

# 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성거동에 관한 해석적 연구

## Analytical Study on Inelastic Behavior of RC Bridge Columns with Unbonding of Main Reinforcements at Plastic Hinge Region

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

### 국문요약

이 연구의 목적은 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 파악하는데 있다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열모델을 사용하였다. 또한 소성힌지영역에서 비부착 주철근에 의한 영향을 고려하였다. 이 연구에서는 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동의 파악을 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

**주요어** : 소성힌지영역, 비부착, 철근콘크리트 교각, 비탄성거동, 재료적 비선형성

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior of reinforced concrete bridge columns with unbonding of main reinforcements at plastic hinge region. 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. The smeared crack approach is incorporated. The effect of unbonding of main reinforcements at plastic hinge region has been also taken into account to model the concrete and reinforcing steel. The proposed numerical method for the inelastic behavior of reinforced concrete bridge columns with unbonding of main reinforcements at plastic hinge region is verified by comparison with reliable experimental results.

**Key words** : plastic hinge region, unbonding, reinforced concrete bridge columns, inelastic behavior, material nonlinearity

## 1. 서 론

근래에 세계 각국에서 발생한 지진들, 즉 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995), 그리고 대만지진(1999) 등으로 인하여 빌딩 및 교량과 같은 사회기반시설물의 피해가 잇따르고 있다. 그 중에서도 교량 구조물의 손상 및 붕괴는 현대사회에서 치명적인 손실로 이어질 수 있다. 따라서 현존하는 교량 구조물의 내진 성능을 정확히 평가하는 연구와 그에 따른 내진성능 향상에 대한 연구가 우선적으로 시급한 과제이다.

지진시 교량의 거동은 지진 가속도에 의한 상부구조의 관성력과 이를 지지하고 있는 교각의 거동에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 이에 따라 교각의 내진성능은 교량 구조물의 내진성능을 나타내는데 가장 중요한 특성이 된다.

철근콘크리트 교각은 종방향 및 횡방향 철근, 축력, 형상비 등에 따라 각기 다른 파괴양상 및 연성거동을 보인다. 이에 많은 연구자들이 실험적, 해석적 방법에 의하여 교각의 내진성능평가를 시도하였다.<sup>(1)-(4)</sup> 그러나 대상 교각

이 한정되어 있어 국내에 존재하고 있는 다양한 형태를 가진 교각의 내진성능을 평가한 자료의 축적은 미흡한 실정이다. 따라서 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내진성능평가를 위한 적절한 해석기법의 개발이 이루어진다면, 다양한 형태의 교각에 대한 비선형 지진해석을 실시하여 미처 다루지 못한 여러 형태의 교각들의 내진성능평가가 가능할 것이다.<sup>(5),(6)</sup>

이 연구의 목적은 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 그림 1과 같은 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을

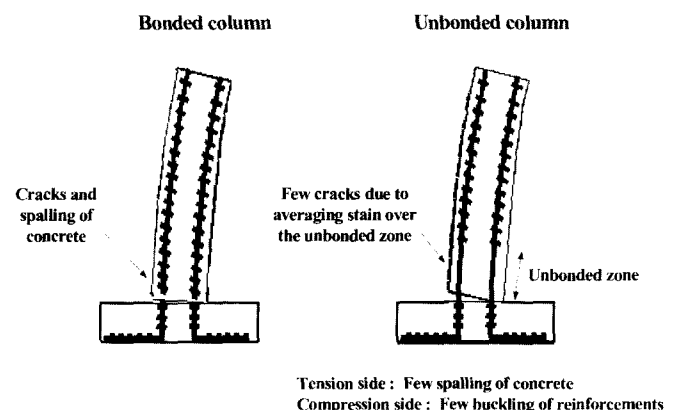


그림 1 Effect of unbonding of main reinforcements

\* 정회원 · 대우건설기술연구소 전임연구원, 공학박사(대표저자 : kimth@dwconst.co.kr)

\*\* 정회원 · 성안관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 1. 14 / 심사종료일 : 2005. 3. 10)

해석적으로 예측하는 것이다. 이러한 교각구조는 소성인지역에서 주철근의 비부착 영향으로 인해 변형률의 집중이 감소되어 전반적으로 손상이 지연되는 거동특성을 나타낸다.<sup>(7)</sup> 즉 인장영역에서는 콘크리트 피복의 박리현상이 감소하고 압축영역에서는 주철근의 좌굴이 줄어들어 최종적으로는 철근콘크리트 교각의 연성능력을 향상시키는 효과가 있다. 그러나 구조물의 에너지 소산능력과 강성을 다소 감소시키는 거동을 보이고 있어 이에 대한 추가적인 고려가 필요하다.

