

부산-김해지역의 산사태 사례

Case Study of Landslides at Busan-Kimhae Area

김 경 수	한국지질자원연구원 환경지질연구부
조 용 찬	한국지질자원연구원 환경지질연구부
이 춘 오	한국지질자원연구원 환경지질연구부
채 병 곤	한국지질자원연구원 환경지질연구부
최 영 섭	한국지질자원연구원 환경지질연구부
김 원 영	한국지질자원연구원 환경지질연구부
이 문 세	한국지질자원연구원 환경지질연구부

1. 서 언

산사태를 유발하는 여러가지 요인 중에서 가장 중요한 요소로는 1) 사면경사 등의 지형조건, 2) 미고결 또는 붕적층 등의 토질특성, 그리고 3) 강우조건을 들 수 있다. 내적 취약성을 갖고 있는 지반에 집중호우와 같은 외적 요인이 부가될 때 사면활동이 촉진되어 산사태가 쉽게 발생할 수 있다. 산사태 발생가능성을 평가하기 위해서는 각 사면들의 활동이력을 조사·분석하는 것이 선행되어야 하고, 이를 바탕으로 지형조건, 지질, 토질특성 등 지질공학적 자료와 강우자료를 종합적으로 비교·분석하는 것이 중요하다.

이 연구는 부산-김해지역을 대상으로 그동안 기록에 의한 산사태 발생현황을 파악하고 이를 바탕으로 현장조사를 실시하였다. 대부분의 산사태가 사면의 토층에서 발생되었으므로 산사태 발생지점에서 교란 및 불교란 토양시료를 채취하여 실내시험을 통한 토질공학적 특성을 분석하였으며, 그 결과를 정리하여 사례별 주요 산사태를 논하였다.

자료에 의하면 본 연구지역에서 1973년 이후로 약 50여개에 달하는 크고 작은 산사태가 발생하였다. 이들 산사태는 여름철인 6월에서 9월에 태풍을 동반한 집중호우에 의해 발생된 것으로 조사되었으며, 사태의 유형은 대부분 유동성산사태(flow type)로 분류되었다. 규모가 비교적 큰 인명 및 재산피해는 모두 이 유동성산사태에 의한 것이었으며, 대표적인 산사태로는 1985년 7월 5일 집중호우시 부산광역시 남구 문현 2동에서 발생한 것으로서 무려 35명의 인명과 36채의 가옥이 파손되는 등 막대한 피해가 발생하였다.

2. 지형·지질

연구대상 지역은 행정구역상으로 부산광역시와 경남 김해시로서 크게는 동편의 사면지역과 서편의 고지 및 평야지대로 구분된다. 연구지역 동편의 사면지역은 달음산(588m)-아홉산(360m)-장산(634m)으로 연결되고 특히 장산은 북동향의 능선을 축으로 하여 남쪽 및 북쪽사면의 경사가 매우 심한 편이다. 또한 부산의 북측으로부터 중남부까지 자리한 금정산

(802m), 상계봉(638m) 및 백양산(641.5m) 등도 고산들로 비교적 급사면을 이루고 있다. 이에 반해 김해를 중심으로 한 서편지대는 비교적 넓은 평야지를 형성하고 있는데, 이들 두 지역사이에 여러 소지류들이 발달한 낙동강이 위치하고 있다.

연구지역의 지질은 제3기의 육성 및 해성의 퇴적층과 화산암류, 경상지층 및 백악기말에 경상지층들을 관입한 화강암질암류들의 대소 암체들과 산성 및 반심성암류들로 구성되어 있다. 퇴적분지의 기반은 주로 선캠브리아기의 편마암류 및 편상화강암과 쥘라기 화강암으로 구성된 복합체로서 북북동-남남서를 나타내는 소위 지나방향의 단층들이 발달되어 있다. 한반도의 남동쪽 가장자리에 위치하는 연일분지는 주로 비해성의 중기 마이오세의 퇴적물로 구성되어 있으며 후기의 해성퇴적물과 계곡을 메운 물질들로 덮혀 있다.

