

산사태지역 자연사면의 지질별 토질특성 및 상관관계 분석

김경수*

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Analysis of Soil Characteristics and its Relationship According to the Geological Condition in Natural Slopes of the Landslide Area

Kyeong-Su Kim*

Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

이 연구는 산사태가 발생한 자연사면의 토층을 대상으로 여러 토질시험을 실시하여 산사태에 영향을 미치는 토질특성을 고찰하고, 산사태와의 관련성 및 각 물성간의 상관관계를 분석하였다. 연구지역은 지질조건이 다른 3개지역으로서 같은 시기에 집중호우로 인해 산사태들이 집중적으로 발생된 경기 장흥 편마암류지역, 경북 상주 화강암류지역 및 경북 포항 제3기퇴적암류지역이다. 지질별로 다소의 차이는 있으나 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 세립자의 함유 비율이 더 높고 대체로 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는다. 그리고 동일한 지질조건인 경우 투수성이 양호한 토층이 산사태에 더 취약한데, 투수성은 입도분포, 간극크기, 흙입자의 거칠기 및 구조 등의 토질특성과 풍화나 퇴적환경 등 지질성인에 영향을 받는다. 모든 지질조건에서 전단저항각이 큰 토층은 작은 토층에 비해 산사태에 더 안정한 지반으로 분류된다. 투수계수에 영향을 미치는 토질인자는 유효경, 균등계수, 곡률계수, 간극율 및 밀도 등이고 이들은 서로 상관관계에 있는 물성이다. 이러한 상관성은 3개지역 모두에서 유사한 경향성을 보였다. 한편, 간극비와 간극율이 크면 투수계수도 따라서 커지는 상호 비례적 관계를 갖는다.

주요어 : 토층사면, 산사태, 지질조건, 토질특성, 상관관계

In this study, the soil characteristics are analyzed using the result of various soil tests as an object of the soil layer of natural slopes in landslides areas. Also, the relationship with landslides and interrelation with each soil properties are analyzed. The landslides in three areas with different geological condition are occurred due to heavy rainfall in same time. The geology of Jangheung area, Sangju area and Pohang area is gneiss, granite, and the tertiary sedimentary rock, respectively. However soil characteristics have a little differentiation to geological condition, the soils sampled from landslide area have higher proportion of fine particle and porosity, and lower density than those from non landslide area. In case of same geological condition, landslides are occurred in the terrain slope with high permeability. The permeability is mainly influenced by the soil characteristics such as particle size distribution, porosity, particle structure, and the geological origins such as weathering, sedimentary environment. The soil layer with high internal friction angle is more stable than that with low internal friction angle in all geological condition. The permeability is mainly influenced by effective particle size, coefficient of uniformity, coefficient of gradation, porosity, density and so on. Also, those have interrelation with each factor. These interrelations are similar in all study area. Meanwhile, in proportion as the void ratio and the porosity rises the permeability increases.

Key words : soil slope, landslide, geological condition, soil characteristics, relationship

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

서 론

자연사면의 산사태에서 지형조건, 사면의 기하학적 형태, 집중호우의 양상 등이 기본적인 평가요소이지만 그에 못지않게 토층의 분포상태도 산사태 발생가능성 및 규모와 밀접하게 관련된다. 자연사면에서 토층이라 함은 풍화암과 암편 등을 포함하는 미고결물질을 통칭하는 것(Varnes, 1978)으로, 집중호우가 발생할 경우 강우에 의해 증가된 간극수압은 토층의 유효응력(effective stress)을 줄이고 전단강도를 감소시킴으로써 결국 붕괴를 유발시킨다(Brand, 1981; Brenner *et al.*, 1985). 자연사면에서 암반층 위에 존재하는 상부토층은 대부분 기반암의 풍화현상에 의해 형성된 것으로서 이들은 풍화정도 및 지질조건에 따라 물리적 및 공학적 특성이 달라지고(Hutchinson, 1988), 풍화잔류토나 퇴적물로 이뤄진 토층은 지질조건과 연관성을 가질 뿐만 아니라 구성광물의 성분에 따라 토질특성이 다르게 나타난다(김원영 외, 1998; 김원영 외, 2000; 김경수 외, 2004).

연구지역에서의 산사태들은 대부분 기반암 상부의 토층붕괴에 의한 유동성 산사태이다. 이러한 유동성 산사태를 평가하기 위해서는 사면의 표토를 구성하고 있는 토층물질의 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이 연구에서는 지질조건이 서로 다른 3개 지역을 대상으로 현장에서 채취된 토층시료에 대해 실내시험을 실시하고 그 결과로부터 산사태와 관련이 있는 여러 토질특성을 평가하였다. 그리고 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역으로 구분하여 토층의 물성과 공학특성 및 이들의 상관성을 분석하였다.

연구지역

연구지역은 지질조건이 서로 다른 3개 지역으로서 편마암류인 장흥지역, 화강암류인 상주지역 및 제3기 퇴적암류인 포항지역이다(Fig. 1). 장흥지역에서는 1998년 8월 4~7일 나흘간에 걸쳐 약 588 mm, 상주지역에서는 8월 10~12일 사흘간에 약 522 mm의 집중호우가 있었다. 그리고 포항지역에서는 7월 25~26일 이틀간에 걸쳐 약 150 mm의 집중호우가 발생되었다. 이들 집중호우의 영향으로 장흥지역에서는 511개, 상주지역과 포항지역에서는 각각 788개 및 283개의 산사태가 발생된 것으로 조사되었다. 이들 3개지역에서 지질조건에 따른 토질특성과 산사태간의 관련성을 분석하기 위하여 산사태 발생지역과 미발생지역으로 구분하여 시험용 토층시료를

채취하였다. 시료는 장흥지역 55개(산사태발생지역 28개 및 미발생지역 27개), 상주지역 58개(산사태발생지역과 미발생지역 각 29개) 및 포항지역 81개(산사태발생지역 39개 및 미발생지역 42개)로서 총 194개이다. 이들 토층시료를 대상으로 실험실에서 각종 토질시험을 수행하였다.

장흥지역의 지질은 크게 흑운모편마암과 일부 석영편암 및 화강암 등 3종의 지질로 구분되며(이병주 외, 1999), 이 중 흑운모편마암과 석영편암 등 변성암지역만을 연구대상으로 국한하여 정밀조사를 실시하였다(Fig. 1(a)). 이들 편마암과 편암은 여타 지역에서의 마찬가지로 광물학적으로 구성성분이 다르게 혼재되어 있어 지역에 따라 다소 다른 암상을 보이고 있으나, 이 연구에서는 대표적인 암석명인 '편마암류'로 표현하였다.

