

셀 단위 평가법을 이용한 사면의 안정성 평가

장보안* · 풍보현 · 장현식

강원대학교 지구물리학과

Analysis of Slope Stability using Cell Unit Evaluation

Bo-An Jang*, Bo-Hyun Poong, and Hyun-Shic Jang

Dept. of Geophysics, Kangwon National University

기존의 사면안정성 평가는 전체 사면을 균질하다고 가정하고 사면 내에서 가장 위험한 부분의 안정성으로 전체 사면의 안정성을 평가한다. 그러나 하나의 사면 내에서도 위치에 따라 암반/토사의 특성과 상태가 각각 다르기 때문에 기존의 평가방법으로 분석한 사면의 안정성이 전체 사면의 안정성을 대표한다고 할 수 없을 뿐만 아니라 사면의 보강에 있어서도 과도한 보강을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 이 같은 문제를 해결하고자 하나의 사면을 격자형의 셀로 분할하여 각각의 셀의 특성을 조사하고 안정성을 평가하는 셀 단위 평가법을 제안하였다. 셀 단위 평가법에서는 사면을 구성 물질에 따라 토사사면과 암반사면으로 구분하며, 각각의 셀에 대해 강도, 체적절리계수(J_v), 절리간격, 지하수상태, 절리상태 등을 조사하고 이를 SMR 및 상태지수를 통해 안정성을 평가한 후 셀 별 조사 자료와 안정성 분석결과를 종합하여 작성된 등고선도를 통해 사면의 위치별 안정성을 평가하게 된다. 본 연구에서는 총 3개의 사면에 대해 셀 단위 평가법을 적용한 결과 대부분의 셀에서 계산된 SMR 값은 기존의 평가법에서 구한 사면 전체의 SMR 값보다 높았다. 이는 셀 단위 평가법이 기존의 평가법 보다 사면을 보다 정확하게 평가할 수 있음을 의미하며, 기존의 사면 평가법이 가진 과도한 보강과 관련된 문제를 해결 할 수 있을 것이라 판단된다.

주요어 : 사면, 안정성, 셀 단위 평가법, 상태지수, 등고선도

When we evaluate slope stability, we regard the slope homogeneous and evaluate slope stability at the most dangerous portion of slope. However, since conditions and properties of rock mass/soil are different from one location to another within a single slope, slope stability evaluated by current concept can not represent slope correctly. This also result in over-reinforcement at the portion where reinforcement is not necessary. In order to solve these problems, we suggest a cell unit evaluation method in which we apply small rectangular cells in a slope and regard each cell as a single slope. In this method, slopes are classified into soil slope and rock slope depending on materials. Strength of rock, volumetric joint count, spacing of joints, condition of joints, ground water condition and so on are examined and SMR and condition index values are calculated. Finally, all data and results are presented as contour maps. We apply the cell unit evaluation method into 3 cut slopes. SMR values estimated by the new method are larger than those by current concept at most portions of slope, indicating that the new method suggested by this research represent slope stability more correctly than methods which were used. This method will prevent over-reinforcement at the portion of slope where reinforcement is not necessary.

Key words : slope, stability, cell unit evaluation, condition index, contour map

서 론

일반적으로 사면의 안정성 평가는 사면의 형상적 요소

와 지질학적 요소들에 대한 조사와 분석을 통해 수행된다. 형상적 요소는 사면의 규모, 사면의 방향 및 경사 등을 포함하며, 지질학적 요소에는 불연속면의 특성, 구성

*Corresponding author: bajang@kangwon.ac.kr

물질, 지반강도 등이 있다. 이러한 요소들을 분석하여 사면의 안정성을 평가하는 방법으로는 운동학적(kinematic) 방법, 동역학적(kinetic) 방법, 경험적(empirical) 방법, 수치해석적(numerical) 방법 등이 널리 사용되고 있다.

운동학적 방법은 사면과 불연속면의 상대적 위치에 따른 기하학적인 파괴가능성 및 파괴형태를 판단할 수 있는 방법으로 사면과 불연속면을 평사투영하여 분석을 수행한다. 평사투영법은 1959년부터 많은 학자들에 의해 여러 차례 제안되었으나, 대원 투영법을 이용하여 암반사면의 안정성을 평가한 Hoek and Bray(1981)의 방법이 널리 사용되고 있다. 동역학적 방법으로는 한계평형해석이 널리 사용되고 있으며, 사면에 존재하는 파괴면을 따라 이동하려는 힘과 저항하는 힘의 비인 안전율로 사면의 안정성을 평가하는 방법이다(Fellenius, 1936; Bishop, 1955; Janbu *et al.*, 1956; Morgenstern and Price, 1965; Spencer, 1967). 한계평형해석은 사면의 특성 값들의 대푯값을 이용하여 하나의 안전율을 얻는 결정론적 방법과 특성 값들의 확률분포특성을 반영한 확률론적 방법(Priest and Brown, 1983)에 모두 사용되고 있다. 경험적 방법은 많은 사면에 대한 조사와 분석을 통하여 사면의 특성들이 안정성에 미치는 정도를 정량적으로 분석한 후, 각각의 특성들을 등급별로 점수화하고 종합하여 구한 값을 이용하여 사면의 안정성을 평가하는 방법이다. 가장 널리 사용되고 있는 방법은 SMR 법이 있으며(Romana, 1985), 각 나라와 기관별로 독자적인 경험적 평가법을 개발하여 사용하고 있다. 수치해석적 방법은 컴퓨터의 발달과 함께 주목 받고 있는 안정성 평가방법으로, 사면에서 조사된 특성 값들을 이용하여 다양한 방법의 진산수치해석을 통해서 사면의 안정성을 분석하는 방법이다.

