The Journal of Engineering Geology, Vol.17, No.3, September, 2007, pp. 471-481

부산지역 자연사면의 지질조건에 따른 토질특성

김경수*

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Soil Characteristics according to the Geological Condition of Natural Slopes in Busan Area

Kyeong-Su Kim*

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

우리나라의 경우 자연사면 산사태는 대부분이 여름철의 집중호우에 의해 발생되며, 암반보다는 주로 토질특성에 영향을 받는다. 그리고 자연사면의 토층은 기반암의 풍화현상에 의해 형성되기 때문에 토질특성은 지질조건에 따라 다르다. 따라서 자연사면의 지반상태를 평가하기 위해서는 지질의 분포양상과 함께 지질조건에 따른 토질특성의 파악이 중요하다. 이 연구는 주로 화산암과 화강암 및 퇴적암이 분포하고 있는 부산지역 자연사면의 토층을 대상으로 지질조건에 따른 토질특성을 분석하였다. 이를 위하여 자연사면에서 채취한 토층시료를 대상으로 각종 토질시험을 수행하여 물리적 성질과 공학적 특성을 파악하고 지질조건과의 상관성을 분석하였다. 그 결과 토층은 주로 양호한 입도의 점토질 모래로 분류되었다. 습윤밀도는 1.07~1.99 kg/cm^3, 전단저항각은 28.2~39.6°, 투수계수는 8.10×10^{-5}~8.38×10^{-2}cm/sec의 범위로서 대체로 양호한 전단강도와 보통~빠른 정도의 투수성지반으로 평가되었다. 그리고 토질특성은 지질별로 서로 다른 경향성을 보였다.

주요어 : 부산지역, 자연사면, 지질조건, 토질특성

The Landslide in natural slope is occurred mostly by a heavy rain of the summer. This landslide is influenced in soil property of the surface than the rock mass. Soils in natural slope are created by weathering phenomena of the bedrock. These soils differed to the geological conditions such as sedimentary rock, metamorphic rock and volcanic rock. Therefore, estimation of landslide in natural slope is the most important analysis of the bedrock distributions and soil characteristics. This study analyzed the soil property to the natural slopes of Busan area where is distributed to volcanic rock, granite and sedimentary rock. Soil sample conducted various soil tests for estimate the soil physical property and soil engineering characteristics, and analysis of the correlation of geological conditions. In the experiment result, soils were mainly classified by a clayey sand. It is also established that 1.07~1.99 kg/cm^3 for wet density, 28.2~39.6° for angle of shearing resistance, and 8.10×10^{-5}~8.38×10^{-2}cm/sec for coefficient of permeability. From the physical parameter, the soils are estimated to the permeable ground with good shear strength, and soil properties are showed a differential tendency for each geological condition.

Key words : Busan area, natural slope, geological condition, soil characteristics

서 론

대부분이 산악지형으로 구성된 부산지역은 도시의 발달과 더불어 산지개발이 점차적으로 증가하고 있는 추세로 아파트, 학교, 도로 및 항만 등의 신축공사가 활발하게 이루어지고 있다. 부산지역은 지형적인 측면에서 보면 태백산맥의 끝자락에 위치하고 있어 높은 산악지역과 해안지역이 접해 있다. 이수곤(1999)은 GIS기법을 이용하여 부산지역의 산사태 재해위험도를 분석하여 부산지역은 산사태 발생가능성이 대단히 높을 것으로 보

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

고하였으며, 김경수 외(2004) 및 채병곤 외(2005, 2006)는 부산지역의 주요 산지를 대상으로 토질특성을 반영한 산사태예측도를 작성하여 산사태 발생가능성을 평가한 바 있다.

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 퇴적물질 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, 2000). 우리나라에서의 산사태들은 대부분 암반층 위의 토층사면에서 발생하고 있으므로 토층의 특성을 파악하는 것은 사면의 안정성과 관련하여 매우 중요한 사항이다. 만약 내적으로 취약한 지질구조 및 상부토층을 가지고 있는 자연사면에 집중강우나 인위적 절개 등의 외적요인이 가해질 경우 산사태의 발생가능성은 더 높아질 것이다.

이 연구에서는 주로 화산암과 화강암 및 퇴적암이 분포하고 있는 부산의 4개 산지지역 즉, 백양산, 구덕산, 황령산 및 장산지역의 자연사면을 대상으로 총 280개소(화산암 188개소, 화강암 47개소 및 퇴적암 45개소)에서 토층시료를 채취하여 실내에서 여러 토질시험을 수행하였다. 그리고 이들 시험결과를 토대로 자연사면 토층지반의 지질조건별 토질특성을 분석하고, 각 물성간의 상관성을 검토하였다. 한편, 토질특성의 비교분석을 위해 지질조건은 크게 화산암, 화강암 및 퇴적암으로만 구분하였다.

지질개요

부산지역은 한반도 동남부 경상분지의 밀양지괴 내 남동단부에 해당하며, 중생대 백악기의 비해성 퇴적층인 경상누층군(장기홍, 1975)의 퇴적암과 이를 관입 분출한 유천층군의 화산암류, 백악기 최후기의 심성암인 불국사 화강암류 및 맥암류, 그리고 제 4기의 퇴적층 등이 분포하고 있다. 연구지역은 크게 4개 산지로서 백양산, 구덕산, 황령산 및 장산지역이 해당된다. 백양산지역은 최하부의 퇴적암류를 기반으로 이를 부정합으로 피복하는 유천층군의 안산암 및 유문암류 암석, 이후 화강반암 및 화강암이 각각 관입하는 층서를 보여주고 있다. 구덕산 지역은 최하부의 안산암질 화산암류 복합체(안산암질화산각력암, 안산암, 암회색응회질퇴적암 등)를 기반으로 이를 관입한 심성암인 화강암과 후기 산성맥암의 관입이라는 층서를 보여주고 있다. 황령산지역은 최하부 호성퇴적암의 퇴적, 안산암질 화산각력암의 관입과 분출, 안산암질암의 관입, 산성 화산암류의 관입과 분출, 심성암인 반려암과 화강암류의 관입이라는 층서를 보인다. 그리고 장산지역은 유천층군에 속하는 중성화산암류, 다대포층, 산성화산암류가 기저에 분포해 있으며 이들을 관입한 불국사관입암류인 각섬석화강암, 흑운모화강암, 맥암류, 화강암 등이 유천층군암류들과 함께 넓게 분포해 있다(손치무 외, 1978; 장태우 외, 1983; 김향수 외, 2003; 김진섭과 윤성효, 1993; Paik *et al.*, 1996).

