

대칭형 교각 코핑부 보의 비틀림 및 휨 거동 특성

권민호* · 김진우** · 정희효*

*경상대학교 건설공학부 공학연구원

**경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소

Torsional and Flexural Behavior Characteristics of Symmetric Pier Copping Beam

MIN-HO KWON*, JIN-WOO KIM** AND HEE-HYO JUNG*

*Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University,

Engineering Research Institute, Gyeongnam, Korea

**Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University,

Institute of Marine Industry, Gyeongnam, Korea

KEY WORDS: Copping 교각 코핑, Bending capacity 휨 강성, Torsional capacity 비틀림 강성

ABSTRACT: The main aim of this study was to evaluate the bending and torsional behaviors of representative regular type cap beams in elevated guideway structures. A1/2 scale model copping beam, excluding the column portion, was designed, constructed, and tested. The copping beam was subjected to horizontal monotonic and cyclic loads with a constant vertical load over the loading stage. The damage was very much dominated by torsion. Experiment results showed that the spiral confinement in the beam helped to restrain the opening of torsional cracks in the column zone. Hence, the torsional strength of the cap beam contributes greatly to the confinement conditions of the column.

1. 서 론

1960년대에 미국에서 시공된 대부분의 교량은 철근 콘크리트 구조 형식으로 건설된 것이 많으며, 이는 그 시대의 설계 및 시공 기준에 맞게 건설되었으나 현재의 내진 설계 기준을 만족하지 못하는 경우가 많다. 그 사례의 하나로 미국의 캘리포니아주에 위치한 샌프란시스코의 대중 철도 교통 시스템의 하나인 교량 구조물의 경우 현재의 내진 설계의 기준에 맞도록 내진 성능의 향상을 위해 최근까지 많은 보수·보강이 이루어져 왔다. 현재 내진 설계에서 규정하고 있는 폐쇄 스테럽에 대한 규정이 1960년대 당시에는 없었으므로 비틀림에 저항할 수 있는 횡방향 철근을 배치하지 않았다(ACI-318, 2005). 그러나 지진이 발생하면 지반 운동에 따라서 Fig. 1 (a)와 같은 교각의 코핑부는 교량의 교축 방향으로 수평하중을 받게 되고, 이는 코핑부에 연결된 박스 거더를 통하여 코핑 부로 전달되며 코핑부 상부에 위치한 전단키를 통하여 코핑부에 비틀림을 발생시키게 된다.

이런 경우에는 이미 시공된 교각의 코핑부 보가 여러 형태의 하중에 의해서 유발된 비틀림 모멘트에 저항 할 수 있는지? 그

리고 발생 가능한 최대 크기의 지진이 발생했을때 그것이 교량의 붕괴로 이어지는 것을 막을 수 있는지를 평가할 필요성이 있다.

지진 하중이 작용할 때 코핑부 보의 손상이 발생되지 않기 위해서는 교각의 기둥 부분 보다 코핑부 보가 높은 하중 저항력을 가져야 한다. 코핑부 보에는 비틀림과 반복하중에 의하여 취성 파괴가 발생할 것으로 예상되나 비틀림 거동에 대한 해석적 접근이 용이하지 않고 그 거동이 상당히 복잡하므로 실험을 통하지 않고는 평가하기 어려운 실정이다(Lampert, 1970; Collins, 1973; Hsu, 1984). 따라서 이런 문제를 해결하기 위하여 대표적인 대칭형 코핑부 보를 선택하여 모델 실험을 수행하였는데 대칭형 보의 실험 크기의 1/2 비율로 제작하여 UCSD(University of California, San Diego)의 실험실에서 실험을 수행 하였다.

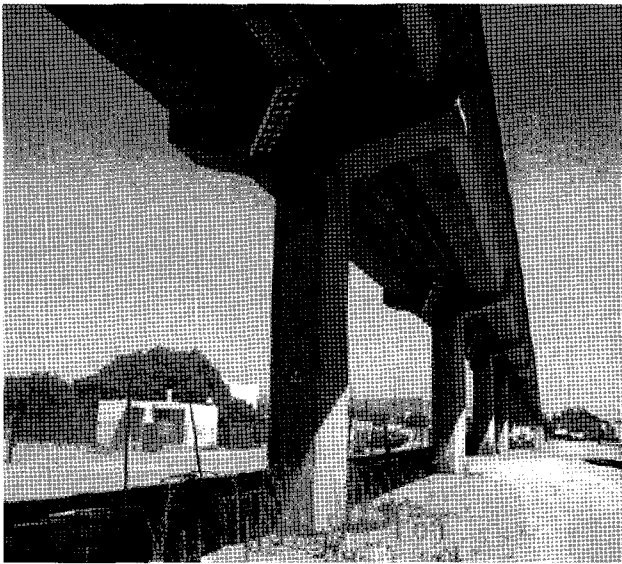
본 연구에서는 일반적인 대칭형 코핑부 보의 비틀림 및 수평 하중 저항 성능에 관한 일반적인 거동 특성에 대하여 연구를 수행하였다. 그리고 코핑부 보의 시험체의 설계와, 실험 장치, 실험과정 및 실험 결과를 비교적 자세하게 설명하고 있는데 이것은 향후 대규모 실험을 수행할 때 좋은 참고 자료가 될 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

