제 6 장 절개사면에 설치된 억지말뚝의 사면안정효과

6.1 개요

그림 6.1의 해석대상사면도는 수정된 해석프로프램에 대한 특성분석을 실시하기 위하여 일반적인 절개사면의 형태를 가상적으로 작성되었다. 해석단면에 대한 물성치는 일반적으로 현장사면에 적용되는 내용을 기준으로 작성하였다. 그림 6.1에서 보는 바와 같이 최상부층은 토사층으로 구성되어 있으며 하부에 약 2m 심도의 풍화암층이 존재하는 대상지반에 사면절개가 실시될 경우에 억지말뚝을 설치하여 사면절개에 의한 사면 활동에 대한 안정을 확보하기 위하여 억지말뚝을 설치할 경우에 발생되는 억지말뚝의 거동을 분석한다.

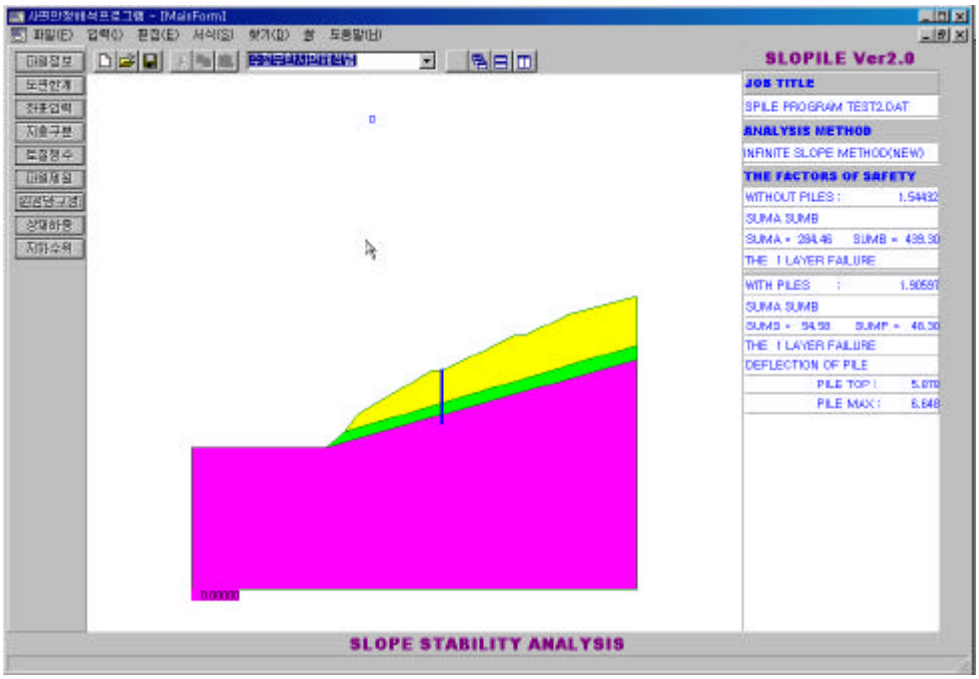


그림 6.1 해석대상 사면도

이 들 토층에 대한 토질정수는 상부 토사층에 대하여는 내부마찰각이 25 °, 습윤단위중량과 포화단위중량이 각각 1.8 t/m^3과 1.9 t/m^3이다.

또한, 풍화암층은 비배수전단강도가 7.0 t/m^2 이며 습윤단위중량과 포화단위중량이 각각 1.8 t/m^3과 1.85 t/m^3 , 연암층의 경우는 내부마찰각을 45 ° 로 하고 습

윤단위중량과 포화단위중량이 각각 2.0 t/m^3, 2.1 t/m^3을 사용한다.

절개사면 방지대책으로 억지말뚝을 1열로 사용하기로 하면 그림에 표시된 바와 같이 사면시작지점에서 20m 지점에 1열 설치하도록 한다. 억지말뚝으로는 H-Pile(H-300X300X10X15)을 사용하였고 말뚝해석에 적용되는 직경은 420mm로 선정하고 단단한 암층에 2.0m 깊이까지 근입시켜 사용하기로 하고 말뚝의 설치간격은 1.25m로 하여 말뚝의 간격비 D_2/D_1을 0.65으로 한다. 안정해석을 실시하기 위한 그밖의 사항에 대하여는 다음과 같이 결정하기로 한다.

1) H-Pile의 탄성계수는 $2.1\times10^6\ kg/cm^2$로 한다.

2) H-Pile의 허용휨응력과 허용전단응력은 각각 1400 kg/cm^2와 800 kg/cm^2로 한다.

3) 말뚝의 구속조건에 대하여는 말뚝머리를 회전구속으로 하고 말뚝선단은 소켓형태로 설치된 것으로 하여 힌지로 간주한다.

4) 지반계수 E_s에 대하여는 사면활동면 상부 토사층의 지반계수 E_{s1}은 91 t/m^2로 하고 풍화암에 대하여는 사면활동면의 상부에 풍화암이 존재하는 경우와 하부에 존재하는 경우로 구분하여 각각 105 t/m^2 ($=15c_u$)와 280 t/m^2 ($=40c_u$)로 한다. 한편 사면활동면 하부의 연암층의 지반계수는 700 t/m^2로 한다.

