초고성능 콘크리트 바닥판과 역T형 강거더의 합성보를 위한 스터드 및 퍼즐스트립 전단연결재에 관한 연구

이경찬¹⁾ · 조창빈²⁾ · 최은석²⁾ · 김지상^{3)*}

¹⁾한국철도기술연구원 고속철도연구본부 ²⁾한국건설기술연구원 인프라구조연구실 ³⁾서경대학교 토목건축공학과

Stud and Puzzle-Strip Shear Connector for Composite Beam of UHPC Deck and Inverted-T Steel Girder

Kyoung-Chan Lee,¹⁾ Changbin Joh,²⁾ Eun-Suk Choi,²⁾ and Jee-Sang Kim^{3)*}

¹⁾High-Speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

²⁾Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

³⁾Dept. of Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University, Seoul 136-704, Korea

ABSTRACT Since recently developed Ultra-High-Performance-Concrete (UHPC) provides very high strength, stiffness, and durability, many studies have been made on the application of the UHPC to bridge decks. Due to high strength and stiffness of UHPC bridge deck, the structural contribution of top flange of steel girder composite to UHPC deck would be much lower than that of conventional concrete deck. At this point of view, this study proposes a inverted-T shaped steel girder composite to UHPC deck. This girder requires a new type of shear connector because conventional shear connectors are welded on top flange. This study also proposes three different types of shear connectors, and evaluate their ultimate strength via push-out static test. The first one is a stud shear connector welded directly to the web of the girder in the transverse direction. The second one is a puzzle-strip type shear connector developed by the European Commission, and the last one is the combination of the stud and the puzzle-strip shear connectors. Experimental results showed that the ultimate strength of the transverse stud was 26% larger than that given in the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, but a splitting crack observed in the UHPC deck was so severe that another measure needs to be developed to prevent the splitting crack. The ultimate strength of the puzzle-strip specimen was 40% larger than that evaluated by the equation of European Commission. The specimens combined with stud and puzzle-strip shear connectors provided less strength than arithmetical sum of those. Based on the experimental observations, there appears to be no advantage of combining transverse stud and puzzle-strip shear connectors.

Keywords : shear connector, UHPC (ultra-high-performance-concrete), composite beam, bridge deck, inverted-T girder

1. 서 론

강도가 150 MPa 이상인 초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete, UHPC)는 기존의 콘크리트 재료에 관한 패러다임을 바꾸는 새로운 재료로 주목을 받고 있다. 높은 압축강도 및 인장강도 그리고 강한 내구성으로 인하여 UHPC를 교량 바닥판에 적용하는 연구¹⁻⁵⁾가 최근 활발히 수행되고 있으며, UHPC를 교량 바닥판에 적용함으로써 교량의 자중을 감소시키면서 바닥판의 수명을 확

기적으로 연장시킬 수 있음이 입증되고 있다. 특히 기존 교량의 노후한 바닥판을 UHPC 바닥판으로 교체하면 교량의 구조적 성능을 향상시킴과 동시에 바닥판의 내구 연한을 증대시킬 수 있는 장점이 있다.

UHPC 바닥판과 강재 거더를 이용하여 합성보를 구성함에 있어서, UHPC 바닥판은 기존의 보통 콘크리트보다 강성 및 강도가 월등히 높아 강재 거더 상부 플랜지의 구조적 역할을 대신할 수 있을 것이다. 이에 착안하여 이 연구에서는 강재 거더의 상부 플랜지를 없앤 역T형 거더를 Fig. 1과 같이 제안한다.

역T형 거더와 UHPC 바닥판을 합성하여 합성보를 구성할 경우, 상부플랜지의 부재로 인하여 전단연결재를 기존의 일반적인 합성보와 같이 상부 플랜지 위에 용접하여 설치할 수 없다. 따라서 UHPC 바닥판에 매립된 강

*Corresponding author E-mail : zskim@skuniv.ac.kr

Received September 13, 2013, Revised November 6, 2013,

Accepted December 20, 2013

©2014 by Korea Concrete Institute

Fig. 1 Schematic diagram of conventional composite girder and inverted-T composite girder

재 웨브에 직접 설치되는 형태의 새로운 전단연결재의 개발이 필요하다.

