

말뚝을 사용한 산사태 억지공법

Application of Piles to Landslides Control

홍 원 표*

Hong, Won-Pyo

Abstract

A lot of landslides has occurred in rainy seasons beginning at June through September in Korea, where about 70 percent of the total area is mountaneous. Piles can be used as one of the most useful methods to stabilize such landslides. When a row of piles is installed in soil undergoing lateral movement such as landslides, the soil across the open space between the piles can be retained by the arching action of the soil.

For the purpose to establish a reasonable design method for stabilizing piles, a method for stability analysis of the slope containing stabilizing piles is presented, using the theoretical equation of the lateral force acting on the piles in soil undergoing lateral movement. In particular, the theoretical equation is arranged by applying the coefficients of lateral force as a simple equation. And also the differential equations proposed in the previous studies for the pile-stability analysis are modified, assumming that the piles above the sliding surface shall be subjected to the lateral reaction from soil in proportion to the pile deflection. Finally, to investigate the effect of stabilizing piles against landslides, an existing landslide slope in Korea is adopted as an example.

요 지

국토의 70%가 산지인 우리나라에서는 6월에서 9월 사이의 우기에 많은 산사태가 발생하고 있다. 이러한 산사태를 방지하기 위한 대책공법의 하나로 억지말뚝공이 사용될 수 있다. 산사태와 같은 측방이동지반속에 억지말뚝이 일렬로 설치되어 있으면 말뚝사이의 지반은 아칭현상에 의하여 지지될 수 있다.

억지말뚝의 합리적설계법을 확립하기 위하여 측방이동지반속의 말뚝에 작용하는 측방토압산정식을 사용하여 억지말뚝이 설치된 사면의 안정해석법이 제안된다. 특히 이 이론식은 측압계수를 사용하므로서 간편한 형태의 식으로 정리된다. 또한 활동면 상부 말뚝부분에 지반반력이 말뚝변위에 비례하여 작용한다고 가정하므로 이전 연구에서 이미 제안된 말뚝안정해석을 위한 미분방정식이 수정 제안된다.

마지막으로 산사태 발생이 예정되었던 우리나라 사면의 한예를 대상으로 산사태억지말뚝의 사면안정효과가 조사된다.

* 정희원, 중앙대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서 론

우리나라는 고온 다우지역에 속하므로 붕적 토층과 風化帶層이 발달되어 山沙汰가 일어날 수 있는 많은 지형적인 內的要因을 가지고 있다. 최근에는 宅地造成과 도로축조등과 같은 切土, 盛土의 인위적인 요인에 의해 自然斜面的 균형이 깨어지는 경우가 증가하고 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 또한 산사태의 自然的인 要因으로 강우를 들 수 있다. 우리나라는 年平均 降雨量 1100~1400mm의 降雨가 6월에서 9월에 집중되는 강우특성이 있으며 이 특성이 우리나라 山沙汰의 主要因으로 작용하여 앞요인들과 복합되어 매년 雨期에 山沙汰에 의한 많은 被害가 보고되고 있는 실정이다.¹⁹⁾

따라서 우리는 이러한 山沙汰와 같은 自然災害로부터 귀중한 人命과 財産을 보호하기 위하여 산사태 발생의 원인 규명과 이에 대한 대책 공법이 무엇 보다 시급한 실정이다. 그러나 불행히도 山沙汰의 발생기구가 대단히 복잡한 관계로 山沙汰 발생의 정확한 진단을 실시하기가 容易하지 못하다. 다행히 山沙汰에 관한 연구가 持續的으로 진행되고 있어 山沙汰가 발생하는 원인을 定性的으로 파악하기 시작하였고¹⁹⁾, 山沙汰 防止對策도 하나, 둘 마련되어 가고 있는 실정이다.²⁻⁶⁾ 山沙汰를 방지하기 위한 對策工法²⁰⁾을 防止技能別로 구분하여 보면 降雨, 降雪 등과 같은 물의 영향에 의하여 斜面的 安全率을 감소하는 것을 방지하는 방법과, 불안정하게 판단된 斜面的 安全率을 말뚝등의 抵抗力을 이용하여 증가시켜 주는 방법 등으로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 山沙汰의 잠재적 요인을 개선시킬수 있는 積極的 對策方法中的 하나인 산사태 抑止말뚝공법에 대하여 말뚝의 사면안정효과를 고려할 수 있는 합리적인 억지말뚝설계법을 확립하고자 함을 궁극적 목적으로 한다. 산사태와 같은 측방유동이 발생하는 지반에서의 말뚝과 지반사이의 역학적인 관계는 그 발생機

構가 매우 복잡해서, 말뚝에 작용하는 측방토압을 정확히 산정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 이 측방토압은 사면의 안정과 말뚝의 안정에서 서로 상반된 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 이미 제시된 소성변형지반속 수동말뚝¹⁾의 측방토압산정 이론식⁷⁻¹²⁾을 이용하여 말뚝의 사면안정효과등을 고려한 산사태 억지말뚝의 해석법을 제안하고자 한다. 본 사면안정해석법은 오래전부터 실시하여오고 있는 일련의 연구로 본 논문에서는 이미 제안한 바 있는 해석법⁴⁻⁶⁾을 보다 합리적이고 사용하기 편리한 형태로 발전시켜 보고자 한다. 또한 산사태 발생이 예정되었던 우리나라 사면의 일예를 선정하여 억지말뚝의 사면안정효과를 검토하고자 한다.

2. 억지말뚝공법

억지말뚝공법은 활동토피를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치하므로써 사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 부동지반에 전달시키는 공법이다. 이러한 억지말뚝은 수동말뚝(passive pile)의 대표적 예중의 하나로 활동토피에 대하여 역학적으로 저항하는 공법이다.¹⁾ 이 공법은 사면안전을 증가효과가 커서 일본과 미국등의 외국에서는 예로부터 많이 사용되어 오고 있다.^{2, 3)} 특히 일본의 경우는 강관말뚝을 사용하여 산사태를 방지하려는 시도가 매우 활발하게 실시되고 있다.³⁻⁵⁾

억지말뚝공법은 타 공법에 비교하여 지중 깊은 곳에까지 활동이 발생하는 산사태의 경우에서도 지중에 저항할 수 있는 구조물을 설치할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 이 억지말뚝을 합리적으로 설계하는 것은 결코 용이한 일이 아니다. 과거 일본에서 적절한 설계법이 없이 억지말뚝을 사용한 결과 실패한 경우도 많이 보고되고 있다.³⁾

이에 필자는 억지말뚝의 설계법을 확립할 목적으로 우선 지반의 측방변형으로 인하여 일렬로 설치된 줄말뚝에 작용하게 될 측방토압

을 산정할 수 있는 이론식을 유도하고 그 신뢰성을 확인하기 위하여 모형실험을 실시한 바 있다.⁷⁻¹²⁾ 이 이론식을 이용하여 일렬의 억지말뚝을 설계할 수 있는 방법을 연구 제안하였고^{4, 5)} 그 후 설계법을 계속 수정하여 오고 있는 실정이다.⁶⁾

우리나라에서도 최근 우기철에 빈번하게 발생하는 산사태를 예방하기 위하여 억지말뚝공법이 사용되는 횟수가 늘어나고 있는 경향이다.¹³⁻¹⁵⁾ 사진 1은 우리나라에서 억지말뚝공이 실시된 일례를 보여주고 있다.¹⁵⁾ 본 현장에서는 H-300×300말뚝이 1.5m 간격으로 일렬로 설치되어 있다. 말뚝선단은 단단한 암에 2.3m 근입되어 있고 말뚝두부는 띠장으로 연결되어 있으며 이 띠장은 지중에 앵커로 지지되어 있다.

