

# 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 접합부에 관한 해석적 연구

## Analytical Study on Joints in Precast Segmental Prestressed Concrete Bridge Piers

김태훈<sup>1)</sup> · 진병무<sup>2)</sup> · 김영진<sup>3)</sup> · 신현목<sup>4)</sup>

Kim, Tae-Hoon · Jin, Byeong-Moo · Kim, Young-Jin · Shin, Hyun-Mock

**국문 요약** >> 이 논문에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 접합부에 관한 해석기법을 제시하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 사용된 비부착 텐던요소는 유한요소법에 근거하며 프리스트레스트 콘크리트 부재의 콘크리트와 텐던의 상호작용을 구현할 수 있다. 개발된 접합요소는 세그먼트 접합부의 비탄성거동을 예측할 수 있다. 이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 접합부에 관한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

**주요어** 조립식, 프리스트레스트 콘크리트 교각, 재료적 비선형성, 비부착 텐던요소, 접합요소

**ABSTRACT** >> This paper presents an analysis procedures of joints in 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 joints in precast segmental prestressed concrete bridge piers is verified by comparison with reliable experimental results.

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

### 1. 서론

국내 교량의 교각은 대부분 콘크리트 교각이 주종을 이루고 있으며, 공사비 면에서도 큰 비중을 차지하여 전체 교량의 경제성에 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 하부구조의 중요성을 인식하여 최근 국내에서도 새로운 교각 시스템에 대한 연구와 개발이 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup>

새로운 시스템에 대한 연구로서 교량 하부구조에 대한 프리캐스트 기술의 적용이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있

는데, 이는 여러 가지 복합적인 요인으로 인해 프리캐스트 공법의 장점이 부각되어 채택되는 경우가 늘어가고 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 PS 강재로 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 품질이 뛰어나기 때문에 설계와 시공에 큰 무리가 없으나, 세그먼트 접합부는 설계 및 시공에서 주의를 기울여 관리를 해야 하는 부분이다. 또한 지진시 교각 하단의 세그먼트 접합부에는 손상이 집중되므로 내진성능에 대해 충분한

<sup>1)</sup> 정회원·대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사 (대표저자: kimth@dwconst.co.kr)

<sup>2)</sup> 정회원·대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사

<sup>3)</sup> 대우건설 기술연구원 수석연구원, 공학박사

<sup>4)</sup> 정회원·성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

히 검토할 필요가 있다. 따라서 세그먼트 접합부에 대한 연구 및 시공 기술 개발은 현재도 꾸준히 이루어지고 있다.<sup>(2,3)</sup>

이 연구의 목적은 최근 들어 관심과 활용이 증가하고 있는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 접합부를 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동 특성 및 파괴메커니즘을 파악하고 내진성능을 검토하는데 있다. 프리스트레스트 콘크리트의 역학적 거동은 프리스트레싱에 의하여 콘크리트가 초기에 압축력을 받는 거동 이외에는 철근콘크리트와 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 저자 등에 의하여 개발된 철근콘크리트의 비선형 재료모델<sup>(4,6)</sup>을 그대로 사용하고 여기에 프리스트레싱을 고려할 수 있는 텐션요소<sup>(7)</sup>를 조합함으로써 프리스트레스트 콘크리트의 역학적 거동을 예측하고자 한다.

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 텐션요소와 세그먼트 접합부의 거동특성을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 이식하여 사용하였다.

## 2. 이차원 응력 하에서의 비선형 재료모델

### 2.1 프리스트레스트 콘크리트의 비선형 재료모델

프리스트레스트 콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근 및 텐션으로 구성되는 복합재료이며, 비선형 재료모델은 이들 각 구성 재료가 중첩된 것으로 표현할 수 있는데 각각의 해석모델은 콘크리트와의 부착특성을 고려하여 개발된 것 이라야 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

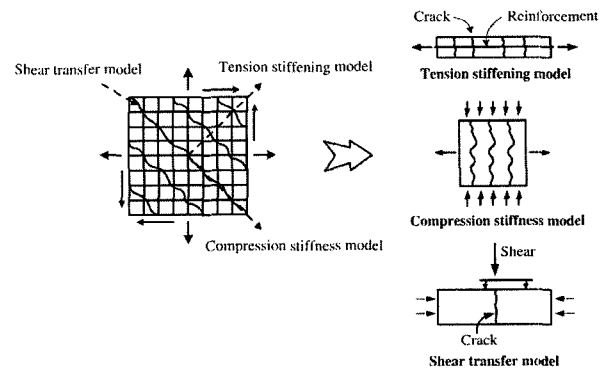
균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가되는 직교 고정균열 모델과 달리, 제 2 균열의 방향을 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

