

999번 지방도로 경상북도 안동시 위리 지역의 사면 변형 및 안정성 분석에 관한 연구

장 보 안, 장 현 식 (강원대학교 지구과학부)

1. 서 론

경상북도 안동시 임동면에 위치한 999번 지방도로 위리 지역은 1987년 ~ 1989년에 고개 마루를 절취하여 도로가 개설되었으나, 공사가 완공된 후 강우량이 많을 때마다 산측이 침하하고 도로가 융기하는 등 주변 지반이 불안정하게 활동하였다. 가장 최근에는 1997년 6월에서 7월 사이의 폭우로 인해 지반이 거동하여 도로가 파괴되는 재해가 발생하였으며, 2000년 4월 현재에는 활동 부분을 절취, 제거하고, 도로 하부를 쇄석으로 치환하는 사면 및 도로 안정화 공사가 완료된 상태이다. 이 연구에서는 연구지역에 대한 기초 지질조사를 실시하고, 기초 조사를 토대로 지반 거동의 모델을 만들어서 한계평형법, 유한요소법 및 유한차분법의 전산해석을 통하여 연구지역 지반 및 사면의 안정성 평가, 지반의 거동원인을 분석하였다.

2. 지형 및 지질특성

연구 지역은 지질학적으로 한반도 남동부의 백악기 경상분지 영양소분지의 서쪽 경계 지역에 해당하며, 경상누층군의 하양층군 동화치층의 사암과 셰일이 호층을 이루며 분포하고 있다(Fig. 1). (김남장 외 1970, 장기홍, 1977). 뚜렷한 지질구조로는 북북동 방향과 북북서 방향의 두 개의 단층이 사교하고 있으며, 북북서 단층을 따라 지반이 하부로 미끄러지며 거동이 발생한다(Fig. 2). 북북서 단층은 상부에서는 N15W, 40SW의 주향과 경사를 보이나, 하부로 갈수록 N5E, 10~15NW 정도의 변화를 보이고 있으며, 단층면은 퇴적암의 층리에 평행하고 정단층의 운동감각을 나타낸다. 단층면에는 단층물질로 구성된 두께 5~10cm 정도의 gouge zone(fault clay)이 발달되어 있으며, 단층면상에는 산사태를 야기시킨 암반거동에 수반된 slickenline(10~13/274~290)이 존재하여 미끄럼 방향을 지시해 주고 있다.

3. 기초 조사

기초조사로는 시추조사, 지하수위 측정 및 시추코아 및 표토에 대한 실내시험이 실시되었다. 시추조사 결과 연구지역의 지하지질은 전반적으로 회백색 사암과 적색 셰일이 호층을 이루고 있으며, 부분적으로 역질 사암 내지 사질 역암이 협재되어 있다. 시추 코아에서 관찰한 바에 의하면 층리의 경사는 대략 10~20° 정도로서 일정한 양상을 보이며 층리 방향으로 주 절리군이 관찰되었다. 지하수위는 강우가 적은 평상시, 도로를 기준으로 지표하 약 11~13m 정도로 거의 일정하였으나, 집중 호우 시에는 거의 지표면까지 지하수위가 상승하는 것으로 관측되었다(Fig. 3). 이와 같은 지하수위의 변화는 ① 장마시에는 지하수위가 상승하여 단층 비지대내의 점토가 포화상태에 이르게 되고, ② 집중 호우시에는 지하수위가 지표면까지 급속하게 상승함을 지시한다.

지표에 분포하는 토질은 대부분이 점토에 해당하며, 비배수 점착력(Cu)은 0.031~0.051 MPa, 직접전단시험에 의하여 구해진 강도정수는 내부마찰각이 12~18.4°, 점착력은 0.0253~0.0442 MPa로 매우 연약한 점토이다. 시추조사에서 채취된 코아시료에 대한 물성 및 역학시험 결과, 시료의 비중은 2.61~2.64 정도로 전형적인 경상계 퇴적암의 값을 보이고 있으며, 인장강도는 12.3~17.9 MPa, 일축압축강도는 153.9~226.4 MPa, 삼축압축시험에서 측정된 내부마찰각은 38~39°, 점착력은 30.6~45.9 MPa로 측정되었으며, Table 1에 요약되어 있다 (한국수자원공사, 1999). 또한 단층면(활동면)에 존재하는 단층점토의 구성 광물을 XRD로 분석한 결과, 팽창성이 미약한 illite로 확인되었다.

