

연약층이 협재된 절개면의 안정성 해석 및 대책

Slope Stability Analysis and Suggestion of Stabilization Methods on Failed Cut-Slopes Interbedded with Weakness Layer

구 호 본 (Ho-Bon Koo)	한국건설기술연구원 지반연구부
김 학 준 (Hak-Joon Kim)*	대전대학교 공과대학 지구시스템공학과
이 대 영 (Dae-Young Lee)	한국건설기술연구원 지반연구부

요약 / ABSTRACT

본 연구는 국도 건설을 위한 절개면 공사중 붕괴된 사면의 붕괴 원인을 분석하고 안정성 해석을 실시한 후 적절한 대책안을 제시하기 위해 수행되었다. 붕괴 절개면은 매산-가곡간의 국도 도로공사 구간의 일부로서 풍화암과 연암으로 구성되어 있으며 국내 지방서에 따라 시공이 완료된 상태에서 붕괴가 발생하였다. 풍화암과 연암의 지반상태에서 1:1.5의 경사를 가지는 절개면의 붕괴는 국내에서 흔히 발생하는 사례는 아니다.

본 연구에서는 절개면의 붕괴 원인을 분석하기 위하여 현장조사, 시추조사, 계측, 사면안정해석 등을 수행하였으며 이들 자료를 이용하여 조사대상 절개면의 장기적인 안정성 확보를 위한 대책 방안을 제안하였다. 또한, 사면내에 연약층 등이 협재 되어 있고 습곡이나 단층 등이 발달되어 있는 경우에는 불연속면의 방향이 절취면의 방향과 30°이상 사교하고 있더라도 사면 붕괴가 발생할 가능성이 있으므로 절개면의 설계에는 이들 지질구조에 대한 고려가 반드시 포함되어야 한다.

주요어 : 절개면 붕괴, 안정해석, 연약층, 습곡, 지질구조

This study is performed to investigate the cause of slope failure and to suggest suitable stabilization methods for the failed rock slopes. The slope which is located along the national highway between Maesan and Kakok in Dangjin-gun failed during the construction of roads.

Site investigation, drilling program, field measurements, rainfall records, and stability analyses are used to investigate the cause of the slope failure. The problem determining the cut-slope

* Corresponding author: hakkim@dju.ac.kr

angle based on the existing design manual for the construction of roads is reviewed based on the case history given in this paper. If weakness layer and geological structures such as folds and faults are developed in a slope, slope failure is possible even though the direction of slope and the direction of discontinuities depart more than 30° .

Key Words : slope failure, stability analysis, weakness layer, folds, geological structures

서론

조사대상 절개면은 충청남도 당진군에 위치한 매산-가곡 도로공사구간(국도 38호선)에 위치하며 현재는 도로가 개통된 상태이다(Fig. 1). 절개

면의 암석강도는 보통암에 해당하나 부분적으로 분포하는 토사를 고려하여 절취 표준시방서 기준보다 더 완만하게 1:1.5로 절개면이 시공되었음에도 불구하고 절개면 절취가 완료된 상태에서 붕괴가 발생하였다. 절개면 붕괴가 도로 개통 이전

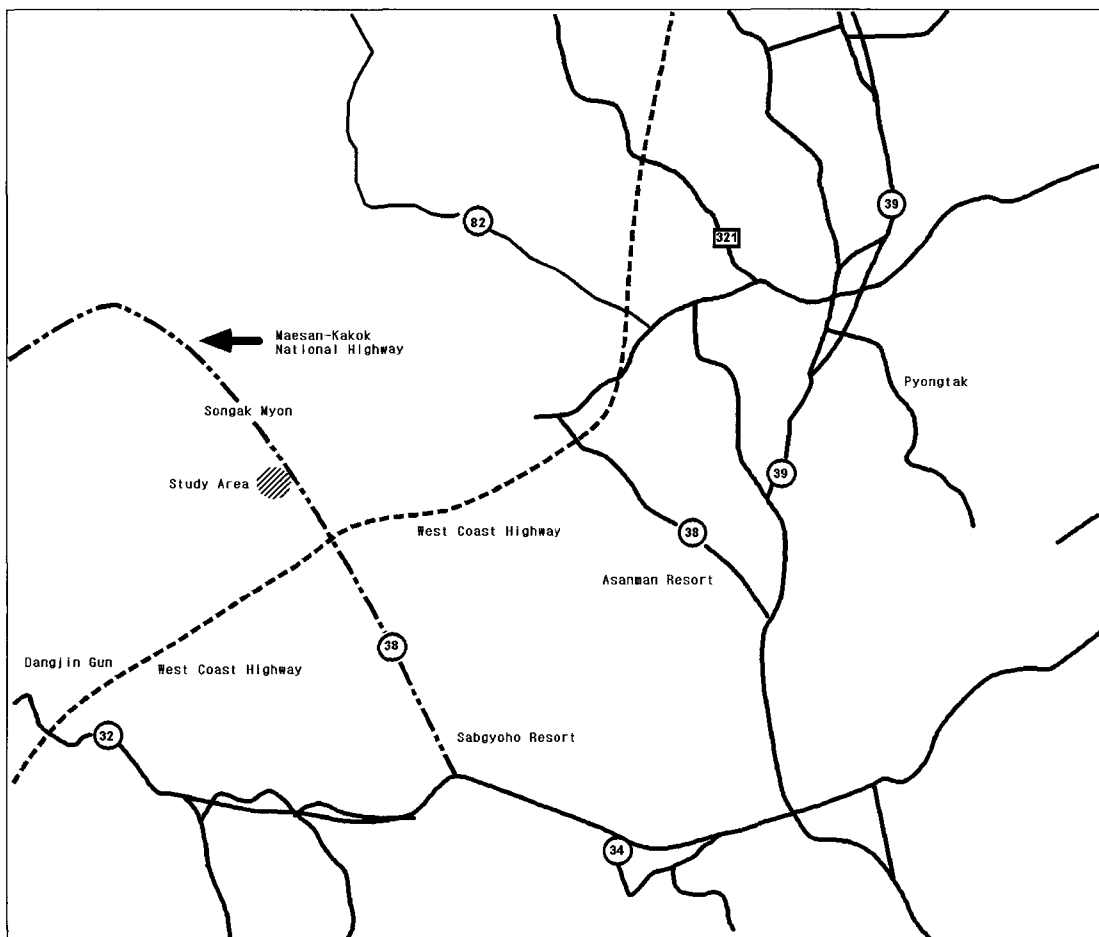


Fig. 1. Location of the study area

연약층이 협재된 절개면의 안정성 해석 및 대책

에 발생하여 피해는 미약하였으나 절개면의 붕괴 원인 분석을 통하여 절개면의 장기적인 안정성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 절개면의 붕괴원인을 분석하기 위하여 현장조사, 시추, 계측, 강우량과 절개면 거동과의 상관관계 조사, 사면안정해석 등을 수행하였으며 이들 자료를 이용하여 조사대상 절개면의 안정성 확보 방안을 제시하였다. 연구 결과는 다른 지역의 도로 공사 시 유사한 지질 조건에서의 절개면 안정성 평가에 도움을 줄 것으로 기대된다.

