

산사태 발생지역에서의 지질조건별 토질특성

Soil Properties regarding Geological Conditions in Landslides area

송영석¹⁾, Young-Suk Song, 김원영²⁾, Won-Young Kim, 채병곤¹⁾, Byung-Gon Chae,
김경수¹⁾, Kyeong-Su Kim

¹⁾ 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geol. & Envir. Hazards Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM)

²⁾ 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 책임연구원, Principle Researcher, Geol. & Envir. Hazards Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM)

SYNOPSIS : A lot of landslides were occurred in Gangnung, Macheon and Geochang areas by Typhoons such as RUSA(2002) and MEAMI(2003). Soil properties of these areas are investigated regarding geological conditions in this study. The shallow plane failure were occurred in Gangnung and Geochang areas, whereas the deep circle failure were occurred in Macheon area. The matrix in Gangnung and Geochang areas was composed of Granite, and the matrix in Macheon area was composed of Gabbro. The disturbed and undisturbed soils were sampled in these areas. As the results of laboratory tests using sampled soils, the coefficient of permeability in Granite region is lower than that in Gabbro region. In the cases that the silt and clay contents are included less than 4% for the soils of Granite region and less than 7% for the soils of Gabbro region, the coefficients of permeability are rapidly increased for both soils. In addition, the simple equations for predicting the coefficients of permeability are proposed using the effective particle size and the silt and clay contents according to geological condition.

Key words : Landslides, Geological condition, Coefficient of permeability, Silt and clay contents, Effective particle size

1. 서론

지난 수십 년간 우리나라에서는 철도, 도로 등의 교통시설, 각종 목적의 댐과 같은 수리시설, 원자력 발전소와 같은 중요구조물, 아파트나 주택 등과 같이 인간의 일상생활과 밀접한 관계가 있는 토목구조물이나 건축구조물의 축조를 위하여 산지나 구릉지의 개발이 급격히 증가되고 있다. 이러한 개발과정에서 균형을 유지하여 안정된 상태에 있던 산지나 구릉지의 자연사면이 붕괴되어 산사태가 발생되고 있으며 이에 따른 피해액과 규모도 해마다 증가되고 있다. 이러한 경향은 우리나라 뿐만 아니라 외국의 경우도 마찬가지이다. 특히, 우리나라를 비롯한 극동아시아의 다우지역에서는 매년 우기나 장마철에 이러한 사면파괴의 피해가 집중 보고되고 있다(Lumb, 1975; Sassa, 1999, Hong et al., 2004).

우리나라에서의 산사태들은 대부분 암반층 위의 상부토층에서 발생하고 있으므로, 상부토층의 특성을 파악하는 것은 사면의 안정성과 관련하여 매우 중요한 사항이다. 이러한 암반층위의 상부토층은 다양한 지질조건과 풍화정도에 따라 심도 및 토질특성이 다르게 나타날 것이다(Hutchinson, 1988).

본 연구에서는 국내 산사태 발생지역에서의 토층을 대상으로 지질조건에 따른 토질특성을 조사하고자

한다. 이를 위하여 2002년 태풍 “루사”에 의해 산사태가 집중적으로 발생된 강원도 강릉시 사천면 일대(강릉지역) 및 경남 함양군 마천면 일대(마천지역), 그리고 2003년 태풍 “매미”에 의해 산사태가 집중적으로 발생된 경남 거창군 가북면 일대(거창지역)를 대상으로 연구를 수행하였다. 이들 연구대상지역은 지질조건, 암석의 풍화특성, 지형조건 등이 서로 다르므로, 각각의 현장에 대하여 비교란 및 교란시료를 채취하고 각종 실내시험을 수행하였다. 이들 실험결과를 통하여 산사태 발생지역에서의 지질조건별 토질 특성을 조사하고, 각 토질정수간의 상관관계를 살펴보고자 한다.

