

강우 및 식생에 의한 토질특성 변화 분석

이문세¹ · 김경수^{2*} · 송영석² · 류제천³

¹충남대학교 토목공학과, ²한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ³충청대학 건설교통과

Analyzed Change of Soil Characteristics by Rainfall and Vegetation

Moon-Se Lee¹, Kyeong-Su Kim^{2*}, Young-Suk Song² and Je-Cheon Ryu³

¹Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University

²Geologic Environment Research Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

³Dept. of Civil & Transportation Engineering, Chung Cheong University

이 연구는 산사태와 같은 지반재해를 조래하는 여름철의 집중호우가 실제 토층지반의 토질특성에 어떤 영향을 미치는지를 분석하였다. 이를 위해 표토에 도달되는 강우량이 식생조건에 따라 어떻게 다른지를 조사하였으며, 토층에 침투한 강우로 인해 토질특성이 어떻게 변화되는지를 분석하였다. 연구지역은 식생조건이 다르나 동일한 지질 및 토질조건의 토층지반이 분포한 대덕연구단지내 자연사면이고 연구지역에서 발생한 2006년과 2007년 여름철의 집중호우를 대상으로 하였다. 강우자료는 연구지역에 인근한 대전지방기상청의 관측치를 기초로 하였으며, 식생조건별 강우량은 직접 제작한 강우량측정기를 이용하여 측정하였다. 또한, 집중호우 전 후에 채취한 토층시료를 대상으로 실내 토질시험을 실시하여 강우와 식생조건에 의한 토질특성 변화를 분석하였다. 연구결과 식생밀도는 실제 표토에 도달한 빗물의 양에 영향을 미치며 그 영향정도는 강우강도 및 지속시간에 따라 감소되는 경향성을 보였다. 또한, 집중호우의 영향으로 토층의 포화도, 함수비, 유동성 및 전단강도가 직접적으로 변화되는 것으로 나타났다.

주요어 : 집중호우, 식생조건, 침투, 토질특성

In this study, some changes of soil characteristics in a field were analyzed to investigate the effect of heavy rainfall during rainy season. The heavy rainfalls were often induced geohazards like landslides. To do this, the reaching rainfall in the ground surface was investigated according to a condition of vegetation, and the change of soil characteristics induced by infiltrating rainfall was analyzed. The study site is a natural terrain located in Daedeok Science Complex. This site has same geology and soil condition whereas it has different vegetable condition. The rainfall records during the rainy season of 2006 and 2007 were selected. The rainfall records are based on the measuring date from Daejeon Regional Meteorological Administration adjacent to the study site. Also, the rainfall records according to the condition of vegetation were measured using rainfall measuring device made by ourselves. The soil tests were carried out about soil specimen sampled before and after rainfall, and then the change of soil characteristics related to rainfall and vegetation were analyzed. As the result, the density of vegetation was influenced by reaching rainfall quantity in the ground surface, and its influence intensity was decreased with rainfall intensity and rainfall duration. Also, it shows that degree of saturations, water contents, liquidities and shear resistances are directly influenced by heavy rainfalls.

Key words : heavy rainfall, condition of vegetation, infiltration, soil characteristics

서 론

우리나라는 지리적으로 온대성기후 지역이었으나 점

차 아열대기후로 변해가고 있으며, 여름철인 6월에서 9월까지에 호우가 집중되고 점차 국지성 집중호우의 양상을 보이기 때문에 이 시기에 산사태 등 많은 지반재

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

해가 발생되고 있다(김경수 외, 2006). 이러한 재해는 많은 인명과 재산손실을 초래하고 최근 들어 그 피해가 더욱 급격하게 증가되는 추세에 있다. 집중호우로 인해 산사태가 많이 발생되었던 최근의 기록으로는 2002년 8월 3일간에 걸친 태풍 “루사(Rusa)”의 영향으로 강릉시를 중심으로 한 영동해안지역에서 무려 898 mm의 집중호우를 기록한 바 있는데, 특히 8월 31일에는 우리나라 강우관측사상 최다일강우량인 870.5 mm의 폭우가 쏟아졌으며(기상청, 2002), 그로 인하여 총 3,000여개소에서 크고 작은 산사태가 발생하였다.

이 때 전국적으로는 무려 5조 1,479억원에 달하는 재산피해와 246명의 인명피해가 발생하였으며, 산사태로 인한 직접적 인명피해만도 65명으로 집계되었다(강릉시, 2002; 행정자치부, 2002). 이와 같이 여름철 태풍을 동반한 집중호우는 자연재해의 발생확률을 높게 할 뿐만 아니라 인명과 재산손실을 야기하는 직접적 원인이 되고 있다. 유엔 산하 “기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)”의 보고서에서는 향후 100년간 한반도의 평균기온이 6.4도 정도 높아질 것이며 이로 인해 슈퍼태풍과 기온상승으로 인한 수증의 황폐화를 예측하였다(환경부, 2006). 이러한 기후변화와 산림훼손 등으로 인해 산사태와 같은 지반재해에 저항하는 수목의 자연 억제력은 점차 줄어들 것임은 자명하다.

