한국지진공학회 논문집 | 제15권 제5호 (통권 제81호) | 2011년 10월, pp.45~54
ISSN 1226-525X eISSN 2234-1099 http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2011.15.5.045

열화된 철근콘크리트 교각의 성능평가

Performance Assessment of Deteriorated Reinforced Concrete Bridge Columns

김태훈[1)]
Kim, Tae Hoon

국문 요약 >> 이 연구에서는 열화된 철근콘크리트 교각의 성능평가를 위한 비선형 유한요소해석 기법을 제시하였다. 사용된 프로그램은 이러한 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 열화된 철근콘크리트 교각의 거동을 예측하기 위해서 진보된 열화재료모델을 개발하였다. 이 연구에서는 열화된 철근콘크리트 교각의 성능을 파악하기 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

주요어 열화된 철근콘크리트 교각, 성능평가, 비선형 유한요소해석, 재료적 비선형성, 열화재료모델

ABSTRACT >> This paper presents a nonlinear finite element analysis procedure for the performance assessment of deteriorated reinforced concrete bridge columns. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), was used to analyze these reinforced concrete structures. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. Advanced deteriorated material models are developed to predict behaviors of deteriorated reinforced concrete bridge columns. The proposed numerical method for the performance of damaged reinforced concrete bridge columns is verified by comparison with reliable experimental results.

Key words Deteriorated reinforced concrete bridge columns, Performance assessment, Nonlinear finite element analysis, Material nonlinearity, Deteriorated material models

1. 서 론

1.1 연구 배경

철근콘크리트 구조물에서 열화는 구조재료의 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 철근의 부식과 콘크리트의 탈락으로 인하여 구조물의 성능을 감소시킨다. 특히 지진해석 관점에서 구조물의 경년열화는 예기치 않은 파괴모드를 발생시키거나 동특성의 변화, 저항성능의 감소, 초기파괴위치 등에 영향을 미친다. 그 결과 구조물의 기대수명이 감소될 수 있으므로 노후화된 구조물의 내진성능평가와 유지관리를 위해서는 열화를 고려한 구조해석은 필수적이다.

철근콘크리트는 타설 시점으로부터 건조수축, 수화열에 의한 온도응력, 예기치 않은 하중재하와 같은 영향으로 균열이 발생하게 되며 균열이 발생한 구조물은 염화물 침투에 취약하게 되어 철근부식이 가속화된다. 철근이 부식되면 단면이 결손되고 부식에 의한 피복 콘크리트의 균열과 부식생성물로 인하여 철근과 콘크리트사이의 부착성능은 저하된다. 이러한 부착성능의 저하는 철근주변에서 콘크리트의 인장경화거동 등 거동특성에 영향을 미치게 된다.[1-5]

이 연구에서는 그림 1과 같은 침해적인 환경요인에 의해 발생하는 열화로 인한 철근콘크리트 교각의 성능저하를 대

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

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 8. 8 / 수정일 1차: 2011. 9. 19, 2차: 2011. 9. 20 / 게재확정일 : 2011. 9. 20)

ⓒ 2011EESK www.eesk.or.kr

2nd Deterioration Stage
Inspection Year = 1988

3rd Deterioration Stage
Inspection Year = 1998

4th Deterioration Stage
Inspection Year = 2000

〈그림 1〉 철근콘크리트 교각의 열화[6]

상으로 하고 있다.[6] 이러한 철근콘크리트 교각은 초기의 성능을 유지하지 못하고 시간의 흐름에 따라 그 구조적 성능이 변화한다. 또한 지진에 대해서도 다른 지진응답, 즉 극한강도, 연성도, 그리고 소산에너지 감소가 발생한다.

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. 그리고 부식이 증가함에 따라 철근과 콘크리트의 부착강도는 초기에는 증가하고 부식이 진행함에 따라 철근 리브(Rib) 표면적의 감소로 부착강도는 지속적으로 감소한다. 이러한 철근의 부식은 최대내력 이후 부착력의 급격한 손실에 따른 피복탈락 등으로 인해 교각의 연성적 거동에 많은 영향을 끼친다.[7-10]

철근콘크리트 교각의 구조거동에 영향을 미치는 열화중 부식에 대한 평가는 잔존 내하성능 추정에 있어서 가장 중요하며 최근 비용이 늘어나고 있는 교량의 보수보강 계획에도 필수적이다. 그러나 열화된 철근콘크리트 교각의 잔존 내하성능에 대한 연구는 제한되어 수행되어 왔다. Rodriguez 등[1]은 휨-압축을 받는 철근콘크리트 교각의 내하성능에 대한 부식의 영향을 고려하였으며 Tapan[6]은 철근의 부식과 콘크리트 피복감소에 따른 철근콘크리트 교각의 구조거동 등을 조사하였다. 열화된 철근콘크리트 교각의 적절하지 않은 성능평가는 부정확한 결과를 가져올 수 있으므로 이에 대한 충분한 고려와 주의가 필요하다.

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

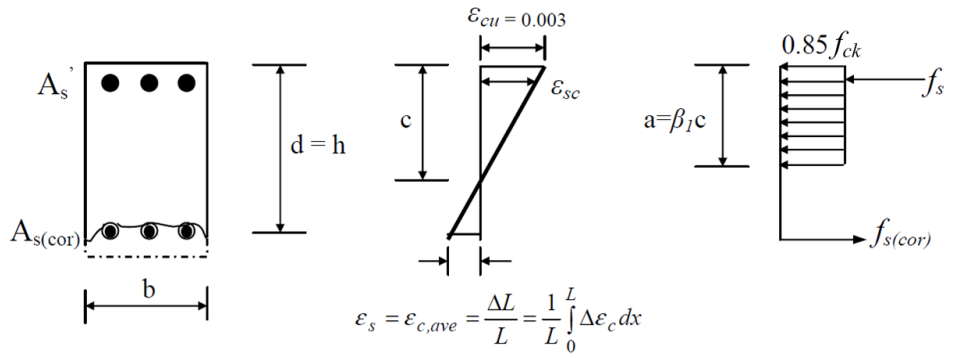
이 연구의 목적은 이러한 열화된 철근콘크리트 교각을 대상으로 비선형 유한요소해석 등을 실시하여 비탄성 거동특성을 파악하고 내진성능을 평가하는데 있다. 이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등[11-15]을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP[16]에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 열화를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(그림 2).