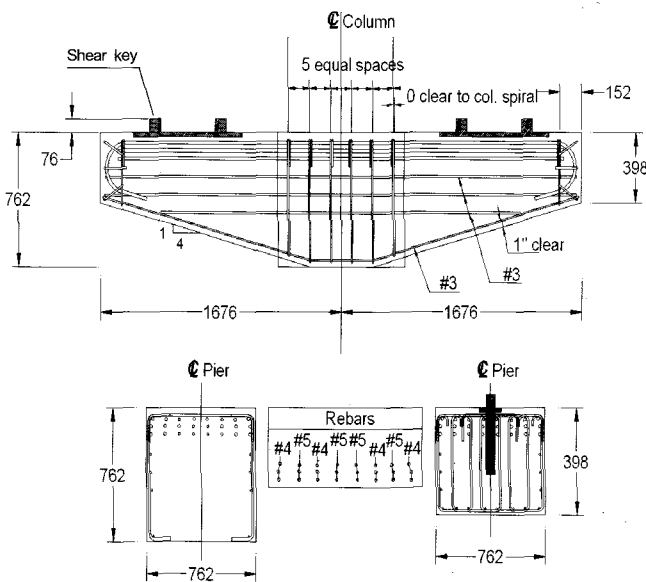
교신저자 김진우: 경남 통영시 인평동 445번지

055-640-3155 kim@gsnu.ac.kr

본 시험에 사용된 시험체는 축척에 따른 재료 물성치의 변환



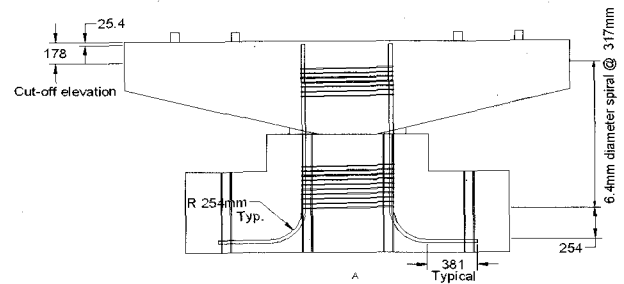
(a) Picture of pier with coping beam



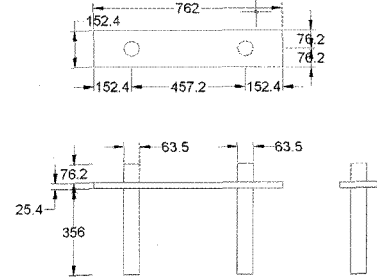
(b) Dimension and details of coping beam (half scale)

Fig. 1 Picture and details of coping beam

을 고려하여 설계하였는데 Fig. 1 (b)는 시험체의 대칭형 코핑부 보의 철근 배치 및 제원을 나타내고 있으며 Fig. 2 (a)는 코핑부 보의 기둥 부분에 대한 철근 배치를 보여주고 있다. 이와 같은 제원으로 제작된 시험체의 교각은 28MPa 압축 강도를 갖는 콘크리트로 시공되었지만 시간에 따른 강도 상승을 고려하여 콘크리트 강도를 35MPa로 결정하였다. Fig. 1 (b)에서 나타난 바와 같이 코핑부 보의 단면에서 횡방향 철근이 폐합되지 않으며 실험 중에 전단키에서 국부 파괴가 발생하는 것을 방지하기 위하여 Restrepo and Panagiotou (2005)의 실험 결과를 바탕으로 Fig. 2 (b) 및 Fig. 1 (b)와 같이 전단키에 25.4 mm 두께의 강판을 추가로 설치하였고 보에 파괴가 집중되도록 기둥 부분을 제거하여 시공하였다.



(a) Column spiral



(b) Shear key and plate

Fig. 2 Column spiral of the coping beam and detail of shear key

실험 장치는 Fig. 4와 같이 제작하였는데 고정 하중과 활하중이 두개의 수직 액츄에이터에 의해 재하 되도록 하였으며 지진 하중 등에 의하여 교각에 작용하는 종방향 하중은 두 대의 수평 액츄에이터에 의해서 각 보에 재하 되도록 하였다. 또한 이미 시공된 구조물과 같은 조건으로 지진 하중이 코핑부 보에 전달되게 하기 위해서 Fig. 1 (b)에 있는 전단키를 통하여 하중이 전달되도록 하중 재하 블록을 이용하였다. 이 하중 블록을 코핑부 보의 양쪽에 설치하고 980kN 용량의 수평 액츄에이터를 연결하여 하중이 재하 되도록 하였다.

수직 하중은 실험이 진행되는 동안 하중 제어에 의해서 보의 양쪽에 동시에 재하 하였고, 수직 하중을 일정한 값으로 유지한 채 시험체의 양쪽에 수평 변위를 점차적으로 증가시켰다. 코핑부 보가 극한의 휨과 비틀림을 받기 전에 소성화 될 것으로 예측되므로 변위 제어에 의해서 수평하중을 재하하였다. 또한 두 대의 수평 액츄에이터에 같은 크기의 하중이 작용하지 않음으로 인해 발생하게 되는 비틀림을 방지하기 위하여 그 중 한 대의 액츄에이터는 변위 제어를 하였고 다른 한 대는 첫 번째 액츄에이터에서 얻어진 반력으로 하중 제어를 하여 동일한 크기의 하중이 재하 되도록 하였다. 그러나 보의 어느 쪽이 먼저 파괴에 도달했는지를 판단하기가 곤란하고, 특히 하중 제어가 되는 쪽이 먼저 파괴되는 경우 다른 액츄에이터의 하중 재하에 문제가 발생하는 경우를 막기 위하여 한계 장치를 설치하였다. 이 한계 장치는 각 액츄에이터의 하중 차가 45kN에 이르면 액츄에이터는 정지하도록 하고 하중 제어와 변위 제어 액츄에이터는 서로의 역할을 바꾸도록 하였다.

코핑부 보의 변위계와 변형률 게이지의 부착 위치는 Fig. 3에 도시하였다. 수직 변위와 보의 양단에서의 처짐각을 측정하기 위하여 변위계 D1, D3, D5, D7을 설치하였고, 수평변위와 보의

종방향을 따라서 비틀림 각을 측정하기 위하여 변위계 D2, D4, D6, D8, D12, D20, D14, D26, D22를 설치하였다. 또한 4개의 회전계 R1, R2, R3, R4를 추가로 설치하여 변위계 D2와 D4, 변위계 D6와 D8에 의해서 측정된 비틀림 각을 검증하도록 하였다. 비틀림과 전단에 의한 트러스 액션이나 또는 휨모멘트에 의해서 발생하는 변형률을 측정하기 위하여 변형률 게이지를 보 상단의 기둥에 인접한 부분의 종방향 철근 중 단면의 양끝에 위치한 철근에 부착하였다. 이때 철근에 부착된 게이지를 위치에 따라서 STx로 표시하였는데 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 x는 게이지의 위치에 따른 번호이다.

시험용 교각의 콘크리트는 2단계로 타설되었는데 기초 부분과 하중 재하 블록을 먼저 타설 하였으며, 콘크리트 타설 1주일 후에 거푸집을 제거하였고 코핑부 보의 보의 기초 부분 콘크리트를 타설한 지 20일 후에 타설 하였다. 보를 실험할 때의 콘크리트의 배합 설계 결과는 Table 1과 같으며 각 콘크리트로 152mm 지름의 콘크리트 공시체를 제작하여 7일, 14일, 21일, 28일 강도를 측정하였고 시험 당일에 공시체의 강도 시험을 실시해 콘크리트의 강도를 측정하였다. 두 코핑부 콘크리트 샘플의 평균 압축 강도는 Table 2에 나타나 있는데 코핑부 보를 시험하는 당일의 강도는 거의 35MPa에 도달하였다. 철근의 응력-변형률 관계는 인장 시험에 의해서 결정되었고 각 철근의 크기 별로 3개의 철근을 시험하였으며 각 철근의 평균 항복응력 및 극한응력은 Table 3에 나타내었다.

