퇴적암 내의 지질구조가 비탈면 안정성에 미치는 영향 : 대구 북서부 지역의 예

고경태^{1,2} · 최진혁¹ · 김영석^{1*}

¹부경대학교 지구환경과학과 지질구조해연구실

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

Effects of Geological Structures on Slope Stability : An Example from the Northwestern Part of Daegu, Korea

Kyoungtae Ko^{1,2}, Jin-Hyuck Choi¹, and Young-Seog Kim^{1*}

¹GSGR, Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University

²Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

본 연구에서는 퇴적암지역에서 발달하는 지질구조들이 비탈면의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지를 이해하고자 하였다. 연구지역과 같이 퇴적암지역 비탈면의 경우, 도로 양쪽의 비탈면이 층리의 경사방향에 따라 매우 다른 양상을 보인다. 또한 단층대가 존재하는 경우에는 보강공사가 완료된 후에도 지속적인 파괴가 관찰되고 있었다. 하지만 대부분의 대규모 단층에서 비탈면 안정성 조사 시 단층대를 정확하게 인지하기 어려워 새로운 누적절리밀도를 통한 단층대 인지방법을 제안하였다. 또한 최근 대규모 공사로 인하여 많은 비탈면들이 다면비탈면의 형태로 나타나는 경우가 많다. 이 경우 일정한 주향을 가진 대표비탈면들의 방향에 따라 구간을 설정하고, 이를 바탕으로 비탈면 안정성 분석을 실시하여, 각 구간에 따라 다른 비탈면 안정성 평가가 이루어져야 하는 예를 보여주었다. 따라서 퇴적암지역에서의 비탈면설계 시 층리와 불연속면의 방향 그리고 이들 사이의 상관관계 등 지질구조들의 발달특성을 잘 고려한다면 공사단계에서도 작업의 효율을 높일 수 있고, 공사 후에도 비탈면의 안정성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 퇴적암, 비탈면안정성, 지질구조, 누적절리밀도, 다면비탈면

The purpose of this work is to gain a better understanding of the interrelationships between geological structures and slope failure in sedimentary rocks. In the studied slopes, construction-related slope failure could only be observed on the south-dipping slopes. This indicates that slope stability may be dependent on the angular relationships between the dip direction of bedding and the orientation of the slope. Slope failure continued, post-construction, around large fault zones in the studied outcrop; these fault damage zones are, however, not easily recognized in the field. Here we suggest a new method that uses accumulated fracture density to precisely identify fault damage zones. Multiple-faced slopes are now increasingly being exposed during large-scale construction projects in South Korea. This multiple-faced slope analysis indicates that the stability of a slope should be evaluated by identifying domains, through the analysis of possible slopes and their angular relationships with bedding and other discontinuities, prior to construction. Therefore, careful consideration of geological structures such as bedding and other discontinuities, and their angular relationships during the design of cuttings through sedimentary rocks, will increase the efficiency of construction and enable the safe construction of more stable slopes that will retain their stability after construction.

Key words : Sedimentary rock, Slope stability, Geological structure, Accumulated fracture density, Multi-face slope

*Corresponding author: ysk7909@pknu.ac.kr

서 론

산사태는 우리 주변에서 빈번하게 발생하고 지속적으로 인명 및 구조물에 직접적인 피해를 입히는 대표적인 자연재해 중 하나이다. 가장 최근의 대표적인 국내 사례는 지난 2011년 여름철 폭우와 관련된 서울 우면산과 춘천펜션 산사태를 들 수 있으며, 사망과 실종을 비롯한 인명피해뿐만 아니라 이재민 발생, 도로 및 건물들의 파손 등 막대한 피해를 가져왔다. 최근 세계 곳곳의 산사태 사례연구 결과들은 이들의 발생 원인이 매우 다양하다는 것을 보여주고, 명확한 원인규명에 따른 적절한 방제시스템을 통하여 그 피해를 줄이고자 활발한 연구가 수행되고 있다(Chen et al., 2011). 우리나라의 경우 국토의 70%가 산지로 되어 있는 지형적 특성과 여름철 집중호우로 대표되는 기후적 특성으로 인하여 이러한 산사태 원인규명 및 방제시스템 구축이 매우 중요한 분야로 부각되고 있다. 특히, 1990년도 이후 급격한 사회경제 발전과 교통의 확충 필요성에 의해 많은 도로와 철도가 건설되면서 불가피하게 발생한 깎기비탈면을 대상으로 한 안정성 관련 연구가 지속적으로 진행 중에 있다(송영석과 홍원표, 2007).

인공적으로 절개된 비탈면의 경우에는 자연비탈면보다 훨씬 다양한 내·외적 요인들에 의한 새로운 형태의 파괴가 발생할 수 있어, 이들의 파괴 원인에 대한 명확한 분석을 바탕으로 한 적절한 대비가 요구된다. 이에 따라 다양한 규모 및 형태의 비탈면 파괴 사례를 중심으로 파괴를 일으키는 주요 인자에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다(송영석과 홍원표, 2007; 김승현 외, 2011). 특히 대부분의 비탈면파괴가 여름철에 발생하는 집중강우에 수반되어 발생하여 주로 강우인자를 고려한 비탈면의 안정성 해석 연구가 활발히 진행되고 있다(김상규와 김영목, 1991; 홍원표, 1996; 이정엽 외, 2010; 송영석과 홍원표, 2011). 그 밖에 기반암의 지질조건과 지질구조 요소를 고려한 비탈면 파괴특성 연구, 수목성장 및 지형특성을 이용한 산사태 재해연구, 그리고 최근에는 GIS, LiDAR, 인공위성 SAR 영상 등의 최첨단 고해상도 원격감지기술을 이용하여 보다 정밀하게 비탈면 거동을 예측·관리하려는 연구가 수행되고 있다(김윤종 외, 1992; 김윤종 외, 1993; 신현준, 1995; 이사로 외, 2000; 이사로 외, 2002; 장훈 외 2004; 유창호 외 2008; 이동하 외 2009; 박성욱과 박혁진, 2011; 최진혁 외, 2011).

고속도로 및 철도 건설 시에는 터널, 교량 등 상대적으로 다양한 시공법이 고려될 수 있는 반면 국토의 경

우 대부분 산지를 깎아 도로를 건설 및 확충하고 있어 인공적인 비탈면의 발생을 막을 수 없는 실정이다. 그러나 최근의 통계자료는 이러한 국도 깎기비탈면의 47.2%에서 최근 붕괴가 발생하였거나 과거에 붕괴가 발생한 이력을 가지고 있고, 특히 사암과 세일이 호층을 이루는 퇴적암 지역에서는 주로 차별적인 풍화에 의한 암탈락형 복합파괴가 특징적으로 나타난다(권오일 외, 2003) 이에 따라 주로 사암과 세일 교호층으로 이루어진 경상분지에서의 비탈면 파괴 사례 및 원인에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며(장현식과 장보안, 2000), 주로 비탈면에 노출되는 지질구조의 분포특성이나 지질구조와 비탈면 안정성과의 관계에 대한 연구에 집중되어 왔다(김영기, 1987; 권오일, 1999; 김교원과 정영국, 2000, 백용 외, 2000).

