

# 철근콘크리트 구조물의 지진 위험성 분석에 관한 연구

## A Study on the Risk Analysis of the RC Structure Subjected to Seismic Loading

이성로\*

Lee, Seong Lo

---

### 요 약

지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 안전성은 확정적 이론에 의한 평가보다 지진하중이 가지는 불확실성과 철근콘크리트의 이력특성을 고려하여 평가하는 것이 합리적이다. 확정적 이론에 의한 내진 구조물의 안전성 평가는 확률변수의 영향 등을 충분히 고려하기가 쉽지 않은데, 이러한 것들을 고려하기 위해서는 신뢰성이론 및 랜덤진동이론을 도입할 필요가 있으며 이에 의해 합리적으로 안전성을 검토하거나 확보할 수 있다.

본 연구에서는 철근콘크리트 뼈대구조물의 이력거동을 고려한 추계적 지진응답을 이용하여 지진손상 정도와 위험성을 평가하고자 하였으며, 지진하중을 받는 뼈대구조물의 파괴확률을 계산하는 과정을 제시하였다.

### Abstract

Seismic safety of RC structure can be evaluated by numerical analysis considering randomness of earthquake motion and hysteretic behavior of reinforced concrete, which is more rational than deterministic analysis. In the safety assessment of aseismatic structures by the deterministic theory, it is not easy to consider the effects of random variables but the reliability theory and random vibration theory are useful to assess seismic safety with considering random effects.

This study aims at the evaluation of seismic damage and risk of the RC frame structure by stochastic response analysis of hysteretic system and then the calculation stages of the probability of failure are presented.

**Keywords :** RC frame structure, seismic damage and risk, randomness, stochastic response analysis, hysteretic system, probability of failure

---

\* 정회원, 목포대학교 토목공학과 조교수

• 본 논문에 토의를 1994년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 1995년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 지진신뢰성은 안전성 평가수단으로 이용될 수 있는데, 일반적으로 반복하중에 의한 철근콘크리트의 강성 및 강도 저감현상과 비선형성을 고려하지 않고 있는 바, 균열 및 반복하중으로 인한 강성감소 등을 효과적으로 묘사할 수 있는 해석방법과 이로부터 손상의 누적으로 인한 구조물의 파괴현상을 연구함으로써 내진 구조물의 지진위험도를 보다 실제적으로 예측하는 방안이 마련될 필요가 있다.

지진하중을 받는 철근 콘크리트 구조물의 안전성은 하중과 저항의 관계에서 평가할 수 있다. 지진하중은 극심한 자연환경의 하나로 지진강도, 진동수 및 하중재하시간 등으로 특징지워지며 진앙지로부터 구조물까지 전달되는 과정에서 많은 요소들에 의해 영향을 받는다. 따라서 지진하중효과는 수학적으로 정확하게 모델링하기가 쉽지 않으며 모델링과정에서 많은 불확실성을 내포하게 된다. 철근콘크리트 구조물의 저항 역시 재료특성으로 인해 수학적 모델링에서 불확실성이 존재한다. 따라서 지진하중과 구조물저항을 확률변수로 취급하여 지진하중효과가 저항을 초과하는 확률을 계산함으로써 구조물의 지진취약도를 평가할 수 있는데, 랜덤진동이론에 의하면 동적 지진응답과 철근콘크리트 구조물의 파괴기구에 의해 파괴확률이 결정된다.

따라서 본 연구에서는 지진하중을 받는 철근콘크리트 뼈대구조물의 지진신뢰성을 평가하기 위해, 지진하중의 랜덤성으로 인한 구조물의 응답특성을 추계적 해석방법에 의해 분석하고 이를 바탕으로 반복하중에 의한 누적손상을 평가하여 신뢰성이론에 의해 비선형기동을 하는 구조물의 한계상태 파괴확률을 계산하고자 한다.

## 2. 지진하중 및 지진응답

### 2.1 Kanai-Tajimi Spectrum

일반적으로 제하중을 받는 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 자연현상을 수학적으로 나타

내는데 있어 발생할 수 있는 불확실성들을 합리적으로 고려하여 모델링을 한후, 구조해석에 의해 얻어지는 결과를 신뢰성이론에 의해 한계상태를 벗어나는 파괴확률을 구하는 과정이 필요하다.

지진에 의한 지반운동의 시간이력은 필터처리된 가우스 shot noise 랜덤과정으로 모델링할 수 있으며 정상 white noise와 Kanai filter에 의한 지반운동의 PSD(power spectral density)는 식 (1)과 같다.

$$S_{\Delta\Delta}(\omega) = S_0 \frac{1+4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2\right]^2 + 4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2} \quad (1)$$

여기서,  $S_0$ 는 필터처리가 되지않은 정상 white noise의 PSD이며,  $\omega_g$ ,  $\zeta_g$ 는 필터의 진동수와 감쇠비이다.

