

# 강-콘크리트 합성 교량 바닥판의 피로거동에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Bridge Deck

심 정 욱\*   김 상 효\*\*   정 연 주\*\*\*   박 휘 립\*\*\*\*  
Sim, Chungwook   Kim, Sang-Hyo   Jeong, Yeon-Joo   Park, Phi Lip

### ABSTRACT

Future bridge decks must have high load-resistance capacity as well as fatigue strength to withstand the increase in traffic loading and the increase in span length between girders due to the decrease in the number of main girders. Steel-concrete composite bridge decks may be proper deck types to satisfy such requirements. To promote the application of composite bridge decks, a rational process to predict and evaluate the fatigue behavior of steel concrete composite bridge deck is required.

Various types of steel-concrete composite bridge decks have been developed in many countries. In this study, combining advantages of the existing composite deck types, a new type of composite bridge deck is proposed. An experimental study is performed to examine the fatigue behavior of the proposed composite bridge deck. This composite bridge deck consists of corrugated steel sheet, welded T-beams, stud-type shear connectors and reinforced concrete filler. The fatigue tests are conducted under four-point bending test with three different stress ranges in constant amplitude. The fatigue category of the fillet welding between corrugated steel sheet and the T-beam is evaluated based on the S-N data obtained from the experiment.

### 1. 서론

장시간 교량이 많이 시공되고 교량을 이용하는 통행량과 중차량이 증가함에 따라 다양한 형식의 교량 바닥판이 연구되고 있다. 이러한 바닥판 중에서 하중저항성능과 피로내구성이 뛰어나며 시공성이 우수하고 건설비를 저감할 수 있는 교량바닥판으로 강-콘크리트 합성바닥판을 들 수 있다. 합성 바닥판은 강 또는 신소재와 콘크리트를 합성하는 것으로 RC 바닥판에 비해 하중저항성능의 감소 없이 합성효과 등으로 피로내구성을 향상시킬 수 있으며 바닥판의 골조를 공장 제작하고 강판 또는 신소재를 거푸집으로 이용하므로 기존 현장에서의 거푸집 및 지보공이 불필요하여 현장 작업의 간소화와 공기단축, 시공비 저감 등이 가능해지는 장점이 있다. 이미 국외에서는 20세기 초부터 다양한 합성바닥판에 대한 연구가 진행되었으며 최근에는 일본과 영국, 호주 등에서 연구가 활발히 진행중이다. 그러나 실제 교량에 적용되기 시작한 역사가 짧고 구조형식도 다양하기 때문에 하중 저항성능, 피로내구성 등이 충분히 검증되지 못하여 이러한 바닥판에 대한 별도의 설계기준이 마련되어 있지 못하다. 국내에서는 아직까지 연구사례나 적용사례가 많지 않아 이에 대한 추가 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 기존에 연구되어온 다양한 합성 바닥판들의 문제점을 보완하여 새로운 형상의 강-콘크리트 합성 바닥판을 개발하기 위해 이에 따른 피로실험과 피로거동에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

\* 정희원, 현대건설 기술연구소 연구원

\*\* 정희원, 연세대학교 토목공학과 정교수

\*\*\* 정희원, 한국건설기술연구원 선임연구원

\*\*\*\* 정희원, 한국표준과학연구원 선임연구원

## 2. 시험체 설계 및 실험방법

본 연구에서는 그림 1과 같은 강-콘크리트 합성바닥판에 대해 피로실험을 수행하였다. 기존에 연구된 강-콘크리트 합성바닥판은 크게 세 종류가 있다. 콘크리트 내부에 강재를 격자로 매입한 형태와 흔히 로빈슨형 바닥판이라고 불리는 종류로 스티드전단연결재를 통해 편평한 강판과 콘크리트를 합성시킨 형태 그리고 건물의 바닥판에 주로 사용된 형태로 절곡된 강판을 콘크리트와 합성시킨 형태가 있다.

강재를 매입한 형태의 바닥판은 강재가 콘크리트에 많이 매입될수록 하중저항성은 뛰어나지만 피로거동 후 바닥판의 강성이 급격히 저하되는 단점이 있다. 로빈슨형 바닥판의 경우, 스티드 전단연결재가 많을수록 피로내구성은 뛰어나지만 취성파괴를 불러일으킨다.