현황

지형 및 지질

조사대상 절개면 주변의 지형은 한반도 서해안에서 쉽게 볼 수 있는 노년기의 표고 30~50m의 독립된 구릉성 산지가 발달하고 있으며, 조사대상 붕괴 절개면은 표고 약 50m의 독립된 산지를 이루고 있다.

조사대상 절개면 일대의 지질은 선캠브리아기의 변성암류와 중생대의 화성암류로 구성되어 있으며, 이 모두를 제 4기 충적층이 부정합으로 피

복하고 있다. 선캠브리아기의 변성암류는 크게 서산층군과 경기편마암 복합체로 구분되며, 중생대의 화성암류 역시 관입시기와 성분에 따라 다양하게 분류될 수 있다. Table 1은 이 지역에 분포하는 암석들에 대한 지질계통표이다.

조사대상 절개면은 선캠브리아기의 서산층군에 해당하는 암석들로 구성되어 있으며, 절개면의 좌측부(절개면을 바라보면서)에서 중앙부에 이르는 구간에는 흑연편암층(graphite schist)과 규암, 석회 규산염암 및 결정질 석회암층이 교호하면서 나타난다(Fig. 2). 편암층의 경우는 1~3m의 층후를 갖고 있으며 하부에 놓이는 결정질 암석과 점이적인 관계를 가지며 상부의 결정질 암석과 침식경계를 갖고 있다. 또한 이 층은 상향 세립의 층서를 보여주고 있어 이들 암석이 퇴적기원임을 보여주고 있다. 절개면 우측부의 절토공사가 일부 진행된 지역은 호상 편마암으로 구성되어 있으며 암반상태가 좌측부에 비해 상대적으로 양호한 특성을 보이고 있다(Fig. 3).

이 지역에 나타나는 암석들의 층서를 고려해 볼 때, 절개면 우측부에 나타나는 호상 편마암층은 좌측부에 나타나는 흑연편암과 결정질 암석의 호층대보다 층서적으로 하부에 위치하고 있어 당

Table 1. Stratigraphic division of the study area

	Quaternary	Alluvium ~ ~ Unconformity ~ ~ ~
Mesozoic	Cretaceous	Dykes Coarse Granite - - - - Intrusion - - - -
	Jurassic	Biotite Granite Foliated Granite - - - - Intrusion - - - -
Precambrian	Gyonggi Gneiss Complex	Onyang Gneiss - - - - Unknown - - - - Porphyroblast Gneiss
	Seosan Group	Dangjin Gneiss Songok Gneiss

: Study Area

진 편마암층의 일부로 보기보다 송옥편암층 내에 협재하는 편마암층의 일부로 보는 것이 타당한 것으로 사료된다.



Fig. 2. Graphite schist(C.W.) and limestone(M.W.) exposed in the left side of the slope



Fig. 3. Moderately weathered banded gneiss(Right side of the slope)

절개면 좌측부를 구성하는 암석들은 대부분 심하게 풍화를 받아 절개면 상에는 노두로 거의 관찰되지 않으며, 휴게소 부지 절토 지역 하부에서만 원암이 그대로 보존되어 분포하고 있다. 이들 가운데 특히 폭 1~3m 정도의 두께를 갖고 협재하고 있는 흑연 편암층의 경우, 암석조직과 구조는 보존되어 있으나 후기 풍화작용에 의해 거의 점토광물화 되어 있다.

지 질 구조

조사대상 절개면을 구성하는 암석들은 엽리, 단

층, 습곡 등의 다양한 지질작용의 영향을 받은 것으로 관찰된다. 조사대상 절개면을 구성하는 암석 가운데 편암층과 편마암층은 엽리구조가 잘 발달되어 있다. 절개면 좌측부 휴게소 예정부지 절토 공사가 시공중인 지역의 편암층의 엽리구조의 방향을 살펴보면 Fig. 4와 같이 N44~58W/30~50NE가 우세하게 나타나며(site 3, Fig. 5), 국부적으로 N80W/80NE 방향(site 1)도 관찰된다. 이에 반해 절개면 우측부에 분포하는 호상 편마암의 엽리구조는 N40E/40SE의 방향성을 갖고 있으며, 절개면의 중앙부는 편암내 엽리면의 방향이 N10~20E/22~26SE로 나타난다. 절개면 주변 엽리면의 방향이 매우 심하게 변화하는 것은 후기 변성작용 동안에 형성된 습곡구조에 의한 것으로 사료된다.

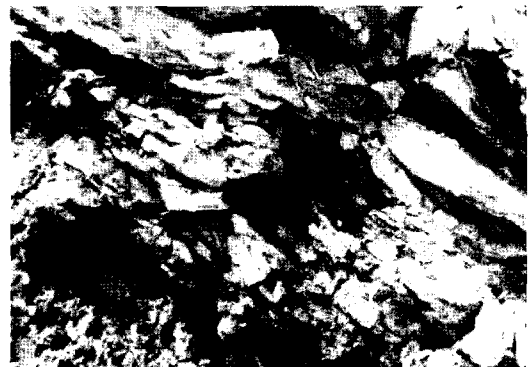


Fig. 4. Foliation developed in graphite schist near site 3 of fig.5 (Attitude of the foliation: N44~58W/30~50NE)

조사대상 지역은 적어도 2회 이상의 습곡작용이 발생된 것으로 인지된다. 첫 번째 습곡작용은 편암-결정질암의 호층대에서 관찰되는 층간 습곡구조(intrafolial fold)이다. 층간 습곡구조는 동일한 응력상태에서 각 암석의 성분, 입자 크기 등의 특성에 따라 상이한 변형거동을 하는 것에 기인한다. 따라서 이들은 상대적으로 연성변형작용(ductile deformation)을 일으키는 편암층이 우세한 지역에 국부적으로 나타나고 있으며 조립질의 규암이나 석회규산염암이 우세한 지역으로 전파가 안되는 특성을 보여주고 있다. 앞서 언급한 엽리구조의 방향성은 층간습곡구조에 의해 국부