6.2 사면 안정에 영향을 미치는 요소

6.2.1 지반계수의 영향

억지말뚝이 사용된 지역에서의 사면의 안정은 사면활동면 상부지반에서의 지반계수 E_{s1}의 값에 의해 많은 영향을 받는다. 따라서, 지반계수 E_{s1}이 사면 안정에 미치는 영향을 고찰하기 위해 지반계수를 사면활동면 상부의 지반계수 E_{s1}을 사면활동면 하부 지반계수값 E_{s2}와 동일한 값을 가질 때 까지 선형적으로 증가시켜 지반계수비에 따른 사면안전율의 변화를 무한사면해석과 원호파괴(Fellenius 방법, Bishop 간편법)에 대하여 해석을 수행하였다.

그림 6.2 그림 6.3에서 보는 바와 같이, 말뚝의 지반저항을 무시한 경우 사면의 최소안전율은 무한사면해석의 경우 1.64로서 말뚝이 설치되지 않은 경우 사면의 안전율 1.54 비해 저항효과가 적다. 원호파괴의 경우에도 비슷한 경향을 나타내었다. 그러나, 지반효과를 고려한 경우, 즉 활동면 상부의 지반계수 E_{s1}이 증가함에 따라 억지말뚝이 설치된 사면의 안전율은 선형적으로 증가함을 볼 수 있다.

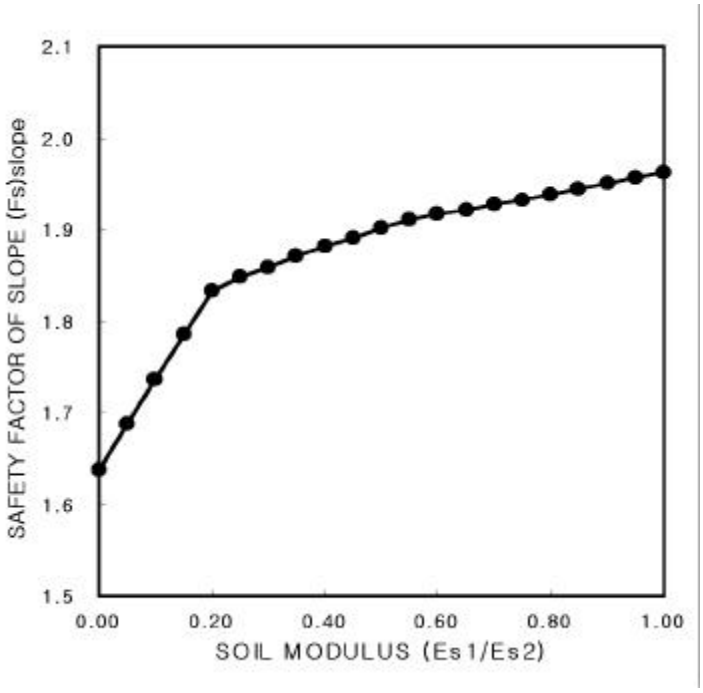


그림 6.2 지반계수에 따른 사면안전율 변화(무한사면해석)

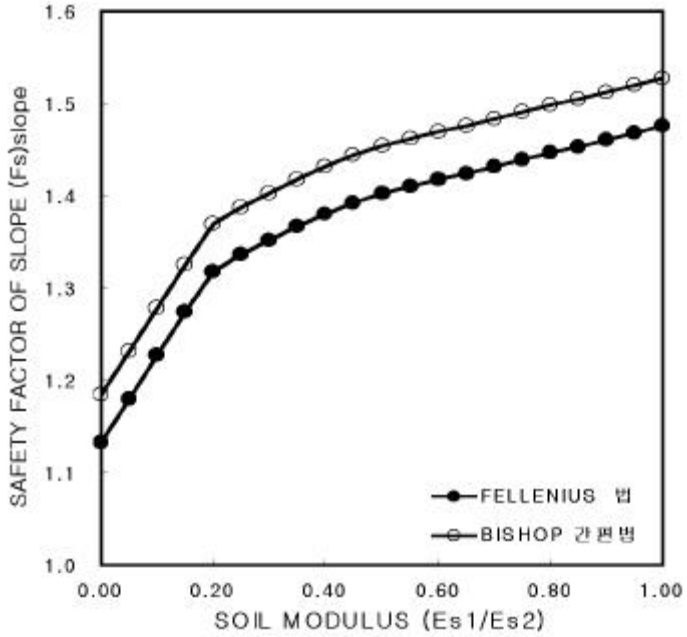


그림 6.3 지반계수에 따른 사면안전율 변화(원호파괴)

따라서 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.

6.2.2 말뚝간격비의 영향

말뚝의 간격비(D_2/D_1)에 따른 사면안전율의 영향을 고려하기 위해 말뚝간격비를 0.1에서 0.99까지 평균적으로 0.1씩 증가시켜 사면안전율을 구하면 그림 6.4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝의 간격비가 감소할수록 사면안전율이 증가하고 있음을 보여주고 있다.

즉, 말뚝의 효과는 말뚝의 간격비가 적을수록 크다는 것을 알 수 있다.

