

# 단양-가곡 간 도로공사구간 덕천터널 입구부 붕괴절토사면 안정성 해석

김승현<sup>1)\*</sup> · 구호분<sup>2)</sup> · 손영진<sup>3)</sup> · 김진환<sup>4)</sup> · 김승희<sup>5)</sup>

## 1. 서 론

연구대상구간 붕괴절토사면(STA.2+540~640 구간)은 단양군과 가곡면을 잇는 기존 국도 59호선의 국도대체도로공사(단양-가곡 도로건설공사) 구간에 포함되어 있다. 기존의 국도 59호선은 단양에서 고수재를 넘어 가곡면에 이르는 도로로 과거 지방도에서 승격된 국도이며, 기존 도로는 도로선형의 변화가 심하며, 도로의 침하가 관찰되고, 급경사 위험절토사면이 상존하는 등 도로이용자의 불안감이 매우 큰 구간을 포함하고 있다. 특히, 고수재는 2002년 태풍 루사에 의해 절토사면을 포함한 도로 붕괴로 도로 이용이 차단된 이력을 가지고 있고, 2006년 태풍 에위니아에 의해 추가 붕괴 징후가 발견되어 2006년 7월 25일부터 고수재의 중차량 이용이 제한되어 왔다.

조사대상 붕괴절토사면의 경우, 단양-가곡 도로건설공사 구간 중 덕천터널 입출구부 절토사면에서 발생한 붕괴로 인하여 상부 군도 6호선 중앙선 일부에 인장균열이 발생하여 도로 폐쇄직전에 봉착된 것으로 만일 군도 6호선을 폐쇄하면 단양과 영춘을 잇는 중차량의 이용이 완전히 제한되는 등의 문제점을 안고 있었다.

조사대상 절토사면은 덕천터널을 바라보면서, 우안사면, 좌안사면, 갱구부 사면으로 구분되며, 본 연구는 절토사면의 붕괴원인 분석과 더불어 상부군도 6호선의 안정성 확보를 위하여 주변의 열악한 지반조건에 대한 상세현장조사를 실시하고, 붕괴 절토사면의 붕괴 원인 분석, 열악지반을 고려한 사면 및 터널의 안정성 해석을 검토하는 데 목적이 있다.

## 2. 현장조사

우안사면과 갱구부 사면을 구성하는 암석은 설계 단계에서 반영하지 못하였던 탄질세일이며, 부분적으로 유백색 사암이 분포하고 있다. 탄질세일 분포지에는 다양한 방향과 조밀한 빈도의 파쇄대가 발달하고 있어 매우 열악한 지반환경을 가진다. 특히 탄질의 경우 지하수가 유입되게 되면 지지력 상실, 반고체상태의 유동성 지반 등 매우 열악한 지반특성을 나타낸다. 비교적 암반강도가 우수한 유백색 사암은 좌안사면의 STA.2+600~630 구간에 제한적으로 나타나며, STA.2+680 이후 구간에 넓은 분포를 가진다. 파쇄대를 중심으로 대규모 붕괴가 발생되었으며, 상부의 군도6호선에서 중·횡방향의 인장균열이 발달하는 등 추가 붕괴가 발생하여 교통 장애 등 많은 피해를 줄 수 있는 상황이었다.

우안사면의 STA.2+620~640 구간은 2006년 12월 3일 붕괴가 발생된 부분으로 주 붕괴 발생 시작 부분인 제3소단 상단부 법면에 대하여 집중적인 조사가 이루어졌다. 본 구간은 터널입구부에 바로 직접 인접하여 존재하는 부분으로, 제3소단 하단부는 1:0.6(60°)경사도

---

주요어 : 붕괴사면, 현장조사, 절토사면안정성해석, 터널안정성해석

- 1) 한국건설기술연구원 국토지반연구부 (sshkim@kict.re.kr)
- 2) 한국건설기술연구원 국토지반연구부 (hbkoo@kict.re.kr)
- 3) 한국건설기술연구원 국토지반연구부 (sonyjin@kict.re.kr)
- 4) 한국건설기술연구원 국토지반연구부 (goethithe@kict.re.kr)
- 5) 한국건설기술연구원 국토지반연구부 (ksh@kict.re.kr)

로 비교적 급경사로 구성되어 있으며, 락볼트와 소일네일링 보강 후 지보재를 철근으로 연결하여 보강을 실시한 상태였다.

