

불의 고리와 지반공학



봉 태 호
Visiting Scholar,
oregon state university
bongt@oregonstate.edu

1. 서 언

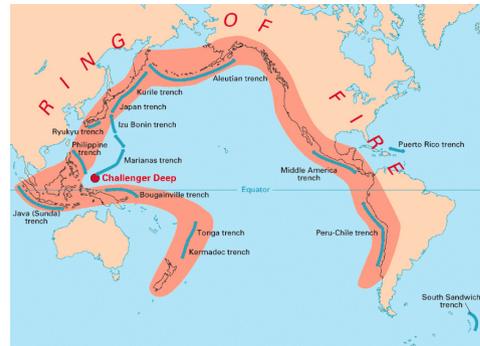
최근 일본과 대만, 에콰도르 등에서 발생한 지진 및 피해에 대한 뉴스를 자주 접하면서 불의 고리라는 용어가 예전에 비하여 자주 등장하고 있으며 지진 발생에 대한 국민들의 경각심이 고조되고 있다. 전 세계적으로 지진발생빈도는 꾸준히 증가하는 추세이며, 대규모 지진이 잦았던 1950~1960년대 이후로 잠잠하던 불의 고리 지역들에서 최근 규모 5.0 이상의 큰 지진들이 계속 발생하면서 반세기마다 대지진이 이어진다는 불의 고리 50년 주기설이 돌고 있다. 특히, 우리나라와 가장 근접해 있는 일본에서는 최근 규모 5.0 이상의 지진이 계속해서 발생함에 따라 국민들의 지진에 대한 불안감과 함께 우리나라도 지진에 대한 대비가 필요하다는 사회적 목소리가 확산되고 있다. 실제 일본 구마모토에서 발생한 지진과 같이 우리나라와 근접한 지역에서 큰 규모의 지진이 발생한 경우 우리나라에 까지 영향을 미친 점을 비추어보면 일본에서 발생한 지진 또한 남의 일이 아니다. 우리나라의 경우 지진에 대하여 안전지대로 인식되어 왔지만 기상청 통계에 따르면 지진 관측 이래 지난해까지 발생한 국내 지진 횟수는 총 1,212회, 올해 1월부터 7월 현재까지 총 40회의 지진이 보고되었으며, 지진의 발생빈도가 꾸준히 증가하고 있음은 우리나라도 더 이상 지진 안전지대가 아니며 이에 대한 대비가 필요함을 시사하고 있다. 특히, 최근 사회적 요구에 따라 매립을 통한 대규모 부지 조성, 항만 및 공항 등의 부지개발이 꾸준히 이루어지고 있으며 사질토 계열의 흙을 준설매립재료로 사용하는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 준설매립의 특성상 매립 후 지반은 매우 느슨한 상태로 지층이 형성되므로 지진에 대하여 매우 취약한 상태라 할 수 있으며 이에 대한 안정성 평가 및 대비가 필요하다.

국내에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 지진에 대한 액상화 평가는 표준 관입시험 결과를 활용한 간이평가방법이며 이 외에도 콘관입시험 결과를 이용한 방법, 진단파 속도를 이용한 방법 등이 적용되고 있다. 하지만 이들 방법은

