

사면붕괴가 발생한 절개사면에서의 억지말뚝 보강 사례연구

송영석*

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

A Case Study on the Reinforcement of Stabilizing Piles against Slope Failures in a Cut Slope

Young-Suk Song*

Geological & Environmental Hazards Division, Korea Inst. Geoscience and Mineral Res.

본 논문은 도로공사시 발생한 붕괴사면을 대상으로 사면안정성을 검토하고, 불안정할 경우 합리적인 사면보강공법을 제안한 현장사례 연구이다. 사면조사결과 대상사면은 5개의 대규모 인장균열을 포함하고 있으며, 사면활동은 인장균열에서 시작하여 표토층과 풍화암층사이까지 발생한 것으로 판단된다. 사면안정해석은 건기시와 우기시에 대하여 각각 수행되었으며, 대상사면은 현재 불안정한 것으로 예측되었다. 사면보강공법은 사면의 파괴규모에 따라 선정하는 것이 바람직하다. 즉, 파괴규모에 따라 소규모파괴, 중규모파괴, 그리고 대규모파괴로 나누고 각각의 파괴규모에 따라 사면보강공법을 결정할 수 있다. 대상사면의 경우 대규모파괴에 해당하므로 사면보강공법은 안전율증가공으로 억지말뚝공을 채택하고, 안전율 유지공으로 식생공(Seed Spray) 및 지표수배제공을 채택할 수 있다. 억지말뚝으로 보강된 사면의 안정해석을 위하여 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램을 적용하였다. 사면안정 해석결과 1열의 억지말뚝을 시공할 경우 안정한 것으로 나타났으며, 해석결과로부터 억지말뚝의 사면안정효과를 확인할 수 있다.

주요어 : 절개사면, 사면파괴규모, 사면보강공법, 억지말뚝, 사면안정해석

This paper presents a field study of the stability of slope collapsed during road construction and proposes a reasonable countermeasure if the current slope is unstable. As a result of slope investigation, it was found that the slope includes five tension cracks and the sliding surface is started from the tension crack and propagated the surface soil layer through weathered rock layer. The slope stability analyses are conducted in case of dry and rainfall seasons. The results indicate that the slope is unstable status. A reinforcement method of slope failure should be selected according to the scale of failure. That is, the scale of slope failure, which is classified small, middle and large size determines the reinforcement method of slope. Since the slope interested in this study is large size failure slope, the reinforcement method to control slope failure is selected stabilizing piles, and seed spray and drainage of surface water are also selected to remain the factor of safety. The SLOPILE (Ver. 3.0) program is applied in order to do stability analysis of slope reinforced by piles. As the result of analysis, the slope reinforced by a row of piles shows the stable state. It is clearly confirmed that the stabilizing of piles can improve the stability of slope.

Key words : cut slope, scale of slope failure, method to control slope failure, stabilizing piles, slope stability analysis

서론

산사태의 발생요인은 내적요인(잠재적소인)과 외적요인(직접적유인)의 두가지로 크게 나눌 수 있으며 이들 두 요인이 함께 구비되었을 때 산사태가 비로소 발생하

게 된다. 즉, 내적으로 취약한 지질구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토 등의 외적유인이 가하여 질 경우 산사태가 발생되기 쉽다. 최근에 발생하는 대부분의 산사태는 구릉지와 산지개발에 따른 인위적인 유인에 의한 경우가 대부분이다. 따라서 산사태발생을 방지할 대

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

책을 마련하려면 이들 발생요인을 잘 파악하여 이에 대한 효과적인 사면안정공법을 결정하여야 할 것이다.

최근에 우리나라에서도 산사태를 방지하고자 많은 사면안정공법이 채택 적용되고 있다. 그러나 효과적인 사면안정공법은 대상지역의 지질학적, 지형학적 및 지반공학적인 특성에 따라 다를 수 있다. 따라서 각 지역의 특성에 적합한 사면안정공법을 제안, 설계 및 시공할 필요가 있다. 종래의 사면안정공법으로는 경사면을 식물이나 불력으로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하는 소규모의 공법이나 사면의 구배를 완만하게 하는 공법이 많이 사용되었다. 그러나 최근에 이르러서는 이들 공법으로 산사태를 방지시키기에는 한계가 있어 억지말뚝, 쏘일네일링, 앵커, 옹벽 등으로 사면의 저항력을 증대시키는 적극적인 공법이 많이 사용되고 있다. 특히, 억지말뚝공법은 활동토괴를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치하므로써 사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 받아 부동지반에 전달시키는 공법이다. 이러한 억지말뚝은 수동말뚝(Passive pile)의 대표적인 예중의 하나로 활동토괴에 대하여 역학적으로 저항하는 공법이다. 그리고 타공법들과 비교하여 지중 깊은 곳까지 활동이 발생하는 중규모 혹은 대규모 산사태에 저항할 수 있다는 장점을 가지고 있다(홍원표 등, 2003; Hong *et al.*, 2004a, 2004b). 이 공법은 사면안정율의 증가효과가 커서 일본, 미국, 유럽 등의 외국에서는 예로부터 많이 사용되어 오고 있다(De Beer & Wallays, 1970;

Viggiani, 1981; Winter *et al.*, 1983; Popescu, 1991; Schuster, 1992; Ergun, 2000). 특히 일본의 경우는 강관말뚝을 사용하여 산사태를 방지하려는 시도가 매우 활발하게 실시되었다(福本安正, 1976; Ito *et al.*, 1981; 1982). 최근에는 우리나라에서도 억지말뚝의 사용하여 산사태를 방지하려는 사례가 늘어나고 있다(Hong & Park, 2000; 홍원표 등, 2003).

