

# 프리캐스트 바닥판 합성형 교량에서의 베딩층의 두께를 고려한 전단연결재의 피로강도

Fatigue strength of stud shear connector  
considering bedding layer thickness in precast deck composite bridges

류형근<sup>1)</sup> · 심창수<sup>2)</sup> · 정철현<sup>3)</sup> · 장승필<sup>4)</sup>  
*Ryu, Hyung Keun Shim, Chang Su Chung, Chul Hun Chang, Sung Pil*

**요약** : 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 전단연결부는 전단포켓과 베딩층이 존재하여 현장타설 강합성 교량과는 다른 구조적 특징을 갖고 있다. 따라서 프리캐스트 바닥판의 전단연결재 설계의 기초를 수립하기 위해서는 실험을 통한 연구가 수행되어야 한다. 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 전단연결재의 피로수명을 평가하기 위하여 베딩층의 두께를 변수로 한 전단연결재의 push-out 피로 시험을 수행하였다. push-out 피로 시험의 수행 결과, 전단연결재의 파괴모드를 확인하였고, 이를 통해 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 전단연결재의 피로수명 곡선식을 유도하였다.

**ABSTRACT** : A shear connection in composite bridges with precast decks has considerable characteristics different from cast-in-place deck bridges such as shear pocket and bedding layer. Thus, it is necessary to build design basis of the shear connector in precast decks through the experiments. In order to estimate fatigue life of shear connector in precast deck bridges, push-out fatigue tests were conducted with parameter, bedding layer thickness. As a result of the tests, failure modes of shear connector were observed. Consequently, empirical S-N curve equations of stud shear connector in precast deck bridges were proposed in this paper.

**핵심용어** : 전단연결부, 베딩층의 두께, push-out 피로시험, 피로수명

**KEYWORDS** : shear connection, bedding layer thickness, push-out fatigue test, fatigue life

## 1. 서론

강합성 교량의 형태가 다양해지고 시공기술의 진전과 건설시장의 상황이 변함에 따라서 전체적인 설계수명동안의 경비(life cycle cost) 개념에서 경쟁력이 있는 교량들이 제시되고 있다. 그 중에서 현장타설 바닥판에서 발생하는 여러 가지 문제들에 대한 대안으로 프리캐스트 바닥판이 제시될 수 있고 이에 따른 연구가 활발하게 진행되고 있다. 프리캐스트 바닥판의 적용을 위해서는 피할 수 없는 문제가 연결부라고 할 수 있는데, 바닥판간 이음부와 합성작용의 확보를 위한 전단연결부가 있다.

프리캐스트 바닥판 교량은 바닥판 이음부에서의 균열 방지를

를 위해서 교축방향 프리스트레스를 도입하게 되는데, 이로 인한 장기거동에서 전단연결부의 거동이 매우 중요하다. 그런데, 설계시 부분합성 설계를 할 경우 실교에서 존재하는 부착과 마찰의 효과로 인해서 전단연결재는 안전측으로 설계되었지만 교축방향 프리스트레스 손실량의 산정에서는 그렇지 못하게 되어 균열발생의 원인이 될 수 있다. 프리캐스트 바닥판을 강합성교량에 적용하는 경우 합성의 정도를 완전합성이나 부분합성을 모두 고려해볼 수 있지만 설계의 편이성이나 실제 거동의 유사성을 보아서 이 논문에서는 완전합성으로 설계하는 것이 타당하다고 판단했고, 설계 트럭에 의한 피로는 반드시 고려되어야 하는 중요한 사항이므로 실험을 통해서 경험식을 제시하고자 하였다.

- 1) 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정
- 2) 정희원, 서울대학교 공학연구소 특별연구원
- 3) 정희원, 대우건설 책임 연구원
- 4) 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

프리캐스트 바닥판 합성형 교량이 일반 현장타설 강합성 교량과 다른 구조적 특징으로서는 전단연결재와 바닥판을 합성하기 위해 바닥판에 전단포켓이 있고 이를 채우기 위한 무수축모르터를 사용한다는 점, 그리고 바닥판을 강주형위에 거치할 때 주형단면의 변화, 연결부 상세 등을 반영하기 위해서 베딩층이 필요하다는 것이다. 따라서, 이러한 구조적 차이점으로 인해, 프리캐스트 바닥판 강합성 교량의 전단연결재를 설계할 때 일반적으로 적용되는 전단연결재의 강도식을 그대로 이용하는 것은 적절하지 못하다고 할 수 있다. 왜냐하면 일반적으로 적용되는 기존의 전단연결재의 설계치들은 현장타설 강합성구조의 전단연결재에 대한 연구를 바탕으로 한 것이기 때문이다.

