

論文

스터립을 이용한 UHPC 바닥판과 콘크리트 거더 연결부의 수평전단강도

유동민*, 황훈희*+, 김성태**, 박성용**

Interface Horizontal Shear Strength between UHPC Deck and Concrete Girder with Stirrups

Dong-Min Yoo*, Hoon-Hee Hwang*+, Sung-Tae Kim**, Sung-Yong Park**

ABSTRACT

The purpose of this experimental research was to evaluate interface shear requirements between UHPC deck and concrete girder with stirrups according to Korean Highway Bridge Design Code and AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. The push-out tests are performed to analyze the composite behavior in interface of connection. The test results were compared to the values of interface horizontal shear strength predicted by current codes. As the results, it was observed that the test results provided more conservative estimate for horizontal shear strength than the values by current codes equation.

초 록

이 연구에서는 초고성능콘크리트 교량 바닥판과 콘크리트 거더 사이의 연결부의 전단에 대하여 도로교설계기준과 AASHTO LRFD 교량설계기준에서 요구되는 규정을 평가하였다. 2면 전단실험을 통해 연결부 접촉면에서의 합성 거동을 분석하였고, 실험결과와 현행 기준에 의해 계산된 수평전단강도를 비교하였다. 그 결과, 실험결과에 의한 수평전단강도가 현행 기준식에 의한 값보다 더 보수적인 예측치를 보이는 것으로 나타났다.

Key Words : 초고성능콘크리트(UHPC), 수평전단강도(horizontal shear strength), 스터립(stirrup), 설계기준(design code)

1. 서 론

교량 분야에서 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC) 재료의 활용은 바닥판의 중량 감소와 경제성 향상을 기대할 수 있으며, 프리캐스트 형식의 바닥판 적용은 시공성과 품질관리의 효율성을 제고할 수 있다.

여기서는 콘크리트 거더와 프리캐스트 UHPC 바닥판을 연결하는 방식의 교량에 대하여 거더와 바닥판의 합성에 따른 수평전단강도에 관해 연구하였다. 여러 연구자들은 이와 관련하여 많은 실험과 이에 근거한 전단강도 평가식을 제안하였으며, 설계기준에서는 기술자들이 전단연결부에 대하여 안전하게 설계할 수 있도록 합리적인 수평전단강도 설계식을 제시하고 있다.

이정우 등[1]은 보통 콘크리트와 UHPC를 연결한 실험체에 대해 표면처리에 따른 수평전단강도를 측정하였고, 그 결과 Smooth, Chipped, Shear key 순으로 수평전단강도가 우수한 것으로 나타났다. Loov 등[2]은 합성보 형태의 전단실험을 통해 콘크리트 강도와 부착응력의 효과를 고려한 수평전단강도식을 제안하였으며, 이 식은 경량 콘크리트에도 적용 가능하다고 하였다. 또한, 실험 초기에는 표면의 부착력에 의해 전단에 저항하며, 이때 스터립은 전단 저항에 거의 기여하지 않음을 보였다. Kahn 등[3]은 고강도 콘크리트 부재의 전단실험을 통해 현행 설계기준의 적용성을 검토하였다. 콘크리트 강도와 스터립 개수 등을 변수로 한 수평전단실험 결과와 AASHTO LRFD 및 ACI의 수평전단강도 설계식을 비교·분석하였으며,

접수: 2012년 8월 21일, 수정: 2012년 10월 25일, 게재승인: 2012년 10월 26일

*+ 한국도로교통협회 기술국, Corresponding author(E-mail:poonhee@krta.co.kr)

** 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 인프라구조연구실

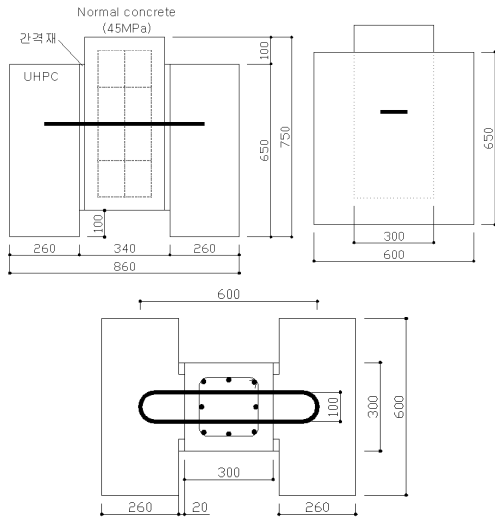


Fig. 1 Specimen Dimensions.

두 설계식 모두 보수적인 경향을 나타냈다. 유동민 등[4]은 강재거더와 UHPC 바닥판의 합성에 따른 전단성능 평가를 위하여 스터드로 연결된 실험체에 대해 2면 전단실험을 수행하였으며, UHPC 바닥판 적용에 따른 전단성능 향상을 실험적으로 검증하였다.

