

# 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성거동에 관한 해석적 연구

## Analytical Study on the Inelastic Behavior of Precast Segmental Prestressed Concrete Bridge Piers

김 태 훈\*      진 병 무\*\*      김 영 진\*\*\*      신 현 목\*\*\*\*  
Kim, Tae-Hoon      Jin, Byeong-Moo      Kim, Young-Jin      Shin, Hyun-Mock

### 국문요약

이 연구의 목적은 조립식 프리스트레스트 콘크리트 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. 사용된 비부착 텐던 요소는 유한요소법에 근거하며 프리스트레스트 콘크리트 부재의 콘크리트와 텐던의 상호작용을 구현할 수 있다. 개발된 접합 요소는 세그먼트 접합부의 비탄성거동을 예측할 수 있다. 이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성 거동의 파악을 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

**주요어** : 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각, 비탄성거동, 재료적 비선형성, 비부착 텐던 요소, 접합요소

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior of precast segmental prestressed concrete bridge piers. 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. An unbonded tendon element based on the finite element method, that can represent the interaction between tendon and concrete of prestressed concrete member, is used. A joint element is newly developed to predict the inelastic behaviors of segmental joints. The proposed numerical method for the inelastic behavior of precast segmental prestressed concrete bridge piers is verified by comparison with reliable experimental results.

**Key words** : precast segmental prestressed concrete bridge piers, inelastic behavior, material nonlinearity, unbonded tendon element, joint element

## 1. 서 론

교량의 하부구조는 고정하중과 차량 활하중 등의 수직 방향 하중을 지지할 뿐만 아니라, 차량 제동하중, 풍하중, 지진하중, 정수압과 유수압, 횡토압, 선박충돌하중, 그리고 온도변화나 크리프 및 건조수축에 의한 하중효과 등 횡방향 하중을 지지해야 하므로 교량의 안전성에 매우 중요한 구조요소이다. 국내 교량의 교각은 대부분이 콘크리트 교각이 주종을 이루고 있으며, 공사비 면에서도 큰 비중을 차지하여 전체 교량의 경제성에 큰 영향을 미치고 있다. 이러한 하부구조의 중요성을 인식하여 최근 국내에서도 교각의 새로운 시스템에 대한 연구와 개발이 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup>

새로운 시스템에 대한 연구로서 교량 하부구조에 대한 프리캐스트 기술의 적용이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있는데, 이는 여러 가지 복합적인 요인으로 인해 프리캐스트 공법의 장점이 부각되어 채택되는 경우가 늘어나

고 있기 때문이다. 프리캐스트 공법은 콘크리트 타설 또는 거푸집 설치 등이 용이하지 않은 입지조건이나 신속한 하부구조 시공이 요구되는 경우에 매우 효과적이며 교량 건설에서 유발되는 환경의 피해를 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

공장 등에서 제작되어진 프리캐스트 세그먼트를 쌓아올려 PC강재로 긴장 연결함으로써 교각을 구축하는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각은 종래의 철근콘크리트 교각에 비해 공기단축 및 품질향상 등에서 유리한 공법이다.

조립식 하부구조를 통한 급속 시공에서는 각 구성부재 자체의 품질은 뛰어나기 때문에 설계와 시공에 큰 무리는 없으나, 세그먼트 연결부는 설계 및 시공에서 주의를 기울여 품질관리를 해야 하는 부분이다. 따라서 세그먼트 연결부에 대한 연구 및 시공 기술 개발은 현재도 꾸준하게 이루어지고 있다.<sup>(2)-(4)</sup>

최근 들어 교각의 내진성능을 보다 합리적으로 만족시키는 구조형식으로 프리스트레스트 콘크리트 교각에 대한 연구가 이루어지고 있으며 실제 시공조건에 따라 프리캐스트 공법에 의한 프리스트레스트 콘크리트 교각에 관한 연구도 이루어지고 있다.

프리스트레스트 콘크리트 교각구조에 비부착 긴장재를 사용하게 되면 그림 1과 같은 이력응답에 따라 잔류변위

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

\*\* 정회원 · 대우건설기술연구소 선임연구원, 공학박사

\*\*\* 정회원 · 대우건설기술연구소 수석연구원, 공학박사

\*\*\*\* 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 6. 27 / 심사종료일 : 2005. 9. 13)

가 작아지고 에너지 소산능력이 감소되는 등의 거동특성을 나타내게 된다. 비부착 긴장재는 변형률의 변화가 텐던 전체길이에 분포되어 변형률의 집중이 감소되므로 그림 1(b)와 같이 높은 연성도에서도 항복하지 않게 되며 구조물의 잔류변위가 줄어들게 된다. 이러한 영향들은 비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실험적 연구에 의해 규명되어지고 있다.<sup>(5)-(7)</sup>

이 연구에서는 최근 들어 관심과 활용이 증가하고 있는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조를 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하고 그 내진성능을 평가하는데 그 목적이 있다. 프리스트레스트 콘크리트의 역학적 거동에서 프리스트레스트에 의하여 콘크리트가 초기에 압축력을 받는 이외의 거동은 철근콘크리트와 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 저자 등에 의하여 개발된 철근콘크리트의 비선형 재료모델<sup>(8)-(11)</sup>을 그대로 사용하고 여기에 프리스트레싱을 고려할 수 있는 텐던요소를 조합함으로써 프리스트레스트 콘크리트의 역학적 거동을 예측하고자 한다.

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>(12)</sup>에 비부착 긴장재의 영향을 고려할 수 있는 비부착 텐던요소와 세그먼트 접합부의 거동특성을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 이식하여 사용하였다.

## 2. 이차원 응력 하에서의 비선형 재료모델

### 2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델<sup>(8)-(11)</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 연구에서는 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 이축응력상태에 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-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다.

