

통계기법에 의한 산사태발생지역 이암 풍화토층의 토질특성 분석

Characteristics Analysis of Mudstone Weathered Soils in the landslide Area using Statistical Technique

황의순¹, 정대석², 김경수^{3*}, 이문세⁴, 송영석⁵

Eui-Soon Hwang¹, Dae-Seouk Chung², Kyeong-Su Kim^{3*}, Moon-Se Lee⁴, Young-Suk Song⁵

¹Non-Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Joongbu University., 101, Daehang-Ro, Chubu-myeon, Geumsan-gun, Chungnam 312-702, Republic of Korea

²Non-Member, Professor, Department of Civil Engineering, Joongbu University., 101, Daehang-Ro, Chubu-myeon, Geumsan-gun, Chungnam 312-702, Republic of Korea

³Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Gwahang-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

⁴Non-Member, Principal Researcher, Research & Development Team, National Forestry Cooperative Federation, 1800, Dongsuro, Daeduk-gu, Daejeon, Republic of Korea

⁵Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124, Gwahang-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, the properties of mudstone weathered soils related to landslides were analyzed at the area of landslide induced by heavy rainfall in Pohang. The soil tests were carried out to the soils obtained from landslide and non landslide sites, and the soil properties were investigated. The correlation between soil properties and landslides were analyzed using statistical technique, and then the soil factors were extracted from the correlation analysis. The correlation equation which can calculate the coefficient of permeability influenced on landslides was proposed using the soil factors. As the result of analysis, the porosity and unit weight of soils from the landslide area is smaller than those of soils from the non landslide area. The soils with poor grain size distribution and loose unit weight are prone to landslides because the soils have a large void ratio and a low unit weight. The permeability of soils from the landslide area is larger than that of soils from the non landslide area. According to the result of correlation analysis, the effective grain size, the saturated unit weight and silt and clay contents are evaluated as the influence factors. These factors were considered to estimate the coefficient of permeability of mudstone weathered soils.

요 지

이 연구는 집중호우로 인해 산사태가 집중적으로 발생한 포항지역 이암 풍화토층을 대상으로 산사태와 관련한 토질특성을 분석하였다. 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분한 토층시료에 대해 토질시험을 실시하고 제반 토질특성을 파악하였다. 그리고 통계적 기법으로 토질특성과 산사태 간의 상관성을 분석하여 산사태와 상관성이 있는 토질인자를 추출하였다. 또한, 이들 토질인자를 적용하여 산사태에 유의한 영향요소인 투수계수를 쉽게 산정할 수 있는 상관식을 제안하였다. 연구결과, 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해서 간극률이 크고 밀도는 작은 것으로 나타났다. 그리고 입도가 불량하고 느슨한 토층지반은 특징적으로 큰 간극과 작은 밀도를 지니므로써 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 또한, 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 다소 큰 투수성지반인 것으로 나타났다. 한편, 상관성분석 결과 유효경, 간극비, 포화단위중량, 및 세립함유량이 투수계수에 유의한 영향인자인 것으로 평가됨으로써 이들 토질인자는 이암 풍화토층의 투수계수산정시 고려되어야 할 토질인자인 것으로 평가되었다.

Keywords : Landslide, Mudstone weathered soil, Soil characteristics, Permeability coefficient, Correlation model

Received 28 Aug. 2013, Revised 23 Sep. 2013, Accepted 23 Sep. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-42-868-3054; Fax: +82-42-868-3414

E-mail address: kks@kigam.re.kr (K. S. Kim)

1. 서론

대규모 토목공사 등으로 사면지역에서의 개발이 급격히 증가되고 있으며, 이로 인해 집중호우시 불안정한 사면에서는 산사태가 많이 발생되고 그 피해규모도 크게 증가되는 추세에 있다. 산사태들은 대부분 암반층 위 토층에서 발생하기 때문에 산사태에 있어서 토질특성을 파악하는 것은 매우 중요하다(Kim et al., 2000; Hutchinson, 1988). 그리고 토층은 기반암 상부의 풍화잔류토와 퇴적물질 및 일부 풍화암편으로 구성되는데, 이들 물질들은 산사태가 일어나는 지역의 지질과 연관성을 가지며, 풍화잔류토나 퇴적물질은 산사태지역의 암석풍화에 의하여 생성되므로 암석을 구성하고 있는 광물성분에 따라 토질특성이 다르게 나타난다(Kim et al., 2000, Kim, 2007). 그러므로 자연사면을 대상으로 산사태 발생가능성을 예측할 경우에도 지질조건을 고려하여 수행되어야 할 것이다(Chae et al., 2004; Song et al., 2007). 이 연구에서는 집중호우로 인해 산사태가 집중적으로 발생한 이암 풍화토층을 대상으로 산사태와 관련한 토질특성을 분석하였다. 연구지역은 포항지역으로서 대부분 제3기퇴적암으로 분류되는 이암풍화토층이 분포한 자연사면이다. 토질특성과 산사태간의 상관성분석을 위해 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 토층시료를 채취하여 토질시험을 실시하였다. 그리고 시험결과를 이용하여 통계기법으로 산사태와 상관성이 있는 토질인자를 추출하였다. 또한, 물성자료를 적용하여 산사태에 유의한 영향인자인 투

수계수를 쉽게 산정할 수 있는 상관식을 제안하였다.

