

변성퇴적암류로 구성된 대규모 암반사면의 붕괴원인 분석에 관한 시례 연구

박부성^{1)*}, 조현²⁾, 차승훈³⁾, 이기환⁴⁾

Case Study on the Causes for the Failure of Large Scale Rock Mass Slope Composed of Metasedimentary Rocks

Boo Seong Park, Hyun Jo, Seung Hun Cha and Ki Hwan Lee

Abstract For the design of large scale rock slope which has complex formations and geological structures, generally, insufficiency of geotechnical investigations and laboratory tests are the main factors of slope failures during construction. In such case, remedial measures to stabilize slope should be selected and applied through reliable investigations and analysis considering the geotechnical characteristics. The rock slope of this study, one of the largest cut slopes in Korea with a length of 520.0 m and maximum height of 122.0 m, consists of metasedimentary rocks. And a case study on the causes of large-scale rock slope failure was carried out by analysis of landslides history and site investigations during construction. When the slope with the original design slope of 0.7:1.0 (H:V) was partially constructed, the slope failure was occurred due to the factors such as poor conditions of rocks (weathered zone, coaly shale and fault shear zone), various discontinuities (joints, foliations and faults), severe rain storm and so on. The types of failures were rockfall, circular failure, wedge failure and the combination of these types. So, the design of slope was changed three times to ensure long-term slope stability. This paper is intended to be a useful reference for analyzing and estimating the stability of rock slopes whose site conditions are similar to those of this study site such as geological structures and geotechnical properties.

Key words Large scale rock slope, Metasedimentary rocks, Slope failure, Sliding history analysis, Slope stability

초 록 복잡한 지층 및 지질구조 특성을 보이는 대규모 절취사면의 경우 설계 시의 조사 및 시험의 한계성 등으로 인하여 지반특성파악 및 설계정수의 산정이 어려워 시공 중 사면활동이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 경우 시공 중 절취상태에서 지반특성에 부합된 최적의 조사 및 분석 과정을 통하여 합리적인 대책방안을 강구해야 한다. 본 연구에서는 변성퇴적암류로 구성된 현존 국내 최대 규모의 대절토사면(연장520 m, 최대절취고 약 122 m, 최대법면길이 약 212 m)을 대상으로, 활동이력분석과 시공 중 지반조사를 통하여 사면의 붕괴원인분석에 관한 시공사례연구를 실시하였다. 원설계 시 대상사면의 경사는 밸파암 기준 1:0.7을 적용하여 일부 시공하였으나 절취과정에서 지질요인, 강우 등 안정성을 저해하는 제반 요인에 의하여 다수의 지반활동이 발생하였으며, 계속적인 지반활동으로 인하여 대규모 산사태가 예상되는 매우 위험한 지반상태를 나타내고 있어, 이에 총 3차의 설계변경을 통해 사면의 장기 안정성을 확보하였다. 이러한 사례연구를 통하여, 본 지반조건과 유사한 지질 및 불연속면 특성을 나타내는 암반사면에 대한 안정성 분석, 평가 및 대책방안 수립을 위한 참고 자료가 되기를 기대한다.

핵심어 대절토사면, 변성퇴적암류, 사면활동, 활동이력분석, 사면안정

1. 서 론

국내에서는 산업화에 따른 산업기반시설의 확충이 요구됨에 따라 많은 건설공사가 진행되어 왔으며 특히 전국토의 약 70%가 산악으로 구성된 우리나라의 지형특성상 도로의 개설 및 화장 등에 따라 산악지를 통과하

¹⁾ 쌍용건설(주) 토목기술부 차장

²⁾ 쌍용건설(주) 토목기술부 부장

³⁾ 쌍용건설(주) 토목기술부 대리

⁴⁾ 쌍용건설(주) 토목기술부 차장

* 교신저자 : bspark@ssyenc.com

접수일 : 2006년 12월 1일

심사 완료일 : 2006년 12월 23일

는 대규모 절취사면의 시공이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 암반사면의 설계 시 충분한 조사 및 분석이 어려울 뿐만 아니라 한정된 시추조사 자료만으로 사면의 자반특성을 파악하기에는 한계가 있는데, 특히 복잡한 지층 및 지질구조적 특성을 보이는 대규모 절취사면의 경우는 더욱 그러하다. 이러한 대상사면에 대한 설계 시, 암반의 다양성, 불확실성, 현장조사 및 시험의 한계 등으로 현장지반의 특성파악 및 설계정수의 산정이 어려운 경우 이를 보완하기 위하여 시공 중 절취상태에서 자반특성에 부합된 최적의 조사방법과 해석과정을 통하여 합리적인 경사선정 및 대책방안을 강구해야한다. 이를 통해서 재해방지 뿐만 아니라 시공 중 사면활동에 의한 추가 건설비용을 최소화하도록 노력하여야 할 것이다. 또한 위험 가능성이 있는 사면에 대해서는 계측계획을 수립하여 사면의 거동을 체계적으로 감시할 필요가 있음을 물론이다.

본 연구에서는 변성퇴적암류로 구성된 현존 국내 최대 규모의 대절토사면을 대상으로 활동이력 분석 및 시공 중 지반조사(지표지질조사, 추가시추조사, 전기비저항탐사, 시추공영상촬영(BIPS), 현장 및 실내 시험 등)를 통한 붕괴원인 분석과, 사면 시공 중 원설계와 상이한 지층 및 불연속면의 출현에 따른 대규모 암반사면의 안정성 확보를 위한 일련의 수행과정을 소개하고자 한다. 이러한 사례연구를 통하여 본 지반조건과 유사한 지질 및 불연속면 특성을 나타내는 암반사면에 대한 안정성 분석, 평가 및 대책방안 수립 시 유익한 참고 자료가 되기를 기대한다.

2. 대상사면 현황

동해고속도로 3공구 현장에 위치한 본 대상사면은 연

장 520 m(STA. NO. 2+120~2+640), 최대절취고 약 122 m, 최대법면길이 약 212 m의 대규모 암반사면이다. 원설계 시 대상사면의 경사는 발파암 기준 1:0.7(약 55°)로서, 사면높이 10 m마다 소단폭 1.0 m를 적용하여 일부 시공하였으나 절취과정에서 지질요인, 강우 등 안정성을 저해하는 제반 요인에 의하여 다수의 지반활동이 발생하였으며, 지속적인 지반활동으로 인하여 대규모 산사태가 예상되는 매우 위험한 지반상태를 나타내고 있었다. 이에 총 3차에 걸친 설계변경으로, 법면경사는 도로계획고 상부 60 m를 기준으로 위로는 경사 1:1.2~1.8, 사면높이 5 m마다 소단폭 1 m 및 20 m마다 소단폭 3 m로, 아래로는 경사 1:1.0, 사면높이 10 m마다 소단폭 1 m 및 20 m마다 소단폭 3 m로 변경 시공되었으며, 사면보강은 도로계획고 상부 60 m를 기준으로 위로는 일부 불량암질구간을 대상으로 국부적인 FRP 보강그라우팅공법이, 아래로는 전구간을 대상으로 앵커공법을 적용(부분적 억지말뚝공 병행)한 전면적인 보강공법이 시행되었다.

본 연구대상사면의 경우 연장 및 절취고 측면에서 볼 때 그 규모가 대형이므로 효율적인 안정성 검토를 위하여 지형, 지질구조 및 기 활동현황 등을 고려하여 대상 구간을 3분할 하였으며 Fig. 1에 분할된 조사대상구간의 전경을 나타내었다.

3. 지형 및 광역지질 개요

3.1 지형

본 연구지역은 행정구역상 강릉시 옥계면 낙풍리에 해당되며, 강동면과 경계를 형성하는 밤재고개의 남쪽에 위치한다. 또한 연구지역의 동쪽에는 국도 7호선이 남북방향으로 지나가고 있다.

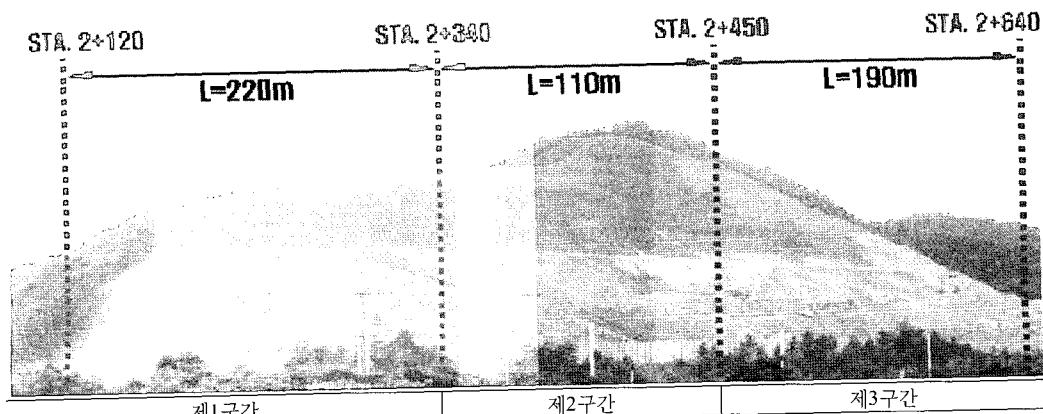


Fig. 1. Study site divided into three zones

산계는 전반적으로 남에서 북으로 발달하는 1차 산계에서 방사상으로 뻗어난 2차 능선 중 일부로서, 정상부에서 해안쪽의 동쪽방향으로 발달한 경사 산지를 이루고 있다.

수계는 만덕봉, 피래산에서 발원한 낙풍천이 서에서 동으로 흘러 동해로 유입되고 있으며, 연구대상인 사면의 북쪽에 소규모의 골짜기가 형성되어 있으나 물은 거의 흐르지 않는다.

3.2 광역지질

본 연구지역 일대는 지체구조적으로 북북동에서 남남서의 방향성을 가진 옥천대의 최상부에 해당되며, 본 옥천대를 따라 분포하는 국내 유명 무연탄 탄전들 중 강릉탄전에 속한다. 조사지역 일대는 고생대 석탄기에서 폐름기에 걸쳐 퇴적된 평안누총군의 하부 지층인 만항층에 해당되는 퇴적암류가 분포한다. 본 만항층의 층서적 평균 두께는 약 350 m이나 습곡에 의하여 약 4 km의 폭을 보이기도 한다. 분포암석은 주로 담녹색 셰일이 우세하며 암회색 셰일, 세립질 사암으로 구성되어 있고, 암회색 셰일 속에는 백색의 중·조립 사암과 백색~분홍색의 렌즈상 석회암이 협재되어 있다. 또한 만항층 중부에는 2매의 얇은 석탄층이 협재되어 있다고 보고되고 있다(대한지질학회, 1999). 본 연구대상 사면

에는 상기 퇴적암류가 광역변성작용에 의하여 부분적으로 저변성셰일, 천매암, 변성사암 등의 변성정도가 다소 낮은 변성퇴적암류로 변하였으며 기존의 층리 외에 염리 또한 발달하고 있다. 연구지역 일대에 대한 광역지지도(대한지질학회, 1999)를 Fig. 2에 나타내었다.

