

고강도 철근콘크리트 교각의 비탄성거동에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Inelastic Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Bridge Columns

이 현 민* 성 대 정** 김 태 훈*** 신 현 목****
Lee, Heon-Min Sung, Dae-Jung Kim, Tae-Hoon Shin, Hyun-Mock

국문요약

이 연구의 목적은 고강도 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 분산 균열모델을 사용하였다. 횡방향 구속철근으로 구속된 고강도 콘크리트의 강도 증가 효과를 고려하였다. 이 연구에서는 고강도 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동의 파악을 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

주요어 : 고강도 철근콘크리트 교각, 비탄성거동, 재료적 비선형성, 분산균열, 구속된 고강도 콘크리트

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the inelastic behavior of reinforced high-strength concrete bridge columns. 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 increase of concrete strength due to the lateral confining reinforcement has been also taken into account to model the confined high-strength concrete. The proposed numerical method for the inelastic behavior of reinforced high-strength concrete bridge columns is verified by comparison with reliable experimental results.

Key words : reinforced high-strength concrete bridge columns, inelastic behavior, material nonlinearity, smeared crack, confined high-strength concrete

1. 서 론

최근 구조물의 초고층화, 대형화 그리고 특수화 경향과 더불어 고강도 콘크리트를 이용한 구조물 해석과 설계법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 고강도 콘크리트의 사용은 탁월한 구조적 장점 때문에 필연적 추세이지만, 취성파괴에 대한 구조적 안정성 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다.

고강도 콘크리트 구조물은 중성화 및 염해에 대한 저항성의 증가 즉, 내구성 측면의 장점과 경우에 따라서는 부재의 크기를 감소시킬 수 있는 역학적인 측면의 장점을 함께 가지고 있다. 특히, 기둥은 압축응력을 받는 단면의 면적비율이 보에 비하여 크므로 콘크리트의 고강도화에 따른 역학적 장점을 가장 효과적으로 이용할 수 있는 구조요소이다. 고강도 콘크리트 기둥이 실무적으로 범용성을 확보하려면 구조거동에 대한 다양한 주제의 연구결과가 축적되어야 한다⁽¹⁾.

고강도 콘크리트 기둥은 보통강도 콘크리트 기둥에 비

하여 취성적인 파괴양상을 보이므로 도로교설계기준⁽²⁾은 콘크리트 강도에 비례하여 나선철근량을 설계하도록 규정하고 있다. 콘크리트의 압축강도가 커지게 되면 응력-변형률 곡선의 형태와 취성의 증대 및 인성의 감소 등 물리적 재료성질의 차이로 인하여 구조물의 거동과 파괴형태가 보통강도 콘크리트를 사용한 경우와 달라지기 때문이다. 그러나 이 식들은 본래 순수 축하중에 대한 보통강도 콘크리트 기둥의 실험결과를 바탕으로 유도된 식이므로 지진하중에 대한 연성거동을 요구하는 내진설계 교각에 고강도 콘크리트를 적용하기 위해서는 고강도 콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 규명하는 작업이 필요하다. 이를 위해 반복 횡하중에 대한 고강도 콘크리트 기둥실험을 기존 연구자들^{(1),(3)-(5)}이 수행한 바가 있으나, 아직 충분한 자료를 확보하지 못하고 있는 실정이다.

이 연구에서는 최근 들어 관심과 활용이 증가하고 있는 고강도 철근콘크리트 교각구조를 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하여 비탄성 거동특성 및 파괴메커니즘을 파악하고 그 내진성능을 평가하는데 그 목적이 있다. 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

* 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

** 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정

*** 정회원-대우건설 기술연구원 신입연구원, 공학박사

**** 정회원-성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

(대표저자: hmshin@skku.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2006. 1. 10 / 심사종료일 : 2006. 2. 17)

