

매립지반의 액상화 신뢰성 및 위험도 평가

Reliability and Risk Assessment of Reclaimed Soil

이진학* · 권오순** · 박우선***
Yi, Jin-Hak · Kwon, O-Soon · Park, Woo-Sun

ABSTRACT

Liquefaction of soil foundation is one of the major seismic damage types of infrastructures. In this paper, deterministic and probabilistic approaches for the evaluation of liquefaction potential are briefly summarized and the risk assessment method is newly proposed using seismic fragility and seismic hazard curves. Currently the deterministic approach is widely used to evaluate the liquefaction potential in Korea. However, there are a certain degree of uncertainties in the soil properties such as elastic modulus and resistant capacity, therefore the probabilistic approach is more promising. Two types of probabilistic approach are introduced including (1) failure probability for a given design earthquake and (2) the seismic risk of liquefaction of soil for a given service life. The results from different methods show a similar trend, and the liquefaction potential can be more quantitatively evaluated using risk analysis method.

Keywords: liquefaction potential, seismic risk, reliability analysis

1. 서론

지진에 대한 체계적이고, 공학적인 연구를 위한 지진 가속도 기록은 1940년 El Centro 지진에서 처음 측정되었으며, 이후 많은 지진기록과 피해사례에 대한 연구가 이루어졌다. 지반 액상화는 이러한 지진피해 중 대표적인 형태라 할 수 있다. 특히, 1995년 Kobe 지진은 매립지반으로 형성된 Kobe항 부근지역의 액상화 피해를 심각하게 유

* 정회원 · 한국해양연구원 선임연구원 E-mail: yijh@kordi.re.kr

** 한국해양연구원 선임연구원 E-mail: oskwon@kordi.re.kr

*** 한국해양연구원 책임연구원 E-mail: wspark@kordi.re.kr

발시킨 바 있으며, 이로 인하여 매립지반에서의 액상화 거동 연구와 함께 매립지반의 액상화 대책공법에 대한 연구가 활발하게 진행되게 되었다. 이 연구에서는 안벽 케이스이 설치된 매립지반에 대하여 기존의 결정론적, 확률론적 액상화 평가를 수행하였으며, 그 결과를 비교하였다.

2. 지반액상화 평가기법

2.1 기존 결정론적 평가방법

지진이 발생한 경우, 지반의 액상화가 발생할 것인지에 대한 평가 및 예측 방법은 구조물의 종류에 따라 여러 가지 기준이 사용되고 있지만, 현재 많이 사용되고 있는 액상화 평가 방법으로는 ① 표준관입시험을 이용한 간이평가(Seed and Idriss, 1971), ② 콘관입시험을 이용한 간이평가(Olsen, 1998), ③ 표준관입시험과 입도분포를 이용한 간이평가(日本港灣協會, 1999), ④ 반복전단시험과 지진응답해석을 이용한 상세평가, ⑤ 진동대시험이나 현장 액상화 시험을 통한 평가 등이 있다. 간이평가는 표준관입시험과 입도분포와 같은 비교적 쉽게 얻을 수 있는 지반의 조건을 이용하여 간단하게 액상화에 대한 판정을 할 수 있고, 정밀도도 비교적 높기 때문에 많이 사용되고 있다. 액상화 상세평가는 반복전단응력비를 구하는 절차와 저항전단응력비를 구하는 절차로 이루어져 있으며, 저항전단응력비를 구하는 과정에서 SPT 실험 및 반복삼축실험 결과 등을 이용하여 구하게 된다. 액상화 평가에 대한 자세한 내용은 내진설계기준(II)(건설교통부, 1997), 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(한국해양연구소, 2000) 등을 참고할 수 있다. 이 연구에서는 기존의 액상화 평가프로그램(권오순, 박우선 2000)을 이용하여 액상화를 평가하였다.

2.2 신뢰성 기법을 이용한 액상화 평가

신뢰성 해석은 대상 구조물, 지반 물성치 및 하중에 대한 불확실성을 고려하여 하중이 저항을 초과하는 파괴의 경우를 확률적으로 산정하는 방법이다. 이를 위하여 각 확률변수들로 이루어진 저항함수(resistance function, $R(x)$)와 하중함수(loading function)로부터 신뢰도 함수(reliability function)를 구하며, 이로부터 파괴확률 및 신뢰지수를 얻을 수 있다. 파괴확률(P_f)은 다음 식 (1)과 같이 저항함수의 확률분포함수($F_R(x)$)와 하중함수의 확률밀도함수($f_s(x)$)를 이용하여 구할 수 있다(양영순 1999).