4. 사면활동 이력 분석

4.1 활동 현황

본 대상사면은 주로 저변성셰일, 천매암, 변성사암 등 퇴적기원의 변성암류가 호층으로 분포하고 부분적으로 탄질셰일이 협재되어 발달한다. 암질상태는 점토광물이 많이 함유된 암종 및 지질구조적 특성상 굴착 후 급속한 풍화상태를 보여 풍화암~풍화토 상태의 암질이 연암상태의 암질과 교호하여 빈번하게 출현하고 있다. 지질구조적으로는 연성 및 취성 변형작용에 의한 습곡과 단층의 발달이 현저하여 부분적으로 두꺼운 단층점토가 협재되어 있을 뿐만 아니라 파쇄대를 형성하는 매우 복잡한 지질구조를 나타내고 있다. 본 구간에 발달하고 있는 불연속면 중에는 단층 외에 절리, 층리 및 염리 등이 발달하고 있는데 층리 및 염리는 쉽게 쪼개지며 변형되는 특징을 나타내고 있을 뿐만 아니라 아주 매끄러운 면상태를 보인다. 본 염리면에는 저변성작용 시 생성된 운

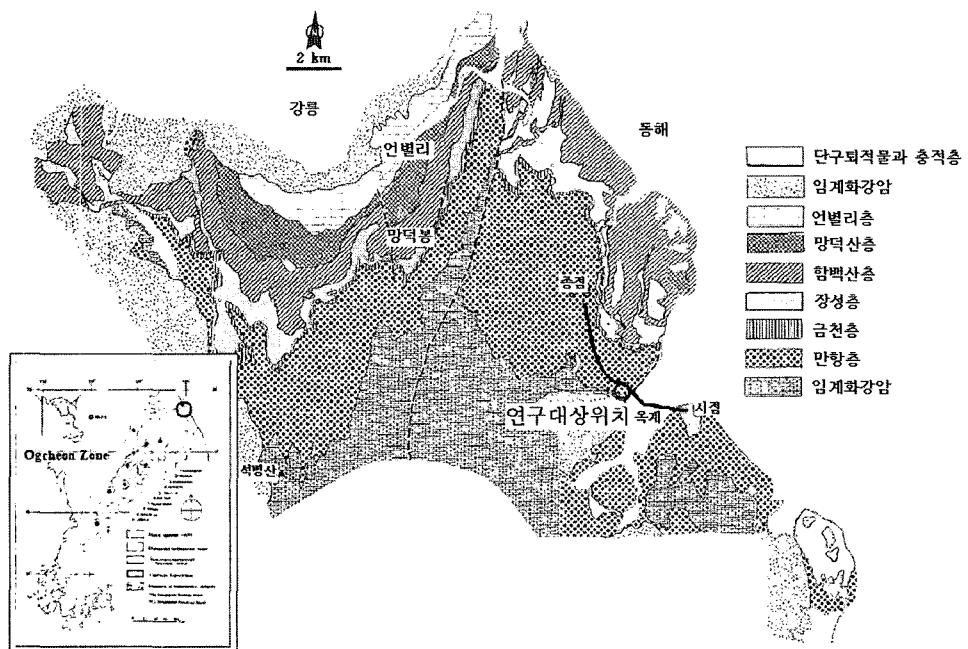


Fig. 2. Regional geological map of the study site (The Geological Society of Korea, 1999)

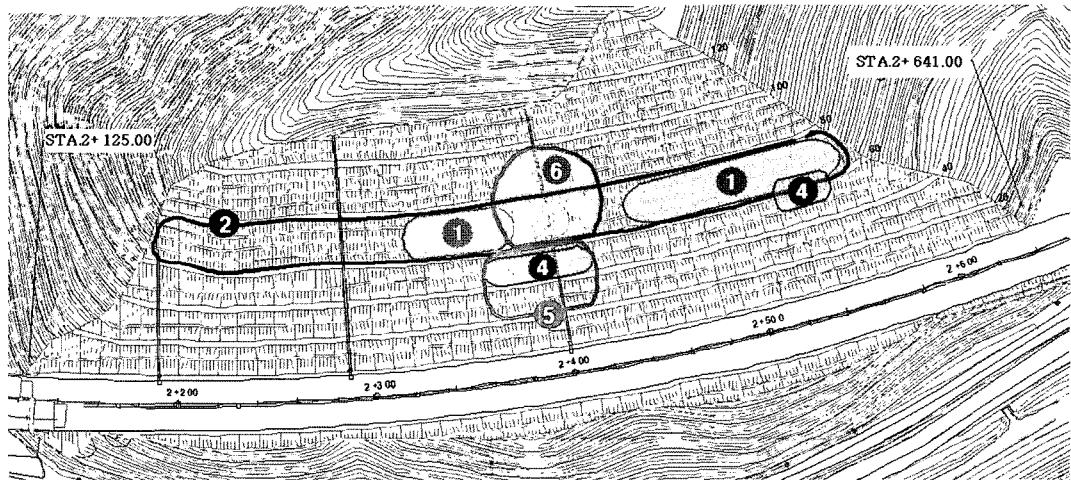
모류 등의 광물입자가 재배열되어 발달하고 있는데 이러한 층리면과 엽리면은 불연속면의 전단강도를 저하시키는 요인이 될 것으로 추정된다.

본 사면에는 상기와 같은 불량한 조건의 암질, 불연속면 및 지질구조 특성 외에 태풍을 동반한 집중호우 등의 영향에 의하여 다수의 사면활동이 발생하였다. 복잡한 지질상태를 보이는 본 대상구간에는 낙석, 원호활동, 쇄기활동 및 복합활동 등 다양한 활동양상을 나타내고 있으며, 소규모 낙석으로부터 대규모 복합활동에 이르는 다양한 활동구모를 보이고 있다. 특히 STA. NO.

2+360~2+430 구간에는 추정 활동심도가 최대 약 20.0 m, 활동체적이 약 21,000 m³에 이르는 대규모 활동이 발생하기도 하였다. 대상사면의 사면활동 발생 현황을 Fig. 3에 나타내었다(태조엔지니어링, 2004). 또한 본 구간에 발생한 대표적인 사면활동 양상을 Fig. 4~Fig. 7에 나타내었다.

4.2 활동 이력

2000년 3월에 착공하여 2004년 12월 준공에 이르기 까지 약 4년 10개월 동안 대규모 암반사면은 원설계와



구분	발생일자	발생위치	활동규모			비고
			면적 (m ²)	체적 (m ³)	깊이 (m)	
①	2001. 4.~10.	STA. NO. 2+320~2+380 STA. NO. 2+440~2+560	증 · 소규모 활동 일부 발생			• 단층파쇄대 및 탄질세일/세일/천매암의 풍화대를 따른 원호활동 및 낙석
②	2002. 7.~9.	STA. NO. 2+120~2+620	증 · 소규모 활동 다수 발생			• 단층파쇄대 및 탄질세일/세일/천매암의 풍화대를 따른 원호활동 및 낙석
		STA. NO. 2+520~2+550	260	400	2.0~3.0	• 태풍 (루사)을 동반한 집중호우: 강우량 101 mm/hr
③	2003. 2.	STA. NO. 2+420	200	100	0.5~1.0	• 탄질세일/세일/천매암의 풍화대를 따른 원호활동 • 용설에 인한 지반강도 저하
④	2003. 6.	STA. NO. 2+520~2+550	1,350	500	0.5	• 단층교차에 의한 쇄기활동
	2003. 7.	STA. NO. 2+360~2+420	700	1,000	1.0~1.5	• 강우에 의한 지반강도 저하
⑤	2003. 10.	STA. NO. 2+360~2+420	4,200	21,000	3.0~20.0	• 단층교차 쇄기, 평면 및 원호의 복합활동 • 강우에 의한 지반강도 저하 • 인장균열 발생
⑥	2004. 1.	STA. NO. 2+370~2+430	1,800	5,000	2.0~14.8	• 인장균열 확장

Fig. 3. Landslides history

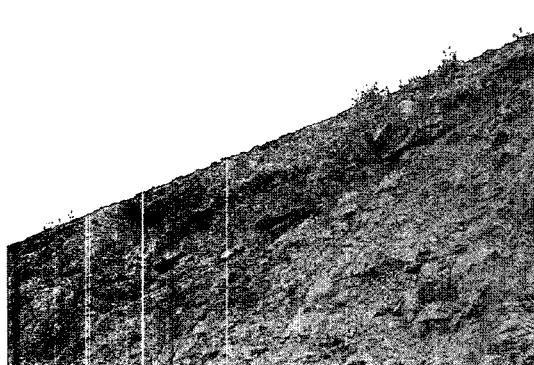


Fig. 4. Circular failure along fault shear zone

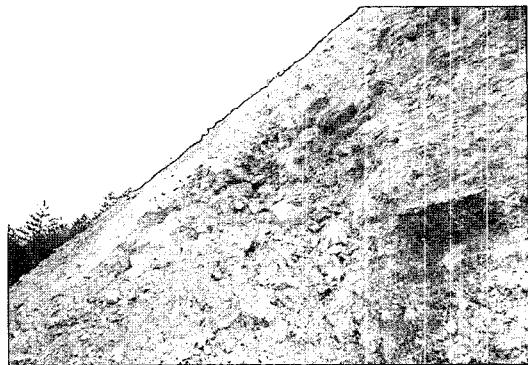


Fig. 5. Circular failure within weathered zone

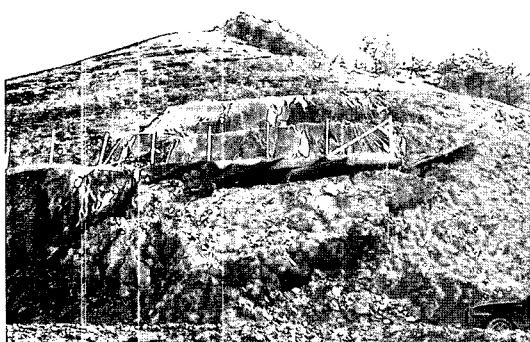


Fig. 6. Wedge failure caused by intersection of faults

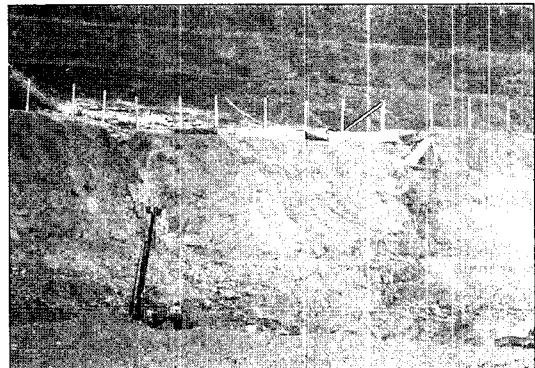
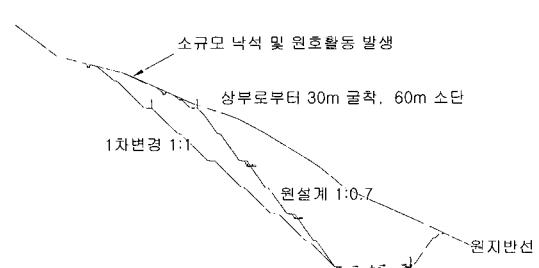


Fig. 7. Complex failure mode

상이한 복잡한 암종, 암질 및 불연속면 등의 출현으로 시공 시 수차례에 걸친 사면활동이 발생하였으며, 이에 경제성 및 시공성을 고려한 사면의 안정성을 확보하기 위하여 산학연 각계 지반전문가들의 심도있는 조사, 분석 및 평가가 수행되었다. 이러한 일련의 과정을 사면 활동 발생 및 검토 순서에 따라 다음과 같이 정리하여 나타내었다(태조엔지니어링, 2004).

가. 1차 사면안정 검토

대상사면의 원설계 경사인 1:0.7에 준하여 사면상부로부터 약 30 m 정도 절취 중 2001년 4월~10월 기간 동안 STA. NO. 2+320~2+380 및 STA. NO. 2+440~2+560 구간에 중·소규모의 활동이 부분적으로 발생되었으며, 조사결과 활동원인은 단층대 발달에 기인한 원호활동 및 낙석에 의한 것으로 분석되었다. 대상사면은 단층 및 단층파쇄대가 발달하여 암반의 대기 노출과 지하수에 의한 풍화 및 침식작용의 영향으로 추가 사면 활동이 예상되어, 사면경사를 1:0.7에서 1:1.0으로 변경

Fig. 8. 1st slope failure and stabilizing measures (2002.2)

하고 부분적으로 FRP 보강을 실시하는 것으로 대책을 수립하였다(1차 설계변경 : 2002년 2월). 1차 사면안정 검토 현황을 Fig. 8에 나타내었다.

