



일반 구조물에 대한 신속한 지진 취약성 분석 방법

정성훈¹⁾ · 최성모²⁾ · 김강수^{2)*}

¹⁾인하대학교 건축학부 ²⁾서울시립대학교 건축학부

Rapid Seismic Vulnerability Assessment Method for Generic Structures

Seong-Hoon Jeong¹⁾, Sung-Mo Choi²⁾, and Kang-Su Kim^{2)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

ABSTRACT Analytical probabilistic vulnerability analysis requires extensive computing effort as a result of the randomness in both input motion and response characteristics. In this study, a new methodology whereby a set of vulnerability curves are derived based on the fundamental response quantities of stiffness, strength and ductility is presented. A response database of coefficients describing lognormal vulnerability relationships is constructed by employing a closed-form solution for a generalized single-degree-of-freedom system. Once the three fundamental quantities of a wide range of structural systems are defined, the vulnerability curves for various limit states can be derived without recourse to further simulation. Examples of application are given and demonstrate the extreme efficiency of the proposed approach in deriving vulnerability relationships.

Keywords : vulnerability curve, nonlinear static procedure, fast demand estimation, response parameters, response database

1. 서 론

취약성 곡선은 지반 진동세기와 한계상태 확률 (limit state probability : 일정한 응답수준에 도달하거나 이를 초과할 확률)간의 관계로 정의한다. 지진이 지역사회에 미치는 피해를 예측하기 위해서 개별 구조물 보다는 유형별 구조물 집단에 따른 손상 정도 분석과 지진 발생 전 피해 예상치나 지진 발생 후 보수보강과 같은 개입 효과를 전체적으로 파악하는 것이 중요하다. 따라서 사전 지진재해 대책과 지진 발생 후 재해 복구 대책에 지진피해 평가 취약성 곡선을 이용해야 할 필요성이 점차 커지고 있다. 지역사회에 대한 지진 위험과 피해 평가 시스템을 구축하기 위한 주요 요소는 다음과 같다.

- 지진 위험도 (예 : 최대 지반 운동 파라미터나 지진 스펙트럼 좌표)
- 취약성 곡선 (예 : 주어진 지진 진동치에서 성능 한계 상태에 도달 또는 초과할 조건부 확률 관계)
- 목록 데이터 (예 : 지진에 노출된 구조물의 수, 위치 및 특성 또는 구조물의 구성 요소)
- 분석 결과 통합 및 가시화 역량 (예 : 데이터 관리 체계, 통합된 지진 위험도 분석 체계, 분석 결과의 표현 방법)

취약성 평가에는 필요한 노력의 정도와 평가 결과 정확도 측면에서 다양한 방법들이 있으며 노력과 정확도 간의 상쇄효과를 감안하여 적절한 평가 방법을 선택해야 한다 (Table 1). 관찰에 의한 취약성 평가 (observed vulnerability assessment) 방법들은 실제 지진피해 통계치를 따랐으며, 자세한 사항은 Rossetto와 Elnashai의 연구에 나와 있다¹⁾. ATC-13²⁾의 지진 위험 평가 방법은 전문가 의견 (expert opinions)에 입각한 취약성 평가 사례이고, ATC-14³⁾의 지진 위험 평가 방법은 점수 평가 (score assignment)에 따른 취약성 평가 사례이다. 이들 방법에 대한 자세한 사항은 Lang의 연구⁴⁾에 나와 있다.

해석에 의한 취약성 평가 (analytical vulnerability assessment) 는 구조 해석 결과로부터 도출된 피해 분포를 이용하는 데, 이것은 구조물의 해석 모델에 지진하중을 증가시키면서 시뮬레이션 된 결과이다. 해석에 의한 방법은 지진 피해의 관찰이나 전문가 의견에 의한 방법에 비교하여 분석상의 편견이 개입될 여지가 감소하며, 다양한 구조물에 대한 취약성 평가의 신뢰도가 향상된다. 그러나 해석에 의한 취약성 분석 방법은 일반적으로 상당한 시간과 계산량을 필요로 한다. 일반적으로 제한된 확률변수를 작은 범위에서 변동시키는 경우에서조차도 상당히 많은 시뮬레이션이 수행되며 해석 결과가 수십만 건에 달하기도 한다. 간략화 된 분석 모델을 사용하면 계산 작업이 현저히 줄어들며 이로 인해 현실적인 여건에서 더 많은 시뮬레이션이 가능하다. 즉, 더 많은 확률 변수

*Corresponding author E-mail : kangkim@uos.ac.kr
Received May 14, 2007, Accepted August 31, 2007
©2008 by Korea Concrete Institute

Table 1 Comparison of vulnerability assessment methods⁴⁾

Methods	1	2	3	4	5
		Observed vulnerability	Expert opinions	Simple analytical models	Score assignment
Effort	Increasing time and computation effort →				
Precision	Accuracy of the assessment →				
Application	Building stock				Individual building

에 대해 더 큰 변동 폭으로 해석 결과를 얻게 된다. 이 개념을 바탕으로 하여, 본 논문은 효율적이고 간단한 해석적 절차를 사용하면서도 정확도가 비교적 높은 취약성 곡선을 도출할 수 있는 체계를 제시하고자 한다.

2. 전반적인 절차

취약성 함수를 해석적 방법을 통한 시뮬레이션으로 도출하는 경우, 확률 변수의 수가 적고 변동 폭이 작은 경우에도 상당한 시간과 노력이 요구된다. 또한 구조물이 바뀌거나 보수보강으로 인하여 구조물의 특성이 변경될 때마다 모든 시뮬레이션을 처음부터 다시 반복해야 한다. 이러한 문제점에 대응하기 위해 본 논문에서는 구조물의 비선형 동적 응답 특성을 나타내는 기초적인 응답 매개 변수 (response parameter)를 취약성 곡선과 연관시키는 방법을 제안하였다. 취약성 곡선에 영향을 주는 매개 변수는 강성 (사용성 한계상태와 밀접한 관계가 있음), 강도 (손상 관리 한계상태와 관계가 있음) 및 연성 (구조물 붕괴 방지와 밀접한 관계가 있음)으로 정의하였다. 이 세 가지 변수를 변화시키면서 실시한 비선형동적해석 결과를 축적함으로써 광범위한 구조물에 대응하는 해석 결과를 데이터베이스화 할 수 있다. 이 응답 데이터베이스 (response database)는 미리 준비된 응답 해석 결과이며 이를 이용하면 다양한 구조물에 대해 시뮬레이션 과정을 거치지 않고 취약성 곡선을 바로 도출할 수 있다. 이러한 점으로 인해 취약성 곡선 도출에 드는 시간과 노력을 최소화하고 보다 광범위한 구조물에 대하여 지진피해 경감 대책을 세울 수 있다.