앞서 살펴본 바와 같이 비록 최근까지 퇴적암 비탈면파괴에서의 지질구조에 대한 다양한 방법론의 연구가 진행되어 온 것은 사실이나, 대부분의 경우 층리, 암맥, 절리, 단층들과 같은 다양한 지질구조들을 단순히 하나의 불연속면으로만 평가하는 방식에 의존하고 있다. 뿐만 아니라 주로 이러한 면상의 지질구조들이 보이는 방향성과 경사 자료만을 바탕으로 비탈면의 안정성을 평가하고 있는 실정이다. 하지만 인접한 지역에 위치하는 깎기비탈면에서도 비탈면의 기하학적 특성 및 지질구조들의 다양한 발달 특성에 따라 안정성에 차이가 발생할 수 있다. 다시 말해서 다양한 지질구조에 대한 명확한 해석을 통하여 보다 실질적이고 세분화된 안정성 평가가 요구되는 것이다. 따라서 이번 연구는 각각의 지질구조에 대한 정밀한 발달특성 조사를 바탕으로 이들이 비탈면 파괴에 미칠 수 있는 영향과 이에 대한 적절한 분석 및 평가방법에 대해 알아보려고 한다. 이를 위해 최근 많은 깎기비탈면이 노출된 대구 북구 사수동 일대의 지천-매천간 국도 4차선 확장공사구간을 중심으로 조사를 실시하였다(Fig. 1). 야외지질조사 및 비탈면 현장조사를 통하여 각각의 지질구조 특성과 이들이 비탈면 안정성에 미칠 수 있는 영향에 대한 분석을 시도하였으며, 특히 기존의 불연속면을 따른 단층작용, 누적절리밀도를 이용한 명확한 단층대 분류, 그리고 휘어진 도로에 위치한 다면비탈면의 안정성평가 시 단층의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 이는 다양한 규모로 빈번하게 발생하는 비탈면파괴와 이에 따른 추가적인 피해를 막고, 적절한 방제 및 보강시스템을 적용하여 도로건설 및 보수비용을 절감하는데 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

Fig. 1. Location and geological map of the research area (modified from Tateiwa, 1929).

연구지역 및 연구방법

연구지역은 대구광역시 북구 시수동과 경북 칠곡군 지천면 일대 지역으로 경상누층군의 백악기 퇴적암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 비록 현재까지 보고된 대규모 단층이 발달하고 있지는 않으나, 최근 이 지역에서 시행된 대규모 도로확장공사로 인해 노출된 다수의 도로 비탈면들에는 중·소규모의 다양한 지질구조들이 발달하고 있어, 지질구조의 특성을 파악하기 용이하다. 또한 비교적 복잡한 도로건설로 경사방향을 달리하며 마주보는 비탈면들과 노선의 굴곡으로 인한 다면비탈면 등 다양한 형태의 깎기비탈면이 발달하고 있어, 각각의 지질구조 및 어떠한 지질구조 요소와 특성이 비탈면파괴 및 안정성에 영향을 미쳤는지에 대해 조사하기 적합한 지역이다.

조사지역에는 하부로부터 경상누층군의 하산동층, 진주층, 그리고 칠곡층이 분포하며, 이들을 백악기 화강암과 이후의 암맥들이 관입하며 발달한다. 그리고 이 지층들은 제4기 충적층에 의해 부정합으로 피복되어 있다

(장기홍 외, 1977; Fig. 1). 조사지역 내 퇴적암 층리의 일반적 자세는 $N50^{\circ}E/20^{\circ}SE$ 로 비교적 일정하게 발달하고 있으며, 비탈면에 노출된 각 퇴적암 지층에 대한 일반적 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

하산동층의 하부 및 중부는 세일, 사암 및 역암으로 구성되어 있다(Fig. 2a). 세일은 흑색 혹은 회색을 띠며 층리의 발달이 뚜렷하다. 흑색 세일 상부는 세일과 사암이 교호하며, 사암 내에서는 점이층리와 사층리가 관찰된다. 사암 및 역암 상부에는 점이적인 경계를 보이는 흑색 세일이 덮고 있다. 이 사암체는 상하부의 흑색 세일로 보아 호수 가장자리에서 형성된 삼각주의 하천 퇴적물로 추정된 바 있다(손영관 외, 2011). 그 상부 역시 사암과 녹회색을 띠는 두꺼운 세일에 의해 덮혀 있다. 그 상부는 적색 세일에 의해 덮여 있으며, 이는 건조 기후 하의 범람원 환경을 지시한다(백인성과 김정률, 1995). 진주층은 하위의 하산동층 및 상위의 칠곡층과는 달리 적색층을 협재하지 않으며, 주로 회색 사암, 흑색 또는 회색 이암 및 세일과 회색의 이회암으로 구성된다. 사암은 상향 세립화 경향을 보이며 괴상의 층

Fig. 2. Main lithologies outcropping in the research area. (a) Hasandong Formation, (b) Jinju Formation, (c) Chilgok Formation.

리 및 대규모 사층리도 관찰된다(손영관 외, 2011; Fig. 2b). 칠곡층은 두꺼운 적색 세일과 응회암 및 응회질 사암으로 구성된다(Fig. 2c). 적색 세일과 교호하는 응회질 사암은 전반적으로 괴상을 보이며, 응회암은 연회색을 띠는 치밀한 세립질 폭발성 화산재로 구성되어 있다(엄상호 외, 1983).

조사지역 내 퇴적암의 가장 주요한 특징 중 하나는 세일과 사암으로 대표되는 층들이 반복적으로 교호층을 이룬다는 것이다. 이러한 서로 다른 물성의 층들은 균질한 암석에 비해 불규칙적인 변형 및 지질구조를 유발할 수 있다. 또한 암석내의 층리가 약대로 작용하여, 단층 및 단열을 비롯한 많은 지질구조들의 발달 및 성장에 영향을 미칠 수 있다. 이는 반복적인 교호층을 대상으로 한 비탈면 안정성 평가에 있어, 이들의 풍화특성 차이에 의한 낙석뿐만 아니라 단층과 단열에 대한 면밀한 조사가 실시되어야 함을 지시한다.

이 연구에서는 서로 다른 비탈면 형태와 노출되는 지질구조들을 기준으로 총 4개의 중점조사지점을 선정하여 이들을 각각 Site 1~4 까지 임의로 명명하였으며(Figs. 1, 3), site 1은 하산동층, site 2는 진주층, site 3과 site 4 지점은 칠곡층에 위치하고 있다. 우선, 층리와 비탈면의 경사방향이 비탈면 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 도로 양측에 존재하는 서로 다른 경사방향의 두 비탈면을 조사하여 비교하였다. 또한, 암맥을 비롯한 기존의 불연속면을 따른 단층작용과 단층 주변에 단열이 집중되는 단층손상대에 대한 명확한 구분기준을 제시하고자, 암맥, 단열 및 단층이 발달하고 있는 비탈면에 대한 새로운 분석법을 제안하였다. 마지막으로 곡선도로를 따라 절개된 휘어진 비탈면을 대상으로 공사 중과 공사 후의 파괴 양상을 살펴보고, 이를 통해 다면 비탈면의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 지질구조에 대한 분석을 시도하였다.

