

프리스트레스트 중공 슬래브 강연선의 전달길이 평가에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Estimation of Transfer Length of Strand in the Prestressed Hollow Core Slab

이정수¹ · 류종현² · 권승희³ · 김진국^{4*}

Jung-Soo Lee¹ · Jong-Hyun Ryu² · Seung-Hee Kwon³ · Jin-Kook Kim^{4*}

(Received October 24, 2022 / Revised November 25, 2022 / Accepted November 26, 2022)

In this study, the transfer length of strand was measured for three types of HCS member(H200, H320, and H400) manufactured by the pretension method. Strain gauges were attached in longitudinal direction at regular intervals on the sides of the HCS members, and the strain was measured during the cutting process of HCS. The stain at the cutting point was zero, and gradually increases in the central direction of the member, converging to a constant value after passing the transfer length. In the case of H200 members in which the strands were arranged one by one, the transfer lengths were formed within the range of the design equation (up to 762 mm). The transfer length of the H320 member and the H400 member, in which three strands were arranged, was higher than the design range (850 mm or more).

키워드 : 중공 슬래브, 전달길이, 강연선, 변형률

Keywords : Hollow core slab, Transfer length, Strand, Strain

1. 연구 배경 및 목적

구조물의 자중을 감소시키고 공간을 길게 제작하기 위하여 중공 슬래브(hollow core slab, 이하 HCS) 부재가 사용되고 있다. HCS는 슬래브 북부에 중공부를 만든 부재로, 중량과 재료비용이 감소되는 장점이 있으나, 단면적이 감소하고 횡방향 철근의 배근이 이루어지지 않아 전단에 취약한 특징이 있다. 특히 프리텐션 공법으로 제작되는 부재의 경우 강연선과의 부착력이 충분하지 않은 단부에서 전단파괴가 발생하기 쉬우며, 슬래브 양단 받침의 위치를 결정하기 위해서는 유효 프리스트레스가 작용하기까지의 거리, 즉 전달길이(transfer length)를 사전에 검토할 필요가 있다.

국내외 설계 기준(ACI Committee 318 2019; CEN 2004; KDS 24 14 20 2018; KDS 24 14 21 2021)에서는 전달길이 계산을 위한 변수로 긴장재의 직경, 초기 긴장력, 긴장력 이완 방법, 긴장재의

종류 등을 제시하고 있으며, 최근 연구(Cousins et al. 1990; Balazs 1992; Kim et al. 2008; Kaar and Hanson 1975; Hanson 1969; Oh et al. 2014; Russell and Burns 1997; Mitchell et al. 1993; Marti-Vargas et al. 2007; Yang et al. 2016)에 따르면 콘크리트의 강도, 긴장재의 배치 간격, 피복 두께, 긴장재의 표면 상태 또한 전달길이를 결정짓는 인자로 작용하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 변수 연구는 대부분 긴장재 한 가닥에 대한 작은 실험체 규모로 이루어져 여러 가닥의 긴장재가 배치된 부재의 거동을 정확하게 평가하기 어려운 문제가 있다. 강연선의 전달길이를 평가하는 부재 단위 실험 연구(Kim et al. 2016; Yang et al. 2015; Dang et al. 2016; Meyer 2002; Yim et al. 2015) 또한 이루어져 있으나, 주로 거더와 같은 대형 부재에 대하여 수행되어 단면이 작고 피복 두께가 얇은 HCS 부재에 연구 결과를 직접적으로 적용하기에는 어려움이 있다.

* Corresponding author E-mail: jinkook.kim@seoultech.ac.kr

¹명지대학교 하이브리드구조실험센터 연구교수 (Hybrid Structural Testing Center, Myongji University, Gyeonggi-do, 17060, Korea)

²GS건설 기술연구소 책임연구원 (R&D institute, GS E&C, Gyeonggi-do, 17130, Korea)

³명지대학교 토목환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Gyeonggi-do, 17060, Korea)

⁴서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea)

최근 HCS 부재에 대한 사용량이 증가하며 국내에서도 다양한 연구(Han et al. 2014; Lee et al. 2020; Oh et al. 2021; Kang et al. 2022)가 수행되고 있으나, 부재의 전단강도 또는 휨 강도와 같은 역학적 성능 평가에 집중되어 있으며 전달길이를 평가하는 연구는 수행된 적 없다. 이 연구에서는 HCS 부재의 실제 전달길이와 설계기준의 차이를 정량적으로 검토하기 위하여 세 가지 높이(200, 320, 400 mm)로 제작된 HCS 부재 11개소에 대하여 부재 절단 시 길이 방향 변형을 변화를 측정하였다.

