

제방의 취약도 곡선 작성을 위한 실용적 신뢰성 해석의 적용성

Applicability of Practical Reliability Analysis to Develop Fragility Curves for Levee

조 성 은¹ Cho, Sung-Eun

Abstract

Developing a fragility curve for the levee requires calculating the probability of failure according to the water level for each failure mode. Since probabilistic analysis requires iterative analysis to account for variability in geotechnical parameters, the fragility curve development inevitably requires many iterative calculations. Therefore, approximate probabilistic analysis techniques are usually applied to reduce the amount of calculation in developing the levee fragility curve. However, their accuracy has not been determined clearly. This study calculated the failure probability of slope and piping failure mode for an actual levee through probabilistic methods, such as FOSM, PEM, and MCS. Then, the fragility curve of the levee according to the water level was developed. The results of the approximate methods: FOSM and PEM, were compared with those of MCS to evaluate the applicability to the fragility curve for slope and piping failure mode.

요 지

하천제방의 취약도 곡선을 구하기 위해서는 수위에 따른 파괴확률을 각 파괴모드 별로 구해야 한다. 확률론적 해석은 지반공학적 확률변수의 변동성을 고려하기 위하여 반복적인 해석을 필요로 하므로 취약도 곡선을 구하는 작업은 많은 반복 계산을 필연적으로 수반한다. 실제 제방의 취약도 곡선 작성에서는 계산량을 줄이기 위하여 단순화된 확률론적 해석기법을 적용하고 있으나 그 정확성에 대한 명확한 평가는 없는 형편이다. 본 연구에서는 실제 하천제방을 대상으로 확률론적인 방법에 의해 사면안정과 파이핑에 대한 파괴확률을 계산하여 제방의 안전도를 평가하고 수위에 따른 제방의 취약도 곡선을 구하였다. 이때 간략법인 FOSM과 PEM의 결과를 MCS의 결과와 비교하여 사면안정과 파이핑 파괴모드의 취약도 곡선 작성에 대한 적용성을 평가하였다.

Keywords : Fragility curve, Levee, Reliability analysis, Piping, Slope stability

1. 서 론

하천제방의 안정성 평가를 위한 결정론적인 접근법은 안전율을 사용하므로 설계변수의 불확실성을 정량

적으로 고려하지 못한다. 설계변수의 불확실성을 정량적으로 고려하는 확률론적 안정성 평가에서도 지반공학적 요인은 무시된 채 주로 수문 및 수리학적 요인인 월류에 대해서 고려하고 있다. 지반공학 분야의 확률론

¹ 정회원, 한경대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil and Environmental Engrg. & Construction Engrg. Research Institute, Hankyong National Univ., Tel: +82-31-670-5149, Fax: +82-31-678-4674, drsecho@hanmail.net, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

적 해석에 대한 연구는 꾸준히 수행되어 왔지만 실제 적용은 초기 단계에 있으므로 많은 경험의 축적이 필요하다. 하천제방의 지반공학적 안정성 평가에 확률론적 해석이 합리적으로 적용된다면 어느 구역, 어느 특정 단면의 신뢰도가 높은지, 혹은 어떤 설계기법이 다른 방법에 비해 신뢰도가 높은지 판단하는데 도움을 줄 수 있으며, 여러 지반공학적 파괴모드 중 어떤 파괴모드가 하천제방의 신뢰도를 지배하는지 판단할 수 있으므로 위험도 분석에 유용하게 사용될 수 있다.

한편, 기후변화로 인하여 하천제방의 설계기준을 넘어서는 극한 홍수가 발생하면서 이에 대비하기 위하여 예상되는 하중에 대한 구조물의 성능을 폭넓게 평가할 필요가 대두되었으며, 이를 위해 취약도 곡선(fragility curve)이 활용되고 있다(Simm and Tarrant, 2018; Rossi et al., 2021; USACE, 1996). 취약도 곡선은 가능한 범위의 하중 조건들에 대한 조건부 파괴확률을 나타내며 구조물의 성능은 취약도 곡선에 의해 특징지어질 수 있다(Kennedy et al., 1980; Tsompanakis et al., 2010).

실제 상황에서는 다양한 손상상태가 존재하므로 취약도 곡선은 손상을 단순히 파괴와 안전으로 구분하지 않고 손상의 범위를 고려할 수 있으나 댐 및 제방과 같은 수리구조물의 위험도 평가에 활용되는 취약도 곡선은 수위에 따른 조건부 파괴확률을 의미하여 손상 정도를 고려하지 않는 것이 일반적이다. 하천제방의 취약도 곡선은 노출될 가능성이 있는 수위에 대하여 제방의 신뢰도를 점이 아닌 곡선의 형태로 나타내므로 점으로 표현되는 신뢰도 정보보다 폭넓은 정보를 제공할 수 있다(Cho, 2019).

국내의 하천 수공구조물의 위험도 분석은 주로 수문학적 위험도 분석 위주로 실시되었으나(Han et al., 1997) 이후 하천제방 붕괴의 수리·수문학적 요인인 월류뿐 아니라 지반공학적 붕괴요인인 침식, 침투요인을 반영하는 종합적인 추계론적 안정성 평가로 확장되었다(Ahn, 2009; Nam et al., 2017, Lee, 2017).

하천제방의 안전도 평가를 위해 USACE(1996, 1999)는 취약도 곡선의 개념을 도입하였다. USACE는 사면 불안정, 파이핑, 제체를 통한 침투, 제체의 침식 등에 의한 파괴모드를 고려하였으며 FOSM(First-Order Second Moment) 기법에 의한 신뢰도 해석을 취약도 곡선 작성 절차로 제시하였다. 이후 하천제방의 취약도 곡선을 작성하기 위한 다양한 연구가 진행되었지만(Vorogushyn et al., 2009; Rice and Polanco, 2012; Moellmann et al.,

2011; Rossi et al., 2021), 실제 문제에 대한 적용성의 관점에서 유리한 USACE의 방법이 하천의 위험도 분석에 필요한 제방의 취약도 곡선을 작성하는 대표적인 절차로 활용되고 있다.

하천제방의 취약도 곡선을 작성하기 위해서는 확률론적 해석을 통하여 주어진 수위에 대한 파괴확률을 다양한 파괴모드에 대하여 구해야 하며, 이러한 과정을 수위를 변화시키며 반복적으로 수행해야 한다. 확률론적 해석은 지반 물성치의 불확실성으로 인한 변동성을 고려하기 위하여 반복적인 해석을 필요로 하므로 취약도 곡선을 구하는 작업은 필연적으로 여러 단계에서의 반복적인 계산을 수반한다. 따라서, 대부분의 취약도 곡선 작성에서는 계산량을 줄이기 위하여 제방의 거동 해석을 단순화하거나 적용이 간편한 실용적인 확률론적 해석기법을 활용한다. 즉, 제방의 거동 해석에 파괴 메커니즘을 단순화하여 고려하는 단순화된 이론해를 적극적으로 활용하며, 제방의 거동 해석에 수치해석 기법을 활용할 때에는 FOSM, PEM(Ponit Estimate Method) 등 단순화된 확률론적 해석기법을 적용하는 경우가 대부분이다. 실제 제방을 대상으로 하는 취약도 곡선 작성에는 USACE(1996)에 따라 제방의 주요 파괴모드인 침투에 의한 파이핑과 사면안정에 대하여 FOSM 방법을 적용하는 절차가 실용적으로 널리 사용되고 있으나 이 방법의 정확성에 대한 평가는 명확하지 않은 실정이다.