나. 2차 사면안정 검토

1차 설계변경에 의하여 1:1 경사로 시공 중 2002년 7월~9월 기간 동안 STA. NO. 2+120~2+620 구간의

도로계획고 상부 60 m~80 m의 여러 구간에 걸쳐 중·소규모의 활동이 발생되었는데 특히, STA. NO. 2+520~2+550 구간에는 추정 활동심도가 약 2.0~3.0 m, 활동체적은 약 400 m³에 이르기도 하였다. 조사결과 활동원인은 단층파쇄대 및 탄질세일, 세일, 천매암의 호충 풍화대를 따른 원호활동 및 낙석에 의한 것으로서, 태풍을 동반한 집중호우(강우량 101 mm/hr)로 지반 내 우수침투에 의한 본 연약대의 지반강도 저하 및 간극수압의 증가로 인한 유효응력 감소에 의하여 활동이 발생한 것으로 분석되었다. 이에 대한 대책으로 도로계획고 상부 60 m에 위치한 소단(이하 60 m 소단)의 상부사면을 대상으로 구간별로 사면경사를 각각 제1구간 및 제2구간은 1:1.0에서 1:1.8로, 제3구간은 1:1.0에서 1:1.2로 변경하였다(2차 설계변경 : 2002년 11월). 2차 사면안정 검토 현황을 Fig. 9에 나타내었다.

다. 3차 사면안정 검토

2차 설계변경에 의하여 제2구간을 대상으로 60 m 소단 상부는 1:1.8 경사, 60 m 소단 하부는 1:1.0 경사로 40 m 소단까지 시공 중 2003년 2월에 STA. NO. 2+400 부근의 60 m 소단 상부에 사면활동이 발생되었다. 이때 추정 활동심도는 약 0.5~1.0 m, 활동체적은 약 100 m³에 이르렀다. 조사결과 활동원인은 탄질세일, 세일 및 천매암의 호충 풍화대를 따른 원호활동에 의한 것으로서, 동절기기에 내린 눈이 녹아 지층에 유입되어 본 연약대의 지반강도를 저하시킴으로써 활동이 발생된 것으로 분석되었으며, 이에 대한 대책으로 붕괴구역을 대상으로 FRP 보강그라우팅 공법(C.T.C = 2.0 m×2.0 m, L = 8.0 m)을 적용하였다. 3차 사면안정 검토 현황을 Fig. 10에 나타내었다.

라. 4차 사면안정 검토

60 m 소단 하부를 1:1.0 경사로 40 m 소단까지 시공 중 2003년 6월에 제3구간에 속하는 STA. NO. 2+520~

2+550 구간의 60 m 소단과 50 m 소단사이에서 사면활동이 발생되었는데, 이때 추정 활동심도는 약 0.5 m, 활동체적은 약 500 m³에 달했다. 또한 상기 활동 발생 한 달 후인 2003년 7월에는 제2구간에 속하는 STA. NO. 2+360~2+420 구간의 60 m 소단과 50 m 소단사이에서도 사면활동이 발생되었는데, 이때의 추정 활동심도는 약 1.0~1.5 m, 활동체적은 약 1,000 m³에 이르렀다. 조사결과 활동원인은 두 구간 공히 약 10~25 cm 내외의 두꺼운 단층점토를 협재한 교차 단층(경사와 경사 방향이 각각 54/312와 33/082 및 90/135와 40/098인 단층)의 발달에 의한 쇄기활동에 의한 것으로서, 당시 본 지역에 내린 다량의 강우에 의한 우수침투로 본 연약대의 지반강도 저하 및 간극수압의 증가로 인한 유효응력 감소에 의하여 활동이 발생된 것으로 분석되었으며, 이에 대한 대책으로 두 붕괴구역을 대상으로 FRP 보강그라우팅 공법(C.T.C=2.0 m×2.0 m, L=15.0 m)을 적용하였다. 4차 사면안정 검토 현황을 Fig. 11에 나타내었다.

마. 5차 사면안정 검토

제2구간을 대상으로 60 m 소단 하부를 1:1.0 경사로 20 m 소단까지 시공 중 2003년 10월에 STA. NO. 2+360~2+420 구간의 70 m 소단과 20 m 소단사이에서

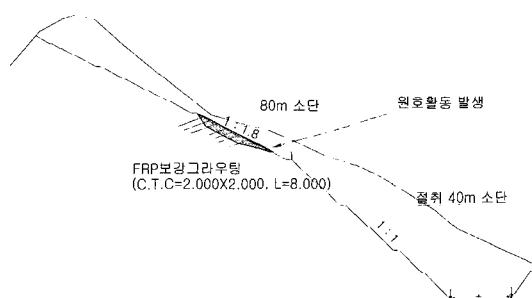


Fig. 10. 3rd slope failure and stabilizing measures (2003.2)

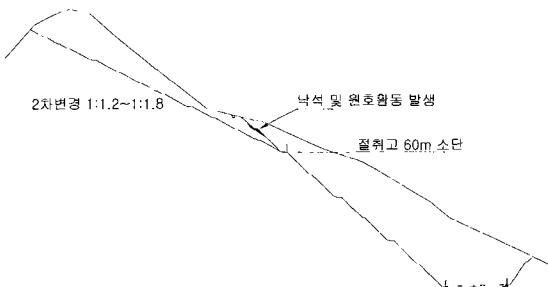


Fig. 9. 2nd slope failure and stabilizing measures (2002.11)

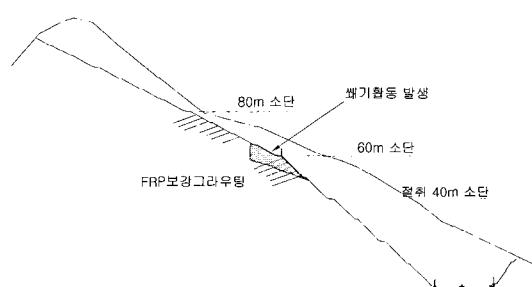


Fig. 11. 4th slope failure and stabilizing measures (2003.7)

대규모 사면활동이 발생되었는데, 이때 추정 활동심도는 약 3.0~20.0 m, 활동체적은 약 21,000 m³에 달했다. 조사결과 활동원인은 약 10~25 cm 내외의 두꺼운 단층점토를 협재한 교차 단층(경사와 경사방향이 55/350 및 44/104인 두 단층)의 발달에 의한 쇄기, 평면 및 원호의 복합활동에 의한 것으로서, 당시 본 지역에 내린 집중 호우로 지반 내 우수침투에 의한 본 연약대의 지반강도 저하 및 간극수압의 증가로 인한 유효응력 감소에 의하여 활동이 발생된 것으로 분석되었으며, 이에 대한 대책으로 붕괴구역을 포함한 60 m 소단 하부의 전 사면을 대상으로 앵커공법을 주 보강으로 하고 부분적으로 마이크로파일 및 FRP 보강그라우팅 공법을 병행하여 적용하는 것으로 계획하였으나, 이후 본 활동구간에 추가 활동이 발생함으로 인하여 실시되지는 못하였다. 5 차 사면안정 검토 현황을 Fig. 12에 나타내었다.

바. 6차 사면안정 검토

제2구간의 복합활동에 의한 인장균열 발생 시점인 2003년 10월로부터 약 3개월 후인 2004년 1월에 기존의 인장균열이 상부로 확대되면서 추가 활동이 발생되었다. 추가 활동은 기 활동구간과 유사한 STA. NO. 2+370~2+430 구간의 95 m 소단과 60 m 소단사이에

서 발생되었는데, 이때 추정 활동심도는 약 2.0~14.8 m, 활동체적은 약 5,000 m³에 이르렀다. 조사 및 검토 결과 이에 대한 대책으로 제1구간과 제3구간은 앵커공법으로, 대규모 활동이 발생한 제2구간은 앵커, 대구경 강관다단 그라우팅 및 강관말뚝 공법을 실시하는 것으로 하였다(3차 설계변경 : 2004년 2월). 6차 사면안정 검토 현황을 Fig. 13에 나타내었다.

5. 지반조사

5.1 조사내용

대상사면은 대하여 원설계 시 지표지질조사, 시추조사(총 4공, 심도 : 4.5~5.5 m), 굴절법 탄성파탐사, 토질 물성 및 역학시험, 암석시험(일축압축강도) 등의 제한된 조사자료를 바탕으로 사면설계가 이루어져 대상지반에 대한 정확한 지층특성이 설계에 반영되지 못하였다. 원설계 시 대상사면의 시추조사 결과 및 암반사면 안정해석 결과를 Table 1에 나타내었다(한국도로공사, 1997).

본 사면구간은 고생대 후기 쇄설성 퇴적물의 퇴적 후 수차에 걸친 큰 지각변동의 영향으로 단층과 습곡의 발달이 매우 현저한 교란된 지층구조를 나타내고 있을 뿐만 아니라 접토질 기원의 저변성 퇴적암류가 파쇄 및

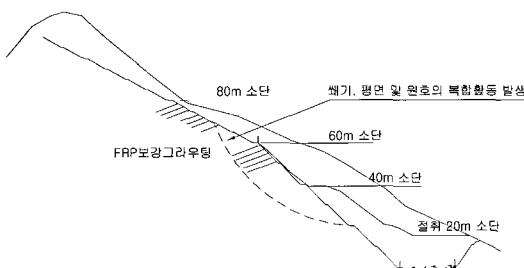


Fig. 12. 5th slope failure and stabilizing measures (2003.10)

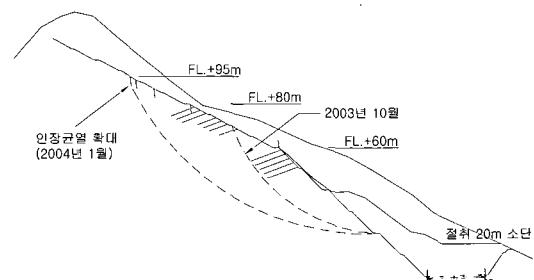


Fig. 13. 6th slope failure and stabilizing measures (2004.2)

Table 1. Results of borehole survey and slope stability analysis of the original design

검토구간		시추조사결과				사면안정해석 (한계평형해석)				적용 경사	비고	
위치	사면고 (m)	시추공	R.Q.D	T.C.R	절취 경사	사면	1:0.5	1:0.7	1:1.0	절취 경사		
STA. NO. 2+120~2+300	0~37	CB-1,2	0	7~8	1:0.8	상행선	2.275	3.962	⊕	1:0.7	1:0.7	
						하행선	0.827	1.352	⊕	1:0.7	1:0.7	사면보강 병행
STA. NO. 2+300~2+430	0~62	CB-2	0	7~8	1:0.8	상행선				1:0.5	1:0.7	
						하행선	0.622	⊕	⊕	1:0.7	1:0.7	사면보강 병행
STA. NO. 2+430~2+640	0~89	CB-3,4	0	5~7	1:0.8	상행선	1.486	⊕	⊕	1:0.5	1:0.7	
						하행선	0.795	1.210	⊕	1:0.7	1:0.7	사면보강 병행

주) ⊕ : 사면경사 < 절리면 경사

풍화축진에 의하여 풍화대의 발달이 빈번하고 이러한 풍화대가 연암 상태의 암질과 호층을 형성하며 반복적으로 발달하고 있다. 따라서 대상사면은 수직 및 수평적 지층구조가 매우 복잡하고 불량암질의 혼재정도가 크며 굴착 중 수차례 걸친 사면활동이 발생한 불안정한 사면을 형성하고 있으므로 대상지반에 대한 정밀한 지반상태 파악을 통한 효율적인 사면안정 설계를 위하여 시공 중 지반조사가 필수적으로 요구되었다.

시공 중 지반조사로는 지표지질조사(6회), 전기비저항탐사(3측선), 공내영상촬영(BIPS, 2공), 시추조사(수직시추 : 12공, 경사시추 : 5공), 공내전단시험(8회), 공내재하시험(12회), 슈미트햄머시험(10회), 직접전단시험(파쇄대 대상, 4회), 절리면전단시험(4회), 점하중강도시험(75회), 물성시험(단층대 시료 4회, 암석 시료 6

회) 등이 실시되었으며 시공 중 지반조사 위치도 및 조사현황을 Fig. 14 및 Table 2에 각각 나타내었다.

