

손상된 철근콘크리트 구조물의 구조성능평가

Structural Performance Assessment of Damaged Reinforced Concrete Structures

김태훈¹⁾ · 김영진²⁾

Kim, Tae Hoon · Kim, Young Jin

국문 요약 >> 이 연구에서는 손상된 철근콘크리트 구조물의 구조성능평가를 위한 비선형 유한요소해석 기법을 제시하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 그리고 철근콘크리트 구조물의 비탄성거동의 예측에 근거한 손상지수를 제시하였다. 이 연구에서는 손상된 철근콘크리트 구조물의 구조성능을 파악하기 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

주요어 손상된 철근콘크리트 구조물, 구조성능평가, 비선형 유한요소해석, 재료적 비선형성, 손상지수

ABSTRACT >> In this study, nonlinear finite element analysis procedures are presented for the structural performance assessment of damaged reinforced concrete structures. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. This paper defines a damage index based on the predicted inelastic behavior of reinforced concrete structures. The proposed numerical method for the structural performance of damaged reinforced concrete structures is verified by comparison with reliable experimental results.

Key words Dmaged reinforced concrete structures, Structural performance assessment, Nonlinear finite element analysis, Material nonlinearity, Damage index

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 그 사용목적에 따라 필연적으로 침해적인 환경에 놓일 수밖에 없다. 침해적인 환경 요인으로는 동결융해 작용, 중성화(탄화) 작용, 황산염 반응, 알칼리-골재 반응, 온도 변화, 철근 부식 등이 있다. 이러한 침해적 환경 요인에 의해 철근콘크리트는 재료적인 특성이 변하게 되며 콘크리트 강도, 철근 강도, 철근과 콘크리트의 부착 강도, 균열 발생 등에 영향을 주고 구조물의 성능저하를 가져온다.⁽¹⁻³⁾

콘크리트는 타설 시점으로부터 건조수축, 수화열에 의한 온도응력, 예기치 않은 하중재하와 같은 영향으로 철근콘크리트 구조물에는 균열이 발생하게 되며 균열이 발생한 철근콘크리트는 염화물 침투에 취약하게 되어 철근부식이 가속화된다. 철근이 부식되면 단면이 결손하고 부식에 의한 덮개 콘크리트의 균열과 부식생성물로 인하여 철근과 콘크리트사이의 부착성능은 저하된다. 이러한 부착성능의 저하는 철근주변에서 콘크리트의 인장경화거동에 큰 영향을 미치게 된다.⁽⁴⁻⁶⁾

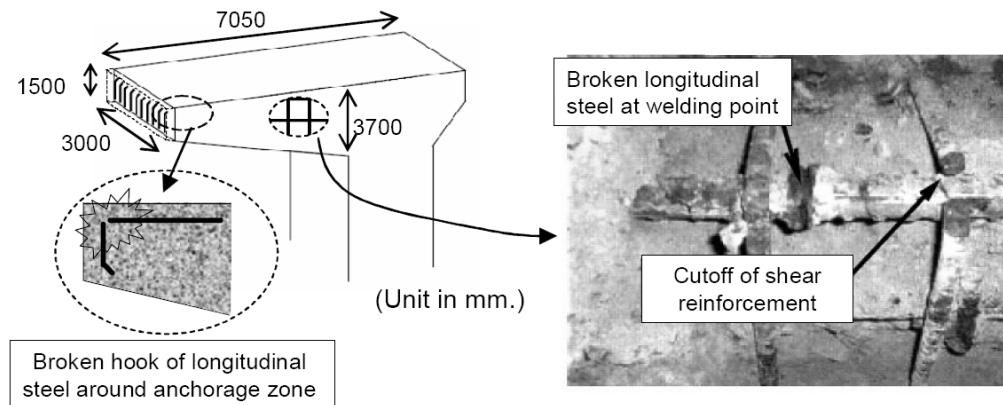
이 연구에서는 그림 1과 같은 침해적인 환경요인에 의해 발생하는 주철근과 전단철근의 손상으로 인한 철근콘크리트 구조물의 구조성능저하를 대상으로 하고 있다.⁽⁷⁾ 구조물은 침해적인 환경의 영향으로 인하여 초기의 성능을 유지하지 못하고 시간의 흐름에 따라 그 구조적 성능이 변화한다. 또한 지진에 대해서도 다른 지진응답, 즉 극한강도, 연성도, 그리고 소산에너지 감소 발생 등을 가져온다.

¹⁾ 정희원·삼성물산(주) 건설부문 기반기술연구소 수석연구원, 공학박사
(교신저자: th1970.kim@samsung.com)

²⁾ (주)대우건설 기술연구원 연구위원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 5. 3 / 수정일 1차: 2010. 10. 6, 2차: 2010. 10. 7 / 게재확정일 : 2010. 10. 8)



〈그림 1〉 손상된 철근콘크리트 구조물⁽⁷⁾

2D or 3D Spring element	4 nodes PSC shell element	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element	4 nodes Elastic shell element
Joint element	FEAP		4 nodes RC shell element
Bonded or Unbonded prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

〈그림 2〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

설계수명동안 일정 성능 이상을 유지해야하는 철근콘크리트 구조물에 있어서 철근의 항복 강도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 부식이다. 부식에 의한 철근 유효 단면적의 감소가 철근의 강도 감소로 이어지기 때문이다. 즉 부식으로 인한 유효단면적의 감소로 인하여 응력과 단면적의 곱으로 나타내지는 강도는 감소하게 된다. 이때 철근의 부식은 표면에서 철근까지의 깊이와 밀접한 관계가 있다.

이 연구의 목적은 이러한 손상된 철근콘크리트 구조물을 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성을 파악하고 구조성능을 평가하는데 있다. 이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등⁽⁸⁻¹²⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹³⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 손상을 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(그림 2).