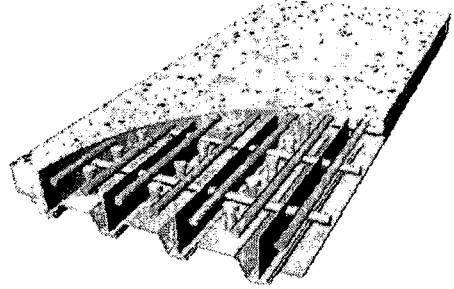


그림 1 제안된 강-콘크리트 합성바닥판 형상

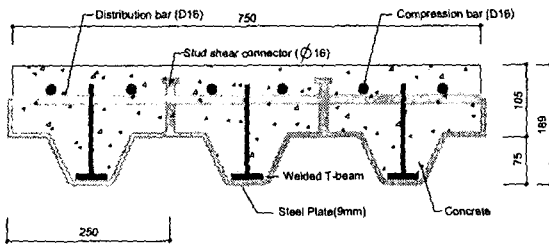


그림 2 강-콘크리트 합성바닥판 단면도

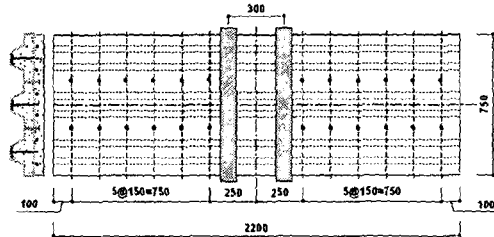


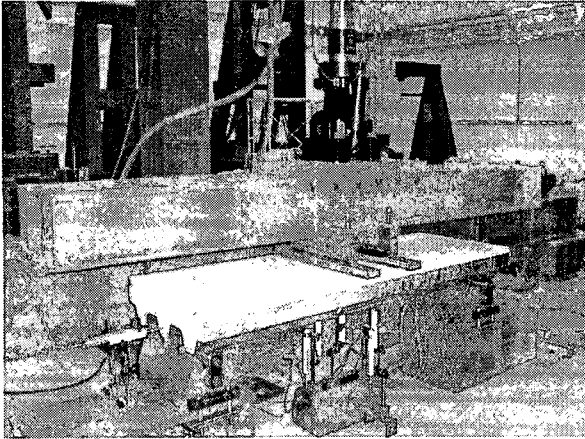
그림 3 합성바닥판 평면도

또한, 절곡강판을 갖는 바닥판의 경우, 강판에 스티드전단연결재를 용접하려면 그 두께가 스티드 직경의 1/2보다 큰 값을 가져야한다. 교량에서 사용되는 스티드전단연결재의 직경에 따라 강판의 두께가 커져 경제성이 문제가 되어 절곡강판형은 주로 건물 바닥판으로만 많이 사용되었다. 그러나 최근 들어, 가공기술의 발달로 강판을 절곡하는데 큰 어려움이 없어 본 연구에서는 절곡된 강판을 이용하여 바닥판의 하중저항성능 및 강성을 높이고 강재의 매입량을 줄여 피로거동 후 강성이 급격히 저하되는 격자형 바닥판의 단점을 보완하였으며 스티드 전단연결재 역시 최소화하여 취성파괴가 일어나지 않도록 보완하였다.

합성바닥판 시편의 폭은 0.75m이며 길이는 2.2m이다. 두께 9mm의 절곡된 강판 위에 역T형강과 16mm 직경의 높이 7.5cm인 스티드 전단연결재를 용접하였다. 스티드 전단연결재는 15cm 간격으로 배치하였다. 또한, 압축철근과 배력철근으로 D16철근이 사용되었으며 배력철근은 30cm 간격으로 배치하였다. 콘크리트의 압축강도는 300kgf/cm<sup>2</sup>이며 강판 및 역T형강으로는 공칭항복강도 2,400 kgf/cm<sup>2</sup>의 SS400 강종이 사용되었다. 시험체 단면도 및 평면도는 각각 그림 2와 그림 3과 같다.