Fig. 1에서 나타나 있듯이 매개변수 취약성 곡선 (parameterized fragility curve) 유도 방법은 다음과 같이 세 단계를 거쳐 도출한다. (1) 구조물 응답 매개변수 측정, (2) 응답 데이터베이스를 이용한 응답 예측 (자세한 사항은 다음 절에서 설명), (3) 다양한 한계상태에 대한 취약성 곡선 유도 위에서 제시된 절차에서, 연성 효과를 고려하지 않고 응답 예측 (2 단계)을 수행할 수 있다는 점이 주목할 만한 부분이다. 이는 일단 강성과 강도에 의해 항복점이 결정되면 극한 변위 능력은 능력 곡선의 형태에 영향을 주지 못하기 때문이다. 따라서 연성 효과가 비선형 구조물의 최대 응답에 영향을 미치지 못한다. 하지만, 극한 변위는 연성과 항복 변위의 곱이므로, 연성 효과는 붕괴 한계상태를 결정하여 이데 대한 취약성 곡선을 유도할 때 구현된다.

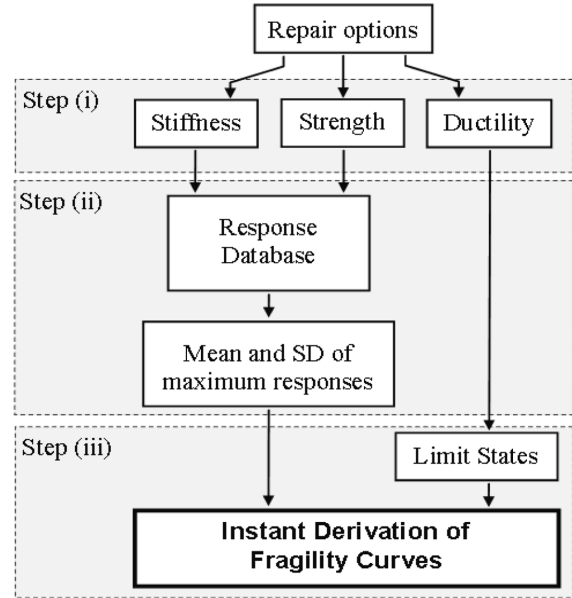


Fig. 1 Overall procedure of the parameterized vulnerability function

3. 구조물 시스템 정의 파라미터

지진공학에서는 비탄성 정적 해석 방법 (ATC 문서에서는 비선형 정적 해석 방법, nonlinear static procedure, NSP)이 간단하고 효율적이기 때문에 구조물 응답 예측에 널리 사용하고 있다. ATC-40⁵⁾, FEMA 273⁶⁾과 같은 현대적인 지진 설계 및 평가 지침은 비선형정적해석 방법 (NSP)을 접목하여 다층 건물의 최대 변위값을 추정한다. 비선형정적해석 방법의 경우 최대 변위값은 등가 자유도 (ESDOF)계와 함께 건물의 1차 모드 유추에 의해 예측된다. 등가 자유도계는 단일 응답 모드에서 복자유도 (MDOF)계의 응답을 추정할 때 사용할 수도 있다. 등가 자유도계와 그 적용에 대한 자세한 사항은 참고문헌에 나와 있다 (Saiidi와 Sozen⁷⁾, Fajfar와 Fischinger⁸⁾, Qi와 Moehle⁹⁾).

단자유도 시스템으로 단순화한 비선형정적해석 방법은 규칙적인 모양의 구조물의 응답 최대값을 추정할 경우 적합한 방식으로 간주되고 있다. 본 논문에서 제안한 방식도 단자유도계 단순화 기법을 사용하고 있다. 본 연구에서 적용한 힘-변위 관계의 주 곡선은 Fig. 2에 나타나 있다. 하중 제거 경로의 강성은 항복 강성 (k)과 같다고 가정한다. Fig. 2에서 꺾선형 곡선은 3개 파라미터, 즉 주기 (T), 강도비 (SR) 및 항복 전 후 강성비 (α)로 정의할

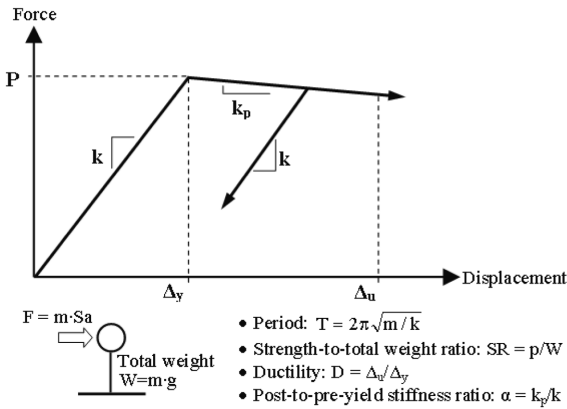


Fig. 2 Structural response parameters

수 있다. 이들 파라미터들은 단위 변환이 필요하지 않아 다양한 경우에 편리하게 적용될 수 있다. 강도비 (SR)는 구조물의 수평 강도 (P)와 전체중량 (W)의 비율을 가리킨다. 임의의 시스템의 강성은 주기 T로 나타내고 강도는 SR로 나타내며 연성은 극한 변위 (Δ_u)를 항복 변위 (Δ_y)로 나눈 값으로 정의된다. 극한 변위는 일반적으로 분석을 수행하는 자가 구조물 특성을 고려하여 결정하게 된다.

