

불연속면의 비선형 전단강도를 이용한 암반사면 썩기파괴 확률 해석

Wedge Failure Probability Analysis for Rock Slope Based on Non-linear Shear Strength of Discontinuity

윤 우 현*¹ Yoon, Woo-Hyun

천 병 식*² Chun, Byung-Sik

Abstract

The stability of the designed rock slope is analysed based on two kinds of shear strength model. Besides the deterministic analysis, a probabilistic approach on Monte Carlo simulation is proposed to deal with the uncertain characteristics of the discontinuity and the results obtained from two models are compared to each other. To carry out the research of characteristics of the discontinuity, BIPS, DOM, Scanline survey data and direct shear test data are used, and chi-square test is used for determining the probability distribution function. The rock slope is evaluated to be stable in the deterministic analysis, but in the probabilistic analysis, the probability of failure is more than 5%, so, it is considered that the rock slope is unstable. In the shear strength models, the probability of the failure based on the Mohr-Coulomb model(linear model) is higher than that of the Barton model. It is supported by the fact that the Mohr-Coulomb model is more sensitive to block size than the Barton model. In fact, there is no reliable way to estimate the unit cohesion of the Mohr-Coulomb model except for back analysis and in the case of small block failure in the slope, Mohr-Coulomb model may excessively evaluate the factor of the safety. So, the Barton model of which parameters are easily acquired using the geological survey is more reasonable for the stability of the studied slope. Also, the selection of the proper shear strength model is an important factor for slope failure analysis.

요 지

암반사면의 대표적인 파괴유형인 썩기파괴에 대한 확률론적 안정 해석 수행 과정에서 가장 주요한 불연속면의 특성인 전단 강도에 대해 Mohr-Coulomb 모델에 의한 선형적 강도특성과 Barton 모델에 의한 비선형적 강도특성이 사면의 안정성 해석에 주는 영향을 비교하고자 하였다. 사면 안정성 해석의 방법으로 결정론적 해석과 Monte Carlo Simulation을 이용한 확률론적 해석을 수행하였으며, 불연속면의 통계적 분석을 수행한 후 χ^2 검증을 통해 분포함수를 검증하였다. 해석 대상 사면은 중앙선 ○○공구로, 불연속면의 특성을 파악하기 위해 BIPS, DOM, Scanline, 절리면 직접전단 시험자료를 사용하였다. Mohr-Coulomb, Barton 모델에 의한 결정론적 해석 결과는 모두 안정한 것으로 나타났다. 확률론적 해석 결과 두 모델 모두 5% 이상의 파괴확률을 나타냄으로서 잠재적인 불안정성을 가지는 것으로 평가되었다. 또한 Mohr-Coulomb의 모델이 Barton의 모델보다 더 큰 파괴확률을 가지는 것으로 나타났다. 불연속면의 전단강도 정수 산정시 Mohr-Coulomb의 모델은 한정된 실내시험 자료를 가지게 되고, 정확한 점착력의 산정이 어려운 점, 파괴블록의 규모가 작은 경우 안전율이 지나치게 과대 평가될 가능성 등이 있으므로, 합리적인 사면 안정성 해석을 위해서는 강도정수 산정시 적절한 모델 선택이 중요하다.

Keywords : Barton model, Discontinuity, Mohr-Coulomb model, Non-linear model, Probability of failure, Rock slope, Wedge failure

*1 정희원, 경원대학교 산업·환경대학원 교수 (Member, Prof., Graduate Sch. of Indus. Study & Environ. Sci., Kyungwon Univ., ywh@mail.kyungwon.ac.kr)

*2 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

1. 서론

암반사면의 안정성은 불연속면의 특성과 발달정도에 많은 영향을 받으며, 이에 대한 분석 또한 많은 지질공학자들에 의해 다루어지고 있다. 그러나 불연속면의 특징은 하나의 대표값으로 표현하기에 많은 불확실성을 내포하고 있으므로, 불연속면에 대해 통계적 기법을 도입, 확률통계론을 이용하여 불규칙하고 다양하게 분포하는 불연속면 특성들을 정량화 하는 연구가 많이 진행되고 있으며, 이를 이용한 암반사면의 파괴확률 해석이 수행되고 있다(배규진, 박혁진 2002; Feng and Lajtai 1998; Park and West, 2001).

사면의 안정성에 대한 확률 해석은 정밀확률 해석에 해당하는 Monte Carlo Simulation, 근사 확률 해석에 해당하는 FOSM(first order second moment method), PEM(point estimate method) 등이 사용되고 있으며(김형배, 이승호 2002), 본 연구에서는 Monte Carlo Simulation을 사용하여 해석을 수행하였다.

암반 사면해석에서 불연속면의 전단강도 특성에 대한 결정이 중요한 요소가 된다. 전단강도 특성은 대부분 Mohr-Coulomb의 선형적 전단강도 특성의 분포함수가 많이 이용되고 있으며(배규진, 박혁진 2002; Feng and Lajtai 1998; Low, 1997), Barton(1976)의 비선형 전단강도에 대한 해석은 수행된 예가 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 파괴면이 선형적 전단강도 특성을 보이는 경우와 비선형적 전단강도 특성을 보이는 경우를 비교, 분석하였으며, 썩기파괴의 경우에 한하여 해석을 수행하였다.

