

천매암 지역에서의 비탈면 붕괴 원인규명 및 보강대책 사례연구

A Case Study on the Slope Collapse and Reinforcement Method of the Phyllite Slope

조 영 훈¹⁾ · 임 대 성²⁾ · 천 병 식[†]

Cho, Younghun · Lim, Daesung · Chun, Byungsik

ABSTRACT : The purpose of this study is to present emergency rehabilitation, cause and the countermeasure of reinforcement about reinforced retaining wall and the slope collapse of the phyllite ground. The study area is broken easily because this area has rock mass discontinuity such as stratification, foliation, joint and fold. And this area consists of the ground where it happens easily to the failure of structure like reinforced retaining wall because of the phyllite ground sensitive to weathering. Counterweight fill in front of reinforced retaining wall was performed as emergency rehabilitation about displacement of reinforced retaining wall and the failure at the rear of slope on phyllite ground. After that, additional displacement didn't occur. Boring and geophysical exploration were launched to present emergency rehabilitation and develop the long-term method of reinforcement. This could grasp anticipated range of the failure section and identify internal and external factors of the cause of the slope collapse. Several methods of reinforcement were suggested by conducting the numerical analysis. When conducting design and construction of major structures at the ground which has complex discontinuities, the precise site investigation should be conducted. During construction, immediate action for over-displacement should be taken by performing the periodic measurement.

Keywords : The phyllite, Slope collapse, Discontinuity, Site investigation, SLIDE 2D

요 지 : 본 연구는 천매암지역에서 발생한 보강토옹벽 및 배후비탈면 붕괴사고에 대한 응급복구, 원인규명 및 보강대책을 마련하는 데에 그 목적이 있다. 연구대상현장은 암반내 층리, 엽리, 절리 그리고 습곡 등과 같은 암반불연속면이 발달해 쉽게 부스러지며 풍화에 민감한 천매암질 지반으로써 보강토옹벽 등과 같은 구조물의 붕괴가 유리한 지반으로 구성되어 있다. 이러한 천매암지반에서의 보강토옹벽의 과변위와 배후 비탈면의 붕괴에 대한 응급복구로써 보강토옹벽의 전면에 압성토를 실시하였고, 압성토 실시 후 추가적인 변위는 발생하지 않았다. 원인규명과 장기적인 보강대책 마련을 위해 실시한 시추조사와 물리탐사에서 예상파괴구간의 범위를 파악할 수 있었고 이를 통해 비탈면의 붕괴원인의 내적·외적 요인을 구명할 수 있었다. 이와 더불어 실시한 수치해석을 통해 몇 가지의 보강대책을 제시하였다. 천매암지반과 같은 복잡한 불연속면을 가지는 지질 조건에서 주요 구조물 설계 및 시공시 정밀한 지반조사를 실시해야하며 구조물 시공시 주기적인 계측을 실시하여 과변위에 대한 즉각적인 조치를 취해야 할 것이다.

주요어 : 천매암, 비탈면 붕괴, 불연속면, 지반조사, SLIDE 2D

1. 서 론

우리나라는 지형적 특성상 대부분이 산악지형으로 이루어짐에 따라 도로, 터널, 철도 등 많은 공사가 산악지형에서 이루어지고 있다. 산악지형은 여러 종류의 암반으로 구성되어 있으며 암종에 따라 각각의 지질공학적 특성을 지니고 있는데 암종의 지질공학적 특성을 제대로 파악하지 않고 산지나 구릉을 절토하여 공사를 하는 경우 다양한 변수들의 영향으로 대규모의 산사태나 비탈면의 붕괴로 이어질 수 있다.

여러 종류의 암반 중 광역 변성퇴적암인 천매암은 단층,

절리, 층리, 엽리, 습곡, 편리 등의 불연속면 특성을 보여 많은 변수를 가지고 있어서 지질공학적 특성을 제대로 파악해야 한다. 천매암의 지질공학적 특성에 대한 선행 연구로 단층발달이 천매암 불연속면 특성에 미치는 영향에 대한 연구가 있었으며, 천매암의 물리적·역학적 특성을 연구하여 엽리면의 전단강도가 매우 낮을 가능성이 있음을 보이는 결과가 있었다(이경미 등, 2007).

기존 비탈면 붕괴사례 분석에 의하면 붕괴 원인으로 암종에 따른 지질공학적 특성을 고려하지 않은 지반조사 자료, 불규칙적인 지반상태에 불충분한 조사항목과 조사수량으로 얻어진 지반조사 자료가 비탈면 설계에 적용되어 비탈

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

면 붕괴가 빈번히 발생하는 것으로 조사되었다(신희순, 2000). 부적절한 기반조사로 인한 비탈면 붕괴사례로는 김해 ○○단지 예정 절취비탈면 붕괴, 부산 ○○터널 입구 부근의 도로비탈면 붕괴, 서울 ○○초등학교 인근 절취비탈면 붕괴 등이 있다. 앞서 언급한 비탈면 붕괴사례 세 경우의 공통점은 비탈면내에서 시추조사를 하지 않고 인근에서 시추조사한 자료를 사용하여 지층상태를 추정하는 방법을 사용한 것이다. 시추조사는 점의 조사로써 여러개의 시추 및 지질조사의 성과가 없으면 지질구조 파악이 어려우며, 산악터널과 같이 접근이 어려운 경우 극히 제한적인 위치에서만 수행되므로 정확한 자료를 얻을 수 없다. 이를 보완하기 위하여 주요시설물이 위치하는 곳에서는 시추조사와 물리탐사를 같이 실시하여 시추공 사이의 지질구조특성을 분석하는 것이 중요하다(소방방재청, 2008).

본 연구에서는 사례연구를 통해 비탈면 설계시 고려할 자료를 제시하여 사고를 미연에 방지하고자 하는 목적으로 천매암 지역인 경기도에 위치한 ○○선 철도복구 노반 건설공사 중 발생한 보강토옹벽의 과변위의 발생원인을 규명하였다. 이를 위해 시추조사, 물리탐사 등을 통하여 붕괴현황을 검토하였고, 한계평형해석법을 수행하여 적절한 보강대책안을 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 비탈면 붕괴 특성

붕괴비탈면의 안정검토에 있어서 필요한 인자를 충분히 고려하여 검토하는 것이 중요하다. 비탈면 안정검토에 필요한 인자는 기반조건 및 지질조건, 지형, 강우, 지하수조건, 비탈면형상 및 그 밖의 여러 조건에 의해 영향을 받는다.

절리, 엽리, 단층, 층리 등과 같은 불연속면 내적 요인은 암반비탈면의 붕괴에 가장 큰 영향을 미친다(정형식 등, 1996). 이러한 지질구조가 발달한 비탈면의 경우 이 지질구조선을 따라 붕괴가 많이 발생하고 있으며, 굴착에 의해 지표면으로 노출되었을 경우 풍화속도가 빠르고 발달된 미세 균열에 의해 쉽게 깨어지게 된다. 지하수 및 지표수는 지형 여건 및 강우에 따라 영향을 받으며 원 지하수의 상태는 비탈면의 풍화속도에 영향을 미치는 요인이므로 비탈면의 지하수위에 대한 정보를 확보하는 것도 중요하다. 또한 지표수의 경우 지표수의 양과 유속 등에 의해 비탈면을 부분적으로 침식시키게 되며 이는 점차로 붕괴로 발전하게 되는 요인이 된다. 비탈면은 높이가 높을수록 붕괴가능성이 크고 붕괴시 피해도 크게 된다. 비탈면의 붕괴는 비탈면형상이 계곡부를 포함하는 여부에 따라라도 붕괴에 영향을 미치게

된다.