3. 억지말뚝의 특징

통상적으로 억지말뚝은 줄말뚝(혹은 무리말뚝)으로 설치된다. 엄밀하게 말하면 이 줄말뚝과 말뚝주변 지반사이의 상호작용은 3차원적이며 여러요인(말뚝의 변형특성 및 지반의 변형강도특성 등)에 영향을 받기 때문에 매우 복잡하다. 따라서 억지말뚝의 설계시에는 이와 같은 복잡한 현상을 단순화시키는 것은 당연할 것이다. 그러나 이러한 단순화 과정에서 아래에 열거하는 바와 같은 매우 중요한 요인을 간과하였기 때문에 지금까지 줄말

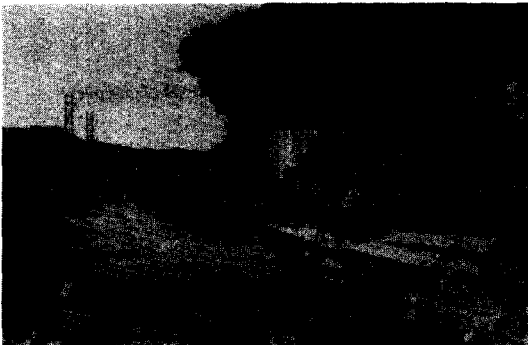


사진 1. 억지말뚝 시공 예

뚝의 산사태 억지효과를 충분히 발휘시킬 수 있는 합리적 설계법을 확립시키지 못하였다 고 생각된다.

3.1 말뚝간격의 영향

억지말뚝의 설계에 있어서 종래 취급이 곤란함으로 인하여 경시되어 온 중요한 요소중의 하나는 줄말뚝의 말뚝간격에 대한 영향이다. 위에서 설명한 바와 같이 실제의 억지말뚝은 거의 다 줄말뚝(혹은 무리말뚝)으로 사용되고 있음에도 불구하고 종종 단일 말뚝으로 해석하여 줄말뚝으로서의 영향을 수정계수에 의하여 개략적으로 고려하고 있다. 실제 억제말뚝에서 말뚝주변지반의 변형은 줄말뚝의 존재에 영향을 받으므로 단일 말뚝에 작용하는 측방토압은 줄말뚝에 작용하는 측방토압과 당연히 다른 값을 가질 것이다. 왜냐하면 억지말뚝에 작용하는 토압은 지반과 말뚝사이의 상호작용의 결과로서 정하여지기 때문이다. 따라서 억지말뚝의 설계에서는 처음부터 줄말뚝의 문제로서 취급하여야 할 필요가 있다.

3.2 안정해석

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

종래 억지말뚝의 설계에 있어서 줄말뚝을 포함하지 않는 사면의 안정해석에 있어서 부족한 저항력으로부터 줄말뚝에 의하여 부가될 저항력을 단순히 역산하여 말뚝간격을 정하는 설계법이 이용되는 경우가 많다.

그러나 이 경우 줄말뚝과 지반사이의 상호작용이라는 입장에서부터 말뚝에 작용하는

측방토압의 발생기구가 검토되어 있지 않다. 따라서 말뚝간격을 좁혀 줄말뚝의 숫자만 늘리면 안전측의 설계가 된다고 생각되었다. 그러나 이것은 사면의 안정에 대하여는 안전측이 됨을 의미하나 말뚝간격을 좁힐수록 말뚝에 작용하는 측방토압이 급격히 커져 말뚝의 안정을 유지하기가 불가능하게 된다.

결국, 우선 말뚝이 파괴되고 사면도 전체로서 안정시킬 수 없게 된다. 또한 산사태가 진행되는 초기상태에서는 말뚝에 소요의 저항력이 꼭 발생되리라는 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 많다고 생각된다.

4. 말뚝이 설치된 사면의 안정해석법

본 장에서는 앞장에서 이미 설명한 억지말

뚝설계시의 2가지 중요한 요인, 즉 말뚝간격을 보다 엄밀히 고려하는 점 및 말뚝과 사면양자의 안정해석을 보다 유기적이고 계통적으로 행하는 점에 중점을 두고 억지말뚝이 설치된 산사태사면의 안정해석법을 설명하고자 한다.

일반적으로 사면안정을 위한 억지말뚝의 설계에 있어서는 그림 1에 도시된 바와 같이 말뚝 및 사면의 2종류의 안정에 대하여 검토하지 않으면 안된다. 만약 활동토괴에 의하여 말뚝에 작용하는 측방토압(혹은 말뚝으로부터 활동토괴에 작용하는 반력)이 알려져 있다면 우선 그림 1(a)에 도시된 바와 같이 말뚝의 안정은 수평하중을 받는 말뚝의 해석법을 응용하여 검토할 수 있다.

이상과 같이 말뚝의 안정성이 확보되면 그림 1(b)에 도시된 바와 같이 줄말뚝으로부터 활동토괴에 작용하는 수평저항력을 부가하여 통상의 사면안정해석법을 적용하여 사면의

