

ORIGINAL ARTICLE

불연속면의 최대경사벡터를 활용한 사면거동해석

조태진*

부경대학교 에너지자원공학과

Analysis of Rock Slope Behavior Utilizing the Maximum Dip Vector of Discontinuity Plane

Taechin Cho*

Department of Energy Resources Engineering, PUKYONG National University

*Corresponding author: chotc@pknu.ac.kr

Received: September 24, 2019

Revised: October 21, 2019

Accepted: October 21, 2019

ABSTRACT

Maximum dip vector of individual joint plane, which can be uniquely defined on the hemispherical projection plane, has been established by considering its dip and dip direction. A new stereographic projection method for the rock slope analysis which employs the maximum dip vector can intuitively predict the failure modes of rock slope. Since the maximum dip vector is uniquely projected on the maximum dip point of the great circle, the sliding direction of discontinuity plane can be recognized directly. By utilizing the maximum dip vector of discontinuity both the plane sliding and toppling directions of corresponding blocks can be discerned intuitively. Especially, by allocating the area of high dip maximum dip vector which can form the flanks of sliding block the potentiality for the formation of virtual sliding block has been estimated. Also, the potentiality of forming the triangular-sectioned sliding block has been determined by considering the dip angle of joint plane the dip direction of which is nearly opposite to that of the slope face. Safety factors of the different-shaped blocks of triangular section has been estimated and compared to the safety factor of the most hazardous block of rectangular section. For the wedge analysis the direction of crossline of two intersecting joint planes, which has same attribute of the maximum dip vector, is used so that wedge failures zone can be superimposed on the stereographic projection surface in which plane and toppling failure areas are already lineated. In addition the maximum dip vector zone of wedge top face has been delineated to extract the wedge top face-forming joint planes the orientation of which provides the vital information for the analysis of mechanical behavior of wedge block.

Keywords: Maximum dip vector, Block flank, Top face, Triangular section, 3D wedge shape

초록

평사투영도에서 불연속면을 대표하는 유일한 점으로 정의되는 최대경사벡터를 해당 면의 경사와 경사 방향에 의거하여 형성하였다. 평사투영해석에서 평면의 극점이 대원과 역방향에 제도되는 것에 비해 최대경사벡터는 대원의 최대 경사지점에 위치하여 불연속면의 미끄러짐 방향을 직접 투영도 상에서 지시한다. 투영도 상에서 불연속면의 거동방향을 직접적으로 지시하는 최대경사벡터를 활용하여 평면 및 전도파괴 양상을 직관적으로 확인하였다. 특히 평면 파괴의 경우 블록의 옆면을 형성하는 고 경사 절리의 존재를 확인하여 실제 미끄러짐 블록의 형성가능성을 산정하였다. 또한 사면 방향과 반대방향을 갖는 고



경사절리들의 존재를 확인하여 3각형 단면을 갖는 미끄러짐 블록의 형성여부를 판별하고 안전율을 도출하였으며, 4각형 단면을 갖는 가장 취약한 블록의 안전율과 비교분석하였다. 썩기파괴 경우에는 절리면 교차에 의해 형성되는 썩기의 기저선 방향이 최대경사벡터 속성을 지니고 있어 썩기파괴 영역을 평면 및 전도파괴 영역이 제도된 투영도 상에 함께 도시하여 분석을 수행하였다. 특히 썩기 상부 면을 형성하는 절리를 추출할 수 있어 전체 썩기형상을 추정하고 역학적 거동분석을 수행하는데 요구되는 썩기의 기하학적 특성자료를 도출하는 토대를 확립하였다.

핵심어: 최대경사벡터, 블록 옆면, 상부면, 삼각형 단면, 3차원 썩기 형상

1. 서론

평사투영도를 이용한 암반사면의 파괴해석은 개착면의 방향성과 미끄러짐 면으로 작용하는 불연속면의 방향성 및 전단강도 특성인 마찰각을 활용하여 수행된다. 사면개착 대상 암반에 분포된 불연속면의 방향성 측정에는 클리노미터를 사용한 직접 측정방법과 사진영상 및 레이저영상을 활용한 원거리 측정방법이 사용되어왔다. 개착면에 발달된 불연속면의 방향성을 개착 이전단계에서 추출하기 위하여 시추공 BIPS 영상해석기법(Raax, 1997)과 기준 방향선이 새겨진 시추코어에서 불연속면 방향을 산정하는 DOM 시추기법(Yoon et al., 2003, Cho et al, 2004)이 개발되었다. 미끄러짐 거동이 유발되는 절리면의 점착력과 마찰각은 전단강도를 직접 측정하는 방법(Ladanyi and Archambault(1970), Barton et al.(1985))을 활용하여 측정되어왔으며, 불연속면의 비선형적 전단강도 특성을 경험적 분석 결과에 의거하여 산정하는 기법이 Hoek and Brown(1980)에 의해 제시되었다. 또한 개착된 암반표면에서의 풍화진행에 따른 불연속면의 강도 저하를 고려하기 위하여 Barth(1948)는 풍화에 의한 암석의 화학조성 변화를 연구하였으며, Judd and Haber(1961)는 풍화산물인 조암광물의 안정성에 기초한 역학적 특성변화를 분석하였다.

개착사면의 안전성은 현장암반에 우세하게 발달된 불연속면의 전단강도와 대표방향성을 활용하여 해석되어왔다. 절리면의 방향성 벡터를 활용하여 Shanley and Mahtab(1976)과 Mahtab and Yegulalp(1982)는 일정기준 이상의 밀집도를 나타내는 dense point 개념을 도입하여 군집성을 판별하는 클러스터링 알고리즘을 개발하였으며, 이 원리에 의거하여 방향성 벡터가 밀집된 절리군을 도출하고 대표 방향성을 산정하였다. 사면의 붕락 잠재성 분석을 위한 평사투영해석(Priest, 1985)은 도출된 절리군의 대표방향성에 의거하여 수행되어져왔으나, 개별 절리군 내의 절리방향성 분산이 클 경우 절리군 방향의 대표성이 저하되며 평사투영해석의 신뢰도가 저하되는 경향이 있다. 이를 극복하기 위하여 Cho(2018)는 클러스터링 알고리즘의 핵심 요소인 콘각을 조정하여 dense point를 추출하고, 이에 의거하여 절리군 대표방향성을 산정하였으며, 절리방향성 집중도를 Read et al.(2003)이 제시한 defect pattern 지수 산정 결과와 비교하여 최적의 사면해석 기초자료를 도출하는 기법을 고안하였다.

