

## 산사태지역 토층사면의 지질조건별 토질특성

김 경 수\*

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

### Soil Characteristics according to the Geological Condition of Soil Slopes in Landslide Area

Kyeong-Su Kim\*

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

이 연구는 산사태가 발생한 편마암류, 화강암류 및 제3기퇴적암류지역 자연사면의 토층을 대상으로 여러 토질시험을 실시하여 산사태에 영향을 미치는 토층사면의 토질특성을 고찰하였다. 이를 위하여 같은 시기에 집중호우로 인해 많은 산사태들이 발생되었던 지역으로 편마암류인 장흥지역, 화강암류인 상주지역 및 제3기퇴적암류인 포항지역의 산사태현장 및 그와 대비되는 곳의 토층으로부터 채취한 시료에 대해 물성 및 공학시험을 실시하였다. 산사태자료와 시험결과를 토대로 산사태지역의 토질특성을 파악하고 발생지역과 미발생지역간의 차별성을 분석하였다. 지질별로 다소의 차이는 있으나 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 균등계수와 곡률계수가 더 크고 세립자의 함유비율이 더 높다. 액성한계는 거의 유사한 경향성을 보이나 소성한계는 다른 두 지질에 비해서 편마암이 상대적으로 더 크게 나타났으며, 산사태 발생지역의 토층이 더 낮은 연경도를 갖는다. 함수비는 다른 두 지질에 비해서 제3기퇴적암류가 훨씬 큰데, 이는 모암의 광물조성과 토층의 구조 및 풍화양상 등 다양한 토질요소에 영향을 받는다.

3개 지질조건 모두에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해서 대체로 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는데, 이는 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 불량한 입도분포와 느슨한 지반상태에 있음을 보여주는 것으로, 간극율이 크고 밀도가 작은 토층에서 산사태가 더 쉽게 발생할 수 있음을 의미한다. 그리고 동일한 지질조건인 경우 투수성이 양호한 토층이 산사태에 더 취약한데, 투수성은 입도분포, 간극크기, 흡입자의 거칠기 및 구조 등의 토질특성과 풍화나 퇴적환경 등 지질성인에 영향을 받는다. 한편, 전단특성은 지질조건에 따라 다소의 차이는 있으나 특별하게 구분되지는 않는다. 그러나 모든 지질조건에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 전단저항각이 더 작은 것으로 나타남으로써 동일한 지질조건인 경우 전단저항각이 큰 토층은 작은 토층에 비해 산사태에 더 안정한 지반으로 분류된다.

**주요어:** 자연사면, 산사태, 집중호우, 지질조건, 토질특성

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 composed with gneiss, granite, and the tertiary sedimentary rock. To investigate the soil characteristics according to landslide and non landslide areas, soils are sampled from Jangheung, Sangju and Pohang. The landslides at three areas 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. On the basis of the landslide data and the result of soil test, the soil characteristics at the landslide area and the differentiation between landslide area and non landslide area are analyzed. However soil characteristics have a little differentiation to geological condition, the uniformity coefficient and the coefficient of gradation of soils at the landslide area is larger than those of soils at the non landslide area. Also, the proportion of fine particle of soils at the landslide area is higher. The plastic limit of soils sampled from the granite and the sedimentary rock regions is larger than that sampled from the gneiss region. However the liquid limit is irrelevant to the geological condition. Also, the consistency of soils at the landslide area is smaller. The natural moisture content of soils in the sedimentary rock regions is larger than that of the granite and gneiss. It is mainly influenced by mineral compo-

\*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

sition, soil layer structure, weathering condition, and so on. The soils sampled from landslide area have higher porosity and lower density than those from non landslide area. It means that the soils of landslide area have poor particle size distribution and loose density. Therefore, the terrain slope with poor distribution and loose density is vulnerable to occur in landslides. Also, 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. Meanwhile, the shear strength of soils is little difference according to the geological condition. But, the internal friction angle of soils sampled from the landslide area is lower than that of soils from the non landslide area. Therefore, the terrain slope with low internal friction angle is more vulnerable to the landslide.

**Key words :** natural slope, landslide, intensive rainfall, geological condition, soil characteristics

## 서론

자연사면의 산사태에서 지형조건, 사면의 기하학적 형태, 집중호우의 양상 등이 기본적인 평가요소이지만 그에 못지않게 토층의 분포상태도 산사태 발생가능성 및 규모와 밀접하게 관련된다. 강우에 의해 발생하는 산사태는 집중적으로 비가 내리는 동안 증가된 간극수압(pore water pressure)과 침투력(seepage force)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(Mathewson *et al.*, 1990; Sitar *et al.*, 1992; Anderson and Sitar, 1995; Montgomery *et al.*, 1997). 자연사면에서 토층이라 함은 풍화암과 암편 등을 포함하는 미고결물질을 통칭하는 것(Varnes, 1978)으로, 강우 등에 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 달라진다(Hutchinson, 1988). 그리고 상부토층은 기반암 상부의 풍화잔류토와 퇴적물 및 일부 풍화암편으로 구성되는데, 이들 물질들은 산사태가 일어나는 지역의 지질과 연관성을 가지며, 풍화잔류토나 퇴적물들은 산사태 지역의 암석풍화에 의하여 생성되므로 암석을 구성하고 있는 광물성분에 따라 토질특성이 다르게 나타난다(김원영 외, 1998; 김원영 외, 2000; 김경수 외, 2004).

연구지역에서의 산사태들도 대부분 기반암의 상부에 위치한 토층이 붕괴된 유동성산사태이다. 이러한 유동성 산사태를 평가하기 위해서는 사면의 표토를 구성하고 있는 토층물질의 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

이 연구에서는 지질조건이 서로 다른 3개지역을 대상으로 현장에서 채취된 토층시료에 대한 실내시험을 실시하고 그 결과로부터 산사태와 밀접한 관련성을 갖는

토층매질의 특성을 지질공학적 측면에서 평가하였다. 그리고 동일지역 내에서도 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역으로 구분하여 토층의 물리적 성질 및 공학적 특성을 상호 비교분석하였다. 또한, 산사태에 의한 토성지수와 영향요인을 파악하고 지질조건에 따른 토질시험 대표치를 제시하였다.