2. 열화를 고려한 철근콘크리트의 비선형 재료모델

시간의 흐름에 따라 구조물의 외부적, 내부적 영향과 물리, 화학적 요인 등에 의해 철근콘크리트 교각의 성능이 저하하는 현상을 고려하기 위하여 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델[11-15]을 다음과 같이 수정하여 열화를 고려하였다.

2.1 열화모델

열화된 철근의 강도를 예측하기 위해서는 부식으로 인한 철근의 강도 및 연성 감소를 반드시 고려하여야 한다. 이 연



〈그림 3〉 열화된 철근콘크리트 교각 단면의 응력과 변형률[6]

구에서는 부식된 철근의 잔존능력을 평가하기 위해서 다음 식과 같은 Du 등[4]의 실험결과를 적용하였다.

$$f = (1 - 0.005 Q_{corr}) f_y \tag{1}$$

$$A_s = (1 - 0.01 Q_{corr}) A_{so} \tag{2}$$

$$Q_{corr} = 0.046 \frac{I_{corr}}{D_b} t \tag{3}$$

여기서, f는 부식된 철근의 항복강도, f_y는 부식되기 이전의 철근의 항복강도, Q_{corr}는 부식된 철근의 량(%), A_s는 부식된 철근의 평균 단면적, A_{so}는 부식되기 이전의 철근의 단면적, I_{corr}는 구조물에서 철근의 부식율($\mu A/cm^2$), D_b는 부식되기 이전의 철근의 직경, 그리고 t는 부식 경과시간(years)이다. 이때 A/cm^2는 전류밀도로서 단위 면적당 흐르는 전류이다.

철근의 부식으로 인하여 콘크리트 내부에서 응력이 증가하게 되면 피복 콘크리트의 균열 후 탈락이 발생하게 되며 이러한 철근의 부식과 콘크리트 탈락을 관계식으로 정의하는 것은 매우 어렵다. 피복 콘크리트의 균열은 최대 후프응력이 콘크리트의 인장강도와 같게 되면 발생하고 이러한 균열이 발생한 후에도 콘크리트는 어느 정도의 잔존강도를 갖는다고 가정한다면 콘크리트 피복과 철근직경의 관계는 열화된 철근콘크리트 교각의 잔존 내하성능에 가장 중요한 요소임을 알 수 있다.

하중재하 초기에는 부식된 철근의 마디와 마디 사이에서 철근과 콘크리트 경계면의 마찰력에 의해 최대내력 도달시까지는 콘크리트와 철근사이의 슬립이 작게 나타나지만, 최대내력 이후에는 철근과 콘크리트의 기계적인 상호작용으로 인해 콘크리트 파쇄면이 힘을 받지 못하는 상태에 이르러 콘크리트와 철근 사이의 슬립이 갑자기 증가한다. 이로부터 콘크리트와 철근 사이의 부착력 손실이 발생하고 콘크리트 피복이 탈락하면서 기둥단면이 급격하게 감소하여 취성적인 거동을 나타낸다.

위와 같이 열화된 철근콘크리트 교각의 파괴형태는 철근의 부식도에 따라 큰 차이를 보이며 잔존 내하성능을 산정하기 위해서는 기존의 변형률 적합조건을 그대로 적용할 수 없으며 그림 3과 같이 부식된 철근의 응력과 변형률 관계를 나타낼 수 있는 수정된 적합방정식을 사용하여야 한다.

2.2 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[17]을 기본적으로 적용한다. 이 연구에서는 부착모델의 적용을 균열직각방향에 대하여 적용하지 않고 철근의 축방향에 대하여 적용함으로써 원실험식에 충실하도록 하였다.

$$\sigma_{xt} = f_t \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_x} \right)^c \qquad \sigma_{yt} = f_t \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_y} \right)^c \tag{4}$$

여기서, σ_{xt}, σ_{yt}는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장응력, f_t는 균열직각방향으로의 콘크리트의 인장강도, ϵ_{cr}는 콘크리트의 균열변형률, ϵ_x, ϵ_y는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장변형률, 그리고 c는 부착 매개변수(0.2: 용접망, 0.4: 이형철근, 0.6: 원형철근, 2.0: 무근콘크리트)이다.[18]

이 연구에서는 열화정도에 따라 부착 매개변수를 0.4에서

2.0까지 변화시켜 열화를 나타내었다.

2.3 축방향 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[19]을 기본적으로 사용하였다.

$$\text{철근항복전, } s = \epsilon_s \cdot (2+3500 \cdot \epsilon_s) \quad (5)$$

$$\text{철근항복후, } s = 0.0047 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y/2 \quad (6)$$

여기서, s는 $(\frac{Slip}{D})(\frac{f_{ck}}{20})^{2/3}$, D는 철근의 직경, f_{ck}는 콘크리트의 일축압축강도, ϵ_s는 철근의 변형률, f_u는 철근의 인장강도, f_y는 철근의 항복강도, ϵ_{sh}는 철근의 변형률 경화가 시작될 때의 변형률, 그리고 s_y는 $\epsilon_y \cdot (2+3500 \cdot \epsilon_y)$이다.

반복하중을 받는 철근콘크리트 부재에는 높은 인장응력, 압축응력 및 전단응력을 번갈아 받는 경우가 일반적이므로 그러한 부분의 콘크리트는 손상을 입게 되며, 부착응력의 저하가 발생한다.[20] 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 4)[12]를 적용하였으며 이를 이용하여 열화에 의한 부착응력의 저하를 고려하였다.