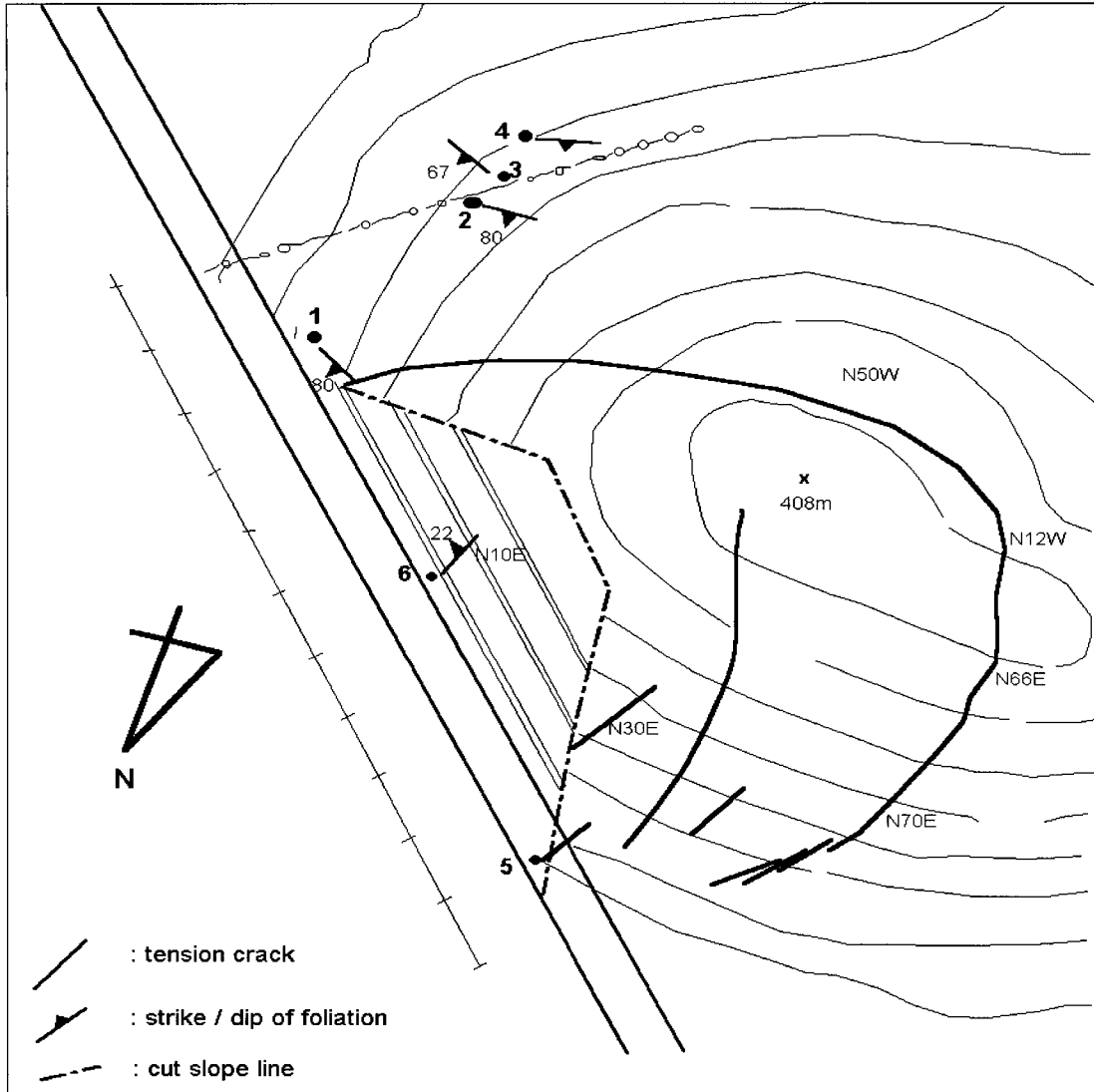


Fig. 5. Structural geology map of the study area (Total slope length along the road 190m; 1, 2, 3 Site Investigation No.)

적으로 교란된 형태를 띠고 있는데 site 1 지점 (Fig. 5)에서 나타나는 엽리면의 방향성이 주변 지역과 다른 것은 이러한 이유에 의한 것으로 사료된다.

이러한 습곡구조는 비대칭적인 형태를 띠고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 습곡작용 당시 전단 운동의 방향을 지시해 주는 역할을 한다. 이 지역에서는 야외조사결과, 습곡구조의 형태상 상부가

동남쪽으로 움직인 전단흔적(shear sense)을 보여주고 있다.

두 번째 습곡구조는 조사대상 절개면을 구성하는 지층전체를 완만하게 습곡시키는 완사습곡구조(open fold)이다. 조사대상 절개면에서 관찰되는 엽리구조의 형태를 살펴보면 절개면 좌측부는 북서-남동 방향의 주향이 우세하며, 중앙부는 남-북 혹은 남남동-북북서 방향이, 우측부는 북동-

남서 방향의 주향이 우세한 것을 알 수 있다. 따라서 이들 지역은 엽리면의 주향을 완만하게 변화시키는 대규모의 향사구조가 발달하고 있음을 유추할 수 있다. 습곡구조의 습곡축은 site 1 과 site 5의 엽리면의 방향성을 기준으로 할 때 077/26의 습곡축을 갖는 것으로 나타났다.

조사대상 절개면에서는 편암층과 결정질 암층의 경계를 따른 엽리면과 평행한 방향의 전단운동이 발생한 흔적을 인지할 수 있었다. 즉, 붕괴 절개면 중심부에 대규모 파쇄대(폭 약 10m)가 발달하고 있고 이들 파쇄대를 중심으로 양방향으로 점이적이고 부분적인 파쇄대의 영향을 받은 흔적이 관찰되었다. 특히 절개면의 좌측부에 분포하는 흑연층의 경우 암석자체의 연약성과 함께 파쇄대의 영향을 받아 강도 및 풍화측면에서 매우 연약한 지반상태를 보이고 있다.

시 공 현 황

본 붕괴 절개면은 충청남도 당진군에 위치한 매산-가곡 도로공사구간에 위치하고 있다. 시공이 완료된 붕괴 절개면의 규모는 수평방향으로 총 연장 190m, 높이 약 35m, 절개면 경사 1:1.5로 약 34°의 경사도를 가지며, 절개면 정점 35m를 기준으로 절개면 반대편 자연사면은 약 20°의 하향 경사를 가진다(Fig. 6).

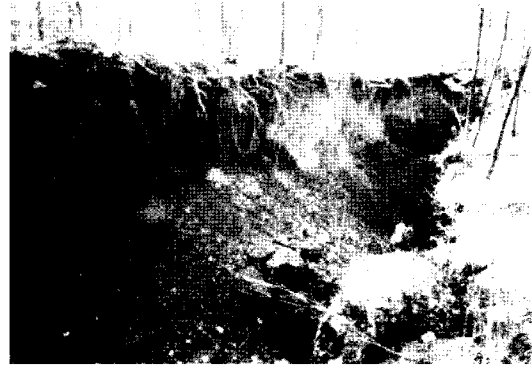


Fig. 7. Crown of the Failed Slope

붕 괴 현 황

본 절개면은 1998년 4월에 절취공사가 일부 완료된 상태(경사도 1:1.5)에서, 1999년 1월 24일에 절개면 정상부에서 후방 자연사면 쪽으로 약 7~9m 떨어진 지점에서 최대변위량 3m의 침하와 아울러 균열폭 최대 8~10m, 연장 280m의 인장균열이 발생하였다(Fig. 7). 인장균열 발달은 절개면을 중심으로 대칭을 이루지 않고 좌측은 절개면의 저부까지 연장되어 있는 반면, 우측은 절개면 상부에 국한되어 있다(Fig. 8). 또한 절개면 좌측부 하단(toe)에 지반용기(heaving)가 발생하였고, 붕괴 후 지반변위는 절개면 좌측에 국한되어 지속적으로 발생하는 경향을 나타내었다.

