



## 헤디드 바를 전단철근으로 사용한 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 반복하중 실험

김영훈<sup>1)</sup>·이주하<sup>2)</sup>·윤영수<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>미국 텍사스 A&M 대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>고려대학교 사회환경시스템공학과

(2005년 3월 7일 원고접수, 2005년 12월 2일)

### Repeated Loading Test of Shear-Critical Reinforced Concrete Beams with Headed Shear Reinforcement

Young-Hoon Kim<sup>1)</sup>, Joo-Ha Lee<sup>2)</sup>, and Young-Soo Yoon<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Texas A&M University, Texas 77843, USA

<sup>2)</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received March 7, 2005, Accepted December 2, 2005)

#### ABSTRACT

The repeated loading responses of four shear-critical reinforced concrete beams, with two different shear span-to-depth ratios, were studied. One series of beams was reinforced using pairs of bundled stirrups with 90° standard hooks, having free end extensions of  $6d_b$ . The companion beams contained shear reinforcement made with larger diameter headed bars anchored with 50mm diameter circular heads. A single headed bar had the same area as a pair of bundled stirrups and hence the two series were comparable. The test results indicate that beams containing headed bar stirrups have a superior performance to companion beams containing bundled standard stirrups, with improved ductility, larger energy absorption and enhanced post-peak load carrying capability. Due to splitting of the concrete cover and local crushing, the hooks of the standard stirrups opened, resulting in loss of anchorage. In contrast, the headed bar stirrups did not lose their anchorage and hence were able to develop strain hardening and also served to delay buckling of the flexural compression steel. Excellent load-deflection predictions were obtained by reducing the tension stiffening to account for repeated load effects.

**Keywords :** headed reinforcement, shear, anchorage, bundled stirrups, repeated loading

#### 1. 서 론

해양 구조물의 플랫폼과 같은 구조물의 벽체와 큰 전단력을 받는 보는 많은 양의 횡방향 철근이 배근되어야 전단에 효과적으로 저항하고, 반복되는 하중이나 예측 불허의 하중에 충분한 연성을 확보할 수 있다. 해양 구조물에 최초로 적용된 큰 직경의 헤디드 바는 작은 직경의 여러 개의 스티럽을 대체하여 효과적으로 사용되어 왔다<sup>1)</sup>. 마찰용접형 헤디드 바가 북미에 소개된 이후 ASTM A 970에 용접형 헤디드 바 표준제작규준이 제시되었다<sup>2)</sup>. 헤디드 바와 관련된 연구와 적용은 슬래브와 셸, 그리고 플레이트는<sup>3-5)</sup> 물론 지진하중과 구조형식에 따른 응력불연속구간의 전단저항성능 향상<sup>6)</sup>, 보-기둥 접합부의 내진성능 향상<sup>7-9)</sup>, 기존의 철근보다 짧은 정착길이<sup>10)</sup>, 교량에 적용되어 내진

성능 향상<sup>11)</sup>, 벽체의 보수 및 보강<sup>12)</sup> 및 지진으로 손상된 교량의 보수 및 보강<sup>13)</sup> 등에 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 정적 인발강도 실험과 같은 기초 연구가 진행되고 있다<sup>14-16)</sup>.

본 실험에서는 전단이 지배하는 보에 전단철근으로 헤디드 바를 사용하였을 때 항복 전후의 정착부의 변화를 면밀하게 관찰하기 위해 반복하중 방식을 채택하였다. 정착부가 거동을 시작하는 것은 전단철근이 항복한 후 어느 순간의 하중부터이며, 콘크리트와 철근 사이의 예측하기 힘든 역학관계로 급격한 파괴가 발생할 수 있다.

따라서 본 실험에서는 다음과 같은 두 가지 이유에서 하중 방식을 결정하였다. 첫째, 정적하중 방식으로 실험을 한다면 항복이후 정적하중을 제어하기가 매우 어렵다. 둘째, 전단파괴거동이라는 점을 고려한다면 항복 이후에는 변위 제어방식을 채택하는 것이 가장 효과적인 실험 방법이다. 다시 말해 변위 제어방식은 세심한 실험 수행이 필요한 거동에 적합한 반복하중 방식의 한 방법이며, 항복 이후에

\* Corresponding author

E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

©2006 by Korea Concrete Institute

정착부의 비탄성적인 응력 변화 양상을 단계별로 추적하면서 면밀한 실험을 할 수 있다는 점에서 본 실험에 적용하였다. 실험의 일관성을 위해 항복 이전과 이후 모두 반복 하중 방식을 채택하였고, 항복 이전에는 하중 제어방식으로 항복 이후에는 변위 제어방식으로 하중을 가하였다. 한번의 목표하중과 목표변위의 왕복 하중은 10번의 반복 회수를 가지며, 그 이유 또한 정착부의 면밀한 거동 분석을 하기 위함이었다. 본 실험의 주요 목적은 각각의 다발 스테럽을 헤디드 바로 대체하였을 때의 전체적인 거동 비교와 정착부의 거동 관찰에 있다.

## 2. 실험체 상세 및 실험 절차

### 2.1 일반

일반적으로 두꺼운 벽체 시공 시에 요구되는 철근량을 만족하기 위해 절곡이 가능한 작은 지름의 여러 개의 철근을 묶어 전단철근으로 사용한다. 이러한 다발 전단철근은 헤디드 바로 대체가 가능하며, 시공상 배근이 용이하기 때문에 널리 적용이 가능하다. 실험 목적에 가장 적합한 실험체를 제작하기 위해 전단철근의 배치는 벽체를 이상화한 구조 형식을 적용하였다. 실제 벽체로 실험을 수행하면 기초와 벽체의 접합부의 철근 상세가 실험 결과에 더 많은 영향을 미칠 수 있기 때문에 이를 배제하기 위해 벽체의 일부를 나타낼 수 있는 비교적 폭이 넓은 보를 사용하였다. 또한 한 단면에 3개의 전단철근을 배근하여 실제 벽체에서 연속되게 전단철근이 배근된 상태에 근접하게 제작하였으며, 3개의 전단철근을 한 단면에서 관찰할 수 있어 실험의 신뢰성을 높였다.

실험체의 보편화를 위한 일반 보의 제작은 다음과 같은 한계가 있었다. 일반 보처럼 폭보다 유효깊이를 크게 하기 위해 현재 폭에서 유효깊이를 늘리면 전단지간이 지나치게 커지게 된다.

또한 실험 절차상 두꺼운 벽체처럼 나타내면서 한 단면에 전단철근을 많이 배근하기 위해서는 폭을 줄이는 것에도 한계가 있었다. 이러한 이유로 비교적 폭이 넓은 보가 사용된 것이며, 철근 배근 방식은 일반적인 두꺼운 벽체의 철근 방식을 이용한 것이다.

