말뚝이 설치된 사면의 안정해석 프로그램

Computer Programs to Analyze Stability of Slopes Containing Piles

홍원표[1], Won-Pyo Hong

1) **중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수**, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang Univ.

SYNOPSIS : Piles have been used as one of the most common measures to ensure the stability of unstable slopes. Considering the arching effect in soil between piles, a technique was presented to analyze the stability of slopes containing piles. It is emphasized in the analysis that both the slope-stability and the pile-stability should be ensured at the same time to capture the whole stability of slopes containing piles. A design method was estabilished in 1981 by the author on the basis of the analysis method of the slope containing piles. Computer programs, SPILE and CHAMP, were made to analyze and design the slope containing piles. SPILE can be used to design the stabilizing piles, while CHAMP can be used to analyze the behavior of foundation piles for bridge abutments. The limit equilibrium method for infinite slope is applied in SPILE, while the limit equilibrium method based on slice method proposed by Fellenius is applied in CHAMP.

A new computer program SLOPILE is presented in this study to analyze the stability of slopes containing piles. The analytical techniques applied in SPILE and CHAMP are also applied in SLOPILE, so that wide application could be provided. Therefore, SLOPILE can calculate the slope stability for both planar failure surfaces in infinite slopes and arc failure surfaces based on Fellenius and Bishop simplified methods. OS system combined Dos and CAD, which is applied in SPILE and CHAMP, is improved to Windows version. SLOPILE can be used to analyze and design piles installed in not only fill slopes but also cut slopes. SLOPILE can be also used to analyze the behavior of foundation piles for bridge abutments constructed on soft grounds.

Key words : slope stability, stabilizing pile, lateral earth pressure, computer program, slope stability analysis.

1. 서론

사면의 안정대책으로 억지말뚝공을 적용하는 경우 말뚝의 사면안정효과를 정확하게 해석할 수 있어야 한다. 지금까지 억지말뚝의 해석에 적용된 프로그램으로는 CHAMP**와** SPILE**이 있다.** CHAMP**프로그램은 한계평형에 의한 절편법**(Fellenius**법**)**을 이용하여 교대의 측방유동해석에 주로 사용되며** SPILE**프로그램은 자연사면을 절개한 절개사면에 대한 무한사면해석법에 적용하여 오고 있다. 이들 프로그램은 최근까지 여러 사면현장에 적용되어 많은 실적을 쌓아왔다. 그러나 현장의 다양한 조건을 모두 고려할 수 있는 프로그램으로 발전하기 위하여는 보다 많은 연구개발이 필요할 것이다. 따라서, 본 연구에서는** CHAMP**프로그램과** SPILE**프로그램의 기본이론을 토대로 성토사면 및 절개사면, 그리고 교대측방이동해석에 모두 적용가능하며 한계평형해석에서 일반적으로 사용하고 있는** Bishop**간편법을 추가로 적용하여 보다 다양한 방법으로 말뚝이 설치된 사면에 대한 안정해석을 수행할 수 있도록 종합적인 프로그램**(SLOPILE)**을 개발하고자 한다. 또한 기존의 프로그램에서는** Dos**와** CAD**를 조합한** OS**시스템을 활용하였으나 이를** Windows**용으로 변환시킴으로써 사용자들에게 편의를 제공하고자 한다.**

특히, 본 논문에서는 억지말뚝이 설치된 사면의 안정해석법과 교대기초말뚝의 안정해석법을 정리하고, 이 이론에 근거하여 개발된 SLOPILE **프로그램을 설명하고자 한다. 그리고,** SLOPILE**을 이용하여 성토사면, 절개사면에 대한 해석예를 통하여 본 프로그램의 적용성을 확인하고자 한다.**

2. 사면안정용 억지말뚝공법

2.1 억지말뚝공법

억지말뚝공법은 활동토괴를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치하므로서 말뚝의 수평저항으로 사면의 활동력을 부동지반에 전달시키는 공법이다. 이러한 억지말뚝은 수동말뚝(Passive pile)의 대표적인 예중의 하나이다(홍원표, 1983). 억지말뚝공법은 사면안전율 증가효과가 커서 일본과 미국 등의 외국에서는 예로 부터 많이 사용되어 오고 있다. 특히 일본의 경우는 강관말뚝을 사용하여 산사태를 방지하려는 시도가 예로부터 매우 활발하게 실시되고 있다(福本, 1977; Ito, Matsui and Hong, 1981, 1982).

억지말뚝공법은 타 공법에 비교하여 지중 깊은 곳에까지 활동이 발생하는 산사태의 경우에서도 사면지반깊이 사면활동에 저항할 수 있는 지지구조물을 설치할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이 억지말뚝을 합리적으로 설계하는 것은 결코 용이한 일이 아니다. 과거 일본에서는 적절한 설계법이 없이 억지말뚝을 사용한 결과 실패한 경우도 많이 보고되고 있다(福本, 1977).

필자는 억지말뚝의 설계법을 확립할 목적으로 지반의 측방변형으로 인하여 일렬로 설치된 줄말뚝에 작용하게될 측방토압을 산정할 수 있는 이론식을 유도하고 그 신뢰성을 확인하기 위하여 모형실험을 실시한바 있다(홍원표, 1982, 1983, 1984a, 1984b, 1984c; Matsui, Hong and Ito, 1982). 이 이론식을 이용하여 일렬의 억지말뚝을 설계할 수 있는 방법을 연구, 제안하였고(Ito, Matsui and Hong, 1981, 1982) 그 후 그 설계법을 계속 수정하여 오고 있는 실정이다(Hong, 1986).

우리나라에서도 최근 우기철에 빈번하게 발생되는 산사태를 예방하기 위하여 억지말뚝공법이 사용되는 횟수가 늘어나고 있는 경향이다(홍원표 외 2인, 1987; 강병희 외 4인, 1987; 이종규 외 3인, 1989). 그림 2.1은 우리나라에서 억지말뚝공이 실시된 일예를 보여주고 있다. 본 사면현장에서는 H-300×300말뚝이 1.5m간격으로 일렬로 설치되어 있다. 말뚝선단은 단단한 암에 2 3m 근입되어 있고, 말뚝두부는 띠장으로 연결되어 있으며, 이 띠장은 지중에 앵커로 지지되어 있다.

2.2 억지말뚝의 사면안정원리

통상적으로 억지말뚝은 일정한 간격으로 말뚝을 설치하는 줄말뚝(혹은 무리말뚝)의 형태로 시공한다. 엄밀하게 말하면 이 줄말뚝과 말뚝주변 지반사이의 상호작용은 3차원적이며 여러요인 즉 말뚝의 변형특성 및 지반의 변형·강도특성 등에 영향을 받기 때문에 매우 복잡하다. 따라서 억지말뚝의 설계시에는 이와 같은 복잡한 현상을 단순화시키는 것을 필요로 하게 된다. 그러나, 이러한 단순화 과정에서 아래에 열거하는 바와 같은 매우 중요한 요인을 간과하였기 때문에 지금까지 줄말뚝의 산사태 억지효과를 충분히 발휘시킬 수 있는 합리적인 설계법을 확립시키지 못하였다고 생각된다.

그림 2.1 억지말뚝의 시공예

2.2.1 말뚝간격의 영향

억지말뚝의 설계에 있어서 종래 취급이 곤란함으로 인하여 경시되어 온 중요한 요소중의 하나는 줄말뚝의 말뚝간격에 대한 영향이다. 실제의 억지말뚝은 거의 다 줄말뚝(혹은 무리말뚝)으로 사용되고 있음에도 불구하고 종종 단일말뚝으로 해석하여 줄말뚝으로서의 영향을 수정계수에 의하여 개략적으로 고려하고 있다. 실제 억지말뚝에서 말뚝주변지반의 변형은 줄말뚝의 존재에 영향을 받으므로 단일말뚝에 작용하는 측방토압과 당연히 다른 값을 가질 것이다. 왜냐하면 억지말뚝에 작용하는 토압은 지반과 말뚝사이의 상호작용의 결과로서 정하여지기 때문이다. 따라서, 억지말뚝의 설계에서는 처음부터 줄말뚝의 문제로서 취급하여야 함이 옳을 것이다.

2.2.2 안정해석

사면안정에 대한 억지말뚝의 설계에 있어서 또 하나의 중요한 요인은 말뚝의 안정과 사면의 안정이라고 하는 서로 상반된 2종류의 안정문제를 유기적 및 계통적으로 해석하여야 한다는 점이다. 왜냐하면, 줄말뚝을 포함하고 있는 사면의 안정문제에는 말뚝자체의 안정과 말뚝의 효과를 고려한 사면의 안정을 모두 만족하여야만 비로소 사면 전체로서의 안정을 확보할 수 있기 때문이다.

종래 억지말뚝의 설계에 있어서 줄말뚝을 포함하지 않는 사면의 안정해석시에는 부족한 저항력으로부터 줄말뚝에 의하여 부가될 저항력을 단순히 역산하여 말뚝간격을 정하는 설계법이 이용되는 경우가 많다. 그러나, 이 경우 줄말뚝과 지반사이의 상호작용이라는 입장으로 부터 말뚝에 작용하는 측방토압의 발생기구가 검토되어 있지 않다. 따라서, 말뚝간격만을 좁혀 줄말뚝의 숫자만 늘리면 안전측의 설계가 된다고 생각되었다. 그러나, 이것은 사면의 안정에 대하여는 안정측이 됨을 의미하나 말뚝간격을 좁힐수록 말뚝에 작용하는 측방토압이 급격히 커져 말뚝의 안정을 유지하기가 불가능하게 된다.

결국, 말뚝이 먼저 파괴되고 사면도 전체로서 안정시킬 수 없게 된다. 또한 산사태가 진행되는 초기상태에서는 말뚝에 소요의 저항력이 꼭 발생된다는 보장은 없으며 말뚝에 소요의 저항력이 발생될 때에는 이미 산사태가 상당히 진행되어 활동면의 전단저항력이 더욱 저하되어 이미 줄말뚝의 효과를 더한다 하여도 사면전체의 안정이 얻어지지 않는 상황이 될 가능성이 많아질 것이다.

3. 억지말뚝이 설치된 사면의 안정해석법

본 장에서는 위에서 열거한 억지말뚝설계시의 2가지 중요한 요인, 즉 말뚝간격을 보다 엄밀히 고려하는 점 및 말뚝과 사면 양자의 안정해석을 보다 유기적이고 계통적으로 행하는 점에 중점을 두고 억지말뚝이 설치된 사면의 안정해석법을 설명하고자 한다.

일반적으로 사면안정을 위한 억지말뚝의 설계에 있어서는 그림 3.1에 도시된 바와 같이 말뚝 및 사면의 2종류의 안정에 대하여 검토하지 않으면 않된다. 만약 활동토괴에 의하여 말뚝에 작용하는 측방토압(혹은 말뚝으로부터 활동토괴에 작용하는 반력)이 알려져 있다면 우선 그림 3.1(a)에 도시된 바와 같이 말뚝의 안정은 수평하중을 받는 말뚝의 해석법을 응용하여 검토할 수 있다. 이상과 같이 말뚝의 안정성이 확보되면 그림 3.1(b)에 도시된 바와 같이 줄말뚝으로부터 활동토괴에 작용하는 수평저항력을 부가하여 통상의 사면안정해석법을 적용하여 사면의 안정을 검토할 수 있다. 따라서 측방토압의 산정은 사면안정을 위한 억지말뚝설계에 있어서 키 포인트이며 이 값을 될 수록 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 이는 말뚝의 안정과 사면의 안정에 미치는 측방토압의 영향이 서로 상반되기 때문이다. 즉 앞절에서 이미 설명된 바와 같이 이 측방토압을 실제보다도 크게 산정하여 설계한 경우, 말뚝의 안정에 관하여는 안전측이나 사면의 안정에 관하여는 위험측이 된다. 반대로 측방토압을 실제보다 적게 산정하여 설계한 경우에는 그 반대현상이 발생할 것이다.

억지말뚝을 설치한 경우는 강성이 좋은 강말뚝을 사용하는 것이 바람직하다. 강말뚝에도 강관말뚝과 H말뚝의 두 종류가 사용되고 있다. 이들 말뚝을 설치할 경우 통상적으로 항타에 의하여 말뚝을 설치하는 것은 매우 바람직하지 못하며 천공후 말뚝을 삽입하는 매입공법이 좋다. 이때 억지말뚝은 설치후 영원히 그 기능을 발휘되도록 영구구조물로 생각하여야 한다. 따라서 말뚝을 삽입한 후 콘크리트나 시멘

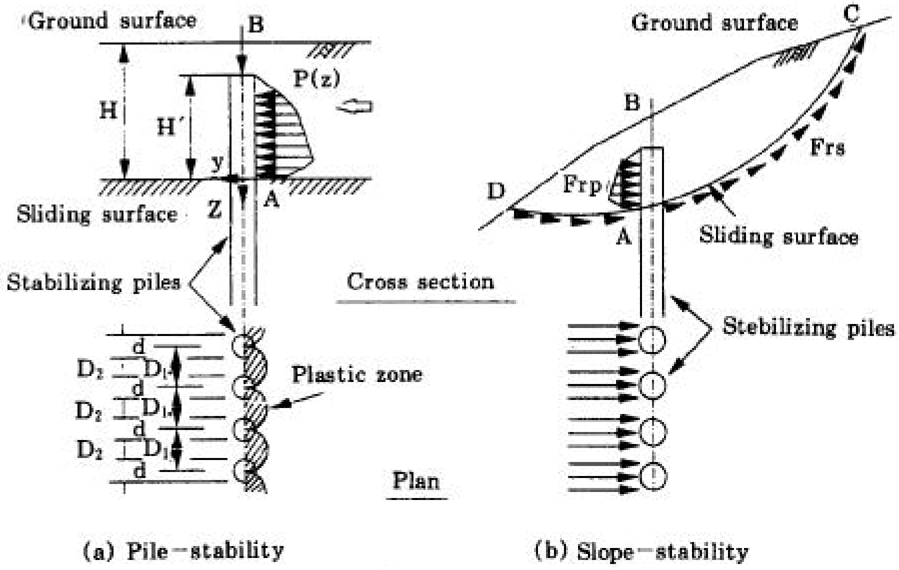


그림 3.1 억지말뚝의 사면안정도

트 그라우팅으로 말뚝의 전 길이를 피복하여 부식의 영향을 받지 않도록 하여 주어야 한다. 그러므로 말뚝의 휨응력은 강재가 받아주나 단면상으로는 원형단면의 말뚝으로 생각하는 것이 좋다.

3.1 사면의 안정

산사태가 발생하는 사면에서는 사면의 지표경사면과 활동파괴면이 서로 평행한 무한사면의 파괴형태로 산사태가 발생하는 경우가 많다. 따라서 이런 경우의 사면안정해석법은 기본적으로 무한사면의 사면안정해석법과 동일한 방법으로 실시될 수 있다. 또한 일반적으로 산사태의 경우는 현장조사에 의하여 활동면이 사전에 알려질 수 있다. 따라서 알려진 고정된 사면활동에 대한 사면안정해석을 실시하면 된다. 즉, 그림 3.1(a)에 도시된 바와 같이 활동토괴 CADBC에 작용하는 활동력 F_d와 저항력 F_r을 비교하므로서 사면의 안정이 검토될 수 있다. 여기서 저항력은 활동면 CAD를 따라 발휘되는 전단저항력 F_{rs} 및 AB면에 있어서의 줄말뚝의 반력 F_{rp}의 합으로 구할 수 있다. 이때, A점에서 D점까지의 활동면의 전단저항력도 고려하는 것에 대한 타당성이 문제가 된다. 그러나, 줄말뚝 설치위치 양측의 토괴(그림 3.1(b)의 ABCA와 ABDA)가 말뚝 사이에서 대부분이 연속되어 있으며, 말뚝에 작용하는 측방토압 산정시 말뚝주변지반만이 소성상태가 되도록 할 경우에는 양측토괴가 일체로 거동하기 때문에 활동면 AD에 연한 전단저항력을 함께 고려하여도 큰 오차를 동반하지 않을 것이다.

따라서 사면의 안정에 대한 안전율$(F_s)_{slope}$은 다음과 같이 표현된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{F_r}{F_d} = \frac{F_{rs} + F_{rp}}{F_d} \tag{3.1}$$

만약 활동파괴면이 원호일 경우에는 다음식이 이용된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rp}}{M_d} \tag{3.2}$$

여기서 M_r은 저항모멘트, M_d는 활동모멘트, M_{rs}는 파괴면 DAC에 연한 전단저항력에 의한 저항모멘트, M_{rp}는 AB면에 있어서의 줄말뚝 반력에 의한 저항모멘트이다. 식(3.1) 및 식(3.2)에 있어서 F_{rs}, F_d 혹

은 M_{rs}, M_d는 통상의 사면안정해석에서의 분할법에 의해 구하여지며, F_{rs} 혹은 M_{rs}는 사면활동면 상부의 줄말뚝에 작용하는 측방토압과 말뚝배면의 지반반력을 말뚝중심간격으로 나눈값을 이용하여 산정된다. 단, 암반활동과 같이 말뚝의 전단에 의하여 파괴될 경우에는 F_{rs} 및 M_{rs}가 활동면 위치에서 말뚝에 작용하는 전단력을 이용하여 산정된다. 식(3.1) 혹은 식(3.2)의 안전율이 소요안전율보다 클 경우에 사면의 안정이 얻어질 수 있다.

