

휨과 비틀림을 받는 프리캐스트 PSC 역T형 보와 직사각형 보의 거동 비교

설동재¹⁾ · 박상렬^{2)*} · 유승룡¹⁾

¹⁾ 동국대학교 건축공학과 ²⁾ 제주대학교 토목환경공학과

(2003년 12월 20일 원고접수, 2004년 9월 6일 심사완료)

Comparison on the Behaviors of Inverted Tee and Rectangular Precast Prestressed Concrete Beams Under Combined Bending and Torsion

Dong-Jae Seol¹⁾, Sang-Yeol Park^{2)*}, and Sung-Yong Yu¹⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Dongguk University, Seoul, Korea

²⁾ Dept. of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Cheju, Korea

(Received December 20, 2003, Accepted September 6, 2004)

ABSTRACT

This study presents the behaviors of the typical architectural precast prestressed concrete beams, inverted tee and rectangular beams, subjected to combined flexural and torsional loads. For this purpose, two inverted-tee beams were designed with a parking live load, 5kN/m^2 , and a market load 12kN/m^2 according to the currently used typical shape in the domestic building site. Also, two 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. Total of four beams were tested, under combined bending and torsion, analysed and compared. Test results showed that the cracking and ultimate flexural strength of the beams decreased under torsional loading. However, two different shaped-beams had roughly the same load resisting capacity in service and ultimate states.

Keyword : Bending, torsion, inverted tee beam, precast prestressed concrete beam

1. 서 론

비틀림만을 받는 철근콘크리트 보의 역학적 거동은 일반적으로 전단력을 받는 철근콘크리트 보와 유사하지만, 휨이나 전단과 비틀림의 조합하중 하에서는 그 거동에 대한 정확한 예측이 어렵다. 프리캐스트 프리스트레스트 보와 관련한 비틀림 연구는 크게 두 가지의 경우로 나눌 수 있는데, 먼저 순수 비틀림을 받는 경우, 그리고 휨, 전단 등과의 복합적인 하중이 조합된 경우의 연구이다. 건축 구조물에서는 순수 비틀림만이 작용하는 경우는 거의 없고, 비틀림과 함께 휨과 전단력, 또는 축 방향력 등과 조합해서 작용하는 경우가 대부분이므로 후자의 경우에 대한 연구가 주로 진행되고 있는 실정이다.

이러한 휨, 전단, 비틀림 등의 조합하중이 철근콘크리트 보에 작용할 때의 역학적 거동은 대단히 복잡하고 난해하여 주로 실험연구에 기초한 이론연구 들이다. 비틀림을 포함한 조합하중에 의한 연구들로는 대표적으로 국내에서

참고문헌 1, 2가 있으며 국외에서는 참고문헌 3, 4 등이 있다. 그러나 국내에서 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보에 대한 연구는 아직 미진한 실정이다.

본 연구에서는 기존의 휨 - 비틀림 조합하중 하에서의 상관관계를 규명하고, 프리캐스트 프리스트레스트 보 부재의 단면형상에 따른 거동과 하중 저항강도를 비교하였다.

직사각형단면과 역T형 단면은 프리캐스트 보에 가장 일반적으로 사용되는 단면이다. 따라서 설계 실무에서 구조 설계자에게 이 두 단면에 대한 보다 정확하고 현실적인 정보가 필요하다. 역T형 보는 Fig. 1과 같이 주로 국내 대형 매장에서 고하중 장 기간 슬래브 재료 활용되고 있는 일반 더블 T 슬래브를 지지하는데 주로 사용되고 있다. 역T형 보의 하부 플랜지는 절곡되어 있는 형태로 일반 더블 T 슬래브 단부를 지지하기 위한 공간이며, 복부는 휨과 전단 내력을 위하여 필요한 깊이이다. 이러한 역T형 보의 절곡형상은 일반 더블 T 슬래브 단부 부위를 감출 수 있고, 충고를 줄일 수 있으며, 외관상으로 돌출된 부분이 나타나지 않아 미적 효과를 더하여 준다. 그러나 역T형 보의 복잡한 단면 형상은 부재의 생산, 운송, 시공 면에서 직사각형 보 보다 경제성이 취약한 것으로 평가되고 있다.

