



초고성능 콘크리트 바닥판을 위한 스테드 전단연결재의 정적 거동

이경찬¹⁾ · 곽종원²⁾ · 박상혁³⁾ · 김지상^{4)*}

¹⁾한국철도기술연구원 고속철도연구본부 ²⁾한국건설기술연구원 인프라구조연구실
³⁾한국건설생활환경시험연구원 ⁴⁾서경대학교 토목건축공학과

Static Behavior of Stud Shear Connector for UHPC Deck

Kyoung-Chan Lee,¹⁾ Jong-Won Kwark,²⁾ Sang-Hyeok Park,³⁾ and Jee-Sang Kim^{4)*}

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

²⁾Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 411-712, Korea

³⁾High-tech Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul 153-803, Korea

⁴⁾Department of Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University, Seoul 136-704, Korea

ABSTRACT Typical composite girder has been composed with conventional concrete deck and steel girder. Recently, ultra-high-performance-concrete (UHPC) deck is proposed in order to enhance durability and reduce weight of deck as well as to increase stiffness and strength of the composite girder. This study investigates that a headed stud is still compatible as a shear connector for the UHPC deck and steel girder composite beam. Twelve push-out specimens are prepared to evaluate the static strength of stud shear connectors embedded in the UHPC deck. The test program proves that the static strength of the stud shear connectors embedded in UHPC well meets with design codes described in AASHTO LRFD. Chosen experimental variables are aspect ratio of height to diameter of stud, thickness of deck and thickness of concrete cover over the head of stud. From the test program, aspect ratio and cover thickness are investigated to mitigate the regulations of the existing design codes. The minimum aspect ratio and the minimum cover thickness given in AASHTO LRFD are four and 50mm, respectively. This limitation hinders to lower the thickness of the UHPC deck. The results of the experiment program give that the aspect ratio and the cover thickness can be lower down to three and 25mm, respectively. Eurocode-4 regulates characteristic relative slip at least 6mm. However, test results show that stud shear connectors embedded in UHPC provide the characteristic relative slip only about 4mm. Therefore, another measures to increase ductility of stud should be prepared.

Keywords : headed stud, shear connector, UHPC (ultra-high-performance-concrete), composite beam, bridge deck

1. 서 론

초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete, UHPC)는 강섬유 및 혼화재료를 사용하여 연성 및 강도를 크게 증가시킨 건설재료로서 일반적으로 압축강도가 150 MPa 이상인 콘크리트를 이른다. 한국건설기술연구원에서는 K-UHPC⁽¹⁻⁴⁾로 명칭된 고유의 UHPC를 개발한 바 있으며, 설계기준압축강도 180 MPa, 설계기준균열발생강도 9.5 MPa 및 설계기준인장강도 13 MPa의 물성치를 제공한다.

현재 세계적으로 초고성능 콘크리트(UHPC)를 교량에 적용하는 다양한 방법에 관하여 연구가 활발히 전개되고

있다. 교량 거더를 UHPC로 제작^{5,6)}하기도 하고, 프리캐스트 바닥판의 연결부를 모르타르 대신 UHPC로 충전⁷⁾하기도 하였다. 이와 더불어 최근에는 교량 바닥판 자체를 UHPC로 제작⁸⁻¹²⁾하여 바닥판의 자중을 감소시키고 내구성을 향상시키는 방안도 큰 관심을 모으고 있다.

UHPC 바닥판을 교량에 적용하는 경우 이에 대응하는 거더는 강재 거더이거나 또는 바닥판과 동일한 UHPC 거더가 될 것이다. UHPC 거더를 채택하는 경우 바닥판과 동일한 재료이기 때문에 일반적인 UHPC의 연결재를 통하여 연결할 수 있다. 하지만 강재 거더를 채택하는 경우 서로 다른 물성치를 갖는 바닥판과 거더를 연결하기 때문에 전단연결재가 필수적으로 수반된다.

보통 콘크리트와 강재 거더 그리고 이들을 일체 거동하도록 연결하는 전단연결재로 구성된 강-합성 구조는 1960년대 이래 널리 사용되고 있다. 이때 사용되는 전단연결

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

Received September 6, 2013, Revised March 27, 2014,

Accepted April 24, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

재료는 채널(channel), 스티드(headed stud) 및 퍼포본드(Perfo-bond) 등의 형식이 있으나, 대부분의 경우에 작업의 효율성과 연성도에 장점을 가지는 스티드형을 사용하고 있다. 이 연구에서는 UHPC 바닥판을 강재 거더와 합성한 합성 거더를 구성함에 있어, 스티드 전단연결재의 적용성을 검토하고 정적 강도 및 제반 사항에 대하여 검토하고자 한다.