본 연구에서는 낙동강 본류의 문산제를 대상으로 확률론적인 방법들을 적용하여 사면안정과 파이핑 파괴모드에 대한 파괴확률을 계산하여 제방의 취약도 곡선을 작성하였다. 이때 간략법인 FOSM과 PEM의 결과를 MCS(Monte Carlo Simulation)의 결과와 비교하여 사면안정과 파이핑 파괴모드의 취약도 곡선 작성에 대한 적용성을 해석 시간 및 정확도 등의 관점에서 평가하였다.

2. 신뢰도 해석

2.1 부하-저항 모델

신뢰도는 시스템이 어떤 수행기준에 부합할 수 있는지에 관한 확률론적 척도로 정의되며 신뢰도 해석은 외력과 저항의 관계를 정립함으로써 이루어질 수 있는데, 시스템의 저항 R 은 시스템의 강도 및 외력에 전달 수 있는 하중 및 용량을 의미하고, 외력 L 은 파괴를 일으

키는 외부적인 부하, 요구 조건을 의미한다(Ahn, 2009).

신뢰도 해석에서 부하와 저항은 단일 한계상태함수로 결합되고 부하가 저항과 같을 때를 한계상태로 정의한다. 신뢰도는 한계상태를 초과하지 않는 확률이며 파괴확률은 한계상태를 초과하는 확률이다. 기본 랜덤변수의 벡터 $\mathbf{X}=[X_1, X_2, \dots, X_n]$ 에 의해 한계상태함수 $g(\mathbf{X})$ 가 정의되며 파괴확률은 다음과 같이 표현되는 적분식으로 정의된다(Cho, 2021).

$$P_f = P[g(\mathbf{X}) < 0] = \int_{g(\mathbf{x}) < 0} f_{\mathbf{X}}(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1, dX_2, \dots, dX_n \quad (1)$$

여기서, $f_{\mathbf{X}}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 는 기본 랜덤변수들 X_1, X_2, \dots, X_n 의 결합확률밀도함수(joint probability density function)이며, 파괴영역에 대하여 적분을 수행한다. 대부분의 실제 문제의 경우, 한계상태함수를 나타내는 기본 랜덤변수들의 결합확률밀도함수를 정의하고 물리적 거동을 나타내는 복잡한 적분 영역에 대하여 n 차의 다중적분을 수행하는 것은 거의 불가능하므로 식 (1)을 계산하기 위하여 다양한 확률론적 해석 기법이 사용된다(Cho, 2021). 확률론적 해석 기법은 크게 FOSM, PEM과 같이 각 랜덤변수들의 평균, 표준편차 등의 간단한 통계치만을 이용하는 근사확률해석기법과 MCS, FORM(First Order Reliability Method), SORM(Second Order Reliability Method)과 같이 관련 랜덤변수들에 대한 확률밀도함수 특성을 고려하여 계산하는 정밀확률해석기법으로 나눌 수 있다.

2.2 FOSM 방법

FOSM 기법은 한계상태함수를 임의의 점에서 Taylor 급수로 전개하여 1차 항만을 유지하고 고차 항은 생략한다. 이러한 단순화로 FOSM 방법은 실용성이 매우 높는데 이는 많은 문제에서 랜덤변수의 확률분포에 대한 정보를 얻는 것은 어렵지만 평균과 표준편차를 얻기는 비교적 쉽기 때문이다(Lee, 2017).

주어진 한계상태함수 $g = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 에서 모든 랜덤변수 X_i 가 서로 독립이라면 주어진 함수의 평균은 랜덤변수들의 평균에 대한 함수값을 계산하여 구할 수 있다(USACE, 1996).

$$E[g] = \mu_g \approx g(E[X_1], E[X_2], E[X_3], \dots, E[X_n]) \quad (2)$$

한계상태함수의 분산은 다음과 같이 계산된다.

$$Var[g] = \sigma_g^2 \approx \sum \left[\left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 Var X_i \right] \quad (3)$$

편미분 값은 랜덤변수의 평균±표준편차($\mu \pm \sigma$)의 두 점에서 한계상태함수를 계산하여 수치적으로 구할 수 있다. 미분값은 주어진 점에서 가장 정확하게 계산할 수 있지만 $\pm \sigma$ 영역에 대한 미분값을 계산함으로써 한계상태함수의 비선형성을 더 잘 반영할 수 있다(USACE, 1996).

$$\frac{\partial g}{\partial X_i} = \frac{g(E[X_i] + \sigma_{X_i}) - g(E[X_i] - \sigma_{X_i})}{2\sigma_{X_i}} \quad (4)$$

X_+ 와 X_- 를 랜덤변수의 평균+표준편차($\mu + \sigma$), 랜덤변수의 평균-표준편차($\mu - \sigma$)라 하면 식 (3)의 분산은 다음과 같아진다.

$$Var[g] \approx \sum \left[\frac{g(X_+) - g(X_-)}{2} \right]^2 \quad (5)$$

랜덤변수들이 서로 연관(correlated)된 경우라면 평균은 서로 독립인 경우와 같지만, 분산은 공분산(covariance)을 포함하는 항을 포함하게 된다(USACE, 1996).

평균과 표준편차가 계산되면 신뢰도 지수(reliability index)를 계산할 수 있으며 한계상태함수의 확률분포를 가정하여 파괴확률을 계산할 수 있다. FOSM 방법은 식 (5)의 각항의 크기로부터 각각의 랜덤변수들이 불확실성에 기여하는 상대적인 크기를 알 수 있으며 일차의 한계상태함수에 대해서는 정확한 해를 준다.

2.3 점추정법(PEM)

Rosenblueth(1975)의 점추정법은 사면안정과 같은 지반의 신뢰성 해석에 널리 사용돼 왔다. 점추정법의 핵심은 FOSM 방법과 마찬가지로 한계상태함수의 평균과 표준편차를 계산하는 것이다. 이 방법은 하나의 랜덤변수에 대하여 두 개의 샘플링 점($\mu + \sigma$, $\mu - \sigma$)이 선정되므로 안전율이 n 개의 랜덤변수로 표현되면 2^n 개의 샘플링

플링 점에서 한계상태함수를 계산해야 한다. 한계상태함수의 평균과 표준편차는 다음과 같이 계산된다(Wang and Huang, 2012).

$$E[g] = \mu_g \approx \sum_{i=1}^{2^n} P_i \times g_i \quad (6)$$

$$Var[g] = \sigma_g^2 \approx \left(\sum_{i=1}^{2^n} P_i \times g_i^2 \right) - \mu_g^2 \quad (7)$$

여기서, g_i 와 P_i 는 i 번째 샘플링 점에서의 한계상태함수의 값과 가중치이다. P_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_i = \frac{1 + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \rho_{jk} \times A}{2^n}; j \neq k \quad (8)$$

여기서, ρ_{jk} 는 랜덤변수들 사이의 상관계수, A 는 행렬식(determinant)로 두 변수가 모두 양의 점추정($\mu + \sigma$)을 사용하거나 모두 음의 점추정($\mu - \sigma$)을 사용하면 1이며, 그 외에는 -1을 갖는다.

FOSM 방법과 마찬가지로 한계상태함수의 평균과 표준편차가 계산되면 한계상태함수의 확률분포를 가정하여 파괴확률을 계산할 수 있다.

Rosenblueth(1975)의 점추정법은 확률변수 사이의 상관성(correlation)을 고려할 수 있으나 랜덤변수의 수가 증가하면 샘플링 수가 급격히 증가하므로 랜덤변수의 수가 많은 문제에서는 수치해석과 연계한 확률론적 신뢰성 평가가 실용적이지 못할 수 있다.

