

지반성질 불확실성을 고려한 사면안정 해석

Assessment of Slope Stability With the Uncertainty in Soil Property Characterization

김진만, Jinman Kim

현대건설(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.

SYNOPSIS : The estimation of key soil properties and subsequent quantitative assessment of the associated uncertainties has always been an important issue in geotechnical engineering. It is well recognized that soil properties vary spatially as a result of depositional and post-depositional processes. The stochastic nature of spatially varying soil properties can be treated as a random field. A practical statistical approach that can be used to systematically model various sources of uncertainty is presented in the context of reliability analysis of slope stability. Newly developed expressions for probabilistic characterization of soil properties incorporate sampling and measurement errors, as well as spatial variability and its reduced variance due to spatial averaging. Reliability analyses of the probability of slope failure using the different statistical representations of soil properties show that the incorporation of spatial correlation and conditional simulation leads to significantly lower probability of failure than obtained using simple random variable approach.

Key words : uncertainty, soil properties, random field, slope stability, reliability

1. 서론

자연현상에 의해 조성된 재료를 공학적 대상으로 하는 지반공학 분야에서는 공장이나 현장에서 일정한 규격에 맞추어 생산한 재료를 쓰는 구조, 기계분야 등 여타 공학 분야에 비해 설계재료의 공학적 성질을 파악하는 것이 상대적으로 어려운 실정이다. 게다가 시간적 경제적인 이유 등으로 지반구조물 전체를 대상으로 공학적 성질을 조사하지 못하고 극히 일부분에 대하여 수행한 조사 결과를 가지고 전체 재료 성질을 추정해야 하는 것이 현실이다. 이렇듯 지반구조물을 설계할 때 지반구조물을 형성하는 재료의 공학적 성질을 제대로 파악하는 것은 지반공학 분야에 종사하는 기술자들에게 있어 가장 중요한 일 중의 하나로 볼 수 있으나 측정기와 방법의 발전 속도에 비해 측정결과를 분석하여 설계정수를 도출하는 과정이 상대적으로 뒤쳐져 있다고 판단된다. 본 논문은 지반성질의 불확실성을 체계적으로 접근하는 다양한 확률통계 기법을 간략히 소개하고 사면안정 해석을 통해 이러한 기법들의 적용가능성과 장단점을 검토한다.

2. 지반성질의 불확실성 원인

지반 성질의 불확실성(geotechnical property uncertainty) 은 다양한 원인 (그림 1) 에서 기인하나 그 중에서도 본질적 변동성 (inherent variability, spatial variation), 측정 (조사) 오차 (measurement error), 통계 오차 (statistical error or uncertainty) 그리고 변환 모델 불확실성(transformation model uncertainty) 등 네 가지가 중요

한 원인이다. 지반의 본질적 변동성이란 생성, 풍화, 운반, 퇴적 과정 등 지반 형성 과정 (natural geologic formation process) 과 형성 후 지반의 변화 과정에서 지반구성 광물의 차이, 지반의 응력, 함수비 등등의 지반형성 조건의 차이에 따라 지반성질이 위치마다 다르고 또 연직방향과 수평방향의 성질이 차이가 나는 현상을 총칭한다.

지반성질이 불확실한 또 다른 이유로는 지반의 참(true) 성질과 측정된 값이 동일하지 않을 경우의 측정오차를 들 수 있다. 측정오차는 측정장비, 측정방법, 조사자, 그리고 무작위 실험 효과 (random testing effects) 등에 의해 발생한다. 장비 영향은 측정장비 자체의 부정확성이나, 일상적으로 사용되는 장비들의 형상 및 시스템이 서로 다른 이유 등에서 온다. 측정방법-인력의 영향은 시험계측 기준(code 또는 procedure) 의 한계와 측정자가 어떻게 이 기준에 따라 구체적으로 어떻게 조사를 수행 하였는 가의 문제이다. 따라서 일반적으로 계측 조사자에 크게 의존하거나 시험방법이 복잡할 때가 시험방법이 간단하거나 계측 조사자에 덜 의존하는 경우보다 조사결과의 변동이 크다.