Fig. 1은 연구대상인 부산지역의 지질도를 나타낸 것이다.

시료채취 및 토질시험

자연사면에 분포한 상부토층의 지질조건에 따른 토질특성을 파악하기 위하여 연구지역인 부산의 백양산, 구덕산, 황령산 및 장산지역의 자연사면 토층지반에서 총 280개의 교란 및 불교란시료를 채취하였다. 시료채취는 지질별로 분포 면적비율을 고려하여 비교적 일정한 빈도로 채취함으로써 토질특성이 균등하게 평가될 수 있도록 하였다. 따라서 채취된 시료는 지질의 분포면적과 관련되어 화산암이 188개로서 가장 많고 화강암과 퇴적암이 각각 47개 및 45개이다.

시료는 표토를 제거한 후 40~60 cm 깊이의 토층에서 교란시료와 불교란시료로 구분하여 채취하였다. 불교란시료는 스테인레스로 제작한 직경 10 cm, 높이 6 cm 크기의 원통형몰드를 이용하였다. 특히, 투수시험용 불교란시료는 직경 10 cm, 높이 13 cm 크기의 원통형몰드를 사용하였다. 그리고 채취된 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉한 상태로 실험실에 운반하였다. 교란시료로는 비중(specific gravity), 함수비(moisture content), 액성한계(liquid limit), 소성한계(plastic limit) 및 입도(grain size) 등의 물성시험을 실시하고 입도시험 결과로부터 유효경(effective diameter; D_{10}), 균등계수(uniformity coefficient; C_u) 및 곡률계수(coefficient of gradation; C_g) 등을 산정하여 토층이 지니고 있는 물리적 성질을 파악하였다. 그리고 불교란시료로는 간극비(void ratio), 간극율(porosity), 포화도(degree of saturation), 밀도(density), 전단강도(shear strength) 및 투수계수(coefficient of permeability) 등의 공학적 특성을 평가하였다.

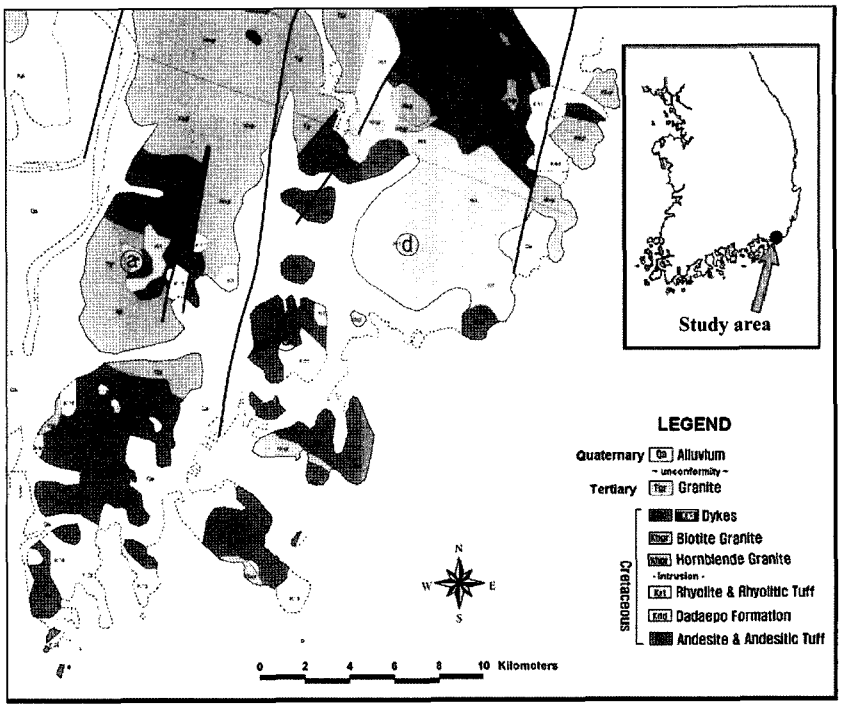

Fig. 1. Geological map of the study area: ⓐ , Bakyang Mt.; ⓑ , Kudeok Mt.; ⓒ , Hwangryeong Mt.; and ⓓ , Jang Mt.(Chang et al, 1983; Kim et al, 2003).

지질조건에 따른 토질특성

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. 자연사면의 토층에서 간극의 상태는 간극비와 간극율로 표현되며 다짐정도는 밀도로 나타낼 수 있는데, 이들은 조성비 즉, 입도분포의 양상에 따라 크게 달라지며 조성비 못지않게 토층이 얼마나 느슨하고 조밀한가 하는 다짐상태와도 밀접한 관계를 갖는다(김경수 외, 2005). Holtz and Gibbs(1956)는 시험을 통하여 모래지반을 여러 등급으로 분류하고 그 대표적인 전단저항각을 제시한 바 있다. 전단강도는 점착력과 전단저항각으로 표시되는 것으로, 토층사면에서는 전단파괴면을 인지할 수 있을 경우 파괴면에 대한 전단특성이 고려되어야 한다. Darcy(1856)는 시험을 통하여 토층을 여러 등급으로 분류하고 그 등급별 대표적 투수계수를 제시한 바 있다. 또한, Das(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. 그리고 투수계수는 유효경, 균등계수, 간극비, 간극율 및 밀도 등과 매우 깊은 관계가 있기 때문에 이들 요소는 투수계수를 개략적으로 산정하기 위한 경험식들에서 주요 인자로 적용되고 있다. 김경수 외(2005)는 토층에서 균등계수와 투수계수는 비교적 높은 상관성을 가지는 물성으로서 상호 반비례적 관계를 갖는다고 보고한 바 있다.

