

철근콘크리트 띠철근 기둥의 구속효과

Confinement Effects of Reinforced Concrete Tied Columns

왕 성 근* 한 범 석** 이 희 수* 신 성 우*** 반 병 열****
Wang, Sung Keun Han, Beom Seok Lee, Hee Su Shin, Sung Woo Bahn, Byong Youl

ABSTRACT

An experimental study was conducted to investigate the effectiveness of transverse reinforcement in reinforced concrete tied columns subjected to monotonically increasing axial compression. Eighteen large-scale columns(260×260×1200mm) were fabricated to simulate similarly an actual structural members size. Effects of main variables such as the concrete compressive strength, the tie configuration, the transverse reinforcement ratio, the tie spacing, and the spalling of the concrete cover were studied in this research program.

Key Point : Confinement, Transverse reinforcement, Tie configuration, Tie spacing

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 일반적으로 지진에 연성적으로 거동하도록 설계되며, 이러한 연성적인 거동을 위하여 구조부재는 주의 깊게 상세설계되어진다. 모멘트 연성골조 구조물의 경우 기둥의 소성힌지 구역에서 횡보강근의 상세는 중요한 고려사항이다. 수 년 동안 강도와 연성을 향상시키기 위한 횡보강근의 상세에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔고, 그 결과 횡보강근에 의한 코어 콘크리트의 적절한 구속과 주근의 횡방향 지지는 기둥의 연성을 가장 효과적으로 증진시키는 것으로 증명되었다. 고강도 콘크리트에 대한 기술은 최근 10여 년에 걸쳐 눈부시게 향상되었으며, 콘크리트의 압축강도가 높아질수록 더 높은 탄성계수와 단면감소로 인한 실질적인 장점들이 고강도 콘크리트의 특징으로써 설계자의 흥미를 끌고 있다. 그러나 불행하게도 각 국의 규정은 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 안전성에 대한 사전 주의없이 사용되는 실정으로 현재 규정(ACI Code)의 횡보강근의 대한 조항을 정의하는 변수들이 콘크리트 압축강도 400kgf/cm² 이하의 철근콘크리트 부재에 대한 실험연구로부터 얻어진 결과이다.(ACI Committee 318, 1995). 또한 Large-Scale(최소단면 200mm이상)의 고강도 콘크리트 띠철근 기둥의 성능에 대해 발표된 자료는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트를 사용한 Large-Scale의 기둥을 대상으로 구조실험을 수행하고, 이를 기초로 고강도 콘크리트 기둥의 구속효과를 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

실험체는 260×260×1200mm로서 각 실험체의 중앙부 800mm를 실험구간으로 하였으며, 실험체 양 끝단 200mm부분에는 단부효과에 따른 국부파괴를 막고 실험구간에서 파괴를 유도하기 위해 횡보강근을 실험구간의 2배로 배근하였으며 또한, 콘크리트 양생 후에 탄소섬유(2겹)로 보강하였다. 콘크리트 피복두께는 20mm로 기둥 전체 단면적에 대한 코어 단면적 비를 0.72로 하였다.

- * 정회원, 한양대학교 건축학부 석사과정
- ** 정회원, 한양대학교 건축학부 박사수료
- *** 정회원, 한양대학교 건축학부 교수
- **** 정회원, 대전대학교 건축공학과 부교수

D형의 Cross-ties를 제외하고 모든 횡보강근은 135°의 구부림각도를 가지고 6d_b의 여장길이를 코아 콘크리트에 정착시켰다. 주근의 체적비는 2.25~2.36%로 거의 동일하게 하였으며, 콘크리트 강도(225~500kgf/cm²), 횡보강근 체적비(ACI규정의 80, 100, 120%), 횡보강근 간격(40~150mm), 주근의 배열(4~12개), 횡보강근의 배근형태(그림 1)를 주요변수로하여 변수에 따른 구속 콘크리트의 거동에 따른 영향을 검토하였다. 실험체 상세 및 일람은 그림 1과 표 1에 나타나 있다.