이러한 연구를 위해 우선 연구지역의 주요 지질구조

분포 및 특성을 알아보기 위하여 항공사진과 위성사진을 이용한 선형구조 분석을 실시하였고, 이를 바탕으로 각각의 지질구조요소들의 수집과 분석을 위하여 정밀 야외지질조사를 실시하였다. 일차적으로 각각의 지질구조들에 대한 방향성 및 경사방향을 측정하였고, 특히 단층이 발달하고 있는 경우에는 이들이 기존의 불연속면을 따라 발생하였는지, 단층 주변의 단열밀도에는 어떠한 변화가 있으며 이를 분석하기 적절한 조사방법은 무엇인지, 그리고 단층면이 비탈면에 노출되었는지 그렇지 않은지에 대한 면밀한 조사 및 검토도 실시하였다. 또한 일부 비탈면에 대해 평사투영법을 이용하여 비탈면 안정성 해석을 통한 검증을 수행하였다.

지질구조 분석

선형구조란 항공사진, 위성사진 및 (수치)지형도에서 관찰되는 선형의 지형적 특성을 의미하고, 주로 광역적인 규모에서 확인된다(O'Leary et al., 1976). 이러한 선형구조는 대부분 면상의 지질구조가 지표에서는 선형의 특징적인 지형으로 발달하는 것으로, 비교적 큰 규모(map-scale)의 절리, 단층, 습곡, 암맥 그리고 서로 다른 암석의 접촉부 등이 존재하고 있음을 지시한다(Richard and Groshong, 1999). 따라서 선형구조 분석은 특정지역에 발달하는 대규모 지질구조의 특성과 밀접한 관련이 있으며, 특히 주요 선형구조의 방향성, 연장성 등에 대한 정보를 획득할 수 있다. 이번 연구지역에 대한 선형구조 분석결과 남-북 내지 북북동-남남서 방향과 북서-남동 방향을 갖는 2조의 뚜렷한 선형구조들이 확인되며(Fig. 3), 이 결과는 이러한 두 방향성을 보이는 지질구조들이 이 지역 내에 주로 발달하고 있음을 지시하는 것으로, 간격과 연장성이 비교적 일정하게 관찰되고 있어 조사지역의 대표적인 단층 및 단열구조로 판단된다.

Fig. 3. Lineaments and main sites in the research area. Lineament analysis indicates the development of mainly N-S, NNE-SSW, and NW-SE trending lineaments.

Fig. 4. A basic dyke reactivated as a right-lateral strike slip fault at site 1. S-C fabrics (a) and slickensides (b) indicate right-lateral slip.

이러한 실내예비조사결과를 바탕으로 중점 조사지역에 대한 정밀 야외지질조사를 실시하였다. 첫 번째 조사지점(Site 1)의 경우 이암, 사암, 역암이 혼재되어 있는 하산동층에 해당하는 지점으로, 깎기비탈면에 두께 5m의 $N5^{\circ}E/70^{\circ}SE$ 방향을 보이는 염기성 암맥이 노출되어 있다(Fig. 4). 그러나 암맥은 일반적인 인장지질구조임에도 불구하고, 이를 중심으로 양측의 기반암이 서로 다른 퇴적암으로 이루어져 있으며, 비탈면 하부에 소규모 애추와 같은 낙석이 관찰되어 이에 대한 정밀조사를 실시하였다. 그 결과 암맥과 기반암의 (주로 서측)경계면을 따라 전단운동을 지시하는 단층암이 발달하고, S-C fabric과 단층조선 등의 구조요소가 확인되었다(Fig. 4). 이들은 우수향 주향이동 단층운동에 의한 결과물로 해석되며, 이 단층운동에 의한 변위로 인해 서로 다른 기반암이 관찰되는 것으로 판단된다. 암맥과 기반암이 단층접촉을 보일 경우, 일반적으로 이미 존재하던 암맥이 이후의 변화된 응력조건 하에서 약대로 작용하여 단층운동이 발생한 것으로 해석될 수 있다(양석준 외, 2008).

두 번째 조사지점(Site 2)은 회색 사암과 흑색 이암

Fig. 5. Left-lateral strike-slip fault at site 2. Fault gouge and breccias (a), and slickenlines (b) indicate left-lateral slip.

내지 세일이 발달하는 진주층에 해당하는 지점으로 $N73^{\circ}W/72^{\circ}NE$ 방향의 수직에 가까운 비탈면이 관찰된다. 이 비탈면 상에는 단층조선을 비롯한 약 3 cm 두께의 단층점토와 약 10 cm 두께의 단층각력암이 관찰되며(Fig. 5), 이들 구조요소들은 좌수향 운동감각의 주향이동단층임을 지시한다. 따라서 이 비탈면은 단층면이 노출된 것으로 단층의 한쪽 지괴가 완전히 붕괴되어 있음을 보여주는 것으로 단층의 존재 및 방향성과 비탈면 파괴 사이에 밀접한 관련이 있음을 지시하는 전형적인 예라고 할 수 있다.

세 번째 조사지점(Site 3)은 응회질 사암과 적색 세일이 협재하는 칠곡층에 해당하는 지점으로 특이한 형태의 염기성 암맥이 발달한다. 즉 암맥이 층리를 가로지르는 지점에서 마치 단층에 의한 변위와 같은 지그재그 형태를 보이는 것이다. 그러나 이 지점을 관통하는 단층을 확인할 수 없고, 이 암맥이 불규칙적이나 연결되어 있다는 점은, 층리 또는 기존의 단열이 암맥의 관입 시 그 형태에 영향을 미친 것을 지시한다(양석준 외, 2008). 이들 암맥과 층리는 모두 $N70^{\circ}W/70^{\circ}NE$ 방향의 단층에 의해 변위되어 있음을 보여주며, 이는 암맥의 관입 이후 역단층성 단층운동이 발생하였음을 지시한다(Fig. 6).

Fig. 6. Cross-cutting relationships between a basic dyke and a reverse fault at site 4. (a) Slickenlines indicate reverse slip. (b) Small calcite veins cut across the basic dyke and the Silla conglomerate.

위 조사결과들은 암맥 및 단층이 발달하고 있는 비탈면의 경우에 보다 면밀한 지질구조 특성 분석이 요구됨을 보여준다. 우선, site 1에서 분석된 암맥을 살펴보면, 이들은 일반적으로 풍화에 약하기 때문에 더욱 철저한 보강을 실시해야 함은 물론 이들이 이후 단층면을 따른 미끄러움을 유발할 수 있는 약대로 작용을 할 수 있다는 것을 고려한 보강평가가 필요하다. 이러한 3차원적 접근의 중요성은 site 2의 비탈면에서도 관찰된다. 단층핵을 중심으로 한 쪽의 단층파쇄대는 모두 탈락되어 제거된 상태이나 비탈면 내부에는 이와 같은 형태의 다른 쪽 단층파쇄대가 존재하고 있음을 간접적으로 알 수 있고, 이는 비탈면 내부가 매우 취약할 수 있음을 지시하는 것이다. 마지막으로 site 3의 경우, 암맥의 관입 메카니즘 또한 비탈면 안정성 평가 시 고려되어야 함을 보여준다. 관입당시의 일차적 형태와 단층 변위에 의한 이차적 형태를 구분하는 것은 비탈면 현장조사 시 명확한 단층의 발달여부를 판단하는데 활용될 수 있으며, 이는 이후의 안정성 평가 및 파괴요인 분석에 유용하게 쓰일 수 있다.

