

편심을 받는 고강도콘크리트 장주의 2차모멘트에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Secondary Moment of High-Strength RC Slender Columns under Eccentric Loads

박동규* 배성용** 이재훈***
Park, Dong-Kyu Bae, Sung-Yong Lee, Jae-Hoon

ABSTRACT

This paper is a part of a research plan aimed at the verification of basic design rules of high-strength concrete columns. A total of 19 slender column specimens were tested to measure secondary moment and stiffness of eccentrically loaded reinforced concrete tied columns. Main variables included in this test program were concrete compressive strength, steel amount, eccentricity, and slenderness ratio. The concrete compressive strength varied from 356 kg/cm² to 951 kg/cm², the longitudinal steel ratios were between 1.13 % and 5.51 %, and slenderness ratios were 40 and 61. Calculated moment magnification factors and column stiffness based on design codes are higher than the test results for high axial load under small eccentricity, for higher slenderness ratio, for lower longitudinal steel ratio, and for high-strength concrete. The moment magnification method of the current design codes may provide a very conservative design for high-strength concrete slender column

1. 서 론

근래에 들어 고강도 콘크리트의 실용화에 대한 노력이 활발히 진행되어 왔으나, 고강도 콘크리트 구조물이 실무적으로 범용성을 확보하려면 재료적 특성과 더불어 구조적 거동에 대한 다양한 주제의 연구결과가 축적되어야 한다. 기둥에 고강도 콘크리트를 사용하는 경우, 휨만을 받는 다른 구조요소에 비하여 설계단면을 축소할 수 있는 효과가 가장 클 것이다. 그러나, 기둥단면을 축소하게 되면 일반적으로 기둥의 세장비가 증가하여 기하비선형성에 의한 기둥의 2차 모멘트가 증가하게 될 것으로 예상된다. 따라서, 콘크리트 강도에 비례하는 단면축소효과를 얻지 못할 가능성이 클 것으로 예상되므로, 실험적인 연구를 통하여 고강도 콘크리트 장주의 거동을 파악하고 시방서에 의한 장주설계방법의 안전성 및 경제성을 분석할 필요가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 356~951 kg/cm²의 콘크리트 압축강도를 갖고, 세장비, 종방향철근비, 재하편심을 변수로 하는 총 19개의 기둥시편에 대한 실험을 수행하여 보통강도 및 고강도 콘크리트 장주의 2차 모멘트 및

* 정회원, 요꼬하마대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 영남대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

기둥강성을 측정하고, 실험결과를 토대로 하여 시방서가 제안하고 있는 모멘트확대계수법에 의한 장주설계과정의 안전성 및 경제성을 비교검토하고자 한다.

2. 장주의 2차 모멘트 및 모멘트확대계수법

2.1 장주의 2차 모멘트

세장비가 큰 장주의 해석 및 설계는 P-Δ 영향 (P-Δ effect)을 고려하여야 한다. Fig. 1 (a)와 같이 편심하중이 작용하는 경우, Fig. 1 (b)와 같은 횡방향변위가 발생하게 된다. 이 때, 횡방향변위 Δ와 축력 P에 의한 2차 모멘트(secondary moment)가 작용하게 되어 기둥의 모멘트분포는 Fig. 1 (c)와 같게 된다. 따라서, 기둥의 총모멘트 M_c 는 식 (1)과 같이 1차 모멘트(primary moment) $P \cdot e$ 와 2차 모멘트 $P \cdot \Delta$ 의 합이며, 모멘트확대계수 δ 를 이용하여 1차 모멘트 $M_o (= P \cdot e)$ 와의 비율로 표현할 수 있다. 2차 모멘트가 무시할 수 있는 정도로 작은 기둥을 단주(short column)라고 하며, 무시할 수 없는 정도로 큰 기둥을 장주(slender column)로 분류한다.

