地震時 斜面破壞의 確率論的 解析

Probabilistic Analysis of Failure of Soil Slopes during Earthquakes

金 泳 壽*
Kim, Young-Su
鄭 聖 寬**
Jung, Sung-Gwan

Abstract

This study presents a probabilistic analysis of the stability of homogeneous soil slopes during earthquakes. The stability of the slope is measured through its probability of failure rather than the customary factor of safety. The maximum horizontal ground acceleration is deterimined with Donovan and McGuire equation. The earthquake magnitude (m) is a random variable the probability density function f(m) has been obtained with a use of Richter law. The potential failure surfaces are taken to be of an exponential shape (log-spiral), Uncertainties of the shear strength parameters along potential failure surface are expressed by one-dimensional random field model. From a first order analysis the mean and variance of safety margin is caculated.

The dependence on significant seismic parameters of the probability of failure of the slope is examined and the results are presented in a number of graphs and tables. On the base of the results obtained in this study, it is concluded that (1) the present model is useful in assessing the reliability of soil slopes under both static and seismic conditions: and (2) the probability of failure of a soil slope is greatly affected by the values of the seismic parameters that are associated with it.

要 旨

이 연구는 지진이 일어나는 동안 균질토의 사면에 대한 확률론적 해석이다. 사면의 안정은 전통적인 안전율 보다는 파괴확률로써 측정된다. 최대지반가속도는 Donovan과 McGuire식을 사용하였다 지진크기는 무작위변수로 취급하였으며 이의 확률분포는 Richter의 법칙을 사용하여 얻어진다. 사면의 파괴면은 대수나선곡선으로 고려하였다. 통계적으로 균질한 흙의 사면에서 파괴면을 따라 흙의 전단강도 정수의 불확실성은 1차원 Random Field Model을 사용하여 나타냈으며 확률분포의 평균과 분산은 1차근사해석(frist-order approximate analysis) 방법으로 계산하였다. 중요한 지진계수들이 사면의 파괴확률에 미치는 영향에 대하여 검토하였고 그 결과가 그림이나 표에서 보여준다. 이 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

* 正會員, 慶北大學校 工科大學 土木工學科 副敎授
** 正會員, 慶北大學校 農科大學 造景學科 助敎授

1. 이 모델은 정적 그리고 지진 하중상태하에서 사면의 신뢰도를 평가하는데 유용하다.
2. 사면의 파괴확률은 각종 지진계수들에 의하여 크게 영향을 받는다.

1. 서 론

정적인 하중상태나 지진하중상태하에서 사면 안정해석에는 많은 불확실성요인들이 존재한다는 사실은 많은 문헌에 소개되었다. 이 불확실성요인들에는 하중상태, 흙의 전단강도정수의 가변성 그리고 지하수위치의 계절적인 변화 등이 있다. 토질공학자들은 전통적인 해석과 연관된 결점을 극복하기 위하여 확률론적 이론과 신뢰성해석을 바탕으로 보다 합리적인 방법을 생각해왔다. 최근에 토질공학분야에서 사면에 대한 확률론적 연구가 널리 수행되고 있다.[2,3,4,5,9,10,12,13] 이 연구에서 사면을 이루는 지반은 통계적으로 균질한 흙 그리고 파괴면은 대수나선곡선이라고 가정하였다. 이 파괴면의 두 극좌표들은 무작위변수, 이들의 확률분포는 베타분포로 가정하였다.[2,3,4,9,10] 지진의 크기는 무작위변수로 취급하였으며 이의 확률분포는 우리나라와 미국 북동부지역에 대하여 Richter의 법칙을 사용하여 얻었다.[2,7,8] 지진하중은 지진이 일어나는 동안 사면에 작용되는 최대지반가속도로써 소개된다.[2,3,6,7] 또 이것은 지진의 크기, 지진의 진원지의 형태 그리고 진원지와 사면까지의 거리에 지배를 받는 확률분포인 무작위변수로 가정된다 이 최대지반가속도에 오차항을 고려하였으며 간극수압계수와 같이 대수정규분포로 가정하였다.[2,3] 최대지반가속도의 수직성분은 수평성분의 2/3로 취급하였다.[2,3] 파괴면에 작용하는 저항은 지진이 일어나는 동안 일정하다고 가정하였다. 이 가정은 어떤 액화현상도 일어나지 않는 경우에 대하여 적합하다. 이 연구에서 사면의 안정은 안전율보다 파괴확률로써 측정되며 파괴면을 따라 흙의 전단강도정수들의 불확실성은 1차원 Random Field Model을 사용하여 고려하였고 파괴확률분포의 평균과 분산을 구하기 위하여 1차 근사해석방법이 채택되었다.[1,9,10,12,13]

2. 불확실성 요소

2.1. 지진하중

지진이 일어나는 동안 사면에 작용하는 부가적인 힘은 최대지반가속도로써 나타냈으며 무작위변수로 가정하였다.