평사투영기법을 활용한 사면해석 수행과정에서 3차원의 개착면 방향성은 투영도상에 대원으로 제도되어 사면붕락의 기준 방향을 제시한다. 그러나 현재 사용되는 평사투영해석기법에서는 현장암반에서 측정된 다수의 절리방향성 및 절리군 대표방향성이 극점 개념의 점으로 제도되어 극점의 선주향이 불연속면의 경사방향과 180도 위상 차이가 나고, 선경사도 불연속면의 경사와 보각 관계를 이루고 있어 평사투영도 상에서 극점 위치가 불연속면의 잠재적 미끄러짐 방향을 직접적으로 지시하지 못하고 있다. 또한 미끄러짐 면의 마찰각 영향영역도 극점을 사용하여 분석되는 평면 및 전도파괴의 경우와 두 개 면의 교선에 의거해 분석되는 썩기파괴의 경우에 평사투영도 상에서 상이한 영역을 차지하게 되어 사면해석의 일관성이 결여되어있다. 본 연구에서는 3차원 불연속면에서의 극점과 동일한 유일성을 지닌 최대 경사선을 지시하는 최대경사벡터를 활용하여 개착사면의 평사투영해석을 수행하는 방법론을 고찰하였다. 불연속면의 경사방향과 경사에 의거하여 단위 길이의 최대경사벡터를 형성하였으며, 최대경사벡터 선의 선주향과 선경사를 평사투영도에 제도하여 개착면 대원과 직접적으로 대비시켰다. 또한 극점 개념에서의 평면 및 전도파괴 영역을 최대

경사벡터 개념에 부합되게 재설정하고, 이 영역에 위치하는 절리군 대표방향성의 최대경사벡터들을 고찰하여 파괴거동양상을 도출하였다. 썩기파괴의 경우 썩기 기저선 방향이 최대경사벡터와 동등한 기하학적 속성을 지니기 때문에 동일한 투영원리에 의거하여 마찰각 영향영역을 제도하여 평면, 전도 및 썩기파괴 영역을 단일 투영도상에 기술하고 파괴 가능성을 분석하는 해석상의 용이성을 추구하였다. 또한 극점 개념에서는 도출하기 곤란한 블록 옆면의 형성 잠재성과 평면블록의 단면형상을 유추하였으며, 썩기의 상부면을 형성하는 불연속면을 추출하여 3차원 썩기형상을 예측하였다. 결과적으로 3차원 썩기의 안정성을 역학적으로 산정하는데 필수적으로 요구되는 썩기의 4개 모서리(Wyllie and Mah, 2004) 방향성 도출도 가능하여졌다.

2. 최대경사벡터 기반의 사면파괴영역

평면의 방향성은 기존에 활용되는 극점 이외에도 최대경사선의 미끄러짐 방향을 지시하는 최대경사벡터를 형성하여 투영도 상에서 유일한 대표점으로 정의된다. 3차원 x-y-z 좌표공간에서 단위길이를 갖는 최대경사벡터(\vec{s})는 평면의 경사방향(α)과 경사(β)에 의거하여 아래와 같이 정의된다.

$$\vec{s} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k} \quad (1)$$

$$\text{여기서 } x = \cos(\beta) \sin(\alpha)$$

$$y = \cos(\beta) \cos(\alpha)$$

$$z = -\sin(\beta)$$

하반구 등각투영기법에 의거하여 최대경사벡터는 투영도 상의 경사방향(α)의 방위각을 갖는 반지름(R) 선상에서 원점으로부터 거리 r 지점에 유일성을 지닌 점으로 제도된다.

$$r = R \tan \frac{(90 - \beta)}{2} \quad (2)$$

평면의 극점을 대표하는 극점이 대원의 반대쪽에 위치하는 것과 비교해서 최대경사벡터는 평면의 대원 상에서 최대 경사방향, 즉 잠재적 미끄러짐이 발생하는 방위각과 경사를 직접 지시한다.

국내 현장에서 측정된 절리 방향성에 대해 Mahtab and Yegulalp(1982)의 절리군 도출기법에서 콘각을 4도로 설정하여 절리군 해석을 수행하였다. 극점 개념을 활용한 절리 방향성 분포양상과 절리군 대표방향성은 Cho(2018)에 의해 도출되어 Fig. 1에 제도 시하였으며, 최대경사벡터를 활용한 절리분포양상과 절리군 대표방향성을 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 1에 도시된 극점들은 해당 위치의 방위각과 반대방향의 경사방향을 갖는 절리면을 지시하며, 미끄러짐 경사각도 보각으로 제도되어 극점의 위치와 절리면의 미끄러짐 방향성이 직관적으로 연계되지 못한다. 절리군 #2의 경우를 살펴보면 해당 절리군의 잠재적 미끄러짐 방향을 지시하는 절리군 대원의 최대 경사선은 고경사 영역인 투영도 원점 인근에서 동남향으로 표출되고 있으나 해당 극점은 북서향의 저경사 영역에 위치하여 우세한 미끄러짐 방향이 용이하게 유추되지 못하고 있다. 이에 비해 개별 절리면 및 대표절리군의 최대경사벡터가 제도된

Fig. 2 경우에는 도시된 절리군 최대경사벡터가 미끄러짐 방향을 지시하는 해당 대원의 최대경사지점에 제도되어 절리암반의 잠재적 거동방향을 직접적으로 지시한다.

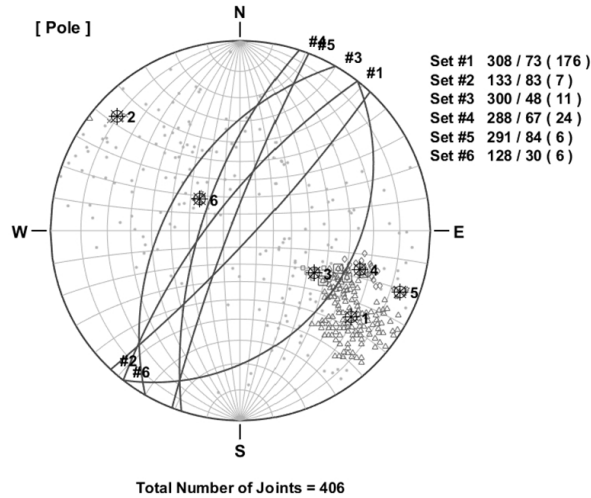


Fig. 1. Pole distribution of joints and joint sets (after Cho, 2018)

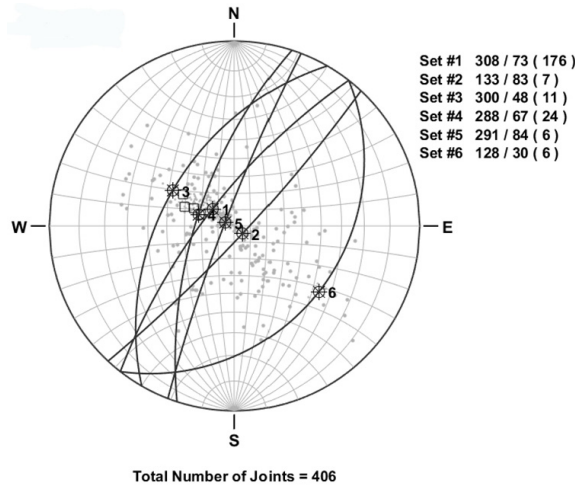


Fig. 2. Maximum dip vector distribution of joints and joint sets

절리면의 최대경사벡터를 활용할 경우 기존의 극점을 사용하는 경우보다 더욱 용이하게 사면해석을 직관적으로 수행할 수 있다. 이를 현시적으로 설명하기 위하여 개착면의 경사방향/경사 = 300/70 및 절리면 마찰각 30°인 경우에 대한 예제 평사투영해석을 수행하였다. 먼저 Cho(2018)에 의해 수행된 극점 개념에 의거한 해석결과를 Fig. 3에 도시하였다. 개착면은 대원으로 제도되었지만 평면파괴 및 전도파괴 영역 설정에 마찰각 30° 영향범위가 극점 투영조건에 일치시키기 위하여 투영도 원점을 기준으로 60° 경사 콘으로 제도되어있다. 실제적인 평면파괴 방향은 사면의 개착방향과 유사하지만 Fig. 3에서는 극점활용 원칙에 부합시키기 위하여 개착방향과 180° 차이나는 역방향으로 평면파괴영역이 설정된다. 전도파괴의 경우에도 동일한 제도원리에 근거하여 개착면 경사 방향과 180° 위상차이가 나는 파괴영역이 개착면 대원에 인접한 지역에 제도된다. 이와 같은 비합리성 때문에 파괴유형에 대한 관