프리캐스트 바닥판 강합성 교량의 전단연결재에 대한 연구는 설계 기준을 마련하기 위한 작업으로 서울대학교에서 대우건설<sup>(3)</sup>과 공동으로 수행되어 왔다. 기존의 연구에서는 무수축 모르터의 강도, 전단연결재의 지름, 베딩층의 두께를 실험변수로 하여 프리캐스트 강합성 구조에 대한 정적강도 압발실험을 수행하였으며 무수축모르터의 강도만을 변수로 하여 피로 강도에 대한 압발실험을 수행하였다. 무수축모르터의 강도를 변수로 하여 직경이 19mm이고 베딩층의 두께가 20mm일 경우의 전단연결재에 대해 피로실험을 수행하였다. 피로실험의 결과, 28일 압축강도가 50MPa에서 72MPa 사이의 강도를 갖는 무수축모르터의 강도는 전단연결재의 피로강도에 영향을 미치지 못하는 것으로 확인되었다. 따라서 프리캐스트 바닥판의 전단연결재의 피로강도는 모르터 강도의 영향은 미미하고 전단연결재에 작용하는 전단응력 범위만이 주요 변수로서 판단되었다.<sup>(6)</sup>

그러나 위의 실험에서는 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 구조적 특징 중의 하나인 베딩층의 두께를 고려하지 못하였기 때문에 채움재인 무수축모르터의 강도뿐만 아니라 베딩층을 변수로 한 피로 실험이 추가적으로 실시될 필요성이 있다. 따라서 이 논문에서는 베딩층의 두께를 변수로 한 프리캐스트 바닥판 압발피로실험을 수행하여 프리캐스트 바닥판 합성형 교량에서 전단연결재의 피로수명에 베딩층이 어떠한 영향을 미치는가를 알아보았다. 결과적으로 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 구조적 특성인 전단포켓 채움재인 무수축모르터 강도와 베딩층의 두께를 모두 고려한 전단연결재의 피로곡선식을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험부재 및 실험변수

### 2.1. 압발시험체

합성형 교량에서의 전단연결재의 거동을 규명하기 위한 실험적인 연구는 크게 두 가지 방법에 의존하고 있다. 그 하나는, 합성보 시험 공시체를 이용한 것이고, 또 다른 하나는 압발시험 공시체를 이용한 것이다. 이들 방법 중 합성보 시험 공시체가 합성형 교량에서의 전단연결재의 실제 거동을 보다 정확히 보여주는 것으로 평가되고 있지만, 합성보 시험에서 전단연결재의 강도를 평가하기 위한 신뢰할 만한 방법은 아직 제시되어 있지 않다. 이는 보의 저항능력이 전단연결재에 민감하지 않기 때문에 보 전체의 거동에서 전단연결재의 분담분을 추출하기 어렵고, 설사 어느 한 전단연결재에 파단 등의 결함이 발생한다 해도 전단연결재군의 하중분담 능력에 의해 보 전체의 거동에 미치는 그 영향이 작기 때문이다. 압발시험 공시체는 보 공시체에서 전단연결재의 거동특성을 파악하기 어려운 단점을 보완하기 위해 고안된 것으로 압발시험 공시체에서 전단연결재에 작용하는 하중구조는 매우 단순하다. 기존에 수행된 연구결과에 의하면 압발시험 공시체로부터 얻은 시험결과가 보 시험 공시체에서의 시험결과에 비해서 안전측의 결과를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 압발시험 공시체는 제작이 쉽고, 간편하여 작은 비용으로 많은 종류의 시험을 할 수 있다는 장점도 지니고 있다. 따라서, 이 연구에서는 압발 시험 공시체를 이용하여 전단연결재의 피로거동을 파악하였으며 이 실험에서 사용된 압발시험 공시체의 형상은 그림 1과 같다.

압발시험 공시체에 사용된 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 폭과 길이는 Eurocode 4<sup>(5)</sup>에서 제안한 표준 압발 시험 공시체를 참조하여 각각 60cm, 70cm로 하였고, 바닥판의 두께는 국내 도로교표준시방서<sup>(1)</sup>의 바닥판 최소두께 규정에 따라 22cm로 결정하였다. 프리캐스트 콘크리트 바닥판 제작시 전단연결재와의 합성을 위해 사다리꼴 형태의 전단연결재용 구멍을 사전에 설치하였다.

전단연결부의 실험을 위한 실험시편 제작 시 실제 합성형 교량에서의 전단연결재의 거동과 가능한 한 유사하게 모사하고자 하였으며, 이 때 고려된 주요한 사항은 다음과 같다. 실제 합성형 교량에서 전단연결재들의 하중 재분배를 고려하기 위해 전단연결재를 2열로 배치하였고 실물크기의 실험을 하기 위해 콘크리트 바닥판의 두께를 국내 도로교시방서의 바닥판 최소두께 규정인 22cm로, 전단연결재의 지름은 실제 교량에서 사용하는 것을 대상으로 하였다. 프리캐스트 콘크리트 바닥판의 폭을 넓게 하여 콘크리트 바닥판의 쪼갬파괴를 방지하고 실제의 합성형 교량에서처럼 스티드 전단연결재의 전단 파괴를 유도하였고 콘크리트의 타설 방향은 전단연결부의 강도에 큰 영향을 미치기 때문에 바닥판 콘크리트와 전단연결재용 구멍 채움재인 무수축모르터의 타설 방향을 실제 프리캐스

트 바닥판 합성형교량 시공시의 타설 방향과 같도록 하였으며 강주형과 프리캐스트 콘크리트 판사이의 응력집중을 막고, 현치의 효과를 고려하기 위해 베딩층 무수축모르터 위에 강주형을 거치하였다. 그리고 강주형과 프리캐스트 콘크리트 바닥판 사이에는 사전에 기름을 도포하여 강주형과 무수축모르터 사이의 부착의 효과를 제거함으로써 보수적인 시험결과를 유도하였으며 강주형의 변형을 막기 위해 공시체 설계시 강주형 상부플랜지의 두께와 폭을 고려하였다.

