

부산 황령산 산사태 발생 원인분석 및 대책에 대한 연구

최 정 찬

부경대학교 환경지질과학과

백 인 성

부경대학교 환경지질과학과

1. 서론

1999년 9월 11일 오전 11시 50분경 부산광역시 대연동에 위치한 도시고속도로 진입램프 황령산터널 방면 우측 산사면이 붕괴되었다. 평면도로 200m 구간이 약 14만 m^3 의 토사로 인해 매몰되고 진입램프 강교 130m가 붕괴되었고 사망자 1명 부상자 3명이 발생하였다. 산사태 발생시각 이전의 2일 누적강우량이 99.8mm이며, 사고당일 최대시우량이 39mm이었고, 약 100mm의 강우가 집중되었다. 그후 파괴사면 복구를 위한 공사 중에도 소규모의 산사태가 두차례 발생되었다.

그 후, 소단을 설치한 사면구배가 1:1.8 (전체사면 1: 2.0)이 되도록 사면구배 완화하고 사면 중간부에 억제말뚝공을 시공하였으며 사면 녹화를 실시하여 현재, 본 사면 및 도로는 완공되었으며 2000년 7월 15일부터 자동계측이 실시되고 있다. 본 논문은 산사태 발생원인과 보강대책 그리고 계측관리에 대하여 전반적인 고찰을 하였다.

2. 원인분석 및 대책

황령산 지역의 전반적인 암질은 중생대 백악기의 퇴적암과 이를 둘러싼 안산암질 화산암 및 화산각력암(용호동 일대)으로 이루어져 있으며, 이번 사태 발생 지역을 비롯한 황령산 터널 진입로 주변과, 사태 발생 지역 상부 지역인 황령산 개발단지 지역 및 맞은 편인 경성대학교 지역 등은 모두 퇴적암이 분포하는 지역이다. 본 퇴적암층은 박층의 셰일과 실트스톤 및 세립 내지 중립질 사암의 호층, 중립 내지 조립의 응회질 사암, 응회암, 이회암, 쳐어트, 역암 등 다양한 암질로 이루어져 있으며, 부분적으로 열변성을 받아 호온펠스화 되어 있다. 야외노두나 절개면 등에서 이들 퇴적암층의 풍화양상은 호층의 양상으로 나타난다. 즉, 호온펠스화되었거나 규산질이 우세한 암층의 경우에는 전반적으로 풍화정도가 미약한 반면, 응회질의 세립질 퇴적층이나 석회질 퇴적층 또는 교결재가 방해석으로 이루어진 응회질 사암층 등은 풍화암 내지 풍화토의 상태로 나타난다. 본 지역 퇴적암 중 규산질 성분이 많이 함유된 쳐어트질 암석이나 호온펠스화된 암석들은 치밀한 조직으로 인하여 매우 단단한 암질을 가지는 반면, 규산질의 함유가 적은 암석에 비하여 대체로 층리에 수직방향인 균열이

흔히 발달한다. 이상에서와 같은 본 지역의 암질특성(응회질, 석회질, 박층의 이질층 발달, 균열 등)과 본 지역 지층에 발달된 소규모의 단층들이 본 지역 암층들의 풍화작용 진행에 중요한 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 특히 층리에 평행한 방향 및 수직 방향으로 발달한 불연속면(층리분리면, 균열, 절리, 단층 등)의 빈번한 발달은 황령산 터널 진입로를 통과하는 많은 차량들(특히 콘테이너)로부터 기인된 지반의 진동에 의하여 지속적인 지반 불안정화의 한 요인이 되었을 것으로 판단된다. 이상과 같은 본 지역 암층의 특성은 비단 이번 사태 발생 지역의 절개면 뿐만이 아니라 황령산 터널 진입로변의 모든 절개면에 공통된 특성임으로 앞으로 이들 지역에 대한 사면 안정성을 분석할 때, 암질을 포함한 지질특성도 함께 분석되어야 할 것이다.