본 연구에서는 전라남도 구례군 산동면 일대의 도로공사시 일부구간에서 발생한 붕괴사면을 대상으로 사면안정해석을 수행하고, 합리적인 사면보강대책공법을 마련하였다. 이를 위하여 먼저 붕괴사면의 현황조사 및 지반조사를 수행하였다. 이러한 조사결과를 토대로 현재사면에 대한 사면안정성을 검토하였으며, 대상사면의 합리적인 사면보강대책공법으로 억지말뚝공을 제안하였다. 그리고 억지말뚝으로 보강된 절개사면에 대하여 사면안정해석을 수행하고, 해석결과로부터 억지말뚝의 사면안정효과를 확인할 수 있다.

현장개요

대상사면

연구대상지역은 전라남도 구례군 산동면에 위치한 도로개설공사 구역내 사면절개구간으로 대상사면은 STA.11+920~12+000에 위치한다. Fig. 1은 연구대상지역에 대한 평면도를 도시한 것으로, STA.11+940을 검토

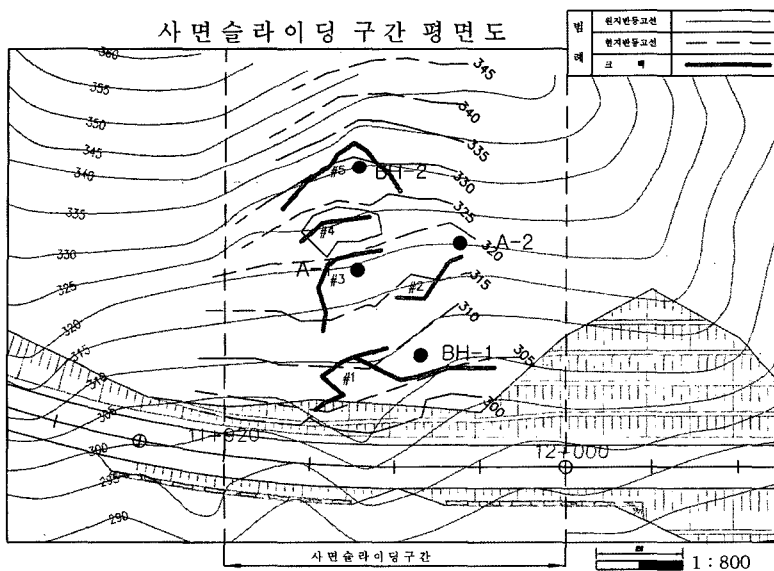


Fig. 1. Plan view of the study area and locations of soil investigation.

단면으로 선정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 대상 사면의 인장균열면은 총 5곳이며, 사면파괴규모도 상당히 큰 것으로 조사되었다.

현장조사결과

대상사면의 시점은 STA.11+920지점이고, 종점은 12+000지점이므로 사면연장은 약 100 m이고, 높이는 70 m이며, 사면의 경사는 35~45°의 범위를 갖는다. 따라서 사면의 파괴규모는 중규모 내지 대규모로 구분할 수 있다. 그리고 대상사면에서는 현재 5개의 대규모 인장균열면을 포함하고 있다. Photo 1은 대상사면의 전경을 나타낸 것으로, 사면활동이 발생한 이후 계속적으로 사면 활동에 대하여 육안으로 관찰하고 있는 상태이다. Photo 1에서 보는 바와 같이 실제로 관찰된 대상사면의 단차 및 균열현황을 토대로 #1, #2, #3, #4 및 #5의 인장균열면을 작도하였다. 그리고 Photo 2는 #5의 인장균열을 나타낸 것으로 단차가 약 100~200 cm 정도로 크게 발생하였으며, 사면전체를 가로질러 발생하고 있음을 알

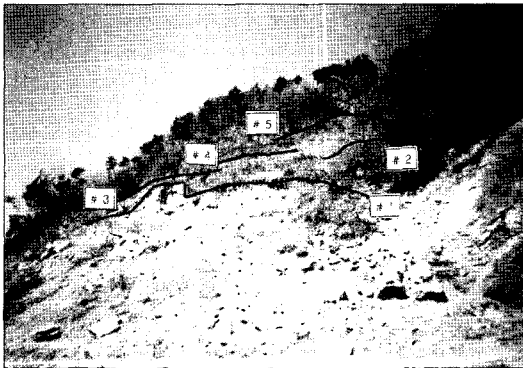


Photo 1. The view of No.1 slope.



Photo 2. The view of #5 tension crack.

수 있다. 이들 인장균열면에 대한 실제 육안관찰을 통하여 대상지역의 사면활동이 과거에서부터 발생되어 현재에도 계속적으로 진행중인 것으로 추정할 수 있다.

지반조사

대상지역에 대하여 시추조사를 실시한 결과를 통하여 지층의 구성 및 심도, 지하수위를 파악할 수 있다. Fig. 1은 지반조사위치를 나타낸 것으로, 시추조사는 총 4곳에 대하여 실시되어 있다. 이 가운데 사면상부의 BH-2 및 사면하부의 BH-1에서의 시추조사 결과를 나타내면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2를 살펴보면 사면 상부에서는 지표면으로부터 표토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있으며, 사면하부에서는 지표면으로부터 표토층 및 연암층을 구성되어 있음을 알 수 있다. 표토층의 경우 황색의 전자갈을 혼재한 실트질 모래로 구성되어 있으며, 표준관입시험결과 N치는 4/30-9/30로 느슨한 상태를 보이는 것으로 나타났다. 풍화암층은 모암의 풍화로 인하여 형성된 층이며, 매우 조밀한 상태를 보이며 풍화암편상으로 존재한다. 그리고 연암층은 암회색의 화강암질로 구성되어 있고, 코어는 단주상, 각력상으로 회수되었으며 코어회수율(CR)은 25% 정도로 나타났다.

