

## 황령산 산사태 원인 분석에 대한 연구

### Study on Analysis for Factors Inducing the Whangryeong Mountain Landslide

최 정 찬(Jung Chan Choi)

부경대학교 환경지질학과

백 인 성(In Sung Paik)

부경대학교 환경지질학과

#### 요약 / ABSTRACT

최근 경상분지 퇴적암 지대에서 절개사면 형성 시, 20° 저각 경사의 층리면을 따른 평면파괴 양상이 빈번하게 발생하고 있다. 부산시에서 1999년 발생한 황령산 산사태도 이 범주에 속한다. 현재 황령산 사면은 사면구배가 1:2.0으로 재조정 되어 2000년도에 공사가 마무리되었다. 황령산 산사태의 사면파괴형태에 대한 분석을 하기위하여 현장 암반조사 및 시험, 시추, 실내 시험, 항공사진판독, X-선 회절분석, 평사투영법 및 한계평형법을 이용한 사면 안정성 분석등이 실시되었다. 그 결과, 산사태 발생 1년 전부터 인장균열들이 연장 발달하는 것이 확인 되었고, 인장균열은 여러방향의 절리들이 합쳐져 생성된 것으로 생각된다. 파괴암체도 각각 다른 층리면을 따라 붕괴된 것으로 분석되었다. 평사투영법 및 한계평형법을 이용한 안정성 검토결과 활동면으로 작용한 녹회색 응회질 셰일층이 풍화된 경우 평면파괴의 위험성이 있는 것이 확인되었다. 향후 이와 유사한 지역에서 절개사면 건설 시, 박층의 풍화에 약한 층에 대한 세밀한 조사가 필요하며 이에 대한 안정성 분석이 수행되어야 한다.

주요어 : 퇴적암, 산사태, 인장절리, 평면파괴

Recently, plane failure mode occurred frequently along the bedding plane having low angle dip about 20 degree when cutting slopes were constructed in sedimentary rock region of the Gyeongsang Basin. Landslide of the Whangryeong Mountain which was occurred at Busan Metropolitan City in 1999 belongs to the category mentioned above. Reconstruction for cutting slope of the Whangryeong Mountain has finished in 2000 and final grade of reconstructed cutting slope is 1:2.0.

To analyze slope failure mode for landslide of the Whangryeong Mountain, various analyses were performed such as in-situ investigation and test, drilling, laboratory test, aerial photograph

interpretation, X-ray diffraction analysis, and slope stability analysis using Stereographic Projection and Limit Equilibrium methods.

As the result, it is identified that tension cracks had been developed one year before the landslide took place. The tension crack seems to be formed by merging several joint sets. It appears that failure blocks broke down along the sliding planes of different layers. Risk of plane failure is conformed as a result of stability analysis using Stereographic Projection and Limit Equilibrium methods in case that greenish gray tuffaceous shales, regarded as sliding planes, are weathered. From now on, a detailed investigation is needed for the thin layers which is sensitive to weathering, and stability analysis for this layer is performed at cut slope construction site having similar geological condition.

**Key words** : sedimentary rock, landslide, tension crack, plane failure

## 1. 서 론

황령산 사면은 부산항건설사무소에서 부산항 3 단계 개발사업의 일환으로 배후수송망 체계에 따른 도로 확장 및 개설을 시행하기 위해 시공된 도로사면이다. 산사태는 1999년 9월 10일 오전 11시 50분경 황령산 터널방면 우측의 도로 절취사면에서 발생하였다. 활동사면의 규모는 길이 약 130여 m, 폭 약 50여m, 지층두께 약 20~30m 정도이며, 퇴적암층의 풍화된녹색이암층을 따라 평면파괴 형태로 발생한 것이다. 주 활동지반은 S7°E~S12°E 방향으로 수평거리 최대 17m 이동하여 황령산 터널입구 입구 4차선 도로의 끝까지 흘러내렸다 (Fig. 1). 평면도로 200m 구간이 약 14만m<sup>3</sup>의 토사로 인해 매몰되고 진입램프 강교 130m가 붕괴되었고 사망자 1명 부상자 3명이 발생하였다. 이로인해 부산시 전체의 교통이 혼잡을 이루어 시민들이 큰 불편을 겪었다.

도심 사면붕괴로 인해 황령산 산사태 원인규명 및 복구대책 수립을 위한 관련자료 분석, 현장조사 및 시험, 실내 시험, 사면안정해석 등이 수행되었다. 본 논문의 연구 목적은 그 중 사면파괴에 대한 지질공학적인 원인 분석에 있다. 즉, 강우와 산사태의 상관성, 인장균열의 특성 및 생성시기, 암반의 강도, 활동면으로 작용한 녹회색 응회질 세일층의 산상, 파괴형태 및 활동면의 풍화에 의한 안정성 분석 등이다.

## 2. 지질 개관

부산 일원에는 중생대 백악기말의 화성활동의 결과로 형성된 중성 및 산성화산암류와 이보다 후기에 관입한 불국사 관입암체들이 곳곳에 분포하고 있으며, 퇴적암체들은 이들 화성암류에 의하여 둘러싸여 고립적으로 산재하여 분포되어 있다(Fig. 2). 따라서, 부산 지역은 지질분포에 있어서 암층들의 횡적분포가 전반적으로 불연속적인 양상을 띤다. 층서적으로는 경상누층군의 최상부에 해당하는 유천층군(중생대 백악기)의 여러 암석들이 혼재되어 분포함이 특징으로서, 본 유천층군은 주로 안산암, 유문암, 석영안산암 등의 용암과 응회암 등 화산기원 암석들과 이에 협재된 역암, 사암, 세일 등의 퇴적암 등으로 구성되어 있으며, 이들 암층들은 백악기 후기에 일어난 화성활동에 의하여 곳곳에서 화강암체에 의하여 관입되어 있는 양상을 보인다. 이번 산사태가 발생한 지역의 지층은 1:50,000 부산·가덕도폭에서 “암회색 응회질 퇴적암”에 해당된다.

