

시뮬레이션 기법을 이용한 지진 시 사면안정 해석 Simulation-Based Assessment of Seismic Slope Stability

김진만*
Kim, Jin Man

ABSTRACT

A simulation-based approach that can be used to systematically model the uncertainties of seismic loading and geotechnical property is presented in the context of reliability analysis of slope stability. The uncertainty of seismic loading is studied by generating a large series of hazard-compatible artificial motions, and by using them in subsequent response analyses. The stochastic nature of spatially varying material properties and also the uncertainty arising from insufficient information are treated in the framework of random fields. The simulation-based analyses indicate that in a seismically less active region, a moderate variability in soil properties has a relatively large effect as much as characterization of earthquake hazard on the computed risk of slope failure and excessive slope deformations.

1. 서론

지진 발생 시 토사사면의 동적 안정성을 검토할 경우 해석결과에 크게 영향을 주는 불확실한 요인을 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 지반성질의 공간적 변화와 측정 오차 등 재료성질과 관련되며 다른 하나는 지진 하중 자체이다. 과거에도 이러한 불확실성을 다루는 수많은 연구가 있었으나 대부분 재료성질의 불확실성을 다루거나 또는 지진하중만의 불확실성을 다루는 것이 보통이었다. 따라서 이러한 두 가지 불확실성들의 종합적인 영향과, 그리고 상대적인 중요성을 판단하는 것이 어려웠다.

본 논문은, 지반진동으로 야기된 사면의 영구변형을 평가함에 있어 대두되는 불확실한 문제들을 체계적으로 모델링 할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 지진 하중의 불확실성은 지진 진도에 상응하는 대량의 인공 지진파를 생성하여 이를 지반응답 해석에 이용하여 분석하였다. 불충분한 정보와 또한 공간적으로 변화는 지반성질의 불확실성은 랜덤필드 (random field) 모델에 기초해서 다루었다. 사면안정 해석은 한계평형기법과 Newmark-type 변위 해석법을 이용하였으며 몬테카를로 시뮬레이션 (Monte Carlo Simulation) 을 수행하여 신뢰성을 계산하였다.

* 정회원 현대건설 (주) 기술연구소, 수석연구원

2. 지진하중의 불확실성

설계 지진파를 규정하는 몇 가지 파라미터들에 상응하는 지진파는 일반적으로 하나 이상 여러 개가 될 수 있다. 따라서, 동일한 설계 파라미터에 상응한 지진파들로부터도 다양한 응답결과를 얻을 수 있다. 설계지진파를 인공적으로 생성하는 방법을 크게 세 가지로 분류할 수 있는 데: (1) 계기 지진파를 수정하거나; (2) 지진파를 랜덤 프로세스 (random process or stochastic process)로 생성하거나; (3) 그린 함수 (Green's function) 기법을 이용하여 생성한다. 일정한 주기를 가진 함수는 사인함수 시리즈로 표현할 수 있다. 특히, 제로평균 (zero-mean) 프로세스 (process) 는 다음과 같이 묘사될 수 있다.

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2G(\omega_i)\Delta\omega} \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (1)$$

본 논문에서는, Kanai(1957)와 Tajimi (1960) 연구에 바탕을 둔 파워 스펙트럴 밀도 (Power Spectral Density, or PSD) $G(\omega)$ 함수를 채용하였다. 위상각 (phase angle) θ_i 를 0 과 2 사이의 무작위 변수로 정의함으로서 지진파의 랜덤 (무작위) 특성을 나타낼 수 있다. 결과적으로 식 (1) 은 동일한 주파수 특성을 가졌으나 개개의 성분 사이의 위상각들이 무작위로 분포된 무한한 숫자의 시간이력을 규정한다. 지진파 강도 (intensity) 의 변동특성 (transient characteristics) 은 상기 불변 프로세스 (stationary process) 에 조절함수 (modulating function) $m(t)$ 를 곱하여 추가할 수 있다. 변동 지진파 $Y(t)$ 는 그러면:

$$Y(t) = m(t) \sum_{j=1}^n \sqrt{2G_j(\omega_j)\Delta\omega} \sin(\omega_j t + \theta_j) \quad (2)$$