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_s(x) dx \quad (1)$$

2.3 지진위험도 분석에 의한 액상화 위험도 분석

Shinozuka 등(2002)은 지진취약도 곡선을 다음 식 (2)와 같은 2계수 대수정규분포함수의 형태로 나타내었다. 여기서 계수인 중간값과 대수표준편차는 최우도추정법(maximum likelihood estimate)에 의해 구할 수 있다.

$$F_L(a) = \Phi \left[\frac{\ln(a/c)}{\zeta} \right] \quad (2)$$

여기서, a 는 PGA 값과 같이 지진의 특성을 나타내는 변수이며, $\Phi[\cdot]$ 는 표준정규분포함수이다. 이렇게 가정된 확률 분포에 대한 계수 c 와 ζ 는 최우도추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 이용하여 추정할 수 있다. 지진위험도 분석에 대한 자세한 내용은 참고문헌(이진학 등 2004, 김두기 등 2005)을 참고할 수 있다.

3. 예제해석

3.1 대상지반 및 지진자료

이 연구에서는 다음 그림 1와 같이 실제 안벽 케이스 설계가 이루어진 지반을 모델로 하여 목적에 맞게 일부 지반물성치를 수정하여 액상화가 일어날 수 있도록 하여 지반 액상화를 평가하였다. 한편 해석을 위하여 사용된 각 층에 대한 지반물성치는 다음과 같이 고려하였다. SPT 실험을 통하여 얻은 N값을 이용하여, V_s , G_{max} 값 등을 구하였으며, 준설매립토에 대한 변형률과 G/G_{max} 및 감쇠비의 관계, 반복저항응력비 등은 실제 반복전단실험 및 삼축압축 실험을 이용하여 얻은 값을, 그리고 그 외 지반에 대해서는 기존의 자료를 이용하여 고려하였다.

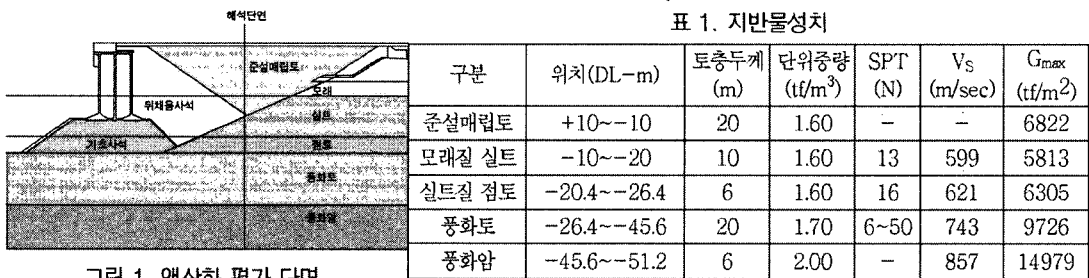


그림 1. 액상화 평가 단면

지반의 액상화 평가를 위하여 도로교 시방서의 표준설계응답스펙트럼을 이용하여 만든 인공지진과 주파수 성분의 특성이 매우 분명하여 최근 지진안전성 분석에서 많이 이용되고 있는 Hachinohe 지진과 Ofunato 지진을 이용하여, 인공지진만을 사용하였을 때의 일반성을 보완할 수 있도록 하였다(그림 2).

