취약도 해석을 위한 철근콘크리트 교각의 지진손상 평가인자 결정
Development of Seismic Damage Evaluation factor of Reinforced Concrete Pier for Fragility Analysis

고현무* 이지호** 강준원*** 조호현****
Koh, Hyun-Moo Lee, Jeeho Kang, Junwon Cho, Hohyun

ABSTRACT

Fragility analysis is widely used for the seismic safety evaluation of a structure. In fragility analysis, damage evaluation is a crucial factor. Most of the present fragility analyses use the representative responses such as displacement and absorbed hysteretic energy as a tool of damage evaluation. But damage evaluation method that can represent the local damage of a structure is required in the case of piers of which the local damage can cause the whole failure of bridge system. Therefore this study proposes a damage index, which can represent the distribution and magnitude of local damage by using the Lee and Fenves' plastic-damage model. Using the proposed damage index, fragility curves and damage probability matrix of pier are produced and fragility analysis is performed.

1. 서 론

지진으로 인한 구조물의 손상을 평가하기 위해서는 대상 구조물의 손상정도를 반영할 수 있는 물리적인 척도가 필요하다. Park과 Ang의 손상지수(Park, 1985)는 이러한 대표적 척도로서, 변위 및 소산에너지 이력 등 구조물의 대표응답을 통해 지진하중에 대한 손상정도를 평가한다. 지진취약도 해석을 위한 최근의 연구에서도 손상평가를 위해 Park과 Ang의 손상지수 등을 사용하고 있는데(Singhal, 1996, Dumova-Jovanoska, 2000), 이러한 해석기법은 구조물 전체의 손상상태를 표현하는 데는 효율적인 방법이다. 그러나 교각과 같이 일부분의 파손이 교량 전체의 파괴에 지배적인 영향을 미치는 경우에는 부분별 손상정도를 보다 정확히 반영할 수 있는 손상평가 방법이 요

* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-880-7352 (E-mail : khm@gong.snu.ac.kr)
** 정회원 · 동국대학교 토목환경공학과 조교수 · 공학박사 · 02-2260-3352 (E-mail : jeeholee@dgu.ac.kr)
*** 비회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 토목공학전공 석사과정 · 02-880-8325 (E-mail : jwkang@sel.snu.ac.kr)
**** 비회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 토목공학전공 박사과정 · 02-880-8325 (E-mail : chh@sel.snu.ac.kr)

구된다.(고현무 등, 2002) 이 연구에서는 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각에 대하여, 대표응답에 의한 손상평가와는 달리 부분별 손상정보를 반영하여 손상평가를 수행하고, 이를 지진취약도 해석에 적용하고자 한다. 이를 위하여 Lee와 Fenves의 소성손상모형(Lee, 1998)을 적용한 비선형 유한요소해석을 통해 교각의 부분별 손상분포와 크기 등을 반영하는 손상지수를 제안하고, 제안한 손상지수로부터 지진하중에 대한 교각의 취약도 곡선과 손상확률행렬을 산출하는 손상평가 방법을 제시한다.

2. 철근콘크리트 교각의 손상평가 방법

2.1 Lee와 Fenves의 소성손상모형

Lee와 Fenves의 소성손상모형은 연속체 손상역학의 파괴에너지(fracture energy)에 의한 손상과 강성도 저하의 개념을 적용한 비선형 유한요소 재료모형이다. 이 모형에서 인장손상과 압축손상을 나타내는 손상변수 $\underline{\kappa} = [\kappa_t \; \kappa_c]$는 단위체적의 파괴에너지가 비탄성 변형으로 소산된 비율로 정의된다.

$$\kappa_{\aleph} = \frac{1}{g_{\aleph}} \int_0^{\epsilon^p} \sigma_{\aleph}(\epsilon^p) d\epsilon^p \quad g_{\aleph} = \int_0^{\infty} \sigma_{\aleph}(\epsilon^p) d\epsilon^p \quad (0 \le \kappa_{\aleph} \le 1 \;,\; \kappa_{\aleph}: \kappa_t \text{ or } \kappa_c) \tag{1}$$

여기서 ϵ^p는 소성변형률, $\sigma_{\aleph}(\sigma_t$ or $\sigma_c)$는 강성도 저하효과를 고려한 인장 또는 압축응력, $g_{\aleph}(g_t$ or $g_c)$는 인장 또는 압축 소산에너지 밀도이다. 이러한 손상변수들은 각 유한요소별로 계산되며, 요소별 인장 및 압축 손상도를 나타낸다. 지진과 같은 반복하중 하에서는 인장에 의한 손상이 균열의 전진, 콘크리트의 탈착, 부착응력의 감소 등에 큰 영향을 미치므로, 앞으로 전개될 철근콘크리트 교각의 지진손상 평가에 인장 손상변수(κ_t)를 사용한다.