상주지역은 화강암이 넓게 분포하고 있으며 일부 변성암류와 퇴적암류가 분포하고 있으나(김동학과 이병주, 1986; 원종관과 김기태, 1969), 이 중 연구대상을 화강암지역으로만 국한하여 정밀조사를 실시하였다(Fig. 1(b)). 화강암은 쥬라기의 보은화강암과 흑운모각섬석화강암 등이며 이들은 광물학적인 구성성분과 입도조성이 다소 다른 암상을 보이고 있으나, 이 연구에서는 대표적인 암석명인 '화강암류'로 표현하였다.

한편, 포항지역은 이암이나 셰일 등 주로 제3기층의 퇴적암류로 이루어져 있다(엄상호 외, 1964). 이들의 암상은 광물학적인 구성성분과 입도조성이 다르나 이 연구에서는 대표적인 암석명인 '제3기퇴적암류'로 표현하였다(Fig. 1(c)).

토질시험

토층시료의 채취는 표토를 제거한 후 40~60 cm 깊이에서 교란시료와 불교란시료로 구분하여 채취하였다. 불교란시료는 스텐레스로 제작한 직경 10 cm, 높이 6 cm 크기의 원통형 몰드(stainless ring sampler)를 이용하였다. 특히 투수시험용 불교란시료는 직경 10 cm, 높이 13 cm 크기의 원통형 몰드를 사용하였다. 그리고 교란시료는 비닐팩을 이용하여 채취하였으며, 모든 시료는 밀봉한 상태로 현장조건이 최대일 유지되도록 실험실로 운반하였다. 교란시료를 이용하여 비중(specific gravity), 함수비(moisture content), 입도(grain size), 액성한계(liquid limit) 및 소성한계(plastic limit) 등의 물성시험을 실시하였으며, 불교란시료를 이용하여 간극비(void ratio), 간극율(porosity), 포화도(degree of saturation),

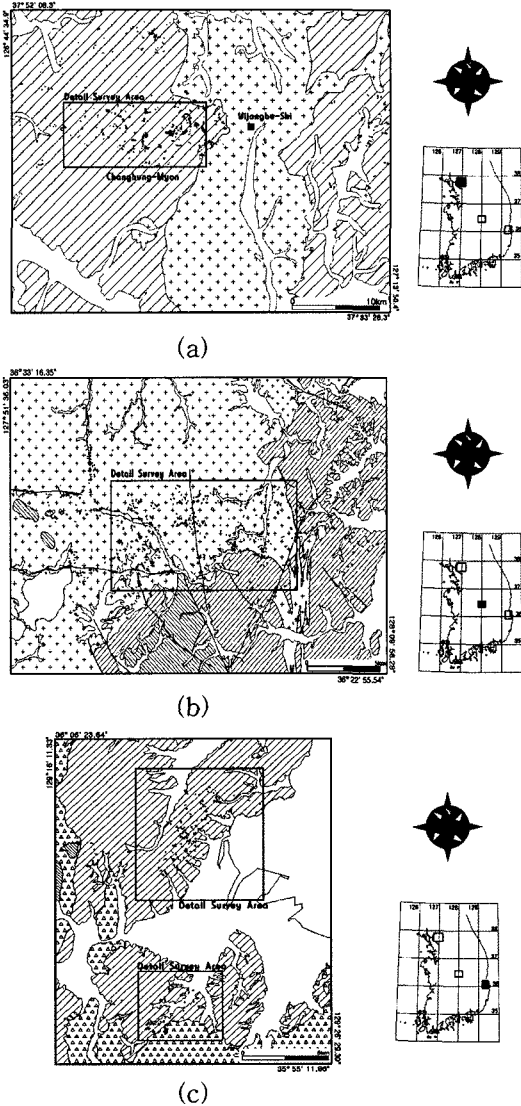


Fig. 1. Geological map and landslides location of study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

밀도(density), 투수계수(coeffcient of permeability) 및 전단강도(shear strength) 등의 공학시험을 실시하였다.

시험방법은 KS의 관련규정에 따라 시험하였다(KS F 2302; KS F 2303; KS F 2306; KS F 2308; KS F 2322; KS F 2343).

물리적 성질

흙은 암반이 물리적이거나 화학적 풍화작용(weathering), 또는 용해작용(solution)에 의해 미세한 조각들로 분리되어 이루어져 있으며(김상규, 1999) 자연사면의 표층은 이러한 흙이 어느정도의 두께로 존재하고 있다. 따라서 자연사면에서 토층은 풍화정도와 지질조건에 따라 물성 및 공학특성이 달라지고, 이들은 집중호우시 산사태의 영향요소로 작용하게 된다. Giannecchini and Pochini (2003)는 산사태지역과 아닌 지역간의 입도특성을 비교 분석한 결과, 산사태가 발생된 지역의 토층은 발생되지 않은 지역에 비해 더 세립(finier grain size)이고 낮은 액성한계를 가지는 것으로 보고하였다. 흙은 아주 낮은 함수비에서 고체와 같이 거동하지만 함수비가 높아지면 액체와 같이 유동하게 된다(Atterberg, 1911). 따라서 토층사면에 강우로 인한 침투수가 발생할 경우 사면의 안정성은 토층을 구성하고 있는 흙의 액성한계나 소성한계와 같은 연경도에 영향을 받고, 큰 액성한계를 지니는 토층은 보다 많은 물을 흡수함으로써 팽창으로 인한 지지력의 저하가 초래될 수 있다. 한편, 토층의 함수비가 액성한계에 달하거나 그보다 크게 될 경우 더 쉽게 붕괴될 수 있다.

Table 1은 3개지역의 토층시료에 대한 물성시험결과를 지역별로 구분하여 나타낸 표이다.

입도분포

대부분의 토층시료는 입도분포곡선의 기울기가 완만하고 조립자와 세립자의 혼합비가 양호하고 균등계수 및 곡률계수가 양입도(well grading)의 조건을 충족함으로써 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. 그리고 모든 지질조건에서 산사태발생지역의 토층시료가 미발생 지역에 비해 실트와 점토크기인 세립자의 함유비율이 다

Table 1. Ranges for specific gravity, moisture content, liquid limit, plastic limit, void ratio, porosity and dry density of soils according to geological conditions.

