

편심을 받는 고강도 콘크리트 기둥의 축력-모멘트 강도에 관한 실험 및 해석적 연구

An Experimental and Analytical Study on Axial Force-Moment Capacity of High-Strength Concrete Column under Eccentric Loads

최창익*

Choi, Chang-Ink

손혁수*

Son, Hyeok-Soo

이재훈**

Lee, Jae-Hoon

Abstract

High strength concrete is a more effective material for columns subject to axial force and moment than for other structural elements. The purpose of this study is to review strength calculation methods for high strength concrete columns by comparison of analytical values and experimental results. The variables of column test under eccentric loading were concrete compressive strength, longitudinal steel ratio, and eccentricity of load. The tied column sections of 120×120 mm and 210×120 mm were tested and the eccentricity of load varied in the range from 0.16 times to 0.54 times the column depth. The analytical results using the stress-strain relationship as well as the ACI's rectangular block, Zia's modified block, and the trapezoidal block are compared with experimentally obtained data, and discussed in this paper.

1. 서 론

고강도의 콘크리트를 구조물에 시공시 축력이 모멘트에 비하여 상대적으로 낮은 경우에는 고강도의 효과가 크지 않지만, 축력이 모멘트에 비하여 상대적으로 높은 경우에는 효과가 크므로 고강도 콘크리트는 보에 적용하는 것보다 상대적으로 휨모멘트보다 축력을 많이 받는 기둥에 적용하는 것이 역학적으로 유리하고 합리적이라고 알려지고 있다. 그러나 고강도 콘크리트기둥에 관한 실험은 보통강도 기

* 정희원, 영남대학교 토목공학과 석사과정

** 정희원, 영남대학교 토목공학과 조교수

등의 실험과 비교할 때 양적으로 미비한 실정이다. 특히 실무현장에서의 고강도의 콘크리트를 시공하는 경우가 많아지고 있는 현실로 볼 때 고강도의 압축강도를 가지고 편심하중에 의한 휨모멘트와 축력이 작용하는 기둥에 대한 실험 및 해석적인 연구가 요구되고 있다. 기둥강도 해석시 콘크리트의 압축응력-변형도 곡선의 형태 및 등가응력 분포는 기둥의 강도 해석시 매우 중요한 변수로 작용한다. 콘크리트의 압축강도가 커지게 되면 응력-변형도 곡선의 형태등 재료적 성질의 차이로 인하여 구조물의 구조적 거동과 파괴형태가 보통강도 콘크리트를 사용한 경우와 달라질 수 있다. 따라서 기둥단면 강도와 거동의 실험적 연구결과를 기초로 하여 기존의 해석 및 설계방법을 검증하고 고강도 콘크리트 기둥부재의 설계시 현 시방서⁽¹⁾와 ACI에서 채택하고 있는 직사각형 응력분포를 사용한 해석결과 뿐만 아니라 응력-변형도 곡선(그림 2)을 이용한 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 고강도 콘크리트 기둥에 대한 적용성을 판단할 필요가 있다.

2. 연구 목적

본 연구에서는 고강도 콘크리트의 취성적인 특성과 실제부재와 실린더의 강도차이를 고려하여 Collins⁽³⁾ 등이 제안한 응력-변형도 관계(식1)로부터 고강도 콘크리트 기둥의 축력-모멘트 상관관계를 파악하고, ACI 318 Code⁽²⁾의 등가직사각형 응력블럭과 ACI 363^(5,6)의 사다리꼴 응력블럭, Paul Zia의 수정된 직사각형 응력블럭⁽⁷⁾을 사용하여 강도해석을 수행한다. 수행된 해석결과와 실험결과와의 비교 분석을 통해 고강도 콘크리트의 응력-변형도 관계를 이용한 축력-모멘트 강도 해석의 적합성을 판단하고 ACI 318 Code의 등가직사각형 응력블럭의 안전성을 검증한다.

