

활동억지시스템으로 보강된 사면의 안정해석 프로그램 개발

홍원표¹⁾ · 송영석^{*2)}

¹⁾중앙대학교 건설환경공학과, ²⁾한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Development of a Computer Program to Analyze Stability of Slopes Reinforced by the Earth Retention System

Won-Pyo Hong¹⁾ · Young-Suk Song^{*2)}

¹⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang University

²⁾Geological & Environ. Hazards Division, Korea Inst. of Geoscience and Mineral Res.

본 연구에서는 활동억지시스템인 억지말뚝, 앵커, 쏘일네일링으로 보강된 성토 및 절개사면에 적용 가능한 SLOPILE (Ver 3.0) 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에는 한계평형이론에 의한 평면파괴 및 원호파괴에 대한 해석이 가능하도록 하였다. 한편, SLOPILE(Ver 3.0)프로그램의 설계 적용성을 검토하기 위하여 현재 범용적으로 사용되고 있는 TALREN 및 SLOPE/W프로그램을 비교하였다. SLOPILE(Ver 3.0)프로그램은 억지말뚝, 쏘일네일링 및 앵커로 보강된 사면의 안정해석이 모두 가능하다. 그러나, TALREN 및 SLOPE/W프로그램에서는 억지말뚝으로 보강된 사면의 안정해석이 불가능함을 알 수 있다. 한편, 해석사례를 통하여 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램에 대한 안정성과 정확성을 확인할 수 있다. 그러므로, SLOPILE(Ver 3.0)프로그램은 활동억지시스템으로 보강된 사면에 대한 사면안정해석에 가장 적합함을 알 수 있다.

주요어 : 사면안정해석, 컴퓨터 프로그램, SLOPILE(Ver 3.0), 활동억지시스템

A new computer program SLOPILE(Ver 3.0) is developed to analyze stability of slopes containing an earth retention system composing of piles, nails and anchors. SLOPILE(Ver 3.0) can calculate the slope stability for both planar failure surfaces in infinite slopes and arc failure surfaces. In order to investigate a design adaptability of SLOPILE(Ver 3.0), analysis results of TALREN and SLOPE/W programs are compared with that of SLOPILE(Ver 3.0). SLOPILE(Ver 3.0) can calculate the slopes reinforced by earth retention system such as piles, nails and anchors. But, TALREN and SLOPE/W can not calculate the slope reinforced by piles. As a analysis result of the example case, SLOPILE(Ver 3.0) is accuracy and suitable program for the stability analysis of slopes reinforced by earth retention system. Therefore, SLOPILE(Ver 3.0) is the most suitable program to analyze the slope reinforced by the earth retention system.

Key words : slope stability analysis, computer program, SLOPILE(Ver 3.0), earth retention system

* Corresponding author : yssong@kigam.re.kr

서 론

산사태의 발생요인은 내적요인(잠재적소인)과 외적요인(직접적요인)의 두가지로 크게 나눌 수 있으며 이들 두 요인이 함께 구비되었을 때 산사태가 비로소 발생하게 된다. 즉, 내적으로 취약한 지질구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토 등의 외적요인이 가하여 질 경우 산사태가 발생되기 쉽다. 최근에 발생하는 대부분의 산사태는 구릉지와 산지개발에 따른 인위적인 유인에 의한 경우가 대부분이다. 따라서 산사태발생을 방지할 대책을 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 지반공학적 특성에 따라 다를 수 있다. 따라서 각 지역의 특성에 적합한 사면안정공법을 제안, 설계 및 시공할 필요가 있다. 종래의 사면안정공법으로는 경사면을 식물이나 블럭으로 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. 이와 같이 사면의 저항력을 증대시키는 억지말뚝, 쏘일네일링 및 앵커를 활동억지시스템으로 분류한다(송영석, 2004).

본 연구에서는 기존의 말뚝의 사면안정효과를 고려한 해석프로그램인 CHAMP, SPILE 및 SLOPILE (Ver 2.0)을 개선하여 활동억지시스템(억지말뚝, 앵커, 쏘일네일링)으로 보강된 성토 및 절개사면에 적용가능한 SLOPILE (Ver 3.0) 프로그램을 개발하고자 한다. 이 프로그램에는 한계평형이론에 의한 평면파괴 및 원호파괴에 대한 해석이 가능하도록 한다. 한편, 현재 사면안정해석 및 보강공법설계시 범용적으로 사용되고 있는 TALREN 및 SLOPE/W프로그램을 비교 검토하여 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램의 안정성과 정확성을 확인하고, 활동억지시스템으로 보강된 사면의 안정해석시 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램의 우수성을 검토하고자 한다.

활동억지시스템의 보강된 사면의 안정해석법

본 연구에서는 최근 많이 적용되고 있는 억지말뚝, 쏘일네일링 및 앵커의 사면안정공법을 활동억지시스템(earth retention system)이라고 정의한다. 활동억지시스템은 사면의 저항력을 증가시키기 위하여 말뚝, 네일, 앵커 등을 사용하여 이들 재료의 전단, 휨, 인장, 압축 등의 역학적 저항특성을 이용하는 방법이다. 이들 역학적 저항력을 사면활동의 저항력에 부가시켜 통상적인 사면안정해석법을 적용하면 사면의 안정성을 검토할 수 있다. 이들 활동억지시스템에 대한 일반적인 내용과 안정해석법은 다음과 같다.

억지말뚝

억지말뚝공법은 사면의 활동토괴를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치함으로써 사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 받아 부동지반에 전달시키는 공법이다. 이러한 억지말뚝은 수동말뚝(passive pile)의 대표적인 예중의 하나로서 활동토괴에 대하여 역학적으로 저항하는 공법이다. 이 공법은 사면안전율증가효과가 커서 우리나라에서도 최근에는 사용되는 회수가 늘고 있다. 말뚝의 거동은 말뚝과 주변지반의 상호작용에 의하여 결정된다. 말뚝의 사면안정효과를 얻기 위하여는 말뚝과 사면 모두의 안정성이 충분히 확보될 수 있도록 말뚝의 설치위치, 간격, 직경, 강성, 근입깊이 등을 결정하여야만 한다. 억지말뚝으로 사용되는 말뚝재료로는 강관말뚝, H말뚝, PC말뚝, PHC말뚝 등을 들 수 있다. 최근에는 이를 활용한 Micropile을 사용하는 사례도 보고되고 있다.

