



프리스트레스트 중공 슬래브와 현장타설된 토평콘크리트의 수평전단성능 평가

임주혁¹⁾ · 박민국¹⁾ · 이득행¹⁾ · 서수연²⁾ · 김강수^{1)*}

¹⁾서울시립대학교 건축학부 ²⁾한국교통대학교 건축공학과

Evaluation of Horizontal Shear Strength of Prestressed Hollow-Core Slabs with Cast-in-Place Topping Concrete

Ju-Hyeuk Im,¹⁾ Min-Kook Park,¹⁾ Deuck-Hang Lee,¹⁾ Soo-Yeon Seo,²⁾ and Kang-Su Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 380-702, Korea

ABSTRACT Prestressed hollow-core (PHC) slabs are structurally-optimized lightweight precast floor members for long-span concrete structures, which are widely used in construction markets. In Korea, the PHC slabs have been often used with cast-in-place (CIP) topping concrete as a composite slab system. However, the PHC slab members produced by extrusion method use concrete having very low slump, and it is very difficult to make sufficient roughness on the surface as well as to provide shear connectors. In this study, a large number of push-off tests was conducted to evaluate interfacial shear strengths between PHC slabs and CIP topping concrete with the key variable of surface roughness. In addition, the horizontal shear strengths specified in the various design codes were evaluated by comparing to the test results that were collected from literature.

Keywords : prestressed hollow-core slab, cast-in-place, topping concrete, shear, horizontal shear strength, design code

1. 서 론

프리스트레스트 중공(Prestressed hollow-core, 이하 PHC) 슬래브는 단면의 중심부분에 여러 개의 중공을 형성해 자중을 줄이고 단면의 효율성을 높인 프리캐스트(Precast, 이하 PC) 부재이며,¹⁻⁸⁾ 상·하부 콘크리트 플렌지에 프리스트레스를 도입함으로써 기존의 철근콘크리트(reinforced concrete, 이하 RC) 슬래브에 비해 휨강성 및 강도가 우수하다. PHC 슬래브는 1960년대부터 지금까지 유럽 및 북미에서 폭넓게 사용되고 있으며, 국내에서도 최근 PC 공법이 활성화되면서 물류창고 및 지하주차장 등에 자주 적용되고 있다. 특히, 국내에서는 공장에서 제작된 PC슬래브를 현장에 설치한 후에 현장타설(cast-in-place, 이하 CIP) 콘크리트를 타설하여 일체화시키는 부분합성 프리캐스트콘크리트(Half PC) 공법이 널리 적용되고 있다. 이러한 Half PC 공법에서는 충분한 수평전단강도를 확보가 전제되어야 하며, 국내 콘크리트 구조설계기준(KCI-12)에서는 합성 콘크리트 부재의 수평전단강도를 접촉면의 표면 거칠기 상

태와 전단연결재의 양의 함수로 제시하고 있다.⁹⁾ 그러나, 압출성형방식으로 제작되는 PHC 슬래브는 매우 낮은 슬럼프의 콘크리트를 사용하여 압출성형기계(extruder machine)로 제작되기 때문에 제품제작 시 전단철근의 배치가 거의 불가능하다. 또한, 빠른 콘크리트의 경화로 인하여 표면경도가 매우 높기 때문에 CIP 콘크리트와 PHC 슬래브 사이 계면에 거친면 처리를 도입하기 어렵다. 즉, PHC 슬래브는 수평전단에 저항할 수 있는 적절한 저항매커니즘을 확보하기가 불리한 것이다. 따라서, 이 연구에서는 이러한 PHC 슬래브에 적용 가능한 여러 가지 슬래브 접촉면 처리방법을 시도하여 실험체를 제작하고 직접전단실험을 수행하였다. 또한, 기존에 수행된 다양한 실험결과를 같이 활용하여 수평전단강도에 대한 국내·외 설계기준을 평가하였다.⁹⁻¹⁴⁾

2. 수평전단강도에 대한 설계기준

국내·외 콘크리트 구조설계기준 및 지침서에서는 계수수평전단력에 대하여 설계수평전단강도가

$$V_u < \phi V_{nh} \tag{1}$$

*Corresponding author E-mail : kangkim@uos.ac.kr

Received July 3, 2014, Revised July 26, 2014,

Accepted August 5, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

을 만족하도록 하고 있다.^{9,14)} 여기서, ϕ 는 강도감소계수, V_{nh} 은 수평전단강도, V_u 는 계수전단력이다.

2.1 KCI-12, ACI 318-11 및 PCI Design Handbook

국내 현행설계기준(17.3.2)⁹⁾ 및 북미 기준(ACI318-11 17.5, PCI 5.3.5)^{11,14)}에서는 계면상태와 최소전단연결재의 배치 유무에 따라 수평전단강도(V_{nh})를 Table 1과 같이 제시하고 있다. 계면에 거친면(또는 요철)이 도입되지 않은 경우에는 최소전단연결재를 배치하도록 규정하고 있으며, 이 경우 수평전단강도는 0.56 MPa (단, ACI318에서는 0.55)이다. 또한, 계면을 의도적으로 거칠게 만든 경우에도 동일한 전단강도를 제시하고 있다. 최소전단연결재가 배치되고 거친면이 도입된 경우에는 최소요철깊이를 6.0 mm로 규정하고 있다. 그러나, 최소전단연결재 없이 거친면만 도입된 경우에 대해서는 요철(거친면처리)의 깊이와 간격 그리고 요철의 방향(예를 들어, 부재의 폭방향 또는 길이 방향)에 대한 명확한 기준이 제시되어 있지 않다.