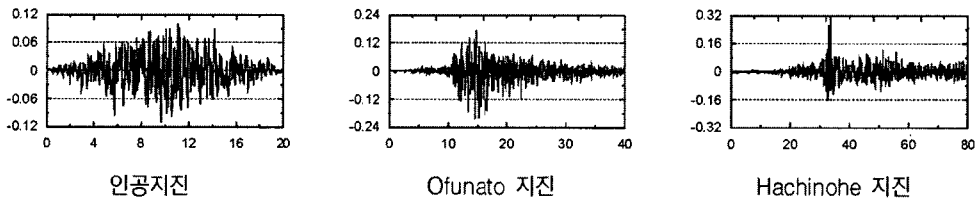


그림 2. 액상화 평가에 사용된 지진

3.2 기존 방법에 의한 액상화 평가 결과

기존 방법에 의하여 액상화 평가를 수행하여 다음 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 우선 그림 3(a)은 지반응답해석에 의하여 구한 각 층에서의 PGA 분포를 보여준 것으로써 주파수 성분이 다른 세 개 지진에 대한 지반응답해석의 결과가 매우 상이함을 알 수 있다. 이러한 지반응답해석 결과는 액상화를 유발하는 반복전단응력비(Cyclic Stress Ratio, CSR)을 계산하는데 영향을 주어 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 CSR의 분포 역시 지진에 따라 상이한 결과를 얻을 수 있으며, 안전계수(Safety Factor, SF) 역시 지진에 따라 매우 다른 결과를 보여준다. 인공지진과 Hachinohe 지진의 경우 안전계수가 심도 20m 이내의 지반에서 모두 1보다 크게 나와 지반 액상화가 일어나지 않는 것으로 평가되었지만, 단주기 성분이 많은 Ofunato 지진의 경우 일부 단면에서 안전계수가 1보다 작게 나와 액상화 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

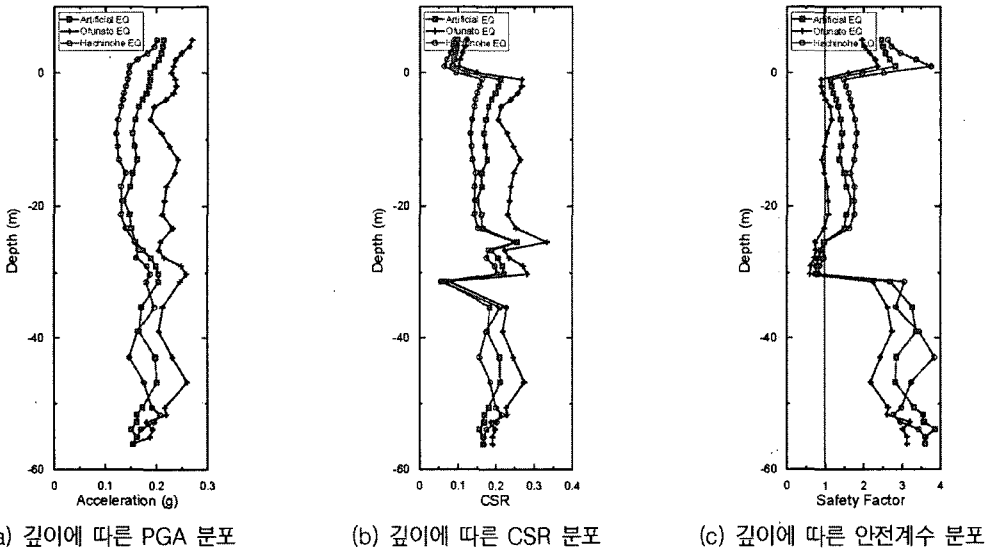


그림 3. 기존 방법의 의한 액상화 평가 결과

3.3 신뢰도 해석에 의한 지반 액상화 발생 가능성 평가

신뢰도 해석을 위해서는 지반 물성치의 확률특성을 먼저 고려하여야 한다. 이 연구에서 사용한 신뢰도 해석은 Level III에 해당하는 신뢰도 해석으로써 Monte Carlo Simulation에 의하여 신뢰도를 분석하였다. 지반 물성치의 확률특성은 여러 번의 시료채취 및 물성치 분석을 통하여 수행할 수 있으나, 이 연구에서는 자료의 제약으로 인하여 매립지반에 대해서는 네 개의 시료를 채취하여 지반 물성치를 분석하였다. 삼축압축시험으로부터 반복저항응력비(Cyclic Resistant Ratio, CRR)를 결정하였으며, 공진주 시험으로부터 변형률과 G/G_{max} 관계, 그리고 변형률과 감쇠비의 관계를 구할 수 있었다. 이 때 G/G_{max} , 감쇠비의 변형률에 따른 관계는 구속압에 따른 영향을 살펴보기 위하여 구속압의 상태를 50kPa, 100kPa, 200kPa로 증가시켜가며 관계를 구하였다. 변형률과 G/G_{max} 관계, 그리고 변형률

과 감쇠비의 관계를 몇 개의 샘플링 자료를 이용하여 확률특성을 구하기 위해서 그 관계를 결정할 수 있는 계수를 확률변수로 고려하였다. 변형률(γ)과 G/G_{max} 및 감쇠비(D)의 관계는 식 (3)과 같은 Hyperbolic 모델(Hardin과 Drnevich)을 사용하였다. 결국 이러한 관계는 두 계수 γ^G 와 γ^D 를 확률변수로 하여 나타낼 수 있다.

