

볼트 접합 스티드 전단연결재의 피로거동에 관한 실험적 분석

천진욱¹ · 정대성² · 박세현³ · 서상욱⁴ · 김선희⁵

(주)아이오콘스텍 대표이사¹, 국토교통연구인프라운영원 수석연구원², 국토교통연구인프라운영원 선임연구원³,
가천대학교 건축공학과 교수^{4,5}

Experimental Study of Fatigue Behavior of a Bolt-Type Shear Connector

Cheon, Jinuk¹ · Jung, Daesung² · Park, Se Hyun³ · Seo, Sanguk⁴ · Kim, Sunhee⁵

¹CEO, AIO Constech, Seoul, Korea

²Chief Researcher, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, Yongin, Korea

³Senior Researcher, Korea Construction and Transport Engineering Development Collaboratory Management Institute, Yongin, Korea

^{4,5}Professor, Department of Architectural Engineering, Gachon University, Seoul, Korea

Abstract: As the life cycle of steel girder bridges is shortened due to the breakage of the concrete deck, research on the modular construction method using the precast deck is being actively conducted. However, research on environmental aspects is insufficient. In this study, static and fatigue strength tests were performed to verify the performance of bolt-type shear connectors that can replace the stud bolts. After the test, no cracks were observed in the specimen, which involved 2 million cycles of fatigue load. The residual strength test conducted afterward was also confirmed to be similar to the static strength test.

Key Words: shear connector, fatigue strength, precast deck, aged bridge, bridge life cycle

1. 서 론

국내 교량 시장이 점차 대형화됨에 따라 장경간 교량에 대한 수요가 증가하고 있으며 특히 인장에 강한 강재에 압축 부재인 콘크리트를 합성한 강합성 거더의 경우 우수한 경제성 및 단면 성능으로 인하여 장경간 교량의 상부 거더로 활발히 사용되고 있다(Kim, 2005).

강합성 거더는 강재의 재료적 특징으로 인해 유지관리가 용이하고 교량의 수명이 길다는 장점에도 불구하고 통행량 증가 및 콘크리트 열화 등으로 인

해 바닥판이 파손될 경우 노후화가 가속되어 유지보수 비용이 증가하고, 심각한 경우 생애주기 내에서 상부거더 전체를 재시공하는 등의 문제가 발생할 우려가 있다(Jang et al., 2022). 이러한 문제점 때문에 손상의 주요 부재인 바닥판만을 쉽게 교체함으로써 유지보수 비용 감소 및 교량의 수명을 연장하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

특히 프리캐스트 바닥판을 사용한 모듈화 공법은 시공이 간편하고 급속시공이 가능하여 도심지 등의 공사에 적용성이 매우 높으며 다양한 시공사례와 연구개발을 통해 노후 바닥판 교체사업에 폭넓게 적용되고 있다(Kim, 2006; Park, 2021).

그러나 연구 동향을 살펴보면 기존의 프리캐스트 바닥판 공법은 거더와 바닥판 간의 합성기술에만 목적이 국한되어 바닥판 철거 과정에서 발생하는 소음, 진동 및 미세먼지 등으로 인한 환경문제와 해결 방안 등 그에 따른 사회적, 경제적 손실에 관한 연구는 매우 미흡하다는 한계가 있다. 또한 시공 편의를 위해 기존 용접 스티드를 전단연결재로 사용하고

Corresponding author: Kim, Sun-Hee

Department of Architectural Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120, Korea.

Tel: +82-31-750-4718, Fax: +82-31-757-5837

E-mail: shkim6145@gachon.ac.kr

Received October 22, 2022 / Revised November 2, 2022 / Accepted November 6, 2022

· 본 논문에 대한 토의를 2023년 01월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 02월호에 토론결과를 게재하겠습니다.



Fig. 1 Concrete Crushing for Replacement of Deck

있기 때문에 바닥판 콘크리트 파쇄 과정에서 거더에 용접되어 있는 스티드의 손상이 불가피하고 파쇄 중 발생하는 충격으로 거더가 손상되는 등의 구조 안전성 저하에 대한 연구가 부족한 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 거더에 설치되는 전단연결재의 수량을 감소시켜 해체 작업의 편의를 도모하기 위해 고강도 재료 및 직경 25mm 이상의 대직경 스티드를 활용한 방식이 연구되고 있으나 두 방식 모두 용접연결 방식을 사용하여 합성단면의 정적강도는 증가시키지만 피로강도는 큰 차이가 없어 적용에 어려움이 있다.