2. 연구지역

연구지역에서는 1998년 7월 25~26일 이틀간에 걸쳐 약 150mm에 달하는 집중호우가 발생되었으며, 이로 인하여 총 283개의 산사태가 발생한 것으로 조사되었다(Kim et al., 2005). 연구지역은 광역적으로 볼 때 백악기퇴적암류 중 제3기퇴적암류로 분류되는 지역으로서 주로 이암이 폭넓게 분포하고 있는 곳이다. 일반적으로 이암은 풍화에 취약하고 특히, 층리가 잘 발달되어 있으며 수분을 흡수하면 잘게 부서지는 특성을 갖고 있기 때문에 산사태에 매우 취약하다(Kim et al., 2003). Lee et al.(2002)은 풍화에 민감한 이암은 강우, 강설 등의 외적조건에 의해 비화작용(slaking) 및 팽윤현상(swelling)이 발생하여 공학적 성질에 영향을 주는데, 특히 강도와 압축특성에 변화가 발생됨으로써 강우로 인하여 산사태가 많이 발생할 수 있음을 보고하였다. 이 지역에서 발생한 산사태들의 유형은 주로 전이형슬라이드로 시작되어 하부로 진행하면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다. 그리고 대부분 평탄사면에서 발생하여 산사태의 길이가 짧고 사태물질 또한 계곡보다는 주로 사면을 따라 흘러내려 평지에 쌓이는 형태를 보였다. 한편, 토층의 두께는 대부분이 50cm 미만으로서 매우 얇은 특징을 보였는데, 이는 풍화 및 강우 등에 의해 잔류토나 붕적토로 구성되는 토층이 쉽게 침식을 받기 때문이다(Kim, 2005). Fig. 1은

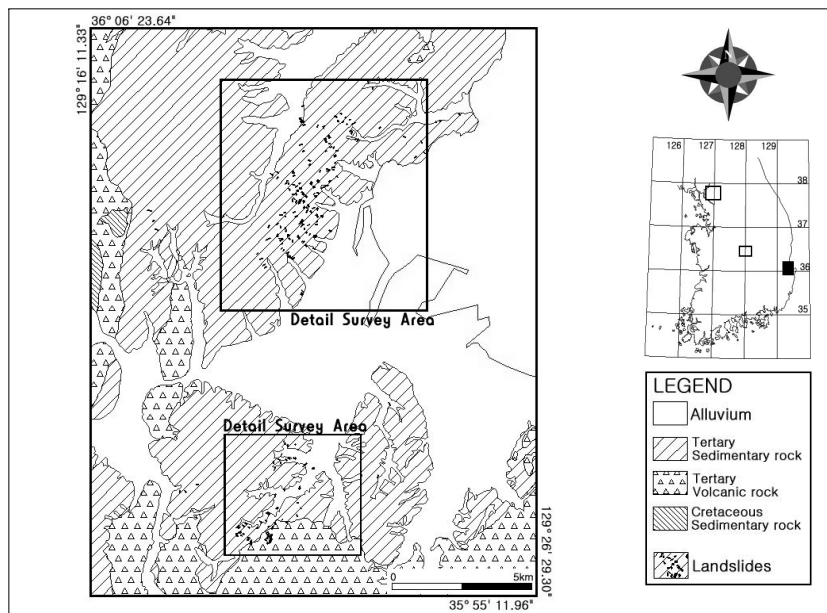


Fig. 1. Survey area and landslides on the geological map of study area (after geological map: Um, S. H. et al., 1964)



(a)



(b)

Fig. 2. Examples of landslide events in study area: (a), Weathering progress due to surface exposure in bedrock; (b), Small scale landslides

연구대상지역의 지질분포 및 산사태발생위치를 나타낸 것이다.

Fig. 2는 연구지역에서의 노두상태와 산사태의 양상을 나타낸 것으로, (a)에서 보는 바와 같이 산사태로 인해 상부토층이 침식된 후 노출된 암반들은 많은 크랙(crack)의 발달과 함께 잘게 부서지는 비화작용에 의해서 풍화가 쉽게 진행되고 있음을 알 수 있다. 한편, (b)는 산사태가 높지 않은 사면에서 발생하여 사태물질이 사면을 따라 하부로 진행되었음을 보여주는 소규모의 산사태들이다. 이처럼 표토가 쉽게 풍화되는 지질조건과 사면이 낮으면서도 급경사를 이루는 지형조건으로 인해 대부분의 산사태들은 그 깊이가 매우 얇고 길이가 짧은 소규모적 산사태임이 특징적으로 관찰된다.

3. 시료채취 및 토질시험

자연사면에서 토층의 토질특성을 이해하기 위해서는 토질시험자료가 필요하다. 토층에서 발생하는 산사태들은 그 사면을 구성하고 있는 토층물질의 토질특성과 직접적으로 관계가 있다. 특히, 우리나라와 같이 주로 집중호우에 의해 발생하는 산사태들의 경우 토층의 기본적인 물리적 특성 외에 간극이나 밀도, 투수성 및 전단강도와 같은 공학적 특성과 관련되므로 이들에 대한 시험방법과 그 결과들의 적용방법 등을 이해하는 것은 매우 중요한 사항이다. 산사태와 토질특성 간의 상관성에 주안점을 두고 산사태 발생지역과 미발생지역의 토질특성을 비교분석하기 위해 집중호우로 인해 산사태가 집중적으로 발생한 자연사면, 그리고 산사태와 인접한 미발생지역 자연사면에서 토



Fig. 3. Soil sampling method from the natural terrain

층시료를 구분하여 채취하였다. 토층시료는 산사태, 지형, 토층분포 및 면적분포비율 등을 고려해 토질특성이 균등하게 평가될 수 있도록 하였다. Fig. 3은 토질시험용 토층시료를 채취하는 모습을 나타낸 것이다. 채취한 시료는 총 81개로서 산사태발생지역 39개와 미발생지역 42개로 구분된다. 시료는 표토로부터 40~60cm 깊이에서 스테인리스(stainless)로 제작한 원통형몰드(ring sampler)를 이용하여 채취하였다. 그리고 실내에서 밀도, 함수비, 입도, 액성한계, 소성한계, 간극비, 간극률, 포화도, 단위중량, 투수계수 및 전단강도 시험을 실시하였다. 시험방법은 모두 한국산업규격(KS)에 준하여 시험하였다.