이 연구에서는 이러한 구조적 특성을 지닌 교각구조를 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 비선형 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하고 내진성능을 평가하였다. 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단 전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 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 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램<sup>(8)</sup>에 비부착 주철근의 영향을 고려할 수 있도록 수정을 가하여 소성인지역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력을 예측하고자 한다.

## 2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

### 2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델<sup>(5),(9),(10)</sup>을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서

는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현된다.

균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성 모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다(그림 2).

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형을 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형을 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형을 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다(그림 3).

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석모델을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인

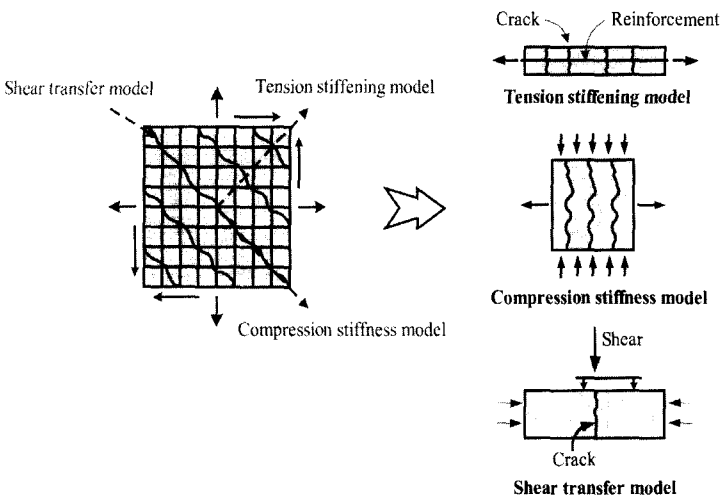


그림 2 Construction of cracked concrete model

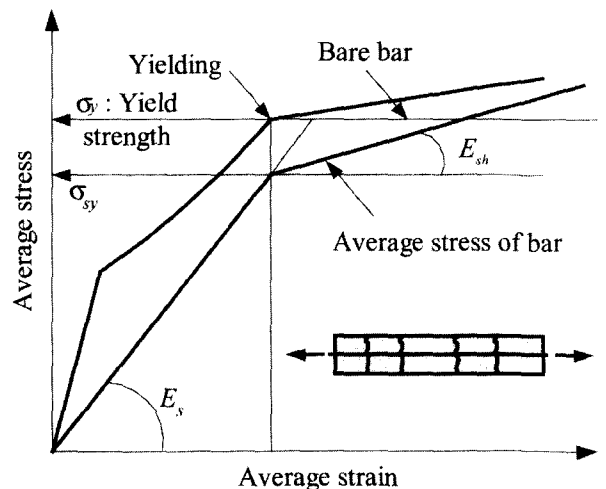


그림 3 Model for reinforcing bar in concrete

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>(11)</sup>

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이 연구에서는 철근과 콘크리트의 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식<sup>(12)</sup>을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식<sup>(13)</sup>을 수정하여 사용하였다.

### 2.2 비부착 철근요소

이 연구에서는 소성인지역역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 예측하기 위해서 저자 등이 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석을 위하여 개발한 비부착 텐던요소<sup>(14)</sup>를 목적에 맞게 수정하여 사용하였다.

비부착 텐던요소는 다절점 트러스요소를 사용하여 정식화하였으며 텐던과 콘크리트사이의 부착작용 등의 비선형 특성을 고려함으로써 해석결과의 정확도와 신뢰성을 향상시켰다.

비부착 철근과 콘크리트 사이에는 비부착으로 인하여 미끄러짐이 생기기 때문에 비부착 철근의 변형을 변화와 주변 콘크리트의 변형을 변화가 상이하게 되며 응력은 부재 전체길이의 변형을 고려하여 산정해야 한다.

