

Level II

A Level II reliability approach to rock slope stability

, Hyuck-Jin Park, , Jong-Min Kim

, Professor, School of Civil and Geoinformation

Engineering, Sejong University

개요(SYNOPSIS): Uncertainty is inevitably involved in rock slope engineering since the rock masses are formed by natural process and subsequently the geotechnical characteristics of rock masses cannot be exactly obtained. Therefore the reliability analysis method has been suggested to deal properly with uncertainty. The reliability analysis method can be divided into level I, II and III on the basis of the approach for consideration of random variable and probability density function of reliability function. The level II approach, which is focused in this study, assumes the probability density function of random variables as normal distribution and evaluates the probability of failure with statistical moments such as mean and standard deviation. This method has the advantage that can be used the problem which the Monte Carlo simulation approach cannot be applied since the complete information on the random variables are not available. In this study, the analysis results of level II reliability approach compared with the analysis results of level III approach to verify the appropriateness of the level II approach. In addition, the results are compared with the results of the deterministic analysis.

주요어(Key words): Level II , , ,

1. 서론

암반사면과 같은 지반 구조물은 자연적으로 생성된 지반을 대상으로 조사, 설계 및 시공이 이루어지므로 정확한 지반정수를 획득하기 어려운 지반의 특성상 불확실성이 개입된다. 따라서 이러한 지반의 불확실성을 효과적으로 다루기 위한 방법의 하나로 신뢰성이론에 기초한 해석방법이 도입되었다. 특히 신뢰성 해석은 최근 들어 관심이 증가하고 있는 생애주기비용(LCC, Life Cycle Cost)개념을 포함하여 반영할 수 있어 그 적용이 증가하고 있다. 신뢰성 해석기법은 변수의 확률분포 고려방법과 신뢰함수의 분포산정방법에 따라 Level I, II, III의 기법으로 구분할 수 있다. Level I 해석은 기존의 결정론적 해석 기법에 부분안전율이나 하중계수 등을 고려하여 안정성을 평가하는 방법이고 Level II 해석은 중간단계의 신뢰성 해석방법으로 간단한 계산을 통해 구조물의 파괴확률을 계산하는 방법을 의미한다. Level III 해석은 가장 엄밀한 해석으로 변수의 실제 확률분포를 적용함으로써 파괴확률을 정확하게 획득하는 방법이다. 확률론적인 해석방법에서는 Monte Carlo simulation 등의 Level III 해석기법을 이용하여 안정성을 수행하는 과정이 가장 보편적으로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 현장 등에서 간단한 계산을 통해 파괴확률을 쉽게 구할 수 있는 간편법의 하나인 Level II 해석방법의 현장 적용성과 Level III 해석 결과의 차이에 관하여 연구했다.

2. 신뢰성 해석

신뢰성 해석의 목표는 구조물이 한계상태(예를들면, 극한파괴)에 도달할 확률을 산정하는 것이다. 안정성 평가의 경우 하중함수와 저항함수로 구성되는 신뢰함수를 설정하고, 변수의 확률분포를 적용하여 이에 따른 신뢰함수의 확률분포와 파괴확률을 산정하는 것이다. 예를 들어 신뢰함수는 ‘저항함수-하중함수’ 혹은 ‘저항함수/하중함수’의 꼴로 설정할 수 있다. 신뢰성 설계에 있어 신뢰성 해석법은 설계변수의 확률분포 고려방법과 신뢰함수의 확률분포 산정 및 이용방법에 따라 다양하게 구분된다.

2.1 Level 1 해석

Level I 해석은 가장 하위단계의 신뢰성해석 방법으로 변수의 확률분포를 반영하기 보다는 변수의 공칭값(대표값)에 부분안전율(partial safety factor)을 적용하여 변수를 결정하거나 혹은 하중함수와 저항함수에 각각 하중계수와 저항계수를 적용하여 안정성을 평가하는 방법이다. 전자의 방법은 부분안전율 설계법으로 Euro-code에 적용되고 있으며, 후자의 방법은 하중저항계수설계법(LRFD)으로 US-code에 적용되고 있다.

