

## 열수변질 점토맥과 산사태

조환주<sup>1</sup>, 정경문<sup>2</sup>, 조호영<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원

<sup>2</sup>(주)도화엔지니어링

<sup>3</sup>고려대학교 지구환경과학과

\* 교신저자: hyjo@korea.ac.kr

### 요약

열수변질대가 폭넓게 분포하고 있는 우리나라에서 자연사면이나 인공사면에서 열수변질대 내에 산출되는 점토맥이 산사태 발생에 중요한 역할을 할 수 있다. 점토맥이 존재하는 지반에 지표수가 침투되면 점토광물의 팽윤성 때문에 국지적으로 간극수압이 급격히 상승할 수 있다. 간극수압의 상승으로 세립의 점토광물이 침식될 수 있다. 침식된 점토광물은 수두가 큰 곳에서 작은 곳으로 유동하면서 동수경사가 작은 부분에서 유속이 느려져 퇴적된다. 점토광물이 퇴적된 곳에서 국지적인 간극수압의 증가로 인한 지하수의 유출이 사면파괴를 일으킬 수 있다. 이에 본고에서는 열수변질 점토맥과 산사태와 관련한 국내외 자료를 소개하고자 한다.

주요어: 열수변질대, 점토맥, 점토광물, 산사태

## Abstract

In Korea, where hydrothermal alteration zones are widely distributed, clay veins formed by hydrothermal alteration processes on natural slopes or artificial slopes can play an important role in the slope stability. When the surface water infiltrates the ground where the clay vein exists, the pore water pressure in the ground can be locally increased due to impermeable properties of clay minerals. Infiltration of the surface water induces the increase in the pore water pressure, which can cause erosion of the fine clay particles. The eroded clay particles flow and deposit in an area where the flow velocity is slowed down. Where clay minerals are deposited, ground water can leak due to an increase in local pore pressures, which can cause slope failure. In this paper, studies related to hydrothermal clay vein and landslide are introduced.

Key words: hydrothermal alteration zone, clay vein, clay mineral, landslide

## ● 서론

지반은 암석이 형성되는 1차적인 과정과 형성된 암석이 열화되는 2차적인 과정에 의해 형성된다. 화성암, 퇴적암 및 변성암이 만들어지는 과정이 1차적인 과정에 해당되고, 풍화·변질작용과 지각 변동에 의한 절리, 균열이나, 단층·파쇄대 형성 등은 2차적인 과정에 해당된다. 지하 심부의 마그마 또는 열수가 1차 또는 2차적인 과정을 거친 지반 내로 이동할 때, 고온·고압 상태의 마그마 또는 열수(Hydrothermal water)는 모암과의 열변성 작용에 의해 녹니석, 고령석, 일라이트, 스펙타이트(몬모릴로나이트) 등 다양한 점토광물을 형성한다. 이 중 몬모릴로나이트는 물을 흡수할 경우 팽윤되어 암반을 분리시키거나 암반의 전단강도가 감소될 수 있다.

예를 들어, Opfergelt *et al.*(2006)은 니카라

과 Casita 화산에서 일어난 산사태는 열수 변질 작용에 의해 형성된 몬모릴로나이트가 산사태를 발생시킨 원인이라고 보고하였다. 최근 에 Regmi *et al.*(2013)은 네팔 히말라야산에서의 산사태 원인 분석 연구를 통해 풍화 작용에 의해 형성된 스펙타이트가 암반의 전단강도를 감소시켜 산사태가 유발되었다는 것을 규명하였다. 특히 일본에서는 화산 활동이 많아 열수변질대와 산사태와의 관련성에 관한 연구가 많이 진행 되어 왔다(Kamai, 1998; Paudel *et al.*, 2005; 정경문과 정규정, 2016). 열수변질대에 산출되는 점토맥은 절토나 터널 공사 시 안전에 영향을 미치는 중요한 인자로 작용하며, 점토맥에 의해 터널 내의 누수가 발생하거나 고각으로 생성된 점토맥에서 큰 간극수압이 발생하여 상부 붕락이 발생할 가능성이 큰 것으로 밝혀졌다(이부경, 2003; 정경문과 정규정, 2016).

