

# 점토광물 함유량을 고려한 땅밀림 산사태 지역의 전기비저항 자료의 해석

김정인<sup>1</sup> · 김지수<sup>2\*</sup> · 이선중<sup>3</sup> · 조경서<sup>1,4</sup> · 김종우<sup>5</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 지구환경과학과 석사과정, <sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과 교수,

<sup>3</sup>산림조합중앙회 산림종합기술본부 연구원, <sup>4</sup>(주)아시아지오 연구원, <sup>5</sup>청주대학교 토목공학과 교수

## Interpretation of Electrical Resistivity Tomogram with Contents of Clay Minerals for the Land Creeping Area

Jeong-In Kim<sup>1</sup> · Ji-Soo Kim<sup>2\*</sup> · Sun-Joong Lee<sup>3</sup> · Kyoung-Seo Cho<sup>1,4</sup> · Jong-Woo Kim<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Master Student, Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

<sup>2</sup>Professor, Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

<sup>3</sup>Researcher, National Forestry Cooperative Federation Forest Technology Division

<sup>4</sup>Researcher, ASIAGEO Co., Ltd.

<sup>5</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Cheongju University

### Abstract

Clay mineral content of weathered zone is a key parameter for landslide studies. Electrical resistivity tomography is usually performed to delineate the geometry of complex landslides and to identify the sliding surface. In clay-bearing weathered zone, parallel resistivity Archie equation is employed to investigate the effect of conductivity added (resistivity reduced) by clay minerals of kaolinite and montmorillonite, which is dependent on their specific surface area and cation exchange capacities (CEC). A decrease of overall resistivity and apparent formation factor is observed with increasing pore-water resistivity, significantly in montmorillonite. Formation factor is found decreased with increasing porosity and decreasing cementation factor. Parallel Archie equation was applied to the electrical resistivity data from the test area (Sinjindo-ri, Taeon-gun, Chungcheongnam-do, Korea) which experienced land creeping in the year of 2014. A panel test with varying clay-mineral contents provides the best fit section when the theoretical section constructed with the assumed contents approaches the field section, from which the clay-mineral content of the weathered zone is estimated to be approximately 10%. Resistivity interpretation schemes including the clay mineral contents for land creeping studies explored in this paper can be challenged more when porosity, saturation, and pore-water resistivity are provided and they are included in the numerical resistivity modeling.

**Keywords:** clay mineral, electric resistivity, land creeping, parallel resistivity Archie equation

### 초 록

산사태 연구에서 풍화대 안에 분포하는 점토광물의 함유량은 매우 중요한 요소이다. 산사태 발생과 관련된 지하 구조를 파악하고 미끌림 면을 확인하기 위해 일반적으로 지구물리탐사를 수행하는데 특히 전기비저항 단면이 많이 사용된다. 이 연구에서는 풍화대에 분포하는 카올리나이트와 몬모릴로나이트와 같은 점토광물에 의한 전기전도도의 증가효과(전기비저항의 감소효과)를 해석하기 위해 병렬모델 아치

### OPEN ACCESS

\*Corresponding author: Ji-Soo Kim  
E-mail: geop22@cbnu.ac.kr

Received: 23 March, 2021

Accepted: 7 April, 2021

© 2021 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 방정식을 이용하였다. 점토의 전기전도도는 광물의 종류 및 그 비표면적과 양이온 교환능력에 따라 달라진다. 간극수의 전기비저항이 증가함에 따라 매질의 전체 비저항과 지층인자는 작아지는데 카올리나이트에 비해 몬모릴로나이트가 훨씬 작게 나타난다. 또한 공극률이 커지고, 고결인자가 작아질수록 지층인자가 감소하는 것으로 나타난다. 점토광물에 대한 병렬모델 아치의 방정식을 현장자료에 적용하기 위해 2014년 땅밀림 산사태가 일어난 충남 태안 신진도리에서 수집되어 처리·해석된 전기비저항자료를 사용하였다. 기존의 실험식에서 카올리나이트의 함유량에 따라 결정되는 계수들을 활용하여 풍화대의 전기비저항 값들을 계산하고 이들을 전기비저항 수치모델링에 포함시켰다. 점토 함유량을 변화시켜 만든 여러 개의 이론자료들 중에서 현장자료와 가장 근접하는 모델자료를 선택하여 이에 입력된 점토 함유량 10%를 이 지역의 풍화대에 대한 점토 함유량으로 추정하였다. 땅밀림 연구에서 처음 시도된 전기비저항 자료를 이용한 점토 함유량의 추정기법은 차후 점토 함유량 외에 전기비저항에 영향을 미치는 다른 인자(공극률, 포화도, 간극수의 전기비저항)들에 대한 자료를 확보하고 이들을 수치모델링에 먼저 포함시켜 수행할 때 더욱 그 신뢰성은 더욱 높아질 것으로 기대된다.

**주요어:** 점토광물, 전기비저항, 땅밀림, 병렬모델 아치의 식

## 서론

사면붕괴와 산사태는 하절기 집중호우 및 태풍을 동반한 강우 시에 집중적이고 급격히 발생하는 특징을 보이지만 땅밀림 산사태의 경우는 활동면이 깊고 서서히 진행되기 때문에 지질 암종의 풍화, 구성 광물의 성질 및 지형적 특성에 더욱 밀접한 영향을 받는다(Stead and Wolter, 2015; Shin et al., 2018).

