

## 퇴적암 지역에서의 산사태 원인 및 특성 분석에 대한 사례연구

송영석<sup>1\*</sup> · 홍원표<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

<sup>2</sup>중앙대학교 건설환경공학과

### A Case Study on the Analysis of Cause and Characteristics of a Landslide at the Sedimentary Rock Area

Young-Suk Song<sup>1\*</sup> and Won-Pyo Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang University

본 연구는 동해고속도로 확장공사구간에서 도로시공을 위한 사면 절개시 산사태가 발생된 현장을 대상하였다. 대상현장의 산사태 규모는 평면적으로 사면 폭이 100 m, 사면높이가 87 m로서 전체면적은 약 9,550 m<sup>2</sup> 정도이다. 대상현장의 산사태는 지반 내 점토층이 존재하는 취약한 지질구조에 의한 내적요인과 사면절개 및 지속적인 강우에 의한 외적요인에 의해 발생된 것이다. 산사태 발생 직후 현장계측결과 사면지반의 수평변위는 우기철의 지속적인 강우로 인하여 누적 강우량이 증가함에 따라 계속적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 산사태 발생시 측정된 사면지반의 수평변위를 통하여 사면활동면의 깊이를 결정할 수 있다. 현장계측을 통하여 사면활동면 발생 깊이에서부터 사면지반의 수평변위가 증가됨을 확인할 수 있으며, 사면활동면 발생 깊이는 점토층이 분포하고 있는 깊이와 일치함을 알 수 있다. Bishop의 간편법을 이용한 사면안정해석결과 강우시 사면안전율은 0.53으로 산사태가 발생가능성이 매우 큰 것으로 나타났으며, 사면활동면의 발생 깊이는 현장계측을 통하여 측정된 점토층이 분포하고 있는 깊이와 일치함을 알 수 있다.

**주요어** : 산사태, 사면절개, 강우, 현장계측, 사면활동깊이

A landslide was occurred due to soil cutting for construction to expand the Donghae express highway in Donghae-City, Korea. The total area of the landslide was about 9,550 m<sup>2</sup> with 100 m of width and 87m of height. The landslide was occurred due to the internal factor of the unstable geological structure including the clay layer and the external factor of continuous heavy rainfalls. As the result of field instrumentation during the landslide, the horizontal displacement of the slope ground increases with increasing the accumulated rainfall by continuous rainfall during the rainy season. Also, the depth of sliding failure was decided by the horizontal displacement distribution during landslide occurrence. It makes sure that the horizontal displacement starts from the depth of sliding failure and the depth of sliding failure matches well with the location of the clay layer. As the slope stability analysis using Bishop's Simplified Method at the landslide area, the safety factor of slope during the rainy season was 0.53. This safety factor of slope was enough to trigger the landslide at this area. The depth of sliding failure obtained by analytical method matches well with the depth of the clay layer.

**Key words** : landslides, cutting slope, rainfall, field instrumentation, depth of slope failure

#### 서 론

지난 수십 년간 우리나라에서는 철도, 도로 등의 교

통시설, 각종 목적의 댐과 같은 수리시설, 원자력 발전소와 같은 중요구조물, 아파트나 주택 등과 같이 인간의 일상생활과 밀접한 관계가 있는 토목구조물이나 건축구

\*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

조물의 축조를 위하여 산지나 구릉지의 개발이 급격히 증가되고 있다. 이러한 개발과정에서 균형을 유지하여 안정된 상태에 있던 산지나 구릉지의 자연사면이 붕괴되어 산사태가 발생되고 있으며 이에 따른 피해액과 규모도 해마다 증가되고 있다.

산사태의 발생요인은 내적요인(잠재적소인)과 외적요인(직접적유인)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 외적유인이 가하여 질 경우 산사태가 발생되기 쉽다.

지반윤회상 우리나라는 만장년기의 지형에 속하기 때문에 급경사면이 많으며, 토층간의 특성이 서로 다른 곳이 많으므로 산사태가 많이 발생될 내적요인을 구비하고 있다. 우리나라의 연평균 강우량은 1,100 mm~1,400 mm로서 이중 대부분이 6월과 9월사이의 우기철에 집중적으로 내리기 때문에 매년 많은 산사태가 이 시기에 발생하고 있다. Table 1은 1960년대부터 1990년대 초까지 20명 이상의 인명피해를 입은 산사태 발생현황을 정리한 것이다(대한토목학회, 2000). Table에서 보는 바와 같이 산사태가 모두 6월에서 9월사이에 발생되고 있음을 알 수 있다. 한편, 1998년에는 경기북부지역의 집중호우로 인하여 전체 사망 및 실종자 가운데 166명이 산사태로 희생되었다(박덕근, 1999). 그리고 2002년 태풍 "루사(RUSA)"로 인하여 발생한 산사태로 사망자가 56명에 이르고, 피해액도 수천억 원에 이르렀다. 2003년도 태풍 "매미(MAEMI)"로 인하여 거창을 중심으로 한

경남지역에 대규모의 산사태가 발생되어 많은 피해를 입혔다.

최근에는 도로건설이나 택지개발을 위한 산지나 구릉지의 절토로 인하여 대규모의 산사태 발생이 점차 늘어나고 있는 실정이다. 이와 같이 인위적으로 지형을 변경시켜 자연사면의 균형을 무너뜨린 경우에는 대규모 산사태가 주로 발생된다. 따라서 우리나라의 산사태 발생 패턴은 두가지로 구분할 수 있다. 즉, 자연산림지역에서는 다발적인 소규모 산사태가 발생되며 인위적인 지형변경이 실시된 지역에서는 대규모 산사태가 발생된다.

본 연구에서는 동해고속도로 확장공사구간에서 도로시공을 위한 사면절개시 대규모 산사태가 발생된 현장을 대상으로 한다. 먼저 산사태 현황조사, 지반조사, 지표지질조사 등을 통하여 산사태 발생현황을 자세하게 검토한다. 이러한 조사결과와 현장계측을 토대로 대상현장의 산사태 발생에 대한 원인을 규명한다. 그리고 한계평형해석법을 이용한 사면안정해석을 통하여 이에 대한 검증을 수행하고자 한다.

## 사례 현장

### 산사태 발생현황

본 연구대상 현장은 강원도 강릉시 옥계면 일원에서 시공 중인 동해고속도로 동해~주문진간 4차로 확장공사 구간이다. 본 구간내 낙폭 1교의 P2 기초터파기 공사중 공사차량 진입도로와 인근 상부사면이 도로방향으로 활동이 진행됨에 따라 낙폭 1교와 보강토 옹벽 구조물에 치명적인 손상을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 1은 연구대상사면에 대한 평면도를 도시한 것이다. 대상사면의 시점은 STA. No. 2+730, 종점은 STA. No. 2+830이므로 사면연장은 100 m이다. 그리고 사면의 높이는 87 m이며, 사면의 경사는 20~45°의 범위에 존재한다. 한편, 지질은 주로 셰일이 광역변성작용에 의해 형성된 천매암이며, 부분적으로 사암 및 석회암이 분포하고 있다.