본 조사지역의 대표적인 지층노출 지역인 3개 지역, 즉 황령산 개발단지 절개지역, 황령산터널 진입로 동측변 절개지역, 경성대 공과대학 절개지역 등에서 관찰된 지층의 총 두께는 100 m 이상이며, 전반적으로 횡적인 연장성이 양호한 균일한 층리가 발달하고 대체적으로 응회질 성분을 다량 함유함이 특징이며, 이와 함께 경질암인 규산질퇴적암이나 호른펠스 사이에 연약질인 세일이 빈번

황령산 산사태원인 분석에 대한 연구

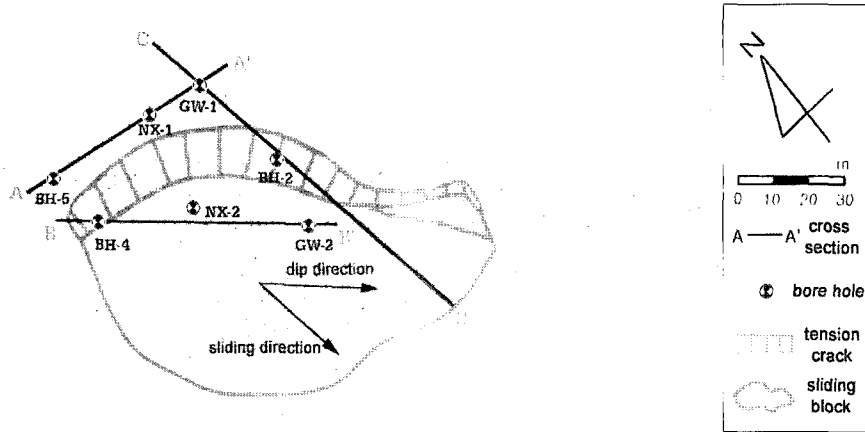


Fig. 1. Map showing the size of landslide and drilling sites.

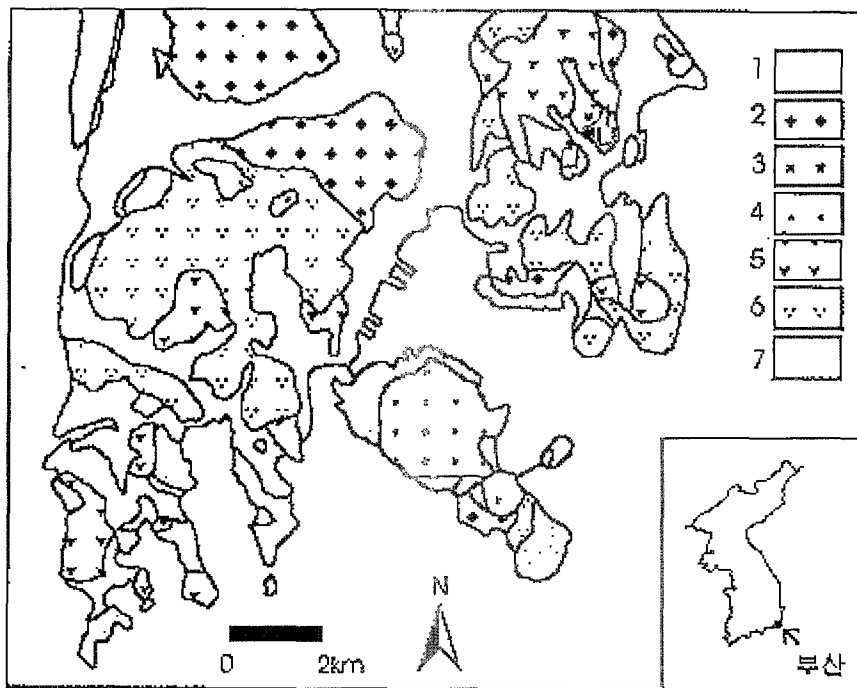


Fig. 2. The Geological Map of Southern Busan (1. Alluvial; 2. Granite; 3. Gabbro; 4. Rhyolitic volcanic-rock; 5. Andesite; 6. Andesitic volcanic breccia; 7. Songdo Formation) (from Kim and Yoon, 1993).

하게 협재함이 본 지역 퇴적층의 특징이다. 이와 같은 암층의 구성으로 본 지층의 풍화암대에서는 세일의 성층면을 따른 분리면 및 층리면에 수직으로 발달한 균열 등이 빈번히 발달한다.

본 응회질퇴적암층은 대체적으로 북동방향의 주향과 남동방향의 경사를 가지며, 북측에서는 20 내지 30도의 경사를 보이다가 남동측으로 오면서 경사가 10도 미만으로 점차 낮아지는 경향을 보인다. 산사태가 일어난 지역의 층리는 주향 N14° ~ 46°E, 경사는 14° ~ 22°SE의 변화를 보인다. 본 퇴적암층은 박층의 세일과 실트스톤 및 세립 내지 중립질 사암의 호층, 중립 내지 조립의 응회질 사암, 응회암, 이회암, 처어트, 역암 등 다양한 암질로 이루어져 있으며, 부분적으로 열변성을 받아 호온펠스화 되어 있다. 호온펠스화되었거나 규산질이 우세한 암층의 경우에는 전반적으로 풍화정도가 미약한 반면, 세립질 퇴적층이나 석회질퇴적층 또는 교결재가 방해석으로 이루어진 응회질 사암층 등은 풍화암 내지 풍화토의 상태로 나타난다.

### 3. 산사태 원인 분석

#### 3.1 강우와 산사태의 상관성

우리 나라는 전 국토의 약 70%가 산지를 이루고 있다. 1904년에서 1991년까지의 기록에 의하면 매해 평균 273 ha의 산사태가 발생하고 있으며, 연평균 약 32억원의 재산피해와 56명의 인명피해가 발생하고있다(Choi and Yoon, 1994). 특히 1987년에 폭풍우와 관련하여 발생한 산사태는 1,030ha에 달하는 지역을 황폐화시켰고 155명의 사상자와 막대한 재산피해를 입혔다(Hong et al., 1994). 또한, 1991년 7월에는 심한 강우와 관련하여 용인-안성 지역에 665여 곳에 이르는 대규모 산사태가 발생하였으며, 특별히 여러 연구자들에 의해 연구되었다(Kim et al., 1994; Park, 1994; Woo, 1994; Jang et al., 1994).

산사태와 강우와의 관계를 분석하기 위해 산사태 발생당시까지 강우기록을 조사하였다. 강우기록은 부산시 중구 대청동에 위치한 부산지방기상청에서 측정한 자료로서 황령산 산사태 현장과는

약 6.8km 정도 거리에 위치해 있다. 1999년 9월에 산사태 발생 전 강우량은 9월 10일까지 누적 강우량이 약 60mm에 불과했으나, 사고 당일 약 100mm의 강우가 발생하였다. 특히 1999년 9월 10일 오전 7시에서 8시까지 시우량이 각각 39mm 및 38mm이었던 것이 산사태의 주요 원인이 된 것으로 판단된다.