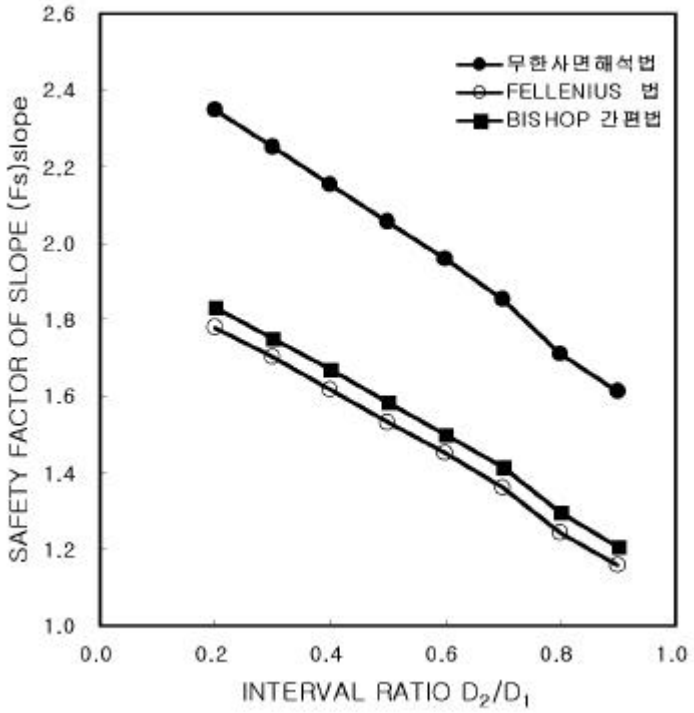


그림 6.4 말뚝의 간격비에 따른 사면안전율 변화

6.2.3 말뚝 열수의 영향

그림 6.5은 그림 6.1의 해석대상지반에 성토사면에 억지말뚝을 설치하는 경우 말뚝이 없는 경우부터 5열의 말뚝을 설치하였을 경우의 사면안전율을 도시한 것이다. 여기에서 말뚝의 열수를 증가시킴에 따라 사면안전율은 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝열을 2열이상 설치하게 되면 본 설계 사면은 소요안전율 1.3을 만족함을 알 수 있다.

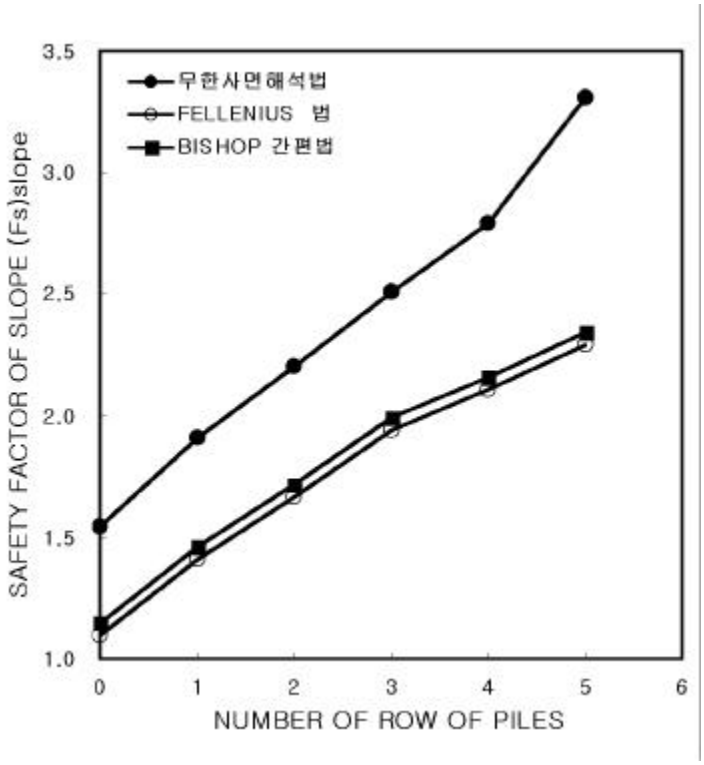


그림 6.5 말뚝열수에 의한 사면안전율 변화

6.2.4 지하수위 상승에 의한 영향

우리나라 연평균 강우량의 절반 이상이 6월과 9월 사이의 우기에 집중된다. 따라서, 이 기간중의 집중호우시에는 우수가 지중에 침투하여 지하수위가 급격하게 상승한다. 그러나 이 우수는 대부분 투수성이 나쁜 풍화잔적토층에 침투되기 이전에 붕적토층을 통하여 지표면과 평행하게 하류로 흘러가는 경우가 많다.

따라서 본 절에서는 지하수위에 의한 영향을 검토하기 위하여 그림 6.1의 해석단면에 대하여 무한사면해석에 대해서는 토사층과 풍화암의 경계면에서 파괴가 일어났을 경우에 대해서 해석을 실시하였고, 원호파괴의 경우에는 토사층 내부에서 파괴가 일어날 경우에 대해서 해석을 실시하였다.

그림 6.6은 지하수위 변화에 따른 사면안전율를 고찰하기 위하여 지하수위변화 비를 나타낸 것으로 토사층에 대하여는 그림 6.6에서와 같이 H를 지표면에서 토사층과 풍화암층의 경계까지의 깊이로 하였고 H_w는 토사층과 풍화암층의 경

계로 부터 위로 상승한 지하수위까지의 길이로 하여 지하수위 비를 H_w/H로 나타내어 지하수위가 완전히 지표면까지 올라왔을 때는 H_w/H를 1로 하고 지하수위가 없을 경우는 0으로 하였다.

