

철도교 세로보 절취부에서의 응력거동에 관한 실험적 연구

- II : 보수 · 보강 방법

An Experimental Study on the Stress Behavior of Coped Stringers in Steel Railway Bridge - II : Repair · Strengthening Method

이광일* · 박영석**

Li, Guang Ri · Park, Young Suk

Abstract

In this study, in order to research the repair-strengthening methods, when fatigue crack occurs in the coped stringers of a steel railway bridge, we manufacture the full size of crossbeam-stringer and floor system model. Also the experimental test is performed on the coped stringers applying the repair-strengthening methods using the stop hole, combination plate, connection plate, bracket, and so on. The results indicate that, the most effective method is to set up connection plate and bracket in the top flange and bottom flange of the stringers, while we can consider the method of punching stop holes in the end of the crack as a subsidiary method. It is necessary to set up the combination plate when the length of crack is quite long.

Keywords : *coped stringers, fatigue crack, repair · strengthening, in plane stress, out plane stress*

요 지

본 연구에서는 철도교의 세로보 절취부에 피로균열이 발생 하였을 때 이에 대한 적절한 보수 · 보강 방법을 연구하기 위하여 실제로 피로균열이 발생한 철도교를 연구대상으로 실물크기의 가로보-세로보 바닥틀 모형을 제작하고, 세로보의 절취부 및 균열부에 스톱 홀 보수, 덧댐판 보강, 연결판 보강, 브래킷 보강 등 보수 · 보강 방법을 적용하여 실내실험을 수행하였다. 그 결과 제일 효과적인 보강 방법으로는 세로보의 상부플랜지와 하부플랜지에 연결판과 브래킷을 설치하는 것이고, 균열 선단에 스톱 홀을 뚫는 방법은 보조적인 방법으로 사용할 수 있다는 결론을 얻었다. 그리고 균열 길이가 어느 정도 길 경우에는 복부판에 덧댐판을 설치할 필요가 있다.

핵심용어 : 세로보 절취부, 피로균열, 보수 · 보강, 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 가로보와 세로보의 연결부의 세로보 플랜지 절단부에서 균열이 많이 발생한다. 피로균열이 발생한 부재에 대해서는 적절한 보수 · 보강 조치를 취하여 균열이 더 진전되지 않도록 해야 한다.

기존의 이와 유사한 피로문제에서의 보수 · 보강 사례들을 조사해 보면 흔히 사용하는 보수 · 보강 방법으로 스톱 홀(Stop Hole) 보수, 덧댐판(Combination Plate) 보강, 연결판(Connection Plate) 보강, 브래킷(Bracket) 보강 등 방법들을 사용하고 있다. 연구대상 교량일 경우에는 세로보 상, 하부절취부에 길이가 작은 피로균열이 발생하였을 때 초기 대책으로 스톱 홀 보수 처리만을 하였는데 얼마 지나지 않아 스톱 홀 부위에서 새로운 피로균열이 발생 하였고,