#### 3.2 인장균열의 특성 및 생성시기

황령산 산사태의 가장 큰 특징 중의 하나는 사면활동면 상부에 나타난 대규모 인장균열을 들 수 있다. 인장균열은 4방향으로 형성되어 있는 데 EW, N20°W, N55°W 및 N10°E 방향이다. 측랑절과 전체적인 모양은 각 방향의 인장균열이 합쳐져 완만한 곡선을 형성하고 있다 (Figure 4). EW 방향의 인장균열은 연장 약 35m 이며 동쪽 말단부에는 불규칙한 형태의 인장균열이 토양층으로 연장 발달하고 있다. 본 인장균열의 서쪽 끝은 N55°W 방향의 인장균열과 합쳐진다. N55°W 방향의 인장균열은 남동측으로 약 40m 정도 연장되다 N20°W로 방향이 변하여 30m 정도 발달하다 다시 N55°W 방향으로 25m 정도 연장된다. N55°W 방향의 인장균열은 파괴암체 동쪽 말단부에서 N10°E 방향으로 전이된다. 파괴암체 중 동쪽 말단부의 N20°W, N55°W 및 N10°E 로 둘러싸인 암체(35m x 25m x 20m)는 인장균열 들에 의해 삼각형의 형태로 주 파괴암체에서 분리되어 있다. 전체 인장균열 방향중 N55°W 및 N20°W 방향이 총 연장 각각 65m로 가장 길게 나타나고 그 다음이 EW (총연장 35m) 그리고 N10°E(20m) 순이다. 인장균열 상부 3~5m의 토사부는 원호상 파괴면을 보여주며 그 하부 암반부에서는 절리에 의한 수직 파괴면이 나타난다. 인장균열의 깊이는 20~30m이며 흙으로 매어진 인장균열의 깊이는 최대 28m까지 확인되었다. 인장균열 면은 매끄럽지 못하고 W자 형태로 뜯겨져 나간 것처럼 관찰된다.

산사태가 발생한 황령산은 동래단층과 기장단층 사이에 위치하며 고립된 암체로 충적층 위에 조성된 시가지에 의해 에워 쌓여 있다 (손치무 외, 1978, 장태우 외, 1983). 동래단층은 부산지역 중앙부를 가로지르는 데, 울산, 양산, 동래를 거쳐

부산시 서면과 영도대교 쪽으로 발달하며 북북동 방향의 주향을 가지고 있다. 기장단층도 동래단층과 마찬가지로 북북동 방향의 주향을 가지며 지형상으로도 특징적인 단층곡이 단층선을 따라 발달해 있다. 즉, 산사태 지역의 큰 구조선은 N10°E 정도의 방향성을 보여준다.

인장균열이 지질구조선과 관련이 있는 지를 규명하기 위하여 산사태 발생 인근지역에 대한 불연속면조사를 실시하였다. 본 지역의 단층은 경성대 공과대학 뒷 사면에서 많이 인지된다. 약 140m 길이의 사면에서 15개의 단층이 확인되는데 3개군이 발달하며 각각의 대표적인 주향 및 경사는 N79°E/76°SE, N58°E/76°NW, N5°W/69°NE이다 (Fig. 3). 단층은 단층파쇄대를 함유하기도 하며 일부 단층은 점토로 충전되어 있다. 단층파쇄대의 최대 폭은 3m 정도이다. 본 지역 퇴적암에서 나타나는 절리들은 대부분 신장절리로 사료되며, 절리면은 방해석의 얇은 막으로 피복되어 있고 깃털무늬 구조가 흔하게 관찰되며 절리간격은 5~80cm이다. 절리는 3개군이 우세한 데 대표적인 주향 및 경사는 각각 N11°E/86°NW, N51°W/86°SW, N88°W/87°SW로 고각으로 경사진 절리들이 우세하게 분포하고 있다 (Figure 4).

따라서, 본 인장균열은 층리면에 수직으로 발달하는 주 절리방향인 N11°E/86°NW, N51°W/86°SW, N88°W/87°SW와 소수의 절리군인 N20°W/80°SE 들이 이어져 형성된 것으로 판단된다.

인장균열의 생성시기를 알아보기 위하여 부산시가 보유하고 있는 92년부터 99년까지 절개지 일대의 1:6,000 축척의 항공사진을 이용하여 입체경하에서 분석하였다 (Fig. 5 참조). '93년도 사진에서는 아직 황령산터널 진입로가 개설되지 않은 상태이고, '96년 사진에서는 도시고속도로 진입로가 건설 중에 있으며 사면도 완성되지 않은 상태이다. '97년 사진에는 사면이 완성되고 도시고속도로 진입램프도 건설완료 되었음을 보여준다. '98년 사진에서는 사면 배후에 사면과 평행한 원호상의 선구조가 관찰되며 된다. '93년, '96년 및 '97년의 사진은 11월 즉 가을에 촬영되었으며 '98년 사진은 늦은 봄인 6월에 촬영되었다. 이렇게 사면과 평행한 원호상 선구조들이 1년 전부터 관

찰되며 산사태 발생범위와 일치하는 것으로 보아 산사태가 급작스럽게 발생하지 않고 장기간에 걸쳐 진행되어 왔음을 암시해준다.

### 3. 3 암반강도

암석은 일반재료와 같이 시료채취방법 및 시험 조건에 따라 역학적 성질이 크게 변화하며, 특히 암석의 강도는 본질적으로 광물조직, 성인, 이력, 산지에 따라 변동범위가 매우 크므로 하나의 공시체의 강도에 대한 측정정도가 원지반 암반의 강도특성을 대표할 수는 없다. 따라서 현장에 분포하고 있는 지반의 강도특성을 보다 신속하고 간편하게 분석하기 위하여 일반적으로 Schmidt Hammer Test를 실시한다.

금번 사용된 Schmidt Hammer는 일본 Sanyo Testing Machines Co. Ltd.에서 제작한 Rock Test Hammer (Standard/GS)를 사용하여 각 지점별로 실시된 Schmidt Hammer의 평균 반발치를 구하고 이를 다시 상관표를 이용하여 일축압축강도를 산정한다 (Sanyo Testing Machines Co., 1999). 하나의 타격위치에서 최소한 20번 이상을 타격하였고 반발치 계산에 있어서 하위 50%는 버리고 상위 50%를 가지고 평균치를 계산하였다. 그 이유는, 1) 타격축을 타격면에 직각으로 유지시키지 못하면 더 낮은 수치가 기록되고, 2) 절리면에서 가깝거나 타격면 내의 6cm 이내로 어떤 불연속면이 존재한다면 낮은 수치가 나오고, 3) 타격면이 일정하게 평평하지 않아서 국소파괴를 일으키는 경우 반발치가 낮게 나타나게 된다 (ISRM, 1981).

