

암과 흙 경계면에서의 전단강도 특성 연구

이수곤
김백순

서울시립대학교 토목공학과
서울시립대학교 토목공학과

1. 서론

2002년 태풍 ‘루사’와 2003년 태풍 ‘매미’에 의해 산사태를 정밀조사한 결과 대부분의 산사태가 암과 흙 경계면에서 붕괴가 일어났었다. 이렇듯 경계면에서의 전단강도 특성이 자연사면 붕괴에 중대한 역할을 할 것이라 생각되어 본연구에서는 암종별로 특별히 고안된 시험장치로 암과 흙 경계면에서의 전단강도와 흙만의 전단강도 특성을 파악하였다. 이렇게 구해진 두 개의 전단강도특성을 비교해 보고 태풍에 의해서 발생한 산사태에 대해 암종에 따른 파괴형태에 특성과 파괴형태에 의한 풍화암과 풍화토에서의 전단강도 특성에 대해서 비교 및 결과를 고찰하는 것이 본논문에 목적이다.

2. 조사지역 및 연구범위

암석의 종류별 산사태 특성을 파악하기 위해 2002년 태풍 ‘루사’와 2003년 태풍 ‘매미’에 의해 발생한 산사태중 강원도 강릉, 동해, 삼척지역 일대와 경상남도 합천, 거창, 함양 지역일대에서 총 171개의 산사태를 조사 및 분석하였다. 이렇게 발생한 171개의 산사태를 정밀 조사를 해서 전단강도를 실험하는데 적용하기로 했다. 화성암은 판상절리에 의한 파괴와 일반적인 직선파괴에 의해서 무너진 것을 비교 분석하였으며, 변성암은 경남 함양지방의 편마암과 거창지방의 편마암을 비교 분석하였으며, 퇴적암은 층리에 평행하게 파괴가 일어난것과 일반적인 직선파괴에 의해서 무너진 사면을 비교 분석하였다.

표 1. 조사지역에서 조사한 산사태 개소수.

조사지역		산사태 개소수	산사태 발생시기
화성암지역	강릉	80	2002. 9. 1
	동해	40	2002. 9. 1
	태백	6	2003. 8. 30
변성암지역	함양	26	2002. 9. 1
	삼척	6	2003. 8. 30
퇴적암지역	합천	6	2003. 8. 30
합계		171	-

3. 산사태 발생지역에 대한 지질조사

붕괴된 산사태에 대해 지질조사를 수행하기 위해 원사면 경사 및 붕괴후의 붕괴면의 길이, 깊이, 경사, 폭, 산사태 발생시점, 핵석분포, 슈미트 타격치값등을 정밀히 조사하였다. 붕괴된 자연사면의 원사면 경사 및 붕괴후 경사를 측정 하기 위해서 클리노미터를 이용하였고, 붕괴깊이, 붕괴길이 및 붕괴폭을 측정하기 위해서 50m줄자를 이용하였다. 슈미트 타격시험은 5회~7회를 실시하였다. 슈미트 타격시험시 슈미트해머의 타격 방향성을 고려해야 하며 암에 분포에 따라서 값을 보정해주었다. 각 암종별로 파괴양상이 독특하여서 크게 2가지씩 나누어 보았다. 화성암은 판상절리에 의한 파괴와 일반적인 직선파괴로 구분해보았고, 변성암은 주로 편마암 지대였는데, 파괴양상이 비슷하였기 때문에 강원도 삼척지역과 경남 거창지역으로 나누어서 비교 분석해 보았으며, 퇴적암은 층리에 평행한 방향과 일반적인 직선파괴로 나누어서 실험 및 조사를 실시하였다. 이렇게 해서 구한 암종별 원사면 경사 및 붕괴특성이 표 2, 3, 4에 나와있다.

표 2. 화성암 (판상절리에 의한 파괴, 일반적인 직선파괴).

