

CASE STUDY

경상남도에서 발생한 암반사면의 파괴유형 연구

박춘식^{1*}, 하정철²

¹창원대학교 토목공학과, ²(주)디엠엔지니어링

Investigations on the Failure Modes of Rock Slopes in Gyeongsangnam-do

Choon-Sik Park^{1*} and Jung-Chul Ha²

¹Dept. of Civil Engineering, Changwon National University

²DM Engineering

*Corresponding author: pcs@changwon.ac.kr

Received: August 2, 2018

Revised: November 15, 2018

Accepted: December 15, 2018

ABSTRACT

The purpose of this study is to identify the collapse characteristics by analyzing various factors causing collapse based on field survey and existing data on rock slopes occurring in the construction of roads and industrial complexes in Gyeongsangnam - do area. In the case of the slope where the slope has been directly surveyed, the analysis of the collapse characteristics can be used for the prediction and prevention of slope failure through the continuous collection of the slope data, database construction, management and analysis. The evaluation items used in the collapse characteristics of slope were selected among the items that can be regarded as objective evaluation items among the overlapping factors by comparing the evaluation items frequently used for the evaluation of the existing slope stability among various factors. The type of destruction of the rock slope depends on the type of carcass of the bedrock, such as planar fracture, wedge fracture, onho fracture, and conduction fracture, which are different from each other. And the slope stability analysis should be performed accordingly.

Keywords: Rock slope, Stereographic projection analysis, Plane fracture

초록

본 연구는 경상남도 일대의 도로 및 산업단지 시공과정에 발생된 암반사면에 대하여 현장조사 및 기존 조사자료 등을 토대로 붕괴를 일으키는 여러 가지 요인들을 분석하여 붕괴 특성을 파악하고자 하였다. 직접 조사한 사면가운데 붕괴가 발생한 사면의 경우 붕괴특성을 분석하여 붕괴사면 자료의 지속적인 수집 및 데이터베이스 구축과 관리 및 분석을 통해 붕괴사면 예측 및 예방에 활용할 수 있을 것이다. 절토사면의 붕괴특성에 사용된 평가항목은 여러 가지 요인들 중에 기존에 사면 안정성 평가에 많이 사용된 평가항목을 비교하여 중복되는 요소들 중에 객관적인 평가항목으로 볼 수 있는 항목을 선택하여 사용하였다. 암반사면의 파괴유형은 기반암의 암중에 따라 평면파괴, 썰기파괴, 원호파괴, 전도파괴 등의 양상이 다르게 발생하므로 사면의 안정성을 검토할 경우 반드시 지표지질 조사를 실시하여 기반암의 암중을 분석한 후 그에 따른 사면의 안정성 해석을 수행하여야 한다.

핵심어: 암반사면, 평사투영해석, 평면파괴, 주향과 경사, 한계평형 해석



1. 서론

절토 사면의 붕괴는 특정한 인자에 의해 발생되기 보다는 강우, 지질 및 토질, 지형 및 식생 등 다양한 인자의 조합에 의해 발생된다. 이러한 사면의 붕괴가능성을 알아보기 위한 안정성 평가법은 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔다.

한국시설안전기술공단(2006)에서는 “건설공사 비탈면 유지관리지침”에서 절토 사면의 안정성 평가를 위해 토사 사면과 암반 사면으로 분류하고 암반 사면은 다시 연약암반사면, 파쇄암반사면, 절리암반사면으로 분류를 실시하여 각각의 사면에 대하여 안정성 평가법을 제안하였다.

이경철(2014) 등은 “급경사지 방재 및 관리를 위한 급경사지 정보 통합관리 시스템 개발”에서 매년 수행된 기 붕괴 사면의 현황 조사 자료를 바탕으로 각 현장조사항목에 대한 가·감 및 가중치를 수정보완하면서 제안하고 있으며, 사면을 토사사면과 암/혼합 사면으로 구분하여 각 사면에 대하여 항목과 항목 점수를 달리하여 위험도 점수를 산정한 뒤 우선순위를 결정하고 있다. 그리고 안정성 평가항목으로는 사면높이, 사면경사, 지하수, 계곡부 유무, 상부 자연사면경사, 붕괴이력을 절리 외 불연속면, 토질, RMR(Rock Mass Rating)등을 통합관리 할 것을 제안하였다.

유병옥(1991)은 “대절토사면의 사면안정성을 고안한 사면절취구배설정에 관한 연구”에서 일본 건설성, 일본 도로공단, 미국 연방도로국의 평가항목을 비교하여 중복되는 요소를 선정하고 지질적인 요인을 추가하여 사면붕괴의 요인이 되는 항목을 선정하고 점수화하여 사면안정성 평가법을 제안하였으며, 안정성 평가항목으로는 사면높이, 사면경사, 절리방향, 절리경사, 풍화정도, 암석 종류, 균열상태, 단층유무, 암석강도, 지하수유무, 상부경사 등을 선정하여 안정성을 평가하는 방안은 제안하고 있다.

이용희(2004) 등은 “로지스틱 회귀분석을 통한 암반사면의 안정성 평가법 제안”에서 지리정보시스템을 이용한 데이터베이스를 구축하였고 조사된 여러 가지 붕괴요인들에 대하여 붕괴된 사면과 안정한 사면에서의 차이점에 대한 비교와 이상치의 분석을 실시하였다. 그리고 붕괴된 사면과 안정한 사면에 대하여 로지스틱 회귀분석을 이용하여 암반사면 안정성 평가법을 제안하였고 재분석한 결과를 역거리 가중치법과 정규 크리깅의 공간정보 모델링 기법을 통해 암반사면 위험도(Rock Slope Hazard Map)를 작성하였다. 그리고 안정성 평가 항목으로는 암종, 사면경사 및 방향, 절리경사 및 방향, 절리면과 사면의 방향차이, 사면높이, 풍화도, 파쇄 정도, 단층 및 충전물 유무, 사면상부경사 등을 선정하여 안정성을 평가하였다.