금번 조사시 기본 타격간격을 20m로 하였으며 수직으로 암종이 바뀌거나 단층대가 나타나면 주변부에 대한 반발치 변화도 측정하였다. 파괴사면의 주 구성암석인 암회색 사암 및 이암호층대의 Rock Hammer 보정 반발치 결과에 의하면, 암회색 사암 및 이암호층대의 경우 37~78 (일축 압축강도 환산 345~2353 kg/cm<sup>2</sup>)의 변화를 보인다 (Fig. 6). 계측을 실시하기 위해 원암반 및 파괴암체에 대한 7개소에 회전수세식으로 시추조사를 실시하였다(Fig. 1). NX core중 상태가 양호한 6개와 노두채취한 1개의 암회색 사암 및 이암호층대 시료에 대해 일축압축강도 시험을 하

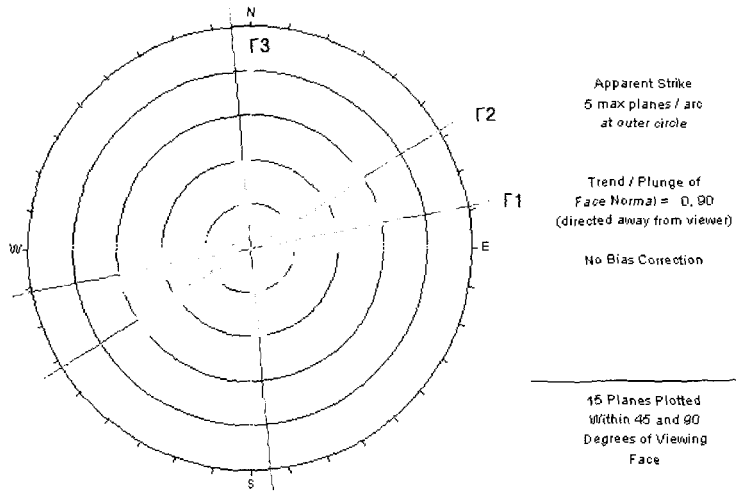


Fig. 3. Rose diagram showing the orientation of faults

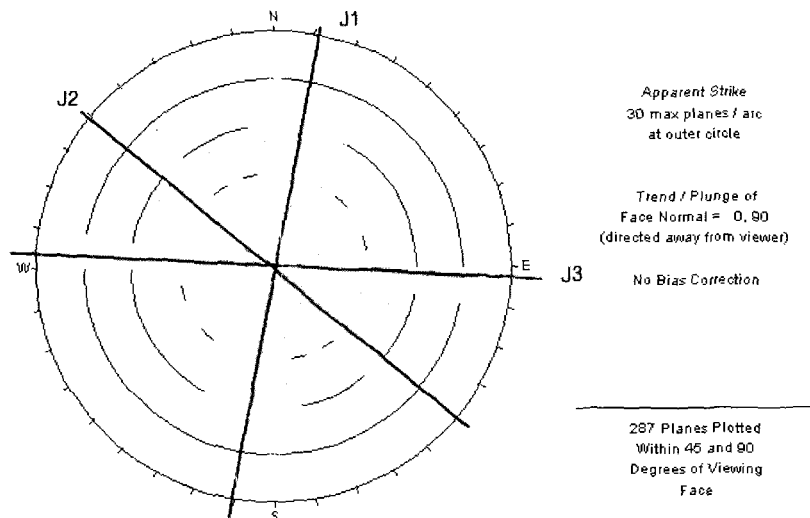


Fig. 4. Rose diagram showing the orientation of joints

황령산 산사태원인 분석에 대한 연구

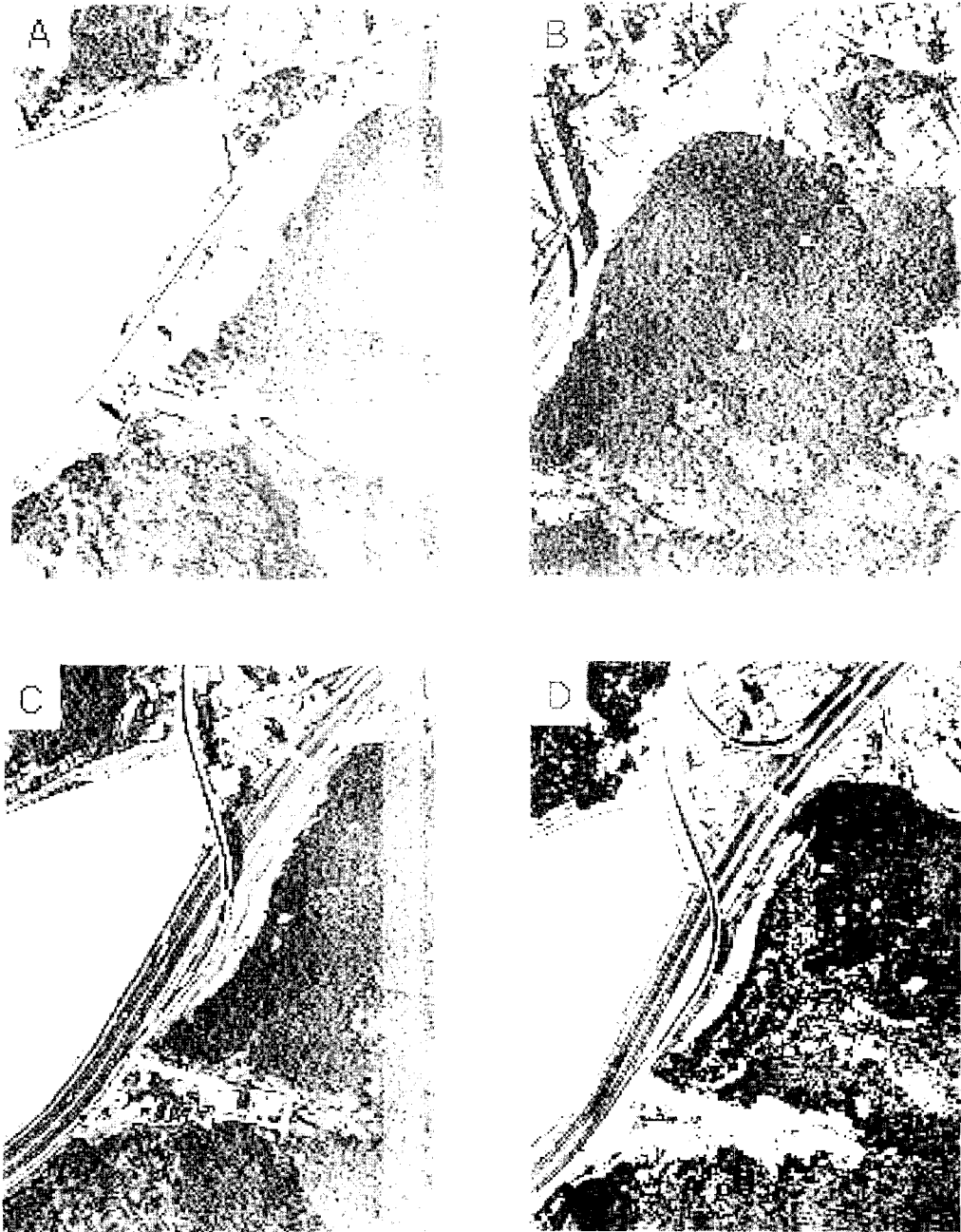


Fig. 5. Aerial photographs of the landslide area taken on ; A. the 15th of November, 1993, B. the 19th of November, 1996, C. the 23th of November, 1997, D. the 17th of June, 1998.

최정찬, 백인성  
Schmidt Hammer Rebound Value(Rock-type)  
Mudstone - shale

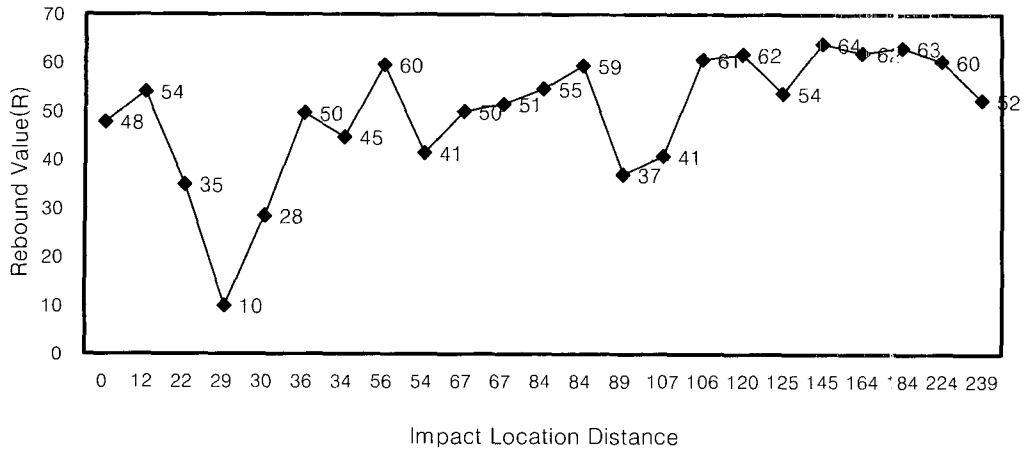


Fig. 6. Schmidt Hammer Rebound Values

였으며 그 결과는 282.5~2352.72 kg/cm<sup>2</sup>의 변화를 보여준다(Table 1). 실내시험 결과는 Rock Hammer Test로 구해진 일축압축강도 345~2453 kg/cm<sup>2</sup>과 거의 유사한 범위 내에서 변하고 있다. 건설표준품셈 암분류기준에 따르면 이 암석은 그룹 B에 속하며 연암에서 극경암까지 나타나고 있다. 즉, 암석 자체는 매우 단단하나 풍화작용 또는 절리의 발달로 인해 암강도가 현저하게 낮아진다고 생각된다.

Table 1. The Results of laboratory rock test

Sampling Location	Depth (m)	$\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Remark
