

지진 취약성 등고선을 이용한 내진성능 평가 방법

Fragility Contour Method for the Seismic Performance Assessment of Generic Structures

정성훈¹⁾ · 이기학²⁾ · 이도형³⁾

Jeong, Seong-Hoon · Lee, Kihak · Lee, Do Hyung

국문 요약 >> 기존의 확률적 지진 취약성 분석은 그 중요성에도 불구하고 시간과 노력의 과도한 소요로 인하여 내진 성능 평가에 사용되기에 많은 제약이 따라왔다. 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 획기적 수준의 신속성과 확장성을 갖춘 지진 취약성 분석 체계와 이를 실용화 하기위한 취약성 등고선을 개발하였다. 응답 데이터베이스를 활용하여 광범위한 구조물의 최대 응답을 즉각적으로 구하고 이를 바탕으로 구조물의 주기와 강성에 따른 한계상태확률의 변화를 한눈에 파악할 수 있는 취약성 등고선을 도출하였다. 최대응답 등고선의 도출과 비교를 통해서 최대응답의 분포는 연성도 요구치로 나타내는 것이 변위의 절대값으로 표현하는 것보다 안정적인 예측곡선을 보여 주며, 구조물의 응답특성변수인 주기와 강도비가 최대응답에 미치는 영향을 분석하는데도 유리함을 확인하였다. 연성도를 내진성능 평가의 기준으로 사용하기 위해서 내진설계기준에서 한계상태변위로서 제시되는 층간변위비와 연성도 요구치 사이의 상호 변환 관계를 정의하였다. 예제 구조물의 내진보강 전략 수립에 대한 논의를 통해서 신뢰성 이론에 기반 한 내진 보강과 설계에 취약성 등고선이 매우 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다.

주요어 취약성 분석, 내진성능평가, 응답데이터베이스, 응답특성변수, 한계상태확률.

ABSTRACT >> Extensive computer simulations to account for the randomness in the process of seismic demand estimation have been a serious obstacle to the adoption of probabilistic performance assessments for the decision of applying seismic intervention schemes. In this study, a method for rapid fragility assessments based on a response database and the fragility contour method are presented. By the comparison of response contours in different formats, it is shown that representing maximum responses in ductility demand is better for the investigation of the effect of structural parameter changes on seismic demands than representations in absolute values. The presented fragility contour enables designers to practically investigate the probabilistic performance level of every possible retrofit option in a convenient manner using visualized data sets. This example demonstrates the extreme efficiency of the proposed approach in performing fragility assessments and successful application to the seismic retrofit strategies based on limit state probabilities.

Key words Fragility analysis, Seismic performance assessment, Response database, Response parameters, Limit state probability

1. 서론

지진에 의한 구조물의 응답 예측에는 여러 가지 불확실성이 수반되며 이를 고려하기 위해서 확률론적 취약성 분석 방법이 이용되어 왔다. 지진 취약성 분석은 일반적으로 지반 진동의 세기와 구조물의 한계상태 확률에 대한 관계를

파악하는 과정으로 진행된다. 여기서 한계상태 확률은 구조물이 일정한 응답수준(손상수준)에 도달하거나 이를 초과할 확률로 정의되며, 신뢰성 있는 통계분석을 위해서 충분한 수의 구조물 응답 자료들이 필요하다. 응답 자료들은 다양한 방법으로 얻어질 수 있는데, 자료의 특성에 따라서 취약성 분석 방법은 아래의 네 가지 분류로 나누어 질 수 있다.

¹⁾ 정회원·인하대학교 건축공학과, 조교수

²⁾ 정회원·세종대학교 건축공학과, 부교수

(교신저자: kihaklee@sejong.ac.kr)

³⁾ 정회원·배재대학교 건설환경철도공학과, 부교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 1. 31 / 수정일 : 2011. 4. 14 / 게재확정일 : 2011. 4. 14)

(i) 경험적(Empirical) 방법: 지진 발생 후 현장 답사에 의해 수집된 데이터

(ii) 판단적(Judgemental) 방법: 전문가의 의견

(iii) 해석적(Analytical) 방법: 구조해석

(iv) 복합적(Hybrid) 방법: (i), (ii), (iii)의 융합

경험적 방법에 의한 취약성 분석은 지진 발생 후 현장에서 수집한 실제 피해 사례들을 바탕으로 이루어지므로 분석의 정확성은 현장 답사의 수준에 의해 크게 좌우된다. 충분한 피해 사례를 모을 수 있을 만큼의 강진이 드물고, 현장답사에 참가한 많은 조사자들의 조사방법과 피해 평가 정도를 일관성 있게 유지하는 것이 현실적으로 불가능하므로 분석 결과의 신뢰성에 한계가 있다. 또한 수집된 데이터는 그 지역적 특성으로 인하여 다른 지역의 지진대비 자료로 사용할 수 없는 경우도 많다. 경험적 방법에 의한 취약성 분석에 대해서는 Rossetto의 연구⁽¹⁾에 보다 자세히 논의되어 있다.

판단적 방법에 의한 취약성 분석은 지진 후 현장평가에 참여한 경험이 있는 전문가 집단을 대상으로 한 설문조사를 바탕으로 도출된다. 설문항목에 취약성 곡선의 도출에 편리한 정량적 데이터를 포함할 수도 있으므로, 취약성 분석이 편리하게 이루어지는 경우가 많다. 하지만, 개인의 지식과 경험에 전적으로 의존하기 때문에 취약성 분석결과의 객관성과 정확성에 큰 제약이 있을 수밖에 없다. 판단적 취약성 분석의 예는 ATC-13⁽²⁾과 HAZUS⁽³⁾의 취약성 곡선 등이 있다.