성토, 굴착과 같은 외적 요인은 인위적인 것으로 도로주변 절토비탈면의 절토작업의 경우 그 자체가 붕괴의 원인이 될 수 있다. 이는 비탈면 절취에 따라 노출된 면의 환경이 급속히 변화하고 지금까지 안정을 찾아온 비탈면이 힘의 불균형으로 붕괴가 발생하기 때문이다.

이는 앞에서 언급된 붕괴유발 요인들을 충분히 고려함으로써 감소시킬 수 있으나 이를 완벽히 제거하기는 경제성과 맞물려 현실적으로 매우 어려운 문제이며 따라서, 이 내·외적 요인들에 대한 충분한 검토가 필요하다.

2.2 비탈면 붕괴 유형

비탈면의 붕괴는 지형적인 변화, 하중의 변화, 강우, 진동 등의 외적인 요인과 풍화작용, 전단강도의 저하, 전단응력의 증대 등과 같은 내적인 요인에 의해 발생한다. 또한 절토비탈면의 붕괴는 자연적인 원인과 인위적인 행위에 의하여 일어나며, 이러한 원인들이 복합적으로 작용되어 실제로 나타나는 붕괴의 유형은 대단히 복잡하다. Varnes(1978)와 Hoek et al(1981)에 의하면 일반적으로 비탈면의 파괴형태는 평면 파괴, 썩기파괴, 전도파괴, 및 원호파괴의 네가지 붕괴유형을 갖는데 이는 퇴적암, 화성암 및 변성암에 따라 발달하는 불연속면의 특성에 차이를 보이므로 사면을 형성하는 암종과 매우 밀접한 관계를 갖는다. 이상의 구조적인 붕괴유형 외에도 이완된 블록이 자중에 의해 자유낙하 하는 낙석과 절토비탈면의 표면부가 풍화작용에 의해 풍화된 부분이 흘러내리는 표층유실 현상이 주요한 붕괴유형으로 분류된다(권오일 등, 2003).

3. 연구대상지역 및 대상비탈면

3.1 대상지역 특성

연구대상지역은 연천층군으로 천매암이 주암종인 지역이다. 천매암은 충주, 보은 일대의 옥천대와 연천, 전곡 일대의 연천층군에 주로 분포하는 광역 변성퇴적암이다. 비교적 낮은 온도와 압력의 영향으로 성질이 변한 암석으로 엽리나 편리 등 엽상 구조를 가지며 연속성이 뚜렷한 엽리면을 관찰할 수 있다. 몇 차례의 변성 및 변형작용을 겪으면서 엽리면, 벽개면, 습곡축면, 절리면, 단층면 등의 면구조들과 광물신장선구조, 습곡축 등의 선구조들이 발달하여 비탈면의 안정성에 영향을 미친다. 또한 이들 내에 단층작용이나 파쇄대작용이 일어난 곳에서는 다른 암석에 비해 더 심한 파쇄양상을 보이고, 변성퇴적암은 점토를 함유하고 있어 비

탈면 형성 후 지표에 노출되면서 풍화작용을 받을 경우 공학적 성질이 급격히 변하여 강도 및 내구성 저하 현상, 토사와 유사한 거동을 보이는 등 토목공사 시 다른 암층에 비해 치명적인 공학적 특성을 가지고 있다. 암반구조물 설계 시 이에 대한 안정성 확보에 유의하여야 하며, 장기적인 안정성 확보를 위한 보강대책이 요구된다(한국지반공학회, 2009).

3.2 연구대상 비탈면

3.2.1 현황

본 연구는 경기도 ○○선 철도복구 노반 건설현장의 비탈면을 대상으로 실시하였다. 연구대상구간은 철도 노반공

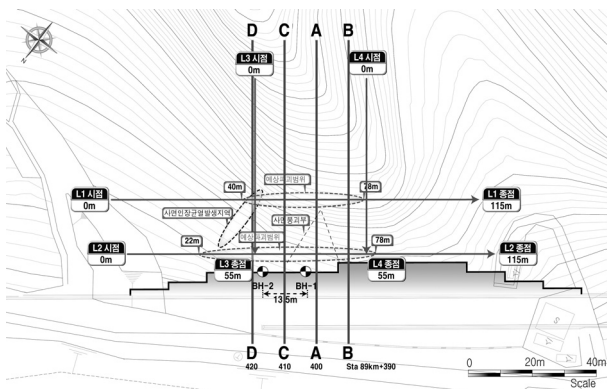


그림 1. 비탈면 현황 평면도

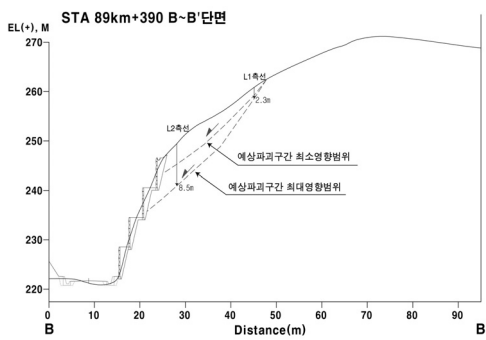
사 중 STA. 89km+320~460 구간으로 절취비탈면과 상부 자연비탈면으로 이루어져 있다. 상부 자연비탈면은 약 30~40° 내외의 기울기를 가지며, 절취비탈면은 4개의 소단의 보강토 옹벽이 시공 중에 있다. 연구대상 비탈면에 대한 현황은 그림 1에서 보는 바와 같고, 비탈면 붕괴부, 인장균열 발생지역과 예상파괴범위를 나타냈다. 그림 2는 인장균열 부 위치와 지반조사결과에 의한 파쇄대층을 토대로 붕괴면을 추정하여 예상붕괴면을 나타낸 것이다.

3.2.2 붕괴 원인 규명

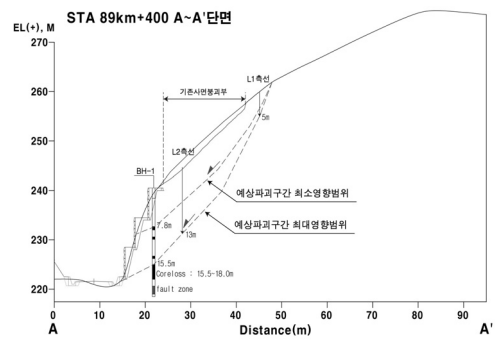
(1) 지반조사

본 연구대상구간에서 붕괴된 비탈면의 대책공법을 마련하기 위해서는 비탈면의 추정 및 예상 붕괴면을 파악하는 것이 필수적이므로 지반조사인 시추조사, 물리탐사, 지표지질조사 등을 실시하였다.

