

論文

초고성능 콘크리트 바닥판 교량의 전단연결부에 대한 실험적 연구

유동민*, 황훈희⁺, 김성태**, 박성용**

An Experimental Study on the shear connection for UHPC Deck Bridge

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

ABSTRACT

The application of high performance materials for the deck can represent a fair alternative to reduce the weight of the deck and improve the economic efficiency of the bridge even if high performance materials are costly. In UHPC(Ultra High Performance Concrete) bridges, it is necessary to verify that existing headed stud can be used to transfer longitudinal shear forces across the steel-concrete interface. In this paper, the push-out tests are performed to analyze the composite behavior between UHPC bridge deck and steel girder. The ultimate strength of test specimens is proportional to the diameter of headed studs in push-out test for static loading. Test results show that the shear strength of headed stud is improved for the case of normal concrete bridge decks.

초 록

교량 바닥판에서 고성능 재료의 적용은 고가임에도 불구하고 바닥판 중량 감소와 경제성 향상을 위한 대안으로 대표될 수 있다. 초고성능콘크리트 재료를 활용한 교량에서 기존의 헤드형 스티드가 바닥판과 강재 거더사이의 전단력을 충분히 전달할 수 있는지 그 적용성을 검증할 필요가 있다. 이 논문에서는 UHPC 교량 바닥판과 강재 거더의 합성거동을 분석하기 위해 2면 전단실험을 수행하였다. 정적 재하 실험 결과 헤드형 스티드의 실험체별 극한강도는 직경에 비례였으며, 일반 콘크리트 교량 바닥판에 비해 전단강도가 향상되는 것으로 나타났다.

Key Words : 초고성능콘크리트(UHPC), 전단연결재(Shear Connector), 스티드(Stud), 2면 전단실험(Push-out test)

1. 서 론

교량 바닥판의 고성능 재료 적용은 고가임에도 불구하고 바닥판 중량 감소와 경제성 향상을 위한 방안으로 대두되어 (한국건설기술연구원, 2009), 최근 하이브리드 사장교 개발의 요소 기술로서 초고성능콘크리트(이하 UHPC) 재료를 적용한 경량의 고성능 바닥판 시스템 개발 연구가 활발히 진행 중이다. 이 연구에서는 하이브리드 사장교 적용을 위한 바닥판 시스템 개발의 일부로서 UHPC 바닥판과 강재거더의 합성에

의한 전단거동특성을 규명하고자 한다.

두 부재를 합성시키기 위해 일반적으로 전단연결재를 사용하며 그 종류는 Headed Stud형, Perfobond형, 역L형 유공판형 등이 있다(이홍수 등 2006, 김영호 등 2008). 이러한 대표적인 방안들은 이미 국내외의 많은 연구자에 의하여 거동특성이 규명되었다.

장승필 등(1997)은 프리캐스트 바닥판 교량의 전단연결부 설계를 위하여 연결부의 강성식을 제안하였고, 제안된 강도 및 강성을 이용하여 설계법에 따른 전단연결재 배치와 구조

접수: 2011년 9월 8일, 수정: 2011년 10월 10일, 게재승인: 2011년 10월 19일

*+ 한국도로교통협회 기술국, 교신저자(E-mail:poonhec@krtca.co.kr)

** 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 구조교량연구실

상세를 제시하였다. 심창수 등(1998)은 프리캐스트 바닥판 교량 전단연결부의 2면 전단실험(Push-out test)대상 부재에 대한 3차원 유한요소해석을 통해 전단연결부의 초기 강성에 대한 평가식을 제안하였다. 김종희 등(2000)은 프리캐스트 콘크리트 바닥판 교량의 전단연결부에 대하여 전단연결재의 단면적, 무수축모르터의 압축강도, 베딩층 두께 등을 변수로 하여 2면 전단실험(Push-out test)을 수행하였고, 무수축모르터를 전단연결재용 흙의 채움재로 사용한 합성형교량에서 전단연결재의 극한강도평가식을 제안하였다. 현병학 등(2005)은 프리캐스트 바닥판과 PSC거더의 합성을 위한 새로운 형식의 수평전단연결구조에 대하여 실험을 수행하였으며, 수평전단강도는 연결재의 항복강도와 단면적에 비례하고 베딩층의 두께에 반비례함을 증명하고 관련 설계식을 제안하였다.