본 연구에서는 기초적인 S-N 도시를 하고자 세 가지 응력범위에 대하여 피로실험을 수행하였다. 시편의 인장부 강판이 갖는 최대항복응력의 90% 응력범위, 75% 응력범위 그리고 60% 응력범위에 대해 피로실험을 수행하였다. 피로실험 전에 수행한 정적실험자료로부터 합성바닥판 인장부 강판의 실제항복응력은 공칭항복응력보다 큰 2,700 kgf/cm<sup>2</sup>인 것으로 밝혀졌으며 한국 표준과학연구소의 SS400 강종에 대한 인장파괴시험 결과와 일치하는 것을 볼 수 있었다. 응력비 R=0.1로 최소응력은 최대응력의 10%가 되도록 하중을 재하하였다. S<sub>r</sub>/S<sub>u</sub> = 90%인 경우, 응력범위 2,430 kgf/cm<sup>2</sup>을 유발하는 최대응력은 2,700 kgf/cm<sup>2</sup>이며 이 때의 재하하중은 43.2 tonf이다. S<sub>r</sub>/S<sub>u</sub> = 75%인 경우, 응력범위는 2,025 kgf/cm<sup>2</sup>이며 이 때 최대 응력은 2,250 kgf/cm<sup>2</sup>이고 최대가력하중은 32.4 tonf이다. 마지막 응력범위는 S<sub>r</sub>/S<sub>u</sub> = 60%에 대해서 선정되었으며 응력범위 1,620 kgf/cm<sup>2</sup>에 대한 최대응력과 최대하중은 각각 1,800 kgf/cm<sup>2</sup>과 28.8 tonf이다.

위와 같은 과정으로 선정된 세 가지 하중에 대해 2.5 Hz의 일정진폭하중을 반복재하하여 피로실험을 수행하였다. 변형률과 변위가 급격히 변하고 균열이 유관으로 관측될 수 있는 시점을 파괴시점으로 정의 내렸으며 동일한 응력범위에 대해 규명된 파괴시점이 발생할 때까지의 반복회수를 측정하여 S-N 도시를 수행하였다. 변형률 값과 변위 값은 매 50,000회마다 정적시험을 수행하여 측정하였고 시험최대하중까지 2단계에 걸친 하중단계로 재하하여 매 1초마다 데이터를 받았으며 3회에 걸친 재하로 총 6분 30초 동안 측정하였다.



피로실험은 4점 휨시험으로 수행하였으며 두 개의 바퀴로 이루어진 트럭의 뒷바퀴 축하중을 모사할 수 있도록 20cm 크기의 하중재하판에 페타이어를 붙이고 두 판의 중심간격을 30cm로 배치하여 피로실험을 수행하였다. 그림 4는 한국표준과학연구소의 구조시험동에서 실시한 피로실험 전경으로 받침 위에 설치된 강-콘크리트 합성바닥판 시편 및 측면과 하면에 설치된 50mm, 100mm 변위계, 변형률 게이지의 연결선, 500kN 가력장치, 하중재하판과 페타이어 그리고 4점 휨시험용 지그를 보여 주고 있다.

그림 4 합성바닥판 피로실험 시험편 및 가력장치

### 3. 실험측정위치 및 측정목적

#### 3.1 변형률 측정 위치

피로실험의 진행에 따라 바닥판 강성이 저하되는 정도를 측정하고 변형률이 급격히 변하는 시점을 통해 바닥판이 파괴되는 반복재하회수를 간접적으로 알아내기 위해 강-콘크리트 합성바닥판에서 인장응력을 받고 있는 강판의 하면에 그림 5와 같이 변형률 게이지를 부착하였다.

바닥판 내부의 응력분포를 확인하기 위해 인장응력을 받는 하부강판 외에 역T형강의 하부 플랜지와 하부플랜지로부터 7.5cm 위에 위치한 중립축 부근 그리고 역T형강의 상부에서 3cm 아래에 위치한 곳에 변형률 게이지를 그림 6과 같이 부착하였다. 한편, 압축철근에도 그림 6과 같이 변형률 게이지를 부착하여 철근의 항복여부를 검토하였다.