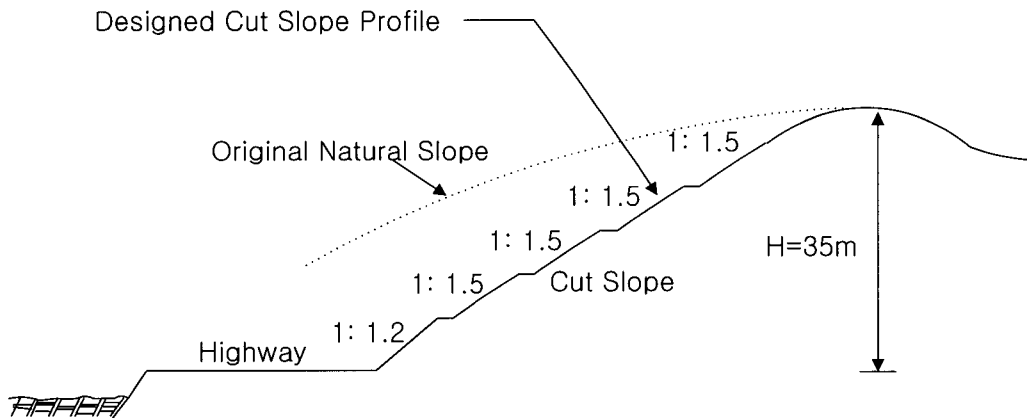


Fig. 6. Profile of the cut-slope

연약층이 협재된 절개면의 안정성 해석 및 대책

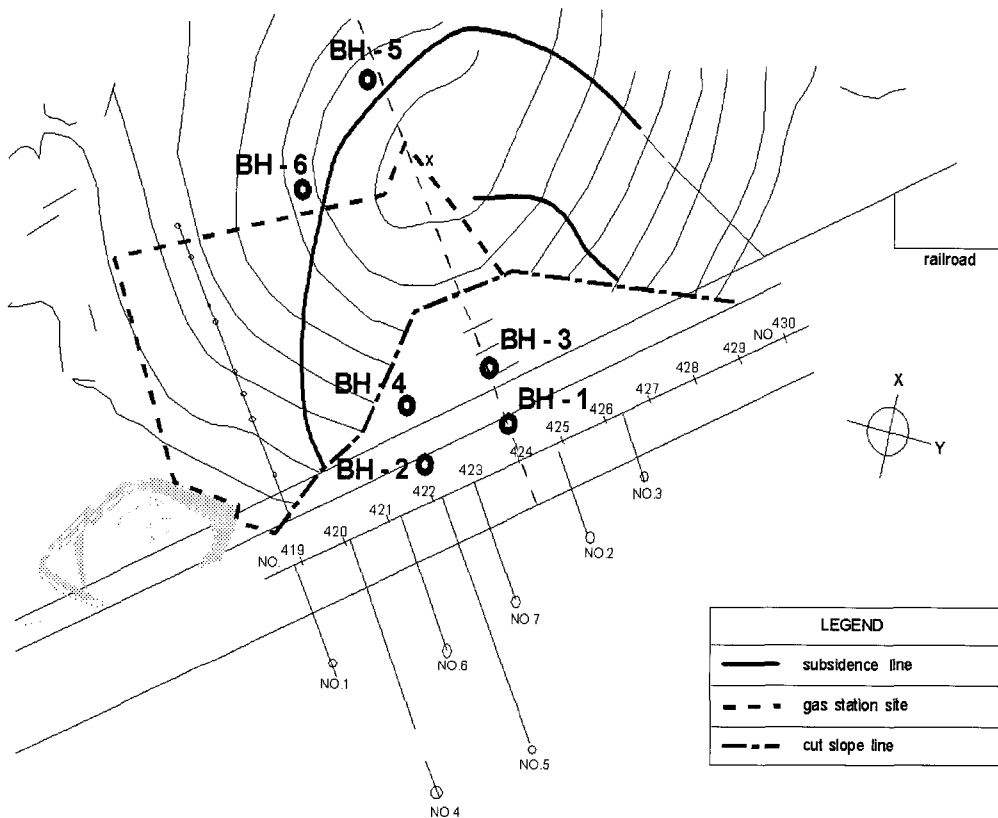


Fig. 8. Situation map of the failed cut-slopes and boring locations

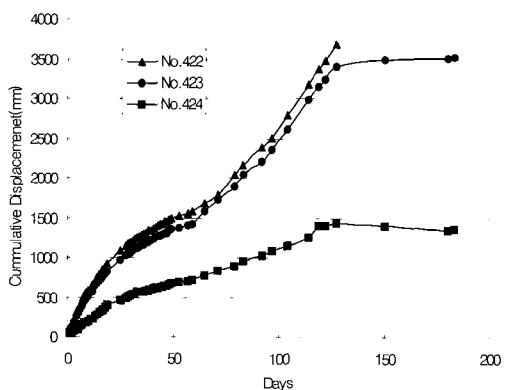


Fig. 9. Cumulative displacements with time

현장 조사

지반변위 계측

본 조사대상 붕괴절개면을 중심으로 지반 침하량과 변위를 정량적으로 파악하기 위해 Fig. 8과 같이 도로중심선을 따라 12지점(No.419 - No. 430)에 지표침하점을 설치하여 매 24시간마다 계측을 지속적으로 실시하였다.

계측결과 변위량이 크게 발생한 지점은 세 지점(No. 422~424)으로 누적 변위량은 Fig. 9와 같다. 지반 변위량은 붕괴 발생일로부터 지속적으로 발생하였고, 일일평균 변위량 30mm, 일일최

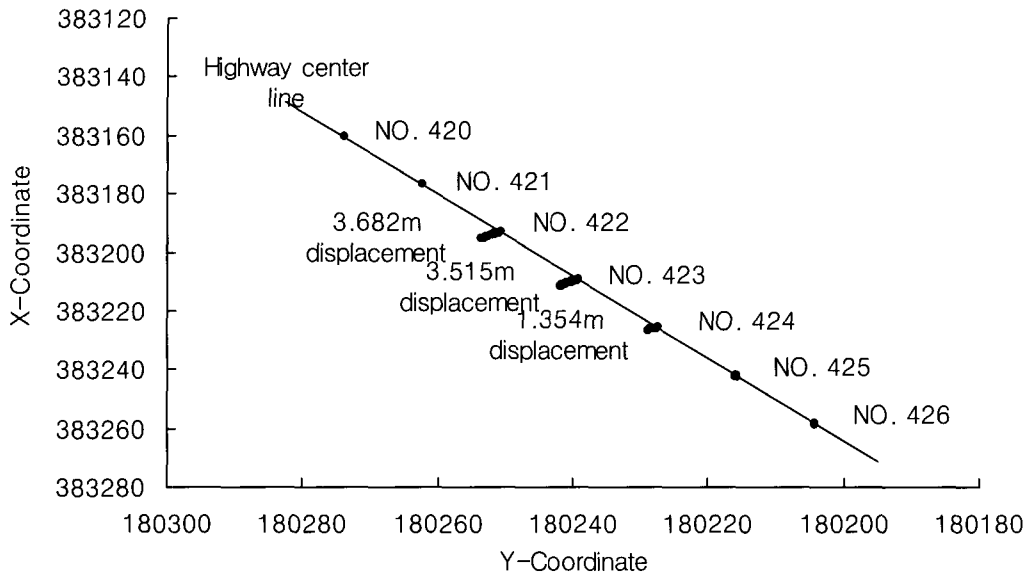


Fig. 10. Cumulative displacements in horizontal and vertical directions along the center line of roads(1999. 7. 29)

대 변위량 80mm가 발생하였으며, 붕괴직후 최초 측정일(99. 1. 26일)로부터 180일 경과 후 최대 누적변위량은 3,682mm이다.