2.1.1 최대지반가속도

최대지반가속도의 수평성분 $ah, \max$는 다음과 같은 식들을 사용하였다.

$$ah, \max = 1080e^{0.5m}(R+25)^{-1.32} \quad (\mathrm{cm/sec^2}) \quad \cdots\cdots(1)$$

(Donovan)

$$ah, \max = 472.3e^{0.64m}(R+25)^{-1.301} \quad (\mathrm{cm/sec^2}) \quad \cdots\cdots(2)$$

(McGuire)

여기서, m은 지진의 크기(richter scale)

R은 지진의 진원지와 사면까지의 거리(km)

예측된 값과 관측된 값 사이의 차이를 줄이기 위하여 최대수평반가속도에 오차항 ε을 곱한다. 여기서 오차항 ε은 평균값이 1.0인 대수정규분포의 무작위변수라고 가정한다. 즉,

식(1), (2)는 다음과 같이 된다.

$$ah, \max = 1080e^{0.5m}(R+25)^{-1.32}\cdot\varepsilon \cdots\cdots(3)$$

$$ah, \max = 472.3e^{0.64m}(R+25)^{-1.301}\cdot\varepsilon \cdots(4)$$

최대지반가속도의 수직성분 $av, \max$는 최대수평지반가속도의 2/3배이다.[2,3] 즉,

$$av, \max = 2/3 * ah, \max \cdots\cdots(5)$$

식(1), (2), (3), (4)에서 지진의 크기 m은 무작위변수이다.

2.1.2 지진의 크기

지진크기의 누적분포함수는 지진크기의 Richter's law를 고려하여 유도될 수 있다. 1392년~1982년 사이에 MM진도 V이상 890회의 우리나라의 역사적인 자료와 지진계의 측정자료에서 Maximum-likelyhood method를 사용하여 다음과 같이 상수 a', b'를 구하였다.[8]

$$\log_{10}Nm=a'-b'I \quad \cdots\cdots(6)$$

여기서 I는 MM진도

Nm은 지진크기 m 또는 그 이상의 지진발생수

한반도 전체에 대하여

$a'=2.88,\ b'=0.60$

캘리포니아에서 발생하는 지진에 대하여

최대진도 I와 지진크기 m 사이에 다음과 같은 경험식이 제시되었다.[7]

$$m=1+2/3I \quad \cdots\cdots(7)$$

그리고 Gutenberg와 Richter는 지진크기와 발생빈도사이의 관계를 다음과 같은 식으로 표현하였다.[2,7]

$$\log_{10}Nm=a-bm \quad \cdots\cdots(8)$$

여기서 a, b는 상수

식 (7)을 사용하여 식 (6)을 정리하면

$$\log_{10}Nm=3.78-0.9\,m \quad \cdots\cdots(9)$$

$$4.3\leq m\leq 6.7$$

그러므로 식 (8)에서 $a=3.78,\ b=0.9$이다.

최소지진크기($m_0=4.3$)보다 큰 크기를 가지는 년간평균지진회수 Nm는 식 (9)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Nm_0=10^{(3.78-0.9\times 4.3)}=0.81283$$

지진이 m보다 큰 크기로 일어날 확률은 Nm과 Nm_0의 비로써 주어진다. 즉,

$$P[M>m]=Nm/Nm_0 \quad \cdots\cdots(10)$$

여기서 $P[\ ]$는 [ ]안의 사건이 일어날 확률

식(10)에 식(9)와 Nm_0의 값 0.91393을 대입하면 다음과 같다.

$$P[M>m]=1.2302696\times 10^{(3.78-0.9m)} \cdots(11)$$

$$4.3\leq m\leq 6.7$$

그리고 지진크기 m의 누적분포 $F(m)$은 식(11)의 여사상과 같다. 즉,

$$F(m)=P[M\leq m]=1-P[M>m] \quad \cdots(12)$$

식(12)에 식(11)을 대입하면 다음과 같다.

$$F(m)=1-1.2302696\times 10^{(3.78-0.9m)} \cdots(13)$$

$$4.3\leq m\leq 6.7$$

지진크기 m의 상한값($m_1=6.7$)에서 $F(m_1)$가 1이 되기 위하여 식(13)에 k를 곱한다. 즉,

$$F(m_1)=k[1-1.2302696\times 10^{(3.78-0.9m_1)}]=1 \quad \cdots\cdots(14)$$

식(14)에 $m_1=6.7$을 대입하면 $k=1.006967$이다.

