

축력과 이축휨을 받는 정사각형 단면의 고강도 콘크리트 기둥에 대한 실험적 연구

An Experimental Study of Square High Strength Concrete Column Sections under Axial Compression and Biaxial Bending

조 문 희 [*]	이 종 원 [*]	한 경 돈 [*]
Cho, Mun Hee	Lee, Jong Won	Han, Kyung Don
유 석 형 ^{**}	반 병 열 ^{***}	신 성 우 ^{****}
Yoo, Suk Hyung	Bahn, Byong Youl	Shin, Sung Woo

ABSTRACT

The exact solution of strength of reinforced concrete RC columns subjected to axial compression combined with biaxial bending needs trial and adjustment procedure to find the depth and inclination of the neutral axis. Thus, approximate methods of analysis and design for biaxial bending are used in practice. Load contour interprets the relation of biaxial bending and equivalent uniaxial bending by α factor which is related to material properties and column shapes.

The purpose of this study is to investigate the behavior of high strength RC columns subjected to the combined axial compression and biaxial bending. Fifteen test specimens with dimensions of $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ and 4-D13 longitudinal steel were examined. The variable of the test is compressive strength of concrete (350, 585, 650kgf/cm²), compression load ratio (0.2P_o, 0.35P_o, 0.5P_o), and inclination of loading ($\theta = 0, 22.5, 45^\circ$). Test results of coefficient α depending on the compressive strength of concrete are compared with ACI code.

1. 서론

초고층건축물이 늘어남에 따라 고축력에 저항할 수 있는 경제적인 설계를 위한 고강도 콘크리트 기둥의 사용이 불가피한 실정이다. 그러나 현행의 콘크리트 기둥설계는 한정된 콘크리트 강도 이하로 된 기둥의 연구결과에 근거하고 있고 실제 구조물에서 대부분의 기둥이 축력과 동시에 이축휨을 받는 상황에 노출되어 있음에도 불구하고 이축휨에 대한 실험적 연구가 부족한 실정이며 현행설계¹⁾에서도 근사적인 방법에 의해 설계가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 기 제안된 근사법에 의한 식을 실험을 통하여 검증해 보고 이와 더불어 고강도 콘크

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

*** 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정

**** 정회원, 한양대학교 건축공학부 교수

리트에서 이러한 제안식들의 적합성을 규명하여 이축력을 받는 고강도 콘크리트 기둥의 거동을 조사함으로써 고강도 콘크리트 기둥설계방안을 위한 기초적인 자료를 제시하고자 한다. 콘크리트 압축강도와 하중의 편심각도를 변수로 한 실험을 통하여 2축 힘에 대한 3차원 파괴면(Failure Surface)상의 실험값들을 구한 후 일정 축하중 상에서 등하중선(Load Contour)의 실험값을 나타냄으로서 현행설계에서 사용되어지고 있는 α 계수에 대한 변화를 각각 축력비와 강도변화에 따라서 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험변수 및 실험체 제작

본 실험의 주요 변수로는 콘크리트 압축강도($350, 585, 650\text{kgf/cm}^2$), 편심각도($0, 22.5, 45^\circ$) 그리고 축력비($0.2P_0, 0.35P_0, 0.5P_0$)로 총 15개의 실험체가 제작되었다. 실험체는 단면의 크기가 $20 \times 20\text{cm}$ 인 정사각형 단면으로 각 모서리에 D13(SD40)의 주근을 배근하고 D6을 10cm간격으로 횡 보강하였다. 실험체의 총 길이는 88cm이고 실험구간은 중앙 40cm로 제작하였다. 주두의 파괴를 막기 위해 실험구간의 1/2 간격으로 띠철근을 배근하고 양생 후에 주두주위를 탄소섬유로 보강하였다. 실험체의 형태와 철근의 배근 상세는 그림 1, 2와 같다.

2.2 실험체 가력 및 측정장치

실험체는 그림 3과 같이 500tonf용량의 UTM으로 실험체 상하를 핀상태로 가력하였다. 정확한 편심 거리에 가력하기위해 상하부에 가력점 구멍이 가공된 가력판을 사용하였다. 실험체 중앙부 주근에 W.S.G.를 타설전에 부착하여 주근의 변형률을 측정하였고 실험체의 횡변위를 측정하기 위해 LVDT를 설치하였으며 실험전에 콘크리트 표면에 Phi Gauge를 부착하여 곡률을 측정하였다.