계측시점에서 20일 경과시점(99. 2. 15)부터 변위가 조금씩 수렴하는 경향을 보이다가 65일 경과시점부터 변위가 크게 발생하였으며 최초 측정일로부터 127일 경과 후인 99. 6. 3일 최대 변위를 보이다가 점차로 수렴하는 경향을 볼 수 있다. No.422

지점의 경우는 6월 3일 계측 후 공사차량에 의해 계측점이 파손되어 추가적인 계측이 불가능하게 되었다. No.423, No.424 지점의 지반변위는 125일 경과 후부터 수렴하는 경향을 보이고 있다.

또한 Fig. 10에서와 같이 도로중심선상의 측정 이동 방향은 도로축과 지표변위 방향이 이루는 사이각이 약 60°사교하는 방향(절개사면 경사방향과는 약 30°사교하는 방향)으로 진행하였고 붕괴절개면 좌측 하단부에 용기현상 등이 발생하였다.

시추조사 및 경사계 계측

본 연구에서는 붕괴절개면의 지반상태 파악, 시료채취, 지하수 상태 조사, 수평변위 측정용 경사계 설치 목적으로 6개 지점(BH-1~BH-6)에 대하여 시추조사를 실시하였다. 시추지점으로 선정된 6개의 지점은 Fig. 3과 같이 지반 변위 발생량이 가장 크고 파쇄대가 존재하는 지점인 No. 422 지점과 No. 424 지점을 기준으로 절개면 방향으로 도로의 중심선에 2개소(심도 20m), 절개면 선단부위에 2개소(심도 30m), 절개면 정상부위 균열발생 지점 후방 5m에 2개소(심도 50m)를 시추하였다.

또한 시추작업과 병행하여 토층의 상대밀도와 구성성분을 파악하기 위한 연속표준관입시험을 실시하였다. 시추작업을 통한 6개 지점의 지층 단면도는 Fig. 11과 같다. BH-5와 BH-6의 풍화암 구간에서는 기반암인 편마암층의 절리와 파쇄대면을 따라 점토 및 흑연 등의 충전물이 협재되어 있는 것이 관찰되었다.

연약층이 협재된 절개면의 안정성 해석 및 대책

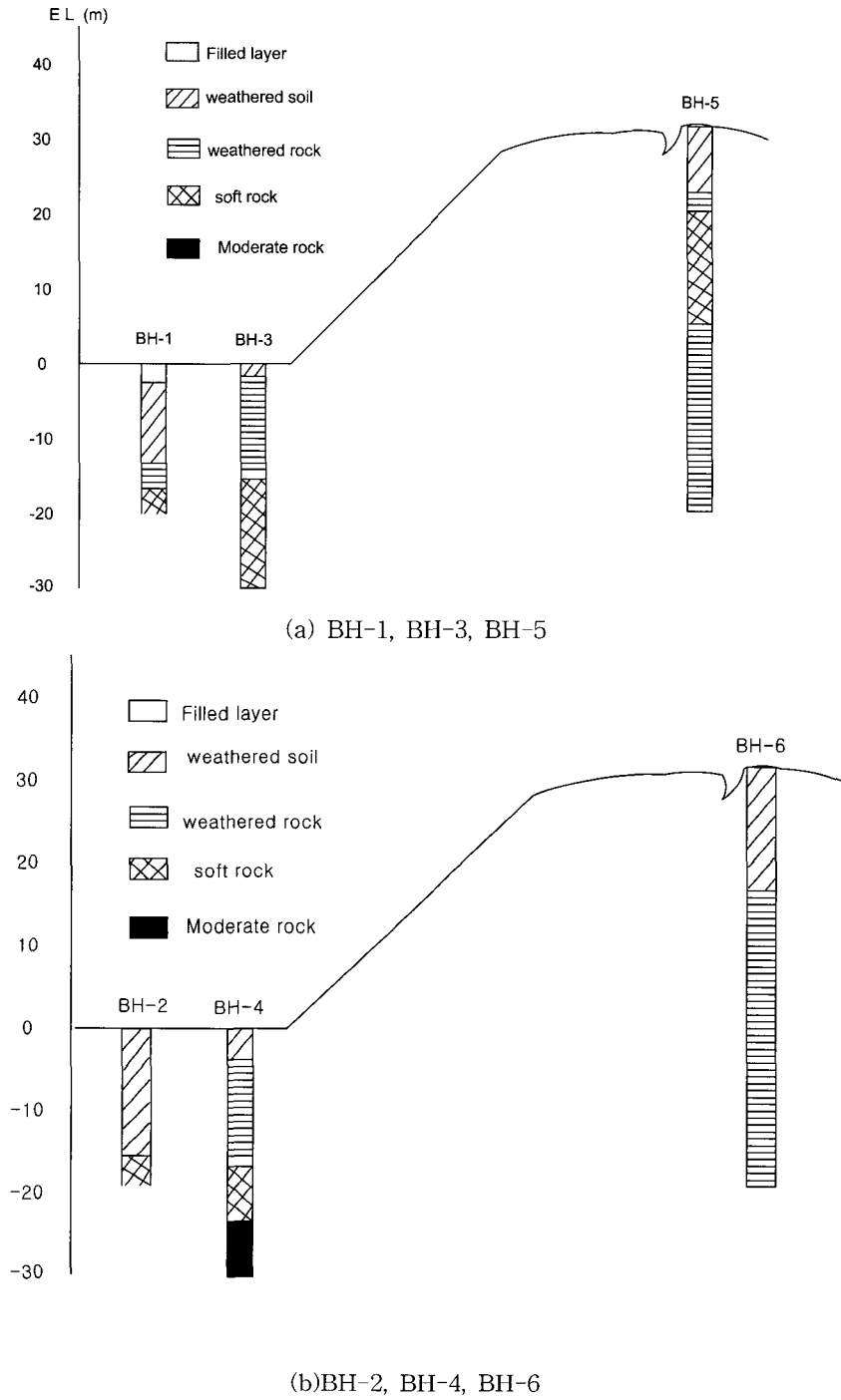


Fig. 11. Cross section of the study area from borehole investigations

시추조사 후 붕괴절개면 지반의 수평변위량과 변위 진행상황을 파악하기 위하여 경사계를 설치하여 계측을 수행하였다. 경사계 설치심도는 BH-1, BH-2 지점의 경우 20m, BH-3, BH-4 지점은 30m, BH-5, BH-6은 50m이다.

