

손상모형을 이용한 철근 콘크리트 교각의 지진여유도 해석 Seismic Margin Analysis of Reinforced Concrete Pier Using Damage Model Proceedings

고현무* 이지호** 정우영*** 조호현****
Koh, Hyun-Moo Lee, Jeeho Jeong, Wooyoung Cho, HoHyun

ABSTRACT

This study introduces the fragility analysis method for the safety evaluation of reinforced concrete pier subject to earthquake. Damage probability is calculated instead of the failure probability from definition of the damage state in the fragility curve. Not only the damage model determined by the response of structure subject to earthquake, but also the plastic-damage model which can represent the local damage is applied to fragility analysis. The evaluation method of damage state by damage variable in global structure is defined by this procedure. This study introduces the fragility analysis method considering the features of nonlinear time history behavior of reinforced concrete element and the plastic behavior of materials. At last, This study gives one of the approach method for seismic margin evaluation with the result of fragility analysis to design seismic load.

1. 서론

이 연구에서는 철근콘크리트 교각의 지진여유도를 평가하기 위하여 교각에 대하여 취약도 해석을 수행하였다. 본래 취약도 해석은 원자력 발전소의 안전성을 평가하기 위하여 사용된 것으로 원전의 노심손상빈도를 계산하기 위한 확률론적 지진 안전성평가의 한 단계이다. 지금까지 개발된 지진취약도 해석 방법은 여러 가지가 있으나, 손상평가 개념을 이용한 방법이 구조물의 비선형성을 잘 반영하고 지진하중을 받는 구조물의 경우 실제 거동을 잘 예측하기 때문에 지진취약도 평가의 객관적 신뢰도가 높다. 또한 최근의 연구에서는 실제 구조물에서 물리적 의미를 갖는 손상상

* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

** 정회원 · 동국대학교 토목환경공학과, 조교수

*** (주) 청석엔지니어링

**** 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

태를 정의함으로써 지진하중에 대한 파괴확률이 아닌 손상확률을 취약도 곡선에서 얻을 수 있다. 이 연구의 목적은 그림 1과 같이 손상모형을 이용한 취약도 해석을 통하여 지진하중에 대한 손상확률을 산출하고 이를 이용하여 지진여유도를 평가하는 것이다.

2. 철근콘크리트 구조물의 손상 모형

이 연구에서 지진 여유도를 평가하기 위한 손상 모형으로는, 철근 콘크리트 구조물의 손상 평가와 손상지수 개념을 이용한 취약도 해석에서 이미 많이 사용되고 있는 Park과 Ang의 손상지수와 파열 에너지에 근거하여 국부손상을 평가할 수 있는 Lee와 Fenves의 소성 손상 모형을 사용한다.

2.1 Park과 Ang의 손상 지수와 손상상태

Park과 Ang의 손상지수는 구조물의 응답에 따른 최대 변형에 의한 손상과 지진하중과 같은 반복하중에서의 누적손상에 의한 손상을 선형 조합한 것으로 다음의 식으로 정의된다.

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q, \delta_u} \int dE \quad (1)$$

여기서, δ_M 은 지진 하중에서의 최대 변형, δ_u 는 단조 하중에서의 극한 변형, Q 는 항복강도, dE 는 소산 이력에너지 증분을 나타내고, β 는 구조물의 형태에 의해 계산되는 양의 매개변수이다.

Park과 Ang의 손상지수는 손상지수를 산출하기가 간편하고 구조물의 응답 수준에 따라 손상정도를 평가할 수 있다. 그리고 손상상태의 정의는 손상지수의 범위를 실제 구조물의 손상에 물리적인 의미를 부여하는 것으로 손상상태에 따라서 실제 철근 콘크리트 구조물의 균열이나 콘크리트의 이탈을 표현한 것이다.