이 연구에서는 스터립을 이용한 일반 콘크리트 거더와 UHPC 바닥판의 합성에 대하여 수평전단거동을 분석하였다. 수평전단강도 평가를 위해 2면 전단실험을 수행하였고, 국내외 관련 기준의 수평전단강도 설계식과 비교·검토를 통해 국내 설계기준의 적용성을 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험 개요

이 실험은 UHPC 바닥판과 콘크리트 거더 연결면의 수평전단성능을 평가하기 위해 수행하였다. 바닥판을 모사한 UHPC 측면 부재와 콘크리트 거더를 모사한 콘크리트 중앙 부재의 합성을 고려하여 2면 전단 실험체를 제작하였다. 전단연결 방식은 일반적인 스터립 형태를 선택하였고, Table 1과 같이 스터립의 직경을 변수로 하였으며, 사용빈도가 높은 13mm와 16mm를 선정하여 UHPC 프리캐스트 바닥판의 성능 평가를 수행하였다.

UHPC의 설계기준압축강도는 180MPa이고, 중앙 콘크리트 부재는 45MPa이며, 철근의 인장강도는 400MPa이다. 실험체 명 중 첫번째 문자는 중앙부재의 재료인 콘크리트(Concrete), 두 번째 문자는 전단연결재인 스터립(Stirrup) 그리고 나머지 문자는 스터립(Stirrup)의 직경을 의미한다. 각 실험체 형상 및 제원은 Fig. 1과 같다.

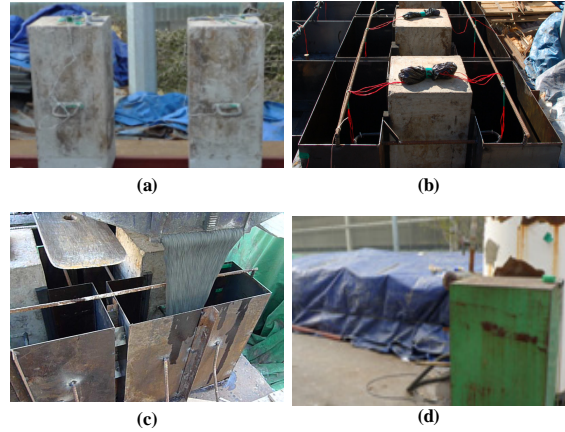


Fig. 2 Specimen Fabrication.



Fig. 3 Post-Out test.

Table 1 Test Specimens

Test Specimen	Diameter of Studs (mm)	Number of Specimen (EA)
CSD13	13	2
CSD16	16	2
total		4

2.2 실험체 제작

실험체는 Fig. 2와 같은 순서로 제작하였다. 거더를 모사한 중앙부재의 철근과 스터립을 조립하고 일반 콘크리트를 타설하였으며(a), 증기양생을 한 후, 바닥판을 모사한 측면부재의 거푸집을 제작하였다(b). 측면부재에 UHPC를 타설하고(c) 증기양생을 하여(d), 실험체 제작을 완료하였다.

증기양생은 90℃의 온도를 48시간 유지하여 초기강도를 발현시키도록 하였고, 이후 서서히 온도를 낮추어 상온에 이르도록하여 적절한 품질관리가 이루어질 수 있게 하였다.

2.3 2면 전단실험

수평전단강도를 평가하기 위한 실험으로는 비교적 경제적이고 전단연결재만의 거동 특성을 분석하기 용이한 2면 전단 실험을 수행하였다.

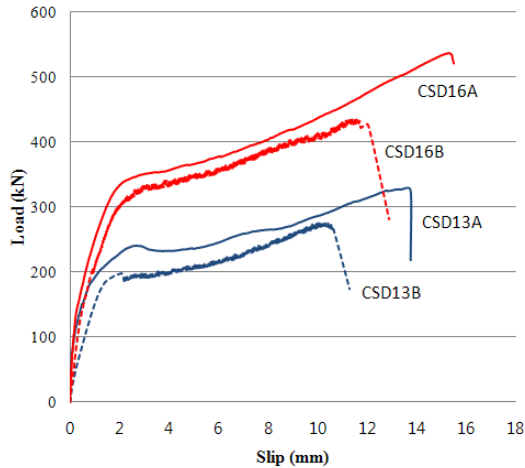


Fig. 4 Load-Slip Relationship Curve.

