



실험을 통한 프리캐스트-프리스트레스트 중공슬래브의 전단강도

한상환^{1)*} · 문기훈¹⁾ · 강동훈¹⁾ · 임주혁²⁾ · 김용남²⁾

¹⁾한양대학교 건축공학과 ²⁾삼성물산(주) 건설부문

Evaluation of Shear Strength of Precast-prestressed Hollow Core Slabs Based on Experiments

Sang-Whan Han,^{1)*} Ki-Hoon Moon,¹⁾ Dong-Hoon Kang,¹⁾ Ju-Hyeuk Im,²⁾ and Young Nam Kim²⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Samsung C&T corporation, Residential Construction Team, Seoul 135-935

ABSTRACT The weight of concrete could be reduced by using hollow core slabs instead of heavy solid slabs, leading to cost reduction. The long span be also achieved by introducing prestress in hollow core slabs. but the evaluation of shear strength of precast-prestressed hollow core slabs are needed because the cross section is reduced in web and arranging shear reinforcement is not possible. In this study, the shear strength of precast-prestressed hollow core slabs were evaluated based on experimental tests. For this purpose, six full scale specimens were made and tested. The shear strength of the specimens were compared with those evaluated from current design provision(EC2 ACI, EN1168 and AASHTO).

Keywords : hollow-core slab, web-shear capacity, tensile strength of concrete, principal tensile stress, transfer length

1. 서 론

프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트(PC-PSC) 중 중공슬래브(Hollow Core Slab, 이하 HCS)는 슬래브 복부에 중공부를 만든 바닥구조시스템이다. 슬래브 복부의 중공부는 슬래브의 중량과 재료비용이 감소되는 장점이 있으나 복부단면의 감소로 전단에 취약하다. 또한 일반적으로 압출성형방식으로 제작되는 특성상 전단철근의 배근이 어려워서 전단에 취약하다. 이러한 이유 때문에 HCS 부재를 사용 시 복부전단에 대해 신중한 검토가 필요하다.

국내에서 HCS의 전단강도평가에 대한 연구는 미비한 상황이며, 기준에 대한 평가도 불분명한 상황이다. 현재 국내에서 HCS의 설계에 사용되는 KCI¹⁾는 ACI 318-11²⁾ 기준을 사용하고 있다. 그러나 HCS부재의 설계기준은 ACI 318-11,²⁾ AASHTO,³⁾ EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾ 등 복부와 유럽기준마다 HCS의 복부전단내력을 평가하는 식이 서로 상이하다. 또한 ACI 318-11²⁾에서 두께가 315 mm를 넘는 깊은 HCS에 대하여 전단철근을 배근할 수 없는 경우, $0.50 V_{cw}$ 을 사용한다는 항목이 명시되어 있다. 하지만

Palmar and Schultz⁶⁾의 연구에 의하면 ACI 318-08 기준으로 315 mm를 넘는 깊은 HCS를 평가할 경우, 크게 과소평가를 하고 있다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 국내에서 생산되는 HCS에 대하여 실험을 통해서 복부전단강도를 평가하고 해외 설계 기준과 비교 및 분석 후, 상대적으로 효율적이고 정확한 설계기준을 찾고자 한다.

2. 복부전단강도 평가

전단철근이 배근되지 않은 HCS의 전단강도는 일반적으로 복부전단력이 지배를 하는데, 파괴지점에서 HCS의 복부에서 발생하는 주인장응력이 콘크리트의 인장강도에 도달할 때 복부전단균열이 발생하게 된다. HCS의 복부전단내력은 복부에서 콘크리트의 단면 감소로 인하여 취약하며, 특히 부재단부에서는 강연선의 부착길이가 충분하지 않아 가장 취약하다. 본 연구에서는 HCS부재의 복부전단력을 가장 취약한 부재단부에서 전단내력을 평가하였다.

국내에서 생산되는 HCS의 복부전단강도를 평가하기 위해 ACI 318,^{2,7)} AASHTO,³⁾ EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾ 등 4개의 해외기준을 선정하여 실험결과와 비교하였다. ACI 기준은 ACI 318-05⁷⁾와 다르게 ACI 318-11²⁾에서는 깊은 HCS

*Corresponding author E-mail : swhan82@gmail.com

Received April 24, 2014, Revised July 29, 2014,

Accepted August 1, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

에 대하여 복부전단내력을 다르게 평가하기 때문에 분리하여 비교하였다.

2.1 ACI 318-05

ACI 318-05⁷⁾에서는 HCS부재의 복부전단내력을 콘크리트강도, 강연선의 전달길이에 따른 유효프리스트레스 힘, 슬래브 두께 등으로 다음 식 (1)과 같이 계산된다.

$$V_{cw} = (0.29\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w d + V_p \quad (1)$$

여기서, f'_c : 콘크리트 설계압축강도(MPa)

f_{pc} : 유효프리스트레스에 의한 단면에 도심에 작용하는 압축응력(MPa)

d : 단면 상면으로부터 긴장재 도심까지의 거리

b_w : 복부단면 폭의 합(mm)

V_p : 유효프리스트레스 힘의 수직성분(N)

ACI 318-05⁷⁾에서는 전단력에 의한 위험단면지점을 프리텐션부재에서 받침부의 안쪽면에서 $h/2$ (h =슬래브두께) 지점으로 지정하고 있다. 하지만 일반적으로 위험단면지점에서는 HCS부재에 삽입되는 강연선이 충분한 내력을 발휘할 수 있는 전달길이를 확보하지 못한다. 따라서 식 (1)에서 f_{pc} 값은 이를 고려하여 계산되어야 한다.