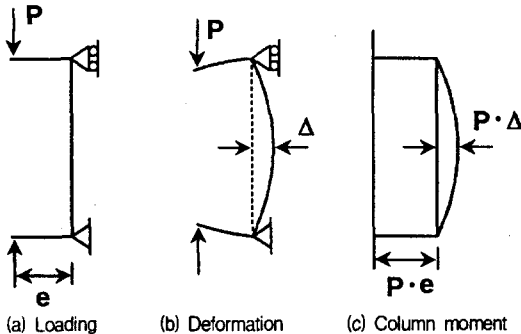


Fig. 1 Primary and Secondary moment for slender column

$$M_c = Pe + P\Delta = P(e + \Delta) = \delta M_o \quad (1)$$

2.2 모멘트확대계수법

장주의 2차 모멘트를 산정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 설계시방서^(1,2)는 재료의 비선형성을 고려한 기하비선형해석 등의 정밀해석을 수행하지 않는 경우 모멘트확대계수법을 추천하고 있으며, 장주설계의 실무에서 주로 사용되고 있다. 양단의 횡방향변위가 방지된 기둥의 경우, 기둥의 횡방향변위를 sine 곡선으로 가정한 이론적인 모멘트확대계수는 식 (2)로 유도되며, 최대모멘트 M_m 과 최대탄성처짐 Δ_o 인 일반적인 경우 C_m 은 식 (3)으로 표현된다. 기둥양단에만 M_o 의 모멘트가 작용하는 경우, C_m 은 식 (5)로 표현된다⁽³⁾.

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_c}} \quad (2) \quad C_m = 1 + \left(\frac{\pi^2 EI \Delta_o}{M_m L^2} - 1 \right) \frac{P_u}{P_c} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (4) \quad C_m = 1 + 1.23 \frac{P_u}{P_c} \quad (5)$$

설계시방서^(1,2)에서 추천하는 모멘트확대계수법은 기둥의 강성감소계수(stiffness reduction factor) ϕ_s 를 적용하고 있으며, 기둥양단 모멘트의 크기가 같은 경우 C_m 은 1이 되어 식 (6)과 같이 표현된다. 식 (4)의 P_c 를 계산할 때, 기둥의 강성은 식 (8)과 (9) 중 큰 값을 사용한다. 기둥강성을 계산할 때, ACI 363 위원회⁽⁴⁾는 콘크리트의 탄성계수로 ACI 318⁽²⁾의 식 (9)와 Carrasquillo⁽⁵⁾의 식 (10) 중 큰 값을 사용하며, 콘크리트표준시방서⁽¹⁾는 압축강도가 300 kg/cm^2 이하의 경우 식(9)를, 300 kg/cm^2 이상의 경우 식(10)을 사용하고 있다.

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{\phi_s P_c}} = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{\phi_s P_c}} \quad (6) \quad EI_{code,1} = 0.2 E_c I_g + E_s I_{se} \quad (7)$$

