

철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Size Effect Influencing Inelastic Behavior of Reinforced Concrete Bridge Piers

김 태 훈* 김 운 학** 신 현 목***
Kim, Tae Hoon Kim, Woon Hak Shin, Hyun Mock

국문요약

이 연구는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과를 파악하는데 그 목적이 있다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열모델을 사용하였다. 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서 단면강성이 급변하기 때문에 생기는 국소적인 불연속변형을 고려하기 위한 경계면요소를 도입하였다. 또한, 같은 범위진폭에 있어서의 하중재하 회수에 의한 효과를 고려하였다. 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과를 규명하기 위해서 실제 규모의 교각과 1/4 축소모델의 거동을 비교, 분석하였다.

주요어 : 철근콘크리트 교각, 비탄성 거동, 크기효과, 재료적 비선형성

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the size effect on inelastic behavior of reinforced concrete bridge piers. A computer program, named RCAST(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. 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 effect of number of load reversals with the same displacement amplitude has been also taken into account to model the reinforcing steel. To determine the size effect on bridge pier inelastic behavior, a 1/4-scale replicate model was also loaded for comparison with the full-scale bridge pier behavior.

Key words : reinforced concrete bridge piers, inelastic behavior, size effect, material nonlinearity

1. 서 론

세계적으로 지진의 규모와 빈도 및 그로 인한 피해가 증가 추세에 있는 현 상황에서 지진으로 인한 기반시설과 인명의 피해를 최소화 또는 방지하기 위해서는 구조물의 역학적 거동을 올바르게 예측하는 방법이 시급히 필요한 실정이다.

강한 지진을 받는 구조물은 대부분 비탄성 거동을 보이게 되며 이런 경우 구조물이 효과적으로 저항하도록 하기 위해서는 적절한 강도와 연성을 확보해야 한다. 현행 내진설계 기준은 이러한 요구를 충족시키기 위해 각 단위부재 및 접합부에서의 상세설계를 규정함으로써 부재수준에서 뿐만 아니라 구조물 전체의 연성거동을 구현하고 있다. 이러한 설계 기준들은 주로 단위부재의 실험결과에 의존하여 검증, 수립되고 있다. 그런데 이와 같은 실험식의 적용에 있어서는 그 적용범위에 주의하여야 한다. 이것은 실험이 여러 가지 제약 조건으로 실제와 같은 단면치수의 실험이 현실적으로 어렵

고, 단면치수가 실제보다 훨씬 작은 축소모형을 이용하고 있기 때문이며 이 축소모형에 의한 실험결과를 실제 구조물에 직접 적용할 때는 세심한 주의가 필요하다.

철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과의 영향에 대한 지금까지의 연구사례는 많지 않다. 일본에서는 실제 철근콘크리트 교각의 단면을 100cm×116.7cm의 1/3 축소모델과 30cm×35cm의 1/10 축소모델로 각각 실험을 수행하여 결과를 비교한 Kosa 등의 실험적 연구⁽¹⁾가 있으며 미국에서는 직경 152cm의 원형단면과 이를 1/6 축소된 직경 25cm의 원형단면을 실험한 Stone 등의 크기효과에 관한 연구⁽²⁾ 등이 있다. 그리고, 국내에서는 직경 120cm, 교각 높이가 320cm의 실물모형과 직경 60cm, 교각 높이가 160cm의 축소모형에 대한 내진성능을 평가한 김 등의 비교실험⁽³⁾이 있다. 이와 같이 주로 실험적으로 한정된 연구가 진행되고 있다.

이 연구는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과를 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다. 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의

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

** 정회원 · 국립한양대학교 토목공학과, 부교수

*** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2002년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 11. 13 / 심사종료일 : 2001. 12. 26)

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⁽⁴⁾을 이용하여 철근콘크리트 교각의 크기효과를 포함한 비탄성 거동특성을 예측하고자 한다.

2. 크기효과를 고려한 철근콘크리트의 비선형 재료모델

2.1 이차원 응력 하에서의 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델⁽⁴⁾⁽⁶⁾을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열 발생후의 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 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.

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 고정균열 모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부차효과 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.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석모델⁽⁷⁾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.

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 지배하는 주철근은 매우 큰 인장과 압축변형률을 교번으로 받는다. 이러한 큰 변형률의 교번작용으로 인한 low-cycle 피로 문제는 휨부재에서 파괴의 두드러진 형태이다. 콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동 모델은 철근만의 특성과 함께 부차효과 등이 동시에 고려되어야 하며 유한요소해석에의 적용성이 평가되어야 한다. 이 연구에서는 철근만의 특성을 고려한 Coffin-Manson의 제안식⁽⁸⁾을 Miner의 선형손상모델⁽⁹⁾에 적용하면서 많은 경우에 대한 해석결과로부터 수정 제안하여 콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동을 고려하였다.

2.2 크기효과를 고려하기 위한 재료모델의 수정

상사법칙에 의한 축소모형 실험시 여러 가지 제약조건으로 인하여 필연적으로 축소율의 차이에 의해서 생기는 크기효과가 나타난다. 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 영향을 미치는 크기효과에는 횡방향으로 배근된 구속철근에 의한 구속효과, 종방향철근의 기초로부터의 정착슬립, 횡방향철근의 배치간격의 영향으로 인한 종방향철근의 좌굴길이의 변화 등이 있다. 따라서, 이러한 영향들을 고려한 해석을 하여야만 정확한 비탄성 거동을 예측할 수 있는 것이다.

이 연구에서는 전 절에서 설명한 비선형 재료모델의 수정을 통해서 위의 효과들을 고려하였으며 다음과 같다.

2.2.1 인장강성 모델

콘크리트는 균열이 발생한 후에도 철근과 콘크리트의 부차작용에 의해서 균열면의 직각방향으로 응력의 일부분을 부담한다. 이와 같은 균열직각방향으로의 인장강성효과를 고려하기 위해서, 철근콘크리트부재의 일축인장실험을 기초로 한 실험식을 Okamura 등이 균열직각방향의 인장변형률의 함수로써 제안한 부차모델⁽¹⁰⁾을 기본적으로 적용한다. 그리고, 부차모델의 적용을 균열직각방향에 대하여 적용하지 않고 원 실험식에서와 같은 조건인 철근의 축방향에 대하여 적용함으로써 원 실험식에 충실하도록 하였다.

