

전단철근이 배치된 프리캐스트 프리스트레스트 중공슬래브의 구조성능 평가

김상윤¹, 김선훈², 이득행^{3*}, 한선진⁴, 김길희⁵

Evaluation of Structural Performance of Precast Prestressed Hollow-Core Slabs with Shear Reinforcement

Sang-Yoon Kim¹, Seon-Hoon Kim², Deuck-Hang Lee^{3*}, Sun-Jin Han⁴, Kil-Hee Kim⁵

Abstract: This study aims to investigate the structural performance of hollow-core slab (HCS) members with 400 mm thickness. To this end, a total of four HCS specimens were fabricated based on the individual mold method to provide shear reinforcement, unlike the extrusion method. The key variables were chosen as the presence of topping concrete, core-filling concrete, and shear reinforcements. The crack patterns and load-displacement responses of the test specimens were analyzed in detail. Test results showed that inclined shear cracking occurred all the specimens, and that the specimen with shear reinforcement on the web of HCS unit had higher strength and ductility than the specimen without shear reinforcement. In particular, shear reinforcements placed on the web of HCS unit effectively resisted not only to vertical shear force but also to horizontal shear force between the interface of HCS unit and topping concrete. In addition, it was discovered that the method in which shear reinforcements are placed on the web of HCS unit is more effective in improving structural performance than core-filling method.

Keywords: Precast concrete, Prestressed concrete, Hollow-core slab, Topping concrete, Shear strength, Flexural strength

1. 서 론

최근 건설분야에서 경제성 확보는 경제 불황과 맞물려 그 어느 때보다 중요한 사항이 되고 있으며, 이에 따라 물량절감 및 공기단축에 따른 공사비 절감이 가능한 프리캐스트(Precast Concrete, 이하 PC) 공법에 대한 관심이 더욱 증대되고 있다 (Lee et al., 2014; Park et al., 2019). PC 공법은 공장에서 제작한 부재를 현장에서 조립하여 시공하는 방법으로 일반 철근 콘크리트(Reinforced Concrete, 이하 RC) 공법과 비교하여 거푸집과 동바리 등의 가설공사가 대폭 줄어들게 되어 경제적이며, 공사 현장에서 습식공법이었던 공정의 많은 부분을 건식으로 조립하게 되어 현장의 인력이 절감되고 공기단축을 가능하게 하는 우수한 공법이다. 또한, 구조부재들이 공장에서 선 제작되기 때문에 균일한 품질을 확보하는데 유리하고 현장 폐기물 및 분진이 최소화된다. 이러한 장점들을 바탕으

로 PC공법이 건설시장에서 점차 광범위하게 적용되고 있는 추세이며, 특히 주차장 및 물류창고 등에 많이 적용되고 있다.

프리스트레스트(Prestress, 이하 PS)가 도입된 중공슬래브(Hollow-core slab, 이하 HCS)는 우수한 휨 및 전단성능을 보이며, 부재 길이방향으로 중공이 형성되어 있기 때문에 물량절감과 동시에 현장에서의 양중이 용이하다는 장점이 있다. 다만, 현행구조기준(KDS 14 20 22 4.3.3절)에 따르면 단면높이가 315 mm를 초과하고 전단보강 되어 있지 않은 HCS의 경우 복부전단강도를 계산된 전단강도의 절반으로 감소시켜야 한다. Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이, 기존의 PC부재 중 자동화 방식으로 생산되는 HCS는 압출성형기계를 통해 제작되기 때문에 전단보강근을 부재 내에 배치하기 어렵다. 따라서, 지붕층과

^{1,2}학생회원, 충북대학교 건축공학과 석사과정

³정회원, 충북대학교 건축공학과 교수

⁴정회원, 동경대학교 토목공학과 박사후연구원

⁵정회원, 공주대학교 건축공학과 교수

*Corresponding author: dk@cbnu.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.



(a) Example of extrusion method



(b) Example of single-mold method

Fig. 1 Casting methods in forming cross section

같이 설계하중이 비교적 높은 조건에는 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고자 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 HCS 부재 내에 직접 전단철근을 배치 할 수 있는 단일몰드를 이용한 제작방법이 적용되었다. 이 공법에서는 압출성형 기계가 이용되지 않기 때문에 콘크리트 타설 전에 HCS 웨브에 전단철근을 배치할 수 있다는 장점이 있다. 또한, HCS 웨브 내에 전단철근이 배치되는 경우에는 315 mm를 초과하는 HCS의 설계 복부전단강도를 감소시키지 않아도 되기 때문에 비교적 경제적인 전단 설계결과를 얻을 수 있으며, 고정 및 활하중이 큰 설계 조건에서도 HCS를 적용할 수 있다. 다만, 국내 현장에 적용되는 상당수의 HCS는 압출성형 기계를 통해 제작된 프리캐스트 부재이며, 이에 따라 기존 연구 대부분은 압출성형을 통해 제작된 HCS의 구조성능 규명에 초점을 맞추었다. 특히, 두께 400 mm 이상의 단일몰드 방식을 통해 제작된 HCS에 대한 구조실험 데이터는 매우 부족한 실정이다.