비교적 폭이 넓은 보에 보편적인 보와 같은 폐쇄형 철근을 사용하면 주요 실험 목적인 정착부의 거동에 대한 분석이 어렵기 때문에 3개의 전단철근을 각 단면에 분할 배근하고 상부 면과 하부 면에 헤디드 바를 동등하게 배근하여 벽체의 연속된 철근을 나타내었다. 전단 지간이 같은 두 개의 보를 각각 표준 정착 길이를 가진 90° 절곡된 전형적인 스테럽과 헤디드 바가 같은 철근 양으로 구성되어 있다. 나머지 전단 지간이 같은 두 개의 보도 같은 방식으로 각각 헤디드 바와 스테럽을 배근하였다.

### 2.2 실험 변수 및 철근 상세

모든 실험체의 단면은 폭 750 mm, 깊이 550 mm, 그리고 유효깊이 432.5 mm의 비교적 폭이 넓은 보로 구성되어 있다. 실험체 W1 계열(실험체 W1, W1H)과 실험체 W2 계열(실험체 W2, W2H)의 지간길이는 각각 3300 mm와 2600 mm이다. 전단지간과 유효깊이의 비,  $a/d$ 는 실험체 W1 계열의 경우 3.42 (휨-전단 파괴 모드)이며, 실험체 W2 계열의 경우 2.61(전단파괴 모드)이다. 실험체 W1과 W2는 2개의 10M( $A_s=100 \text{ mm}^2$ ,  $d_b=11.3 \text{ mm}$ )의 다발 전단철근 3개가 275 mm 간격으로 배근되었다. 이러한 전단철근은 벽체의 횡방향 전단 갈고리군(ties)에 해당하며 양끝에 90° 절곡의 표준 정착길이  $6d_b$ 를 확보하였다<sup>17)</sup>. 본 실험에 사용된 헤디드 바는 50 mm 지름과 12.7 mm의 두께를 가진 원형헤드<sup>18)</sup>와 15M( $A_s=200 \text{ mm}^2$ ,  $d_b=15.9 \text{ mm}$ )의 철근으로 구성되어 있으며, 용접으로 헤드와 철근을 접합하였다. 실험체 W1H와 W2H는 3개의 15M 헤디드 바가 W1과 W2와 같이 275 mm의 간격으로 배근되었다. 모든 실험체에서 2개 묶음의 10M의 철근 단면적은 하나의 15M 헤디드 바의 철근 단면적에 대응한다.

Fig. 1의 사진에서 보듯이 모든 실험체에서 단면 중앙부에 배치된 전단철근의 갈고리와 헤디드 바는 좌우로 향하도록 교대 배치하여 좌우 대칭성이 유지되도록 하였다. Fig. 2에 보듯이 모든 실험체에 10개의 35M ( $A_s=1,000 \text{ mm}^2$ ,  $d_b=35.7 \text{ mm}$ ) 인장철근이 단면 하부에 배근되어 있으며 3개의 25M( $A_s=500 \text{ mm}^2$ ,  $d_b=25.2 \text{ mm}$ ) 상부철근이 배근되어 있다.

휨 철근비는 2.79%로 균일 배근하여 휨철근의 항복에 의한 휨파괴보다 전단철근의 항복에 의한 전단파괴가 먼저 발생하도록 하였다. 이것은 전단파괴를 통해 각각의 전단철근의 거동을 살피기 위함이다.

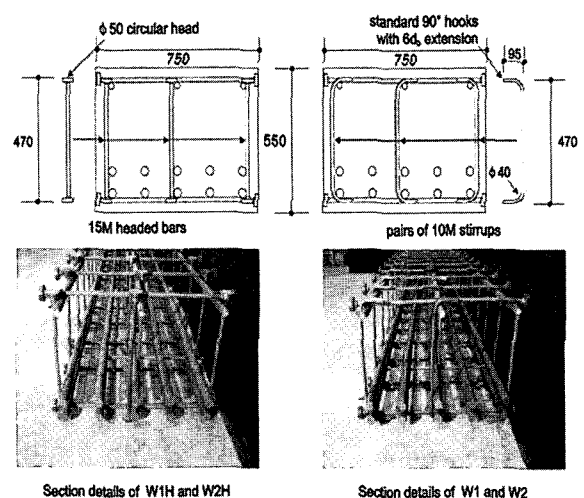


Fig. 1 Cross-sectional details of specimens

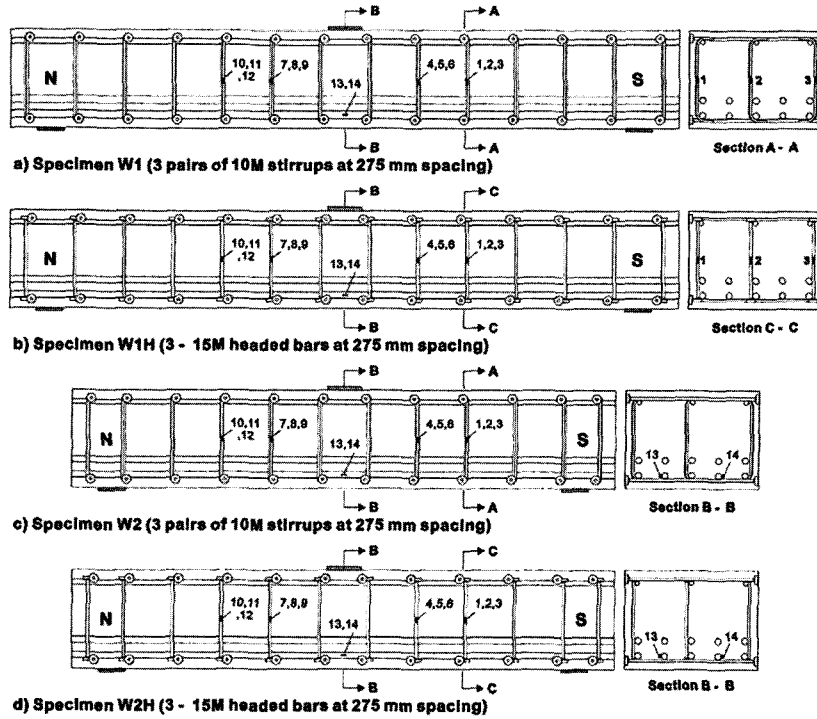


Fig. 2 Reinforcing steel details and locations of strain gages

Table 1 Concrete material properties

	$f_{ck}$ (MPa)	$\epsilon_c$ (mm/mm)	$f_{sp}$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
Average value	32.3	0.0032	2.80	4.39

[Note]  $f_{ck}$ : average compressive strength of concrete,  $\epsilon_c$ : corresponding limit strain,  $f_{sp}$ : the average splitting tensile stress,  $f_t$ : average modulus of rupture

Table 2 Steel material properties

Bar description	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (mm/mm)	$f_{sh}$ (MPa)	$\epsilon_{sh}$ (mm/mm)	$f_{ult}$ (MPa)	$\epsilon_{ult}$ (mm/mm)
35 M	455	0.0023	469	0.0150	625	0.1265
25 M	413	0.0021	419	0.0050	699	0.1078
15 M	440	0.0022	447	0.0055	620	0.0484
10 M	452	0.0023	457	0.0054	564	0.0605

[Note]  $f_y$ : steel yield stress,  $\epsilon_y$ : yield strain,  $f_{sh}$ : stress at which strain hardening commenced,  $\epsilon_{sh}$ : strain at which strain hardening commenced,  $f_{ult}$ : ultimate stress,  $\epsilon_{ult}$ : corresponding strain at ultimate

### 2.3 콘크리트 및 철근 물성치

콘크리트의 물성치는 Table 1에 나타나 있다. 처음 실험이 시작되는 날과 마지막 실험이 종료되는 날에 3개의 150×300mm의 공시체의 평균 압축강도  $f_{ck}$ 와 쪼갬 인장강도  $f_{sp}$ 를 측정하였다. 파괴계수  $f_t$ 는 3개의 100×100×400mm 보(지간 길이=300mm)를 3점 휨 실험을 통해 결정하였다.