3. 산사태 유형

Q. Zaruba(1976), D. Varnes(1978), T. H. Nilsen(1979) 등에 의하면, 산사태의 유형(type)은 낙반(fall), 전도(topple), 크리프(creep), 슬라이드(slide) 및 유동(flow) 등으로 분류된다. 이는 붕괴물질을 기준으로 할 경우 암석(rock), 암설(debris), 토양(soil) 등으로 구분될 수 있는데(UNESCO Working party on World Landslide Inventory, 1990), 이 중 낙반과 전도는 토층사면에서도 발생되기는 하나 주로 암반사면에서 사용되는 용어이다.

토질공학에서는 형태에 따라 붕괴(circular 및 semicircular failure), 슬라이드(rotational 및 translational slide), 유동(debris 및 mud flow) 및 복합(compound) 등으로 세분되기도 한다. 이러한 기준을 적용할 경우 연구지역에서 발생한 산사태는 풍화토, 잔적토 또는 붕적토가 사면에 얇게 덮여 있는 토층사면에서 발생한 것들로서, 대부분 유동성산사태로 분류된다.

Creep type

크리프는 사면지역에서 풍화암이나 암편 및 토양이 중력에 의해 1년에 수mm 내지 수cm의 울로 서서히 흘러내리는 현상을 말하는데, 크리프가 산사태와 다른 점은 일정한 파괴면이 없고 발생속도가 아주 느리다는 점이다. 겨울철 토양이나 암석이 얼면 사면에 직각으로 응기했다가 해빙기에 녹으면 수직으로 떨어져 원위치보다 아래로 움직이게 된다. 크리프에 의해 붕적층(colluvium)이 생기기도 하는데, 지구표면의 많은 부분은 이 붕적층으로 덮혀져 있으며 산사태의 주 대상이 되고 있다.

Slide type

슬라이드는 1개 이상의 면을 따라서 전단파괴가 일어나는 현상으로서 회전형과 전이형으로 구분된다. 회전형슬라이드는 비교적 균질한 점토와 세일층으로 구성된 사면에서 주로 일어나지만, 모래질 토층이나 불연속면 간격이 매우 좁게 발달한 암석의 사면에서도 발생할 수 있는데, 이는 회전형슬라이드를 일으킬 만큼 간극수압이 충분히 높은 경우이다. 전이형슬라이드는 주로 암석의 각종 구조면이 사면의 하향으로 발달되어 있을 때 그 면을 따라 암석이나 토양층이 미끄러져 파괴되거나, 서로 다른 물질로 구성된 2개의 지층면을

따라 전단파괴되는 현상이다.

Flow type

유동은 점착성 액체가 흘러내리는 것과 유사하며 대부분의 유동성산사태는 집중호우시 혹은 후에 일어나는데, 이 때 토양은 점착성이 낮아지고 토양층 내 간극수압이 높아져 완만한 경사에서도 쉽게 흘러내리게 되며, 대단히 빠르게 진행되기 때문에 대개의 경우 막대한 인명과 재산피해를 유발하게 된다. Varnes(1978)는 사태물질을 입도분석하여 직경 2mm 미만의 입자를 80% 이상 함유하면 진흙유동으로, 직경 2mm 이상의 입자를 20~80% 함유하면 암설유동으로 구분하였다.

4. 토질특성

Figure 1은 현지조사를 통해 확인된 총 49개 산사태발생 위치를 표시한 것이다. 이들 중 대표적인 곳에서 교란 및 불교란 토층시료를 채취하여 실내 토질시험을 실시하였는데, 교란시료로 비중, 함수비, 액성한계, 소성한계, 입도분석을 등의 물성을, 불교란시료로는 밀도, 일축압축, 삼축시험 또는 직접전단시험 등의 공학적 특성시험을 실시하였다. 시험방법은 KS 및 ASTM의 관련기준에 준하여 시험하였으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Physical characteristics of the soils collected from landslides.