3. 모델의 검증

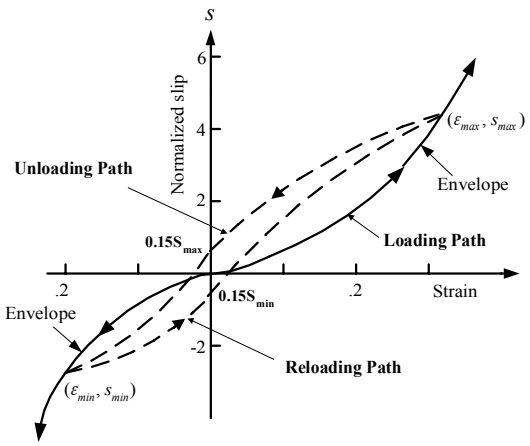
이 연구에서 개발한 열화를 고려한 비선형 재료모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 5에 나타난 것과 같은 열화된 철근콘크리트 기둥 실험체[6]를 선정하였다. 이 실험체를 검증 예로 채택한 이유는 열화된 철근콘크리트 기둥의 비탄성 거동특성을 정량화시킨 실험이기 때문이다.

실험체는 200 mm × 200 mm의 단면과 2000 mm의 높이를 갖는 기둥으로서 축하중하에서 철근의 부식이 잔존 내하성능에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 요구되는 철근의 부식은 타설시 혼합수에 염화나트륨을 첨가하고 1200 mm 구간에 100 $\mu A/cm^2$ 전류를 가하여 모사하였으며 그림 6에는 실험체의 3가지 열화된 경우를 나타내고 있다. 또한 각각의 부식율을 함께 나타내었다.

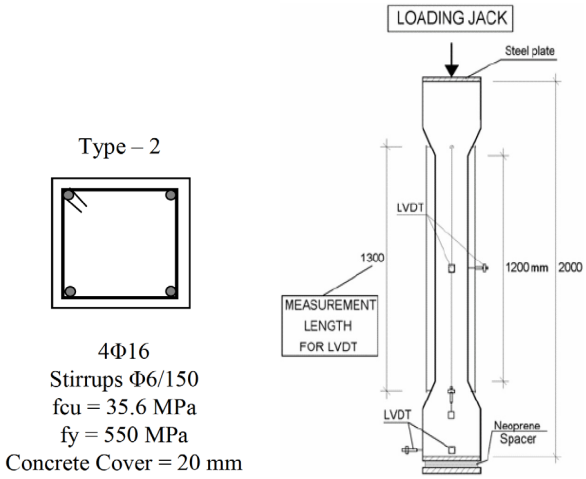
열화된 철근콘크리트 기둥의 구조거동을 전절의 열화재료모델이 포함된 수정된 해석절차에 의한 P-M 상관도(그림 7)에 의해 정량화 하여 검증하였다.

그림 8～그림 10에서 이 연구의 해석모델을 적용한 P-M 상관도 관계가 실험결과를 도출하는데 실패한 Type-2(Case-1) 실험체를 제외하고 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이때 축방향 압축의 최대 하중은 시공오차 또는 예상하지 않은 편심하중을 고려하여 나타내었다. 그리고 Tapan(2007)에 의해 개발된 P-M 상관도 관계를 함께 나타내고 있으며 이 연구에서 제안한 P-M 상관도가 실험결과와 보다 유사한 값을 나타내고 있어 보다 경제적이고 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

