

# Headed Bars를 활용한 기둥의 구속효과에 대한 연구

## Confinement of Columns using Headed Bars

김 영 훈\*  
Kim, Young Hoon

윤 영 수\*\*  
Yoon, Young Soo

데니스 미첼\*\*\*  
Mitchell, Denis

### ABSTRACT

Eight full-scale columns were constructed and tested under monotonic axial compression loading to investigate the influence of headed bars on the confinement of the concrete. One column represented a column with no transverse reinforcement and another column had poor detailing and little confinement. A third column contained seismic hoops and crossties, which represented current detailing practice for significant confinement. A fourth column test is conducted to investigate the response with the seismic crossties replaced by headed bars. Two column specimens were constructed and tested with all of the transverse reinforcement provided by headed bars. These six specimens enabled an assesment of the effectiveness of headed bars in confining the concrete. It was found that the use of headed bars improved the confinement of the columns. Two additional specimens were constructed without any transverse reinforcement. These columns were later retrofitted, by drilling horizontal holes in the columns, adding special headed bars (one head fixed and the other head threaded) and then filling the drilled holes with epoxy. These retrofitted specimens with these added headed bars provided insight into the rehabilitation of older structures containing poorly detailed columns. All of the test specimens were instrumented to determine strain localization during failure and to monitor the strain in the longitudinal and transverse reinforcement.

### 1. 서론

Headed bars(Headed reinforcement)는 철근의 양끝에 기계적 정착 시스템을 도입하여 기존의 철근에 요구되었던 정착 길이를 정착판(head)이 대신하게 된다. Headed bars는 철근의 파밀 배근이 요구되는 구역의 철근량을 줄여주면서 시공성과 구조성능을 향상시킨다. 이미 북미 및 유럽에서는 해양구조물 건설에 처음 적용되었고 다양한 구조물에 설계 및 시공되고 있다. 특히, 원전 구조물과 같은 안전성이 요구되는 내진 구조물과 고층 빌딩의 빔-기둥 접합부, 교량의 접합부(Cap beam/Column joint), 기둥 및 벽체의 보강 기법으로도 연구 및 시공이 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 기둥의 횡방향 내진 철근의 종류(내진 갈고리를 가진 연결 철근, 내진 갈고리를 가진 후프, Headed bars) 및 배근 방식(수직 철근 간격 및 철근량)에 따른 고강도 콘크리트의 구속효과(Confinement effect)에 따른 강도, 변형량 그리고 연성 증진을 실험적이고 정량적으로 평가하고 고강도 콘크리트의 구속 효과를 예측하는 Cusson and Paultre 제안식을 통해 실험의 타당성 및 Headed bar에의 예측식 적용 가능성을 검증하였다.

\* 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\* 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

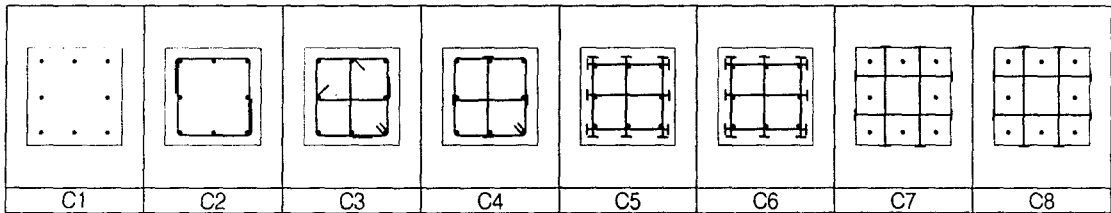
\*\*\* 캐나다 맥길대학교 토목공학과 교수

## 2. 실험 개요

### 2.1 실험체 상세

8개 기둥 실제 구조물을 모사(Full-scale)하여 일축 압축 강도 실험을 수행하였다. 콘크리트는 강도 400kg/cm<sup>2</sup>으로 고강도 콘크리트이며, 철근은 D16의 항복 강도 4000kg/cm<sup>2</sup>인 일반 및 내진 철근과 5000kg/cm<sup>2</sup>인 50mm의 원형 정착판(Head)을 가진 Headed bars(ASTM A970-98)가 사용되었다. 실험 주요 변수는 횡방향 철근의 배근 방식의 차이, 철근 간격에 의한 횡방향 철근량의 차이 그리고 횡방향 철근의 종류와 정착 방식이다. 변수에 따른 실험체 형상에 대한 간략한 설명은 다음과 같다. 모든 실험체에 대해 단면의 크기는 500mm의 정사각형이며 높이는 2000mm로 동일하며 콘크리트 강도(400kg/cm<sup>2</sup>) 및 콘크리트 피복 두께(40mm)로 일정하게 또한 기둥의 수직 철근량(철근비 1.6%; D25 8개)도 동일하게 배근하였다.<sup>(1-3)</sup>