*Sample No.	Moisture content, %	Specific gravity	Gradation, %			Atterberg limits, %			USCS	Description
			Gravel	Sand	Fines	LL	PL	PI		
2	19.5	2.66	15.2	47.2	37.6	26.7	19.3	7.4	CL	Colluvium
6	42.7	2.70	2.7	10.4	86.9	37.6	26.4	11.2	ML	Colluvium
7	26.3	2.65	12.6	53.2	34.2	36.5	23.6	12.9	SC	Colluvium
8	18.0	2.65	14.8	48.8	36.4	31.8	21.1	10.7	SC	Residum
10	12.0	2.67	3.7	71.2	25.1	25.4	18.1	7.3	SM	Colluvium
11	29.6	2.83	3.5	26.5	70.0	29.6	22.0	7.6	CL	Colluvium
14	33.4	2.65	0.1	1.2	98.7	47.0	31.6	15.4	ML	Residum
16	25.1	2.66	7.5	35.4	57.1	31.3	23.1	8.2	ML	Colluvium
19	27.5	2.65	0.6	43.5	55.9	38.5	27.8	10.7	SM	Colluvium
21	38.7	2.65	0.4	2.2	97.4	43.5	28.1	15.4	ML	Residum
24	10.9	2.68	1.9	65.6	32.5	26.7	17.0	9.7	SC	Colluvium
27	35.8	2.70	0	1.4	98.6	51.6	29.4	22.2	MH	Residum
31	24.0	2.65	1.5	50.6	47.9	29.8	18.1	11.7	SC	Saprolite
32	32.0	2.71	7.8	29.7	62.5	31.8	23.2	8.6	ML	Colluvium
36	15.4	2.61	26.2	47.7	26.1	38.3	20.4	17.9	SC	Colluvium
40	35.9	2.71	0	13.1	86.9	42.4	29.5	12.9	ML	Saprolite
41	16.4	2.64	1.4	54.2	44.4	37.1	26.4	10.7	ML	Colluvium
42	2.5	2.66	7.8	88.3	3.9	Nonplastic			SP	Saprolite
43	27.1	2.66	35.0	24.5	30.5	31.8	21.2	10.6	GC	Colluvium
45	19.3	2.75	21.6	49.4	29.0	29.9	22.3	7.6	SC	Colluvium

*See Figure 1 for sample location

5. 강우자료

1976년부터 2001년까지의 기간 중 일별강우량이 가장 많았던 때를 살펴보면 1991년 8월 23일로서 일강우량이 439mm에 달했는데, 강우조건과 밀접하게 관계되는 산사태는 이때 특히 많이 발생한 것으로 기록되었으며, 1993년 8월 10일 양산지역의 154.5mm의 강우시에도 산사태가 많이 발생하였다. 산사태는 주로 6월에서 9월까지의 집중호우나 태풍을 동반한 폭우에 의해 발생한 것으로 조사되었는데, 이는 산사태발생이 강우조건과 밀접하게 관련됨을 증명하는 것이기도 하다.

Figure 2에서 보는 강우량분포도는 연구지역에 위치한 6개 관측소로부터 수집된 1996년부터 2001년까지의 강우기록 중 각 관측소별 강우량이 가장 많은 2개를 평균한 자료에 근거하여 분포도를 작성하였다.

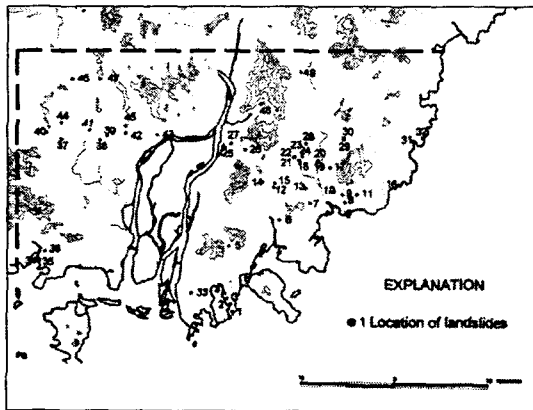


Figure 1. Map showing the locations of landslides in the study area.

