

웹 개구부를 가진 합성보의 이력거동 Hysteretic Behavior of Composite Beam with Web Opening

박 노웅¹⁾ 김 원기²⁾ 이 승준³⁾
Park, Noh Woong Kim, Wonki Lee, Seung Joon

ABSTRACT

This research investigates the hysteretic behavior of composite beams with web opening near the beam end. The objective of this research is to intend a ductile failure around the web opening subjected to cyclic loading prior to the potential brittle failure at the beam-to-column connection. Experimental tests of two specimens having different location of opening were conducted resulting in better performance of strength and ductility at the specimen of middle opening compared with that of upper opening. Also, comparisons of experimental and theoretical results were carried out.

핵심용어: 합성보, 이력거동, 웹 개구부, 실험값

KEYWORDS: Composite Beam, Hysteretic Behavior, Web Opening, Experiment

1. 서 론

외국의 기존건물에 발생한 지진피해 중에서, 보 단부의 최대 모멘트 부위에 발생하는 손상은 취성파괴의 결과를 초래하였다. 이러한 피해를 극소화하기 위한 연구로서 보의 단부 가까이에 있는 부재 단면을 감소하여, 이 감소된 단면에서의 소성힌지를 유도하여 인성파괴의 결과를 초래하는 연구가 계속되어 왔다. 그 중에서 강재보의 플랜지 부분을 곡선으로 감소시켜 개뼈다귀 모양의 플랜지 형태를 가진 강재 단면의 연구^(1,2)가 미국에서 실용화되어 있는 상태이다. 그러나 이러한 단면은 콘크리트 슬래브와의 합성보인 경우에 복잡한 거동을 보여주며, 또한 기존의 합성보를 보강하는 방법으로는 적합하지가 않다.

개구부를 가진 유공 합성보의 단조하중에 대한 거동에 관한 연구 역시 그 동안 많이 수행되었으며 부재의 공칭강도 산정 설계식^(3,4)이 이미 제시되어 있다. 또한, 국내에서는 웹 개구부가 상단에 설치된 경우인 상부 유공 합성보의 극한 내력에 관한 연구⁽⁵⁾가 이미 수행되어 단조하중에 대한 성능은 우수함이 확인되었다.

이번 연구는 반복하중을 받는 합성보에서, 합성보의 웹 단면에 개구부를 설치하여 개구부 주변에서의 소성힌지를 유도하여 인성파괴의 결과를 초래하는 연구이다. 웹 개구부 주변의 비틀림 거동으로서, 보 단부의 전단력에 의한 2차모멘트의 영향으로 생기는 4개 부위의 소성모멘트를 이용하며 에너지소산을 유도하는 방법이다.

본 연구는 개구부를 가진 합성보의 이력거동을 조사하는 실험적인 연구로서, 개구부의 위치를 변수로 하여 차이점을 비교 분석하고자 한다.