2.2 AASHTO-LRFD Bridge Design Specification

미국의 교량설계규정인 AASHTO-LRFD Bridge Design Specification (5.8.4)¹⁰⁾ (이하 AASHTO-LRFD)의 2.1절에서는 계면의 공칭수평전단강도(V_{ni})를

Table 1 Interfacial horizontal shear strength specified in KCI-12, ACI318-11, PCI^{9,11,14)}

	Surface type	Horizontal shear strength
(a)	Contact surfaces are clean, free of laitance, and intentionally roughened surface	$V_{nh} \leq 0.56b_v d^*$
(b)	Contact surfaces are clean and free of laitance, but not intentionally roughened surface with minimum ties	$V_{nh} \leq 0.56b_v d^*$
(c)	Contact surfaces are clean, free of laitance and intentionally roughened to a full amplitude of approximately 6 mm with minimum ties	$V_{nh} = (1.8 + 0.6\rho_v f_y)\lambda b_v d < 3.5b_v d$
(d)	Design for horizontal shear shall be done by shear-friction design method	$V_u > \phi 3.5b_v d$

where, b_v is width of cross section at contact surface being investigated for horizontal shear, d is distance from extreme compression fiber to centroid of longitudinal tension reinforcement, ρ_v is ratio of tie reinforcement area to area of contact surface, f_y is specified yield strength of reinforcement. *In ACI318¹¹⁾ and PCI¹⁴⁾, $0.56b_v d$ in Eqs. (a) and (b) is differently expressed as $0.55b_v d$.

$$V_{ni} = cA_{cv} + \mu(A_{vf} + P_c) \quad (2-1)$$

$$V_{ni} \leq K_1 f_{ck} A_{cv} \quad (2-2)$$

$$V_{ni} \leq K_2 A_{cv} \quad (A_{cv} = b_{vi} L_{vi}) \quad (2-3)$$

으로 제시하고 있다. 여기서, c 는 점착계수(cohesion factor), A_{cv} 는 수평전단력이 전달되는 계면의 면적, μ 는 계면의 마찰계수, A_{vf} 는 전단연결재의 단면적, P_c 는 계면에 수직으로 작용하는 압축력, K_1 은 수평전단력에 저항하는 콘크리트 강도의 비율, K_2 는 수평전단력의 최대계수, L_{vi} 와 b_{vi} 는 각각 수평전단력이 전달되는 계면의 길이와 폭이다.

식 (2)를 적용하기 위해서는 접촉면에 최소전단철근을 배치해야 한다. Table 2는 AASHTO-LRFD에서 제시된 수평전단강도에서 전단연결재의 기여분과 압축력의 기여분을 제외하고 콘크리트 기여분(cA_{cv})만을 5가지의 경우로 구분하여 나타낸 것이다. AASHTO-KCI-12, ACI318-11 및 PCI Design Handbook (이하 PCI)과 마찬가지로 요철의 방향, 폭 및 간격에 대한 규정을 명확하게 제시하고 있지 않지만, 거친표면의 요철깊이를 모든 경우에 대하여 6 mm 이상으로 규정하고 있는 것을 알 수 있다.

2.3 Eurocode 2

Eurocode 2¹³⁾ (이하 EC2)에서는 앞서 2.2절에 소개된 AASHTO-LRFD 기준에서 cA_{cv} 항으로 표시되었던 점착력에 의한 기여분을 콘크리트의 인장강도(f_{ctd})로 표현하여,

Table 2 Interfacial horizontal shear strength excluding resistance of steel ties specified in AASHTO-LRFD¹⁰⁾

	Surface type	Horizontal shear strength
(a)	For normal-density concrete placed monolithically	$V_{ni} = 2.8b_{vi} L_{vi}$
(b)	For cast-in-place concrete slab on clean concrete girder surfaces, free of laitance with surface roughened to an amplitude of 6 mm	$V_{ni} = 1.9b_{vi} L_{vi}$
(c)	For low-density concrete placed monolithically, or nonmonolithically, against a clean concrete surfaces, free of laitance with surface intentionally roughened to an amplitude of 6 mm	$V_{ni} = 1.7b_{vi} L_{vi}$
(d)	For normal-density concrete placed against a clean concrete surfaces, free of laitance, with surface intentionally roughened to an amplitude of 6 mm	$V_{ni} = 1.7b_{vi} L_{vi}$
(e)	For concrete placed against a clean concrete surface free of laitance, but not intentionally roughened	$V_{ni} = 0.52b_{vi} L_{vi}$

Table 3 Interfacial horizontal shear strength specified in EC2¹³⁾

Surface type	Grade of in-situ concrete (MPa)	
	25	40
Very smooth : a surface cast against steel, plastic or specially prepared wooden moulds	0.30	0.41
Smooth : a slipformed or extruded surface, or a free surface left without further treatment after vibration	0.42	0.57
Rough : a surface with at least 3 mm roughness at about 40 mm spacing, achieved by raking, exposing of aggregate or other methods giving an equivalent behaviour	0.54	0.74
Indented : a surface with indentations complying with Fig. 1	0.60	0.82

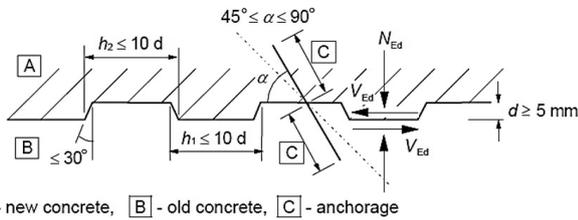


Fig. 1 Indented construction joint details specified in EC2¹³⁾

계면의 수평전단강도(V_{Rdi})를

$$V_{Rdi} = cf_{cd} + \mu\sigma_n + \rho(\mu \sin\alpha + \cos\alpha) < 0.5\nu f_{cd} \quad (3)$$

으로 제시하고 있다. 여기서, c 와 μ 는 계면상태 계수, f_{cd} 는 콘크리트 인장강도, σ_n 은 전단면에 수직으로 작용하는 압축응력, ρ 는 전단연결재 비, f_{yd} 는 철근의 항복강도, α 는 전단면과 전단연결재 사이의 각도, ν 는 강도연화계수, f_{cd} 는 설계압축강도이다. Table 3은 식 (3)에서 전단연결재의 기여분과 압축력의 기여분을 제외한 콘크리트의 기여분(cf_{cd})을 4가지의 경우로 구분하여 나타낸 것이다. EC2에서는 다른 설계기준들과 다르게 접촉면의 처리방식과 요철 형상을 Fig. 1과 같이 매우 구체적으로 규정하고 있다.

