

다양한 하중 이력을 받는 철근콘크리트 기둥의 구조적 성능에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Structural Performance of Reinforced Concrete Columns Subjected to Various Loading Histories

정 훈 식*
Jeong, Hoon Sik

이 정 윤**
Lee, Jung Yoon

ABSTRACT

This paper compares the moment-curvature relations of reinforced concrete columns subjected to various loading histories. A sectional analysis was proposed to predict the behavior of reinforced concrete columns.

The proposed analysis predicted the real moment-curvature relations of reinforced concrete columns with good agreement. Four types of loading programs were adapted to the analysis. The analysed results indicated that the moment-curvature relations of reinforced concrete columns were strongly affected by the loading history.

1. 서론

철근콘크리트 기둥의 대부분은 2축 휨을 받고 있다. 특히 모서리기둥, 측면 기둥 등은 2축 휨의 영향이 크게 작용한다. 철근콘크리트 기둥에 2축 휨이 작용할 경우 중립축이 재축에 대하여 경사지게 되며 압축력을 받는 콘크리트 단면이 줄어 1축 휨을 받는 경우보다 불리하게 작용할 우려가 있다. 2축 휨을 받는 철근콘크리트 기둥의 거동은 여러 연구자에 의하여 연구되어 왔다^{1)~3)} 본 연구에서는 탄소성 섬유 보강을 한 철근콘크리트 기둥의 연성 예측을 위한 연구의 일환으로 다양한 하중 이력에 따른 철근 콘크리트 기둥 거동의 차이를 비교, 분석하고자 한다.

본 논문에서는 미소 단면 분할 해석 프로그램을 작성하여 1축과 2축 휨을 받는 기둥의 거동을 예측한 후, 실험결과와 비교하였다. 또한, 다양한 하중 이력에 대해 철근콘크리트 기둥의 변형성상을 비교 고찰함으로써 하중이력이 철근콘크리트 기둥의 구조적 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 해석방법

본 연구에서는 다양한 하중 이력에 대한 철근콘크리트 기둥 거동의 변화를 비교하기 위하여 미소단면 분할 해석 프로그램을 작성하였다. 해석에서는 평면유지의 가정과 단면의 미소 분할, 미소 증분 해석을 이용하였다.

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 전임강사

해석에서는 그림 1과 같이 부재의 단면을 $n \times m$ 개로 분할하여 각 요소를 각기 독립된 하나의 요소로 하였다. 각 분할단위내의 변형률과 응력은 같은 분포를 가진다고 가정하였다. 단면의 각 요소의 변형률 증분 $\Delta\epsilon_{ij}$ 는 식 (1)과 같다.

$$\Delta\epsilon_{ij}(Y_{ij}, Z_{ij}) = \Delta\epsilon_o + Z_{ij} \cdot \Delta\phi_Y - Y_{ij} \cdot \Delta\phi_Z \quad (1)$$

식 (1)에서 $\Delta\epsilon_{ij}$ 를 구하면 식 (2)에 의해 각 요소의 응력을 구할 수 있다.

$$\Delta\sigma_{ij}(Y_{ij}, Z_{ij}) = E_{ij}\Delta\epsilon_{ij}(Y_{ij}, Z_{ij}) \quad (2)$$

단면의 축력 증분 ΔN 및 y, z 방향 모멘트의 증분 ΔM_y 와 ΔM_z 는 식(3)에서 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M_y \\ \Delta M_z \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \int_{A_{ij}} \begin{pmatrix} 1 \\ Z_{ij} \\ -Y_{ij} \end{pmatrix} \Delta\sigma_{ij} dA_{ij} \quad (3)$$

여기서, $\Delta\epsilon_{ij}(Y_{ij}, Z_{ij})$ 는 $i-j$ 요소의 변형률 증분, $\Delta\epsilon_o$ 는 단면중심에 있어서의 변형률 증분, $\Delta\phi_Y$ 는 Y 축에 대한 곡률 증분, $\Delta\phi_Z$ 는 Z 축에 대한 곡률 증분, (Y_{ij}, Z_{ij}) 는 부재중심에서 (i, j) 요소중심까지의 y 축과 z 축까지의 거리, E_{ij} 는 $i-j$ 요소의 탄성계수, A_{ij} 는 $i-j$ 요소의 단면적이다.

