

## 석영반암이 관입된 퇴적암반의 사면안정성 분석

### Slope Stability Analysis of the Sedimentary Rock Intruded by Quartz Porphyry

이 수곤<sup>1)</sup>, Su-Gon Lee

<sup>1)</sup>서울시립대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, The Univ. of Seoul

**SYNOPSIS:** As this paper intends to measure the slope stability of sedimentary rock with Quartz Porphyry inside, numerous experiments had actually been made on such rocks. The study shows that the possibility of the rock sliding along the bedding plane is being reduced in proportion to the amount of the Quartz Porphyry intruded within the rocks.

**Key Words:** Rock slope stability, Sedimentary rock, Bedding

## 1. 서론

일반적으로 국내에서 표준시방서에서 고려하는 연암-경암은 사면의 절취경사가 1:0.3(73°)~1:0.5(63°) 이고, 풍화암은 1:1 (45°) 경사로서 확일적으로 암반 절취사면을 설계한다. 그러나 금번에 본 연구의 대상이 되는 충북 영동지역과 같이 국내에서 가장 복잡한 지질로서 구성된 지역에서는 보다 정밀한 지질조사와 사면안정성검토 및 적절한 보강대책 수립이 요구된다. 국내의 퇴적암은 일반적으로 취약한 부분인 층리(層理: Bedding plane)를 따라서 붕괴되는 것으로 알려져있고, 이러한 퇴적암의 특성에 근거하여서 암반사면의 안정성을 우선적으로 고려하여 설계하는 것이 중요하다. 그러나 본 지역에서와 같이 퇴적암 사이를 반심성암인 석영반암(石英斑岩: Quartz Porphyry)이 관입한 복잡한 지질상태인 경우에는 합리적인 사면설계가 곤란한 것이 국내의 현실이었다. 그 이유는 첫째, 현장조사시에 이와같은 복잡한 지질을 정확하게 조사하여서 분석하는 것이 어려웠고, 둘째, 지질상태를 이해한다고 하여도 복잡한 지질 상태에 따른 합리적으로 정량화된 암반사면의 안정성을 분석하는 방법이 연구되어 있지 않기 때문이다.

## 2. 지형 및 지질 현황

본지역은 충청북도 영동군 심천면 고당리 지역으로서 해발 280m 되는 높은 산이 절취사면의 배후지역에 형성된 산악지형이다. 본 산자락을 절취하여서 고당-영동

간 도로 확장 및 포장공사를 수행하기 때문에 높이 20~80m 되는 대규모의 가파른 대절취사면이 많이 형성될 뿐만아니라 절취사면의 인근에 경부철도가 지나가므로 절취사면이 붕괴시에 대규모 암괴가 도로와 철도쪽으로 굴러떨어지는 매우 심각한 위험을 유발할 여지가 있는 지역이다.

본 지역은 백악기에 형성된 퇴적암(堆積岩)으로서 영동층군(永同層群)으로 불리우는데, 구성암석은 검은색~담회색의 셰일(Shale: 흑색 셰일)과 사암(Sandstone)이 주로 분포한다. 그리고 간혹 백악기에 관입된 반심성암(半深成岩)의 일종인 석영반암(石英斑岩: Quartz Porphyry)이 지질구조선(주로 단층)을 따라서 관입(貫入)되어 있다. 석영반암은 담황색을 띠며 석영 혹은 장석반정(長石斑晶)을 함유한 치밀한 암석이다. 영동도폭에 따르면 본 석영반암은 퇴적암을 거의 수직으로 관입한 것으로 분석되고 있고 또한 관입한 두께는 작은 것부터 두꺼운 것까지 다양한 것으로 보고되고 있다.

### 3. 지반특성

본 지역의 암석과 암반의 풍화발달 상태는 다음과 같다: 본지역은 퇴적암으로 구성되어 있고 풍화가 비교적 적은편이고, 퇴적암을 관입한 석영반암도 풍화가 적어서 강한편이다. 본 지역의 절취면들은 하단부가 발파암으로서 퇴적암에서는 주로 연암-보통암으로서 슈미트해머수치는 40~50 으로서 일축압축강도가 750~1200 kg/cm<sup>2</sup> 정도이고, 석영반암에서는 연암-경암으로서 슈미트해머수치는 45~55 로서 일축압축강도가 1050~1550 kg/cm<sup>2</sup> 으로 판정된다.