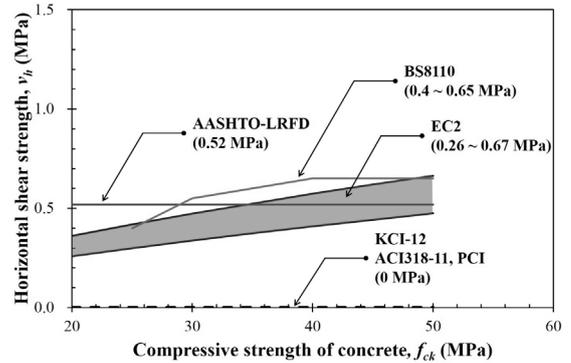
2.4 BS8110-1:1998

BS8110-1:1998¹²⁾ (이하 BS8110)에서는 전단연결재의 유무와 접촉면의 상태, 토핑콘크리트의 압축강도에 따라 Table 4와 같이 수평전단강도를 도표화하여 제공하고 있으며, EC2와 유사하게 표면의 처리방식을 비교적 상세하게 분류하고 있다.

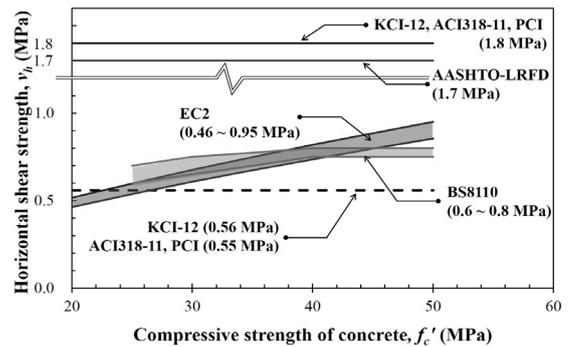
Fig. 2에는 국내·외 기준에서 제시하고 있는 수평전단강도를 CIP 콘크리트 압축강도(f_{ck})에 대하여 나타내었다.

Table 4 Interfacial horizontal shear strength specified in BS8110¹³⁾

Precast unit	Surface type	Grade of in-situ concrete (MPa)		
		25	35	40 and over
without ties	As-cast or as extruded	0.40	0.65	0.65
	Brushed, screeded or rough-tamped	0.60	0.65	0.75
	Washed to remove laitance or treated with retarder and cleaned	0.70	0.75	0.80
with ties	As-cast or as-extruded	1.20	1.80	2.00
	Brushed, screeded or rough-tamped	1.80	2.00	2.20
	Washed to remove laitance or treated with retarder and cleaned	2.10	2.20	2.50



(a) Smooth surface



(b) Intentionally roughend surface

Fig. 2 Comparison of interfacial horizontal shear strengths neglecting resistance of steel ties provided by various design codes

Fig. 2(a)는 전단연결재가 배치되지 않고 표면 거칠기 없는 경우에 대하여 설계기준들에서 제시하고 있는 수평전단강도를 보여주고 있다. KCI-12, ACI318-11 및 PCI에서는 표면처리와 전단연결재가 모두 없는 경우를 기본적으로 허용하지 않고 있는 반면에, AASHTO-LRFD는 압

축강도에 상관없이 0.52 MPa로 제시하고 있다. 또한, 계면 거칠기가 없더라도 EC2와 BS8110에서 제시하고 있는 수평전단강도는 CIP 콘크리트의 압축강도에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 EC2에서는 수평전단강도가 0.26 MPa에서 0.67 MPa까지 분포하였다.

Fig. 2(b)는 거친면 처리가 된 경우에 대하여 설계기준식들을 통해 산정된 수평전단강도를 비교하여 나타낸 것이다. ACI318-11, PCI 및 KCI-12에서 제시하는 수평전단강도는 0.55 또는 0.56 MPa이며, EC2와 BS8110은 CIP 콘크리트의 압축강도와 표면처리 방식에 따라 각각 0.46~0.95 MPa 및 0.6~0.8 MPa의 수평전단강도를 제시하고 있다. 또한, 모든 기준에서 전단연결재가 있는 경우에는 콘크리트의 수평전단강도 기여분이 전단연결재가 없는 경우에 비하여 약 3배 이상 큰 값을 보여주었다.

물론, AASHTO-LRFD에서는 최소전단연결재가 반드시 배치되어야 하며, 앞서 설명한 것과 같이 Fig. 2(b)에는 다른 기준들과 비교하기 위하여 콘크리트의 기여분만을 나타낸 것이다. 이처럼 각국의 설계기준들에서 제시하고 있는 수평전단강도는 서로 매우 상이한 값을 나타내었으며, 계면의 요철 깊이, 방향, 및 간격 등에 따라서 변동성이 더 크게 나타날 수도 있을 것이다.

3. 실험적 연구

3.1 실험계획

압출성형방식으로 제작된 PHC 슬래브는 매우 낮은 슬럼프의 콘크리트를 사용하기 때문에 성형 직후에도 콘크리트표면이 매우 단단하다. 따라서, 기존 PC제작공법에서 전통적으로 사용하는 갈퀴(rake)나 빗질(broom)로 거친면처리를 하는 것은 거의 불가능하다.⁹⁾ 이 연구에서는 PHC 슬래브가 거의 100% 자동화되어 생산된다는 점을 바탕으로 건식·기계화 시공에 적합한 2가지 거친 요철처리방법을 고안하였다.¹⁾ 또한, 추가적으로 표면처리를 하지 않은 경우와 표면처리가 가능한 슬립성형방식으로 제작된 PHC 슬래브 실험체들을 동시에 제작하여 직접전단실험을 수행하였다. 여기서, 슬립성형방식은 슬립성형기계를 통해 단일몰드형식으로 PHC 슬래브를 제작하는 방식이며, 일반적인 슬럼프의 콘크리트를 사용하기 때문에 표면처리가 가능하지만 압출성형방식에 비하여 강도가 낮다. 이 연구에서는 실험결과의 신뢰성을 높이기 위하여 각 표면처리방법에 대하여 동일한 실험체를 3개씩 제작하였다.

제작된 실험체들과 사용된 재료의 물성치는 Table 5에 나타낸 바와 같다. 표의 하단에 보이는 바와 같이, 실험체명의 첫 문자(D 또는 W)는 PHC슬래브의 생산방식을 의미하며, D와 W는 각각 압출성형 및 슬립성형방식으로 제작되었음을 의미한다. 두 번째와 세 번째 문자(SS, RL, RT, WM 또는 RR)는 PHC슬래브 상부표면처리상태를 나타낸

다. 즉, SS는 표면처리 없이 압출성형된 매끄러운 표면, RL과 RT는 각 부재의 길이방향과 폭방향으로 요철이 있는 경우, WM은 SS와 마찬가지로 표면처리 없이 와이어 매쉬로 전단보강된 경우이고, RR은 외플형 사각격자무늬로 거친면 처리된 경우이다. 압출성형방식으로 생산된 실험체들은 콘크리트 압축강도(f_{ck})가 40 MPa, 슬래브의 두께는 200 mm이었다. 슬립성형방식으로 제작된 PHC 슬래브 실험체는 압축강도(f_{ck})가 35 MPa, 두께가 315 mm이었다.