2. 전달길이 설계식

프리텐션 부재를 제작하는 과정에 긴장재를 인장하면 포아송 효과에 의하여 긴장재의 단면은 수축한다. 콘크리트 타설 및 양생 후 긴장재를 이완하면 긴장재는 원상태로 돌아가기 위하여 길이 방향으로 줄어들고 방사 방향으로 단면이 증가한다. 이 때 긴장재의 단부가 뼈기와 같이 작용하며 콘크리트 내부에 정착하게 된다. 프리텐션 부재의 긴장재는 호이어(hoyer) 효과(Briere et al. 2013)라고 불리는 이러한 현상과 함께 콘크리트와 긴장재 사이의 마찰과 부착으로 인하여 전달길이(transfer length) 만큼 떨어진 위치에서 유효 프리스트레스를 발휘하게 된다.

전달길이에 대한 국내 설계기준 KDS 24 14 20에서는 긴장재의 전달길이를 재료 직경의 50배($50d_b$)로 가정하여 설계하도록 제시하고 있으며, KDS 24 14 21에서는 직경의 60배($60d_b$)로 설계하도록 제시하고 있다.

유럽의 설계기준(CEN 2004)에서는 전달길이를 긴장재의 초기 인장력, 긴장재 절단 방식, 긴장재의 형태 및 표면 상태, 콘크리트의 인장 강도를 고려하여 식 (1)과 식 (2)에 따라 계산하도록 제시하고 있다.

$$l_t = \alpha_1 \alpha_2 d_b f_{pi} / f_{bpt} \tag{1}$$

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd} \tag{2}$$

여기서 l_t 는 강연선의 전달길이(mm)이며, d_b 는 강연선의 직경(mm), 그리고 f_{pi} 는 강연선에 가해진 초기 인장응력(MPa)이다. α_1 은 부재 양단의 강연선의 긴장력을 점진적으로 이완하는 경우 1.0, 급격하게 절단하는 경우 1.25로 적용한다. α_2 는 강연선이 원형인 경우 0.25, 7연선인 경우 0.19를 적용한다. η_{p1} 은 강선을 사용하는 경우 2.7, 3연선 혹은 7연선을 사용하는 경우 3.2를 적용한다. η_1 은 강연선과 콘크리트 사이에 부착 상태가 양호한 경우 1.0, 그렇지 않은 경우 0.7을 적용한다. f_{ctd} 는 긴장력을 이완하는 시점의 콘크리트의 설계 인장 강도(MPa)이다.

리트의 설계 인장 강도(MPa)이다.

미국 설계기준(ACI 318 2019)에서는 콘크리트 피복 두께가 50 mm일 때 강연선의 전달길이를 유효 프리스트레스와 긴장재의 직경을 고려하여 식 (3)에 따라 계산하도록 되어 있다.

$$l_t = 0.048 f_{sc} d_b \tag{3}$$

여기서 f_{sc} 는 유효 프리스트레스이다.

Mitchell et al.(1993)은 ACI 318에서 제시한 전달길이 설계식을 바탕으로 콘크리트의 압축강도를 추가적으로 고려할 수 있는 식 (4)를 제안하였다.

$$l_t = 0.048 f_{pi} d_b \sqrt{\frac{20}{f_{ci}}} \tag{4}$$

여기서 f_{ci} 는 강연선의 긴장력을 이완하는 시점의 콘크리트 압축강도(MPa)이다.