스티드 전단연결재의 정적 강도는 실험적 연구 결과에 따른 경험식으로 평가하고 있는데, 이는 1971년에 보고된 Ollgaard 등¹³⁾의 연구에 근거를 두고 있다. 식 (1)은 AASHTO LRFD¹⁴⁾에 제시된 전단연결재의 정적 강도평가식이며, 식 (2)는 Eurocode-4¹⁵⁾에 제시된 식이다.

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

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 인장강도.

$$P_{Rd} = 0.29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} / \gamma_v \leq 0.8 F_u A_{sc} / \gamma_v \quad (2)$$

$$\alpha = 0.2(h/d+1) \quad \text{for } 3 \leq h/d \leq 4$$

$$\alpha = 1 \quad \text{for } h/d > 4$$

여기서, P_{Rd} = 전단연결재의 설계 정적 강도; h = 스티드 전체 높이; d = 스티드 직경; f_{ck} = 콘크리트 특성 압축강도; E_{cm} = 콘크리트 탄성계수; γ_v = 부분계수(1.25).

전단연결재의 정적 강도는 식 (1) 및 (2)에 제시된 바와 같이 콘크리트 강도가 일정 수준 이상이면 콘크리트 강도와 관계없이 스티드의 극한 강도에 지배된다. 좌변은 콘크리트 파쇄가 지배적인 거동을 나타내고, 최대값을 제공하는 우변은 스티드를 둘러싼 콘크리트 강도가 충분하여 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 콘크리트 강도와 관계없이 스티드의 극한강도에 지배되게 된다. 하지만 이 경험식의 근거가 되는 Ollgaard 등¹³⁾의 연구는 콘크리트 강도가 18~35 MPa인 경우에 대하여만 평가하였기 때문에 기존의 식을 UHPC에 매립된 스티드에 그대로 적용하는 것에 대하여 검증된 바가 없다.

이 연구에서는 UHPC 바닥판에 매립된 스티드 전단연결재의 정적 강도를 평가하고 이를 기존 전단연결재의 강도 평가식과 비교 평가하고자 한다. 이와 더불어, 기존 스티드 전단연결재의 설계에서 제한된 기하적 조건으로 인하여 바닥판의 두께를 충분히 얇게 만들 수 없기 때문에 기존의 기하적 조건들이 UHPC에 매립된 경우에도 유효한지에 대하여 평가하고자 한다.

스티드 전단연결재의 여러 기하적 조건 중에서 이 연구에서 특히 주목한 것은 스티드 길이와 직경의 비율인 형상비(aspect ratio= h/d)와 스티드 상부를 덮는 콘크리트 피복두께이다. AASHTO LRFD¹⁴⁾에서는 형상비를 4 이상으로 제한하며, Eurocode-4¹⁵⁾에서는 식 (2)에 제시된 바와 같이 형상비가 3 내지 4인 경우 계수 α 를 도입하여 스티드의 강도를 최대 20%까지 감소시켜 사용하도록 하고 있다. 하지만 강도 감소 계수 α 는 식 (2)에 보인 바와 같이 콘크리트 파괴 모드에만 적용하므로 항상 스티드 파단 모드에 의해 지배되는 UHPC 바닥판에 매립된 스티드 전단연결재에는 적용되지 않는다. AASHTO LRFD¹⁴⁾에서는 스티드 상부 피복두께를 최소 2 in. (약 50 mm)로 제한하며, Eurocode-4¹⁵⁾에서는 스티드 머리 아래에서 바닥판 하부 철근까지의 간격을 최소 30 mm로 제한하고 있지만, UHPC 바닥판에는 철근이 없기 때문에 Eurocode-4¹⁵⁾의 제한 사항을 직접 적용할 수 없다.

UHPC 바닥판은 고강도의 재료로 바닥판의 두께를 일반 콘크리트 바닥판보다 충분히 얇게 할 수 있음에도 위와 같은 기하적 요구 조건으로 인하여 두께를 충분히 얇게 할 수 없다. 이로 인하여 기존의 UHPC 바닥판에서는 전단연결재가 설치되는 부분의 두께를 다른 부분 보다 두껍게 하도록 주로 설계가 되어 왔다. 이 연구에서는 기존의 기하적 요구 조건을 UHPC 바닥판에 매립된 전단연결재에 그대로 적용하는 것이 적합한지 실험적 연구를 통하여 검토하고자 한다.