일반적으로 강주형의 플랜지위에는 강주형끼리 연결하기 위해 필요한 연결판, 볼트 등이 돌출되어 있다. 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 갖는 합성형 교량에서는 공장에서 제작되어 이미 경화된 상태의 콘크리트 바닥판을 현장에 가설된 강주형위에 거치하기 때문에 시공 시 이러한 상해를 반드시 고려해야한다. 그러므로 프리캐스트 콘크리트 바닥판 합성형 교량에서 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 거치할 시에는 강주형위에 간격재와 탄성재 등을 설치하고, 유동성이 강한 무수축 모르터로 전단연결재용 구멍을 충전함으로써 프리캐스트 콘크리트 바닥판과 강주형 사이에 일정두께의 베딩층을 두는 방법을 사용하고 있다. 이 베딩층은 강주형 위에 콘크리트 바닥판을 베딩층이 없이 거치하였을 때 발생할 수 있는 활하중의 재하시의 진동문제나, 콘크리트 파쇄현상 등을 방지하는 역할도

하고 있다.

프리캐스트 바닥판 합성형 교량에서는 베딩층 무수축 모르터층의 존재로 인해 전단연결재에 작용하는 하중의 전달 메카니즘이 변할 것으로 생각된다. 즉 현장타설 바닥판 합성형 교량에서는 전단연결재에 작용하는 수평전단력이 강주형 바로 위의 전단연결재 용접부에 작용하지만, 기존의 정적압발시험 연구결과<sup>(2)</sup>에 의하면 프리캐스트 바닥판 합성형 교량에서는 이와는 다른 거동을 보이는 것으로 판단된다. 이와 같이 프리캐스트 바닥판 합성형 교량에서 베딩층은 필수 불가결한 구조적 특성이므로 이를 변수로 한 피로실험을 통해 S-N 곡선을 유도하였다.

피로실험을 수행할 압발시험체의 전단연결재 직경은 모두 19mm로 하였으며 무수축모르터의 강도는 48.9MPa인 것을 사용하였다. 그리고 베딩층의 높이가 20mm, 30mm, 40mm일 때에 대해 각각에 대한 피로실험을 수행하였다.

## 2.2. 재료 성질

실험에 사용된 재료의 기본 물성치를 파악하는 것은 매우 중요한 일이라고 할 수 있다. 따라서 무수축모르터의 압축강도와 탄성계수, 그리고 전단연결재의 인장강도 등을 실험에 의해 다음과 같이 결정하였다. 무수축모르터의 압축강도실험은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르터의 압축강도시험방법)에 따라 수행되었으며, 표준 원형 공시체를 제작하여 28일 동안 대기중에서 양생하였다. 압축강도시험 결과 평균 48.9MPa의 압축강도를 나타내었다.

한편, 무수축모르터의 압축강도와 탄성계수사이의 관계를 구하기 위하여 100mm×200mm의 실린더 공시체에 대한 실험이 수행되었다.<sup>(4)</sup> 실험결과 무수축모르터의 압축강도와 탄성계수 사이의 관계는 식 (1)와 같이 나타났다.

$$E_m = 3280 \sqrt{\sigma_m} \quad (1)$$

여기서  $E_m$ 은 무수축모르터의 탄성계수(MPa)이고,  $\sigma_m$ 은 100mm×200mm의 실린더 공시체를 이용한 무수축모르터의 압축강도(MPa)이다. 이와 같은 재료 성질을 표 1에 나타내었다.

표 1. 콘크리트와 모르터의 압축강도 및 탄성계수

재료	28일 압축 강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
콘크리트	35.3	2.8E+04
무수축 모르터	48.9	2.3E+04

그림 1. 압발시험 부재치수

시험시편에 전단연결재로 사용된 스티드의 인장강도를 구하기 위하여 KS B 0802 금속재료 인장시험 방법에 따라 3개의 스티드 전단연결재 인장시험시편에 대해 인장시험을 수행하였다. 실험결과 스티드 전단연결재의 인장강도는 평균 503MPa인 것으로 나타났다.