현장 및 실내 암석시험 결과, 단위중량은 $2.642\text{--}2.869\text{ g/cm}^3$ 의 변화를 보이는 데, 일반적인 퇴적암의 단위중량 $1.91\text{--}2.72\text{ g/cm}^3$ 보다는 높은 경향을 보인다. 일축압축강도의 경우 암회색 사암과 이암의 호층대는 $282.5\text{--}2352.72\text{ kg/cm}^2$ 의 변화를 보여주는 데, 신선한 암석의 경우 매우 높은 강도치를 보이며 Rock Hammer Test로 구해진 일축압축강도 $345\text{--}2453\text{ kg/cm}^2$ 과 거의 유사한 범위 내에서 변하고 있다. 파괴 활동면의 녹회색 이암을 각주상으로 6개의 시료를 형성하여 직접전단시험을 한 결과, 평균값은 내부마찰각이 43.064° , 점착력이 0.434 kg/cm^2 로 풍화되어 점토광물로 변하기 전에는 상당히 높은 강도치를 보여주고 있다. 활동면에서 채취된 대부분의 점토는 녹니석(chlorite)과 일라이트(illite)로 구성되며 녹니석 및 일라이트는 다른 점토광물에 비하여 팽창성이 약한 안정된 점토광물이다. 따라서 녹색 이암이 지하수의 침투에 의해 풍화되어 생성된 것으로 여겨지는 이 점토는 팽창에 의한 응력보다는 산사태 활동면의 전단강도를 감소시키는 요인으로 작용한 것으로 생각된다. 항공사진 판독결과, 산사태가 발생한 구역에 사면과 평행한 선구조들이 1년 전부터 관찰되며 산사태 발생범위와 대략 일치하는 것으로 보아 산사태가 급작스럽게 발생하지 않고 장기간에 걸쳐 진행되어 왔음을 암시해준다.

DIPS 프로그램을 이용하여, 사면의 주향경사를 $N34^\circ W, 29^\circ SW$ 로 설정하고 측정된 모든 수직절리와 층리의 주향 및 경사들을 입력시킨 결과 신선한 암석의 내부마찰각(ϕ)을 40° 를 적용했을 때는 사면파괴의 위험성이 없었으나, 활동면에서 채취한 점토시료 직접전단 시험 결과인 내부마찰각 20° 를 적용하였을 때는 전도파괴(toppling) 및 평면파괴의 위험성이 있는 것으로 확인되었다

1차 산사태는 일시적으로 발생한 것이 아니고 장기간에 걸친 강우의 지하침투에 의해 간극수압이 증가해 수직절리의 틈이 상하부로 연결되어 인장균열이 발생 한 뒤, 단단한 암석층에 협재되어 있는 녹회색 이암이 지하수에 의해 풍화되어 점토화 되어 활동 파괴면으로 작용하게 되었다. 상부 3-5m의 토사부는 원호상 파괴면을 그리고 그 하부 암반부에서는 절리에 의한 수직 파괴면을 보여준다. 연약층은 1개조가 아니라 3m 구간에 3-10 cm 폭으로 4개조가 발달하며 이중 각기 다른 3개 면을 따라 암체의 활동이 일어났다. 즉, 4개

조의 얇은 연약층 중 각 부분에서 가장 풍화가 잘 진행되어 분리되기 쉬운 곳을 따라 활동이 발생되었다고 사료된다. 연약층 상부의 신선한 암석은 매우 단단하기 때문에 분리되지 않고 큰 암체를 형성해, 연약층 면을 따라 약 30-60m 정도 암체가 활동한 평면파괴의 전형적인 유형이다. 2차 산사태는 파괴가 일어난 암체와 그로 인해 생겨난 수직절개지 사이에 느슨하게 토사를 메워 파괴부분에 대한 토사제거작업을 하던 중 이 부분에 강우가 침투하여 배수가 되지않아 간극수압이 상승하게 되어 잔류응력 만이 남아 있는 파괴암체가 한번 더 활동을 하게 되어 발생한 것으로 사료된다. 3차 산사태는 파괴되지 않고 남아 있는 수직 절개지 부분이 앞에서 받쳐주던 암체가 제거됨으로써 발생한 응력이완 현상으로 도로와 평행한 방향으로 인장균열이 수개 조 발달하게 되었고 2차 산사태 발생 후 균열의 폭은 시간이 갈수록 넓어 지게 되었다. 결국 2차 산사태 발생 후 하루만에 수직절개지의 일부가 파괴되었다. 이 부근에는 수개조의 진행성 인장균열이 분포하고 있어 인장균열 발생 후 이 부분은 제거되었다.

이상과 같은 분석을 토대로 사면 상에 남아 있는 활동면 상부의 층을 보강하기 위하여 4개의 연약층 하부까지 결속시키는 억제말뚝공을 시공하였고, 소단을 설치한 사면구배가 1:1.8 (전체사면 1: 2.0)이 되도록 사면구배 완화하고 파괴활동면 가능성이 있는 녹회색 이암층들에 대한 수평변위, 간극수압, 축력의 변화를 관찰하기 위한 수동 및 자동계측이 실시되고 있다.

