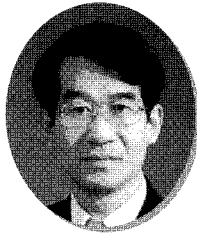


셰일층에 대한 암반 비탈면 설계 사례연구



장 옥 성
(주)한국해외기술공사
지반부 부사장
oschang@kcieng.com



박 태 영
(주)한국해외기술공사
지반부 차장
civil967@kcieng.com

1. 서론

비탈면 파괴에 크게 영향을 미치는 요인으로는 지형 및 지질조건, 우수 및 지하수 조건, 시공조건 등을 들 수 있다. 특히 단층, 층리, 편리 및 엽리 등의 지질구조가 발달되어 있는 암반 비탈면은 지질구조선에 따른 파괴가 많이 발생하고 있으며, 기반암의 풍화상태와 밀접하게 연관되어 굴착사면 안정성에 대한 위험도가 결정되게 된다.

이러한 지질 구조적 문제는 비탈면의 암종과 밀접한 관

련이 있으며, 퇴적암 중 셰일(Shale)은 굴착에 의해 지표면에 노출되었을 경우 풍화속도가 빠르게 진행되어 파쇄 및 박리 현상이 쉽게 발생하는 경향이 있다.

따라서, 굴착 암반 비탈면의 장기적인 안정성을 확보할 수 있는 기술기는 일반적으로 고려되는 TCR(Total Core Recovery), RQD(Rock Quality Designation), 불연속면의 특성(주향, 경사 및 전단강도 등) 및 암반 비탈면의 특성(비탈면 방향 및 기울기) 뿐만 아니라 암종에 따른 풍화특성 등을 종합적으로 분석하여 결정해야 한다고 판단된다.

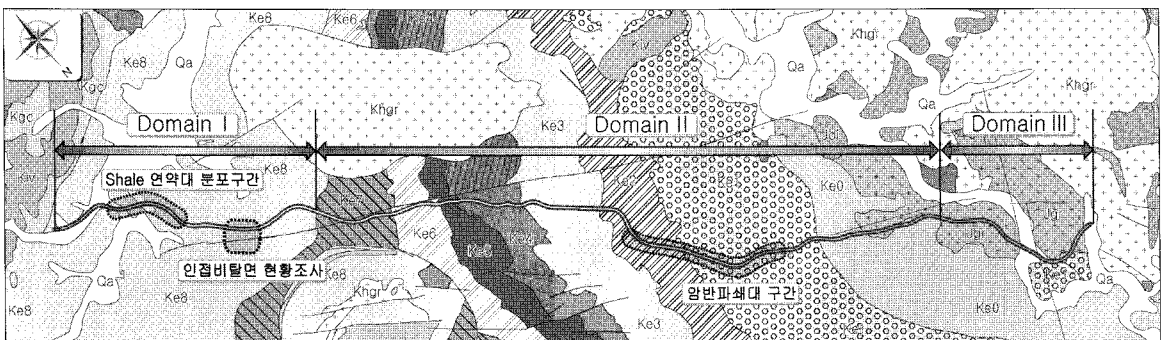


그림 1. 사업노선 지질도

기술기사 2

본 기술기사에서는 00고속도로 민간투자사업 노선에 발달되어 있는 셰일층(Shale)의 지질 및 공학적 특성을 분석하고 이러한 특성을 반영한 비탈면 설계사례를 소개하고자 한다.

2. 셰일층의 지질 및 공학적 특성

1) 지질특성

사업노선 중 셰일층이 발달되어 있는 Domain I에 대한 지질 현황 및 특성은 그림 1, 표 1과 같다.

2) 공학적 특성

셰일의 공학적 특성을 파악하기 위하여 시추조사시 채

취한 암석코어를 이용하여 실내시험을 수행하였으며 그 결과는 표 2와 같다.

