

# 콘크리트 구조물의 확률적 응답특성을 이용한 손상평가모델

Probabilistic Damage Assessment of Concrete Structures

오병환\* 이성로\*\* 윤철호\*\*\* 이성규\*\*\*

Oh, ByungHwan, Lee, SeongLo, Yoon ChulHo, Lee, SungKyu

## ABSTRACT

The concrete structures subjected to strong earthquakes may undergo hysteretic behavior and result in severe damage. The inelastic behavior and stiffness degradation due to seismic loading must be properly modeled. The present study proposes a realistic model to assess the structural damage of concrete structures under seismic loadings. The present model also takes into account the probabilistic nature of seismic loading and thus the randomness of motion.

### 1. 서론

콘크리트 구조물이 지진하중을 받을 때, 구조물은 비선형영역에서의 응답을 가지게 되며 이로 인해 심한 손상을 받을 수 있다. 또한 구조물의 응답은 이력거동을 나타내며 반복하중을 받게 됨에 따라 강도 및 강성이 감소하게 된다. 따라서 이러한 구조물을 정확하게 해석하기 위해서는 구조해석모델이 비선형, 비탄성, 이력거동 및 강성감소현상을 묘사할 수 있어야 한다.

일반적으로 지진하중을 받는 구조물의 비선형 응답은 시간이력에 의한 수치적분에 의해 얻을 수 있으나, 지진하중이 가지는 무작위성(randomness)으로 인해 같은 규모의 지반가속도에 대한 경우에도 시간이력이 다르면 그 응답도 매우 다르게 되므로 지진에 대한 응답은 반복되는 시간이력해석을 통해 얻을 수 있는 확률적특성으로 표시하게 된다. 그러나 이러한 반복적 시간이력해석(Monte Carlo calculations)은 비용이 많이 드는 단점이 있어 랜덤진동이론에 기초한 등가선형화방법을 이용하는 것이 합리적이다. 등가선형화방법은 추계학적 시스템에 대해 이력거동 및 강성감소현상을 쉽게 고려할 수 있다.

콘크리트 구조물이 지진하중을 받으면 항구적인 변형을 일으킬 수 있으며, 하중이 반복됨에 따라 손상이 누적되어 강성 및 저항능력을 상실함으로써 종국적으로는 파괴에 이르게 된다. 이러한 피로형태에서는 손상에 대한 지표를 응력이나 변형률크기, 주기횟수 등으로 나타내기 보다는 연성비(ductility), 에너

지소산(energy dissipation), 손상비(damage ratio), 누적소성변형(cumulative plastic deformation) 등으로 나타내는 것이 합리적이다.

반복하중을 받는 콘크리트 부재에 대한 손상은, 손상초기에 변형손상이 전체손상을 지배하나 손상이 누적됨에 따라 부재가 파괴에 도달하게 되면 강도손상이 전체손상을 지배하게 되므로 지진하중을 받는 구조물의 파괴는 강도손상에 의해 예측하는 것이 합리적인 바, 이러한 강도손상은 구조물의 강성감소와 이력에너지의 소산에 의해 표시할 수 있다. 콘크리트 구조물의 강도손상은 구조물 응답의 크기에 따라 다르며, 재하하중에 대한 응답은 확률적 특성을 가지고 있으므로 구조물의 파괴를 합리적으로 예측하기 위해서는 이러한 특성을 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 지진하중을 받는 구조물의 확률적 응답특성을 이용하여 누적손상을 확률적으로 계산하는 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 구조물 응답특성

#### 2.1 응답의 확률적 특성

지진가속도에서 첨두치의 통계적 분포를 살펴보면 멱급수 또는 멱급수와 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 따라서 이러한 하중을 받는 구조물의 첨두응답 역시 멱급수 형태의 유사한 거동을 한다고 기대할 수 있으며, 표준 멱급수 모델은 지진하중을 받는 구조물의 유효 첨두변위와 비탄성 첨두변위를 연구하는데 주로 사용될 수 있다. 반복하중을 받는 구조물의 전체 변위는 탄성부분과 비탄성부분으로 구분되는 바, 입력운동이 정상과정의 가우스분포를 가지고, narrow band random process 일 때의 선형구조계의 첨두응답 (변

\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 부교수

\*\* 정희원, 서울대학교 토목과 박사과정 수료

\*\*\*정희원, 한국원자력 안전기술원 토목구조 전문위원실

위)는 Rayleigh 분포를 가진다.