4. 확률론적 응답 추정

본 논문에서 제안한 방식에서는 응답 데이터베이스 (RD)와 매개변수로 사용되는 구조물 응답 특성 (응답 매개변수 : 강성, 강도 및 연성)으로 취약성 곡선을 유도한다. 이때 구조물의 응답 매개변수는 실제 구조물의 단순화 된 모델인 단자유도계로 부터 정해지게 된다. 응답 데이터베이스는 광범위한 구조물 응답 매개변수에 대한 비선형동적해석 결과를 축적하여 구축된다. 따라서 새로운 응답 특성을 가진 구조 시스템의 취약성 곡선의 유도에 시뮬레이션 수행할 할 필요가 없다. 본 논문에서 제안한 방법은 (1) 단순화된 구조물 모델 (단자유도계)을 활용하고, (2) 응답내력 최대값을 이용하며, (3) 미리 구축된 해석 결과 (응답 데이터베이스)로 동적 해석을 대체한다는 점에서, 지진 응답스펙트럼 (earthquake response spectrum)과 개념이 유사하다 (Fig. 4). 또한, 제안된 방법

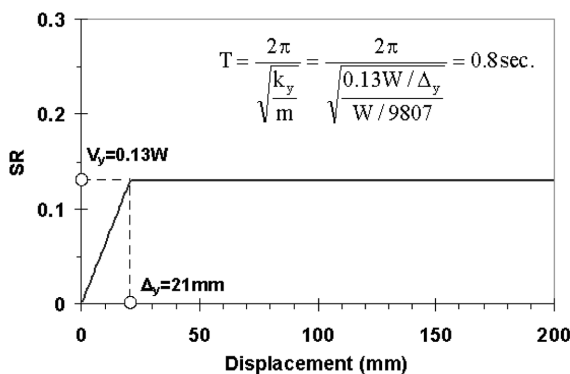
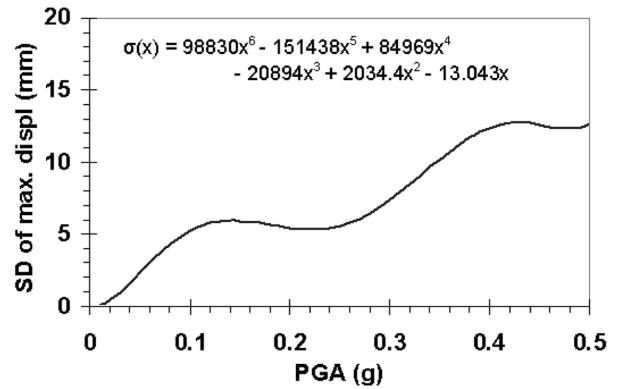
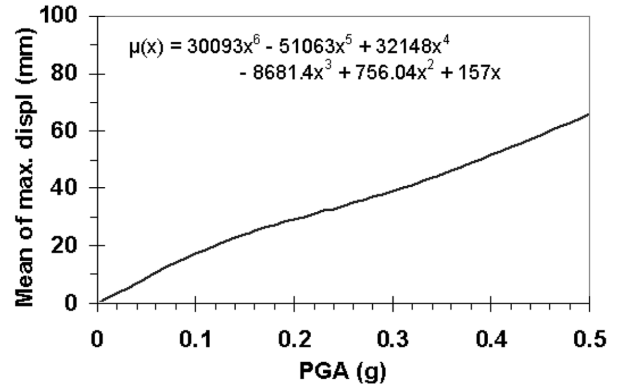


Fig. 3 Force-displacement relationship of the example structure



(a) Mean of maximum displacement



(b) SD of maximum displacement

Fig. 4 Mean and standard deviation of maximum displacement of the example structure

은 이미 확보된 응답예측의 신뢰도를 바로 취약성 곡선의 유도에 사용할 수 있다.

4.1 응답 데이터베이스의 구조

응답 데이터베이스는 다양한 구조물의 응답 최대치에 대한 정보를 통계 파라미터 형태로 저장하도록 고안되어 있다. 이 응답 데이터베이스가 있으면 동적 응답 내력 해석으로부터 얻어지는 대량 데이터를 취급하지 않고 2개의 통계 파라미터 (평균 및 표준편차)만 사용하여 취약성 함수를 구축할 수 있다. 따라서 기존 방법에 비해 취약성 곡선 유도 과정이 훨씬 용이하다. 또한 최대 응답치 확률분포를 나타내는데 사용하는 누적 정규 또는 누적 로그 정규분포가 응답 변수의 평균 및 표준편차에 의해서만 좌우되기 때문에 정보의 충실성에도 전혀 손실이 없다.

동적 응답 특성을 정의하는 응답 매개변수가 파악된 구조물에 특정 지진 시나리오를 나타내는 일련의 지반 거동을 적용하여 동적 응답내력해석을 수행함으로써 응답 최대치의 집합을 얻는다. 이렇게 얻어진 값들로부터 데이터베이스의 기본 요소가 되는 평균 및 표준편차를 계산한다. 이 과정을 광범위한 지진강도와 구조물 응답 매개변수에 대해 반복하여 특정 한 지진 시나리오의 응답 데이터베이스를 구축한다. 평균 및 표준편차를 지진강도

에 대한 함수로 나타냄으로써 응답 데이터베이스의 차원을 줄일 수 있다. 이 단계를 거치면 지진강도와 최대 변위 요구값의 통계 파라미터 (평균 및 표준편차)간 관계를 나타내는 회귀함수의 상수가 응답 데이터베이스에 들어가게 된다. 이 단계를 거친 데이터베이스의 예로서 평균값의 응답 데이터베이스가 Appendix 1에 나타나 있다. 여기서 각 셀마다 5차 다항회귀함수의 6개 상수가 들어가 있으며 이를 통해 최대 변위값의 평균편차 또는 표준편차를 식 (1)과 같이 지진강도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$y = a_1 \cdot x^5 + a_2 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^2 + a_5 \cdot x + a_6 \quad (1)$$

여기서 x 는 지진강도, y 는 응답량의 평균 또는 표준편차를 나타낸다. 이 응답 데이터베이스는 지진 시나리오나 구조물 간략화 방법에 따라 유도된 회귀함수를 취합하여 확장될 수 있다.

4.2 지진 시나리오

본 논문에서 제시된 방법을 적용하는 사례로서, 중앙진 지역의 인공지진파에 대한 취약성 곡선을 유도하였다. 이 지진파는 맴피스 (미 테네시주 소재)의 저지대 지역에 대한 지진 상황을 시뮬레이션한 것으로 Drosos가 수행한 연구에서 3개 시나리오 중 ‘시나리오 #3’을 적용한 것이다¹⁰⁾. ‘시나리오 #3’은 10개 지진파로 구성되어 있으며, 진도 규모 (M_w) 5.5, 진원깊이 20 km, 84% 수준 (단위 표준편차만큼 평균값을 초과하는 수준)의 지진 상황을 시뮬레이션한다.