2001년 4월 27일 낙폭 1교의 P2(주문진방향) 기초시공을 위한 사면 절개시 공사차량 진입도로 및 사면상부에 총 3개소의 인장균열이 발생되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 3개소의 인장균열을 하부에서부터 각각 Crack 1, 2 및 3으로 나타내었다. Crack 1은 기초터파기 과정에서 발생된 것으로 현재는 변위가 없는 상태이며, Crack 2 및 3은 현재에도 계속적으로 변위가 약간씩 진행되고 있는 상태이다.

**Table 1.** The number of casualties caused by landslides. (KSCE, 2000)

기 간	위 치	인명피해(명)
1963. 6. 24~25	경상남도 장승포	69
1965. 7. 16~17	경기도 포천	55
1965. 8. 12	부산	21
1969. 8. 4	강원도 화천	60
1969. 9. 14~15	경상남도 김해	39
1969. 9. 15	경상남도 창령	70
1972. 8. 19	서울 평창동	90
1976. 8. 13~15	강원도 원주	20
1977. 7. 8	경기도 안양~시흥	122
1979. 8. 5~6	강원도 평창	23
1979. 8. 25~27	경상남도 진해	38
1985. 7. 5	부산 문현동	36
1987. 7. 27	서울 시흥동	20
1991. 7. 21	경기도 용인	32

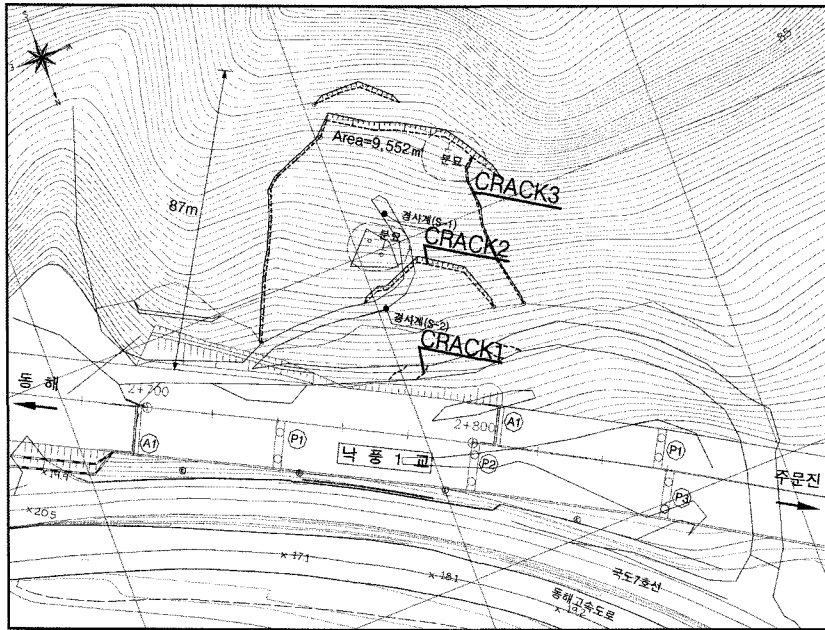


Fig. 1. Plan view of the study area.

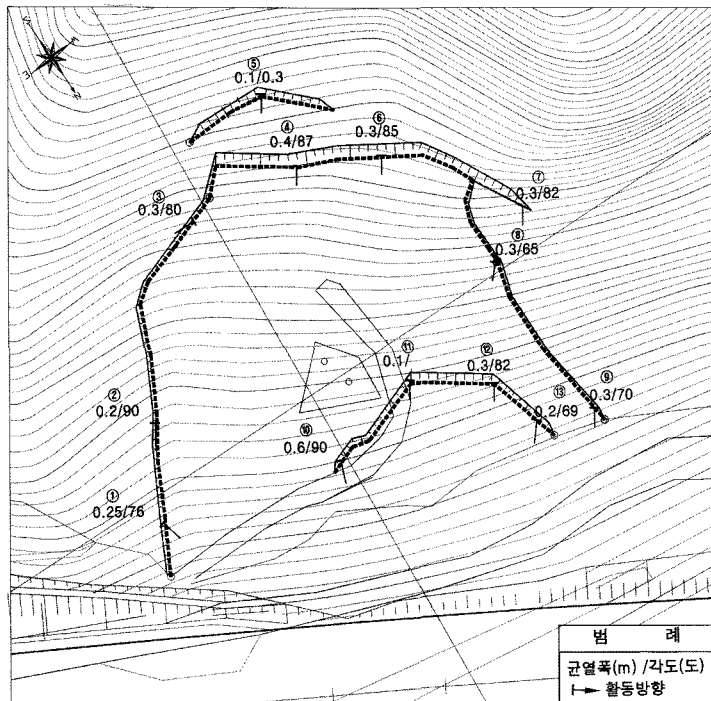
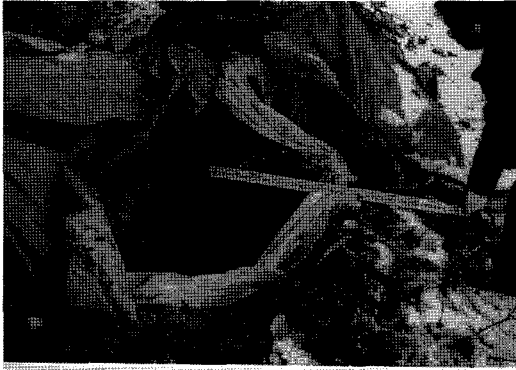


Fig. 2. The state of tension crack.