본 지역의 불연속면 발달특성은 다음과 같다: 도로쪽으로 뚜렷하게 30~34°의 경사로 기울어진 층리가 발달한다. 이 층리는 연장성이 수m로 긴편으로서 본 층리를 따라서 암괴들이 평면형태의 활동과괴가 우려된다. 본 지역의 우측 상단부에서 붕괴된 양상을 관찰해 보면 퇴적암의 층리면을 따라서 평면활동과괴로 붕괴된 형태인데, 역시 퇴적암의 후방에는 도로 절취면과 주향이 비슷하고, 거의 수직인 절리들도 역시 발달하는 것을 보여준다. 또한 본 지역의 암반의 평점은 석영반암은 RMR % = 58 이고, 퇴적암은 RMR % = 40 이다. 그리고 절리방향에 의한 보정을 하면 석영반암은 RMR % = 53 이고 퇴적암은 RMR % = 0~20 이다.

### 4. 현장 시험 및 실내시험

현장에서 수행한 현장 시험은 슈미트해머시험, 암석의 Tilt test (경동시험)이고, 실내에서 수행한 실내시험은 암석의 건조와 습윤 단위중량 측정시험, 암석의 일축압축강도 시험, 암석의 삼축압축강도 시험, 암석 절리면의 직접전단시험이다.

석영반암의 단위중량은 함수상태시에 2.55 g/cm<sup>3</sup>로 계산되는데 암석내에 철분이 많은 것이 특색이다. 암석의 일축압축강도를 추정하기 위하여 현장에서 절취면위에서 슈미트해머로서 타격하였는데 퇴적암과 석영반암이 각각 슈미트해머수치 (SHV)가 40~50, 45~55 로서 연암-경암이었다. 현장에서 대표적인 시료를 채취하여서 코아로서 성형하여서 점하중강도시험기(영국의 ELE사 제품)로서 측정해 본바로는 800~1300 kg/cm<sup>2</sup> = 80~130 MPa 이었다.

본 지역에는 퇴적암으로 주로 구성되었지만 간혹 석영반암이 관입하고 있으므로 석영반암의 전단강도 특성을 판단하는 것이 필요하다. 수일동안 침수시킨 후에 암석 삼축압축시험을 수행하였고 시험장비는 미국의 SBEL사 제품인 Model STS-200을 사용하였는데, 석영반암의 삼축압축 암석시험결과는  $C = 1 \sim 2 \text{ MPa} = 10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$  ( $100 \sim 200 \text{ t/m}^2$ ),  $\phi = 55^\circ$  이다. (그림 1)

본 지역에는 퇴적암으로 주로 구성되었지만 간혹 석영반암이 관입하고 있으므로 석영반암의 전단강도 특성을 판단하는 것이 필요하다. Hoek & Brown (1980, 1995)이 제시한 암반의  $\sigma_1, \sigma_3, m, s$  간의 상관관계를 나타내는 공식을 적용하여서  $\sigma_3$ 의 변화에 따른  $\sigma_1$ 의 수치를 계산하여서 전단응력( $\tau$ ) 대 수직응력( $\sigma$ )에 관한 Mohr circle을 그리고 그 경우에 최적의 접선을 계산하면 석영반암의 암반 전단강도 지수가 다음과 같이 산출된다 (그림 2):  $\phi = 35^\circ$ ;  $C = 2 \text{ kg/cm}^2 = (20 \text{ t/m}^2)$

절리면의 전단강도를 측정하기 위하여 사용된 장비는 영국 Golder Associates 사 제품 (Model Golder Shear Box) 으로서 전단시험시에 수직 변위와 수평변위가 LVDT 로서 자동 측정되며, 전단응력은 Load cell로서 자동 측정되어서 컴퓨터프로그램으로 입력되고 분석된다. 시험을 위하여 채취된 절리면의 특성은 퇴적암의 층리면으로서 충전물질이 없는 경우가 대부분인데  $C = 0 \text{ kg/cm}^2$  ( $\text{t/m}^2$ );  $\phi = 33^\circ$  로서 분석된다. (그림 3)

## 5. 암반사면안정성의 정량적 수치해석 분석

### 5.1 수치해석방법

본 지역과 같이 복잡한 지질로 구성된 암반사면의 정량적인 수치 안정성분석을 위하여 다음과 같은 사항들을 고려하였다.