이 연구에서 비부착 철근요소는 모체 요소와 공유하는 각 절점을 이용하여 강성을 구성한다. 그리고 각 절점에서 비부착 철근의 변위는 모체 요소와 동일하지만 각각의 비부착 철근요소의 변위를 비부착 철근 전체 길이로 나누어 모든 비부착 철근요소의 변형률을 동일하게 유지함으로써 비선형 거동특성을 모사하였다.

### 2.3 비선형 유한요소해석 프로그램

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등<sup>(5),(8),(11)</sup>을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한

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	<b>FEAP</b>		4 nodes RC shell element
Reinforcing or Prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

그림 4 Element library RCAHEST

범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP<sup>(15)</sup>에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)<sup>(8)</sup>에 비부착 주철근의 영향을 고려할 수 있도록 수정을 가하고 개발된 비부착 철근요소를 이식하여 사용하였다(그림 4).

### 2.4 손상지수 평가

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

이에 이 연구에서는 비선형 유한요소해석을 전제로 하여 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스적분점에서의 변형률을 이용하여 해석프로그램에서 직접 손상지수를 산정할 수 있는 방법을 사용하였다. 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.<sup>(9),(10)</sup>

손상지수  $D.I.$ 는 손상이 없는 0.0으로부터 파괴를 나타내는 1.0까지로 표현되며 손상지수 0.75는 파괴의 시점을 알린다. 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 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.<sup>(9),(10)</sup>

### 3. 소성인지영역에서 비부착 주철근의 거동특성 고려

소성인지영역에서의 비부착 주철근의 거동특성은 콘크리트와 철근의 상호작용에 크게 영향을 받으며 콘크리트와 철근 접촉면의 부착작용에 의한 인장경화모델, 무근콘크리트에 대한 인장연화모델, 그리고 주철근의 기초로부터의 정착슬립 등에 지배된다. 따라서 이러한 영향들을 고려한 해석을 하여야만 정확한 비탄성 거동을 예측할 수 있는 것이다.

#### 3.1 인장경화모델

철근과 콘크리트의 부착특성으로 인하여 철근콘크리트에 균열이 발생된 후에도 콘크리트가 부착작용에 의하여 철근으로부터 전달되는 인장응력의 일부를 부담하는 것을 인장경화(tension stiffening)효과라 한다,

인장응력하의 콘크리트 모델은 균열의 간격, 철근의 방향과 철근비와는 무관하며 평균변형률이 균열변형률에 도달하면 콘크리트의 응력은 인장경화효과를 고려하여 점진적으로 감소되는 형태로 다음식과 같이 표현된다.

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

여기서,  $\sigma_{xt}$ ,  $\sigma_{yt}$ 는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장응력,  $f_t$ 는 균열직각방향으로의 콘크리트의 인장강도,  $\epsilon_{tr}$ 는 콘크리트의 균열변형률,  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_y$ 는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장변형률 그리고  $c$ 는 부착 파라미터(0.2 : 용접망, 0.4 : 이형철근, 0.6 : 원형철근, 2.0 : 무근콘크리트)이다.

#### 3.2 인장연화모델

철근콘크리트와 달리 무근콘크리트의 경우 부착응력 특성이 없어 균열 발생 후의 응력은 급격하게 감소하게 된다. 이런 인장연화(tension softening) 효과는 파괴에너지(fracture energy)를 사용하여 특성화할 수 있다. 균열밴드(crack band)의 단위 진전당 소모에너지인 파괴에너지는 다음식과 같이 표현된다.<sup>(16)</sup>

$$G_f = w_c \int \sigma_f d\epsilon_f \quad (2)$$

여기서,  $G_f$ 는 파괴에너지,  $w_c$ 는 균열의 폭, 그리고  $\sigma_f$ ,  $\epsilon_f$ 는 균열의 연직방향의 평균응력과 평균변형률이다.

파괴에너지는 많은 실험을 통해서 최대골재크기와 큰 상관관계가 있는 재료의 성질이라는 사실이 알려져 있다. 따라서 재료의 성질이 주어지면 결정되게 된다. 이 파괴에너지의 개념은 균열의 폭을 대신하는 요소의 기준길이(reference length)를 도입하여 근사적으로 분산균열을 이용한 유한요소해석에 적용할 수 있다.<sup>(17)</sup>

이런 파괴에너지를 만족시키는 인장응력-변형률 관계식은 여러 형태로 수식화할 수 있지만 이 연구에서는 인장경화모델과 일관성을 유지하기 위하여 식 (1)을 사용하고 부착 파라미터는 2.0을 적용하여 비부착에 의한 영향을 고려하였다. 따라서 균열 발생후의 인장응력은 급속하게 저하하게 된다.