최근 연구 결과 (예 : Wen 외¹¹⁾, Pinto 외¹²⁾)에 따르면 구조물의 능력에 존재하는 불확실성이 지진파의 불확실성에 비해 구조물의 지진 응답에 미치는 영향이 현저히 낮은 것으로 나타났다. 이러한 관찰은 취약성 분석의 결과가 구조물 능력의 불확실성보다 지진파의 불확실성에 결정적인 영향을 받고 있음을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 지진 지반 거동만을 확률변수로 사용하여 취약성 곡선을 유도하였다.

4.3 응답 예측

응답 데이터베이스는 광범위한 구조물에 대한 비선형 응답해석 결과의 집합이다. 이를 이용하여 임의의 구조물에 대해 응답 예측을 하고자 할 경우, 응답 데이터베이스에서 주어진 매개변수와 지진 시나리오에 해당하는 값만 검색하여 불러오면 되므로 취약성 분석 결과를 즉시 얻을 수 있다.

데이터베이스를 이용하여 최대 응답치의 평균 및 표준편차를 구하기 위한 첫 번째 단계는 구조물의 단순화 방법 및 응답 매개변수 결정이다. 이 과정을 예시하기 위하여 임의로 설정된 구조물의 비선형 거동이 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3은 탄성-완전소성 (elastic-perfectly plastic) 구조물의 힘-변위 상관관계를 나타내며, 해당 구

조물의 주기는 0.8초, 강도비는 0.13이다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 예시된 구조물의 데이터베이스를 통한 응답 예측 결과 ($T=0.8$ 초, $SR=0.13$)를 나타낸 것이다. 응답 최대치의 평균 및 표준편차는 지진강도의 6차 다항함수이다 (식 (1) 참조).

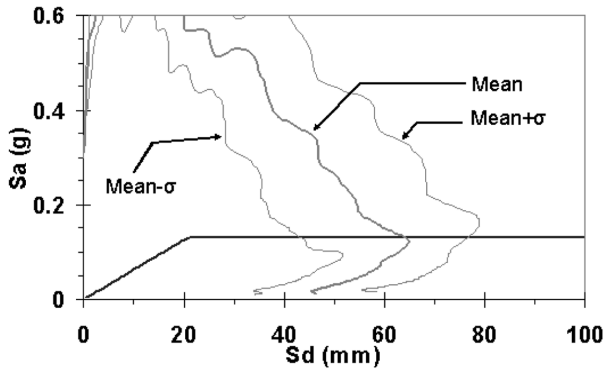
4.4 능력 스펙트럼법과 비교

응답 데이터베이스를 토대로 하는 위의 응답 예측 방법을 능력 스펙트럼법 (capacity spectrum method)과 비교하였다. 이 능력 스펙트럼법은 지진공학에서 가장 많이 쓰이고 있는 비선형 정적 절차 (NSP)이며 변위 최대값은 능력 곡선과 요구 스펙트럼이 만나는 점에서 결정된다. 여기서 요구 스펙트럼은 소성 정도에 따라 변화된 단자유도계의 비선형 응답을 가속도-변위응답스펙트럼 (acceleration-displacement response spectrum)형으로 표현한 것이다. 본 연구에서는 비교를 위해 단자유도계의 비탄성 최대 응답값을 정확하게 예측할 수 있는 비선형동적해석에 의해 도출된 상수-연성 스펙트럼 (constant-ductility spectrum)을 이용하였다. 능력 스펙트럼법에 대한 보다 자세한 설명은 ATC-40⁵⁾에 나와 있다.

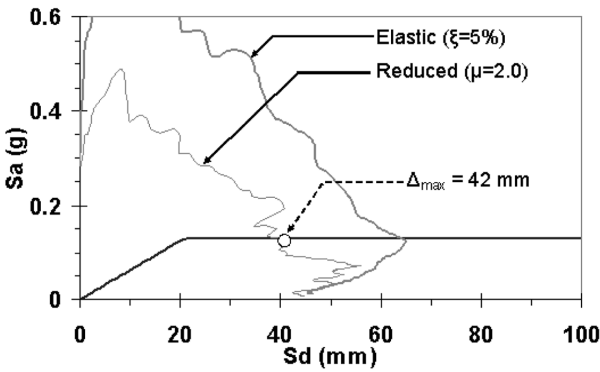
능력 스펙트럼법을 이용하여 최대 변위의 평균 및 표준편차를 구하기 위해 Shinozuka의 연구에서 제안한 방법을 이용하였다¹³⁾. 이 연구에서는 평균 및 평균 $\pm \sigma$ (표준편차) 요구 스펙트럼을 이용하여 능력 스펙트럼법으로부터 최대 변위값의 평균 및 평균 $\pm \sigma$ (표준편차)를 구했다. 여기서 가속도-변위 응답 스펙트럼의 가속도와 변위의 평균 및 평균 $\pm \sigma$ (표준편차)를 좌표에 따라 곡선으로 이어주면 요구 스펙트럼이 만들어진다. 이 때 지진강도를 먼저 결정하고 해당 시나리오의 지진파 집합에 대한 스펙트럼 가속도와 변위의 평균과 표준편차를 계산해야 한다. Fig. 5 (a)는 평균과 평균 $\pm \sigma$ (표준편차) 탄성 요구 스펙트럼을 나타낸다. 여기서 최대 지반 가속도는 0.3 g이며 감쇠비는 5%이다.

최대 비탄성 변위값은 상수-연성 스펙트럼을 좌표상에 나타내 구하는데, 연성값을 계속적으로 변화시키면서 적절한 연성값을 정한다. 이 경우 교차점의 연성 요구치는 해당 상수-연성 스펙트럼의 연성값과 같게 된다. 이 방법은 Chopra와 Goel¹⁴⁾의 연구에서 ATC-40⁵⁾에 의한 최대 변위 예측 방법의 정확도를 향상시키기 위해 고안한 것이다. Fig. 3의 예시한 구조물 ($T=0.8$ 초, $SR=0.13$)에서 능력 스펙트럼을 이용한 최대 변위값의 평균 및 평균 $\pm \sigma$ (표준편차) 예측 결과는 Fig. 5 (b), (c) 및 (d)에 나와 있다. Fig. 5 (b), (c), (d)에서 능력 곡선과 평균 (또는 평균 \pm 표준편차) 탄성 및 비탄성 요구 스펙트럼이 교차하는 점이 최대 지반 가속도 0.3 g에서 예측된 최대 변위이다. 취약성 곡선을 유도하기 위해서는 위의 절차를 다양한 최대지반 가속도 (PGA)에 대하여 반복해야 한다.

