

인장지배영역에서의 철근콘크리트 기둥의 연성에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on Ductility of Reinforced Concrete Columns under Tension Controlled Region

손혁수* 김준범* 이재훈**
Son, Hyeok-Soo Kim, Jun-Beom Lee, Jae-Hoon

Abstract

Design strength of structural members could be determined by applying a strength reduction factor to nominal strength. At the beginning point of the transition region for the strength reduction factor, $P=0.1\sigma_{ck}A_g$, only sectional area and concrete strength are adopted as the variables of $P=0.1\sigma_{ck}A_g$. Therefore, $P=0.1\sigma_{ck}A_g$ is the empirically adopted which does not consider steel ratio, steel yielding stress, and steel arrangement. So, this research was performed the computer program for the analysis of axial force-moment-curvature relationship of reinforced concrete columns by sectional behaviour nonlinear analysis using a concrete compressive stress-strain curve, in order to investigate the ductility of reinforced concrete columns. As a result, ductility indices of axial force, $P=0.1\sigma_{ck}A_g$, represented the lack of consistency of the indices value for the various sections.

1. 서론

철근콘크리트 기둥의 파괴거동은 취성적인 압축파괴영역과 연성적인 인장파괴영역으로 구분할 수 있는데, 인장파괴영역에서는 강도감소계수^[1]의 적용시 축력이 비교적 작은 경우에 기둥의 연성을 고려하여 순수압축부재의 강도감소계수 값으로부터 휨부재의 강도감소계수값까지 증가시켜서 사용하고 있다. ACI 318^[2]과 콘크리트표준시방서^[3]에서는 강도감소계수 변화의 기준점으로 $0.1\sigma_{ck}A_g$ 의 축력을 택하고 있다. 그러나, 강도감소계수 변화구간의 기준 $P=0.1\sigma_{ck}A_g$ 는 부재의 단면적과 콘크리트 강도만을 변수로 취하고 있기 때문에 철근비, 철근의 항복응력, 철근의 배치형태 등과 같은 철근에 관한 변수를 무시한 경험적인 값이라고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 현시방서에서 규정하고 있는 강도감소계수 변화구간의 기준인 축력 $P=0.1\sigma_{ck}A_g$ 인 점에서의 연성지수 해석을 통하여 철근콘크리트 기둥의 강도감소계수 변화구간의 합리성 여부를 고찰하고자 한다.

* 정희원, 영남대학교 토목공학과 석사과정

** 정희원, 영남대학교 토목공학과 조교수

2. 철근콘크리트 기둥의 파괴거동 및 연성

철근콘크리트 구조물에서 연성은 구조물의 거동에 중요한 영향을 미치는데 연성의 중요성^[5]은 취성파괴의 방지, 모멘트 재분배, 지진에 대한 에너지 흡수와 발산 등으로 설명할 수 있다. 취성파괴의 방지는 구조물의 연성과 밀접한 관계가 있는데 철근콘크리트 구조물에서는 일반적으로 구조물의 연성파괴를 유도하게끔 설계되며, 이는 구조물의 급작스런 파괴(취성파괴)를 방지하기 위한 것이다. 부재의 연성이 충분한 경우 파괴가 임박하였다는 것을 미리 예측할 수 있으며, 또한 구조물 전체의 급작스런 파괴를 미연에 방지할 수 있다. 모멘트 재분배의 차원에서 살펴보면 정적부정정구조(statically indeterminate structures)의 설계에 사용되는 휨모멘트, 전단력, 축하중의 분배가능성은 부재단면의 연성에 좌우된다. 선형탄성해석으로 구해진 휨모멘트는 모멘트 재분배에 의한 모멘트와는 다르다. 모멘트 재분배를 위해서는 소성회전(plastic rotation)과 추가하중전달(additional load carrying)이 충분해야 하는데 이는 소성상태의 메카니즘이 발휘될 때 모멘트 재분배가 이루어짐을 의미한다. 모멘트 재분배의 효과로는 연속부재에서의 지점(부모멘트 구간)의 철근량을 줄일 수 있으며, peak부분에서의 모멘트를 감소시킬 수 있다. 또한, 지진에 대한 에너지 흡수와 발산에 있어서 내진설계시에 연성은 상당히 중요한 영향을 미치는데 연성이 충분할 때 에너지 흡수능력이 좋아 구조물의 지진에 의한 영향을 줄일 수 있다. 이는 현재의 내진설계 개념이 큰 지진하중이 작용할 때의 생존에 대한 후탄성변형(postelastic deformation)에 의한 에너지 흡수와 발산에 관계되기 때문이다.