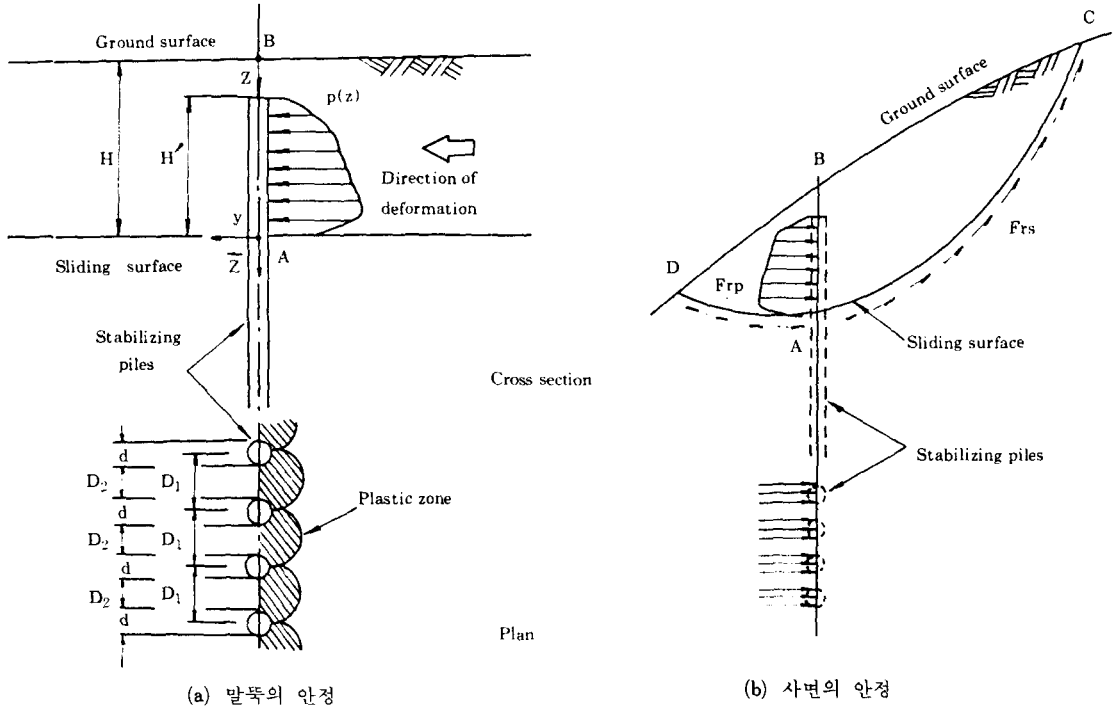


그림 1. 억지말뚝의 사면안정도

안정을 검토할 수 있다. 따라서 측방토압의 산정은 사면안정을 위한 억지말뚝설계에 있어서 키 포인트이며 이 값을 될수록 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 이는 말뚝의 안정과 사면의 안정에 미치는 측방토압의 영향이 서로 상반되기 때문이다. 즉 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 설치할 경우는 강성이 좋은 강말뚝을 사용하는 것이 바람직하다. 강말뚝에도 강관말뚝과 H말뚝의 두종류가 사용되고 있다. 이들 말뚝을 설치할 경우 통상적으로 항타에 의하여 말뚝을 설치하는 것은 매우 바람직하지 못하여 천공후 말뚝을 삽입하는 공법이 좋다. 이때 억지말뚝은 설치후 영원히 그 기능을 발휘되도록 하는 영구구조물로 생각하여야 한다. 따라서 말뚝을 삽입한 후 콘크리트나 시멘트그라우팅으로 말뚝의 전 길이를 피복하여 부식의 영향을 받지않도록 하여 주어야 한다. 그러므로 말뚝의 휨응력은 강재가 받아주나 단면상으로는 원형단면의 말뚝으로 생각하는 것이 좋다. 따라서 본 설계방법에서는 말뚝은 원형말뚝으로 취급하여도 무방하다고 생각한다.

4.1 사면의 안정

산사태가 발생하는 사면에서는 사면의 지표경사면과 활동파괴면이 서로 평행한 무한사면에서의 파괴형태로 산사태가 발생하는 경우가 많다. 따라서 이런 경우의 사면안정해석법은 기본적으로 무한사면의 사면안정해석법¹⁶⁾과 동일한 방법으로 실시될 수 있다. 또한 일반적으로 산사태의 경우는 현장조사에 의하여 활동면이 사전에 알려질 수 있다. 따라서 알려진 고정된 사면활동에 대한 사면안정 해석을 실시하면 된다. 즉, 그림 1(b)에 도시된 바와 같이 활동토괴 CADBC에 작용하는

활동력 F_d 와 저항력 F_r 을 비교하므로써 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 1(b)의 ABCA와 ABDA)가 말뚝 사이에서 대부분이 연속되어 있으며, 말뚝에 작용하는 측방토압 산정시 말뚝 주변지반만이 소성상태가 되도록 할 경우에는 양측 토괴가 일체로 거동하기 때문에 활동면 AD에 연한 전단저항력을 함께 고려하여도 큰 오차를 동반하지 않을 것이다.

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

$$(F_s)_{slpoe} = \frac{F_r}{F_d} = \frac{F_{rs} + F_{rp}}{F_d} \quad (1)$$

만약 활동파괴면이 원호일 경우에는 다음식이 이용된다.

$$(F_s)_{slpoe} = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rp}}{M_d} \quad (2)$$

여기서 M_r 은 저항모멘트, M_d 는 활동모멘트, M_{rs} 는 파괴면 DAC에 연한 전단저항력에 의한 저항모멘트, M_{rp} 는 AB면에 있어서의 줄말뚝 반력에 의한 저항모멘트이다. 식(1) 및 식(2)에 있어서 F_{rs} , F_d 혹은 M_{rs} , M_d 는 통상의 사면안정해석에서의 분할법에 의해 구하여지며, F_{rp} 혹은 M_{rp} 는 사면활동면 상부의 줄말뚝에 작용하는 측방토압과 말뚝배면의 지반반력을 말뚝중심간격으로 나눈 값을 이용하여 산정된다. 단, 암반활동과 같이 말뚝의 전단에 의하여 파괴될 경우에는 F_{rp} 및 M_{rp} 가 활동면 위치에서 말뚝에 작용하는 전단력을 이용하여 산정된다. 식(1) 혹은 식(2)의 안전율이 소요안전율 보다 클 경우에 사면의 안정이 얻어질 수 있다.

4.2 말뚝의 안정

말뚝의 안정에 관하여는 그림 1(a)에 표시된 바와 같이 滑動面上的의 土塊에 의하여 말뚝이 $p_{mi}(\bar{z})$ 의 側方土壓을 받는다고 생각하면 主動말뚝에 대하여 이용하는 水平力을 받는 말뚝의 解析法이 적용될 수 있다. 단, 受動 말뚝의 경우는 滑動面上的의 말뚝에 작용하는 側方土壓이 分布荷重이 된다. 이 側方土壓을 分布荷重으로 취급할 경우 말뚝에 관한 基本方程式은 滑動面 상부와 하부에 대하여 다음 식으로 表現된다.

$$\left. \begin{aligned} E_p I_p \frac{d^4 y_{1i}}{d\bar{z}^4} &= P_{mi}(\bar{z}) - E_{s1i} y_{1i} \quad (-H' \leq \bar{z} \leq 0) \\ E_p I_p \frac{d^4 y_{2i}}{d\bar{z}^4} &= -E_{s2i} y_{2i} \quad (\bar{z} > 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서 $\bar{z} = (z-H)$, i 는 多層地盤의 각 地層番號를 의미하며 z 는 地表面에서부터의 깊이, H 및 H' 는 각각 滑動面에서 지표면 및 말뚝머리까지의 거리, L_p 는 말뚝길이, y_{1i} 및 y_{2i} 는 각각 滑動面 상하의 각 地層의 말뚝의 變位, $E_p I_p$ 는 말뚝의 휨剛性, E_{s1i} 및 E_{s2i} 는 각각 斜面滑動面 상하부의 각 지층의 地盤係數이다. 破壞面 上部地層의 側方土壓 P 는 각 지층에 구하여진 말뚝 1개당의 側方土壓으로 깊이 z 에 대하여 $f_{1i} + f_{2i}$ \bar{z} 의 直線分布로 작용한다.

