

고강도 철근 콘크리트 기둥 부재의 연성해석

An Analytical Evaluation of the Ductility of Reinforced High-Strength Concrete Columns

박훈규* 장일영**

Park, Hoon Gyu Jang, Il Young

ABSTRACT

Ductility is an important consideration in the design of reinforced high-strength concrete. Therefore, this research investigate the ductile behavior of rectangular reinforced high-strength concrete columns like as bridge piers with confinement steel. The effects on the ductility of axial load, lateral reinforcement ratio, longitudinal reinforcement ratio, shear span ratio, and compressive strength of concrete were investigated analytically using layered section analysis. As the results, it was proposed the proper relationship between ductility and variables and formulated into equations.

1. 서론

RC구조물의 내진설계에 있어서나 고강도 콘크리트의 취성적특성 보완을 위해서도 정확한 연성예측이 매우 중요하다. 이러한 목적으로 많은 실험적연구가 수행되었으며 RC부재에 대한 이러한 실험을 바탕으로 몇몇 연성평가방법이 제안되었다. 그러나 RC구조물의 극한 거동은 다수의 방법으로 분류될 뿐만 아니라 부재의 형상외에도 재료의 비선형성에 관한 여러 요인에 의해 달라지므로 부재의 연성을 정확히 예측하는 것은 그리 쉬운 일이 아니다. 뿐만 아니라 기존의 연구결과와는 대체로 한정된 실험결과만을 토대로 한 것이어서 광범위한 적용에는 많은 문제가 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 실험결과와 비교를 통하여 극한상태까지의 RC기둥 부재 거동을 잘 표현할 수 있는 적층화 유한요소해석 기법을 이용하여 일반적이고 광범위한 적용이 가능한 연성평가식을 제시하기 위한 해석적 연구를 수행하였다.

2. 해석방법

RC부재의 하중-변위 거동을 해석적으로 수행하기 위하여 재료의 비선형성과 철근과 콘크리트와의 부착-슬립관계를 고려한 비교적 적용이 간편한 적층화 유한요소 해석법을 이용하였다. 철근 콘크리트 부재의 연성은 다양한 방법으로 정의 될 수 있으나 본 연구에서는 비교적 정의가 명확한 최대하중이후 내력저하시 최대하중의 80%점에서의 변위(δ_u)에 대한 축방향 인장철근이나 압축 철근의 항복시 변위(δ_y)의 비로 정의한다. 철근 콘크리트 기둥부재의 전체변위(δ)는 다음 식(1)과 같이 일반적인 방법으로 휨변형(δ_f), 기둥 부재에서 축방향 주철근의 인발에 의한 부착-슬립 변위(δ_b) 및 전단변형(δ_s)에 의한 성분으로 표현하였다.

$$\delta = \delta_f + \delta_b + \delta_s, \quad (1)$$

2.1 휨변형에 의한 변위

부재의 휨변위는 이론적 정적 휨모멘트-곡률을 산정하여 곡률분포를 이중적분함으로서 구한다. 본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 휨변위 산정을 위하여 실용적이며, 동시에 철근과 콘크리트의 부착특성을 직접적으로 고려할 수 있는 휨모멘트-등가곡률 관계⁽¹⁾를 이용하였다.

* 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사수료

** 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

구속 및 비구속 고강도 콘크리트의 응력-변형을 관계는 Mander⁽²⁾의 모델에 대해 기존의 실험자료를 토대로 고강도 콘크리트에 적합한 횡보강효과 및 강도, 압축연성증가에 관한 변수들을 새로이 산정하여⁽³⁾ 수정한 Fig.1의 모델을 사용하였다. 비구속 콘크리트의 연단 극한변형한계를 0.004로 두었으며, 구속콘크리트에서는 Mander등이 제시한 식(2)의 횡보강철근이 파단되는 시점을 부재전체의 한계변형으로 추정하였다.

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4 \rho_{sh} f_{yh} \epsilon_{su}}{f_{oc}} \quad (2)$$

여기서, ρ_{sh} 는 횡보강근의 구속면적에 대한 체적비, f_{yh} 와 ϵ_{su} 는 횡보강근의 항복강도 및 최대응력점에 대한 변형률이다.