1) 호서대학교 대학원 건축학과 석사과정

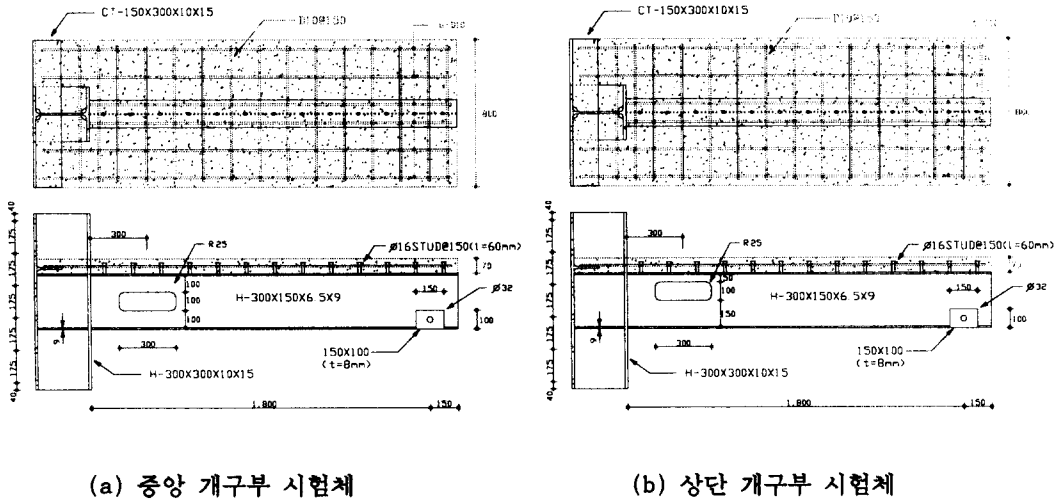
2) 호서대학교 건축학부 교수, 정희원

3) 아주대학교 환경·도시공학부 교수, 정희원

2. 실험계획 및 실험

2.1 시험체 설계 및 제작

웹 개구부를 갖는 합성보의 이력거동을 평가하기 위한 시험체의 형상은 보 단부에서 30cm 떨어진 위치에 개구부를 설치하여 개구부 주변에서 인성파괴가 유도되도록 계획하였다. 시험체의 형상과 치수는 그림 1과 같다. 실험의 주요변수는 개구부의 위치로서, 개구부를 웹 중심의 중앙에 설치한 '중앙 개구부 시험체'와 웹 중심의 중앙에서 5cm 상단에 설치한 '상단 개구부 시험체'로 분류하여 제작하였다.



(a) 중앙 개구부 시험체

(b) 상단 개구부 시험체

그림 1 시험체의 형상

기둥과의 접합부 위치와 개구부 위치에서의 상대적인 강도와 인성도를 비교분석하기 위해서 두 개의 시험체 모두 기둥재와 접합부 패널을 포함시켜 제작하였다. 두 개의 시험체 구성에서 기둥재는 H-300x300x10x15, 강재보는 H-300x150x6.5x9이며, 평판 철근콘크리트 슬래브의 폭은 80cm, 두께는 7cm이다. 슬래브 두께의 중앙에 배근된 주근은 6-D10 이며, 합성보 역할로 사용된 스티드 코넥터는 13-Ø16이다.

합성보 자유단의 가력점은 기둥과의 접합부에서 180cm 떨어진 위치이며, 결과적으로 웹 개구부의 중심에서 150cm 떨어진 위치이다.

개구부의 크기는 두 개의 시험체 모두 폭이 30cm이고 높이가 10cm이다. 한편, 개구부의 모서리 부분에서 발생할 수 있는 균열에 따른 취성파괴를 방지하기 위하여 그림 1과 같이 네 모서리에 반경 25mm의 필렛을 설치하였다.

2.2 재료의 강도

시험체를 구성하는 강재의 재료 인장시험 결과는 표 1과 같다. 강재의 인장시편은 플랜지와 웹으로부터 각각 2개의 인장시편을 제작하여 실험하였다. 시편의 형상 치수는 길이 200mm, 폭 40mm이다. 표 1에 보이는 바와 같이 항복강도 F_y 는 플랜지가 $3.06t/cm^2$ 이며, 웹이 $3.25t/cm^2$ 이다. 항복비 F_y/F_u 는 플랜지가 0.66, 웹이 0.74로서, 플랜지보다 웹이 더 크게 나타났다.

콘크리트의 재료강도 시험 결과는 4주 압축강도의 평균값이 269kg/cm^2 이다.

표 1 강재의 인장시험 결과

	플랜지			웨브		
	F_y (t/cm ²)	F_u (t/cm ²)	F_y/F_u	F_y (t/cm ²)	F_u (t/cm ²)	F_y/F_u
시편 #1	3.17	4.67	0.68	3.27	4.31	0.76
시편 #2	2.94	4.56	0.65	3.23	4.46	0.74
평균	3.06	4.62	0.66	3.25	4.39	0.74

2.3 실험방법 및 측정

그림 2는 시험체의 실험 전경을 보여주고 있다. 실험과정에서 그림 1의 시험체를 수직으로 세워 기둥부를 바닥 골조에 고력볼트로 접합하였으며, 보의 기둥접합부로부터 180cm 떨어진 가력점 위치에 변위측정장치를 설치하여, 가력점에서의 하중-처짐 관계를 조사하였다.