이처럼 산사태와 같은 자연재해를 야기하는 직접적인 요인이 여름철의 집중호우이고 산사태는 대부분 토층에서 발생되기 때문에 토층을 구성하는 토질특성과 관련이 있다(김경수 외, 2000). 또한, 산사태는 식생조건과도 관계되는 것으로 인식되고 있는데, 이는 집중호우가 발

생할 경우 자연사면을 덮고 있는 수목들의 분포상태에 의해 상부에서 내리는 빗물이 하부지반에 다르게 작용하기 때문이다(이문세 외, 2007). 이러한 관점에서 볼 때, 집중호우시 식생조건이 토층에 미치는 영향과 그로 인한 산사태 등 지반재해 가능성과 관련한 연구가 필요함에도 현재까지 별로 진행된 바 없다. 따라서 이 연구에서는 산사태 등 지반재해에 가장 큰 영향을 미치는 집중호우와 식생조건이 실제로 토질특성의 변화에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다.

이를 위해 우선 1차적으로 강우가 식생조건에 따라 어느 정도 감소하여 표토에 도달하는지를 조사하였으며, 2차적으로는 식생조건에 의해 실제의 강우량보다 줄어든 빗물이 토층에 도달하여 어떤 토질특성에 변화가 발생되는지를 분석하였다.

연구지역

연구지역은 대덕연구단지내 화봉산(226 m)이 위치한 산지지역으로서 활엽수와 침엽수 등이 고루 분포되어 있는 자연사면이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 연구지역은 지형고도가 높지 않고 사면경사는 10~30도 정도로서 완만한 편이어서 강우시에도 현장까지의 접근이 비교적 수월할 뿐만 아니라 강우량측정 및 토층시료 채취 또한 용이한 곳이다. 지질은 화강암이 넓게 분포되어 있는 지역으로서 토층은 전체적으로 점토를 소량 함유한 모래지반으로 SW, SC 및 SW-SC로 분류되고, 투수계수가 $3.77 \times 10^{-3} \sim 5.88 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 의 범위로서 Darcy(1856)에 의하면 보통~빠른 정도의 토층지반으로 평가되었다.

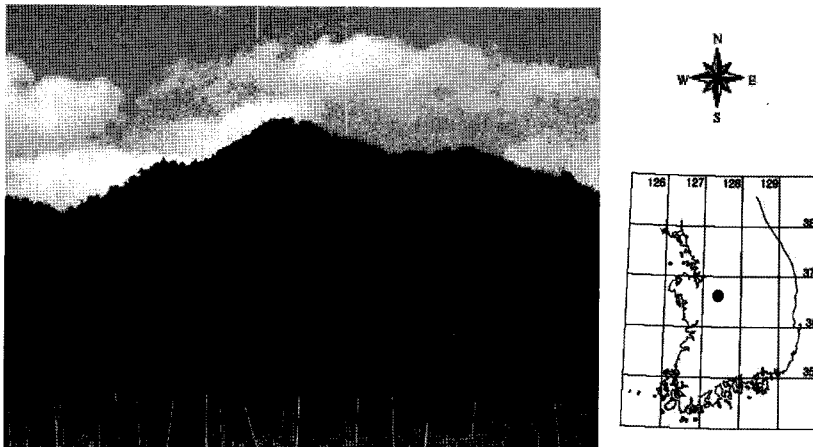


Fig. 1. Location of survey area and photograph at hwabong mountain.

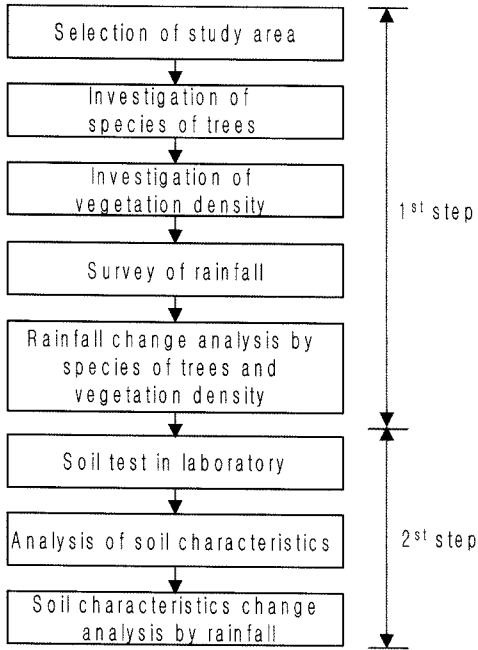


Fig. 2. Flow chart of investigation and analysis method.

연구방법

지질 및 토질조건, 식생분포상태, 강우자료취득, 현장 접근성 등의 여건을 고려하여 연구지역을 선정하였다. 1단계는 현장조사 단계로서 식생의 종류 및 분포밀도, 강우량측정 및 강우자료 수집, 집중호우 발생 전후의 토층시료 채취 등을 통해 강우가 수종과 식생밀도에 따라 어느 정도 감소하여 토층에 도달되는지를 조사하였다. 그리고 2단계는 결과분석 단계로서 강우자료 분석, 시험 및 시

험결과 분석, 강우 및 식생조건과 토질특성 분석 등을 통해 식생조건에 의해 실제 강우량보다 줄어든 빗물이 토질특성 변화에 어떤 관련성이 있는지를 분석하였다. Fig. 2는 이러한 연구과정을 흐름도로 나타낸 것이다.