2. 손상을 고려한 철근콘크리트의 비선형 재료모델

시간의 흐름에 따라 구조물의 외부적, 내부적 영향과 물리, 화학적 요인 등에 의해 구조물의 성능이 저하하는 현상을 고려하기 위하여 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델⁽⁸⁻¹²⁾을 다음과 같이 수정하여 손상을 고려하였다.

2.1 인장강성 모델

콘크리트는 균열이 발생한 후에도 철근과 콘크리트의 부착작용에 의해서 균열면의 직각방향으로 응력의 일부분을 부담한다. 이와 같은 균열직각방향으로의 인장강성효과를 고려하기 위해서, 철근콘크리트 부재의 일축인장실험을 기초로 한 실험식에 Okamura 등이 균열직각방향의 인장변형률의 함수로써 제안한 부착모델⁽¹⁴⁾을 기본적으로 적용한다. 이 연구에서는 부착모델의 적용을 균열직각방향에 대하여 적용하지 않고 철근의 축방향에 대하여 적용함으로써 원실험식에 충실하도록 하였다.

$$\sigma_{xt} = f_t \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_x} \right)^c \quad \sigma_{yt} = f_t \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_y} \right)^c \quad (1)$$

여기서, σ_{xt}, σ_{yt} 는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장응력, f_t 는 균열직각방향으로의 콘크리트의 인장강도, ϵ_{cr} 는 콘크리트의 균열변형률, ϵ_x, ϵ_y 는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장변형률, 그리고 c 는 부착 매개변수(0.2: 용접망, 0.4: 이형철근, 0.6: 원형철근, 2.0: 무근콘크리트)이다.⁽¹⁵⁾

이 연구에서는 부착 매개변수를 변화시켜 손상을 나타내었다.

2.2 종방향 철근의 기초로부터의 정착슬립

철근콘크리트 교각 등과 같은 구조물은 보, 기둥, 기초 등

서로 다른 종류의 부재들로 이루어져 있기 때문에 기둥과 기초부 등의 경계면에는 단면강성이 급변함에 따라 철근의 정착슬립(Anchorage Slip)이나 접합면의 미끄러짐, 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속 변위가 발생하게 되는데 이를 고려하기 위해 경계면 요소(Interface Element)를 도입하였다.

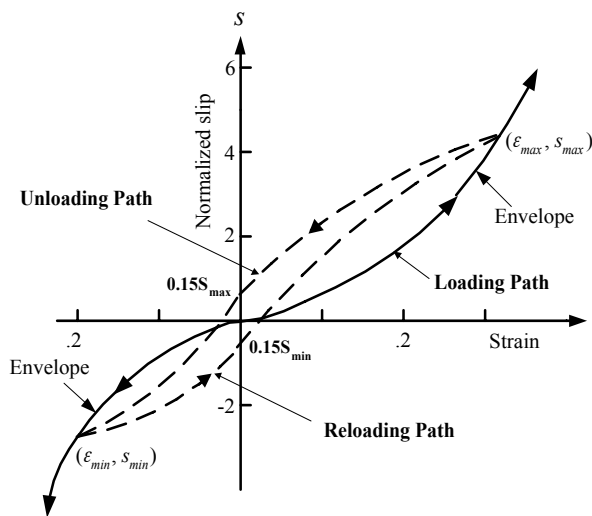
이 연구에서는 기초로부터의 철근의 정착슬립에 관한 해석모델은 Shima 등이 제안하고 있는 정착길이가 긴 경우의 철근의 변형률-슬립(Slip) 관계식⁽¹⁶⁾을 기본적으로 사용하였다.

$$\text{철근항복전, } s = \epsilon_s \cdot (2 + 3500 \cdot \epsilon_s) \quad (2)$$

$$\text{철근항복후, } s = 0.0047 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y/2 \quad (3)$$

여기서, s 는 $(\frac{Slip}{D})(\frac{f'_c}{200})^{2/3}$, D 는 철근의 직경, f'_c 는 콘크리트의 일축압축강도, ϵ_s 는 철근의 변형률, f_u 는 철근의 인장강도, f_y 는 철근의 항복강도, ϵ_{sh} 는 철근의 변형률 경화가 시작될 때의 변형률, 그리고 s_y 는 $\epsilon_y \cdot (2 + 3500 \cdot \epsilon_y)$ 이다.

반복하중을 받는 철근콘크리트 부재에는 높은 인장응력, 압축응력 및 전단응력을 번갈아 받는 경우가 일반적이므로 그러한 부분의 콘크리트는 손상을 입게 되며, 부착응력의 저하가 발생한다. 이 연구에서는 Shima 등의 제안모델에 부착응력의 저하구간을 설정하고 철근의 직경, 철근의 항복강도 및 콘크리트의 강도를 매개변수로 하여 많은 경우에 대한 해석결과로부터 수정 제안된 철근의 변형률-슬립(Slip) 관계(그림 3)를 적용하였으며 이를 이용하여 손상에 의한 부착응력의 저하를 고려하였다.



〈그림 3〉 철근의 변형률-슬립 관계

3. 손상지수에 의한 구조성능평가

최근 들어 기존 구조물의 비선형 거동특성의 파악과 구조 성능 평가를 위한 노력이 계속되고 있으며 손상정도를 판단하기 위한 척도로서 손상지수를 사용하는 경우가 많아지고 있다. 손상지수는 구조물의 손상된 정도를 평가할 수 있는 편리한 방법으로서 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타내는 지수이다. 이러한 손상지수는 구조물레벨과 요소레벨로 나누어 볼 수 있다.