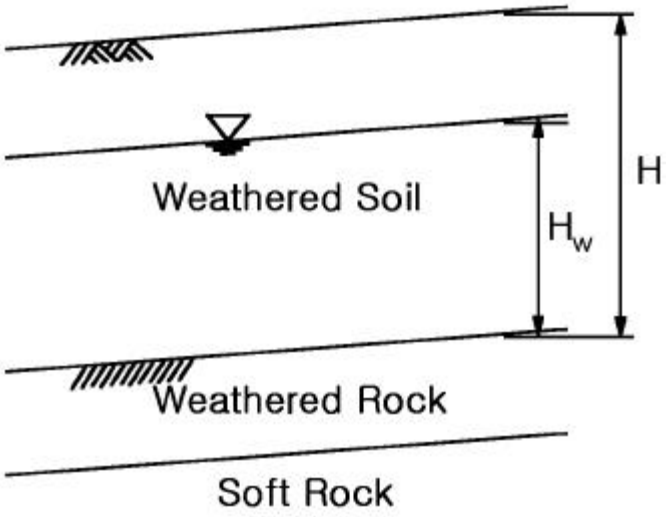


그림 6.6 지하수위 상승률(H_w/H)

토사층에 대한 사면안전율은 H_w/H가 0인 경우는 무한사면해석의 경우 1.54, Fellenius 방법의 경우 1.10, Bishop 간편법의 경우 1.15 로 나타났으며 지하수위가 상승할수록 안전률은 조금씩 감소하여 H_w/H가 1인 경우 즉 완전히 포화되어 있는 경우의 사면 안전률은 무한사면해석, Fellenius 방법, Bishop 간편법의 경우 각각 0.73, 0.55, 0.48를 나타내고 있어 지하수위에 의한 영향으로 사면안전율은 선형적으로 감소하고 있다는 것을 할 수 있다.

소요안전률 확보면에서 살펴보면 소요안전률을 1.10으로 하였을 경우 토사층에 대한 파괴는 무한사면의 경우 H_w/H의 비가 약 0.7 이상일 때 원호파괴의 경우에는 H_w/H의 비가 약 0.4 이상이 되면 소요안전률을 확보하지 못하게 된다.

특히 원호파괴의 경우 Fellenius 방법과 Bishop 간편법의 사면안전율의 변화를 살펴보면 H_w/H가 0.6에서 Bishop 간편법의 안전율이 Fellenius 방법 보다

적어지는 현상을 볼 수가 있다. 이러한 현상은 동일한 활동원에 대해 해석함으로써 Bishop 간편법으로 구한 안전율이 Fellenius 방법으로 구한 안전율보다 적은 경우는 Numerical Problem이 생긴 것으로 결론지을 수 있다.

따라서 이 경우에는 Fellenius 방법으로 얻은 안전율이 더 정확하다. 이러한 이유로 Bishop의 간편법을 쓸때에는 Fellenius 방법으로 동일한 활동원에 대해 안전율을 구하고, 두 값을 비교해 보는 것이 좋다.

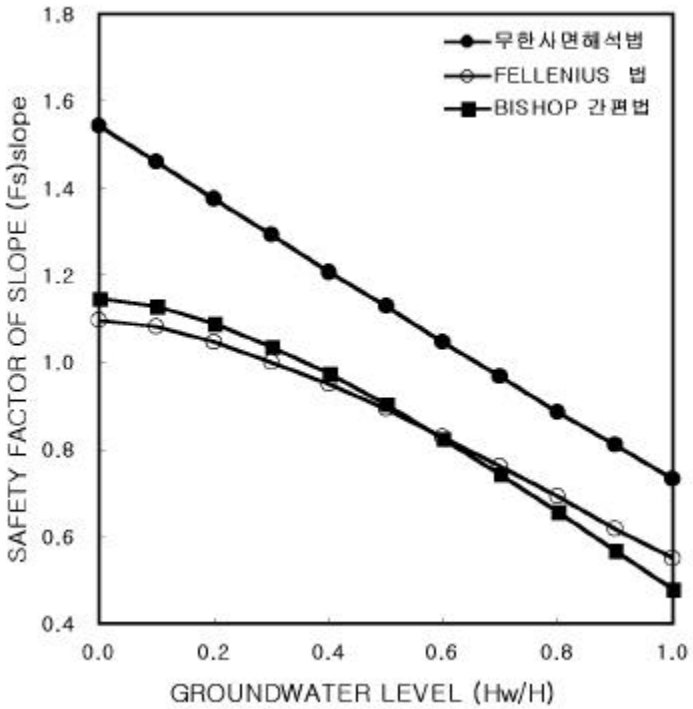


그림 6.7 지하수위 변화에 따른 영향

이상에서 보는 바와 같이 지하수위가 없을 경우에는 무한사면해석에서의 안전율이 원호파괴에서의 안전율보다 훨씬 높은데 반해 지하수위가 상승함에 따라 무한사면해석에서의 안전율이 원호파괴에서보다 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 우기시는 강우침투에 대한 대책이 많이 요구되어 져야 할 것으로 사료된다.