① 강도특성 결과

시추 조사시 채취된 셰일의 코어에 대한 일축압축 시험 결과 일축압축 강도는 300~1500kg/cm²로서 연암 내지는 보통암 수준의 매우 높은 강도를 나타내고 있다. 수평 방향으로는 층리의 발달 영향으로 손으로 가벼운 타격을 가해도 쉽게 파괴되는 정도이다.

② XRD시험 결과

채취된 시료를 상온에서 자연 건조시켜 아게이트 물탈을 이용 분말화시켜 X-선 회절계에 의한 조성광물 및 함

표 1. Domain I에 대한 지질 현황 및 특성

구분	지질 특성
셰일층	<ul style="list-style-type: none"> • Domain I ⇒ 지질도상에서 지질학적 분류기호 : ke8 • 계획노선 지역에 분포하는 중생대 백악기 퇴적암층으로 경상누층군 하양층군에 속하는 반야월층(춘산층) • 녹회색, 암회색, 흑색 셰일(Greenish gray, Dark gray, Black Shale)과 저색 셰일(Purple Shale), 실트스톤(Siltstone), 사암(Sandstone), 역질사암(Pebbly sandstone) 등으로 구성 • 셰일은 지표에 노출되면 잘게 파쇄되고 얇은 층으로 분리되는 파쇄 및 파괴현상을 보임

표 2. 실내시험 결과

조사항목
<ul style="list-style-type: none"> • 시추조사 <ul style="list-style-type: none"> - NX규격의 암석코어를 채취 • 실내 시험 <ul style="list-style-type: none"> - 일축압축강도 - XRD 시험 - 현미경 분석 - NP 시험 - 산침수 시험
결과분석
<ul style="list-style-type: none"> • XRD와 현미경 분석을 통해 광물성분과 함량을 분석 • NP 시험을 통해 중화잠재력(NP)을 구해 탄산염의 함량을 유추 • 암석에 산을 직접 반응시켜 셰일의 풍화특성을 파악