프리스트레스 힘은 단부에서 0이고, 단부부터 전달길이 만큼 떨어진 거리에서 최대값으로 선형적으로 변화한다고 가정하여, 위험단면에서 f_{pc} 값을 구하였다.

2.2 ACI 318-11

ACI 318-05⁷⁾에서는 HCS의 두께에 따른 전단내력을 다르게 적용하는 규정이 없었다. 하지만 Hawkins, Ghosh⁸⁾의 연구에서 315 mm를 초과하는 깊은 HCS의 실험 및 연구결과 전단강도가 설계기준 값보다 낮게 관측되어 ACI 318-08 기준부터 두께에 대한 규정을 적용하여 현행 기준까지 사용하고 있다. ACI 318-11²⁾은 두께가 315 mm 초과할 경우 작용하중(V_u)이 복부전단내력의 절반 값($0.5\phi V_{cw}$) 이상이면 최소전단철근을 배근하도록 규정하고 있으며, 전단철근을 배근하지 않을 경우 복부전단내력을 반 값($0.5\phi V_{cw}$)으로 사용하도록 제시하고 있다.

$$V_{cw} = 0.5[(0.29\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w d + V_p] \quad (h > 315\text{mm}) \quad (2)$$

2.3 AASHTO

AASHTO³⁾는 ACI 318²⁷⁾에서 콘크리트의 인장강도를 $0.29\sqrt{f_{ck}}$ 대신 $0.16\sqrt{f_{ck}}$ 으로 사용하는 것을 제외하고 동일하게 적용하여 식 (3)과 같이 복부전단내력을 계산한다.

$$V_{cw} = (0.16\sqrt{f'_c} + 0.3f_{pc})b_w d + V_p \quad (3)$$

ACI 318²⁷⁾와 동일하게 복부전단강도에 대하여 보수적인 평가를 하고 있으며, 대신 ACI 318²⁷⁾에서 $\phi = 0.75$ 를 사용하는 반면 AASHTO³⁾에서 $\phi = 0.90$ 을 사용한다.

2.4 EC2

EC2⁴⁾에서는 전단철근이 없는 부재에 대한 전단강도를 휨 균열이 발생하지 않는 단면에서 전단내력 $V_{Rd,c}$ 로 나타내고 있다. $V_{Rd,c}$ 는 식 (4)와 같이 계산한다.

$$V_{Rd,c} = \frac{b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (4)$$

여기서, I : 단면 2차모멘트(mm^4)

S : 도심 축에 대한 상부 면적의 일차모멘트(mm^3)

f_{ctd} : 콘크리트의 설계인장응력(MPa)

α_1 : 전달길이 효과에 따른 계수

σ_{cp} : 축력 또는 프리스트레스에 의해 도심 축에서 콘크리트 압축응력(MPa)

콘크리트의 설계인장응력(f_{ctd})은 콘크리트의 5% 특성인장강도($f_{ctk,0.05}$)와 콘크리트 불완전계수(γ_c)를 고려하여 계산을 한다. 본 연구에서 실험결과와 $V_{Rd,c}$ 값을 비교할 때 콘크리트의 설계강도가 아닌 실제 실험강도 값을 사용하였기 때문에 불안전계수(γ_c)로 1.0 값을 사용하여 계산하였다.

2.5 EN 1168

EN 1168⁵⁾은 EC2⁴⁾ 보다 HCS의 복부전단강도를 더 상세히 평가하고 있다. ACI 318²⁷⁾와 EC2⁴⁾ 기준과는 다르게 보수적인 방법으로 평가하지 않고, 식 (5)와 같이 실제 응력블록을 고려하여 계산한다.

$$V_{Rd,c} = \frac{b_w(y)}{S_c(y)} \left(\sqrt{(f_{ctd})^2 + \sigma_{cp}(y) f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \right) \quad (5)$$

I : 단면 2차모멘트(mm^4)

l_x : 전달길이 시작점에서부터 파괴 선을 고려한 점까지 거리(mm)

y : 파괴선상에 있는 위험 지점의 높이(mm)

$S_c(y)$: 도심 축에서 y 높이에 대한 상부 면적의 일차모멘트(mm^3)

$\sigma_{cp}(y)$: l_x 거리와 y 높이 지점에서 콘크리트 압축응력(MPa)

$\tau_{cp}(y)$: l_x 거리와 y 높이 지점에서 프리스트레스 전달에 의한 콘크리트에 작용하는 전단응력(MPa)

EN 1168⁵⁾기준은 깊은 HCS부재의 전단내력을 낮게 평가하여 450 mm보다 두꺼운 HCS 부재의 전단강도는 식으로 계산한 값에 10% 값만큼 감소하여 사용하도록 하였다.