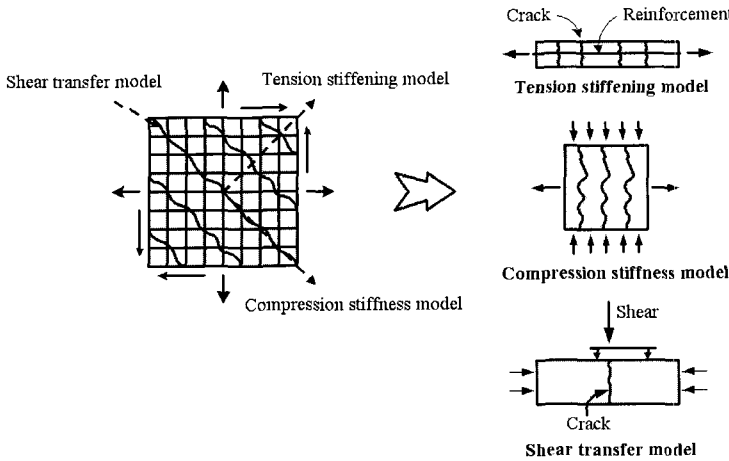


그림 1 균열발생후 콘크리트의 구성모델

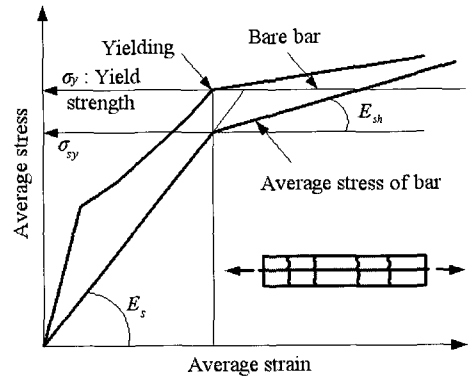


그림 2 철근모델

구축이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한 요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽⁶⁾에 고강도 콘크리트의 거동특성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾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 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-변형을 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평

균변형을 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 항복 고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 tri-linear 모델로써 표현하였다(그림 2).

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⁽⁹⁾.

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⁽¹⁰⁾을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식⁽¹¹⁾을 수정하여 사용하였다.

2.2 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 간단하

고 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⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹²⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)⁽⁶⁾을 고강도 콘크리트의 거동특성을 모사할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(그림 3).

| | | | |
|---|---------------------------|--|--|
| 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 |
| Reinforcing or Prestressing bar element | Interface element | RC plane stress element | 2D Elasto-plastic plane stress element |

그림 3 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

3. 고강도 철근콘크리트의 구속효과 고려

3.1 개요

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시키는 효과를 가져다준다. 이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형률로 인해서 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다.

구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 특성에 관한 연구는 1980년대 후반부터 여러 연구자들⁽¹³⁾⁻⁽¹⁶⁾에 의해 진행되었으나 현재까지 구속된 고강도 콘크리트의 특성을 정확하게 예측하고 있는 모델은 거의 없으며, 이에 대한 자료도 부족한 실정이다.

3.2 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 모델

이 연구에서는 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST에 이식되어 있는 기존의 Mander 등의 제안모델⁽¹⁷⁾이 구속된 고강도 콘크리트의 역학적 거동을 정확하게 예측할 수 있는지를 판단하기 위하여 표 1~표 3의 일축 압축하중을 받는 실험결과⁽¹⁶⁾와 비교·분석하였으며 그 결과를 그림 4~그림 6에 나타내었다.

해석값과 실험값의 비교 결과로부터 기존의 응력-변형률 모델인 Mander 등의 제안모델은 구속된 고강도 콘크

표 1 실험체 제원 (Nagashima 등, 1992)

| Specimen no. | f'_{co} (MPa) | b_c (mm) | d_b (mm) | S_l (mm) | S (mm) | f_{yt} (MPa) | f_s (MPa) | f_l (MPa) | K_1 | K_2 | f'_{cc} (MPa) |
|--------------|-----------------|------------|------------|------------|----------|----------------|-------------|-------------|-------|-------|-----------------|
| LH08LA | 51.3 | 199.9 | 5.1 | 61.6 | 55 | 1387 | 829 | 6.92 | 5.6 | 0.52 | 70.9 |
| LH13LA | 51.3 | 199.9 | 5.1 | 61.6 | 35 | 1387 | 917 | 11.20 | 4.9 | 0.65 | 85.7 |
| HH10LA | 98.8 | 199.9 | 5.1 | 61.6 | 45 | 1387 | 795 | 8.71 | 5.3 | 0.57 | 122.5 |
| HH13LA | 98.8 | 199.9 | 5.1 | 61.6 | 35 | 1387 | 835 | 11.20 | 4.9 | 0.65 | 131.5 |
| HL08LA | 100.4 | 200.0 | 5.0 | 61.7 | 35 | 807 | 807 | 9.04 | 5.0 | 0.65 | 133.2 |
| HH20LA | 100.4 | 198.6 | 6.4 | 60.7 | 35 | 1368 | 884 | 17.14 | 4.5 | 0.65 | 148.2 |

* f_{co} = unconfined concrete compressive strength; f'_{cc} = confined concrete compressive strength

b_c = core dimension measured center-to-center of perimeter hoop;