### 2.3. 하중재하 및 측정내용

프리캐스트 바닥판 압발시험 공시체의 파괴시험 수행과정은 다음과 같다. 압발 시험체에 작용하는 하중은 최대 500kN의 재하능력을 가진 MTS 유압식 반복하중 재하시험기를 이용하여 재하 하였고 반복하중의 형상은 sine파의 하중으로 선택하였다. 하중범위는 상한하중의 크기만 변화시키고 하한 하중은 4.9kN으로 고정시켜 두는 편진 압축 하중제어 시험법을 선택하여 적용하였다. 압발시험체가 받는 하중의 변동량, 즉 작용전단력의 범위는 기존 연구자들의 연구를 참조하여<sup>(6)</sup>, 122kN, 142kN, 171.4kN와 같이 세가지의 전단력 범위에 대해 실험하였다. 실험에 적용된 하중 범위 및 전단응력 범위는 실험변수별로 표 2에 제시하였다. 재하속도는 변위량이 극히 미미하다는 전단시험시편의 특성 등을 고려하여 5Hz를 기준으로 하였다.

파괴시험에서의 측정항목은 재하하중의 크기, 반복하중의 영향으로 인한 콘크리트와 강주형의 상대적인 변위, 즉 미끄러짐량과 파괴시의 반복하중의 회수이며 재하하중의 크기는 시험기에 내장된 로드셀을 통하여 측정되고 PC에 설치된 시험기 제어 S/W에 의해 제어되었다.

전단연결재의 미끄러짐량은 파괴에 이르기까지의 회수를 여러 단계로 나누어 각 단계의 회수까지 반복하중을 재하한 후 하중재하를 멈추고, 반복하중의 상한치까지 서서히 하중을 가하면서 시험시편에 설치된 LVDT(Large Vertical Deformation

Testment)를 통해 측정한다. LVDT의 부착위치는 그림 2와 같다. 또한 전단연결재의 변형율을 관찰하기 위해 시편의 각 전단연결재 줄기 부분에 스트레인게이지를 부착하였다.

측정회수는 0, 1,000, 10,000, 50,000, 100,000등을 기본으로 하지만, 강과 콘크리트 부착유무, 균열발생 유무, 균열진전 상태 등을 조사하기 위하여 가능한 한 많은 측정을 한다.

미끄러짐량의 측정방법은 스티드의 위치에 상응하는 H형강의 좌우, 전후에 4개의 1/100mm LVDT를 설치한 후 그 값을 평균하여 사용하며 반복하중의 재하회수는 파괴시까지 누적적으로 기록된 회수를 사용한다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1. 용접부 파괴양상

Lo<sup>(8)</sup>와 Hallam<sup>(7)</sup>에 의한 연구에 의하면 스티드 용접부의 파괴양상은 다음과 같은 세 가지 모드로 구분되어진다고 하였다.

- 1) Weld(W) Mode Failure : 파괴균열이 weld-collar/hank 인터페이스에서 발생하여 스티드의 HAZ(heat affected zone)영역으로 전파되는 양상을 나타내는 경우이다. 남은 단면이 하중에 저항하지 못할 정도로 균열이 진전될 경우 급속한 파괴가 일어나게 된다. 그림 3(a)
- 2) Lamennar(L) Mode Failure : 파괴균열이 weld-collar/flange 인터페이스에서 발생하여 HAZ 영역으로 전파되는 경우이다. 파괴단면은 단계적인 패턴을 보여주는데, 전형적인 금속의 lamennar tearing 형태의 파괴이다. 그림 3(b)

표 2. Fatigue Tests

Specimen	Compressive Strength Of Mortar (MPa)	Maximum Load (kN)	Minimum Load (kN)	Stress Range /stud (MPa)
F2a	48.9	127.4	4.9	26.975
F2b	48.9	147.0	4.9	31.3
F2c	48.9	176.4	4.9	37.8
F3b	48.9	147.0	4.9	31.3
F3c	48.9	176.4	4.9	37.8
F4a	48.9	127.4	4.9	26.975
F4b	48.9	147.0	4.9	31.3
F4c	48.9	176.4	4.9	37.8

그림 2. LVDT 및 스트레인 게이지의 부착위치

3) Flexural(F) Mode Failure : 초기에는 L-mode의 피로균열이 진전되다가 이차 피로균열이 스테드 줄기에서 진전되는 경우이다. 그림 3(c)

이 연구에서 수행된 압발 피로시험 결과 각 베딩층에 대한 응력범위별 전단연결재의 파괴양상은 거의 대부분 W-mode 피로파괴양상을 나타내었다. 그림 4는 실제 강재 주형측 용접 파괴단면 및 슬래브측 파괴단면의 예를 보여주고 있다. 주형