Fig. 3은 시추조사 및 사면현황조사 결과를 토대로 대상사면의 단면도를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 대상사면의 상부에서 표토층이 0.4~6.8 m 두께

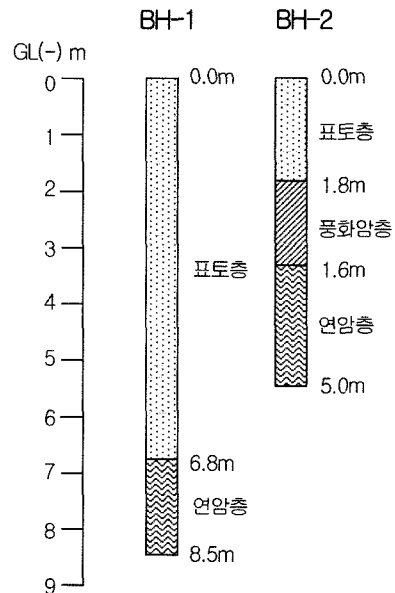


Fig. 2. Subsurface profile.

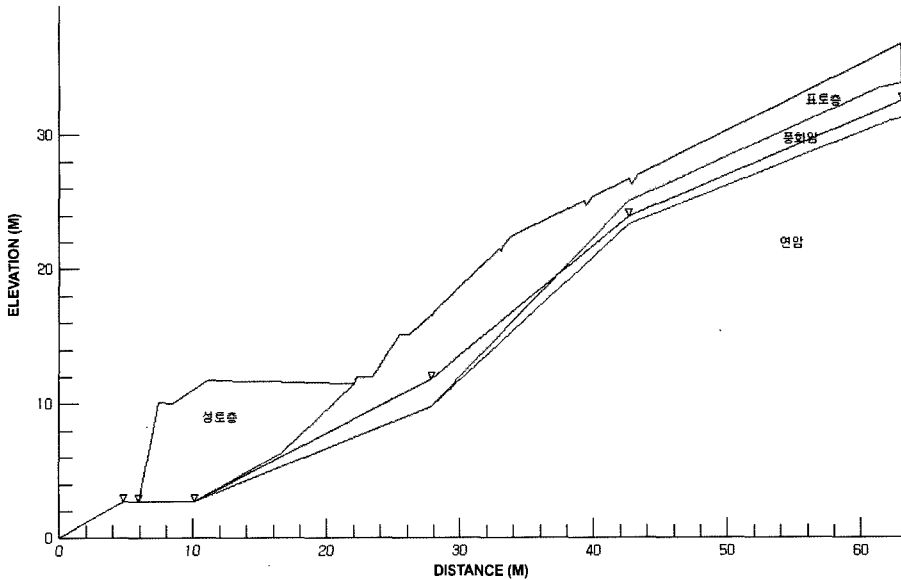


Fig. 3. Cross sectional view of the slope for numerical analysis 강도정수 산정.

로 분포하며, 그 아래에 풍화암층 및 연암층이 존재하는 것으로 나타났다. 사면의 중앙부 및 상부에서는 표토층 아래에 풍화암층이 존재하며, 사면의 측면부 및 하부에서는 표토층 아래에 연암층이 존재하는 것으로 나타났다. 그리고, 풍화암층은 1.6~4.6 m 두께로 분포하며, 사면상부에서만 존재하는 것으로 나타났다. 한편, 지하수위는 지표면으로부터 2.8~4.8m 아래에 위치한다.

대상사면에 대하여 상부 표토층의 경우는 실내 직접 전단시험과 현장 표준관입시험을 실시하여 강도정수를 산정하였으며, 하부 암반층의 경우는 기존의 고속도로 설계시 적용된 물성치를 토대로 강도정수를 추정하였다.

상부 표토층의 경우 현장에서 채취한 시료를 이용하여 직접전단시험을 실시하였다. 직접전단시험결과 점착력은 1.0-1.5 t/m²이며, 내부마찰각은 23.8-27.5°인 것으로 나타났다. 이에 대한 평균값을 적용하여 점착력은 1.2 t/m², 내부마찰각은 27°로 결정하였다. 그리고 풍화암층 및 연암층의 경우 기존 고속도로의 설계시 적용되었던 강도정수들의 최소값을 적용하였다(한국도로공사, 1998). 이상의 결과를 정리하면 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

사면안정해석 프로그램

본 해석에 사용된 사면안정해석 프로그램은 국내에서

Table 1. Soil properties in each layer

| Layer | unit weight | | c(t/m ²) | φ(°) |
|----------------|---------------------|---------------------|----------------------|------|
| | (t/m ³) | (t/m ³) | | |
| weathered soil | 1.7 | 1.8 | 1.2 | 27 |
| weathered rock | 2.0 | 2.1 | 4 | 30 |
| soft rock | 2.5 | 2.6 | 10 | 35 |

개발된 SLOPILE(Ver.3.0)이다. SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램은 활동역지시스템인 역지말뚝, 쏘일네일링 및 앵커로 보강된 절·성토사면 및 무한사면에 대한 원호파괴면해석(Fellenius 방법, Bishop 간편법) 및 평면파괴면해석이 가능하도록 개발되었으며, SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램의 흐름도는 Fig. 4와 같다(홍원표와 송영석, 2006).