활동토괴의 규모는 평면적으로 사면폭이 100 m, 사면 높이가 87 m로서, 전체면적은 약 9,550 m<sup>2</sup> 정도임을 알

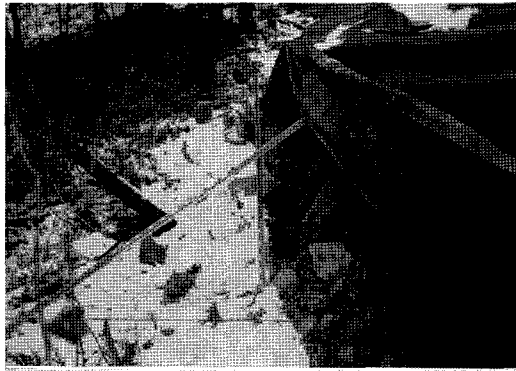
수 있다. 인장균열의 폭은 Crack 3의 경우 상부에서 30~40 cm 정도이며, 최대 단차는 2 m 정도이다. 그리고



(a) ① width 0.25m / differential settlement 0.85m  
strike, dip : N73E, 76NW



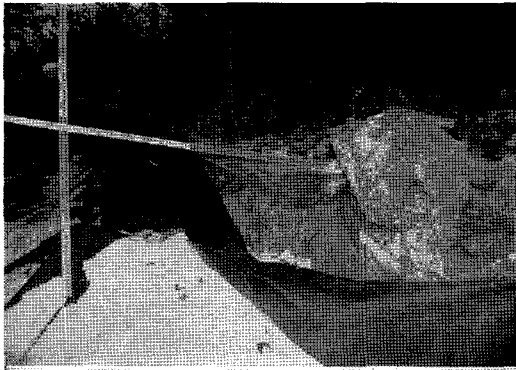
(b) ④ width 0.4m / differential settlement 2.0m  
strike, dip : N59W, 87NE



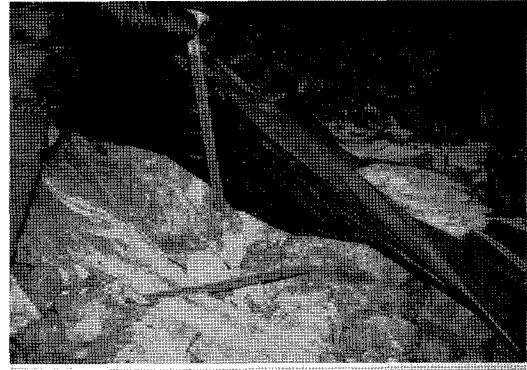
(c) ⑥ width 0.3m / differential settlement 2.0m  
strike, dip : N62W, 85NE



(d) ⑨ width 0.3m / differential settlement 0.1m  
strike, dip : N11W, 70NE



(e) ⑫ width 0.3m / differential settlement 0.9m  
strike, dip : N57W, 82NE



(f) ⑬ width 0.2m / differential settlement 0.1m  
strike, dip : N21W, 69NE

**Fig. 3.** The measurement of tension cracks.

측방으로는 소규모 골짜기를 중심으로 인장균열이 진행되고 있음을 알 수 있다.

사면활동의 이력, 범위, 이동상황을 파악하기 위하여

현재 육안으로 구별 가능한 균열면에 대해 균열폭, 단차, 발달방향 및 경사를 조사하였다. Fig. 2는 대상사면의 균열면 현황도를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 보는 바와

같이 사면활동 토괴의 이동방향은 N19W~N95E 사이에서 여러 방향으로 나타나고 있으나 대표적인 사면활동 토괴는 N15E~N25E 범위 내에서 활동하고 있다. 그리고 균열폭은 0.1~0.4 m, 단차 0.1~2.0 m까지 위치별로 심한 차이를 보여주고 있으며, 활동면의 중심에서 양측 방으로 인장균열이 진행되고 있다. 한편, Fig. 3은 Fig. 2에 표시된 각각의 균열면에 대하여 폭과 단차 및 주향과 경사를 측정하였다.

**지형 및 지질**

**지형학적 특성**

본 연구대상 지역은 행정구역상 강원도 옥계면 낙풍리에 해당하며, 한반도의 동북쪽에 위치한다. 그리고 본 지역의 동쪽에 국도 7호선이 남북방향으로 지나가고 있다. 서쪽에 청학산(337 m), 괴래산(753.9 m) 및 화산(307.6 m)이 남북방향으로 형성되어 있으며, 동쪽에 가마봉(383 m) 및 망운산(338.4 m)이 위치하고 있다. 본 지역의 수계는 낙풍천, 정동천, 주수천 및 옥계저수지 등 소지류들이 수지상 수계(Dendritic drainage pattern)의 특징을 보인다. 자연사면의 경사방향은 N26E 방향이 우세하며, 대체로 사면의 경사각은 21~45° 정도를 보이고, 사면활동 예상부분은 약 20° 정도의 구배를 보이는 것으로 예상된다. 현재 사면 활동부를 중심으로 3개소에서 연장성을 가진 균열(Crack)을 보이며, 이는 과거로부터 계속적으로 사면활동이 진행 중인 것으로 추정된다.

**지질학적 특성**

본 연구대상 현장의 지질은 시추 조사시 채취된 코어 등으로 기반암을 판단하였다. 그 결과 평안계(Pyeongan system)의 고방산층, 사동층, 홍점층과 조선계(Joscon system)의 석빙산 석회암층이 분포하고 있으며, 이를 제 4기 층적층이 부정합으로 피복하고 있다. Fig. 4는 본 현장에 대한 지질 계통도를 나타낸 것이다.

본 지역은 고생대 석탄기에서 페름기에 걸쳐 퇴적된 평안누층군의 하부 지층인 만항층(과거에는 홍점층이라 칭함)에 해당하는 퇴적암류이다. 이 지역은 남한에 분포하는 탄전 중에서 가장 북동부에 위치한 소위 강을탄전에 해당하는 부분으로 이 지역의 지질조사는 1962년 태백산 지구 지하자원 조사단에 의해 체계적으로 조사 발간되었으며 그 후 탄광을 중심으로 단편적으로 조사된 바 있다. 일반적으로 만항층은 약 250~300 m의 두께로 조선누층군의 석회암층을 부정합으로 덮는다. 강릉탄전에서 이 층은 담회색~유백색, 담록색 조립사암, 담록

Quaternary	신기하성층 (Recent River Deposits)
부정합 (Unconformity)	
Triassic	고방산층 (Sandstone, Shale)
Permian	사동층 (Shale, Sandstone, Anthracite)
Upper Carboniferous	홍점층 (Shale, Sandstone, Limestone)
부정합 (Unconformity)	
Ordovician - Cambrian	석빙산 석회암층

Fig. 4. Geological formation.

색~녹색, 회색의 중립내지 세립사암, 적자색, 녹회색, 암회색의 셰일 및 실트암, 박층의 탄질셰일 등으로 구성되어 있으며 수매의 렌즈상의 분홍 및 석회암을 협재하기도 한다. 이 층은 금천층에 의해 정합적으로 피복된다. 본 지역의 만항층 퇴적암류에 비해 변성작용을 받아 천매암질로 되어 있으며, 층리뿐만 아니라 엽리도 매우 잘 발달되었다.

**지반특성**

**지표지질조사**

본 조사는 대상 사면에 존재하는 노출암(노두) 및 인위적인 절취면을 대상으로 암반의 불연속면을 측정하는 것이다. 암반사면의 경우 사면 붕괴는 불연속면의 공학적인 특성에 따라 좌우되므로 본 조사에서는 암반 내에 발달된 불연속면의 공학적인 특성 및 풍화상태, 지하수 상태 등 사면의 제반 특성을 파악하였다.

