

시공중인 절토비탈면 붕괴사례 분석 (홍천지역의 편마암 절토비탈면 중심)

Case Studies on Countermeasures and Failure Types of Gneiss Slopes under Construction



유 병 옥
한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

1. 서론

강원도 홍천지역은 경기육괴의 편마암에 해당하는 암종이 주로 분포하는 지역으로 과거 및 현재 고속도로를 건설하는 과정에서 특히 다른 지역에 비해 많은 절토비탈면의 붕괴를 경험해 왔다. 대부분의 비탈면붕괴는 단층파쇄대를 수반하는 붕괴가 많아 붕괴규모 상으로도 비교적 규모가 있는 붕괴가 발생하는 경우가 많았으며 이는 홍천지역에 분포하는 대단층의 영향이 있는 것으로 판단된다.

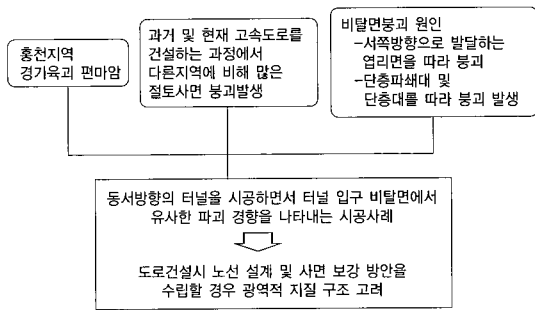
최근의 기상적인 이상으로 발생하는 비탈면붕괴는 장기적인 풍화로 인한 표면유실 및 풍화가 심한 구간에서의 원호파괴가 주를 이루었지만 연약한 지질구조에 의한 비

탈면붕괴는 많은 경우가 공사 중에 발생이 되는 경우가 많았다.

홍천지역일대의 비탈면붕괴를 유발시키는 원인으로는 크게 두 가지 지질구조적인 요인을 들 수 있는데 하나는 비탈면방향으로 발달하는 편마암내에 발달하는 엽리면을 따라 붕괴가 발생하는 사례가 있고 둘째는 단층파쇄대 및 단층대를 따라 붕괴가 발생하는 원인으로 대별할 수 있다. 두 번째의 요인은 비교적 규모가 큰 비탈면붕괴를 유발하게 되고 막대한 복구비용이 수반되는 결과를 초래하게 된다.

본 논문은 고속도로 중심으로 그동안 붕괴가 발생된 절토비탈면의 붕괴사례를 통해 상호 연관성을 살펴보고, 차

후 비탈면붕괴를 최소화하기 위한 노력과 이러한 단층의 수반에 의해 발생하는 절토비탈면에서의 대책방안에 사례중심으로 알아보고자 하며 편마암이 광범위하게 분포하는 지역에 건설되는 고속도로 중에서 동서방향의 터널을 시공하면서 터널 입구 비탈면에서 유사한 파괴 경향을 나타내는 시공사례를 바탕으로, 도로건설시 노선 설계 및 비탈면 보강 방안을 수립할 경우 광역적 지질을 고려해야 한다고 판단된다(그림 1).

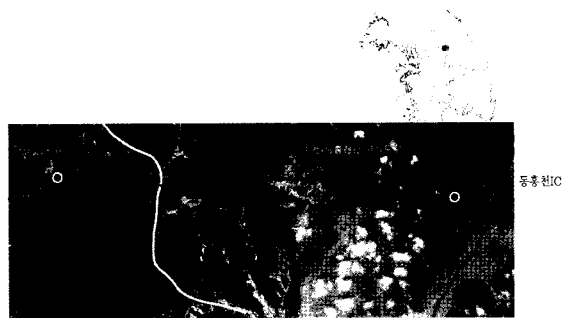


〈그림 1〉 설계시의 광역적인 지질구조 파악의 중요성

2 검토 지역의 지질

2.1 일반 현황

현재, 기존에 시공된 남북 방향의 홍천-춘천간 중앙고속도로를 가로로 관통하는 서울-춘천고속도로와 춘천-동홍천 고속도로가 건설되고 있다. 본 검토지역은 고속도로를 건설하는 홍천일대로 고속도로는 제일 마지막 구간인 춘천인근지역, 춘천-동홍천 고속도로는 중앙고속도로에 인접한 구간이며, 시공 중인 터널 중에서 서쪽방향(서울방향)의 터널갱구비탈면에서 붕괴가 발생하는 사례가 많았으며 그 규모도 대규모 양상을 보인다.

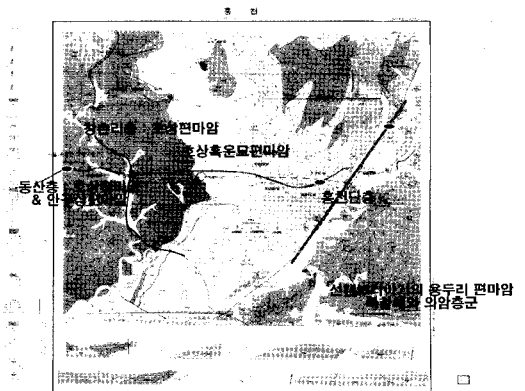


〈그림 2〉 검토대상지역의 위치

2.2 지질현황

본 지역의 지질은 선캠브리아기의 용두암 편마암복합체와 이를 부정합으로 피복하는 의암층군 그리고 이들을 관입한 화성암류 등으로 크게 나누어진다. 변성암 분포지역의 지질구조는 의암층군의 구조에 지배된다. 의암층군의 중심은 현재 중앙선이 가로지르는 일대를 중심으로 큰 분지구조를 이루고 있다고 판단되는데 실제 이 중심부로 향함에 따라 의암층군 내에서의 순차적인 상위층이 나타나며 의암층군의 모든 지층은 대체로 이 중심부를 향하여 20° 내지 45°의 각도로 경사되어 있는 것이 보통이다. 또한 이 지역에 해당되는 창춘리층과 동산층에 기재된 엽리의 경사방향은 중앙 북부는 남동쪽, 중앙 남부는 북서쪽으로 경사져 있다.