4. 시험결과

Table 1은 연구지역 자연사면으로부터 채취한 토층시료에 대한 토질시험 결과를 나타낸 것으로, 산사태발생지

Table 1. Physical and engineering characteristics of the soils collected from the landslide and non slide sites of study area

Content	Landslide	Landslide		non slide	
		Range	Average	Range	Average
Specific gravity		2,50~2,65	2,59	2,49~2,65	2,58
Moisture content (%)		21,83~48,41	32,07	11,30~36,78	25,41
Liquid limit (%)		22,07~36,32	30,31	22,00~43,68	31,69
Plastic limit (%)		11,25~20,37	16,97	12,00~22,45	17,01
Void ratio		0,94~2,00	1,32	0,60~1,91	1,15
Porosity (%)		63,76~82,26	76,16	43,08~87,64	70,99
Dry unit weight (g/cm ³)		0,84~1,32	1,12	0,86~1,62	1,21
Permeability coefficient		$1,77 \times 10^{-4} \sim 1,82 \times 10^{-2}$	$4,78 \times 10^{-3}$	$8,60 \times 10^{-5} \sim 2,01 \times 10^{-2}$	$3,90 \times 10^{-3}$
Cohesion (kg/cm ²)		0,015~0,085	0,045	0,007~0,120	0,048
Angle of shearing resistance (°)		31~37	34	31~41	36

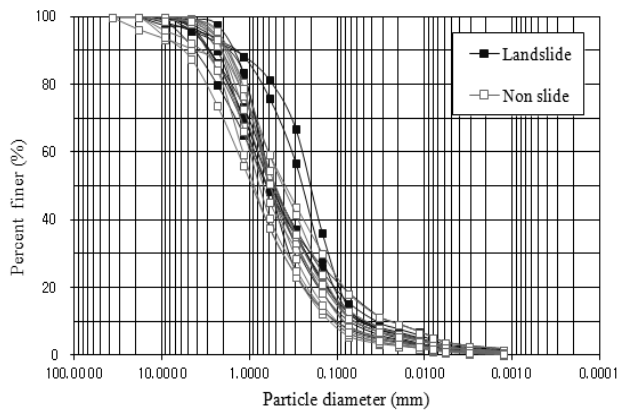


Fig. 4. Grain size distribution curves of soils collected from the study area

역과 미발생지역으로 구분하여 각 시험항목별 최소치 및 최대치로 표시되는 범위와 그 평균치를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 모든 시험항목에서 산사태발생지역과 미발생지역의 시험결과가 상이하게 나타남으로써 산사태 발생여부와 토질특성 간에 상관성이 있음을 짐작케 한다.

4.1 물리적 성질

Fig. 4는 토층시료에 대한 시험결과 중 대표적 20개 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 입도분포곡선의 기울기가 대체로 완만하고 입자크기별 비율도 양호하며, 균등계수가 6~34의 범위이고 곡률계수는 1~2의 범위로서 대부분 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. 그리고 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 세립이라는 Giannecchini and Pochini (2003)의 연구결과 대체로 일치하는 경향성을 보였다. 한편, Fig. 5는 입도시험결과를 산사태발생지역과 미발생지

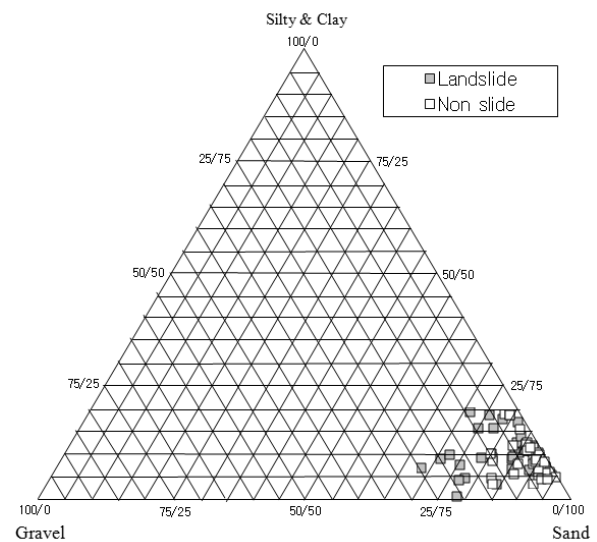


Fig. 5. Grain sizes distribution by the triangle diagram of soils collected from the study area