S_l = spacing of longitudinal reinforcement; S = spacing of transverse reinforcement

f_{yt} = yield strength of transverse reinforcement; f_s = tensile stress in transverse reinforcement at peak concrete stress; f_l = average confinement pressure

K_1 = coefficient that relates confinement pressure to strength enhancement

K_2 = coefficient that reflects efficiency of confinement reinforcement

표 2 실험체 제원 (Nishiyama 등, 1993)

| Specimen no. | f'_{co} (MPa) | b_c (mm) | d_b (mm) | S_l (mm) | S (mm) | f_{yt} (MPa) | f_s (MPa) | f_l (MPa) | K_1 | K_2 | f'_{cc} (MPa) |
|--------------|-----------------|------------|------------|------------|----------|----------------|-------------|-------------|-------|-------|-----------------|
| 12 | 96.2 | 214 | 6 | 64 | 60 | 462 | 462 | 4.31 | 5.84 | 0.52 | 115.0 |
| 7 | 92.4 | 214 | 6 | 64 | 60 | 813 | 799 | 7.58 | 5.31 | 0.52 | 120.0 |
| 10 | 96.2 | 214 | 6 | 64 | 31 | 462 | 462 | 8.34 | 4.94 | 0.72 | 133.0 |
| 3 | 92.4 | 214 | 6 | 64 | 31 | 813 | 813 | 14.67 | 4.49 | 0.72 | 145.0 |

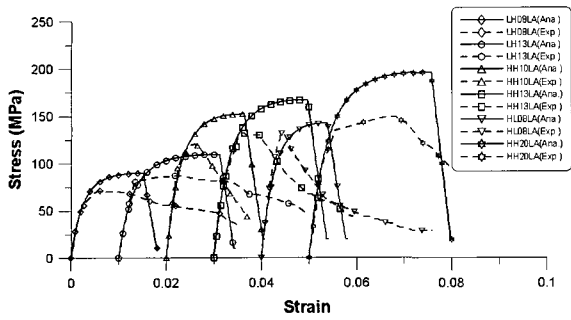


그림 4 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선: Mander 모델 (Nagashima 등, 1992)

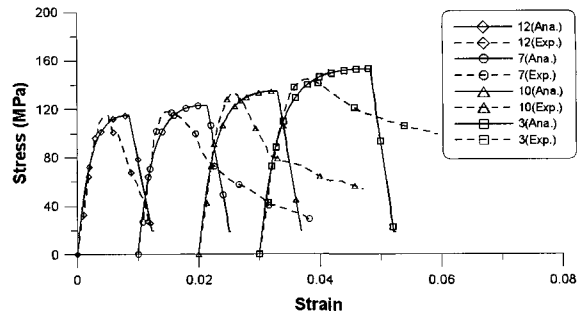


그림 5 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선: Mander 모델 (Nishiyama 등, 1993)

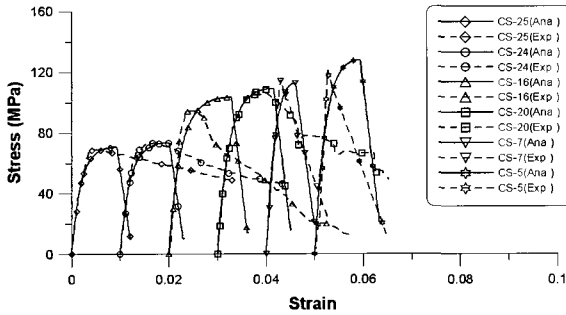


그림 6 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선: Mander 모델 (Razvi 등, 1996)

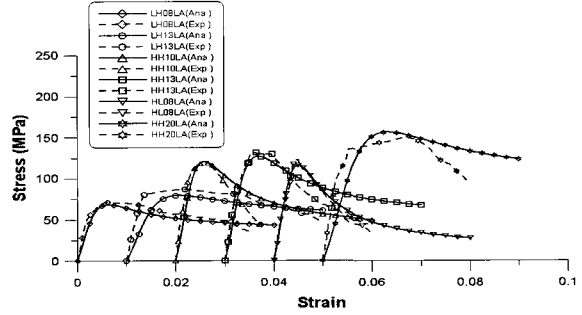
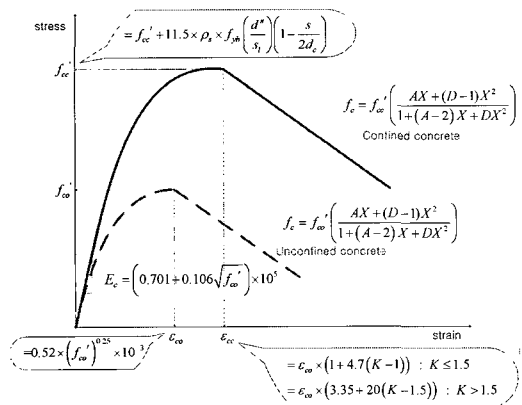