가. 복잡한 지질조건을 감안: 본 지역은 퇴적암내에 석영반암이 불규칙하게 관입되어 있어서 횡단면도상에서 지질구조가 매우 복잡하므로 기존에 사용되는 암반사면 안정성 컴퓨터프로그램으로서는 해석상 어려움이 있으므로 수작업으로서 안전율과 보강량을 매 측정 20m마다 계산하였다. (그림 4)

나. 위험암괴의 면적 산출: 일본 KOIZUMI 社 제품의 구적계 (Digital planimeter; Model KP-90N)를 사용하여서 측정 20m 마다 작성된 횡단면도상에서 암석 분포 (퇴적암, 석영반암) 및 위험절리와 단층에 의한 위험 가능한 암괴의 면적을 횡단면도의 1m 횡폭에 대한 면적으로서 측정하였다.

다. 위험가능한 예상과괴선을 산정: 각 횡단면도상에서 약 10가지의 붕괴가능성 Mode (층리면으로 만 붕괴 가능성, 층리면과 석영반암을 관통하여서 붕괴 가능성, 석영반암내의 수직 절리를 따라서 붕괴가 촉진될 가능성, 절취면의 상단에서 퇴적암내에 수직절리가 인장절리로서 작용하여서 붕괴될 가능성 등)를 검토하여서 지하수가 절리면에 침투한 경우의 수치적인 사면안전율을 한계평형법으로서 계산하였다.

라. 입력한 전단강도 지수: 퇴적암의 층리를 따라서 붕괴되는 가능성과 아울러서 석영반암이 지지하는 역할을 하는 경우도 고려하여서 안전율을 산출하였다. 퇴적암의 층리인 절리면의 전단강도는 암석 절리면 전단시험 결과를 사용하였고, 석영반암은 암석 삼축시험결과와 아울러서 Hoek & Brown (1980,1988)의 경험적인 파괴기준에 따라서 석영반암의 암반 전단강도지수를 산출하였다.

마. 사면안전을 계산 및 보강량 계산방법: 본 지역은 경부철도에 인접하여 있으므로 절취면의 붕괴시 매우 큰 재난을 일으킬 우려가 크므로 일반적인 도로 절취사면의 안정성 검토보다도 매우 신중하여야 하므로 본 절취사면의 안전율은  $F_s = 1.5$  으로 고려하는 것이 타당하리라 판단하였다. 또한 본 지역은 지질이 복잡하므로 기존의 컴퓨터프로그램으로 분석이 불가능하므로 수작업으로 사면안정성 수치분석을 수행하였다. 본 지역은 퇴적암이 주이고 석영반암이 불규칙하게 관입되어 있으므로 사면 안정성에 미치는 석영반암의 지지력 효과를 사면안전에서 고려하였는바, 토질 사면에서 수치해석하는 Slice method 의 이론을 도입하였다. 즉, Slice의 자중이 미치는 활동면이 절리면이면 (그림 5 에서 무늬가 없는 경우) 절리면의 전단강도를 적용하였고 Slice 의 자중이 미치는 활동면이 석영반암이면 (그림 5 에서 ▣ 무늬로 표시됨) 석영반암의 암반 전단강도를 적용하였다. 장기적인 사면 안정성을 위하여 필요한 사면안전을  $F_s = 1.5$  를 확보하기 위하여 필요한 앵커 보강량도 상기와 같은 방법으로 계산하였다. (그림 5 는 축점 1+200의 사례임)

## 5.2 사면안정성 수치해석 결과

각 축점별 사면안정성 분석결과 및 보강대책은 다음과 같다.

가. 축점 1+80 구간: 본 구간은 특이하게도 절취면의 대부분은 하부에서 상부까지 석영반암이 존재하는데, 석영반암은 수직으로 대규모로 관입되어있으므로 현재의 절취구배에서 비교적 안정하므로 특별한 보강은 필요치 않은 것으로 판단된다.

나. 축점 1+100~1+120 구간: 본 구간은 석영반암이 관찰되지 않고 퇴적암만으로 구성되어 있어서 층리의 경사인  $30^\circ$  를 따라서 대규모로 암괴가 붕괴될 우려가 있다. 층리면에 지하수가 없는 경우의 사면안전율이  $F_s = 1.13$  으로서 약간 안전한 편이나 강우시에는 층리면에 수압이 발생할 경우에 사면안전율이  $F_s = 0.43$  으로 급격하게 떨어져서 매우 위험하게 된다. 그러므로 장기적으로 본 절취사면이 안정하기 위해서는 사면안전율  $F_s = 1.5$  를 충족시키기 위해서는 앵커를 약 805 톤/1m 횡폭당 으로 많은 보강량을 시공하여야 한다.