제안된 역T형 거더의 웨브에 설치할 수 있는 전단연결재는 여러 형태가 될 수 있다. 이 연구에서는 우선적으로 Fig. 1의 우측에 보인 바와 같이 웨브에 직접 스티드 용접하여 설치한 횡-스티드 전단연결재를 제안하며 그 적용성 및 성능을 검토하고자 한다.

최근 유럽에서 새로운 형태의 전단연결재를 사용한 Preco-beam⁶⁾을 개발하였다. Preco-beam은 상부 플랜지가 없는 역T형 거더에 콘크리트 거더 또는 바닥판을 합성한 구조로, H형강의 웨브를 절단하여 2개의 T형 거더를 제작할 때 웨브를 퍼즐스트립(puzzle-strip) 형태로 절단하여 절단면이 연속된 전단연결재로 직접 작용하는 방식으로 시공 편의성이 우수하다. Hegger 등⁷⁾은 약 110 MPa의 고강도 콘크리트에 매립된 퍼즐스트립 전단연결재의 정적 거동 및 피로 성능을 검토하였으며, Hechler 등⁸⁾은 퍼즐스트립형태의 연속된 전단연결재의 적용성을 검토하였다. Feldmann 등⁹⁾은 강도가 약 110 MPa 인 고성능 콘크리트에 매립된 퍼즐스트립 전단연결재의 피로 성능을 시험하였으며, Dudziński 등¹⁰⁾은 퍼즐스트립 전단연결재의 피로 성능을 보 실험을 통하여 평가하였다.

이 연구에서는 UHPC 바닥판과 역T형 거더를 합성한 구조에 적합한 전단연결재로 앞서 언급한 횡-스티드와 유럽에서 개발된 퍼즐스트립 그리고 이 2가지 형태의 전단연결재를 조합한 3가지 형태의 전단연결재를 push-out 정적 실험을 통하여 극한하중을 포함한 적용성을 평가하고자 한다.

2. 연구 내용

2.1 실험 계획

Table 1에 제시된 바와 같이 3가지 다른 형식의 전단연결재가 매립된 push-out 시험체를 형식별로 각 3개(A, B, C)씩 준비하였으며, Fig. 2 내지 4에 도시된 바와 같이 2면 슬래브 형태로 제작하였다. 실험은 현재로서는 유일하게 전단연결재의 push-out 시험에 대한 표준 시험 방법을 제시하고 있는 Eurocode-4¹⁵⁾에 제시된 방법에 따라 정적거동을 평가하였다.

역T형 강재 거더는 H형강(300×300×10×15)의 웨브 중앙을 중방향으로 절단하여 제작하였다. UHPC는 강도 및

Table 1 Push-out test specimens

Specimens	Deck thickness (mm)	Stud		Puzzle-strip		EA
		h (mm)	d (mm)	h (mm)	R (mm)	
PS	100	100	22	-	-	3
PZ	100	-	-	40	10	3
PSZ	100	100	22	40	10	3

Fig. 2 Push-out specimen for lateral stud shear connector (PS) (unit: mm)

Table 2 Mix proportions of K-UHPC

w/b ratio	Cement	Silica fume	Filler	Fine aggregate	Water reducer	Steel fiber
0.2	1.0	0.25	0.3	1.1	0.016	16.5 mm 1% 19.5 mm 1%

강성이 우수하여 기존 콘크리트 바닥판의 최소 두께인 150 mm 보다 얇게 바닥판을 구성할 수 있으므로, 이 연구의 바닥판 두께는 100 mm로 결정하였다.