### 2.2 구조물의 지진응답특성

지진하중을 받는 구조물의 손상을 평가하기 위해서는, 해석모델에서 구조부재의 비선형 이력기동 및 강성저감효과를 고려하고 있어야 한다. 이러한 구조계의 강성감소를 모델링하기는 어렵지만 임의 진동하중에 대한 구조계의 응답을 수식적으로 정확하게 얻을수는 없어서 근사해법에 의존하게 된다. 자주 이용되는 근사해법으로는 등가선형방법이 있는데, 이 방법은 추계학적 비선형 미분방정식을 선형화된 방정식으로 치환하는 것으로, 다자유도 구조계의 방정식 구성이 간편하며 구조물응답을 공분산 행렬의 형태로 얻을 수 있어 임의 진동하중에 대한 응답의 추계적 특성을 얻는데 편리하다<sup>19)</sup>.

랜덤 진동이론에서 구조물의 최대 응답은 통계적 변수로 취급하고 있으나 이에 대한 정확한 예측을 하지 못하고 있다. 비정상과정을 가지는 지진하중에 대한 최대 응답의 분포는 극치이론을 이용하여 근사적으로 얻을 수 있는데 지진하중이 정상 랜덤과정으로 모델링하는 경우에도 비정상과

정의 경우와 유사하게 응답분포를 얻을 수 있다.

응답의 통계치는 등가선형화 방법을 이용하여 구조물의 운동방정식을 공분산 행렬식으로 구성함으로써 얻는다. 이러한 응답특성은 응답의 확률적 성질을 구조물의 신뢰성평가에 이용하기 위하여 여러 측면에서 분석된다.

### 2.3 최대응답의 확률분포

구조물의 최대응답은 지진하중하에서의 구조물의 해석 및 설계에서 가장 중요한 정량치로서, 일반적으로 구조물 응답의 최대값은 응답스펙트럼에 의해 결정되는 여러 운동모드의 최대응답치를 중첩하므로써 얻을 수 있으나, 지진하중이 추계적 과정으로 모델링될 때의 구조물의 최대응답은 통계적 변수로 취급하여 분포특성을 얻을 수 있다.

비정상과정의 최대응답에 대한 근사적 분포는 다음에서 제시되고 있다.

시간영역 ( $T_1, T_2$ )에서 응답  $Y(t)$ 의 절대최대값을  $Y_m$ 이라하면  $Y_m$ 의 누적분포함수  $F_{Y_m}(u)$ 은 Gumbel 형태의 식 (2)에 점근적으로 접근함을 알 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$F_{Y_m}(u) \cong \exp[-\exp[-K^{-1}(\frac{u}{\sigma} - K)]] \quad (2)$$

여기서  $K$ 는 식 (3)과 같으며,  $v(t)$ 은 응답  $Y(t)$ 의 零位평균통과율이다.

$$K \cong [\alpha \ln \int_{T_1}^{T_2} v(t) dt]^{-1/2} \quad (3)$$

식 (2)에서의 Weibull 상수  $\alpha$ 와  $\sigma$ 은 시간구간 ( $T_1, T_2$ )에서 극치  $\eta$ 의 평균  $\mu_\eta$ 와 분산계수  $V_\eta$ 의 크기에 의해 결정된다<sup>(11)</sup>.

응답의 절대최대값  $Y_m$ 의 평균과 표준편차는 다음과 같다.

$$\mu_{Y_m} = (K + 0.5772K^{-1})\sigma \quad (4)$$

$$\sigma_{Y_m} = \frac{1.28\sigma}{K^{2-1}} \quad (5)$$

한편, 정상과정의 최대응답분포에서  $\alpha$ 는 2.0 (Rayleigh 분포)이 된다.

## 3. 이력거동을 하는 뼈대구조물의 추계적 해석

### 3.1 비선형 구조해석 모델링

본 연구에서는 랜덤진동이론(random vibration theory)에 의해 운동방정식을 구성하고, 등가선형화기법(equivalent linearization technique)을 도입하여 뼈대구조물의 추계적 응답해석을 수행하고자 하였다.

뼈대구조물의 비선형 기동 및 파괴기구는 접합부에서 발생하는 힌지에 의해 고려할 수 있다. 부재에 대한 변형성분은 부재의 탄성기동에 대한 부분과 비선형기동에 대한 부분으로 나눌 수 있으며, discrete hinge model에서는 힌지에서 비선형 기동을 가지고 있다고 보고 있다<sup>(12)</sup>.