먼저, 해석대상사면의 해석을 위해 전체 사면을 일정한 분할요소로 구분한 후 사면안정해석법을 선택한다. 그리고 설정된 사면안정해석법에 따라 평면파괴해석(무한사면해석)과 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

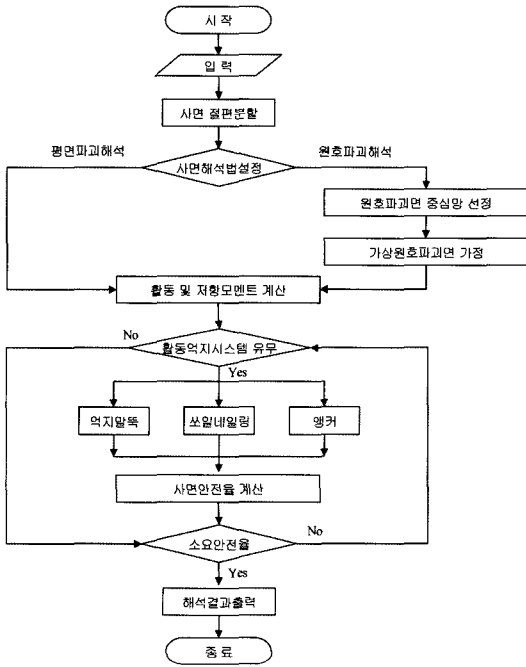


Fig. 4. Flow chart of SLOPILE(Ver 3.0) program

전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다. 활동억지시스템이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전을 계산한다. 그러나 활동억지시스템에 의한 사면보강이 필요할 경우 억지말뚝, 앵커 및 쏘일네일링을 선정하여 이를 고려한 사면안전을 계산한다.

만약 활동억지시스템 가운데 억지말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동토괴로부터 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 소요안전율을 이내가 될때까지 반복한다. 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 크게 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 사용하여 가상원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 앵커 및 쏘일네일링의 경우도 마찬가지로 앵커 및 쏘일네일링의

전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다. 활동억지시스템이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전을 계산한다. 그러나 활동억지시스템에 의한 사면보강이 필요할 경우 억지말뚝, 앵커 및 쏘일네일링을 선정하여 이를 고려한 사면안전을 계산한다.

만약 활동억지시스템 가운데 억지말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동토괴로부터 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 소요안전율을 이내가 될때까지 반복한다. 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 크게 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 사용하여 가상원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 앵커 및 쏘일네일링의 경우도 마찬가지로 앵커 및 쏘일네일링의 안정성을 검토한 이후 가상원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 사면안전을 계산시 구하였던 사면파괴면에서의 전단저항에 의한 저항모멘트에 활동억지시스템에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전을 계산하여 활동억지시스템의 사면안정효과를 산정한다.

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

사면의 안정해석

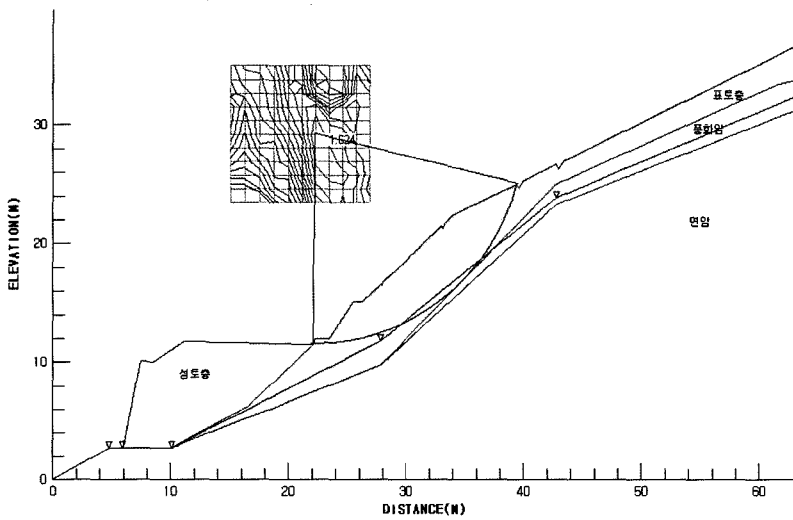
대상지역의 절개사면에 대한 안정성을 검토하기 위하여 사면안정해석을 실시하였다. 대상지역의 상부에는 토사층이 위치하며, 하부에는 암반층이 위치하고 있기 때문에 상부 토사층에 대해서는 원호파괴와 평면파괴에 대한 사면안정해석을 실시하였다. 사면안정해석법은 원호파괴의 경우 Bishop의 간편법을 사용하였으며, 평면파괴의 경우 무한사면해석법을 사용하였다.

사면안정해석은 건기시와 우기시에 대하여 각각 실시하였으며, 그 결과는 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 사면안정해석은 Bishop의 간편법과 무한사면해석법에 대하여 실시하였다. 건기시의 경우에는 지반조사시 측정된

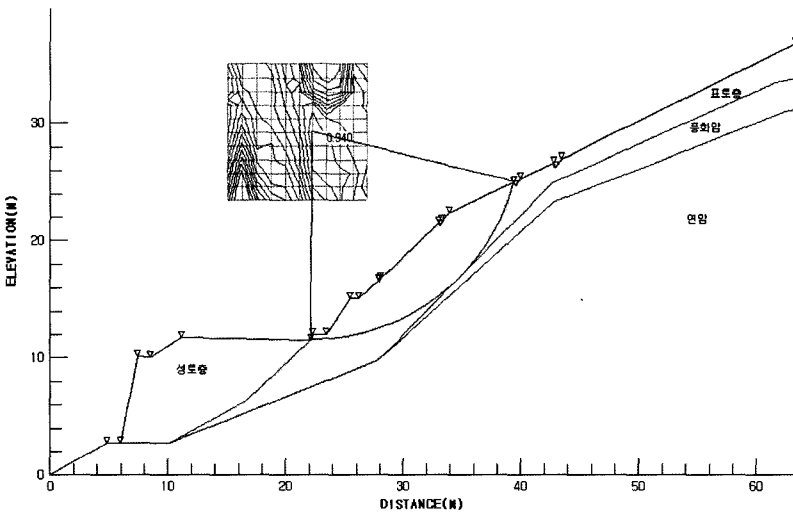
지하수위를 기준으로 사면안정해석을 수행하였으며, 우기시의 경우에는 우수의 지표침투로 인하여 지표면으로부터 지반습윤대가 하강하여 사면전체가 포화된 것으로 가정하여 사면안정해석을 수행하였다. Fig. 5는 건기시

Table 2. Result of the slope stability analysis

| Failure Type | Dry Season | Stability | Wet Season | Stability |
|------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| circular failure | 1.62 | stable | 0.94 | unstable |
| plane failure | 1.90 | stable | 1.37 | stable |



(a) Dry season



(b) Wet season

Fig. 5. Slope stability analysis considering circular failure.