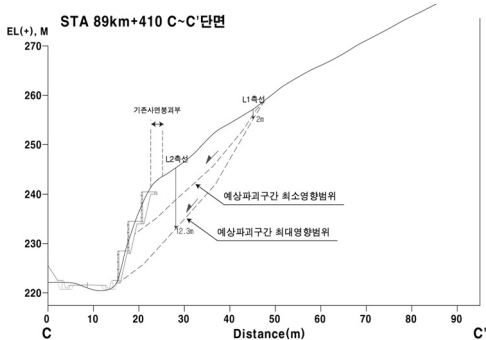
시추조사는 조사구간에 대하여 지층의 성층상태와 각 지층의 지반 공학적 특성, 기반암의 분포상태 및 풍화도, 절리 간격 등을 파악하여 비탈면의 붕괴면을 관찰하기 위하여 수행되었다. 비탈면 단면의 붕괴면을 관찰하기 위해서는 비탈면의 경사방향으로 시추위치를 달리하여야 하나 진입로 개설이 어려워 주향방향으로 두 개의 시추조사를 수행하였다. 그림 3에서 시추조사 전경을 나타내었으며, 표 1에서는 시추 심도를 나타내었다.



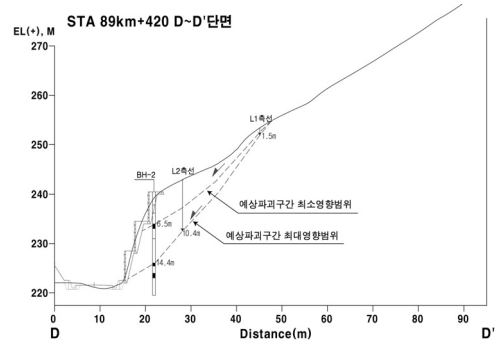
(a) 89km+390 예상 파괴범위



(b) 89km+400 예상 파괴범위



(c) 89km+410 예상 파괴범위



(d) 89km+420 예상 파괴범위

그림 2. 예상 파괴범위



그림 3. 시추 조사 전경

표 1. 시추 심도

공종	공번	심도
시추조사	BH-1	22.0m
	BH-2	21.0m
	합 계	43.0m

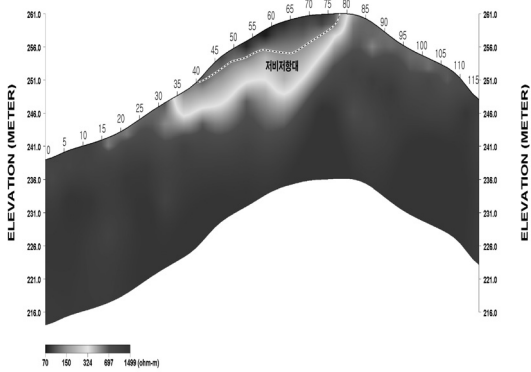
시추조사 시 풍화대층을 포함한 토사층은 표준관입시험의 시료 채취기에 의하여 시료를 채취하고자 하였으며, 기반암층에서는 코어 회수율을 높여 정확한 암질 상태를 파악

표 2. 전기비저항 축선방향 및 길이

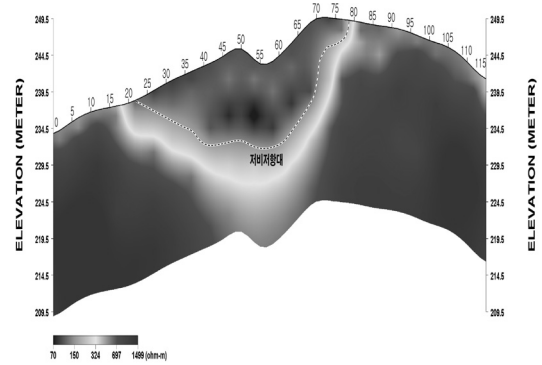
공종	축선명	축선방향	축선길이
전기비저항 탐사	L1	N54°E	115m
	L2	N54°E	115m
	L3	N36°W	55m
	L4	N36°W	55m
	합 계		340m

하기 위하여 다이아몬드 비트 및 D-3 코어 배럴을 사용하여 암석시료를 채취하였다.

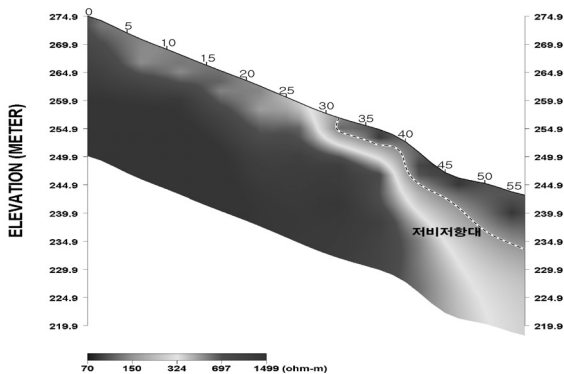
시추조사를 실시한 결과 BH-1(B-zone)은 붕괴구간 하부 3소단에 수직으로 22.0m 굴진하였고, 주 암종은 천매암이 분포하며, 단층대 및 파쇄대의 영향으로 전반적으로 RQD 0~23%의 불량한 암반상태를 보였다. BH-2(A-zone)는 붕괴구간 하부 3소단 좌측부(원산방향)에 수직으로 21.0m 굴진하였으며, 주 암종은 천매암이 분포하였다. 일부 구간에서 비연속적인 파쇄구간이 발달하고 있으나, 이 구간을 제외한 구간의 RQD는 0~73%를 나타내며, BH-1에 비해 전반적으로 양호한 암질이 분포하고 있다. 따라서 BH-1(B-zone)과 BH-2(A-zone)의 시추조사결과를 비교해 볼 때 비탈면 파괴가 발생한 A-zone보다 발생하지 않은 B-zone의 지반조건이 공학적으로 더 불리한 것으로 조사되었다.



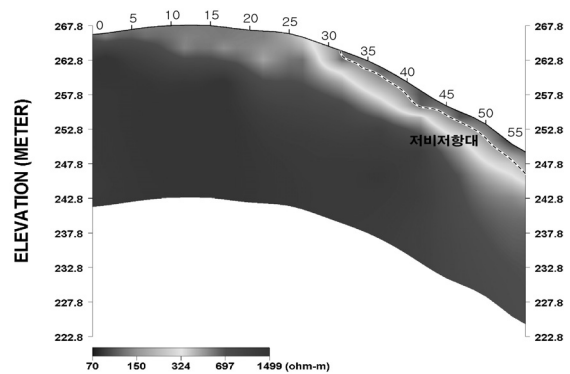
(a) 축선 L1 역산단면



(b) 축선 L2 역산단면



(c) 축선 L3 역산단면



(d) 축선 L4 역산단면

그림 4. 각 축선의 역산단면

연구대상구간에서 실시한 시추조사는 점의 조사이며 제한적인 위치에서만 수행되어 정확한 지반조사 자료를 얻기 어렵기 때문에 이를 보완하기 위해 보강토옹벽 배후 비탈면에서 물리탐사법의 일종인 전기비저항 탐사법을 사용하였다. 전기비저항탐사는 전도율이 서로 상이한 지층 혹은 암석에 대하여 대지에서 인위적으로 전류를 흐르게 하여 전위차(ΔV)를 측정함으로써 지층의 비저항 분포와 층 두께 등을 계산할 수 있다. 표 2에 나타난 전기비저항 측선방향 및 길이에 대해 전기비저항탐사를 수행하였으며, 각 측선의 역산단면을 그림 4에 나타내었다.