5.2 조사결과

가. 지표지질조사

총 6차에 걸친 사면안정검토 시마다 굴착 중인 노출사면을 대상으로 지표지질조사를 실시하였다. 전반적인 지질현황은 다음과 같으며 시공 중(1:0.7 경사) STA. NO. 2+310~2+380 구간에 대한 사면응용지질도를 Fig. 23에 나타내었다.

1) 구성암석

본 대절토사면부는 고생대 평안계에 해당하는 변성퇴

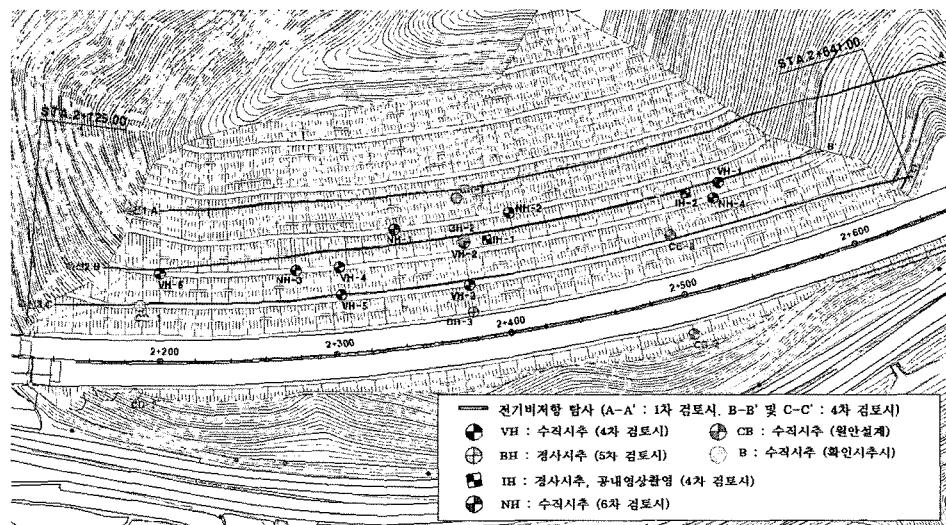


Fig. 14. Geotechnical investigations in site

Table 2. Summary of geotechnical survey

구 분		내 용
지질조사	• 지표지질조사	6회
물리탐사	• 전기비저항탐사 • 공내영상촬영 (BIPS)	3측선 1,580 m 2공
현장시험	• 시추조사 • 공내전단시험 • 공내재하시험 • 슈미트햄머시험	총 17공 623.9 m (수직 : 12공 444.0 m, 경사 : 5공 179.9 m) 8회(단층파쇄대, 단층점토, 풍화대 대상) 12회(단층파쇄대, 풍화대, 세일, 사암 대상) 10회
실내시험	• 직접전단시험 • 절리면전단시험 • 점하중강도시험 • 물성시험	4회 (파쇄대 대상) 4회 75회 총 10회 (단층대 시료 4회, 암석 시료 6회)

적암류가 주분포하고 있다. 암종은 저변성세일 및 천매암(Phyllite)이 주를 이루며, 부분적으로 탄질세일(Coaly Shale), 사암 및 변성사암 등이 혼재되어 분포한다. 대상사면에 주분포하고 있는 암종의 발달상태를 Fig. 15~Fig. 18에 나타내었다.

2) 암질특성

• 저변성세일

이질기원의 세일이 낮은 정도의 변성작용을 받아 형성된 암석으로서 공정석(Chiarolite) 등의 변성광물이 점문상조직을 보이며 국부적으로 산출된다. 또한 장석류의 2차 변질광물로 점토광물의 일종인 견운모(Sericite)가 부분적으로 생성되어 있어 부분적으로 천매암화가 진행되고 있음을 알 수 있으며 이러한 견운모 등 운모류의 생성은 불연속면 및 암반의 전단강도를 약화시켜 사면의 안정성을 저해하는 요인 중의 하나가 될 수 있을 것으로 사료된다.

본 암석의 풍화상태는 굴착에 의한 암석노출 초기 대체로 중간풍화(M.W)~약간풍화(S.W) 상태를 보이나, 부분적으로 완전풍화(C.W)~심한풍화(H.W) 상태의 풍화대(폭은 대체로 0.5~2.0 m이나 부분적으로 25 m 내외의 큰 폭을 보이기도 함)가 발달하고 있으며 암석의 종류, 암질특성 및 습곡작용 등의 영향으로 층리면과 엽

리면을 따른 쪼개짐(Fissility)이 발달되어 나타나는데 이는 굴착 후 풍화촉진에 의하여 더욱더 심화되는 특성이 있다. 또한 풍화대 및 파쇄대를 제외한 연암이상 암질의 경우 추정 일축압축강도는 대체로 25~50 MPa, 부분적 50~100 MPa의 보통강함(Moderately Strong) 정도의 강도특성을 보이며 불연속면 간격은 대체로 0.2~0.6 m 내외로 블록형 암괴를 형성하고 있다.

• 천매암

세일의 광역변성작용에 의하여 형성된 암석으로 대체로 완전풍화(C.W)~심한풍화(H.W) 상태를 보이는 풍화대(폭은 대체로 0.5~2.0 m이나 부분적으로 20 m 내외를 보이기도 함)를 형성하고 있으나 부분적으로는 불연속면 간격 0.2~0.6 m 내외, 추정 일축압축강도 5~25 MPa 내외의 블록형 암괴를 형성하고 있다.

본 충은 굴착 후 풍화작용의 촉진으로 인하여 점토화가 진행되고 있으며, 편리(Schistosity)가 심하게 발달하고 있어 1 mm 이하의 세편상으로 쪼개지는 특성이 있을 뿐만 아니라 구성광물 중 견운모(Sericite)의 함량비율이 커 불연속면 및 암반의 전단강도를 크게 약화시켜 사면의 안정성을 저해하는 요인이 되고 있다.

• 탄질세일

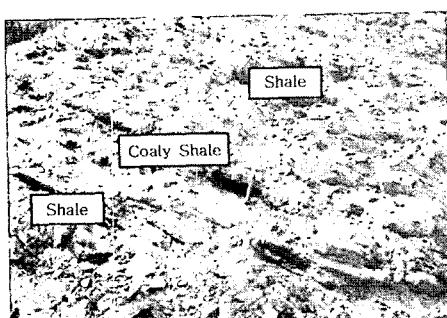


Fig. 15. Shales and coaly shales

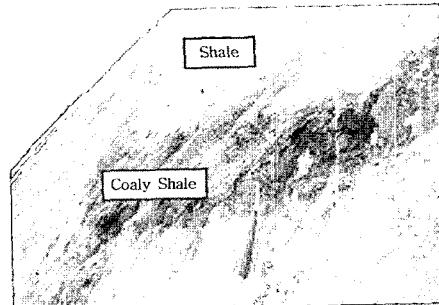


Fig. 16. Coaly shales

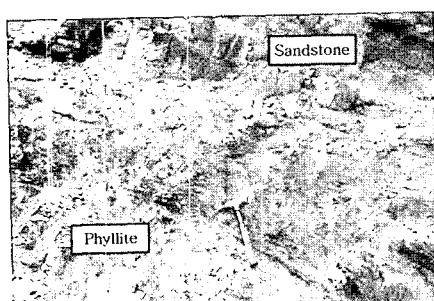


Fig. 17. Phyllites

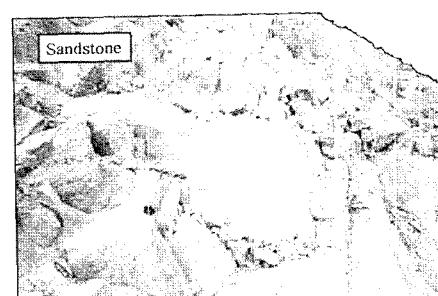


Fig. 18. Sandstones

주로 완전풍화(C.W) 상태의 풍화대를 형성하고 있으며 교란된 층리를 따라 부분적으로 협재되어 산출된다. 폭은 대체로 0.2~0.5 m 내외의 소폭으로 발달하고 있으며 본 층 역시 사면의 안정성에 불리하게 작용하는 요인 이 되고 있다.

• 사암 및 변성사암

본 층들은 부분적으로 협재되어 발달하며, 암질 및 풍화상태가 양호한 편으로서 추정 일축암축강도는 대체로 50~100 MPa의 강함(Strong) 정도의 강도특성을 보이고 풍화정도는 약간풍화(S.W) 상태, 불연속면 간격은 0.2~0.6 m 내외로 블록형 암괴를 형성하고 있다.

3) 불연속면

본 대상사면에는 층리, 엽리, 절리 및 단층 등 여러 종류의 불연속면이 복잡하게 발달하고 있다(Fig. 19 및 Fig. 20 참조). 층리는 대체로 사면의 주향과 사교하는 주향을 가지며, 경사는 약 50~70° 내외로서 절취면의 경사와 반대의 경사 방향을 가지나 부분적으로 습곡 및 단층 작용에 의하여 교란된 층리구조가 다수 확인된다. 엽리는 사면의 주향과 사교~수직하는 주향을 가지며, 절취

면의 경사와 같은 방향으로 약 10~30° 내외의 경사를 가지나 엽리 또한 층리와 마찬가지로 습곡 및 단층 작용에 의하여 교란되어 복잡한 방향성을 나타내는 부분이 다수 확인되기도 한다. 절리는 조사구간별로 무질서한 발달양상을 보이나 대체로 4~5 Sets의 절리군이 발달하며, 경사는 저각~고각까지 다양하게 발달하고 있다. 이러한 불연속면의 연속성은 대체로 Persistent하고 거칠도는 대체로 약간거침(Slightly rough)~매끄러움(Smooth), 절리틈은 절취 후 풍화 및 이완에 의하여 1~5 mm 정도를 보이며, 절리면에 철 및 망간 산화물이 피복되어 있고 실트 및 점토가 협재되어 있다.

4) 지질구조

본 대상사면은 오랜 지질시대를 거치면서 지질구조적으로 횡압력에 의한 연성변형작용 및 축성변형작용의 영향으로 습곡과 단층(역단층 및 충상단층)의 발달이 현저하다. 본 지역에 발달하는 대표적인 습곡과 단층의 예를 Fig. 21 및 Fig. 22에 나타내었다.

• 습곡

습곡은 완만한 경사(20~30° 내외)의 완사습곡(Open

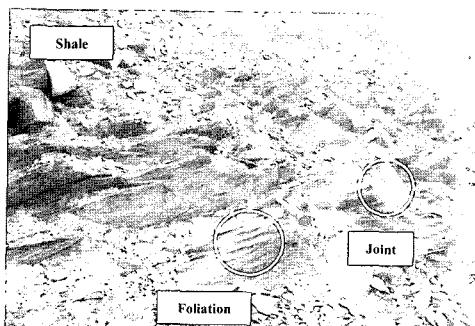


Fig. 19. Development of foliations and joints

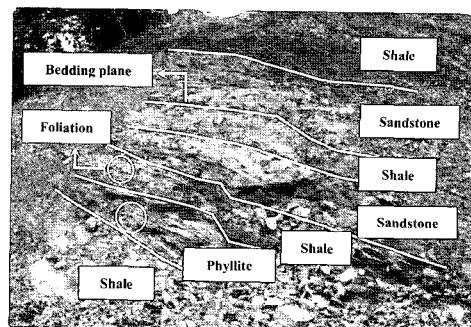


Fig. 20. Development of bedding planes

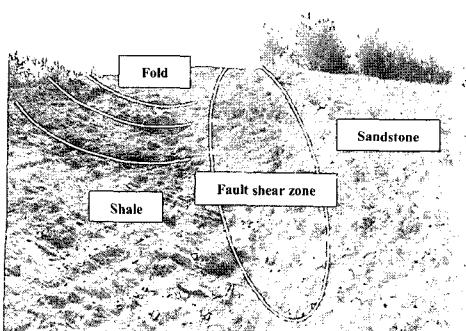


Fig. 21. Folds and fault shear zone (shale and sandstone zone)