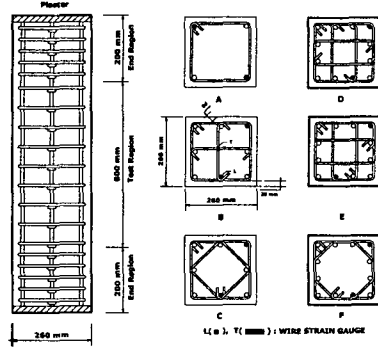


그림 1 실험체 상세

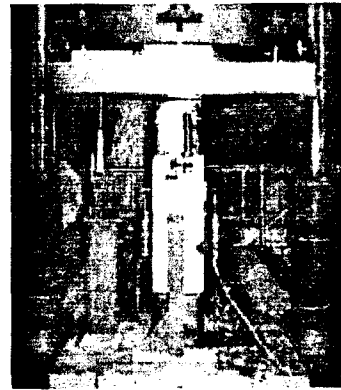


그림 2 실험체 설치 상황

표 1 실험체 일람표

실험체 명	f _{ck} (kgf/cm ²)	주 근			횡 보 강 근				
		개수&직경 (mm)	주근비 (%)	f _y (kgf/cm ²)	직경 (mm)	배근간격 (mm)	체적비 (%)	f _{yh} (kgf/cm ²)	$\frac{\rho_{prov.}}{\rho_{ACI}}$
NSC-P	245	-	-	-	-	-	-	-	-
NSC-A-10	260	4-D22	2.29	3300	D10	90	1.543	4450	1.0
NCS-B-10	245	8-D16	2.36	3630	D8	100	1.302	5100	1.0
NSC-D-10	265	12-D13	2.25	3860	D8	130	1.335	5100	1.0
NSC-E-10	225	12-D13	2.25	3860	D8	150	1.350	5100	1.0
NSC-F-10	255	12-D13	2.25	3860	D8	120	1.305	5100	1.0
NSC-E-NS	230	12-D13	2.65	3860	D8	150	1.350	5100	1.0
HSC-P	470	-	-	-	-	-	-	-	-
HSC-A-10	445	4-D22	2.29	3300	D8	40	2.169	5100	1.0
HSC-E-10	450	12-D13	2.25	3860	D8	90	2.250	5100	1.0
HSC-F-10	490	12-D13	2.25	3860	D8	70	2.237	5100	1.0
HSC-B-NS	470	8-D16	2.76	3630	D8	60	2.169	5100	1.0
HSC-A-08	440	4-D22	2.29	3300	D8	50	1.736	5100	0.8
HSC-B-08	495	8-D16	2.36	3630	D8	75	1.736	5100	0.8
HSC-E-08	445	12-D13	2.25	3860	D8	115	1.761	5100	0.8
HSC-A-12	470	4-D22	2.29	3300	D10	45	3.085	4450	1.2
HSC-B-12	480	8-D16	2.36	3630	D10	70	2.975	4450	1.2
HSC-E-12	500	12-D13	2.25	3860	D8	75	2.700	5100	1.2

* NSC-A-10 : first term - 콘크리트 강도, second term - 횡보강근 배근형태, third term - $\rho_{prov.}/\rho_{ACI}$