특히, 지질도의 우측에 홍천 대단층이 발달하고 인근에 소규모의 단층이 심하게 발달하는 특성을 보인다.



〈그림 3〉 검토지역의 지질도

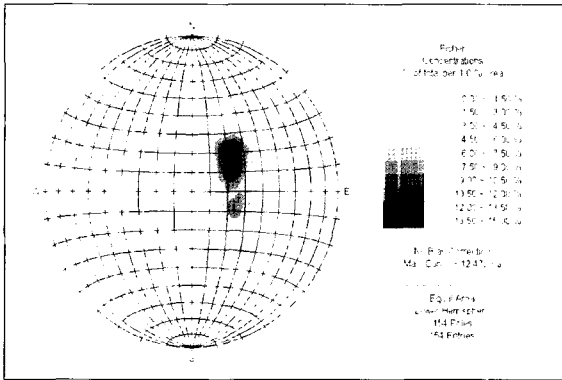


2.3 불연속면의 발달

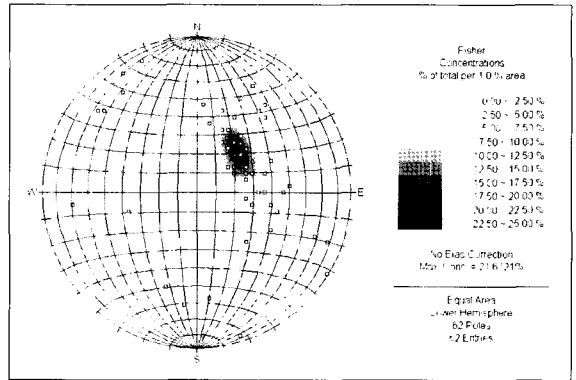
본 지역의 암종은 편마암으로 다른 지역에 비해 엽리의 발달이 우세하여 뚜렷한 방향성을 가지는 특징을 보이고 있다. 지질도 상에서 표기된 주지질 구조인 엽리 (foliation)의 경사방향으로 30~40/210~230°, 30~40/270~280° 방향이 우세하고 현장조사에서는 30~

3.1.1 붕괴현황

본 지역이 속해 있는 행정구역은 강원도 홍천군 00면이며, 동-서방향의 터널을 굴착 중에 터널 입구 비탈면에서 붕괴가 발생되었다. 비탈면의 최대 높이는 약 38m 정도이며, 비탈면의 경사는 45°~73°로서 터널 입구부에서 상부로 갈수록 경사가 완만해진다. 조사지역의 지질은 경기



지질도 : 주지질구조 방향 30-40/210-230



현장조사 : 주지질구조 방향 30-40/210-230

〈그림 4〉 검토지역 인근의 주 지질구조 비교(지질도폭과 현장조사)

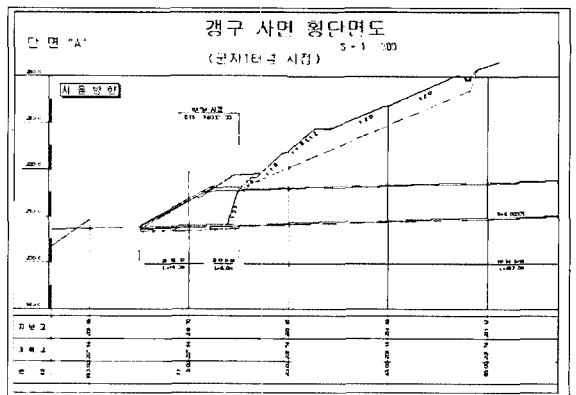
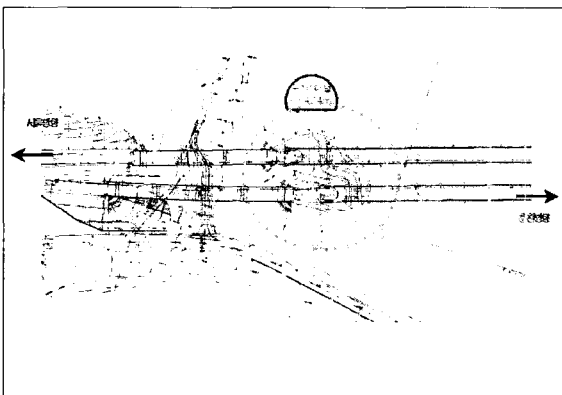
40/210~230°가 우세하게 발달하는데 이는 습곡구조의 양상을 보이기도 한다. 이는 주로 서울방향으로 분포하여 단층과 수반하여 붕괴를 발생시키는 주원인이 되기도 한다. 엽리면은 경사가 30°~50° 정도로 기울어져 있는 것이 우세하다.