$$G/G_{max} = 1/(1+\gamma/\gamma^G), \quad D = D_{max}[(\gamma/\gamma^D)(1+\gamma/\gamma^D)] \quad (3)$$

다음의 표 2는 4개 시편에 대하여 변형률과 G/G_{max} , 감쇠비의 관계를 보간하기 위한 계수의 확률특성값을 정리 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 구속압의 조건에 따라서 계수의 평균과 COV값이 달리 산정되었으며, 이는 곧 동일한 매립지반이라 하더라도 구속압 상태 즉 깊이에 따라서 거동 특성이 상이함을 알 수 있다. 모든 층에 대한 실험을 수행하여 그 결과를 반영하기는 제한된 상황에서 매우 어려우므로 매립지반층을 5m, 5m, 10m로 분류하여 구속압 상태를 각각 고려하여 대표값으로 이들을 고려하도록 하였다. 표 3에서 신뢰도 해석을 위한 각 지반 물성치의 확률적 특성값을 정리하였다.

표 2. 4개 시편에 대한 보간계수(γ^G, γ^D)의 확률특성값

	P=50kPa		P=100kPa		P=200kPa	
	γ^G	γ^D	γ^G	γ^D	γ^G	γ^D
S1	0.0427	0.1069	0.0518	0.1617	0.0650	0.1997
S2	0.0412	0.1076	0.0496	0.1609	0.0739	0.1818
S3	0.0366	0.1251	0.0460	0.1260	0.0535	0.1592
S4	0.0413	0.1371	0.0526	0.1657	0.0653	0.1852
평균	0.0404	0.1192	0.0500	0.1536	0.0644	0.1815
표준편차	0.0026	0.0146	0.0030	0.0185	0.0084	0.0168
COV	0.0654	0.1227	0.0593	0.1206	0.1303	0.0923

표 3. 신뢰성 해석에 사용된 확률특성값

구분	단위중량(tf/m3)	Gmax(tf/m2)	G	D	CRR
준설패립토	1.60(0.07)	6822(0.07)	0.040(0.065)	0.119(0.123)	0.24(0.05)
	1.60(0.07)	6822(0.07)	0.050(0.059)	0.154(0.121)	0.24(0.05)
	1.60(0.07)	6822(0.07)	0.064(0.130)	0.182(0.092)	0.24(0.05)
모래질 실트	1.60(0.07)	5813(0.07)	0.030(0.2)	0.04(0.3)	0.25(0.05)
실트질 점토	1.60(0.07)	6305(0.07)	0.030(0.2)	0.04(0.3)	0.17(0.05)
풍화토	1.70(0.07)	9726(0.07)	0.037(0.2)	0.11(0.3)	0.60(0.05)
풍화암	2.00(0.07)	14979(0.07)	0.630(0.2)	0.05(0.3)	0.60(0.05)

주) 괄호안의 값은 분산계수(COV, Coefficient of Variation)임

다음의 그림 4~6은 신뢰도 해석에 의한 파괴확률을 구한 것으로 결정론 방법에 의한 결과와 유사하게 Ofunato 지진에 의한 파괴확률이 가장 크게 평가되어 1에 가까운 파괴확률을 가지는 것으로 나왔다. 즉 Ofunato 지진과 같은 주파수성분을 가지는 1000년 지진이 발생하는 경우 해당되는 지반은 거의 액상화가 발생한다고 할 수 있다. 그러나 국내 지방서의 표준응답스펙트럼으로 작성한 인공지진과 유사한 주파수 성분을 갖는 지진이나, 혹은 Hachinohe 지진과 같이 장주기 성분이 많은 지진이 발생하는 경우에는 거의 액상화가 발생하지 않는 것으로 평가되었다.