우리나라에서도 열수변질대가 폭넓게 분포하고 있어 자연사면이나 인공사면에서 열수변질대 내에 생성된 점토맥이 산사태 발생에 중요한 역할을 할 수 있다(조환주, 2009; 조환주 외, 2010). 점토맥이 존재하는 지반에 지표수가 침투되면 점토광물의 차수 성질에 의해 국지적으로 간극수압이 급격히 상승할 수 있다. 지표수가 침투되면 간극수압이 증가해 세립의 점토광물이 침식되고, 침식된 점토광물은 수두가 큰 곳에서 작은 곳으로 이동하면서 동수경사가 작은 부분에서 유속이 느려져 퇴적된다. 점토광물이 퇴적된 곳에서 국지적인 간극수압의 증가로 인한 지하수의 유출이 사면파괴를 일으킬 수 있다. 그러나 국내 산사태 관련한 조사와 연구에서 열수변질대에 대한 관심은 미비한 실정이다. 이에 본고에서는 열수변질 점토맥과 산사태와 관련한 국내외 자료를 소개하고자 한다.

## ● 우리나라 열수변질 점토 분포 및 특성

열수는 지각에 존재하는 주변보다 온도가 5℃ 이상 큰 모든 종류의 물을 나타낸다(White, 1957). 열수변질 작용은 열수와 열수가 이동하는 경로 주변 모암과의 반응에 의해 발생된다. 열수변질대는 화강암질의 마그마가 관입하여 굳어갈 때 광역적으로 압력을 받아 생긴 열극이나, 마그마가 급격히 식으면서 생겨난 열극 후기에 열수가 채우면서 생기기도 한다.

점토광물은 마그마 또는 열수의 성질, 모암의 광물 조성 및 산출상태에 따라 다양한 규모

와 형태로 산출된다. 일반적으로 열수변질에 의해 형성된 점토맥을 이루는 광물로는 스펙타이트(몬모릴로나이트), 일라이트, 고령석, 녹니석, 석영, 방해석, 불석 등이 있다. 이러한 광물 중 몬모릴로나이트는 물을 흡수할 경우 팽윤되어 암반을 분리시키거나 암반의 전단강도를 저하시키는 역할을 한다.

우리나라에서 열수변질대는 화성암 관입체 및 그 주변지역의 모든 암석에서 발견되나, 주로 화산암이나 화산성 퇴적암, 화강암 및 제3기층 미고결퇴적층 등에서 주로 나타난다. 국내에서 발견되는 열수변질 점토광상은 경상계 백악기 유천층군 화산암대 내에 주로 분포하고 있으며, 공간적인 분포에 따라 크게 전남 열수변질대와 경상 열수변질대로 구분된다(고상모, 2001). 고상모(2001)는 전남 열수변질대에서는 명반석, 카올린, 석영, 엽납석, 견운모 및 다이아스포아가 우세한 변질광물로 나타나며, 경상 열수변질대에서는 견운모, 백운모, 석영, 엽납석, 듀모티어라이트, 전기석, 홍주석이 우세한 변질광물로 나타난다고 보고하였다.

황진연 외(1998)는 경주시 양북면에 분포하는 제3기 화강암체에 분포하는 점토맥을 조사하여 열수변질작용에 의해 형성된 일라이트, 스펙타이트 등의 점토광물이 다량 산출되고 있으며, 점토 세맥들이 많이 관찰됨을 보고하였다. 또한 장태우 외(2005)는 울산단층 동측부에 발달한 제4기 단층에 나타나는 단층비지(gauge)를 대상으로 X-선 회절분석법을 이용하여 광물조성을 조사하였다. 단층비지 내 변질광물인 점토광물이 산출되었고, 이는 단층작용에 수반된 열수변질작용으로 형성되었음을 보

고하였다. 산출된 점토광물은 스�멕타이트, 녹니석, 일라이트, 카올리나이트이었다.