6.2.5 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 6.8 그림 6.10는 말뚝의 간격비에 따른 말뚝두부의 구속조건을 고려한 사면안전율 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사면의 안전율은 회전구속인 경우에 안전율이 가장 크게 나타나고 있으며 산사태의 억지말뚝에서 말뚝의 구속조건에 의한 사면안전율은 회전구속인 경우에 말뚝이 사면안전율에 가장 많은 기여를 하고 자유와 힌지의 순으로 기여도가 작아지며 고정인 경우에 기여도가 아주 작아진다.

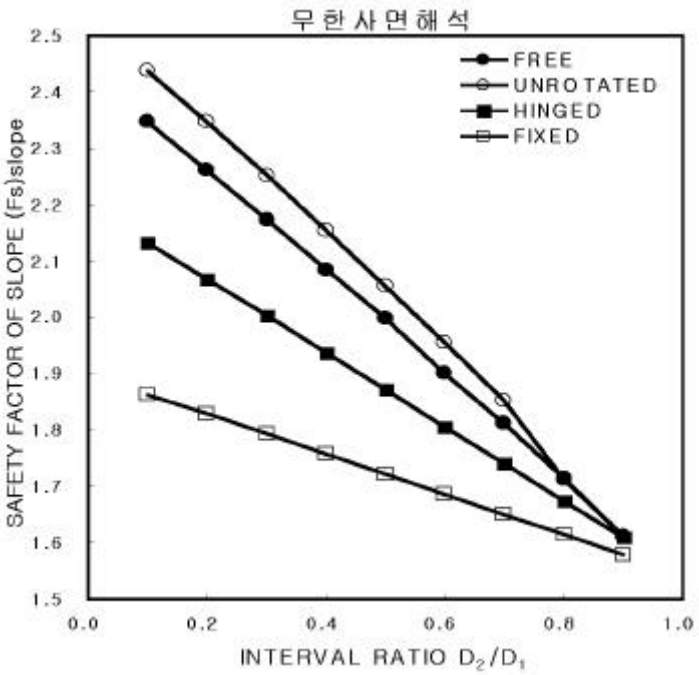


그림 6.8 말뚝두부의 구속조건에 의한 사면 안전율 변화(무한사면)

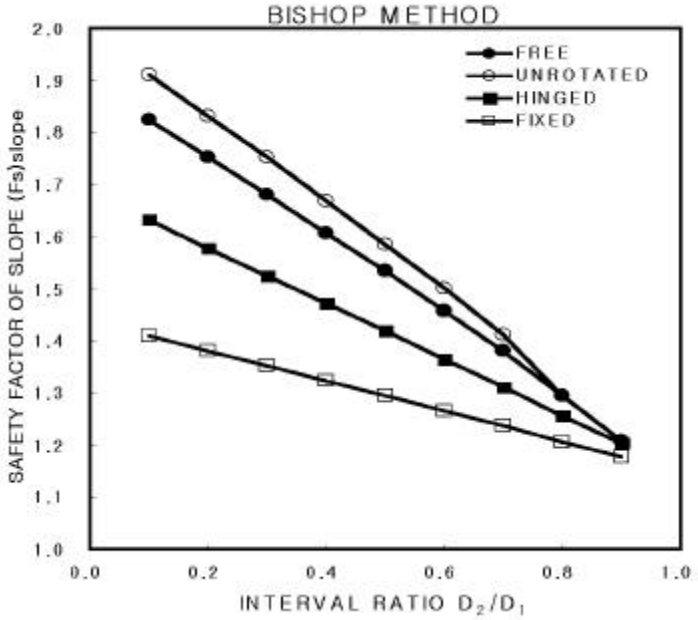


그림 6.9 말뚝두부의 구속조건에 의한 사면 안전율 변화(BISHOP METHOD)

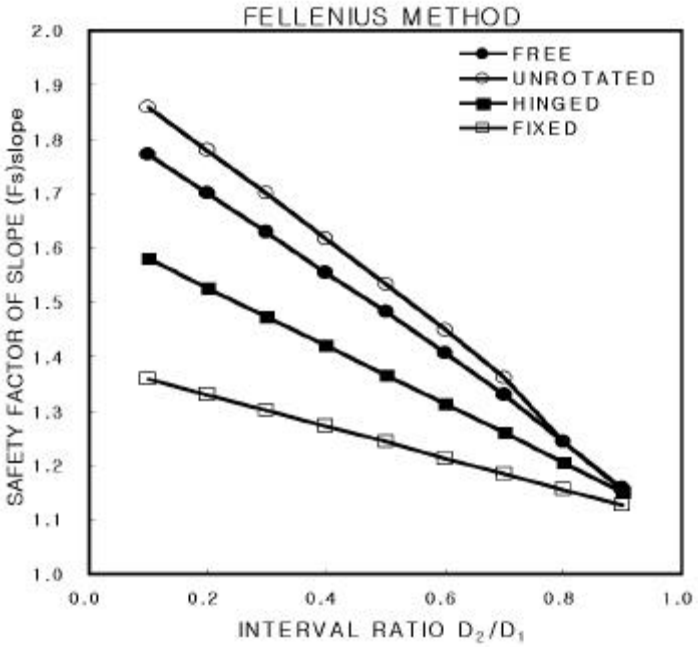


그림 6.10 말뚝두부의 구속조건에 의한 사면 안전율 변화(FELLENIUS METHOD)

6.3 말뚝의 거동에 영향을 미치는 요소

6.3.1 지반계수의 영향

지반계수에 의한 영향을 파악하기 위하여 파괴면 상부의 지반계수와 하부의 지반계수 비를 이용하여 그림 6.11와 같이 정리하여 보면 지반반력을 기대하기가 어려운 초기 지반반력비 0.2까지는 선형적으로 증가하는 양상을 보이다가 이후부터 급격히 감소하는 추세를 나타내며 지반반력비가 일정한 단계를 지나 약 0.6이상에서는 대체로 말뚝의 변위 감소율은 일정하게 된다.