* Corresponding author

Tel : 064-754-3456 Fax : 064-725-2519

E-mail : sypark@cheju.ac.kr

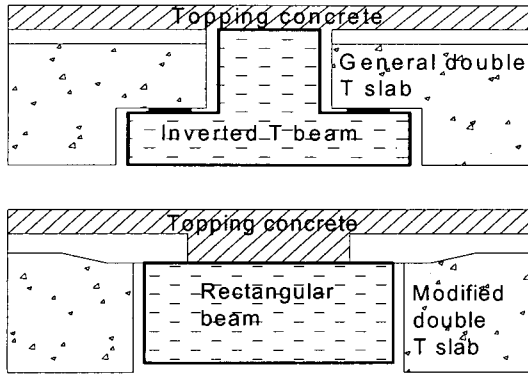


Fig. 1 General inverted T and rectangular beams

최근 국내 S사에서 개량 더블 T 슬래브를 발전시켜 국내 대형 매장에 적용하려 하고 있다. 이 개량 더블 T 슬래브의 단부는 Fig. 1에 보인 바와 같이 단부 플랜지의 두께를 증가시켜 집중하중 대신 플랜지의 전 단면에 의한 등분포 반력을 받게 되고, 단부지지는 역T형 보의 복부 대신 직사각형 보에 의하여 지지할 수 있도록 설계되었다. 이 경우 증가된 전단내력으로, 기존의 일반 더블 T 슬래브와 비교하여 충고를 줄일 수 있으며, 토평 콘크리트 타설 시 거푸집이 필요 없게 된다. 또한 슬래브의 연속화가 가능하여, 강철 집합을 통해 모멘트 골조로서의 성능을 발휘할 수 있게 된다. 이 개량 더블 T 슬래브는 복잡한 단면형상의 역T형 보를 대신하여 생산, 운송, 시공 면에서 활용도가 뛰어난 직사각형 보를 효율적으로 이용할 수 있으며, 이를 통해 역T형 보에 비하여 보다 직사각형 보의 장점을 그대로 활용할 수 있게 된다. 이를 요약하여 직사각형 보를 역T형 보와 비교하면 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 1) 역T형 보의 복잡한 단면과 달리 단순한 단면 형태를 가지고 있어 생산, 운송, 시공 면에서 우수하다.
- 2) 역T형 보의 깊은 단부 취약성을 개선할 수 있다.
- 3) 역T형 보는 직사각형 보 보다 많은 전단 및 비틀림 보강을 필요로 한다.
- 4) 역T형 보와는 다르게 슬래브의 연속화가 가능하다.

보 구조물에 작용하는 비틀림은 휨 모멘트나 전단력에 비하여 그 영향이 작으므로 2차적인 영향으로 간주되었으며, 따라서 설계에서도 비틀림 모멘트를 제외한 힘들에 대하여 상대적으로 충분한 안전율에 의한 설계로 비틀림 모멘트의 영향을 포함시킴으로서 비틀림 모멘트에 대한 직접적인 설계는 피하였다. 그러나 근래에는 다음의 두 가지 이유로 인하여 비틀림 모멘트에 대한 보다 정확한 예측이 필요하게 되었다. 첫째는, 강도설계법으로 재하되는 하중을 좀더 정확하게 평가함으로써 전체적인 안전계수의 감소와 이에 따라 설계된 부재단면이 축소되었고, 둘째로는, 비틀림 거동이 주된 부재의 사용이 점차 증가하게 되었기 때문이다. 그러나 비틀림은 거의 대부분이 휨이나 전단력이 조합되어 작용하게 된다. 또한, 지금까지의 연구는 주

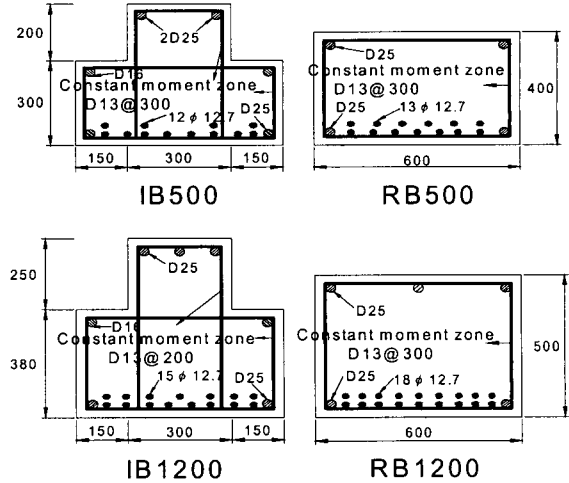


Fig. 2 Dimension and reinforcement of test beams (unit : mm)

로 일반 철근콘크리트 부재에 국한되어 조합하중을 받는 프리스트레스트 부재에 대한 정보가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재 구조물에 쓰이는 역T형 보와 직사각형 보에 가장 불리한 형태의 비틀림 하중을 가정하여 설계하고 그에 따른 실험을 실시하여 휨과 비틀림의 상관관계를 고찰하였고 Lampert와 Collins³⁾의 일반 철근콘크리트 부재의 휨과 비틀림 상관관계 제안식을 프리스트레스트 부재에 적용하여 분석하였다.

2. 시험체 계획

2.1 시험체 제작

본 연구에서는 8.4×10m 모듈, 적재하중 5kN/m²와 12kN/m²를 적용하여 지간 8.4m인 실물크기 프리캐스트 프리스트레스트 역T형 보와 직사각형 보를 각각 1개씩 총 4개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 단면 크기와 배근상세는 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 직사각형 보와 역T형 보의 단면크기는 밑면의 폭을 60cm로 각각의 단면적을 같게 하여 깊이를 단면변수로 채택하여 시방기준^{5,6)} 과 참고문헌 7, 8에 따라 설계하였다. Table 1에서는 각 시험체의 보강재 종류별 휨 보강량과 보강비를 정리하였다.

2.2 재료

프리스트레싱 강선은 저이완 강재로서, 직경 12.7mm, 인장강도 1,900 MPa, 7연선으로 국내 제조업체 K사의 것을 사용하였다. 일반 철근은 항복강도 400 MPa 이형철근을 사용하였고 콘크리트는 설계 압축강도 42 MPa이며 배합표는 Table 2와 같다.

Table 1 Reinforcement details of test beams

Test beam	Prestressing steel	Reinforcing bar
IB500	12φ12.7 strand $A_{ps}=11.85\text{cm}^2$ ($\rho_p=0.93\%$)	2D25($A_s=10.13\text{cm}^2$) 2D16($A_{so}=3.97\text{cm}^2$) 2D25($A'_s=10.13\text{cm}^2$)
RB500	13φ12.7 strand $A_{ps}=12.83\text{cm}^2$ ($\rho_p=0.66\%$)	2D25($A_s=10.13\text{cm}^2$) 2D25($A'_s=10.13\text{cm}^2$)
IB1200	15φ12.7 strand $A_{ps}=14.81\text{cm}^2$ ($\rho_p=0.89\%$)	2D25($A_s=10.13\text{cm}^2$) 2D16($A_{so}=3.97\text{cm}^2$) 3D25($A'_s=15.20\text{cm}^2$)
RB1200	18φ12.7 strand $A_{ps}=17.77\text{cm}^2$ ($\rho_p=0.70\%$)	2D25($A_s=10.13\text{cm}^2$) 3D25($A'_s=15.20\text{cm}^2$)

Table 2 Concrete mix design

Water (kN/m ³)	Cement (kN/m ³)	Aggregate (kN/m ³)	Sand (kN/m ³)
1.65	4.85	10.11	7.08
Fly ash (kN/m ³)	W/C (%)	Slump (cm)	Air (%)
0.49	34	12	1.8

2.3 실험계획

실험에서는 모든 시험체에 대하여 지간 455m를 적용스팬으로 하였다. 단부에서의 시험체 지지는 폭 60cm에 대하여 중앙 30cm만 핀 지점을 사용하여 단순 지지되게 하였다.