본 연구에서는, Wang 과 Kavazanjian (1987)이 액상화 관련 연구에서 제안한 아래와 같이 2가지 파라미터를 가진 삼각함수 형상의 조절함수를 적용한다.

$$m(t) = \sin^\alpha(\pi(t/t_d)^\beta) \quad (3)$$

여기서, α 와 β 는 조절함수의 모양을 결정하는 2 가지 파라미터이며, t_d 는 지진파 지속시간이다. 지진파 주파수 특성의 시간적 변화를 반영하는 방법은 여러 가지 다른 방법이 있다. 그중 비교적 단순하면서도 효율적인 방법의 하나는 지진파를 몇 개의 시간구역으로 나누어 각각의 소 구간별로는 주파수 특성이 불변하는 것으로 가정하는 것이다. (Saragoni and Hart, 1974). 본 논문에서는 지진파를 균등하게 세 구역으로 나누어 다음과 같이 주파수 특성을 모델링 하였다.

$$Y(t) = m(t) \sum_{j=1}^3 (X_j(t_j)), \quad t = \sum_{j=1}^3 t_j \quad (4)$$

2.1 조절함수와 RMS 의 관계

RMS (Root Mean Square) 가속도는 에너지 개념에 근거한 지진파 강도 파라미터들 중 하나이며 다음과 같이 정의된다: .

$$RMS_a = \sqrt{\frac{E(T_d)}{T_d}} = \left[\frac{1}{T_d} \int_{t_0}^{t_0+T_d} a^2(\tau) d\tau \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서, $a(t)$ 는 가속도 시간이력이고, t_0 는 초기시간, T_d 는 지속시간, 그리고 $E(T_d)$ 는 지속시간 사이의 총 에너지이다. 마찬가지로, 지속시간 T_d 을 미소 시간 간격 Δt 로 대체하여 일시적 (temporal) 인 RMS 를 다음과 같이 구할 수 있다:

$$RMS_a(t) = \left[\frac{1}{\Delta t} \int_i^{i+\Delta t} a^2(\tau) d\tau \right]^{1/2} \quad \text{for } \Delta t \rightarrow 0 \quad (6)$$

또 하나 중요한 개념으로서, PSD를 분산 (σ^2) 으로 나누어 아래와 같이 표준화된 (normalized) PSD 를 규정할 수 있다:

$$G^*(\omega) = \frac{1}{\sigma^2} G(\omega) \quad (7)$$

불변 프로세스 $X^*(t)$ 가 단위 분산과 표준 PSD 로 정의된 프로세스일 경우에는, 식 (2)를 조절함수 $m(t)$ 와 표준 PSD $G^*(\omega)$ 을 사용하여 다음과 같이 수정한 식으로 표현할 수 있다:

$$Y(t) = m(t) \sum_{i=1}^n \sqrt{2G^*(\omega_i)\Delta\omega} \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (8)$$

이럴 경우, 일시적 (temporal) RMS 와 조절함수 $m(t)$ 는 다음과 같은 관계를 가진다:

$$RMS_y^2(t) = E[Y^2(t)] = m^2(t)E[X^{*2}(t)] = m^2(t) \quad (9)$$

다시 말해서, 만약 표준 PSD 가 주어진다면, 지진파는 일시적 (temporal) RMS 와 표준화된 불변 프로세스 (normalized stationary process) 의 곱으로 구할 수 있다. 문제는 일반적으로 지진 재해 해석 (seismic hazard analysis) 으로부터 구할 수 있는 RMS 가속도가 시간함수가 아니고 상수 (불변량) 라는 점에 있다. 따라서 상수 RMS 로부터 조절함수를 유도하는 과정이 추가적으로 필요한 데, 1987 년 Wang and Kavazanjian 이 제안한 다음과 같은 관계식으로부터 추정이 가능하다:

$$m(t) = C \cdot \sin^\alpha(\pi(t/t_d)^\beta) \quad (10)$$

여기서, 조절함수 계수 C 는 다음과 같이 주어진다.

$$C = \frac{RMS_y}{\left[\int_0^{t_d} \sin^{2\alpha}(\pi\tau^\beta) d\tau \right]^{0.5}} \quad (11)$$

그림 (1) 은 이상과 같이 설명한 과정으로 생성한 인공 지진파 (변동 프로세스) 를 보여주고 있다.