** NS : 피복 콘크리트가 없는 실험체

표 2 실험결과 일람표

실험체명	축 하 중				축 변 형 륜			
	P_{max} (tf)	P_{cmax} (tf)	P_{cmax}/P_{oc}	P_{cmax}/P_{occ}	ϵ_{max}	ϵ_{cmax}	ϵ_{c50c}	$\epsilon_{c50c}/\epsilon_{co}$
NSC-P	143.09	143.09	1.02	1.02	0.00174	0.00174	0.0044	2.14
NSC-A-10	207.24	137.98	0.95	1.33	0.00242	0.00430	0.0157	7.56
NCS-B-10	225.96	130.95	0.95	1.34	0.00226	0.00410	0.0152	7.41
NSC-D-10	211.89	147.12	0.99	1.39	0.00256	0.00450	0.0170	8.15
NSC-E-10	186.64	123.90	0.98	1.38	0.00261	0.00440	0.0162	8.02
NSC-F-10	221.50	140.91	0.98	1.39	0.00250	0.00440	0.0183	8.85
NSC-E-NS	171.90	111.85	1.22	1.22	0.00443	0.00360	0.0186	9.17
HSC-P	269.43	269.43	1.00	1.00	0.00223	0.00223	0.0036	1.50
HSC-A-10	293.70	233.56	0.94	1.32	0.00201	0.00370	0.0177	7.43
HSC-E-10	351.16	258.03	1.02	1.44	0.00275	0.00414	0.0230	9.62
HSC-F-10	364.22	278.60	1.01	1.43	0.00316	0.00469	0.0200	8.14
HSC-B-NS	298.49	237.72	1.27	1.27	0.00362	0.00360	0.0206	8.50
HSC-A-08	301.26	213.48	0.86	1.22	0.00224	0.00480	0.0098	4.14
HSC-B-08	356.66	251.08	0.90	1.27	0.00270	0.00440	0.0140	5.68
HSC-E-08	325.20	228.73	0.92	1.29	0.00272	0.00422	0.0141	5.92
HSC-A-12	335.54	263.84	1.00	1.41	0.00267	0.00480	0.0283	11.68
HSC-B-12	352.33	291.55	1.08	1.53	0.00370	0.00390	0.0370	15.37
HSC-E-12	396.01	333.83	1.19	1.68	0.00419	0.00430	0.0355	14.36

3.3 주요변수에 따른 구속된 콘크리트의 거동

3.3.1 콘크리트강도의 영향

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 더 큰 탄성계수와 더 적은 내부 Micro-crack때문에 압축하에 더 적은 횡팽창을 나타낸다. 결과적으로 적은 횡팽창에 따라 항보강근에 의한 횡압력은 감소하게 된다. 그림 4는 콘크리트 강도에 따른 구속된 콘크리트의 거동을 보여주고 있다. 실험체 NSC-A-10, HSC-A-08, HSC-A-10는 1.33, 1.22, 1.32의 강도증진과 7.56, 4.44, 7.47의 연성증진을 얻었고, 실험체 NSC-E-10, HSC-E-08, HSC-E-10는 1.38, 1.27, 1.44의 강도증진과 8.02, 5.92, 9.62의 연성증진을 나타내었다. 이 실험결과는 항보강근의 구속에 의해 상당한 강도와 연성향상을 얻을 수 있다는 것을 보여주고 있다. 하지만 동일한 비율의 강도와 연성증진을 기대한다면, 콘크리트강도가 높을수록 더 많은 구속이 필요하다는 것을 알 수 있다.

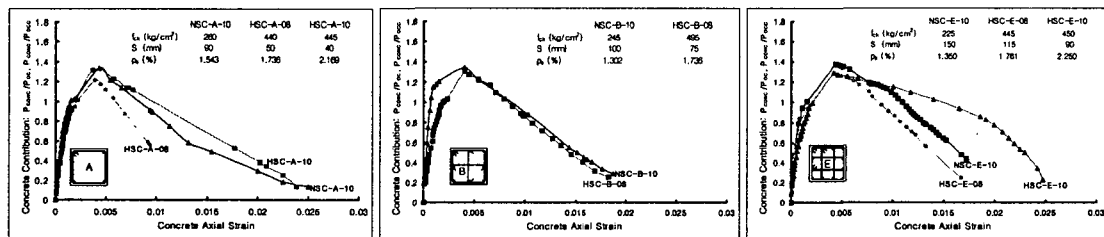


그림 4. 콘크리트강도에 따른 구속된 콘크리트의 거동

3.3.2 횡보강근의 체적비에 따른 영향

코아 콘크리트에 부과되는 횡구속 압력은 직접적으로 횡보강근량에 관계된다. 그림 5는 횡보강근의 체적비에 따른 구속된 콘크리트의 거동을 나타내고 있다. 횡보강근의 체적비가 약 70% 증가되었을 때, HSC-A-08과 HSC-A-12, HSC-B-08과 HSC-B-12, HSC-E-08과 HSC-E-12에서 강도증진은 각각 16%, 20%, 30% 이었고, 연성증진은 2.8, 2.7, 2.4 배의 향상을 나타내었다. 이 실험결과로부터 체적비의 증가는 구속된 콘크리트에 직접적으로 강도와 연성 모두 향상시킬 수 있으며, 더 효과적인 횡보강근의 배근형태를 가진 경우에 강도 증진에 더 큰 효과를 발휘할 수 있음을 알 수 있다.