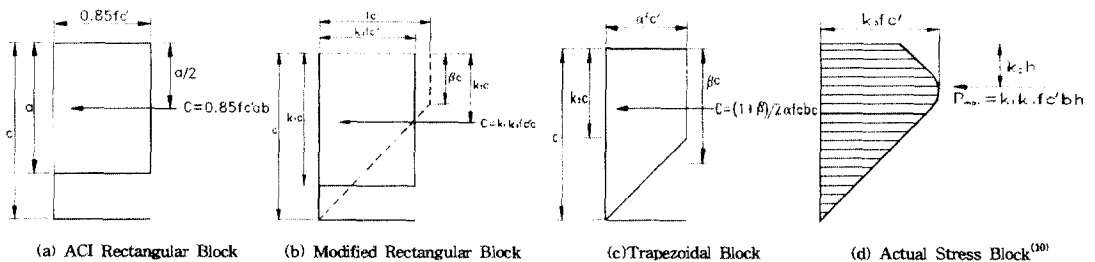


그림 1 Compressive stress block

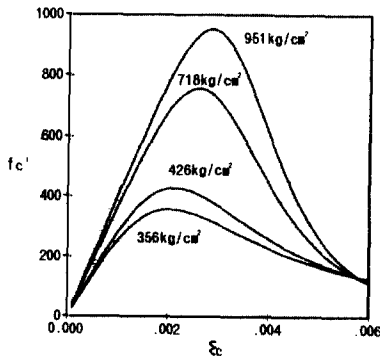


그림 2 Stress-Strain Curve⁽³⁾

$$f_c = k_3 f'_c \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \cdot \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c}\right)^n} \text{ kg/cm}^2, \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} < k = 1, \quad \frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} > 1 \text{ 일 때 } k > 1$$

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{173}, \quad k = 0.67 + \frac{f'_c}{632}$$

$$\epsilon'_c = \frac{f'_c}{E_c} \cdot \frac{n}{n-1}, \quad k_3 = 0.6 + \frac{102}{f'_c} \quad \text{단 } k_3 \leq 0.85$$

$$E_c = 10600 \sqrt{f'_c} + 70400 \text{ kg/cm}^2$$

3. 실험 시편 제작 및 재하실험

3.1 실험변수

표 1 Details of test columns/Test variables

시편 번호	압축강도 (kg/cm ²)	f _y (kg/cm ²)	단 면(B×H) (mm×mm)	A _{st} (cm ²)	철근비(ρ)	총길이(L) (mm)	세장비 (L/r)	편심(e) (mm)
LS-1	426	3250	210×120	2.85	0.0113	660	19.1	20
LS-2								45
LS-3								65
LM-1						1380	60.8	20
LM-2								45
LM-3								65
LL-1	356	3250	120×120	7.94	0.0198	2100	60.8	20
LL-2								45
LL-3								65
HS-1	718	3550	120×120	4-D10	0.0551	660	19.1	20
HS-2								45
HS-3								65
HM-1						1380	60.8	20
HM-2								45
HM-3								65
HL-1	2100	60.8	20					
HL-2			45					
HL-3			65					
HS-1A	951	4052	120×120	7.94	0.0198	660	19.1	20
HS-3A								65
HM-1A								1380
HM-3A						65		
HL-1A						2100	60.8	
HL-3A								65
VHS-1	951	3471	120×120	7.94	0.0551			660
VHS-2						45		
VHM-1						1380	39.9	
VHM-2								45
VHS-1A								660
VHS-2A						45		
VHM-1A	1380	39.9	20					
VHM-2A			45					

실험의 주요변수로는 표 1에 나타난 바와 같이 콘크리트 압축강도, 세장비, 철근량, 편심등이며 정사각형과 직사각형 단면을 가진 총32개의 시편을 제작하였다.

3.2 재료

기둥 시편제작에 사용한 골재는 조립율이 2.95, 비중 2.56인 잔골재를 사용하였고, 최대치수가 13mm, 비중이 2.68인 굵은 골재를 사용하였다. 사용된 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트(KS L5201) 이고, 혼화제로는 액상 실리카흄, 감수제(Water Reducer)로는 Mighty-150을 사용하였다.

철근은 KS D 3504에 규정된 이형철근을 사용하였고, D10과 D16철근은 주철근용으로 D6은 띠철근용으로 사용하였다. 철근의 인장시험에 의한 항복강도는 D10에서 3250 kg/cm² 와 4052 kg/cm², D16에서는 3550 kg/cm² 와 3471 kg/cm² 를 나타내었고, 각각의 콘크리트강도에 따른 재료의 배합은 아래 표 2와 같다.