3. 복부전단강도 평가식 비교분석

이와 같이 HCS의 복부전단강도 기준식을 비교하면 북미기준인 ACI 318,^{2,7)} AASHTO³⁾기준의 설계식이 서로 유사하다. 유럽기준인 EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾기준의 설계식 역시 서로 유사하다. 반면 북미기준과 유럽기준에서 복부전단내력을 선정하는 방식에 차이가 있다. 하지만 북미기준과 유럽기준 모두 HCS의 복부전단내력을 평가하는데 (1) 콘크리트의 인장강도, (2)강연선의 전달길이, (3)전단응력의 치환은 각 설계식에 공통적으로 들어가 있다. 또한 복부에서 가장 취약한 파괴점에서 균열이 발생하는데, (4) 파괴점의 선정도 변수로 작용한다. 본 연구에서는 각 설계기준에 사용된 위 4가지 변수 값을 비교 분석하였다.

3.1 콘크리트의 인장강도

HCS의 복부전단내력은 복부의 주인장응력이 콘크리트의 인장강도에 도달할 때 전단균열이 발생하기 때문에 중요한 설계요소이다. 콘크리트의 인장강도는 북미기준에서 압축강도의 함수로 계산하며, 압축강도의 크기에 상관없이 하나의 식만 사용하고 있다. 북미기준인 ACI 318,^{2,7)} AASHTO³⁾기준에서 각각 $0.29\sqrt{f_{ck}}$, $0.16\sqrt{f_{ck}}$ 으로 인장강도로 간단하게 평가하고 있다. 반면 유럽기준인 EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾에서는 설계인장응력(f_{td})으로 표현하며 콘크리트의 5% 특성 인장강도($f_{tk,0.05}$)를 콘크리트 불완전계수(γ_c)로 나눈 값으로 계산한다. 콘크리트의 5% 특성 인장강도($f_{tk,0.05}$)는 북미기준과는 다르게 콘크리트 압축강도의 값을 50 MPa기준으로 2개의 식으로 나눠서 식 (6), (7)와 같이 계산한다.

$$f_{tk,0.05} = 0.21(f_{ck})^{2/3} \quad (f_{ck} \leq 50\text{MPa}) \quad (6)$$

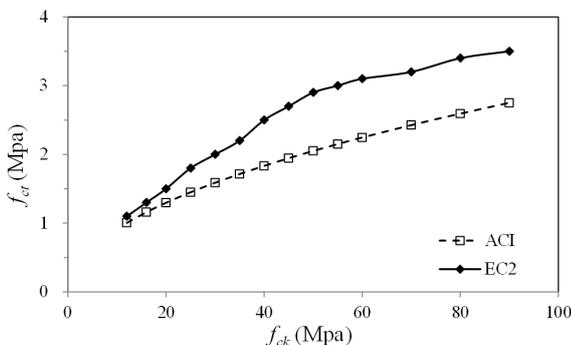


Fig. 1 Comparison with concrete of tensile strength by ACI, EC2 code

$$= 1.484 \ln \left(1 + \frac{(f_{ck} + 8)}{10} \right) \quad (f_{ck} > 50\text{MPa}) \quad (7)$$

Fig. 1은 콘크리트 압축강도(f_{ck})와 콘크리트 인장강도(f_d)의 관계를 ACI 318^{2,7)}와 EC2⁴⁾으로 비교하여 나타내었다. 콘크리트 압축강도(f_{ck})가 20MPa이하일 때는 두 기준의 콘크리트 인장강도(f_d)값은 서로 비슷하다. 하지만 콘크리트 압축강도(f_{ck})가 50 MPa까지는 두 기준의 값이 점점 더 많은 차이가 발생하고 50 MPa이후에는 두 기준의 차이가 일정하게 유지하고 있다.

3.2 강연선의 전달길이

프리스트레스는 강연선과 콘크리트 사이의 부착응력에 의하여 도입이 되는데 부재단부에 가까운 강연선은 부착응력이 부족하여 프리스트레스가 100% 발현되기 어렵고 일정한 길이이상의 부착길이가 확보되어야 프리스트레스가 100% 발현된다. 이처럼 단부에서 프리스트레스가 100% 발현되는 거리까지를 강연선의 전달길이(l_t)라고 한다. 해외설계기준에서는 프리스트레스를 단부에서 0 이라고 하며, 강연선의 전달길이(l_t)까지 선형적으로 변화한다고 가정한다. 그렇기 때문에 전달길이는 복부전단강도를 계산하는데 중요한 요소로 작용한다. ACI 318,^{2,7)} AASHTO³⁾에서는 전달길이를 강연선의 직경을 사용하여 각각 $50d_b$, $60d_b$ 로 계산하고 유럽기준인 EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾에서는 콘크리트 재령일, 강연선 종류 및 직경 등을 고려하여 계산하고 있다.

Fig. 2는 콘크리트 압축강도를 40 MPa로 가정하여 콘크리트 재령일(t)에 따른 강연선의 전달길이 값을 각 기준마다 비교한 것이다. AASHTO,³⁾ ACI 318,^{2,7)} 유럽기준 (EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾ 순서로 강연선의 전달길이가 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 유럽기준에서는 콘크리트 재령일에 따라서 강연선의 전달길이가 변화하지만 강연선의 전달길이에 큰 영향을 주지 않았다. 강연선의 두께와 상관없이 AASHTO³⁾의 전달길이는 ACI 318^{2,7)}기준에 비하여 20% 큰 값이며, 유럽기준(EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾의 전달길이는 28% 작은 값이다.