땅밀림 현상은 토층의 깊이와 구성 물질에 따라 그 규모와 사태 물질의 이동 방향이 결정되는데 구성 광물 중에서 특히 주로 풍화대에 분포하는 점토 광물과 그 함유량이 주요 인자이다. 점토 광물은 그 구조가 판상이고 팽창성과 함수율이 높을 뿐 아니라, 토층의 투수율에 대한 영향이 크므로 산사태 발생 초기에 중요한 역할을 하게 된다. 팽윤성(swelling) 점토 광물인 스�멕타이트(몬모릴로나이트), 버미큘라이트, 할로이사이트, 녹니석, 카올리나이트/버미큘라이트, 일라이트-스멕타이트와 같은 혼합층상 광물의 존재 여부와 함량비는 다른 광물에 비하여 그 기여도가 훨씬 크다(Kim et al., 2005). 특히 몬모릴로나이트는 물을 흡수할 경우 많이 팽윤되어 암반을 분리시키거나 암반의 전단강도를 감소시킨다. 한 예로서, 열수 변질 작용에 의해 형성된 몬모릴로나이트로 인한 니카라과 캐시타 화산에서 일어난 산사태(Opfergelt et al., 2006), 풍화 작용에 의해 형성된 스�멕타이트가 암반의 전단강도를 감소시켜 산사태가 유발된 네팔 히말라야에서의 산사태(Regmi et al., 2013)를 들 수 있다(Jo et al., 2016).

지반 환경조사에서 전기비저항은 지반의 전기적 성질에 관계되는 물성이므로 암종, 파쇄대 및 균열에 의한 공극률, 포화도, 간극수 및 지하수의 전기비저항, 온도, 풍화 및 변질에 따른 점토광물의 함유량에 의해 변한다(Park et al., 2004). 특히 서서히 일어나는 땅밀림 산사태의 경우 땅밀림 산사태가 일어난 지역과 징후 지역들을 대상으로 해석한 전기비저항 자료에서 땅밀림 현상은 지질암석 환경보다 주로 풍화대에 분포하는 점토에 기인하는 것으로 정리된 바 있다(Lee, 2021). Park(2004)과 Park et al.(2005)은 점토광물의 종류 및 함유량과 전기비저항의 상관성을 그들이 고안한 점토광물을 함유한 한천공시체를 이용하는 실험적 연구를 수행하여 각 점토광물의 함유량에 따른 전기비저항의 경험식을 도출하였다.

이 연구에서는 점토를 고려한 병렬모델 아치(Archie)의 식(parallel resistivity Archie equation)을 이용하여 공극률과 지층인자의 관계, 간극수의 전기비저항 및 점토광물의 함유량에 따른 전기비저항의 변화, 카올리나이트와 몬모릴로나이트의 함유량에 따른 전기비저항 특성곡선을 작성한 후, 땅밀림 현상에서 가장 중요한 역할을 하는 풍화대의 점토함유량을 전기비저항 단면에서 추정하고자 하였다. Lee et al.(2020)에서 해석된 땅밀림 전기비저항 단면을 현장자료로 활용하여 Park(2004)이 제안한 경험식을 사용해 구성 광물의 점토함유량의 변화에 따른 풍화대의 이론적인 전기비저항을 결정하여 수치 모델링 자료들을 각각 얻고 이들을 현장자료와 비교 해석하여 실제 전기비저항 단면에 가장 근접하는 모델 자료에

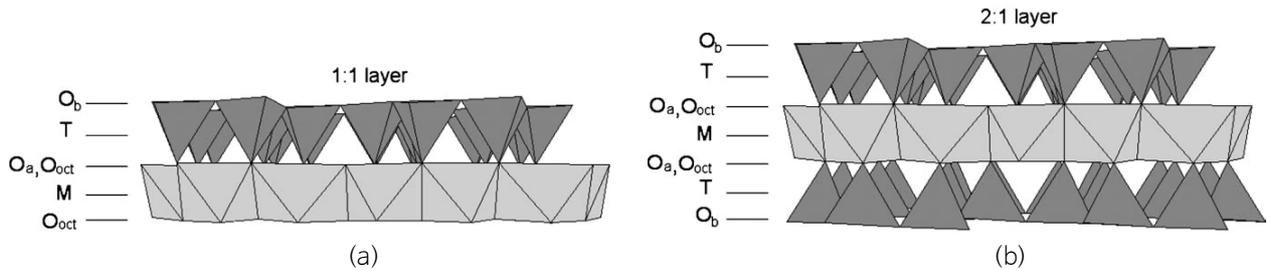
입력된 값을 풍화대의 점토함유량으로 추정하는 과정을 보이고자 한다.

## 점토광물과 전기비저항

### 점토광물과 양이온 교환능력

점토는 적절한 물을 함유할 때 소성이 되고, 가열하거나 건조하면 단단해지는, 주로 입자가 작은 광물로 구성되는 자연적으로 생성된 물질을 말한다. 점토광물은 점토에서 물질의 기원, 입자의 크기에 상관없이 주로 가소성과 단단함을 유발시키는 광물을 말한다(Moon and Choi, 2001). 즉, 점토광물이 점토에 비해 더 큰 범위를 나타낸다고 할 수 있다.

층이 쌓이는 형태에 따라 분류되는 점토광물에는 대표적으로 사면체(T)층과 팔면체(O)층이 1:1로 결합하여 하나의 단위(TO)층을 만드는 판상 형태의 구조로 구성되어 반데르발스 결합과 수소 결합으로 강한 결합을 하여 층간 팽윤이 일어나지 않는 카올리나이트(kaolinite)(Fig. 1a), 두 개의 사면체(T) 시트 사이에 팔면체 시트가 중간에 끼워진 형태로 구성되는 일라이트(illite)와 몬모릴로나이트(montmorillonite)(Fig. 1b) 등이 있다. 이 중에서 일라이트는 사면체(T)층의 규소 이온( $Si^{4+}$ )이 알루미늄 이온( $Al^{3+}$ )으로 치환되면서 층간 팽윤이 거의 일어나지 않으며, 몬모릴로나이트는 알루미늄 이온( $Al^{3+}$ )이 마그네슘 이온( $Mg^{2+}$ )으로 치환되면서 물이 들어가며 층간 사이의 결합력이 약해져서 팽윤이 잘 일어난다(Jo et al., 2016).