바닥판은 설계기준압축강도 180 MPa, 설계기준균열발생강도 9.5 MPa 및 설계기준인장강도 13 MPa의 물성치를 제공하는 한국건설기술연구원에서 개발한 초고성능콘크리트인 K-UHPC¹¹⁻¹⁴⁾를 이용하였고, 철근은 사용하지 않았다. 구체적인 배합은 Table 2에 제시된 바와 같으며, 강섬유는 길이가 각각 16.5 mm와 19.5 mm인 섬유를 콘크리트 부피에 대한 비율로 각 1%씩 혼입하였다. 실험

Fig. 3 Push-out specimen for puzzle-strip shear connector (PZ) (unit: mm)

Fig. 4 Push-out specimen for lateral stud and puzzle-strip shear connector (PSZ) (unit: mm)

평균 압축강도는 200 MPa, 실측 평균 인장강도는 18 MPa, 그리고 탄성계수는 4.5×10^5 MPa로 기준값을 상회하였다.

횡방향 스티드를 웨브에 용접한 시험체(PS)는 H형강의 웨브를 절단하기 전에 각 바닥판에 4개씩의 스티드가 매립되도록 총 8개의 스티드를 용접하였다. 이때 스티드 및 웨브로 인한 콘크리트의 탈락을 고려하여 최소 25 mm의 피복두께를 확보하였다.

퍼즐스트립 전단연결재 시험체(PZ)는 H형강의 웨브를 절단할 때 Fig. 3에 보인바와 같은 퍼즐 모양으로 절단하여 절단과 동시에 전단연결재가 형성되도록 하였다. 퍼즐 스트립과 횡방향 스티드가 동시에 설치된 시험체(PSZ)는 모재 용융으로 인한 잔류응력을 최소화하고자 스티드를 먼저 용접한 이후 퍼즐 모양으로 웨브를 절단하였다.

스티드는 AWS.D 1.1에 제시된 Type B에 해당하는 요구조건인 인장강도 450 MPa, 항복강도 350 MPa를 만족하는 제품을 사용하여 스티드건으로 용접하였다.

2.2 실험 결과

Eurocode-4^{15,16)}에서는 실험에서 얻은 최대하중 즉 극한하중(P_{max})을 10% 감소시킨 값을 특성 극한강도(P_{Rk})로 정의하며, 특성 극한강도(P_{Rk})에서의 최대 상대슬립을 다시 10% 감소시킨 값을 특성 상대슬립(δ_{uk})으로 정의한다.

Table 3 Push-out test results

Specimens		P _{max} (kN)	P _{Rk} (kN)	δ _{uk} (mm)
PS	A	1918	1726	11.6
	B	1985	1786	11.3
	C	1850	1665	14.3
PZ	A	1418	1276	13.8
	B	1427	1285	14.3
	C	1520	1368	16.0
PSZ	A	2014	1813	14.5
	B	1936	1743	11.6
	C	2014	1812	13.2

전단연결재의 연성도 기준으로 특성 상대슬립(δ_{uk})이 6 mm 이상일 것을 요구한다.

Eurocode-4¹⁵⁾에서는 극한하중(P_{max})과 특성 극한강도(P_{Rk})는 모두 한 개의 전단연결재에 대한 값으로 표기하도록 하였으나, 이 연구에서는 시험체마다 전단연결재 형식이 서로 달라 하나의 시험체 전체에 대한 극한하중(P_{max})과 이를 10% 감소시킨 특성 극한강도(P_{Rk})로 표시하였다. 이 연구의 실험에 따른 3종류의 시험체(PS, PZ, PSZ) 각각에 대한 극한하중(P_{max}), 특성 극한강도(P_{Rk})와 특성 상대슬립(δ_{uk})의 실험 결과는 Table 3에 보인 바와 같다. 모든 시험체의 특성 상대슬립(δ_{uk})은 연성도 기준인 6 mm를 크게 상회하였으므로 제안된 전단연결재 모두 연성도 기준을 충분히 만족하는 것으로 평가되었다.