말뚝의 사면안정 효과를 얻기 위하여는 말뚝과 사면 모두의 안정성이 충분히 확보되도록 말뚝의 설치위치, 간격, 직경, 강성, 근입깊이 등을 결정하여야만 한다. 억지말뚝을 일렬로 사면에 설치하여 사면안정을 도모할 경우 억지말뚝으로 보강된 사면의 안전율 $(F_s)_{slope}$ 은 식(1)과 같이 표현된다.

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

여기서, F_r 과 F_d 는 사면의 저항력과 활동력이며, F_{rs} 는 사면파괴면의 전단저항력이고, F_{rp} 는 말뚝의 저항력이다. 만약 활동파괴면이 원호일 경우에는 식 (2)가 이용된다.

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

여기서, M_r 은 저항모멘트, M_d 는 활동모멘트, M_{rs} 는 파괴면의 전단저항력에 의한 저항모멘트, M_{rp} 는 줄말뚝 반력에 의한 저항모멘트이다.

쏘일네일링

쏘일네일링공법은 절토면에서 수평하향방향으로 천공한 후 강봉(steel bar)을 삽입하여 보강된 지반을 일체화시켜 작용토압에 저항하도록 하는 공법이다. 시공방법은 소형천공기를 이용하여 천공후 철근을 삽입하고 시멘트 그라우팅을 하여 고결시킨 후 표면부에 쇼크리트로 처리하여 보강한다. 본 공법은 토사 혹은 풍화가 심한 암반사면에 사용이 가능하며 평면활동이 우려되는 곳에 주로 사용된다. 그리고, 영구사면의 경우에는 네일의 부식방지대책이 필요하다. 장점은 시공이 간편하고, 소형장비로 시공이 가능하며 얇은 지표활동 억제가 가능하다. 단점으로는 추가적인 표면처리공법을 적용해야만 한다.

쏘일네일링의 사면안정효과를 얻기 위해서는 쏘일네일링과 사면 모두의 안정성이 충분하게 확보되도록 쏘일네일링의 설치위치, 간격, 직경, 강성, 근입깊이 등을 결정하여야만 한다. 쏘일네일링이 일렬로 설치되어 사면안정을 도모할 경우 쏘일네일링으로 보강된 사면의 안전율 $(F_s)_{slope}$ 은 식(3)과 같이 표현된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{F_r}{F_d} = \frac{F_{rs} + F_{rn}}{F_d} \quad (3)$$

여기서, F_r 과 F_d 는 사면의 저항력과 활동력이며, F_{rs} 는 사면파괴면의 전단저항력이고, F_{rn} 는 쏘일네일링의 저항력이다.

위식에서 F_r 및 F_d 는 통상의 사면안정해석에 있어서의 분할법에 의하여 구하여 진다. 만약 활동파괴면이 원호일 경우에는 식(4)가 이용된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rn}}{M_d} \quad (4)$$

여기서, M_r 은 저항모멘트, M_d 는 활동모멘트, M_{rs} 는 파괴면의 전단저항력에 의한 저항모멘트, M_{rn} 는 쏘일네일링에 의한 저항 모멘트이다.

앵커

앵커공법은 고강도 강재(PC strand)를 앵커재로 하여 보링공내에 삽입하고, 그라우팅 주입을 실시함으로써 앵커재를 지반에 정착시킨다. 그리고 앵커재 두부에 인장력(jacking force)을 가하고, 이를 정착지반에 전달하여 사면을 안정화시키는 공법이다. 앵커공법은 고강도의 강재를 사용하여 프리스트레스를 가한다는 점에서 공법의 특징이 있다. 프리스트레스를 가하는 장점은 정착된 구조물에 하중이 작용하는 경우 구조물의 변위를 영(zero)으로 하거나 혹은 미소하게 할 수 있는 점이다. 본 공법은 두꺼운 붕적토층 혹은 파쇄가 심한 풍화잔류토와 풍화암지역에 적합하며, 썩기활동이 우려되는 지역에서 적합하다.

앵커의 사면안정효과를 얻기 위해서는 앵커와 사면 모두의 안정성이 충분하게 확보되도록 앵커의 설치위치, 간격, 직경, 강성, 근입깊이, 인장력 등을 결정하여야만 한다. 앵커가 일렬로 설치되어 사면안정을 도모할 경우 앵커로 보강된 사면의 안전율 $(F_s)_{slope}$ 은 식(5)와 같이 표현된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{F_r}{F_d} = \frac{F_{rs} + F_{ra} + F_{rt}}{F_d} \quad (5)$$

여기서, F_r 과 F_d 는 사면의 저항력과 활동력이며, F_{rs} 는 사면파괴면의 전단저항력이고, F_{ra} 는 앵커의 저항력이며, F_{rt} 는 앵커축방향 prestress에 대한 파괴면상의 전단저항력 증가분이다.

위식에서 F_r 및 F_d 는 통상의 사면안정해석에 있어서의 분할법에 의하여 구하여 진다. 만약 활동파괴면이 원호일 경우에는 식(6)이 이용된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{ra} + M_{rt}}{M_d} \quad (6)$$

여기서, M_r 은 저항모멘트, M_d 는 활동모멘트,

M_{rs} 는 파괴면의 전단저항력에 의한 저항모멘트, M_{ra} 는 앵커체에 의한 저항 모멘트이고 M_{rt} 는 축방향 인장력에 의한 파괴면상의 저항력 증가분에 의한 저항모멘트이다.