따라서 절개사면 억지용 말뚝 설계시에는 사면의 안전율을 어느정도 확보하여야만 말뚝의 변위도 감소시키고 말뚝에 의한 사면안전율 효과도 증대된다.

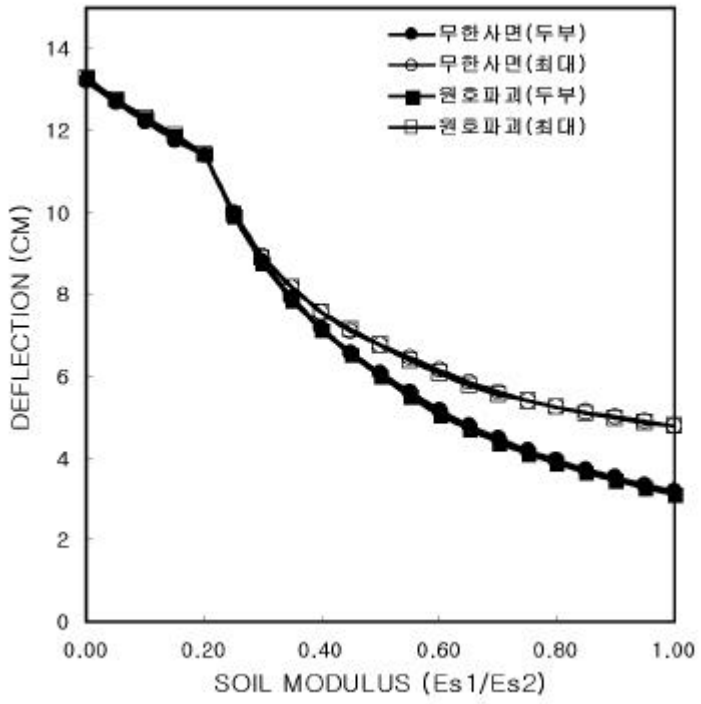
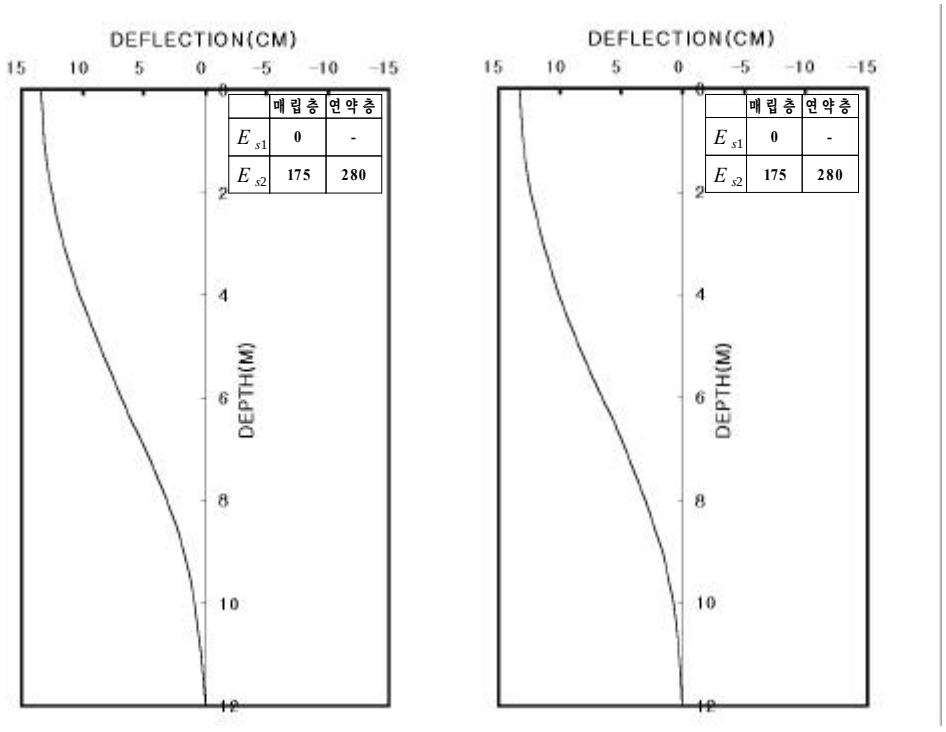


그림 6.11 지반계수에 따른 말뚝두부 및 최대변위

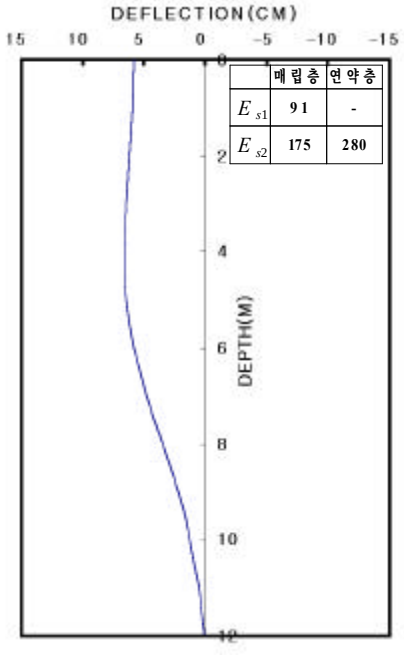
그림 6.12은 파괴면 상부의 지반계수 E_{s1} 를 0, 91, 175로 변화시키면서 지반반력계수에 의한 말뚝의 거동을 분석하기 위한 것이다. 무한사면 파괴의 경우와