토층은 암반이 물리적 혹은 화학적 풍화작용(weathering), 용해작용(solution) 등에 의하여 미세한 조각들로 분리되어 형성된 것이다(김상규, 1999). 따라서 어떤 지역에 분포하는 토질특성은 그 지역에 분포하고 있는 지질조건과 밀접하게 연관되어 있으므로 암반의 분포현황을 파악하면 토층의 물리적 및 공학적 특성을 유추할 수 있을 것이다. 연구지역의 경우 지질은 화산암, 화강암 및 퇴적암지역으로 크게 구분된다. 여러 토질시

험을 실시하여 연구지역의 토질특성을 평가하고 각 물성간의 상관성 분석과 함께 지질조건에 따른 토질특성을 상호 비교하였다.

토질분류

Das(1983)는 자연상태의 토층에서 간극수는 흙입자의 형상, 크기, 광물학적 구성 등 흙의 구조(structure)와 관계가 있다고 하였다. 이 연구에서는 입자의 형상과 배열상태 및 광물학적 연구는 시도되지 않았으나 입도, 간극비 및 간극율 등의 시험결과로부터 이들의 상관성을 분석하였다.

Fig. 2는 연구지역의 토층을 통일분류법(USCS)에 의하여 구분한 것이다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 연구지역의 토층은 SW-SC, SW, SC 및 SP-SC 등으로 전반적으로 점토질모래지반으로 분류되고 대체로 양호한 입도조성을 보이는 것으로 나타났다. 이를 지질별로 살펴보면, 화산암지역은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 61%정도가 SW-SC와 SW로서 입도가 양호한 모래 및 점토질모래이고 5%정도는 SP-SM과 SP로서 입도가 불량한 모래이거나 실트질모래로 구성되어 있다. 화강암지역은 전반적으로 입도가 양호한 점토질모래지반으로서 Fig. 2(c)에서와 같이 94% 정도가 SW, SW-SC 및 SC로 분류되었다. 그리고 퇴적암지역은 전반적으로는 화강암과 유사한 경향성을 보였는데, 87% 정도가 SW, SW-SC 및 SC로서 양호한 입도조성을 보이는 점토질모래지반으로 분류되나 13%정도가 SP와 SP-SC로서 화산암과 화강암의 5% 및 6% 정도에 비해 불량한 입도조성의 비가 배 이상 높은 것으로 분석되었다(Fig. 2(d)). 이러한 결과에서 보는 바와 같이 퇴적암지역 토층이 불량한 입도의 비율이 높기는 하나 전체적으로는 입도조성이 양호한 토층지반으로 분류됨을 알 수 있다.

기본물성

Fig. 3은 연구지역 토층에 대한 물리적 성질을 지질조건별로 대비한 결과이다. 비중은 흙입자에 포함된 광물들의 종류와 함유비율에 직접적으로 기인되는 물성인데, 전체적으로는 2.49~3.02의 범위로서 평균 2.64이다. 화

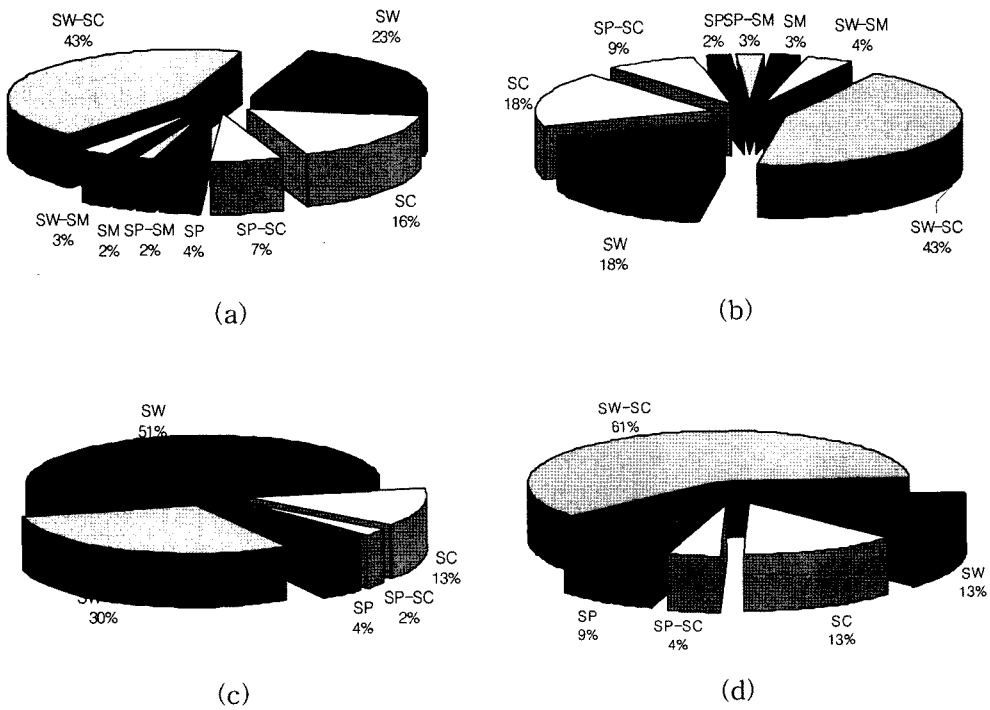

Fig. 2. Classification by USCS of soil samples according to geological conditions: (a), total samples; (b), volcanic rock; (c), granite; (d), sedimentary rock; SW, well graded sands; SC, clayey sands; SP-SC, poorly graded to clayey sands; SW-SM, well graded sands to silty sands, and SM, Silty sands.