2. 암반사면 안정성 해석을 위한 통계적 기법

2.1 불연속면 특성의 확률 변수

불연속면의 방향성 : 불연속면에 대한 자료는 일반적으로 조사선이나 BIPS(borehole image probe system) 조사를 통해 얻게 되며, 이때 scanline 방향에 대해 sampling의 편차가 발생하게 된다. 즉, 수평한 scanline 조사에서 이에 유사한 방향성을 가진 불연속면들은 조사선과 교차할 확률이 적어지고 수직한 방향성을 가진 불연속면은 많은 교차점을 가지게 된다(Priest, 1993). 이러한 sampling bias에 의한 오차의 보정을 위해 Terzaghi(1965)는 조사선과 불연속면 수선의 교각 관계를 이용하여, 일정 방향의 조사선이 있을 때 이를 따라 조사선과 불연속면이

교차할 확률을 P_s 라 하고, 임의 불연속면의 면적을 A, 불연속면의 수선과 조사선의 예각을 δ 라고 하고 조사선이 조사선이 불연속면과 교차할 최대의 확률을 P_{sm} 이라고 하면 $\delta=0$ 이므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{P_s}{P_{sm}} \propto \frac{A \cos \delta}{A} = \cos \delta \quad \therefore w = \frac{1}{\cos \delta} \quad \delta < 90^\circ \quad (1)$$

$$\cos \delta = |\cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos \beta_n \cos \beta_s + \sin \beta_n \sin \beta_s| \quad (2)$$

여기서, α_n = 조사선의 trend α_s = 불연속면의 trend
 β_n = 조사선의 plunge β_s = 불연속면의 plunge

결과적으로 불연속면에 대한 가중치의 선정은 δ 값의 선정에 따라 큰 편차를 보이게 된다(Priest, 1993). Yow(1987)은 방향성 측정의 오차(ϵ), 최대 가중치 오차($w_{s,max}$)의 관계를 아래와 같이 나타내었다.

$$w_{s,max} = \left(\frac{\cos \delta}{\sin(90 - \delta - \epsilon)} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

최대 가중치 오차를 10%로 두고 측정 오차를 1°로 두면 δ 값은 79°가 되며, 따라서 불연속면 자료들에 대한 평사투영 해석시 Minimum Bias Angle은 11°가 된다. 즉 가중치의 최대값은 5.2를 넘지 않는다.

일반적으로 공간상에 분포하는 방향 자료의 통계적 분포는 Fisher분포(Fisher, 1953)와 Bingham분포(Einstein and Baecher, 1983) 등을 따르는 것으로 보고된 바 있다. 본 연구에서 측정된 불연속면의 공간적 분포는 Fisher분포를 따르는 것으로 가정하였다. Fisher분포의 확률밀도함수 $f(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta e^{K \cos \theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (4)$$

Fisher 함수에서 상수 K는 불연속면의 군집도(degree of clustering)를 나타내는 것으로 K가 클수록 군집도가 높아짐을 의미하며, 대부분의 경우 K값이 5를 넘게 된다(Fisher, 1953). v_n 이 참값에 대해 θ 만큼의 방향으로 분포할 확률을 $P_r(>\theta)$ 라 하고, 자료의 수가 충분히 클 때 θ 를 도출하면 다음과 같다.

$$\cos \theta \approx 1 + \frac{\ln(1 - P_r(<\theta))}{K|r_n|} \quad (5)$$

$P(<\theta)$ 를 θ 값에 따른 누적 확률 분포로 나타내면 그림 1과 같으며, 95%의 신뢰구간에서 K값이 커짐에 따라 θ 값의 범위가 줄어드는 것을 보여주고 있다.

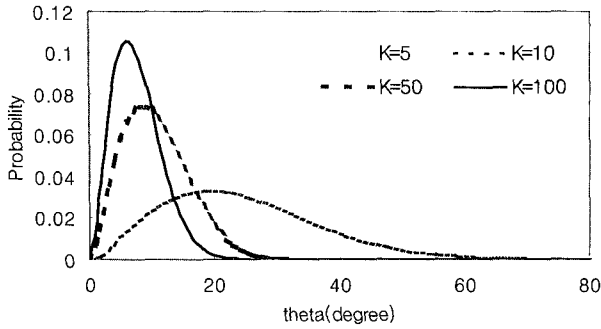


그림 1. K값의 변화에 따른 θ 의 확률 분포

모든 불연속면의 조합을 고려한 정상적인 안정성 해석은 경우의 수가 많기 때문에 현실적으로 적용이 곤란하다. 따라서 불연속면군을 설정하고 이의 대표값을 선정하여 해석하게 된다. Shanley and Mahtab(1976)과 Mahtab and Yegulalp(1982)는 무작위의 불연속면의 pole 중 t 개가 v 간격 크기에서 모일 확률은 Poisson 분포를 따른다고 하였다.

$$P(t, v) = \frac{e^{-\lambda v} (\lambda v)^t}{t!} \quad (\lambda : \text{빈도수}) \quad (6)$$

ψ 내에 n 개의 불연속면이 plot될 확률 $P(>t, c)$ 는 다음과 같다.

$$P(>t, c) = 1 - \sum_{j=0}^t \frac{e^{-nc} (nc)^j}{j!} \quad (7)$$

따라서, 200개의 불연속면이 있다면 $\psi = 15^\circ$ 내에서 t 개의 불연속면이 하나의 군내에 유의 수준 0.05로 plot될 확률을 위 식에서 구하면 적어도 11개의 불연속면이 하나의 군내에 포함되어야 한다.

불연속면의 기타 특성 : 불연속면의 분석은 기본적으로

로 앞서 언급한 것과 같이 동일한 방향성을 갖는 불연속면군을 기준으로 수행되며 이때 불연속면의 분포특성을 결정하는 중요한 요인으로 간격을 들 수 있다. 따라서 불연속면을 수 개의 군으로 선정한 후 각 군별로 불연속면의 특성을 통계적으로 분석하였다.

한 불연속면군 내에서 측정된 한 불연속면과 인접한 다른 불연속면과의 거리를 S_s , 실제간격을 S_n 이라고 하면 다음 관계식이 성립된다.

$$S_n = S_s \cdot \cos\delta = | \cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos\beta_n \cos\beta_s + \sin\beta_n \sin\beta_s | \quad (8)$$

간격과 달리 3차원 공간상에 분포하는 불연속면의 연장(크기)을 정확히 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 이는 불연속면의 실제모양과 공간상 분포특성을 규정하는 것이 거의 불가능하기 때문이며, 일반적으로 조사기법에 따라 불연속면의 trace length나 areal density 등이 척도로 사용된다. 여기서는 불연속면의 평균 연장성을 추론하기 위해 full trace length를 이용한 추론을 사용하였다.