Geology	Specific gravity	Moisture content (%)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Void ratio	Porosity (%)	Dry density (g/cm ³)
Gneiss	2.61-2.76	8.72-33.47	20.15-42.65	14.74-28.93	0.75-1.57	53.11-89.46	1.03-1.53
Granite	2.52-2.72	7.18-31.84	22.90-37.30	13.77-27.00	0.76-1.29	64.46-85.99	1.15-1.52
Tertiary sediments	2.49-2.65	11.30-48.41	22.00-43.68	11.25-22.45	0.60-2.00	43.08-87.64	0.84-1.62

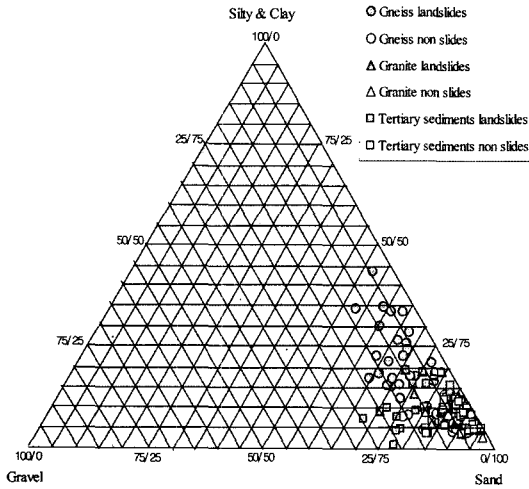


Fig. 2. Grain sizes distribution considering geological condition by the triangle diagram of soils collected from the study areas.

소 높은 것으로 나타남으로써 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 세립이라는 Giannecchini and Pochini(2003)의 연구결과와 대체로 일치하는 경향성을 보였다. 그리고 평균치로 기준하여 균등계수와 곡률계수를 살펴보면, 산사태발생지역의 토층시료가 미발생지역에 비해 전반적으로 큰 것으로 나타났다.

Fig. 2는 3개지역 모든 토층시료의 입도분포를 삼각좌표로 나타낸 그림이다. 분석결과 대부분 모래크기 입자들의 구성비가 높고 실트나 점토크기의 세립들은 함유비율이 10% 내외로서 비교적 낮은 편이다. 지질별로는 편마암류지역의 토층이 높은 세립토의 함유비율을 보이고 화강암류와 제3기퇴적암류지역은 거의 유사한 경향성을 보였다. 또한, 전반적으로 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 자갈크기와 세립토의 함유비율은 더 높고 모래크기의 입자들은 더 낮은 함유비율을 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 현상은 화강암류지역이 다른 두 지역에 비해 더 두드러진 양상을 보였는데, 그 이유는 완전히 풍화되지 않은 암석조각이나 자갈크기의 조립토가 상대적으로 더 많이 함유되어 있는 지질특성에 기인되는 현상으로 판단된다.

연경도

Fig. 3은 3개지역의 토층시료에 대한 연경도를 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 소성도에 도시한 그림이다. 편마암류지역의 토층시료는 액성한계와 소성지수가 각각 20~43% 및 5~19%의 범위이고, 평균치는

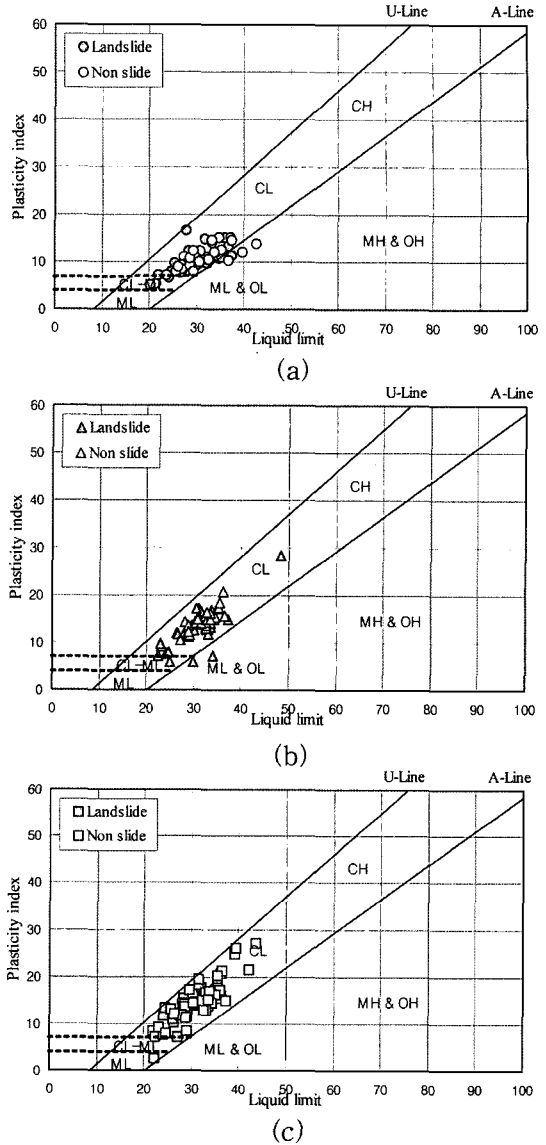


Fig. 3. Relationship between liquid limit and plastic index in plasticity diagram of soils collected from the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

31% 및 11%로서 ML이나 CL의 영역에 점시됨으로써 대체로 점성이 낮고 중간정도의 소성을 지니는 것으로 나타났다. 화강암류지역은 액성한계와 소성지수가 각각 22~48% 및 6~28%의 범위이고, 평균치는 31% 및 14%로서 대체로 높은 소성을 가지며, 제3기 퇴적암류지역은 액성한계와 소성지수가 각각 22~43% 및 2~27%의 범위이고, 평균치는 31% 및 14%로서 대체로 높은

소성을 지나는 것으로 나타났다.

이와 같이 액성한계와 소성지수로서 각 지질별 토층에 대한 소성과 연경도를 비교한 결과, 평균치에 있어 액성한계는 거의 동일한 결과치를 보였으나 소성지수는 편마암류지역의 토층이 화강암류지역과 제3기 퇴적암류지역에 비해 다소 낮은 경향성을 보였다. 이는 토층의 풍화양상보다는 주로 모암의 광물조성비에 따른 결과로 판단된다. 한편, 산사태의 발생여부에 따른 연경도의 차이를 비교한 결과, 3개지역 모두에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역보다 더 낮은 연경도를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 낮은 액성한계를 가진다는 Giannecchini and Pochini(2003)의 연구결과와 일치하였다.