역으로 구분하여 삼각좌표로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분 모래크기 입자들의 구성비가 높고 실트나 점토크기의 세립들은 함유비율이 10% 내외로서 비교적 낮은 편이다. 전반적으로 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 자갈크기와 세립토의 함유비율은 더 높고 모래크기의 입자들은 더 낮은 함유비율을 가지는 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 토층시료의 연경도를 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 소성도에 도시한 것이다. 액성한계와 소성지수가 각각 22~43% 및 2~27%의 범위이고, 평균치는 31% 및 14% 정도인 것으로 분석되었다. 그리고 산사태발생지역의 토층시료는 액성한계와 소성지수의 평균치가 각각 30% 및 13%이고 미발생지역은 각각 32% 및 15%로서 산사태 발생지역의 토층시료가 미발생지역에 비

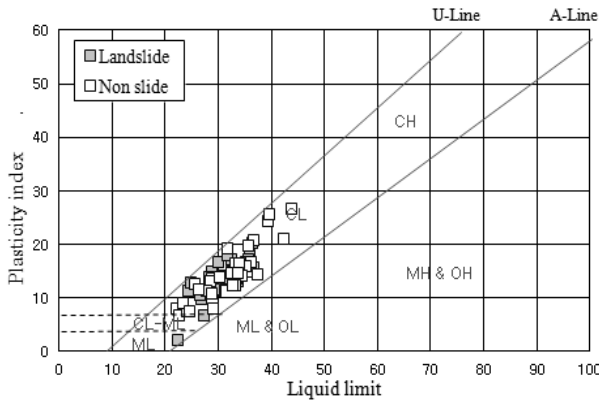


Fig. 6. Relationship between liquid limit and plastic index in plasticity diagram of soils collected from the study area

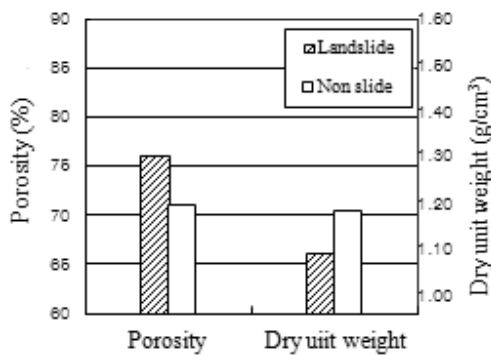


Fig. 7. Porosity and dry unit weight of soils collected from the study area

해 다소 낮은 액성한계와 소성지수를 지니는 것으로 분석되었다. 이러한 결과로 볼 때 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 낮은 액성한계를 가진다는 Giannecchini and Pochini(2003)의 연구결과와 대체로 일치하는 것으로 분석되었다.

4.2 공학적 특성

Fig. 7은 토층시료의 간극률 및 단위중량시험결과를 나타낸 그림이다. 간극비는 0.60~2.00의 범위로서 평균 1.24이고, 간극률은 43.08~87.64%의 범위로서 평균 73.48%인 것으로 나타났다. 그리고 습윤단위중량과 포화단위중량은 각각 1.18~1.96g/cm³ 및 1.50~1.99g/cm³의 범위로서 평균치는 1.50g/cm³ 및 1.72g/cm³이고, 건조단위중량은 0.84~1.62g/cm³의 범위로서 평균 1.17g/cm³인 것으로 나타났다. 또한, 평균치를 기준으로 하여 이들 간극률과 건조단위중량을 살펴보면, 산사태발생지역의 토층시료는

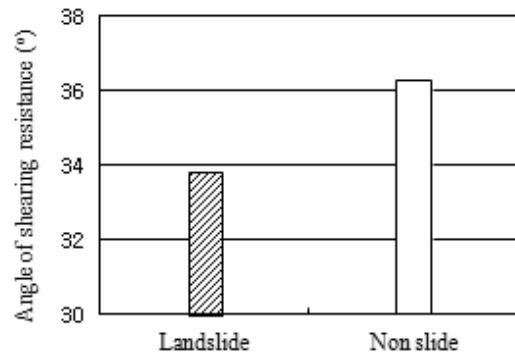


Fig. 8. Shearing resistance angle of soils collected from the study area

간극률과 건조단위중량이 각각 76.16% 및 1.12g/cm³이고 미발생지역은 각각 70.99% 및 1.21g/cm³로서 앞의 두 지역의 경우 즉, 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 큰 간극률과 작은 단위중량 특성을 보이는 결과와 일치하는 것으로 나타났다. 이처럼 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해서 간극률이 크고 단위중량은 작은 토질특성을 지니는 것으로 나타났다. 따라서 불량한 입도분포와 느슨한 상태의 토층지반은 특징적으로 큰 간극과 작은 단위중량을 지니므로써 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 그리고 이러한 분석결과로부터 자연사면의 토층에서 간극과 단위중량이 산사태발생에 유의한 영향인자인 것으로 평가되었다.

Fig. 8은 직접전단시험에 의한 전단저항각을 평균치로 기준하여 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 나타낸 것이다. 토층시료의 전단저항각은 31~41°, 점착력은 0.007~0.120kg/cm²의 범위로서 평균치는 각각 36° 및 0.046kg/cm²인 것으로 나타났다. 점착력은 산사태발생지역이 0.045kg/cm²로서 미발생지역의 0.048kg/cm²과 거의 동일한 결과를 보여 이를 제외하고 전단저항각만을 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 비교하였다. 평균치를 기준으로 할 경우 산사태발생지역과 미발생지역의 전단저항각이 각각 34°와 36°로서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 작은 전단저항각을 지니는 것으로 분석되었다. 이처럼 산사태발생지역 토층의 전단저항각이 미발생지역에 비해 2° 정도 작은 것으로 나타남으로써 전단저항각이 작은 토층은 큰 토층에 비해서 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 따라서 자연사면의 토층에서 산사태와 전단저항각은 서로 상관성이 있으며, 전단강도 또한 산사태발생에 유의한 영향인자인 것으로 평가되었다.