2.2 소성손상모형에 의한 비선형 유한요소해석

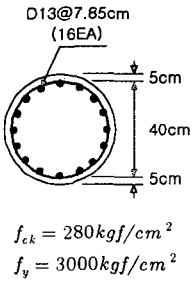


그림 1 준정적 실험 교각시험체의 제원

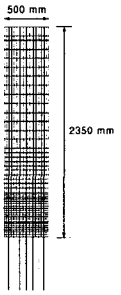


그림 2 유한요소 모델링

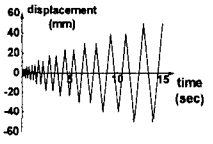


그림 3 준정적 하중재하 과정

그림 1은 준정적 실험을 위한 철근콘크리트 교각시험체의 제원(대한토목학회, 2001)이고, 그림 2는 대상 교각을 평면응력 요소로 모델링한 것이다. Lee와 Fenves의 소성손상모형을 FEAP(Taylor, 1999)에 적용하고 그림 3의 준정적 하중재하 과정에 따라 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 그림 4에 힘-변위 이력곡선에 대한 실험결과와 해석결과를 나타내었는데, 결과에 보이는 이력곡선의 유사성으로부터 소성손상모형을 이용한 손상평가가 실험결과의 손상상태를 잘 표현할 수 있다는

것을 알 수 있다.

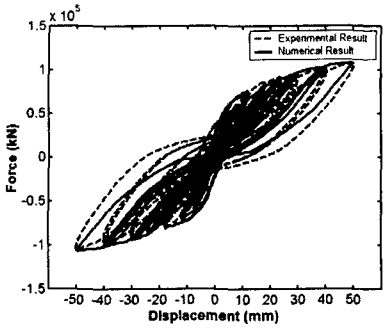


그림 4 힘-변위 이력곡선에 대한 실험결과와 해석결과

2.3 손상지수의 도출

철근콘크리트 교각의 손상평가를 위해서는 손상상태를 합리적으로 반영할 수 있는 손상지수의 도입이 필요하다. Lee와 Fenves의 소성손상모형을 FEAP에 적용하여 비선형 유한요소해석을 실시하면 각 요소별로 인장손상변수(κ_t)가 분포한다. 이는 요소단위의 손상을 나타내는 지수로서, 이들을 사용하여 교각 전체의 손상상태를 표현하는 손상지수를 도출한다. 이러한 손상평가방법에 의하여, 변위, 소산에너지 이력 등 대표응답을 이용하지 않고 부분별 손상상태를 반영하는 손상평가를 수행한다.

3. 손상모형에 의한 철근콘크리트 교각의 손상지수

3.1 손상지수 D_1

철근콘크리트 교각 요소들의 손상이 교각 전체에 걸쳐 진행된 정도를 나타내기 위해 다음과 같이 손상지수 D_1을 제안한다.

$$D_1^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_e} A_i (\overline{\kappa_t})_i}{\sum_{i=1}^{N_e} A_i} \qquad 0 \le D_1^* \le 1 \tag{2}$$

$$D_1 = 1 - (D_1^* - 1)^{10} \qquad 0 \le D_1 \le 1 \tag{3}$$

$(\overline{\kappa_t})_i$는 i번째 요소의 모든 적분점에서의 손상변수 값들의 평균이고, A_i는 i번째 요소의 면적으로서 $(\overline{\kappa_t})_i$에 대한 가중치이다. N_e는 해석대상 교각의 전체 유한요소 수이다. D_1^*는 손상변수들의 가중평균으로서 요소들의 면적을 가중치로 하여 계산된다. D_1^*는 0에서 1사이의 범위를 가지며 $D_1^* = 0$의 경우는 교각의 모든 요소에서 손상이 발생하지 않았음을 의미하고, $D_1^* = 1$의 경우는 이론상 전 요소의 파괴를 의미한다. 그러나 철근콘크리트 교각의 준정적 해석 결과, D_1^*가 0.2 (모든