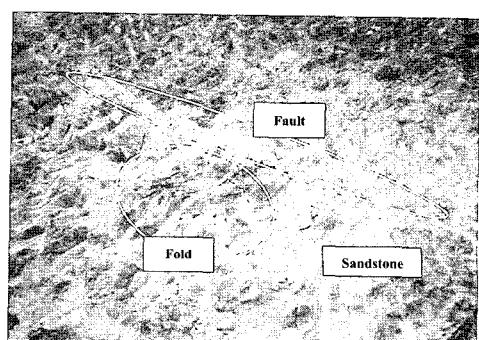


Fig. 22. Fold and fault (sandstone zone)

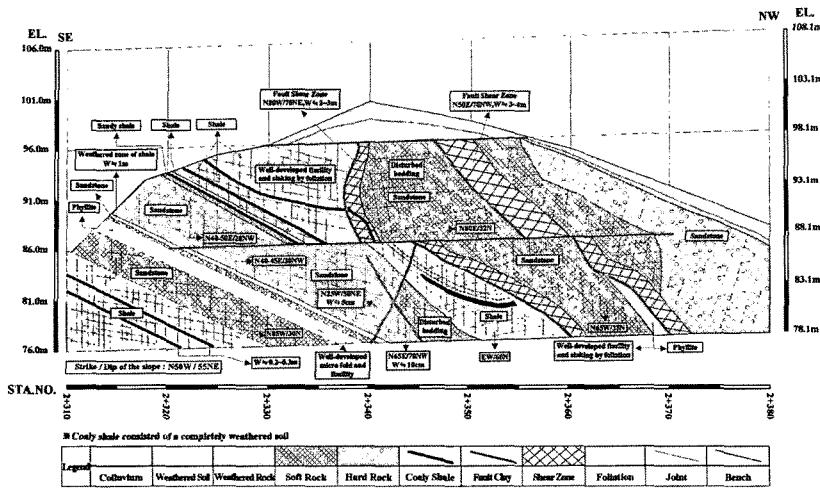


Fig. 23. Applied geologic map of the study area during construction (STA. NO. 2+310~2+380)

Fold) 형태를 보이며, 횡압력에 의해 층리 및 엽리가 조밀하게 발달하고 있어 풍화 및 광물배열상태에 의해 분리면의 쪼개짐이 매우 심하게 발달하고 있다. 대상사면의 시점에서 종점방향으로 볼 때 향사→배사→향사→배사구조를 나타내며, 부분적으로 날개(Wing)를 따른 소습곡이 발달하여 복향사 및 복배사의 구조도 동시에 나타난다. 특히, 향사습곡 발달부는 강우 시 집수에 의한 간극수압의 증가로 유효응력이 감소되어 사면의 안정성에 매우 취약한 조건을 제공할 것으로 사료된다.

• 단층

사면의 주향과 거의 수직~사교하는 주향으로 주로 발달하고 있으며, 경사는 약 40~80° 내외로 다양하게 나타나고 있다. 단층의 종류로는 역단층(Reverse fault) 및 충상단층(Thrust fault)으로서, 단층의 출현빈도가 다소 큰 편이다. 구성물질은 단층점토가 주를 이루며 일부 각력을 포함하기도 하는데 그 폭은 약 5~30 cm 내외이다. 본 단층점토 주변부는 부분적으로 수 m 내외의 폭으로 파쇄대를 형성하기도 한다. 또한 60 m 소단을 기준으로 상부사면의 경우 단층면을 따라 일부 5~30 cm 내외로 틈이 벌어진 분리면이 인지되기도 하는데 이는 엽리면 또는 층리면을 따른 Creep 변형에 의한 결과로 추정된다.

5) 지표지질조사에 의한 사면의 안정성

전반적으로 본 사면을 구성하고 있는 암종의 암질특성, 풍화특성 및 파쇄특성 등을 고려해 볼 때 본 대상사면은 사면의 안정성에 매우 취약한 조건을 나타내고 있음을 알 수 있으며 특히, 점토화가 진행중인 풍화대(풍

화대 구성 암종: 저변성세일, 천매암 및 탄질세일 등)의 출현빈도가 크고 엽리, 층리 등의 불연속면 및 습곡, 단층 등 지질구조의 발달이 현저하여 사면의 불안정은 더욱 가증될 것으로 사료된다.

나. 물리탐사

본 대상사면은 원설계 시 굴절법 탄성파탐사가 수행되었으나, 이는 본 연구지역과 같이 자각변동 및 다양한 암종과 경연의 암질이 호흡상태를 이루 수직 및 수평적 지층구조가 매우 복잡한 지반에는 암반사면의 안정성 검토를 위한 적절한 탐사법으로 보기는 어렵다. 따라서 보다 면밀한 검토를 위하여 연구대상구간에 대하여 전기비저항탐사 및 공내영상촬영(BIPS)의 2가지 물리탐사법을 적용하여 시행하였다. 전기비저항탐사에 의해서는 층서구조 파악, 단층파쇄대, 풍화대 등 연약대(Weak zone)의 개략적인 분포파악 및 최적의 시추위치 선정을 위해, 공내영상촬영에 의해서는 구성암석의 종류 및 상태, 단층, 절리 등 불연속면의 분포상태 및 방향성 등의 분석을 통해 사면의 안정성에 불리하게 작용하는 불량암질 및 불연속면을 파악하고자 함이 그 목적이라고 할 수 있다.

전기비저항탐사는 2차원 쌍극자배열법(Dipole-dipole method)을 이용하였다. 총 3개의 측선(Fig. 14 참조)을 설정하였는데 측선 1은 1차 검토 시에, 측선 2와 3은 4차 검토 시에 실시하였다. 각 측선별 이격거리는 약 25~30 m 내외이며 전극간격은 측선 1의 경우 10 m, 20 m 및 30 m로, 측선 2와 3의 경우 15 m, 30 m 및 45 m로 증복하여 측정함으로써 측선 공히 가탐심도가 도로계획고를

충분히 포함하도록 하였다.

지표지질조사 결과와의 비교·분석에 의한 탐사자료 해석결과, 일부 고비저항대가 분포하지만 사면의 안정성에 영향을 줄 수 있는 저비저항대가 매우 복잡한 양상으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 본 지역에 저비저항대를 형성할 수 있는 단층, 파쇄대, 풍화대 및 탄질세일 등의 분포정도가 심함을 알 수 있으며 습곡, 단층작용 등의 구조적 변동에 의한 향사, 배사, 횡와습곡 등의 습곡구조를 인지할 수 있는데, 특히 대규모 활동이 발생된 제2구간은 향시습곡구조(Syncline)를 나타내고 있어 점토분을 많이 함유한 불투수층에 의하여 강우에 의한 다량의 집수가 예상될 수 있는 구조적 특징을 나타내고 있다. 본 대상지역에 분포하는 암석의 암질특성과 전기비저항값의 상관성 분석 결과, 전기비저항값이 $< 1,500 \Omega\text{-m}$ 인 저비저항대는 풍화대, 단층 및 탄질세일 등이 주분포하는 불량암질대로 추정되며, $> 1,500 \Omega\text{-m}$ 인 고비저항대는 풍화상태가 중간풍화(M.W)~약간

풍화(S.W) 정도인 저변성세일, 천매암 및 사암 등의 양호암질대로 추정된다. Fig. 24에 측선 1에 대한 전기비저항 해석 단면도를 나타내었으며, 측선 2와 3의 분석 결과에 의하여 VH-1~VH-6, IH-1 및 IH-2의 총 8공에 대한 시추위치를 선정하였다(Fig. 14 참조).

공내영상촬영은 4차 검토 시 IH-1과 IH-2의 경사시 추공에 대하여 실시하였다(Fig. 14 참조). 조사결과를 Table 3에 나타내었으며 IH-2공에 대한 불연속면의 심도별 밀도분포도 및 Rose Diagram을 Fig. 25에 나타내었다(한국지반공학회, 2003).

다. 시추조사

대상사면은 원설계 시 CB-1~CB-4의 총 4공에 대하여 지표 하 4.5~5.5 m 내외의 심도로 연암 이상의 추정 기반암선을 확인한 후 시추가 종료되었다. 설계 시의 이러한 시추심도는 추정 기반암선 이하의 암질상태가 양호할 경우는 암반사면안정 설계를 위하여 어느 정도

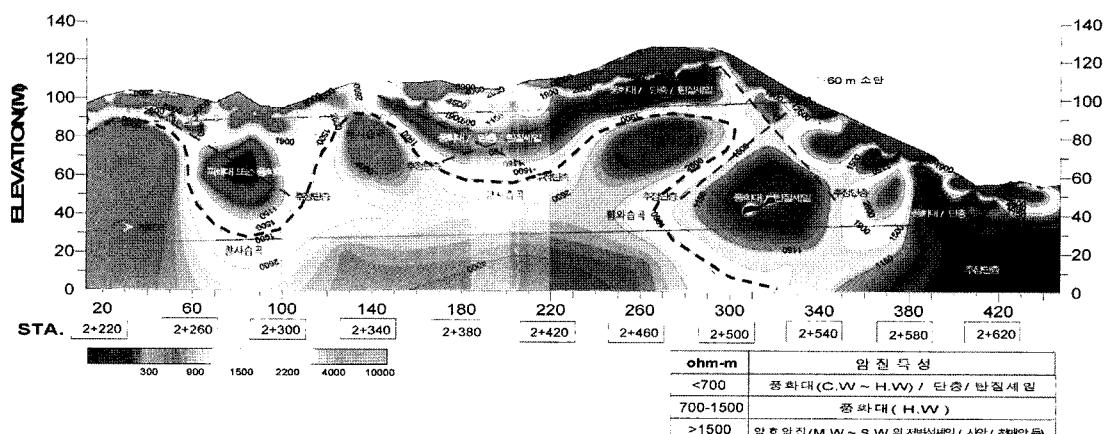


Fig. 24. Electric resistivity with dipole-dipole arrays on the slope

Table 3. Results of BIPS

구 분		지층특성 및 불량암질 분포 현황	대표 불연속면 방향 (Dip/Dip Dir.)
제2구간	IH-1 (총50 m)	<ul style="list-style-type: none"> 암반의 연경 교호 풍화대 및 파쇄대 <p>GL(-) 4.5~9.6 m (폭 5.1 m) : 탄질세일</p> <p>GL(-) 16.4~33.3 m (폭 16.9 m) : 이 중 21.8~28.3 m (폭 6.5 m) 및 29.6~30.3 m (폭 0.7 m) 탄질세일 협재</p> <p>GL(-) 37.4~40.4 m (폭 3.0 m)</p>	06/090 (남북방향의 주향)
제3구간	IH-2 (총52 m)	<ul style="list-style-type: none"> 암반의 연경 교호 풍화대 및 파쇄대 <p>GL(-) 16.9~25.0 m (폭 8.1 m)</p> <p>GL(-) 27.5~28.5 m (폭 1.0 m)</p> <p>GL(-) 32.0~36.5 m (폭 4.5 m)</p>	40/289 (남북방향의 주향)