$$EI_{code,2} = 0.4 E_c I_g \quad (8) \quad E_c = 15,000 \sqrt{f'_c} \quad (9)$$

$$E_c = 10,500 \sqrt{f'_c} + 70,000 \quad (10)$$

3. 실험시편의 제작 및 재하실험

콘크리트의 압축강도, 철근량, 기둥의 길이 및 세장비, 재하시의 편심을 주요변수로 하여, 정사각형과 직사각형 단면을 가진 총 32개의 실험시편을 제작하였으며, 본 연구에서는 Table 1에 보이는 19개의 장주를 대상으로 하였다. 시편번호의 두 문자 중 앞의 문자는 콘크리트 강도를 나타내는데 L은 목표 압축강도 400 kg/cm², H는 700 kg/cm², V는 900 kg/cm²를 의미한다. 뒤의 문자에서 M은 중간길이의 장주(길이 138 cm, 세장비 40), L은 장주(길이 210 cm, 세장비 61)를 의미한다. 문자 뒤의 숫자는 재하시의 편심을 나타내는데, 1은 단주가 압축지배구역에서 파괴될 편심, 2는 평형편심에 가까운 편심, 3은 인장지배구역에서 파괴될 편심을 의미하고, 숫자 뒤에 추가된 문자 A는 철근비가 약 5.51 %로 상대적으로 큰 시편을 의미한다. 시편의 재하실험을 수행하기 전에 주철근 및 띠철근에 대한 철근인장 시험을 수행하여 항복응력을 측정하였다. 변형률의 측정을 위하여 주철근에는 시편제작시에 strain gauge를 부착하였고, 재하실험 직전에 시편의 압축연단, 인장연단, 그리고 측면의 콘크리트표면에 strain gauge를 부착하였으며 횡방향 처짐을 측정하기 위하여 L.V.D.T를 설치하였다. 시편의 재하실험은 양단 힌지인 재하 장치를 사용하였다. 실험시편의 제작, 재하, 측정 및 측정결과에 관한 자세한 사항은 참고문헌 6에 나타나 있다.

Table 1 Details of specimens

Specimens	Slender-ratio	f' _c (kg/cm ²)	b×h (mm)	A _s (cm ²)	Steel Ratio (ρ _g)	e (mm)	
LM-1	40	426	210 × 120	2.85	0.0113	20	
LM-2						45	
LM-3						65	
LL-1	61	356	120		0.0198	20	
LL-3						65	
HM-1						20	
HM-2	40	718	120 × 120	4-D10	0.0198	45	
HM-3						65	
HL-1						20	
HL-2	61			718	120 × 120	0.0551	45
HL-3							65
HM-1A							20
HM-3A	40	718	120 × 120	4-D16	0.0551	65	
HL-1A						20	
HL-3A						65	
VM-1	40	951	120 × 120	2.85	0.0198	20	
VM-2						45	
VM-1A						20	
VM-2A	61	951	120 × 120	4-D16	0.0551	45	

4. 실험결과 및 비교분석

4.1 기둥의 2차 모멘트 및 모멘트확대계수의 변화

모멘트확대계수는 기둥의 총모멘트를 1차 모멘트로 나눈 값이므로, δ-1의 값은 2차 모멘트를 무차원화한 값이라고 할 수 있다. 식 (1)을 변형하면 식 (11)과 같이 모멘트확대계수가 축력과 횡방향변위로 표현되어, 재하실험 중 측정된 축력과 기둥 중앙의 변위로 각 시편에 대한 모멘트확대계수의 변화를 얻을 수 있다.

콘크리트표준시방서⁽¹⁾에서는 모멘트확대계수를 계산할 때 기둥의 강성감소계수 φ_s로 0.65를 적용한 식 (12)과 ACI 318⁽²⁾에서는 0.75를 적용한 식 (13)을 사용한다. 식 (14)는 φ_s를 적용하지 않은(φ_s = 1) 식이며, 식 (15)는 이론적인 C_m값을 적용한 식이다. 이와 같은 식들을 적용하여 보통강도 장주와 고강도 장주에 대한 모멘트확대계수를 계산하여 Fig. 2와 3에 하중의 증가에 따른 변화를 측정치와 함께 나타내었는데, 보통강도 장주에 비하여 고강도 장주의 경우에 모멘트확대계수가 과대평가되는 경향을 보이고 있다.