#### 3.3 주철근의 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 위해서 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<sup>(18)</sup>을 기본적으로 사용하였다.

$$\text{철근항복전, } s = \epsilon_s \cdot (2 + 3500 \cdot \epsilon_s) \quad (3)$$

$$\text{철근항복후, } s = 0.0047 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y/2 \quad (4)$$

여기서,  $s$ 는  $(\frac{Slip}{D})(\frac{f_c'}{200})^{2/3}$ ,  $D$ 는 철근의 직경,  $f_c'$ 는 콘크리트의 일축압축강도,  $\epsilon_s$ 는 철근의 변형률,  $f_u$ 는 철근의 인장강도,  $f_y$ 는 철근의 항복강도,  $\epsilon_{sh}$ 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 파라미터로 하여 많은 경우에 대한 해석결과로부터 수정 제안된 철근의 변형률-슬립(slip) 관계를 적용하였다. 또한 매개변수를 도입하여 소성인지영역에서 비부착 주철근의 거동특성을 고려하였다.

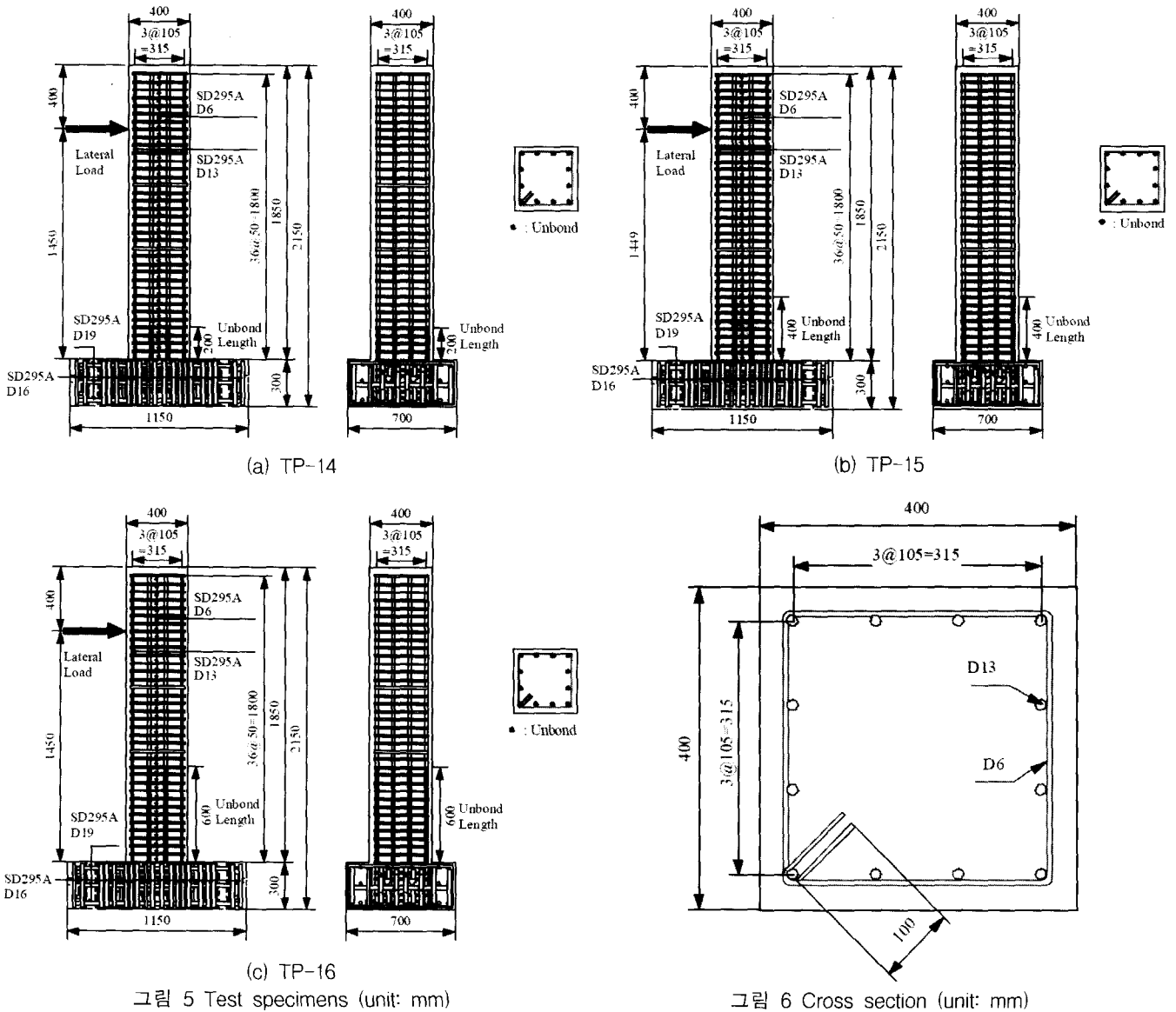


그림 5 Test specimens (unit: mm)

그림 6 Cross section (unit: mm)