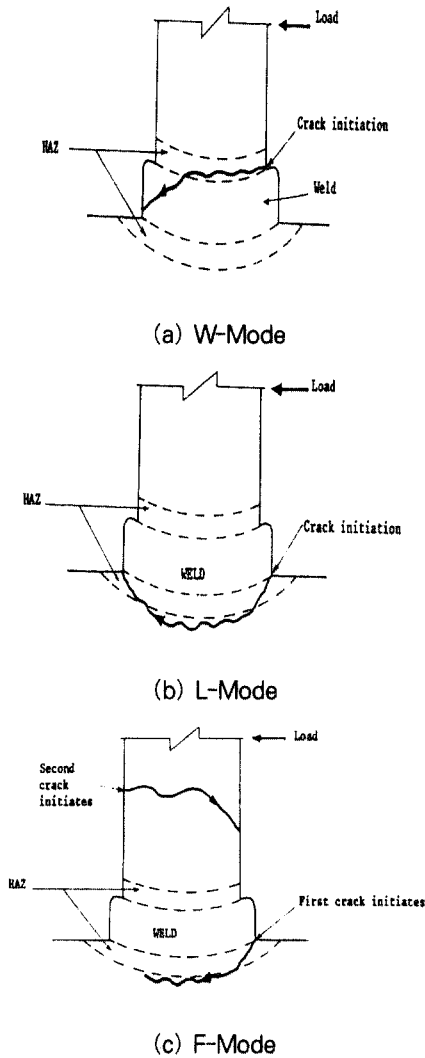


그림 3. 전단연결재의 피로파괴 양상

측 용접 파괴단면은 실험체 대부분이 W-mode 파괴형태를 띄었기 때문에 weld-collar / shank 인터페이스에서 파괴가 일어난 것을 확인할 수 있다. 피로균열은 스테드 줄기 끝부분에서 발생하여 거의 수평으로 진전되었음을 알 수 있으며 피로균열이 진전하면서 스테드의 단면적은 감소하게 되고 따라서 전단연결재의 강도는 감소하게 된다. 이 때 반복하중의 최대하중치에 대해 저항할 수 없을 정도로 단면적이 감소되었을 경우 갑작스런 취성파괴가 발생하게 된다. 이렇게 발생하는 파괴면을 잘 살펴보면 어둡고 매끈한 파괴면이 피로균열단면이며 밝고 불규칙한 파괴면이 취성파괴단면을 알 수 있는데 스테드 단면적의 대부분이 피로균열단면인 것을 확인할 수 있었다. 또한 그림 5는 피로 파괴된 압발피로시험체의 베딩층 단면을 보여주고 있는데, 그림에서 보여지듯이 스테드의 피로 파괴가 발생했음에도 불구하고 스테드 하단 바로 밑의 베딩층에 발생한 국부적인 손상이외에는 베딩층 전면에 어떠한 균열이나 손상이 진전되지 않고 원래의 형상을 그대로 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 베딩층이 20mm, 30mm, 40mm 일 때, 모두 똑같은 양상을 보여주어서, 20mm~40mm 범위에서의 베딩층의 두께는 전단연결재의 피로수명에 큰 영향을 주지 못할 것이라는 사실을 유추하는 하나의 근거가 된다고 생각된다. 즉, 전단연결재의 피로파괴가 발생할 때까지 베딩층은 구조적인 역할을 수행하였다고 판단되기 때문이다.

그림 4. 전단연결재의 피로파괴단면

그림 5. 피로 파괴된 압발시험체의 베딩층 단면

### 3.2. 반복하중횟수별 슬립이력곡선

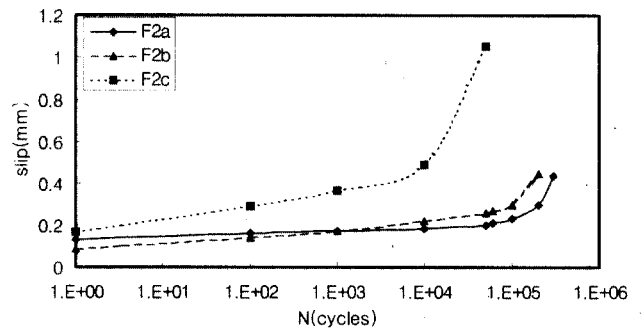
반복하중횟수에 따른 대표적인 상대슬립이력곡선을 그림 6과 같이 나타내었다. 이와 같이 그림 6에서 (a)와 (b)를 비교하여 보면 LVDT에 의해 측정된 콘크리트 슬래브와 강주형 간의 상대슬립은 스테드에 부착된 스트레인 게이지에 의해 구해진 이력곡선과 거의 유사함을 알 수 있다. 이로부터 LVDT에 의해 측정된 상대슬립은 전단연결재의 변형을 잘 모사해주고 있다고 생각된다.