이창섭과 이효민(2009)은 울산시 울주군의 양산단층대를 통과하는 터널(북안터널) 구간에 나타나는 열수변질대의 특성을 조사하고 공학적 특성을 규명하였다. 조사 결과 양산단층 서측부에서 기계적 파쇄작용과 열수변질대가 발견되었다. X-선 회절분석 결과 변질광물은 녹니석, 견운모, 고령석, 일라이트, 스�멕타이트 등이었다. 변질도가 증가하면서 단위중량, 탄성계수, 점착력, 내부마찰각은 감소하고 포아송비가 증가하였다(표 1). 이는 변질이 진행됨에 따라 암반이 약화되었음을 나타낸다. 이러한 결과는 열수변질작용과 지반의 공학적 특성과의 밀접한 연관성을 나타내 주는 것이므로 지반조사에서 열수변질대에 대한 정확한 이해와 조사 및 분석이 수행되어야 한다는 것을 지시한다.

표 1. 북안터널 구간의 암석 시료의 공학적 성질 (이창섭과 이효민, 2009)

Zone	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Poisson's Ratio	Young's Modulus (MPa)	Cohesion (MPa)	Internal Friction Angle (°)
Unaltered	26.0	0.230	5000	30	35
Altered	20.0	0.265	110	6	25
Altered, fractured	19.5	0.270	90	6	25
Fault gauge	19.0	0.280	70	8	25

### ● 열수변질 점토의 공학적 성질

점토광물의 연경도, 팽윤성, 수리전도도, 전단강도, 압축성 등과 같은 공학적 성질은 점토광물의 종류에 따라 다르게 나타난다. 점토광물 중 열수변질대에서 많이 산출되고, 구조와 성분에 따라 공학적 성질이 다른 점토광물은 고령석, 일라이트, 몬모릴로나이트 등이다(표 2).

고령석(kaolinite)은 고령토군의 점토광물로 규산염 사면체(T)층 하나와 팔면체(O)층 하나가 결합하여 하나의 단위(TO)층을 만드는 판상 형태로 되어있다. 하나의 TO층과 다른 TO층간의 결합은 반데르발스 결합과 수소 결합으로 강한 결합을 하여 층간 팽윤이 일어나지 않는다. 대부분의 고령석의 화학 조성은  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 이다. 고령석의 비표면적과 양이온 교환능은 각각 10-20 m<sup>2</sup>/g과 3-15 meq/100g이다(Mitchell, 1993).

일라이트(illite)는 규산염 사면체(T)층과 또 다른 규산염 사면체(T)층 사이에 팔면체(O)층이 위아래로 결합해 하나의 단위(TOT)층을 만드는 판상 형태로 되어 있다. 규산염 사면체(T)층의 규소 이온(Si<sup>4+</sup>)이 알루미늄 이온(Al<sup>3+</sup>)으로 치환되면, TOT층이 전기적 중성을 잃어 음이온 형태가 된다. 전기적 중성을 이루기 위해 TOT층과 TOT층 사이에 포타슘 이온(K<sup>+</sup>)이 들어가 전기적 중성이 된다. TOT층과 TOT층 사이의 결합력이 상대적으로 강해 층간 팽윤이 거의 일어나지 않는다. 일라이트의 화학 조성은  $(K,H_2O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)[(OH)_2,(H_2O)]$ 이다. 일라이트의 비표면적과 양이온 교환능은 각각 65-100 m<sup>2</sup>/g과 10-40 meq/100g이다(Mitchell,

1993).

몬모릴로나이트(montmorillonite)는 규산염 사면체(T)층과 또 다른 규산염 사면체(T)층 사이에 팔면체(O)층이 위아래로 결합해 하나의 단위(TOT)층을 만드는 판상 형태로 되어 있다. 일라이트와 구조는 유사하나 팔면체(O)층의 알루미늄 이온( $Al^{3+}$ )이 마그네슘 이온( $Mg^{2+}$ )으로 치환되어 TOT층이 전기적 중성을 잃고 음이온 형태가 된다. 전기적 중성을 이루기 위해 TOT층과 TOT층 사이에 나트륨 이온( $Na^+$ ) 또는 칼슘( $Ca^{2+}$ )이온이 들어가 전기적 중성이 된다. 층간에 있는 나트륨 이온 또는 칼슘 이온은 농도와 원자가 등의 차이에 따라 다른 양이온에 의해 교환될 수 있어 교환성 양이온이라 한다. TOT층과 TOT층 사이의 결합력이 약해 층간 팽윤이 잘 일어난다. 몬트모릴로나이트의 화학 조성은  $(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH) \cdot 2n(H_2O)$ 이다. 몬모릴로나이트의 비표면적과 양이온 교환 능력은 각각 700-800  $m^2/g$ 과 80-150 meq/100g이다(Mitchell 1993).

