

철도교 세로보 절취부에서의 응력거동에 관한 실험적 연구

-I : 균열 발생원인

An Experimental Study on the Stress Behavior of Coped Stringers in Steel Railway Bridge

-I : the Reason Why Crack Occurs

이광일* · 박영석**

Li, Guang Ri · Park, Young Suk

Abstract

In this study, in order to research the causes lead to fatigue crack in the coped stringer of a steel railway bridge, we take the steel railway bridge which actually occurs fatigue crack as a research object and manufacture the full size of crossbeam-stringer and floor system model to perform the experimental test. The results indicates that, the fatigue crack in the top of coped area of stringers is caused by the reciprocal action of the in plane stress in the tip of coped area of web by the negative moment occurred in the end of the stringers. While the fatigue crack in the bottom of coped area of stringers is due to the plane stress caused by the out-plane deformation relative to the bottom of coped area of web of the fixed end in the stringers.

Keywords : *coped stringers, lateral bracing, in plane stress, out plane stress*

요 지

본 연구에서는 철도교의 세로보 절취부에서의 피로균열 발생 원인을 연구하기 위하여 실제로 피로균열이 발생한 철도교를 연구대상으로 실험크기의 가로보-세로보 바닥틀 모형을 제작하고 실내실험을 수행하였다. 연구 결과 세로보 상부절취부에서의 피로균열 발생원인은 세로보의 단부에서 발생하는 부모멘트에 의한 상부절취부 복부판의 면내응력의 반복적 작용 결과이고, 하부절취부에서의 피로균열 발생 원인은 세로보 단부의 고정단에 대한 하부절취부 복부판의 상대적 면외변형에 의해 발생하는 면외응력의 반복적 작용 결과라는 결론을 얻었다.

핵심용어 : 세로보 절취부, 수평브레이싱, 면내응력, 면외응력

1. 서 론

일반적인 철도교의 바닥틀(floor system) 구성은 그림 1과 같이 가로보와 세로보가 격자형식으로 이루어져 있으며, 세로보 위에 침목을 설치하고 침목 위에 레일을 설치한 무도상 궤도로 설계된다. 그리고 세로보의 상부에는 수평브레이싱이 설치되어 있다.

철도교에서는 세로보를 가로보에 연결시키기 위해 종종 플랜지를 절단하고 세로보의 복부판을 가로보의 수직보강재와 연속된 볼트로 연결한다.

철도교의 구조부재 및 접합부에는 주행하는 철도차량에 의한 반복하중이 도로교에 비해 상대적으로 많이 작용하고 하중의 크기도 일반적으로 크기 때문에 반복하중에 의한 피로문제가 많이 발생하고 있다. 특히 그림 2와 같이 가로

보와 세로보의 연결부의 세로보 플랜지 절단부에서 균열이 많이 발생한다.

기존의 유사한 피로사례 자료들을 조사해보면 절단부에서의 피로균열 발생의 중요한 원인은 절취부 모서리부분에서의 응력집중이라고 보는데 사실 실제교량에서 응력집중을 완화하기 위해 절취부에 대해 라운딩처리를 하더라도 여전히 피로균열이 발생하는 사례가 발생하고 있다. 이것은 절취부에서의 피로균열 발생 원인은 응력집중이 전부가 아니라는 것을 말해준다. 절취부에서의 정확한 피로균열 발생 원인을 파악하기 위해서는 바닥틀 구조에 대한 엄밀한 해석적 또는 실험적 연구를 수행하여 세로보의 정확한 역학적 거동과 세로보 절취부의 응력거동을 파악해야 한다.

본 연구에서는 실제로 피로균열이 발생한 철도교를 연구 대상으로 실험크기의 가로보-세로보 바닥틀 모형을 제작하

*정회원 · 교신저자 · 명지대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정 (E-mail : lgr81@mju.ac.kr)