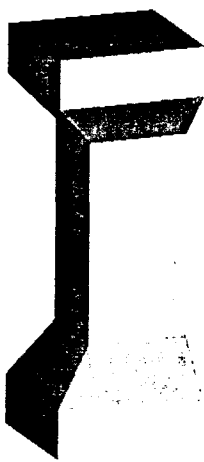


그림 1 실험체

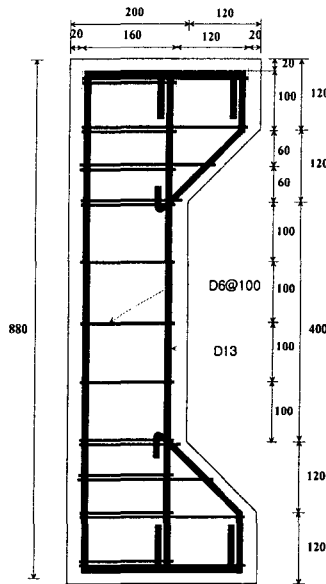


그림 2 실험체 배근상황

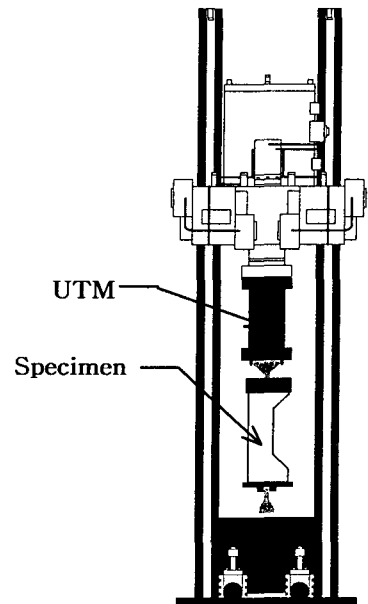


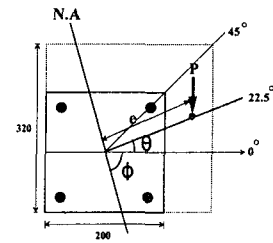
그림 3 실험체 설치상황

3. 실험결과 및 분석

총 15개의 실험체에 대한 실험결과는 표 1, 그림 5~7과 같다.

표 1 실험 결과

실험체 명	f_{ck} (kgf/cm ²)	P(tonf)		M_{max} (tf · m)	파괴 형태	편심각 (°)		
		P_{cr}	P_{max}			가력각 θ	N · A 각 φ	$\theta + \varphi$
NST-Ux	350	7.8	25.9	3.38	*T	0	80.97	80.97
NSB-Ux		11.7	52.7	4.46	B		63.60	63.60
NSC-Ux		-	70.6	3.76	C		75.96	75.96
NST-B		6.2	32.3	3.77	T	45	38.35	83.35
NSB-B		13.0	54.9	3.99	B		47.26	92.26
NSC-B		26.0	77.55	3.67	C		36.65	81.65
H1ST-Ux	585	15.8	52.3	5.63	T	0	86.48	86.48
H2SB-Ux	650	18.0	91.0	6.57	B		88.85	88.85
H1SC-Ux	585	70.0	123.7	5.97	C		82.48	82.48
H2ST-B'	650	12.0	61.5	6.24	T	22.5	70.74	93.24
H2SB-B'		45.0	107.2	7.14	B		64.97	87.47
H2SC-B'		90.0	132.8	6.02	C		68.64	91.14
H1ST-B	585	11.6	56.2	5.54	T	45	35.00	80.00
H1SB-B		25.0	98.6	6.25	B		36.27	81.27
H1SC-B		70.0	131.6	5.72	C		45.17	90.17