그러므로 누적분포 $F(m)$은 다음과 같다.

$$F(m)=1.006967-1.238840\times 10^{(3.78-0.9m)} \quad \cdots\cdots(15)$$

또한 지진크기의 확률밀도함수 $f(m)$은 식(15)를 미분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f(m)=-\frac{dF(m)}{dm}=1.11496\times 10^{(3.78-0.9m)} \quad \cdots\cdots(16)$$

$$4.3\leq m\leq 6.7$$

미국 북동부지역에 대한 지진크기의 확률밀도함수 $f(m)$는 다음과 같다.

$$f(m)=\begin{cases}0 & m<m_0\\ k\beta e^{-\beta(m-m_0)} & m_0\leq m\leq m_1\\ 0 & m_1<m\end{cases} \cdots(17)$$

여기서 β는 지역적인 계수

$$k=[1-e^{-\beta(m_1-m_0)}]^{-1} \quad \cdots\cdots(18)$$

미국 북동부지역에 대하여

m_0와 m_1는 제각기 2와 6.3이다.

2.2. 흙의 강도정수

흙의 성질들이 지반의 모든 점에서 정확히 측정되지 않기 때문에 확률론적으로 흙의 성질을 모델링(modelling)하는 것이 편리하다.

주어진 지반에 있어서 흙의 성질을 예측하는데 관련있는 불확실성은 여러가지 원인에서 생긴다.

2.2.1 1차원 Random Field Model

토질공학 문제의 해석에 있어서 보통 어떤 지역의 흙의 종단면도는 일정한 흙의 성질을 가지는 균질한 층으로 나타낸다.

어떤 토층의 한 점에서의 측정된 흙의 성질을 바탕으로 공간적 평균성질에 관한 통계를 추론할 필요가 있다. 균질한 토층에서 흙의 성질에 관한 Random Field Modelling은 이런 틈을 연결하기 위한, 수학적으로 다루기 쉬운 도구이다 균질한 흙만으로 구성하는 토층일지라도 광물성분, 퇴적하는 동안 환경적인 조건, 과거의 응력이력, 함수비 그리고 다른 요소들의 변화때문에 자연적인 이질성이 균질한 층에 있는 점들 사이에 존재한다. 결과적으로 흙의 성질은 본래의 가변성에 지배를 받는다. 즉, 흙의 성질은 점들

사이에 변한다. 한층에 있는 두 점 사이의 흙의 성질에 있어서의 불일치는 두 점이 멀리 떨어짐에 따라 증가할 것으로 기대된다. 1차원 Random Field Model을 사용하여 L길이에 걸쳐 통계적으로 균질한 흙의 성질의 공간적인 평균은 다음과 같이 주어진 평균과 분산을 갖도록 나타낼 수 있다.[9,10,11,13,15,16]

$$\bar{U}_L=\bar{U} \cdots\cdots (19)$$

그리고

$$\hat{U}_L^2=\left[\frac{2}{L}\int_0^L\left(1-\frac{\tau}{L}\right)\rho_u(\tau)d\tau\right]$$

$$\hat{U}^2=\Gamma_u^2(L)\hat{U}^2 \cdots\cdots (20)$$

여기서 $\bar{U}, \hat{U}$, 그리고 $\rho_u(\tau)$는 제각기 각 점들에서 측정된 흙의 성질의 평균, 표준편차 그리고 τ만큼 떨어진 곳에서 흙의 성질들 사이의 상관함수(correlation function)이다.

$\Gamma_u^2(L)$는 0과 1 사이의 값을 갖는 분산함수(variance function)이다. 그러므로 공간적인 평균 흙의 성질의 분산은 점 분산(point variance) $\hat{U}^2$보다 일반적으로 작다. 감소량은 L에 따라 증가하고 또 게다가 상관함수 $\rho_u(\tau)$에 달려 있다. 파동규모(the scale of fluctuation) d_j는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, d_j내에서는 흙의 성질이 상관관계가 있고 d_j밖에서는 상관관계가 없다.