표 2. 점토광물의 화학식, 표면적 및 양이온 교환 능력(Mitchell, 1993)

Clay Minerals	Chemical Formula	Specific Surface ( $m^2/g$ )	Cation Exchange Capacity (meq/100g)
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	10-20	3-15
Illite	$(K,H_2O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)[(OH)_2,(H_2O)]$	65-100	10-40
Montmorillonite	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH) \cdot 2n(H_2O)$	700-800	80-150

## 연경도(Consistency)

연경도는 함수량에 따라 고체 상태에서 액체 상태까지 변화하는 상태의 정도이다. 고체에서 반고체로 가는 한계를 수축한계, 반고체에서 소성상태로 가는 한계를 소성한계, 소성에서 액상으로 가는 한계를 액성한계라 한다. 일반적으로 점토광물의 액성한계가 증가할수록 점토광물이 물을 흡수할 수 있는 능력과 팽윤도가 크다. 팽창성 점토광물(몬모릴로나이트)의 경우, 층간에 있는 교환성 양이온의 원자가가 증가할수록 결합력이 강해 액성한계는 감소한다. 일반적으로 액성한계와 소성한계는 몬모릴로나이트>일라이트>고령석 순으로 크다(표 3).

## 팽윤도(Swelling capacity)

점토광물의 팽윤도는 점토광물의 소성 성질과 비례한다. 점토광물의 팽윤도는 액성한계와 소성한계의 차이, 즉 소성도가 증가할수록 커진다. 따라서 점토광물의 팽윤도는 몬모릴로나이트>일라이트>고령석 순으로 크다. 팽창성 점토광물인 몬모릴로나이트는 교환성 양이온의 종류, 공극수의 양이온 농도 및 원자가, pH 등에 의해 팽윤도가 달라진다. 예를 들어, 교환성 양이온으로 1가 양이온인 나트륨을 갖는 몬모릴로나이트가 2가 양이온인 칼슘을 갖는 몬모릴로나이트보다 팽윤도가 크다.

## 수리전도도(Hydraulic conductivity)

점토광물의 수리전도도는 점토광물의 종류에 영향을 받는다. 점토광물의 소성성질과 팽윤도와 수리전도도는 음의 상관관계를 보인다.

즉, 소성성질과 팽윤도가 큰 팽창성 점토인 몬모릴로나이트의 수리전도도는 가장 작다. 일라이트와 고령석의 수리전도도는 거의 차이가 없으나, 일라이트가 고령토보다 약간 작다. 따라서 열수변질대에 팽창성 점토광물인 몬모릴로나이트의 함량이 증가할수록 물이 많이 흡수되고 간극수압이 증가된다.

### 전단강도(Shear strength)

점토광물의 전단강도는 함수율, 압축응력 등에 따라 다르다. 일반적으로 판상으로 되어 있는 점토광물의 전단강도는 석영 등 비점토광물에 비해 작으나, 점토광물의 종류에 따라 다르다. 일반적으로 함수율이 일정할 경우 고령석>일라이트>몬모릴로나이트 순으로 전단강도가 크다. 팽창성 점토광물인 몬모릴로나이트의 전단강도는 함수율의 변화에 제일 민감하다. 즉 함수율이 증가할수록 전단강도의 감소가 크다. 따라서 강수 시 점토맥에 함유된 몬모릴로나이트의 함량이 클수록 산사태 발생 가능성은 증가된다.

### 압축성(Compressibility)

점토광물의 압축성은 함수율에 영향을 받고, 일정한 함수율에서 팽창성 점토광물의 압축성이 비팽창성 점토광물에 비해 크다. 즉 포화된 점토광물의 압축성은 몬모릴로나이트>일라이트>고령석 순으로 크다. 이는 포화된 몬모릴로나이트가 하중의 증가에 따라 부피 변화가 더 크게 발생한다는 것을 나타낸다. 즉 열수변질대에 팽창성 점토광물인 몬트모릴로나이트의 함량이 증가할수록 강우 시 물 흡수에 의한

팽창에 의해 부피가 증가하고, 하중 변화에 따라 부피 변화가 발생해 변형이 일어나 안정성이 감소된다.