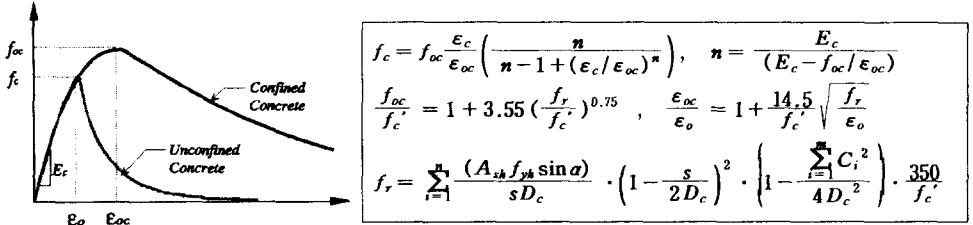


Fig.1 Idealized stress-strain curves for concrete in compression

인장강성을 고려하기 위한 콘크리트 인장응력-변형률은 균열발생후 변형연성효과를 잘 표현하는 Collins⁽⁴⁾ 모델을 사용하였다. 철근의 응력-변형률 모델은 Park-Pauly⁽⁵⁾의 모델을 사용하였다.

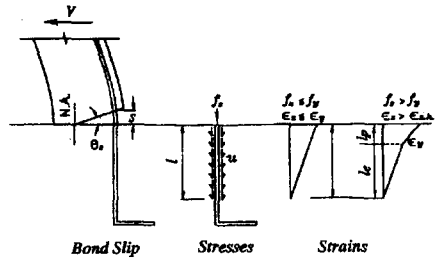


Fig.2 Bond-slip relation of embedded steel

2.2 축방향 주철근 인발에 의한 변위

보-기둥 및 기둥-기초 연결부에서 발생하는 축방향 철근 인발에 의한 부착-슬립변위는 Fig.2에서와 같이 접합부 단면에서의 중립축(x)에 대해 발생한 슬립회전각(θ_b)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_b = \frac{S}{x}, \quad \delta_b = \theta_b L$$

여기서, S는 접합단면 인장부 총슬립량, L은 부재길이이다. 접합단면에서의 부착에 의한 슬립량은 철근의 변형률-슬립량의 관계로부터 구할 수 있으며 본 연구에서는 Shima등⁽⁶⁾의 모델을 이용하였다.

2.3 전단변형 변위

대부분의 현행 설계 기준에서는 전단파괴이

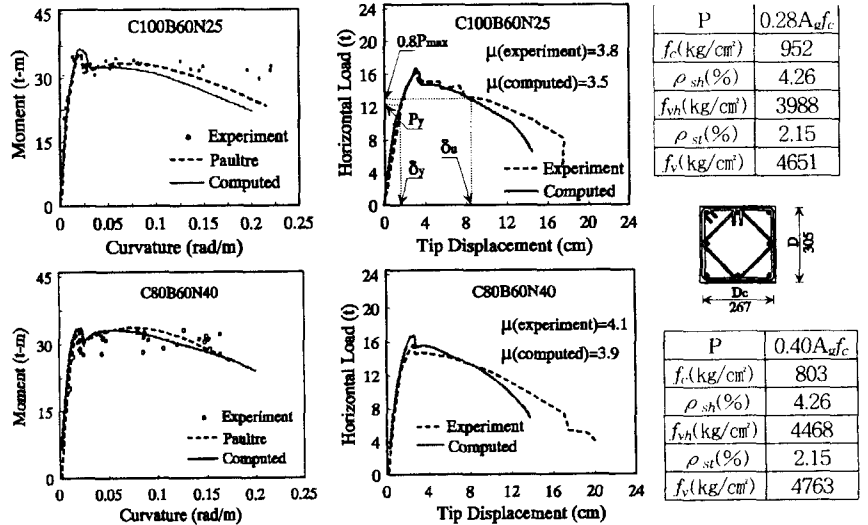


Fig.3 Comparison of M-φ and P-δ curves of columns(Paultre⁽⁷⁾)

전에 휩에 의한 항복이 발생하도록 유도하고 있으므로 일반적인 철근 콘크리트 부재는 휩 보다 큰 전단저항능력을 발휘하게 되어 전단에 의한 변형은 휩변형에 비해 비교적 그 값이 적다. 따라서 본 연구에서는 Park-Pauly⁽⁶⁾가 제안한 비교적 간단한 방법으로 전단변형에 의한 부재변위를 다음과 같이 산정 하였다.

$$\delta_s = VL/K_s \quad (3)$$

여기서, V는 전단력, K_s는 단위길이당 전단강성이다.