지금까지의 사면안정성 평가는 앞에서 언급한 평가법들을 이용하여 전체적인 사면의 안정성을 평가하는데 초점을 맞추고 있다. 그러나 하나의 사면 내에서도 구성 물질, 강도, 풍화도, 절리상태 등이 위치별로 동일하지 않기 때문에 전체 사면의 안정성을 하나의 값으로 평가하는 기존의 평가방법에는 한계가 존재한다. 또한 기존의 연구에서는 사면을 구성물질에 따라 토사사면, 암반사면, 혼합사면으로 분류하여 안정성 평가를 수행하고 있다. 그러나 암반사면 혹은 토사사면으로 분류된 사면이라 할지라도 부분적으로 토사나 암반이 분포하는 경우에는 사면의 안정성 평가에 있어서 그 부분의 특성이 안정성 분석과정에서 배제되므로 평가결과에 오류가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 평가방법이

가지고 있는 문제를 해결하고자 셀(Cell)단위 평가법을 제안하고자 한다. 여기서 셀이란 사면을 정사각형 격자로 분할했을 때 각각의 격자 내의 영역을 의미하며, 셀 단위 평가법은 셀을 하나의 독립적인 사면으로 간주하여 조사와 안정성 분석을 수행한 후, 각 셀을 종합하여 전체 사면의 위치별 특성과 안정성을 분석하는 방법이다. 셀 단위 평가법을 시행하면 사면의 위치별 특성과 안정성의 변화양상이 상세하게 분석되고, 시각적으로 표현할 수 있다는 장점이 있으며, 암반사면이나 토사사면에 부분적으로 분포하는 토사나 암반 부분이 안정성 분석에서 배제되는 문제를 해결할 수 있다. 또한 셀 단위 평가법의 적용성을 분석하기 위하여 추천 인근의 3개 사면을 선정하여 기존의 사면 안정성 평가방법과 셀 단위 평가법을 동시에 적용한 후 각 평가법의 특징을 비교 분석하였다.

연구방법

사면의 셀 단위 평가법은 셀의 구성, 각 셀에 대한 조사 및 자료처리, 등고선도(contour map)의 작성 및 안정성 분석의 단계로 구성된다(Fig. 1).

셀의 구성은 먼저 사면을 분할할 셀의 크기를 결정하고 사면을 분할한 후, 각 셀의 위치에 따라 구분 가능한 고유번호를 부여한다. 이때 셀의 크기에 따라 자료의

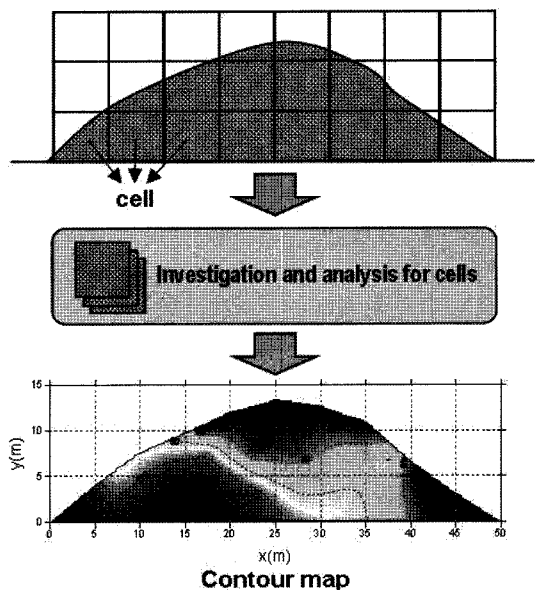


Fig. 1. Flow chart for cell unit evaluation method.

정밀도와 조사량 및 자료처리량이 결정되기 때문에 사면의 규모나 특성 조사 및 분석에 소요되는 시간을 고려하여 적절한 크기의 셀을 사용하여야한다.

셀을 구성한 후 각각의 셀을 하나의 사면으로 가정하고, 각각의 셀에 대하여 독립적인 조사를 수행한다. 셀은 구성 물질에 따라 토사 셀과 암반 셀, 토사와 암반이 혼재하는 혼합 셀로 분류되며, 암반 셀에는 SMR 분석을, 토사 셀에는 절토사면 상태평가법(국토해양부, 2003)을 이용하여 안정성 평가를 수행한다. Table 1은 암반 셀과 토사 셀에서 수행되는 조사 항목을 보여준다. 셀의 경사와 방향은 측면에서 원격으로 클리노콤파스를 이용해 측정하고, 암반강도는 셀 내의 대표적인 암반에 대하여 슈미트 햄머를 이용하여 반발계수를 측정하고 Miller(1965)의 경험식을 이용하여 구한다. 절리의 방향 특성은 셀의 크기가 작기 때문에 육안으로 대표절리군의 결정이 가능하고 한정된 조사시간을 고려하여 셀에 발달한 대표 절리군 만을 측정한다. 절리상태에 해당하는 연장성과 틈새는 휴대용 측정자를 이용하여 조사하고, 충전물, 풍화도, 거칠기, 습윤상태는 현장관찰과 프로파일 게이지를 이용하여 조사한다. 절리간격은 줄자를 이용하여 측정하고 조사된 절리간격으로부터 체적절리계수(Jv)를 계산하고, 이를 다시 RQD로 환산한다 (Palmstrom, 1982). 토층심도는 1m의 탐침봉을 이용하

여 수차례 측정된 후 평균값을 구하고, 토질조건 및 표면보호상태와 습윤상태는 현장관찰을 통해 등급을 구한다.