처음 실험이 수행된 68일부터 실험이 종료되는 98일까지 재령에 따른 콘크리트 물성은 거의 변동이 없었으며, 이것은 모든 실험체에 사용된 콘크리트의 균일성을 나타낸다.

모든 실험체의 피복두께(전단철근)는 40mm로 동일하게 적용되었다. 특히, 헤디드 바가 사용된 실험체 W1H와 W2H에서 헤디드 바의 양끝 표면에서부터 콘크리트 표면까지 피복두께는 40mm이다.

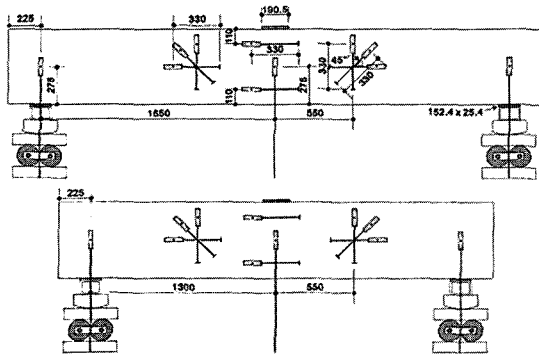
철근 물성치의 평균값은 Table 2에 나타나 있으며 각각의 철근에 대하여 3개 샘플을 취하여 평균값을 결정하였다.

### 2.4 실험 절차

지점조건(Fig. 3)에서 보는 것과 같이 높은 전단하중에 따른 지점부의 압축 파괴를 피하기 위해서 양쪽 지점에 롤러를 사용하였다. 하중은 보의 중앙 강재 재하판을 통해 전폭에 걸쳐 가력하였다. 각 실험체의 하중 프로그램은 10회 반복되는 목표하중(target load) 또는 목표변위(목표처짐량, target deflection)로 구성되어 있다.

전단철근의 최초 항복이 나타날 때까지 하중제어반복하중을 가하였으며, 전단철근의 항복 이후에는 반복하중을 가하였다. 실험이 수행되는 동안 최소하중은 50kN으로 설정하여 실험체와 UTM이 지속적으로 접촉되도록 하였다.

균열 폭과 균열 진전 과정은 지속적이고 규칙적으로 관찰하였다. 실험체에 적용되는 하중은 각 UTM에 내장되어 있는 로드셀(load cell)로 측정하였다. 변위는 12개의 LVDTs(linear variable differential transducer)를 이용하여 측정하였다. Fig. 3에 LVDTs 설치 위치가 상세히 나타나 있으며, 지점부의 변위와 보 중앙의 변위를 측정하여 실제 보의 변위를 계산하였다. Fig. 2에 14개의 스트레인 게이지



unit: mm

Fig. 3 Test set-up and LVDT details(top : W1(W1H), bot. : W2(W2H))

는 전단과 휨에 가장 취약한 단면의 철근에 부착하였다. 모든 변형률과 하중은 3초 간격으로 측정하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 실험체 W1

Fig. 4(a)에 실험체 W1의 하중-변위(처짐량)관계가 나타나 있다. 휨 균열은 160 kN-m의 모멘트에서 발생하였으며 최초 전단균열은 800 kN(전단 하중 400 kN)에서 발생하였다. 1200 kN의 하중을 가하는 10번의 반복하중 중 첫 번째 하중을 가력 했을 때 gage No. 7에서 최초의 철근항복과 주요 전단균열이 관찰되었다. 연속적인 1200 kN의 반복하중으로 추가적으로 2개의 전단철근(gages No. 8, 9)이 항복하는 것을 발견하였다. 최초의 전단철근 항복이 발생했을 때 보 중앙의 변위(10 mm)를  $\Delta_y$ (general shear yielding)로 표기하고, 항복 후에는 변위 제어(displacement control)방식의 반복하중을 가하였다. 변위가 12.6 mm일 때 휨철근의 항복(gage No. 13)이 발생하였고, 여러 전단철근(gages No. 1, 2, 4, 5)이 항복하였다. 이때 전단균열을 따라 균열면 사이의 마찰로 인한 콘크리트 탈락 현상이 발생하였다. 최대하중이 1788 kN에서 15 mm의 변위와 2.0 mm의 최대 전단균열 폭이 관찰되었다. 이때 보의 중앙 상부에서 반복하중으로 콘크리트 피복탈락 현상이 발생하였다. 17.5 mm의 변위에서 압축 철근의 좌굴 현상과 함께 갈고리가 바깥쪽으로 꺾이며 콘크리트 표면을 뚫고 나오는 현상이 발생하였다. 실험은 변위가 2.25  $\Delta_y$ 에서 중지되었으며, 이때 하중은 최대하중의 51%에 해당하였다.