2. 연구 내용

전단연결재는 휨거동을 하는 합성보에 있어 바닥판과 거더의 인터페이스에 발생하는 상대 슬립(relative slip)을 지지하는 구조적 역할을 한다. 전단연결재의 정적 강도는 합성보에 휨을 가하여 실험을 하는 것이 가장 적합하지만, 실험 비용과 시간을 줄이기 위하여 일반적으로 push-out 시험 방법을 사용한다. 이 시험은 과거 1면 슬래브로 시험되기도 하였으나, 하중의 편심재하로 인하여 전단연결재에 의도하지 않은 인장력이 가해질 수 있는 것이 확인되어 현재는 대부분 2면 슬래브로 시험하고 있다. 이 연구에서는 Eurocode-4¹⁶⁾에 제시된 표준 시험 방법에 따라

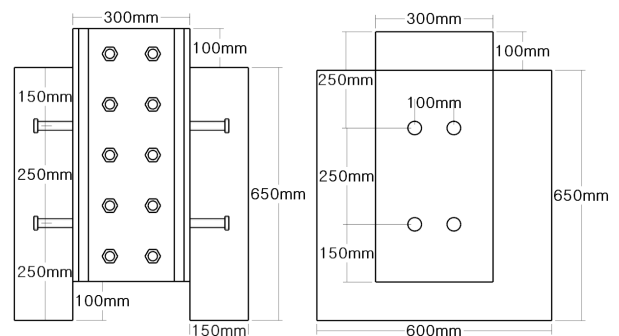


Fig. 1 Push-out specimen Dimensions

2면 슬래브 실험체를 Fig. 1에 도시된 바와 같이 제작하여 push-out 시험을 수행하였다.

2.1 실험 계획

이 연구에서는 Table 1에 제시된 바와 같이 UHPC 콘크리트 바닥판에 스티드를 매립한 4 종류의 시험체를 준비하였으며, 각 종류마다 3개씩(A, B, C)의 시편을 제작하였다. 시험체명 UHPC-I~IV는 바닥판의 두께 및 스티드의 직경, 길이에 변화를 주어 스티드의 형상비 및 피복 두께에 따른 영향을 평가하고자 하였다.

UHPC-I은 스티드의 기하적 요구조건인 형상비 4 이상과 피복두께 50 mm 이상을 모두 만족하는 시험체이며 이를 위하여 바닥판의 두께가 150 mm로 일반적인 콘크리트 바닥판의 두께와 동일하게 선택되었다. 실제 UHPC 바닥판을 적용함에 있어 바닥판 두께를 이 시험체와 같이 150 mm로 하게 되면 UHPC 사용을 통한 자중 저감 효과가 크게 줄어든다. UHPC-II는 기존 AASHTO LRFD¹⁴⁾에 제시된 스티드 최소 피복두께 조건 2 in. (50 mm)보다 작은 35 mm의 피복을 갖도록 하여 바닥판의 두께가 100 mm로 줄어든 시험체이다. UHPC-III은 피복두께 조건은 만족시키되 스티드의 형상비를 AASHTO LRFD¹⁴⁾에서 제한한 4이하인 3.1로 채택한 시험체이다. UHPC-IV는 피복두께 및 형상비를 모두 만족시키기 못한 시험체로 바닥판의 두께를 75 mm로 최대한 얇게 선택한 시험체이다.

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

바닥판은 별도의 철근없이 K-UHPC²⁾를 사용하였으며 구체적인 배합은 Table 2에 제시된 바와 같다. 강섬유는 길이가 각각 16.5 mm와 19.5 mm인 섬유를 콘크리트 부피에 대한 비율로 각 1%씩 혼입하였다. 압축강도 특성값은 180 MPa이며, 실측 평균 압축강도는 200 MPa, 실측 평균 인장강도는 18 MPa 그리고 탄성계수는 4.5×10^5 MPa

이다.