## 연구지역

연구지역은 지질조건이 서로 다른 3개지역으로서 편마암류인 장흥지역, 화강암류인 상주지역 및 제3기퇴적암류인 포항지역이다(Fig. 1). 장흥지역에서는 1998년 8월 4~7일 나흘간에 걸쳐 약 588 mm의 집중호우가 내렸으며, 상주지역에서는 8월 10~12일 사흘간에 걸친

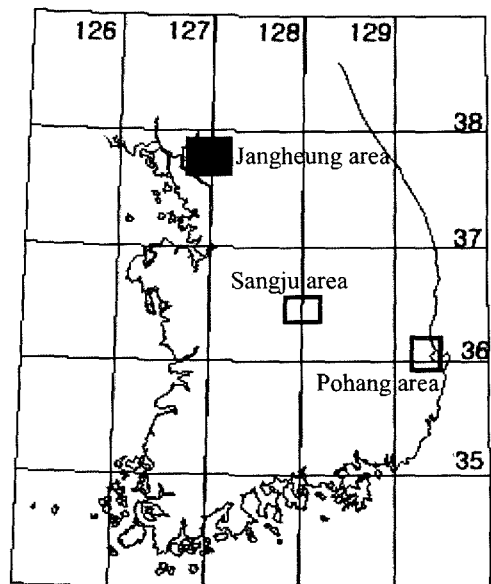


Fig. 1. Location map of study area.

522 mm 정도의 집중호우가 있었다. 그리고 포항지역에서는 7월 25~26일 이틀간에 약 150 mm의 집중호우가 발생되었다. 현장조사 결과 이들 집중호우의 영향으로 장흥지역에서는 511개, 상주지역과 포항지역에서는 각각 788개 및 283개의 산사태가 발생된 것으로 조사되었다.

산사태에 유의한 영향요소로 간주되고 있는 토질특성을 평가하고 토질특성과 산사태간의 관련성을 분석하기 위하여 현장조사시 시험용 토층시료를 채취하였으며, 이를 대상으로 실험실에서 각종 토질시험을 수행하였다. 시험용 토층시료는 장흥지역 55개(산사태발생지역 28개 및 미발생지역 27개), 상주지역 58개(산사태발생지역과 미발생지역 각 29개) 및 포항지역 81개(산사태발생지역 39개 및 미발생지역 42개)로서 총 194개이다. 이들은 서로 다른 지질조건인 3개지역으로부터 채취된 토층시료로서 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역으로 구분하였다.

### 토질시험

연구지역에서의 토층시료 채취는 표토를 제거한 후 40~60 cm 깊이의 토층을 대상으로 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 최대한 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), 밀도(density), 투수계수(coefficient 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 발생한 지역의 토층은 발생되지 않은 지역에 비해 더 세립(finier grain size)이고 낮은 액성한계를 가지는 것으로 보고하였다. 한편, Varnes (1978)는 산사태에서 입도분포는 중요한 요소로서 유동성산사태의 경우 흘러내리는 물질에 대해 입도분석을 실시하여 직경 2 mm 이상의 입자를 20~80% 함유하면 암설유동(debris flow), 직경 2 mm 미만의 입자를 80% 이상 함유하면 토양유동(mud flow)으로 구분하였다. 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 경우에도 연약한 상태에 이르게 되어 더 쉽게 붕괴될 수 있을 것이다.

### 입도분포

Fig. 2는 편마암류(장흥지역), 화강암류(상주지역), 제3기 퇴적암류(포항지역) 토층시료에 대한 입도시험결과를 지질별로 구분하여 대표적인 입도분포 분석결과를 나타내었다. Fig. 2(a)는 편마암류지역의 토층시료에 대한 시험결과 중에서 대표적 20개시료의 입도분포곡선을 나타낸 것으로, 입도분포곡선이 대체로 완만한 기울기를 보이며, 균등계수가 5~40의 범위이고 곡률계수는 1~3의 범위로서 대부분 양입도(well grading)의 조건을 충족함으로써 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. 산사태 발생지역과 미발생지역의 입도분포를 비교해 볼 때, 산사태발생지역의 토층시료는 실트와 점토크기인 세립자의 함유비율이 평균 10.72%로서 미발생지역의 9.03%에 비해 세립의 구성비가 다소 높은 것으로 나타났다. 이는 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 세립이라는 Giannecchini and Pochini(2003)의 연구결과와 대체로 일치하는 경향성을 보였다. 그리고 균등계수와 곡

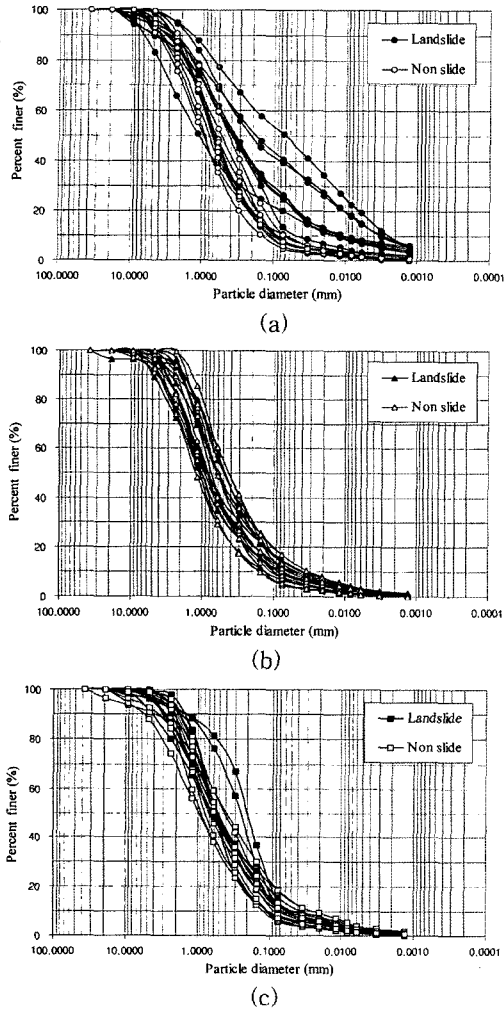


Fig. 2. Grain size distribution curves by the sieve analysis test in the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

틀계수를 평균치로 기준하여 살펴보면, 산사태발생지역의 토층시료는 균등계수와 곡률계수가 각각 14.3 및 1.4이고 미발생지역은 13.7 및 1.2로서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 모두 큰 것으로 나타났다.

Fig. 2(b)는 화강암류지역의 토층시료에 대한 시험결과 중 대표적 20개시료의 입도분포곡선을 나타낸 것으로, 입도분포곡선이 대체로 완만한 기울기를 보이며 균등계수가 2~33의 범위이고, 곡률계수는 1~3의 범위로서 대부분 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. 산사태발생지역과 미발생지역의 입도분포를 비교해 볼 때, 세립자의 함유비율이 평균치를 기준으로 하여 각각

10.49%와 10.88%로서 거의 동일한 것으로 나타났다. 그리고 자갈과 모래인 조립의 구성비율 또한 거의 유사한 결과를 보임으로써 산사태의 발생여부에 따른 입도특성이 특별히 대비되지 않음을 알 수 있다. 한편, 균등계수와 곡률계수를 평균치로 기준하여 살펴보면, 산사태발생지역의 균등계수 및 곡률계수는 14.6 및 1.3이고, 미발생지역은 14.2 및 1.4로서 거의 동일한 것으로 나타나 화강암류지역은 산사태발생지역과 미발생지역이 거의 유사한 입도특성을 보였다.