**Fig. 1.** (a) A tetrahedral layer combined with octahedral layer (1:1 TO structure) and (b) two tetrahedral layers combined with octahedral layer (2:1 TOT structure). M and T indicate the octahedral and tetrahedral cation, respectively.  $O_a$ ,  $O_b$ , and  $O_{oct}$  refer to tetrahedral basal, tetrahedral apical, and octahedral anionic position, respectively (after Bergaya et al., 2006).

중력 보다는 표면력에 의해 거동이 지배되는 점토입자는 그 크기가 작고 형상이 불규칙한 콜로이드 상태를 보인다. 비표면적(specific surface)은 단위질량에 대한 표면적의 크기로서 전하의 크기와 직접 관련된다. 광물입자는 자신이 가지고 있는 전하를 중성화시키기 위하여 이온을 끌어당기며 끌려 온 이온은 입자 표면에 약하게 결합되어 다른 이온으로 쉽게 대체되는 이온교환 과정(ion exchange process)이 수반된다. 대표적인 점토광물의 비표면적(specific surface)과 양이온 교환능력(cation exchange capacity, CEC)은 카올리나이트( $10\sim 20\text{ m}^2/\text{g}$ ;  $3\sim 15\text{ m}\cdot\text{equiv}/100\text{ g}$ ), 일라이트( $65\sim 100\text{ m}^2/\text{g}$ ;  $10\sim 40\text{ m}\cdot\text{equiv}/100\text{ g}$ ), 몬모릴로나이트( $10\sim 20\text{ m}^2/\text{g}$ ;  $80\sim 150\text{ m}\cdot\text{equiv}/100\text{ g}$ ) 순으로 증가하여(Table 1) 암석 공극에 있는 물의 전기전도도는 이와 같은 순서로 커지며 전기비저항은 이와 역순이다.

**Table 1.** Chemical formula, specific surface, and cation exchange capacity (CEC) of three representative clay minerals (after Mitchell, 1993; Jo et al., 2016)

Clay mineral	Chemical formula	Specific surface	Cation exchange capacity (CEC)
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

### 병렬모델 Archie 방정식

지하매질의 전기비저항을 이용하여 저류암의 물성을 평가하기 위해 제안된 Archie의 식은

$$\rho = a\phi^{-m}s^{-n}\rho_w \tag{1}$$

이다(Reynolds, 2010). 여기서,  $\phi$ 는 공극률,  $a$ 는 흐름계수(flow factor)( $0.5 \leq a \leq 2.5$ ),  $m$ 은 고결계수(cementation factor)( $1.3 \leq m \leq 2.5$ ),  $n$ 은 포화계수(saturation factor)( $n \approx 2$ )이다. 따라서 공극이 물로 완전히 포함된 경우( $s = 1$ ) 간극수의 전기비저항  $\rho_w$ 에 대한 지층의 전기비저항  $\rho$ 의 비로 나타나는 지층인자(formation factor)  $F$ 는 다음과 같다.

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} = a\phi^{-m} \tag{2}$$

지층인자는 유체와 관계없이 오직 지층매질의 기하학적인 상태, 즉 공극의 크기와 형상 및 분포상태를 반영하는 매질의 고유계수이기 때문에 토양 및 암석의 종류, 치밀함, 저류능력의 판정에 이용할 수 있다.

지층 간극수의 전기비저항  $\rho_w$ 를 알면 지층의 공극률  $\phi$ 를 파악할 수 있기 때문에 저류암 평가에 많이 사용되어 온 이 식은 지층의 전기전도도가 간극수에만 의존할 경우에만 적용할 수 있으므로 점토를 함유하고 있는 지층에서는 앞에서 설명한 점토의 비표면적과 양이온 교환능력(CEC)에 따라 전기비저항이 추가로 감소되는 전기비저항 병렬모델(resistivity parallel model)을 생각해야 한다(Nabighian, 1994; Kirsch, 2006; Kim et al., 2021). 즉 표면력에 의해 지배되는 점토의 흐름 전류에 대한 전기전도도의 추가분  $\sigma_s = 1/\rho_s$ 을 포함시킨다. 따라서 공극이 물로 완전 포화된 경우( $s = 1$ ) Archie의 식 (1)을 역전시키고  $\sigma_s = 1/\rho_s$ 을 더하면

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\phi^m s^n}{a\rho_w} + \frac{1}{\rho_s} \tag{3}$$

이 된다. 여기서, 우측의 첫 번째 항은 식 (1)과 같은 Archie의 식이며 두 번째 항이 점토광물로 인해 전류가 추가로 흐른다는 개념이다. 앞에서 추가 전류는 점토광물의 비표면적과 CEC에 관계가 있으므로, 그 종류 및 함유량에 따라 달라진다.

한 가지 예로서 Rhoades et al.(1989)은 점토 함유량  $C(\%)$ 에 의한 추가 전기전도도  $\sigma_s$ 를

$$\sigma_s = 2.3C - 0.021 \tag{4}$$

로 표현하였다. 그러나 이것은 특정 지역에 대한 경험식으로서 지역에 따라 달리 표현되어야 할 것이다. 또한 Sen et al.(1988)은 각 점토광물의 전기전도도를 직접 CEC로 표현하여 다음과 같이 제시하였다.