성능 설계에서 보의 연성도, 비틀림 파괴 하중, 그리고 파괴 형태는 아주 중요한 요소인데, 본 실험에서는 이를 조사하기 위하여 보의 최대 정점 하중을 지나 정점 값의 80%로 수평하중이 감소 할 때까지 수평변위를 증가시키는 형태로 수평 하중을 재하 하였다. 그런 후 반대 방향으로 변위를 재하하여 한 사이클을 반복하고 최초의 정점 변위가 발생하는 위치까지 수평 변위를 다시 재하한 후 하중을 제거하도록 하였다. 이러한 재하 방법이 지진 하중을 받는 보의 비틀림 저항력이나 정점 후 변형 능력과 보의 잔류강도 등에 대한 가장 적절한 정보를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 실험을 실시하는 도중에 발생한 국부파괴에 의해서 위의 하중 제어 절차를 정확하게 따르지는 못했다.

실험에서 사용된 하중의 경우 교각에서 보의 양쪽에서 지지되는 거더의 총 계수되지 않은 고정하중은 550kN이고 교각의 양쪽에 열차하중이 동시에 작용할 때 활하중은 552kN이었다. 이 고정하중과 활하중 총합을 50%로 축소한 값인 551kN이 각 보에 작용하는 수직하중인데 실험에서는 이 값보다 20% 증가된 667kN을 작용시켰다. 수직하중을 보의 양쪽에 먼저 재하하여 실험이 진행되는 동안 667kN을 유지하도록 하였으며 수평하중은 수직하중을 재하한 후 변위 형태로 보의 북쪽에서 남쪽 방향으로 재하 하였다.

수평하중에 대하여서는 2회의 실험이 수행 되었는데 첫 번째 실험은 수평하중을 보의 전단키를 통하여 전달되도록 하였다. 첫 번째 실험을 진행하는 동안 보의 동쪽 부분의 전단키에 수직의 활렬 균열이 발생하여 전단키가 더 이상의 하중에 저항 할 수 없게 되어 첫 번째 실험을 중단하고 38mm 두께의

합성 고무 패드(Neoprene pads)를 보의 북쪽 면과 하중 블럭 사이에 장착하여 이를 통하여 보의 북쪽 면에 하중이 전달되도록 하중을 재하하면서 두 번째 실험을 수행하였다. 이때 하중 재하 장치와 보 사이에 패드를 장착하기 위하여 수평 변위를 반대 방향으로 재하하였고 수평하중 크기가 440kN일 때 패드를 장착한 후, 수평하중 크기가 "0"이 될 때까지 수평 변위를 반대 방향으로 재하한 후 하중을 다시 재하하여 두 번째 실험을 실시하였다. 그러므로 앞에서 언급한 반복 하중 제어 절차를 그대로 따를 수 없었다.

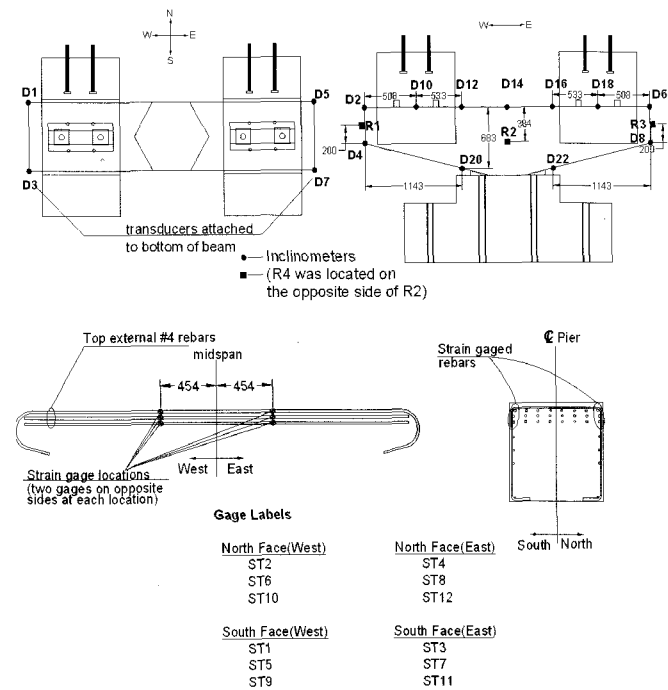


Fig. 3 Displacement transducers and strain gage location

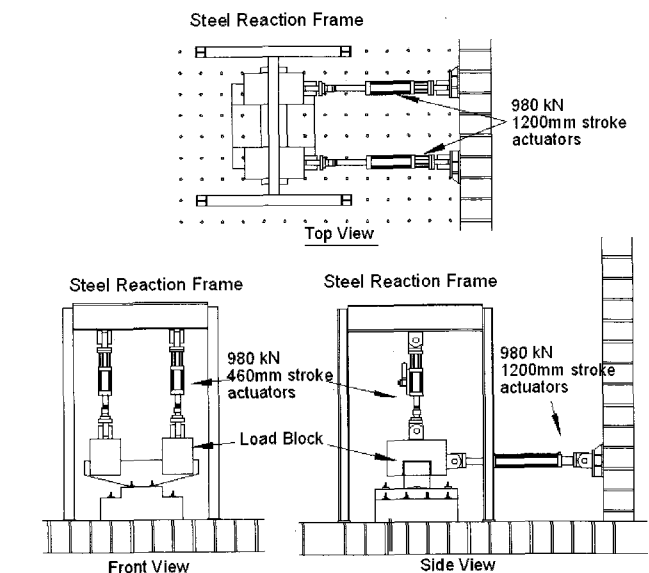


Fig. 4 Test configuration of coping beam

Table 1 Concrete mix design

Concrete mix	Quantity (N/m ³)
Portland cement type II/V (ASTM C-150)	3625
Class F flyash (ASTM C-618)	640
Sand	7,144
1" x #4 Coarse aggregate	8,326
3/8" x #8 Coarse aggregate	1472
Water (W/C ratio)	1891
	W/C : 0.44
Water reducing agent (ASTM C-494 type A)	10.67

Table 2 Compressive strengths of concrete

Age (days)	Compressive strength (MPa)
7	28.7
14	31.5
21	33.6
26 (Day of beam test)	32.9
28	32.9

Table 3 Tensile strengths of reinforcing bars

Re-bar type	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
Strength (MPa)	(D10)	(D13)	(D16)	(D20)	(D22)
Yield	490	476	448	434	483
Ultimate	686	770	742	749	777

3. 실험 결과 분석

3.1 수직하중 하에서 코핑부 보의 거동

Fig. 5는 수직 하중과 수직 변위 곡선을 보여주고 있는데 T1과 T2는 각각 첫 번째 실험과 두 번째 실험을 의미하고 Avg는 변위계 측정값의 평균 변위를 나타내며 E와 W는 보의 동쪽 부분과 서쪽 부분을 의미한다. 예를 들어 D01-D03 Avg T1W는 첫 번째 실험에서 보의 서쪽 부분에 위치한 변위계 D01과 D03의 평균 수직변위를 나타낸다. 끝단의 변위 값은 보의 서쪽 부분에 위치한 D1과 D3 변위계와 동쪽 부분에 위치한 D5와 D7 변위계의 평균값을 사용하였다.