**정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : pys@mju.ac.kr)

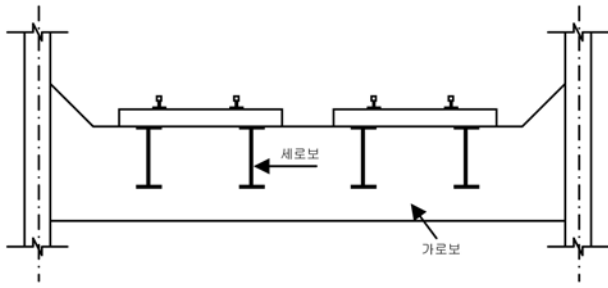


그림 1. 바닥 횡단면도

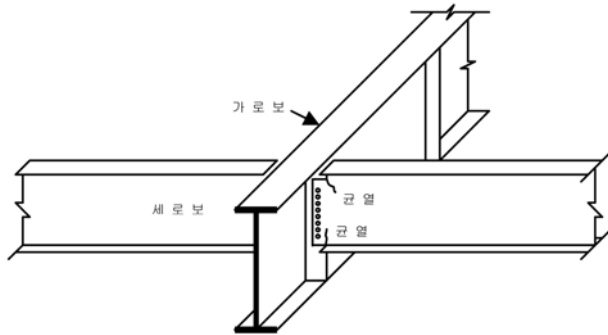


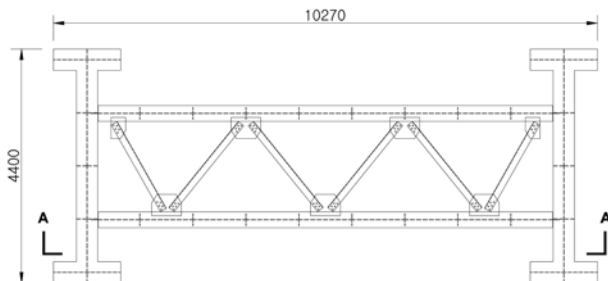
그림 2. 균열발생 위치

고 실내실험을 수행하였으며 몇가지 중요한 연구결과를 얻었다. 이는 기존 철도교의 유사한 연결부에서의 피로균열 발생 가능성을 예측하고 균열 발생 교량의 보수·보강과 새로운 철도교 설계 시 합리적인 설계를 하는데 있어서 좋은 참고자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

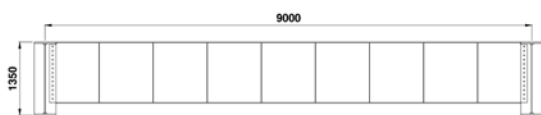
2. 시험체 제원

가로보와 세로보로 구성된 바닥 구조의 평면도와 종단면도는 그림 3과 같다. 두 가로보의 복부판 중심 사이의 거리는 9m이고 두 세로보의 복부판 중심 사이의 거리는 2m이다. 세로보를 지지하는 가로보의 높이는 1.35 m이고 가로보의 길이는 4m이다. 그리고 두 세로보 사이에는 상부에 W형의 수평브레이싱이 설치되어 있다.

그림 4는 세로보의 제원이다. 세로보의 길이는 8.7 m이고,

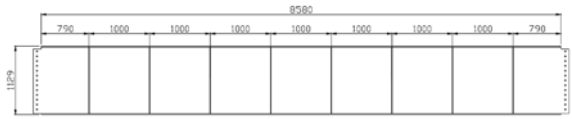


(a) 상부 평면도

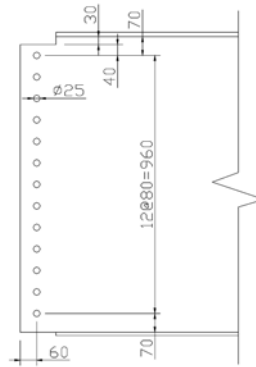


(b) A-A 단면도

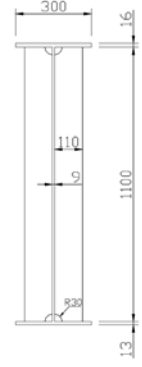
그림 3. 바닥 구조



(a) 정면도

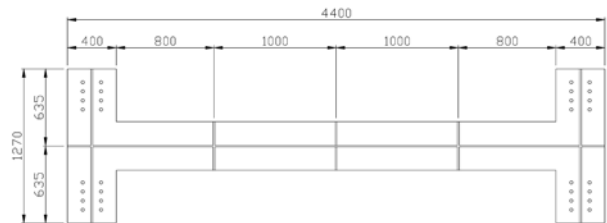


(b) 단부 상세도

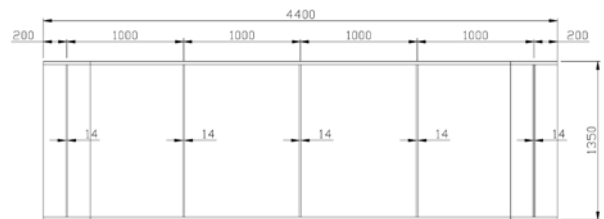


(c) 단면도

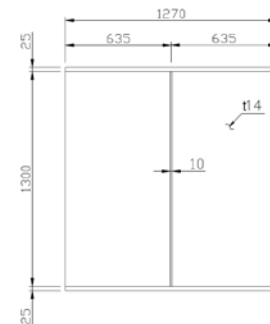
그림 4. 세로보 제원



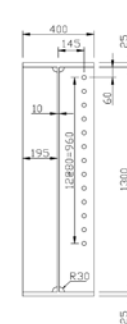
(a) 상, 하부 평면도



(b) 정면도



(c) 측면도



(d) 단면도

그림 5. 가로보 제원

높이는 1.129 m이고, 상부플랜지와 하부플랜지 폭은 모두 300 mm이고, 상부플랜지와 하부플랜지의 두께 및 복부판의 두께는 각각 16 mm, 13 mm, 9 mm이다. 그리고 세로보의 단부는 그림 4(b)와 같이 13개의 연속된 볼트로 가로보의 수직보강재에 연결할 수 있도록 되어있고 가로보와 연결하는 부위는 상부플랜지와 하부플랜지가 모두 절단되어있다.