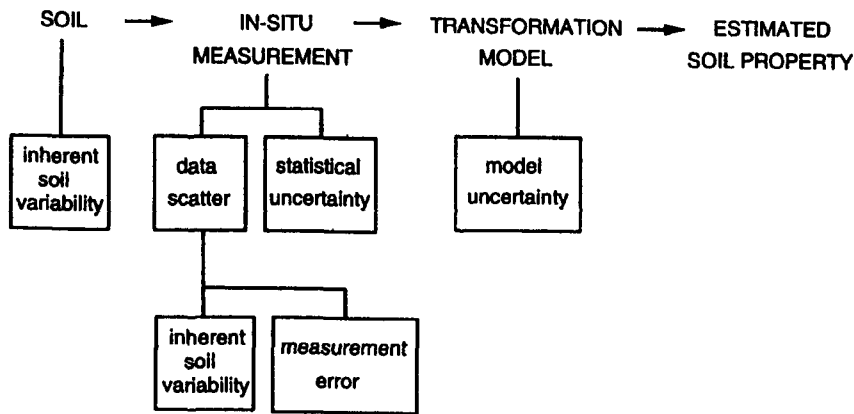


그림 1. Uncertainty in soil property estimates (Phoon and Kulhawy 1999).

통계오차 (statistical uncertainty or sampling error) 는 측정자료 부족 (통계적인 의미에서 모집단에 비해 적은 표본숫자) 에서 오는 오차이다. 이 오차는 조사량과 데이터가 증가함에 따라 감소한다.

변환 모델 오차 (transformation model uncertainty) 는 간접적 시험결과를 가지고 상관식을 이용해 현장 또는 실내 시험치를 설계 지반 정수로 변환하는 과정에서 발생하는 것이다. 예를 들어 지반의 유효 내부 마찰각은 삼축 또는 직접전단시험에 의해 직접 구할 수도 있지만 경제성 문제로 대부분 표준관입시험 (SPT) 이나 콘관입시험 (CPT) 또는 흙의 상대밀도 시험 결과와 마찰각 사이의 상관식으로부터 간접적으로 구하는 경우가 많다. 점성토의 비배수 강도도 소성지수, 액성한계, 함수비등 실내시험으로부터 얻은 교란토의 지수들로부터 추정 가능하다. 이와 같이 설계 지반정수를 시험결과로부터 추정할 때 변환이 필요한데, 변환오차 (transformation uncertainty) 는 이때 발생하는 것이다.

지반성질의 전체적 불확실성에 대한 상기 네 가지 원인의 상대적 중요도는 현장조건, 장비 및 측정 수행방법의 정밀도, 측정 횟수 그리고 변환 관련식 모델 (transformation model) 의 정밀도에 좌우된다. 따라서 전체적 불확실성만 고려해 얻어진 지반성질 통계치는 설계하고자 하는 지반구조물의 현장조건, 측정기법, 변환 관련식 등 특정한 조건들이 통계치를 얻은 대상과 매우 유사한 상황에서만 적용 가능하다.

3. 확률론계 기법을 이용한 불확실성 정량화

1970 년 Wu and Kraft 가 확률기법에 의한 사면안정 해석법을 제시한 후 해석 시 발생하는 설계 지반 정수의 불확실성을 체계적으로 고려하려는 수많은 방법이 제안되었다. 이중, 가장 보편적인 방법은 지반 성질을 간단한 랜덤 변수로 모델링 하는 것이다. (Christian et al. 1994). 이러한 방법은 겉보기로 등질인 구역 안에서 지반 성질이 완전한 관련성을 가진다는 가정에 기초한다. 다시 말해서 지반성질이 한 구역 안에서 모두 동일하다고 보는 것이다.