2.2 Lee와 Fenves의 손상모형과 손상상태

2.2.1 Lee와 Fenves의 손상모형

Lee와 Fenves의 손상모형은 소성-손상모형을 기본으로 한 것으로, 구조물의 손상 정도가 동해석 과정에서의 구성방정식에서 손상변수로 표현이 되고 있다. Lee와 Fenves의 소성-손상 모형에서의 철근 콘크리트 재료모형은 그림 2와 같이 콘크리트 손상모형, 철근모형, 그리고 두 재료간의 부착특성을 나타내는 연결모형으로 구성된다. 먼저, 미소 및 대형 균열의 발생에 따른 변형의 국부 집중화를 표현하는 콘크리트 손상모형으로, 단조증가의 준정적 하중을 받는 콘크리트 구조의 균열해석 문제에 적용되었던 Lubliner의 소성 손상모형을 기반으로 반복하중을 받는 콘크리트 재료의 균열거동을 해석할 수 있도록 확장한 모형을 Lee와 Fenves는 제안을 하였다. 다음은 탄소성 거동을 표현하는 철근 모형으로, Bauschinger 효과를 고려한 Menegotto-Pinto의 일축 반복하중모형을 Filippou 등이 등방성 변형경화까지 고려하여 개량한 모형을 사용하였다. 그리고 콘크리트와 철근, 두 재료의 부착 특성을 표현하는 비선형 부착연결모형으로, Eligehausen 모형에 기초한 부착모형을 사용하였다.

소성-손상 역학은 연속 손상 역학 모형을 확장하여 소성론과 결합시킨 연속균열모형의 한 형태으로써, 강도에 대응하는 응력을 강성도 손상 부분과 유효응력부분($\bar{\sigma}$)으로 나눈다. 소성-손상 역학

에서의 강성도 손상과 손상 변형은 공통의 내부상태 변수를 통하여 서로 연관되어 복잡한 형태의 하중을 받는 구조물의 균열손상거동을 효과적으로 나타내어 준다.

$$\bar{\sigma} = E_0(\epsilon - \epsilon^p), \quad \sigma = (1-D) E_0(\epsilon - \epsilon^p) \quad (2)$$

여기서, E_0 는 탄성 강성도 텐서, $D = D(x) = 1 - (1 - D_c)(1 - sD_\rho)$ 으로 강성도저하변수이고, 다시, D_c, D_ρ 는 각각 일축 압축 및 인장 강성도저하지수를 나타내며 손상변수(x)의 함수로 정의된다. 그리고 s 는 균열의 닫힘을 표현하는 유효응력의 가중치 함수이다.

그리고 손상변수는 단위 체적의 파괴에너지가 비탄성 변형으로 소산된 비율로 식(3)과 같고, 이 연구에서 구조물의 손상정도와 전체 손상상태를 정의하는 변수로써 사용한다.

$$x = [x_t, x_c]^T, \quad x_n = \frac{1}{g_n} \int_0^{\epsilon^p} \sigma_n(\epsilon^p) d\epsilon^p, \quad g_n = \int_0^{\infty} \epsilon_n(\epsilon^p) d\epsilon^p \quad (3)$$

Lee와 Fenves의 모형은 동해석의 결과가 아닌 과정에서 적용이 되는, 즉 손상모형 자체가 철근 콘크리트 부재의 비선형성을 표현하는 모형이므로, 콘크리트의 비선형성을 잘 반영하여 지진하중에서 합리적인 수치해석을 수행할 수 있다.

2.2.2 Lee와 Fenves 모형에서의 손상상태 정의

Lee와 Fenves 모형에서 손상의 정도는 요소단위의 국부적인 손상으로 표현되고, 해석 결과를 이용한 손상상태 평가는 그림 3과 같이 손상변수 x 의 매개변수 연구를 통해 국부손상이 전체 구조물에 영향을 미치는 패턴 연구를 수행하였다. 국부손상을 전체 구조물에서 물리적 의미를 갖는 손상상태로 정의하기 위하여 그림 4와 같은 교각을 그림 5와 같이 콘크리트, 철근, 부착 모형을 이용하여 유한요소 해석을 수행하고 그 결과를 실험의 결과와 비교하였다. 유한요소 해석은 FEAP(Finite Element Analysis Program ver. 5.01)을 사용하였다. 그림 6은 Lee와 Fenves의 소성-손상 모형을 이용한 유한요소 해석과 실험의 하중-변위 이력을 비교한 것이다.