해석에 의한 취약성 평가는 구조해석 결과로부터 도출된 응답분포를 이용하는데, 이것은 구조물의 수치 해석 모델에 일련의 지진하중을 가해서 얻어진 결과이다. 해석에 의한 방법은 앞에서 언급한 지진피해의 관찰이나 전문가 의견에 의한 방법과 비교하여 분석과정에 편견이 개입될 여지가 감소하므로 다양한 구조물에 대한 취약성 평가의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 이러한 취약성 분석에는 모델링 오차를 감소시키기 위해 상세한 해석모델을 사용하거나^(4,6), 분석에 소요되는 시간을 줄이기 위해 단순화된 해석모델을 채택하기도 한다.⁽⁷⁻⁹⁾

복합적 취약성 분석은 경험적 방법의 데이터 부족, 판단적 방법의 주관성, 해석적 방법의 모델링의 불확실성을 상호 보완하기 위해 고안되었다. 그 예로는 ATC-14⁽¹⁰⁾과 ATC-40⁽¹¹⁾의 취약성 분석 방법들이 있다. 이들 참고문헌에서 알 수 있듯이 현실적으로는 복합적 취약성 분석이 판단적 방법에 바탕을 두고 제한적으로 지진 후 수집된 피해 데이터를 추가하는 정도에 그치고 있어, 여러 가지 취약성 분석방법의 단점을 상호 보완하는 단계에 이르지 못하고 있는 실정이다.

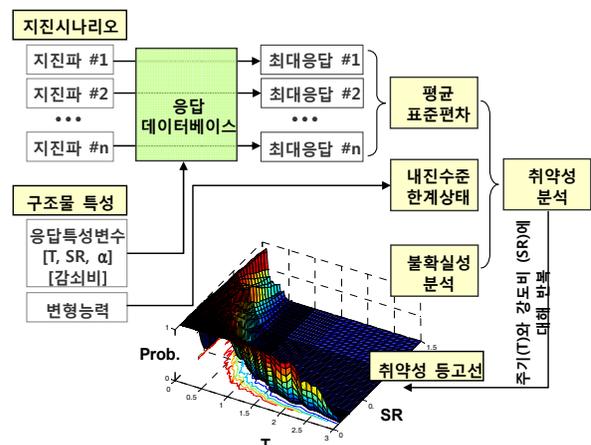
경험적 취약성 분석 방법의 데이터 부족과 확장성의 결여, 판단적 취약성 분석 방법의 주관성 등의 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 해석적 취약성 분석 방법을 채택한다. 해석에 의한 분석방법은 일반적으로 상당한 시간과 계산을 필요로 하는데, 이로 인해서 확률적 취약성 분석이 그 중요성에도 불구하고 널리 사용되지 않는 이유가 되기도 한다. 따라서 취약성 분석을 내진 설계 및 보강을 위한 내진성능 평가에 적

용하기 위해서는 분석과정에 소요되는 시간과 노력을 획기적으로 감소시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 단순화된 모델과 응답 데이터베이스를 바탕으로 취약성 분석을 신속히 수행하는 시스템을 채택하여, 취약성 등고선을 도출하고 이를 구조물의 내진 보강 전략수립에 활용하는 방법을 제시한다.

2. 신속한 지진 취약성 분석 방법

취약성 분석을 해석적 방법으로 수행하는 경우에는 응답 데이터의 통계 분포를 얻기 위한 비선형 해석과정에서 상당한 시간과 노력이 요구된다. 또한 구조물이 바뀌거나 보수 보강으로 인하여 구조물의 특성이 변경될 때마다 해석 시뮬레이션을 처음부터 다시 반복해야 하는 것은 더 큰 문제라고 할 수 있다. 이러한 문제점에 대응하기 위해 구조물의 비선형 동적응답 특성을 나타내는 응답특성변수(주기 T, 강도비 SR, 항복후강성비 α , 감쇠비 ξ)로부터 즉각적으로 최대 응답을 도출할 수 있는 응답 데이터베이스를 활용한다. 응답 데이터베이스는 취약성 분석 과정에서 비선형 동적해석을 대체하기 위해 도입되었으며 주어진 구조물의 응답특성 변수에 해당하는 비선형 해석결과를 저장해 두었다가 필요할 때 읽어서 사용하도록 고안되었다. 응답 데이터베이스에 대하여 3.2절에서 보다 상세히 설명되어 있다.

응답 데이터베이스를 활용한 취약성 분석 방법은 다음과 같이 세 단계를 거쳐 진행된다: (i) 데이터베이스 입력 정보인 구조물의 응답특성변수와 지진파 결정 (ii) 응답 데이터베이스를 이용한 응답예측, (iii) 응답의 평균과 표준편차 및 내진성능 수준에 해당하는 변형 한계상태를 기준으로 취약성 분석. 이상의 절차를 광범위한 주기와 강도비에 대해 반복함으로써 취약성 등고선을 도출할 수 있다(그림 1). 구조



〈그림 1〉 응답 데이터베이스를 이용한 취약성 등고선 도출 과정

물의 변형능력은 최대응답과는 직접적인 상관관계가 없으나 한계상태를 결정하므로 취약성 분석결과에 큰 영향을 준다. 이상의 개별적인 요소는 이 논문의 다음 절부터 보다 자세히 설명되어 있다. 취약성 등고선은 주어진 지진 시나리오에 대하여 현실적으로 가능한 모든 구조물의 주기와 강도비에 해당하는 취약성 값을 한눈에 파악할 수 있으므로 구조물의 내진설계와 내진보강의 목표를 내진성능수준에 따른 한계상태확률로 설정하는데 유용하다.