균열이 발생하기 전의 콘크리트의 역학모델은 이축응력 상태에 대한 탄소성파괴모델의 기본개념에 의해서 표현되며 비선형성은 균열발생후에 현저하게 나타나게 된다. 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열

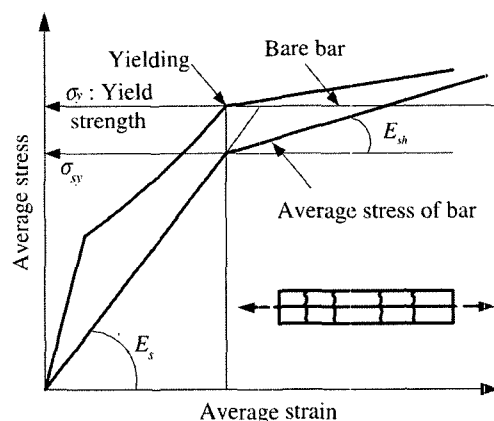
방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달 모델을 각각 적용한다(그림 1).

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 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-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다(그림 2).

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시키는 효과를 가져다준다. 이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진하중 등



〈그림 1〉 균열발생후 콘크리트의 구성모델



〈그림 2〉 철근모델

과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다. 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>(9)</sup>을 채택하였다.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석 모델<sup>(10)</sup>을 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>(6)</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>(11)</sup>, 그리고 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식<sup>(12)</sup>을 수정하여 적용하였다.<sup>(6)</sup>

콘크리트 속의 텐던의 응력과 변형률의 관계는 콘크리트와 텐던사이의 부착효과로 인하여 텐던만의 그것과는 다르게 나타난다.<sup>(13)</sup> 이 연구에서는 저자 등에 의하여 제안된 부착이 고려된 철근의 응력-변형률 관계를 고려하여 텐던의 응력-변형률 관계를 그림 3과 같은 trilinear 모델로써 표현하였다.<sup>(7)</sup>

2.2 접합요소의 재료모델

조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로 그림 4와 같은 Coulomb 파괴기준을 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

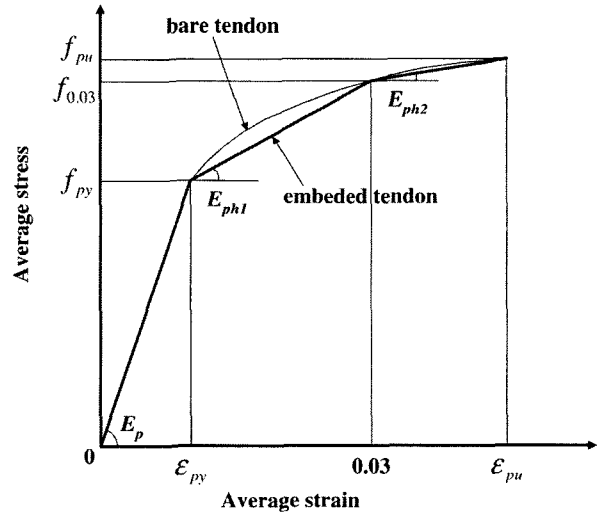
$$\tau + \sigma \tan \phi \geq c \tag{1}$$

여기서  $\tau$ 와  $\sigma$ 는 접합면에서의 전단응력과 수직응력이며,  $\phi$ 와  $c$ 는 내부마찰각과 점착력으로 실험을 통하여 결정할 수 있는 접합면의 재료특성이다.