넘적인 유추과정이 혼동될 수 있다. 실제로 Fig. 3에 도시된 평면파괴영역에 위치한 절리군 #3 경우에 극점이 제도된 방위각 120° 방향이 아니라 180° 회전된 300° 방향으로 파괴가 발생하는 것으로 재해석해야 되며, 파괴면 경사도 극점이 제도된 위치인 경사 42°가 아니라 보각개념에서 산정된 48°로 재유추해야 된다.

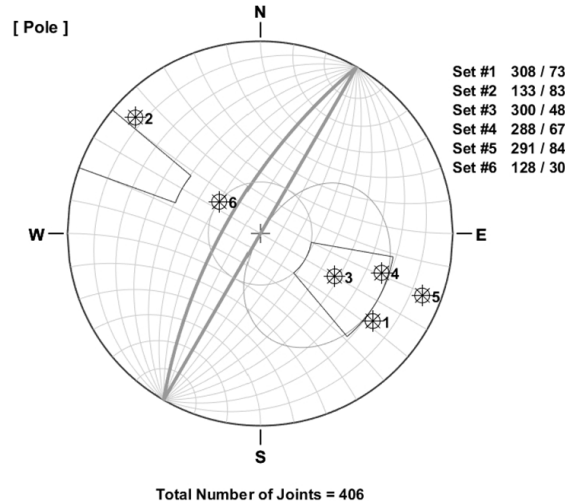


Fig. 3. Plane and toppling failure analysis utilizing joint pole (after Cho, 2018)

최대경사벡터를 활용한 사면해석의 편의성을 설명하기 위하여 동일한 사면개착조건에서의 평면 및 전도 파괴영역을 제도하여 Fig. 4에 도시하였다. 개착면은 극점 경우와 동일하게 경사방향/경사 = 300/70인 대원으로 제도되지만, 마찰각 30° 영향범위가 투영도 원점기준 30° 경사콘으로 제도된다. 평면파괴 영역도 고정사의 대원과 상대적으로 저경사인 마찰각 콘 사이에 제도되고, 경사방향도 개착면 경사방향과 ±20° 사이에서 설정된 것이 직관적으로 유추된다. 이에 따라 평면파괴 잠재성을 지닌 절리군 #3의 최대경사 벡터가 대원의 가장 불룩한 지점인 개착면 경사방향과 유사하고, 평면파괴의 경사조건을 만족시킨다는 사실이 확연하게 나타난다. 또한 고정사 절리면에 연관된 전도파괴의 경우에도 절리군 #2 및 #5의 최대경사벡터가 파괴영역 인근에 위치하여 전도파괴가 우세하게 발생할 확률은 낮지만 절리군 #2와 #5에 소속된 절리들에 의하여 전도파괴가 제한적으로 발생될 수 있다는 점을 지시한다.

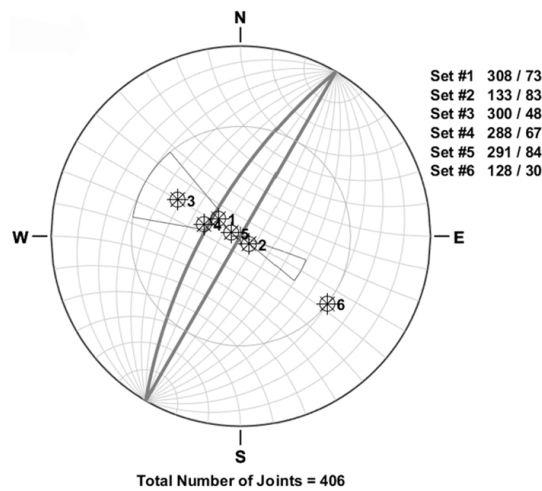


Fig. 4. Plane and toppling failure analysis utilizing joint maximum dip vector

썩기파괴의 잠재성은 썩기 기저선을 형성하는 2개 절리면의 교차선이 평사투영도 상의 썩기파괴 영역에 투영되는지에 따라 판별되기 때문에 절리면의 극점 또는 최대경사벡터 사용여부에 관계없이 기존에 사용된 파괴영역이 투영도 상에서 동일하게 지정된다(Fig. 5 참조).

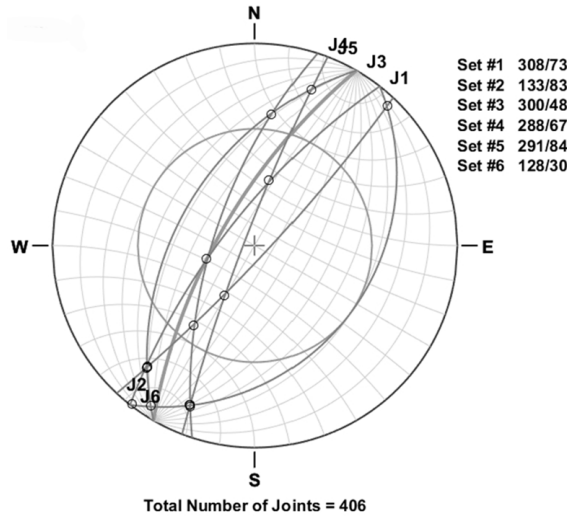


Fig. 5. Wedge failure analysis.

최대경사벡터 개념을 활용할 경우 평면 및 전도파괴 영역과 썩기파괴 영역이 단일 평사투영도에 함께 제도되어 암반사면해석이 총체적으로 수행될 수 있다. 이를 설명하기 위하여 Fig. 4에 도시된 6개 절리군 교선의 방향성을 산정하여 Fig. 6에 도시하였다. 제도 상의 간결성을 유지하기 위하여 Fig. 5에 제도된 6개 절리군 대원을 제거하고 절리군의 교차선만을 도시하였다. Fig. 6에 도시된 바와 같이 평면, 썩기 및 전도파괴 영역이 단일 평사투영도 상에 도시되어 절리군 최대경사벡터 및 절리군 교차선 분포에 의거하여 파괴모드 분석이 용이하게 수행될 수 있다. 절리군 #3에 의해 평면파괴가 유발될 가능성이 존재하며, 절리군 #2를 형성하는 절리면에 의한 전도파괴 잠재성이 나타나며, 썩기파괴의 경우에는 절리군 교차선 1개가 썩기파괴영역에 위치하지만 교선의 경사가 개착면 경사와 유사하기 때문에 ‘daylight’ 조건을 충족시킬 확률이 매우 낮고, 썩기가 형성되어도 파괴는 개착부에 한정될 것으로 사료된다.