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

여기서, σ_{xt} , σ_{yt} 는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장응력, f_t 는 균열직각방향으로의 콘크리트의 인장강도, ϵ_{cr} 는 콘크리트의 균열변형률, ϵ_x , ϵ_y 는 철근 축방향으로의 콘크리트의 인장변형률, 그리고 c 는 부차 파라미터(0.2 : 용접망, 0.4 : 이형철근, 0.6 : 원형철근, 2.0 : 무근콘크리트)이다.

이 연구에서는 유한요소해석을 위한 요소크기를 고려하여 부차 파라미터를 변화시켜 크기효과를 나타내었다.

2.2.2 횡방향으로 배근된 구속철근에 의한 구속효과

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형률을 크게 증가시켜 콘크리트 부재가 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력 특성을 나타낸다(Fig. 1).

이 연구에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등의 제안모델⁽¹¹⁾을 채택하였으며 구속된 콘크리트 압축부재의 파괴시 압축변형률을 유한요소해석을 위한 요소크기를 고려할 수 있도록 다음 식과 같이 수정하였다.

$$\epsilon_{cus} = \epsilon_{cu} \times sfct \quad (2)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}} \quad (3)$$

여기서, ϵ_{cu} 는 구속된 콘크리트 압축부재의 파괴시 압축변형률, ρ_s 는 횡방향 구속철근비, f_{yh} 는 구속철근의 항복강도, ϵ_{sm} 는 철근의 최대 인장응력시의 변형률, f'_{cc} 는 구속된 콘크리트의 압축강도, 그리고 $sfct$ 는 유한요소해석을 위한 요소크기를 고려할 수 있도록 제안된 계수로서 다음 식과 같이 구한다.

$$sfct = \frac{15\sqrt{2}}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \quad \text{단, } 1.0 \leq sfct \leq \frac{\epsilon_{cum}}{\epsilon_{cu}} \quad (4)$$

여기서, dx , dy 는 요소의 크기, 그리고 ϵ_{cum} 는 Scott 등이 제안한 에너지 평형의 개념에 기본을 둔 접근방법⁽¹²⁾으로 구한 최종변형률로 다음 식과 같이 구한다.

$$\rho_s \cdot \int_0^{\epsilon_s} f_s d\epsilon_s = \int_0^{\epsilon_{cum}} f_c d\epsilon_c + \rho_{cc} \int_0^{\epsilon_{cum}} f_{sl} d\epsilon_c - \int_0^{\epsilon_{sp}} f_c d\epsilon_c \quad (5)$$

여기서, ρ_s 는 횡방향 보강비, f_s 와 ϵ_s 는 횡방향철근의 응력과 변형률, ϵ_{sf} 는 횡방향철근의 최종파괴변형률, f_c 와 ϵ_c 는 구속된 콘크리트의 응력과 변형률, ρ_{cc} 는 콘크리트 심부의

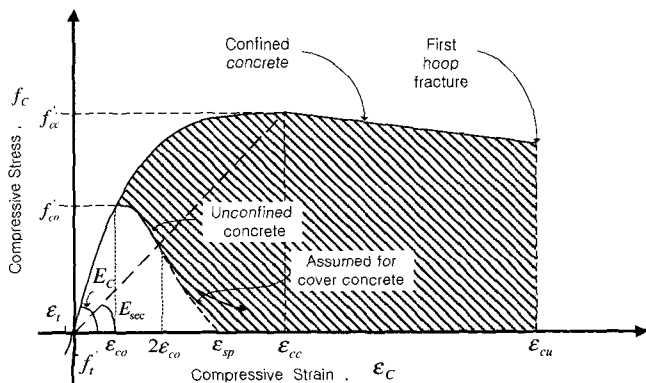


Fig. 1 Stress-strain model proposed for confined and unconfined concrete

면적에 대한 종방향철근비, f_{sl} 은 종방향 주철근의 응력, 그리고 ϵ_{sp} 는 구속되지 않은 콘크리트의 파괴변형률이다. 식 (5)를 ϵ_{cum} 에 대해서 풀게 되면 최종변형률을 얻을 수 있다.

위와 같이 유한요소해석을 위한 요소크기를 고려하여 콘크리트의 극한변형률을 변화시켜 크기효과를 나타내었다.

2.2.3 종방향철근의 기초로부터의 정착슬립

철근콘크리트 교각 등과 같은 구조물은 보, 기둥, 기초 등으로 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⁽¹³⁾을 기본적으로 사용하였다.

$$\text{철근항복전, } s = \epsilon_s \cdot (2 + 3500 \cdot \epsilon_s) \quad (6)$$

$$\text{철근항복후, } s = 0.0047 \cdot (f_u - f_y) \cdot (\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y / 2 \quad (7)$$

여기서, s 는 $\left(\frac{\text{Slip}}{D}\right) \left(\frac{f'_c}{200}\right)^{2/3}$, D 는 철근의 직경, f'_c 는 콘크리트의 일축압축강도, ϵ_s 는 철근의 변형률, f_u 는 철근의 인장강도, f_y 는 철근의 항복강도, ϵ_{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) 관계(Fig. 2)를 적용하여 축소모형 실험시 여러 가지 제약조건으로 인한 축소율의 차이에 의해서 생기는 크기효과를 고려하였다.