해석프로그램 개발

교대측방이동에 대한 안정해석이 가능한 CHAMP(Ver 1.0) 프로그램 (홍원표 외 3인, 1991; 1994), 말뚝으로 보강된 사면의 평면파괴해석이 가능한 SPILE(Ver 1.0) 프로그램(홍원표, 1991, 홍원표, 1997)을 통합하고, 이를 Windows상에서 작업이 가능하도록

SLOPILE(Ver 2.0)프로그램이 개발되었다(홍원표, 1999). 기존의 SLOPILE(Ver 2.0)프로그램에서는 억지말뚝으로 보강된 절성토사면 및 무한사면에 대하여 Fellenius법(Fellenius, 1936) 및 Bishop간편법(Bishop, 1955)을 이용한 원호파괴해석과 평면파괴해석(Skempton & Delory, 1957)이 가능하도록 개발되었다. 최근에도 SLOPILE(Ver 2.0) 프로그램을 이용하여 해석한 사례연구가 있으며, 이를 통하여 프로그램의 합리성을 검증한 바 있다(Hong et al., 2001; 2002). 이를 토대로 하여, 본 연구에서는 기존의 SLOPILE(Ver 2.0)프로그램에서 억지말뚝 뿐만아니라 쓰일네일링 및 앵커로 보강된 사면의 안정해석이 가능하도록 수정하여 SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램을 개발한다.

SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램의 해석 흐름도는 Fig. 1

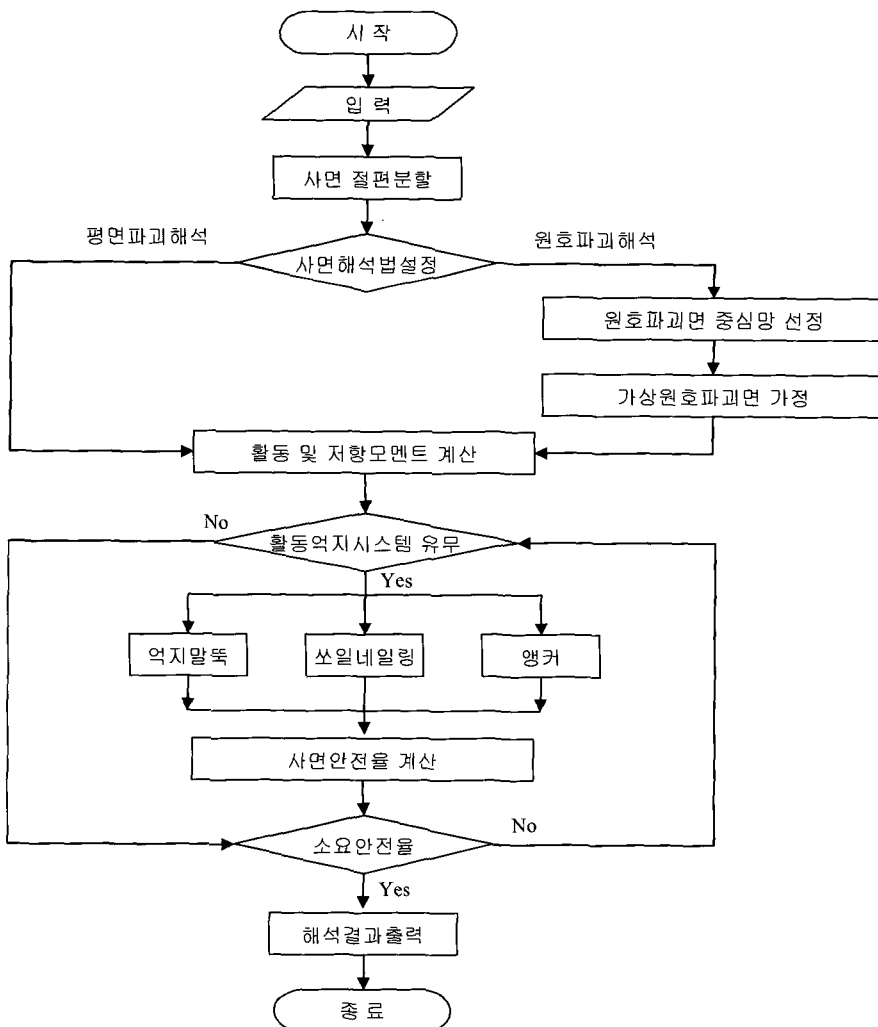


Fig. 1. Flow chart of SLOPILE (Ver 3.0) program.

과 같다. 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 중심으로 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. 활동역지시스템이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전율을 계산한다(홍원표, 1999). 그러나 활동역지시스템에 의한 사면보강이 필요할 경우 억지말뚝, 앵커 및 쏘일네일링을 선정하여 이를 고려한 사면안전율을 계산한다.

만약 활동역지시스템 가운데 억지말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동토피로부터 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(홍원표, 1999).

앵커 및 쏘일네일링의 경우도 마찬가지로 앵커 및 쏘일네일링의 안정성을 검토한 이후 가상원호활동면의 원점을 기준으로 추가적인 저항모멘트를 구한다. 사면안전율 계산시 구하였던 사면파괴면에서의 전단저항에 의한 저항모멘트에 활동역지시스템에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전율을 계산하여 활동역지시스템의 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 동일

한 계산을 반복한다.

기존 해석프로그램과의 비교

TALREN

TALREN 프로그램은 사면안정해석 범용 프로그램 중의 하나로서 2차원 한계평형해석이 가능하며, 본 프로그램에 대한 원리 및 특징을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

개요

TALREN 프로그램은 토체내부의 구조와 응력에 대한 경험적 연구를 바탕으로 개발된 사면안정해석 전용 프로그램이다. 지반굴착이나 사면의 설계시 실제의 파괴면 구조나 가상파괴면 구조를 대상으로 하여 안전율을 해석할 수 있으며, 수압과 진동에 관한 입력자료를 처리할 수 있다. 본 프로그램의 개발회사는 TERRASOL (France)이며, 적용범위는 Nail, Anchor, Brace, Reinforcing strip, Geotextile, Pile, Micropile, Sheetpile 로 구성된 지반굴착, 보강토, 성토 및 사면안정 분야이다.