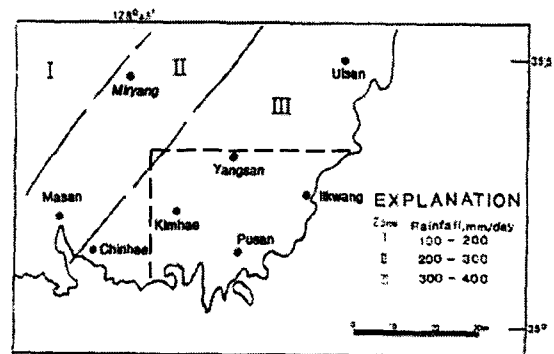


Figure 2. Zonal map of rainfall for the study area.

6. 산사태 사례

부산시 남구 문현 2동

이 지역은 붕적층에서 크리프현상이 발생하고 있는 지점이다. 채취된 불교란시료에 대한 삼축압축 시험결과 내부마찰각: 3° , 점착력: 40kPa로서 전단강도가 매우 낮은 것으로 확인되었으며, X-ray 회절분석결과 토양 중에 Montmorillonite도 소량 함유하고 있으며, 현재도 크리프가 계속 진행 중에 있는 곳이다.

크리프가 발생하고 있는 지점으로부터 약 50m 거리에 위치한 곳에서 Figure 3에서 보는 바와 같이 1985년 7월 5일 집중호우에 의해 큰 산사태가 발생하여 34명이 사망하고 36

채의 가옥이 파손되었다. 이 산사태는 붕적층의 유실에 의한 유동성산사태에 해당한다.

부산시 남구 광안 1동

상아아트빌라는 1991년 8월 태풍 글래디스(gladys)가 동반한 폭우로 유발된 유동성산사태로에 의해 Figure 4에서 보는 바와 같은 피해를 입었다. 사태물질들이 아파트 4층까지 침범하여 많은 재산손실이 발생하였다. 기상자료에 의하면 산사태발생 당시인 1991년 8월 23일의 일강우량은 무려 439.0mm에 달했다. 이 지역은 붕적층으로 피복되어 있었지만 현재는 거의 없고 적갈색 화강암의 부식토(saprolite)가 노출되어 있다. 통일분류법상 SC에 속하는 토층시료는 건조밀도가 1.414-1.450g/cm³, 간극비가 0.83-0.85이며, 직접전단 시험결과 점착력은 아주 낮아 12kPa에 불과하나 내부마찰각은 39°로 높은 편이다. 이 지역에서는 붕적층과 그 하부에 위치한 부식토의 일부도 부분적으로 함께 흘러내렸는데, 이 부식토는 건기임에도 포화도가 80.0-83.5%인 것으로 보아 강우시 포화도가 높게되고 간극수압의 상승으로 인해 산사태 발생가능성이 높을 것으로 생각된다.



Figure 3. Houses destroyed by the 2nd Moonhyondong landslide.



Figure 4. Landslide damage to the Sangah apartment.

부산시 동래구 복천동

1991년 8월 23일의 집중호우로 사면이 붕괴된 후 석축쌓기를 하여 복구하였으나 1993년 8월 21일의 강우시에 추가붕괴된 것으로 보고되었다. 붕괴지역에 돌쌓기를 하였으나 Figure 5에서 보는 바와 같이 현재 만곡형 전단균열(tension crack)이 진행 중에 있어 사면붕괴 가능성이 높은 곳으로 예방대책이 요구된다. 이 지역의 토층은 액성한계가 비교적 높은 ML로 분류되며, 삼축압축 시험결과 점착력은 점착력이 155kPa로 높은 편이나 내부마찰각이 8°로서 전단강도가 낮은 것으로 분석되었다.