2.4 신뢰도 지수

FOSM 방법과 PEM에서는 랜덤변수의 확률분포에 대한 정보가 필요하지 않기 때문에, 한계상태함수의 확률분포는 정의되지 않은 상태로 남게 된다. 만약 부하와 저항이 정규분포를 따르면 $g = R - L$ 도 정규분포를 따르며 파괴확률은 다음과 같이 계산된다.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad (9)$$

여기서, Φ 는 표준정규누적분포함수이고 신뢰도 지수 β 는 다음과 같이 구해진다.

$$\beta = \frac{E[g]}{\sigma_g} = \frac{E[R-L]}{\sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_L^2)}} \quad (10)$$

R 과 L 이 대수정규분포를 따른다면 신뢰도 지수는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{E[\ln R - \ln L]}{\sigma_{(\ln R - \ln L)}} = \frac{E[\ln R/L]}{\sigma_{\ln R/L}} \quad (11)$$

이때 랜덤변수 X_i 의 $E[X_i]$ 와 σ_{X_i} 로부터 $E[\ln X_i]$ 와 $\sigma_{\ln X_i}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{X_i} = \frac{\sigma_{X_i}}{E[X_i]} \quad (12)$$

$$\sigma_{\ln X_i} = \sqrt{\ln(1 + V_{X_i}^2)} \quad (13)$$

$$E[\ln X_i] = \ln E[X_i] - \frac{1}{2} \ln(1 + V_{X_i}^2) \quad (14)$$

사면안정 문제에서 가정하는 안전율의 확률분포에 따라 신뢰도 지수는 다음과 같이 계산된다.

$$\beta = \frac{E[F_s] - 1}{\sigma_{F_s}}; \text{ (정규분포)} \quad (15)$$

$$\beta = \frac{E[\ln F_s]}{\sigma_{\ln F_s}}; \text{ (대수정규분포)} \quad (16)$$

여기서, F_s 는 사면의 안전율이다.

침투에 따른 파이핑 문제에서 가정하는 유출동수경사(exit gradient) i_e 의 확률분포에 따라 신뢰도 지수는 다음과 같이 계산된다.

$$\beta = \frac{i_{crit} - E[i_e]}{\sigma_{i_e}}; \text{ (정규분포)} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\ln i_{crit} - E[\ln i_e]}{\sigma_{\ln i_e}}; \text{ (대수정규분포)} \quad (18)$$

여기서, i_{crit} 는 지반의 한계동수경사이다.

2.5 Monte Carlo Simulation

MCS는 식 (1)을 계산하기 위하여 확률변수들의 확률분포 특성이 반영된 난수를 발생하여 표본집단을 생성한 후, 한계상태식을 계산하고 이 과정을 충분한 수만큼 반복하여 파괴확률을 추정하는 방법이다. 샘플링은 Random 샘플링 기법이나 Latin hypercube 샘플링 기법에 의해 수행된다.

지반공학에서 확률론적 해석은 지반구조물의 확률론적 거동을 결정하거나 신뢰성을 평가하기 위해 사용된다. 지반의 거동은 강한 비선형성을 나타내며 지반의 물성은 큰 변동성을 갖는다. 이런 경우에도 정확한 해를 얻을 수 있는 유일하고 보편적인 해석 방법은 MCS이다. MCS는 파괴확률뿐 아니라 지반의 거동에 대한 평균, 표준편차, 확률밀도함수 및 누적확률분포 등의 정보를 평가할 수 있으므로 주어진 시스템에 대한 보다 다양한 정보를 제공한다(Cho, 2011).

3. 하천제방의 취약도 곡선 작성

우리나라의 주요 하천 본류에 설치된 제방은 엄격한 기준에 의하여 설계 및 시공, 유지관리가 수행되어 파괴확률이 현저하게 낮게 평가되는 중요 방재 관련 사회기반시설이다.

지반구조물의 확률론적 해석에 사용되는 방법은 여

러 가지가 있으나 해석 방법에 따라 정확도가 다르며 각각 장단점을 가지고 있다. 제방의 경우 긴 유역을 따라 다수의 단면에 대한 해석이 수행되어야 한다. 또한 선정된 각각의 단면에 대하여 복수의 파괴모드를 고려해야 하며, 각각의 파괴모드에 대한 취약도 곡선을 작성하기 위해 수위의 변화에 따른 확률론적 해석을 수행해야 하므로 해석 방법의 선정에는 많은 양의 해석을 수행해야 하는 점을 고려하여야 한다. 실무에서 이루어지는 제방에 대한 해석은 복잡한 기하학적 형상, 층상구조, 하중조건 등을 고려하기 위해 대부분 수치해석 기법을 사용한다. 따라서 확률론적 해석의 한계상태함수는 랜덤변수에 대하여 명시적인(explicit) 형태로 표시될 수 없으며 음함수(implicit)의 형태로 표시되는 점도 고려해야 한다.

3.1 해석 대상

본 연구에서는 낙동강 본류의 문산제를 대상으로 사면안정과 침투에 의한 파이핑에 대한 파괴확률을 계산하여 제방의 수위에 따른 취약도 함수를 구하였다. Fig. 1 및 Table 1은 해석에 사용된 제방의 제원 및 지반 물성치로 낙동강 살리기 사업의 지반조사보고서(Kwater, 2010)를 참고하였다. 침윤선 상부에 존재하여 해석에 불포화특성이 필요한 매립층의 함수특성곡선은 실내시험 결과를 반영하여 Fig. 2와 같이 적용하였다.

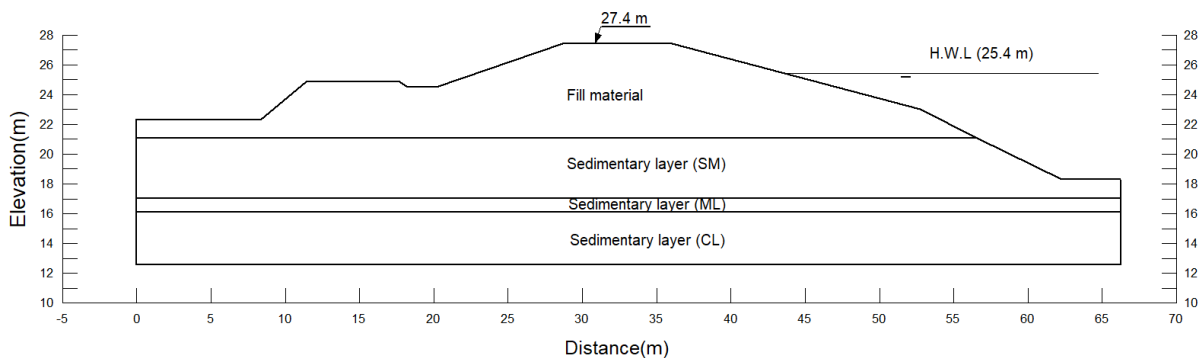


Fig. 1. Levee cross-section and geological configuration

Table 1. Input soil parameters used for analysis

	Unit weight, γ (kN/m ³)	Internal friction angle, ϕ (°)	Cohesion, c (kPa)	Hydraulic conductivity, k (m/sec)
Fill material	17	25	5	8.0×10^{-5}
Sedimentary layer (SM)	17	25	5	2.0×10^{-5}
Sedimentary layer (ML)	18	—	50	2.0×10^{-7}
Sedimentary layer (CL)	18	—	50	2.0×10^{-7}