2. 대상현장의 산사태 특성 및 지질조건

2.1 강릉지역

강릉지역은 2002년 8월 31일~9월 1일 양일간에 걸쳐 태풍 “루사”에 의하여 약 900mm의 집중호우가 내렸으며, 이로 인하여 강릉시 사천면과 양양읍 일대에 수 백개의 산사태가 발생되었다. 강릉지역은 중립질의 흑운모 화강암으로 이루어져 있으며, 풍화가 상당히 진행되어 대부분 지역이 완전 풍화암으로 이루어져 있다. 대체적인 풍화심도는 1m 내외로 풍화의 수평적 분포는 대체로 규칙적인 것으로 나타났다. 강릉지역에서 발생한 산사태의 폭은 2m~18m 범위에 분포하며, 산사태의 길이는 40m~100m 범위로 다양하게 분포하는 것으로 나타났다. 따라서, 이 지역은 비교적 소규모의 산사태가 발생한 것으로 판단할 수 있다. 그리고, 산사태가 발생한 사면의 경사각은 10~50°의 범위를 보이며, 16~30°의 사면 경사각에서 약 80%가 발생되었음을 알 수 있다(조용찬 외 4인, 2003). 이와 같이 강릉지역의 산사태 규모는 소규모이나, 발생빈도가 매우 높고 사태물질이 거의 모래질 입자로 구성되어 있어 사면활동 발생시 먼 거리까지 이동할 수 있다는 특징이 있다. 그림 1은 강릉지역에서 산사태가 발생되어 사태물질이 사면하부에 부채꼴 모양(fan type)으로 퇴적된 것을 나타낸 것이다.

2.2 마천지역

2002년 8월 31일~9월 1일 사이에 태풍 ‘루사’에 의하여 지리산 어리목에서 1일 최대강우량이 856mm를 기록하는 등 지리산 일대에 많은 산사태를 유발하였으며, 이로 인하여 가옥 및 인명 손실을 가져왔다. 산사태는 마천지역을 중심으로 북측의 백운산 북쪽사면과 남서부측의 덕전리 남쪽사면에 집중적으로 발생되었다. 특히, 가흥리 금대산 남서측에서 발생한 산사태로 인하여 마천중학교 건물이 심하게 파손되었다. 마천지역은 흑운모와 각섬석을 다량 함유한 반려암과 선캠브리아기 편마암으로 이루어져 있으며, 대부분의 산사태는 반려암 분포지역에서 발생한 것으로 나타났다. 이러한 이유는 마천지역에 분포하는 반려암이 주변 암석에 비하여 풍화에 취약한 암석학적 특성을 가지고 있기 때문이라 판단된다. 마천지역의 최대 풍화심도는 10m 정도로서 다른 지역의 풍화심도에 비하여 매우 깊게 발달하는 것으로 나타났다. 따라서, 이 지역의 산사태가 타 지역에 비하여 파괴규모가 크고, 원호 혹은 준원호 파괴형태를 보인다. 마천지역에서 발생한 산사태의 폭은 2m~65m 범위에 분포하며, 산사태의 길이는 160m~480m범위로 다양하게 분포하는 것으로 나타났다. 따라서, 이 지역은 비교적 대규모의 산사태가 발생한 것으로 판단할 수 있다. 그리고, 산사태가 발생한 사면의 경사각은 대부분 30°미만인 것으로 나타났다. 한편, 사태물질은 다양한 크기의 입자로 구성되어 있으며, 다수의 핵석이 존재하는 것으로 나타났다. 그림 2는 마천지역에서 산사태 발생 시작부에 대규모의 핵석이 분포하고 있는 모습을 나타낸 것이다.

2.3 거창지역

2003년 9월 12일~13일 사이에 태풍 “매미”에 의하여 거창군 가북면 일대에 집중적으로 산사태가 발생하였으며, 용암리의 송정마을과 중촌리의 다전마을에서는 대규모 산사태로 인하여 인명 및 재산상 손실을 가져왔다. 거창지역은 선캠브리아기 변성암류를 기반으로 하여 이를 관입한 중생대의 화성암류로