전기비저항 탐사결과 전체적인 비저항값은 50~2,300 Ω m의 분포를 보이며 하부로 갈수록 비저항값이 증가하는 비저항구조를 보였다. 측선 L1 구간에서는 최대 5m 심도까지, 측선 L2 구간에서는 최대 13m 심도까지, 측선 L3 구간에서는 2~10m 심도까지, 측선 L4 구간에서는 최대 1~2m 심도까지 주위 기반암에 비해 낮은 150 Ω m 이하의 저비저항대가 나타났다. 이러한 저비저항대는 균열 단면 및 시추조사 결과와 비교해 볼 때 비탈면 붕괴와 연관된 것으로 판단된다.

또한 지표지질조사를 통해 절리의 방향성에 대해 분석한 결과, 그림 5와 같이 총 4개조의 절리군으로 구분되며, 절리군의 방향은 표 3과 같았다.

연구대상구간 비탈면에는 총 3개조의 단층이 발달하였는

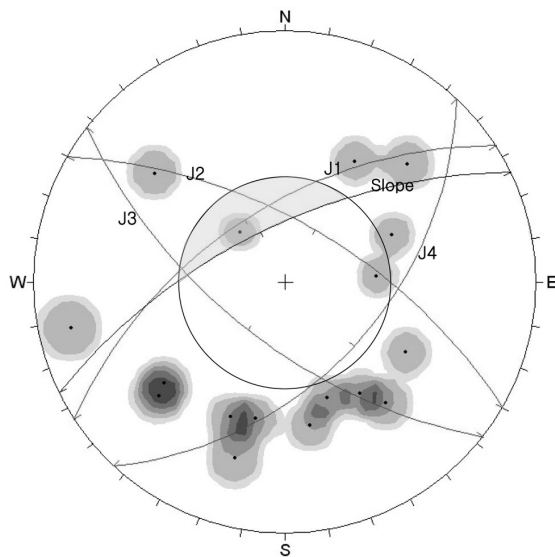


그림 5. 붕괴구간 절리/엽리 방향성 분석

표 3. 절리군의 방향

구분	방향	Fisher's(k)
J1	327/56	23.4
J2	030/63	22.3
J3	218/62	43.5
J4	132/48	8.9

데 F1단층은 N24W/48~60SW의 방향성을 가졌고, 5cm내외의 단층점토가 관찰되었으며, 주변 파쇄대로 단층각력대가 약 50cm 폭으로 발달하고 있다. F2단층은 N42W/68NE 방향성을 가지고 파괴구간 좌측부에 발달하며, 엽리의 방향을 교란시키는 단층각력대로 단층 주변으로 엽리의 방향이 매우 교란되어짐을 관찰할 수 있으며, 상부 토사층과 함께 연속체적 거동을 일으키는 데에 상당한 영향을 끼칠 것으로 판단된다. F3단층은 비교적 양호한 암반구간에 소규모로 발달하는 단층으로 N74W/72NE 방향성을 가진다. 단층점토 및 파쇄대가 분포하는 F1을 제외하고는 소규모 단층 내지는 엽리면을 따른 파쇄구간의 형태로 발달된 것으로 나타났다.

(2) 내적 요인

붕괴가 발생한 구간(A-zone)에서 2개소의 시추조사를 실시한 결과 연구대상 비탈면은 RQD가 일부구간을 제외하고 대부분 0~30%로 심한 파쇄상태인 것으로 나타났다. 붕괴가 발생하지 않은 구간(B-zone)과 약 10m 이격되어 있는 BH-2에서는 RQD가 거의 0%에 가까워 심한 파쇄상태를 나타냈으며 단층점토를 포함한 절리가 발견되었다. 이러한 구조에서는 상재하중의 제거로 응력해방이 발생하여 팽창 등으로 인한 비탈면의 균열이 진전될 가능성이 있다. 또한 붕괴가 발생한 구역 뒤편으로 인장균열이 넓고 뚜렷하게 발견되었다. 이상의 결과를 볼 때 추가 비탈면 붕괴가 발생할 수 있다고 판단된다.

(3) 외적 요인

비탈면 인장균열을 발생시킨 외적 요인은 비탈면을 절개 중인 각종 공사(암파쇄작업 등)에 의한 진동·충격이 비탈면 내로 전달되어 전단저항력이 약한 불연속면의 상부에 위치한 암괴에 전달되어 비탈면 붕괴에 부분적으로 영향을 미칠 가능성이 있다. 그러나 비탈면 붕괴가 썩기과파임을 감안하면 이러한 외적인 요인은 인장균열 발생의 주된 요인은 아닌 것으로 판단된다.

3.2.3 붕괴 비탈면 응급복구대책

본 연구대상구간은 2009년 2월 8일 STA. 89km+320~460 구간의 비탈면 최초 인장균열이 관측되었을 때, 붕괴의 위험이 있는 것으로 간주되어, 휨스와 균열지역 계측기를 설치했으며, 우수침투방지를 위해 소단 되메우기를 실시했다. 그림 6과 같이 보강토옹벽의 전면부에 설치된 수평변위 계측기 15개소를 광파측량기로 1일 2회 계측하였으며 시간 경과에 따른 수평변위 계측결과를 그림 7에 나타냈다.

보강토옹벽의 과변위가 진행되는 것을 억제하기 위한 응급복구대책으로 2009년 2월 18일 보강토옹벽의 전면에 압

대하여 주동토압에 대한 저항력을 키워야 할 것이다.

4. 안정성 해석

4.1 개요

본 연구대상 비탈면에 대한 장기적인 보강대책안을 마련하기 위하여 역해석에 의한 전단강도 추정방법과 절리면 전단시험 등의 현장시험을 통해 적용물성치를 산정한 후, 비탈면 안정해석 프로그램을 이용하여 안정해석을 실시하였다.

암반비탈면 안정해석은 평사투영해석을 실시하여 파괴가능성과 파괴유형을 결정하고, 이를 바탕으로 파괴가능성을 가진 비탈면에 대하여 불연속면의 특성과 지하수조건을 고려한 한계평형해석을 실시하는 것이 원칙이다. 그러나 건설공사비탈면 설계기준에 의하면 풍화가 심하거나 절리가 발달한 경우는 원호형태의 파괴에 대해서도 안정해석을 수행하도록 되어 있다(한국시설안전공단, 2006). 따라서 본 연구대상 비탈면 안정해석의 경우는 풍화가 심하고 절리가 발달하였으므로 원호형태의 파괴를 가정하였다.

본 연구대상 비탈면에 대한 안정성은 한계평형해석법을 적용하여 검토하였으며, 안정해석에 Slide 프로그램을 사용하였다. Slide 프로그램은 Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, Barton-Bandis 등 여러 구성방정식을 지원하며 Bishop의 간편법, Fellenius법, Janbu법, Morgenstern-Price법 등 다양한 해석방법을 제공하고 있으나(Rocscience Inc, 2006), 본 연구에서는 Mohr-Coulomb모델, Bishop의 간편법을 이용하여 해석을 수행하였다.