그림 1 실험체 상세



- (1) 실험체C1: 횡방향 구속 철근이 없는 기둥
- (2) 실험체C2: 90° 갈고리를 가진 횡방향 구속 철근이 넓은 수직 간격(400mm)으로 배근된 기둥
- (3) 실험체C3: 135° 내진 갈고리를 가진 후프 철근(Seismic hoop)과 양단 철근의 끝이 각각 90°, 135°의 내진 갈고리를 가진 연결 철근이 내진 설계 기준(ACI318-99)에 따라 좁은 간격(125mm)으로 배근된 기둥
- (4) 실험체C4: C3에서 연결 철근(Cross tie)대신에 Headed bars를 사용하여 좁은 간격(125mm)으로 배근된 기둥
- (5) 실험체C5: C4에서 연결 철근과 후프 철근이 모두 Headed bars로 좁은 간격(125mm)이 배근된 기둥
- (6) 실험체C6: C5의 철근 배근 방식을 채택하고 배근 간격(175mm)이 C5보다 넓게 배근된 기둥
- (7) 실험체C7: C1의 횡방향 무근 기둥에 C3의 기둥과 같은 횡방향 철근량을 가지도록 하기 위해 수평방향으로 드릴링 후 강봉을 삽입 후, Head를 정착하여 보강 수직 간격(245mm)이 좁게 보강된 기둥
- (8) 실험체C8: C1의 횡방향 무근 기둥에 C3의 기둥과 같은 횡방향 철근량을 가지도록 하기 위해 수평방향으로 드릴링 후 강봉을 삽입 후, Head를 정착하여 보강 간격(300mm)이 C7보다 넓게 보강된 기둥

### 2.2 실험체 설치 및 측정

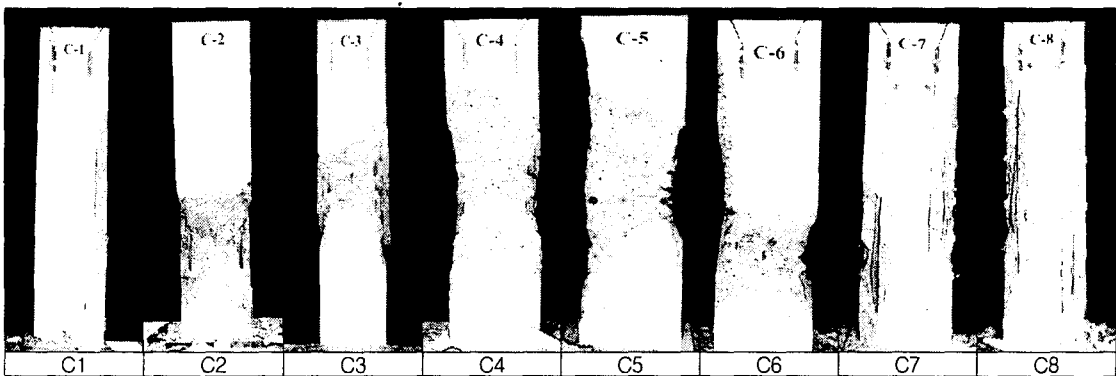
본 실험은 HRC(California, USA)의 철근 공급과 현지(Montreal, Canada) 콘크리트 제조 업체의 협조를 받아 Jamieson Structural Lab.(McGill University)에서 수행되었다. 모든 실험체는 28일의 양

생기간을 거쳤으며 마지막으로 끝난 실험의 실험체는 재령 40일이 소요되었다. 여덟개의 실험체는 1140ton 용량의 MTS(Universal Testing Machine)을 이용하여 1축 압축력을 가력하였다. 하중 재하 방법은 다음과 같다. 먼저 400ton까지는 하중 제어 방식(Loading control)으로 단위 초당 0.4ton로 가력하였으며 초당 0.0025mm의 속도로 변형량 제어 방식(Displacement control)으로 가력하였다. 하중은 각각의 기둥에 최대 압축 하중의 50%까지 저하되었을 때, 또는 압축 변형량이 30mm까지 되었을 때 실험을 종료하였다. 하중 측정은 MTS에 내장된 로드셀(Internal load cell)을 이용하였으며 변형량은 LVDT's를 이용하여 실시간의 측정 시스템을 이용하였다. 압축 강도 실험의 변형량 측정을 위해 각각의 기둥에 수직 방향으로 실험체 표면에 LVDTs를 정면(2개) 및 후면(7개)에 모두 9개를 설치하였으며 측정 범위는 1500mm로 한정하였다. 기둥의 철근 표면에 매립형 철근 스트레인 게이지(Strain gauge)를 부착하여 철근의 변형률을 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 Ultimate 상태의 실험체 형상