Yang et al.(2016)은 콘크리트 강도, 피복 두께, 강연선의 개수에 따른 전달길이 변화를 실험을 통해 검토하였다. 콘크리트 강도와 피복 두께가 감소함에 따라 강연선의 전달길이는 증가하는 경향을 보이며, 동일한 단면에 강연선 개수가 증가함에 따라 전달길이 또한 증가하는 것을 확인하였다. 특히 강연선 3가닥이 좁은 단면에 함께 시공되는 경우 Fig. 1에 나타난 것과 같이 피복 두께에 따른 전달길이 변화가 크며, 피복 두께가 50 mm에서 40 mm로 감소하는 경우 전달길이는 약 30 % 수준 증가하는 것을 확인하였다.

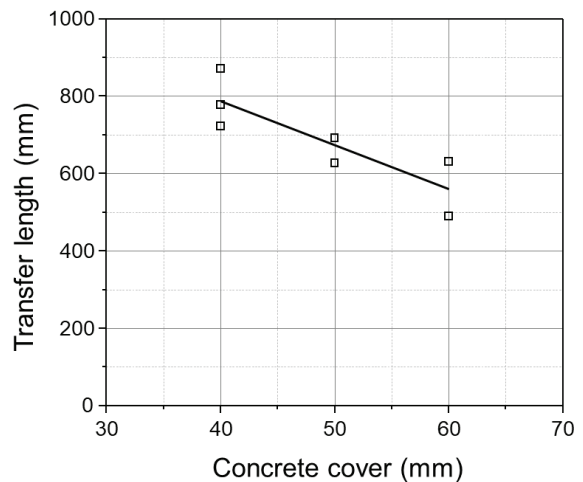


Fig. 1. Transfer length according to the concrete cover depth (Yang et al. 2016)

Table 1. Material properties of concrete and strands

Concrete	Compressive strength (MPa)	40.0
	w/b (%)	35.0
	s/a (%)	49.0
Strand	Tensile strength (MPa)	1,860
	Nominal diameter (mm)	9.5 / 12.7
	Cross section area (mm ²)	54.8 / 98.7

3. HCS 강연선의 전달길이 평가 실험

3.1 재료

Table 1에 콘크리트와 강연선의 재료 특성을 나타내었다. HCS 제작에 사용한 콘크리트의 설계기준 압축강도는 40 MPa이며, 물-결합재 비는 35 %, 잔골재율은 49 %이다. 강연선은 모두 7연선으로, 공칭 직경이 9.5 mm와 12.7 mm로 구분된다. 강연선의 인장강도는 1,860 MPa이며, 9.5 mm와 12.7 mm 각각의 단면적은 54.8 mm², 98.7 mm²이다.

3.2 HCS 부재

실험에 사용한 HCS 부재는 3가지로, Fig. 2에 단면의 형상을 나타내었다. 실험체의 변수명은 높이에 따라 H200, H320, H400으로 설정하였다. 모든 실험체는 상단에 직경 9.5 mm 강연선이, 하단에는 직경 12.7 mm 강연선이 배치되었다. 강연선 주변의 콘크리트 피복 두께는 최대 30 mm 수준이며, 강연선에 가해진 초기 긴장력은 인장강도의 65 % 수준이다.

HCS 부재는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 150 m 길이로 연속 타설

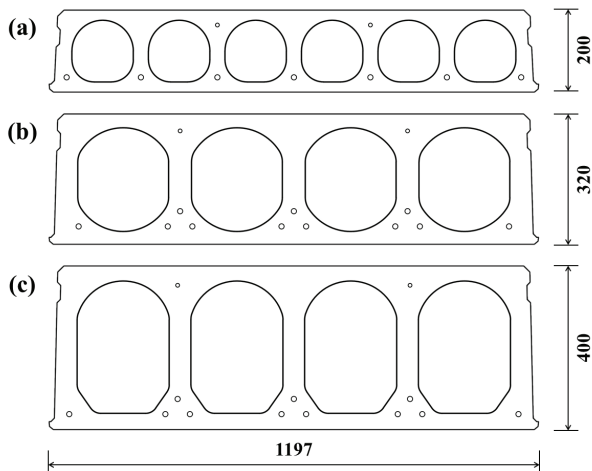


Fig. 2. Cross section of HCS. (a) H200; (b) H320; (c) H400



Fig. 3. Shape of HCS member before cutting

하여 제작되며, 20시간 동안 부재 하단에 위치한 온수 라인을 통해 고온 양생하였다.

