

초고강도 RC 기둥의 이력특성에 관한 실험적 연구

Hysteric Behavior of Ultra-High Strength RC Columns

김종근* 안종문** 한범석*** 신성우****
Kim Jong Keun Ahn Jong Mun Han, Beom Seok Shin, Sung Woo

ABSTRACT

An experimental investigation was conducted to examine the hysteric behavior of Ultra-High strength concrete columns. The purpose of this study is to investigate the safety of Ultra-High strength concrete columns for the requirement of ACI provision. Seven 1/3 scaled columns were fabricated to simulate an 1/2 story of actual structural members with the cross section 300×300mm and the shear span ratio 4. The main variables are axial load ratio, configuration and volumetric ratio of transverse reinforcement.

It has been found that the behavior of columns was affected by axial load ratio rather than the amount and the configuration of transverse reinforcement. Consequently, to secure the ductile behavior of 100MPa Ultra-High strength concrete columns, ACI provision for the requirement of transverse steel may considered axial level and the detail of transverse reinforcement.

1. 서론

철근콘크리트 구조물에서 지진에 대해 안전하고 경제적인 구조물을 설계하기 위해서는 대지진시 건물에 입력되는 에너지를 부재의 소성변형에 의해 건물전체에 균등하게 분산시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 기둥보다 보에서 소성힌지가 발생하도록 하는 것이 안전하고 경제적이지만, 지진하중은 건물의 2개 주축방향으로 동시에 작용하기 때문에 강진시 기둥에서 소성힌지의 발생은 피할 수 없으며, 기둥 단부에는 높은 전단력이 발생된다. 그러므로 강진시 기둥에서 소성힌지가 발생된 후, 기둥의 연성적인 거동을 확보하는 것은 구조물의 갑작스런 붕괴방지 및 인명구조를 위한 시간적 여유라는 측면에서 매우 중요하다.

이에 대하여 각국의 규준에서는 기둥의 변형능력을 확보하기 위하여 횡보강근으로 코아 콘크리트를 구속시키도록 의무화하고 있으나, 이 식은 중심축력을 받을 때 피복콘크리트 박리후, 코아 콘크리트만의 내력이 박리전의 내력이상을 유지하여야 한다는 개념에서 유도된 설계식이므로 기둥이 편심하중을 받거나, 축력 및 반복 횡하중을 동시에 받을 경우 이 식을 그대로 적용하는 데에는 문제가 있다.

또한 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 취성적이라는 단점을 고려할 때 규준에서 정하고 있는 횡보강근량 산정식을 그대로 적용할 경우 일정연성의 확보에 있어 다소 문제가 있을 것으로 판단된다. 실제로 기존의 실험적 연구결과에 의하면, 규준에 따라 설계된 기둥이 횡하중을 받을 경우, 저축력($0.3f_{ck}A_g$) 및 소변형($3\delta_y$)하에서는 만족스러운 거동을 보였으나, 고축력 및 강진으로 인하여 기둥이 대변형하의 하중을 받을 경우 강도와 강성이 저하되어 취성적인 거동을 나타내는 것으로 보고되고 있어^{1, 2, 3)} 이러한 경우에 대하여 기둥의 충분한 연성 확보를 위한 방안이 요구되고 있다.

본 연구에서는 기둥의 축력비 및 횡보강근의 형상을 주요 변수로 현행 규준⁴⁾(ACI Code)의 횡보강근량 산정식이 고축력과 반복횡력을 받는 압축강도 100MPa의 초고강도 RC 기둥의 설계에도 적용가능한지 여부를 실험적 연구를 통하여 평가하였다.

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사수료
*** 정회원, 한양대학교 STRESS 연구조교수

** 정회원, 안산 1대학 건축설계과, 전임강사
**** 정회원, 한양대학교 건축학부 교수

2. 실험

2.1 실험체 계획

본 연구에서는 실제 구조물의 보를 이상화한 스테르블을 가진 1/2개층의 기둥 실험체를 계획하였다. 취성파괴를 방지하고 휨파괴를 유도하기 위하여 형상비(L/d)를 4로 하였고, 횡보강근양에 대하여 축력비 및 횡보강근의 형상을 주요 변수로 하여 총 7개의 실험체를 제작하였다. 콘크리트 피복두께는 20mm로 기둥 전체 단면적에 대한 코어 단면적 비(A_g/A_c)는 모두 규준의 1.4이하인 1.33으로 하였다. 모든 실험체의 횡보강근은 내진설계기준에 따라 135°의 구부림 각도를 가지고 $6d_b$ 의 여장길이를 코어 콘크리트에 정착시켰다.