구조물레벨에는 구조물의 기본주기 변화를 이용하는 평가방법이 있으며 요소레벨에는 강성의 저하, 피로의 정식화 그리고 이력곡선의 에너지 방출 등을 이용하는 평가방법이 있다. 이러한 구조물레벨의 손상지수 산정법은 구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이지만 각 하중단계에서의 기본주기를 계산하는 등의 번거로움이 있다.

이에 기존의 연구^{(10),(11)}에서는 비선형 유한요소해석을 전제로 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스적분점에서의 변형률을 이용하여 해석프로그램에서 직접 손상지수를 산정할 수 있는 방법을 개발하였다. 즉, 비탄성 해석으로 얻어지는 콘크리트와 철근의 극한변형률에 근거한 파괴기준을 토대로 요소레벨의 손상지수를 개발하였다. 파괴기준은 크게 콘크리트의 압축파괴와 전단파괴, 그리고 철근의 인장파괴로 나누어 볼 수 있으며 이를 토대로 각 해석단계의 변형률에 해당하는 손상지수를 구한다. 이러한 파괴기준과 손상지수를 정리하여 표 1에 나타내었다.

손상지수 DI 는 손상이 없는 0.0으로부터 파괴를 나타내는 1.0까지로 표현되며 손상지수 0.75는 파괴의 시점을 알린다. 일반 구조물에 대한 각각의 손상지수의 값을 이 연구의 대상인 손상된 철근콘크리트 구조물에 수정하여 적용하면, 보수가 가능한 손상지수 값 0.1은 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달한 상태로, 보수가 불가능한 손상지수 값 0.4는 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 파괴가 박리된 상태로, 파괴 시점의 손상지수 값인 0.75는 주철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로, 그리고 손상지수 값 1.0은 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 상태로 설명할 수 있다.

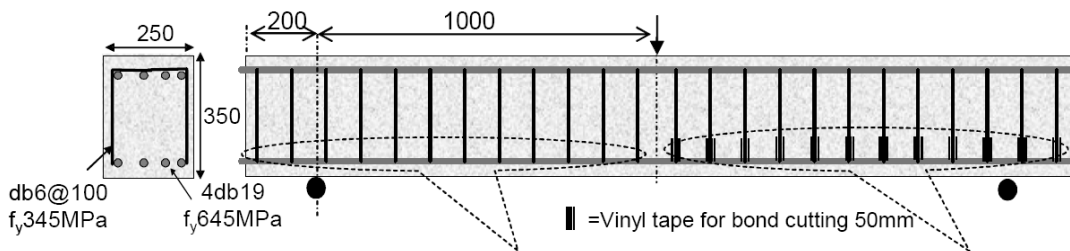
4. 검증 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 손상된 전단철근을 갖는 철근콘크리트 보의 실험

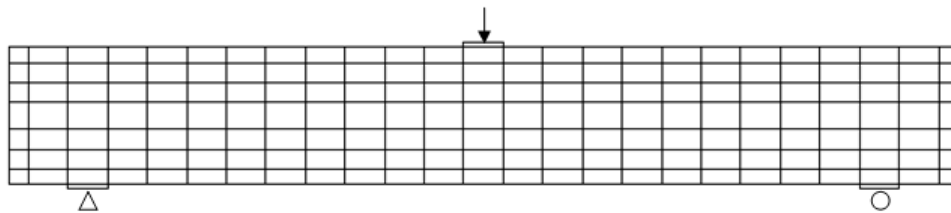
〈표 1〉 요소레벨의 손상지수

Item		Failure Criterion (ϵ_{cu} or ϵ_{tu})	Damage Index ($D.I_e$)
Concrete	Compressive and Shear	$0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1 - ftg_c \left(\frac{2\epsilon_{cu} - \epsilon_{cs}}{2\epsilon_{cu}} \right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20 \left(\frac{\epsilon_{ts}}{2ftg_r \epsilon_{tu}} \right)^{0.67}$

* ρ_s = transverse confining steel ratio; f_{yh} = yield stress of the confining steel
 ϵ_{sm} = steel strain at maximum tensile stress; f'_{cc} = confined concrete compressive strength
 ftg_c = fatigue parameter for concrete; ftg_r = fatigue parameter for steel
 ϵ_{cs} = compressive strain in analysis step; ϵ_{ts} = tensile strain in analysis step
 ϵ_{cu} = ultimate strain of concrete; ϵ_{tu} = ultimate strain of reinforcing bars



〈그림 4〉 실험체의 제원 (단위: mm)⁽¹⁷⁾



8-node RC element	175
8-node Elastic element	3

〈그림 5〉 유한요소모델

체^{(17),(18)}와 손상된 주철근을 갖는 철근콘크리트 보의 실험체^{(2),(18)}를 선정하여 해석하고 그 결과를 고찰하였다.

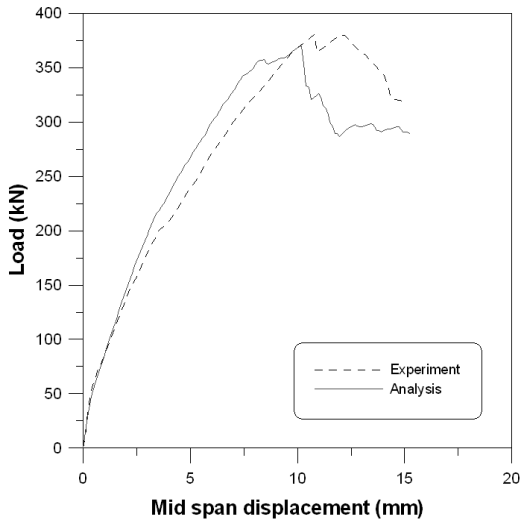
4.1 손상된 전단철근을 갖는 철근콘크리트 보

이 연구에서 개발한 손상을 고려한 비선형 재료모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 4에 나타난 것과 같은 손상된 전단철근을 모사한 철근콘크리트 보의 실험체⁽¹⁷⁾를 선정하였다. 실험체는 기준이 되는 손상이 없는 실험체와 손상된 실험체로 구성되어 있다. 이 실험체를 검증 예로 채택한 이유는 손상된 전단철근이 철근콘크리트 보 실험체의 전체 거동특성에 미치는 영향을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