2.4 해석결과의 검토

해석결과의 검증을 위하여 Fig.3과 같이 Paultre등⁽⁷⁾이 수행한 반복횡하중 및 축력을 받는 띠근보강 고강도 콘크리트 캔틸레버기둥에 대한 실험결과중 정(+)방향의 M- ϕ 및 P- δ 관계와 정적해석 결과를 비교하였다.

3. 연성평가

고강도 콘크리트 기둥부재의 연성평가를 위해 수행한 변수 및 해석대상 부재의 제한은 다음 Table 1과 같다. 이러한 변수들은 가능한 기존의 설계규준 및 실험결과를 토대로 정하였다.

Table 1 Variable factors for analysis

Dimension of model	Lateral bar		Main bar	Shear span ratio	Strength of concrete	Axial load ratio
	R _{sh}	ρ_s (%)	ρ_{sh} (%)	ρ_{st} (%)	A/D	f_c (kg/cm ²)
	0~1.4	0~1.1	0~2.2	0.6~4	2.5~6	350~1000
R _{sh} =A _{sh} /A _{sh(ACI)} , ρ_s =A _{sh} /(sD _c), ρ_{sh} -volumetric ratio of hoop ρ_{st} =A _{st} /(BD), N=P/(BDf _c), s-hoop spacing B=D=40cm, D _c =36cm, s=10cm, f _c =4500kg/cm ²						

Table 1의 변수를 바탕으로 해석한 결과를 Fig.4(a)~(e)에 나타내었다. 이들 해석결과들은 횡보강근 사용량과 ACI318⁽⁸⁾ 규준량의 비 R_{sh}를 1.0, 전단스팬비 4, 축방향철근비 2.5%, 콘크리트 압축강도 500kg/cm²를 각각 일정요인으로 정하여 축력비를 0~0.8로 증가시켜 변위연성값을 구하였다.

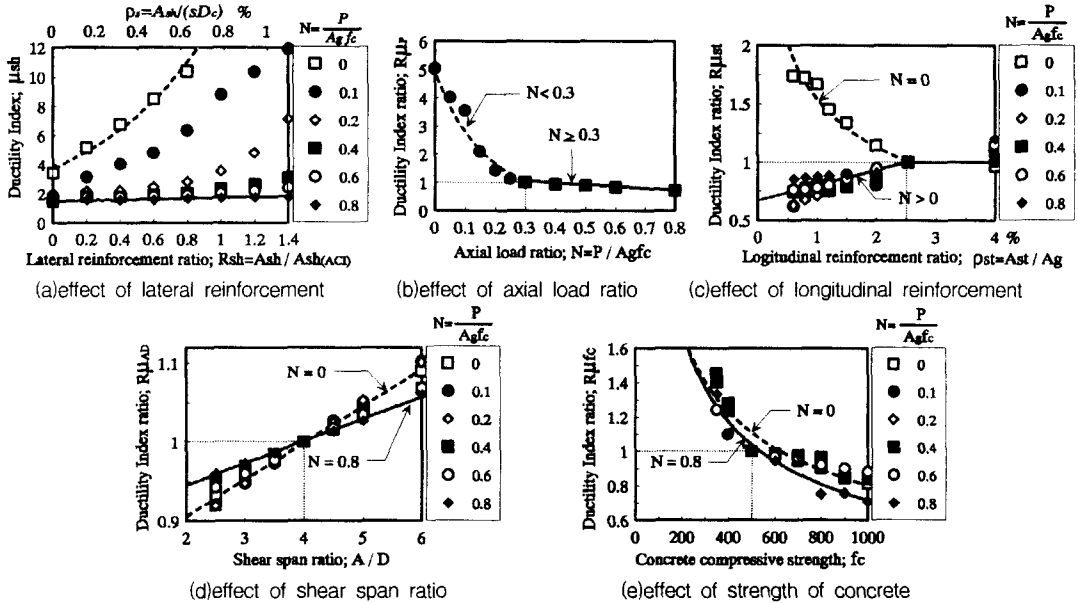


Fig.4 Effect on the ductility of variable factors

Fig.4(a)에서는 다른변수가 일정할 경우 횡보강근량이 증가함에 따른 연성의 증가를 확인할 수 있으며, Fig.4(a)와 (b)에서는 축력이 증가할수록 기둥의 연성이 크게 감소하나 비교적 고축력비인 0.3이후에는 다