경사계 케이싱 설치 후 지반의 경사계 초기치를 측정하였으며, 6개의 계측지점 중 BH-2의 경우 경사계 설치 후 일주일만에 지표로부터 10m 지점에서 경사계 관입이 불가능하였으며, 이 지점에서 지반의 변형에 의해 케이싱이 파손된 것으로 추정된다. 또한 8월 16일 계측시 BH-5지점의 경사계가 지반변형에 의해 파손되었다. 이는 붕괴절개면 하부의 지속적인 절취 및 지지력 상실에 의하여, 파괴면이 활동진행방향과 반대로 확대(Retrogressive landslide)되어 발생하는 지반 변형에 의한 것으로 추정된다. 실제로 계측지점의 상부사면 쪽에 폭 10~20cm, 길이 5~7m의 인장균열이 관찰되었다. 따라서, 본 연구에서는 BH-2지점 과 BH-5지점을 제외한 4개소에 대해 지속적인 계측을 실시하였다.

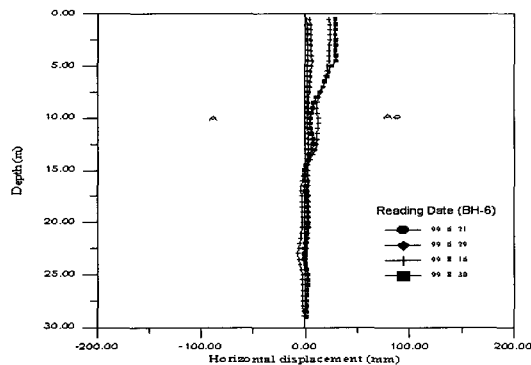


Fig. 12. Horizontal displacements with depths obtained from slope indicators. (BH-6)

99년 6월 14일 초기값을 측정후 8월 30일까지의 계측결과를 관찰한 결과 BH-1, BH-3, BH-4, BH-6의 경우 8월 16일 측정시 변위가 크게 발생하는 것을 알 수 있고 BH-6의 경우 Fig. 12와 같이 지표로부터 약 4~5m 깊이에서 45mm의 변위가 발생하는 것을 알 수 있는데, 이

는 99. 8. 1~3일에 걸친 집중강우(440mm)에 의한 영향으로 판단된다. 경사계 계측결과를 종합하면, 변위량은 8월 14일경에 최대값을 나타낸 후 서서히 변위량이 줄어들어 수렴하는 경향을 보인다. 이러한 결과는 도로중심선에서의 지반변위 계측치 자료와 일치하며, 미미한 변위량은 절개면 자체의 붕괴에 의한 것이라기보다 절개면 대책방안인 절취 진행과정에 의한 것으로 추정되며 추가적인 붕괴 가능성은 희박한 것으로 판단된다.

실 내 시 험

정상부 활동면 시점과 절개면 선단, 절개면 좌측 하단 붕괴부위에서 직경 65mm의 틴월샘플러(thin wall sampler)를 이용하여 실내시험용 시료를 채취하였다. 또한 샘플러에 의한 시료채취 외에 15kg 정도의 흙을 입도분포와 함수비 측정을 위해 채취하여 밀봉을 한 후 보관 운반하였다. 조사대상 지역 흙의 공학적 분류를 수행하기 위하여 체분석, 아터버그 한계시험을 실시하였다. 본 현장에서 채취한 시료와 같이 점토함유량이 높으나 수분에 의해 입자들이 뭉쳐있는 경우 일반적인 체분석 방법을 실시할 경우 점토함유량을 정확히 측정하기 어렵다. 그러므로 본 시험에서는 ASTM/AASHTO에서 제안한 방법을 이용하여 시료를 물에 24시간 담가놓은 후 물로 씻으면서 체분석을 실시하였다. 물에 담가놓은 4개의 현장 시료를 물로 씻어 200번체에 남은 시료는 항온건조로에서 100도의 온도로 24시간 건조시킨 후 체분석을 실시하였고 200번체 통과시료는 비중계분석을 실시하였다. 조사지역의 입도분포곡선은 Fig. 13과 같다. 아터버그한계시험 결과 조사지역 풍화토의 액성한계와 소성한계는 각각 40~46%, 26~29%로 나타났다.

체분석과 아터버그한계시험 결과를 토대로 통일분류법을 실시한 결과, 본 조사지역의 흙은 소성도(plasticity)가 낮은 점토(CL) 내지는 실트(ML)로 분류되었다. 본 조사지역 풍화토의 액성한계와 소성지수를 Mitchell(1976)이 제안한 Casagrande의 액성한계-소성지수 그림에 투영하면 점토광물중 일라이트와 카올리나이트가 우세

연약층이 협재된 절개면의 안정성 해석 및 대책

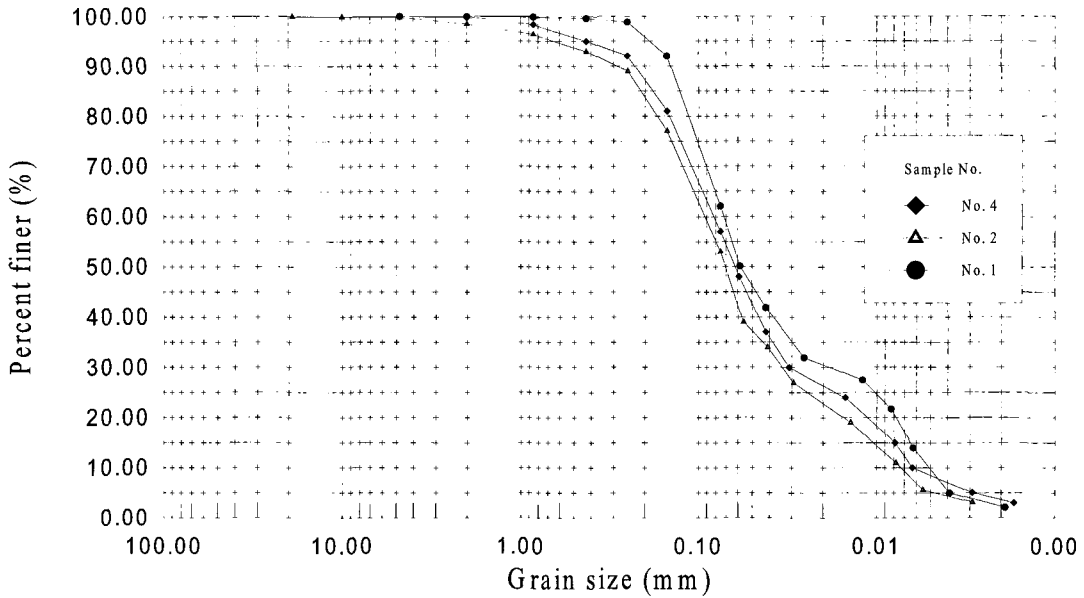


Fig. 13. Grain size distributions of the collected samples

Table 2. Shear strength from direct shear tests

	No. 1 (Samples from crown area)	No. 2 (Samples from fracture zone)
Cohesion(c)	0.2kg/cm ²	0.16kg/cm ²
Friction angle(θ)	24°	17°

하게 나타난다. 또한 붕괴절개면 흙의 활성도(activity)는 0.1에서 0.3정도로 낮으며 카올리나이트가 우세한 것으로 나타나므로 공학적으로는 안정한 것으로 판단된다.