뼈대구조물의 기동을 그림 1에서와 같이 discrete hinge model로 이상화하여 부재력,  $F$ 를 전체좌표계의 변위와 힌지의 변위로 나타내면 식 (6)과 같다. 여기서 전체좌표계의 변위는 수평, 수직변위와 회전변위로 구성된다.

$$F = K_L u - K_H \bar{u} \quad (6)$$

여기서,  $F$  : vector of member end forces

$u$  : global displacements

$\bar{u}$  : hinge displacements

$K_L, K_H$  : stiffness matrices

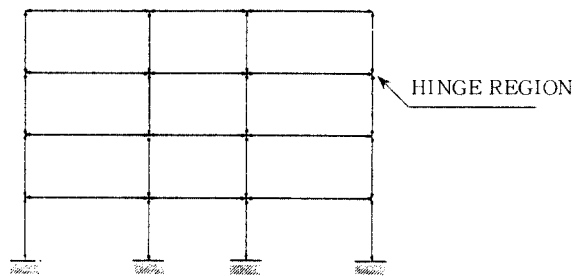
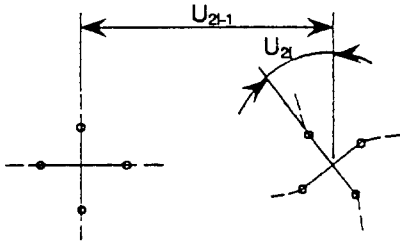
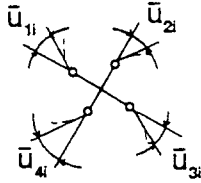


Fig. 1 Discrete hinge model of planar frame structure

식 (6)에서 뼈대구조의 변위  $u, \bar{u}$ 는 아래의 그림 2에서 나타낸 예와 같이 절점과 소성힌지에서 자유도에 대응된다. 그림에서  $u_{21}, u_{11}$ 은 횡변위  $u_T, u_{22}$ 는 회전변위  $u_R$ 을 나타낸다.



DOFs for Joint Global Generalized Displacement



DOFs for Hinge Deformation  $\bar{u}$

Fig. 2 Discrete hinge model degrees of freedom

부재력  $F$ 를 강도범에 의해 구성되는 강도행렬로 표시하면 다음과 같이 수평, 수직방향과 회전방향 그리고 힌지의 부재력으로 나타낼 수 있다.

$$F_T = K_{TT}u_T + K_{TR}u_R - K_{TH}\bar{u} \quad (7)$$

$$F_{Re} = K_{Re}u_T + K_{Re}u_R - K_{RHe}\bar{u} \quad (8)$$

$$F_{RH} = K_{RH}u_T + K_{RH}u_R - K_{RH}\bar{u} \quad (9)$$

여기서,  $F_T$  = member end shears

$F_{Re}$  = member end moments for elements not ending at hinges

$F_{RH}$  = member end moments at hinges

윗식에서 회전방향의 부재력  $F_R$ 은 다음식과 같다.

$$F_R = F_{Re} + F_{RH} = K_{RT}u_T + K_{RR}u_R - K_{RH}\bar{u} \quad (10)$$

여기서, 힌지의 변위에 대한 비선형성은 이력(hysteresis) 성분  $z$ 에 의해 정의할 수 있으므로 식(11)과 같은 이력법칙(hysteresis rule)을 도입하여 운동방정식 구성시 이용한다.

$$\dot{z}_{ij} = \{A_i \bar{u}_{ij} - v_i [\beta_i |\bar{u}_{ij}| |z_{ij}|^{n-1} z_{ij} + \gamma_i \bar{u}_{ij} |z_{ij}|^m]\} / \eta_i \quad (11)$$

위의 식에서 철근콘크리트 구조물의 비선형이력 거동을 이력곡선식에서 곡선의 형상을 조절하는 계수  $\beta_i, \gamma_i, A_i, \eta_i$  등에 의해 나타낼 수 있으며, 이러한 계수들은 부재의 단면특성이 주어지면 역학적으로 얻을 수 있는 모멘트-곡률 관계식으로부터 결정하게 된다<sup>(3, 8, 14)</sup>. 또한 이력곡선에서 강도 및 강성의 감소현상은 소산에너지의 함수에 의해 나타내는  $v_i, \eta_i$  등의 계수로 나타낸다<sup>(3, 8)</sup>.

식 (11)은 등가선형화 기법에 의해 식 (12)와 같이 나타낸다.

$$\dot{z} = C_e \dot{\bar{u}} + K_e z \quad (12)$$

여기서,  $C_e, K_e$  = equivalent linearization coefficients

힌지에서의 부재력  $F_{ij}$ 는 힌지의 변위  $\bar{u}$ 와 이력 성분  $z$ 에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$F_{ij} = \alpha_i K_i \bar{u}_{ij} + (1 - \alpha_i) K_i z_{ij} = K_p \bar{u} + K_v z \quad (13)$$

여기서,  $K_i$  = initial tangent stiffness

$\alpha_i$  = ratio of postyield stiffness to preyield stiffness

구조물의 추계적 지진응답해석에서 이력기동을 고려하면 기존의 유한요소해석에 비해 자유도가 증가하므로, 해석을 간편하게 하기 위해서는 운동방정식 구성시의 자유도를 수평, 수직방향과 discrete hinge의 두가지만 고려하고 부재의 회전방향에 대한 자유도는 절점에 대한 다음의 평형방정식을 이용하여 위의 두가지 자유도로 대체한다.

$$T_{RS} F_R = 0 \quad (14)$$

여기서,  $T_{RS}$  = joint rotational equilibrium matrix

구조물의 추계적 응답을 구하는 시스템방정식은 운동방정식과 이력법칙을 이용하여 구성할 수 있다.