기본원리

TALREN 프로그램의 기본원리는 사면이나 연직굴착 또는 보강토구조물의 설계시 사면안정해석법의 고전적인 이론인 한계평형상태 해석을 실시하는 것이며 이에 대한 구체적인 방법으로서 Bishop 또는 Fellenius의 절편법이나 Perturbation 방법을 이용하여 경사면과 원호면 또는 임의의 파괴면에 대한 활동토체의 평형을 고려하는 것이다.

안전율 Γ 는 파괴면에 작용하는 전단력 τ 에 대한 전단강도 τ_{max} 의 비로 정의되며 이때 지반정수에 대한 감소율 C/Γ_c 와 $\tan \phi / \Gamma_\phi$ 이 해석과정에서 고려된다.

해석가능 조건

파괴면을 따르는 수압을 계산하는데 필요한 조건은 침윤선, 임의 점에서의 간극수압, 미세요소 유선분석에서 주어진 삼각형 mesh에 의한 간극수압, 각 토층에 대한 간극수압비이다.

연직분포하중(distributed load) 및 선하중(line

load)에 대한 해석이 가능하며, Bishop법 및 Fellenius법을 이용하여 상재하중으로 인한 원호과파면상 모멘트의 증감해석이 가능하다. 진동하중은 토압, 간극수압에 따른 수평가속도와 흙, 물, 상재하중에 따른 수직가속도에 관련된 힘을 고려한 유사정적해석방법으로 적용된다.

해석 보강재

지반이 여러 가지 보강재에 의해 보강되었을 때 과파면에서 요소에 작용하는 힘은 정적으로 평형상태를 유지하는 것으로 간주한다. 본 프로그램에서 각 보강재에 따라 고려해야될 힘은 다음과 같다.

- 1) 말뚝(Pile-nails) - 인장력과 전단력
- 2) 쏘일네일링 - 인장력과 전단력
- 3) 앵커 - 인장력

SLOPE/W

개요

SLOPE/W프로그램은 GEO-SLOPE International LTD.(Canada)에서 개발되었으며, 2차원 사면안정해석 프로그램이다. PC-SLOPE프로그램의 후속 version으로 PC-SLOPE이 DOS환경에서 운영되었던 것에 비하여, 이것은 그 운영체제를 WINDOWS환경으로 변경한 것이다. 그러므로, 그래픽능력이 뛰어나 사용자가 데이터를 입력 및 검토하는데 상당히 편리하게 되어있다.

기본원리

본 프로그램은 데이터 입력에 이용되는 'DEFINE', 문제의 수치해석을 수행하는 'SOLVE', 해석결과를 시각적으로 볼 수 있게 해주는 'CONTOUR', 그리고, 각종 자료들을 그래프로 보여주는 'GRAPH'로 구성되어 있다.

사면안정해석법은 한계평형상태의 해석을 수행하며, 본 프로그램에서 적용이 가능한 해석법은 Ordinary법, Fellenius법, Bishop간편법, Janbu간편법, Spencer법, Morgenstern-Proce법, GLE법 등이 있다.

해석가능 조건

사용자가 지정한 가상활동면의 안전율을 구하거나 임의 발생에 의한 가상활동면을 구할 수 있으며, 여러 해석법을 동시에 사용할 수 있다. 절편사이의 힘들에 가정을 실시하고 이러한 가정들이 비선형 안전율 방정식을 만들어 내면 프로그램은 활동면에서 절편과 관련된 몇

가지 힘들이 수렴될 때까지 반복하여 계산하게 된다. 또한 전단강도에 있어서 쌍일차(Bilinear) 전단강도 포락선이 이용될 수 있으며, 불포화 흙에 대해서는 확장된 Mohr-Coulomb파괴포락선을 이용할 수 있다. 또한 부분적으로 사면이 물에 잠겼을 경우나 인장균열, 사면이 완전히 잠겼을 경우의 해석도 가능하다. 이 경우에 있어서 간극수압을 고려하는 방법은 여러 가지 방법을 사용함으로써 물에 대한 영향도 비교적 현실적으로 고려될 수 있다. 한편, 지표면의 등분포하중 및 집중하중에 대한 해석이 가능하며, 지진하중도 고려할 수 있도록 되어있다. 그리고, 활동면의 형상은 원호활동, 평면활동, 복합활동중 선택사용이 가능하다.

한편, SEEP/W(침투해석), SIGMA/W(유한요소해석)의 프로그램과 연계한 해석이 가능하도록 되어있다.

해석 보강재

본 프로그램에서는 앵커, 네일 및 보강토에 대한 해석이 가능하다.

기존 사면안정해석프로그램과의 비교

본 연구에서 개발된 SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램과 현재 범용적으로 사용되고 있는 TALREN 프로그램 및 SLOPE/W 프로그램을 비교 검토하였다. Table 1은 SLOPILE(Ver 3.0), TARLEN 및 SLOPE/W를 비교한 것이다. Table에서 보는 바와 같이 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램은 국내에서 개발된 것으로 국내기술력을 축적할 수 있으며, 이를 토대로 사면안정해석에 대한 지속적인 발전을 기대할 수 있게 되었다. 그리고, 모든 명령어와 입력자료가 한글로 되어 있어 프로그램에 대한 이해와 사용성이 우수함을 알 수 있다. SLOPILE(Ver 3.0), TARLEN 및 SLOPE/W 프로그램에서 사면안정해석법은 평면과파, 원호과파 및 복합과파에 대한 해석이 가능하며, SLOPILE(Ver 3.0), TARLEN프로그램에서는 사면활동면을 임의로 지정할 수 있는 기능이 있다. 그리고, SLOPILE(Ver 3.0), TARLEN 및 SLOPE/W 프로그램에서 상재하중 및 지하수위를 모두 고려할 수 있도록 되어 있다.