표 3. 점토광물의 연경도(Mitchell, 1993)

Clay Minerals	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Shrinkage Limit (%)
Kaolinite	30-110	25-40	25-29
Illite	60-120	35-60	15-17
Montmorillonite	100-900	50-100	8.5-15

### ● 열수변질대와 사면안정

사면의 파괴는 사면을 이루는 지층의 전단강도가 감소하거나, 전단응력이 증가되면서 전단강도의 평형이 무너지며 발생한다. 강우가 발생할 경우 강우의 침투와 지하수위의 상승에 의해 지층의 전단응력 감소가 발생된다. 암석이나 경질토는 풍화작용을 통해 강도를 잃게 된다. 점토질의 토양이나 과압밀된 토양은 물과 접촉하면 팽윤(swelling) 현상이 발생하기 쉬우며, 팽윤 현상은 사면 구성 지층의 전단강도를 감소시킨다. 전단강도가 유지되더라도 외부 환경이나 내부 구조의 변화로 전단응력이 증가할 수 있다. 사면 상부에 하중이 작용하거나, 사면 상부에 위치한 균열면에 수압이 증가할 경우, 함수비의 증가 등에 의해 사면에 작용하는 전단응력이 증가한다(Duncan and Wright, 2005).

열수는 화강암의 내부 단열면이나 관입암의 경계면을 따라 이동하므로 점토맥 또한 대부분 열수의 이동 경로를 따라 분포하게 된다.

점토막이 고각으로 사면 내에 존재할 경우 지하수의 횡적인 흐름을 막고 양압력을 발생시켜 사면의 상부 붕락을 일으키는 요인이 될 수 있다(그림 1).

그림 2는 강우 시 저수지에서 산사태가 발생한 지역의 지질 단면도이다(이부경, 2003). 이 산사태는 강우 전에는 점토막이 저수지 수위 위에 존재하였으나, 강우에 의해 저수지 수위가 상승하여 점토막이 저수지 수위 아래로 내려가 물의 침투에 의해 간극수압이 상승하고, 점토막의 전단강도가 감소해 발생했다. 이와 같은 산사태의 원인이 된 점토막은 열수변질대에 수반되어 발달한다.

터널 공사 시에는 변질대에 존재하는 점토막에서 간극수압이 증가하여 지하수가 대량으로 용출되는 사고도 발생할 수 있다(그림 3). 또한 점토막이 사면의 방향성과 비슷한 방향성을 가지고 존재할 경우, 점토막의 낮은 강도로 인해 심층 중력 사면 변형(Deep-seated Gravitational Slope Deformation, DSGSD)이나 전이형 산사태가 될 가능성도 존재한다.

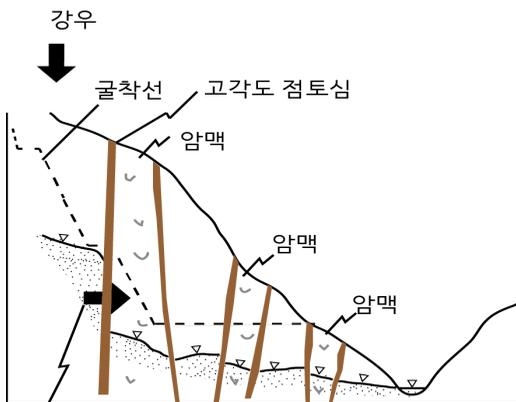


그림 1. 고각의 변질 점토막을 수반하는 암반 사면 (정경문과 정규정, 2016).

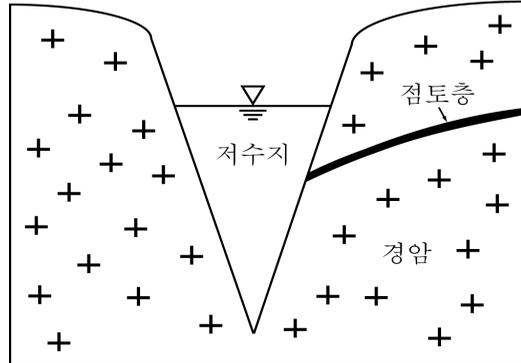


그림 2. 저수지에서 변질 점토막을 수반하는 암반 사면(이부경, 2003).