그림 2. 시추조사시 채취된 암석(Shale) 코어 시료

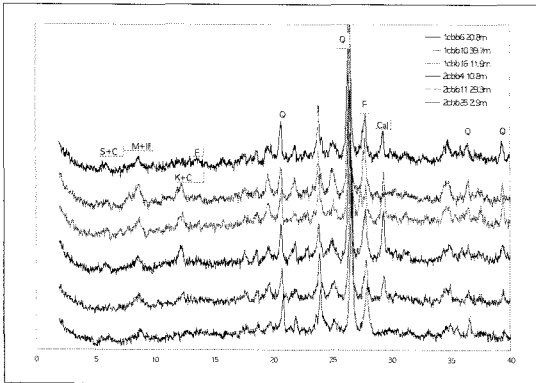


그림 3. XRD 분석 결과

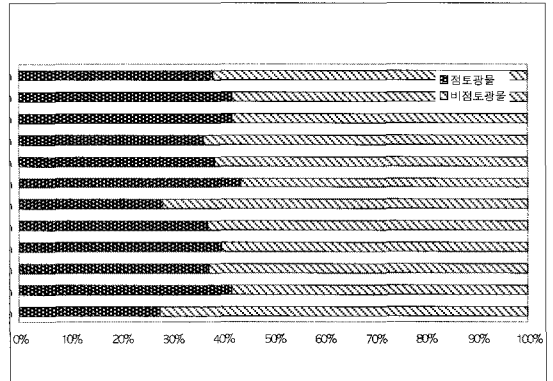


그림 4. 점토광물 함량 결과

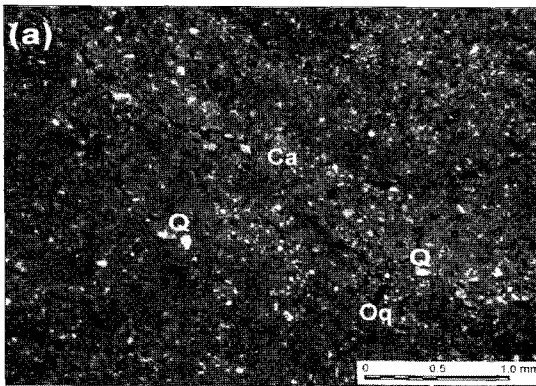


그림 5. 직교니콜 하에서의 박편사진

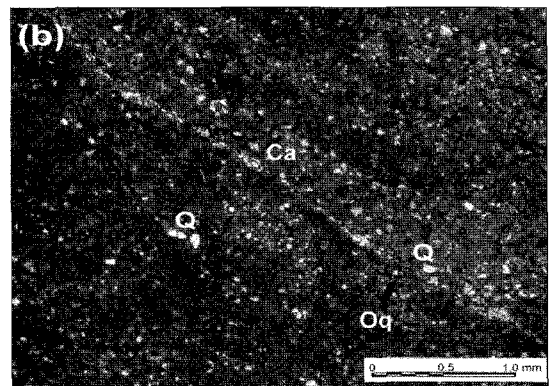


그림 6. 개방니콜 하에서의 박편사진

* Q: quartz(석영), Ca: Calcite(방해석), Oq: opaque mineral(불투명광물)

유량을 분석한 결과 25% 내외의 방해석을 함유하고 있으며, 30~40% 내외의 점토광물을 함유하고 있다.

③ 현미경 분석

박편제작에 의한 현미경 분석 결과 세일의 주 구성광물은 석영과 방해석 그리고 미립의 점토로 구성되어 있다. 입자크기별로 비율은 미사질 입자가 21~52%, 점토질 입자가 47~68%로 점토질 입자의 함량이 우세한 것으로 나타나며, 실트질 입자 중 방해석을 함유한 사실에서 입자 간 고결물질이 방해석인 것으로 판단된다.

④ NP(Neutralization Potential) 시험

중화 잠재력을 구해 탄산염의 함량을 유추하기 위하여 산에 의한 방해석 함량을 분석한 결과 다량의 방해석(10~50%)이 함유되어 있는 것으로 나타났다.

⑤ 암석 코어의 산침수 시험

절개 후 비탈면에 대한 산성비 등 풍화 가속화 요인에 대한 민감도를 파악하기 위하여 산침수 시험을 수행하였다. 산침수 시험은 산성비(acid ratio : pH 5.6 이하)와 산성폐수가 암석의 풍화에 미치는 영향과 어느 정도 풍화를 가속화 하는가를 예측하는 시험으로 지표로 노출되기 전 암석들은 pH 7~8의 중성 내지 염기성 지하수와 반응하지만 지표에 노출되면 압력의 개방에 의해 암석 및 광물

기술기사 2

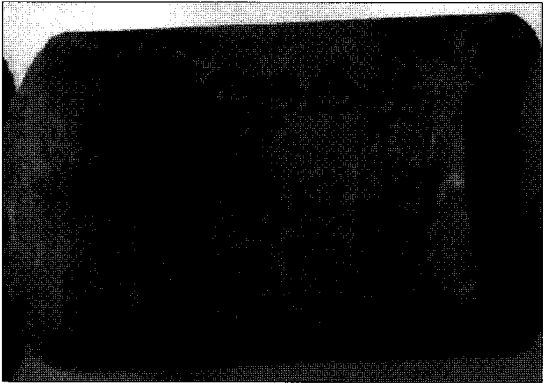


그림 7. 산침수 반응전



그림 8. 산침수 반응후

의 조직이 손상을 받은 상태가 되며, 노출된 암석들은 대기의 오염에 의해 생성된 산성비(산성안개, 산성눈)와 직접 반응하여 암석의 풍화가 가속된다.

암석코어(그림 7)를 산에 침수하여 실험한 결과 사질입자가 포함되고 방해석 함량이 적은 시료를 제외하고 그림 8.과 같이 대부분의 암석시료에서 층리를 따라 쪼개짐의 발달이 현저하게 나타났으며, 산에 의해 분말화가 5% 내외로 진행되었고, 일부 시료에선 10% 이상의 분말화가 진행되어 시료의 손상이 매우 심한 경향을 보였다.