한편, 각 시료별 자연함수비를 액성한계에 대비하였을 때 편마암류지역과 화강암류지역은 모든 토층시료의 자연함수비가 액성한계에 비해 더 낮은 반면, 제3기 퇴적암류지역은 상당수가 액성한계에 비해 자연함수비가 더 높고, 이러한 경향성은 산사태발생지역에서 더 두드러진 현상으로 나타났다(Table 1). 따라서 주로 세립과 미립질의 이암으로 구성된 제3기 퇴적암류지역의 토층은 다른 두 지역에 비해 상대적으로 더 높은 자연함수비를 유지하고 있을 뿐만 아니라 집중호우시에는 함수비의 증가로 인해 토층의 지지력이 쉽게 약해짐으로써 다른 두 지역보다 강우에 의한 산사태에 더 취약할 수 있다.

공학적 특성

자연사면의 토층에서 간극의 상태는 간극비와 간극율로 표현되며 다짐정도는 밀도로 나타낼 수 있는데, 이들은 조성비 즉, 입도분포의 양상에 따라 크게 달라지며 조성비 못지않게 토층이 얼마나 느슨(loose)하고 조밀(dense)한가 하는 다짐상태와도 밀접한 관계를 갖는다(김경수 외, 2005).

강우에 의해 발생된 산사태를 분석하기 위해서는 흙의 투수특성과 전단특성을 정량적으로 파악하는 것이 매우 중요하다. Darcy(1856)는 시험을 통하여 토층을 여러

등급으로 분류하고 그 등급별 대표적 투수계수를 제시한 바 있다. 또한, Braja(1998)에 의하면, 토층의 투수성은 유체의 점성, 입도분포, 간극의 크기 및 비율, 광물입자의 거칠기 및 토층의 포화도 등 여러가지 요인에 영향을 받으며 특히, 점성토에서 입자의 구조는 투수계수와 매우 밀접하게 관계된다. 이와 같은 산사태의 특징을 감안할 때, 동일한 지질이 분포하는 자연사면이더라도 투수계수가 크고 작음에 따라 산사태의 발생가능성이 다를 수 있다는 해석이 가능해진다.

Holtz and Gibbs(1956)는 시험을 통하여 모래지반을 여러 등급으로 분류하고 그 대표적인 전단저항각(angle of shearing resistance)을 제시한 바 있다. 전단강도는 점착력(cohesion)과 전단저항각으로 표시되는 것으로, 토층사면에서는 전단파괴면을 인지할 수 있을 경우 파괴면에 대한 전단특성이 고려되어야 한다. 이 연구에서는 자연사면의 산사태가 대부분 기반암의 상부에 위치한 토층이 붕괴되어 발생하므로 토층만의 전단특성을 파악하였다.

간극 및 밀도

Table 2는 3개지역 토층시료의 간극비, 간극율 및 밀도시험결과를 평균치로 기준하여 지질별로 나타낸 표이다. 편마암류지역의 간극비와 간극율은 평균 1.08 및 76.85%이고 건조밀도는 1.31 g/cm³인 것으로 나타났다. 이들을 평균치로 기준할 경우 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는다. 이는 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 입도분포가 불량하고 더 느슨한 지반상태에 있음을 보여주는 결과임과 동시에 이들 간극율과 밀도가 산사태에 영향을 미치는 토성지수임을 반증하는 결과이기도 하다.

화강암류지역의 간극비와 간극율은 평균 0.97 및 78.35%이고 건조밀도는 1.33 g/cm³인 것으로 나타났다. 이들을 평균치로 기준할 경우 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는 것으로 나타나 산사태의 발생여부에 따른 간극율 및 밀

Table 2. Ranges and mean values for void ratio, porosity and dry density of soils according to geological conditions.

Geology	Void ratio		Porosity (%)		Dry density (g/cm ³)	
	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.
Gneiss	0.75~1.57	1.08	53.11~89.46	76.85	1.03~1.53	1.31
Granite	0.76~1.29	0.97	64.46~85.99	78.35	1.15~1.52	1.33
Tertiary sediments	0.60~2.00	1.24	43.08~87.64	73.48	0.84~1.62	1.17

도특성이 편마암류지역의 경우와 거의 유사한 경향성을 보였다.

한편, 제3기퇴적암류지역의 간극비와 간극율은 평균 1.24 및 73.48%이고, 건조밀도는 1.17 g/cm^3 인 것으로 나타났다. 이들을 평균치로 비교하였을 경우, 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 큰 간극율과 작은 밀도특성을 보이는 앞의 두 지질의 경향성과 일치하였다.

이처럼 모든 지질조건에서 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 간극율이 크고 밀도는 작은 토질특성을 지니는 것으로 나타났다. 따라서 불량한 입도분포와 느슨한 상태의 토층지반은 특징적으로 큰 간극과 작은 밀도를 지니므로써 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 그리고 이러한 분석결과에 의해 자연사면의 토층에서 간극과 밀도가 산사태발생에 유의한 영향인자인 것으로 평가되었다.

투수성

Table 3은 투수시험으로부터 구한 3개지역 토층시료의 투수계수와 전단강도 시험결과를 나타낸 표이다. 이들은 Darcy(1856)의 분류기준에 의해 대부분 조립 내지 중립질 모래~점토질 실트에 해당되어 투수성이 보통~빠른 편인 지반으로 평가되었다. 이들을 평균치로 비교하였을 경우, 편마암류지역은 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 큰 투수성 토층지반인 것으로 분석되었다. 다만, 산사태발생지역과 미발생지역간의 투수계수는 큰 차이를 보이지는 않은 것으로 나타났는데, 이는 한편으로 투수계수가 작은 차이일지라도 투수성이 산사태에 밀접하게 연관됨을 지시하는 결과로 해석된다.

화강암류지역의 토층은 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 큰 투수성지반을 이루고 있는 것으로 분석되었으며, 산사태발생지역과 미발생지역간의 투수계수는 큰 차이를 보이지는 않았다.

한편, 다른 두 지질과는 다르게 제3기퇴적암류지역 토층은 산사태발생지역에 비해 미발생지역의 투수계수가 다소 큰 투수성 지반인 것으로 분석되었다. 그리고 제3기퇴적암류지역 역시 산사태발생지역과 미발생지역간의 투수계수는 큰 차이를 보이지는 않았다.