식생조건 구분

식생의 종류에 따라 실제 내린 강우량과 토층에 도달되는 강우량의 차이를 알아보기 위해 비슷한 밀도조건으로 분포되어 있는 침엽수, 활엽수 및 혼효림으로 구분되는 지역을 각각 선정하였다. 식생조건은 수목이 분포한 밀도를 기준으로 하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 하절기에 잎이 무성할 때 3m×3m 넓이에 대한 수목의 가지와 잎이 차지하는 넓이의 비로 표현하였으며, 20% 미만, 21~50%, 51~80%, 그리고 81% 이상의 4가지 경우로 구분하였다. 측정의 편의를 위해 수종별 및 밀도별로 구분하여 대표적인 위치에 강우량측정기를 설치하여 강우량을 측정하였다.

강우량 측정

집중호우가 발생했을 때 토층에 흡수되는 빗물의 정도는 식생의 밀도나 종류에 의해 변화되기 마련이므로 앞에서 구분한 방법에 따라 식생조건별로 각각의 강우량측정 대상지역에 Fig. 4와 같은 강우량측정기를 설치하고 강우량을 측정하였다(한국수자원공사, 2006). 강우량측정기는 아크릴로 제작된 직경 20cm 높이 30cm 크기의 투명원통을 이용하여 누적된 강우량을 시간당 높이의 비로 측정하였다. 강우량측정기가 놓인 위치에 따라서 누적강우량이 다를 것이기에 식생밀도를 구분하기 위한 기본면적을 3m×3m 넓이로 하여 기본면적당 3개의 강우관측기를 설치하여 그 기록을 평균하였다.

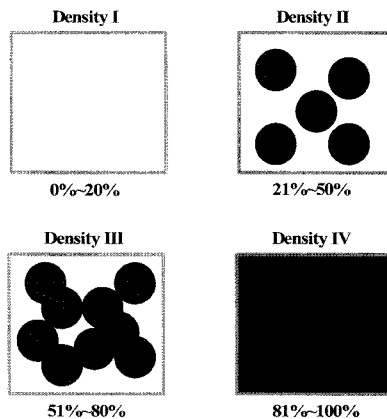
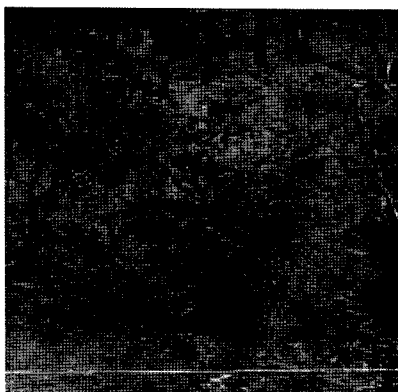


Fig. 3. Method of measuring vegetation density.

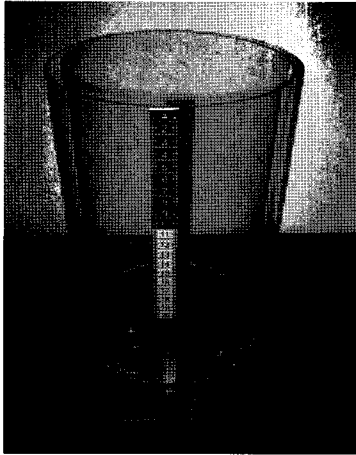


Fig. 4. Rainfall measuring device.

토질특성 분석

강우와 토질특성간의 관련성을 분석하기 위해 집중호우가 발생되기 전과 후에 연구지역의 토질특성이 잘 반영되도록 침엽수 분포지역의 지정된 위치에서 4가지 경우의 식생밀도별로 3개씩 총 12개의 토층시료를 채취하였다. 시료는 표토를 제거한 후 동일한 조건으로 20 cm 깊이의 토층에서 불교란시료를 채취하였다. 불교란시료는 스테인리스로 제작한 직경 10 cm, 높이 5 cm 크기의 원통형몰드를 이용하였으며, 특히 투수시험용 불교란시료는 직경 10 cm, 높이 13 cm 크기의 원통형몰드를 사용하였다. 모든 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉한 상태로 실험실에 운반하였다.

KS 시험기준에 따라 자연함수비, 밀도, 액성한계, 소성한계, 단위중량, 간극비 및 간극율을 측정하였으며, 입도시험을 통해 유효경(D_{10}), 균등계수(C_u) 및 곡률계수(C_g)를 산정하였다. 그리고 변수위투수시험과 직접전단 시험을 실시하여 투수계수와 전단강도를 구하였다.

실제 산사태 등의 지반재해에 직접적인 영향을 주는 토질인자는 함수비, 간극율, 투수계수 및 전단강도 등을 들 수 있는데(김경수, 2005), 집중호우로 인해 토층에서 함유수분의 정도에 따라 지반지력 저하의 요인이 될

수 있는 유동성과 전단강도를 검토하였다. 강우가 발생되기 전후에 토층의 유동성의 변화를 분석하기 위해 액성한계시험을 응용한 방법으로써 강우상태의 함수비조건으로 시료를 조제하여 황동접시에 시료를 장착한 후 흡파기날에 의해 분리된 시료가 1 cm 길이로 접합될 때의 낙하 횡수를 측정하였다. 한편, 전단강도의 경우 전단저항각 또는 점착력의 변화 폭이 미미하여 그 변화량을 정확히 파악하기 어렵기 때문에 전단파괴시 얻어지는 파괴포락선의 최고 전단저항값을 측정하여 상대적으로 비교분석하였다.