Fig. 2(c)는 제3기퇴적암류지역의 토층시료에 대한 시험결과 중 대표적 20개시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 입도분포곡선의 기울기가 대체로 완만하고 균등계수가 6~34의 범위이고 곡률계수는 1~2의 범위로서 대부분 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. 산사태발생지역과 미발생지역의 입도분포를 비교해 볼 때, 세립자의 함유비율이 평균치를 기준으로 하여 각각 11.64%와 10.86%로서 산사태발생지역이 더 높고, 모래크기 입자의 함유비율은 각각 81.72% 및 86.16%로서 산사태발생지역이 더 낮은 경향성을 보였으나 뚜렷하게 구분되지는 않는다. 그러나 제3기퇴적암류지역 또한 다른 두 지역과 마찬가지로 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 세립이라는 Gianneccchini and Pochini(2003)의 연구결과와 대체로 일치하는 경향성을 보였다. 그리고 균등계수와 곡률계수를 평균치로 기준하여 살펴보면, 산사태발생지역의 토층시료는 균등계수와 곡률계수가 각각 11.3 및 1.2이고 미발생지역은 11.5 및 1.2로서 거의 동일한 결과치를 보였다.

Fig. 3은 3개지역의 모든 토층시료를 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 삼각좌표로 나타낸 것이다. 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.

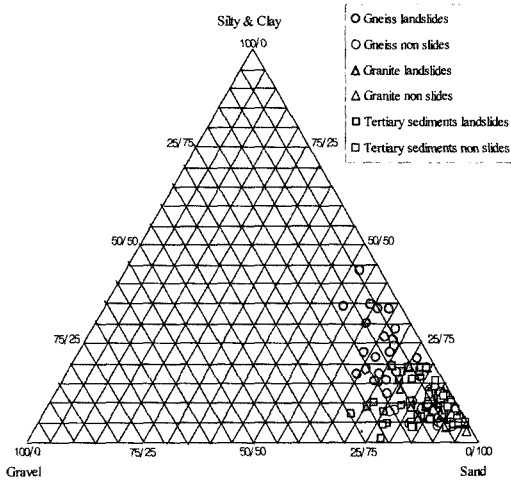


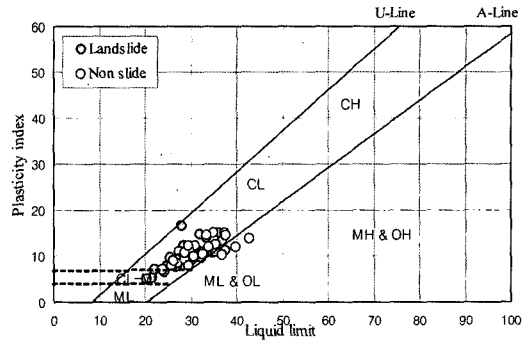
Fig. 3. Grain sizes distribution considering geological condition by the triangle diagram of soils collected from the study areas.

연경도(consistency)

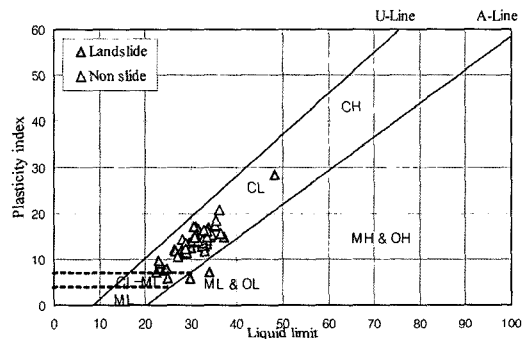
Fig. 4는 3개지역의 토층시료에 대한 연경도를 산사태 발생지역과 미발생지역으로 구분하여 소성도에 도시한 그림이고, Appendix 1은 시험결과를 세부적으로 나타낸 표이다. 편마암류지역 토층시료는 액성한계와 소성지수 평균치가 각각 31% 및 11%로서 소성도의 ML이나 CL의 영역에 점시됨으로써 대체로 점성이 낮은 실트나 점토질을 주로 함유하고 있으며, 중간정도의 소성을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 평균치를 기준으로 하였을 경우 산사태발생지역은 액성한계와 소성지수가 각각 30% 및 10%이고 미발생지역은 31% 및 11%로서 산사태의 발생여부에 따라 액성한계와 소성지수 모두 크게 구분되지는 않으나, 산사태발생지역의 토층시료가 미발생지역에 비해 약간 낮은 경향성을 보였다(Fig. 4(a)).

화강암류지역의 토층시료는 액성한계와 소성지수 평균치가 각각 31% 및 14%로서 대체로 높은 소성을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 산사태발생지역은 액성한계와 소성지수의 평균치가 각각 30% 및 13%이고 미발생지역은 32% 및 15%로서 산사태발생지역의 토층시료가 미발생지역에 비해 다소 낮은 연경도를 지니는 것으로 분석되었다. 또한, 산사태발생지역의 토층시료는 대체로 좁은 범위에 점시되는 반면, 미발생지역은 더 넓은 영역에 산포되는 양상을 보였다(Fig. 4(b)).

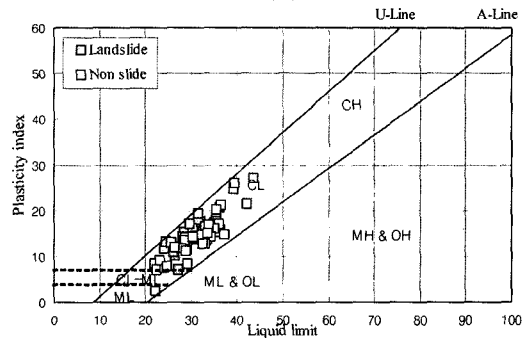
한편, 제3기퇴적암류지역의 토층시료는 액성한계와 소성지수 평균치가 각각 31% 및 14%로서 대체로 높은



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. 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.

소성을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 산사태발생지역은 액성한계와 소성지수의 평균치가 각각 31% 및 14%이고 미발생지역은 32% 및 15%로서 산사태발생지역의 토층시료가 미발생지역에 비해 다소 낮은 연경도이고, 이들은 화강암류지역과 거의 같은 정도의 연경도를 가지는 것으로 나타났다. 제3기퇴적암류지역 역시 편마암류와 화강암류지역의 경우와 마찬가지로 산사태의 발생

여부에 따라 액성한계 및 소성지수가 크게 구분되지는 않으나, 산사태발생지역의 토층시료가 미발생지역에 비해 더 낮은 액성한계와 소성지수를 지니므로써 연경도가 낮은 것으로 나타났다(Fig. 4(c)).

