

화강암-안산암 접촉부 대규모 사면의 붕괴 사례 연구

A case study of large-scale slope failure in Granite - Andesite contact area

이수곤⁽¹⁾, Su-Gon Lee, 양홍석⁽²⁾, Hong-Suk Yang, 황의성⁽³⁾, Ui-Sung Hwang

⁽¹⁾ 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

⁽²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

⁽³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

개요(SYNOPSIS) : In this study, we performed ahead a field geological investigation, boring investigation for slope stability analysis in large scale slope failure area. But the geological stratum was not clearly grasped, because ground was very disturbed by large scale Granite intrusion. Furthermore, the existing test data was not pertinent to the large scale Granite intrusion site like here. Therefore, various kind of field test were performed to grasp clearly for geological stratum. And the results of back analysis, various kind tests used to slope stability analysis.

주요어(Key words) : a field geological investigation, Granite intrusion, slope stability analysis, geological stratum

1. 서론

대규모 조산운동에 의하여 발생한 화강암의 관입은 기존의 암반에 많은 영향을 미친다. 특히 관입암과 기존의 암반 경계부에서는 지반의 교란이 매우 심하기 때문에 풍화가 매우 불규칙하고 지층구성이 복잡한 경향을 보인다. 본 연구지역은 불국사 화강암이 기존의 백악기의 주산안산암류의 함각력질안산암을 관입한 경계 지역으로, 지난 여름 태풍 Rusa 발생시 집중호우에 의하여 대규모 사면붕괴가 발생하였다. 기존의 안정성 검토에서 대규모 붕괴를 예상하지 못한 이유는 공학적으로 풍화암반의 거동을 하는 지층에 대하여 암석의 강도에만 의존하여 연암으로 분리하고, 연암 2m까지만 시추를 실시하여 연암, 경암 하부에 나타나는 풍화암층이나 단층파쇄대 등을 정확하게 파악하지 못하였기 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 사면붕괴에 대한 안정성을 분석하기 위하여 현장지표지질조사, 시추조사를 실시하였으나, 대규모 관입에 의하여 지반이 매우 교란되었기 때문에 명확한 지층구성을 쉽게 파악할 수 없었다. 따라서 정확한 지층구성의 파악을 위하여 시추심도를 경암 하부까지 실시하고 시추공내 영상촬영, 현장 탄성과 탐사, 실내 시험 등을 추가로 실시하였고, 기존의 붕괴가 발생한 파괴면에 대한 역해석과 각종 조사결과를 이용하여 사면안정성에 대한 분석을 실시하였다.

2 연구 대상 지역의 특성

2.1 연구 대상 지역의 지질학적 특성

1. 암석의 종류

본 지역의 지질은 경상계 신라통에 속하는 화산암류를 기저로 하여 후기에 관입한 불국사통의 화강암으로 주 구성되어 있다. 기저부의 화산암류는 주산안산암질암으로 본 과업지역에서는 암산암질응회암으

로 분포하며 후기의 화강암류는 흑운모화강암으로 분포한다.



그림 1. 조사 사면의 지질도

2. 풍화 상태

노두에서 관찰된 풍화상태는 보통 보통풍화에서 심한풍화까지 다양한 양상을 보이고 있으며 단층등의 영향으로 불규칙한 풍화상태를 보인다. 본 사면의 암질상태 (RQD)는 파쇄가 심하고 붕괴토와 붕괴암반이 절취사면의 대부분을 덮고 있기 때문에 정확하게 파악하기는 어려우나 일부 암반이 노출된 구간에서는 연암 정도의 구간에서 50~60%, 풍화암 정도의 구간에서는 0~10% 정도로 매우 파쇄가 심한편이다. 시추조사를 통하여 얻은 자료를 분석해 볼 때 단층파쇄 등의 영향으로 인하여 지반이 매우 교란되어 있는 것을 알 수 있으며 연암이나 경암하부에 풍화암이 발견되는 경우도 많다.

3. 항공사진을 통한 불연속면 발달 상태

본 과업지역은 독립적으로 산계가 발달한 지역이기 때문에 정확한 선구조의 발달 경향을 파악하기 어렵지만 정밀한 항공사진 판독결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

· 주 구조선의 방향 : N30 ~ 50W

4. 사면의 위치 및 크기

본 과업지역에서 2002년 8월에 발생한 산사태는 공장들이 위치하는 표고 약 90m 지점에서 산사태 상부 경계면인 표고 210m 까지 약 200m 높이를 갖으며, 산사태의 면적은 평면도 상에서 계산하여 볼때 대략적으로 약 34,000m² 이다. 또한 산사태의 하부 폭은 약 230m이고 상부의 폭은 50m이다.