#### 4. 해석에 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 5와 그림 6에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체<sup>(7)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 소성힌지영역의 비부착 주철근이 철근콘크리트 교각의 전체 거동특성에 미치는 영향을 정량화시킨 실험이기 때문이다.

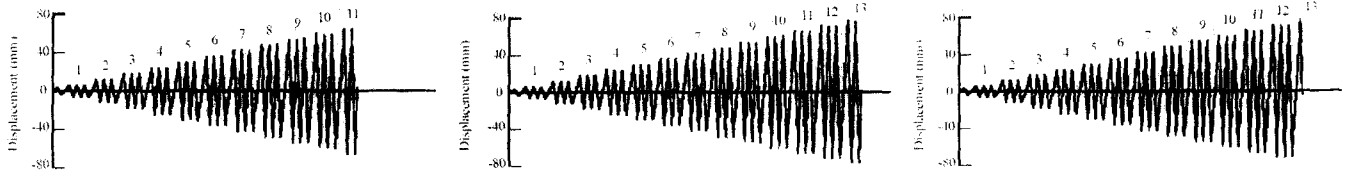
##### 4.1 선정된 실험체의 제원<sup>(7)</sup>

실험체의 제원은 표 1과 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 그림 7에 나타난 것과 같다. 재하는 교각기초부에서 주철근이 항복할 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 증가시켰으며 동일한 재하변위진폭에 있어서 반복회수를 3회로 하였다.

실험에서는 비부착 주철근의 거동특성을 나타내기 위해

표 1 Test specimens

Item	TP-14	TP-15	TP-16
Section	Square		
Section size (mm)	400 × 400		
Effective height (mm)	1,450		
Effective depth (mm)	360		
Aspect ratio	4.03		
Longitudinal reinforcement ratio (%)	0.95		
Volumetric ratio of tie reinforcement (%)	0.77		
Cylinder strength of concrete (MPa)	23.6	24.6	23.5
Longitudinal reinforcement	SD295A D13 (Yield strength = 367 MPa)		
Tie reinforcement	SD295 D6 (Yield strength = 376 MPa)		
Axial force (kN)	160 (1.05 MPa at the bottom)		