표 2 Concrete Mix Proportion(1m³)

목표강도 (kg/cm ²)	시멘트 (kg)	물 (kg)	잔골재 (kg)	굵은골재 (kg)	감수제 (%)	실리카흄 (%)
400	400	160	773.4	109	0	0
700	520	172	634.6	113	2.0	10
900	700	151	635	181	1.86	10

3.3 재하 및 측정

양단 힌지인 재하장치(그림 3)를 사용하였으며, 변형률 측정을 위해 철근과 콘크리트에 Strain Gage를 부착하였고, 횡방향 처짐을 측정하기 위해 부재길이의 중앙점과 상하로 각각 2개씩 LDVT를 설치하였다. 하중재하는 Stroke Control 방식으로 하였다.

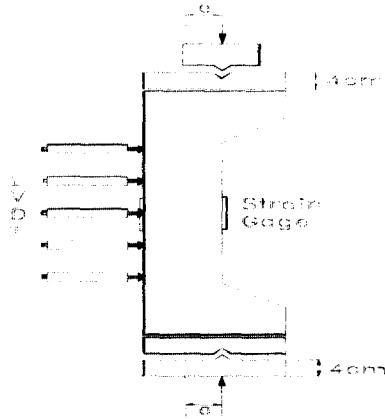


그림 3 Specimen Installation

4. 기둥단면의 축력-모멘트 강도의 비교 분석 및 결론

본 연구는 고강도 콘크리트기둥 부재의 설계시 보다 합리적인 해석방법을 제시하고 자 콘크리트 압축강도 356, 426, 718, 951kg/cm²의 철근콘크리트 기둥에 대한 실험을 토대로 고강도 콘크리트기둥 부재의 역학적 거동에 관한 해석을 수행하였다. 기존의 기둥강도 해석시 제안된 응력블럭들과 Collins⁽⁵⁾등이 제안한 Stress-strain curve를 이용하여 기둥의 축력-모멘트 강도해석을 수행하고 실험결과와 비교하였다. 여기서 그림 4는 본 실험에 의한 실험치를 축력-모멘트 강도 해석치와 비교한 결과이고 그림 5은 김진근, 양주경⁽⁶⁾의 실험치를 본 연구에서 강도해석한 결과이다. 실험을 통하여 각 시편의 최대하중과 최대하중 재하시의 처짐량을 측정하였으며 $P-\Delta$ 영향을 고려한 파괴시의 축력과 모멘트를 계산하였다. 그림 4는 각 실험 시편의 파괴점을 P-M 곡선 상에 표시한 것으로 직사각형 응력분포, 사다리꼴 응력분포, Zia의 수정된 직사각형 응력분포, 응력-변형도를 사용한 해석결과와 비교하였다. 그림 4에서 나타난 바와 같이 응력블럭을 이용한 해석결과와 응력-변형도 관계로부터 얻은 해석결과는 인장지배구역에서 콘크리트의 강도와 철근비에 관계없이 비교적 단면강도를 정확히 예측하였고, 그림 5의 인장지배구역에서는 실험치에 비해 축력-모멘트 강도를 과대평가 하는 경향을 보였다. 압축강도가 각각 356 kg/cm², 426 kg/cm²인 그림 4 (a)와 그림 4 (b)에서 보이는 바와 같이 응력-변형도 곡선의 강도수정 계수(k_s)를 1.0 과 0.85로 강도해석한 결과와 직사각형 응력블럭을 사용한 해석치는 압축지배영역에서 안전측인 단면강도를 보이고 있다. 압축강도가 260kg/cm²인 그림 5 (a)와 그림 5 (b)에서 보이는 바와 같이 압축지배구역에서 직사각형 응력블럭과 수정된 직사각형 응력블럭의 해석치는 단면강도를 비교적 정확히 예측하고 있다. 그림 4 (d)의 압축지배구역에서 직사각형 응력블럭은 대체로 안전측인 경향을 보이고 있다. 그림 5 (c)는 강도수정 계수(k_s)가 1.0인 해석결과가 단면강도를 비교적 정확히 예측하고 있음을 보여준다.