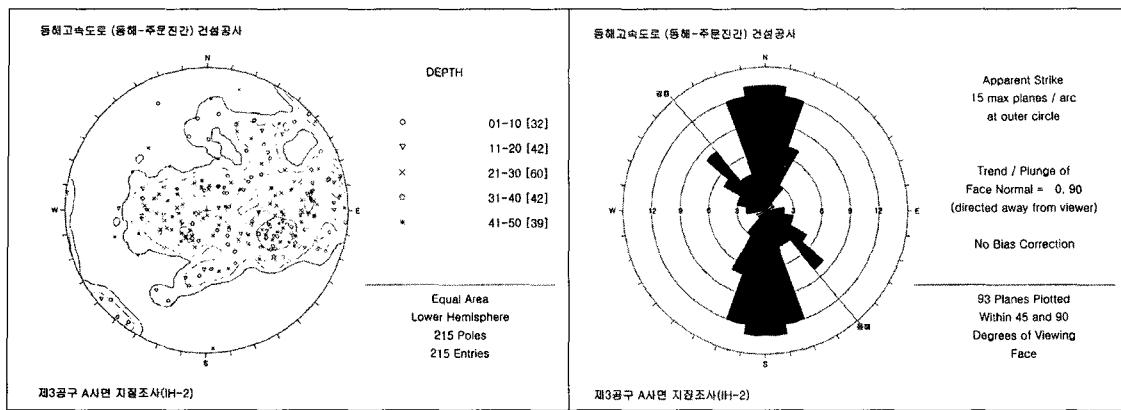


Fig. 25. Results of BIPS in the borehole IH-2

Table 4. Results of the borehole survey

구 분	공 번	위 치	표고 (EL. m)	시추심도 (GL·m)	지하수위 (GL·m)	비 고
확인시추 (2001.2)	B-1	STA. NO. 2+500 (하부)	71.93	28.0	-	
	B-2	STA. NO. 2+500 (상부)	91.87	46.0	-	
4차 사면안정검토 (2003.8)	VH-1	STA. NO. 2+535 (좌측)	82.63	50.0	29.08	
	VH-2	STA. NO. 2+380 (좌측)	71.37	44.0	16.95	
	VH-3	STA. NO. 2+380 (좌측)	61.02	34.0	-	공벽붕괴
	VH-4	STA. NO. 2+305 (좌측)	67.34	43.0	-	공벽붕괴
	VH-5	STA. NO. 2+305 (좌측)	61.95	37.0	-	공벽붕괴
	VH-6	STA. NO. 2+200 (좌측)	63.62	42.0	-	공벽붕괴
	IH-1	STA. NO. 2+395 (좌측)	71.51	50.0	18.65	경사시추
	IH-2	STA. NO. 2+515 (좌측)	82.63	52.0	31.58	경사시추
	BH-1	STA. NO. 2+380 (좌측)	85.09	19.6	4.5	경사 (218/70)
	BH-2	STA. NO. 2+380 (좌측)	67.13	18.2	5.8	경사 (221/70)
5차 사면안정검토 (2003.11)	BH-3	STA. NO. 2+380 (좌측)	47.90	40.1	5.2	경사 (229/70)
	NH-1	STA. NO. 2+340 (좌측)	60.00	30.0	18.8	
	NH-2	STA. NO. 2+410 (좌측)	60.00	30.0	15.9	
	NH-3	STA. NO. 2+280 (좌측)	40.00	30.0	14.8	
6차 사면안정검토 (2004.2)	NH-4	STA. NO. 2+530 (좌측)	50.00	30.0	-	

적절하다고 볼 수도 있으나, 본 대상지역과 같이 경연의 암질이 호층을 이루는 복잡한 지층구조를 나타내는 지반에 대해서는 적절한 심도라 할 수 없다. 이러한 점을 고려하여 시공 중 4차에 걸쳐 총 17공에 대한 수직 및 경사시추를 실시하였으며, 시추심도는 지표 하 최소 18.2 m로부터 최대 52.0 m에 이른다(Table 4 참조, 태조엔지니어링, 2004, 한국지반공학회, 2003, 지오텍컨설팅, 2003).

시추결과 구성암종은 저변성세일, 탄질세일, 사질세일, 사암, 규질사암 및 천매암 등의 대체로 저변성작용을 받은 다양한 변성퇴적암류가 호층을 이루며 발달하고 있는데, 지중의 이러한 암석분포는 굴착 중 노출된 지표지질조사에 의한 결과와도 거의 유사한 것으로 조사되

었다. 지층분포특성은 상부로부터 봉적층이 수 m내외의 폭을 보이며, 그 하부는 풍화대와 연암상태의 암질이 호층을 형성하며 분포하고 있다. 암질지수(RQD)는 0~83%로 다양하게 나타나나 0%를 보이는 매우 불량(Very poor)한 구간이 다수 포함되고 있다. 또한 본 사면의 안정성에 불안정 요인으로 작용할 수 있는 불량암질대가 심부까지 불규칙하게 다양한 암상을 보이며 나타나는데, 본 대상구간에 분포하는 이러한 불량암질대는 풍화대, 파쇄대, 탄질세일, 풍화점토, 단층파쇄대 등으로 특징지울 수 있으며, 그 협재 폭은 풍화토~풍화암 상태의 풍화대의 경우 0.1~7.4 m, 암질지수(RQD)가 0% 내외인 파쇄대의 경우 0.1~6.0 m, 대체로 풍화토 상태를 보이는 탄질세일의 경우 1.0~6.0 m, 풍화점토의 경

우 수 cm 내외, 단층점토와 각력으로 구성된 단층파쇄대의 경우 0.2~2.4 m 내외로 나타났다(Table 5 참조). 이 렇게 연암상태의 암질과 불규칙하게 혼재하고 있는 풍

화대, 단층파쇄대 등의 불량암질대는 점토질 물질의 함유정도가 크며 심한~완전 풍화상태와 약함~매우 약한 암반강도를 나타내는 연약대를 형성시킴으로써 사면활

Table 5. Rock types and poor rock distribution in borehole survey

공번	지층분포 (GL.-m)	구성암종	불량암질 분포 (GL.-m)
B-1	<ul style="list-style-type: none"> 봉격층 : 0.0~3.5 m 풍화대와 연암의 호층 : 3.5~28.0 m TCR : 40~100%, RQD : 0~20% 	세일 사질세일 사암	<ul style="list-style-type: none"> 5.0~5.4 m (폭 0.4 m) : 풍화대 6.0~6.2 m (폭 0.2 m), 7.9~8.0 (폭 0.1 m) : 파쇄대 8.8~9.5 m (폭 0.7 m) : 풍화대 15.3~16.5 m (폭 1.2 m) : 파쇄대 18.0~22.3 m (폭 4.3 m) : 탄질세일 24.5~24.8 m (폭 0.3 m) : 풍화점토 25.0~26.5 m (폭 1.5 m) : 파쇄대
B-2	<ul style="list-style-type: none"> 풍화대와 연암의 호층 : 0.0~46.0 m TCR : 9~100%, RQD : 0~65% 	세일 사질세일 사암 규질사암	<ul style="list-style-type: none"> 0.0~6.0 m (폭 6.0 m) : 파쇄대 7.0~8.0 m (폭 1.0 m) : 탄질세일 8.8~9.5 m (폭 0.7 m) : 풍화대 (일부 풍화점토) 12.0~12.6 m (폭 0.6 m), 13.7~14.5 m (폭 0.8 m), 16.6~17.1 m (폭 0.5 m), 17.4~18.0 m (폭 0.6 m) : 파쇄대 20.0~21.5 m (폭 1.5 m) : 풍화대 24.8 m 및 27.0 m 부근 : 풍화점토 30.0~30.5 m (폭 0.5 m) : 풍화대 32.0~33.2 m (폭 1.2 m), 37.5~38.5 m (폭 1.0 m), 44.0~46.0 m (폭 2.0 m) : 파쇄대
BH-1	<ul style="list-style-type: none"> 봉격층 : 0.0~3.0 m 풍화대와 연암의 호층 : 3.0~19.6 m TCR : 30~100%, RQD : 0~80% 	세일 사질세일	<ul style="list-style-type: none"> 3.0~5.2 m (폭 2.2 m) : 풍화대 5.2~5.9 m (폭 0.7 m) : 단층파쇄대 5.9~7.4 m (폭 1.5 m) : 풍화대 8.4~9.6 m (폭 1.2 m) : 단층파쇄대 9.6~11.9 m (폭 2.3 m) : 풍화대 11.9~14.3 m (폭 2.4 m), 15.6~15.8 m (폭 0.2 m), 19.2~19.6 m (폭 0.4 m) : 단층파쇄대
BH-2	<ul style="list-style-type: none"> 봉격층 : 0.0~4.5 m 풍화대와 연암의 호층 : 4.5~18.2 m TCR : 50~100%, RQD : 0~81% 	세일 사질세일 사암	<ul style="list-style-type: none"> 4.5~6.9 m (폭 2.4 m), 9.0~15.5 m (폭 6.5 m) : 풍화대
BH-3	<ul style="list-style-type: none"> 봉격층 : 0.0~6.0 m 풍화대와 연암의 호층 : 6.0~40.1 m TCR : 30~100%, RQD : 0~77% 	세일 사질세일 탄질세일 사암	<ul style="list-style-type: none"> 6.0~7.8 m (폭 1.8 m), 9.6~12.4 m (폭 2.8 m) : 풍화대 12.4~13.5 m (폭 1.1 m) : 단층파쇄대 24.7~30.7 m (폭 6.0 m) : 탄질세일 30.7~33.7 m (폭 3.0 m) : 풍화대
NH-1	<ul style="list-style-type: none"> 풍화대와 연암의 호층 : 0.0~30.0 m TCR : 42~100%, RQD : 0~75% 	세일 사질세일 사암	<ul style="list-style-type: none"> 0.0~2.0 m (폭 2.0 m) : 풍화대 3.8~5.2 m (폭 1.4 m), 5.8~6.2 m (폭 0.4 m) : 단층파쇄대 20.7~21.1 m (폭 0.4 m), 23.0~23.1 m (폭 0.1 m) : 파쇄대
NH-2	<ul style="list-style-type: none"> 풍화대와 연암의 호층 : 0.0~30.0 m TCR : 23~100%, RQD : 0~71% 	세일 천매암 사질세일 사암 석영맥	<ul style="list-style-type: none"> 0.0~7.4 m (폭 7.4 m) : 풍화대 23.5~25.0 m (폭 1.5 m) : 단층파쇄대
NH-3	<ul style="list-style-type: none"> 풍화대와 연암의 호층 : 0.0~30.0 m TCR : 30~100%, RQD : 0~48% 	세일 사질세일 사암	<ul style="list-style-type: none"> 6.8 m 부근 : 소규모 단층 9.8~10.2 m (폭 0.3 m) : 파쇄대 12.3 m 부근 : 풍화점토 14.2~14.4 m (폭 0.2 m), 15.6~16.4 m (폭 0.8 m), 18.2~18.4 m (폭 0.2 m) : 파쇄대 18.6~19.0 m (폭 0.4 m) : 단층파쇄대 11.3~11.9 m (폭 0.6 m), 28.2~29.0 m (폭 0.8 m) : 풍화대
NH-4	<ul style="list-style-type: none"> 매립토층 : 0.0~1.4 m 풍화대와 연암의 호층 : 1.4~30.0 m TCR : 41~100%, RQD : 0~83% 	세일 사질세일 사암	<ul style="list-style-type: none"> 3.3~3.4 m (폭 0.1 m) : 파쇄대 4.4~4.8 m (폭 0.4 m) : 풍화대 5.1~5.3 m (폭 0.2 m), 5.7~6.2 m (폭 0.5 m) : 파쇄대 7.5~7.9 m (폭 0.4 m), 11.6~12.2 m (폭 0.6 m) : 풍화대 13.2~13.5 m (폭 0.3 m) : 단층파쇄대 17.5~17.9 m (폭 0.4 m) : 파쇄대 19.5~20.0 m (폭 0.5 m), 20.7~20.8 m (폭 0.1 m) : 풍화대 24.2~24.5 m (폭 0.3 m) : 단층파쇄대 26.7~26.8 m (폭 0.1 m), 28.8~30.0 m (폭 1.2 m) : 풍화대

동의 주요인으로 작용할 것으로 분석되었다. Fig. 26에서 BH-1공에서 회수된 풍화대 및 단층점토를 나타내었다.

라. 현장시험 및 실내시험

현장암반의 물리적, 역학적 특성을 파악하기 위하여 다양한 현장 및 실내 시험을 실시하였다(Table 2 참조). 이 중 대상지반의 강도정수를 산정하기 위하여 공내전단시험(BST), 직접전단시험 및 공내재하시험(PMT) 등을 실시하였으며 그 결과를 Table 6~Table 9에 나타내었다(태조엔지니어링, 2004).

6. 대규모 활동구간(제2구간) 붕괴원인 분석

6.1 붕괴현황

제2구간에 해당하는 STA. NO. 2+360~2+430(L=70m) 구간은 과거 소규모 계곡부를 중심으로 2003년 7월 사면활동 발생 후 2004년 2월까지 계속하여 대규모 지반활동이 진행되었다.