비탈면안정성 분석

앞서 살펴본 바와 같이 지질구조를 단순한 불연속면으로 평가하기보다는 3차원적 지질구조로의 해석, 그리고 활성지역에서는 이들에 대한 추가 단층작용의 가능성까지 고려하는 것이 필요하다. 특히 조사지역과 같은 퇴적암 비탈면의 경우 단층대의 영향과 같은 지질구조 자체뿐만 아니라 단열과 층리면과의 교차에 의한 낙석, 빠르고 차별적인 풍화 작용과 같은 부수적인 영향으로 인하여 파괴의 규모 및 정도가 다양할 수 있다(김영기, 1987; 이영희, 1996; 권오일, 1999; 채병곤 외, 2005). 특히 사암과 셰일이 교호하는 지역에서는 시간의 경과에 따른 비탈면파괴 발생률이 다른 지역보다 현저하게 높게 보고되고 있으므로 정밀한 파괴원인에 대한 연구가 필요하다(조용찬 외, 2008). 따라서 이 연구에서는 이들 비탈면의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자인 층리의 영향, 다면비탈면의 효과 그리고 단층대의 영향 등에 대해 집중적으로 검토하고자 한다.

층리의 영향

퇴적암 지역에 나타난 비탈면의 대부분은 복합적인 파괴가 발생하는데, 이는 층리가 2차적인 불연속면과 함께 블록형태의 파괴를 발생시키기 때문이다. 또한 이러

한 블록들의 이완이 심해져 대규모 파괴의 원인이 되기도 한다(김영기, 1987; 권오일, 1999; 김교원과 정영국, 2000). 이번 연구에서는 조사기간이 도로 확장공사 기간과 동일하여, 즉 비탈면의 노출된 시간이 길지 않아, 비탈면 시공 후 대규모 파괴의 발생여부를 확인하기는 어려웠다. 그러나 소규모 낙석과 같은 파괴양상을 확인하였으며, 이들은 비탈면 파괴의 일차적 요인 및 그 영향이 외적요인에 의해 증폭될 수 있음을 보여준다.

도로건설 시 도로의 양측 모두 인공적으로 절개된 비탈면이 존재하는 지점에서는 층리와 비탈면의 경사방향이 갖는 관계에 따라 낙석과 같은 파괴양상이 매우 다르게 관찰된다. 이 지점의 층리는 25° 내외의 경사를 보이며 경사방향은 남동 방향이다. 북동-남서 방향의 도로가 건설된 지점의 두 비탈면을 살펴보면, 남동쪽 비탈면은 층리와 반대방향인 북서 방향으로 경사하고 있는 반면 북서쪽 비탈면은 층리와 같은 방향인 남동 방향으로 경사하고 있다. 이 지점에 대해 공사 중 소규모 낙석발생 및 보강실시 여부를 확인한 결과 남동쪽 비탈면의 경우 별다른 비탈면파괴 양상이 관찰되지 않았지만, 북서쪽 비탈면의 경우 공사 단계에서 비탈면의 불안정성이 인지되고 파괴가 이미 발생하였으며, 이에 대한 보강이 시행되었음을 확인하였다(Fig. 7). 우선, 비탈면 내에 암맥이 발달하는 경우 암맥의 주변부에서 소규모 낙석이 관찰되었으며(Fig. 7a), 일부 암맥에 대한 보강이 실시되었음을 확인하였다(Fig. 7b). 또한 특징적으로 이암 내지 셰일과 사암의 암상 경계부를 따라서 파괴가 발생하였음을 관찰하였다(Fig. 7c). 이는 사암보다

Fig. 7. Slope failure observed on the northern slope at site 3. (a) Overview of the collapsed slope. Slope failure was caused mainly by discontinuities such as faults, joints, dykes and/or bedding. (b) Anchor and lattice block countermeasures put in place to prevent slope failure. (c) Stepped retaining wall as a countermeasure against failure.

이암과 셰일이 상대적인 약대로 작용하여 절리가 상대적으로 많이 분포하면서 썰기파괴 형태로 파괴되는 등 서로 다른 물성차이에 의한 차별적인 변형의 결과로 판단된다. 이는 층리의 발달 및 지질구조와의 교차뿐만 아니라 층리의 경사방향과 비탈면의 경사방향이 동일할 경우 비탈면 안정성에 취약할 수 있음을 보여주는 전형적인 사례라고 할 수 있다.

이러한 결과는 동일한 지질조건인 인접한 지역이라 할지라도 보다 세부적인 도로건설 계획이 요구됨을 보여준다. 실제 조사지점의 북서쪽 비탈면은 파괴가 관찰되지 않는 남동쪽 비탈면에 비해 상대적으로 비탈면의 규모(길이와 높이)가 크기 때문에 비탈면 보강 시 더 많은 어려움을 겪었을 것이며, 막대한 비용이 소요되었을 것으로 추측된다. 이 지점 외에도 도로공사를 통해 많은 깎기비탈면들이 노출되어 있는데, 대부분의 파괴는 도로를 따라 양측의 비탈면에서 모두 발생하는 것이 아니라 한 쪽 비탈면에서 주로 발생하는 것이 특징이다. 또한 대부분의 양쪽 비탈면은 비슷한 지질구조가 발달하지만 다른 크기로 노출되기 때문에 도로설계 단계에서 층리의 경사방향, 주요 불연속면의 발달방향 그리고 불안정 비탈면의 발달방향과 크기 등을 좀 더 세밀하게 예측하여 설계할 필요가 있다. 이는 비탈면파괴의 발생 빈도를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 위험구간을 중심으로 적절한 보강이 이루어진다면 비탈면보강을 위한 막대한 비용의 절감이 가능할 것으로 판단된다.

다면비탈면의 영향

최근 급속한 사회발전에 따라 도로의 확충이 증가되면서 도로의 구성이 복잡해지고 있으며, 특히 국도의 경우 진입로 및 휘어진 도로의 건설이 증가하면서 하나 이상의 주향을 가지는 다면비탈면 형태가 자주 발생하고 있다. 다면비탈면의 경우, 비탈면의 기하학적 특성을 고려한 보다 세부적인 비탈면 안정성 평가가 요구된다(윤운상 외, 2001). 따라서 이번 연구지역에서 발견되는 다면비탈면 중 지질구조의 영향으로 인하여 차별적인 파괴양상이 관찰되는 지점을 선정하여 이들에 대한 분석을 시도하였다. 도로는 북쪽과 동쪽 방향으로 대략 90°의 각도를 보이며 서서히 휘어지고, 북동쪽에는 이 도로를 따라 다면비탈면이 존재한다(Fig. 8). 특히 이 비탈면에는 북서-남동 주향의 단층이 발달하고 있으며, 이 단층의 북서와 남동쪽 단층자취(fault trace)가 비탈면 내에 모두 노출되고 있다. 따라서 다면비탈면의 다양한 방향성과 단층의 상관성을 이해하기 위하여 단층의

Fig. 8. The arc-shaped slope with slightly different orientations is divided into three domains. Development of a left-lateral strike-slip fault (N10W/ 84SW) is shown sub-parallel to the slope.