산암지역의 토층은 평균 2.63으로서 화강암과 퇴적암지역의 2.64 및 2.65에 비해 가장 낮은 것으로 나타났다(Fig. 3(a)). 자연함수비는 8.09~52.60%의 범위로서 전체적인 평균은 25.50%이다. 지질별로는 화산암지역의 토층이 평균 28.11%로서 가장 높고 퇴적암지역은 20.60%이며, 화강암지역이 19.79%로서 가장 낮은 결과를 나타내었다(Fig. 3(b)). 흙입자들의 구조 및 배열상태에 기인되는 간극비는 평균치를 기준으로 할 때 화산암지역의 토층이 1.15로서 퇴적암지역의 1.04 및 화강암지역의 0.97에 비해 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 3(c)). 그리고 포화도의 양상은 간극비와 거의 유사한 경향성을 보였는데, 평균치를 기준으로 할 때 화산암지역의 토층이 65.21%로서 퇴적암지역의 53.71% 및 화강암지역의 52.98%에 비해 가장 높게 나타났다(Fig. 3(d)). 한편, 지

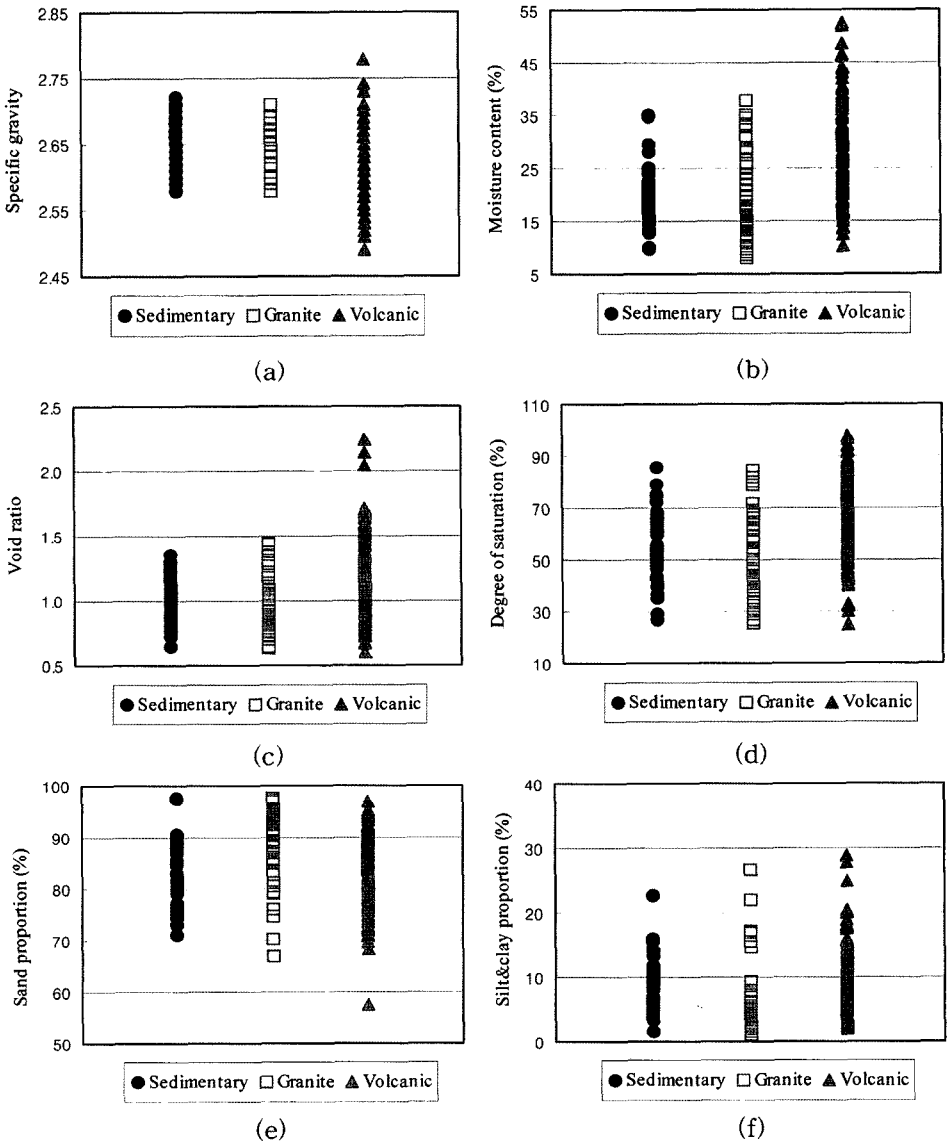

Fig. 3. Physical properties of sampled soils according to geological conditions: (a), specific gravity; (b), moisture content; (c), void ratio; (d), degree of saturation; (e), sand proportion, and (f), silt and clay proportion.

질의 성인과 관련성이 높은 것으로 알려진 토층의 입자 크기별 조성비는 Fig. 3(e) 및 (f)에서 보는 바와 같이 함유비율의 양상은 다르나 조립질인 모래는 평균치를 기준으로 하였을 경우 화강암지역의 토층이 89.50%로서 화산암의 83.99% 및 퇴적암의 81.75%에 비해 약간 높은 것으로 나타났다. 반면, 세립질인 실트와 점토크기 입자의 함유비율은 화강암지역의 토층이 6.08%로서 화산암의 8.91% 및 퇴적암의 8.42%에 비해 더 낮은 것으로 나타났다. 이와 같이 토층지반의 물성들은 서로 연관성이 있을 뿐만 아니라 지질조건에 따라서도 차이가 있음을 알 수 있다. 한편, Appendix I은 물성시험 결과를 세부적으로 나타낸 표이다.

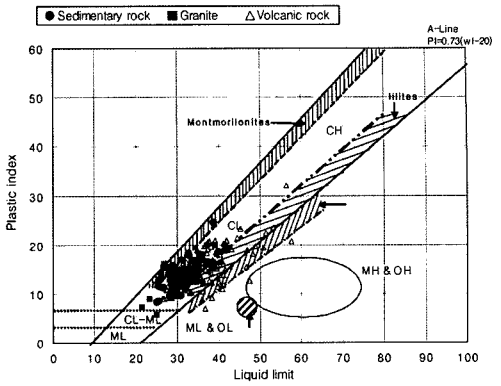

Fig. 4. Plasticity diagram using the relationship between liquid limit and plastic index of sampled soils according to geological conditions(modified Casagrande, 1948; Mitchell, 1976).