식생조건에 따른 강우의 토층흡수 변화

식생종류에 따른 변화

식생의 종류에 따라 실제 강우가 토층에 도달되기까지의 차이를 알아보기 위해 유사한 밀도조건인 침엽수, 활엽수 및 혼효림으로 나누어진 3개소에 강우량측정기를 설치 후 2006년 7월 16일부터 18일까지 3일간에 걸쳐 집중호우시 강우량을 측정하였다. 식생종류에 따라 수목을 통과하여 토층에 떨어진 측정결과는 Table 1에서 보는 바와 같다.

강우량 측정결과, 식생종류에 따라 강우강도의 차이는 크지 않으나 7월 16일 11 mm/h의 강우시 침엽수지역에서 나무를 통과한 강우는 3 mm/h로 측정되었고 17일에는 32 mm/h의 강우시 23 mm/h, 그리고 18일에는 23 mm/h의 강우시 12 mm/h인 것으로 측정되었으며, 활엽수 및 혼효림지역에서도 유사한 경향성을 보였다. 이는 수목들이 우산효과로 작용함으로써 실제 강우량보다 토층에 떨어지는 강우량이 더 적음을 보여주는 결과이다. 식생의 종류에 따른 차이점을 살펴보면, 침엽수에 비해 활엽수와 혼효림이 상대적으로 강우에 대한 우산효과가 더 큰 것으로 나타났다. 한편, Fig. 5에서 보는 바와 같이 강우량이 많지 않을 때는 수종에 따른 우산효과와의 차이가 거의 없는 것으로 나타났으나 강우량이 증가할수록 활엽수와 혼효림에 의한 우산효과가 상대적으로 더 크게 나타나는 경향성을 보였다.

Table 1. Reaching rainfall quantity in ground surface as tree species.

Date	Rainfall (mm/h)	Ground	Needle-leaf tree	Broad-leaf tree	Mixing-leaf tree
16 July, 2006		11	3	3	3
17 July, 2006		32	23	20	19
18 July, 2006		23	12	11	11

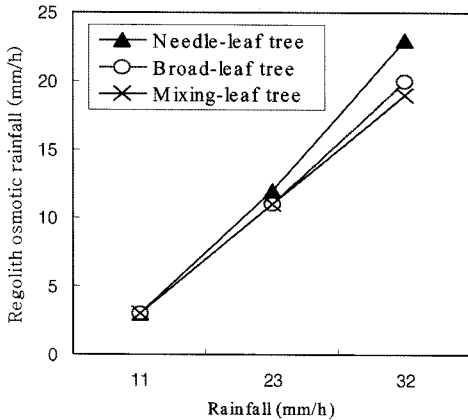


Fig. 5. Relationship between rainfall in ground surface and tree species.

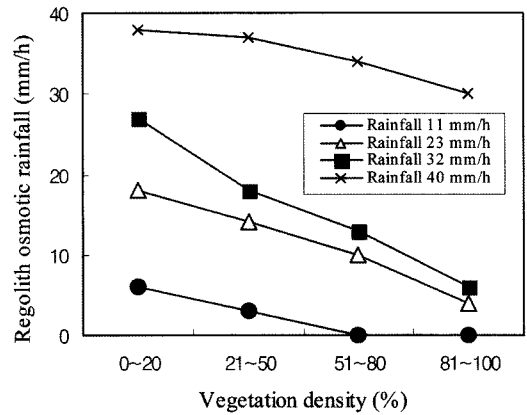


Fig. 6. Relationship between rainfall quantity in ground surface and vegetation density.

식생밀도에 따른 변화

식생종류별 강우변화와 마찬가지로 식생의 밀도에 따라 실제 강우가 토층에 흡수되기 전까지의 차이를 살펴 보기 위해 연구지역에서 가장 넓은 분포비율을 점하고 있는 침엽수지역에서 2006년 7월 16일부터 18일까지의 집중호우시 강우강도와 식생밀도에 따라 수목을 통과하여 토층에 떨어지는 강우의 변화를 조사한 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다.

Table 2는 식생밀도와 강우량에 따라 수목을 통과하여 측정된 강우량을 나타낸 것으로서 식생밀도에 따라 표토에 도달될 수 있는 강우량이 분명히 차이가 있음을 보여준 결과이다. 식생밀도가 높을수록 수목이 더 많은 우산역할을 함으로써 표토에 도달하는 강우의 양은 적어지고 반대로 식생밀도가 낮을수록 수목에 의한 우산 효과는 적어짐으로써 표토에 도달하는 강우량이 많아지게 되는데, 이를 그림으로 나타낸 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 4가지 경우로 구분한 식생밀도에서는 32 mm/h의 강우시 실제 강우량의 약 25%만 표토에 도달하는 것으로 나타남으로써 이 정도의 강우 강도는 토층사면의 안정성에 크게 영향을 미치지 않을

Table 2. Reaching rainfall quantity in ground surface as a vegetation density.