그림 8 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선: Sakino-Sun 모델(Nagashima 등, 1992)



$$A = \frac{E_c}{E_{cc}}$$

where $E_{cc} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}$: confined concrete

$$A = \frac{E_c}{E_{cu}}$$

where $E_{cu} = \frac{f'_{cu}}{\epsilon_{cu}}$: unconfined concrete

$$D = 1.5 - 1.68 f'_{cc} \times 10^{-3} + 0.5 \sqrt{\frac{(K-1) f'_{cc}}{23}}$$

$K = \frac{f'_{cc}}{f'_{cu}}$: Confined concrete

$K = 1$: Unconfined concrete

그림 7 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계(Sakino-Sun 모델)

리트에 대하여 응력 최대점에서의 변형률과 구속된 콘크리트의 최대응력 f'_{cc} 을 과대평가하는 경향을 보이고 있어 그 대안으로 구속된 고강도 콘크리트에 대한 응력-변형률 모델인 Sakino-Sun 모델⁽¹⁸⁾을 적용하였다(그림 7). Sakino-Sun 모델은 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있다.

구속된 고강도 콘크리트에 대한 Sakino-Sun 모델의 신뢰성을 확인하기 위해 위와 같이 표 1~표 3의 일축 압축하중을 받는 실험결과와 비교·분석하였으며 그 결과를 그림 8~그림 10에 나타내었다.

신뢰성을 확인할 때 기준이 된 사항은 응력 최대점에서의 변형률 오차, 구속된 고강도 콘크리트의 일축압축강도 오차, 그리고 최대점 이후의 $0.85 \times f'_{cc}$ 에서의 변형률 오차이다. 이를 종합하여 본 결과 Skino-Sun 모델의 응력-변형률 곡선은 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있으며 안전측의 해석결과를 도출하는 것을 확인할 수 있었다.

표 3 실험체 제원 (Razvi 등, 1996)

| Specimen no. | f_c (MPa) | b_c (mm) | d_b (mm) | S_l (mm) | S (mm) | f_{yt} (MPa) | f_s (MPa) | f_l (MPa) | K_1 | K_2 | f'_{cc} (MPa) |
|--------------|-------------|------------|------------|------------|----------|----------------|-------------|-------------|-------|-------|-----------------|
| CS-25 | 51.0 | 218.7 | 11.3 | 63.8 | 120 | 400 | 400 | 6.11 | 5.8 | 0.37 | 69.7 |
| CS-24 | 51.0 | 218.7 | 11.3 | 95.7 | 85 | 400 | 400 | 6.47 | 5.8 | 0.36 | 72.6 |
| CS-16 | 68.9 | 222.5 | 7.5 | 66.3 | 85 | 1000 | 814 | 7.60 | 5.4 | 0.44 | 95.2 |
| CS-20 | 78.2 | 218.7 | 11.3 | 63.8 | 85 | 400 | 400 | 8.63 | 5.3 | 0.45 | 106.3 |
| CS-7 | 105.4 | 223.5 | 6.5 | 67.0 | 120 | 400 | 400 | 1.98 | 7.1 | 0.37 | 115.0 |
| CS-5 | 105.4 | 222.5 | 7.5 | 66.3 | 120 | 1000 | 729 | 4.83 | 6.1 | 0.37 | 122.5 |

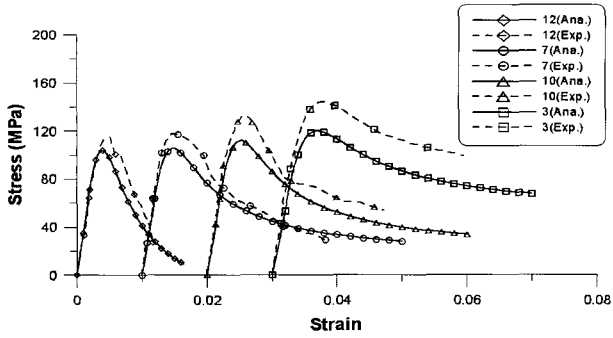


그림 9 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선: Sakino-Sun 모델(Nishiyama 등, 1993)