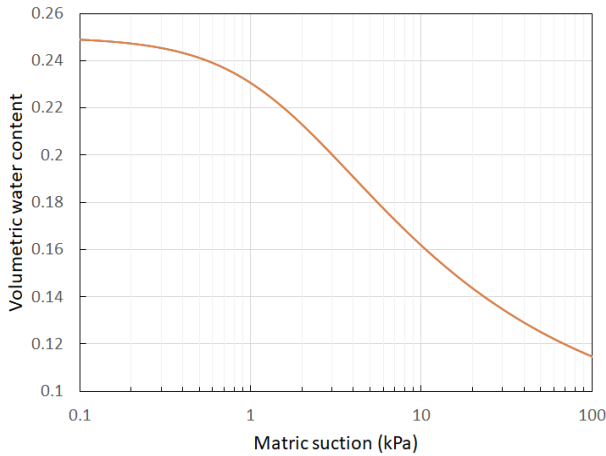


Fig. 2. Soil-water characteristic curve of fill material

3.2 사면안정에 대한 취약도 곡선

사면안정해석은 한계평형법에 이론적 바탕을 둔 해석 프로그램인 Slide V6.0(RocScience, 2016)을 사용하였다. Slide는 특히 확률론적 해석에 강점을 가진 상업용 프로그램으로 수위에 따른 제체의 침윤선 및 간극수압 분포를 유한요소 침투해석으로 구하여 사면안정 해석에 반영하는 기능을 내장하고 있다. 안전율은 제방의 사면안정 평가에 널리 사용되는 Bishop의 간편법을 적용하여 계산하였다. Bishop의 간편법은 모멘트평형만 만족시키지만 충분히 정확한 안전율을 평가하여 원호 파괴면에 널리 사용되는 방법이다.

Fig. 3은 제외지의 수위가 홍수위인 EL. 25.4m에서 정상상태에 도달했을 때, Table 1의 물성치(평균값)에 대한 결정론적 사면안정 해석의 결과이다. 최소안전율은 1.685로 계산되었으며 임계파괴면은 제내지 소단의 사면에 위치하였다. 홍수위에서 침윤선이 제내지까지 도달한 상태임에도 문산제의 안전율은 매우 큰 상태임을 알 수 있다.

확률론적 해석을 위해 매립층, 퇴적층(SM)의 점착력

과 내부마찰각을 대수정규분포를 따르는 서로 독립적인 $n=4$ 개의 랜덤변수로 고려하였다. 문헌에 제시된 지반물성의 변동성에 대한 가이드라인(Baecher and Christian, 2003; Phoon and Kulhawy, 2008)으로부터 점착력의 변동계수는 0.4, 내부마찰각의 변동계수는 0.1을 적용하였다. 사면안정 해석을 위한 제체의 침윤선과 간극수압 분포는 정상상태 침투해석의 결과를 이용하였다.

각각의 수위에 대하여 FOSM 방법을 적용하기 위한 총 $2n+1=9$ 회의 반복적인 사면안정해석을 Bishop의 간편법에 따라 수행하였다. Fig. 4는 수위가 25.4m인 경우의 파괴확률을 구하기 위한 계산과정을 보여준다. 매립층의 점착력이 안전율의 분산에 가장 큰 영향을 미쳤다(91.74%). Fig. 5는 수위가 25.4m인 경우의 파괴확률을 PEM을 적용하여 구하기 위한 계산과정을 보여주며 총 $2^n=16$ 회의 사면안정해석이 수행되었다. FOSM 방법과 PEM에 의해 안전율의 평균과 표준편차가 구해지면 안전율의 확률분포를 대수정규분포로 가정하여 Fig. 4와 Fig. 5의 하단과 같이 파괴확률을 구할 수 있다.

FOSM 방법 및 PEM의 정확도를 비교하기 위하여 Slide를 사용하여 MCS를 수행하였다. Slide에는 MCS를 수행할 때 결정론적 해석에서 결정된 파괴면을 고정한 상태에서 샘플링된 지반변수들에 대하여 해석을 수행하는 MCS(Global minimum)과 샘플링된 지반변수들에 대하여 매번 임계파괴면을 탐색하는 MCS(Overall slope)의 두 가지 해석기능이 있다. MCS(Global minimum)은 고정된 파괴면에 대하여 시행 횟수만큼 안전율만 계산하므로 계산 시간이 매우 짧으나 샘플링된 랜덤변수의 변동에 따라 파괴면이 변할 수 있는 가능성을 무시하므로 경우에 따라 결과에 큰 오차가 발생할 수 있다. 반면에 MCS(Overall slope)은 파괴면을 가정하지 않고 매번 탐색하므로 정확한 결과를 얻을 수 있지만 계산 시간이 과도하게 소요되는 단점이 있다. MCS(Overall slope)은 매번 최소안전율을 주는 임계파괴면을 탐색하므로 항

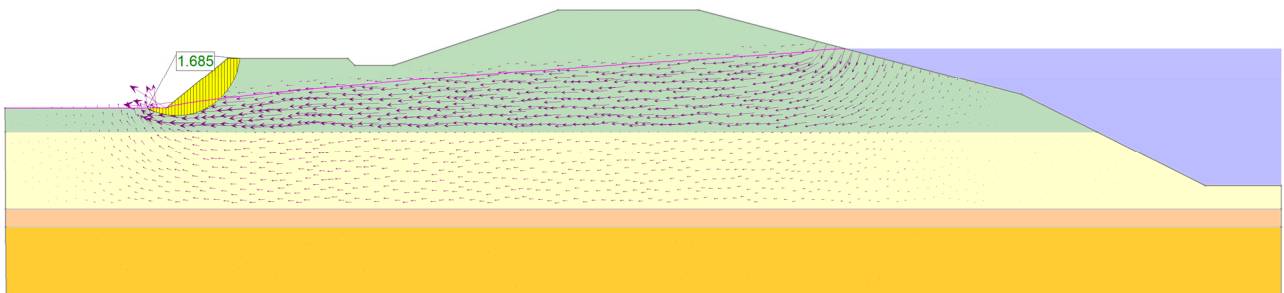


Fig. 3. Result of deterministic slope stability analysis (Bishop's simplified method, H=25.4m)

Run	c(Fill)(kPa)	ϕ (Fill)(°)	c(SM)(kPa)	ϕ (SM)(°)	FS	Variance	Percent of total variance
1(mean)	5.0	25.0	5.0	25.0	1.685		
2	3.0	25.0	5.0	25.0	1.353	0.105625	91.74%
3	7.0	25.0	5.0	25.0	2.003		
4	5.0	22.5	5.0	25.0	1.59	0.009506	8.26%
5	5.0	27.5	5.0	25.0	1.785		
6	5.0	25.0	3.0	25.0	1.685	0	0.00%
7	5.0	25.0	7.0	25.0	1.685		
8	5.0	25.0	5.0	22.5	1.685	0	0.00%
9	5.0	25.0	5.0	27.5	1.685		
Total						0.115131	100.00%
StDev=						0.33931	

FS follows a lognormal distribution			
E[FS]=	1.685	FS _{crit} =	1.000
Var[FS]=	0.11513125	ln[FS _{crit}]=	0
σ [FS]=	0.33930996		
V(FS)=	20.14%	P _r =	5.9122.E-03
E[lnFS]=	0.50189074		
σ [lnFS]=	0.19937314		
β =	2.51734383		

Fig. 4. Spreadsheet for slope stability by FOSM method (H=25.4m)