기존의 연구자료에서 대부분 이들의 확률 분포함수는 자료의 제한성으로 인해 정규분포를 따르는 것으로 규정하는 경우가 많았으나, 본 연구에서는 scanline 조사를 통해 이들의 함수를 직접적으로 규명하고자 하였다. 불연속면 특성의 확률분포함수(Probability Distribution Function : PDF)는 많은 사람들의 연구 결과 음지수 분포(Hudson and Priest, 1979; Wallis and King, 1980; Baecher, 1983; Priest, 1993), 대수정규 분포(Narr and Suppe, 1991), 프랙탈 분포(Barton and Zoback, 1990; Samis et al, 1987) 등을 따르는 것으로 보고된 바 있다.

2.2 확률밀도함수(PDF)의 검증

일반적으로 확률밀도함수를 검증하기 위하여 best fit

표 1. 간격등급 0.02m에서의 χ^2 검증 예(유의수준 0.05 적용)

실제 값		음지수 분포		대수 정규 분포	
간격등급	실측치(빈도)	기대값(빈도)	χ^2	기대값	χ^2
0.02	37	57.17	7.12	44.80	1.36
0.04	46	44.45	0.05	57.54	2.31
0.06	42	34.56	1.60	40.55	0.05
중 략					
0.56	0	0.06	0.06	0.27	0.27
0.58	1	0.05	18.12	0.24	2.44
0.6	0	0.04	0.04	0.21	0.21
합 계	257	257	48.99	257	29.30
자유도		28 (41.34)		27 (40.11)	
검증결과		부적합		적합	

curve를 이용하는 방법과 χ^2 검증을 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 각 불연속면의 특성이 어떤 특정 함수를 따른다는 가정 하에 몇 가지의 알려진 분포함수를 선정 한 후, 이중에서 가장 적합한 함수를 선택하는 방식을 적용하기 위해 χ^2 검증을 이용하였다.

이를 위해 연속형의 확률분포함수를 이산형의 등급으로 나누어 각 등급별로 적분하여 기대값을 얻었으며, 이를 실측치와 비교한다. χ^2 검증의 예는 표 1과 같다. 표 1의 검증결과를 보면, 음지수 분포의 χ^2 값은 48.99 이고, 이 값은 기각 영역치 41.34 보다 크므로 기각되어 대수정규분포에 적합한 것으로 나타난다.

2.3 파괴확률의 산정

2.3.1 결정론적 해석기법

결정론적 해석기법은 해석에 사용되는 많은 입력변수들에 대해 하나의 고정된 대표값을 산정해 한계평형 해석이론에 근거하여 안정성 해석을 수행하는 것이다. 쉐기파괴를 이루는 두 불연속면을 각각 A, B라고 하고 보다 완만한 경사를 가지는 불연속면을 A라고 할 때 사면의 안전율은 다음과 같다(Hoek and Bray, 1995).

$$F = \frac{3}{\gamma H} (C_A X + C_B Y) + (A - \frac{\gamma_w}{2\gamma} X) \tan \phi_A + (B - \frac{\gamma_w}{2\gamma} Y) \tan \phi_B \quad (9)$$

여기서, C_A, C_B : A면과 B면의 절리면 점착력
 ϕ_A, ϕ_B : A면과 B면에서의 절리면 마찰각
 H : 쉐기의 전체높이 γ : 암석의 단위중량
 γ_w : 물의 단위중량
 X, Y, A, B : 쉐기의 기하형상에 좌우되는 무차원 요소

2.3.2 사면의 파괴 확률 해석

암반사면의 안정성해석은 미끄러짐을 발생시키려는 힘과 이에 저항하려는 힘의 비율로 나타낸다. 이때 저항력을 C(Capacity)로, 파괴를 발생시키려는 힘을 D(Demand)로 표현하는데 이 두 힘을 결정하기 위해 이용되는 매개변수들이 확률 변수이며 따라서 C와 D역시 확률변수로 고려한다.

일반적으로 C와 D의 차이를 SM(Safety Margin)라고 하며 $C-D \leq 0$ 인 경우 파괴가 발생하게 된다. 이를 그래프로 표현하면 다음 그림 2와 같다.

그림 2에서 C와 D 확률분포함수에서의 각각 대표값들을 비교하게 되면 일반적인 결정론적 해석을 수행하게 되며, 그림 2(a)에서와 같이 $C/D \geq 1.0$ 이 되므로 안정한 것으로 판단하게 된다. 그러나 각각의 분포함수를 고려할 때 $C/D \leq 1.0$ 혹은 $C-D \leq 0$ 가 되는 영역이 존재하게 되며 이는 각 분포함수의 분산정도에 따라 아주 높은 파괴확률을 가질 수도 있게 된다. 따라서 결정론적 해석에서의 안전율이 1.0이상인 것이라고 해서 대상사면이 안정하다고 할 수는 없게 된다.

본 연구에서 적용한 파괴확률의 해석은 불연속면 방향성과 사면의 방향성의 관계에 의한 운동학적 해석과 불연속면의 전단강도 특성과 암반에 작용하는 힘을 고려한 해석을 실시하였으며, 이들의 파괴확률을 곱하여 전체 사면의 파괴확률을 계산하였다(배규진, 박혁진, 2002).

파괴확률에 대한 안정성 판단의 평가기준은 아직 국내에서 정해진 바가 없으며, 결정론적 해석에서의 안전율과 같은 절대적인 평가기준이 성립될 수가 없다. 여기서는 여러 연구 중 보수적인 조건을 적용하여, 파괴확률 $P > 5\%$ 를 사면의 허용 파괴확률로 적용하였다(Smith, 1986).