다. 축점 1+120~1+160 구간: 석영반암이 비교적 소규모로 퇴적암을 두군데서 관입하고 있지만 석영반암과 퇴적암의 상하 접촉부를 정밀하게 관찰하여본 바에 따르면 본 석영반암은 절취사면의 안쪽 깊은곳까지는 발달하지 않은 것으로 판단된다. 그러므로 퇴적암의 층리를 따라서 암반이 붕괴되는데 있어서 석영반암의 억지말뚝 효과를 기대하기가 미약하므로 사면안정분석시에 본 석영반암의 존재는 무시하고 고려하지 않는 것이 타당하다고 판단된다. 그러므로 본 구간에서는 축점 1+100~1+120 구간에서와 같은 과도한 앵커보강이 필요하다.

라. 축점 1+180~1+200 구간: 그런데 본 구간에서는 퇴적암을 석영반암이 보통규모로 두군

데서 관입하고 있다. (그림 7) 여기서는 층리에 지하수가 없으면 사면안전율이  $F_s = 1.42$  로서 대체적으로 안전한 편이다. 그러나 층리에 지하수를 고려하면 사면안전율이  $F_s = 0.851$  로서, 장기적으로 사면이 안정하기 위해서 필요한 사면안전율  $F_s = 1.5$  를 확보하기 위해서 필요한 앵커보강량은 보통 규모로서 459 톤/1m 횡폭당 이다.

마. 측점 1+220~1+240 구간: 본 구간에서는 퇴적암을 두군데서 관입한 석영반암의 규모가 비교적 많으므로 퇴적암의 층리를 따라서 암괴가 붕괴되는데 있어서 석영반암이 큰 억제효과가 있다. 층리면에 지하수가 없는 경우에는 사면안전율이  $F_s = 2.11$ 로서 높은편이고 층리면에 지하수가 있는경우에도 사면안전율이  $F_s = 1.5$  로서 비교적 높으므로 본 구역은 앵커로 보강하지 않더라도 전체적인 사면은 안정하다고 판단된다.

## 6. 결론

본 지역은 퇴적암이 주이므로 도로쪽으로 기울어진 퇴적암의 층리  $30\sim 34^\circ$  를 따라서 평면 파괴형태로 활동과파괴될 가능성이 가장 높은 것으로 분석된다. 그리고 절취사면의 중간부와 하단부에는 석영반암이 맥암구조로 관입한 형태로서 절취사면의 안정성을 증가시키는데 대체적으로 큰 역할을 하는 것으로 판단된다. 즉 석영반암의 관입 규모가 크면 억지말뚝과 같은 효과로서 절취사면의 안정성을 크게 증가시키므로 절취사면을 앵커로 보강하지 않아도 안정하지만, 석영반암의 관입규모가 적으면 절취사면의 안정성을 높이는 큰 효과를 기대할 수 없으므로 많은 앵커보강량이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구중의 일부는 96년도 서울시립대학교 교내학술연구조성비 (신진교수연구분야)를 지원 받아 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 이수곤 외, 도로와 가옥주변의 절취면 붕괴위험 평가 및 보강대책 연구 (Part I~III), 과학기술처,(1991~94), pp.88, 134, 104.
2. 이수곤. 서울 일원의 화강암과 편마암 절취사면의 안정성연구, 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회 제2집, (1993.11), pp.167-189.
3. 이수곤 외. 암반 절취사면의 조사, 설계, 감리를 위한 합리적인 기준 설정방안, 한국지반공학회 사면안정위원회 95'학술발표회, (1995.6). pp.59-95.
4. 한국자원연구소, 영동의 지질도(1:50,000), 한국동력자원연구소, (1986).
5. S.R.Hencher. "The implications of joints and structures for slope stability," Slope Stability, Wiley & Sons. Ltd., (1987), pp. 145-186.

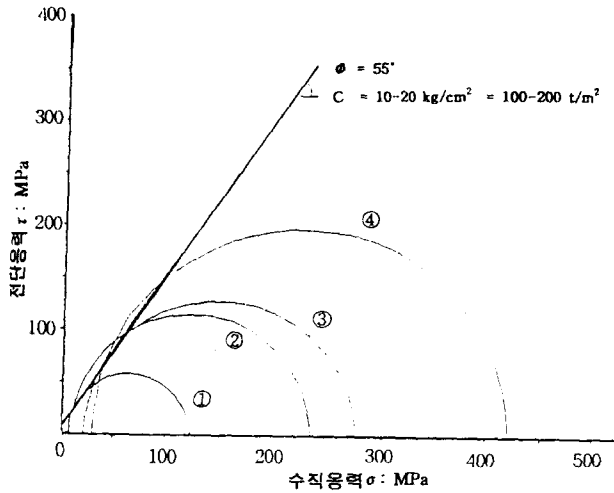


그림1 석영반암의 암석 삼축압축시험 결과  
(수직응력  $\sigma_n$ 과 전단응력  $\tau$ 의 관계)