*T : Tension failure, B : Balanced failure, C : Compression failure

N S T - Ux
 — 편심각도 : Ux($\theta=0^\circ$),
 B'($\theta=22.5^\circ$), B($\theta=45^\circ$)
 — 축력비 : T(Tension failure /0.2P₀),
 B(Balanced failure /0.35P₀),
 C(Compression failure /0.5P₀)
 — 단면 형태 : Square Section
 — 콘크리트 압축강도 :
 N(350kgf/cm²), H1(585kgf/cm²),
 H2(650kgf/cm²)

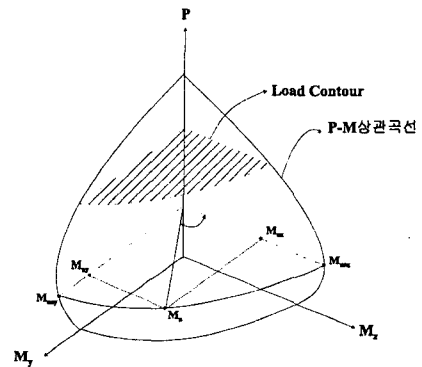
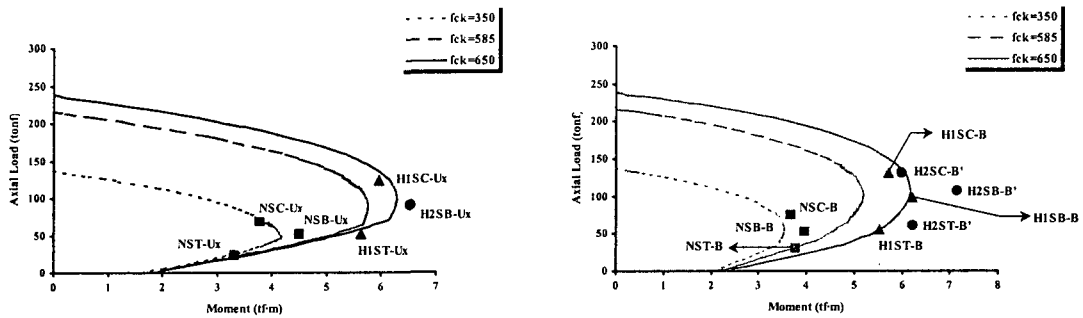


그림 4 Failure surface

3.1 P-M 상관곡선

기둥에 대한 3차원의 파괴곡면은 그림 4에서 볼 수 있듯이 파괴하중 P_n과 각 축에 대한 편심거리에 따른 M_{nx}, M_{ny}를 나타냄으로서 표현할 수 있다. 본 실험에서는 단면의 주축에 대한 일축 휨 상태에서의 결과와 22.5, 45°의 이축 휨을 받는 상태에서의 실험값으로 기둥의 내력을 평가하기 위하여 그림 5에서와 같이 정역학적인 방법에 의해 구해진 축력과 모멘트의 상관곡선과 비교하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 일축 휨을 받는 기둥이 이축 휨을 받는 기둥의 결과보다 비교적 잘 일치하는 것을 보여주고

있으며 이축 휨 상태에서는 기둥의 내력이 다소 과소평가되고 있는 것으로 나타났다. 이는 이축 휨일 경우 콘크리트의 압축부위가 사각형에서 삼각형에 가까운 형태로 변해감에 따라 압축부위의 중심이 중립축에 더 가까워져 극한 상태에서 압축연단의 변형률이 사각형 압축단면의 극한 변형률 값인 0.003의 가정치 보다 더 크게 나타나기 때문에 압축력이 커지고 압축응력의 분포가 모멘트 강도에 영향을 미치기 때문²⁾인 것으로 판단된다.



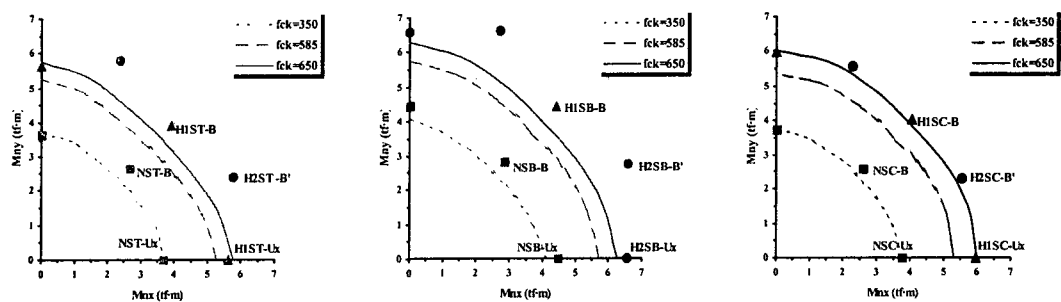
(a) 일축 휨을 받는 기둥($\theta=0^\circ$)