대상사면의 암종은 평안누층군 만항층의 퇴적암류로서 타 지역의 만항층 퇴적암류에 비해 변성작용을 받아 점판암 내지 천매암의 형태를 보인다. 그리고 층리 뿐만 아니라 엽리도 매우 발달되어 있다.

STA. No. 2+740 주변과 STA. No. 2+700주변의 노출된 암반을 대상으로 암반사면의 주향과 경사를 측정하였다. Fig. 5는 노출된 암반의 주향과 경사를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 측정결과 주향은 N65-80W의 범위에 있으며, 경사는 20-45NE의 범위에 있는 것으로 조사되었다. 이들 결과를 정리하면 주절리의 방향은 N82/32NE이며, 사면의 방향과는 20° 정도의 차이를 갖는 것으로 나타났다.

한편, 대상사면에 대한 상세조사를 통하여 침투수의 유출 및 균열면의 현황을 파악하였다. 먼저 사면의 하부에서 침투수 유출에 의한 수빙현상이 발견되었다. Fig. 6은 수빙현상을 확대하여 나타낸 것으로, 침투수의 유출

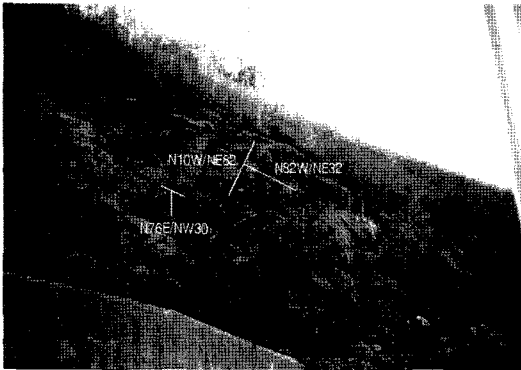


Fig. 5. Strike and dip on a rocky outcrop.



Fig. 6. Frozen water phenomenon.

과 함께 점토성분의 토사가 사면외부로 유출되는 현상도 관찰되었다.

### 지층구조

Fig. 7은 시추조사를 실시한 위치를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 총 14공의 시추조사를 실시하였다. 시추조사를 통하여 지층분포현황을 파악하였으며, 실내시험을 위한 시료채취도 실시하였다. 그리고 1.5 m 깊이별로 표준관입시험을 실시하였다. 시추조사 결과 연구대상 지역의 지층은 상부로부터 봉적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있다. 이들 지층에 대한 특성은 다음과 같다.

#### 봉적토층

상부사면이 붕괴, 또는 침식되어 쌓인 층으로 전석, 모래, 암편, 점토 등으로 구성되어 있다. 습윤 상태이며,

갈색~회색을 띠고 있다. 표준관입시험 결과 N치가 13/30~50/3으로 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이나, 자갈의 분포정도에 따라 N치가 과대 측정되는 경향이 있다. 분포심도는 GL(-)0.0~6.5 m이며 완전 누수상태이다.

#### 풍화잔류토층

토사와 연암이 교호하는 층으로서 이 층은 천매암의 차별 풍화에 의해 형성되었다. 연직투수성은 크지 않을 것으로 판단되나 수평방향으로는 파쇄가 심한 연암층의 영향으로 투수성이 매우 큰 것으로 나타났다. 지표면으로부터 GL(-)12.0~15.5 m 부분은 활동의 예상층으로서 함수비가 높은 편이다. 이 층은 입도시험결과 실트 섞인 점토층(CL)으로 구별할 수 있다. 표준관입시험 결과 N치가 13/30~50/26로 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이며, 부분적으로 누수현상이 심한상태이다.

#### 풍화암층

CB-2 및 CB-3위치에서 나타나며 습윤, 회색의 천매암이 상부 풍화대로 모래, 실트 및 암편 등으로 이루어져 있으며, 표준관입시험 결과 N치가 50/2로 상대밀도는 매우 조밀한 상태이다. 풍화정도는 완전풍화상태이며, 층후는 2.3~5.7 m이다.

#### 파쇄심한 연암층

천매암의 파쇄대로서 회색~갈색을 띠며 시추시 주로 암편으로 채취된다. 부분적으로 풍화암대도 나타나며 시추시 누수현상이 심한 상태를 보인다. 채취된 코아의 TCR=14~80%이나 RQD는 평균적으로 0% 정도로 파쇄가 심하다. 분포심도는 GL(-)15.5~23.0 m이다.

#### 연암층

회색~갈색의 천매암 및 일부 석회암으로 구성되어 있고, 시추시 암편~주상의 코아로 채취된다. 채취된 코아의 TCR=42.1~100%, RQD는 평균적으로 50% 정도로 비교적 신선한 편이다. 분포심도는 GL(-)23.0 m 이하이다.

#### 지하수위

본 연구대상 지역에 대한 지하수위 측정은 시추작업이 완료된 후 24~48시간이 경과된 후 안정된 지하수위를 얻을 수 있도록 관찰하였으며, 측정된 지하수위는 조사 지역의 지하수위 분포현황을 파악하기 위한 자료로 이용한다. 측정 결과 지하수위는 지표면으로부터 GL(-)

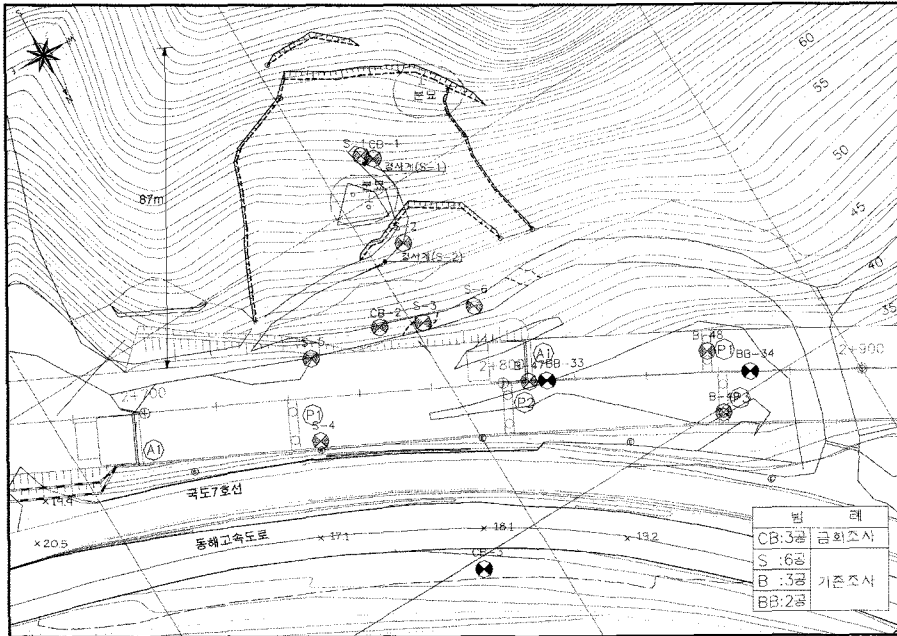


Fig. 7. Situation of boring log.