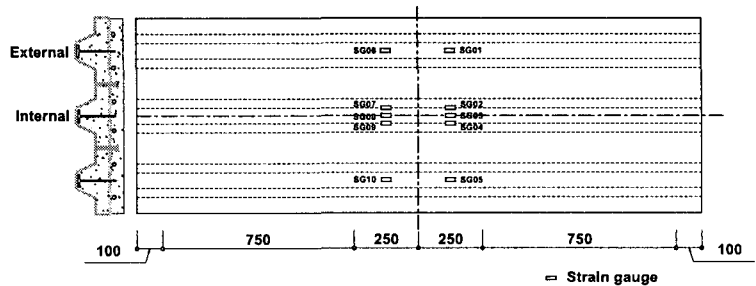


그림 5 절곡강판의 변형률 게이지 배치도 (단위:mm)

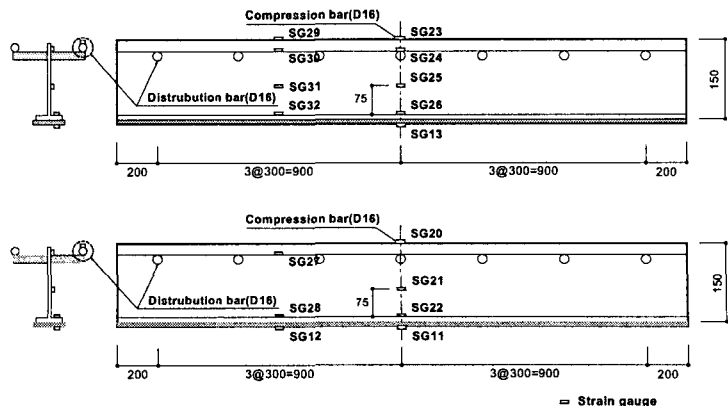


그림 6 역T형강과 압축철근에 부착된 변형률 게이지 배치도 (단위:mm)

### 3.2 변위 측정 위치

반복재하회수가 증가함에 따라 처짐분포가 어떤 변화를 갖는지 측정하고자 바닥판의 중앙부와 중앙으로부터 좌·우로 25cm 떨어진 지점에 그림 7과 같이 변위계를 설치하였다. 본 연구와 같은 강-콘크리트 합성바닥판이 파괴될 수 있는 방법은 전단연결재의 파손으로 인한 합성능력의 저하로 피로파괴가 발생하는 경우와 인장응력을 받고 있는 절곡된 강판과 역T형강의 용접부에서 항복이 일어나서 파괴되는 경우 그리고 콘크리트의 상부가 편칭전단에 의해 파괴되는 경우가 있다. 따라서, 합성바닥판의 피로파괴모드를 간접적으로 검토하기 위해 콘크리트와 강재의 상대변위를 측정하였다. 합성바닥판의 양 끝단 콘크리트와 강재의 경계면에 그림 7과 같이 변위계를 설치하여 콘크리트와 강재의 상대변위를 측정하였다.

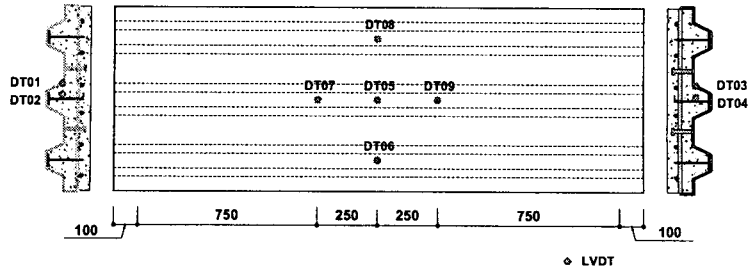


그림 7 합성바닥판의 하부와 측면에 설치된 변위계 (단위:mm)