실험에서의 시각적 손상의 정도와 손상 피해 결과에 따라 Park과 Ang의 손상상태에 근거하여 Lee와 Fenves의 소성모형에 따른 손상상태를 표 1과 같이 5단계로 새로이 정의하였다.

Lee와 Fenves의 손상 모형에서 손상변수 x 는 균열의 발생 정도에 따라 유한요소 해석 모델의 요소 하나에서의 손상의 정도를 나타내 준다. 따라서 그림 3에서와 같이 구조물 전체에서 손상이 발생한 요소의 개수와 분포에 따른 패턴에 따라 구조물 전체의 손상상태를 평가하게 된다. 이 때에 요소 형상과 위치에 따른 가중치와 손상 변수 x 에 따른 가중치를 도입하여 구조물 전체의 손상분포와 하나의 요소 내에서의 손상을 나타내는 매개변수 D_1, D_2, D_3 를 정의하였다. 매개변수 D_1 는 구조물 전체에서의 손상정도로써, 손상의 분포, D_2 는 요소에서의 손상변수의 평균값이 0.9 이상일 때로 심각한 손상을 입은 요소, D_3 는 더 이상 응력을 받을 수 없는 완전 파괴 수준에 이른 요소를 각각 구조물 전체에 대한 비율로 나타낸 변수이다. 수치해석 결과에 의한 매개변수를 이용하여 표 1에서 정의한 손상상태에 따라 표 2와 같이 손상상태를 정의하였다.

그림 7,8은 각각 Moderate와 Severe 상태에서의 해석에 의한 손상 분포와 실험 결과를 나타낸 것이다.

3. 지진 여유도 평가 방법

3.1 Park과 Ang의 손상지수를 이용한 취약도 곡선

취약도 곡선은 확률론적 개념에 의해서 생성된 인공지진파를 이용하여 해석한 결과를 통계적 처리를 한 것으로, Park과 Ang의 손상지수를 사용하여 취약도 곡선을 산출할 경우, 동해석에 의한 각 지진파의 지표에 대한 구조물의 손상지수를 얻을 수 있다. 여기서 지진파의 지표로 사용한 가속도 계수에 따라 손상지수들을 Gumbel의 경험식에 의하여 누적확률분포 곡선으로써 나타낼 수 있다. 취약도 곡선에서의 임의의 점은 주어진 지진파의 지표(이 연구에서는 가속도계수)에서의 손상이 어떤 손상 상태를 넘어설 조건부 확률로써 식(4)와 같고, 손상지수들의 누적확률분포 곡선에서 정의한 손상상태를 이용하여 취약도 곡선을 그리게 된다.

$$P_{ij} = P[DT \geq DT_i | A_j] \quad (4)$$

여기서, DT 는 손상상태, A 는 가속도 계수이다.

그림 9는 가속도 계수 $A=0.15$, 지반계수 $S=1.0$ 인 인공지진파 80개에 대한 동해석을 수행하여 Park과 Ang의 손상지수를 산출하고, 이것의 누적확률분포곡선을 그린 것이다.

해석한 교각의 경우 가속도 계수 $A=0.15$ 일 때 Park과 Ang의 손상지수는 대략 0.1에서 0.25사이에 분포하고 손상상태 Moderate 이상일 경우는 14%로서, 그림 10에서와 같이 가속도 계수 $A=0.15$ 에 대한 손상확률을 취약도 곡선에 나타낸다.