붕괴부 내의 기반암은 탄질세일로서 층리면이 0.06 m 이하로 매우 조밀하게 발달하고 있으며, 운모류 광물이 층리면을 따라 집중적으로 발달하고 있는 상태였다. 층리 발달 방향은 쉼기파괴를 유발할 수 있는 방향이었으며, 붕괴부 주변으로 층리 및 절리의 발달 방향이 매우 다양하게 노출되고 있어 지반의 교란 정도가 뚜렷하다. 붕괴발생모드는 층리면을 따라 협재된 탄질토사가 우기시 유수의 주입으로 반고체 유체 상태로 층리면을 따라 서서히 빠지기 시작하면서 지지력 상실이 유발되었고, 도로하부의 세립자의 세굴현상과 붕괴부 상부 탄질세일의 세굴에 의해 변위가 발생된 형태로 퇴행성붕괴에 해당된다. STA.2+620~640 구간의 붕괴는 자연사면과 군도 6호선 지지력 상실로 이어져 군도 중심부에 인장균열이 발생하는 등 파급효과를 크게 하였다. 따라서 추가적인 안정화 조치를 취하지 않을 경우, 군도의 도로 전반에 걸쳐 붕괴가 이어질 수 있는 상황이었다.

군도 6호선은 STA.2+540~2+700 구간의 경우 터널입구부 및 터널굴착예정도로와 평행한 방향으로 달리다가 그 이후 구간에서는 좌측으로 휘어지는 형태를 가지고 있는데, 주로 STA.2+540~640 구간에서 인장균열이 관찰되고 있다. 인장균열의 경우, 군도 6호선의 중앙선을 따라 관찰되며, 붕괴발생 이전인 12월 1일부터 실균열(인장균열의 최초 조짐)이 인지되었고, 붕괴 발생과 더불어 인장균열로 급격히 확대되었다. 군도 6호선의 인장균열 발생 지점은 지형 특성상 산지를 성토하면서 도로를 조성하였던 것으로 추정되며, 상기 도랑에서 집수된 지표수가 도로 하부 원지반을 따라 붕괴 절토사면 쪽으로 유입되는 효과를 발생케 한 것으로 추정된다.

터널 갱구부 사면은 우안사면의 붕괴 발생 후 임시적으로 압성토 형태의 버력을 집적시켜 지지력을 확보시킨 상황이었다. 터널 입구부의 층리 발달 형태는 우안사면의 붕괴부에서 관찰되는 층리 발달 상태와 매우 유사하다. 터널입구부의 지반 내 발달하는 층리는 매우 조밀하게 발달되어 있으며, 연장성이 우수하고, 점토충진물을 다수 함유하고 있어 터널 설계 기준값인 RMR(Rock Mass Rating) 값이 현저히 떨어지는 상황이다. 층리의 발달 방향은 터널의 굴진 방향과 평행하며, 약 45°의 경사를 가지므로 굴진시 터널 굴착의 안정성은 “불량”에 해당되며, 무지보 자립시간이 짧을 것으로 예상되므로 굴진과 더불어 빠른 보강이 이루어져야만 안정적인 터널 굴착이 보장될 수 있는 상황이었다.

### 3. 안정성 평가

#### 3.1 우안사면 안정성 평가

본 지역의 토사의 경우, 붕적층에 해당되며, 붕적층의 시험결과 및 기존참고문헌 내용 등을 고려해 보았을 때, 점착력은 1.0 t/m<sup>2</sup>, 내부마찰각은 25°값을 사용하였다. 탄질세일과 사암의 경우, RMR을 이용한 경험식 및 참고문헌을 참조하여 최종값을 결정하였고, 파쇄대의 경우, 역해석을 통하여 도출된 방법을 이용하여 구한 강도정수의 범위 중 파쇄대가 통과하는 탄질세일의 내부마찰각 값이 20°에 해당되는 불연속면의 점착력 값을 참조하여 점착력은 1.6 t/m<sup>2</sup>, 내부마찰각 값은 20°로 최종 물성치를 적용하였다.