셀 조사를 통해서 획득된 자료를 이용하여 암반 셀에서는 운동학적 해석과 SMR 암반평가를 수행하고, 토사 셀은 국토해양부(2003)의 토사사면 상태평가기준을 이용하여 안정성 평가를 수행한다. 운동학적 해석은 셀의 암반부분에서 조사된 대표 절리군의 방향성 자료와 셀의 방향성 자료를 이용하여 평사투영해석으로 수행한다.

SMR 암반평가에서는 암반 셀과 혼합 셀에서 조사된 자료를 이용하여 RMR_{Basic}을 계산하고 불연속면의 방향성에 따른 보정계수를 적용하여 최종 SMR점수를 계산하였다.

토사 셀과 혼합 셀의 토사부분에 대한 안정성 분석에는 국토해양부(2003)의 토사사면 상태평가 항목인 토질조건, 사면경사, 표면보호, 붕괴이력의 등의 항목을 대상으로 상태평가를 수행하였다. 국토해양부(2003)의 절토사면 상태평가에서는 사면을 결합지수로 평가하게 되어 있으며, 이 결합지수는 0에서 1사이의 값을 가지며 0에 가까울수록 안전한 상태이고 1에 가까울수록 불안정한 상태로 인식하게 된다. 그러나 본 연구에서는 암반부분의 SMR 평가결과와의 비교를 위해서 결합지수와 반대되는 개념을 갖는 상태지수(Condition Index)를 도입하여 사용하였다. 상태지수는 '1-결합지수' 로서 0에 가까

Table 1. Items for Investigation of rock and soil cells.

Constituting materials	Items for investigation
Rock cells	orientation of cell and joint, characteristics of joint, RQD, strength of rock, groundwater conditions, weathering grade
Soil cells	orientation of cell, Depth of soil, characteristics of soil, groundwater condition, failure history, vegetation condition

Table 2. parameters and ratings for soil cells.

Items	class	class				
		a	b	c	d	e
① Soil condition	sand	Very dense	Dense	Medium dense	Lose	Very lose
	clay	Very stiff	Stiff	Medium stiff	Soft	Very soft
	score	8	6	4	2	0
② Angle of slope	degree	< 27	27~34	34~40	40~45	45
	score	8	6	4	2	0
③ state of slope surface	state	Good vegetation	Medium vegetation	Poor Vegetation	No Vegetation	
	score	4	3	2	0	
④ failure history	history	No history	Surface failure		Circular failure	
	score	2	1		0	

Condition Index = $\Sigma(①\sim④) / 22$

Table 3. Stability classes of SMR and condition index.

SMR class	V	IV	III	II	I
SMR / 100	0 - 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.6	0.6 - 0.8	0.8 - 1.0
Condition class*	E	D	C	B	A
Condition index	0 - 0.25	0.25 - 0.45	0.45 - 0.7	0.7 - 0.85	0.85 - 1.0

*Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2003)

Table 4. Properties of rock mass and joint in slope-1.

Parameter	Value	Parameter	Value
Rock strength (MPa)	37	Roughness	Smooth
RQD	73	Filling	Soft filling (>5mm)
Spacing (cm)	20	Weathering	Highly weathered
Persistence (m)	5	Groundwater condition	Damp
Aperture (mm)	10		

올수록 불안정한 상태를, 1에 가까울수록 안정한 상태를 나타낸다. Table 2는 본 연구에서 사용된 토사부분의 상태평가 항목과 상태지수 산출방법을 보여준다.

또한 본 연구에서는 많은 사면에서 암반과 토사가 함께 혼재되어 있는 것을 고려하여 암반과 토사에 대한 평가결과를 함께 비교할 수 있도록 암반 셀에서 계산된 SMR 값을 100으로 나누어 토사셀에서 계산된 상태지수와 함께 도시하였다. SMR 값의 백분율과 상태지수는 Table 3과 같이 5개의 안정성 등급으로 분류되며 등급별 점수 범위도 거의 유사하므로 안정성 분석에 두 평가결과를 함께 사용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.

각 셀에서 조사/분석된 결과는 셀의 각 위치좌표에 특성 점수로 표시되어, 최종적으로 6가지의 등고선도로 작성되었다. 등고선도의 종류에는 사면의 공학적 특성을 나타내는 암반강도 등고선도, RQD 등고선도, 토층심도 등고선도와 안정성 평가 결과를 나타내는 SMR 등고선도, 상태지수 등고선도, 종합평가 안정성 등고선도 등이 있다.

셀 단위 평가법의 현장적용

셀 단위 평가법의 적용성을 판단하기 위하여 실제 절토사면을 대상으로 셀 단위 평가법을 적용하였다. 평가가 실시된 사면은 총 3곳으로 강원도 춘천시와 홍천군, 화천군에 위치한 높이 8~16m, 길이 50~80m 정도의 가장 일반적인 규모의 도로 절토사면이다. 사면에 대한 평가는 전체사면을 대상으로 하는 기존의 평가방법과 이 연구에서 제안한 셀 단위 평가를 함께 수행한 후, 각각의 평가 결과를 비교 분석하였다.

사면-1

사면의 개요 : 강원도 춘천에서 홍천을 잇는 70번 지방도로 인근 절토사면으로서 길이 80m, 높이 16m의 규모를 가지며, 춘성층군에 속하는 흑운모 편암과 호상편마암이 혼재하여 분포한다. 사면의 경사방향은 322°이고 경사는 45°이며, 선조사와 무작위 조사를 이용하여 절리의 방향특성을 조사한 결과 3개의 절리군이 발달해 있으며, 각 절리군의 방향은 38/336(절리군 1), 80/283(절리군 2), 78/097(절리군 3)이다.