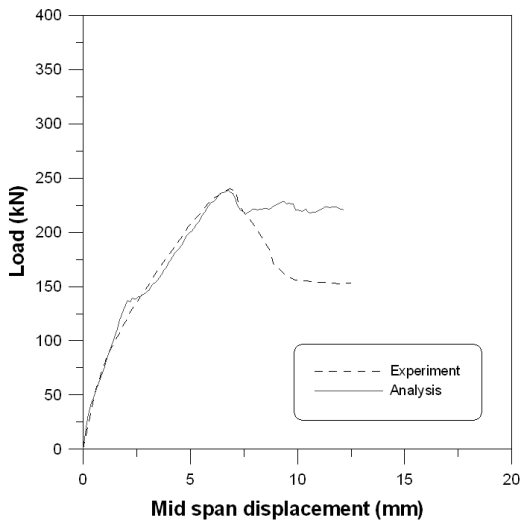
실험체는 그림 4에 보이는 바와 같이 250 mm × 350

mm × 2400 mm의 장방형의 단순보로서 콘크리트 설계기준 압축강도는 35 MPa이고 집중하중에 의한 파괴 실험을 수행하였다. 실험체는 그림 1과 같은 전단철근의 손상을 모사하기 위하여 50 mm 길이의 비닐테이프를 사용하여 스티럽을 감싸 주변 콘크리트와의 부착을 제거하였다.

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 그림 5와 같이 총 178개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 175개, 그리고 가력점과 지지점에 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소 3개가 사용되었다. 손상된 전단철근에 의한 영향은 수직방향 전단스티럽의 철근비와 부착 매개변수를 변화시켜 손상을 나타내었다. 이때 부착 매개변수는 무근콘크리트에 대한



〈그림 6〉 손상이 없는 실험체의 하중-변위 곡선

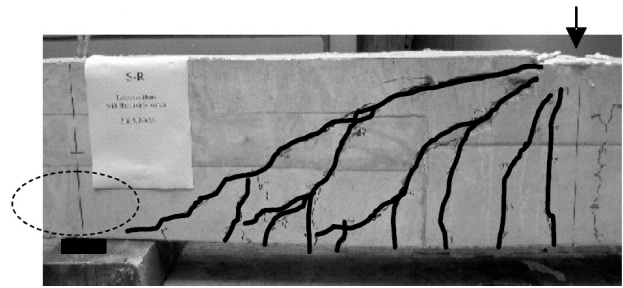


〈그림 7〉 손상된 실험체의 하중-변위 곡선

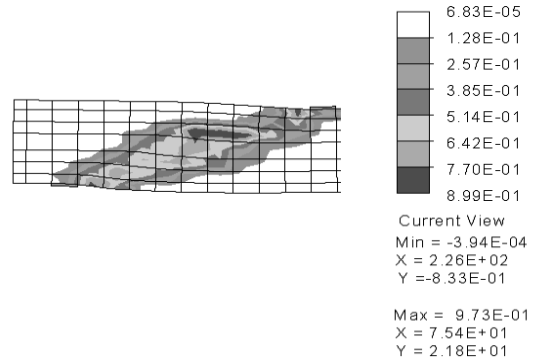
2.0으로 정하였다.

그림 6, 7은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있다. 전단철근에 손상이 없는 철근콘크리트 보 실험체의 실험값은 380.5 kN이며 해석값은 369.8 kN이다. 그리고 전단철근에 손상이 있는 철근콘크리트 보 실험체의 실험값은 240.1 kN이며 해석값은 239.0 kN이다. 손상 유무에 따라 철근콘크리트 보 실험체의 전단내력이 전단파괴에 의해 실험에서는 37% 감소하고, 해석에서는 36% 감소함을 확인할 수 있었다.

그림 8, 9는 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도^{(10),(11)}와 실험결과를 비교한 예로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 균열진전 및 파괴양상을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 철근콘크리트 보 실험체의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 성능평가 등에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