조사내용	화성암 (판상절리에 의한 파괴)			화성암 (일반적인 직선파괴)			
	지역1 (강원도강릉)	지역2 (강원도강릉)	지역3 (강원도강릉)	지역1 (강원도태백)	지역2 (강원도삼척)	지역3 (강원도삼척)	
원사면의 경사(°)	44	37	43	40	41	41~42	
붕괴면의 경사(°)	42	33	40	36	38	37~38	
붕괴 깊이(m)	0.6	0.4	0.4	0.4	0.3~0.4	0.3~0.4	
붕괴 길이(m)	32~33	9	21~24	55~60	50~60	65~70	
붕괴폭(m)	21	6	15	25~30	12~13	10~11	
산사태 발생시점	9부능선	7부능선	9부능선	8부능선	8부능선	8부능선	
핵석의 분포(%)	-	-	-	20	25	30	
슈미트 타격치값	상부	25~30	-	23~28	25~28	26~32	22~25
	중간	33~35	16~18	30~35	38~42	30~35	26~29
	하부	34~36	17~19	32~36	50~52	34~40	35~36

표 3. 변성암 (강원도 지방의 변성암, 경상남도 지방의 변성암).

조사내용	변성암 (강원도 지방의 변성암)			변성암 (경상남도 지방의 편마암)			
	지역1 (강원도삼척)	지역2 (강원도삼척)	지역3 (강원도삼척)	지역1 (경남거창)	지역2 (경남거창)	지역3 (경남거창)	
원사면의 경사(°)	36~37	상33, 하39	상36, 하33	39~40	41~42	36~37	
붕괴면의 경사(°)	32~33	상30, 하35	상32, 하28	35~36	39~40	33~34	
붕괴 깊이(m)	1~2	상0.5, 하0.6	상0.3, 하0.5	0.4	0.4~0.5	0.4	
붕괴 길이(m)	60~65	상12, 하13	상7, 하20	35	35~40	20	
붕괴폭(m)	8~9	8~9	7~8	12~13	15	3	
산사태 발생시점	8부능선	8부능선	8부능선	9부능선	8부능선	8부능선	
핵석의 분포(%)	-	-	-	-	-	-	
슈미트 타격치값	상부	15~20	15~20	17~22	46~50	44~50	45~48
	중간	15~22	22~25	20~25	40~44	42~46	42~47
	하부	35~40	30~33	24~31	38~40	38~40	38~41

표 4. 퇴적암 (층리에 평행한 파괴, 일반적인 직선파괴).

조사내용	퇴적암 (층리에 평행한 파괴)			퇴적암 (일반적인 직선파괴)		
	지역1 (경남합천)	지역2 (경남합천)		지역1 (경남합천)	지역2 (경남합천)	
원사면의 경사(°)	39~40	39~40		37~38	39~40	
붕괴면의 경사(°)	35~36	35~36		34~35	36~37	
붕괴 깊이(m)	0.5	0.5		0.5	0.4~0.5	
붕괴 길이(m)	15~20	25		15	15	
붕괴 폭(m)	12~13	16		7~8	10	
산사태 발생시점	7부능선	7부능선		5부능선	8부능선	
핵석의 분포(%)	-	-		-	-	
슈미트 타격치값	상부	20	26~28	21~25	22~24	
	중간	24~28	25~29	22~28	25~27	
	하부	28~34	32~36	26~34	28~30	

4. 산사태 발생 지역의 전단강도 특성

4.1. 암(Rock) 및 흙(Soil) 시료 준비

흙 시료의 준비는 기본 토질 물성 시험과 전단강도 시험에 사용된다. 그렇기 때문에 각 사이트를 대표할 수 있는 곳으로 최대한 교란이 되지 않게 채취한다. 이렇게 각각 암종별로 시료를 링에 샘플링을 하여 약 400여개를 준비한다. 전단시험은 5개의 다른 수직응력하에서 흙만의 시험과 암과 흙 경계면에서의 시험이 자연상태와 습윤상태로 각각 수행되고, 약 15회에 시험을 실시하여서 그 평균값을 사용하였다. 암과 흙 경계면에서의 전단시험을 위해 암석시료는 산사태가 발생한 지역에서 그 지역의 거칠기를 대표할 수 있는 시료를 신중히 골라 채취하였는데 이렇게 그 지역의 거칠기를 대표하는 암석시료를 채취하는 이유는 암석 거칠기가 거칠수록 경계면에서의 전단강도가 커지기 때문이다.