3.3 콘크리트 압축강도

콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 Fig. 4에 나타난 것과 같이 KS F 2730에 따라 슈미트해머를 사용하여 비파괴 시험을 수행하였다. 부재의 단면이 100 mm 이상인 위치에서 20회 타격하여 반발경도를 측정하였으며, 평균값을 사용하여 콘크리트 압축강도를 계산하였다.



Fig. 4. Measurement of compressive strength of concrete using schmidt hammer

3.4 HCS 부재 위치에 따른 변형률 변화

강연선의 전달길이를 평가할 때 강연선 각각의 길이 방향 변형률을 직접적으로 측정하는 것이 가장 정확하지만, 부재 전체의 거동을 평가하기 위하여 부재의 측면 변형률을 측정하는 방식을 채택하였다. 이렇게 측정되는 결과는 강연선의 전달길이 구간에서 압축 변형률이 증가하다가 유효 프리스트레스가 발휘되는 위치에서부터 일정한 값을 나타낼 것이다.

변형률 게이지 부착 위치는 Fig. 5와 같다. 게이지는 절단면으로부터 100 mm 떨어진 위치에서 150 mm 간격으로 9개씩 부착하였으며, 높이는 부재 측면의 상부(Top), 중앙(Mid.), 하부(Bot.)로 구분된다. 변형률 측정은 HCS 부재의 양생 후부터 절단 후까지 지속적으로 이루어졌다.

양생 후 HCS 부재 양단의 긴장력을 이완(강연선 절단)하였으며, 이후 Fig. 6에 나타낸 다이아몬드 커터를 사용하여 HCS 부재를 절단하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 콘크리트의 역학적 특성

Fig. 7에 슈미트해머 시험으로 측정된 부재 별 콘크리트 압축강도를 나타내었다. HCS 절단 전 콘크리트의 강도는 대부분 설계기준 압축강도(40 MPa)에 도달하였다. 현장에 납품하기 전 추가적인 양생 기간을 고려하였을 때 모두 설계기준 압축강도 이상 발현될 것으로 판단된다.

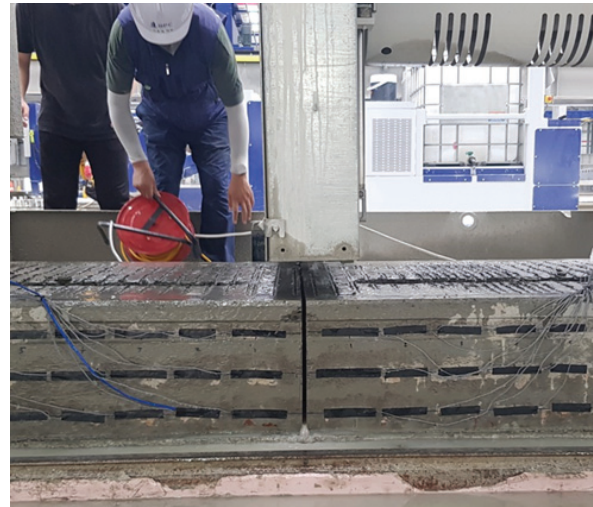


Fig. 6. Cutting of HCS member

HCS 부재는 압출 방식으로 제작되므로, 공시체를 제작하여 콘크리트의 탄성계수를 측정하기에는 어려움이 있다. 이 연구에서는 강연선에 가해진 긴장력, 부재 양단의 강연선 절단 후 발생하는 변형률, 그리고 HCS의 단면적을 사용하여 콘크리트 탄성계수를 산정하였다.

Fig. 8에 HCS 부재 생산 과정에서 측정되는 축 방향 변형률 양상을 개략적으로 나타내었다. HCS 부재 양생 후 양단의 강연선을 순차적으로 절단시키면 부재에는 변형률 측정 위치와 상관없이 동일한 압축 방향 변형률이 발생한다. 이후 HCS 부재 절단 시 절단면에서 가까울수록 압축 변형률이 크게 감소하는 경향을 보인다.