이상과 같이 철근콘크리트 부재에서는 파괴거동 및 연성이 매우 중요한데, 철근콘크리트 기둥의 파괴거동은 파괴시의 축력과 모멘트의 비율에 따라 큰 차이를 보인다. 축력(P_u)이 평형파괴하중(P_b) 이상인 압축파괴영역($P_u > P_b$)에서는 인장축의 철근이 항복하기 전에 콘크리트의 급작스런 파괴가 일어나는 취성파괴의 양상을 나타내며, 축력(P_u)이 평형파괴하중(P_b) 이하인 인장파괴영역($P_u < P_b$)에서는 인장철근의 항복으로 부터 서서히 파괴가 일어나는 연성파괴의 양상을 나타낸다. 기둥에 비해 상대적으로 연성인 보는 축력(P_u)이 0인 기둥으로 볼 수 있으며, 연성이 크므로 시방서상에서 강도감소계수 ϕ 값이 크다. 반대로, 축력이 P_b 보다 큰 경우에는 취성이므로 강도감소계수 ϕ 값이 작다.

3. 강도감소계수의 적용에 관한 각 시방서 기준^{[2], [3]}

ACI code와 콘크리트표준시방서에서 규정하고 있는 강도감소계수 변화구간을 Fig. 1과 Table 1으로 나타내었다. Fig. 1에서 (1)은 순수압축부재의 강도감소계수를 적용하는 구간을 나타낸 것이며, (2)는 순수압축부재의 강도감소계수에서 휨부재의 강도감소계수까지 직선보간하여 증가시켜 사용하는 구간을 나타낸 것이다.

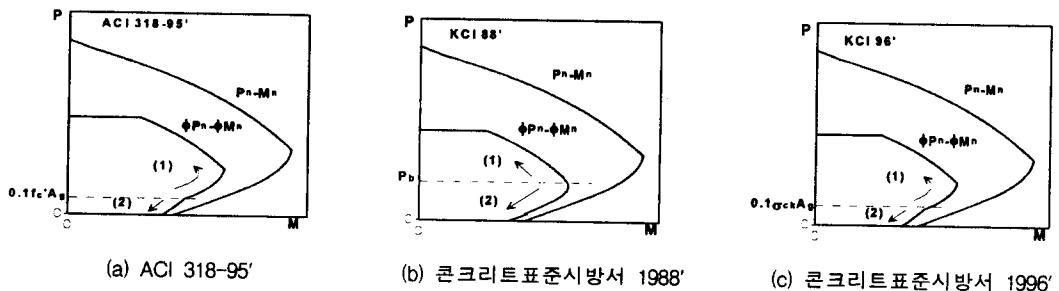


Fig. 1 Comparison of P-M interaction diagram

Table. 1 Strength reduction factors for transition region

	ACI 318-95'	콘크리트표준시방서 88'	콘크리트표준시방서 96'
transition region	$P=0.1f_c'A_g \sim P=0$	$P=P_b \sim P=0$	$P=0.1\sigma_{ck}A_g \sim P=0$
ϕ for transition region	0.70(0.75) ~ 0.90	0.65(0.70) ~ 0.85	0.65(0.70) ~ 0.85

4. 연성지수(Ductility Index)^{[4], [5], [6]}

철근콘크리트 부재의 단면강도 해석에 사용되는 응력분포는 많은 연구자들의 연구결과에 의해 제안된 여러 가지의 응력분포를 사용할 수 있으나, 본 연구에서는 현재 가장 많이 사용하고 있는 ACI 등가직사각형응력블럭과 Collins등이 제안한 응력-변형률 곡선^[7]을 이용하여 곡률연성지수와 변형률 연성지수를 구하였다.