그림 5는 가로보의 제원이다. 실제 교량의 바닥 구조는 교량의 종방향으로 총 네개의 세로보가 가로보의 수직보강

재에 연결된 것으로 되어 있는데, 본 연구에서는 바닥 구조에 대한 사전의 엄밀한 구조해석을 통하여 실제교량에서의 세로보의 양단 경계조건을 정확히 구상할 수 있도록 가로보를 설계, 제작 하였다.

본 연구에서 사용한 강재는 SM400이고, 강재의 항복강도는 235 MPa이고, 인장강도는 400 MPa이다.

3. 실내 정적실험

3.1 실험 방법

실제 철도교 바닥틀 시스템은 세로보 상부수평브레이싱이 설치되어 있지만, 본 연구에서는 세로보의 역학적 거동과 이에 따른 절취부의 응력변화의 연구 편리를 위하여 그림 6, 그림 7과 같이 상부수평브레이싱이 없는 경우와 있는 경우로 나누어 정적실험을 수행하였다.

시험체의 경계조건은 그림 8과 같이 가로보의 하부플랜지를 지점판과 16개의 볼트로 연결하고, 지점판은 4개의 큰 고장력 볼트로 실험실 바닥판에 고정하였다. 재하 방법은



그림 6. 상부수평브레이싱이 없는 경우

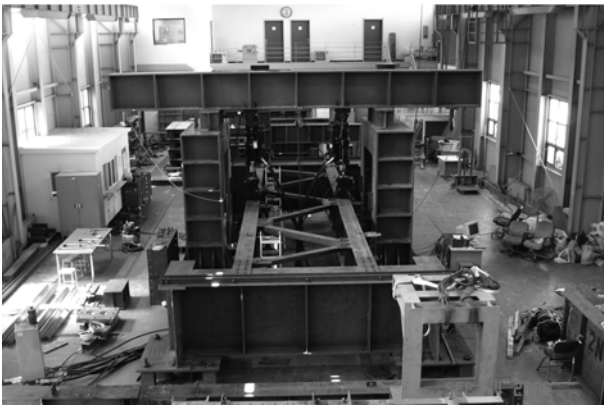


그림 7. 상부수평브레이싱이 있는 경우

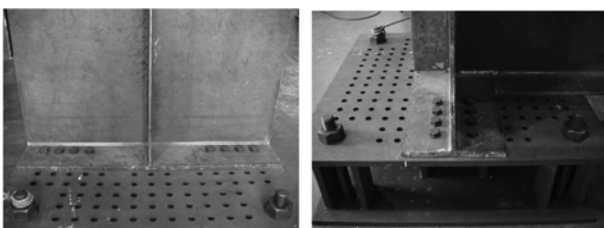


그림 8. 지점부 형상

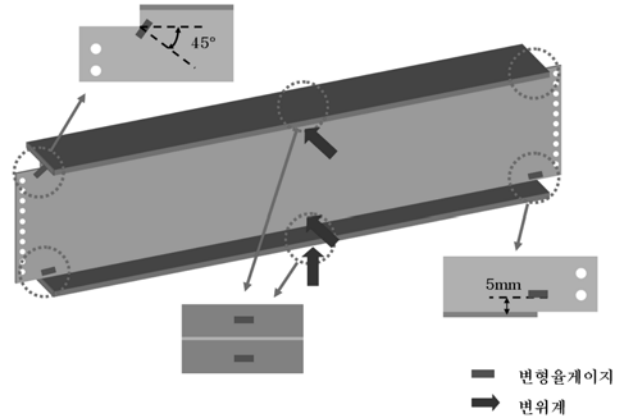


그림 9. 변형률게이지 및 변위계 위치

은 두대의 500 kN급 유압가력기를 사용하여 각각의 유압가력기 재하 단부를 세로보의 상부플랜지에 볼트로 직접 연결하고 세로보의 중앙에 수직으로 재하 하였다. 피로를 고려한 최대설계차량하중은 840 kN인데 이때 전동차량의 단위 축하중은 210 kN이고 단위 윤하중은 105 kN이 된다. 전동차의 서로 인접한 두 축 사이의 최소 거리가 2.1 m이고 이 두개의 윤하중이 동시에 세로보의 중앙에 재하 되는 경우를 고려하여 본 실험에서의 최대 재하 하중 크기를 210 kN으로 하였다.