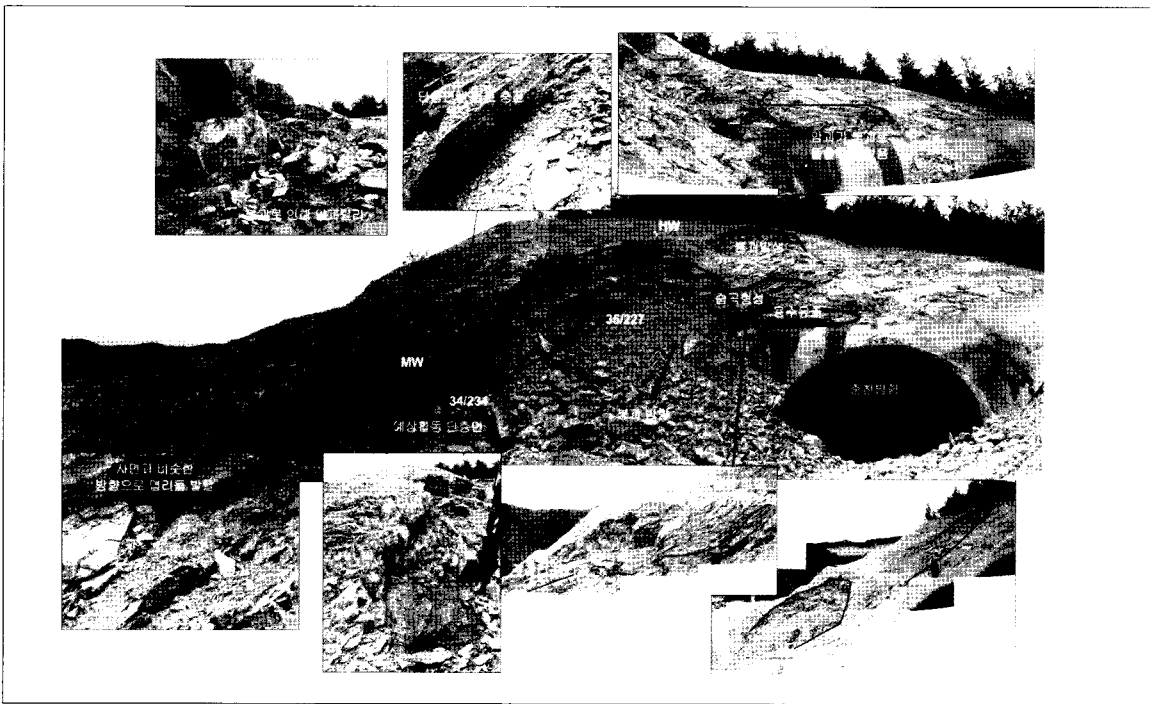
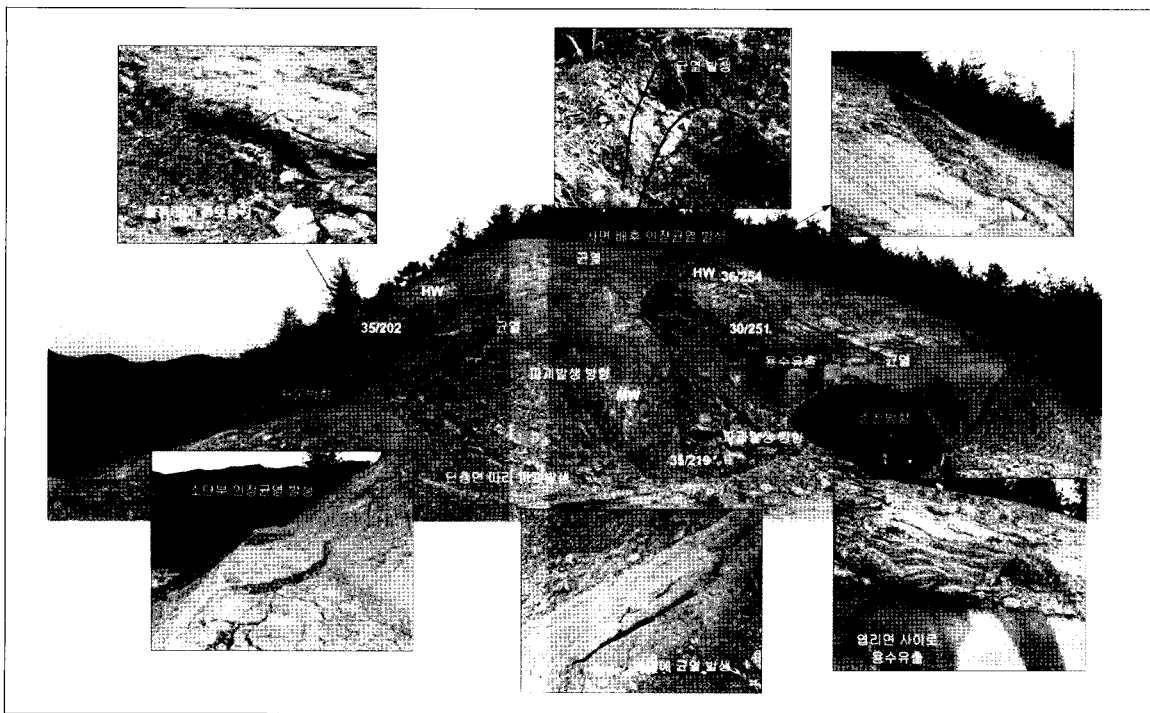
육괴를 형성하는 선캄브리아기의 편마암으로 이루어진 지역으로 대상구조(Banded)가 잘 발달하며, 편마암은 판상의 백운모성분이 많이 함유하고 엽리 및 단층이 우세하게 발달한다.