3.2 말뚝의 안정

말뚝의 안정에 관하여는 그림 3.1(a)에 표시된 바와 같이 활동면상의 토괴에 의하여 말뚝이 $P_{mi}(\bar{z})$의 측방토압을 받는다고 생각하면 주동말뚝에 대하여 이용하는 수평력을 받는 말뚝의 해석법이 적용될 수 있다. 단, 수동말뚝의 경우는 활동면상의 말뚝에 작용하는 측방토압이 분포하중이 된다. 이 측방토압을 분포하중으로 취급할 경우 말뚝에 관한 기본 방정식은 활동면 상부와 하부에 대하여 다음 식으로 표현된다.

$$
\begin{aligned}
E_pI_p\frac{d^4y_{1i}}{d\bar{z}^4} &= P_{mi}(\bar{z}) - E_{S1i}y_{1i} \quad (-H' \le \bar{z} \le 0) \\
E_pI_p\frac{d^4y_{2i}}{d\bar{z}^4} &= -E_{S2i}y_{2i} \quad (\bar{z} > 0)
\end{aligned}
\tag{3.3}
$$

여기서 $\bar{z} = (z - H)$, i는 다층지반의 각 지층번호를 의미하며 z는 지표면에서부터의 깊이, H 및 H'는 각각 활동면에서 지표면 및 말뚝머리까지의 거리, L_P는 말뚝길이, y_{1i}및 y_{2i}는 각각 활동면 상하의 각 지층의 말뚝의 변위, E_pI_p는 말뚝의 휨강성, E_{S1i} 및 E_{S2i}는 각각 사면활동면 상하부의 각 지층의 지반계수이다. 파괴면 상부지층의 측방토압 P는 각 지층에 구하여진 말뚝 1개당의 측방토압으로 깊이 z에 대하여 $f_{1i} + f_{2i}\bar{z}$의 직선분포로 작용한다. 식(3.3)에 대한 미분방정식 해를 구하면 말뚝의 변위에 대한 일반해는 다음식과 같이 된다.

$$
\begin{aligned}
y_{1i} &= e^{-\beta_{1i}\bar{z}}(a_{1i}\cos\beta_{1i}\bar{z} + a_{2i}\sin\beta_{1i}\bar{z}) + e^{\beta_{1i}\bar{z}}(a_{3i}\cos\beta_{1i}\bar{z} + a_{4i}\sin\beta_{1i}\bar{z}) + (f_{1i} + f_{2i}\bar{z})E_{S1i} \\
y_{2i} &= e^{-\beta_{2i}\bar{z}}(b_{1i}\cos\beta_{2i}\bar{z} + b_{2i}\sin\beta_{2i}\bar{z}) + e^{\beta_{2i}\bar{z}}(b_{3i}\cos\beta_{2i}\bar{z} + b_{4i}\sin\beta_{2i}\bar{z})
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

여기서 a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i} 및 b_{4i}는 적분상수로 말뚝의 머리와 선단에서의 구속조건 및 활동면과 지층 경계위치에서의 말뚝의 연속조건에 의하여 결정된다. 말뚝머리의 구속조건으로는 자유(변위 및 회전 가능), 회전구속(변위만 가능), 힌지(회전만 가능) 및 고정(변위와 회전 모두 불가능)의 4종류를 생각할 수 있으며 β_{1i}는 $\sqrt[4]{E_{S1i}/4E_pI_p}$이고 β_{2i}는 $\sqrt[4]{E_{S2i}/4E_pI_p}$이다.

이와 같은 구속조건은 다음과 같은 상태와 대응시켜 생각할 수 있다. 즉 회전구속의 조건은 억지말뚝의 두부를 철근콘크리트의 지중보로 연결시킨 경우로 얻어질 수 있으며 힌지 조건은 억지말뚝의 두부를 강재 띠장으로 연결시키고 이 지중보를 앵커로 말뚝두부를 고정시킨 경우로 얻어진다. 한편 고정조건은 말뚝두부를 철근콘크리트의 지중보와 앵커로 말뚝두부를 고정시킨 경우로 얻어진다.

암반파괴와 같은 말뚝의 강성에 비하여 지반의 강성이 큰 경우를 제외하면 일반적으로 말뚝의 파괴는 휨응력에 의하여 발생된다. 따라서, 통상 말뚝의 안정에 대한 안전율 $(F_S)_{pile}$은 허용휨응력 σ_{allow}와 최대휨응력 σ_{max}의 비로 다음과 같이 구한다.

$$(F_S)_{pile} = \sigma_{allow} \ / \ \sigma_{max} \tag{3.5}$$

상기와 같이 휨 파괴를 발생하지 않는 경우에는 말뚝의 전단응력에 의하여 다음과 같이 검토할 필요가 있다.

$$(F_S)_{pile} = \tau_{allow} \ / \ \tau_{max} \tag{3.6}$$

여기서, τ_{allow}는 허용전단응력, τ_{max}는 최대전단응력이다. 위 두식의 안전율이 1보다 클 때 말뚝의 안정이 확보될 수 있다.

3.3 말뚝의 측방토압

사면의 안정과 말뚝의 안정 두 종류의 안정에 모두 줄말뚝에 작용하는 측방토압이 이용되고 있다. 따라서 산사태 억지말뚝의 설계에 있어서는 이 측방토압을 되도록 설계에 맞도록 산정하지 않으면 안된다. 원래 줄말뚝의 전면과 배면에는 서로 평형상태의 토압이 작용하고 있다가 활동토괴의 변형에 의하여 이 평형상태가 무너지게 된다. 여기서 취급하는 측방토압은 줄말뚝의 전면과 배면에 작용하는 토압의 차에 상당한다. 줄말뚝에 작용하는 측방토압의 산정식을 유도할 때 특히 고려할 점은 말뚝간격 및 말뚝주변지반의 소성상태의 설정이다. 즉, 일반적으로 말뚝에 부가되는 측방토압은 활동토괴가 이동되지 않는 0의 상태에서 부터 활동토괴가 크게 이동하여 말뚝주변의 지반에 수동파괴를 발생시킨 경우의 극한치까지 큰 폭으로 변화한다. 따라서, 사면안정에 있어서 수동말뚝을 설계하기 위하여는 어떤 상태의 측방토압을 이용하여야 적합한가를 선택하여야만 한다.

우선, 말뚝간격에 대하여는 줄말뚝 1개당에 작용하는 측방토압을 산정하기 위하여 그림 3.1(a)의 평면도에 사선을 친 부분의 지반거동만을 취급하는 것으로 충분하다. 이 부분을 확대하여 표시하면 그림 3.2와 같으며 두 개의 말뚝 사이 지반거동을 취급함에 따라 말뚝간격을 정확히 고려하게 되고 처음부터 줄말뚝의 문제로 취급할 수 있게 된다.

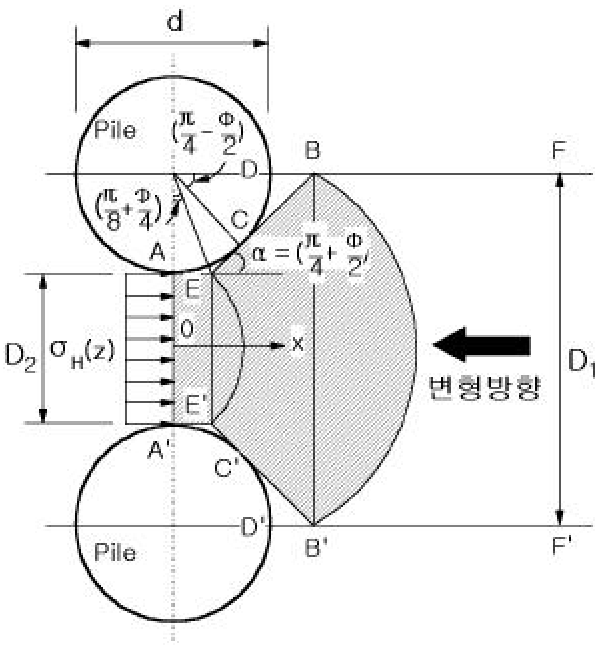


그림 3.2 말뚝주변지반의 소성상태 설정 (원형말뚝의 경우)

한편, 말뚝주변지반의 소성상태의 설정에 대하여는 만약 말뚝주변지반에 수동파괴가 발생하였다고 하면 그때는 산사태가 상당히 진행되어 활동면의 전단저항력이 상당히 저하하여 버리는 점과 수동파괴시 말뚝에 작용하는 측방토압이 상당히 커서 말뚝자체가 지탱하지 못할 염려가 있는 등 불안한 점이 많다.

따라서 설계에 적용될 수 있는 측방토압은 산사태의 진행에 따른 활동면의 전단저항력의 저하가 거의 발생하지 않는 상태에 있는 값을 적용하는 것이 가장 합리적이라고 생각된다. 이 조건을 만족하는 측방토압의 최대치를 산정하기 위하여 그림 3.2에서 사선을 친 부분만이 Mohr-Coulomb의 항복조건을 만족하는 소성상태에 있다고 가정한다. 이러한 가정은 사면 전체의 평형상태를 거의 변화시키지 않고 말뚝에 부가되는 측방토압을 산정하는 것을 의도하는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

이러한 가정하에 억지말뚝에 작용하는 측방토압은 소성변형지반 속의 측방토압 산정식을 이용하여 산정될 수 있다. 산사태 토층의 단위길이당 1개의 원형말뚝에 작용하는 측방토압의 최대치(설계에 이용할 수 있는 값중 최대치의 의미)는 다음 식으로 제안된 바 있다.

$$P(z)/d = K_{p1}\, c + K_{p2}\, \sigma_H(z) \tag{3.7}$$

여기서, d는 말뚝직경, c는 활동토괴의 점착력, $\sigma_H(z)$는 지반의 측방유동에 저항하여 말뚝전면으로부터 줄말뚝에 작용하는 토압으로 주동토압($\gamma z N_\phi^{-1} - 2 c N_\phi^{-1/2}$)을 사용함이 바람직하다. K_{p1}과 K_{p2}는 측방토압계수로 식(3.8) 혹은 식(3.9)로 표시된다.

우선 점착력(c)와 내부마찰각(ϕ)를 모두 가지고 있는 일반토사지반의 경우 측방토압계수 K_{p1}과 K_{p2}는 다음과 같다.

$$K_{P1} = \frac{1}{1-D_2/D_1}\left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{G_1(\phi)}\left\{\frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)}\left(\exp\left(\frac{D_1-D_2}{D_2}\tan\left(\frac{\pi}{8}+\frac{\phi}{4}\right)G_3(\phi)-1\right)+\frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)}\right\}-\frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)}\right] \tag{3.8a}$$

$$K_{P2} = \frac{1}{1-D_2/D_1}\left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{G_1(\phi)}\left(\exp\left(\frac{D_1-D_2}{D_2}\times\tan\left(\frac{\pi}{8}+\frac{\phi}{4}\right)G_3(\phi)\right)-\frac{D_2}{D_1}\right]\right. \tag{3.8b}$$

여기서, D_1 과 D_2는 각각 말뚝의 중심간격과 순간격(그림 3.1참조)

$G_1(\phi) = N_\phi^{1/2}\tan\phi + N_\phi - 1$

$G_2(\phi) = 2\tan\phi + 2N_\phi^{1/2} + N_\phi^{-1/2}$

$G_3(\phi) = N_\phi \tan\phi_0$

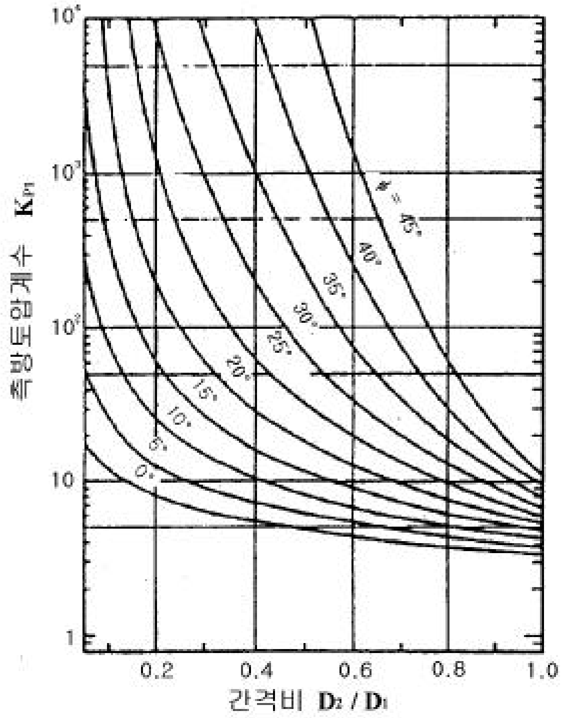
$G_4(\phi) = 2N_\phi^{1/2}\tan\phi_0 + 1$

$N_\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$

점착력이 0인 사질토의 경우는 식(3.7)에 c = 0을 대입하면 측방토압 p(z)/d는 σ_H만의 항으로 표시된다. 한편 내부마찰각이 0인 점성토의 경우는 별도의 유도과정으로 측방토압계수 K_{p1}과 K_{p2}가 다음과 같이 된다.

$$K_{p1} = \frac{1}{1-D_2/D_1}\left(3\ln\frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1-D_2}{D_2}\tan\frac{\phi}{8}\right) \tag{3.9a}$$

$$K_{p2} = 1 \tag{3.9b}$$



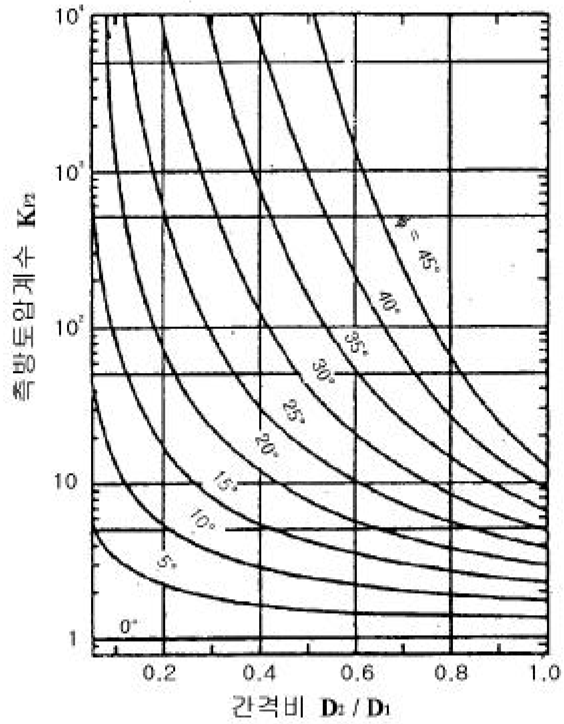


그림 3.3 측방토압계수 K_{p1}과 K_{p2} (원형말뚝의 경우)

식(3.9)중의 K_{p2}는 식(3.8)에 $\phi = 0$를 대입한 결과와도 일치한다. 따라서 측방토압계수 K_{p1}은 식(3.8a)로 구하되 $\phi = 0$인 점성토의 경우만은 식(3.9a)로 구하며, 측방토압계수 K_{p2}는 언제나 식(3.8b)만으로 구할 수 있다.

이들 측방토압계수식 (3.8)과 (3.9)을 그림으로 나타내면 그림 3.3과 같다. 즉 말뚝간격 D_1과 D_2로부터 결정되는 말뚝간격비 D_2/D_1과 내부마찰각 ϕ로부터 그림 3.3을 이용하면 간편하게 측방토압계수 K_{p1}과 K_{p2}를 구할 수 있다.

이미 앞에서 설명한 바와 같이 설계에 적용가능한 측방토압은 0에서 식(3.7)로 주어지는 최대치까지의 값이다. 즉, 활동토괴의 변형과 함께 줄말뚝에 측방토압이 차츰 증가되어 말뚝주변지반만이 소성상태가 발생할 때의 위 식으로 나타내는 최대치까지 달하게 된다. 여기에, 이상의 측방토압 부가정도를 나타내기 위하여 측방토압부가계수 α_m $(0 < \alpha_m < 1)$을 도입하면 식(3.10)과 같다.

$$p_m(z) = \alpha_m \times p(z) \tag{3.10}$$

이 측방토압부가계수 α_m은 변수로 사용될 수 있다. 우선 임의의 가상 활동파괴면에 대하여 말뚝의 안전율을 1보다 크게 되도록 α_m을 결정한 후 사면의 안전율을 계산한다.

3.4 SPILE 프로그램

앞에서 설명한 설계법에 의거 말뚝의 사면안정 효과를 고려한 산사태 억지말뚝 해석프로그램 SPILE(Stabilizing Piles to Control Landslide)을 개발하여 산사태를 방지하기 위한 억지말뚝공의 설계를 실시하여 오고 있다(과기처 등록번호 : 94-01-12-2970).

SPILE프로그램은 구릉지에서의 도로건설이나 택지개발시 발생되는 절,성토사면 및 자연사면에서의

»ç면활동을 파괴면이 토사층과 암층(풍화암) 사이에서 발생된 무한사면의 파괴형태로 취급하여 사면안정성을 검토하고 사면안정성이 부족한 경우 억지말뚝으로 보강하기 위한 해석프로그램이다. 또한 본 프로그램은 임의의 형태의 파괴면을 설정할 수 있으며 어떤 형태의 파괴면에 대하여도 그 파괴면의 형태를 입력시켜 사면안전율을 계산할 수 있는 특징이 있다. 이 프로그램을 사용하여 산사태 발생가능 지역에 안전한 억지말뚝의 합리적 설계가 가능하고 이를 통해 인위적인 요인으로 말미암아 발생되는 산사태 피해를 방지할 수 있다.