3. 응답 예측과 취약성 분석

3.1 구조물의 응답 특성 변수

구조물의 동적 응답은 몇 가지 특성 변수에 의해 크게 영향을 받게 되는데 이 연구에서 사용하는 응답특성변수는 이 선형(Bi-Linear) 하중-변위 곡선을 가진 단자유도 시스템을 바탕으로 정의되었다. 그림 2에 나타나 있는 하중-변위 관계는 기본적으로 강성(k), 강도(P), 항복 후 강성(k_p)에 의해서 결정된다. 이 변수들에 각각 대응되는 주기(T), 강도비(SR), 및 항복전후 강성비(α)를 감쇠비(ξ)와 더불어 구조물의 응답 특성변수로 사용하였다. 여기서 강도비는 전체 중량에 대한 수평강도의 비를 나타낸다. 상기의 변수들은 주어진 지진하중에 대하여 구조물의 동적 응답을 결정하게 되며 응답데이터베이스의 구축과 활용에 있어서 기준이 된다. 이들은 단위변환이 필요하지 않아 다양한 경우에 편리하게 적용될 수 있다.

비선형 정적 해석방법(Nonlinear Static Procedure)을 바탕으로 하중-변위 관계를 파악하고 이를 단자유도 시스템으로 단순화하여 구조물의 응답을 예측하는 방법은 지진공학 분야에서 널리 이용되어 왔다. 단자유도 모델을 이용한 단순화 해석 방법은 형상이 규칙적이고 고차모드의 영향을 적게 받는 구조물에 적용했을 때, 응답의 예측이 비교적 정확하고

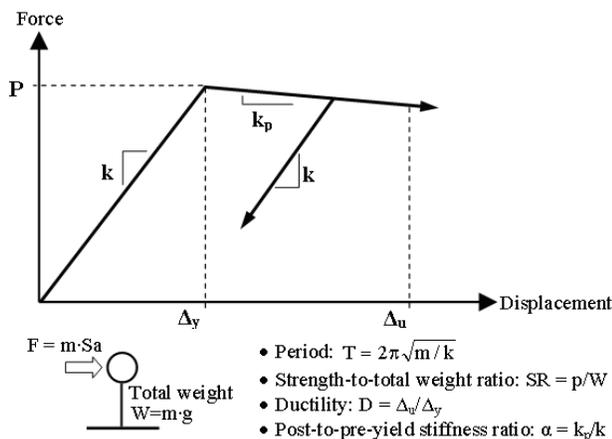
그 과정이 효율적이라고 할 수 있다. 따라서, ATC-40⁽¹¹⁾ 와 FEMA 273⁽¹²⁾과 같은 현대적인 지진설계 및 평가지침에서도 비선형 정적 해석방법과 단자유도 응답해석을 이용하여 다양한 구조물의 최대 변위를 예측하는 방법을 제시하고 있다. 사실 지진과 응답스펙트럼을 이용하는 모든 설계 및 평가 방법은 기본적으로 구조물을 단자유도 시스템으로 단순화하여 지진응답을 예측한다고 할 수 있다. 다자유도 시스템을 단순화하는 등가단자유도시스템과 그 적용에 대한 자세한 사항은 여러 연구문헌⁽¹³⁻¹⁵⁾에 나타나있다.

3.2 응답 데이터베이스

이 연구에서 응답 데이터베이스는 취약성 분석 과정에서 구조물의 응답을 즉각적으로 구하기 위한 장치로 도입되었다. 즉, 구조물의 특성을 나타내는 파라미터가 결정되면 데이터베이스로부터 최대응답을 바로 읽어 들이는 방식이 채택되었는데, 이를 위해서 구조물의 응답 특성 변수(T, SR, α , ξ)를 기준으로 응답 데이터베이스를 구축한다. 또한, 지진 응답에 영향을 미치는 지진시나리오(지진파 및 지진의 세기)도 데이터베이스를 정리하는 변수로 사용된다. 따라서 응답 데이터베이스의 입력 변수는 지진 시나리오, 주기, 강도비, 항복전후 강성비, 감쇠비이며 출력 변수는 구조물의 최대 응답이 된다.

응답 데이터베이스는 광범위한 응답 특성 변수에 대해서 비선형 동적해석과정을 미리 수행하고 그 결과를 축적하여 생성된다. 비록 이 방법이 비선형 해석의 수행으로부터 완전히 자유로운 것은 아니지만, 취약성 도출과정에 있어서 시간이 많이 걸리는 비선형 해석과정을 생략할 수 있어서 취약성 분석의 실용성과 적용성을 크게 높일 수 있다. 한편 주어진 구조물의 응답특성변수가 응답 데이터베이스를 구축할 때 사용했던 값들과 정확히 일치하지 않고 그 사이에 있을 때, 주어진 값과 가장 가까운 응답특성변수들에 해당하는 최대응답들을 데이터베이스에서 읽어서 이 값들의 직선보간을 사용하여 최대응답을 계산한다. 응답 데이터베이스에 대한 보다 자세한 설명은 Jeong & Elnashai의 연구⁽⁷⁾에 나타나 있으며 데이터베이스를 구축하는 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1단계: 주어진 응답 특성 변수(T, SR, α , ξ) 및 지진파에 대하여 비선형 동적해석을 수행하고 최대 응답을 데이터베이스에 저장한다. 이 과정을 광범위한 응답 특성 변수에 대하여 반복하여 주어진 지진파에 대한 모든 구조물의 최대 응답을 데이터베이스화 한다. 즉, 1단계에서 변수는 구조물의 모든 응답 특성 변수이며 상수는



〈그림 2〉 단자유도 시스템의 비선형 하중-변위 관계와 응답특성변수

지진파이다.