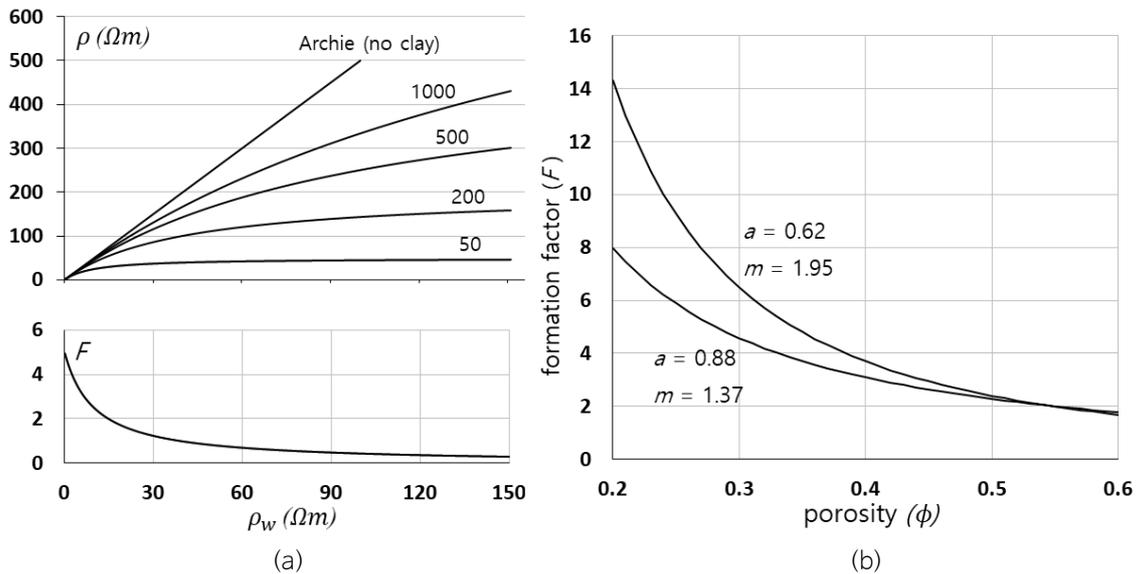
$$\sigma = \frac{1}{F} \left( \sigma_w + \sigma_w \frac{A Q_v}{\sigma_w + B Q_v} \right) + E Q_v \tag{5}$$

여기서,  $F$ 는 지층인자  $F = \sigma_w / \sigma$ 이며,  $Q_v$ 는 입자(matrix)의 밀도  $\rho_m$ 를 포함시켜 다음과 같이 표현된다.

$$Q_v = \frac{\rho_m(1 - \phi)}{\phi} CEC \tag{6}$$

점토가 전혀 없는 경우에는 식 (6)에서  $CEC = 0$ 이므로  $Q_v = 0$ 이고 따라서 식 (5)의 지층함수  $F = \sigma_w / \sigma$ 는 식 (2)에 표현된 지층함수  $F = \rho / \rho_w$ 와 같아진다.

점토를 함유하고 있는 지층에서는 간극수 자체의 이온 전도 외에 지층에 함유된 점토분이 전기전도성 물질의 역할을 하기 때문에 점토를 고려한 병렬모델의 전기비저항의 식 (3)은 간극수의 비저항만을 고려한 Archie의 식 (1)에 비해 낮아질 것이다. Fig. 2a는 식 (2)와 식 (3)에서 지층인자  $F$ 를 5로 가정하여 간극수의 전기비저항  $\rho_w$ 에 대한 전체 전기비저항  $\rho$ (윗 그림)와 지층인자  $F$ 의 곡선으로서(아랫 그림) 점토의 비표면적이 커질수록, 즉  $\rho_s$  값이 작아질수록 점토로 인한 비저항의 감소 현상을 잘 보여주고 있다. 점토광물이 분포하지 않을 경우에는 전기비저항 곡선은 식 (2)를 따라 원점을 지나는 직선의 형태로 나타난다. 점토의 비저항  $50 \Omega m$  곡선에 대한 겉보기 지층인자는 식 (2)에서 간극수의 비저항이 커질수록 작아지며(Fig. 2a) 공극률이 커질수록 또 고결계수  $m$ 이 감소하면 작아진다(Fig. 2b).



**Fig. 2.** (a) Electrical resistivity  $\rho$  (the upper) and apparent formation factor  $F$  based on the surface resistivity  $\rho_s$  of  $50 \Omega m$  (the lower) dependent on pore-water resistivity  $\rho_w$ . Overall resistivity  $\rho$  decreases with surface resistivity  $\rho_s$ . (b) Formation factor  $F$  is dependent on porosity  $\phi$  with cementation factor  $m$  and flow factor  $a$ . A decrease of  $F$  is observed with increasing  $\phi$  and  $a$ , and with decreasing  $m$ .

## 땅밀림 현장자료에 대한 적용

### 전기비저항 쌍극자 단면도

점토 함유량의 반응에 따른 전기비저항의 반응을 해석하기 위해 충청남도 태안군 신진도리에서 2014년에 발생한 땅밀림 현상과 관련하여 총 4개의 전기비저항탐사 측선에서 쌍극자간격  $a = 5 \text{ m}$ , 깊이인자  $n = 8$ 로 설정하여 약 25 m의 가탐 심도가 확보된 2차원 단면도 중의 하나를 이용하였다(Lee et al., 2020).

자료처리 소프트웨어 Dipro(2000)를 사용하여 해석한 전기비저항 단면도에서 150  $\Omega\text{m}$  이하의 약 8 m 두께의 경사층은 붕괴 사면의 미끄럼 활동의 주된 역할을 하는 지질 연약층(풍화 토사층)으로서 0~45 m 거리에서 지면에 거의 노출되고 있다(Fig. 3). 상부 45~100 m 거리에서 지층면과 평행하게 남아있는 400  $\Omega\text{m}$  내외의 고비저항대는 자갈을 다량 함유하고 있는 붕적층으로 해석되는데 이것은 특히 거리 75 m 지점에서 자갈이 다수 쌓여있는 테일러스 지형으로 현장에서 잘 관찰된 바 있다(Lee, 2021).