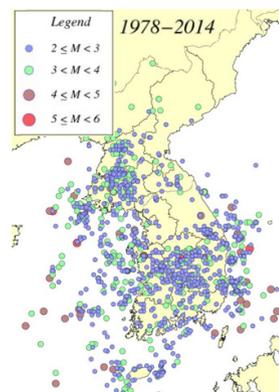
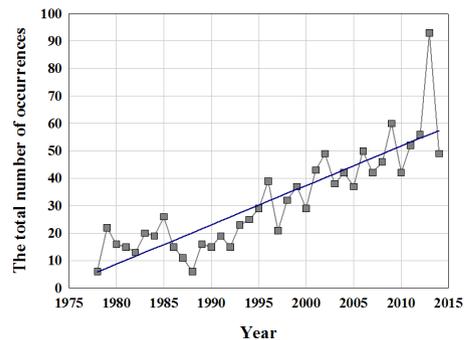
결정론적 방법에 기초하고 있어 지반 물성치에 포함된 많은 불확실성을 합리적으로 고려할 수 없다는 단점이 있으며, 최근 이러한 단점을 극복하기 위하여 국내외적으로 확률론적 접근방법에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 신뢰성기반 해석에 대한 연구는 기초 설계기준의 국제표준화 대응이라는 또 다른 중요한 의미를 갖는다. 북미와 유럽을 중심으로 구조물 설계와 관련하여 신뢰성 분석을 기반으로 한 설계법인 하중저항계수설계법(load and resistance factor design, LRFD)과 유로코드(Eurocode)로 기준이 정비되었다. 이 중, 유로코드 7은 지반공학 분야를 다루고 있으며 국제표준규격의 중심적인 역할을 할 것으로 전망되고 있다. 국제표준화 기구(ISO)와 건설관련 설계표준(ISO 2394) 역시 신뢰성기반 설계법을 채택하였으며, 미국의 경우 2007년 8월 이후 교량 설계 시 지반의 불확실성을 고려한 하중저항계수 설계법의 사용이 의무화되었다. 우리나라도 세계적인 흐름 및 국제기술표준화에 부합하여 이에 대한 대응이 필요하지만 아직까지 이에 대한 관심 및 연구는 미미한 실정이다. 이에 본 고에서는 지반의 신뢰성 해석에 있어 공간 변동성을 정량적으로 고려할 수 있는 기법을 소개하고 이를 통하여 지진에 대한 지반의 안정성 평가 수행 방법에 관한 연구를 소개하고자 한다.

2. 지진재해

불의 고리(ring of fire)란 세계 주요 지진대와 화산대 활동이 중첩된 지역인 환태평양 조산대를 칭하는 용어로서, 서쪽의 일본-대만-동남아, 북쪽의 러시아 캄차카와 미국의 알래스카,



〈그림 1〉 Ring of fire (USGS)



〈그림 2〉 국내 지진발생 추이 및 진앙분포도 (기상청, 2016)

동쪽의 미주 대륙 서부와 남미 해안 지역 그리고 뉴질랜드 등 태평양 연안지역을 아우르는 고리모양의 지진-화산대를 이룬다. 세계적으로 약 90%의 지진과 81%의 대규모 지진이 불의 고리에 속해있는 지역에서 발생하였다.



〈그림 3〉 액상화에 의한 피해사례

우리나라의 경우 직접적으로 불의 고리에 속해있지는 않지만 기상청에 따른 지진발생 추이를 살펴보면 지진의 발생횟수는 계속 증가하고 있음을 알 수 있으며, 일정 규모 이상의 강진이 꾸준히 관측되고 있다. 지난 2000년 이후 우리나라에서 발생한 지진의 규모는 대부분 2~3으로 대부분의 사람이 진동을 느끼지 못하는 정도의 지진이지만 발생한 지진 중 규모 4.0 이상의 지진도 약 2%를 차지하는 것으로 나타났다.

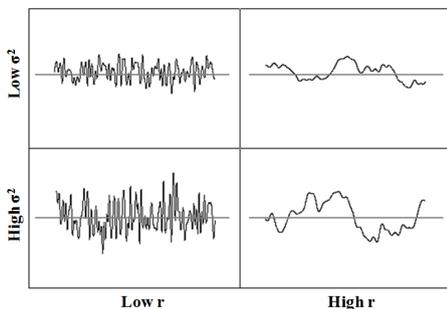
우리나라에서 관측된 가장 큰 규모의 지진은 2004년에 울진군 해역에서 발생한 지진(규모 5.2)로 아직까지 규모 5.5 이상의 지진이 발생한 적은 없으며 그 발생확률이 극히 낮은 것으로 예측하고 있지만 과거 역사 속 문헌 등에서 한반도에 강진이 일어났던 기록이 있듯이 이에 대한 가능성이 아예 없는 것도 아니다.

지진 재해는 지진에 따른 직접적인 피해에 기

인하는 1차 재해와 부수적으로 발생하는 2차 재해로 나뉘며, 지표나 지하구조물의 파괴, 지반 및 건물의 붕괴 등은 1차 재해에 속한다고 할 수 있다. 지진에 의한 피해 중 지반에서 발생하는 대표적인 형태는 액상화(liquefaction)로 지진 시 포화된 느슨한 사질토 지반이 급작스런 정적 혹은 반복하중을 받게 되면 과잉간극수압의 증가로 유효응력이 0이 되고 흙이 액체처럼 되는 현상이다. 액상화가 발생하면 지반은 전단강도를 거의 상실하게 되며 이로 인하여 상부 구조물의 파괴나 부등침하, 측방유동, 제방붕괴 등 큰 피해를 가져온다. 특히, 해안 연약지반이나 매립지반에 설치되는 구조물은 지하수위가 높은 상태에서 지반개량이 되어 있지 않으면 느슨한 지반 때문에 지반진동 발생 시 지진규모가 작아도 액상화 현상으로 인해 큰 피해가 발생할 수 있다.