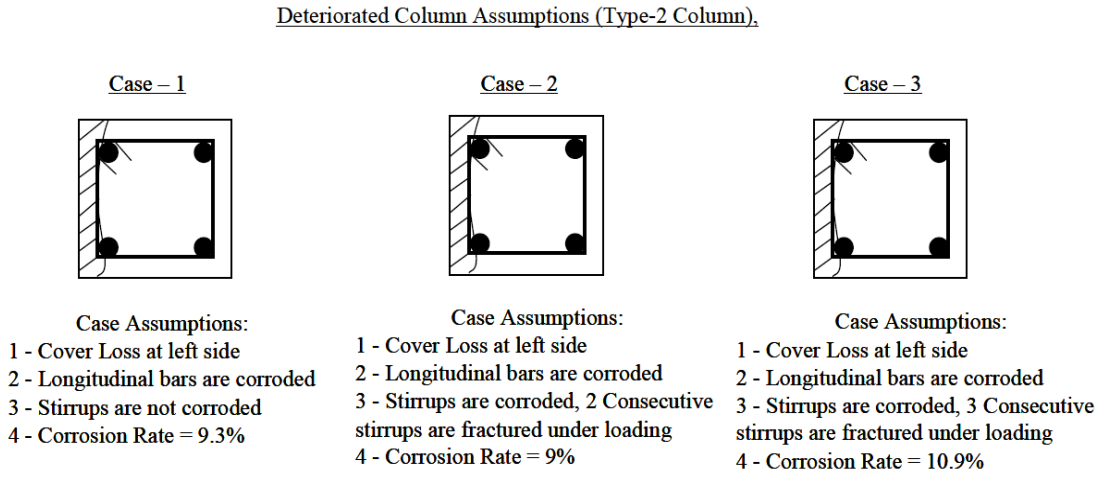
위와 같이 검증된 P-M 상관도의 적용성을 확인하기 위해



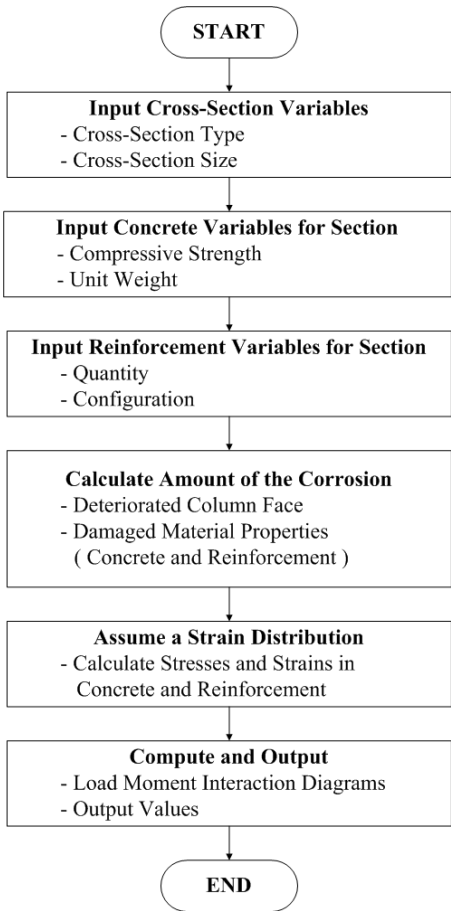
〈그림 4〉 철근의 변형률–슬립 관계



〈그림 5〉 실험체의 제원[6]

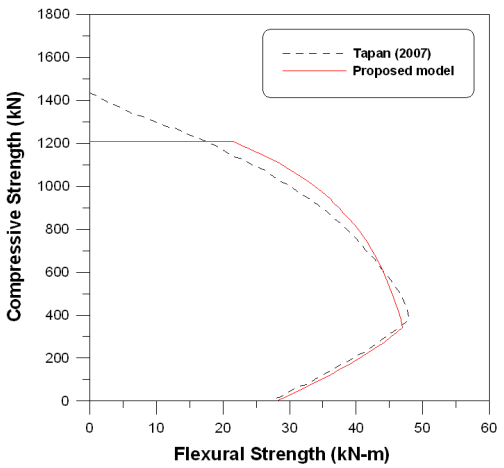


〈그림 6〉 열화된 기둥 실험체[6]

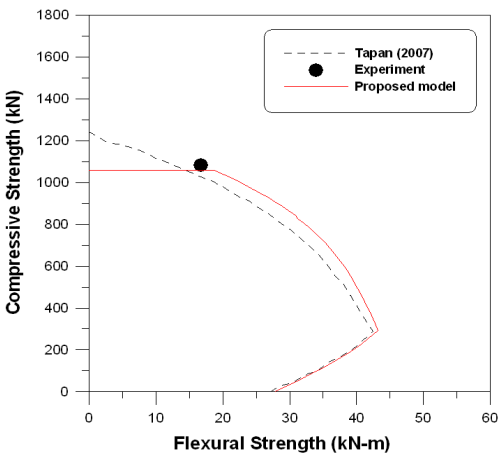


〈그림 7〉 열화된 철근콘크리트 교각의 P-M 상관도 작성 순서도

서 그림 11과 같은 철근콘크리트 기둥 실험체를 선정하여 그림 12에 나타낸 바와 같이 다양한 6가지의 열화 경우에 대한 잔존 내하성능을 조사하여 기존 연구결과와 비교 · 분석하였다. 이때 부식율(CR)은 부식되기 이전 철근의 직경을 기준으로 부식된 이후 철근의 직경과의 차이를 백분율로 나타내었다.

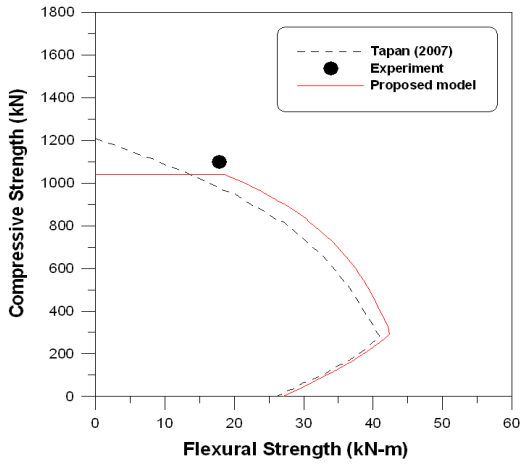


〈그림 8〉 Type-2(Case-1) 실험체의 P-M 상관도

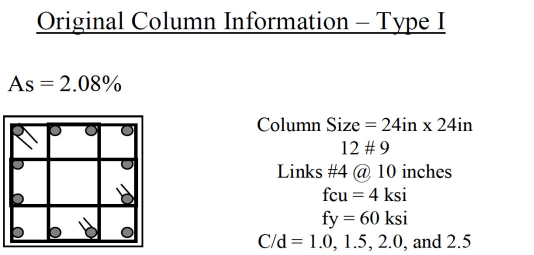


〈그림 9〉 Type-2(Case-2) 실험체의 P-M 상관도

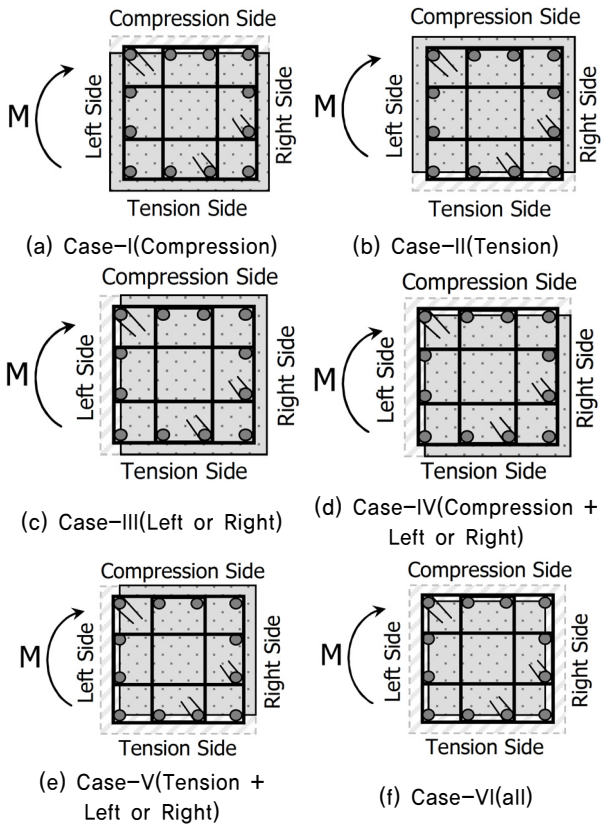
그림 13～그림 18은 이 연구의 해석모델을 적용한 P-M 상관도 관계와 Tapan(2007)에 의해 개발된 P-M 상관도 관계를 부식율(CR) 0%와 10%에 대해 각각 나타내고 있으며 6가지 열화경우에 대해 모두 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.