### 3.3. 반복하중횟수별 잔류슬립곡선

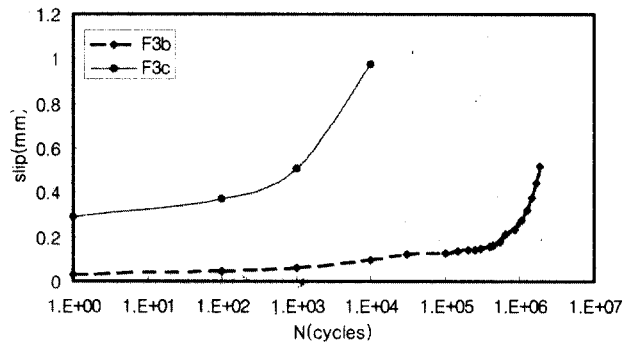
반복하중횟수별 잔류슬립곡선을 베딩두께별, 적용 응력범위별로 각각에 대해 그림 7, 그림 8과 같이 나타내었다. 동일한 베딩층두께를 지닐 때, 작용 응력범위가 달라지는 경우에 대해 살펴보면, 그림 7에서와 같이 응력범위가 큰 경우에 잔류슬립의 발생량이 더 많은 것을 확인할 수 있었다. 즉 베딩층 두께가 20mm인 F2계열과 30mm인 F3계열의 시편의 경우 작용응력범위가 작을수록 피로수명이 증가하는 것 (a)~(c)을 확인할 수 있다. 따라서 응력범위가 커질수록 피로수명이 짧아지는 일반적인 사실과 일치하는 것을 알 수 있

다. 그러나 예외적으로 F4b의 경우 가장 빠르게 잔류슬립이 증가하는 것을 보여주고 있는데 이는 F4b 실험부재의 전단연결재에 이미 상당량의 초기균열결합이 있었던 것으로 판단된다. 따라서 이 경우의 실험데이터는 전체적인 경향성에서 많이 벗어나므로 배제되어야 할 것으로 판단되었다.

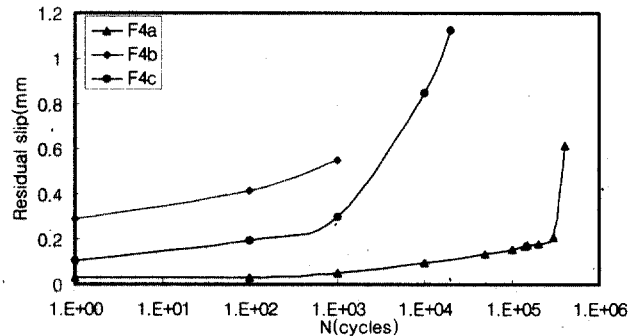
동일한 응력범위에서 베딩의 두께를 변수로 한 잔류슬립곡선을 살펴보면 특별한 경향성을 살펴보기 어렵다. 아마도 베딩두께의 영향보다는 오히려 전단연결재의 응접부위에 존재하는 초기결합이 잔류슬립의 크기 및 피로수명을 결정하는 주요 요소로 생각된다. 앞에서 언급했듯이 측정된 상대슬립의 양으로부터 간접적으로 전단연결재의 변형을 고려할 수 있으므로 반복하중횟수의 증가에 따른 상대슬립의 진전과 전단연



