

Headed Shear Bar를 사용한 콘크리트 보의 반복 하중 실험

Repeated Loading Tests of Reinforced Concrete Beams Containing Headed Shear Reinforcement

김 영 훈* 윤 영 수** 데니스 미첼***
Kim, Young Hoon Yoon, Young Soo Mitchell, Denis

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 adsorption 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.

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.

* 정회원, 고려대학교 방재과학기술연구센터 연구원

** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

*** 캐나다 맥길대학교 토목공학과 교수

특히 원전구조물과 같은 고도의 안전성이 요구되는 내진 구조물 벽체와 고층 빌딩의 보-기둥 접합부, 교량의 접합부(Cap beam/Column joint), 기둥 및 벽체의 보강 기법으로도 연구 및 시공이 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 헤드드바가 기존의 전단 연결 철근을 대체하여 구조성능과 시공성을 향상하기에 적합한 대안으로 판단하여 이를 검증하기 위한 실험을 계획하였다. 특히, 본 연구에서 철근 콘크리트 보는 거대 구조물에 적용되는 벽체의 일부 또는 거대 철근 콘크리트 보를 재현하기 위해 제작되었다. 벽체를 모사한 보에 전단 철근의 종류와 전단 지간과 유효깊이의 비, a/d (span-to-depth ratio)를 변수로 하여 반복 하중 실험을 수행하였다.

2. 실험체 상세 및 실험 과정

2.1. 실험 변수 및 철근 상세

모든 실험체의 단면은 폭 750mm, 깊이 550mm, 그리고 유효 깊이 432.5mm로 구성되어 있다. 실험체 W1 계열(실험체 W1, W1H)과 실험체 W2 계열(실험체 W2, W2H)의 실험체는 각각 지간 길이 3300mm와 2600mm로 제작되었다. 전단 지간과 유효깊이의 비, a/d 는 실험체 W1 계열은 3.42 (전단-휨 파괴 모드)이며 실험체 W2 계열은 2.61 (전단 파괴 모드)이다. 실험체 W1과 W2는 2개의 No. 10 ($A_s = 100\text{mm}^2$, $d_b = 11.3\text{mm}$)의 묶음식 전단 철근 3개가 275mm 간격으로 배근되었다. 이러한 전단 철근은 벽체의 횡방향 철근 전단 갈고리근(ties)에 해당하며 양끝은 90° 절곡의 표준 정착 길이, $6d_b$ 를 확보하였다(그림. 1). 실험체 W1H와 W2H는 3개의 #5 ($A_s = 200\text{mm}^2$, $d_b = 15.9\text{mm}$) 헤드드 바가 W1과 W2와 같이 275mm의 간격으로 배근되었다.