볼트 접합 스티드 전단연결재는 기존 용접 스티드의 문제점을 해결하기 위해 고안된 공법으로 스티드와 거더를 용접연결이 아닌 볼트 접합 방식으로 연결하여 거더와 바닥판의 합성 및 분리가 용이한 공법이다.

바닥판 교체 시 콘크리트 파쇄를 최소화하여 분진 및 소음 발생 등으로 인한 환경 문제를 감소시킬 수 있고, 콘크리트 파쇄 시 충격으로 인한 거더의 손상이 없어 구조 안전성 저하의 우려가 없다. 또한 용접 연결이 아닌 볼트 접합 방식으로 설계 시 피로(fatigue)의 영향으로 인한 재료적 성능의 감소를 최소화 할 수 있어 경제성 향상과 함께 생애주기 비용을 절감할 수 있는 공법으로 평가받고 있다(Kim, 2005; Matthew et al., 2020).

이 연구에서는 Figs. 2와 3과 같이 경사진 돌기부를 적용하여 거더와 전단연결재간의 일체성을 향상시킨 볼트 접합 스티드 전단연결재의 전단강도 실험 및 피로강도 실험을 수행하였고 이후 잔류강도 실험을 통해 피로에 대한 영향과 거동에 대한 분석을 수행하였다.

2. 전단연결재 설계 기준

일반적으로 전단연결재의 설계는 콘크리트와 전단연



Fig. 2 Bolt Type Shear Connector with Sloped Protrusion

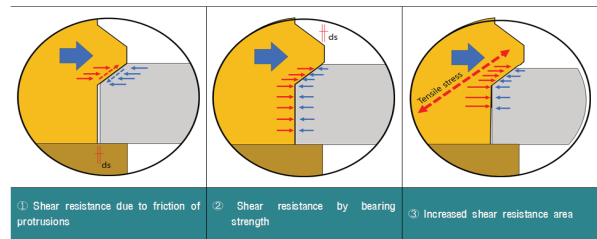


Fig. 3 Resistance Performance of Bolt Type Shear Connector with Sloped Protrusion

결재의 강도에 관한 극한강도 설계기준과 반복적인 하중에 대하여 발생하는 용접부의 응력집중에 저항하기 위한 피로강도 설계기준을 따르도록 하고 있다. 본 장에서는 볼트 접합 전단연결재의 실험결과를 분석하기 위하여 국내외의 전단연결재 설계식을 검토하였다.

2.1 정적 설계기준

국내 도로교설계기준(Road Bridge Design Standards, 2015)과 강구조설계기준의 전단연결재 설계강도는 미국 AASHTO LRFD에 준하여 식 (1)과 같이 규정하고 있으며(AASHTO, 2017), 유럽의 Eurocode-4 (2004)는 식 (2)와 사용하고 있다. Eurocode-4 (2004)는 부분계수(partial factor, γ_V)를 적용하여 국내 설계기준과 AASHTO LRFD보다 전단연결재의 전단강도를 작게 평가하고 있다. 또한 국내설계기준과 AASHTO LRFD는 스티드의 높이와 직경에 대한 비율을 4.0 이상으로 규정하고 있는 반면, Eurocode-4 (2004)의 경우 3.0과 4.0 사이에 속하는 경우를 허용하여 보다 다양한 형태의 전단연결재에 대해 적용할 수 있도록 하고 있다.

$$Q_r = \phi_{sc} Q_n = \phi_{sc} 0.5 A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq \phi_{sc} A_{sc} F_u \quad (1)$$

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

여기서, Q_r 과 P_{RD} 는 전단연결재의 설계강도이며 Q_n 은 전단연결재 공칭전단강도, ϕ_{sc} 는 전단연결재에 대한 강도감소계수, f_{ck} 는 콘크리트의 공칭압축강도, F_u 는 전단연결재의 인장강도, E_c 및 E_{cm} 은 콘크리트의 탄성계수, E_c 및 E_{cm} 은 콘크리트의 탄성계수, A_{sc} 는 전단연결재 단면적, d 는 전단연결재 직경, α 는 스티드 형상에 관한 계수, γ_V 는 부분계수이다.