김승현(2013)은 “국내 도로 사면의 거동 특성과 체계적인 유지관리에 관한 연구”에서 현장조사를 실시하여 토사사면을 포함한 붕괴위험성이 내포된 사면의 파괴형태에 대한 연구를 통해 보강대책을 제시하였으며 황영철(2007) 등은 “국내 절토 사면 설계기준의 해석적 평가”에서 붕괴된 사면의 조사를 통해 설계 기준을 제시하였고 박재영(2010) 등은 “국내 도로변의 사면 현황 분석 연구”에서 사면 일반현황과 붕괴가 발생된 사면에 대해 비교분석을 통하여 유지관리시 중요한 사항에 대하여 연구를 수행하였다.

우리나라는 국토의 70%이상이 산악지형으로 이루어져 있으며 산업화에 따른 도로 및 건설용지의 고갈 문제로 인한 부지확보 차원에서 산지나 구릉지의 활용도는 날이 갈수록 높아지고 있다. 최근 들어 국가 기반 시설에 대한 투자 확충으로 인해 도로의 신설이 급격히 증가하고 있으며, 기존의 도로 역시 지속적인 확장 및 선형 개선 등으로 인해 절토 사면의 수가 급속히 증가하고 있다. 절토 사면은 얇은 토층과 풍화토, 풍화암, 연암 등의 풍화도가 다른 물질로 구성되어 지반 구성 물질에 대한 공학적인 판단은 많은 경비가 소요되고 또한 그 한계성을 가지고 있어 시공 중 또는 시공 후에 절토 사면의 안정성 문제가 대두되고 있는 실정이다.

절토 사면의 안정성에 영향을 미치는 요소로는 암종, 풍화, 지질구조의 특성 등의 내적인 요인과 강우, 지하수, 지진 등의 외적인 요인을 들 수 있으나 이들 중 암반 사면의 내적인 요인들이 사면의 안정성에 큰 영향을 주는 주요인으로 작용할 수 있다. 따라서 국내에 분포하는 암반의 내적 요인들에 대한 지질학적인 구분과 공학적인 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 즉 지역에 따라 분포

하는 암석종류, 지질시대 및 지질구조에 따라 사면의 붕괴유형 및 발생빈도 다른 특성을 보이고 있어 암반의 종류 및 지질구조 특성에 따른 붕괴특징을 분석함으로써 도로 및 산업단지의 개설시 예비적인 사면 안정문제를 예견하여 대비할 수 있다.

절토사면의 붕괴특성을 분석함으로써 비슷한 유형의 사면을 조성할 시 예비단계에서 미리 발생할 수 있는 파괴에 대한 분석 및 대비가 이루어 질 수 있으므로 본 연구 자료를 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

절토 사면의 안정성을 분석하기 위해서는 절토 사면의 안정성에 영향을 미치는 여러 가지 요인들을 조사, 분석해야 한다. 일반적으로 절토 사면의 안정성은 사면 자체의 지질 및 지반 공학적인 요인에 의해 좌우되지만 주변 환경에 의해서도 영향을 받을 수 있으므로 절토 사면의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 모든 요인들을 조사, 분석하여 큰 영향을 미칠 수 있는 요인들을 선정하여야 한다.

또한 평사투영 해석시 Hoek and Bray(1973)가 제시한 대로 경사면의 방향과 주절리면의 방향이 이루는 각이 $\pm 20^\circ$ 이내 일 때 그리고 경사면의 경사와 절리면의 경사가 이루는 각이 30° 이내 일 때 평면파괴가 발생하는 것으로 해석하고 있으나 실제 평면파괴 현장을 방문하여 역해석을 실시하여 본 결과 이 이상의 각도에서도 실제 파괴가 발생하고 있다. 이러한 현상은 공학적 관점에서 연구해야 할 과제이다.

2. 평사투영해석

평사투영법은 3차원의 암반형상을 2차원의 평면상으로 투영하여 절개면(Slope)에 대한 암반의 활동성을 정성적으로 분석하는 방법으로 대원(Great Circle, 썩기파괴의 가능성 예측)과 극점(Pole, 평면 및 전도파괴의 가능성 예측)으로 해석하는 두 가지 방법으로 대별되며, 대원투영법은 썩기파괴에 대한 안정성을 분석하고, 극점 투영법은 평면파괴 및 전도파괴에 대한 안정성 분석을 하며 Fig. 1과 같이 각 지역별로 검토하여야 한다.

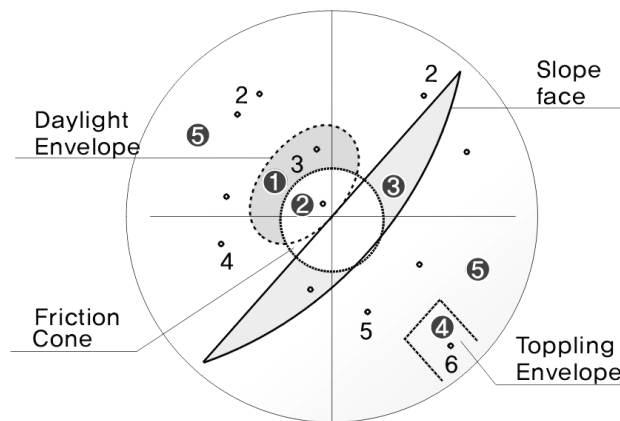


Fig. 1. How to review by region

Fig. 1에서 ①지역은 불연속면의 기울기가 마찰각보다 큰 Daylight로서 불안정한 지역에 해당하며 ②지역은 불연속면의 기울기가 마찰각보다 작은 Daylight로서 안정한 지역에 해당하고 ③지역은 불연속면의 기울기가 마찰각보다 작으며, Daylight도 아닌 안정한 지역에 해당한다.

④지역은 Toppling 붕괴 위험성이 잠재된 불안정한 지역이며 ⑤지역은 불연속면의 기울기가 마찰각보다 크더라도 Daylight나

Toppling Envelope이 아니므로 안정한 지역에 해당한다.