Loov(1994)는 주로 전단연결재에 기여도에 대한 실험적 연구를 수행하였는데 전단연결재의 개수, 접촉면적, 간격 및 항복강도를 주요 변수로 선정하였다. 합성보 형상의 실험체를 이용한 이 실험에서 최대 상대변위는 플랜지 단부에서 발생함을 보였고, 콘크리트 강도, 전단연결재의 수량 및 항복강도의 함수로 표현되는 평가식을 제안하였다. Oehlers등(1995)은 합성보 전단연결재의 거동특성에 대한 연구에서 전단연결재에 휨 변형이 바닥판과 거더의 상대변위를 유발하므로 합성보의 휨강성을 감소시켜 처짐이 증가하게 된다고 보고하였다.

Wang(1998)은 강-콘크리트 부분합성 부재의 최대처짐과 연결재 강성에 대한 연구를 수행하였고, Patnaik(2001)는 접촉면의 거칠기, 연결재 배근량 그리고 콘크리트 강도 등의 영향에 대해 연구하였다. Tadros 등(2002)은 PSC 거더에 전단키를 설치하여 현장타설 바닥판과 합성을 한 합성보를 제작하여 최적의 전단키 형상과 전단키의 파괴모드를 규정하였다.

그러나 바닥판의 재료가 일반 콘크리트가 아닌 UHPC를 사용하는 경우, 바닥판과 강재거더의 상호작용에 따른 영향인자에 대해 검토, 분석하여 그 적용성을 검토할 필요가 있다.

따라서 이 논문에서는 UHPC바닥판과 강재거더의 합성에 따른 전단연결부의 거동 및 성능 향상 여부를 규명하기 위하여 양면전단실험체에 대하여 정적재하실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 실험 개요

이 실험은 UHPC 바닥판과 거더(또는 가로보)를 연결하는 전단연결재의 수평전단강도를 평가하기 위한 것으로, 바닥판을 모사한 UHPC 측면 부재와 거더를 모사한 강주형 중앙부재의 합성을 고려하여 양면전단실험체를 제작하였다.

전단연결재의 전단강도에 영향을 미치는 주요인자로는 전단연결재의 종류, 직경, 배치 간격과 위치, 베딩층 두께, 콘크리트 강도 등이 있으나, 이 실험에서는 현재 일반적으로 상용되고 있는 전단연결재인 Headed stud에 대하여 UHPC의

적용성과 성능 평가를 수행하고자 하므로 Table 1과 같이 전단연결재의 직경을 변수로 선정하여 실험을 계획하였다.

UHPC의 설계기준압축강도는 180MPa을 목표로 하였고, 강재는 H300×300×10×15, 전단연결재는 일반적인 높이 150mm를 사용하였으며(도로교설계기준, 2010), 전단연결재와 강재는 용접으로 연결되었다.

Table 1 Test specimens

Specimens	Diameter of studs (mm)	Number of Specimen (EA)
SHd19	19	2
SHd22	22	2
SHd25	25	2
합계		6

실험체명에서 제일 앞에 위치한 문자 S는 실험체 중앙부재의 재료(Steel)를 의미하며, 두 번째 문자 H는 전단연결재 종류(Headed stud), 나머지 문자 d19는 전단연결재의 직경(diameter)을 나타낸다. 각 시험체 형상 및 제원은 Eurocode 4를 기본으로 하였으나, 수행된 연구의 특성과 실험실 여건을 고려하여 수정결정하였으며, 상세는 Fig. 1과 같다.

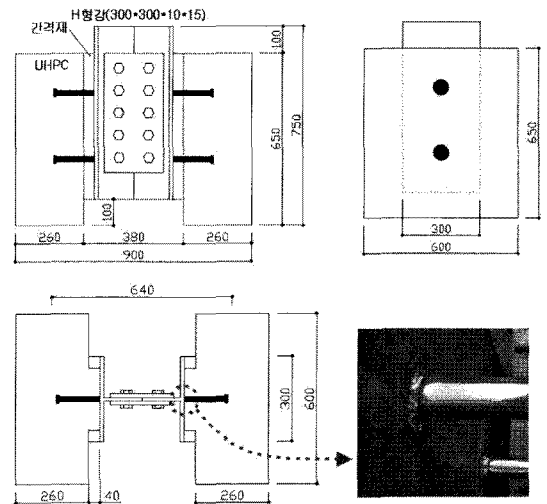


Fig. 1 Specimen Dimensions.