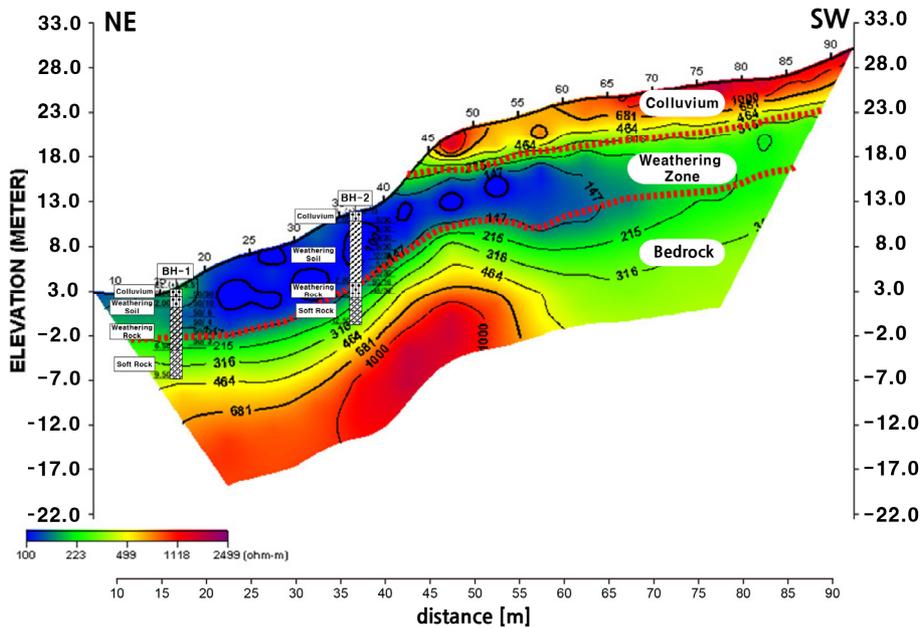


Fig. 3. Dipole-dipole electric resistivity structure (after Lee et al., 2020). Three-layer structure indicated by the red dotted line (A: colluvial soil, B: weathered zone, C: bedrock) is used in simplified modeling for investigating the clay mineral contents of the weathered zone.

거리 36 m에서 교차하는 BH-2 시추자료의 세립질 점토, 실트의 풍화토층은 약 8 m 두께의 전기비저항 연약대를 잘 설명해주고 있다. 붕괴가 발생한 사면 상부의 붕적층 밑에 있는 전기비저항 값이 10~150  $\Omega\text{m}$ 인 풍화층은 점토, 실트로 구성된 토사층으로서 약 10 m의 두께로 분포하고 있다. 석회암으로 이루어진 연암은 그 표면이 지표로부터 약 10 m 깊이로 200  $\Omega\text{m}$  이상의 비저항 값을 보이고 있다.

이 지역에서 일어난 소규모 산사태는 집중 호우로 인하여 상승하는 지하수위의 영향으로 점토층의 함수율이 증가하고 아울러 강수율이 지질의 평균 침투율보다 높아서 상부의 자갈로 이루어진 붕적층을 쉽게 통과하는 초과침투 현상이 주요 발생 원인으로, 이 침투수가 실트질 점토로 이루어진 풍화층의 전단계수를 더욱 감소시켜 토사 사면이 불연속 경계면을 따라 파괴되어 미끄러지는 형태로 나타난 것으로 해석되었다(Lee et al., 2020).

### 점토광물에 대한 전기비저항 특성곡선

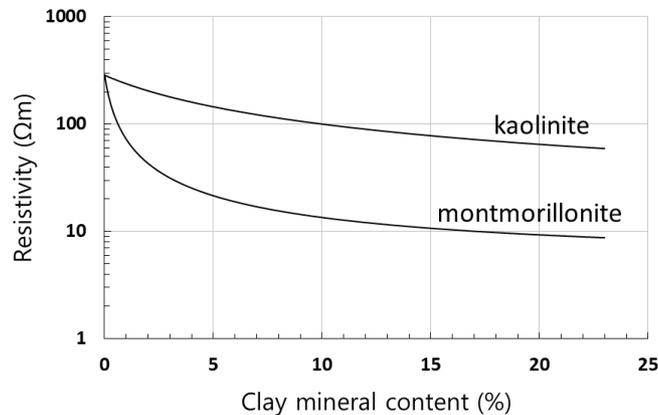
지반의 전기 비저항은 주로 포화도, 공극률, 간극수의 전기전도도, 점토함유량, 온도 등에 따라 복합적으로 결정된다 (Table 2)(Park, 2004). 물로 포화된 지층에서는 주로 공극률과 간극수의 전기비저항이 큰 영향을 미치고, 불포화 지층에서는 함수비에 크게 좌우된다. 이들 인자 중에서 산사태에서 파괴면의 거동에 가장 민감하게 작용하는 풍화대 안의 점토 광물 및 그 함유량에 대한 전기비저항의 반응 효과를 알아보기 위해 이 연구에서는 점토광물의 함유량에 따른 전기비저항 특성에 대한 실험적 연구에서 도출된 경험식(Park, 2005; Park et al., 2005)을 사용하였다.

$$\rho_{wz-clay} = \rho_{wz-0} - (aC / C + b) \tag{7}$$

여기서,  $\rho_{wz-clay}$  은 점토광물을 함유한 샘플의 전기비저항이고,  $\rho_{wz-0}$  은 점토광물을 함유하지 않은 샘플의 전기비저항이다.  $C$ 는 점토광물의 함유량(%)이고  $a$ 와  $b$ 는 점토광물의 종류에 따른 고유상수이다(Park et al., 2005). 식 (2)에서 그들이 제안한  $a$ 와  $b$ (카올리나이트에서 272와 4.72, 몬모릴로나이트에서 280과 0.315)를 토대로 계산하여 작성한 점토 함유량에 따른 전기비저항 특성곡선(Fig. 4)에서 몬모릴로나이트는 카올리나이트에 비해 그 함유량이 적음에도 불구하고 전기비저항을 현저히 저하시킨다(Kim et al., 2021). 이러한 이유는 식 (5)와 식 (6)에서 전기전도도에 영향을 미치는 양이온 교환용량(CEC)(Table 1)이 카올리나이트에 비해 약 10배 이상 높기 때문으로 해석된다. 또한 점토 함유량이 증가할수록 전기비저항의 감소폭은 작게 나타나고 있다.