그러나, 이러한 완전관련성의 가정이 불확실성을 증가시킴으로서 사면파괴 확률을 과다 계산한다는 점 (다시 말해서 지나치게 보수적이 결과를 줌) 잘 알려져 있다. 공간적으로 변화하는 지반 성질의 불확실성은 Vanmarcke (1983) 가 제시한 랜덤필드 (random field) 로서 모델링 할 수 있다. 이 랜덤필드 모델은 공간적 변화를 체계적으로 표현해 줄뿐만 아니라 주어진 정보를 최대한 이용해서 결과적으로 불확실성을 최소화 할 수 있다. 과거 20 년간 랜덤필드 기법에 기초한 다양한 공간적 평균기법이 제시 되었는데 그 예로서 사면안정 해석, 원위치 지반조사, 지반 응답 해석, 액상화 위험 해석, 기초 침하 해석, 구조해석, 그리고 stochastic aquifer 모델링 등이 있다.

본 논문에서는 지반성질의 공간적 평균값의 통계를 제시하고자 한다. 그 이유는 토질은 일반적으로 소성적 변화를 보이며 토사사면의 안정성은 사면 활동면 상의 특정한 위치의 성질보다는 활동면의 평균적 성질에 의해 좌우되기 때문이다. 아울러 Vanmarcke (1977) 가 제시한 기존의 공간적 평균 방법을 연장하여 측정오차와 조사위치까지도 고려할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

3.1 랜덤필드 모델 (Random field mode)

Vanmarcke (1983)에 의하면 랜덤필드는 N 차원 변수공간에서의 랜덤변수의 집합으로 정의된다. 만약 랜덤필드가 가우시안 (Gaussian) 분포이면, 랜덤필드는 평균함수, 분산함수, 그리고 자체 상관성 함수로써 완전히 표현될 수 있다. 가우시안 이외의 랜덤필드는 일반적으로 2차 모멘트 통계함수 이상의 정보가 필요하다.

연속한 대상물 (랜덤필드) 에서는 전체 랜덤필드를 소규모 구역을 대표할 수 있는 랜덤 변수 벡터들로 적절히 분할하는 것이 필요하다. 연속적 랜덤필드를 랜덤변수 벡터로서 대표하기 위하여 다양한 분할 방법이 제안되었으며 중간점 법 (Midpoint method), 공간 평균법 (Spatial averaging method), 형상함수법 (Shape function method), 급수 전개법 (Series expansion method), 그리고 최적 선형 추정법 (Optimal linear estimation method) 등이 있다.

3.2 공간평균 통계

비록 중간점 법과 공간평균 법을 제외한 상기 방법들이 소구역 안에서의 랜덤필드의 연속적 변화를 표현할 수 있지만, 미소한 연속적 공간 변화를 자세히 표현하는 것이 꼭 필요한 것은 아니다. 예를 들면 토사 사면의 안정성 해석을 검토하는 경우 활동면의 토사가 일반적으로 소성변화를 보이며 따라서 토사사면의 안정이 활동면상의 특정 미소 지점의 지반강도 보다는 활동면의 평균적 전단 강도에 결정되는 경향을 보인다.

소구역 안의 랜덤 (지반) 성질 의 공간 평균치는 다음과 같이 적분의 형태로 정의 할 수 있다.

$$\bar{v} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} v(\mathbf{x}) d\mathbf{x} ; V = \int_{\Omega} d\mathbf{x} ; \mathbf{x} \in \Omega, \quad (1)$$

여기서, $d\mathbf{x}$ 는 3, 2, 그리고 1 차원 공간에서 각각 구역의 체적, 면적, 또는 선을 의미한다.