$$\delta = \frac{P(e + \Delta)}{P_e} = \frac{e + \Delta}{e} \quad (11)$$

$$\delta_{KSC} = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{0.65 P_c}} \quad (12)$$

$$\delta_{ACI} = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{0.75 P_c}} \quad (13)$$

$$\delta_{SR1} = \frac{1}{1 - \frac{P_u}{P_c}} \quad (14)$$

$$\delta_{THR} = \frac{1 + 1.23 (P_u / P_c)}{1 - \frac{P_u}{P_c}} \quad (15)$$

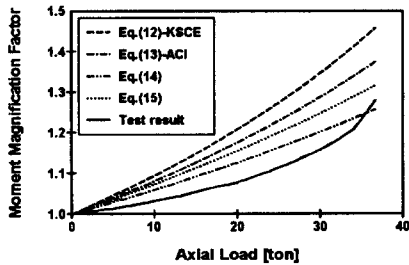


Fig. 2 Experimental and analytical δ for LM-2

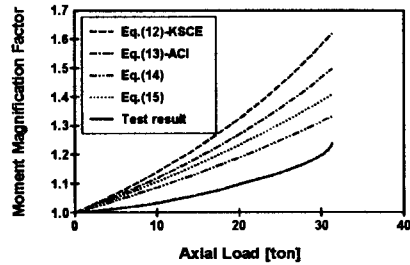


Fig. 3 Experimental and analytical δ for HM-2

4.2 모멘트확대계수

장주의 설계에서는 극한하중에서의 모멘트확대계수를 산정하여 파괴시의 안전성을 검토한다. 식 (11)에서 횡방향변위 Δ 에, 파괴시의 최대하중에 대한 변위추정값 Δ_r 를 대입하면 식 (16)과 같이 극한하중에서의 모멘트확대계수를 얻을 수 있다. 이 값은 Fig. 2와 3에 나타나 있는 모멘트확대계수 측정치의 최대값을 의미하는데, 식 (12) ~ (15)로 계산된 값과 함께 Table 2에 나타나 있으며, 시방서에 따라 계산된 모멘트확대계수와 실험값이 축력비율에 따라 Fig. 4 ~ 11에 비교되어 있다.

$$\delta_{test} = \frac{e + \Delta_f}{e} \quad (16)$$

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 시방서에 의하여 계산된 모멘트확대계수는 축력비율이 낮은 경우 실험결과와 유사하지만, 축력비율이 높을수록 과대평가되어 매우 큰 값을 제공한다. 세장비가 61인 경우에는 세장비가 40인 경우에 비하여 매우 큰 모멘트확대계수가 계산되어, 축력비율이 큰 경우에는 실험결과와 비교할 때 과도한 값을 보여준다. 또, 시방서의 모멘트확대계수는 철근비가 작고 콘크리트의 강도가 높을수록 과도하게 큰 값이 계산된다

