

배율조정 및 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델에 대한 비선형 단자유도 시스템의 파손확률

Failure Probability of Nonlinear SDOF System Subject to Scaled and Spectrum Matched Input Ground Motion Models

김동석¹⁾ · 박원석²⁾ · 고현무³⁾ · 최창열⁴⁾

Kim, Dong-Seok · Park, Wonsuk · Koh, Hyun-Moo · Choi, Chang-Yeol

국문 요약 >> 비선형 구조계의 확률론적 지진해석 방법 중 대표적인 것은 지진 재해도 수준에 해당하는 입력지반운동 모델을 사용한 시간이력을 수행하여 그 응답의 확률분포를 예측하는 것이다. 이 연구에서는 널리 사용되고 있는 두 가지 입력지반운동 모델에 따른 구조계 응답의 분포특성 및 파손확률의 차이와 그 원인을 분석한다. 입력지반운동 모델로는 실제 지진기록을 배율 조정하여 사용하는 배율조정 입력지반운동과 설계 응답스펙트럼에 상응하는 인공 지진기록을 사용하는 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 두 가지를 고려한다. 동일한 지진재해도 수준을 고려한 해석결과 설계 응답스펙트럼에 상응하는 인공 지진기록을 사용한 입력지반운동 모델은 실제 지진기록을 배율 조정된 입력지반운동 모델보다 평균적으로 응답을 크게 평가하였고 이로 인해 파손확률 또한 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 연약한 지반에서 더욱 현저한 것으로 나타났다. 이러한 입력지반운동 모델에 따른 파손확률의 차이는 스펙트럼 맞춤 입력지반운동의 목표로 사용된 도로교 설계기준의 설계 응답스펙트럼이 실제 지진기록의 응답스펙트럼보다 장주기로 갈수록 응답을 크게 평가하도록 보수적으로 만들어졌기 때문인 것으로 나타났다.

주요어 시간이력해석, 비선형 단자유도 시스템, 파손확률, 배율조정 입력지반운동, 스펙트럼 맞춤 입력지반운동

ABSTRACT >> In probabilistic seismic analysis of nonlinear structural system, dynamic analysis is performed to obtain the distribution of the response estimate using input ground motion time histories which correspond to a given seismic hazard level. This study investigates the differences in the distribution of the responses and the failure probability according to input ground motion models. Two types of input ground motion models are considered: real earthquake records scaled to specified intensity level and artificial input ground motion fitted to design response spectrum. Simulation results for a nonlinear SDOF system demonstrate that the spectrum matched input ground motion produces larger failure probability than those of scaled input ground motion due to biased responses. Such tendency is more remarkable in the site of soft soil conditions. Analysis results show that such difference of failure probability is due to the conservative estimation of design response spectrum in the range of long period of ground motion.

Key words time history analysis, nonlinear SDOF system, failure probability, scaled input ground motion, spectrum matched input ground motion

1. 서론

최근의 구조물 내진성능 평가 및 내진설계에서는 부재의

비선형 이력거동을 나타낼 수 있는 유한 요소 모형을 사용한 시간이력해석을 수행하는 경우가 많아지고 있다⁽¹⁻³⁾. 이 같은 경향은 지진 재해도(seismic hazard) 수준에 따라 구조물의 안정성과 기능성에 대해 정량적 해석을 요하는 최근의 성능기반 지진공학(Performance-Based Seismic Engineering, PBSE)⁽⁴⁾ 또는 성능기반설계(Performance-Based Design, PBD)^(5,6) 개념의 발전으로 인해 특히 두드러지고 있다.

성능기반 내진설계에서 비선형 시간이력해석을 통하여 구조물의 소요역량(seismic demand)을 예측하는 일련의 과

¹⁾ 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

²⁾ 정회원·서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원, 공학박사
(대표저자: wpark@sel.snu.ac.kr)

³⁾ 서울대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사

⁴⁾ 서울대학교 건설환경공학부 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 10. 16 / 심사종료일 : 2007. 12. 14)

정을 살펴보면 먼저 해석하고자 하는 지진 재해도 수준(hazard level)을 정하고 그 지진 재해도 수준에 해당하는 강도척도(Intensity Measure; IM)에 따른 입력지반운동 모델을 정한다. 그 후 다수의 비선형 시간이력해석을 수행하여 최대 응답의 평균을 구함으로써 구조물의 소요역량을 산출하게 된다⁽⁷⁾. 이러한 과정에서 신뢰성 있는 구조물의 소요역량을 예측하기 위해서 필요한 비선형 시간이력해석의 수는 응답의 분산에 비례하게 된다⁽⁸⁾. 즉, 응답의 분산이 크면 그 만큼 많은 수의 해석이 필요하고 응답의 분산이 작으면 적은 수의 해석으로도 신뢰성 있는 소요역량을 예측할 수 있다. 따라서 많은 지진공학자들은 보다 경제성 있는 비선형 해석을 위해 응답의 분산이 적게 되는 입력지반운동 모델이나 강도척도(IM)를 개발하려고 노력하고 있다⁽⁹⁻¹²⁾.

지진 재해도 수준을 나타내는 강도척도로서 최대지반가속도(PGA)가 많이 쓰이고 있으나 Shome과 Cornell(1998) 등 여러 연구결과⁽¹³⁻¹⁵⁾들에 의해 최대지반가속도(PGA)보다 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도(spectral acceleration, $Sa(T_1)$)가 비선형 시스템 최대 응답의 분산을 작게 한다는 것이 알려지면서 최근에는 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도($Sa(T_1)$)가 강도척도로 많이 사용되고 있다. 그리고 해당 지역의 지진 재해도 수준을 반영하면서 응답의 분산이 작게 되는 입력지반운동 모델도 여러 연구자들에 의해 제안되었는데 그 중에서 실제 지진기록을 배율조정(scaling)하여 사용하는 방법과⁽¹³⁾, 목표 응답스펙트럼에 상응하도록 실제 지진기록을 변형하거나^(16,17) 인공 지진기록을 생성하여 사용하는 방법⁽¹⁸⁻²⁰⁾이 널리 쓰이고 있다. 이러한 입력지반운동 모델은 실제 지진기록에서 적합한 지진기록을 선택하는 것보다 손쉽게 해석을 위한 지진 기록을 얻을 수 있기 때문에 우리나라와 같이 강진기록이 충분하지 않은 지역에서 유용하다 할 수 있다. 배율조정 방법은 선별된 지진기록들을 특정 강도척도(IM)에 대해 일정한 지진세기를 가지도록 조정하여 해석에 사용하는데, 예를 들어 지진기록들의 최대지반가속도(PGA)값을 일정하게 조정하여 사용하는 방법이 여기에 속한다. 이 방법에서는 주파수 성분이나 비정상(non-stationary) 특성 등과 같은 지반운동의 여러 특성을 그대로 유지하면서도 강도척도(IM)값으로 통상 표현되는 지진 재해도 수준에 대한 지반운동 표본들을 손쉽게 마련할 수 있는 특성이 있어 널리 사용된다. 목표 응답스펙트럼을 사용하는 방법에는 통계적인 방법으로 평활화된 목표 응답스펙트럼(smooth response spectrum)에 대해서 이에 상응하는 입력지반운동의 시간이력을 생성하여 해석을 수행하게 된다. 응답스펙트럼은 지반운동 자체의 특성뿐만 아니라 구조물의 주기와 관련된 특성을 함께 표현하므로 구조해석 목적의 지

진과 생성방법으로 널리 사용된다.