이루어져 있다. 이 지역의 산사태는 편마암 분포지역에서도 다소 발생했으나 주로 화강암 분포지역에서 발생되었다. 거창지역의 풍화심도는 매우 얇은 것으로 나타났으며, 사면의 활동깊이는 0.5m 내외로 매우 얇게 발생됨을 알 수 있다. 거창지역에서 발생한 산사태의 폭은 4m~73m 범위에 분포하며, 산사태의 길이는 50m~300m범위에 다양하게 분포하는 것으로 나타났다. 따라서, 이 지역은 마천지역과 비교하면 상대적으로 작은 규모임을 알 수 있다. 그리고, 산사태가 발생된 사면의 경사각은 대부분 30°미만인 것으로 나타났다. 한편, 사태물질은 세립질 실트 및 점토로 구성되어 있으며, 일부 암버력(boulder)이 혼재되어 있는 것으로 나타났다. 그림 3은 거창지역에서 산사태로 인하여 피해를 입은 가옥을 나타낸 것으로 대규모의 암반과 실트 및 점토로 구성된 사태물질을 나타낸 것이다.



그림 1. 강릉지역 산사태 사례



그림 2. 거창지역 산사태 사례



그림 3. 마천지역 산사태 사례

3. 토질실험 결과

산사태 발생지역에서 지질에 따른 토질에 대한 물리적 및 역학적 특성을 파악하기 위하여 강릉지역 21개소, 거창지역 56개소 및 마천지역 30개소에서 각각 토질시료를 채취하였다. 시료채취는 지형, 지질 조건, 토층분포 등을 반영하여 실시하였고 단위면적당의 밀도비를 고려함으로써 토층의 특성이 균등하게 평가될 수 있도록 하였다.

시료는 표토를 제거한 후 40~70cm 깊이의 토질을 대상으로 교란시료와 불교란시료로 구분하여 채취하였다. 불교란시료는 스테인레스로 제작한 직경 10cm, 높이 6cm 크기의 원통형 몰드(stainless ring sampler)를 이용하였다. 특히, 투수시험을 위한 불교란시료를 채취하기 위하여 직경 10cm, 높이 13cm 크기의 원통형 몰드를 제작하여 이용하였다. 그리고, 교란시료는 비닐팩을 이용하여 채취하였으며, 모든 시료는 밀봉한 상태로 현장조건이 최대한 유지되도록 실험실로 운반하였다. 교란시료를 이용하여 비중, 함수비, 입도, 액성한계 및 소성한계 등의 시험을 실시하였으며, 불교란시료를 이용하여 간극비, 간극율, 포화도, 밀도, 투수시험 등을 실시하였다.

3.1 강릉지역

강릉지역 토층시료는 화강암 풍화토로서 균등한 입도의 모래로 이루어져 있다. 비중은 2.56~2.59의 범위이고 평균 2.58로서 모암인 화강암의 비중과 유사하며, 이는 일반적인 모래의 비중과 거의 같다. 간극비는 0.70~0.96의 범위로서 평균은 0.84이며, 건조밀도는 최소 1.32g/cm³부터 최대 1.51g/cm³의 범위이고 평균은 1.40g/cm³이다. 입도분석 시험결과 모래의 함유비는 최소 90%이상의 값을 가짐으로서 토층시료의 대부분이 모래질로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 세립토는 10%이내인 것으로 나타났다. 입도분포곡선은 기울기가 완만하고 균등계수 및 곡률계수는 양입도의 조건을 충족함으로서 양호한 입도로 구분되며, 통일분류법에 의하면 대부분 SW로 분류된다. 그리고, 투수시험 결과에 의하면 투수계수가 $3.27 \times 10^{-3} \sim 3.78 \times 10^{-2}$ cm/sec의 범위이고 평균 1.33×10^{-2} cm/sec로서 일반적인 모래의 투수계수에 해당한다.