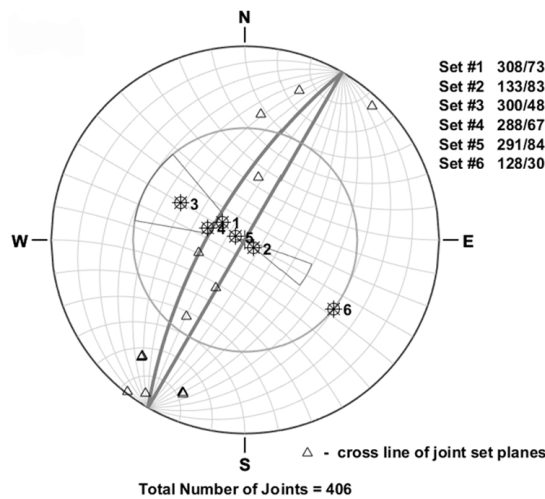


Fig. 6. Comprehensive layout of plane, toppling and wedge failure criteria

3. 최대경사벡터를 활용한 평사투영해석

3.1 평면파괴

개착사면에서 평면파괴가 발생되기 위해서는 기본적으로 미끄러짐이 발생할 블록이 형성되어야 한다. 극점 개념을 활용한 기존의 평사투영해석에서는 절리군 대표방향성의 극점 위치에 따른 파괴 유발가능성 해석에 주안점을 두고 있다. 즉 개착면의 경사방향과 유사한 경사방향을 갖고(경사방향 조건), 경사가 사면경사보다 낮아서 개착면에 표출되고 마찰각보다 높아서(경사 조건) 점착력을 고려하지 않을 경우 자연적인 미끄러짐이 발생하는지에 초점이 모여져 있다. 그러나 실제로 평면파괴 블록이 형성되기 위해서는 블록 옆면을 형성시킬 수 있는 고경사 절리의 존재가 요구되며(Fig. 7(a) 참조), 추가적으로 블록 단면이 개착면에 국한된 삼각형 형태인지 또는 사면 상부면으로 연장되어 사각형 형태로 형성되는지 판단되어야 한다. 본 연구에서는 최대경사벡터 개념을 평사투영해석에 도입하여 블록 옆면의 형성 가능성과 파괴블록의 단면 형상을 유추하고 평면파괴 가능성 분석을 수행할 수 있는 기법을 고찰하였다. 일차적으로 경사방향/경사 = 300/70을 갖는 예제적 개착사면의 대원과 절리면 마찰각 30° 콘을 Fig. 7(b)에 도시하였다. 평면파괴 영역은 경사방향/경사 = (280 - 320)/(30 - 70) 영역에 설정되었다. 블록의 옆면을 형성시킬 수 있는 절리들은 70° 이상의 고 경사를 갖고 경사방향이 개착사면과 거의 직각을 유지해야 한다는 가정 하에 경사방향/경사 = (020 - 040)/(70 - 90) 및 (200 - 220)/(70 - 90) 구간에 블록 옆면 방향성 영역을 설정하였다. 한편 개착면의 경사방향에 역방향인 절리의 경사가 30° 이하이면 자체적으로 블록을 형성할 확률이 매우 낮아 수직 절리 또는 상부면의 인장균열에 연계된 사각형 단면이 형성될 가능성이 높다. 경사가 70° 이상인 경우에도 수직 인장균열이 발생된 사각형 단면 경우와 유사한 수리역학적 거동 양상이 예상된다. 이와 같은 단면 형성 양상을 고려하여 삼각형 단면형상을 형성하는 절리들의 경사방향은 개착면 경사방향과 역방향이고 중간 정도의 경사를 갖는다고 가정하고 경사방향/경사 = (110 - 130)/(30 - 70) 구간에 최대경사벡터 개념의 3각형 단면형성영역을 설정하였다.

Fig. 7(b)에 도시된 최대경사벡터를 활용한 평면파괴 해석결과에 의거할 때 절리군 #3 및 #4(Fig. 6 참조)에 의해 평면파괴가 발생할 가능성이 있는 것으로 분석된다. 그러나 블록 옆면을 형성시킬 수 있는 고경사 절리들의 최대경사벡터가 블록 옆면 방향성 영역에 분포되지 않아서 실제로 평면파괴를 야기 시키는 블록들은 매우 제한적으로 형성될 것으로 사료된다(Fig. 7(c) 참조). 또한 개착면에 분포되어 삼각형 블록단면을 형성시키는 절리들이 경사 30° - 70° 영역에 소수 존재하여 삼각형 단면의 블록들이 형성될 수도 있겠지만 최대경사벡터의 밀집도가 낮아 상부면을 형성하기는 어려울 것으로 사료된다. 대신에 경사방향 110 - 130 구간 및 290 - 310 구간에서 경사 80 이상의 고경사 절리들이 다수 분포하여 인장균열을 형성시킬 잠재성이 높은 것으로 사료된다.

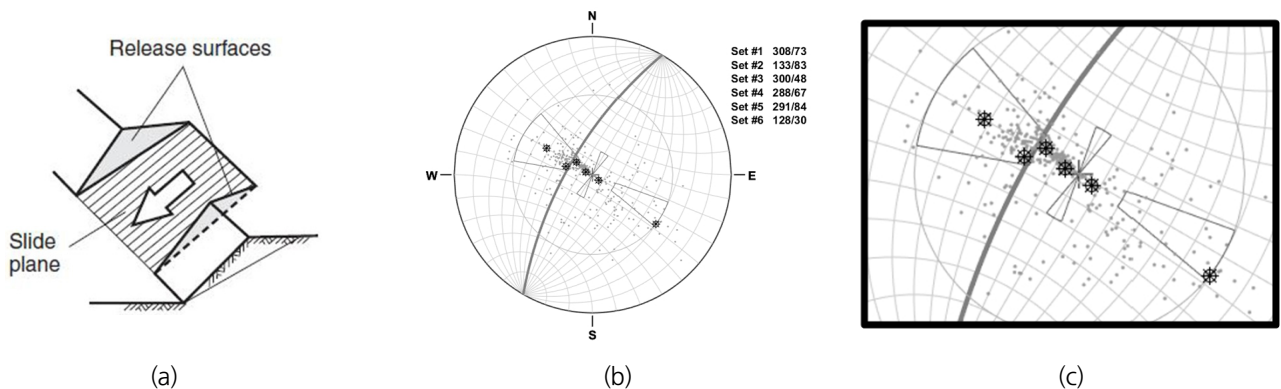


Fig. 7. Formation of plane sliding block
 (a) plane sliding block(after Willie and Mah, 2004), (b) stereographic analysis of plane sliding failure using maximum dip vector, (c) close-up of plane sliding block criterion