소 감소정도가 둔화됨을 알 수 있다. 이러한 축력증가에 따른 연성감소 특성은 이미 많은 연구결과에서도 확인된 일반적인 경향으로 축력의 영향을 고려하지 않는 ACI318의 횡보강근량 산정방법에 연성확보를 위한 재평가가 있어야 할 것으로 보인다. Fig.4(c)에서는 축력이 작용하지 않는 순수 휨하중 하에서의 부재의 연성은 축방향철근비증가에 따라 감소하는 일반적인 양상을 보이거나, 축력과 휨이 작용하는 기둥에서는 오히려 축력이 증가에 따라 연성이 감소함을 보이고 있다. 이것은 축방향철근이 횡보강근을 지점으로 어느 정도의 구속력을 발휘함에 따른 것으로 보이거나, 기존의 연구결과와는 다소차이가 있으므로 이러한 특성을 정량화하기 위한 평가 실험연구가 필요할 것으로 보인다. Fig.4(d)에서는 전단스팬비 증가에 따라 연성이 증가하는 일반적인 경향을 확인 할 수 있으며, Fig.4(e)에서는 콘크리트 고강도화에 따른 연성감소 현상을 확인 할 수 있다.

이러한 해석결과를 토대로 각 변수를 고려한 다음 Table 2와 같이 기둥 부재 변위연성 평가식을 산출하였다

Table 2 Proposed equation to evaluate ductility

Equation	$\mu = \mu_{sh} \cdot R\mu_{sl} \cdot R\mu_{AD} \cdot R\mu_f$
Effect of lateral reinforcement ratio	$\mu_{sh} = a \cdot b^{\rho_{sh}}$; $a = \frac{1.5}{1 - 0.6e^{-8N}}$, $b = 3.6e^{-1.7N}$
Effect of longitudinal reinforcement	$R\mu_{sl} = (\frac{\rho_{sl}}{2.5\%})^{0.4}$; $N=0$, $R\mu_{sl} = 0.6 + 0.4(\frac{\rho_{sl}}{2.5\%})$; $N>0$, $R\mu_{sl} = 1$; $\rho_{sl} > 2.5\%$
Effect of shear span ratio	$R\mu_{AD} = 0.84 + 0.16(\frac{A/D}{4})$
Effect of compressive strength of concrete	$R\mu_f = [\frac{f_c}{500}]^{(300/f_c)}$

4. 결론

철근콘크리트 기둥부재의 연성평가 및 연성확보를 위해 변위연성을 추정할 수 있는 평가식을 해석적으로 제안하였으며, 이를 통해 적절한 연성을 확보함으로써 현행 횡보강근 산정 기준에서 나타나는 연성확보에 대한 비경제적 또는 불안전에 대한 우려를 감소시킬 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. 張一泳, RC部材の荷重-變位關係に關する解析的研究, 東北大學校 博士論文, 1991
2. Mander, J. B. et al., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", J. of Struct. Engrg., ASCE, V.114, No.ST8, 1998, pp.1804-1826
3. 박훈규, 장일영, "띠근보강 고강도 콘크리트 기둥의 강도 및 축변형특성 산정에 관한 연구", 콘크리트학회지, 제 11권2호, 1994, pp.197-208
4. Vecchio, F. J., and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for RC Elements Subjected to Shear", ACI J., 1986, pp.219-231
5. Park, R., and Paulay, T., Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, New York, 1975
6. Shima, H. et al., "Micro Macro Models for Bond Behavior in RC", J. of the Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo, V.39, No.2, 1987, pp.133-194
7. Paultre, P., and Legeron, F., "Seismic behavior High-Strength Concrete Tied Cokumns", 1st International Conference of High Strength Concrete, ASCE, 1997, pp.159-172
8. ACI 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI318-95)", ACI, Farmington Hills, 1995, pp.369