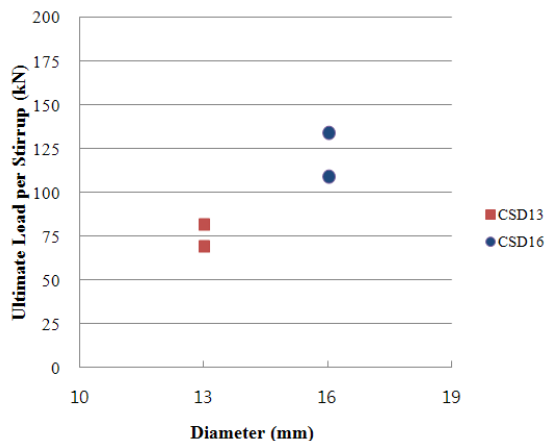


Fig. 5 Relation between Maximum load and Diameter of Stirrup.

가력기는 3,000kN까지 재하 가능한 장비를 사용하였으며, 초기에는 하중제어방법으로 2kN/sec의 속도로 가력한 후, 상대변위가 급격히 늘어날 것으로 예상되는 단계(직경 13mm 일 때 150kN)에서는 변위제어 방식으로 변경하여 0.01mm/sec 속도로 더 이상의 하중이 증가하지 않을 때까지 가력하였다.

거더를 모사한 중앙 콘크리트와 바닥판을 모사한 측면 UHPC의 상대변위를 측정하기 위하여 측면 UHPC 상단으로부터 120mm 지점에 처짐계(LVDT)를 설치하였으며, 앞 뒤 2곳에서 측정하여 부재 제작과 하중 재하시 편심 발생 여부도 관측하였다.

2.4 실험 결과 및 분석

이 실험에서는 바닥판을 모사한 측면부재의 할렬파괴 방지를 위해 폭을 600mm로 하였고, 직접재하 방법으로 정적실험을

Table 2 Test Results

Specimen	Ultimate Load (kN)	Slip (mm)	Failure Mode
CSD13 A	327.64	13.91	Stirrup Failure
CSD13 B	277.60	10.65	
CSD16 A	536.48	15.41	
CSD16 B	436.00	11.93	

실시한 결과 모든 실험체는 스티럽의 파단으로 파괴되는 양상을 보였다.

슬립(Slip)은 극한하중 상태에서 발생한 콘크리트 중앙부재와 UHPC 측면부재 사이의 상대변위 값으로 시편당 2개의 처짐계에서 측정된 값을 평균한 것이다.

실험체별 극한하중, 상대변위 그리고 파괴모드를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 4를 보면 대부분의 실험체에서 파괴하중의 약 60~70% 정도까지는 하중이 증가함에 따라 상대변위가 거의 선형적으로 증가하였다. 그 이상의 하중에서는 상대변위가 급격히 증가하다가 실험체의 파괴에 이르게 되는데, 이때 극한하중 상태에서 최대 상대변위는 10mm ~ 15mm 정도로 나타났다.

Fig. 5는 직경별로 스티럽 한 본당 최대하중을 비교한 것으로 직경이 클수록 전단 저항능력이 우수함을 알 수 있다.

3. 수평전단강도 설계식 검토

이 절에서는 스티럽을 이용한 UHPC 프리캐스트 바닥판과 콘크리트 거더의 합성설계를 위하여 국내외 관련 기준을 검토하였다. 설계기준에서는 균열이 발생하거나 발생할 가능성이 있는 면, 서로 다른 재료간의 접촉면 또는 서로 다른 시기에 친 콘크리트 사이의 접촉면에 대해서 전단전달을 고려하도록 규정하고 있다. 여기에서는 국내 도로교설계기준[5]과 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(AASHTO LRFD)[6]의 관련 규정을 조사하여 실험값과 비교·검토하였다.

3.1 도로교설계기준

도로교설계기준에서는 합성빔부재에 대한 수평전단설계를 다음 식에 기초하고 있다.

$$V_u \leq \phi V_{nh} \quad (1)$$

여기서 V_u 는 계수전단력이고, V_{nh} 는 공칭 수평전단강도로서 접촉면의 상태에 따라 다르게 규정하고 있다. 전단마찰철근이 전단면에 수직인 경우, 전단강도 V_{nh} 은 다음과 같이 계산하도록 하고 있다.

$$V_{nh} = A_{vf} f_y \mu \leq \min.(0.2 f_{ck} A_c, 5.6 A_c)(N) \quad (2)$$

여기서 A_{vf} 는 전단전달철근의 소요단면적, μ 는 마찰계수이다.

이 논문의 실험체는 Fig. 2(a)에서와 같이 바닥판과 거더의 접촉면이 일부를 거칠게 하지 않은 굳은 콘크리트에 새로 친 콘크리트이므로 μ 는 0.6 λ , λ 는 중앙부재가 일반 콘크리트이므로 1.0을 적용하였다.