3. 지반의 공간 변동성

지반 물성은 무작위성(randomness)이 아닌 거리에 따라 점진적 변화(gradual variation) 양상을 나타내는 공간적 상관구조를 보인다. 이러한 공간 변동성은 제거하거나 줄일 수 없는 흙의 고유한 불확실성으로 이를 고려하여 지반 물성을 예측함으로써 보다 나은 결과를 얻을 수 있다. 지반 물성이 상관성을 갖는 공간적 범위는 모암의 종류, 생성원인, 퇴적환경 등 다양한 원인에 의하여 매우 다르게 나타나며 지반 물성의 종류에 따라서도 다른 상관거리를 갖게 된다. 공간 변동성이 고려되지 않으면 지반 물성을 단일 확률변수로 취급하므로 공간적 위치에 관계없이 모두 동일한 값을 나타낸다. 따라서 지반 전체가 극단치를 갖는 경우가 증가하게 되므로 지반 물성의 변동성을 과대평가 하게 되며, 지반 거동의 불확실성을 확대하는 측면이 있다. 하지만 실제 지반의 공학적 거동은 극단치보다 국부적으로 평균화된 물성에 지배를 받기 때문에 이러한 공간 변동성은 더욱 중요하게 인식되고 있다. 그림 5는 지반 물성치의 분산 및 공간적 상관구조에 따른 측정값의 공간적 분포를 나타내는 것으로 공간적 상관구조에 따라 지반 거동에 대한 예측



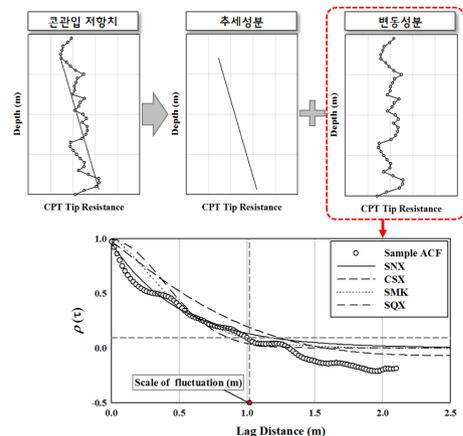
〈그림 4〉 자기상관거리(r) 및 분산(σ^2)에 따른 공간 변동성

이 매우 다르게 나타날 수 있음을 알 수 있다.

지반조사 방법 중 콘관입시험(Cone Penetration Test, CPT)은 일정한 간격으로 신뢰할만한 결과를 얻을 수 있고 다른 지반 물성치와의 관계가 잘 정립되어 있기 때문에 지반 물성치의 공간적 상관구조를 파악하는데 효과적으로 활용되고 있다. 지반의 공간 변동성은 변동모수(scale of fluctuation)를 통하여 표현할 수 있는데 이는 지반물성이 강한 상관이나 일관성을 보이는 공간적 범위를 나타내는 것으로 이를 추정하는 기법은 다음과 같다(정중홍, 2008).

- 표본자기상관함수의 정의를 직접 이용하는 방법
- 표본자기상관함수의 바트렛 한계(Bartlett's limit)를 이용하는 방법
- 이론 자기상관모형 적합법
- 분산감소함수를 이용하는 방법

일반적으로 표본자기상관함수의 바트렛 한계를 이용하는 방법과 이론 자기상관모형 적합법



〈그림 5〉 콘관입 저항치의 변동성분에 대한 변동모수 산정

〈표 1〉 자기상관모형의 종류

Autocorrelation model	Equation	Scale of fluctuation
Single exponential (SNX)	$R(\tau) = \exp(-k_{SNX} \tau)$	$\delta = 2/k_{SNX}$
Cosine exponential (CSX)	$R(\tau) = \exp(-k_{CSX} \tau)\cos(-k_{CSX} \tau)$	$\delta = 1/k_{CSX}$
Second-order Markov (SMK)	$R(\tau) = \exp(1+k_{SMK} \tau)\exp(-k_{SMK} \tau)$	$\delta = 4/k_{SMK}$
Squared exponential (SQX)	$R(\tau) = \exp(-k_{CSX} \tau)^2$	$\delta = \sqrt{\pi}/k_{SQX}$

이 널리 사용되고 있으며 그림 5는 변동모수를 산정하기 위하여 콘관입 저항치를 추세성분과 변동성분으로 분리한 뒤, 변동성분에 대한 자기상관함수를 추정하는 과정을 나타낸다.