Vegetation density (%)	Rainfall quantity in ground surface (mm/h)			
0~20	6	18	27	38
21~50	3	14	18	37
51~80	0	10	13	34
81~100	0	4	6	30
Ground	11	23	32	40

것임을 짐작케 한다. 그러나 2006년 7월 17일에는 연구 지역에서 시간당강우량이 40 mm 정도로 1시간 이상 발생하였는데, 이 경우에는 식생상태에 따른 우산효과가 현저히 감소하고 밀도비율에 상관없이 내리는 비의 대부분이 표토에 도달함으로써 식생밀도의 영향이 크게 작용하지 않은 것으로 분석되었다.

강우로 인한 토질특성 변화

집중호우시 실제 토층에 흡수되는 빗물의 양에 따라 변화하는 토질특성들을 파악하기 위해 집중호우가 발생되기 전에 4가지 경우의 식생밀도별로 구분하여 3개씩 총 12개 토층시료를 채취하였다. 그리고 동일한 지점에서 강우강도 30 mm/h의 집중호우가 발생한 직후인 2007년 9월 1일에 같은 방법으로 토층시료를 채취하였다. 채취한 토층시료에 대해서는 실험실에서 비교 가능한 여러 토질시험들을 실시하였으며, 그 결과를 정리하여 Table 3 및 4에 나타내었다.

함수비 및 포화도 변화

집중호우 전 후의 토층시료에 대한 함수비 및 포화도 시험결과를 4가지 경우의 식생밀도별로 구분하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 함수비 및 포화도는 강우량이 증가함에 따라 토층에 빗물의 침투량이 증가함으로써 비례적으로 증가하는 현상을 보였다. 그리고 식생밀도에 따른 변화양상을 살펴보면, 식생밀도가 높은 IV지역(81~100%)의 함수비 및 포화도의 변화폭이 식생밀도가 낮은 I지역(0~20%)에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 집중호

Table 3. Physical and engineering properties of soils before rainfall.

Sample No.	G_s	Atterberg limits (%)					D_{10} (cm)	C_u	C_g	USCS	e	S_r (%)	Unit weight (g/cm ³)			k (cm/sec)	Shear strength		Vegetation density
		w (%)				Wet							Sat.	dry	C (kg/cm ²)		ϕ (°)		
			LL	PL	PI														
b D1-01	2.63	29.57	32.12	22.64	9.48	0.148	6.5	1.1	SW	1.42	54.78	1.41	1.68	1.09	8.99E-03	0.23	33.5	I (0~20%)	
b D1-02	2.67	25.57	33.30	23.55	9.75	0.205	11.2	1.7	SW-SC	1.29	52.46	1.47	1.73	1.17	4.75E-02	0.29	34.2		
b D1-03	2.61	17.74	35.59	25.23	10.36	0.150	11.3	1.4	SW-SC	0.89	52.21	1.63	1.85	1.38	9.20E-03	0.37	34.1		
b D2-01	2.66	13.26	29.15	22.49	6.66	0.200	9.5	1.6	SW-SC	0.98	36.21	1.53	1.84	1.35	4.75E-02	0.53	32.4	II (21~50%)	
b D2-02	2.62	27.61	34.69	23.20	11.50	0.195	8.7	1.6	SW-SC	1.47	49.12	1.35	1.66	1.06	3.70E-02	0.27	34.7		
b D2-03	2.60	27.00	28.86	21.58	7.28	0.160	9.7	1.5	SW-SC	0.97	72.06	1.67	1.81	1.32	3.97E-03	0.64	30.3		
b D3-01	2.67	29.01	34.39	23.93	10.46	0.425	6.1	1.0	SC	1.50	51.43	1.38	1.67	1.07	5.88E-02	0.71	35.2	III (51~80%)	
b D3-02	2.68	27.99	32.65	24.06	8.59	0.240	9.2	1.4	SC	1.38	54.17	1.44	1.70	1.12	4.17E-02	0.34	32.1		
b D3-03	2.67	13.54	31.74	24.85	6.88	0.165	9.1	1.5	SW	0.67	54.65	1.82	2.00	1.60	3.77E-03	0.35	31.4		
b D4-01	2.61	17.31	27.32	20.12	7.19	0.150	8.7	1.4	SW	0.89	38.13	1.40	1.74	1.20	3.75E-02	0.51	31.1	IV (81~100%)	
b D4-02	2.65	23.68	38.64	22.95	15.69	0.245	6.9	1.3	SW-SC	1.23	51.16	1.47	1.74	1.19	4.73E-02	0.39	33.8		
b D4-03	2.64	12.09	24.47	13.50	10.97	0.200	7.0	1.5	SW	0.64	49.93	1.81	2.00	1.61	5.69E-02	0.58	30.6		

Table 4. Physical and engineering properties of soils after rainfall.