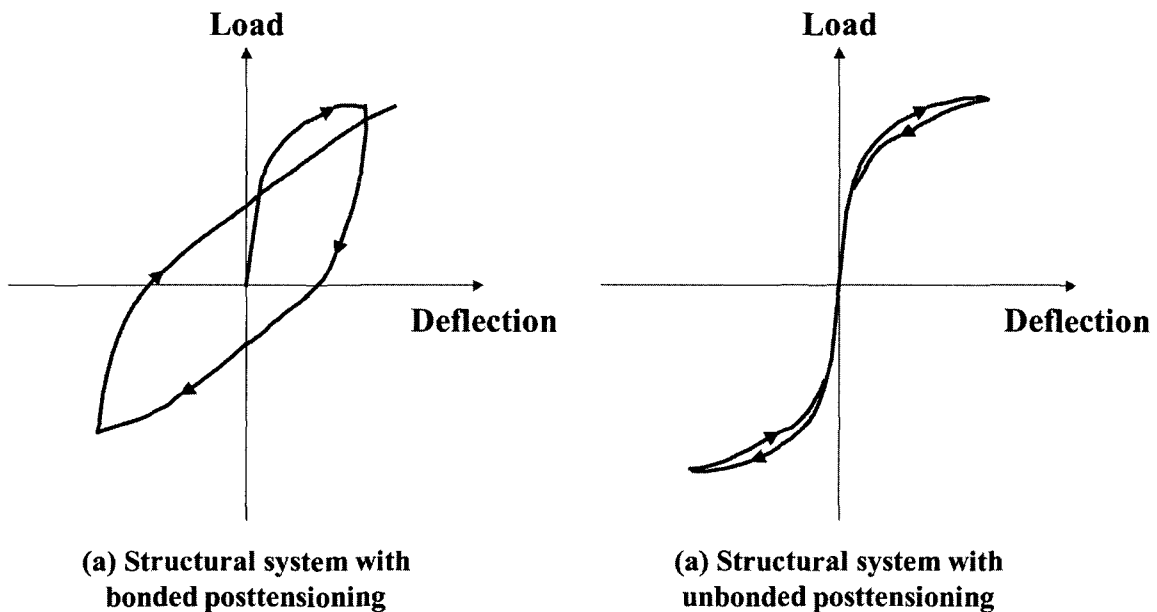


그림 1 Effect of unbonding of main reinforcements

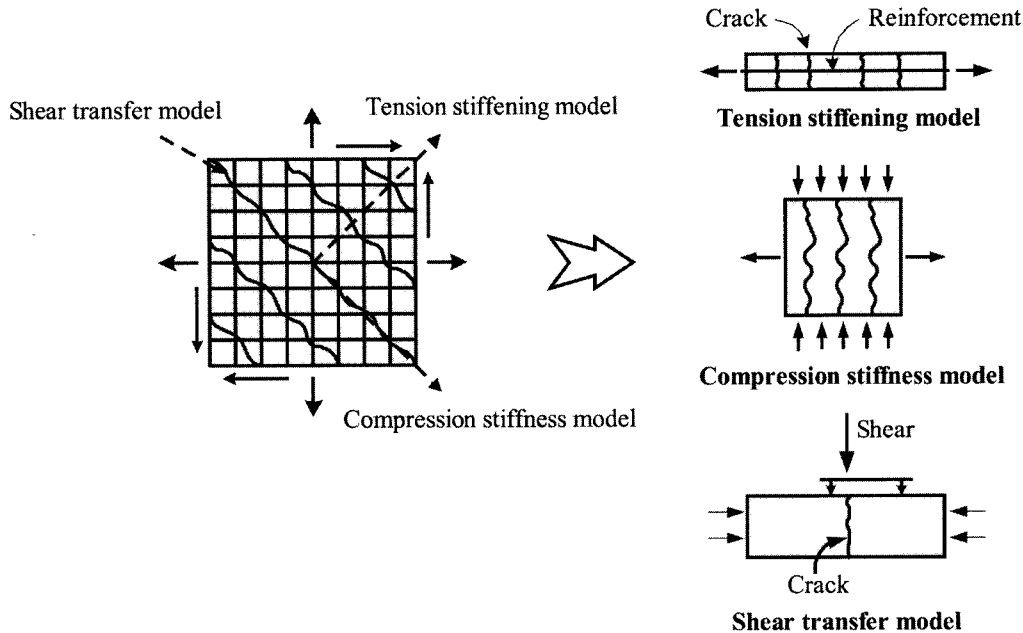


그림 2 Construction of cracked concrete model

균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열 부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형률 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 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>(10)</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>(13)</sup>을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식<sup>(14)</sup>을 수정하여 사용하였다.

## 2.2 텐던의 재료모델

콘크리트 속의 텐던의 응력과 변형률의 관계는 콘크리트와 텐던사이의 부차효과로 인하여 텐던만의 그것과는 다르게 나타난다. 이러한 부차효과에 대해서 많은 연구가 있었지만 여러 가지 변수 등의 영향으로 인하여 평균응력, 평균변형률 관계는 명확하게 규명되지 않고 있다.<sup>(15)</sup>

텐던은 일반적으로 고강도 강재를 사용하므로 일반 철근과 같이 뚜렷한 항복점을 갖지 않으며 항복고원 또한 나타나지 않는다. 따라서 텐던의 경우에는 일반 철근과는 달리 텐던 자체(bare bar)의 응력-변형률 관계와 부차이 고려된 텐던의 응력-변형률 관계에서 현격한 차이를 보이지 않게 된다. 따라서 이 연구에서는 저자 등에 의하여 제안된 부차이 고려된 철근의 응력-변형률 관계를 고려하여 텐던의 응력-변형률 관계를 다음 식과 같이 trilinear 모델(그림 4)로써 표현하였다.

$$\sigma_p = f_{py} + E_{ph1} (0.03 - \epsilon_{py}) + E_{ph2} (\epsilon_{pu} - 0.03) \quad (1)$$