Table 1. Properties of soil and rock masses.

	Soil	Weak Zone	Active Mass	Soft Rock
γ_t (kg/m ³)	1735.0	1702.2	2544.0	2544.0
γ_{sat} (kg/m ³)	2013.0	2029.0	2581.0	2581.0
cohesion (MPa)	0.03415	0.03779	0.075	0.15
friction angle (°)	15.5	0	19.3	35
Tensile Strength(MPa)	0.03415	0.03779	0.075	0.15
E (MPa)	4.247	2.993	841	1778
ν	0.35	0.35	0.30	0.25

4. 전산 해석을 위한 해석 단면 및 단계 설정

정밀한 전산해석을 위해 연구 지역에 대한 지표 지질 조사, 측량 조사, 시추 조사를 토대로 line-1로부터 line-8까지 총 8개의 2차원 단면을 설정하였다(Fig. 1). 각각의 단면은 15m

의 등간격으로 서로 평행하며 단층면에서 관측된 slickenline(13/274)과 평행하게 설정하였고, soil, active mass, weak zone, soft rock 등 4가지의 층으로 구성되어졌다(Fig. 4). Soil 층은 지표 지질 조사와 시추 조사 결과 관찰된 표토층, 풍화토 및 심한 풍화암으로 지표로부터 약 3~5m 하부에까지 이르며, weak zone은 지반의 미끄러짐을 유발시키는 단층면상의 비지대(fault clay)로서 약 10~30cm의 두께를 가진다. 또한 weak zone의 위치를 결정하는 단층면은 연구 지역의 안정화 공사로 인해 노출된 단층면을 측량하여 위치를 조사하였고, 지표 아래의 숨은 단층면 위치는 측정된 단층면을 연장시켜 추정하여 설정하였다. Active mass는 soil과 weak zone 사이의 지반으로 활동의 주체가 되는 지괴를 의미하며, soil과 단층면 아래의 모든 부분은 soft rock으로 가정하였다.

전산해석은 해석 단면에 대하여 지하수위의 변화와 사면 안정화 공사 전·후를 고려하여 설정된 3단계에 대하여 실시되었다. 첫 번째 해석 단계인 stage-A는 안정화 공사 이전의 초기 조건으로서 지하수위가 단층면 아래에 위치한 상태를 가정하였고, 두 번째 해석 단계인 stage-B는 stage-A상에서 강우로 인하여 지하수위가 지표면까지 상승한 단계이고, 마지막 단계인 stage-C는 안정화 공사가 끝난 상황에서 강우로 인해 지하수위가 지표면에까지 상승하였을 때의 단계이다.

5. 한계평형법을 이용한 전산해석

한계평형해석은 미국의 Purdue University에서 개발한 STABL5M software를 사용하여 실시하였다. STABL5M은 안정문제의 일반적인 해를 2차원으로 구하며, 사면의 안전율을 절편법(Janbu의 간편법)으로 계산한다. 이때 안전율이란 사면 활동면상에 활동을 일으키고자 하는 합력에 대한 활동에 저항하고자 하는 합력의 비율로, 이론상으로는 안전율이 1 이상이면 사면은 안전한 것으로 인정되지만, 지반 구조의 불확실성, 강도 정수의 불확실성, 안정 계산상의 가정 및 오차 등을 고려할 때 일반적으로 허용 최소 안전율($F_s > 1.5$) 이상이 되어야 사면이 안정하다고 간주한다.

한계평형 해석 시에 적용된 각 지반의 물성은 역학시험을 통하여 결정된 Table 1의 값을 이용하였다. 그러나 역학시험의 결과만으로는 강도정수를 결정하기 어려운 암반 지반에 대하여서는 RQD 및 굴착난이도를 고려한 암반 강도정수(전성기, 1998)를 적용하여 결정하였다. 또한 함수비에 따라 물성의 차이가 크게 나타나는 단층점토(weak zone)의 경우 습윤상태에서의 강도정수와 건조상태에서의 강도정수를 각각 구분하여 적용하였다.