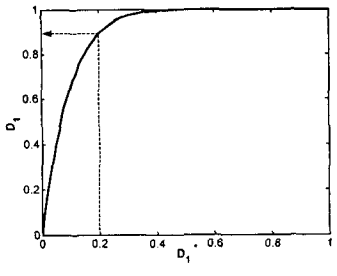


그림 5 D_1^*와 D_1과의 관계

유한요소 파괴의 20%에 해당하는 손상상태)에만 이르러도 교각 지점부의 심한 균열발생으로 심각한 손상이 발생한다. 따라서 식 (3)에 의해 D_1^*를 보정함으로써, 0과 1 사이에서 고른 값을 갖는 손상지수 D_1을 유도하였다. 그림 5는 손상변수들의 가중평균 D_1^*와 보정된 손상지수 D_1의 관계를 나타낸다.

그림 6은 해석에 사용된 철근콘크리트 교각 상단의 변위 증가에 따른 D_1의 변화를 나타낸다. 그림 7은 각 유한요소별 인장손상변수(κ_t)의 분포를 통해 교각변위의 증가에 따른 하단부 고정단의 손상상태 진전을 단계별로 보여준다. 교각 상단 변위가 증가함에 따라 그림 6에서 D_1이 단조증가하고, 그림 7과 같이 손상상태가 진전되었는데, 이로부터 손상지수 D_1의 증가가 교각 손상의 심화를 반영한다고 할 수 있다. 또한 그림 6에서, 해석을 위한 유한요소의 개수의 변화에 대해 D_1이 수렴함을 알 수 있다.

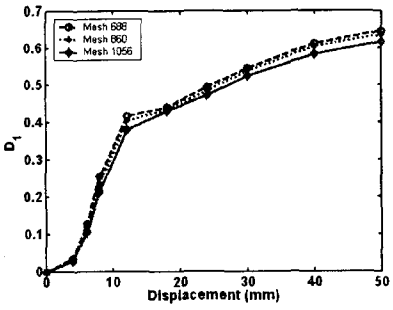


그림 6 교각 상단의 변위 증가에 따른 D_1의 변화

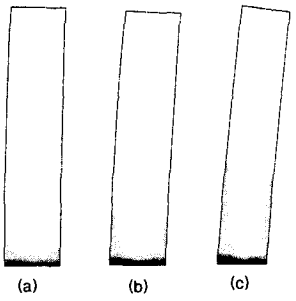


그림 7 손상상태의 진전
교각 상단 변위 (a)12mm (b)30mm (c)50mm

3.2 손상지수 D_2

균열이 교각 내에서 크게 확산되지 않고 특정부분에만 집중되어 있을 경우, 소성힌지가 발생한다. 이때 교각 전체의 크기에 비하여 소성힌지 영역의 크기가 작으면 D_1은 교각 전체의 손상상태를 과소평가할 수 있다. 따라서 손상의 국부 집중화를 손상평가에 반영하는 새로운 손상지수가 필요하다.

이러한 관점에서 철근콘크리트 교각의 국부손상을 나타내는 손상지수 D_2를 다음과 같이 제안한다.

$$\{M_c\}_i = \left\{ \frac{\sum_{n=1}^{N_h} (1-\kappa_t(x_n))|x_n|A_n}{\sum_{n=1}^{N_h} |x_n|A_n} \right\}_{i=1,2,\cdots,N_v} \tag{4}$$

$$D_2 = 1 - Min[M_c] \qquad (0 \le D_2 \le 1) \tag{5}$$

여기서 N_h와 N_r는 각각 교각 수평방향과 수직방향 요소들의 수이다. x_n은 교각의 수직 중심선으로부터 특정 요소까지의 거리이고, A_n은 그 요소의 수평 단면적이다. 식 (5)에서 $Min[M_c]$는 교각의 모멘트 잔존강도의 척도로 쓰일 수 있는 무차원량이며, 따라서 D_2는 교각의 모멘트 손상도라고 정의할 수 있다. 교각의 손상이 특정 영역에 집중될수록 강성도 저하로 인해 그 영역에서 모멘트 손상도가 증가하여, 손상의 국부 집중화를 나타내는 D_2가 증가한다.