공간평균을 구하는 소구역이 통계적 의미에서 균질 (statistically homogeneous)의 지반일 경우 공간 평균값의 \bar{v} 의 일차모멘트와 이차 모멘트 통계특성을 다음과 같이 지점 (point) 통계 특성을 이용하여 표현할 수 있다 (Vanmarcke 1977). 즉 평균 (mean) 은:

$$E[\bar{v}] = E\left[\frac{1}{V} \int_{\Omega} v(\mathbf{x}) d\mathbf{x}\right] = \frac{1}{V} \int_{\Omega} E[v(\mathbf{x})] d\mathbf{x} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} \mu(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \mu \quad (2)$$

분산 (variance) 은:

$$\text{var}[\bar{v}] = \frac{\sigma^2}{V^2} \iint_{\Omega} \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{x} d\mathbf{x}' = \sigma^2 \cdot \gamma(\Omega_e) \quad (3)$$

여기서, $\gamma(\Omega_e) = \frac{1}{V} \iint_{\Omega_e} \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{x}d\mathbf{x}'$ 이고 $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{x}'$ 이다. 마찬가지로 상관성 (covariance) 은:

$$\text{cov}[\bar{v}, \bar{v}'] = \frac{\sigma^2}{V V'} \int_{\Omega_e} \int_{\Omega_e'} \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{x}d\mathbf{x}' = \sigma^2 \cdot \gamma(\Omega_e, \Omega_e') \quad (4)$$

여기서, $\gamma(\Omega_e, \Omega_e') = \frac{1}{V V'} \int_{\Omega_e} \int_{\Omega_e'} \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{x}d\mathbf{x}'$ 이며 랜덤 (지반) 성질 $v(\mathbf{x})$ 은 추세와 랜덤 요소로 분할하여 $v(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) + \varepsilon(\mathbf{x})$ 로 표현된다.

상기 식에서 $\gamma(\Omega_e)$ 와 $\gamma(\Omega_e, \Omega_e')$ 는 분산 (variance) 및 상관성 (covariance) 감소인자로 불려진다. 감소인자는 공간평균 COV (Coefficient of Variation) 과 지점값 COV의 비 (ratio) 이다. 감소인자는 상관성 함수와 소구역의 기하학적 특성만으로 결정되며, 지점분산의 대소와 무관하다는 점을 주목할 필요가 있다. 상관성이 항상 1 과 같거나 작기 때문에 감소인자는 0 과 1 사이의 값을 가진다. 따라서, 공간평균의 분산은 지점성질의 분산보다 항상 작으며, 소구역의 크기가 증가하면 감소한다.

3.3 조사자료에 의한 공간평균 통계특성

상기 식들은 지반전체의 통계적 특성을 완전히 알고 있다고 가정하고 전개한 것이다. 하지만 실제로는 지반성질을 결정함에 있어서 불확실성은 전장에서 설명한 바와 같이 공간적 변동성 이외에 조사와 자료분석 과정에서 생기는 여타 오차 원인을 포함한다. 즉 제한된 조사 자료와 측정 시 생기는 오차 (무작위 조사오차와 편향성을 포함한) 로 인해 생기는 부정확성을 고려해야 한다. 제한된 지면으로 인해 최종 결과만을 소개하고 구체적인 내용은 참고문헌 (Kim 2001, Kim and Sitar 2002, 김진만의 2003 등)을 참조하기 바란다.

3.3.1 비 조건적 방법 (Unconditional approach)

통계적 등질의 구역 (또는 지층) 의 N 개 지점 (또는 면적)에서 지반성질을 측정하였다고 가정하자. 따라서 각각의 측정값 v_i 은 참값 v_i 과 측정오차 e_i 를 합한 값이다. 따라서 만약 측정값의 편향도 B 까지를 고려하면 지반 성질의 참값은 다음과 같이 이론적으로 표현될 수 있다.

$$v_i = B v_i + e_i; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

참값은 알 수 없으므로 지반성질의 통계치는 측정값으로부터 추론한다. 우선 조사위치를 고려하지 않은 비조건적 방법(Unconditional approach) 으로 구한 추론치의 통계적 특성 (평균과 분산) 은:

$$E[v] \approx \hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [B v_i + e_i] \quad (6)$$

$$\text{var}[v] = s^2 + \sigma_e^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (v_i - \hat{\mu})^2 \quad (7)$$