Shinozuka와 Yang은 입력운동이 비정상과 정인 경우에는 구조물의 첨두응답이 극치형태의 분포 (Weibull-like)를 가진다고 보고하였다. 한편, Vanmarcke와 Veneziano는 전체 변위중의 비탄성부분은 입력운동이 정상과정인 경우에 맥급수형태의 분포를 가진다고 보고하였다. 그러나, 지진하중이 비정상과정인 경우의 구조물의 비탄성 첨두응답분포는 정상과정인 경우와는 다르다.

Azevedo는 비탄성 영역에서의 구조물응답이 증가할 수록 낮은 주기의 구조물에서는 Weibull 거동을, 높은 주기의 구조물에서는 Exponential 거동을 나타낸다고 보고하였다.

이상에서의 연구결과에서 보면 비정상과정의 입력하중이 작용할 때의 구조물의 첨두응답(변위)에 대한 분포는 Weibull 분포에 의해 나타낼 수 있으며, 입력하중이 정상과정인 경우에도 비탄성응답에 대한 분포는 Weibull에 의해 표현할 수 있다.

## 2.2 구조물의 응답해석

### 2.2.1 지진하중의 모델링

지진은 부지특성을 고려하는 재해도분석 (hazard analysis)에 의해 최대지반가속도에 대한 초과확률을 모델링할 수 있고, 지반가속도에 대한 빈도개념을 도입함으로써 지진하중에 대한 구조물의 신뢰성평가 등에 유용하게 이용할 수 있다. 그러나 지진하중은 한정된 지진기록과 기록의 부정확성으로 모델링과정에서 많은 불확실성이 내포되어 확률적 모델을 이용하고 있다. 하중에 대한 불확실성은 최대지반가속도가 같지만 서로 다른 시간이력을 갖는 두개의 지진하중에 대한 구조물의 상이한 응답으로서 나타난다. 이것은 하중이력의 차이에 의한것으로 지반운동을 무작위과정 (random process)으로 표현함으로써 이를 설명할 수 있다.

### 2.2.2 구조해석 모델링

지진하중을 받는 구조물은 종종 비선형영역에서 응답을 하게 되며, 이러한 경우 매우 큰 손상을 입을 수가 있다. 또한 구조물의 응답은 이력거동을 가지며 반복되는 진동에 따라 구조물의 강도와 강성이 약화되기도 한다. 따라서 지진하중을 받는 구조물을 정확히 해석하기 위해서는 구조모델링에 비선형, 비탄

성 및 이력거동을 포함하여야 한다. 이러한 구조계의 강성감소를 모델링하기는 어렵지 않지만 임의 진동하중에 대한 구조계의 응답을 수식적으로 정확하게 얻을 수는 없어서 근사해법에 의존하게 된다. 그렇지 않을 경우에는 시간이력해석과 같이 운동방정식을 수치적분 하거나 응답의 통계적특성과 확률분포를 얻기 위해 반복되는 시간이력해석을 수행하여야 하는 바, 이러한 방법들은 시간이 많이 소요되고 비경제적이다.

철근콘크리트 구조물의 비선형거동을 고려한 응답특성을 구하기 위해서 근사해법인 등가선형화기법 ( equivalent linearization technique ) 을 도입하여 일계도 공분산행렬식 ( first - order differential covariance matrix equation ) 을 구성하면 식 (2.1)과 같으며, 구조부재의 강도 및 강성 감소현상 ( strength and stiffness degradation ) 을 구조계방정식 ( system equation ) 구성시 고려한다. 비선형 응답특성은 수치해석에 의해 구하게 되며, 이때 입력과정이 정상 (stationary) 인 경우는 구조계방정식이 Liapunov 행렬식으로 되어 반복법에 의해 해를 구하며, 비정상 (nonstationary)인 경우는 수치적분에 의해 해를 구한다.

$$[\dot{S}] + [G][S] + [S][G]^T = [B] \quad (2.1)$$

여기서,  $[G]$  = 등가선형계수를 포함하는 행렬,  $[S]$  = 구조물응답의 공분산행렬이다. 식 (2.1)을 이용하여 비정상과정의 입력하중이 재하되는 1-자유도 구조물에 대한 응답해석을 수행한 결과 (변위 및 속도에 대한 분산값)를 시간영역에서 도시하면 그림 1과 같다.