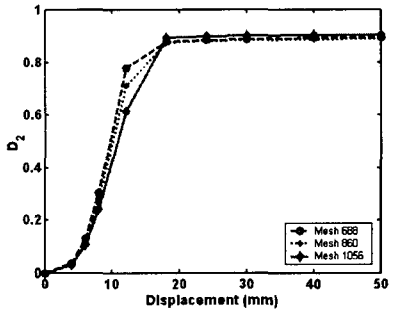


그림 8 교각 상단 변위증가에 따른 D_2의 변화

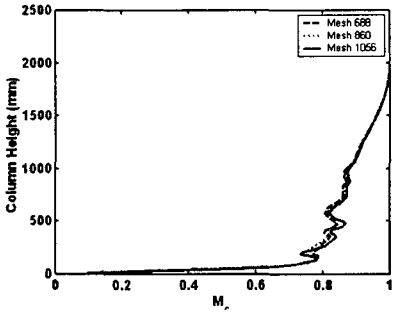


그림 9 교각높이에 따른 M_c분포
(준정적 실험, 교각상단 변위 d=50mm)

그림 8은 교각 상단 변위의 증가에 따른 D_2의 변화를 나타낸 것으로, 손상의 집중도가 교각 변위의 증가에 따라 단계별로 높아짐을 반영한다. 이 그래프에서 D_2가 0.85 이상부터는 증가율이 점점 떨어져 값의 차이가 별로 없다. 이는 그 시점부터 국부손상의 발생이 더 이상 크게 증가하지 않음을 의미하며, 따라서 $D_2 = 0.85$를 소성힌지가 형성되었을 때의 모멘트 손상도로 생각할 수 있다. D_1과 마찬가지로 D_2 역시 해석을 위한 유한요소 개수의 변화에 대해 수렴한다. 그림 9는 교각 상단 변위 50mm에서 교각의 높이에 따른 모멘트 잔존강도 척도인 M_c 분포를 나타낸 것으로, 교각 하단부에서 심한 균열의 생성 및 콘크리트 강성 저하로 소성 힌지가 발생하였음을 알 수 있다.

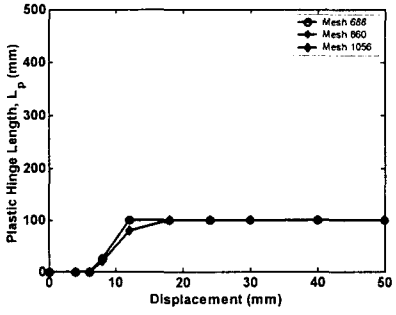
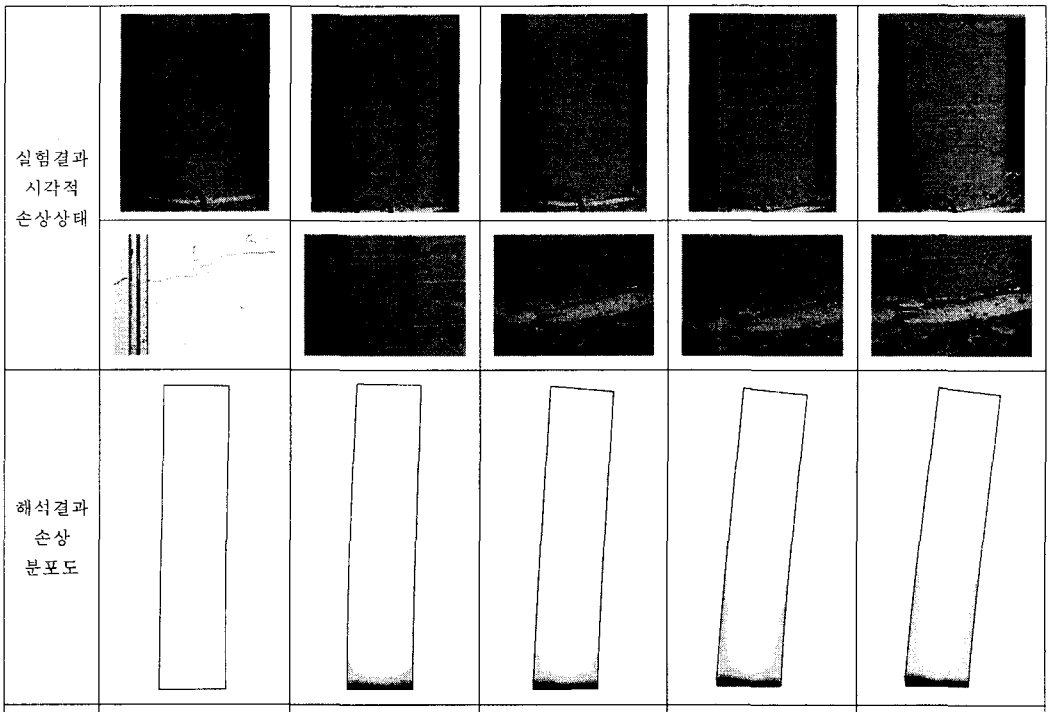