이 연구에서 사용된 PHC 슬래브는 본래 폭이 1200 mm로 생산되었으나, Fig. 3(a)와 3(b)에 나타낸 것과 같이 커

Table 5 Summary of test specimens

Specimens name	PHC Slab		CIP		surface condition
	$f_{ck,PHC}$ (MPa)	h_{PHC} (mm)	$f_{ck,CIP}$ (MPa)	h_{CIP} (mm)	
DSS	40	200	24	200	as-extruded (smooth)
DRL	40	200	24	200	longitudinal roughened
DRT	40	200	24	200	transverse roughened
DRT*	40	200	24	200	transverse roughened
DWM	40	200	24	200	as-extruded (smooth) + wiremesh
WRR	35	315	24	200	grid roughened

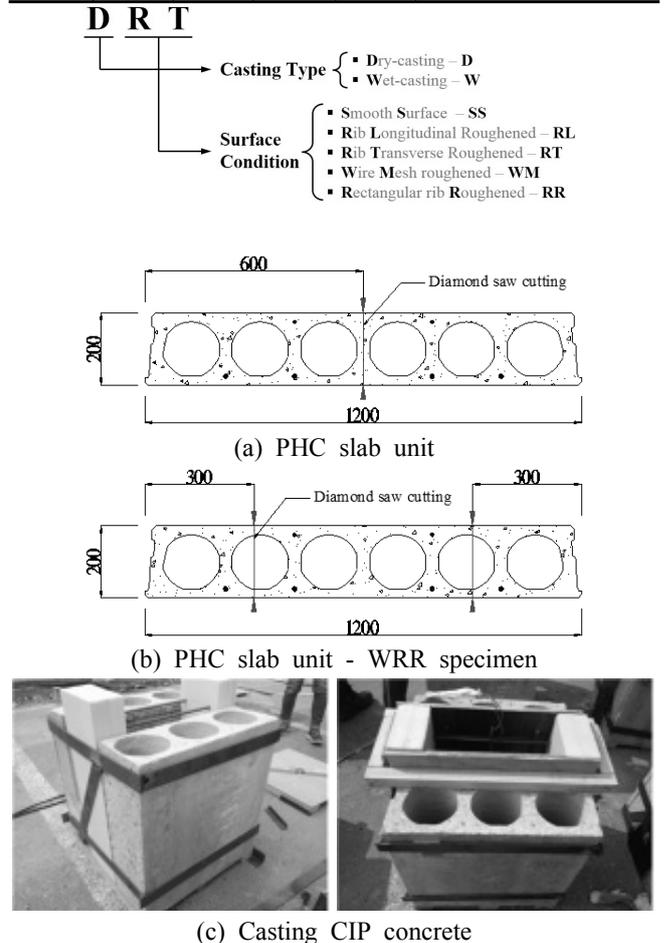


Fig. 3 Fabrication of specimens

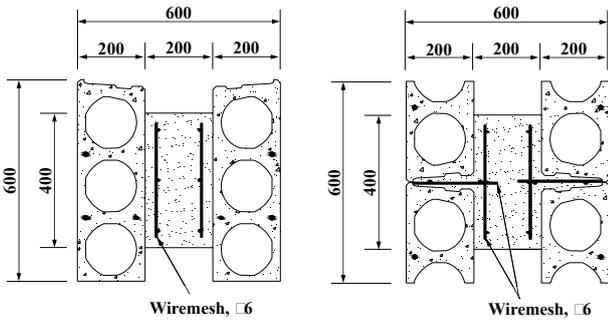


Fig. 4 Details of test specimens

텅머신(diamond saw)을 이용하여 폭이 600 mm가 되도록 절단하였다. Fig. 3(c)와 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 PHC 슬래브들의 상부표면이 CIP 콘크리트와 2면에서 접촉되도록 하였으며, 접촉계면의 넓이가 400 mm×400 mm가 되도록 제작되었다. 실험체 단면 상세는 Fig. 4에 나타낸 바와 같으며, 모든 실험체들의 토폽콘크리트에는 계면에 근접하게 6 mm 직경을 갖는 와이어 메쉬(wire mesh)를 배치하였다.

3.2 실험체 표면 상세

Fig. 5는 실험체들에 도입된 거친표면의 상세를 보여준다. Fig. 5(a)에 나타낸 DSS 실험체는 압출성형방식으로 제작된 PHC 슬래브로서, 상부면에 표면처리를 도입하지 않은 실험체이다. Fig. 5(b)에 나타낸 DRL 실험체는 부재의 길이방향(즉, 하중가력방향과 평행한 방향)으로 요철이 있으며, 요철의 폭은 15~20 mm, 깊이는 6 mm가 되도록 자동화 장비를 통해 제작되었다. 요철은 상부면에 2개의 쌍으로 제작되었으며, 좁은 간격은 30 mm, 긴 간격은 150 mm이다. 이러한 거친면 처리방법은 압출성형기에 요철 시공장비를 연결하여 PHC 슬래브 제작시에 요철을 시공할 수 있기 때문에 자동화 생산에 유리하다.

Fig. 5(c)에 나타낸 DRT 실험체는 부재의 폭방향(하중가력방향에 대하여 직각방향)으로 요철을 도입한 것이며, 요철의 폭은 약 15 mm, 깊이는 6~10 mm, 요철의 간격은 25 mm의 등간격을 갖도록 자동화 기계를 통해 처리되었다. Fig. 5(d)에 나타낸 DRT* 실험체는 DRT 실험체와 유사하지만, 요철 깊이가 2~4 mm, 요철 간격이 40 mm로 제작되어, DRT 실험체에 비해 요철의 깊이는 작고, 간격이 크게 제작된 것이다. 이 경우에도 별도의 기계장비를 통해 자동화 시공되었다. Fig. 5(e)에 나타낸 DWM 실험체는 DSS 실험체와 같이 표면처리를 하지 않고, Fig. 4에 나타낸 것과 같이, PHC 슬래브 측면의 전단기 공간에 직경이 6 mm인 100 mm×150 mm 규격의 와이어메쉬를 전단연결재로서 배치하였다. 이 방법은 PHC 슬래브의 측면 공간을 활용하여 수평전단강도를 향상시킬 수 있는 현장 적용성이 우수할 것으로 판단되어 고안된 방법이다. Fig. 5(f)에는 슬립성형방식으로 제작된 WRR 실험체를 나타내

었다. WRR 실험체는 20 mm×100 mm 크기의 외플형 사각홈이 있는 모듈화된 장비를 통하여 거친면 처리된 실험체이다.