합성부재에서 바닥판의 콘크리트 실제 타설 방향을 고려하여 I형강을 웹에서 절단한 T형강에 스티드 전단연결재를 용접한 후 Fig. 2과 같이 UHPC를 타설하였다. 양생은 40°C로 시작하여 시간당 10°C씩 온도를 증가시켜 최종 90°C의 온도에서 3일간 증기양생을 실시한 후 천천히 온도를 감소시키는 방식으로 모든 시험체에 걸쳐 동일한 조건으로 수행하였다. 양생이 완료된 후 바닥판이 결합된 2개의 T형강을 Fig. 3에 도시된 바와 같이 M24 고장력 볼트로 연결하여 push-out 시험체를 구성하였다.

하중은 Eurocode-4¹⁶⁾에 제시된 실험 방법의 하중이력에 따라 2000 kN UTM을 사용하여 수직 재하하였다. 스티드 파단을 가정하여 예상 파단 강도의 40% (560 kN)까지 2 kN/s의 속도로 하중을 재하한 뒤 예상 파단 강도의 5% (70 kN)과 40% (560 kN) 사이를 0.82 kN/s의 속도로 5회 반복재하하였다. 이후 실험체가 15분 이내에 파괴되지 않도록 0.005 mm/s의 변위제어로 실험체에 더 이상의 하중증가가 발생하지 않을 때까지 실험을 진행하였다.

시험체의 상대슬립은 Fig. 3에 도시된 바와 같이 시험



Fig. 2 Concrete placing

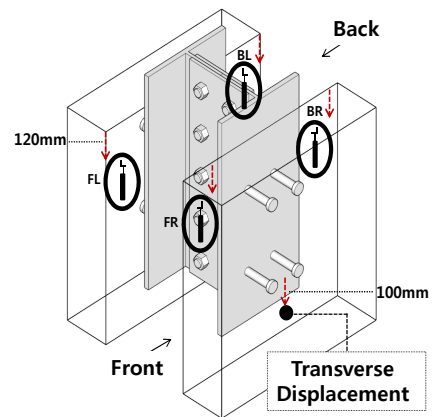


Fig. 3 Measurement plan

Table 1 Push-out test specimens

Specimens	Deck Thickness (mm)	Stud Connector			Cover (mm)	EA
		<i>h</i> (mm)	<i>d</i> (mm)	<i>h/d</i>		
UHPC-I	150	100	22	4.5	50	3
UHPC-II	100	65	16	4.1	35	3
UHPC-III	100	50	16	3.1	50	3
UHPC-IV	75	50	16	3.1	25	3

Table 2 K-UHPC mixture

w/b ratio	Cement	Silica fume	Filler	Fine Aggregate	Water reducer	Steel fiber
0.07	1.0	0.25	0.3	1.1	0.016	16.5 mm 1% 19.5 mm 1%

체의 바닥판 상면에서 120 mm 떨어진 곳에 각각 4개의 LVDT를 설치하여 측정하였다. 이와 더불어 바닥판의 벌어짐에 의한 부가적인 편심을 억제하기 위하여 Fig. 4에 도시된 바와 같이 횡방향지지 구조를 바닥판 상하부에 각각 설치하였으며, 시험 중 바닥판 하부의 벌어짐을 관찰하기 위하여 바닥판 외측 양쪽에서 별도의 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다.

2.2 실험결과

Push-out 실험에 의한 극한 강도(P_{max})와 상대슬립(δ_u) 결과는 Table 3에 제시된 바와 같으며, 이때 특성 극한강도(P_{Rk})는 Eurocode-4¹⁶⁾에 제시된 실험결과 평가 방법에 따라 극한하중을 10% 감소시킨 값을 택하였다. 이때 상대슬립은 4개의 LVDT에서 얻어진 값을 평균하였다. 연성도에 대한 기준이 되는 상대슬립(δ_u)은 특성 극한강도에서의 최대 상대슬립으로 얻어지며, 특성 상대슬립(δ_{uk})은 이를 다시 10% 감소시킨 값으로 계산된다.