〈그림 10〉 Type-2(Case-3) 실험체의 P-M 상관도

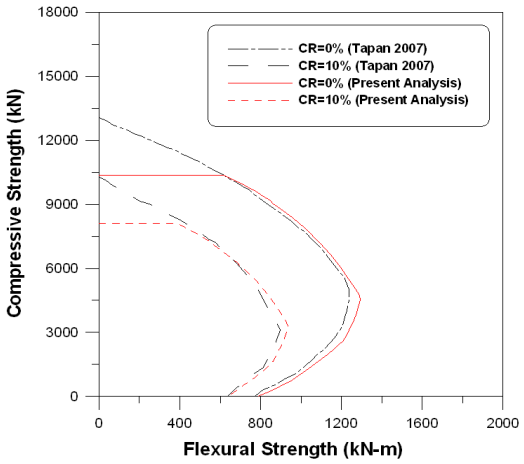


〈그림 11〉 기둥 실험체의 제원[6]

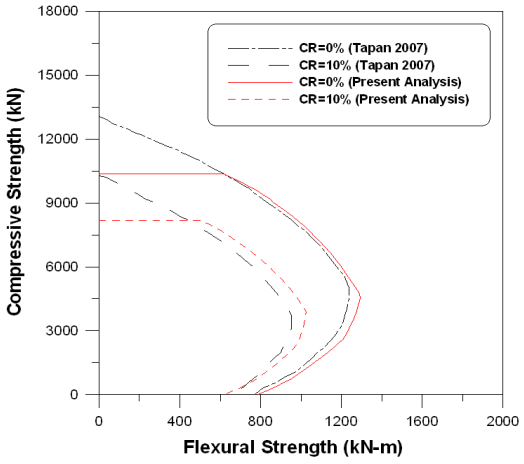


〈그림 12〉 매개변수 연구를 위한 열화조건(C/d = 2.0)[6]

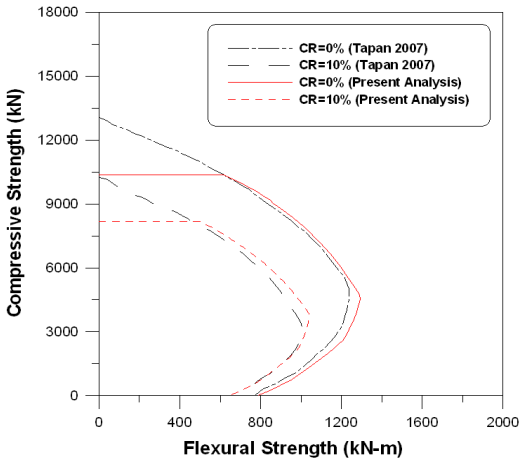
Case-I에서는 압축철근의 부식이 증가함에 따라 잔존내



〈그림 13〉 Case-I의 P-M 상관도

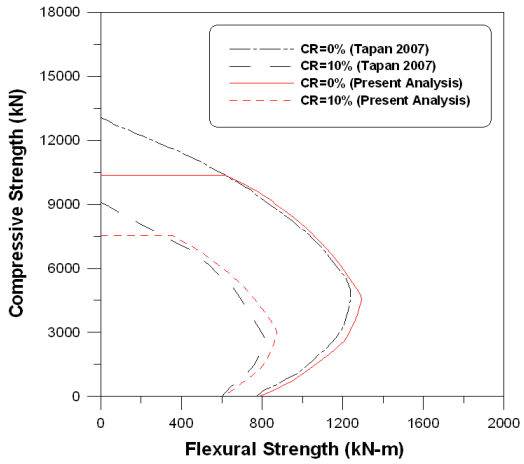


〈그림 14〉 Case-II의 P-M 상관도

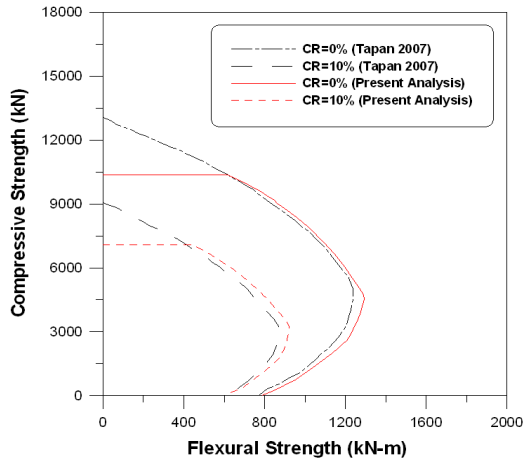


〈그림 15〉 Case-III의 P-M 상관도

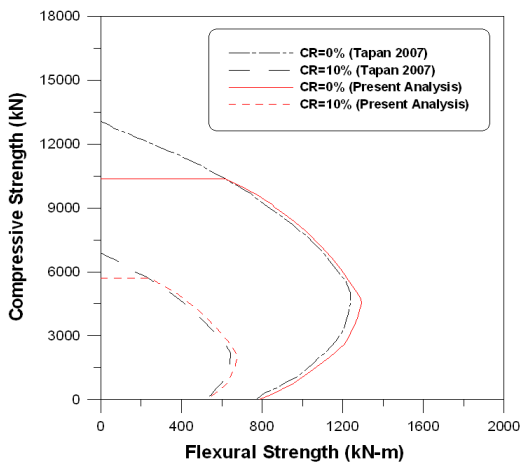
하 성능이 감소한다. 압축철근의 하중이 감소하면 축하중 능력이 줄어들고 소성중심이 인장측으로 이동함에 따라 휨 모멘트 능력도 줄어들게 된다. Case-II에서는 인장철근의 부식이 증가함에 따라 Case-I과 같이 축하중 능력이 줄어든다. 부식이 증가함에 따라 소성중심이 압축측으로 이동함에