3.3 실험방법

가력장치는 Fig. 6(a)와 같이 1000 kN 용량의 만능시험기를 사용하였으며, 0.005 mm/sec 속도의 변위제어 방식으로 재하 되었다. 실험체 제작시 Fig. 6(b)와 같이 PHC 슬래브와 CIP 콘크리트 계면에 합판을 사용하여 일부 구간을 디본딩(debonding) 처리함으로써 계면의 면적을 정

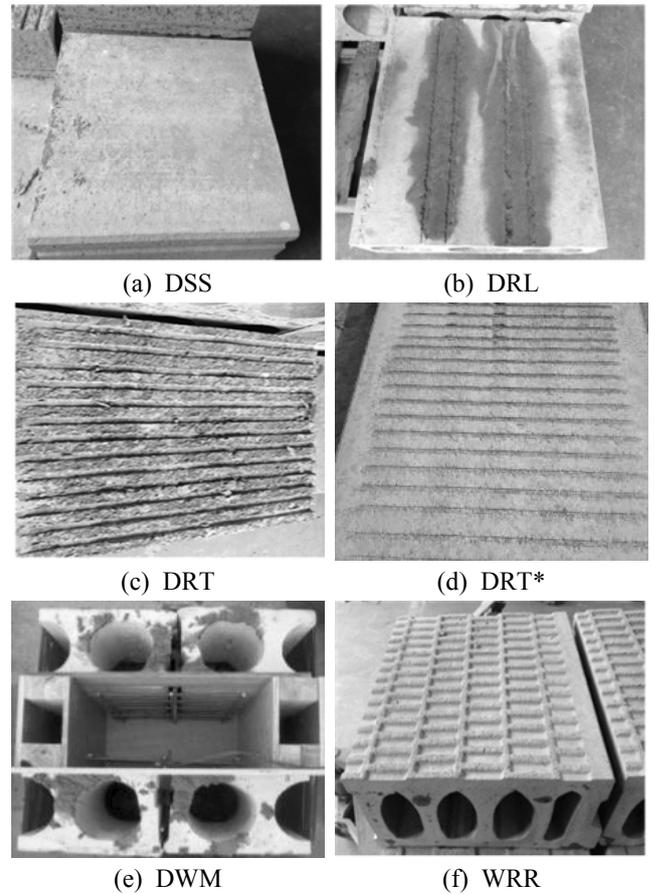


Fig. 5 Surface conditions of test specimens

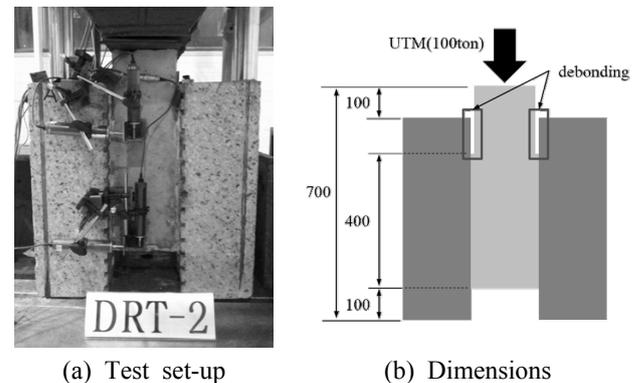


Fig. 6 Test set-up and loading apparatus

밀하게 제어하였다. 와이어 매쉬가 사용된 DWM 실험체를 제외한 모든 실험체들은 CIP 콘크리트와 PHC 슬래브 사이에 전단연결재 없이 순수 콘크리트만으로 접합되었으며, 계면이 분리되는 순간까지 가력한 후 실험을 종료하였다. 실험종료 후에는 실제 접촉면적을 실측하여 수평전단강도(v_{hm})를 평가하였다.

3.4 직접전단 실험결과

모든 직접전단 실험체들은 계면에서 전단파괴 되었으며, 직접전단실험으로부터 얻어진 실험결과들은 Table 6과 Fig. 7에 나타낸 바와 같다. 계측된 최대하중($V_{nh,max}$)을 PHC 슬래브와 CIP 콘크리트의 접촉면적(A_c)으로 나누어 수평전단강도(v_{hm})를 산정하였다. PHC 슬래브와 CIP 콘크리트의 접촉면적은 최초에 $400 \times 400 \text{ mm}^2$ 로 계획되었지만, 실험종료 후에 실측된 면적에서 계획대비 최대 7.5%의 차이가 있었기 때문에 이를 수평전단강도 산정에 직접 반영하였다.

거친면 처리가 되지 않은 DSS 실험체들 중에서 1개의 실험체는 가력 셋팅 중 발생한 약간의 충격에 의하여 한쪽 접촉면에서 계면이 분리되어 실험을 수행할 수 없었다. Table 6과 Fig. 7에 보이는 바와 같이 DSS 계열의 실험체는 모든 실험체들 중에서 가장 낮은 평균 0.09 MPa의 수평전단강도를 나타내었다. 이는 KCI-12에 제시된 수

평전단강도인 0.56 MPa의 16% 정도 밖에 미치지 못한 것이며, 압출성형방식으로 제작된 PHC 슬래브를 합성 슬래브로 적용하기 위해서는 적절한 표면처리가 요구된다는 것을 알 수 있다.

길이방향으로 거친면 처리된 DRL 계열의 실험체는 거친면처리 없는 DSS 계열의 실험체보다 약 2배정도 상승된 0.16 MPa의 수평전단 강도를 보여주었으나, 콘크리트 구조설계기준에 제시된 수평전단강도인 0.56 MPa에는 여전히 크게 미치지 못하는 것이었다. 다만, 거친면 처리 시에 길이방향 요철의 개수를 더 늘린다면 수평전단강도가 증가될 수 있는 가능성이 있을 것으로 판단된다.