4.2. 토질 물성 시험

암종별 전단시험을 하기 앞서서 흙에 대한 기본 물성시험을 실시한다. 각각의 시험의 준비를 위해 각 사이트에서 채취한 흙 시료를 준비한다. 수분에 증발 및 건조를 방지하기 위하여 랩으로 동봉한 후에 최대한 교란되지 않도록 주의한다. 각각 현장에서 채취한 잔류토에 대하여 채분석, 비중, 액성한계, 소성한계, 함수비, 시험을 하였으며, 각각에 시험은 10~15회에 시험을 거쳐 암종별 평균치 값의 결과를 얻을 수 있었다.

4.3. 전단강도 시험

모든 시험은 건기시와 만수위시 시험을 실시하였다. 모형시험을 하기 위해 편의상 자연조건과 습윤조건으로 나누기로 한다. 실제 만수위시의 조건을 시험하기 위해서는 샘플링을 해놓은 흙 시료에 거름종이를 밀봉하여 5일간 물속에 넣어두어서 완전포화 시킨후에 시험을 실시하였다. 전단속도는 0.2mm/min 로 하였다. 수직응력은 대부분 자연사면의 토층깊이가 1~3m 였으므로 0.3kg/cm² 부터 1.5kg/cm² 까지 5단계로 증가시키며 재하 하였다. 최대 전단변위는 시료전체길이의 15%인 9mm로 하였다. 암과 흙의 경계면 시험은 기본적인 개념과 시험절차는 토질 전단시험과 동일하지만 하부링에 solid grid와 poros plate 대신에 암석시료가 들어갔다.

4.4. 토질 물성 시험 및 전단강도 시험 결과

토질 물성 시험을 정리해보면 단위중량은 대략 1.78~1.81ton/m³ 정도의 수준이고, 함수비도 화성암은 평균 19%, 변성암은 17%, 퇴적암은 18%로 대체적으로 많은 수분을 내재하고 있었다. 비중은 2.561~2.705까지 값이 나왔고, 체분석 시험을 통한 흙에 분류에서는 전반적으로 입도가 좋은 것으로 나왔다. 직접 전단시험 결과 흙만의 단독시험보다는 암과 흙 경계면에서의 c, Φ 값이 암종별로 모두 작게 나왔고, 건조상태에서 시험을 수행한 것 보다 습윤상태 즉 만수위시를 가정하고 시험한 c, Φ 값 이 더 낮게 나왔다. 특이한 사항은 판상절리에 의한 파괴에 값에서 c, Φ 값이 아무래도 적게나오는 이유는 풍화에 의해서 암석이 전반적으로 떠있기 때문에 그 값이 낮게 나온다. 이렇게 흙만의 전단강도 값보다 경계면에서의 전단강도 값이 더 낮게 나타난 것은 경계면에서의 산사태 붕괴를 더욱 입증시켜 주고 있는 것이라 생각된다.

표 5. 암종별 잔류토의 토질 물성 시험 및 전단강도 시험 결과.

				단위중량 (ton/m ³)	함수비 (%)	Gs	LL(%)	PI(%)	USCS	점착력 C(kg/cm ³)	마찰각 Φ (°)
화성암	판상절리에 의한 파괴	흙	건조	1.81	19.18	2.625	42.55	30.57	SP	0.185	24.29
			습윤	1.84	23.51	2.624	42.55	30.57	SP	0.173	20.47
		흙+암	건조	1.83	21.56	2.606	42.55	30.57	SP	0.176	19.62
			습윤	1.84	21.77	2.561	42.55	30.57	SP	0.195	18.77
	일반직선 파괴	흙	건조	1.76	17.82	2.607	31.88	11.56	SM	0.281	20.94
			습윤	1.79	20.75	2.607	31.88	11.56	SM	0.271	20.47
		흙+암	건조	1.78	16.18	2.646	31.88	11.56	SM	0.267	19.11
			습윤	1.82	19.12	2.705	31.88	11.56	SM	0.281	18.79
변성암	강원도 지역의 변성암	흙	건조	1.80	18.68	2.598	40.30	19.76	SM	0.322	17.74
			습윤	1.80	19.08	2.597	40.30	19.76	SM	0.288	15.81
		흙+암	건조	1.79	14.45	2.592	40.30	19.76	SM	0.327	17.40
			습윤	1.80	14.72	2.640	40.30	19.76	SM	0.349	16.24
	경남 지역의 변성암	흙	건조	1.78	18.67	2.664	39.64	21.54	SW	0.316	21.54
			습윤	1.80	18.98	2.564	39.64	21.54	SW	0.278	20.67
		흙+암	건조	1.74	18.28	2.578	39.64	21.54	SW	0.287	19.54
			습윤	1.80	19.57	2.642	39.64	21.54	SW	0.274	18.26
퇴적암	층리에 평행한 파괴	흙	건조	1.80	18.82	2.654	35.81	11.25	SM	0.286	22.35
			습윤	1.80	19.04	2.614	35.81	11.25	SM	0.342	21.14
		흙+암	건조	1.80	19.87	2.647	35.81	11.25	SM	0.275	19.57
			습윤	1.80	18.72	2.597	35.81	11.25	SM	0.297	18.44
	일반직선 파괴	흙	건조	1.81	18.94	2.603	45.54	13.24	SW	0.302	23.56
			습윤	1.80	20.14	2.641	45.54	13.24	SW	0.274	22.11
		흙+암	건조	1.81	18.97	2.647	45.54	13.24	SW	0.297	20.48
			습윤	1.80	19.37	2.640	45.54	13.24	SW	0.264	19.16