(a) TP-14

(b) TP-15

(c) TP-16

그림 7 Loading Hystereses

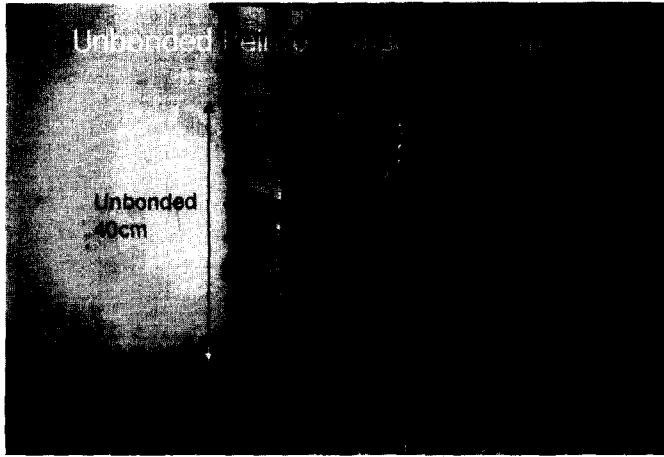


그림 8 Unbonding of main reinforcements

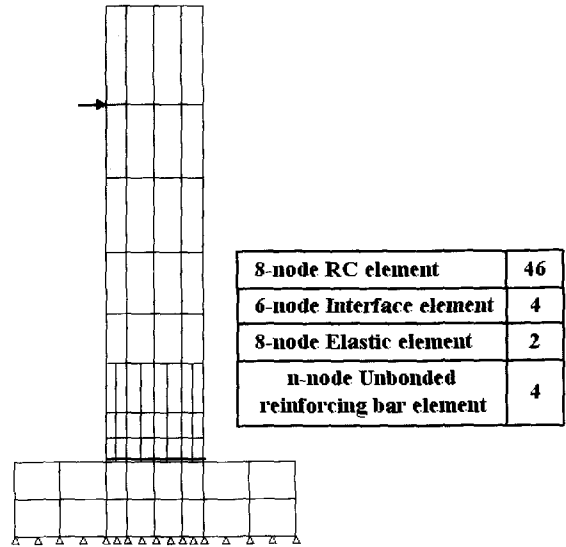


그림 9 Finite element mesh for the analysis

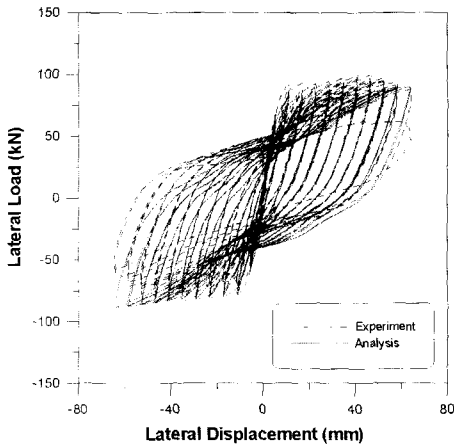


그림 10 Hysteresis loop for specimen TP-14

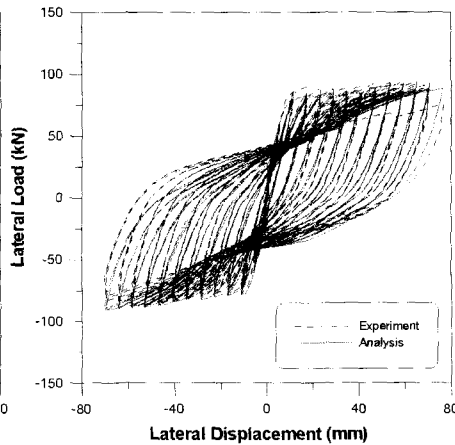


그림 11 Hysteresis loop for specimen TP-15

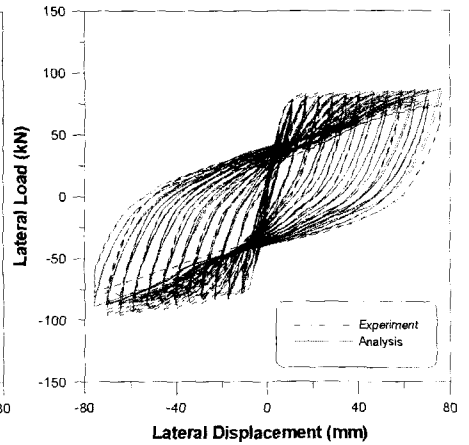


그림 12 Hysteresis loop for specimen TP-16

그림 8과 같이 철근의 표면을 소성재료로 처리하여 사용하였다.

#### 4.2 유한요소해석을 위한 요소분할

그림 9는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소분할한 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등배개 요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험체와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속 변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 이용하였고 비부착 주철근의 거동을 고려하기 위한 다절점 비부착 철근요소를 사용하였다.

#### 4.3 내력, 변형성능과 이력특성

그림 10 ~ 그림 12는 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 주기 하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다. 다만 TP-14 실험체에 대하여는 이 연구의 해석결과가 실험결과에 비하여 이력곡선을 다소 slim하게 평가하고 있는데 추후 이에 대한 원인규명이 필요할 것으로 판단된다.