소성도

흙입자에 함유된 점토광물 등의 함유비는 X-ray 회절분석법 등으로 알 수 있으나 토질시험에 의하여 액성한계와 소성지수를 소성도에 도시함으로써 점성토에 포함된 우세한 점토광물을 개략적으로 판단할 수도 있다. 이에 개략적 활동가능성의 판별을 위해 연구지역의 토층시료에 대한 시험결과를 지질별로 구분하여 Fig. 4와 같이 소성도에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 총 280개 토층시료 중에서 13개는 활성점토인 몬모릴로나이트(montmorillonite) 영역에 점지됨으로써 활동가능성이 있는 것으로 볼 수 있으나 그 외 대부분의 시료는 몬모릴로나이트의 함유가능성이 낮음을 알 수 있다. 그리고 대부분 비활성점토인 카올리나이트(kaolinite)이거나 비교적 활성도가 낮은 일라이트(illites)의 영역으로 점시되는 것으로 보아 연구지역은 비교적 활성도가 낮은 토층지반인 것으로 생각된다. 한편, 소성도상에서의 분포양상이 화강암과 퇴적암은 거의 같은 영역에 도시되어 유사한 경향성을 보이는 반면, 화산암은 두 지질에 비해 소성한계 및 액성한계가 상대적으로 높을 뿐만 아니라 일부는 고유기질토의 영역에 점시되어 특징적으로 구별된다. 이는 토층이 풍화양상이나 구성광물의 변질상태라기 보다는 주로 성인에 기인되는 것으로, 높은 미립자의 조성비율 및 점토성분으로 구성된 화산암에서 더 큰 소성도를 보임이 이를 반증하는 결과라 할 수 있다.

입도분포

입도분포는 다른 지역과 비교하여 퇴적물이 쌓인 과정이나 역사를 추정할 수 있으며, 흙의 조직에 의한 물성을 파악하는데 이용되는 매우 중요한 성질로서 입도분포곡선은 입자의 크기 및 분포형태를 알 수 있다. 총 280개 토층시료에 대한 입도분석을 실시한 결과 입도분포곡선은 대체로 완만한 기울기를 보이고 양호한 입도분포를 보이는 것으로 나타났다. 퇴적암지역의 토층은 화산암이나 화강암지역에 비해 조립질의 분포비율이 높고 점토질보다는 실트질의 함유비가 더 높은 것으로 분석되었다. 입도분포곡선과 함께 유효경, 균등계수 및 곡률계수 등은 기본적인 토질 파라미터를 결정하는 중요요소의 하나인데, 통일분류법에서는 입도분포곡선으로부터 구한 균등계수가 4내지 6보다 크고 곡률계수가 1에서 3의 범위에 존재할 경우 입도분포가 양호한 것으로 평가한다. 시험결과 화산암의 5개를 제외한 대부분의 시료가 균등계수는 4~89의 범위이고, 곡률계수는 1~5의 범위에 해당하여 양입도의 조건에 부합되었다. Fig. 5는 균등계수와 곡률계수를 지질별로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 평균치를 기준으로 할 경우 균등계수는 퇴적암지역의 토층이 18.4로서 화산암과 화강암지역의 15.5 및 11.9에 비해 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다. 이와는 다르게 곡률계수는 화산암지역의 토층이 1.6이고 퇴적암 및 화강암지역이 1.8로서 거의 유사한 결과를 나타내었다.

Fig. 6은 모든 토층시료를 지질별로 구분하여 삼각좌표로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분 모래크기 입자들의 구성비가 높고 실트나 점토크기의 세립들의 함유비율은 25% 이내로서 비교적 낮은 편이다. 지질별로는 퇴적암지역 토층이 다른 두 지질에 비해 자갈을 포함한 조립질이 우세하고 화강암지역은 모래크기

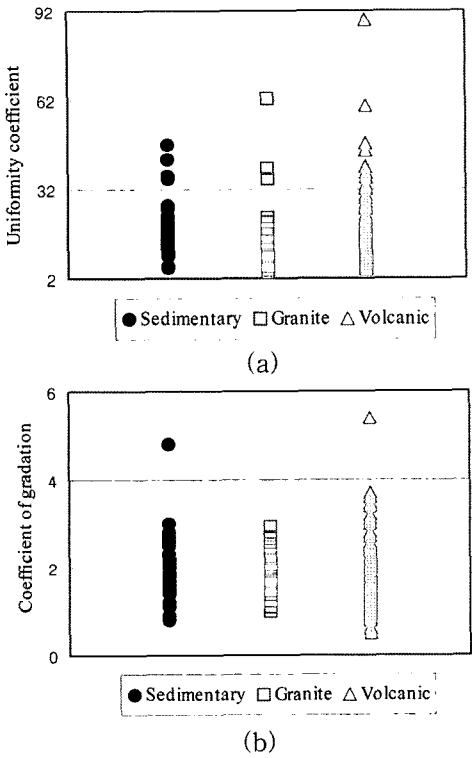

Fig. 5. Uniformity coefficient and coefficient of gradation of sampled soils according to geological conditions: (a), uniformity coefficient, and (b), coefficient of gradation.

입자들의 함유비율이 다른 두 지질에 비해 높은 편이며, 화산암지역은 두 지질에 비해 전반적으로 세립의 경향성을 보이는 것으로 나타났다.

간극비 및 밀도

Fig. 7은 간극비 및 건조밀도를 지질별로 대비하여 나타낸 것이고, Appendix II는 시험결과를 세부적으로 나타낸 표이다. 토층에서 간극비와 건조밀도는 상호 반비례적 관계를 가지는 것으로 알려져 있는데, Fig. 7에서 보는 바와 같이 평균치를 기준할 경우에도 지질별로 간극비가 큰 화산암지역의 토층은 가장 작은 건조밀도를, 그리고 간극비가 가장 작은 화강암지역은 가장 큰 건조밀도로써 서로 반비례적인 관계를 보였다. 그리고 화산암지역은 간극비와 건조밀도가 각각 0.60~2.25 및 0.77~1.63 g/cm^{3}의 범위로서 퇴적암지역의 0.65~1.36 및 1.12~1.59 g/cm^3, 화강암지역의 0.63~1.44 및 1.10~1.59 g/cm^{3}에 비해 가장 넓은 영역에 산포되는 경향성을 보였다. 일반적으로 토층에서 간극이 크면 느슨한 지반상태이고 밀도가 크면 조밀한 지반상태를 의미하는데, 이는 동일한 지질을 대상으로 하였을 경우로서 지질별로 상호 절대치를 비교하기 위해서는 지질에 따른 다양한 특성들이 충분히 고려되어야 할 것이다.