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

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

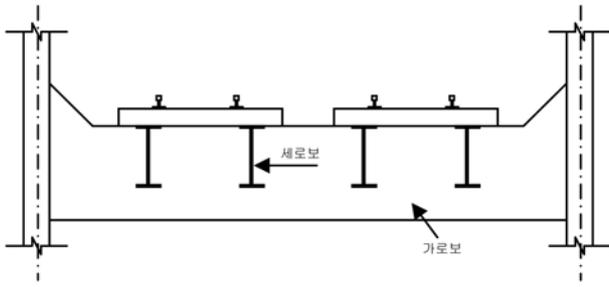


그림 1. 바닥틀 횡단면도

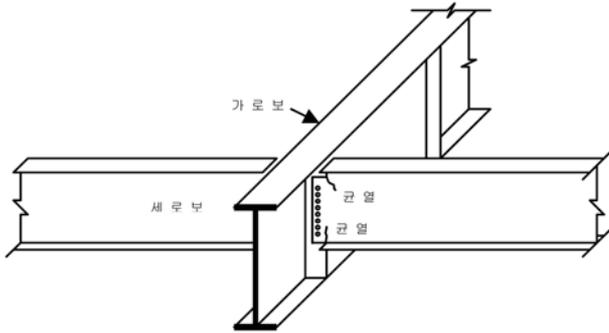


그림 2. 균열발생 위치

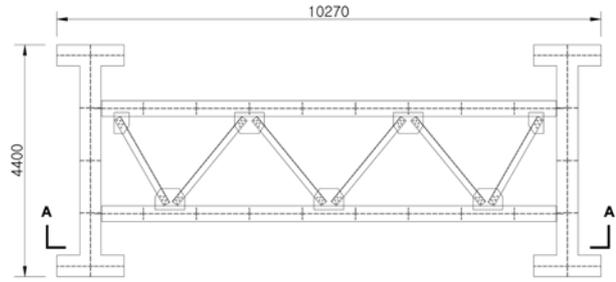
또 일부 세로보들에 대해서는 브라켓 보강을 하였지만 브라켓의 한쪽 플랜지를 세로보의 하부플랜지와 볼트로 연결하지 않고 단지 받쳐만 주도록 처리한 잘못된 설치방법으로 인해 피로균열이 계속 진전하였다. 이러한 결과를 초래한 원인은 시행자가 피로균열 발생의 근본적 원인을 제대로 파악하지 못했거나 또는 각 보수·보강 방법이 부재의 역학적 거동과 균열부의 응력거동에 미치는 영향을 정확히 파악하지 못한 상태에서 잘못된 방법으로 보수·보강 조치를 취하였기 때문이다.

본 연구에 앞서 진행 한 세로보 절취부의 피로균열 발생 원인 연구 실험에 의하면 세로보 상부절취부의 피로균열 발생 원인은 응력집중 외에 세로보의 단부에서 발생하는 부모멘트에 의한 상부절취부 복부판의 면내응력의 반복적 작용 결과인 것으로 나타났고, 세로보 하부절취부의 피로균열 발생 원인은 세로보 단부의 고정단에 대한 하부절취부 복부판의 상대적 면외변형에 의해 발생하는 면외응력의 반복적 작용 결과인 것으로 나타났다.

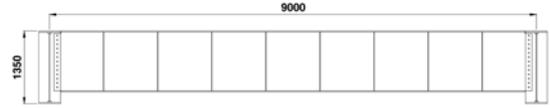
이런 결론을 전제로, 본 연구에서는 동일한 시험체를 연구대상으로 스톱 홀 보수, 덧댐판 보강, 연결판 보강, 브라켓 보강 등 보수·보강 방법을 적용하여 각 방법의 효과를 분석하였고, 상부절취부의 면내응력을 인장에서 압축으로 변화시키는 보강 방법과 하부절취부의 면내, 면외응력 크기를 감소시킬 수 있는 보강 방법을 제시 하였다. 이는 기존 철도교의 유사한 연결부에서 피로균열 발생 시, 이에 대한 정확하고 효과적인 보수·보강 조치를 실시하는데 도움이 될 수 있는 좋은 참고자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 시험체 제원