2.2 피로강도 설계기준

국내 도로교설계기준과 AASHTO LRFD는 Slutter and Fisher (1966)의 연구에 근거하여 전단연결재의 피로강도를 식 (3), (4)와 같이 제안하고 있다. 또한 피로에 대한 상세 범주에 따라 피로 설계곡선(S-N Curve)을 Fig. 4와 같이 제시하여 범주에 해당하는 공칭피로강도를 식 (5)와 같이 규정하고 있다. 피로에 대한 상세범주 예시를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 도로교 설계기준은 설계 편의를 위해 설계응력 범위가 일정피로진폭 한계값의 1/2보다 작을 때, 각 범주들은 이론상 피로에 대하여 무한수명을 기대할 수 있다고 명시하고 있다. 특히 피로균열이 쉽게 발생하지 않는 부재와 이음부에 대한 상세범주 A, B 및 B'에 대해서는 피로 검토의 생략을 허용하고 있다.

$$Z_r = \alpha d^2 \geq \frac{38d^2}{2} \quad (3)$$

$$\alpha = 238 - 29.5 \log N \quad (4)$$

$$(\Delta F)_n = \left(\frac{A}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \geq \frac{1}{2} (\Delta F)_{TH} \quad (5)$$

여기서, Z_r 은 전단연결재의 피로강도, N 은 하중 반복횟수, A 는 구조 상세범주 상수, $(\Delta F)_{TH}$ 은 피로진폭 한계값이다.

Eurocode-4 (2004)의 전단연결재 피로설계 기준은 식 (6)과 같으며, 스티드 전단연결재에 대한 피로 설계곡선을 Fig. 6과 같이 제시하고 있다.

$$\log N = 21.935 - 8 \log S \quad (6)$$

여기서, $S = \Delta \tau_R$ 은 응력범위이다.

또한 일본강구조학회에서 제시하는 전단연결재의 피로강도식은 식 (7)과 같으며 무한수명에 대한 피로한계를 66.6MPa로 규정하고 있다. 마지막으로 영국의 BS-5400: part 10(British Standards Institution, 2006)은 전단연결재의 피로강도를 식 (8)과 같이 2단계의 기울기로 제시하고 있으며 응력범위를 극한강도에 대한

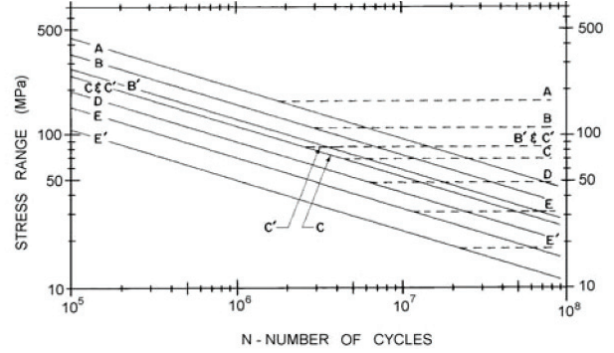


Fig. 4 Stress Range Versus Number of Cycles (AASHTO LRFD)