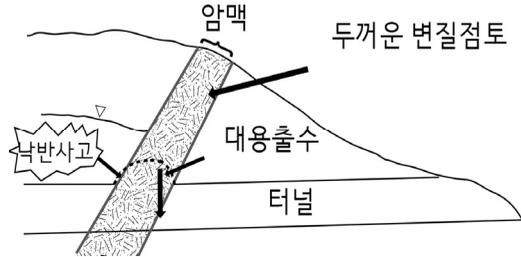


그림 3. 변질 점토막이 터널을 횡단하고 있는 예(정경문과 정규정, 2016).

우리나라에서도 단열대에서 산사태가 발생한 사례가 보고되었다. 이수곤 외(2003)는 2002년 태풍 루사에 의해 사면붕괴가 발생된 지역을 대상으로 원인을 분석하였다. 대상 지역은 불국사 화강암이 기존의 함각력질 안산암을 관입한 지역이다. 기존의 사면 안전을 검토에서는 연암의 2 m 깊이까지만 시추하여 하부에 위치하는 풍화암층이나 단층파쇄대 등을 인지하지 못하여 사면 안전율이 실제보다 과대평가된 것으로 나타났다. 조사 지역은 화강암의 관입으로 인하여 생성된 단층파쇄대에 점토가 충전된 환경으로 단층파쇄대의 낮은

전단강도로 인해 사면붕괴가 발생한 경우이다. 또한 이창섭(2007)은 사면 내에 소규모의 단층이 다수 발달해 있으며 수직 절리가 발달하여 강우 발생 시 지표수가 암반 내부로 유입되어 간극수압을 형성하여 파괴된 사례, 사면 내에 세일의 층리와 함께 점토가 협재되어 있어 파괴면이나 침투수의 통로 역할을 하여 사면 파괴의 원인이 된 사례 등을 소개하였다.

## ● 열수변질 점토의 조사 방법

산사태 대책을 위한 지질조사의 목적은 산사태 위험 지역의 파악을 위한 조사, 산사태 위험 지역에서 안정성을 평가하기 위한 조사, 사면절취를 위한 사전조사 등이 있다. 중요한 조사항목은 지형자료, 구성 지반의 기본물성 및 포화시의 특성, 단층-파쇄대의 분포 및 역학적 특성, 절리-층리면 등의 분포, 지하수의 거동, 기상자료 등이다(윤지선, 1990).

열수변질대가 폭넓게 분포하고 있는 우리나라에서 자연사면이나 인공사면에서 열수변질대 내에 산출되는 점토맥이 산사태 발생에 중요한 역할을 할 수 있다. 점토맥이 사면에 존재할 경우 국지적인 간극수압의 급격한 증가가 발생할 수 있으므로 지하수위를 자유면대수층으로 가정하여 산출된 사면 안전율은 실제보다 과소평가 될 수 있다(조환주, 2009; 조환주 외, 2010). 따라서 사면의 안정성을 평가하기 위한 지질조사 시 열수변질대의 분포 및 특성 뿐 아니라 산출되는 점토맥의 수리·역학적 특성을 조사해야 한다. 특히, 점토맥의 수리·역학적 특성은 점토맥의 구성 광물인 점토광물의

종류에 따라 변한다. 따라서 시간과 장비가 요구되는 점토맥의 수리·역학적 특성을 조사하기 전에 실내와 현장에서 점토광물의 종류 및 기본물성을 예측할 수 있는 간편한 방법을 소개하고자 한다.

## X-선 회절분석

점토광물의 종류는 점토광물의 분말시료를 채취하여 X-선 회절분석을 통해 알 수 있다. 분말 X-선에 의한 점토광물의 동정은 회절 형태가 물질의 고유한 특성이라는 것에 기초를 두고 있다. X-선을 미지의 시료에 조사하면 그 중 일부는 회절을 일으키고 물질의 고유한 회절각과 강도 정보로부터 시료에 함유된 결정성 물질에 대한 구조 정보를 얻을 수 있다. 이와 같이 점토광물의 구조 정보를 통해 점토광물을 동정할 수 있다(Mitchell, 1993).