3.2 마천지역

마천지역 토층시료의 비중은 2.61~2.86의 범위이고 평균은 2.72로서 모암인 반려암의 비중과 유사하며, 일반적인 토층의 비중에 비해서는 높은 값을 갖는다. 간극비는 0.77~2.27의 범위로서 평균은 1.33인데, 이는 강릉지역 평균치인 0.84에 비해 높은 편이다. 건조밀도는 최소 0.80g/cm³에서 최대 1.52g/cm³의 범위이고 평균은 1.20g/cm³이다. 입도분석 시험결과 원지반토에서는 모래 이상의 입자크기가 90% 이상을 차지한 반면, 하부의 퇴적토에서는 굵은 암편이나 큰 자갈 등의 함량이 80% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 원지반토의 경우 입도분포가 대부분 양호한 상태이고, 퇴적토의 경우 큰 암석덩어리와 자갈들이 함유되어 있으므로 입도분포가 불량하거나 불균형한 입도를 가지는 것으로 나타났다. 통일분류법에 의한 흙의 분류에 의하면 원지반토는 SW, SW-SC가 주를 이룬 반면, 퇴적토는 거의 GP이거나 SP로 분류된다. 그리고, 투수시험 결과에 의하면 투수계수가 $7.16 \times 10^{-4} \sim 2.43 \times 10^{-1}$ cm/sec의 범위이고 평균 3.59×10^{-2} cm/sec로서 투수성이 대체로 양호한 것으로 나타났다.

3.3 거창지역

거창지역 토층시료는 화강암 풍화토로서 모래가 주를 이루고 있으며, 비교적 큰 풍화암편들과 자갈들을 함유하고 있다. 비중은 2.60~2.71의 범위이고 평균 2.65로서 모암인 화강암의 비중과 유사한 것으로 나타났다. 간극비는 0.70~1.57의 범위로서 평균은 0.93이며, 건조밀도는 최소 1.04g/cm³부터 최대 1.54g/cm³의 범위이고 평균은 1.38g/cm³로서 강릉지역과 거의 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 두지역의 토층이 모두 화강암 풍화토인 점과 상관성이 있는 것으로 판단된다. 입도분석 시험결과 모래의 함유비는 평균 85%이상을 차지하며, 원지반토의 경우 비교적 양입도인 반면 퇴적토의 경우 빈입도이거나 불균형입도인 것으로 나타났다. 통일분류법에 의하면 원지반은 SW, SW-SC이며, 퇴적토는 대부분이 SP로 분류된다. 그리고, 투수시험 결과에 의하면 투수계수가 $2.34 \times 10^{-3} \sim 2.32 \times 10^{-2}$ cm/sec의 범위이고 평균 7.74×10^{-3} cm/sec로서, 강릉지역에 비해 다소 낮은 투수성을 갖는 것으로 나타났다.

4. 분석 및 고찰

산사태가 발생된 지역의 지질조건을 고려하여 화강암과 반려암 지역으로 구분하여 사태물질의 토질특성을 분석하였다. 즉, 강릉지역과 거창지역은 지질조건을 화강암으로 구분하고, 마천지역은 지질조건을 반려암으로 구분하여 서로 비교분석을 수행하였다. 그리고, 투수계수 및 입도조성에 따른 특성을 지질조건별로 비교 고찰하였다.

그림 4 및 그림 5는 지질조건에 따른 투수계수와 단위중량의 관계를 나타낸 것이다. 먼저 그림 4는 투수계수와 건조단위중량의 관계를 나타낸 것으로 건조단위중량은 지질조건과는 무관하게 1.0~1.5g/cm³의 범위에 존재하고 있음을 알 수 있다. 그리고, 그림 5는 투수계수와 습윤단위중량의 관계를 나타낸 것으로

습윤단위중량도 건조단위중량과 마찬가지로 지질조건과는 무관하게 1.3~1.8g/cm³의 범위에 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 화강암지역 토질의 투수계수는 4×10⁻²cm/sec이하인 것으로 나타났으며, 반려암지역의 토질의 투수계수는 1×10⁻¹cm/sec이하인 것으로 나타났다. 따라서, 반려암지역 토질의 투수성이 더 양호한 편으로 판단된다.