시험체 측정값 중에서 중요한 것은 개구부 주변의 응력도이므로 그림 3과 같이 스트레인 게이지를 부착하였다. 게이지의 위치는 기둥과의 접합부 위치와 개구부의 모서리 주변에 설치되었다.

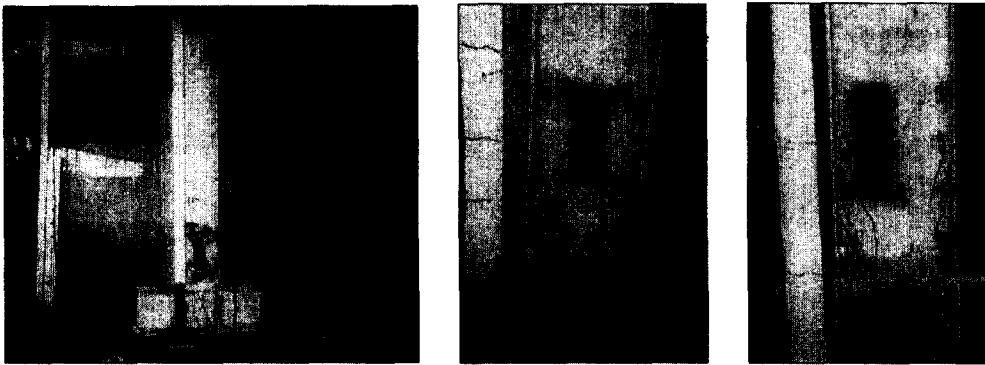
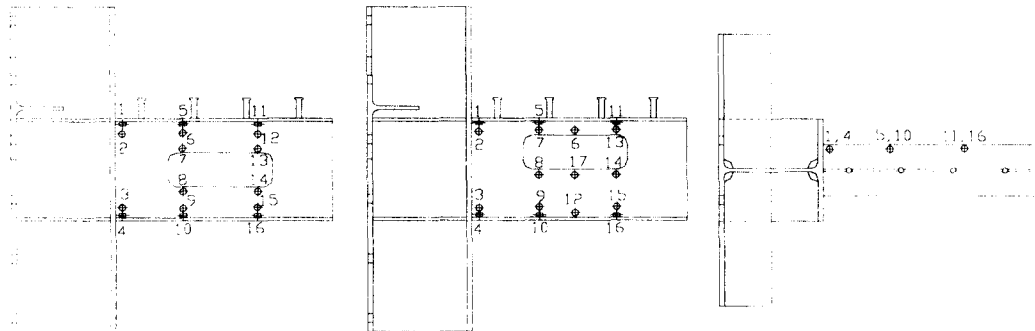