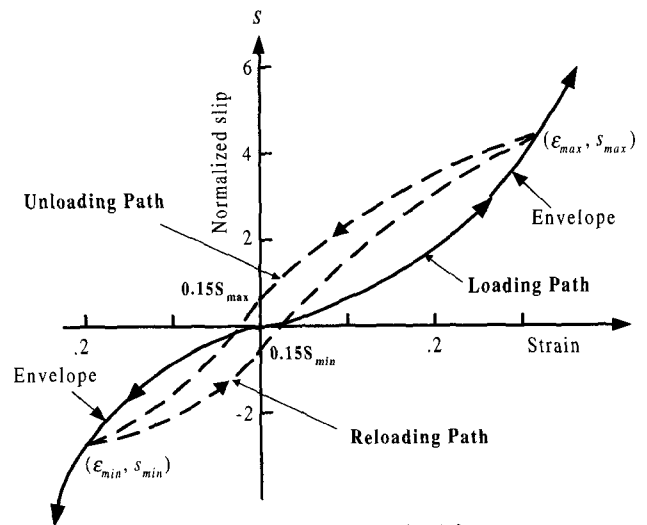


Fig. 2 Strain-slip relationship of reinforcement

3. 비선형 유한요소해석 프로그램의 작성

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^{(4),(6)}, 그리고 경계면요소^{(4),(6)} 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹⁴⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(reinforced concrete analysis in higher evaluation system technology)⁽⁴⁾를 사용하였으며 이차원 응력 하에서의 철근콘크리트의 비선형 재료모델을 상사법칙에 의한 축소모형 실험시 여러 가지 제약 조건으로 인하여 필연적으로 축소율의 차이에 의해서 생기는 크기효과를 고려할 수 있도록 수정하여 적용하였다.

4. 해석모델의 타당성 검증 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 3에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체⁽¹⁵⁾를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 실제 교각과 같은 구조조건을 재현하기 위해서 2.4m × 2.4m

의 단면치수를 적용한 실물모형과 상사법칙을 적용한 1/4 축소모형에 대해서 반복하중시의 비탄성 거동을 비교, 관찰한 실험이기 때문이다.

4.1 선정된 실험체의 제원⁽¹⁵⁾

실험에 사용된 모형은 표준이 되는 L2 실험체와 이를 1/4로 축소한 S1 실험체로 나눌 수 있다. L2 실험체는 단면치수가 2.4m × 2.4m의 정사각형 단면이며, 교각기초부에서 재하점까지의 높이는 9.6m로서 형상비가 4.0이다. 이 구조제원은 휨변형에 지배적이며, 실제교각의 배근상세를 충분히 재현할 수 있는 치수이다. S1 실험체는 L2 실험체를 기초로 상사법칙을 적용하여 1/4로 축소된 모형이다. 이 구조제원을 정리하여 비교하면 Table 1과 같다.

실험체의 재료물성은 Table 2와 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 Fig. 4에 나타난 것과 같다. 실물실험체의 수평력은 대변위가력재(최대하중 ±2500kN, 최대변위 ±600mm) 2개를 병렬로 배치해서 가했으며 실험에 있어서 재하장치와 반력판의 성능상 축력은 주는 것이 곤란하기 때문에, 축력은 재하하지 않았다. 한편 축소모형은 기둥단면을 횡으로 한 형태로 기초를 반력벽에 고정시켰으며 수평력은 가진기(최대하중 ±1250kN, 최대변위 ±500mm, 최대속도 ±100cm/sec)에 의해서 주어졌다. 축력은 실물모형에 대한 실험조건에 맞추어서 작용시키지 않았다. 재하하는 항복내력까지는 4단계로 나누어서 하중제어하며, 이후 항복변위의 정수배로 변위제어한다. 항복변위는 최외측철근의 변형률이 항복변형률에 도달할 때의 재하점에서의 수평변위로 정의되지만, 실험에