구조물의 운동방정식은 식 (15)와 같다.

$$\ddot{u}_T + M^{-1} C_T \dot{u}_T + M^{-1} T_{st} F_T = -i \ddot{\xi}_g \quad (15)$$

여기서,  $M$ =mass matrix

$C_t$ =viscous damping matrix

$T_{st}$ =transformation matrix to sum  
the appropriate shears

$\ddot{\xi}_\beta$ =base acceleration

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} \dot{\bar{u}} \\ z \\ u_R \\ F \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} u_T \\ \dot{u}_T \\ \bar{u} \end{pmatrix} = T \cdot V \quad (19)$$

또한 소성현저에서의 이력저동은 수평변위  $u_T$ 와 힌지변위  $\bar{u}$ 에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = C_1 u_T + C_2 \bar{u} \quad (16)$$

여기서,

$$C_1 = K_Y^{-1} [K_{RT_H} + K_{RR_H} (T_{RS} K_{RR})^{-1} T_{RS} K_{RT}]$$

$$C_2 = K_Y^{-1} [-K_{RH_H} - K_\rho + K_{RR_H} (T_{RS} K_{RR})^{-1} T_{RS} K_{RT}]$$

추계적 지진하중을  $\ddot{\xi}_\beta$ 라 하면 위의 운동방정식은 State Vector,  $V = \{ u_T^T \dot{u}_T^T \bar{u}^T \}^T$ 에 의해 식 (17)과 같이 지진응답에 대한 공분산 행렬식으로 재구성되며<sup>(4,9)</sup>, 이력곡선식과 함께 식 (18)과 같은 공분산행렬,  $S_{VV} = E[V(t) V^T(t)]$ 의 항으로 나타내게 된다. 식 (18)에서  $[B]$ 는 지진하중을 나타내는 항으로 지반변수  $u_g$ 가  $V$ 에 추가됨으로써 지반운동을 고려하게 된다.

$$\dot{V} + GV = -\hat{i} \ddot{\xi}_\beta \quad (17)$$

여기서,  $\hat{i} = \{0^T 1^T 0^T\}^T$

$$[\dot{S}] + [G][S] + [S][G]^T = [B] \quad (18)$$

### 3.2 수치해석

위의 식 (18)은 IMSL의 DGEAR subroutine을 이용하여 수치해석할 수 있는데<sup>(8)</sup>, 행렬  $[G]$ 의 성분이 각 해석단계에서 이전의 해석결과에 따라 갱신되어야 하므로 이를 구하기 위한 관계식을 유도하여야 한다. 식 (19)는 행렬,  $[G]$ 의 주요성분인  $K_e$ ,  $C_e$ 을 매 해석단계에서 얻기위한 관계식이다.

따라서,  $S_{VV} = TS_{VV}T^T$ 이 성립하여  $S_{VV}$ 에 의해  $S_{VV}$ 를 구하게 되며 이로부터  $E[\dot{u}_{ij}^2(t)]$ ,  $E[z_{ij}^2(t)]$ ,  $E[\dot{u}_{ij}(t) \cdot z_{ij}(t)]$ 의 세성분에 대한 정보를 얻을 수 있고 이를 이용하여 다음단계의 반복수치해석을 수행할 수 있다<sup>(4,14)</sup>.

이상에서 구한 해,  $S_{VV}$ 는 지진응답의 최대값에 대한 확률분포를 구하는데 이용된다<sup>(13)</sup>.

## 4. 손상평가 및 한계상태 파괴확률

### 4.1 지진손상 평가

강진을 받고 있는 철근콘크리트 구조물은 반복 변형을 하게되며 종종 항구적인 손상을 입을 수가 있다. 이로 인해 구조물의 구성부재는 강성과 하중저항능력의 대부분을 상실하여 종국적으로 파괴를 유발하게 된다.