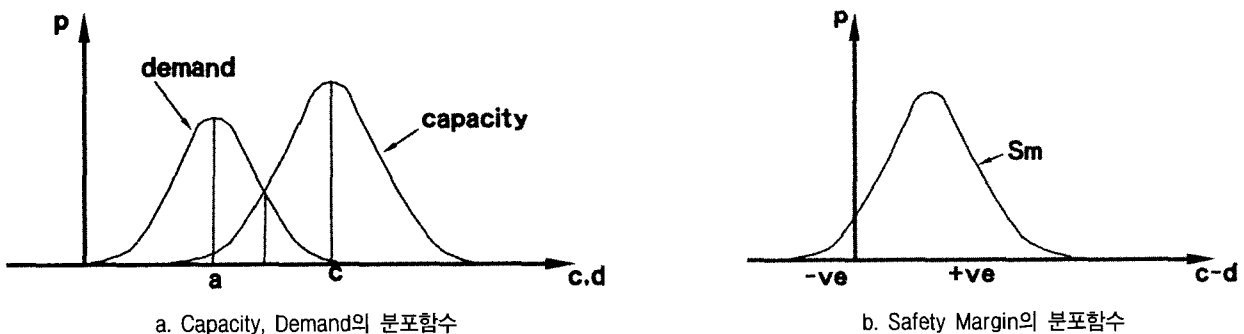


그림 2. Capacity와 Demand로 표현되는 파괴 확률의 개념

3. 불연속면 강도특성의 산정

3.1 Mohr-Coulomb모델

불연속면의 강도특성은 암반의 거동을 연속체로 취급한 Mohr-Coulomb(M-C)의 탄성모델로 표현하며 전단 강도는 다음과 같이 나타낸다.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (10)$$

따라서 M-C모델에서는 점착력 c 값과 마찰각 ϕ 값을 결정하는 것이 중요하다. 그러나, c 와 ϕ 를 구할 수 있는 절리면 직접전단시험은 매우 제한된 자료수량을 가져서 대상이 되는 불연속면의 대표값으로 판단하기가 현실적으로 어렵다.

3.2 Barton-Chubey(1977)의 전단강도 모델

암반내 존재하는 불연속면의 거동특성을 규명하기 위해 불연속면의 특성을 고려한 Barton의 비선형 전단 강도 모델은 다음과 같다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right) \quad (11)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} (\partial \tau / \partial \sigma_n) \quad (12)$$

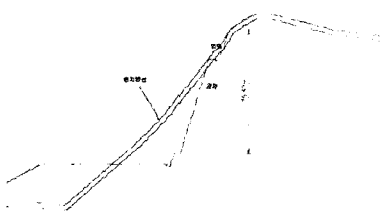
$$c_i = \tau - \sigma_n \tan \phi_i \quad (13)$$

Barton의 전단강도 모델은 JRC, JCS, ϕ_r 의 세 변수로

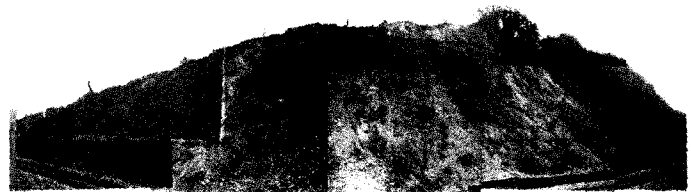
서 표현이 되며 이들은 절리면 직접전단시험, scanline 조사에서 다수 자료의 획득이 가능하다. 대부분의 사면 해석 프로그램과 수식은 M-C모델의 점착력과 마찰각을 사용하고 있으므로 이에 대해 M-C모델의 점착력과 마찰각을 해당 수직응력에 대해 접선 성분을 고려하여 계산하게 된다. 본 연구에서는 M-C모델을 통한 사면 안정성 해석과 Barton모델을 이용한 사면 안정성 해석 결과를 비교 분석하였으며, M-C모델의 경우 절리면 직접전단시험의 결과를 Barton모델의 경우 절리면 직접전단시험과 scanline 조사 결과를 종합하였다. 사면안정해석을 위하여 Barton식에 있어 전단강도를 결정하는 수직응력은 각 파괴블록의 규모를 고려하여 각 면에 작용하는 수직응력을 구한 후 개별적으로 적용하였다.

4. 암반사면에서의 분석 사례

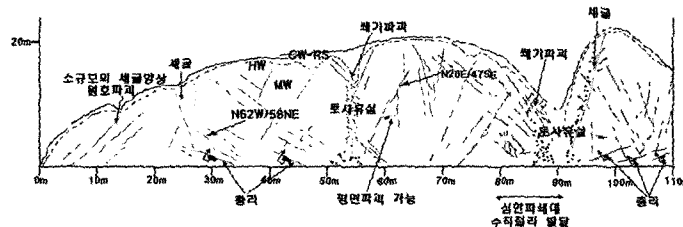
점토사면의 연장은 190m이며 최대 절취고는 26.42m로 계획되어 있다. 기반암은 캄브로-오르도비스기 조선누층군의 일부인 백운암류이다. 인근 사면 조사 결과 백운암은 층리 발달이 양호하며 사면의 구배는 50°로 완만하고, 토사 심도는 최대 2~3m 정도이다. 사면에 대한 face mapping 결과 토사, 풍화암 구간 소규모의 원호파괴가 발생하며(폭:1.5m, 길이:1m, 심도:0.5m), 다수의 지점에서 풍화 진행에 의한 세굴과 토사 유실이 관찰되었다. 따라서 설계 대상 암반 비탈면에서의 파괴는 비탈면과 평행한 방향의 절리면을 따른 소규모의 파괴 및 썩기파괴의 가능성이 있는 것으로 판단되었다(그림 3).



(a) 해석 대상 사면의 횡단도



(b) 인근 사면(scanline 조사)



(c) 인근 사면에 대한 face mapping 결과

그림 3. 해석대상 사면의 단면과 인접 사면의 조사 및 mapping결과

4.1 지반 조사 결과

암반 사면 해석을 위해 CB-8, CB-9의 두 시추조사를 시행하였으며, 조사 결과 대부분 경암으로 구성된 보통~양호한 암반상태를 지시하는 것으로 나타났다.

해석 대상 사면의 불연속면 특성 조사를 위하여 Scanline, BIPS, DOM 조사를 행하였으며, 각 조사 방법에 의한 불연속면에 대해 각각 trace line에 대해 Terzaghi weighting을 시킨 후 실제 적용한 불연속면군을 설정하였다(표 3). 불연속면 직접 전단 시험은 자료의 한계로 인해 유사한 암상에서 실험된 값들을 모두 이용하였다(표 4).