3. 검토연구 사례

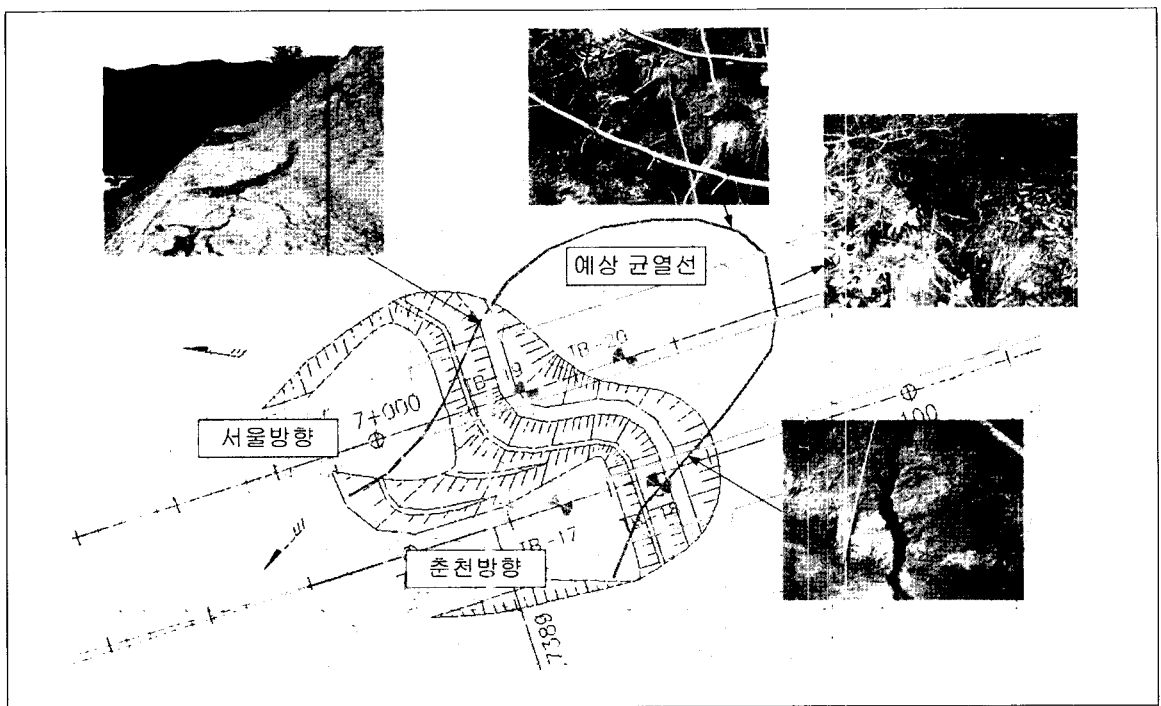
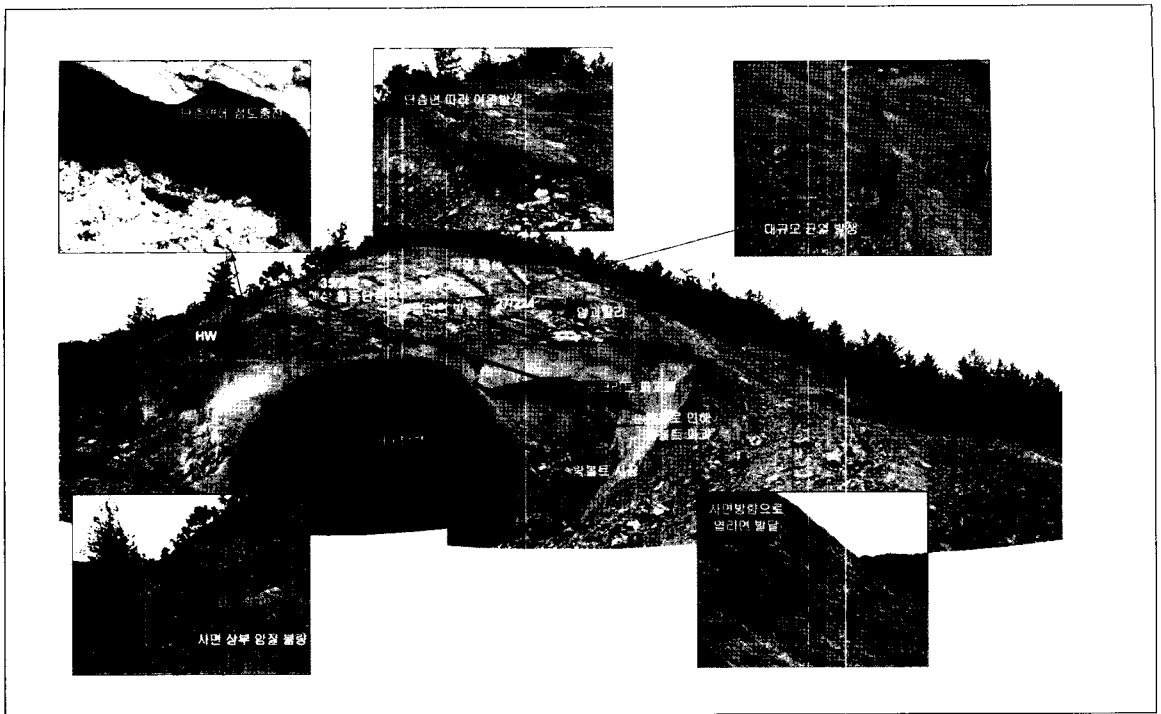
3.1 00고속도로 터널갱구 비탈면(서울방향)의 붕괴사례 1

본 검토지역에서는 양방향 터널 상부에서 모두 붕괴가 발생되었다(그림 5. & 6). 붕괴는 단층 및 엽리면을 따라 비탈면 상부에서부터 평면파괴가 발생되었고, 우측 터널 상부에서는 단층 점토층에 의해 대규모의 붕괴가 발생되





〈그림 5〉 붕괴 발생 지역의 전경사진



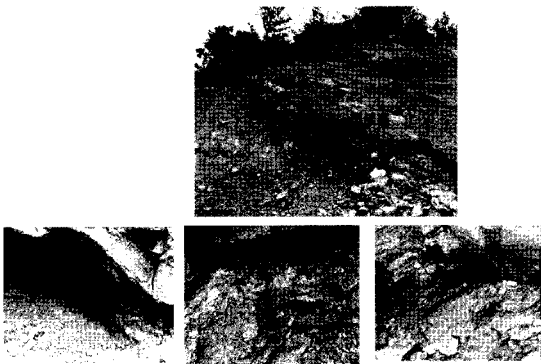
〈그림 6〉 검토 비탈면 1의 균열발생 현황

었다. 단층면에 점토층 및 암편이 두텁게 충전되어 있으며, 파쇄 및 풍화가 심하게 발달되어 있어 강우시 추가 붕괴가 발생될 가능성이 높을 것으로 판단되었다.

3.1.2 비탈면안정검토

비탈면에 발생된 불연속면은 엽리면이 비탈면방향으로 우세하게 발달한다. 불연속면의 대표적인 경사방향은 25~35/210~250° 방향이 우세하며 이는 비탈면의 경사방향(260°)과 유사하고 평면파괴면의 활동방향과 유사한 방향을 보인다.

비탈면의 붕괴를 유발시킨 활동면은 하부에서 35/219, 갱구비탈면 상부에서 35/202 방향으로 발달하고 이면 사이에 점토층이 두텁게 충전되어 나타나고 있다(그림 7). 단층구조는 64/270, 70/289 방향을 보이고 단층 주변의 엽리면이 습곡화 되어 있다.