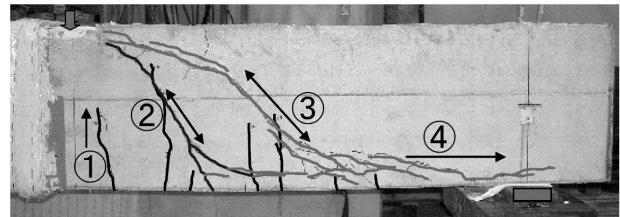


(a) Experiment⁽¹⁷⁾

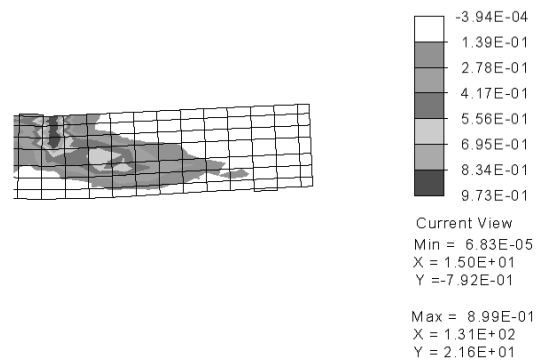


(b) Analysis

〈그림 8〉 손상이 없는 실험체의 실험 및 해석 결과



(a) Experiment⁽¹⁷⁾

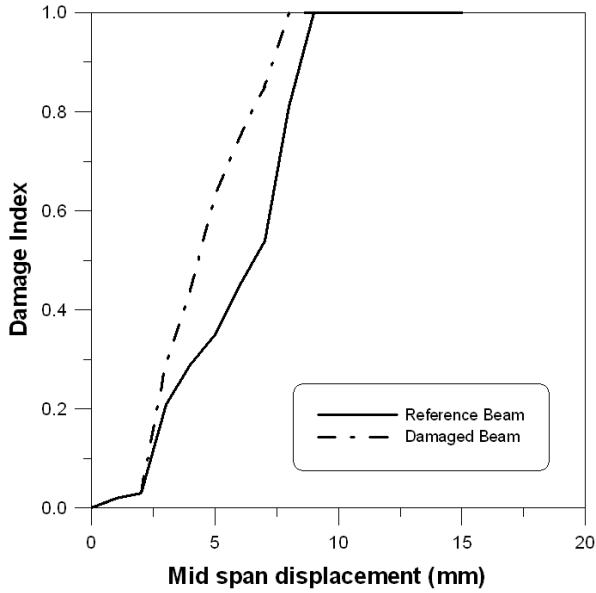


(b) Analysis

〈그림 9〉 손상된 실험체의 실험 및 해석 결과

그림 10은 이 실험의 변수로 사용한 전단철근의 손상유무에 따른 실험체의 거동특성을 비교한 것으로 손상된 실험체가 하중 증가에 따라 손상이 진전되는 실험결과를 해석결과가 잘 모사하고 있다. 해석결과와 재하 단계별 손상지수값을 확인해보면 처짐 4 mm에서 손상이 없는 실험체는 0.29이고 손상된 실험체는 0.44이다. 그리고 처짐 8 mm에

서 손상이 없는 실험체는 0.81이며 손상된 실험체는 1.0이다. 즉 전단철근에 손상이 없는 실험체보다 손상이 있는 실험체가 동일한 하중단계에서 손상이 진전되고 있음을 확인할 수 있다.



〈그림 10〉 실험체의 구조성능평가

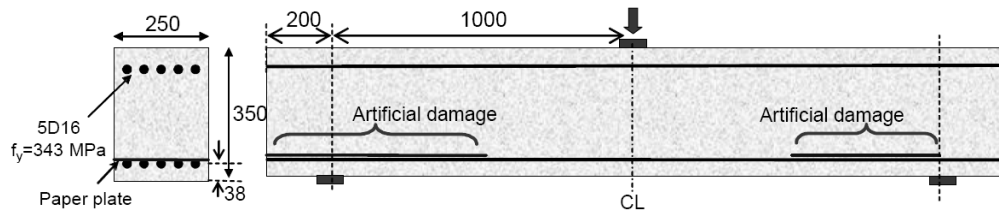
4.2 손상된 주철근을 갖는 철근콘크리트 보

이 연구의 해석기법에 대한 타당성을 확인하기 위하여 Toongoenthong 등의 실험체⁽²⁾를 해석하였다. 이 실험체는 손상된 주철근을 모사한 철근콘크리트 보 실험체와 기준이 되는 손상이 없는 실험체의 구조성능 등을 비교·검토하기 위한 것으로서 그림 11과 같다.

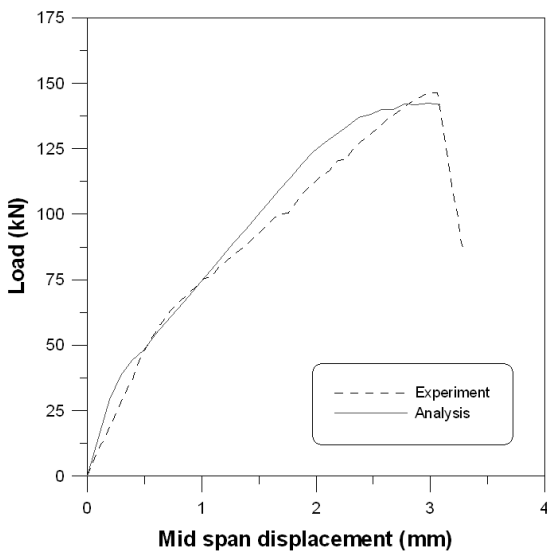
실험체는 그림 11에 보이는 바와 같이 250 mm × 350 mm × 2400 mm의 장방형의 단순보로서 콘크리트 설계기준 압축강도는 34 MPa이고 집중하중에 의한 파괴 실험을 수행하였다. 실험체는 주철근 정착부의 손상 등을 모사하기 위하여 1 mm 두께의 종이판을 사용하여 주변 콘크리트와 분리시켰다.

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 4.1절의 그림 5와 같이 총 178개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 175개, 그리고 가력점과 지지점에 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소 3개가 사용되었다. 손상된 주철근에 의한 영향은 부착 매개변수를 변화시켜 손상을 나타내었으며 부착 매개변수는 무근콘크리트에 대한 2.0으로 정하였다.