세로보의 정확한 역학적 거동과 절취부의 응력 거동을 파악하기 위하여 그림 9와 같이 변위계를 설치하고 변형률게이지를 부착하였다. 변위계는 세로보 중앙의 상, 하부플랜지 근처의 복부판에 수평으로 각각 하나씩 설치하였고, 하부플랜지 밑에도 수직으로 한개의 변위계를 설치하였다. 실제 교량의 세로보 상부절취부와 하부절취부의 균열 초기 진전방향을 관찰해보면 상부절취부에서는 거의 45도 각도로 초기 균열 진전이 시작되고, 하부절취부에서는 거의 수직방향으로 초기 균열 진전이 시작된다(그림 2). 균열 발생을 초래한 균열 진전 방향과 수직되는 방향의 응력 크기를 측정하기 위하여 본 실험에서의 변형률게이지 위치는 그림 9와 같이 상부절취부인 경우 절취부의 끝단에 수평방향과 45도 각도로 복부판 양쪽에 서로 대칭되게 부착하고, 하부절취부인 경우에는 수평방향으로 복부판 양쪽에 서로 대칭되게 부착되 하부플랜지와 복부판의 용접두께를 고려하여 절취부 끝단에서 5 mm 떨어진 위치에 부착하였다. 그리고 재하 시 강재의 항복여부를 알기 위하여 세로보의 상부플랜지와 하부플랜지에 거더 종방향으로 복부판을 중심으로 양쪽에 대칭되게 각각 한개의 변형률게이지를 부착하였다.

3.2 실험 결과

그림 10은 상부수평브레이싱이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 하중 증가에 따른 세로보의 상부수평변위를 측정할 결과이다. 그림에서 상부수평브레이싱이 없을 때 세로보의 상부수평변위는 하중이 증감함에 따라 비선형으로 급격히 증가하지만 상부수평브레이싱을 설치한 후에는 대폭 감소하여 브레이싱이 없을 때에 비해 상대적으로 매우 작은 값을 나타낸다. 이것은 세로보의 상부수평브레이싱은 세로보의 상부수평변위를 감소시키는 작용을 한다는 것을 말해준다.

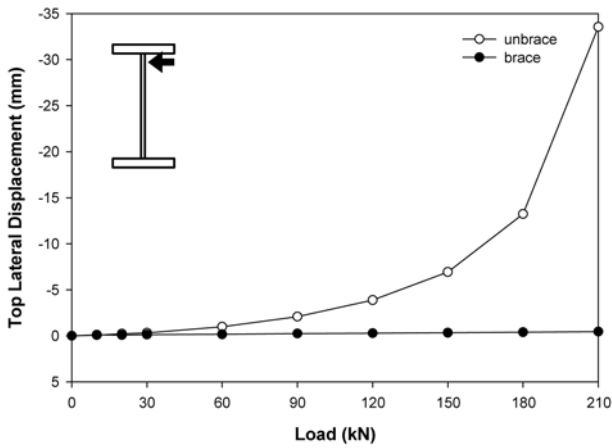


그림 10. 상부수평변위

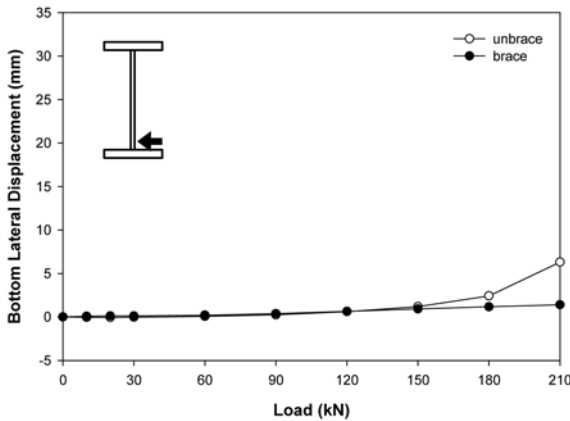


그림 11. 하부수평변위

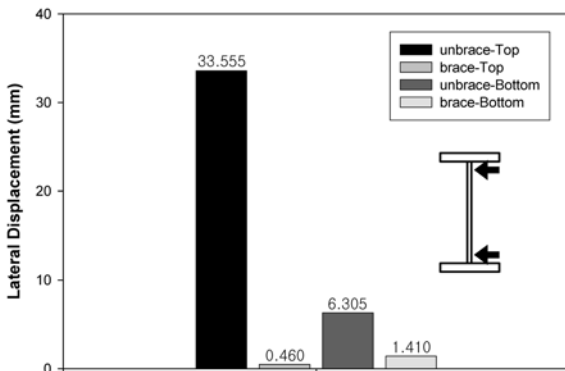


그림 12. 상, 하부수평변위 비교

그림 11은 상부수평브레이싱이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 하중 증가에 따른 세로보의 하부수평변위를 측정할 결과이다. 그림에서 상부수평브레이싱이 없을 때 세로보의 하부수평변위는 하중이 증감함에 따라 비선형으로 증가하고, 상부수평브레이싱을 설치한 후에는 크게 감소한다. 이것은 세로보의 상부수평브레이싱은 세로보의 하부수평변위도 감소시키는 작용을 한다는 것을 말해준다.