또한, 불연속면의 긴 연장선 외에 충전물 협재, 지하수 유동 등 위험요소를 내포한 절리와 단층과 같은 불연속면은 평사투영 해석 시 방향성이 우세하게 나타나지 않아도 중요 위험 불연속면으로 고려하여 해석하여야한다.

3. 연구대상 사면 및 분석방법

본 연구에서는 Table 1과 같이 경남 일원의 기 파괴된 사면에 대하여 데이터를 취합하여 평사투영해석을 실시하였다. 캐나다 Rocscience사의 DIPS(Ver 5.0)을 이용하여 분석하였으며 복합적인 방향성에서 빈도수가 높은 주방향성을 고려하여 분석하였으며 파괴 이외의 인자에 대해서는 고려하지 않았다. 다양한 암반사면의 파괴형태를 단순화하기 위하여 신속하게 파괴의 유형 및 파괴각을 분석할 수 있는 평사투영 해석을 사용하여 경남 일원의 기 파괴된 사면의 데이터를 역해석하여 사면경사, 사면방향, 절리경사, 절리 방향, 사면 높이, 암종, 붕괴유형, 풍화도, 균열상태, 지하수 상태 등을 정리하였다.

Table 1. Slope survey data by region of Gyoungsangnam-do

지역별	조사사면갯수	지역별	조사사면갯수
거제시	36	양산시	1
거창군	9	의령군	10
고성군	8	진주시	9
김해시	10	진해시	1
남해군	13	통영시	3
마산시	13	하동군	1
밀양시	2	함안군	22
사천시	11	합천군	1
산청군	18	부산 기장군	12

4. 조건에 따른 파괴유형 분석

4.1 암종에 따른 파괴유형 분석

사면의 붕괴유형은 퇴적암, 화성암, 변성암에 따라 발달하는 불연속면의 특성에 차이를 보이므로 사면을 형성하는 암종과 매우 밀접한 관계를 갖는다. 퇴적암에서는 주로 층리에 의해서 붕괴가 일어나며 화성암에서는 절리, 변성암에서는 단층과 암질 불량에 의한 붕괴가 우세하게 나타난다.

본 연구에서 암종에 따른 파괴유형 분석을 실시하였다. 크게 성인에 따라 암종은 일반적으로 넓게 분류하는 화성 기원인 마그마 작용에 의해 형성된 화성암(화산암 포함), 퇴적 작용에 의해 형성된 퇴적암, 화성암이나 퇴적암이 접촉 변성되어 형성된 변성암으로만 분류하였으며 그 결과는 다음 Table 2와 같으며 암종에 따른 파괴유형별 발생 빈도는 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2. Analysis of destruction type according to rock type

파괴유형	화성암	퇴적암	변성암	계
평면파괴	32	10	14	56
썩기파괴	22	16	16	54
전도파괴	13	8	7	28
원호파괴	9	10	23	42
계	76	44	60	180

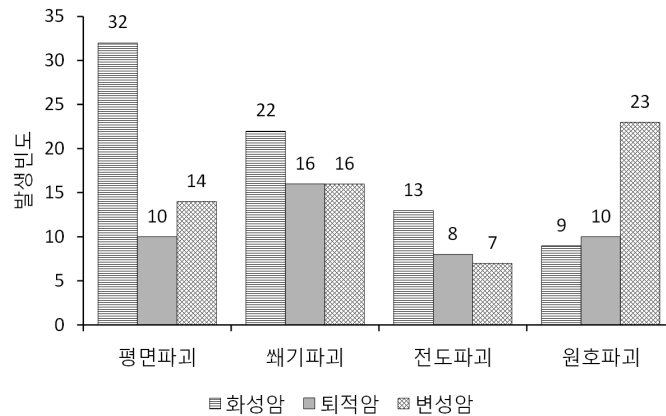
**Fig. 2.** Frequency of occurrence by type of destruction type according to rock type

Table 2에서와 같이 화성암의 붕괴 사면은 76개소, 퇴적암의 붕괴 사면은 44개소, 변성암의 붕괴사면은 60개소이며 이들 각 암종에 대하여 파괴유형을 분석한 결과 화성암에서는 평면파괴(42%)와 썩기파괴(29%)가 주로 발생하며, 전도파괴(17%)와 원호파괴(12%)도 발생하는 것으로 분석되었다.

암종에 따른 파괴유형을 분석하면, 퇴적암에서는 평면파괴(23%), 썩기파괴(36%), 원호파괴(23%)가 비슷한 수치로 발생하며 전도파괴(18%)가 가장 적게 발생하는 것으로 확인되었다. 변성암에서는 원호파괴(38%)가 가장 우세하게 나타나며 평면파괴(23%), 썩기파괴(27%)로 비슷한 수치로 발생하고 있으며 전도파괴(12%)로 가장 적게 발생하고 있다.

4.2 풍화정도에 따른 파괴유형 분석

일반적으로 암반사면의 경우 원호파괴가 잘 발생하지 않는다고 알려져 있으나 본 연구에서는 23.3% 정도로 원호파괴가 발생하는 것으로 확인되었다. 원호파괴의 원인을 분석하기 위하여 풍화전도에 따른 파괴유형 분석을 실시하였으며 본 연구에서 붕괴된 사면의 경우 보통 풍화(MW), 많이 풍화(HW), 완전 풍화(CW)정도로 나타나며 그 결과는 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Analysis of destruction type according to degree of weathering

파괴유형	보통풍화(MW)	많이풍화(HW)	완전풍화(CW)	계
평면파괴	14	42	0	56
썩기파괴	18	36	0	54
전도파괴	19	9	0	28
원호파괴	0	1	41	42
계	51	88	41	180

평면 파괴와 썩기파괴의 경우 많이 풍화(HW)된 암반 사면에서 아주 우세하게 나타나며 전도파괴의 경우 보통 풍화(MW)된 암반 사면에서 우세하게 나타난다. 원호파괴의 경우 거의 완전 풍화(CW)된 암반 사면에서만 발생하는 것으로 분석되었다.