식 (3)에 대한 미분방정식 해를 구하면 말뚝의 變位에 대한 一般解는 다음식과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} y_{1i} &= e^{-\beta_{1i}\bar{z}} (a_{1i} \cos \beta_{1i}\bar{z} + a_{2i} \sin \beta_{1i}\bar{z}) \\ &+ e^{\beta_{1i}\bar{z}} (a_{3i} \cos \beta_{1i}\bar{z} + a_{4i} \sin \beta_{1i}\bar{z}) \\ &+ (f_{1i} + f_{2i}\bar{z}) E_{s1i} \\ y_{2i} &= e^{-\beta_{2i}\bar{z}} (b_{1i} \cos \beta_{2i}\bar{z} + b_{2i} \sin \beta_{2i}\bar{z}) \\ &+ e^{\beta_{2i}\bar{z}} (b_{3i} \cos \beta_{2i}\bar{z} + b_{4i} \sin \beta_{2i}\bar{z}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

여기서 a_{1i} , a_{2i} , a_{3i} , a_{4i} , b_{1i} , b_{2i} , b_{3i} 및 b_{4i} 는 積分常數로 말뚝의 머리와 先端에서의 拘束條件 및 滑動面과 地層 境界位置에서의 말뚝의 連續條件에 의하여 결정된다. 말뚝머리의 拘束條件으로는 自由(變位 및 回轉 可能), 回轉拘束(變位

만 可能), 回轉만 可能) 및 固定(變位와 回轉 모두 불가능)의 4종류를 생각할 수 있으며 β_{1i} 는 $\sqrt[4]{E_{s1i}/4E_p I_p}$ 이고 β_{2i} 는 $\sqrt[4]{E_{s2i}/4E_p I_p}$ 이다.

이와같은 구속조건은 다음과 같은 상태와 대응시켜 생각할 수 있다. 즉 회전구속의 조건은 억지말뚝의 두부를 철근콘크리트의 지중보로 연결시킨 경우로 얻어질 수 있으며 回轉조건은 억지말뚝의 두부를 강재띠장으로 연결시키고 앵커로 말뚝두부를 고정시킨 경우로 얻어진다. 한편 고정조건은 말뚝두부를 철근콘크리트의 지중보로 연결시키고 이 지중보를 앵커로 말뚝두부를 고정시킨 경우로 얻어진다.

岩盤破壞와 같은 말뚝의 剛性에 比하여 地盤의 剛性이 큰 경우를 제외하면 일반적으로 말뚝의 破壞는 휨응력에 의하여 발생된다. 따라서, 통상 말뚝의 安定에 대한 安全率 $(F_s)_{pile}$ 은 허용 휨응력 σ_{allow} 와 最大 휨應力 σ_{max} 의 比로 다음과 같이 구한다.

$$(F_s)_{pile} = \sigma_{allow} / \sigma_{max} \dots \dots \dots (5)$$

단, 상기와 같이 휨 破壞를 발생하지 않는 경우에는 말뚝의 剪斷應力에 의하여 다음과 같이 검토할 필요가 있다.

$$(F_s)_{pile} = \tau_{allow} / \tau_{max} \dots \dots \dots (6)$$

여기서, τ_{allow} 는 許容剪斷應力, τ_{max} 는 最大剪斷應力이다. 식 (5) 및 (6)의 安全率이 1보다 클 때 말뚝의 安定이 확보될 수 있다.

4.3 말뚝의 측방토압

사면의 안정과 말뚝의 안정에서 이미 설명하여서 알 수 있는 바와같이 두 종류의 안정에 모두 出말뚝에 작용하는 측방토압이 이용되고 있다. 따라서 산사태 억지말뚝의 설계에 있어서는 이 측방토압을 되도록 설계에 맞도록 산정하지 않으면 안된다. 원래 出말뚝의 전면과 배면에는 서로 평형상태의 토압이 작용하고 있다가 활동토괴의 변형에 의하여 이 평형상태가 무너지게 된다. 여기서 취급하는 측방토압은 出말뚝의 전면과 배면에 작용하는 토압의 차에 상당한다.

出말뚝에 작용하는 측방토압의 산정식을 유

도할 때 특히 고려할 점은 말뚝간격 및 말뚝 주변 지반의 소성상태의 설정이다. 전자에 대하여는 3.1절에서 이미 그 필요성을 강조하였다.

한편 후자의 필요성에 대하여는 아래와 같다. 즉, 일반적으로 말뚝에 부가되는 측방토압은 활동토괴가 이동되지 않는 0의 상태에서부터 활동토괴가 크게 이동하여 말뚝주변지반에 수동파괴를 발생시키는 경우의 극한치까지 큰 폭으로 변화한다. 따라서 사면안정을 위한 억지말뚝의 설계를 행하기 위하여는 어떤 상태의 측방토압을 이용하여야 좋은가 정하여야만 한다.

우선, 말뚝간격에 대하여는 줄말뚝 1개당에 작용하는 측방토압을 산정하기 위하여는 그림 1(a)의 평면도에 사선을 친 부분 지반의 거동을 취급하는 것으로 충분하다. 이 부분을 확대하여 표시하면 그림 2와 같으며 두개의 말뚝 사이 지반거동을 취급함에 따라 말뚝간격을 정확히 고려하게 되고 처음부터 줄말뚝의 문제로 취급할 수 있게 된다.

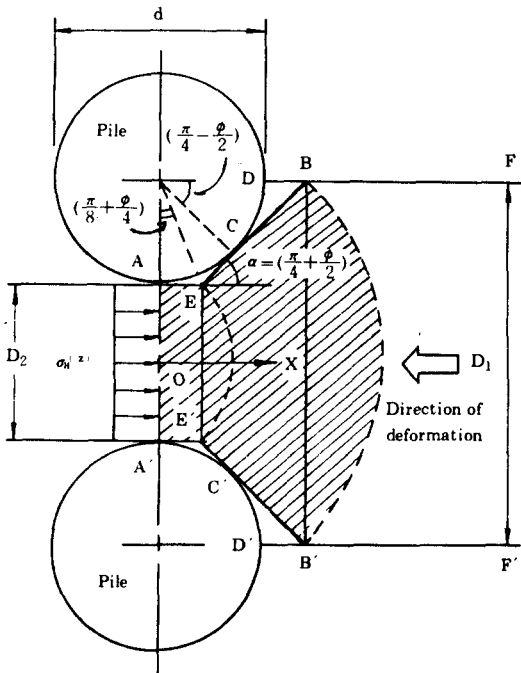


그림 2. 말뚝주변 지반의 소성상태의 설정

한편, 말뚝주변 지반의 소성상태의 설정에 대하여는 만약 말뚝주변 지반에 수동파괴가 발생하였다고 하면 그때는 산사태가 상당히 진행되어 활동면의 전단저항력이 상당히 저하하여 버리는 점과 수동파괴시 말뚝에 작용하는 측방토압이 상당히 커서 말뚝자체의 안정이 지탱하지 못할 염려가 있는 등 불안한 점이 많다. 따라서 설계에 채용될 수 있는 측방토압은 산사태의 진행에 따른 활동면의 전단저항력의 저하가 거의 발생하지 않는 상태에 있는 값을 채용하는 것이 가장 합리적이라고 생각된다. 이 조건을 만족하는 측방토압의 최대치를 산정하기 위하여 그림 2에 사선을 친 부분만이 Mohr-Coulomb의 항복조건을 만족하는 소성상태에 있다고 가정한다. 이 가정은 사면전체의 평형상태를 거의 변화시키지 않고 말뚝에 부가되는 측방토압을 산정하는 것을 의도하는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