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 변형률 측정 결과

인장부의 변형률을 측정하기 위해 합성바닥판의 하부 강판에 변형률계를 설치하였으며 압축부의 변형률은 콘크리트를 타설하기 전에 매입한 변형률계로부터 그 값을 도출하였다. 피로실험이 진행됨에 따라 각 단면의 응력변화 및 하중저항성을 평가하기 위해 변형률계를 부착하였다. 또한, 급격한 변형률 변화가 일어나는 시점을 관측하여 간접적으로 피로균열이 발생하는 시점을 예측하기 위해 피로균열이 발생할 것으로 예상되는 최대 휨모멘트 구간에 변형률 게이지를 부착하였다. 피로실험을 수행하기 이전에 수행된 하중재하를 통해 압축부와 중립축 근처 그리고 인장부에서 측정된 변형률은 해석적으로 계산된 변형률과 2~3% 이내의 오차를 보여 비교적 정확한 측정이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 반복재하회수가 증가함에 따라 인장부의 변형률이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 변형률이 급격하게 변하는 시점에서 피로균열을 관측하였다. 피로균열은 절곡된 강판과 역T형강의 용접부에서 발생하여 인장부 하부 강판 밖으로 관통하였다. 그림 8은 60% 응력범위(28.8 tonf)를 재하한 시편의 인장부 변형률 변화값을 나타낸다. 합성바닥판의 피로거동으로 강성이 저하되어 같은 하중에 대해서도 반복재하회수가 증가함에 따라 변형률이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

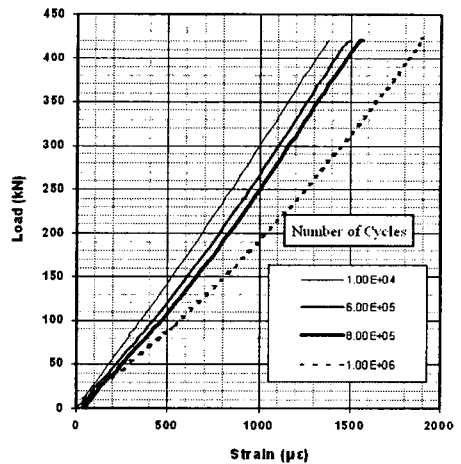


그림 8 인장부의 변형률 변화

### 4.2 변위 측정 결과

강-콘크리트 합성바닥판의 중앙과 측면에 변위계를 설치하였다. 반복재하회수에 따른 처짐 변화를 관측하기 위해 중앙부에 5개의 변위계를 설치하였으며 바닥판의 양 끝단에 각각 2개의 변위계를 설치하여 end-slip을 측정하였다. 변위 측정결과 end-slip은 거의 일어나지 않는 것으로 나타났으며 반복재하회수가 증가함에 따라 바닥판의 강성이 저하되어 중앙부 처짐이 증가하는 것으로 나타났다. 본 합성 교량바닥판은 인장부의 절곡된 강판과 역T형강의 용접부에서 피로균열이 발생하였으며 end-slip양이 작은 것을 보아 스티드 전단연결재의 파손으로 인한 합성능력의 저하로 바닥판이 파괴된

것이 아님을 알 수 있었다. 그림 9는 90% 응력범위를 재하한 시편의 처짐 분포도를 나타낸다. 반복 재하회수가 증가함에 따라 처짐양이 증가하는 것을 통해 바닥판의 피로거동에 따라 강성이 저하되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그림 10은 90% 응력범위, 75% 응력범위 그리고 60% 응력범위를 재하한 시편의 양 끝단 end-slip양을 나타낸다. 콘크리트와 강재의 경계면에 변위계를 설치하고 상대변위를 측정하여 end-slip양을 측정하였으며 측정결과 90% 응력범위에 대해서 최대 1mm의 변위를 가져 합성바닥판이 합성의 능력 저하로 인해 파괴되지 않았음을 알 수 있었다.