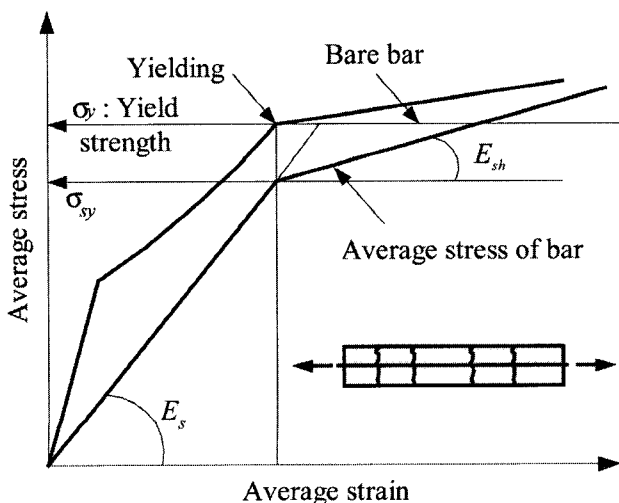


그림 3 Model for reinforcing bar in concrete

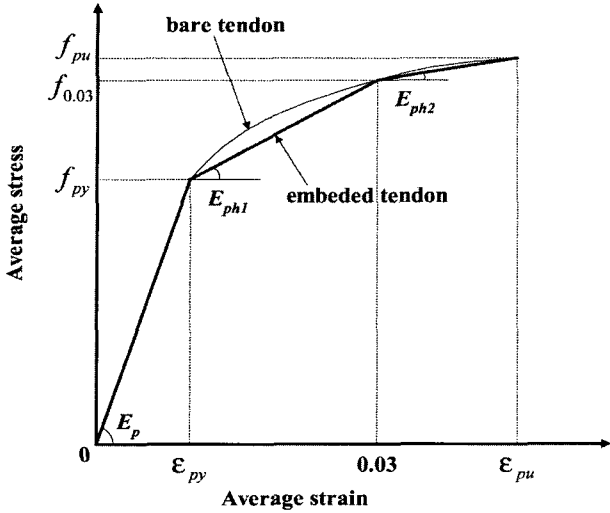


그림 4 Model for tendon

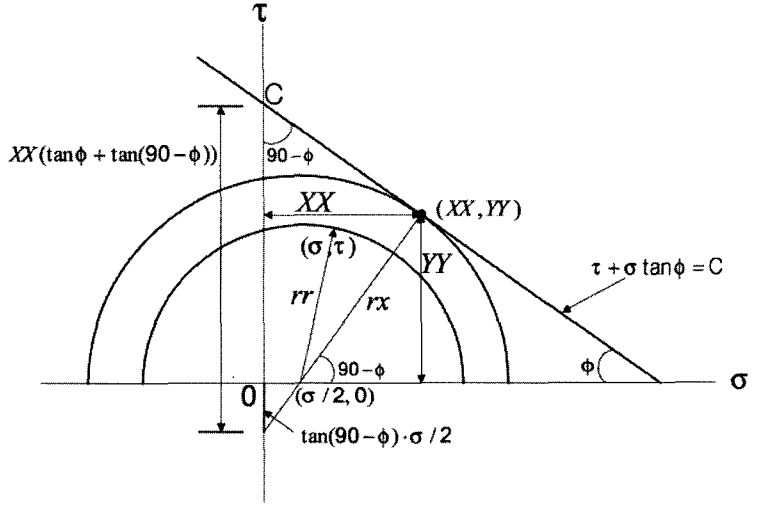


그림 5 Mohr-Coulomb failure criterion

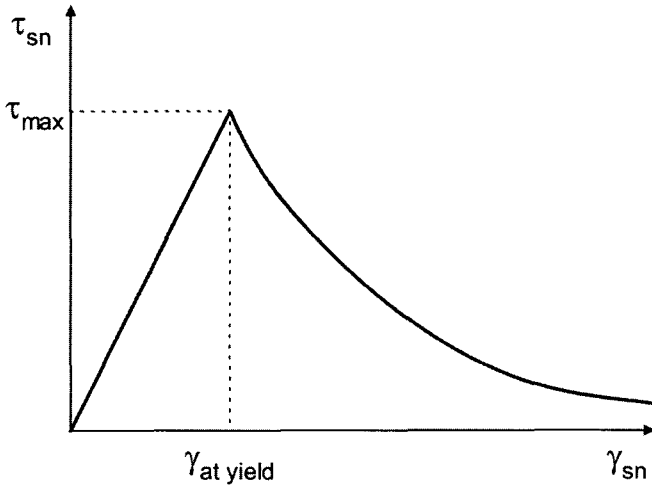


그림 6 Shear stress - Shear strain relationship

$$E_{ph1} = \frac{f_{0.03} - f_{py}}{0.03 - \epsilon_{py}} \quad (2)$$

$$E_{ph2} = \frac{f_{pu} - f_{0.03}}{\epsilon_{pu} - 0.03} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_p$ 는 텐던의 응력,  $f_{py}$ 는 텐던의 항복강도,  $f_{pu}$ 는 텐던의 극한강도,  $\epsilon_{py}$ 는 텐던의 항복변형률,  $\epsilon_{pu}$ 는 텐던의 극한변형률, 그리고  $E_{ph1}$ ,  $E_{ph2}$ 는 텐던의 변형률 경화율이다.

### 2.3 접합요소의 재료모델

조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로 그림 5와 같은 Mohr-Coulomb 파괴기준을 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$\tau + \sigma \tan \phi \geq c \quad (4)$$

여기서  $\tau$ 와  $\sigma$ 는 각각 접합면에서의 전단응력과 수직응력,  $\phi$ 는 내부마찰각, 그리고  $c$ 는 접착력이다.

그림 5에서  $r_x$ 는 파괴가 시작되는 시점에서의 Mohr-circle의 반지름이며,  $r_r$ 는 파괴 전의 임의의 하중에서의 Mohr-circle의 반지름이다. 접합요소를 사용하면 접착방향에 평행한 전단 응력과 이에 수직인 방향의 수직 응력을 구할 수 있다. 프로그램에서 계산된 접합면의 전단 응력 및 수직 응력이 식 (4)을 만족하면 해당되는 접합요소가 항복거동을 하는 것으로 하여 부착파괴를 모사하였다.

접합요소의 전단 응력 모델은 그림 6과 같이 최대 전단 응력값까지는 선형증가를 보이고 그 이후부터 부착파괴까지는 급격히 감소하는 것으로 가정하였다.

## 3. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAST

### 3.1 비부착 텐던요소

이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성 거동을 예측하기 위해서 저자 등이 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석을 위하여 개발한 비부착 텐던요소<sup>(16)</sup>를 목적에 맞게 수정하여 사용하였다.

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

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

이 연구에서 비부착 텐던요소는 모체 요소와 공유하는 각 절점을 이용하여 강성을 구성한다. 그리고 각 절점에서 비부착 텐던의 변위는 모체 요소와 동일하지만 각각의 비부착 텐던요소의 변위를 비부착 텐던 전체 길이로 나누어 모든 비부착 텐던요소의 변형률을 동일하게 유지함으로써 비선형 거동특성을 모사하였다.

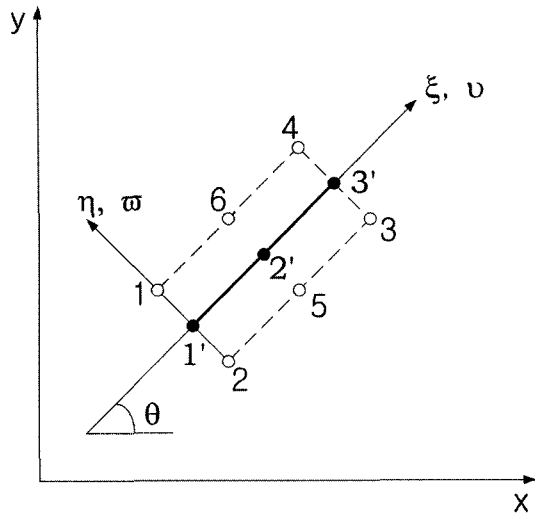


그림 7 6-node Joint element

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
Unbonded prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

그림 8 Element library RCAHEST

일반적으로 텐던은 구조물 내부에서 편심을 갖고 배치되어 있으며 비부착 텐던을 모사하기 위하여 개발된 다절점 트러스요소는 각 절점에서 텐던의 편심, 기울기, 그리고 형상에 따라 등가절점력을 계산할 수 있다.

### 3.2 접합요소

이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비선형 유한요소해석을 위하여 세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로 Mohr-Coulomb 파괴기준을 도입하여 접합요소를 개발하였다.

세그먼트 접합부에 발생하는 수직응력과 전단응력을 표현하기 위한 접합요소의 강성매트릭스는 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} O \\ S \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $\sigma$ 는 수직응력,  $\tau$ 는 전단응력,  $K_n$ 는  $E/t$ ,  $K_s$ 는  $G/t$ ,  $E$ 는 접합부의 탄성계수,  $G$ 는 접합부의 전단탄성계수,  $t$ 는 접합부의 두께,  $O$ 는 접합부의 열림 변위(opening), 그리고  $S$ 는 접합부의 미끄러짐 변위(slip)이다.