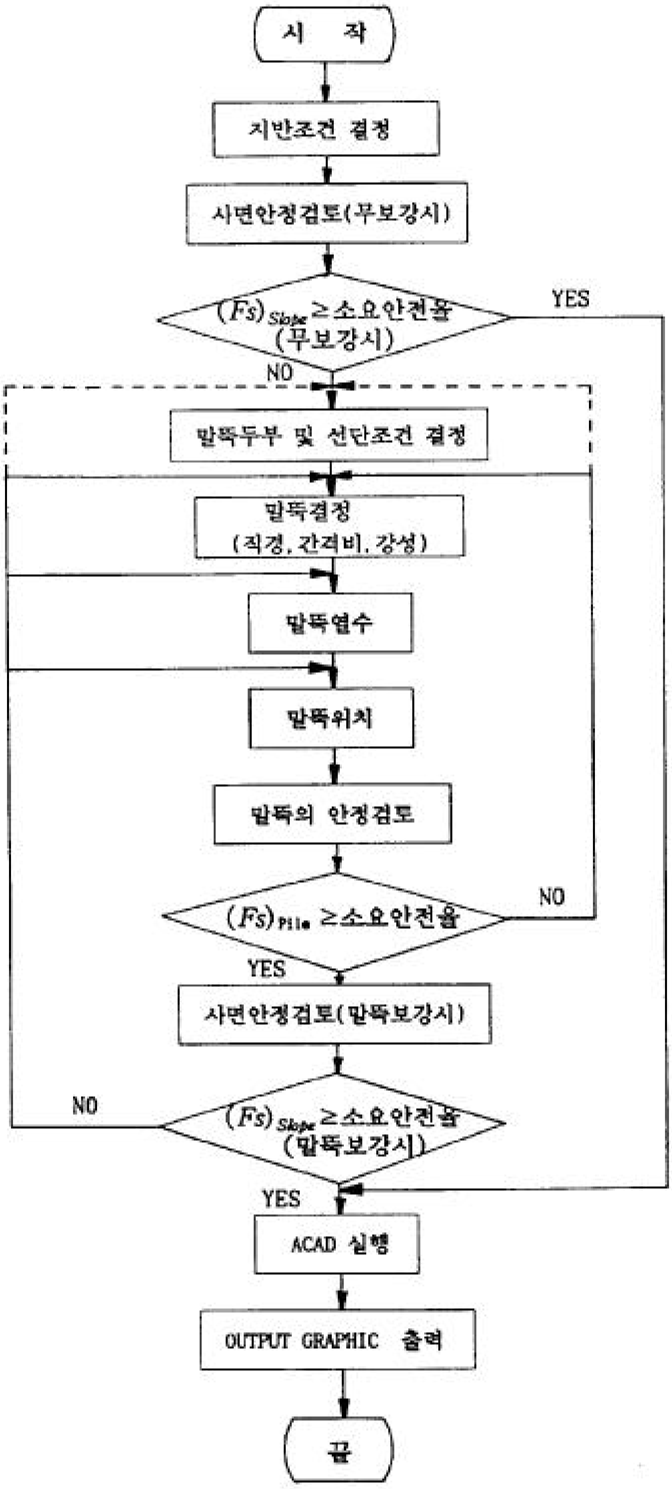


그림 3.4 SPILE **프로그램 흐름도**

본 프로그램은 산사태가 발생된(혹은 예정된) 사면의 사면안정해석, 억지말뚝의 사면안정효과를 고려한 사면안정해석 및 억지말뚝설계에 활용될 수 있다. 절토 혹은 성토시 발생될 수 있는 사면파괴를 줄말뚝을 이용하여 억지하고자 할 경우 사면안정해석 및 억지말뚝설계를 가능케 한다. 또한, 말뚝간격, 말뚝강성, 말뚝열수, 말뚝위치 및 지반계수들을 고려하여 지반과 말뚝상호간의 영향을 고려할 수 있도록 되어 있다. 그림 3.4는 SPILE 프로그램의 흐름도이다.

먼저 대상지반에 대한 지질, 지형, 지반에 대한 실내시험, 현장조사 등에 의하여 지반조사가 정밀하게 수행되어 토질정수와 지층단면도 등 지반조건을 정확히 결정할 수 있어야 한다. 이때 사면의 소요안전율과 말뚝의 허용응력도 함께 결정되어야 한다.

지반조건이 결정되면 결정된 단면에 대한 사면안정해석을 실시하여 사면에 대한 안정성을 검토한다. 이때 파괴면은 이미 균열과 지층으로 결정된 파괴면을 대상으로 하거나 발생될 가능성이 보이는 사면에 대하여 실시한다. 이렇게 안정을 검토한 사면의 안전율이 소요안전율을 만족하면 보강설계가 불필요하다. 그러나 해석사면이 소요안전율을 만족시키지 못하여 대책으로 억지말뚝공을 채택한다면 말뚝을 이용한 산사태 보강대책은 다음의 순서에 따라 설계가 가능하다.

우선 말뚝의 구속조건을 결정하여야 한다. 말뚝의 구속조건으로는 회전구속, 힌지, 고정, 자유의 4가지 경우로 생각할 수 있다. 말뚝두부회전 구속조건은 일렬로 설치된 줄말뚝의 두부를 띠장으로 서로 연결하고 이를 다시 철근콘크리트 지중보로 capping한 경우에 해당된다. 말뚝두부 힌지구속조건은 간단한 강재로 줄말뚝 두부를 서로 연결시킨 후 이를 앵커로 지지시켜 말뚝두부에 회전각은 발생되나 변위는 발생되지 않는 경우에 해당된다.

말뚝두부고정은 회전구속 조건시의 철근콘크리트 지중보를 타이로드, 앵커 등에 의해 다시 구속한 경우에 해당된다. 한편, 말뚝의 선단구속조건은 암반속에 관입된 말뚝의 관입깊이에 따라 결정된다. 즉 억지말뚝을 근입시킨 암의 종류에 따라 선단구속조건은 힌지나 고정으로 취급한다. 억지말뚝의 사면안정효과를 효과적으로 얻기 위하여는 말뚝두부의 회전과 변위(혹은 그중 하나)를 구속함이 바람직하다.

그 다음으로 억지말뚝의 직경, 강성과 설치간격을 결정한다. 그런 후 억지말뚝 열수 및 그 설치위치를 결정한다. 이와 같이 말뚝에 대한 성상이 결정되면 말뚝을 포함한 사면의 전체안전율을 검토하여야 한다. 만약 이와 같이 결정된 억지말뚝의 제원으로 사면의 안정성이 확보되지 않으면 그림 3.4의 feed back선을 따라 억지말뚝에 관련된 사항들 즉, 구속조건, 직경, 강성 및 설치간격을 다시 결정하여 동일작업을 반복하여야 한다. 이때 억지말뚝에 작용하는 측방토압을 먼저 산정하여 말뚝의 안전성과 사면의 안전성을 검토하여야 한다. 이 검토에서 말뚝의 안전성과 사면의 안전성을 동시에 만족하도록 억지말뚝에 관한 제반사항을 수절하면서 사면안정해석을 실시한다. 이때 말뚝의 소요안전율은 1.0, 사면의 소요안전율은 1.1 1.3중 적절한 값으로 정하여 사용한다.

이러한 순서에 의거 사면안정해석 및 억지말뚝의 설계를 실시하며 그 결과를 CAD를 이용하여 GRAPHIC으로도 출력한다.

4. 교대기초말뚝의 안정해석법

4.1 교대의 측방이동

최근에는 교량을 지지하기 위한 교대, 항만시설을 위한 잔교, 도로의 성토 등이 연약지반상에 실시되는 경우가 많아지고 있다. 그러나 이러한 구조물이 연약지반상에 축조될 경우, 교대나 잔교의 배면 뒤채움이나 도로의 성토 등은 하부지반에 편재하중으로 작용하게 되어 지반의 측방유동을 유발시키게 된다. 또한 뒤채움이나 성토로 형성된 사면지반의 안정 측면에서도 매우 불안정하게 되는 경우가 많다. 이와 같은 측방유동이 발생될 가능성이 보이는 연약지반에 교대기초말뚝이 설치되어 있으면 말뚝은 지반으로부터 측방토압을 받게 된다. 통상적으로 말뚝이 수평으로 이동하려면 지반으로부터 저항을 받게 된다. 그러나 불안한 사면지반에서는 기초 말뚝이 측방토압에 저항하여 줄 수 있는 지반의 저항력도 크게 부족하게 되어 상부구조물은 수평으로 이동할 수 밖에 없게 된다 결국 이러한 현상은 상부교량에 막대한 피해를 주게되어 그 대책이 마련된 예가 많이 보고되고 있는 실정이다.

그림 4.1 교대기초말뚝이 설치된 지반의 안정

이러한 교대의 피해는 크게 두 가지로 구분된다. 하나는 교대가 기초말뚝과 함께 교량구조물쪽으로 수평변위가 발생하여 교량의 Girder에 균열이 발생하는 경우이며 다른 하나는 교대본체 옹벽이 뒤로 기울어져 Girder가 추락한 경우이다.

교대기초말뚝의 안정은 교대배면뒤채움의 편재하중에 의하여 발생되는 지반의 측방토압과 사면안전율 등에 많은 영향을 받게 된다. 따라서, 앞에서 설명된 소성변형지반속 말뚝의 측방토압산정 이론식을 이용하여 기초말뚝의 사면안정효과 등을 고려한 교대기초말뚝의 해석법을 제안한바 있다(홍원표 외 3인, 1991).

4.2 교대기초말뚝의 안정해석

교대기초말뚝의 설계시에는 사면의 안정검토와 말뚝의 안정검토가 반드시 실시되어야만 한다. 불안한 사면지반에 말뚝이 일렬로 설치되어 있으면 이 말뚝은 사면활동을 방지하는 역할을 하게 된다. 한편 이 경우 말뚝은 사면활동면 상부의 토괴로부터 측방토압을 받게 된다. 이 문제를 해석하기 위해서는 이 말뚝의 측방토압을 정확하게 산정하여 말뚝의 사면활동 저지능력 및 말뚝의 거동에 관한 분석을 정확하게 하여야만 한다. 그러나 말뚝에 작용하는 측방토압의 발생기구는 복잡하기 때문에 정확하게 하기가 매우 어려워 강성벽에 사용하는 고전적 토압론에 의거한 토압산정식을 사용하고 있는 실정이다.

일반적으로 말뚝이 설치된 사면안정 문제에 있어서는 사면의 안정과 말뚝의 안정에 대한 두 가지의 해석이 그림 4.1에서와 같이 실시되어야 한다. 왜냐하면 말뚝이 설치된 사면의 전체안정은 사면과 말뚝 모두의 안정이 확보되었을 경우에만 비로소 가능하기 때문이다.

만약, 말뚝에 작용하는 측방토압(혹은 붕괴토괴에 저항하는 말뚝의 저항력)이 알려져 있다면, 먼저 말뚝의 안정이 수평하중을 받는 말뚝(주동말뚝)의 해석법을 응용하여 그림 4.1(b)와 같이 검토될 수 있다. 그러나, 주동말뚝의 경우는 수평하중이 말뚝머리 부분에 집중하중으로 작용하나 수동말뚝은 사면파괴면 상부의 측방변형지반을 통하여 말뚝에 분포하중으로 작용하게 됨에 유의하여야 한다.

이상의 말뚝안정계산에서 말뚝의 안정이 확보되면 사면의 안정 계산이 그림 4.1(a)에서와 같이 파괴면의 전단저항 및 말뚝의 저항력을 고려하여 실시될 수 있다.

교대기초말뚝의 안정해석에 적용된 말뚝과 사면의 안정해석법, 말뚝에 작용하는 측방토압, 지반계수 등에 대한 내용은 억지말뚝이 설치된 사면의 안정해석법에서 설명한 것과 동일하다.

4.3 CHAMP 프로그램

프로그램 CHAMP(**CH**UNG-ANG **A**BUT**M**ENT **P**ILES)는 이러한 교대기초말뚝의 안정해석용

으로 개발된 해석프로그램이다(**과기처등록번호** : 94-01-12 -1022). **즉**, CHAMP**프로그램은 측방유동이 발생할 가능성이 있는 연약지반에 말뚝을 일정간격으로 설치한 위에 교대를 설치하고 배면에 뒤채움을 실시할 경우의 교대안정검토용 프로그램이다**. **또한**, **잔교**(Landing pier)**기초말뚝과 벽강관안벽의 사면안정효과를 검토할 경우에도 활용될 수 있다**.

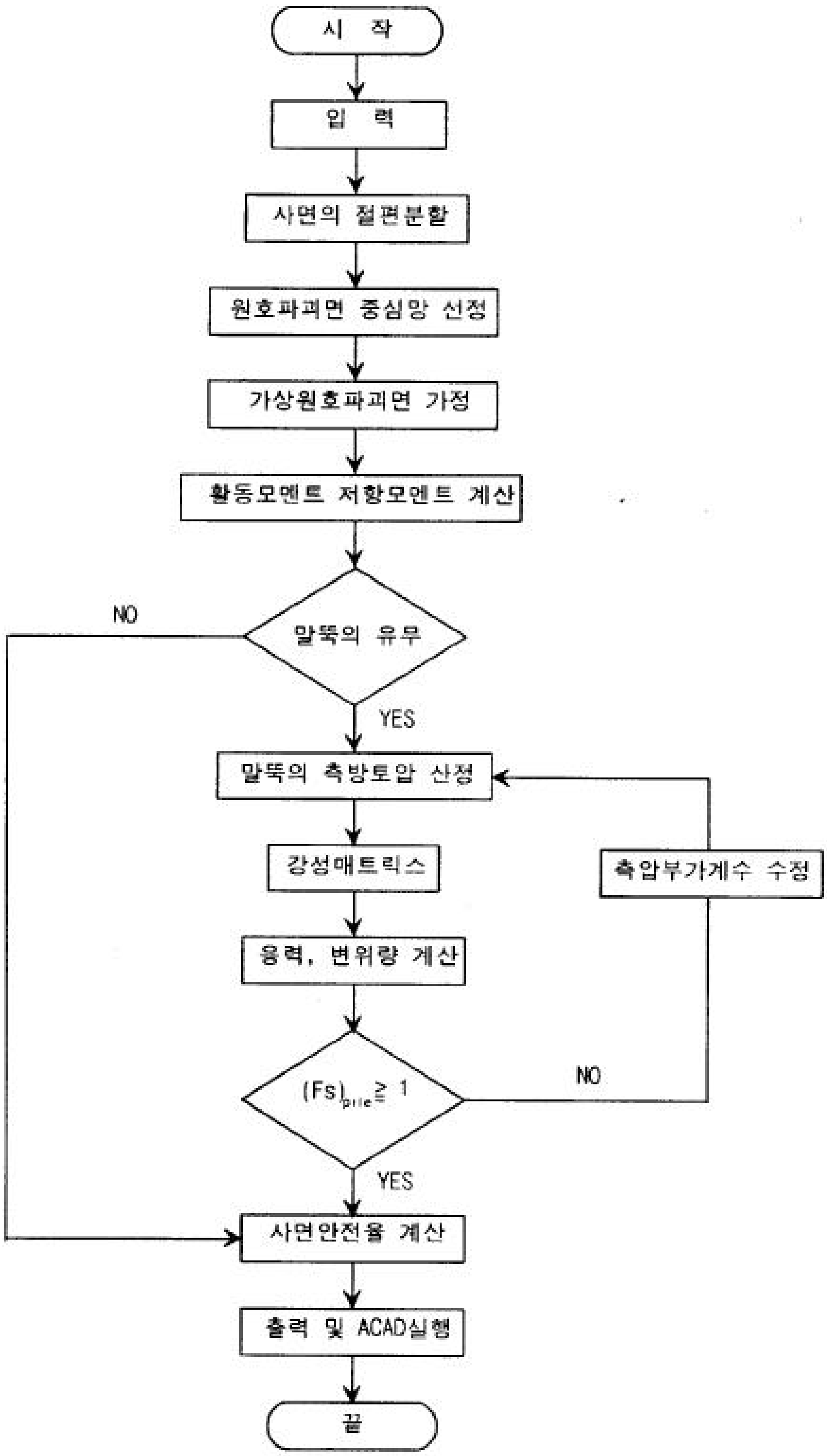


그림 4.2 CHAMP **프로그램 흐름도**

본 프로그램에서는 먼저 가상원호활동면을 기준으로 활동면 상부의 활동토괴로 부터 줄말뚝에 작용하는 측방토압을 산정하여 교대기초말뚝의 안정해석을 실시하며, 교대기초말뚝이 저항할 수 있는 측방토압만을 저항력으로 활용하여 사면의 안전율계산에 말뚝의 저항력을 추가시켜 사면안정의 기여도를 평가할 수 있도록 되어 있다. 그림 4.2는 CHAMP 프로그램의 흐름도이다.

먼저, 가상원호활동면의 원점으로 예상되는 부분에 원점망을 작성하여 원점망의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상원호활동면에 대하여 사면안전율 계산작업을 반복하여 최소사면안전율이 구하여지는 원점과 가상원호활동면을 찾는다. 사면안전율계산은 한계평형원리에 입각한 분할법을 사용하였고 절편에 작용하는 부정정력은 서로 평형을 이루고 있다고 가정하였다. 각각의 가상원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다.

교대기초말뚝이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전율을 계산한다. 교대기초말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동토괴로 부터 측방토압을 받고 이 측방토압에 의하여 발생될 말뚝의 수평변위에 대하여, 말뚝이 지반으로 부터 지반반력을 받도록 한 상태에서 말뚝머리와 선단의 구속조건을 고려하여 말뚝의 강성Matrix를 구성한다.

말뚝의 휨응력과 전단응력 및 변위량을 계산하여 말뚝의 안전율을 계산한다. 만약 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 낮으면 측압부가계수를 수정하여 말뚝의 측방토압을 줄여 계산을 반복하여 말뚝의 안전율이 소요안전율 이내가 될때까지 반복한다. 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 크게 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 사용하여 가상원호활동면의 원점을 기준으로 저항모멘트를 구한다. 사면안전율 계산시 구하였던 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트에 말뚝에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전율을 계산하여 말뚝의 사면안정효과를 산정한다.