4.2 적용물성치

절토 비탈면에서 붕괴가 발생된 경우에는 붕괴면의 전단강도를 결정하는 방법으로 역해석(Back Analysis), 토질시험, 경험적인 전단강도 추정방법 등이 있으나, 그 중에서 역

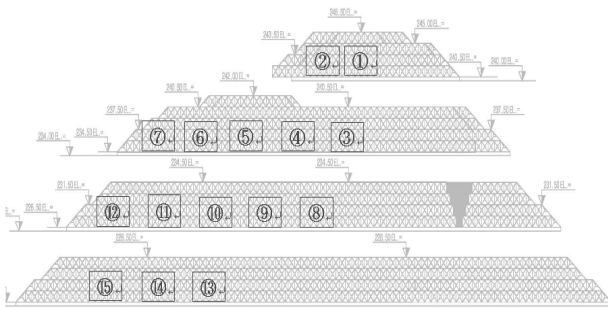


그림 6. 보강토옹벽 전면부 수평변위계측기 설치위치

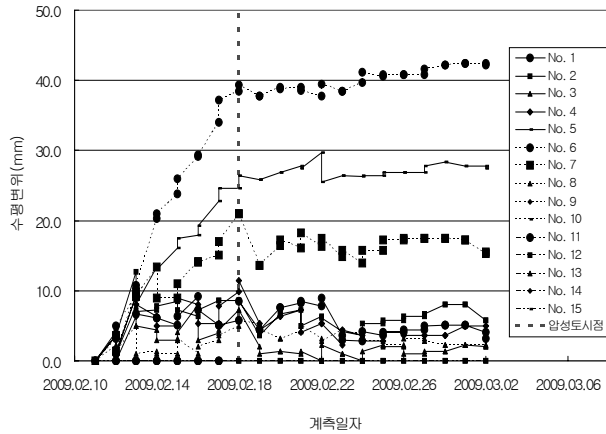


그림 7. 시간경과에 따른 수평변위 계측결과

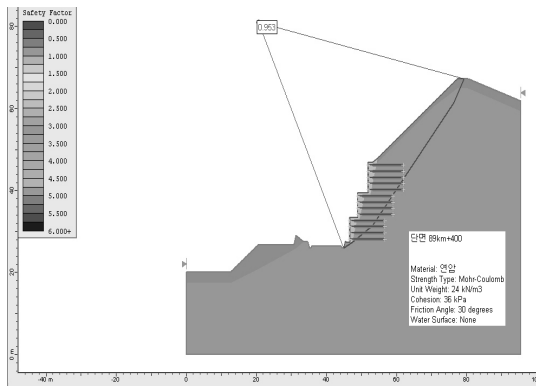
성토를 성토하였다. 압성토공법은 성토 본체의 측방에 본체 성토고보다 낮은 성토를 덧붙임 시공하여 성토 시공 중에 발생하는 활동파괴에 대한 저항모멘트를 작용시켜서 성토 본체의 안정을 유지하는 공법이다(이승언, 2007). 그림 7의 계측결과를 통하여 보강토옹벽 배후 비탈면의 인장균열이 발견된 이후 시간경과에 따라 수평변위가 증가하였으나, 압성토(2009년 2월 18일)를 실시한 이후부터는 수평변위 증가폭이 감소되는 것으로 나타났다. 이는 압성토가 주동토압에 의해 유발될 수 있는 수평변위를 억제하여 응급복구대책의 효과가 발휘되고 있는 것으로 나타났다. 보강토옹벽에서 추가적인 변위발생 징후가 발견될 시에는 압성토의 규모를 확

표 4. 비탈면의 상태와 비탈면의 붕괴에 대한 전체안전율과의 관계(한국도로공사, 1996)

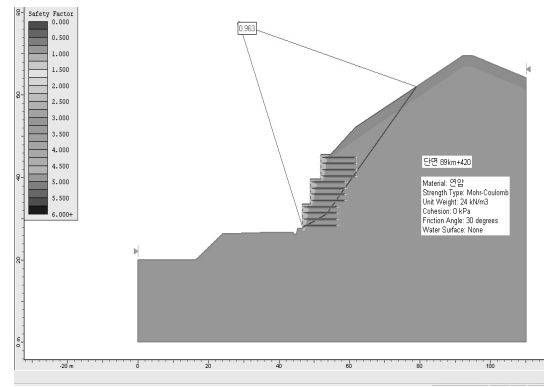
비탈면상태	지반조건	암 반	풍화암	붕적토	점토질
활동정지중		1.10	1.05 ~ 1.10	1.03 ~ 1.05	1.00 ~ 1.03
활동중		0.88	0.95 ~ 0.99	0.93 ~ 0.95	0.90 ~ 0.93

표 5. 연암 전단강도

해석단면	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kN/m^2)	내부마찰각 ($^{\circ}$)	안전율 ($0.95 < FS < 0.99$)
89km+420m	24	0	30	0.963
89km+400m	24	36	30	0.953



(a) 단면 89km+400



(b) 단면 89km+420

그림 8. 현상태 비탈면에 대한 역해석 결과

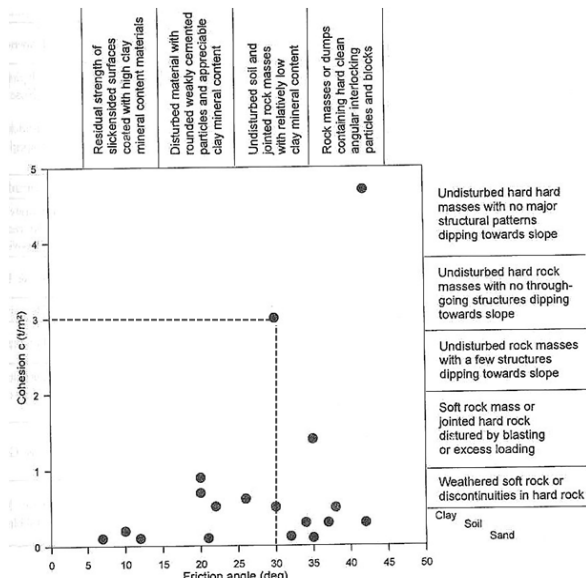


그림 9. 지반조건에 따른 비탈면 붕괴시 점착력과 내부마찰각과의 관계 (Hoek 등, 1974)

해석에 의한 전단강도 추정방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 비탈면의 상태와 비탈면의 붕괴에 대한 전체안전율과의 관계를 살펴보면 표 4와 같이 붕괴하고 있는 경우에는 안전율이 0.9~1.0 범위이며, 붕괴가 정지한 경우에는 안전율이 1.0~1.1 범위를 나타낸다.

표 6. 해석에 사용한 지반의 강도정수

구분	지층	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kN/m ²)	내부마찰각 (°)	비고
원설계에 사용된 강도정수	풍화토	19	15	31	
	연암	24	36	30	암반절리면 시험결과
역해석에 의해 산정된 불연속면의 전단강도	연암	24	0	30	
	연암	24	36	30	
적용 물성치	풍화토	19	15	31	
	연암	24	0	30	평면파괴해석시 적용
		24	36	30	원호파괴해석시 적용

지반조사결과를 토대로 인장균열이 발생한 STA. 89km+400, 420m 지점 추정붕괴면에 대해 연암에 해당하는 비탈면 붕괴에 대한 안전율(=0.95~0.99)을 기준으로 역해석을 수행한 결과를 요약하면 표 5 및 그림 8과 같다.