2.2.1 횡방향 스티드 시험체 (PS)

보통의 스티드 전단연결재의 정적 강도는 AASHTO LRFD¹⁷⁾에 제시된 아래 식 (1)에 따라 평가된다. 이 식에서 콘크리트 강도(f'_c) 및 탄성계수(E_c)로 표현된 좌변은 콘크리트 파쇄가 지배적인 거동을 나타내고, 전단연결재의 극한강도(F_u)로 표현되어 최대값을 제공하는 우변은 스티드를 둘러싼 콘크리트 강도가 높아 스티드 자체의 파단이 지배적인 거동을 의미한다. 위 두 가지 거동의 경계가 되는 콘크리트 강도는 대개 40 MPa 정도이므로, 콘크리트 강도가 150 MPa를 상회하는 UHPC에 기존의 스티드 전단연결재의 강도 평가식을 적용하는 경우 스티드 전단연결재의 정적 강도는 언제나 스티드 파단 거동에 지배되어 콘크리트 강도와 관계없이 스티드의 단면적(A_{sc})과 극한강도(F_u)의 곱으로 $A_{sc}F_u$ 로 평가된다.

$$Q_r = \phi_{sc} Q_n = \phi_{sc} 0.5 A_{sc} \sqrt{f'_c E_c} \leq \phi_{sc} F_u A_{sc} \quad (1)$$

여기서, Q_r = 전단연결재의 정적 강도; ϕ_{sc} = 저항계수(0.85); A_{sc} = 스티드 줄기의 단면적; f'_c = 콘크리트 공칭 압축강도; E_c = 콘크리트 탄성계수; F_u = 스티드 공칭 인장강도이다.

이 연구에서 사용한 스티드는 직경(d)이 22 mm이고,

공칭 극한강도(F_u)가 450 MPa 이므로, 저항계수를 고려하지 않고 식 (1)을 적용하면 스티드 한 개가 제공하는 예상 극한강도($A_{sc}F_u$)는 171 kN이다. 각 시험체의 작용하중과 상대슬립 사이의 이력곡선을 Fig. 6에 도시하였으며, 이때 작용하중은 식 (1)에 따른 예상 극한강도 171

Fig. 5 Longitudinal crack at left deck of PS-A specimen

Fig. 6 Relative slip vs. ratio of applying force to design ultimate force for PS specimens

Table 4 Test results with respect to design ultimate load

Specimens		$1 - P_{\max}/P_{Rk}$	Average	Definition of design ultimate load (P_{Rk})
PS	A	26 %	26 %	Eq. (1) ($A_{sc}F_u$)
	B	31 %		
	C	22 %		
PZ	A	36 %	40 %	Eq. (3)
	B	37 %		
	C	46 %		
PSZ	A	3 %	1 %	Eq. (1)($A_{sc}F_u$) + Eq. (3)
	B	-1 %		
	C	3 %		

kN에 대한 비율로 표시하였다. 웨브와 콘크리트 마찰에 의한 기여를 무시한다면 각 전체 시험체의 하중을 스티드 개수로 나눈 값이 하나의 스티드가 지지한 하중이라 할 수 있으며, 이는 Table 4에 보인바와 같이 AASHTO LRFD¹⁷⁾의 평가식에 따른 예상 극한강도($A_{sc}F_u$)를 각각 26%, 31%, 22% 상회하는 것으로 평가된다. 따라서 UHPC 바닥판에 매립된 횡방향 스티드 전단연결재의 정적 극한강도는 AASHTO LRFD¹⁷⁾에서 제안된 평가식을 평균 26% 상회하므로, 보수적으로 설계할 때 AASHTO LRFD¹⁷⁾에 제안된 기존의 평가식(식 (1))을 충분히 적용할 수 있음을 확인하였다.