곡선 T1은 수평 하중이 재하되기 전에 측정된 값이며 곡선 T2는 첫 번째 실험이 수행된 후 수평하중이 없는 상태에서 측정된 값이다. 곡선 T2로부터 첫 번째 실험에서 발생한 손상으로 인해서 보의 동쪽 부분에 잔류 변위가 발생한 것을 알 수 있으나 보의 서쪽 부분에서는 이것이 관찰되지 않았다. 수직하중과 상단 종방향 철근의 변형률과의 관계는 Fig. 6에 나타내었다. No.4(D13) 철근과 No.5(D16)철근의 항복 변형률은 0.0023이고 수직하중에 의해서 발생한 최대 변형률은 0.00086이었다. 하중-변형률 곡선에서 기울기가 감소한 것으로 보아 코핑부 보에 휨 균열이 발생한 것으로 사료되는데 이를 근거

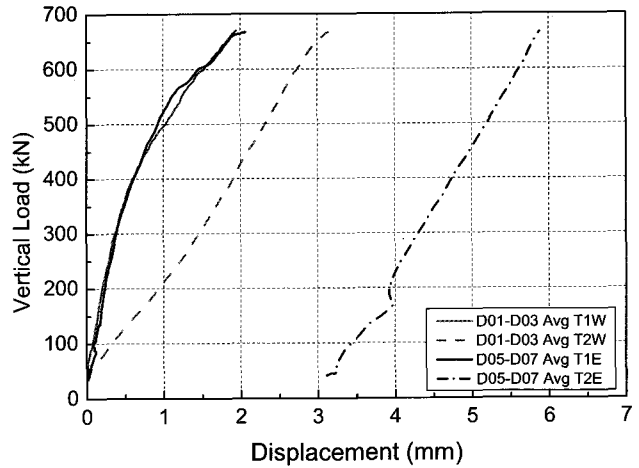


Fig. 5 Vertical load vs. averaged vertical displacement

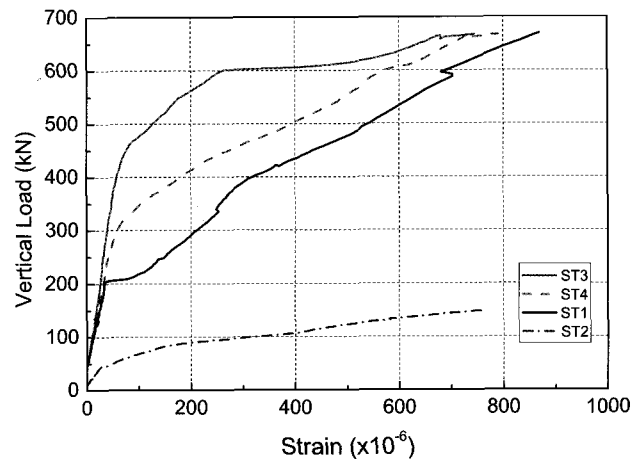


Fig. 6 Vertical load vs. strain in longitudinal reinforcement

로 보의 서쪽 부분은 대략 209 kN에서 보의 동쪽 부분은 311 kN과 445 kN사이에서 휨 균열이 발생한 것으로 보인다.

3.2 수평 하중 하에서 코핑부 보의 거동

수평 하중을 재하한 첫 번째 실험에서 발생한 각 부위별 손상을 Fig. 7에 나타내었으며 Fig. 8은 두 번째 실험에서 발생한 손상을 보여주고 있다. 사진에 나타난 바와 같이 보의 동쪽 부분이 서쪽 부분보다 더 많은 손상을 입은 것을 알 수 있는데 발생한 손상을 열거하면 다음과 같다. 수평하중이 578kN일 때 Fig. 7(a)와 같이 경미한 경사 비틀림 균열이 남쪽 면과 보의 상부에서 발생하였으며 Fig. 7 (b)와 같이 휨-비틀림 균열은 교각 기둥이 연결된 두 부분의 북쪽 면의 하단부에서 발생되었다. 수평 하중에 의해서 발생한 휨 및 비틀림에 의해서 Fig. 7 (c)와 같이 남쪽 면의 바닥 콘크리트가 파쇄를 일으켰다. 첫 번째 실험에서 수평하중 663kN일 때 전단기에 발생한 Fig. 7 (e) 및 7(f)와 같은 수직 활열 균열에 의해서 보의 동쪽 부분의 수평 하중 저항력은 더 이상 증가하지 못했다. Fig. 7(e)에서와 같이 수직 활열 균열은 보의 상부에 발생한 경사 비틀림 균열에서 시작하여 전단기를 둘러싼 강판의 북쪽 끝을 따라 보의