⑥ Swelling Strain과 Slaking 내구성 시험

암석의 지표 노출시 반복적인 습윤-건조 및 온도 변화 등에 따른 거동 특성과 절개 후 비탈면에 대한 물리적·기계적 풍화특성을 분석하기 위하여 Swelling Strain과 Slaking 내구성 시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음 표 3과 같다. 참고적으로 Slaking 내구성 지수에 의한 분류는 표 4에 나타나 있다.

흡수팽창율(swelling strain)은 전체 시료에서 0.04~0.14%(표 3) 내외로 낮은 팽창성을 나타내고 있으며,

표 3. Swelling Strain 및 Slaking 내구성 시험 결과

시료번호	구분	Swelling Strain(%)	Slaking Durability Index (%)
1		0.140	95.3
2		0.098	96.5
3		0.065	97.5
4		0.060	97.7
5		0.060	97.6
6		0.072	95.4
7		0.125	94.6
8		0.046	96.5
9		0.096	96.6
10		0.111	95.6
11		0.040	99.2
12		0.060	98.1

표 4. Slaking 내구성지수에 의한 풍화인내 특성 분류(Gamble, 1971)

구분	1회 10분간 회전후 잔류량 (%) (건조중량)	2회 10분간 회전후 잔류량(%) (건조중량)
극히 높은 내구성	>99	>98
고 내구성	98~99	95~98
중-고정도 내구성	95~98	85~95
중정도 내구성	85~95	60~85
저 내구성	60~85	30~60
극히 낮은 내구성	<60	<30

Slaking 내구성 지수(표 3)는 대부분의 시료에서 95~99%로 “고 내구성” 내지 “극히 높은 내구성”을 나타냈다.

세일은 점토입자로 구성되어 있고 고결물질(cementation agents)로 방해석이 공극을 채우고 있어 짧은 시간에 수분이 암석 내에 침투하기는 어렵다. 그러므로 Swelling Strain과 Slaking 내구성 시험으로는 암석의 반복적인 습윤-건조에 따른 오랜 시간의 풍화나 물에 의한 팽창성의 변화를 인지하기에는 무리가 있다고 판단된다.

한편, 퇴적암 중 세일은 점토광물을 다량 함유하고 있고 고결물질로 방해석을 함유하고 있어서 깎기 비탈면의 시공시 우수와 지표수에 노출되면 입자간 고결물질인 방해석의 용탈이 발생하여 암반 비탈면이 빠르게 박리되고 풍화(그림 9)될 것으로 판단되며, 특히 퇴적암의 약한 면(weak plane)인 층리면(bedding plane)을 따라 지표수의 유입이 쉬워져 풍화의 진행속도가 더욱 가속화되므로 굴

착시에는 이에 대한 대책이 필요하다고 판단된다.

3. 세일층에 대한 암반 비탈면 기술기

1) 암석의 풍화 메커니즘

암석의 풍화작용을 지배하는 요소로는 기후조건, 지질 구조, 암석의 광물조성과 조직 그리고 시간 등이 있으며, 풍화가 진행됨에 따라 암석은 물리적·역학적 특성이 변화되어 공학적 안정성이 저하된다. 암석의 풍화를 유발시키는 여러 가지 요소들은 표 3.에 나타나 있으며, 이 중에서 풍화의 주된 요소로는 대기의 영향, 물의 영향 및 온도의 영향 등을 들 수 있다.