그림 2 실험체의 파괴 형상



#### 3.2 Cusson and Paultre 제안식

Cusson and Paultre(1994)는 자체적으로 수행한 실험 결과와 Nagashima et al.(1992)에 수행한 실험 결과를 이용하여 회귀분석을 통해 횡방향 철근으로 구속된 고강도 콘크리트의 하중-변형 관계식을 제안하였다. 이 식은 횡방향 철근에 의해 증가하는 변형량, 하중 그리고 연성을 Mander et al.(1994, 1988) 제안식을 수정하여 발전시킨 식이다.<sup>(4)</sup> Cusson and Paultre 제안식과 응력-변형률 관계 그래프는 다음과 같다.<sup>(6-7)</sup>

표 1 Proposed Equation

Ascending Branch
$f_c = f_{cc} \left[ \frac{k(\epsilon_c / \epsilon_{cc})}{k-1 + (\epsilon_c / \epsilon_{cc})^k} \right], \epsilon_c \leq \epsilon_{cc}; k = \frac{E_c}{E_c - (f_{cc} / \epsilon_{cc})}$
Descending Branch
$f_c = f_{cc} \cdot \exp[ k_1 (\epsilon_c - \epsilon_{cc})^{k_2} ]; \epsilon_c \geq \epsilon_{cc}$
$k_1 = \frac{\ln 0.5}{(\epsilon_{c,0.5} - \epsilon_{cc})^{k_2}}; k_2 = 0.58 + 16 (f_c / f_{cc})^{1.4}$

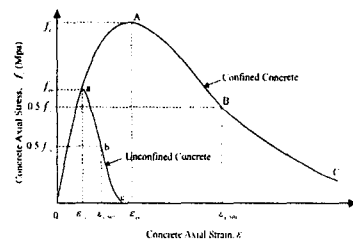


그림 3 Stress-strain relationship

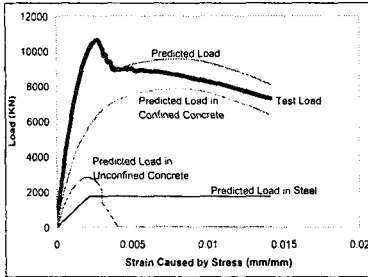
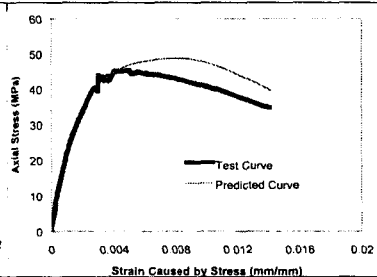
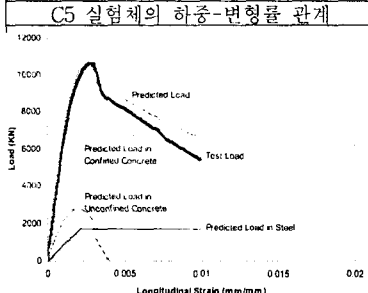
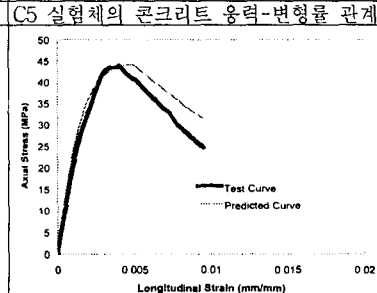
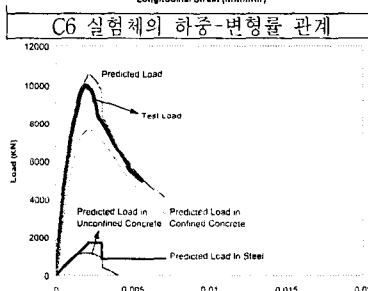
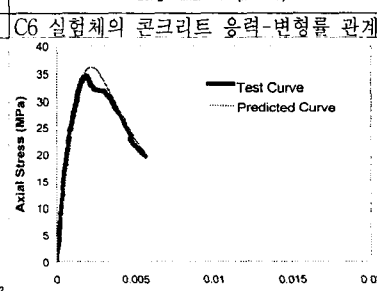
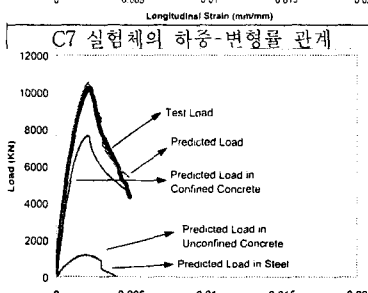
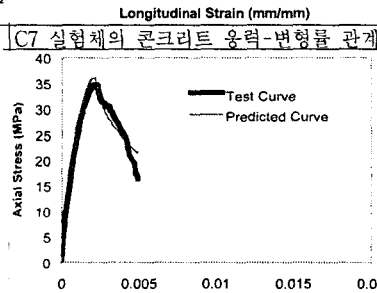
### 3.3 실험값과 예측값의 비교 분석