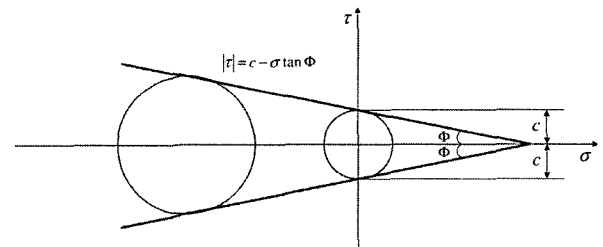
접합요소를 사용하면 접착방향에 평행한 전단 응력과 이에 수직인 방향의 수직 응력을 구할 수 있다. 프로그램에서 계산된 접합면의 전단 응력 및 수직 응력이 식 (1)을 만족하

면 해당되는 접합요소가 항복거동을 하는 것으로 하여 접합면에서의 전단 거동을 모사하였다.

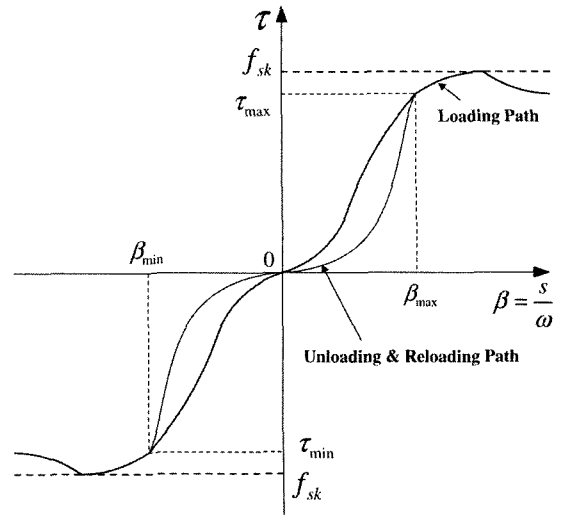
접합요소의 전단응력 모델은 접촉면 밀도함수에 근거한 전단전달모델<sup>(14)</sup>을 수정하여 다음 식과 같이 표현하였으며 최대값 이후에는 전단전달 연화계수(softening parameter)로써 부착파괴까지 감소하는 것으로 가정하였다(그림 5).



<그림 3> 텐던의 trilinear 모델



<그림 4> Coulomb 파괴기준



<그림 5> 전단응력 모델

1) 재하시

$$\tau_{xy} = K_{shro} \gamma_{xy} \tag{2}$$

2) 제하 및 재재하시( $\beta \geq 0$ )

$$\tau_{max} = f_{sk} \frac{\beta_{max}^2}{(1 + \beta_{max}^2)} \tag{3}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{max} \left( \frac{\beta}{\beta_{max}} \right)^3 \tag{4}$$

3) 제하 및 재재하시( $\beta < 0$ )

$$\tau_{min} = f_{sk} \frac{\beta_{min}^2}{(1 + \beta_{min}^2)} \tag{5}$$

$$\tau_{xy} = -\tau_{min} \left( \frac{\beta}{\beta_{min}} \right)^3 \tag{6}$$

여기서  $\tau_{xy}$ 는 접합면에서의 전단응력,  $K_{shro}$ 는 접합면에서의 전단강성,  $\gamma_{xy}$ 는 접합면에서의 전단변형률,  $\beta$ 는 정규화된 전단변형률( $=\frac{s}{w}$ ),  $s$ 는 접합면의 미끄러짐 변위,  $w$ 는 접합면의 열림 변위로서 0.000001보다 큰 값,  $\tau_{max}$ 는 재하시에 경험한 최대의  $\tau$ ,  $f_{sk}$ 는 전단전달강도로서 Coulomb 파괴기준으로부터 정해지는 최대 전단강도,  $\beta_{max}$ 는 재하시에 경험한 최대의  $\beta$ ,  $\tau_{min}$ 는 제하시에 경험한 최소의  $\tau$ , 그리고  $\beta_{min}$ 는 제하시에 경험한 최소의  $\beta$ 이다.

3. 유한요소 정식화 및 비선형 유한요소해석 프로그램

3.1 접합요소

이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 접합부에 대한 유한요소해석을 위하여 세그먼트 접합부의 부착파괴 기준으로 Coulomb 파괴기준을 도입하여 접합요소를 개발하였다.