## 팽윤도 시험

X-선 회절분석은 결정성 점토광물을 동정할 수 있으나, 고가의 기기와 시간이 요구되고 정량적 분석이 어려운 단점이 있다. 점토광물의 팽윤도를 측정하여 간접적으로 점토광물의 종류와 소성성질, 수리·역학적 성질 등 공학적 특성을 예측할 수 있다.

점토의 팽윤도 시험은 ASTM D5890의 표준시험 방법을 따라 수행한다. 우선 현장에서 점토 시료를 채취한 후 미국 표준 체(US Standard Sieve) 중 200 메시를 통과하도록 분쇄한다. 분쇄된 점토 2.00 g을 90 ml의 탈이온수 용액이 담겨있는 100 ml 용량의 메스실린더에 약 0.1 g씩 넣는다. 완전히 점토 분말이

가라앉은 후 다시 점토 분말 0.1 g을 메스실린더에 넣는다. 점토 분말 2.00 g을 모두 넣고, 점토 분말이 가라앉은 후 실린더 벽면을 탈이온수로 씻어낸다. 이 때 메스실린더 안에 물의 부피가 100 ml가 되도록 한다. 24시간 후에 점토 분말의 부피를 ml단위로 0.5 ml로 반올림하여 기록한다. 기록된 점토 분말의 부피를 ml/2g 단위의 팽윤지수라 한다.

팽윤지수는 소성성질과 팽윤도와 양의 상관관계를 갖으나 수리전도도와 전단강도와는 음의 상관관계를 갖는다. 즉 점토광물의 팽윤도가 클수록 소성성질과 팽윤도가 크고, 수리전도도와 전단강도는 작다. 따라서 팽윤지수로부터 팽창성 점토광물과 비팽창성 점토광물을 구분할 수 있고, 점토광물의 종류와 공학적 성질을 예측할 수 있다.

### 시약 사용

파라-페니린-디아민 용액, 즉 파라민 포화수용액을 몬모릴로나이트가 함유된 점토에 떨어뜨리면 산화환원 반응에 의해 청색이나 농청색으로 변화해서 몬모릴로나이트 함유 여부를 알아볼 수 있다. 파라민 포화수용액은 파라민 분말 4 g에 물 100 g을 섞어 제조한다. 공기에 접촉되면 변색됨으로 사용 직전에 용액을 제조해야 한다(정경문과 정규정, 2016).

조사하고자 하는 열수변질대의 점토에 팽창성 점토광물인 몬모릴로나이트의 존재 여부를 파라민 포화수용액을 사용하여 현장에서 간편하게 판정할 수 있다. 그림 4는 점토에 파라민 포화수용액을 점토에 떨어뜨려 몬모릴로나이트의 함유를 색깔 변화에 의해 확인한 결과이다.

몬모릴로나이트의 함유가 확인되면 그 후 시료의 채취를 통해 기본 물성, 수리·역학적 특성 등에 대해 정밀조사를 실시할 수 있다.

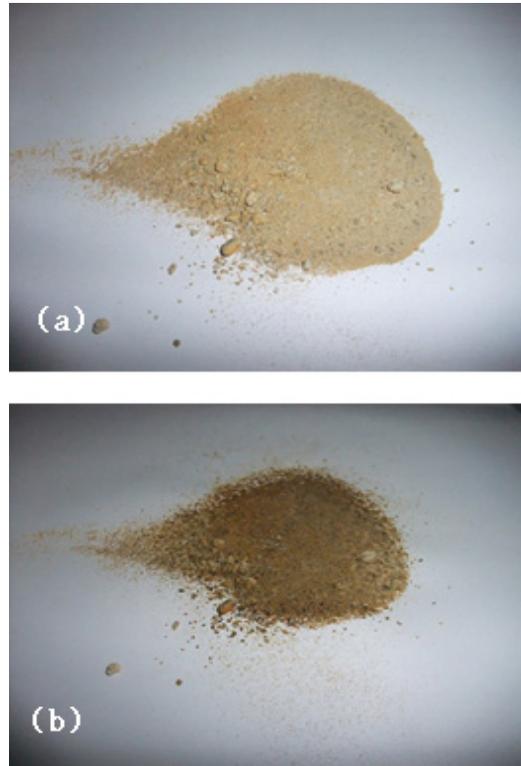


그림 4. 점토에 파라민 포화수용액을 떨어뜨려 몬모릴로나이트의 함유를 색깔 변화에 의해 확인한 결과: (a) 반응 전, (b) 반응 후.