가로보와 세로보로 구성된 바닥틀 구조의 평면도와 종단

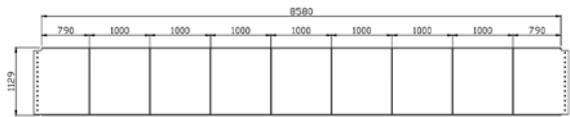


(a) 상부 평면도

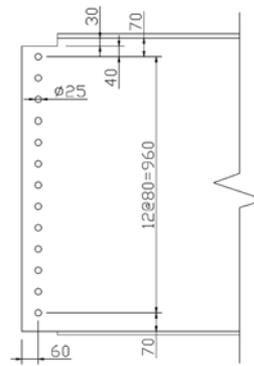


(b) A-A 단면도

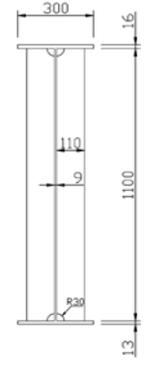
그림 3. 바닥틀 구조



(a) 정면도



(b) 단부 상세도



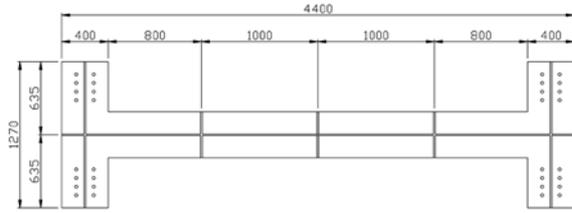
(c) 단면도

그림 4. 세로보 제원

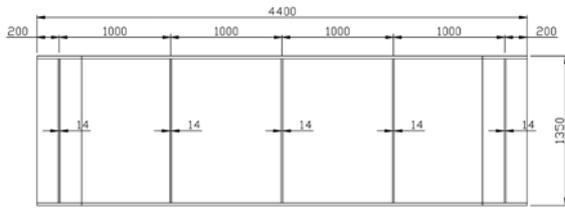
면도는 그림 3과 같다. 두 가로보의 복부판 중심 사이의 거리는 9 m이고 두 세로보의 복부판 중심 사이의 거리는 2 m이다. 세로보를 지지하는 가로보의 높이는 1.35 m이고 가로보의 길이는 4 m이다. 그리고 두 세로보 사이에는 상부에 W형의 수평브레이싱이 설치되어 있다.

그림 4는 세로보의 제원이다. 세로보의 길이는 8.7 m이고, 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.

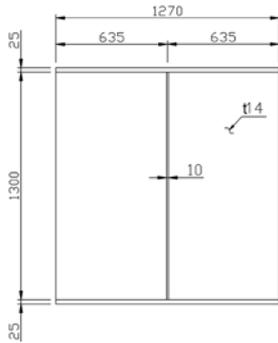
그림 5는 가로보의 제원이다. 실제 교량의 바닥틀 구성은 교량의 종방향으로 총 네개의 세로보가 가로보의 수직보강재에 연결된 것으로 되어 있는데, 본 연구에서는 바닥틀 구조에 대한 사전의 엄밀한 구조해석을 통하여 실제교량에서의 세로보의 양단 경계조건을 정확히 구상할 수 있도록



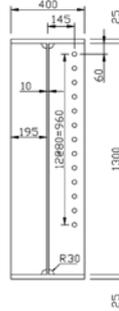
(a) 상, 하부 평면도



(b) 정면도



(c) 측면도



(d) 단면도

그림 5. 가로보 제원

가로보를 설계, 제작 하였다.

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

3. 실내 정적실험

3.1 실험 방법

그림 6은 실내실험 전경인데 재하 방법은 두대의 500 kN 급 유압가력기의 단부를 각각 세로보의 상부플랜지에 볼트로 직접 연결하고 세로보의 중앙에 수직으로 재하 하였다.

시험체의 경계조건은 그림 7과 같이 가로보의 하부플랜지를 지점판과 16개의 볼트로 연결하고, 지점판은 4개의

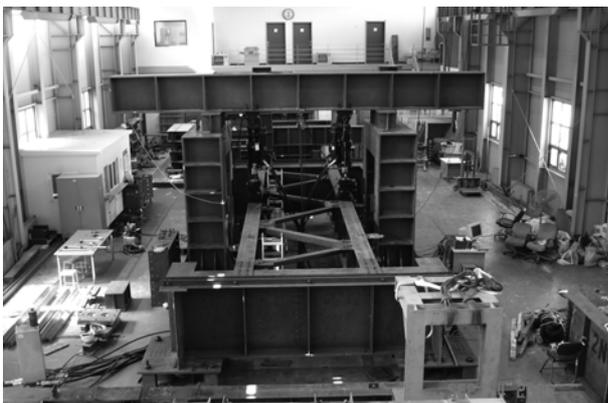


그림 6. 실험 전경

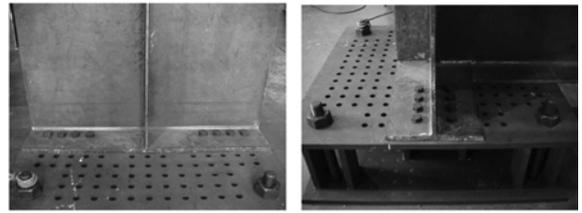


그림 7. 지점부 형상

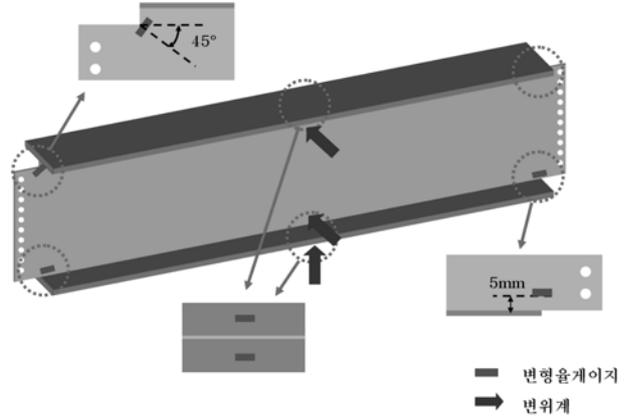


그림 8. 변형률게이지 및 변위계 위치

큰 고장력 볼트로 실험실 바닥판에 고정하였다.