위에 보인바와 같이 횡방향 스티드 전단연결재가 하중 및 연성도 수치에서 우수한 결과를 보였음에도 불구하고, push-out 시험 중 작용하중이 1200 kN일 때 Fig. 5에 보인바와 같이 양쪽 바닥판에서 종방향 쪼갬 균열이 발생하기 시작하였으며, 이후 하중 증가시 계속해서 강점유가 끊어지면서 균열이 진전되었다. 균열이 발생하기 시작한 작용하중은 극한 작용하중(1918 kN)의 62%이며, 설계극한하중($A_{sc}F_u=1368$ kN)의 87%이다. UHPC 바닥판에 횡스�티드를 설치한 전단연결재는 설계강도 이하의 하중에서도 바닥판에 쪼갬 균열이 발생하였으므로, 기존의 설계식을 그대로 적용한다 할지라도 균열 문제를 반드시 해결할 필요가 있다.

웨브 단부 및 스티드에서 콘크리트 피복두께가 25 mm로 비교적 적은 편이었기 때문에 이로 인하여 쪼갬 균열이 발생한 것으로 보이며, 피복두께를 더 두껍게 하여 균열 문제를 해결할 수 있을 것이다. 다만 피복두께를 증가시키면 그로 인한 바닥판 두께 또한 증가하게 될 수 있으므로, 대안으로 철근 또는 철근메쉬를 전단연결재 주변부에 설치하여 쪼갬 균열을 제어할 수도 있을 것이다.

2.2.2 퍼즐스트립 시험체 (PZ)

European Commission의 Preco-Beam에 관한 기존연구⁶⁾에서 퍼즐스트립(puzzle-strip) 전단연결재의 정적 강도를 아래 식 (2)에 보인 바와 같이 평가하도록 제안하였으며, 전단연결재에 상향력(uplift)이 없는 경우에는 식 (3)과 같이 단순화될 수 있다고 하였다. Push-out 시험은 바닥판에 휨모멘트가 가해지지 않기 때문에 전단연결재에 가해지는 상향력이 없으므로, 이 연구에서는 식 (3)에 따라 퍼즐스트립 전단연결재의 정적 강도를 평가하였다.

$$P_{Rk} = \frac{f_y \cdot t_w \cdot b_i^2}{\sqrt{\left(4h_{s,i} + \frac{h_i'(b_2 + b_3)}{e_x}\right)^2 + 3b_i^2}} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

$$P_{Rk} = \frac{f_y \cdot t_w \cdot b_i^2}{\sqrt{16h_{s,i}^2 + 3b_i^2}} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

여기서,

f_y = 항복인장강도(MPa), t_w = 웨브두께(mm),

$b_i = b_1 - (2 - \sin\alpha)R$ (mm), $h_{s,i} = h_s - (1 - \cos\alpha)R$ (mm),

e_x =연결재간 거리, α = 곡률반경(push-out 시험시 70°)이다.

시험체의 단면수치 및 물성치는, $f_y = 325$ MPa(강종 SM490), $t_w = 10$ mm, $b_1 = 145$ mm, $R = 10$ mm, $h_s = 15$ mm, $\alpha = 70^\circ$ (push-out 시험), $h_{s,i} = 7.59$ mm 이므로, 식 (3)에 따라 계산된 특성 극한강도(P_{Rk})는 235 kN이다. Table 3에 기재된 이 연구의 실험 결과는 4개의 퍼즐스트립 연결재 전체에 대한 값이므로 이를 연결재의 하나의 값으로 변환하고 다시 10% 감소시켜 특성 극한강도(P_{Rk})로 환산하면 각각 319 kN, 321 kN, 342 kN이다. 이는 식 (3)에 따른 설계강도 235 kN을 각각 36%, 37%, 46% 상회한다. 각 시험체의 작용하중과 상대슬립 사이의 이력곡선을 Fig. 8에 도시하였으며, 작용하중은 식 (3)에 따른 극한강도 235 kN에 대한 비율로 표시하였다. Fig. 8에서 보듯이 기존 연구에서 제시된 평가식 (3)을 UHPC에 매립된 전단연결재에 적용하면 그 결과가 매우 보수적임을 확인할 수 있으며, Table 4에 보인 바와 같이 실측 강도가 예측치보다 평균 40% 더 큰 값을 제공했다.