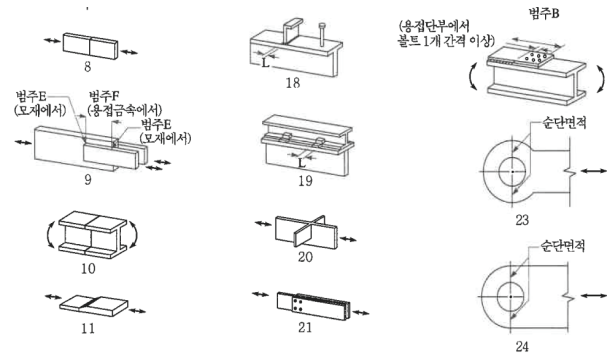


Fig. 5 Fatigue Categories Example

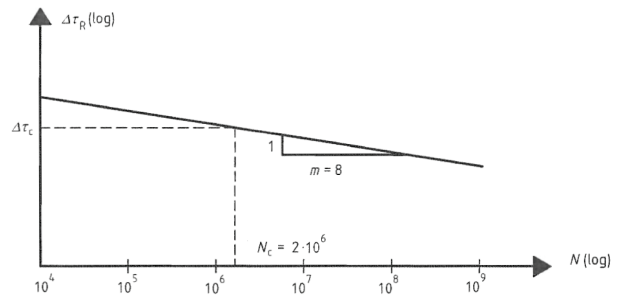


Fig. 6 Stress Range Versus Number of Cycles (Eurocode-4, 2004)

비율로 환산하여 사용하고 있다. 따라서 고강도의 전단연결재를 사용할 경우 피로 강도 또한 증가하도록 하고 있다.

$$\log N = 15.816 - 5 \log S \quad (7)$$

$$\log N = 22.318 - m \log S_{BS} \quad (8)$$

여기서, $S_{BS} = 425 \text{ MPa} \times \Delta P / P_{RD}$ 이며, 응력범위이다. m 은 피로 설계곡선의 기울기이며 $m = 8; N < 10^7$ 이고 $m = 10; N \geq 10^7$ 이다.

2.3 설계기준 적용

전단연결재 설계 시 정적하중에 대한 설계 기준은 전단연결재의 직경과 재료에 대한 함수로 전단연결재의 단면적과 강도가 증가할수록 설계하중 또한 콘크리트 강도 내에서 비례하여 증가하도록 제시하고 있다. 하지만 피로강도에 대한 설계기준은 반복하중의 횟수와 반복하중에 따른 전단연결재의 응력 범위에 대해 평가하고 있기 때문에 전단연결재의 직경이나 재료에 의한 영향보다 연결 방식에 따른 응력집중의 영향이 지배적이다.

본 논문에서는 설계의 범용성과 분석의 정확도를 높이기 위하여 연결방식에 따른 상세범주를 제시하고 있는 국내 도로교설계기준과 전단연결재의 피로 설계곡선을 직접 제시하고 있는 Eurocode-4 (2004)의 피로강도식을 적용해 볼트 접합 전단연결재의 피로 강도를 검토하였다.

3. 실험

볼트 접합 스티드 전단연결재의 하중저항 성능을 평가하기 위하여 전단실험체(5개)를 제작하였고, 정적강도 실험(3개)과 피로강도 실험(2개)을 실시하였다. 실험은 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 진행되었으며, 국토교통연구인프라운영원에서 제안한 표준실험절차서와 국내 도로교설계기준의 바닥판 규정 등을 참조하여 실험체를 제작하였다. 볼트 접합 스티드 전단연결재는 Fig. 7과 같이 전단연결재 하부의 나사산에 너트를 체결하여 거더와 연결하였으며, 체결력을 높이기 위하여 일반 풀림방지 와셔를 사용하였다. 실험체의 제원을 Table 1에 나타내었고 볼트 접합 스티드 전단연결재와 실험체 상세 및 제작과정을

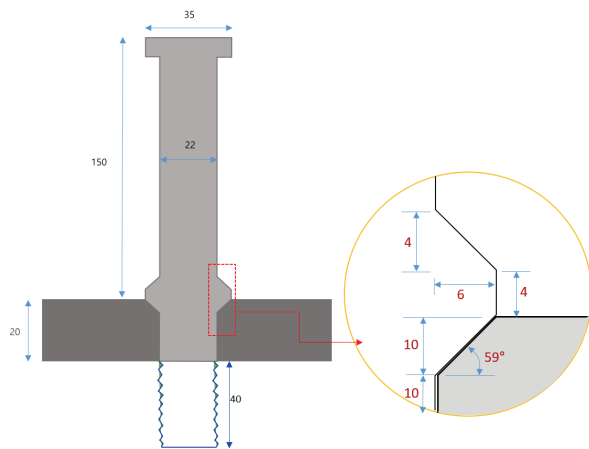


Fig. 7 Details of the Bolt Type Shear Connector with Sloped Protrusion

Table 1. Properties of the Specimen

Strength of Precast Deck (MPa)	Strength of Non-Shrink Mortar (MPa)	Diameter of DY Bolt (mm)	Length of DY Bolt (mm)
35	60	22	200