그런데, 위에서 언급한 구조물의 최대 응답을 추정하기 위한 시간이력해석 방법에 있어서 최근의 연구 결과들은 배율조정법이나 스펙트럼 맞춤 방법 등 사용하는 입력지반운동의 모델링 방법에 따라서 그 결과가 상이한 특징이 있음을 보이고 있다^(8,21,22). 이들 연구 결과에 따르면 같은 실제 지진기록들을 사용할 지라도 배율조정법과 스펙트럼 맞춤 방법에 의한 최대 응답의 추정 값 사이에 명백한 편차(bias)가 발생하며, 편차의 발생 방향과 크기는 배율 조정 구간 주변의 응답스펙트럼 형상, 스펙트럼 평탄화 방법, 스펙트럼 상용 인공지진파를 생성할 경우 그 생성방법 등에 의존하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 특징은 동일한 강도척도(IM)에 대한 최대 응답의 추정값이 입력지반운동 모델링 방법에 따라 다를 수 있음을 보여주는 것이다.

이 같은 연구 결과는 시간이력해석을 수행하여 구조물 최대 응답의 확률 분포를 추정하는 성능기반설계 기법이나 취약도 해석과 같은 비선형 시스템의 확률론적 해석에서도 입력지반운동 모델이 결과에 매우 큰 영향을 끼치게 될 수 있음을 의미한다. 특히 확률론적 해석에 있어서는 응답의 평균값 뿐 만 아니라 응답의 분산도 파괴확률 산정에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 분석이 필요하다.

따라서 이 연구에서는 비선형 시간이력해석을 수행하여 최대 응답의 분포를 추정하고 이에 따른 파손확률을 산정하는 확률론적 해석에 있어서, 입력지반운동 모델에 따른 파손확률 추정 값의 차이와 그 원인을 분석한다. 이를 위해 2장에서는 이 연구에서 고려하는 배율조정 입력지반운동과 스펙트럼 맞춤 입력지반운동에 대한 정의 및 범위 그리고 불확실성의 특징에 대해 설명하고 응답스펙트럼 상에서 두 입력지반운동 모델의 비선형 응답을 예측, 분석한다. 3장에서는 2장의 분석결과를 확인하기 위해 이 연구에서 고려하고 있는 비선형 단자유도 구조물의 모델링과 한계상태를 정의하고 파손확률 산출방법을 설명한다. 4장에서는 입력지반운동 모델에 따른 비선형 단자유도 시스템의 최대 변위응답의 분포와 그에 따른 파손확률 추정 값의 차이와 그 원인을 분석한다. 마지막으로 5장에서는 4장까지의 결과를 종합하여 결론을 제시한다.

2. 입력지반운동 모델의 특성 및 비선형 응답의 예측

확률론적 해석에서 구조물의 불확실성과 더불어 입력하중의 불확실성은 결과에 매우 큰 영향을 미친다. 특히 지진 시간이력은 같은 재해도 수준이라도 지진 강도, 주파수 성분, 이력 모양 등에서 많은 불확실성을 가지고 있으므로 확

물론적 지진해석에서 사용하고 있는 입력지반운동 모델이 갖는 불확실성이 무엇인지 파악하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 입력지반운동 모델들은 설계와 해석의 편의를 위하여 합리적인 가정에 의해 적절히 선정되지만 각 모델의 시간이력 생성방법에는 분명한 차이가 있기 때문에 서로 다른 불확실성을 가질 수밖에 없다. 따라서 이 장에서는 이 연구에서 사용한 배율조정 입력지반운동 모델과 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 정의 및 범위 그리고 각 입력지반운동 모델이 갖는 불확실성이 무엇이며 이로 인해 각 입력지반운동 모델이 어떠한 특성을 갖는지 살펴본다. 또한 입력지반운동 모델에 따른 비선형 응답을 응답스펙트럼 상에서 예측, 분석한다.

지진의 세기를 표현하는 강도척도에는 지금까지 널리 사용되어 왔던 최대지반가속도(PGA)와 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도 $Sa(T_1)$ 등이 있는데 이 연구에서는 동일한 강도척도에서 입력지반운동 모델의 방법상의 비교가 가능하며, 응답의 분산이 적은 것으로 알려진 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도 $Sa(T_1)$ 을 강도척도로 사용한다. 이때 1차 모드 주기는 일반적인 구조물의 주기범위 내에서 선정되 주기가 너무 짧거나 긴 것을 배제하여 1초로 선정하였다. 최대지반가속도(PGA)의 경우 응답스펙트럼 값과 최대지반가속도(PGA)가 일대일 대응이 되는 것이 아니므로 배율조정 방법과 스펙트럼 맞춤 방법을 동일한 강도척도 하에서 비교하는 근거가 불명확해지므로 이 연구에서는 고려하지 않았다.

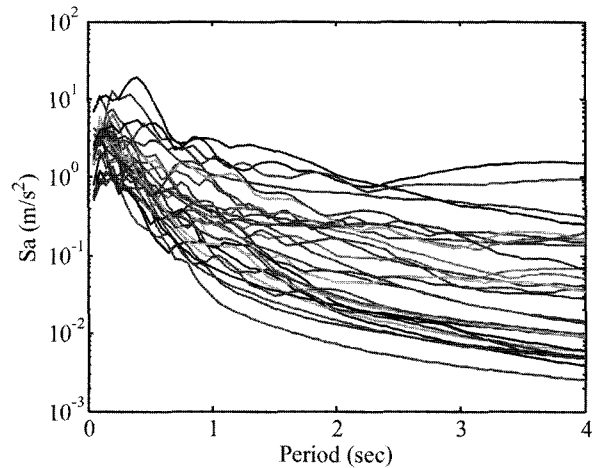
2.1 배율조정 입력지반운동(Scaled input ground motion)

배율조정 입력지반운동은 지반 특성이 유사한 지역의 지진기록들을 원하는 지진강도 수준(intensity level)으로 증폭하거나 감폭하여 사용하는 입력지반운동 모델을 말한다. 이 모델은 지진강도에 대해서만 배율조정을 하기 때문에 사용된 지진기록들이 가지고 있던 주파수 성분과 이력 모양은 그대로 유지하면서 강도 측면에서의 불확실성만 감소시킬 수 있는 특징이 있다. 따라서 이 방법은 신뢰성 있는 응답을 얻기 위한 해석의 수를 줄일 수 있으면서도 주파수 성분이나 이력 모양과 같은 특성들은 실제지진의 것을 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있다.