Run	c(Fill)(kPa)	ϕ (Fill)(°)	c(SM)(kPa)	ϕ (SM)(°)	FS	P	P*(FS)	P*(FS) ²
1	7	27.5	7	27.5	2.114	0.0625	1.32E-01	2.79E-01
2	7	27.5	7	22.5	2.114	0.0625	1.32E-01	2.79E-01
3	7	27.5	3	27.5	2.096	0.0625	1.31E-01	2.75E-01
4	7	27.5	3	22.5	1.959	0.0625	1.22E-01	2.40E-01
5	7	22.5	7	27.5	1.893	0.0625	1.18E-01	2.24E-01
6	7	22.5	7	22.5	1.893	0.0625	1.18E-01	2.24E-01
7	7	22.5	3	27.5	1.893	0.0625	1.18E-01	2.24E-01
8	7	22.5	3	22.5	1.825	0.0625	1.14E-01	2.08E-01
9	3	27.5	7	27.5	1.451	0.0625	9.07E-02	1.32E-01
10	3	27.5	7	22.5	1.451	0.0625	9.07E-02	1.32E-01
11	3	27.5	3	27.5	1.451	0.0625	9.07E-02	1.32E-01
12	3	27.5	3	22.5	1.451	0.0625	9.07E-02	1.32E-01
13	3	22.5	7	27.5	1.257	0.0625	7.86E-02	9.88E-02
14	3	22.5	7	22.5	1.257	0.0625	7.86E-02	9.88E-02
15	3	22.5	3	27.5	1.257	0.0625	7.86E-02	9.88E-02
16	3	22.5	3	22.5	1.257	0.0625	7.86E-02	9.88E-02
Sum=							E[FS]	E[FS] ²
							1.6636875	2.874478813

FS follows a lognormal distribution			
E[FS]=	1.6636875	FS _{crit} =	1.000
Var[FS]=	0.1066227		
σ [FS]=	0.3265313		
V(FS)=	0.196	P _r =	5.8503.E-03
E[lnFS]=	0.4901374		
σ [lnFS]=	0.1944179		
β =	2.5210504		

Fig. 5. Spreadsheet for slope stability by PEM (H=25.4m)

상 MCS(Global minimum)에 의한 파괴확률 이상의 파괴확률값을 준다. 사면안정 해석은 임계파괴면을 찾기 위해 많은 반복적인 계산이 수행되고, 파괴확률이 작은 경우에는 해의 수렴을 위해 MCS의 시행 횟수가 증가하

므로 해석에 소요되는 시간의 관점에서 매번 임계파괴면을 탐색하는 것은 실용적으로 사용하기 어려운 선택이다. 본 연구에서는 MCS의 두 가지 해석기능을 모두 적용하여 4개의 랜덤변수를 Latin hypercube sampling

에 의해 1,000,000회 샘플링 한 후 안정해석에 의해 안전율을 계산하였다.

Fig. 6은 각각의 확률론적 방법들로부터 얻은 취약도 곡선을 비교한 것이다. 모든 수위에 대하여 FOSM 방법과 PEM의 파괴확률은 유사한 값을 보였으나 FOSM 방법이 PEM에 비해 반복 계산 횟수가 적으므로 더 효율적이라 할 수 있다. FOSM 방법과 PEM의 파괴확률은 항상 MCS에 의한 파괴확률보다 큰 값을 나타내나 차이의 절댓값은 크지 않으므로 간략법인 FOSM 방법과 PEM을 사면안정에 대한 취약도 곡선 작성에 효과적으로 적용할 수 있다. 특히 간략법의 결과와 가장 정확한 해로 여겨지는 MCS(Overall slope)의 결과는 매우 유사한 곡선 형태를 나타내고 있어 수위에 따른 위험도 평가에 합리적으로 사용할 수 있다고 판단된다.

앞서 언급한 바와 같이 항상 MCS(Overall slope)은 MCS(Global minimum)에 비해 큰 파괴확률을 나타내고 있다. 저수위 영역에서는 두 방법의 값이 차이를 보이고 있으며 곡선의 모양도 다르게 나타나나 고수위 영역에서는 일치하는 결과를 나타내고 있다. 실제 제방에서는 수위가 낮은 경우보다 수위가 높은 경우의 안정성 및 위험도 평가가 중요하므로 계산 시간을 고려하면 MCS(Global minimum)도 효율적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

Fig. 7은 수위가 25.4m에 위치할 때 각 방법에 따른 안전율의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)와 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 비교한 것이다. FOSM 방법과 PEM은 안전율의 평균과 표준편차만 계산하고 확률분포에 대한 정보는 제공하지 않으므로 대수정규분포 가정을 적용하였다. 사용

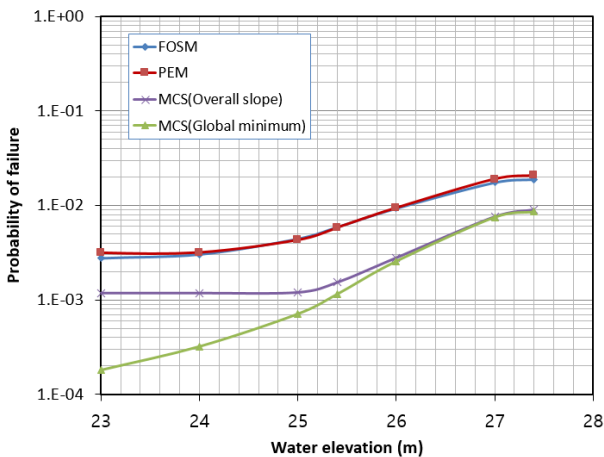
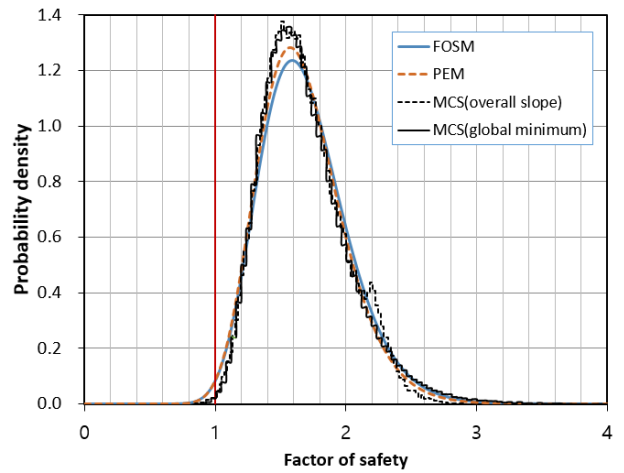
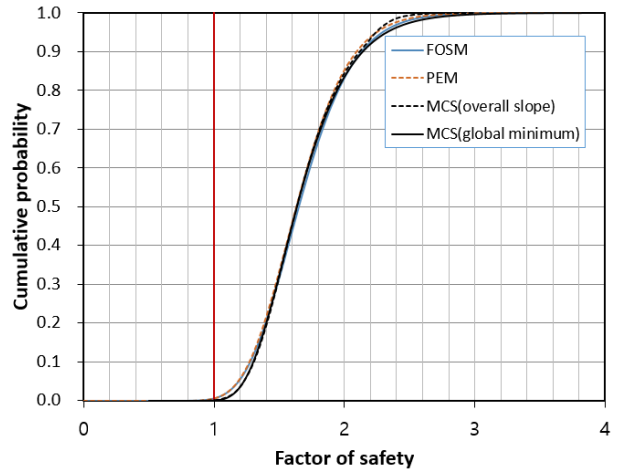


Fig. 6. Comparison of fragility curves for slope failure mode

된 방법에 상관없이 안전율의 확률분포가 유사하게 평가되므로 사면안정 문제에서는 정확도 면에서 확률론적 해석 방법에 따른 적용성에 큰 차이가 없는 것으로 평가된다. 다만, 실용적인 면에서 소요되는 계산 시간에 차이가 나므로 효율성이 해석 방법 선택의 기준이 될 수 있다. Table 2는 각 방법에 따라 평가된 안전율의 평균과 표준편차를 나타내며 대체로 모두 유사한 결과를 주고 있다.