11.65~23.65 m에 위치하는 것으로 조사되었다. 지하수위는 상부사면부의 경우 연암층에 분포하며 하단부의 경우에는 자갈층 내에 분포하고 있다.

현장투수시험결과 파쇄가 심한 연암층은 투수시험이 불가능할 정도로 완전누수가 발생되었으며, 봉적토의 경우  $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ , 풍화잔류토층의 경우  $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 으로 비교적 투수가 용이함을 알 수 있다.

**지반조사결과**

앞 절에서 설명된 지형 및 지질특성, 지층구성, 지하수위 등을 토대로 본 연구에 적용될 대표단면을 선정하였다. 대표단면은 사면활동의 중앙부를 대상으로 하였다. Fig. 7의 지반조사 위치에서 사면상단부는 S-1 및 CB-1 위치, 사면중앙부는 S-2위치, 사면하단부는 S-3 및 CB-2위치, 도로시공구간은 S-4 및 CB-4위치에서의 시추조사결과를 토대로 하였다. 이상에서와 같은 시추조사 결

과를 토대로 대표단면을 선정하였으며, 선정된 대표단면은 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

한편, 시추조사시 CB-1위치에서 채취한 시료를 대상으로 직접전단시험(KS F 2343)과 체분석시험(KS F 2309)을 실시하였다. Table 2는 실험결과를 나타낸 것으로 GL(-)12~15 m 위치에서 점토층이 존재함을 확인할 수 있다.

**사면활동 원인분석**

**사면의 거동**

산사태는 대부분 지형적으로 구릉지역과 산지 등에서 일어나며, 이러한 지역은 특정한 지역으로만 국한되는 것이 아니다. 대부분의 산사태는 지각운동으로 인한 파쇄대가 많은 지역과 같은 지형 지질의 약조건 하에 호우나 폭설이 자주 발생하는 영향에 의해 발생된다. 이와

Table 2. The result of soil tests.

No.	Depth (m)	Wn (%)	Gs	Atterberg limits			Direct shear test		Grain size distribution (%), less than			USCS
				LL (%)	PL (%)	PI (%)	c (kg/cm <sup>2</sup> )	φ (deg)	No.4	No.40	No.200	
CB-1	4.0~6.5	6.8	2.65	-	N.P	-	-	-	55	36	20	SM
CB-2	12.0~15.0	15.4	2.72	27.0	14.5	12.5	1.7	23.8	91.7	75	54.8	CL

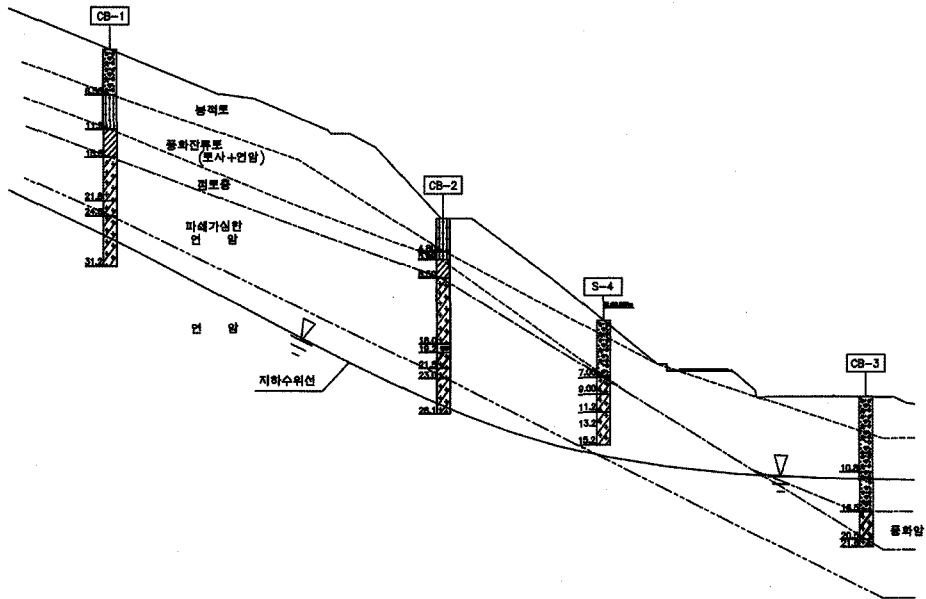


Fig. 8. Typical profile and geometry of slope.

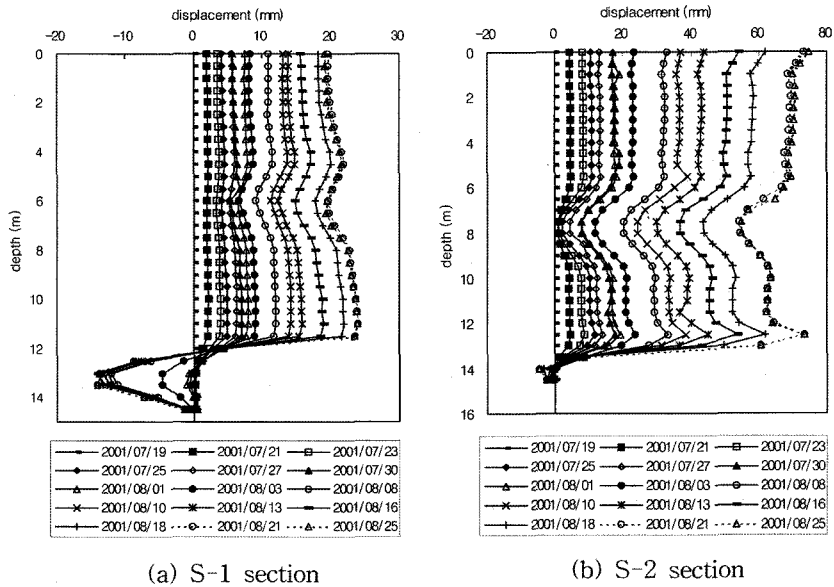


Fig. 9. Deformation of slope soils.