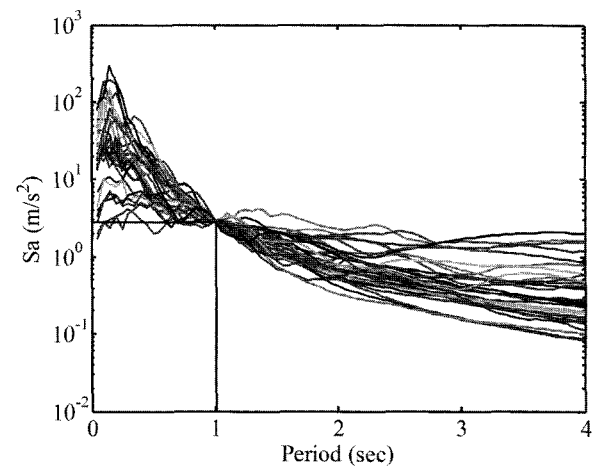
그림 1은 견고한 지반에서 평균 규모가 6.1이고 평균 진앙거리가 21km 인 30개의 실제 지진기록에 대한 가속도 응답스펙트럼을 나타낸 예이다. 모든 주기에서 스펙트럼 가속도의 크기는 매우 넓게 산포되어 있는데, 이는 지진강도와 주파수 성분에 대한 불확실성이 큰 것을 의미한다. 따라서

이러한 불확실성을 가진 입력지반운동 표본을 사용할 경우 신뢰성 있는 구조물의 최대 응답을 추정하기 어렵다.

이와 같은 실제 지진기록의 불확실성은 배율조정 방법을 사용하여 감소시킬 수 있다. 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도 $Sa(T_1)$ 을 강도척도로 사용하는 배율 조정 입력지반운동 모델은 1차 모드 주기에 대해 스펙트럼 가속도의 값을 일치시켜 원하는 입력지반운동을 구한다. 그림 2는 1차 모드 주기가 1초라고 할 때 1초에서 스펙트럼 가속도가 0.3g 가 되도록 그림 1의 지진 기록들을 배율 조정하여 나타낸 것이다. 주기 1초에서 같은 스펙트럼 가속도 값을 갖도록 배율 조정한 것이므로 주기 1초에서 지진 강도에 대한 불확실성은 없다고 할 수 있다. 그러나 각 시간이력의 주파수 성분에 대한 불확실성은 그대로 유지한 모델이기 때문에 1초 이외의 다른 주기에서는 산포된 값을 가지게 된다. 그 산포된 정도는 1초에 가까울수록 작아지고 멀어질수록 커진다. 그러나 0.3초 이하를 제외하고 전반적으로 산포된 정도가 그림 1에 비해 줄어든 것을 볼 수 있다.



〈그림 1〉 실제 지진기록의 가속도 응답스펙트럼



〈그림 2〉 배율조정 입력지반운동

이 배율조정 입력지반운동 모델이 비선형 응답에 미치는 영향을 살펴보기 위해 비교 대상으로서 구조물의 주기가 1초인 선형 단자유도 시스템의 파손확률을 구하는 경우를 고려해 보자. 구조물의 주기가 1초이고 선형 시스템이기 때문에 사용한 입력지반운동 모두 동일한 최대 응답(가속도 응답의 경우 0.3g)을 보일 것이라는 것을 예측할 수 있다. 한계상태식을 응답한계값(역량응답)과 소요응답의 차로 정의할 경우 최대 응답의 표준편차는 발생하지 않으므로 파손확률은 응답한계값의 확률분포에 따라 결정된다. 만일 응답한계값을 확률분포가 아닌 하나의 결정론적인 값을 사용하는 경우라면 파손확률은 응답한계값의 초과 여부에 따라 0 또는 1 중 하나가 된다. 이와 같이 배율조정 입력지반운동 모델은 특정 주기의 선형 시스템에 대해 입력지반운동의 불확실성이 없도록 만든 극단적인 경우가 된다. 그러나 비선형 시스템의 경우는 입력지반운동의 이력특성에 따라 응답이 달라지고 또 이력거동을 보이는 부재의 항복 등 비선형 거동으로 인한 유효주기의 증가로 응답의 분산이 생기게 된다. 그림 2에서 주기 1초보다 큰 영역에서 가속도 응답스펙트럼이 산포되어 있으므로 이를 간접적으로 확인할 수 있다. 이와 같이 배율조정 입력지반운동 모델은 강도 측면에서 특정 주기에서 멀어질수록 기존의 불확실성을 회복하고, 실제 지진의 주파수 성분과 이력 모양에 대한 불확실성을 그대로 유지하므로 비선형 시스템의 경우 이러한 불확실성들이 구조물의 최대 응답 분포와 파손확률에 영향을 주게 된다.

2.2 스펙트럼 맞춤 입력지반운동(Spectrum matched input ground motion)

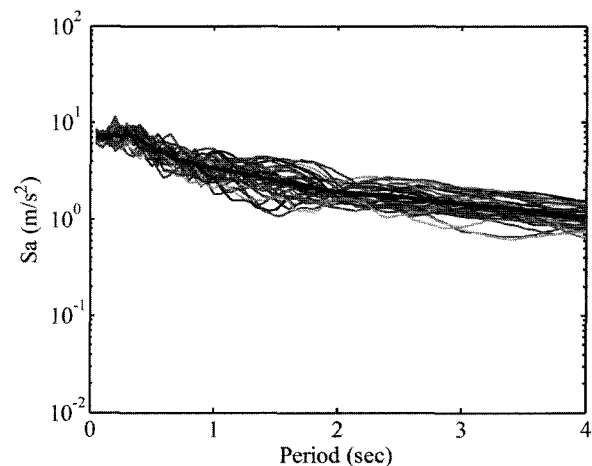
스펙트럼 맞춤 입력지반운동은 목표로 하는 응답스펙트럼이 그 지역의 지진 시나리오를 대표한다는 가정 하에 지진기록의 강도 및 주파수 특성을 목표 응답스펙트럼에 일치하도록 하여 강도와 주파수 특성에서의 불확실성을 줄인 입력지반운동 모델이다. 이 입력지반운동 모델은 지진기록 하나하나를 목표 응답스펙트럼에 일치시키는 방법^(16,17)과 스펙트럼 밀도함수에서 생성한 지진기록들의 평균 응답스펙트럼이 목표 응답스펙트럼에 일치하도록 스펙트럼 밀도함수를 생성한 후 생성된 스펙트럼 밀도함수로부터 인공 지진기록을 생성하는 방법^(18,19)으로 나눌 수 있다.

전자의 경우는 목표 응답스펙트럼에 일치시키는 방법상의 허용오차 정도의 불확실성만 존재하며 해석 대상 구조물의 특정주기 뿐만 아니라 모든 주기에 대해 응답의 크기를 일치시킨 것이기 때문에 비선형 시스템에서도 응답의 분산이 크지 않다. 따라서 비선형 시스템이라 할지라도 10회 이

하의 해석으로 얻은 응답의 평균을 그 응답의 대푯값으로 선정해도 큰 무리가 없을 정도로 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있다⁽²¹⁾. 그러나 파손확률을 구하는 문제에서는 응답의 분산이 작기 때문에 한계상태나 응답의 평균이 조금만 이동해도 파손확률이 크게 변하게 되어 적절한 파손확률의 추정이 어렵다.