구조물의 손상은 크게 강도손상 및 변형손상으로 구분하며 손상의 정도를 평가하는 방법은 여러 가지가 있는 바, 저빈도 피로파괴(low cycle fatigue failure)에서는 변위, 변형률 등으로 표시되는 변형손상에 의한 파괴예측보다 누적손상량, 비선형 소산에너지, 손상비 등으로 나타내는 강도손상에 의한 파괴예측이 합리적이다<sup>(8)</sup>. 즉, 구조물이 반복하중에 의해 손상을 받을 때, 초기의 손상은 주로 변형손상에 의해 지배받는다. 이것은 연성손상의 개념과 일치하나, 손상이 누적되어 구조물이 파괴에 이를 때에는 변형손상의 변화가 거의 없는 상태에서 강도손상에 의해 손상지수가 영향을 받게 된다. 따라서 강도손상이 누적손상에 의한 구조물의 파괴를 잘 예측할 수 있다. 이것은 신뢰성 평가에서 제2 모멘트기법에 의해 신뢰성지수를 산정할 때, 평균 2차 모멘트법보다 불변 2차 모멘트법이 보다 합리적이기 때문이다<sup>(11)</sup>.

일반적으로 내진구조물의 손상은 피로에 의한

누적의 형태를 가지며 구조물의 저항능력 뿐만 아니라 침투응답의 최대값분포와 지진응답의 항복 수준 초과수에 의해 영향을 받는다. 따라서, 본 연구에서는 추계적 지진응답 해석결과에 의해 구조물의 손상을 평가하였다.

구조부재에서 단일 하중주기에 대해 주어진 곡률  $\phi$ 에 대한 손상의 평균을  $\mu_{\Delta M} \cdot n$ , 응답의 항복수준 평균초과수를  $n$ 이라 하면 누적손상량은  $\mu_{\Delta M} \cdot n$ 으로 나타내며, 손상저항능력  $\mu_{Ma(\phi)}$ 는 식 (21)과 같이 나타낸다<sup>(8, 12)</sup>.

$$\int_0^t v_{\phi y} dt \cdot \int_{\phi} f_{\phi y} \cdot \Delta M(\phi) d\phi = \mu_{\Delta M} \cdot n \quad (20)$$

$$\int_{\phi} f_{\phi y} \cdot M_a(\phi) d\phi = \mu_{Ma(\phi)} \quad (21)$$

여기서,

$\Delta M(\phi)$  = strength drop in one load cycle for some curvature  $\phi$

$v_{\phi y}$  = upcrossing rate over yield curvature

$f_{\phi y}$  = probability distribution of maximum curvature beyond yield level

$n$  = mean upcrossing number over yield level

$t$  = loading duration time

$M_a(\phi)$  = allowable moment up to failure for some curvature  $\phi$

구조부재의 손상지수 DI는 식 (22)와 같이 계산하며, 구조물의 손상지수,  $D_T$ 는 구조물을 구성하는 각 부재의 손상을 소산에너지의 비로 표시하는 가중치를 곱한 가중평균으로 계산한다<sup>(8, 10, 14)</sup>.

$$DI = \frac{\mu_{\Delta M} \cdot n}{\mu_{Ma(\phi)}} \quad (22)$$

#### 4.2 손상지수를 이용한 한계상태 파괴확률<sup>(8)</sup>

신뢰성이론에서 구조물의 파괴를 나타내는 한계상태는 비선형 영역에서 정의하여야 하며 따라서 응답해석도 비선형 거동을 포함하여야 한다. 그러므로 비선형 응답해석의 결과를 이용한 손상지수의 산정은 한계상태를 정의하는데 도움을 준다.

본 연구에서는 지진하중을 받는 구조물의 한계상태 파괴확률을 계산하기 위해 한계상태를 식 (23)에서와 같이 누적손상지수로 나타냈다.

$$g(P_a) = \ln(D_T(P_a)) \quad (23)$$

여기서,

$g(\quad)$  = limit state function

$D_T(P_a)$  = global damage index at PGA,  $P_a$

신뢰성평가에서 하중과 저항에 대한 불확실성은 하중과 저항을 정의하는 종속변수의 함수형태로 근사적으로 결정하는데, 본 연구에서는 손상지수의 불확실성량의 지배적인 종속변수로 응답의 변동성과 손상누적에 이용되는 모멘트-곡률곡선의 변동성을 선택하였다. 따라서 식 (23)과 같은 한계상태에서의 손상지수의 변동성은 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega_{DI} = \sqrt{\Omega_R^2 + \Omega_M^2} \quad (24)$$

여기서,

$\Omega_{DI}$  = C.O.V. of damage index

$\Omega_R$  = C.O.V. of seismic response

$\Omega_M$  = C.O.V. of moment-curvature relationship

위의 식에서  $\Omega_R$ 은 식(4)와 (5)의 최대응답의 표준편차와 평균비에 의해 구하며,  $\Omega_M$ 은 모멘트-곡률곡선을 정의하는데 필요한 항복모멘트 및 곡률, 극한모멘트 및 곡률에서의 변동성으로 구하게 된다.