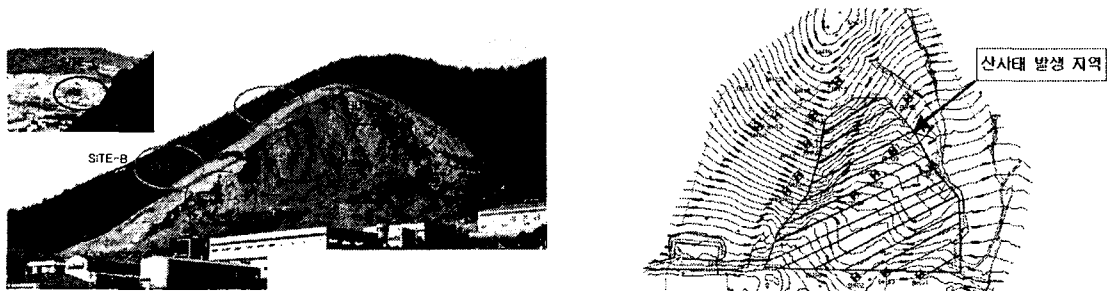


그림 2. 붕괴사면 전경 및 조사 구역

2.2 연구 대상 지역의 인장균열 발달 상황

본 과업 지역에서 발생한 인장균열의 상태는 크게 두가지로 구분된다. 첫째로 사면 붕괴 시작 전후에 발생한 것으로 붕괴 경계선과 약 5~10m 정도 떨어진 지역에서 전체적으로 발견되는 인장균열과 붕괴사면 좌측 상부에서 남동쪽으로 약 100m 정도 발달하는 인장균열(SITE-I)이 발견된다. 둘째로 붕괴사면 좌측 하부에서 과거의 긴 시간동안 여러 가지 원인으로 인하여 국부적으로 발생된 인장균열(SITE-II)이 발견된다.

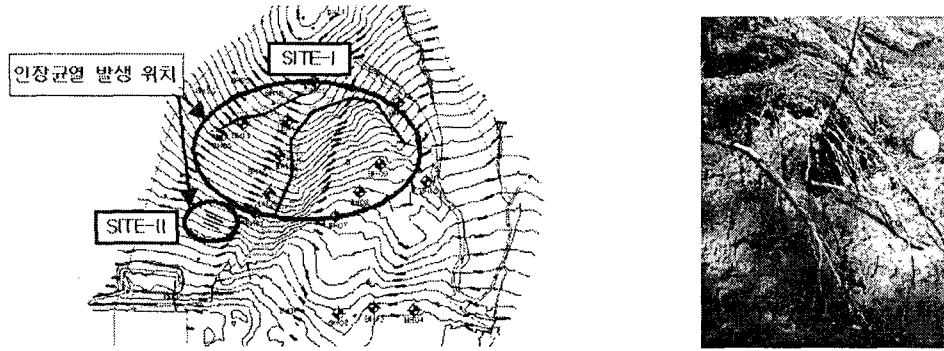


그림 3. 인장균열 발생 위치 및 인장균열 상세도

3. 연구지역의 지반 구성 파악을 위한 현장조사

본 연구지역의 이미 대규모의 붕괴가 발생한 지역으로 붕괴 토사와 붕괴암반 때문에 정밀한 지표지질 조사가 어렵다. 따라서 22개의 시추조사, 8개의 공내영상촬영, 현장 탄성과 탐사 등을 실시하여 가능한 정밀한 결과를 얻고자 하였다..

1. 시추조사를 통한 불연속면 발달 상태

절취사면에 인접하여서 22개의 시추조사를 수행하였다. 기존에는 절취사면에 인접하여서 15개의 시추 조사를 수행하려고 하였으나 사전에 추측한 것보다도 지반의 상태가 취약하고 교란이 심하여 정확한 지층 구성을 파악하기 어려웠다. 따라서 7개의 시추공을 지반이 복잡하고 지층구조를 파악하기 용이한 지역에 추가로 수행하였다. 또한 기존에 작성된 본 연구지역의 안정성 보고서들은 연암 2m까지만 시추를 실시하고 암석의 강도만에 의하여 암반을 구분하였기 때문에 연암, 경암 하부에 발생하는 풍화암층을 확인하지 못했고 공학적으로 풍화암반의 거동을 하는 지층에 대하여 연암반으로 구분하는 오류를 범하였다. 따라서 기존의 안정성 검토시에는 풍화암층의 두께를 3~5m로 판단하였지만 금번의 연구에서는 풍화암층의 두께가 10~30m로 대규모의 파괴가 발생할 수 있는 것으로 판단되었다.