이러한 계산작업은 다른 가상원호활동면에 대하여도 반복실시하여 한 원점에 대한 무수한 가상원호활동면중 최소안전율을 가지는 활동면과 안전율을 구한다. 또한 이 원점을 원점망상의 각 절점으로 이동시키면서 동일한 계산을 반복한다.

5. Windows용 해석 프로그램 SLOPILE의 개발

5.1 SLOPILE 프로그램의 구성

말뚝 효과를 고려한 기존의 사면안정해석 프로그램인 CHAMP와 SPILE을 개선하여 새로운 프로그램 SLOPILE을 개발하였다. 절・성토사면 및 무한사면에 대한 원호파괴면해석(Fellenius 방법, Bishop 간편법) 및 평면파괴면해석이 가능하도록 개발한 프로그램 SLOPILE의 흐름도는 그림 5.1과 같다.

본 프로그램에서는 먼저 가상원호활동면을 기준으로 활동면 상부의 활동토괴로 부터 줄말뚝에 작용하는 측방토압을 산정하여 말뚝의 안정해석을 실시하며, 말뚝이 저항할 수 있는 측방토압만을 저항력으로 활용하여 사면의 안전율계산에 말뚝의 저항력을 추가시켜 사면안정의 기여도를 평가할 수 있도록 한다.

먼저, 해석대상사면의 해석을 위해 전체 사면을 일정한 분활요소로 구분한 후 사면안정해석법을 선택한다. 그리고 설정된 사면안정해석법에 따라 무한사면해석과 원호파괴해석으로 구분하여 실행되도록 하였다. 원호파괴면 해석법의 경우 가상원호활동면의 원점으로 예상되는 부분에 원점망을 작성하여 원점망의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상원호활동면에 대하여 사면안전율 계산을 반복하여 최소사면안전율이 구하여지는 원점과 가상원호활동면을 찾는다. 사면안전율계산은 한계평형원리에 입각한 절편법을 사용하였고, 각각의 가상원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다.

말뚝이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 바로 사면안전율을 계산한다. 그러나 만약 말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동토괴로 부터 측방토압을 받고 이 측방토압에 의하여 발생될 말뚝의 수평변위에 대하여, 말뚝이 지반으로부터 지반반력을 받도록 한다. 또한, 말뚝머리와 선단의 구속조건을 고려하여 말뚝의 강성매트릭스를 작성한다.

말뚝의 휨응력과 전단응력 및 변위량을 계산하여 말뚝의 안전율을 계산한다. 만약 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 낮으면 측압부가계수를 수정하여 말뚝의 측방토압을 줄여 계산을 반복한다. 이러한 작업을 말뚝의 안전율이 소요안전율 이내가 될때까지 반복한다.

말뚝의 안전율이 소요안전율보다 크게 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 사용하여 가상원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 사면안전율 계산시 구하였던 사면파괴면에서의 전단저항에 의한 저항모멘트에 말뚝에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전율을 계산하여 말뚝의 사면안정효과를 산정한다.

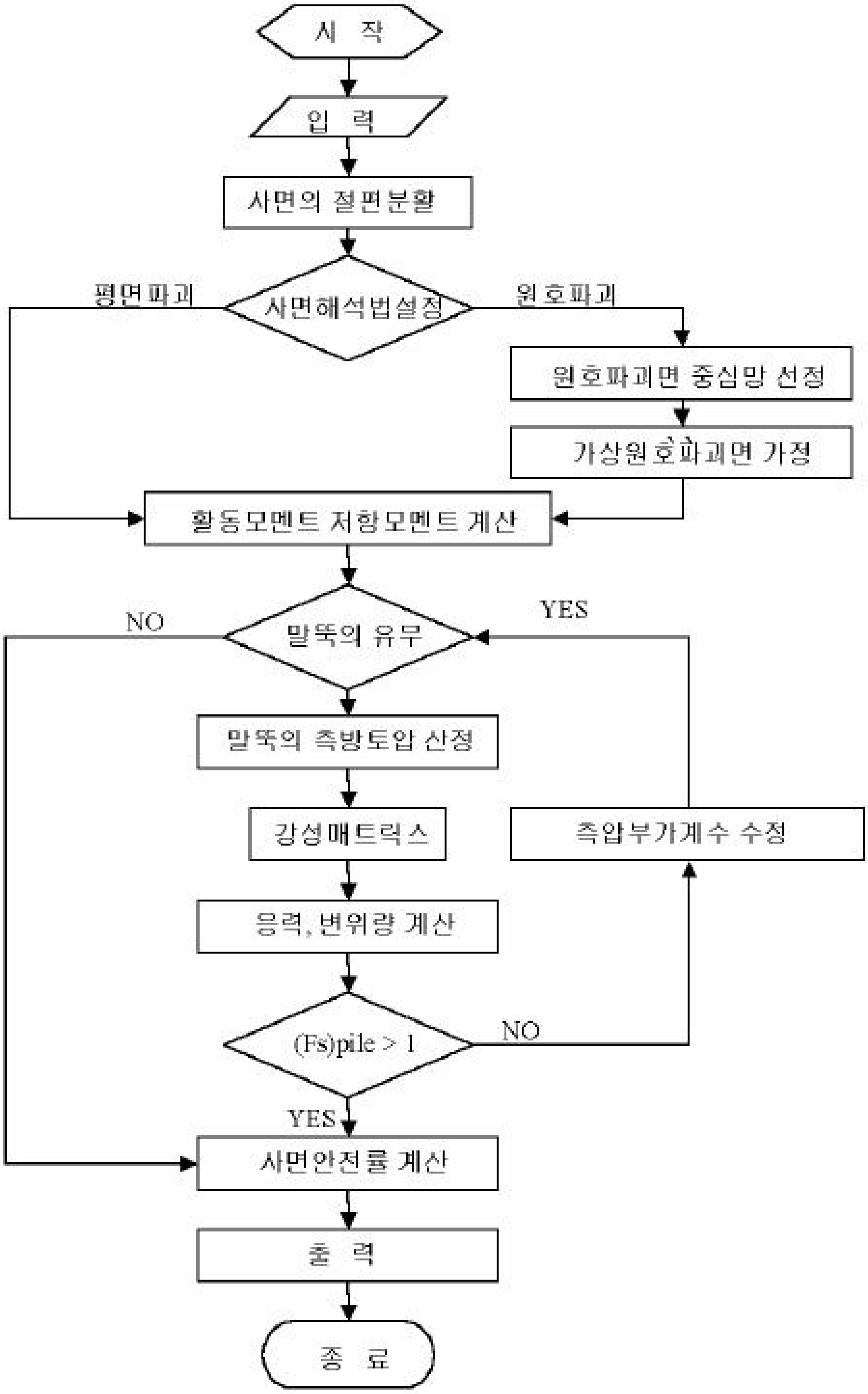


그림 5.1 SLOPILE 프로그램 흐름도

이러한 계산작업은 다른 가상원호활동면에 대하여도 반복실시하여 한 원점에 대한 무수한 가상원호활동면중 최소안전율을 가지는 활동면과 안전율을 구한다. 또한 이 원점을 원점망상의 각 절점으로 이동시키면서 동일한 계산을 반복한다.

5.2 SLOPILE 프로그램의 사용방법

SLOPILE는 Windows를 기반으로 제작된 프로그램으로 Windows에서 적용되는 장점들, 예를 들어 멀티태스킹(Multitasking)의 지원, 그래픽 디바이스 인터페이스, 시각적인 환경 등을 갖추고 있기 때문에 기존 Dos용 프로그램인 CHAMP, SPILE에서 나타난 사용상의 어려움을 SLOPILE에서는 쉽게 해결할 수 있다. 또한 데이터의 입력 및 수정을 화면상 메뉴에서 제시하는 방식에 의거 쉽게 작성할 수 있으므로 데이터 입력시의 에러를 최소화 할 수 있으며 출력 및 해석결과를 화면에서 즉시 확인할 수 있으므로 쉽게 수정하여 원하는 해석결과를 얻을 수 있다.

그림 5.2에서부터 그림5.12까지는 SLOPILE의 실행화면으로 각종 해석단면의 정보에서 지반의 토질특성, 말뚝의 제원 및 사면안정해석방법의 설정 등 억지말뚝이 설치된 사면에 대한 안정해석에 있어 필요한 모든 파라미터들을 쉽게 입력하고 수정할 수 있도록 메뉴와 다이얼로그 형태로 설정된 것을 보여주고 있다. 따라서 아래의 그림에서와 같은 순서로 프로그램을 수행하면 쉽게 사면안정해석을 수행할 수 있다.