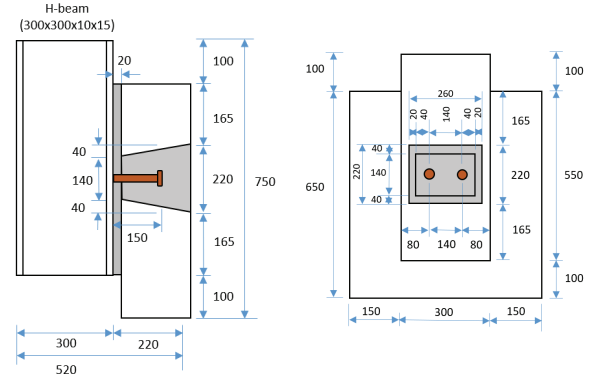


Fig. 8 Details of the Specimen

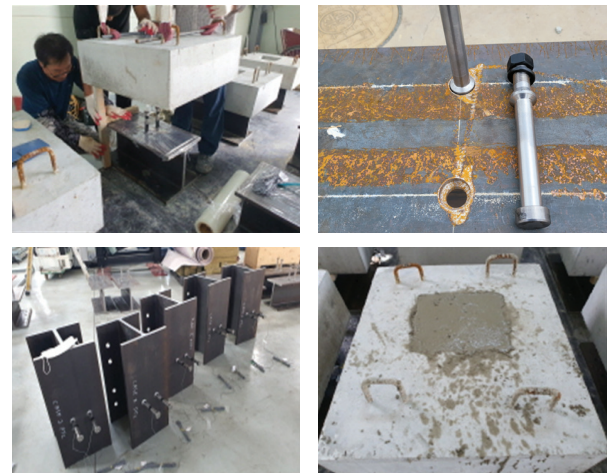


Fig. 9 Manufacturing

을 Fig. 8과 9에 나타내었다.

3.1 정적강도 실험(Static strength test)

정적강도 실험은 볼트 접합 스티드 전단연결재의 전단강도 평가 및 피로 실험을 위한 피로응력 범위를 결정하기 위하여 총 3개의 전단실험체를 대상으로 수행되었다. 실험은 변위제어 방식(1mm/min)으로 진행되었으며 국토교통연구인프라운영원에서 제안한 표준실험절차서의 수평전단실험 수행 절차에 따라 예상 파괴하중의 5~40%를 25회 반복가력 후 파괴 시까지 가력하였다.

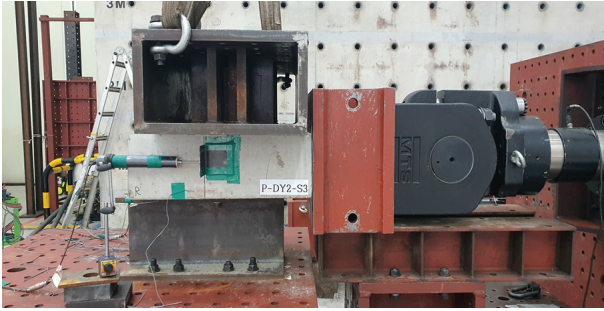


Fig. 10 Static Strength Test



Fig. 11 Failure Shape

Table 2. Results of Static Strength Test

Specimen Designation	Actuator Force (kN)	Ultimate Load per DY Bolt (kN)	Cylinder Stroke (mm)
P-DY-S1	417.84	208.92	16.94
P-DY-S2	406.09	203.05	14.51
P-DY-S3	400.38	200.19	15.11

정적강도 실험 결과, 모든 실험체는 플랜지와 콘크리트 접합면에서 볼트 접합 스테드 전단연결재가 전단파괴 하는 것으로 확인되어 나사선으로 인한 단면적 감소부위 파괴 및 편심으로 인한 인장파괴 없이 안정적인 합성거동을 한 것으로 판단된다. Figs. 10과 11에 각각 정적강도 실험과 파괴형상을 나타내었으며 결과를 Table 2 및 Fig. 12에 정리하였다.