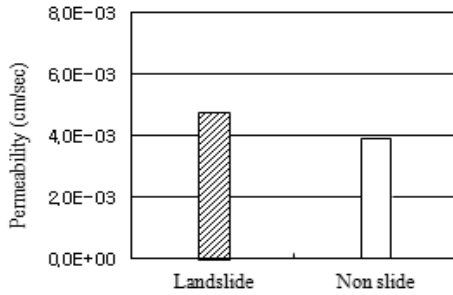


Fig. 9. Permeability coefficient of soils collected from the study area

Fig. 9는 투수시험에 의한 토층시료의 투수계수를 평균치로 기준하여 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 표현한 것이다. 토층시료의 투수계수는 $8.60 \times 10^{-5} \sim 2.01 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위로서 평균은 $4.32 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 정도인 것으로 나타났다. 이는 Darcy(1856)에 의하면 조립이나 중립질모래~점토질실트 정도의 투수계수에 해당되며, 투수성이 보통~빠른 토층지반으로 평가되었다. 이들을 평균치로 기준할 경우 산사태발생지역은 $4.78 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이고 미발생지역은 $3.90 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 투수성이 다소 크나 특징적으로 구별되지는 않는 것으로 분석되었다. 자연사면의 산사태는 기반암과 그 상부에 얇은 두께로 분포된 토층과의 경계부에서 주로 발생한다는 사실과 연관지어 볼 때, 투수성이 양호하면 토층이 더 쉽게 포화되어 하중이 증가될 뿐만 아니라 물이 더 빠르게 경계부에 달함으로써 파괴요인으로 작용될 수 있는 것으로 해석된다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 자연사면의 토층에서 산사태와 투수계수는 상관성이 있을 뿐만 아니라 투수계수가 산사태발생에 유의한 영향인자인 것으로 평가되었다.

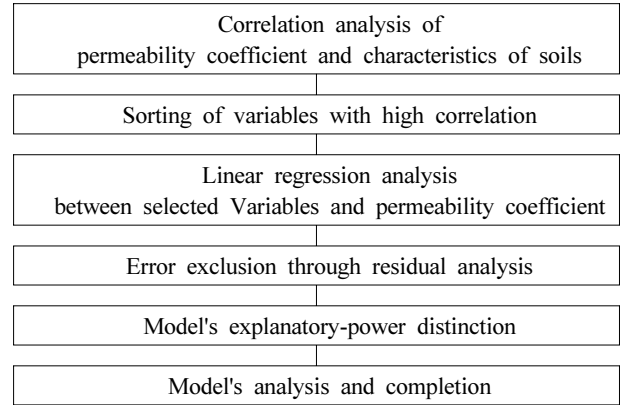


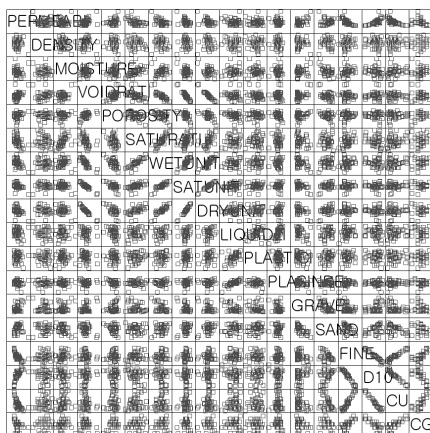
Fig. 10. Flow chart of statistical analysis

5. 선형회귀분석에 의한 투수계수 산정모델

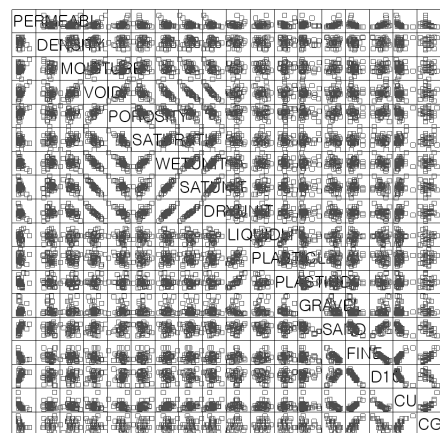
이 연구의 주 목적은 실내시험을 통해 토질물성치를 구하고 이를 통계적인 투수계수산정모델에 적용하여 간단하게 투수계수를 산정할 수 있도록 함이다. 모델의 과정은 일차적으로 통계프로그램(SPSS)을 이용해 실내시험에서 구한 토질물성 간의 상관성을 분석한 후 투수계수와 상관성이 높은 토질인자를 선정하게 된다. 그리고 선정된 토질인자와 직접투수시험에 의한 투수계수를 단순회귀분석하여 가중치 즉, 선형적 계수 및 상수를 구함으로써 투수계수산정모델이 완성된다(Fig. 10).