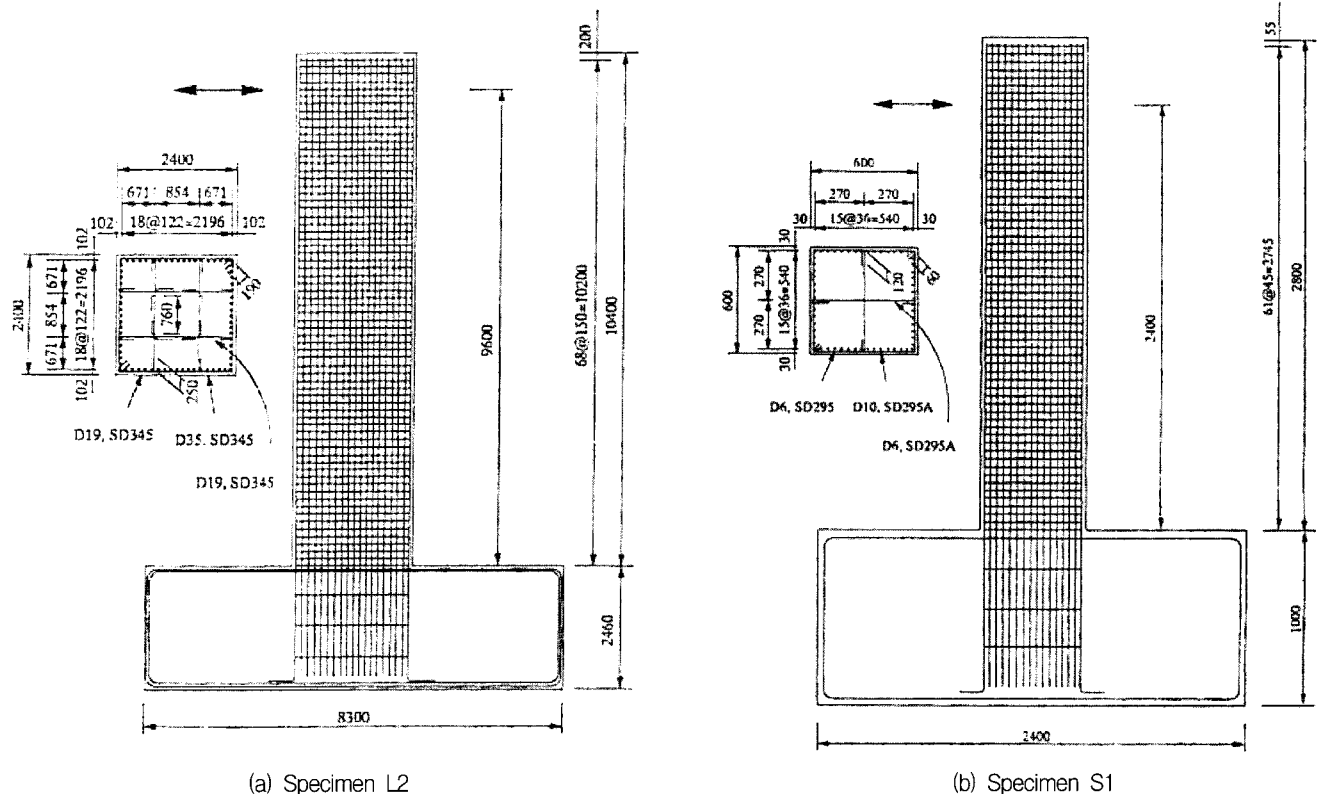


Fig. 3 Dimension of specimen

Table 1 Characteristics of test specimens

구 분	L2	S1	L2/S1
단면치수(mm)	2400×2400	600×600	4.0
교각높이(mm)	9600	2400	4.0
형상비	4.0	4.0	1.0
종방향철근 직경(mm)	35	10	3.5
종방향철근 간격(mm)	122	36	3.39
종방향 철근비	0.012	0.012	1.0
횡방향철근 직경(mm)	19	6	3.17
횡방향철근 간격(mm)	150	45	3.33
횡방향철근 유효길이(mm)	854	270	3.16
횡방향철근 체적비	0.0089	0.0104	0.86
최대굵은골재 치수(mm)	20	20	1.0

Table 2 Test specimens

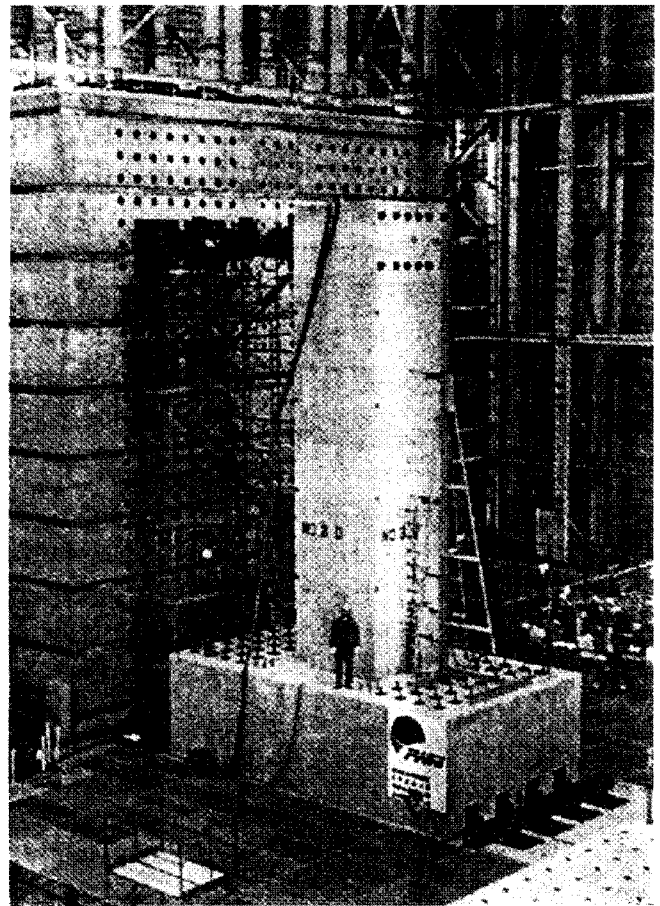
Specimen		L2	S1
Dimension of the cross section(cm)		240×240 (Square)	60×60 (Square)
Effective height(cm)		960	240
Aspect ratio		4.0	4.0
Main reinforcement	Material	SD345 D35	SD295A D10
	Yielding stress(MPa)	424	395
	Reinforcement ratio ρ_t (%)	1.2	1.2
Hoop reinforcement	Material	SD345 D19	SD295 D6
	Yielding stress (MPa)	344	389
	Volumetric ratio ρ_w (%)	0.89	1.04
Strength of concrete(MPa)		32.6	39.0
Axial stress(MPa)		0	0

서는 사전에 항복내력을 계산에 의해서 산출하여 수평력의 계측치가 이 항복내력에 도달할 때의 수평변위를 항복변위로 정했다. 변위진폭은 이 변위의 정수 배 $n \times \delta_y$ ($n=1, 2, 3, \dots$)로 순차적으로 증가시킨다. 또한, 동일한 재하변위진폭에 있어서 반복회수를 3회로 하였다. 실험은 수평력이 최대내력보다 저하되고 종방향철근의 파단 등의 손상이 생길 때까지 수행했다.

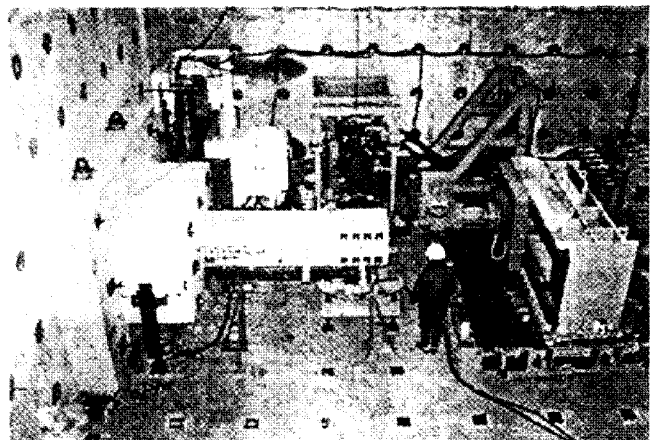
4.2 유한요소해석을 위한 요소분할

요소분할은 상사법칙에 의한 축소모형 실험시 여러 가지 제약조건으로 인하여 필연적으로 축소율의 차이에 의해서 생기는 크기효과를 규명하기 위해서 실물모형과 축소모형 모두 동일하게 하였다. 즉, Fig. 5와 같이 철근콘크리트요소 60개, 경계면요소 6개, 그리고 탄성요소 2개로 총 68개의 요소로 분할하였다.