위의 식(1), (2), (3)을 정리하면, 단면의 강성매트릭스에 관한 식(4)를 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Delta N / bhf_{ck} \\ \Delta M_y / b^2 hf_{ck} \\ \Delta M_z / bh^2 f_{ck} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & -K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & -K_{yz} \\ -K_{xz} & -K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\epsilon_x \\ b \cdot \Delta\phi_y \\ h \cdot \Delta\phi_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$K_{xx} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij} A_{ij}}{b \cdot h \cdot f_{ck}}$$

$$K_{yy} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij} (I_y + A_{ij} Z_{ij}^2)}{b^3 \cdot h \cdot f_{ck}}$$

$$K_{zz} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij} (I_z + A_{ij} Y_{ij}^2)}{b \cdot h^3 \cdot f_{ck}}$$

$$K_{xy} = K_{yx} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij} A_{ij} Z_{ij}}{b^2 \cdot h \cdot f_{ck}}$$

$$K_{xz} = K_{zx} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij} A_{ij} Y_{ij}}{b \cdot h^2 \cdot f_{ck}}$$

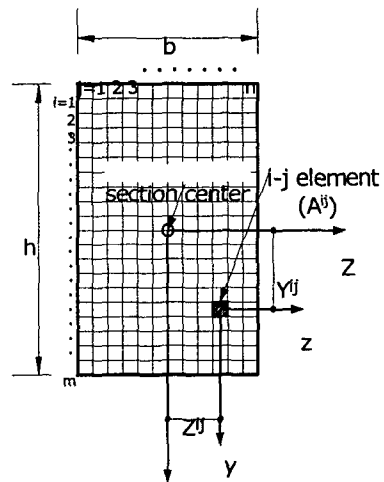


그림 1 부재 단면의 분리된 요소

$$K_{yz} = K_{zy} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{E_{ij} (I_{yz} + A_{ij} Y_{ij} Z_{ij})}{b^2 \cdot h^2 \cdot f_{ck}}$$

여기서, b 는 단면의 폭, h 는 단면의 높이, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도이다.

해석에서는 y 축과 z 축방향 곡률의 증분 $\Delta\phi_y$, $\Delta\phi_z$ 와 축력의 증분 ΔN 이 주어진 후, 각 요소의 탄성계수 E_{ij} 가 구해진다. E_{ij} 가 구해지면, 식(1)을 이용하여 $\Delta\epsilon_{ij}$ 를 구한다. $i-j$ 요소의 모멘트 증분 ΔM_y 와 ΔM_z 는 식(3)을 이용하여 구한다. 해석에서 반복하중을 받는 콘크리트의 응력-변형을 관계로써 Muguruma 등의 제안식⁴⁾을 이용하였으며, 철근의 응력-변형을 관계는 Ramberg-Osgood 식⁵⁾에 기본을 둔 Yokoo⁶⁾ 등의 제안식을 이용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 실험결과와 해석결과와의 비교

해석 결과의 검증을 위하여 1축과 2축 휨을 받는 철근콘크리트 기둥에 대한 Murat Saatcioglu와 Guney Ozcebe의 실험결과⁷⁾를 이용하였다. Murat Saatcioglu와 Guney Ozcebe는 콘크리트 압축강도 약 $f_{ck} = 35\text{MPa}$ 이며 단면 $35 \times 35\text{cm}$ 인 철근 콘크리트 기둥을 제작하여 연성율을 측정하였다. 실험체의 상세는 그림 2 및 표1과 같다. 또한, 실험에서는 그림 3과 같은 1축과 2축 하중 이력에 대한 철근콘크리트 기둥의 거동을 비교 분석하였다.

시험체 U4는 1축 하중을 받으며, 시험체 B1은 S-W방향의 변위가 N-S방향의 1/2 크기인 2축휨을 받고 있다. 그림 3에서 Δy 는 철근 항복시의 변위를 나타낸다.