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

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} O \\ S \end{Bmatrix} \tag{7}$$

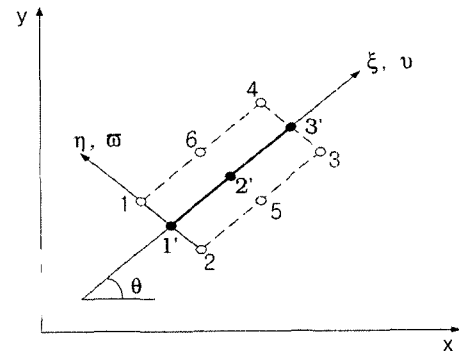
여기서  $\sigma$ 는 수직응력,  $\tau$ 는 전단응력,  $K_n$ 는  $E/t$ ,  $K_s$ 는  $G/t$ ,  $E$ 는 접합부의 탄성계수,  $G$ 는 접합부의 전단탄성계수,  $t$ 는 접합부의 두께,  $O$ 는 접합부의 열림 변위(opening displacement), 그리고  $S$ 는 파괴이전까지는 접합부의 전단변형률이며 파괴이후에는 접합부의 미끄러짐 변위(slip displacement)이다.

접합요소는 그림 6과 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.

3.2 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 비부착 텐던요소 등<sup>(4,7)</sup>을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2<sup>(15)</sup>에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)<sup>(8)</sup>에 세그먼트 접합부의 부착파괴를 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 이식하여 사용하였다(그림 7).



〈그림 6〉 접합요소

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	Element library in RCAHEST		4 nodes RC shell element
Unbonded prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

〈그림 7〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

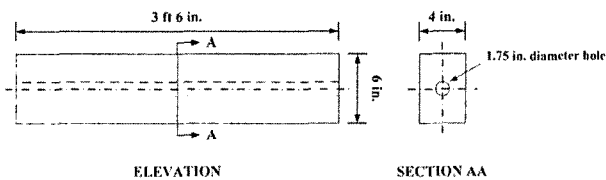
### 4. 해석 에 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보의 실험체<sup>(16)</sup>와 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 교각의 실험체<sup>(17)</sup>를 선정하여 해석하고 그 결과를 고찰하였다.

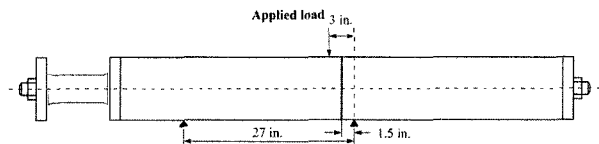
#### 4.1 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보

이 연구에서 개발한 접합요소의 타당성을 검증하기 위해서 그림 8에 나타난 것과 같은 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 보의 실험체<sup>(16)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 검증 예로 채택한 이유는 비부착 텐던과 세그먼트 접합부가 프리스트레스트 콘크리트 부재의 전체 거동특성에 미치는 영향을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

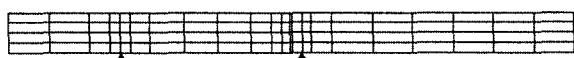
실험체는 그림 8에 보이는 바와 같이 4 in.×6 in.×42 in. (101.6mm×152.4mm×1066.8mm)의 장방형의 단순보 두 개를 그림 9와 같이 접합시키고 포스트텐션 방식으로 프리스트레스트를 도입한 후 재하 하였다. 세그먼트 접합부는 plain butt(맞댐 접합)와 mortared(모르타르 접합)의 두 가지 형식을 갖고 있으며 비부착 텐던을 통해 프리스트레스트를 가하였다. 이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 그림 10과 같이 평



〈그림 8〉 실험체의 제원(1 in.=25.4mm)



〈그림 9〉 실험체의 형상(1 in.=25.4mm)



8-node Plane stress element	84
6-node Joint element	4
n-node Unbonded prestressing element	1

〈그림 10〉 유한요소모델

면응력요소 84개, 접합요소 4개, 그리고 비부착 텐던요소 1개로 총 89개의 요소로 분할하였다. 세그먼트 접합부의 비탄성 거동특성을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소를 사용하였으며, 비부착 텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 비부착 텐던요소를 이용하였다. 또한 접합요소의 재료특성인 내부마찰각과 점착력은 기본적인 실험값을 그대로 사용하였다. 해석결과와 실험결과 모든 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 1.03과 0.01로서, 파괴하중의 평균값은 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.01에 불과하여 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다(그림 11). 이때 프리스트레스트에 대한 전단력의 비율로 나타나는 내부마찰각은 21~35° 범위에 있다.