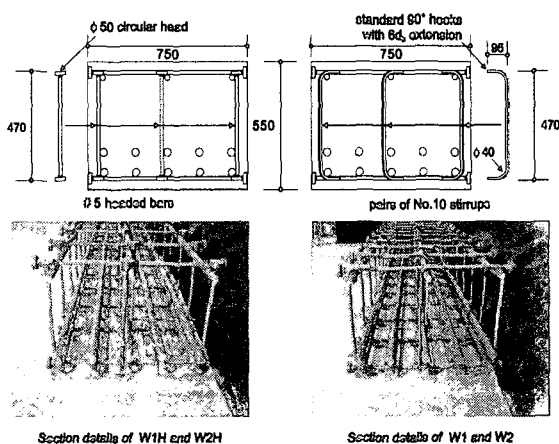


그림 1 단면 상세

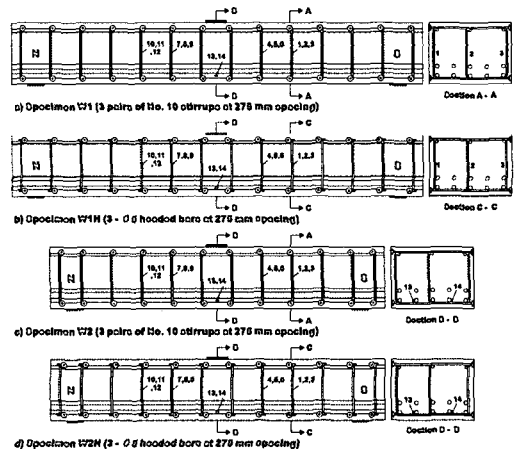


그림 2 실험체 상세 및 gage 상세

모든 실험체에서 2개 묶음의 No. 10의 철근 단면적은 하나의 #5 헤디드 바의 철근 단면적에 대응하도록 하여 실험체의 길이 방향으로 전단 철근은 헤디드 바로 대체하여 모든 실험체에 적용되었다. 모든 실험체 (W1, W1H, W2, W2H)에 10개의 No. 35 ($A_s = 1000\text{mm}^2$, $d_b = 35.7\text{mm}$) 휩 철근이 단면 하부에 배근되어 있으며 3개의 No. 25 ($A_s = 500\text{mm}^2$, $d_b = 25.2\text{mm}$) 압축 철근이 단면 상부에 배근되어 있다. 철근비는 2.79%으로 균일 배근 되어 있다(그림. 2). 연속 벽체를 모사하기 위해 스패 길이 방향의 직각 방향(폭 방향)으로 상, 하부에 #5 헤디드 바를 배근하였다.

2.2. 콘크리트 및 철근 물성치

실험체에 사용된 모든 콘크리트는 동시 타설되었으며 동일한 양생 조건에서 제작되었다. 처음 실험이 수행된 68일부터 실험이 종료되는 98일까지 콘크리트 물성은 거의 변동이 없었으며 이것은 모든 실험체에 사용된 콘크리트의 균일성을 나타낸다. 모든 실험체의 피복두께(전단철근)는 40mm로 동일하게 적용되었다. 특히, 헤디드바가 사용된 실험체 W1H와 W2H에서는, 피복두께는 헤디드바의 head 표면에서부터 콘크리트 표면까지 측정된 값은 40mm이다. 철근 물성치의 평균값은 표 2에 나타나 있으며 각각의 철근의 3개 샘플을 취하여 평균값을 취하였다.

표 1 콘크리트 물성치 (Mpa, mm/mm)

콘크리트 물성치	f'_c	ϵ'_c	f_{sp}	f_r
평균값	32.3	0.0032	2.80	4.39

표 2 철근 물성치 (Mpa, mm/mm)

철근 종류	f_y	ϵ_y	f_{sh}	ϵ_{sh}	f_{ult}	ϵ_{ult}
No.35	455	0.0023	469	0.0150	625	0.1265
No.25	413	0.0021	419	0.0050	699	0.1078
No.10	452	0.0023	457	0.0054	564	0.0605
#5	440	0.0022	447	0.0055	620	0.0484

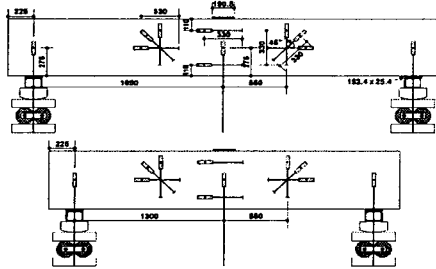


그림 3 LVDTs 설치

2.3. 실험 과정

지점조건(그림 3)에서 보는 것과 같이 양쪽 롤러 조건이며 하중이 가해지는 지점은 회전(Rotation)은 허용하되 횡방향 변형(horizontal movement)는 구속되어 있다. 각 실험체의 하중 프로그램은 10회 반복되는 목표 하중(target load) 또는 목표 변형률(target deflection)로 구성되어 있다. 초기 하중 단계에서는 실험체의 전단 철근의 최초 항복이 나타날 때까지 하중 제어 반복 하중을 가하였으며, 전단 철근의 항복 이후에는 각 실험체는 변형률 제어 반복 하중이 가해졌다. 실험이 수행되는 동안 최소 하중은 50kN으로 설정되어 실험체와 UTM가 지속적으로 접촉되어 있었다. 균열폭과 균열 전진 과정은 지속적이고 규칙적으로 관찰되었다. 실험체에 적용되는 하중은 각 UTM에 내장되어 있는 로드셀로 측정되었다. 변형량은 12개의 LVDTs(linear variable differential transformers)를 이용하여 측정하였다. 그림 3에 LVDTs 설치 위치가 상세히 나타나 있으며 지점부의 처짐량과 보 중앙의 처짐량을 측정하여 실제 보의 처짐량을 계산하였다. 14개의 스트레인 게이지 전단과 휩에 가장 취약한

단면의 철근에 부착되어 있다(그림 2). 모든 변형률과 하중은 3초 간격으로 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 실험체 W1