비탈면 붕괴에 대한 역해석결과를 바탕으로 암석과 토층에 대한 점착력과 내부마찰각과의 일반적인 관계를 도시하면 그림 9와 같고, 본 연구대상구간의 암반비탈면에 대한 역해석결과와 대체로 일치되는 경향을 알 수 있다(Hoek 등, 1974).

본 연구대상지역 연암층의 불연속면에 대해 실시된 절리면 전단시험 등의 현장시험결과와 인장균열이 발생한 연구대상단면(STA. 89km+400~420 지점)에 대해 실시된 역해석 결과를 토대로 결정된 지반특성치를 정리하면 표 6과 같다. 표 6을 통해 연암층의 불연속면에 대한 강도정수는 붕괴가 기 발생한 추정붕괴면으로부터 역해석으로 추정된 강도정수와 암반절리면 시험에 의한 강도정수가 유사한 결과를 보이고 있는 것으로 나타났다.

이 같은 경향으로 볼 때, 붕괴가 기 발생한 추정붕괴면의 지반특성치는 절리면 전단시험의 잔류강도에 해당하는 역해석에 의해 추정된 지반특성치를 적용하고 향후 예상되는 원호예상붕괴면의 지반특성치는 역해석에 의한 최대강도 및 절리면 전단시험의 강도에 해당하는 지반특성치를 적용

하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 따라서 해석에 사용한 지반강도정수는 풍화토층의 경우 원설계의 지반정수를 활용하였으며, 연암층의 불연속면의 경우에는 붕괴가 기 발생한 추정붕괴면에 대해서는 역해석 결과 중 최소값을 나타낸 89km+420 지점의 역해석 결과값을 적용하였다. 또한 향후 예상되는 원호붕괴면의 지반강도정수는 역해석 결과 중 최대값을 나타낸 89km+400 지점의 역해석 결과값(절리면 전단시험결과)을 적용하였다.

4.3 보강대책안

본 연구대상현장은 철도노반 건설공사현장으로써 철도노반과 비탈면이 불과 10m이내에 위치하고 있으며 비탈면의 높이가 30m 이상으로써 비탈면 붕괴 등의 문제 발생 시 운용중인 철도에 막대한 인명 및 재산 피해가 예상되므로 장기적인 보강대책 공법이 마련되어야 한다. 철도는 도로와 달리 큰 진동 및 충격이 주기적으로 주변 지반에 영향을 미치므로 보강대책안 마련 시 보수적인 안전율이 필요하다.

보강대책공법으로는 비탈면 경사를 완화시켜 활동하려는 토괴 또는 암괴를 제거하여 활동면에서 발생하는 전단응력을 감소시키는 경사완화공법과 말뚝을 비탈면의 활동지반을 지나 견고한 지반까지 관입시켜 비탈면의 활동하중을 말뚝의 수평저항력으로 저항하는 억지말뚝공법을 적용하였다(송영석, 2006). 강우침투 등을 방지하기 위한 슛크리트와 비탈면 표면에 식물이 자라게 하여 강우의 직접적인 유입을 방지하고 식물뿌리에 의한 표층의 전단강도 증가, 표층유실

과 세굴에 대한 안정성을 확보할 수 있는 식생공법을 적용하였다.

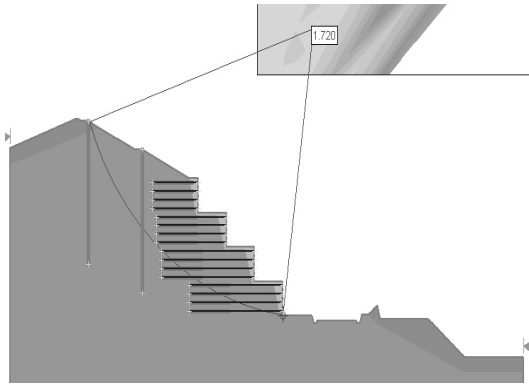
본 연구대상 비탈면의 보강대책안을 표 7과 같이 여섯 가지 방안으로 마련하였다. 붕괴가 발생한 구간은 이미 붕괴가 발생하였기 때문에 예상 및 추정활동면까지 제거해야 장기적인 안정성을 확보할 수 있게 된다. 따라서 붕괴가 발생한 구간에 대한 보강 제 1,2,4안은 활동면을 제거하고 보강토옹벽 배후면 경사를 완화하였고, 보강 제 1,2안에는 억지말뚝으로 추가 보강하였다. 보강 제 4안의 경우, 보강 제 1,2안과 달리 보강토옹벽 배후면에 투수성 슛크리트와 덩굴식재보호공을 적용하였으나 보강토옹벽 배후면에 대한 추가적인 용지매입을 통해 안전율을 확보하는 안이다. 붕괴가 발생하지 않은 구간에 대한 보강 제 3,5,6안은 보강토옹벽 4단 제거, 배후면 경사를 완화하였으며, 각각 대구경 억지말뚝 및 보강토옹벽 배후면에 투수성 슛크리트와 덩굴식재보호공을 적용하였다.

4.4 해석결과

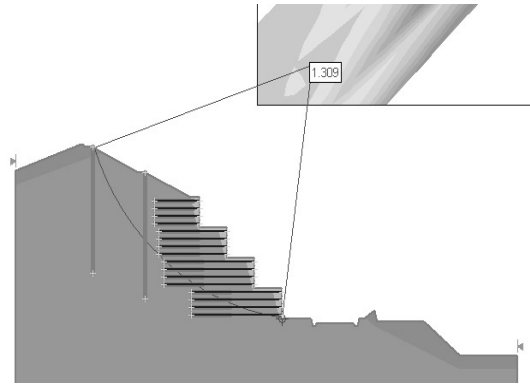
비탈면 붕괴에 대한 장기적인 보강대책을 위하여 건설공사 비탈면 설계기준(한국시설안전공단, 2006)을 참고하여 건조시 1.5 이상, 우기 시 1.2 이상을 설계기준 안전율로 결정하였으며, 여섯 가지 보강대책안에 대한 안전율을 구하기 위해 한계평형해석을 실시하였다. 해석결과, 보강대책안으로 제시한 여섯 가지 보강안은 그림 10에서 건기 시와 우기 시의 안전율 모두 만족함을 보였다. 대구경 억지말뚝을