각 기둥의 축방향 변형률은 설치된 4개(정면 2개, 후면 2개)의 1500mm의 LVDTs의 실측값의 평균값으로 하였다. 다음 표2, 3은 예측식 *Cusson and Paultre(1994)*을 이용하여 구한 값과 실험값을 비교한 표이다. 여기서, 실제 기둥의 변형률-응력 관계식에 사용된 비구속 콘크리트 압축 강도는 공시체 압축강도의 85%로 가정하였고 공시체와 같은 최대 응력 변형률을 가지도록 가정하였다.<sup>(5)</sup>

표 2 C1, C2, C3 그리고 C4의 실험 결과 및 분석

		<p>실험체 C1의 실험으로부터 측정된 초기 강성은 <i>Cusson &amp; Paultre</i>식에 의해 계산된 값 보다 작게 나왔다. 그 이유는 압축 하중을 주는 과정에서 편심이 작용한 것으로 평가된다. 최대 하중 이후에 응력과 하중이 급격하게 떨어졌는데 그 이유는 수직 철근의 좌굴과 콘크리트 표면(shell)의 탈락 현상으로 평가된다.</p>
		<p>횡방향 철근의 간격이 크기 때문에 구속 효과가 거의 없다. 상승부 곡선에서 실험값과 예측값은 거의 일치하고 있다. 최대 하중 발생 이후 강성이 급격하게 떨어지는 이유는 수직 철근의 좌굴과 콘크리트 피복의 박리 현상 때문으로 평가된다.</p>
		<p>구속 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 실험 결과로부터 측정된 하중에서 피복 콘크리트가 부담하는 하중과 철근이 부담하는 하중을 감하여 계산하였다. 실험적으로 얻은 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계는 <i>Cusson &amp; Paultre</i>식에 의해 계산된 값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.</p>
		<p>구속 콘크리트에 Headed bar의 구속 효과를 고려하기 위해 횡방향 철근들의 순간격을 50mm Heads의 순간격으로 계산하였다. 이렇게 고려된 순간격은 구속 콘크리트의 면적이 커지게 하면서 수직 순간격도 줄어들게 한다. 그래프에서 보듯이 구속 콘크리트의 하중에 대한 부담이 과대 평가되었다.</p>
<p>C1 실험체의 하중-변형률 관계</p>	<p>C1 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>C2 실험체의 하중-변형률 관계</p>
<p>C2 실험체의 하중-변형률 관계</p>	<p>C2 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>C3 실험체의 하중-변형률 관계</p>
<p>C3 실험체의 하중-변형률 관계</p>	<p>C3 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>C4 실험체의 하중-변형률 관계</p>
<p>C4 실험체의 하중-변형률 관계</p>	<p>C4 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>C4 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>