4.1 응력-변형률 곡선을 이용한 곡률연성지수(CDI_{cur})

$$\phi (curvature) = \frac{\text{콘크리트 압축연단의 변형률}}{\text{중립축 거리}} \dots\dots\dots (1)$$

$$CDI_{cur} = \frac{\phi_{u,cur}}{\phi_{y,cur}} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, CDI_{cur} : 응력-변형률 곡선을 이용한 곡률연성지수

$\phi_{u,cur}$: 콘크리트 압축연단의 변형률이 0.003일때의 곡률

$\phi_{y,cur}$: 철근이 항복변형률에 도달했을 때의 곡률

응력-변형률 곡선을 이용한 곡률연성지수는 식(1)과 식(2)에 의해서 구할 수가 있다. ϕ_u 와 ϕ_y 는 축력-모멘트-곡률 상관도(P-M- ϕ curve)로부터 구할 수 있으며 P-M- ϕ curve를 구성하는 방법은 다음과 같다.

- ① 콘크리트 압축연단의 변형률을 0.0001로 고정시킨다.
- ② 곡률을 변화시키면서 $0.1f_c'A_g$ =외력(P_{ext})=내력(P_{int})을 만족하는 중립축을 찾는다.
(Rotating Plane Method : Fig. 2)
- ③ ②에서 찾은 중립축에 대해서 모멘트와 곡률을 계산한다.
- ④ 콘크리트 압축연단의 변형률을 0.0001~0.005까지 0.0001씩 증가시키면서 ①~③의 과정을 반복한다. 이상의 과정을 반복하면 Fig. 3과 같은 P-M- ϕ curve를 구성할 수 있다.

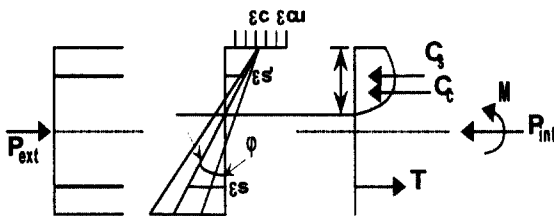


Fig. 2 Rotating plane method

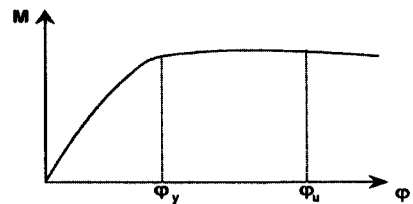


Fig. 3 Moment-curvature relationship

4.2 응력-변형률 곡선을 이용한 변형률연성지수(SDI_{cur})

응력-변형률 곡선을 이용하여 콘크리트 압축연단의 변형률이 0.003에 도달했을 때의 최외곽 인장철근의 변형률($\epsilon_{s,cur}$)을 구한다음, 식(3)에 따라 응력-변형률 곡선을 이용한 변형률연성지수를 계산하였다.

$$SDI_{cur} = \frac{\epsilon_{s,cur}}{\epsilon_y} \dots\dots\dots (3)$$

ϵ_y : 철근의 항복변형률

4.3 ACI 응력불력을 이용한 곡률연성지수(CDI_{blo})

ACI 응력불력은 극한상태만을 고려한 것이므로 철근이 항복했을 때의 콘크리트 압축연단의 변형률을 알 수 없으며 그때의 곡률도 알 수 없다. 따라서 철근이 항복했을 때의 곡률($\phi_{y,cur}$)은 3.1의 응력-변형률 곡선을 이용하여 구한 곡률을 사용하고, 콘크리트 압축연단의 변형률이 0.003일때의 곡률($\phi_{u,aci}$)은 ACI 응력불력을 이용하여 구하였다.