2.2 2면 전단실험(Push-out test)

수평전단강도를 평가하기 위한 실험으로는 합성보의 휨 실험과 2면 전단실험(Push-out test)이 있다. 합성보의 휨 실험은 휨과 전단을 동시에 받는 전단연결재의 거동을 보다 합리적으로 평가할 수 있으나, 보의 전체적 거동에서 전단연결재 부위에 미치는 영향이 어느 정도인지 파악하기 힘들고 실험방법이 까다로우며 2면 전단실험(Push-out test)에 비해 고가의

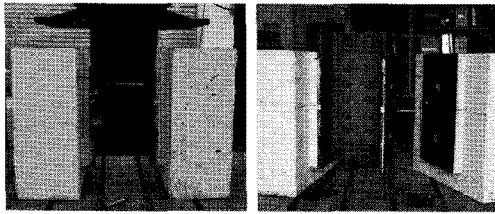


Photo 1 Push-out test.

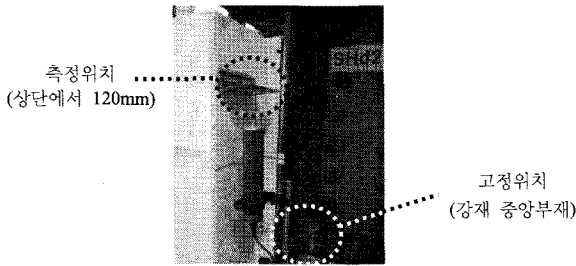


Photo 2 Measuring point.

제작비가 소요된다. 따라서 이 연구에서는 Photo 1과 같이 합성보에 비해 경제적이며 안전측의 결과를 볼 수 있는 2면 전단실험(Push-out test)을 수행하였다.

실험에서 사용된 가력기는 3,000kN까지 재하 가능한 장비로, 실험시 150kN까지 하중제어방법(load control method)으로 2kN/sec의 속도로 가력한 다음 변위제어 방식(displacement control method)으로 변경하여 0.01mm/sec 속도로 실험체가 파괴에 이르러 더 이상의 하중증가가 이루어지지 않을 때까지 실시하였다.

처짐계는 중앙부재와 UHPC 측면부재의 상대변위를 측정하기 위하여 Photo 2와 같이 측면부재 상단으로부터 120mm 지점에 설치하였으며, 앞 뒤 2곳에서 측정하여 부재 제작과 하중 재하시 편심 발생 여부도 관측하였다.

2.3 결과 분석

기존 연구 결과를 분석해 보면 전단연결부위의 파괴 모드는 크게 스티드 전단파괴와 콘크리트 바닥판의 할렬파괴로 구분된다. 이는 1960년대 영국에서 도입된 표준 실험체의 콘크리트 바닥판 폭이 작아 콘크리트 할렬파괴가 발생한 것으로 판단하고 있다. 그러나 실제 교량의 바닥판 폭은 할렬파괴가 발생하지 않을 만큼 충분히 넓기 때문에 1980년 이후 BS5400에서 표준 실험체의 바닥판 폭을 600mm로 수정하여 스티드 전단파괴를 유도하고 있다. 이 실험에서도 바닥판의 폭을 600mm로 하였으며, 직접재하 방법으로 정적실험을 실시한 결과 모든 실험체의 파괴는 전단연결재의 파단에 의해 발생하였다.

그 결과를 정리하여, Table 2 및 Fig. 2에 나타내었다. 슬립(Slip)은 극한하중 상태에서 발생한 강제 중앙부재와 UHPC 측면부재 사이의 상대변위 값으로 시편당 2개의 처짐계 측정값을 평균한 것이다.