이러한 가정하에 억지말뚝에 작용하는 측방토압은 소성변형 지반속의 측방토압 산정식⁷⁻¹²⁾을 이용하여 산정될 수 있다. 산사태 토층 단위길이당 1개의 원형말뚝에 작용하는 측방토압의 최대치(설계에 이용할 수 있는 값중 최대치의 의미)는 다음 식으로 제안된바 있다.¹¹⁾

$$P(z)/d = K_{p1} c + K_{p2} \sigma_H(z) \dots\dots\dots (7)$$

여기서, d는 말뚝직경, c는 활동토괴의 점착력, $\sigma_H(z)$ 는 지반의 측방유동에 저항하여 말뚝전면으로부터 줄말뚝에 작용하는 토압으로 주동토압($=\gamma z N_s^{-1} - 2c N_s^{-1/2}$)을 사용함이 바람직하다. K_{p1} 과 K_{p2} 는 측방토압계수로 식(8) 혹은 (9)로 표시된다.¹¹⁾

우선 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 모두 가지고 있는 일반토사지반의 경우 측방토압계수 K_{p1} 과 K_{p2} 는 다음과 같다.^{9, 11)}

$$K_{p1} = \frac{1}{1 - D_2/D_1} \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \left\{ \frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)} \times \left(\exp\left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan(\pi/8 + \phi/4) \right) G_3(\phi) \right) - 1 \right\} + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right] - \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \quad (8a)$$

$$K_{p2} = \frac{1}{1 - D_2/D_1} \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \exp\left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) \times \tan(\pi/8 + \phi/4) G_3(\phi) - \frac{D_2}{D_1} \right] \dots\dots\dots(8b)$$

여기서, D_1 과 D_2 는 각각 말뚝의 중심간격과 순간격(그림 2 참조)이며, $G_1(\phi) = N_s^{1/2} \times \tan\phi + N_s - 1$, $G_2(\phi) = 2\tan\phi + 2N_s^{1/2} + N_s^{-1/2}$, $G_3(\phi) = N_s \tan\phi$, $G_4(\phi) = 2N_s^{1/2} \times \tan\phi + 1$, $N_s = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$

점착력이 0인 사질토의 경우는 식(7)에 $c=0$ 을 대입하면 측방토압 $P(z)/d$ 는 σ_H 만의 항으로 표시된다.

한편 내부마찰각이 0인 점성토의 경우는 별도의 유도과정으로 측방토압계수 K_{p1} 과 K_{p2} 가 다음과 같이 된다.

$$K_{p1} = \frac{1}{1 - D_2/D_1} \times \left[3 \ln \frac{D_1}{D_2} + \frac{D_1 - D_2}{D_2} \tan(\pi/8) \right] \dots\dots(9a)$$

$$K_{p2} = 1 \dots\dots\dots(9b)$$

식(9)중의 K_{p2} 는 식(8b)에 $\phi=0$ 을 대입한 결과와도 일치한다. 따라서 측방토압계수 K_{p1} 은 식(8a)로 구하되 $\phi=0$ 인 점성토의 경우만은 식(9a)로 구하며, 측방토압계수 K_{p2} 는 언제나 식(8b)만으로 구할 수 있다.

이들 측방토압계수식 (8)과 (9)를 그림으로 나타내면 그림 3과 같다. 즉 말뚝간격 D_1 과 D_2 로부터 결정되는 말뚝간격비 D_2/D_1 과 내부마찰각 ϕ 로부터 그림 3을 이용하면 간편하게 측방토압계수 K_{p1} 과 K_{p2} 를 구할 수 있다.

이미 앞에서 설명한 바와 같이 설계에 적용가능한 측방토압은 0에서 식 (7)로 주어지는 최대치까지의 값이다. 즉, 활동토괴의 변형과 함께 줄말뚝에 측방토압이 차츰 증가되어 말뚝주변 지반만이 소성상태가 발생할 때의 위식으로 나타내는 최대치까지에 달하게 된다. 여기에, 이상의 측방토압 부가정도를 나타내기 위하여 측방토압부가계수 $\alpha_m (0 < \alpha_m < 1)$ 을 도입하면 식 (10)과 같다.

$$P_m(z) = \alpha_m \times P(z) \dots\dots\dots(10)$$

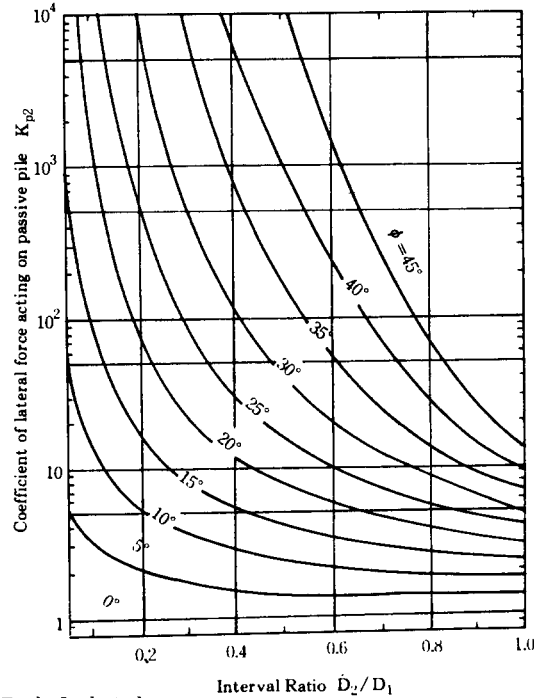
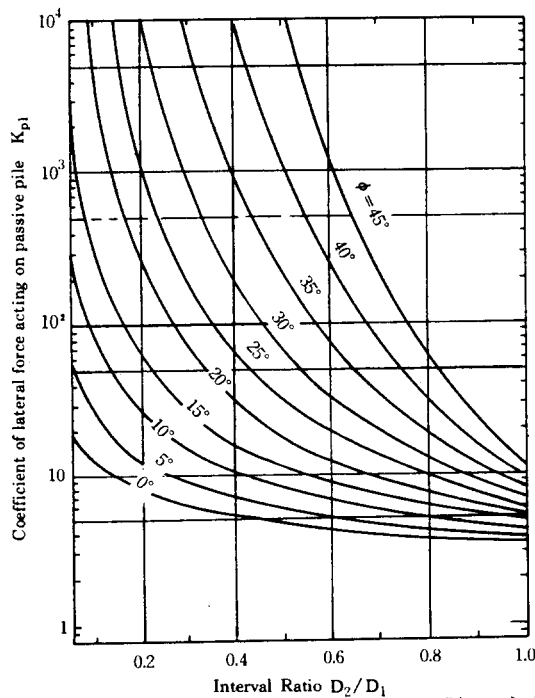


그림 3. 원형말뚝의 측방토압

이 측방토압부가계수 α_m 은 변수로 사용될 수 있다. 우선 임의의 가상 활동파괴면에 대하여 말뚝의 안전율을 1보다 크게 되도록 α_m 을 결정 한 후 사면안정의 안전율을 계산한다.