발달구간을 중심으로 대표적인 주향과 경사를 보이는 3개의 구역으로 나누어 안정성 평가를 수행하였다(Site 3, Fig. 8).

첫 번째 구역(Domain 1)은 전체 다면비탈면에서 가장 북쪽에 위치한 구간이며, N15°E/72°NW의 대표비탈면 방향을 보인다. 이 구역에서는 N70°W/88°NE, N14°W/84°NE, N78°E/80°SE의 절리군이 평균 1 m 이내의 간격으로 발달하고 있으며, 절리들 간의 교차로 인해 국부적인 암반탈락이 관찰되었다. 그러나 비탈면 공사 후에도 비교적 암반강도가 높게 유지되고 있고, 낙석방지망이 설치되어 있어 암반탈락에 의한 도로 피해는 없을 것으로 판단된다. 두 번째 구역(Domain 2)은 전체 다면비탈면에서 중앙에 위치한 구역이며, N5°W/72°SW의 대표비탈면 방향을 가진다. 이 구간에는 N10°W/ 84°SW 방향의 대규모 단층대와 평행한 방향의 수직절리들이 10 cm 내외의 간격으로 매우 높은 밀도를 보이며 발달하고 있다. 단층대와 평행한 방향으로 조밀하게 발달하는 수직절리들로 인해 풍화가 빠르게 진행되고 있으며, 추가적인 대규모 파괴가 우려된다. 마지막 구역(Domain 3)은 전체 다면비탈면에서 가장 동쪽에 위치한 구역이며, N30°W/72°SW의 대표비탈면 방향을 보인다. 이 구간에는 N88°W/70°SW, N78°E/80°SE, N18°W/86°NE의 절리군이 평균 1~2 m 정도의 간격으로 발달하고 있다. 이 구역에서는 별다른 파괴양상이 관찰되지 않았다.

Fig. 9. Slope stability analysis of each domain in a multi-faced slope (friction angle = 30°) for planar failure. Stereographic projections show the different stabilities at each domain: unstable (domains 1 & 2) and stable (domain 3).

단층이 발달하고 있는 구간, 특히 한 비탈면 내에 하나의 단층자취가 아닌 두 개 이상의 단층자취가 존재하는 경우, 단층이 비탈면의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있음이 확인된다. 이들은 추후 집중강우를 비롯한 외적 요인에 의해 Fig. 5와 같이 단층의 한쪽 지괴가 완전히 탈락될 수 있으며, 막대한 피해를 초래할 수 있다. 이러한 다면비탈면에서의 지질구조 영향을 보다 면밀히 평가하기 위해 평사투영법을 이용하여 각 구역에 대한 안정성평가를 실시하였다. 그 결과, 구역 1과 2는 평면파괴의 영역에 속하는 불안정한 구역에 속하는 양상을 보이는 반면, 구역 3에서는 평면파괴의 영역에 속하지 않는 양상을 보이고 있다(Fig. 9). 이는 구역 3에서 파괴가 관찰되지 않는 야외관찰의 결과와 일치하는 것으로 추후에도 이 구역이 안정할 것이라 판단된다. 하지만 구역 1의 경우 야외조사에서는 단층과 평행한 방향의 수직 절리군으로 인한 파괴가 관찰되지 않았지만, 평사투영법을 이용한 해석에서는 평면파괴가 예상되는 지역임으로 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 생각된다. 그리고 구역 2에서는 야외관찰과 평사투영법을 이용한 해석 모두에서 파괴의 영역에 속해 있어 추후에도 단층대의 영향으로 인한 대규모 파괴가 발생할 수 있어 정기적인 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

위와 같이 다면비탈면의 경우에는 다양한 비탈면의 방향 및 지질구조의 발달여부에 따라 비탈면의 안정성에서 매우 큰 차이를 보인다. 이는 비탈면의 방향과 불

연속면을 포함한 지질구조들의 각 관계가 상대적인 지질구조들의 발달방향에 따라 달라지기 때문인 것으로 해석된다. 이는 비탈면의 안정성 조사단계와 보강단계에서 좀 더 세밀한 구획화가 요구됨을 의미하며, 또한 파괴가 예상되는 부분에 보다 집중적인 보강이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 이러한 연구결과는 앞으로의 공사가 진행될 다른 지역의 다면비탈면에 대한 안정성 평가에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 비탈면 보강의 경제적인 측면에서도 매우 유용할 것으로 판단된다.

단층대의 영향과 단층손상대의 인지

일반적으로 하나의 단층대는 대부분의 변형과 변위가 집중되는 단층핵(fault core)과 양쪽에 단열이 집중적으로 발달하는 단층손상대(fault damage zone), 그리고 단층의 영향을 받지 않은 모암(wall-rock)으로 분류된다(Caine et al., 1996; Cowie and Shipton, 1998; 최진혁 외 2009). 특히 단층손상대는 단열 및 세맥 같은 많은 불연속면으로 이루어져 있어 잠재적인 비탈면 파괴에 크게 영향을 미칠 수 있다(권오일 외, 2010).

일반적으로 단층손상대의 단열밀도는 모암에서 단층핵으로 가까워질수록 증가하는 경향이 있으며, 스캔라인과 같은 구간별 단열밀도를 통해 단층대를 정의하는 것이 일반적이다. 대규모 단층대에서 주 단층과 평행한 이차단열로 구성된 단층파쇄대는 공사 후에도 지속적인

파괴 유발 인자로 작용하게 된다. 하지만 조사단계에서 단층점도 및 단층각력암을 쉽게 인지할 경우 신속한 보강이 이루어지는 반면, 이를 인지하지 못하였을 경우 비탈면의 안정성에 대한 잘못된 해석을 통해 공사 중의 안전을 위협할 뿐만 아니라 추후의 계속적인 비탈면파괴를 유발할 수 있다. 또한 대규모 단층파쇄대의 경우, 풍화와 식생으로 인하여 노두 상에서는 단층점도나 단층각력암 같은 단층핵을 쉽게 인지하기 어려운 경우가 많다.

우리나라는 특히 여름철에 집중강우가 많이 발생하기 때문에 단층파쇄대를 따라 지하수가 침투하여 암반의 강도를 약화시키고 단층점도가 윤활작용을 하여 대규모 비탈면파괴가 발생할 확률이 높다. 그러므로 중요하지만 단층핵이 잘 인지되지 않는 경우에는 상대적으로 확인하기 쉬운 단층손상대의 특성을 밝히는 것이 단층대나 파쇄대의 범위를 추정하고, 이를 안정성 평가에 반영하는데 도움을 줄 수 있다.