(a) PDF



(b) CDF

Fig. 7. Comparison of probability distribution of MCS and FOSM/PEM results (slope stability, H=25.4m)

Table 2. Summary of comparison for slope stability (H=25.4m)

	Mean, μ_{F_s}	Standard deviation, σ_{F_s}
FOSM	1.685	0.339
PEM	1.664	0.327
MCS (Overall slope)	1.670	0.307
MCS (Global minimum)	1.684	0.346

3.3 파이핑 파괴에 대한 취약도 곡선

제체 및 기초지반을 통한 흐름에 대한 제방의 안정성을 검토하기 위해서 침투수가 유출되는 제내지 사면의 선단에서 상향의 유출동수경사 i_e 와 한계동수경사 i_{crit} 를 비교한다. 유출부의 동수경사를 구하기 위해 Seep/W와 같은 침투해석 프로그램이 사용되지만, 대부분의 상업용 해석 프로그램에는 MCS를 수행할 수 있는 기능이 없으므로 본 연구에서는 포화-불포화 이론 기반의 유한요소해석 프로그램(Cho, 2011; Cho, 2012; Cho, 2021)을 작성하여 사용하였다.

Fig. 8은 수위가 홍수위인 25.4m일 때 Table 1의 물성치에 대한 결정론적 해석의 결과이며 총수두와 흐름벡터의 분포를 나타내고 있다. 유출부에서의 동수경사는 0.2로 일반적인 모래지반의 한계동수경사보다 매우 작은 값을 보여 높은 안전율을 갖는다.

확률론적 해석을 위해 매립층, 퇴적층(SM), 퇴적층(ML), 퇴적층(CL)의 투수계수를 서로 독립적인 4개의 랜덤변수로 고려하였다. 투수계수는 큰 불확실성을 보이는 지반의 물성치이므로 문헌(Baecher and Christian, 2003; Phoon and Kulhawy, 2008)을 참고하여 변동계수는 0.9로 설정하였다.

한계동수경사 $i_{crit} = 0.8$, 수위가 25.4m인 경우에 대한 FOSM 방법의 해석에 의하면 모든 랜덤변수의 기여를 합한 유출동수경사의 총 분산은 0.0037이며 매립층의 기여도가 95.5%, 퇴적층(SM)의 기여도가 4.5%이고 나머지 2개 층은 거의 영향을 주지 않았다. 확률론적 해석을 위해 FOSM 방법은 총 9회, PEM은 총 16회의 침투해석이 수행되었다. FOSM 방법 및 PEM의 결과와 비교하기 위하여 4개의 랜덤변수를 Latin hypercube sampling에 의해 100,000회 샘플링 한 후 정상상태 침투해석을 반복하여 MCS를 수행하였다.

수위를 증가시키며 반복하여 계산하면 수위에 따른

파괴확률을 구할 수 있으며 Fig. 9(a)는 $i_{crit} = 0.8$ 일 때, 각각의 방법들에 따라 작성한 취약도 곡선을 비교한 것이다. 문산제의 경우, 제체의 사면 경사가 매우 완만하고 축조재료(매립층)와 퇴적층(SM)의 투수계수의 특성이 매우 유사하여 유출면에서 매우 작은 동수경사가 발생하고 침투에 따른 파이핑 파괴에 대한 확률이 매우 작은 것으로 평가되었다. 파이핑 파괴의 경우에 FOSM 방법과 PEM의 차이가 크게 나타났으며 동일한 수위에 대하여 PEM이 더 큰 파괴확률을 나타냈다. $i_{crit} = 0.8$ 인 경우에는 파이핑에 대한 파괴확률이 매우 작으므로 수위가 제방고에 도달한 경우를 제외하고는 100,000회의 시행에서 MCS에 의한 파괴확률이 수렴하지 않아 MCS에 의한 취약도 곡선은 구할 수 없었다.

FOSM 방법, PEM, MCS에 의한 취약도 곡선을 비교하기 위하여 i_{crit} 가 0.5, 0.4인 경우에 대하여 Fig. 9(b), 9(c)와 같이 취약도 곡선을 작성하였다. 이 경우에 수위가 25.4m 이상이면 MCS에 의한 파괴확률이 수렴하였으나 수위가 낮은 경우에는 파괴확률이 매우 작아 여전히 수렴하지 않았다. 실제 제방의 취약도 곡선에서 수위가 낮은 경우에는 파이핑 파괴의 가능성이 거의 없으므로 중요도가 높지 않으며 파괴가 급격하게 증가하는 수위 및 파괴확률이 크게 평가되는 부분의 중요도가 더 높다.

상세한 비교를 위해 Fig. 10에 수위가 25.4m에 위치할 때 각 방법에 따른 유출동수경사의 확률밀도함수(PDF)와 누적분포함수(CDF)를 제시하였다. FOSM 방법과 PEM은 확률분포에 대한 정보를 제공하지 않으므로 대수정규분포 가정을 적용하였다. 파괴확률은 Fig. 10(a)의 확률밀도함수에서 $i_e > i_{crit}$ 인 영역의 면적과 같다. MCS에 의한 확률분포가 오른쪽으로 긴 꼬리를 갖는 비대칭이고 뾰족한 모양을 나타내며 유출동수경사가 0.19 이하로는 발생하지 않고 대부분의 유출동수경사의 분포는 0.19~0.2 사이에 분포되어 있음을 알 수 있

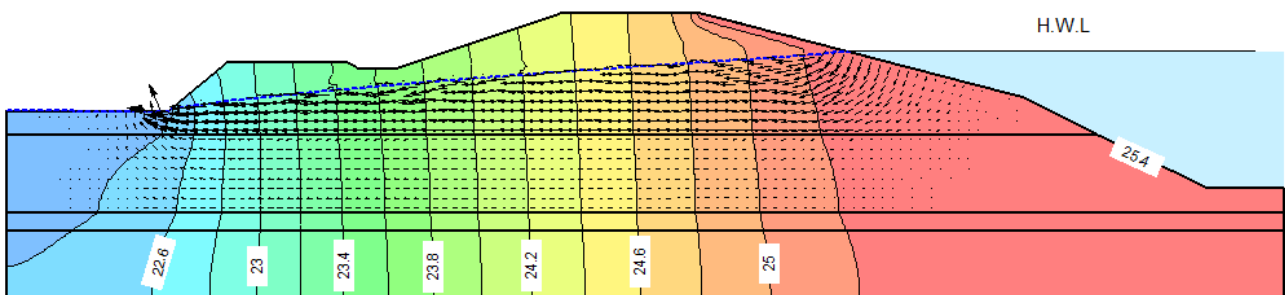
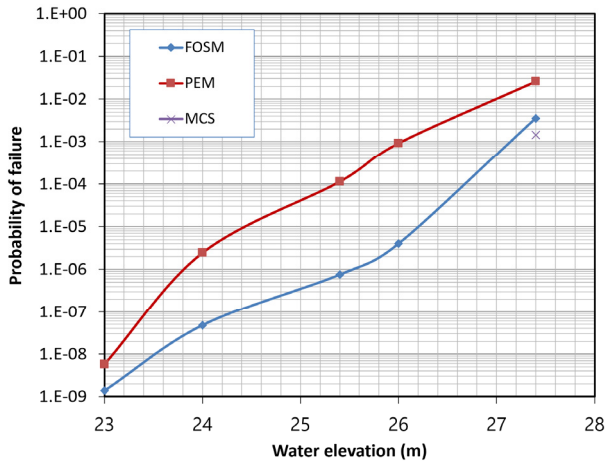
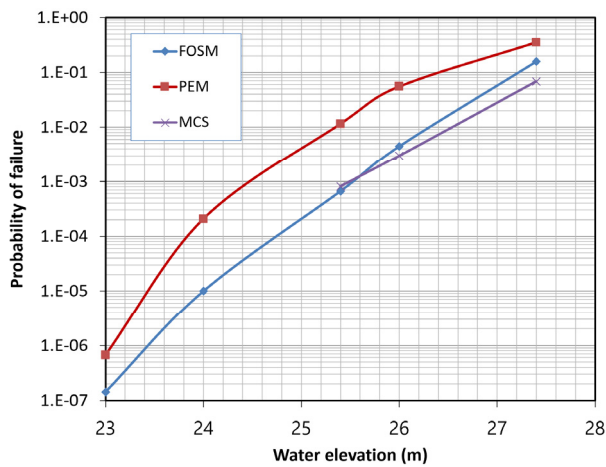