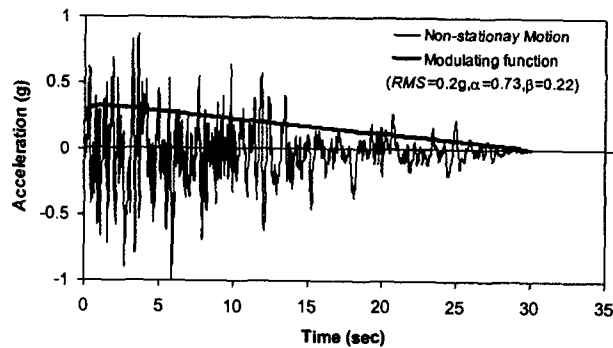


그림 1. Sample time history of non-stationary ground motion (Kim 2001)

3. 지반성질의 공간 변화와 불확실성

지반 성질의 불확실성 (geotechnical property uncertainty) 은 다양한 원인 (그림 2) 에서 기인하나 그 중에서도 공간적 변화 (inherent variability, spatial variation), 측정오차

(measurement error), 통계오차 (statistical error or uncertainty) 그리고 변환모델 불확실성 (transformation model uncertainty) 등 네 가지가 중요한 원인이다. 제한된 지면으로 인해 최종 결과만을 소개하고 구체적인 내용은 참고문헌 (Kim 2001, Kim and Sitar 2002, 김진만의 2003 등)을 참조하기 바란다.

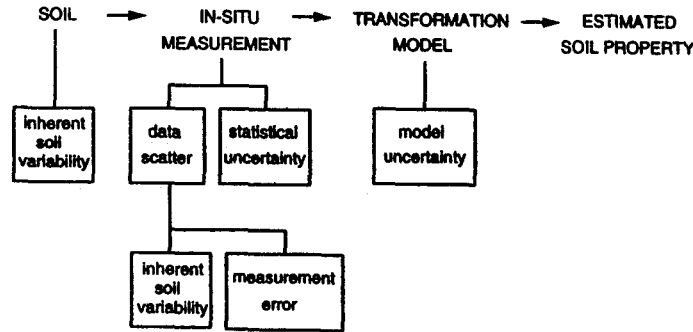


그림 2. Uncertainty in soil property estimates (Phoon and Kulhawy 1999)

3.1. 지반의 불확실성 정량화

공간적으로 변화하는 지반성질의 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. 본 논문은 Vanmarcke 가 제시한 기존의 공간적 평균 방법을 연장하여 측정오차와 조사위치까지도 고려할 수 있는 방법을 제시한다. 소구역 안의 랜덤 (지반) 성질 의 공간 평균치는 다음과 같이 적분의 형태로 정의 할 수 있다.

$$\bar{v} = \frac{1}{V} \int_{\Omega} v(x) dx ; V = \int_{\Omega} dx ; x \in \Omega \quad (12)$$

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 까지 고려하면 지반 성질의 참값은 다음과 같이 이론적으로 표현될 수 있다.

$$v_i = B_i v_i^* + e_i ; i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

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

$$E[v] \approx \hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [B_i v_i^* + e_i] \quad (14)$$

측정값 평균 $\hat{\mu}$ 의 불확실성을 나타내는 분산도는:

$$\text{var}[\hat{\mu}] = \text{var} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_i v_i^* + e_i) \right] = \frac{\mu_B^2 \sigma^2 + \mu^2 \sigma_B^2 + \sigma_B^2 \sigma^2 + \sigma_e^2}{N} \quad (15)$$