본 연구지역의 한 비탈면(Site 4)은 선형구조 분석에서 인지된 북북서-남남동 방향의 뚜렷한 지질구조가 관통하는 곳으로, 깎기비탈면의 방향과 평행한 방향의 대규모 단층파쇄대와 많은 불연속면들이 관찰된다(Fig. 10). 이 노두에서는 공사 진행 중에 별다른 파괴 양상이 관찰되지 않았지만, 공사 완료 후 N10°W/84°SW 방향의 대규모 단층대와 남-북 방향의 수직절리들을 따른 파괴가 관찰되었다. 따라서 대규모 단층 및 단층손상대의 특성을 밝히고 이들이 안정성 평가에 미칠 수 있는 영향에 대한 정밀분석을 실시하였다. 특히 이번 연구에서는 현장조사 단계에서 불연속면들의 방향 및 밀

도와 비탈면의 경사방향을 분석하는 방법 등을 바탕으로 단층손상대의 범위를 명확히 인지하고 그 영향을 평가하는데 초점을 두었다. 실제 단층손상대에 대한 개념적 연구는 많이 진행된 바 있으나, 이들에 대한 명확한 범위를 인지하는 구분법에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 조사자마다의 객관적인 해석으로 인하여 공통된 조사법이 없는 실정이다. 그러나 대규모 단층의 경우 두 번 이상의 단층작용이 발생하였을 가능성이 높고, 이에 따라 단층손상대가 때로는 매우 복잡하고 다양한 양상으로 발달하기 때문에 보다 실질적인 조사법이 요구된다고 할 수 있다.

최근의 연구들(Micarelli et al., 2002)에 의하면 단층대가 잘 노출되었을 경우에는 단층점도나 각력암으로 구성된 단층핵과 모암의 특성을 간직하고 있지만 단열밀도가 증가하는 단층손상대 사이의 특성은 야외에서 비교적 뚜렷하게 구분이 된다. 그러나 단층손상대의 다른 쪽 경계인 모암과의 구분은 단열밀도의 차이만을 보이고 있어 명확한 경계를 구분하는 것은 쉽지가 않다. 단층손상대는 대부분 연약한 파쇄대로 구성되어 있어 실질적으로 많은 대규모 단층들에서 이를 인지하는 것은 지질공학적으로 매우 중요하다. 따라서 이 연구에서는 이 지역에 잘 발달하는 한 단층대를 대상으로 기존에 사용하던 구간별 단열밀도가 아닌 누적단열밀도를 이용하여 단층손상대를 상대적으로 쉽게 구분하는 방법을 소개하고자 한다(Fig. 11). 우선 누적단열밀도를 이용한 단층손상대 조사법에 대한 간단한 개념을 설명한 후, 이를 앞서 언급한 단층대가 발달하는 비탈면을 대상으로 적용하고자 한다.

기존의 많은 연구에서는 일반적으로 스캔라인 조사법을 이용하여 왔고, 이는 일정구간으로 조사지역을 나누어 단열밀도를 측정하고 이러한 단열밀도의 변화를 통해서 단층손상대의 영역과 모암의 영역을 구별하였다(Micarelli et al., 2003; Berg and Skar, 2005; Mitchell and Faulkner, 2009; Riley et al., 2010). 예를 들어 1m 간격으로 구간을 정해서 각 구간에 존재하는 절리의 개수를 재어 단층의 영향을 파악하였다. 하지만 이 경우에는 명확한 경계부분이 한 구간 내에 위치할 수 있어 정확성에 오차가 발생할 수 있는 문제점이 있다. 또한 조사선 조사의 구간범위는 조사자마다의 주관적 범위설정과 해석으로 인한 문제점이 발생할 수 있다. 하지만 누적절리밀도는 구간별 분석이 아닌 연속적인 밀도변화를 보여주고, 누적밀도변화의 변화기울기 및 이들이 변화하는 지점을 인지하여 비교적 통일되고 명확한 단층

Fig. 10. (a) Large fault zone revealed during construction. (b) Sub-parallel vertical fractures are well developed around the fault zone. (c) Slope failure: continuous rockfall along the fault zone after completion of the road cutting. (d) Slickenlines indicate left-lateral slip.

Fig. 11. Comparison between general fracture density and accumulated fracture density. (a) An example of fracture development along a hypothetical section. (b) General method of fracture density counting (2-m intervals). (c) New method of accumulated fracture density counting, which clearly distinguishes the fault damage zone from wall-rock.

손상대 확인이 가능할 수 있다. 구간별 단열밀도 조사법에서 발생할 수 있는 문제점과 이를 개선할 수 있는 누적단열밀도 조사법의 개념을 모식도에 나타냈다(Fig. 11).

Fig. 11a는 단층핵을 중심으로 한 양측의 단열 발달 양상을 보여준다. 이 단계에서는 단층핵으로부터 멀어질수록 단열의 밀도가 감소하도록 가정하여 임의의 단열 단면도를 작성하였으며, 단층핵의 양측부는 두 조사방법의 차이점을 보여주기 위해 대칭적으로 나타내었다. Fig. 11b는 2 m 간격의 구간별 단열밀도 분포를 보여주는 것이다. 8 m 지점을 중심으로 단열의 밀도 감소가 없어지는 분포특성을 보여, 이러한 경우 대부분의 조사자들은 이 지점을 중심으로 단층손상대와 모암의 경계를 구분할 것이다. 그러나 단열밀도의 누적분포를 살펴보면 이와는 다른 결과가 나타남을 알 수 있다(Fig. 11c). 이 경우 밀도분포 그래프의 기울기를 분석해 보면, 단층핵의 가까운 구간과 먼 구간에서 서로 다른 경사의 그래프가 도시되고 이들 두 기울기는 특정 지점에서 교차하는 것을 확인할 수 있다. 이 특정 지점은 약 6.7 m에 해당되는 곳으로, 단층의 영향에 의한 단열밀도 양상이 다른 지점임을 알 수 있고, 다시 말하면 단층손상대와 모암의 경계임을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 11은 누적단열밀도를 바탕으로 단층손상대를 인지하는 것이 보다 명확하고, 확실하게 단층손상대를 정의할 수 있음을 보여준다.

단열의 누적밀도를 이용한 조사법의 실제 적용가능성을 알아보기 위해, 조사지점 4(Fig. 1, 3)의 남쪽 비탈면(Section B)을 대상으로 한 조사선조사를 실시하였다. 이 비탈면의 가장 큰 특징 중 하나는 국부적인 층리의

변화가 관찰된다는 것이고(Fig. 12a), 이는 소규모이나 다수의 단층들과 3 m 이상의 폭을 가지는 암맥 등과 같은 지질구조의 발달에 따른 영향으로 판단된다. 위와 같은 국부적인 층리의 변화 양상을 통해 단층 및 대규모 지질구조의 존재여부를 판단할 수 있지만, 정확한 단층손상대 구간을 판단하는 것은 쉽지가 않다. 비탈면을 따라 약 100 m 구간에 걸쳐 조사선조사를 실시하여 약 1,200개에 달하는 절리를 확인하였으며, 이들의 누적밀도변화를 Fig. 12b에 도시하였다. 그 결과 누적밀도의 기울기가 81 m 지점에서 급격하게 변하는 양상이 관찰되었다(Fig. 12b). 이 누적밀도의 기울기가 급격히 변화하는 지점은 실질적으로 단열밀도에서 상대적으로 많은 차이를 보이는 지점과 잘 일치하였다. 또한 암맥이나 소규모 단층들이 발달하는 지점에서도 국부적인 누적밀도 변화가 관찰되었다. 그러나 이러한 소규모의 구조들은 국부적인 영향을 미치고 상대적으로 넓은 범위에서의 전체적인 기울기에는 거의 영향을 주지 않았다(Fig. 12b). 이는 이러한 단열밀도가 더 큰 규모의 단층에 의해 제어되고 있음을 지시하는 것으로 해석된다. 따라서 이러한 조사선조사를 이용한 누적밀도 분석을 통하여 현장 조사단계에서는 인지하지 못하였던 비탈면 동쪽의 대규모 단층을 인지할 수 있었으며, 단층손상대와 모암의 경계를 상대적으로 쉽게 구분할 수 있었다.