$$CDI_{blo} = \frac{\phi_{u,aci}}{\phi_{y,cur}} \dots\dots\dots (4)$$

4.4 ACI 응력불력을 이용한 변형률연성지수(SDI_{blo})

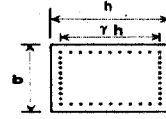
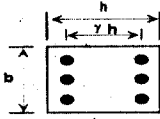
ACI 응력불력을 이용하여 콘크리트 압축연단의 변형률이 0.003에 도달했을 때의 최외곽 인장철근의 변형률($\epsilon_{s,blo}$)을 구한다음, 식(5)에 따라 변형률연성지수를 계산하였다.

$$SDI_{blo} = \frac{\epsilon_{s,blo}}{\epsilon_y} \dots\dots\dots (5)$$

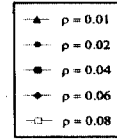
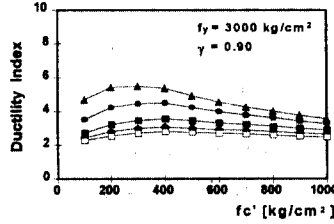
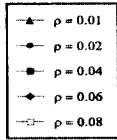
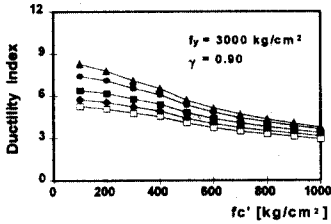
5. 연성지수 해석결과 분석 및 결론

강도감소계수 변화구간의 기준이 되는 축력 $P=0.1\sigma_{ck}A_g$ 에서의 연성지수를 구하기 위해 사각형 단면의 양단에만 철근을 배근한 단면과 사각형 단면의 4변에 40개의 철근을 배근한 단면(Fig. 4(a))에 대하여 콘크리트 압축강도(σ_{ck}) 100~1,000kg/cm², 철근의 항복응력(σ_y) 3,000kg/cm², 철근비(ρ) 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 압축철근과 인장철근사이의 거리(γ) 0.90의 변수들을 가진 단면에 대해 computer program [CODI-TR]을 이용하여 연성해석을 수행하였다. 그 결과 $P=0.1\sigma_{ck}A_g$ 의 축력이 작용하고 있는 경우의 연성지수는 Fig. 4(b), (c), (d), (e)와 같은 경향을 나타내고 있으며, 결과분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

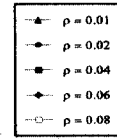
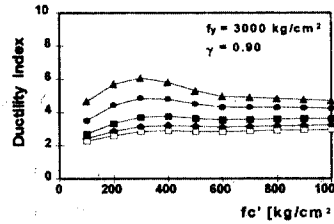
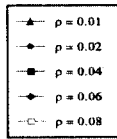
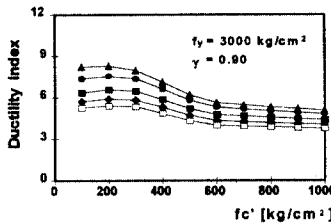
- 1) 철근비가 높을수록 연성지수를 낮게 평가하는 경향을 나타낸다.
- 2) 콘크리트 강도가 증가할수록 철근비의 증가에 따른 연성지수 값의 차이가 줄어드는 경향을 나타낸다.
- 3) 철근을 단면의 양단에만 배근한 경우 콘크리트 강도가 증가할수록 연성지수는 감소하는 경향을 나타내는데 반하여, 철근을 단면의 4변에 고르게 배근한 단면에 대해서는 콘크리트 강도가 증가함에 따라 연성지수의 값이 증가하다가 감소하거나 다시 증가하는 경향을 나타낸다.



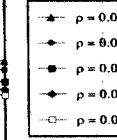
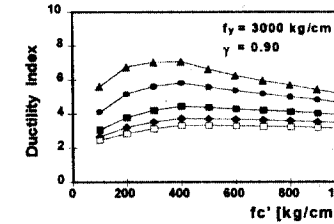
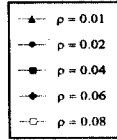
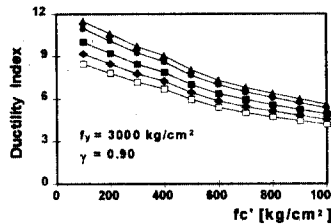
(a) Section