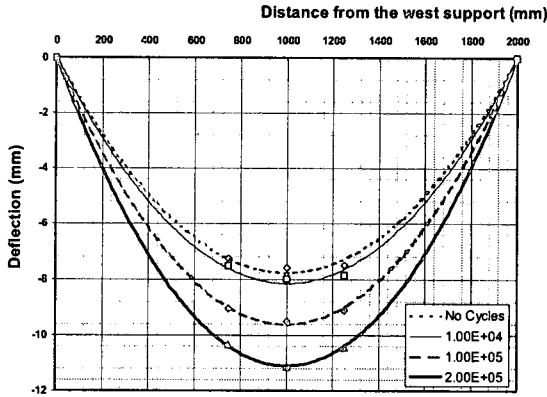


그림 9 합성바닥판의 처짐분포도

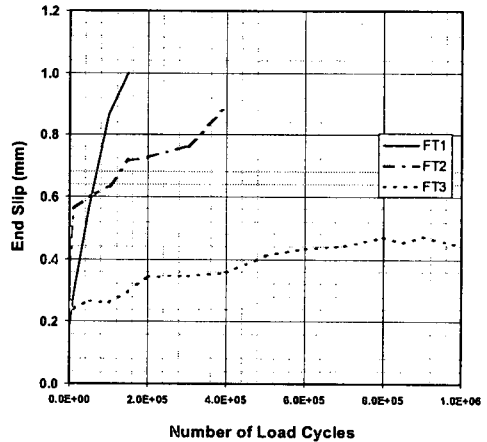


그림 10 양 끝단의 end-slip양

### 4.3 S-N 도시 및 응력상세범주 평가

본 실험의 목표는 S-N 곡선을 작성할 수 있는 기초적인 S-N 도시를 하는데 있었으며 이에 따라 세 가지 응력범위에 대해서 실험을 수행하였다. 적은 시편 수로 응력상세범주를 평가하는데 어려움이 있어 설계기준에서 제시하고 있는 S-N곡선들을 작성하는데 근거가 된 NCHRP 102와 NCHRP 147의 피로실험데이터를 바탕으로 각각의 응력상세범주가 가질 수 있는 확률론적 범위를 지정하였다. 이때 Albrecht가 제시한 확률모형 변수를 사용하여 신뢰지수가  $\beta = 2.2$ 로 실험 시편이 파괴되지 않을 확률이 98.61%인 경우와 신뢰지수  $\beta = -2.2$ 로 시편이 생존할 확률이 1.39%인 경우의 응력범위와 반복재하회수를 구하여 각각의 응력상세범주에 대해서 그림 11에서 그림 14까지와 같이 S-N 도시를 하였다. 각각의 응력상세범주에 대해 도시한 결과 본 강-콘크리트 합성바닥판의 절곡된 강판과 역T형강의 용접부는 응력상세범주 C에 해당하는 것으로 나타났다.