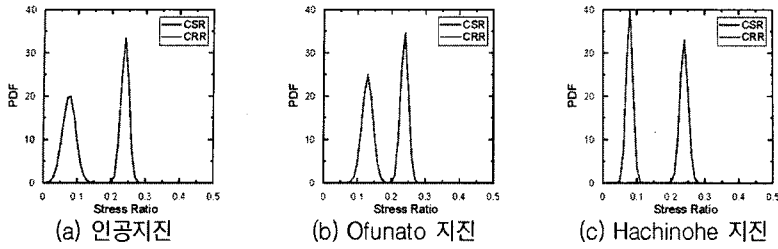


그림 4. 깊이 0m에서의 CSR 및 CRR의 확률밀도함수

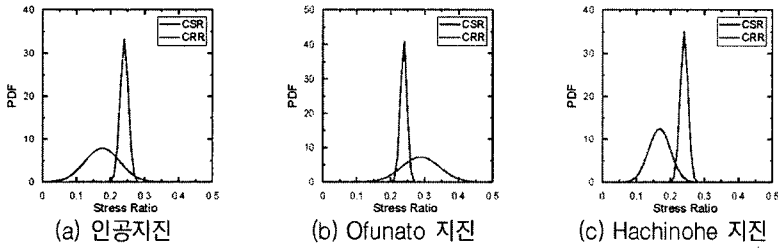


그림 6. 깊이 5m에서의 CSR 및 CRR의 확률밀도함수

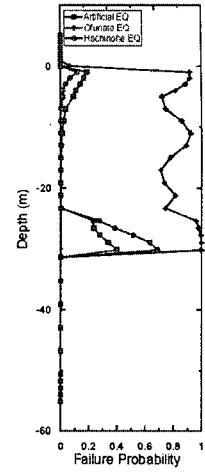


그림 5. 깊이에 따른 파괴확률

3.4 액상화 위험도 평가

1000년 설계지진에 대한 액상화 발생 가능성에 대한 결정론적 방법과 신뢰도 평가를 이용한 확률적 방법 모두 액상화 발생 가능성을 평가하고 지반 개량을 수행하여야 하는가에 대한 정보를 제공하는 데 충분한 면이 있지만, 생애주기분석 혹은 확률지반 최적설계, 혹은 사용기간 동안의 지진에 의한 액상화 발생가능성 등을 검토하기 위해서는 해당지역에서 발생 가능한 지진의 크기와 지진 발생 빈도 등을 고려한 지진 위험도에 대한 평가가 필요하다. 우선 이 안벽 케이슨이 시공되는 지역에 대한 지진재현주기와 기간 중 최대 PGA값을 지진재해지도로부터 다음의 표 4와 같이 구하였다.

표 4. 지진재해주기와 기간 중 최대 PGA의 관계

지진재현주기 (년)	최대 PGA(g)
50	0.024
100	0.042
200	0.055
500	0.085
1000	0.114
2400	0.155
4800	0.196

액상화에 대한 취약도를 구하기 위하여 인공지진을 80%, Hachinohe 지진, Ofunato 지진을 각각 10% 고려하여, Monte Carlo Simulation을 수행하였다. 실제 발생가능성이 높은 형태의 지진에 대한 연구가 필요한 것으로 보여진다. 다음의 그림 7은 깊이별로 액상화 취약도를 분석한 결과를 보여주고 있다. 지하수위가 위치한 매립지반의 경우 PGA가 0.2g 보다 작은 경우에는 액상화 발생 가능성이 없음을 알 수 있으나, 심도 5m, 10m인 경우에는 작은 지진

에 대해서도 액상화 발생 가능성이 어느 정도 존재함을 알 수 있다. 또한 대수표준편차가 매우 큰 분포함수를 보여주고 있어, 곡선 자체가 거의 직선에 가까운 형태를 가지고 있다. 한편 그림 8은 지진재해지도로부터 지진재해도를 구한 결과이다. 지진재해지도로부터 PGA값과 이에 대한 F_A 관계로부터 지진재해도 관련상수를 구하기 위한 보간과정을 보여주고 있다. 그리고 8(b)는 지진재해도 상수를 이용하여 구한 확률분포함수, 그리고 8(c)는 이를 미분하여 구한 확률분포함수(f_A), 즉 지진재해도를 제시한 것이다. 취약도 곡선과 재해도 곡선을 이용하여 100년 사용기간, 그리고 재현주기가 1000년인 지진에 대한 액상화 위험도를 그림 9에서 제시하였다. 결정론적 방법 및 신뢰도 해석에서의 결과와 마찬가지로 지하수위 아래에서 10m 깊이까지 액상화에 대한 위험이 있는 것으로 분석되었다.

