

2축 편심 축력을 받는 고강도 RC 기둥의 비선형해석

Nonlinear Analysis of High Strength RC Columns Subjected to Axial Load and Biaxial Bending

신성우* 반병열** 유석형*** 조문희**** 한경돈**** 이종원****
Shin, S. W. Bahn, B. Y. Yoo, S. H. Cho, M. H. Han, K. D. Lee, J. W.

ABSTRACT

The main objective of this study is to provide data on high strength concrete columns subjected to axial load and biaxial bending. For the design of biaxial bending, the approximate method (Bresler load contour method, PCA load contour method) is presented in ACI code. The present study investigate whether the methods are valid in high strength concrete and compare analysis results (by FEM method) with experimental results. Also, this study examines whether statics method and failure surface equation (by Hsu) are adequate.

Key word : high strength concrete, biaxial bending, failure surface, load contour

1. 서론

기존의 설계시방서는 보통강도 콘크리트 부재에 대한 실험결과를 기초로 하여 작성되었으므로, 고강도 콘크리트부재를 안전하고 합리적으로 설계하기 위해서는 고강도 콘크리트부재에 대한 실험적 연구 결과를 기초로 하여 기존의 해석 및 설계방법을 수정,보완, 또는 검증할 필요성이 있다.

본 연구에서는 고강도 콘크리트의 가장 큰 장점을 살릴 수 있는 기둥에 대하여 연구하였다. 기둥은 압축응력을 받는 단면의 면적비율이 크므로, 콘크리트의 고강도화에 따른 역학적 장점을 가장 효과적으로 이용할 수 있는 구조요소이다. 축하중이 기둥 단면의 두 주축에 대하여 동시에 힘을 유발시킬 때, 기둥에서는 2축 휨이 발생된다. 일반적으로, 기둥이 축력과 이축 휨을 받게되면 주어진 단면 저항강도인 파괴곡면 (Failure Surface)을 갖게 된다. 이러한 파괴곡면은 모멘트비 (편심각)에 의한 하중-모멘트 곡선과 축하중에 의한 등하중선으로 구성된다. 파괴곡면을 수평으로 자른다면 등하중선의 형태는 근사원형식으로 정의될 수 있으며 단면의 기하학적

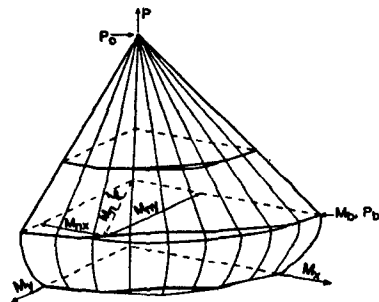


그림 1 파괴곡면

- * 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수
- ** 정희원, 대전대학교 건축공학과 교수
- *** 정희원, 한양대학교 건축공학과 박사과정
- **** 정희원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

조건, 콘크리트 압축강도, 철근의 항복강도, 철근의 배열상태와 양에 따라 각기 형태를 달리한다.

2축 휨을 받는 기둥의 설계방법으로 AIC 318-99 기준에서는 등하중선법(Load Contour Method)을 제안하고 있으며, 등하중선(Load Contour)을 구하기 위하여 도표를 사용하고 있는데, 본 연구에서는 2축휨에 영향을 주는 변수(콘크리트 강도, 단면형상비)에 대한 연구를 하고자한다. 기둥을 해석하기 위해서 본 연구에서는 실제의 응력-변형을 곡선을 이용하여 등가 응력블럭을 이용하는 정역학적 방법(Statics Method)의 타당성을 검토하고자한다. 또한, Hsu가 제안한 파괴곡면(Failure Surface)식의 타당성을 검토하여 2축휨 설계를 위한 기본 자료를 제시하고자한다.

2. 2축 휨을 받는 기둥의 해석 방법

2.1 화이버 모델에 의한 해석방법

화이버 모델은 부재(Member)를 여러개의 요소(Element)로 나누고 각 요소의 양 끝에 단면이 위치하고 이 단면들은 다시 유한개의 화이버(Fiber)로 나누는 모델이다. 철근 콘크리트 구조물의 모델링에 파이버 모델을 사용하면 이산 모델(Discrete Model)보다 정교하게 철근콘크리트 거동과 관련된 현상들을 많이 고려할 수 있다. 또한, 화이버 모델은 단면이 완전하게 독립적이어서 다양한 형태의 단면과 재료성질을 가지는 부재들의 모델링이 가능하다.