2. BIPS를 통한 불연속면 발달 상태

자세한 시추공내의 암석상태(풍화, 불연속면)를 파악하기 위하여 8개의 시추공내에 내시경 카메라를 삽입시켜서 영상촬영하여서 보다 정밀한 조사를 수행하였다. 그 결과 다수의 개구성 절리(단층파쇄대로 판단됨)가 다수 발견되었고, 특히 연암과 경암을 구분짓는 경계가 단층파쇄대인 것으로 판단되었다. 이는 시추조사의 결과와 비교하여 볼 때 단층 점토와 심한 파쇄구간이 발견되었으며, 지표지질조사의 결과와 비교하여 봤을 때 붕괴 예상면으로 판단하기에 충분한 위험성을 내포하고 있었다.

3. 현장탄성과 탐사

시추조사는 일종의 점조사이기 때문에 본 연구지역과 같이 지반이 복잡한 형태를 보이는 지역에서는 정확한 지층 구조를 파악하기 어렵다. 따라서 전체에 대한 평가가 가능하도록 시추 위치를 기준으로 하여 6개의 축선, 총 1,980m를 설정하여 현장탄성과 탐사를 수행하였다. 조사결과 우측부에 비하여 좌측부의 지반이 풍화심도가 깊고 훨씬 복잡한 형태를 나타내는 것으로 판단되었으며, 시추조사 결과와 함께 지반 구성도를 작성하는데 참고자료로 사용하였다.

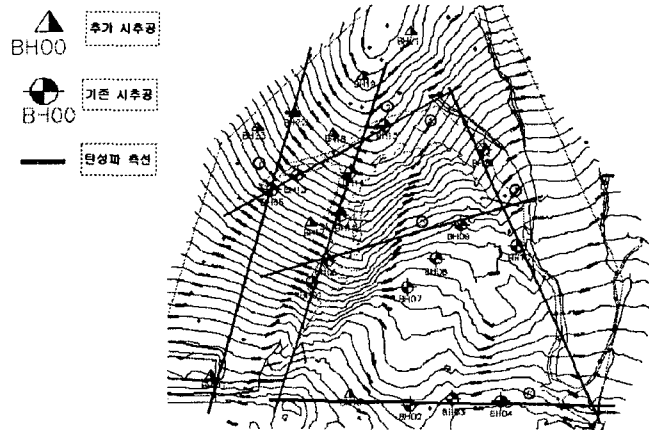


그림 4. 시추공 위치 및 단성과 탐사 축선

4. 붕괴사면의 안전성 해석

4.1 평사투영 해석

본 과업지역은 대규모 산사태에 따른 붕괴도와 붕괴압반이 절취면의 대부분을 덮고 있기 때문에 절취면에서 다양한 지질조사자료를 획득하기 불가능하다. 따라서 주로 불연속면의 방향성과 풍화상태를 조사하였으며, 또한 절취사면 좌우측의 노두 조사를 통하여 일부 자료를 획득하였다. 불연속면을 측정한 지역에 따라 세분된 zone으로 구분하였으며, 평사투영 해석결과 본 붕괴 사면과 주변 노두에서는 썩기 파괴 및 평면파괴 발생 시킬 가능성이 있는 불연속면이 다수 분포하고 있으며 전도파괴의 가능성이 있는 불연속면 역시 분포하고 있다. 따라서 이 불연속면들이 사면의 안정성에 영향을 준 것으로 판단된다. 그러나 이러한 불연속면들은 붕괴면에서 발견된 소량의 측정치와 주변 노두 조사에 의한 것으로 정확한 불연속면 분포 특성을 파악하기 위해서는 시추공내 영상촬영 결과에 함께 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