시험체 적용하중은 한쪽은 고정하중의 비만큼만 하중을 적용하고 다른 한쪽은 고정하중과 적재하중을 모두 고려한 비율만큼의 하중을 적용하였으며, 반대편은 역 대칭으로 재하하여 비틀림을 유도하였다. 시험체에 비틀림을 주기 위한 가력 점은 Fig. 3과 같이 시험체의 단면 폭의 끝에서 7.5cm 떨어진 곳에 위치시켰다. Fig. 4는 시험체 설치 및 재하도를, Fig. 5는 그 사진을 보여주고 있다.

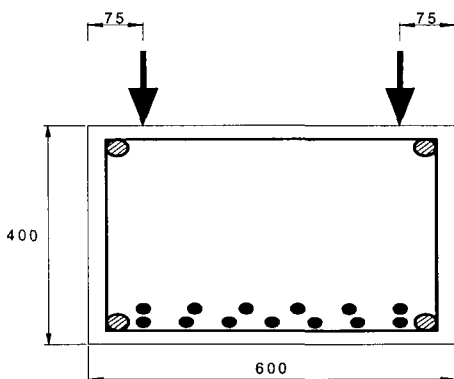


Fig. 3 Loading point in beam section (unit : cm)

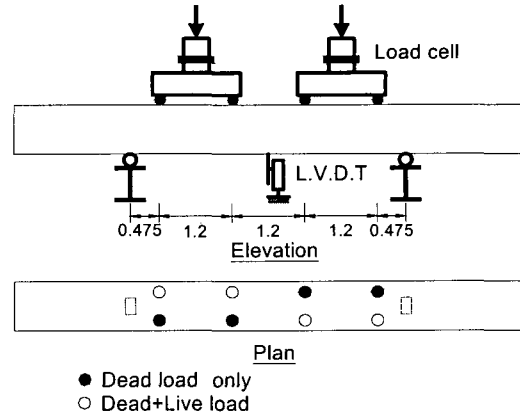


Fig. 4 Loading point in test set-up (unit : m)

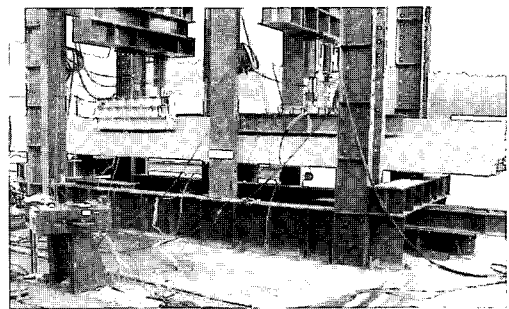


Fig. 5 View of test set-up

2.4 실험절차 및 방법

시험체를 설치한 후 실험은 시작에서부터 파괴 시까지 하중을 증가시켜가며 시험체의 균열, 하중 및 처짐, 최종 파괴 형태를 관찰하였다. 실험 초기에는 초기균열 발생을 정확히 측정하기 위하여 가력하중을 50 kN 단위로 증가시켰으며 예상 균열 강도 부근에서는 10 kN 단위로 가력하중을 세밀하게 증가시키며 실험하였다. 이러한 실험을 통해서는 다음과 같은 사항에 대하여 검토하고자 하였다.

- 1) 초기 균열 발생 하중과 위치,
- 2) 전체 사용 하중 적용시 시험체의 거동,
- 3) 극한 하중 적용시 균열의 크기 및 확산 형태와 시험체 거동
- 4) 최종 파괴형태와 최종 파괴시 시험체에 적용된 비틀림과 휨의 상관관계.

3. 실험

3.1 시험체 거동

하중 가력후의 초기균열 발생과 극한하중 시의 파괴형태, 처짐 등의 거동은 시험체의 단면 형상에 따라 차이를 나타내고 있다. Table 3은 이러한 실험결과를 정리한 것이다.

Table 3 Summary of test results

Test beam	f_{ck} (MPa)	M_{cr} (kN·m)	M_u (kN·m)	d_u (mm)	T_u (kN·m)	Failure mode
IB500	43.6	420	573.5	36.1	94.9	Tension
IB1200	44.2	802	1,166.7	38.5	211.3	Tension
RB500	46.5	390	579.8	35.0	108.4	Tension
RB1200	48.7	720	1,125.4	26.0	204.2	Tension

3.1.1 초기균열

초기 균열 모멘트는 PCI Design Handbook에 제안되어 있는 아래의 식 (1)으로 계산하였다.