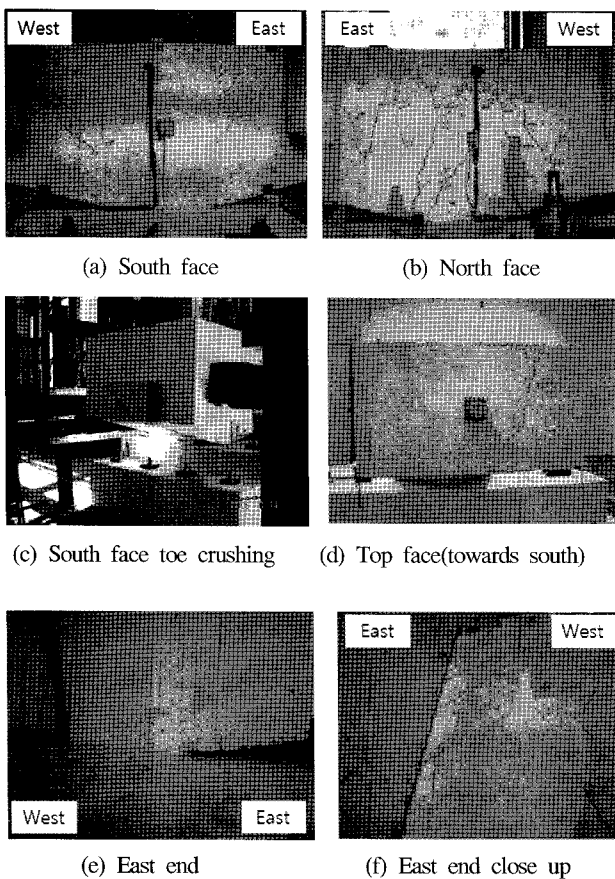


Fig. 7 Damage picture after first test

동쪽 끝부분까지 확장되었다. 첫 번째 실험에서 측정된 최대 수평 하중은 752kN이었다.

두 번째 실험에서 수평하중은 합성고무 패드를 통하여 보에 직접적으로 재하하도록 하였다. Fig. 8 (a)에서와 같이 휨-비틀림 균열이 교각 기둥부분에 집중적으로 발생하였다. 그러나 보의 동쪽 부분의 최종 파괴는 Fig. 8 (c), 8 (d), 8 (e)에서와 같이 비틀림에 의해서 발생하였으며 Fig. 8 (c)와 8 (d)는 균열 콘크리트에 의하여 형성된 압축 스트럿을 보여 주고 있다. 보의 서쪽 부분의 손상은 Fig. 8 (f)와 같이 비교적 경미한 것으로 관찰되었다. 두 번째 실험에서 측정된 최대 수평하중은 동쪽 끝단에 설치된 변위계 D6 값이 38mm(수평변위)일 때 783kN이었으며 수평하중이 556kN(수평변위 61mm)으로 감소하였을 때 하중을 제거하였다. 보의 경간이 짧기 때문에 경사 비틀림 균열이 발생한 후 교각 기둥 부로 확장되었으며 확장된 균열은 Fig. 2에서와 같이 기둥 부에 정착된 나선형 철근에 의하여 저지되었고 이로 인하여 급작스런 보의 비틀림 강성 감소를 방지한 것으로 판단되었다. Fig. 8 (c)와 8 (d)의 콘크리트 압축 스트럿은 비틀림을 저항하는 공간 트러스 메커니즘을 보여주고 있다. 기둥부의 나선철근과 비틀림 균열은 코핑 부 보에 트러스 작용을 활성화시켜 비틀림 하중을 저항할 수 있도록 하였다. 이 부분은 나중에 철근의 변형을 값에 의해서 확인되었다.

두 번째 실험의 결과에 의하면 첫 번째 실험은 전단기를 따

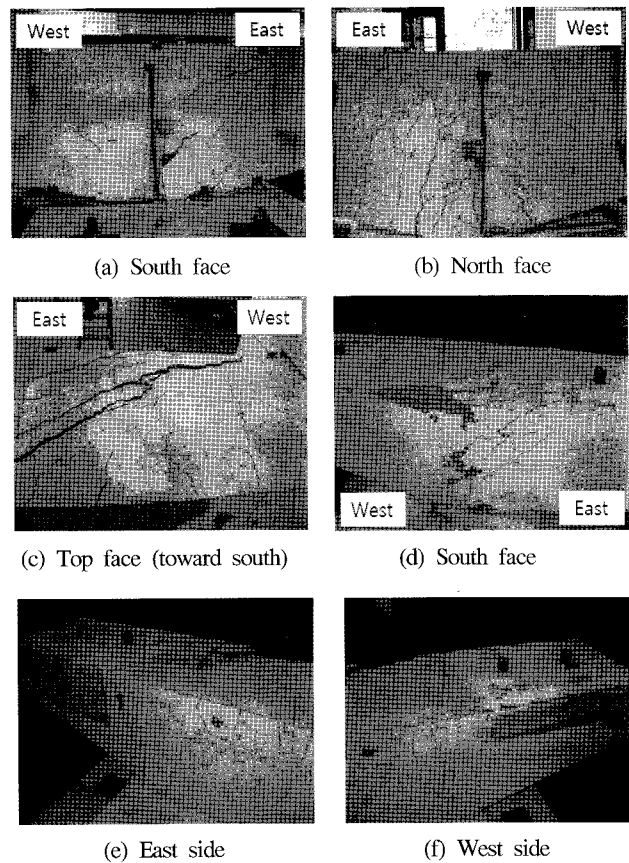


Fig. 8 Damage picture after second test

라 발생한 수직 할렬 균열에 의하여 보가 비틀림에 대하여 충분히 저항하지 못함을 알 수 있다. 두 번의 실험에서 얻어진 수평하중과 수평 단부 처짐 이력곡선을 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9에서 T1과 T2는 첫 번째 실험과 두 번째 실험을 각각 나타내고 E와 W는 보의 동쪽부분과 서쪽부분을 의미한다. Fig. 10에서 평균 단부 처짐은 상부에 설치된 변위계 D2, D4와 D6, D8의 평균값으로 계산하였고 보의 동쪽 부분의 비선형 변형이 서쪽 부분보다 더 크게 나타났다. Fig. 9와 10을 비교해보면 보의 회전각이 상부 변위에 미치는 영향은 상대적으로 적으며 대략 첫 번째 실험에서는 25%, 두 번째 실험에서는 14% 정도 변위에 영향을 주었다.

Fig. 11로부터 보의 수평 변위와 회전각이 서로 비례하고 있음을 알 수 있으며 보의 중앙 부분에서 수평 하중과 회전각 곡선을 Fig. 12에 나타내었다. 보의 북쪽 면의 중앙에서의 회전각(R4)이 보의 남쪽 면 중앙에서의 회전각 (R2)보다 훨씬 작는데 이것은 교각 기둥과 코핑부 보의 연결 부분에서 발생한 비틀림 균열에 기인한 것으로 판단된다.