1200kN의 하중을 가하는 10번의 반복하중 중 첫 번째 하중(1st cycle)에서 주요 전단 균열이 발생하였다.(First yielding, gage 7) 계속되는 반복하중으로 추가적인 두 개의 전단 철근(gages 8, 9) 항복이 발생하였다. 최초의 전단 철근 항복이 발생했을 때 보 중앙의 처짐량(10mm)을 Δ_y (General shear yielding)으로 표기하고 이 때의 변형률 이후 하중 재하시 변형률 제어 반복하중을 가하였다. 처짐량이 12.6mm일 때 휨 철근 항복(gage 13)이 발생하였고 여러 전단 철근이(gages 1, 2, 4 and 5) 항복하였다. 최대 하중은 1788kN에서 15mm의 처짐량과 최대 전단 균열은 2.0mm가 관찰되었다. 이때 보의 중앙 상부에서 반복하중에 의한 콘크리트 피복 탈락 현상이 발생하였다. 17.5mm의 처짐량에서 압축 철근의 좌굴 현상과 함께 갈고리의 철근 대변형이 발생하였다.

3.2 실험체 W1H

실험은 수행하는 동안 헤드 바 전단 철근의 정착부(Head)의 어떠한 정착 손실(Anchorage loss)이 발생하지 않았다. 실험체 W1과 W1H에 동시에 관찰된 보 중앙 상부의 콘크리트 피복 탈락은 높은 전단 응력에 의한 상부 휨 철근의 좌굴로 인한 것으로 판단된다. 발생 시점 또한 실험체 W1은 처짐량이 $1.50 \Delta_y$ 이고 실험체 W1H의 경우 $2.0 \Delta_y$ 이다. 이것으로 보아 전단 철근의 정착부 종류가 상부 철근의 좌굴 지연에 주요한 변수로 작용함을 알 수 있다.

3.3 실험체 W2

중앙 상부의 콘크리트 피복 탈락 현상도 관찰되었다(처짐량 $1.75 \Delta_y$). 이러한 현상은 또한 상부 휨 철근의 좌굴을 동반한 전단 철근 갈고리의 대변형을 시사한다. 이후 반복하중을 가하는 동안 여러 전단 철근의 갈고리의 대변형을 시사하는 콘크리트 피복 탈락 현상이 발견되었다. 최대 하중의 62.8%가 되었을 때 실험을 종료하였다.

3.4 실험체 W2H

반복 하중에 의해 수평 방향의 전단 균열이 기준의 사균열과 만나는 것이 발견되었다(처짐량 $2.25 \Delta_y$). 여러 부분 콘크리트 압축 파괴와 콘크리트 피복 탈락이 발견되었다(처짐량 $2.5 \Delta_y$, $2.75 \Delta_y$, $3.0 \Delta_y$). 최대 하중의 65%가 되었을 때 실험을 종료하였다. 또한 W1과 W1H의 실험에서 보는 것과 같이 실험 수행

하는 동안 헤드 바 전단 철근의 정착부(Head)의 어떠한 정착 손실(Anchorage loss)이 발생하지 않았다. 그림 6은 실험 종료 후 실험체 사진을 보여주고 있다.

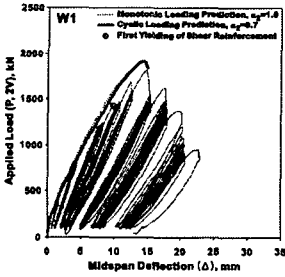


그림 4.1 실험체 W1
(예측값과 실험값)

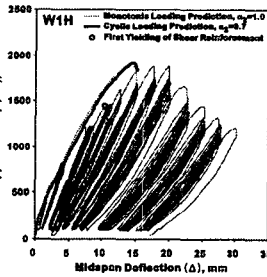


그림 4.2 실험체 W1H
(예측값과 실험값)

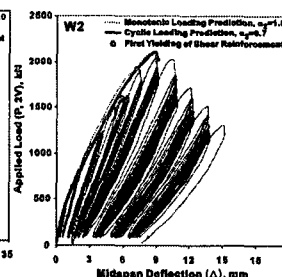


그림 5.1 실험체 W2
(예측값과 실험값)

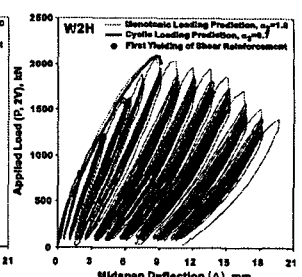


그림 5.2 실험체 W2H
(예측값과 실험값)

4. 실험 분석

4.1 Response Prediction

정적 하중 및 반복 하중에 의한 실험체의 하중-처짐량 관계식을 예측하기 위하여 프로그램 RESPONSE 2000을 사용하였다. 본 프로그램은 MCFT(Modified Compression Field Theory)에 기초한 전단 및 휨에 대한 단면 해석 프로그램이다. 콘크리트의 인장 경화(Tension Stiffening)는 하중 재하 방식을 변수로 한다. 본 개념으로 하중 종류에 따른 균열면 사이에 콘크리트의 평균 인장 응력을 고려하여 균열 이후의 콘크리트 부재의 거동에 대해 예측하여 실제 실험 조건을 충분히 고려하였다.