입도조성에 따른 지질조건별 사태물질의 투수특성을 조사하기 위하여 세립토함유량 및 유효입경에 따른 투수계수를 고찰하였다. 그림 6은 지질조건에 따른 세립토함유량과 투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 지질조건과는 무관하게 세립토함유량이 증가함에 따라 투수계수가 감소하고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 화강암지역 토질의 경우 세립토함유량이 4%이하일 경우 투수계수는 급격하게 증가하는 것으로 나타났으며, 반려암지역 토질의 경우 세립토함유량이 7%이하일 경우 투수계수가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 화강암지역 토질의 투수계수와 세립질함유량과의 상관식은 식(1)과 같이 제안할 수 있으며, 반려암지역 토질의 상관식은 식(2)와 같이 제안할 수 있다. 제안된 상관식은 회귀분석방법을 통하여 계산하였다.

$$k = 0.09F^{(-1.58)} \quad (1)$$

$$k = 0.35F^{(-1.85)} \quad (2)$$

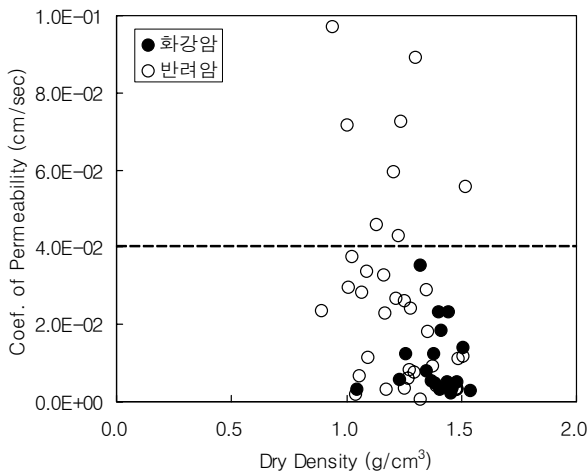


그림 4. 투수계수와 건조단위중량의 관계

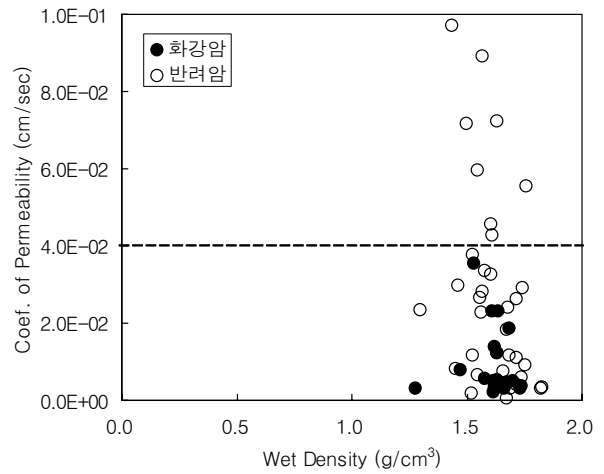


그림 5. 투수계수와 습윤단위중량의 관계

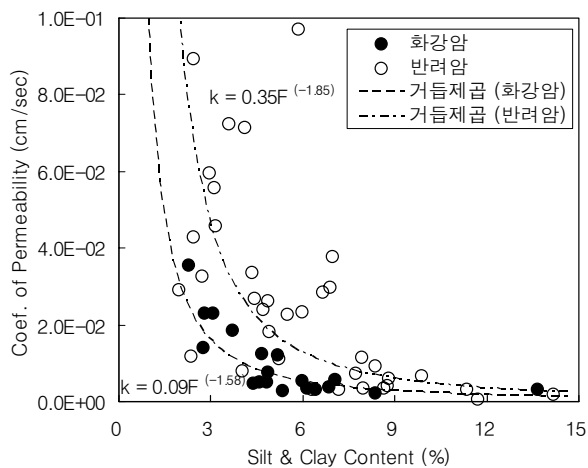


그림 6. 세립토함유량과 투수계수의 관계

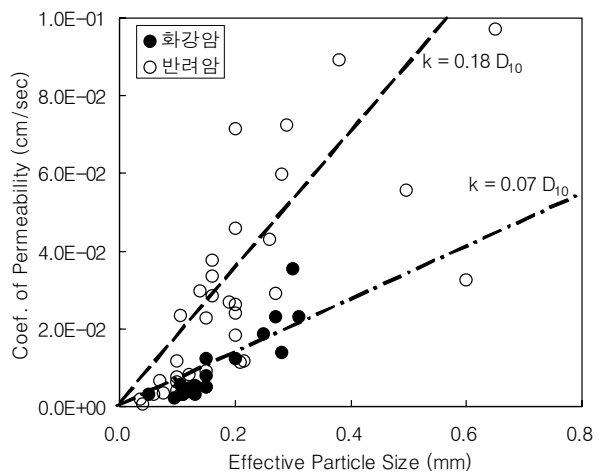


그림 7. 유효입경과 투수계수의 관계

그림 7은 지질조건에 따른 유효입경과 투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 지질조건과는 무관하게 토질의 유효입경이 증가함에 따라 투수계수가 증가하고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 유효입경에 따른 반려암지역 토질의 투수계수는 화강암지역 토질의 투수계수보다 더 크게 발생됨을 알 수 있다. 이를 토대로 지질조건에 따른 유효입경과 투수계수의 상관식을 각각 식(3) 및 식(4)와 같이 제안할 수 있으며, 제안된 상관식은 회귀분석방법을 통하여 계산하였다.

$$k=0.07D_{10} \quad (3)$$

$$k=0.18D_{10} \quad (4)$$

본 연구를 통하여 화강암지역 및 반려암지역 토질의 입도조성 즉, 세립토함유량 및 유효입경을 이용하여 간편하게 투수계수를 구할 수 있는 실험식을 제안하였다. 그러나, 제안된 식의 신뢰성을 확보하기 위하여 추후 계속적인 자료수집을 통하여 수정 보완되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 2002년 태풍 “루사” 및 2003년 태풍 “매미”에 의해 산사태가 집중적으로 발생한 강릉, 마천 및 거창지역에 대하여 비교란 및 교란시료를 채취하고 각종 실내시험을 수행하였다. 이들 실험 결과로부터 얻은 산사태 발생지역에서의 지질조건별 토질특성을 정리하면 다음과 같다.