### ● 결론

우리나라에 열수변질대가 폭넓게 분포하고 있어 자연사면이나 인공사면에서 열수변질대 내에 생성된 점토맥이 산사태 발생에 중요한 역할을 할 수 있다. 점토맥이 존재하는 지반에 지표수가 침투되면 점토광물의 팽윤성 때문에 국지적으로 간극수압이 급격히 상승할 수 있

다. 지표수의 침투에 의해 간극수압이 증가하면 세립의 점토광물이 침식된다. 침식된 점토광물은 유동하면서 동수경사가 작은 부분에서 유속이 느려져 퇴적된다. 점토광물이 퇴적된 곳에서 국지적인 간극수압의 증가로 인한 지하수의 유출이 사면파괴를 일으킬 수 있다. 따라서 사면안정 평가를 위한 지반조사에서 열수변질대에 대한 정확한 이해와 조사 및 분석이 수행되어야 한다.

## ● 참고문헌

- 고상모 (2001) 한국의 열수변질 점토광상의 형성 환경 고찰, 한국광물학회·한국암석학회 2001년 공동학술발표회 논문집.
- 이부경 (2003) 지질방재공학, 대운출판사.
- 이수곤, 양홍석, 황의성 (2003) 화강암-안산암 접촉부 대규모 사면의 붕괴 사례 연구, 서울시립대학교 산업기술연구소논문집, 11, 79-85.
- 이창섭 (2007) 사면파괴 사례와 안정화 대책, 2007년도 지질공학 심포지엄 발표 논문집, 대한지질공학회.
- 이창섭, 이효민 (2009) 양산단층을 통과하는 북안티널구간의 열수변질작용과 공학적 특성, 한국광물학회지, 22, 1, 13-22.
- 윤지선 (1990) 토목지질공학, 구미서관.
- 장태우, 채연준, 추창오 (2005) 울산단층 동부지역 제4기단층 비지대내 변질광물의 형성, 한국광물학회지, 18, 3, 205-214.
- 정경문, 정규정 (2016) 토목지질의 비법 전수 97, 기술경영사.
- 조환주 (2009) 점토매이 사면안정성에 미치는 영향에 관한 모델링 연구, 고려대학교 일반대학원 석사학위 논문.
- 조환주, 조호영, 정경문 (2010) 연수별질 점토매이 사면 안정성에 미치는 영향에 관한 모델링 연구, 자원환경지질, 43, 2, 185-196.
- 황진연, 윤지해, 키타가와 (1998) 경주시 양북면 고제3기 화강암 내에 나타나는 점토광물과 점토 세맥, 지질학회지, 4, 4, 267-282.
- ASTM D5890 Standard test method for swell index measurement of clay mineral component of geosynthetic clay liners, Annual Book of ASTM Standards (2012), Vol. 4.13, ASTM International, W. Conshohocken, PA.
- Duncan, J.M. and Wright, S.G., (2005) Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons, Inc.
- Mitchell, J.K. (1993) Fundamentals of Soil Behavior, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Opfergelt, S., Delmelle, P., Bolvin, P., Delvaux, B., (2006) The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua: Investigation of the role of hydrothermal smectite in promoting slope instability, Geophysical Research Letters, 33, 15, L15305.
- Paudel, P.P., Omura, H., Kubota, T., and Inoue, T., (2007) Spatio-temporal patterns of

historical shallow landslides in a volcanic area, Mt. Aso, Japan, *Geomorphology*, 88, 1-2, 21-33.

Kamai, T., (1998) Monitoring the process of ground failure in repeated landslides and associated stability assessments, *Engineering Geology*, 50, 71-84.

White, D.E., (1957) Thermal waters of volcanic origin, *Geological Society of America Bulletin*, 68, 1637-1658.