앵커로 보강된 사면의 경우 SLOPILE(Ver 3.0), TARLEN 및 SLOPE/W 프로그램에서 앵커의 정착장에서의 주면마찰력, 앵커의 설치간격 및 설치각도를 모두 고려할 수 있도록 되어있다. 따라서, SLOPILE(Ver 3.0),

TARLEN 및 SLOPE/W 프로그램은 앵커로 보강된 사면의 해석하는데 적합함을 알 수 있다.

쏘일네일링으로 보강된 사면의 경우 SLOPILE(Ver 3.0), TARLEN프로그램에서는 해석이 가능하지만 SLOPE/W 프로그램에서는 해석이 불가능하다. SLOPE/W프로그램의 매뉴얼에서는 네일의 해석이 가능하다고 되어있으나, 실제 프로그램상에서 네일에 대한 입력항이 존재하지 않는 것으로 나타났다. SLOPILE(Ver 3.0), TARLEN프로그램에서는 네일의 간격조절이 가능하며, 네일에 발생하는 저항력의 계산이 가능하다. 따라서, SLOPILE(Ver 3.0) 및 TARLEN프로그램은 쏘일네일링으로 보강된 사면의 해석하는데 적합함을 알 수 있다.

말뚝으로 보강된 사면의 경우 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램에서는 해석이 가능하지만, TALREN 및 SLOPE/W 프로그램에서는 해석이 불가능하다. TALREN프로그램의 매뉴얼에서는 말뚝의 해석이 가능하다고 되어있으나, 실제 프로그램상에서 말뚝에 대한 입력항이 존재하지 않는 것으로 나타났다. SLOPILE(Ver 3.0)프로그램에서는 말뚝의 휩해석이 가능하고, 해석결과로 말뚝의 거동을 알 수 있다. 그리고, 말뚝의 간격비를 조절할 수 있으므로, 준 3차원의 해석이 가능하도록 되어있다. 한편, 교대 기초말뚝의 해석도 가능하도록 되어 있다. 교대기초말뚝의 거동, 교대변위를 제어한 해석 등이 가능하므로 합리적인 교대의 설계가 가능하다. 기존 SLOPILE(Ver 2.0)프로그램을 이용하여 역지말뚝 및 교대기초말뚝에 대한 해

Table 1. Comparison with computer programs to analyze the slope stability.

구분		SLOPILE(V3.0)	TALREN	SLOPE/W·
개발국가		한국	프랑스	캐나다
사용성(한글지원)		○	×	×
WINDOWS 호환성		○	○	○
평면파괴해석		○	○	○
원호파괴 해석	Fellenius법	○	○	○
	Bishop간편법	○	○	○
예상활동면 제어가능		○	○	×
지하수위 설정 여부		○	○	○
상제하중 고려가능		○	○	○
역지 말뚝	휩해석	○	×	×
	거동해석	○	×	×
	활동면지반반력고려	○	×	×
	간격비 고려 (준3차원해석)	○	×	×
쏘일 네일링	네일작용력 계산	○	○	×
	수평/수직간격	○	○	×
앵커	주면마찰력 고려	○	○	○
	수평/수직간격	○	○	○
교대 기초 말뚝	거동해석	○	×	×
	교대변위제어	○	×	×
	축하중고려	○	×	×

석 및 설계사례를 통하여 이미 본 프로그램에서 말뚝해석에 대한 검증이 완료된 상태이다.

이상의 결과를 정리하면 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램은 억지말뚝, 쏘일네일링 및 앵커로 보강된 사면의 안정해석이 모두 가능하지만, TALREN 및 SLOPE/W프로그램에서는 억지말뚝으로 보강된 사면의 안정해석이 불가능함을 알 수 있다. 따라서 활동역지시스템인 억지말뚝, 쏘일네일링 및 앵커로 보강된 사면에 대한 안정해석이 가능한 컴퓨터 프로그램은 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램 뿐임을 알 수 있다.

해석 예

SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램의 정확도를 확인하기 위하여 동일한 해석단면을 대상으로 SLOPE/W프로그램과 TARLEN프로그램을 이용한 해석을 수행하였다. 즉, 동일한 단면에 동일한 활동역지시스템을 적용하였을 경우 SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램, SLOPE/W프로그램 및 TARLEN프로그램을 적용하여 해석한 결과를 서로 비교 검토하였다. 억지말뚝에 대한 해석은 SLOPE/W프로그램 및 TARLEN프로그램에서 불가능하므로 쏘일네일링 및 앵커에 대한 해석만을 수행하였다.

Fig. 2는 해석단면을 나타낸 것으로 국내의 일반적인

도로절개사면의 예를 나타낸 것이다. Fig.를 살펴보면 무보강시, 쏘일네일링 보강시 및 앵커보강시로 구분하여 나타내었다. 해석단면에 적용된 지반의 물성치와 쏘일네일링 및 앵커의 입력자료는 일반적으로 사용되는 값을 이용하였으며, 이를 정리하면 Table 2 및 Table 3과 같다.

Fig. 3은 SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램을 이용하여 해석한 결과이고, Fig. 4는 TARLEN프로그램을 이용하여 해석한 결과이며, Fig. 5은 SLOPE/W프로그램을 이용하여 해석한 결과이다. SLOPE/W프로그램에서는 쏘일네일링에 대한 해석이 불가능하므로 이를 제외하였다.