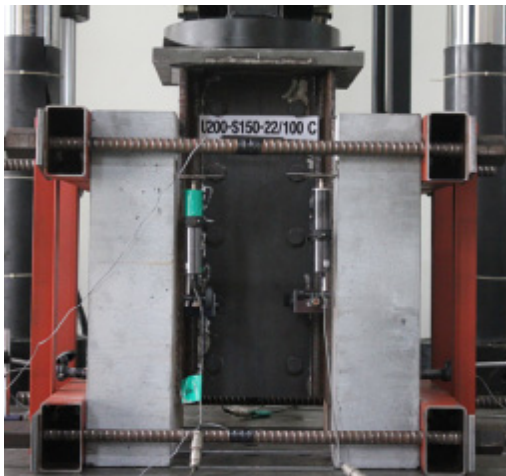


Fig. 4 Test set-up

Table 3 Push-out test results for single stud

Specimens		P_{max} [kN]	P_{Rk} [kN]	δ_u [mm]	δ_{uk} [mm]
UHPC-I	A	198	179	7.66	6.89
	B	193	174	5.73	5.16
	C	212	191	7.18	6.46
UHPC-II	A	123	111	4.98	4.48
	B	120	108	4.02	3.62
	C	114	103	4.21	3.79
UHPC-III	A	105	95	4.84	4.36
	B	103	92	5.93	5.34
	C	111	99	5.64	5.08
UHPC-IV	A	109	98	5.42	4.88
	B	109	98	5.04	4.54
	C	117	105	5.18	4.66

2.2.1 정적 극한 강도

저항계수 또는 부분계수를 고려하지 않은 전단연결재의 정적강도는 AASHTO LRFD¹⁴⁾에 따르면 전단연결재의 단면적과 인장강도의 곱($A_{sc}F_u$)으로 계산된다. 작용 하중을 스티드의 $A_{sc}F_u$ 에 대한 비율로 정규화한 후 상대슬립과의 하중-이력관계로 표시하면 Fig. 5와 같다. 이 연구에서 사용한 스티드의 최소 극한인장강도 $F_u = 450$ MPa 이므로, 1개의 스티드의 설계 극한강도는 스티드의 직경이 22 mm인 UHPC-I 시험체에 대해서는 171 kN이고, 스티드의 직경이 16 mm인 UHPC-II, UHPC-III, UHPC-IV 시험체에 대해서는 90 kN이다. 동일한 방식으로 Eurocode-4¹⁵⁾를 적용하면 이보다 20% 작으므로 각각 137 kN 및 72 kN으로 계산된다. 이렇게 AASHTO LRFD¹⁴⁾와 Eurocode-4¹⁵⁾에 제시된 설계식으로 평가한 강도와 이 실험의 결과를 비교하면 Table 4에 제시된 바와 같다.

이 연구의 실험 결과를 AASHTO LRFD¹⁴⁾에서 제시한 정적 강도 $A_{sc}F_u$ 와 비교하면, UHPC-I은 평균 6% 상회, UHPC-II는 평균 18% 상회, UHPC-III는 평균 6% 상회, 그리고 UHPC-IV는 평균 23% 상회하는 결과를 얻었으며, Eurocode-4¹⁵⁾

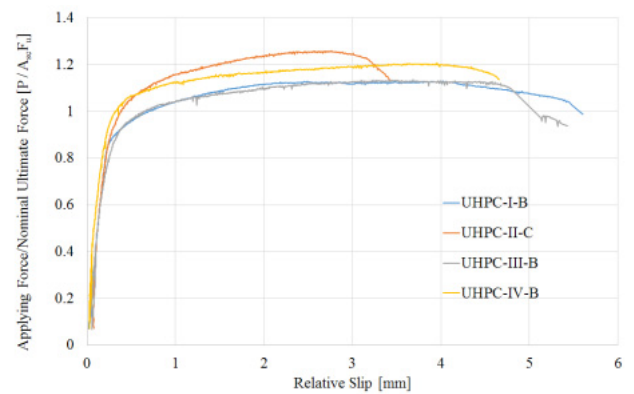


Fig. 5 Normalized applying force vs. relative slip

Table 4 Test results compared to design codes

Specimens		$P_{Rk} \times 100 /$ AASHTO $[A_{sc}F_u]-1$	$P_{Rk} \times 100 /$ Eurocode $[0.8A_{sc}F_u]-1$
UHPC-I	A	4%	31%
	B	2%	27%
	C	11%	39%
UHPC-II	A	22%	53%
	B	19%	49%
	C	13%	42%
UHPC-III	A	5%	31%
	B	2%	28%
	C	10%	37%
UHPC-IV	A	21%	51%
	B	21%	51%
	C	29%	61%

와는 각각 평균 32%, 48%, 32%, 54% 상회하는 결과를 얻었다. 이 결과로부터 정적 강도 측면에 있어서 AASHTO LRFD⁴⁾에서 제시된 설계식은 UHPC 바닥판에 매립된 스티드 전단연결재에 충분히 적용가능하다고 판단되며, Eurocode-4¹⁵⁾는 그 여유분이 상당하여 매우 보수적으로 평가된다고 볼 수 있다.