기존 평가법 적용 결과 : 사면에 분포하는 불연속면에 대하여 방향성 조사와 절리특성 조사를 실시하고 평사투영해석과 SMR 평가를 수행하였다. 평사투영해석을 실시한 결과는 절리군 1(38/336) 따라서 평면파괴 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 현장에서 측정된 절리의 특성과(Table 4) 방향성을 이용하여 계산된 SMR 값은 23점으로 분석되었다. SMR 값 23점은 IV등급의 '불안정'에 속하며, 체계적인 보강 슛크리트, 하단 벽 및/혹은 콘크리트, 재굴착 및 깊은 배수 등의 보강이 필요한 사면임을 의미한다(Singh and Goel, 1999).

셀 단위 평가법 적용 결과 : 사면을 가로 및 세로가 각각 5m인 격자로 분할하여 합계 40개의 셀을 구성하였고, 셀들은 구성 물질에 따라 18개의 암반 셀, 15개의 토사 셀, 7개의 혼합 셀로 분류되었다. 암반 셀에 대해서는 평사투영해석과 SMR 평가를 수행하였으며, 토사 셀에서는 상태평가를, 혼합 셀에 대해서는 암반 셀과 토사 셀에서 수행되는 평가방법들을 모두 적용하였다.

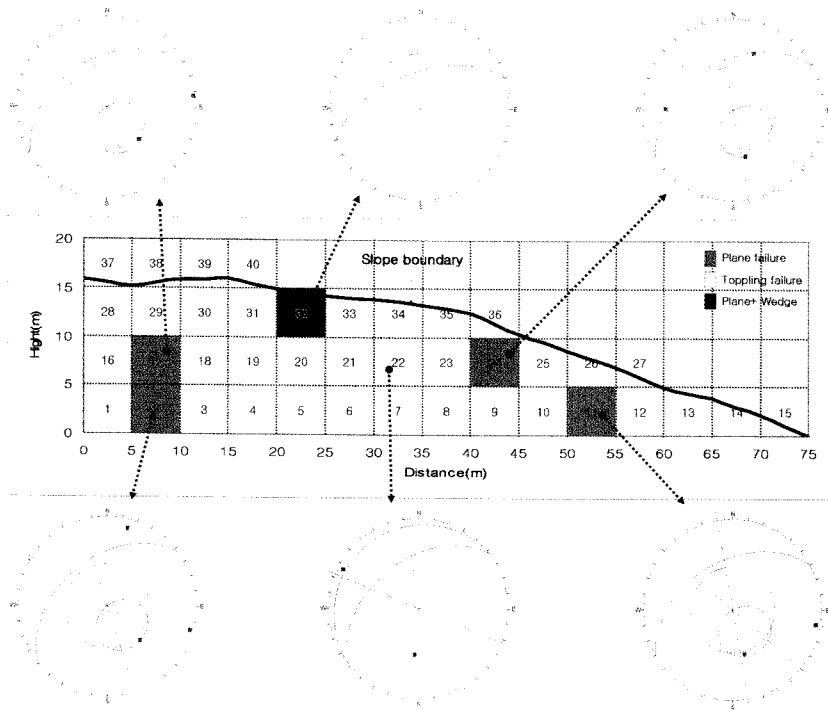


Fig. 2. Formation of cells and kinematic analysis of slope-1.

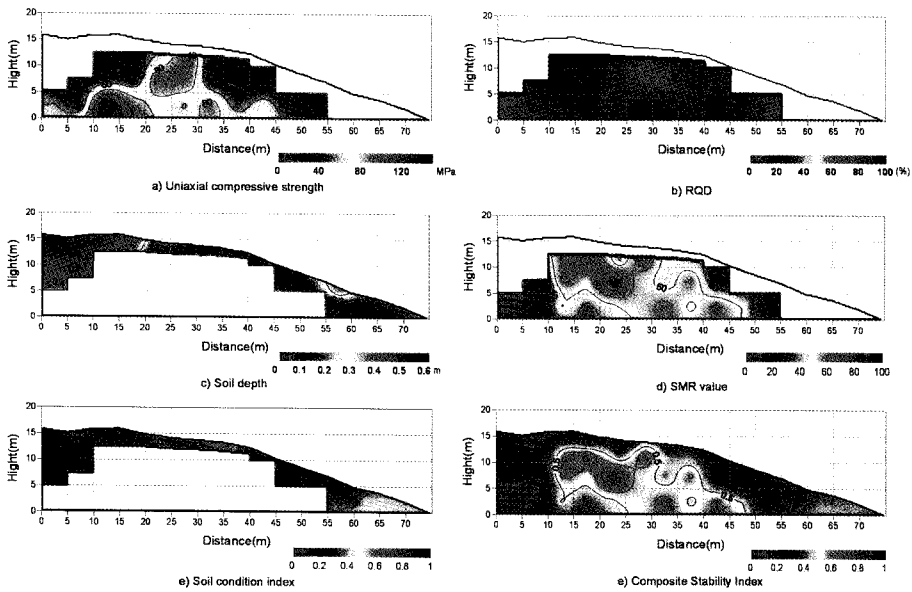


Fig. 3. Contour maps for slope-1.

Fig. 2는 셀의 구성과 암반 셀에 대한 평사투영해석 결과를 보여 주며, 6개의 셀에서 불연속면에 의한 기하학적 불안정성이 있는 것으로 분석되었다.

암석의 일축압축강도 분포는 Fig. 3(a)와 같으며 최대 152 MPa에서 최소 23 MPa의 범위를 보인다. 최대강도는 거리 10~15 m 영역에서 나타나고, 최소강도는 거리

Table 5. Properties of rock mass and joint in slope-2.