4.4 지반계수

점성토 지반의 경우 地盤係數 E_s 는 식 (11)과 같이 쓰여진다.¹⁷⁾

$$E_s = 15c_u - 95c_u \dots\dots\dots(11)$$

여기서, c_u 는 점토의 非排水剪斷強度이다. 즉, 지반계수는 연약지반일 경우 $15c_u$, 견고한 지반 일 경우는 $95c_u$ 값까지 사용한다. 통상적으로는 식 (12)와 같이 평균값을 사용한다.

$$E_s = 40c_u \dots\dots\dots(12)$$

한편, 사질토의 지반계수는 Poulos에 의해 表 1과 같이 提案되었다.¹⁸⁾

表 1. 사질토의 지반계수 $E_s(t/m^2)$

밀도	사용범위(t/m^2)	평균치(t/m^2)
느슨	90-210	175
중간	210-420	350
조밀	420-980	700

이 지반계수는 식(3)에서 설명한 바와 같이 활동면을 경계로 하여 상부와 하부로 구분하여 결정하여야 한다. 통상적으로 활동면 하부지반은 부동지반으로 억지말뚝의 변위에 대한 지반으로부터의 반력이 크기 때문에 비교적 중간에서 상한치 사이의 지반계수를 선택할 수 있다. 그러나 활동토괴속의 말뚝부분에 대하여는 지반반력이 그다지 강하지 못하므로 하한치에서 중간사이의 지반계수를 선택함이 바람직하다.

5. 억지말뚝의 사면안정효과

억지말뚝은 말뚝주변지반과의 상호작용에 의하여 3차원적으로 거동하기 때문에 억지말뚝의 사면안정효과는 지반과 말뚝에 관련된 여러 요인에 영향을 받는다. 이미 이전의 연구에서 억지말뚝의 사면안정효과는 말뚝의 설치간격, 말

뚝머리의 구속조건, 사면활동면 상부활동토괴속의 말뚝의 길이, 강관말뚝의 직경, 두께 및 강성에 영향을 받고 있음을 규명한 바 있다.⁴⁾ 또한 장대사면에서의 억지말뚝 설계연구에서도 억지말뚝의 사면안정효과는 측방토압부가계수 및 말뚝열수에 영향을 받고 있음을 밝힌바도 있다.⁵⁾

본 장에서는 우리나라의 산사태 예정지를 예로 들어 앞장에서 설명한 수정사면안정해석법으로 억지말뚝의 사면안정효과를 검토하여 보고자 한다. 특히, 지하수위상승이 억지말뚝의 사면안정효과에 미치는 영향을 조사하여 보고자 한다.

5.1 해석대상사면

그림 4는 아파트부지개발을 목적으로 예정되어 있는 구릉지사면의 일예이다. 자연상태의 지표면경사는 1/2 구배를 가지며 표면으로부터 약 8m 두께로 지표면과 평행하게 붕적토층(점토와 전석 혼합층)이 분포되어 있고 그 하부에 기반암의 풍화대인 풍화토 및 풍화암이 약 4m 두께로 역시 지표면에 평행하게 되어 있다. 그 하부에 기반암인 연암층이 형성되어 있다. 이들 토층에 대한 토질정수는 붕적토층에 대하여는 내부마찰각이 25°, 습윤단위중량과 포화단위중량이 각각 $1.8t/m^3$ 과 $1.9t/m^3$ 이다.

또한, 풍화 잔적토층은 풍화도에 따라 풍화토로 존재하는 지역과 풍화암의 상태로 존재하는 지역으로 구분할 수 있으나 이것을 구별없이 풍화토로 간주하였으며, 표준관입시험에 의한 N치는 대단히 높게 나타나고 있으나 절리면을 따라 편용력이 작용할 경우 강도가 대단히 저하될 수도 있다. 풍화토의 비배수전단강도는 $7.0 t/m^2$ 이며, 습윤단위중량과 포화단위중량은 각각 $1.8t/m^3$ 과 $1.85t/m^3$ 이다. 한편 연암층에 대해서는 내부마찰각을 45°로 하고 습윤단위중량 γ_s 는 $2.0t/m^3$ 로 사용한다.

이와 같은 구릉지에 그림 4에서 보는 바와 같이 하부지역에 절토와 성토를 실시하고 옹벽을 설치하여 아파트부지를 확보하도록 계획되어

있다. 본부지의 사면쪽 경계부에 설치된 옹벽의 상단부에는 1:1 경사구배를 갖도록 하였다. 이러한 단지조성이 완료된 상태의 지반과 지형조건에 대하여 갈수기에 본지역의 최소사면안전율을 구하여보면 0.91이었다. 이때 사면의 활동면은 풍화잔적토층과 연암층 사이의 경계면으로 나타난다. 따라서 사면의 소요 안전율을 1.10이라고 하는 경우 본사면은 풍화토층과 연암층 사이의 경계면을 따라 산사태가 발생할 것으로 예상된다.

두께가 13mm인 강관말뚝을 단단한 암층에 2.3m 깊이까지 근입시켜 사용하기로 하고 말뚝의 설치간격은 1.25m로 하여 말뚝의 간격비 D_2/D_1 을 0.6으로 한다.

안정해석을 실시하기 위한 그밖의 사항에 대하여는 다음과 같이 결정하기로 한다.

- 1) 지하수위면은 지표면과 평행하게 존재한다.
- 2) 강관말뚝의 탄성계수는 $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$