및 우기시 원호파괴해석에 대한 결과를 나타낸 것이다.

Table 2에서 보는 바와 같이 전기시에는 원호 및 평면파괴해석에 대한 사면안전율이 모두 소요안전율을 만족하고 있으며, 우기시에도 평면파괴해석에 대한 사면안전율이 소요안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 우기시 원호파괴해석에 대한 사면안전율이 소요안전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 사면안전율을 증가시킬 수 있는 사면안정대책공법을 적용하여 우기시 원호활동파괴에 대한 사면안전율을 소요안전율 이상으로 증가시켜야 할 것으로 판단된다.

보강사면의 안정해석

사면보강공법

사면보강공법의 정리방법으로는 여러 가지가 있을 수 있다. Schuster(1992)는 대책공법을 배수공(drainage), 절토공(slope modification), 압성토공(earth buttresses) 및 지반보강공(earth retention systems)의 4가지로 구분하였다. 山田(1982)는 대책공법을 억제공(抑制工)과 역지공(抑止工)의 두가지로 구분하였다. 그리고 홍원표와 송영석(2002)은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 국내 사면보강공법을 안전율유지법과 안전율증가법으로 구분하였다. 즉, 현재의 사면안전성은 확보되어 있으나 우수의 침투, 세굴 등에 의하여 사면안전율이 감소되는 것을 방지하기 위하여 적용되는 안전율유지법과 사면안전성이 확보되지 못할 것이 미리 예측하여 사면에 적용할 수 있는 안전율증가법으로 구분하였다.

사면파괴규모별 사면보강공법의 선정

사면보강공법의 선정은 어떤 종류의 사면을 막론하고 대상사면의 규모, 사면 기울기와 높이, 지형조건, 지질조건, 및 주변 여건 등에 대한 충분한 사전 조사결과를 토대로 이루어져야 한다. 복구공사를 위한 보강공법 선

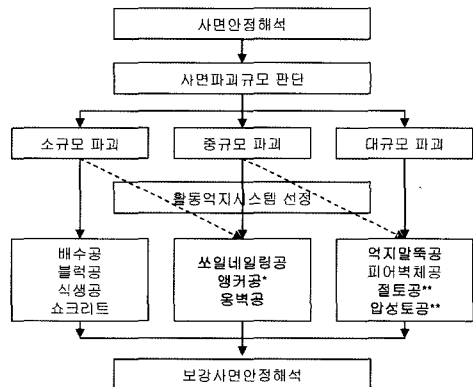


Fig. 6. Classification of the slope stabilization method in Korea (Hong & Song, 2002).

정의 경우에는 이외에 별도로 붕괴의 원인을 고려하여 선정해야 할 것이다. 자연사면의 붕괴방지대책 및 이전 파괴면에 대한 복구공법의 선정에 있어서는 많은 정보를 이용하여 대책공법을 수립하는 것이 바람직하다. 여기에 필요한 자료들로는 지형도, 지질도, 현장조사에 의한 사면정보, 계측에 의한 사면활동의 정보 등 여러 가지가 있는데 복구공법에 있어서는 붕괴당시의 상황에 대해서도 고려할 필요가 있다.

절개사면의 경우는 자연사면에 비하여 현장조건이 파악이 비교적 용이하기 때문에 적용 가능 공법별 특성을 파악한 후 허락되는 경제적 조건하에서 최적의 공법을 선정하면 된다. 절개 사면은 보통 자연사면에 비하여 교통시설이나 주택시설 등 인간의 생활과 밀착되는 경우가 많으므로 다소의 경제적인 부담을 감수하더라도 가장 확실한 공법을 선정해야 할 필요가 있다. 그리고 사면 파괴후 복구공법으로 사면보강공법을 적용할 경우에는 자연적인 조건과 현장조건 이외에서 다음과 같은 사항에 대하여 검토할 필요가 있다. 검토할 사항은 재붕괴되는 경우에 공공시설, 주거시설, 및 교통 등에 미치는 영향, 도로 복구시 교통량과 우회로 유무 판단, 한 종류만의 공법을 사용할 경우와 두 종류이상의 공법을 조합하여 사용할 경우의 보강효과 및 경제성 비교 등이 있다.

Fig. 7은 사면보강공법의 선정방법을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 사면의 파괴규모에 따라 사면보강공법을 선정하도록 한다. 즉, 파괴규모에 따라 소규모파괴, 중규모파괴, 그리고 대규모파괴로 나누고 각각의 파괴규모에 따라 사면보강공법을 결정할 수 있다.



* 옹벽공은 대규모파괴에도 적용가능
** 절토공 및 압성토공은 소규모, 중규모 및 대규모파괴에도 적용가능

Fig. 7. Selection technique of the slope stabilization method according to failure size (Song, 2004).

Table 3. Selection of the slope failure size (Song, 2004)

| Failure Size | Small | Middle | Large |
|--|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| Volume of the slope failure | less than 150 m ³ | 150~900 m ³ | more than 900 m ³ |
| Height of the slope failure | less than 10 m | 10~30 m | more than 30 m |
| Depth of a soil depth above rock layer | less than 1 m | 1~2 m | more than 2 m |

사면의 파괴규모는 Table 3에 나타난 바와 같이 사면 파괴의 위험성을 평가하는 각종 기준(Task Committee of Japanese Geotechnical Society, 1996; Japanese National Railways, 1974; Okada *et al.*, 1992; 1994; Sugiyama *et al.*, 1995; 이부경, 2003)을 토대로 마련된 방법을 적용한다(송영석, 2004).