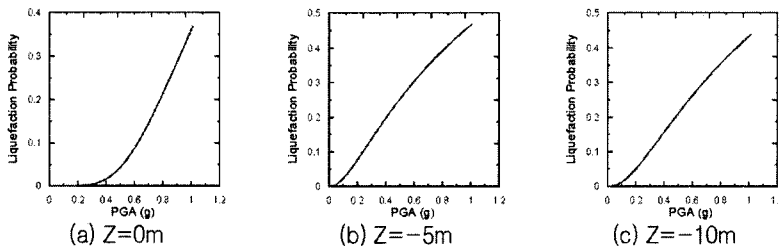
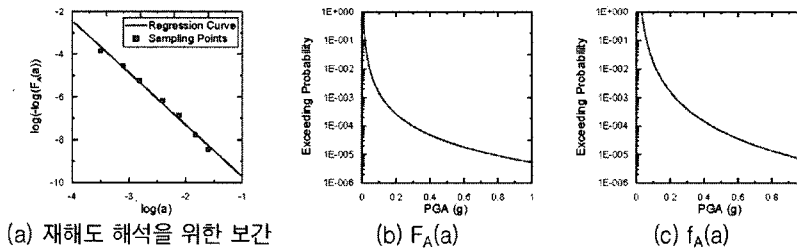


그림 7. 액상화 취약도 (지하수위 기준)



(a) 재해도 해석을 위한 보간

(b) $F_A(a)$

(c) $f_A(a)$

그림 8. 지진재해도

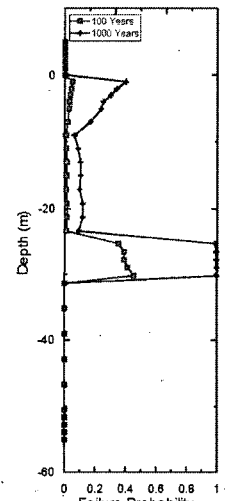


그림 9. 깊이에 따른 액상화 위험도

4. 결론

이 연구를 통하여 매립지반에 대한 액상화 발생가능성을 기존의 결정론적 방법과 확률론적 방법에 의하여 평가하였다. 확률론적 방법에서는 주어진 설계지진에 대하여 지반물성치의 확률특성을 고려하여 설계지진에 대한 파괴확률을 산정하였으며, 지진위험도 분석기법을 도입한 방법에서는 주어진 사용기간에 대한 액상화 발생가능성을 평가하였다. 결정론적인 방법에 의하여 대상지반이 Ofunato 지진과 같은 단주기 성분이 많은 지진에 대하여 액상화 발생가능성이 큰 것으로 평가되었으며, 안전계수가 1.0 부근에 있어 지진 안전성에 대한 판단이 어려운 지반임을 알 수 있다. 한편 설계지진에 대한 신뢰도 분석 결과 마찬가지로 Ofunato 지진에 대하여 파괴확률이 가장 크게 산정되어 결정론적 방법과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 한편 주어진 사용기간 동안 액상화가 일어날 수 있는 가능성, 즉 위험도

를 평가함으로써 보다 정량적인 확률론적 액상화 평가를 수행하였다.

성능기반설계로 설계개념이 옮겨가고 있기 때문에 위험도 분석기법을 도입한다면 실제 사용기간 동안 액상화가 일어날 확률을 평가할 수 있기 때문에 보다 직관적인 기준이 될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 액상화에 의한 지진 손실비용 등을 고려한 생애주기분석 등을 수행할 수 있으며, 또한 일본, 유럽 등에서 사용하고 있는 신뢰도 기준 등에 대한 검토를 통하여 사용기간 중의 파괴확률을 정의하여 새로운 설계기준을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

건설교통부(1997), 내진설계기준연구(II)

권오순, 박우선(2000) 등가선형화에 의한 1차원 지진응답해석의 민감도분석, 한국지반공학회 논문집, 16(5), 5~17

김두기, 서형렬, 이진학 (2005) LRB 면진장치가 설치된 엑스트라라즈드교의 지진위험도 평가, 대한토목학회 논문집, 26(1A), 155~162

양영순 (1999) 구조진뢰성 공학, 서울대학교 출판부

이진학, 윤진영, 윤정방 (2004) 지진취약도분석을 통한 교량의 지진위험도 평가. 한국지진공학회 논문집, 8(6), 31~43

日本港灣協會(1999). 港灣の施設の技術上の基準同解説

한국해양연구소(1999), 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서, 해양수산부

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*

Seed, H.B. and Idriss, I.M.(1971) Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of Soil Mechanics and Foundation, Division, ASCE, 97(9), 1249~1273.*

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., and Ueda, T. (2002) Statistical Analysis of Fragility Curves. *Technical Report at Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, N.Y., USA*