3.2 피로강도 실험(Fatigue Test)

정적강도 실험 결과에 따라 결정된 피로강도 실험의 하중재하범위 및 반복횟수 등을 Table 3에 나타내었다. 피로하중에 의한 볼트 접합 스테드 전단연결재의 응력범위는 탄성한계 내에 있도록 하기 위하여 피로하중의 최대 하중이 정적최대하중의 60%를 넘지 않도록 하였다. 피로실험은 총 두 개의 피로실험체를 대상으로 수행되었으며 정해진 응력범위에 따

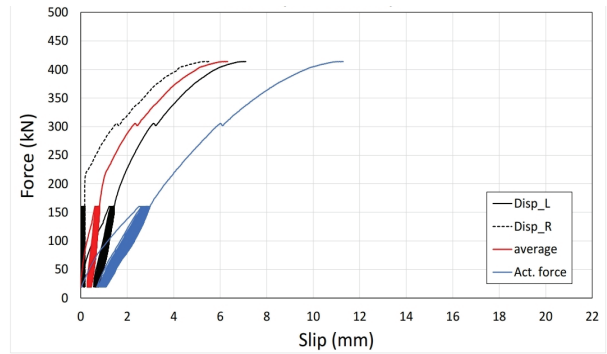


Fig. 12 Force-Displacement (P-DY-S1)

Table 3. Fatigue Load Range

Stress Range (MPa)	Stress (MPa)		Ratio	Cycles
	Min	Max		
110	16.4	126.4	0.1	2,000,000

라 2,000,000회의 피로하중을 반복적으로 재하한 후 파괴 시까지 가력하였다. 피로강도 실험체의 파괴하중은 정적강도 실험의 파괴하중과 비교하여 반복적인 피로하중으로 인한 실험체의 잔류강도 영향을 검토하기 위한 목적으로 사용되었다.

피로강도실험 결과, 2,000,000회 가력 후 콘크리트 표면의 균열은 발견되지 않았으며 피로하중 반복 횟수에 따른 변위 차이는 발생하지 않았다.

P-DY-F1 실험체의 경우, 1,000,000회 피로하중 반복 이후 최대 하중(92.89kN)에서 약 0.27mm의 상대변위가 발생하였다. 해당 변위는 피로실험 종료 시까지 증가하지 않고, 최소하중에서의 변위는 모든 구간에서 동일한 것으로 확인되어 베딩층 내 무수축 모르타르의 공극 또는 콘크리트 내부에 발생한 미세 균열에 의한 것으로 판단된다. 이후 잔류강도에 의한 영향을 검토하기 위하여 파괴 시까지 정적하중을 가력하였다. 잔류강도 실험 결과 약 300kN에서 콘크리트의 균열이 발생하였으며 404.16kN에서 전단연결재의 항복이후 실험을 종료하였다.

P-DY-F2 실험체의 경우, 모든 구간에서 피로 하중 반복에 따른 변위가 동일한 것으로 나타났다. 잔류강도 실험 결과 약 250kN에서 콘크리트의 균열이 발생하였으며 391.55kN에서 전단연결재의 항복이후 실험을 종료하였다.

피로강도실험을 Fig. 13에 나타내었고 각 실험체의 반복하중-변위 그래프를 Figs. 14와 15에 나타내었으며, 잔류강도 실험의 $P-\delta$ 그래프를 Fig. 16에 나타내었다. 또한 실험체 파괴 형상을 Figs. 17과 18에 나타내었다.