원호파괴의 경우 약간의 차이를 나타내고 있으나 그 차이는 적어 절토사면과 같은 파괴면의 깊이가 얇은 경우에는 비슷한 거동을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

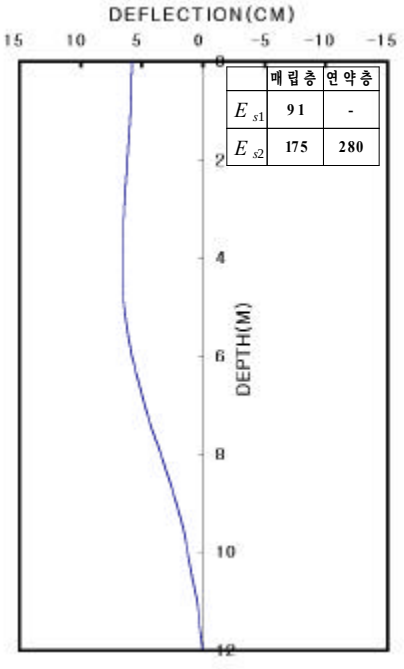
지반계수비가 0/175인 경우는 말뚝의 두부에서 최대수평변위(원호파괴(무한사면))는 약 13.315 (13.2)cm의 변위를 보이고 있다. 지반계수비가 91/175인 경우 말뚝의 최대수평변위도는 말뚝두부로부터 약 5m의 깊이에서 약 6.602(6.648)cm의 변위를 보이고 있다. 또한 지반계수비가 175/1759인 경우 말뚝의 최대 수평변위는 말뚝의 두부로부터 약 5m깊이에서 약 4.774(4.786)cm의 변위를 보이고 있다.



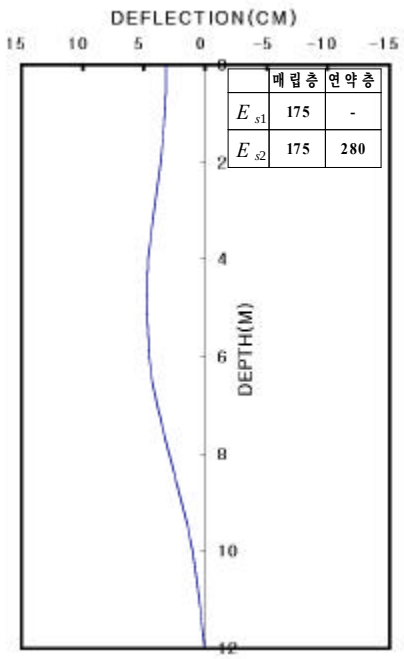
(a)원호파괴 (b)무한사면



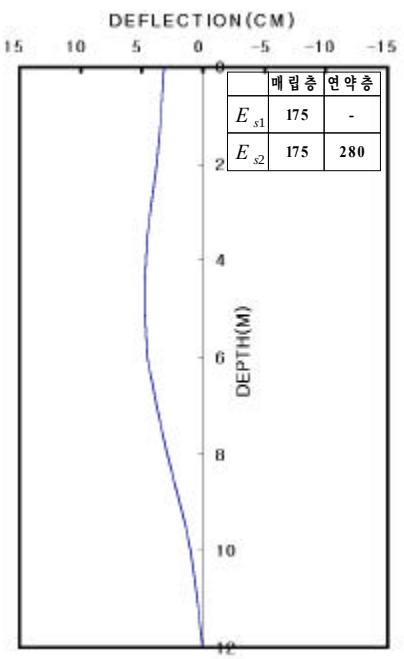
(a)원호파괴



(b)무한사면



(a)원호파괴



(b)무한사면

그림 6.12 지반계수에 따른 말뚝의 변위

6.3.2 말뚝의 두부구속 조건의 영향

그림 6.13은 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.