식 (6) 과 식 (7) 은, 그러나, 조사수량이 늘어남에 따라 증가하는 측정값 평균 $\hat{\mu}$ 의 신뢰도에 관한 고려가 없다. 조사가 된 측정값 또는 참값은 전체 모집단에서 표본 채취한 무작위 변수들이 현실화 된 것으로 생각할 수 있으며

따라서 측정값 평균 μ 도 무작위 변수로 간주할 수 있다. 그러면 측정값 평균 μ 의 불확실성을 나타내는 분산도는:

$$\text{var}[\hat{\mu}] = \text{var}\left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_i V_i + e_i)\right] = \frac{\mu_B^2 \sigma^2 + \mu^2 \sigma_B^2 + \sigma_B^2 \sigma^2 + \sigma_e^2}{N} \quad (8)$$

한편 공간평균의 예측치 (expected value) 는 지점 평균 μ 을 측정값 평균 $\hat{\mu}$ 으로 대체하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[\bar{V}] = \mu \quad (9)$$

또한 공간평균의 분산은:

$$\text{var}[\bar{V}] = \frac{\mu_B^2 \sigma^2 + \mu^2 \sigma_B^2 + \sigma_B^2 \sigma^2 + \sigma_e^2}{N} + \sigma^2 \gamma(\Omega_e) \quad (10)$$

마찬가지로, 서로 떨어져 있는 두 개의 소구역 공간평균간의 상관성 (covariance) 은:

$$\text{cov}[\bar{V}, \bar{V}'] = \frac{\mu_B^2 \sigma^2 + \mu^2 \sigma_B^2 + \sigma_B^2 \sigma^2 + \sigma_e^2}{N} + \sigma^2 \gamma(\Omega_e, \Omega_e') \quad (11)$$

식 (10) 과 식 (11) 의 첫 부분은 통계 및 측정 오차를, 뒷 부분은 공간 평균으로 인한 감소된 본질적 불확실성 (분산)을 나타낸다. 그림 2 는 공간적 변동과 통계 오차간의 불확실성 크기를 비교하였다. 식 (10) 에서 지반자체의 고유한 불확실성과는 달리 측정값의 부정확성에 의한 오차는 공간적으로 평균하여도 감소하지 않으며 단지 조사량 N 에 좌우된다는 것을 알 수 있다.

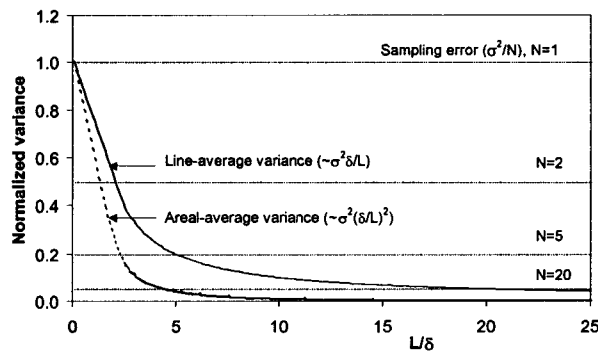


그림 2. Comparison of the uncertainty magnitudes.

3.3.2 조건적 방법 (Conditional Approach or Ordinary Kriging)

(지반성질) 랜덤필드를 시뮬레이션하는데 있어서 각각의 측정된 값을 조사 위치에서의 값으로 생성하는 것이 매우 바람직하다. 조건 접근법 또는 일반 크리깅 (Ordinary Kriging) 는 이러한 매우 바람직한 성질이 있으며 광물탐사를 포함해서 많은 분야에 광범히 사용되어 왔다 (Journel 1978). Kriging 기법은 선형 보간법의 하나로서 통계학에서 다루는 BLUE (Best Unbiased Linear Estimator) 기법과 사실상 동일하며, 구조 신뢰성 해석 분야에서의 최적 선형 추정법 (Optimal linear estimation method) 와 매우 유사하다. 전 절에서 거론한 비조건 접근법은 본 조건적

(크리깅) 방법의 특수한 사례라고 생각할 수 있다. 제한된 지면 사정상 크리깅 기법을 이용한 공간평균의 통계특성 도출하는 과정은 생략하였으며 자세한 내용은 참고문헌 (Kim 2001, Kim and Sitar 2002)을 참조하기 바란다.