그림 2 시험체의 실험 전경과 개구부 위치



(a) 중앙 개구부 시험체

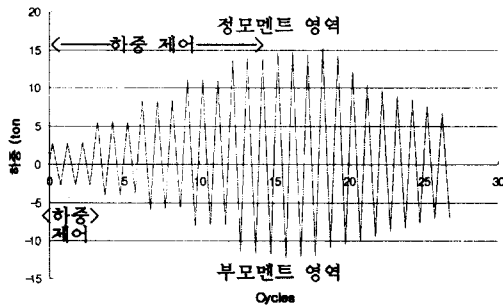
(b) 상단 개구부 시험체

(c) 플랜지에 부착된 게이지

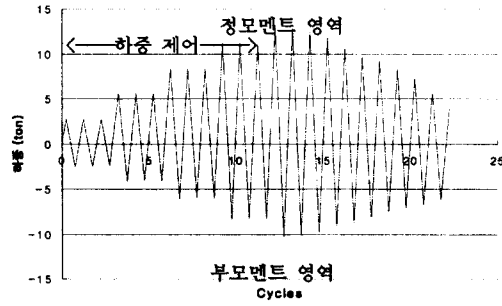
그림 3 스트레인 게이지 부착 위치

시험체에 가해지는 재하하중은 탄성영역과 비탄성영역으로 구분된다. 탄성영역에서는 우선 시험체의 탄성한계(P_y)를 예측한다. 이 탄성한계를 몇 개의 단계로 나누어 탄성범위에서의 하중제어로서 하중을 반전하며 증가시킨다. 이러한 단계별 재하에서 각각의 단계는 다시 3개의 Cycles로 나누어서 일정하중을 반복적으로 작용시킨다. 탄성범위에서의 일정한 하중제어가 끝난 후에는 변위제어로서 변위를 반전하며 증가시킨다.

그림 4는 하중 및 변위 제어 프로그램을 보여주고 있다. ‘중앙 개구부 시험체’의 하중제어는 2.8ton 간격으로서 14ton까지 실행하였다. 다만, 부모멘트 구간에서는 2.8ton까지만 적용하고, 그 이후는 정모멘트 구간의 변위량과 일치하도록 변위로서 제어하였다. 하중제어 영역 이후는 16.5mm 간격으로 변위를 증가시켰다. ‘상단 개구부 시험체’의 하중제어는 2.8ton 간격으로서 11.2ton까지 실행하였다. 다만, 부모멘트 구간에서는 처음부터 정모멘트 구간의 변위량과 일치하도록 변위로서 제어하였다. 하중제어 영역 이후는 15mm 간격으로 변위를 증가시켰다. 두 개의 실험 모두 시험체의 파괴가 일어날 때까지 계속 수행되었다.



(a) 중앙 개구부 시험체



(b) 상단 개구부 시험체

그림 4 하중 및 변위 제어 프로그램

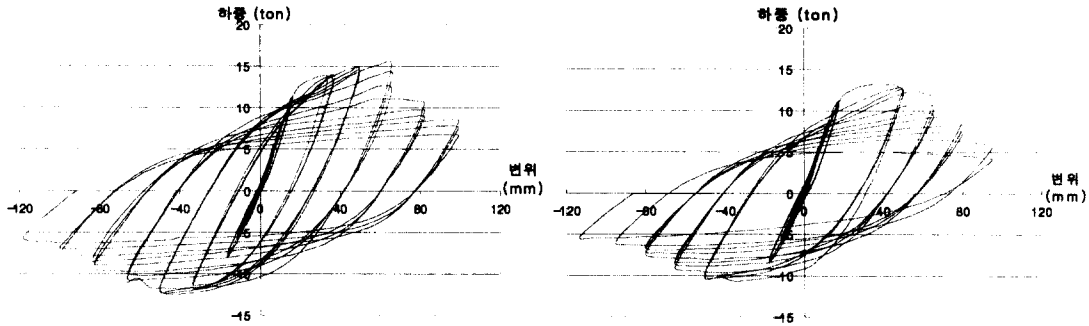
3. 실험 결과

3.1 하중-변위 곡선

그림 5는 실험이 완료되기까지의 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. ‘중앙 개구부 시험체’의 경우에 부모멘트 구간의 최대하중은 약 12.3ton(변위 49.5mm)에 도달하였고, 정모멘트 구간의 최대하중은 약 15.3ton(변위 66mm)에 도달하였다. 정모멘트 구간과 부모멘트 구간의 최대변위는

99mm이다.

'상단 개구부 시험체'의 경우에 부모멘트 구간의 최대하중은 약 10.3ton(변위 50mm)에 도달하였고, 정모멘트 구간의 최대하중은 약 13.2ton(변위 50mm)에 도달하였다. 정모멘트 구간과 부모멘트 구간의 최대변위는 95mm이다.