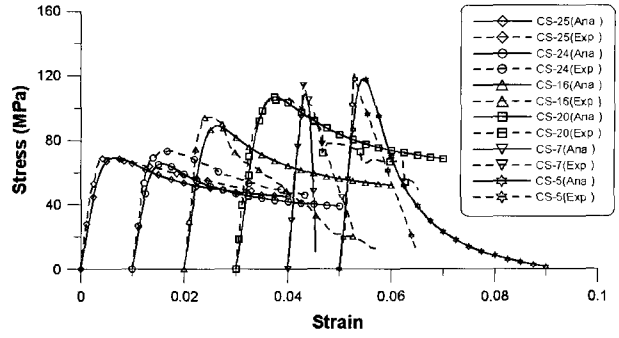


그림 10 구속된 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선: Sakino-Sun 모델(Razvi 등, 1996)

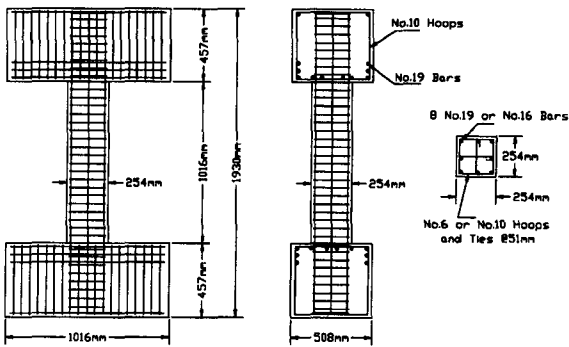


그림 11 실험체의 제원^{(19),(20)}

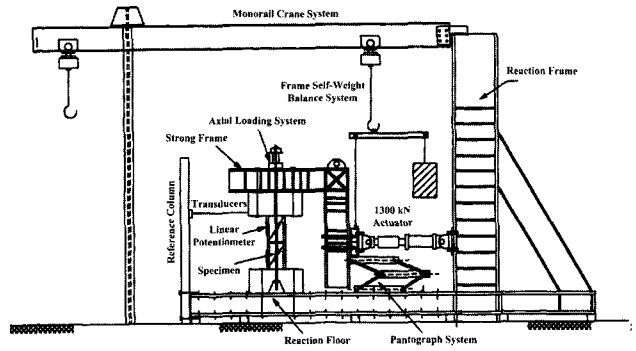


그림 12 실험체의 형상^{(19),(20)}

4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 11에 나타난 것과 같은 고강도 철근콘크리트 교각의 실험체^{(19),(20)}를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 지진하중과 같은 반복하중을 받는 고강도 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

4.1 선정된 실험체^{(19),(20)}

실험체의 제원은 표 4와 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 그림 12, 13에 나타난 것과 같으며 일정한 하중 재하를 위하여 pantograph system를 도입하였다. 실험체

의 단면은 중실 사각형 단면이며 전단거동을 파악하기 위해 전단 형상비(shear aspect ratio)를 2.0으로 하였다.

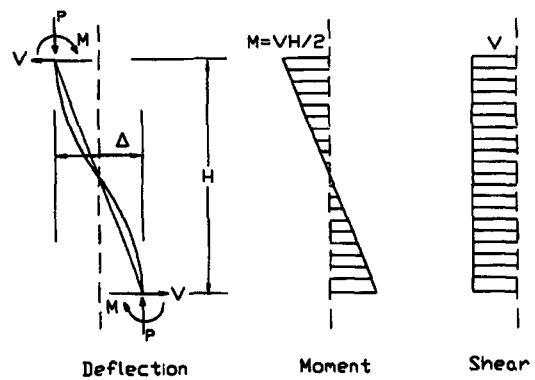


그림 13 하중조건^{(19),(20)}

표 4 실험체 제원^{(19),(20)}

| Test unit | f_c (MPa) | Column H/D (M/V/D) | Longi. steel | Longi. steel ratio | Trans. steel | Trans. steel ratio | Axial load (kN) | Axial load ratio | | | | | |
|-------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------|------|------|------|-----|-----|
| HC4-8L19-T10-0.1P | 76 | 4.0 (2.0) | 8 No. 19 (510 MPa) | 3.52 | No. 10 hoops, ties at 51mm (510 MPa) | 3.67 | 489 | 0.1 | | | | | |
| HC4-8L19-T10-0.2P | 76 | 4.0 (2.0) | | | | | | | 979 | 0.2 | | | |
| HC4-8L16-T10-0.1P | 86 | 4.0 (2.0) | 8 No. 16 (510 MPa) | 2.48 | | | No. 6 hoops, ties at 51mm (449 MPa) | 1.63 | 534 | 0.1 | | | |
| HC4-8L16-T10-0.2P | 86 | 4.0 (2.0) | | | | | | | | | 1068 | 0.2 | |
| HC4-8L16-T6-0.1P | 86 | 4.0 (2.0) | | | | | | | 2.48 | 2.48 | 1.63 | 534 | 0.1 |
| HC4-8L16-T6-0.2P | 86 | 4.0 (2.0) | | | | | | | | | | | |