BH-2	18.0-19.5	2.735	2260.02	Core
BH-4	13.5-15.5	2.734	565.01	"
GW-1	8.7-8.9	2.642	2357.72	"
GW-1	11.3-11.5	2.715	1130.01	"
GW-1	16.2-17.7	2.745	1180.19	"
GW-2	15.0-16.5	2.774	282.50	"
Block Sample		2.869	1008.00	average of 5 samples
평균		2.745	1254.78	

### 3. 4 활동면의 특성

황령산 부근에 분포하는 정상누층군의 유천층

군 퇴적층에는 5~수십 cm 두께의 규모를 갖는 점이퇴적층이 흔히 발달되어 있으며, 이 퇴적층은 특히 사태가 일어난 황령산 터널 진입로 주변의 퇴적층에 반복적으로 발달되어 있음이 특징이다. 이 점이퇴적층은 하부의 응회질사암에서 상부의 응회질 세일로 점이되는 내부 구성을 가지고 있는 퇴적층으로, 호수로 유입된 저탁류에 의해 퇴적된 저탁암층이다. 따라서 이 점이퇴적층은 황적인 연장성이 양호하여, 조사지역 내에서 연속적으로 분포되어 있다 (Fig. 1 및 Fig. 7 참조). 이 점이퇴적층 내의 상부에 발달한 녹회색의 응회질 세일은 조사지역에 분포하는 퇴적층 중 풍화에 가장 취약한 퇴적층으로서, 이 지역에 노출되어 있는 퇴적층 내에서 층리를 따라 나타나는 분리면 형성의 주된 대상이 되는 퇴적층이다. 따라서 이 응회질세일의 풍화로부터 기인된 분리면은 이 지역 암반을 통과하는 지하수의 주된 통로역할을 하고 있으며, 이에 따라 이 지역 암반의 안정성을 저해시키는 데에 광범위한 영향을 미치고 있다.

토사제거 작업 시 확인된 파괴활동면에서 측정된 주향 및 경사는 N46°E/18°SE로 관찰되었다. 파괴활동면에서 발견된 동일한 녹회색 응회질 세일의 경우는 반발치가 58-66 (일축압축강도 환산 1,521~2,125 kg/cm<sup>2</sup>)로 측정되어 풍화되지 않은 녹회색 응회질 세일의 암석강도는 경암 내지 극경암으로 높게 나타났다.



녹회색 응회질 세일의 풍화산물인 점토를 활동면에서 채취하여 실내시험을 실시한 결과 강도 정수는 자연상태에서의 내부마찰각 및 점착력은 각각 21.4° 및 0.11 kg/cm<sup>2</sup>, 포화상태에서 내부마찰각 16.8°, 점착력 0.11kg/cm<sup>2</sup>, 로 확인되었다 (Table 2).

Table 2. The Results of laboratory soil test for clay from failure surface.