따라서, 이 연구에서는 성토에 의한 중력방향 토압으로 인해 고정하중이 매우 큰 지하구조물의 최상층 또는 물류창고 등에 적용 가능한 높이인 400 mm를 갖는 두꺼운 HCS의 구조성능을 검토하기 위하여 단일몰드를 통해 제작된 HCS 부재에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험의 주 목적은 단일몰드 방식을 통해 제작된 HCS 유닛 웨브에 배치된 전단철근이 구조성능에 어느정도 기여하는지를 규명하기 위함이다. 이를 위하여 단일몰드방식을 통해 총 4개의 HCS 실험체를 제작하였으며, 실험의 주요 변수는 토핑콘크리트의 유무, 전단보강근의 배치 유무 및 위치로 설정하였다. 또한, 실험결과를 기반으로 주요 실험변수에 따른 실험체들의 균열패턴 및 하중-변위 응답을 상세히 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 실험체 상세

Table 1에는 실험체별 콘크리트 압축강도와 전단철근의 배치 위치를 정리하여 나타내었으며, Fig. 2에는 실험체 단면 상세를 정리하여 나타내었다. 이 연구에서는 총 4개의 실험체 HCS 실험체를 제작하였고, HCS 유닛 내의 전단철근 보강 효과를 검증하기 위하여, Fig. 2(a) 및 (b)에 나타난 것과 같이, 전

단철근 및 토핑콘크리트가 배치되지 않은 무보강의 NN 실험체와 NN 실험체와 동일한 상세에 전단철근이 직접 배치된 NS 실험체를 계획하였다. 이 때 전단철근은 D13이 사용되었으며, 150 mm 간격으로 배치하였다. 또한, PC공법의 특성상 구조 일체성을 확보하기 위해 적용되는 토핑콘크리트의 영향을 비교하기 위하여 Fig. 2(c)에 나타난 것과 같이 NS 실험체에 토핑콘크리트를 합성한 CS 실험체를 제작하였다. 한편, 현행 실무에서는 HCS의 전단보강을 위하여 중공채움기법을 폭넓게 활용하고 있다. 따라서, HCS 유닛의 웨브에 전단철근을 배치하는 경우와 중공채움 콘크리트(Core-filling concrete) 내에 전단철근을 배근하는 경우의 구조성능 차이를 규명하기 위하여 Fig. 2(d)에 나타난 것과 같이 6개의 중공 중 2개의 중공에 전단보강근을 배근하고 중공채움 콘크리트를 타설한 CC 실험체를 추가적으로 제작하였다. 중공채움 콘크리트가 타설되는 중공단

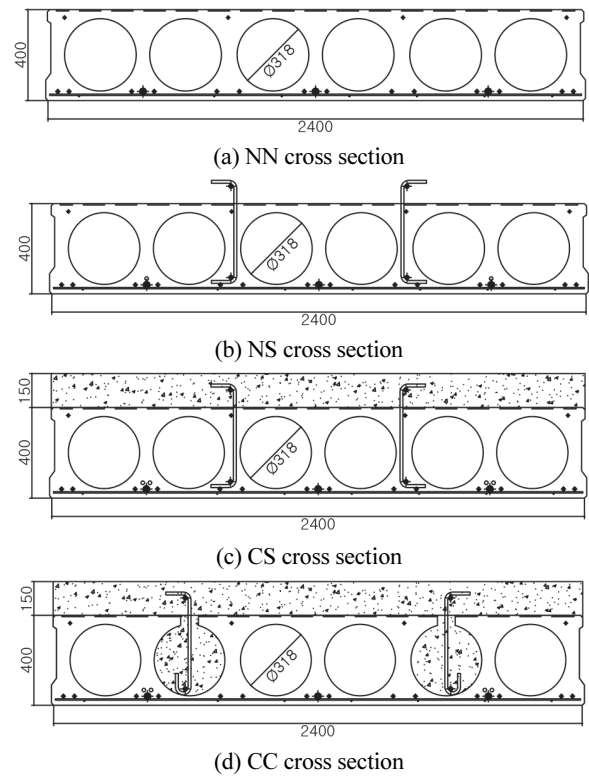


Fig. 2 Section details of specimens (unit : mm)

Table 1 Summary of test specimens

Specimen ID	f_{ck} [MPa]		Thickness of topping concrete [mm]	Shear reinforcement	Size of specimen [B×H×L, mm]	Hollow ratio [%]	a/d
	HCS unit	CIP					
NN	69.8	-	-	-	2400×400×10200	50	9.06
NS	68.9	-	-	Provided in HCS unit web	2400×400×10200	50	9.06
CS	67.1	50.6	150	Provided in HCS unit web	2400×550×10200	36	6.39
CC	74.4	48.6	150	Provided in core-filling concrete	2400×550×10200	24	6.39