2.2.2 불확실성의 성분

불확실성의 3가지 중요한 형태가 공간적인 평균흙의 성질과 연관되어 확인될 수 있다.

(1) 본래의 가변성

앞에서 언급한 바와 같이 균질한 토층에서 일지라도 흙의 성질은 점들 사이에 변한다. 비록 평균의 효과를 통하여 그 가변성이 점가변성으로부터 다소 줄어들기는 하지만 어떤 주어진 범위에 걸쳐 공간적인 평균흙의 성질은 불확실성에 지배를 받는다.

(2) 통계적인 불확실성

한 토층내에서 흙의 성질이 가변성과 무작위 시험 그리고 대부분의 현장과 실내실험과 연관된 측정오차들 때문에 한 점에서 흙의 성질의 통계는 제한된 수의 흙시료에 대한 실험으로 평가될 수 없다. 이러한 불확실성은 시료의 수가 많으면 많을수록 없어질 것이다.

(3) 조직적인 불확실성

시료의 교란, 시료의 크기, 다른 응력조건등과 같은 요소들 때문에 현장성질을 그대로 나타내기 위한 실험의 불가능 때문에 원인이 된다. 이런 불일치오차는 광범위한 시료추출로는 반드시 줄어들지 않을 것이다. 왜냐하면 같은 종류의 시험조건이 지속되기 쉽고 시종일관 높고 낮은 성질의 값을 내기 때문이다. 같은 시험조건의 경험적인 검정공식을 통하여 흙의 성질을 평가하는데 적용된다. 어떤 특별한 흙의 형태와 현장조건에 대한 검정오차 또한 조직적인 불확실성이 될 수 있다. 현장의 평균 흙의 강도 S_I에 위와같은 불확실성들을 가입시키기 위한 간단한 모델은 다음과 같다.[11,12]

$$S_I=N_0(N_1,N_2,\cdots N_n)S_A \cdots\cdots (21)$$

여기서 S_A는 본래의 가변성에 대하여야만 설명할 수 있는 어떤 범위에 걸친 공간적인 평균 흙의 강도이다. N_0는 불충분한 시료의 결과에서나오는 통계적인 불확실성을 설명하는 수정요소이다. 그리고 $N_1,N_2\cdots N_n$는 실험실과 현장사이에 불일치와 검정등의 결과에서 나오는 조직적인 불확실성을 설명하는 수정요소들이다. 1차 근사해석으로부터 S_I의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\bar{S}_I=N_0\bar{N}_1\bar{N}_2\cdots\bar{N}_n\bar{S}_A=\bar{N}_1\bar{N}_2\cdots\bar{N}_n\bar{S} \cdots (22)$$

$$\Omega_I=\sqrt{\Delta_0^2+\Delta_{n_1}^2+\Delta_{n_2}^2+\cdots+\Delta_{n_n}^2+\delta_A^2} \cdots (23)$$

여기서 $-$(bars)는 평균값, δ와 Δ는 변동계수(c,o,v), $\bar{S}$는 한 점에서의 평균 흙의 강도 그리고 $\bar{N}_0$는 1이다. 식(23)에 있는 각 불확실성 요소는 Random Field Model을 이용하여 제각기평가 될 수 있다. 예를 들어 본래의 공간적인 흙의 성질의 가변성으로 인한 불확실성은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_A=\frac{\hat{S}_A}{\bar{S}_A}=\frac{\Gamma(D)\hat{S}}{\bar{S}}=\Gamma(D)\delta \cdots\cdots (24)$$

여기서 δ는 한 점에서의 흙의 성질의 변동계수 $\hat{S}_A$과 $\hat{S}$는 각각 S_A와 S의 표준편차, $\Gamma(D)$는 영역 D에 걸친 표준편차함수이다.