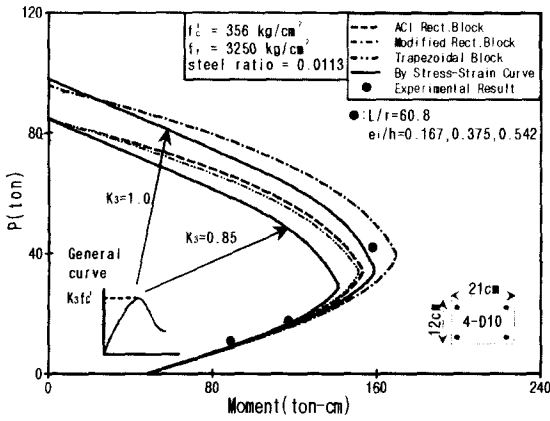


그림 4(a)

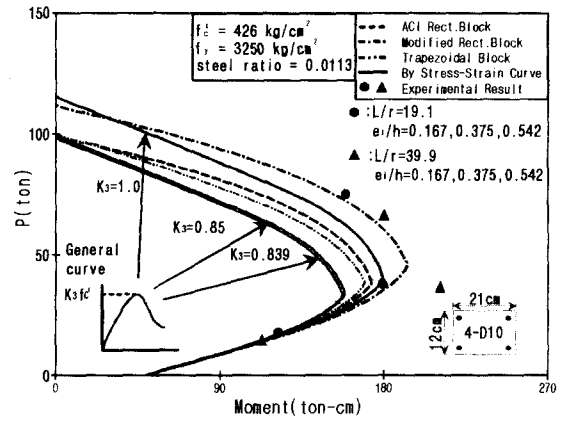


그림 4(b)

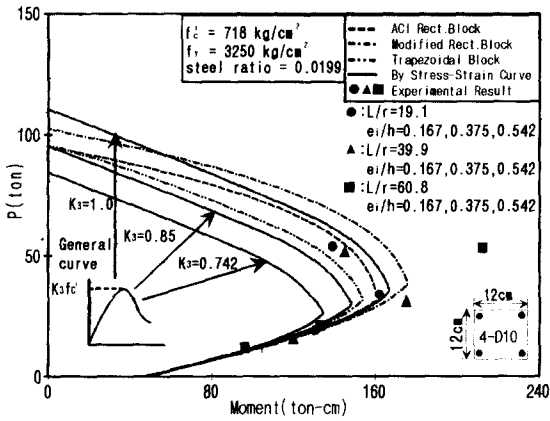


그림 4(c)

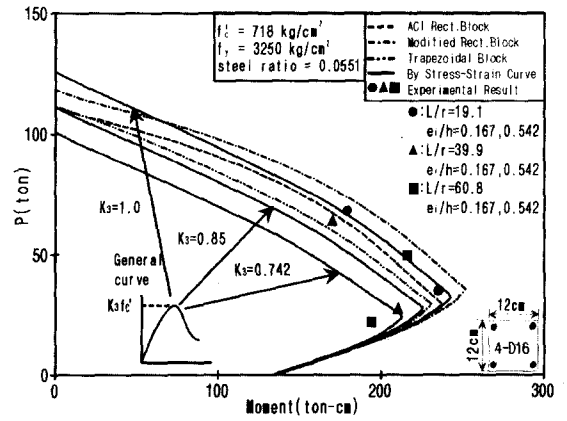


그림 4(d)

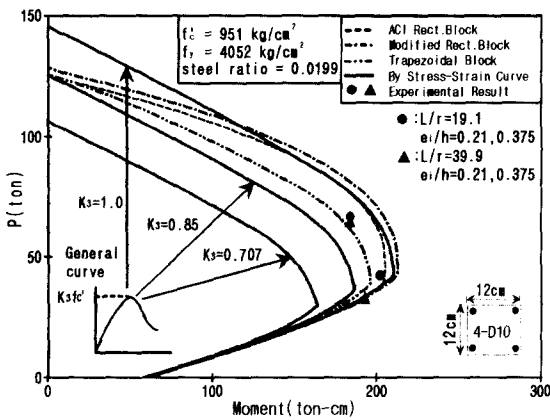


그림 4(e)

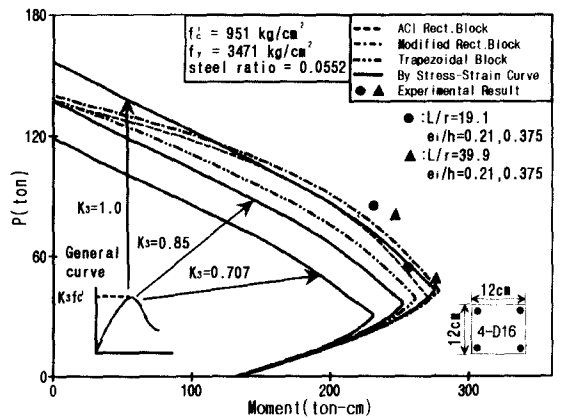


그림 4(f)