3.2 Lee와 Fenves의 손상모형을 이용한 취약도 곡선

그림 4 해석예제의 유한요소 모델링에 비선형 동해석을 수행하였고, 그림 11와 그림 12는 가속도 계수 $A=0.15$, $S=1.0$ 일 때의 인공지진파에 대한 변위-반력 곡선과 시간-변위 곡선으로써 해석예제에 대한 유한요소 모델과 손상모형이 교각의 비선형성과 소성성을 잘 나타내줌을 보여준다.

그림 13은 각 가속도계수에서 60개의 인공지진파에 대하여 동해석을 수행하고 표 2의 손상상태에 따라 손상상태를 평가하여 취약도 곡선을 그린 것으로, 취약도 곡선에서 가속도 계수 $A=0.25$ 일 때 손상상태 Severe 이상의 손상을 입을 손상확률은 50%정도에 이른다.

3.3 취약도 곡선과 실험 결과 비교

Lee와 Fenves 손상모형을 적용한 취약도 해석의 타당성을 검증하기 위하여 지진하중이 작용하는 교각의 실제 손상과 비교를 하였다. 비교 대상은 그림 4와 같은 교각에 대한 유사동적 실험 결과로써, 가속도계수 $A=0.98$, 0.154 , 0.294 인 인공지진파를 사용하였다. 해석예제의 취약도 곡선 그림 13에서 가속도 계수 $A=0.98$, 0.154 , 0.294 일 때의 손상상태 SEVERE 이상의 손상을 입을 손상확률은 각각 0%, 3%, 60%이고, 실제 실험결과는 그림 14,15,16과 같다.

이와 같이 취약도 해석의 결과가 유사동적 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러므로 해석된 결과에서 설계지진력의 가속도 계수를 고려하여 해석교각에 대한 지진여유도를 평가할 수 있다. 즉 이 해석결과의 경우 설계지진력의 가속도 계수 $A=0.154g$ (내진1등급)라고 하면, 손상상태 SEVERE 이상의 손상을 입을 손상을 입을 확률은 약 2%로써 설계지진력에 대해서는 심각한 손상을 입을 확률이 거의 없으므로 지진에 대한 여유도를 가지고 있다고 평가할 수 있다.

4. 해석 예제 및 결과

Lee와 Fenves의 손상모형을 적용하여 취약도 해석을 수행하고 이 결과로부터 지진여유도 평가 방법을 그림 17과 같은 해석예제에 적용하였다.

그림 19은 수치해석과 실험에 의한 하중-변위 곡선을 나타낸 것으로 전체적인 거동이 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 20와 그림 21는 가속도 계수 $A=0.10$, 지반계수 $S=1.0$ 인 인공지진파에 대한 수치해석 결과로써, 각각 변위-반력 곡선과 시간-변위 곡선이다.

그림 22의 취약도 곡선에 의하면 이 교각의 경우, 설계지진력의 가속도 계수 $A=0.154$ (내진1등급)이라고 하면, 손상상태 SEVERE 이상의 손상을 입을 손상확률이 10%이상, MAJOR 이상의 손상을 입을 손상확률이 40%이상으로 설계지진력 0.154g의 지진에 대해서는 내진성능을 완벽하게 보장하지는 못하지만, 설계지진력의 가속도 계수 $A=0.098g$ (내진2등급)이라고 하면, SEVERE의 손상확률이 2% 미만, MAJOR 이상의 손상을 입을 손상확률이 5%미만으로 내진성능을 만족한다고 할 수 있다.

5.결론

철근 콘크리트 교각에 대하여 손상모형을 적용하고, 원전격납건물의 지진안전성 평가에 사용되어 온 취약도 해석을 도입하여 구조물의 지진파의 가속도 계수에 대한 손상정도를 확률적으로 평가할 수 있는 취약도 곡선을 산출하였다. 그리고 이로부터 해석 구조물에서 지진에 대한 손상정도와 설계지진력을 고려하여 지진여유도를 평가할 수 있는 근거를 제시하였다.