재하는 교각기초부에서 주철근이 항복할 때, 하중작용 위치에 생기는 변위를 항복변위 δ_y 로 정의하고, 이 변위의 정수 배 $n \times \delta_y (n=1, 1.5, 2, 3, 4 \dots)$ 로 순차적으로 변위진폭을 증가시켰으며 동일한 재하변위진폭에 있어서 반복회수를 3회로 하였다.

4.2 유한요소해석을 위한 요소분할

그림 14는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할된 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개요소를 이용하였고 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 이용하였다.

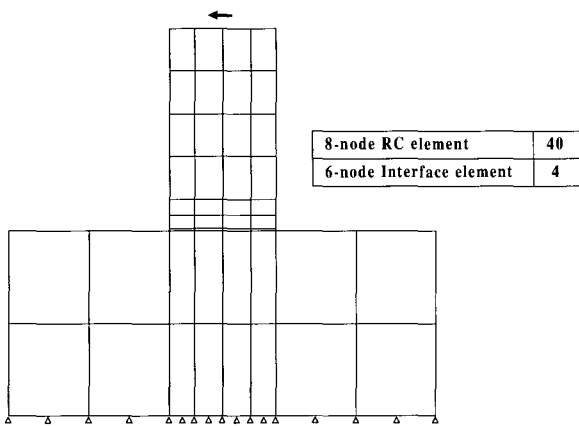


그림 14 유한요소모델

이산균열개념에 근거한 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⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾.

이 연구에서 사용된 유한요소의 크기는 일반 탄성해석과의 convergence test를 통하여 타당성을 검증하여 결정하였다.

4.3 내력, 변형성능과 이력특성

그림 15~그림 20은 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 소성흔지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파괴와 잘 일치하고 있다.

일반적인 교각 실험체의 파괴형상은 실험과 해석결과 모두 먼저 수평균열이 발생하고 다음으로 수평균열 주위로 미세한 수직균열이 발생하였다. 상부 변위가 더욱 커지면서 최초로 발생한 수평균열이 사방향으로 발전하게