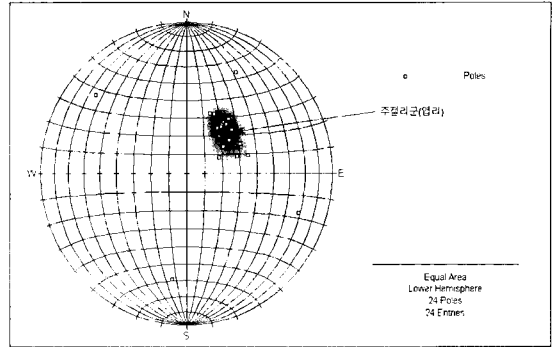
(그림 7) 검토 비탈면 1의 활동면 조사

(1) 평사투영법에 의한 안정성 검토

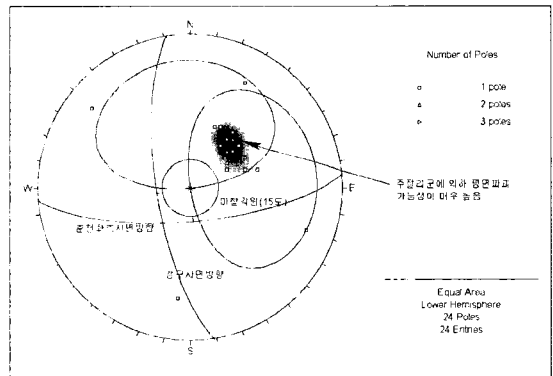
비탈면 내에 발달하는 불연속면의 방향을 측정하여 비탈면안정해석을 실시하였으며, 본 해석은 DIPS Ver.5.0 프로그램을 이용하여 불연속면을 평사투영법에 도시하였다. 해석에 적용된 절리면의 마찰각은 암반의 일반적인 마찰각, 인근 지역의 지반보고서 및 역해석을 통하여 약 15°의 값을 적용하였다.

평사투영법해석에 의한 비탈면안정 검토 결과, 조사된

불연속면이 파괴영역에 도시됨으로써 평면파괴가 발생될 가능성이 매우 높은 것으로 판단되었다(그림 8 & 9).



(그림 8) 불연속면의 양상



(그림 9) 평사투영법에 의한 평면파괴해석

(2) 한계평형법에 의한 안정성 검토

조사지역에 대한 한계평형해석은 평면파괴가 발생된 구간에서 절리면에 의한 안전율 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 프로그램은 Slope/W를 사용하였으며, 검토단면은 지형적 변화가 심하므로 좌측터널단면, 우측터널단면, 측벽을 따라 형성된 비탈면의 단면(대표단면), 3개의 단면을 선정하였다.

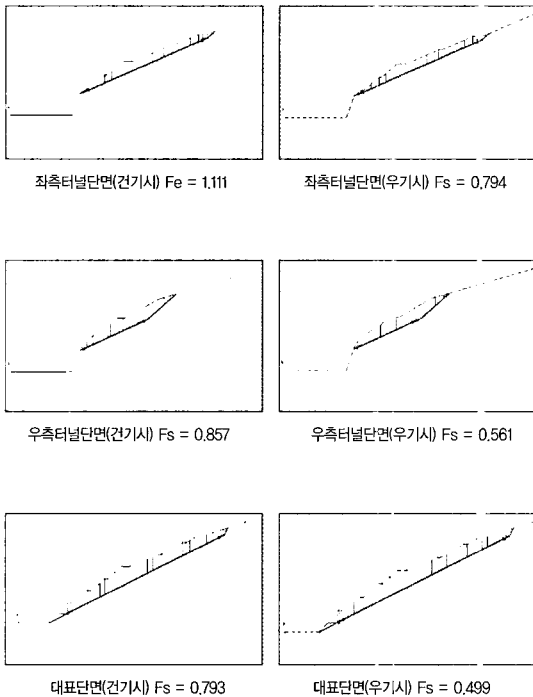
강도정수를 추정하는 방법에는 시험에 의한 방법, 경험에 의한 방법, 역해석에 의한 방법 등이 있는데, 이는 검토자마다 견해를 달리할 수 있다. 본 검토에서는 붕괴가 발생된 구간의 붕괴당시 상황이 우기시에 붕괴가 발생되었기보다 굴착 중에 붕괴가 발생되었으므로 역해석을 통해 물성값을 적용하였다. 해석에 적용된 강도정수는 단위중



량(γ)은 $2.1(t/m^3)$, 점착력(c)은 $1.5(t/m^2)$, 내부마찰각(ψ)은 15° 로 적용하였다.

최소안전율을 적용기준은 건설교통부 비탈면 설계기준(2006)에 의하여 건기시 $F_s \geq 1.5$, 우기시 $F_s \geq 1.2$ 를 적용하였다.

좌측터널단면에 대한 안정성 해석 결과, 건기시 $F_s=1.111$, 우기시 $F_s=0.794$ 로서 모두 불안정한 상태이었으며, 우측터널단면에 대한 결과는 건기시 $F_s=0.857$, 우기시 $F_s=0.561$ 로서 모두 불안정한 상태이었다. 또한 측벽을 따라 형성된 비탈면의 단면(대표단면)의 경우, 건기시 $F_s=0.793$, 우기시 $F_s=0.499$ 로서 불안정한 상태로 해석되었다(그림 10).

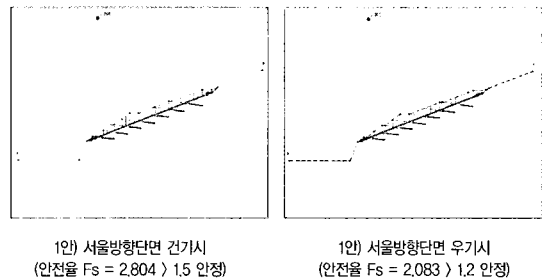


〈그림 10〉 한계평형해석에 의한 안전율 검토결과

3.1.3 비탈면안정 대책공법

본 비탈면은 굴착이 완료된 시점에서 대규모의 평면파괴가 발생되었으며 상부인장균열이 추가적으로 상부로

진전될 가능성이 매우 높으므로 안정화 대책방안이 요구되는 비탈면이다. 붕괴가 발생된 구간은 활동면의 경사각도가 $30^\circ \sim 35^\circ$ 정도로 저각을 형성하고 있으므로 붕괴면 상부를 모두 제거하는 방안은 대규모의 장대비탈면을 형성하게 되므로 불합리할 것으로 판단되므로 비탈면경사완화와 앵커보강을 병행하는 방안을 제안한다(그림 11).