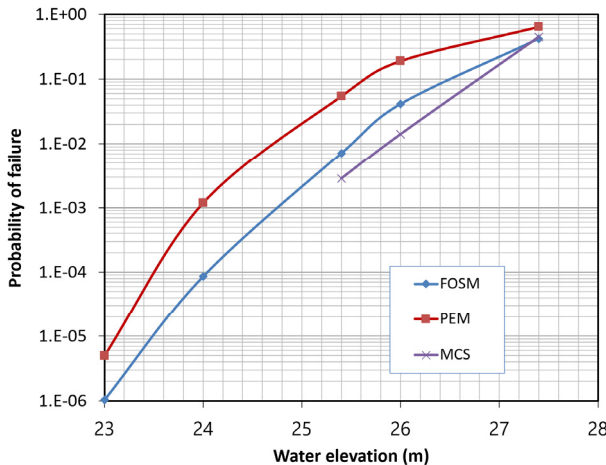
Fig. 8. Result of deterministic seepage analysis (distribution of total head (m) and flow vector, H=25.4m)



(a) $i_{crit} = 0.8$



(b) $i_{crit} = 0.5$



(c) $i_{crit} = 0.4$

Fig. 9. Comparison of fragility curves for piping failure mode

다. 즉, FOSM 방법과 PEM에서 가정한 확률분포와 상당히 다른 모양을 하고 있다. 따라서 제방의 파이핑 파괴모드에 대한 취약도 곡선 작성에서 FOSM 방법과 PEM으로 정확하게 계산하는 것은 어려우나 FOSM 방

Table 3. Summary of comparison for seepage ($H=25.4m$)

	Mean, μ_{i_e}	Standard deviation, σ_{i_e}
FOSM	0.203	0.061
PEM	0.248	0.085
MCS	0.214	0.031

법이 PEM에 비해 효과적인 것으로 판단된다. Table 3은 각 방법에 따라 평가된 유출동수경사의 평균과 표준편차를 나타내며 평균은 모두 유사한 결과를 주고 있으나 FOSM 방법과 PEM이 MCS에 비해 큰 표준편차를 나타내고 있다.

FOSM과 PEM은 고려되는 랜덤변수의 확률분포를 고려할 수 없으므로 해석결과인 유출동수경사의 평균 및 표준편차에 대한 평가만 가능하고 확률분포에 대한 정보를 제공하지 못한다. 따라서 파괴확률을 계산하기 위해서는 유출동수경사의 확률분포에 대한 가정이 필요하다. FOSM과 PEM에 의하여 정확한 파괴확률을 계산하기 위해서는 유출동수경사의 평균 및 표준편차의 정확도, 가정한 유출동수경사 확률분포의 적절성이 MCS에 의해 얻은 유출동수경사의 평균, 표준편차, 확률분포와 비교하여 보장되어야 한다. 파이핑에 대한 파괴확률은 제방의 유출동수경사가 한계동수경사 보다 크게 되는 확률을 의미하므로 Fig. 10(a)의 PDF의 우측 꼬리의 모양에 영향을 받게 된다. Fig. 10(a)에서와 같이 실제 유출동수경사의 확률분포가 FOSM과 PEM에서 가정한 확률분포와 다른 경우에도 특정 한계동수경사에 대하여 정확한 파괴확률을 평가하는 경우가 있을 수 있다. Fig. 9에서 한계동수경사를 0.8, 0.5, 0.4로 설정한 것은 한계동수경사를 바꾸며 파괴확률을 계산함으로써 FOSM과 PEM에 의한 유출동수경사의 확률론적 정보가 MCS에 의한 확률론적 분포와 달라 파괴확률이 다르게 평가될 수밖에 없음을 명확하게 보이기 위한 것이다.

사면안정의 경우 FOSM 방법과 PEM이 취약도 곡선 작성에 효과적이지만, 파이핑 파괴모드에는 적용성이 좋지 않은 것으로 평가된다. 사면안정에서는 랜덤변수인 전단강도 정수와 사면의 안전율이 비교적 선형의 관계를 갖지만, 파이핑 문제에서는 랜덤변수인 투수계수와 전수두의 연직방향 변화율로 표현되는 유출동수경사의 관계가 심한 비선형성을 갖기 때문이다. 즉, 침투 문제에서 투수계수의 변화폭이 클지라도 이에 따른 유출동수경사의 변동은 크지 않다.

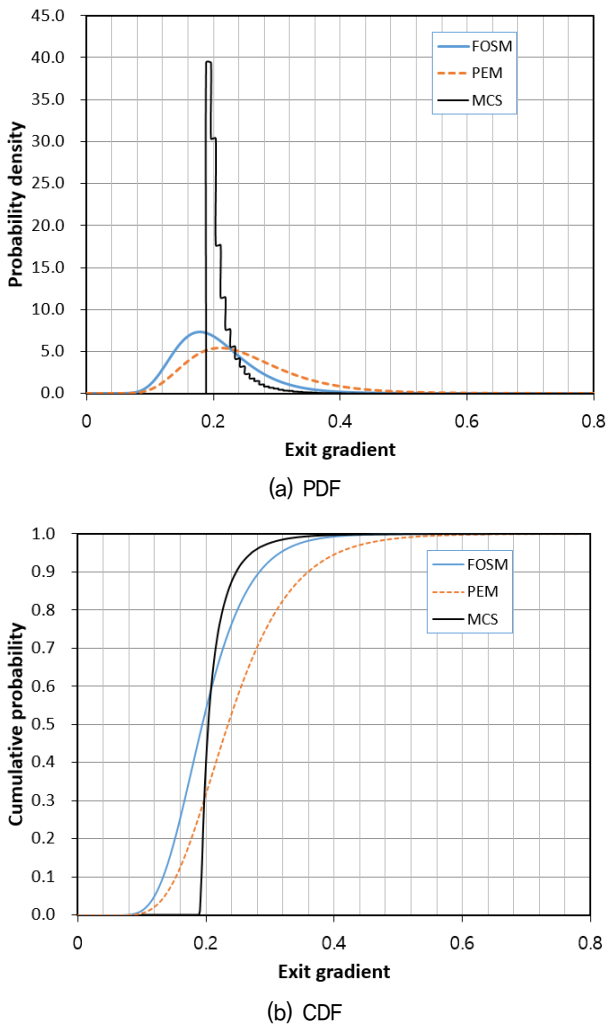


Fig. 10. Comparison of probability distribution of MCS and FOSM/PEM results (seepage, $H=25.4\text{m}$)

4. 결론

본 연구에서는 실제 하천제방을 대상으로 확률론적 방법을 적용하여 사면안정과 파이핑 파괴모드에 대한 파괴확률을 수위에 따라 계산하여 제방의 취약도 함수를 작성하였다. 이때 간략법인 FOSM 방법과 PEM의 결과를 MCS의 결과와 비교하여 사면안정과 파이핑 파괴모드의 취약도 곡선 작성에 대한 적용성을 평가하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) FOSM 방법과 PEM은 지반 물성치의 평균과 분산에 대한 정보만으로 적용할 수 있고 계산이 간단하므로 지반 물성치에 대한 자세한 확률분포가 있어야 하고 많은 계산이 요구되는 MCS에 비해 적용에 유리한 측면이 있다. 그러나 기술적 발전으로 컴퓨

터 계산 능력이 향상되고 있어 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는 MCS의 적용성이 지속적으로 향상되고 있다.