대기 중 암석의 풍화작용에 주된 영향을 주는 성분은 산성비(acid rain)의 원인이 되는 이산화탄소, 질소, 산소 및 황산염 등이 있다. 특히 황산염은 대부분의 암석에 가



그림 9. 세일층 굴착 후 노출시 급격한 파쇄 및 박리 현상 발생

기술기사 2

표 5. 암석의 다양한 풍화 요인

Classification	Weathering Agents	Effects
atmosphere	carbon dioxide carbon monoxide ozone, sulfates SO ₂ , SO ₃ chloride, nitrate	chemical wethering by acid rain
solar radiation	ultraviolet radiation visible spectrum infrared	greenhouse effect disintegration of organic consolidants and sealers
temperature	repeated fluctuation fire	cracking
water	relative humidity groundwater	cracking
salt	Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄ , NaCl, K ₂ SO ₄ et al.	efflorescence cracking
biological	plant animal	mechanical action chemical action

장 강력한 부식제로 작용한다.

또한 대부분의 암석은 침수와 건조과정을 반복할 경우 점진적으로 광물입자간의 결합력이 약화되어 부스러지거나 균열이 발생되고, 이 균열에 물이 침투하여 결빙되면 부피팽창으로 인하여 균열이 더욱더 크게 확장되거나 새로운 균열이 발생하게 되어 풍화가 더욱더 진행되게 된다.

우리나라는 계절의 변화가 뚜렷하여 동결·융해과정에 따른 암반의 풍화가 상대적으로 많이 나타나고 있으며 환경오염에 따른 산성물질의 영향도 점점 커지고 있는 실정이다. 특히 이러한 풍화 현상은 세일 및 이암 등의 점토광물을 함유한 암석에서 뚜렷이 발생하므로 주의를 기울여야 한다.

2) 비탈면 기울기 결정

① 비탈면 기울기 기준

설계시 암반 비탈면은 다음 표 6과 표 7에 기술되어 있는 바와 같이 불연속면의 특성(주향, 경사 및 전단강도 등)과 비탈면의 특성(비탈면의 방향 및 기울기) 그리고 암반 상태(TCR, RQD)를 고려하여 기울기를 가정한 다음 안정 해석을 수행하여 기울기를 결정하는 것이 일반적이나, 암반이 갖는 특성 중 간과해서는 안되는 물리·화학적 풍화특성도 종합적으로 고려하여 암종에 따른 비탈면의 최종적인 기울기를 결정하는 것이 합리적인 방법이라 판단된다.

표 6. 건설교통부(2009) 건설공사 비탈면 설계기준(p.120)

연암 이상 암반 비탈면의 경사는 암반내에 발달하는 단층 및 주요 불연속면의 경사 및 방향을 이용한 평사투영해석을 실시하고 발생가능한 파괴형태에 대한 안정해석을 실시하여 비탈면 기울기를 결정함

표 7. 암반의 특성에 따른 표준비탈면(도로설계요령, 한국도로공사, 2009, p.151)

암석 종류(강도)	암반파쇄상태		굴착 난이도	경사
	NX시추시(BX)			
	TCR	RQD		
강한 풍화암으로 파쇄가	20~40%(10~30%)	10~25%(0~10%)	발파암(연암)	1:0.8~1:1.0
거의 없는 경우와	40~60%(30~50%)	25~50%(10~40%)	발파암(보통암)	1:0.7
대부분의 연·경암	60%이상(50%이상)	50%이상(40%이상)	발파암(경암)	1:0.5

② 기 시공 사례에 대한 문헌 및 현장 조사 결과
세일층에 기 시공된 비탈면 기울기 적용 현황에 대하여

문헌 및 현장 조사를 수행하였으며, 그 결과는 다음 표 8 및 표 9와 같다.