(1) 해석단면선택 : 기존에 수행한 해석단면 불러오기

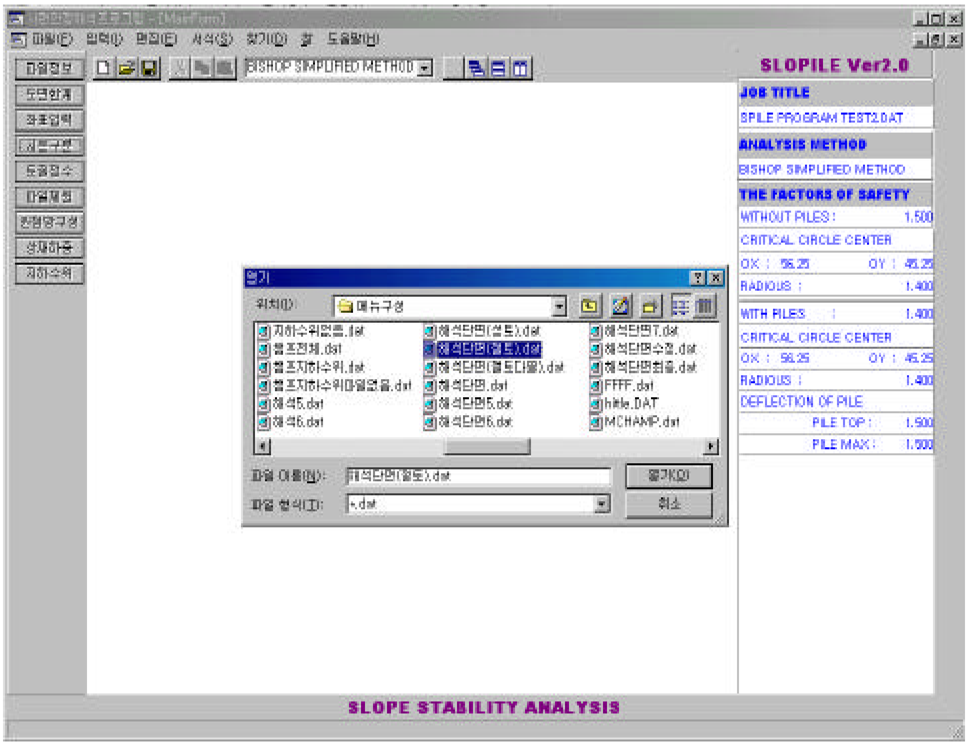


그림 5.2 해석단면 불러오기

(2) **해석단면에 대한 정보입력 : 프로젝트명, 회사명, 사용자 설정**

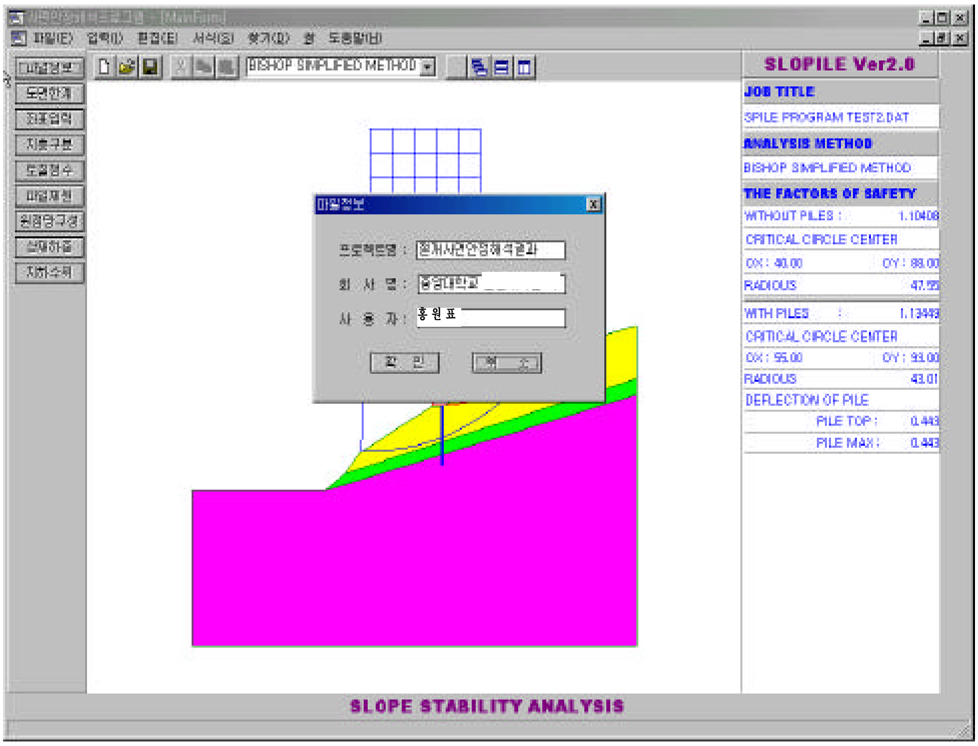


그림 5.3 해석단면 정보입력

(3) **해석단면의 절점 좌표입력**

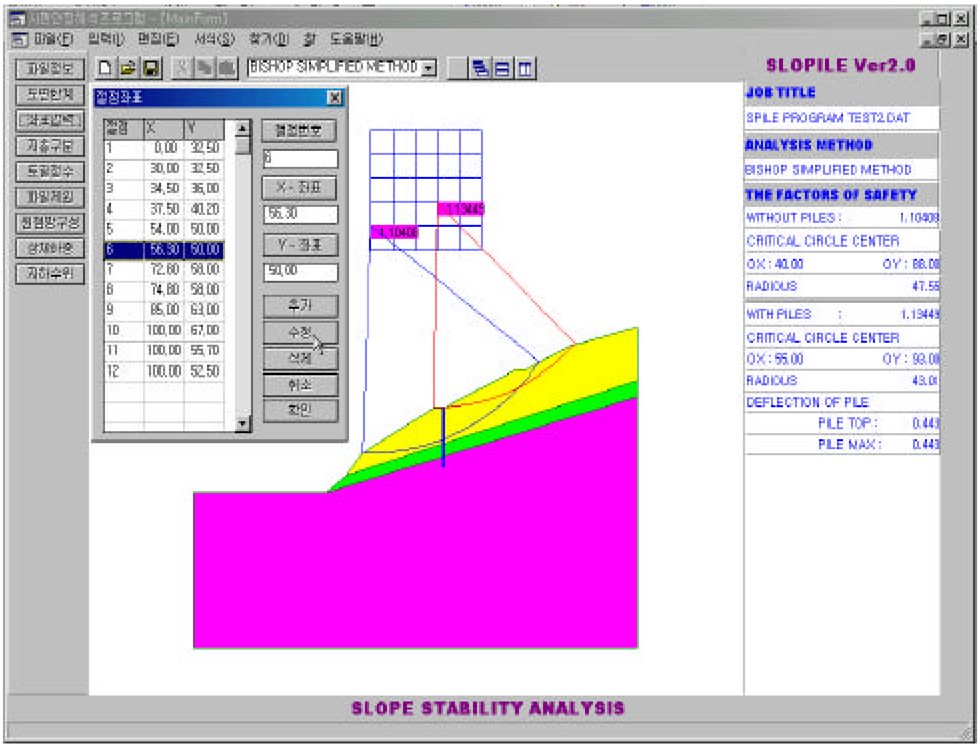


그림 5.4 해석단면의 절점 좌표입력

(4) **절점좌표을 이용하여 해석단면의 지층구분**

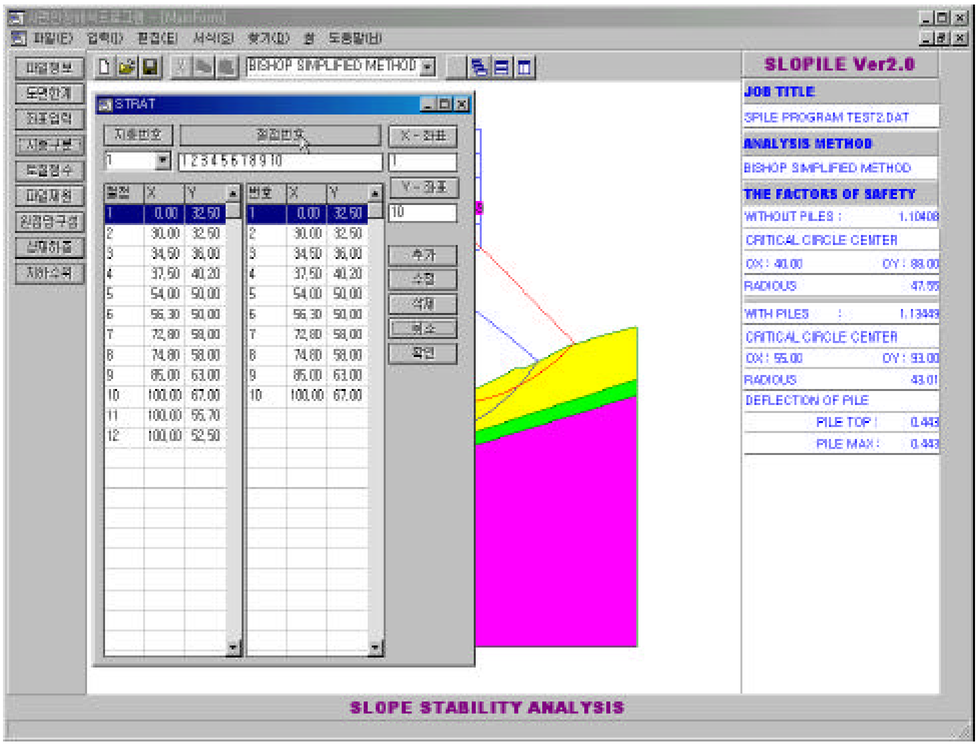


그림 5.5 해석단면 지층구분

(5) **각 지층에 대한 토질정수 입력 : 지층명, 점착력, 내부마찰각, 단위중량, 탄성계수 등 각종 지층에 대한 정보 입력**

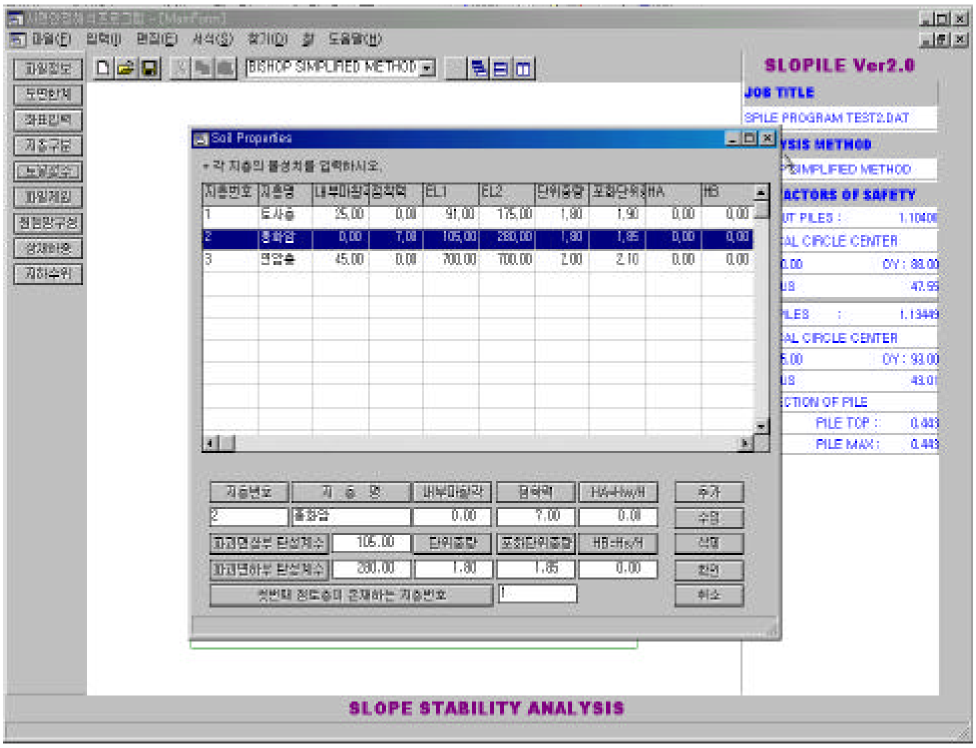


그림 5.6 각 지층에 대한 토질정수 입력

(6) **말뚝에 대한 제원 입력** : **간격비, 직경, 말뚝제원, 두부조건 등 말뚝에 대한 각종 정보 입력**

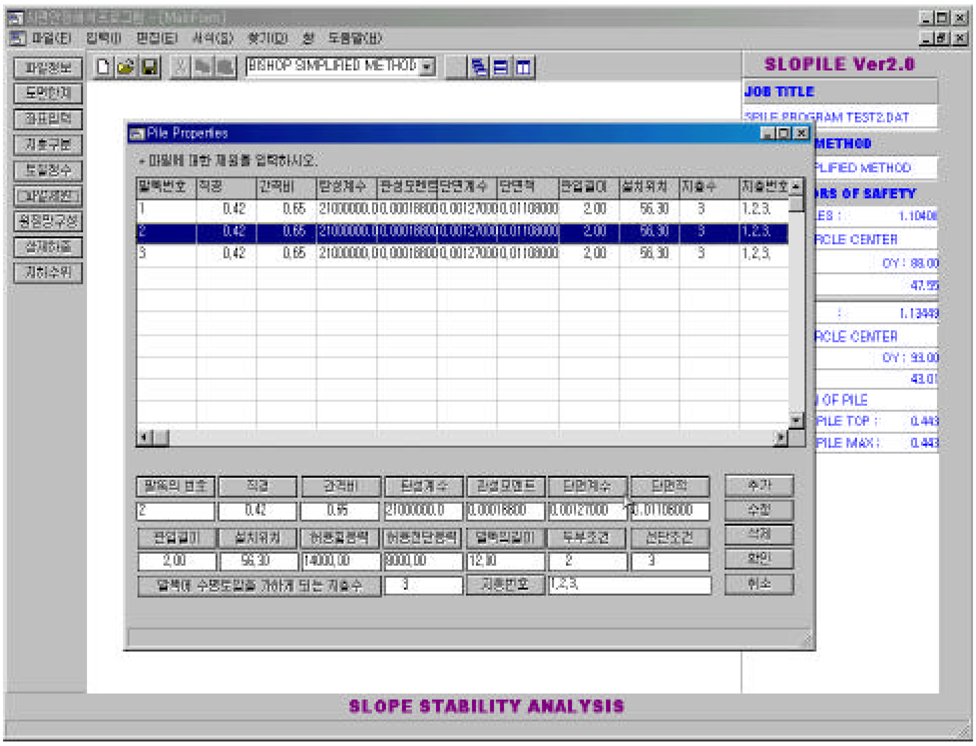


그림 5.7 **말뚝에 대한 제원 입력**

(7) **지하수위 입력**

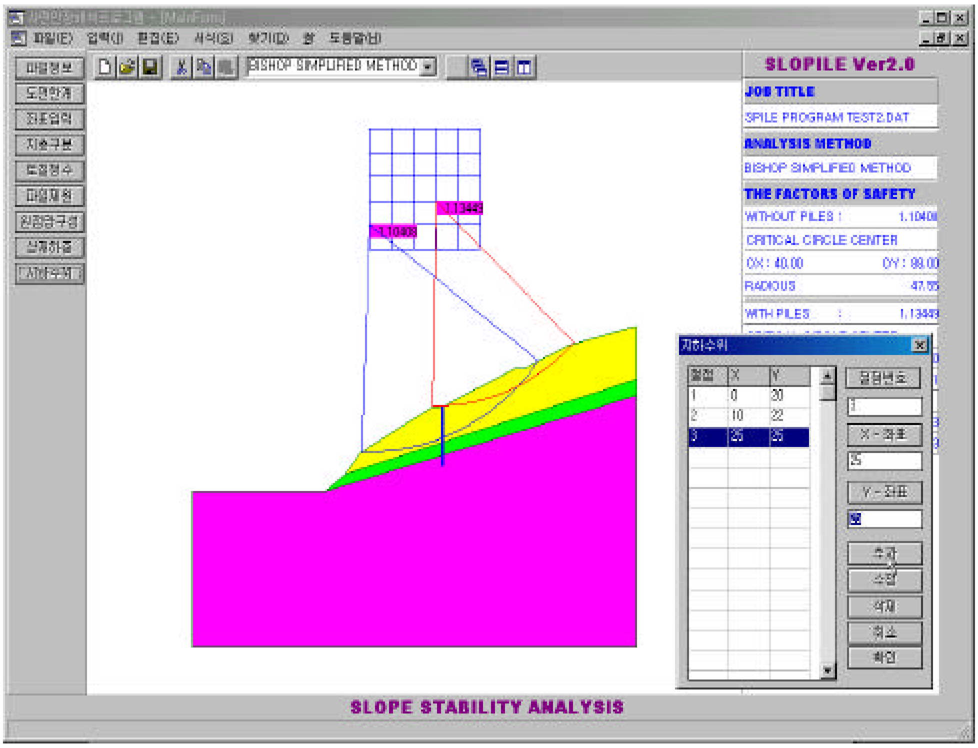


그림 5.8 **지하수위 입력**

(8) **해석 원점망구성 : 원점망구성, 분활절편수 등 정보입력**

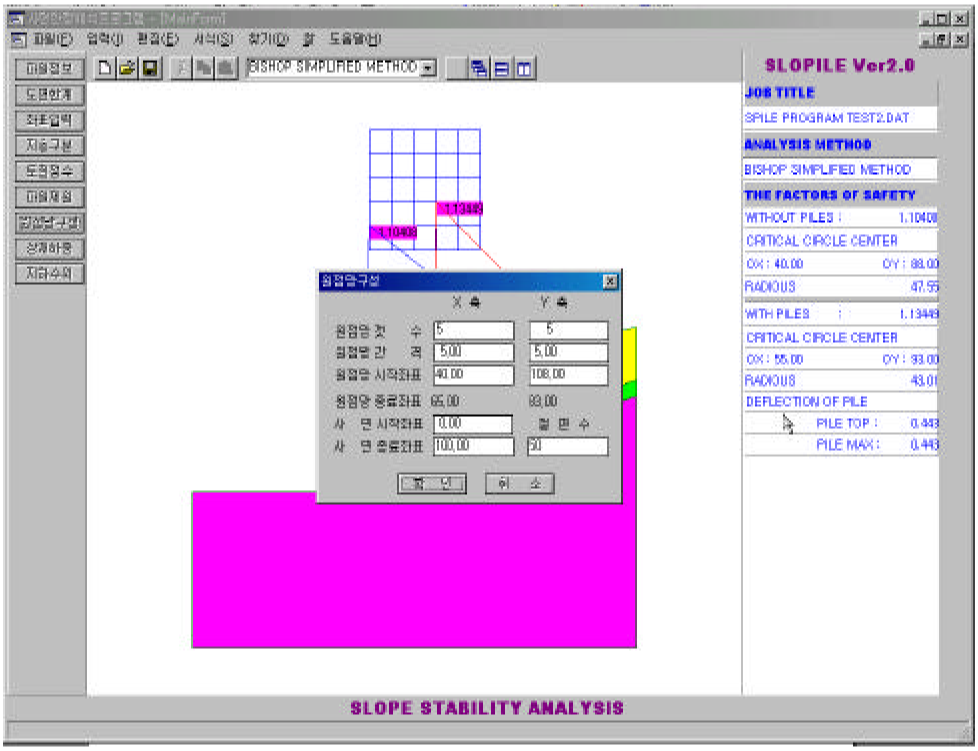


그림 5.9 **원점망 구성**

(9) **사면안정해석법 선택 : 무한사면해석,** Fellenius **방법,** Bishop **간편법**

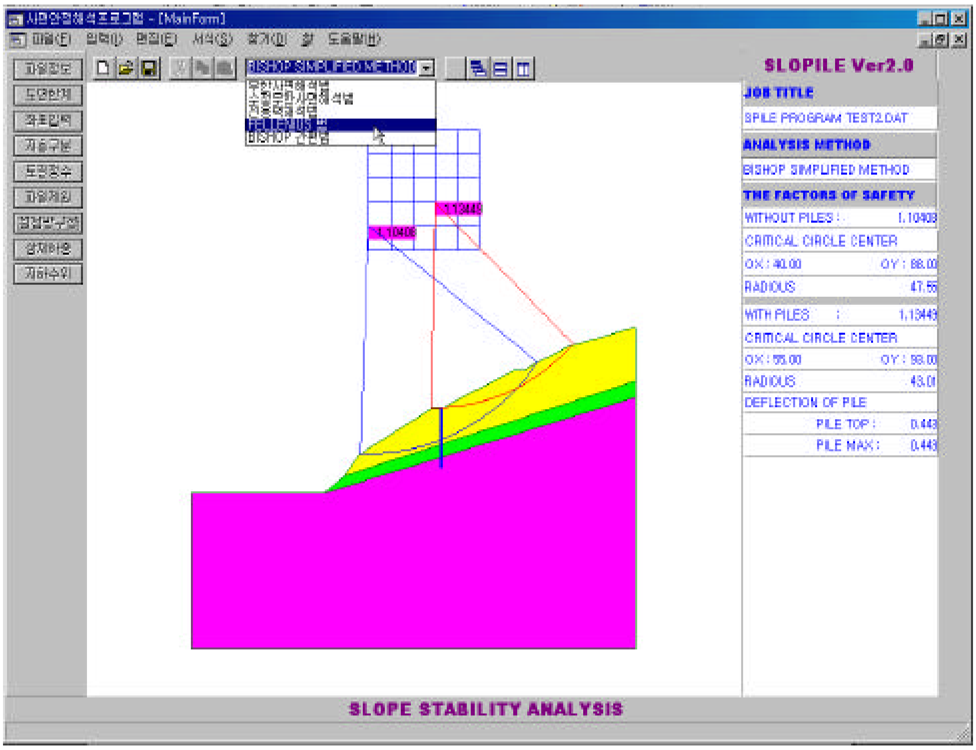


그림 5.10 **사면안정해석법 선택**

(10) **사면안정해석 수행과정 : 선택한 사면안정해석법에 대한 수행과정**

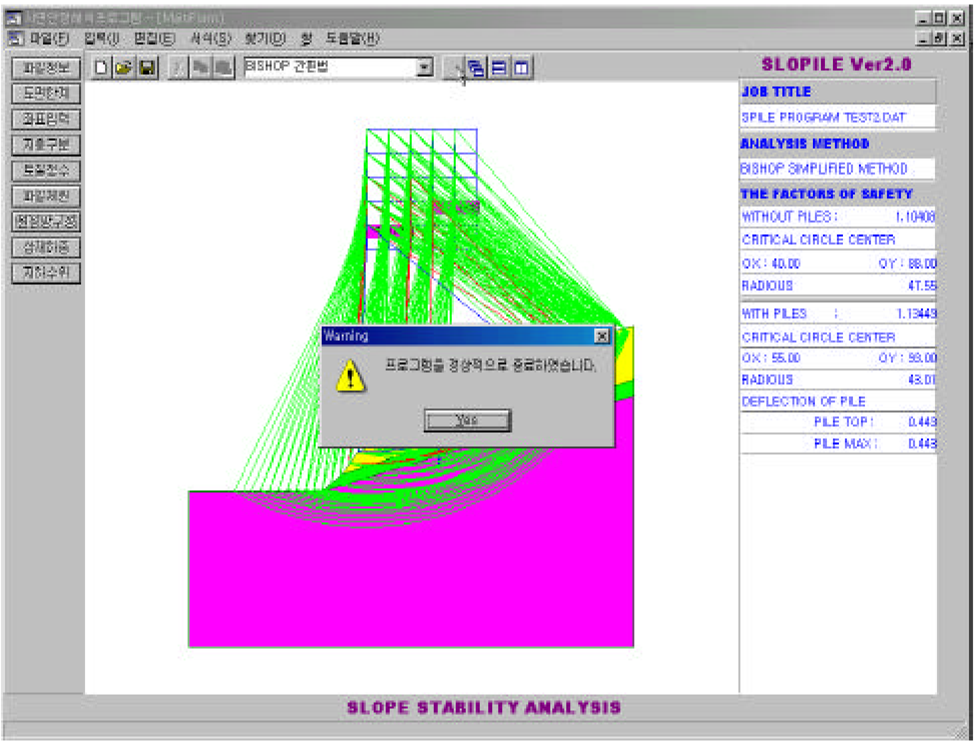


그림 5.11 사면안정해석 수행과정

(11) **사면안정해석결과 : 해석결과에 대한 파괴면과 안전율을 화면상에서 즉시 확인**

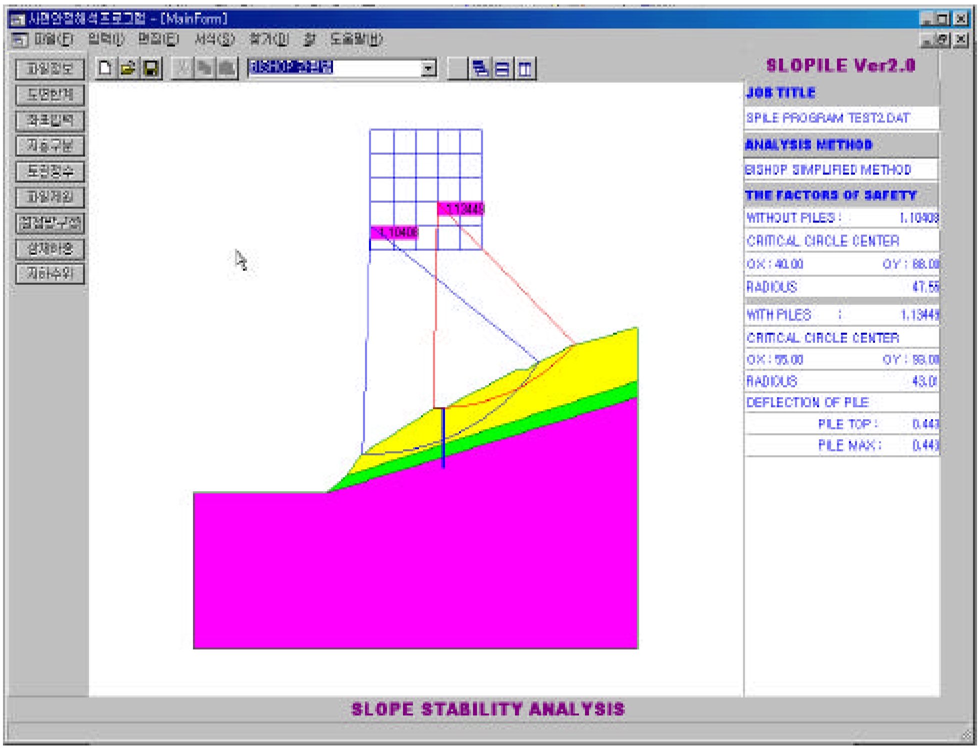


그림 5.12 사면안정해석결과

6. SLOPILE을 이용한 해석예

6.1 성토사면

6.1.1 해석대상사면

그림 6.1의 해석단면은 수정된 해석프로그램에 대한 특성분석을 실시하기 위하여 일반적인 성토사면의 형태를 가상적으로 작성하였다. 해석단면에 대한 물성치는 일반적으로 현장사면에 적용되는 내용을 기준으로 작성하였다. 즉 그림 6.1에서 보는 바와 같이 지표면 매립층하부에 약 20m심도의 연약층이 존재하는 대상지반에 6m성토가 실시될 경우, 사면경사부분에 억지말뚝을 설치하여 성토사면의 활동에 대한 안정 및 성토체의 상재하중으로 인한 연약층의 측방유동을 방지하도록 한다.