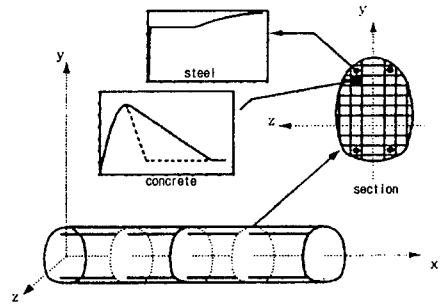


그림 2 화이버 모델

2.1.1 강성행렬

국부좌표계로 표시된 부재의 변형벡터 d_m 와 힘벡터 f_m 는 다음과 같이 정의 된다.

$$d_m = \{d_{m1} \ d_{m2} \ d_{m3} \ d_{m4} \ d_{m5}\}^T \quad f_m = \{f_{m1} \ f_{m2} \ f_{m3} \ f_{m4} \ f_{m5}\}^T$$

단면의 변형벡터 d_s 와 힘벡터 f_s 는 다음과 같이 정의 된다.

$$d_s = \{\epsilon_0 \ \phi_y \ \phi_z\}^T \quad f_s = \{P \ M_y \ M_z\}^T$$

단면은 l 개의 화이버로 나뉘어지고 각각의 화이버는 콘크리트 또는 철근을 나타낸다. 각 화이버의 변형률벡터 d_f 와 응력벡터 f_f 는 다음과 같이 정의된다.

$$d_f = \{\epsilon_1 \ \dots \ \epsilon_k \ \dots \ \epsilon_l\}^T \quad f_f = \{\sigma_1 \ \dots \ \sigma_k \ \dots \ \sigma_l\}^T$$

각 화이버중심에서의 변형률은 다음의 식으로 구해진다.

$$\epsilon_k = \epsilon_0 + \phi_y \cdot z_k + \phi_z \cdot y_k$$

즉, $d_f = l d_s$

각 화이버의 변형률이 결정되면 이에 대응하는 화이버의 응력은 재료 구성방정식에서 구할 수 있다.

각 화이버의 강성이 구해지면 이로부터 단면의 강성과 저항력들을 구할 수 있다. 단면력중분 Δf_s 는 화이버의 변형률중분 Δd_f 로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta f_s = l^T [A_f \ E_f] \Delta d_f$$

윗 식에 $\Delta d_f = l \Delta d_s$ 를 대입하면 단면력중분과 단면변형중분 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta f_s = l^T [A_f \ E_f] \Delta d_s \text{ or } \Delta f_s = K_s \Delta d_s$$

화이버 변형률에 대하여 화이버 응력들이 계산되면, 다음 식에 의하여 단면의 저항력을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} P^R \\ M_y^R \\ M_z^R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^l \sigma_k A_k \\ \sum_{k=1}^l \sigma_k A_k z_k \\ \sum_{k=1}^l \sigma_k A_k y_k \end{Bmatrix}$$

위에서 만들어진 강성 행렬(K_s)은 국부좌표계에 의한 것이므로 이것을 전체좌표계에 대한 것으로 바꾸면 부재 강성행렬이 구성된다.

2.1.2 재료 구성방정식

콘크리트는 Ahmad, Shah가 제안한 응력-변형률 모델식을 사용하였으며 압축축 각 영역을 묘사하기 위한 식은 다음과 같다.

$$Y = \frac{AX + (B-1)X^2}{1 + (A-2)X + BX^2}$$

$$A = E_c (\epsilon_0 / f_{ck})$$

$$B = 0.876A - 0.8164$$

또한, 콘크리트의 인장강도도 고려하였다.

