

# 비탄성 유한요소해석을 이용한 주철근 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 손상지수 평가

## Evaluation of Damage Indices for RC Bridge Piers with Premature Termination of Main Reinforcement Using Inelastic FE Analysis

김 태 훈\*      신 현 목\*\*  
Kim, Tae Hoon      Shin, Hyun Mock

### 국문요약

이 논문에서는 주철근 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 비탄성 해석 기법을 제시하였다. 하중의 단계에 따라 수반하게 되는 콘크리트의 균열 및 철근의 항복, 이로 인한 부착 효과와 골재의 맞물림 현상 및 강도의 감소 등과 같은 재료적 비선형성을 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열 모델을 사용하였다. 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서 단면강성이 급변하기 때문에 생기는 국소적인 불연속변형을 고려하기 위한 경계면 요소를 도입하였다. 또한, 횡방향 구속철근으로 인한 강도의 증가 효과를 고려하였다. 이 연구에서는 주철근 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

**주요어** : 주철근 단락, 내진성능평가, 비탄성 해석, 경계면 요소

### ABSTRACT

In this paper, inelastic analysis procedures are presented for the seismic performance evaluation of RC bridge piers with premature termination of main reinforcement. The mechanical characteristic of cracked concrete and reinforcing bar in concrete has been modeled, considering the bond effect between reinforcing bars and concrete, the effect of aggregate interlocking at crack surface and the stiffness degradation after the crack. The smeared crack approach is incorporated. In boundary plane at which each member with different thickness is connected, local discontinuous deformation due to the abrupt change in their stiffness can be taken into account by introducing interface element. The increase of concrete strength due to the lateral confining reinforcement has been also taken into account to model the confined concrete. The proposed numerical method for seismic performance evaluation of RC bridge piers with premature termination of main reinforcement will be verified by comparison with reliable experimental results.

**Key words** : termination of main reinforcement, seismic performance evaluation, inelastic analysis, interface element

## 1. 서 론

최근, 세계 각지의 지진으로 인한 도로교 피해 중에서 대표적인 것으로 철근콘크리트 교각의 주철근 단락부에서 발생하는 손상을 들 수 있다. 주철근 단락시 정착길이가 충분하지 않기 때문에 발생하는 이러한 손상은 휨에 의한 손상으로부터 전단파괴로 이행되기 쉽고, 낙교라는 치명적인 피해에 도달되기 쉽기 때문에 많은 주의와 대책이 필요하다. 따라서, 주철근 단락을 갖는 기존 또는 신축 철근콘크리트 교각의 내진성능을 미리 조사해 두는 것이 지진의 대책상 반드시 필요하다.

주철근이 어디서 단락 되는지는 설계 휨 모멘트에 따라 결정되지만 일반적으로 사면전단 균열 발생에 수반하는 tension-shift의 영향은 고려되고 있지 않다. Tension-shift에 의한 휨모멘트 분포의 변화를 허용할 수 있도록 단락되는 주철근의 정착길이가 확보되어 있으면 문제가 없지만 정착

길이가 충분히 확보되어 있지 않은 경우 휨 내력이 부족하게 된다. 또한, 교축 주위의 회전 관성의 영향으로 주철근 단락위치에 작용하는 휨 모멘트가 증가하는 경우도 피해를 확대하는 원인이 되고 있다. 이와 같이 교각 중간부에 기초 부만큼 횡방향 구속철근이 배치되어 있지 않은 경우에 소성 힌지가 형성되면 대형피해로 이어지기 쉽기 때문에 주철근 단락에 대한 충분한 검토가 필요하다.<sup>(1)</sup>

우리나라의 내진상세 규정<sup>(2)</sup>에서는 단락을 갖는 주철근의 정착부는 겹침이음 길이 규정을 적용하고 있다. 이러한 설계 기준에 의해서 설계되어진 철근콘크리트 교각은 그 문제가 적지만 정착길이가 충분하지 않은 교각은 현행 내진설계 레벨로 보면, 단락부에서의 내진성능이 상대적으로 낮으므로 이와 같은 철근콘크리트 교각에 대한 적절한 내진성능의 평가가 필요하다.

내진성능의 평가는 구조물이 큰 손상을 입거나 붕괴되어 그 기능을 손실하는 위험의 정도를 결정하기 위해 실시한다. 이러한 위험을 정량화할 수 있는 합리적인 기법이 개발되면 교량을 내진 보강해야 하는지 재시공해야 하는지 또는 그에 상당하는 위험을 받아 들여 그대로 계속 사용할 지의 여부를 판단할 수 있을 것이다.

\* 학생회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료  
(대표저자 : kth7love@mail.skku.ac.kr)

\*\* 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 3. 29 / 심사종료일 : 2001. 7. 4)

이 연구는 비탄성 유한요소해석을 이용하여 주철근 단락을 갖는 신축 또는 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능을 평가하는데 그 목적이 있다. 지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 해석적으로 규명하기 위해서는 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성을 정확하게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서, 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용한 부재 수준에 대한 것으로 확장함으로써 주철근 단락을 갖는 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 기법을 제시하고자 한다. 또한, 이러한 연구를 통한 단락부의 주철근에 발생하는 변형률과 파괴 메커니즘 등의 파악으로부터 우리나라 지진환경에 적합한 단락부의 내진상세 기초를 마련하고자 한다.

## 2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 재료모델은 콘크리트의 균열 및 철근과의 부착 등과 같은 비선형 특성을 고려하여 이들을 중첩함으로써 표현할 수 있다. 균열이 발생한 철근콘크리트 요소는 직교 방향에 대해서 이방성이 현저해지므로 이 연구에서는 균열이 발생한 철근콘크리트의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.<sup>(3)(5)</sup>

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제2 균열의 발생을 제 1균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.<sup>(3)(5)</sup>

### 2.1 콘크리트의 직교 이방성 재료모델

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현할 수 있다. 이 모델에 의하면, 식 (1)과 같이 콘크리트의 응력 상태를 콘크리트의 초기탄성계수, 파괴 파라미터 및 등가의 소성변형률의 함수로 이루어진 등가응력-등가변형률 관계로 표현하고 있다.<sup>(3)(5)</sup>

$$\sigma = E_o K_o (\epsilon - \epsilon_p) = E_o K_o \epsilon_e \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 등가응력,  $\epsilon$ 는 등가의 전체변형률( $\epsilon_e + \epsilon_p$ ),  $E_o$ 는 콘크리트의 초기 탄성계수 그리고  $K_o$ 는 콘크리트 파괴 전진을 나타내는 파괴 파라미터이다. 등가 소성변형률은 콘

크리트의 응력이 0이 될 때의 변형률이며, 파괴 파라미터는 제하시의 강성의 감소를 나타낸다. 등가응력은 평면응력상태에 작용하는 응력수준을 의미하며, 평균응력과 편차응력의 함수로 정의된다.