- 2단계: 위의 1단계 과정을 주어진 지진시나리오에 해당하는 여러 가지 지진파에 대해서 반복한다. 또 이 과정을 다양한 지진의 세기에 대해서 반복한다. 여기서 지진파의 세기를 조절하는 기준으로 최대지반가속도를 이용하였다. 최대지반가속도는 지진파의 세기를 조절하고 다른 측정값으로 변환하기에 편리하다. 예를 들면 지진파의 탄성응답스펙트럼은 최대지반가속도에 정비례하므로 응답스펙트럼 가속도를 기준으로 취약성 곡선을 도출하는 경우에도 지진의 세기를 쉽게 변환하여 사용할 수 있다.
- 3단계: 위의 2단계 과정을 다양한 지진시나리오에 대해서 반복하여 데이터베이스를 확장한다.

3.3 손상확률계산

주어진 지진강도(s)에서 한계상태(LS)에 도달하거나 이를 초과할 확률은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(LS|s) = P(D_{LS} \leq D_{max} | s) = 1 - F(D_{LS} | s) \quad (1)$$

여기서 $F(D_{LS} | s)$ 는 지진강도가 s 일 때 최대 응답(D_{max})이 0과 D_{LS} 사이에 있을 누적확률을, D_{LS} 는 임의의 한계상태에 대한 한계변위량을 나타낸다. 한계상태는 구조물 형태, 하중과 경계조건, 구조상세 및 파괴모드 등과 같은 다양한 조건에 따라 결정된다. 특정한 건물의 한계변위량을 명확하게 정하는 것은 매우 어려운 일이므로, 내진설계 및 보강기준^{(16),(17)}에서 제시하는 값을 채택하여 사용하는 것이 일반적이다.

지진의 크기가 s 일 때 특정한 한계상태(D_{LS})에 이를 조건부 확률은 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있는데, 이 과정에서 필요한 $F(D_{LS})$ 는 로그정규분포 누적확률로서 식 (2)와 같이 계산되어진다.

$$F(D_{LS}) = \Phi\left(\frac{\ln D_{LS} - \lambda}{\beta_t}\right) = \int_0^{D_{LS}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta_t y}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln y - \lambda}{\beta_t}\right)^2\right] dy \quad (2)$$

여기서, λ 는 $\ln(D_{max})$ 의 평균값을 나타낸다. β_t 는 취약성 분석과정에 개입된 불확실성의 합이며 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\beta_t = \sqrt{\beta_d^2 + \beta_c^2 + \beta_m^2} \quad (3)$$

식 (3)에서 β_d 는 지진 거동 자체의 무작위성에 기인한 불확실성으로서, 주어진 지진 시나리오에서 발생 가능한 일련의 지진파들에 대한 최대응답(D_{max})의 표준편차(σ)와 평균값(m)으로부터 $\sqrt{\ln[1+(\sigma/m)^2]}$ 와 같이 계산할 수 있다. β_c 는 구조물의 특정 한계상태에 대한 변형능력 값의 불확실성을 나타내는데, 기존의 연구⁽⁶⁾에 따르면 즉시거주(Immediate Occupancy), 인명보전(Life Safety), 붕괴방지(Collapse Prevention) 한계상태에 대하여 0.25로 가정하여 사용할 수 있다. β_m 은 해석 모델의 불완전성을 반영한 것으로서 기존⁽¹⁸⁾의 연구에 따르면 모델링 방법에 따라서 0.2에서 0.4사이의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서와 같이 단자유도로 단순화된 해석모델을 사용하는 경우에는 모델링의 불완전성이 상대적으로 크기 때문에 β_m 을 0.4로 가정하여 사용한다.

4. 취약성 등고선

4.1 확률론적 내진성능 목표

지진하중과 구조물에 내재되어 있는 불확실성을 고려할 때 구조물의 설계와 보강을 위한 내진성능의 목표는 신뢰성 이론에 바탕을 두고 설정되는 것이 타당하다. 내진성능의 목표값을 구조물의 지진취약성(주어진 지진 시나리오에 대하여 구조물이 특정 한계상태에 이를 확률)으로 설정하고, 이 확률값이 설계자가 원하는 수준 이하가 되도록 구조물을 설계한다. 예를 들면, 신뢰성 이론에 바탕을 둔 내진성능의 목표는 다음과 표현될 수 있다. “50년 동안 2%의 발생확률을 가진 지진시나리오에 대하여 구조물이 붕괴방지 수준의 손상에 이를 확률은 10% 이하가 되어야 한다.” 이러한 내진성능의 목표를 만족시킬 때까지 구조물의 특성을 반복적으로 개선시켜 나가야 한다. 여기서, 내진성능의 목표가 확률로 설정되었으므로 구조물의 특성이 변경될 때마다 취약성 분석과정이 수반되어야 한다. 따라서 취약성 분석에서 많은 시간이 소요된다면, 확률론적 내진성능 목표를 만족하는 구조 설계를 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이를 극복하기 위하여 이 연구에서는 응답 데이터베이스를 도입하였다.