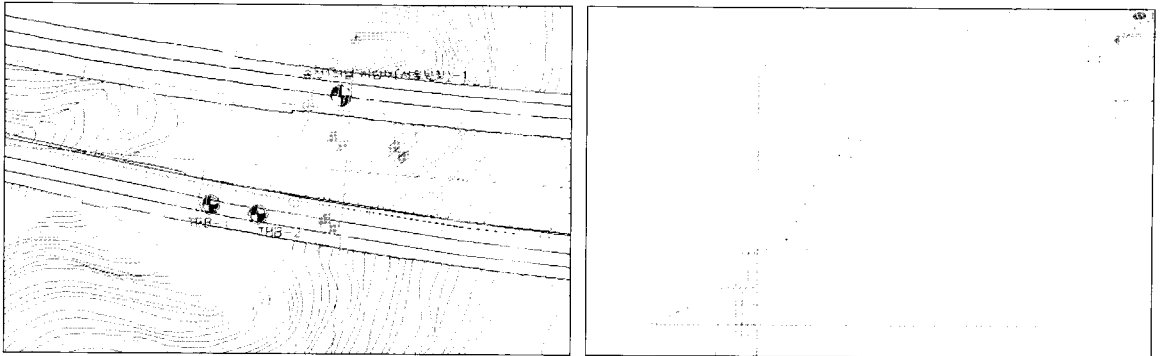
〈그림 11〉 검토대상비탈면의 대책공법

3.2 00고속도로 터널갱구비탈면(서울방향)의 붕괴사례 II

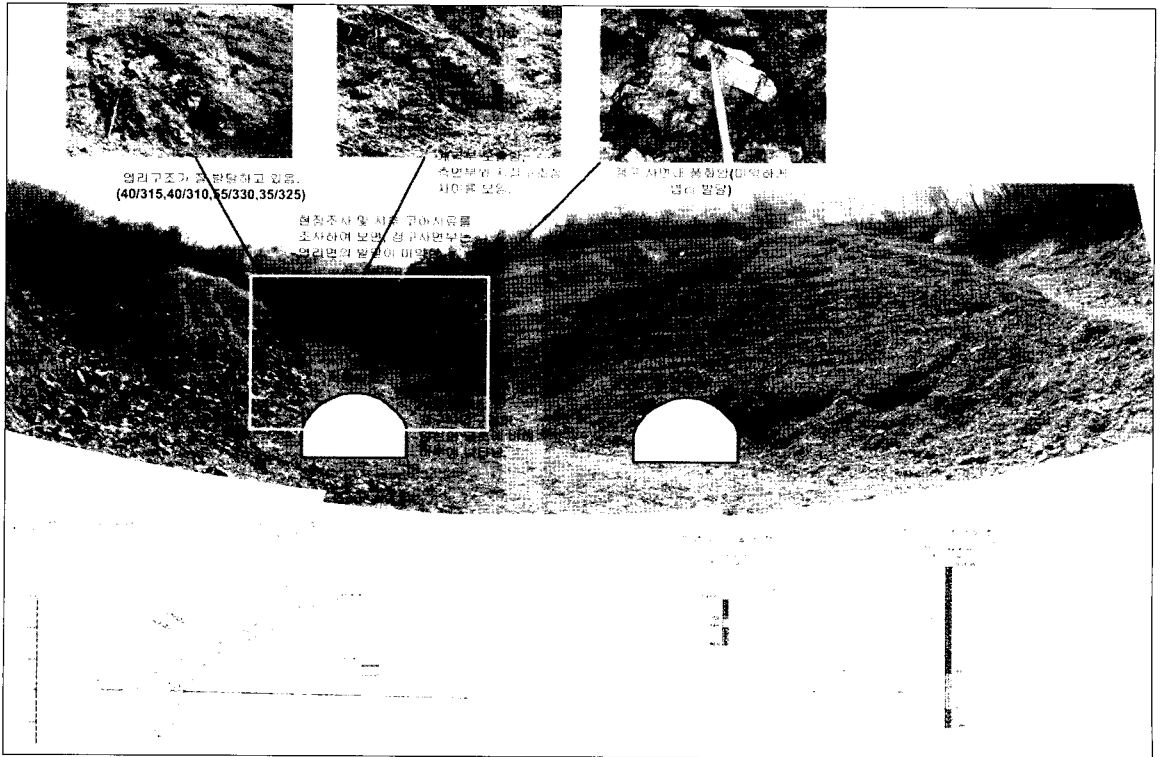
3.2.1 붕괴 현황

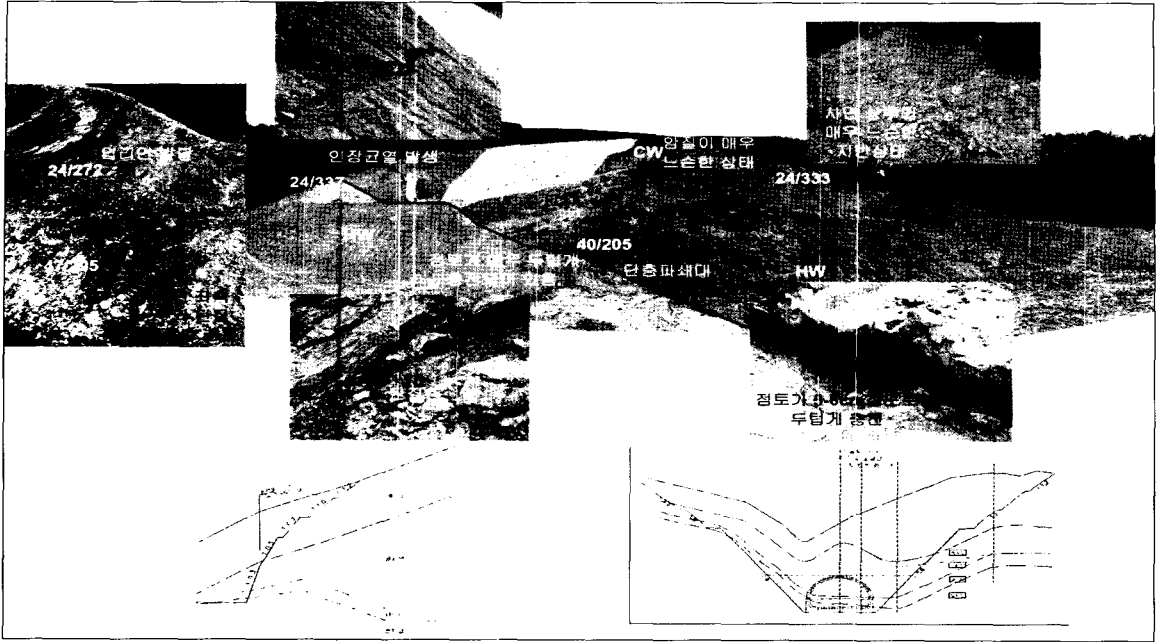
본 지역이 속해 있는 행정구역은 강원도 홍천군 00면으로서, 반대편에서부터 터널이 굴착중이며 붕괴가 발생된 지점에서 터널시공을 위한 공사 준비 중에 붕괴가 발생하였다(그림 12 & 13). 비탈면 굴착 도중 대규모의 단층 파쇄대가 발견되었으며, 파쇄대 내에 점토가 두텁게 충전되어 붕괴가 발생되었을 것으로 판단된다. 또한 비탈면의 상부에는 인장균열이 발생되어 전반적인 안정성에 문제가 있는 것으로 판단된다. 비탈면의 최대 높이는 약 30m 정도이며, 비탈면의 경사는 $40^\circ \sim 63^\circ$ 로서 비탈면 상단부로 갈수록 경사가 완만해진다.