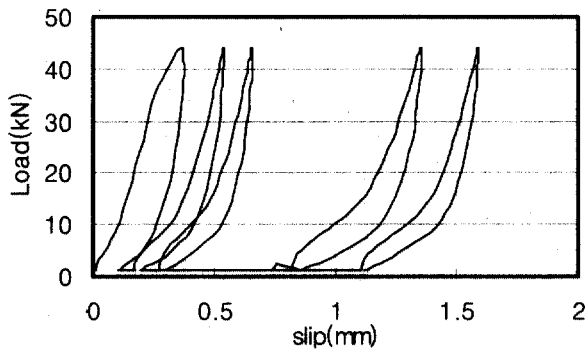
(a) 베딩층 20mm 일 경우



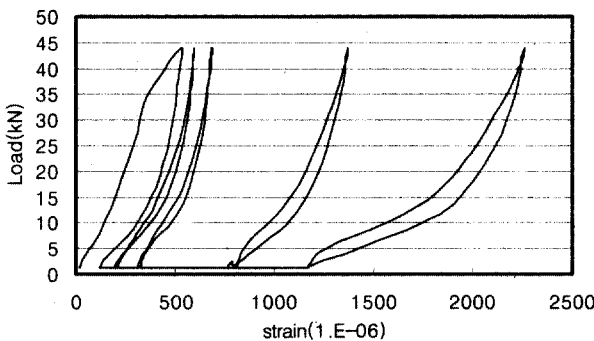
(b) 베딩층 30mm 일 경우



(c) 베딩층 40mm 일 경우



(a) LVDT에 의해 측정된 상대슬립



(b) 스트레인 게이지에 의해 측정된 상대슬립

그림 6. F4c 부재의 상대슬립이력곡선

그림 7. 베딩층 두께에 따른 반복하중횟수별 잔류슬립곡선

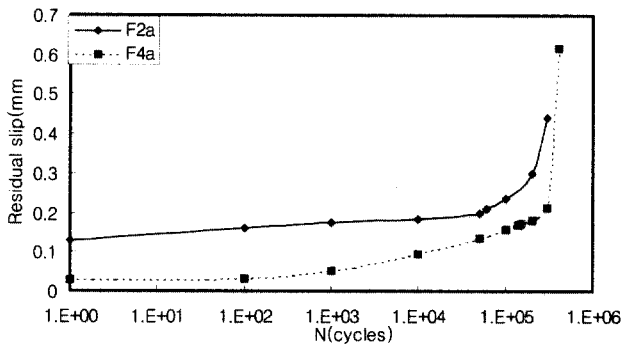
결재의 균열전파를 동일하게 생각할 수 있을 것이다. 따라서 그림 7과 그림 8에서 보여지듯이 초기 상대슬립이 큰 곡선이 더 빨리 상대슬립이 진전하여 파괴되는 것을 알 수 있는데 이로부터 우리는 제작결함, 용접결함 및 운반, 보관시에 발생할 수 있는 초기균열의 크기를 전단연결재의 피로수명을 결정짓는 중요한 요소로 추측해 볼 수 있겠다. 따라서 기존의 연구 결과를 고려하여 종합적으로 생각해 볼 때 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 전단연결재 피로수명은 실험 대상 범위내에서의 무수축 모르타르의 강도 및 베딩층의 두께의 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단되며 수명에 영향을 미치는 주요 변수는 전단응력범위로 생각된다. 그리고 일반적인 피로문제에서 중

요시 여기는 초기결함과 같은 것이 전단연결재 용접부의 피로수명에도 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

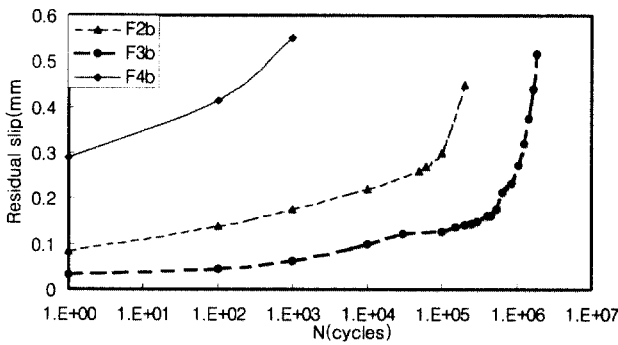
### 3.4. 전단연결재의 피로수명

정적강도에 대한 실험결과와는 달리 피로실험에서는 베딩층의 두께를 변수로 한 피로실험결과 전단연결재의 피로수명에 베딩층의 영향이 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 보여진다. 따라서 베딩두께를 고려하지 않고 모든 피로실험결과를 이용하여 응력범위를 변수로 한 S-N 곡선을 유도하여 그림 9와 같이 제시하여 보았다. 여기서 구한 S-N 곡선은 피로한계의 평균을 의미하므로 일반적인 설계에 적용하기 위해서는 안전측의 곡선이 필요로 하게 된다. 따라서 S-N 곡선의 95% 신뢰도를 취하여 식(3)과 같이 구하여 보았다. 본 논문에서 수행된 전단연결재의 피로실험은 바닥판과 강형 플랜지 간의 결함을 방지한 후 수행된 실험이므로 피로에 좋은 영향을 미치는 결함이나 마찰효과가 제거되어 보다 보수적인 결과가 나온 것으로 판단된다.

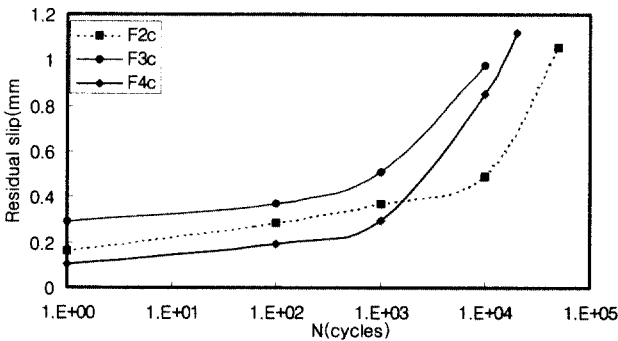
이 연구에서 실험을 통해 제안한 전단연결재의 피로곡선식은 다음과 같다.



