

휨과 비틀림을 동시에 받는 PSC 역티형보와 직사각형보의 거동 비교

Comparison on Flexural and Torsional Behaviors of Inverted Tee and Rectangular Precast Pretensioned Concrete Beams

설동재* 유승룡**
Seol Dong Jae Yu Sung Yong

ABSTRACT

Flexural-torsional behaviors of the typical architectural precast beam sections - inverted tee and rectangular - were compared. The inverted-tee beams were designed with a parking live load - 500kgf/m^2 and a market - $1,200\text{kgf/m}^2$ according to the currently used typical shape in the domestic market building site. The rectangular beams were also designed as the same bottom dimension and area, and reinforced for similar strength as in the cases of inverted tee beams. Two rectangular and two inverted precast pretensioned concrete beams were tested and analyzed

1. 서론

보 구조물에 작용하는 비틀림은 휨 모멘트나 전단력에 비하여 그 영향이 작으므로 2차적인 영향으로 간주되었으며, 따라서 설계에서도 비틀림 모멘트를 제외한 힘들에 대하여 상대적으로 충분한 안전계수에 의한 설계로 비틀림 모멘트의 영향을 포함시킴으로서 비틀림 모멘트에 대한 직접적인 설계는 피하였다. 그러나 근래에는 다음의 2가지 이유로 인하여 비틀림 모멘트에 대한 보다 정확한 예측이 필요하게 되었다. 첫째는, 강도설계법으로 재하되는 하중을 좀더 정확하게 평가함으로써 전체적인 안전계수의 감소와 이에 따라 설계된 부재단면의 축소가 가능하다는데 있으며, 둘째로는, 비틀림 거동이 주된 부재의 사용이 점차 증가하게 되었다. 그러나 비틀림은 거의 대부분이 휨이나 전단력이 조합되어 작용하게 된다. 또한, 지금까지의 연구는 주로 일반 RC에 국한된 실험이 진행되어 조합하중을 받는 프리스트레스트 부재에 대해서는 정보가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 구조물에 쓰이는 역티형 보와 직사각형 보에 가장 불리한 형태의 비틀림 하중을 가정하여 설계를 진행하였고 그에 따른 실험을 진행하여 휨과 비틀림의 상관관계를 실험결과를 토대로 고찰하였고 Lampert와 Collins¹⁾의 일반 RC부재의 휨과 비틀림 상관관계 제안식을 프리스트레스트 부재에 적용시켜 분석하였다.

2. 시험체 계획

2.1 시험체 제작

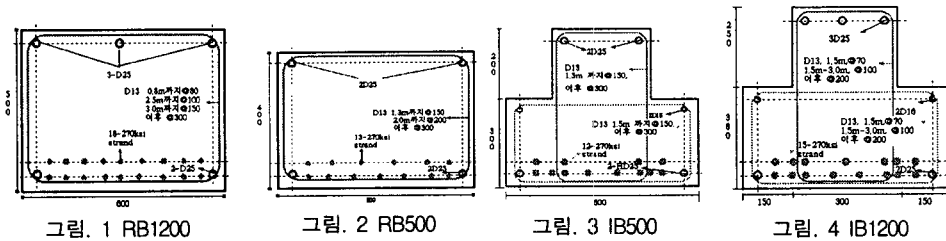


그림. 1 RB1200

그림. 2 RB500

그림. 3 IB500

그림. 4 IB1200

본 연구에서는 $8.4 \times 10\text{m}$ 모듈, 적재하중 500kgf/m^2 와 $1,200\text{kgf/m}^2$ 를 적용하여 지간거리 8.4m 인 실물크기 PS 역티형 보와 PS 직사각형 보를 각각 1개씩 총 4개의 시험체를 제작하였다.