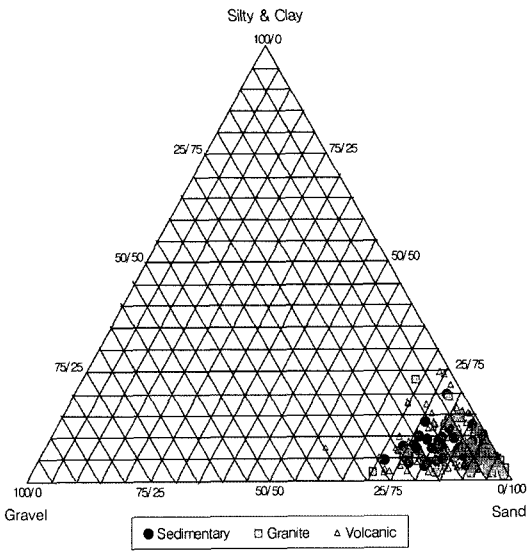

Fig. 6. Grain sizes distribution considering geological condition by the triangle diagram of collected soils from the study area.

전단강도

직접전단시험결과 점착력은 0.001~0.071 kg/cm^{2}의 범위로서 평균은 0.21/로 나타났는데, 이는 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 대체로 다짐도가 중간정도인 모래질지반에 해당하는 값으로 실트와 점토를 함유한 혼합토이며, 아주 적은 점착성분을 지니고 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 지질조건에 따른 토층의 점착력과 전단저항각을 구분하여 비교한 것이고, Appendix III은 시험결과를 세부적으로 나타낸 표이다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 점착력은 평균치를 기준으로 할 경우 퇴적암지역의 토층이 0.023 kg/cm^{2}로서 가장 크고 화산암과 화강암지역이 각각 0.022 kg/cm^2 및 0.018 kg/cm^{2}로서 작은 것으로 나타났다. 한편, 전단저항각은 28.2~39.6°의 범위로서 평균 34.1° 정도이므로 연구지역 토층은 전단강도가 비교적 큰 지반으로 분류되는데, Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 평균치를 기준으로 할 경우 퇴적암지역의 토층이 36.5°로서 가장 크고 화산암과 화강암지역이 34.0° 및 32.4°의 순으로 작게 나타나 점착력과 동일한 경향성을 보였다.

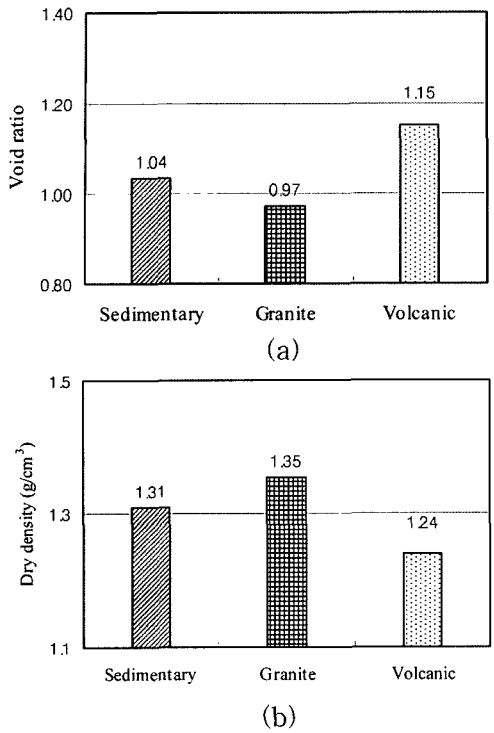

Fig. 7. Void ratio and dry density of sampled soils according to geological conditions: (a), void ratio, and (b), dry density.

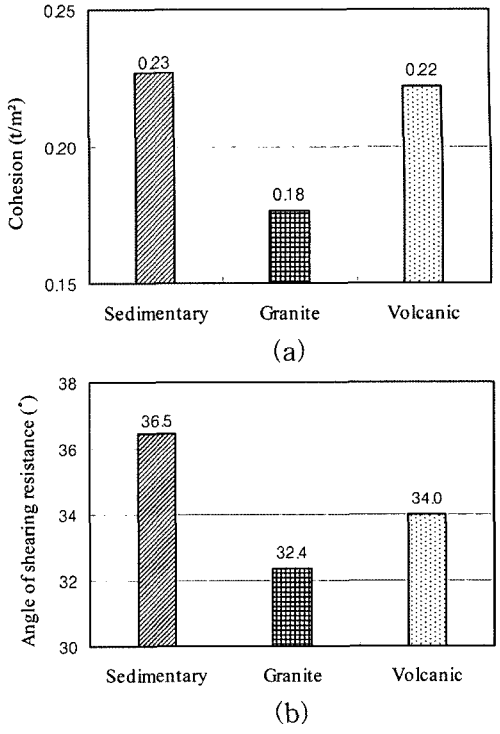

Fig. 8. Shear strength of sampled soils according to geological conditions: (a), cohesion, and (b), angle of shearing resistance.

투수계수

투수시험결과로부터 산정된 연구지역 280개 토층시료의 투수계수는 8.10×10^{-5}~8.38×10^{-2}cm/sec의 범위로서 평균은 1.06×10^{-2}cm/sec 정도인데 이는 Darcy(1856)에 의하면 대부분 세립질모래~점토질실트 정도의 투수계수에 해당하는 것으로서, 연구지역의 투수성은 보통~빠른 정도의 지반인 것으로 평가되었다. 강우에 의한 산사태는 토층과 암반의 경계면에서 주로 발생한다(이수곤 외, 2004)는 점을 고려할 때, 이처럼 빠른 투수성지반은 강우가 얕은 토층을 통과하여 토층과 암반의 경계부에 빠르게 도달할 수 있음을 의미하는 것으로 토층과 암반의 경계부에 내재하는 사면을 보다 불안정하게 하는 요인으로 작용될 수 있을 것이다. Fig. 9는 지질조건에 따른 토층의 투수계수를 나타낸 것이고, Appendix IV는 시험결과를 세부적으로 나타낸 표이다. 그림에서 보는 바와 같이 평균치를 기준으로 할 경우 화강암지역 토층은 1.46×10^{-2}cm/sec로서 투수계수가 가장 크고, 화산암과 퇴적암지역은 각각 9.88×10^{-3}cm/sec 및 9.69×10^{-3}cm/sec로서 거의 유사한 것으로 나타났다. 앞에서도 언급한 바와 같이 투수계수는 입도특성과 관계되는 것으로 화강암지역 토층에서 투수계수가 가장 크게 나타난 점은 다른 두 지질에 비해 모래크기 입자의 함유비율이 높은 것과 관련성이 있는 것으로 분석되었다.