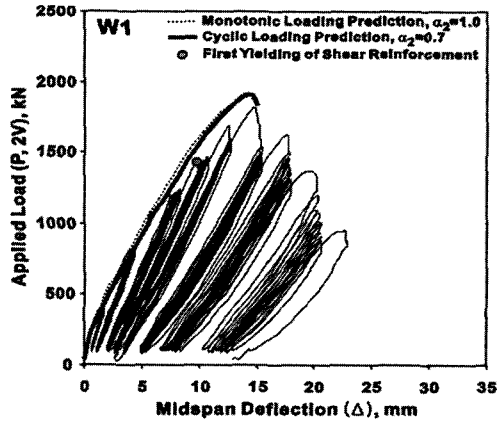
#### 3.2 실험체 W1H

실험체 W1H는 W1과 동일한 조건이며 단지 전단철근이 헤디드 바로 사용되었다. Fig. 4(b)에 하중-처짐 관계가 나

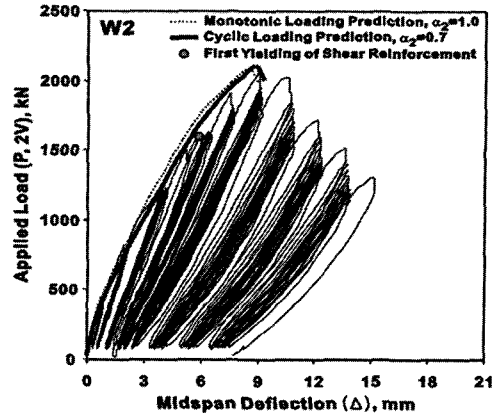
타나 있다. 최초의 휨균열은 140 kN-m의 모멘트에서 발생하였으며, 주요 전단균열은 800 kN에서 발생하였다. 콘크리트 면에 설치한 수직 변위를 측정하는 LVDTs는 변위가 10.4 mm일 때 주요 철근의 항복을 나타낸다. 이러한 관측이 가능한 것은 게이지에는 측정되지 않더라도 주요 균열 폭의 큰 증가가 균열면 사이 철근의 변위를 나타내고, 이는 LVDTs의 변위의 증가로 나타나기 때문이다. 또한 반복하중에 의해 여러 전단철근(gages No. 2, 4, 6)이 항복하였다. 변위 12.7 mm의 하중이 재하되었을 때 9개의 헤디드바(gages No. 1~6, 8, 9, 11)는 항복하였다. 이후 동일 변위 반복하중에 의해 전단철근(gage No. 5)의 변형률은 변형률경화 시점에 도달하였으며, 휨철근(gage No. 14)은 항복을 시작하였다. 최대하중 1860 kN에서 변위 17.5 mm이 발생하였다. 계속되는 반복하중에 의해 전단철근(gages No. 4, 6, 11)은 변형률경화 시점에 도달하였으며 이때 관찰된 최대 전단 균열 폭은 2.5 mm이다. 변위 2.25  $\Delta_y$ 에서 수평 방향의 전단균열 진진과 보의 중앙 상부에서 콘크리트 피복탈락 현상이 발생하였다. 변위 2.50  $\Delta_y$ , 2.75  $\Delta_y$ 에서는 반복하중에 의해 부분 콘크리트 압축파괴와 같은 압축 거동과 피복탈락 현상이 발생하였다. 실험은 변위가 3.0  $\Delta_y$ 일 때 중지하였으며 이때 하중은 최대하중의 61%에 해당하였다. 실험을 수행하는 동안 헤디드 바 전단철근의 양끝(head)에는 어떠한 정착손실(anchorage loss)도 발생하지 않았다. 실험체 W1과 W1H에 동시에 관찰된 보 중앙 상부의 콘크리트 피복탈락은 큰 전단응력에 의한 상부철근의 좌굴로 인한 것으로 판단된다. 발생 시점 또한 실험체 W1은 변위가 1.50  $\Delta_y$ 이고 실험체 W1H의 경우에는 2.0  $\Delta_y$ 이다. 이것으로 보아 전단철근의 정착부 종류가 상부철근의 좌굴 지연에 주요한 변수로 작용함을 알 수 있다.

#### 3.3 실험체 W2

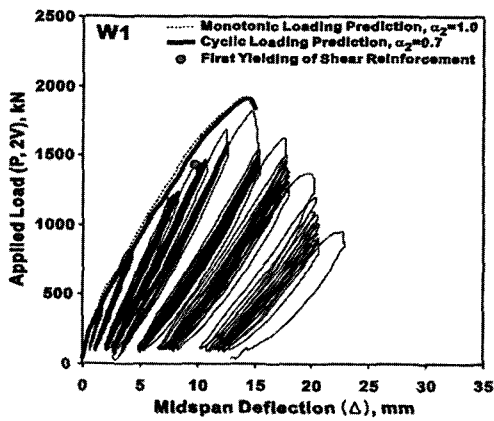
실험체 W2의 하중-변위 관계는 Fig. 4(c)에 나타나 있다. 최초의 휨균열은 160 kN-m의 모멘트에서 발생하였으며, 주요 휨-전단균열은 800 kN에서 발생하였다. 최초의 전단철근 항복은 변위가 5.25 mm일 때이며, gage No. 3에서 관찰되었다. 최대하중이 2047 kN일 때 변위는 9 mm로 관찰되었으며, 최대 전단균열 폭은 1.1 mm이다. 이때 전단철근 변형률의 급격한 저하 현상이 발생하였다. 또한 보의 중앙 상부에 콘크리트의 압축파괴와 같은 압축거동과 수평 방향 전단균열이 발생하였다. 변위 1.75  $\Delta_y$ 에서 보 중앙 상부의 콘크리트 피복탈락 현상도 관찰되었다. 이러한 현상은 또한 상부철근의 좌굴을 동반한 전단철근 갈고리의 대변형을 시사한다. 이후 반복하중을 가하는 동안 여러 전단철근의 갈고리의 대변형을 시사하는 콘크리트 피복탈락 현상이 발견되었다. 최대하중의 62.8%가 되었을 때 실험을 종료하였다.



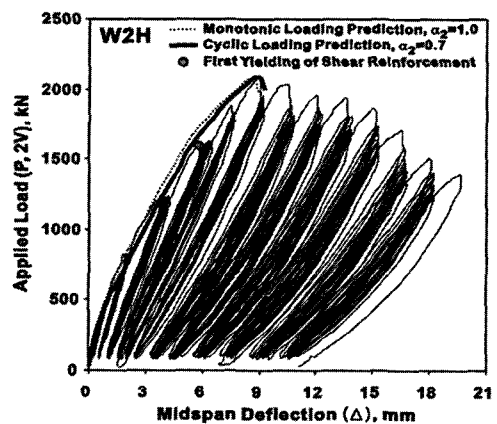
(a) Specimen W1



(c) Specimen W2



(b) Specimen W1



(d) Specimen W2H

Fig. 4 Experimental and predicted load-deflection responses for specimens(P: applied load, V: shear force)

### 3.4 실험체 W2H

실험체 W2H의 하중-변위 관계는 Fig. 4(d)에 잘 나타나 있다. 최초의 휨균열은 160 kN-m의 모멘트에서 발생하였으며, 주요 휨-전단균열은 800 kN에서 발생하였다. 헤드 전단철근의 최초의 항복은 변위가 5.83 mm일 때 gage No. 3에서 관찰되었다. 이때 재하된 하중과 변위는 W2와 동일하다. 변위 1.25Δ에서 일부 전단철근(gage No. 4)에서 변형률경화가 시작되었다. 최대하중 2073 kN에서 변위 9 mm가 관찰되었다. 이후 반복하중에 의해 여러 철근이 항복(gages No. 5, 6)을 하거나 변형률경화(gages No. 1~4, 7, 8, 9)가 시작되었다. 이때 관찰된 최대 전단균열 폭은 1.5 mm이다. 보의 중앙 상부에 콘크리트 피복탈락 현상이 전단균열의 마찰 현상과 함께 관찰되었다. 변위 2.25Δ에서 반복하중에 의해 수평 방향의 전단균열이 기존의 사균열과 만나는 것이 발견되었다. 변위 2.5Δ, 2.75Δ, 3.0Δ에서 여러 부분 콘크리트 압축파괴와 콘크리트 피복탈락이 발견되었다. 최대하중의 65%가 되었을 때 실험을 종료하였다.