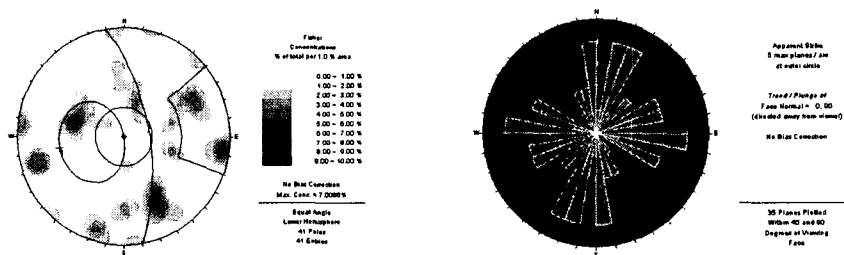


그림 5. 본 연구 지역의 불연속면 발달 특성

4.2 역해석을 통한 불연속면의 강도정수 산정

본 지역은 이미 대규모의 사면 붕괴가 발생한 지역이므로 역해석을 통하여 절취사면 붕괴를 발생시킨 불연속면(점토가 충전된 단층파쇄면)의 강도 정수를 산출하였다. 붕괴의 형태는 점토가 충전된 단층파쇄면을 따라 경암층 상부까지 발생한 평면파괴와 원형파괴로 예상되나 단순 원형파괴의 경우 파괴면이 풍화토~연암까지 지나가기 때문에 점토가 충전된 단층파쇄면의 영향이 적다. 따라서 점토가 충전된 단층파쇄면을 따라 발생하는 평면파괴의 경우와 경암층 상부를 따라서 파괴가 발생하는 비원호파괴의 경우에 대해서 역해석을 실시하였다. 붕괴의 원인을 연암과 경암 경계부의 점토가 충전된 단층파쇄면으로 설정하였기 때문에 풍화토, 풍화암, 연암, 경암의 물성치 및 강도 정수는 실험과 조사를 통하여 도출해 낸 값을 사용하였고 점토가 충전된 단층파쇄면의 강도 정수를 평면파괴와 점토가 충전된 단층파쇄대를 따라 발생하는 비원호파괴에 대한 역해석을 통하여 얻고자 하였다. 해석 단면은 실제 파괴가 발생한

것으로 판단되는 방향으로 선정하였으며 단면의 형상은 다음 그림 5와 같다.

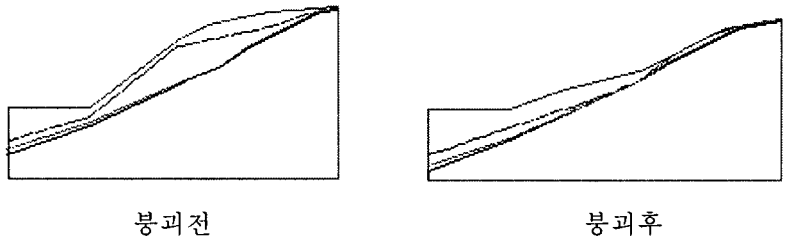


그림 6. 역해석을 위한 붕괴 단면 형상 비교

표 1. 평면파괴와 원호파괴의 경우 활동면에서의 점착력과 마찰각의 관계($F_s = 1.0$ 일 경우)

마찰각 (°)	평면파괴의 경우	비원호파괴의 경우
	점착력(ton/m ²)	점착력(ton/m ²)
26	0	-
24	1.3	0
22	2.7	1.7
20	3.9	3.4
18	5.2	5.1

역해석을 통하여 얻은 $F_s=1.0$ 상태에서 마찰각 20.45°일 경우의 평면파괴 해석시 점착력은 3.6ton/m² 이고 비원호파괴 해석시 점착력은 2.5ton/m²이다. 그러나 본 과업지역과 같이 이미 붕괴가 발생한 지역의 경우에는 이 값보다 작은 값을 갖을 가능성이 매우 크기 때문에 실내시험을 통하여 얻은 점착력 1.55ton/m²을 사용하여 안정성 해석을 실시하는 것이 보다 안전측의 안정성 해석이 될 수 있을 것으로 사료된다.

4.3 절취면의 지반 강도정수 산정

풍화토의 강도정수는 토질전단시험을 통하여 얻어진 값을 현장 응력 수준에 맞추어 조정하여 사용하였으며 GSI와 RMR방법을 사용하여 구한 암반의 C, ϕ 값과 절리면 전단 시험값을 사용하여 본 사면의 안전을 계산 및 설계에 사용하였다.