철근콘크리트요소의 경우에는 8절점을 갖는 등매개요소로서 3점 가우스적분을 적용하였고, 하중이 재하되는 부위



(a) Specimen L2



(b) Specimen S1

Fig. 4 Experiment set-up

에는 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 사용하였으며 요소의 길이방향으로 3개의 적분점에 대해서 변형률과 응력을 산정하도록 하였다.

4.3 내력, 변형성능과 이력특성

Fig. 6과 Fig. 7은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소 해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 곡선으로부터 포락선

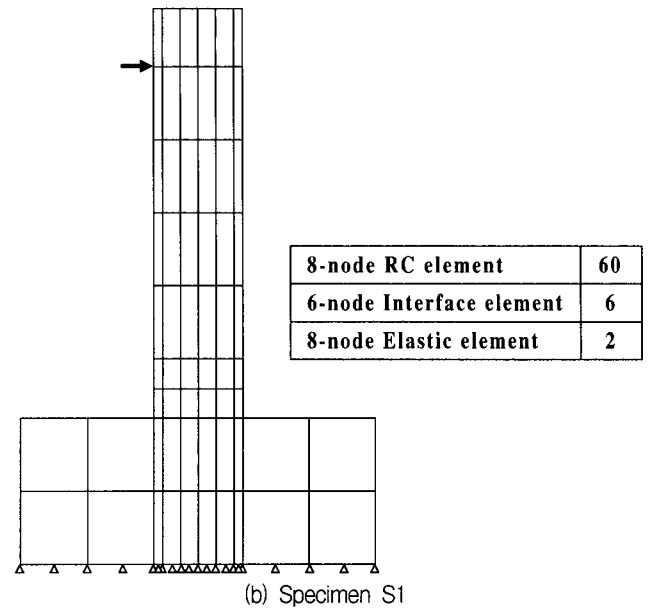
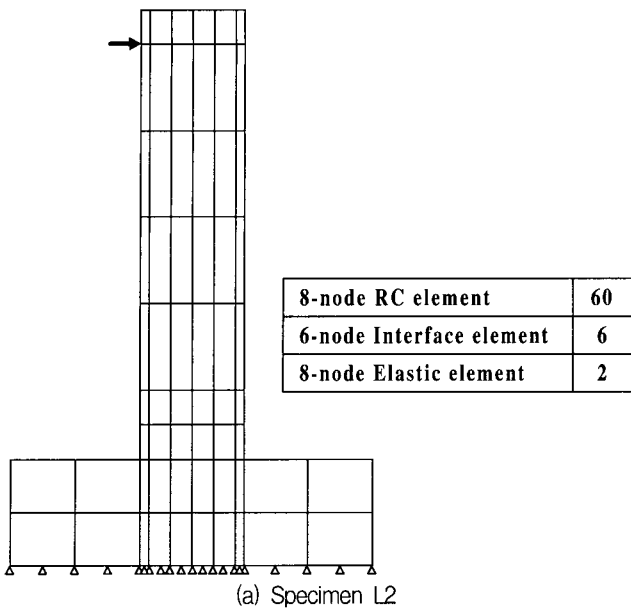


Fig. 5 Finite element mesh used for analysis

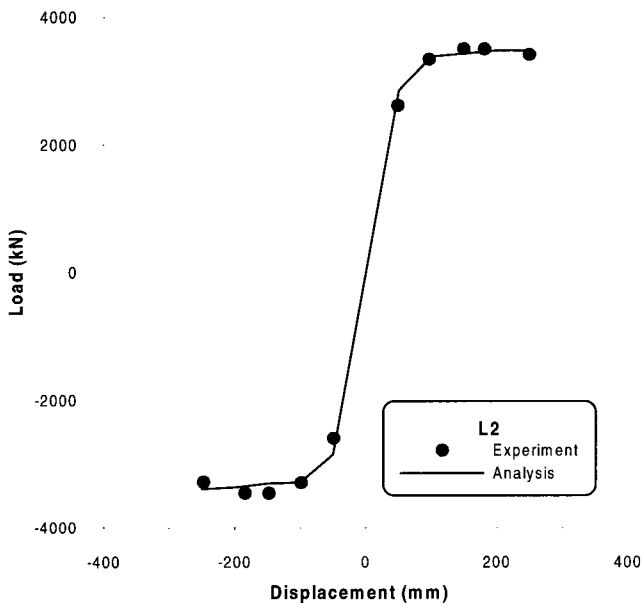


Fig. 6 Comparison envelope of hysteresis loop

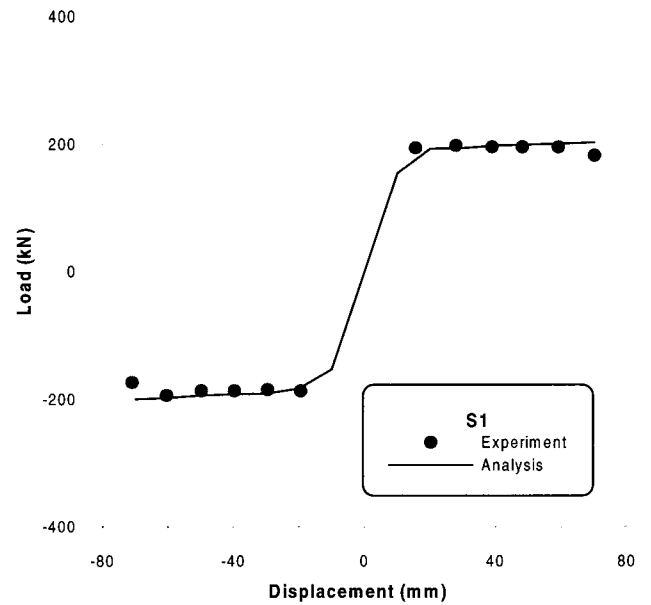


Fig. 7 Comparison envelope of hysteresis loop

(envelope)의 형태로 나타낸 결과이다. 실험과 해석결과 모두 콘크리트 피복이 박리한 후 종방향철근의 좌굴로 인한 손상으로 인해 수평력이 저하함을 알 수 있다.