지질별로는 화강암류지역의 토층이 가장 큰 투수성지

반이고 다음으로 편마암류지역과 제3기퇴적암류지역의 순으로 투수성이 작은 것으로 분석되었는데, 이는 주로 토층물질의 입도특성에 좌우되는 것으로서 간극이나 밀도 등과도 상관성이 있으며 지질조건과도 관계된다. 즉, Braja(1998)가 밝혔듯이 비교적 세립토로 구성된 편마암류지역에 비해 주로 자갈이나 모래질의 화강풍화토로 구성된 화강암류지역은 입도가 더 조립이어서 물의 통로가 되는 간극 또한 더 큰 반면, 주로 세일이나 이암으로 구성된 제3기퇴적암류지역은 입도가 세립이거나 미립이기 때문에 다른 두 지역에 비해 간극의 크기가 훨씬 작을 뿐만 아니라 서로 균질한 입자들이 퇴적된 지질환경과도 관련성이 있다. 또한, 3개지역 모두에서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 투수계수가 더 큰 것으로 나타나 동일한 지질조건에서는 투수계수가 클수록 산사태에 더 취약할 수 있다.

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 도달함으로써 파괴요인으로 작용될 수 있는 것으로 해석된다. 따라서 이러한 결과들을 종합해 보면, 자연사면의 토층에서 산사태와 투수계수는 상관성이 있을 뿐만 아니라 투수계수가 산사태발생에 유의한 영향인자인 것으로 평가되었다.

전단강도

Table 3에서 보는 바와 같이 편마암류지역 토층시료의 전단저항각과 점착력은 각각 $18\sim39^\circ$ 및 $0.011\sim0.296 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위인 것으로 나타났는데, 이는 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 다짐도가 매우느슨(very loose)~중간정도(medium dense)의 사질지반에 해당하는 값이다. 점착력은 차이가 미미하므로 전단저항각만을 비교하였는데, 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 3° 정도 더 작은 전단저항각을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 평균치에 못 미치는 시료들은 대부분 산사태발생지역에 해당되는데, 이는 전단강도가 작은 토층이 산사태에 더 취약함을 반증하는 결과로 해석된다.

화강암류지역 토층시료의 전단저항각과 점착력은 각

Table 3. Ranges and mean values for permeability and shear strength of soils according to geological conditions.

Geology	Permeability (cm/sec)	Cohesion (kg/cm^2)	Angle of shearing resistance ($^\circ$)
Gneiss	$7.95 \times 10^{-5} \sim 2.17 \times 10^{-2}$	0.011~0.296	18~39
Granite	$1.50 \times 10^{-4} \sim 6.92 \times 10^{-2}$	0.001~0.133	31~42
Tertiary sediments	$8.60 \times 10^{-5} \sim 2.01 \times 10^{-2}$	0.007~0.120	31~41

각 31~42° 및 0.001~0.133 kg/cm²의 범위인 것으로 나타났다는데, 이는 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 대체로 다짐도가 중간정도~매우조밀(very dense)한 사질지반에 해당하는 값이다. 전단저항각은 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 2° 정도 더 작은 것으로 나타났다.

한편, 제3기퇴적암류지역 토층시료의 전단저항각과 점착력은 각각 31~41° 및 0.007~0.120kg/cm²의 범위인 것으로 나타나 다른 두 지역과 거의 동일한 전단특성을 보였다. 제3기퇴적암류지역 역시 앞의 두 지역에서와 마찬가지로 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 2° 정도 더 작은 전단저항각을 지니는 것으로 분석되었다.

이상의 결과들을 종합해 볼 때, 전단특성은 지질에 따라 크게 구분되지는 않으나 편마암류지역에 비해 화강암류와 제3기퇴적암류지역의 전단강도가 다소 큰 것으로 나타났다. 그리고 지질조건이 서로 다른 3개지역 모두에서 산사태발생지역 토층의 전단저항각이 미발생지역에 비해 2~3° 이상 더 작은 것으로 나타남으로써 전단저항각이 작은 토층은 큰 토층에 비해서 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 따라서 자연사면의 토층에서 산사태와 전단저항각은 서로 상관성이 있으며, 전단강도가 산사태발생에 유의한 영향인자인 것으로 평가되었다.

물성간의 상관관계

기존에 수행된 연구(Kozeny and Carman, 1956; Amer and Awad, 1974; 김경수 외, 2004)에 의하면, 여러 토질인자들 중에서 전단강도와 투수계수에 영향을 미치는 인자로는 유효경, 균등계수, 곡률계수, 간극비 및 밀도 등을 들 수 있다. 토층에서의 투수계수를 개략적으로 산정하는 방법으로는 Hazen(1930), Casagrande(1937), Amer and Awad(1974), Samarasinghe *et al.*(1982) 및 Kenney(1984) 등에 의해 제안된 경험식이 널리 사용되고 있는데, 이들 경험식들에서 유효경, 균등계수, 간극비 및 밀도 등을 주요 인자로 적용하고 있음이 이를 증명하고 있다. 그리고 투수계수는 간극 크기의 함수로서 흡입자의 크기가 작을 수록 물과 접촉하는 표면적은 커지게 되고, 토층에서 물의 흐름에 대한 마찰저항이 증가되어 투수계수를 감소시키게 되므로 투수계수는 입경에 비례한다(Lambe and Whitman, 1969). 또한, 함수상태에 따른 단위중량을 의미하는 건조밀도, 습윤밀도 및 포화밀도는 상호간 밀접한 관련성이 있는 물성으로서 서로 정비례관계에 있으며, 이들 밀도는 간극비와 상호 반비례관계에 있다(김경수, 2001; 김경수 외, 2004).

밀도와 간극비 및 간극율

Fig. 4는 시험결과에 의한 건조밀도와 간극비 및 간극율간의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)는 건조밀도와 간극비의 관계를 도시한 것으로, 제3기퇴적암류지역의 일부 토층시료가 다른 두 지역에 비해 큰 간극비와 작은 밀도영역에 점사되고 화강암류지역의 토층시료는 주로 작은 간극비와 큰 밀도영역에 점사될 뿐 3개지역 모두에서 간극비는 건조밀도와 뚜렷하게 반비례적인 관계를 보였다. 그리고 나머지 습윤밀도 및 포화밀도와도 건조밀도와 거의 동일하게 반비례적 관계를 나타내었다.