(b) 이축 휨을 받는 기둥($\theta=22.5, 45^\circ$)

그림 5 P-M 상관곡선

3.2 등하중선(Load Contour)

기둥에 대한 3차원 파괴곡면을 일정한 축하중 P_n 에 대하여 절단하면 그림 6과 같이 두 축에 대한 모멘트 M_{nx} 와 M_{ny} 의 관계에 대한 등하중곡선을 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 변수로 채택하고 있는 축력비에 따라 각각 인장($0.2P_0$), 평형($0.35P_0$), 압축파괴($0.5P_0$)영역의 특정하중에 대하여 곡선을 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있듯이 보통강도인 경우 인장과 압축파괴에 대해서는 대체적으로 실험값이 잘 맞는 반면 평형파괴영역에서는 다소 과소평가되는 것을 알 수 있다. 고강도인 경우에는 전반적으로 모든 값들이 과소평가되고 있어 기둥의 내력산정시 등가 직사각형 응력블록의 사용은 고강도인 경우에는 부적절 하다고 사료된다.



(a)인장파괴($0.2P_0$)

(b)평형파괴($0.35P_0$)

(c)압축파괴($0.5P_0$)

그림 6 등하중곡선

3.3 무차원화한 등하중곡선

그림 6에서와 같이 두 축에 대한 모멘트 M_{nx} 와 M_{ny} 의 관계를 표현한 Load Contour에서 곡선부분에 대한 식을 표현하면 $(\frac{M_{nx}}{M_{nox}})^{\alpha} + (\frac{M_{ny}}{M_{noy}})^{\alpha} = 1$ 로 나타낼 수 있으며 Load Contour상의 모멘트 값을 각각 일축에 대한 모멘트 M_{nox} 와 M_{noy} 로 나누어 무차원화 하면 그림 7과 같은 α 값을 나타내는 곡선을 얻을 수 있다. ACI Code에서 제안하고 있는 일반적인 α 값의 범위는 대략 1.0~2.0의 값을 가지며 대부분의 사각형 단면에 대해서 1.5를 적절한 α 의 값으로 제시하고 있다. Bresler³⁾는 실험을 통하여 이 값의 범위를 1.15~1.55로 정의하였고 Hsu⁶⁾는 인장력을 받는 정사각형 단면의 기둥설계에 있어서 α 값은 1.75가 적절하다고 제안하고 있다. α 값은 철근과 콘크리트 강도, 기둥의 크기, 철근의 위치와 철근비 등에 따라 변화되는 값으로 본 연구에서는 변수로 작용하는 콘크리트 강도와 축력비의 영향에 대하여 α 값의 변화를 분석하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 고강도 평형파괴($\alpha=4.0$)를 제외한 α 값의 범위는 1.51~2.18를 나타내고 있으며 이는 현행설계에서 사용하고 있는 α 값 1.6이 보통 강도의 평형파괴시($\alpha=1.51$)를 제외하고는 안전측이라고 할 수 있다. 실험결과 각각 축력비에 따라 인장(0.2 P_0), 평형(0.35 P_0), 압축파괴(0.5 P_0)로 나타난 α 값은 인장과 압축파괴시 고강도 콘크리트에서 상대적으로 더 낮은 값을 보여주고 있으나 평형파괴시에는 이와 달리 더 높은 값을 나타내고 있다. 평형파괴부분에서는 보통강도일 경우 가장 낮은 값($\alpha=1.51$), 고강도일 경우에는 가장 높은 값($\alpha=4.0$)으로 분석되었다.