### 2.3 첨두응답의 확률분포

첨두변위의 최대값을  $Y_m$ 이라하면,  $Y_m$ 에 대한 누적확률분포는 다음과 같이 Weibull 분포 형태로 나타낼 수 있다.

$$F_{Y_m}(u) \cong \exp \left[ -\exp \left[ -K \left( \frac{u}{\sigma} - K \right) \right] \right] \quad (2.2)$$

여기서,  $K$ ,  $a$ ,  $\sigma$ 는 구조물의 응답에 의해 계산된다.

따라서  $Y_m$ 의 평균과 표준편차는 식 (2.2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{ym} = (K + 0.5772K^{1-a}) \cdot \sigma \quad (2.3)$$

$$\sigma_{ym} = 1.28\sigma / K \quad (2.4)$$

그림 2는 그림 1에서의 구조물 응답해석결과로부터 식 (2.2)에 의해 구한 침두응답의 확률분포를 모멘트-곡률 관계곡선상에 나타낸 것이다.

### 3. 콘크리트 손상모델

#### 3.1 손상의 형태

손상의 형태는 크게 변형손상 (deformation damage)과 강도손상 (strength damage)으로 구분할 수 있으며 손상의 형태에 따라 누적방법이 다르게 된다. 강도손상은 구조물의 비탄성 반복변형으로 인해 강도와 강성이 감소되고, 이력에너지가 소산되는 형태로 나타낼 수 있는 바, 손상을 예측하기 위해서는 하중반복에 대한 강도와 강성의 감소현상을 모형화하고 이력거동에 의한 에너지소산을 모형화하여야 한다. 구조물의 손상이 누적되어 파괴에 도달하게 되면 강도손상이 전체손상량을 지배하여 파괴예측에 적절하다. 변형손상은 구조물의 영구변형으로 인한 손상을 나타내며 구조물의 극한변형과 침두응답 (변위, 곡률 등)에 의해 손상을 예측할 수 있다.

기존의 손상의 누적은 하중의 시간이력과 응답특성을 고려하고 있으나 지진하중과 같은 무작위과정 (random process)에 대한 구조물 응답의 확률적 특성을 고려하지 못하고 있다.

#### 3.2 손상모델

구조물의 손상을 나타내는 모델이 여러 형태로 제시되었으며, 콘크리트 구조물에 적용 가능한 손상모델을 살펴보면 다음과 같다.

Lybas 와 Sozen 은 손상비  $D_R$ 을 초기접선 강성과 감소된 시컨트 강성비로 정의하였다.

Banon 등은 균열단면의 초기 휨강성과 최대변위에서의 감소된 시컨트 강성비로 휨손상비를 정의하였다. 휨손상비에 의해 강도와 강성의 감소현상을 고려할 수 있으나 반복되는 하중에 의해 소모되는 에너지로 인한 누적손상을 고려할 수 없다. 따라서 Banon은 추가로 정규 누적회전과 정규 소산에너지의 개념을 제안하여 누적손상의 영향을 고려하고자 하였다. 또한 구조물의 손상이 하중이력 뿐만 아니라 하중경로에 따라 변화하는 현상을 휨손상비와 누적 손상에너지로 표현하여 이에 의한 구조물의 파괴를 예측하고자 하였다.

Park과 Ang은 구조물의 최대변형과 반복하중에 따른 소산에너지의 향으로 구조물의 손상을 모델하였다.

$$D_e = \frac{\delta_{max}}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (3.1)$$

여기서,  $\delta_{max}$  = 구조물 최대변형,  $\delta_u$  = 단조하중하에서의 극한변형,  $Q_y$  = 구조물 항복강도,  $dE$  = 소산된 이력에너지의 증분,  $\beta$  = 반복하중효과 이다.

이 모델은 구조물의 손상상태를 변형과 소산에너지의 선형조합으로 표현하고 있으나 실험결과에 의하면 구조물의 손상이 이들의 비선형 형태로 표현하여야 합리적임을 보여주고 있다.

Chung은 수정된 Miner가설을 조합하여 손상지수를 제안하였다. 이 모델에서는 하중이력효과를 손상수정계수에 의해 고려하였으며 철근 콘크리트부재의 정,부모멘트에 따른 응답이 다르다는 것을 고려하였다.

이상에서의 손상모델들을 살펴보면, 손상예측을 합리적으로 하기 위해서는 하중이력과 응답특성을 고려하여야 함을 알 수 있다.