〈그림 16〉 Case-IV의 P-M 상관도



〈그림 17〉 Case-V의 P-M 상관도



〈그림 18〉 Case-VI의 P-M 상관도

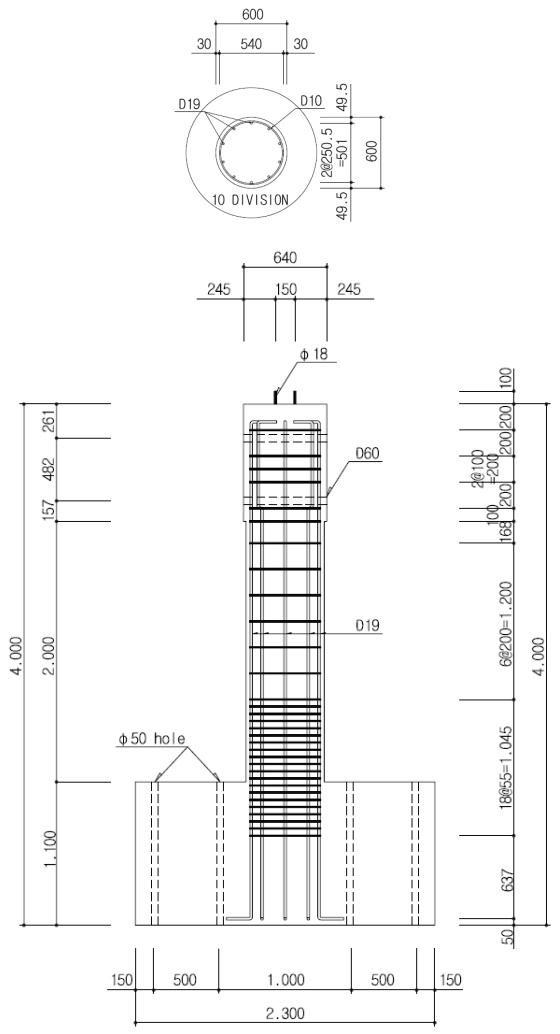
따라 휨모멘트 능력도 줄어들게 된다. Case-III에서는 좌 또는 우측의 철근이 부식함에 따라 Case-I, II와 같이 축하중 능력이 줄어든다. 부식이 증가함에 따라 압축철근과 인장철근의 하중이 감소하고 이에 따라 잔존내하 성능이 감소한다. 비대칭인 Case-IV, V에서는 철근의 부식이 증가함에 따라 축방향 특성에 의해 잔존 내하성능의 감소가 나타난다. 그리고 Case-Ⅵ에서는 모든 철근이 부식함에 따라 다른 경우보다 큰 폭으로 잔존 내하성능이 감소한다.

각 경우에 대한 P-M 상관도에서 열화단계별로 잔존 내하성능의 저하를 잘 표현하고 있으며 철근의 부식 위치가 교각의 잔존 내하성능에 다른 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 이에 대한 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4. 적용 예 및 고찰

열화된 철근콘크리트 교각구조의 내진성능을 평가하기 위한 수치예제로 기존 연구[13]에서 준정적 실험 및 비선형 유한요소해석으로 검증된 철근콘크리트 교각 실험체를 선정하였다.

수치실험에 사용된 예제의 모델상세는 그림 19에 나타내었다. 교각실험체의 콘크리트 압축강도는 22.4 MPa, 축방향 철근의 항복강도는 351.4 MPa (인장강도 470.5 MPa)



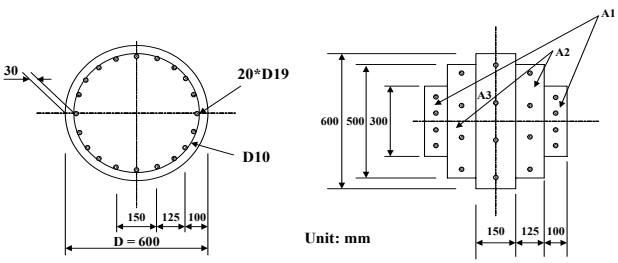
〈그림 19〉 교각 실험체의 상세 (단위: mm)[13]

그리고 횡방향 철근의 항복강도는 392.3 MPa(인장강도 517.0 MPa) 이다.

실험체의 축방향력은 교각단면 축강도의 10%에 해당하는 일정 축하중을 재하하였으며, 유압펌프에 의한 일정하중 유지장치로 실험도중 축력의 변화가 없도록 하였으며 횡방향 하중은 2,000 kN 가력기(Actuator)를 가력벽에 부착하여 실험을 실시하였다(그림 20). 이때 사용된 가력 이력곡선은 그림 21과 같다.