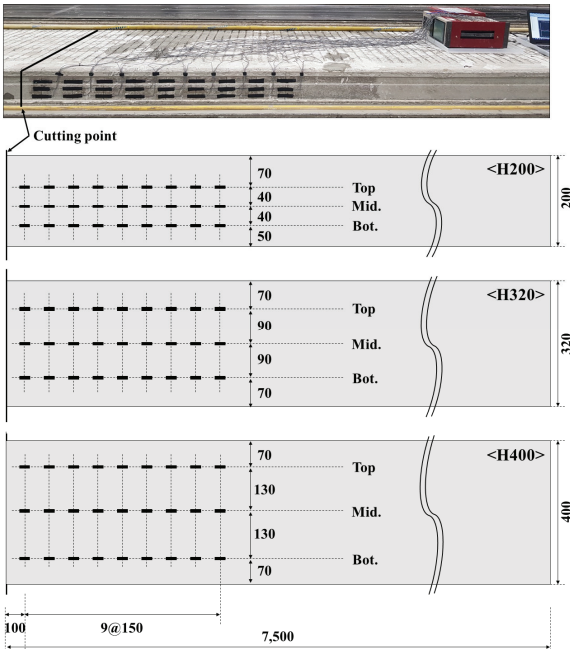


Fig. 5. Strain measurement positions for each HCS member

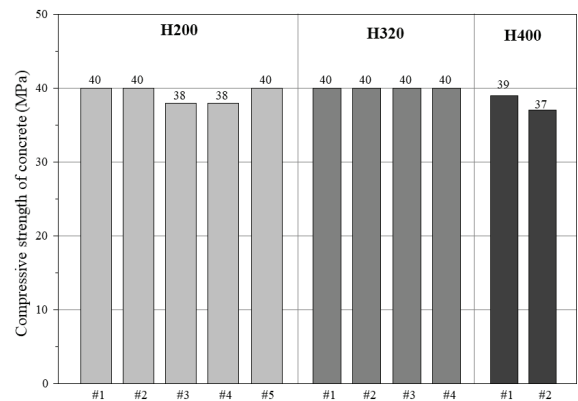


Fig. 7. Compressive strength of concrete

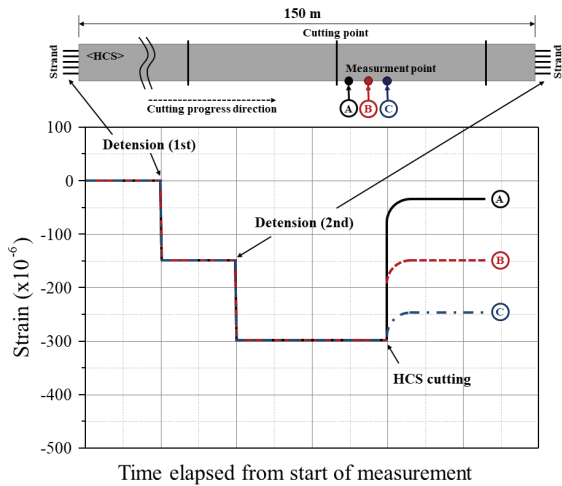


Fig. 8. Strain variations in HCS during detension and cutting

Table 2. Elastic modulus of concrete

Designation	Initial prestressing force (kN)	Dimension of HCS ($\times 10^3 \text{ mm}^2$)	Strain of HCS after detension ($\times 10^{-6}$)	Elastic modulus of concrete (GPa)
H200-1	963	119	300	26.9
H200-2			300	26.9
H200-3			300	26.9
H200-4			300	26.9
H200-5			250	32.3
H320-1	1,438	183	300	26.1
H320-2			250	31.3
H320-3			300	26.1
H320-4			300	26.1
H400-1	1,438	205	220	31.9
H400-2			220	31.9

Table 2에 각 부재의 콘크리트 탄성계수를 산정하여 나타내었다. 강연선 이완 후 HCS 부재의 압축 변형률은 220 microstrain에서 300 microstrain 범위이며, 계산된 탄성계수는 최소 26.9 GPa에서 최대 32.3 GPa 범위이다.

