및 선단의 구속조건이 결정되면 다음으로 설치할 말뚝의 직경, 두께 및 간격 등을 적당히 선정하여야 하고 또한 말뚝의 열수 및 위치도 결정하여야 한다.

이러한 말뚝에 대한 선정이 끝나면, 그 말뚝에 대한 안정검사를 실시, 선정된 말뚝이 너무 크거나 작지 않게 검토를 하고 말뚝이 부적당한 경우는 다시 Feed Back하여 말뚝을 재선정 하면 된다.

5.5 요약

본 장에서는 성토사면 억지말뚝이 설치된 사면의 안정성 해석을 위하여 수동 말뚝에 제안된 측방토압 산정식을 이용하여 말뚝 및 사면의 안정으로 검토하여 보았다. 특히, 말뚝안정시 사면활동면 상부 토괴 속의 억지말뚝 배면에 작용하는 지반계수를 사용하므로써 지반반력을 고려할 수 있도록 하였다. 또한 지반계수와 변위에 따른 지반반력의 작용을 극한수평저항력으로 한계치를 적용함으로써

보다 현실적인 해석을 수행할 수 있었다. 그리고 해석예를 수행함으로써 억지말뚝의 사면안정효과를 검토하여 보았다.

말뚝의 사면안정효과, 사면활동면 상부의 지반계수의 크기, 줄말뚝의 열수를 증가시킬수록 사면안정기여 효과는 증가하고 말뚝의 거동은 말뚝의 구속조건, 강성 및 지반계수에 의해 많은 영향을 받는다.

사면의 안전율은 지반계수, 말뚝두부의 구속조건, 말뚝간격, 지하수위상승등에 크게 영향을 받으며 말뚝두부의 구속조건은 힌지인 경우가 가장 효과적이었다.

이와같이 사면 및 억지말뚝의 영향요소에 대하여 그 효과를 검토하여 보았다. 또한, 본 장에서 검토된 바와 같이 성토사면에 억지말뚝을 설치하는 경우 가장 많은 영향을 미치는 실패요인인 말뚝의 순간격 D_2/D_1 , 말뚝의 근입깊이, 그리고 말뚝설치위치 등의 재배열 등을 고려하여 성토사면에 대한 억지말뚝의 설계법을 합리적으로 제시할 수 있었으며 사례를 통하여 그 적용성을 검토할 수 있었다.