응답 데이터베이스를 이용하면 광범위한 응답특성변수(3.1절)에 대해 최대응답을 즉각적으로 구할 수 있다. 이를 바탕으로 현실적으로 가능한 모든 구조물의 주기와 강도비에 해당하는 취약성 분포를 동시에 도출할 수 있다. 이 취약성 분포를 주어진 지진 시나리오에 대해서 그래프로 표현한 것이 취약성 등곡선이다. 취약성 등고선은 구조물의 단순화

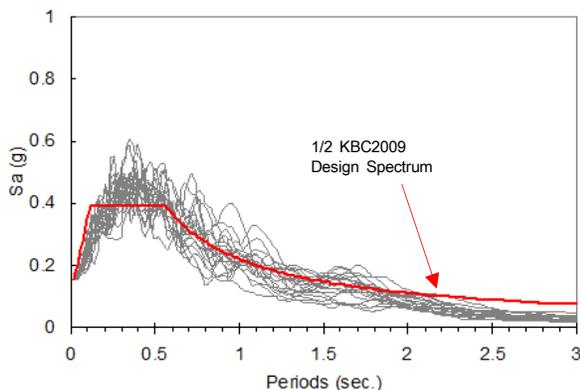
모델(단자유도계)을 이용하고 미리 구축된 해석결과(응답데이터베이스)로 동적 해석을 대체한다는 점에서 지진 응답 스펙트럼⁽¹⁹⁾과 매우 유사한 개념이라고 할 수 있다. 신뢰성 이론에 바탕을 둔 성능기반 내진설계와 내진보강의 방향 설정에 취약성 등고선이 유용하게 사용될 수 있다.

4.2 최대응답 등고선

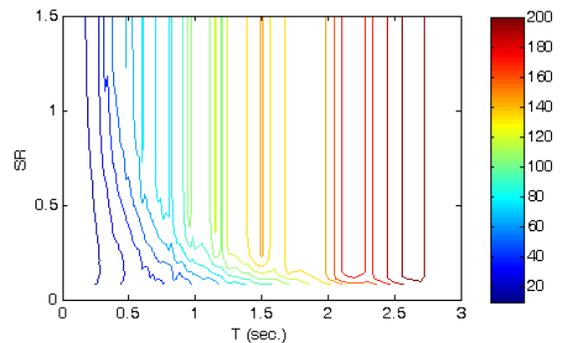
이 연구에서 취약성 분석을 위해 사용한 지진파의 재해 위험도는 대한민국의 서울 경기 지역에서 재현주기 500년(50년에 10%의 초과 확률)에 해당하는 수준으로 가정하였다. 이 지진의 지반진동의 세기를 재현주기 2400년인 지진의 1/2수준으로 가정하고, 인공지진파를 2400년 재현주기를 기본으로 하는 건축구조설계기준⁽²⁰⁾의 설계 응답스펙트럼의 1/2수준에 부합되도록 변형시켜 사용하였다. 이 과정에서 사용된 20개의 인공지진파는 미국의 중앙진 지역인 중서부의 멤피스 지역에서 50년간 10%의 초과 확률을 가진 지진 시나리오를 바탕으로 생성된 것이며, 이에 대한 보다 자세한 설명은 Rix and Fernandez의 연구⁽²¹⁾에 나타나 있다. 그림 3에는 본 연구에 사용한 최대지반가속도 0.13g인 20개 지진파의 5% 응답스펙트럼과 재현주기 500년을 가정한 설계응답스펙트럼이 나타나 있는데 이는 건축구조설계기준⁽²⁰⁾의 지진지역1(S=0.22)에서 연암 지반(S_c, F_a=1.17)을 가정한 응답스펙트럼 값의 1/2 수준에 해당한다. 여기서 설계응답스펙트럼과 인공지진파에는 내진설계기준⁽²⁰⁾과 달리 2/3의 감소계수를 적용하지 않았다. 이 감소계수는 내진설계 과정에서 여러 가지 안전율로 인해 생기는 구조물의 초과강도를 감안하여 지진하중을 적절히 낮추어 주는 것이다. 즉, 과도한 내진 설계의 가능성을 줄여주기 위한 감소계수이므로 내진성능의 평가에는 사용하지 않는 것이 바람직하다. 이에 대한 보다 상세한 논의는 FEMA-355F⁽²²⁾와 Leyendecker

et al.⁽²³⁾에서 찾아볼 수 있다.

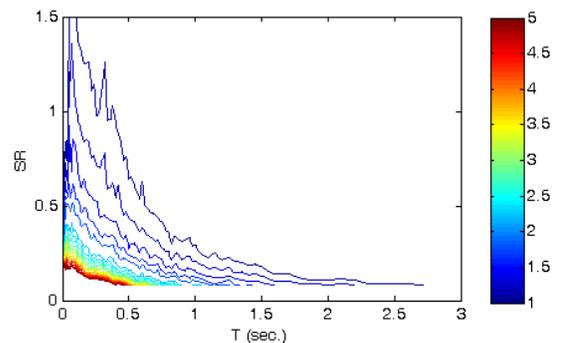
그림 4(a)와 4(b)는 각각 광범위한 주기와 강도비의 조합에 대한 최대응답을 최대변위와 연성도 요구값의 등고선으로 나타낸 것이다. 이 두 등고선의 기본 자료는 그림 3의 지진 시나리오에 해당하는 20개의 지진파에 대한 최대응답의 평균값이다. 등고선의 도출과정에는 이 연구의 예제 구조물(4.3절)과 호응되도록 감쇠비를 5%로 항복후강성비를 -0.01로 가정하고 주기와 강도를 변수로 하여 응답 데이터베이스를 이용하였다. 즉, 79개의 주기(0.01~3초)와 68개의 강도비(0.08~1.5)에 해당하는 5372개 구조물의 20개 지진파에 대한 107,440개의 최대응답을 응답 데이터베이스로부터 불러들여서 사용하였다. 20개 지진파에 대한 최대응답의 평균값을 항복변위로 나누어 연성도 요구치를 구하고 이를 등고선으로 나타내면 그림 4(b)와 같이 일정연성도 비선형 응답스펙트럼(Constant-Ductility Inelastic Spectrum)과 매우 유사한 결과를 얻게 된다. 그림 4의 비교로부터 알 수 있듯이, 최대응답의 분포는 연성도 요구치로 나타내는 것이 변위의 절대값으로 표현하는 것보다 안정적인 예측곡선을 보여주며, 구조물의 응답특성파라미터인 주기와 강도비가 최대응답에 미치는 영향을 분석하는데도 유리하다. 따라서 이 연구에서는 취약성 분석을 위한 최대응답과 한계상태를 연성도로 표현한다.