콘크리트에 균열이 발생한 후에도 철근과 콘크리트의 부착작용에 의해서 균열면의 직각방향으로 콘크리트는 응력의 일부분을 부담한다. 이와 같은 균열직각방향으로의 인장강성효과를 고려하기 위해서, 철근의 방향에 관계없이 적용할 수 있고 비교적 간단한 모델인 Okamura 등이 제안한 부착모델을 기본적으로 적용한다. 단, 이 연구에서는 부착모델로부터 구한 콘크리트의 응력을 각 철근의 방향으로 변환함으로써 원실험식에 충실하도록 하였다.<sup>(3)(5)</sup> 제하 및 재제하의 경우에는 Tamai 등이 제안한 모델을 적용하였다. 이 모델에서는 콘크리트가 부담하는 인장응력은 철근과의 부착에 의한 응력과 균열면의 접촉에 의한 응력의 합으로 결정된다. 제하시의 경우, 균열면의 접촉은 콘크리트의 평균변형률이 완전히 0이 되기 전에 이미 시작되고 있으므로 균열면의 접촉개시 변형률을 정의하여 콘크리트의 인장변형률이 이보다 클 경우에는 접촉에 의한 응력은 발생하지 않고, 반대로 이보다 작을 경우에는 콘크리트의 인장변형률과 접촉에 의한 응력은 선형관계를 나타낸다. 이 연구에서는 제하 및 재제하와 같은 반복하중이력으로 인한 콘크리트의 손상증가 및 에너지 소비를 고려하는 것과 함께 수치해석상의 편리를 위해서, 제하시의 응력-변형률 관계를 제하시점과 잔류변형률을 지나는 단순 2차 포물선으로 가정하였으며 재제하시의 관계는 재제하시점과 제하점을 지나는 1차식으로 가정하였다.<sup>(3)(5)</sup>

균열이 발생한 콘크리트는 균열이 없는 콘크리트에 비해서 강성이 작아진다는 사실은 이미 여러 연구자들<sup>(6)</sup>에 의해서 규명된 바가 있다. 균열이 발생한 콘크리트의 압축강성의 저하는, 균열직각방향으로의 인장변형률의 함수로 표현되고 있는 파라미터에 의해서 강성의 저감을 고려할 수 있다(식 (2)). 즉, 균열을 포함한 콘크리트의 파괴 파라미터  $K$ 와 균열이 없는 콘크리트의 파괴 파라미터  $K_o$ 는 다음과 같은 관계에 있다.

$$K = \omega K_o \quad (2)$$

따라서, 균열이 발생한 콘크리트의 탄소성파괴모델은 다음 식과 같이 된다(Fig. 1).

$$\sigma_y = E_o K (\epsilon_y - \epsilon_p) \quad (3)$$

여기서,  $E_o$ 는 콘크리트의 초기탄성계수,  $\epsilon_y$ 는 균열평행방향의 변형률 그리고  $\epsilon_p$ 는 균열평행방향의 소성변형률이다.

균열면에서 골재의 맞물림 현상으로 인한 전단전달에 효과는 접촉면 밀도함수에 근거하여 유도한 응력전달모델을 사용하였다. 이 모델에서는 균열면의 형상을 세 개의 파라미터로 표현하고, 접촉면에서 콘크리트의 탄소성 거동을 가정하고 있기 때문에 제하 및 재제하와 같은 임의 하중이력에 대해서 그 적용성이 좋다(Fig. 2). 이 연구에서는 Li · Maekawa가

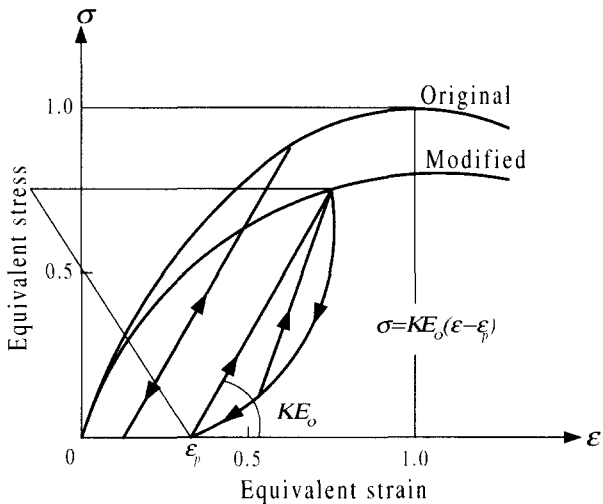


Fig. 1 Equivalent stress-equivalent strain relationship at unloading and reloading

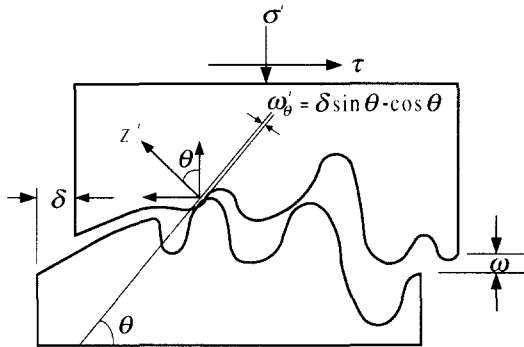


Fig. 2 Shear transfer mechanism at crack surface

제한한 한 개의 균열에 대한 전단전달모델을 균열폭, 미끄러짐 및 이들의 비 등을 파라미터로 하는 파라미터 해석과 함께 분산균열모델의 평균응력 개념을 도입하고 제하 및 재재하시에 대해서는 Shin 등이 제안한 전단전달모델을 기본적으로 사용하였다.<sup>(3)-(5)</sup> 위의 제하 및 재재하 이력곡선은 거의 같은 선위를 지나고 있어서 이를 구분하는 것은 구분하지 않는 경우와 이력거동에서 실용적으로 큰 차이를 보이지 않으며 복잡한 하중이력에 대하여 안정적인 수렴해를 얻기가 곤란한 약점을 갖고 있다. 따라서, 이 연구에서는 Shin등이 제안한 전단전달모델의 제하 및 재재하곡선을 하나로 통일 시킴으로써 해의 발산을 막고 안정적인 수렴해를 얻도록 하였다.<sup>(3)-(5)</sup>

2.2 철근콘크리트에 대한 철근모델

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나, 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근의 응력은 항복응력보다 작기 때문에, 철근만의 응력-변형률 관

계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않으며 즉시 변형을 경화현상을 보인다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 일정한 변형을 경화율을 갖는 것으로 제안된 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다. 제하 및 재재하의 경우에는 콘크리트 속의 철근의 응력분포를 정현곡선으로 가정하여 유도한 Kato 모델을 평균응력과 평균변형률의 개념을 적용하여 수정한 모델을 사용하였다.<sup>(3)-(5)</sup>

2.3 경계면 요소의 모델

이 연구에서 대상으로 하고 있는 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 이러한 변위는 구조물 전체 변위의 약 30%에 달하고 있다. 따라서, 구조물의 거동특성을 올바르게 평가하기 위해서는 부재 경계면에서의 불연속 변위를 무시할 수 없으며 이를 고려하기 위한 경계면 요소(interface element)의 도입이 필요하다.<sup>(4),(5)</sup>

이 연구에서는 이산균열개념에 근거한 가상의 경계면 요소를 적용하여 이와 같은 접합부의 불연속 변형을 고려하였다. 경계면 요소는 기본적으로 요소의 평행 및 직각방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 전술한 철근과 콘크리트의 재료모델을 그대로 적용할 수 있다. 그러나, 경계면 요소의 변형은 인접한 두 부재간의 상대변위로부터 결정되기 때문에 요소의 응력-변형률 관계는 압축응력-압축변위 및 전단응력-전단미끄러짐의 관계로 정의된다. 이때 경계면 요소의 총 전단변위는 접합면에서의 미끄러짐과 국소적인 응력집중의 영향으로 인한 변위의 합으로 표현하였다.<sup>(4),(5)</sup>

2.4 횡방향 철근의 구속효과

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시키는 효과를 가져다준다(Fig. 3).