Fig. 8은 L2 실험체와 S1 실험체의 수평력-드리프트 관계의 이력곡선의 포락선을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 S1 실험체의 수평력은 상사법칙에 의해서 보정을 하여 L2 실험체와 상대적인 비교가 가능하도록 했다. 이 그림으로부터 수평력-드리프트 이력곡선의 포락선은 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 다만, 최대수평력에 관해서는 L2 실험체가 S1 실험체에 비해서 약 7% 정도 큰 결과를 보이고 있다. 이는 두 실험체의 종방향철근비는 모두 1.2%로 일치하지만 사용된 철근의 항복점이 L2 실험체가 S1 실험체 보다 7% 정도 컸기 때문이라고 판단되며 실험에서도 같은 결과를 보고하고 있다.

L2 실험체와 S1 실험체의 에너지 흡수성능을 비교하면 중국 시에 도달하기 전까지의 범위에서는 각 재하단계에 있

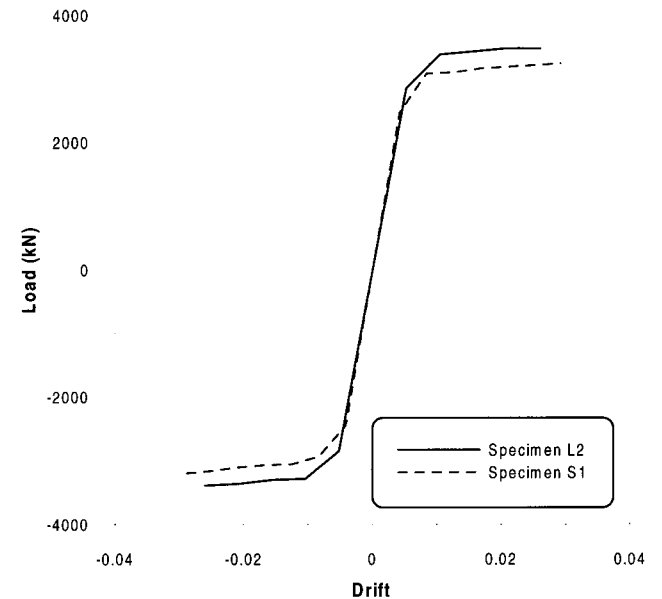


Fig. 8 Horizontal force vs. drift hysteresis loop

어서 이력흡수 에너지가 거의 증가였지만, 종국 시에 있어서는 축소모형 쪽이 상대적으로 이력흡수 에너지가 크게 되었다. 이는 Fig. 8의 수평력-드리프트관계의 이력곡선의 포락선을 통해서도 확인 할 수 있다.

4.4 검증 및 고찰

4.4.1 최대하중 및 변위연성도

이 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험과 함께 비교하여 Table 3에 정리하였다. 이 표에서 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 직접적인 방법⁽⁵⁾으로 평가하였다. 즉, 항복변위는 시스템 내의 위험단면의 가우스 적분점에서의 철근의 평균응력이 항복응력에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로, 극한변위는 위험단면의 가우스 적분점에서의 콘크리트 또는 철근의 변형률이 각각의 파괴기준 변형률에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로 정하였다. 해석에 의한 결과를 볼 때 해석결과가 실험 결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of test with analysis

Specimen No.		Yielding displacement (mm)	Ultimate displacement (mm)	Ultimate force (kN)	Ductility factor
L2	Test (1)	50	250	3503	5.0
	Analysis (2)	60	285	3536	4.8
	(1)/(2)	0.83	0.88	0.99	1.04
S1	Test (1)	10	70	197.8	7.0
	Analysis (2)	13	76	206.0	5.8
	(1)/(2)	0.77	0.92	0.96	1.20

4.4.2 손상진전도

Fig. 9는 L2 실험체의 S1 실험체의 손상진전 상황을 비교하여 나타낸 것이다. 손상의 진전은 두 실험체를 상대적으로 비교하기 위하여 재하변위를 교각 기초부에서 재하점까지의 높이로 나눈 드리프트 값을 기준으로 나타내었다. 교각의 손상메커니즘은 두 실험체 모두 수평균열의 진전후, 콘크리트 피복이 박리·이탈되고 종방향철근의 좌굴이 일어난다. 여기에 좌굴이 현저하게 되면 내부콘크리트의 손상으로 진행되며 최종적으로 종방향철근의 파단이 생기는 것이다. 종방향철근의 파단은 강성과 강도저하에 큰 영향을 미친다. 이러한 강성과 강도저하는 반복 주기하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 종방향철근의 좌굴이 그 주요 원인이다. Fig. 9로부터 드리프트의 증가에 동반한 손상의 진전은 L2 실험체가 약간 빠르다는 것을 판단할 수 있다. 이러한 사실은 하중재하에 따른 요소레벨의 손상지수^{(16),(17)}의

변화를 나타내고 있는 Fig. 10을 통해서도 평가할 수 있다.