손상평가에 의해 계산된 손상지수를 이용하여 비선형 이력거동을 하는 구조물의 한계상태 파괴확률을 계산할 수 있는데, 랜덤성만 고려하는 경우 주어진 침투 지반가속도  $P_a$ 에 대한 조건부 파괴확률  $f_0$ 를 식 (25)와 같이 구할 수 있다. 구조부재의 한계상태 파괴확률은 식 (25)에서  $D_T(P_a)$ 를 부재손상지수  $DI(P_a)$ 로 치환하여 계산할 수 있다.

$$f_0 = \Phi \left[ \frac{\ln[D_T(P_a)]}{\Omega_{D_T}} \right] \quad (25)$$

여기서,

$\phi[\ ]$  = standard normal probability distribution

$\Omega_{r,D_T}$  = randomness of  $D_T$

$D_T(P_a)$  = global damage index at PGA,  $P_a$

또한 하중과 저항의 불확실성에 의해 한계상태 파괴확률에 대한 신뢰구간을 정의할 수 있으며, 내재된 랜덤성으로부터 불확실성을 명백하게 분리할 수 없는 파괴확률의 최우추정(best estimate)치를 계산하기 위해서는 식 (25)에서  $\Omega_{r,D_T}$ 를 랜덤성과 불확실성의 SRSS로 정의되는 복합 변동성으로 치환하여 사용할 수 있다<sup>[7]</sup>.

### 5. 구조물의 손상 및 한계상태 파괴확률 계산

뼈대구조의 지진하중에 대한 손상 및 파괴확률을 계산하는 일련의 과정을 나타내기 위해서, 그림 3에서와 같이 접합부의 거동을 소성힌지로 모델링한 뼈대구조물<sup>(6)</sup>을 해석예제로 선택하였으며, 그림 4는 해석에 이용된 거동과 보의 단면성질을 나타낸 것이다.

지진하중을 표 1에 나타낸 바와 같이 식 (1)의 Kanai-Tajimi Spectrum과 Amin & Ang type의

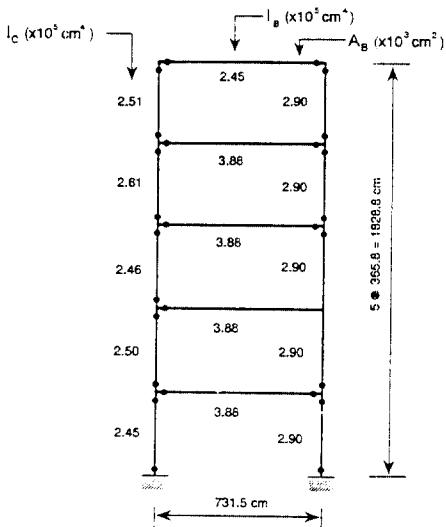


Fig. 3 Analysis model of planar frame structure

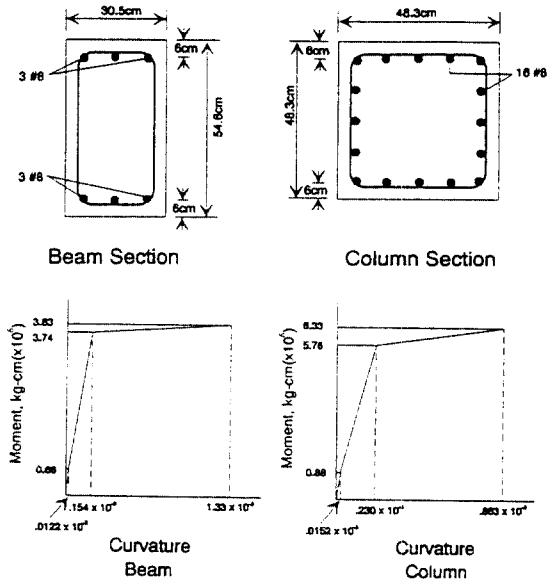


Fig. 4 Section properties of structural member

포락함수에 의해 비정상과정으로 모델링한 후 식 (18)의 방정식을 수치해석함으로써 지진응답을 구할 수 있었는데, 결과로는 응답의 시간이력, 각 층의 상대변위, 힌지의 회전변위 등이며, 이로부터 응답의 최대값에 대한 확률분포를 식 (2)에 의해 구하였다<sup>(13)</sup>.

Table 1 Characteristics of Earthquake Load

Spectrum	Effective Duration	$\zeta_g$		$\omega_g$	Envelope Type
		Mean	COV		
Kanai Tajimi	10sec	0.6	0.4	$5\pi$	Amin & Ang Type

그림 5는 0.5g의 비정상과정의 지진하중을 받는 구조물의 각 층별 공분산응답이력을 나타낸 것이고, 그림 6은 1층의 거동과 거더부분의 힌지에 대한 응답이력을 나타낸 것이다. 이러한 응답이력을 이용하여 지진응답의 최대값에 대한 확률분포를 그림 7, 8, 9에서 각각 나타내었다.