단조하중 하에서 코핑부 보의 거동은 예상과는 달리 하중 변위 곡선과 같이 연성적인 거동을 보여주었다. 하중 조건에 따른 보의 변형 형태에 대한 다양한 정보를 얻기 위하여 보의 종방향을 따라서 설치된 변위계(D2, D12, D14, D16, D6)로 측정된 수평 변위와 회전각을 하중 단계별로 Fig. 13과 Fig. 14

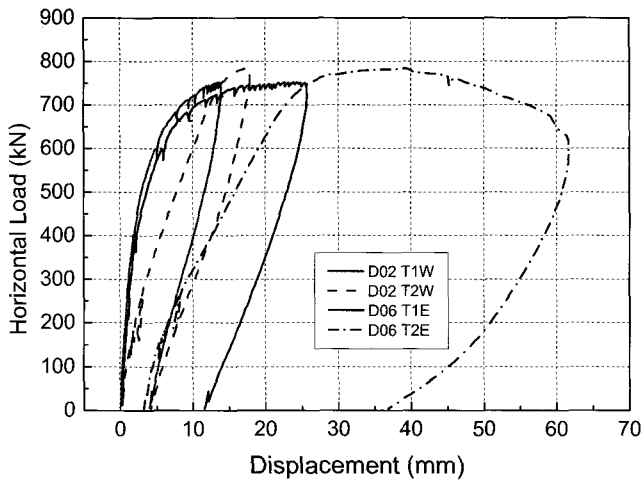


Fig. 9 Horizontal load vs. end displacement

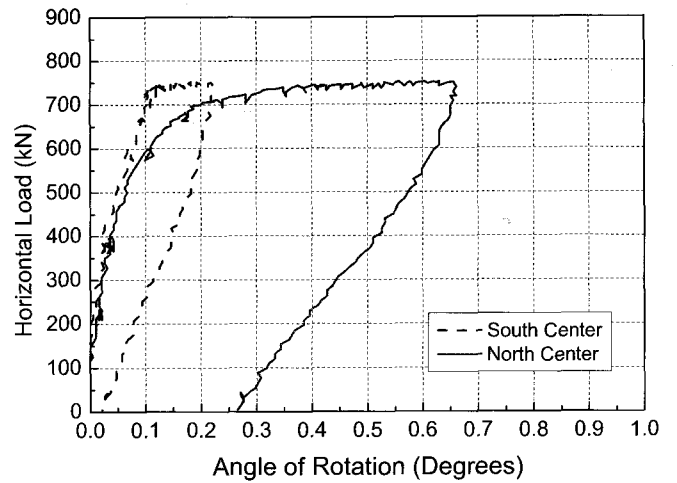


Fig. 12 Horizontal load vs. rotation at the center of beam

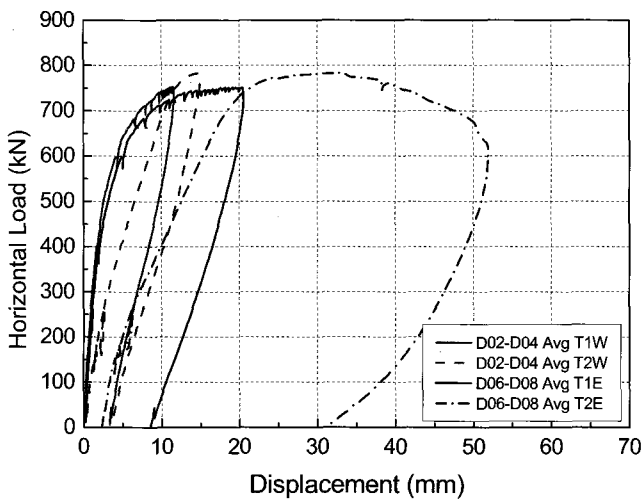


Fig. 10 Horizontal load vs. averaged end displacement

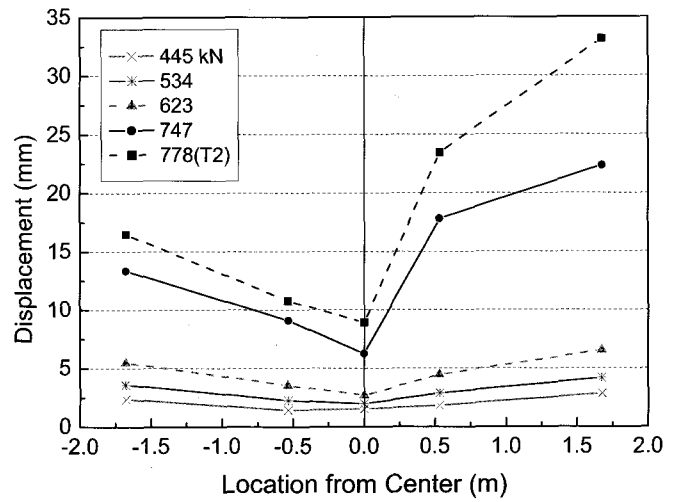


Fig. 13 Displacement along longitudinal location

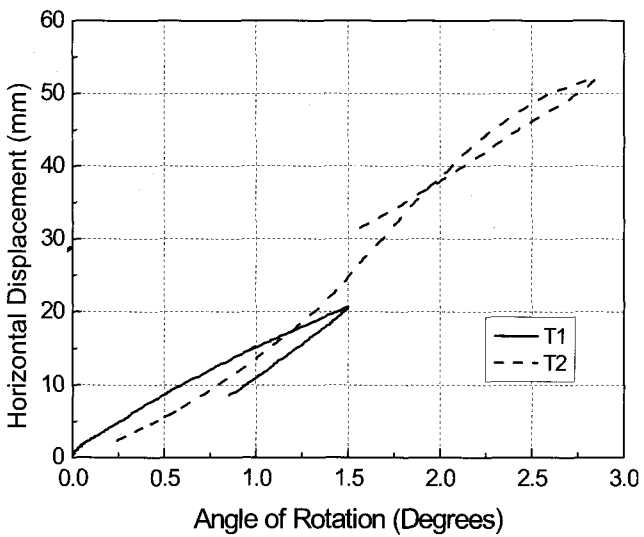


Fig. 11 East end displacement vs. east end rotation

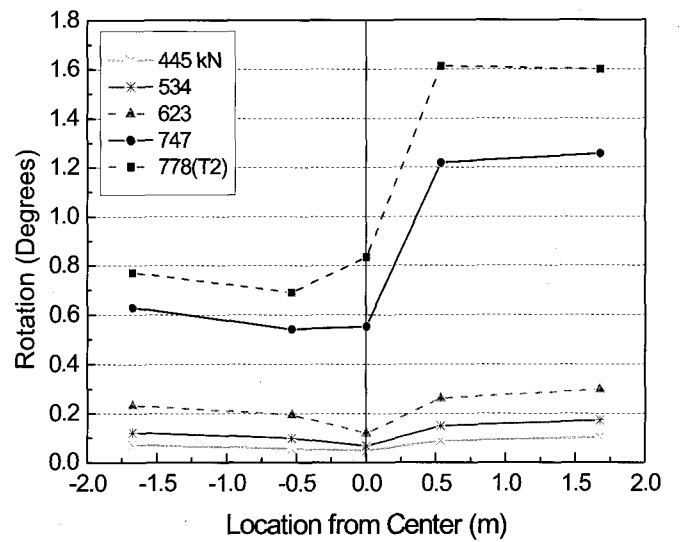


Fig. 14 Rotation along longitudinal location

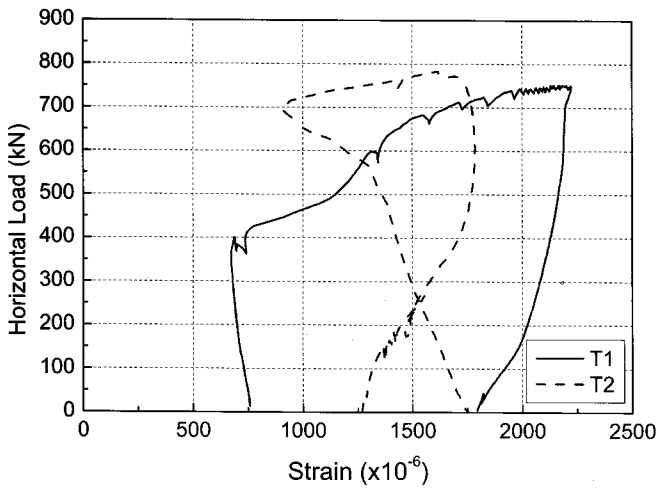