**Table 2.** Major factors and their degrees affecting the electrical resistivities of the subsurface (modified from Park, 2004)

Major factors		Resistivity decreasing	Resistivity increasing	Subsurface lithology and discontinuities
Porosity	Saturated condition	Large	Small	Weathered and fault fractured zone
	Unsaturated condition	Small	Large	
Pore fluid resistivity (resistivity of groundwater)		Low	High	Components of groundwater
Water saturation		Large	Small	Water table
Water content by volume (porosity and water saturation)		Large	Small	Weathered and fault fractured zone
Clay content		Much	Little	Weathered and altered zone



**Fig. 4.** Resistivity curves for kaolinite and montmorillonite as a function of their contents. The curves are constructed from the Eq. (7).

### 풍화대의 점토 함유량 추정

시험지역의 지질은 선캠브리아기의 변성퇴적암류 및 고기관입암류를 포함하는 중생대의 화성암류로 구성된다(Jang and Lee, 1982). 이 지역은 석회암, 호상편마암, 규암 등이 교호하게 혼재된 습곡구간으로서 기반암의 경사가 불규칙하고 풍화가 급격히 진행되는 특징을 가지고 있어 사면 형성 시 잠재적 붕괴 취약성이 다소 높은 것으로 나타났다(Lee et al., 2020). 규암은 풍화에 강한 석영 등으로 구성되었기 때문에 규암의 풍화로 점토광물 등의 극세립 토양광물은 형성되지 않는 것으로 해석하여 현장지역의 주된 점토광물을 석회암 환경에 가장 많이 분포하는 카올리나이트로 설정하여 모델링을 수행하였다.

Fig. 5는 전기비저항 단면(Fig. 3)에서 해석된 풍화대의 상하부 경계면을 기준으로 한 붕적층, 풍화대, 기반암(연암 포함)의 3개 층에 대한 모델링 자료로부터 풍화대의 점토함유량을 추정하는 과정을 보여준다. 3개 층에 대한 모델은 비저항 단면, 지표에서 관찰된 인장균열, 시추자료와 N 값 등 지질공학 자료들을 참조하여 단순화시켰다.