같은 산사태의 발생은 지질, 토질, 지질구조, 지형 등의 내적요인과 강우, 융설, 지하수, 하천해안의 침식, 지진 등의 외적요인이 바로 원인이 된다. 또한, 우리나라에서 발생하는 산사태의 대부분은 7월~9월사이의 우기철에 집중되어 있으며 강우와도 많은 관련이 있는 것으로 나타났다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 대상사면에 대한 활동면의 규모는 평면적으로 폭 100 m, 높이 87 m 규모로 면적은 약 9,550 m<sup>2</sup>이며, 균열의 폭은 Crack 3의 경우 상부에서 30~40 cm(단차 최대 2 m) 정도이며 측방으로는 소규모 골짜기를 중심으로 인장균열이 진행되어 있는 것으로 나타났다.



사면지반의 거동을 조사하기 위하여 사면활동이 발생 되는 대상사면에 경사계를 설치하였다. 경사계의 설치위 치는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 사면상단부의 S-1위치 와 사면중앙부의 S-2위치에 각각 설치하였다.

Fig. 9는 시간에 따른 사면지반의 거동을 나타낸 것이 다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 지남에 따라 사면 지반은 계속적으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그리고 사면상단부인 S-1위치에서의 변위보다 사면중앙부인 S-2 위치에서의 변위가 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 9(a)는 사면상단부인 S-1위치에서 사면지반의 거 동을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)를 살펴보면 지표면으로부터 약 12 m 아래의 위치에서 사면지반의 변위가 급속하 게 감소되고 음의 값을 갖는다. 이러한 이유는 이 위치 에서 사면활동이 일어났기 때문이며, 이 깊이를 사면활 동깊이로 예상할 수 있다.

그리고 Fig. 9(b)는 사면중앙부인 S-2위치에서의 사면 지반의 거동을 나타낸 것이다. Fig. 9(b)를 살펴보면 S-1 위치에서와 마찬가지로 지표면으로부터 약 14 m 아래 의 위치에서 사면지반의 변위가 급속하게 감소되었다. 따라서 이 깊이를 사면활동깊이로 예상할 수 있다.

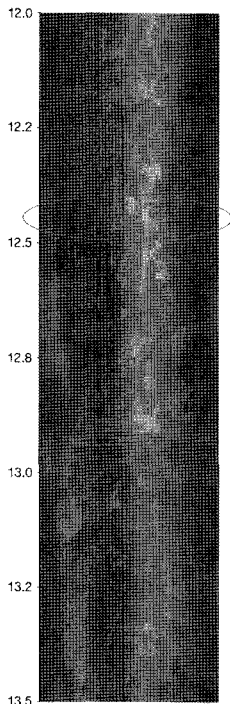


Fig. 10. Potential slip surface in clay layer.

### 사면활동의 내적요인

대상현장의 사면활동깊이는 경사계 계측결과를 토대 로 GL(-) 12-14 m 부근으로 추정할 수 있다. 지반조사 결과 GL(-) 12-14 m의 지층은 토사와 연암이 교호하는 풍화잔류토층으로서 함수비가 높은 점토층(CL)이 존재 하는 것으로 나타났다. 그리고 Fig. 10은 BIPS를 이용 한 추가조사시 관찰된 활동면으로 예상되는 깊이에서의 점토분포를 나타낸 것이다.

한편, 대상지층에 대한 파쇄가 심한 연암층은 투수시 험이 불가능할 정도로 완전누수가 발생되었으며, 붕적토 의 경우  $1.0 \times 10^{-2}$  cm/sec, 풍화잔류토층의 경우  $5.0 \times 10^{-3}$  cm/sec으로 비교적 투수가 용이함을 알 수 있다.

따라서, 대상사면의 경우 사면활동에 대한 주요원인 중의 하나는 내적요인인 지층구조에 의한 것이다. 즉, 상 부 붕적토층은 강우시 침투가 용이하며, 풍화잔류토층 가운데 GL(-)12-14 m 부근에서 함수비가 높은 점토층 이 존재하는 것으로 나타났다.

### 사면활동의 외적요인

대상사면의 경우 사면활동의 주요원인중의 하나는 외 적요인인 강우에 의한 것이다. 따라서 본 연구대상 지역 에서도 지속적으로 강우기록을 조사하였으며, 이를 정리 하면 Fig. 11과 같다. 이는 2001년 7월과 8월의 강우기 록을 정리한 것이며, 산사태가 주로 발생되는 우기철에 측정된 것이다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 7월부터 계 속적으로 일일강우량이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 8월 8일에는 98 mm로 조사 기간중 최대 강우량을 기록 하였다.

본 현장의 경우 약 40일간의 조사 기간동안 일일강우 량이 10 mm 이상인 경우는 7회, 20 mm 이상인 경우는 4회, 그리고 30 mm 이상인 경우는 2회가 발생되었다.

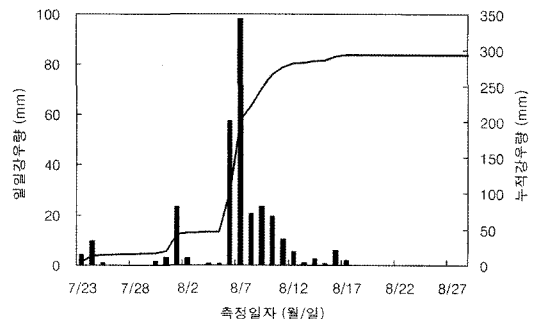


Fig. 11. Daily rainfall and cumulative rainfall in this area.

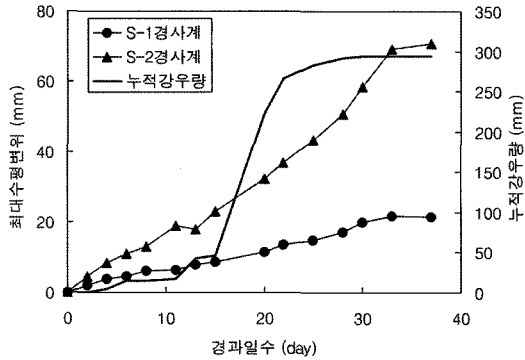


Fig. 12. The maximum horizontal deformation of slope soils according to cumulative rainfall.

또한, 8월 5일부터 11일까지 계속된 강우에서 최대시간 강우강도는 8월 8일 16시에 13.5 mm로 기록되었고, 당일 최대시간강우강도가 10 mm/hr 이상인 경우도 2회로 조사되었으며, 일일강우량도 98 mm를 기록하였다. 따라서 조사 기간동안 연구대상지역의 강우형태는 집중호우성으로 예상하였다.

Fig. 12는 누적강우량에 따른 사면지반의 최대수평변위를 도시한 것이다. Fig. 12를 살펴보면 누적강우량이 증가함에 따라 사면지반의 최대수평변위는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 누적강우량이 일정해지는 경우에는 사면지반의 최대수평변위도 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 누적강우량과 사면지반의 수평변위는 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 산사태는 외적요인인 강우에 의하여 발생됨을 확인할 수 있다.