그림 6.1에서 보는 바와 같은 토층에 대한 토질정수는 상부 성토층에 대하여는 내부마찰각이 27°, 습윤단위중량과 포화단위중량이 각각 1.8 t/m^3과 1.9 t/m^3으로 한다.

또한, 매립층은 내부마찰각이 25°, 습윤단위중량과 포화단위중량이 각각 1.7 t/m^3과 1.8 t/m^3이며, 하부의 연약층은 비배수전단강도가 2.5 t/m^2이며, 습윤단위중량과 포화단위중량은 각각 1.65 t/m^3과 1.75 t/m^3으로 한다. 한편 연약층 하부의 풍화토 에 대해서는 내부마찰각을 35° 로 하고 습윤단위중량는 2.0 t/m^3으로, 포화단위중량은 2.1 t/m^3을 사용한다.

이와 같은 성토사면의 경우에는 일반적인 파괴형태는 성토체의 상부지역에서 파괴가 발생하는 경우가 일반적이며 연약층의 심도가 깊을 경우에는 파괴면의 심도가 대단히 깊게 발생한다. 여기서는 성토사면의 파괴면이 연약층내에서 일어나는 것으로 가정하였으며, 또한 기존에 사용된 해석법(Fellenius 방법과 Bishop 간편법)과 비교·연구를 실시하기 위하여 동일한 파괴원에 대해서만 특성분석을 실시하였다.

억지말뚝으로는 H-말뚝(H-300×300×10×15)을 사용하였고 말뚝해석에 적용되는 직경은 말뚝설치를 위한 천공경으로 420mm를 선정하고 하부 풍화토층 이하까지 근입시켜 사용하기로 하고 말뚝의 설치간격은 1.25m로 하여 말뚝의 간격비 D_2/D_1을 0.65로 한다. 안정해석을 실시하기 위한 그밖의 사항에 대하여는 다음과 같이 결정하기로 한다.

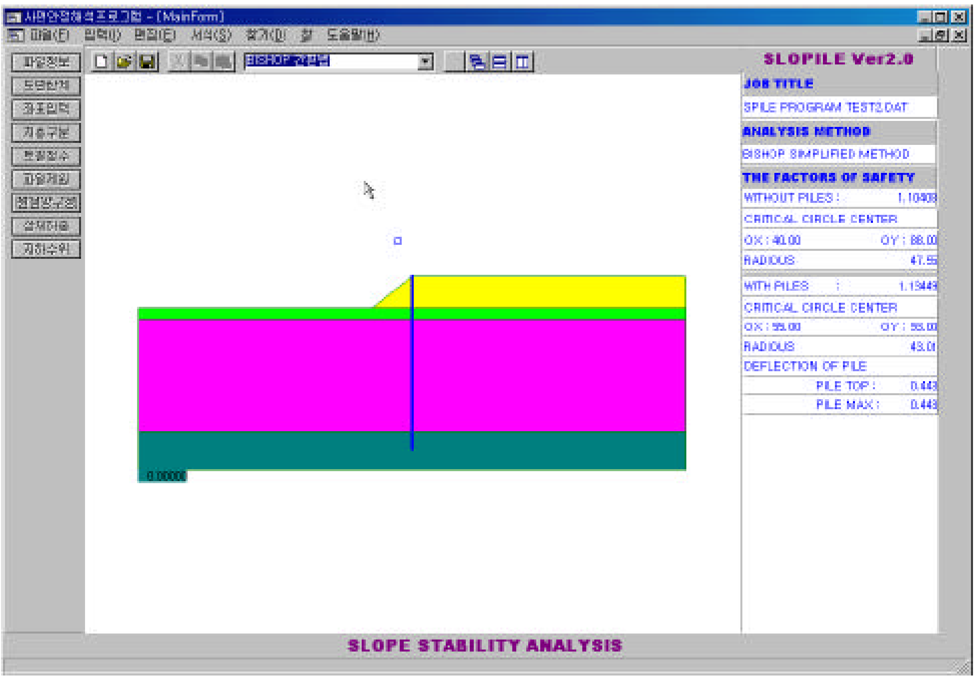
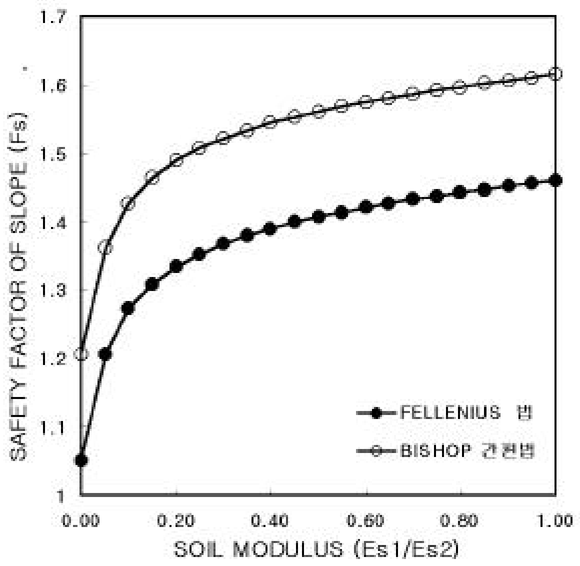


그림 6.1 성토사면 해석단면



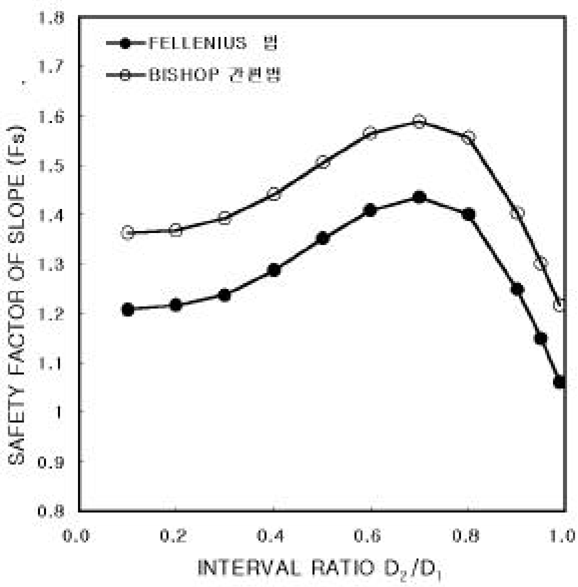


그림 6.2 지반계수에 따른 사면안전율 변화　　　그림 6.3 말뚝의 간격비에 따른 사면안전율 변화

1) 지하수위면은 지표면과 평행하게 존재한다.

2) H-Pile의 탄성계수는 $2.1 \times 10^6\ kg/cm^2$으로 한다.

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

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

5) 지반계수 E_s에 대하여는 사면활동면 상부 매립층의 지반계수 E_{s1}은 91 t/m^2으로 하고 연약층에 대하여는 사면활동면의 상부와 하부를 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^2으로 한다.

6.1.2 사면 안정에 영향을 미치는 요소

1) 지반계수의 영향

사면의 안정에 기여하는 말뚝의 효과에 대한 고찰에서 사면안전율에 관계하는 지반계수의 영향은 그림 6.2에서 보는 바와 같이 가장 큰 변수로 작용함을 볼 수 있다. 또한, 해석단면에 사용되는 지반계수는 파괴활동면을 기준으로 활동면 상하의 지반계수를 E_{s1}, E_{s2}로 구별한다. 지반계수비(E_{s1}/E_{s2})에 따른 사면의 안전율을 구하면 지반계수비가 증가함에 따라 사면안전율은 급격히 증가한다. 활동면 상부지반계수 E_{s1}의 값이 E_{s2}에 접근하면, 즉 사면 활동면 상하의 지반반력계수가 같아지면 사면안전율은 소요안전율을 만족할 정도로 크게 된다.

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

그림 6.2에서 보는 바와 같이, 사면파괴면 상부지반에서의 말뚝변위에 대응하는 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 매우 적다. 그러나, 지반효과를 고려한 경우, 억지말뚝이 설치된 사면의 안전율은 초기 E_{s1}값의 증가에 따라 급격히 증가를 나타낸 후 E_{s1}값이

일정한 지반저항효과를 가지는 값에 도달한 경우부터는 증가량이 점차 완화되는 경향을 볼 수 있다.

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

일반적으로 사면안정 검토시에는 지반계수값을 Marche & Lacroix 및 Poulos의 제시값 범위내에서 사면자체의 안정성을 감안하여 결정함이 바람직하다.

2) 말뚝간격비의 영향

말뚝의 간격비에 대한 영향은 간격비(D_2/D_1)을 변수로 하여 살펴보면 그림 6.3과 같다. 즉, D_2/D_1을 0.1에서 0.99까지 변화시키면서 말뚝간격비에 따른 사면안전율의 영향을 조사하면 그림 6.3과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 말뚝의 간격비가 증가할수록 즉, 말뚝과 말뚝사이의 간격이 넓어지면 어느 한도까지는 사면안전율이 증가하다가 그 이후 급격히 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 말뚝의 효과를 최대화하기 위해서는 말뚝간격비는 0.70에서 사면안전율이 최대임을 알 수 있다. 즉 이는 말뚝의 간격이 좁아짐에 따라 사면의 안정효과가 큼을 알 수 있다. 그러나, 말뚝을 너무 좁은 간격으로 설치할 경우 사면안정효과가 오히려 감소할 수도 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상은 말뚝간격이 좁아짐으로 인해 말뚝에 작용하는 토압이 과다하게 커져서 말뚝의 안정성이 떨어지기 때문이다. 따라서, 소요안전율을 만족하고 말뚝효과를 극대화하기 위해서는 말뚝간격비는 0.6 0.8사이의 값을 적용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

3) 말뚝 열수의 영향

그림 6.4는 그림 6.1의 해석대상지반인 성토사면에 억지말뚝을 설치하는 경우 말뚝이 없는 경우부터 5열의 말뚝을 설치하였을 경우까지의 사면안전율을 도시한 것이다. 그 결과 말뚝의 열수를 증가시킴에 따라 사면안전율은 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 여기서 일정한 선형을 나타내지 않는 것은 말뚝의 설치 위치의 변화에 따라 사면파괴면 상부 말뚝의 길이가 각각 다르게 되기 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.

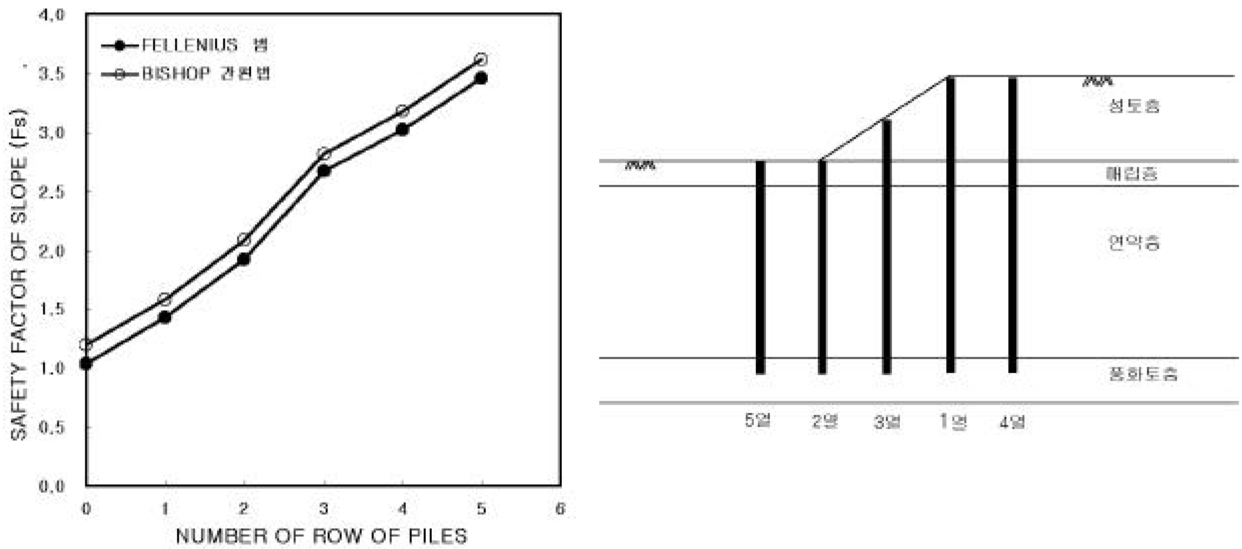
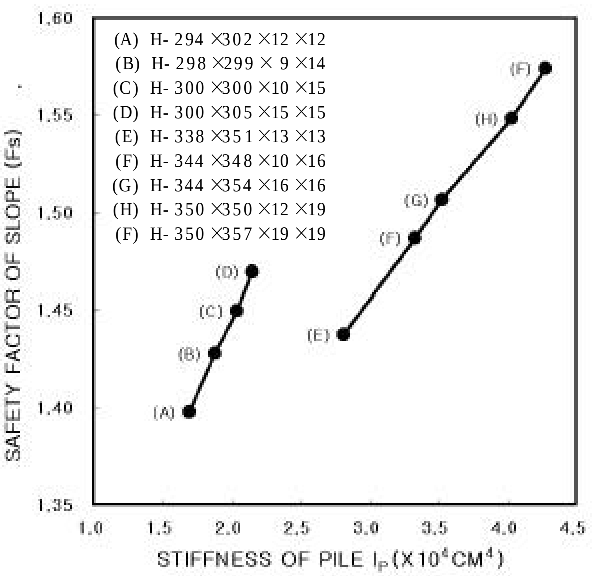


그림 6.4 말뚝열수에 의한 사면안전율 변화



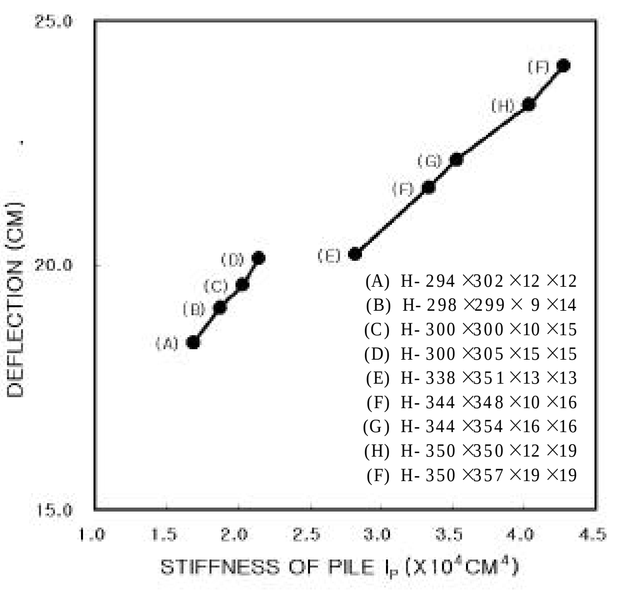


그림 6.5 말뚝 강성의 변화에 따른 사면안전율 변화 **그림 6.6 말뚝 강성의 변화와 말뚝변위와의 관계**

4) 말뚝 강성의 영향

말뚝의 강성이 사면안정효과에 미치는 영향은 그림 6.5와 같이 나타난다. 본 해석에서는 동일말뚝의 크기를 가지는 말뚝에 대하여 두께를 증가시키는 방법으로 말뚝 강성을 증가시켰다. 이 그림으로부터 말뚝의 강성이 다른 두 종류의 말뚝(대표치수는 H-300×300과 H-350×350이다)을 선택하였다. 이 그림으로부터 말뚝을 사면선단부분에 설치하였을 경우 사면안전율은 말뚝강성의 증가와 함께 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다.

한편, 그림 6.6은 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.

6.1.3 말뚝의 거동에 영향을 미치는 요소

1) 지반계수의 영향

그림 6.7은 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 증대시킬 수 있다.