사면의 파괴규모는 사면안정해석 프로그램을 이용하여 사면의 활동면을 예측하고, 이를 통하여 사면의 파괴 규모를 판단한다. 사면의 파괴규모에 따른 사면보강공법을 살펴보면 소규모파괴의 경우는 식생공법, 지표수 배수공법, 블록공법, 표층안정공법, 낙석방지 Net, Shotcrete 등으로 보강할 수 있으며, 중규모파괴의 경우는 앵커공법, 쏘일네일링공법, 옹벽공법, Rock Bolt 공법 등으로 보강할 수 있다. 그리고 대규모파괴의 경우는 억지말뚝공법, 절토공법, 압성토공법, 피어벽체공법 등으로 보강할 수 있다. 이와 같이 사면보강을 위한 사면보강공법이 선정이 되면 이를 고려한 사면안정해석이 수행되어야 할 것이다.

대상사면의 경우 사면보강공법의 선정방법에 의하면 대규모 파괴에 해당하므로 안전율증가공으로 억지말뚝공을 채택하고 안전율유지공으로 식생공(Seed Spray) 및 지표수배제공을 채택하였다. 따라서 대상사면에 억지말뚝을 효과적으로 설치하여 소요안전율을 만족하도록 설

계하여야 할 것이다.

억지말뚝으로 보강된 사면의 안정해석법

억지말뚝의 설계시 고려해야할 사항으로는 두가지 중요한 요인이 있다. 즉 말뚝간격을 보다 엄밀히 고려하는 것과 억지말뚝과 사면지반 양자의 안정해석을 보다 유기적이고 계통적으로 행하는 것이다. 따라서 말뚝이 설치된 사면의 안정해석법을 억지말뚝이 설치된 사면의 안정과 억지말뚝의 안정에 대해 설명하고자 한다.

억지말뚝이 설치된 사면의 안정을 해석하기 위해서는 Fig. 8에 도시된 바와 같이 억지말뚝과 사면의 두가지 안정에 대하여 해석하여야 한다. 만약 토괴활동에 의하여 말뚝에 작용하는 측방토압(혹은 말뚝으로부터 활동 토괴에 대한 저항력)을 알 수 있다면 Fig. 8(b)에 도시된 바와 같이 말뚝의 안정을 먼저 검토할 수 있다. 이때 말뚝의 안정은 수평하중을 받는 말뚝의 해석법을 적용할 수 있다. 말뚝의 안정해석을 통하여 말뚝의 안정성이 확보되면 말뚝에 작용하던 수평하중을 Fig. 8(a)와 같이 말뚝의 수평저항력으로 간주할 수 있다. 이 수평저항력을 사면활동 저항력에 부가시켜 통상의 사면안정 해석법을 적용하면 사면의 안정을 검토할 수 있다. 여기서, 측방토압의 산정은 사면의 안정을 위한 억지말뚝 설계에 있어서 매우 중요한 사항이 되므로 이 값을 정

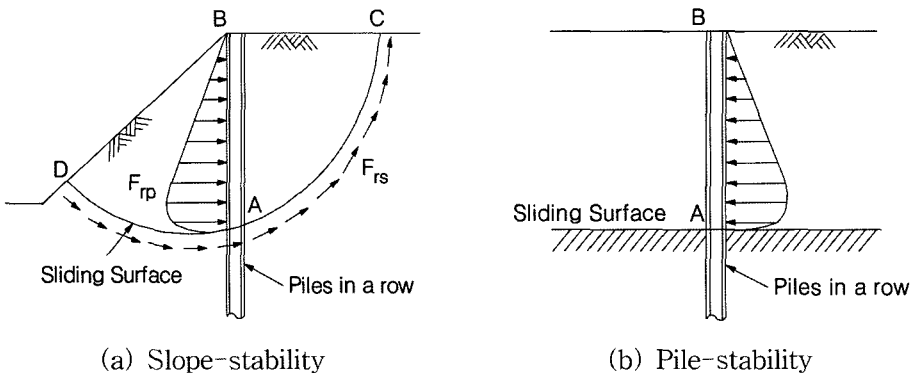


Fig. 8. Stability analysis of the slope containing stabilizing piles.

확하게 예측하는 것이 대단히 중요하다. 왜냐하면, 말뚝의 안정과 사면의 안정에 미치는 축방토압의 영향이 서로 상반되기 때문이다. 즉, 축방토압을 실제보다도 크게 산정하여 설계할 경우, 말뚝의 안정에 관하여는 안전측이나 사면의 안정에 관하여는 위험측이 된다. 반대로 축방토압을 실제보다 적게 산정하여 설계할 경우에는 그 반대현상이 발생할 것이다. 실제로 말뚝주변에서 지반의 파괴는 지중에 형성된 지반아치영역중 외부아치의 천정부에서 파괴가 진행되어 말뚝주변부의 켈페기부로 발전하게 된다. 따라서, 억지말뚝에 작용하는 축방토압은 말뚝주변지반의 파괴형태에 따라 정상파괴시 축방토압(홍원표 와 송영석, 2004)과 켈페괴시 축방토압(Matsui et al., 1982)으로 분류할 수 있다.