표 3 C5, C6, C7 그리고 C8의 실험 결과 및 분석

 <p>C5 실험체의 하중-변형률 관계</p>	 <p>C5 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>콘크리트 피복이 박리하기 전까지는 실험값과 예측값 사이에는 거의 일치하는 거동을 보여준다. Mander et al. 방법에 의한 구속 콘크리트의 부피 계산에서 C5의 실험체가 횡방향 철근이 모두 Headed bar를 사용하였기 때문에 가장 큰 구속 효과를 발휘한다고 평가되며, 수직 및 수평 순간력이 Head의 순간력을 사용하였기 때문에 구속효과가 과대 평가되었다.</p>
 <p>C6 실험체의 하중-변형률 관계</p>	 <p>C6 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>실험값과 예측값 사이에는 거의 일치하는 거동을 보여준다. 횡방향 철근의 간격이 크기 때문에 Mander et al. 이 제안한 방법에 근거한다면 횡방향 철근의 수직 간격이 콘크리트에 작용하는 Arch effect의 구속 콘크리트에 기여하는 구속 유효 면적을 작게 한다. 이것은 실험값과 예측값 모두 최대치 이후에 C5의 실험체보다 급격한 강성 저하를 보여주는 것으로부터 알 수 있다.</p>
 <p>C7 실험체의 하중-변형률 관계</p>	 <p>C7 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>보강된 기둥의 거동을 위해 다음과 같은 가정이 필요하다. 먼저 콘크리트 박리 시 변형률을 0.003으로 가정하고 그 때부터 수직 철근은 좌굴을 한다고 보았다. 실험값과 예측값 사이에 적은 편차를 보이는 것을 볼 수 있다. 이것은 비구속 콘크리트의 거동과 수직 철근의 좌굴에 대한 가정이 적절하다는 것을 보여준다.</p>
 <p>C8 실험체의 하중-변형률 관계</p>	 <p>C8 실험체의 콘크리트 응력-변형률 관계</p>	<p>수직 철근의 간격이 C7보다 크기 때문에 최대 응력 이후에 구속 콘크리트의 급격한 응력 저하를 보여주고 있다. 예측값과 실험값 사이의 거동 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 보강 Headed bar의 수직 간격이 크기 때문이다. 상대적으로 보강 Haded bar에 의해 구속이 안된 곳에서는 최대응력 이후에 압축 파괴(Crushing)가 발생하였다.</p>

#### 4. 결론

- (1) 실험체 C1(횡방향 무근)은 매우 취성적인 하중-변형 관계식을 보여준다.
- (2) 실험체 C2는 90° 갈고리를 가진 횡방향 철근이 넓게 배근되어 충분한 구속 효과를 발휘하지 못하여 취성적인 하중-변형 관계식을 보여준다.
- (3) 실험체 C3는 내진 갈고리를 가진 후프와 90°, 135° 갈고리를 가진 연결 철근이 충분한 고강도 콘크리트의 강도 증진 및 연성 증진에 효과가 있다.

- (4) 실험체 C4는 Headed bars(C3의 연결 철근 대체)와 후프 철근이 배근되어 C3 보다는 강도 증진 및 연성 증진 효과가 뛰어나다. 따라서 Headed bars는 고강도 콘크리트의 강도 및 연성 증진(구속효과)에 기존의 연결 철근보다 더욱 효과적임이 입증되었다. 또한 철근 배근이 용이하여 시공성이 뛰어나다.
- (5) 실험체 C5와 C6는 모두 횡방향 철근을 Headed bars로 배근(후프 철근 및 연결 철근 대체)하였다. C5의 경우 연성 효과가 가장 크다. C6의 경우에는 배근 간격이 175mm로 125mm(C3, C4, C5)보다는 커서 콘크리트 구속 효과를 충분히 발휘하지 못하였다.
- (6) 실험체 C7, C8은 C1(횡방향 무근)의 실험체에 수평방향으로 드릴링 후 강봉을 삽입하고 양끝에 나사 형태의 Head를 정착하였다. 콘크리트 타설 후 Headed bar로 보강한 실험체 C7 와 C8은 C1 보다 강도, 연성 증진을 통한 구속 효과가 크다. Head 하부 콘크리트에 1:1 방사형 압축장이 형성됨을 알 수 있었다.
- (7) Cusson and Paultre식은 Headed bar의 횡방향 구속에 의한 강도 및 변형 증가량을 실험치와 근사하게 예측하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 국가지정연구실(National Research Laboratory, NRL)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. American Concrete Institute (ACI), 1999, ACI 318 Building Code Commentary (ACI 318M/318RM), Detroit, Michigan, pp. 299-315
2. Canadian Standards Association (CSA), 1994, CSA Standard A23.3-94. "Design of Concrete Structure", Rexdale, Ont., 220 pp.
3. Canadian Standards Association (CSA), 1994, CSA Standard A23.3-94. "Design of Concrete Structure", Rexdale, Ont., pp. 146-149.
4. Mander, J.B, Priestly, M.J.N., and Park, R., 1998, "Theoretical Stress-Strain model for Confined Concrete", Journal of Structure Engineering, ASCE, V114, No.8, pp. 1827-1849.
5. Collins, M.P, Mitchell, D., 1997, "Prestressed Concrete Structures", Response Publications, Montreal/Toronto, Canada, 776 pp.
6. Cusson, D., and Paultre, P. 1993, "Confined model for High-Performance Concrete Tied Columns". Rep. No.SMS-9320. Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Quebec, Canada
7. Cusson, D., and Paultre, P., 1994, "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties", Journal of Structural Engineering, ASCE, V 120 No.3, pp. 468-476.