활동유형은 쌓기(단층 교차), 평면 및 원호의 복합활동으로서 활동체적은 2003년 10월 발생 시 약 21,000 m³ 내외, 2004년 1월 발생 시 약 5,000 m³ 내외로 추정

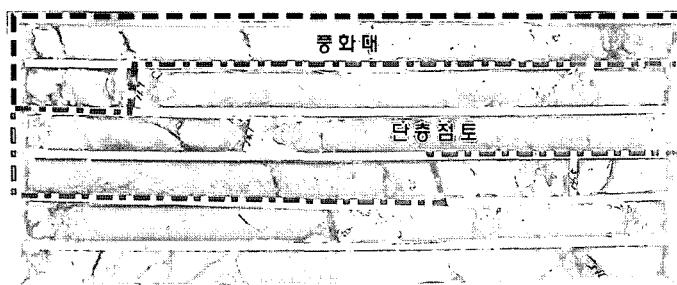


Fig. 26. Weathered zone and fault clay in the borehole BH-1

Table 6. Shear strength parameters from shear test in the boreholes NH-1~NH-4

지 층	지층별 강도정수	
	접착력 (c, tonf/m ²)	내부마찰각 (ϕ , deg)
풍화토	2.2	32
풍화대	1.6~4.9	27~33
단층파쇄대	2.0~3.2	22~26

Table 7. Deformation modulus from pressuremeter test in the boreholes NH-1~NH-4

구 분	풍화대	세일	사암	단층파쇄대
변형계수 (E_m , kgf/cm ²)	50.8~63.8	653~6,900	2,320~6,930	998~1,390

Table 8. Shear strength parameters of filling material in fault from laboratory direct shear test

구 분	단위중량 (γ , tonf/m ³)	접착력 (c, tonf/m ²)	내부마찰각 (ϕ , deg)
범 위	1.92~2.0	0.8~2.0	27.4~33.4

*시료 채취 위치 : STA. NO. 2+373 및 STA. NO. 2+420 부근 4개소

Table 9. Physical properties for limit equilibrium analysis

암 종	지층별 강도정수			
	단위중량 (γ , tonf/m ³)	접착력 (c, tonf/m ²)	내부마찰각 (ϕ , deg)	변형계수 (E_m , kgf/cm ²)
사암	2.4	22.0	34	3,500
세일	2.3	19.0	27	4,000
풍화대	2.1	2.8	33	51
파쇄대	2.2	2.0	24	1,000
탄질세일	1.9	2.0	32	45

* E_m 은 공내재하시험에서 구한 지반 변형계수임

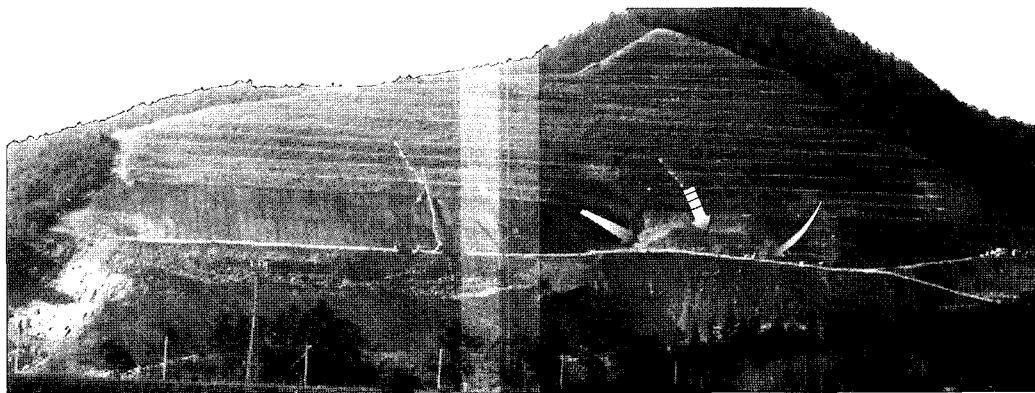


Fig. 27. Slope failure occurrence at Zone 2

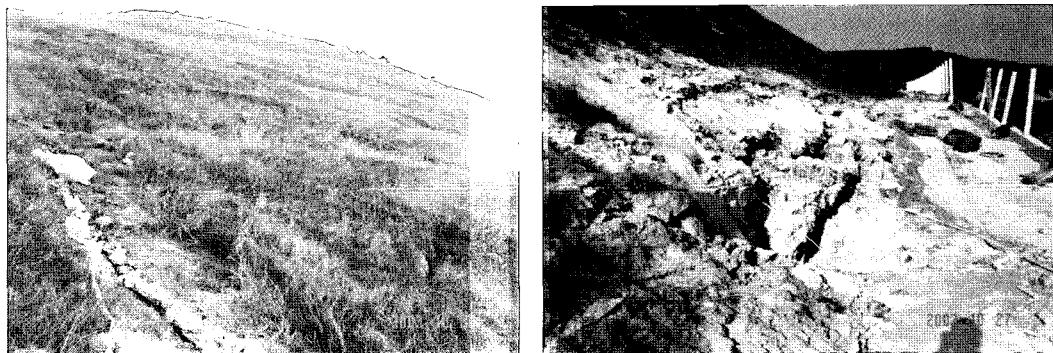


Fig. 28. Tensile cracks at Zone 2

되었으며 인장균열이 확장된 2004년 1월에 발생한 사면 활동의 경우 인장균열 폭은 약 0.5~0.7 m 내외, 단자는 0.7~1.8 m 내외에 이르렀다(Fig. 27 및 Fig. 28 참조).

본 붕괴구간에 대한 사면활동심도를 파악하고자 실시된 시추조사의 자료분석 결과(Table 5 참조)에 의하면, 본 구간은 일부 연암상태의 암질이 국부적으로 협재되어 분포하나 대체로 풍화대, 탄질세일 및 단층파쇄대 등의 불량암질로 구성되어 있음을 알 수 있다. 특히, 단층파쇄대의 발달이 빈번한데 폭은 대체로 0.2~2.4 m 내외를 이루고 단층점토를 포함하고 있어 사면의 활동면 역할을 한 것으로 판단된다. 또한 BH-1~BH-3의 시추자료에 의하면 사면 활동의 영향으로 이완된 암반구간이 나타나는데, 그 심도는 계획사면 기준으로 GL(-) 9.0~16.0 m 내외이며 이를 예상활동면(활동면은 단층파쇄대와 풍화대의 연약층으로 주 구성됨)으로 추정하였다. Fig. 29에 본 사면활동의 주된 요인 중의 하나인 단층점토가 협재되어 있는 단층면을 나타내었으며, Fig. 30에 본 구간의 예상활동심도를 모식도로 나타내었다.

6.2 붕괴원인

본 구간에 대한 붕괴원인을 파악하고자 지표지질조사, 추가시추조사 및 물리탐사 등을 실시하였다. 분석결과 본 대상사면은 지형, 암종, 암질, 불연속면, 지질구조 및 강우 특성 등 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 사면활동이 발생한 것으로 추정되며 상세 내용은 다음과 같다(태조엔지니어링, 2004).

가. 지형 및 기하학적 특성

대상구간 중 STA. NO. 2+380 주변은 소규모 계곡부가 존재했던 곳으로서, 우기 시 계곡부에 유입되는 침투수에 의하여, 지중의 이질기원 암층, 단층점토 등과 같은 불투수층에 수압이 크게 작용함으로 인한 비탈면의 활동력 증가뿐만 아니라 지층의 강도 열화 등에 의한 전단강도 감소 현상도 붕괴의 요인으로 분석된다. 또한 대규모의 인위적 절취에 의한 응력해방과 응력 불균형으로 인한 활동력에 대한 저항력 감소도 원인이 되었을 것으로 판단된다.

나. 풍화대의 교호 및 급속한 풍화 특성

본 지역의 구성암종은 저변성세일, 탄질세일, 천매암 및 변성사암 등의 저변성 퇴적암류가 주를 이루며, 이 중 변성사암을 제외한 대다수 암종은 파쇄 및 풍화작용에 의한 풍화대(폭 약 0.5~6.5 m 내외) 발달이 빈번하다. 또한 점토광물이 많이 함유된 암종 및 지질구조적 파쇄 특성 등에 의하여 굴착 후 급속한 풍화특성을 보이며, 쟁리면과 엽리면을 따른 조개침 특성 또한 암질의 연약화를 가중시키는 요소가 되고 있다. 따라서 이러한 풍화대의 교호와 빈번한 발달 및 급속한 풍화축진 작용도

사면활동의 원인이 되었을 것으로 판단되며, SLOPILE Program을 이용한 본 비탈면의 한계평형해석 결과(Fig. 31 참조) 대상사면은 불안정한 것으로 검토되었다.

다. 단층, 습곡 등 복잡한 지질구조적 특성

대상사면은 고생대 평안계에 해당하는 지층으로 구성되어 있어 오랜 지질시대를 거치는 동안 지질구조적 변동에 의하여 습곡(향사, 배사 및 횡와습곡) 및 단층(역단층 및 충상단층)의 발달이 현저하다. 지표지질조사와 전기비저항탐사 결과의 비교·분석에 의하면 본 대규모