5.1 상관성분석

Pearson 상관계수를 이용하여 투수계수를 포함한 총 18개 항목의 토질특성치에 대해 서로간의 상관관계를 분석하고 Fig. 11과 같은 상관행렬 그래프(matrix plot)를 얻었



(a) landslide



(b) non slide

Fig. 11. Matrix plot

Table 2. Pearson correlation and significance of landslide area

Variable	Correlation	Permeability (cm/sec)	Variable	Correlation	Permeability (cm/sec)
Permeability (cm/sec)	Pearson correlation coefficient	1,000	Liquid limit	Pearson correlation coefficient	-0,114
	Significance	.		Significance	0,489
Density	Pearson correlation coefficient	0,143	Plastic limit	Pearson correlation coefficient	0,030
	Significance	0,315		Significance	0,858
Moisture content (%)	Pearson correlation coefficient	-0,069	Plasticity index	Pearson correlation coefficient	-0,089
	Significance	0,678		Significance	0,590
Void ratio	Pearson correlation coefficient	0,451	Gravel (%)	Pearson correlation coefficient	0,521
	Significance	0,004		Significance	0,001
Porosity (%)	Pearson correlation coefficient	0,236	Sand (%)	Pearson correlation coefficient	0,019
	Significance	0,148		Significance	0,906
Degree of saturation (%)	Pearson correlation coefficient	-0,490	Silt/Clay (%)	Pearson correlation coefficient	-0,739
	Significance	0,002		Significance	0,000
Wet unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0,548	D10 (cm)	Pearson correlation coefficient	0,734
	Significance	0,000		Significance	0,000
Saturated unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0,486	Cu	Pearson correlation coefficient	-0,718
	Significance	0,002		Significance	0,000
Dry unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0,474	Cg	Pearson correlation coefficient	-0,430
	Significance	0,002		Significance	0,006

Table 3. Pearson correlation and significance of non slide area

Variable	Correlation	Permeability (cm/sec)	Variable	Correlation	Permeability (cm/sec)
Permeability (cm/sec)	Pearson correlation coefficient	1,000	Liquid limit	Pearson correlation coefficient	0,075
	Significance	.		Significance	0,638
Density	Pearson correlation coefficient	0,178	Plastic limit	Pearson correlation coefficient	-0,016
	Significance	0,259		Significance	0,921
Moisture content (%)	Pearson correlation coefficient	0,335	Plasticity index	Pearson correlation coefficient	-0,090
	Significance	0,030		Significance	0,569
Void ratio	Pearson correlation coefficient	0,625	Gravel (%)	Pearson correlation coefficient	0,003
	Significance	0,000		Significance	0,984
Porosity (%)	Pearson correlation coefficient	0,458	Sand (%)	Pearson correlation coefficient	0,544
	Significance	0,002		Significance	0,000
Degree of saturation (%)	Pearson correlation coefficient	-0,322	Silt/Clay (%)	Pearson correlation coefficient	-0,552
	Significance	0,037		Significance	0,000
Wet unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0,562	D10 (cm)	Pearson correlation coefficient	0,580
	Significance	0,000		Significance	0,000
Saturated unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0,562	Cu	Pearson correlation coefficient	-0,552
	Significance	0,000		Significance	0,000
Dry unit weight (g/cm ³)	Pearson correlation coefficient	-0,572	Cg	Pearson correlation coefficient	-0,405
	Significance	0,000		Significance	0,008

다. 상관행렬그래프는 각각의 토질인자간 상관성을 점으로 표시한 선점도의 행렬형태 집합체로서 대각선을 중심으로 위아래의 그래프는 동일하다. 그리고 선형성이 높은 것이 상관성 또한 높음을 의미하는데, 몇몇 토질특성치들의 선점도 모양이 직선의 형태를 보이는 것으로 보아 상관성이 높은 토질특성치들이 있음을 알 수 있다. 그 외의 토질특성치들 상호간에도 상관성이 높은 선형적 관계가 있는데, 이는 선형회귀분석법으로 회귀식을 얻을 수 있음을 의미한다.

Table 2 및 Table 3은 상관분석을 통해 얻은 투수계수와 각 토질물성치간의 Pearson 상관계수와 유의도를 구한 것으로 Pearson 상관계수는 음과 양에 관계없이 클 수록, 유의도가 0에 가까울수록 상관성이 높음을 의미한다. 그리고 상관계수의 음은 반비례관계를, 양은 비례관계를 뜻한다. 이처럼 유의수준을 기준으로 할 때 입력변수로 이용된 18개 토질인자 중에서 유효경, 간극비, 포화단위중량, 및 세립함유량(실트 및 점토 함유량) 등이 상관성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 선형회귀분석을 통해 투수계수 산정모델을 개발함에 있어 유의수준이 높은 변수 중, 투수계수와 상관성이 높은 4개 토질인자 즉, 유효경, 간극비,

포화단위중량, 및 세립함유량을 유효항목으로 선정하였다. 이는 인자가 많을수록 정확도는 높아지지만, 효율성 측면에서 적은 수의 독립변수(토질인자)만으로 종속변수(투수계수)를 예측하는 것이 보다 효과적이기 때문이다.

5.2 선형회귀분석

상관성분석으로부터 상위 상관관계의 유의한 변수인 유효경, 간극비, 포화단위중량, 및 세립함유량을 이용하여 직접투수시험에 의한 투수계수와 선형회귀분석을 실시한 결과는 Table 4~Table 8과 같다.

이처럼 선형회귀분석 결과로 볼 때 잔차의 정규성과 등분산성은 모두 만족이며, 분산분석의 유의확률 $P=0.000$ 이고, 산사태 미발생지역의 수정된 R제곱은 설명력이 약 57%로서 다소 미흡하나 산사태 발생지역은 약 70%로서 회귀모형이 대체로 적합하다는 것을 알 수 있다. 따라서 이암으로 구성된 자연사면 풍화토층에서의 투수계수를 토질물성자료만을 적용하여 보다 쉽고 간편하게 산정할 수 있는 모델은 다음 식 (1) 및 (2)와 같이 정리된다. 앞에서 살펴본 바와 같이 자연사면에서 동일한 지질조건이라 할

Table 4. Entered and removed variables^b

Model	Entered variables	Removed variables	Method
1	Effective grain size Void ratio Saturation unit weight Finesa	.	Enter

a, All the requested variables entered; b, Dependent variable is a permeability coefficient.