5. 결론

(1) 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미'에 의해 발생한 171개의 산사태에 대해 암종별로 지질 및 붕괴특성을 정밀 조사해 본 결과 대부분의 산사태가 암과 흙의 경계면에서 붕괴가 일어났다.

(2) 산사태조사에 의해서 각 암종별로 파괴양상을 조사해본 결과 각각 독특한 파괴형상을 알 수 있었다. 화성암은 판상절리에 의한 파괴와 직선파괴로 구분이 되었고, 변성암은 파괴양상이 비슷한 편마암으로 강원도 지역의 편마암과 경상남도 지역의 편마암으로 구분되었으며, 퇴적암은 층리에 평행한 파괴와 일반적인 직선파괴에 의해서 나뉘었다.

(3) 직접 전단시험 결과 건기시 일때보다 만수위 일때 시험한 c, Φ 값 더 낮게 나오는 것을 알 수 있었다. 이는 일반 자연사면에서 폭우시 산사태에 붕괴가 일어날 확률이 더 높다는 것을 입증 해준다.

(4) 직접 전단시험 결과 흙만의 단독시험보다는 암과 흙 경계면에서의 c, Φ 값이 암중별로 모두 작게 나왔다. 이렇게 흙만의 전단강도 값보다 경계면에서의 전단강도 값이 더 낮게 나타난 것은 경계면에서의 산사태 붕괴를 더욱 입증시켜 주고 있는 것이라 사료된다.

참고문헌

- 유남재외 1인(2001), "집중호우시 산사태 원인분석에 관한 사례연구", 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 제21권 A호, 303~315.
- 최경(1989), "한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구", 강원대학교, 박사학위 논문.
- 최경(1989), "산사태 예지방법과 예방대책", 임업연구원 연구정보, No. 27. 1~3.
- 김영목(1992), "집중호우로 인한 절토사면의 붕괴조사 및 분석에 관한연구", 대전공업대학 논문집, 제9권 1집, 153~166.
- 이영남(1991), "산사태, 지반공학과 자연재해(II)", 대한지질공학회지, 제7권 제1호, 105~113.
- 김용필외 2인(1997), 지반공학 시험법 및 응용, 37~50, 283~310.
- 임창관. (1999). 화강암과 풍화토 경계면에서의 전단강도 특성. , 중앙대학교 건설대학원 석사학위 논문
- 임창호(2002), "암과 흙 경계면에서의 전단강도 특성 연구", 서울시립대학교 도시과학대학원, 석사 학위 논문.
- Patton, F.D. (1968), The determination of shear strength of rock masses, Paper presented to the terrametric course on measurement systems of control of construction and mining, Denver, Col. 37 p.
- Kanji M.A. (1974). Unconventional Laboratory Tests for the Determination of the Shear Strength of Soil-Rock Contacts. *Proc. of the 3rd Congress of ISRM*. Denver 2, 241-247.
- Hatzor, Y. H. (1997). The shear strength of clay-filled bedding planes in limestones - back analysis of a slope failure in a phosphate mine, Israel, *Eotechnical and Geological Engineering*, Vol.15 No.4, 263-282.