(a) 중앙 개구부 시험체

(b) 상단 개구부 시험체

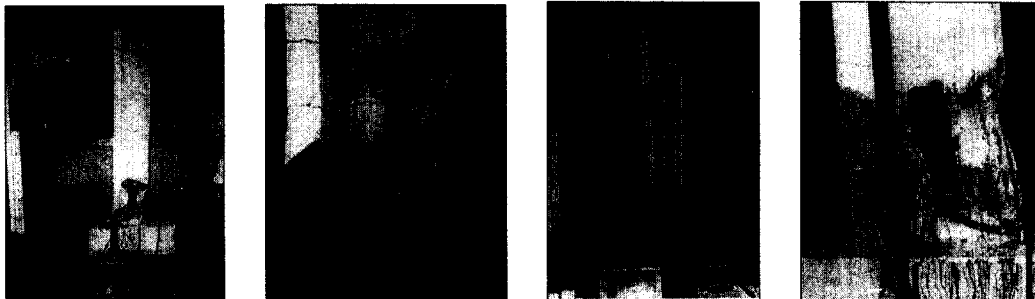
그림 5 보 단부의 하중-변위 이력곡선

3.2 시험체의 균열진전 및 파괴형태

'중앙 개구부 시험체'의 경우에 부모멘트 방향 재하 하중 약 4.2ton에서 슬래브 콘크리트의 최초 균열 발생이 시작되었고, 이후 지속적인 균열이 진행되었다. 정모멘트 방향 재하 하중 약 14ton에서 눈에 띄는 강재의 변형이 개구부 모서리에 시작되었다.

'상단 개구부 시험체'의 경우에 부모멘트 하중 약 4.2ton에서 콘크리트의 최초 균열 발생이 시작되었고, 지속적인 균열이 진행되었다. 정모멘트 하중 약 8.4ton에서 강재의 웨브와 하부의 플랜지에 눈에 띄는 변형이 시작되었다.

두 개의 시험체 모두가 그림 6과 같이 콘크리트 부분이 완전히 파괴되고, 개구부 모서리 네 군데에 소성힌지가 발생한 후에, 플랜지의 국부좌굴과 개구부 모서리 부분의 균열 발생 파단으로 내력이 저하되어 실험을 중단하였다.



(a) 중앙 개구부 시험체

(b) 상단 개구부 시험체

그림 6 시험체의 파괴 상태

4. 시험체 강도의 이론적 고찰

4.1 시험체의 공칭강도

미국의 강구조학회인 AISC에서 제공한 설계식^(3,4)을 적용하여 웨브 개구부를 가진 강재보와 합성보의 공칭강도를 산정하였다. 계산 과정은 여기서 생략하며, 휨강도와 전단강도의 상관식은 참고문헌 3과 4에 따라 다음과 같다.

$$\left(\frac{M_n}{M_m}\right)^3 + \left(\frac{V_n}{V_m}\right)^3 = 1 \quad (1)$$

여기서, M_n : 전단력을 고려한 공칭휨강도 (t·m)

M_m : 전단력이 없다고 가정한 경우의 공칭순수휨강도 (t·m)

V_n : 휨모멘트를 고려한 공칭전단강도 (ton)

V_m : 휨모멘트가 없다고 가정한 경우에 공칭순수전단강도 (ton)

시험체별로 정모멘트 방향 하중에 의한 합성단면의 강도와 부모멘트 방향 하중에 의한 강재단면의 강도로서 식 (1)에 계산된 값들을 비교하여 표 2와 같이 요약하였다.