Sample No.	G_s	Atterberg limits (%)					D_{10} (cm)	C_u	C_g	USCS	e	S_r (%)	Unit weight (g/cm ³)			k (cm/sec)	Shear strength		Vegetation density
		w (%)				Wet							Sat.	dry	C (kg/cm ²)		ϕ (°)		
			LL	PL	PI														
a D1-01	2.64	45.12	31.23	22.63	8.60	0.151	6.8	1.2	SW	1.46	70.33	1.43	1.71	1.11	1.05E-02	0.24	33.0	I (0~20%)	
a D1-02	2.67	41.33	34.15	23.00	11.15	0.208	11.8	1.6	SW-SC	1.33	70.12	1.47	1.75	1.18	5.60E-02	0.33	33.8		
a D1-03	2.62	33.45	35.02	25.10	9.92	0.150	10.9	1.3	SW-SC	0.92	68.33	1.65	1.87	1.41	1.06E-02	0.30	34.2		
a D2-01	2.66	25.12	29.66	22.15	7.51	0.204	9.4	1.5	SW-SC	1.02	41.56	1.54	1.86	1.36	5.31E-02	0.49	33.4	II (21~50%)	
a D2-02	2.62	37.69	34.93	22.93	12.00	0.198	8.2	1.6	SW-SC	1.56	54.30	1.36	1.68	1.07	4.12E-02	0.26	34.2		
a D2-03	2.61	38.02	29.45	22.35	7.10	0.163	10.0	1.6	SW-SC	1.03	79.12	1.68	1.84	1.32	4.51E-03	0.57	31.2		
a D3-01	2.66	36.44	34.02	24.02	10.00	0.240	6.2	1.1	SC	1.55	55.12	1.40	1.69	1.08	6.08E-02	0.62	35.0	III (51~80%)	
a D3-02	2.68	35.12	33.63	24.00	9.63	0.283	9.0	1.3	SC	1.43	56.75	1.40	1.72	1.14	6.19E-02	0.30	31.6		
a D3-03	2.66	22.03	32.50	25.03	7.47	0.193	8.9	1.6	SW	0.69	58.13	1.80	2.02	1.59	5.41E-03	0.34	31.8		
a D4-01	2.62	20.12	26.93	20.36	6.57	0.160	8.6	1.4	SW	0.91	39.44	1.42	1.76	1.21	4.02E-02	0.58	30.2	IV (81~100%)	
a D4-02	2.66	25.99	39.44	22.36	17.08	0.243	7.0	1.3	SW-SC	1.26	52.96	1.46	1.76	1.20	4.52E-02	0.42	32.9		
a D4-03	2.66	16.33	25.45	14.23	11.22	0.213	6.8	1.5	SW	0.65	51.63	1.80	2.01	1.60	6.02E-02	0.52	31.2		

G_s , density; w , natural moisture content; LL , liquid limit; PL , plastic limit; PI , plasticity index; D_{10} , effective size; C_u , uniformity coefficient; C_g , coefficient of gradation; USCS, unified soil classification system; e , void ratio; S_r , Degree of saturation; k , coefficient of permeability; C , cohesion; ϕ , angle of shearing resistance; I, vegetation density 0~20%; II, vegetation density 21~50%; III, vegetation density 51~80%; IV, vegetation density 81~100%.

우시 식생밀도에 따라 수목에 의한 우산효과가 다르게 나타남으로써 토층에 미치는 영향도 다르게 나타남을 보여주는 결과이다.

전단강도 변화

평소에는 안정된 지반이더라도 집중호우 등으로 인해 토질특성이 변화되고 안정성이 소실되어 지지력이 급격히 저하됨으로써 산사태와 같은 지반재해가 발생되는데,

그 가장 대표적인 토질특성이 바로 전단강도 저하라고 할 수 있다. 이 연구에서는 포화도에 따른 전단강도의 변화를 알아보기 위해 가장 보편적으로 이용되고 있는 직접전단시험을 실시하였다. 그러나 집중호우 전과 후의 토층시료에 대한 시험결과 전단강도정수 즉, 전단저항과 및 점착력의 변화가 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 시험방법상의 문제로서 실제 직접전단시험의 경우 3단계의 수직하중을 주어 mohr circle 이론

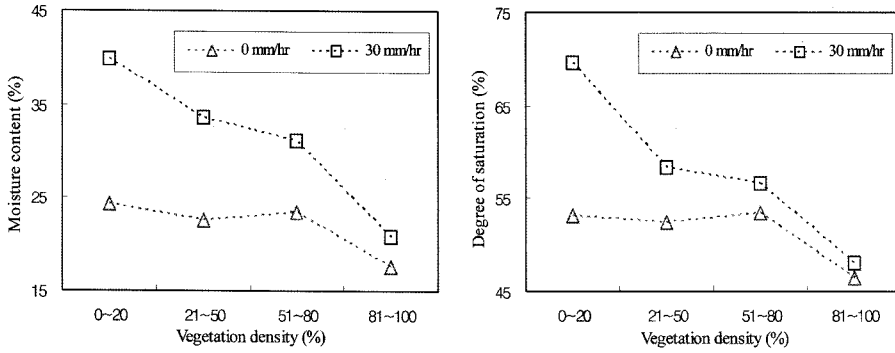


Fig. 7. Relationship between moisture content, degree of saturation and vegetation density by rainfall: (a), moisture content; (b), degree of saturation.

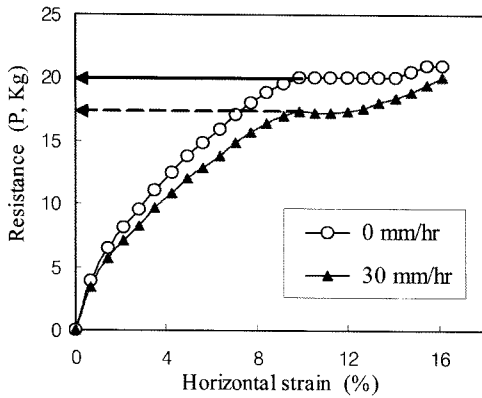


Fig. 8. Relationship between shear resistance and rainfall density.