Table 2 Test results

Specimens		Ultimate Load (kN/Stud)	Slip (mm)	Failure Mode
SHd19	A	137.23	7.91	Stud Failure
	B	152.15	10.24	Failure
SHd22	A	198.10	9.73	Stud Failure
	B	193.63	7.07	Failure
SHd25	A	239.47	8.48	Stud Failure
	B	257.63	9.64	Failure

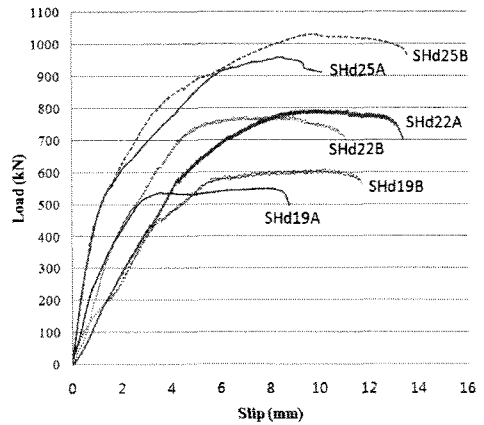


Fig. 2 Load-Slip Relationship Curve.

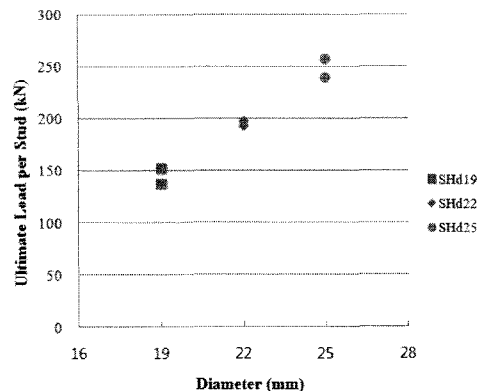


Fig. 3 Relation between Ultimate load and Diameter of Stud.

Fig. 2를 보면 실험체별로 파괴하중의 약 60 ~ 80%까지는 하중이 증가함에 따라 상대변위가 거의 선형적으로 증가하였다. 그 이상의 하중에서는 상대변위가 급격히 증가하면서 비선형적인 양상을 보이다가 결국 하중이 급격히 떨어지며 상대변위 증가량이 줄어들는데, 이것은 스티드의 전단파단이 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 극한 하중 상태에서의 최대 상대변위는 10mm~14mm 정도로 나타났다.

Fig. 3은 전단연결재 직경별로 스티드 1분당 극한하중을 비교한 것으로 직경이 커짐에 따라 선형적인 증가를 보이고 있어, 직경이 클수록 전단 성능이 우수함을 알 수 있다.

Fig. 4는 파단된 stud 형상으로 (a)와 (b) 모두 용접목 부근에서 파단되었다. (b)의 하단부가 (a)에 비해 큰 변형을 보이는데, 이는 측면부재인 UHPC의 강도가 높아 압쇄현상이 비교적 작게 발생함에 따라 스티드의 변형이 크지 않은 것으로 판단된다.

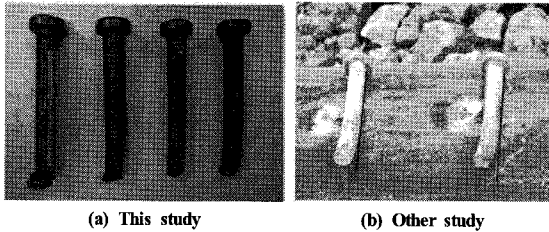


Fig. 4 Shear stud after test.

Fig. 5는 스티드 1본당 극한하중에 대하여 이 연구의 실험결과와 기존 연구사례의 결과를 비교한 것이다. 연구사례 A는 스티드 직경이 19mm이고, 연구사례 B는 스티드 직경이 22mm 였으며, 두 사례 모두 높이는 100mm, 콘크리트 압축강도는 30MPa로 동일하였다. 이 연구의 결과가 타 연구사례에 비해 비교적 큰 극한강도를 나타내고 있어 고성능 재료인 UHPC를 사용함에 따른 합성성능의 향상을 기대할 수 있는 것으로 평가되었다. 또한, 현행 기준을 사용하여 전단연결재를 설계하더라도 안전측의 성능을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

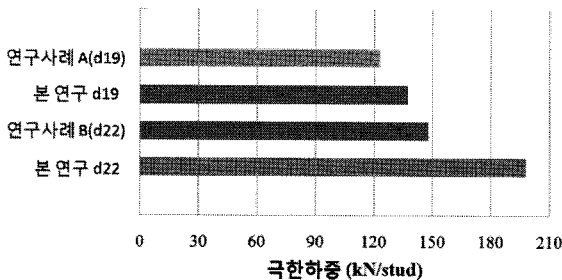


Fig. 5 Case study comparison.