부산시 사하구 장림 2동

Figure 6은 1987년 7월 태풍 셀마(thelma)와 동반한 집중호우로 인해 유동성산사태가 발생한 현장이다. 이 사태로 6명의 인명피해가 있었으며, 10여채의 가옥이 묻히고 파괴되는 피해가 발생하였다. 이 산사태는 지형과 토층상양으로 보아 사면상부의 붕적층에서 발생하였으며, 복구는 되었으나 현재도 그 주변사면은 불안정성 요인을 지니고 있는 것으로 관찰되었다. 토층은 모래질실트로서 통일분류법상 ML에 속하며, 내부마찰각이 6.5°, 점착력이 70kPa로서 전단강도가 매우 낮은 것으로 분석되었다. 또한 X-ray 회절분석결과 타 지역에 비해 활성도가 크고 팽창성 점토광물인 몬모릴로나이트(montmorillonite)의 함유비가 높은 것으로 보아 이 점토광물이 사태를 더욱 촉진시켰을 것으로 생각된다.



Figure 5. Curved tension crack in the foreground.



Figure 6. Landslide damage to private houses due to the heavy rain.

7. 결 언

1973년 이후 현재까지 연구지역에서의 50여개 산사태는 대부분 집중호우에 의하여 발생하였으며, 인구가 밀집한 도시지역이어서 피해가 더욱 가중되었다. 주로 불안정 토층사면인 붕적층에서 발생하였으며 유형은 유동성산사태로 분류된다. 대표적 산사태 발생지에서 채취한 토층시료에 대한 시험결과 대부분 CL과 ML에 속하며, 액성한계와 소성지수는 각각 25.3-47.0%와 7.3-22.4%인 것으로 분석되었다. 산사태 발생지역의 토층은 사면안정성에 유의한 영향인자인 전단강도가 대체적으로 낮은 편인데, 그 범위는 전단저항각이 2-42.5°이고 점착력은 2-110kPa이다. 진흙유동은 암설유동에 비해 전단저항각이 작고 점착력은 높은 결과치를 보였는데, 이는 진흙유동으로 분류된 지역이 소성(plastic)을 지닌 실트와 점토입자를 더 많이 함유하고 있기 때문이다. 또한 산사태 발생지역의 토층은 풍화가 심한 부식토와 활성도 및 팽창성이 크다고 알려져 있는 점토광물인 Montmorillonite

등이 함유되어 있어 이들이 산사태발생과 상관성이 있을 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가 연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행되었으며, 일부는 한국지질자원연구원 기관고유사업으로 수행되었다.

참고문헌

- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도 1:50,000 동래·월내도폭, 자원개발연구소.
- 엄상호 외, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구, 한국동력자원연구소, 연구특보 36.
- 이하영, 김상욱, 1964, 한국지질도 1:50,000 김해도폭, 국립지질조사소.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도 1:50,000 부산·가덕도폭, 한국동력자원연구소.
- 한대석, 김원영, 유일현, 김경수, 이사로, 최영섭, 1997, 지질재해조사연구, 연구보고서, 한국자원연구소, KR-97(C)-46, p.3-68.
- Amer, A. M., and Awad, A. A., 1974, Permeability of Cohesionless Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100, GT12, p.1309-1316.
- Howard, A. D. and I. Remsen, 1978, Geology in Environmental Planning, p.399-414.
- Nilsen, T. H. et al., 1979, Relative Slope Stability and Land-use Planning, Geological Survey Professional Paper 944, p.1-89.
- Rahn, P. H., 1986, Engineering Geology, Elsevier, New York, p.147-181.
- UNESCO Working Party on Landslide Inventory, 1990, A suggested method for reporting a landslide, Bull. of IAEG, no. 41, p.5-12.
- Vanes, D. J., 1978, Slope movement types and process, National Academy of Science, Washington, D C., special report, 2, p.11-33.
- Zaruba, Q. and V. Mencl, 1976, Engineering geology, Elsevier, Amsterdam, p.163-197.