면은 실무에서 해당 공법이 적용되는 위치와 동일하도록 계획되었다. 모든 실험체는 실제 현장에 적용되는 부재와 동일한 상세를 갖도록 제작되었으며, 이에 따라 실험체의 길이는 10.2 m의 실대형으로 계획되었다. 모든 실험체의 HCS 유닛 단면상세는 동일하며, 인장측에는 14- ϕ 15.2 강연선과 3-SHD25 길이방향 철근을 배근하였다. 또한, 단면의 압축측에는 PS 도입시 발생할 수 있는 인장균열을 제어하기 위한 4- ϕ 12.7의 강연선을 배치하였다. 실험체 제작 시 상부와 하부의 강연선에는 각각 140 kN 및 195 kN의 인장력이 도입되었으며, 이는 각각 인장강도의 76% 및 75%(즉, $0.76f_{pu}$ 및 $0.75f_{pu}$)에 해당한다. 토핑콘크리트가 배치되지 않은 HCS의 순두께는 400 mm이며, 토핑콘크리트의 높이는 150 mm이었다.

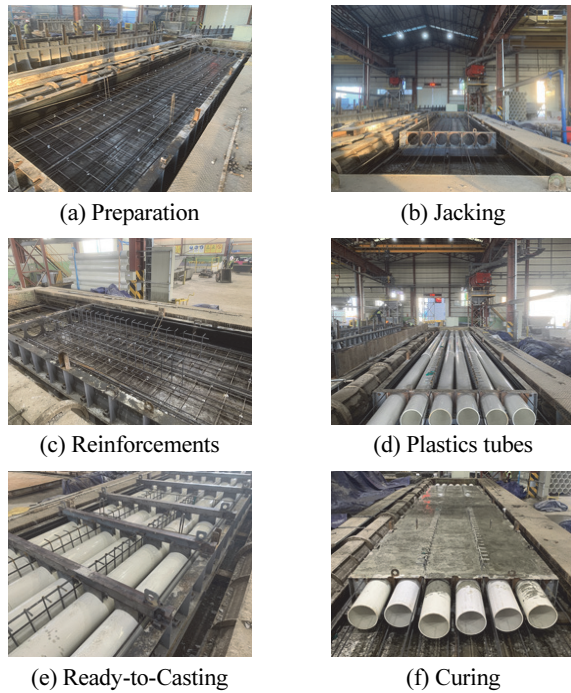


Fig. 3 Manufacturing process of test specimens

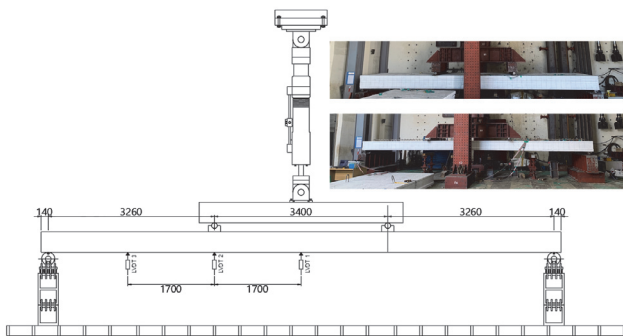


Fig. 4 Test setup (unit: mm)

2.2 실험체 제작과정

Fig. 3에는 단일 몰드방식을 통한 실험체의 제작과정을 단계별로 나타내었다. 다만, 실험체 제작당시 공장 내에 설비가 완전히 구축되지 않았으며, 이에 따라 중공 형성 시 Fig. 3(d)에 나타난 것과 같이 불연속 플라스틱 튜브를 사용하여 중공을 형성하였다. 또한, 굳지 않은 콘크리트에 의한 부유력을 제어하기 위하여 콘크리트 타설 전 Fig. 3(e)와 같이 떠오름 방지용 철물을 거푸집에 설치하였다.

2.3 가력상세

Fig. 4에는 실험체 가력상세를 나타내었다. 실험시설의 여건상 액추에이터(Actuator)를 활용하여 변위제어를 통한 가력이 불가능 하였으며, 이에 따라 모든 실험은 2000 kN 용량의 유압잭(Oil jack)을 통해 하중제어 방식으로 진행되었다. 참고로 실험동 안전관리규정에 따라서 전단균열의 폭이 크게 증가되는 시점 이후에는 실험을 진행할 수 없었음을 주지한다. 실험은 10.2 m의 경간길이를 Fig. 4와 같이 나누어 2점 가력 하였으며, 가력점과 지지점간의 거리는 3.26 m, 가력점과 가력점간의 거리는 3.4 m이었다. 또한, 실험체의 처짐을 계측하기 위하여 최대 처짐이 발생하는 실험체 중앙부와 가력점 그리고 지지점과 가력점 사이의 1/2 위치에 변위계를 설치하였다. Table 1에 나타난 것과 같이 실험체의 전단경간비(a/d)는 N계열 실험체의 경우 9.06, 토핑콘크리트가 합성된 C계열 실험체의 경우에는 6.39이었다. 여기서, a 는 전단경간 길이, d 는 압축연단으로부터 긴장재 도심까지 거리이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과 분석 방법