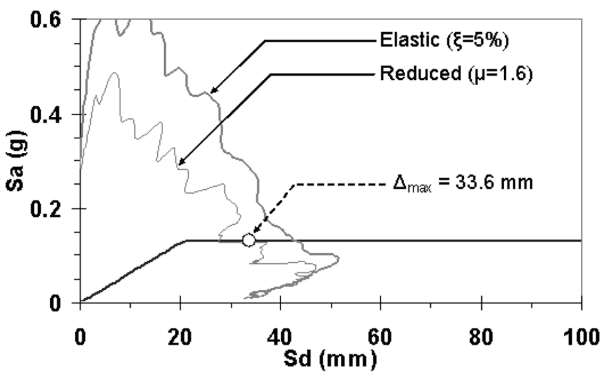
Fig. 6과 같이 본 연구에서 제시된 방법인 응답 데이터베이스를 이용하여 예측된 최대 응답과 능력 스펙트럼법을



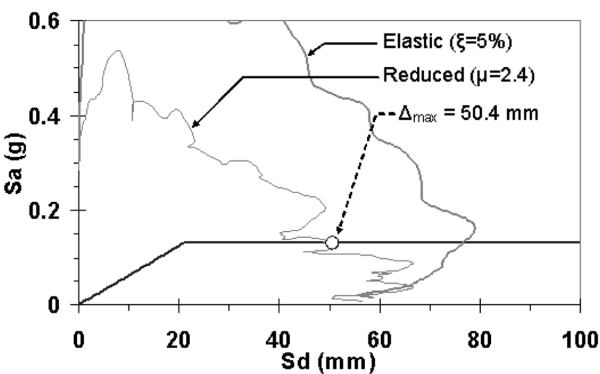
(a) Mean and mean $\pm \sigma$ elastic demand



(b) Mean elastic and inelastic demand



(c) Mean - σ elastic and inelastic demand



(d) Mean + σ elastic and inelastic demand

Fig. 5 Capacity-demand diagrams for the estimation of maximum responses (PGA = 0.3 g)

이용한 예측값은 거의 차이가 나지 않는다. 즉 매개변수 취약성 분석 방법 (parameterized vulnerability assessment method)은 능력 스펙트럼 평가 방법과 같은 정도의 응답 예측 정확성을 가지며 취약성 분석에 필요한 응답 예측치를 즉각 알 수 있기 때문에 기존의 능력 스펙트럼법

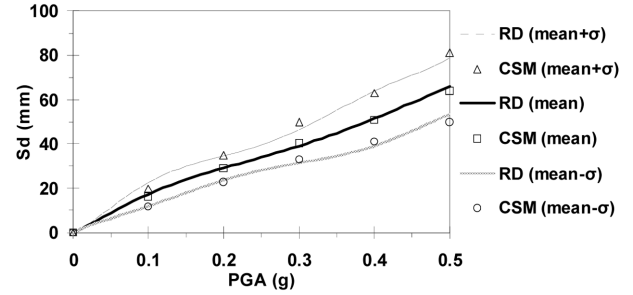


Fig. 6 Comparison of response estimation results by using the response database (RD) and the capacity spectrum method (CSM)

과 같이 다양한 최대 지반 가속도에 대해서 응답 예측 절차를 반복할 필요가 없으므로 매우 효율적이다.

본 논문에서 제안한 방법은 등가 단자유도계를 이용하여 구조물의 반응을 나타내는데 이는 고차모드의 영향을 반영하는데 한계점이 있다. 따라서 고층 빌딩이나 비정형성을 가진 구조물과 같이 고차모드의 영향이 큰 경우의 응답 예측에 있어서 정확성이 미흡할 수 있다. 이것은 등가 단자유도계를 이용하는 기존의 모든 단순화된 방법들의 공통적인 한계점이다. 그러나 많은 구조물을 동시에 해석할 필요가 있거나 예비 설계 검토와 같이 구조물의 복잡한 거동을 정밀하게 파악하는 것이 현실적으로 불가능한 경우에 사용되기에 충분한 정확성을 가진다고 판단되어왔다. 이는 능력 스펙트럼법이 현재 지진평가에 가장 널리 사용되는 방법 중에 하나이며, ATC-14³⁾와 FEMA-273⁶⁾ 등 지진 설계 및 평가 지침에서도 채택된다는 사실에서 알 수 있다.

5. 취약성 곡선의 유도

5.1 확률 분포

취약성 곡선을 도출하기 위해서 응답 변수의 확률 분포가 필요한데, 본 논문에서는 응답 최대치가 로그 정규 분포를 따른다고 가정하였다. 이 가정의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 7과 같이 로그 정규 확률지를 작성하였다. 이 확률지에 표현된 3개의 표본 데이터 집합은 예시

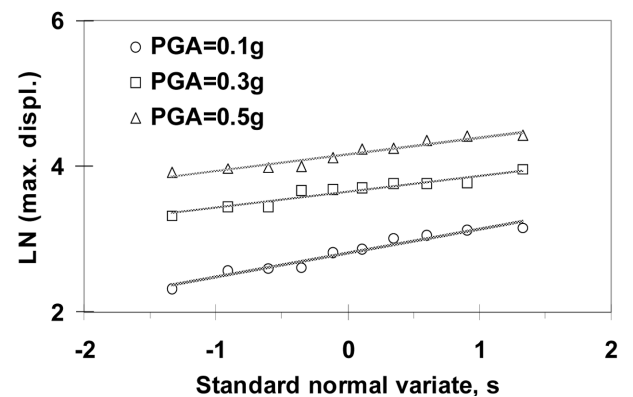


Fig. 7 Lognormal probability paper for maximum displacements of the example structure ($T = 0.8\text{sec.}$ and $SR = 0.13$)

한 구조물 ($T=0.8$ 초, $SR=0.13$)에 대한 동적 응답 내력 해석을 통해 얻은 것이다. 여기서 지진강도는 각기 0.1 g, 0.3 g 및 0.5 g이다. ‘시나리오 #3’에서 댄퍼스 저지대 지역에 대한 10개 레코드 (4절 (2)항 참조)를 최대 지반 가속도 별로 적용하였다. 횡축은 표준정규변량으로 누적 확률의 역수이며 응답 로그의 N 데이터 (x_1, x_2, \dots, x_N , 오름차순으로 정렬)에서 m 번째 값의 누적 확률은 $m/(N+1)$ 에 의해 결정된다. 이 로그정규 확률지에 대한 보다 자세한 설명과 이론적 근거는 Gumbel¹⁵⁾에 나와 있다.