이와 같이 액성한계와 소성지수로서 각 지질별 토층에 대한 소성과 연경도를 비교한 결과, 평균치에 있어 액성한계는 거의 동일한 결과치를 보였으나 소성지수는 편마암류지역의 토층이 화강암류지역과 제3기퇴적암류지역에 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.

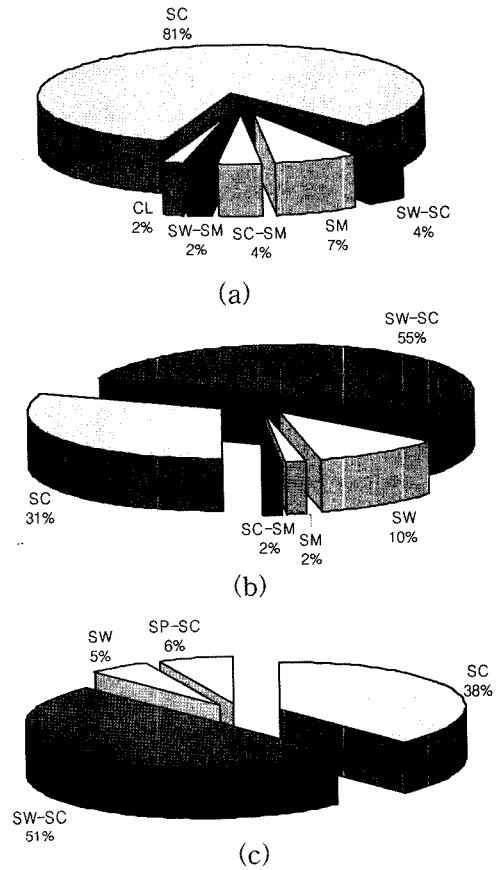
한편, 각 시료별 자연함수비를 액성한계에 대비하였을 때 편마암류지역과 화강암류지역은 모든 토층시료의 자연함수비가 액성한계에 비해 더 낮은 반면, 제3기퇴적암류지역은 상당수가 액성한계에 비해 자연함수비가 더 높고, 이러한 경향성은 산사태발생지역에서 더 두드러진 현상으로 나타났다. 따라서 주로 세립과 미립질의 이암으로 구성된 제3기퇴적암류지역의 토층은 다른 두 지역에 비해 상대적으로 더 높은 자연함수비를 유지하고 있을 뿐만 아니라 집중호우시에는 함수비의 증가로 인해 토층의 지지력이 쉽게 약해짐으로써 다른 두 지역보다 강우에 의한 산사태에 더 취약할 수 있다.

**토질분류**

Fig. 5는 연구지역 토층시료에 대한 토질을 통일분류법에 의해 분류하여 지질별로 나타낸 것이다. 편마암류지역은 대부분이 양호한 입도조건을 보이는 토층으로 분류된다. 그리고 SC와 SW-SC가 각각 81% 및 4%로서 주로 점토를 함유하는 모래질지반으로 분류되며, 일부만이 SM 및 SW-SM으로서 실트를 함유하는 모래지반임을 알 수 있다(Fig. 5(a)).

화강암류지역도 대부분이 양호한 입도조건을 보이는 토층으로 분류되며, 2% 정도만이 SM으로서 실트를 함유하는 모래질지반일 뿐, 대부분은 점토를 함유한 모래질지반으로서 SC와 SW-SC가 각각 31% 및 55%이고 SW가 10% 정도인 것으로 나타났다(Fig. 5(b)).

한편, 제3기퇴적암류지역은 SC와 SW-SC가 각각 38% 및 51%이고 SW가 5% 정도로서 대부분이 점토를



**Fig. 5.** USCS results of soils according to geological conditions in the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

함유하는 양호한 입도의 모래지반으로 분류되나 6% 정도는 SP-SC로서 다소 불량한 입도의 모래질지반인 것으로 나타났다. 따라서 3개지역의 토층은 통일분류법에 의한 입도조성이 전반적으로 양호한 편으로서 세립이나 미립자들은 실트보다는 점토를 주로 함유하는 모래질지반으로 분류되었다(Fig. 5(c)).

**공학적 특성**

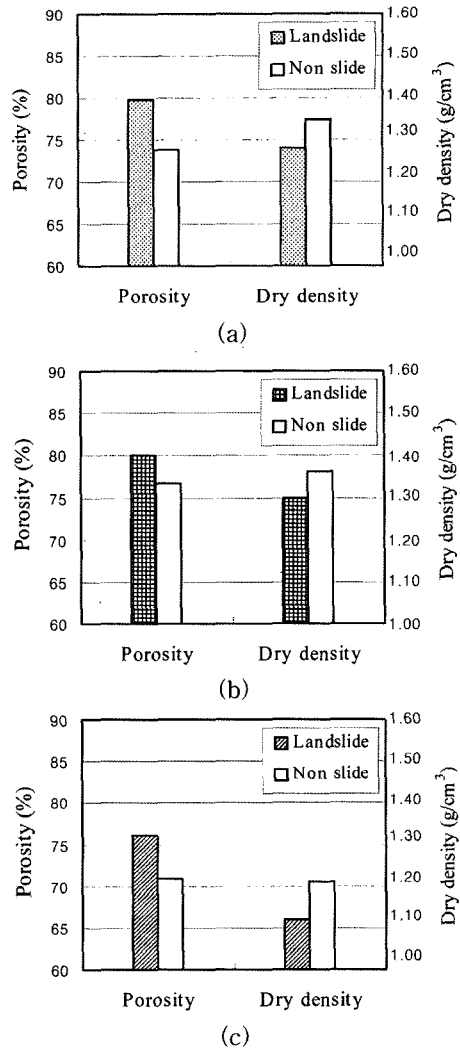
자연사면의 토층에서 간극의 상태는 간극비와 간극율로 표현되며 다짐정도는 밀도로 나타낼 수 있는데, 이들은 조성비 즉, 입도분포의 양상에 따라 크게 달라지며 조성비 못지않게 토층이 얼마나 느슨(loose)하고 조밀(dense)한가 하는 다짐상태와도 밀접한 관계를 갖는다(김경수 외, 2005).