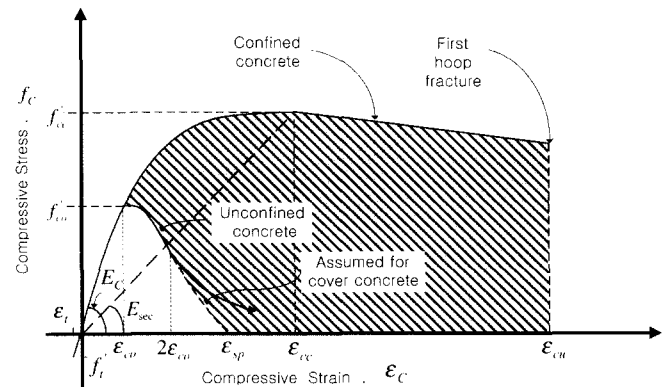


Fig. 3 Stress-strain model proposed for confined and unconfined concrete

이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진 하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력특성을 나타낸다. 구속된 콘크리트의 압축강성을 표현하기 위한 압축응력-압축변형률 관계에 대해서는 많은 연구자들<sup>(7),(8)</sup>이 제안한 모델이 있으며, 이 연구에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델<sup>(7)</sup>을 채택하였다.<sup>(4),(9)</sup>

### 2.5 콘크리트 압축파괴 이후의 효과

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등<sup>(10)</sup>에 의해 제안된 해석모델을 수정하여 고려하였다(Fig. 4). 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다.<sup>(4),(9)</sup>

### 3. 비탄성 유한요소해석에 의한 손상지수 평가

최근 들어 내진상세가 적용되지 않은 기존 구조물의 비선형 거동특성의 파악과 내진성능 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 변화<sup>(11)</sup>를 이용하는 평가방법이 있으며 요소레벨에는 강성의 저하<sup>(12)</sup>, 파괴의 정식화<sup>(13)</sup> 그리고 이력곡선의 에너지 방출<sup>(14)</sup> 등을 이용하는 평가방법이 있다.

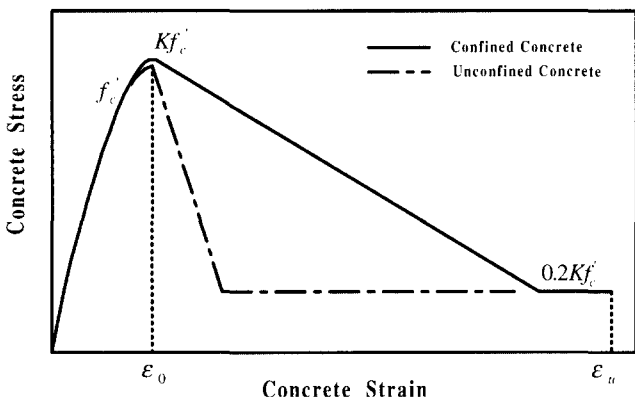


Fig. 4 Stress-strain relation for confined and unconfined concrete

### 3.1 구조물레벨의 손상지수

구조물레벨의 손상지수의 산정은 기본주기의 변화를 이용한 Rodriguez-Gomez 등의 연구<sup>(11)</sup>를 적용하였으며 손상지수를 초기조건에 의한 접선강성의 변화에 기인한 구조물의 기본주기 변화에 근거하여 구조물의 손상을 정량적으로 평가하기 때문에 매우 효율적이다.

손상지수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$D.I. = 1 - \left( \frac{T_{initial}}{T_{final}} \right)^2 \quad (4)$$

여기서  $D.I.$ 는 손상지수(damage index),  $T_{initial}$ 는 처음 단계의 기본주기 그리고  $T_{final}$ 는 마지막 단계의 기본주기이다.

손상지수  $D.I.$ 는 손상이 없는 0.0으로부터 파괴를 나타내는 1.0까지로 표현되며 손상지수 0.7은 파괴의 시점을 알린다. 이러한 한계는 이 연구의 목적과 특성에 일치하는 철근콘크리트 구조물에 대한 Rodriguez-Gomez 등의 연구결과<sup>(11)</sup>를 수정하여 사용하였으며 Table 1에 나타나 있는 기존의 연구자들이 제안한 손상지수<sup>(15)-(17)</sup>와도 잘 일치함을 알 수 있다.<sup>(18),(19)</sup> Table 1에 표시된 일반 구조물에 대한 각각의 손상지수의 값을 이 연구의 대상인 철근콘크리트 교각에 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 파복이 박리된 상태로, 파괴 시점의 손상지수 값인 0.7은 주철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로, 그리고 손상지수 값 1.0은 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 상태로 설명할 수 있다.

Table 1 Correlations of damage index with damage state

Damage state	Minimum value of damage index		
	Park et al.	Stone and Taylor	Williams et al.
Repairable damage	0.10	0.11	0.12
Irreparable damage	0.40	0.40	0.39
Collapse	1.00	0.77	1.28

### 3.2 요소레벨의 손상지수

전 절의 구조물레벨의 손상지수 산정법은 구조물의 손상을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이지만 각 하중단계에서의 기본주기를 계산하여야 하며 기본주기로부터 손상지수를 산정하여야 하는 번거로움이 있다. 이에 이 연구에서는 비선형 유한요소해석을 전제로 하여 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 파괴기준을 기준으로 각 해석단계의 변형률에 해당하는 손상지수를 구한다. 이러한 파괴기준과 손상지수를 정리하여 Table 2에 나타내었으며 수행 절차는 Fig. 5와 같다.<sup>(18),(19)</sup>

Table 2 Damage index of element level

Item		Failure criterion ( $\epsilon_u$ )	Damage index ( $D.I.$ )
Concrete	Compressive	$0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1 - \left( \frac{2\epsilon_u - \epsilon_c}{2\epsilon_u} \right)^2$
	Shear		
Steel	Tensile	0.10	$1 - \left( \frac{2\epsilon_u - \epsilon_t}{2\epsilon_u} \right)^3$

\*  $\rho_s$  : transverse confining steel ratio  
 $f_{yh}$  : yield stress of the confining steel  
 $\epsilon_{sm}$  : steel strain at maximum tensile stress  
 $f'_{cc}$  : confined concrete compressive strength

#### 4. 수치예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 6에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체<sup>(20)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 주철근의 단락을 갖는 기존 철근콘크리트 교각의 정착길이 영향을 정량화 시킨 실험이기 때문이다. 실험체의 재료물성은 Table 3과 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 Fig. 7에 나타난 것과 같다. 재하는 교각기초부에서 주철근이 항복(실험에 기초해서 항복변형률을  $1800 \times 10^{-6}$ 로 한다.)할 때, 하중작용위치에 생기는 변위를 항복변위  $\delta_y$ 로 정의하고, 이 변위의 정수 배  $n \times \delta_y$  ( $n=1,2,3 \dots$ )로 순차적으로 변위진폭을 증가시킨다. 또한, 동일한 재하변위진폭에 있어서 반복회수를 10회로 하였다.