그림 6.8은 지반계수 E_{s1}의 변화에 따른 말뚝의 변위를 나타낸 것이다. 그림 6.8(a)의 경우는 사면활동면 상부의 지반저항효과를 무시한 경우의 말뚝변위를 나타낸 것으로 말뚝의 최대 변위는 말뚝 두부에서 51.8cm가 발생하였다. 그림 6.8(b)의 경우는 사면활동면 상부의 지반저항효과를 Marche & Lacroix가 제시한 값중 매립층에서는 E_{s1}을 느슨한 상태에 대한 최소값인 91 t/m^2로 하였고 연약층에 서는 비배수 전단강도의 15 c_u 에 해당하는 37.5 t/m^2로 하였을 때 말뚝의 변위를 나타낸 것으로 여기에서 말뚝의

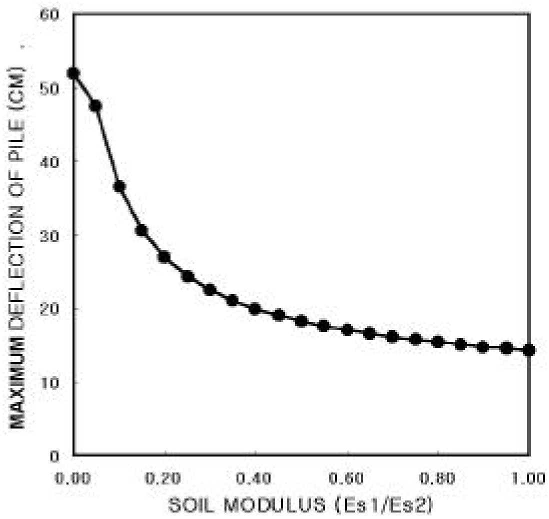
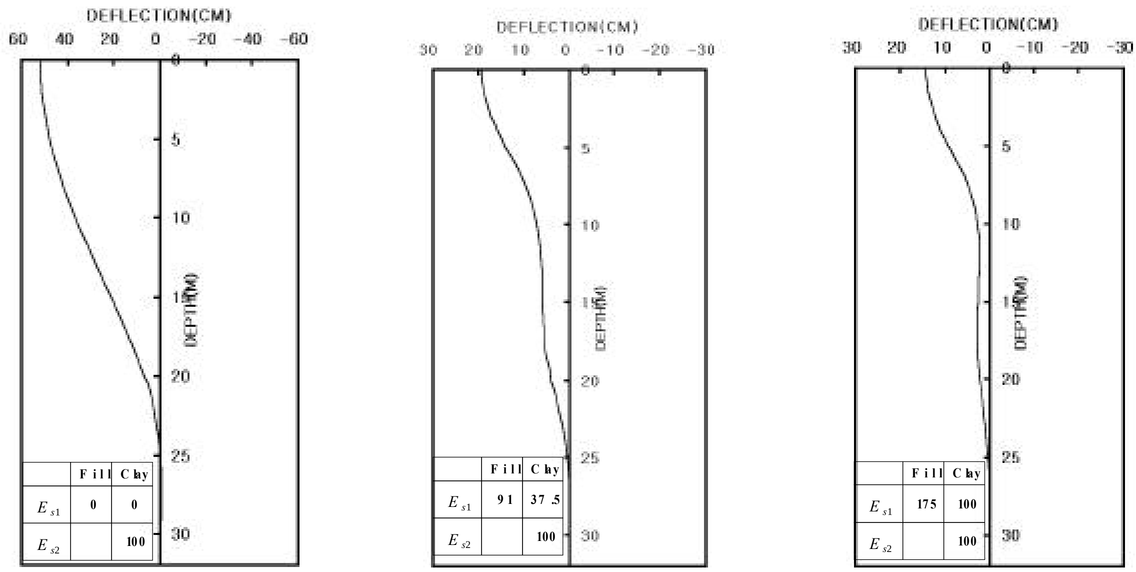


그림 6.7 지반계수에 따른 말뚝최대수평변위



(a) E_{s1}=0의 경우　　(b) E_{s1}=91t/㎡인 경우　　(c) E_{s1}=E_{s2}인 경우

그림 6.8 지반계수에 따른 말뚝의 변위

최대변위는 말뚝 두부에서 19.1cm가 발생하였다. 그림 6.8(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 말뚝두부에서 14.3cm가 발생하였다. 그림 6.8에서 보는 바와 같이 말뚝의 변위양상이 말뚝 심도 6 10m에서 지반계수비에 따른 말뚝변위의 감소량이 가장 심하게 나타나는 것은 상부 매립층의 지반에 의한 지반저항의 구속효과가 큼을 의미한다.

2) 말뚝의 두부구속 조건의 영향

그림 6.9는 말뚝두부의 구속조건에 따른 말뚝의 수평변위, 휨모멘트 및 전단력 분포상태를 나타내고 있다. 말뚝의 선단은 암반에 관입되어 있는 관계로 힌지로 가정하였으며 말뚝의 두부는 말뚝의 시공상

태에 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 6.1과 같다.

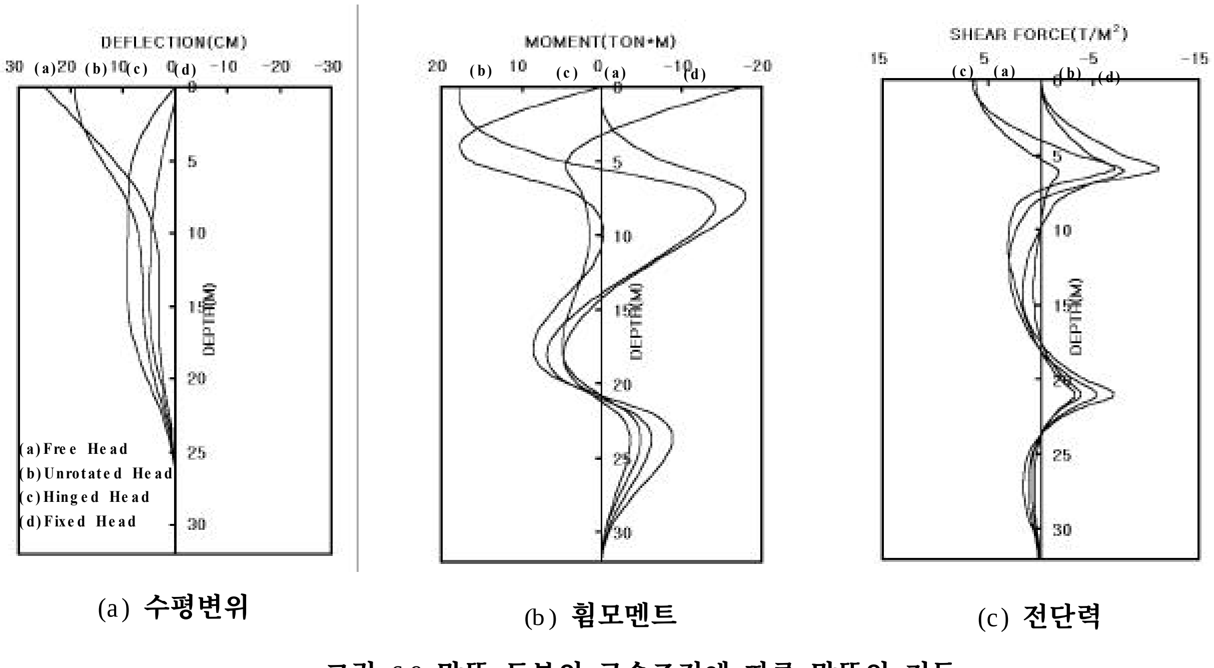
먼저 그림 6.9(a)에 나타난 수평변위에 대해서 살펴보면, 말뚝두부가 자유지지인 경우 말뚝두부에서 가장 많이 발생하며 다음으로는 회전구속 상태에서 많이 발생함을 알 수 있다. 그러나, 힌지와 고정의 경우는 매우 적게 발생되고 있다. 또한 모멘트는 고정상태에서 말뚝 두부에서 가장 많이 발생하고 있으며 자유지지때는 매립층과 연약층이 접하는 부분에서 가장 많은 모멘트가 발생하고 있다. 전단력은 회전구속상태일때 매립층과 연약이 접하는 부분에서 가장 많이 발생함을 알 수 있다.

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 6.9(b)는 모멘트를 도시한 것으로 말뚝의 최대 휨모멘트는 고정과 회전구속인 경우에는 말뚝두부에서, 힌지의 경우는 말뚝두부로부터 4m지점에서, 자유의 경우에는 7m지점에서 최대휨모멘트가

표 6.1 말뚝의 두부구속조건에 따른 말뚝 변위량

구분	회전구속		힌지		자유		고정	
	위치(m)	발생량	위치(m)	발생량	위치(m)	발생량	위치(m)	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



(a) 수평변위 (b) 휨모멘트 (c) 전단력

그림 6.9 말뚝 두부의 구속조건에 따른 말뚝의 거동

발생하고 있다. 그림 6.9(c)는 전단력에 대한 것으로 두부구속조건이 고정인 경우에는 최대전단력이 말뚝두부에서 발생하고 있으며 자유, 회전구속 및 힌지인 경우에는 각각 약 6m, 6m, 21m 지점에서 발생하고 있다.

6.2 절개사면

6.2.1 해석대상사면

그림 6.10의 대상사면은 수정된 해석프로그램에 대한 해석예를 실시하기 위하여 일반적인 절개사면의 형태를 가상적으로 작성한 것이다. 해석단면에 대한 물성치는 일반적으로 현장사면에 적용되는 내용을 기준으로 작성하였다. 그림 6.10에서 보는 바와 같이 최상부층은 토사층으로 구성되어 있으며 그 하부에 약 2m 심도의 풍화암층이 존재하는 대상지반에 사면절개가 실시된 위치에 억지말뚝을 설치하였다. 이러한 현장에서 사면절개에 의한 사면 활동에 저항할 수 있는 사면안정성을 확보하기 위하여 억지말뚝을 설치하였으며 이 경우에 발생되는 억지말뚝의 거동을 분석하여 보고자 한다.

이들 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 습윤단위중량과 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-말뚝(H-300×300×10×15)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 0.65로 한다. 안정해석을 실시하기 위한 그밖의 사항에 대하여는 앞의 6.1절에서와 동일하게 한다.

단, 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.

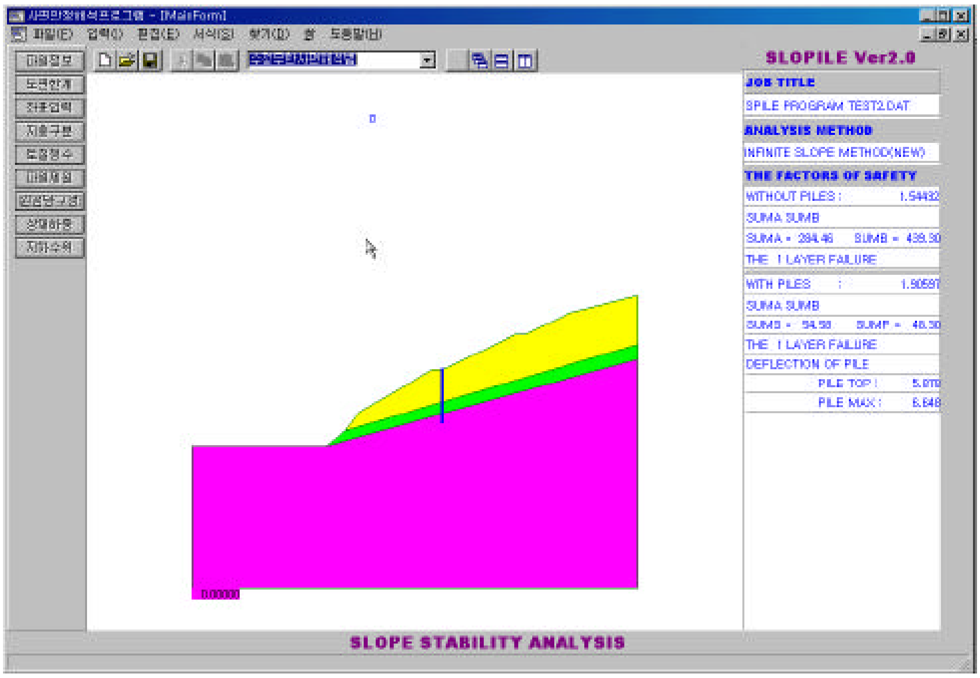


그림 6.10 절개사면 해석단면

6.2.2 사면 안정에 영향을 미치는 요소

1) 파괴면형상의 영향

그림 6.11은 억지말뚝이 설치된 절개사면에서 파괴면형상에 따른 지반계수비와 사면안전율의 관계를 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 사면의 파괴형상에 따라 사면안전율의 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 사면의 파괴형상이 평면파괴인 경우 지반계수비가 증가함에 따라 사면안전율은 1.65 1.95로 증가하며, 원호파괴인 경우 지반계수비가 증가함에 따라 사면안전율은 Fellenius법 적용시 1.15 1.45, Bishop법 적용시 1.2 1.5로 증가하였다. 따라서, 파괴면형상이 평면인 경우가 원호인 경우보다 사면안전율이 약 0.5정도 더 큼을 알 수 있다.

또한, 그림 6.11에서는 사면파괴면 상부의 지반계수 E_{s1}을 사면파괴면 하부의 지반계수 E_{s2}와 동일한 값을 가질 때까지 증가시키면서 사면파괴면 상부의 지반계수의 변화에 따른 사면안정에 미치는 영향도 나타내고 있다. 이 결과에 의하면, 사면파괴면 상부 말뚝의 지반저항을 무시할 경우 사면의 최소안전율은 무한사면해석의 경우 1.64로서 말뚝이 설치되지 않은 경우의 사면안전율 1.54에 비해 저항효과가 그다지 높지 않다. 이 경향은 원호파괴의 경우에도 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나, 지반효과를 고려할 경우, 즉 사면파괴면 상부의 지반계수 E_{s1}이 증가함에 따라 말뚝이 설치된 사면의 안전율은 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 따라서 말뚝이 설치된 사면의 안정성은 사면파괴면 상부의 말뚝이 배면지반으로부터 받는 지반저항력의 크기에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서, 지반계수의 결정은 안정해석에 중요한 영향을 미치게 되므로 신중을 기하여야 할 것이다.

2) 말뚝간격비 및 말뚝열수의 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 6.12와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝의 간격비가 감소할수록 사면안전율이 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 6.13은 그림 6.10의 해석대상사면에 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 설계사면은 소요안전율 1.3을 만족함을 알 수 있다.

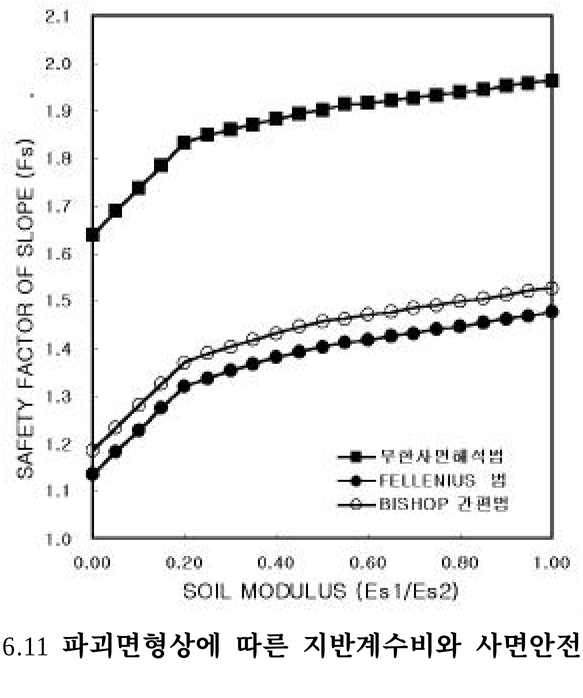


그림 6.11 파괴면형상에 따른 지반계수비와 사면안전율의 관계

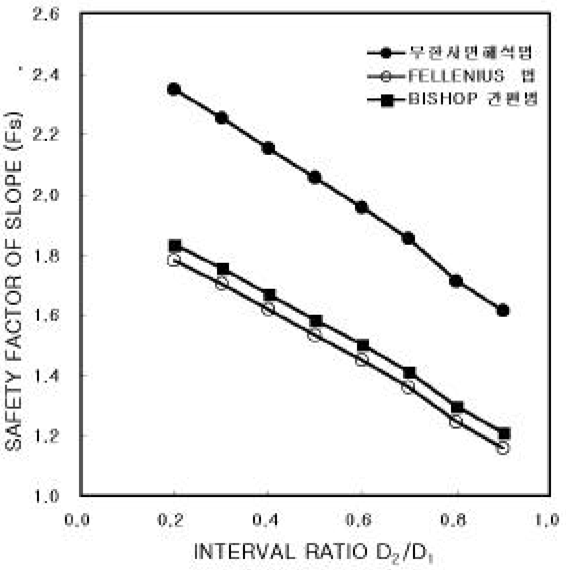


그림 6.12 말뚝의 간격비에 따른 사면안전율 변화

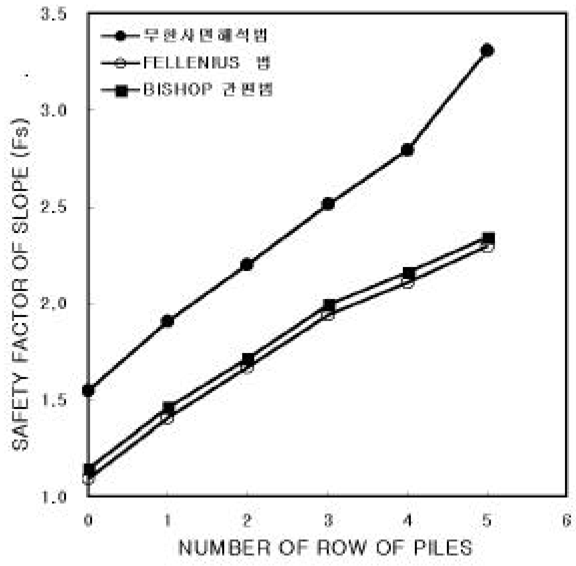


그림 6.13 말뚝열수에 의한 사면안전율 변화

3) 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. 본 절에서는 지하수위에 의한 영향을 검토하기 위하여 그림 6.10의 해석단면에 대하여 무한사면해석을 실시할 경우는 토사층과 풍화암의 경계면을 파괴면으로 가정하여 해석을 실시하였고, 원호파괴의 경우에는 토사층 내부에서 파괴가 일어난 경우를 대상으로 해석을 실시하였다.

그림 6.14는 지하수위 변화에 따른 사면안전율를 고찰하기 위하여 지하수위 변화비를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 H를 지표면에서 토사층과 풍화암층의 경계까지의 깊이로 하고 H_w는 토사층과 풍화암층의 경계로부터 위로 상승한 지하수위까지의 길이로 하여 지하수위 비를 H_w/H로 나타내었다.