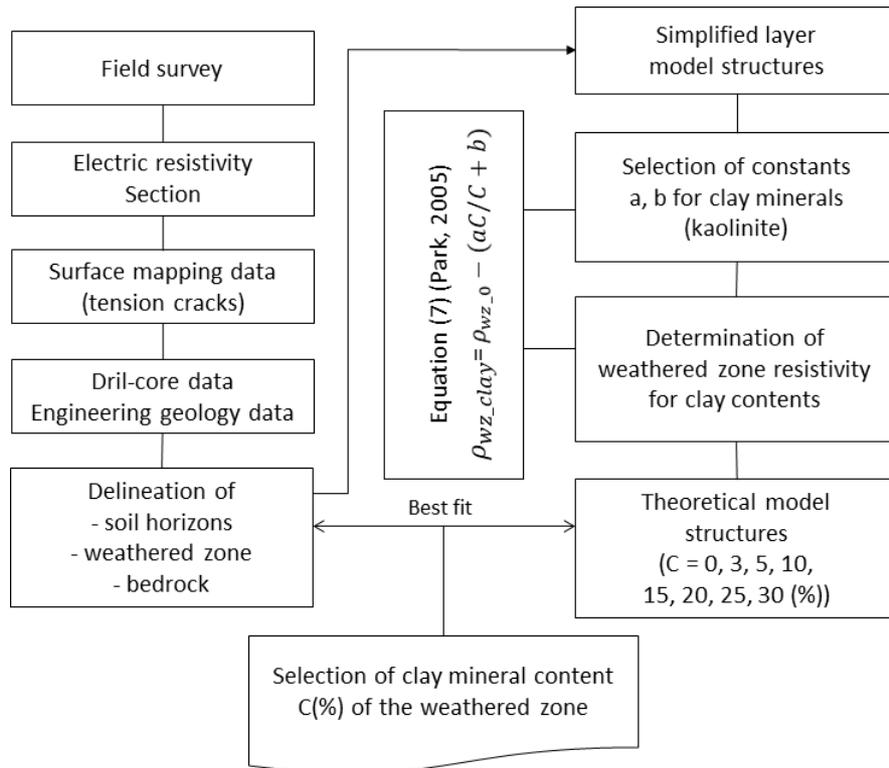
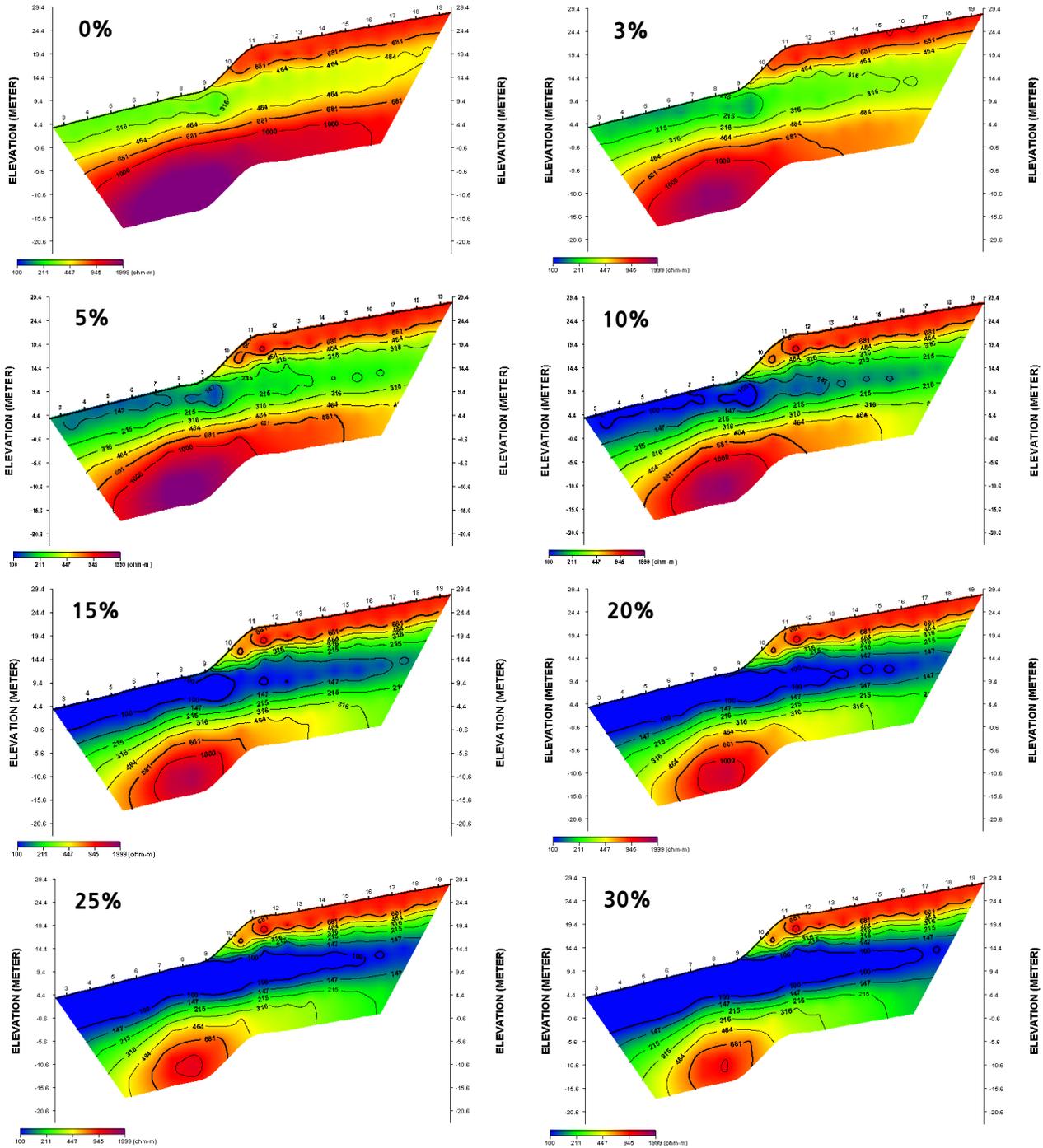


Fig. 5. Research flowchart for estimating the clay mineral contents using the field electric resistivity section and simplified layer modeling.

우선 식 (7)에서 이 지역의 주요 점토광물(카올리나이트)에 해당하는 고유상수  $a, b$ 를 선택하고(Park et al., 2005) 그 함유량  $C(\%)$ 를 변화시켜가면서 결정되는 풍화대의 비저항  $\rho_{wz-clay}$ 을 입력하여 모델링을 수행하였다. 이로부터 얻어진 이론자료(Fig. 6)들을 현장자료(Fig. 3)와 비교 해석하여 현장자료에 가장 근접하는 모델 자료에 입력된  $C$  값을 풍화대에 분포하는 점토의 함유량으로 추정하였다.

카올리나이트의 함유량별(0, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30%) 특성곡선을 이용하여 결정된 풍화대의 전기비저항(285, 179, 145, 100, 78, 65, 56, 50  $\Omega m$ )(Fig. 4)을 각각 입력하여 모델링한 결과(Fig. 6) 현장자료(Fig. 3)에 가장 근접하는 이론자

료는 점토 함유량이 10%일 때 얻어져서 이 지역의 땅밀림 산사태를 발생시킨 풍화대의 점토 함유량을 약 10%로 추정하였다. 이론자료 또한 점토 함유량이 증가할수록 단면도에 보이는 전기비저항의 차이는 작아지는데 이것은 점토광물의 특성곡선(Fig. 4)에서 점토 함유량이 증가할수록 전기비저항의 감소폭이 작게 나타나는 현상과 잘 부합된다.



**Fig. 6.** Panel tests for investigating the clay mineral contents of the weathered zone. The image correlation test between field data and theoretical structure with varying clay mineral contents (0, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30%) provides the best resistivity panel with optimum value 10% of clay mineral content of the weathered zone.

## 결론

땅밀림 발생 지역에 대한 전기비저항 자료에서 저비저항 이상대인 풍화대의 하부 경계면이 산사태를 일으킨 미끌림면이며 특히 점토광물의 함유량이 주요 인자로 해석되었다.

전기비저항에 대한 표준 Archie의 식은 점도에 의한 추가적인 전기전도성 효과를 설명하기 어렵기 때문에 점토광물 및 그 함유량을 충분히 고려한 병렬모델 Archie의 식이 활용되었다. 산사태의 주요인자인 점토광물중에서 팽윤성이 큰 몬토릴로나이트는 카올리나이트에 비해 비표면적(specific surface area)과 양이온교환능력(CEC)이 커서 전기비저항 값이 상대적으로 작게 나타났다.