$$M_{cr} = f_r S_2 + P_e \left(\frac{r^2}{c^2} + e \right) \quad (1)$$

여기서, f_r = 콘크리트의 휨 인장강도

S_2 = 인장영역의 단면계수

P_e = 유효 프리스트레스트 힘

c^2 = 중립축에서 하단까지의 거리

r^2 = 단면 2차 반경, e = 편심거리

계산된 각 시험체의 예측 균열 모멘트(Expected M_{cr})는 Table 4와 같다. IB500 시험체를 제외한 나머지 시험체의 경우 휨 - 비틀림 조합하중 하에서의 초기균열 발생 모멘트는 예측 균열 모멘트를 만족하고 있다. IB1200 시험체는 실험/예측 비가 1.13으로 가장 높은 값을 나타내고 있으며, 직사각형 시험체인 RB계열 시험체 모두 예측치를 상회하는 실험값을 보여주고 있다. 그러나 IB500 시험체의 경우 실험/예측 비율이 0.95로 예측 균열모멘트 이전에 균열이 발생하였다. 따라서 휨 - 비틀림 조합 하중 하에서 비틀림 하중의 영향에 의해 예측 균열 모멘트보다 앞서 초기 균열이 발생한 것으로 판단된다. 그러므로 휨과 비틀림의 조합하중 작용이 예상되는 부재의 설계에 대해서는 비틀림 보강근에 대한 고려가 필요하지 않더라도 적절한 비틀림 균열제어를 위한 최소한의 비틀림 균열 보강근이 고려되어야 한다고 판단된다.

3.1.2 역T형 보

1) IB500 시험체

IB500 시험체의 경우 중앙부 최대 모멘트 420 kN·m에서 첫 번째 균열이 발생하였으며 위치는 가력점 하단에서 발생되어 진행되었다. 시험체 양쪽면 모두 초기 균열이 발생되어 고정 및 적재하중을 고려한 중앙축 하중점으로 경사져서 진행되는 비틀림 균열의 양상을 보이며 진행하였다. 중앙부 최대 모멘트가 568 kN·m 정도에서는 고정 및 적재하중을 고려한 중앙축 하중점 밑으로 약 4개의 플랜지 뚫림 전단 균열이 발생되었고, 하중점 부근의 복부와 플랜지 경계면을 가로로 분리 균열이 발생되었다. 이 균열은 점차 진행되어 플랜지 옆면에서 경사져서 진행되어 올

라운 비틀림 균열과 결합되었다.

573.5 kN·m에서 시험체는 하부 휨 인장파괴가 발생되었고 상부 면에서는 콘크리트 압축파괴가 관찰되었다. IB500 시험체는 최종 파괴시 적용된 비틀림 모멘트는 94.9 kN·m로서 공칭 비틀림 강도 75.5 kN·m를 26%정도 초과하였고, 휨모멘트는 573.5 kN·m로서 공칭 휨강도 744.4 kN·m의 약 77%정도에서 최종 파괴되었고(3.2절 Table 4 참조), 파괴시의 극한처짐은 36.1 mm 였다.

2) IB1200 시험체

IB1200 시험체는 최대 모멘트가 802 kN·m에서 초기 균열이 가력점 밑에서 발생되었다. IB500 시험체와 마찬가지로 초기 균열에 이어 발생된 균열들은 고정 및 적재하중을 재하한 중앙축 가력점으로 경사져서 진행되는 비틀림 균열의 양상을 보였다. 1,070 kN·m에서 고정 및 적재하중을 고려한 중앙축 가력점 밑으로는 3 - 4개의 플랜지 뚫림 전단 균열이 발생이 되었으나 웨브와 플랜지 경계면에서는 별다른 분리 균열이 관찰되진 않았다.

시험체 하부에서는 이때부터 계속 파괴 소리가 들렸다. 1,160 kN·m에 이르러 플랜지와 웨브의 경계 면에서 분리 균열이 발생되어 IB500 시험체와 마찬가지로 플랜지 옆면에서 발생되어 진행된 비틀림 균열과 결합되었고, 하부 휨 인장파괴가 발생되어 하중지지 능력을 상실하였다. 이때 시험체의 처짐은 26.0 mm가 발생되었다.

IB1200 시험체는 최종 파괴시 적용된 비틀림 모멘트는 211.3 kN·m로서 공칭 비틀림 강도 158.2 kN·m를 34% 정도 초과하였고, 휨모멘트는 1,166.7 kN·m로서 공칭휨강도 1,223.8 kN·m의 약 95%정도에서 최종 파괴 되었다(3.2절 Table 4 참조). Fig. 6의 사진은 IB1200 시험체의 균열양상을 보여주고 있다.

3.1.3 직사각형 보

1) RB500 시험체

RB500 시험체는 중앙부 최대 모멘트가 390 kN·m에서 첫번째 균열이 발생되었다. 중앙에서 휨 균열의 양상으로 발생된 3~4개의 초기균열은 430 kN·m에서 중립축 까지 진행되어 이후로 고정 및 적재하중을 고려한 중앙축 하중점으로 경사져서 진행되는 비틀림 균열의 양상을 보였다.

532 kN·m에서는 중앙에서 약 12~13개의 휨·비틀림 균열이 경사져서 하중 점으로 진행이 되었다. 이후 579.8 kN·m에서 시험체는 하부 휨 인장파괴가 이루어졌고 상부에서 콘크리트 압괴 현상은 관찰되지 않았다. 중앙에서 처짐은 35 mm가 발생되었다. RB500 시험체는 최종 파괴시 적용된 비틀림 모멘트는 108.4 kN·m로서 공칭 비틀림 강도 134.4 kN·m의 81%정도에서 그리고 휨모멘트는 579.8 kN·m로서 공칭 휨강도 708.1 kN·m의 약 82% 정도에서 최종 파괴 되었다(Table 4 참조).