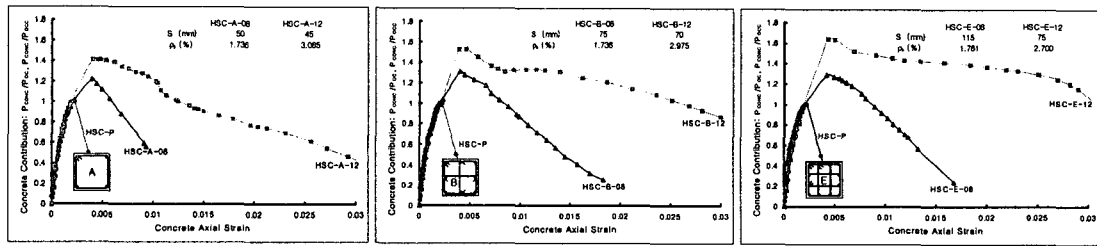


그림 5 횡보강근의 체적비에 따른 영향

3.3.3 횡보강근의 배근형태 및 간격에 따른 영향

유효구속 콘크리트 면적과 주근의 좌굴은 횡보강근의 형태와 배근간격에 의해 결정된다. 그림 6은 횡보강근의 배근형태와 간격에 따른 구속된 콘크리트의 거동을 보여주고 있다. 그림 6(a)에서 알 수 있듯이 A형의 배근형태를 가진 실험체가 강도 및 연성 증진면에서 좋지 않으며, 이는 동일한 체적비를 가진 경우, 횡보강근의 배근형태에 의해 더 큰 구속효과가 발휘될 수 있음을 나타낸다.

그러나, 그림 6(b)에서는 배근형태에 따라 구속된 콘크리트의 거동에 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 횡보강근의 배근간격이 코아단면 폭의 1/2이상을 갖는 경우에, 배근형태에 의해 강도와 연성이 큰 영향을 받지 않고 있음을 나타낸다. 또한 동일한 배근형태와 체적비를 가질 경우, 횡보강근의 배근간격을 조밀하게 함으로써, 더 효율적인 구속효과를 발휘할 수 있음을 나타내는 것이다. 따라서, 구속된 콘크리트의 강도와 연성에 변수 등의 기여도는 다른 변수들에 의해 주어진 구속정도에 따라 변한다. 따라서 구속된 콘크리트의 거동에 따라 분리된 독립의 변수의 영향을 분석할 때, 이것은 단지 부분적 영향으로 파악해야 할 것으로 판단된다.

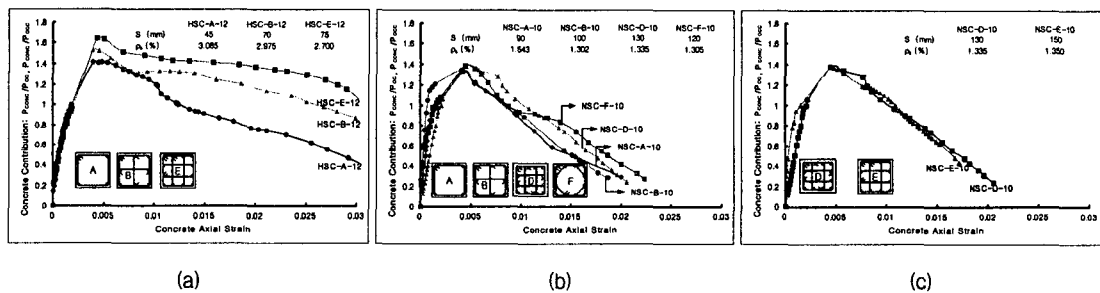
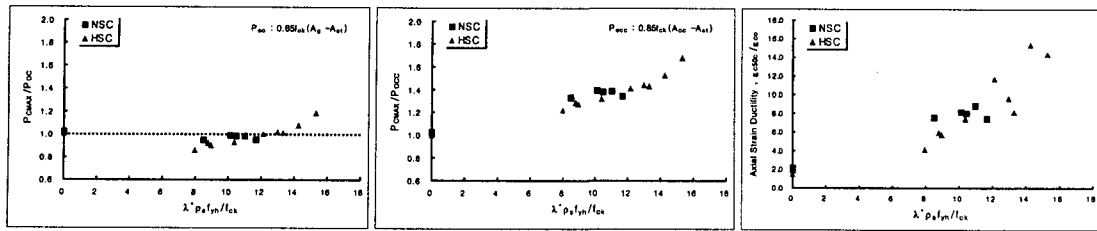