### 4. 손상의 확률론적 누적

#### 4.1 확률론적 누적손상

구조물의 에너지 소산능력은 변위 혹은 곡률의 수준에 따라 변화하므로 에너지 소산에 의해 구조물이 받는 손상은 침두변위의 분포에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 손상은 구조물 응답이 항복변위보다 클 때 발생하며 변위수준이 높을수록 손상정도가 크게 된다. 따라서 손상의 누적은 구조물 침두응답(곡률 혹은 변위)의 확률특성에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_t \nu[\phi_y] dt \cdot \int_{\phi} f[\phi_y] \cdot \Delta M(\phi) d\phi = n \cdot \overline{\Delta M} \quad (4.1)$$

여기서,  $\nu[\phi_y]$  = 곡률수준이 항복곡률을 초과하는 평균비율,  $f[\phi_y]$  = 구조물침두응답(곡률)의 확률분포,  $n$  = 곡률수준이 항복곡률을 초과하는 평균횟수,  $t$  = 입력하중 재하시간,  $\Delta M_i$  = 1회의 하중반복에 따른 강도저하를 나타낸다.

#### 4.2 구조물 응답과 손상관계

구조물의 강도저하는 입력하중이 항복하중을 초과하면서 시작되며 파괴하중에 다가갈수록 이러한 현상은 가속되는 바, 실험자료들

근거로 하여 1회 하중반복시 변위수준에 따른 강도저하를 다음과 같은 식으로 표현하였다. 그림 3에서 보면 첨두응답의 크기에 따라 강도저하의 크기가 변화함을 알 수 있다.

$$\Delta M = [(\phi_f - \phi_y)p(EI)_e + M_y - M_f] \left[ \frac{\phi_u - \phi_y}{\phi_f - \phi_y} \right]^{1.5} \quad (4.2)$$

여기서,  $p(EI)_e = \frac{M_u - M_y}{\phi_u - \phi_y}$   
 $M_y, \phi_y =$  항복시의 모멘트, 곡률,  
 $M_u, \phi_u =$  극한 모멘트, 곡률,  $M_f, \phi_f =$  파괴시의 모멘트, 곡률

#### 4.3 구조저항과 손상지수

구조물의 손상저항능력은 응답수준에 따라 변화하므로 첨두응답의 확률분포에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 따라서 손상저항능력의 기대값은 각 응답수준에 대한 저항능력과 응답의 발생빈도의 곱으로 나타낼 수 있다. 이를 식으로 나타내면 식(4.3)과 같으며, 첨두응답의 확률분포와 각 응답수준의 저항능력에 의해 결정됨을 알 수 있다.

$$E[M_a] = \int \phi f[\phi_y] \cdot M_a(\phi) d\phi \quad (4.3)$$

여기서,  $M_a(\phi) =$  응답수준에서의 손상저항 능력 (모멘트)

따라서 구조물의 손상지수는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\text{손상 지수, } DI = \frac{n \cdot \overline{\Delta M}}{E[M_a]}$$

여기서, 손상지수가 1 이면 구조물이 파괴에 이르는 것을 의미한다.

#### 5. 결론

불규칙적이고 불확실성이 많이 내포된 지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물이 비선형 거동을 하게 되면 이에 대한 응답을 정확하게 해석적으로 구하기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 이러한 거동을 비교적 정확하게 예측하고 또한 지진하중이 가지고 있는 불확실성을 고려하기 위해서 지진하중을 무작위과정 (random process)으로 모델하고 구조해석모델을 추계적으로 구성하여 수치적 근사해법에 의해 응답을 구하였다.

구조해석에서 얻어지는 응답에 대한 확률적특성을 분석하여 첨두응답 (변위, 곡률등)에 대한 확률분포를 구할 수 있으며, 이러한 특성을 고려하여 본 연구에서는 지진하중을 받는 콘크리트 구조물의 손상을 확률론적으로 누적하는 모델을 제시하였다.

#### 6. 참고문헌

- [1] Baber, T.T., and Wen, Y-K., "Random Vibration of Hysteretic, Degrading Systems," ASCE, Vol.107, No. EM6, December, 1981, p.1069-1087.
- [2] Banon, H., and Veneziano, D., "Seismic Safety of Reinforced Concrete Members and Structures," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, 179-193 (1982)
- [3] Chung, Y.S., Meyer, C., and Shinozuka, M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Members," Technical Report NCEER-87-0022, State University of New York at Buffalo, 1987.
- [4] Park, Y.J., Ang, A. H-S., and Wen, Y. K., "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete buildings," ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.4, April, 1985, pp.740-757.
- [5] Yang, J.N., and Liu, S.C., "Distribution of Maximum and Statistical Response Spectra," ASCE, Vol.107, No. EM6, December, 1981, pp.1089-1103.