Mortared 형식의 접합부에 대한 유한요소해석 결과에서도 파괴하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 1.03과 0.01로 Plain butt 형식의 접합부와 거의 유사한 결과를 보여주고 있다. 이때 내부마찰각은 33~37° 범위에 있으며 점착력은 3.7kgf/cm<sup>2</sup>(0.36MPa)이다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 세그먼트 접합부의 비탄성 거동특성을 적절히 평가하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 세그먼트 접합부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 교각

이 연구의 해석기법에 대한 타당성을 확인하기 위하여 新井崇裕 등의 실험체<sup>(17)</sup>를 해석하였다. 이 실험체는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 세그먼트 접합부에 적용하기 위하여 고안된 연결구조의 내진성능 등을 검토하기 위한 것으로서 그림 12~13과 같으며 제원과 재료물성은 표 3~4와 같다.

고안된 연결구조는 세그먼트 접합부에서의 전단력을 효과적으로 전달시키기 위하여 외부강관에 내부강관을 삽입하는 시스템이다. 즉 외부강관을 매설하여 제작한 세그먼트를 조립한 후 내부강관을 배치하고, 내부강관 안에 PS 강재를 삽입하여 긴장한 후 공극을 그라우팅 하는 방식이다.<sup>(17)</sup>

실험체는 상부세그먼트와 하부세그먼트를 조립하여 내·외부 강관에 의한 접합부를 모델화한 요소모형이며 접합면에서는 데프론 시트를 사용하여 마찰을 가능한 배제하였다. 실험체는 그림 13과 같이 유압잭에 의해 1.0MPa의 압축응

〈표 1〉 실험 및 해석 결과 - plain butt joints

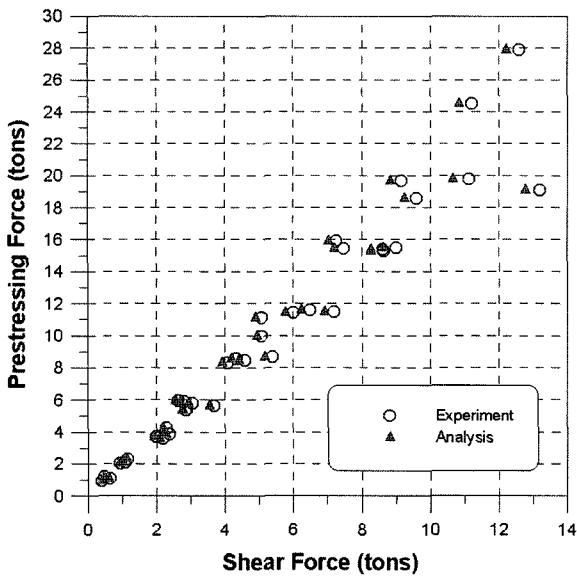
Prestressing force (tons)	Prestress (lb/in <sup>2</sup> )	Load (tons)	Shear force / Prestressing force $\mu$	Shear force at joints (tons)		
				Exp. (1)	Ana. (2)	(1) / (2)
0.96	100	0.45	0.417	0.40	0.40	1.00
1.12	116	0.71	0.572	0.64	0.62	1.03
1.20	125	0.53	0.391	0.47	0.47	1.00
2.04	212	1.04	0.456	0.93	0.91	1.02
2.08	216	1.21	0.514	1.07	1.04	1.03
2.30	238	1.31	0.505	1.16	1.13	1.03
3.60	363	2.45	0.606	2.18	2.10	1.04
3.74	388	2.24	0.532	1.99	1.92	1.04
3.89	402	2.66	0.606	2.36	2.27	1.04
4.24	440	2.58	0.540	2.29	2.21	1.04
5.40	560	3.25	0.535	2.89	2.78	1.04
5.41	561	3.21	0.527	2.85	2.75	1.04
5.65	586	4.15	0.654	3.69	3.56	1.04
5.80	601	3.44	0.528	3.06	2.95	1.04
5.90	612	3.15	0.474	2.80	2.71	1.03
5.95	616	2.96	0.442	2.63	2.56	1.03
8.30	860	4.57	0.488	4.06	3.92	1.04
8.45	875	5.15	0.542	4.58	4.41	1.04
8.55	886	4.88	0.508	4.34	4.19	1.04
8.70	902	6.05	0.618	5.38	5.17	1.04
10.00	1,036	5.70	0.506	5.06	4.94	1.02
11.10	1,150	5.70	0.456	5.06	4.91	1.03
11.45	1,185	6.75	0.524	6.00	5.78	1.04
11.50	1,192	8.07	0.625	7.18	6.92	1.04
11.60	1,203	7.29	0.560	6.48	6.24	1.04
15.30	1,585	9.70	0.565	8.64	8.29	1.04
15.42	1,600	9.74	0.559	8.62	8.27	1.04
15.45	1,602	8.42	0.484	7.48	7.22	1.04
15.50	1,605	10.12	0.581	9.00	8.64	1.04
15.90	1,647	8.15	0.457	7.25	7.04	1.03
18.60	1,925	10.80	0.516	9.60	9.25	1.04
19.10	1,980	14.82	0.691	13.20	12.78	1.03
19.70	2,041	10.30	0.464	9.15	8.84	1.04
19.80	2,050	12.50	0.562	11.12	10.67	1.04
24.50	2,540	12.60	0.457	11.20	10.84	1.03
27.90	2,890	14.15	0.452	12.58	12.21	1.03
Mean						1.03
COV						0.01