〈그림 3〉 지진파 스펙트럼과 500년 재현주기 설계스펙트럼



(a) 최대 변위 요구값 등고선(mm)



(b) 최대 연성도 요구값 등고선

〈그림 4〉 최대 응답 등고선의 표현방식 비교

4.3 취약성 등고선의 적용

신뢰성 이론에 기반 한 내진성능 평가의 원리와 과정을 다음에 나타나 있는 취약성 등고선의 활용 예제를 통해서 논의하고자 한다. 본 절에서는 예제 구조물의 내진 성능을 확률론적으로 평가하고 이를 바탕으로 목표 성능에 이르기 위한 강성과 강도의 증가치를 파악하는 과정을 중심으로 취약성 등고선의 활용 방법을 설명하고자 한다. 확률론적 내진 성능 목표를 “예제 구조물이 재현주기 500년(50년에 10%초과 확률)인 지진에 대하여 즉시사용(Immediate Occupancy) 수준의 손상에 이를 확률이 50%이하가 되도록 한다.”로 설정하였다. 이를 만족시키는 내진보강의 목표를 강성과 강도의 증가치로서 제시하기 위하여 취약성 등고선을 활용한다. 취약성 분석 과정에서 식 (1)을 이용하는데, 구조물 최대응답(D_{max})의 분포와 한계 변형능력(D_{Ls})이 우선적으로 정해져야 한다. 본 연구에서는 응답 데이터베이스를 이용하여 그림 4에서와 같이 광범위한 주기와 강도비에 대한 최대응답을 즉각적으로 얻어낼 수 있다.

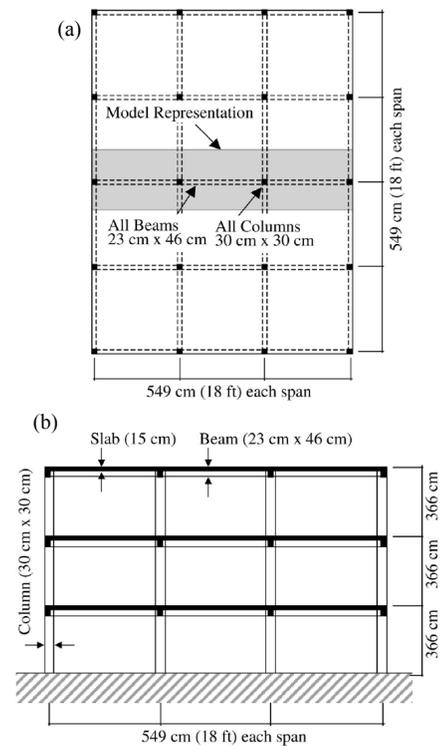
이 연구에서 사용되는 예제 구조물은 높이 11m인 3층 철근콘크리트 골조 건물로서 층고는 3.7m이고, 기둥 간격은 5.5m이다. 이 건물에는 내진구조설계가 적용되지 않았으며, 구조설계에 있어서 중력하중이 풍하중보다 크고 결정적인 하중 요소로 간주 되었다. 철근콘크리트 구조설계에는 ACI 318-89를 이용하였고 콘크리트의 압축강도(f'_c)는 24MPa, 철근의 인장강도(f_y)는 337MPa이다. 예제 건물의 평면과 단면이 그림 5에 나타나 있다. 그림 5(a)의 평면에서 어둡게 표시된 중간 프레임을 2차원 모델로 해석하여 그 결과를 바탕으로 주기와 강도를 정하였다. 이 예제 건물은 Bracci et al.⁽²⁴⁾ 연구에 사용된 실험체를 바탕으로 보수보강의 효과를 두드러지게 관찰하기 위해서 압축강도가 낮은 콘크리트를 적용하였다. 구조물의 무게에 비해 횡강성이 낮아서 주기가 일반적인 건물보다 길어졌다. 응답특성 파라미터는 그림 6에서 보듯이 비선형 능력곡선을 이선형으로 단순화 하여 구할 수 있으며 이로부터 강성 3.5kN/mm, 강도 240kN, 항복 후강성비 -0.01임을 파악할 수 있다. 건물의 고정하중에 해당하는 질량인 149N·sec²/mm를 반영하여 주기 1.3 초와 강도비 0.16을 구할 수 있다.

구조 시스템의 항복이 시작되는 변형값인 연성도 1.0은 지진 이후 손상의 정도가 매우 제한적인 ‘즉시사용’ 한계상태를 나타내기에 적합하다. 따라서 본 연구에서 제시된 내진성능의 목표인 즉시사용(IO)에 해당하는 한계 변형능력(D_{Ls})은 연성도 1.0으로 가정하였다. 인명보전(Life Safety)나 붕괴방지(Collapse Prevention) 수준의 손상에 부합하는 한계 변형능