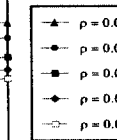
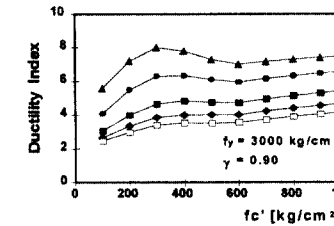
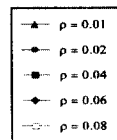
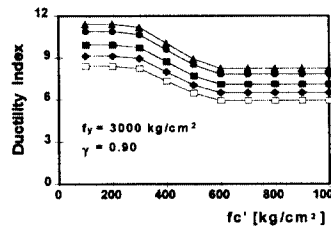
(b) Curvature ductility index using stress-strain curve under $P=0.1\sigma_{ck}A_0$ (CDI_{cur})



(c) Curvature ductility index using stress block under $P=0.1\sigma_{ck}A_0$ (CDI_{bb})



(d) Strain ductility index using stress-strain curve under $P=0.1\sigma_{ck}A_0$ (SDI_{cur})



(e) Strain ductility index using stress block under $P=0.1\sigma_{ck}A_0$ (SDI_{bb})

Fig. 4 Comparison of ductility index

- 4) 양단에 철근을 배근한 경우에 대하여 응력-변형률 곡선을 이용한 연성지수는 곡률연성지수, 변형률연성지수 모두 콘크리트 강도가 높아질수록 연성지수가 감소하는 경향을 나타내고 있다.
- 5) ACI 응력블럭을 이용한 연성지수는 콘크리트 강도의 증가에 따라 연성지수가 일관성 있는 경향을 나타내지는 않고 있으며 특히, Fig. 4(e)의 경우 콘크리트 강도가 증가해도 연성지수의 값은 일정한데 이는, ACI 응력블럭을 사용하여 해석할 경우 콘크리트 강도가 560kg/cm^2 이상인 경우에는 $k_1(\beta)$ 값이 0.65로 일정하기 때문일 것으로 판단된다.
- 6) 철근콘크리트 기둥의 연성해석시 ACI 응력블럭을 사용하기 보다는 콘크리트의 압축응력-변형률 곡선을 사용하는 것이 합리적이라고 판단되며 특히, 고강도 콘크리트에 적용시 해석의 정확성을 향상시킬수 있다고 사료된다.
- 7) 동일한 단면에 대해서도 콘크리트 압축강도 뿐만 아니라 철근비, 철근의 항복응력, 철근의 배치 형태 등에 따라 연성지수가 다양하게 분포하고 있음으로, 부재의 단면적과 콘크리트 강도만을 변수로 취하고 있는 현시방서상의 강도감소계수 변화구간의 기준 $P=0.1\sigma_{ck}A_g$ 로는 일관된 연성지수를 제공하지 못하고 있다.
- 8) 따라서, 연성에 이론적 근거를 둔 합리적인 강도감소계수 변화구간을 제시할 필요성이 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] James G. MacGregor., "Load and Resistance Factors for Concrete Design," ACI Journal, *Proceedings*, Vol. 80, July-August 1983, pp. 279-287.
- [2] ACI Committee318., "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary," *American Concrete Institute*, Detroit, 1995.
- [3] 대한민국 건설교통부, "콘크리트 표준시방서," 1988, 1996.
- [4] E. O. Pfrang, C. P. Siess, and M. A. Sozen., "Load-Moment-Curvature Characteristics of Reinforced Concrete Cross Sections," *ACI Journal, Proceedings*, V. 61, July 1964, pp. 763-778.
- [5] R. Park and T. Paulay., "Reinforced Concrete Structures," *John Wiley & Sons*, Inc. (1975)
- [6] 이재훈., "철근콘크리트 휨부재의 연성지수에 관한 해석적연구," *대한토목학회논문집* 제4권, 제3호, 1994년 5월, pp. 391-402.
- [7] Collins, M. P., Mitchell, D., and J. G. MacGregor., "Structural Design Consideration for High-Strength Concrete," *Concrete International*, ACI, V. 15, No. 5, May 1993. pp. 27-34.