표 7. 보강대책안

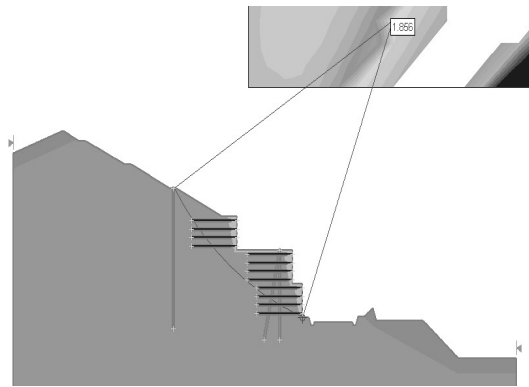
구분	보강 제 1안		보강 제 2안		보강 제 3안	
구간	A-zone(붕괴구간)				B-zone(미 붕괴구간)	
개요	<ul style="list-style-type: none"> 활동면 제거 보강토옹벽 재설치 보강토옹벽 배후면 경사 1:2.0 완화 대구경 억지말뚝 2열 보강 		<ul style="list-style-type: none"> 활동면 일부 제거 기존 보강토옹벽 1, 2단 존치, 3단 제거 보강토옹벽 배후면 경사 1:2.0 완화 소구경 억지말뚝 1열 보강 및 대구경 억지말뚝 1열 보강 		<ul style="list-style-type: none"> 기존 보강토옹벽 1, 2, 3단 존치, 4단 제거 보강토옹벽 배후면 경사 1:2.0 대구경 억지말뚝 1열 보강 	
안전율	건기 (FS>1.5)	우기 (FS>1.2)	건기 (FS>1.5)	우기 (FS>1.2)	건기 (FS>1.5)	우기 (FS>1.2)
	1.72(OK)	1.30(OK)	1.85(OK)	1.41(OK)	1.59(OK)	1.26(OK)
구분	보강 제 4안		보강 제 5안		보강 제 6안	
구간	A-zone(붕괴구간)		B-zone(미 붕괴구간)			
개요	<ul style="list-style-type: none"> 활동면 제거 보강토옹벽 제거 보강토옹벽 배후면 경사 1:1.5 완화 보강토옹벽 배후면 투수성 슛크리트+덩굴식재보호공 적용 		<ul style="list-style-type: none"> 기존 보강토옹벽 1:2:3단 존치, 4단 제거 보강토옹벽 배후 사하중 경감 보강토옹벽 배후면 투수성 슛크리트+덩굴식재보호공 적용 		<ul style="list-style-type: none"> 기존 보강토옹벽 1, 2, 3단 존치, 4단 제거 보강토옹벽 배후면 경사 1:0.7 대구경 억지말뚝 1열 보강 보강토옹벽 배후면 투수성 슛크리트+덩굴식재보호공 적용 	
안전율	건기 (FS>1.5)	우기 (FS>1.2)	건기 (FS>1.5)	우기 (FS>1.2)	건기 (FS>1.5)	우기 (FS>1.2)
	1.88(OK)	1.48(OK)	1.57(OK)	1.22(OK)	1.61(OK)	1.22(OK)



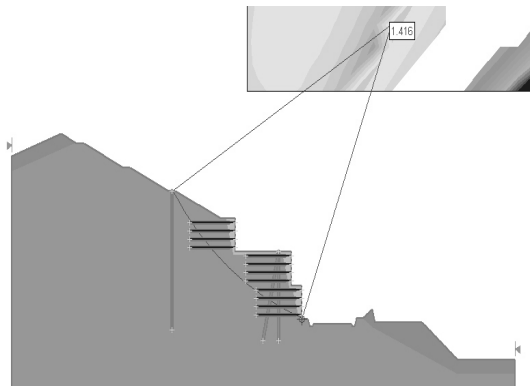
(a) 보강 제 1안 - STA. 89km+400m(건기 시)



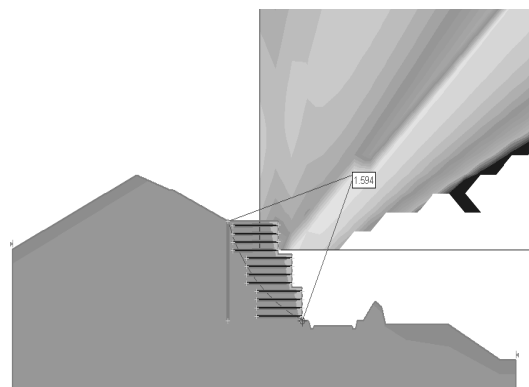
(b) 보강 제 1안 - STA. 89km+400m(우기 시)



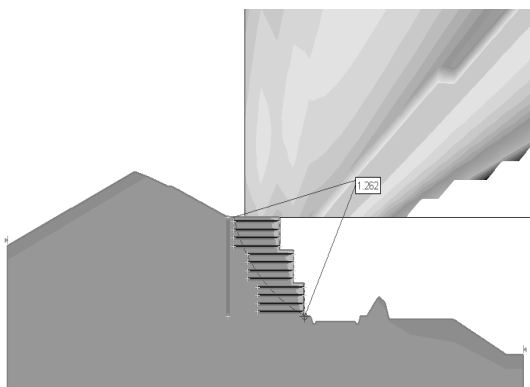
(c) 보강 제 2안 - STA. 89km+400m(건기 시)



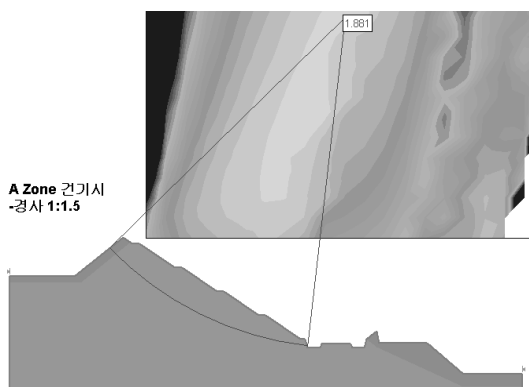
(d) 보강 제 2안 - STA. 89km+400m(우기 시)



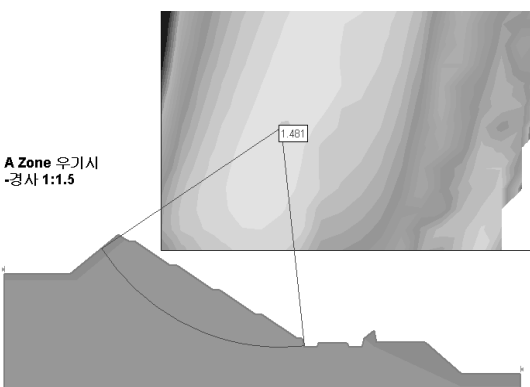
(e) 보강 제 3안 - STA. 89km+360m(건기 시)



(f) 보강 제 3안 - STA. 89km+360m(우기 시)

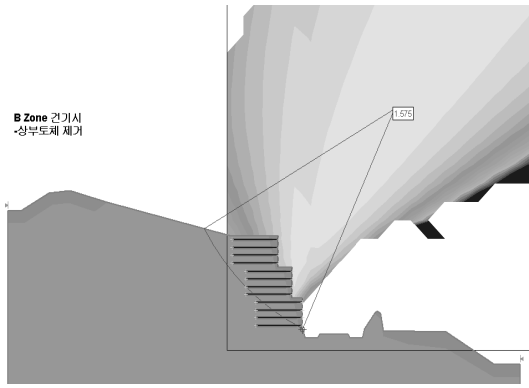


(g) 보강 제 4안 - STA. 89km+420m(건기 시)