표본자기상관계수는 자기상관계수의 추정이므로 $\rho(\tau)=0$ 일 때의 자기상관거리는 정확히 알 수 없지만 표본수 (n)에 대하여 이론 자기상관함수가 0 일 것으로 생각되는 지연거리에 대한 기준이 다음 식과 같이 제시되어 있으며 이를 바트렛 한계라고 한다.

$$\text{Bartlett's Limit} \approx \frac{\pm 1.96}{\sqrt{n}} \quad \text{식(1)}$$

변동모수는 자기상관함수가 바트렛 한계와 만나는 교점에 대한 지연거리이며, 강한 공간상관성을 갖는 범위로 간주된다. 자기상관모형 적합법은 이론적 자기상관모형을 표본자기상관함수에 적합시켜 최적의 매개변수를 산출하고 이를 근거로 변동모수를 평가하는 방법으로 일반적인 자기상관모형의 종류는 표 1에 정리하였다.

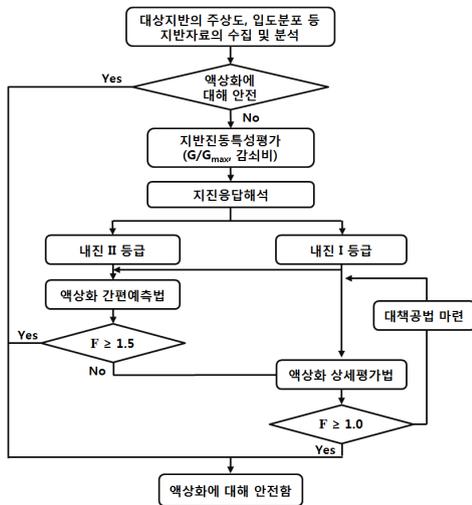
지반 물성의 공간적 변동성은 입력물성을 확률장(random field)의 개념을 도입하여 재현함으로써 고려할 수 있으며 이를 기존 해석방법과 결합한 후, Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하여 지반의 거동특성을 확률적으로 평가할 수 있다. 확률장의 재현을 위해서는 변동성분에 대한

평균, 표준편차 그리고 변동모수를 매개변수로 필요로 하며, 기본 원리 및 효율성에 따라 Matrix decomposition method, Turning bands method, Local average method, Series expansion discretization method 등 다양한 방법들이 제안되었다.

4. 지반의 액상화 평가 및 지반침하

액상화 평가방법으로는 현장시험 결과를 이용한 간편법, 진동삼축시험결과를 이용한 상세법, 수치해석 기법 등 여러 가지가 제안되었으며 실용적으로는 현장시험 결과를 이용한 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 국내의 액상화 평가 흐름도는 그림 6과 같으며 액상화 간편예측법을 통해 구한 대상지반 안전율이 1.5미만인 경우는 액상화 상세예측법이 요구된다.

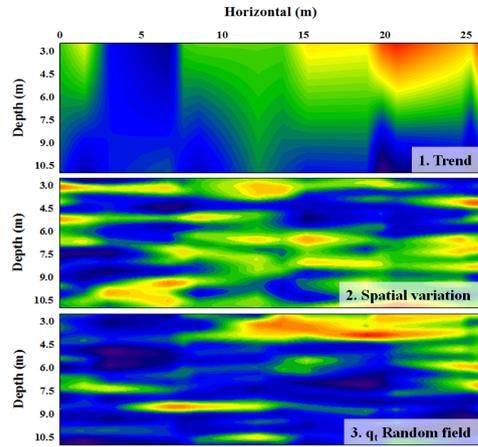
현장 시험결과를 이용한 기존의 방법에는 크게 1) 표준관입시험 결과를 이용하는 방법(Seed and Idriss, 1985) 2) 콘관입시험 결과를 이용하는 방법(Olsen et al., 1998) 3) 전단파 속도를 이용하는 방법(Andrus and Stokoe, 1986) 4) 베커관입시험을 이용한 방법(Harder and Seed, 1986) 등이 있다. 이 중에서 콘관입시험을 이용한 액상화 평가는 연속적인 콘관입 저항치를 얻을 수 있어 층별 해석이 용이하며, 표준관입시험