그림 12는 하중크기가 210 kN인 경우에 대해 브레이싱이 없을 때와 있을 때의 세로보의 상부와 하부의 수평변위를 비교한 것이다. 그림에서 상부수평브레이싱을 설치한 후 세로보의 상부수평변위는 33.555 mm에서 0.46 mm로 감소하고 하부수평변위는 6.305 mm에서 1.41 mm로 감소하는데 상부수평브레이싱을 설치한 후 세로보의 하부수평변

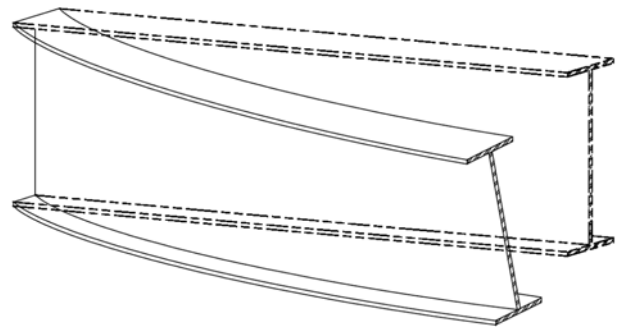


그림 13. 횡-비틀 거동

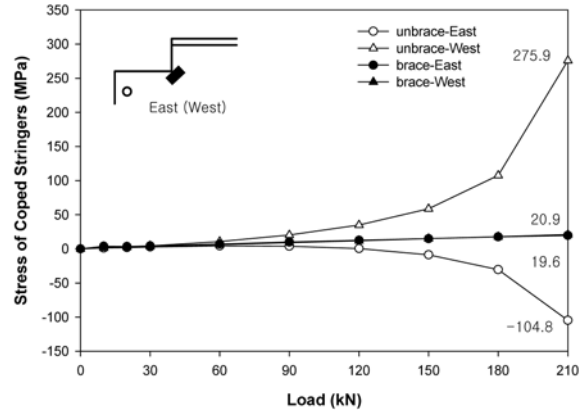


그림 14. 상부절취부 응력

위는 1.41 mm로써 상부수평변위 0.46 mm에 비해 크다. 이것은 브레이싱이 세로보의 상부에만 있고 하부에는 없기 때문에 세로보의 하부에는 상부보다 훨씬 큰 수평변위가 발생한 것이다.

앞에서의 세로보의 상, 하부 수평변위에 대한 실험결과 분석을 통하여 상부수평브레이싱이 없을 때 세로보는 그림 13과 같은 횡-비틀 거동을 하고, 상부수평브레이싱이 있을 때에는 세로보의 상부수평변위는 거의 발생하지 않지만 하부에는 여전히 큰 수평변위가 발생 한다는 것을 알 수 있다.

그림 14는 상부수평브레이싱이 없을 때와 있을 때의 세로보 상부절취부의 복부판 좌, 우 양측 응력 값을 비교한 것이다. 상부수평브레이싱이 없을 때 절취부의 응력은 하중이 증가함에 따라 비선형으로 급격히 증가하는 반면, 상부수평브레이싱이 있을 때 절취부의 응력은 하중 증가에 따라 거의 선형으로 일정하게 증가하고 그 크기는 브레이싱이 없을 때보다 훨씬 작다.

실제 절취부의 응력은 면내응력과 면외응력의 합으로 나타낼 수 있는데 절취부의 응력 분석은 이 두 응력요소로부터 시작하는 것이 편리하다. 먼저 면내응력과 면외응력에 대하여 정의 한다면 다음과 같다.

그림 15에 나타난 것과 같이 판에 발생하는 응력의 판 두께 방향 분포는 직선이다. 이 응력 분포에서 판 표면에 발생하는 응력 σ_1 , σ_2 를 표면응력이라 한다. 이 표면응력은 식 (1)과 식 (2)에 의해 면내응력 σ_m 과 면외응력 σ_b 로 분해된다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (2)$$

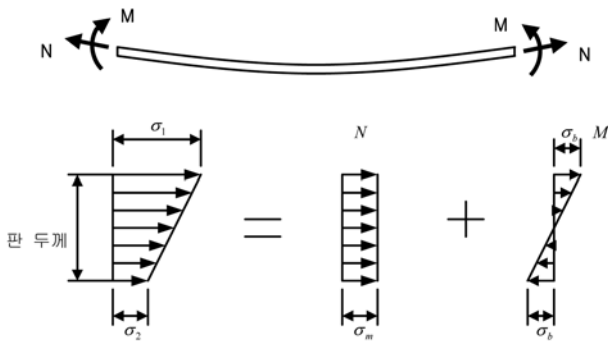


그림 15. 면내응력과 면외응력

면내응력 σ_m 은 축력 N에 의해 발생하는 응력인데 판의 면내방향 변형, 즉 판 평면 내에서의 변형에 기인하는 응력이다. 면외응력 σ_s 은 휨 모멘트 M에 의해 발생하는 응력인데 판의 면외방향 변형, 즉 판 평면 외부에로의 변형에 기인하는 응력이다.