2.2 Level 2 해석

Level 2 해석은 중간단계의 신뢰성해석 방법으로 설계변수의 실제 확률분포를 적용하기 보다는 정규분포와 같은 임의의 확률분포를 따르는 것으로 가정하여 파괴확률을 산정해내는 방법이다. 설계변수의 확률분포를 가정하였으므로 변수의 평균값과 표준편차만 있으면 신뢰성해석이 가능하다.

Level 2 해석법으로는 일계이차모멘트법(First Order Second Moment method, FOSM)이 대표적이다. 일계이차모멘트법은 신뢰함수를 Taylor급수를 이용하여 전개한 후 확률변수의 평균값과 표준편차를 대입하여 신뢰지수 및 파괴확률을 산정해내는 기법이다. 따라서 일계이차모멘트법은 신뢰함수의 설정이 필수적이며, 만약 신뢰함수의 변수가 너무 많아 Taylor급수의 전개가 어려운 경우 적용이 불가능한 단점이 있다. 이러한 일계이차모멘트법의 단점을 보완한 대안으로 최근 점추정법(Point Estimate Method, PEM)의 적용을 도입하고 있다. 점추정법은 신뢰함수가 복잡한 경우, 설계변수의 변화에 따른 각각의 신뢰함수값을 계산하고 계산된 신뢰함수값의 평균과 표준편차 자료를 이용하여 파괴확률을 산정해내는 기법이다. 따라서 신뢰함수의 설정이 필요 없으므로 일계이차모멘트법의 적용이 곤란한 경우 유용한 신뢰성 해석기법이다.

2.3 Level 3 해석

Level 3 해석은 가장 엄밀한 신뢰성해석 방법으로 변수의 실제 확률분포를 신뢰함수에 적용함으로써 여러 확률변수들의 상호작용을 엄밀하게 고려하여 파괴확률을 정확하게 산정해내는 방법이다. 따라서 Level III 해석은 가장 완벽한 형태의 신뢰성 해석 방법으로 확률변수에 대한 정확한 확률특성을 기초로 하여 분석하므로 가장 정확하고 신뢰할 수 있는 결과를 획득할 수 있다. 다만 Level III 확률변수에 관한 방대한 자료가 필요하며 신뢰함수식이 복잡할 경우 수치적분용 프로그램이 필수적이다. 대표적인 Level 3 해석 기법으로는 Monte-Carlo Simulation이 있다.

3. Level 2 신뢰성해석

3.1 일계이차모멘트법(First Order Second Moment Method)

일반적으로 신뢰함수 $g(x_i)$ 는 비선형적이므로 모든 변수들이 정규분포를 보인다고 하더라도 $g(x_i)$ 는 그렇지 않을 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 방법이 Taylor 시리즈 전개와 첫 번째 항을 이용하는 일계이차모멘트법(First Order Second Moment Method, FOSM)이다. 이 방법은 정확한 파괴확률값을 산정하기보다는 파괴함수의 선형화를 통해 근사값을 획득하는 방법이다.

구조물의 파괴확률을 계산하기 위해서는 파괴함수에 포함되어 있는 확률변수들에 대한 확률밀도함수가 포함되어야 한다. 그러나 현실적으로는 불충분한 현장자료 등의 원인으로 인해 이러한 정보를 획득하기 어렵거나 불가능할 수 있다. 또한 이러한 정보가 제공된다고 할지라도 파괴확률을 획득하기 위한 수학적 적분이 불가능해 정확한 확률값을 획득하기 어려울 가능성도 있다.