또한 W1과 W1H의 실험에서 보는 것과 같이, 실험 수행

하는 동안 헤드 바 전단철근의 양끝(head)에서 어떠한 정착손실도 발생하지 않았다. Fig. 5는 실험 종료 후 실험체 사진을 보여주고 있다.

## 4. 실험 분석

### 4.1 하중-변위 관계 실험값 및 예측값 비교

정적하중 및 반복하중에 의한 실험체의 하중-변위 관계식을 예측하기 위하여 프로그램 RESPONSE 2000을 사용하였다<sup>18)</sup>. 본 프로그램은 MCFT(modified compression field theory)에 기초한 전단 및 휨<sup>19)</sup>에 대한 단면 해석 프로그램이다. 단면의 철근 상세 및 콘크리트 물성치를 기본 입력 값으로 하여 지점 조건 및 전단지간 길이 또한 입력할 수 있는 전단면 해석(full member response) 프로그램이다.

콘크리트의 인장경화(tension stiffening)는 하중 재하 방식을 변수로 한다<sup>20,21)</sup>. 본 개념으로 하중 종류에 따른 균열 면 사이에 콘크리트의 평균 인장응력을 고려하여 균열 이후의 콘크리트 부재의 거동에 대해 예측하여 실제 실험 조

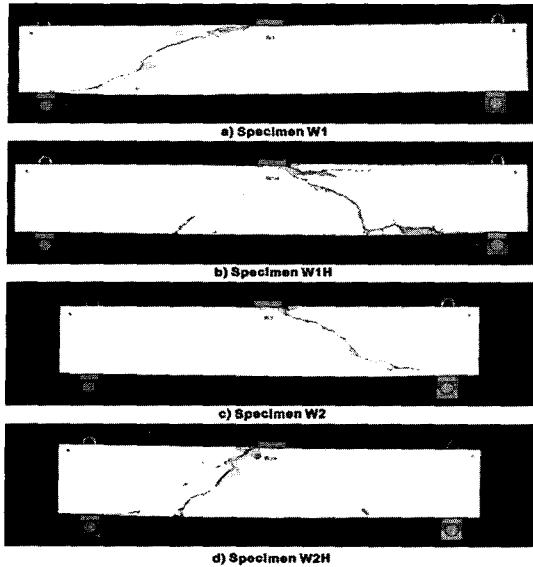


Fig. 5 Specimens after testing

건을 충분히 고려하였다. 다음의 Vecchio와 Collins가 제안한 평균 인장응력,  $f_c$ 는 콘크리트의 변위,  $\epsilon_c$ 의 함수로 다음 식(1)과 같다. 여기서  $f_{cr}$ 은 콘크리트 균열 발생 응력,  $\alpha_1$ 은 철근의 부착특성계수(이형철근:  $\alpha_1=1.0$ , 원형철근:  $\alpha_1=0.7$ ),  $\alpha_2$ 는 하중 특성 계수(정적하중:  $\alpha_2=1.0$ , 지속하중이나 반복하중:  $\alpha_2=0.7$ ) 이다.

$$f_c = \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \epsilon_c}} \quad (1)$$

Fig. 4 와 Table 3은 각각의 실험체의 하중-변위의 관계를 실험값과 예측치(정적하중과 반복하중)를 비교하였다. 각각의 실험체에 기본적으로 자중을 모두 고려하여 예측하였으며 정적하중에 의한 정확도보다 반복하중 특성을 고려한 예측이 더욱 실측에 근접한 정확도를 나타냈다. 최대하중에 대한 예측 정확도에서 실험치와 오차 범위는 5%이내이며 최대하중에 의한 부재 변위에서 오차 범위는 17%이내이다.

정착부의 형상을 고려한 변수를 MCFT이론에서는 고려하지 않기 때문에 본 실험의 해석에서도 포함하지 않았다. 미묘한 전단철근의 물성치의 차이만이 실험체의 특성에 적합하게 예측하였다. 이러한 예측 값과 실험값의 비교에서

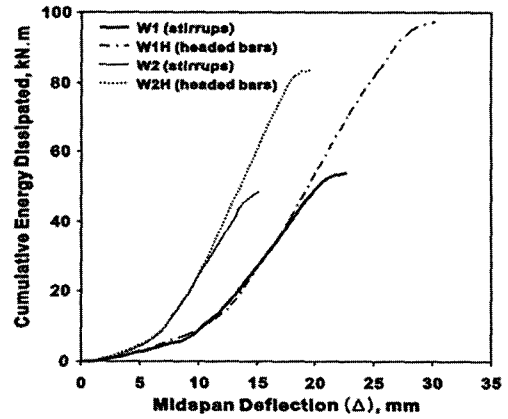


Fig. 6 Cumulative energy dissipated vs. midspan deflection

일련의 실험의 타당성을 증명할 수 있었다. 또한 동적 실험치의 타당성이 증명됨과 동시에 본 실험에서 하중 제어의 어려움으로 하지 못한 정적 실험에 대한 결과를 예측할 수 있었다. 지금의 이론을 기초로 한 예측은 정착부의 형상과 특성을 고려하는데 한계가 있지만 적어도 최대하중까지는 정착부의 차이에 의한 보의 거동에 차이가 없다는 것을 알 수 있었다. 결론적으로 양끝이 다른 전단철근의 종류의 차이가 최대하중 이후 거동에 직접적으로 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

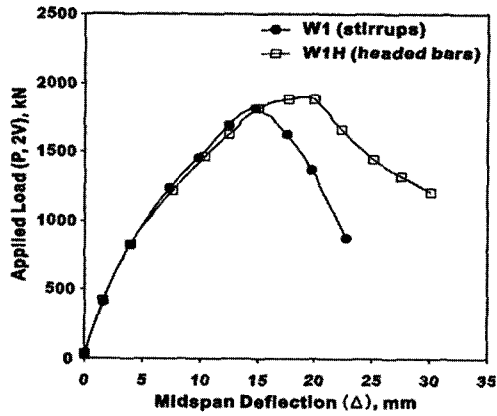
#### 4.2 에너지 흡수량 비교

에너지 흡수량(cumulative energy dissipated)은 Hysteric loop의 적분 값이다. Fig. 6에 보 중앙 변위에 의한 에너지 흡수량이 나타나 있으며, 실험체 W1H(W2H)는 실험체 W1(W2)의 에너지 흡수량보다 82%(73%)이상의 에너지 흡수량을 가지고 있다. 실험체 W1과 W2에서 실험 중 갈고리가 바깥쪽으로 꺾이는 현상과 콘크리트 표면을 뚫고 나오는 현상이 동시에 발생하였다. 에너지 흡수량의 차이에서 헤드 바는 에너지 흡수량에 매우 뛰어난 기여를 하며, 특히 정착부의 거동에 차이가 발생하는 시점부터 기울기의 차이가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. 각각의 그래프에서 공통적으로 발견되는 최초의 기울기 급변 지점은 철근의 항복 지점과 일치하는 지점이다.