본 검토지역은 풍화암 구간의 풍화정도가 완전풍화(CW)정도로 거의 토사에 가깝게 풍화가 심하게 진행되었다. 굴착이 진행되지 않았기 때문에 정확한 판단은 어려우나 현 노출된 지반의 풍화상태 및 암질로 판단해 볼 때, 측면절토부에 염리가 우세한 편마암이 노출되었으며 터널 입구부가 위치하는 구간에서는 염리구조가 미약하게 발



〈그림 12〉 붕괴발생 지역의 전경사진





(그림 13) 붕괴 발생 지역의 세부사진

달하고 있다. 또한 비탈면 전반부에 큰 규모의 단층 파쇄대가 발달하고 있으며, 파쇄대 내에 점토가 두텁게 충전되어 있어 안정성에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2.2 비탈면안정검토

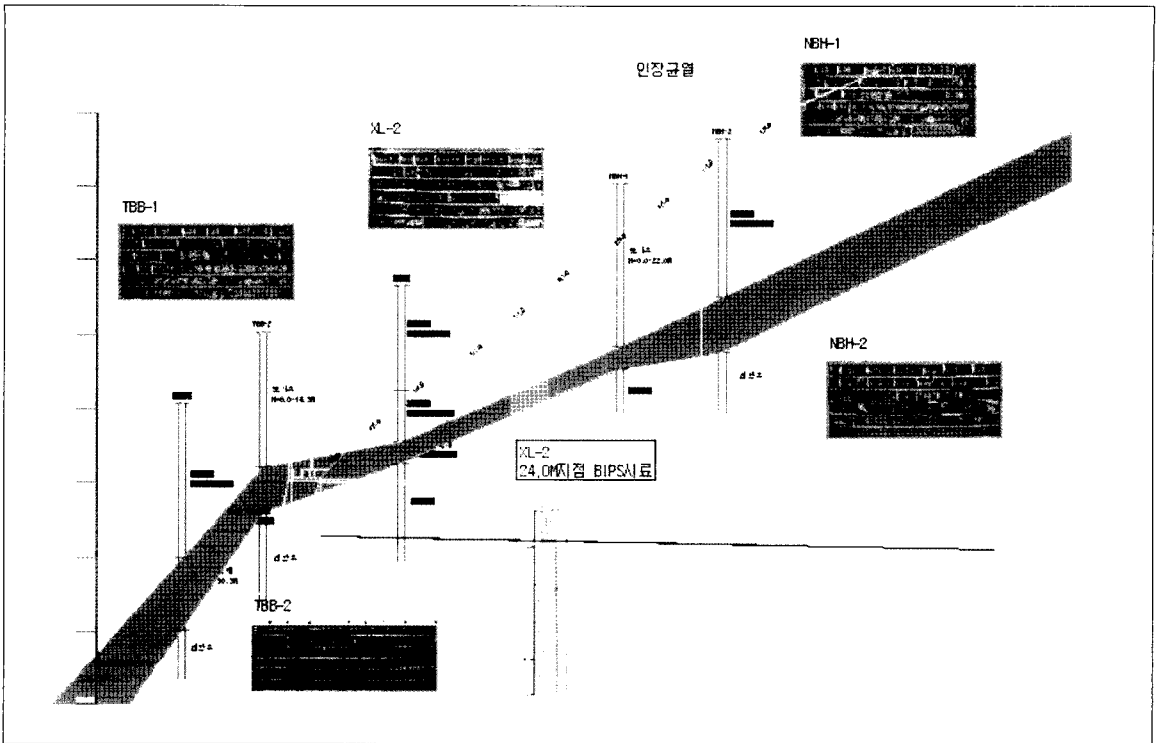
조사지역에 대한 한계평형해석은 파괴가 발생된 구간에서 현장조사결과 추정된 그림 14의 활동면에 대해 특정 파괴면에 의한 안전율 해석을 실시하였으며 당초와는 풍화단면의 차이를 보인다. 해석에 사용된 프로그램은 Terrasol 사에서 개발한 TALREN 97 프로그램을 사용하

였으며, 검토단면은 터널진행방향의 단면을 선정하여 당초 설계시에 적용된 네일공법으로 해석하였다.