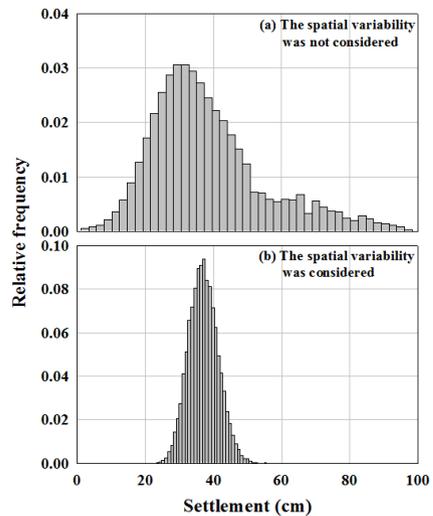
〈그림 6〉 액상화 평가 흐름도(한국지반공학회, 2006)

에 비하여 높은 정밀도를 제공하고 다양한 지반 물성치의 추정이 가능한 장점이 있어 이를 활용한 액상화 평가가 증가하고 있는 추세이다. 특히, 지반의 공간 변동성을 고려한 확률론적 해석에 있어서도 위에서 언급한 바와 같이 지반의 공간적 상관구조를 파악하는데 효율적으로 활용할 수 있다. CPT를 활용한 액상화 평가에 있어 콘관입 저항치의 확률장은 변동모수를 고려하여 재현된 변동성분의 확률장에 추세성분을 합하여 생성되며(그림 7), 이를 해석 시 입력값으로 활용하게 된다.

CPT를 통한 액상화 평가는 기존에 제안된 평가 과정을 그대로 따르며, Monte-Carlo 시뮬레이션을 통한 확률론적 해석으로 각 지층별 평균 안전율 및 액상화 발생가능성을 정량적으로 분석할 수 있다. Ishihara and Yoshimine (1992)는 액상화 안전율과 최대전단변형률(또는 상대 밀도), 체적변형율의 관계를 통하여 액상화에 의하여 유발되는 침하량을 산정할 수 있는 관계식을



〈그림 7〉 콘관입 저항치의 확률장 생성



〈그림 8〉 액상화에 의한 지반침하 발생량의 확률분포

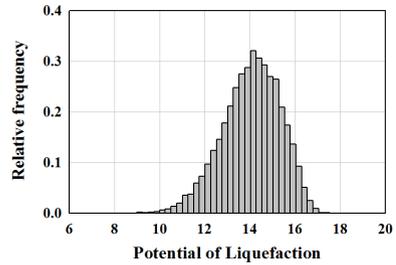
제안하였다. 그림 8은 최대지반가속도가 0.3g이며 지진강도가 7.0일 때 액상화로부터 유발되는 침하량의 확률분포를 산정한 결과이다.

그림 8(a)는 콘관입 저항치의 공간 변동성을 고려하지 않고 단일 확률변수로 취급한 경우이며, 그림 8(b)는 공간 변동성을 고려하여 침하량을 산정한 결과를 나타낸 것으로 콘관입 저항치

에 대한 동일한 평균 및 표준편차를 사용하더라도 확률론적 결과의 차이는 매우 크게 발생함을 알 수 있다. 이는 공간 변동성을 고려하지 않을 경우 실제 지반에서 발생할 수 없는 매우 극단적인 지반조건이 재현되기 때문에 지반의 불확실성을 과대평가할 수 있는 것으로 나타났다. 과도한 지반의 침하는 상부 구조물의 파괴로 이어질 수 있으며, 지반이 비균질한 경우 부등침하가 발생할 수 있다. 특히, 지반의 수평방향에 대한 공간 변동성은 지반의 부등침하에 따른 구조물의 파괴확률과도 밀접한 관련이 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 지금까지 살펴본 방법은 각 층별 안전율을 통하여 액상화를 평가하는 방법으로 지반 전체에 대한 액상화 가능성을 하나로 표현하기에는 무리가 있다. Iwasaki et al. (1978)는 액상화로 인한 피해 정도를 판단하기 위하여 액상화 가능성 지수(Potential of Liquefaction, PL)를 제안하였으며 이는 각 토층마다 구해진 $F(z)$ 와 깊이에 따른 가중함수를 곱하여 깊이방향으로 적분한 값이다.