폭방향으로 거친면 처리된 DRT 계열의 실험체는 모든 실험체 중 가장 높은 1.33 MPa의 수평전단강도를 나타내었으며, 이는 KCI-12에서 제시하고 있는 거친면 처리된 계면의 전단강도인 0.56 MPa 보다 약 2.4 배정도 큰 수평전단강도이다.

DRT 실험체에 비해 거친면 처리의 깊이나 간격이 불리하게 적용된 DRT* 실험체는 3개 실험체들 중에서 2개가 실험 셋팅 중 파손되어 오직 1개의 실험결과만을 얻을 수 있었으며, 0.36 MPa의 수평전단강도를 나타내었다. 이는 DRT 실험체강도의 약 25%, KCI-12에서 제시하고 있는 수평전단강도의 약 64% 수준이었다. 즉, 이 같은 결과는 PHC 부재의 수평전단강도는 요철의 방향뿐만 아니라 요철의 깊이와 폭에 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다. 따라서 EC2에서 규정하고 있는 것과 같이 더욱 명확하게 요철에 대한 세부내용을 규정할 필요가 있을 것이다.

거친면 처리없이 와이어매쉬를 전단연결재로 배치한 DWM 실험체는 DRT 실험체의 약 70%에 해당하는 0.92 MPa의 수평전단강도를 나타내었으며, 이는 KCI-12에서 제시하고 있는 수평전단강도인 0.56 MPa에 비하여 매우 큰 수평전단강도이다.

슬립성형방식으로 제작되어 외플형 표면처리가 도입된 WRR 실험체의 수평전단강도 역시 DWM 실험체의 수평전단강도와 유사한 수준인 0.92 MPa로 나타났으며, KCI-12에 제시된 수평전단강도를 만족하였다.

Table 6 Summary of test results

Specimens name	Test results				
	Surface A	Surface B	Max. Load	vh,max	vh,AVG
	(mm ²)	(mm ²)	(kN)	(MPa)	(MPa)
DSS-1	-	-	-	-	0.09
DSS-2	148000	148000	31.97	0.11	
DSS-3	155925	157950	21.57	0.07	
DRL-1	147825	151700	31.87	0.11	0.16
DRL-2	154050	150150	74.82	0.25	
DRL-3	152000	156000	41.48	0.13	
DRT-1	156000	160000	451.27	1.43	1.33
DRT-2	160000	158000	351.64	1.11	
DRT-3	158000	158000	458.92	1.45	
DRT*-1	-	-	-	-	0.36
DRT*-2	-	-	-	-	
DRT*-3	160000	160000	114.34	0.36	0.92
DWM-1	160000	160000	264.76	0.83	
DWM-2	160000	160000	273.00	0.85	
DWM-3	160000	160000	344.29	1.08	0.92
WRR-1	160000	160000	261.82	0.82	
WRR-2	159975	159975	372.92	1.16	
WRR-3	160000	160000	250.74	0.78	

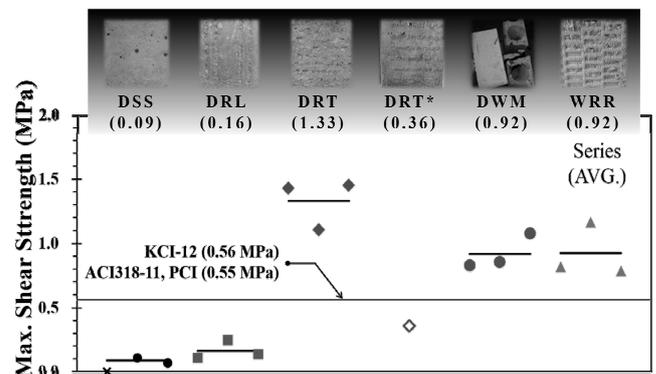


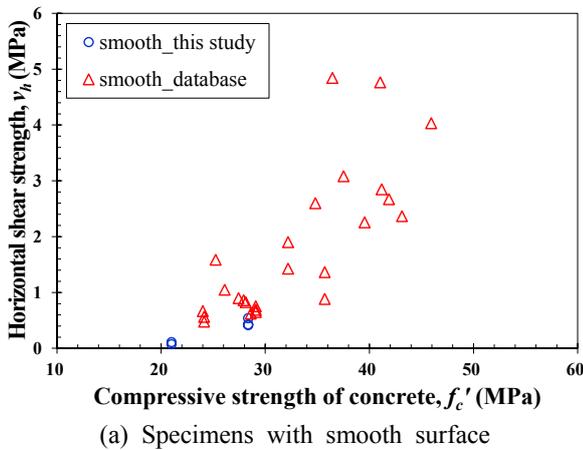
Fig. 7 Measured interfacial shear strength of test specimens

4. 수평전단강도 기준평가

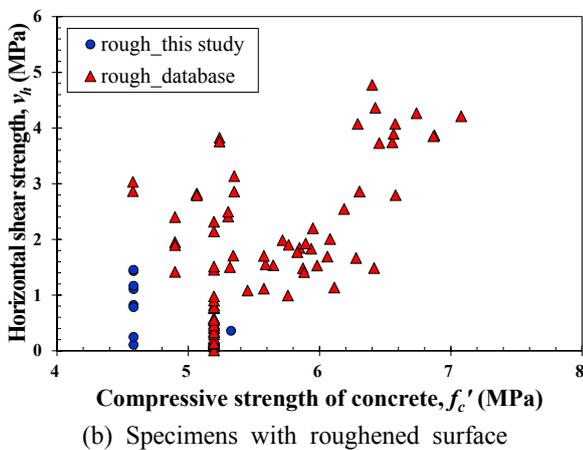
1950년대부터 합성콘크리트 부재의 수평전단강도에 대한 많은 실험적 연구가 많이 수행되었다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 따라서, 이 연구에서는 여러 문헌^{16,18-22)}으로부터 전단연결재가 배치되지 않은 직접전단(Push-off) 실험결과들을 추가적으로 수집하여, 합성부재의 계면 전단강도에 대한 기준식을 보다 더 명확히 평가하고자 하였다. 수집된 실험체들을 접합면이 매끈(smooth)한 실험체와 거친면 처리된(roughened) 실험체로 구분하였다. 매끈한 실험체들은 접합면이 미장(troweled)되어 있거나, 진동다짐만 적용된 상태의 실험체들이었다. 거친면 처리된 실험체들은 길이방향 또는 폭방향으로 거친면 처리되었거나, 전단키(shear key)가 시공된 경우 또는 모래분사(sandblast)를 통해 거친면이 형성된 실험체들이 포함되어 있다. 수집된 실험체들은 총 128개이며, 매끈한 접합면을 갖는 실험체는 30개, 거친 접합면을 갖는 실험체는 98개이다. Fig. 8에는 수집된 실험체들의 수평전단강도(v_h)를 콘크리트의 압축강도(f_{ck})에 대하여 나타내었다. 실험체마다 표면처리의 상세가 약간씩 다르기는 하지만, 이를 감안하더라도 매끈한 접합면을 갖는 실험체들과 거친 접합면을 갖는 실험체들 모두 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 수평전단강도가 증가하는 경향을 나