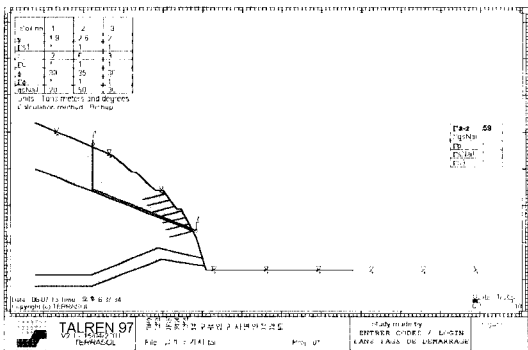
해석에 적용된 강도정수는 기존의 설계보고서의 물성값과 동일한 값을 적용하였으며, 단위중량(γ)은 $1.9(t/m^3)$, 점착력(c)은 $0.2(t/m^2)$, 내부마찰각(ψ)은 30° 로 적용하였다. 안정성해석결과, 건기시 $Fs=1.47$, 우기시 $Fs=0.59$ 로서 불안정한 상태로 해석되었다.

3.2.3 비탈면안정 대책공법

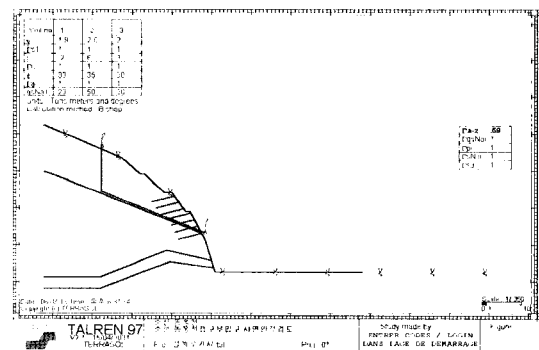
본 비탈면은 원설계에 의한 시공시 최소안전율이 확보



<그림 14> 검토 대상비탈면의 단층파쇄대(활동면) 추정결과



건기시 안정해석 $F_s = 1.47$

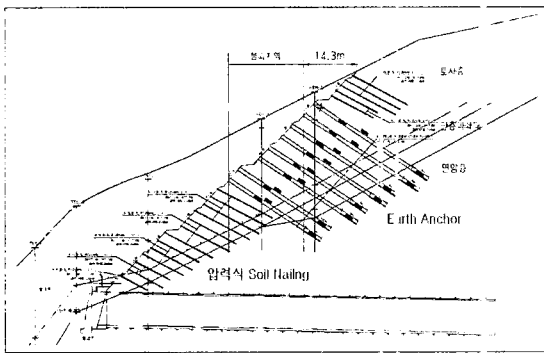


우기시 안정해석 결과 $F_s = 0.59$

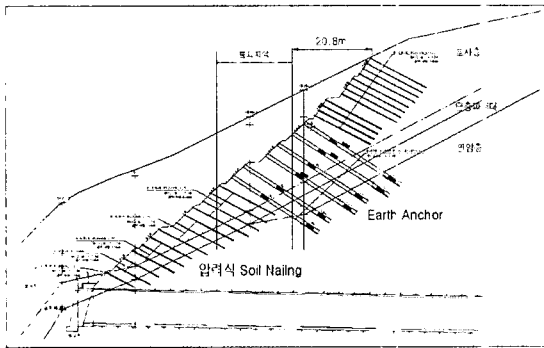
<그림 15> 당초 설계 적용된 네일 공법에 대한 안전을 검토결과



되지 않으므로 안정화 공법이 적용되어야 한다고 판단되며, 현장 여건상 비탈면의 경사를 완화 하였을 경우 비탈면의 절토고가 커지며 환경영향 평가에 문제가 발생할 수 있으므로 경사완화 방안을 배제하고 보강하는 방안을 제안하였다. 비탈면 상단부에 분포할 것으로 예상되는 활동면의 심도가 매우 깊을 것으로 판단하여 앵커공법이 적절할 것으로 판단된다.



제 1 안 : 비탈면경사 완화(1:1.0), 앵커보강 및 네일 보강



제 2 안 : 비탈면경사 완화(1:1.2), 앵커보강 및 네일 보강

〈그림 16〉 보강후의 안전율 계산 결과

4 결론

본 검토지역은 굴착중인 터널갱구비탈면에서 붕괴가 발생된 사례를 살펴보았다. 검토지역은 엽리 및 단층 등의 불연속면이 잘 발달된 편마암 지역으로서, 불연속면의 주향은 남북방향이고 경사는 서쪽방향으로 발달하였다. 이러한 지역에서 고속도로를 건설 중에 다음과 같은 사항을 고려하여 시공해야 한다고 판단된다.

1) 현재 건설 중인 ○○고속도로와 ○○고속도로는 동서방향으로서 불연속면의 주향과 거의 수직을 이루고 있으며, 이로 인하여 서쪽을 향하는 터널갱구비탈면(서울방향)에서 비탈면방향과 유사한 방향의 엽리면이 발달하게 터널 갱구비탈면에서 유사한 형태의 비탈면 붕괴가 다수 발생하였다.

2) 엽리면은 편마암에서 발달하는 단층과 만나 켜기과괴 및 평면과괴를 일으키는 주원인이 되고 있으며 단층대에는 점토층이 두텁게 충전되어 있는 지질적인 특성을 보여 붕괴규모가 대규모 양상을 보인다.

3) 그러므로 이러한 뚜렷한 이방성의 성질을 보이는 지질을 갖는 지역에서는 노선 설계시 불연속면의 방향성을 고려하여 적절한 보강설계를 실시하여야 하며 굴착공사시에 세심한 주의가 요망된다.

참고문헌

- 건설교통부, 서울-춘천간 고속도로 토질조사보고서.
- 한국도로공사, 춘천-동홍천간 고속도로 토질조사보고서.
- 유병욱의 2인(2006), 서울춘천 및 춘천-동홍천간 고속도로 건설공사 절토비탈면 안정검토서, 한국도로공사 도로교통연구원.
- 한국지질자원연구원, 지질조사보고서(홍천 도록).