접합요소는 그림 7과 같이 수직방향 2개 절점의 위치가 같은 가상의 절점을 이용한 6절점 접합요소 또는 4절점 접합요소 중의 하나를 선택하여 사용할 수 있도록 하였다. 접합요소를 사용하면 접합부에 평행한 수평방향의 전단응력과 이에 수직방향의 인장응력 또는 압축응력을 결정할 수 있다.

### 3.3 비선형 유한요소해석 프로그램

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소

해석 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>(8),(11)</sup>을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP<sup>(17)</sup>에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)<sup>(12)</sup>에 비부착 긴장재의 영향을 고려할 수 있도록 수정을 가하고 개발된 비부착 텐던요소를 이식하였다. 그리고 세그먼트 접합부의 부착파괴를 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 이식하여 함께 사용하였다(그림 8).

## 4. 개발된 해석기법의 타당성 검증

### 4.1 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보

이 연구에서 개발한 접합요소의 타당성을 검증하기 위해서 그림 9에 나타난 것과 같은 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보의 실험체<sup>(18)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 검증 예로 채택한 이유는 비부착 긴장재와 세그먼트 접합부가 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전체 거동특성에 미치는 영향을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

실험체는 그림 9에 보이는 바와 같이 4 in. × 6 in. × 42 in. (101.6 mm × 152.4 mm × 1066.8 mm)의 장방향의 단순보 두 개를 그림 10과 같이 접합시키고 포스트텐션 방식으로 프리스트레스를 도입한 후 재하 하였다. 세그먼트 접합부는 plain butt와 mortared의 두 가지 형식을 갖고 있으며 비부착 긴장재를 통해 프리스트레스

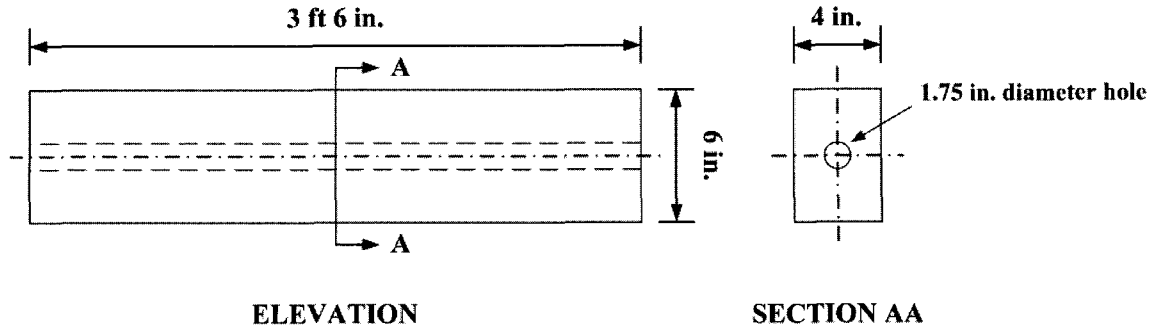


그림 9 Details of test specimen (1 in. = 25.4 mm)

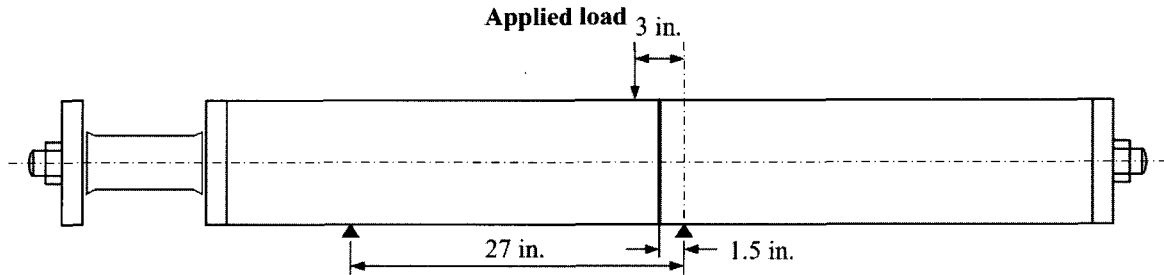
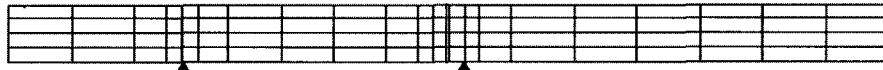


그림 10 Applied shear load for joint test (1 in. = 25.4 mm)



<b>8-node Plane stress element</b>	<b>84</b>
<b>6-node Joint element</b>	<b>4</b>
<b>n-node Unbonded prestressing element</b>	<b>1</b>

그림 11 Finite element mesh for analysis

를 가하였다.

이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 그림 11과 같이 평면응력요소 84개, 접합요소 4개, 그리고 비부착 텐던요소 1개로 총 89개의 요소로 분할하였다. 세그먼트 접합부의 비탄성 거동특성을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 사용하였으며, 비부착 긴장재의 거동을 고려하기 위한 다절점 비부착 텐던요소를 이용하였다.

해석결과와 실험결과 모두 실험체는 접합부에서 미끄러짐에 의해 파괴되었으며, 이러한 결과를 정리하여 표 1과 표 2에 나타내었다.

Plain butt 형식의 접합부에 대한 유한요소해석 결과에서 파괴하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 1.31과 0.04로서, 파괴하중의 평균값은 전반적으로 실험결과 보다 다소 작게 평가하고 있다. 이는 유한요소해석의 경우 파괴기준을 가우스 적분점으로 평가를 하고 있어 실험에서의 평균적인 거동과는 차이를 보이고 있는 것으로 판단된다. 또한 변동계수가 0.04에 불과하여 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다(그림 12). 이때 프리스트레스트에 대한 전단력의

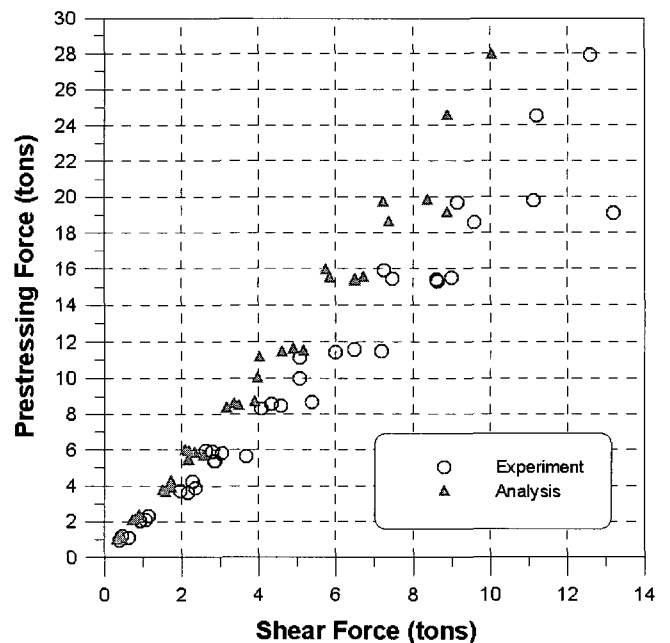


그림 12 Shear force for varying prestressing force (Plain butt joints) (1 tons = 9.80665 kN)

비율로 나타나는 내부마찰각은 21~35° 범위에 있다.