종종 확률변수들에 대해 획득 가능한 정보는 1차 모멘트값(평균값)과 2차 모멘트값(분산)만 가능할 경우가 있다. 이러한 경우 구조물의 안정성과 관련하여 획득할 수 있는 유일한 정보는 파괴함수에 대한 평균과 분산으로 한정될 수 있다. 이러한 조건하에서 확률변수에 대한 두 모멘트 값만을 사용한 공식에 의해서 구조물의 파괴확률을 획득하도록 제한될 수밖에 없다. 이러한 제약 속에서 사용되는 공식을 2차 모멘트식(second moment formulation)이라 하며 일계이차모멘트법도 이러한 방법의 하나이다.

일계이차모멘트법의 경우 하나의 확률변수만이 파괴확률 내에 포함되어 있고 파괴함수 $g(x)$ 가 대칭인 분포를 보인다고 가정할 때 파괴함수의 1차 모멘트값은 식 (1)과 같다.

$$E[g(x)] = g(\bar{x}) + \frac{g''(\bar{x})}{2} V[x] \quad (1a)$$

$$V[g(x)] = [g'(\bar{x})]^2 V[x] + \frac{1}{2} [g''(\bar{x})]^2 V^2[x] \quad (1b)$$

이다. 한 편 파괴함수 내에 여러 개의 확률변수들이 존재하고 이들이 서로 상호의존성이 없다고 가정할 때 파괴함수의 1차 모멘트는 식 (2)과 같다.

$$E[g(x_i)] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (2a)$$

$$V[g(x_i)] = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial g(x_i)}{\partial x_i} \right)^2 V[x_i] \quad (2b)$$

이렇게 계산된 파괴함수의 1차 모멘트를 이용하고 파괴함수가 정규분포를 보인다는 가정을 이용하여 파괴확률을 산정할 수 있다.

3.2 점추정법(Point Estimate method)

Level 2 신뢰성 해석 기법 중 일계이차모멘트법의 이용은 미분의 계산을 필수적으로 필요로 한다. 그러나 경우에 따라 이러한 미분과정이 매우 복잡하며 심지어는 계산을 불가능한 경우도 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나로 Rosenblueth(1981)에 의해 점추정법(point estimate method)이 제안되었다. 점추정법은 이미 알고 있는 Level II 수준의 확률변수에 대한 정보, 즉 확률변수의 평균과 표준편차만 획득 가능할 경우 이를 이용하여 파괴함수의 1차 모멘트인 평균과 표준편차의 근사값을 획득하는 방법이다. 일단 점추정법을 통해 파괴함수의 평균값과 표준편차를 획득하면 파괴함수가 정규분포를 보인다는 가정을 이용하여 신뢰지수를 획득하고 파괴확률을 산정할 수 있다.

점추정법에서는 파괴함수 내에 확률변수가 하나만 존재할 경우 확률변수에 대한 두 개의 점추정값을 획득하여 이를 확률변수에 대체함으로써 파괴확률을 식 (3)과 (4)를 이용하여 산정해낸다.

$$E[g(x)] = p_+ \cdot g(x_+) + p_- \cdot g(x_-) \quad (3a)$$

$$E[g^2(x)] = p_+ \cdot g^2(x_+) + p_- \cdot g^2(x_-) \quad (3b)$$

$$V[g(x)] = E[g^2(x)] - (E[g(x)])^2 \quad (3c)$$

여기서,

$$p_+ = \frac{1}{2} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{1}{1 + [\beta(1)/2]^2}} \right] \quad (4a)$$

$$p_- = 1 - p_+ \quad (4b)$$

$$x_+ = \bar{x} + \sigma[x] \sqrt{\frac{p_-}{p_+}} \quad (4c)$$

$$x_- = \bar{x} - \sigma[x] \sqrt{\frac{p_+}{p_-}} \quad (4d)$$

그러나 두 개 이상의 확률변수가 존재할 경우 각각의 확률변수에 대하여 두 개의 점추정값을 대입하므로 결국 n개의 확률변수에 대하여 2^n 개의 조합에 대한 계산을 식 (5)의 개념으로 수행하여야 한다.

$$\begin{aligned} G(\pm \pm \pm \dots \pm) \\ = G[\bar{x}_1 \pm \sigma(x_1), \bar{x}_2 \pm \sigma(x_2), \dots, \bar{x}_n \pm \sigma(x_n)] \end{aligned} \quad (5)$$