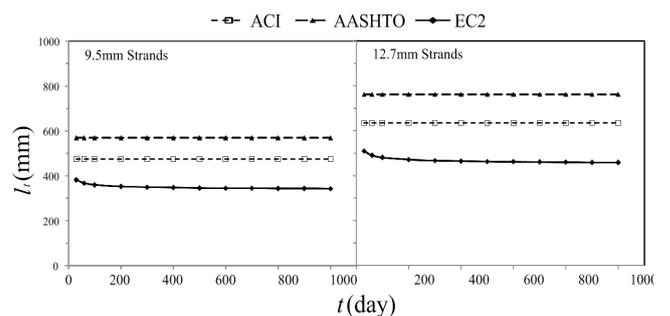


Fig. 2 Comparison with transfer length

3.3 전단응력 치환

각 기준의 설계식에서 전단하중을 전단응력으로 치환하는 방법은 서로 다르다. 북미기준인 ACI 318 (2005, 2011),^{2,7)} AASHTO³⁾에서는 식 (8)과 같이 단순히 전단응력의 평균값으로 평가하였으며 부재의 폭과 깊이만 고려하였다.

$$\tau_{cp} = \frac{V_z}{b_w d} \quad (8)$$

반면 EC2⁴⁾에는 탄성거동 상태에서 Mohr의 원을 이용한 주인장응력과 전단응력을 식 (9), (10)으로 평가하여 ACI 318 (2005, 2011),^{2,7)} AASHTO³⁾ 보다 자세히 평가하였다.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = \frac{Q}{b_w I_y} V_z \quad (10)$$

EN 1168⁵⁾는 EC2⁴⁾와 동일한 방법으로 평가하며, 기준에 대한 비교는 뒤에 실험결과를 바탕으로 비교분석하였다.

3.4 파괴점

설계기준에서 복부전단강도를 평가하는 파괴점이 Fig. 3과 같이 2가지로 구분되어 평가하고 있다. ACI 318^{2,7)},

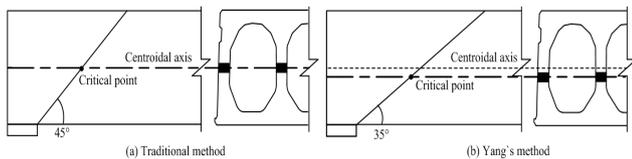


Fig. 3 Comparison with critical point by (a) Traditional method, (b) Yang's method

Table 1 Summary of test Specimens

Specimen ID	h (mm ²)	b _w (mm)	y _b (mm)	A _c (mm ²)	I (mm ⁴)	f' _c (MPa)	9.5mm prestressing strand				12.7mm prestressing strand			
							n'	n	A' _s (mm ²)	P _i (tonf)	n	A' _s (mm ²)	P _i (tonf)	
S200	200	246	99.7	121,591	619,050,000	59.0	2	0	54.84	6.50	5	98.71	14	
S300T1	300	252	149.0	185,307	2,109,364,960	54.0	2	2		7.65	8			
S300T2	300	252	149.0	185,307	2,109,364,960	50.1	2	0		7.65	6			
S350	350	260	173.0	197,453	3,124,514,185	43.4	2	0		6.50	11			
S400	400	266	198.4	212,115	4,390,209,100	47.2	3	0		6.50	11			
S500	500	286	247.6	255,406	8,184,089,200	57.6	3	0	7.65	11				

h: nominal depth of slab, b_w: sum of web widths, y_b: distance from bottom to center of gravity of section, A_c: area of HCS, I: second moment of area of cross-section, f'_c: specified compressive strength of concrete, n': number of upper strands, n: number of lower strands, P_i: initial prestress force

AASHTO,³⁾ EC2⁴⁾는 보수적인 방법으로 단면에서 균열각 45°로 중립축에 파괴점이 있다고 가정⁹⁾하여, 전단강도를 간편하고 구하고자 설계식에 적용한 것이다. EN 1168⁵⁾은 Fig. 3과 같이 Yang¹⁰⁾의 연구로 제안된 것이다. Yang (1994)의 연구는 프리스트레스 하중을 고려해 균열각 35°로 가정하여 중립축보다 밑부분에 파괴점이 있다고 평가하였다. 이 방법은 프리스트레스 하중을 고려하기 때문에 보수적인 방법보다 자세한 평가방법이다. 두 방법에 대한 비교 역시 실험결과를 바탕으로 비교분석하였다.

4. 실험계획

본 연구에서 실험체는 HCS의 두께로 분류하여 5종류에 대해 전단내력실험을 수행하였다.

실험체 ID는 두께를 반영하여 S200, S300, S350, S400, S500으로 하였으며, 실험체는 두께 별로 각각 2개씩 제작하였다. 두께가 300 mm인 S300 실험체는 강연선의 개수를 다르게 하여 각각 1개씩 제작하였으며 S300T1, S300T2으로 분류하여 표기하였다. 두께별로 2개씩 제작된 실험체는 3번씩 전단내력실험을 수행하였으며 S300T1, S300T2는 2번의 실험을 수행하였다. 1번째 실험은 각 두께 별로 제작된 2개의 실험체 중 1번 실험체의 한쪽 단부를 가력하여 결과값을 측정하였다. 2번째 실험은 1번 실험체를 180° 돌려서 가력하지 않은 단부에 설치하고 동일한 방법으로 가력하여 실험을 수행하여 양 끝단에서 복부전단내력을 평가하였다. 3번째 실험은 2번 실험체의 한쪽 끝단에서 복부전단내력을 평가하였다. 이와 같이 실험은 총 16번의 실험을 수행하였다. 모든 실험체는 폭이 1200 mm, 길이는 6400 mm로 동일하게 제작하였으며, 콘크리트의 설계강도는 40 MPa이며 타설 후 14일 강도 (f'_{ck}) 및 단면상세는 Table 1과 같다.