* 정희원, 동국대학교 건축공학과 석사과정
** 정희원, 동국대학교 건축공학과 부교수

시험체의 단면 크기와 철근 배근상세는 그림. 1~4에 제시하였다. 그림. 1~4에서와 같이 직사각형 보와 역티형 보의 단면크기는 밑면의 폭을 60cm로 각각의 단면적을 같게 하여 깊이를 단면변수로 채택하여 휨과 비틀림의 조합하중을 받을 때 시험체의 거동을 관찰하였다.

2.2 재 료

PS강선은 저이완률의, 직경 12.7mm, 270 Gr. 7연강선으로, 국내 제조업체 K사의 것을 사용하였다. 일반 철근은 항복강도 4,000 kgf/cm² 이형철근을 사용하였고 콘크리트 배합표는 다음의 표 1,2와 같다..

표 1 콘크리트 배합설계 (1)

설계강도(kgf/cm ²)	골재최대입경(mm)	슬럼프(cm)	공기량(%)	잔골재비율(%)	물시멘트비(%)	단위F/A량(kg/m ³)
420	25	12	1.8	41	34	49

표 2 콘크리트 배합설계 (2)

단위수량(kg/m ³)	단위시멘트(kg/m ³)	단위굵은골재(kg/m ³)	단위잔골재량(kg/m ³)	단위혼화제량(kg/m ³)
165	485	1,011	708	4.9

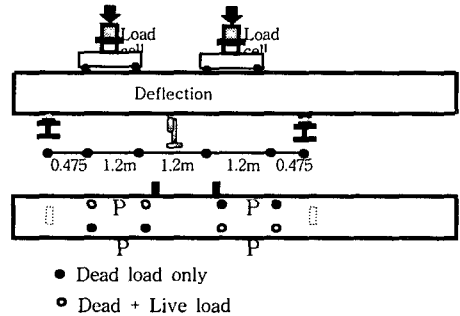


그림. 5 실험 계획

3. 실험

3.1 실험계획

실물크기로 제작된 역티형보 시험체 2개, 직사각형보 시험체 2개, 총 4개 시험체에 대하여 실험을 실시하였다. 스패ンは 4.55m를 적용하였다. 단부에서의 시험체 지지는 폭 60cm에 대하여 중앙 30cm만 핀 지점을 사용하여 단순 지지되게 하였다. 시험체 적용하중은 한쪽은 고정하중만큼만 하중을 적용하고 다른 한쪽은 고정하중과 적재하중을 모두 고려한 하중을 적용하였고 반대편은 역방향으로 하중을 가력하여 비틀림을 유도하였다. 시험체 설치는 그림. 5와 같다.

3.2 시험체의 거동

3.2.1 역티형 보

IB500 시험체의 경우 중앙부 최대 모멘트 42tf·m에서 첫 번째 균열이 가력점 밑에서 발생되어 진행되었다. 시험체 양쪽면 모두 초기 균열이 발생되어 고정+적재하중을 고려한 중앙측 하중 점으로 경사져서 진행되는 비틀림 균열의 양상을 보이며 진행하였다. 중앙부 최대 모멘트가 56.8tf·m 정도에서는 고정+적재하중을 고려한 중앙측 하중점 밑으로 약 4개의 플랜지 뚫림 전단 균열이 발생되었고 하중점 부근의 웹과 플랜지 경계면을 가로로 분리 균열이 발생되었으며 이 균열은 점차 진행되어 플랜지 옆면에서 경사져서 진행되어 올라온 비틀림 균열과 결합되었다. 시험체 하부에서는 계속해서 파괴소리가 들리면서 처짐이 계속 이때 중앙부 처짐은 32mm가 발생되었다. 57.35tf·m에서 시험체는 하부 휨 인장파괴가 발생되었고 상부 면에서는 콘크리트 압괴가 관찰되었다.