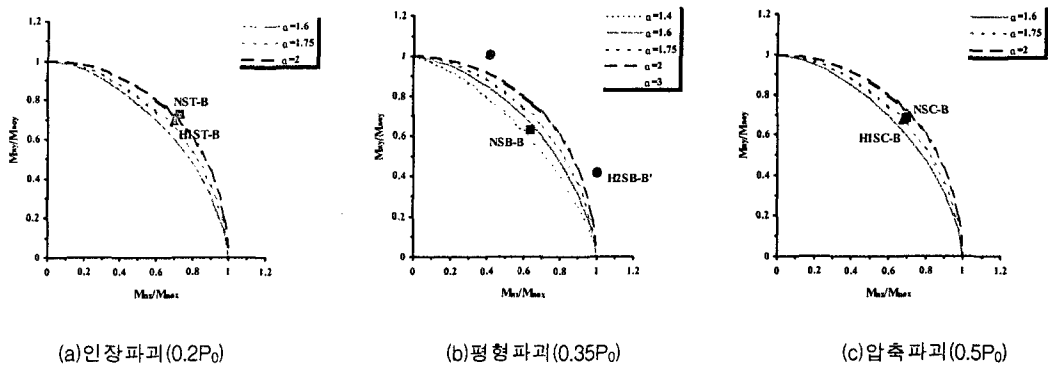


그림 7 무차원화한 등하중곡선

4. 결론

콘크리트강도와 축력비, 편심각의 변화에 따른 축력과 이축힘을 받는 고강도 콘크리트 정사각형 기둥에 대한 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 변형률 적합조건에서 사용되어지고 있는 콘크리트의 극한변형률 값인 0.003에 대한 가정이 이축힘을 받는 기둥설계시에는 부적절하며 콘크리트 압축면의 형태에 따른 실험적 연구가 수행되어야 할 것이다.
- (2) 등가직사각형 응력블록에 대한 사용이 고강도 콘크리트에서는 기둥의 내력을 과소평가하고 있는 경향을 보여주고 있으므로 합리적인 기둥설계를 위하여 고강도 콘크리트 사용에 따른 수정이 필요

요하다고 판단된다.

- (3) 현행설계에서 사용되는 α 값(1.6)은 대체적으로 안전측인 것으로 나타나 고강도 콘크리트에서도 이 값은 적절하다고 사료된다. 그러나 고강도 콘크리트에서 분석된 α 값은 보통강도에 비해 큰 차이를 나타내고 있지는 않으나 상대적으로 더 낮은 값을 보여주기 때문에 안전율에 대한 고려가 되어야 할 것이며 평형과괴부분의 α 값에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한양대학교 초대형구조시스템 연구센터의 세심한 지원으로 진행된 것으로 본 연구에 도움을 주신 모든 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99)," ACI Committee 318, American Concrete Institute, 1999.
2. H. Rusch, "Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete," ACI Journal, Proceedings, V.57, No.1, July.1960, pp.1~28.
3. Boris Bresler, "Design Criteria for Reinforced Columns under Axial Load and Biaxial Bending," ACI Journal, Proceedings, V.57, No.5, Nov.1960, pp.481~490.
4. John L. Meek, "Ultimate Strength of Columns with Biaxially Eccentric Loads," ACI Journal, Proceedings, V.60, No.8, Aug.1963, pp.1053~1064.
5. Richard W. Furlong, "Concrete Columns under Biaxially Eccentric Thrust," ACI Journal, Proceedings, V.76, No.10, Oct.1979, pp.1093~1118.
6. Chen-Tzu Thomas Hsu, "Reinforced Concrete Members Subject to Combined Biaxial Bending and Tension," ACI Journal, Proceedings, V.83, No.1, Jan-Feb.1986, pp.137~144.
7. Cheng-Tzu Thomas Hsu, "Analysis and Design of Square and Rectangular Columns by Equation of Failure Surface," ACI Structural Journal, 85, Mar-April.1988, pp.167~179.
8. 소윤희, 김선영, 이수곤, "2축 휨을 받는 철근콘크리트 기둥의 내하력에 관한 연구," 대한 건축학회 학술발표 논문집, 1998.4, 제18권 제1호, pp.565~570.
9. 김진원, 강석봉, "2축 휨모멘트와 축하중을 받는 정방형 RC부재의 파괴면을 위한 매개변수," 대한 건축학회 학술발표 논문집, 1999.10, 제19권 제2호, pp.266~271.