강연선은 7연선 강선으로 직경이 9.5 mm와 12.7 mm인 두 종류의 강연선을 사용하였다. 실험체에 따라 강연선의 위치와 개수가 다르며 상세정보는 Table 1과 같다. 공통적으로 상부에는 9.5 mm 강연선과 하부에는 12.7 mm

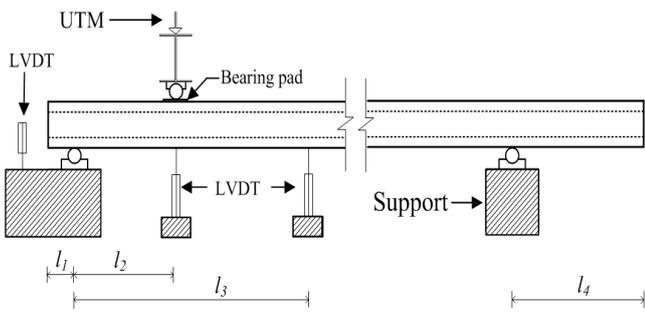


Fig. 4 Test set up

Table 2 Specimens set up position

Specimen	l_1 (mm)	l_2 (mm)	l_3 (mm)	l_4 (mm)
S200	100	504	2697	906
S300T1		720	2535	1230
S300T2		720	2535	1230
S350		870	2422	1450
S400		1020	2310	1680
S500		1320	2085	2130

강연선을 사용하였다. 단 S300T1 실험체는 하부에 9.5 mm 강연선 2개를 사용하였다. 12.7 mm 강연선은 강연선 도입 직후 프리스트레스 힘(P_i)이 137.34 kN (14.0 tonf)이며, 9.5 mm 강연선은 강연선 도입 직후 프리스트레스 힘(P_i)이 63.77 kN (6.5 tonf) 와 75.05 kN (7.65 tonf)으로 나눠서 사용하였다. 강연선의 유효 프리스트레스 힘(P_e)은 손실률 15%를 가정하여, $0.85P_i$ 값을 사용하였다.

실험체는 Fig. 4와 같이 단순지지 조건으로 설치하였으며 Table 2와 같이 실험체마다 설치위치가 다르게 하였

다. 실험은 100tonf UTM 가력장치를 사용하였으며, 전단 경간비(a/d)는 3.0 인 지점에 1점 가력을 점진적으로 증가시켜 복부전단실험을 진행하였다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 실험결과

실험결과 모든 실험체는 Fig. 5와 같이 복부전단파괴가 발생하여 실험이 종료되었다. S300T2와 S400을 제외한 모든 실험체는 초기 균열이 발생 후 하중이 50%이상 급격히 감소되고 곧 복부전단파괴가 되는 형태를 나타냈다.

S300T2와 S400실험체는 복부전단균열이 발생한 후 바로 내력이 감소하지 않고, 하중이 각각 40%, 12% 증가한 후 복부전단파괴 되었다. 슬래브 두께별 복부전단강도 실험값의 평균값과 표준편차, 해외설계기준의 복부전단값을 Table 3과 같으며, 슬래브 두께별 평균값과 설계기준값은 Fig. 6과 같이 비교하였다.

Fig. 6(a)에서 ACI 318-05⁷⁾기준은 S400과 S500 실험체를 제외하고 전체적으로 실험결과 값을 18~32% 과소평가하고 있다. S400실험체는 54% 과소평가하였으며, S500 실험체인 경우 21% 과대평가하고 있다.

현행 기준인 ACI 318-11²⁾에서 두께가 깊은 HCS실험체 S350, S400, S500는 ACI 318-05⁷⁾기준의 반값으로 평가한 결과, Fig. 6(b)와 같이 복부전단내력을 크게 과소평가하고 있다. 3개의 실험체는 약 135%, 208%, 57% 과소평가하고 있으며, 전체적으로 실험결과 값을 약 80% 과소평가하고 있다.