확률지의 횡축은 표준정규 누적 확률의 역수인 표준정규변량 (s) 이므로 종축과 횡축 간 선형 관계에 의해 종축을 정규분포 특성을 갖는 확률 변수로 사용할 수 있을 지 판단한다. Fig. 7에서 종축은 최대 변위값의 로그이며 따라서 표본 데이터 집합의 선형성에 의해 응답 로그 확률이 정규분포 특성을 갖는다. 이에 따라 본 연구에 사용된 확률분포 (로그정규분포) 선택이 적절하다는 것을 알 수 있다. 즉, 최대 응답값의 확률분포에 대한 로그정규분포 가정이 타당하다는 결론을 내릴 수 있으며 본 논문에서는 로그정규분포를 이용하여 취약성 곡선을 도출하고자 한다.

5.2 확률 계산

주어진 지진강도 (s)에서 한계상태 (LS)에 도달하거나 이를 초과할 확률은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(LS|s) = P(\Delta_{LS} \leq \Delta_{max})|s = 1 - F(\Delta_{LS})_s \quad (2)$$

여기서 $F(\Delta_{LS})_s$ 는 지진강도가 s 일 때 최대 변위 (Δ_{max})가 0과 Δ_{LS} 사이에 있을 누적 확률을 가리킨다. Δ_{LS} 는 임의의 한계상태에 대한 한계 변위량을 나타낸다. 임의의 한계상태에 대한 취약성 곡선은 지진 강도 별로 식 (2)의 확률을 좌표상에 나타내 구한다.

로그정규분포 $F(\Delta_{LS})$ 의 누적 확률은 다음의 식 (3)과 같은 방법으로 얻을 수 있다.

$$F(\Delta_{LS}) = \Phi\left(\frac{\ln \Delta_{LS} - \lambda}{\xi}\right) = \int_0^{\Delta_{LS}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln y - \lambda}{\xi}\right)^2\right] dy \quad (3)$$

이 때 λ 과 ξ 는 각각 $\ln(\Delta_{max})$ 의 평균 및 표준편차로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \ln x_m, \quad \xi = \sqrt{\ln(1 + \delta^2)} \quad (4)$$

이 때 x_m 은 중간값이고 δ 는 변동계수이며, 이들 파라미터는 다음과 같이 평균 (μ) 및 표준편차 (σ)로 나타낼 수 있다.

$$x_m = \mu / \sqrt{1 + \delta^2} \quad \delta = \sigma / \mu \quad (5)$$

매개변수 취약성 곡선 방법에서는 최대 변위의 평균 및 표준편차가 바로 지진강도에 대한 함수로 응답 데이

터베이스에 구축되어 있으므로 지진강도 별로 위의 계산을 반복 실행 할 필요가 없다.

5.3 취약성 곡선

Fig. 3의 예시 구조물을 이용한 적용 사례를 통해 본 연구에서 제안한 취약성 곡선의 유도 과정을 제시하였다. 응답 데이터베이스 (Fig. 4)를 이용한 응답 예측 값에 따라 (1) 항복 변위 (Δ_y), (2) 중간 손상 변위 (Δ_m) 및 (3) 극한 변위 (Δ_u)에 대한 한계상태 취약성 곡선을 도출하였다. 중간 손상 변위는 본 적용 사례에서 임의로 설정된 한계상태 기준으로서 항복 및 극한 변위 사이의 중간 지점, 즉 $0.5(\Delta_y + \Delta_u)$ 를 가리킨다. 한계상태에 대한 정의는 구조물의 반응과 이의 피해 상태 간 관계를 적절히 나타내기 위하여 분석을 수행하는 자가 결정할 수 있는 것으로 본 연구에서 제안한 방법의 필수불가결한 부분은 아니다. 일반적으로 한계상태는 구조물 형태, 하중과 경계조건, 구조상세 및 파괴모드 등과 같은 조건에 따라 결정된다.

매개변수 취약성 곡선 유도에 있어서 강성과 강도 변화의 효과는 응답 데이터베이스로부터 최대 변위 예측에 반영되는 한편, 연성 능력 (δ_s) 변화의 효과는 Fig. 8과 같이 극한 변위를 결정하는데 사용되어 조건부 확률 계산 절차를 통해 취약성 곡선에 반영할 수 있다. Fig. 9는 본 연구에서 제안한 매개변수 방법에 따라 예제 구조물 (Fig. 3)의 취약성 곡선을 도출한 것이다.