Fig. 4(b)는 간극율과 건조밀도의 관계를 도시한 것으로, 제3기퇴적암류지역은 간극율과 건조밀도가 다른 두 지역에 비해 좌표기준으로부터 왼쪽 영역에 점사되고 화강암류지역은 다른 두 지역에 비해 상대적으로 외곽에 점사되는 차이만을 보일 뿐 전반적으로 간극율과 건조

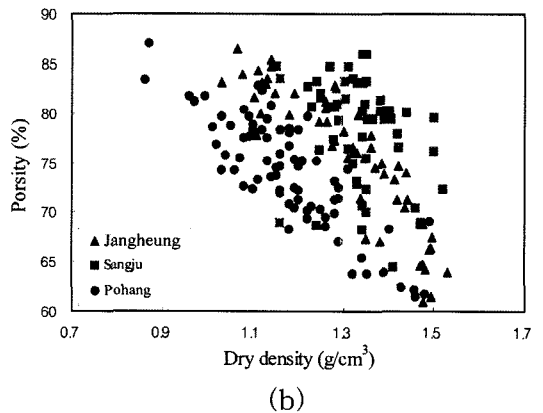
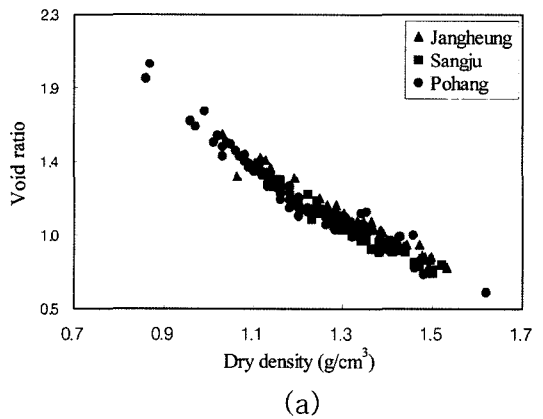


Fig. 4. Relationship between void ratio, porosity and dry density of soils collected from the study areas: (a), Void ratio and dry density; (b), Porosity and dry density.

밀도가 반비례적인 관계를 나타내었다. 따라서 간극비와 간극율은 모두 건조밀도와 반비례적인 관계에 있는 물성임을 알 수 있으며, 이러한 상관성은 3개지역 모두에서 유사한 경향성을 보였다.

투수계수와 간극비 및 간극율

Fig. 5는 시험결과에 의한 토층의 투수계수와 간극비 및 간극율간의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)는 투수계수와 간극비의 관계를 도시한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 상관성이 뚜렷하게 관찰되지는 않으나 대체로 간극비가 클 수록 투수계수가 따라서 커지는 비례적인 경향성을 보였다. 지역별로도 특별히 대비되지는 않으나 화강암류지역의 토층시료는 간극비가 가장 좁은 영역에 산포하고 투수계수가 선형적으로 비례하여 증가되는 경향성을 보인 반면, 편마암류지역과 제3기퇴적암류지역은 간극비가 넓은 영역에 분포하고 투수계수 또한 산포되는 양상을 보였는데, 이러한 현상은 제3기퇴적암류지역에서 특히 두드러진 것으로 관찰되었다. 그림에도 불구하고 전반적으로는 간극비가 크면 투수계수도 크게 나타나는 비례적인 관계를 보임으로써 간극비와 투수계수는 상관성이 있다.

토층에서 간극비란 투수계수에 직접적으로 영향을 미치는 토질요소로서 각각의 간극크기와 상관없이 간극 모두를 합산한 산술적인 수치보다는 각 간극이 차지하는

개별적인 크기에 더 직접적으로 상관된다는 점이 중요하다. 이러한 사실을 염두에 두고 지역별로 간극비와 투수계수를 살펴보면, 상주지역 화강암류는 좁은 영역에서도 선형적 비례관계를 보이는 반면, 장흥지역 편마암류와 포항지역 제3기퇴적암류는 대체로 비례적 관계를 보이는 것이나 훨씬 넓은 영역에 걸쳐 산포하고 있으며, 특히 제3기퇴적암류지역에서 이러한 양상이 더 두드러짐을 알 수 있다. 이는 화강암류지역은 화강풍화토이기 때문에 자갈이나 모래크기의 입자들의 함유비율이 높아 간극비가 작음에도 간극의 크기들이 큰데 반해, 제3기퇴적암류지역은 세일이나 이암들로서 입자크기가 더 세립이기 때문에 간극비는 크나 개개 간극들의 크기가 화강암류지역에 비해 상대적으로 작은 데서 나타날 수 있는 양상을 단적으로 보여주는 결과로 해석된다.

Fig. 5(b)는 투수계수와 간극율의 관계를 도시한 것으로 간극비와 마찬가지로 뚜렷한 상관성이 관찰되지는 않으나 대체로 간극율이 클 수록 투수계수도 따라서 커지는 비례적인 경향성을 보였다. 지역별로는 간극비의 경우와 마찬가지로 다른 두 지역에 비해 화강암류지역은 전반적으로 간극율이 다소 큰 편이나 투수계수가 작아 좁은 영역에 점시된 반면, 편마암류지역과 제3기퇴적암류지역은 간극율이 크고 투수계수가 또한 넓은 범위로 전반적으로 산포되는 양상을 보였다. 그리고 간극비의 경우와 마찬가지로 전반적으로는 간극율이 크면 투

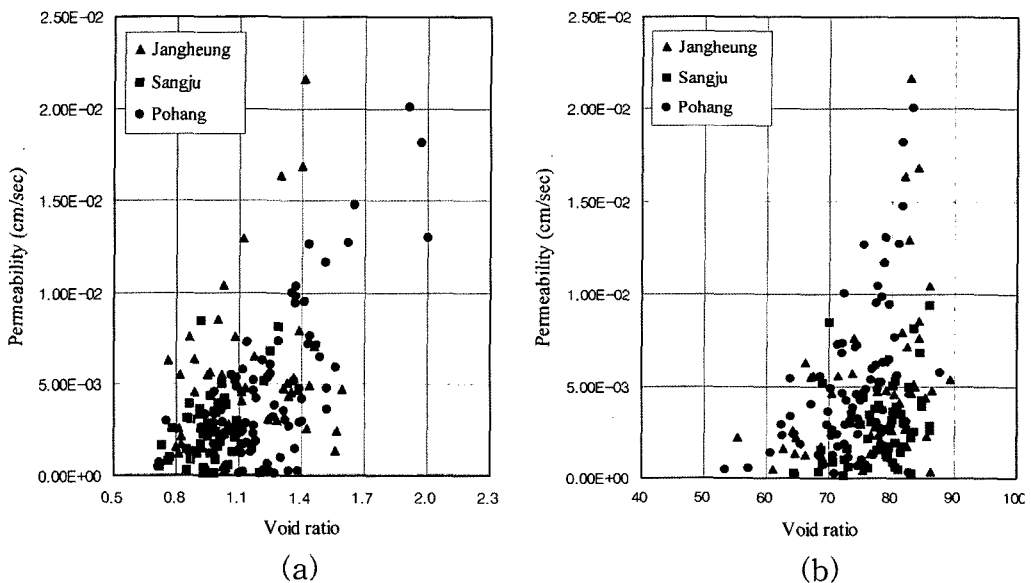


Fig. 5. Relationship between void ratio, porosity and permeability coefficient of soils collected from the study areas: (a), Void ratio and permeability coefficient; (b), Porosity and permeability coefficient.