실험체 P-10~P-16은 단면형상, 형상비 그리고 횡방향철

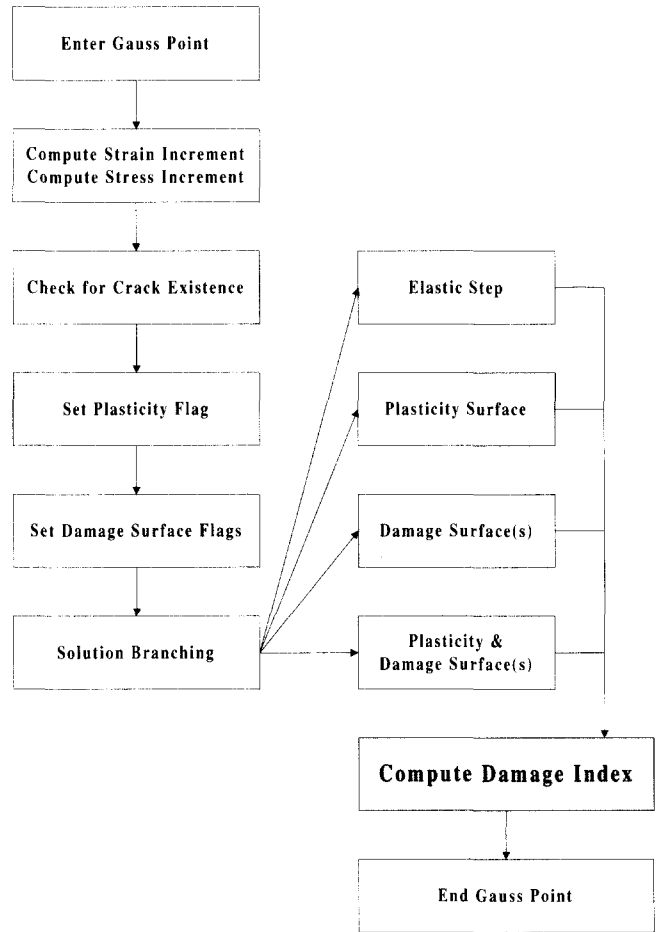


Fig. 5 Computation of damage index

근비는 일정하게 하고 주철근의 정착길이만을 변화시킨 것이다. P-10에서는 주철근의 단락을 하지 않았으며 P-14는 계산상 단락을 하여도 좋은 위치에 주철근량을 기초부의 1/2로 감소시켰다. 따라서, 주철근의 정착길이는 완전히 없는 것으로 된다. 그리고 P-15, P-16은 계산상 단락해도 좋은 위치에서부터 각각 단면 폭의 1/2배(25cm) 및 1배(50cm)의 위치의 높이에서 주철근량을 기초부의 1/2로 줄였다. 따라서,

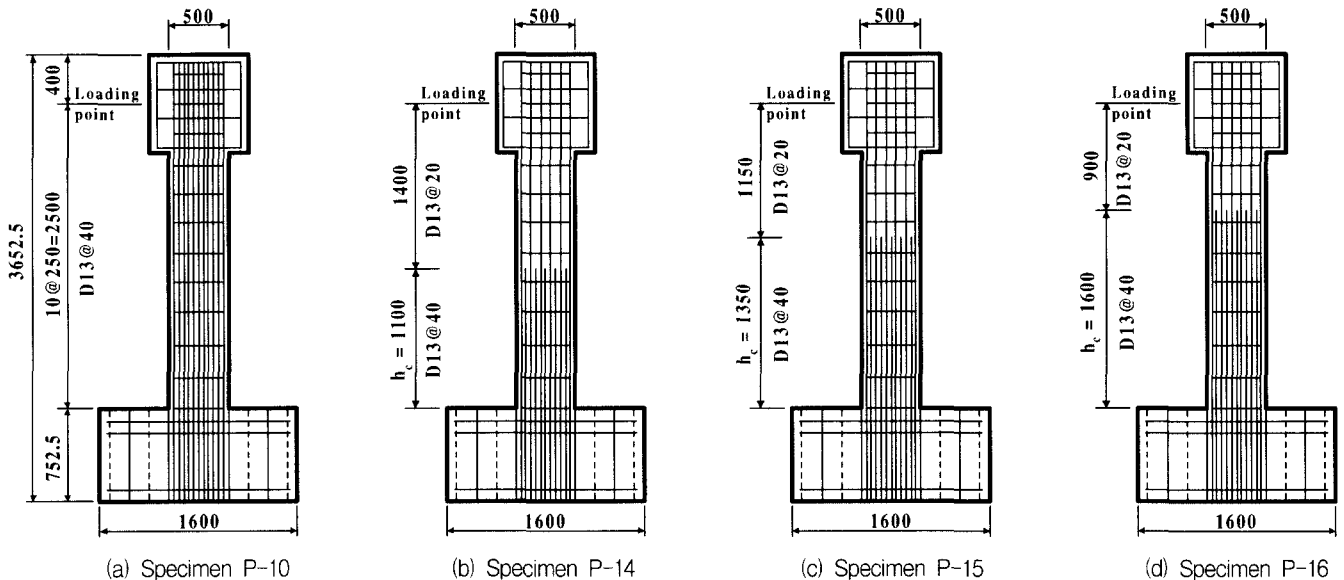


Fig. 6 Specimen used for loading test

Table 3 Test specimens

Specimen		P-10	P-14	P-15	P-16
Dimension of the cross section(cm)		50×50(Square)			
Effective height(cm)		250			
Shear span ratio		5.4			
Main reinforcement	Material	SD295 D13			
	Yielding stress(MPa)	308			
	Termination height from base $h_c$ (cm)	-	110	135	160
	Reinforcement ratio $\rho_l$ (%)	Base		2.03	
		Termination		1.01	
Hoop reinforcement	Material	SR235 $\phi 9$			
	Yielding stress(MPa)	272			
	Hoop reinforcement ratio $\rho_w$ (%)	0.10			
Strength of concrete(MPa)		31.3	32.1	32.6	31.9
Axial stress(MPa)		0			

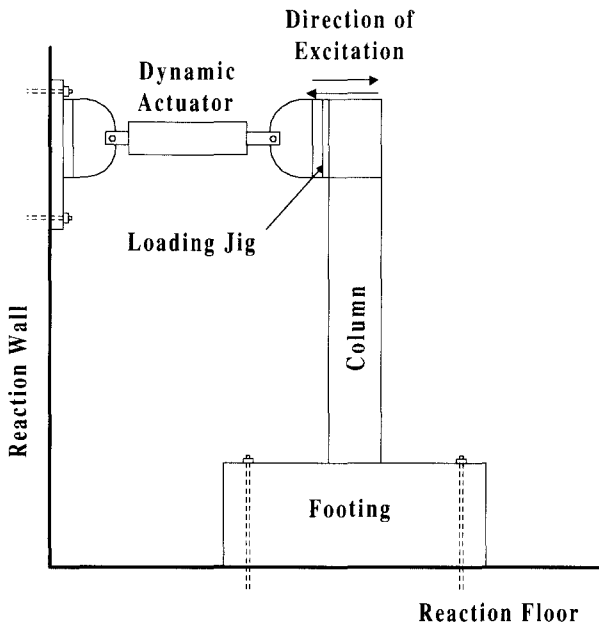


Fig. 7 Experiment set-up

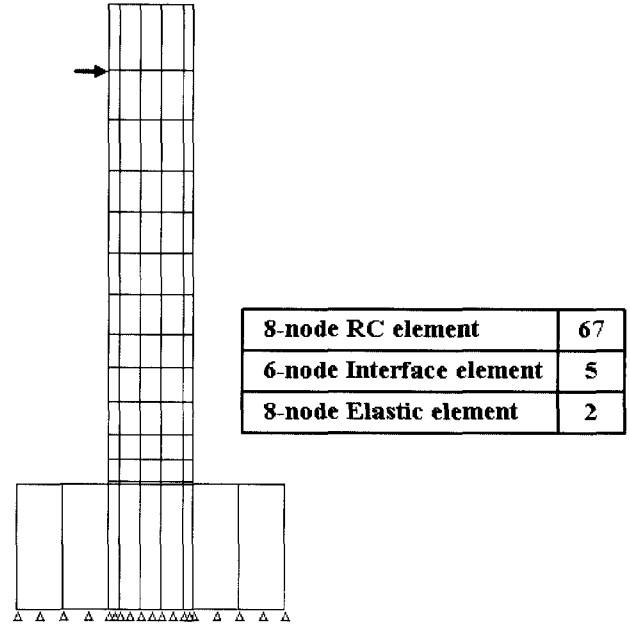


Fig. 8 Finite element mesh used for analysis

주철근의 정착길이는 각각 25cm 및 50cm가 된다.