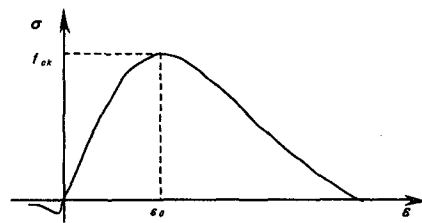


그림 3 콘크리트의 응력-변형률 관계

철근은 항복한 이후에 E_{sp} 의 기울기를 가지고 선형으로 변화하는 변형경화 재료로 모델링하였는데 이 모델은 간단하면서도 이전의 여러 철근콘크리트 구조물의 해석에서 성공적으로 적용되어 왔다.

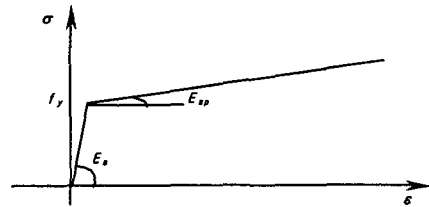


그림 4 철근의 응력-변형률 관계

2.2 정역학적 해석방법

$$P_n = C_c + C_s - T_s$$

$$M_{nx} = C_c \cdot y_c + C_s \cdot y_{st} + T_s \cdot y_{st}$$

$$M_{ny} = C_c \cdot x_c + C_s \cdot x_{st} + T_s \cdot x_{st}$$

등가응력 블록을 이용하여 중립축각도와 거리를 변화시키면서 힘의평형에 의해 P_n , M_{nx} , M_{ny} 를 구할수 있다.

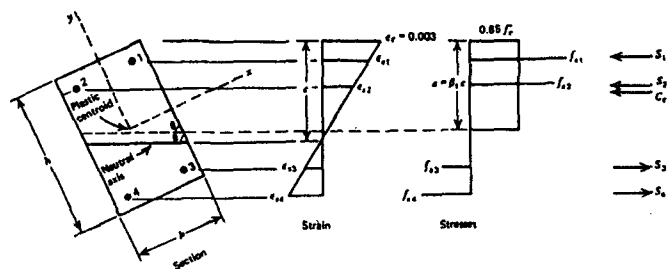


그림 5 정역학적 해석방법

3. 비선형해석결과 및 비교

콘크리트의 압축강도는 고강도인 585-650kgf/cm²이고 철근은 SD40이다.