투수계수도 크게 나타나는 비례적인 관계를 보임으로써 투수계수와 간극율은 서로 상관성이 있다.

투수계수와 유효경

Fig. 6은 시험결과에 의한 투수계수와 유효경의 상관 관계를 도시한 그림이다. 앞에서도 밝혔듯이 일반적으로 투수계수는 간극 크기의 함수로서 입경에 비례하는데, 그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 유효경이 증가하면 투수계수 또한 증가하는 경향성을 보임으로써 유효경과 투수계수가 서로 비례관계에 있음을 알 수 있다. 이러한 양상은 지역별로 다소의 차이점이 있을 뿐 거의 비슷한 경향성을 보이는 것으로 관찰되었다. 즉, 화강암 류지역은 다른 두 지역에 비해 유효경과 투수계수 모두 작은 편이어서 비교적 좁은 영역에 점사되고 제3기퇴적 암류지역은 투수계수와 유효경이 커서 넓은 영역에 걸쳐서 분포되며, 편마암류지역은 그 중간부에 위치하는 것으로 분석되었다. 따라서 유효경은 토층에서의 투수성을 예측하는 판별인자로 이용될 수 있으며, 또한, 투수계수에 영향을 미치는 요소이기도 하다.

투수계수와 균등계수 및 곡률계수

Fig. 7은 투수계수에 유의한 영향인자로 간주되고 있는 균등계수와 곡률계수를 투수계수에 대비하여 나타낸

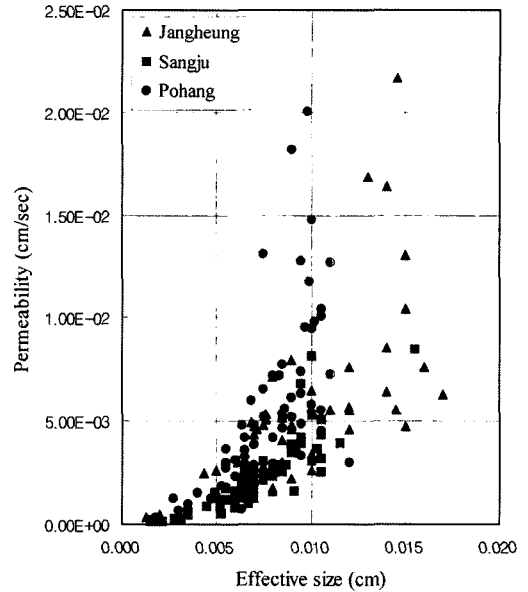
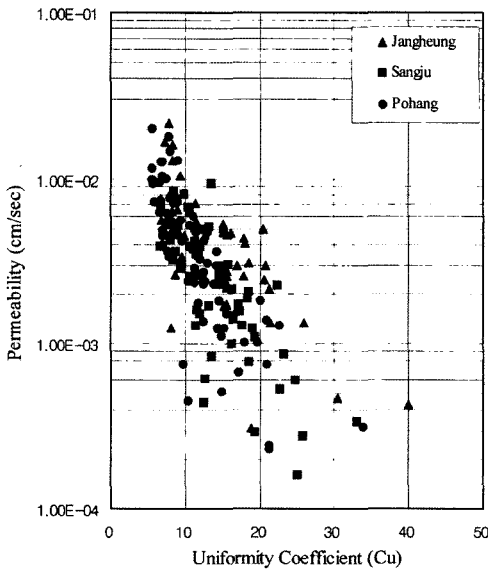
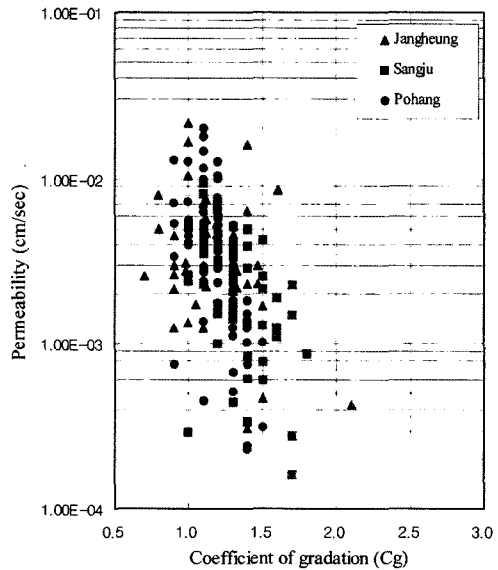


Fig. 6. Relationship between effective size and permeability coefficient of soils collected from the study areas.

그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 균등계수와 투수계수, 그리고 곡률계수와 투수계수는 서로 상관성이 있음을 알 수 있다. 즉, 균등계수가 크면 투수계수는 감소될 뿐만 아니라 곡률계수가 커지면 투수계수는 감소하는 반



(a)



(b)

Fig. 7. Relationship between uniformity coefficient, gradation coefficient and permeability coefficient of soils collected from the study areas.

비례적 관계를 갖는다. 그리고 이러한 양상은 지역별로 거의 유사한 경향성을 보였다.

일반적으로 균등계수가 4 또는 6이상이면서 그 값이 클 수록 입도분포가 양호하다고 말할 수 있는데, Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 그 분포양상은 대략 5~20의 범위에 밀집되고 일부는 40 정도까지 분포하여 양호한 입도조건을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 지역별로 뚜렷한 차이점이 관찰되지는 않았으나 균등계수는 투수계수와 반비례적 관계에 있으며, 산사태발생지역과 미발생지역간 균등계수의 차별성은 특별히 관찰되지 않는다. 한편, 일반적으로 곡률계수 또한 1 이상이면서 그 값이 클 수록 입도분포가 양호하다고 할 수 있는데, Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 1~2사이에 밀집되어 분포함으로써 양호한 입도조건을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 지역별로 뚜렷한 차이점이 관찰되지는 않았으나 균등계수와 마찬가지로 곡률계수는 투수계수와 반비례적 관계에 있으며, 역시 산사태발생지역과 미발생지역간 곡률계수의 차별성은 특별히 관찰되지 않는다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때, 균등계수와 곡률계수 모두 토층에서의 투수성을 예측하는 판별인자로 이용될 수 있을 것으로 평가되었다.