4.2 불연속면 특성

각 조사 항목의 Trace line에 대해 Terzaghi weighting을 적용하여 불연속면 조사자료들을 종합분석 하면 그림 4와 같다.

불연속면에 대한 가중치 적용후 낮은 경사의 값들의 비중이 낮아지고 높은 경사각을 가지는 불연속면 군이 형성됨을 나타내주고 있다. 즉, 가중치 적용을 통해서 불연속면 군의 상정이 더욱 합리적이 된다.

절리면 직접 전단시험과 지표지질 조사 결과를 이용하여 JRC(절리면 거칠기), JCS(절리면 일축압축강도), ϕ_c (잔류마찰각)값의 분포함수를 구하였으며, 이중 불연

표 2. 암반 사면 해석을 위한 시추 조사 결과

시추공번	지 층	심도(m)	RMR	암반양호도
CB-8	연 암	0.6~6.0	41.1	보 통
	경 암	6.0~30.2	41.0~73.6	보통~양호
CB-9	연 암	3.2~5.5	50.4~50.9	보 통
	경 암	5.5~32.3	50.4~71.3	보통~양호

표 3. 사면해석에 사용된 불연속면의 조사 항목과 자료

사면현황			불연속면 자료			
사면방향	최대 절토고	암종	조사항목	조사위치	자료수	trace line 방향
63/047	26.42m	백운암	scanline	SC-7	106	118/00
			BIPS	CB-8	124	000/90
			DOM	CB-9	280	000/90

표 4. 절리면 직접전단시험 결과치

시추 공번	심 도 (m)	JCS (kgf/cm ²)	점착력(kgf/cm ²)		마찰각(°)		수직강성(Kn) (kgf/cm ² /cm)	JRC	비고
			최대	잔류	최대	잔류			
CB-8	19.95	913	3.19	2.59	33.13	30.37	3.56	3.24	층상 백운암
TBC-28	32.4~32.8	528	1.4	0.86	33.3	29.7	48.5	7.89	
TBC-29	15.7~16.1	-	0.08	0.06	33.0	30.0	-	10.0	
TBC-31	26.0~26.2	694	1.69	0.98	34.2	32.5	37.4	8.12	
TBC-36	21.6~21.8	-	0.0	0.0	39.0	36.0	-	6.0	

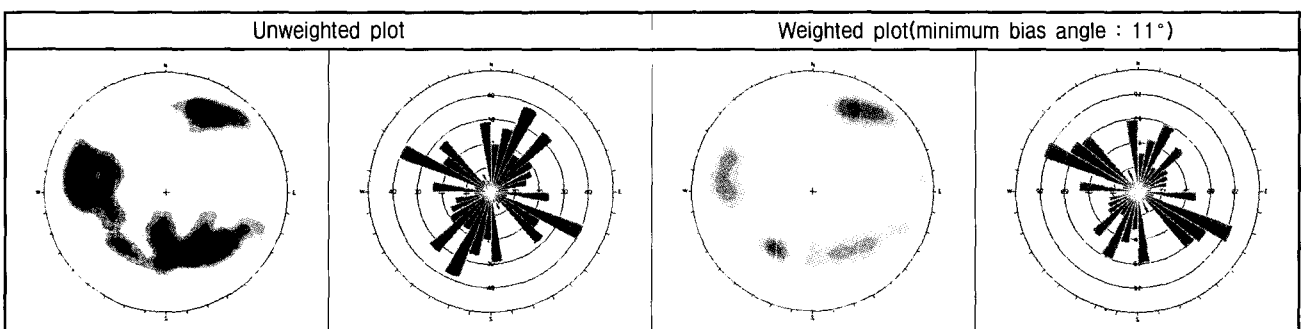
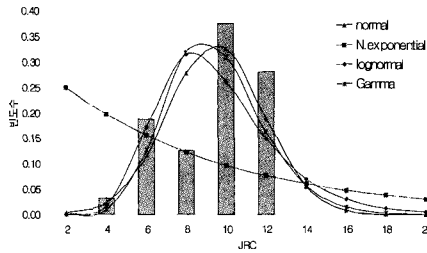
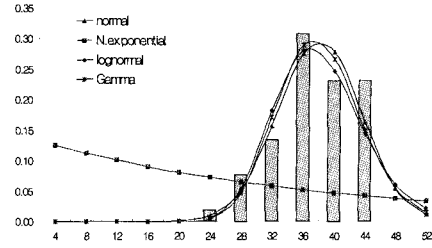


그림 4. 불연속면의 평사투영 결과



(a) JRC(정규분포채택)



(b) JCS(정규분포채택 : 반발계수)

그림 5. 지표지질조사, DOM조사 결과 Set 1의 JRC, JCS의 확률분포함수 선정

표 5. 각 불연속면 군의 분포함수 특성 및 선정 결과

물성치		평균	표준편차	상한	하한	분포 함수
단위중량(g/cm ³)		2.60	0.4	2.3	3.0	정규분포
마찰각(degree)		32.34	2.31	35	20	정규분포 가정
점착력		4.65	4.19	10	0	정규분포 가정
Set 1	방향성(°)	67/207	$\theta = 28.1$	-	-	Fisher 분포 K=25.33
	JRC	8.5	2.3	14	2	정규분포
	JCS(kgf/cm ²)	608.6	161.6	1000	300	정규분포
Set 2	방향성(°)	50/325	$\theta = 35.3$	-	-	Fisher 분포 K=16.33
	JRC	$\mu' = 2.5, \sigma = 0.2$		16	2	대수정규분포
	JCS(kgf/cm ²)	448.93	180.72	800	200	정규분포
Set 3	방향성(°)	49/032	$\theta = 14.0$	-	-	Fisher 분포 K=100.48
	JRC	10.6	3.3	14	2	정규분포
	JCS(kgf/cm ²)	449	152	800	200	정규분포
Set 4	방향성(°)	59/101	$\theta = 26.4$	-	-	Fisher 분포 K=28.74
	JRC	10.4	2.9	14	2	정규분포
	JCS(kgf/cm ²)	$\alpha = 14.3, \beta = 2.0$		800	200	γ 분포

속면군 Set 1에 대한 JRC와 JCS값들의 분포함수를 구하면 그림 5와 같다.