한편, 이 연구를 통해서도 균등계수는 투수계수와 비교적 높은 상관성이 있는 것으로 분석되었으며, 유효경 또한 투수계수와 관계되는 물성요인임이 확인되었다. Fig. 10은 여러 시험결과들 중 투수계수에 대비한 균등계수 및 유효경의 관계를 도시한 것이다. Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 투수계수와 균등계수는 대체로 반비례적인 관계로서 균등계수가 크면 투수성이 낮고 균등계수가 작으면 높은 투수성을 갖는 반비례적인 관계를 보였다. 그리고 이러한 현상은 3개 지질조건 모두에서 비슷한 경향성을 보이는 것으로 분석되었다. 화강암지역의 토층은 균등계수가 가장 크거나 작은 범위까지 폭넓게 산포되고 화산암지역 역시 비교적 넓은 범위로 분포되는데 반해, 퇴적암지역은 균등계수가 47 미만으로서 작고 좁은 영역에 밀집됨으로써 다른 두 지질에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다. Fig. 10(b)에서와 같이

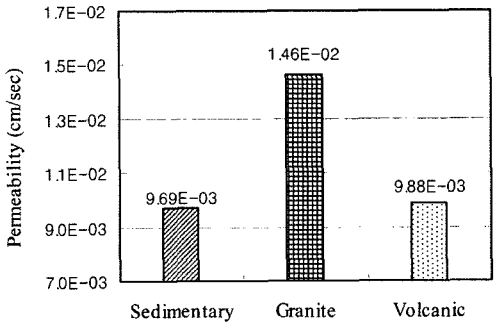

Fig. 9. Permeability of sampled soils according to geological conditions.

투수계수와 유효경은 서로 비례적인 관계에 있는 물성으로서 유효경이 증가하면 투수계수 또한 증가하는 경향성을 보였다. 이 또한 3개 지질조건 모두에서 유사한 경향성을 보이는 것으로 분석되었다. 즉, 화강암지역의 토층은 유효경과 투수계수 모두 화산암과 퇴적암지역에 비해 가장 넓은 범위로 산포되는 양상으로 나타났다. 이들은 특히 입도특성에 좌우되는 것으로 간극과 밀도특성 등 지반상태와도 상관성이 있으며 지질성인과도 관계되는 것으로 판단된다.

결 론

이 연구에서는 화산암과 화강암 및 퇴적암이 주로 분포하고 있는 부산지역의 자연사면을 대상으로 토층시료를 채취하여 실내에서 여러 토질시험을 실시하였다. 이들 시험결과를 토대로 자연사면 토층지반의 지질조건별 토질특성과 각 물성간의 상관성을 분석하였으며, 시험을 통한 각 지질조건별 물성 및 공학특성은 Appendix I~IV와 같이 제시할 수 있다.

1) 연구지역의 토층은 입도조성이 전반적으로 양호한 편이며, 세립이나 미립자들이 실트보다는 점토를 주로 함유하는 모래질지반으로 분류되었다. 기호로는 SW, SW-SC 및 SC가 가장 우세한데, 이들의 비율은 지질별로 볼 때 화강암지역이 94%로 가장 높고, 퇴적암 및 화산암지역이 각각 87% 및 79%인 것으로 나타났다.

2) 자연함수비는 평균치를 기준으로 화산암지역이 28.11%로서 퇴적암과 화강암지역의 20.60% 및 19.79%에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났는데, 이는 지질조건별 성인에 기인된 것으로 흙입자의 구조와 광물조성비 및 간극상태 등과 관련성이 있다.

3) 간극비는 화산암지역이 가장 크고 퇴적암과 화강암지역의 순으로 작게 나타났으며, 간극비가 매우 큰 경우는 대부분 화산암지역의 토층이다. 반면, 건조밀도는 화

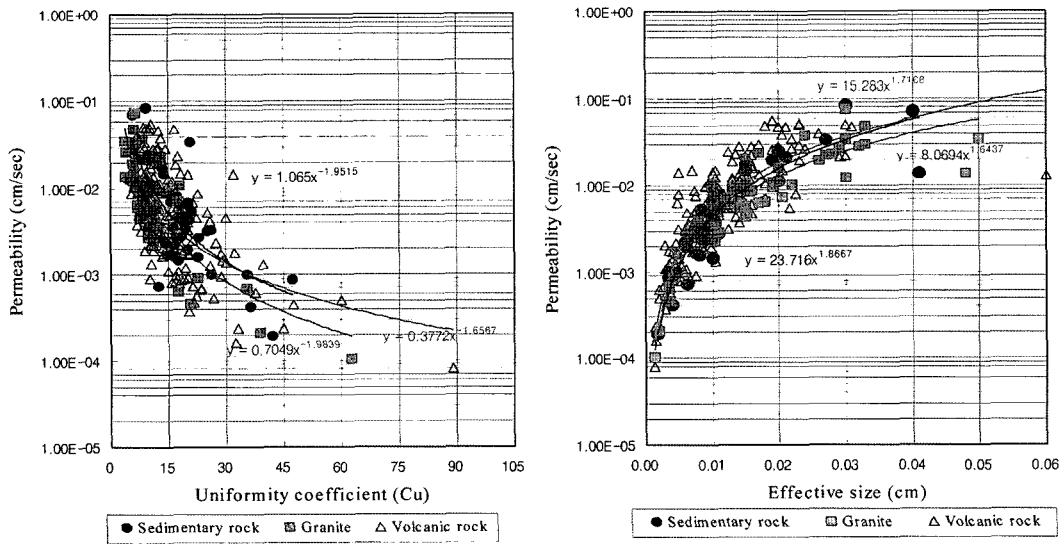

Fig. 10. Relationship between uniformity coefficients, effective size and permeability in sampled soils: (a), uniformity coefficient, and (b) effective size.