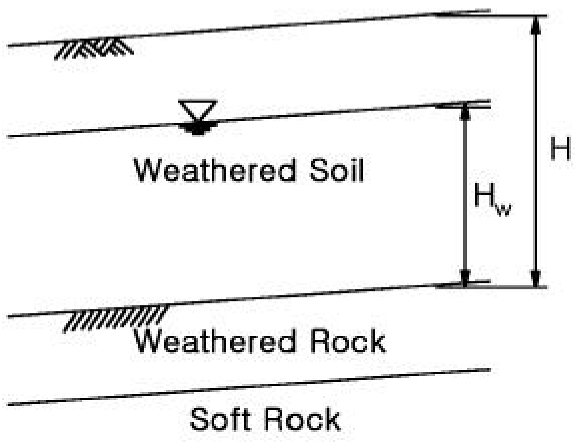


그림 6.14 지하수위 상승률(H_w/H)

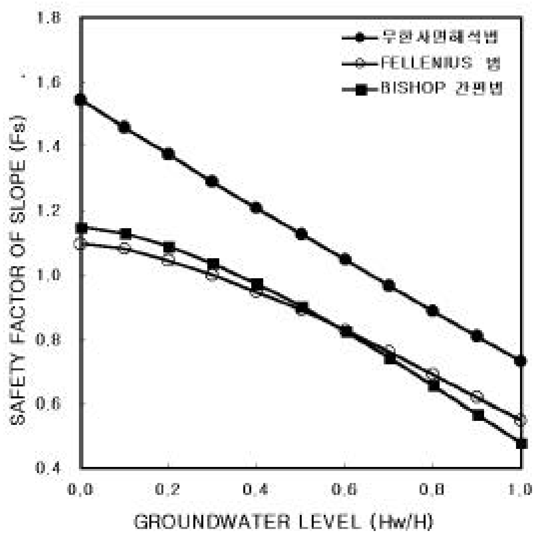


그림 6.15 지하수위 변화에 따른 영향

따라서, 지하수위가 완전히 지표면까지 올라왔을 때는 H_w/H를 1로 하고 지하수위가 없을 경우는 0으로 하였다.

그림 6.15는 지하수위 변화에 따른 사면안전율을 나타낸 것이다. 토사층에 대한 사면안전율은 H_w/H가 0인 경우는 무한사면해석의 경우 1.54, Fellenius 방법의 경우 1.10, Bishop 간편법의 경우 1.15로 나타났다. 지하수위가 상승할수록 사면안전율은 조금씩 감소하여 H_w/H가 1인 경우 즉 완전히 포화되어 있는 경우의 사면안전율은 무한사면해석, Fellenius 방법, Bishop 간편법의 경우 각각 0.73, 0.55, 0.48를 나타내고 있어 지하수위에 의한 영향으로 사면안전율은 선형적으로 감소하고 있다는 것을 알 수 있다.

한편, 소요안전율을 1.1로 하였을 경우 평면파괴의 경우에는 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.

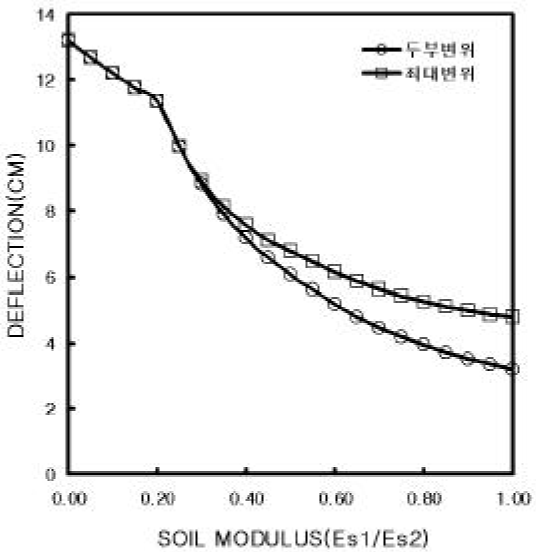
이상에서 보는 바와 같이 지하수위가 없을 경우에는 무한사면해석에서의 안전율이 원호파괴에서의 안전율보다 훨씬 높은데 반해 지하수위가 상승함에 따라 무한사면해석에서의 안전율이 원호파괴에서보다 많이 감소하는 것을 알 수 있다.

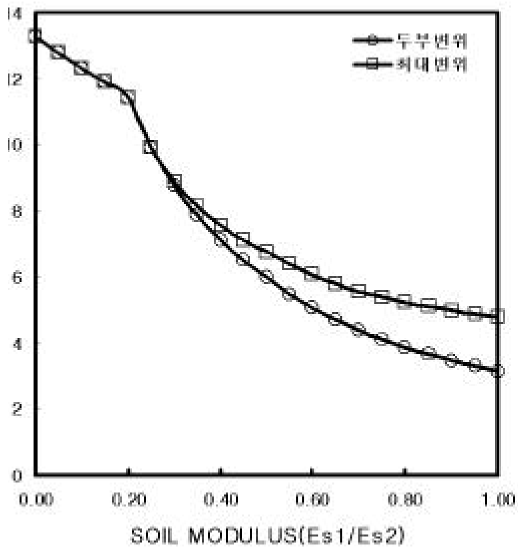
6.2.3 말뚝의 거동에 영향을 미치는 요소

1) 지반계수의 영향

지반계수에 의한 영향을 파악하기 위하여 파괴면 상부의 지반계수와 하부의 지반계수 비를 이용하여 정리하면 그림 6.16과 같다. 그림을 살펴보면 지반반력을 기대하기가 어려운 초기 지반반력비 0.2까지는 말뚝변위가 선형적으로 감소하는 양상을 보이다가 이후부터 급격히 감소하는 추세를 나타내며 지반반력비가 약 0.6이상에서는 대체로 말뚝의 변위 감소율은 일정하게 된다. 따라서 산사태 억지용 말뚝 설계시에는 사면의 안전율을 어느 정도 확보하여야만 말뚝의 변위도 감소시키고 말뚝에 의한 사면안전율 효과도 증대된다.

그림 6.17은 파괴면 상부의 지반계수 E_{s1}를 0, 91, 175로 변화시키면서 지반반력계수에 의한 말뚝의 거동을 분석한 것이다. 평면파괴의 경우와 원호파괴의 경우 약간의 차이를 나타내고 있으나 그 차이는 적어 절토사면과 같이 파괴면의 깊이가 얕은 경우에는 비슷한 변위거동을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.





(b) 원호파괴

그림 6.16 지반계수에 따른 말뚝의 수평변위

지반계수비가 0/175인 경우는 말뚝의 두부에서의 최대수평변위는 약 13.2cm의 값을 보이고 있다. 지반계수비가 91/175인 경우 말뚝의 최대수평변위는 말뚝두부로부터 약 5m의 깊이에서 약 6.6cm의 값을 보이고 있다. 또한 지반계수비가 175/175인 경우 말뚝의 최대수평변위는 말뚝의 두부로부터 약 5m깊이에서 약 4.8cm의 값을 보이고 있다.

2) 말뚝의 두부구속 조건의 영향

그림 6.18은 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.

표 6.2 말뚝의 변위량

구분	회전구속		힌지		자유		고정	
	위치(m)	발생량	위치(m)	발생량	위치(m)	발생량	위치(m)	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

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 6.2와 같다.

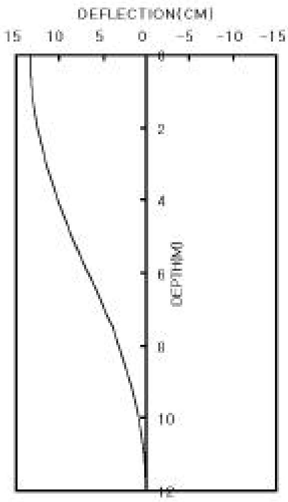
상기에서와 같이 말뚝두부의 변위는 자유, 회전구속, 힌지, 고정의 순으로 발생하고 있으며 말뚝의 최대변위는 자유와 회전구속인 경우 거의 비슷하게 발생하고 힌지, 고정의 순으로 나타나고 있다.

한편, 그림 6.18(b)는 모멘트를 도시한 것으로 말뚝의 최대 휨모멘트는 고정인 경우에는 말뚝두부에서 최대휨모멘트가 발생하고 있다. 다른 구속조건의 경우에는 말뚝두부로부터 5m지점에서 발생하였다. 그림 6.18(c)는 전단력에 대한 것으로 두부구속조건이 고정인 경우에는 최대전단력이 말뚝두부에서 발생하고 있으며 자유, 회전구속 및 힌지인 경우에는 약 12m 지점에서 발생하고 있다.

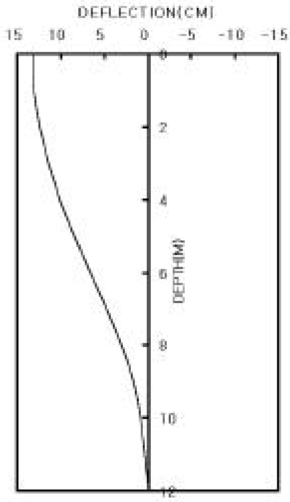
7. 결론

본 연구에서는 억지말뚝이 설치된 사면의 안정성 해석을 하기 위해 수동말뚝에 제안된 측방토압 산정식을 이용하여 말뚝의 안정과 사면의 안정을 검토할 수 있는 해석법을 정리하였다. 그리고, 이를 토대로 기존의 말뚝의 사면안정효과를 고려한 해석프로그램인 CHAMP와 SPILE을 개선하여 성토사면 및 절개사면, 교대기초말뚝해석에도 적용가능한 프로그램 SLOPILE을 개발하였다. 이 프로그램에는 한계평형해석에서 일반적으로 사용하고 있는 Bishop 간편법을 새롭게 추가 적용하여 보다 다양한 방법으로 해석을 수행할 수 있도록 하였다. 또한, 본 프로그램은 기존의 Dos와 CAD를 조합한 OS시스템에서 Windows용으로 변환함으로써 사용자들에게 편의를 제공할 수 있게 하였다.

SLOPILE을 이용하여 성토사면 및 절개사면에 억지말뚝이 설치된 사면의 해석예를 수행하므로써 억지말뚝의 사면안정효과를 검토하여 보았다. 말뚝의 사면안정효과는 사면활동면 상부의 지반계수의 크기, 줄말뚝의 열수를 증가시킬수록 그 효과는 증가됨을 알 수 있다. 그리고, 말뚝의 거동은 말뚝의 구속조건, 강성 및 지반계수에 의해 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

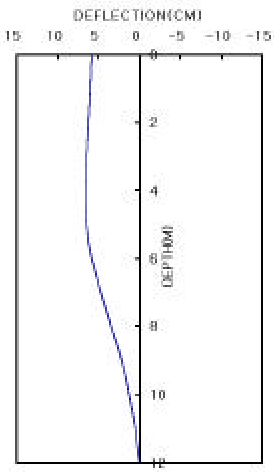


(a)원호파괴

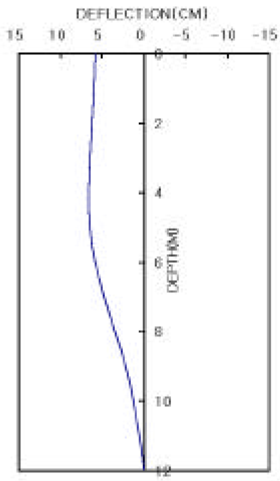


(b)평면파괴

	매립층	연약층
E_{s1}	0	-
E_{s2}	175	280

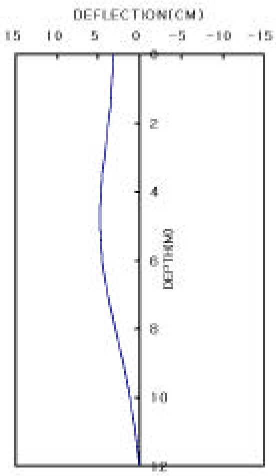


(c)원호파괴

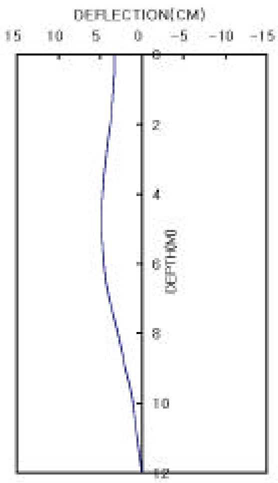


(d)평면파괴

	매립층	연약층
E_{s1}	91	-
E_{s2}	175	280



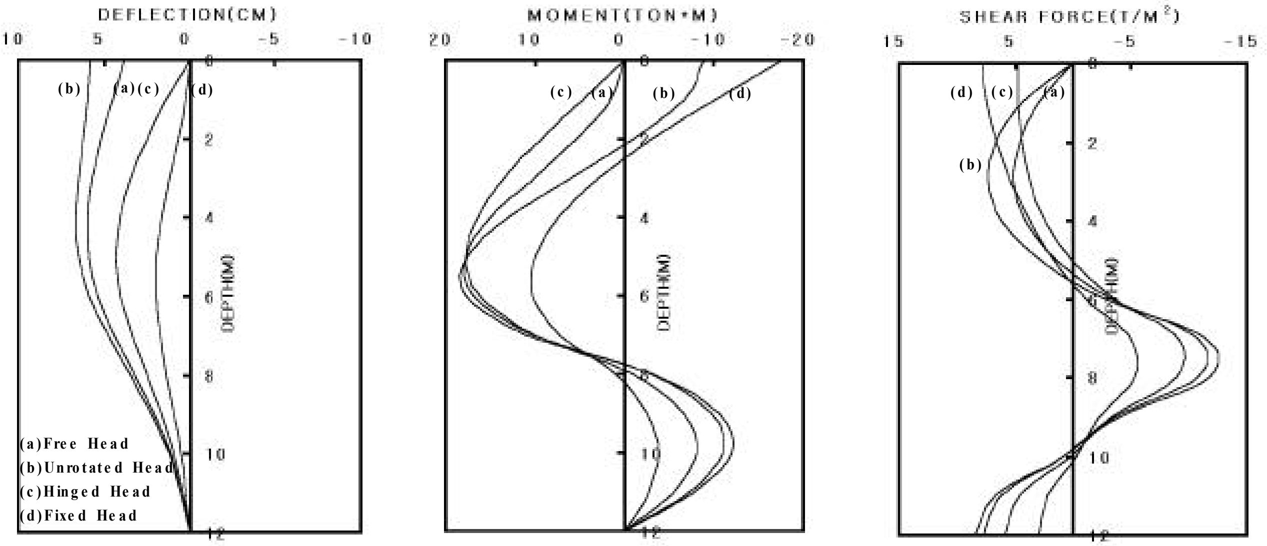
(e)원호파괴



(f)평면파괴

	매립층	연약층
E_{s1}	175	-
E_{s2}	175	280

그림 6.17 지반계수에 따른 말뚝의 수평변위



(a) 수평변위　　　　(b) 휨모멘트　　　　(c) 전단력

그림 6.18 말뚝 두부의 구속조건에 따른 말뚝의 거동

감사의 말

본 연구를 수행함에 있어 유익한 토론과 도움을 준 (주)이엔지의 손규만 과장에게 감사의 뜻을 표하는 바이다. 또한 본 논문의 정리에 도움을 준 중앙대학교 대학원생 송영석군에게도 감사의 뜻을 표하는 바이다.

참고문헌

1. 강병희, 김상규, 박성재, 홍원표, 이재현(1987), 장복로 사면붕괴 방지대책 연구용역보고서, 대한토목학회
2. 이종규, 강병희, 박성재, 홍원표(1989), 대한주택공사 부산덕천지구 사면안정검토 연구용역보고서, 대한토질공학회
3. 홍원표(1982), "점토지반 속의 말뚝에 작용하는 측방토압", 대한토목학회논문집, 제2권, 제1호, pp.45 52.
4. 홍원표(1983), "모래지반 속에 작용하는 측방토압", 대한토목학회논문집, 제3권, 제3호, pp.63 69.
5. 홍원표(1983), "수평력을 받는 말뚝", 대한토목학회지, 제31권, 제5호, pp.32 36.
6. 洪元杓(1984a), "側方變形地盤속의 줄말뚝에 作用하는 土壓", 大韓土木學會論文集, 第4卷, 第1號, pp.59 68.
7. 洪元杓(1984b), "受動말뚝에 作用하는 側方土壓" 大韓土木學會論文集, 第4卷, 第2號, pp. 77 88.
8. 洪元杓(1984c), "側方變形地盤 속의 圓形말뚝에 作用하는 土壓의 算定", 中央大學校論文集, 제27집, 자연과학편, pp.319 328.
9. 홍원표, 김명모, 심재구(1987), 정선병원 절토사면 안전진단 연구보고서, 대한토목학회
10. 홍원표, 이우현, 안종필, 남정만(1991), "교대기초말뚝의 안정", 대한토질공학회지, 제7권, 제2호, pp.67 79.

11. 福本安正(1977), 地すべり調査報告書 -地すべり工法(抗打)調査-, 新潟縣農林部治山課.
12. Bowles, J. E.(1982), Foundation Analysis and Design, 3rd Ed., McGraw-Hill, Tokyo, pp.516 547.
13. Hong, W. P.(1986), "Design Method of Piles to Stabilize Landslides", Proc., Int. Symp. on Env. Geo, Allentown, PA. pp.441 453.
14. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P.(1981), "Design Method for Stabilizing Piles against Landslide-One Row of Piles", Soil and Foundations, JSSMFE, Vol.21, No.1, pp.21 37.
15. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P.(1982), "Extended Design Method for Multi-Row Stabilizing Piles against Landslides", Soil and Foundations, JSSMFE, Vol.22, No.1, pp.1 13.
16. Marche, R. & Lacroix, Y.(1972), "Stabilite des Culees de Pomts Establies sur de Pieux Traversant une Couche Molle", Can. Geot. Jour., Vol.9, No.1, pp.1 24.
17. Matsui, T., Hong, W. P. and Ito, T.(1982), "Earth Pressures on Piles in a Row due to Lateral Soil Movement", Soil and Foundations, JSSMFE, Vol.22, No.2, pp.71 81.
18. Poulos, H. G.(1971), "Behavior of laterally loaded piles ; Ⅰ-single piles", ASCE, Vol.97, No.SM5, pp.711 731.