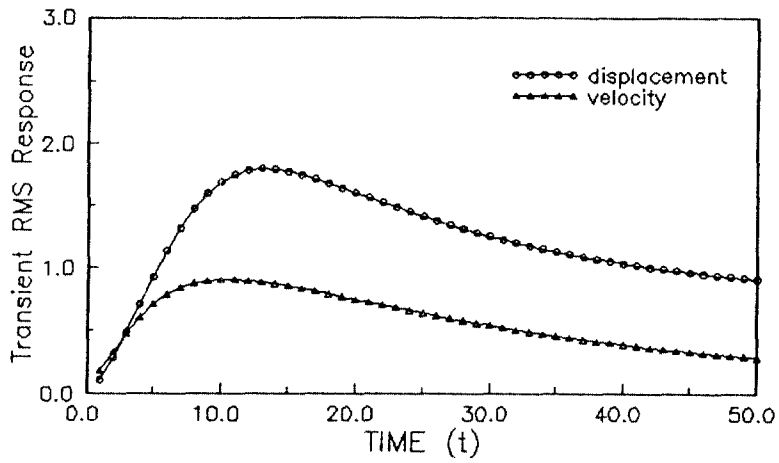


그림 1. 비정상 지진하중에 대한 구조물의 응답

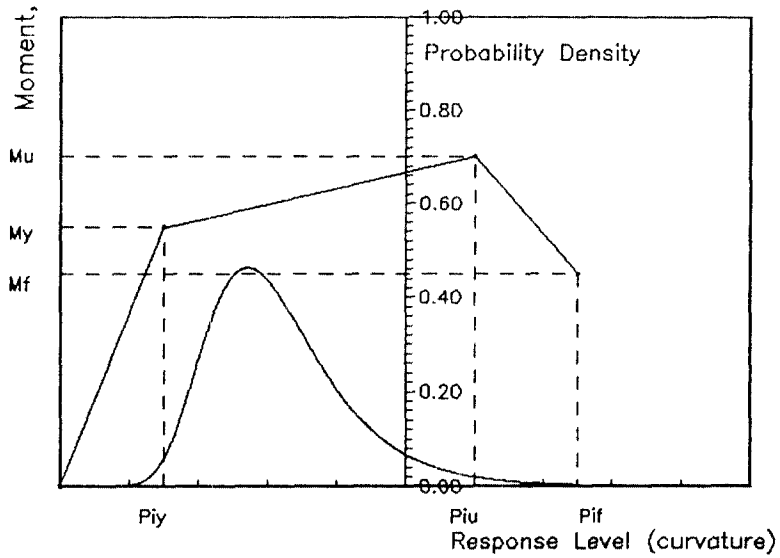


그림 2. 구조물 첨두응답의 확률분포

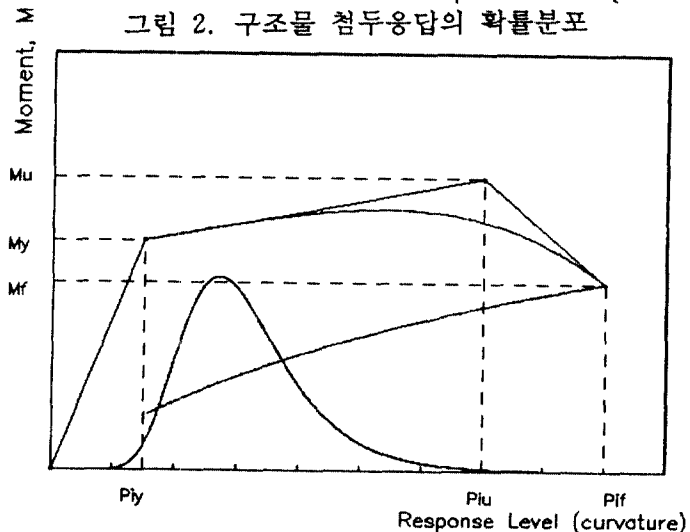


그림 3. 구조물의 응답수준에 따른 손상 및 손상저항능력