각각의 불연속면 군에 대한 방향성과 특성을 정리하면 표 5와 같으며, 현장상황을 고려하여 상한과 하한으로 나누어 제한하였다.

4.3 결정론적 사면안정 해석

결정론적 사면 안정 해석 결과는 다음 표 6과 같다. 평사투영해석 결과에 의해서 본 사면은 Set 2/Set 3, Set 3/Set 4절리군의 교차에 의해 썩기파괴가 발생할 가능성이 있으며, Set 2/Set 3절리군의 경우 1:0.5이상의 구배에서는 안정화되며, Set 3/Set 4절리군의 경우 1:0.3

표 6. 암반사면의 썩기파괴에 대한 결정론적 해석 결과

평사투영 해석 결과		결정론적 해석 결과				
	검토 구배	Set 2 / Set 3		Set 3 / Set 4		
		평사투영	한계평형		평사투영	한계평형
	M-C모델		Barton모델	M-C모델		Barton모델
	1:0.3	불안정	1.51	1.82	불안정	1.29
1:0.5	불안정	2.53	2.14	불안정	1.61	2.27
1:0.7	안정	-	-	불안정	2.46	2.59
1:1.0	안정	-	-	안정	-	-

1:0.5 1:0.7 구배에서 불안정한 것으로 나타난다.

이에 대한 한계 평형 해석 결과 M-C모델과 Barton모델 두 가지에 대해 모두 안전율이 1.0을 초과하여 대상 사면은 안정성을 확보하는 것으로 나타난다(표 6).

4.4 파괴확률해석

불연속면의 확률해석을 위하여 DIPS 5.0의 Jtdist를 이용하여 generation하였다. 각각의 불연속면군의 Fisher 값을 이용하여 각 불연속면 군을 1000회 generation한 후 각각의 절리군 조합을 도시하고 대표적인 교차선에 대해 평사투영상에 교차점을 도시하면 그림 6과 같다.

결정론적 해석시 Set 2/Set 3, Set 3/Set 4의 조합만이

썩기파괴의 가능성이 있는 것으로 조사되었으나 Fisher 값에 의해 재생성된 경우 다양한 썩기파괴의 가능성이 있는 것으로 나타난다.

동역학적 파괴확률 계산시, M-C모델은 점착력과 마찰각의 정규분포를 고려하였으며 Barton모델은 JRC, JCS, σ_c 의 분포함수를 고려하여 각각 계산을 수행하였다. 이 결과와 운동학적 분석 결과를 종합하여 파괴 확률을 해석한 결과는 표 7과 같으며, 그림 7에 파괴확률 누적 그래프가 나타나 있다.

4.5 분석 결과의 해석

M-C모델에서의 결정론적 해석 결과 안전율은 각각

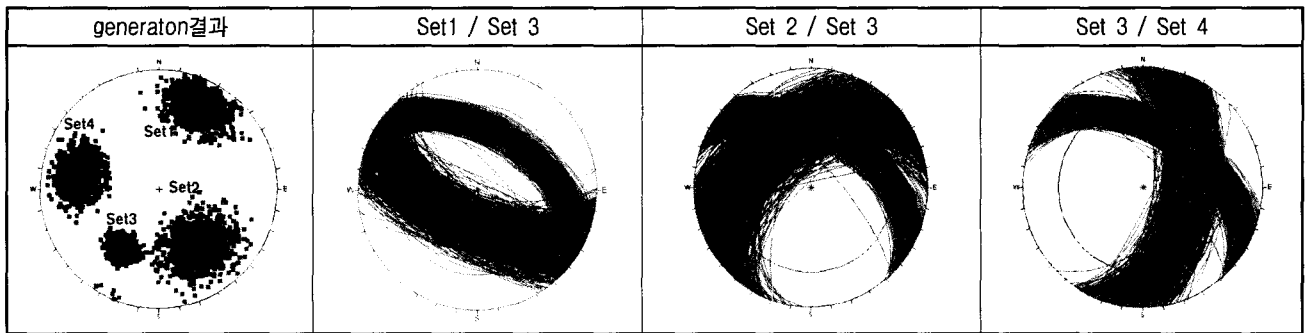


그림 6. 방향성의 재생성과 평사투영에 의한 썩기파괴 조합의 확률론적 도시 결과

표 7. 결정론적 및 확률론적 해석 결과의 비교

구분	절리군	M-C모델				Barton모델			
		결정론적 해석	확률론적 해석			결정론적 해석	확률론적 해석		
			kinematic	kinetic	pf(%)		kinematic	kinetic	pf(%)
①	Set 1/Set 2	-	0	0	0	-	0	0	0
②	Set 1/Set 3	-	0.685	0.0015	0.1	-	0.685	0.00146	0.13
③	Set 1/Set 4	-	0.03	0.067	0.2	-	0.03	0	0
④	Set 2/Set 3	Fs=1.51	0.946	0.171	16.2	Fs=1.82	0.946	0.0624	5.9
⑤	Set 2/Set 4	-	0.988	0.0051	0.5	-	0.988	0	0
⑥	Set 3/Set 4	Fs=1.29	0.997	0.213	21.3	Fs=2.09	0.997	0.008	0.8