소구역 a 의 공간평균 지반 성질은 인접한 위치에서 측정된 지반조사 결과의 선형 가중 합계 \hat{v}_a 로서 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{v}_a = \hat{v}(\mathbf{x}_a) = \sum_{j=1}^N w_{aj} v_j = \sum_{j=1}^N w_{aj} (B_j v_j^* + e_j) \quad (12)$$

상기 추정치가 편향되지 않고 오차가 최소한 되는 조건을 확률적으로 검토하여 다음과 같은 공간평균 \hat{v}_a 의 통계특성을 구할 수 있다. 즉 소구역 a 의 공간평균 추정치의 오차범위를 나타내는 분산은:

$$\sigma_{OK,a}^2 = E[(\hat{v}_a - v_a)^2] = \sigma_a^2 - \sum_{j=1}^N w_{aj} \sigma_{ja}^* + \lambda_a \quad (13)$$

마찬가지로 인접한 소구역 a 와 b 사이의 관련성은:

$$\sigma_{OK,ab} = E[(\hat{v}_a - v_a)(\hat{v}_b - v_b)] = \sigma_{ab} - \sum_{j=1}^N w_{aj} \sigma_{jb}^* + \lambda_a \quad (14)$$

식 (13) 과 식 (14) 에서 두 번째 부분은 공간 관련성의 결과로서 지점 지반성질의 분산보다 추정치 분산이 감소하는 것을 나타낸다.

4. 예제 해석

그림 3 에 표시한 점성토 사면의 파괴 가능성을 검토하고자 한다. 파괴 예상 단면에서 시추조사를 3공 수행하고 10 개의 시료를 채취하였다. 실내 전단시험 결과 시료의 비 배수 전단강도는 평균 45 kN/m^2 이고 표준편차는 13.5 kN/m^2 이었으며, 중량의 평균과 편차는 각각 18 kN/m^2 과 0.9 kN/m^2 이었다. 사면이 위치한 지역의 지질에 대한 과거 경험으로부터 본 지반은 등질의 랜덤 필드로 모델링 가능하고 수평 수직 변동자 (scale of fluctuation) 는 각각 $\delta_x = 5m$ 와 $\delta_y = 1m$ 로 판단되었다. 공간 관련성은 분리형 2-D exponential 자체 관련성 함수를 사용하였다.

단순 Bishop 방법을 이용한 사면 해석을 위해 가상활동 토체를 40개의 수직절편으로 나누었다. 평균 지반강도 값 ($\hat{\mu}$) 을 이용해서 확정적(Deterministic) 정적 사면 안정해석을 한 결과 1.52 의 안전율을 얻었다. 좀더 보수적인 지반정수 (전단강도는 평균 - 표준편차, 토사중량은 평균 + 표준편차) 를 입력한 결과 1.02 의 안전율을 보이었다.

랜덤 변수법과 랜덤필드로 지반성질을 모델링하여 신뢰성 해석(reliability)을 수행한 결과 (안전율) 를 그림 4 에 표시하였다. 평균은 기본적으로 모든 경우에 같으나 샘플링(통계) 오차를 포함한 경우 (조건 및 비조건 모두) 불확실성 증가로 인해 파괴확률이 증가하였다. 그림에서 안전율 분포중 FS 가 1 보다 작은 부분의 면적이 파괴확률이 다. 랜덤필드 모델에 기초한 방법과 달리, 랜덤 변수 방법에 의한 결과는 샘플링 오차를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 차이가 매우 적은 점에 주목하라. 지층을 하나의 랜덤변수로 표현하는 것 (이것은 변동자가 무한하다는 것과 동일하다)은 공간평균에 의해서 지반성질의 불확실성 (또는 분산) 감소를 고려하지 않기 때문에 결과적으로 매우 보수적인 결과를 주며 랜덤필드 모델을 이용한 경우보다 100 배나 높은 파괴확률을 보인다 (그림 5). 이와는 달리, 모든 토사 수직절편에 대해 독립적 랜덤변수를 부여하는 것은 지나치게 큰 분산감소로 인해 비보수적인 결론에 이를 수 있다. 그 이유는 절편숫자가 많아질수록 전체 지반성질의 분산감소가 증가하기 때문이며 결론적으로 틀린 방법이다.