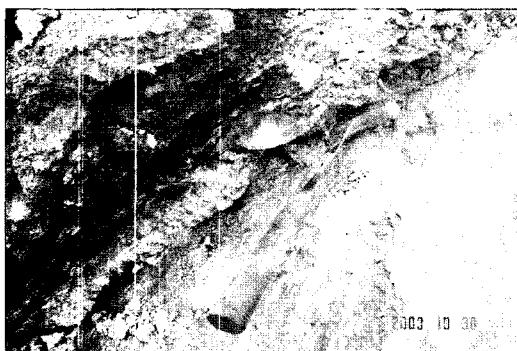


Fig. 29. Fault clay and fault plane

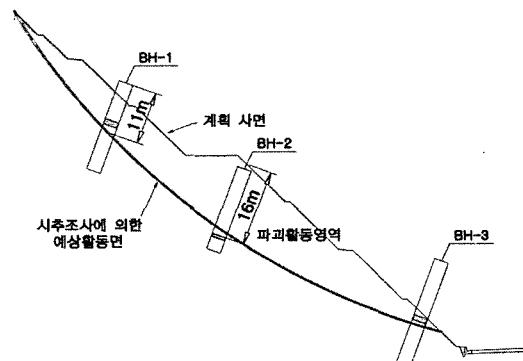


Fig. 30. Depth of anticipated sliding surface

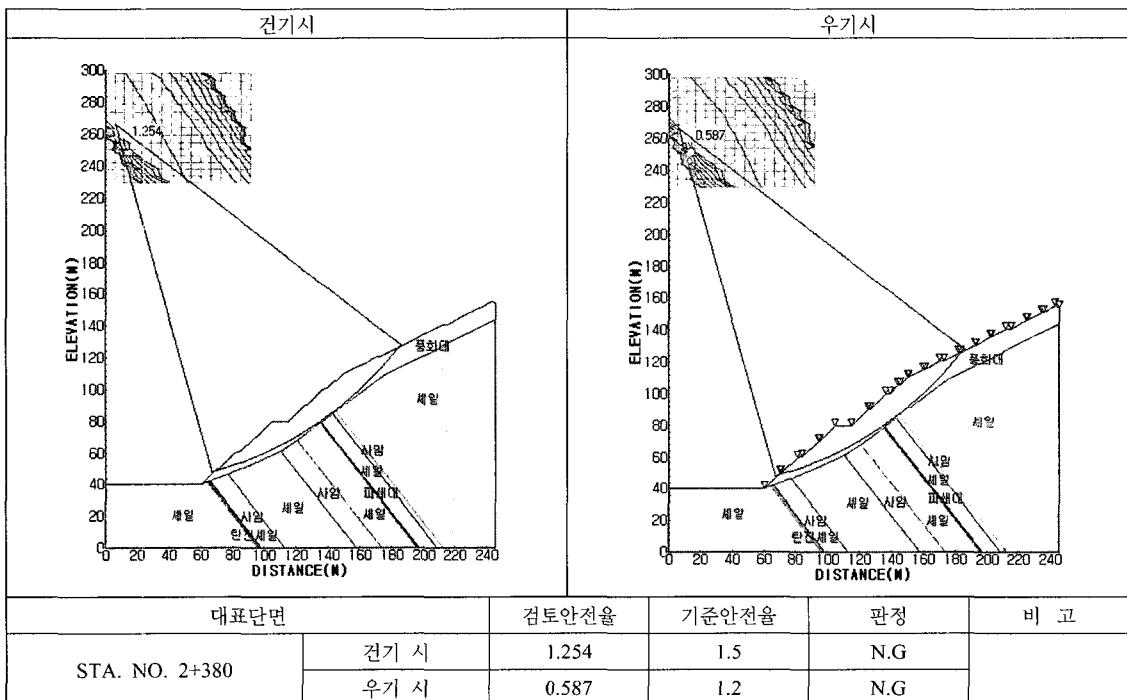


Fig. 31. Results of slope stability analysis at Zone 2

사면활동구간은 불량암질대가 깊게 분포하는 향사습곡구조(Syncline)를 나타내고 있다. 이러한 구조는 점토분을 많이 함유한 불투수층에 의하여 강우에 의한 다량의 집수 및 지하수위 상승에 의한 간극수압의 증가를 유발하여 사면활동의 한 원인을 제공했을 것으로 판단된다. 또한 본 구간에는 5~30 cm 내외 폭의 단층점토를 포함하는 수 조의 단층이 교차 발달하고 있을 뿐만 아니라 부분적으로는 단층점토 주변부를 따라 2.0~3.0 m 내외 폭의 단층파쇄대를 형성하고 있어 지반의 연약화를 가중시키고 있다. 이러한 단층 중 20~30 cm 내외 폭의 단층점토를 협재한 두 교차 단층(55/350 및 44/104)과 엽리(21/006)가 본 사면활동의 주원인으로 작용했을 것으로 판단된다(Fig. 32 참조, 태조엔지니어링, 2004).

라. 불연속면의 특성

본 대상사면에는 층리, 엽리, 절리 및 단층 등 여러 종류의 불연속면이 복잡하게 발달하고 있으며, 이 중 층리와 엽리는 습곡 및 단층 작용의 영향으로 부분적으로 교란된 방향성을 나타내기도 한다. 특히, 본 불연속면 중 엽리는 10~30° 내외의 저경사가 우세한데, 평사투영해석 결과에 의하면 단층과의 교차에 의한 쇄기활동 뿐만 아니라 평면활동이 예상되는 등 안정성에 불리한 조건을 제공하고 있다. 그 외 절리에 의한 평면활동 및 단층과 절리에 의한 전도활동의 가능성 등 복합적 거동특성이 나타나는 불안정한 조건에 있는 사면임을 판단할 수 있다(Fig. 32 참조).

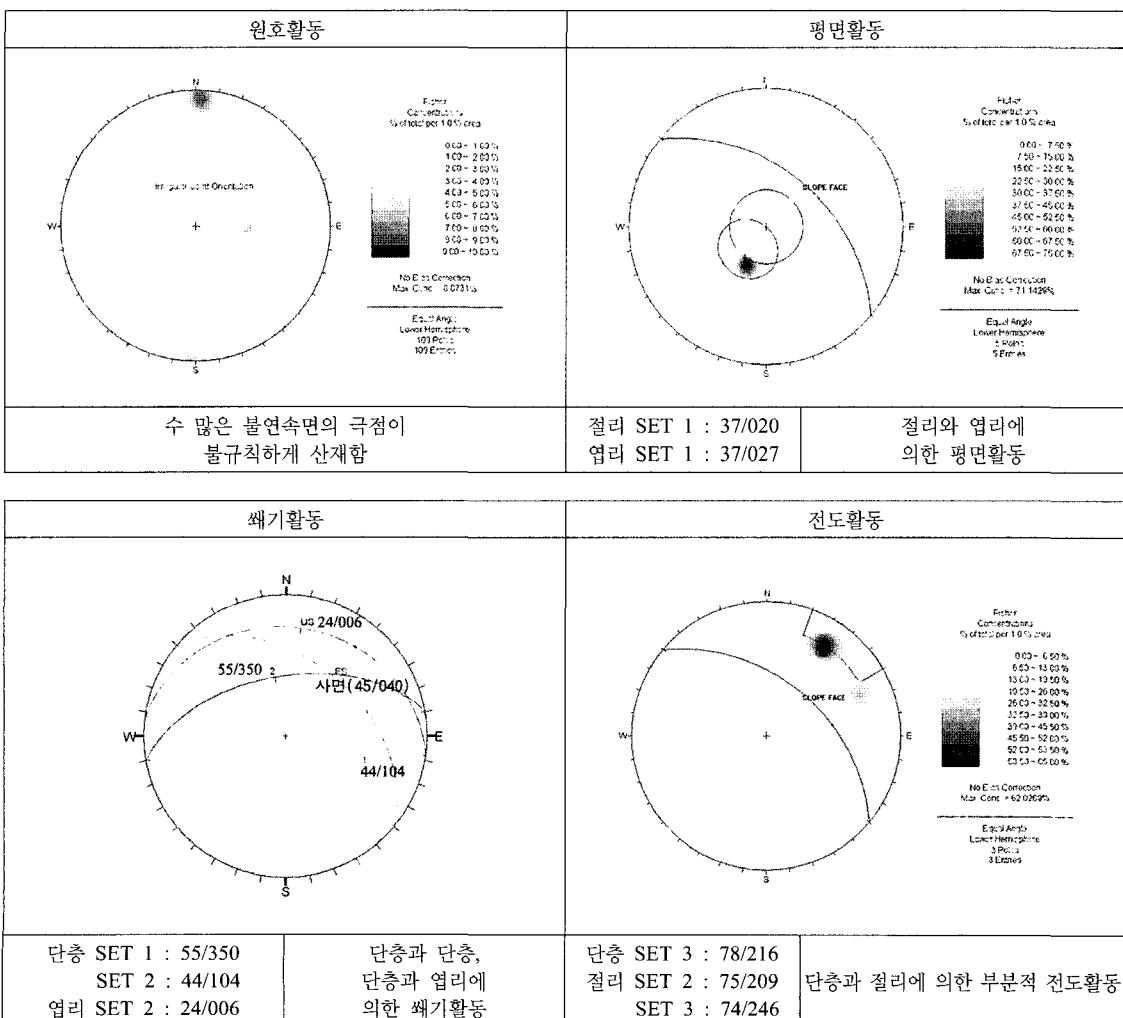


Fig. 32. Results of stereonet analysis at Zone 2

마. 강우 및 지하수위 상승

최근의 국지적인 집중호우와 2002년 8월의 태풍 루사, 2003년 9월의 매미와 같은 집중호우 시 우수 침투에 의한 침투암의 작용과 지하수위의 상승으로 인한 간극 수압 증가 및 지반의 전단강도가 저하 현상도 붕괴발생의 원인으로 작용하였을 것으로 판단되는데 특히, 당시 강릉일대에 걸친 다수의 비탈면 활동이 이를 뒷받침해 준다.

7. 결 론

본 연구에서는 굴착 중 원설계와 상이한 지층 및 불연속면의 출현에 따른 변성퇴적암류로 구성된 대규모 암반 절취사면을 대상으로 활동이력 및 시공 중 지반조사를 통한 붕괴원인 분석을 실시하였으며, 그 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 대상사면은 이질기원의 저변성 퇴적암류로 구성되어 있어 파쇄 및 풍화촉진에 의하여 풍화대의 발달이 빈번하고 이러한 풍화대가 연암상태의 암질과 호층을 형성하고 있을 뿐만 아니라 복잡한 단층 및 습곡의 발달에 의하여 교란된 지질구조를 나타내고 있다. 즉, 사면구간은 수직 및 수평적 지층구조가 매우 복잡하고 불량암질의 협재정도가 크며 굴착 중 수차례 걸친 사면활동이 발생한 불안정한 사면을 형성하고 있다.
- 2) 원설계 시 대상사면의 경사는 밸파암 기준 1:0.7(약 55°)이었으며, 이에 준하여 시공 중 불량한 조건의 암질, 불연속면 및 지질구조 특성, 집중호우 등의 영향으로 다수의 사면활동이 발생하였다. 활동 양상은 낙석, 원호활동, 쌓기활동 및 복합활동 등 다양하게 나타났으며, 소규모 낙석으로부터 대규모 복합활동에 이르는 다양한 활동규모를 보이고 있어, 총 6차례에 걸친 사면조사 및 안정성 검토가 수행되었고 이를 통한 사면 활동이력 분석을 실시하였다.
- 3) 대상사면은 원설계 시 지표지질조사, 시추조사(총 4공, 심도 : 4.5~5.5 m), 굴절법 탄성파탐사, 토질시험, 암석시험(일축압축강도) 등의 제한된 조사

자료를 이용한 사면설계가 수행됨으로써 대상지반에 대한 정확한 지층특성이 설계에 반영되지 못하였다. 따라서 본 사면의 정밀한 지층상태 파악을 위하여 시공 중 지반조사를 실시하였으며, 이에는 지표지질조사(6회), 전기비저항탐사(3측선), 공내영상촬영(BJPS 2공), 시추조사(수직 및 경사시추 17공), 공내전단시험, 공내재하시험, 직접전단시험, 절리면전단시험 등이 포함된다. 이러한 조사 및 시험을 통하여 각 구성 암종의 분포 및 암질 특성, 지층분포상태, 불연속면 발달상태, 지질구조 특성을 면밀하게 파악할 수 있었으며 연약층의 강도 정수 또한 산정할 수 있었다.

- 4) 본 연구대상 사면 중 대규모 사면활동이 발생한 제2구간의 주 붕괴원인은 소규모 계곡부 발달에 의한 지형적 특성, 저변성 퇴적암류의 특성인 급속한 풍화, 풍화대와 연암의 교호 발달, 단층, 습곡 등 복잡한 지질구조 및 불연속면의 특성(특히, 두꺼운 단층점토를 협재한 교차 단층과 엽리가 활동의 주요인) 그 외 루사, 매미 등 태풍을 동반한 폭우 및 국지적인 집중호우 등일 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 대한지질학회, 1999, 한국의 지질, 시그마프레스, 60p, 160-162.
2. 태조엔지니어링, 2004, 동해고속도로(동해~주문진간) 확장공사 3공구 대절토 비탈면 보강대책 설계 보고서, 10p, 53-58, 64-65, 67p, 77p
3. 태조엔지니어링, 2004, 동해고속도로(동해~주문진간) 3공구 A지구 대절토 비탈면 보강대책 설계 요약 보고서, 8p.
4. 한국도로공사, 1997, 동해고속도로(동해~주문진간) 확장공사 실시설계 일반보고서(3공구), 189p.
5. 한국지반공학회, 2003, 동해~강릉간 제3공구 대절토사면 보강대책 연구보고서, 14-19.
6. 지오텍컨설팅, 2003, 동해고속도로 동해~주문진간 확장공사(제3공구) 대절토사면 지반조사보고서, 23-25.

박 부 성

1991년 2월 인하대학교 공과대학 지원공학과 공학사
 1993년 2월 인하대학교 대학원 지원공학과 공학석사



Tel: 02-3433-7715
 E-mail: bspark@ssyenc.com
 현재 쌍용건설(주) 토목기술부 차장

조 현

1985년 2월 한양대학교 공과대학 지원공학과 공학사
 1987년 2월 한양대학교 대학원 지원공학과 공학석사
 1995년 9월 동경대학(東京大學) 지구시스템공학과 공학박사
 Tel: 02-3433-7760
 E-mail: hcho@ssyenc.com
 현재 쌍용건설(주) 토목기술부 부장

**차 승 훈**

2000년 8월 전남대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 2002년 8월 연세대학교 대학원 토목공학과 공학석사



Tel: 02-3433-7761
 E-mail: chocopie@ssyenc.com
 현재 쌍용건설(주) 토목기술부 대리

이 기 환

1986년 2월 건국대학교 공과대학 토목공학과 공학사



Tel: 02-3433-7772
 E-mail: Lkhjin@korea.com
 현재 쌍용건설(주) 토목기술부 차장