억지말뚝으로 보강된 사면의 안정해석결과

억지말뚝이 사면에 일정한 간격으로 일렬로 설치된 경우 줄말뚝은 산사태 억지효과를 갖게 된다. 따라서, 대상사면의 안정화를 위하여 억지말뚝을 일렬로 설치하고자 한다. 일반적으로 산사태 방지용 억지말뚝의 설계에 있어서는 말뚝과 사면 모두의 안정에 대하여 검토하여야 한다. 우선 파괴면 상부의 붕괴토괴의 이동에 의하여 말뚝에 작용하는 축방토압을 산정하여 말뚝이 축방토압을 받을 때 발생될 최대휨응력을 구하고 말뚝의 허용휨응력과 비교하여 말뚝의 안전율을 산정한다. 한편, 사면의 안정에 관하여는 말뚝이 받을 수 있는 범위까지의 축방토압을 산출하여 사면안정에 기여할 수 있는 부가적 저항력으로 생각하여 사면의 안전율을 산정한다. 이와 같이 하여 말뚝과 사면의 안전율이 모두 소요안전율 이상이 되도록 말뚝의 치수를 결정한다. 억지말뚝의 설계에는 줄말뚝의 사면안정효과를 고려할 수 있도록 개발된 SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램을 사용하였다. 억지말뚝의 설계에서는 억지말뚝의 치수 및 간격, 설치위치, 열수 등을 고려하여 수행하였다.

억지말뚝을 고려한 사면안정해석은 건기시와 우기시에 대하여 각각 실시하였으며, 그 결과는 Table 4와 같이 나타낼 수 있다. 사면안정해석은 Bishop의 간편법과 무한사면해석법에 대하여 실시하였다. 그리고 건기시의

경우에는 시추조사시 측정된 현재 지하수위에 대하여 사면안정해석을 수행하였으며, 우기시의 경우에는 강우로 인하여 상부 토사층이 완전히 포화된 것으로 가정하여 사면안정해석을 수행하였다. 사면안정해석에 사용된 억지말뚝은 H-300×300×10×15이며, 말뚝과 말뚝사이의 간격비(D2/D1)는 0.83으로 하였다.

Fig. 9는 Bishop의 간편법을 이용하여 원호파괴시 사면안정성을 검토한 결과이다. 대상사면의 경우 1열의 억지말뚝을 설치할 경우 우기시에도 소요안전율을 만족하는 것으로 나타났다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 말뚝의 사면안정효과를 고려한 경우 원호파괴시 사면안전율은 건기시 1.93, 우기시 1.23으로 나타났다.

결 론

본 연구에서는 도로공사시 일부구간에서 발생한 붕괴 사면을 대상으로 사면현황 및 지반조사를 수행하였다. 그리고 이를 토대로 현재사면에 대한 사면안정성을 검토하였으나, 대상사면은 불안정한 것으로 판단되어 사면보강공법을 제안하였다. 사면보강공법은 사면파괴규모를 고려하여 선정하였으며, 보강사면에 대한 사면안정해석을 수행하였다. 이에 대한 결과를 정리하면 다음과 같다.

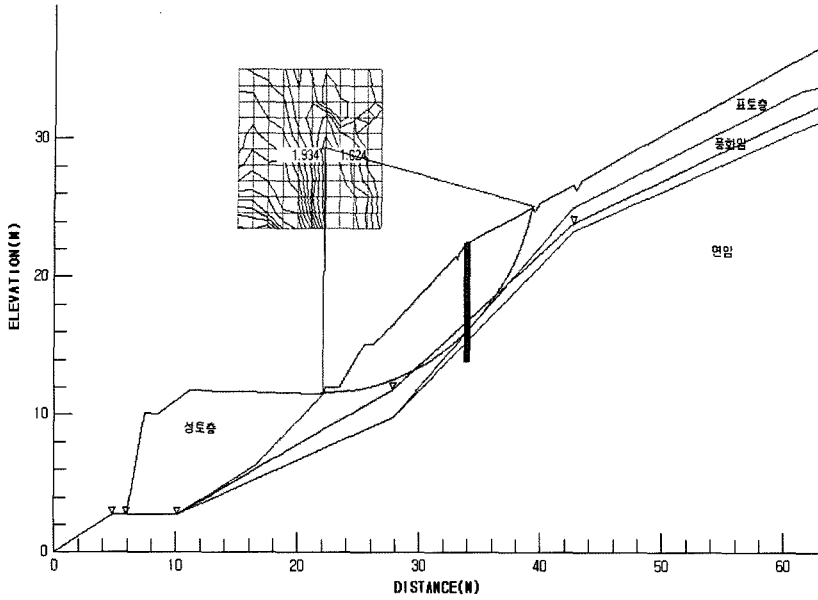
1) 대상사면의 지층은 지표면으로부터 표토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있다. 대상사면은 5개의 대규모 인장균열을 포함하고 있으며, 사면활동은 인장균열에서 시작하여 표토층과 풍화암층사이에서 발생한 것으로 판단된다.

2) 사면안정해석은 건기시와 우기시에 대하여 각각 실시하여야 한다. 건기시에는 지반조사에서 측정된 지하수위를 기준으로 해석을 수행하고, 우기시에는 우수의 지표침투로 인하여 지표면으로부터 지반습윤대가 하강하여 사면전체가 포화된 것으로 가정하여 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

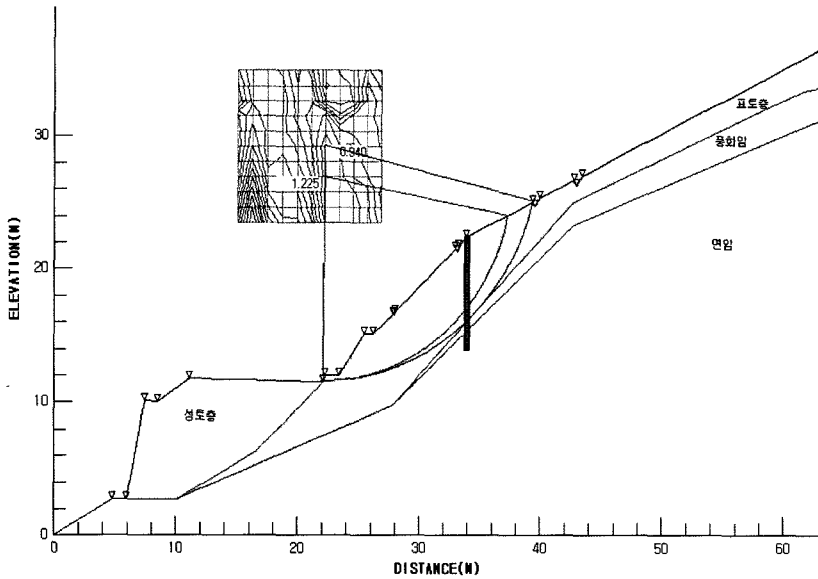
3) 사면보강공법은 사면의 파괴규모에 따라 선정하는 것이 바람직하다. 즉, 파괴규모에 따라 소규모파괴, 중규모파괴, 그리고 대규모파괴로 나누고 각각의 파괴규모에