해석 및 실험결과는 그림 4(a)~(d)와 같다. 그림에서 보여지는 것과 같이 초기 저항 모멘트에 대하여 실험과 해석 결과는 매우 유사하다. 시험체 U4의 경우 실험결과는 $\Delta/\Delta y = \pm 3$ 이후 하중이 감소하였지만, 해석에서는 하중의 감소없이 시험체의 연성능력을 다소 과대평가 하였다.

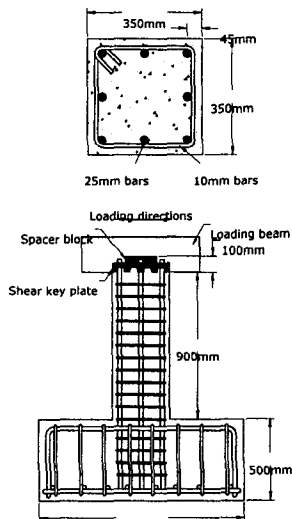
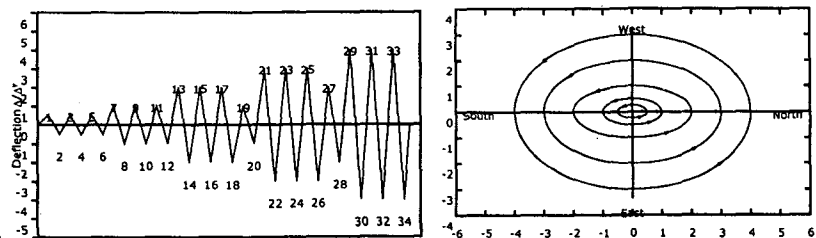


그림 2 실험체 상세

표 1 실험체 상세

| Specimen | f_{ck} (MPa) | Longitudinal Steel | | Transverse Steel | | | Axial Load (kN) |
|----------|-------------------|--------------------|----------------|------------------|-----------|-----------------|--------------------|
| | | ρ_s' (%) | f_y (MPa) | f_y (MPa) | S (mm) | ρ_s (%) | |
| U4 | 32.0 | 3.27 | 438 | 470 | 50 | 2.54 | 600 |
| B1 | 32.0 | 3.27 | 438 | 470 | 50 | 2.54 | 600 |



(a) U4 실험체 하중 이력

(b) B1 실험체 하중 이력

그림 3 실험에 사용된 하중 이력

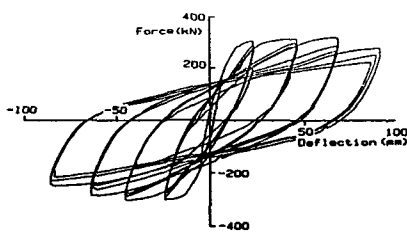
2축 하중을 받는 시험체 B1에 대해서도 해석 결과는 실험의 초기 저항 모멘트를 매우 정확히 예측하고 있다. 연성 능력의 평가에 있어서도 해석결과는 실험결과를 잘 평가하고 있다. 2축 하중을 받는 시험체 B2의 경우, 그림 4(c)에서 보여지는 것과 같이 실험에서 얻은 모멘트는 $\Delta/\Delta y = \pm 4$ 에서 감소하고 있으며, 해석에 있어서도 휨모멘트는 $\Delta/\Delta y = \pm 4$ 에서 감소하여, 연성능력을 정확히 평가하였다.

3.2 다양한 하중이력에 의한 해석결과

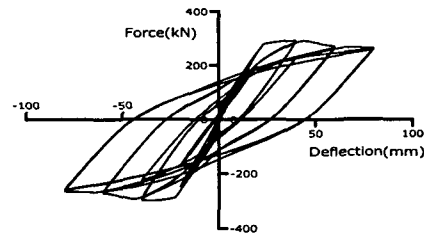
해석에서 사용된 하중이력은 그림 5와 같다. 1축 하중 이력은 Δy 의 1배, 2배, 3배, 4배로 하여 각각 2사이클의 하중이력을 주었다. 2축 하중 이력의 경우, 모두 3가지 형태의 하중 이력을 가하였는데, Type 1은 부재 축방향과 부재축과 직각되는 방향에 휨모멘트가 작용하는 경우이며 Type 2는 부재축을 중심으로 원형으로 휨모멘트가 작용하는 경우이다. Type 3은 Murat Saaticioglu와 Guney Ozcebe의 실험과 같이 2축 하중 이력을 사용하였지만 진행 방향을 부재축의 30° 방향으로 기울어지게 한 경우이다. 모든 하중 이력에서는 동일한 변위에 대하여 각각 2사이클의 하중을 가력하였다.