파괴함수에 대한 평균과 표준편차는 다음의 식 (6)을 이용하여 산정하며,

$$E[G] = p_{++++} G_{++++} + p_{+...-} G_{+...-} + \dots + p_{-...-} G_{-...-} \quad (6a)$$

$$E[G^2] = p_{++++} G_{++++}^2 + p_{+...-} G_{+...-}^2 + \dots + p_{-...-} G_{-...-}^2 \quad (6b)$$

이때 가중치 변수, p 는 다음 식 (7)와 같이 산정된다.

$$p_{\pm \pm \dots \pm} = \frac{1}{2^n} \left[1 + \sum_{i,j} (\pm \rho_{i,j}) \right] \quad (7)$$

4. 연구대상지역

암반사면의 Level II 신뢰성 해석기법을 적용해 보기 위해 경기도 남양주 덕소 - 양수간 복선화 공사 구간 중 일부 구간을 선정하여 예상되는 암반사면의 안정성을 분석해 보았다. 본 연구지역에는 245/65 방향의 암반사면 시공이 예정되어 있으며 예상되는 암반사면의 높이는 약 35m로 약 300개의 불연속면 방향성 자료가 scanline 기법과 BIPS를 통해 획득되었고 총 15개의 시추코어를 이용하여 직접전단시험을 수행하였다.

5. 불연속면 자료의 확률 특성 분석

신뢰성 해석을 수행하기 위해 우선적으로 획득되어야 하는 것은 확률변수의 확률특성이며 따라서 암반사면의 경우 불연속면의 확률특성에 대한 분석에 선행되어야 한다. 이것은 Kulatilake et al.(1985)에 의해서도 지적된 바와 같이 확률변수에 대한 확률특성의 선정 결과에 따라 신뢰성 해석의 결과가 상이

하게 나타날 수도 있기 때문이다. 본 연구에서는 불연속면의 전단강도 특성과 방향성을 확률변수로 고려하여 이들 변수에 대한 확률특성을 파악하였다. 불연속면 방향성의 경우 현장으로부터 획득된 대부분의 자료는 매우 분산이 심한 상태로 이는 불확실성과 가변성이 불연속면의 방향자료에 많이 개입되어 있음을 의미한다. 그림 1은 현장으로부터 획득된 불연속면 방향 자료를 평사투영망에 도시한 결과이다. 현장에서 획득된 자료를 기초로 하여 Mahtab and Yegulp (1984)의 알고리즘을 이용, 절리군을 파악하였다. 또한 불연속면 방향성 자료에 대해 Fisher 분포를 확률분포함수(probability density function)로 이용하였다. Fisher 함수는 Priest(1993)에 의해 설명된 바와 같이 단순성과 유연성으로 인해 불연속면의 방향성을 표현할 수 있는 적절한 확률분포함수로 이용되고 있다. 표 1은 절리군 분석의 결과이다. 표 1에 제시된 바와 같이 총 4개의 절리군이 획득되었으며 각각의 평균 방향과 Fisher 상수가 계산되었다.

파괴예상면의 전단강도특성 역시 암반사면 붕괴에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이다. 그러나 대개 적절한 불연속면을 포함하고 있는 시료를 현장에서 획득하기 어려운 점과 이로 인한 실내실험의 자료 획득 제한 등으로 인해 전단강도 획득을 위한 자료의 수가 한정되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 이유로 인해 전단강도의 값을 정확하게 획득할 수 없고 불확실성과 가변성이 포함하게 된다. 결국 불연속면의 전단강도 역시 확률변수로 고려되어야 한다. 총 15개의 시료가 획득되었으며 실내에서 직접전단강도 시험을 통해 내부마찰각과 점착력을 획득하였다. 내부마찰각의 값은 27.0도에서 32.2도까지의 분포를 보였으며 평균 및 표준편차는 각각 32.2도와 3.0을 보였다. 또한 실험을 통해 평균 0.07MPa의 점착력 값을 획득하였으나 Hoek (1997)의 지적대로 점착력은 0으로 고려하였다.