Fig. 8은 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.

실험체 P-10 및 P-14~P-16의 각 재하 단계에 따른 손상의 진전상태를 요소레벨의 손상지수의 변화와 함께 Fig. 9~Fig. 12에 나타내었다.

주철근의 정착길이가 전혀 없는 공시체 P-14의 실험결과를 재하 단계별로 기술하면 다음과 같다. 수평변위 1  $\delta_y$ 에서 교각 전면에 수평의 휨균열이 생긴다. 2  $\delta_y$ 에서 단락부의 휨균열이 진전하며, 재하방향과 평행한 면에서는 단락부에 경사 균열이 발생하였다. 3  $\delta_y$ 에서는 단락부의 경사균열이 진

전되며, 콘크리트 피복이 박리하기 시작하였으며, 4  $\delta_y$ 에서 단락위치를 중심으로 30cm에 걸쳐서 콘크리트 피복이 이탈하였다. 5  $\delta_y$ 가 되면서 단락부에 있어서 콘크리트의 이탈이 진전하고 주철근 2개가 파단되었으며, 6.5  $\delta_y$ 에서는 단락되지 않은 20개의 주철근 중에 8개가 파단되었으며, 여기서 실험을 종료하였다. 이에 대하여 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값은 수평변위 1  $\delta_y$ 에서 0.1, 3  $\delta_y$ 에서 0.4, 5  $\delta_y$ 에서 0.7, 그리고 6  $\delta_y$ 에서 1.0을 나타내고 있다. 이 해석결과에 나타난 손상지수의 값을 3.1절에 기술된 역학거동으로 표현하면, 수평변위 1  $\delta_y$ 에서 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달하여, 3  $\delta_y$ 에서 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 피복이 박리되었고, 5  $\delta_y$ 에서 주철근의 파단이 일어나기 시작하여, 6  $\delta_y$ 에서 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 것으로 된다.

주철근의 정착길이를 단면폭의 1/2로 한 실험체 P-15에서는

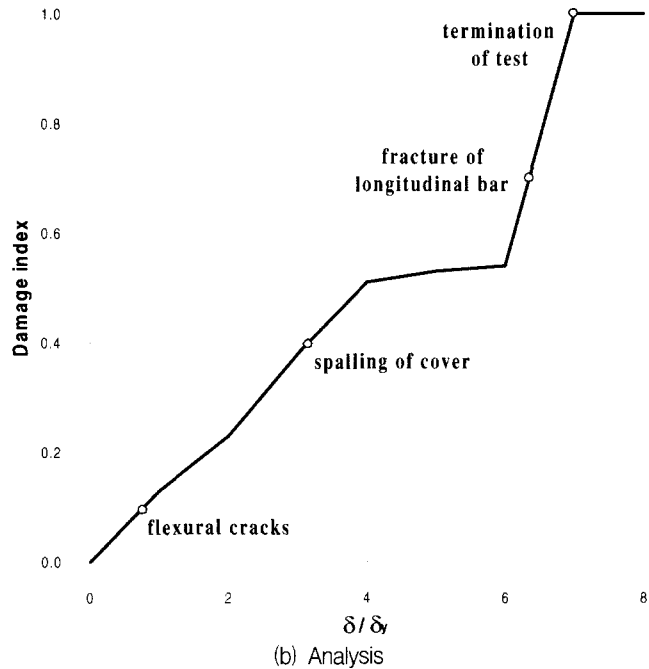
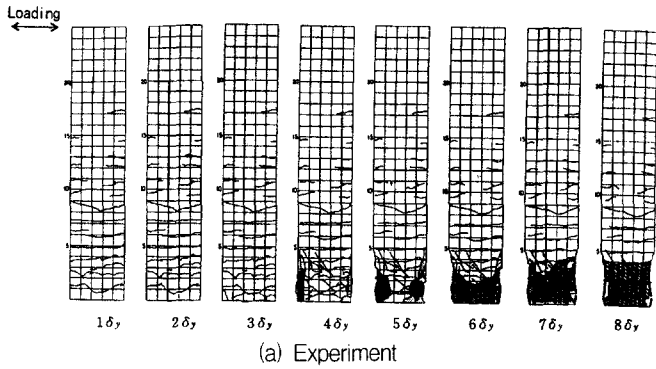


Fig. 9 Development of damage during test for P-10

1  $\delta_y$  재하에서는 P-14와 같게 수평의 휨균열이 발생하였고, 2  $\delta_y$  재하에서는 단락부의 휨균열이 진전되는 동시에 경사균열이 발생하였다. 3  $\delta_y$  재하가 되면 단락부의 경사균열이 진전하는 동시에 기초부에도 경사균열이 발생하기 시작한다. 4  $\delta_y$  재하에서는 단락부와 기초부의 경사균열이 함께 증가하고 5  $\delta_y$  재하가 되면 기초부로부터 20~40cm의 범위에 콘크리트 피복의 박리가 생겼다. 6  $\delta_y$  재하 이후가 되면 기초부에만 손상이 집중되며 8.5  $\delta_y$  재하에서는 기초부에 있어서 40개 중 24개의 주철근이 파단하였다. 이에 대하여 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값은 수평변위 1  $\delta_y$ 에서 0.1, 5  $\delta_y$ 에서 0.4, 6  $\delta_y$ 에서 0.7, 그리고 7  $\delta_y$ 에서 1.0을 나타내고 있다. 이들 해석결과를 역학거동으로 표현하면, 수평변위 1  $\delta_y$ 에서 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달하여, 5  $\delta_y$ 에서 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 피복이 박리되었고, 6  $\delta_y$ 에서 주철근의 파단이 일어나기 시작하여, 7  $\delta_y$ 에서 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 것으로 된다.

주철근의 정착길이를 단면폭의 1배로 한 실험체 P-16 및 단락을 하지 않은 실험체 P-10은 거의 같은 파괴형태를 보

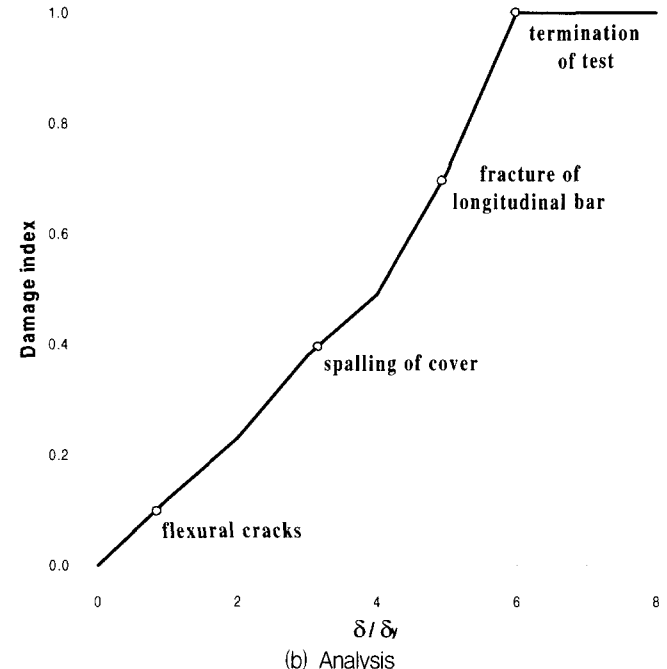
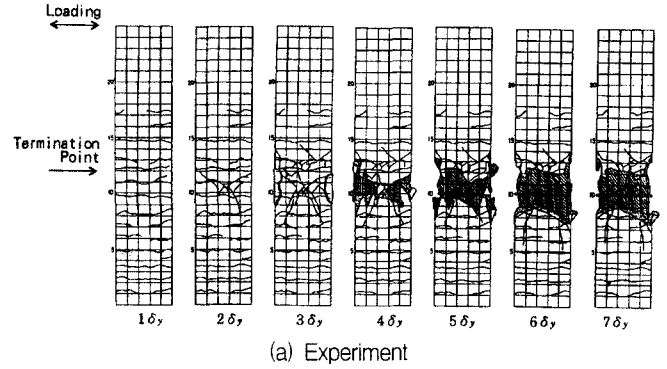