반면 후자의 경우는 목표 응답스펙트럼에 상응하도록 맞춘 스펙트럼 밀도함수에서 인공 지진기록을 생성하는 방법이므로 인공 지진기록을 만드는 과정에서 도입되는 불확실성이 존재하게 된다. 스펙트럼 밀도함수에서 인공 지진기록을 생성하는 대표적인 방법인 스펙트럼 표현법(spectrum representation method)^(19,20)을 살펴보면 주파수 영역에서 시간 영역으로 전환될 때 임의의 위상각을 선택하게 되는데 이 과정에서 불확실성이 도입되게 된다. 위상각을 선택하는 방법에는 -2π 와 2π 사이에서 임의의 선택하거나 정규분포를 따르도록 선택할 수 있는데 정규분포에 기반을 둔 선택 방법은 정규분포의 표준편차를 줄이므로 해서 위상각 선택으로 인한 불확실성의 정도를 감소시킬 수 있다. 일반적인 스펙트럼 표현법에서는 -2π 와 2π 사이에서 임의의 선택하는 방법을 사용하고 있다.

이 연구에서는 응답의 분산도 파손확률 산출에 영향을 주는 중요한 인자라는 인식에 따라 파손확률의 급격한 변화를 막기 위해 응답의 분산이 어느 정도 나타날 수 있는 후자의 방법을 사용하였다. 그림 3은 도로교 설계기준에서 지반조건 I에 가속도 계수가 0.3인 경우의 설계 응답스펙트럼을 목표 응답스펙트럼으로 하여 생성한 30개의 인공 지진기록의 가속도 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림에서 목표 응답스펙트럼을 중심으로 인공 지진기록의 응답스펙트럼이 일정하게 분포하고 있음을 볼 수 있으며 그 차이를 통해 임의의 위상각 선택에 의한 불확실성을 확인할 수 있다. 따라서 이 입력지반운동 모델은 스펙트럼 맞춤을 통해 지진의 강도



〈그림 3〉 스펙트럼 맞춤 입력지반운동

와 주파수 특성에 대한 불확실성을 감소 시켰으나 임의의 위상각 선택으로 인해 불확실성이 남아있는 것을 볼 수 있으며 이러한 불확실성이 구조물의 최대 응답 분포와 파손확률에 영향을 주게 된다.

2.3 입력지반운동 모델에 따른 비선형 응답의 예측과 분석

지진해석에서는 기본적으로 지반조건과 해석하고자 하는 지진 재해도에 해당하는 강도척도(IM) 값이 주어진다. 일반적으로 지반조건과 주어진 지진 재해도에 해당하는 강도척도(IM) 값이 동일한 경우에도 서로 다른 입력지반운동 모델을 사용하여 지진해석을 수행할 수 있다. 이 연구에서도 지반조건과 강도척도(IM)로 표현되는 지진강도를 동일하게 한 조건에서 두 입력지반운동 모델에 따른 확률론적 해석값의 특성이 비교되도록 하였다. 배율조정 입력지반운동 모델의 경우 실제 지진기록을 사용하는데 이 때 사용한 실제 지진기록들을 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델에서 사용하도록 설계기준의 지반조건에 맞도록 선택함으로써 두 입력지반운동 모델이 동일한 지반조건을 가지도록 하였다. 지진강도의 경우는 구조물의 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도 즉, $Sa(T_1)$ 값이 동일하도록 스펙트럼 맞춤 입력지반운동의 목표 응답스펙트럼과 배율조정 입력지반운동 모델의 가속도 응답스펙트럼을 1차 모드 주기에서 일치하도록 하였다.

그림 4는 견고한 지반에서 1차 모드 주기가 1초이고 그 가속도 응답스펙트럼이 0.3g가 되도록 일치시킨 두 입력지반운동 모델에 대해 가속도 응답스펙트럼의 평균과 ± 1 표준편차를 나타낸 것이다. 그림에서 $Sa(T_1=1\text{sec}) = 0.3g$ 로 두 입력지반운동의 강도척도는 동일하지만 1초 이외의 주기에서 가속도 응답스펙트럼은 서로 다른 것을 알 수 있다. 특히 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 경우 장주기로 갈수

록 실제지진을 사용한 배율조정 입력지반운동 모델의 응답스펙트럼보다 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 목표 응답스펙트럼으로 사용된 도로교 설계기준의 설계 응답스펙트럼이 장주기의 지진에 대한 보수적 설계를 위해 장주기로 갈수록 가속도 응답을 크게 평가하도록 만들어졌기 때문이다⁽²³⁾. 이와 같은 입력지반운동 모델을 사용하여 시간이력해석을 수행할 경우 단자유도 선형 시스템에 대해서는 두 입력지반운동 모델 모두 동일한 최대 응답의 평균을 가질 것으로 예상된다. 그러나 비선형 시스템에 대해서는 비선형 거동으로 인한 구조물의 유효주기 증가로 1초 이상의 응답스펙트럼에 영향을 받을 것이다. 따라서 그림에서 볼 수 있듯이 1초 이상에서의 스펙트럼 가속도는 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델이 더 크므로 지진 응답 또한 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델이 배율조정 입력지반운동 모델보다 클 것으로 예상되며 이로 인해 한계상태를 초과하는 파손확률도 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델이 더 크게 나타날 것으로 예상된다.

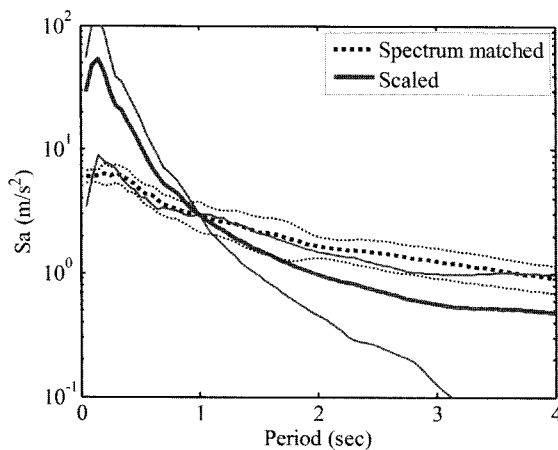
이와 같이 강도척도가 동일하다 하더라도 입력지반운동 모델에 따라 서로 다른 주파수 특성을 갖는 시간이력이 사용될 수 있으며 그 차이로 인해 비선형 단자유도 시스템의 파손확률도 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 비선형 단자유도 시스템의 시간이력 해석 및 파손 확률 산정

2.3에서는 두 입력지반운동 모델의 가속도 응답스펙트럼을 비교하여 입력지반운동 모델에 따라 비선형 시스템의 지진응답이 차이가 날 수 있음을 살펴보았다. 이러한 차이는 분명 파손확률에 영향을 주게 되는데 지진응답의 평균과 표준편차의 영향을 명확히 살펴보기 위해 비선형 시간이력해석을 수행하고 결과를 분석한다. 3 장에서는 비선형 단자유도 시스템과 한계상태를 정의하고 다수의 비선형 시간이력 해석을 수행하여 그 응답의 분포와 한계상태를 초과하는 파손확률 산출방법을 설명한다.