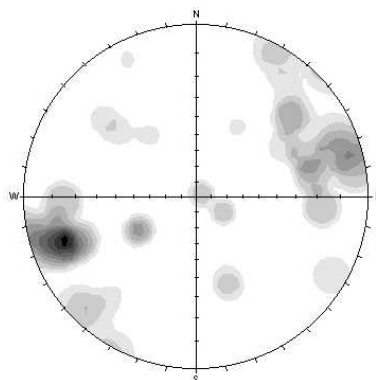
6. 암반사면에 대한 신뢰성 해석

6.1 결정론적 해석

신뢰성 해석 결과와의 비교를 위하여 기존의 연구 해석 방법인 결정론적인 방식을 통해 안정성 분석을 수행하였다. 결정론적 해석에서는 확률론적 해석에서 사용되었던 동일한 자료와 동일한 계산식을 사용하였다. 또한 확률분포를 보이는 불연속면의 방향성과 전단강도 특성에 대해서는 대부분의 결정론적 해석 방법에서 수행하는 방식대로 평균값을 대푯값으로 선정하여 계산에 이용하였다.

암반사면의 안정성 해석은 운동학적 해석(kinematic analysis)와 동역학적 해석(kinetic analysis), 두 개의 과정을 통해 수행된다. 운동학적 해석은 불연속면의 방향성에 기초하여 불연속면에 의해 정의되는 암반 블록이 기하학적으로 파괴될 가능성이 있는 가에 대한 분석으로 운동학적 해석을 통해 암반블록이 움직일 수 있을 것으로 파악되는 경우 동역학적 해석을 수행한다. 동역학적 해석은 한계평형해석에 기초하여 암반블록에 작용하는 전단응력과 전단강도의 비교를 통하여 암반블록의 안전율을 획득한다.

결정론적 해석 방법의 과정 중 우선적으로 수행되는 것이 각 변수들에 대한 대표 값을 획득하는 것이다. 대개 결정론적 해석에서는 평균값이 각 확률변수를 대표하는 값으로 사용된다.



1

표 1. 절리군 분석 결과

Joint Set	Mean dip dir/dip	Fisher const.
J1	078/80	53
J2	270/28	280
J3	255/66	58
J4	115/18	23

따라서 본 연구에서도 불연속면의 방향성이나 전단강도 특성을 나타내기 위한 대표 값으로 평균값을 사용했다. 결정론적인 해석 결과에 따르면 절리군 3에서 기하학적으로 평면파괴가 발생할 수 있을 것으로 해석되었다. 또한 표 2에서와 같이 절리군 3에 대해 다양한 수위변화에 따른 안전율을 계산하였다. 표 2에서와 같이 지하수위가 증가함에 따라 안전율이 감소되었으며 완전히 건조한 상태에서도 안전율은 0.346으로 사면 높이의 절반에 지하수위면이 이르렀을 때 안전율은 0이 되었다. 즉 이 결과에 따르면 사면은 건조한 상태에서도 불안정한 것으로 해석되었다.