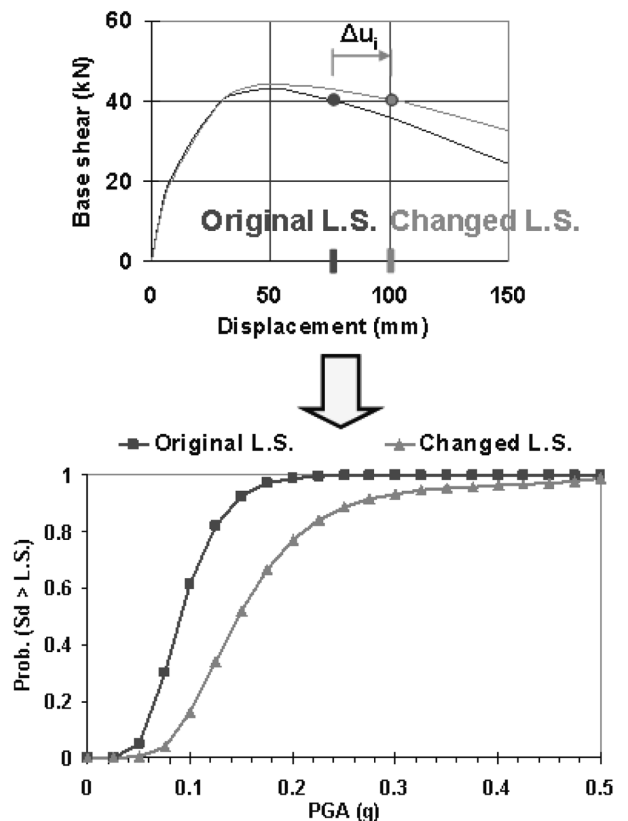


Fig. 8 Effect of ductility change on vulnerability curves

본 적용 사례의 유도 과정에서 구조물의 연성 능력 (δ_s)은 3으로 가정하였으며, 이때 극한 변위는 $\Delta_u = 3 \times \Delta_y = 63 \text{ mm}$ (Fig. 3에서 $\Delta_y = 21 \text{ mm}$)이다. 한계상태 (Δ_y , Δ_m 및 Δ_u)에 도달하거나 이를 초과하는 최대 변위확률이 매개변수방법과 능력 스펙트럼 방법의 두 가지 방법에 의해 구해졌으며 그 결과들이 Fig. 9에 비교되어 있다. 이 두 가지 방법에 의한 한계상태 확률 값들은 서로 매우 가까우며 이 같은 일치성은 Fig. 6의 최대 변위값 비교에서 이미 보여지기도 했다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 방법은 기존 매개변수 방법에 비해 훨씬 신속하게 동일한 정확도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 즉 기존의 능력 스펙트럼법 대신 매개변수법을 이용하여 취약성 곡선을 효율적으로 도출할 수 있다.

6. 결 론

어느 분류에 속하는 전체 구조물에 대해 확률론적 지진 취약성 곡선을 도출하려면 해석 과정에서 상당한 시간과 노력이 요구된다. 특히 다수의 확률 변수를 고려해야 하는 경우나 구조물의 수많은 보수 및 보강 방법에 따라 취약성 곡선을 다시 도출해야 하는 경우에는 그 계산량이 현실적으로 불가능할 정도에 이르기도 한다. 이 같은 문제점 대한 해답을 제시하고자 본 논문에서는 강성, 강도 및 연성 등 구조물의 기본적인 특성에 따라 동적응답해석을 미리 수행하고 그 결과를 응답 데이터베이스에 구축해 두는 방법으로 기존 방법의 제약에 대응하는 새로운 취약성 평가 분석 체계를 제안하였다. 이 응답 데이터베이스는 광범위한 구조물의 강성과 강도에 대한 응답값의 평균과 표준편차를 지진강도의 함수로 표현하는 다항식 계수를 저장하고 있다. 이 데이터베이스로부터 임의 구조물의 강성, 강도 및 지진파 집합에 해당하는 최대 변위 값의 평균과 표준편차를 바로 얻을 수 있기 때문에 취약성 곡선의 유도과정에 동적 해석 절차가 필요 없다. 또한 연성 능력 변동 효과는 누적 조건부 확률 계산시 한계상태 정의에 포함시켜서 취약성 곡선에 반영한다. 따라서 일단 사용자가 구조물 시스템의 강성, 강도 및 연성 능력을 정의하면 확률론적 취약성 곡선을 곧바로 얻을 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법은 등가 단자유도계에 바탕을 두고 있으므로 고차 모드의 영향이

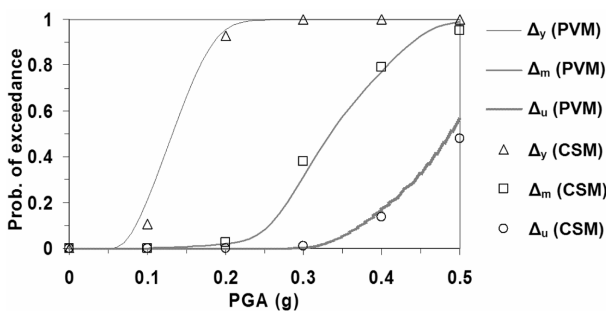


Fig. 9 Vulnerability curves by the PVM and limit state probabilities by the CSM

적은 단순한 구조물의 응답 예측에 적합하다.

본 논문에서 제안한 방법은 취약성 곡선의 즉각적인 구현을 가능하게 하므로 다수의 구조물에 대한 다양한 보수 및 보강 방법을 모두 고려해야 하는 지진피해 복구나 피해 경감 대책 수립 시 크게 도움이 된다. 이 경우 다양한 구조물 형상별, 지진피해 경감 대책 별로 한계상태 확률을 신속하게 측정하는 일이 긴요하기 때문이다.

취약성 곡선은 지역적인 지진피해 평가에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 구조 재료의 물성과 지진 데이터에 필연적으로 존재하는 불확실성을 고려하여 개별 구조물의 손상 정도를 확률론적으로 평가하는 데도 적용할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부 (과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R0A-2007-000-10047-0).

참고문헌

1. 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, 2003, pp.1241~1263.
2. ATC-13, *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1985, 492pp.
3. ATC-14, *Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1987, 370pp.
4. Lang, K., *Seismic Vulnerability of Existing Buildings*, IBK Bericht, Bd. 273, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 2002, 302pp.
5. ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996, 612pp.
6. FEMA-273, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington, DC, 1997, 400pp.
7. Saiidi, M. and Sozen, M. A., "Simple nonlinear seismic analysis of RC structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.107, No.5, 1881, pp.937~953.
8. 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, 1988, pp.111~116
9. Qi, X. and Moehle, J. P., *Displacement Design Approach for Reinforced Concrete Structures Subjected to Earthquakes*, EERC 91/02, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 1991, 202pp.
10. Drosos, V A., *Synthesis of Earthquake Ground Motions for the New Madrid Seismic Zone*, MS Thesis, Atlanta (GA), Georgia Institute of Technology, 2003, 300pp.
11. 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, 160pp.

12. Pinto, P. E., Giannini, R., and Franchin, P., *Seismic Reliability Analysis of Structures*, IUSS Press, 2004, 370pp.
 13. 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, 2000, pp.1287~1295.

14. Chopra, A. K. and Goel, R. K., *Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures, SDF Systems*, PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 1999, 202pp.
 15. Gumbel, D. J., *Statistical Theory of Extreme Values and Some Practical Applications*, Applied Mathematics Series 33, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1954, 51pp.