Table 4는 이들 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. Table에서 보는 바와 같이 무보강시 사면안전율은 최대 0.1정도의 오차를 나타내고 있고, 쏘일네일링 보강시 사면안전율은 최대 0.03정도의 오차를 나타내고 있으며, 앵커 보강시 사면안전율은 최대 0.2정도의 오차를 나타내고 있다. 그리고, SLOPILE(Ver 3.0)프로그램과 TARLEN프로그램의 해석결과는 유사하며, SLOPE/W프로그램은 사면안전율을 약간 과소산정하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구를 통하여 개발된 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램을 기존 프로그램과 비교한 결과 오차가 미소하므로 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램에 대한 해석결과와 안정성과 정확성을 확인할 수 있다.

Table 2. Input data of ground layers.

구분	c (t/m ²)	ϕ (°)	γ_t (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)
토사층	2	30	1.9	2.0
리핑암층	5	32	2.1	2.2
발파암층	20	35	2.4	2.5

Table 3. Input data of soil nailing and anchor.

구분	수평간격	설치각도	설치길이	인장강도	천공직경	강선수 및 직경
쏘일네일링	1.5m	20°	10m	7.5ton	0.1m	-
앵커	5.0m	25°	자유장8m, 정착장8m	11.22ton/본	0.1m	4본, 0.0127m

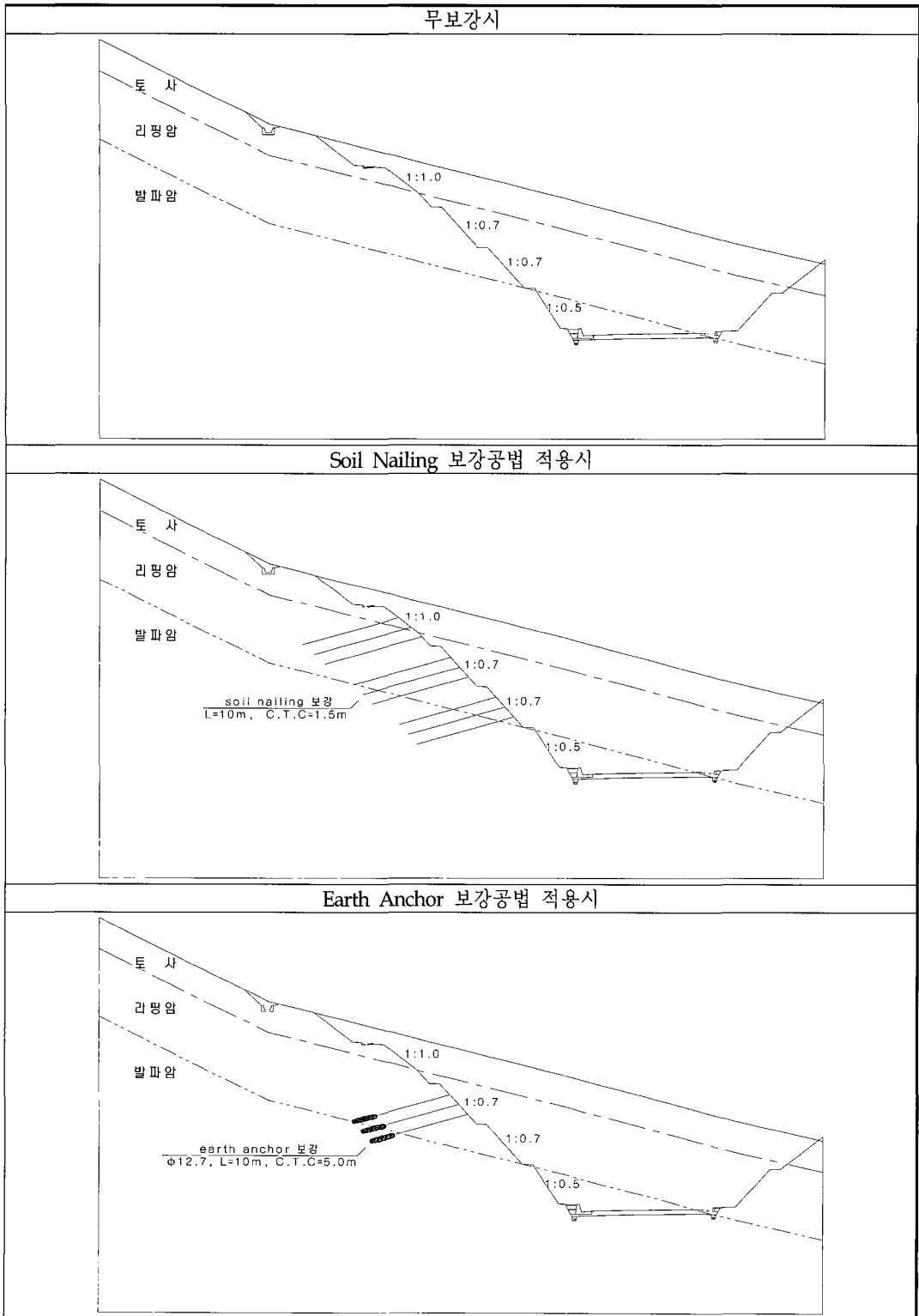


Fig. 2. Cross sectional views for the slope stability analysis.