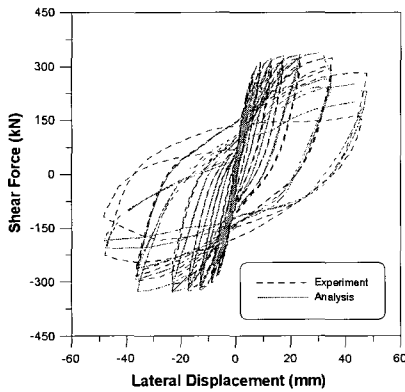


그림 15 실험체 HC4-8L19-T10-0.1P의 하중-변위 이력곡선

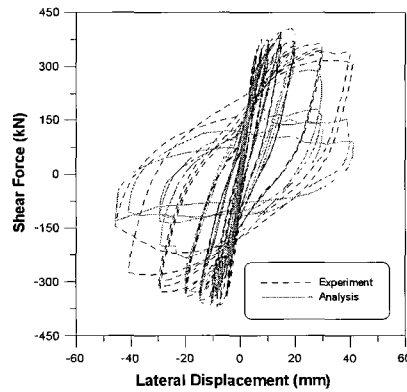


그림 16 실험체 HC4-8L19-T10-0.2P의 하중-변위 이력곡선

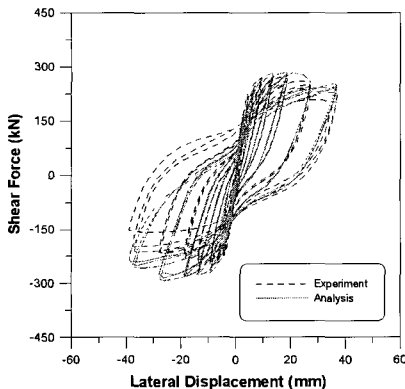


그림 17 실험체 HC4-8L16-T10-0.1P의 하중-변위 이력곡선

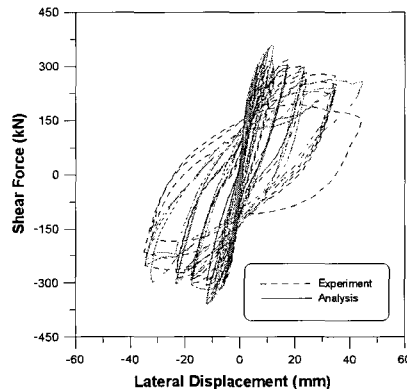


그림 18 실험체 HC4-8L16-T10-0.2P의 하중-변위 이력곡선

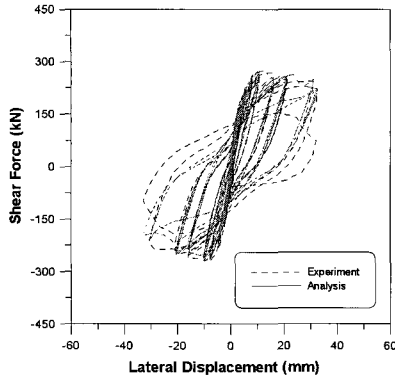


그림 19 실험체 HC4-8L16-T6-0.1P의 하중-변위 이력곡선

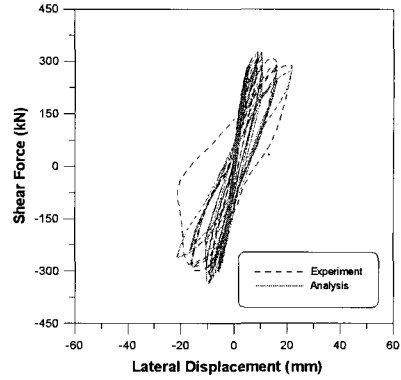


그림 20 실험체 HC4-8L16-T6-0.2P의 하중-변위 이력곡선

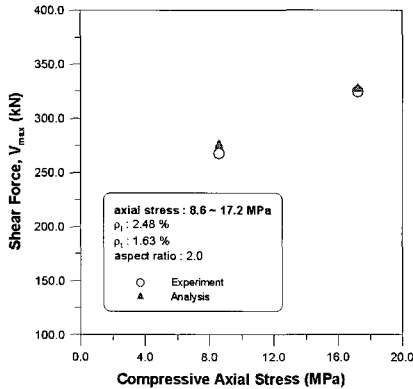


그림 21 축방향 압축력의 영향(실험체 HC4-8L16-T6-0.1P, HC4-8L16-T6-0.2P)

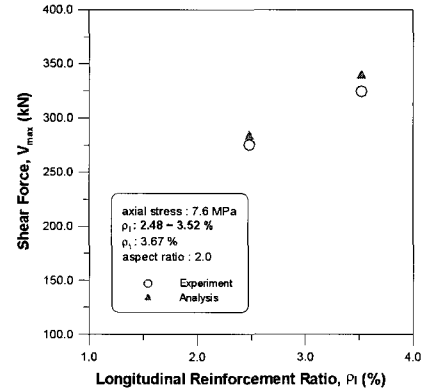


그림 22 종방향 철근비의 영향(실험체 HC4-8L16-T10-0.1P, HC4-8L19-T10-0.1P)

되며 이 단계에서부터 수직균열이 발생하였다. 이후 하중이 반복되면서 소성힌지부에서 콘크리트 피복의 탈락이 시작되었다. 콘크리트 피복이 탈락이 된 이후에도 상당한 변형능력을 보이다가 노출된 철근의 좌굴과 인장이 반복되면서 주철근이 파단에 이르렀다.

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 파괴양상을 실험과 함께 비교하여 표 5에 정리하였다. 유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 0.95와 0.04로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.04에 불과하여 고강도 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다.