지진 하중에서 철근 콘크리트의 소성 거동을 표현하기 위하여, 손상모형으로써 소성-손상모형의 Lee와 Fenves의 모형을 적용하여 교각의 거동을 실제와 가깝게 표현할 수 있었다. 또한 기존의 취약도 해석과는 다르게, 손상 상태 개념을 정의함으로써 취약도 곡선에서 파괴확률이 아닌 손상확률을 계산하여 지진 여유도를 평가하는 근거로써 사용하였다.

이 연구에서 손상모형으로 사용한 소성-손상모형은 요소의 국부적인 손상을 표현하는 모형으로써, 구조물의 전체적인 손상지수를 산출하지 못한다. 그래서 이 연구에서는 국부손상을 전체 구조물의 손상 정도로 표현하기 위하여 Park과 Ang의 손상상태를 기본으로, 수치해석결과와 실험결과를 비교하여 새로운 손상상태를 정의하였다. 그리고 이를 통하여 철근 콘크리트 부재의 비선형 이력거동과 반복하중에 의한 재료의 소성 거동을 고려한 취약도 해석 방법을 제시하였다.

이 연구는 원전 구조물에 사용되어 온 취약도 해석을 철근 콘크리트 교각에 적용함으로써 지진에 대한 교각의 안전성 평가에 새로운 방법을 제시하였다. 제시된 방법을 통해서 기존의 교량 교각에 대한 지진여유도를 평가할 수 있을 뿐만 아니라 교각 설계 시 내진설계에 대한 적절한 기준을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

6.참고문헌

1. 건교부, 도로교 표준시방서, 2000.
2. 윤철호, "지진손상특성을 고려한 원전구조물의 취약도 해석", 박사학위논문, 서울대학교, 1994.
3. 이지호, "손상모형에 의한 철근 콘크리트 구조의 해석", 한국 콘크리트학회 연구위원회 발표집, KCI-M-01-002, 2001, pp.75-89.
4. 정우영, "취약도곡선을 이용한 철근 콘크리트 교각의 지진여유도 평가", 석사학위논문, 서울대학교, 2002.
5. Ang, A. H-S., Tang, W. H., "Probability concepts in engineering planning and design", J. Wiley and Sons, New York, Vol. I., 1975.
6. Dumova-Jovanoska E., "Fragility curves for reinforced concrete structures in Skopje (Macedonia) region", Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, 2000, pp. 455-466.
7. Lee, J., Fenves, G. L., "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No. 8, 1998, pp. 892-900.
8. 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. 722-39.
9. Park, Y. J., Ang, A. H-S., and Wen, Y. K., "Seismic damage analysis and damage-limiting design of R.C. buildings", Struct. Res. Ser., Rep. No. UILU-ENG-84-2007, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill., 1984.
10. Singhal, A., Kiremidjian, A. S., "Bayesian updating of fragilities with application to RC frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 8, 1998, pp. 922-929.
11. Taylor, R. L., FEAP : A Finite Element Analysis Program (Version 5.01 Manual), Depart of Civil Engineering of California, Berkeley, California, 1996.
12. Wehbe, N. I., Saiidi, S. M., Sanders., D. H., "Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement", ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 2, 1999, pp. 248-258.

표 1 Lee와 Fenves 모형의 손상상태 정의

손상상태	시각적 손상	손상 피해 결과
NONE	미세균열 발생	사용성의 손실 없음
MINOR	미세균열 확산	최소한의사용성 손실, 약간의 보수가 필요할 수 있음
MODERATE	1mm이하의 균열 및 교각과 기초 접합부에서의 균열 발생	구조물의 사용성 손실, 일정 보수 필요
MAJOR	1mm이상의 균열 발생 및 교각과 기초 접합부에서의 균열 심화, 교각의 뒤틀림 현상 발생	주요 보수를 위해 구조물의 사용금지
SEVERE	2mm이상의 대균열 발생 및 교각 기초 접합부 콘크리트의 파손	보수할 수 없는 상태, 철거