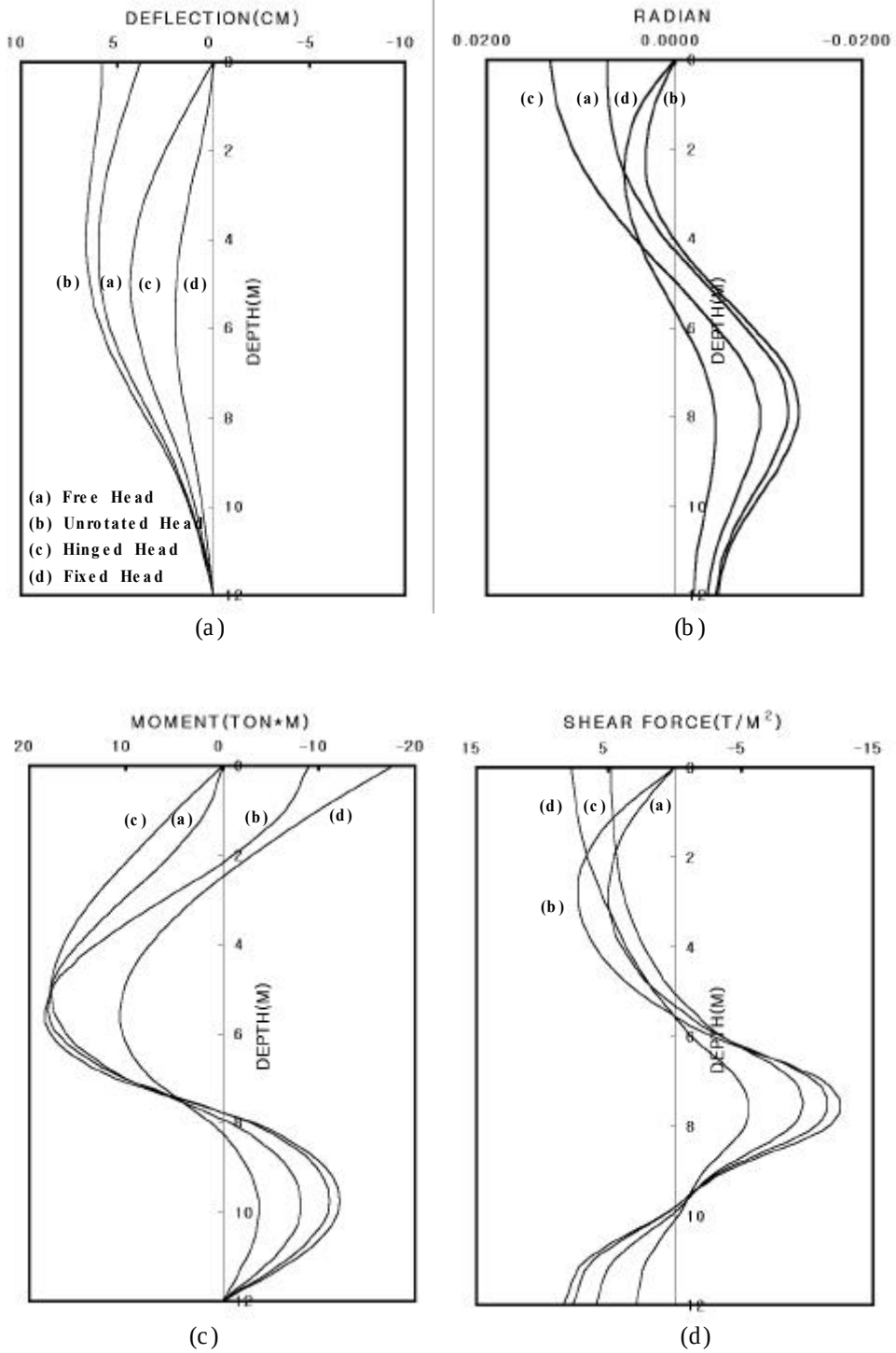
말뚝에 작용하는 측방토압은 지중으로 내려 갈수록 증가하는데 반해 이에 저항하는 지반계수는 층마다 일정하게 설정함으로써 말뚝의 최대변위는 측방토압이 크게 작용하는 지중에서 발생하는 것으로 판단된다. 말뚝의 거동을 요약하면 표 6.1와 같다.

표 6.1 말뚝의 변위량

구분	회전구속		힌지		자유		고정	
	위치	발생량	위치	발생량	위치	발생량	위치	발생량
두부수평변위 (cm)	0	5.878	0	0	0	3.86	0	0
최대수평변위 (cm)	4	6.648	5	4.198	4	5.957	6	1.912
최대 모멘트 (t・m)	5	17.78	5	17.78	5	17.78	0	17.78
최대전단력 (t/m^2)	12	8.354	12	5.771	12	7.596	0	7.836

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

한편, 그림 6.13(c)는 모멘트를 도시한 것으로 말뚝의 최대 휨모멘트는 고정인 경우에는 말뚝두부에서 최대휨모멘트가 발생하고 있다. 다른 구속조건의 경우에는 말뚝두부로부터 5m 지점에서 발생하였다. 그림 6.13(d)는 전단력에 대한 것으로 두부구속조건이 고정인 경우에는 최대전단력이 말뚝두부에서 발생하고 있으며 자유, 회전구속 및 힌지인 경우에는 약 12m 지점에서 발생하고 있다.



(a) (b)

(c) (d)

그림 6.13 말뚝 두부의 구속조건에 따른 말뚝의 거동

6.4 절개사면억지말뚝의 설계법

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

절개사면 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 그림의 개략도에서와 같이 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, 산사태 억지 말뚝의 설치를 위해서는 우선 그 말뚝의 설치방법에 따라 말뚝의 두부 및 선단의 구속조건이 결정되어야 한다. 말뚝의 구속 조건으로는 자유, 회전구속, 힌지, 고정의 네가지 경우를 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.

6.5 요약

본 장에서는 절개사면에 억지말뚝이 설치된 사면의 안정성 해석을 위하여 수동말뚝에 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 지반 반력의 작용을 극한수평저항력으로 한계치를 적용함으

로서 보다 현실적인 해석을 수행할 수 있었다. 그리고 해석예를 수행하므로써 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 회전구속일 경우가 가장 효과적이었다.

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