Fig. 10 Development of damage during test for P-14

인다. 3  $\delta_y$  재하에서 기초부에 있어서 휨 균열이 현저하게 되고, 4  $\delta_y$  재하에서 기초부에서 약 30cm 높이에 걸쳐서 콘크리트 피복이 박리되었다. 그후 기초부의 콘크리트 피복의 박리가 순차적으로 진행되고, 8  $\delta_y$  재하에서는 누계로 11개 (P-10) 및 10개 (P-16)의 주철근이 파단되며, 최종적으로 기초부에서 휨파괴되었다. 그러나, 단락부 주변에서는 손상이 거의 생기지 않았다. 이에 대하여 해석결과의 재하 단계별 손상지수 값은 수평변위 1  $\delta_y$ 에서 0.1, 4.5  $\delta_y$ 에서 0.4, 6  $\delta_y$ 에서 0.7, 그리고 7  $\delta_y$ 에서 1.0을 나타내고 있다. 이들 해석결과를 역학거동으로 표현하면, 수평변위 1  $\delta_y$ 에서 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달하여, 4.5  $\delta_y$ 에서 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 피복이 박리되었고, 6  $\delta_y$ 에서 주철근의 파단이 일어나기 시작하여, 7  $\delta_y$ 에서 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 것으로 된다.

주철근의 단락 유무에 따른 구조적인 특성은 다음과 같으며 이러한 결과는 실험 및 해석에서 같은 경향을 보이고 있다. 주철근의 정착길이를 0cm로 한 실험체 P-14는 단락부에서 전단파괴하며, 정착길이를 단면폭의 반으로 한 실험체

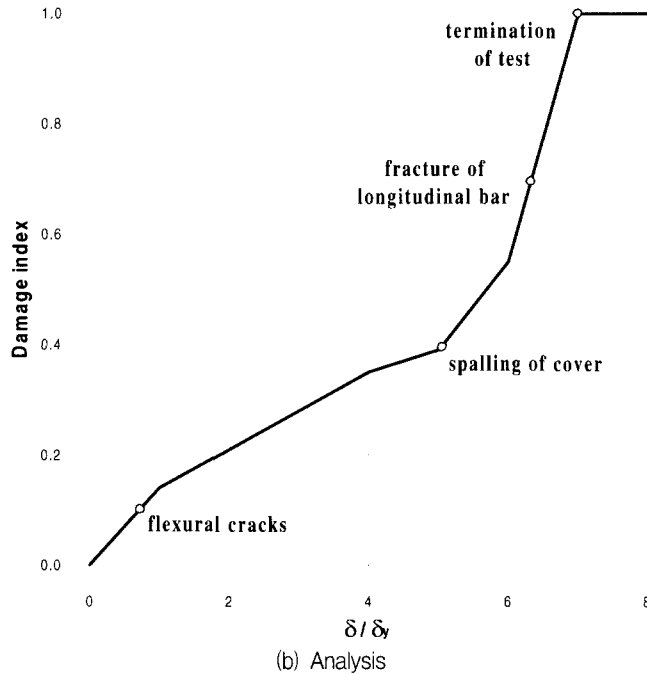
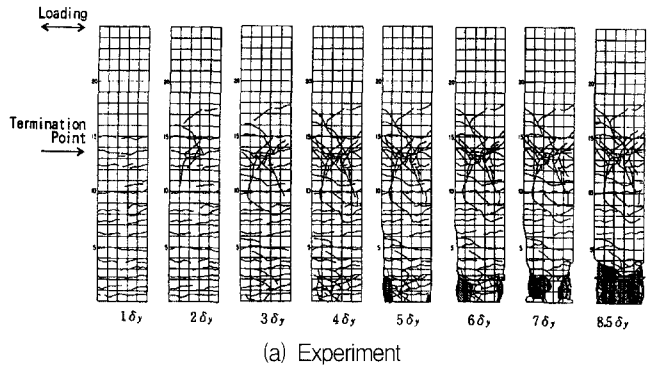


Fig. 11 Development of damage during test for P-15

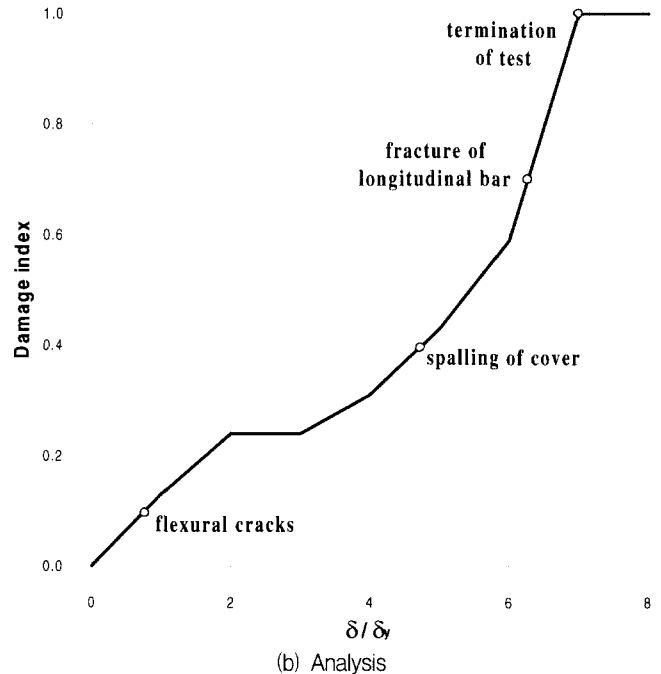
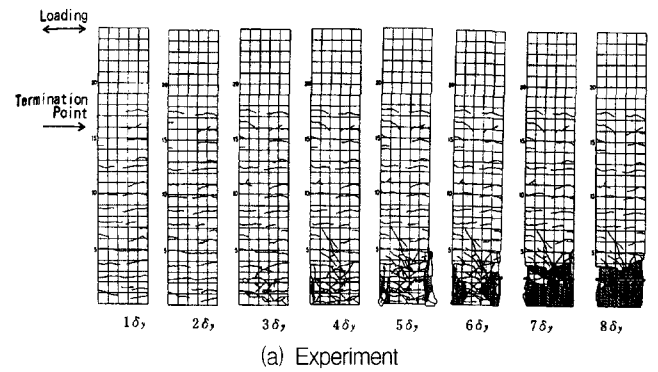


Fig. 12 Development of damage during test for P-16

P-15는 단락부에 손상이 발생하였지만 최종적으로는 기초부에서, 정착길이를 단면폭의 1배로 한 실험체 P-16은 기초부에서 각각 휨파괴하였다. 또한, 단락부에서 파괴하는 실험체가 기초부에서 파괴하는 실험체보다 빠른 재하단계에서 콘크리트의 박리 및 주철근의 파단이 생겼다.