그림 13은 이 실험의 변수로 사용한 비부착 길이의 변

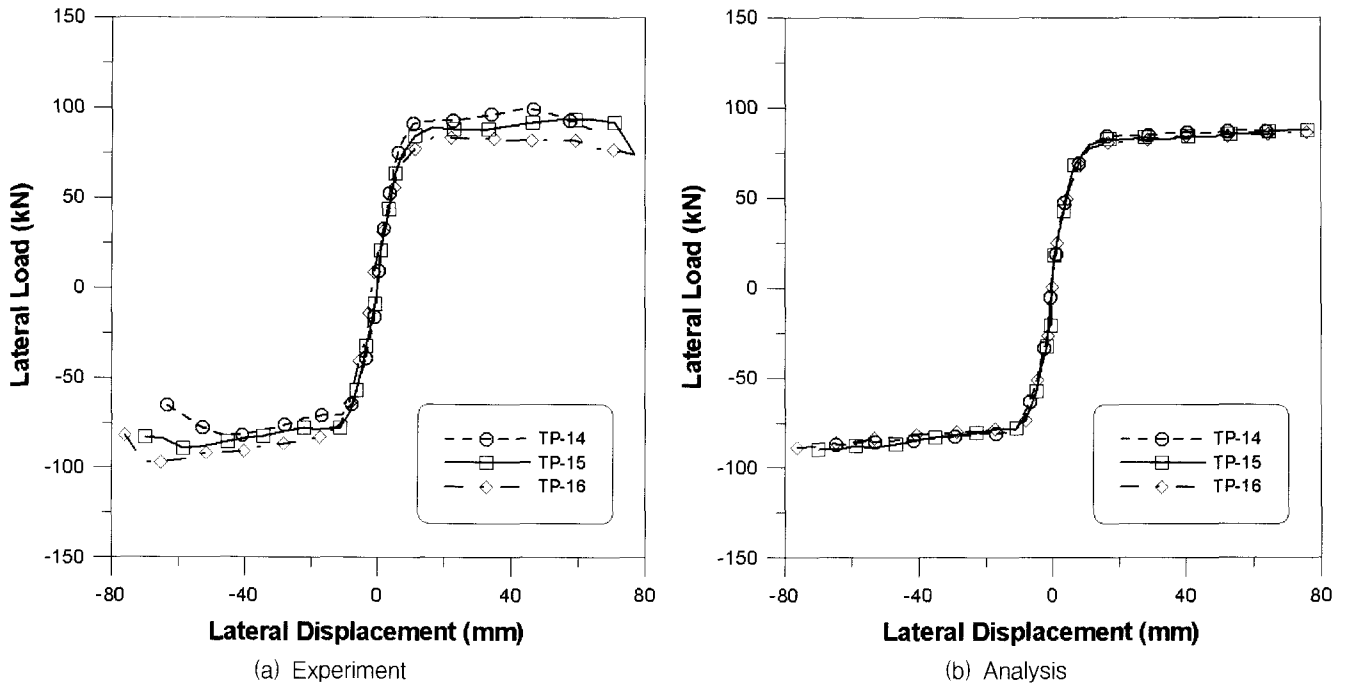


그림 13 Lateral load versus lateral displacement response of the specimens

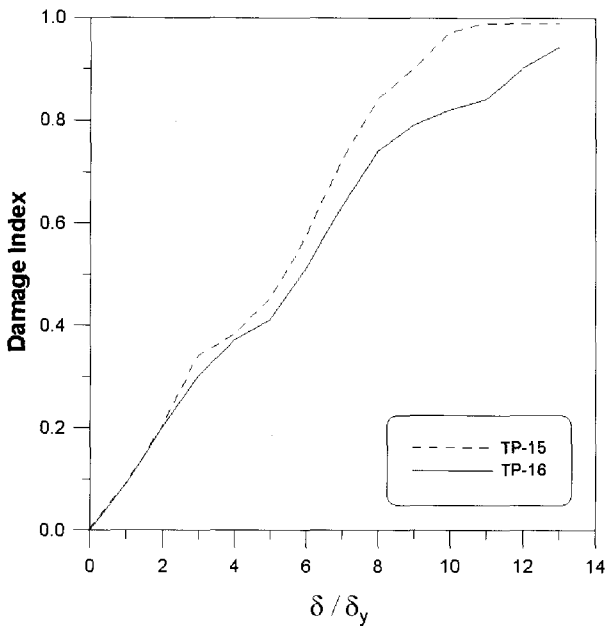


그림 14 Development of damage during the test

화에 따른 실험체의 거동특성을 비교하여 나타낸 것으로 비부착 길이의 증가에 따라 연성능력이 향상되는 실험결과를 해석결과가 잘 묘사하고 있다. 즉 20cm의 비부착 길이를 사용한 TP-14 실험체보다 40cm와 60cm의 비부착 길이를 사용한 TP-15와 TP-16 실험체의 연성능력이 크게 나타나고 있다. 이러한 거동특성은 주철근의 비부착 영향으로 인해 변형률의 집중이 감소되어 전반적으로 손상이 지연되는 현상에 기인한다. 즉 인장영역에서는 콘크리트 파복의 박리현상이 감소하고 압축영역에서는 주철근의 좌굴이 줄어들어 최종적으로는 철근콘크리트 교각의 연성능력을 향상시키는 것이다. 하중재하에 따른 요소레벨의 손상지수<sup>(9),(10)</sup>의 변화를 나타내는 그림 14를 통해서도 이를

알 수 있다. 해석결과와 재하 단계별 손상지수 값을 확인해보면 수평변위  $5\delta_y$ 에서 TP-15 실험체는 0.45이고 TP-16 실험체는 0.41이며, 수평변위  $10\delta_y$ 에서 TP-15 실험체는 0.97이고 TP-16 실험체는 0.82이다. 즉 40cm의 비부착 길이를 사용한 TP-15 실험체보다 60cm의 비부착 길이를 사용한 TP-16 실험체가 동일한 하중단계에서 손상이 지연되고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 구조물의 에너지 소산 능력과 강성을 다소 감소시키며 잔류변위가 다소 증가하는 거동을 함께 보이고 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과와 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가가 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비선형 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여, 반복되는 면내력이 작용하는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 전반적인 거동

- 특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 2) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각구조의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있다.
  - 3) 소성힌지영역에서 비부착 주철근을 사용함으로써 인장영역에서는 콘크리트 피복의 박리현상이 감소하고 압축영역에서는 주철근의 좌굴이 줄어들어 최종적으로는 철근콘크리트 교각의 연성능력을 향상시키는 효과를 이용하면 내진성능 향상에 이용할 수 있을 것이다. 다만 구조물의 에너지 소산능력과 강성을 다소 감소시키며 잔류변위가 다소 증가하는 거동특성을 보이고 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
  - 4) 지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 정영수, 박창규, 이은희, "지진을 경험한 형상비 2.5 RC 교각의 내진 변위 연성도 평가", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 3호, 2003, pp. 79-88.
2. 손혁수, 이재훈, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 연성도 상관관계", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 4호, 2003, pp. 51-61.