그림 6 횡보강근의 배근형태 및 간격에 따른 영향

3.4 구속지수에 따른 강도와 연성증진 효과

그림 7은 구속된 콘크리트의 거동에 영향을 미치는 변수들을 포함하는 구속지수($\lambda \cdot \rho_{sfyh}/f_{ck}$)에 따른 강도와 연성증진 관계를 나타내고 있다. ACI-318규정에서 제시된 횡보강근의 요구량은 피복 콘크리트 박리 후, 박리 전의 내력을 유지할 수 있도록 제안된 것이다. 그림 7(a)는 NSC-Series의 경우, ACI의



(a) (b) (c)

그림 7 구속지수에 따른 강도와 연성증진효과

규정에서 요구하는 횡보강근량을 만족하지만, P_{cmax}/P_{oc} 가 1.0미만에 값을 나타내고 있으며 구속지수의 증가에 따라 강도와 연성면에서 큰 영향을 받지 않고 있다. 이는 우선 횡보강근의 간격이 코아 단면폭의 1/2를 초과하여 효과적인 구속효과를 발휘하지 못하고, 또한 주근의 불안정에 의한 좌굴에 기인된 것으로 판단된다. 또한, 보통강도 콘크리트에서 횡보강근의 항복강도 5000kgf/cm^2 이상의 고강도 철근은 효과적이지 않다고 할 수 있다. HSC-Series의 경우 구속지수에 증가에 따라 강도증진은 연성증진만큼 비례적인 증가를 보이고 있지 않지만 강도증진 및 연성증진에서 모두 선형적인 증가를 나타내고 있다.

4. 결론

1. 고강도 콘크리트 기둥은 횡보강근의 구속에 의해 상당한 강도와 연성향상을 얻을 수 있지만, 더 낮은 강도의 콘크리트 기둥과 동일한 비율의 강도와 연성향상을 위해서 더 효과적인 구속이 필요하다.
2. 체적비의 증가는 구속된 콘크리트에 직접적으로 강도와 연성을 모두 향상시킬 수 있으며, 더 효과적인 횡보강근의 배근형태를 가질 경우, 강도증진에 더 우수한 것으로 판단된다.
3. 동일한 체적비를 가진 경우 더 효과적인 횡보강근의 배근형태에 의해 더 큰 구속효과를 발휘할 수 있다.
4. 횡보강근의 배근간격이 코아단면 폭의 1/2를 넘을 경우, 배근형태에 따른 강도와 연성에 큰 영향을 나타내지 않았으며, 동일한 배근형태와 체적비를 가진 경우에 배근간격을 조밀하게 함으로써 더 우수한 구속효과를 낼 수 있다.
5. 합리적으로 횡보강근이 배근되었다면, 구속지수의 증가에 따라 강도와 연성이 선형적인 향상을 나타낼 것으로 판단되므로 구속된 콘크리트의 거동에 영향을 미치는 변수들의 상호관계를 구속지수를 통해 합리적으로 표현하여 분석함으로써 구속 콘크리트의 거동을 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위해 지원을 아끼지 않은 한양대학교 초대형구조시스템연구센터(STRESS), 연구에 필요한 재료를 지원해 주신 (주)동남기업 및 (주)한국카보넥스 관계자분들께 깊이 감사 드립니다.

참고문헌

1. ACI, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99)", (ACI Committee 318, American Concrete Institute, 1999).
2. Daniel Cusson and Patrick Paultre, "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties", (ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.3, Mar, 1994), pp. 783~804.
3. J. B. Mander, M. J. N. Priestley and Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", (ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.2, Feb, 1992), pp. 1804~1825.
4. Koji Sakai and Shamim A. Sheikh, "What Do We Know about Confinement in Reinforced Concrete Columns?", (ACI Structural Journal, Vol.86, No.2, Mar.~Apr. 1989), pp. 192~207.