3. 결론

이 연구에서는 바닥판 세그먼트와 가로보의 합성 방안으로, 스티드형 전단연결재에 의한 연결구조에 대하여 성능평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

모든 전단연결재는 항복 후 파단에 의한 파괴 양상을 보였으며, 극한하중값은 직경에 비례하여 직경이 클수록 전단 저항 능력이 우수한 것으로 나타났다.

이전 연구사례와의 비교에서 이 연구의 실험결과, 극한강도는 유사한 조건의 전단연결재에 비해 큰 값을 나타내어 고성능 재료인 UHPC를 사용함에 따른 합성성능의 향상을 기대할 수 있는 것으로 평가되었다. 이는 전단연결재를 둘러싸고 있는 고강도 재료인 UHPC가 전단연결재의 휨변형을 억제하여 순수 전단 거동에 보다 가깝게 저항하게 하는 역할을 하기 때문인 것으로 유추할 수 있다.

후 기

이 연구는 한국건설기술연구원의 “하이브리드사장교 바닥판 개발,” 과제에 위탁연구로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Chang, S.P., Shim, C.S., Kim, J.H., and Kim, Y.J., “Design of Shear connection In Full-Depth Precast Concrete Deck Bridge,” *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 10, No. 4, 1998, pp. 759-767.
- 2) Hyun, B.H., Chung, C.H., Shim, C.S., and Ma, H.W., “Design of Horizontal Shear Strength of the Shear Connectors Between Precast Decks and PSC Girders,” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 2A, 2005, pp. 327-335.
- 3) Kim, J.H., Chang, S.P., and Choi, S.H., “Strength Evaluation of Shear Connection in Composite Bridges with Precast Concrete Decks,” *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 20, No. 5-A, 2000, pp. 679-690.
- 4) Kim, Y.H., “A Study on the Evaluation of Shear Resisting Capacity for the Various Perforated Shape Shear Connector,” *Magazine of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 21, No. 5, 2008, pp. 1-8.
- 5) Korea Institute of Construction Technology, “Development of Deck Systems for Hybrid Cable-Stayed Bridge,” *Report of Korea Institute of Construction Technology*, KICT 2009-092, 2009.
- 6) Korea Institute of Construction Technology, “Development of Long-Life Deck Systems for Bridges - Precast Concrete Deck,” *Report of Korea Institute of Construction Technology*, KICT 2006-098, 2006.
- 7) Korea Institute of Construction Technology, “Development of Long-Life Deck Systems for Bridges(I),” *Report of Korea Institute of Construction Technology*, KICT 2003-053, 2003.
- 8) Lee, H.S., Chung, C.H., Kim, B.S., Kang, J.Y., and Sohn,

- Y.S., "Applicability Evaluation of \cap type Perfobond Rib Shear Connectors," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, 2006, pp. 410-413.
- 9) Loov, R.E., and Patnaik, A.K., "Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams with a Rough Interface," *PCI Journal*, Vol. 39, No. 1, 1994, pp. 48-66.
- 10) Ministry of Construction & Transportation, Application and Development of Precast Concrete Bridge Deck, Ministry of Construction & Transportation, 2002.
- 11) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korean Highway Bridges Design Code, Korea Road & Transportation Association, 2010.
- 12) Oehlers, D.J., "Composite Beams with Limited-Slip-Capacity Shear Connectors," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 6, 1995, pp. 932-938.
- 13) Patnaik, K.A., "Behavior of Composite Concrete Beams with Smooth Interface," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 4, pp. 359-366.
- 14) Shim, C.S., Chung, C.H., Kim, C.Y., and Chang, S.P., "Shear Stiffness of Shear connections in Full-Depth Precast Concrete Deck Bridge," *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 10, No. 4, 1998, pp. 749-758.
- 15) Tadros, K.M., Badie, S.S., and Kamel, R.M., "Girder Deck Connection for Rapid Removal of Bridge Decks," *PCI Journal*, Vol. 47, No. 3, pp. 58-69.
- 16) Wang, Y.C., "Deflection of Steel-Concrete Composite Beams with Partial Shear Interaction," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 10, pp. 1159-1165.