- (2) 사면안정의 경우, FOSM 방법과 PEM에 의한 취약도 곡선은 유사한 결과를 주었다. 모든 수위에 대하여 FOSM 방법과 PEM의 파괴확률은 MCS에 의한 파괴확률보다 큰 값을 나타냈으나 그 차이는 크지 않아 간략법인 FOSM 방법과 PEM을 제방의 사면안정에 대한 취약도 곡선 작성에 효과적으로 적용할 수 있다. 사용된 확률론적 해석 방법에 상관없이 안전율의 확률분포가 유사하게 평가되어 정확도 관점에서 방법에 따른 적용성에는 큰 차이가 없는 것으로 평가된다.
- (3) 침투에 의한 파이핑 파괴에 대한 취약도 곡선을 비교한 결과, 파괴확률은 $\text{MCS} < \text{FOSM 방법} < \text{PEM}$ 순으로 평가되었다. MCS에 의한 확률분포는 오른쪽으로 긴 꼬리를 갖는 비대칭의 뾰족한 모양을 나타내어 FOSM 방법과 PEM에서 가정한 확률분포와 상당히 다른 모양을 보였다. 따라서 제방의 파이핑 파괴모드에 대한 취약도 곡선 작성에서 FOSM 방법과 PEM으로 정확하게 계산하는 것은 어려우나 FOSM 방법이 PEM에 비해서는 효과적인 것으로 판단된다.
- (4) 사면안정의 경우 FOSM 방법과 PEM이 취약도 곡선 작성에 효과적이지만 파이핑 파괴모드의 경우 적용성이 좋지 않다. 이는 해석 대상의 문제가 아니라 지반의 사면안정과 침투문제의 거동 특성에 따른 것이다. 즉, 사면안정에서는 랜덤변수인 전단강도 정수와 사면의 안전율이 비교적 선형의 관계를 갖지만, 파이핑 문제에서는 랜덤변수인 투수계수와 유출동수경사의 관계가 심한 비선형성을 갖기 때문에 유출동수경사의 평균과 분산의 계산이 부정확하고 확률분포에 대한 정보를 제공하지 못하므로 큰 왜도(skewness)를 갖는 유출동수경사의 분포에는 적용이 어렵기 때문이다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1F1A1062669).

참고문헌 (References)

1. Ahn, K. H. (2009), *Combined Reliability Model for Levee Embankment Integrated Stochastic Characterization of Rainfall Variation*, Doctoral Thesis, Kyungpook National University (in Korean).
2. Baecher, G. B. and Christian, J. T. (2003), *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, John Wiley & Sons.
3. Cho, S. E. (2011), "Probabilistic Seepage Analysis by the Finite Element Method Considering Spatial Variability of Soil Permeability", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.10, pp. 93-104 (in Korean).
4. Cho, S. E. (2012), "Probabilistic Analysis of Seepage that Considers the Spatial Variability of Permeability for an Embankment on Soil Foundation", *Engineering Geology*, Vol.133-134, pp.30-39.
5. Cho, S. E. (2019), "Probabilistic Failure-Time Analysis of Soil Slope under Rainfall Infiltration by Numerical Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.12, pp.45-58 (in Korean).
6. Cho, S. E. (2021), "Probabilistic Assessment of Seepage Stability of Soil Foundation under Water Retaining Structures by Fragility Curves", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No. 10, pp.41-54 (in Korean).
7. Han, G. Y., Lee, J. S., and Kim, S. H. (1997), "Risk Model for the Safety Evaluation of Dam and Levee : I. Theory and Model", *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol.30, No.6, pp.679-690 (in Korean).
8. Kennedy, R. P., Cornell, C. A., Campbell, R. D., Kaplan, S., and Perla, H. F. (1980), "Probabilistic Seismic Safety Study of an Existing Nuclear Power Plant", *Nuclear Engineering and Design*, Vol.59, No.2, pp.315-338.
9. Kwater (2010), *Geotechnical Investigation Report for Section 23 of Nakdong River Restoration Project*, Korea Water Resources Corporation (in Korean).
10. Lee, C. W. (2017), *A Study on the Stability Evaluation of the Levee Considering Geotechnical Factors*, Master Thesis, Hankyong National University (in Korean).
11. Moellmann, A., Vermeer, P. A., and Huber, M. (2011), "A Probabilistic Finite Element Analysis of Embankment Stability under Transient Seepage Conditions", *Georisk*, Vol.5, No.2, pp.110-119.
12. Nam, M. J., Lee, J. Y., Lee, C. W., and Kim, K. Y. (2017), "Estimating the Compound Risk Integrated Hydrological/Hydraulic/Geotechnical Uncertainty of Levee Systems", *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 50, No.4, pp.277-288 (in Korean).
13. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (2008), *Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering: Computations and Applications*. Taylor & Francis.
14. Rice, J. D. and Polanco, L. (2012), "Reliability-Based Underseepage Analysis in Levees Using a Response Surface-Monte Carlo Simulation Method", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138, No.7, pp.821-830.
15. RocScience (2016), SLIDE V6.0, Rocscience Inc, Toronto.
16. Rosenblueth, E. (1975), "Point Estimates for Probability Moments", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol.72, No.10, pp.3812-3814.
17. Rossi, N., Bačić, M., Kovačević, M. S., and Librić, L. (2021), "Development of Fragility Curves for Piping and Slope Stability of River Levees", *Water*, Vol.13, No.5, 738, <https://doi.org/10.3390/w13050738>
18. Simm, J. and Tarrant, O. (2018), "Development of Fragility Curves to Describe the Performance of UK Levee Systems", *Proceedings of the Twenty-Sixth International Congress on Large Dams*, Vienna, Austria.
19. Tsompanakis, Y., Lagaros, N. D., Psarropoulos, P. N., and Georgopoulos, E.C. (2010), "Probabilistic Seismic Slope Stability Assessment of Geostuctures", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.6, No.1-2, pp.179-191.
20. USACE (1996), *Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies*, US Army Corps of Engineers, Engineer Manual 1110-2-1619.
21. USACE (1999), *Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies*, Engineer Technical Letter 1110-2-556, U.S. Army Corps of Engineers.
22. Vorogushyn, S., Merz, B., and Apel, H. (2009), "Development of Dike Fragility Curves for Piping and Micro-Instability Breach Mechanisms", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.9, pp.1383-1401.
23. Wang, J. P. and Huang, D. (2012), "RosenPoint: A Microsoft Excel-Based Program for the Rosenblueth Point Estimate Method and an Application in Slope Stability Analysis", *Computers & Geosciences*, Vol.48, pp.239-243.

Received : August 16th, 2022

Revised : October 24th, 2022

Accepted : October 24th, 2022