2.3. 파괴면의 위치

파괴면의 모양은 대수나선곡선이라 가정하고 그 위치는 흙의 내부마찰 각 ϕ와 그 극점의 두

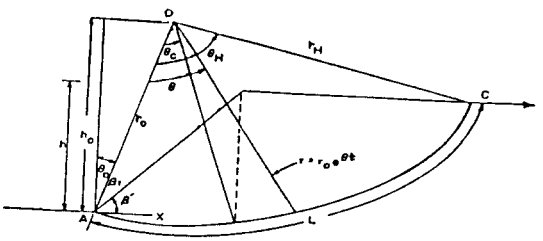

Fig. 1. Shape of rupture surface

극좌표(h_0,θ_0)에 달려 있다. h_0,θ_0의 통계적 값(변화의 범위, 평균값 그리고 표준편차)은 사면의 높이 h와 경사각 β'의 함수이다. 여기서는 h_0와 θ_0는 일반적인 베타분포를 하는 무작위변수로 취급된다.[2,3,4,9,10](그림 1)

2.4 간극수압계수

간극수압계수 R_u는 계절적인 변동 등으로 대수정규분포를 하는 무작위 변수로 취급하였다.

3. 파괴 확률

파괴면의 전 길이는 3개의 요인(h_0,θ_0,t)의 함수로 표시된다. 즉,

$$L'=\frac{h_0}{\cos\theta_0}\left(1+\frac{1}{t^2}\right)^{1/2}(e^{\theta Ht}-1)\cdots(25)$$

여기서 $t=\tan\phi$

파괴면의 미소요소 dL에 작용하는 정적인 힘은 그림 2에서 보여준다.

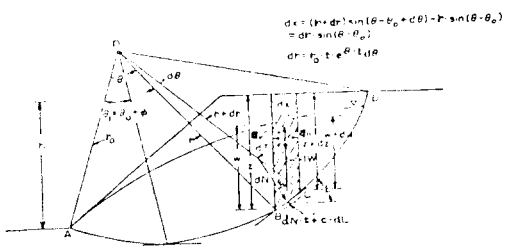

Fig. 2. Forces on a differential element along the rupture surface

만일, 한 절편의 폭을 dx라 하면 그 무게 dW는 다음과 같다.

$$dW=\gamma_m(z-w)dx+\gamma'_m\cdot w\cdot dx\cdots\cdots(26)$$

여기서 γ_m은 흙의 습윤단위중량, γ'_m는 흙의 수중단위중량, W는 사면의 표면으로부터 파괴면까지의 수직거리이다.

지하수면의 위치는 간극수압계수 R_u에 의하여 나타내며 R_u는 다음과 같이 정의된다.

$$R_u=\frac{u}{\gamma_m\cdot z}\cdots\cdots(27)$$

여기서 u는 파괴면에 작용하는 간극수압이다.

하나의 절편의 무게 dW의 수직과 접선방향의 성분은 제각기 다음과 같다.

$$dN=dw\cos\varepsilon'-ah,\max dw\cos\varepsilon'-av,\max dw\sin\varepsilon'$$
$$dT=dw\sin\varepsilon'-ah,\max dw\sin\varepsilon'+av,\max dw\cos\varepsilon'\cdots\cdots(28)$$

여기서 ε'는 하나의 절편에서 수평면에 대한 파괴면의 경사각으로 다음과 같다.

$$\varepsilon'=\tan^{-1}\left(\frac{\tan(\theta-\theta_0)-\tan\phi}{\tan(\theta-\theta_0)\tan+1}\right)\cdots\cdots(29)$$

파괴면의 미소요소 dL에 작용하는 파괴를 일으키려는 힘 dS와 저항하려는 힘 dR은 다음과 같다.

$$dS=dT$$
$$dR=dN\ t+c\ dL\cdots\cdots(30)$$

여기서 c는 점착력이다.

식(28)을 다른 표현으로(i번째 절편에 대하여) 정리하면 다음과 같다.

$$N_i=W_i\cos\varepsilon'_i-ah,\max W_i\cos\varepsilon'_i-av,\max W_i\sin\varepsilon'_i$$
$$T_i=W_i\sin\varepsilon'_i-ah,\max W_i\sin\varepsilon'_i+av,\max W_i\sin\varepsilon'_i\cdots\cdots(31)$$

또 식(30)을 다른 표현으로 (i번째 절편에 대하여) 정리하면 다음과 같다.

$$D_i=T_i$$
$$C_i=N_i\tan\phi+cL_i\cdots\cdots(32)$$

i번째 절편에 대한 Safety Margin SM_i는 다음과 같이 정의된다.

$$SM_i=C_i-D_i\cdots\cdots(33)$$

그러므로 전체 사면에 대한 Safety Margin, SM은 다음과 같다.

$$SM=\sum_{i=1}^{n}SM_i=\sum_{i=1}^{n}(C_i-D_i)\cdots\cdots(34)$$

또 파괴확률 Pf는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Pf=P[SM\leq 0]=\int_{-\infty}^{0}f_{SM}(x)dx=F_{SM}(0)\cdots\cdots(35)$$

여기서 f_{SM}와 F_{SM}는 확률밀도함수 그리고 누적분포 함수이다.