하중이력의 변화에 따른 해석결과는 그림 6(a)~(d)와 같다. 1축 하중 이력을 받는 실험체에 비해 2축 하중 이력을 받는 경우 Type 1을 제외한 모든 경우에서 최대 저항 모멘트의 감소를 보였다. 2축 하중을 받는 모든 경우에 소성 영역에서 사이클이 진행됨에 따라 저항 모멘트가 큰 폭으로 감소하였다. Type 1의 경우, 최대 저항 모멘트 도달 이후 하중 이력이 진행됨에 따라 저항 모멘트의 감소가 큰 폭으로 나타났다. 특히, 하중 가력이 반대 방향으로 진행되는 시점에서 급격한 저항모멘트의 변화를 보이는데, 이는 중립축 방향의 변화에 따른 부재의 압축단 면적이 변화하기 때문이다.

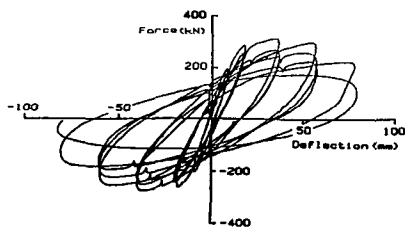
Type 2와 Type 3의 경우 최대 모멘트 이후 모멘트의 저감은 Type 1에 비하여 현저히 줄어들었다. 특히 Type 3의 경우처럼 부재축에 30° 방향으로 가력 될 경우 에너지 소산 능력이 다른 2축 휨을 받는 경우보다 큼을 알 수 있다.



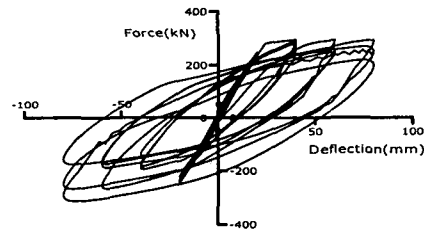
(a) U4 실험체의 1축 하중 이력 실험결과



(b) U4 실험체의 1축 하중 이력 해석결과

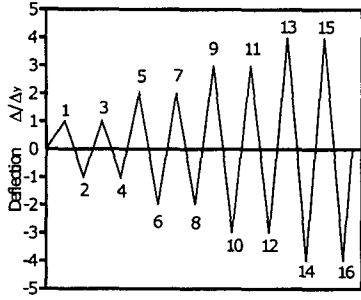


(c) B1 실험체의 2축 하중 이력 실험결과 (N-S)

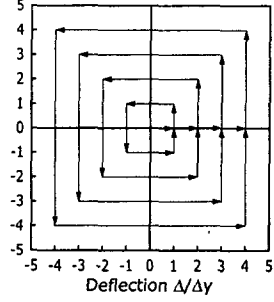


(d) B1 실험체의 2축 하중 이력 해석결과 (N-S)