6.2 점추정법에 의한 해석

불연속면의 변수에 대한 확률특성을 고려하여 점추정법을 이용하여 Level II의 신뢰성 분석을 수행하였다. 이 분석과정에서도 역시 운동학적 해석과 동역학적 해석이 순차적으로 수행되었다. 운동학적 해석의 결과 절리군 2와 절리군 3이 각각 12.0%와 68.4%의 불안정 가능성을 보였으며 이러한 결과는 앞서 결정론적 해석 결과인 절리군 3의 기하학적 붕괴 가능성과는 차이를 보이는 결과이다. 운동학적 해석 결과에 따라 절리군 2와 3에 대한 동역학적 해석을 수행하였으며 그 결과는 표 3과 같다. 표 3에서와 같이 절리군 2의 경우 지하수위의 변동에 따라 평균 안전율이 1.19에서 0.79까지의 변화를 보이고 있다. 안전율의 평균 값을 기준으로 해석한 연구 대상 암반사면의 안정성은 건기시에는 안정한 것으로 해석되었으나 지하수위가 사면 높이의 70% 이상이 되었을 경우 평균 안전율이 1.0 이하로 떨어지면서 불안정해지는 것으로 해석되었다. 반면 점추정법에 의한 해석 결과에 따르면 건기시 동역학적 불안정성의 확률이 약 8.5%에 이르고 있다. Priest and Brown(1982)에 따르면 영구사면에 대한 허용 파괴확률은 약 1%, 임시 사면에 대한 허용 파괴확률은 10%가 적절한 것으로 제안하고 있어 연구 대상 사면의 경우 건기시에도 영구사면의 허용 파괴확률인 1%를 상회하고 있는 것으로 해석되어 안정성에 문제가 있는 것으로 보인다. 지하수위가 사면 높이의 20% 이상으로 상승하면 연구대상 사면은 동역학적 불안정성의 확률이 10%이상으로 증가하여 임시사면으로서도 부적합한 것으로 해석되었다. 따라서 본 사면은 신뢰성 이론에 기초한 해석 결과에 의해 매우 불안정한 것으로 판단되었다. 그러나 이러한 결과는 앞서 분석된 결정론적 해석 기법과 차이를 보이는 것으로 이러한 차이는 불연속면의 특성에 내재되어 있는 불확실성이 결정론적 해석에서는 반영되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

절리군 3의 경우 완전히 건조 사면에 대하여 계산된 평균 안전율은 0.365로 완전히 건조된 상태에서도 사면이 불안정한 것으로 분석되었으며 지하수위가 증가함에 따라 평균 안전율이 감소하는 것으로 분석되었다. 동역학적 불안정성의 확률은 완전히 건조한 상태에서도 100%를 보이고 있다.

6.3 해석 결과의 분석

앞서 언급한 바와 같이 결정론적 해석에서는 절리군 2에 대한 운동학적 불안정성의 가능성이 인지되지 않았으며 이것은 절리군 2의 대표 방향이 불안정한 조건에 일치되지 않기 때문으로 판단된다. 그러나 신뢰성 해석에서는 약 12%의 운동학적 불안정성의 가능성이 인지되었다. 동역학적 불안정성 해석의 경우 결정론적 해석에서는 해석조차 수행되지 않았으나 신뢰성 해석에서는 지하수위의 변동에 따라 8.5%에서 98.8%까지의 값을 보였다.

2.

Height of water table	Factor of safety
0%	0.364
10%	0.35
20%	0.31
30%	0.23
40%	0.13
50%	0

반면 절리군 3의 경우 결정론적인 해석과 신뢰성 해석의 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. 이 절리군은 결정론적 해석과 신뢰성 해석에서 모두 운동학적 불안정성의 가능성이 인지되었으며 동역학적 예에서도 안전율이 0에서 0.36의 값을 보여 결정론적 해석 결과 불안정한 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 신뢰성 해석의 결과와도 일치한다. 즉, 동역학적 불안정성의 확률은 건기시에도 100%를 보이고 있으며 이는 연구대상 사면이 매우 위험하며 평면파괴가 발생할 확률이 매우 높음을 보여주는 결과이다.