3.1.1 실험강도 산정

실험을 통해 계측된 하중(P_{exp} , 가력하중의 1/2)을 바탕으로 실험체에 발생된 최대 휨모멘트(M_{exp})는

$$M_{exp} = \frac{P_{exp} \times a}{2} \quad (1)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, a 는 전단경간 길이이다. 추가적으로 실험체의 자중에 의해 경간중앙에서 발생하는 휨모멘트(M_d)는

$$M_d = \frac{w_d \times L^2}{8} \quad (2)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, L 은 지지점사이 경간길이, w_d 는 실험체의 자중에 의한 등분포 하중이며, $\gamma \times A_g$ 로 산정할 수

있다. γ 는 철근콘크리트의 단위체적중량이고, A_g 는 콘크리트의 단면적이다. 이 연구에서는 철근콘크리트의 단위체적중량(γ)을 거푸집 및 동바리 설계기준(ACI 347R-14 1.4.1절)에 따라 24.0 kN/m^3 으로 가정하였다. 실험체의 최대강도(M_{test})는 앞서 식 (1), (2)를 통해 산정된 M_{exp} 와 M_d 의 합으로

$$M_{test} = M_{exp} + M_d \quad (3)$$

으로 계산하였다.

3.1.2 균열 모멘트 및 공칭 휨강도

휨균열 발생 시 모멘트(M_{cr})는 미국 콘크리트 구조 설계기준(ACI318-19 24.2절)에 근거한 다음의 식 (4a) 및 (4b)를 이용하여 비합성단면과 합성단면에 대하여 각각

For Non-Composite Member

$$M_{cr} = \left(f_r + \frac{P_{se}}{A_c} \right) S_b + (P_{se} \times e) \quad (4a)$$

For Composite Member

$$M_{cr} = \left(f_r + \frac{P_{se}}{A_c} + \frac{P_{se}e}{S_b} \right) S_c + M_d \left(\frac{S_c}{S_b} - 1 \right) \quad (4b)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, f_r 은 콘크리트의 휨균열강도 ($0.63 \sqrt{f_{ck}}$, MPa), S_b 는 PC 부재의 단면 중립축에서 단면 하부까지의 단면계수(mm³), S_c 는 합성부재의 단면 중립축에서 단면 하부까지의 단면계수(mm³), A_c 는 PC 부재의 단면적(mm²), P_{se} 는 긴장재의 유효긴장력(kN), M_d 는 부재 자체 무게와 합성작용 이전에 적용된 하중으로 인한 모멘트(kN·m), e 는 단면 중립축으로부터 긴장재 중심까지의 거리(mm)이다.

한편 프리스트레스트 콘크리트 부재의 공칭휨강도(M_n)는 미국 콘크리트 구조설계기준(ACI318-19 22.3절)에서 제시하고 있는 강도설계법에 근거하여

$$M_n = \left[A_{ps} f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y \left(\frac{a}{2} - d' \right) \right] \quad (5a)$$

$$a = \frac{A_p f_{ps} + A_s f_y - A_s' f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (5b)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, A_{ps} 는 인장영역에서 긴장재의 단면적(mm²), A_s 는 인장철근의 단면적(mm²), A_s' 는 압축철근의 단면적(mm²), f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준 압축강도(MPa), f_{ps} 는 부재가 공칭강도를 발휘할 때 긴장재의 인장응력(MPa),

d_p , d 및 d' 는 각각 압축단부에서 하부 긴장재의 도심, 인장철근의 도심, 그리고 압축철근의 도심까지의 거리(mm), a 는 압축을 받는 콘크리트의 등가 직사각형 응력블럭의 깊이(mm), b 는 압축영역에서의 유효폭(mm)이다. 압축 응력블럭의 깊이 a 를 산정시, 토핑콘크리트가 합성되지 않은 HCS 유닛 실험체에 대해서는 HCS 유닛의 압축 강도 f_{ck-p} , 토핑콘크리트가 타설된 합성 슬래브 실험체에 대해서는 토핑콘크리트의 압축 강도 f_{ck-t} 를 적용하였다. 부재가 공칭강도를 발휘할 때 긴장재의 인장응력(f_{ps})은

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \rho_p \frac{f_{pu}}{f_{ck}} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right\} \right] \quad (6)$$