3.1 시간이력 생성

2장에서 설명한 두 가지 입력지반운동 모델에 대해 각각 시간이력을 생성하였다. 지반조건은 도로교 설계기준에서 정의한 4가지 지반조건을 고려하였으며 각 지반조건 별로 30개의 시간이력을 해석에 사용하였다. 배율조정 입력지반운동 모델에 사용한 실제 지진기록들은 PEER strong motion database⁽²⁴⁾에서 규모는 5.0 - 7.5 사이, 진앙거리는 10km - 30km 사이의 지진기록을 추출한 것으로서 총 15 개 지진

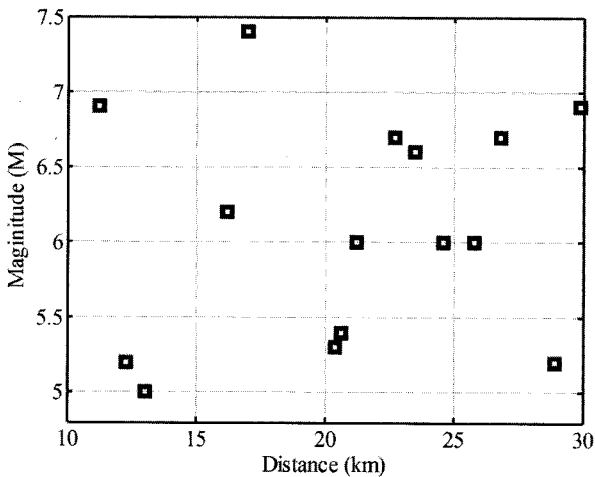


(그림 4) 두 입력지반운동 모델의 응답스펙트럼 평균과 $\pm 1\sigma$

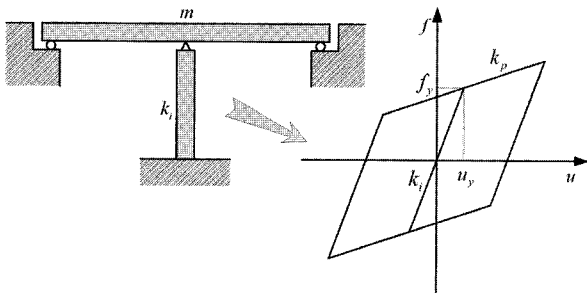
에 대해 수평 두 방향 지진기록을 사용하였다. 그림 5는 견고한 지반조건(지반조건 I)에서 선택된 지진기록들의 규모와 진앙거리를 나타낸 것이다. 이 지진기록들의 배율을 조정하여 배율조정 입력지반운동 모델로 사용하였다. 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델은 지반조건별로 도로교 설계기준의 설계 응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼 밀도함수로부터 스펙트럼 표현법을 이용하여 인공 지진기록을 생성하였다⁽²⁰⁾.

3.2 비선형 단자유도 시스템

비선형 단자유도 시스템은 그림 6과 같이 교각의 강성과 상부구조의 질량으로 표현될 수 있는 단순 교량을 가정하였으며 교각의 비선형 거동은 이중선형으로 모델링하였다. 구조물의 질량(m)과 초기강성(k_i)은 구조물의 주기가 1초가 되도록 정의하였으며 항복하중(f_y)은 도로교 설계기준에서 지진구역 I의 내진 1등급 교량으로 가정하여 결정하였다. 이때 가속도계수(A)는 0.154, 응답수정계수(R)는 단주일 경우의 3을 사용하였으며 지반계수(S)는 지반조건에 따라 변화하도록 하여 구조물이 지반조건에 맞게 설계되는 것으로 가정하였다. 식 (1)은 견고한 지반(지반조건 I)인 경우 항복하중을 계산하는 식을 예로 나타낸 것이다.



〈그림 5〉 선택된 지진기록의 규모와 진앙거리 분포



〈그림 6〉 비선형 단자유도 시스템

$$F_y = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \cdot m \cdot \frac{1}{R} = \frac{1.2 \times 0.154 \times 1}{1^{2/3}} \cdot m \cdot \frac{1}{3} = 0.0616m \quad (1)$$

비선형 단자유도 시스템의 이중선형 모델에서 항복 후 강성(k_p)은 철근의 변형경화(strain hardening)현상을 고려하여 초기강성(k_i)의 5%인 것으로 가정하였다. 또한 비선형 거동으로 인한 감쇠 외에 구조물의 기본 감쇠는 감쇠비 5%로 가정하여 시간이력해석을 수행하였다.

3.3 한계상태 및 파손확률 산정

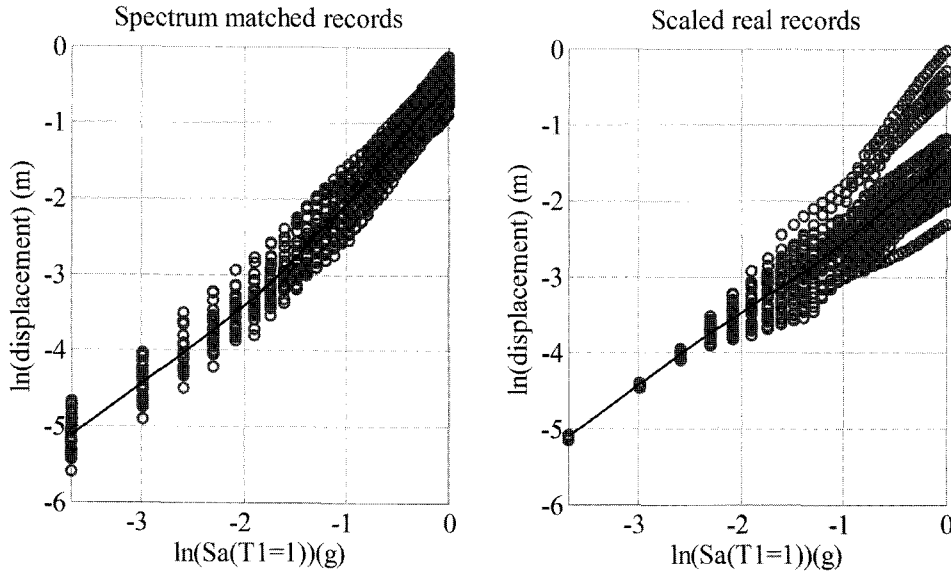
한계상태로는 비선형 단자유도 시스템의 변위응답에 대한 한계상태를 고려하였다. 교각은 심부구속 등으로 어느 정도 연성도(ductility)가 보장된다는 가정 하에 항복변위(u_y)의 5배까지를 한계상태로 정의하였다. 한계상태를 초과하는 파손확률을 구하기 위해서는 응답의 분포를 알아야 하는데 일반적으로 응답의 최대값들의 분포는 대수정규 분포를 따른다고 알려져 있으므로⁽²⁵⁾ 이 연구에서도 변위 응답의 최대값은 대수정규 분포를 따른다고 가정하였다. 먼저 앞의 3.1에서 생성한 두 가지 입력지반운동 모델에 대해 각각 30개씩의 비선형 시간이력해석을 수행하고 이를 통해 얻은 변위응답의 최대값들의 분포를 가장 잘 근사할 수 있는 대수정규분포의 평균과 표준편차를 구한다. 응답의 분포가 대수정규 분포를 따른다고 할 때 한계상태(u_{lim})를 초과하는 파손확률은 식 (2)와 같다. 한계상태 또한 평균과 표준편차를 갖는 대수정규 분포로 가정할 수 있으나 이 연구에서는 입력지반운동 모델의 불확실성이 파손확률에 미치는 영향을 알아보기 위함하므로 한계상태나 비선형 모델의 불확실성은 고려하지 않았다.

$$P_f = \Phi \left[\frac{m_y - \ln(u_{lim})}{\sigma_y} \right] \quad (2)$$

여기서, Φ 는 표준정규 누적확률분포이며, m_y 와 σ_y 는 대수정규분포인 응답의 평균과 표준편차이다.