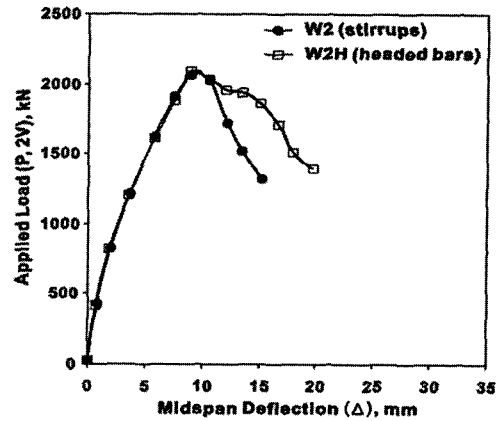
Fig. 7은 네 개의 실험체의 하중-변위 관계를 비교하여

Table 3 Comparison of predicted and experimental results

Specimen	Experimental result		Monotonic prediction( $\alpha_2 = 1.0$ )		Cyclic prediction( $\alpha_2 = 0.7$ )	
	Max. load(kN)	Deflection at max. load(mm)	Max. load(kN)	Deflection at max. load(mm)	Max. load(kN)	Deflection at max. load(mm)
W1	1825	15.25	1924	14.186	1914	14.336
W1H	1897	17.76	1924	14.345	1923	14.666
W2	2078	9.05	2092	8.501	2107	8.829
W2H	2104	9.07	2082	8.529	2096	8.845

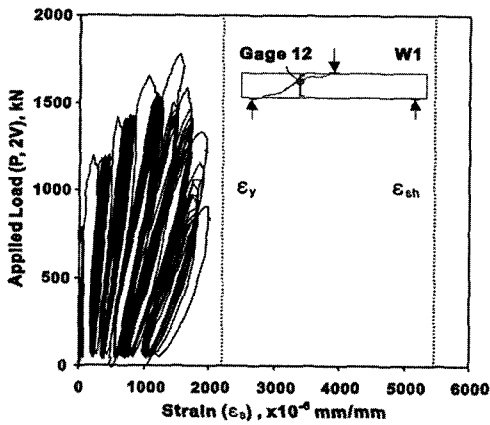


(a) Specimen W1 & W1H

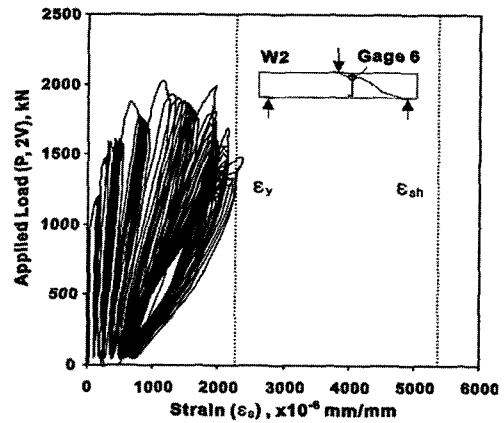


(b) Specimen W2 & W2H

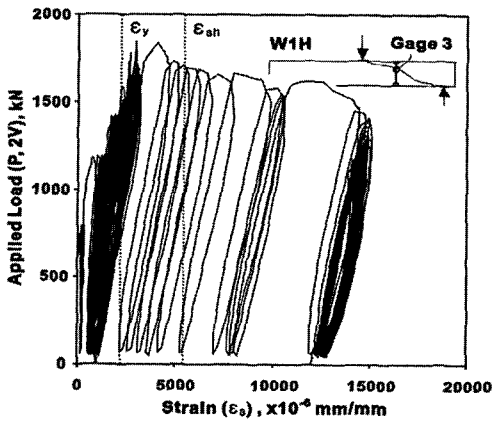
Fig. 7 Comparison of load-deflection envelope



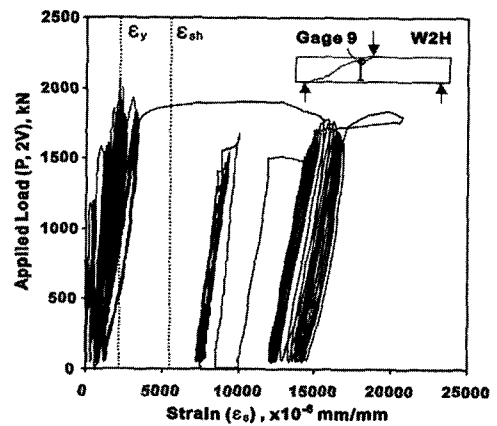
(a) Specimen W1



(c) Specimen W2



(b) Specimen W1H



(d) Specimen W2H

Fig. 8 Load vs. strain responses of stirrups for specimens

제시하고 있다.

실험체 W1과 W2는 주요한 갈고리의 정착손실이 발생하기 전에는 W1H와 W2H와 거의 비슷한 하중-변위 관계를 보여주었다. 전단철근 양끝의 차이가 최대하중 이후의 거동에 지대한 영향을 미쳤다.

### 4.3 전단철근의 비교

Fig. 8은 하중-전단철근(주요 전단균열면)의 변형률 관계를 보여준다. 반면 같은 위치에 배치된 실험체 W1과 W2의 전단철근은 반복하중에 의해 갈고리의 정착손실이 발생

하여 항복 거동을 하지 못함을 알 수 있었다.

실험체 W1H와 실험체 W2H의 헤디드 전단철근은 항복 이후 철근의 변형률경화와 함께 전단철근 사이의 응력 재분배 현상이 발생하였다. 증가하거나 감소하는 하중에 철근의 하중 분담이 이루어져 보의 중앙에서 지점까지 전체적인 철근의 변형률이 비슷한 경향으로 증가하거나 감소하였다. 하지만 W1과 W2의 경우에는 응력 재분배는 최대하중까지 이루어졌으나 연속적인 정착손실과 동시에 응력 집중 현상이 발생하여 일부 철근 게이지가 손실되거나 항복 이상으로 하중을 분담하지 못하였다. 또한 반복적인 하중에 대해 어떤 철근이 그 하중에 주요하게 반응이 일어나는지 예측하는 것이 어려웠다. 다시 말해 응력 재분배가 이루어지지 않고 어느 특정 철근에 응력 집중 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 면에 위치한 3개의 철근 중 일부에 하중이 실려 콘크리트와 철근의 부착 성능에 심각한 손상을 주는 것을 알 수 있었다.