Fig. 13~Fig. 16은 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도를 나타내고 있으며 Fig. 17은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 곡선으로부터 포락선(envelope)의 형태로 나타낸 결과이다. 이것으로부터 최종적으로 기초부에서 파괴한 P-15 및 P-16의 포락선은 단락이 없는 P-10과 거의 같은 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 단 P-15는 단락부와 기초부의 2곳에서 손상이 발생하여 소성형지가 증가하므로 지진시 원하지 않는 파괴형태로 볼 수 있다. 한편 단락부에서 파괴한 P-14는 최대내력이 다른 실험체보다 작으며 최대내력 이후의 내력저하도 현저한 것을 알 수 있다. 따라서, 내진성능의 관점에서부터 단락부에서의 손상은 발생하지 않도록 해야 할 것으로 판단된다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 Table 4에 정리하였다. 이 표에서 해석에 의한

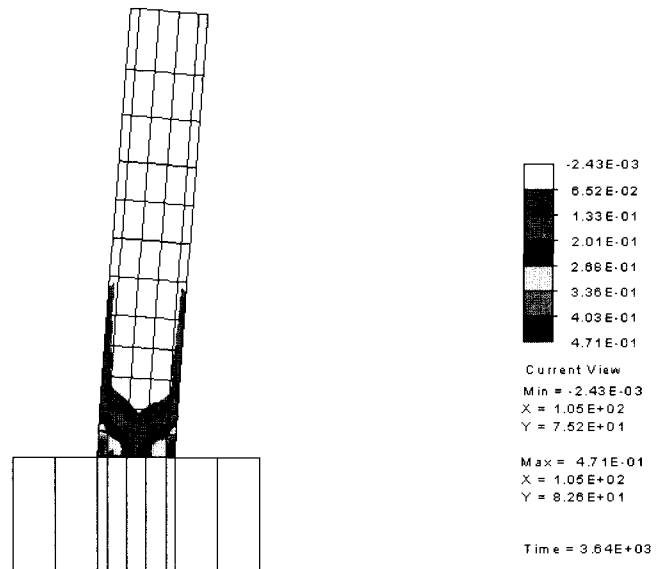


Fig. 13 Computed local damage indices for P-10

항복변위 및 극한변위는 직접적인 방법<sup>(4)</sup>으로 평가하였다. 즉, 항복변위는 시스템 내의 위험단면의 가우스 적분점에서의 철근의 평균응력이 항복응력에 도달하였을 때의 기준점의



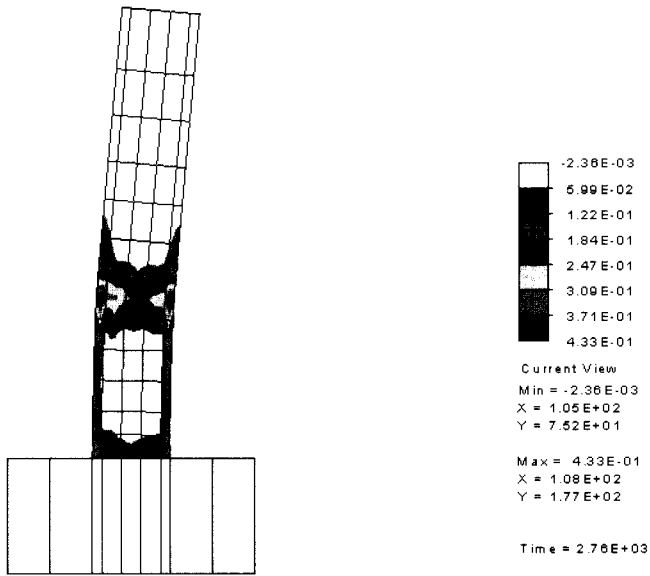


Fig. 14 Computed local damage indices for P-14

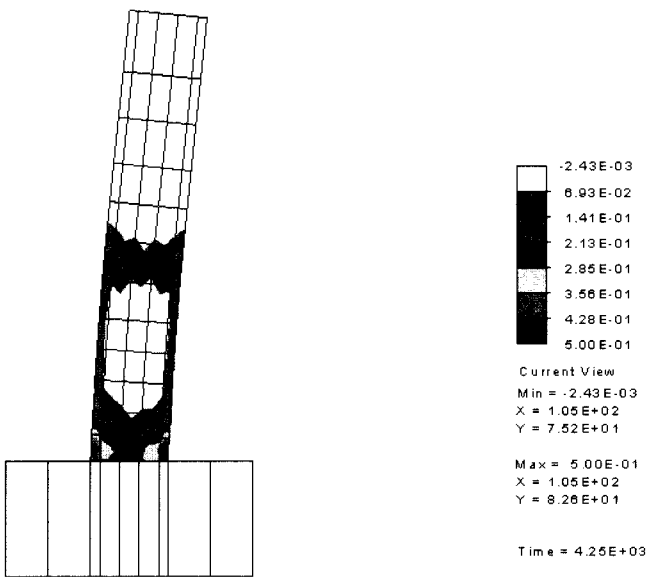


Fig. 15 Computed local damage indices for P-15

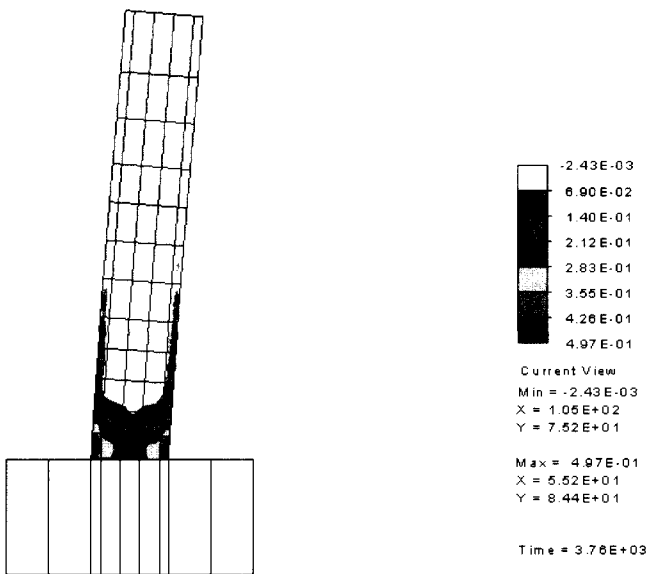
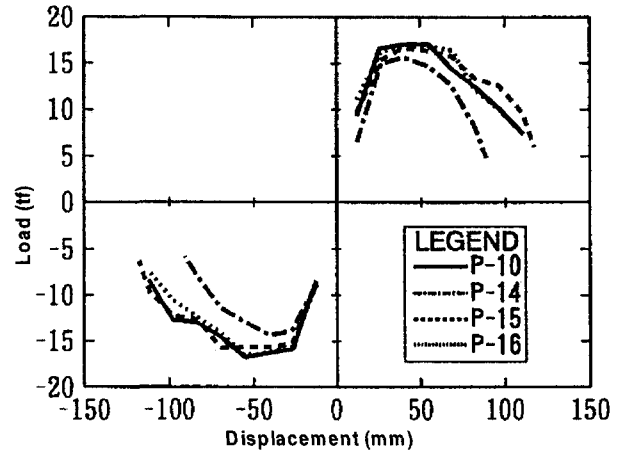
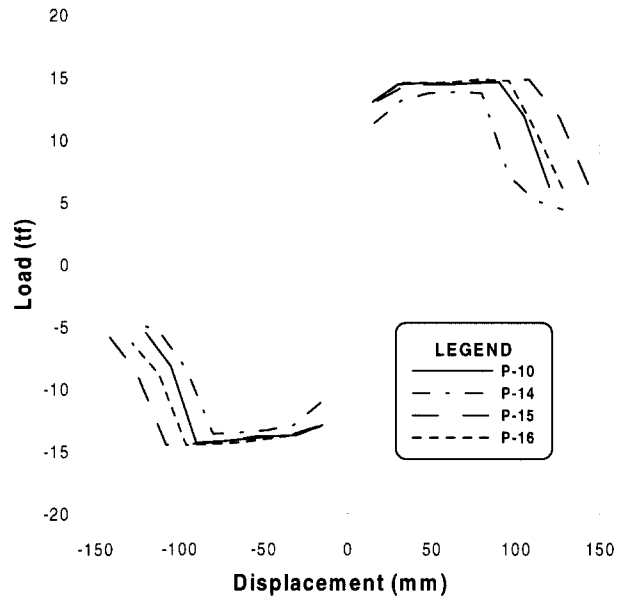