IB1200 시험체는 최대 모멘트가 80.2tf·m에서 초기 균열이 가력점 밑에서 발생되었다. IB500 시험체와 마찬가지로 초기 균열에 이어 발생된 균열들은 고정+적재하중을 고려한 중앙측 가력점으로 경사져서 진행되는

표 3 실험결과

시험체	콘크리트 fck (kgf/cm ²)	균열모멘트 (tf·m)		파괴하중하									파괴형태
				휨강도(tf·m)			비틀림강도(tf·m)						
		①실험 (tf·m)	②예측 (tf·m)	①실험/②예측	③실험	④예측	③실험/④예측	⑤실험	⑥예측	⑤실험/⑥예측			
IB500	436	42	37.77	1.11	57.35	74.44	0.77	9.49	7.55	1.26	휨파괴		
IB1200	442	80	61.54	1.3	116.67	122.38	0.95	21.13	15.82	1.34	휨파괴		
RB500	465	39	32	1.22	57.98	70.81	0.82	10.84	13.44	0.81	휨파괴		
RB1200	487	72	58.9	1.23	112.54	121.10	0.93	20.42	23.55	0.87	휨파괴		

Comments : RB:Rectangular Beam, IB:Inverted Beam, 500:Live load 500kgf/m², 1200:Live load 1200kgf/m²

비틀림 균열의 양상을 띄었다. 107tf·m에서 고정+적재하중을 고려한 중앙축 가력점 밑으로는 3-4개의 플랜지 톱질 전단 균열이 발생이 되었으나 웨브와 플랜지 경계 면에서는 별다른 분리 균열이 관찰되진 않았다. 시험체 하부에서는 이때부터 계속 파괴 소리가 들렸다. 116tf·m에 이르러 플랜지와 웨브의 경계 면에서 분리균열이 발생되어 IB500시험체와 마찬가지로 플랜지 옆면에서 발생되어 진행된 비틀림 균열과 결합되었고 하부 휨 인장파괴가 발생되어 하중지지 능력을 상실하였다. 이때 시험체의 처짐은 25.99mm가 발생되었다. (그림. 6참조)

5.2.2 직사각형 보

RB500시험체는 중앙부 최대 모멘트가 39tf·m에서 첫번째 균열이 발생되었다. 중앙에서 휨균열의 양상으로 발생된 3-4개의 초기균열은 43tf·m에서 중립축 까지 진행이 되어 이후로 고정+적재하중을 고려한 중앙축 하중 점으로 경사져서 진행되는 비틀림 균열의 양상을 보였다. 53.2tf·m에서는 중앙에서 약 12-13개의 휨·비틀림 균열이 경사져서 하중 점으로 진행이 되었다. 이후 57.98tf·m에서 시험체는 하부 휨 인장파괴가 이루어졌고 상부에서 압괴 현상은 관찰되지 않았다. 중앙에서 처짐은 35mm가 발생되었다.

RB1200시험체는 중앙부 최대 모멘트 72tf·m에서 첫 번째 균열이 발생되었다. 86tf·m에서 발생된 6-7개의 균열은 중립축을 넘어서 고정+적재하중을 고려한 중앙축 하중 점으로 경사져서 진행되는 비틀림 균열의 양상을 띄며 진행되었다. 103.42tf·m에서는 약14-15개의 균열이 발생되어 계속 경사져서 진행되었고 시험체에서는 파괴 소리가 들리기 시작했다. 이후 112.54tf·m에 이르러서 시험체는 최종파괴 되었는데 파괴양상은 하부 휨인장에 의한 파괴가 이루어 졌으며 이때의 처짐은 38.54mm가 발생되었다. (그림. 7참조) 위의 표 3은 실험결과를 나타낸 것이다.