Fig. 5는 한계평형 해석 결과를 보여준다. Stage-A에서는 8개 해석 단면 모두에서 1.7 이상의 안전율을 보여 지반은 안전한 것으로 분석되었다. 그러나 stage-B의 경우, 연구지역의 가장 북쪽에 위치한 line-1 단면을 제외한 모든 단면에서 허용 최소 안전율인 1.5 보다 낮은 안전율로 해석되어, 지반이 불안정한 것으로 분석되었다. 특히 line-3, 6, 7, 8 단면들은 1.0 보다 작은 안전율을 나타내어 강우에 의하여 지하수위가 지표까지 상승하면 사면의 파괴가

필연적으로 발생함을 지시하고 있다. 안정화 공사 이후의 상태를 나타내는 stage-C의 경우 모든 해석단면에서 2.4 이상의 높은 안전율을 나타내어, 연구 지역은 안정화 공사로 인해 지반이 평형을 이룬 것으로 사료된다.

6. 유한요소법(FEM)을 이용한 전산해석

유한요소법에서는 구조체의 매질을 더 작은 물체나 단위(유한요소)로 나누고, 그 요소들을 두 개 이상의 요소들이 공유하는 점(절점)이나, 경계선, 또는 경계면으로 연결된 대등한 시스템으로 만드는 모델화 과정인 이산화(discretization) 혹은 격자분할을 우선적으로 수행하고, 매질에 대해 요소의 공통되는 점(절점), 선 등에서 여러 가지 경계조건을 사용하여 수식을 만든 후, 이를 이용해 매질 전체에 대한 연립 대수 방정식을 만들어 미지의 해를 근사적으로 구한다(신중계 외, 1998).

본 연구에서는 캐나다의 University of Toronto에서 개발한 *Phase²*(ver 4.05) 프로그램을 이용하여 FEM 해석을 수행하였다. FEM 해석의 적용단면은 앞서 설정한 한계평형 단면과 일치하고 한계평형 해석결과 stage-B에서의 안전율이 1이하로 사면 파괴가 인지된 line-3, 6, 7, 8 단면에서는 사면활동에 중대한 영향을 미치는 연약면을 한계평형 해석에서 도출된 파괴면으로 수정하여 적용하였다. 또한 한계평형 해석결과 전 구간이 안전율 1.725 이상을 보인 stage-A 단계는 변위 발생이 없는 것으로 간주하였고 stage-B와 C 단계에서는 도로상부(P1), 산사면 상부의 두 지점(P2, P3), 연약면 상의 두 지점(P4, P5) 등 총 5개의 변위 추적점을 설정하여 각 지점에서의 변위량을 산출하였다.

유한요소 전산해석에 의한 stage-A의 해석 결과는 최초 설정단계에서 초기 변위가 없는 것으로 가정하였으므로 모든 변위 추적구간에서 변위를 0cm으로 설정하였다.

stage-B의 경우 한계평형 해석결과 안전율이 1 이상으로 해석된 line-1, 2, 4, 5 단면은 산사면 상부에 설정된 각 추적점에서 최대 3.25cm (line-5, P2) ~ 6.69cm (line-2, P3) 이하의 비교적 적은 변위가 발생하였다. 이들 단면이 갖는 1 이상의 안전율은 이론적으로 지반 내에 작용되는 힘이 서로 균형을 유지하고 있음을 의미하므로 단층면을 따라 미끄러지는 변위는 매우 작게 계산될 것으로 사료된다. 이에 반해서 line-3, 6, 7, 8 단면은 대부분의 추적점에서 비교적 큰 변위를 발생시켰다. 산사면 정상부(파괴의 시작부분)의 변위는 최대 35.02cm (line-8 P3) 정도였으며 사면 상부가 침하하는 형상으로 발생하였고, 사면파괴의 종단부쪽인 도로 부분의 경우 최대 35.97cm (line-8, P1) 정도의 변위가 용기하는 형상으로 발생하였다 (Fig. 6).