Table 5. Summary of model^b

Classification	Model	R	R-square	Modified R-square	Standard error of predicted values	Dubin-Watson
Landslide	1	.849 ^a	.720	.687	2.088E-03	2.673
Non slide	1	.784 ^a	.614	.573	2.563E-03	2.203

Table 6. Analysis of variance^b

Classification	Model	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F	P-value
Landslide	Linear Regression Analysis	3.812E-04	4	9.531E-05	21.863	.000 ^a
	Residuals	1.482E-04	34	4.360E-06		
	Sum	5.295E-04	38			
Non slide	Linear Regression Analysis	3.872E-04	4	9.680E-05	14.739	.000 ^a
	Residuals	2.430E-04	37	6.568E-06		
	Sum	6.302E-04	41			

a, Predicted valuables(Constant) are effective grain size, void ratio, saturated unit weight and silt&clay; b, Dependent variable is a permeability coefficient.

Table 7. Standardized coefficients^a

Classification	Model	Non-standardized coefficients		Standardized coefficients	t	P-value
		B	Standard error	β		
Landslide	(Constant)	6.653E-02	.052		1.270	.213
	Effective grain size	.635	.609	.438	1.042	.305
	Void ratio	-2.623E-03	.007	-.152	-.380	.706
	Saturated unit weight	-3.579E-02	.025	-.564	-1.409	.168
	Fines	-1.978E-04	.000	-.260	-.618	.541
Non slide	(Constant)	-6.500E-02	.040		-1.642	.109
	Effective grain size	.873	.786	.574	1.110	.274
	Void ratio	1.625E-02	.006	1.061	2.641	.012
	Saturated unit weight	2.437E-02	.017	.560	1.397	.171
	Fines	1.046E-04	.000	.121	.235	.815

a. Dependent variable is a permeability coefficient.

Table 8. Residuals statistics^a

Classification	Model	Min	Max	Average	Standard deviation	N
Landslide	Predicted values	-2.5516E-03	1.172E-02	4.775E-03	3.167E-03	39
	Standardized predicted values	-2.313	2.193	.000	1.000	39
	Standard error of predicted values	3.515E-04	1.701E-03	7.023E-04	2.597E-04	39
	Adjusted Predicted values	-3.4661E-03	1.349E-02	4.783E-03	3.320E-03	39
	Residuals	-7.8808E-03	6.479E-03	2.224E-19	1.975E-03	39
	Standardized residuals	-3.774	3.103	.000	.946	39
	Studentized residuals	-4.691	3.778	-.002	1.125	39
	Residuals removed	-1.2175E-02	9.605E-03	-7.7641E-06	2.813E-03	39
	Studentized residuals removed	-7.783	4.887	-.050	1.591	39
	Mahal. distance	.102	24.252	3.897	4.330	39
	Cook' s distance	.000	2.399	.107	.436	39
	Centered leverage values	.003	.638	.103	.114	39
Non slide	Predicted values	-2.4847E-03	1.238E-02	3.903E-03	3.073E-03	42
	Standardized predicted values	-2.078	2.760	.000	1.000	42
	Standard error of predicted values	4.117E-04	1.766E-03	8.278E-04	3.147E-04	42
	Adjusted Predicted values	-3.8510E-03	1.014E-02	3.843E-03	3.056E-03	42
	Residuals	-7.8171E-03	7.717E-03	-6.6085E-18	2.435E-03	42
	Standardized residuals	-3.050	3.011	.000	.950	42
	Studentized residuals	-3.247	3.565	.011	1.047	42
	Residuals removed	-8.8595E-03	1.082E-02	5.921E-05	2.977E-03	42
	Studentized residuals removed	-3.788	4.341	.008	1.190	42
	Mahal. distance	.082	18.485	3.905	3.949	42
	Cook' s distance	.000	1.022	.050	.165	42
	Centered leverage values	.002	.451	.095	.096	42

a. Dependent variable is a permeability coefficient.

지라도 산사태 발생여부에 따라 물리적 성질 및 공학적 특성이 다르게 나타난 바와 같이 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역의 토층사면에 대해서 투수계수 산정모

델 또한 각각 다르게 적용되어야 할 것이다.

한편, 이 연구에서는 모델의 검증이 이루어지지 못하였으나, 제안된 모델의 신뢰도 검증을 위해 추가적으로 투수

시험을 실시한 결과와 상관성분석을 실시하거나 기존에 제안된 여러 경험식들을 적용한 결과와 비교분석을 실시함으로써 그 적합성을 확인할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서 제안된 이암 풍화토층의 전단강도 산정모델의 검증과 관련하여서는 향후 추가적으로 연구를 계속할 계획이다.

$$\begin{aligned} \text{산사태 발생지역 이암 풍화토층의 투수계수 산정모델} \\ = -0.067 + (0.0026 \times e) + (0.0358 \times r_{sat}) + (0.0002 \times fines) \\ + (0.635 \times D_{10}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{산사태 미발생지역 이암 풍화토층의 투수계수 산정모델} \\ = -0.065 + (0.0162 \times e) + (0.0244 \times r_{sat}) + (0.0001 \times fines) \\ + (0.873 \times D_{10}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, D_{10} : 유효경, e : 간극비, $fines$: 세립함유량, r_{sat} : 포화단위중량