Soil classification	CL	Natural condition	
Passing NO. 200 (%)	66	$c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0.11
$\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.88	$\phi$ (°)	21.4
$\omega_n$ %	20.4	Saturated condition	
LL (%)	41.6	$c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0.11
PL (%)	17.8	$\phi$ (°)	16.8

활동면에서 채취한 점토시료의 확인을 위해 X선 회절분석(XRD)을 실시하였다. 채취된 시료는 아게이트 몰타르(Agate mortar)에서 대략 0.005mm의 크기로 분쇄하였다. X선 회절분석에 사용된 기기로는 네덜란드 Philips 회사의 X'Per-MPT 기종이며, 40kv, 30mA의 상태에서 Target으로는 Cu의 K $\alpha$ , Scan Speed 2.4°/분, 분석범위 2 $\theta$  (5~70°)의 조건으로 분석하였다.

시험결과 대부분의 점토는 녹니석 (chlorite)과 일라이트 (illite)로 구성되며 녹니석 및 일라이트는 다른 점토광물에 비하여 팽창성이 약한 공학적으로 안정된 점토광물이다. 따라서 녹회색 응회질 세일이 지하수의 침투에 의해 풍화되어 생성된 것으로 여겨지는 이 점토는 팽창에 의한 응력보다는 산사태 활동면의 전단강도를 감소시키는 요인으로 작용한 것으로 생각된다.

### 3. 5 파괴형태

파괴암체는 크게 주 파괴암체와 앞서 설명한대로 인장균열들에 의해 분리된 소규모 암체로 구성된다. 주 파괴암체는 다시 3개의 암체로 분리되어 있는데 활동방향은 S7°E~S12°E이다(Fig.

8). 이 방향은 파괴활동면 상에서 측정된 경사방향 S44°E(주향경사 N46°E, 18°SE)와는 32~38°의 차이를 보여주고 있다. 따라서, 층 경사방향으로 활동하는 전형적인 평면파괴와는 차이가 있다 (Fig. 1). 3개의 분리된 암체는 각각 다른 녹회색 이암이 풍화된 점토층을 따라 이동하였으며, 파괴암체 제거 후 활동면 상에는 점토와 파쇄된 암편으로 피복되어 있었으며 활동방향으로 굽힌 자국이 관찰되었다. 각 활동면의 점토층은 두께가 10~20cm 정도로 예상되나 활동할 당시 상부 사암층이 파쇄되어 이 층을 따라 회전하고 부서진 것을 발견할 수 있다. 상기 관찰결과를 요약하면 길이 약 130여 m, 폭 약 50여m, 지층두께 약 20~30m의 거대한 블럭이 최대 17m 이동할 때 유발되는 힘(Driving Force)의 불균형으로 인하여 활동뿐 아니라 회전하여 3개의 암체로 분리된 것으로 생각된다.

### 3. 6 안정성 분석

파괴되기 전의 안정성분석을 하기위하여 캐나다 Rocscience 회사의 DIPSS(version 5.02 for Windows) 프로그램을 이용하여 사면안정성을 분석하였다. 사면의 주향경사를 N34°W/ 59°SW로 설정하고, 녹회색 응회질 세일의 풍화 산물인 점토층에 대해 실내시험 결과치인 포화시의 내부마찰각인 16.8°를 적용하였다. 그 결과, 층리면에 의한 평면파괴(Plane Failure) 및 일부 절리군에 의한 전도파괴(Toppling)의 위험성이 있는 것으로 확인되었다 (Fig. 9 참조).

안전율을 계산하기 위하여 아래와 같은 한계평형공식을 이용하였다 (Hoek and Bray, 1981). 층은 2개로 분리하여 토사 및 풍화암층은 단위중량을 1.895 t/m<sup>3</sup>, 하부 신선한 퇴적암층은 단위중량을 2.745 t/m<sup>3</sup>로 설정하였다 (Table 1 및 Table 3 참조). 인장균열의 깊이는 20m, 활동면의 길이는 90m, 활동면의 경사각은 18°로 하였다. 또한, 실내시험 결과를 이용하여 활동면의 자연상태에서의 내부마찰각 및 점착력은 21.4° 및 0.11 kg/cm<sup>2</sup>, 포화상태일 때의 내부마찰각 및 점착력은 각각 16.8° 및 0.11kg/cm<sup>2</sup>을 각각 적용하였다 (Fig. 1의 C-C' 선, Fig. 10).

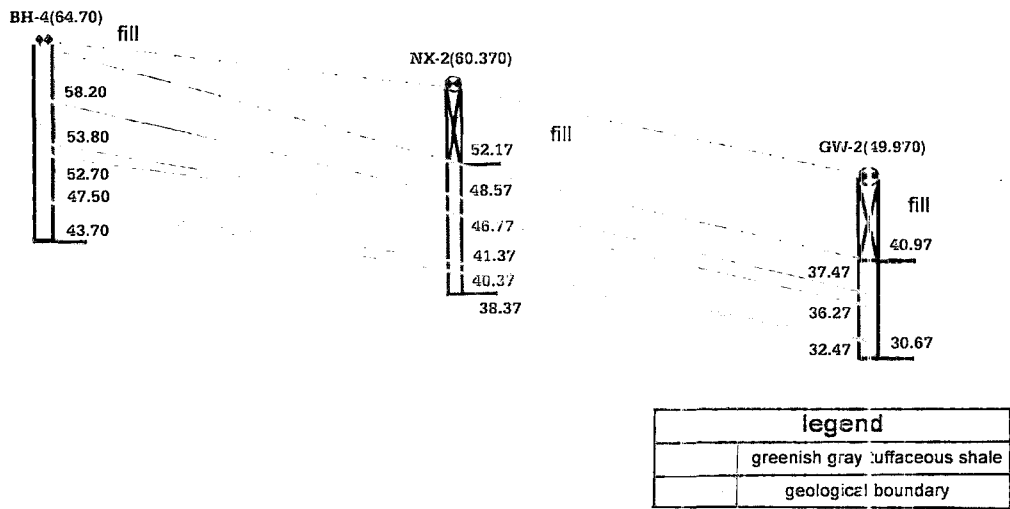
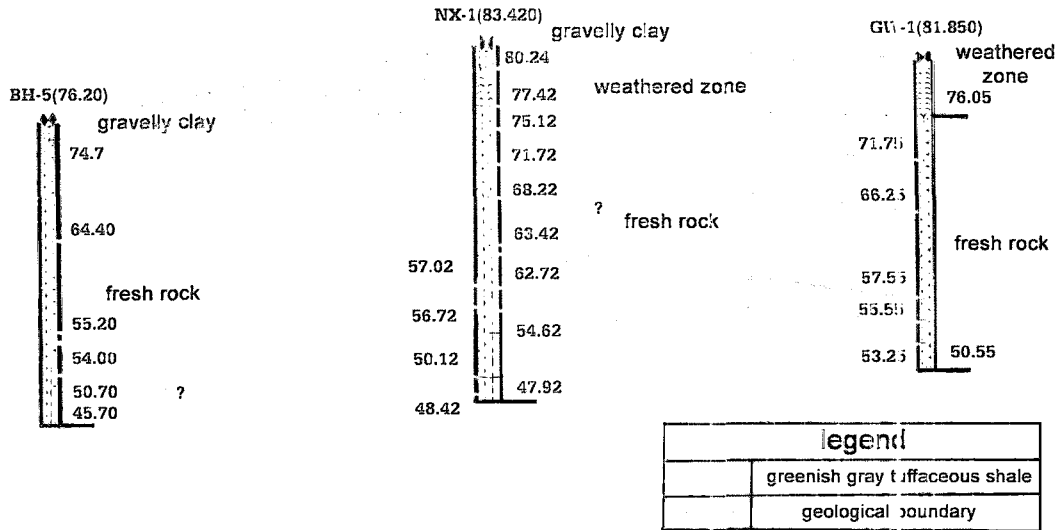