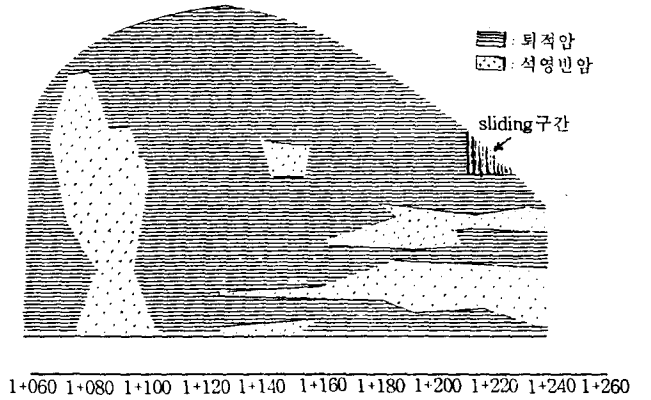


그림4 본지역의 축첩별 암석분포도

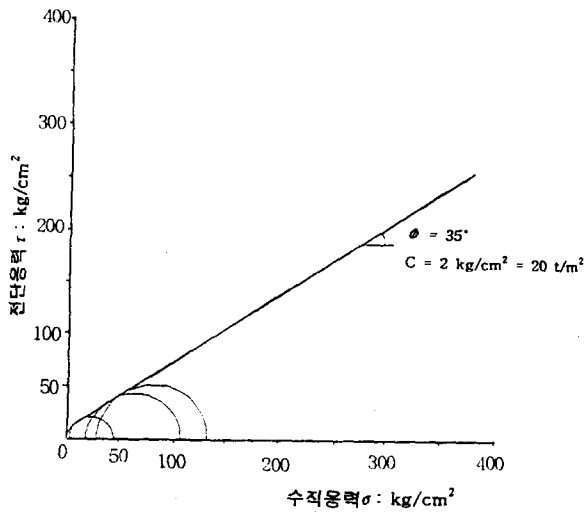


그림2 석영반암의 암반 삼축압축상태의  
응력해석 결과  
(수직응력  $\sigma_n$ 과 전단응력  $\tau$ 의 관계)

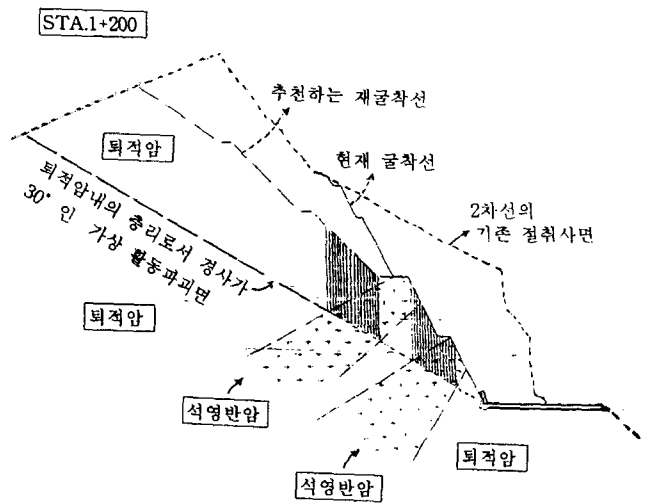


그림5 본 지역에서 층리를 따라서 압괴가  
붕괴되는 경우에 사면 안정성 수치  
해석을 한 방법

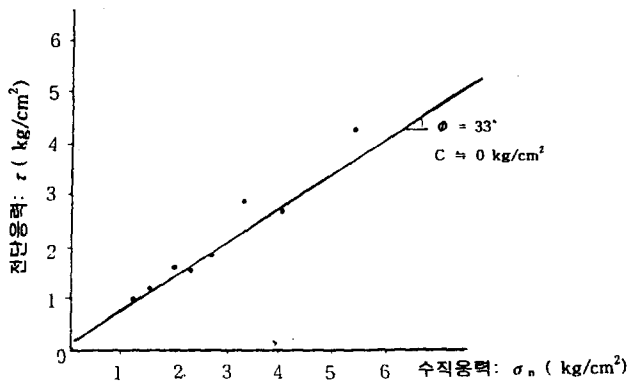


그림3 암석 절리면의 직접전단시험 결과  
(수직응력  $\sigma_n$ 과 전단응력  $\tau$ 의 관계)