표 2 공칭강도와 실험값의 비교

	합성단면 (정모멘트 방향 하중)			강재단면 (부모멘트 방향 하중)		
	중앙 개구부 단면	상단 개구부 단면	기둥과의 접합부 위치 단면	중앙 개구부 단면	상단 개구부 단면	기둥과의 접합부 위치 단면
M_m (t·cm)	22.7	23.7	24.4	15.5	14.5	16.6
V_m (ton)	17.4	17.6	-	11.9	13.2	-
공칭휨강도 M_n (t·cm)	19.2	19.8	24.4	13.1	13.0	16.6
공칭전단강도 V_n (ton)	12.8	13.2	-	9.7	9.7	-
공칭강도에 따른 최대 하중 P_{max} (ton)	12.8	13.2	13.6 ^{*1}	9.7	9.7	9.2 ^{*1}
실험값 최대하중 P_u (ton)	15.3	13.2	-	12.3	10.3	-

주기 1 : 기둥과의 접합부 위치 단면의 공칭휨강도에 따라 결정되는 최대 하중 산정에서 모멘트 발생 캔틸레버 길이는 1.8m를 적용함.

4.2 이론값과 실험값의 비교 분석

표 2에 보이는 비교값을 분석하면 다음과 같다.

(1) 합성단면과 강재단면의 경우 모두에 있어서, 공칭강도에 따른 최대하중은 개구부의 위치에

따른 차이점이 거의 없다. 즉, 공칭강도 산정에서 상부티와 하부티 단면의 국부좌굴이 적절히 고려되지 않았다.

(2) 합성단면의 경우에 실험값의 최대하중은 중앙 개구부 시험체($P_u=15.3\text{ton}$)가 상단 개구부 시험체($P_u=13.2\text{ton}$)보다 큰 값을 보이고 있다. 즉, '중앙 개구부 시험체'에서 전단력에 의한 2차모멘트 분포가 상부티와 하부티에 적절히 분배되었으며, '상단 개구부 시험체'의 경우에 상부티의 플랜지 부위와 하부티의 웹 부분의 국부좌굴이 빨리 발생한 것으로 분석된다.

(3) 강재단면의 경우에도 역시 실험값의 최대하중은 '중앙 개구부 시험체'($P_u=12.3\text{ton}$)가 '상단 개구부 시험체'($P_u=10.3\text{ton}$)보다 큰 값을 보이고 있다. 즉, '상단 개구부 시험체'의 경우에 상부티와 하부티 단면의 국부좌굴이 빨리 발생한 것으로 분석된다.

(4) '중앙 개구부 시험체'의 경우에 이론값에 대한 실험값의 비율은 합성단면이 120%, 강재단면이 127%를 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서 2개의 시험체에 대한 실험값과 이론값을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 반전하중을 받는 합성보에서, 합성보의 단부(기둥과의 접합부 위치)에서 발생할 수 있는 파단 이전에 웹 개구부 주변에서 발생하는 소성변형과 에너지 흡수를 확인하였다.
- (2) 웹 개구부 주변의 상부티와 하부티의 국부좌굴을 고려할 경우에 중앙 개구부 단면이 상단 개구부 단면보다 강도와 인성도에서 우월하다.
- (3) 미국 AISC의 'Steel Design Guide Series'에서 제시한 웹 개구부를 가진 합성단면과 강재 단면의 공칭강도가 실험값과 비교할 때 약 1.2 내지 1.27의 안전율을 가지고 있다.
- (4) 보다 인성도가 큰 합성보의 개발로서, 개구부의 크기와 보강방법에 관한 연속적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. Iwankiw, Nestor R., "Ultimate Strength Considerations for Seismic Design of the Reduced Beam Section (Internal Plastic Hinge)", AISC Engineering Journal, 1997 Volume 34, No.1, PP.3-16
2. Plumier Andre, "The Dogbone: Back to the Future" AISC Engineering Journal, 1997 Volume 34, No.2, PP.61-67
3. David Darwin, "Steel and Composite Beams with Web Openings / Steel Design Guide Series 2", American Institute of Steel Construction, Inc., 1990
4. 김원기, 이승준, 신영창, 이강훈, "춤이 큰 열연 H형강 보의 효율성", 강원산업주식회사, 1995.8
5. 이승준, 김원기, 정이근, "상부 유공 합성보의 극한 내력", 대한건축학회논문집 11권 6호 PP.137-144, 1995.6, 대한건축학회