에 의한 강도정수를 기하학적으로 산정하는 방법(Holtz, 1956)이기 때문에 토층시료의 포화도에 따른 변화폭이 적을 수밖에 없다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 직접전단시험법을 응용하여 보다 변별력 있는 수치로 전단강도를 표현하고자 하였다. 시험방법은 집중호우 전과 30 mm/h의 집중호우 후의 포화도가 다른 각각의 토층시료를 전단시험기에 거치하고 파괴현상에 영향이 큰 수직하중을 재하하지 않은 상태에서 1회 파괴하여 얻어지는 파괴포락선의 최고치 즉, 최고전단저항치(P_{max})를 측정하여 변별력이 부족한 전단저항각을 대신하였다(Fig. 8).

한편, 이러한 방법으로 구한 최고전단저항치(P_{max})를 4가지 경우의 식생밀도별로 구분하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 4가지 경우의 식생밀도별 강우강도의 차이 즉, 빗물의 침투에 따라 전단저항치에 차이가 있는 것으로 나타났다. 집중호우 전의 시료에

비해 집중호우가 있는 후의 모든 시료에서 전단저항치가 작은 결과치를 보였는데, 이는 집중호우로 인해 함수비와 포화도가 증가하면 전단강도가 저하됨으로써 지반 안정성이 더 취약할 수 있음을 보여주는 결과로 해석된다. 또한, 식생밀도에 따라 전단강도도 함수비 및 포화도의 경우와 동일한 경향성을 보였으며, 우산효과에 의해 식생밀도가 높은 IV지역(81~100%)의 전단저항치 감소 폭이 식생밀도가 낮은 I지역(0~20%)에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

이는 동일한 토층에서 식생밀도가 높은 지역은 낮은 지역에 비해 빗물의 침투가 상대적으로 적어짐으로 인해 집중호우시 산사태와 같은 지반재해에 덜 취약할 수 있음을 의미하는 결과로 해석된다.

유동성 변화

산사태 등의 지반재해에 직접적인 영향을 주는 인자로서 강우량에 따라 좌우되는 토층의 유동성을 파악하

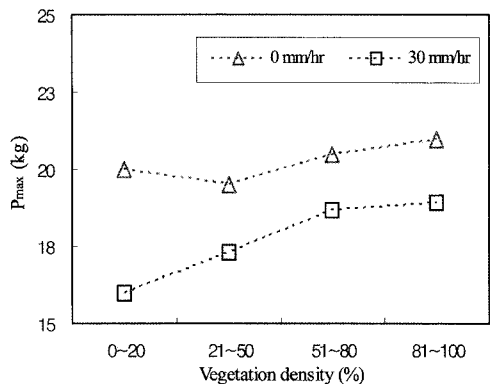


Fig. 9. Relationship between shear resistance and vegetation density.

기 위해 액성한계시험법을 응용한 시험을 실시하였다. 토질 물성으로 유동지수(flow index)가 있으나 실제 시험결과치를 비교한 결과 전단강도 경우와 같이 함수비에 따른 변별력이 떨어졌는데, 이는 추세선에 의해 액성한계를 구하는 시험방법상의 문제점에서 기인된 결과이다. 따라서 지반이 강우에 의해 액성상태로 접근하는 수준을 알아보고자 유동성을 구할 수 있는 척도로서 액성한계시험법을 그대로 이용하되 전단강도에서와 마찬가지로 최종 결과치의 선정방법만을 다르게 하였다. 즉, 시험방법은 강우량을 고려하여 토층시료에 물을 증가시키며 함수비를 조절한 후 액성한계시험기에 장착하고 흙파기날로 시료를 반으로 가른 뒤 황동그릇을 낙하하여 낙하횟수 1회일 때 시료가 1 cm 접합될 때의 함수비를 측정하는 방법으로 구하였다. 이는 동일한 충격에너지를 줄 경우 함수비에 따라 보다 유동성을 갖는 시료가 더 빨리 접합되는 점을 응용한 시험방법으로 이에 따라 토층시료의 유동성을 시험하였다. Fig. 10은 빗물이 침투하여 함수비가 증가할수록 낙하횟수(N)는 작아지는 현상 즉, 유동성이 증가하는 양상을 표현한 것으로 식생밀도에 따른 유동성의 변화양상도 함수비, 포화도 및 전단강도 등과 마찬가지로 식생밀도가 높을수록 수목의 우산효과로 인해 토층의 유동성이 적은 것으로 나타났다. 특히, 연구지역의 토층은 40 mm/h 이상부터 유동성이 상대적으로 급격하게 변화될 뿐만 아니라 40 mm/h 이상의 집중호우시는 식생밀도의 영향을 거의 받지 않기 때문에 내리는 비의 모든 량이 지표에 도달함을 알 수 있다. 이러한 결과에서 보듯 40 mm/h 이상의 집중호우시는 토층의 유동성이 급격하게 증가되고 지반지력역이 저하됨으로써 산사태와 같은 지반재해에 더 취약할 것으로 해석된다.