Parameter	Value	Parameter	Value
Rock strength (Mpa)	61	Roughness	Smooth
RQD	47	Filling	None
Spacing (cm)	10	Weathering	slightly Weathered
Persistence (m)	6	Groundwater condition	Dry
Aperture (mm)	5		

40~45 m, 높이 10 m 상부 영역에서 나타난다. 사면 중심 부분의 강도가 60 MPa 이상으로 토사와의 경계지역의 30 MPa 보다 상대적으로 강한 것으로 분석되었다. RQD는 최대 100에서 최소 71의 분포를 가지며 거리 0~10 m, 높이 0~5 m 영역, 거리 25~35 m, 높이 5~10 m 영역에서 RQD가 상대적으로 낮은 것으로 나타나, 절리가 다른 영역과 비교해 많이 발달해 있음을 보여주고, 거리 10~20 m 상부, 거리 25~35 m 하부영역은 RQD 값이 90 이상의 높은 값을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 3(b)). 토층심도는 최소 0.1 m에서 최대 0.5 m 범위 값을 가지며, 사면의 좌측 부분은 평균 0.5 m로 상대적으로 토층심도가 깊은 반면에 사면의 우측부분은 0.3 m 이하로 얕다(Fig. 3(c)). 토층심도는 토사부분에서만 값을 갖기 때문에 암반 부분은 토층심도 등고선도에서 흰색으로 나타난다.

암반 부분의 SMR 값은 최소 6점에서 최대 88점 사이로, 사면의 중심 부분이 토사와의 경계지역에 비해 상대적으로 높은 점수 즉 안전한 것으로 분석되었고, 거리 0~20 m, 높이 0~7.5 m 영역과 거리 40~55 m의 토사와의 경계영역에서는 SMR 점수가 40점 이하로 IV~V등급의 불안정에서 매우 불안정한 것으로 나타났다. 이 영역은 운동학적 분석을 통해 파괴의 가능성이 있다고 분석된 영역과 동일한 영역으로 SMR 평가시 안정성에 불리한 방향성을 가진 절리로 인해 낮은 SMR 점수를 획득한 것으로 판단된다(Fig. 3(d)).

토사부분의 상태지수는 최대 0.45에서 최소 0.05의 값을 가지며, 거리 0~15 m, 40~60 m 상부영역이 상대적으로 낮은 상태지수를 보여 불안정한 것으로 나타났는데 이는 다른 토사부분에 비해 표층유실의 붕괴이력이 존재하기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 3(e)).

Fig 3(f)는 SMR의 백분율과 토사의 상태지수를 함께 도시한 종합평가 안정성 등고선도로, 사면의 좌측지역과 우측의 상부지역이 0.3 이하로 불안정한 것으로 분석되었다. 이는 토사부분이 전반적으로 고각의 경사와 표면보호상태의 불량 및 표층유실의 붕괴이력으로 인하여 암반부분에 비해서 상대적으로 불안정하게 분석된 것이라

판단되며, 사면 중앙 상부지역의 경우는 안정성에 불리한 방향특성을 가진 절리가 발달해 있기 때문인 것으로 판단된다.

사면-2

사면의 개요 : 강원도 춘천에서 화천을 잇는 407번 도로상의 절토사면으로 행정구역상 강원도 춘천시 사북면에 위치한다. 사면은 길이 50 m, 높이 14 m 규모로 경사방향은 061°이나 사면의 좌측과 우측에서는 ±5° 정도의 변화를 보이며, 높이 10 m를 기준으로 하부는 52°, 상부는 62°의 경사를 갖는다. 3개의 절리군이 발달해 있으며, 각 절리군의 방향은 73/074(절리군 1), 82/090(절리군 2), 61/347(절리군 3)이다.

기존 평가법 적용 결과 : 평사투영해석 결과는 모든 절리면에서 파괴 가능성이 없는 것으로 분석되어, 주 절리군인 절리군 1의 절리특성을 사면의 대표값으로 결정하였다. 절리군 1의 특성과 암반의 특성은 Table 5와 같으며 SMR 값은 49점으로 분석되었다. SMR 값 49점은 III등급의 '부분적 안정'에 속하며, 체계적 볼트/앵커, 체계적 슛크리트, 하단 벽 및/혹은 채움(dental) 콘크리트 등의 보강이 필요한 사면임을 의미한다(Singh and Goel, 1999).

셀 단위 평가법 적용 결과 : 사면은 가로 및 세로 각각 5 m의 격자를 사용하여 총 23개의 셀로 분할되었고, 구성 물질에 따라 19개의 암반셀과 4개의 토사셀로 분류되었으며, 5번 셀에서 평면파괴의 가능성이 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 4는 각 항목의 등고선도를 보여준다. 일축압축강도는 10~192 MPa의 범위를 보이며, 사면의 좌측 하부에서 높은 강도를 보이는 반면에 사면의 우측과 상부는 풍화의 영향으로 인하여 상대적으로 낮은 강도를 보인다. RQD는 39~100의 분포를 가지며, 일축압축강도가 높은 영역에서 대체적으로 높은 값을 보이나 좌측 하단