그림 4, 5은 각각의 실험체의 하중-처짐량의 관계를 실험값과 예측치(정적 하중과 반복 하중)를 비교하였다(Response 2000). 각각의 실험체에 기본적으로 자중을 모두 고려하여 예측하였으며 정적 하중에 의한 정확도보다 반복하중 특성을 고려한 예측이 더욱 실측에 근접한 정확도를 나타냈다. 최대 하중에 대한 예측 정확도는 실험치와 5%이내의 오차 범위를 나타냈으며 최대 하중에 의한 부재 처짐량에 있어서는 17%이내의 오차 범위를 보였다.

4.2 Cumulative Energy Dissipation

에너지 흡수량(Cumulative Energy Dissipation)은 Hysteric loop의 적분값이다. 그림 6에 보 중앙 처짐량에 의한 에너지 흡수량이 나타나 있으며 실험체 W1H(W2H)는 실험체 W1(W2)의 에너지 흡수량보다 82%(73%)이상의 에너지 흡수량을 보여주고 있다. 그림 7은 네 개의 실험체의 하중-처짐량 관계를 비교하여 제시하고 있다. 실험체 W1과 W2는 주요한 갈고리의 정착 손실이 발생하기 전에는 W1H와 W2H와 거의 비슷한 하중-처짐량 관계를 보여 주고 있다. 헤드 바가 최대 하중 이후의 거동(Post-peak response)에 지대한 영향을 미침을 알 수 있다.

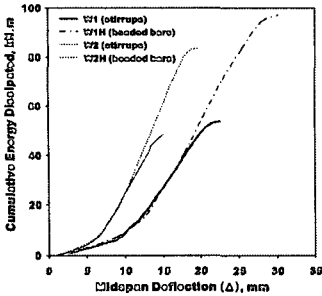


그림 6 에너지 흡수량과 처짐량의 관계

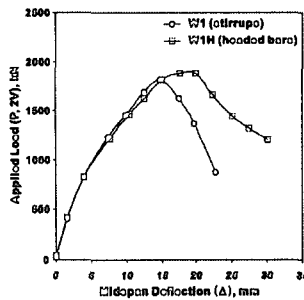


그림 7.1 하중-처짐량 비교 (W1 and W1H)

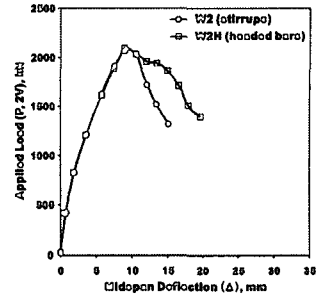


그림 7.2 하중-처짐량 비교 (W2 and W2H)

5. 결론

1. 반복하중에 의한 90° 절곡의 표준 정착 길이를 가진 전단 철근(실험체 W1, W2)의 정착 성능은 현저하게 감소하며 항복 응력을 증가하는 거동은 보여주지 못하고 보의 중앙 상부와 하부에 콘크리트의 피복 탈락과 국부적 콘크리트 압축파괴를 동반하며 철근 대변형이 발생하였다.
2. 반복하중에 의한 헤드 전단 철근의 정착 성능(실험체 W1H, W2H)은 피복 탈락 이후에 충분한 구속 효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 헤드 바는 항복 이후에도 정착 손실 없이 항복 이후 전단 철근 응력의 재분배와 함께 Strain hardening까지 응력 증가가 관찰되었다.
3. 90° 절곡의 표준 정착 길이를 가진 전단 철근과 비교하여, 헤드 전단 철근을 가진 실험체는 뛰어난 에너지 흡수 능력과 최대 하중 이후 하중 지속 능력(Sustainability)를 가지고 있다.
4. 하중-처짐량 관계에서 예측값은 실험값에 뛰어난 정확도를 보여주고 있는데 반복하중에 의한 인장 경화(Tension Stiffening) 감소 효과를 고려한 예측이 가장 실험체의 실제 실험 조건에 근접하며 뛰어난 정확도를 보여주었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. ASTM(1998), Standard specification for welded or forged headed bars for concrete reinforcement, A 970/ A 970M-98. West Conshohocken. Pa.
2. Bentz, E. C. and Collins, M. P. (2000). RESPONSE 2000, Version 1.05, University of Toronto.