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

$$E[\bar{v}] = \hat{\mu} \quad (16)$$

또한 공간평균의 분산은:

$$\text{var}[\bar{v}] = \frac{\mu_b^2 \sigma^2 + \mu^2 \sigma_b^2 + \sigma_b^2 \sigma^2 + \sigma_e^2}{N} + \sigma^2 \gamma(\Omega_e) \quad (17)$$

여기서, $\gamma(\Omega_e) = \frac{1}{V^2} \iint_{\Omega_e} \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{x}d\mathbf{x}'$ 이고 $\mathbf{r} = \mathbf{x} - \mathbf{x}'$ 이다. 마찬가지로, 서로 떨어져 있는 두 개의 소구역 공간평균간의 상관성 (covariance) 은:

$$\text{cov}[\bar{v}, \bar{v}'] = \frac{\mu_b^2 \sigma^2 + \mu^2 \sigma_b^2 + \sigma_b^2 \sigma^2 + \sigma_e^2}{N} + \sigma^2 \gamma(\Omega_e, \Omega_e') \quad (18)$$

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 램덤 (지반) 성질 $v(\mathbf{x})$ 은 경향 (trend) 과 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. 따라서, 공간평균의 분산은 지점성질의 분산보다 항상 작으며, 소구역의 크기가 증가하면 감소한다. 식 (17) 과 식 (18) 의 첫 부분은 통계 및 측정 오차를, 뒷 부분은 공간 평균으로 인해 감소된 본질적 불확실성 (분산)을 나타낸다. 그림 (3) 은 공간적 변동과 통계 오차간의 상대적인 불확실성 크기를 비교하였다. 식 (17) 에서 지반자체의 고유한 불확실성과는 달리 측정값의 부정확성에 의한 오차는 공간적으로 평균하여도 감소하지 않으며 단지 조사량 N 에 좌우된다는 것을 알 수 있다.

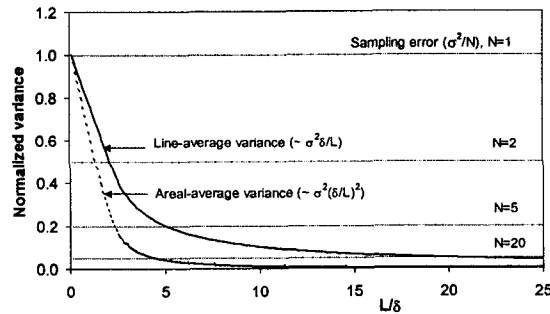


그림 3. Comparison of the uncertainty magnitudes.

3.1.1 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) 은 이러한 장점이 있으며 광물탐사를 포함해서 많은 분야에 광범히 사용되어 왔다. Kriging 기법은 선형 보간법의 하나로서 통계학에서 다루는 BLUE (Best Unbiased Linear Estimator) 기법과 사실상 동일하며, 구조 신뢰성 해석 분야의 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 이용하여 공간평균의 통계특성을 도출하는 과정은 생략하였으며 자세한 내용은 참고문헌 (Kim 2001, Kim and Sitar 2002)을 참조하기 바란다.

4. 예제 해석

그림 (4) 에 표시한 점성토 사면에 대해 지진으로 인한 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. 지반을 등질의 랜덤 필드로 모델링하고 수평 수직 변동자 (scale of fluctuation) 는 각각 $\delta_x = 5\text{m}$ 와 $\delta_y = 1\text{m}$ 로 정하였다. 공간 상관성은 분리형 2-D exponential 자체 상관성 함수를 사용하였다. 전단강도에 추가하여, 사면 지반의 전단파 속도는 150 에서 250 m/sec 사이로 판단되었다.

단순 Bishop 방법을 이용한 사면 해석을 위해 가상활동 토체를 40개의 수직절편으로 나누었다. 평균 지반강도 값 ($\hat{\mu}$) 을 이용해서 결정적 (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 보였다.