본 조사대상 지반의 강도정수를 구하기 위하여 절개면 정상부위에서 채취한 시료(No. 1)와 파쇄대 부근에서 채취한 시료(No. 2)를 사용하여 직접전단시험을 수행하였다. 시험실시 시료수는 각 지점별로 교란정도가 가장 양호한 시료중 지점별로 각 3개씩의 시료를 사용하여 실험을 수행하였다. 시험은 현장의 예상 응력범위를 고려하여 0.4kg/cm², 0.8kg/cm², 1.2kg/cm²의 3단계 수직

응력을 적용하였으며 시험결과는 Table 2와 같다. 실험결과, 파쇄대가 위치한 지역의 토층이 절개면의 다른 토층에 비해 상대적으로 약한 강도를 보이고 있음을 알 수 있다.

파괴가 발생한 사면에 대한 보강공사 후 추가적인 사면 붕괴의 가능성을 검토하기 위해서는 지반의 잔류강도(residual strength)를 이용하여야 하는데 직접 전단시험을 통해 구한 지반의 잔류강도정수는 $c = 0.12\text{kg/m}^2$, $\theta = 12^\circ$ 로 결정되었다.

절개면 붕괴원인

붕괴절개면 최상부 붕괴 두부의 인장균열의 경우 절개면 좌측부에서는 절개면 하부까지 연장되어 있고, 하부에 융기현상이 발생하였으며, 우측부(right flank)의 경우 인장균열이 절개면 하부까지 연장되지 못하고 상부에 국한되고 있는 등 도로를 중심으로 비대칭적인 붕괴현상을 보이고 있다. 즉, 절개면 시공에 따른 붕괴의 경우 지반상태가 균질하다면 절개면 방향과 수직방향으로 붕괴가 대칭적으로 진행되는 것이 일반적이거나 본 조사대상 붕괴절개면은 도로측과 지표변위 방향이 이루는 사이각이 약 60°사교하는 방향(절개사면 경사방향과는 약 30°사교하는 방향)으로 절개면의 우측에서 좌측으로 붕괴가 발생하였다(그림 10). 이러한 특성을 고려할 때 본 절개면의 붕괴는 암반에 존재하는 불연속면의 영향을 받았음을 암시해 준다. 또한 본 절개면의 경우 옆리면의 주향을 완만히 변화시키는 대규모의 향사구조가 발달되어 있고 이 습곡구조의 습곡축은 077/26으로 조사되었다.

지표 지질 조사 결과, 절개면 안정성에 치명적인 영향을 끼칠 수 있는 흑연편암층이 절개면에 협재되어 있는 것이 관찰되었으며 일부 흑연편암층이 지반의 활동에 의해 경면화(slickensided)된 것이 붕괴 두부의 인장균열 틈내에서 발견되었다. Brekke와 Howard(1973)에 의하면 흑연층은 전단강도가 매우 낮으며 특히 수분을 함유할 경우 전단강도가 상당히 저하되는 것으로 보고되어 있

는데 본 연구지역의 흑연 편암층은 파쇄대와 풍화작용에 의해 강도가 현저히 저하된 상태이다. 또한 절개면 좌측부에는 파쇄대(폭 10m, 높이 15m)의 발달과 풍화작용에 의해 모암이 심하게 풍화(C.W.-H.W.)되었으며 상대적으로 잔류 토층의 심도가 15~20m로 매우 깊은 상태이다. 사면의 붕괴방향은 080방향으로 본 절개면에 발달되어 있는 대규모 향사구조의 습곡축(077/26)과 거의 일치하고 있다.

결론적으로, 조사대상 지역은 흑연 편암층이 사면안정에 불리한 방향으로 협재되어 있고 절개면 좌측부에 풍화작용과 파쇄대의 영향으로 전단강도가 현저히 저하된 상태에서 도로 건설에 의한 지반의 저항력 감소로 습곡축과 동일한 방향으로 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

안정성 해석 및 대책

붕괴 절개면의 안정성 검토결과 대책공법은 억지말뚝과 앵커에 의한 사면보강 공법과 절토공법이 있으나, 본 절개면의 경우 좌측부에 휴게소 부지 조성을 위한 사면절토가 이미 예정되어 있고 주변지역의 도로공사에 필요한 토사를 제공할 수 있다는 장점이 있어 절개면의 절토를 주요 대책공법으로 채택하였다.

붕괴절개면의 안정 경사도를 결정하기 위해 한계평형해석법에 의한 사면안정해석용 전산 프로그램인 PC-STABL5 M을 이용하였다. 이미 붕

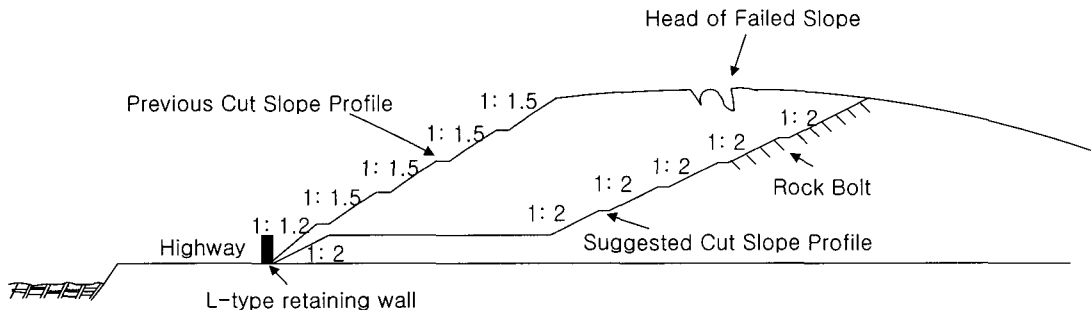


Fig. 14. Remedial measures of the failed slope

괴 절개면의 경우 파괴면을 따라 지반의 강도가 현저히 감소되어 잔류강도 상태에 있을 것이므로 파괴면 깊이까지 절취를 하는 것이 절개면 안정성 및 토사확보에 유리할 것으로 판단되었다. 직접전단시험을 통해 도출한 강도정수를 이용한 사면의 안정성 해석을 수행한 결과 우기시에도 사면의 안정성을 충분히 확보할 수 있도록 Fig. 14와 같이 붕괴 절개면 절취 대책안을 제안하였다. 즉, 높이 5m의 제 1소단을 두고 붕괴면까지 절취한 후 절개면 경사를 1:2로 시공하고, 절개면 상부 제 5, 6소단 상부에 2×2의 록볼트를 간격 2m, 심도 6m로 보강을 하였는데, 도로가 개통된 현지점에서 사면이 안정화되어 있음이 확인되었다.