4.2 전달길이

Fig. 9에 절단 후 HCS 부재의 변형률 측정 높이별 축 방향 변형률 변화를 예시로 나타내었다. 절단 후 부재의 솟음으로 인해 높이에 따라 압축 변형률이 다르게 발생하며, 하단부의 압축력이 가장 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 절단 위치에서 HCS의

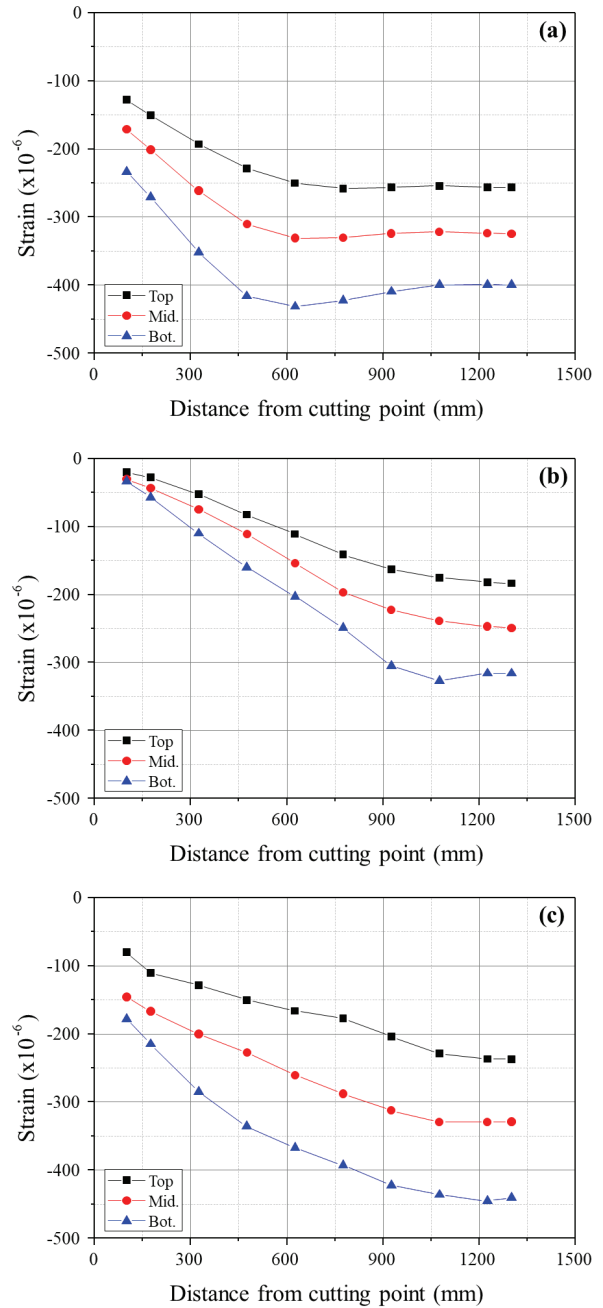


Fig. 9. Strain distribution on the HCS according to the measurement height. (a) H200-3; (b) H320-2; (c) H400-1

변형률은 0에 수렴하며, 절단 위치에서 멀어질수록 압축 변형률이 증가하다 특정 위치에서 일정한 값으로 수렴하는 모습을 보인다. 전달길이는 기존 연구(Oh and Kim 2000)에서 제시한 변형률 완화 기법과 95 % 평균 최대 변형률법에 따라 산정하였다.

Table 3에 실험으로부터 측정된 전달길리와 국내 설계기준

Table 3. Comparison of transfer length measurement results with design equations

Designation	Transfer length (mm)				
	Measured	50d _b	60d _b	Mitchell et al.	Yang et al.
H200-1	700	635	762	532	532
H200-2	1,000				
H200-3	550				
H200-4	750				
H200-5	600				
H320-1	850	635	762	532	691
H320-2	950				
H320-3	950				
H320-4	950				
H400-1	1,000				
H400-2	850				