표 8. 문헌 조사 결과

공사명	공사구간		암종	시공시 적용기울기	비고
	공구	STA			
중앙고속도로 ^{주1)}	1	10+420~650	세일/사암	1:0.7(사암층) 1:1.0(세일층)	
		12+300~560	세일/사암	1:1.4~1:2	
		13+000~240	세일/사암	1:0.7(사암층) 1:1.0(세일층)	
	2	3+040~300	세일/사암	1:1.5	
		3	0+280~440	세일/사암	1:0.7(사암층) 1:1.0(세일층)
	0+780~920		세일/사암	1:0.7(사암층) 1:2.0(세일층)	
	11+780~980		세일/사암	1:1.2	
	3-2	9+440~620	세일/사암	1:1.0~1:2	
10+700~820		세일/사암	1:1.2		
경부고속도로	0+640~0+760(하)		세일/사암	1:0.5(보강공법)	
구마-동대구간	3+880~4+080(하)		세일/사암	1:0.8(보강공법)	
8차선 확장공사 ^{주2)}	4+080~4+220(하)		세일/사암	1:0.8(보강공법)	
경부고속철도 노반시설공사 ^{주3)}	제11-2공구(토공4구간)		세일	1:0.8~1:1.2	

^{주1)} 1997 기술지문 사례집 1999. 6. 한국도로공사 p164~197

^{주2)} 1999 기술지문 사례집 2000. 6. 한국도로공사 p123~172

^{주3)} 경부고속철도 제11-2공구 노반시설기타공사 사면안정성 검토 보고서

표 9. 현장 조사 결과

도로명	조사내용
경부고속도로 (STA126.200 구간)	<ul style="list-style-type: none"> • 세일 구간으로 급속한 풍화 진행 상태 • 시공시 비탈면 기울기 : 1:1.0 적용
신녕-영천 국도	<ul style="list-style-type: none"> • 시공시 비탈면 법면 파괴 발생 : 기울기 1:1.0 적용 • 세일 구간으로 노출시 급격한 파쇄, 박리 현상 발생

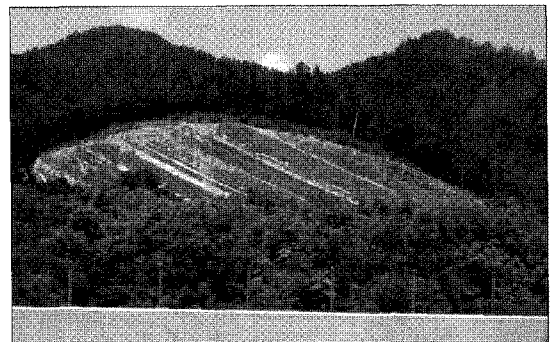


그림 10. 경부고속도로 세일층 비탈면 구간(기울기 1 : 1.0 적용)

기술기사 2

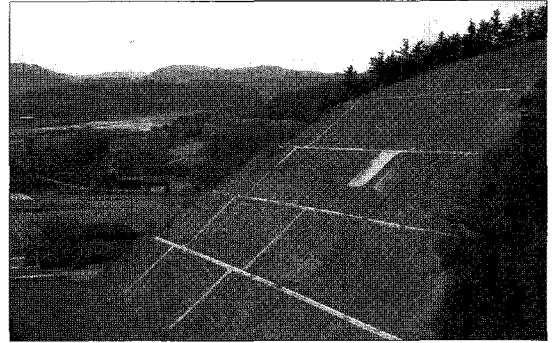


그림 11. 신녕-영천간 국도 세일층 비탈면 구간(기울기 1 : 1.0 적용)

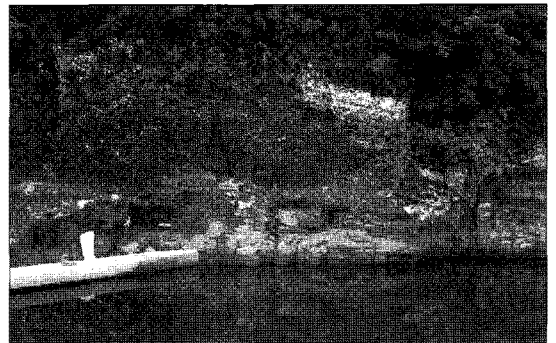


그림 12. 세일층이나 비탈면 기울기가 급경사로 형성되어 있는 경우

기 시공 사례에 대한 문헌조사 결과 세일층 구간의 비탈면 기울기는 1:1.0~1.2의 완경사를 적용하였으며, 세일과 사암이 혼재되어 발달되어 있는 경우에는 1:0.5~0.8의 급경사를 적용하고 보강공법을 적용하여 안정성을 확보하였다.