이 연구에서 새롭게 제시된 단열의 누적밀도를 이용한 단층손상대 경계의 정의와 명확한 인지법은 비탈면 안정성 평가와 관련한 현장조사 단계에서도 쉽게 적용할 수 있을 뿐만 아니라 대규모 단층의 인지가 어려운 경우에도 단층손상대와 모암영역을 구별하는데 매우 유

Fig. 12. (a) Sketch of a well-exposed road-cut section and subsequent fracture density analysis of the southern slope at site 3. (b) The fracture slope density can be divided into three zones based on the slope gradient of the accumulated fractures. The main slope change occurs at around 81 m, indicating that this is the damage zone boundary.

용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 이는 결국 설계와 시공 및 보강 과정에 있어 적절한 평가를 실시함으로써 비용절감이라는 효과와 함께, 빈번하게 발생하고 있는 자연재해로 인한 비탈면파괴 피해를 줄이는 데 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

결론

이번 연구에서는 퇴적암 지역에서의 지질구조가 비탈면 안정성에 미치는 영향에 대해 보다 세부적으로 접근하였다. 특히, 단층 및 단열, 암맥과 같은 지질구조를 단순히 불연속면으로 취급하지 않고, 이들을 따른 운동 및 단층손상대 발달 등과 같은 구조지질학적 접근을 실시하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 비탈면의 경사방향과 층리의 경사방향이 동일할 경우, 이는 비탈면의 안정성에 매우 취약할 수 있다. 특히 층리의 방향은 암맥 및 단층과 같은 이차적인 지질구조에 의해 국부적으로 영향을 받아 비탈면 파괴를 야기하는 주요한 인자가 될 수 있으므로 주의해야 한다. 서로 다른 경사방향을 보이는 도로 양측 비탈면을 설계 및 시공할 때에 층리의 경사방향과 동일한 경사방향의 비탈면에 대한 차별적인 평가가 필

요함을 확인하였다.

둘째, 비탈면에 존재하는 암맥의 경우 일반적으로 풍화에 약하기 때문에 이들에 대한 차별적인 안정성 평가가 필요할 뿐만 아니라, 암맥의 경계면을 따라 후기 단층작용 여부에 대한 면밀한 검토 및 암맥의 관입 메카니즘에 대한 명확한 해석이 요구된다. 즉 이러한 단층의 활동여부를 명확히 인지하는 것이 지질구조 분석을 통한 안정성 평가의 신뢰도를 높일 수 있다.

셋째, 다양한 방향의 비탈면으로 이루어진 다면비탈면에 단층대가 발달할 경우, 이들을 기준으로 구분된 각 구역의 비탈면 파괴정도 및 안정성이 큰 차이를 보인다. 이는 단층대가 발달한 다면비탈면의 경우에 보다 상세한 구획화를 바탕으로 한 비탈면 안정성 평가가 이루어져야 한다는 것을 지시한다. 또한, 추가적으로 단층대의 3차원적인 특성을 고려한다면 비탈면의 안정성을 확보하고 공사비용을 절감하는데 도움을 줄 수 있다.

넷째, 대규모 단층의 경우 단층핵은 비탈면상에 노출되지 않으나 이 비탈면은 단층손상대에 속할 수 있다. 이 경우 단층손상대의 존재여부 및 모암과의 뚜렷한 구분이 어려워 그범위와 경계를 구분하고 평가에 적용하기가 쉽지 않다. 따라서 일반적으로 실시되어 온 구간별 단열밀도가 아닌 단열의 누적밀도 분포를 이용한 조

사법을 새롭게 제안하고 이를 실제로 한 비탈면에 적용한 결과, 비교적 뚜렷하고 명확한 단층선상대 인지 및 모암과의 경계부를 확인하였다. 이 조사법은 현장조사 단계에서도 쉽게 적용할 수 있으며, 대규모 단층대와 같이 단층핵을 인지하기 어려운 지역에서도 매우 유용할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 국토해양부 “서해 연안지질 위험 요소 연구(11-9106)”에 대한 위탁연구의 일부로 수행되었다. 이를 지원하여 주신 한국지질자원연구원의 한현철 박사님께 감사드리며, 야외지질조사와 실내작업을 도와준 부경대 지질구조재해연구실의 가족들에게도 감사드린다. 또한 이 논문의 심사를 통해 문제점을 꼼꼼히 지적하여 주시고 이 논문이 더욱 좋은 모습으로 출판될 수 있도록 도와주신 권오일 박사님과 두 분의 심사위원님들께도 진심으로 감사를 드린다.