그림 14에서의 상부절취부의 응력으로부터 면내응력과 면외응력을 구하면 그림 16과 같다. 재하 하중이 210 kN인 경우에 대하여 면내응력과 면외응력을 계산하는 과정을 예로 본다면 그림 14에서 브레이싱이 없을 때 절취부 양쪽의 응력은 각각 275.9 MPa와 -104.8 MPa이기에 면내응력은 $(275.9 - 104.8) / 2 = 85.6$ MPa이 되고, 면외응력은 $(275.9 + 104.8) / 2 = 190.4$ MPa이 된다.

그림 16에서 상부수평브레이싱이 없을 때 세로보의 횡비틀 거동에 의해 상부절취부에는 큰 면외응력이 발생한다. 그러나 브레이싱을 설치한 후 상부절취부의 응력은 면내응력이 주되는 응력이고 면외응력은 매우 작다. 이 면내응력

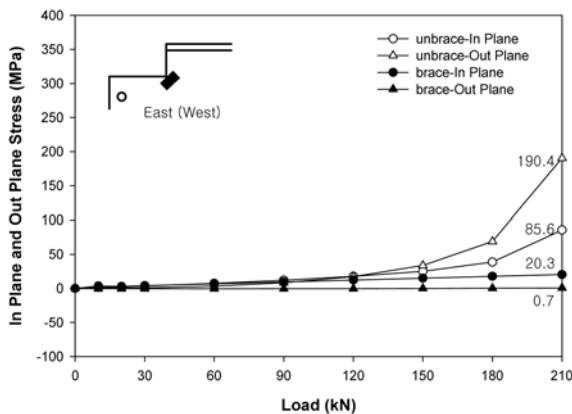


그림 16. 상부절취부 면내, 면외응력

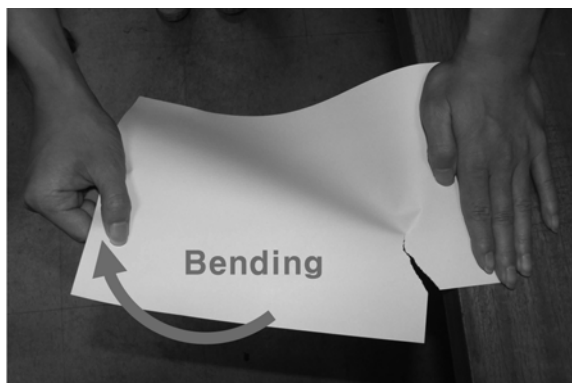


그림 17. 상부절취부의 균열

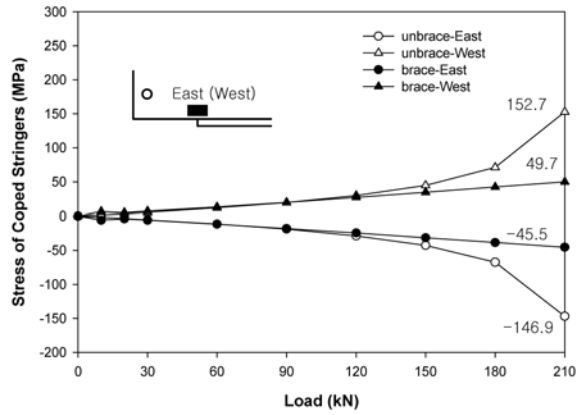


그림 18. 하부절취부 응력

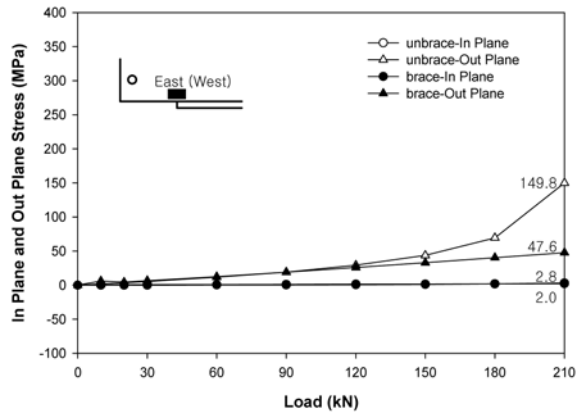


그림 19. 하부절취부 면내, 면외응력

은 세로보의 상부플랜지 절단으로 인해 세로보의 단부에서 발생하는 부모멘트를 세로보 복부판에 의해 저항하면서 생긴 것이다. 절취부 선단에서의 실제 응력은 응력집중으로 실험에서 측정된 응력보다 훨씬 더 크다. 이런 응력이 세로보의 상부절취부에 반복적으로 작용할 경우 절취부 선단에서 피로균열이 발생하게 된다. 이런 현상을 그림 17과 같은 간단한 종이모형 실험을 통해 쉽게 이해 할 수 있다.