강우에 의해 발생하는 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, 광물 입자의 거칠기 및 토층의 포화도 등 여러가지 요인에 영향을 받으며 특히, 점성토에서 입자의 구조는 투수계수와 매우 밀접하게 관계된다. 집중호우시 대부분의 유동성산사태들은 이와 같은 투수특성에 의해 사면을 구성하고 있는 토층이 일차적으로 포화된 후 배수가 원활하지 못하여 단위중량을 증가시키는 요인으로 작용하고, 이차적으로는 전단강도가 저하되어 상대적으로 중력의 영향이 크게 작용함으로써 사태물질이 급격히 흘러내리는 양상을 나타낸다(김경수 외, 2000). 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**

Fig. 6은 3개지역 토층시료의 간극율 및 밀도시험결과를 평균치로 기준하여 지질별로 나타낸 그림이고, Appendix II는 시험결과를 세부적으로 나타낸 표이다. 편마암류지역의 간극비와 간극율은 평균 1.08 및 76.85%로 나타났으며, 습윤밀도와 포화밀도의 평균치는 각각 1.54 g/cm<sup>3</sup> 및 1.82 g/cm<sup>3</sup>, 건조밀도는 1.31 g/cm<sup>3</sup>인 것으로 나타났다. 이들을 평균치로 기준하여 산사태발생지역과 미발생지역간의 간극율과 건조밀도를 살펴보면, 산사태발생지역의 토층시료는 간극율과 건조밀도가 각각 79.79% 및 1.28g/cm<sup>3</sup>이고 미발생지역은 각각 73.81% 및 1.35 g/cm<sup>3</sup>로서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는다. 이는 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 입도분포가 불량하고 더 느슨한 지반상태에 있음을 보여주는 결



**Fig. 6.** Distributions of porosity and dry density of soils collected from the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

과임과 동시에 이들 간극율과 밀도가 산사태에 영향을 미치는 토성지수임을 반증하는 결과이기도 하다(Fig. 6(a)).

화강암류지역의 간극비와 간극율은 평균 0.97 및 78.35%로 나타났다. 그리고 습윤밀도와 포화밀도의 평균치는 각각 1.55 g/cm<sup>3</sup> 및 1.82 g/cm<sup>3</sup>이고, 건조밀도는 1.33 g/cm<sup>3</sup> 인 것으로 나타났다. 이들을 평균치로 비교하였을 경우, 산사태발생지역의 토층시료는 간극율과 건조밀도가 각각 80.11% 및 1.30 g/cm<sup>3</sup>이고, 미발생지역은 각각 76.59% 및 1.37 g/cm<sup>3</sup>로서 산사태발생지역의 토층

이 미발생지역에 비해 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는 것으로 나타나 산사태의 발생여부에 따른 간극율 및 밀도특성이 편마암류지역의 경우와 거의 유사한 경향성을 보였다(Fig. 6(b)).

한편, 제3기퇴적암류지역의 간극율과 간극율은 평균 1.24 및 73.48%인 것으로 나타났다. 그리고 습윤밀도와 포화밀도의 평균치는 각각  $1.50 \text{ g/cm}^3$  및  $1.72 \text{ g/cm}^3$ 이고, 건조밀도는  $1.17 \text{ g/cm}^3$ 인 것으로 나타났다. 이들을 평균치로 비교하였을 경우, 산사태발생지역의 토층시료는 간극율과 건조밀도가 각각 76.16% 및  $1.12 \text{ g/cm}^3$ 이고 미발생지역은 70.99% 및  $1.21 \text{ g/cm}^3$ 로서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 큰 간극율과 작은 밀도특성을 보이는 앞의 두 지질의 경향성과 일치하였다(Fig. 6(c)).

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 지님으로써 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 그리고 이러한 분석결과에 의해 자연사면의 토층에서 간극과 밀도가 산사태발생에 유의한 영향인자인 것으로 평가되었다.

### 투수성

Fig. 7은 투수시험으로부터 구한 3개지역 토층시료의 투수계수를 산사태발생지역과 미발생지역으로 구분하여 평균치로 표현한 그림이고, Appendix III은 시험결과를 세부적으로 나타낸 표이다. 편마암류지역의 투수계수는 평균  $4.67 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 인 것으로 나타났다. 이는 Darcy (1856)에 의하면 대부분 조립이나 중립질모래-점토질실트 정도의 투수계수에 해당하는 것으로서, 투수성이 보통~빠른 편의 지반으로 평가되었다. 이들을 평균치로 비교하였을 경우, 편마암류지역 산사태발생지역의 토층은 투수계수가  $5.43 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 인 반면, 미발생지역은  $4.33 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 큰 투수성 토층지반을 이루고 있다. 다만, 산사태발생지역과 미발생지역간의 투수계수는 큰 차이를 보이지는 않은 것으로 나타났는데, 이는 한편으로 투수계수가 작은 차이일지라도 투수성이 산사태에 밀접하게 연관됨을 지시하는 결과로 해석된다(Fig. 7(a)).

화강암류지역 토층시료의 투수계수는 평균  $5.65 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 인 것으로 나타났다. 이는 Darcy(1856)에 의하면 조립이나 중립질모래-점토질실트 정도의 투수계수에 해

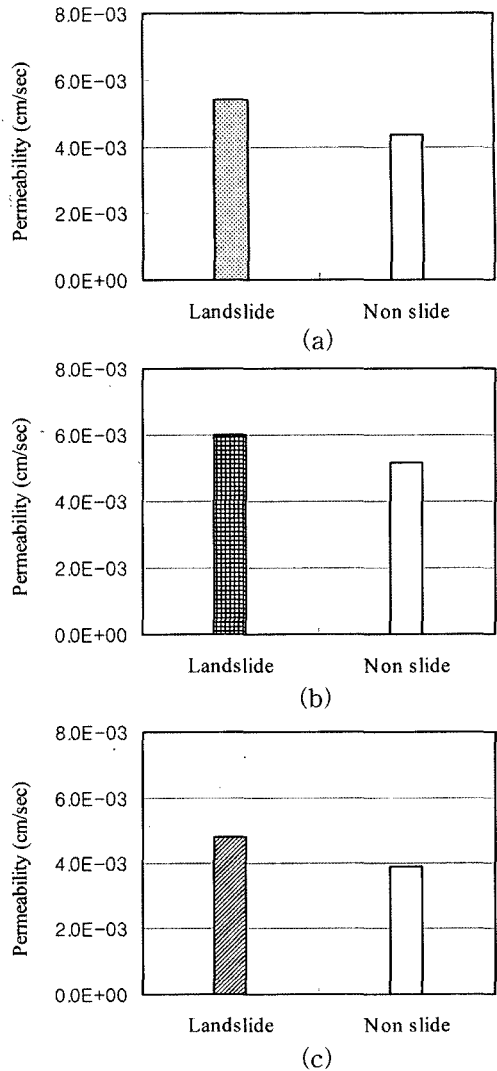


Fig. 7. Distribution of permeability coefficient of soils collected from the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

당하는 것으로서, 투수성이 보통~빠른 편의 지반으로 평가되었다. 이들을 평균치로 비교하였을 경우, 화강암류지역의 산사태발생지역은  $6.00 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이고 미발생지역은  $5.14 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 큰 투수성지반을 이루고 있는 것으로 분석되었다. 화강암류지역도 산사태발생지역과 미발생지역간의 투수계수는 큰 차이를 보이지는 않았다(Fig. 7(b)).