표 2. 본 연구에 사용된 지반 강도 정수

구분	강도정수	단위중량 $\gamma_i(t/m^3)$	점착력 C(t/m ²)	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$	비 고
	토층	1.80	2.09	21.87	
	풍화암	2.0	2.5	25	
	연암	2.4	4.0	28	
	경암	2.6	8.0	35	

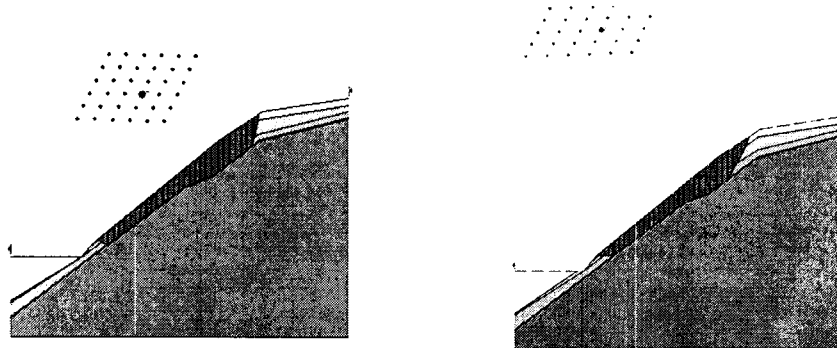
표 3. 원형 파괴 및 평면파괴 해석시 적용된 불연속면(점토가 충전된 단층파쇄대)의 강도정수 결과(역해석 값과 실험값을 분석하여 적정 값 산정)

구 분	점착력C(t/m ²)	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$
점토가 충전된 단층파쇄대	1.55	20.45

4.4 SLOPE/W 해석

상기와 같은 다양한 현장조사 및 시험과 실내 시험을 통하여 지층구성을 파악하고 지반의 물성치를 선정하고 파괴 가능면을 선정하였다. 이러한 결과를 이용하여 아직 붕괴가 발생하지 않았지만, 안정하지 않은 것으로 판단되는

붕괴 사면 좌측부의 안정서에 대한 해석을 위한 SLOPE/W를 이용하여 비원호파괴에 대한 가능성을 검토하였다. 그 결과 기준안전율을 만족시키지 못하는 것으로 판단되었으며 특히 우기시에 만수위를 고려하였을 경우에는 붕괴의 가능성이 매우 큰 것으로 판단되어 사면 안정화가 매우 시급한 것으로 판단되었다.



건기시 FS=0.857

우기시 FS=0.393

그림 7. SLOPE/W를 이용한 사면 안정성 해석 예

5. 결론

본 연구는 기존에 여러번의 안전성 검토를 거쳤으나 지난 여름 태풍 Rusa 발생시 집중호우에 의하여 대규모 사면붕괴가 발생한 불국사 화강암이 기존의 백악기의 주산안산암류의 함각력질안산암을 관입한 경계 지역에 대하여 상세한 지질조사와 현장, 실내 시험 등을 통하여 관입에 의하여 심한 교란이 발생한 지역에서의 사면 안정성 방법을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구지역과 같이 교란이 심한 암반에서는 시추심도를 연암 2m가 아닌 계획고하 1m 까지 확인하거나, 최소한 경암 하부 까지로 설정하여 연암, 경암 하부에서 발달하는 풍화암층이나 단층파쇄대를 확인하여야 한다. 또한 시추시 작성하는 암층 구분에 있어서 암석에 의한 구분이 아닌 공학적인 거동 특성에 따라 암반을 구분해야 한다.
2. 시추조사는 일종의 점조사 방법이므로 본 연구지역과 같이 지반의 교란이 심한 경우에는 반드시 현장 탄성과 탐사나 전기비저항 탐사등과 같은 현장조사가 수반되어 시추조사와 상호비교하여야 한다.
3. 상세한 지표지질조사, 현장시험등을 통하여 연암과 경암의 경계부에서 단층파쇄대가 발달하는 것을 확인할 수 있었으며, 충분한 파괴 가능성을 확인하였다. 따라서 본 연구지역과 같이 교란이 심한 지역에서는 비교적 깊은 심도에서도 불리한 불연속면이 발달할 경우 파괴의 가능성이 상존한다는 것을 고려하여야 할 것이다.
4. 점토가 충전된 단층파쇄대의 경우에는 현장조건과 가장 비슷한 조건에서 실내 시험을 실시하여 전단강도 특성을 반드시 확인하여야 하며, 기존문헌에서의 결과는 참고사항으로 고려하여야 한다.

* 참고문헌

1. 한국동력자원연구소,(1982), 금해지질도폭
2. Lee.S.G and de Freitas.M.H(1989), " A revision of Description and classification of weathered granite and its application to granite in Korea " Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol.22, pp. 31-48
3. E. Hoek & E. T. Brown(1980), " Underground Excavations in Rock ", The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 131-149
4. E. Hoek & J. W. Bray(1981), " Rock Slope Engineering " , The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 83-90II