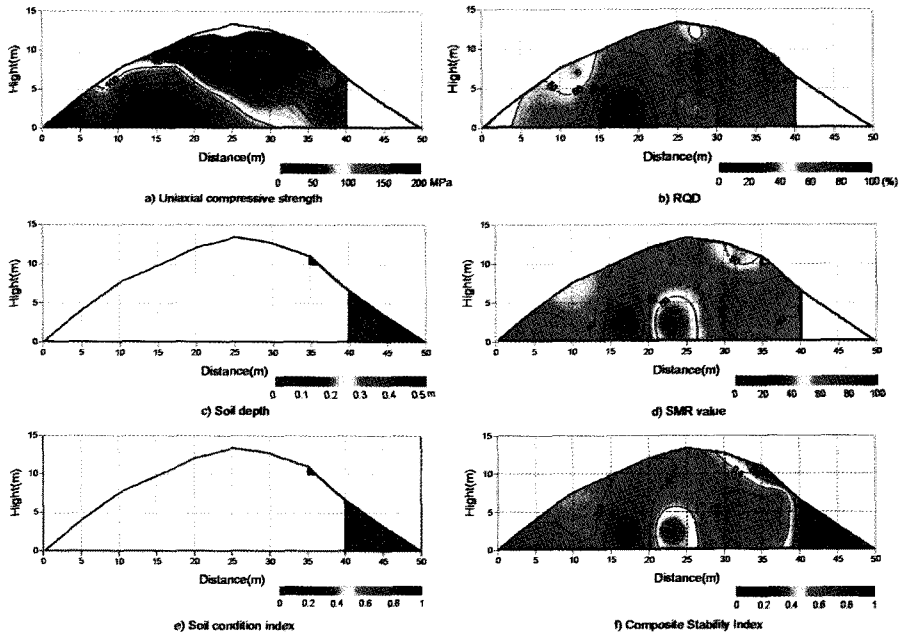


Fig. 4. Contour maps for slope-2.

Table 6. Properties of rock mass and joint in slope-3.

Parameter	Value	Parameter	Value
Rock strength (Mpa)	60	Roughness	Rough
RQD	50	Filling	Soft filling (< 5 mm)
Spacing (cm)	20	Weathering	Slightly Weathered
Persistence (m)	3.5	Groundwater condition	Damp
Aperture (mm)	10		

부에는 일축압축강도는 높은 반면에 RQD는 매우 낮은 50 이하의 값을 보인다. 토사는 거리 45~50 m 영역에 일부 존재하며 토층은 0.3 m에서 0.5 m의 깊이를 가진다.

SMR 점수는 23~96점 사이의 값을 가지며, 사면의 대부분의 영역에서 60점 정도의 값을 가진다. 일축압축 강도가 높은 영역에서 SMR 값도 높은 경향을 보이거나 인접한 5번 셀에서는 일축압축 강도와 RQD는 비교적 높은 값을 가지나 절리의 방향이 매우 불리하여 SMR 값이 40이하의 낮은 값을 나타내고 있다. 토사부분은 상태평가의 모든 항목에서 낮은 값을 보여 상태지수는 평균 0.04로 매우 불안정한 상태로 판단된다.

사면-3

사면의 개요 : 강원도 춘천에서 홍천을 잇는 56번 국도상의 절토사면으로 행정구역상 강원도 춘천시 동면 평

촌리에 위치한다. 사면은 길이 70 m, 높이 8.1 m 규모로 길이에 비해 높이가 낮은 소규모 사면에 해당하며 경사 방향은 225°이고 경사는 55°이다. 3개의 절리군이 발달해 있으며 각 절리군의 방향은 73/116(절리군 1), 24/281(절리군 2), 71/012(절리군 3)이고, 거리 35~50 m 구역에 3개의 단층이 관찰되었다.

기존 평가법 적용 결과 : 모든 절리군에서 파괴의 가능성이 없는 것으로 분석되어 주 절리군인 절리군1의 절리특성을 사면의 대푯값으로 결정하였다. 절리군 1의 절리의 특성과 암반의 특성은 Table 6과 같으며, SMR 값은 42점으로 분석되었다. SMR 값 42점은 III등급의 '부분적 안정'에 속하며, 체계적 볼트/앵커, 체계적 슛크리트, 하단 벽 및/혹은 채움(dental) 콘크리트 등의 보강이 필요한 사면임을 의미한다(singh and Goel, 1999).

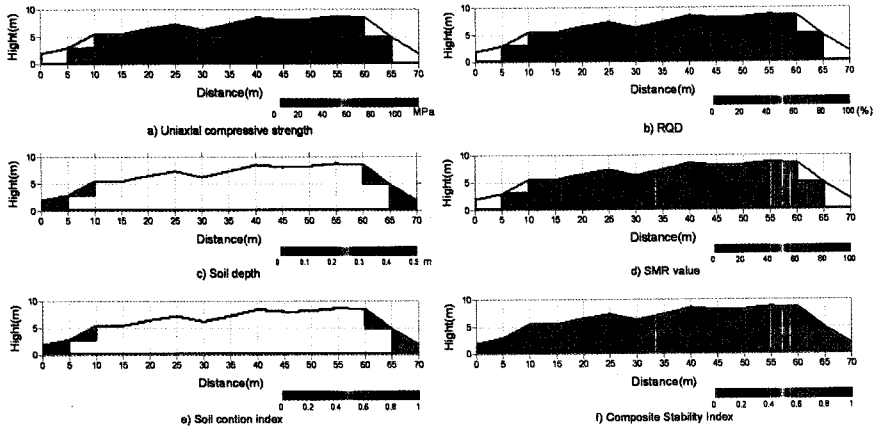


Fig. 5. The Contour maps for slope-3.

셀 단위 평가법 적용 결과 : 가로 및 세로 각각 5m의 격자를 사용하여 연구사면은 총 25개의 셀로 분할되었고, 셀의 구성 물질에 따라 21개의 암반셀, 4개의 토사셀로 분류되었으며, 평사투영해석결과 모든 셀에서 절리에 의한 파괴 가능성은 없는 것으로 분석되었다.