3. 계측관리

계측을 수행하기 위하여 수행하기 위하여 자동측정장치가 현장에 설치되었으며 자동 및 수동계측을 위해 경사계 4개소 (3개소에 자동측정공 및 수동측정공 각각 1개소 설치, 1개소는 자동측정공만 설치), 간극수압계 3개소, 하중계 4개소 및 우량계 1개소를 설치하였다 (그림1 및 2 참조). 방향은 도로방향과 산정상 방향 (A-B 방향)의 변위를 측정하였으며 상단 계측공은 수동계측공 0011, 중단계측공은 수동계측공 0021, 하단계측공은 수동계측공 0031에 각각 대비된다. 본 공들은 심도가 11m로 자동계측 센서는 심도 3m, 5m, 7m, 9m 및 11m에 설치되어 있다. 본 공들은 과거 활동면으로 작용한 녹색이암 상부에 남아 있는 층들에 대한 평면파괴의 가능성을 분석하고자 설치되었다.

경사계의 경우 2000년 10월 16일부터 2001년 1월 3일까지는 수동경사계를 이용하여 일 2회 수평 두 방향 (A-B 및 C-D 방향)의 변위를 측정 한 뒤 두 방향의 벡터를 합성하여 실제 변위 방향을 측정하였다. 자동 수평변위 계측은 2001년 1월 5일부터 일 2회 시작되었으며 그후 2001년 3월 14일 보정을 거쳐 이날 측정치를 제로상태로 재설정하여 계측을 실시하고 있다.

추가계측공은 억지말뚝이 횡렬로 시공된 전면에 위치하며 자동 수평변위 센서는 3m간격으로 심도 3m, 6m, 12m 및 15m에 설치되어 있다.