변동자 (즉, 지반성질의 공간적 관련성) 는 사면안정에 상당한 영향을 주며 샘플링 오차를 고려하지 않은 비조건

적 방법이 특히 그러하다 (그림 5). 예상대로, 파괴위험도는 변동자가 증가함에 따라 상당히 증가한다. 이 예제의 경우 샘플링 오차로 인한 불확실성이 파괴 위험도에 상당히 영향을 주며 따라서 사면 안정 해석 시 샘플링 및 측정오차의 중요성을 예시하고 있다. 그러나 이러한 효과는 변동자가 증가하여 공간평균의 분산감소 효과가 감소함에 따라 감소한다. 반대로 샘플링 오차를 고려한 비조건적 방법과 조건적 방법은 상대적으로 변동자에 예민하지 않다. 이것은 변동자가 증가함에 따라 크리깅에 의한 분산감소는 증가하지만 공간평균에 의한 분산감소는 상대적으로 감소해 서로 상쇄되기 때문이다. 이러한 사실은 정확하게 변동자를 구하기 어려운 현실에 비추어 볼 때 향후 지반구조물 신뢰성 해석에서 중요한 의미를 갖을 수 있다.

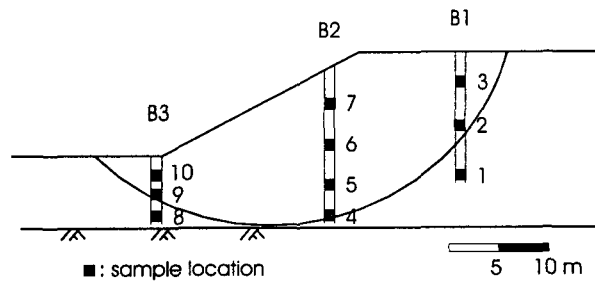


그림 3. Geometry and sample location of a cohesive slope with a circular slip surface.

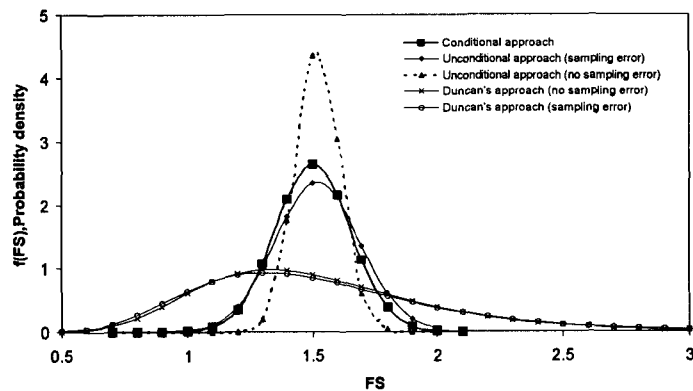


그림 4. Probability distributions of factors of safety ($\delta_x = 5m$, $\delta_y = 1m$).

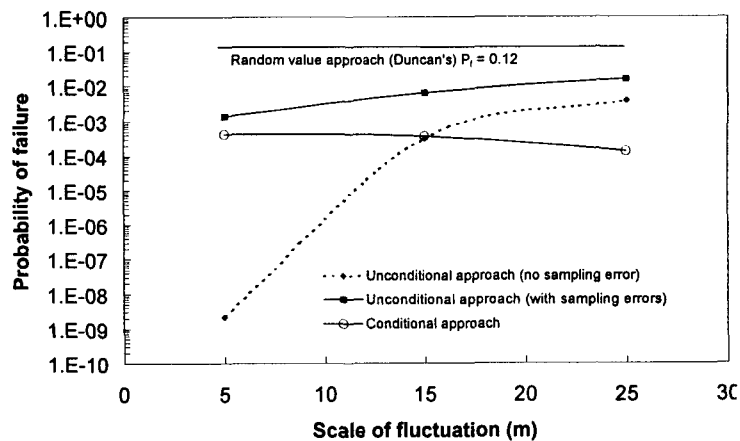


그림 5. Effects of the scale of fluctuation on the failure probability of the slope.