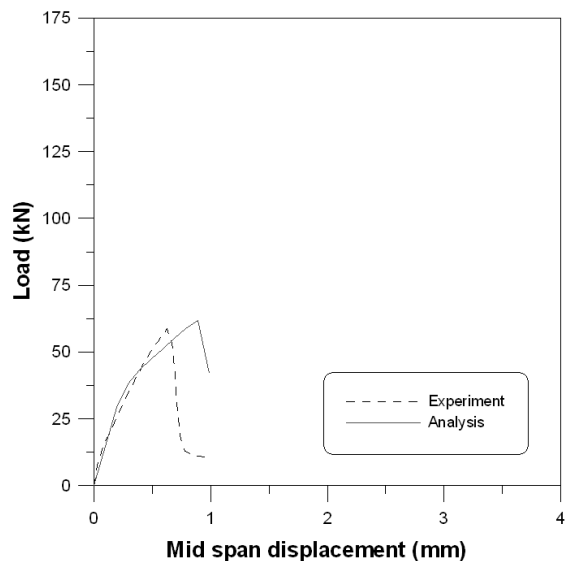
그림 12, 13은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해



〈그림 11〉 실험체의 제원 (단위: mm)⁽²⁾



〈그림 12〉 손상이 없는 실험체의 하중-변위 곡선



〈그림 13〉 손상된 실험체의 하중-변위 곡선

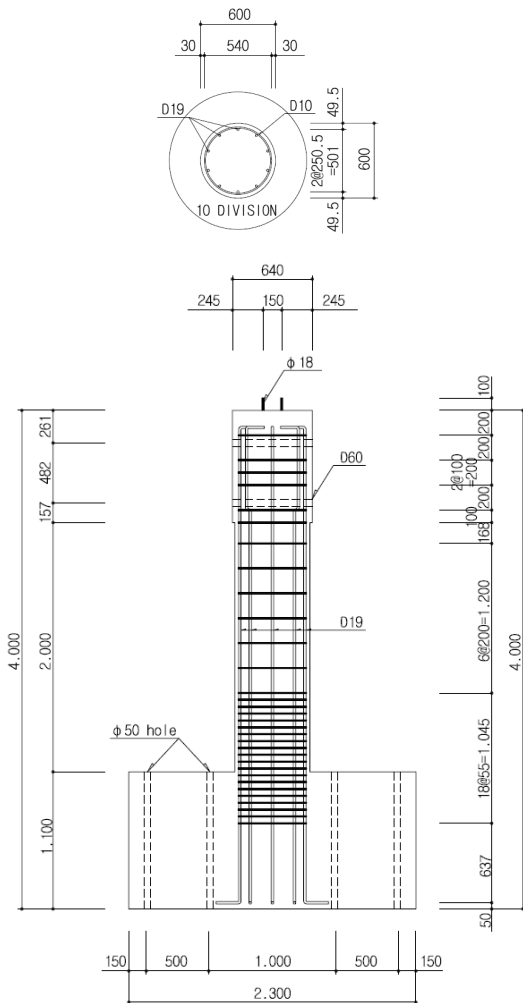
석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있다. 주철근에 손상이 없는 철근콘크리트 보 실험체의 실험값은 146.3 kN이며 해석값은 142.4 kN이다. 그리고 주철근에 손상이 있는 철근콘크리트 보 실험체의 실험값은 58.6 kN이며 해석값은 61.8 kN이다. 손상 유무에 따라 철근콘크리트 보 실험체의 전단내력이 실험에서는 60% 감소하고, 해석에서는 57% 감소함을 확인할 수 있었다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 손상된 철근콘크리트 보의 비탄성 거동특성을 적절히 평가하고 있음을 알 수 있다.

5. 적용 예 및 고찰

반복하중을 받는 손상된 철근콘크리트 교각구조의 내진 성능을 평가하기 위한 수치예제로 기존 연구⁽¹¹⁾에서 준정적 실험으로 검증된 철근콘크리트 교각 실험체를 선정하였다.

수치실험에 사용된 예제의 모델상세는 그림 14에 나타내



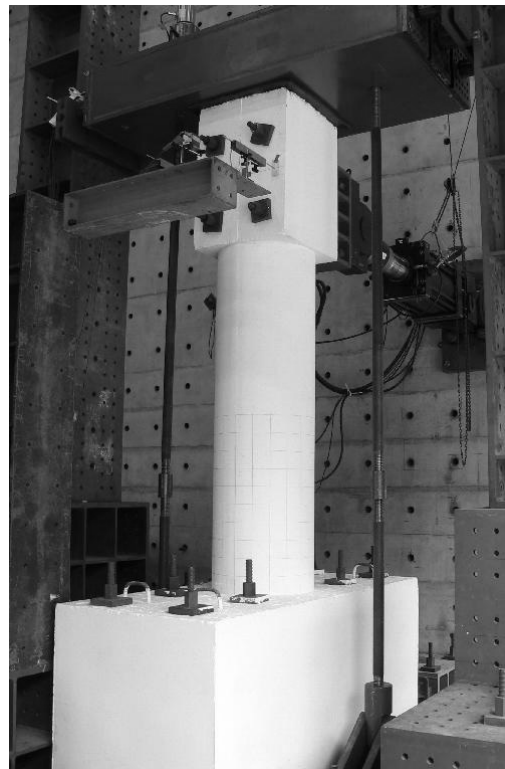
〈그림 14〉 교각 실험체의 상세 (단위: mm)

었다. 교각실험체의 콘크리트 압축강도는 22.4 MPa, 종방향 철근의 항복강도는 351.4 MPa 그리고 횡방향 철근의 항복강도는 392.3 MPa이다.