3.2 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

AASHTO LRFD에서는 전단전달을 고려하여 다음 설계식을 만족하도록 하고 있다.

$$V_{ui} \leq V_{ri} \quad (3)$$

여기서 $V_{ri} = \phi V_{ni}$, V_{ni} 는 계수전단강도, V_{ni} 는 접촉면의 공칭 전단저항으로 다음 식으로 계산하도록 하고 있다.

$$V_{ni} = cA_{cv} + \mu(A_{vf}f_y + P_c) \leq \min(K_1f'_cA_{cv}, K_2A_{cv})(\text{kip}) \quad (4)$$

여기서, c 는 부착강도, A_{cv} 는 전단전달을 고려한 콘크리트 접촉면적, μ 는 마찰계수, P_c 는 전단면에 압축으로 작용하는 고정하중, f'_c 은 접촉면에서 강도가 더 낮은 콘크리트의 28일 압축강도, K_1 은 접촉면의 전단에 콘크리트 강도가 저항하는 부분, K_2 는 전단저항의 제한을 의미한다.

이 논문의 실험체는 깨끗한 콘크리트 표면에 새로 친 콘크리트이고 레이턴스(Laitance)가 없으며 표면을 의도적으로 거칠게 하지 않은 경우로 $c=0.075(\text{ksi})$, $\mu=0.6$, $K_1=0.2$, $K_2=0.8(\text{ksi})$ 를 적용하였다. 전단면에 압축으로 작용하는 고정하중은 고려하지 않았으므로 P_c 는 0으로 계산하였다.

3.3 비교 결과

실험에 의한 수평전단강도와 국내 도로교설계기준 및 AASHTO LRFD에 의한 수평전단강도를 비교하여 Table 3에 나타내었다. V_{test} 는 실험결과값, V_{KHBDC} 는 도로교설계기준(Korean Highway Bridge Design Code)에 의한 수평전단강도, V_{AASHTO} 는 AASHTO LRFD에 의한 수평전단강도를 의미한다.

비교 결과 설계값에 대한 실험값의 비율이 1보다 큰 값을 보이고 있어, 스터립을 사용한 UHPC 바닥판과 콘크리트 거더의 수평전단 설계시 현행 기준을 적용하여도 안전측의 경향을 볼 수 있는 것으로 판단된다.

국내 도로교설계기준과 AASHTO LRFD의 수평전단강도를 비교한 결과, 국내 도로교설계기준이 보수적인 경향을 보이는데, 이것은 AASHTO LRFD의 식 (4) 첫 번째 항에서 접촉면의 점착력 및 골재의 맞물림 등을 고려하기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3 Test Results/Designed Values for Interface Shear Strength

Specimens		V_{KHBDC} (kN)	V_{AASHTO} (kN)	V_{Test} / V_{KHBDC}	V_{Test} / V_{AASHTO}
CSD13	A	121.63	246.77	2.69	1.33
	B			2.28	1.12
CSD16	A	190.66	315.79	2.81	1.70
	B			2.29	1.38

4. 결 론

이 연구에서는 UHPC 바닥판과 콘크리트 거더의 합성 방안으로 스터립에 의한 연결구조에 대한 성능평가를 위해 실험과 설계기준 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

모든 실험체는 항복 후 스터립의 파단에 의한 파괴 양상을 보였으며, 전단저항 능력은 스터립의 직경에 비례하는 것으로 나타났다.

실험값과 설계기준에 의한 수평전단강도를 비교·검토한 결과, 현행 기준을 사용하여 설계하여도 안전측의 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 수평전단강도 설계시 국내 UHPC 재료에 대한 점착력이나 마찰계수 등 재료 특성이 반영되어야 할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 한국건설기술연구원의 “하이브리드사장교 바닥판 개발” 과제의 지원으로 작성되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Lee, J.W., Joh, C.B., and Kim, B.S., “Horizontal Shear Strength between Ultra High Performance Concrete and Normal Concrete,” *Korea Concrete Institute*, 2011, pp. 31-32.
- 2) Loov, R.E. and A.K. Patnaik, “Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams with a Rough Interface,” *PCI Journal*, Vol 39, No. 1, 1994, pp. 48-67.
- 3) Kahn, L.F. and Mitchell, A.D., “Shear Friction Tests with High-Strength Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 1, pp. 98-103.
- 4) Yoo, D.M., Hwang, H.H., Kim, S.T., and Park, S.Y., “An Experimental Study on the shear connection for UHPC

-
- Deck Bridge,” *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 24, No. 5, 2011, pp. 29-33.
- 5) Minister of Land, Transport and Maritime Affairs, 도로 교설계기준, Korea Road & Transportation Association, Seoul, 2010, pp. 4-84.
- 6) AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 6th ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2012. pp. 5-84.