$$PL = \int_0^z F(z) \cdot w(z) dz \quad \text{식(2)}$$

여기서, $w(z)$ 는 $F_s < 1.0$ 이면 $F = 1 - F_s$, $F_s \geq 1.0$ 이면 $F = 0$ 이고, $w(z) = 10 - 0.5z$ 이다. 액상화 가능성 지수를 통한 평가는 액상화의 발생 깊이와 발생 가능 지층 두께가 액상화에 미치는 영향을 고려할 수 있으며, 국부적으로 발생하는 액상화에 대해 전체 지반의 심도로 평가하는 방법을 취함으로써 과도하게 액상화를 평가하는 것을 방지할 수 있는 장점이 있다(이종근과 최홍석, 2011). 그림 9는 공간 변동성을 고려하



〈그림 9〉 액상화 가능성 지수의 확률분포

〈표 2〉 액상화 지수에 따른 액상화 등급 판정기준

PL	액상화 판정
0	액상화 발생 위험이 없거나 매우 적은 조건
$0(PL \leq 5)$	액상화 발생 가능성이 낮은 조건
$5(PL \leq 15)$	액상화 발생 가능성이 있는 조건
$PL > 15$	액상화 발생 위험이 높은 조건

여 액상화 가능성 지수의 확률분포를 산정한 결과이며, 표 2는 액상화 지수에 따라 액상화 등급을 판정하는 기준을 정리한 것이다.

5. 결 언

본 고에서는 최근 큰 규모 지진의 잦은 발생과 피해로 국민들의 지진에 대한 관심 고조와 우리나라도 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아니라는 불안감이 확산됨에 따라 지반에서 발생하는 대표적인 지진재해 형태인 액상화에 대한 안정성 평가에 방법에 대하여 살펴보았다. 또한, 신뢰성 기반의 설계법이 세계적인 추세 및 국제 표준화가 되어감에 따라 지반의 불확실성을 정량적으로 고려하기 위한 신뢰성 해석방법의 적용을 소개하였다. 특히, 지반의 불확실성을 보다 합리적으로 고려하기 위해서는 지반 물성치를 단일 확률변수가 아닌 확률장의 개념을 도입하여 공간적 변동성을 고려할 필요성이 있음을

언급하였으며, 이를 액상화 평가에 적용하여 확률론적 결과의 차이를 비교하여 보았다.

지진은 막대한 인명 및 재산피해를 초래하는 만큼 우리나라도 지진으로 인한 피해가 가능하다는 사실을 인지하고 이에 대한 대비가 필요할 때가 되었다. 또한, 지반분야 설계기준의 국제 표준화 부합 및 이에 대한 대응을 위해서는 지반의 불확실성에 대한 올바른 이해와 함께 신뢰성 기반 해석기법에 대한 보다 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Andrus, R.D., and K.H. Stokoe, 2000, Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(11):1015-1025.
2. Harder, L.F. and H.B. Seed, 1986. Determination of penetration resistance for coarse-grained soils using the Becker hammer drill. Rep. UCB/EERC-86/06, *Earthquake Engrg. Res. Ctr.*, University of California at Berkeley.
3. Ishihara, K., and M. Yoshimine, 1992. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1):173-188.
4. Iwasaki, T., F. Tatsuoka, K.I. Tokida and S. Yasuda, 1978. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation*, San Francisco.
5. Olsen, R.S., 1998. Using the cone penetrometer test (CPT) to predict liquefaction potential. U.S. NCEER workshop on In-situ based techniques for prediction of liquefaction potential.
6. Seed, H.B., K. Tokimatsu, L.F. Harder and R.M. Chung, 1985. Influence of SPT Procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering* 111(12):1425-1445.
7. 기상청, <http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/domestictrend.jsp>
8. 이종근, 최홍석, 2011. 기존 하구둑 시설물의 액상화 평가방법 및 평가사례, *시설안전지* 38: 134-158.
9. 정종홍, 2008. 지반의 확률 특성화를 위한 콘저항력의 공간변동성 연구, 서울대학교, 박사학위논문.
10. 한국지반공학회, 2006. *지반구조물의 내진설계*, 서울: 구미서관.