Fig. 16 Computed local damage indices for P-16



(a) Experiment



(b) Analysis

Fig. 17 Envelopes of lateral load vs. displacement hysteresis loops

수평변위로, 극한변위는 위험단면의 가우스 적분점에서의 콘크리트 또는 철근의 변형률이 각각의 파괴기준 변형률에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로 정하였다.<sup>(4)</sup> 여기서 파괴기준은 전장에서 기술한 바와 같다. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고있는 손상지수 평가법은 주철근의 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 재하 단계별 손상정도를 적절히 평가하고 있으며, 제안된 손상지수 평가법을 철근콘크리트 구조물의 동적 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)<sup>(21)</sup>에 이식함으로써, 해석적 방법에 의한 신축 또는 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가가 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 주철근의 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 비선형 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석

Table 4 Comparison of test with analysis

Specimen		P-10		P-14		P-15		P-16	
		Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.	Exp.	Ana.
Load	Yield load $P_y$ (tf)	13.9	12.7	12.0	10.8	12.9	12.8	12.7	12.8
	Maximum load $P_u$ (tf)	17.0	14.6	15.1	13.8	16.4	14.8	16.9	14.8
	$P_u / P_y$	1.22	1.15	1.26	1.28	1.27	1.16	1.33	1.16
Displacement	Yield disp. $\delta_y$ (cm)	1.54	1.40	1.62	1.30	1.79	1.60	1.56	1.50
	Ultimate disp. $\delta_u$ (cm)	7.41	9.00	7.06	6.40	8.35	10.80	8.00	9.60
	$\delta_u / \delta_y$	4.8	6.4	4.4	4.9	4.7	6.8	5.1	6.4

프로그램을 사용하여, 반복되는 면내력이 작용하는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 주철근의 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 2) 주철근의 정착길이를 매개변수로 한 철근콘크리트 교각의 실험과 해석결과로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 계산상 단락해도 좋은 위치에서 주철근량을 반으로 줄인 경우에는 손상은 단락부에만 발생하며, 최대 내력 이후의 내력저하는 현저하다. 단락위치를 이로부터 단면폭의 1/2의 위치의 높이에 하는 경우에는 단락부에서의 손상이 선행해서 발생하지만, 최종적으로는 기초부에서 파괴하고 단락위치를 단면폭의 1배까지 높이면 기초부에서만 파괴가 나타난다.
- 3) 면내 횡하중에 저항해야 하는 주철근의 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 반복거동을 제대로 평가함으로써 단조 증가하중에 대한 해석 또는 실험으로 제한되었던 부재의 강도를 유한요소 해석만으로도 예측이 가능하게 하였으며 내진성능 평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.
- 4) 현행 내진 설계 규정에 만족하지 않는 기존의 철근콘크리트 교각에 대한 보수·보강등의 판단을 위한 내진성능 평가기법을 제시하였다.
- 5) 단락부의 주철근에 발생하는 변형률과 파괴 메커니즘 등의 파악으로 우리나라 지진환경에 적합한 단락부의 내진상세의 기초를 마련하였다.

### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996, pp. 12-21.
2. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 2000.
3. 김태훈, 유영화, 신현목, "반복하중을 받는 철근콘크리트 쉘구조의 비선형 해석," 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제1호, 2000, pp. 35-49.
4. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구," 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제4호, 2000, pp. 37-51.
5. 김태훈, 신현목, "지진시 철근콘크리트 기둥-기초 접합부의 불연속 변위에 관한 해석적연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권, 제6호, 2000, pp. 83-90.
6. Collins, M. P. and Vecchio, F. J., *The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses*, University of Toronto, 1982.
7. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
8. Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M., "Strength and ductility of tied concrete columns," *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 106, No. 5, 1980, pp. 1079-1102.
9. 김태훈, 유영화, 신현목, "등가환산단면을 이용한 원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 해석," 대한토목학회 논문집, 제20권, 제5-A호, 2000, pp. 755-763.
10. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural members with confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.
11. Rodriguez-Gomez, S. and Cakmak, A. S., "Evaluation of seismic damage indices for reinforced concrete structures," Report No. NCEER 90-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1990.
12. Roufaiel, M. S. L. and Meyer, C., "Analytical modeling of hysteretic behaviour of R/C frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 3, 1987, pp. 429-444.
13. Chung, Y. S., Meyer, C., and Shinozuka, M., "Modeling of concrete damage," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 3, 1989, pp. 259-271.
14. Kratzig, W. B., Meyer, I. F., and Meskouris, K., "Damage evolution in reinforced concrete members under cyclic

- loading," *Proceedings of 5th International Conference on Structural Safety and Reliability, Vol. II*, San Francisco, 1989, pp. 795-802.
15. Park, Y. J., Ang, A. H. S., and Wen, Y. K., "Damage-limiting aseismic design of buildings," *Earthquake Spectra*, Vol. 3, No. 1, 1987, pp. 1-26.
  16. Stone, W. C., and Talyor, A. W., *Seismic Performance of Circular Bridge Column Designed in Accordance with AASHTO/CALTRANS Standards*, NIST Building Science Series 170, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, M.D., 1993.
  17. Williams, M. S., Villemure, I., and Sexsmith, R. G., "Evaluation of seismic damage indices for concrete elements loaded in combined shear and flexure," *ACI Structural Journal*, Vol. 94, No. 3, 1997, pp. 315-322.
  18. 김태훈, 문정곤, 신현목, "비탄성 손상 해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 2000년도 학술발표회 논문집( I ), 대한토목학회, 2000, pp. 309-312.
  19. 김태훈, 이상철, 신현목, "비탄성 손상 해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 대한토목학회 논문집, 제21권, 제3-A호, 2001, pp. 361-372.
  20. Kawashima, K., Hoshikuma, J., and Unjoh, S., "A seismic evaluation method for reinforced concrete bridge piers with inadequate anchoring length at termination of main reinforcements," *Journal of JSCE*, No. 525, I-33, 1995, pp. 83-95.
  21. 김태훈, 신현목, "Analytical approach to evaluate the inelastic behaviors of reinforced concrete structures under seismic loads," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 113-124.