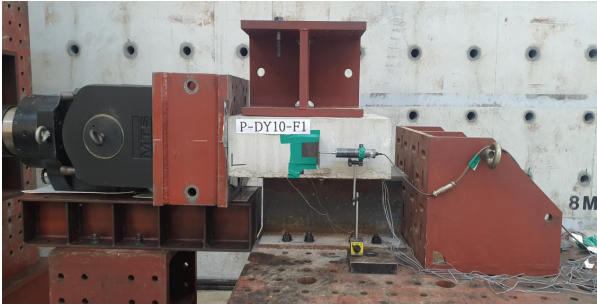


Fig. 13 Fatigue Strength Test



Fig. 17 Fatigue Shape (P-DY-F1)

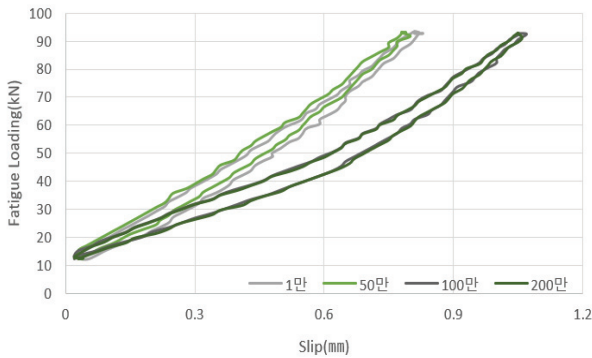


Fig. 14 Fatigue Loadng-Slip (P-DY-F1)



Fig. 18 Fatigue Shape (P-DY-F2)

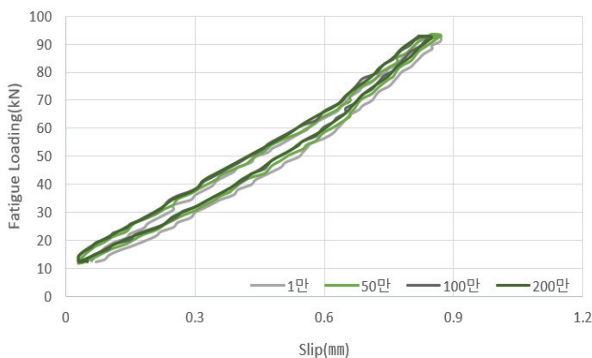


Fig. 15 Fatigue Loadng-Slip (P-DY-F2)

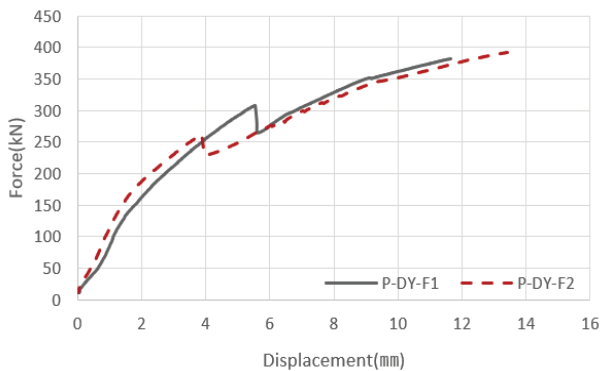


Fig. 16 Results of Residual Strength(P-δ)

4. 결 론

본 논문에서는 볼트 접합 스테드 전단연결재의 피로 하중에 대한 성능 및 거동을 검토하기 위하여 정적강도 실험 및 피로강도 실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 볼트 접합 스테드 전단연결재의 강도 및 피로강도 실험의 하중 범위를 결정하기 위하여 정적강도 실험을 실시한 결과, 볼트 접합 스테드 전단연결재의 최대 전단강도는 408.10 kN (평균값)으로 나타났다.
- (2) 2,000,000회 반복하중에 의한 피로실험 결과 볼트 접합 스테드 전단연결재의 피로파괴는 발생하지 않았으며, 잔류강도 실험결과 최대하중은 정적강도 최대하중의 약 98% 수준으로 반복하중에 의한 볼트 접합 스테드 전단연결재의 잔류강도는 매우 작은 것으로 확인되었다.
- (3) 2장에서 언급한 Eurocode-4 (2004) 피로설계에 따르면 응력범위 110 MPa 의 하중반복 횟수는 401,660회로 본 피로실험의 하중반복 횟수인 2,000,000회의 약 20%에 해당할 뿐 아니라 피로 파괴 또한 발생하지 않았다. 따라서 볼트 접합 스테드 전단연결재는 Eurocode-4 (2004)에서 제시하는 피로강도와 비교하여 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

- (4) 국내 도로교설계기준에서 제시하고 있는 피로 설계 기준에 따르면 용접 스티드 전단연결재의 피로 상세 범주는 C이며, 볼트 접합 스티드 전단연결재의 피로 상세범주는 볼트 및 리벳 연결부에 해당하는 B로 분류된다. 상세범주 B는 상세범주 C와 비교하여 약 1.4~1.6배 우수할 뿐 아니라 도로교설계기준은 상세범주 B에 대하여 설계 시 피로에 대해 무시할 수 있다고 규정하고 있다.