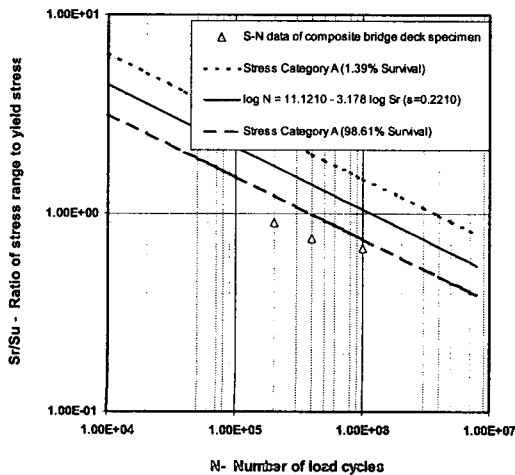


그림 11 응력상세범주 A에 해당하는 S-N도시

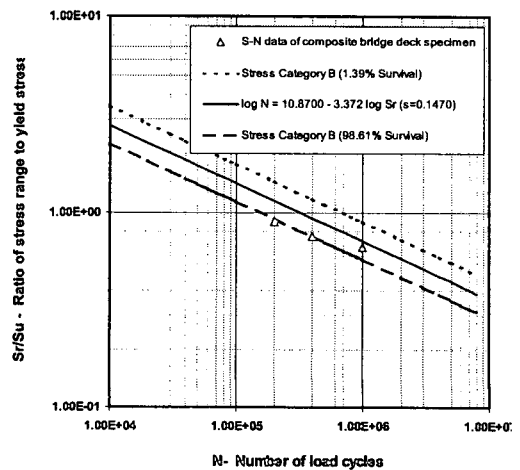


그림 12 응력상세범주 B에 해당하는 S-N도시

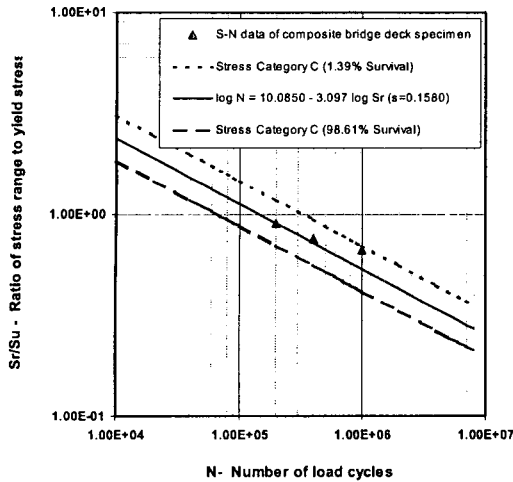


그림 13 응력상세범주 C에 해당하는 S-N도시

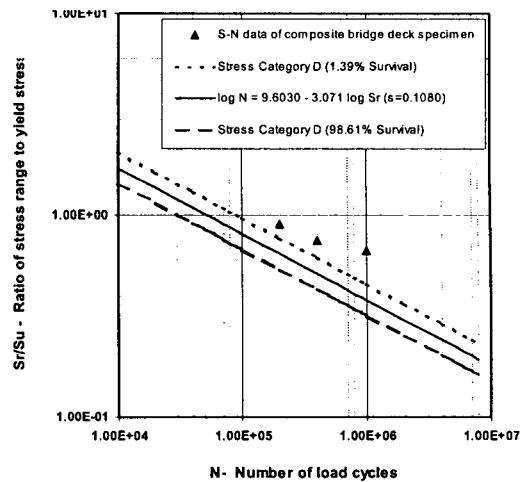


그림 14 응력상세범주 D에 해당하는 S-N도시

## 5. 결론

본 연구에서는 새로 제안된 강-콘크리트 합성바닥판의 피로파괴거동과 피로취약부를 분석하고 설계기준에서 제시하고 있는 피로 응력상세범주에 대하여 평가하였고 합성바닥판의 S-N곡선을 도출할 수 있는 기초적인 자료를 제시하였다.

1. 90% 응력범위, 75% 응력범위 그리고 60% 응력범위에 대해서 피로실험을 수행한 결과, 세 응력범위에 대해 모두 강-콘크리트 합성바닥판은 인장부의 하부 절곡된 강판과 역T형강의 용접부에서 피로균열이 발생하여 파괴되었다.
2. 강합성바닥판의 피로설계기준이 현재 마련되어 있지 않기 때문에 강재에 대한 피로설계기준을 바탕으로 실험 결과의 피로 응력상세범주를 검토해보았다. 실제 항복응력의 90% 응력범위와 75% 응력범위 그리고 60% 응력범위에 대하여 시편이 파단된 반복재하회수는 각각 20만회, 40만회 그리고 100만회인 것으로 관측되었다. NCHRP 102와 147의 피로실험결과를 바탕으로 각각의 응력상세범주에 따른 확률론적 범위를 지정하고 각각의 시편이 갖는 생존확률을 계산한 결과 본 실험시편의 절곡된 강판과 역T형강의 용접부는 응력상세범주 C에 해당하는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. 피로실험은 한국표준과학연구원 안전계측센터 강도평가그룹의 구조시험동에서 실시되었으며 실험에 대한 모든 지원에 대해 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Fisher, J.W., Frank, K. H., Hirt, M. A. and McNamee, B. M. (1970), Effects of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams, *NCHRP Report 102*, pp. 114.
2. Fisher, J. W., Albrecht, P. A., Yen, B. T., Klingerman, D. J. and McNamee, B. M. (1974), Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments, *NCHRP Report 147*, pp.85.
3. Johnson, R. P. (1994), *Composite Structures of Steel and Concrete*, 2nd edition, Blackwood Scientific Publications, U.K.
4. 文兌景 (1992), 鋼板·콘크리트 합성床版의 疲勞特性と 疲勞設計法に關する 研究