2.2 실험체 제작 및 실험변수

실험체는 500×600×700mm인 스테르블을 가진 300×300×1200mm인 기둥으로 실제 구조물의 1/3 Scale로 하였고, 실험구간은 접합면으로부터 기둥 깊이의 2.5배(750mm)로 하였으며, 실험구간의 부분에는 단부효과에 따른 국부파괴를 방지하고, 실험구간내에서 파괴를 유도하기 위해 횡보강근을 실험구간의 1.5배 이상으로 배근하였다. 그리고 실험체 양 끝단에는 실제구조물의 조건과 유사하게 500mm인 철물을 부착하여 힌지 상태를 유지하였다.

주요 실험변수로는 횡보강근의 형상을 A, B, C, D, E의 5개 형태로 구분하였으며, 축력비는 단면 내력의 0.3, 0.5 P_0 로 하였고, 횡보강근의 양은 ACI 요구량의 0.7, 1.0으로 정하였다.

실험체의 콘크리트 압축강도는 100MPa로 모두 동일하고, 주근은 횡보강근의 형상에 따라 A, B, C Type은 8-D19, D, E Type은 12-D16로 다르지만, 주근비는 모두 비슷하게 하였으며, 횡보강근은 D13과 D10을 사용하였다. 이상과 같은 실험체 상세가 다음 Fig. 2 및 Table 1에 나타나 있다.

2.3 실험방법

실험은 10,000kN 용량의 유압 만능시험기(U.T.M)를 사용하여 일정한 축력(0.3, 0.5 P_0)을 가력한 상태에서, 수평가력철물을 고정시킨 후, 980kN 용량의 Actuator를 사용하여 반복수평하중을 가력하였다(Fig. 3). 이때 항복변위(δ_y)는 축력을 가한 후 발생한 주근의 변형률이 횡력이 증가함에 따라 재료시험에서 얻은 주근의 항복변형률에 도달할 때를 기준으로 산정하여 Fig. 1과 같이 변위제어로 가력하였고, 수평하중이 최대내력의 50%로 떨어지는 시점에서 실험을 종료하였다. 실험시 수평변위와 전단변형률 및 곡률을 측정하기 위하여 총 19개의 LVDT를 설치하였고, 철근의 변형률을 측정하기 위하여 주근에 11개, 스테르블의 접합면으로부터 동일한 위치에 있는 횡보강근에 각각 2개씩의 철근게이지(Wire Strain Gage, WSG)를 부착하였다.

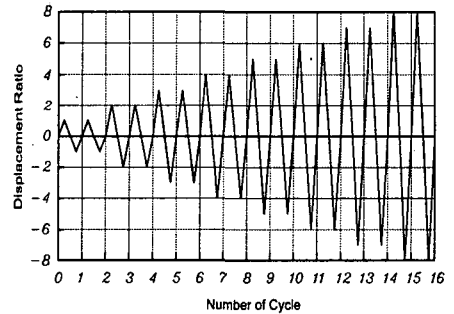


Fig. 1 Loading History

Table 1 Specimens Properties

Specimens $f_{ck}=100(\text{MPa})$	Longitudinal Reinforcement		Transverse Reinforcement(D10)				$\frac{P}{P_0}$	V_y (kN)	V_{max} (kN)	Ductility Ratio $\frac{\delta_{80\%}}{\delta_y}$	Cumulative Energy	
	Diameter & Ratio(%)	f_y (MPa)	Type	ρ_s (%)	Spacing (mm)	f_{yh} (MPa)						$\frac{\rho_{EXP}}{\rho_{ACI}}$
A-07-3N	8-D19 & 2.25	488.4	A(D13)	2.79	70	470.3	0.7	0.3	521.4	614.9	2.53	58,394
B-07-3N			B	2.78	65	445.7	0.7	0.3	587.6	690.6	3.04	89,834
C-10-3N			C	3.98	50	445.7	1.0	0.3	609.1	717.8	3.12	92,293
D-10-3N	12-D16 & 2.65	499.0	D	3.96	55	45.7	1.0	0.3	617.6	699.7	3.22	108,715
D-10-5N								0.5	673.6	850.6	2.80	73,908
E-10-3N			E	4.02	70	445.7	1.0	0.3	639.6	736.3	3.02	93,269
E-10-5N								0.5	686.2	820.5	2.58	67,708