그림 10 교각 상단 변위에 따른 소성힌지 길이

교각의 높이에 따른 M_c의 분포로부터 소성힌지의 길이를 정량적으로 평가할 수 있다. 이 연구에서는 그림 9로부터, 교각의 높이에 따른 M_c가 0.75 이하인 부분에서 소성힌지가 발생한다고 판단하였으며, 그림 10에 해석대상 교각 상단의 변위 증가에 따른 소성힌지 길이(L_p)의 변화를 나타내었다.

3.3 손상지수에 의한 손상상태 정의

손상지수 D_1, D_2에 의하여 손상평가를 하기 위해서는, 먼저 철근콘크리트 교각의 물리적인 손상정도를 반영하는 손상단계에 대한 정의가 이루어져야 한다. 일반적으로 철근콘크리트 교각의 손상단계는 NONE, MINOR, MODERATE, MAJOR, SEVERE의 5단계로 나타낸다.(EERI, 1994). 그림 11에 2.2절에서 제시한 교각 시험체의 준정적 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교하였다. 이 결과와 EERI에서 제시한 각 손상단계별 시각적 손상(표 1) 및 피해결과로부터 표 2와 같이 철근콘크리트 교각의 손상단계별 D_1, D_2의 범위를 제시할 수 있다.



교각변위	6mm	12mm	24mm	40mm	50mm
D_1	0.11	0.38	0.47	0.59	0.62
D_2	0.11	0.61	0.90	0.90	0.91

그림 11. 철근콘크리트 교각 시험체의 준정적 실험결과와 유한요소해석 결과의 비교

표 1 철근콘크리트 교각의 손상상태별 시각적 손상 (EERI, 1994)

손상상태	시각적 손상
NONE	미세균열 발생
MINOR	미세균열 확산
MODERATE	1mm 이하의 균열 및 교각과 기초 접합부에서의 균열 발생
MAJOR	1mm 이상의 균열 발생 및 교각과 기초 접합부에서의 균열 심화, 교각의 뽑힘 발생
SEVERE	2mm 이상의 대균열 발생 및 교각 기초 접합부 콘크리트의 파손

표 2 철근콘크리트 교각의 손상상태별 손상피해 결과와 손상지수 분포 (EERI, 1994)

손상상태	손상피해 결과	손상지수 D_1, D_2	Park & Ang.
NONE	사용성 손실 없음	$D_1 < 0.2$, $D_2 < 0.85$	$0 \sim 0.1$
MINOR	최소한의 사용성 손실, 약간의 보수 필요	$D_1 < 0.4$, $D_2 < 0.85$	$0.1 \sim 0.2$
MODERATE	사용성 손실, 일정 보수 필요	$D_1 < 0.5$, $D_2 < 0.85$	$0.2 \sim 0.5$
MAJOR	주요 보수를 위해 구조물의 사용 금지	$D_1 < 0.6$, $D_2 \geq 0.85$	$0.5 \sim 1.0$
SEVERE	보수할 수 없는 상태, 철거	$D_1 \geq 0.6$, $D_2 \geq 0.85$	> 1.0