Fig. 15 Horizontal load vs. strain of reinforcement gage ST3

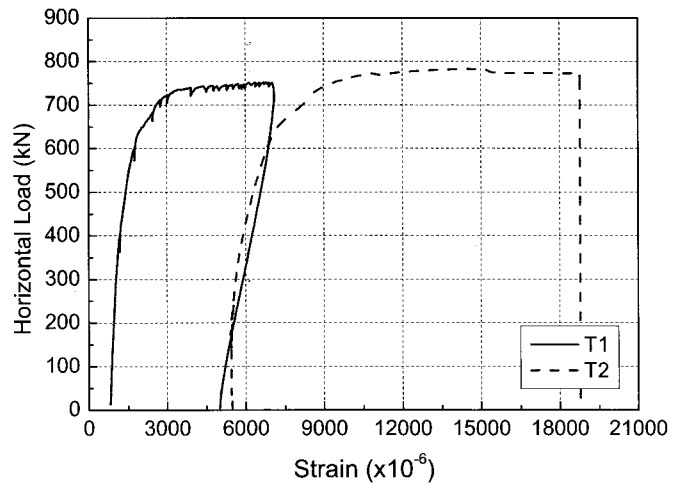


Fig. 16 Horizontal load vs. strain of reinforcement gage ST4

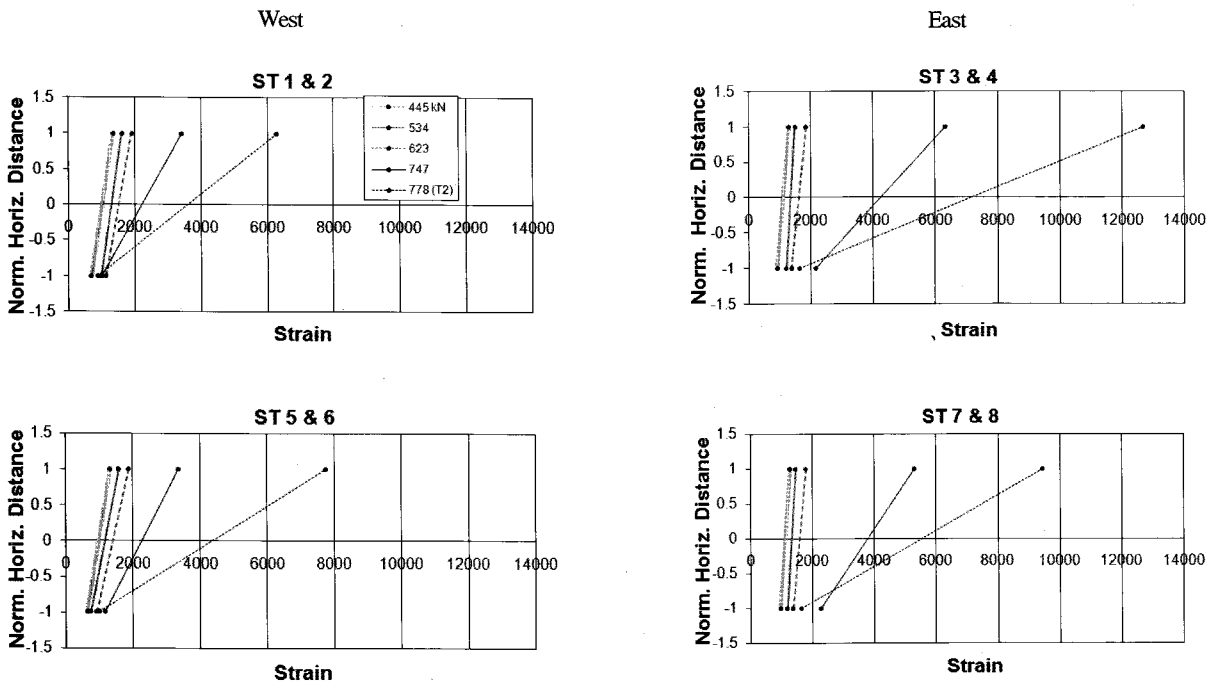


Fig. 17 Rebar strains along the width of the beam at different horizontal loads (positive distance: north; negative distance: south)

에 도시하였다. 동쪽과 서쪽 보가 대칭이며 하중 또한 대칭으로 작용하고 있기 때문에 수평하중이 623kN까지는 비교적 대칭적인 거동을 나타내고 있으며 이후 보는 비대칭적인 거동을 하게 되고 동쪽 부분의 보가 더 빨리 비선형 영역으로 들어간 것을 보여주고 있다. 특히 비선형 변형은 수평하중이 623 kN에서 747kN으로 증가될 때 급작스럽게 증가하였으며, 대부분의 비선형 변형은 기둥과 코핑부 보의 연결 부분에서 발생하였다. 그리고 보의 회전각은 교각 기둥 연결부를 중심으로 강제 회전의 양상을 보여주고 있는데 이는 기둥과 보 연결부에 발생한 비틀림 균열에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 15는 수평하중과 ST3게이지에 의해서 측정된 변형률과의 관계를 보여주고 있는데, ST3 게이지는 보의 동쪽 부분의