1차원요소 Random Field Model과 1차근사해석을 사용하여 SM의 평균과 분산은 다음과 같이 구한다.[1,9,10,12,13]

$$\overline{SM}=\bar{c}_p L+N(\tan\bar{\phi}_p)-D \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(36)$$

$$\mathrm{var}(SM)=L^2[\Gamma_{cp}^2(L)\delta_{cp}^2+\Delta_c^2]\bar{c}_p^2 + N^2(\tan\bar{\phi}_p)^2[\Gamma_{\phi p}^2(L)\delta_{\phi p}^2+\Delta_\phi^2] \left(\frac{\partial\tan^2\bar{\phi}_p}{\partial\bar{\phi}_p}\right)^2 \cdots\cdots\cdots\cdots(37)$$

여기서 $N=\sum_{i=1}^{n} N_i$, $D=\sum_{i=1}^{n} D_i$

$\bar{c}_p$와 $\bar{\phi}_p$는 제각기 점 평균 점착력과 내부마찰각, δ_{cp}와 $\delta_{\phi p}$는 제각기 점착력과 내부마찰각의 점 변동계수, Δ_c와 Δ_ϕ는 제각기 점착력과 내부마찰각의 조직적인 모델링(modelling) 오차로써 공간적으로 상이하지 않다고 가정하며 변동계수로써 표시된다.

그리고 Γ_j^2은 분산함수로써 3각형 상관함수를 사용하였다.

$|\tau|$가 0에서 d_j까지 증가함에 따라 1에서 0까지 감소하는 3각형 상관함수 $\rho_u(\tau)$는 다음과 같다.

$$\rho_u(\tau)=\begin{cases}1-\dfrac{|\tau|}{d_j}, & |\tau|\le d_j\\ 0 & |\tau|>d_j\end{cases} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(38)$$

그리고 분산함수 Γ_j^2는 다음과 같다.

$$\Gamma_j^2=\begin{cases}1-\dfrac{L_j}{3d_j} & L_j\le d_j\\ \dfrac{d_j}{L_j}\left(1-\dfrac{L_j}{3d_j}\right) & L_j>d_j\end{cases} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(39)$$

여기서 j는 점착력 cp와 내부마찰각 ϕp를 대신한다.

그리고 d_j는 상관매개변수(correlation parameter)이다.

4. 한 경우의 연구와 고찰

4.1 사면의 종단면도와 흙의 각종 계수

이 해석은 그림 3에서 보여주는 치수를 가지는 통계적으로 균질한 흙사면에 대하여 수행되었다.

사면의 높이 h는 15m, 사면의 경사각 β'는

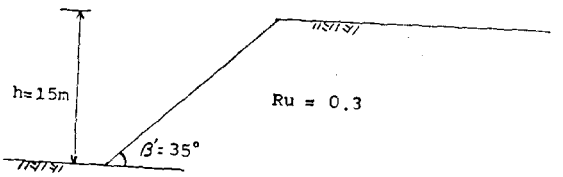

Fig. 3. Geometry of the slope used in case study

35°이다.

그리고 흙의 습윤단위중량 γ_m과 포화단위중량 γ_m'은 각각 $18KN/m^3$, $20KN/m^3$이다. 파괴면의 두 극좌표(h_0,θ_0), 강도정수(c,ϕ), 간극수압계수 R_u 그리고 최대지반가속도의 오차항 ε의 통계값들은 각각 표 1, 2, 3에 주어진다. 지진상수 a,b는 각각 3.78과 0.9이다. 지진크기의 최대값 m_1과 최소값 m_0는 각각 6.7과 4.3이다.

그리고 진원지와 사면까지의 거리 R은 1km, 5, 25, 50, 100 그리고 400km에 대하여 해석하였다. 또한 각종 무작위변수의 발생수는 1000으로 하였다.