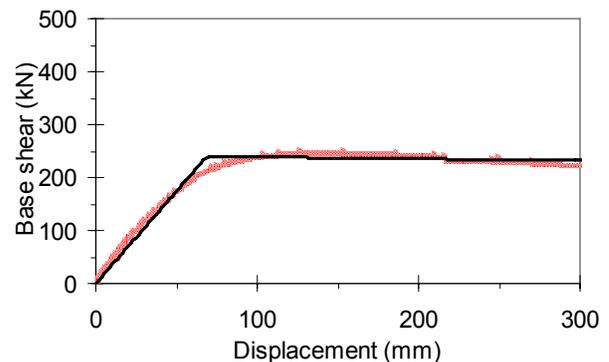
력은 구조물의 종류에 따라서 여러 가지 내진설계 기준에 제시되어 있다. 예를 들면 FEMA273⁽¹²⁾과 ASCE/SEI 41-06⁽¹⁶⁾와 같은 내진설계 기준에서는 철근콘크리트 골조를 비롯한 다양한 구조물의 한계 변형능력을 층간변위비(Interstory Drift Ratio)로 제시하고 있다. 층간변위비(δ)를 연성도 능력(μ_C)으로 전환하기 위해서는 다음의 공식을 이용할 수 있다.

$$\mu_C = \frac{\delta \times H}{\alpha \times \Delta_y} \quad (4)$$

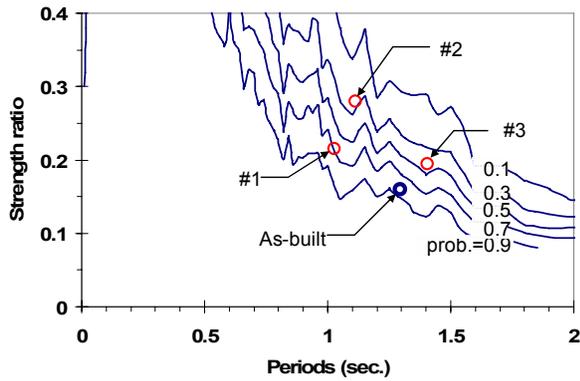
여기서, H는 건물의 전체 높이, Δ_y 는 항복 최상층 변위이다. α 는 층간변위비 환산계수로서 최상층 변위비에 대한 층간변위비의 비율로 정의된다. 환산계수 α 는 정형인 철근콘크리



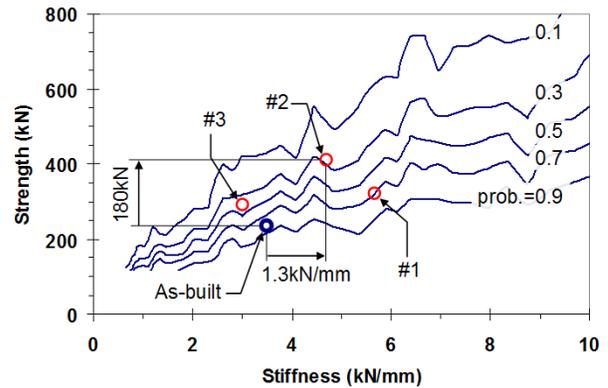
〈그림 5〉 예제건물의 개요: (a) 평면, (b) 단면



〈그림 6〉 밀면전단력-형변위 관계곡선과 이선형 간략곡선



〈그림 7〉 취약성 등고선(주기-강도비 관계)



〈그림 8〉 취약성 등고선(강성-강도 관계)

트 건물의 경우 1.05에서 1.2 사이의 값을 가지며 적용 시 환산에 수반되는 불확실성을 취약성 분석에 반영해야 한다. 이에 대한 자세한 내용은 Jeong & Elnashai⁽⁷⁾에 나타나 있다.

이상에서 논의된 지진시나리오에 대한 취약성 등고선이 그림 7에 나타나 있다. 이 취약성 등고선으로부터 주어진 지진시나리오(그림 3)에서 예제 건물의 보강 전의 한계상태확률을 바로 파악할 수 있다. 보강 방법을 결정하기 이전에 보강 이후 한계상태확률이 50% 이하로서 내진성능목표를 만족하는지 확인하기 위하여 가상의 보강 이후 내진성능(#1, #2, #3)을 그림 7의 취약성 등고선에 표시하였다. 보강 전 건물이 80%의 한계상태확률을 보이고 있으나, #1, #2, #3의 방법으로 보강 후에는 각각 70%, 25%, 45%의 한계상태 확률에 이른다. 보강방법 #1은 내진성능을 만족시키지 못하고, 보강방법 #3은 주기를 증가시켜야 하므로 이는 현실적인 방법이 아니다. 따라서, 그림 7의 취약성 등고선으로부터 보강방법 #2가 가장 적절하다고 판단할 수 있다.

그림 7은 주기와 강도비로 표현된 취약성 등고선으로서 다양한 구조물의 한계상태확률을 비교할 때 유용하게 사용될 수 있다. 반면, 개별적인 건물의 내진성능을 파악하기 위해서는 주기를 강성으로, 강도비를 강도로 표현하는 것이 더 편리하다. 그림 8은 그림 7과 같은 내용의 취약성 등고선을 강성과 강도의 관계로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 내진성능을 만족시키기 위해 필요한 강성과 강도의 증가치를 즉각적으로 파악할 수 있다. 그림 8의 개별 구조물의 취약성 등고선은 그림 7의 일반적인 취약성 등고선으로부터 변환되며 이 과정에서 건물의 중량이 매개변수로 사용된다. 그림 7에서 가정 적절하다고 판단된 보강 목표 #2에 해당하는 강성과 강도의 증가치는 각각 1.3kN/mm와 180kN임을 그림 8로부터 파악할 수 있다. 위의 예제와 같이 보강을 통해서 강성과 강도의 특정 값을 동시에 맞추어 내는 방식보다, 강성의 증가치를 우선 정한 다음에 정해진 보강 방법에

수반되는 강도의 증가치가 그림 8의 취약성 등고선 상에서 내진 성능 목표(0.5 미만)를 만족하도록 조절해 나가는 것이 보다 현실적이라고 판단된다.