그림. 6 역티형 보의 균열

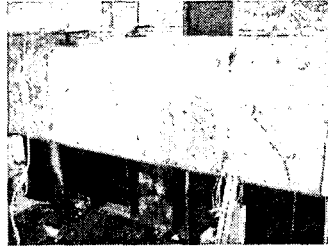


그림. 7 직사각형보의 균열

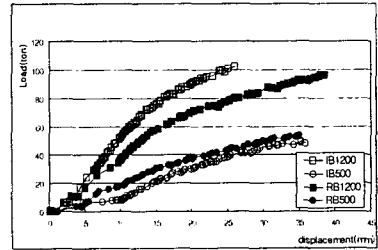


그림. 8 하중-변위 곡선

5.2.3 하중-처짐곡선

그림. 8은 각 시험체의 하중-처짐곡선이다. 적재하중 500kgf/m² 시험체의 경우에는 휨과 비틀림 하중이 동시에 작용할 때 처짐 양상은 거의 비슷한 반면에 적재하중 1200kgf/m² 시험체의 경우에는 직사각형 시험체가 확실히 더 많은 처짐을 발생시키면서 파괴되었다.

5.3 순수 휨을 받는 시험체와의 비교

본 논문에 앞서 발표된 "건축용 프리캐스트 프리스트레스트 역티형보와 직사각형보의 휨거동 비교"논문의

표 4 휨 논문과의 비교

시험체	콘크리트 fck (kgf/cm ²)		사용하중시 균열모멘트						최종파괴시 휨 강도					
	휨 시험체	휨-비틀림 시험체	기존 휨 논문		본 연구				기존 휨 논문			본 연구		
			①예측 (tf·m)	②실험 (tf·m)	②실험 / ①예측	③예측 (tf·m)	④실험 (tf·m)	④실험 / ③예측	⑤예측 (tf·m)	⑥실험 (tf·m)	⑥실험 / ⑤예측	⑦예측 (tf·m)	⑧실험 (tf·m)	⑧실험 / ⑦예측
RB500	463.8	465	32	41.33	1.28	32	39	1.22	70.81	78.87	1.11	70.81	57.98	0.82
IB500	483.8	436	37.77	52.2	1.38	37.77	42	1.11	74.44	72.98	0.98	74.44	57.35	0.77
평균	473.8	450.5	34.88	46.77	1.33	34.88	40.5	1.17	72.63	75.92	1.04	72.63	57.66	0.80
RB1200	486.7	487	58.97	79.75	1.35	58.9	72	1.23	121.1	121.9	1.00	121.1	112.54	0.93
IB1200	468.3	442	61.54	97.55	1.58	61.54	80	1.3	122.4	135.6	1.11	122.4	116.67	0.95
평균	477.5	464.5	60.26	88.65	1.47	60.22	76	1.26	121.75	128.8	1.05	121.8	114.61	0.94

Comment : ⑤, ⑦ Calculated nominal strength by Ultimate strength design method

결과와 본 연구의 휨과 비틀림을 동시에 받는 시험체의 실험결과를 비교 분석하였다. 순수 휨을 받는 직사각형 보와 역티형 보의 경우에 비해 휨과 비틀림을 동시에 받는 직사각형 보와 역티형 보의 전체 사용하중 작용시의 초기균열 발생 시점이 순수 휨만을 받는 시험체에 비하여 실험값이 이론값은 만족시켰으나 좀더 일찍 초기 균열이 발생함을 알 수 있다. 또한 최종파괴시의 순수 휨을 받는 시험체에 비하여 비틀림 영향으로 인한 휨 내력 저하로 최대 휨 강도에 도달하지 못한 채 파괴되는 것을 볼 수 있다. 이는 비틀림이 작용이 최종 휨 내력의 저하를 가져오는 것으로 판단된다. 표 4는 휨논문과의 비교 표이다.

5.4 시험체의 휨과 비틀림의 상관관계

그림. 9는 writer가 제안한 휨과 비틀림 간의 상관곡선이다. 본 연구에서 사용된 시험체의 축방향 철근의 비율은 모두 1%내이므로 writer가 제안한 직사각형 곡선과 실험결과를 비교하였다. 또한 축방향 철근이 없는 경우의 포물선곡선과도 같이 비교하였다. 그림. 16에서 보는바와 같이 RB1200의 경우 오차는 약 10%정도이고 RB500은 약 20%의 오차를 보였다. IB1200의 경우 약 36%정도와 IB500의 경우 약 24%정도의 오차를 보여 역티형 보의 경우 오차범위가 비교적 큼을 알 수가 있다.