으로 산정할 수 있다. 여기서, f_{pu} 는 긴장재의 인장강도(MPa), γ_p 는 긴장재의 종류에 따른 계수($f_{py}/f_{pu} \geq 0.80$ 일 때 0.55, $f_{py}/f_{pu} \geq 0.85$ 일 때, 0.40, $f_{py}/f_{pu} \geq 0.90$ 일 때 0.28이며, 이 연구에서는 0.28을 적용하였음), β_1 은 등가직사각형 압축응력블럭과 관련된 계수(= a/c), ρ_p 는 긴장재 비(= A_{ps}/bd_p), ω 는 인장철근의 강재지수(= $\rho f_y/f_{ck}$, $\rho = A_s/bd$), ω' 은 압축철근의 강재지수(= $\rho' f_y/f_{ck}$, $\rho' = A_s'/bd$)이다.

3.2 실험결과

3.2.1 균열 및 파괴 양상

Fig. 5에는 실험체들의 균열패턴 및 파괴양상을 나타내었다. 모든 실험체에서는 최대 휨모멘트 영역에서 최초의 휨균열이 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 양 단부방향으로 추가적인 휨 균열이 발생하였다. HCS 유닛에 전단철근이 배치되지 않은 NN 실험체는 공칭강도에 도달하기 이전에 Fig. 5(a)에 나타난 것과 같이 좌측 전단경간 내에 사인장 균열이 발생함과 동시에 파괴되었다. 전단철근이 웹에 배치된 NS 실험체의 경우, 하중이 증가함에 따라 휨균열의 폭이 비례해서 증가하는 양상을 보였으며, 공칭강도를 넘어선 하중에서 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 우측 단부에서 경사균열이 발생함과 동시에 파괴되었다. 결과적으로, NN 및 NS 실험체 모두 사인장 균열에 의해 파괴되었으나, HCS 유닛 웹에 전단철근이 배치된 NS 실험체가 비교적 안정적인 휨거동을 보였다.

토핑콘크리트가 합성되고 HCS 유닛 웹에 전단철근이 배근된 CS 실험체는 파괴직전까지 상부토픽이 없는 비합성 슬래브와 거의 동일한 균열패턴을 보여주었으며, 휨균열이 가력점 주변으로 균등하게 확산되는 전형적인 휨 거동을 보였다. 하중이 증가함에 따라 토핑콘크리트와 HCS 유닛 사이에서 수평전단균열이 관측되었으나 균열폭의 증가는 관측되지 않았다. 또한, Fig. 5(c)에 나타난 것과 같이 휨균열이 경사 균