손상평가는 지진응답의 최대값에 대한 확률분포(그림 7, 8, 9)를 이용하였으며, 식 (22)에 의해 손상지수를 계산하였다. 그림 10은 지진하중이 0.3g, 0.5g, 0.7g인 경우에 대한 뼈대구조물의 힌지

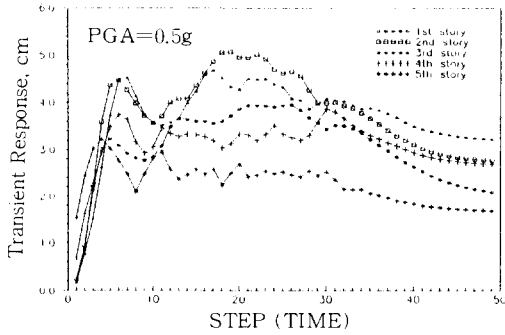


Fig. 5 RMS displacement of the structure (pga=0.5g)

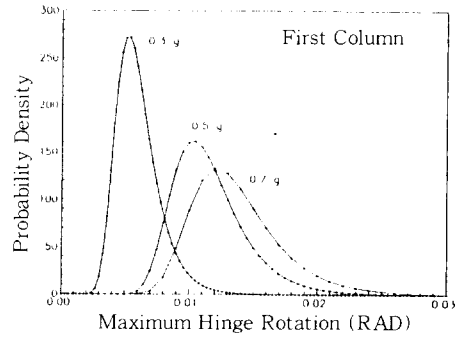


Fig. 9 Probability distribution of maximum rotation at the several pga level

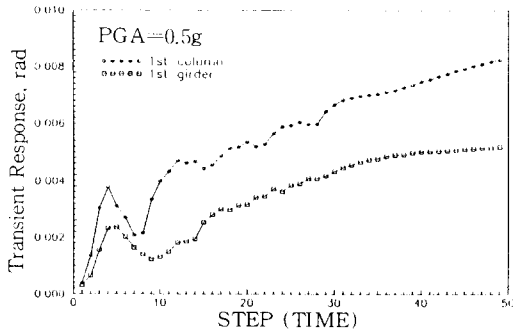


Fig. 6 RMS rotation of of the discrete hinge (pga=0.5g)

부분에서의 누적 손상지수  $D_I$ 와 전체손상지수  $D_T$ 를 나타낸 것으로, 지진하중의 크기가 증가함에 따라 1층과 3층 기둥부분에서 손상이 집중되고 또한 손상의 누적이 가속되는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상은 기둥의 단면 2차모멘트가 보에 비해 작으며 특히 1층 및 3층의 경우가 작으므로 인해 생기는 것으로 판단된다. 즉, 하중의 증가에 따른 구조물의 손상은 강성이 작은 부분에 집중되는 것을 알 수 있다.

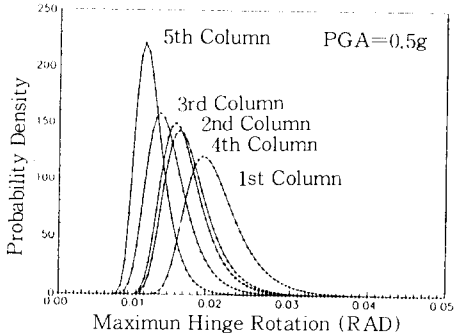


Fig. 7 Probability distribution of maximum rotation of column (pga=0.5g)

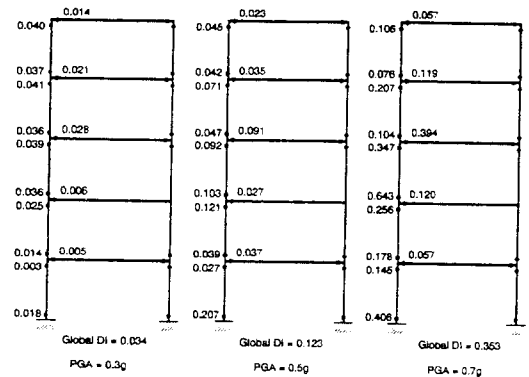


Fig. 10 Damage index at discrete hinge of frame structure

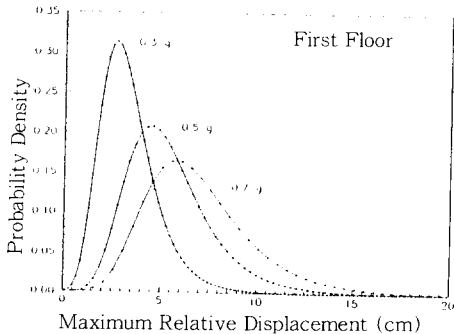


Fig. 8 Probability distribution of maximum displacement at the several pga level

구조물 힌지부분에서의 한계상태 파괴확률은 손상지수  $D_I$ 를 식 (25)에 대입하여 계산할 수 있으며, 구조물의 조건부 한계상태 파괴확률은 전체 손상지수  $D_T$ 를 이용하여 계산하는데 하중의 크기에 따라 각각  $pga = 0.3g$ 에서는  $2.336 \times 10^{-12}$ ,  $pga = 0.5g$ 에서는  $2.766 \times 10^{-7}$ ,  $pga = 0.7g$ 에서