일축압축강도는 23~114 MPa 범위를 가지며, 좌측 중앙과 우측에서는 80 MPa 이상의 강도를 보이나 중앙부분은 단층의 영향으로 50 MPa 이하의 낮은 강도를 가진다(Fig. 5(a)). RQD는 최대 96에서 최소 62의 분포를 보이며 전체적으로 80정도의 값으로 나타나지만, 거리 30~60 m 하부영역에서는 단층의 영향에 의하여 60 이하의 상대적으로 낮은 값을 보인다(Fig. 5(b)). 토사는 사면의 좌측과 우측의 경계를 따라 소규모로 분포하고, 토층심도는 최소 0.15m에서 최대 0.5 m 사이의 값을 가지며 사면의 좌측에 비해 우측의 토층심도가 상대적으로 더 깊은 것으로 나타났다(Fig. 5(c)).

SMR 점수는 37~70점의 값을 가지며 사면의 좌측 영역이 평균 60점 이상으로 II등급에 해당하나, 그 외의 영역에서는 단층의 영향으로 III등급의 부분적 안정에 해당한다(Fig. 5(d)). 토사부분의 상태지수는 최대 0.6에서 최소 0.2로 나타났으며 거리 60~65 m, 높이 5~10 m 영역

에서 표층유실의 붕괴이력이 존재하여 평균 0.3으로 다른 토사부분에 비해 불안정한 것으로 분석되었다(Fig. 5(e)).

셀 단위 평가방법과 기존 평가방법의 비교

Table 7과 Fig. 6은 사면의 셀 별 SMR 등급과 종합 등고선도를 보여준다. 사면-1의 경우 기존의 사면 평가방법으로 분석한 SMR 등급은 IV 등급인 반면에 셀 단위 평가법을 이용하여 평가한 SMR 등급은 I 등급 셀이 1개, II 등급 셀이 7개, 3등급 셀이 10개, IV 등급 셀이 4개, V 등급 셀이 3개로, 기존의 사면 평가방법으로 분석한 SMR 등급과 동일한 영역은 단지 16%에 불과하고 사면의 72%에 해당하는 영역은 기존의 평가방법보다 높은 값을 보이는 반면에 12%의 영역은 낮은 등급을 보여 기존의 사면 평가방법과 상당한 차이를 보인다. 사면의 보강 대책에도 상당한 차이를 보여, 기존의 사면 평가방법에 의하여 이 사면을 보강할 경우 72%의 영역에서 과대보강이, 12% 영역에서는 부족한 보강이 실시될 수 있음을 지시한다. 또한 사면-1은 암반 사면으로 분류되어 기존의 사면 평가방법에 의하면 토사 부분의 안정성이 누락된다. 그러나 셀 단위 평가법을 이용한 중

Table 7. Comparison of SMR classes using conventional method and cell unit evaluation method.

site	Conventional method (SMR class / value)	Cell unit evaluation method (No. of cells in each SMR class)				
		I	II	III	IV	V
slope-1	IV / 23	1	7	10	4	3
slope-2	III / 49	1	8	9	1	0
slope-3	III / 42	0	8	13	1	0

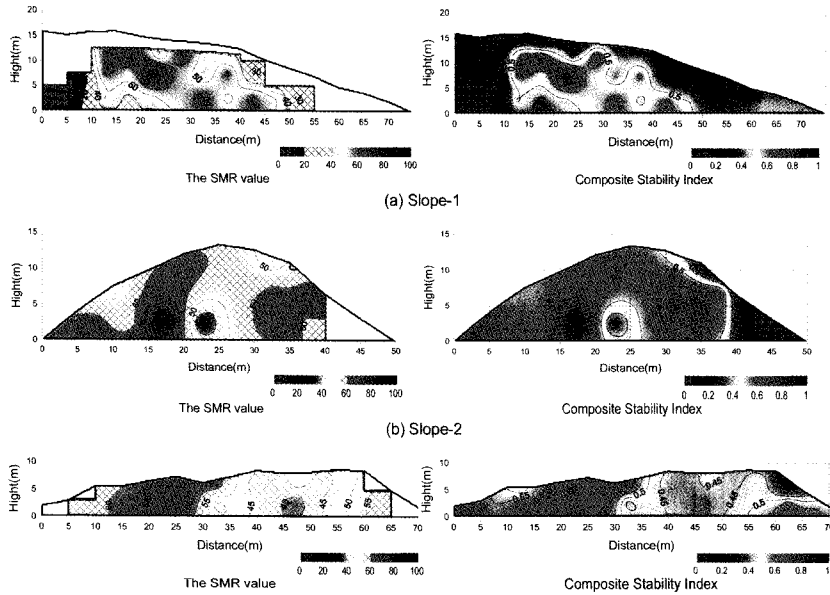


Fig. 6. Contour maps of SMR value and composite stability index. Areas of cross lines are the same SMR classes analyzed by slope stability of current concept and this research.

함 등고선도에 의하면 토사 부분의 안정성이 암반 부분의 안정성보다 낮아서 토사 부분에 대한 보강 대책이 시급한 것으로 판단된다. 사면-2의 경우 셀 단위 평가법을 이용한 SMR 등급은 47.4%의 영역에서 기존의 사면 평가방법보다 높은 등급을 보이고, 사면-3의 경우 36%의 영역에서 기존의 사면 평가방법보다 높은 등급을 보여 모든 사면에서 셀 단위 평가법이 사면의 상태나 안정성을 정확히 평가할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 사면-2와 사면-3에서도 암반이 전체의 대부분을 차지하고 있어서 기존의 사면 평가방법에서는 토사의 안정성이 누락되지만, 토사의 안정성이 매우 낮아서 토사 부분에서의 붕괴가 우려되어 토사에 대한 보강 대책이 필수적인 것으로 판단된다.