일반적으로 현장조사 결과 대부분의 반야월층(춘산층)에 해당하는 세일층 비탈면은 급속하게 풍화가 진행되어 파쇄 및 박리현상이 뚜렷하게 나타났으며, 기울기는 1:1.0 이상의 완경사가 적용되어 있다(그림 10 및 11).

③ 생성기원에 따른 세일의 특성 및 비탈면의 기울기

세일은 퇴적층이 세일로 변성되는 과정에서 높은 압력과 높은 열에 의하여 고결되어진 경우 높은 강도를 나타

내며, 특히 사질성분이 우세할 경우에도 높은 강도를 나타내는 특성이 있다. 시추시 채취한 코어를 손으로 타격했을 경우 쉽게 부러지거나 박리가 잘 되지 않는다. 이러한 세일은 풍화에 대한 내구성 또한 상대적으로 강하여 노출시에도 쉽게 파쇄되거나 박리가 되지 않는 특성이 있다. 따라서 이와 같은 세일층이 발달된 굴착 비탈면의 경우에는 일반적인 암반 비탈면의 설계와 유사하게 안정해석을 수행하여 비탈면 기울기를 결정하는 것이 합리적인 것이라 판단된다. 참고적으로 기반암이 세일이면서 급경사로 안정되어 있는 현장사진은 그림 12에 나타나 있다.

반면에 퇴적층이 세일로 변성되는 과정에서 낮은 압력과 낮은 열에 의하여 고결되어진 경우 상대적으로 낮은 강도를 나타내며, 층리가 잘 발달되어 있다. 이러한 세일층은 TCR 및 RQD가 거의 100%에 가까우며, 층리의 발

달영향으로 코어를 손으로 가볍게 타격을 가해도 쉽게 부러지거나 박리되는 특성이 있다. 또한 풍화에 대한 내구성이 상대적으로 매우 약하여 굴착 후 대기에 노출시 파쇄 및 박리현상이 빠르게 진행되는 특성이 있다(그림 9). 따라서 이와 같은 반야월층(춘산층)에 해당하는 세일층이 발달된 굴착 비탈면의 경우에는 일축압축강도가 매우 크고, TCR 및 RQD가 거의 100%라고 할지라도 일반적인 암반 비탈면의 설계방법을 적용해서는 장기적인 안정성 확보가 곤란하다고 판단된다. 굴착법면에서 파쇄 및 박리가 빠르게 진행되어 쓰일네일링 등에 의한 보강방법 적용도 용이하지 않다고 판단된다.

그러므로 반야월층(춘산층)에 해당하는 세일층(그림 2)이 발달된 굴착 비탈면의 경우에는 비탈면 기울기를 층리의 경사가 굴착비탈면 방향과 관계없이 45° 이내 일지라도 최소한 1:1.0 이상의 완경사(그림 10 및 11)로 계획하고, 층리의 경사가 굴착비탈면 방향으로 45° 이상이라면 층리의 경사를 비탈면의 기울기로 계획하는 것이 필요하다고 판단된다. 또한 가능한 신속하게 식생에 의한 법면 보호공을 적용하여 비탈면의 안정성을 확보하는 것이 합리적일 것이라 판단된다.