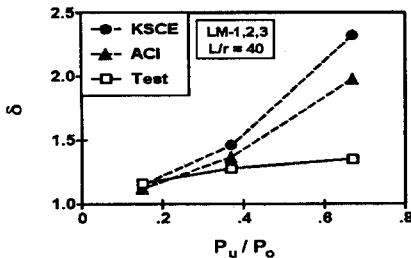


Fig. 4 Moment magnification factors for LM-series

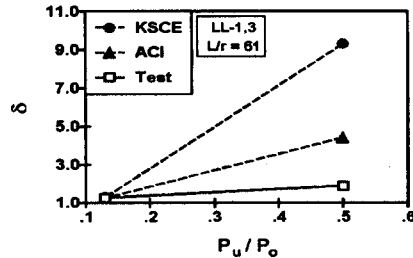


Fig. 5 Moment magnification factors for LL-series

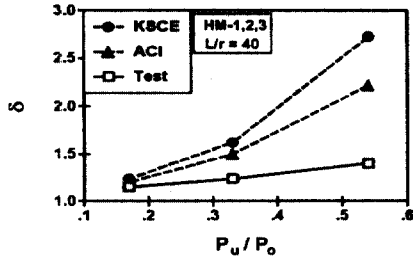


Fig. 6 Moment magnification factors for HM-series

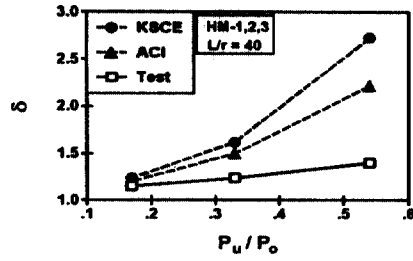


Fig. 7 Moment magnification factors for HL-series

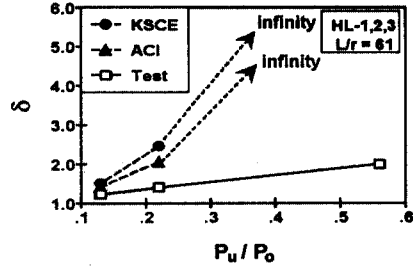


Fig. 8 Moment magnification factors for HMA-series

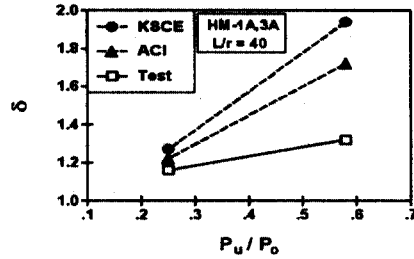


Fig. 9 Moment magnification factors for HLA-series

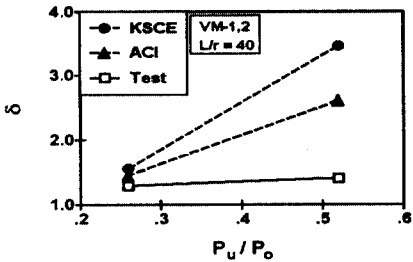


Fig. 10 Moment magnification factors for VM-series

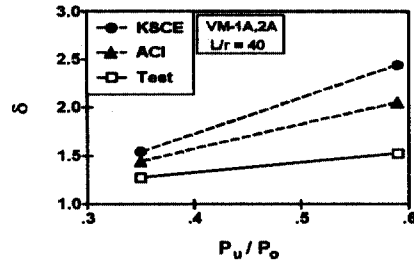


Fig. 11 Moment magnification factors for VMA-series

4.3 기동 강성

전술한 바와 같이 시방서의 모멘트확대계수는 실험결과와 비교하여 경우에 따라서 매우 과도한 값이 계산되는데, 기동강성의 산정방법이 가장 큰 영향을 준다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 극한하중에서의 최대휨방향변위의 측정값을 이용하여 식 (17)과 같은 sine 곡선으로 처짐을 가정하고 각 기동시편의 파괴시 평균강성을 계산하였다. 즉, 최대축력과 식 (17)에 의한 휨방향변위를 이용하여 2차 모멘트의 분포를 얻고, 1차 모멘트와 더한 총모멘트분포에 대한 처짐해석으로 기동중양의 처짐이 변위측정값 Δ_f 과 같도록 하는 기동강성 EI_{test} 를 식 (18)로 계산하였다.

$$v(x) = \Delta_f \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (17) \quad EI_{test} = \frac{P_u L^2 (\delta_{test} + 0.23)}{\pi^2 (\delta_{test} - 1)} \quad (18)$$

Table 3과 Fig. 12 ~ 15은 실측한 기동강성과 시방서의 기동강성을 보여주는데, 시방서의 기동강성식은 대체적으로 보통강도 기동보다 고강도 기동에 대하여 과소평가하는 경향을 보이며, 축력비율이 높을수록, 철근비가 낮을수록, 세장비가 클수록 기동강성을 낮게 산정하고 있음을 보이고 있다. 시방서의 기동강성식은 식 (19)와 (20)과 같은 형태로 표현되어 a_1 로는 0.2, a_2 로는 0.4를 사용하는데, 실측한 기동강성 값에 대한 a_1 과 a_2 의 값을 계산하여 Table 3에 나타내었다. a_1 에 대하여는 LM-3에 대하여 0.2보다 작으며, a_2 에 대하여는 LM-3와 LL-3에