보의 전체 거동(Fig. 7)과 철근의 변형률 변화 양상(Fig. 8)을 함께 고려한다면, 실험체 W1(W2)의 철근이 하중을 부담하는 크기가 헤디드 바를 가진 실험체 W1H(W2H)의 철근이 하중을 부담하는 크기보다 작은 것을 알 수 있었다. 또한 실험체 W1(W2)의 콘크리트가 하중을 부담하는 크기가 헤디드 바를 가진 실험체 W1H(W2H)의 콘크리트가 하중을 부담하는 크기보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다. 실험체 W1(W2)에서 전단철근이 정착 성능을 상실하고 이는 콘크리트에 상당한 하중으로 작용하였다. 이로 인해 균열폭 증가와 함께 급격한 콘크리트 파괴가 발생하며, 콘크리트와 철근의 부착을 보장할 수 없을 정도로 철근의 하중 분담이 가해지고 연속적으로 콘크리트에 하중 분담이 늘어나 콘크리트가 압축 파괴되면서 급격한 전단파괴가 진행되었음을 알 수 있었다. 반면 헤디드 바를 가진 실험체 W1H(W2H)의 경우에도 전단파괴가 발생하였지만 하중에 대한 철근의 분담이 변형률경화까지 거치면서 지속적으로 기여하고 있기 때문에 콘크리트의 하중 분담을 줄여 주었다. 이러한 차이는 각 전단철근의 양끝의 형상에 차이가 있기 때문에 발생하였다. 실험 종료 후 압축 전단 파괴가 발생한 주요 지점의 전단철근의 양끝(Fig. 9)을 관찰하였다. 갈고리(W1, W2) 바로 밑 부분의 그림자 진 부분은 콘크리트의 압축파괴가 발생하면서 정착이 상실한 것을 보여 준다. 반면 헤디드 바의 헤드(W1H, W2H) 바로 밑의 콘크리트는 정착손실과 같은 현상을 시사하는 변화가 없이 헤드와 완전히 부착된 상태이다.

#### 4.4 전단경간비에 따른 전단철근의 영향 분석

Table 4에서 실험체의 중요 거동 변화 시점(항복하중, 최대하중, 실험 종료 시점의 하중)을 파괴형상과 에너지량을 포함하여 상대적 값으로 도표화하였다.  $P_y$ 와  $\Delta_y$ 는 각각 전단철근이 항복할 때 하중과 변위를 나타내며,  $P_u$ 와  $\Delta_u$ 는 각각 실험체 종료 시점의 하중과 변위를 나타낸다.  $P_{max}$ 와  $\Delta P_{max}$ 는 각각 실험체가 최대하중과 그때의 변위를 나타낸다. 최대하중을 기준으로 최초로 하중이 65%이하로 떨어질 때 실험을 종료하였고  $P_u$ 로 결정하였다. 그러므로  $P_u/P_{max}$ 은 0.65 이하의 값을 가져야 하며, 실제 결과에서도 0.51에서 0.65 사이의 값이 나타났다.  $\Delta_u/\Delta P_{max}$ 은 최대하중 이후 실험 종료까지 최대하중과 비교하여 어느 정도의 변형이 발생하였는가를 보여준다. 변위의 관점에서 W1H(W2H)가 W1(W2)보다  $\Delta_u/\Delta P_{max}$ 의 값이 크다.

전단경간비에 따른 헤디드 바의 효율성을 살펴보면 다음과 같은 두 가지 관점에서 접근이 가능하다. 앞에서 말한 변위 관점에서 보면 헤디드 바의 전단경간이 짧은 경우 (1.70/1.49=1.14)보다 전단경간이 긴 경우(2.16/1.67=1.29)에 더 큰 효율성을 보여준다. 정착성능의 차이가 발생하는 최대하중 이전의 단계에서는 거동이 비슷하기 때문에 에너지 흡수량 차이는 상대적으로 작다고 가정할 수 있다. 그러므로 최대하중 이전의 에너지 흡수량은 W1H와 W1 그리고 W2와 W2H는 각각 서로 같다. 이런 가정 하에서 절대적인 에너지 흡수량 차이를 살펴보면 헤디드 바는 W1H에서 W1보다 43.67 KN-m의 에너지를 더 흡수하게 하며 W2H에서 W2보다 35.20 KN-m의 에너지를 더 흡수하게 한다. 결국 어느 전단지간 또는 a/d에서 더 효율적인 헤디드 바의 거동이 있다고 결론을 내리기 어렵다. 이렇게 변위의 관점과 흡수 에너지량의 관점에서 다른 결과가 나타난 것은 휨과 전단 거동, 헤디드 바의 역학 관계가 단순한 상관 관계가 아님을 보여준다. 한편,  $\Delta_u/\Delta_y$ ,  $\Delta P_{max}/\Delta_y$ ,  $P_u/P_y$ 은 각각의 변수 사이에 특별한 경향성을 보여주지 않지만 전체적으로 실험이 어떻게 수행되었는지 보여주고 있다.

### 5. 결 론

본 실험에서 헤디드 전단철근의 사용한 보와 보편적 철근을 사용한 보 사이에 여러 다른 구조적 차이를 알 수 있었다. 네 개 보의 전단 거동 실험 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Table 4 Summary of responses

Specimen	$\Delta_u/\Delta_y$	$\Delta P_{max}/\Delta_y$	$\Delta_u/\Delta P_{max}$	$P_u/P_y$	$P_u/P_{max}$	Energy(KN.m)	Failure mode
W1	2.31	1.55	1.49	0.64	0.51	53.80	Shear failure anchorage loss of six bars
W1H	2.90	1.71	1.70	0.83	0.61	97.47	Shear failure
W2	2.88	1.72	1.67	0.80	0.63	48.50	Shear failure anchorage loss of four bars
W2H	3.36	1.55	2.16	0.86	0.65	83.70	Shear failure