변성암의 경우 원호파괴가 우세하게 나타나는데 이는 변성암이 고압과 고온에 의해 완전 풍화(CW)된 양상을 보이므로 원호파괴의 양상이 우세하게 나타나는 것으로 분석되었다. 그리고 전도 파괴의 경우 암석의 풍화도와 상관없이 절리면의 경사와 방향에 의존하여 주로 붕괴가 발생하는 것으로 분석되었다.

4.3 단층의 존재 유무에 따른 파괴유형 분석

암반 사면의 경우 절리나 균열이 우세하게 발달하고 있으나 지구조 운동에 의해 단층을 포함하고 있는 경우도 많이 관찰된다. 이러한 단층들이 사면의 파괴형태에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 단층의 존재 유무에 따른 사면의 파괴형태 분석을 실시하였으며 그 결과는 다음 Table 4와 같다.

Table 4. Analysis of destruction type with existence of faults

파괴유형	단층 유	단층 무	계
평면파괴	34	22	56
썩기파괴	26	28	54
전도파괴	12	16	28
원호파괴	31	11	42
계	103	77	180

단층이 있을 경우 사면의 붕괴가 더 잘 일어나며 평면 파괴와 썩기파괴의 경우 단층의 존재 유무와 상관없이 비슷하게 나타나나 전도파괴의 경우 단층면이 없을 경우 더 잘 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 전도 파괴의 경우 절리면의 방향과 경사각에 의존하여 사면의 파괴가 발생하는 것으로 분석되며 원호파괴의 경우 단층면이 있을 경우 잘 일어나는 것으로 관찰되었다. 이는 단층의 생성시 지각 변동에 의하여 암반이 파쇄 되는 경우 많고 단층면 사이의 단층점토 등이 형성되는데 이 단층점토층이 두꺼울수록 원호 파괴가 잘 발생하는 것으로 분석되었다.

4.4 충전물의 존재 유무에 따른 파괴유형 분석

암반사면의 경우 암반 내에 충전물들을 포함하는 경우도 많다. 이들 충전물들이 암반 사면의 파괴 유형에 어떠한 요소로 작용하는지 알아보기 위해 분석을 실시하였으며 그 결과는 다음 Table 5와 같다.

Table 5. Analysis of the type of destruction by presence or absence of packing

파괴유형	충전물 유	충전물 무	계
평면파괴	38	18	56
썩기파괴	36	18	54
전도파괴	13	15	28
원호파괴	31	11	42
계	118	62	180

암반 내에 충전물들을 포함하고 있는 경우가 포함하지 않는 경우보다 아주 우세하게 나타나며 평면파괴, 썩기파괴, 원호파괴의 경우 충전물들을 포함하고 있는 사면에서 우세하게 나타나며 전도 파괴의 경우 충전물을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우가 비슷한 수치로 분석되었다.

평면 파괴와 썩기파괴, 원호 파괴의 경우 충전물들이 암괴의 분리 역할을 수반하는 경우가 많기 때문에 충전물들을 포함하는 경우가 아주 우세하게 나타나는 것으로 판단되며 전도파괴의 경우 암반 내에 포함된 절리의 방향성과 경사각에 의존하여 발생하는 것으로 분석되었다.

4.5 균열 정도에 따른 파괴유형 분석

암반 사면의 경우 현장 조사시 균열 정도를 표시하여 현황도를 작성한다. 본 연구에서 나타나는 균열 정도는 보통 균열, 심한 균열, 매우 심한 균열로 구분하였으며 그 결과는 다음 Table 6과 같다.

Table 6. Analysis of fracture type according to degree of crack

파괴유형	보통 균열	심한 균열	매우 심한 균열	계
평면파괴	6	24	26	56
썩기파괴	12	16	26	54
전도파괴	18	4	6	28
원호파괴	0	0	42	42
계	36	44	100	180

Table 7에서 대체로 사면의 파괴는 주로 매우 심한 균열에서 주로 발생하며 원호파괴의 경우 매우 심한 균열이 발달한 사면에서만 나타나는 것으로 분석되었다. 전도 파괴의 경우 보통 균열에서 우세하게 나타나는 것으로 보아 전도 파괴의 경우 균열의 정도에 영향을 받지 않고 주 절리면의 방향과 경사에 의존하여 발생하는 것으로 분석되었다.

4.6 사면 높이에 따른 파괴유형 분석

본 연구에서는 사면의 높이에 따른 파괴빈도와 파괴양상을 분석하였다. 사면의 높이에 따라 파괴빈도와 파괴유형을 분석함으로써 사면의 안정해석 시 예비조사의 자료로 활용할 수 있도록 하였으며 그 결과는 다음 Table 7과 같다.

Table 7. Analysis of the type of failure according to slope height

파괴유형	0~10 m	11~20 m	21~30 m	31~40 m	41 m 이상	계
평면파괴	4	17	19	11	5	56
썩기파괴	6	8	28	12	0	54
전도파괴	3	7	9	7	2	28
원호파괴	1	12	15	12	2	42
계	14	44	71	42	9	180

Table 7의 결과와 같이 사면의 파괴는 대부분 11~40 m의 높이에서 발생하였으며 특히 21~30 m 사이의 높이에서 많이 발생하고 있다. 높이에 따른 파괴의 유형은 뚜렷한 특징을 나타내지 않는 것으로 분석되었다.

5. 평면 파괴시 사면과 주절리면의 방향과 경사

복잡한 지질구조에서 비교적 단순한 붕괴형태인 평면 파괴가 발생하기는 쉽지 않다. 기본적으로 평면 파괴가 발생하기 위해서는 활동할 잠재성이 있는 암괴가 독립적으로 떨어져 나와 움직일 수 있는 형태적 조건을 갖추어야 한다. 또한 사면 암반의 운동방향과 하중 정도가 사면 활동을 용이하게 하기 위한 구조-역학적 조건을 갖추어야 한다. 이러한 조건은 Hoek and Bray(1981)에 의해 다음 4가지 항목으로 잘 요약되어 제시되었다.