(KDS 24 14 20 2018; KDS 24 14 21 2021) 및 연구자(Mitchell et al. 1993; Yang et al. 2016)들이 제시한 전달길이 산정 방법을 비교하여 나타내었다. H200 부재의 전달길이는 550 mm에서 1,000 mm 범위로 측정되었으며, 설계식에 따라 계산한 전달길이는 최소 532 mm에서 최대 762 mm로 측정 결과가 대부분 설계 범위 내에 들어온다. 그러나 H320 부재와 H400 부재의 전달길이는 최소 850 mm에서 1,000 mm로 측정되어 설계식으로 계산된 전달길이를 초과하는 것으로 나타났다. 이는 기존의 설계식이 최소 50 mm 이상의 피복두께를 갖는 단면을 기준으로 마련되었으며, HCS의 경우 피복 두께가 30 mm 이하인 좁은 단면에 세 가닥의 강연선이 배치되었기 때문으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 프리텐션 기법으로 제작되는 중공 슬래브(hollow core slab, HCS) 부재 3종(H200, H320, H400)에 대하여 강연선의 전달길이를 평가하였다. HCS 부재의 인장부에 사용한 강연선의 직경은 12.7 mm이며, 상부에는 9.5 mm 강연선이 배치된다. 실험 결과로 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 강연선의 전달길이를 구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 20시간 고온 양생 후 슈미트해머를 사용하여 콘크리트의 압축강도를 측정하였다. 대부분의 부재에서 설계기준 압축강도인 40 MPa를 확보하였으며, 추가적인 양생기간을 고려하였을 때 모든 부재가 설계기준 압축강도를 확보할 것으로 판단된다.

2. 강연선을 이완하였을 때 발생하는 HCS 부재의 변형률과 초기 긴장력을 바탕으로 콘크리트의 탄성계수를 산정하였다. 콘크리트의 탄성계수는 최소 26.1 GPa에서 최대 32.3 GPa 범위로 계산되었다.
3. HCS 부재 절단 직후 절단 위치에서부터의 거리와 변형률 사이의 관계를 검토하여 전달길이를 평가하였다. H200의 경우 대부분 설계식 범위(최대 760 mm) 내에 전달길이가 형성되나, H320과 H400의 경우 설계 범위보다 높은 수준(850 mm 이상)으로 나타났다.

이 연구에서 측정된 전달길이는 특정 콘크리트 배합과 강연선 배치를 갖는 HCS 부재에 대한 사례연구이므로 실험 결과를 일반화하기에 어려움이 있다. 추후 다양한 재료와 형상을 갖는 HCS 부재에 대한 반복적인 실험을 통해 부재의 안전성을 확보할 수 있는 설계식이 제시될 필요가 있다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 GS건설 기술연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

ACI Committee 318 (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Balazs, G. (1992). Transfer control of prestressing strands, *PCI Journal*, **37(6)**, 60-71.

Briere, V., Harries, K.A., Kasan, J., Hager, C. (2013). Dilation behavior of seven-wire prestressing strand-the Hoyer effect, *Construction and Building Materials*, **40**, 650-658.

CEN (2004). EN 1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-2: General rules-Structural fire design, Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.

Cousins, T.E., Johnston, D.W., Zia, P. (1990). Transfer and development length of epoxy coated and uncoated prestressing strand, *PCI Journal*, **35(4)**, 92-103.

Dang, C.N., Floyd, R.W., Hale, W.M, Marti-Vargas, J.R. (2016).