일반적으로 강합성 거더는 전단연결재의 설계 시 극한한계상태에 의한 전단연결재 수량을 만족하더라도 피로한계상태를 만족하지 못해 전단연결재 수량이 증가하게 된다. 때문에 기존 용접 스티드 전단연결재를 사용한 강합성 거더의 경우 필요 이상의 전단연결재가 배치되며 이는 초기 공사비의 증가를 초래한다. 볼트 접합 스티드 전단연결재의 경우 실험을 통해 피로하중에 대한 성능을 입증하였을 뿐 아니라 도로교설계기준에 따라 피로 검토를 생략할 수 있기 때문에 극한한계상태에 의한 전단검토만으로 전단연결재를 배치할 수 있어 초기 공사비 절감에 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(22CTAP-C164082-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- AASHTO (2017), *AASHTO LRFD Bridge Design Specification*, LRFD 8, USA.
- British Standards Institution. (2006), *Code of Practice for Design of Composite Bridges*, BS5400-2 Steel, Concrete and Composite Bridges, United Kingdom.
- Eurocode 4 (2004), *Design of Composite Steel and Concrete Structures-Part1-1: General Rules and Rules for Buildings*, EN1994-1, Belgium.
- Jang, M., S., Lee, H., C., Kim, S., J., and Choi, B. H. (2022), "Analysis of the Performance Improvement of Aging RC Columns due to Degraded Concrete based on the Height and Number of FRP-Reinforcement Layers," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-9. doi: 10.11004/kosacs.2022.13.1.001
- Japan Institute of Steel Construction. (2000), *Fatigue Design Guidelines for Steel Structures*, Japan.
- Kim, J. S. (2005), Strength of Bolt Type Shear Connector in Precast Deck Composite Bridges, *Master Thesis*, Department of Civil Engineering, Dankook University, Seoul, Korea. (in Korean)
- Kim, K. M. (2006), Fatigue Behavior of Headed Stud Shear Connectors for Steel-Concrete Composite Bridge Deck, *Master Thesis*, Department of Civil Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea. (in Korean)
- Matthew, S., Jeffrey, S., and Scott, W. (2020), "Performance of Embedded Bolt Shear Connectors," *2019 Structural Engineering International*, Vol. 30, ISBSE, Switzerland, pp. 421-429.
- Park, S. H. (2021), A Study on the Improve Experimental Method for Performance Evaluation of Composite Girder Shear Connector, *Master Thesis*, Department of Civil Engineering, Myongji University, Yongin, Korea. (in Korean)
- Road Bridge Design Standards. (2015), *Road Bridge Design Standards Interpretation(LRFD)*, Korean Bridge Design & Engineering Research Center.
- Slutter, R. G., and Fisher, J. W. (1966), "Fatigue Strength of Shear Connectors," *Highway Research Records*, Vol. 147, Highway Research Board, USA, pp. 65-88.

주요어: 전단연결재, 피로강도, 프리캐스트 바닥판, 노후교량, 생애주기

국문초록: 콘크리트 바닥판의 파손 등으로 인하여 강합성 거더 교량의 생애주기가 짧아짐에 따라 프리캐스트 바닥판을 사용한 모듈화 공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 바닥판의 해체 시 발생하는 분진 및 소음으로 인한 환경적 측면에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 기존 용접 스티드 볼트를 대체할 수 있는 볼트 접합 전단연결재의 성능을 검증하기 위하여 정적강도 실험 및 피로강도 실험을 수행하였다. 실험결과 200만 회 피로하중에 대하여 실험체의 균열 및 파괴 양상은 관측되지 않았으며, 이후 실시한 잔류강도 실험 또한 정적강도 실험과 동일한 것으로 확인되었다.