4. 소성손상모형을 이용한 지진취약도 해석

제안한 손상지수 D_1과 D_2를 사용하여 2.2절의 철근콘크리트 교각 시험체에 대한 지진취약도 해석을 수행하였다. 입력지반운동으로서 PGA 0.05g부터 0.30g까지 스펙트럼 해석법에 의하여 생성한 입력지진파를 사용하여 동해석을 실시하였고, 계산된 손상지수로부터 그림 12의 취약도 곡선과 표 3의 손상확률행렬을 작성하였다. 그림 13에 PGA 0.098g, 0.294g의 유사동적실험(대한토목학회, 2001) 결과와 0.1g, 0.3g의 동해석 결과를 각각 비교하였다. PGA 0.098g의 실험결과, 미세균열이 확산되는 등 MINOR 이상의 손상상태가 발생한 것으로 판단되며, PGA 0.294g의 실험결과, 교각 하단부에 심한 균열이 발생하고 피복 콘크리트가 떨어져 나가는 등 SEVERE 이상의 손상상태가 발생한 것으로 판단된다. 그림 12의 취약도 곡선으로부터 PGA 0.098g의 경우는 MINOR 이상의 손상발생 확률이 95% 이상, PGA 0.294g의 경우는 SEVERE 이상의 손상발생 확률이 40% 이상으로서, 손상분포도와 함께 유사동적실험 교각의 손상상태를 잘 반영한다.

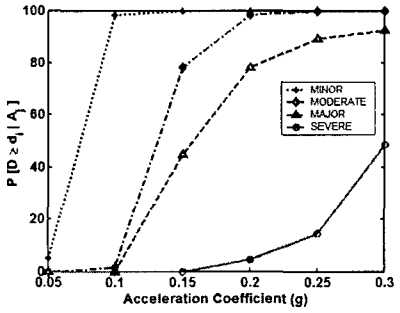


그림 12 취약도 곡선

표 3 손상확률행렬 (%)

Damage state	Acceleration Coefficient					
	0.05g	0.10g	0.15g	0.20g	0.25g	0.30g
NONE	95.0	1.7	-	-	-	-
MINOR	5.0	96.6	21.7	1.7	-	-
MODERATE	-	1.7	33.3	20.0	10.7	7.3
MAJOR	-	-	45.0	73.6	75.0	44.0
SEVERE	-	-	-	4.7	14.3	48.7

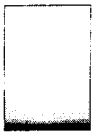
실험결과 시각적 손상상태	동해석 결과 손상분포도	실험결과 시각적 손상상태	동해석 결과 손상분포도
			
PGA 0.098g	PGA 0.1g	PGA 0.294g	PGA 0.3g

그림 13 철근콘크리트 교각 시험체의 유사동적 실험결과와 유한요소해석 결과의 비교

5. 결 론

이 연구에서는 철근콘크리트 교각의 손상상태를 소성손상모형에 근거한 손상지수로부터 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 손상평가인자로서 교각 내에서의 전체적인 손상분포를 나타내는 지수 D_1과 손상의 국부 집중화를 나타내는 지수 D_2를 제안하였고, 이를 지진취약도 해석에 적용하여 제안한 손상지수를 철근콘크리트 교각의 손상평가에 효과적으로 적용할 수 있음을 보였다. 이러한 과정은 Park과 Ang의 손상지수 등 대표응답을 이용하는 방법과는 달리 교각의 부분별 손상정도를 반영하는 손상평가 방법으로서, 이를 이용해 철근콘크리트 교각의 비선형 특성과 입력지반운동의 변동성을 반영하는 정밀한 손상평가를 수행할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단, 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Dumova-Jovanoska, E., "Fragility curves for reinforced concrete structures in Skopje(Macedonia) region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.19, 2000, pp.455-466.
2. EERI, "Expected Seismic Performance of Buildings", Publication SP-10, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 1994
3. Lee, Jeeho and Fenves, Gregory L., "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", Journal of Engineering Mechanics, Vol.124, No.8, 1998, pp.892-900.
4. Park, Y. J., Ang, A. H-S., "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, 1985, pp.722-739.
5. Singhal, Ajay and Kiremidjian, Anne S., "Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage", Journal of Structural Engineering, Vol.122, No.12, 1996, pp.1459-1467.
6. Taylor, Robert L., "FEAP : A Finite Element Analysis Program (Version 7.1j User Manual)", 1999
7. 고현무, 이지호, 정우영, 조호현, "손상모형을 이용한 철근콘크리트 교각의 지진여유도 해석", 한국지진공학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, 2002, pp.220-227.
8. 대한토목학회, "주요시설물 내진설계기준의 재정비", 2001