- 주향조건 : 암괴가 미끄러지는 활동면의 주향이 사면의 주향과 거의 평행(약 $\pm 20^\circ$ 이내)
- 경사조건 1 : 활동면의 경사는 사면의 경사보다 완만하여 활동면이 사면에 노출되어 있어야 한다.
- 경사조건 2 : 활동면의 경사는 그 면의 물성인 마찰각보다 커야 한다.
- 이완면 존재의 조건 : 암괴 운동에 대한 저항을 최소화 하고 하나의 독립된 블록으로 분리되어 미끄러질 수 있도록 이완면들이 존재해야 한다.

수평으로 퇴적된 지층이 지각변동으로 지층이 경사지게 되었을 때, 그 성층면의 기울어진 형태를 나타내기 위해 Fig. 3과 같이 주향과 경사로 표시한다.

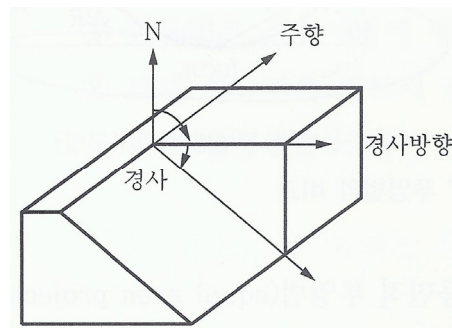


Fig. 3. Definition of discontinuity direction

주향(酒香)은 성층면과 수평면의 교선의 방향을 말하며, 이 방향은 북을 기준으로 하여 나타낸다. 주향의 표시방법은 주향선이 북으로부터 30° 동쪽으로 기울어져 있으면 N30E, 북북쪽에서 서쪽으로 45° 기울어져 있으면 N45W로 표시한다. 경사는 성층면이 주향선과 직각을 이루며 수평면과 이루는 각이 최대한 각을 나타낸다. 이 경사가 가리키는 방향을 경사 방향이라고 한다.

주향과 경사를 측정하기 위해서는 클리노메타나 브란트 컴퍼스 또는 클리노컴퍼스를 사용하며, 주향을 지도상에 표시할 때는 자침이 가리키는 북쪽방향을 자북과 자오선이 가리키는 북쪽방향 진북에 주의를 해야 한다.

본 연구에서는 방향성을 표시하기 위해 평사투영법을 사용하였는데 평사투영법에는 등면적 투영(Schmidt Net)과 등각 투영 방법(Wulff Net)이 있는데 공간적인 분포의 정확성을 기하기 위해 등면적 투영과 하반구 투영(Lower Reference Hemisphere)을 사용하였다.

Hoek and Bray(1981)의 4가지 조건 중 첫 번째 주향 조건에 대해 분석해보았다. 일반적으로 주향과 경사방향은 서로 직각이므로 암괴가 미끄러지는 활동면의 주향이 사면의 주향과 비슷하여야 평면파괴가 잘 발생한다고 알려져 있으며 활동면의 주향과 사면의 주향이 이루는 각이 적을수록 평면파괴가 발생할 수 있는 조건이 상향된다.

주향 조건은 사면의 주향과 주절리면의 주향이 이루는 각으로 분석하였으며 주향을 나타내는 방법으로는 DIP/DIP direction으로 환산하여 표기하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 4에서 보여 지는 바와 같이 전체 사면의 방향성은 30~40°(DIP/DIP direction) 방향으로 형성되었고, 화성암, 퇴적암, 변성암 사면에 대한 사면 방향성은 Fig. 5~7에 나타내었다.