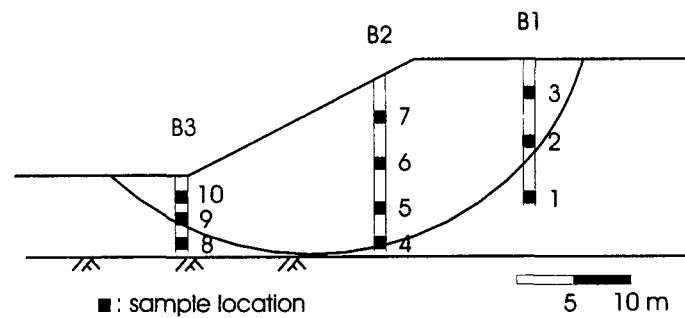


그림 4. Geometry and sample location of a cohesive slope with a circular slip surface

사면이 지진활동이 활발한 샌프란시스코 만 지역의 Berkeley 에 위치한 것으로 가정하였으며 현장에서 가장 가까운 Hayward 지진대만을 고려하였다. 지진재해 해석을 수행하여 얻은 RMS 가속도를 강도, 규모, 그리고 거리별로 분리 (de-aggregate) 하여 각각의 범위에 상응하는 인공지진파를 생성하여 지반응답 해석에 입력자료로 사용하였다. 인공지진파의 주파수 특성과 강도 (intensity) 변화는 Wang 과 Kavazanjian (1987) 이 제안하고 Tung et al. (1992) 이 보완한 자료를 이용하였으며 지진파의 지속시간 분포는 Abrahamson 과 Silva (1996) 가 제안한 경험식을 적용하였다. 지진파 생성과 동시에 파괴면상의 흩절편의 무작위 (random) 지반성질을 생성하여 (그림 5) 항복 가속도 (yield acceleration) 를 계산하였다. 본 사면의 허용변위를 최대 200mm 로 가정하고 사면안정 해석은 한계평형기법 (Limit Equilibrium Method) 과 Newmark-type 변위해석법을 이용하였으며 몬테카를로 시뮬레이션 (Monte Carlo Simulation) 방법으로 사면의 신뢰성을 계산하였다.

해석결과를 그림 (6) 에 표시하였다. 그림 6(a) 는 일정한 RMS 가속도 구간별 파괴 확률을 표시하고 있고 (fragility curve), 그림 6(b) 는 1 년 안에 영구 변위량이 허용 변위를 초과할 가능성을 나타낸다 (risk curve). 지반성질의 불확실성을 5 가지 서로 다른 경우로 모델링 하였다. 이중 결정론 (deterministic approach) 적 지반 특성은 재료성질의 불확실성이 가장 작은 경우이고, 샘플링 오차를 포함한 조건적 (conditional) 및 비조건적 (unconditional) 방법이 불확실성이 가장 큰 경우를 나타낸다. 지반 모델링 방법에 따른 파괴확률 차이는 가속도 수준이 낮을 때 ($\text{RMS} < 0.1\text{g}$) 는 서로 큰 차이를 보이나 가속도 수준이 점차 증가함에 따라 차이가 감소되며 높은 가속도 수준 ($\text{RMS} > 0.2 \text{ g}$) 에서는 무시해도 좋을 만큼 차이가 거의 없는 것을 알 수 있다. 제한된 지면으로 인해 소개하지는 못하지만 비원호 활동면을 가진 대규모 사면의 경우도 비슷한 양상을 보

였다. 따라서 지반성질의 불확실성이 지진 진도가 낮을 경우에는 해석결과에 큰 영향을 줄 수 있지만, 상대적으로 진도가 높을 경우에는 그 영향력이 적다는 결론을 내릴 수 있다.