여러 가지 보수·보강 방법에 따른 세로보의 역학적 거동과 절취부의 응력 거동을 파악하기 위하여 그림 8과 같이 변위계를 설치하고 변형률게이지를 부착하였다. 변위계는 세로보 중앙의 상, 하부플랜지 근처의 복부판에 수평으로 각각 하나씩 설치하였고 하부플랜지 밑에도 수직으로 한 개의 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 8과 같이 상부절취부인 경우 절취부의 끝단에 수평방향과 45도 각도로 복부판 양쪽에 서로 대칭되게 부착하고, 하부절취부인 경우에는 수평방향으로 복부판 양쪽에 서로 대칭되게 부착하되 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.

본 연구에서는 피로균열이 발생하기 전의 세로보에 대해서는 연결판 보강과 브라켓 보강 방법을 적용하여 보강 효과를 분석하였고, 하부절취부에 균열이 있는 세로보에 대해서는 연결판 보강과 브라켓 보강 방법 외에 스톱 홀 보수와 덧댐판 보강 방법을 추가하여 보수·보강 효과를 분석하였다.

연결판 보강은 그림 9와 같이 두께가 25 mm이고 변의 길이가 770×300 mm인 철판을 사용하여 가로보와 세로보의 상부플랜지를 볼트를 체결하여 연결하였다.

브라켓 보강은 그림 10과 같이 받침모양의 구조물을 제

작하여 한쪽은 세로보의 하부플랜지와 볼트로 연결하고 다른 한쪽은 가로보의 수직보강과 볼트로 연결함으로써 세로보의 하부플랜지가 가로보에 연결되게 하였다. 그러나 연구 대상 교량에서는 브라켓의 한쪽만 가로보의 수직보강재와 볼트로 연결하고 다른 한쪽은 세로보의 하부플랜지를 받쳐만 주고 볼트를 체결하지 않았는데 나중에 추가 균열이 발생하였다.

스톱 홀 보수는 그림 11과 같이 균열 선단에 직경이 25 mm인 구멍을 뚫었다. 그리고 홀 바로 위에는 수평으로 변형률게이지를 부착하여 홀 부위에서의 응력 거동을 분석하였다.



그림 9. 연결판 보강



그림 10. 브라켓 보강

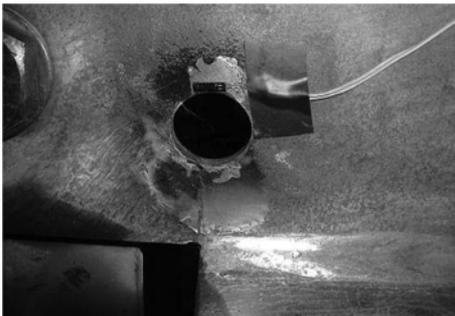


그림 11. 스톱 홀 보수



그림 12. 덧댐판 보강

였다.

덧댐판 보강은 그림 12와 같이 두께가 복부판 두께와 동일한 9 mm이고 변의 길이가 400×400 mm인 철판을 균열 부위를 충분히 가리도록 세로보 하단부에 배치하고 세로보의 복부판과 덧댐판이 일체가 되어 가로보의 수직보강재에 연결되도록 총 11개의 볼트로 체결하였다.

3.2 실험 결과

그림 13은 하중 증가에 따른 세로보 중앙부 하부의 수평변위를 보강하지 않았을 때와 연결판 보강, 브라켓 보강, 연결판과 브라켓으로 동시에 보강한 등 네가지 경우에 대하여 비교한 그래프이다.