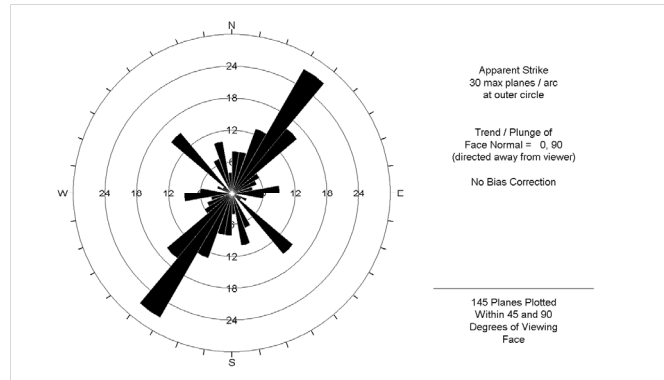


Fig. 4. Directional analysis of whole slope

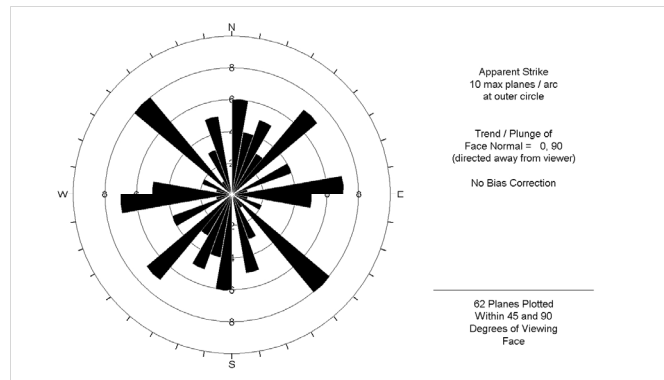


Fig. 5. Directional analysis of igneous rock slope

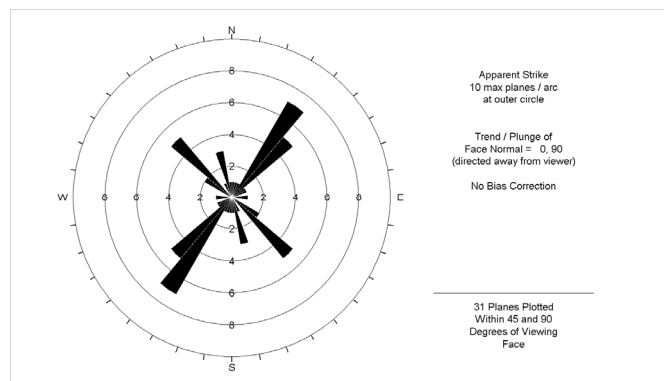


Fig. 6. Directional analysis of sedimentary rock slope

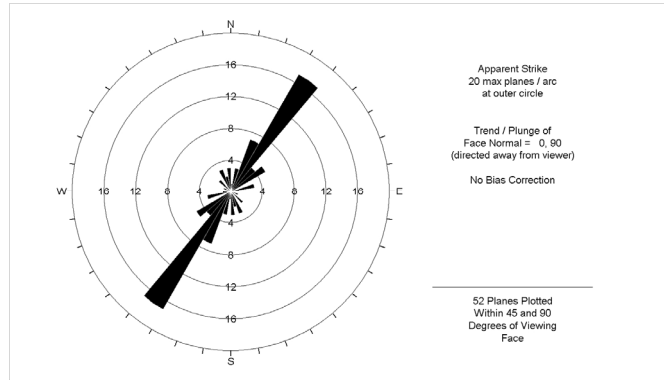


Fig. 7. Directional analysis of metamorphic rock slope

사면에 발달되어 있는 주절리면을 DIPS(Ver5.0) 프로그램을 이용하여 Fig. 8과 같이 분석한 결과 10~70°(DIP/DIP direction)로 발달하여 있다. 이는 사면의 방향을 기준으로 약 ± 20~30°(DIP/DIP direction)내외의 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

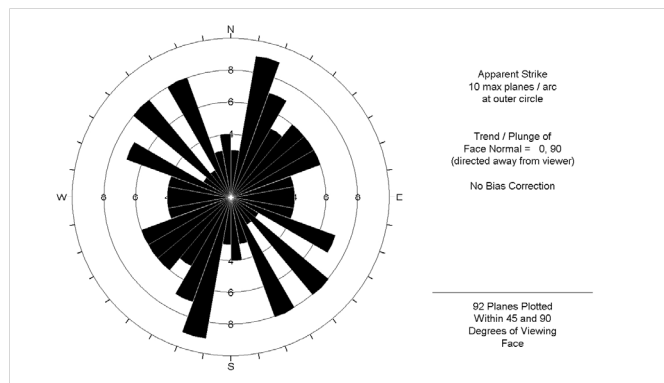


Fig. 8. Directional analysis of joint plane

Fig. 9~11과 같이 암종별 방향성을 분석한 결과, 화성암의 경우 주로 주절리면이 10~20°, 40~50° 방향이 우세하고 310~330° 방향도 발달하고 있는 것으로 측정되었다. 퇴적암의 경우 구재의 방향이 특징적으로 나타나고 있는데 이는 경상분지 퇴적암의 특징을 잘 나타낸 것으로 주절리면이 20~30° 방향이 우세하고 310~320° 방향도 발달하고 있는 것으로 측정되었다. 그리고 변성암의 경우 특징적인 방향성을 나타내지 않고 여러 방향에서 평면파괴를 일으키는 것으로 측정되었다.

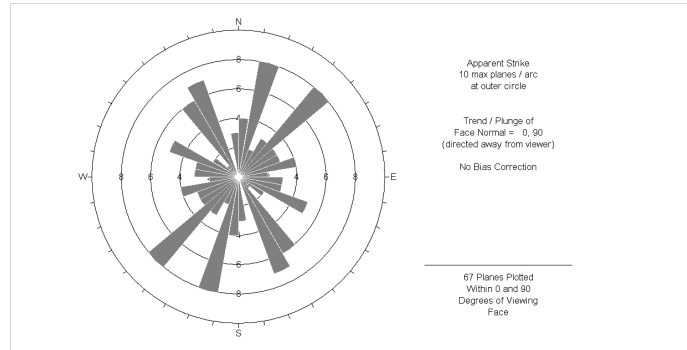


Fig. 9. Directional Analysis of Joint Surface of Iwasin Rock Slope

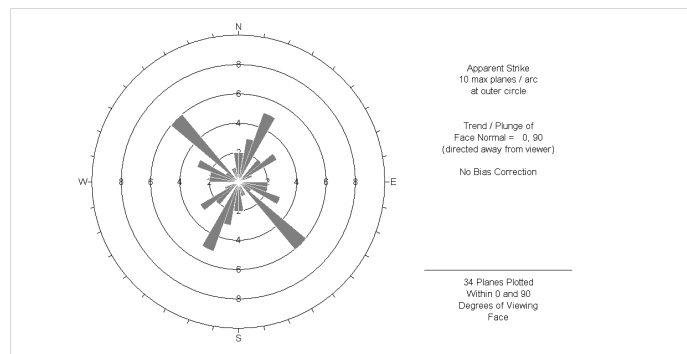


Fig. 10. Directional Analysis of Joint Surface of Sedimentary Rock Slope

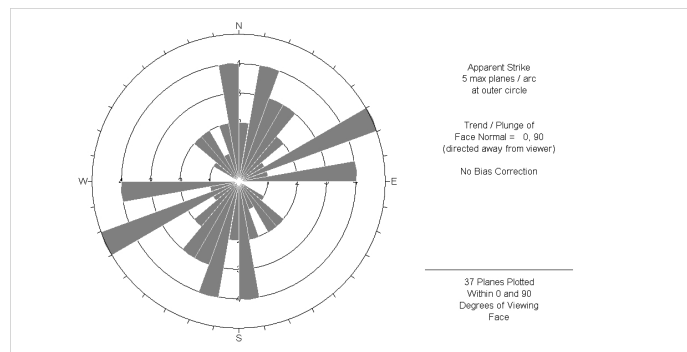


Fig. 11. Directional Analysis of Joint Surface of Metamorphic Rock Slope

Fig. 12과 Fig. 13와 같이 사면의 방향과 주절리면의 방향이 이루는 각을 암종별로 분석해 보면 화성암의 경우 $0\sim 30^\circ$, 변성암의 경우 $11\sim 20^\circ$, 퇴적암의 경우 $0\sim 20^\circ$ 일 때 평면파괴가 주로 발생하는 것으로 분석되었다.