그리고 미 북동부 지역의 지진계수 β는 1.5로 하였다.[3]

Table 1. Location of center

	h_0(m)	θ_0(°)
Mean	15	−30
Standard diviation	3.0	30
Maximun	25	−40
Minimum	5	−20

Table 2. Statistical values of strength parameters

Statistical parameter	C(KN/m²)	ϕ(°)
Mean	10	30
C.O.V(point)	0.4	0.1
Systematic error(C.O.V)	0.3	0.08
Correlation parameter(m)	3.0	3.0

Table 3. Statistical values of pore water pressure parameter

Statistical parameter	Pore water pressure parameter(Ru)	Error(ε)
Mean	0.3	1
Standard deviation	0.02	0.05
(σ_s)		0.1

4.2 정적인 상태에서의 사면안정해석

이 연구에서 사용된 조건에 대하여 보수적인 해석결과 안전율은 1.409이었다. 그리고 확률론적 해석결과 파괴확률 P_f는 0.0152이었다.

4.3 지진에 의한 사면의 확률론적 해석

앞에서 언급된 모델을 사용하여 같은 조건에 대하여 그리고 지진하중은 우리나라의 지진특성과 미국북동부지역의 지진특성에 대하여 해석하였다. 우리나라의 최대지반가속도는 Donovan 식과 McGuire 식을 그리고 미국 북동부지역에 대한 최대지반가속도는 Donovan 식을 사용하였다. 오차항의 표준편차(σ_ϵ)의 변화에 따라 그리고 지진의 진원지와 사면까지의 거리 R의 변화에 따라 해석한 결과는 표 4,5,6에 수록되었다. R에 따라 파괴확률의 변화는 그림 4,5,6에서 보여 준다.

Table 4. Probability of failure for various distances between slope and point source(Korea)

R(km)	Donovan 식 without ϵ	$\sigma_\epsilon=0.05$	$\sigma_\epsilon=0.1$
1	0.577	0.600	0.648
5	0.393	0.420	0.474
25	0.085	0.093	0.103
50	0.042	0.045	0.051
100	0.024	0.025	0.025
400	0.017	0.017	0.017

Table 5. Probability of failure for various distances between slope and point source(Korea)

R(km)	McGuire 식 without ϵ	$\sigma_\epsilon=0.05$	$\sigma_\epsilon=0.1$
1	0.745	0.801	0.874
5	0.545	0.580	0.636
25	0.116	0.122	0.142
50	0.050	0.053	0.055
100	0.026	0.027	0.032
400	0.017	0.018	0.019

Table 6. Probability of failure for various distances between slope and point source(Northeast U.S.)

R(km)	Donovan without ϵ	$\sigma_\epsilon=0.5$
1	0.314	0.364
5	0.207	0.240
25	0.061	0.068
50	0.033	0.036
100	0.022	0.023
400	0.016	0.016

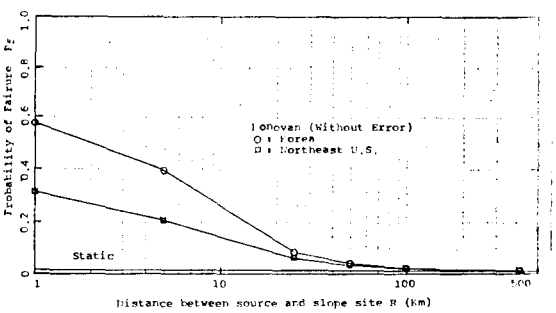

Fig. 4. Probability of failure vs. distance between slope and point source.

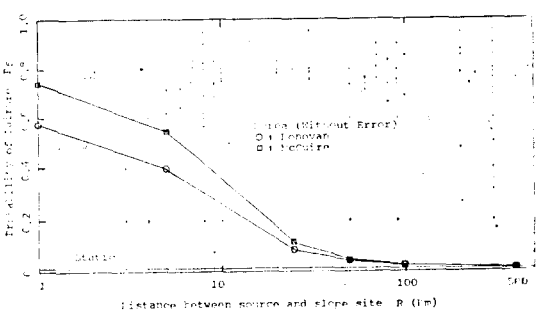

Fig. 5. Probability of failure vs. distance between slope and point source.

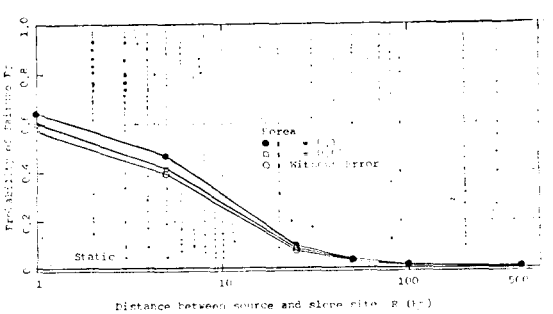

Fig. 6. Probability of failure vs. distance between slope and point source.