전반적으로 보면 보강 전 보다 보강 후에 수평변위가 상

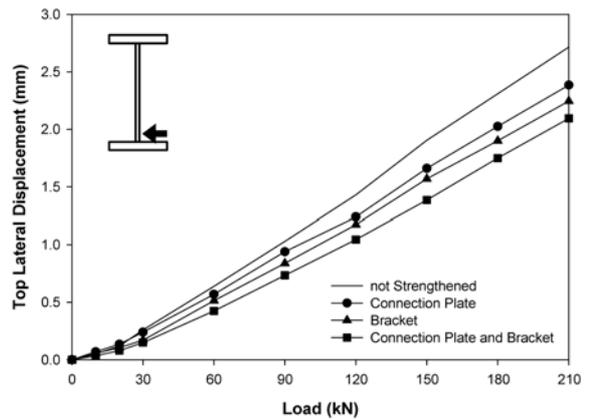


그림 13. 하부 수평 변위

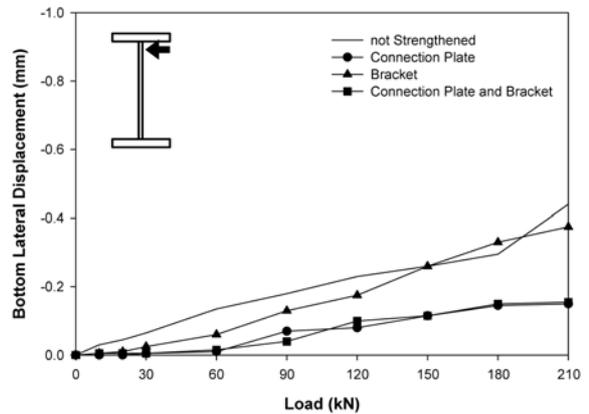


그림 14. 상부 수평 변위

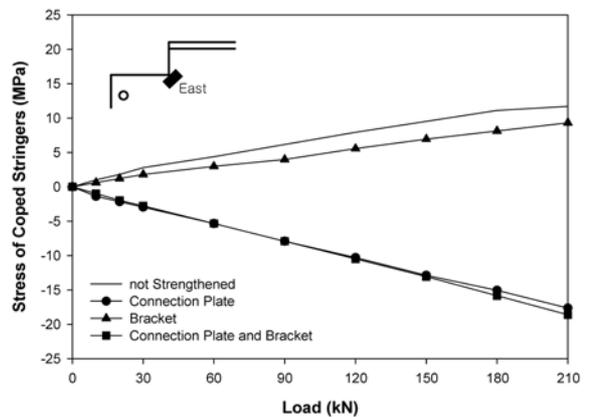


그림 15. 상부절취부(East) 응력

대적으로 좀 작은 값을 보이는데 이것은 연결판 또는 브라켓 보강으로 세로보의 플랜지를 가로보에 연결함으로써 세로보의 횡방향 변형에 대한 저항이 증가하기 때문이다.

그림 14는 하중 증가에 따른 세로보 중앙부 상부의 수평 변위를 그림 13에서와 같이 4가지 경우에 대하여 비교한 것인데 여기에서도 보강 전 보다 보강 후에 수평변위가 상대적으로 좀 작은 값을 보인다. 그러나 전체적으로 볼 때 상부수평변위의 크기는 하부수평변위보다 매우 작는데 이것은 세로보의 상부에만 수평브레이싱이 설치되어 있기 때문이다.

그림 15와 그림 16은 보강하지 않은 경우, 연결판으로 보강한 경우, 브라켓으로 보강한 경우, 연결판과 브라켓을 동시에 사용하여 보강한 경우 등 4가지 경우에 대한 하중 증가에 따른 세로보 상부절취부 복부판 양쪽면의 응력 변화를 비교한 그래프이다.

그림 15와 그림 16은 모두 비슷한 경향을 보이는데 브라켓 만으로 보강하였을 때 상부절취부의 응력은 보강하지 않았을 때보다 상대적으로 작은 값을 보인다. 이것은 브라켓 보강은 상부절취부의 응력 감소에 일정한 효과가 있다는 것을 말해준다. 그리고 연결판 만으로 보강한 경우와 연결판과 브라켓을 동시에 사용하여 보강한 경우의 응력이 서로 비슷하고 원래 인장을 받던 절취부의 응력을 압축으로 변화시키는데 이것은 상부절취부에 대한 연결판의 보강효과는 매우 좋다는 것을 말해준다. 이와 같은 결과의 발생 원인을 분석 하려면 그림 17과 그림 18의 각각의 보강 방법

에 따른 상부절취부의 면내응력과 면외응력의 구체적인 변화를 분석해야 한다.