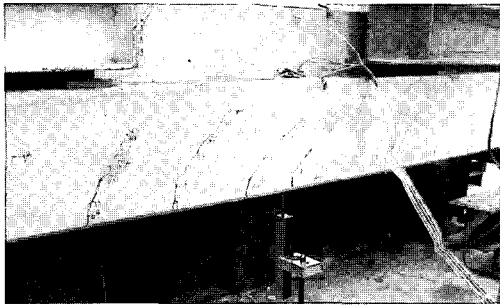


Fig. 6 Crack view of inverted T beam IB1200



Fig. 7 Cracks view of rectangular beam RB1200

2) RB1200 시험체

RB1200 시험체는 중앙부 최대 모멘트 720 kN·m에서 첫 번째 균열이 발생되었다. 860 kN·m에서 발생한 6~7개의 균열은 중립축을 넘어서 고정 및 적재하중을 고려한 중앙축 하중 점으로 경사져서 진행되는 비틀림 균열의 양상을 보이며 진행되었다. 1,034.2 kN·m에서는 약 14~15개의 균열이 발생되어 계속 경사져서 진행되었고, 시험체에서는 파괴 소리가 들리기 시작했다. 이후 1,125.4 kN·m에 이르러서 시험체는 최종 파괴되었는데 파괴양상은 하부 휨인장에 의한 파괴가 이루어졌으며 이때의 처짐은 38.5 mm가 발생되었다. RB1200 시험체는 최종 파괴시 작용된 비틀림 모멘트는 204.2 kN·m로서 공칭비틀림강도 235.5 kN·m의 87% 정도에서 그리고 휨모멘트는 1,125.4 kN·m로서 공칭휨강도 1,211.0 kN·m의 약 93% 정도에서 최종 파괴되었다(Table 4 참조).

3.1.4 하중 - 처짐 곡선

Fig. 8은 각 시험체의 하중 - 처짐곡선을 보여주고 있

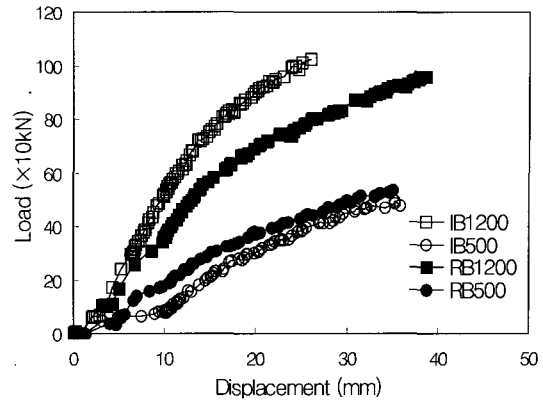


Fig. 8 Load-deflection curves of test beams

다. 적재하중 5 kN/m² 시험체의 경우에는 휨과 비틀림 하중이 동시에 작용할 때 비슷한 휨 강성과 최종 처짐으로 거의 유사한 거동을 보였다.

반면에 적재하중 12 kN/m² 시험체의 경우에는 직사각형 시험체가 역T형 시험체 보다 작은 휨 강성으로 더욱 많은 처짐을 발생시키면서 파괴되었다. 휨강도의 경우 실험/예측 비율이 거의 비슷한 값을 보여주고 있으나, 비틀림 강도면에서는 역T형 시험체가 실험/예측 비율이 더 큰 결과를 나타내고 있다(Table 4 참조). 그러나 거의 비슷한 극한강도를 갖는 두 시험체에 있어서 직사각형 시험체가 더욱 큰 처짐을 보이며 파괴되었다. 따라서 연성파괴를 유도함에 있어 단면형상의 변수를 고려하여 볼 때, 직사각형 단면이 역T형 단면에 비하여 보다 연성적인 거동을 한다고 판단된다.

3.2 시험체 강도

휨과 비틀림을 동시에 받는 프리캐스트 프리스트레스트 보에 대한 실험강도와 이론식에 의한 예측강도를 Table 4에 정리하였다. 시험체의 휨 공칭 강도(M_n)는 PCI⁽⁶⁾에서 제안되어 있는 휨 강도 계산식을 이용하여 계산하였으며, 비틀림 공칭강도(T_n)는 경사 - 휨 이론(Skew - Bending Theory)을 바탕으로 $T_n = T_c + T_s$ 의 식으로 계산하였다.

IB500 시험체의 경우 공칭휨강도의 77%에서 최종 파괴가 일어났으며 IB1200 시험체는 공칭휨강도의 95%에서 최종 파괴가 발생하였다.

Table 4 Comparison of measured and calculated strength

Test beam	f_{ck} (MPa)	Cracking moment(kN·m)			Ultimate strength(kN·m)			Ultimate torque(kN·m)			Failure mode
		Mea. M_{cr}	Cal. M_{cr}	$M_{Mea}/C.M_{cr}$	M_u	M_n	M_u/M_n	T_u	T_n	T_u/T_n	
IB500	43.6	420	440.2	0.95	573.5	744.4	0.77	94.9	75.5	1.26	Tension
IB1200	44.2	802	708.0	1.13	1,166.7	1,223.8	0.95	211.3	158.2	1.34	Tension
RB500	46.5	390	383.4	1.02	579.8	708.1	0.82	108.4	134.4	0.81	Tension
RB1200	48.7	720	680.5	1.06	1,125.4	1,211.0	0.93	204.2	235.5	0.87	Tension

RB500 시험체의 경우는 공칭 휨강도의 82%에서 최종 파괴 되었고, RB1200 시험체의 경우는 공칭 휨강도의 93%에서 최종 파괴 되었다. 역T형 시험체와 직사각형 시험체 모두 실험 강도가 휨 공칭강도를 밑도는 결과를 보여주었는데 이는 비틀림 하중의 조합으로 인하여 각 시험체의 휨 내력 저하를 의미한다. 따라서 휨과 비틀림을 동시에 받는 보의 경우 비틀림에 의한 휨 저항강도의 감소를 고려해야 함을 알 수 있다.