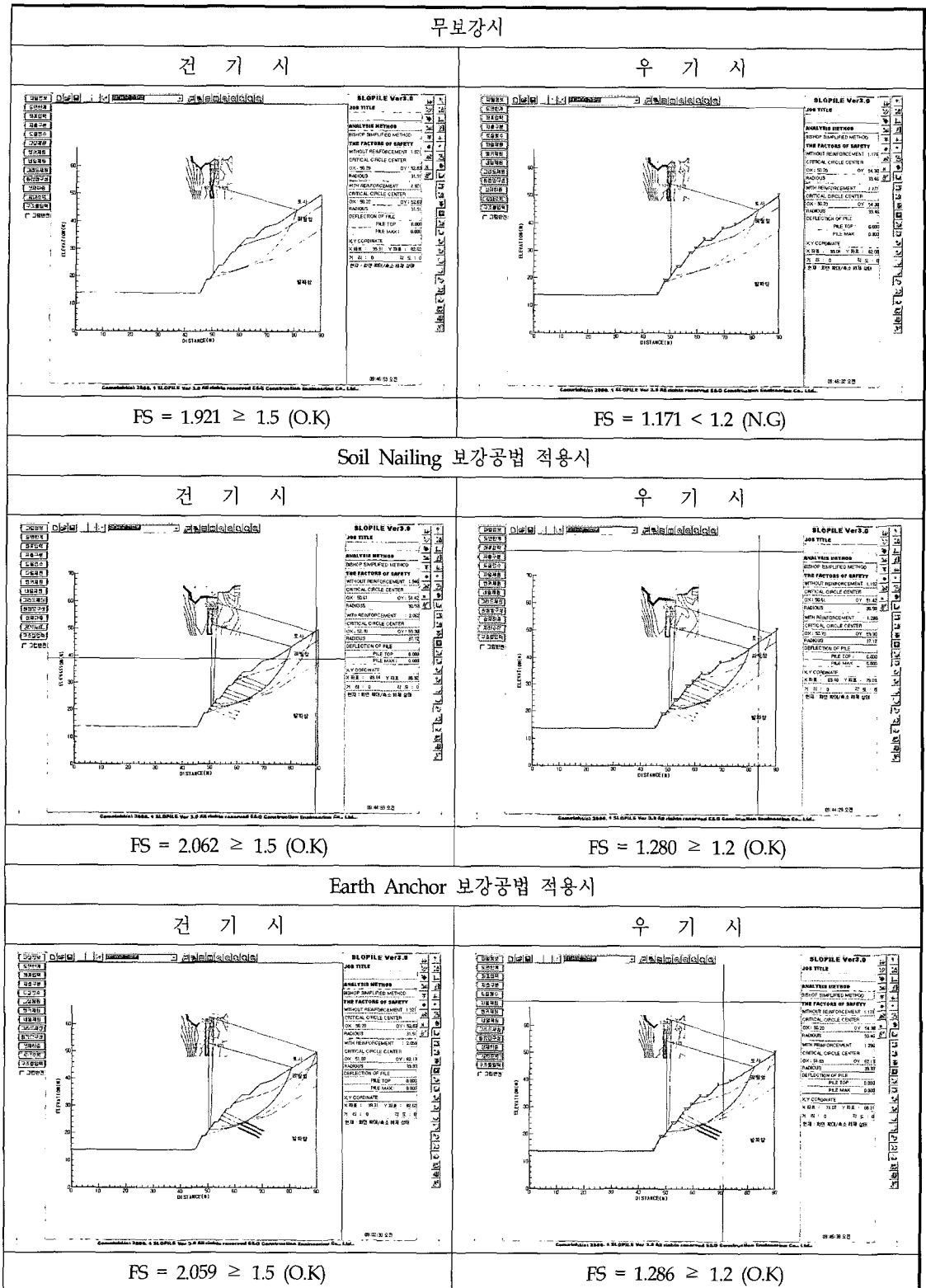


Fig. 3. Results of SLOPILE(Ver 3.0) program.