표 2 Lee와 Fenves 모형의 손상상태에 따른 손상피해 결과 및 손상분포

손상상태	손상피해 결과 및 손상분포	Park & Ang
NONE	사용성 손실 없음	0-0.08
	$D_1 < 10\%$, D_2 없음	
MINOR	최소한의 사용성 손실, 약간의 보수가 필요할 수 있음	0.08-0.18
	$D_1 < 23\%$, D_2 발생	
MODERATE	구조물의 사용성 손실, 일정 보수 필요	0.18-0.6
	$D_1 < 50\%$, $D_2 > 4\%$, D_3 발생	
MAJOR	주요 보수를 위해 구조물의 사용금지	0.6-1.3
	$D_1 < 75\%$, $D_2 > 8\%$, $D_3 > 1\%$	
SEVERE	보수할 수 없는 상태, 철거	>1.3
	$D_1 < 75\%$, $D_2 > 11\%$, $D_3 > 5\%$	

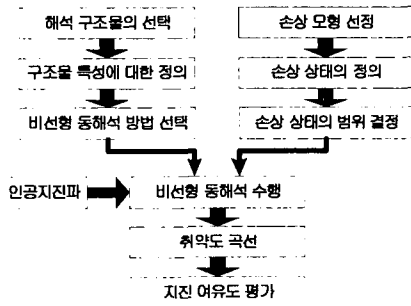


그림 1. 손상 모형을 이용한 지진여유도 평가 방법

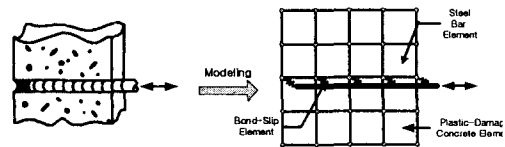


그림 2. 철근 콘크리트 손상모형의 구성

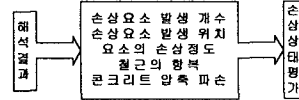


그림 3. Lee와 Fenves 손상모형의 손상상태 평가 과정

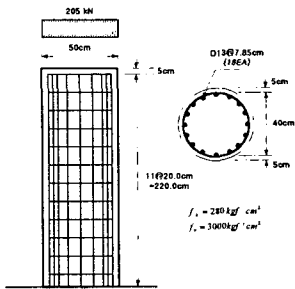


그림 4. 실험예제의 단면제원

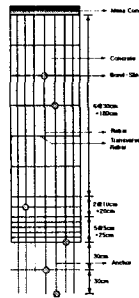


그림 5. 유한요소모델

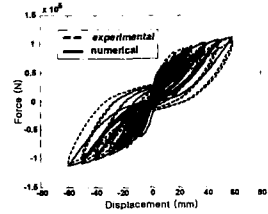


그림 6. 해석예제의 하중-변위 곡선

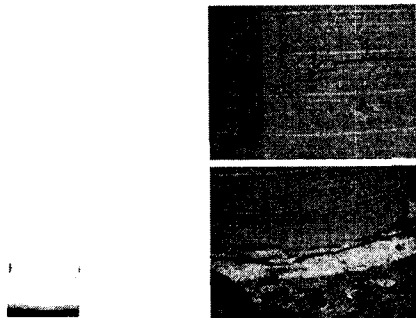


그림 7. Moderate 상태의 손상분포와 실험결과

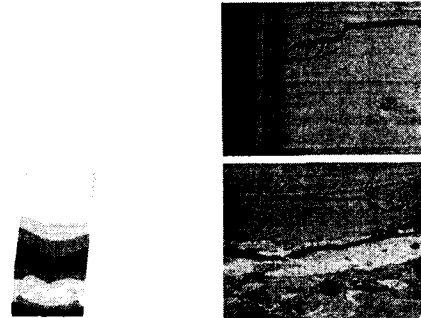


그림 8. Severe 상태의 손상분포와 실험결과

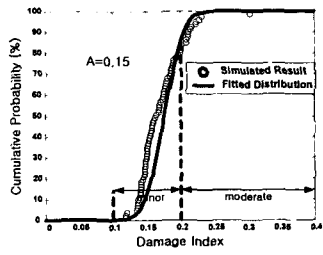


그림 9. A=0.15에서의 누적확률분포 곡선

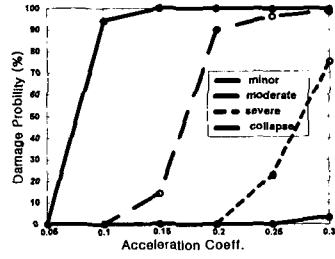


그림 10. 취약도 곡선 (Park과 Ang의 손상지수 이용)