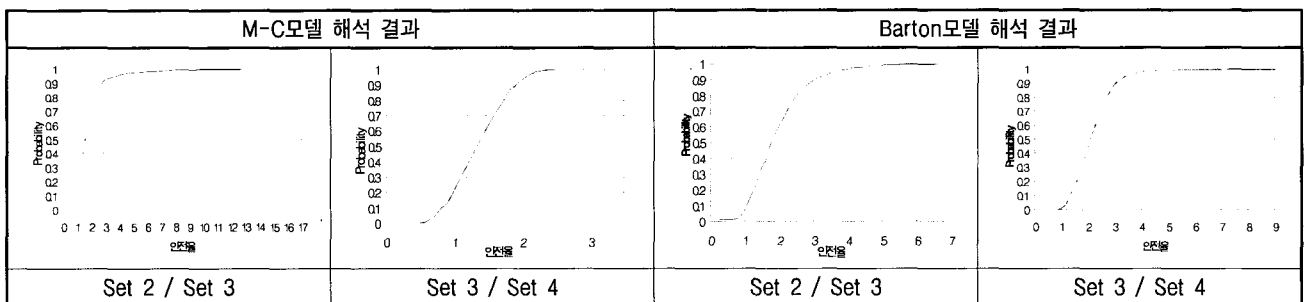


그림 7. 파괴확률 해석 결과 누적 확률 그래프

.51, 1.29로 나타나 한계평형 상태인 1.0의 안전율을 초과하여 잠재적인 안정성을 가지고 있는 것으로 나타났으나, ④와 ⑥은 각각 붕괴 확률 16.2%, 21.3%로서 Smith의 5%의 허용확률을 많이 초과하는 것으로 나타나며, ①을 제외한 나머지도 1% 이하지만 파괴확률이 있음을 보여주고 있다. 따라서 확률론적 해석에 의하면 1:0.3구배 절취시 ④, ⑥의 경우에 대해 적절한 보강대책이 필요하게 된다. 이러한 차이는 썩기파괴해석에 있어 방향성의 분산의 정도에 의해 다양한 썩기파괴 블록이 설정되며, 또한 강도정수의 변화에 의해 사면의 안정성이 크게 영향을 받을 수 있다는 것을 의미하게 된다.

Barton의 비선형 전단강도식을 이용한 해석 결과는 다음과 같다. 결정론적 해석 결과는 ④, ⑥에 대해 각각 1.82와 2.09의 안전율을 나타내어 역시 안정한 것으로 나타나며, 확률론적 해석 결과도 대체로 이와 유사하여 대부분 1%미만의 파괴확률을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 ④의 경우 파괴 확률이 5.9%로 허용 확률 5%를 상회하는 것으로 나타나 불안정한 것으로 나타나게 되어 이 역시 결정론적 해석 결과만으로 사면의 안정성을 해석 할 경우 위험한 판단을 초래 할 수 있음을 보여준다. 또한 확률 해석에서 전반적으로 Barton의 모델보다 M-C모델이 큰 파괴확률을 보여주고 있다. 이는 M-C모델의 경우 방향성의 재생성에 따른 다양한 파괴블록의 형성과 이들에 의해 파괴면에 작용하는 수직응력의 변화가 불연속면의 전단강도에 반영되지 않았기 때문이며, 점착력과 마찰각의 재생성만을 고려할 경우 사면의 안정성에 미치는 민감도가 매우 크게 나타난 결과라고 판단된다.

5. 토의 및 결과 검토

결정론적 해석 결과 대상 사면은 1:0.3의 구배에서 안전율(F_s)가 1.0을 초과하여 안정한 것으로 나타났다. 그러나, 파괴 확률 해석 결과 허용 파괴 확률 5%를 초과하여 불안정한 요소가 있는 것으로 나타나며 그외 기타 절리군의 조합에 의한 파괴의 가능성도 나타나므로, 결정론적 해석만을 수행시 잠재적인 사면의 안정성을 확보하기가 어려우며 사면 설계시 위험한 오판을 초래할 수 있게 된다.

사면의 파괴 확률에는 일반적으로 파괴면의 전단강도가 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타난다(박혁진 외, 2002). 이 파괴면의 전단강도에 대해 M-C모델과 Barton

의 모델을 비교한 결과 M-C모델이 결정론적 해석과 확률론적 해석에서 낮은 안전율과 높은 파괴확률을 보여주고 있다. 이러한 경향은 M-C모델이 파괴면에 작용하는 수직응력의 영향을 고려하지 못하고 단순한 점착력과 마찰각의 재생성 과정만을 가지기 때문이며, 따라서 결정론적 해석 결과와도 차이가 많은 해석 결과를 가지게 되는 것으로 보인다.

암반 사면의 파괴에 있어 안전율과 면에 작용하는 수직응력의 영향을 살펴보기 위하여 연구 사면에 대해 전단강도를 대표값으로 고정 시킨후 M-C모델과 Barton모델의 안전율 민감도를 살펴보면 다음과 같다. 이때 사면의 높이를 조정하여 썩기블록의 크기를 조절하여 구하여 해석하였으며, 대상 썩기블록은 Set 2/Set 3블록으로 하였다. 그림 8에서 M-C모델이 Barton모델에 비해 블록의 크기에 매우 민감한 변화를 보이며, 상대적으로 Barton모델의 경우 덜 민감하게 나타난다.

또한 대략 18m이하의 사면높이에서는 Barton의 모델이 낮은 안전율을 보여주게 되며 사면의 높이가 높아지게 되면 두 모델이 거의 근사한 값으로 수렴하나 Barton의 모델이 약간 높은 안전율을 갖게 된다. 따라서 이와 같은 결과는 파괴 확률 해석시 Barton모델이 M-C모델보다 낮은 파괴확률을 가지는 것을 뒷받침하고 있다. Peng et al.(1998)도 이와 유사한 분석에서 M-C모델보다 Barton모델이 사면의 높이에 따른 안정성 해석시 덜 민감하다고 한 바 있으며, 두 모델중 어떤 모델을 선정하는가에 있어 이점을 유의해야 한다고 지적한 바 있다.