표 1 Experimental and analytical results on plain butt joints

Prestressing force (tons)	Prestress (lb/in <sup>2</sup> )	Load (tons)	Shear force / Prestressing force ( $\mu$ )	Shear force at joints (tons)		
				Exp. (1)	Ana. (2)	(1) / (2)
0.96	100	0.45	0.417	0.40	0.32	1.25
1.12	116	0.71	0.572	0.64	0.48	1.33
1.20	125	0.53	0.391	0.47	0.39	1.21
2.04	212	1.04	0.456	0.93	0.74	1.26
2.08	216	1.21	0.514	1.07	0.82	1.30
2.30	238	1.31	0.505	1.16	0.90	1.29
3.60	363	2.45	0.606	2.18	1.60	1.36
3.74	388	2.24	0.532	1.99	1.52	1.31
3.89	402	2.66	0.606	2.36	1.73	1.36
4.24	440	2.58	0.540	2.29	1.74	1.32
5.40	560	3.25	0.535	2.89	2.20	1.31
5.41	561	3.21	0.527	2.85	2.18	1.31
5.65	586	4.15	0.654	3.69	2.58	1.43
5.80	601	3.44	0.528	3.06	2.34	1.31
5.90	612	3.15	0.474	2.80	2.20	1.27
5.95	616	2.96	0.442	2.63	2.10	1.25
8.30	860	4.57	0.488	4.06	3.16	1.28
8.45	875	5.15	0.542	4.58	3.48	1.32
8.55	886	4.88	0.508	4.34	3.36	1.29
8.70	902	6.05	0.618	5.38	3.89	1.38
10.00	1,036	5.70	0.506	5.06	3.97	1.27
11.10	1,150	5.70	0.456	5.06	4.02	1.26
11.45	1,185	6.75	0.524	6.00	4.60	1.30
11.50	1,192	8.07	0.625	7.18	5.16	1.39
11.60	1,203	7.29	0.560	6.48	4.89	1.33
15.30	1,585	9.70	0.565	8.64	6.50	1.33
15.42	1,600	9.74	0.559	8.62	6.50	1.33
15.45	1,602	8.42	0.484	7.48	5.85	1.28
15.50	1,605	10.12	0.581	9.00	6.72	1.34
15.90	1,647	8.15	0.457	7.25	5.76	1.26
18.60	1,925	10.80	0.516	9.60	7.39	1.30
19.10	1,980	14.82	0.691	13.20	8.90	1.48
19.70	2,041	10.30	0.464	9.15	7.23	1.27
19.80	2,050	12.50	0.562	11.12	8.38	1.33
24.50	2,540	12.60	0.457	11.20	8.88	1.26
27.90	2,890	14.15	0.452	12.58	10.03	1.25
Mean						1.31
COV						0.04

( Note: 1 tons = 9.80665 kN; 1 lb/in<sup>2</sup> = 6.89476×10<sup>-3</sup> MPa )

표 2 Experimental and analytical results on mortared joints

Prestressing force (tons)	Prestress (lb/in <sup>2</sup> )	Load (tons)	Shear force / Prestressing force ( $\mu$ )	Shear force at joints (tons)		
				Exp. (1)	Ana. (2)	(1) / (2)
5.40	559	4.63	0.763	4.12	2.92	1.41
9.70	1,003	7.25	0.665	6.45	4.81	1.34
14.30	1,480	10.37	0.645	9.22	6.86	1.34
Mean						1.37
COV						0.03

(Note: 1 tons = 9.80665 kN; 1 lb/in<sup>2</sup> = 6.89476×10<sup>-3</sup> MPa)

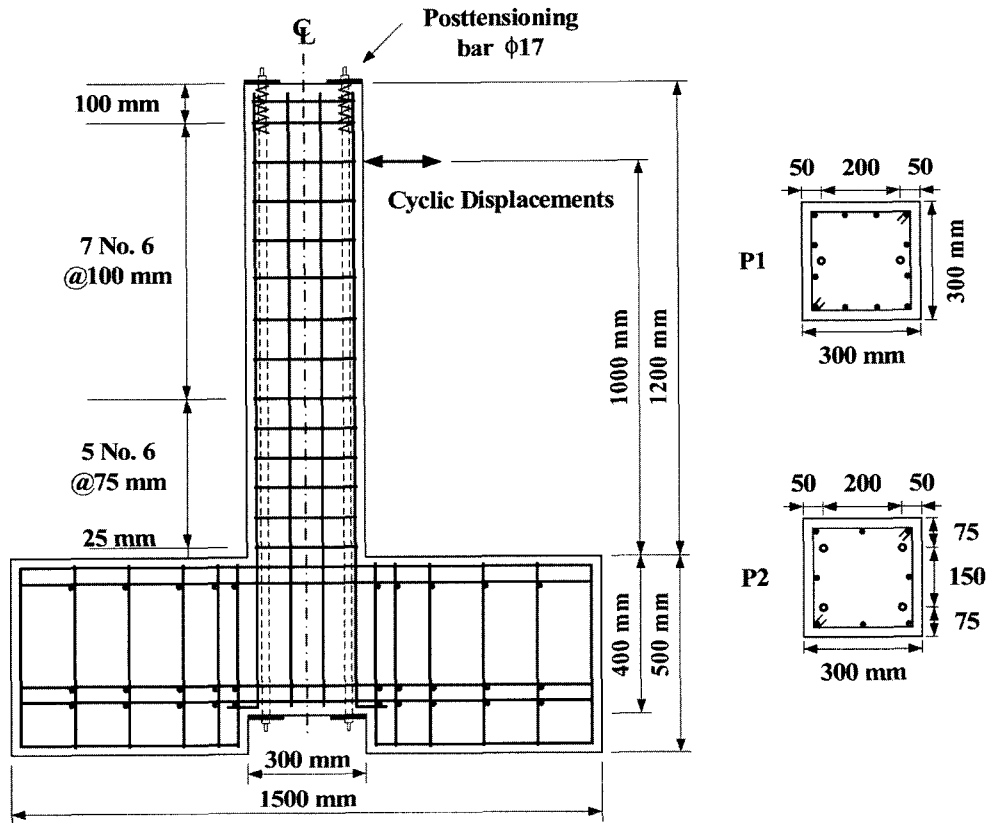


그림 13 Test specimens (unit: mm)

Mortared 형식의 접합부에 대한 유한요소해석 결과에서도 파괴하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 1.37과 0.03으로 Plain butt 형식의 접합부와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 이때 내부마찰각은 33~37° 범위에 있으며 점착력은 3.7 kgf/cm<sup>2</sup> (0.36 MPa)로 산정된다.