그림 17에서 브라켓을 설치한 후 상부절취부의 면내응력은 많이 감소하는데 이것은 브라켓 설치로 인해 세로보 단부의 단면 높이가 증가하기 때문이고, 연결판 보강 후에 상부절취부의 면내응력은 인장에서 압축으로 변하는데 이것은 연결판 설치로 인해 원래 세로보의 복부판에 의해 저항하던 부모멘트를 연결판에 의해 저항하기 때문이다. 그리고 그림 18에서 상부절취부의 면외응력은 보강한 후에 보강 전보다 모두 일정한 감소를 보이는데 이것은 연결판 또는 브라켓 보강을 통하여 세로보의 상부 또는 하부플랜지를 가로보에 연결 함으로써 세로보의 횡.비틀 거동에 의한 절취

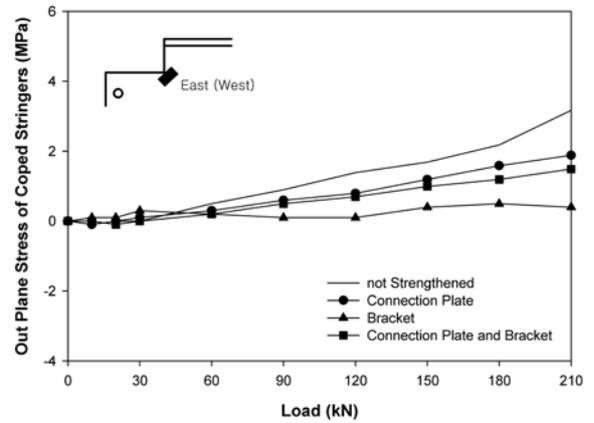


그림 18. 상부절취부 면외응력

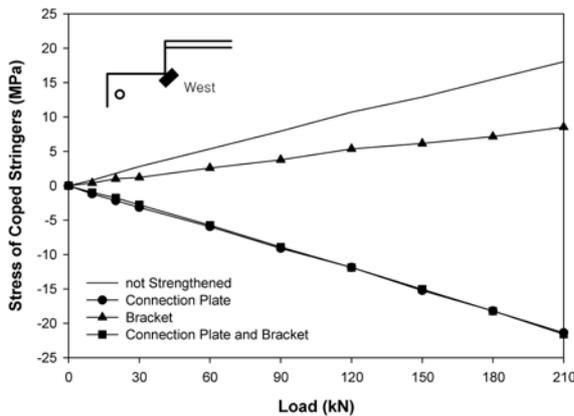


그림 16. 상부절취부(West) 응력

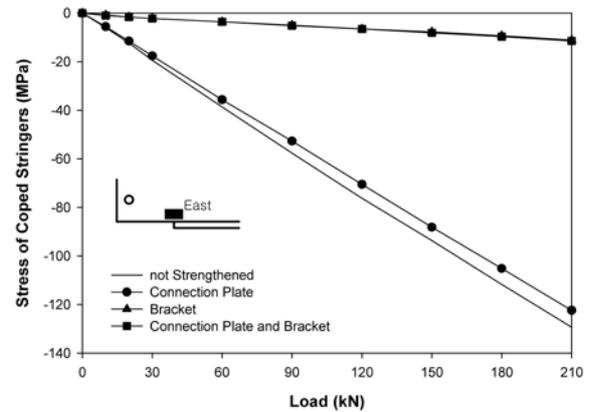