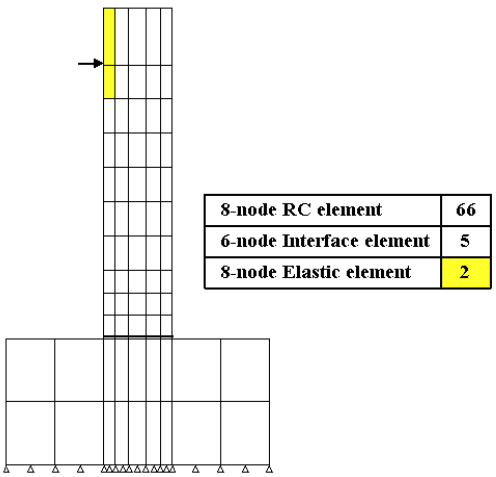
실험체들의 유한요소해석을 위해서 원형 철근콘크리트 교각을 등가환산단면을 이용하여 그림 22과 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 그림 23은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였다.

그림 24는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있다. 해석결과는 최대하중까지 실험결과에 비해 다소 크게 평가하고 있으며 최대하중 이후에는 에너지 소산능력을 다소 작게 평가하고 있으나 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이

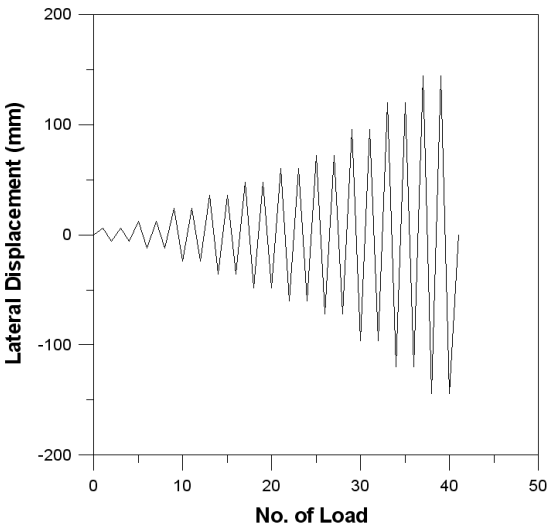


〈그림 22〉 등가환산단면

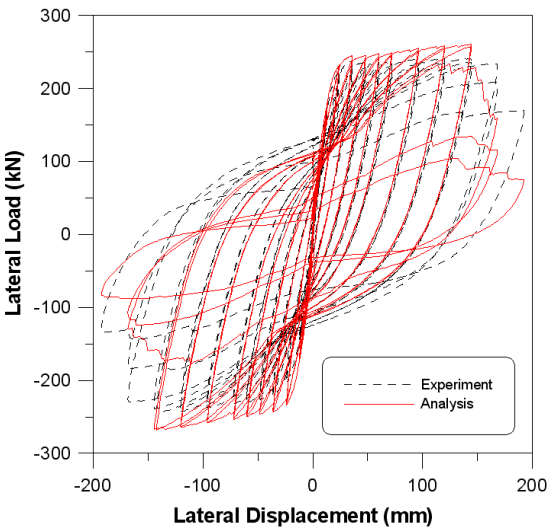
〈그림 20〉 실험체의 전경[13]



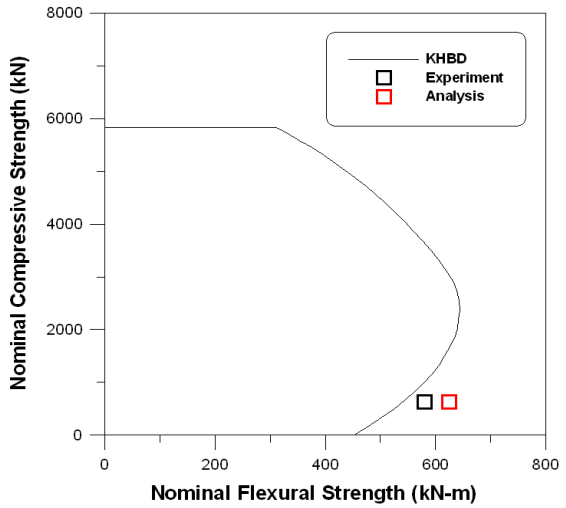
〈그림 23〉 유한요소모델



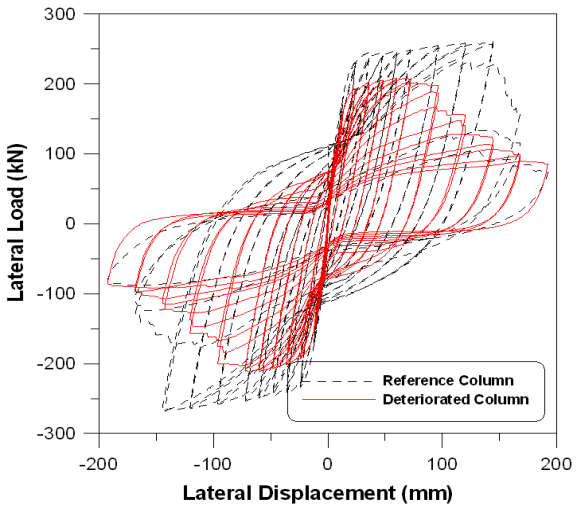
〈그림 21〉 실험체의 가력이력



〈그림 24〉 교각 실험체의 하중-변위 이력곡선



〈그림 25〉 교각 실험체의 P-M 상관도

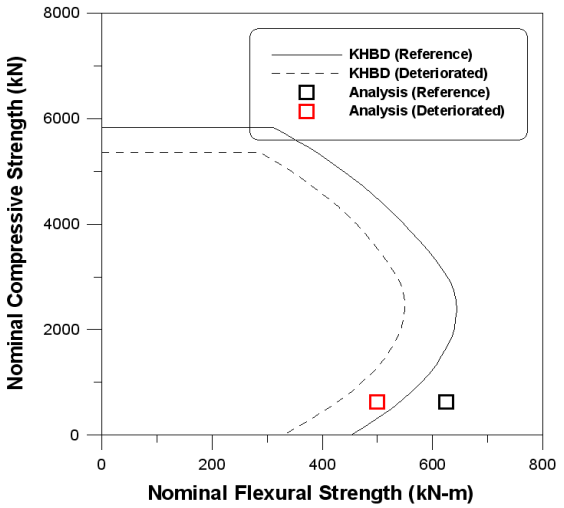


〈그림 26〉 하중-변위 이력곡선 비교

러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

선정된 실험의 결과와 실험체에 사용된 제원을 사용하여 그림 25와 같이 현행설계법(KHBD)의 기준으로 산정한 P-M 상관도를 나타내었다. 이때 비선형 유한요소해석에 의한 실험체의 해석결과도 함께 나타내었다. 준정적 실험을 통하여 구한 최대 수평하중으로 모멘트를 계산하여 P-M 상관도 상에 점으로 표시한 실험값은 공칭강도보다 7%의 안전측으로 큰 내력을 갖고 있음을 알 수 있다.