* $P_0 = 0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$

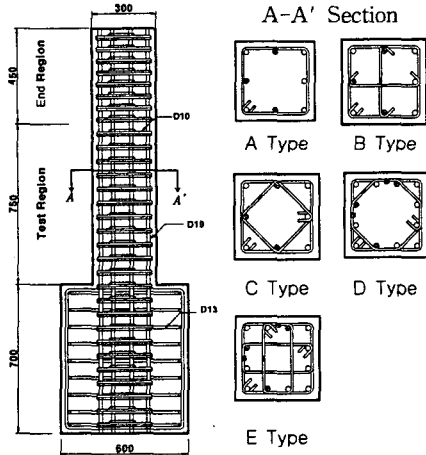


Fig. 2 Details of Specimen & Tie Configurations

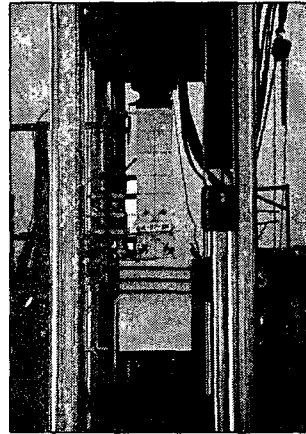


Fig. 3 Set-up of Specimen

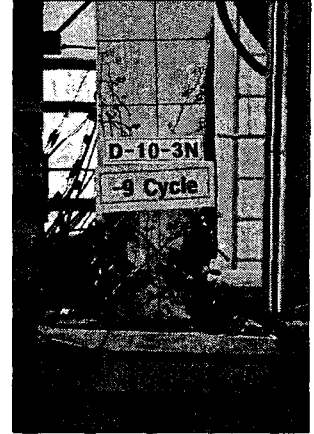


Fig. 4 Specimen at Failure

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열 및 파괴상황

각 실험체의 초기균열발생 후 최종 파괴까지의 양상은 다음과 같은 단계를 순차적으로 보여주었다. ① 초기균열은 정·후면의 스티브면에서 기둥단면(d)만큼 떨어진 거리에 수평 횡균열로 발생 ② 초기에 발생한 횡균열이 점차 측면으로 진전 ③ d/4~2d 구간에 추가적인 횡균열과 측면에 수평균열이 경사균열로 다수 진전 ④ 실험구간(0~2.5d)에 피복콘크리트 탈락 ⑤ 하중이 점차 저하되면서 피복콘크리트 박리 ⑥ 횡보강근이 휘어지면서 코아 콘크리트의 파괴 ⑦ 주근의 좌굴되는 파괴양상을 나타내었으며, 이러한 양상은 대부분의 실험체에서 유사하게 발생하였다.

또한, 주근의 항복은 축력으로 인하여 압축측에서 초기에 항복하였고, 횡보강의 항복은 횡보강근의 형상 및 양에 따라 항복의 시점 및 변형률이 변화하는 경향이 있어 일정한 순서를 보이지 않았다. 최대하중 직전 또는 최대하중에 도달한 시점에서 갑작스런 피복 콘크리트의 박리와 다수의 균열이 발생하였으며, 균열의 발생은 실험구간의 횡보강근 위치에서 횡보강근을 따라 수평균열이 발생되어 측면으로 이어져 경사균열로 진전되었다. 이는 수평하중을 가함에 따라 횡보강근이 주근을 구속함으로써 발생한 것으로 판단된다.

3.2 실험변수의 고찰

본 실험에서는 동일한 조건에서 최대내력은 횡보강근의 형상이나 양보다는 축력비가 높을수록 크게 나타났고, 연성은 축력비가 낮을수록, 횡보강의 양이 많을수록, 횡보강근의 형상이 원형에 가까울수록 안정적인 거동을 보였다.

3.2.1 축력비의 영향

Fig. 7, 8은 횡강근 형상 D와 E형태의 하중-변위 곡선으로 횡보강근의 양은 ACI 규준에 따른 $1.0 \rho_{ACI}$ 로 모두 동일하다.

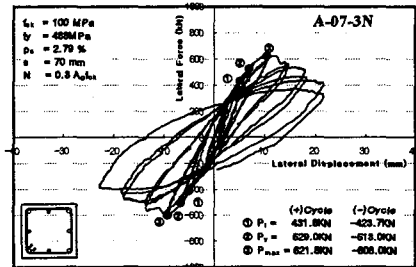


Fig. 5 Behavior of specimen A-07-3N

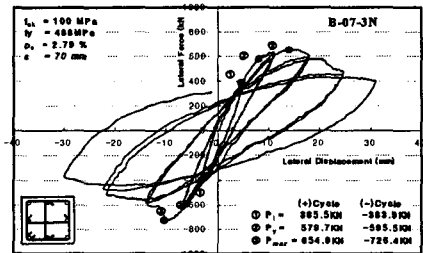


Fig. 6 Behavior of specimen B-07-3N

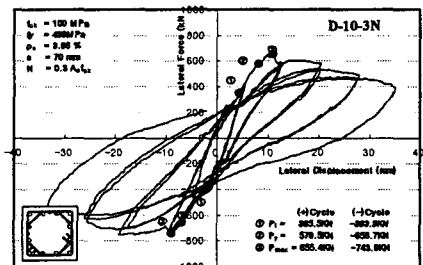


Fig. 7 Behavior of specimen D-10-3N

D Type인 저축력(0.3Po)상태의 Fig. 7은 실험종료까지 안정적인 거동을 보이나, E Type인 고축력(0.5Po)상태의 Fig.8은 최대하중 부근에서 하중이 급격히 감소하고 변위가 증가함에 따라 내력이 최대하중의 50% 이하로 저하되었다. 따라서, 저축력하에서는 보에서처럼 인장철근 항복여부에 따른 철근비의 제한으로 인장파괴를 유도할 수 있으나, 고축력하의 기둥에서는 강한 수평하중 작용시 축력으로 인한 P- Δ 효과가 커지므로 갑작스런 압축파괴가 발생할 수 있어 이에 대한 적절한 횡보강근양과 상세가 필요한 것으로 판단된다.