4. 해석결과 및 분석

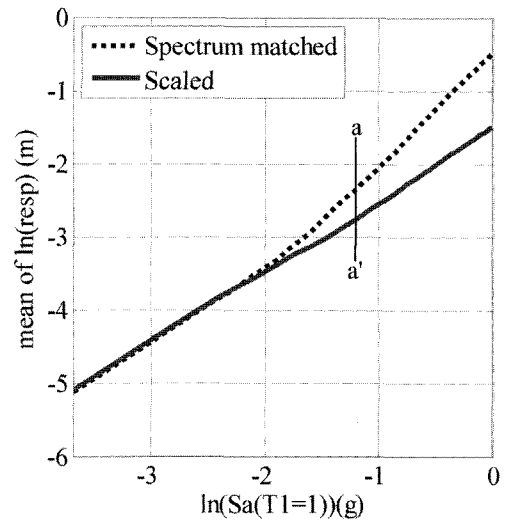
3.2절에서 설명한 비선형 단자유도 시스템에 대해 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도($Sa(T_1)$) 값을 0.025g부터 1g까지 변화시켜가면서 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 그림 7은 견고한 지반(지반조건 I)인 경우 두 가지 입력지반운동 모델에 대해 30개씩의 최대 변위응답을 지진의 세기에 따라 나타낸 것이다. 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 경우는 단자유도 시스템의 선형 비선형 거동에 상관없이 거



〈그림 7〉 지진강도에 따른 최대 변위응답 : 스펙트럼 맞춤(좌), 배율조정(우)

의 일정한 응답의 분산을 보인다. 반면, 배율조정 입력지반운동 모델은 단자유도 시스템이 선형 거동을 보이는 지진의 세기가 작은 구간에서는 응답의 분산이 없으나 비선형 거동을 하게 되는 지진의 세기가 큰 구간에서는 응답의 분산이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 그 분산의 정도는 지진의 세기가 커서 비선형 거동을 많이 할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 두 입력지반운동 모델이 고려하고 있는 불확실성이 서로 다르기 때문이다. 이 연구에서 사용한 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 경우 인공 지진 기록 생성과정에서의 임의 위상각 선택으로 인한 인위적인 불확실성을 가지고 있는데 이 불확실성은 주파수 특성에 관계없이 전 주파수 영역에 걸쳐 일정하게 나타난다. 이는 그림 4의 표준편차에서도 확인할 수 있다. 한편 배율조정 입력지반운동 모델의 경우는 앞의 2장에서도 설명하였듯이 특정 주기에서만 불확실성이 없도록 만든 경우로서 그 특정주기에서 멀어질수록 실제 지진기록이 가지고 있던 불확실성을 회복하게 된다. 따라서 지진의 세기가 증가하여 비선형 영역에 들어가는 정도가 클수록 유효주기도 증가하기 때문에 그 만큼 더 많은 불확실성의 영향을 받게 되고 이로 인해 응답의 분산이 증가하게 된다.

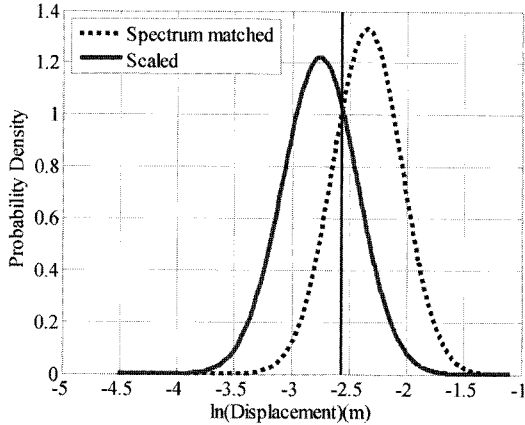
그림 7에서 가운데 실선은 응답의 분포를 대수정규분포로 맞추었을 때 응답의 평균을 나타낸 것인데 지진의 세기가 증가할수록 스펙트럼 맞춤 입력지반운동에 대한 응답의 평균이 배율조정 입력지반운동에 대한 응답의 평균보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 이를 조금 더 분명하게 보기 위해 응답의 평균값만을 따로 하여 그림 8에 나타내었다. 선형 거동을 하는 지진의 세기가 작은 영역에서는 평균의 차이가 거의 발생하지 않으나 비선형 거동을 하기 시작하면서 응답 평균



〈그림 8〉 입력지반운동 모델에 따른 응답의 평균차이

의 차이가 발생하고 있으며 그 차이가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다.

이러한 응답의 평균 차이와 분산이 파손확률에 얼마만큼의 영향을 주는지 살펴보기 위해 그림 8에서 $Sa(T_1)$ 이 0.3g 인 a-a'부분에 대한 응답의 분포를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 x축은 변위응답에 자연로그를 취한 값으로 표시하여 응답의 분포가 정규분포 모양이 되도록 하였으며 정규분포 모양일 때 분포 아래쪽의 면적이 1이 되도록 크기를 조정하였다. 그리고 응답분포에서 한계상태의 위치를 확인하기 위해 한계상태 값을 함께 표시하였으며, 두 입력지반운동 모델에 대해 응답의 평균과 표준편차를 표 1에 나타내었다. 표 1과 그림 9에서 응답의 분산은 배율조정 입력지반운동 모델이 더 크지만 평균 응답은 스펙트럼 맞춤 입력지반운동이 더 큰 것을 알 수 있다. 이 때 한계상태를 초과하는



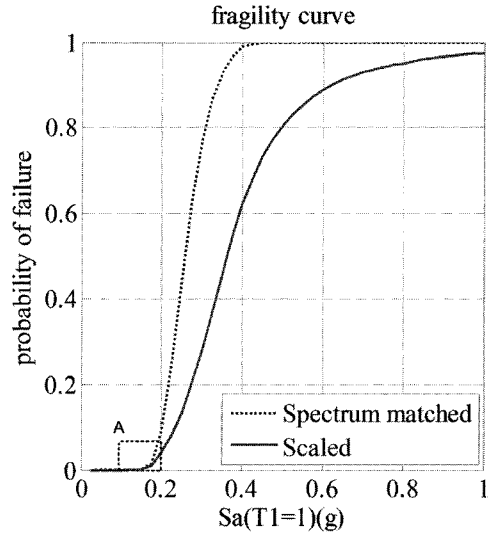
〈그림 9〉 입력지반운동 모델에 따른 변위응답 분포($Sa(T_1)=0.3g$)

〈표 1〉 입력지반운동에 따른 응답의 평균과 표준편차($Sa(T_1) = 0.3g$)

	스펙트럼 맞춤 입력지반운동 (spectrum matched)	배율조정 입력지반운동 (scaled)
응답의 평균(m_y) ($\exp(m_y)$)	-2.3463 (0.0957)	-2.7590 (0.0634)
응답의 표준편차(σ_y)	0.2998	0.3264