그림 4 Axial Force-Moment Capacities(영남대 실험결과와의 적용)

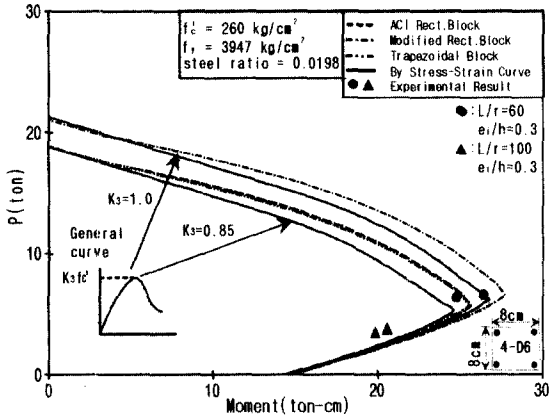


그림 5(a)

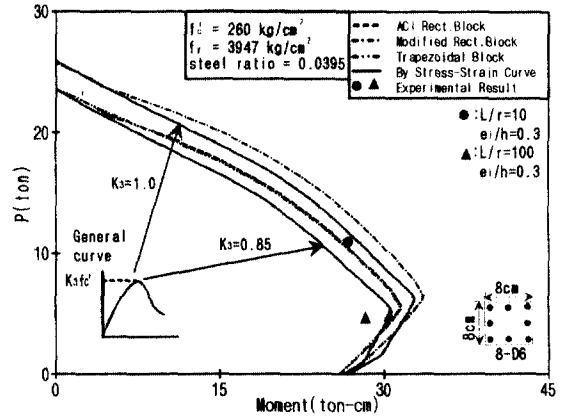


그림 5(b)

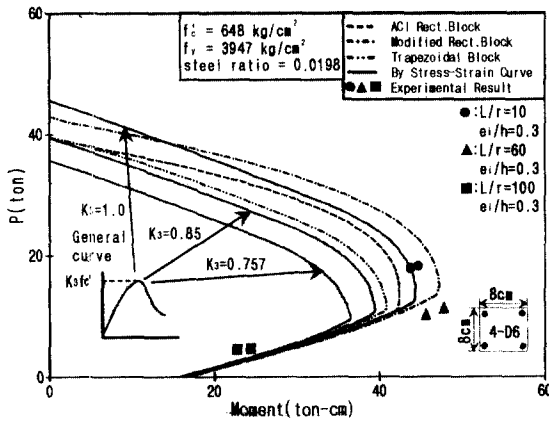


그림 5(c)

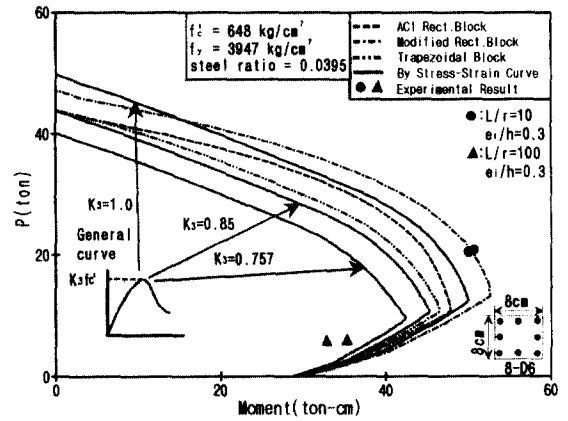


그림 5(d)

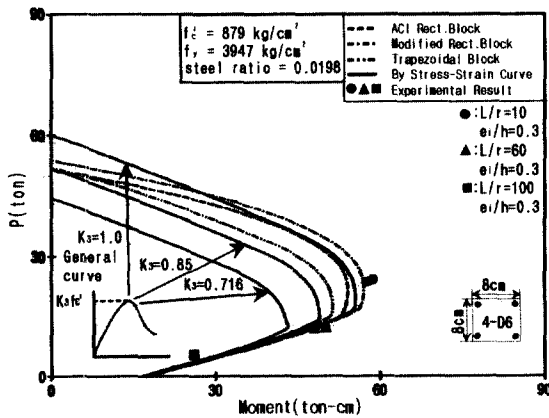


그림 5(e)