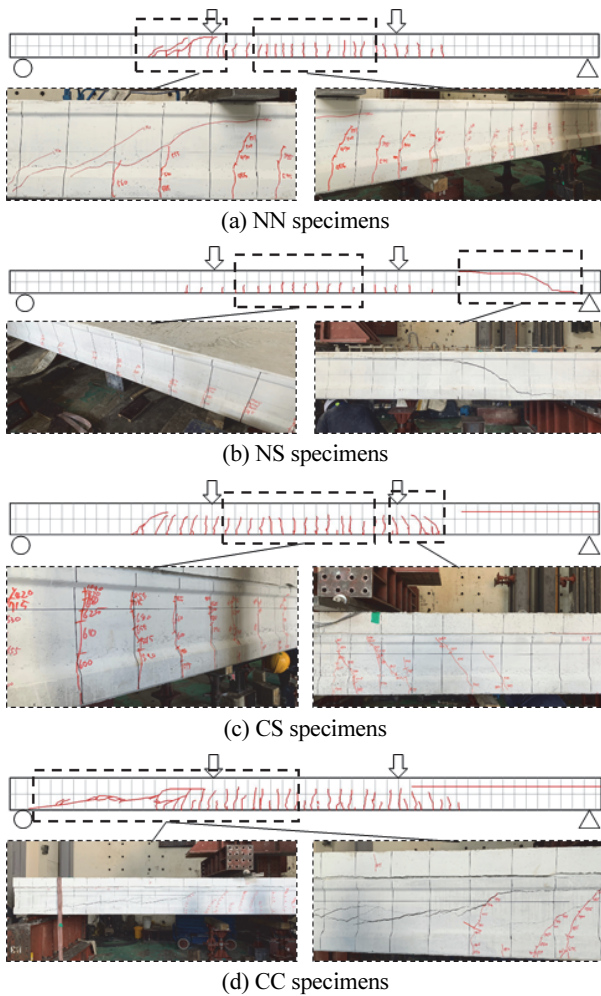


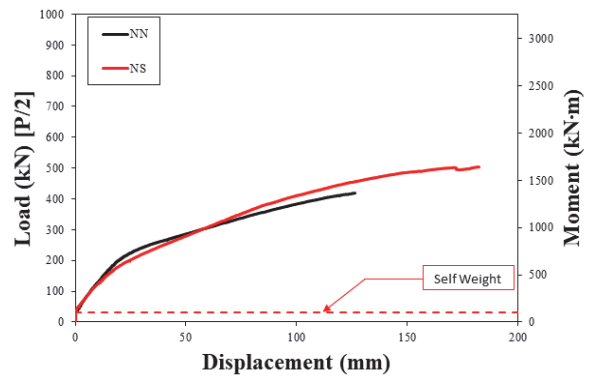
Fig. 5 Crack patterns after failure

열로 발전하는 경향을 보였으나, 전단균열의 폭은 크게 증가하지 않았으며, 최대 하중 시점에서 휨균열 폭이 급격히 증가함에 따라 실험을 종료하였다. 실무에서 폭넓게 활용되고 있는 중공채움공법이 적용된 CC 실험체의 경우, 초기 균열패턴은 CS 실험체와 유사한 경향을 보였다. 그러나, 가력도중 토평콘크리트와 HCS 유닛 계면에서 분리가 발생하였으며, 이후 가력점에서 지점으로 향하는 전단 균열이 발생함과 동시에 파괴되었다.

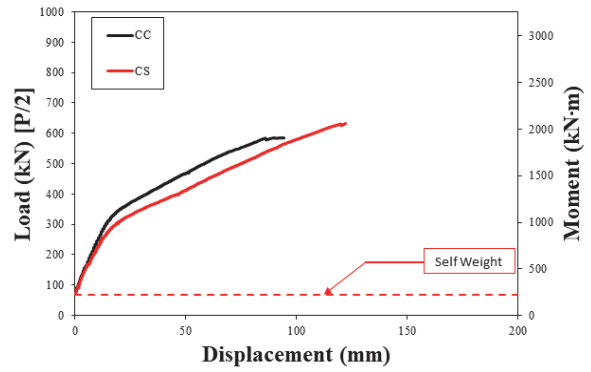
3.2.2 하중 변위 응답

Fig. 6에는 실험체의 하중 변위 응답을 나타내었으며, 여기서 처짐은 실험체 중앙 하단부에 설치된 변위계로부터 계측된 변위이다. 그래프의 좌측 세로축에는 하중, 우측 세로축에는 이에 대응되는 휨모멘트를 나타내었다.

모든 실험체에서는 최대 휨모멘트 영역에서 최초의 휨균열이 발생하였으며, 이후 실험체의 강성이 서서히 감소하였다. 토평콘크리트가 합성되지 않은 HCS 유닛 실험체인 NN 및



(a) NN & NS specimens



(b) CC & CS specimens

Fig. 6 Load-deflection relationships

NS 실험체들에서 최초의 휨균열은 각각 195.9 kN과 203.9 kN에 발생되었으며, 이때의 변위는 평균 8.75 mm 이었다. 이후 강성이 서서히 감소되었지만 하중은 지속적으로 증가하였으며, NN 및 NS 실험체는 각각 415.9 kN(최대 변위 127 mm)과 510.9 kN(최대 변위 183 mm)에서 부재 단부로부터 시작된 사인장 균열의 발생과 동시에 파괴되었다. 전단철근이 HCS 유닛 웹에 배치된 NS 실험체의 경우 스티럽이 보강되지 않은 NN 실험체와 비교하여 약 23% 높은 강도를 보였으며, 파괴 시점까지 보다 연성적인 거동을 나타내었다. 이는 HCS 유닛 웹에 배치된 전단철근이 부재의 구조성능에 유효하게 기여하였음을 의미한다. 두께 150 mm의 토평콘크리트가 합성된 CS 및 CC 실험체들의 경우 최초 휨균열은 각각 280.7 kN 및 286.1 kN에 발생되었으며, 이때의 변위는 평균 6.01 mm이었다. 이후 하중은 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며 CS 및 CC 실험체의 최대하중은 각각 628.7 kN과 581.1 kN이었고, 최대변위는 각각 122 mm 와 95 mm 로 계측되었다. 토평콘크리트가 있는 C계열 실험체들의 경우, 실험 계획 시 토평콘크리트로 인해 긴장재의 유효깊이(d_p)가 증가함에 따라 HCS 유닛 실험체인 N계열 실험체보다 높은 휨강도를 보일 것으로 예상하였다. 그러나, 상부의 토평콘크리트와 중공채움기법이 적용된 CC 실험체에서는 토평콘크리트와 HCS 유닛이 완전한

합성거동을 보이지 못하고, 일부 분리가 발생되며 취성적인 파괴모드가 관측되었다. 이외는 달리 전단철근이 HCS 유닛 웨브에 직접 보강된 CS 실험체의 경우 CC 실험체에 비해 토핑콘크리트와 HCS 유닛이 비교적 안정적인 합성거동을 보였으며, 이에 따라 약 10% 높은 강도를 발휘하였다. 이는 HCS 유닛 내에 배치된 전단철근은 연직방향의 전단저항과 더불어 HCS와 토핑콘크리트 사이에 발생하는 수평전단력에도 유효하게 저항하였기 때문으로 판단된다. 다만, 앞서 설명한 것과 같이, 하중제어로 실험이 진행되었기 때문에 최대하중 도달 이후의 변형능력을 평가하기 위한 가력은 불가하였다.