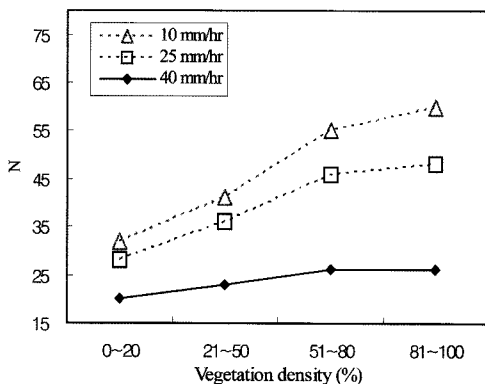


Fig. 10. Relationship between liquidity and vegetation density.

결 론

이 연구는 여름철의 집중호우시 산지에 분포한 식생 조건으로 인해 하부지반인 표토에 얼마나 도달되는지, 그리고 토층에 침투한 빗물이 토질특성에 어느정도 변화를 초래하는지를 분석하였다. 또한, 이러한 식생조건에 따른 침투양상과 토질특성의 변화가 산사태와 같은 지반재해에 어떻게 관련되는지를 검토하였다. 이 연구는 연구지역과 유사한 식생 및 토질조건을 가지는 지역에서 집중호우가 발생할 경우 지표에 흡수될 강우양상, 토질특성의 변화, 그리고 산사태와 같은 지반재해 취약성을 예측하는데 기초자료로 활용 가능할 것이다.

1) 자연사면에 집중호우가 발생할 경우 수목들의 우산효과로 인해 실제 강우량보다 더 적은 강우량이 표토에 도달된다. 이러한 우산효과는 적은 강우량일 때는 별 차이가 없으나 강우량이 증가할수록 침엽수에 비해 활엽수와 혼효림지역에서 상대적으로 더 크다.

2) 식생밀도가 높을수록 우산역할이 증대됨으로써 표토에 도달되는 강우량은 적어진다. 그러나 강우강도가 40 mm/h 이상으로 클 경우에는 식생상태에 따른 우산효과가 현저히 줄어들고 강우량의 대부분이 표토에 도달함으로써 강우강도가 크고 강우지속시간이 길수록 우산효과는 감소된다.

3) 토층지반에서 함수비, 포화도 및 유동성은 강우량이 증가할수록 비례적으로 증가하는 현상을 보였으며, 이들의 변화폭은 식생밀도가 높은 지역에서 상대적으로 적은 것으로 분석되었다. 특히, 시간당강우량이 40mm 이상인 집중호우시는 토층의 유동성이 급격하게 증가되고 지반지력역이 저하됨으로써 산사태와 같은 지반재해에 더 취약할 수 있다.

4) 집중호우가 있는 후의 토층지반은 빗물의 영향으로 전단강도가 저하되었으며 전단강도 감소 폭은 식생밀도가 높은 지역이 낮은 지역에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 이는 동일한 토질조건에서 식생밀도가 높은 지역은 낮은 지역에 비해 빗물의 침투가 상대적으로 적기 때문에 집중호우시 산사태와 같은 지반재해에 덜 취약할 수 있다.

사 사

본 연구는 2006 건설기술혁신사업인 '국가 주요시설물 안전관리 네트워크 시범구축 및 운영시스템 개발'의 세부협동과제인 'GIS기반 급경사지 재해위험 취약지구 선정기법 연구'의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

강릉시, 2002, 제15호 태풍 “루사” 피해복구계획, 강릉시
 기상청, 2002, 기상연보, 기상청.
 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도보은지역-, 지질공학, 10, 2, 163~174.
 김경수, 2005, 산사태지역 자연사면의 지질별 토질특성 및 상관관계 분석, 지질공학, 17, 2, 205~215.
 김경수, 송영석, 조용찬, 김원영, 정교철, 2006, 지질조건에 따른 강우와 산사태의 특성분석, 지질공학, 16, 2, 201~214.
 이문세, 임희대, 김경수, 송영석, 2007, 강우에 따른 토질 특성 변화 분석, 춘계 지질과학기술 공동학술대회, 283~285.
 한국수자원공사, 2006, 강수량 및 하천수량 측정방법, 한국수자원공사.
 행정자치부, 2002, 재해연보, 행정자치부.
 환경부, 2006, 기후변화에 의한 한반도 영향 예측사례, 환경부.
 Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Digon, Dalmont, Paris.
 Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils, Soil Mechanics and Foundation. Div., ASCE, 82, SM1, 867p.

김경수

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
 305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
 Tel: 042-868-3054
 Fax: 042-861-9723
 E-mail : kks@kigam.re.kr

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
 305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
 Tel : 042-868-3035
 Fax : 042-861-9723
 E-mail : yssong@kigam.re.kr

류제천

충청대학 건설교통과
 363-792 충북 청원군 강내면 월곡리 330
 Tel: 043-230-2310
 Fax: 043-230-2319
 E-mail : ryu-jecheon@hanmail.net

2009년 2월 7일 원고접수, 2009년 3월 23일 게재승인

이문세

충남대학교 토목공학과
 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220
 Tel: 042-868-3068
 Fax: 042-861-9723
 E-mail : eoehchr@hanmail.net