5. 결 론

우리나라와 미국 북동부에 위치한 사면에 대한 신뢰성해석이 정적인 하중과 지진하중상태하에서 수행되었다.

이 확률론적 모델은 정적인 하중과지진하중상태하에서 사면의 신뢰성을 평가하는데 유용하다. 사면의 파괴확률은 각종 지진계수들에 의하여 크게 영향을 받는다.

한 경우의 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 정적인 하중상태하에서 전통적인 해석방법으로 구한 안전율은 1.409이었고 확률론적 해석방법으로 구한 파괴확률은 0.0152이었다.

(2) 지진하중상태하의 파괴확률은 진원지와 사면까지의 거리가 증가할수록 정적인 하중상태하에서 얻어진 값에 접근한다.

(3) McGuire식을 사용한 경우가 Donovan식을 사용한 경우보다 더 큰 파괴확률을 나타내었다.

(4) 오차항의 표준편차의 값이 클수록 더 큰 파괴확률을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Ang, A. H-S, and Tang, W.O., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design," John Wiley & Sons, New York, 1975.
2. A-Grivas, D., "Probabilistic Seismic Stability Analysis A Case Study, "Canadian Geotechnical Journal, 13, 1980, pp. 352~360.
3. A-Grivas, D., "Seismic Analysis on Earth Slope," Proceedings of the Specialty Conference on Probabilistic Mechanics structural Reliablity, ASCE, Jan., 1979, pp. 338~342.
4. A-Grivas, D., "Probability of Failure of Soil Slope during Earthquakes," Central American Conference of Earthquake Engineering, Jan., 9~12, 1978, pp. 409~416.
5. Chowdhury, R.N., and A-Grivas, D., "Probabilistic Model of Progressive Failure of Slopes," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol. 108, No. GT6, 1982, pp. 803~819.
6. Donovan, N.G., "A Ptatistical Evaluation of Strong Data Including the February 9, 1971 San Fernondo Earthquake," Proc., Fifth World Confer. on Earthq. Engin., Rome, Italy, 1973, pp. 1252~1261.
7. Haldor, A., "Probabilistic Evaluation of Liquefaction of Sand under Earthquake Motions," Thesis Presented to the University of Illinois at Urbana, Illinois in 1976, in Partial Fulfillment of The Requirments for the Degree of Doctor of Philosophy.
8. Kyung, J.B., Mand Lee, K.W., "An Analysis of Seismic Hazard in the Korean Penisula, "The Journal of the Geotechnical Society of Korea, Vol. 23, No. 3, Sep., 1987, pp. 229~241.
9. Kim, Y.S., "Probabilistic Analysis of the Stability of Soil slopes," Proc. of the Korean society of civil eng., vol. 8, no. 3, sep., 1988, 85~90.
10. Kim, Y.S., "Probabilistic Analysis of Slope Stability for Progressive Failure," Journal of the Korean Society of Geotechnical Eng., Vol. 4, No. 2, Jun, 1988, pp. 5~14.
11. Tang, W.H., "Principal of Probabilistic Characterization of Soil Propertyies." in Probabilistic Characterzation of Soil Properties: Bridge Between Theory and Practice, ASCE, May 1984, pp. 74~89.
12. Tang, W.H., Yucemen, M.S., and Ang, A.H-S., "Probability-Based Short-term Design of Soil Slopes," Canadian Geotechnical Journal, 13, 1976, pp. 201~215.
13. Tang, W.H., Chowdhury, R.N., and Sidi, I., "Progressive Failure Probability of Soil Slope," 4th International Conference on Structure Safety and Reliability., 1985, pp. 111-363-373.
14. Tang, W.H., "Probabilistic Evaluation of Loads, "Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. GT3, Mar., 1981, pp. 287~304.
15. Vanmarcke, E.H., "Random Fields: "Analysis and Synthesis," M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 1983, pp. 18512.
16. Vanmarke, E.H., "Probabilistic Modelling of Soil Profils," Journal of the Geotechnical Engineering Division Vol. 103, No. GT11, Nov., 1977, pp. 1227~1245.

(접수일자 1989. 1. 26)