결론 및 고찰

지금까지의 사면 안정성 평가는 전체적인 사면의 안정성 평가에 초점을 맞추어 사면에서 가장 불안정한 상태를 보이거나 가장 대표적인 지반특성을 보이는 구간에 대하여 제한된 규모의 선(scanline)조사나 창(window) 조사를 수행하여 하나의 대표 안정성을 제시하였다. 이러한 조사 방법은 시간이나 비용면에서는 효율적인 반면에 ① 사면 전체의 지반특성을 파악할 수 없으며 ② 대표적인 지반 특성을 보이는 지점을 조사자가 주관적으

로 선정하므로 조사자의 전문성에 따라 사면 평가의 결과가 좌우될 수 있는 단점이 있고 ③ 조사된 지반특성이 전체사면에서 동일하지 않을 수도 있기 때문에 분석된 안정성이 전체 사면을 대표하지 못하는 경우도 있다. 이 연구에서는 이러한 기존의 사면 평가방법의 문제점을 인식하고 사면의 위치별 안정성을 평가할 수 있는 셀 단위 평가방법을 제안하였다. 셀 단위 평가방법은 시간이나 비용이 많이 소요되는 단점이 있으나 사면전체의 지반특성이 파악되고, 사면 전체에 대한 보다 객관적이고 상세하며 신뢰성 있는 자료와 평가결과를 얻을 수 있으며, 등고선도를 통하여 전체 사면의 지반 특성 및 안정성을 시각화 시킬 수 있다는 장점이 있다.

제안된 셀 단위 평가법의 적용성을 판단하기 위하여 3개의 절토사면을 대상으로 기존의 사면 평가방법과 이 연구에서 제안한 셀 단위 평가를 함께 수행한 후, 각각의 평가 결과를 비교 분석하였다. 셀 단위 평가법에 의하여 분석된 SMR 등급은 사면의 36~72% 영역에서 기존의 사면 평가방법에 의하여 분석된 SMR 등급보다 1등급~3등급의 높은 등급을 보여 셀 단위 평가법이 사면의 안정성을 보다 정밀하고 정확하게 평가하는 것으로 판단된다. 위의 결과는 기존의 사면 평가방법에 의하여 분석된 결과를 바탕으로 보강이 이루어질 경우 사면의 많은 영역에서 과도한 보강이 실시될 수 있음을 지시하여, 셀 단위 평가방법이 조사나 분석 시 기존의 사면

평가방법보다 시간과 비용이 추가로 소요되어도 훨씬 경제적임을 보여준다. 또한 셀 단위 평가법에서는 사면 전체에 대한 종합적인 안정성을 평가하고 시각화하기 위하여 암반 부분의 SMR 값을 백분율로 환산하여 토사 부분의 상태지수와 함께 도시하는 방법을 제안하였고, 사례분석을 통하여 상대적인 비교가 가능함을 확인하였다. 그러나 SMR 등급과 상태지수 등급이 동일하여도 암반부분의 보강대책과 토사부분의 보강대책이 상이하여, 이 부분에 대하여는 추가적인 연구가 필요할 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

- 국토해양부(건설교통부), 2003, 절토사면 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침, 66-76.
- Bishop, A. W., 1955, The use of slip circles in the stability analysis of earth slopes, *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Fellenius, W., 1936, Calculation of the stability of earth dams, transactions of the 2nd congress on large dams, international commission on large dams of the world power conference, 4, 445-462.
- Hoek, E. and Bray, J. W., 1981, *Rock slope engineering*, 3rd eds., Inst. Min. and metall, London. 358p.
- Janbu, N., Bjerrum, L. and Kjaernsli, B., 1956, Soil mechanics applied to some engineering problems, Norwegian Geotechnical Institute Pub. No. 16, 93p.
- Miller, R. P., 1965, Engineering classification and index properties for intact rock, Ph. D. Thesis. Univ. Ill., 332p.
- Morgenstern, N. R. and Price, V. E., 1965, The analysis of the stability of general slip surfaces, *Geotechnique*, 15(1), 79-93
- Palmstrom, A., 1982, The volumetric joint count- A useful and simple measure of the degree of rock jointing, *Proceeding of 4th Int. Cong. IAEG, Delhi, V21-V228*.
- Priest, S. D. and Brown, E. T., 1983, Probabilistic stability analysis of variable rock slopes, *Trans. Instn Mining & Metallurgy, (sect A)*, 92, 1-12.
- Romana, M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, *Int. Sym. on the Role of Rock Mechanics, Zacatecas*, 49-53.
- Singh, B. and Goel, R. K., 1999, *Rock mass classification - A practical approach in civil engineering*, Elsevier, 267p.
- Spencer, E., 1967, A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces, *Geotechnique*, 19(1), 11-26.

2008년 10월 20일 원고접수, 2008년 12월 11일 게재승인

장보안

강원대학교 지구물리학과
200-701, 강원도 춘천시 효자동 192
Tel: 033-250-8583
Fax: 033-244-9276
E-mail: bajang@kangwon.ac.kr

풍보현

강원대학교 지구물리학과
200-701, 강원도 춘천시 효자동 192
Tel: 033-244-9275
Fax: 033-244-9276
E-mail: begawind@hanmail.net

장현식

강원대학교 지구물리학과
200-701, 강원도 춘천시 효자동 192
Tel: 033-244-9275
Fax: 033-244-9276
E-mail: whitenull@kangwon.ac.kr