그림 18은 상부수평브레이싱이 없을 때와 있을 때의 세로보 하부절취부의 복부판 좌, 우 양측 응력 값을 비교한 것이다. 그리고 그림 19는 하부절취부의 면내응력과 면외응력이다.

상부수평브레이싱이 없을 때 세로보의 횡비틀 거동에 의해 하부절취부에는 큰 면외응력이 발생한다. 브레이싱을 설치한 후 하부절취부의 면외응력이 149.8 MPa에서 47.6 MPa로 많이 감소하지만 면내응력보다는 훨씬 크다. 즉 브레이싱을 설치한 후 하부절취부의 응력은 상부절취부의 응력과 달리 면외응력이 주되는 응력이다. 하부절취부에서 이런 큰 면외응력이 발생하는 원인은 다음과 같다. 세로보의 단부는 하부플랜지가 절단된 상태에서 복부판만 가로보의 수직보강재에 연속된 볼트로 고정되어 있다. 그리고 바닥틀 구조는 세로보의 상부에만 브레이싱이 설치되어 있기에 세로보의 하부에는 여전히 횡비틀거동에 의한 수평변위가 발생한다.

이것은 하부플랜지가 절단된 부위의 복부판이 세로보 단부의 고정단에 대한 상대적 변형 즉 면외변형을 일으켜 절취부에 큰 면외응력이 발생하게 한다. 이 응력이 세로보의



그림 20. 하부절취부의 균열

하부절취부에 반복적으로 작용할 경우 절취부 선단에서 피로균열이 발생하게 된다. 이런 현상을 그림 20과 같은 간단한 종이모형 실험을 통해 쉽게 이해 할 수 있다.

4. 구조해석

본 연구에서 수행한 실험의 타당성과 정확성을 검증하기 위하여 범용 구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 구조해석을 수행하고 일부 실험 결과들을 구조해석 결과와 비교 하였다. 구조해석 모델형상은 그림 21과 같고 가로보와 세로보는 Shell요소를 사용하고 상부수평브레이싱은 Beam요소를 사용하여 모델링 하였다.

표 1에서는 하중크기가 210 kN인 경우에 대해 세로보 중앙부 하부플랜지의 세로보 종방향 응력과 수직 변위를 실험 결과와 구조해석 결과를 서로 비교하였다. 세로보 하부플랜지의 응력이 실험 값과 해석 값이 약간의 차이를 보이는 외에 수직변위는 실험 값과 해석 값이 일치하다. 이것은 본 실험의 타당성과 정확성을 말해 준다.

세로보의 절취부를 모델링 함에 있어서 직각으로 모델링 할 경우 절취부 끝단에서 응력발산이 일어나기 때문에 이를 방지하기 위하여 그림 22(a)와 같이 절취부 끝단을 반경이 1 mm인 원호로 모델링 하였다. 그리고 절취부에서의

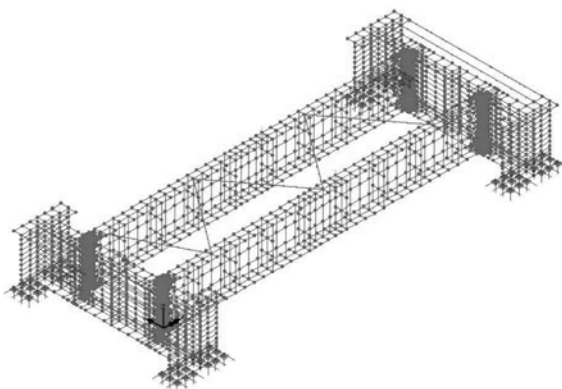
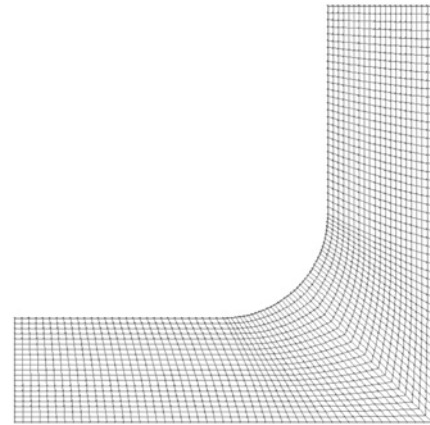