강암지역이 가장 크고 퇴적암 및 화산암지역의 순으로 작은 결과를 보였다. 따라서 간극비와 건조밀도는 상관성이 있는 물성으로 서로 반비례적이며 지질별로도 대비된다.

4) 점착력은 0.001~0.071 kg/cm^{2}의 범위로서 다짐도가 중간정도인 모래질지반에 해당되어 아주 적은 점착성분을 지니고, 전단저항각은 28.2~39.6°의 범위로서 비교적 큰 것으로 나타나 전단강도가 대체로 양호한 토층지반으로 평가되었다. 점착력과 전단저항각 모두 퇴적암지역이 가장 크고 화산암과 퇴적암 순으로 작은 결과를 보였다.

5) 투수계수는 8.10×10^{-5}~8.38×10^{-2}cm/sec의 범위로서 투수성이 보통~빠른 정도의 토층지반으로 평가되었다. 화강암지역의 투수계수가 가장 크고 화산암과 퇴적암지역은 거의 유사한 것으로 나타났는데, 이는 모래크기 입자의 함유비율과 관계되는 것으로 분석되었다. 한편, 투수계수는 입도조건에 관계되는 균등계수 및 유효경과는 각각 반비례적 관계 및 비례적인 관계를 갖는다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 "지질재해 피해 평가기술 및 대응기술 실용화사업"과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 대한지질공학회지, 10(2), 163-174.
김경수, 이춘오, 조용찬, 채병곤, 김원영, 송영석, 최영섭, 최정찬, 2004, 대도시 사면 통합관리시스템 구축(부산지역), 한국지질자원연구원, KR-04(연차)-09, 207p.
김경수, 조용찬, 송영석, 이춘오, 채병곤, 이문세, 2005, 부산 백양산지역 자연사면의 지질조건에 따른 토질공학적 특성, 한국지질자원연구원 논문집, 9(2), 3-19.
김상규, 1999, 토질역학 이론과 응용, 청문각, 434p.
김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, 지형특성에 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.
김진섭, 윤성효, 1993, 부산일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I), 한국석유지질학회지, 2(2), 156-166.
김향수, 고정선, 윤성효, 2003, 부산 백양산지역의 백악기 화산-심성암류에 대한 암석학적 연구, 한국암석학회지, 12(1), 32-52.
손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 한국지질도(1:50,000) 동래炤珌뻐됐‾ 및 설명서, 자원개발연구소, 27p.
이수곤, 1999, 부산지역의 산사태 위험 연구, 한국환경복원녹화기술학회지, 2(2), 9-23.
이수곤, 선건규, 김민성, 2004, 암과 흙 경계면 산사태의 수위특성 연구, 사면안정 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 37-48.
장기홍, 1975, 한반도 동남부의 백악계 층서, 지질학회지, 11(1), 1-23.
장태우, 강필종, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 한국지질도(1;50,000) 부산·가덕도폭 및 설명서, 한국동력자원연구소, 21p.
채병곤, 김경수, 송영석, 이춘오, 조용찬, 김원영, 최영섭, 장태우, 나종화, 2006, 대도시 사면 통합관리시스템 구축(부산지역), 한국지질자원연구원, OAA2004019-2006(3), 367p.
채병곤, 이춘오, 조용찬, 송영석, 김경수, 김원영, 최영섭, 정교철, 2005, 대도시 사면 통합관리시스템 구축(부산지역), 한국지질자원연구원, OAA2004019-2005(2), 213p.
Atterberg, A., 1911, Uber die Physikalische Bodenuntersuschung und Uber die Plastizitat der Tone, Int. Mitt. Bodenkunde, 1, 1-5.
Das, B. M., 1983, Advanced Soil Mechanics, The University of Taxas at El Paso, 511p.
Das, B. M., 1998, Principles of Geotechnical Engineering, Fourth Edition, Thomson Learning, 764p.
Casagrande, A., 1948, Classification and Identification of Soils, Transactions, ASCE, 113, 901-930.
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, 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.
Mitchell, J. K., 1976, Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., New York, 422p.
Paik, I. S., Kim, H. J., Kim, J. Y., Jin, S. I., 1996, Paleoenvironments of the Cretaceous lacustrine deposits (Yucheon Group), Mt. Hwangryeong, Pusan. Korea. J. Paleont. Soc. Korea, 12(2), 181-202.

2007년 8월 23일 원고접수, 2007년 9월 15일 게재승인

김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3054

Fax: 042-861-9723

E-mail: kks@kigam.re.kr

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

Geology	Specific gravity		Moisture concent (%)		Liquid limit (%)		Plastic limit (%)	
	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.
Volcanic rock	2.49~3.02	2.63	10.20~52.60	28.11	24.46~57.48	34.60	10.96~34.88	19.93
Granite	2.58~2.71	2.64	8.09~37.83	19.79	21.35~41.52	30.48	10.64~23.85	16.44
sedimentary rock	2.58~2.72	2.65	9.64~35.13	20.60	25.06~41.76	31.36	11.43~22.89	17.34

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

Geology	Void ratio		Porosity (%)		Dry density (g/)	
	Range	Aver.	Range	Aver.	Range	Aver.
Volcanic rock	0.60~2.25	1.15	33.26~89.51	61.21	0.77~1.63	1.24
Granite	0.63~1.44	0.97	49.16~86.16	65.85	1.10~1.59	1.35
sedimentary rock	0.65~1.36	1.04	39.37~86.75	69.54	1.12~1.59	1.31

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

Geology	Cohesion ($kgcm^2$)		Angle of shearing resistance (°)	
	Range	Mean	Range	Mean
Volcanic rock	0.001~0.071	0.022	28.5~39.6	34.0
Granite	0.005~0.066	0.018	28.2~35.5	32.4
sedimentary rock	0.001~0.068	0.023	29.8~39.5	36.5

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

Geology	Range of permeability (cm/sec)	Mean values of permeability (cm/sec)
Volcanic rock	8.10×10^{-5}~5.72×10^{-2}	9.88×10^{-3}
Granite	1.04×10^{-4}~7.68×10^{-2}	1.46×10^{-2}
sedimentary rock	1.90×10^{-4}~8.38×10^{-2}	9.69×10^{-3}