타냈다. BS8110은 콘크리트 압축강도를 수평전단강도에 반영하고 있으며, EC2도 콘크리트의 인장강도를 통하여 콘크리트의 강도를 반영한다. 다만, 한편으로는 콘크리트의 압축강도와 수평전단강도 사이에 큰 상관관계를 나타내지 않는다는 일부 연구결과가 있으며,²⁰⁾ 국내 및 북미의 기준에서도 수평전단강도에 콘크리트의 압축강도를 반영하고 있지 않다. 따라서, 압축강도의 영향에 대한 고려여부에 대하여 추가적인 성찰이 필요하며, 이 때 토핑콘크리트와 모재의 콘크리트 압축강도의 차이도 고려되어야 할 필요가 있을 것이다.

Fig. 9에는 수집된 실험결과들과 앞서 Fig. 2에서 설명한 국내·외 구조설계기준에서 제시하고 있는 수평전단강도를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에 나타낸 것과 같이, 매끈한 접합면을 갖는 경우에는 국내·외 구조설계기준은 대체로 보수적인 수평전단강도를 제시하고 있는 것을 알 수 있으며, 이 연구에서 수행된 실험체들 중에서 압축강도가 낮은 일부 실험체들이 다른 실험체들에 비해 매우 낮은 수평전단강도를 나타낸 것을 알 수 있다. Fig. 9(b)에는 거친 접합면을 갖는 실험체들의 수평전단강도를 설계기준식들과 비교하여 나타낸 것이다. AASHTO-LRFD 기준을 제외한 나머지 기준들은 CIP 콘크리트의 압축강도가 30 MPa 이상인 범위에서 안전측의 수평전단강도를 제

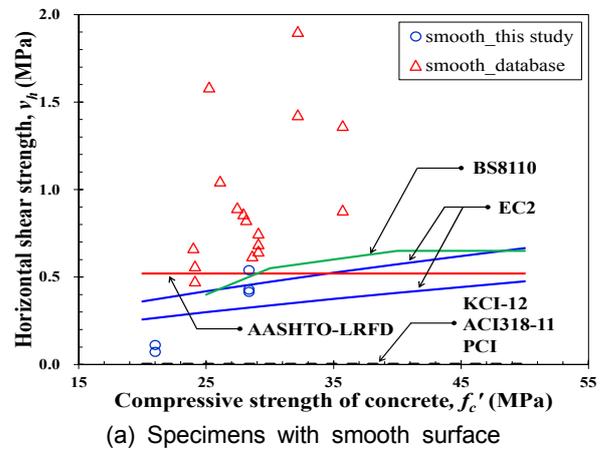


(a) Specimens with smooth surface

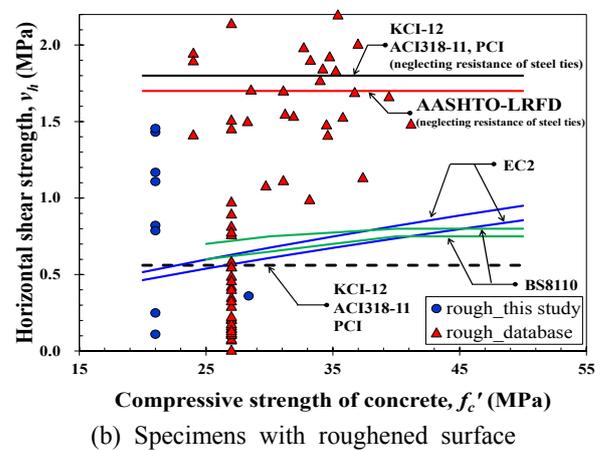


(b) Specimens with roughened surface

Fig. 8 Effect of surface condition and compressive strength of concrete on horizontal shear strength



(a) Specimens with smooth surface



(b) Specimens with roughened surface

Fig. 9 Evaluation of interfacial shear strengths specified in various design codes

공하고 있지만, 30 MPa 이하의 범위에서는 국내·외 구조 설계기준을 만족하지 못하는 데이터가 상당수 있는 것을 볼 수 있다.