(a) 응력범위 27MPa 일 경우



(b) 응력범위 31.3MPa 일 경우



(c) 응력범위 37.8MPa 일 경우

그림 8. 응력범위에 따른 반복하중횟수별 잔류슬립곡선

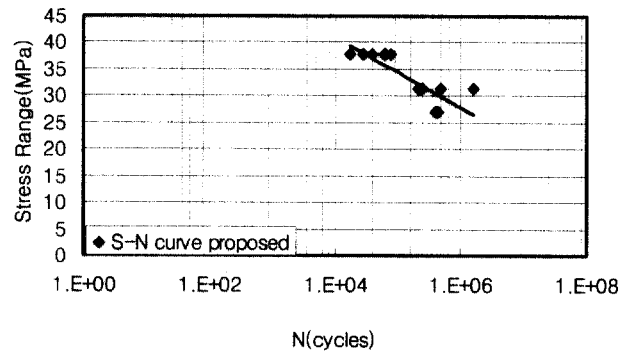


그림 9. 프리캐스트 바닥판 합성구조 전단연결재의 S-N 곡선

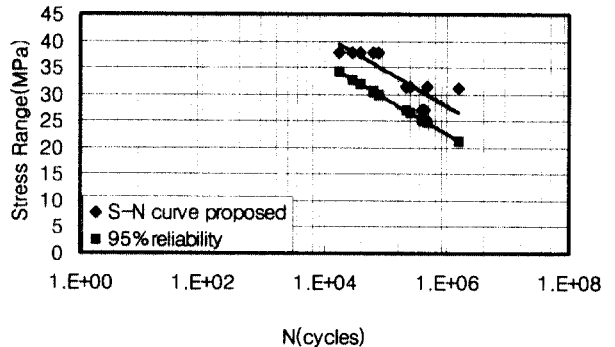


그림 10. 95% 하한 신뢰도를 취한 전단연결재의 S-N 곡선

$$\log N = 10.226 - 0.1519R$$

$$r=0.83 \quad (2)$$

제안된 식의 95% 신뢰곡선:

$$\log N = 9.432 - 0.1519R \quad (3)$$

N : 반복하중횟수

R : 수평전단응력범위(MPa)

d : 스티드의 지름(cm), r : 상관관계

#### 4. 결론

베딩층을 변수로 한 압발 피로 시험결과, 프리캐스트 바닥판 합성구조 전단연결재의 피로수명에 베딩층의 영향이 거의 없다는 결론을 유추하였다. 잔류슬립곡선에 베딩층의 영향이 뚜렷이 보이지 않았으며 각각의 베딩층을 변수로 한 S-N 곡선에서 뚜렷한 경향성을 보여주지 않았기 때문이다. 즉 기존의 정적실험결과에 의하면 베딩층의 두께가 두꺼워지면서 전단연결재가 받는 휨응력의 증가로 정적강도가 떨어진다는 결론으로부터 유추해 볼 때 베딩층의 두께별로 S-N 곡선을 작성했을 경우 20mm, 30mm, 40mm의 두께 순서대로 S-N 곡선이 평행한 기울기를 갖으며 위에서 아래로 정렬되는 양상을 나타내어야 한다. 그러나 이 연구결과 각각의 베딩층을 변수로 한 S-N 곡선은 위와 같은 경향성을 전혀 보여주지 못하였다. 특히 실험결과 슬래브 파단면을 살펴보면 무수축 모르타의 베딩층에 균열이 보이지 않았다. 다시 말해서 전단연결재가 피로파괴를 일으키는 동안 베딩층은 자신의 강도를 발휘하고 있었음을 의미한다. 이는 정적강도 실험결과와는 달리 피로실험 시에는 베딩층의 존재가 유지되므로 베딩층의 두께에 해당하는 만큼의 휨응력 발생 매커니즘을 생각할 수 없게 된다. 오히려 베딩층이 두꺼워짐에 따라 전단력에 대해 저항할 수 있는 삼축압축영역이 넓어져 베딩층에 손상이 적어진 것으로 생각된다. 특히 피로시험에 적용되는 응력수준은 탄성응력범위이기 때문에 극한하중을 재하하게 되는 정적강도 실험결과와는 다른 양상을 보여주는 것으로 생각된다. 따라서 기존의 연구결과를 고려하여 종합적으로 생각해 볼 때 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 전단연결재 피로수명은 실험시

적용되었던 범위내에서의 무수축 모르타의 강도(50MPa~72MPa) 및 베딩층의 두께(20mm~40mm)의 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단된다. 그러므로 프리캐스트 바닥판 합성형 교량의 전단연결재의 피로 수명은 전단응력범위만을 생각하여 평가하여도 좋을 것으로 생각된다. 그리고 일반적인 용접구조상세 부재의 피로문제에서 중요시 여겨지는 초기결합 및 잔류응력과 같은 것이 전단연결재의 피로수명에도 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

이 연구는 POSCO 석좌기금과 BK21사업 연구 지원으로 이루어진 것입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 건설교통부 제정(2000) 도로교 표준 시방서(설계편).
2. 김종희, 장승필, 최석환(2000), "프리캐스트 콘크리트 바닥판 합성형 교량에서의 전단연결부의 강도평가", 대한토목학회논문집, 제 20권, 제 5-A호, pp. 679-690
3. 대우건설(1998). "프리캐스트 콘크리트 교량 바닥판의 개발 및 실용화", '96연구개발사업 제2차년도 연차보고서.
4. 심창수, 정철현, 김철영, 장승필(1998), 프리캐스트 바닥판 교량 전단연결부의 전단강성, 한국강구조학회논문집, 제 10권, 4호, pp. 749-758
5. ENV 1994-1-1: 1992 Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures Part 1.1, General rules and rules for buildings, 1994.
6. JongHee Kim (2000), "Static and Fatigue Behavior of Stud Shear Connector in Precast Concrete Bridge," Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University.
7. Hallam, M.W(1978)., "The behavior of stud shear connector under repeated loading", Research report No. R281, University of Sydney.
8. Lo, K.K(1978)., "Fatigue testing of stud connector", M.Eng.Sc. thesis, Univ. of Melbourne.

(접수일자 : 2001년 10월 26일)