한편, 제3기퇴적암류지역 토층시료의 투수계수는 평균  $4.32 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 인 것으로 나타나 이 지역도 역시 Darcy(1856)에 의하면 조립이나 중립질모래-점토질실트



정도의 투수계수에 해당되며, 투수성이 보통~빠른 편인 지반으로 평가되었다. 이들을 평균치로 비교하였을 경우, 제3기퇴적암류지역 산사태발생지역은  $4.78 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$  이고 미발생지역은  $3.90 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로서 미발생지역의 투수계수가 다소 큰 투수성 지반인 것으로 분석되었다. 그리고 제3기퇴적암류지역 역시 산사태발생지역과 미발생지역간의 투수계수는 큰 차이를 보이지는 않았다(Fig. 7(c)).

지질별로는 화강암류지역의 토층이 가장 큰 투수성지반이고 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 연관이어 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**

Fig. 8은 3개지역의 토층시료에 대한 직접전단시험결과 중 전단저항각을 지역별로 구분하여 표현한 그림이고, Appendix IV는 시험결과를 세부적으로 나타낸 표이다. 편마암류지역 토층시료의 전단저항각과 점착력의 평균치는 각각 34° 및  $0.071 \text{ kg/cm}^2$ 인 것으로 나타났는데, 이는 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 대체로 다짐도가 매우느슨(very loose)-중간정도(medium dense)의 사질지반에 해당하는 값이다. 점착력은 산사태발생지역이  $0.088$

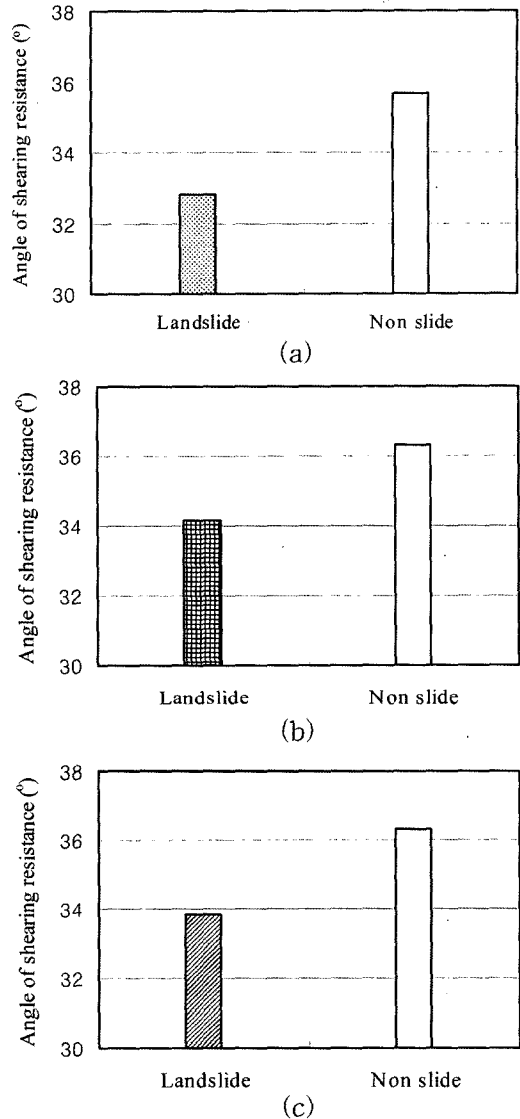


Fig. 8. Distribution of shearing resistance angle of soils collected from the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

$\text{kg/cm}^2$ 로서 미발생지역의  $0.051 \text{ kg/cm}^2$ 와 유사한 결과를 나타내므로 전단저항각만을 비교하였다. 평균치로 기준하여 산사태발생지역과 미발생지역의 전단저항각을 살펴보면, 산사태발생지역의 토층은 33°이고 미발생지역은 36°로서 산사태발생지역이 3° 정도 더 작은 전단저항각을 지니는 것으로 나타났다. 그리고 평균치에 못 미치는 시료들은 대부분 산사태발생지역에 해당되는데, 이는 전단강도가 작은 토층이 산사태에 더 취약함을 입증하는

결과로 해석된다(Fig. 8(a)).

화강암류지역 토층시료의 전단저항각과 점착력의 평균치는 각각 36° 및 0.047 kg/cm<sup>2</sup>인 것으로 나타나 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 대체로 다짐도가 중간 정도~매우조밀(very dense)한 사질지반에 해당하는 값이다. 점착력은 산사태발생지역이 0.053 kg/cm<sup>2</sup>로서 미발생지역의 0.040 kg/cm<sup>2</sup>와 거의 동일한 결과를 나타내므로 전단저항각만을 비교하였다. 평균치를 기준으로 한 산사태발생지역과 미발생지역 토층의 전단저항각은 각각 34° 및 36°로서 산사태발생지역이 2° 정도 더 작은 것으로 나타났다(Fig. 8(b)).

제3기퇴적암류지역 토층시료의 전단저항각과 점착력의 평균치는 각각 36° 및 0.046 kg/cm<sup>2</sup>인 것으로 나타나 다른 두 지역과 거의 동일한 전단특성을 보였다. 제3기퇴적암류지역 역시 산사태발생지역과 미발생지역 토층시료의 전단시험결과 점착력은 거의 유사한 결과를 보였기 때문에 전단저항각만을 대상으로 비교분석을 실시하였다. 평균치를 기준으로 할 경우에도 산사태발생지역과 미발생지역의 전단저항각이 각각 34°와 36°로서 앞의 두 지역에서의 마찬가지로 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 작은 전단저항각을 지니는 것으로 분석되었다(Fig. 8(c)).

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.

### 지질조건에 따른 산사태지역의 토질특성

토층은 암반이 물리적 풍화작용이나 지화학적 풍화작용 또는 용해작용(solution)에 의해 형성된 것으로서 그 자리에 남기도 하고 다른 곳으로 이동되어 퇴적되기도 한다. 그러므로 서로 다른 기원에 의해 지질조건이 결정되며, 각기 다른 지질조건하에서 이루어진 토층은 그 고유의 물성과 공학특성 또한 다르게 나타날 것이다. 우리나라에서와 같이 강우에 기인되는 산사태는 대부분이 토층에서 발생되는데, 일반적으로 강우의 침투로 인해 토

층이 포화됨으로써 얇은 파괴가 발생하는 현상을 보이고 있다. 그리고 토질특성은 산사태와 밀접하게 연관될 뿐만 아니라 산사태에 영향을 미치는 토질인자들 또한 여러가지가 있을 수 있다. 따라서 토층에서 발생하는 자연사면의 산사태를 평가함에 있어 지질조건에 따른 토질특성이 어떻게 다른가를 파악하는 것은 매우 중요한 일이다.