일련의 해석결과와 실험결과의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 교각

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 13에 나타난 것과 같은 비부착 긴장재를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실험체<sup>(5)</sup>를 선

정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비선형 이력특성을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

실험체의 재료물성은 표 3과 같으며 이들 실험체에 대한 재하는 교각기초부에서 주철근이 항복할 때, 하중작용 위치에 생기는 변위를 항복변위  $\delta_y$ 로 정의하고, 이 변위의 정수 배  $n \times \delta_y$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ )로 순차적으로 변위진폭을 증가시켰다.

이 실험은 프리스트레스트 콘크리트 교각의 거동특성을 평가하기 위하여 비부착 긴장재량, 주철근 비, 그리고 축방향 압축력 등을 변수로 하였다.

그림 14는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등대개요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않



표 3 Test specimens

Specimen	Axial force (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Mild steel	Mild steel $f_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Prestress steel ( $f_y = 12,500$ kgf/cm <sup>2</sup> )	Prestress (kgf/cm <sup>2</sup> )	Shear reinf. ( $f_y = 3,540$ kgf/cm <sup>2</sup> )
P1(N)	10	356	12-D10	4,090	2- $\Phi$ 17mm	35	Base: D6@75mm; elsewhere: D6@100 mm
P2(N)			8-D6	3,540	4- $\Phi$ 17mm	70	
P1(H)	40		12-D10	4,090	2- $\Phi$ 17mm	35	
P2(H)			8-D6	3,540	4- $\Phi$ 17mm	70	

(Note: 1 kgf/cm<sup>2</sup> = 9.80665 × 10<sup>-2</sup> MPa)

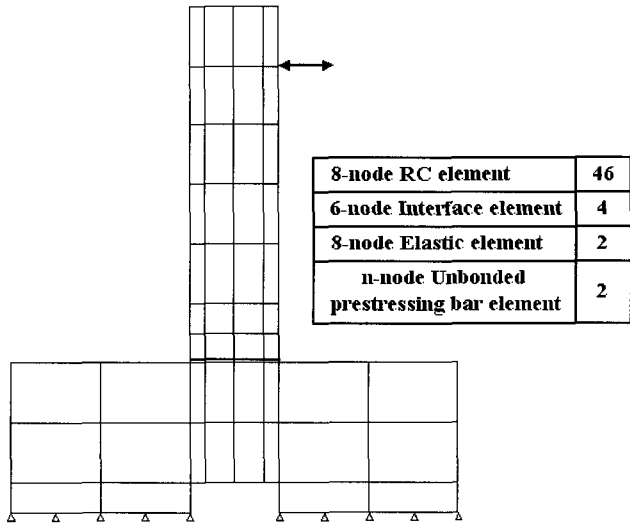
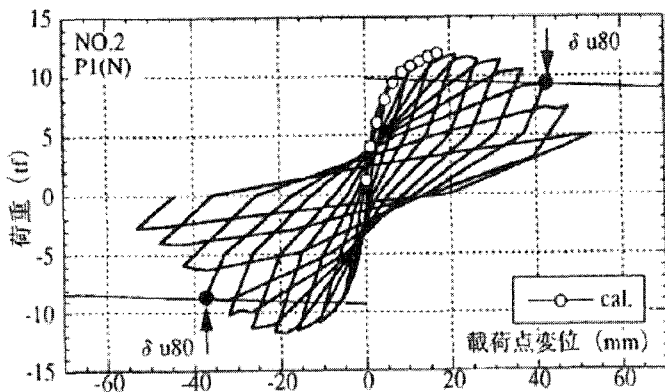


그림 14 Finite element mesh for the analysis

는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 이용하였고 비부착 긴장재의 거동을 고려하기 위한 다절점 비부착 텐던요소를 사용하였다.

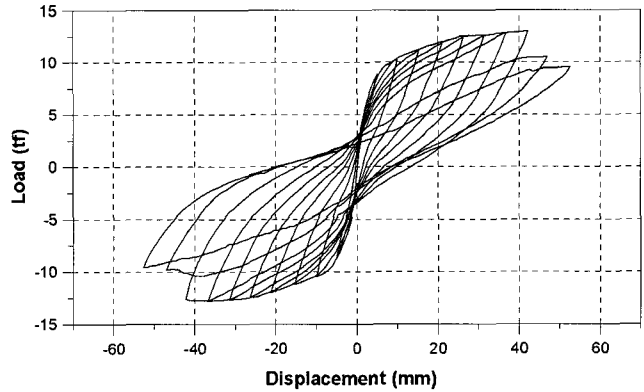
그림 15~그림 18은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 실험체에 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성인성 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

이 실험의 변수로 사용한 비부착 긴장재량의 변화에 따른 실험체의 잔류변위를 분석해보면 프리스트레스트량의 증가에 따라 잔류변위가 감소하는 실험결과를 해석결과가 잘

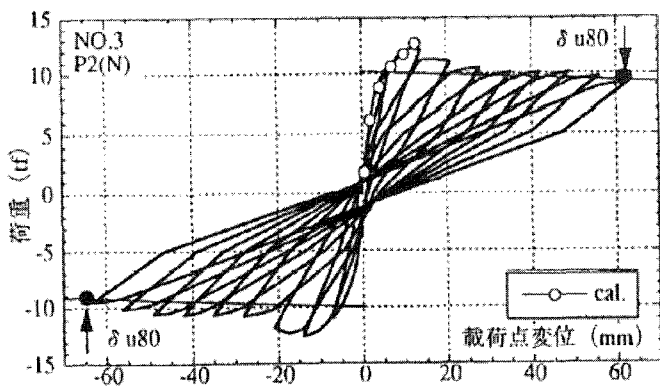


(a) Experiment<sup>(5)</sup>

그림 15 Shear vs. Displacement response of specimen P1(N) (1 tf = 9.80665 kN)