그림 19. 하부절취부(East) 응력

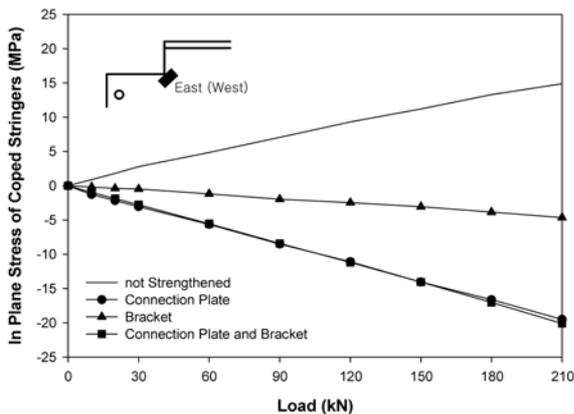


그림 17. 상부절취부 면내응력

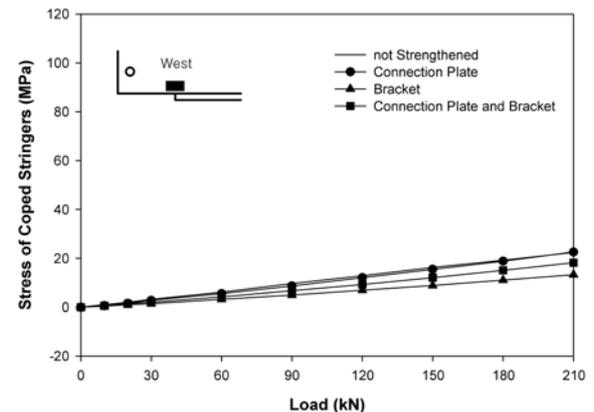


그림 20. 하부절취부(West) 응력

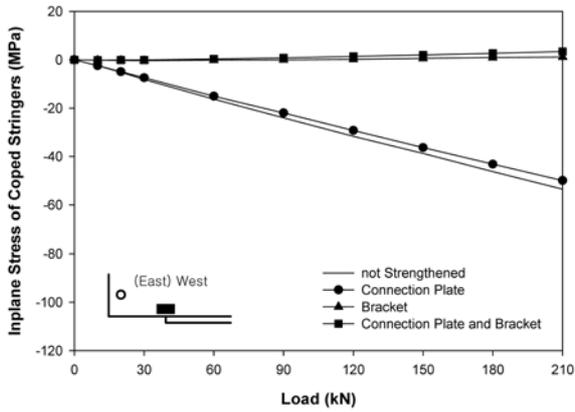


그림 21. 하부절취부 면내응력

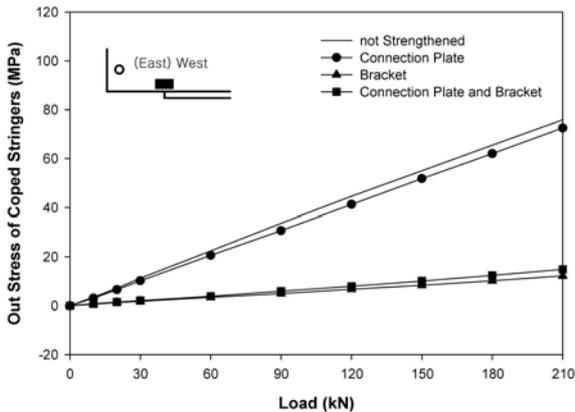


그림 22. 하부절취부 면외응력

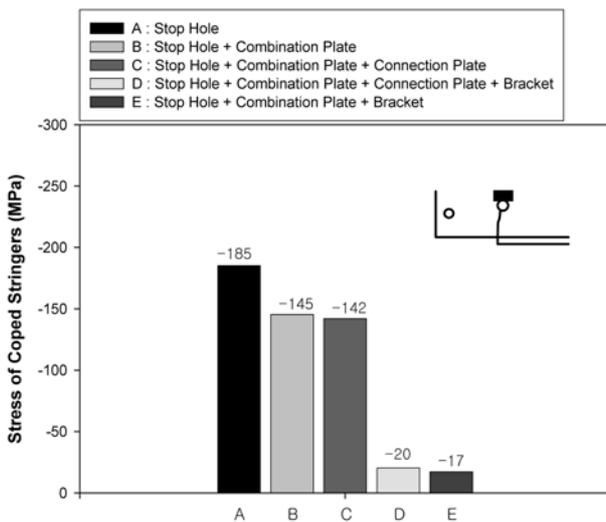


그림 23. 보수·보강 효과

부의 면외변형을 감소 시키기 때문이다.

그림 19와 그림 20은 보강하지 않은 경우, 연결판으로 보강한 경우, 브라켓으로 보강한 경우, 연결판과 브라켓을 동시에 사용하여 보강한 경우 등 4가지 경우에 대한 하중 증가에 따른 세로보 하부절취부 북부판 양쪽면의 응력을 비교한 그래프이다.