- Measured transfer lengths of 0.7 in. (17.8 mm) strands for pretensioned beams, *ACI Structural Journal*, **113(3)**, 525–535.
- Han, S.W., Moon, K.H., Kang, D.H., Im, J.H., Kim, Y.N. (2014). Evaluation of shear strength of precast–prestressed hollow core slabs based on experiments, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **26(5)**, 635–642 [in Korean].
- Hanson, N.W. (1969). Influence of surface roughness of prestressing strand in bond performance, *PCI Journal*, **14(1)**, 32–45
- Kaar, P.H., Hanson, N.W. (1975). Bond fatigue tests of beams simulating pretensioned concrete crossties, *PCI Journal*, **20(5)**, 65–80.
- Kang, J.H., Kang, S.M., Eom, T.S., Kim, Y.D., Park, H.S. (2022). Shear strength of prestressed hollow core slabs according to section shape, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **34(1)**, 73–82 [in Korean].
- KDS 24 14 20 (2018). Korea Construction Standards Center, Korea [in Korean].
- KDS 24 14 21 (2021). Korea Construction Standards Center, Korea [in Korean].
- Kim, J.H., Moon, D.Y., Ji, G.S., Kim, K.S. (2008). Dynamic behavior of pretensioned concrete member during detensioning, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, **28(5A)**, 747–756 [in Korean].
- Kim, J.K., Yang, J.M., Yim, H.J. (2016). Experimental evaluation of transfer length in pretensioned concrete beams using 2,400-MPa prestressed strands, *Journal of Structural Engineering*, **142(11)**, 04016088.
- KS F 2730 (2018). Testing Method for Rebound Number to Conclude Compressive Strength of Concrete, KS Standard, Korea [in Korean].
- Lee, Y.J., Kim, H.G., Kim, M.J., Kim, D.H., Kim, K.H. (2020). Evaluation of flexural performance for prestressed concrete hollow core slabs, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **32(2)**, 193–200 [in Korean].
- Marti–Vargas, J.R., Arbelaez, C.A., Serna, P., Navarro–Gregori, J., Pallares–Rubio, L. (2007). Analytical model for transfer length prediction of 13 mm prestressing strand, *Structural Engineering and Mechanics: An International Journal*, **26(2)**, 211–229.
- Meyer, K.F. (2002). Transfer and Development Length of 0.6-inch Diameter Prestressing Strand in High Strength Lightweight Concrete, Georgia Institute of Technology.
- Mitchell, D., Cook, W.D., Khan, A.A., Tham, T. (1993). Influence of high strength concrete on transfer and development length of pretensioning strand, *PCI Journal*, **38(3)**, 52–66.
- Oh, B.H., Kim, E.S. (2000). Influencing factors and evaluation of transfer lengths in pretensioned prestressed concrete members, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, **20(6-A)**, 945–956 [in Korean].
- Oh, B.H., Lim, S.N., Lee, M.K., Yoo, S.W. (2014). Analysis and prediction of transfer length in pretensioned, prestressed concrete members, *ACI Structural Journal*, **111(3)**, 549–560.
- Oh, Y.H., Moon, J.H., Yoon, Y.J., Lee, J.S. (2021). Experimental study on a web shear design equation for composite precast concrete hollow core slabs, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **33(5)**, 509–517 [in Korean].
- Russell, B.W., Burns, N.H. (1997). Measurement of transfer lengths on pretensioned concrete elements, *Journal of Structural Engineering*, **123(5)**, 541–549.
- Yang, J.M., Yim, H.J., Kim, J.K. (2015). Transfer length of 2,400 MPa PS strand in 15 m-long full-scale pretensioned prestressed concrete beam, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **15(5)**, 139–146 [in Korean].
- Yang, J.M., Yim, H.J., Kim, J.K. (2016). Transfer length of 2400 MPa seven-wire 15.2 mm steel strands in high-strength pretensioned prestressed concrete beam, *Smart Structures and Systems*, **17(4)**, 577–591.
- Yim, H.J., Kim, J.K., Yang, J.M. (2015). Experimental study on the transfer length in pretensioned prestressed concrete beam using 2,400 MPa PS strand, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **15(2)**, 41–49.

프리스트레스트 중공 슬래브 강연선의 전달길이 평가에 대한 실험적 연구

이 연구에서는 프리텐션 기법으로 제작되는 중공 슬래브(hollow core slab, HCS) 부재 3종(H200, H320, H400)에 대하여 강연선의 전달길이를 평가하고 기존 설계식과 비교하였다. HCS 부재의 측면에 일정한 간격을 두어 변형률 게이지를 부착하였으며, 절단 과정에서 발생하는 변형률을 측정하였다. 변형률은 절단면에서 0이며, 부재의 중앙으로 갈수록 점차 증가하여 전달길이 위치에서 일정한 값을 보인다. 강연선이 한 가닥씩 배치되는 H200의 경우 대부분 설계식 범위 내(최대 762 mm)에 전달길이 가 형성되나, 강연선이 세 가닥 배치되는 H320과 H400의 전달길이는 설계 범위보다 높은 수준(850 mm 이상)으로 나타났다.