3.2.3 실험체 성능 평가

Table 2에는 식 (4a)-(6)을 통해 실험체들의 균열모멘트강도(M_{cr}) 및 공칭휨강도(M_n)를 평가하였다. 또한, 강도감소계수(ϕ)를 고려한 설계 휨강도(ϕM_n)도 함께 산정하였으며, 그 결과를 경간길이를 적용한 하중값($P_{cr, DGN}$, P_n 및 ϕP_n)으로 환산하여 나타내었다. 먼저, 식 (4a)를 기반으로 계산된 토핑콘크리트가 합성되지 않은 HCS 유닛 실험체인 NN 실험체와 NS 실험체의 예상균열하중은 155.76 kN으로써 실제 NN 실험체와 NS 실험체의 균열하중 대비 각각 26%와 31%의 오차를 나타내었다. 또한, 전단철근이 배치되지 않은 NN 실험체의 경우, 공칭 휨강도에 도달하기 이전에 파괴가 발생한 것으로 평가 되었으며, 전단철근이 HCS 유닛 웨브에 배치된 NS 실험체는 공칭 휨강도 이상을 발휘하는 구조성능을 가진 것으로 나타났다.

토핑콘크리트가 합성된 CS 실험체와 CC 실험체의 경우, 실험을 통해 계측된 균열하중과 식 (4b)를 통해 예측한 휨균열강도의 비는 각각 1.11 와 1.13 이었다. 전단철근이 HCS 부재에 직접적으로 보강된 CS 실험체는 공칭휨강도와 유사한 실험결과를 보여주었으나 중공채움을 통해 간접 보강된 CC

실험체는 현행설계기준을 통해 계산된 휨강도보다 12% 작은 실험결과를 보여주었다. 다만, 실제 설계 시에는 안전율을 반영한 강도감소계수(ϕ)가 적용되며, 이를 고려할 경우, 실험을 통해 계측된 CS 실험체와 CC 실험체의 최대하중과 계산된 휨강도의 비는 각각 1.05 과 0.97 이었으며, CS 실험체가 CC 실험체보다 향상된 휨성능을 나타냈다.

4. 결론

이 연구에서는 단일몰드 방식을 통해 제작된 HCS의 구조 성능 검증을 위하여 토핑콘크리트의 합성 여부, 전단보강근의 배치 유무 및 위치를 주요 변수로 실제 생산되는 HCS 부재에 대한 실대형 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. HCS 유닛 부재 웨브에 전단철근이 배치되지 않은 NN 실험체는 공칭강도를 발휘하지 못한 반면, 전단철근이 배근된 NS 실험체는 공칭 휨강도 이상을 발휘하는 구조성능을 나타내었다. 이는 HCS 유닛 웨브에 배치된 전단철근이 부재의 구조성능 향상에 유효하게 기여하였음을 의미한다.
2. 토핑콘크리트 및 속채움 콘크리트로 보강된 CC 실험체의 경우 극한강도 도달 이전에 발생한 수평전단 균열로 인해 토핑콘크리트와 HCS 유닛이 완전한 합성거동을 보이지 못하고, 일부 분리가 발생되며 취성적인 파괴모드를 보였다. 이는 CC 실험체 제작 시 현장타설 콘크리트와 HCS 유닛 사이 발생하는 수평전단력의 전달을 위한 별도의 작업(중공면 거친면 처리, 전단철근의 배치 등)이 이루어지지 않았기 때문이다. 따라서, 합성 HCS 부재의 안정적인 합성거동을 확보하기 위해서는 현장타설 콘크리트가 맞닿는 HCS 유닛의 표면을 의도적으로

Table 2 Comparison of calculated strengths and test results

Specimen ID	f_{ck} [MPa]		Test results				Calculation results			Test/calculation		
	HCS unit	CIP*	At cracking		At failure		$P_{cr, DGN}$ (kN) ⁺	P_n (kN) ⁺⁺	ϕP_n (kN)	$\frac{P_{cr}}{P_{cr, DGN}}$	$\frac{P_{max}}{P_n}$	$\frac{P_{max}}{\phi P_n}$
			P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	P_{max} (kN) ^{**}	δ_{max} (mm)						
NN	69.8	-	195.9	8.3	415.9	127	155.76	469.1	422.2	1.26	0.89	0.99
NS	68.9	-	203.9	9.2	510.9	183	155.76	469.1	422.2	1.31	1.09	1.21
CS	67.1	50.6	280.7	7.5	628.7	122	253.94	665.0	598.5	1.11	0.95	1.05
CC	74.4	48.6	286.1	6.4	581.1	95	252.10	665.8	599.2	1.13	0.87	0.97

* Cast-in-place (CIP) Topping concrete

** P_{max} : Maximum value of measured P_{exp}

⁺ $P_{cr, DGN}$: Calculated cracking strength from Eq. (4a), (4b)

⁺⁺ P_n : Calculated flexural strength from Eq. (5)

거칠게 제작할 필요가 있다.