그림 26은 열화된 교각 예제와 열화가 없는 교각 예제의 유한요소해석 결과를 비교하여 나타내고 있다. 이때 열화된 교각은 철근의 부식 등으로 발생하는 단면 감소를 모사하였으며 기존 연구결과[7]를 토대로 사용년수 40년에 해당하는



〈그림 27〉 교각 실험체의 P-M 상관도

철근의 경년 열화 함수를 적용하여 축방향 철근과 횡방향 구속철근의 단면적을 각각 15%, 25% 감소시켰다. 그리고 열화정도에 따른 부착 매개변수는 선형보간법을 이용하여 0.7을 적용하였다. 그림에서 확인되는 바와 같이 열화된 교각 예제는 열화가 없는 교각 예제와 다른 응답거동, 즉 극한강도, 연성도, 그리고 소산에너지 감소 발생 등이 나타난다. 따라서 이러한 열화된 철근콘크리트 교각의 내진성능평가에 있어서는 이 연구에서 제안한 열화를 고려한 비선형 유한요소해석 기법이 필요할 것으로 판단된다.

그림 27은 현행설계법(KHBD)의 기준으로 산정한 P-M 상관도와 이 연구의 열화를 고려한 재료모델을 적용한 P-M 상관도를 함께 나타내었다. 이때 비선형 유한요소해석에 의한 실험체의 최대 수평하중으로 모멘트를 계산하여 P-M 상관도 상에 점으로 표시하였으며, 열화된 교각 예제와 열화가 없는 교각 예제 모두 각각의 공칭강도 보다 큰 내력을 갖고 있어 보수적인 평가가 가능함을 알 수 있다. 그리고 그림 27에서 보는바와 같이 P-M 상관도에서 열화된 교각예제와 열화가 없는 교각 예제는 27%, 비선형 유한요소해석에서는 25% 차이로 유사한 값을 나타내고 있어 합리적인 평가가 가능함을 알 수 있다.

일련의 해석결과와 실험결과의 비교로부터 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 열화된 철근콘크리트 교각의 성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 열화된 철근콘크리트 교각의 비선형 거동 파악과 성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제

안된 해석기법과 모델을 적용한 P-M 상관도와 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 열화된 철근콘크리트 교각 등을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 제안된 재료모델에 의한 P-M 상관도는 열화된 철근콘크리트 교각의 잔존내하 성능을 평가하는데 효율적이며 경제적인 보수, 보강 공법을 결정하는데 중요한 도구가 될 수 있다.
2) 이 연구에서는 열화된 철근콘크리트 교각을 대상으로 하여 철근콘크리트 교각의 성능저하를 체계적으로 구현하는 성능평가 프로그램을 개발하였다.
3) 수치예제로부터 제안한 해석기법과 모델이 열화된 철근콘크리트 교각의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다. 개발된 P-M 상관도에서 열화된 교각예제와 열화가 없는 교각 예제는 27%, 비선형 유한요소해석에서는 25% 차이로 유사한 값을 나타내고 있어 합리적인 평가가 가능함을 알 수 있다.
4) 제안된 비선형 유한요소해석은 열화된 철근콘크리트 교각의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공할 수 있으며 반복하중을 받는 열화된 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 손상을 제대로 평가함으로써 기존 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Rodriguez, J., Ortega, L. M., and Casal, J., "Load carrying Capacity of Concrete Structures with Corroded Reinforcement," *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 11, No. 4, 239-248, 1997.
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. Du, Y. G., Clark, L. A., and Chan, A. H. C., "Residual Capacity of Corroded Reinforcing Bars," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 57, No. 3, 135-147, 2005.
5. 김길수, 변근주, 송하원, 이창홍, "균열 및 철근부식에 의해 열화된 콘크리트 구조물의 성능저하해석," 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제17권, 제1호, 163-166, 2005.
6. Tapan, M., Strength Evaluation of Deteriorated Reinforced Concrete Bridge Columns, Ph.D. Dissertation, Syracuse University, 2007.
7. 고현무, 조근희, 조호현, "경년 열화를 고려한 철근콘크리트 구조물의 지진응답해석," 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집, 239-247, 2001.
8. Miyagawa, T., "Safety Evaluation of Structures with Ruptured Reinforcing Bars by ASR (Intermediate Report)," *Journal of JSCE*, Vol. 88, 83-84, 2003.
9. Federal Highway Administration, Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: *2004 Conditions and Performance Report to Congress*, 2004.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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*, Vol. 34, No. 7, 843-855, 2007.
14. 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*, Vol. 61, No. 9, 705-719, 2009.
15. Seong, D. J., Kim, T. H., Oh, M. S., and Shin, H. M., "Inelastic Performance of High-Strength Concrete Bridge Columns under Earthquake," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 9, No. 2, 205-220, 2011.
16. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Vol. 1 and Vol. 2, 2000.
17. 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.
18. Shin, H. M., Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to Reversed Cyclic In-plane Loadings, Ph.D. Thesis, University of Tokyo, 1988.
19. 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.
20. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor and Francis, London, 2009.