3.2 전도파괴

전도파괴는 블록전도와 굴곡전도로 대별되며, 전도파괴 영역에 위치하는 고 경사 절리들에 의해 기본적으로 굴곡파괴가 진행되는 것으로 추정된다(Fig. 8(a) 참조). 최대경사벡터를 활용한 평사투영도 상에서 개착사면의 경사방향/경사 = 300/70 및 절리면 마찰각 30°에 대한 전도파괴 영역은 Sjöberg(2000)의 전도파괴 형성과정 이론에 의거하여 개착사면의 역방향인 경사방향/경사 = (110 - 130)/(50 - 90) 영역에 설정된다(Fig. 8(a)). 개착사면과 유사한 경사방향을 지닌 저경사 절리가 분포할 경우 굴곡전도블록이 분리되어 전도블록이 형성되고 블록전도가 발생하는 것으로 사료된다. 전도블록을 형성시키는 절리면의 경사방향이 개착면 방향과 유사하고($\pm 10^\circ$ 이내) 경사가 20° 이하인 것으로 설정하여 경사방향/경사 = (290 - 310)/(0 - 20)인 블록전도 영역을 Fig. 8(b)에 도시하였다. 예제 사면에 대한 전도파괴 해석결과 Fig. 8(b)에 도시된 바와 같이 절리군 최대경사벡터가 전도파괴 영역 내에 위치하지는 않으나, 절리군 #2 경우 최대경사벡터가 파괴영역에 매우 인접되어 위치하고 개별 절리들의 최대경사벡터도 다수 파괴영역 내에 위치하여 전도파괴가 발생할 가능성을 보여준다. 또한 블록전도 영역에 절리 및 절리군 최대경사벡터가 투영되지 않아서 전도파괴는 굴곡전도 양상이 우세하게 진행될 것으로 예측된다.

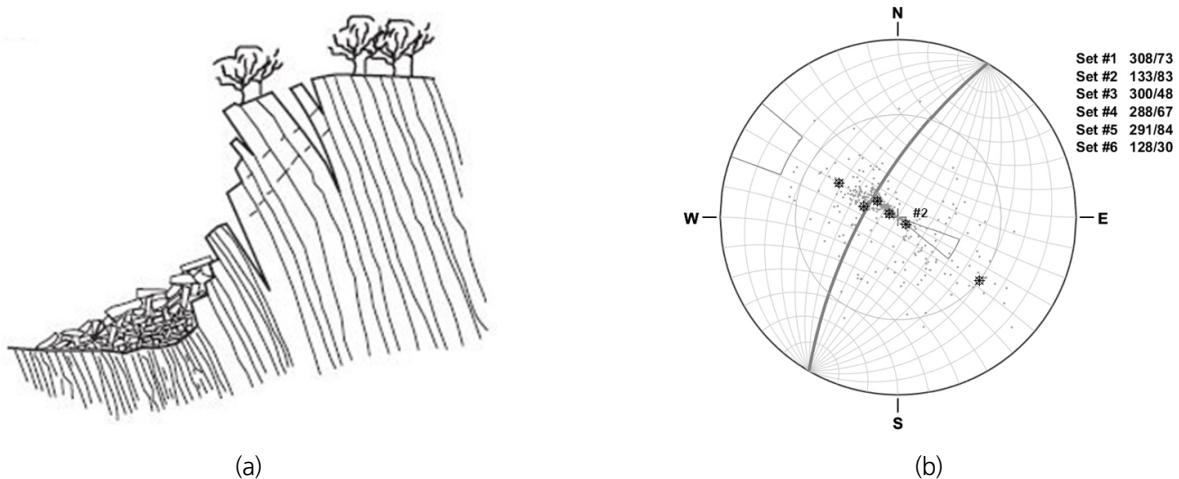


Fig. 8. Formation of toppling block
 (a) flexural toppling and block flexure toppling(after Willie and Mah, 2004)
 (b) stereographic toppling analysis using maximum dip vector

3.3 썩기파괴

썩기파괴해석은 절리면의 극점이나 최대경사벡터 대신에 2개 절리면의 교선 방향성에 의거하여 수행되기 때문에 기존에 설정된 투영도 상에서의 썩기파괴 영역이 변화되지 않는다. 예제 사면해석에 사용된 절리 방향성 자료에 기초하여 도출된 6개 절리군의 교선 방향을 산정하여 Fig. 9에 도시하였으며, 콘각 4° 를 적용하여 도출된 dense point 들의 교선 방향을 산정하고 썩기파괴영역 내에 위치하는 교선들을 추출하여 투영도에 제도하였다. 썩기파괴 해석결과 절리군 #1(308/73)과 절리군 #4(288/67)의 교차(Fig. 5 참조)에 의해서는 선주향 254° 방향으로의 썩기파괴 가능성이 제기되지만 교차선의 선경사가 62° 이어서 개착면의 경사 70° 를 고려할 때 대심도 블록이 형성되지는 않을 것으로 사료된다. 한편 무수한 dense point(DP) 교선들이 썩기파괴 영역에 위치하고 있으며, dense point 교차선의 평균 방향성 231/44를 고려할 때 개착면의 오른쪽 측면으로 붕락되는 썩기들이 형성될 가능성이 상당히 높게 나타난다.

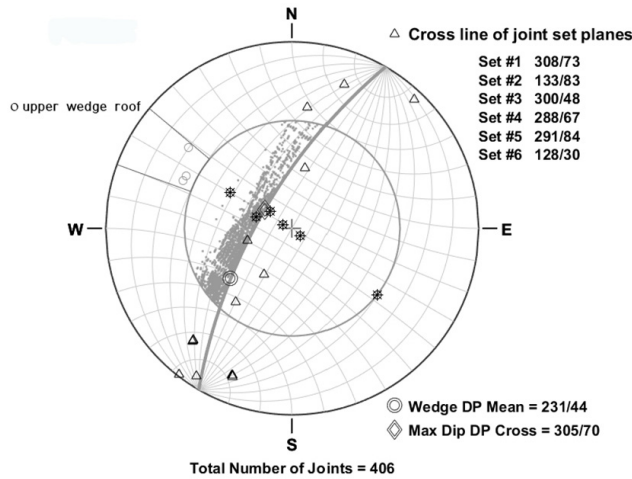


Fig. 9. Formation of wedge block

개착사면에서 형성된 썩기블록의 수리역학적 거동을 해석하기 위해서는 썩기의 3차원 형상이 도출되어야 하며(Fig. 10 참조), 썩기 상부면을 구성할 수 있는 방향성을 지닌 절리를 도출하여 썩기형상을 유추할 수 있다. 썩기 상부면을 형성하기 위해서는 일차적으로 절리면의 경사방향이 개착면과 유사하여야 한다. 또한 썩기 기저선이 상부면에 표출되어야 하기 때문에 절리경사가 기저선의 최소 경사각을 결정하는 절리 마찰각보다 작아야 한다. 이러한 관점을 고려하여 썩기 상부면을 형성하는 절리면의 경사방향 범위를 3각형 단면을 갖는 평면파괴블록 형성의 경우와 동일하게 $\pm 10^\circ$ 로 설정하였으며, 경사 범위는 자연적인 미끄러짐 발생이 미약할 것으로 사료되는 마찰각보다 낮은 $0^\circ - 30^\circ$ 구간으로 설정하였다. 이와 같은 썩기 상부면 방향성 영역을 Fig. 9에 추가로 도시하고, 이 영역에 위치하는 절리면을 추출하여 최대경사벡터를 투영도에 도시하였다. 현장암반에서 조사된 전체 406개 절리면 중에 3개 절리면 방향성이 썩기 상부면을 형성할 수 있을 것으로 분석되었다.