공극률이 증가할수록, 고결계수가 감소할수록 지층인자는 작아지며, 간극수의 전기비저항과 전체 전기비저항의 관계식에서 점토가 없는 매질에 대한 표준 Archie의 식은 원점을 지나는 직선, 점토가 포함되는 병렬 Archie의 식은 곡선으로 표현되며 점토함유량이 많을수록 전기비저항은 작게 나타난다.

땅밀림 지역의 비저항자료에 대한 풍화대의 점토함유량은 Park et al.(2005)의 실험적 연구에서 제안된 경험식을 이용하여 추정하였다. 현장 지역의 주된 점토광물인 카올리나이트의 고유상수들을 선택하여 점토함유량의 변화에 따라 결정되는 풍화대의 전기비저항들을 이용하여 수치모델링을 수행한 결과 현장자료에 가장 근접한 모델링 자료에 입력된 점토 함유량 10%를 최적 함유량으로 추정하였다.

모델자료는 점토 함유량이 증가할수록 각 단면도에 보이는 전기비저항의 차이는 작아지는데 이것은 특성곡선에서 점토 함유량이 증가할수록 전기비저항의 감소폭이 작게 나타나는 현상과 잘 부합되었다.

지반의 전기비저항이 점토 함유량 외에 공극률, 포화도, 간극수의 전기비저항에 영향을 받으므로 차후 지하수위 및 단층파쇄 자료, 공극률, 포화도 및 간극수의 전기비저항에 대한 정보들을 포함시켜 모델링을 수행한다면 보다 정확한 점토 함유량이 파악될 것으로 기대한다.

## 사사

본 연구는 충북대학교 국립대학육성사업(2020)의 지원을 받아 작성하였습니다. 논문 심사를 해주신 심사위원분들과 자료 수집에 도움을 준 송수민, 풍혜림, 정민규님께 감사드립니다.

## References

- Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G., 2006, Handbook of clay science, Elsevier Science, 1246p.
- Dipro, 2000, Electrical resistivity dipole-dipole processing software, Hisong Ltd.
- Jang, T.W., Lee, S.Y., 1982, Seosan-Mohang geological mapping manual (1:50,000), Korea Institute of Power and Resources, 64p.
- Jo, H.J., Jeong, K.M., Jo, H.Y., 2016, Hydrothermal clay vein on slope stability, Mineral and Industry, 29, 56-66 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.I., Kim, J.S., Lee, S.J., 2021, Estimation of clay-mineral contents using parallel archie equation for the interpretation of electrical resistivity structure of the land creeping area, Korean Geotechnical Society, Spring Conference, 34p.
- Kim, K.S., Choo, C.O., Booh, S.A., Jeong, G.C., 2005, Importance of microtextural and geochemical characterizations of soils on landslide sites, The Journal of Engineering Geology, 15(4), 447-462 (in Korean with English abstract).

- Kirsch, R., 2006, Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology, Springer, 500p.
- Lee, S.J., 2021, Delineation of geological anomaly zone of land creeping using integrated geophysical methods, Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, 164p.
- Lee, S.J., Kang, Y.G., Lee, C.H., Jeon, S.I., Kim, J.S., 2020, Delineation of geological weak zones in an area of small-scale landslides using correlation between electrical resistivity, bore, and well-logging data, *The Journal of Engineering Geology*, 30(1), 31-42 (in Korean with English abstract).
- Mitchell, J.K., 1993, Fundamentals of soil behavior, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 558p.
- Moon, H.S., Choi, S.G., 2001, Earth materials science, Sigmaphress, 558p.
- Nabighian, M.N., 1994, Electromagnetic methods in applied geophysics - theory volume 1, Investigations in Geophysics No.3, Society of Exploration Geophysicists, 513p.
- 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.
- Park, M.K., 2005, Laboratory study on the electrical resistivity characteristics with contents of clay minerals, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 8(3), 218-224 (in Korean with English abstract).
- Park, M.K., Park, S.G., Kim, H.J., 2005, Laboratory study on the electrical resistivity characteristics using an artificial agar specimen with clay minerals, Korea Society of Earth and Exploration Geophysicists, Fall Conference, 65-70 (in Korean with English abstract).
- Park, S.G., 2004, Physical property factors controlling the electrical resistivity of subsurface, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 7(2), 130-135 (in Korean with English abstract).
- Park, S.G., Kim, J.H., Cho, S.J., Yi, M.J., Son, J.S., 2004, Electrical resistivity characteristic of soils, Korean Geotechnical Society, Spring Conference, 847-854 (in Korean with English abstract).
- Regmi, A.D., Yoshida, K., Dhital, M.R., Devkota, K., 2013, Effect of rock weathering, clay mineralogy, and geological structures in the formation of large landslide, a case study from Dumre Besei landslide, Lesser Himalaya Nepal, *Landslides*, 10(1), 1-13.
- Reynolds, J.M., 2010, An introduction to applied and environmental geophysics, 2nd ed., Wiley-Blackwell, 696p.
- Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., Alves, W.J., 1989, Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations, *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 433-439.
- Sen, P.N., Goode, P.A., Sibbit, A., 1988, Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities, *Journal of Applied Physics*, 63(10), 4832-4840.
- Shin, H.O., Kim, M.I., Yoon, W.J., 2018, Application of geophysical exploration technique to the identification of active weak zones in large scale mountainous region, *Journal of Korean Geophysical Society*, 21(3), 162-170 (in Korean with English abstract).
- Stead, D., Wolter, A., 2015, A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology, *Journal of Structural Geology*, 74, 1-23.