### 사면안정해석

#### 지반강도정수 산정

역해석을 이용한 강도정수 산정

사면의 활동에 대한 안전율은 해석방법에 따라 각각 다를 수 있으며, 또 안전율은 안정성을 나타내는 지표이기도 하지만 현재로서는 오히려 설계에서의 여러 가지 불명확한 점을 보상하는 계수로서의 뜻이 강하다. 안전율의 크기에 의해서 안정성을 정량적으로 비교할 수 있는 것은 엄밀하게는 동일 조건의 구조물에서만 가능한 것이며, 조건이 다른 구조물에서는 안정성의 비교가 곤란하다. 본 설계사면의 원지반은 천매암이 차별풍화에 따라서 아주 복잡하게 교호되고 불균일하며 또한 절토 시공 후 시간의 경과에 따라 응력이완, 대기노출로 인한 풍화 등으로 원지반의 공학적 특성이 사면안정에 불리

Table 3. The used safety factor during back analysis. (KHC, 1996)

운동	분류	암반 활동	풍화암 활동	붕괴토 활동	점토질 활동
활동정지층	1.10	1.05~1.10	1.03~1.05	1.00~1.03	
활동층	0.88	0.95~0.99	0.93~0.95	0.90~0.93	

한 쪽으로 진행되는 점을 충분히 감안하여야 한다.

본 설계에서는 역해석에 의한 활동면의 강도정수 추정시 적용안전율은 한국도로공사(1996)의 설계자료를 참고하여 사면활동중인 붕괴층의 안전율은 0.93~0.95로 하고, 예상 활동면인 점토층의 안전율은 0.90~0.93로 적용하고자 한다.

붕괴토층은 교량 기초시공시 굴착으로 발생된 인장균열(Crack 1, 2)을 고려하고, 현재 사면이 활동 중인 점을 감안하여 안전율을 0.93~0.95를 적용하였다. 그리고 Table 3에 제시된 기준을 토대로 하여 역해석을 실시하였다(한국지반공학회, 2001). 그 결과를 적용하여 붕괴토층의 강도정수는 점착력 0.44 t/m<sup>2</sup>, 내부마찰각 27°로 산정할 수 있다.

실제 사면 파괴가 예상되는 점토층에 대해서도 역해석을 실시하였다. 계측결과 사면이 활동 중인 점을 감안하여 안전율을 0.90~0.93을 적용하고, Table 3에 제시된 값들과 직접전단시험 결과를 토대로 역해석을 실시하였다. 그 결과를 적용하여 점토층의 강도정수는 점착력 1.5 t/m<sup>2</sup>, 내부마찰각 20°로 산정할 수 있다.

#### 해석에 적용된 강도정수

해석에 사용한 지반의 토질정수는 토사층의 경우에는 실내시험결과와 역해석 및 일반적인 값을 참조하고 암반의 경우에는 Hoek & Bray(1981) 경험치, Hoek & Brown(1980) 경험치, 도로설계실무편람(한국도로공사, 1996) 등에 제안된 강도정수를 비교, 검토하여 적용하였다. 이와 같이 사면안정해석에 적용된 토질정수는 Table 4와 같다.

Table 4. Soil parameter for slope stability analysis.

지층	구분	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Deg.)
붕괴토		1.85	0.5	27
풍화잔류토		1.9	1.0	30
점토		1.7	1.5	20
파쇄심한 연암		2.2	5.0	35
연암		2.5	10.0	40

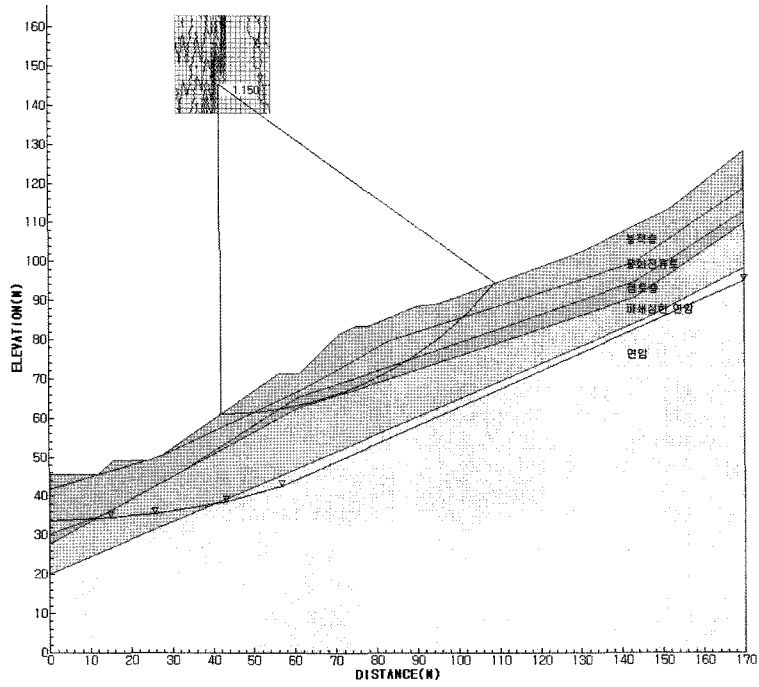


Fig. 13. The result of slope stability analysis at the present condition.

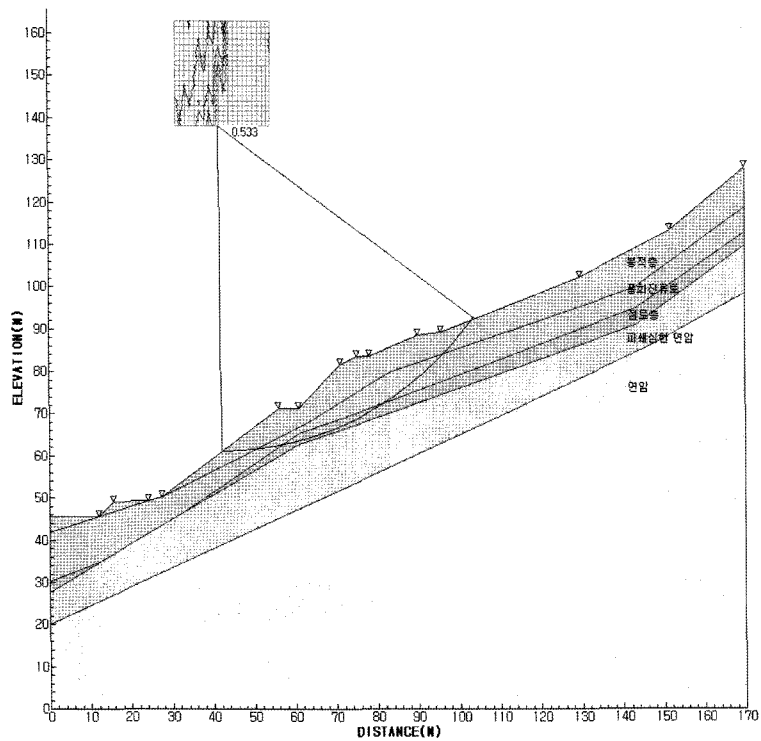


Fig. 14. The result of slope stability analysis considering the effect of rainfall.