L2 실험체의 실험결과를 재하 단계별로 기술하면 다음과 같다. 드리프트 0.005에서 교각 전면에서 수평의 휨균열이 생긴다. 0.02에서는 콘크리트 피복이 박리하기 시작하였다. 0.03이 되면 종방향철근이 파단되었다. 이에 대하여 해석결과와 재하 단계별 손상지수 값은 드리프트 0.005에서 0.1, 0.02에서 0.45, 그리고 0.03에서 0.7를 나타내고 있다. 이 해석결과에 나타난 손상지수 값을 역확거동으로 표현하면^{(16),(17)}, 손상지수 값 0.1은 보수가 가능한 손상지수 값으로서 종방향철

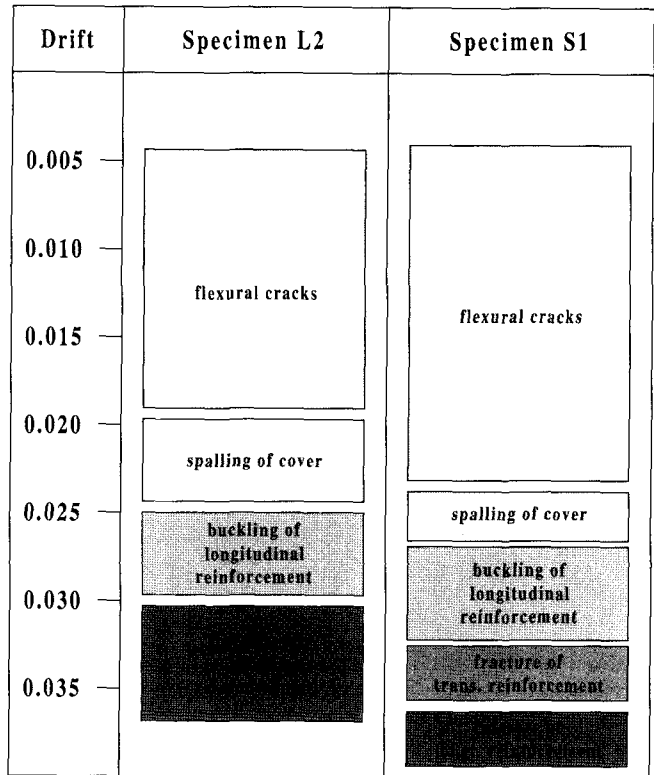


Fig. 9 Development of damage during test

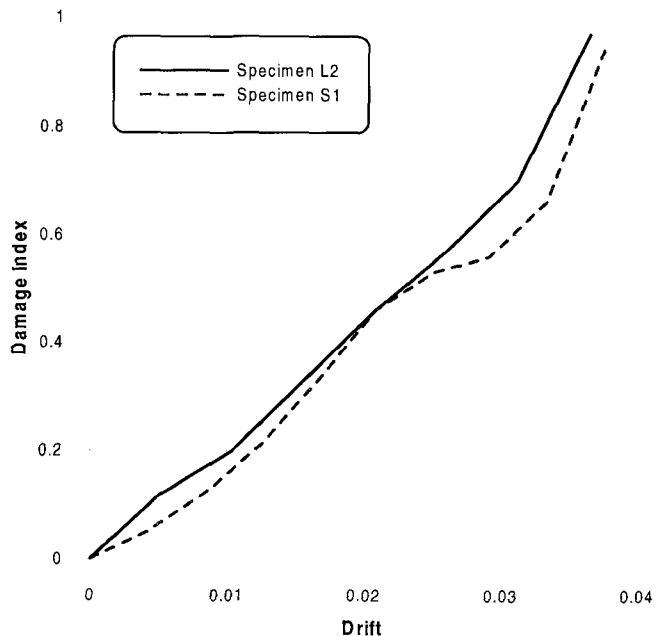


Fig. 10 Development of damage index during test

근의 항복이 일어나기 전 경미한 휨균열이 발달한 상태로, 손상지수 값 0.45는 보수가 불가능한 손상지수 값 0.4 보다 약간 큰 값으로서 종방향철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트 피복의 박리가 진행되고 있는 상태로, 손상지수 값 0.7은 파괴 시점을 알리는 손상지수 값으로서 종방향철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로 설명할 수 있으며 이로부터 해석결과와 손상지수 값은 실험결과와 각 단계별 손상상태와 대체적으로 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

S1 실험체에서 드리프트 0.005에서는 교각 전면에 수평의 휨균열이 생긴다. 0.024에서 콘크리트 피복이 박리하기 시작하였다. 0.035가 되면 종방향철근이 파단되었다. 이에 대하여 해석결과와 재하 단계별 손상지수 값은 드리프트 0.005에서 0.05, 0.024에서 0.5, 그리고 0.035에서 0.7를 나타내고 있다. 각 재하 단계별 해석결과를 역학거동으로 표현하면^{(16),(17)}, 손상지수 값 0.05는 종방향철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달한 상태로, 손상지수 값 0.5는 보수가 불가능한 상태인 0.4보다 큰 값으로서 종방향철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 피복이 박리된 상태로, 손상지수 값인 0.7은 종방향철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로 설명할 수 있으며 이러한 손상은 실험에서 나타난 현상과 대체적으로 같은 경향을 보이고 있다.

실험체들의 파괴시점의 손상의 진전상태를 요소레벨의 손상지수도^{(16),(17)}와 함께 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 철근콘크리트 교각의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있다.

4.4.3 고찰

구조물의 역학적 특성과 파괴양상을 파악하기 위한 구조 실험은 실물크기의 구조물과 부재로써 실시하는 것이 가장 좋은 방법이지만, 실험의 규모가 매우 커져서 많은 시간과 비용을 필요로 하기 때문에 주로 축소모형실험을 이용하게

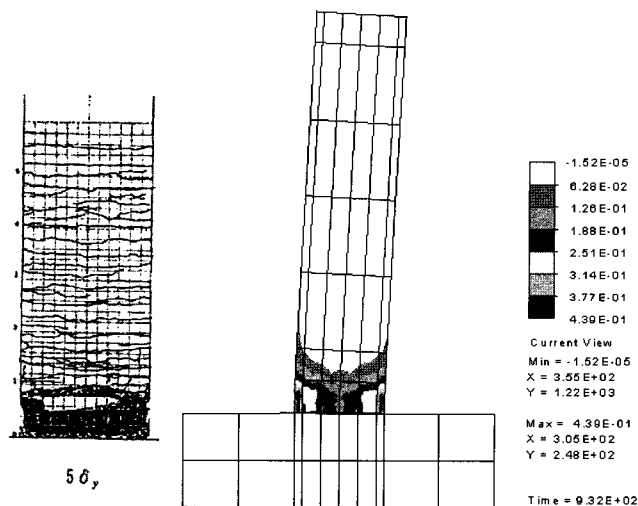


Fig. 11 Failure mode for specimen(L2)

된다. 이러한 축소모형실험을 최소한의 오차범위내에서 실물실험과 같은 결과를 재현하고 예측하도록 실험을 준비하는 데에는 상사법칙이 필요하게 된다. 그러나, 상사법칙에 의한 축소모형 실험시 여러 가지 제약조건으로 인하여 필연적으로 축소율의 차이에 의해서 생기는 크기효과가 나타날 수 있다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안한 방법은 철근콘크리트 교각의 크기효과를 포함한 비탄성 거동특성을 적절히 평가하고 있음을 알 수 있다.