3. 김익현, 이종석, 이윤복, 김원섭, 선창호, "50% 주철근 겹침이음을 갖는 중실 및 중공 사각단면 교각의 거동특성", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 5호, 2003, pp. 25-35.
4. 이도형, "철근콘크리트 교각의 비선형 지진변형 해석", 대한토목학회 논문집, 제24권, 5A호, 2004, pp. 1083-1091.
5. 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, V. 129, No. 9, 2003, pp. 1199-1207.
6. 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.

- II: Numerical Validation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 129, No. 9, 2003, pp. 1208-1219.
7. Kawashima, K., Hosoi, K., Shoji, G. and Sakai, J., "Effects of Unbonding of Main Reinforcements at Plastic Hinge Region for Enhanced Ductility of Reinforced Concrete Bridge Columns," *Structural and Earthquake Engineering*, Proc. JSCE, 689/I-57, 2001, pp. 45-64.
8. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 113-124.
9. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위 논문, 성균관대학교, 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*, 2005, Vol. 27, No. 4, pp. 576-592.
11. 김태훈, 유영화, 최정호, 신현목, "P-delta 영향을 포함한 철근콘크리트 교각의 비선형 유한요소해석", 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제5호, 2004, pp. 15-24.
12. Mander, J. B., Panthaki, F. D. and Kasalanati, K., "Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.
13. Kakuta, Y., Okamura, H. and Kohno, M., "New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan," *IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures*, Lausanne, 1982, pp. 51-58.
14. 박재근, 최강룡, 신현목, "PSC 구조물의 비선형 해석을 위한 비부착 텐던 모델", 대한토목학회 학술대회 논문집, 2004, pp. 470-475.
15. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
16. Bazant, Z. P. and Oh, B. H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete," *Material and Structures*, Vol. 16, 1983, pp. 155-177.
17. Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H., *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, 2003.
18. 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, 1987, pp. 133-194.