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

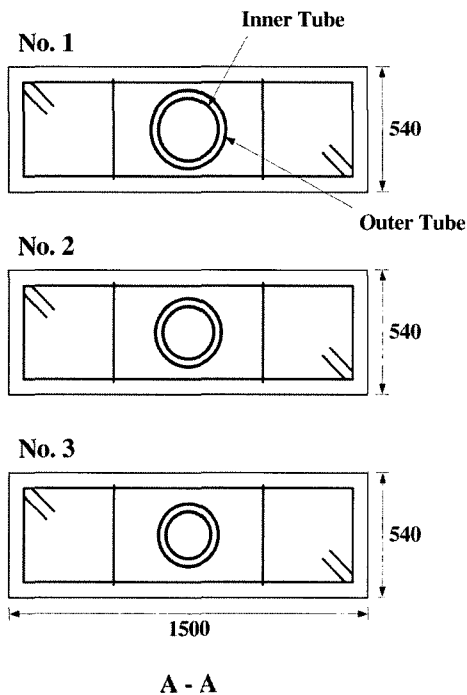
〈표 2〉 실험 및 해석 결과 - mortared joints

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	4.03	1.02
9.70	1,003	7.25	0.665	6.45	6.23	1.04
14.30	1,480	10.37	0.645	9.22	8.89	1.04
Mean						1.03
COV						0.01

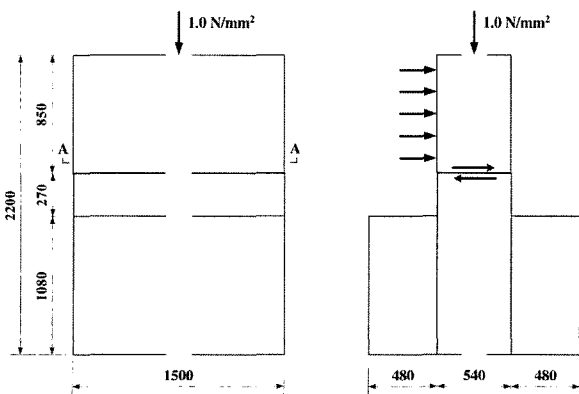
( Note: 1tons=9.80665kN; 1lb/in<sup>2</sup>=6.89476×10<sup>-3</sup>MPa )



〈그림 11〉 실험 및 해석결과 - Plain butt joints (1tons=9,80665kN)



〈그림 12〉 실험체의 단면(단위: mm)



〈그림 13〉 실험체의 형상(단위: mm)

〈표 3〉 실험체의 제원

실험체	벽체두께와 내부강관 외경의 비	벽체 두께	내부강관		외부강관		내부강관과 외부강관의 간격(mm)
			외경	두께	외경	두께	
	$T/\Phi_i$	$T$ (mm)	$\Phi_i$ (mm)	$t_i$ (mm)	$\Phi_o$ (mm)	$t_o$ (mm)	
No. 1	2.5	540	216.3	8.2	267.4	9.3	16.3
No. 2	3.3		165.2	7.1	216.3	8.2	17.4
No. 3	3.9		139.8	4.5	165.2	7.1	7.7