1) 강릉 및 거창지역은 활동면의 깊이가 얇은 평면파괴형태로 산사태가 발생되었으며, 마천지역은 활동면의 깊이가 깊은 원호파괴형태로 산사태가 발생되었다.

2) 산사태가 발생한 강릉지역 및 거창지역은 모암이 화강암으로 구성되어 있으며, 마천지역은 반려암으로 구성되어 있다.

3) 화강암지역 토질의 투수계수는 4×10^{-2} cm/sec이하이며, 반려암지역의 토질의 투수계수는 1×10^{-1} cm/sec이하인 것으로 나타났다. 그리고, 화강암지역 토질은 세립토함유량이 4%이하일 경우 투수계수가 급격하게 증가하며, 반려암지역 토질은 세립토함유량이 7%이하일 경우 투수계수가 급격하게 증가한다.

4) 지질조건에 따라 유효입경 및 세립토함유량을 이용하여 투수계수를 산정할 수 있는 간편식을 제안할 수 있으며, 제안된 식의 신뢰성을 확보하기 위하여 추후 계속적인 자료수집을 통하여 수정 보완되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원에서 지원하는 “산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발”에 의하여 실시된 연구 결과임을 밝히며, 이에 감사의 뜻을 전하는 바이다.

참고문헌

1. 조용찬, 김경수, 이춘오, 채병곤, 김원영 (2003) “태풍 ‘루사’에 의해 발생한 강릉지역 산사태의 특징”, 2003년 대한지질공학회 학술발표회 논문집, pp.21-26.
2. Hong, W. P. Song, Y. S. and Lee, J. H. (2004) “Behavior of stabilizing piles installed in cut slope during heavy rainfall”, *Proc. 9th Int. Symp. on Landslides*, Vol.1, pp.655-661
2. Hutchinson, J. (1988) “Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology”, *Proc. 5th. Int. Symp. on Landslides*, Vol.1, pp.3-35.
3. Lumb, P. (1975) “Slope failure in Hong Kong”, *Journal of Engineering Geology*, Vol.8, pp.31-65.
4. Sassa, K. (1999) *Landslides of the world*, Japan Landslide Society, Kyoto University Press.