6. 결론

이 연구에서는 집중호우로 인해 산사태가 집중적으로 발생한 이암 풍화토층을 대상으로 산사태와 관련한 여러 토질특성을 분석하였다. 그리고 이들 토질특성 중 자연사면의 산사태에서 주요 영향인자로 간주되는 투수계수를 몇 가지 토질물성만으로 쉽게 산정할 수 있도록 선형회귀 분석을 이용한 투수계수 산정모델을 제안하였다. 연구결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 이암풍화토로 구성된 자연사면에서 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 자갈크기와 세립토의 함유비율이 더 높고 모래크기의 입자들은 더 낮으며, 액성한계와 소성지수가 다소 낮은 것으로 분석되었다.
- (2) 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해서 간극률이 크고 단위중량은 작은 것으로 나타났으며, 입도는 양호하나 느슨한 토층지반의 특성상 큰 간극과 작은 단위중량을 지님으로써 산사태에 상대적으로 취약한 것으로 분석되었다.
- (3) 산사태발생지역 및 미발생지역의 투수성이 큰 차이가 없으나, 연구대상지역의 토층이 전반적으로 투수성이 양호하므로 토층이 더 쉽게 포화되어 하중이 증가될

뿐만 아니라 물이 더 빠르게 경계부에 달함으로써 토층의 파괴요인으로 작용하는 등 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다.

- (4) 상관성분석을 통해 여러 토질인자들과 투수계수간의 상관관계를 분석한 결과 유효경, 간극비, 포화단위중량, 및 세립함유량이 투수계수에 유의한 영향인자인 것으로 평가됨으로써 이들 토질인자는 투수계수산정시 고려되어야 할 요소에 해당된다.
- (5) 이 연구를 통하여 토질 물성만으로 이암 풍화토층의 투수계수를 산정할 수 있는 선형회귀식은 다음과 제시할 수 있다. 즉, 산사태 발생지역의 투수계수 = $-0.067 + (0.0026 \times e) + (0.0358 \times r_{sub}) + (0.0002 \times fines) + (0.635 \times D_{10})$ 이고, 산사태 미발생지역의 투수계수 = $-0.065 + (0.0162 \times e) + (0.0244 \times r_{sub}) + (0.0001 \times fines) + (0.873 \times D_{10})$ 이다.
- (6) 이 연구에서 제안된 투수계수 산정모델은 동일한 지질조건에서 국내 자연사면 토층지반을 대상으로 적용이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 추후 더 많은 토질 자료를 추가하여 통계분석을 실시함으로써 지속적으로 수정 및 보완하고 그 적합성 검증 또한 이루어져야 할 것이다.

Acknowledgement

이 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술개발”과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Chae, B. G., Kim, W. Y., Cho, Y. C., Kim, K. S., Lee, C. O., and Choi, Y. S. (2004), “Development of a Logistic Regression Model for Probabilistic Prediction of Debris Flow”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.14, No.2, pp.211-222 (in Korean).
2. Darcy, H. (1856), “Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon”, Dalmont, Paris.
3. Giannecchini, R., and Pochini, A. (2003), “Geotechnical influence on soil slips in the Apuan Alps (Tuscany): first results in the Cardoso area”. *Proc. International Conference on Fast Movements-Prediction and Prevention for Risk Mitigation (IC-FSM 2003)*, pp.241-245.
4. Hutchinson, J. N. (1988), “Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydro-

- geology”, *In Landslides, Proc. 5th Symp. on Landslides*, 1, pp.3-35.
5. Kim, K. S. (2007), “Soil Characteristics according to the Geological Condition of Natural Slopes in Busan Area”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.17, No.3, pp.471-481 (in Korean).
 6. Kim, K. S., Kim, W. Y., Chae, B. G., and Cho, Y. C. (2000), “Engineering Geologic Characteristics of Landslide Induced by Rainfall - Boeun, Chungcheong Buk-do-”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.10, No.2, pp.163-174 (in Korean).
 7. Kim, K. S., Kim, W. Y., Chae, B. G., Song, Y. S., and Cho, Y. C. (2005), “Engineering Geological Analysis of Landslides on Natural Slopes Induced by Rainfall”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.17, No.2, pp.205-215 (in Korean).
 8. Kim, W. Y., Chae, B. G., Kim, K. S., Cho, Y. C., Choi, Y. S., Lee, C. O., Lee, C. W., Kim, G. Y., Kim, J. H., and Kim, J. M. (2003), Study on Landslide Hazard Prediction, Ministry of Science & Technology, KR-03-(T)-03, 339p (in Korean).
 9. Lee, J. S., Lee, K. I., and Kim, K. W. (2002), “Shear and Compression Characteristics of Mudstone Sedimentary Soils Based on Slaking”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.22, No.4C, pp.453-460 (in Korean).
 10. Song, Y. S., Kim, K. S., and Chae, B. G. (2007), “Soil Characteristics according to Geological Conditions in Landslide Area of Natural Terrain”, *Disaster Prevention Research Institute of Chung-Ang University*, Vol.1, pp.43-49 (in Korean).
 11. Um, S. H., Lee, D. W., and Bak, B. S. (1964), Explanatory text of the geologic map of Pohang sheet, Geological Survey of Korea.