퍼즐스트립 시험체 또한 중방향 쪼갬 균열이 Fig. 7에 보인바와 같이 발생하였다. 균열은 재하하중이 1300 kN

일때부터 발생하기 시작하였으며, 이는 최대극한 작용하중(1418 kN)의 90%이고, 식 (3)에 따른 설계극한하중(940 kN)의 1.38배이다. 따라서 기존 연구의 설계식에 따라 전단연결재를 설계할 경우 25 mm의 퍼복두께만으로도 쪼갬 균열이 발생하지 않는다 할 수 있지만, 퍼즐스트립 연결재가 실제로 제공할 수 있는 극한 하중을 모두 사용하도록 설계에 반영할 경우에는 균열을 제어하기 위하여 퍼복두께를 증가시키거나 퍼즐스트립의 홀에 철근을 삽입할 필요가 있을 것이다.

2.2.3 횡방향 스티드 + 퍼즐스트립 시험체 (PSZ)

마지막 시험체는 횡방향 스티드와 퍼즐스트립을 Fig. 4에 보인바와 같이 동시에 설치한 전단연결재로, 스티드 6개와 퍼즐스트립 4개가 조합되어 복합적으로 작용한다. 각각의 전단연결재가 산술적으로 누적된 강도를 제공한다고 가정하면, 6개의 스티드는 식 (1)로부터 각각 $A_{sc}F_u = 171$ kN의 극한 강도를 제공하고, 4개의 퍼즐스트립은 식 (3)으로부터 각각 235 kN의 극한 강도를 제공한다. 6개의 스티드와 4개의 퍼즐스트립에서 제공되는 극한강도를 산술적으로 합한 예상 극한하중은 1965 kN이다.

실제 실험 결과 시험체의 극한 하중은 Table 3 및 Table 4에 보인바와 같이 예상극한하중(1965 kN)과 대체

Fig. 7 Longitudinal crack at left deck of PZ-A specimen

Fig. 9 Longitudinal crack at left deck of PSZ-A specimen

Fig. 8 Relative slip vs. ratio of applying force to design ultimate force for PZ specimens

Fig. 10 Relative slip vs. ratio of applying force to expected ultimate load for PSZ specimens

로 일치하여 각각 3%, -1%, 3%의 차이를 나타냈다. 상대 슬립과 작용하중의 예상 극한하중과의 비율의 이력곡선은 Fig. 10에 보인바와 같다. 횡방향 스티드(PS)와 퍼즐스트립(PZ) 전단연결재 실험 결과는 설계식 (1) 및 (3)에 따른 예상 극한 강도를 각각 평균적으로 26% 및 40% 상회하였으나, 횡방향 스티드와 퍼즐스트립을 조합한 전단연결재는 그 결과가 예측치와 유사하였으므로, 2가지 다른 종류의 전단연결재를 동시에 설치한 조합으로 인하여 각 전단연결재의 극한 강도는 조합하지 않은 경우와 비교하여 오히려 저하된 것으로 볼 수 있다.

이 실험체도 다른 시험체와 마찬가지로 바닥판에 쪼갬 균열이 발생하였다. 작용하중이 1180 kN일 때 쪼갬 균열이 좌측 바닥판에서 발생했으며, 1580 kN일 때 우측 바닥판에도 쪼갬 균열이 시작되었다. 이는 실제 극한하중은 58% 및 78%의 작용 하중에서 균열이 시작된 것이므로, 횡방향 스티드만이 설치된 시험체(PS)와 마찬가지로 균열 발생시점이 하중 이력 전체에서 비교적 빨리 나타났다고 볼 수 있다. 따라서 횡방향 스티드와 퍼즐스트립 전단연결재를 모두 설치한 것은 그 조합으로 인한 상승효과가 없다고 볼 수 있다.