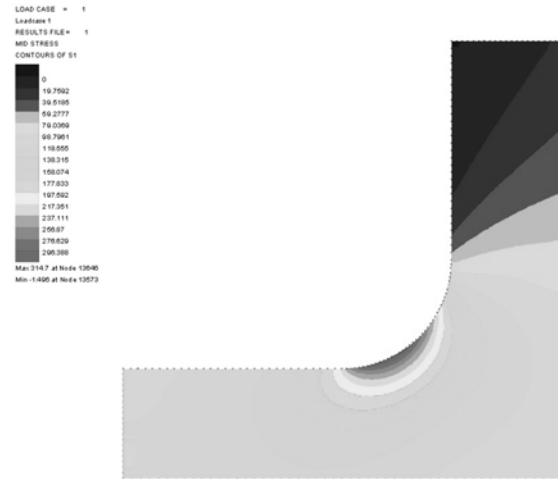
그림 21. 바닥틀 해석 모델

표 1. 세로보 하부플랜지 응력 및 수직 변위

	하부플랜지 응력 (MPa)	수직변위 (mm)
Test	53.5	3.5
FEM	55.9	3.5



(a) mesh 분할



(b) 응력 분포

그림 22. 상부 직각절취부

자세한 응력분포를 파악하기 위하여 mesh를 작게 분할하였다. 그림 22(b)는 하중크기가 210 kN일 때 상부절취부의 응력분포인데 절취부 끝단에서 기하형상이 직선에서 원호로 변하는 부위에서 응력집중이 발생 함을 볼 수 있다. 그리고 최대 응력의 크기는 314.7 MPa로써 실험 값보다 훨씬 크고 항복응력을 초과한다. 실험에서 변형률계이지를 비록 절취부 끝단에 부착하였다고 하지만 사실 이것은 정확한 이상적인 절취부 끝단이 아니기에 이렇게 측정된 절취부의 응력을 구조해석 값과 직접 비교하는 것은 타당하지 않고 큰 의미가 없다고 본다. 그러나 구조해석을 통하여 절취부에서의 응력집중 발생 여부 및 응력분포를 예측할 수 있고 실제 교량의 절취부에서도 응력집중으로 상당히 큰 응력이 발생 할 것이라는 것을 충분히 예측 할 수 있다고 본다.

5. 결 론

철도교 세로보 절취부에서의 피로균열 발생 원인을 파악하기 위하여 상부수평브레이싱이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 정적실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 세로보의 상부에만 수평브레이싱이 설치되었기에 하부에는 여전히 횡비틀 거동에 의한 수평변위가 발생하고 하부절취부에는 이로 인한 큰 면외응력이 발생한다.

2. 세로보 상부절취부의 피로균열 발생 원인은 세로보의 단부에서 발생하는 부모멘트에 의한 상부절취부 복부판의 면내응력의 반복적 작용 결과이다.
3. 세로보 하부절취부의 피로균열 발생 원인은 세로보 단부의 고정단에 대한 하부절취부 복부판의 상대적 면외변형에 의해 발생하는 면외응력의 반복적 작용 결과이다.
4. 세로보 절취부의 피로균열 발생을 예방하기 위해서는 상부절취부의 면내응력 감소와 하부절취부의 면외응력을 감소시킬 수 있는 새로운 가로보-세로보 연결 상세가 필요하다.

참고문헌

이광일, 정시운, 심낙훈, 박영석(2006) 강철도교 연결부의 세로보 절취부 형상에 따른 정적거동에 관한 실험적 연구. 2006년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2306.

이광일, 정시운, 심낙훈, 박영석(2007) 상부수평브레이싱이 바닥틀

시스템 세로보의 거동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구. 2007년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 150.

장동일 등(1989) 강구조물의 피로설계 매뉴얼 보고서, 한양대학교 산업과학연구소.

장동일 등(1996) 세로보 증설방안 및 교체대비 최적접합구조 제시 용역, (사)한국강구조학회, 서울특별시 지하철공사.

정시운, 이광일, 심낙훈, 박영석(2007) 바닥틀 시스템 세로보의 절취부에 발생된 균열의 보수 및 보강 방법에 대한 실험적 연구. 2007년도 학술발표회 논문집(1), 대한토목학회, pp. 105.

조효남 등(2003) 당산철교 감정의뢰 연구 보고서, (사)한국강구조학회.

최외호 등(1997) 당산철교 증거보전사건 감정연구 보고서, (사)대한토목학회, 시설안전기술공단.

日本剛構造協會(1993) 剛構造物の疲勞設計指針同解説, 技報堂出版.

大倉一郎(1994) 鋼橋の疲, 東洋書店.

J.W. Fisher 著(1984) 朴英錫 譯(1994) 鋼橋의 疲勞와 損傷, 歐美書館.

(접수일: 2008.12.30/심사일: 2009.3.23/심사완료일: 2009.6.11)