3. 이와는 달리, 전단철근이 HCS 유닛 웹에 보강된 CS 실험체의 경우 CC 실험체에 비해 토핑콘크리트와 HCS 유닛이 비교적 안정적인 합성거동을 보였으며, 이에 따라 공칭 휨강도에 가까운 휨성능을 발휘하였다. 이는 HCS 유닛 내에 배치된 전단철근은 연직방향의 전단저항과 더불어 HCS와 토핑콘크리트 사이에 발생하는 수평전단력에도 유효하게 저항하였기 때문으로 판단된다.
4. 다만, CS 실험체의 경우에도 파괴 시 사인장 균열 폭이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 단면내의 7개의 웹 중 2개의 웹에만 전단보강이 적용되었기 때문으로 판단된다. 이 경우, 5개의 웹은 전단균열 발생 이후 전단저항에 유효하게 기여할 수 없기 때문에 전단철근이 배근된 부재라 할지라도 전단에 취약할 수 있다. 따라서, 추후 전단보강된 웹의 개수, 전단철근 간격 등을 주요 변수로 합성 HCS 부재에 대한 추가적인 실험을 수행할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2022) 지원을 받아 작성되었음.

References

1. Lee, D. H., Park, M. K., Oh, J. Y., Kim, K. S., Im, J. H., and Seo, S. Y. (2014), Web-Shear Capacity of Prestressed Hollow-Core Slab Unit with Consideration on the Minimum Shear Reinforcement Requirement, *Computers and Concrete*, 14(3), 211-231.
2. Park, M. K., Lee, D. H., Han, S. J., and Kim, K. S. (2019), Web-Shear Capacity of Thick Precast Prestressed Hollow-Core Slab Units Produced by Extrusion Method, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 13(1), 1-14.
3. KCI (2017), Concrete Design Code and Commentary, *Korea Concrete Institute*, Seoul, 81-285.
4. ACI Committee 347 (2014), Guide to Formwork for Concrete (ACI347R-14), *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, 2-8.
5. ACI Committee 318 (2019), Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI318R-19), *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan, 51-59, 89-94, 397-466.
6. PCI Industry Handbook Committee (2017), PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete, 8th Edition, *Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI)*.
7. Lee, D. H., Park, M. K., Ju, H. E., Han, S. J., and Kim, K. S. (2020), Strengths of Thick Prestressed Precast Hollow-Core Slab Members Strengthened in Shear, *ACI Structural Journal*, 117(2), 129-140.
8. Park, M. K., Lee, D. H., Yang, Y. G., Zhang, D., and Kim, K. S. (2022), Composite Performance of Prestressed Hollow-Core Slabs with Cast-in-Place Topping Concrete, *ACI Structural Journal*, 119(3), 153-164.
9. Hur, M. W., Chae, K. H., Park, T. W., Kang, H. W., and Park, H. S. (2021), Safety Evaluation of Void Plywood Slab System with form Work Panel, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 25(6), 185-192.

Received : 11/23/2022

Revised : 12/28/2022

Accepted : 12/29/2022

요 지 : 이 연구에서는 높이가 400 mm인 중공슬래브(Hollow-Core Slab, 이하 HCS)의 구조성능을 평가하기 위한 실험실 실험을 수행하였으며, 기존의 압출성형방식이 아닌 단일몰드방식을 적용하여 총 4개의 HCS를 제작하였다. 실험의 주요 변수는 토핑콘크리트의 유무, 전단보강근의 배치 유무 및 위치로 설정하였으며, 실험체들의 균열패턴 및 하중-변위 응답을 상세히 분석하였다. 실험결과 전단철근이 배치된 HCS 실험체들은 휨강도를 달성하였고, 이후에 최종적인 파괴는 사인장균열에 의하여 지배되었으며, HCS 유닛 웹 내에 전단철근이 배치되지 않은 실험체들의 경우 설계기준을 통해 산정된 공칭휨강도를 발현하지 못하였다. 전단철근을 HCS 유닛에 배근 할 경우에는 전단강도가 약 8~23% 증가하는 것으로 나타났으며, HCS의 중공을 철근콘크리트로 보강하는 방법보다 전단성능 향상에 더 효과적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 프리캐스트 콘크리트, 프리스트레스트 콘크리트, 중공슬래브, 토핑콘크리트, 전단강도, 휨강도