3. 결 론

초고성능 콘크리트(UHPC)를 이용한 교량 바닥판에 합성되는 강재로 역T형 거더를 제안하며, 상부 플랜지가 없는 역T형 합성거더에 적합한 전단연결재로 횡방향 스티드, 퍼즐스트립 그리고 이 둘을 조합한 형식 등 세 가지 종류의 전단연결재의 정적 거동을 push-out 실험을 통하여 검증하였다. 이를 통하여 구체적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 세 가지 시험체 모두 Eurocode-4¹⁶⁾에서 제시한 연성도 기준을 충분히 만족하였다.
- 2) 횡방향 스티드 전단연결재의 정적 강도는 AASHTO LRFD¹⁷⁾에 제시된 강도 평가식과 비교하여 평균 26% 더 큰 결과를 보였으나, 최대 극한하중의 62%의 하중에서 바닥판 쪼갬 균열이 발생하기 시작하였다.
- 3) 퍼즐스트립 전단연결재의 정적 강도는 EUR 25321 최종보고서⁶⁾에 제시된 강도 평가식과 비교하여 평균 40% 더 큰 결과를 보였으므로, 기존 평가식은 UHPC 바닥판에 적용하기에는 지나치게 보수적인 것으로 평가되었다. 최대 극한하중의 90%의 작용하중에서부터 발생하기 시작하였으므로, 횡방향 스티드보다 쪼갬 균열에 유리한 것으로 평가되었다.
- 4) 횡방향 스티드와 퍼즐스트립을 조합한 전단연결재는 각각의 강도 평가식을 산술 합산한 결과와 1% 차이로 거의 동일한 결과를 보였으나, 앞의 실험으로부터 얻은 각 전단연결재의 실제 극한 성능을 산술적으로 합한 것보다는 크게 작았으므로 횡방향

스티드와 퍼즐스트립의 조합으로 인한 상승효과는 없었다. 또한 최대 극한하중의 58%의 작용하중에서 바닥판 쪼갬 균열이 발생하기 시작하였다.

- 5) 이 연구의 결과를 종합하면, UHPC 바닥판과 역T형 강거더를 합성하기 위한 전단연결재로 횡방향 스티드를 사용할 수 있으나, 바닥판의 쪼갬 균열이 예상되므로 이에 대하여 엄밀하게 검토 대응하여야 한다. 또한 퍼즐스트립 전단연결재를 적용하는 것도 가능하며, 이때 기존에 제시된 평가식으로 적용할 경우 매우 보수적인 설계가 될 수 있음에 유의하여야 한다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술연구개발사업의 연구비지원(압축강도 80~180 MPa급 맞춤형 SUPER 콘크리트 재료 및 구조물 기술 개발 연구단, SUPER Structure 2020) 및 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)(No. 20111010100030)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. John, H. and George, S., *The Implementation of Full Depth UHPC Waffle Bridge Deck Panels*, Federal Highway Administration Highways for LIFE Technology Partnerships Program, 2010.
2. Harris, D. K. and Roberts-Wollmann, C. L., *Characterization of the Punching Shear Capacity of Thin Ultra-High Performance Concrete Slabs*, Final Report, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 2005.
3. Naaman, A. E. and Chandrangsou, K., "Innovative Bridge Deck System Using High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 1, 2004, pp. 57-64. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/12998>)
4. Naaman, A. E., Likhitrungsilp, V., and Parra-Montesinos, G., "Punching Shear Response of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Slabs," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 2, 2007, pp. 170-179. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/18529>)
5. Toutlemonde, F., "Fatigue Performance of UHPFRC Ribbed Slab Applied as a Road Bridge Deck Verified According to the Eurocodes," *Proceedings of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions*, Tours, France, 2007, pp. 1191-1200.
6. European Commission, EUR 25321-Prefabricated Enduring Composite Beams Based on Innovative Shear Transmission (Preco-Beam), RFSR-CT-2006- 00030, Final Report, 2009.
7. Hegger, J., Feldmann, M., Rauscher, S., and Hechler, O., "Load-Deformation Behavior of Shear Connectors in High Strength Concrete Subjected to Static and Fatigue Loading," *IABSE Symposium Report Budapest 2006*:

Responding to Tomorrow's Challenge in Structural Engineering, IABSE, 2006, pp. 17-24.