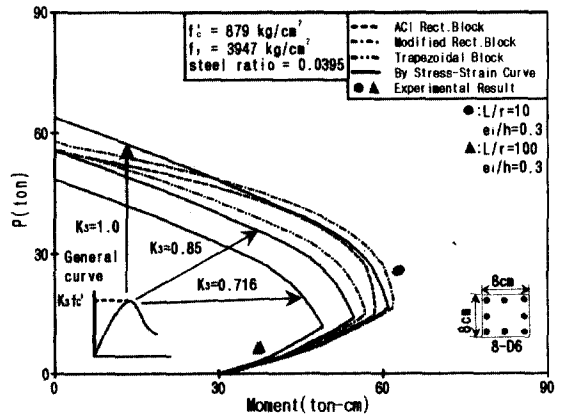


그림 5(f)

그림 5 Axial Force-Moment Capacities(한국과학기술원 실험결과의 적용)

그림 4.(e)에서 알 수 있는 바와 같이 사다리꼴 응력블럭은 비교적 단면강도를 잘 예측하나 직사각형 응력블럭은 비안전측인 결과를 보였다. 동일한 콘크리트 강도를 가지고 철근비가 5% 그림 4.(f)인 경우 직사각형 응력블럭은 철근비가 약 2% 그림 4.(e)인 경우에 비해 안전측인 단면강도를 보였다. 이상의 실험치와 축력-모멘트 강도 해석치를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

본 실험과 비교된 김진근, 양주경의 실험치는 고강도의 콘크리트에서 직사각형 응력블럭과 수정된 직사각형 응력블럭이 안전측인 단면강도를 보인 반면 본 실험치를 강도 해석한 결과 직사각형 응력블럭과 수정된 직사각형 응력블럭은 보통강도 콘크리트에서 비교적 안전측인 단면강도를 보이지만 콘크리트 강도가 커질수록 비안전측인 단면강도를 보인다. 그러므로 파괴편심이 평형편심보다 작은 압축 지배영역의 파괴인 경우 압축강도와 철근비에 관계없이 응력블럭과 응력-변형도 관계를 이용한 해석 결과들간의 편차가 크게 나타나는 경향을 보이고 또한 실험 값에 대한 오차도 크게 나타났다. 이러한 경향으로 미루어 볼 때 현 시방서⁽¹⁾에서 제시한 직사각형 응력블럭을 고강도 콘크리트 기둥설계시 적용한다면 비안전측일 가능성이 있다고 판단된다. 한편 강도수정 계수 k_s 가 0.85인 응력-변형도 관계를 고강도 철근콘크리트 기둥의 축력-모멘트강도 계산시 적용한다면 콘크리트강도의 변화나 철근비의 변화에 무관하게 기둥단면 강도를 비교적 안전하게 평가해 줌을 알 수 있다. 그러나 k_s 를 변수로 하는 응력-변형도 곡선을 이용한 해석결과나 응력블럭을 이용한 해석결과가 두가지 실험에 대하여 일치하는 경향을 보이고 있지는 않으므로, 고강도 철근콘크리트 기둥설계시 경제적이고 합리적인 설계기준을 제시하기 위해서는 많은 실험의 수행과 함께 해석결과의 비교분석이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 건설부, "콘크리트 표준시방서", 1996.
2. ACI Committee 318., "Building Code Requirementary." American Concrete Institute. Detroit, 1989.
3. Collins, M.P., Mitchell, D., and MacGregor, J.G., "Structural Design Considerations for High-Strength Concrete." Concrete International, ACI, Vol. 15. No. 5. May 1993. pp. 27-34
4. CEB-FIP, "High-Strength Concrete." State of Art Report, Bulletin No. 197. London, 1990.
5. ACI Committee 363, "State-of-the Art Report on High-Strength Concrete," American Concrete Institute. Detroit, 1984.
6. Garcia, D.T. and Nilson, A.H., "A comparative Study of Eccentrically Loaded High-Strength Concrete Column." Research Report No. 90-2, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, 1990.
7. Zia, P., "Review of ACI Code for design with High-Strength Concrete," Concrete International, ACI, Vol. 5. No. 8, August 1983, pp. 16-20.
8. 현대건설, "高强度콘크리트의 實用化를 위한 材料/構造實驗 및 解析技法研究," 연구 보고서 91MTR01, 현대건설 기술연구소, 1995. 11.
9. 양주경, "철근콘크리트 기둥의 2계 거동에 관한 연구," 한국과학기술원 박사학위 논문, 1993, 8.
10. Kaar, P.H., Hanson, N.W., and Capell, H.T., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete," Research and Development Bulletin RD051.01D, Portland Cement Association, 1977.