요약 해석적 방법에 의한 지진 취약성 분석 (fragility analysis)은 입력 거동과 응답 특성의 불확실성을 고려하기 위해 임의화된 확률 변수들 (randomized response variables)로 인하여 해석 과정에 상당한 노력과 시간이 요구된다. 본 연구에서는 구조물의 기본적인 특성인 강성, 강도 및 연성 능력에 따라 지진 취약도 곡선을 바로 도출할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 광범위한 구조물을 대표할 수 있는 일반화된 단자유도계의 동적 해석 결과로부터 로그 정규 취약성 곡선의 도출에 필요한 파라미터를 응답 데이터베이스에 저장한다. 이를 이용함으로써 구조물의 기본적인 특성 (강성, 강도, 연성 능력)만으로 동적해석 과정을 수행하지 않고도 한계상태 취약성 곡선을 도출할 수 있다. 본 논문의 적용 사례를 통해서 제안된 방법이 지진 취약성 곡선을 얻는데 매우 효율적임을 확인 할 수 있다.

핵심용어 : 취약성 곡선, 비선형정적해석, 신속한 변위 예측, 응답 파라미터, 응답 데이터베이스

Appendix 1 Response database for mean value (μ) of maximum displacement EPP (elastic-perfectly plastic) structure under records for Memphis, Lowlands soil profile, Scenario #3 (M = 5.5 at Memphis, TN with focal depth 20 km)

S.R.		Period (sec.)											
		0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	
0.025	a ₁	-2053.20	-1799.50	3993.60	-12511.00	-14142.00	6481.00	12945.00	1994.10	-6332.50	-10515.00	-7383.70	1818.90	
	a ₂	3849.10	2678.80	-2723.20	16516.00	18417.00	-8232.20	-17754.00	-5258.80	7126.70	13956.00	11854.00	690.11	
	a ₃	-2681.80	-1323.70	-328.19	-7799.40	-8318.00	3965.30	9077.60	4609.40	-2049.60	-6022.10	-6134.90	-1682.80	
	a ₄	865.28	259.81	486.79	1580.10	1544.90	-855.88	-2074.70	-1608.70	-120.96	833.08	1082.30	440.90	
	a ₅	27.94	123.45	65.74	25.28	54.60	242.03	363.57	366.71	254.32	178.84	143.22	162.69	
	a ₆	-0.09	-1.38	2.07	3.09	3.13	1.22	-0.84	-0.98	0.51	1.38	1.43	0.73	
0.050	a ₁	-1443.80	-5822.70	7218.20	21152.00	34835.00	2993.30	-6074.80	6579.10	-4843.90	-20906.00	2686.00	8019.50	
	a ₂	600.35	9847.80	-12664.00	-27038.00	-44184.00	-4142.80	8421.90	-7684.20	4877.80	27075.00	-2542.50	-10461.00	
	a ₃	33.72	-6161.00	7627.40	11716.00	19480.00	2527.80	-3307.90	3651.20	-1176.00	-12345.00	558.10	4654.80	
	a ₄	149.35	1711.90	-1815.40	-1919.10	-3510.90	-843.48	139.15	-1111.30	-269.82	2230.50	-9.74	-853.39	
	a ₅	59.46	-55.39	285.44	238.10	399.87	299.49	271.32	370.92	310.55	82.80	210.83	258.94	
	a ₆	-0.96	3.31	-2.46	0.97	-2.10	-0.13	0.37	-1.33	-1.46	3.05	0.23	-1.25	
0.075	a ₁	-8191.30	5907.00	-10807.00	-215.82	-15211.00	8049.60	1616.80	5203.30	5376.50	11576.00	-8245.90	-493.92	
	a ₂	11311.00	-7795.30	14472.00	-2222.80	13140.00	-10168.00	-2796.80	-8021.90	-3546.80	-14034.00	9798.20	769.34	
	a ₃	-5692.10	3105.60	-6360.80	2612.70	-2213.70	4912.50	1933.50	4654.50	15.83	5693.60	-4150.40	-370.15	
	a ₄	1380.90	-240.56	1041.50	-828.59	-469.25	-1241.50	-820.84	-1429.00	133.32	-976.59	741.99	71.42	
	a ₅	-58.89	78.27	75.04	214.72	275.10	347.49	367.69	433.08	246.32	305.23	164.03	192.35	
	a ₆	1.75	1.13	1.99	1.37	-0.75	-1.21	-2.23	-3.42	0.30	-1.35	1.06	0.11	
0.100	a ₁	-2038.70	3544.80	-17130.00	15596.00	4264.90	10393.00	-18126.00	-19994.00	-4348.90	-5253.10	4137.60	327.31	
	a ₂	4296.30	-5296.30	24925.00	-22208.00	-4094.80	-15177.00	23978.00	26240.00	5394.00	6485.90	-4928.90	-369.23	
	a ₃	-3092.80	2618.80	-12817.00	11893.00	2122.40	8192.00	-11143.00	-11977.00	-2725.50	-2964.00	2040.70	149.44	
	a ₄	1035.50	-350.11	2724.80	-2833.10	-777.55	-2095.30	1959.30	2040.70	548.22	584.40	-356.53	-26.09	
	a ₅	-60.26	93.06	-88.11	404.17	287.64	446.97	147.20	163.17	218.71	191.81	241.43	199.54	
	a ₆	2.33	1.04	6.51	-2.79	-0.80	-3.91	2.50	2.25	0.83	1.01	-0.50	-0.04	
0.125	a ₁	10177.00	9971.80	15657.00	3214.00	12098.00	-13304.00	11872.00	-10045.00	7735.50	3347.30	-3560.50	0.00	
	a ₂	-11910.00	-14160.00	-16887.00	-6870.60	-16522.00	14840.00	-11390.00	16895.00	-8652.00	-4468.90	4154.40	0.00	
	a ₃	4520.00	7192.20	5777.90	5307.90	8536.00	-5253.40	3233.80	-9765.50	3130.30	2059.40	-1736.30	0.00	
	a ₄	-470.49	-1423.30	-691.29	-1753.40	-2149.90	445.25	-383.50	2144.60	-454.22	-398.02	312.42	0.00	
	a ₅	46.01	188.16	155.42	357.62	417.20	270.37	296.04	116.82	284.80	268.14	193.89	197.69	
	a ₆	0.36	-0.96	1.84	-2.27	-4.05	-0.53	-0.22	3.84	-0.40	-0.66	0.47	0.00	
⋮														



Longer period



Higher strength