## 해석결과 및 분석

전 절에서 산정된 토질정수를 적용하여 대상현장의 사면에 대한 안정해석을 수행하고자 한다. 대상사면에 대한 안정해석은 SLOPILE (ver 3.0) 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 실제 파괴형상을 고려하여 원호파괴시 안정해석법을 적용하였다. 그리고 원호파괴시 안정해석법 가운데 일반적으로 많이 사용되고, 편리성 및 신뢰성이 검증된 Bishop의 간편법(Bishop, 1955)을 적용하였다.

Fig. 13은 대상사면의 안정해석을 위하여 선정된 대표 단면을 SLOPILE(ver 3.0) 프로그램으로 모델링한 것이다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 대상사면의 지층조건 및 지하수위를 모두 고려할 수 있도록 하였다.

Fig. 13은 대상사면에 대하여 강우의 영향을 고려하지 않고, 현재의 지하수위 위치만을 고려하여 사면안정해석을 수행한 것이다. Bishop의 간편법을 적용하여 해석한 결과 최소사면안전율은 1.15의 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 사면활동면의 발생 깊이는 현장계측을 통하여 측정된 점토층이 분포하고 있는 깊이와 일치함을 알 수 있다.

사면의 소요안전율은 대상지역과 규모, 구조물의 중요성 등에 따라 서로 다르지만 도로사면의 경우에는 일반적으로 1.1~1.5정도 범위의 사면안전율을 적용하고 있다. 만약 사면의 소요안전율을 1.3으로 가정할 경우 현재 대상사면은 안정성에 의문이 있는 것으로 판단된다. 현 상황에서는 사면활동이 발생되지 않더라도 강우 혹은 사면절개와 같은 외적요인에 의하여 산사태가 갑자기 일어날 가능성이 매우 큰 것으로 판단할 수 있다.

한편, Fig. 14는 대상사면에 대하여 강우의 영향을 고려하여 사면안정해석을 수행한 것이다. 즉, 강우로 인하여 사면지반 내 습윤전선의 하강과 지하수위 상승이 동시에 발생되어 완전포화 되었을 경우를 가정하여 해석한 것이다. Bishop의 간편법을 적용하여 해석한 결과 최소사면안전율은 0.53의 값을 나타내므로 산사태가 발생될 것으로 예측할 수 있다. 사면안정해석 결과에서 보는 바와 같이 대상사면의 경우 강우시 산사태가 발생되는 것으로 나타났으며, 이는 현장계측결과와 일치함을 알 수 있다.

## 결 론

본 연구에서는 동해고속도로 확장공사구간에서 도로 시공을 위한 일부 사면절개시 대규모 산사태가 발생된

현장을 대상으로 산사태 발생현황을 자세하게 검토하였다. 이러한 검토결과와 현장계측결과를 토대로 대상현장의 산사태 발생에 대한 원인을 규명하였으며, 한계평형 해석법을 이용한 사면안정해석을 통하여 이를 검증하였다. 이상의 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1) 대상현장의 산사태 규모는 평면적으로 사면폭이 100 m, 사면높이가 87 m로서 전체면적은 약 9,550 m<sup>2</sup> 정도이다. 그리고 최대 폭이 30~40 cm 정도인 3개의 큰 인장균열이 발생되었으며, 최대 단차는 2 m 정도로 조사되었다.

2) 대상현장의 산사태는 지반내 점토층이 존재하는 취약한 지질구조에 의한 내적요인과 사면절개 및 지속적인 강우에 의한 외적요인에 의해 발생된 것이다.

3) 산사태 발생 직후 현장계측결과 사면지반의 수평변위는 우기철의 지속적인 강우로 인하여 누적강우량이 증가함에 따라 계속적으로 증가함을 알 수 있다.

4) 산사태 발생시 측정된 사면지반의 수평변위를 통하여 사면활동면의 깊이를 결정할 수 있다. 즉, 사면활동면 발생 깊이에서부터 사면지반의 수평변위가 증가됨을 확인할 수 있으며, 사면활동면 발생 깊이는 점토층이 분포하고 있는 깊이와 일치함을 알 수 있다.

5) Bishop의 간편법을 이용한 사면안정해석결과 강우시 사면안전율은 1이하로 산사태가 발생가능성이 매우 큰 것으로 나타났으며, 사면활동면의 발생 깊이는 현장계측을 통하여 측정된 점토층이 분포하고 있는 깊이와 일치함을 알 수 있다.

## 사 사

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2001년 산학연공동연구개발사업(R&D 2001-B04)과 소방방재청에서 지원하는 2006년 자연재해저감기술개발사업(NEMA-06-NH-04)에 의하여 실시된 연구 결과임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 전하는 바이다.

## 참 고 문 헌

- 대한토목학회, 2000, 사면붕괴 방지대책 제도화를 위한 기본방안 연구, 행정자치부 국립방재연구소, pp.3-6.
- 박덕근, 1999, 우리나라 사면붕괴의 현황과 대책, 제4회 방재행정세미나 논문집, pp.177-214.
- 한국도로공사, 1996, 도로설계실무편람 -토질 및 기초-, 한국도로공사
- 한국도로공사, 1996, 사면안정처리공법에 관한 연구(II), 도로연 96-46-10, pp.195-198.

- 한국지반공학학회, 2001, 동해고속도로 동해-주문진간 4차로 확장공사 사면안정성 검토 및 대책공법수립 연구 보고서.
- 홍원표, 송영석, 2002, 우리나라에서의 사면안정대책공법 적용사례 연구, 한국지반공학학회 사면안정학술발표회 논문집, 초청강연, pp.1-28.
- Bishop, A.W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, Vol.5, pp.7-17.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1981, *Rock slope engineering*, Third Edition, Institute of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, *Underground excavation in rock*, Institute of Mining and Metallurgy, London, pp.61-86.

**송영석**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3035  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: yssong@kigam.re.kr

**홍원표**

중앙대학교 건설환경공학과  
156-756, 서울특별시 동작구 흑석동 221  
Tel: 02-820-5258  
Fax: 02-817-8050  
E-mail: wphong@cau.ac.kr

---

2007년 2월 2일 원고접수, 2007년 3월 13일 게재승인