파손확률은 배율조정 입력지반운동의 경우 28.23%이고 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 경우 77.32%로 배율조정 입력지반운동 모델보다 무려 2.7배나 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 $Sa(T_1) = 0.3g$ 라는 동일한 지진강도임에도 불구하고 입력지반운동 모델에 따라 파손확률이 큰 차이를 보일 수 있다는 것을 확인하였으며 그러한 파손확률의 차이는 응답의 분산보다는 응답의 평균 차이에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

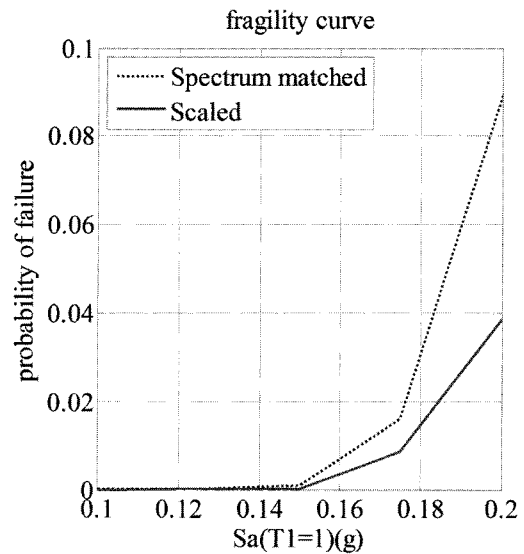
0.3g 외의 다른 지진세기에 대한 파손확률을 살펴보기 위해 $Sa(T_1)$ 을 0.025g부터 1g까지 변화시켜가면서 입력지반운동 모델에 따른 취약도 곡선을 그림 10에 나타내었다. 전 영역에 걸쳐 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델을 사용했을 때의 파손확률이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 지진의 세기가 작은 경우에는 비선형성이 작아 아직 불확실성을 회복하지 못한 배율조정 입력지반운동 모델보다 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 응답 분산이 더 크기 때문에 파손확률이 크게 나타난다. 반면, 지진의 세기가 점점 증가하여 파손확률이 50%를 넘어서게 되면 응답의 분산은 오히려 파손확률의 증가를 둔화시키게 되는데 배율조정 입력지반운동 모델의 경우 비선형성이 증가하면서 증가한 응답의 분산으로 인해 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델보다 낮은 파손확률을 갖게 된다. 더욱이 파손확률에 더 큰 영향을 주는 평균 응답의 증가 또한 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델보다 작기 때문에 결국 지진의 세기가 커짐에 따라 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 파손확률이 더 빠르게 증가하게

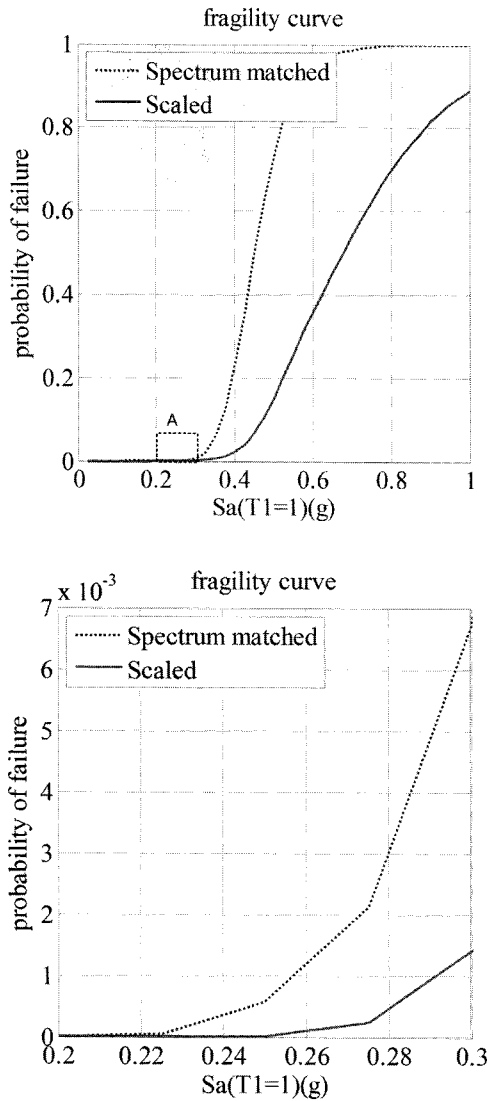


〈그림 10〉 입력지반운동 모델에 따른 취약도 곡선(지반조건 I), A의 확대

되는 것이다. 이와 같은 두 입력지반운동 모델에 따른 변위 응답 특성과 파손확률의 차이는 연약한 지반으로 갈수록 더욱 두드러지게 나타나는데 연약한 지반인 지반조건 IV에 대해 나타낸 그림 11은 이를 잘 나타내 주고 있다.

앞의 결과에 따르면 두 입력지반운동 모델에 따른 파손확률의 차이는 주로 두 입력지반운동 모델에 대한 응답의 평균이 서로 다르기 때문에 발생하는데 이러한 비선형 응답은 1차 모드 주기에서의 스펙트럼 가속도($Sa(T_1)$)을 강도척도로 사용하는 경우 1차 모드 주기보다 큰 주기에서의 응답 특성에 큰 영향을 받는다. 2장의 그림 4에서 보았듯이 1차 모드 주기에서는 동일한 값을 갖지만 1차 모드 주기 이상에서는 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 평균 가속도 응답 스펙트럼이 배율조정 입력지반운동 모델의 평균 가속도 응답 스펙트럼보다 크다. 이것은 비선형 영역으로 들어가는 정도가 커서 유효주기가 증가할수록 스펙트럼 맞춤 입력지반





〈그림 11〉 입력지반운동 모델에 따른 취약도 곡선(지반조건 IV), A의 확대
 운동 모델을 사용한 경우가 평균적으로 응답이 크게 된다는 것을 의미한다.

이와 같이 동일한 강도척도 값을 가짐에도 불구하고 입력 지반운동 모델에 따라 매우 상이한 파손확률을 얻을 수 있으므로 지진하중에 대한 확률론적인 해석을 수행하는 경우에는 입력지반운동 모델의 특성을 확실히 이해하고 주의 깊게 선정할 필요가 있다. 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델은 목표로 한 응답스펙트럼에 큰 영향을 받으므로 목표 응답스펙트럼을 합리적으로 선정하고 그 특성을 이해하고 있어야 한다. 도로교 설계기준의 설계 응답스펙트럼을 목표 응답스펙트럼으로 사용할 경우 설계 응답스펙트럼은 안전측의 설계를 위해 일반적으로 보수적으로 정의된 것이므로 이를 목표로 만들어진 스펙트럼 맞춤 입력지반운동을 사용하여 구해진 파손확률은 과대평가될 수 있음에 주의해야 한다. 그리고 배율조정 입력지반운동 모델은 지진의 세기 이외의 실제 지진기록의 특성을 그대로 이용할 수 있는 장점

이 있으나 이 점은 실제 지진기록의 선택이 적합하지 않을 경우 단점이 될 수 있다. 이러한 점 때문에 배율조정 입력지반운동 모델에 적합한 지진기록을 선택하는 방법에 대해서도 최근 연구가 진행되고 있다⁽²⁶⁾.