Fig. 7. Geological cross sections showing greenish gray tuffaceous shale layers.

황령산 산사태원인 분석에 대한 연구

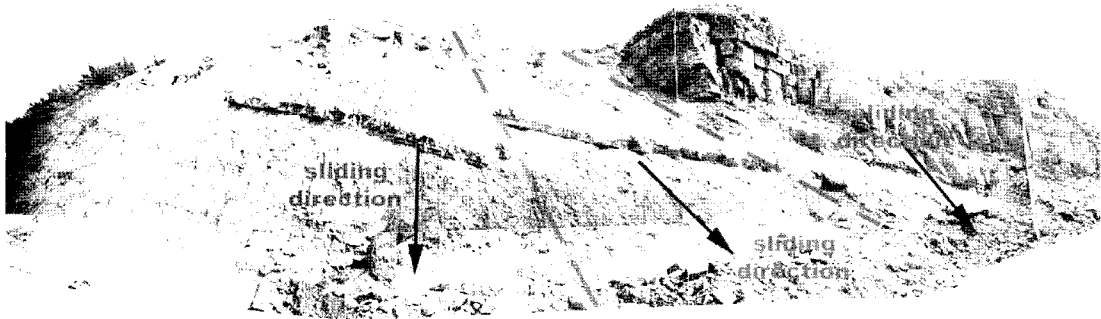


Fig. 8. Sketch showing the failure slope due to the Hwangryeong Mountain landslide.

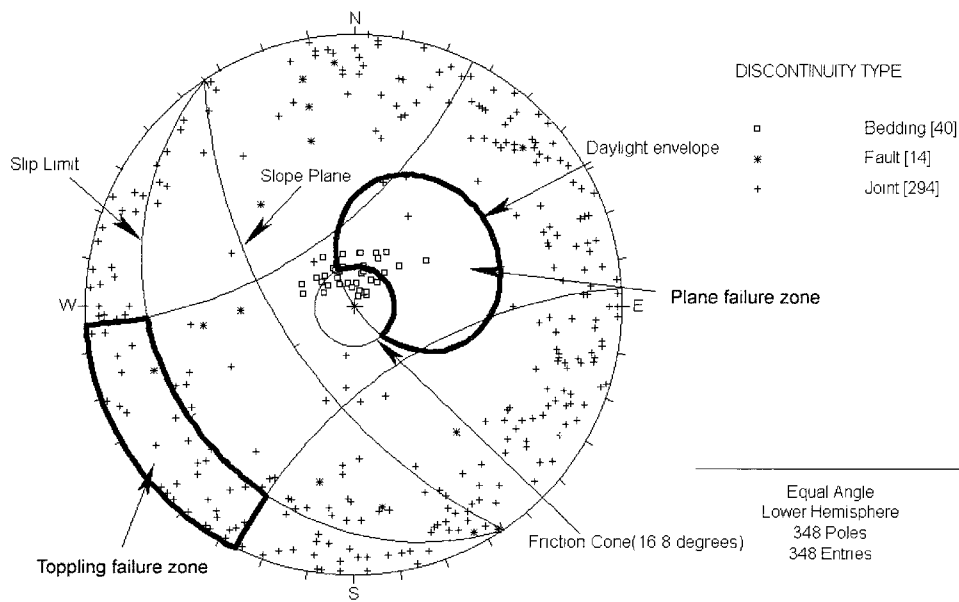


Fig. 9. Analysis of slope stability ( A case of internal friction angle =  $16.8^\circ$  )

Table 3. The Results of laboratory soil test for block samples.

	Range	Average
Soil classification	CL, CH	
Passing No. 200 (%)	63~95	85
$w_n$ (%)	23.7~32.3	26.6
$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	1.884~1.919	1.895
LL (%)	37.2~65.9	46.4
PL (%)	20.5~28.8	24.2
PI (%)	16.7~37.1	22.3

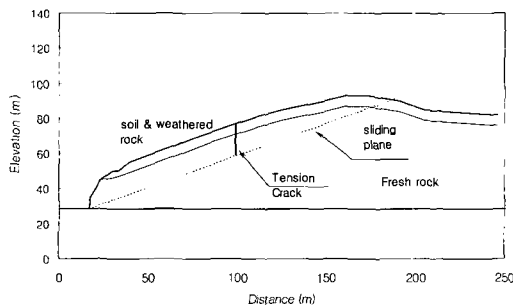


Fig. 10. Map showing cross section along C-C' line.

$$\text{안전율}(FS) = \frac{cA + W \cos \theta \tan \phi}{W \sin \theta}$$

- c : 점착력
- A : 접촉면적
- W : 암체의 무게
- $\theta$  : 활동면과 지표간의 각도
- $\phi$  : 내부마찰각

분석결과 활동면이 자연상태일 경우에 안전율은 1.22로 나타났고 포화상태일 때에는 0.94로 계산되었다. 따라서, 활동면이 포화상태일 때는 안전율이 1.00이하로 내려가 파괴위험성이 컸던 것으로 나타났다. 그러나 인장균열 내의 간극수압(Pore Pressure)과 부양력(Uplift Force)을 고려하지 않았는데도 파괴가 일어나는 것으로 분석된 것은 실제상황과 일치하지 않으며, 그 이유는 실내시험 수행과정에서 유추할 수 있다.