Fig. 6(c)에서 AASHTO³⁾기준은 모든 두께에 대해서 V_{test}/V_{code} 의 값이 1 이상으로 전체적으로 23~139% 과

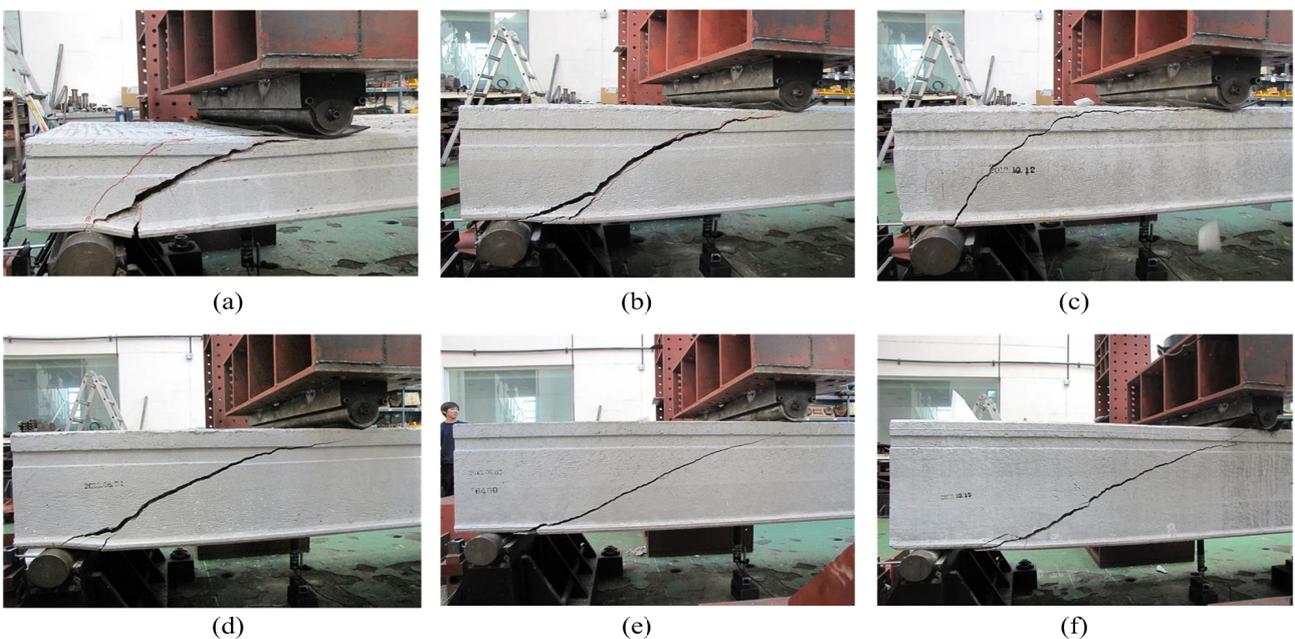


Fig. 5 Failure mode of specimens (a)S200, (b)S300T1, (c)S300T2, (d)S350, (e)S400, (f)S500

Table 3 Summary of comparison with test(V_{test}) and code(V_{code}) values

Specimen	V_{test}		V_{test}/V_{code}									
			ACI 318-05		ACI 318-11		AASHTO		EC2		EN 1168	
	mean (kN)	σ	mean	σ	mean	σ	mean	σ	mean	σ	mean	σ
S200	145.14	23.74	1.27	0.19	1.27	0.19	1.98	0.31	0.90	0.13	0.86	0.13
S300T1	249.60	35.99	1.32	0.16	1.32	0.16	2.11	0.26	0.95	0.12	0.95	0.12
S300T2	205.17	89.63	1.21	0.46	1.21	0.46	1.99	0.75	0.89	0.33	0.90	0.34
S350	267.83	34.32	1.18	0.12	2.35	0.25	1.83	0.19	0.90	0.09	0.90	0.09
S400	436.14	97.18	1.54	0.27	3.08	0.53	2.39	0.42	1.16	0.20	1.15	0.20
S500	326.28	99.04	0.79	0.16	1.57	0.33	1.23	0.26	0.60	0.13	0.59	0.12

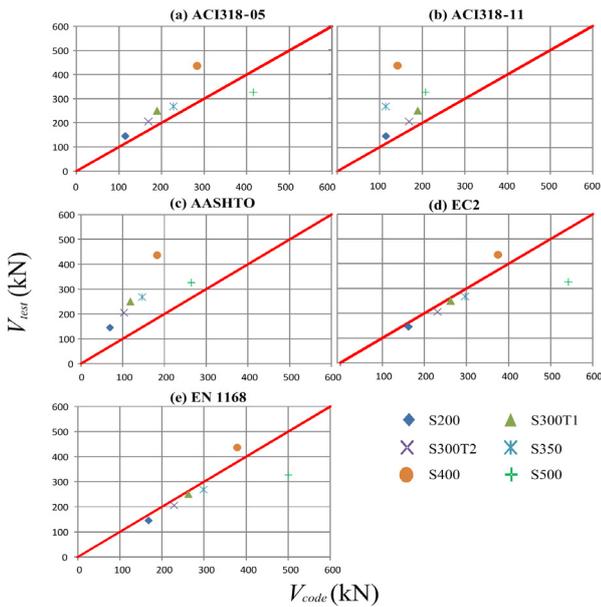


Fig. 6 Comparison with test(V_{test}) and code(V_{code}) values. (a) ACI318-05, (b) ACI318-11, (c) AASHTO, (d) EC2, (e) EN1168

소평가하고 있으며, 복부전단내력을 ACI 318-05⁷⁾ 기준보다 낮게 평가하고 있다.

EC2⁴⁾와 EN 1168⁵⁾ 기준은 현행기준들 중에서 V_{test}/V_{code} 의 값이 1에 가장 근접하여 실제 내력을 작은 오차로 예측하고 있다. Fig. 6(d), (e)에서 ACI 318^{2,7)} AASHTO³⁾ 기준과는 달리 S400 실험체를 제외하고 전체적으로 과대평가하고 있다. S400 실험체를 제외한 V_{test}/V_{code} 의 평균값은 0.60~0.95 내에 분포하고 있으며, EC2⁴⁾와 EN 1168⁵⁾ 기준은 전체적으로 10% 과대평가하고 있다. S400 실험체인 경우 각각 16%, 15% 과소평가하고 있다.