〈표 4〉 실험체의 재료물성

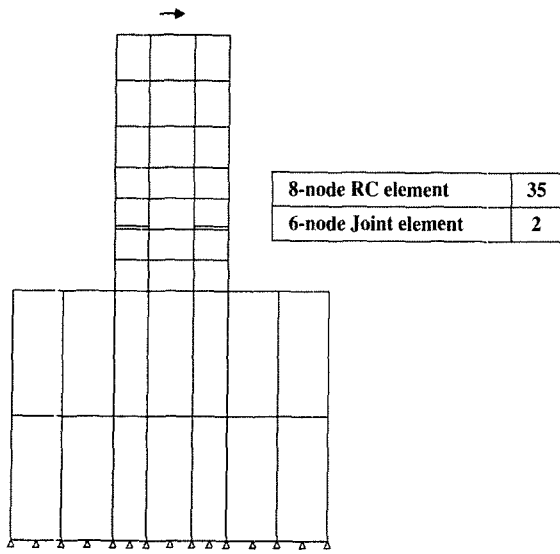
강재의 종류		항복강도 (N/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kN/mm <sup>2</sup> )	
철근	SD345 D19	403	572	209	
강관	$\Phi 267.4$ t = 9.3	343	412	207	
	$\Phi 216.3$ t = 8.2	363	442	205	
	$\Phi 165.2$ t = 7.1	392	432	208	
	$\Phi 139.8$ t = 4.5	382	441	209	
재료의 종류	실험체	재령	압축강도 (N/mm <sup>2</sup> )	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kN/mm <sup>2</sup> )
콘크리트	No. 1	39	38.0	3.67	30.1
	No. 2	48	37.4	2.69	28.0
	No. 3	56	40.0	4.09	29.7
PSC 그라우트	No. 1	32	28.9		15.1
	No. 2	41	25.1		12.9
	No. 3	49	27.8		13.8

력을 도입한 후, 수평가력을 통해 내부강관에 전단하중을 작용시킨다.

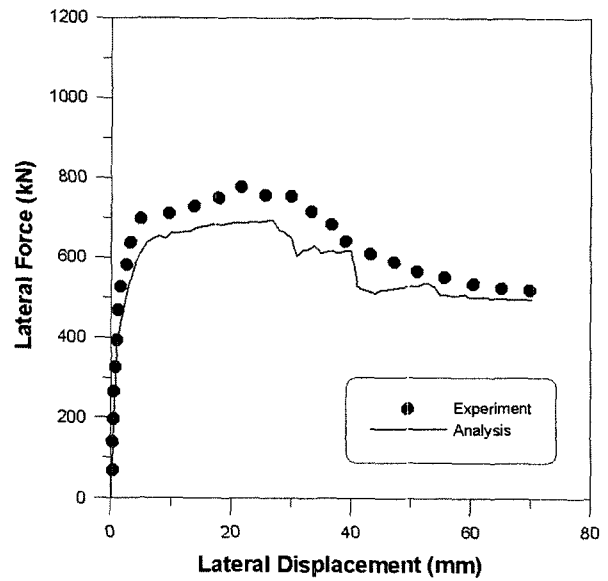
이 실험체들의 유한요소해석을 위해서 그림 14와 같이 철근콘크리트 평면응력요소 35개와 세그먼트 접합부의 비탄성 거동을 모사할 수 있도록 개발한 접합요소 2개로 총 37개의 요소로 분할하였다.

그림 15~그림 17은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 1.02와 0.07로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.07에 불과하여 세그먼트 접합부의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있는 것으로 판단된다. 또한 해석결과 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 균열의 진전 및 파괴양상이 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있다.