실내직접전단 시험시 사용된 층리면의 점토는 산사태 현장의 활동면에 협재되어 있는 시료를 채취한 것이다. 현장에서 비교란 시료의 채취는 불가능하여 실내에서 재성형하여 시험을 수행하였다. 시료를 재성형하여 시험하게 되면 일반적으로 점착력은 현장의 비교란 시료에 비해 작게 산정된다. 이는 현장의 경우 aging 효과에 의한 cementation으로 인해 점착력이 재성형 시료보다 크기 때문이다. 이에 반해 마찰각은 실내시험시 구속압력이 현장조건에 비해 구속압력이 커지면 전단저항각은 증가하기 때문에 마찰각이 크게 산정된다. 하지만 본 시험에 사용된 구속압력이 1.0 ~ 9.0 t/m<sup>2</sup>의 범위여서 실내시험을 수행하였기 때문에 현장조건(약 50t/m<sup>2</sup>)에 비해 작은 구속압력으로 전단시험이 수행되었다. 이러한 사항을 근거로 볼 때 실내직접전단시험에서 산정된 강도정수는 현장조건에 비해 과소평가된 결과이다. 따라서, 현장의 점착력과 내부마찰각은 시험결과보다 더 큰 값을 사용하는 것이 타당하다고 생각된다.

#### 4. 결론 및 제언

황령산 산사태는 1999년 월 10일 오전 11시 50분 경에 발생하였으며 1999년 9월 10일 오전 7시에서 8시까지 시우량이 각각 39mm 및 38mm이었던 것이 산사태의 주요 원인이 된 것으로 판단된다. 인장균열의 총연장 길이는 185m이며, 층리면에 수직으로 발달하는 주 절리방향인 N11°E/86°NW, N51°W/86°SW, N88°W/87°SW와 소수의 절리군인 N20°W/80°SE 들이 이어져 형성된 것으로 판단된다. 항공사진 판독에 의하면, 사면과 평행한 원호상 선구조들이 1년 전부터 관찰되며 산사태 발생범위와 일치하는 것으로 보아 산사태가 급작스럽게 발생하지 않고 장기간에 걸쳐 진행되어 왔음을 암시해준다.

파괴형태는 평면파괴로 길이 약 130여 m, 폭 약 50여m, 지층두께 약 20~30m의 거대한 블록이 최대 17m 이동할 때 유발되는 힘(Driving Force)의 불균형으로 인하여 활동뿐 아니라 회전하여 3개의 암체로 분리된 것으로 생각된다.

활동면으로 작용한 녹회색 응회질 세일층은 활

동면 상부에도 반복적으로 나타난다. 이 응회질 세일의 풍화로부터 기인된 분리면은 이 지역 암반을 통과하는 지하수의 주된 통로역할을 하고 있으며, 이에 따라 이 지역 암반의 안정성을 저해시키는 데에 광범위한 영향을 미치고 있다. 풍화되지 않은 녹회색 응회질 세일의 암석강도는 경암 내지 극경암으로 높게 나타난다. 그러나, 풍화산물인 점토를 활동면에서 채취하여 실내시험을 실시한 결과 강도정수는 자연상태에서의 내부마찰각 및 점착력은 각각  $21.4^\circ$  및  $0.11 \text{ kg/cm}^2$ , 풍화상태에서 내부마찰각  $16.8^\circ$ , 점착력  $0.11 \text{ kg/cm}^2$ 로 확인되었다. X선 회절시험 분석결과 대부분의 점토는 녹니석(chlorite)과 일라이트(illite)로 구성되며 녹니석 및 일라이트는 다른 점토광물에 비하여 팽창성이 약한 공학적으로 안정된 점토광물이다. 따라서, 녹회색 응회질 세일이 지하수의 침투에 의해 풍화되어 생성된 것으로 여겨지는 이 점토는 팽창에 의한 응력보다는 산사태 활동면의 전단강도를 감소시키는 요인으로 작용한 것으로 생각된다.

평사투영법 및 한계평형법을 이용한 안정성 검토결과 활동면으로 작용한 녹색이암층이 풍화된 경우 평면파괴의 위험성이 있는 것이 확인되었다. 향후, 이와 유사한 지역에서 도로사면 건설 시 박층의 풍화에 약한 층에 대한 세밀한 조사가 필요하며 이에 대한 안정성 분석이 수행되어야 한다.

## 5. 사 사

본 연구는 부경대학교 학술연구재단 학술연구지원으로 수행되었으며 연구를 지원해주신 부경대학교 학술연구재단에 감사드립니다.

## 6. 참고문헌

- 김진섭, 윤성호, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구 (I). 대한암석학회지, 제 2 권, 제 2 호, pp. 156-166.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도 (1:50,000) 동래·월내도폭 설명서, 자원개발연구소, pp. 2-27.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도 (1:50,000) 부산·가덕도폭 설명서, 한국동력자원연구소, pp. 2-11.
- Bo-Myeong Woo, 1994, "Analysis of Vegetation Establishment Stage of the Landslide Scars in Yongin-Ansung Region". Proceedings of The North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea. pp. 235-242.
- Hock, E. & J.W. Bray, 1981, Rock Slope Engineering, Revised third edition, Institution of Mining and Metallurgy, pp. 18-34.
- ISRM, 1981, Rock characterization, testing and monitoring, Pergamon Press Ltd, pp.101-102.
- Kyung Choi, Ho-Joong Yoon, 1994, "The Status and Characteristics of Landslide in Korea". Proceedings of The North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea. pp. 19-26.
- Sang-Kyu Kim, Yeon-Soo Jang, Heung-Seok Seo & Sung-Gil Han, 1994, "Failure Mechanisms of the Landslides in Yongin-Ansung County". Proceedings of The North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea. pp. 107-117.
- Sanyo Testing Machins Co., 1999, Instruction Manual on Rock Hammer, p. 18.
- Sung-Wan Hong, Chun-Wan Cho, Ho-Bon Koo & Je-Yoon Woo, 1994, "The Characteristics of Landslides in Korea". Proceedings of The North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea. pp. 267-276.
- Yeon-Soo Jang, Sang-Kyu Kim, Seung-Mock Shin & chi-Hyob Ryu, 1994, "A Study on the Landslides and their Shape of Failure in Yongin-Ansung County".

최정찬, 백인성

Proceedings of The North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea. pp. 291-306.

Yong-Won Park, 1994, "On the Rainstorm Induced Landslides in Yongin-Ansung Region". Proceedings of The North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea. pp. 323-330.

---

최 정 찬

부경대학교 환경지질학과

608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

Tel : 051) 620-6239, Fax : 051) 628-6432

E-mail : jcchoi@pknu.ac.kr

백 인 성

부경대학교 환경지질학과

608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

Tel : 051) 620-6234, Fax : 051) 628-6432

E-mail : paikis@pknu.ac.kr