휨 강도에서 적재하중 12 kN/m^2 로 설계된 IB1200, RB1200 시험체가 적재하중 5 kN/m^2 로 설계된 IB500, RB500 시험체 보다 더욱 공칭휨강도에 근접한 강도에서 최종 파괴 되었다. 이는 프리스트레싱 강재의 증대 등으로 인한 부재의 휨내력 증대가 휨과 비틀림의 조합하중 하에서 비틀림 하중의 영향을 상대적으로 적게 받았다고 판단할 수 있다. 따라서 휨과 비틀림을 동시에 받는 프리캐스트 프리스트레스트 부재의 설계에 있어 비틀림에 대한 저항 성능을 증대시키기 위해서는 적절한 비틀림 보강 철근의 배근과 함께 적절한 수준의 휨 내력 증대가 고려되어야 한다고 판단되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

그러나 단면형상에 따른 휨 저항강도는 역T형 시험체 IB500가 직사각형 시험체 RB500 보다 약 1% 작았으며, 역T형 시험체 IB1200는 직사각형 시험체 RB1200 보다 3.5% 큰 강도를 보여 거의 같은 휨 강도를 가짐을 알 수 있다. 따라서 휨과 비틀림을 함께 받는 부재의 휨 저항강도에 있어서 역T형 보와 직사각형 보는 단면형상에 의한 차이는 없는 것으로 판단할 수 있다.

비틀림 강도에서는 직사각형 시험체는 공칭 비틀림 강도의 평균 84%에서 최종 파괴가 일어났다. 그러나 역T형 시험체의 경우에는 공칭비틀림강도의 평균 130%에서 최종 파괴되었다. 이는 휨과 비틀림을 동시에 받는 프리 캐스트 프리스트레스트 보에 있어서 역T형 단면이 강도 감소계수(ϕ)까지 고려할 경우 설계 시 예측한 비틀림 강도에 적절한 안전율이 있는 반면 직사각형 단면의 경우에는 시방서에서 제시하고 있는 안전율에 크게 미치지 못함을 알 수 있다. 허나 본 연구에서 예측한 비틀림 강도는 경사-휨 이론에 근거하여 계산하고 있으므로 다른 기준 시방식과의 비교, 검토가 필요하다고 할 수 있다.

그러나 단면형상에 따른 비틀림 저항강도는 역T형 시험체 IB500가 직사각형 시험체 RB500 보다 약 14% 작았으며, 역T형 시험체 IB1200는 직사각형 시험체 RB1200 보다 3.5% 큰 강도를 보여 적재하중 5 kN/m^2 로 설계된 보는 조금 작은, 적재하중 12 kN/m^2 로 설계된 보는 비슷한 비틀림 저항강도를 가짐을 알 수 있다. 따라서 휨과 비틀림을 함께 받는 부재의 비틀림 저항강도에 있어서 직사각형 보는 역T형 보에 비하여 단면형상 변화에 의해 불리한 결과는 없는 것으로 판단할 수 있다.

결론적으로 건축용 프리캐스트 프리스트레스트 역T형 보와 직사각형 보의 휨 거동 비교⁹⁾ 논문에서 보여주었던 결과나 본 연구의 실험 결과에서 보면 휨 저항강도 면에서는 두 단면 형상의 시험체 모두 비슷한 강도를 보여주었으며, 연성적인 면에서는 직사각형 시험체가 조금 나은 거동을 보여주고 있다. 한편, 비틀림 저항강도 면에서는 직사각형 보가 역T형 보와 비슷하거나 오히려 조금 나은 강도를 보여주고 있다. 따라서 순수 휨이나 휨과 비틀림을 받는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보의 부재 설계 시에는 생산, 운송 시공 면에서 보다 효율적인 직사각형 단면을 역T형 단면을 대신하여 고려하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

3.3 휨과 비틀림의 상관관계

Writer는 휨과 비틀림을 동시에 받는 철근콘크리트 보의 상관관계를 다음과 같이 제안하고 있다.

- 축방향 철근이 있는 경우

$$T_u \leq T_n \text{ and } M_u \leq M_n \text{ (직사각형)} \quad (2)$$

- 축방향 철근이 없는 경우

$$\left(\frac{T_u}{T_n}\right)^2 + \left(\frac{M_u}{M_n}\right)^2 = 1 \text{ (원)} \quad (3)$$

Fig. 9는 Writer가 제안한 휨과 비틀림 간의 상관곡선과 실험결과를 비교한 것이다. 본 연구에서 사용된 시험체의 축방향 철근의 비율은 모두 1%내외이므로 Writer가 제안한 직사각형과 실험결과를 비교하였다. 또한 축방향 철근이 없는 경우의 곡선과도 같이 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 가장 가까운 직선과의 거리와의 비로 구한 오차는 RB1200의 경우 약 10%정도이고 RB500은 약 20%의 차이를 보였다. IB1200의 경우 약 35%정도와 IB500의 경우 약 25%정도의 오차를 보여 역T형 보의 경우가 오차범위가 비교적 큼을 알 수가 있다.