3.2.2 횡보강근량과 형상의 영향

기존 연구에 의하면 횡보강근량이 동일할지라도 횡보강근의 기하학적 형상, 직경, 간격 등의 상호 연관성에 따라 거동이 다르다고 보고되었다. 본 실험에서도 동일한 횡보강근에서 보조횡보강근이 없는 경우보다 있는 경우, 횡보강근의 형상이 복잡할수록 더 안정적인 거동이 나타났다. 또한 횡보강근양이 ρ_{ACI} 의 0.7에서 1.0으로 증가함에 따라 더욱 안정적인 거동이 나타났다. 이는 수평하중 작용시 횡보강근이 휨을 받는 주근을 구속지지하고, 횡보강근 형상이 원형에 가까울수록 코어 콘크리트를 더 적절히 구속해 줌으로써 보다 더 좋은 거동을 하였던 것으로 판단된다.

3.3 연성 및 소산능적에너지평가

Fig. 5~8에서처럼 축력비가 낮고, 원형에 가까운 횡보강근 형상을 가지는 실험체의 변형능력이 가장 좋아 Fig. 9, 10의 D-10-3N이 연성비 및 소산에너지의 합이 가장 높게 나타났다. 이는 콘크리트 피복이 박리 후 최대하중을 지나서도 코어 콘크리트를 적절히 구속해 줌으로써 급격한 내력저하 없이 하중을 지지한 것으로 판단된다.

6. 결론

횡보강근으로 구속된 축력과 휨력을 받는 100MPa의 초고강도 콘크리트 기둥의 거동을 파악하기 위해 실시한 본 실험에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하중-변위 곡선 및 연성, 누적소산에너지 등의 결과로부터 초고강도 콘크리트 기둥의 거동은 횡보강근의 형상 및 양보다는 축력비에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 100MPa의 초고강도 콘크리트를 사용한 기둥의 연성 거동을 확보하기 위해서는 횡보강근양의 증가와 함께 원형에 가까운 횡보강근 형상이 필요한 것으로 판단된다.
- 3) 고축력 및 횡보강근 형상 등을 고려하지 않고 있는 현재의 기준을 100MPa의 초고강도 콘크리트 기둥 설계에 적용하기 위하여는 횡보강근의 상세 및 축력효과를 고려한 식으로의 수정이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Shamin A. Sheikh, Shafit S. Khoury, "Confined Concrete Columns with Stubs", ACI Structural Journal, V. 90, No. 4 July-August 1993.
2. Shamin A. Sheikh, Shafits. S. Khoury., "A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns", ACI Structural Journal, July Aug., 1997, pp 421~431
3. Salim Razvi and Murat Saatcioglu., "Confinement Model for High-Strength Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No 3, March, 1999, pp. 281~289
4. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02)", ACI Committee 318, American Concrete Institute.

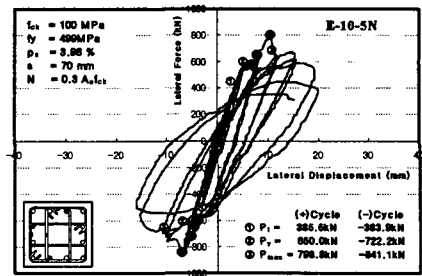


Fig. 8 Behavior of specimen E-10-5N

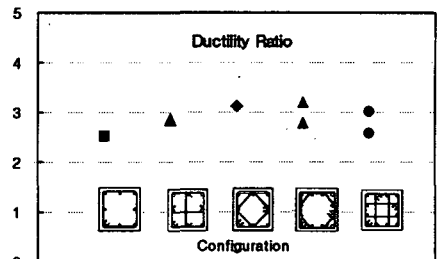


Fig. 9 Ductility Ratio of specimen

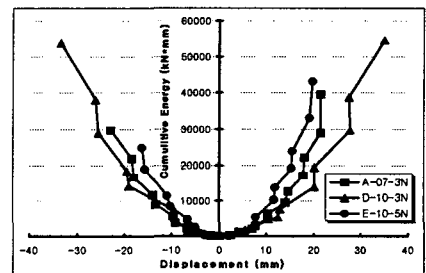


Fig. 10 Energy Dissipation Capacity