종합적으로 살펴보면 ACI 318-11²⁾ AASHTO³⁾ 기준으로 복부전단내력을 산정할 경우 슬래브 두께와 관계없이 복부전단내력을 만족할 수 있다. 하지만 크게 과소평가하여 부재가 커지기 때문에 비효율적인 문제가 있다.

반면에 ACI 318-05⁷⁾ EC2⁴⁾ EN 1168⁵⁾ 기준식으로 복부전단내력을 산정할 경우 S500을 제외하고 작은 오차를

Table 4 Comparison with tensile strength of concrete

Specimen	f_{ck} (MPa)	Tensile strength of concrete		
		ACI (MPa)	AASHTO (MPa)	EC2, EN 1168 (MPa)
S200	59.0	2.23	1.23	3.03
S300T1	54.0	2.13	1.18	2.93
S300T2	50.1	2.05	1.13	2.85
S350	43.4	1.91	1.05	2.59
S400	47.2	1.99	1.10	2.74
S500	57.6	2.20	1.21	3.00

보이며 평가하고 있다. S500 실험체는 40% 정도 과대평가하여 큰 오차를 보였다.

5.2 실험분석

실험을 통해 얻은 전단강도 값과 HCS의 복부전단강도 평가 비교에서 언급한 콘크리트의 인장강도, 강연선의 전달길이, 전단응력, 파괴점의 값을 각 설계기준별로 계산하여 비교분석하였다.

Table 4는 각 기준에 의한 콘크리트의 인장강도 값을 나타낸 것이다. 콘크리트의 인장강도는 각 실험체의 실제 콘크리트 압축강도가 서로 다르기 때문에 다른 값을 갖는다. 그 결과 AASHTO³⁾ 기준은 ACI 318^{2,7)} 기준보다 45% 작게 평가하고 있으며, EC2⁴⁾, EN 1168⁵⁾ 기준은 ACI 기준보다 37% 크게 평가하고 있다.

북미기준인 ACI 318^{2,7)} AASHTO³⁾ 기준에서 강연선의 전달길이는 강연선의 직경만을 고려하여 각각 635 mm, 762 mm의 값을 갖는다. 반면에 유럽기준인 EC2⁴⁾, EN 1168⁵⁾ 기준은 콘크리트 재령기간(t)과 부착응력을 고려하여 각각 다른 값을 갖지만 평균 413 mm이다. Table 5에서 전달길이를 비교한 결과, AASHTO³⁾ 기준이 ACI 318^{2,7)} 기준보다 20% 크게 평가하고 있으며, EC2⁴⁾, EN 1168⁵⁾ 기준이 35% 작게 평가하고 있다.

전단응력 치환은 기준에서 제시하는 설계식에서 콘크

Table 5 Comparison with transfer length

Specimen	d_b (mm)	t (day)	Transfer length		
			ACI (mm)	AASHTO (mm)	EC2, EN 1168 (mm)
S200	12.7	480	635	762	376
S300T1		330			391
S300T2		330			402
S350		90			458
S400		90			433
S500		30			417

d_b : diameter of stands, t : age of concrete in days

Table 6 Comparison with cross-section

Specimen	d (mm)	I/S (mm)
S200	168	153
S300T1	260	229
S300T2	260	229
S350	310	271
S400	360	311
S500	460	390

Table 7 Comparison with Shear strength by EC2, EN 1168

Specimen	V_{code}	
	EC2 (kN)	EN 1168 (kN)
S200	162.19	168.26
S300T1	262.20	262.84
S300T2	231.06	228.93
S350	296.71	298.90
S400	374.69	378.76
S500	542.04	500.62

리트의 인장강도와 강연선의 영향을 제외하고 비교하였다. 북미기준인 ACI 318,^{2,7)} AASHTO³⁾는 $b_w d$ 로 나타낼 수 있으며, 유럽기준인 EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾은 b_w/S 으로 나눠서 평가할 수 있다. Table 6에는 북미기준과, 유럽기준의 공통요소인 b_w 를 제외한 d 와 I/S 만 비교하였다. 그 결과 북미기준의 전단응력 치환인 d 값은 유럽기준의 치환인 I/S 값보다 약 12% 크게 평가 하고 있다.

파괴점은 가정하는 방법에 따라서 2가지로 분류된다. ACI 318,^{2,7)} AASHTO,³⁾ EC2⁴⁾기준과 EN 1168⁵⁾ 기준으로 분류할 수 있으며, 설계기준 중 파괴점 가정에서만 차이를 보이는 EC2⁴⁾기준과 EN 1168⁵⁾기준을 비교하여 Table 7에 나타냈다. 그 결과 S500실험체를 제외하고 거의 유사하여 실질적으로 동일하다고 판단된다. EN 1168기준은 450 mm보다 깊은 HCS 부재인 경우 전단강도를 계산한 값에 10% 값만큼 감소하여 사용하기 때문에 S500 실험

체에서 약 8% 오차가 발생한 것으로 판단된다.