④ 사업구간 세일층 비탈면 기울기 선정

상기 분석 결과 본 사업구간에 발달되어 있는 세일층은 지질학적으로 반야월층(춘산층)에 해당하는 지층으로서 미립의 점토광물로 구성되어 있으며, 입자들이 화학적 결합보다는 압력과 열에 의하여 고결된 것으로 판단된다. 이러한 세일은 입자간 고결물질인 방해석이 비탈면 시공시 우수와 대기중에 노출되면 방해석의 용탈로 인하여 쉽게 파쇄 및 박리 현상이 발생되고 빠른 속도로 풍화의 진행이 예상된다. 이에 따른 전단강도의 저하로 비탈면의 장·단기적인 안정성을 확보하기 위해서는 굴착 비탈면의 기울기를 완화시켜야 한다고 판단된다.

문헌 및 시공 사례 조사 결과와 실제 설계와 시공 경험을 종합해볼 때 반야월층(춘산층)에 해당하는 세일층의 비탈면 기울기는 1:1.0 이상의 완경사로 계획하고 식생에 의한 비탈면 보호공법을 적용하여 장기적인 안정을 확보하는 것이 합리적일 것이라 판단된다.

따라서 본 사업구간의 세일층에 대한 암반비탈면 기울기는 1:1.0을 적용하고 굴착 직후에 굴착법면 보호공을 적용하여 전반적인 암반비탈면의 안정성을 확보할 수 있도록 계획하였다.

4. 결론 및 요약

- 1) 사업노선의 분포암층은 생성기원상 중생대 백악기 퇴적암층으로 경상누층군 하양층군에 속하는 반야월층(춘산층)이며, 미세립분 함유량이 90%이상인 세일층으로 구성되어 있다.
- 2) 본 사업구간의 세일층은 암종특성 상 미립의 점토로 구성되어있으며, 입자간 고결물질인 방해석이 비탈면 시공시 우수와 대기중에 노출되면 방해석의 용탈로 빠른 풍화가 발생되어 비탈면의 안정성이 급격하게 저하될 것으로 예상된다.
- 3) 세일층의 비탈면에 대한 기존 현장조사 결과 대부분 완경사를 적용하였고 식생에 의한 비탈면 보호공법을 적용하여 비탈면의 장기적인 안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.
- 4) 본 사업구간 중 세일층에 대한 비탈면 구간은 1:1.0 기울기로 계획하고, 풍화방지를 위해 굴착 직후 곧바로 비탈면 보호공을 시공하여 암반 비탈면의 안정성을 확보할 수 있도록 계획하였다.
- 5) 지질학적으로 반야월층(춘산층)에 해당하는 세일층에 굴착비탈면을 계획할 경우 시추시 채취한 코어를 손으로 가볍게 타격했을 때 쉽게 부러지거나 박리되

기술기사 2

는 특성이 있다면 일축압축강도가 매우 크고, 층리의 경사가 굴착비탈면 방향과 관계없이 45° 이내이며, TCR 및 RQD가 거의 100%라고 할지라도 굴착비탈면 기울기는 최소한 1:1.0 이상으로 계획하고, 층리

의 경사가 굴착비탈면 방향으로 45° 이상 이라면 층리의 경사를 비탈면의 기울기로 계획한 다음 신속하게 법면 보호공을 시공할 수 있도록 해야 한다고 판단된다.

[참고문헌]

1. 국토해양부(2009), 건설공사 비탈면 설계기준
2. 도로설계요령, 한국도로공사(2009), 제2권 토공 및 배수
3. 배규진(2007), 비탈면붕괴 사례로부터 얻은 교훈
4. 장현식, 장보안, 이준성(2007), 강원도 횡성군 풍암분지 백악기 세일의 동결-융해에 따른 지질공학적 특성 변화
5. 소철섭, 배병렬(1975), 경상계 퇴적암의 공학적 성질에 관한 연구
6. 김영수 외 4인(2001), 층리면을 고려한 세일의 공학적 특성
7. 김영수 외 4인(2001), 세일(혈암)의 이방성 파괴 특성
8. 한국도로공사 기술자문 사례집(1997, 1999)
9. 경부고속철도 제11-2공구 노반시설기타공사 사면안정성 검토 보고서(2004)
10. 00고속도로 민간투자사업 실시설계 지반조사 보고서