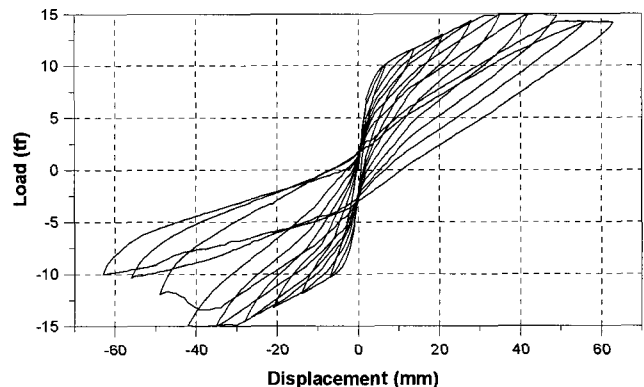


(b) Analysis

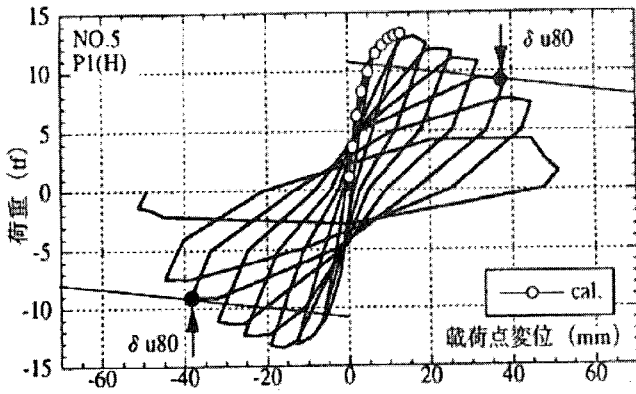


(a) Experiment<sup>(5)</sup>

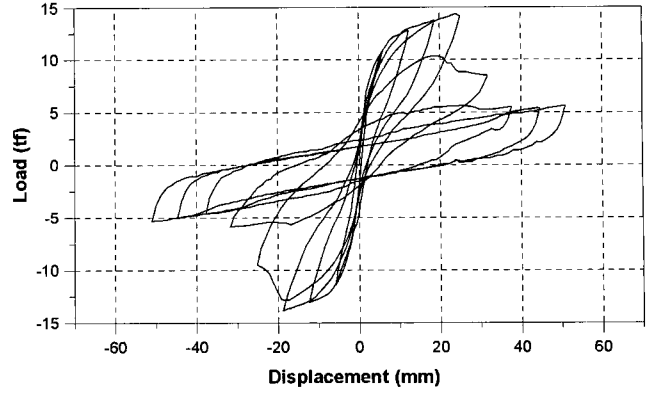
그림 16 Shear vs. Displacement response of specimen P2(N) (1 tf = 9.80665 kN)



(b) Analysis

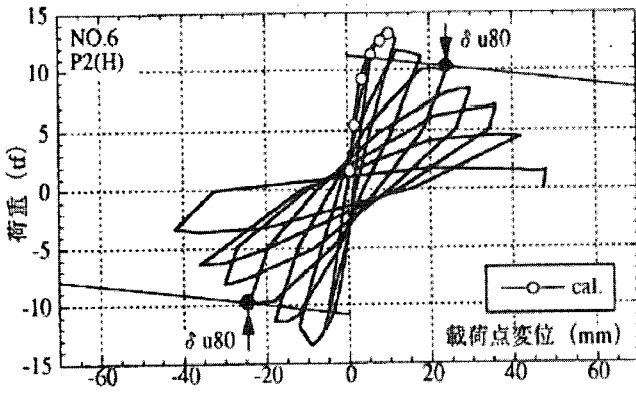


(a) Experiment<sup>(5)</sup>

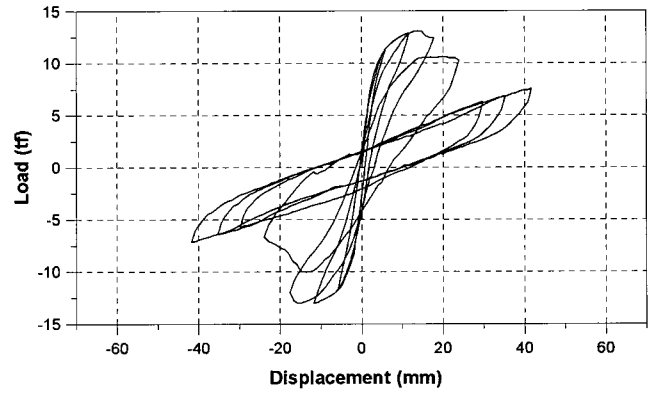


(b) Analysis

그림 17 Shear vs. Displacement response of specimen P1(H) (1 tf = 9.80665 kN)



(a) Experiment<sup>(5)</sup>



(b) Analysis

그림 18 Shear vs. Displacement response of specimen P2(H) (1 tf = 9.80665 kN)

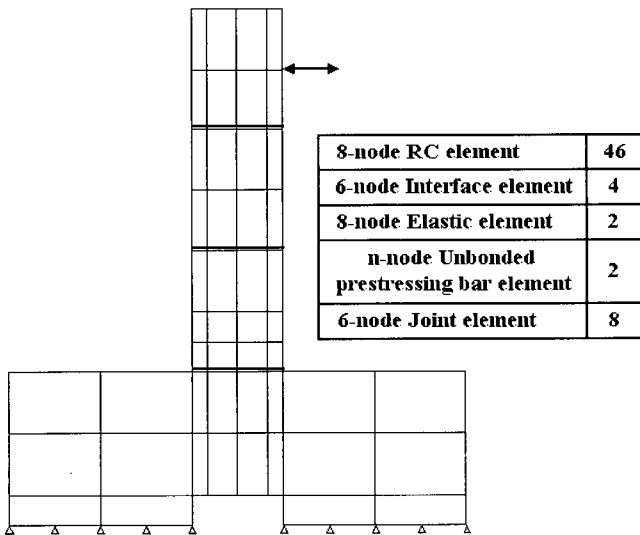


그림 19 Finite element mesh for the analysis

모사하고 있음을 알 수 있다. 즉 35 kgf/cm<sup>2</sup> (3.43 MPa)의 프리스트레스를 사용한 P1 실험체들보다 70 kgf/cm<sup>2</sup> (6.86 MPa)의 프리스트레스를 사용한 P2 실험체들의 잔류변위가 작게 나타나고 있다. 이러한 거동특성은 비부착 긴장재의 영향으로 인해 변형률의 집중이 감소되고 프리스트레스에 의한 회복 현상에 기인한다. 그러나 구조물의 에너지 소산능력을 다소 감소시키는 거동을 함께 보이고 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

### 5. 적용에 및 고찰

이 연구의 대상인 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각에의 적용성을 확인하기 위해서 전 절의 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실험체<sup>(5)</sup>에 조립식 공법을 모사하기 위해 400 mm 마다 세그먼트 접합부를 임의로 설치하였다. 선정된 실험체의 제원과 재하방법은 전 절과 동일하며 세그먼트 접합부의 거동특성을 지배하는 내부마찰각과 접착력은 기존의 연구결과<sup>(19)</sup>를 근거로 하여 각각 45°와 60 kgf/cm<sup>2</sup> (5.88 MPa)로 가정하였다.

그림 19는 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 사용하였으며 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 이용하였다. 또한 세그먼트 접합부의 비탄성 거동을 모사할 수 있도록 개발된 접합요소를 사용하였으며, 비부착 긴장재의 거동을 고려하기 위한 다절점 비부착 텐던요소를 이용하였다.