편마암류, 화강암류 및 제3기퇴적암류로 대표되는 서로 다른 지질조건에서의 토질특성과 산사태의 발생여부에 따른 토질특성을 살펴본 결과, 지질별로 여러 물리적 성질 및 공학적 특성의 차이점과 함께 산사태발생지역과 미발생지역의 토층간에는 서로 상이한 토질특성들이 관찰되었다.

### 물리적 성질

3개지역의 토층은 모두 입도분포곡선이 대체로 완전한 기울기와 조·세립자들이 잘 혼합되어 있으며, 균등계수와 곡률계수가 양입도의 조건을 충족함으로써 입도조성이 양호한 토층으로 평가되었다. 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 균등계수와 곡률계수가 더 크고 세립자의 함유비율이 높은 것으로 나타났다. 비중은 편마암류가 가장 크며 화강암류와 제3기퇴적암류의 순으로 작으며, 함수비는 다른 두 지질에 비해서 제3기퇴적암류가 두배 정도나 더 큰 것으로 나타났는데, 이들은 모암의 광물조성과 토층의 구조 및 풍화양상 등 다양한 토질요소에 영향을 받는 것으로 생각된다. 그리고 액성한계는 거의 유사한 경향성을 보인 반면, 소성한계는 다른 두 지질에 비해서 편마암이 상대적으로 더 큰 것으로 나타났는데, 이들은 특히 토층의 입도분포 중 점토입자의 함유량과 직접적으로 관계되는 물성으로 다른 두 지질에 비해서 편마암류지역이 더 높은 세립토의 함유비율을 보이는 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 또한, 산사태의 발생여부에 따른 연경도의 차이를 비교한 결과, 모든 지질에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역보다 더 낮은 연경도를 가지는 것으로 나타났다.

이 연구에서 시험을 통해 나타난 각 지질별 산사태 발생여부에 따른 토층의 비중, 함수비, 액성한계 및 소성한계는 Appendix I과 같이 제시할 수 있다.

### 공학적 특성

간극율은 편마암류와 화강암류지역의 토층이 제3기퇴적암류지역에 비해 더 큰 반면, 간극비는 제3기퇴적암류지역의 토층이 가장 크며 편마암류와 화강암류의 순

으로 나타났다. 그리고 건조밀도는 화강암류와 제3기퇴적암류지역의 토층은 거의 동일하나 편마암류지역의 토층은 이들에 비해 더 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 간극율이 크면 느슨한 지반상태이고 밀도가 크면 조밀한 지반상태를 의미하는데, 이는 동일한 지질을 대상으로 하였을 경우로서 지질별로 상호 절대치보다는 상대적 비교와 함께 주로 지질조건에 따른 산사태발생지역과 미발생지역간의 간극과 밀도특성의 비교에 주안을 두었다. 모든 지질에서 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해서 대체로 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 불량한 입도분포와 느슨한 지반상태에 있음을 보여주는 것으로 간극율이 크고 밀도가 작은 토층은 산사태에 더 취약하다.

3개지역의 토층은 모두 대체로 투수성이 양호한 지반으로 평가되었으나 투수계수는 서로 다르게 나타났다. 화강암류지역의 토층이 가장 높은 투수계수를 보였으며, 다음으로는 편마암류지역이고 제3기퇴적암류지역의 토층이 가장 작은 투수계수를 지닌 것으로 나타났다. 또한, 모든 지질에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 큰 투수성지반인 것으로 나타나 동일한 지질조건인 경우 투수성이 양호한 토층이 산사태에 더 취약한 것으로 분석되었다. 한편, 이러한 현상은 입도분포, 간극 크기, 흡입자의 거칠기 및 구조 등의 토질특성과 풍화나 퇴적환경 등 지질성인에 영향을 받는다.

전단특성은 지질조건에 따라 다소의 차이는 있으나 특별하게 구분되지는 않는다. 그러나 지질조건이 서로 다른 3개지역 모두에서 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 전단저항각이 더 작은 것으로 나타남으로써 산사태발생과 전단저항각은 서로 상관성이 있으며, 동일한 지질조건인 경우 전단저항각이 작은 토층은 큰 토층에 비해서 산사태에 더 취약하다.

이 연구에서 시험을 통해 나타난 각 지질별 산사태 발생여부에 따른 토층의 간극비, 간극율 및 건조밀도는 Appendix II, 투수계수는 Appendix III, 그리고 전단강도는 Appendix IV와 같이 제시할 수 있다.

### 결론

이 연구에서는 지질조건을 달리하는 3개지역 즉, 편마암류인 장흥지역, 화강암류인 상주지역, 그리고 제3기 퇴적암류인 포항지역의 자연사면 토층을 대상으로 여러 토질시험을 실시하여 지질조건에 따른 토질특성을 파악

하였다. 그리고 이들 물리적 성질 및 공학적 특성들과 산사태간의 관련성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 연구지역의 토층은 통일분류법에 의한 입도조성이 전반적으로 양호한 편이며, 세립이나 미립자들이 실트보다는 점토를 주로 함유하는 모래질지반으로 분류되었다. 기호로는 SC와 SW-SC계열이 가장 우세한데, 이들의 비율은 지질별로 볼 때 편마암류지역이 85%이고, 화강암류와 제3기퇴적암류지역이 각각 86% 및 89%로서 입도조건이 특별히 구별되지는 않는다.

2) 3개 지질조건 모두에서 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 균등계수와 곡률계수가 더 크고 세립자의 함유비율이 높으며, 더 낮은 연경도를 가진다. 액성한계는 거의 유사한 경향성을 보였으나 소성한계는 편마암류지역이 다른 두 지질에 비해서 상대적으로 더 크다. 이들은 특히 토층의 입도분포 중 점토입자의 함유량과 직접적으로 관계되는 물질으로 다른 두 지질에 비해서 편마암류지역이 더 높은 세립토의 함유비율을 보이는 결과와 잘 일치하였다.

3) 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해서 대체로 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는 것으로 나타났는데, 이는 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 불량한 입도분포와 느슨한 지반상태에 있음을 보여주는 결과로서 동일한 지질조건일 경우 간극율이 크고 밀도가 작은 토층이 산사태에 더 취약할 수 있음을 의미한다.