스티드 전단연결재는 이론적으로 초기강성이 무한한 것으로 가정하여 설계하지만, 실제로는 소량의 상대슬립이 발생한다. 이 연구의 실험결과로부터 극한하중의 10%와 40%의 하중이 가해졌을 때의 상대슬립으로부터 초기강성을 측정된 결과 각 시험체군 UHPC-I 내지 -IV에 대하여 평균 6094 kN/mm, 4781 kN/mm, 5887 kN/mm, 4306 kN/mm의 결과를 얻었다.

2.2.2 형상비

AASHTO LRFD¹⁴⁾는 스티드의 직경에 대한 높이의 비율(형상비)을 4 이상으로 할 것을 요구하며, Eurocode-4¹⁵⁾에서도 4 이상을 권유하고 3 내지 4에 속하는 경우 식 (2)와 같이 강도를 감소시키도록 하고 있다. UHPC 바닥판은 그 두께가 얇기 때문에 스티드의 길이가 짧아지게 되어 제시된 형상비를 만족시키기 위해서는 불가피하게 스티드의 직경이 작아지게 되며 이로 인하여 많은 수의 스티드를 설치해야만 하는 문제를 야기하게 된다. 따라서 이 연구의 시험체는 Table 1에 보인바와 같이 순서대로 형상비가 각각 4.5, 4.1, 3.1, 3.1이 되도록 하였다.

실험 결과를 살펴보면 형상비가 4 이상인 경우와 3.1인 경우를 비교할 때 그 거동에서 주목할 만한 차이점을 발견할 수 없었다. UHPC에 매립된 스티드는 보통 콘크리트에 매립된 스티드보다 둘러싼 콘크리트의 강도와 강성이 높음으로 인하여 휨거동을 거의 하지 않고 전단거동이 지배적일 것이다. Xu 등의 연구¹⁷⁾에서도 콘크리트의 강도가 높아 콘크리트 파괴가 아닌 스티드의 파단에 의한 거동이 지배적인 경우에 휨거동이 거의 없고 전단에 의한 파단 거동을 보인다고 알려져 있으며, 이 실험의



Fig. 6 Stud failure

파괴 후 스티드 사진인 Fig. 6을 보더라도 용접부에 파단이 없고 스티드 하단에서 깨끗하게 절단면이 형성된 것으로부터 전단에 의해서 스티드가 파단 되었음을 쉽게 예측할 수 있다.

따라서, 이 연구의 결과로부터 UHPC에 매립된 스티드 전단연결재의 형상비 기준을 3.1까지 낮추어도 전혀 문제가 없음을 확인 할 수 있다.

2.2.3 스티드 피복두께

AASHTO LRFD¹⁴⁾에 제시된 기준에 따르면 스티드 머리부를 덮은 콘크리트 피복두께가 최소 50 mm (2 in.)가 될 것을 명시하고 있으나, 이를 그대로 UHPC 바닥판에 적용할 경우 바닥판의 두께를 두껍게 하는 원인이 될 수 있다. 더욱이 UHPC 콘크리트의 높은 강도를 고려할 때 50 mm 피복두께는 과다한 것일 수 있다는 판단에 이 연구의 실험체 UHPC-II와 UHPC-IV에서 피복두께를 기준치 이하인 35 mm와 25 mm로 각각 설정하였다.

실험 결과로부터 보건데 얇아진 피복두께로 인한 강도 저감이나 바닥판의 쪼개짐 균열 발생이 전혀 없었고, 오히려 강도가 다른 시험체보다 12% 내지 17% 증가하였다. 연성도 기준을 만족하지 못하는 문제가 있었으나 이는 피복두께가 50 mm인 UHPC-III에서도 동일하였으므로 피복두께가 원인이라고 볼 수 없다. 따라서 기존의 스티드 피복두께 기준을 25 mm까지 완화하여도 문제가 없으므로 판단된다.