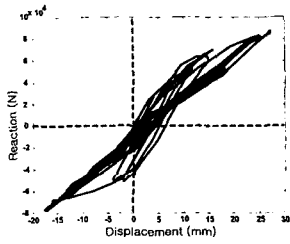


그림 11. 그림 4 모델링을 적용한 변위-반력곡선

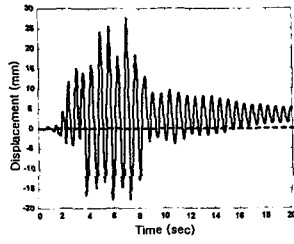


그림 12. 그림 6 예제의 변위 이력곡선

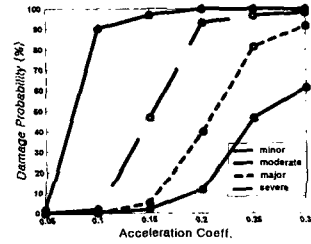


그림 13. 취약도 곡선 (Lee와 Fenves 손상모형 이용)

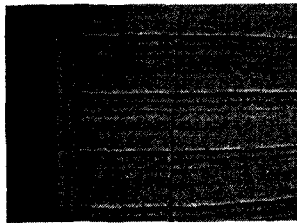


그림 14. 유사동적실험결과 A=0.98

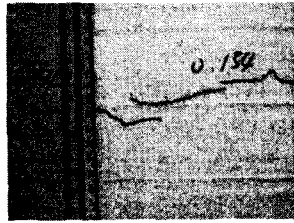


그림 15. 유사동적실험결과 A=0.154

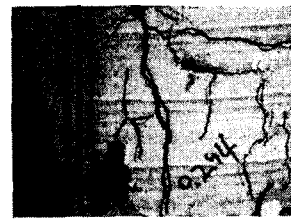


그림 16. 유사동적실험결과 A=0.294

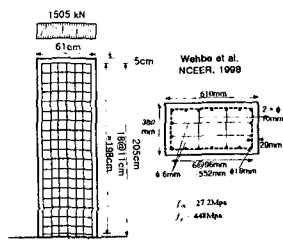


그림 17. 해석예제 교각

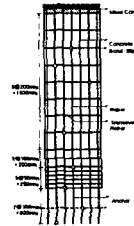


그림 18. 유한요소 모델

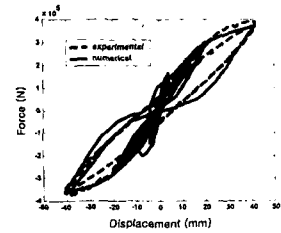


그림 19. 해석예제의 하중-변위곡선

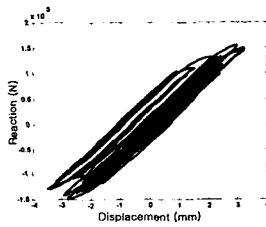


그림 20. 변위-반력곡선

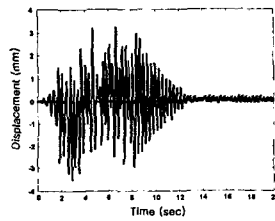


그림 21. 시간-변위곡선

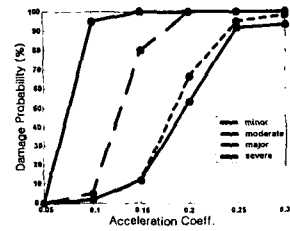


그림 22. 취약도 곡선