산사면을 절취하는 안정화 공사가 이후를 가정한 stage-C에서는 전 단면에 걸쳐 0.54cm (line-3, P1) ~ 2.08cm (line-7, P2)의 매우 작은 변위가 발생하여, 안정화 공사로 인해 지반 내에 작용하는 힘들이 서로 평형을 이룰 만큼 지반이 안정화되었음을 지시한다.

7. 유한차분법(FDM)을 이용한 전산해석

본 연구에서는 미국의 Itasca Consulting Group, Inc.에서 개발한 *FLAC*을 이용하여 FDM 전산 해석을 수행하였다. 적용단면은 앞서 설정한 FEM 해석 단면과 일치하며, 9900~12000개의 조밀한 grid mesh를 형성하였고, Table 1의 물성치를 적용하였다.

각 단계별 해석 결과, 건기에 해당하는 stage-A에서는 최초 설정단계에서 초기 변위가 없는 것으로 가정하였으므로 모든 변위 추적구간에서 변위를 0cm으로 설정하였다.

Stage-B의 경우 line-1, 2, 4, 5 단면에서는 거의 변위 발생이 없고, line-3, 6, 7, 8 단면에서는 큰 변위가 발생하여 FEM 해석과 비슷한 결과 보인다. 종단부쪽인 도로상부에 위치한 P1 추적점에서는 최대 35.26cm (line-8, P1)의 변위가 용기되는 형상으로 발생하였고, 파괴가 시작되는 부분인 산사면 상부에서는 최대 29.57cm (line-8, P3)의 변위가 침하하는 형상으로 발생하였으며 이외의 추적점들에서도 13~30cm 정도의 비교적 큰 변위가 발생하였다 (Fig. 7).

산사면을 절취하는 안정화 공사가 끝난 상태인 stage-C에서는 전구간에 걸쳐 0.19cm (line-7, P5)의 매우 작은 변위가 발생하여, 안정화 공사 결과 지반이 안정화되었다는 것을 의미한다.

8. 사면 파괴의 영향 요인 분석

연구 지역의 사면 파괴는 이 지역에 발달한 경사가 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 정도인 습곡 양상을 보이는 북북서 방향 단층면의 자세와 집중 강우로 인한 지하수위 상승이 초래하는 단층 비지대의 전단강도 감소, 간극수압의 증가, 지반의 단위중량 증가 등의 요인에 의하여 발생된 것으로 판단된다. 이러한 각 요인이 사면파괴에 미치는 영향을 line-8 단면에 대하여 한계평형법으로 분석하였다. 영향 요인 분석은 지하수 상승에 의하여 발생하는 간극수압의 증가, 지반의 단위중량 증가, 비지대(단층점토)의 전단강도 감소 등을 각각 개별적으로 대상 구간에 적용하여 실시하였고, 간극수압의 증가와 단위중량의 증가, 간극수압의 증가와 전단강도의 감소 등 두 요인을 동시에 적용하는 분석도 실시하였다. 이 때 사면의 안전성에 영향을 미치는 또 하나의 요인인 단층면의 자세는 외부 환경에 의해 변하지 않는 것으로 고려하여 분석대상에서 제외하였다.

Fig. 8은 각각의 요인이 작용하였을 때 사면의 안전율을 보여준다. 먼저 안정화 공사를 시행하지 않은 상태에서 건조한 경우에는 안전율이 1.725로 계산되었으나, 지하수위가 상승하여 간극수압이 증가하면 안전율은 1.258로 감소한다. 지반이 포화되어 단위중량이 증가하면 안전율은 1.716으로 계산되어 안전율의 변화가 거의 없으나, 단층점토의 함수비 증가에 따른 전단강도 감소에 의한 안전성 영향 분석 결과 안전율은 0.981로, 평상시 보다 안전율이

0.744 감소하였다. 따라서 분석 대상 구간에서는 이 한 요인만으로도 사면이 불안정하게 될 수 있는 것으로 판단되며 단층점토의 전단강도 감소는 사면 안전에 가장 큰 원인인 것으로 판단된다.