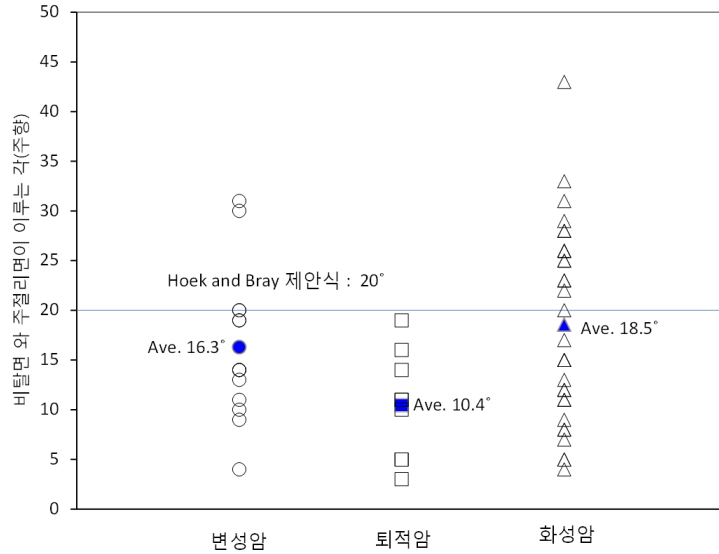


Fig. 12. Analysis of angles between slopes and joint faces (Strike)

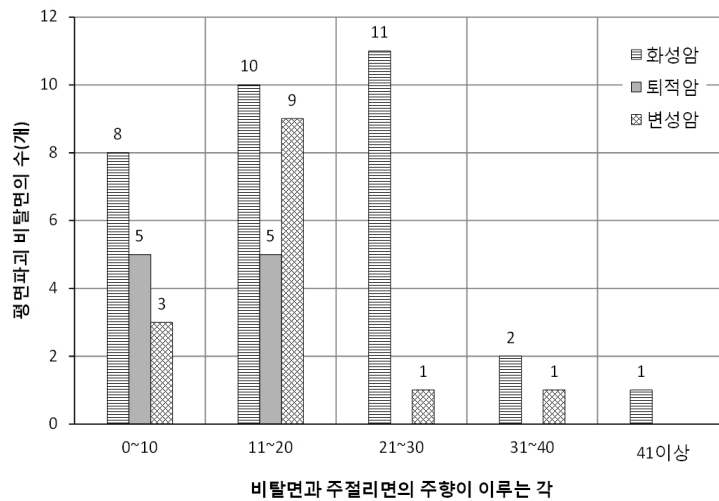


Fig. 13. An analysis of the angle between slopes and joint faces of bedrock (Strike)

경사조건1 사면과 주절리면의 경사가 이루는 각에 대해서도 분석을 실시하였으며 그 결과는 다음 Fig. 14~15와 같다.

화성암의 경우 주로 0~20° 내외의 각에서 평면파괴가 주로 발생하며 퇴적암은 10~30°, 변성암은 0~30°의 각에서 평면파괴가 주로 발생한 것으로 분석되었다. 40°가 넘는 각에서 평면 파괴가 발생한 지역은 암괴의 모양, 거칠기 등 여러 가지 요인에 의하여 발생하였으나 대체적으로 0~40° 이내의 각에서 평면파괴가 발생하는 것으로 분석되었다.

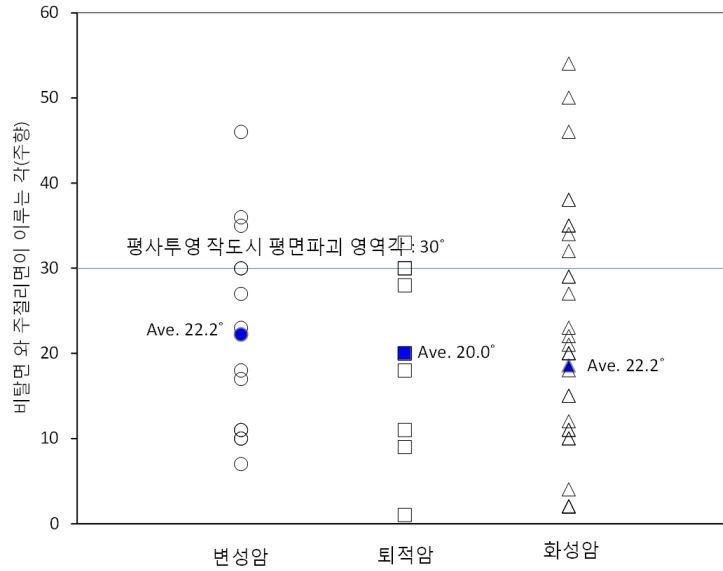


Fig. 14. Analysis of angles between slopes and joint faces (Dip)

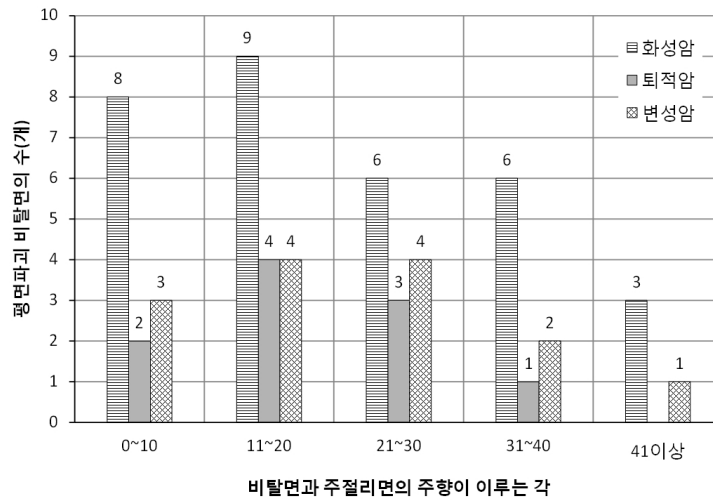


Fig. 15. An analysis of the angle between slopes and joint faces of bedrock (Dip)