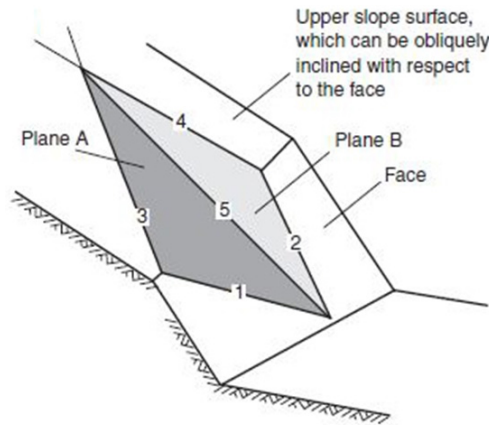


Fig. 10. Configuration of wedge block(after Willie and Mah, 2004)

개착사면의 방향성, 썩기를 형성하는 2개 절리면의 방향성 및 상부면의 방향성에 의거하여 Fig. 10에 도시된 5개 선의 방향성을 산정하고, 이 결과를 활용하여 썩기파괴에 대한 정밀 안전도 분석을 위한 수리역학적 해석을 수행할 수 있다. 예제사면의 방향성(경사방향/경사) 300/70, A 면(절리군 #4)의 방향성 288/67, B 면(절리군 #1)의 방향성 308/73 및 상부면의 방향성을 300/20으로 설

정하였을 때 썩기블록을 형성하는 5개 모서리 선의 방향성은 평사투영도 상에서 2개 대원의 교점방향으로 추출할 수도 있으며(Fig. 11 참조), 대수기하학적 기법을 활용할 때 다음과 같이 산정된다. 선 1: 258/64, 선 2: 253/62, 선 3: 016/05, 선 4: 219/03, 선 5: 255/62. 이상 5개 선의 방향성에 근거하여 Hoek et al.(1973)이 제시한 방법론에 의거하여 썩기거동을 대수학적으로 분석할 수 있으며, 세부적인 사항은 Willie and Mah(2004)에 기술되어있다.

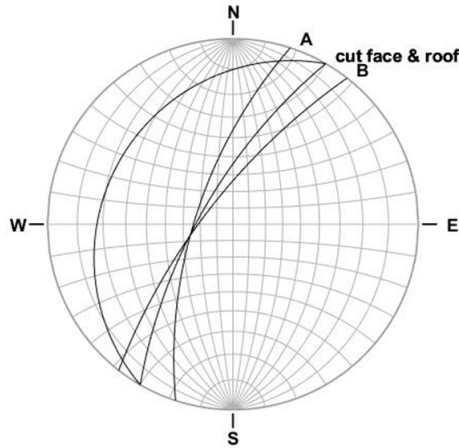


Fig. 11. Orientation of wedge-forming faces.

4. 평면블록 단면형상에 따른 거동해석

예제사면에서의 절리면 분포를 고려하여 평면파괴블록의 단면형상을 추정하고 이에 따른 블록의 거동양상을 분석하였다. 평사투영해석 결과 절리군 #3(300/48) 및 #4(288/67)에 의해 평면파괴가 유발될 가능성이 도출되었다(Fig. 7 참조). 절리군 #4에 의한 파괴면 형성의 경우 블록 경사가 개착면 경사와 유사하여 판상의 평면블록 미끄러짐이 우세할 것으로 사료된다. 미끄러짐 면의 경사가 개착면 경사보다 상당히 낮은 절리군 #3의 경우 평면파괴블록의 단면은 일반적으로 개착면, 상부면, 인장균열 및 미끄러짐 면의 교차에 의해 형성되는 사각형 형상으로 추정되지만, Fig. 7에 도시된 최대경사벡터의 위치를 고려할 때 투영도 상에 설정된 삼각형 단면영역에 위치하는 경사 $30^{\circ} - 70^{\circ}$ 절리에 기인하여 개착면, 사면 역방향 절리면 및 미끄러짐 면과의 교차에 의해 복수 형상의 삼각형 단면도 형성될 수 있을 것으로 판단된다. 개착사면 내의 절리면 분포에 대한 위치자료가 획득되지 않아서 블록단면형상을 정확하게 추정하기는 불가능하지만 실제로 미끄러짐이 발생될 블록은 복수의 삼각형 및 4각형 단면형태의 블록 중에서 안전율이 가장 낮은 것으로 추정될 수 있다.

본 연구에서는 삼각형 단면 블록형성에 따른 사면 안정성 변화를 고찰하고 사각형 단면의 경우와 비교하여 현실적으로 가장 미끄러짐 가능성이 높은 블록단면형상을 도출하였다. 이를 위하여 Cho(2018)에 기술된 사각형 단면 블록(Fig. 12 참조)을 기준으로 Fig. 7의 삼각형 단면영역에 위치한 절리들의 경사들을 고려하여 미끄러짐 블록의 기하학적 형태를 추정하고 역학적 안정성을 산정하였다. 기본적인 안정성 해석에 사용된 사각형 단면을 갖는 사면의 기하학적 및 역학적 특성은 사면 높이를 10m로 설정하였을 경우 다음과 같다. 개착면 경사 = 70° , 미끄러짐 경사 = 48° , 배후 인장균열 위치 = 2.1m 및 인장균열 깊이 = 3.6m 이다. Fig.12에 도시된 사면 형태를 기준으로 역 경사방향 절리의 경사가 30° , 45° 및 60° 경우에 형성되는 삼각형 단면형상을 추정하였다. 블록 상부

면을 형성하는 절리면이 사각형 단면의 인장균열 최 하부 점을 통과하는 것으로 가정하였으며, 개착면에서의 표출 위치를 산출하여 삼각형 단면 형상을 Fig. 12에 도시하였다.