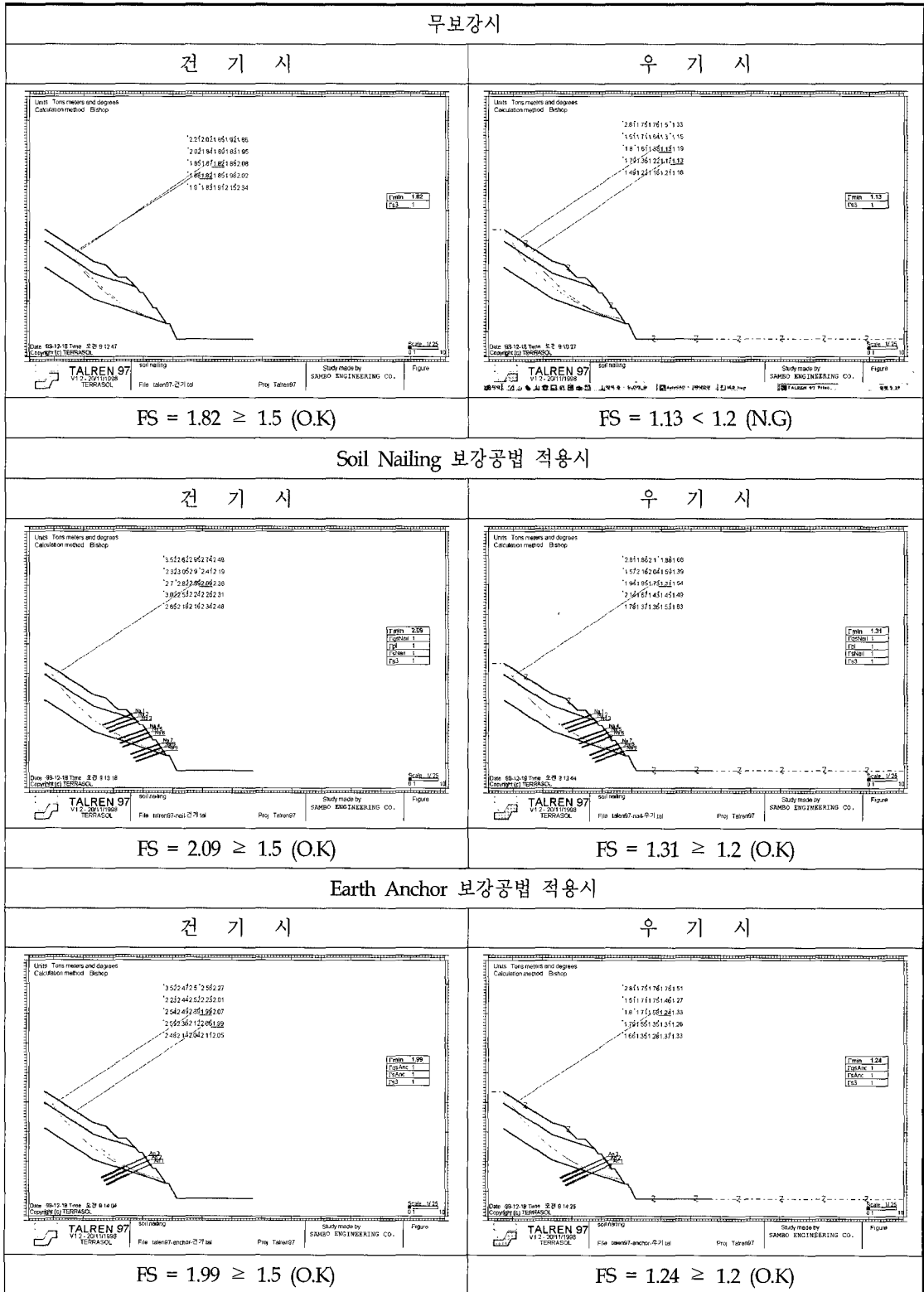


Fig. 4. Results of TARLEN program.

무보강시	
건 기 시	우 기 시
FS = 1.801 ≥ 1.5 (O.K)	FS = 1.095 < 1.2 (N.G)
Soil Nailing 보강공법 적용시	
건 기 시	우 기 시
-	-
Earth Anchor 보강공법 적용시	
건 기 시	우 기 시
FS = 1.811 ≥ 1.5 (O.K)	FS = 1.327 ≥ 1.2 (O.K)

Fig. 5. Results of SLOPE/W program.

Table 4. Comparison with the results of slope stability analysis.

구 분		무보강	쏘일네일링	앵커
SLOPILE(Ver 3.0)	건기시	1.92	2.06	2.06
	우기시	1.17	1.28	1.29
TARLEN	건기시	1.82	2.09	1.99
	우기시	1.13	1.31	1.24
SLOPE/W	건기시	1.80	-	1.81
	우기시	1.10	-	1.33

결 론

기존의 말뚝의 사면안정효과를 고려한 해석프로그램인 CHAMP, SPILE 및 SLOPILE (Ver 2.0)을 개선하여 활동역지시스템인 억지말뚝, 앵커, 쏘일네일링으로 보강된 성토 및 절개사면에 적용가능한 SLOPILE (Ver 3.0) 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에는 한계평형이론에 의한 평면파괴 및 원호파괴에 대한 해석이 가능하도록 하였다. 원호파괴의 경우 Fellenius법과 Bishop간편법을 적용하여 보다 다양한 방법으로 해석을 수행할 수 있도록 하였다. 본 프로그램에서 활동역지시스템의 사면안정해석법은 억지말뚝, 쏘일네일링 및 앵커의 전단, 휨, 인장, 압축 등의 역학적 저항특성을 이용하였다. 이들 역학적 저항력을 사면활동의 저항력에 부가시켜 통상적인 사면안정해석법을 적용하여 사면의 안정성을 검토할 수 있도록 개발하였다.

SLOPILE(Ver 3.0)프로그램의 설계 적용성을 검토하기 위하여 현재 범용적으로 사용되고 있는 TALREN 및 SLOPE/W프로그램과 비교하였다. 이를 위하여 동일한 단면에 대한 사면안정해석을 각각 수행하였으며, 해석 결과 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램은 기존 프로그램과 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이를 통하여 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램에 대한 안정성과 정확성을 확인할 수 있으며, 활동역지시스템으로 보강된 사면에 대한 사면안정해석에 가장 적합함을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2001년 산학연 공동연구개발사업(R&D 2001-B04 : 활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법 및 안정해석 프로그램 개발연구)에 의하여 실시된 연구 결과임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 전하는 바이다.

참고문헌

- 송영석, 2004, 활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법, 중앙대학교 대학원 박사학위논문, pp.1-15.
- 홍원표, 1991, 말뚝을 사용한 산사태 억지공법, 한국지반공학회논문집, 제7권, 제4호, pp.75-87.
- 홍원표, 1997, 흙사면 보강, 사면안정, 지반공학시리즈 5, 한국지반공학회, pp.245-280.
- 홍원표, 1999, 말뚝이 설치된 사면의 안정해석 프로그램, 사면안정위원회 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.33-66.
- 홍원표, 권오현, 한중근, 조성한, 1994, 연약지반상 교대의 측방이동에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제10권, 제4호, pp.53-65.
- 홍원표, 이우현, 안종필, 남정만, 1991, 교대기초말뚝의 안정, 대한토질공학회지, 제7권, 제2호, pp.67-79.
- Bishop, A. W., 1955, The use of slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, Vol.5, pp.7-17.
- Fellenius, W., 1936, Calculation of stability of earth dams, Trans., 2nd International Congr. Large Dams, 4, pp.445.
- GEO-SLOPE, 2002, SLOPE/W for slope stability analysis, Geo-Slope International LTD.

Hong, W. P., Song, Y. S. and Lee, S. J., 2001, A case study on lateral movement of bridge abutment", Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE-2001), Stavanger, Norway, pp.607-614.

Hong, W. P., Song, Y. S., Shin, D. S., Lee, S. J., 2002, The Use of Piles to stabilize a cut slope in soft ground, Proceeding of 12th International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE-2002), KitaKyushu, Japan, pp.820-826.

TERRASOL, 1997, TALREN 97 program for the stability analysis of geotechnical structures, TERRASOL Geotechnical Consultants.

홍원표(Won-Pyo Hong)

중앙대학교 공과대학 건설환경공학과
156-756, 서울특별시 동작구 흑석동 221

Tel: 02-820-5258

Fax: 02-817-8050

e-mail: wphong@cau.ac.kr

송영석(Young-Suk Song)

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3035

Fax: 042-861-9723

e-mail: yssong@kigam.re.kr

투 고 일 2006년 2월 3일

심 사 일 2006년 2월 4일

심사완료일 2006년 3월 16일