8. Hechler, O., Berthelémy, J., Lorenc, W., Seidl, G., and Viefhues, E., "Continuous Shear Connectors in Bridge Construction," *International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete VI*, 2008, pp. 78-91.
9. Feldman, M., Hechler O., Hegger, J., and Rauscher S., "Fatigue Behavior of Shear Connectors in High Performance Concrete," *International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete VI*, 2008, pp. 78-91.
10. Dudziński, W., Pękalski, G., Harnatkiewicz, P., Kopczyński, A., Lorenc, W., Kożuch, M., and Rowiński, S., "Study on Fatigue Cracks in Steel-Concrete Shear Connection with Composite Dowels," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, 2011, pp. 839-858.
11. Korea Institute of Construction Technology (KICT), *Development of Design and Construction System Technology for Hybrid Cable Stayed Bridge*, KICT 2011-076, KICT, Korea, 2011 (in Korean).
12. Korea Concrete Institute, *Design Recommendations for Ultra-High Performance Concrete K-UHPC*, KCI-M-12-003, Korea, 2012 (in Korean).
13. Yang, I. H., Joh, C., Lee, J. W., and Kim, B. S., "Torsional Behavior of Ultra-High Performance Concrete Squared Beams," *Engineering Structures*, Vol. 56, 2013, pp. 372-383. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.027>)
14. Park, J. S., Kim, Y. J., Cho, J. R., and Jeon, S. J., "Characteristics of Strength Development of Ultra-High Performance Concrete according to Curing Condition," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 3, 2013, pp. 295-304 (in Korean). (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.3.295>)
15. CEN, 1994-4-4 *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures*, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, 2004.
16. CEN. 1994-2 *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures*, Part 2: General Rules and Rules for Bridges, 2005.
17. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th Edition, Washington, D.C., 2007.

요 약 초고성능 콘크리트(UHPC)의 높은 강도 및 내구성으로 인하여 교량 바닥판에 UHPC를 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. UHPC 바닥판은 강도 및 강성이 기존 콘크리트보다 월등히 높아 합성된 강재 거더 상부 플랜지의 구조적 역할을 대신할 수 있을 것이므로, 이 연구에서는 상부 플랜지를 생략한 역T형 거더를 UHPC 바닥판과 합성한 형식을 제안하고자 한다. 역T형 거더를 적용함에 있어 상부플랜지에 전단연결재를 용접하는 방식으로 전단연결재를 설치할 수 없으므로, 새로운 형식의 전단연결재의 개발이 필요하다. 이 연구에서는 3가지 형식의 전단연결재를 제안하고 이들의 정적 극한강도를 실험적으로 평가하였다. 첫 번째 형식은 웨브에 스티드를 횡방향으로 직접 용접한 전단연결재이고, 두 번째는 유럽에서 개발된 퍼즐스트립 형식의 전단연결재이며, 마지막은 횡방향 스티드와 퍼즐스트립을 조합한 전단연결재이다. 실험 결과 횡방향 스티드는 AASHTO LRFD에 제시된 기존 스티드 전단연결재의 강도 설계식 보다 평균 24% 크게 나타났으나, 바닥판에 쪼갬 균열이 현저히 발생하여 이를 방지하기 위한 새로운 대책이 필요한 것으로 나타났다. 퍼즐스트립은 기존 유럽의 연구에서 제안한 극한강도 평가식 보다 40% 큰 강도를 보여, 기존의 평가식이 지나치게 보수적인 것으로 나타났다. 마지막으로 2가지를 조합한 형식의 전단연결재의 극한강도는 각각의 전단연결재의 극한강도를 산술적으로 합한 것보다 작은 극한 강도를 보였고 바닥판에 균열 또한 현저하였으므로, 조합에 따른 상승효과를 기대할 수 없었다.

핵심용어 : 전단연결재, UHPC(초고성능 콘크리트), 합성보, 바닥판, 역T형 거더