그림 20~그림 21은 전 절에서 실험결과와의 비교를 통해 타당성이 검증된 해석결과에 세그먼트 접합부를 도입한 해석결과를 함께 비교하여 나타내었다. 두 해석결과와의 비교로부터 교각의 내력은 일치하며 세그먼트 접합부

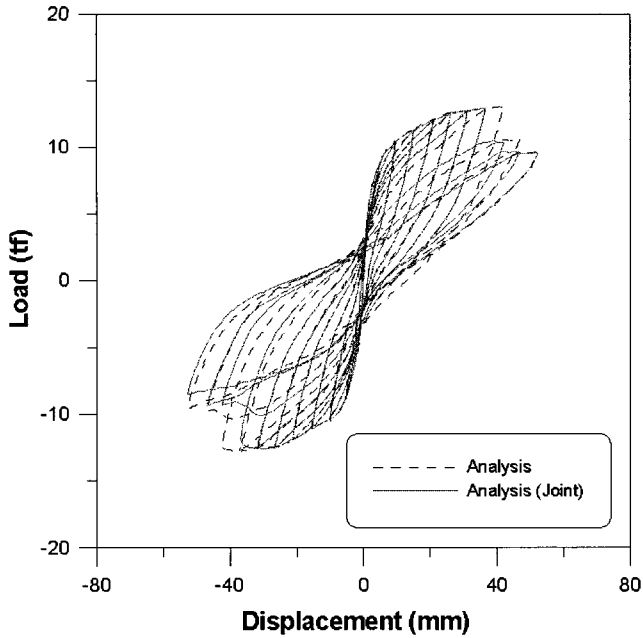


그림 20 Shear vs. Displacement response of specimen P1(N) (1 tf = 9.80665 kN)

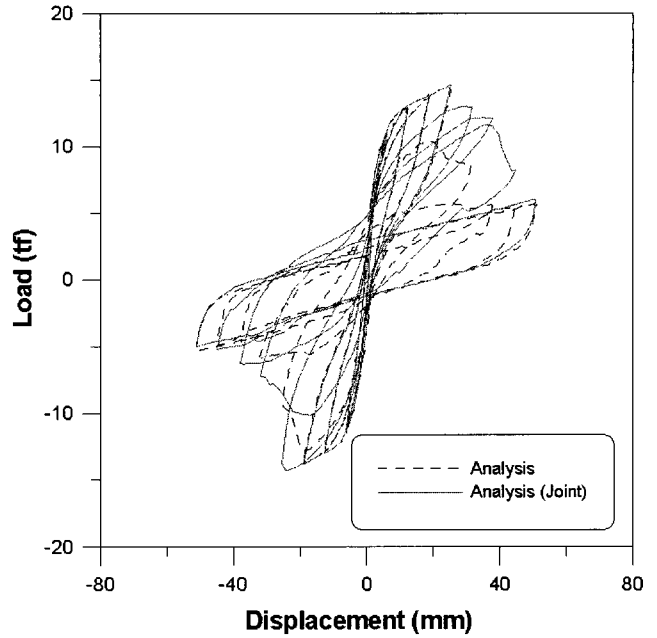


그림 21 Shear vs. Displacement response of specimen P1(H) (1 tf = 9.80665 kN)

를 도입한 해석의 변위연성도가 약간 떨어지는 것이 보이나 전반적인 내진성능에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 이를 통해 적절한 세그먼트 접합부의 성능특성을 갖는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각은 현장타설 프리스트레스트 콘크리트 교각의 성능특성과 거의 유사함을 알 수 있다.

조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 연구를 수행한 결과 성능특성을 발휘할 수 있는 적절한 세그먼트 접합부를 도입한다면 철근콘크리트 교각이나 프리스트레스트 콘크리트 교각과 비교하여 전반적으로 유사한 내진성능을 나타낼 것으로 기대되며 이로부터 현장타설 콘크리트 교각에 비하여 시공성이 우수한 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실용화가 가능할 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 조립식 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소 해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비선형 거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 다양한 실험결과와 비교·검토를 수행하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 2) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공할 수 있다.
- 3) 개발된 접합요소를 통해 세그먼트 접합부의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 모사할 수 있다.
- 4) 비부착 긴장재를 사용함으로써 잔류변위가 감소하는 효과를 이용하면 내진성능 향상에 이용할 수 있을 것이다. 다만 구조물의 에너지 소산능력을 다소 감소시키는 거동특성을 보이고 있어 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 적절한 성능특성을 갖는 세그먼트 접합부를 도입한 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각은 일반 프리스트레스트 콘크리트 교각의 거동특성과 거의 일치할 것으로 판단되며 설계에도 이러한 점을 반영할 수 있을 것으로 판단된다.
- 6) 지진하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 향후 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 이재훈, 양종호, "콘크리트 교각의 새로운 형식", 한국콘크리트학회지, 제16권, 2호, 2004, pp. 24-30.
2. Billington, S. L. and Breen, J. E., "Improving Standard Bridge with Attention to Cast-In-Place

- Substructure," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 4, 2000, pp. 344-351.
3. Billington, S. L., Barnes, R. W. and Breen, J. E., "Alternative Substructure Systems for Standard Highway Bridges," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 2, 2001, pp. 87-94.
  4. Nasir, S., Gupta, S., Umehara, H. and Hirasawa, I., "An Efficient Method for the Construction of Bridge Piers," *Engineering Structures*, 2001, Vol. 23, No. 9, pp. 1142-1151.
  5. Ito, T., Yamaguchi, T. and Ikeda, S., "Seismic Performance of Concrete Piers Prestressed in Vertical Direction," *Proc. Japan Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 1997, pp. 1197-1202. (in Japanese)
  6. Ikeda, S., Hirose, S., Yamahuchi, T. and Nonaka, S., "Seismic Performance of Concrete Piers Prestressed in the Critical Section," *The First fib Congress*, 2002, CD.
  7. Mori, T., Park, D.-K., Ikeda, S. and Yoshioka, T., "Seismic Performance of Prestressed Piers," *The First fib Congress*, 2002, CD.
  8. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위 논문, 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, 2003, pp. 1199-1207.
  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, 2005, pp. 576-592.
  11. 김태훈, 신현목, "소성힌지영역에서 비부착 주철근을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 관한 해석적 연구", 한국지진공학회 논문집, 제9권, 제2호, 2005, pp. 29-36.
  12. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 113-124.
  13. 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.
  14. 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.
  15. Collins, M. P. and Mitchell, P., *Prestressed Concrete Structure*, Prentice Hall, 1991.
  16. 박재근, 최강룡, 신현목, "PSC 구조물의 비선형 해석을 위한 비부착 텐던 모델", 대한토목학회 학술대회 논문집, 2004, pp. 470-475.
  17. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
  18. Jones, L. L., "Shear Tests on Joints between Precast Post-Tensioned Units," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 11, No. 31, 1959, pp. 25-30.
  19. 박윤제, 신동혁, 이광명, 신현목, "강판으로 보강된 RC보의 에폭시-콘크리트 계면의 부착특성", 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 제3호, 2001, pp. 221-227.