EC2⁴⁾기준에서 제시하는 복부전단강도는 ACI 318-05⁷⁾에서 제시하는 복부전단강도보다 35% 더 높게 평가하고 있다. ACI 318-05⁷⁾와 EC2⁴⁾기준에서 제시하는 복부전단강도를 결정하는 요소들을 비교한 결과, 콘크리트의 인장강도는 37% 증가, 강연선의 전달길이는 35% 감소, 전단응력의 치환은 12% 증가의 차이를 확인하였다. 그러나 각 변수는 식 (1), (4)에서와 같이 복부전단강도 식 안에서 계산되어지기 때문에 각 변수 차이의 비율이 복부전단강도 차이의 비율을 의미하지는 않는다. 콘크리트 인장강도가 37% 증가할 때 복부전단강도는 약 26% 증가, 전달길이가 35% 감소할 때 복부전단강도는 약 14% 증가, 그리고 전단응력 치환은 12% 증가할 때 복부전단강도는 12% 증가하였다. 이와같이 두 기준식에서 복부전단강도 차이가 발생시키는 요소는 콘크리트 인장강도, 강연선의 전달길이, 전단응력 치환 순으로 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결 론

국내에서 HCS에 대한 연구가 미비하고, 기준에 대한 평가가 불분명한 상황에서 본 연구는 국내에서 생산되는 HCS에 대하여 전단강도 실험을 수행하였으며, 복부전단강도를 해외설계기준(ACI 318,^{2,7)} AASHTO,³⁾ EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾)으로 평가 및 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국내에서 생산되는 HCS에 대하여 ACI 318-05,⁷⁾ EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾기준이 상대적으로 정확한 평가를 하고 있다. 500 mm미만인 HCS는 EC2,⁴⁾ EN 1168⁵⁾기준이 정확한 평가를 하며, 실험값과 약 4% 오차를 확인하였다. 500 mm이상인 HCS는 ACI 318-05⁷⁾기준이 정확한 평가를 하며, 실험값과 약 21% 오차를 확인하였다.
- 2) 현재 국내에서 사용 중인 KCI¹⁾와 ACI 318-11²⁾기준은 315 mm를 초과하는 깊은 HCS에 대하여 전단철근을 배근하지 않을 경우 복부전단내력을 절반값($0.50 V_{cw}$)으로 하도록 규정하고 있다. 하지만 이러한 평가는 실제 전단강도값에 비해 크게 과소평가하여 부재가 커지는 비효율적인 문제가 발생하기 때문에 두께가 315 mm를 초과하는 HCS에 대하여 적절한 강도저감계수가 필요하다.
- 3) AASHTO³⁾기준은 전반적으로 과소평가를 하며 비효율적인 문제가 있다. 실험값과의 오차가 94%로 ACI 318-11²⁾기준보다 크게 과소평가함을 확인하였다.
- 4) 유럽기준에서 EN 1168⁵⁾기준은 EC2⁴⁾기준과 파괴점에 대한 가정방법이 다르지만, 복부전단강도 값은 큰 차이가 없음을 확인하였다.
- 5) 기준식을 결정하는 변수 중에서 콘크리트의 인장강도가 복부전단강도 평가에 가장 큰 차이를 주며, 강

연선의 전달길이, 전단응력 치환 순서로 복부전단 강도 평가에 영향을 주는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 삼성물산 주택공사팀(PC ENG)의 “Hollow Core Slab 전단성능실험”에 관한 일련의 지원과 한국연구재단(No.2012R1A2A2A06045129)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Korea Concrete Institute, concrete design code and commentary, Kimoon dang, publish company, Seoul Korea, 2012, pp. 118-121.
2. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318M-11), *American Concrete Institute*, 2011. pp. 166.
3. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *LRFD Bridge Design Specification*

Customary U.S. Units. 2012. pp. 5-74.

4. EC2 (EN 1992-1-1), Eurocode 2 : Design of concrete structures–Part 1:General rules and rules for buildings. *Commission for the European Community*, 2002. pp. 86.
5. BSI, Group(BS EN 1168), Precast concrete products–Hollow core slabs. *British Standards Institution*, 2011. pp. 16.
6. Palmer, K. D. and Schultz, A. E., “Experimental investigation of the web-shear strength of deep hollow-core units,” *PCI Journal*, Vol. 56, No. 4, 2011, pp. 83-104.
7. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318M-05), *American Concrete Institute*, 2005. pp. 153.
8. Hawkins, N. M. and Ghosh, S. K. “Shear strength of hollow-core slabs”, *PCI Journal*, Vol. 51, No. 1, pp. 110-114.
9. Pajari, M., Resistance of Prestressed Hollow core Slabs Against Web Shear Failure, Research Notes 2292, VTT Building and Transport, Kemistintie, Finland, 2005, pp. 1-69.
10. Yang, L. “Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 9, pp. 2675-2696.

요 약 일반적인 슬래브대신에 중공슬래브를 사용함으로써 콘크리트의 무게를 줄일 수 있으며 비용도 절감시킬 수 있다. 하지만 중공슬래브는 복부에서 콘크리트단면의 감소와 전단철근을 배근할 수 없기 때문에 전단에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 프리캐스트-프리스트레스트 중공슬래브를 실험을 기반으로 전단강도 평가를 수행하였다. 전단강도실험은 6개의 실험체를 제작하고 수행하였으며, 전단강도는 현행기준인 EC2, ACI, EN1168, AASHTO로 평가하여 비교분석하였다.

핵심용어 : 중공슬래브, 복부전단강도, 콘크리트 인장강도, 주인장응력, 전달길이