결 론

이 연구는 지질조건이 다른 3개지역으로서 같은 시기에 집중호우로 인해 산사태들이 집중적으로 발생한 장흥 편마암류지역, 상주 화강암류지역 및 포항 제3기퇴적암류지역의 자연사면 토층을 대상으로 여러 토질시험을 실시하여 지질조건에 따른 토질특성과 산사태와의 관련성을 파악하였다. 그리고 이들 토질특성간의 상관관계를 분석하였다.

(1) 모든 지질에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역보다 세립자의 함유비율이 높고 낮은 연경도를 가지며, 대체로 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는 것으로 나타났다. 액성한계는 유사하나 소성한계는 편마암지역이 다른 두 지질보다 상대적으로 더 크다.

(2) 투수계수는 화강암류 토층이 가장 크고, 다음으로 편마암류이고 제3기 퇴적암류가 가장 작은 것으로 나타났다. 그리고 모든 지질에서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 큰 투수성지반인 것으로 나타나 동일한 지질조건인 경우 투수성이 양호한 토층이 산사태에 더 취약하다.

(3) 점착력은 지질별로 특별히 대비되지 않으며 전단

저항각은 모든 지질에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 작게 나타남으로써 같은 지질조건일 경우 전단저항각이 작은 토층은 큰 토층에 비해 산사태에 더 취약한 것으로 해석되었다.

(4) 간극비와 간극율은 모두 건조밀도와 반비례적인 관계를 갖는다. 그리고 습윤밀도 및 포화밀도 또한 건조밀도와 거의 동일하게 반비례적 관계에 있으며, 이러한 상관성은 3개지역 모두에서 유사한 경향성을 보였다. 한편, 간극비와 간극율이 크면 투수계수도 따라서 커지는 상호 비례적 관계를 갖는다.

(5) 입도조건과 관계되는 유효경, 균등계수 및 곡률계수는 모두 투수성과 관계되는 토질인자로서 전반적으로 유효경이 증가하면 투수계수 또한 증가하는 경향성을 보인다. 반면, 균등계수와 곡률계수가 크면 투수계수는 감소하는 반비례적 관계를 갖는다. 그리고 이러한 양상은 지역별로 거의 유사한 경향성을 보였다.

사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 산사태재해 예측 및 저감기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김경수, 2001, 지형 및 토질특성을 고려한 산사태 예측, 한국지질자원연구원 논문집, 5(4), 29-41.
- 김경수, 김원영, 채병근, 송영석, 조용찬, 2005, 강우에 의해 발생된 자연사면 산사태의 지질공학적 분석-용인·안성지역을 대상으로-, 지질공학, 15(2), 105-121.
- 김경수, 이문세, 조용찬, 채병근, 이춘오, 2004, 지질에 따른 토층사면의 토질공학적 특성-부산 황령산지역-, 지질공학, 14(4), 487-498.
- 김동학, 이병주, 1986, 1:50,000 한국지질도 청산도폭, 한국동력자원연구소.
- 김상규, 1999, 토질역학 이론과 응용, 청문각, 434p.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병근, 1998, 지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성-연천-철원지역을 대상으로-, 대한지질공학회지, 8(2), 115-130.
- 김원영, 채병근, 김경수, 기원서, 조성관, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09, 642p.
- 임상호, 이동우, 박봉순, 1964, 1:50,000 한국지질도 포항도폭, 국립지질조사소.
- 원종관, 김기태, 1969, 1:50,000 한국지질도 상주도폭, 국립지질조사소.
- 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필중, 최현일, 민명식, 1999, 1:250,000 서울-남천점 지질도폭, 과학기술부.
- KS F 2302, 흙의 입도시험, 한국산업규격.
- KS F 2303, 흙의 액성 및 소성한계시험, 한국산업규격.

- KS F 2306, 흙의 함수비시험, 한국산업규격.
 KS F 2308, 흙의 밀도시험, 한국산업규격.
 KS F 2322, 흙의 투수시험, 한국산업규격.
 KS F 2343, 압밀 배수조건에서 흙의 직접전단시험, 한국산업규격.
- Amer, A. M., and Awad, A. A., 1974, "Permeability of Cohesionless Soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100(GT12), 1309-1306.
- Atterberg, A., 1911, *Über die Physikalische Bodenuntersuchung und Über die Plastizität der Tone*, Int. Mitt. Bodenkunde, 1, 1-5.
- Braja M. D., 1998, Principles of Geotechnical Engineering, Fourth Edition, Thomson Learning, 764p.
- Brand, E. W., 1981, Some thoughts on rainfall-induced slope failures, Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, Stockholm, The Netherlands, 373-376.
- Brenner, R. P., Tam, H. K., Brand, E. W., 1985, Field stress path simulation of rainfall-induced slope failure, Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, San Francisco, 991-996.
- Casagrande, A., 1937, Seepage through Dams, Contributions to Soil mechanics, ASCE.
- Darcy, H., 1856, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Dalmont, Paris.
- Giannecchini, R., 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), 241-245.
- Hazen, A., 1930, "Water Supply" in American Civil Engineers Handbook, Wiley, New York.
- Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils, Journal, Soil Mechanics and Foundation. Div., ASCE, 82(SM1), 867p.
- Hutchinson, J. N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology, In Landslides Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, 1, 3-35.
- Kenney, T. C., 1984, Permeability of Compacted Granular Materials, Canadian Geotechnical Journal, 21(4), 726-729.
- Kozeny, J., and Carman, P. E., 1956, Flow of gases Through Porous Media, Academic, New York.
- Lambe, T. W., and Whitman, R. V., 1969, Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.
- Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H., Drnevich, V. P., 1982, Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108, GT6, 835-850.
- Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and process, National Academy of Science, Washington, D. C., special report, 2, 11-33.

2007년 4월 28일 원고접수, 2007년 6월 14일 게재승인

김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3054

Fax: 042-861-9723

E-mail: kks@kigam.re.kr