Level II의 신뢰성 해석과 Level III의 신뢰성 해석 결과를 비교해 보기 위해 Monte Carlo simulation 기법을 사용하여 안정성 해석을 수행하였다. 표의 결과에서와 같이 Level III의 해석 결과 역시 절리군 2와 3에 의해 사면의 불안정 가능성이 파악되었다. 또한 절리군 2에 대한 동역학적 불안정성의 확률은 건기 시 16.5%와 100% 포화 시에 85.6%를 보이고 있으며 절리군 3의 경우 건기 시의 87.5%에서 지하수위가 사면 높이의 절반에 도달했을 때 100%까지의 값을 보이고 있다. 그러나 Level II의 해석 결과는 Level III의 해석 결과와는 확률 수치상에서 차이를 보이고 있다. 이는 Level II의 해석 방법이 근사법이기 때문인 것으로 보인다. 또 다른 가능성은 Level II 신뢰성 해석에서 확률분포함수를 정규분포함수로 추정했기 때문으로 사료된다. Level II 신뢰성 해석에서는 확률변수의 평균과 표준 편차값만을 이용하여 파괴확률을 계산하므로 파괴함수에 대한 파괴 확률을 계산하는 과정에서 계산결과가 정규분포함수를 보인다는 가정 하에서 파괴확률을 산정한다. 따라서 Level III 신뢰성 해석에서 획득된 확률분포가 정규분포곡선을 보인다면 두 결과는 일치하게 되고 그렇지 않은 경우 약간의 차이를 보이게 마련이다.

7. 결론

본 연구에서는 암반사면의 안정성 해석과정에 포함되는 불확실성에 대해 정량적이고 객관적인 해석 결과를 획득하기 위하여 신뢰성 해석 기법을 이용하였다. 특히, 현장자료의 부족과 실내 실험 자료가 불충분할 경우 발생할 수 있는 신뢰성 해석 기법의 적용 제한을 극복할 수 있는 Level II 해석 기법을 이용하여 파괴확률을 산정하였으며 Level III 신뢰성 해석 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하고자 하였다. Level II의 해석기법은 제한된 자료를 이용하여 파괴확률을 산정하게 되므로 발생하는 추정치의 사용 및 확률분포함수의 가정 등과 같은 단점과 이에 따른 Level III 해석 결과의 차이 등 문제점을 가지고 있으나 계산 시간의 단축과 제한된 자료를 이용하여 손쉽게 파괴확률을 획득할 수 있다는 장점 등을 이용할 경우 현장에서 간편하게 파괴확률을 계산하거나 제한된 자료를 이용해야할 경우 등 적절하게 활용 가능할 것으로 보인다.

표 3. 점추정법과 Monte Carlo simulation에 의해 획득된 결과

Height of water table	Set 2				Set 3			
	Mean(FS)	STD(FS)	P _f (PEM)	P _f (M.C.)	Mean(FS)	STD(FS)	P _f (PEM)	P _f (M.C.)
0%	1.19	0.138	0.085	0.165	0.365	0.042	1.0	0.875
10%	1.18	0.137	0.088	0.170	0.351	0.041	1.0	0.907
20%	1.17	0.136	0.102	0.175	0.306	0.036	1.0	0.946
30%	1.15	0.134	0.125	0.217	0.232	0.027	1.0	0.974
40%	1.13	0.131	0.168	0.265	0.128	0.015	1.0	0.991
50%	1.09	0.126	0.237	0.324	0	0	1.0	0.998
60%	1.05	0.122	0.351	0.398				1.0
70%	0.99	0.115	0.517	0.495				
80%	0.94	0.109	0.724	0.639				
90%	0.87	0.100	0.905	0.730				
100%	0.79	0.092	0.988	0.856				

참고문헌

1. Kulatilake, P.H.S.W., Finely, R.E. and Ghosh, A. (1985), "Effect of variability of joint orientation and strength on factor of safety of wedge stability", *Proceedings of International Symposium on Foundations of Rock Joints*, pp. 25 -33.
2. Hoek, E. (1997), *Rock Slope Engineering Course Note*, Available: <http://www.rockeng.utoronto.ac/>
2. Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M. (1982), "A rejection criterion for definition of clusters in orientation data", *Proceedings of 22nd Symposium on Rock Mechanics*, pp. 116 -123.
3. Priest, S.D. (1993), *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman and Hall.
4. Priest, S.D. and Brown, E. T. (1983), "Probabilistic stability analysis of variable rock slope", *Trans. Inst. Min. Metall.*, 92.
5. Rosenblueth, E. (1975), "Point estimates for probability moments", *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 72.