대하여 0.4보다 작은 것 이외에는 시방서의 계수값보다 크다는 것을 알 수 있으나, α_1 과 α_2 의 값을 하나의 상수로 표현하기는 어려울 것으로 판단된다.

$$EI = \alpha_1 E_c I_g + E_s I_{se} = EI_{test} \quad (19)$$

$$EI = \alpha_2 E_c I_g = EI_{test} \quad (20)$$

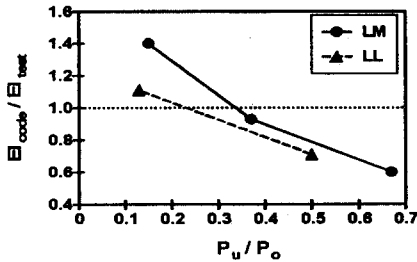


Fig. 12 Column stiffness for LM and LL-series

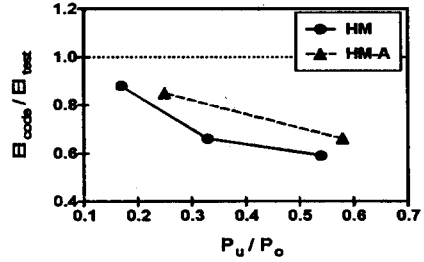


Fig. 13 Column stiffness for HM and HMA-series

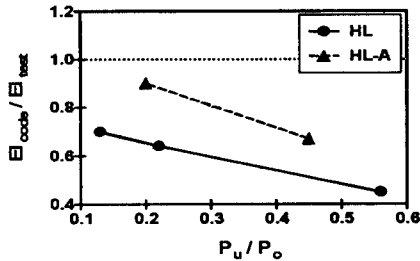


Fig. 14 Column stiffness for HL and HLA-series

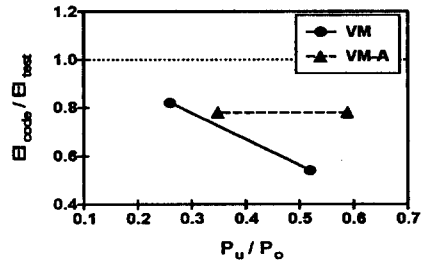


Fig. 15 Column stiffness for VM and VMA-series

5. 결론

편심하중을 받는 콘크리트 압축강도 356, 426, 718, 951 kg/cm²의 철근콘크리트 기둥실험을 수행하여 모멘트 확대계수와 기둥강성을 측정하고, 시방서에 따라 계산된 값과 비교하였다. 시방서에 의하여 계산된 모멘트확대계수는 전반적으로 실험값에 비하여 크며, 축력비율이 높을수록, 세장비가 클수록 과도평가되어 매우 큰 값을 제공한다. 또, 시방서의 모멘트확대계수는 철근비가 작고 콘크리트의 강도가 높을수록 과도하게 큰 값이 계산되는 경향을 보인다. 시방서의 기둥강성식은 대체적으로 보통강도 기둥보다 고강도 기둥에 대하여 과소평가하는 경향을 보이며, 축력비율이 높을수록, 철근비가 낮을수록, 세장비가 클수록 기둥강성이 실험값보다 낮게 산정되어 과도하게 안전측인 모멘트확대계수를 계산하게 된다. 기둥강성식을 분석한 결과, 현행 설계시방서와 같이 콘크리트 전 단면의 강성에 대한 비율 α_1 과 α_2 의 값을 하나의 상수로 표현한다면 일관성있는 정확도를 얻기가 어려울 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, "콘크리트표준시방서", 1996.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary," *American Concrete Institute*, Farmington Hills, 1995.
3. Wang, C. K. and Salmon, C. G., *Reinforced Concrete Design*, 6-th ed., Addison-Wesley, 1998.
4. ACI Committee 363, "State-of-The Art Report on High-Strength Concrete," ACI, Detroit, 1984.
5. Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads," *ACI Journal, Proceedings* V. 78, No. 3, May-June, 1981, pp. 171-178.