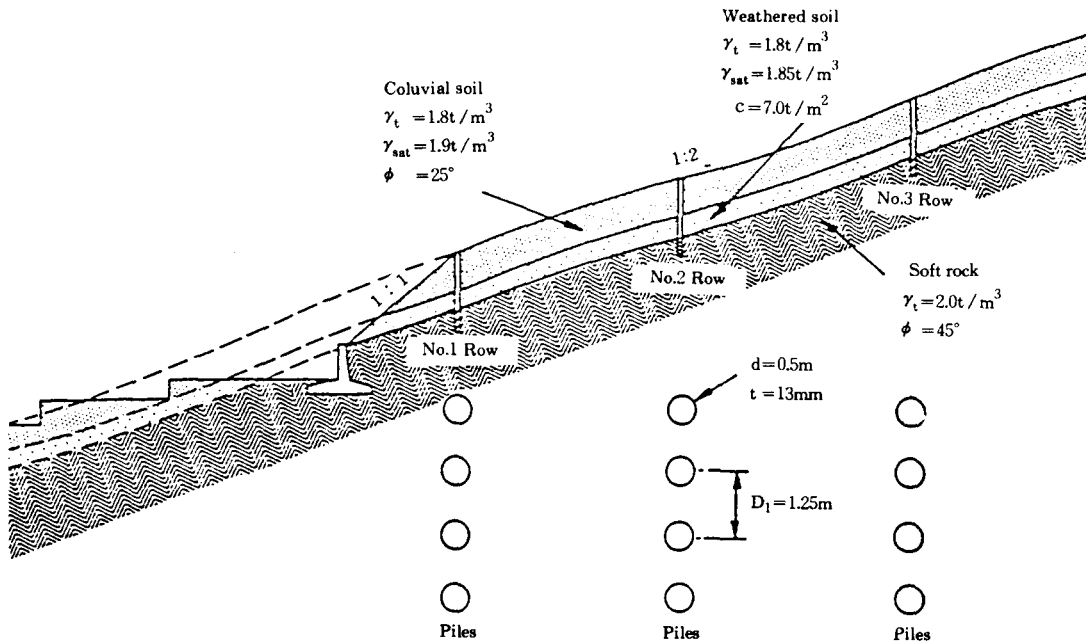


그림 4. 해석대상사면 단면도

5.2 억지말뚝의 사면안정효과

본 지역에 대하여 집중호우시에도 사면의 안정성을 확보하기 위하여는 산사태 방지대책이 강구되어야 할 것이다. 방지대책으로 억지말뚝을 3열로 사용하기로 한다. 그림 4에 표시된 바와 같이 옹벽배면 25m 지점인 법면 상단부에 1열 설치한후 50m 간격으로 2열을 추가 설치하도록 한다. 억지말뚝으로는 직경이 500mm이고

로 한다.

3) 강관말뚝의 허용휨응력과 허용전단응력은 각각 1400kg/cm^2 와 800kg/cm^2 로 한다.

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

5) 지반계수 E_s 는 4.4절에서 설명한 사항을 참조하기로 하여 사면활동면 상부 붕적토의 지반계수 E_{s1} 은 90t/m^2 로 하고 풍화토에 대하여

는 사면활동면의 상부에 풍화토가 존재하는 경우와 하부에 존재하는 경우로 구분하여 각각 $105t/m^2 (=15c_u)$ 와 $280t/m^2 (=40c_u)$ 로 한다. 한편 사면활동면 하부의 연암층의 지반계수는 $700t/m^2$ 로 한다.

이상과 같은 조건하에서 3열의 억지말뚝의 사면안정효과를 고려하여 사면안전율을 구하여 보면 갈수기에 연암층 상부에 지하수위가 존재하지 않는 경우 사면안전율은 풍화토층과 연암층 사이의 활동면에 대하여 억지말뚝의 효과에 의하여 0.91에서 1.19로 상승한다. 따라서 사면안전율은 억지말뚝을 사용하지 않으면서 0.28 상승하게 되어 소요안전율 1.10을 넘게됨을 알 수 있다.

이 경우의 억지말뚝은 말뚝머리부를 서로 철근콘크리트 지중보로 연결시킨 경우에 해당한다. 만약 억지말뚝의 사면안정효과를 더욱 크게 얻고자 한다면 이 지중보를 앵커로 단단한 암층에 정착시키는 것이 바람직하다. 혹은 말뚝머리를 그저 강제 띠장으로 연결시킨후 앵커로 띠장을 단단한 암에 정착시키면 된다.

5.3 地下水位 上昇에 의한 影響

우리나라 年平均 降雨量의 절반 이상이 6월과 9월 사이의 雨期에 집중된다. 따라서, 이 기

간중의 集中豪雨시에는 雨水가 地中에 침투하여 地下水位가 급격하게 上昇한다. 그러나 이 雨水는 대부분 투수성이 나쁜 풍화잔적토층에 침투되기 이전에 붕적토층을 통하여 地表面과 平行하게 하류로 흘러가는 경우가 많다. 본 절에서는 地下水位에 의한 影響을 검토하기 위하여 붕적토층과 풍화토층의 경계면에서 破壞가 일어났을 경우와 風化土層과 연암층의 경계면에서 破壞가 일어났을 경우 모두에 대한 解析을 실시하였다.

그림 5는 地下水位 변화에 따른 斜面 安全率을 고찰하기 위한 地下水位의 比를 나타낸 것으로 崩積土에 대하여는 그림 5(a)에서와 같이 H를 地表面에서 崩積土層과 風化土層의 경계까지의 깊이로 하였고 H_w 는 崩積土層과 風化土層의 경계로부터 위로 상승한 地下水位까지의 길이로 하여 地下水位의 比를 H_w/H 로 나타내어 地下水位가 완전히 地表面까지 올라왔을 때는 H_w/H 를 1로 하고 地下水位가 없을 경우는 0으로 하였다. 風化土層에 대하여는 그림 5(b)와 같이 H를 地表面으로부터 風化土層과 軟岩層의 경계까지로 하고 H_w 는 風化土層과 軟岩層의 境界로부터 상승된 地下水位까지의 길이로 하였다. 이러한 地下水位의 변화에 따른 斜面安全率의 變化를 그림 6에 圖示하였다.

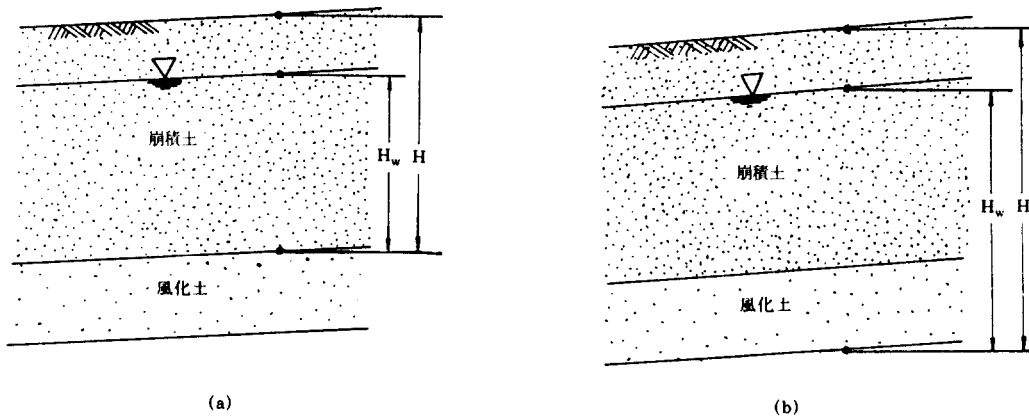


그림 5. 地下수위 상승률 (H_w/H)