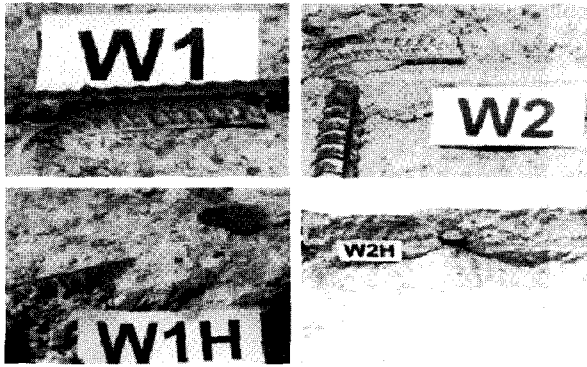


Fig. 9 Anchorage details after test

## 참고문헌

1. Berner, D. E., Gerwick, B. C., and Hoff, G. C. "T-headed Stirrup Bar", *Concrete International*, May, 1991, pp.49~53.
  2. ASTM, "Standard Specification for Welded or Forged Headed Bars for Concrete Reinforcement," *A970/A970M-98*, West Conshohocken, Pa., 1998.
  3. McLean, D. I., Phan, L. T., Lew, H. S., and White, R. N., "Punching Shear Behavior of Lightweight Concrete Slabs and Shells," *ACI Structural Journal*, Vol.87, No.4, 1990, pp.386~392.
  4. Dilger, W. H., Ghali A. "Shear Reinforcement for Concrete Slabs", *Journal of Structure Division*, ASCE 107(ST12), 1981, pp.2403~2420.
  5. Maraouk, H., Jiang, D. "Experimental Investigation on Shear Enhancement Types for High-Strength Concrete Plates", *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.1, 1997, pp.49~58.
  6. Berner, D. E. and Hoff, G. C. "Headed Reinforcement in Disturbed Strain Regions of Concrete Members", *Concrete International*, January 1994, pp.48~52.
  7. Wallace, J. W., "Headed Reinforcement A Viable Option", *Concrete International*, Dec. 1997, pp.47~53.
  8. Wallace, J. W., McConnell, S. W., Gupta, P., and Cote, P. A., "Use of Headed Reinforcement in Beam-Column Joints Subjected to Earthquake Loads", *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.5, 1998, pp.590~606.
  9. Sritharan, S., Ingham, J., Priestley, M., and Seible, F., "Design and Performance of Bridge Cap Beam/Column Joints using Headed Reinforcement and Mechanical Couplers", *ACI International*, SP-184, 1999, pp.7~21.
  10. Devries, R. A., Jirsa, J. O., and Bashandy, T., "Anchorage Capacity in Concrete of Headed Reinforcement with Shallow Embedments", *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.5, 1999, pp.728~736.
  11. Berner, D. E., Dahlgren, T., and Dahl, K., "Design and Detailing with Headed Reinforcement for Seismically Resistant Concrete Bridge Structures", *ACI International*, SP-184, 1999, pp.23~43.
  12. Haroun, M., Pardoan, G., Bhatia, H., Shahi, S., and Kazanjy, R., "Structural Behavior of Repaired Walls", *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.2, 2000, pp.259~268.
  13. Lehman, D. E., Gookin, S. E., Nacamuli, A. M., and Moehle, J. P., "Repair of Earthquake-Damaged Bridge Columns", *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.5, 2001, pp.728~736.
- 1) 네 개의 보는 휨철근의 항복 이전에 전단철근의 항복이 먼저 발생하여 전형적인 전단거동을 보여 주었다. 하중이 증가함에 따라 하중이 가해지는 부근에서 콘크리트 피복탈락을 동반한 압축파괴가 발생하였다.
  - 2) 반복하중에 의해 90°절곡의 표준 갈고리 상세를 가진 전단철근(실험체 W1, W2)의 정착 성능은 현저하게 감소하였으며, 항복응력을 증가하는 거동도 보여주지 못하였다. 최대하중 이후에 보의 중앙 상부와 하부에 콘크리트의 피복이 탈락하는 현상과 갈고리가 바깥쪽으로 벌어지는 변형이 발생하였다. 또한 갈고리 바로 밑의 콘크리트에 국부적인 압축파괴가 발생하면서 갈고리와 콘크리트와의 정착이 상실되었다.
  - 3) 반복하중에 의해 전단철근으로 사용된 헤디드 바(실험체 W1H, W2H)는 피복탈락 이후에도 충분한 구속 효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 전단철근으로 사용된 헤디드 바는 항복 이후에도 정착손실없이 전단철근 응력의 재분배와 함께 변형률경화 시점을 초과하는 변형률을 보여 주었다.
  - 4) 최대하중 이전에서 90°절곡의 표준 갈고리 상세를 가진 전단철근을 사용한 실험체와 헤디드 바를 전단철근으로 사용한 실험체는 비슷한 거동(하중-변위 관계)을 보여주는데, 이러한 현상은 전단철근 양끝의 정착 성능이 발휘하는 이전 단계이기 때문이다. 최대하중 이후에서 각 전단철근의 종류의 차이가 거동에 차이를 가져오는데 헤디드 바를 전단철근으로 사용하였을 경우에 하중 지속 능력 또는 에너지 흡수가 뛰어난 것으로 나타났다. 에너지 흡수량에서 일반적인 전단철근을 사용한 경우보다 헤디드 바를 사용한 경우에 대략 두 배의 값을 보여 주었다.
  - 5) MCFT이론에 근거한 하중-변위 예측에서 최대하중 검중의 오차 범위는 5%이내였으며, 최대하중에 의한 부재 변위 검중의 오차 범위는 17%이내이다. 반복하중에 의한 인장경화(tension stiffening) 감소 효과를 고려하였을 경우의 예측 값이 그렇지 않은 정적하중 예측 값보다 실험값에 더 근접한 값을 보여주었다.

14. 천성철, 김대영, “철근 기계적 정착장치의 설계 고려 사항과 인발특성”, 콘크리트학회 논문집, 13권 6호, 2001, pp.593~601.
15. 박명기, 신인용, 최동욱, “Headed Reinforcement 인발 실험”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, 2001. 11, pp.203~208.
16. H. K. Park, Y. S. Yoon, Y. H. Kim. “The Effect of Head Plate Details on Pull-out Behaviour of Headed Bars”, *Magazine of Concrete Research*, Vol.55, No.6, 2003, pp.485~496.
17. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, *ACI 318-02 and ACI 318R-02*, American Concrete Institute, Detroit, Mich, 2002.
18. Bentz, E. C. and Collins, M. P., *RESPONSE 2000*, Version 1.05, University of Toronto., 2000.
19. Collins, M. P., Mitchell, D., Adebar, P., and Vecchio, F. J., “A General Shear Design Method”, *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.1, 1996, pp.36~45.
20. Vecchio, F. J. and Collins, M. P. “The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Element Subjected to Shear”, *ACI Journal*, Vol.83, No.2, 1986, pp.219~231.
21. Collins, M. P. and Mitchell, D., *Prestressed concrete structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1991.

## 요 약

본 연구에서는 두 종류의 전단지간 대 유효깊이의 비( $a/d$ )를 가진 전단에 취약한 보 네 개에 대한 반복하중 실험을 수행하였다. 실험군에는  $6d_b$ 의 정착 길이의  $90^\circ$ 절곡된 갈고리를 가진 두 개의 스테럽을 묶은 하나의 다발 스테럽(bundled stirrups)을 배근하였으며 대조군에는 직경 50mm의 원형 헤드를 가진 헤디드 바를 배근하였다. 하나의 헤디드 바의 철근 직경은 하나의 다발 스테럽의 철근 직경과 같기 때문에 효과적인 실험 비교가 가능하였다. 실험 결과는 헤디드 바를 배근한 보가 일반 스테럽을 가진 보보다 연성, 에너지 흡수량, 최대하중 이후의 거동에 있어서 뛰어난 구조 성능을 보여 주었다. 반복하중에 의한 콘크리트 피복과 부분 압축파괴에 의해 스테럽의 갈고리는 바깥 방향으로의 변형과 함께 정착 성능을 상실하였다. 반면에, 헤디드 바는 헤드의 정착손실 발생 없이 변형률경화 시점을 지나서도 변형이 발생하였으며 압축 철근의 좌굴 발생을 지연하는 데에도 기여하는 것으로 나타났다. 반복하중에 의한 감소된 인장경화를 고려한 하중-변위 예측은 뛰어난 정확도를 보여 주었다.

**핵심용어** : 헤디드 바, 전단, 정착, 다발 스테럽, 반복하중