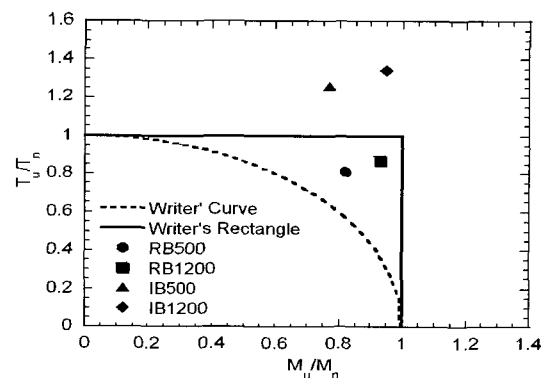


Fig. 9 Writer's interaction diagram of bending and torsion

또한 Lampert와 Collins는 휨과 비틀림을 동시에 받는 철근콘크리트 보의 상관관계를 다음과 같이 제안하고 있다.

$$r \left(\frac{T_u}{T_n} \right)^2 + \left(\frac{M_u}{M_n} \right) = 1 \quad (\text{포물선}) \quad (4)$$

여기서, $r = \frac{A' f_y}{A f_y}$

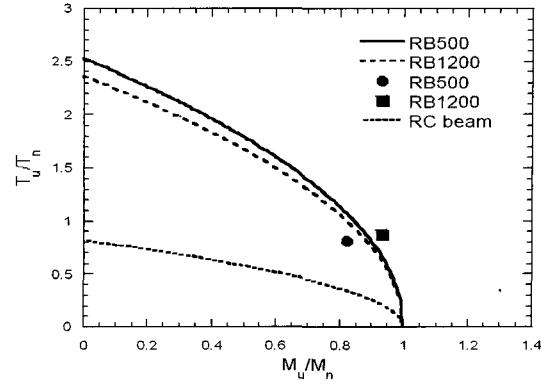
Fig. 10은 본 연구의 실험결과와 Lampert와 Collins가 제안한 휨-비틀림 상관곡선과 비교하여 보았다. Lampert와 Collins가 실험결과를 토대로 제안한 상관관계 곡선은 단면이 직사각형일 때와 일반 철근콘크리트일 때의 실험 결과에 의한 것이지만 이를 확장하여 본 연구의 실험결과를 비교해 보았다. 그래프에서 일반 RC보의 상관곡선은 Lampert와 Collins에 의해 제안된 상관관계식에서의 r 값 ($r = \frac{A' f_y}{A f_y}$)을 그대로 적용하여 그린 것이다. 그러나 Lampert와 Collins의 연구는 일반 철근콘크리트 부재에 대한 연구로 그들이 제안한 상관 관계식에서 r 값은 프리스트레싱 힘을 고려하지 않고 있다. 따라서 프리스트레싱 효과를 고려한 r 값 ($r = \frac{A' f_y}{A f_y + A_{ps} f_{ps}}$)으로 계산하여 그린 상관곡선과 본 실험결과를 비교하였다.

그림에서 실험결과와 상관곡선을 비교하여 보면 IB1200 시험체 경우를 제외하고서는 거의 상관곡선에 가까운 결과를 얻고 있음을 볼 수가 있다. IB1200 시험체의 경우 상관곡선과는 약 23%의 오차를 보이고 있다.

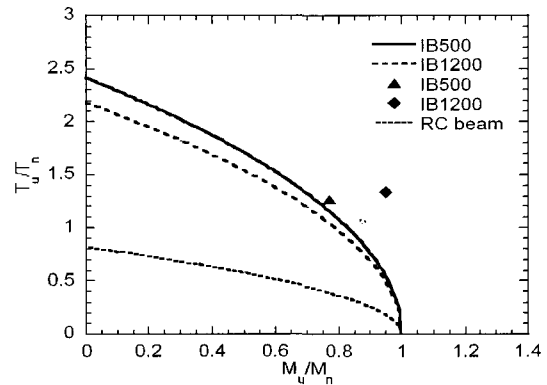
한편, 일반 철근콘크리트 보로 고려된 r 값을 이용한 상관곡선은 실제 실험 결과와 큰 차이를 보여주고 있다. 그러나 프리스트레싱 힘을 고려한 r 값을 적용한 상관관계 곡선은 실험 결과와 거의 근접한 결과를 보여주고 있어, 프리캐스트 프리스트레스트 부재에 대해서는 휨과 비틀림의 상관관계 고려 시 r 값에 프리스트레싱 힘을 고려되어야 할 것으로 판단된다. 그러므로 Lampert와 Collins가 제안한 상관관계 곡선은 r 값에 대한 프리스트레싱 힘을 고려한다면, 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보 부재에서도 적용이 가능하다고 판단된다.

3.4 휨 거동 논문과의 비교

본 논문에서 앞서 발표된 “건축용 프리캐스트 프리스트레스트 역T형 보와 직사각형 보의 휨 거동 비교” 논문⁹⁾에서는 4m 스패에서의 휨 실험을 통한 역T형 보와 직사각형 보의 휨 거동을 비교하였다. 따라서 본 절에서는 순수 휨 실험결과와 휨과 비틀림을 동시에 고려한 실험결과를 비교 분석하였다. 휨 시험체와 휨과 비틀림을 동시에 받는 시험체는 동일한 휨강도를 갖도록 설계되었다. Table 5는 순수 휨만을 받는 실험결과와 휨과 비틀림을 동시에 받는



(a) Rectangular beam



(b) Inverted T beam

Fig. 10 Lampert and Collins's interaction diagram of bending and torsion

Table 5 Comparison of test results in bending only and bending-torsion test

Test beam	Cracking moment(kN*m)			Ultimate moment(kN*m)		
	Bend-ing①	Bend-ing + torsion②	②/①	Bend-ing③	Bend-ing + torsion④	④/③
RB500	413	390	0.94	789	580	0.74
IB500	522	420	0.80	730	574	0.79
RB1200	798	720	0.90	1,219	1,125	0.92
IB1200	976	800	0.82	1,356	1,167	0.86

동시에 받는 보의 실험결과를 비교하고 있다. 표에서 보는 바와 같이 휨과 비틀림을 동시에 받는 시험체는 초기 균열 모멘트나 최종 파괴시의 휨 강도 면에서 순수 휨을 받는 시험체에 비하여 저하된 휨 성능을 보여주고 있다.