2.2.4 연성도

스티드 전단연결재는 대부분의 설계 기준에서 탄성 설계가 아닌 강도 설계를 하고 있다. 탄성 설계시에는 스티드 간의 교축방향 간격이 지점부로 갈수록 촘촘해지는 가변적인 형태로 설치되어 시공 및 설계에 번잡함이 있었으나, 현재는 강도 설계를 통하여 모든 전단연결재가 극한 상태에서 동시에 파단 된다는 가정 하에 전 경간에 걸쳐 동일한 간격으로 전단연결재를 설치하고 있다. 이러한 가정을 만족하기 위해서는 전단연결재의 연성도가 반드시 확보되어야 한다. 얼마의 연성도가 충분한 것인지에 대해서는 각 교량의 상태에 따라 가변적일 수 있으나, 현재 Eurocode-4^{15,16)}에는 연성도 기준으로 스티드의 특성 상대슬립(δ_{uk})이 6 mm 이상일 것을 요구하고 있다.

Table 3의 실험 결과를 보면 UHPC-I의 A와 C 시험체를 제외하고는 모두 Eurocode-4^{15,16)}의 연성도 기준을 만족하지 못하고 있다. Hegger 등¹⁸⁾에 의한 기존 연구에서도 이 연구의 결과와 동일하게 UHPC에 매립된 스티드 전단연결재의 특성 상대슬립이 5.7 mm로 Eurocode-4^{15,16)}의 기준을 만족하지 못하는 결과를 얻었다. 따라서 Eurocode-4^{15,16)}를 만족하기 위하여 연성도를 향상시키기 위한 별도의 방안이 필요할 것으로 판단된다. 연성도를 향상시키기 위한 방안으로는 전단연결재 주변부에 철근 또는 철근망(wire-mesh)를 설치하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

연성도 보강방안이 적용되지 않는다면, UHPC에 매립된 스티드 전단연결재는 연성 전단연결재가 아닌 강성 전단연결재로 간주하여, 하중분배를 고려하지 않고 하중 효과에 의하여 각 단면에 발생하는 종방향 전단력에 대하여 소요 전단연결재를 설계하는 탄성 설계법을 적용하여야 할 것이다.

더불어, Eurocode-4^{15,16)}에 제시된 연성도 기준 6 mm를 만족하지 못한다 할지라도, 적용하고자하는 특정 교량의 구체적인 합성보 해석을 통하여 UHPC에 매립된 스티드에 실제 발생하는 상대 슬립양이 충분히 작아 4 mm 내지 5 mm 정도의 상대 슬립으로도 연성 거동이 충분히 가능하다면 스티드 전단연결재를 연성 전단연결재로 간주하여 강도 설계를 적용하는 것도 가능할 것이다.

3. 결 론

UHPC 바닥판의 전단연결재로 기존의 합성보에 일반적으로 적용되던 스티드 전단연결재를 사용할 수 있음이 연구로부터 확인할 수 있었으며 구체적으로 다음의 결과를 얻었다.

- 1) UHPC 바닥판에 매립한 스티드 전단연결재의 정적 강도 평가시 기존 설계식을 사용할 경우 높은 콘크리트 강도로 인하여 콘크리트 파괴 모드가 아닌 스티드 파단 모드에 의해 지배되므로, 콘크리트 강도와 관계없이 스티드 줄기의 단면적과 극한강도에 의해서 스티드의 정적 강도가 결정된다.
- 2) UHPC 바닥판에 매립된 스티드 전단연결재의 극한 강도는 AASHTO LRFD에 제시된 강도 평가식과 비교하여 2~29%의 여유가 있음이 실험적으로 확인 되었으므로, 기존의 AASHTO LRFD에 제시된 평가식을 UHPC에 확대 적용하여도 무방한 것으로 판단 된다.
- 3) UHPC 바닥판에 매립된 스티드 전단연결재의 극한 강도는 Eurocode-4에 제시된 강도 평가식과 비교하여 27~61%의 여유가 있어 매우 보수적으로 평가 되는 것으로 확인되었다.
- 4) AASHTO LRFD는 스티드 전단연결재의 형상비(h/d)를 4 이상으로 제한하였으나, 이 연구의 실험 결과로부터 3.1까지 낮추어도 문제가 없음을 확인하였다.
- 5) AASHTO LRFD는 스티드 상면 콘크리트 피복두께를 50 mm (2 in.) 이상으로 제한하였으나, 이 연구의 실험 결과 25 mm까지 낮추어도 문제가 없음을 확인하였다.
- 6) Eurocode-4는 전단연결재의 연성도 기준으로 특성 상대슬립이 6 mm이상일 것을 제시하고 있으나, 이 연구 결과 UHPC에 매립된 스티드의 특성 상대슬립은 3.8~5.3 mm로 Eurocode-4를 만족하지 못하였다. 따라서 UHPC에 매립된 스티드는 연성 전단연결재가 아닌 강성 전단연결재로 간주하여 탄성 설계를

하거나 혹은 연성도 확보를 위한 별도의 방안이 필요할 것으로 판단된다.