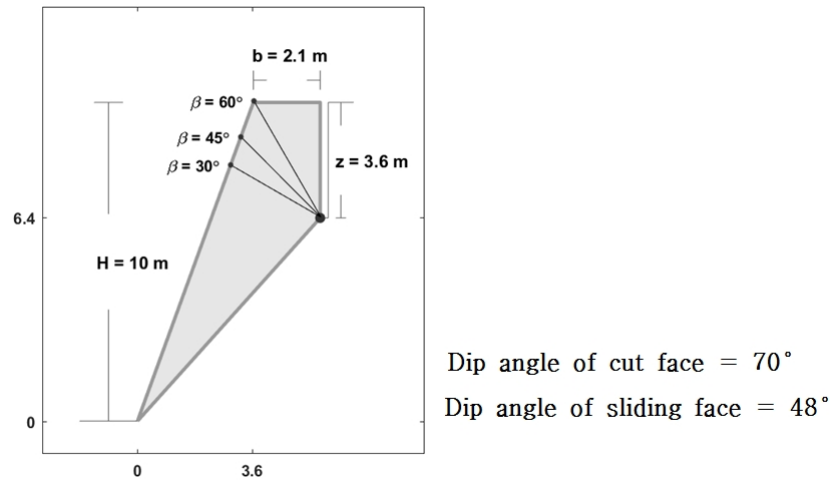


Fig. 12. Potential cross sections of plane sliding block

삼각형 단면블록은 상부면 경사에 따라 블록 형태 및 체적이 변화되며, 이에 따라 블록 하중과 미끄러짐 면 및 상부면에 작용하는 수압의 크기도 달라진다. 상부면 경사 30°, 45° 및 60° 경우에 대한 자중 및 블록 상부면과 미끄러짐 면에 작용하는 최대수압을 산정하여 Fig. 13에 도시하였다. 블록 상부면 절리경사가 30°인 경우 사면 높이는 8m, 최대수압형성 높이는 1.6m, 자중은 372.5kN, 미끄러짐 면에 법선방향으로 작용하는 최대수압 U는 70.5kN, 블록 상부면에 법선방향으로 작용하는 최대수압 V는 26.8kN으로 산정되었다. 상부면 절리경사가 45° 및 60°로 증가할 경우 삼각형 블록의 규모가 증가하여 블록자중과 미끄러짐 면 및 상부면에 작용하는 수압 U와 V도 블록 규모에 따라 증가된다.

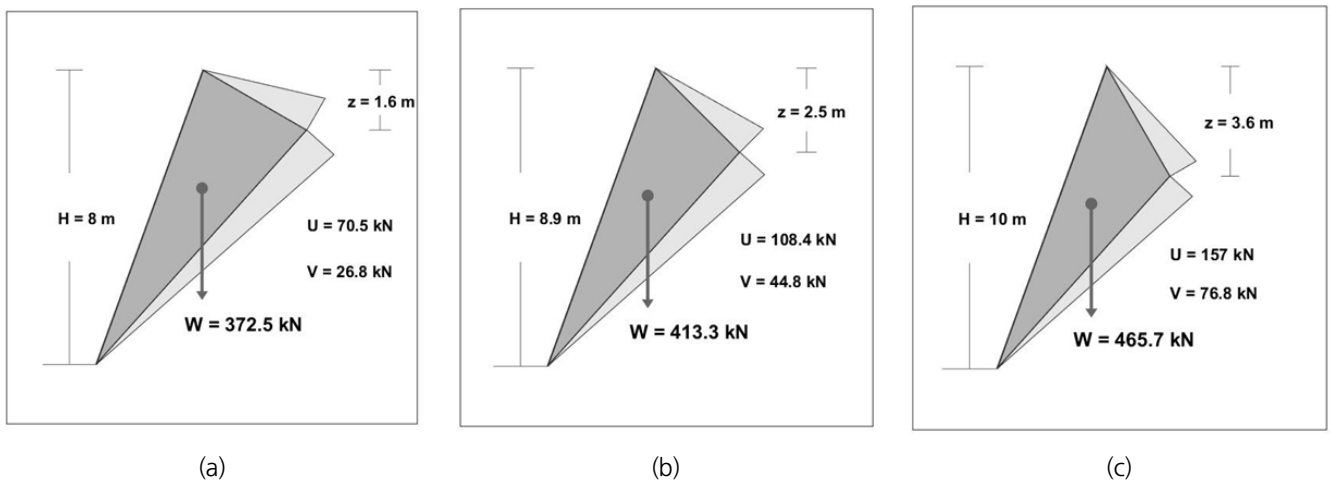


Fig. 13. Block weight and water pressures for the different dip of upper plane. (a) dip of block roof = 30°. (b) dip of block roof = 45°. (c) dip of block roof = 60°

미끄러짐 면의 점착력을 50 kPa로 설정하고 블록 상부면 경사 30°, 45° 및 60° 인 경우에 대한 안전율을 산정하였다. Fig. 10에 설정된 블록의 미끄러짐 면적은 일정하지만 형태적 특성에 따라 상부면 경사가 증가할수록 블록 규모가 커져 자중이 증가한다. 먼저 건조한 상태를 가정하여 안전율을 산정한 결과 경사 30°, 45° 및 60° 경우에 각각 2.08, 1.92 및 1.76으로 나타나서 블록 규모가 증가할수록 안전도가 감소한다(Fig. 14 참조). 블록 하중이 가장 큰 사각형 단면의 경우에는 안전율이 1.56으로 감소한다(Cho, 2018 참조). 삼각형 단면 상부에 지하수위가 형성될 경우에 대한 안전율 변화를 산정하였다. 블록 상부면 경사가 30°인 경우 최대높이 1.6 m 지하수압에 의해 안전율은 1.79로 감소된다. 경사 45° 및 60° 경우에는 최대높이 2.5 m 및 3.6 m 지하수압에 의해 안전율이 각각 1.51 및 1.2로 감소된다. 블록 상부면 경사 60° 경우와 동일한 최대수위를 갖는 사각형 단면의 경우 수압이 작용되는 면적이 감소되어 수압 V가 76.8 kN 에서 64.4 kN 으로 감소하였으나 안전율은 가장 낮은 수준인 1.16을 나타낸다(Cho, 2018 참조).

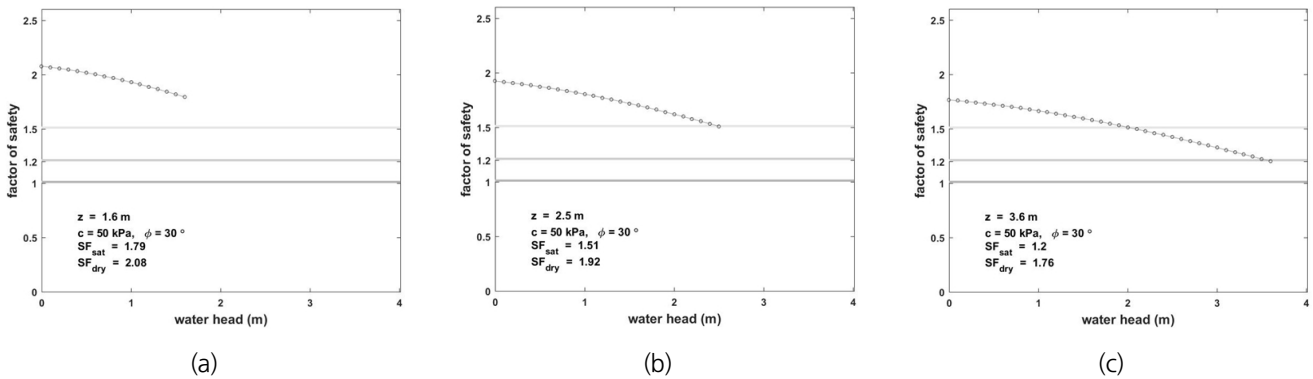


Fig. 14. Variation of safety factor with respect to the height of water head inside the upper plane of sliding block. (a) dip of block roof = 30°. (b) dip of block roof = 45°. (c) dip of block roof = 60°