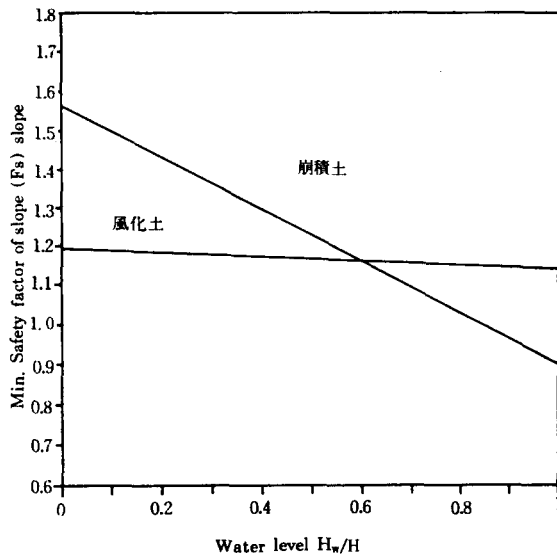


그림 6. 지하수위 변화에 따른 영향

우선 風化土層에 대해 살펴보면 H_w/H 가 0인 경우는 1.2의 安全率을 나타내고 있으며 地下水位가 상승할수록 安全率은 조금씩 감소하여 H_w/H 가 1인 경우는 安全率이 1.14를 나타내고 있어 地下水位에 의한 影響을 그다지 많이 받지 않고 있다. 한편 崩積土의 경우 H_w/H 가 0인 경우에는 斜面安全率이 1.56으로 風化土의 경우보다 훨씬 높는데 반해 地下水位의 上昇 影響은 斜面安全率을 급격히 下落시켜 H_w/H 가 1인 경우는 安全率이 0.91까지 下落함을 볼 수 있다.

所要安全率 확보면에서 살펴보면 所要安全率을 1.10으로 하였을 경우 風化土層에 대한 破壞는 地下水位의 깊이에 관계없이 모두 安全한 것으로 나타나고 있다. 그러나 崩積土의 경우는 H_w/H 의 비가 약 0.7 이상이 되면 所要安全率을 확보하지 못하게 된다. 또한 所要安全率을 1.2로 하였을 경우는 풍화토는 지하수위가 없을 경우에만 사면안전율이 확보되고 있으며 崩積토는 H_w/H 가 0.55이상이 되면 所要安全率을 확보하지 못하게 된다. 所要사면안전율이 1.3인 경우는 풍화토에서 항상 사면안전성을 확보하

지못하고 있으며 崩積토에서는 H_w/H 가 약 0.4 이하에서만 사면의 안전율을 확보하고 있다.

이상에서 지하수위가 없을 경우에는 崩積토에서의 안전율이 풍화토층에서의 안전율보다 훨씬 높는데 반해 지하수위가 상승함에 따라 崩積토에서의 안전율이 풍화토층에서보다 훨씬 많이 감소하여 H_w/H 가 1인 경우에는 崩積토에서 안전율이 훨씬 작아지게 된다. 따라서, 雨期時는 崩積土層 下部 境界面이 斜面滑動面이 될 確率이 많으므로 崩積토에 대해서는 雨期時 降雨浸透에 대한 대책이 많이 요구되어 진다.

6. 결 론

산사태 억지말뚝공법은 산사태 방지대책의 대표적인 방법중에 하나이므로 그 방지기구를 정확히 파악하여 그 기능을 충분히 발휘시킬 수 있는 설계를 실시하여야만 한다. 이러한 산사태 억지말뚝설계에 있어서 종래 취급하기 곤란함 때문에 경시되어 온 중요한 요인중 말뚝설치간격의 영향을 고려하는 점과 사면안정시 말뚝과 사면의 안정을 유기적이고 체계적으로 해석 실시하는 점에 역점을 두고 억지말뚝의 설계법을 개발하여 오고 있다. 특히 본 논문에서는 이 설계법을 사용하기 편리하도록 몇가지 점에 대한 발전을 시도하여 보았다. 특히 말뚝안정해석시 사면활동면 상부토괴속의 억지말뚝 배면에 작용하는 지반계수를 사용하므로써 지반반력을 고려할 수 있도록 하였다. 또한 억지말뚝에 작용하는 측방토압산정식을 사용하기 편리한 형태로 정리하였다. 마지막으로 산사태 예정지역을 설정하여 억지말뚝해석 예를 실시하여 억지말뚝의 사면안정효과를 확인하였으며 지반계수와 지하수위 상승이 사면안정에 미치는 영향을 조사하였다.

감사의 말

이 논문은 1990년도 문교부지원 학술진흥재

단의 자유공모과제 학술연구비에 의하여 연구된 결과이며 동 재단에 감사드리는 바이다.

參考文獻

1. 홍원표(1983): “수평력을 받는 말뚝”, 대한토목학회지, 31(5), pp.32-36.
2. ASCE(1982): Application of Walls to Landslide Control Problems.
3. 福本安正(1977): “地すべり調査報告書-地すべり工法(杭打)調査-”, 新潟縣農林部治山課.
4. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P.(1981): “Design method for stabilizing piles against landslide-One row of piles”, Soils and Foundations, 21(1), pp.21-37.
5. Ito, T., Matsui, T. and Hong, W.P.(1982): “Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslides”, Soils and Foundations, 22(1), pp.1-13.
6. Hong, W.P.(1986): “Design method of piles to stabilize landslides”, Proc., Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Allentown, pp. 441-453.
7. 홍원표(1982): “점토지반속의 말뚝에 작용하는 측방토압”, 대한토목학회논문집, 2(1) pp.45-52.
8. 홍원표(1983): “모래지반 속에 작용하는 측방토압”, 대한토목학회논문집, 3(3), pp.63-69.
9. 홍원표(1984): “측방변형 지반속의 원형 말뚝에 작용하는 토압의 산정”, 중앙대학교 논문집, 제27집, 자연과학편, pp.319-328.
10. 홍원표(1984): “측방변형 지반속의 줄 말뚝에 작용하는 토압”, 대한토목학회논문집, 4(1), pp. 59-68.
11. 홍원표(1984): “수동말뚝에 작용하는 측방토압”, 대한토목학회논문집, 4(2), pp.77-88.
12. Matsui, T., Hong, W.P. and Ito, T. (1982): “Earth pressures on piles in a row due to lateral soil movements”, Soils and Foundations., 22(2), pp.71-81.
13. 대한토목학회(1987): “정선병원 절토사면 안전 진단 연구 보고서”
14. 대한토목학회(1987): “장복로 사면붕괴 방지대책 연구용역 보고서”
15. 대한토질공학회(1989): “대한주택공사 부산덕천 지구 사면안정검토 연구용역 보고서”
16. Huang, Yang H.(1983): “Stability analysis of earth slopes”, Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp.13-25.
17. Marche, R. and Lacroix, Y.(1972): “Stabilite des culées de ponts établies sur des pieux traversant une couche molle”, Canadian Geotechnical Journal, 9(1), pp. 1-24.
18. Poulos, H.G.(1971): “Behavior of laterally loaded piles: I-Single piles”, ASCE, 97(SM5), pp. 711-731.
19. 홍원표, 김상규, 김마리아, 김윤원, 한중근(1990): “강우로 기인되는 우리나라 사면 활동의 예측”, 대한토질공학회지, 6(2), pp.55-63.
20. 홍원표(1990): 산사태 및 방지대책, 사면안정강좌(Ⅷ) 대한토질공학회, 6(3), pp.88-98.

(접수일자 1991. 10. 14)