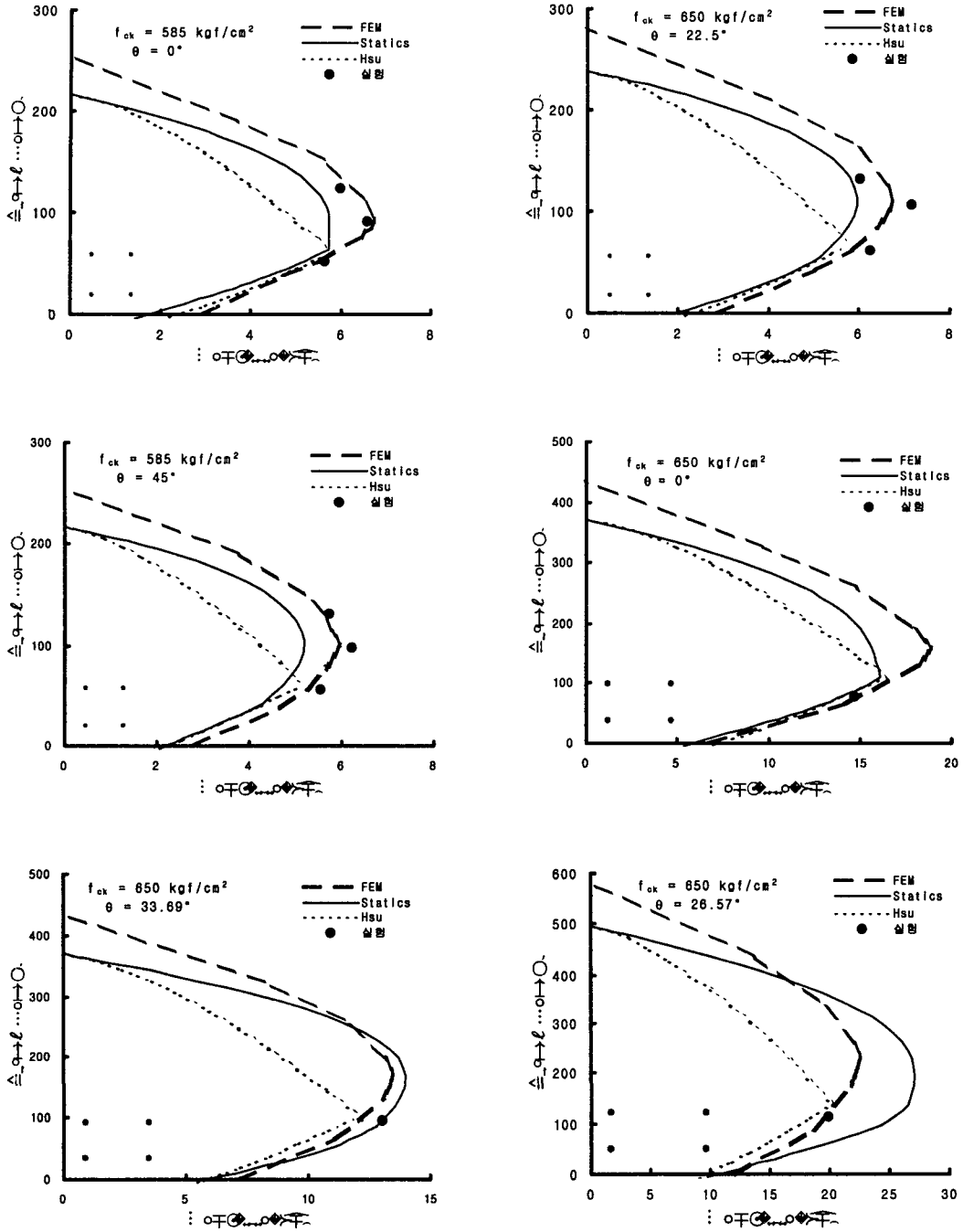


그림 6 P-M 상관도

화이버 모델을 사용해 해석한결과 실험치와의 오차가 10%이내에 나타나 비교적 정확하게 예측할수 있었다. 정역학적 방법으로 해석한 결과 1축, 정사각형 단면인 경우에는 안전측인 것으로 보이나 2축, 직사각형 단면인 경우에는 과대평가하는 것으로 나타났다. Hsu가 제안한 파괴곡면식은 고강도콘크리트일 때 보통강도일 때보다 더욱더 과소 평가하고 있고 1축 일때보다 2축일 때 더욱더 과소평가 하며, 특히 압축파괴 영역에서 차이가 크게 나타나는 것으로 판단되므로 합리적인 설계를 하기 위해서는 파괴곡면식을 수정할 필요가 있을것으로 판단된다.

4. Bresler, PCA 등하중선법에 대한 검토

해석을 위한 단면은 그림 6에 표시되어 있으며 다른 단면에 대해서도 해석을 하였으나 대표적으로 이 단면을 선택하였으며, 등하중선은 $0.75P_0-0.15P_0$ 에 대하여 해석을 하였다. Bresler 등하중선법에서 Bresler는 α 를 1.15에서 1.55의 값을 갖는다고 제안하였으며, 일반적으로 실용적인 형상계수로 α 의 값은 다음과 같이 취한다. $\alpha=1.5$ (직사각형 단면), $1.5-2.0$ (정사각형 단면). British code CP 110은 α 값을 저축력인 경우에는 1.0으로 제안하였으며, 고축력인 경우에는 α 의 값을 2.0으로 제안하였는데, 이러한 값들은 단순히 안전측에 속하도록 설계하기 위한 값이다. PCA 등하중선법에서 β 값의 범위는 0.55-0.70의 값을 가지며, 설계목적에 위해서는 β 의 값을 0.65의 값으로 취한다.