4) 투수계수는 화강암류 토층이 가장 크고, 다음으로 편마암류이고 제3기퇴적암류가 가장 작은 투수계수를 지닌 것으로 나타났다. 그리고 모든 지질에서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 큰 투수성지반인 것으로 나타나 동일한 지질조건인 경우 투수성이 양호한 토층이 산사태에 더 취약하다. 이러한 현상은 입도분포, 간극크기, 흡입자의 거칠기 및 구조 등의 토질특성, 그리고 풍화나 퇴적환경 등 지질성인에 기인된 결과로, 투수성이 양호하면 기반암의 상부에 얇게 덮인 토층이 쉽게 포화되어 하중증가로 이어지고 물이 더 빠르게 암반과의 경계부에 도달됨으로써 파괴요인으로 작용되기 때문이다.

5) 전단강도는 지질조건에 따라 특별히 구분되지는 않았으나, 모든 지질조건에서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 전단저항각이 더 작게 나타남으로써 같은 지질조건일 경우 전단저항각이 작은 토층은 큰 토층에 비해 산사태에 더 취약한 것으로 해석되었다.

사 사

참 고 문 헌

이 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 소방방재청 자연재해저감기술 개발사업인 ‘산사태 피해규모 정량화 및 최적 피해저감 기술 개발’ 연구과제의 일환으로 수행되었습니다.

김경수, 김원영, 채병곤, 송영석, 조용찬, 2005, 강우에 의해 발생된 자연사면 산사태의 지질공학적 분석 -용인·안성지역을 대상으로-, 지질공학, 15, 2, 105-121.  
 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 지질공학, 10, 2, 163-174.

**Appendix I.** Ranges and mean values for specific gravity, moisture content, liquid limit and plastic limit of soils according to geological conditions.

Geology	Material	Specific gravity		Moisture content (%)		Liquid limit (%)		Plastic limit (%)	
		Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.
Gneiss	Landslide	2.61~2.76	2.69	8.72~33.47	17.38	20.15~37.55	29.66	14.74~26.32	19.84
	Non slide	2.61~2.74	2.68	10.36~27.78	19.17	23.77~42.65	31.82	16.53~28.93	20.29
Granite	Landslide	2.52~2.72	2.62	9.49~31.84	16.23	23.97~37.15	30.10	13.77~27.00	18.97
	Non slide	2.55~2.70	2.61	7.18~29.22	16.52	22.90~37.30	30.75	15.13~25.42	17.79
Tertiary sediments	Landslide	2.50~2.65	2.59	21.83~48.41	32.07	22.07~36.32	30.81	11.25~20.37	16.67
	Non slide	2.49~2.65	2.58	11.30~36.78	25.41	22.00~43.68	31.69	12.00~22.45	17.01

**Appendix II.** Ranges and mean values for void ratio, porosity and dry density of soils according to geological conditions.

Geology	Material	Void ratio		Porosity (%)		Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	
		Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.
Gneiss	Landslide	0.75~1.57	1.13	55.35~89.46	79.79	1.03~1.53	1.28
	Non slide	0.76~1.47	1.03	53.11~86.17	73.81	1.10~1.49	1.35
Granite	Landslide	0.76~1.29	1.03	68.93~85.99	80.11	1.15~1.47	1.30
	Non slide	0.72~1.16	0.90	64.46~83.04	76.59	1.24~1.52	1.37
Tertiary sediments	Landslide	0.94~2.00	1.32	63.76~82.26	76.16	0.84~1.32	1.12
	Non slide	0.60~1.91	1.15	43.08~87.64	70.99	0.86~1.62	1.21

**Appendix III.** Ranges and mean values for permeability of soils according to geological conditions.

Geology	Material	Range of permeability (cm/sec)	Mean values of permeability (cm/sec)
Gneiss	Landslide	$1.33 \times 10^{-3} \sim 2.17 \times 10^{-2}$	$5.43 \times 10^{-3}$
	Non slide	$7.95 \times 10^{-5} \sim 1.69 \times 10^{-2}$	$4.33 \times 10^{-3}$
Granite	Landslide	$1.66 \times 10^{-4} \sim 5.16 \times 10^{-2}$	$6.00 \times 10^{-3}$
	Non slide	$1.50 \times 10^{-4} \sim 6.92 \times 10^{-2}$	$5.14 \times 10^{-3}$
Tertiary sediments	Landslide	$1.77 \times 10^{-4} \sim 1.82 \times 10^{-2}$	$4.78 \times 10^{-3}$
	Non slide	$8.60 \times 10^{-5} \sim 2.01 \times 10^{-2}$	$3.90 \times 10^{-3}$

**Appendix IV.** Ranges and mean values for cohesion and shearing resistance angle of soils according to geological conditions.

Geology	Material	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )		Angle of shearing resistance (°)	
		Range	Mean	Range	Mean
Gneiss	Landslide	0.016~0.296	0.088	18~38	33
	Non slide	0.011~0.106	0.051	31~39	36
Granite	Landslide	0.008~0.133	0.053	30~39	34
	Non slide	0.001~0.082	0.040	31~42	36
Tertiary sediments	Landslide	0.015~0.085	0.045	31~37	34
	Non slide	0.007~0.120	0.048	31~41	36

- 김경수, 이문세, 조용찬, 채병곤, 이춘오, 2004, 지질에 따른 토층사면의 토질공학적 특성 -부산 황령산지역-, 지질공학, 14, 4, 487-498.
- 김상규, 1999, 토질역학 이론과 응용, 청문각, 434p.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, 지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 -연천-철원지역을 대상으로-, 대한지질공학회지, 8, 2, 115-130.
- 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09. 642p.
- 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.
- Anderson, S. A., Sitar, N., 1995, Analysis of rainfall-induced debris flow, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121, 7, 544-552.
- 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.
- Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Digon, 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.
- Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils, Journal, Soil Mechanics and Foundation. Div., ASCE, 82-SM 1, 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.
- Mathewson, C. C., Keaton, J. R., Santi, P. M., 1990, Role of bedrock ground water in the initiation of debris flows and sustained post flow stream discharge, Bulletin of Association of Engineering Geologists, 27, 1, 73-83.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T., Loague, K., 1997, Hydrologic response of a steep, Uachanneled valley to natural and applied rainfall, Water Resources Research, 33, 1, 91-109.
- Sitar, N., Anderson, S. A., Johnson, K. A., 1992, Conditions leading to the initiation of rainfall-induced debris flows, Geotech. Engrg. Div. Specialty Conference: Stability and Performance of Slopes and Embankments-II, ASCE, New York, 834-839.
- Varnes, D J., 1978, Slope movement types and process, National Academy of Science, Washington, D C., special report, 2, 11-33.

---

2006년 10월 29일 원고접수, 2006년 12월 8일 게재승인

#### 김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3054

Fax: 042-861-9723

E-mail: kks@kigam.re.kr