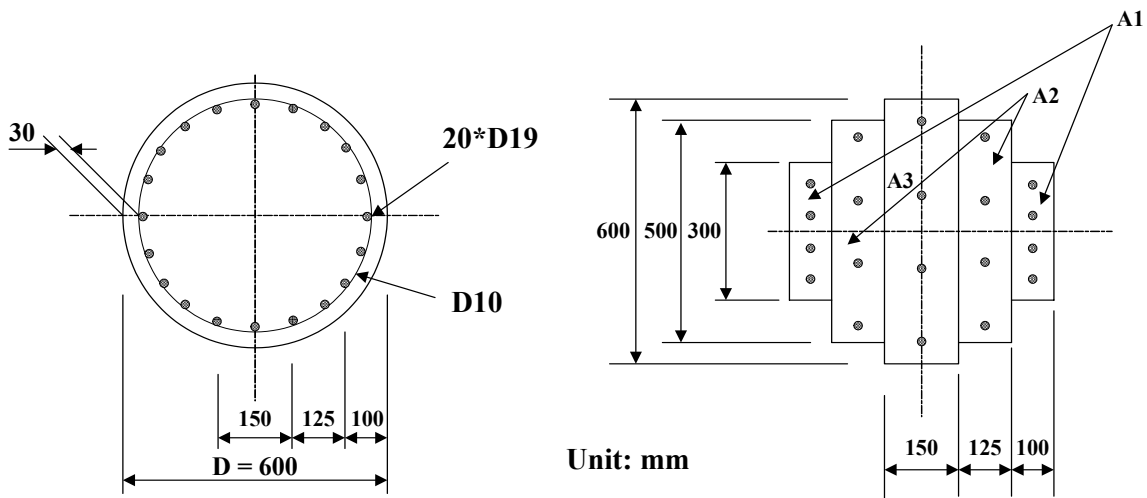
실험체의 축방향력은 교각단면 축강도의 10%에 해당하는 일정 축하중을 재하하였으며, 유압펌프에 의한 일정하중 유지장치로 실험도중 축력의 변화가 없도록 하였다(그림 15). 횡방향 하중은 2,000 kN 가력기(Actuator)를 가력벽에 부착하여 실험을 실시하였으며, ±0.25%, ±0.50%, ±1.00%, ±1.50%, ±2.00%, ±2.50%, ±3.00%, ±4.00%, ±5.00%, ±6.00%, ±7.00%, ±8.00%로 드리프트 비(Drift Ratio)를 증가시키는 방법으로 2 사이클(Cycle)씩 반복 재하하였다.

실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 그림 16과 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 원형 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

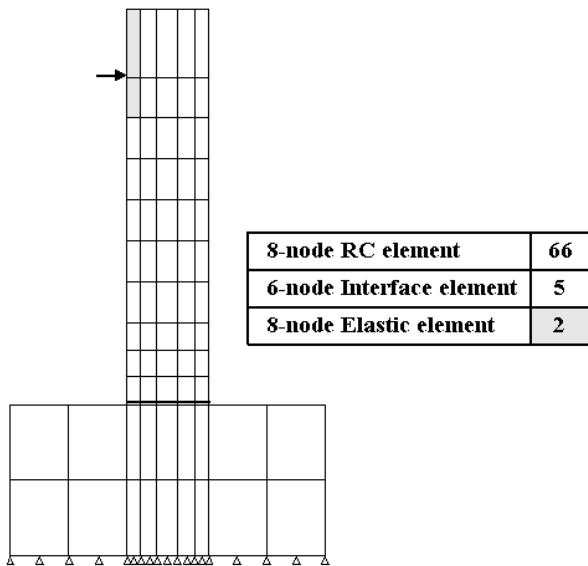
그림 17은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립



〈그림 15〉 실험체의 전경



〈그림 16〉 등가환산단면

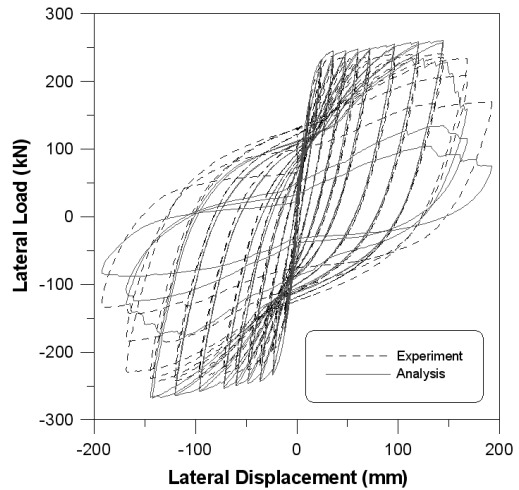


〈그림 17〉 유한요소모델

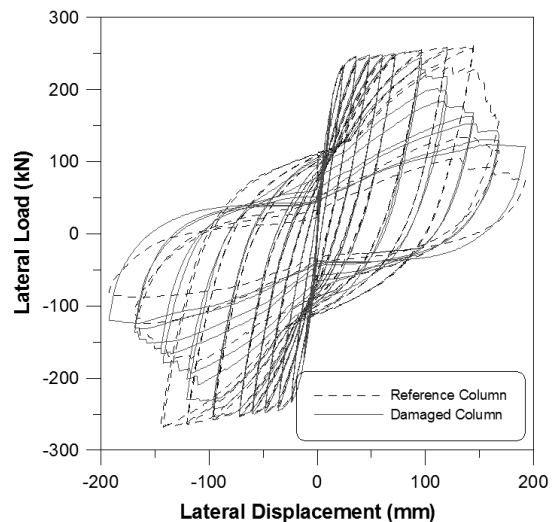
등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다.

그림 18은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

그림 19는 손상된 교각 예제와 손상이 없는 교각 예제의 유한요소해석 결과를 비교하여 나타내고 있다. 이때 손상된 교각은 철근의 부식 등으로 발생하는 단면 감소를 모사하였으며 기존 연구결과⁽¹⁾를 토대로 철근의 경년 열화 함수를 적