6. 결론

본 연구는 경상남도 일원에 발생된 암반사면에 대하여 사면의 방향, 경사 그리고 주절리면의 방향과 경사, 사면 높이, 암종, 풍화 정도, 균열 상태, 단층 유무, 충전물의 유무 등의 현장조사 결과를 데이터베이스화 하여 각 요소가 사면의 파괴유형에 미치는 영향 등을 분석하였으며, 이를 통하여 비슷한 유형의 사면을 조성할 때 조사자료를 활용하여 발생할 수 있는 사면의 재해에 대처하여 보다 정확하고 경제적인 설계에 활용하고자 하는데 그 목적이 있다.

- 1) 암중에 따른 파괴유형을 보면 화성암이나 퇴적암의 경우 절리면의 경사와 층리면의 주향 경사에 의해 파괴유형이 우세한 평면 파괴 및 썩기 파괴가 우세하게 발생하였고, 변성암의 경우 원호파괴의 발생빈도가 높게 나타났다. 이는 암중의 생성원인에 의한 것으로 화성암과 퇴적암은 형성시 일정한 주향과 경사를 가지지만 변성암의 경우 화학적 또는 기계적인 변질에 의해 주향 및 경사가 뒤틀리게 되므로 나타나는 현상으로 분석된다.
- 2) 전도파괴의 경우 풍화정도가 완전 풍화에서 보통 풍화로 풍화정도가 줄어들수록 발생빈도가 높아지는 것으로 보아 풍화도와는 무관한 것으로 분석되었으며, 주절리면의 주향과 경사각에 의존하여 파괴가 발생하는 것으로 판단되었다.
- 3) 일반적으로 암반사면에서는 원호파괴가 발생하지 않는 것으로 알려져 있으나 대부분 완전 풍화된 상태로 단층을 포함하고 매우 심한 균열이 발달한 암반사면에서는 특정한 방향성을 보이지 않고 토사사면의 원호파괴와 유사한 경향을 보이는 원호 파괴도 발생하였다. 이는 단층을 포함하고 심한균열이 발생한 암반사면에서는 미세한 균열이 무수히 발달하고 있으므로 이에 기인하여 토사화 된 현상으로 분석되어진다.
- 4) 완전 풍화된 변성암으로 충층물, 지하수, 단층을 포함하고 있는 암반 사면의 경우 대부분 원호파괴의 형태로 파괴되었으며 이는 고온 고압에 의해 암반 입자들이 재배열하거나 변질되면서 암반의 뚜렷한 방향성을 나타내지 못한 암석의 생성요인에 의해 발생된 것으로 판단되었다.
- 5) 사면의 높이에 따른 파괴유형 및 파괴빈도에 대해서 분석한 결과 20~30 m 높이의 사면에서 파괴빈도가 가장 높았으며 높이에 따른 파괴유형은 특징적으로 구분되지 않았다.
- 6) Hoek and Bray(1973)이 제안한 평면파괴의 4가지 조건 중 첫 번째 주향에 대한 조건들을 분석하기 위하여 평면 파괴가 발생한 사면들에 대해서 분석한 결과 퇴적암, 변성암의 경우 제안대로 $\pm 20^\circ$ 이내에서 평면 파괴가 발생하였으나 화성암의 경우 20° 이상에서도 평면파괴가 발생하는 것으로 나타났다.
- 7) 사면경사와 주절리면의 경사가 이루는 각에 대하여 분석한 결과 화성암의 경우 주로 $0\sim 20^\circ$ 내외의 각에서 평면파괴가 주로 발생하며, 퇴적암은 $10\sim 30^\circ$, 변성암은 $0\sim 30^\circ$ 의 각에서 평면파괴가 주로 발생한 것으로 분석되었다. 40° 가 넘는 각에서 평면 파괴가 발생한 지역은 암괴의 모양, 거칠기 등 여러 가지 요인에 의하여 발생하였으나 대체적으로 $0\sim 40^\circ$ 이내의 각에서 평면 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

REFERENCES

- 김승현, 2013, 국내도로 비탈면의 거동특성과 체계적인 유지관리에 관한 연구, 부산대학교 박사 학위논문, 37-91.
- 유병욱, 1991, 대절토사면의 사면안정성을 고려한 사면절취 구배설정에 관한 연구, 한양대학교 석사학위 논문.
- 한국시설안전공단, 2006, 건설공사 비탈면 유지관리지침, 56-72.
- E. Hoek, J. W. Bray and J. M. Boyd, 1973, The stability of rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities, *Journal of Engineering Geology*, Vol. 6, No. 1, 1-55.
- Hwang, Y.-C., Lee, H.-S., 2007, Analytical Evaluation on Design Criteria for Cut Slopes, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 8, No. 3, 51-57.
- Lee, K., Jang, Y., Song, J., Kang, I., 2014, Development of Integrated Management System for Steep Slope Prevention and Management, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 15, No. 9, 77-85.

- Lee, Y.-H., Kim, J.-R., 2004, A Proposal of the Evaluation Method for Rock Slope Stability Using Logistic Regression Analysis, Tunnel & Underground Space, Vol. 14, No. 2, 133-141.
- Park, J.-Y., Shin, C.-G., Chang, B.-S., 2010, Analysis for Current Situation of Slope along National Roads in Korea, Journal of the Korean Geoenvironmental Society, Vol. 11, No. 12, 19-25.