Table 4. Result of stability analysis of the slope reinforced by piles

| Failure Type | Dry Season | | Wet Season | |
|------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | before reinforcement | after reinforcement | before reinforcement | after reinforcement |
| Circular Failure | 1.62 | 1.93 | 0.94 | 1.23 |
| Plane Failure | 1.90 | 2.12 | 1.37 | 1.56 |



(a) Dry season



(b) Wet season

Fig. 9. Stability analysis of the slope reinforced by piles considering circular failure

따라 사면보강공법을 결정할 수 있다.

4) 대상사면의 경우 대규모파괴에 해당하므로 사면보강공법은 안전율증가공으로 억지말뚝공을 채택하고, 안전율유지공으로 식생공(Seed Spray) 및 지표수배제공을 채택할 수 있다.

5) 현재 대상사면은 본 연구에서 제안된 억지말뚝공법을 적용하여 사면보강을 시행하고 있으며, 억지말뚝 시공완료후 사면 및 억지말뚝의 거동을 지속적으로 조사 및 분석할 예정이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘대도시 사면 통합관리시스템 구축(부산지역)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 송영석, 2004, 활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법, 중앙대학교 대학원 박사학위논문.
- 이부경, 2003, 지질방재공학, 도서출판 대운, 228-332.
- 홍원표, 송영석 2006, 활동역지시스템으로 보강된 사면의 안정해석 프로그램 개발, 지질공학, 16(1), pp.45-58.
- 홍원표, 송영석, 2002, 우리나라에서의 사면안정대책공법 적용사례 연구, 한국지반공학회 사면안정학술발표회 논문집, 초청강연, pp.1-28.
- 홍원표, 송영석, 2004, 측방변형속 줄말뚝에 작용하는 토압의 산정법, 한국지반공학회논문집, 20(3), pp.13-22.
- 홍원표, 한중근, 송영석, 신도순, 2003, 대절토사면에 보강된 역지말뚝의 활동역지효과에 관한 연구, 한국지반공학회 사면안정학술발표회 논문집, pp.65-81.
- De Beer, E. and Wallays, M., 1970, Stabilization of slope in schist by means of board piles reinforced with steel beams, Proc. 2nd International Congress Rock Mechanics, Belgrade, 3, pp.361-369.
- Ergun, M. U., 2000, Stabilization of landslides using piles, Proc. of 8th ISL, Cardiff, pp.513-518.
- Hong, W.P and Park, N.S., 2000, A design of slope stabilization using piles; A case study on the slopes of Hwangryung-mountain in Pusan, Korea, Proc. of 8th ISL, Cardiff, pp.725-730.
- Hong, W.P Song, Y.S. and Lee, J.H., 2004a, Behavior of stabilizing piles installed in cut slope during heavy rainfall, Proc. 9th Inter. Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil, pp.655-661.
- Hong, W.P. Han, J.G., Song, Y.S. and Lee, J.H., 2004b, Reinforcement effect of stabilizing piles in large-scale cut slope, Proc. 9th Inter. Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil, pp.1579-1583.
- 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.
- 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.
- Japanese National Railways, 1974, Modern inspection and maintenance procedure for railway structures, Japan Railway Civil Engineering Association, pp.691-739. (in Japanese)
- Matsui, T., Hong, W. P. and Ito, T., 1982, Earth pressure on piles in a row due to lateral soil movements, Soils and Foundations, 22(2), pp.71-81.
- Okada, K. and Sugiyama, T., 1994, A risk estimating method of railway embankment collapse due to heavy rainfall, Structural Safety, Elsevier, 14, pp.131-150.
- Okada, K. Sugiyama, T., Muraishi, H. and Noguchi, T., 1992, Statistical estimating method of railway embankment damage due to rainfall, Proc. of JSCE, No. 448/III-19, pp.25-34.
- Popescu, M. E., 1991, Landslide control by means of a row of piles, Slope Stability Engineering, London, pp.389-394.
- Schuster, R. L., 1992, Keynote paper : Recent advances in slope stabilization, Proc. of 6th ISL, Christchurch, New Zealand, pp.1715-1745.
- Sugiyama, T., Okada, K. Muraishi, H., Noguchi, T. and Samizo, M., 1995, Statistical rainfall risk estimating method on deep collapse of cut slope, Soils and Foundations, 15(4), pp.37-48.
- Task Committee of Japanese Geotechnical Society, 1996, Manual for zonation on rain-induced slope failure (Preliminary draft), Japanese Geotechnical Society.
- Viggiani, C., 1981, Ultimate lateral load on piles used to stabilize landslides, Proc. of 10th ICSMFE, Stockholm, 3, pp.555-560.
- Winter, H., Schwarz, W. and Gudehus, G., 1983, Stabilization of clay slopes by piles, Proc. of 8th European Conf. on SMFE, Helsinki, pp.545-550.
- 福本安正, 1976, 地スベリ防止グイの舉動について, 土質工學會論文報告集, 16(2), pp.91-103.
- 山田 邦光, 1982, 最新の斜面安定工法(設計施工), 理工圖書, 東京

2006년 5월 12일 원고접수, 2006년 6월 16일 게재승인

송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3035

Fax: 042-861-9723

e-mail: yssong@kigam.re.kr