는 0.015의 값을 나타내고 있다. 이때의  $D_T$ 에 대한 C.O.V.는 각각 0.4887, 0.4135, 0.4802 이다. 이러한 지진하중 크기에 따른 조건부 한계상태 파괴확률은 구조물의 부지특성에 따라 결정되는 지진재해도(seismic hazard)와 회선적분하여 구조물의 파괴확률을 결정하는데 이용되므로<sup>(1, 7, 11)</sup>, 지진하중은 지진재해도에서 고려하는 지반가속도 크기의 상,하한치 구간내의 모든 값들을 포함해야 한다. 즉, 본 연구에서는 0.3g, 0.5g, 0.7g의 세값을 예로 들어 조건부 파괴확률을 계산하였지만, 실용적으로 이용하기 위해서는 특정부지의 지진재해도를 결정 한 후 고려해야 할 상,하한치내의 지진하중에 대한 파괴확률들을 계산해야 구조물의 파괴확률을 정량화할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 지진하중을 받는 뼈대 구조물의 파괴확률을 계산하는 과정을 체계적 지진응답해석, 최대응답의 확률분포 결정, 손상평가, 파괴확률 계산 등 각 단계별로 기술하였으며, 뼈대구조물에 대해 해석과정을 예시하였다. 지진하중의 변동성과 철근콘크리트 구조물의 비선형 이력거동을 고려하기 위해 랜덤진동이론과 등가선형화기법을 도입하여 운동방정식을 공분산행렬식으로 재구성하였고, 수치해석을 통하여 얻은 응답의 공분산치를 이용하여 최대응답의 분포를 결정할 수 있었다. 또한 최대응답의 확률분포를 이용하여 지진손상을 평가하였으며 구조물의 한계상태를 손상지수로서 정의하여 파괴확률을 계산하였다.

이상의 지진하중에 대한 파괴확률 계산은 지진재해도와 함께 구조물의 지진에 대한 위험성을 판단하는데 이용될 수 있는데, 특히 파괴확률 계산시 손상지수를 이용함으로써 강진에 대한 구조물의 파괴현상을 적절히 묘사하도록 하였으며 응답의 확률분포로부터 변동성을 정량화하도록 하였다.

## 감사의 글

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Ang, A. H-S., and Tang, W. H., "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", Volume 1 and 2, John Wiley & Sons, Inc., 1975.
2. Azevedo, J.J.R.T., "Characterization of Structural Response to Earthquake Motion," Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, Stanford University, August, 1984.
3. Baber, T. T. and Wen, Y-K., "Stochastic Equivalent Linearization for Hysteretic, Degrading, Multistory Structures," Civil Engineering Studies, SRS no. 471, University of Illinois, Urbana, IL, 1980.
4. Baber, T., and Wen, Y-K., "Stochastic Response of Multistory Yielding Frames," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, 1982, pp403-416.
5. Banon, H., and Veneziano, D., "Seismic Safety of Reinforced Concrete Members and Structures," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, 179-193 (1982)
6. Humar, J., "Seismic Response of Reinforced Concrete Frames," ASCE, Vol.107, No. ST7, July, 1981, pp.1215-1232.
7. Kennedy, R.P., and Ravindra, M.K., "Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies," Nuclear Engineering and Design 79, pp. 47-68, 1984.
8. Lee, S. L., Seismic damage assessment and fragility analysis of reinforced concrete structures, Ph. D. Thesis, Seoul National University, 1992.
9. Lin, Y.K., "Probabilistic Theory of Structural Dynamics," McGraw-Hill, 1967.
10. 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.
11. Yang, J.N., and Liu, S.C., "Distribution of Maximum and Statistical Response Spectra," ASCE, Vol.107, No. EM6, December, 1981, pp.1089-1103.
  12. 오병환, 이성로, 윤철호, 이성규, "콘크리트 구조물의 확률적 응답특성을 이용한 손상평가모델," 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제 3권 2호, 1991. 11. 9, pp.119-123.
  13. 이성로, 윤철호, 오병환, 장승필, "구조물의 지진 안전성평가를 위한 추계적 지진응답해석," 대한토목학회 학술발표회 개요집, 1993. 10. 23. pp. 215-218.
  14. 이성로, 원전구조물 지진취약도 평가방법 연구, KINS/HR-075, 한국원자력안전기술원, 1993. 12.
- (접수일자 : 1994. 8.16)