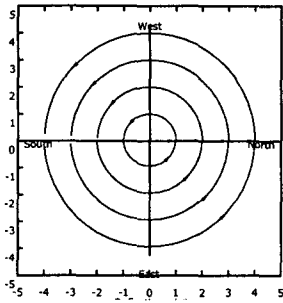
그림 4 실험결과와 해석결과에 의한 변형-휨하중 관계의 비교



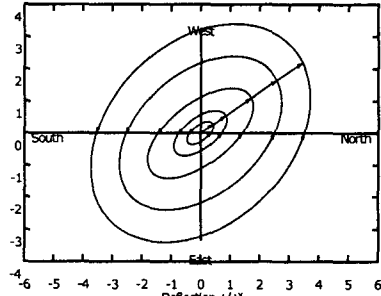
(a) 1축 하중 이력



(b) 2축 하중 이력 Type 1

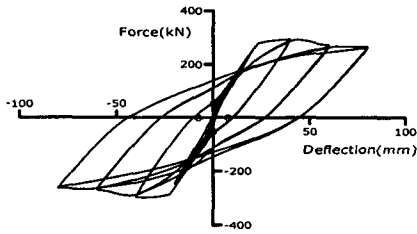


(c) 2축 하중 이력 Type 2

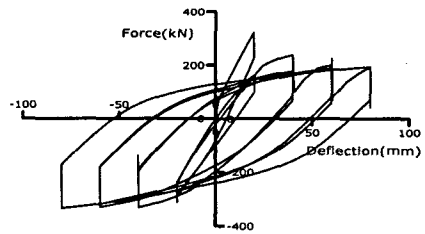


(d) 2축 하중 이력 Type 3

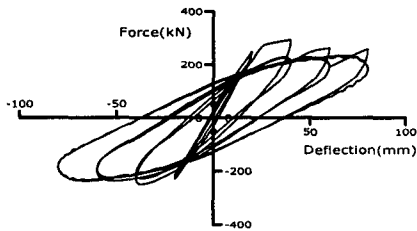
그림 5 해석에 사용된 하중 이력



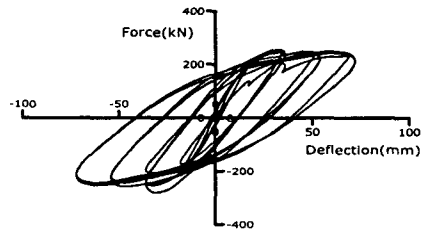
(a) 1축 하중 이력



(b) 2축 하중 이력 Type 1



(c) 2축 하중 이력 Type 2



(d) 2축 하중 이력 Type 3

그림 6 각 하중 이력에 대한 B1 실험체의 변형-횡하중 관계 (N-S 방향)

4. 결론

다양한 하중이력을 받는 철근콘크리트 기둥의 해석결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기 저항 모멘트의 경우 1축 하중 이력이나 2축 하중 이력에 관계없이 비슷한 초기 값을 가진다. 즉 탄성 영역 내에서는 하중 이력이 부재의 성능에 미치는 영향이 적다.
- (2) 2축 하중 이력을 받는 부재의 경우, 1축 하중 이력을 받는 부재에 비하여 소성 영역에서 상대적으로 저항 모멘트가 크게 감소하였다.
- (3) 부재축과 부재축에 직각되는 방향으로 휨모멘트가 동시에 작용할 경우 기둥의 휨모멘트는 다른 형태의 하중이 가해질 경우보다 급격히 감소하였다.
- (4) 부재축을 중심으로 30° 되는 방향에서 휨모멘트가 가해질 경우 에너지 소산능력은 다른 형태의 하중이 가해질 경우보다 컸다.

참고문헌

1. F. Watanabe, J.-Y. Lee, and M. Nishiyama, "Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Different Grade Longitudinal Bars," *ACI Structural Journal*, Vol. 92, No. 4, July-Aug. 1995, pp. 412-418.
2. 부척량, 김선자, "2축휨과 축력을 받는 철근 콘크리트 기둥의 변형성상에 대한 해석적 연구," *대한건축학회논문집*, 제7권, 6호, 1991. 12, pp. 217-227.
3. R. Park and T. Paulay, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, Inc. 1975, pp. 154-158.
4. H. Muguruma and F. Watanabe, "Ductility Improvement of High Strength Concrete Columns with Lateral Confinement," *High-Strength Concrete*, 2nd International Symposium, SP-121, ACI, 1990, pp. 47-60.
5. W. Ramberg and R. Osgood, "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters," *Technical Note 902*, National Advisory Committee for Aeronautics, July 1943.
6. Y. Yokoo and T. Nakamura, "Non-stationary Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relations of a Wide-Flange Steel," *Transactions of AIJ*, No. 260, Oct. 1997, pp. 71-80.
7. M. Saatcioglu and G. Ozcebe, "Response of Reinforced Concrete Columns to Simulated Seismic Loading," *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 1, Jan.-Feb. 1989, pp. 3-12.