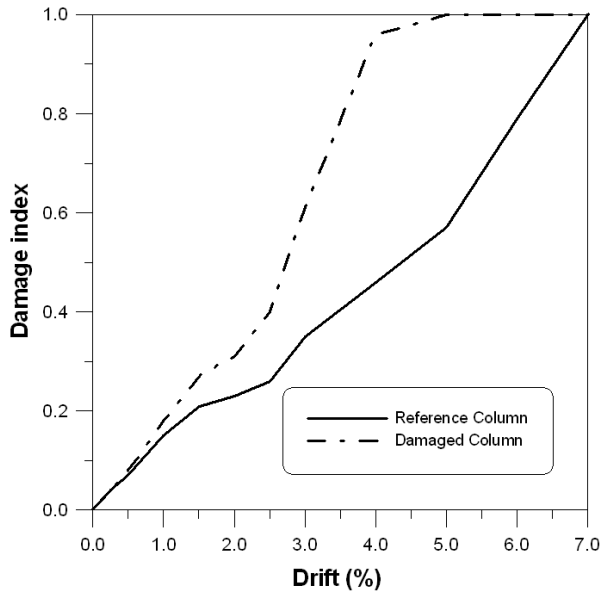


〈그림 18〉 교각 실험체의 하중-변위 이력곡선



〈그림 19〉 하중-변위 이력곡선 비교

용하여 횡방향 구속철근의 단면적을 25% 감소시켰다. 횡방



〈그림 20〉 손상지수에 의한 구조성능평가

향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시켜주는데 이러한 철근의 손상이 구속효과와 감소시켜준다. 그림에서 확인되는 바와 같이 손상된 교각 예제는 손상이 없는 교각 예제와 다른 응답거동, 즉 극한강도, 연성도, 그리고 소산에너지 감소 발생 등이 나타난다. 따라서 이러한 손상된 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가에 있어서는 이 연구에서 제안한 손상을 고려한 비선형 유한요소해석 기법이 필요할 것으로 판단된다.

그림 20은 손상유무에 따른 교각 예제의 거동특성을 비교한 것으로 손상된 교각이 하중 증가에 따라 손상이 없는 교각보다 손상이 진전되는 결과를 보여주고 있다. 해석결과 재하 단계별 손상지수 값을 확인해보면 drift 2.5%에서 손상이 없는 교각 예제는 0.26이고 손상된 교각 예제는 0.40이다. 그리고 drift 5.0%에서 손상이 없는 교각은 0.57이며 손상된 교각은 1.0이다. 즉 손상이 없는 교각 예제보다 손상된 교각 예제가 동일한 하중단계에서 손상이 진전되고 있음을 확인할 수 있다.

일련의 해석결과와 실험결과를 비교로부터 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 기존 철근콘크리트 교각의 손상을 고려한 구조성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

이 연구에서는 손상된 철근콘크리트 구조물의 비선형 거동 파악과 구조성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 프로

그램을 사용하여, 다양한 철근콘크리트 구조물을 해석하였다. 실험결과와 비교검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 이 연구에서는 손상이 있는 철근콘크리트 구조물을 대상으로 하여 콘크리트 구조물의 성능저하를 체계적으로 구현하는 구조성능평가 프로그램을 개발하였다.
2. 제안한 해석기법과 모델이 손상된 철근콘크리트 구조물의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다. 또한 제안된 비선형 유한요소해석은 손상된 철근콘크리트 구조물의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공할 수 있다.
3. 이 연구에서 구조물의 손상정도를 판단하기 위한 척도로서 개발한 손상지수를 사용하여 손상된 철근콘크리트 구조물의 구조성능을 신뢰성 있게 평가하였다. 손상지수는 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타내는 지수이다.
4. 지진하중을 받는 손상된 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 기존 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

1. 고희무, 조근희, 조호현, “경년 열화를 고려한 철근콘크리트 구조물의 지진응답해석,” 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 239-247, 2001.
2. Toongoenthong, K., and Maekawa, K., “Interaction of Pre-Induced Damages along Main Reinforcement and Diagonal Shear in RC Members,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, No. 3, 431-443, 2004.
3. Toongoenthong, K., and Maekawa, K., “Multi-Mechanical Approach to Structural Performance Assessment of Corroded RC Members in Shear,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 3, No. 1, 107-122, 2005.
4. 김길수, 변근주, 송하원, 이창홍, “균열 및 철근부식에 의해 열화된 콘크리트 구조물의 성능저하해석,” 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제17권, 1호, 163-166, 2005.
5. 송하원, 유동우, 변근주, “정적 반복하중을 받는 노후된 철근콘크리트 T형교의 파괴해석,” 한국콘크리트학회논문집, 제10권, 6호, 291-301, 1998.
6. Rodriguez, J., Ortega, L. M., and Casal, J., “Load carrying Capacity of Concrete Structures with Corroded Reinforcement,” *Journal of Construction and Building Materials*, 11(4), 239-248, 1997.
7. Miyagawa, T., “Safety Evaluation of Structures with Ruptured Reinforcing Bars by ASR (Intermediate Report),” *Journal*

- of JSCE, Vol. 88, 83-84, 2003.
8. 김태훈, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가,” 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
 9. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., “Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation,” *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 9, 1199-1207, 2003.
 10. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., “Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns,” *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, 576-592, 2005.
 11. Kim, T. H., Kim, Y. J., Kang, H. T., and Shin, H. M., “Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns Using a Damage Index,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 34, No. 7, 843-855, 2007.
 12. Kim, T. H., Hong, H. K., Chung, Y. S., and Shin, H. M., “Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns with Lap Splices Using Shaking Table Tests,” *Magazine of Concrete Research*, V. 61, No. 9, 705-719, 2009.
 13. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
 14. Okamura, H., Maekawa, K., and Sivasubramaniyam, S., “Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element,” *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE*, 528-543, 1985.
 15. Shin, H. M., “Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to Reversed Cyclic In-plane Loadings,” Ph.D. Thesis, University of Tokyo, 1988.
 16. Shima, H., Chou, L., and Okamura, H., “Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete,” *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, Vol. 39, No. 2, 133-194, 1987.
 17. Toongoenthong, K., and Maekawa, K., “Computational Performance Assessment of Damaged RC Members with Fractured Stirrups,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 3, No. 1, 123-136, 2005.
 18. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor and Francis, London, 2009.