5. 결론

이 연구에서는 비선형 시간이력해석을 수행하여 최대 응답의 분포를 추정하고 이에 따른 파손확률을 산정하는 확률론적 해석에 있어서, 입력지반운동의 선정 방법에 따른 파손확률 추정 값의 차이와 그 원인을 살펴보았다. 입력지반운동 모델로는 실제 지진기록을 배율 조정하여 사용하는 배율조정 입력지반운동과 설계 응답스펙트럼에 상응하는 인공 지진기록을 사용하는 스펙트럼 맞춤 입력지반운동을 고려하였다. 대상 구조물은 교각이 하나인 2경간 단승교량을 비선형 단자유도 시스템으로 모델링하였고 비선형 거동은 이중선형 모델로 표현하였다. 다수의 비선형 시간이력해석 결과를 토대로 대수정규분포로 가정한 최대 변위응답 분포의 특성치를 구하였으며 이로부터 파손확률을 산출하였다.

비교결과 배율조정 입력지반운동 모델보다 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델을 사용한 경우 더 큰 파손확률을 보였으며 연약한 지반으로 갈수록 파손확률의 차이는 더욱 두드러졌다. 이러한 입력지반운동 모델에 따른 파손확률의 차이는 응답의 표준편차 보다는 주로 두 입력지반운동 모델의 평균 응답의 차이에 기인하는 것으로 나타났다. 그리고 이 평균 응답의 차이는 $Sa(T_1)$ 을 강도척도로 사용하는 경우 1차 모드 주기 이상에서의 응답 특성으로 설명될 수 있는데 이 연구에서 사용한 스펙트럼 맞춤 입력지반운동 모델의 경우 실제 지진기록의 응답보다 장주기로 갈수록 응답을 크게 평가하도록 보수적으로 만들어진 도로교 설계기준의 설계 응답스펙트럼을 목표로 하고 있기 때문이다. 이와 같이 합리적인 가정 하에 선정된 입력지반운동이라고 해도 입력지반운동 모델에 따라 파손확률이 크게 차이날 수 있으므로 입력지반운동 모델의 선정에 보다 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 입력지반운동 모델의 방법상 차이가 파손확률에 미치는 영향에 초점을 두고 다른 조건을 동등하게 맞추려고 노력한 결과 파손확률에 영향을 줄 수 있는 다른 변수에 대한 분석은 수행되지 못했다. 그러나 향후 지역에 따라 적합한 입력지반운동 모델을 선정하기 위해서는 한계상태의 변화에 따른 분석, 배율조정 방법에 사용될 수 있는 여러 지진기록의 종류나 특성에 대한 분석, 다른 강도척도에 대한 분석 등이 추가로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 및 안전하고 지속가능한 사회기반건설사업단을 통한 Brain Korea 21의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Kunnath, S.K., Larson, L. and Miranda, E., "Modelling consideration in probabilistic performance-based seismic evaluation: case study of the I-880 viaduct", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 1, 2002, pp. 57-75.
- Choi, E., DesRoches, R. and Nielson, B., "Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones", *Engineering Structures*, Vol. 26, 2004, pp. 187-199.
- 김동석, 최현석, 박원석, 고현무, "에너지 소산장치를 장착한 사장교의 지진 취약도 해석", *한국지진공학회 논문집*, 제 10권 제 3호, 2006, pp. 1-11.
- Bertero, R.D. and Bertero, V.V., "Performance-based seismic engineering: the need for a reliable conceptual comprehensive approach", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, 2002, pp. 627-652.
- Foschi, R.O., Li, H. and Zhang, J., "Reliability and performance-based design: a computational approach and applications," *Structural Safety*, Vol. 24, 2002, pp. 205-18.
- Chandler, A.M. and Lam, N.T.K., "Performance-based design in earthquake engineering: a multi-disciplinary review", *Engineering Structures*, Vol. 23, 2001, pp. 1525-1543.
- Mackie, K. and Stojadinovic, B., "Seismic demands for performance-based design of bridges", *Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, PEER Report*, 2003.
- Bazzurro, P. and Luco, N., "Do scaled and spectrum matched near-source records produced biased nonlinear structural response?", *proceeding of the 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA*, paper No. 1029, 2006.
- Shantz, T.J., "Selection and scaling of earthquake records for nonlinear dynamic analysis of first mode dominate bridge structures", *proceeding of the 8th U. S. national conference on earthquake engineering, San Francisco, USA*, paper No. 1012, 2006.
- Naeim, F., Alimoradi, A. and Pezeshk, S., "Selection and scaling of ground motion time histories for structural design using genetic algorithms", *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 2, 2004, pp. 413-429.
- Baker, J.W. and Cornell, C.A., "A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, 2005, pp. 1193-1217.
- Dimova, S.L. and Elenas, A., "Seismic intensity parameters for fragility analysis of structures with energy dissipating devices", *Structural Safety*, Vol. 24, 2002, pp. 1-28.
- Kurama, Y.C., and Farrow, K.T., "Ground motion scaling methods for different site conditions and structural characteristics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 15, 2003, pp. 2425-2450.
- Shome N. and Cornell C.A., "Normalization and scaling accelerograms for nonlinear structural analysis", 6-th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, WA, 1998. (CD-ROM)
- Shome N., Cornell C.A., Bazzurro P. and Carballo J.E., "Earthquakes, records, and nonlinear responses", *Earthquake Spectra*, Vol. 14, 1998, pp. 469-500.
- Silva, W.J. and Lee, K., "WES RASCAL Code for Synthesizing Earthquake Ground Motions", *State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States*, US Army Corps of Engineers, Report 24, 1987.
- Abrahamson, N.A., "Non-stationary spectral matching program RSPMATCH", *PG&E Internal Report*, 1993.
- Gasparini, D.A. and Vanmarcke, E.H., "Simulated earthquake motions Compatible with prescribed response spectra", *Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Publication No. 76-4*. 1976.
- Shinozuka, M. and Deodatis, G., "Simulation of stochastic processes by spectral representation", *Applied Mechanics reviews*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 191-204.
- 고현무, 송준호, "사용기간비용 최소화에 의한 지진경력교량의 경제성 평가", *대한토목학회논문집*, 제 19권, 제 1-4호, 1999, pp. 539-550.
- Carballo, J.E., and Cornell, C.A., "Probabilistic seismic demand analysis: Spectrum matching and design", *Department of Civil and Environmental Engineering, Reliability of Marine Structures Program, Stanford University, Stanford, California, Report No. RMS-41*, 2000.
- Watson-Lamprey, J.A. and Abrahamson, N.A., "Bias caused by use of spectrum compatible motions", *proceeding of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA*, paper No. 909, 2006.
- AASHTO, *Standard specifications for highway bridges, Fifteenth Edition*, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2002.
- PEER strong motion database, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- Aslani, H. and Miranda, E., "Probability-based seismic response analysis", *Engineering Structures*, Vol. 27, 2005, pp. 1151-1163.
- Baker, J.W. and Cornell, C.A., "Spectral shape, epsilon and record selection", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, 2006, pp. 1077-1095.