실험에서는 시간적 경제적인 제약으로 인하여 축소모형 실험에 의존할 수밖에 없으므로 크기효과와 정량적인 평가가 어려우나 이 연구에 제안된 유한요소해석프로그램을 이용하면 축소모형은 물론 실물크기의 철근콘크리트 교각의 거동특성 평가를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동에 미치는 크기효과와 영향을 검토하기 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석 프로그램을 사용하여, 1축 방향의 휨을 받는 철근콘크리트 교각을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석방법은 철근콘크리트 교각의 모형 및 실물 실험에 대한 전체적인 역학적 거동특성을 비교적 충실히 예측하고 있다.
- 2) 이 연구에서 제안된 유한요소해석은 철근콘크리트 교각의 크기효과를 포함한 비선형 거동특성에 대한 구체적인 정보를 제공하고 있으며 실험결과에 나타난 균열 및 변형 결과와 전반적으로 일치하는 손상지수도를 보여주고 있다.
- 3) 실험에서는 시간적 경제적인 제약으로 인하여 축소모형 실험에 의존할 수밖에 없으므로 크기효과와 정량적인 평가가 어려우나 이 연구에 제안된 유한요소해석프로그램을

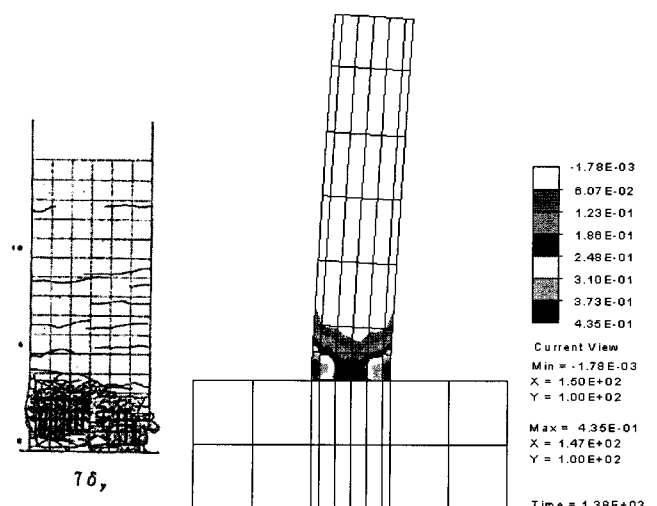


Fig. 12 Failure mode for specimen(S1)

- 이용하면 축소모형은 물론 실물크기의 철근콘크리트 교각의 거동특성 평가를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 철근콘크리트 교각의 크기효과를 포함한 거동특성을 해석적으로 규명함으로써 철근콘크리트 교각구조의 중약진 지진지역에서의 합리적이면서 경제적인 내진설계법의 개발을 위한 기초적인 데이터를 제시하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. Kosa, K., Kobayashi, K., Murayama, Y., and Yosizawa, Y., "Experimental study on reversed load-displacement behavior of RC pier by large scale model tests," *Journal of JSCE*, No. 538, Vol. 31, 1996, pp. 47-56.
2. Stone, W. C. and Cheok, G. S., *Inelastic Behavior of Full-Scale Bridge Columns Subjected to Cyclic Loading*, NIST Building Science Series 166, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, M. D., 1989.
3. 김병석, 김영진, 곽임중, 조창백, 조정래, "휨-전단 복합 거동을 보이는 RC 원형교각의 내진성능 평가", 한국지진공학회논문집, 제5권, 제3호, 2001, pp. 29-36.
4. 김태훈, 신현목, "Analytical approach to evaluate the inelastic behaviors of reinforced concrete structures under seismic loads," 한국지진공학회논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 113-124.
5. 김태훈, 유영화, 신현목, "지진하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능 력에 관한 해석적 연구", 한국지진공학회논문집, 제4권, 제4호, 2000, pp. 37-51.
6. 김태훈, 이상철, 신현목, "지진시 철근콘크리트 교각의 피로거동에 관한 해석적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 제4호, 2001, pp. 389-396.
7. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural members with confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.
8. 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.
9. Perera, R., Carnicero, A., Alarcon, E., and Gomez, S., "A fatigue damage model for seismic response of RC structures," *Computers and Structures*, Vol. 78, 2000, pp. 293-302.
10. Okamura, H., Maekawa, K., and Sivasubramaniam, S., "Verification of modeling for reinforced concrete finite element," *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*, ASCE, 1985, pp. 528-543.
11. 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.
12. Scott, B. D., Park, R., and Priestley, M. J. N., "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates," *ACI Structural Journal*, Vol. 79, No. 1, 1982, pp. 13-27.
13. 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.
14. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Vol. 1 and Vol. 2*, 2000.
15. Hosikuma, J., Unjoh, S., and Nagaya, K., "Size effect on inelastic behavior of reinforced concrete columns subjected to cyclic loading," *Journal of JSCE*, Vol. 50, No. 669, 2001, pp. 215-232.
16. 김태훈, 이상철, 신현목, "비탄성 손상 해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 대한토목학회 논문집, 제21권, 3-A호, 2001, pp. 361-372.
17. 김태훈, 신현목, "비탄성 유한요소해석을 이용한 주철근 단락을 갖는 철근콘크리트 교각의 손상지수 평가," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제4호, 2001, pp. 39-49.