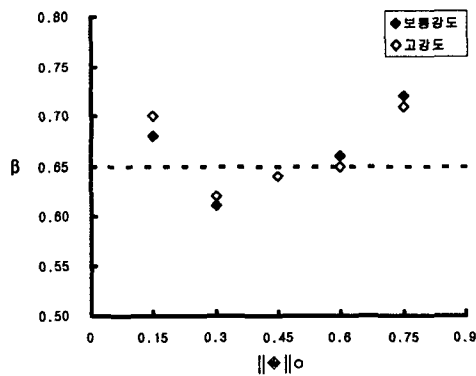


그림 7 정사각형단면(20×20cm)

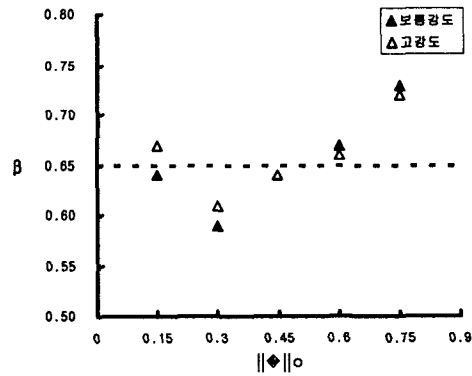


그림 8 직사각형단면(20×30, 20×40cm)

4.1 정사각형 단면

α, β 값의 범위는 1.5-2.02, 0.62-0.71의 값을 갖는 것으로 나타나 보통강도 콘크리트와 크게차이를 보여주지는 않는다. 그러나 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 고축력인 경우에는 α, β 값이 작은 값을 나타내지만, 저축력인 경우에는 보통강도 콘크리트보다 큰값을 보이고 있다. 고축력에서는 α 가 2.0의 값에 근접한 값을 보이고 있어서 앞에서 언급한 British code와 일치하고 있지만, 저축력인 경우에는 1.0보다도 큰 값을 보이고 있다. 수치적인 검토결과, Bresler가 제시한 α 값은 고강도 콘크리트에도 적용될 수 있음을 보여주고 있다. 또한 β 값도 PCA에서 제시한 값의 범위에 드는 것으로 나타났다.

4.2 직사각형 단면

직사각형 단면인 경우 α, β 값은 1.4-2.11, 0.61-0.72의 값을 갖는 것으로 나타나 보통강도 콘크리트와 크게 차이를 보여주지는 않았다. 그러나, 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 고축력인 경우에는 α, β 값이 작은 값을 나타내지만, 저축력인 경우에는 보통강도 콘크리트보다 큰값을 보이고 있다. 단면 형상비에 따라서는 차이가 없는 것으로 나타났다.

5.결론

본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 2축 휨을 받는 기둥의 해석시 등가응력 블록을 사용한 해석은 직사각형 단면에서는 실험결과 보다 과대평가하는 것으로 나타났다.
- 2) Hsu가 제안한 파괴곡면식은 과소평가 하고 있으므로 합리적인 설계를 하기 위해서는 파괴곡면식을 수정할 필요가 있을것으로 판단된다.
- 3) 근사방법의 타당성을 검토한 결과 고강도 콘크리트를 사용했을 때의 α, β 값은 근사식에서 제시하는 값의 범위에 드는 것으로 나타났다. 그러나 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 고축력인 경우에는 α 값이 작은 값을 나타내지만, 저축력인 경우에는 보통강도 콘크리트보다 큰값을 보이고 있다.
- 4) 이러한 결과를 고려해 볼 때, 기존의 근사식을 사용하는데 커다란 문제점은 없으나 합리적인 설계를 위해서는 많은 예제를 통해서 설계도표가 제시되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구를 진행함에 있어 세심한 지원을 아끼지 않으신 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hsu, C.T.T, Analysis and Design of Square and Rectangular Columns by Equation of Failure Surface, ACI Structure Journal, 1988, PP. 167-179.
2. Hsu, C.T.T, Complete Biaxial Load-Deformation Behavior of RC Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1992, pp. 2590-2609.
3. ACI Committee, Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-99).
4. 정찬영, 2축 휨을 받는 고강도 콘크리트 기둥설계, 한국과학기술원 석사학위 논문, 1987.
5. 문선미, 2축 휨과 축하중을 받는 임의 단면 형태의 철근콘크리트 부재의 설계, 한양대학교 석사학위 논문, 1993.
6. 송하원, 파이버모델에 의한 철근콘크리트 구조물의 비선형 파괴해석, 한국 전산 구조 공학회, 1998, pp. 127-134.