먼저 활하중 5kN/m²로 설계한 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 시험보의 초기균열 강도는 비틀림의 영향으로 직사각형 보는 6%, 역T형 보는 20% 낮은 값을 나타내고 있다. 한편, 극한 휨 저항력의 경우는 비틀림의 영향으로 직사각형 시험체는 26%, 역T형 보는 21% 낮은 강도를 나타내고 있다. 활하중 12kN/m²로 설계한 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 시험체의 초기균열 강도는

비틀림의 영향으로 직사각형 보는 10%, 역T형 보는 18% 낮은 값을 나타내고 있다. 한편, 극한 휨 저항력의 경우는 비틀림의 영향으로 직사각형 시험체는 8%, 역T형 보는 14% 낮은 강도를 나타내고 있다.

따라서 두 설계 활하중과 단면형상을 비교하여 보면 균열강도의 경우 두 설계 활하중 단계가 비슷한 감소를 나타냈으나 같은 설계 활하중에서는 역T형 보가 직사각형 보에 비하여 비틀림의 영향을 더 받는 것으로 나타나고 있다. 한편, 극한 하중강도의 경우 낮은 설계 활하중 5 kN/m²로 제작된 시험체가 높은 설계 활하중 12 kN/m²로 제작된 시험체 보다 비틀림의 영향을 더 받는 것으로 나타나고 있으며 단면형상에 의한 차이는 크지 않은 것으로 시험되었다. 이는 부재의 비틀림에 대한 저항능력이 균열 전에는 프리스트레싱 강재의 영향보다는 단면형상에 영향을 받지만 균열 후에는 단면의 영향보다 프리스트레싱 강재의 영향이 더 크다는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 더블 T형 슬래브를 지지하는 프리캐스트 프리스트레스트 역T형 보와 직사각형 보에 대하여 실제 구조물에서 발생할 수 있는 휨과 비틀림이 조합된 하중 하에서의 실험연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 휨과 비틀림이 조합된 하중을 받는 같은 면적의 역T형 및 직사각형 보는 비슷한 극한 휨 저항강도를 갖는다. 또한 극한 비틀림 저항강도 면에서도 서로 비슷한 강도를 갖는다. 한편, 순수 휨만을 받는 경우에도 같은 면적의 역T형 및 직사각형 보는 서로 비슷한 극한 휨 저항강도를 갖는다.
- 2) 따라서 1)의 결론으로 순수 휨이나 휨과 비틀림을 함께 받는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보의 설계 시 생산, 운송, 시공 면에서 보다 효율적인 직사각형 단면을 역T형 단면을 대신하여 적극적으로 고려해 보는 것이 바람직하다.
- 3) 휨과 비틀림이 조합된 하중 하에서는 비틀림의 영향으로 휨만 받는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보 보다 초기 균열 강도 및 휨 저항강도가 저하된다. 특히,

극한 휨강도의 경우는 설계 활하중 5 kN/m²로 제작된 시험체가 높은 설계 활하중 12 kN/m²로 제작된 시험체 보다 비틀림의 영향을 더 받는 것으로 나타났다.

- 4) 휨과 비틀림이 조합된 하중 하에서는 본 시험체의 경우 최종 파괴 형태가 경사-휨(skew - bending)이론에 따라 설명될 수 있음을 알 수 있다.
- 5) 본 실험에서의 휨 비틀림 시험체 결과들로 기존의 연구에서 제안된 상관곡선들과의 비교해본 결과 Writer가 제안한 상관곡선과는 비교적 오차가 큰 반면에 Lampert와 Collins가 제안한 곡선과는 비교적 작은 오차를 보였다.

참고문헌

1. 신중학, 하기주, 강신태 “휨과 비틀림을 받는 철근콘크리트 보의 거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 12권 4호, 1996, pp.211~222.
2. 문옥선, 박성수 “전단과 비틀림의 조합하중이 작용하는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 설계에 관한연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 1996, pp.617~622.
3. P. Lampert and M. P. Collins, “*Torsion, Bending and Confusion-An Attempt to Establish the Facts,*” ACI Journal, Vol.69, No.8, 1972, pp.500~504.
4. V. S. Hota, A. M. Gangarao, and Paul Zia, “Rectangular Prestressed Beams In Torsion and Bending,” *Journal of ASCE*, 1972, pp.183~198.
5. ACI Committee 318, “*Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-95),*” American Concrete Institute, 1996.
6. PCI Design Hand Book - Precast and Prestressed Concrete, fifth Edition, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1999.
7. Edward G. Nawy., “*Prestressed Concrete,*” Prentice Hall, New Jersey, 1989.
8. M. P. Collince and D. Mitchell, “*Prestressed Concrete Structures,*” Prentice Hall, New Jersey, 1991.
9. 유승룡 “건축용 프리캐스트 프리스트레스트 역T형 보와 직사각형 보의 휨 거동 비교”, 콘크리트학회논문집, 12권 6호 2000, pp.75~82.

요 약

본 논문에서는 휨과 비틀림을 함께 받는 전형적인 건축분야의 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 역T형 보와 직사각형 보의 거동을 연구하였다. 연구 목적을 위하여 국내 건축시장에서 사용되고 있는 주차장 활하중 5 kN/m² 및 상가 활하중 12 kN/m²의 역T형 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하였다. 또한 같은 길이의 보 밀면과 면적을 갖는 두개의 직사각형 콘크리트 보도 제작하였다. 따라서 설계 활하중과 단면형상이 다른 네 개의 보를 휨과 비틀림의 동시 작용 하에서 실험하여 그 결과를 분석하고 비교하였다. 실험결과 비틀림의 영향으로 시험체 모두 초기 균열 및 극한 휨 강도가 저하되었다. 그러나 단면형상에 따라 사용하중 및 극한 하중 하에서의 하중 지지력에는 커다란 차이가 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 휨, 비틀림, 역T형 보, 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보