또한 본 연구의 실험결과를 Lampert와 Collins가 제안한 휨-비틀림 상관곡선과 비교하여 보았다.(그림. 10, 11) 그들이 실험결과를 토대로 제안한 상관관계곡선은 단면이 직사각형일 때와 일반 RC일 때의 실험결과에 의한 것이지만 본 연구에서는 그들이 제안한 상관관계와 본 연구의 실험결과를 비교해 보고자 하였다.

위의 그림. 10과 11에서 보면 IB1200시험체 경우를 제외하고서는 거의 상관곡선과 가까운 결과를 얻고 있음을 볼 수가 있다. IB1200시험체의 경우 상관곡선과는 약 23%의 오차를 보였다.

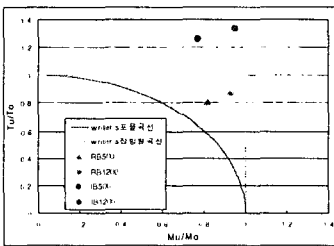


그림. 9 Writer제안 휨-비틀림 상관곡선

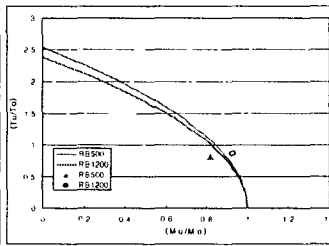


그림. 10 장방형보의 휨-비틀림 상관곡선

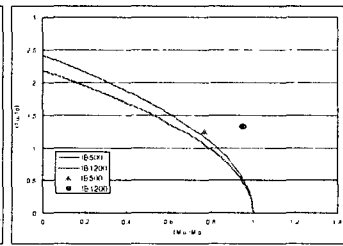


그림. 11 역티형보의 휨-비틀림 상관곡선

6. 결 론

휨과 비틀림이 조합된 하중 하에서의 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 휨과 비틀림이 조합된 하중 하에서도 각 시험체는 사용하중을 벗어나서 초기균열이 발생이 되어 본 연구에서 진행된 각 단면에 대한 사용성 평가에 있어서는 양호한 결과를 얻었다.
- (2) 휨과 비틀림이 조합된 하중 하에서는 그간의 연구에서 증명이 되었듯이 최종 파괴 형태는 경사-휨(skew-bending)이 지배한다는 것이 본 연구의 실험에서도 증명이 되었다.
- (3) 저자가 제안한 축방향 철근 1%내외의 프리스트레스트 보가 휨-비틀림의 조합하중을 받을 때 상관곡선은 직사각형이라는 것은 본 연구에서 고려한 역티형 보의 경우에는 잘 일치하지 않았다.
- (4) 본 실험에서의 결과들로 기존의 연구에서 제안된 상관곡선들과의 비교해본 결과 writer가 제안한 상관곡선과는 오차가 많았던 반면에 Lampert와 Collins가 제안한 곡선에는 IB1200시험체가 최대 23%의 오차를 보였지만 나머지 시험체와의 관계는 약 10%내외의 오차를 보였다.

참고문헌

1. P. Lampert and M. P. Collins, "Torsion, Bending and Confusion - An Attempt to Establish the Facts," ACI Journal, Vol. 69, No. 8, August 1972, pp. 500-504.
2. V. S. Hota, A. M. Gangarao, Paul Zia, "Rectangular Prestressed Beams In Torsion and Bending." Journal of ASCE, January, 1972, pp 183-198.
3. 유승룡 "건축용 프리캐스트 프리스트레스트 역티형보와 직사각형 보의 휨거동 비교", 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 6호 PP.75-82, 2000.12.