외적하중인 지진파가 전달되었을 경우에 대한 사면 안정성을 고찰하기 위하여 지진계수(k_H)를 0.0 - 0.2 구간에서 변화시켜 건조 및 포화 상태에서의 안전율을 산정하였다. 안전성 해석은 Wyllie and Mah(2004)에 기술된 외적하중을 고려한 한계평형식을 기반으로 수행하였다. Fig. 15에 도시된 결과에 의거할 때 삼각형 단면의 평면파괴 블록은 지진계수가 증가할수록 안전율이 감소하며, 지하수위 변화의 경우와 동일하게 상부면 절리경사가 증가할수록 즉, 블록규모가 커져서 자체 하중이 증가할수록 안전율이 저하된다. 이러한 블록규모에 따른 안전율 저하양상은 $k_H = 0.2$ 조건에서 상부면 경사 60° 경우에 건조 및 포화상태 안전율이 각각 1.40 및 0.94에서 블록 규모가 제일 큰 사각형 블록의 경우 1.23 및 0.91로 저하되는 분석결과에 의해 확인된다.

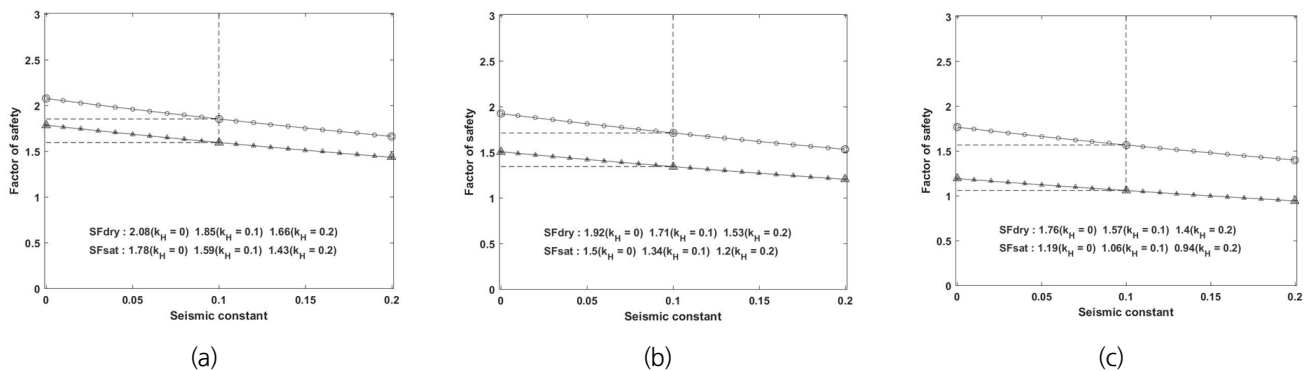


Fig. 15. Variation of safety factor with respect to the change of seismic load. (a) dip of block roof = 30°. (b) dip of block roof = 45°. (c) dip of block roof = 60°

5. 결론

암반사면에 대한 평사투영해석을 절리면의 미끄러짐 방향에 따라 직관적으로 수행할 수 있는 해석기법을 절리면의 최대경사벡터를 활용하여 개발하였다. 투영도 상에서 최대경사벡터 위치가 해당 불연속면의 미끄러짐 방향을 직접 지시하는 속성을 활용하여 극점을 사용할 경우에 도출되기 곤란한 파괴블록의 형성 가능성을 용이하게 도출하였다. 평면파괴의 경우 블록 옆면 및 상부면을 형성하는 절리면의 존재성을 파악하여 블록형상에 따른 거동 특성을 분석할 수 있었다. 블록의 상부면 경사에 따른 블록 자중의 증가 안전율에 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 분석되었으며, 수압 및 지진 효과를 고려하여도 블록의 미끄러짐 면적이 동일하게 유지될 경우 삼각형 단면 블록보다는 상대적으로 규모가 큰 사각형 단면 블록에서 평면파괴가 용이하게 발생하는 것으로 고찰되었다. 전도파괴의 경우에는 굴곡전도와 블록전도 예측에 필요한 저경사 절리면의 분포를 확인할 수 있었다. 썩기파괴의 경우 썩기 상부면을 형성하는 절리면을 도출하여 썩기거동에 대한 수리역학적 해석에 긴요한 썩기 모서리 선들의 방향성 자료를 용이하게 산정할 수 있었다.

사사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Barth T.W. 1948. Oxygen in rocks: A basis for petrographic calculation. *J. Geol.*, 56, 51-60.
- Barton N., Bandis S.C. and Bakhtar K. 1985. Strength, deformation and conductivity of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 22, No. 3, pp. 121-140.
- Cho T. 2018. A Study for the Optimum Joint Set Orientations and Its Application to Slope Analysis. *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE* Vol.28, No.4, 2018, pp.343-357.
- Cho T.F., Won K., You B. and Lee S. 2004. Application of a discontinuity orientation measurement drilling system to the characterization of an in situ rock mass and the prediction of cut-slope stability. *Int J Rock Mech Min Sci (SINOROCK 2004 Symposium)* Vol. 41, No. 3, pp. 503-504.
- Hoek E. and Brown E.T. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 106(GT9). pp. 1010-1035.
- Hoek E., Bray J. and Boyd J. 1973. The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. *Quart. J. Engng Geol.*, 6(1), pp. 22-35.
- Judd W. and Harber C. 1961, Correlation of rock properties by statical method. *Int. Sym. Mining Res.*
- Ladanyi B. and Archambault G. 1970. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. *Proc. 11th Symp. Rock Mech., AIME*, New York, 105-125.
- Mahtab M.A. and Yegulalp T.M. 1982. A rejection criterion for definition of clusters in orientation data. In *Issues in Rock Mechanics*, Proceedings of the 22nd Symposium on Rock Mechanics, Berkeley. R. E. Goodman and F. E. Heuze (eds),

- American Institute of Mining Metallurgy and Petroleum Engineers. New York. pp. 116-123.
- Priest S.D. 1985. Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics in Rock Mechanics George Allen and Unwin. London.
- Raax. 1997. Borehole Image Processing System Information. Sapporo, Japan.
- Read S., Richards L. and Cook G. 2003. Rock mass defect patterns and the Hoek-Brown failure criterion. Proc. 10th Cong. ISRM, South Africa. pp. 947-954.
- Shanley R.J. and Mahtab M.A. 1976. Delineation and analysis of clusters in orientation dat. Journal of Mathematical Geology Vol. 8, No. 3, pp. 9-23.
- Sjöberg J. 2000. Failure mechanism high slopes in hard rock. Slope Stability in Surface Mining. Society of Mining, Metallurgy and Exploration. Littleton, CO. pp. 71-80.
- Wyllie D.C. and Mah C.W. 2004. Rock Slope Engineering. Civil and mining 4th edition. Spon Press.
- Yoon K.S., Cho T.F., You B.O. and Won K.S. 2003. A new approach for borehole joint investigation - Development of Discontinuity Orientation Measurement drilling system. Proc. 10th Congress of the ISRM. pp. 1355-1358.