토 의

조사대상 절개면의 암석강도는 보통암에 해당하나 부분적으로 분포하는 토사를 고려하여 절취 표준시방서 기준보다 더 완만하게 1:1.5로 절개면이 시공되었음에도 불구하고 절개면 절취가 완료된 상태에서 붕괴가 발생하였다. 국내의 경우 도로절개면은 사전 지반조사에 의한 주변 지반의 물성 파악, 설계, 시공 등의 순서로 이루어지며 절개면의 설계는 주로 절개면 구성물질의 강도에 따라 표준구배를 결정하고 있다. 암반강도에 의한 절개면 경사각 설계는 절개면 구성재료의 균질성에 근간을 둔 것이나 실제 현장에서 절개면을 구성하는 암반은 비교적 짧은 거리에서도 지질구조적 영향으로 강도의 변화가 클 수 있다.

국내의 경우 최근에서야 건설교통부(2000)의 도로설계편람에 불연속면을 고려한 설계가 포함되었다. 즉 불연속면으로 인한 사면의 불안정 요인이 뚜렷할 경우에는 우세한 불연속면의 경사도를 기준으로 비탈면의 경사면을 결정하는 것이 표준경사 보다 우선한다는 조항이 추가되었다. 그러나 국내에서는 절취가 완료된 암반사면에 대한 안정성해석의 경우에는 불연속면의 방향과 강도를 고려한 안정해석이 이루어지고 있으나 사면의 경사도를 결정하는 설계단계에 있어서는 이에 대한 고려가 아직도 미흡한 실정이다.

Hoek & Bray(1981)는 평면파괴 발생조건을

불연속면주향과 사면주향의 차이가 $\pm 20^\circ$ 이내일 경우라고 제시하였다. 황영철 등(1999)은 고속도로의 절토사면 붕괴사례연구로부터 평면파괴 발생조건을 불연속면주향과 사면주향의 차이가 $\pm 25^\circ$ 까지 확대할 것을 제안하였다. 본 연구사면의 경우 사면주향과 사면붕괴방향이 약 30° 사교하고 있고 사면붕괴방향이 습곡축방향과 일치하고 있어, 불연속면의 방향이 절취면의 방향과 30° 이상 사교하고 있더라도 습곡이나 단층 등에 의하여 사면 붕괴가 발생할 가능성이 있음을 보여 준다. 따라서 본 조사지역에서 발생한 사면붕괴가 향후에 반복 되지 않기 위해서는 절개면의 절취 경사도 결정시 암석의 강도 이외에도 파쇄대, 불연속면, 습곡, 단층 등과 같은 지질구조를 반드시 고려해야 한다. 특히 흑연층이나 점토층과 같은 연약층이 암반내에 협재되어 있는 경우에는 이들의 강도와 경사각을 고려하여 암반 비탈면의 경사나 보강대책을 결정해야 한다. 이를 위해서는 사면 설계단계에서의 지반조사나 지표지질조사를 철저히 수행하여야 하며 사면의 절취공사중 예상하지 못했던 지질구조가 발견되는 경우에는 이를 고려하여 사면의 경사나 적절한 보강대책을 결정해야 할 것이다.

결 론

조사대상 절개면의 암석강도는 보통암에 해당하나 부분적으로 분포하는 토사를 고려하여 1:1.5로 절개면이 시공되었음에도 불구하고 절개면 절취가 완료된 상태에서 붕괴가 발생하였다. 본 연구에서는 붕괴절개면의 정밀현장조사, 실내실험, 지반변위 계측 및 안정성 해석 등을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 붕괴절개면의 경우 지형특성상 우측절개면이 상대적으로 높고, 좌측절개면이 낮은 지형특성을 보이고 있다. 이는 지질구조상 절개면 좌측은 상대적으로 지질 구조적 영향에 의해 풍화대가 깊게 발달하고 파쇄대가 존재하는 열악한 지반상태를 보이고 있으며, 절개면의 우측은 상대적으로 양호한 지반상태 등의 영향에 의한 것으로 사료된다.

2) 조사대상 지역은 절개면 좌측부가 풍화작용과 파쇄대의 영향으로 풍화대가 깊게 발달하고 있어 전단 강도가 현저히 저하된 상태에서 도로 건설에 의한 지반의 저항력 감소로 절개면에 협재되어 있는 흑연 편암층을 따라 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

3) 절개면의 붕괴방향과 붕괴 특성을 고려할 때 붕괴면이 절개면 전면부를 향해 대칭적으로 이동하는 일반적인 사면붕괴 형태와는 달리 절개면 붕괴방향이 절취면 경사방향과 약 30° 경사지게 발달하고 있는 등 주변의 지질구조적 영향을 받은 것으로 사료된다. 특히 절개면의 붕괴방향이 본 절개면에 발달되어 있는 대규모 향사구조의 습곡축(077/26)과 거의 일치하고 있음이 이를 뒷받침하고 있다.

4) 국내 절개면에 대한 표준시방서는 지반구성 재료의 강도에 따라 분류하여 절취경사도의 표준구배를 결정하고 있다. 그러나 이와 같은 기준은 지반이 균질한 물질로 이루어진 경우에는 적용이 가능하다. 그러나 사면내에 파쇄대, 불연속면, 연약층 등이 발달되어 있는 경우에는 불연속면의 방향이 절취면의 방향과 30°이상 사교하고 있더라도 습곡이나 단층 등에 의하여 사면 붕괴가 발생할 가능성이 있으므로 절개면의 설계에는 이들 지질구조에 대한 고려가 반드시 포함되어야 한다.

358p.

Mitchell, J.K., 1976, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422p.

투 고 일	2003년 2월 20일
심 사 일	2003년 2월 21일
심사완료일	2003년 4월 7일

구호본 (Ho-bon Koo)
한국건설기술연구원 지반연구부
경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지
Tel: 031-910-0217
E-mail: hbkoo@kict.re.kr

김학준 (Hak-Joon Kim)
대전대학교 공과대학 지구시스템공학과
대전시 동구 용운동 96-3
Tel: 042-280-2574
E-mail: hakkim@dju.ac.kr

이대영 (Dae-Young Lee)
한국건설기술연구원 지반연구부
경기도 고양시 일산구 대화동 2311번지
Tel: 031-910-0528
E-mail: dylee@kict.re.kr

참 고 문 헌

건설교통부, 2000, 도로설계편람(II), 제4편 토공 및 배수, 한국건설기술연구원, 400-1-412- 3.

황영철, 유병욱, 김성환, 이승호, 1999, 암반사면의 평면파괴조건 고찰, 사면안정 학술발표회, 한국지반공학회, 98-105.

Brekke, T.L. and Howard, T.R., 1973, Functional Classification of Gouge Material from Seams and Faults as Related to Stability Problems in Underground Openings, Report from University of California to U.S B. Mines.

Hoek, E. and Bray, J., 1981, Rock Slope Engineering, Institute of Mining and Metallurgy, London,