최대하중에 크게 영향을 미치는 기둥에 작용하는 축방향 압축력, 종방향 철근비, 그리고 횡방향 철근비 등의 인자들에 대한 이 연구의 해석과 실험결과의 매개변수 연구를 그림 21~그림 23에 나타내었다. 이러한 비교결과로부터 축압축력이 커질수록 그리고 종방향 철근비가 커질수록 최대하중은 증가하지만, 횡방향 철근비는 최대하중에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

일련의 실험결과와 해석결과의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중과 같은 반복하중에 의한 고강도 철근콘크리트 교각의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써,

표 5 실험 및 해석결과

| Specimen | Experiment | | Analysis | | Ratio of experimental and analysis results V_{max} |
|-------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---|
| | V_{max} (kN) | Failure Type | V_{max} (kN) | Failure Type | |
| HC4-8L19-T10-0.1P | 324.1 | Flexure | 339.1 | Flexure | 0.96 |
| HC4-8L19-T10-0.2P | 378.3 | Flexure | 405.0 | Flexure | 0.93 |
| HC4-8L16-T10-0.1P | 275.5 | Flexure | 283.3 | Flexure | 0.97 |
| HC4-8L16-T10-0.2P | 318.9 | Flexure | 358.0 | Flexure | 0.89 |
| HC4-8L16-T6-0.1P | 267.6 | Flexure-Shear | 275.3 | Flexure-Shear | 0.97 |
| HC4-8L16-T6-0.2P | 324.1 | Flexure-Shear | 327.0 | Flexure-Shear | 0.99 |
| Mean | | | | | 0.95 |
| COV | | | | | 0.04 |

해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 고강도 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 지진하중과 같은 반복하중을 받고 있는 고강도 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동특성을 파악하기 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 고강도 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 재료적 비선형성을 고려하기 위해서 균열 발생후의 콘크리트의 인장강성 및 압축강성, 균열면에서의 전단전달강성, 철근의 부착 등에 대한 각각의 구성방정식을 조합하고 구속된 고강도 콘크리트에 대한 신뢰성 있는 응력-변형률 모델을 이식함으로써 고강도 철근콘크리트 교각구조의 균열발생에서부터 철근의 항복 및 파괴에 이르는 모든 응력상태에 대한 비선형 거동특성을 비교적 충실히 예측할 수 있었다.
- 2) 고강도 철근콘크리트 교각의 손상메커니즘은 실험과 해석결과 모두 수평균열의 진전후, 콘크리트 피복이 박리·이탈되고 종방향 철근의 좌굴이 일어났다. 여기에 좌굴이 현저하게 되면 내부콘크리트의 손상으로 진행되며 최종적으로 종방향 철근의 파단이 생겼다. 종방향 철근의 파단은 강성과 강도저하에 큰 영향을 미친다.
- 3) 이 연구에서 제안된 비선형 유한요소해석은 고강도 철근콘크리트 교각구조의 응력 분포 및 변형에 대한 구체적인 정보를 제공할 수 있다.
- 4) 지진하중을 받는 고강도 철근콘크리트 교각의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 고강도 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부 건설기술연구개발사업(고성능 콘크리트 고교각의 개발 및 실용화 기술 개발)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이재훈, 김광수, 배성용, 윤석구, "고강도콘크리트 나선철근교각의 내진거동특성," 대한토목학회논문집, 제21권, 5-A호, 2001, pp.707-718.
2. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005.
3. 신성우, 한범석, "고강도 철근콘크리트 띠철근 기둥의 구속효과," 한국콘크리트학회논문집, 제14권, 4호, 2002, pp.578-588.

4. Saatcioglu, M., and Baingo, D., "Circular High-Strength Concrete Columns under Simulated Seismic Loading," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, 1999, pp.272-280.
5. Legeron, F., and Paultre, P., "Behavior of High-Strength Concrete Columns under Cyclic Flexure and Constant Axial Load," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 4, 2000, pp. 591-601.
6. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 2호, 2001, pp. 113-124.
7. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
13. Fafitis, A., and Shah, S. P., *Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns*, ACI, Detroit, 1985, 278pp.
14. Yong, Y. K., Nour, M., and Nawy, E. G., "Behavior of Laterally Confined High Strength Concrete under Axial Loads," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 2, 1988, pp. 332-351.
15. Cusson, D., and Paultre, P., "Stress-Strain Model for Confined High-Strength Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121,

- No. 3, 1995, pp. 468-477.
16. Razvi, S., and Saatcioglu, M., "Confinement Model for High-Strength Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 3, 1999, pp. 281-289.
17. 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.
18. Sun, Y.-P., and Sakino, K., "A Comprehensive Stress-Strain Model for High Strength Concrete Confined by Circular Transverse Reinforcement," *The 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, University of Southern California, 2000, pp. 1067-1074.
19. Xiao, Y., and Martirosyan, A., "Seismic Performance of High-Strength Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 3, 1998, pp. 241-251.
20. Xiao, Y., and Martirosyan, A., PEER Structural Performance Database, Available from <http://nisee.berkeley.edu/spd/>.