위의 관찰로 부터, 표면처리가 되지 않은 경우에도 EC2에 제시하고 있는 것과 같이 적절한 수평전단강도를 부여할 필요가 있다는 것을 알 수 있으며, 표면처리가 된 경우에는 표면처리의 상세에 따라서 수평전단강도를 다르게 제시할 필요가 있다는 점을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 전단연결재가 배치되기 어려운 PHC 슬래브와 CIP 토평콘크리트의 합성성능의 개선을 위하여 다양한 접촉면 처리 방식을 고안하여 직접전단실험을 수행하였다. 또한 기존 문헌으로부터 수집한 실험결과를 활용하여 국내·외 설계기준에서 제시하고 있는 수평전단강도를 평가하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 압출성형방식으로 제작된 PHC 슬래브는 적절한 표면처리방식을 통하여 수평전단강도를 확보할 필요가 있다.
- 2) 폭방향 거친면이 도입된 DRT와 와이어매쉬가 배치된 DWM, 그리고 와플형 표면처리가 도입된 계열 실험체들은 설계기준에서 제시하고 있는 거친면의 수평전단강도인 0.56 MPa 이상의 강도를 보여주었으며, 현행국내 설계기준(또는 ACI318)에서 제시하고 있는 것과 같이 최소전단연결재를 배치하지 않더라도 충분한 요철깊이와 간격을 확보한다면 적절한 수평전단강도를 확보할 수 있다는 것을 실험적으로 확인하였다.
- 3) 길이방향으로 거친면 처리된 DRL와 매우 낮은 요철깊이로 폭방향 거친면 처리된 DRT* 계열은 현행 설계기준에서 제시하고 있는 수평전단강도를 만족하지 못하였으며, 따라서 요철의 방향, 깊이 및 간격에 대한 상세내용이 설계기준에 추가적으로 반영될 필요가 있다.
- 4) 수집된 실험결과들을 통하여 각국의 현행설계기준식들을 평가한 결과 접촉면이 매끈할 경우 현행설계기준은 전단강도를 안전측으로 평가하였으며, EC2와 같이 약간의 수평전단강도를 인정할 여지가 있다.
- 5) 접촉면에 의도적인 거친면 처리를 했을 경우 국내·외 기준에서 일부 비안전측의 결과를 제공하기 때문에 거친면 요철의 깊이 등에 대한 세부적인 상세를 추가적으로 규정할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A

2A2A02010512). 또한, 삼성물산의 재정적 지원에도 감사드립니다.

References

1. Kim, K. S., Lee, D. H., Park, M. K., and Im, J. H., *Development of Enhancement Techniques on Shear Strength of Hollow-core Slab and its Composite Action with Topping Concrete*, SAMSUNG C&T Technical Report, 2012, pp. 212.
2. Becker, R.J. and Buettner, D.R., "Shear Tests of Extruded Hollow Core Slabs", *PCI Journal*, Vol. 30, No. 2, 1985, pp. 40-54.
3. Hawkins, N.M. and Ghosh, S.K., "Shear Strength of Hollow-Core Slabs", *PCI Journal*, Vol. 51, No. 1, 2006, pp. 110-114.
4. Im, J.H., Park, M.K., Lee, D.H., Kim, K.S., Seo, S.Y., and Jang, S.Y., "Effect of Effective Prestress on Shear Capacity of Hollow-Core Slab Units", *Advanced Science Letter*, Accepted for Publication, 2012.
5. Mones, R.M. and Brena, S.F., "Hollow-Core Slabs with Cast-In-Place Concrete Toppings: A Study of Interfacial Shear Strength", *PCI Journal*, Vol. 58, No. 3, 2013, pp. 124-141.
6. Pajari, M., "Web Shear Failure in Prestressed Hollow Core Slabs", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 42, No. 4, 2009, pp. 83-104.
7. Palmer, K.D. and Schultz, A.E., "Factors Affecting Web-shear Capacity of Deep Hollow-Core Units", *PCI Journal*, Vol. 55, No. 2, 2010, pp. 123-146.
8. Palmer, K.D. and Schultz, A.E., "Experimental Investigation of the Web-shear Strength of Deep Hollow-Core Units", *PCI Journal*, Vol. 56, No. 3, 2011, pp. 83-104.
9. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code*, Kimoondang Publishing Company, 2012, pp. 342.
10. AASHTO LRFD, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2007.
11. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318M-11)*, American Concrete Institute, Detroit, 2011, pp. 503.
12. British Standard Institute, *Structural Use of Concrete - Part 1 Code of Practice for Design and Construction*, BS 8110-1: 1997, London, 1997, pp. 163.
13. European Committee for Standardization (CEN), *Eurocode 2: Design of Concrete Structure. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, EN 1992-1-1:2004, Brussels, 2004, pp. 225.
14. PCI Industry Hand Book Committee, *PCI Design Handbook*, 7th ed., Precast/Prestressed Concrete Institute, 2010.
15. Anderson, A.R., "Composite Designs in Precast and Cast-in-Place Concrete", *Progressive Architecture*, Vol. 41, No. 9, 1960, pp. 172-179.

16. Hanson, N.W., "Precast-Prestressed Concrete Bridges 2. Horizontal Shear Connections", *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, Vol. 2, No. 2, 1960, pp. 38-58.
17. Mattock, A.H. and Kaar, P.H., "Precast-Prestressed Concrete Bridges, 4 - Shear Tests of Continuous Girders", *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, Portland Cement Association, Vol. 3, No. 1, 1961, pp. 47-56.
18. Lee, S. S., Hong, S. Y., Park, K. S., and Bae, K. W., "Evaluation of Horizontal Shear Strength for Cotter Type Surface Roughness of Hollow Core Slab", *Journal of the architectural institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 28, No. 8, 2012, pp. 61-68.
19. Aziz, R.J., "Shear Capacity of Concrete Prisms with Interface Joints", *Journal of Engineering*, Vol. 16, No. 2, 2010, pp. 5084-5097.
20. Gohnert, M., "Horizontal Shear Transfer Across a Roughened Surface", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, No. 3, 2003, pp. 379-385.
21. Wallenfelsz, J.A., "Horizontal Shear Transfer for Full-Depth Precast Concrete Bridge Deck Panels", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006, pp. 111.
22. Djazmati, B. and Pincheira, J.A., "Shear Stiffness and Strength of Horizontal Construction Joints", *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 4, 2004, pp. 484-493.

요 약 프리스트레스트 중공(PHC) 슬래브는 장경간에 적합하도록 경량화된 효율적인 프리캐스트 부재이며, 국내·외에서 많이 사용되고 있다. 특히, 국내에서는 현장타설콘크리트와 같이 사용되는 합성슬래브 형태로 주로 적용되고 있다. 그러나, 압출성형 방식으로 제작되는 PHC 슬래브 부재는 매우 낮은 슬럼프의 콘크리트로 제작되어 타설 직후에도 표면경도가 높기 때문에 계면의 거친면 처리 및 전단연결재 배치가 어려운 단점이 있다. 이 연구에서는 PHC slab 부재와 토핑콘크리트 사이의 합성성능을 고찰하기 위하여 다양한 계면상태를 변수로 직접전단실험을 수행하였으며, 기존 실험결과를 수집하여 국내·외 수평전단강도 설계기준을 평가하였다.

핵심용어 : 프리스트레스트 중공 슬래브, 현장타설, 토핑콘크리트, 전단, 수평전단강도, 설계기준