5. 결 론

지반의 공학적 성질 결정 시 생기는 다양한 불확실성을 체계적으로 모델링 할 수 있는 실용적인 통계적 접근법을 제시하였다. 재료성질의 공간적 변화와 공간 평균으로 인한 불확실성 감소뿐만 아니라 샘플링 및 측정오차로 인한 불확실성을 모두 고려할 수 있는 새로운 확률식을 제시하였다. 사면안정 문제를 다루었으나 제시된 방법은 지반공학에서 생기는 여타 문제들에도 일반적으로 적용 가능하다.

해석결과를 통해 공간 (local) 평균 성질의 불확실성은 지점 (point) 성질의 불확실성보다 항상 작다는 점을 확인하였다. 또 다른 중요한 결과는 공간평균의 분산은 차원이 높아짐에 따라 항상 감소한다. 따라서 면적 또는 체적에 대해 평균한 지반 성질의 불확실성은 지점의 그것보다 훨씬 작어진다.

지반성질의 공간적 불확실성 (inherent uncertainty) 달리 자료 부족과 조사의 부정확성으로 인한 불확실성은 공간적 평균으로는 감소하지 않으며 단지 조사 숫자에 좌우된다. 따라서 소구역 크기를 증가시키는 것은 분산감소에 국지적으로만 효과가 있으며 사면과파 위험성에 미치는 전체적 분산감소 효과는 소구역 크기와 상관없이 일정하다. 또한 평균을 취하는 소구역의 크기가 변동자에 대해서 충분히 크면 공간변화와 관련된 분산은 실제적으로 무시할 수 있고 (관련성은 무시할 수 없지만), 통계적 불확실성과 측정오차에 주의를 기울이어야 한다.

마지막으로, 다양한 통계기법을 이용한 사면안정의 신뢰성 해석 결과로부터 재료의 공간적 관련성 및 조사위치를 고려한 방법이 종래의 램덤 변수 방법에 비해 매우 안전한 결과를 보여준다. 계산시간이 상대적으로 오래 걸리지만 조건적 방법이 조사위치에서의 측정값을 존중하는 장점이 있으며 특히 상관성이 뚜렷한 랜덤필드에서 조사량이 많은 경우 적합하다.

6. 참고문헌

1. 김진만 외(2003), “제 2 장: 지반의 불확실성 및 정량화 기법”, 지반공학 시리즈 1, 지반조사결과의 해석 및 이용, 한국지반공학회, pp.43 ~ 58.
2. Christian, J. T., Ladd, C. C., and Baecher, G. B.(1994). “Reliability applied to slope stability analysis”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 120(12), pp.2180 ~ 2207.
3. Journel, A. G.(1989), Fundamentals of geostatistics in five lessons, American Geophysical Union.
4. Kim, J.(2001), Probabilistic approach to evaluation of earthquake-induced permanent deformation of slopes. Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Env. Engineering, University of California, Berkeley.
5. Kim, J., and Sitar, N.(2002), “Reliability analysis of slope stability with spatially correlated soil properties”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, (submitted for publication).
6. Phoon, K. and Kulhawy, F. H.(1999), “Characterization of geotechnical variability”, Canadian Geotechnical Journal, 36, pp.612 ~ 624.
7. Vanmarcke, E.(1983), Random fields: analysis and synthesis, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
8. Vanmarcke, E. H.(1977), “Probabilistic modeling of soil profiles”, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT11), 1227 ~ 1246.
9. Wu, T. H., and Kraft, L. M.(1970), “Safety analysis of slopes”, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ACSE, 96(SM2), pp.609 ~ 630.