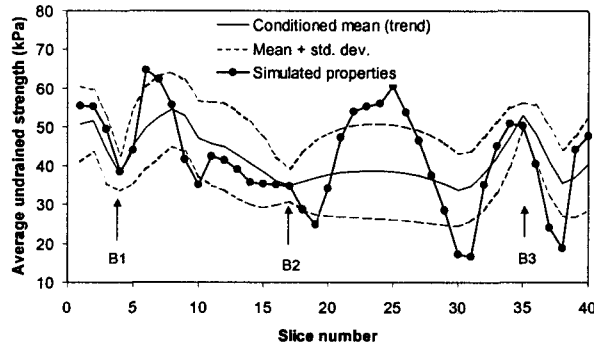


그림 5. Simulation of average undrained shear strengths; conditional simulation

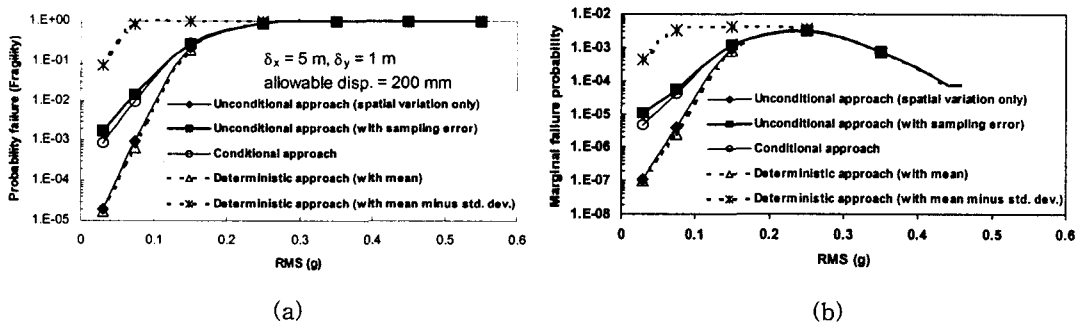


그림 6. (a) Fragility curve; (b) Marginal annual risk curve

6. 결 론

이 연구에서 가장 중요한 성과중의 하나는 지진활동이 활발한 지역 ($RMS > 0.1 - 0.2g$) 에서는 지반성질의 불확실성이 해석결과에 큰 영향을 미치지 아니하나 지진활동이 상대적으로 활발하지 않은 지역 ($RMS < 0.1 - 0.2g$) 에서는 지반성질의 불확실성이 사면안정 해석 시 매우 중요한 사항이 될 수 있다는 점이다. 따라서 지진활동이 상대적으로 활발하지 않은 한반도의 경우 사면안정 해석 시 지반성질의 불확실성을 고려하는 것이 지진파를 선정하는 문제만큼이나 중요하다는 결론이다.

7. 참고문헌

1. 김진만 외, “제 2 장: 지반의 불확실성 및 정량화 기법”, 지반공학 시리즈 1, 지반조사결과 해석 및 이용, 한국지반공학회, 2003, pp.43-58.
2. Abrahamson, N. and Silva, W., “Empirical ground motion models, draft report”, Brookhaven National Laboratory, 1996.
3. Kanai, K., “Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground”, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Tokyo University, 35, 1957, pp.308-325.

4. Kim, J., "Probabilistic approach to evaluation of earthquake-induced permanent deformation of slopes", Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil and Env. Engineering, University of California, Berkeley, 2001.
5. Kim, J., and Sitar, N., "Reliability analysis of slope stability with spatially correlated soil properties", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, (submitted for publication), 2002.
6. Phoon, K. and Kulhawy, F. H., "Characterization of geotechnical variability", *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 1999, pp.612-624.
7. Saragoni, G. R., and Hart, G. C., "Simulation of artificial earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2, 1974, pp.249-267.
8. Tajimi, H., "A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake", *Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 1960, pp.781-797.
9. Tung, A. T. Y., Kiremidjian, A. S., Wang, J. N., and Kavazanjian, J., E., "Statistical parameters of AM and PSD functions for the generation of site-specific strong ground motions", *Earthquake Engineering*, Tenth World Conference, 1992.
10. Vanmarcke, E., *Random fields: analysis and synthesis*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1983.
11. Wang, J. N., and Kavazanjian, J., E., "A nonstationary probabilistic model for pore pressure development and site response due to seismic excitation", Report No. 84, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, 1987.