남쪽 면에 위치하고 있다. 첫 번째 실험(T1)에서 철근은 667kN의 수직하중에 의해서 0.0008의 초기 인장 변형률이 발생하였다. 수평하중이 증가되면서 인장 변형률은 휨작용에 의해서 초기에는 감소하다가 수평하중이 356kN보다 커지면서 수평하중의 증가에 따라 인장 변형률이 증가하는 형태를 보여주었는데 이러한 현상은 위에서 언급한 것과 같이 공간 트러스 메커니즘에 의해서 발생하는 것으로 생각된다. 수평하중이 752kN일 때 철근이 거의 항복에 도달하고 수평하중을 제거한 후에도 잔류 변형률은 0.0018 이었는데 이 잔류 변형률은 철근의 항복보다는 보에 발생한 콘크리트의 손상에 의한 것으로 보인다.

두 번째 실험(T2)에서 초기 인장 변형률은 0.00131 이었고

수평하중이 578kN일 때까지 수평하중의 증가와 함께 인장 변형률은 증가하였다. 그런 후 인장 변형률은 휨 작용이 커지면서 감소하기 시작 하였다. 이는 압축 스트럿 작용이 감소함으로써 나타나는 현상으로 보이고 이러한 변형률 감소 현상은 수평하중이 최대 정점 하중인 783kN을 지나면서 가속화되었다. 첫 번째 실험 후 보와 하중 장치 사이에 합성고무 패드를 설치하기 위하여 수평하중을 440kN까지 감소 시켰기 때문에 두 번째 실험에서 초기 변형률은 첫 번째 실험에서의 잔류 변형률보다 작은 값을 보여주었고 있다. 그리고 Fig. 16으로부터 북쪽 면에 위치한 철근의 인장 변형률이 수평하중의 증가에 따라서 증가하고 있음을 알 수 있다. 두 번째 실험(T2)에서 최대 변형률이 항복 변형률의 거의 10배 정도로 변형률 게이지의 한계 값을 초과하였다.

Fig. 17은 수평하중 증가에 따른 종방향 철근의 변형률을 나타낸 것인데 북쪽 면에 설치된 게이지는 짝수로 표시하였고 남쪽 면에 설치된 게이지는 홀수로 표시하였다 (Fig. 3 참조). 서쪽 부분의 변형률과 동쪽 부분의 변형률은 수평하중이 623 kN일 때까지는 거의 비슷한 값을 보여주었으며 북쪽 면에 설치된 보의 변형률은 0.002에 도달하였다 (철근의 항복 변형률은 0.0023이었다). 첫 번째 실험에서 관측된 최대 수평하중에 가까운 값인 747kN에서 동쪽 부분에서의 변형률은 서쪽 부분에서의 변형률보다 훨씬 큰 값을 보여주었고, 동쪽 부분에 있는 모든 종방향 철근이 항복하였거나 항복에 근접하였다. 또한 북쪽 면에 가깝게 위치한 철근에는 남쪽 면에 위치한 철근보다 훨씬 큰 변형률 값을 보여주었다. 여기서 수평 하중이 증가에 따라서 모든 종방향 철근에서 인장 변형률도 같이 증가하는 것을 보여주고 있는데 이러한 현상은 순수 휨 메커니즘에서는 발생할 수 없고 보의 공간 트러스 메커니즘의 발현에 기인한 것으로 사료된다. 두 번째 실험(T2)에서, 최대 수평하중에 근접한 값인 778kN에서 트러스 작용은 감소되면서 휨 작용이 두드러지게 나타났으며, 이에 따라서 남쪽 면에 가깝게 설치된 종방향 철근에서 인장 변형률은 하중이 증가함에 따라 감소하는 양상을 보여주었다. 이러한 결과가 Fig. 8 (c)에서와 같이 기둥부의 남쪽 면에 있는 콘크리트가 균열에 의해서 파괴되면서 압축 스트럿 작용이 감소하여 발생한 것으로 생각된다.

4. 결 론

수평 및 수직하중을 받는 대칭형 코핑부 보에 대한 실험의 결

과 다음과 같은 거동 특성을 알 수 있었다.

- (1) 대칭형 코핑부 보에 수평하중이 작용할 때의 손상은 주로 휨 보다는 비틀림 하중에 의해서 발생하는 것이 관찰되었다.
- (2) 또한 종방향 철근의 변형률 분포도로부터 비틀림 균열 발생 후 비틀림 균열 면 사이의 콘크리트에 압축 스트럿이 발달되었는데 이는 곧 스트럿-타이 매커니즘(공간 트러스 작용)을 형성하여 비틀림 저항하고 있음이 관찰되었다. 따라서 코핑부 보의 해석을 위해서 스트럿-타이 (공간 트러스) 방법에 의한 접근이 용이할 것으로 판단된다.
- (3) 첫 번째 실험에서와 같이 상부 횡방향 철근 부족으로 인하여 전단키를 따라 발생한 수직 할렬 균열은 전체 코핑 부 보의 최대 강도를 제한시켰다. 그러나 코핑부 보의 거동은 광범위한 종방향 철근의 항복에 의한 연성적 거동을 보여주었다.
- (4) 두 번째 실험에서 발생된 비틀림 균열이 기둥 속으로 확장되는 것을 기둥의 나선 철근이 막아 주었고 이에 따라서 보에 트러스 메커니즘이 형성될 수 있도록 구속시켜 주었다. 이로 인하여 압축 스트럿 메커니즘이 현저하게 나타났고 최대 수평 저항력은 다소 증가하였다. 그러므로 기둥 부의 철근 구속 여부가 보의 비틀림 강도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- ACI-318 (2005). Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI
- Collins, M.P. (1973). "Torque-Twist Characteristics of Reinforced Concrete Beams", Inelasticity and Non-Linearity in Structural Concrete, University of Waterloo Press, Waterloo, Ontario, pp 211-231.
- Hsu, T.T.C. (1984). Torsion of Reinforced Concrete, Van Nostrand Reinhold, NY.
- Lampert, P. (1970). "Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams in Torsion and Bending", Dissertation No 4445, Institut fur Baustatik, ETH Zurich.
- Restrepo, J.I. and Panagiotou, M.(2005). BART Aerial Guidway Shear Key Tests, Report to BART, University of California, San Diego, La Jolla, CA.

2007년 10월 4일 원고 접수

2007년 11월 9일 최종 수정본 채택