간극수압의 증가와 지반의 단위중량 증가의 두 요인을 함께 적용 분석한 결과 안전율은 1.208로서 간극수압의 증가만을 고려하였을 때와 유사하였다. 간극수압의 증가와 단층 점토의 전단강도 감소를 함께 적용한 안전성 분석에서는 안전율이 0.861로 계산되어 이 두 영향 요인이 사면파괴에 주요 원인임을 보여준다. 이러한 결과를 종합하면 연구지역의 사면 파괴를 유발하는 영향 요인 중에서 단층점토의 전단강도 감소가 안전성 저하에 가장 지배적인 요인이고, 간극수압의 증가 또한 상당한 작용을 한 것으로 판단된다. 그러나, 지반의 단위중량 증가는 사면 파괴에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

9. 결 론

경상북도 안동시 임동면에 위치한 999번 지방도로 우리 지역의 지반변형은 사교하고 있는 북북동 방향과 북북서 방향의 두 개의 단층을 따라 지반이 이동하여 발생하며, 특히 북북서 단층을 따라 지반이 하부로 미끄러지며 거동이 발생하는 것으로 조사되었다. 이러한 조사 결과를 토대로 연구지역에 8개의 단면을 설정하였고, 각 단면에 대하여 한계평형법, 유한요소법, 유한차분법등의 전산해석을 통하여 지반의 안정성 및 변위 발생 상태를 분석하였다.

한계평형 전산해석 결과, 연구 지역은 지하수위가 단층면 아래 위치할 때에는 전 구간이 1.725 이상의 안전율을 보여 안전한 것으로 분석되었다. 그러나 집중 강우로 인해 지하수위가 지표면까지 상승할 경우, 사면 북쪽의 line-1 구간을 제외한 모든 구간에서 최소 허용 안전율 1.5 보다 낮게 분석되었다. 특히 연구 지역의 남쪽에 위치한 line-7, 8 구간은 사면의 안정성이 극히 취약하여 연구 지역내의 북쪽 사면 보다 남쪽 사면에서 주도적인 파괴가 일어나는 것으로 판단된다. 안정화 공사가 끝난 현재는 전 구간이 안전율 2.415 이상의 높은 안정성을 나타낸다.

FEM과 FDM를 통한 변위량 해석 결과, 지하수위가 단층면 아래에 위치하였을 때는 연구 지역의 지반은 변형이 발생하지 않는 안정된 상태로 분석되었다. 그러나 집중 강우로 인하여 지하수위가 지표면까지 상승할 경우, 999번 지방도로 상부에서는 최대 35cm 이상 융기하며, 사면의 산측은 약 30cm 이상 침하되는 것으로 분석되었다. 안정화 공사가 끝난 후에는 지반의 변형이 없는 안정된 상태로 해석되었다.

연구 지역의 사면 파괴 요인은 북북서 단층의 자세와 집중 강우로 인한 지하수위 상승이 초래하는 단층 비지대의 전단강도 감소, 간극수압의 증가, 지반의 단위중량 증가 등인 것으로 판단된다. 이러한 요인을 한계 평형법을 통하여 분석한 결과 단층점토의 전단강도 감소가 안전성 저하에 가장 지배적인 요인이고, 간극수압의 증가가 또한 상당한 작용을 한 것으

로 분석되었다. 그러나 지반의 단위중량 증가는 사면 파괴에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서 실시한 전산해석의 결과는 기 발생된 사면 파괴 현상과 비교적 일치하나 시추자료 부족으로 인해 지반내에 위치한 단층면을 노출된 단층면의 경사로 추정하여 적용한 점, 지반의 대표 물성치 추정에 있어서의 여러 가지 가정, 사면 파괴에 있어서 creep 효과를 고려하지 못한 점, 지하수의 흐름이 없는 정수압 상태로 가정한 점등에 있어서 오차 요인 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 김남장, 강필중, 이흥규, 1970. 한국지질도 중평동 도폭 및 도폭 설명서, 국립 지질 조사소.
- 장기홍, 1977. 경상분지 상부 중생대의 층서, 퇴적 및 지구조. 지질학회지, 13권, 76~90.
- 전성기, 1998. 사면안정화 설계실무편람, 도서출판 과학기술, 278 p.
- 한국수자원공사, 1999. 임하댐 저수지 주변지역 지반변형 원인조사 보고서. A206 p.
- 신종계, 이용신, 조성욱, 1998, Logan의 유한요소법 첫걸음, 시그마 프레스, 722p.