실제 사면 설계시에 M-C모델의 경우 많은 수의 자료를 획득하기에 어려움이 있으며, 실제 불연속면을 대표하는 값을 측정하기가 어려우나, Barton모델의 경우 지표지질조사 결과에서 각 불연속면군에 대한 상당한 자료의 획득이 가능하다. 따라서 절리면 직접전단시험과 같은 자료의 획득이 곤란한 곳에서의 설계에서는 Barton

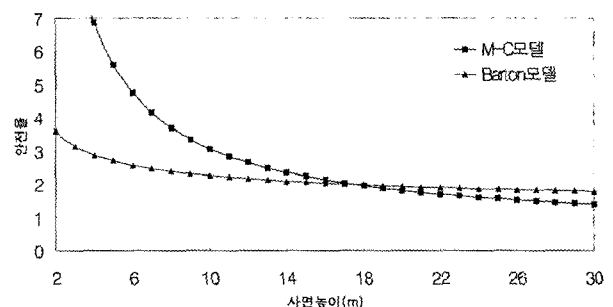


그림 8. 사면의 높이(블록의 크기)와 안전율의 관계

의 모델이 실제 사면의 안정성 해석에 적용성이 높을 것으로 판단된다. 그러나 시공이 완료된 사면에서는 소규모의 파괴블록을 통해 역해석이 가능하며 이를 통해 점착력의 산정이 이루어지면, 적절한 응력조건 하에서 M-C모델의 적용도 가능할 것으로 생각된다.

6. 결론

암반사면의 안정성 해석시 M-C모델과 Barton의 모델에 의한 기존의 결정론적 해석과 본 연구에서 수행한 확률론적 해석결과를 비교 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 암반사면의 불연속면 전단 강도에 대해 선형적인 M-C 모델과 비선형의 Barton 모델에 따라 각각 안정성 해석을 수행하고, Monte Carlo simulation에 의한 확률 해석을 수행하여 안정성 평가를 하였다. 확률론적 해석에서 각 변수의 분포함수는 χ^2 검증을 통해 산정하였으며, 조사 결과를 바탕으로 상한과 하한을 설정 하였다.
- (2) 대상사면에 대해 1:0.3의 구배에서 결정론적 해석 결과 두모델에 대해 모두 안전율 1.0을 초과하여 안정한 것으로 나타났다. 그러나, 이에 대한 파괴 확률 해석 결과 허용 확률 5%를 초과하여 불안정요소가 있는 것으로 나타나므로, 결정론적 해석만으로 사면 설계 수행시 중요한 불안정성 요인을 간과할수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 파괴면의 전단강도에 대해 M-C모델과 Barton 모델 수행결과 M-C모델이 Barton의 모델에 비해 높은 파괴확률을 가지는 것으로 나타난다. 이는 M-C모델의 경우 파괴블록이 파괴면에 미치는 수직응력과 이에 의한 전단강도의 변화가 선형적 증가를 보이며, M-C모델 자체가 가지는 자료 획득의 제한성에 영향을 받았기 때문이다. 따라서 설계사면과 같은 제한된 자료획득만이 가능한 경우 Barton의 모델을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김형배, 이승호(2002), "실용적인 확률론적 사면안정 해석 기법 개발", 한국지반공학학회지, 제18권, 제5호, pp.271-280.

2. 배규진, 박혁진(2002), "불연속면의 확률 특성을 고려한 암반사면의 평면파괴 확률 산정", 한국지반공학학회지, 제18권, 제2호, pp.97-105.

3. Bacher, G. B.(1983), "Statistical analysis of rock mass fracturing", *Journal of Mathematical Geology*, Vol.15, No.2, pp.33-40.

4. Barton, C. A., and Zoback, M. D.(1992), "Self-similar distribution and properties of macroscopic fractures at depth in crystalline rock in the Cajoin Pass scientific drill hole", *J. Geophysics. Res.*, 97(B4), pp.5181-5200.

5. Barton, N.(1976), "The shear strength of rock and rock joints", *Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abstr.* 13. pp.255-279.

6. Einstein, H. H. and Baecher, G. B.(1983), "Probabilistic and statistical method in engineering geology, specific methods and examples, part 1 : exploration", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.16, pp.39-72.

7. Feng, Ping and Lajtai, Emery, Z.(1998), "Probabilistic treatment of the sliding wedge with ExSlide", *Engineering Geology*, Vol.50, pp.153-163.

8. Fisher, R.(1953), "Dispersion on a sphere", *Proceeding of the Royal Society of London, A*, Vol.217, pp.295-305.

9. Hoek, E., and Bray, J. W.(1995), *Rock slope Engineering*, 이정인역, 엔지니어즈, p.459.

10. Hudson, J. A. and Priest, S. D.(1979), "Discontinuities and rock mass geometry", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Vol.16, pp.339-362.

11. Low, B. K.(1997), "Reliability Analysis of Rock Wedges", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.498-505.

12. Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M.(1982), "A rejection criterion for definition of clusters in orientation data", *Issues in Rock Mechanics, Proceedings of the 22nd Symposium on Rock Mechanics, Engineers, New York*, pp.116-123.

13. Narr, W., and Suppe, J.(1991), "Joint spacing in sedimentary rocks", *Journal of Structure Geology*, Vol.13, pp.1037-1048.

14. Park, H. and West, T. R.(2001), "Development of a probabilistic approach for rock wedge failure", *Engineering Geology*, Vol.59, pp.233-251.

15. Priest, S. D.(1993), *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman & Hall., p.473.

16. Sammis, C., King, G. and Biegel, R.(1987), "The kinematics of gouge deformation", *Pure & Appl. Geophys.*, Vol.125, pp.777-812.

17. Shanley, R. J. and Mahtab, M. A.(1976), "Delineation and analysis of clusters in orientation data", *Journal of Mathematical Geology*, Vol.8, No.3, pp.9-23.

18. Smith, G. N.(1986), *Probability and statistics in civil engineering*, Collins, London.

19. Terzaghi, R. D.(1965), "Source of error in joint survey", *Geotechnique*, Vol.15, pp.287-304.

20. Wallis, P. F. and King, M. S.(1980), "Discontinuity spacings in a crystalline rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. Abstracts*, Vol.17, pp.63-66.

21. Yow, J. L.(1987), "Blind zones in the acquisition of discontinuity orientation data", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, Technical Note, Vol.24, No.5, pp.317-318.

(접수일자 2003. 6. 12, 심사완료일 2003. 11. 6)