- 7) 스티드 전단연결재를 연성을 확보하지 못한 강성 전단연결재로 간주한다면 UHPC 바닥판을 75 mm 두께까지 얇게 사용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. 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).
2. Korea Concrete Institute, *Design Recommendations for Ultra-High Performance Concrete K-UHPC*, KCI-M-12-003, Korea, 2012 (in Korean).
3. Yang, I. H., Joh, C., Lee, J. W., and Kim, B. S., "Torsional behavior of ultra-high performance concrete squared beams," *Engineering Structures*, 56, 2013, pp. 372-383.
4. 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, Issue 3, 2013, pp. 295-304 (in Korean).
5. Yang, I. H., Joh, C., and Kim, B. S., "Flexural strength of large-scale ultra high performance concrete prestressed T-beams," *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38, 2011, pp. 1185-1195.
6. Graybeal, B. A. "Flexural Behavior of an Ultrahigh-Performance Concrete I-Girder", *Journal of Bridge Engineering ASCE*, Vol. 13, Issue 6, 2008, pp. 602-610.
7. Graybeal, B. A. "Fatigue Response in Bridge Deck Connection Composed of Field-Cast Ultra-High- Performance Concrete", *Transportation Research Record* 2251, 2011. pp. 93-100.
8. 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.
9. 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.
10. Naaman, A. E. and Chandrangsu, K., "Innovative Bridge Deck System Using High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 1, Jan.-Feb., 2004, pp. 57-64.

11. Naaman, A. E., Likhitruangsilp, V., and Parra-Montesinos, G., "Punching Shear Response of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Slabs," *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 2, Mar.-Apr. 2007, pp. 170-179.
12. 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.
13. Ollgaard, J. G., Slutter, R. G., and Fisher, J. W., "Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete," *AISC Engineering Journal*, Vol. 8, Issue 2, 1971, pp. 55-64.
14. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th edition. Washington, D.C. 2007.
15. CEN. *1994-2 Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures*, Part 2: General rules and rules for bridges. 2005.
16. CEN, 1994-4-4 *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures*, Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.
17. Xu, C. and Sugiura, K., "FEM analysis of failure development of group studs shear connector under effects of concrete strength and stud dimension," *Engineering Failure Analysis*, in press, 10.1016/j.engfailanal.2013.02.023, available online 26 Feb. 2013.
18. 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.

요 약 합성보는 콘크리트 바닥판과 강재 거더로 이루어져 왔으나, 바닥판의 자중을 줄이면서 내구성을 향상시키고 나아가 교량의 강도 및 강성을 향상시키기 위하여 초고성능 콘크리트(UHPC)를 교량 바닥판으로 채용한 합성보가 최근에 제안되고 있다. 이 연구는 기존의 스티드 전단연결재가 UHPC 바닥판을 합성함에 있어 유효한지에 관하여 실험적으로 검토해보고자 한다. 12개의 push-out 시험체를 통하여 UHPC 바닥판에 매립된 스티드 전단연결재의 정적 강도를 평가하였으며, 실험 변수로 바닥판 두께, 스티드 높이 및 지름을 채택하여, 기존에 제한되었던 스티드 지름에 대한 높이의 비율인 형상비와 스티드 머리부 상부 콘크리트 피복두께의 제한을 완화하는 것이 가능한지에 대하여 검토하였다. 이 연구의 실험으로부터 기존 AASHTO LRFD에 제시된 정적 강도평가식을 UHPC에 매립된 스티드 전단연결재에 적용하는 것이 유효함을 확인하였으며, 4이상으로 제한된 형상비는 3.1까지 낮추어도 되며, 50 mm로 제한된 최소 피복두께도 25 mm까지 낮출수 있음을 확인하였다. 다만 Eurocode-4에 제시된 연성도 기준인 특성 상대슬립 6 mm 이상의 기준을 만족하지 못하여, UHPC에 매립된 스티드 전단연결재는 별도의 연성 보강 방안이 채택되지 않는다면 강성 전단연결재로 간주하여야 할 것이다.

핵심용어 : 스티드, 전단연결재, UHPC(초고성능 콘크리트), 합성보, 바닥판