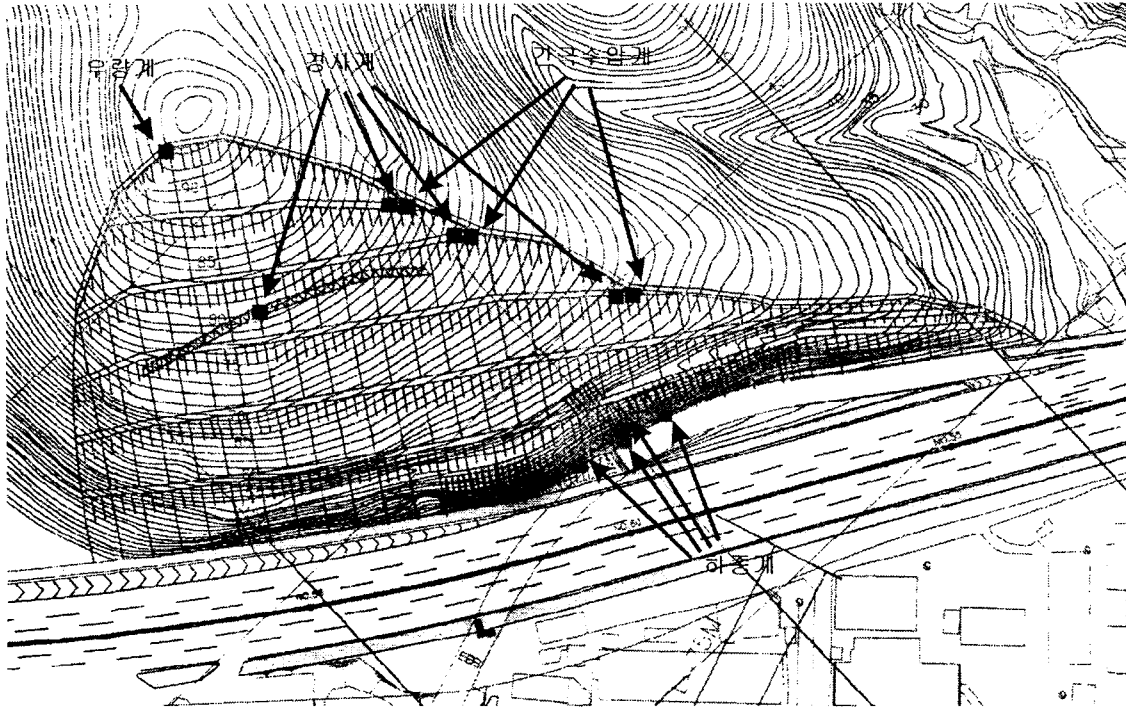


그림 1. 계측기 설치 위치도

계측 위치 단면도

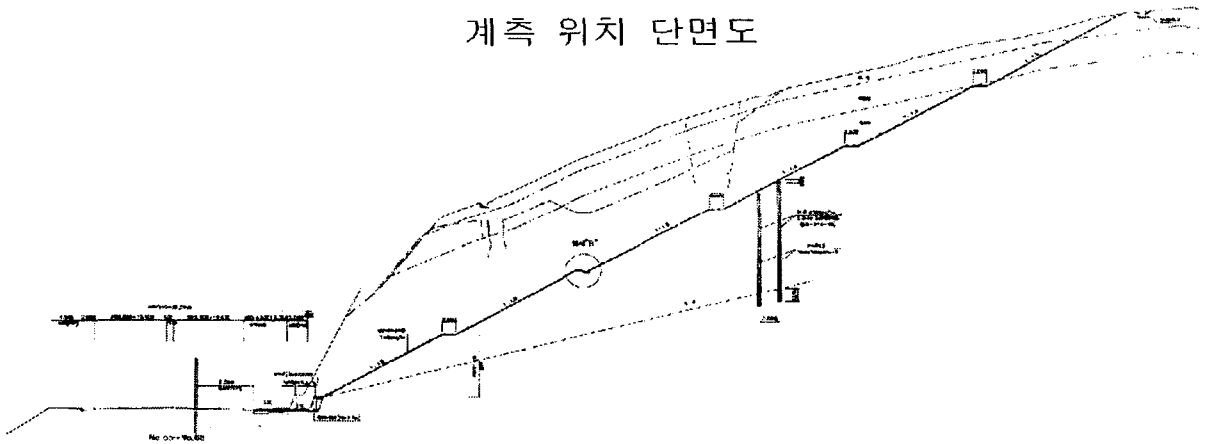


그림 2. 계측위치 단면도

이 공의 경우에는 대비되는 수동계측공이 설치되어 있지 않다. 본 공은 2001년 4월 17일 보정을 하여 이 날 계측치를 제로상태로 하여 계측을 실시하고 있다.

계측자료는 모뎀을 통해 본 연구실에서 사면계측관련 S/W (Zero Zone)를 이용하여 자료를 수신 및 분석하고 있다.

간극수압계의 경우에는 2000년 7월 27일부터 계측이 시작되었으며 2000년 10월 16일부터

일 2회 계측을 실시하고 있다. 간극수압계 0013은 상단

수평변위계측공, 간극수압계 0023은 중단 수평변위계측공, 간극수압계 0033은 하단 수평변위 계측공 옆에 심도 9m에 설치되어 있다.

하중계의 경우에는 백양로로 올라가는 램프교대와 옹벽에 설치되어 있다. 하중계 1002의 경우 교대부 4단, 하중계 1003은 옹벽 1단, 하중계 1004는 옹벽 1단 그리고 하중계 1005의 경우에는 교대부 1단에 설치되었다. 하중계 1002는 2000년 10월 17일, 하중계 1003은 2000년 10월 28일, 하중계 1004는 2000년 11월 6일 그리고 하중계 1005의 경우에는 2000년 11월 28일부터 계측이 시작되었으며 일 2회 계측이 실시되고 있다. 이중 교대부 4단의 경우 센서의 이상으로 인하여 계측을 중지하였다.

자동화계측 관련 S/W의 명칭은 ZeroZone(Ver. 1.0)으로 진산지오시스템이 개발하였으며 모델은 자넷 56K를 사용하고 있다.

2000년 7월 15일부터 2001년 8월 14일까지 측정한 계측결과는 다음과 같다.

수평변위 수동 측정자료에 의하면 3공 모두 절개면이 준공된 2001년 2월까지의 2mm이하의 변위를 보이며 소폭으로 완만하게 증감을 반복하였다. 그후 6월달까지는 최대 3mm정도로 비교적 급격하게 증가하다 다시 변위가 감소하여 안정되는 추세이다. 공사 준공 후 가파른 수평변위의 증가는 ASNA 공법에 의한 배토조성물로 법면이 피복되어 지하수가 유동 경로를 찾을 때까지 일시적으로 배수가 되지 않아 일어난 현상으로 사료된다.