5. 요약 및 결론

기존의 지진 취약성 분석 과정에 수반되는 과도한 시간과 노력을 경감시킴으로서 취약성 분석의 적용성을 확장시킬 수 있는 방법이 제안되었다. 본 연구에서 제시된 방법에서는 비선형 동적 해석을 대체하는 응답 데이터베이스를 도입하여 분석에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있었으며 이를 기반으로 하는 취약성 등고선을 도출하여 취약성 분석의 적용성을 높였다. 주어진 지진과 세트를 이용하여 광범위한 주기와 강도비에 대한 최대응답의 평균값을 최대변위 요구값 등고선으로 표현하였다. 여기서 최대응답의 분포는 연성도 요구치로 나타내는 것이 변위의 절대값으로 표현하는 것보다 안정적인 예측곡선을 보여주며, 구조물의 응답특성변수인 주기와 강도비가 최대응답에 미치는 영향을 분석하는데도 유리함을 확인하였다. 따라서 응답 등고선을 이용한 내진성능 평가는 연성도 요구치를 기준으로 수행하는 것이 적절하며, 이를 위해서 내진 설계 기준이나 지침서에 제시하고 있는 층간 변위비 기준의 다양한 건물의 한계 상태 변위를 연성도로 전환하는 방법을 제시하였다.

응답 데이터베이스를 바탕으로 주어진 지진 시나리오와 한계상태 변위에 대한 취약성 등고선을 도출할 수 있으며 이를 통해서 광범위한 구조물의 한계상태확률을 한 눈에 파악할 수 있었다. 예제 건물 적용을 통해서 신뢰성 기반 내진 설계와 보강에 취약성 등고선이 매우 적절하게 활용될 수 있음을 보여주었다. 기존의 내진 성능의 목표는 구조물의 최대 응답으로 제시되어 왔지만, 본 연구에서 제시된 취약성 등고선을 활용하면 한계상태 확률 자체를 내진성능의 목

표로 지정하고 이를 만족시키는 구조물의 강성과 강도를 결정할 수 있다. 본 연구에서 제안한 방법은 단순화된 구조물 모델을 활용하고, 미리 구축된 해석결과로 동적 해석을 대체한다는 점에서 지진 응답스펙트럼과 개념적인 유사성이 있다. 지진파 스펙트럼이 지진공학 분야에서 다양한 활용분야를 생성하여 왔듯이, 본 연구에서 개발된 지진 취약성 등 고선도 신뢰성 기반 내진 성능평가 분야에서 많은 응용분야를 만들어 내고 유용하게 활용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초사업 연구임 (KRF-2008-D00644).

참고 문헌

- Rossetto, T., and Elnashai, A.S., "Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data," *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 10, 1241-1263, 2003.
- ATC-13, *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1985.
- HAZUS-National Institute of Building Sciences, *Development of a Standardized Earthquake Loss Estimation Methodology*, FEMA, Washington, DC, 1995.
- Singhal, A., and Kiremidjian, A.S., "Bayesian updating of fragilities with application to RC frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 8, 922-929, 1998.
- Chryssanthopoulos, M.K., Dymiotis, C., and Kappos, A.J., "Probabilistic evaluation of behaviour factors in EC8-designed R/C frames," *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 8, 1028-1041, 2000.
- Celik, O.C., and Ellingwood, B.R., "Seismic risk assessment of gravity load designed reinforced concrete frames subjected to Mid-America ground motions," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 4, 414-424, 2009.
- Jeong, S.H., and Elnashai, A.S., "Probabilistic Fragility Analysis Parameterized by Fundamental Response Quantities," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 6, 1238-1251, 2007.
- Calvi, G.M., "A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings," *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3, No. 3, 411-438, 1999.
- Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H.K., and Kim, S.H., "Nonlinear static procedure for fragility curve development," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 12, 1287-1295, 2000.
- ATC-14, *Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1987.
- ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
- FEMA-273, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington, DC, 1997.
- Saiidi, M., and Sozen, M.A., "Simple nonlinear seismic analysis of RC structures," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 107, No. 5, 937-953, 1981.
- Fajfar, P., and Fischinger, M., "N2 - A method for non-linear seismic analysis of regular structures," *Proceedings from the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 111-116, 1988.
- Qi, X., and Moehle, J.P., "Displacement design approach for reinforced concrete structures subjected to earthquakes," *EERC Report 91/02*, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 1991.
- ASCE, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings* (ASCE/SEI 41-06), American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2007.
- SEAOC Vision 2000 Committee, *Performance Based Seismic Engineering of Buildings*, Structural Engineers Association of California(SEAOC), Sacramento, CA, 1995.
- Wen, Y.K., Ellingwood, B.R., and Bracci, J., "Vulnerability function framework for consequence-based engineering," *MAE Report 04-04*, Mid-America Earthquake Center, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- Newmark, N.M., and Hall, W.J., *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 1982.
- 대한건축학회, 건축구조설계기준 - KBC 2009.
- Rix G.J., and Fernandez, J.A., *Probabilistic ground motions for selected cities in the Upper Mississippi Embayment*, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Foutch, D. A., State-of-the-art report on performance prediction and evaluation of moment-resisting steel frame structures, *Report No. FEMA-355f*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
- Leyendecker, E.V., Hunt, R.J., Frankel, A.D., and Rukstales, K.S., "Development of maximum considered earthquake ground motion maps," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 1, 21-40, 2000.
- Bracci, J.M., Reinhorn, A.M., and Mander, J.B., Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed Only for Gravity Loads: Part I-Design and Properties of a One-Third Scale Model Structure, *Technical Report NCEER-92-0027*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York, 1992.