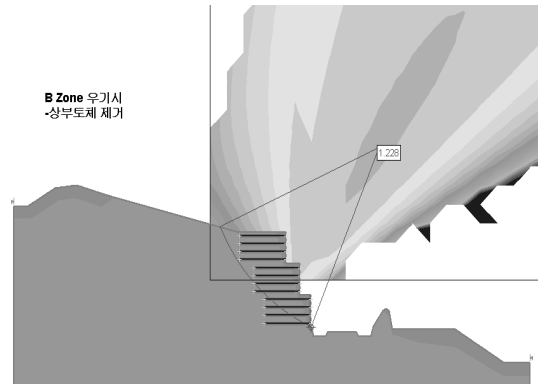


(h) 보강 제 4안 - STA. 89km+420m(우기 시)

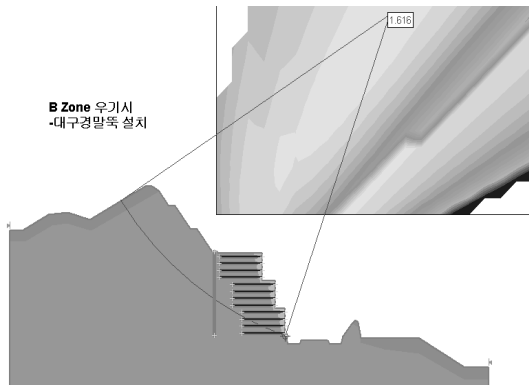
그림 10. 각 보강대책안에 대한 한계평형 해석결과(계속)



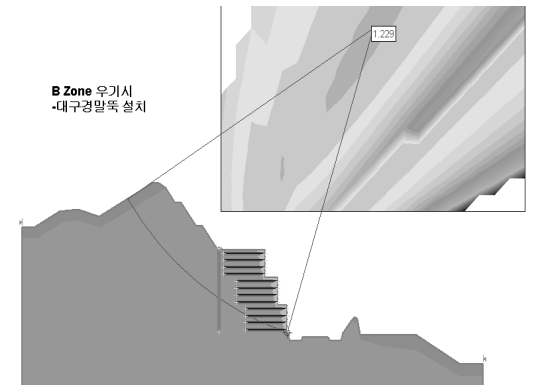
(i) 보강 제 5안 - STA. 89km+360m(건기 시)



(j) 보강 제 5안 - STA. 89km+360m(우기 시)



(k) 보강 제 6안 - STA. 89km+360m(건기 시)



(l) 보강 제 6안 - STA. 89km+360m(우기 시)

그림 10. 각 보강대책안에 대한 한계평형 해석결과

설치하여 비탈면안정효과를 얻는 보강 제 6안도 소요의 안전율을 만족함을 보여서, 역지말뚝이 비탈면에 일정한 간격으로 일렬로 설치된 경우 비탈면 붕괴 역지효과를 갖게 되는 것을 알 수 있었다. 그러나 보강 제 4안의 경우 추가적인 용지매입이 필요하여 부적절할 것으로 예상된다. 따라서 보강 제 5, 6안을 적용함이 장기적인 보강측면에서 적당할 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서는 천매암 지역에서의 비탈면 붕괴에 대해 응급복구대책을 실시하였으며, 원인규명과 장기적인 보강대책을 마련하기 위해 현장조사, 현상상태 비탈면의 안정해석, 보강대책안에 대한 한계평형해석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구대상구간 보강토옹벽의 과변위가 진행되는 것을 억제하기 위하여 보강토옹벽의 전면에 압성토를 실시하였다. 계측결과를 통해 압성토를 실시한 이후 수평변위 증가폭이 감소되는 것으로 나타남에 따라 응급복

구대책으로써 효과가 발휘되고 있는 것으로 나타났다.

- (2) 본 연구대상 비탈면 붕괴의 원인규명을 위해 시추조사, 물리탐사, 지표지질조사 등의 지반조사를 실시하였다. 시추조사를 실시한 결과 비탈면 파괴가 발생한 구간보다 발생하지 않은 구간에서 더 낮은 RQD를 보여 지반조건이 공학적으로 더 불리한 것으로 나타났다. 점의 조사인 시추조사를 보완하기 위하여 실시한 물리탐사는 주위 기반암에 비해 낮은 전위차를 보이는 저비저항대가 나타나는 결과를 보였으며, 또한 지표지질조사 결과, 단층점토 및 파쇄대가 분포하는 구간과 소규모 단층 내지는 엽리면을 따른 파쇄구간의 형태로 발달된 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구대상 비탈면의 전단강도를 결정하기 위해 역해석에 의한 추정방법과 절리면 전단시험 등의 현장시험을 실시한 결과, 유사한 전단강도를 보였다. 따라서, 풍화토층, 연암층 붕괴가 기 발생한 추정붕괴면, 향후 예상되는 붕괴면에 대해 역해석과 현장시험 결과를 통해 얻어진 지반정수를 각각 적용하였다.
- (4) 보강대책안으로 제시한 여섯 가지 보강안은 건기 시와 우기 시의 안전율을 모두 만족함을 보였다. 추가적인 용지를 매입하여 활동면과 보강토 옹벽을 제거하고 보강

토옹벽 배후면 경사를 완화시켜 슛크리트와 식재보호 공을 적용한 보강 제 4안이 건기 시 1.88, 우기 시 1.48 의 가장 높은 안전율을 가진 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 권오일, 김교원, 구호본, 백용, 최정해(2003), 구성 암중별 절토사면의 붕괴유형, 2003년도 정기학술대회, 대한토목학회, pp. 3860~3865.
2. 소방방재청(2008), 절취사면 조사·설계 기술 개발연구 및 사면통합관리 시스템개발, pp. 284~538.
3. 송영석(2006), 사면붕괴가 발생된 절개사면에서의 역지말뚝 보강 사례연구, *지질학회지*, Vol. 16, No. 2, pp. 189~199.
4. 신희순(2000), 지반조사 및 시험결과 활용과 문제점, *터널과 지하공간*, Vol. 10, No. 1, pp. 92~110.
5. 이경미, 이성호, 서용석, 김창용, 김광열(2007), 천매암 터널 단층물질의 암석·광물학적 및 역학적 특성, *지질학회지*, Vol. 17, No. 3, pp. 339~350.
6. 이승연(2007), *살아있는 토목시공학*, 구미서관, pp. 82~88.
7. 정형식, 유병옥(1996), 지질특성에 따른 암반사면 붕괴 유형 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 12, No. 6, pp. 37~49.
8. 한국도로공사(1996), *사면안정처리공법에 관한 연구(II)*, 도로연 96-46-10, pp. 195~198.
9. 한국시설안전공단(2006), *건설공사 비탈면설계기준*, pp. 127~130.
10. 한국지반공학회(2009), *지반기술자를 위한 지질 및 암반공학*, 씨아이알, pp. 1~641.
11. Hoek, E. and Bray, J. W.(1974), *Rock Slopes Engineering*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 74~108.
12. Hoek, E. and Bray, J.(1981), *Rock Slopes Engineering 3rd eds*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 18~34.
13. Rocscience Inc.(2006), *Slide 2D Limit Equilibrium Slope Stability for Soil and Rock slopes Verification Manual*, pp. 1~127.
14. Varnes, D. J.(1978), *Slope Movement Types and Processes*, In Special Report 176, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 11~33.

(접수일: 2010. 6. 17 심사일: 2010. 6. 22 심사완료일: 2010. 7. 9)