참고문헌

- 권오일, 1999, 달성군 다사읍 지역의 자연사면 안정성 분석, 경북대학교 석사학위논문, 1-54.
- 권오일, 김교원, 구호본, 백용, 김승현, 2003, 국내 절토 사면의 구성암종에 따른 붕괴유형 분석, 2003년도 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, 146p.
- 권오일, 백용, 박철희, 2010, 사면 안정성 평가를 위한 단층파쇄대 발달 지반의 현장조사 사례 연구, 대한자원환경지질학회 2010년 춘계기술 공동학술대회 논문집, 299p.
- 김교원, 정영국, 2000, 터널입구의 사면안정성 검토 및 보강대책, 대한지질공학회 창립10주년 기념 학술발표회 논문집, 147-154.
- 김상규, 김영목, 1991, 강우로 인한 사면 불안정, 대한토질공학회지, 7, 53-64.
- 김승현, 구호본, 황진연, 손문, 2011, 전라남도 OO우회도로 비탈면 붕괴발생원인 및 토사지반특성 사례 연구, 지질공학, 21(4), 313-322.
- 김영기, 1987, 하부 경상층군에 발달하는 분리면 특성연구, 지질학회지, 23, 120-135.
- 김윤중, 김원영, 유일현, 1992, 광역 지질재해분석(산사태)을 위한 GIS 활용, 지질공학, 2(2):131-140.
- 김윤중, 김원영, 유일현, 1993, 지질재해 분석을 위한 GIS 응용 연구, 한국GIS학회, 1, 89-94.
- 박성욱, 박혁진, 2011, 지상라이다를 이용한 암반사면 불연속면거칠기에 대한 확률특성 분석, 지질공학, 21(1), 1-13.
- 백용, 김교원, 구호본, 2000, 건설공사와 사면안정성, 2000년도 지질재해관측 및 방지기술 심포지움 논문집, 1-17.
- 백인성, 김정률, 1995, 경남 진주시 부근의 백악기 하산동층 상부에 발달된 석회질고토양: 범람원퇴적작용 및 고기후적 의미, 지질학회지, 31, 482-498.
- 손영관, 손문, 황진연, 2011, 육성 배호분지(경상분지)의 층서발달, 화산활동, 그리고 구조진화, 2011년도 대한지질학회 춘계학술답사, 74-78.
- 송영석, 홍원표, 2007, 퇴적암지역에서의 산사태 원인 및 특성분석에 대한 사례연구, 지질공학, 17(1), 101-113.
- 송영석, 홍원표, 2011, 강우시 습윤전선 및 지하수위를 고려한 사면의 안정성 해석, 지질공학, 21(1), 25-34.
- 신현준, 1995, 원격탐사와 GIS를 이용한 충주지역의 사면 안정 평가, 연세대학교 석사학위 논문, 5-11.
- 양석준, 진광민, 김영석, 2008, 거제도 지역 암맥의 관입 형태와 변형사로부터 도출된 고응력장의 변화, 지질학회지, 44(6), 747-764.
- 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 박영훈, 신성진, 윤현수, 1983, 경상분지에서의 경상층군의 지질학적 및 지화학적 연구, KIER Bull., 36, 124p.
- 유창호, 최윤수, 김재명, 2008, 지상라이다를 이용한 사면파괴 거동분석, 한국GIS학회지, 16(3), 279-290.
- 윤운상, 정의진, 김정환, 김원형, 2001, 다면 사면의 활동 파괴를 위한 운동학적 해석, 대한지질학회, 제56차 추계공동학술발표회 초록집, 67p.
- 이동하, 김영섭, 서용철, 2009, 고해상도 항공라이다 DEM 해석을 통한 강원도 일원의 산사태 예측 가능성 분석, 한국GIS학회, 17(3), 381-387.
- 이사로, 김윤중, 민경덕, 2000, 산사태 공간 정보시스템 개발 및 산사태 공간 정보의 활용, 한국GIS학회지, 8(1), 141-153.
- 이사로, 최위찬, 장범수, 2002, 지질구조자료를 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구, 한국GIS학회지, 10(2), 247-261.
- 이영희, 1996, 포항 이암층의 Slaking, 팽창 및 전단강도 특성, 한국지반공학학회지, 12(2), 33-42.
- 이정엽, 김승현, 최지용, 구호본, 2010, 반복강우에 의한 풍화토층 절토사면 침투특성에 관한 연구, 지질공학, 20(4), 409-414.
- 장기홍, 1977, 경상분지 상부중생세의 층서퇴적 및 지구조, 지질학회지, 13(2), 76-90.
- 장형식, 장보안, 2000, 999번 지방도로 경상북도 안동시 위리 지역의 사면 변형 및 안정성 분석, 지질공학, 10(1), pp1-12.
- 장훈, 윤완석, 신동준, 2004, 지리정보시스템(GIS)을 이용한 사면붕괴지역 예측방법 연구 및 비교, 한국GIS학회04 GIS/RS 공동 춘계학술대회 논문집, 99-105.
- 조용찬, 채병근, 김경수, 2008, 퇴적암지역 절취사면의 안정성 검토, 대한자원환경학회 2008년 추계공동학술발표회 초록집, 164p.
- 최진혁, 김현태, 오재용, 김영석, 2011, 부산 황령산에서의 수목 성장 및 지형 특성을 이용한 도시 산사태의 발생원인 분석, 지질공학, 21(4), 281-293.
- 최진혁, 양석준, 김영석, 2009, 울산시 상천리 일대에 발달하는 남부 양산단층의 단층대 분류와 지질구조적 특성, 지질학회지, 45, 9-28.
- 채병근, 김원영, 이준오, 김경수, 조용찬, 송영석, 2005, 지질조건에 따른 사태물질 이동특성 고찰, 지질공학, 15(2), 185-199.
- 홍원표, 1996, 강우시 사면안정해석법에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 195-198.
- Berg, S.S. and Skar, T., 2005, Controls on damage zone asymmetry of a normal fault zone: outcrop analyses

- of a segment of the Moab fault, SE Utah, *Journal of Structural Geology*, 27, 1803-1822.
- Caine, J.S., Evans, J.P., and Foster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1125-1128.
- Chen, R.-H., Kuo, K. J., Chen, Y. N., and Ku, C.-W., 2011, Model tests for studying the failure mechanism of dry granular soil slopes, *Engineering Geology*, 119, 51-63.
- Cowie, P.A. and Shipton, Z.K., 1998, Fault tip displacement gradients and process zone dimensions, *Journal of Structural Geology*, 20, 983-997.
- Micarelli, L., Daniel, J.M., and Moretti, I., 2002, Structural characterisation of Quaternary fault zones in the Aigion area (Greece), In: EGS XXVII General Assembly, *Geophysical Research Abstracts*, 4p.
- Micarelli, L., Moretti, I., and Daniel, J.M., 2003, Structural properties of rift-related normal faults: the case study of the Gulf of Corinth. Greece, *Journal of Geodynamics* 36, 275-303.
- Mitchell, T.M. and Faulkner, D.R., 2009, The nature and origin of off-fault damage surrounding strike-slip fault zones with a wide range of displacements: a field study from the Atacama fault system, northern Chile, *Journal of Structural Geology*, 31, 802-816.
- O'Leary, D.W., Friedman, J.D., and Pohn, H.A., 1976, Lineament, linear, lineation; some proposed new standards for old terms: *Geological Society of America Bulletin*, 87, 1463-1469.
- Richard, H. and Groshong, Jr., 1999, 3-D Structural Geology: a practical guide to surface and subsurface map interpretation, Springer, New York, 25p.
- Riley, P.R., Goodwin, L.B., and Lewis, C.J., 2010, Controls on fault damage zone width, structure, and symmetry in the Bandelier Tuff, New Mexico, *Journal of Structural Geology* 32, 766-780.
- Tateiwa, I., 1929, *Geologic Atlas of Korea*, No. 10, Gyeongju, Yeongchon, Deagu and Waegwan Sheet, Geological Survey of Chosen, 1p.

고경태

한국지질자원연구원 석유해저연구본부 해저지질연구실
305-350 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3394
Email: kkt8212@kigam.re.kr

최진혁

부경대학교 지구환경과학과 지질구조재해연구실
608-737 부산광역시 남구 용소로 45
Tel: 051-629-7909
Email: cjh0421@pknu.ac.kr

김영석

부경대학교 지구환경과학과 지질구조재해연구실
608-737 부산광역시 남구 용소로 45
Tel: 051-629-6633
Email: ysk7909@pknu.ac.kr

2012년 1월 9일 원고접수

2012년 3월 2일(1차), 2012년 3월 16일(2차) 수정일자

2012년 3월 19일 게재확정