앞에서도 언급한 바와 같이 이 시기에 수동측정공의 자료에 의하면 변위가 가파르게 증가하였으며 자동측정공들의 경우도 같은 양상을 보인다. 다만, 자동측정공의 변위량은 수동측정공의 약 10배 정도가 되어 센서의 민감도/안정성 및 공내 설치에 따른 기술적인 문제점에 기인하는 것으로 사료된다.

간극수압계는 3개소에 설치되어 있는 데, 초기수위는 상단, 중단 및 하단이 각각 -6.87m, -6.80m 및 -8.77mm로 지형과 거의 비슷하게 형성되어 있었다. 그후, 상단 지하수위는 장마기임에도 불구하고 완만하게 하강하여 2000년 10월 5일 지하수위가 -8.22m 까지 하강하였으나 그후 완만하게 회복되어 2001년 장마기에는 -6.848.m까지 회복되어 초기치와 거의 비슷하여 졌다. 중단 지하수위의 경우 2000년 10월 25일 지하수위가 -9.64m까지 하강하였으나 그후 다시 회복되어 2001년도 7월 15일에는 -6.505m로 초기치와 비슷해졌다. 하단 지하수위는 2000년 10월 12일까지 지하수위가 -10.32m가 될 때까지 완만하게 수위가 하강하다 급격히 상승하여 2000년 10월 30일 -8.44m까지 상승하여 초기치와 비슷하여 졌으나 그후 완만히 감소하여 2001년 장마기에도 수위가 -9.0m이하에서 형성되어 초기치보다 약 50cm정도 수위가 낮게 형성되어 공사 후 배수가 잘되는 것으로 나타났다. 상단 및 중단 지하수위도 2001년 장마기에 폭우가 내린후 수위가 급격하게 상승하나 짧은 시간 내에 다시 수위가 하강하여 배수가 잘되는 것으로 사료된다.

3개공 모두 2001년 1월 중순부터 수위가 완만하게 상승하였는 데 ASNA 공법에 의한 배토조성물로 법면이 피복되어 가면서 지하수위가 새로 형성된 것으로 사료된다.

하중계 1003의 경우, 인장 당시 축력이 47.67t이었으나 인장 직후 45.02t으로 약간 감소하였고 2000년 10월 30일 36.88t으로 대폭 감소하였고, 2001년 6월 15일 35.61t으로 완만하게 증감을 반복하였다. 그 후 불규칙적으로 급격히 축력이 증가하여 2001년 8월 3일 최고 축력 70.613t을 기록하였다. 하중계 1003이 설치된 곳은 되메우기 한 지역으로 배수가 불량하거나 혹은 침하에 의한 편압의 형성 등이 고려될 수도 있다고 사료된다. 또한, 하중계 센서의 오작동도 고려되어야 할 것이다.

하중계 1004의 경우 인장 당시 45.56t이었으나 인장 직후 39.78t, 2000년 11월 7일에는 28.66t으로 대폭 감소하였다. 그후 완만한 감소세를 보여 2000년 11월 22일에는 26.51t이었으나 2000년 11월 22일 재인장 후 50.99t을 나타내었고 인장 직후에는 42.94t, 2000년 11월 23일에는 40.02t으로 측정되었다. 그 후 완만한 감소세를 유지하여 2001년 1월 22일에는 35.005t을 기록하였고 2001년 8월 5일 마지막 측정 시에는 37.126t의 축력을 보여 거의 변동없이 축력이 유지되는 것으로 여겨진다.

하중계 1005는 하중계 1001에 대체하여 교대 1단에 새로 설치되었으며 2000년 11월 28일부터 측정이 시작되었다. 11월 28일 인장 시 축력은 52.15t으로 측정되었고 인장 직후 46.39t의 축력을 유지하였다. 그 후 완만한 감소세를 유지하여 2001년 1월 16일에는 40.729t을 기록하였고 2001년 8월 5일 마지막 측정 시 40.109t으로 축력이 거의 변동없이 유지되고 있다.

4. 참고문헌

- 김진섭, 윤성호, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구 (I). 대한암석학회지, 제 2 권, 제 2 호, p. 156-166.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱과 김형식, 1978, 한국지질도 (1:50,000) 동래·월내도폭 설명서, 자원개발연구소, p. 2-27.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구와 이동우, 1983, 한국지질도 (1:50,000) 부산·가덕도폭 설명서. 한국동력자원연구소, p. 2-11.