주요 붕괴발생부인 우안사면의 사면경사 및 사면경사방향은 50/330이며, 본 사면의 주요 불연속면의 대표군은 45/335(set 1, 파쇄대), 45/215(set 2, 층리), 60/055(set 3, 절리), 70/130(set 4, 절리)였다. 불연속면 발달 방향에 따른 암반사면의 안정성 평가를 위하여

DIPS를 이용하여 안정성 해석을 실시한 결과, 썩기파괴 발생가능성이 인지되었으며, 이에 대한 한계평형해석에서는 우기시 최소안전율이 0.84로 허용안전율에 미달되므로 추가적인 보강이 필요한 것으로 나타났다.

### 3.2 덕천터널 입구부 안정성 평가

덕천터널 입구부에 나타나는 대상 지반의 특성을 고려하였을 때, 현재 덕천터널 설치 예정 구간인 시점부 지반은 터널입구부(STA.2+640 지점)으로부터 굴착 연장 약 40 m(STA.2+680 지점)까지는 매우 열악한 탄질 세일로 구성되어 있다.

터널입구부(STA.2+640)에 대하여 기존설계안과는 다르게 지반조건을 달리하여 강관다단 그라우팅을 1열, 슛크리트 적용, 락볼트를 적용하였을 경우에 대하여 FLAC 2D를 이용하여 안정성해석을 실시하였다.

해석결과로부터 터널의 각 위치별 변위량을 살펴보면, 천단부에 강관다단 그라우팅 1열을 보강하였을 경우 920 mm의 최대 변위가 발생하였다. 이 변위값은 기존 안정해석에서 수행한 터널안정성 해석 결과 값에 비해 변위가 무려 10~20배 이상 증가했음을 확인할 수 있었다. 또한 슛크리트에 작용하는 축력과 모멘트는 상기 언급된 토피 및 지표사면 특성에 의해 주로 천단부에서 크게 작용하고 있었다. 안정해석 결과, 슛크리트에 작용하는 전단응력이  $15.5 \text{ tf/m}^3$  으로서 허용기준을 상회하게 나타났다. 락볼트에 작용하는 축력의 분포는 천단부보다는 주로 측벽에 설치된 락볼트에 상대적으로 큰 축력이 작용하는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

단양-가곡 간 우회도로 공사 구간 내 조성된 덕천터널 설치구간에 양안 사면 및 입구부 사면에 대하여 현장조사 및 안정성 해석을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 조사대상 절토사면을 구성하는 암석은 주로 탄질세일이며, 다양한 방향과 조밀한 빈도의 파쇄대가 발달하고 있어 매우 열악한 지반환경을 가진다.
- 2) 본 사면의 붕괴는 열악한 지반 내로 우기시 우수가 침투함으로서 토립자가 이동되어 점토로 충전된 파쇄대를 따라 슬라이딩이 발생한 상황으로 추가적인 안정화 공법의 적용이 요구되는 상황이었다.
- 3) 절토사면 내 나타나는 불연속면에 대하여 안정해석을 검토한 결과, 썩기파괴 및 평면파괴의 가능성이 인지되었고, 우안사면의 썩기파괴 한계평형해석결과에 의하면 우기시 산출 안전율이 설계기준 안전율에 미달되어 추가적인 보강이 요구되는 것으로 확인되었다.
- 4) 터널 갱구부의 기존설계안에 대하여 수치해석을 실시한 결과, 920 mm의 최대 변위가 인지되었고, 슛크리트에 작용하는 축력과 모멘트는 주로 천단부에서 크게 작용하는 것으로 나타났다.