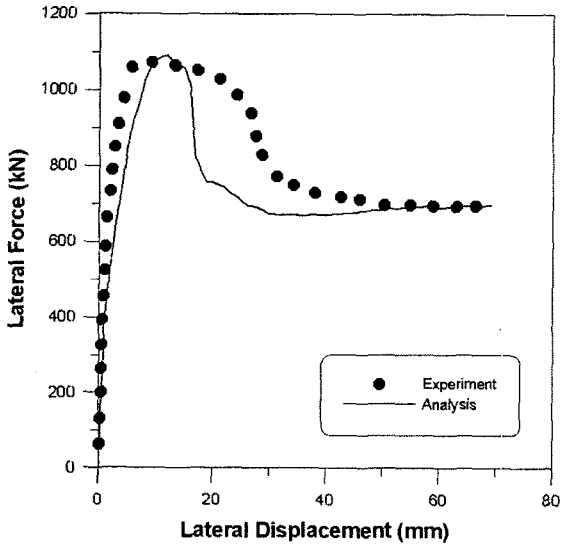
실험체의 파괴양상은 실험과 해석결과 모두 No. 1( $T/\Phi_i=2.5$ )에서 벽체의 파괴가 선행하고, No. 3( $T/\Phi_i=3.9$ )에서는 내부강관의 파괴가 선행하며, No. 2( $T/\Phi_i=3.3$ )에서는



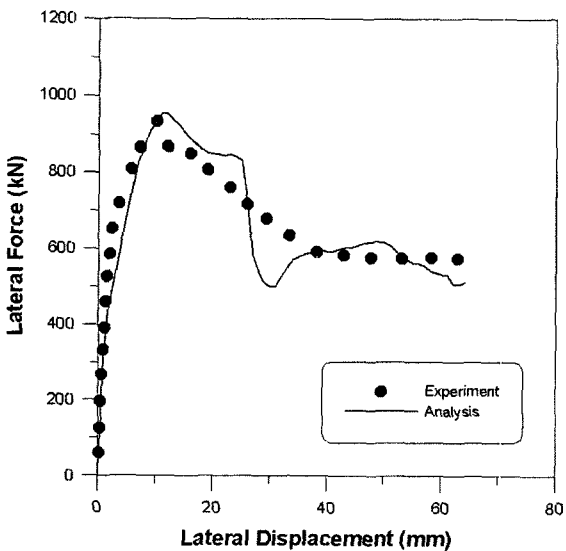
〈그림 14〉 유한요소모델



〈그림 17〉 실험체 No. 3의 하중-변위 곡선



〈그림 15〉 실험체 No. 1의 하중-변위 곡선



〈그림 16〉 실험체 No. 2의 하중-변위 곡선

벽체와 내부강관의 파괴가 거의 동시에 발생하고 있다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 접합부의 비선형 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 접합요소를 조합하여 사용한 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신축 또는 기존 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 거동특성 예측과 내진성능 검토가 가능할 것으로 판단된다.

### 5. 결론

이 연구에서는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 접합부의 비선형 거동을 예측하기 위한 해석기법과 모델 등을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 선정된 실험결과와 비교·검토를 수행하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 제안한 해석기법과 모델이 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 접합부의 전반적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- (2) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 접합부의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공할 수 있다.
- (3) 이 연구에서 제시한 해석방법에 의해 세그먼트 접합부를 갖는 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 정밀해석이 가능하며, 각종 콘크리트 구조물의 해석에



유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

- (4) 세그먼트 접합부의 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 제대로 평가함으로써 향후 조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

### 참고 문헌

1. 이재훈, 양중호, “콘크리트 교각의 새로운 형식”, 한국콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제16권, 2호, 2004, pp. 24-30.
2. 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.
3. Nasir, S., Gupta, S., Umehara, H. and Hirasawa, I., “An Efficient Method for the Construction of Bridge Piers,” *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 9, 2001, pp. 1142-1151.
4. 김태훈, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가”, 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
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, Vol. 129, No. 9, 2003, pp. 1199-1207.
6. 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.
7. 김태훈, 박재근, 진병무, 신현목, “비부착 텐던을 갖는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 관한 해석적 연구”, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권, 5A호, 2005, pp. 813-821.
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. 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.
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. 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.
12. 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.
13. Collins, M.P. and Mitchell, P., *Prestressed Concrete Structure*, Prentice Hall, 1991.
14. Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H., “Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete,” *Journal of the Faculty of Engineering*, University of Tokyo (B), Vol. 40, No. 1, 1989, pp. 9-52.
15. Taylor, R.L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
16. Jones, L.L., “Shear Tests on Joints between Precast Post-Tensioned Units,” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 11, No. 31, 1959, pp. 25-30.
17. 新井崇裕, 日紫喜剛啓, 須田久美子, 山本 徹, 滝沢清一郎, 尾鍋卓巳, “新しいプレキャストP C 橋脚の開発,” 年報 48, 鹿島技術研究所, 2000.