그림 19에서 연결판 만으로 보강하였을 때 하부절취부의 응력은 보강하지 않았을 때와 거의 비슷한 값을 보이는데 이것은 연결판 보강은 하부절취부에 거의 효과가 없다는 것을 말해준다. 그리고 브라켓 만으로 보강한 경우와 연결

판과 브라켓을 동시에 보강한 경우의 응력이 서로 비슷하고 모두 보강하지 않았을 때보다 응력의 크기가 훨씬 작다. 이것은 하부절취부에 대한 브라켓의 보강 효과는 매우 좋다는 것을 말해준다. 그림 20에서도 연결판 만으로 보강하였을 때 하부절취부의 응력은 보강하지 않았을 때와 비슷한 값을 보이는 반면 브라켓으로 보강한 경우에는 응력이 크기가 거의 절반으로 감소 한다.

이와 같은 결과의 발생 원인에 대해 역시 그림 21과 그림 22의 하부절취부의 면내응력과 면외응력의 변화에 대한 분석을 통해 알 수 있다.

그림 21에서 브라켓을 설치한 후 하부절취부의 면내응력은 크게 감소하는데 이것은 브라켓 설치로 인해 세로보 단부의 단면 높이가 증가하기 때문이다. 그림 22에서 브라켓을 설치한 후 하부절취부의 면외응력도 크게 감소하는데 이것은 브라켓을 설치하여 세로보의 하부플랜지를 가로보에 연결함으로써 세로보 단부 하부절취부의 가로보에 상대적인 비틀림 및 수평방향 변형을 감소시키기 때문이다. 즉 하부절취부 북부판의 면외변형이 감소하고 이로 인해 면외응력도 감소한다. 그런데 여기서 주의 할 것은 만일 브라켓을 세로보의 하부플랜지와 볼트를 체결하여 연결하지 않고 단지 받쳐만 준다면 세로보 하부절취부의 면외응력 감소 효과를 발휘할 수 없게 된다.

그림 23은 하부절취부에 피로균열이 발생한 세로보에 대해 보수·보강 효과를 분석한 것이다.

일반적으로 균열 선단에서는 응력집중으로 인해 매우 큰 응력이 발생하는데 스톱 홀 보수를 한 후에는 응력의 크기가 상대적으로 많이 작아진 것으로 보아 스톱 홀은 응력 집중부의 응력을 분산하는 작용이 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 실제 교량에서 오직 스톱 홀로만 보수 한 부위는 새로운 균열이 발생하는 현상이 있었는데 이로부터 볼 때 스톱 홀 보수는 임시적인 보수 방법으로서 스톱 홀 보수 외에도 균열발생의 근본원인을 해결할 수 있는 기타 보강방법이 더 필요하다는 것을 알 수 있다.

스톱 홀 보수 외에 덧댐판 보강을 한 경우에는 응력의 크기가 어느 정도 감소하는데 이것은 균열발생으로 인해 축소된 북부판의 저항 단면을 덧댐판 보강으로 다시 증가시키기 때문이다. 덧댐판 보강방법은 북부판에 진전된 균열 길이가 길 경우에 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

덧댐판 보강과 연결판 보강을 동시에 한 경우에는 덧댐판 보강만 한 경우와 응력의 크기가 거의 비슷한데 이것은 연결판 보강이 하부절취부에 대해서는 거의 효과가 없는 것으로서 앞의 균열발생 전의 보강효과 실험에서 얻은 결과와 동일하다.

마지막 두 경우는 모두 브라켓 보강을 한 경우인데 이때는 응력의 크기가 훨씬 감소 됨으로써 하부절취부에 대한 브라켓의 보강효과가 좋다는 것을 말해준다. 이것도 역시 앞의 균열발생 전의 실험에서 얻은 결과와 동일하다.

4. 결 론

균열발생 전, 후 바닥틀 시스템의 세로보 절취부에 대해

여 일련의 보수·보강 방법을 적용하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스톱 홀 보수와 덧댐판 보강은 각각 응력 분산과 복부판 강도 증가 작용으로 일정한 보수·보강 효과가 있지만 균열발생의 근본적 원인을 해결할 수 없기에 새로운 균열이 발생 할 수 있다.
2. 연결판 보강은 세로보 상부절취부의 면내응력을 인장응력에서 압축응력으로 변화시켜 상부절취부에 대한 보강효과가 매우 좋지만 하부절취부에는 거의 영향이 없다.
3. 브라켓 보강은 세로보 하부절취부의 면내응력과 면외응력 크기를 감소 시키는 작용을 하기에 하부절취부에 대한 보강 효과가 매우 좋고 또 상부절취부의 응력 감소에도 일정한 효과가 있다.
4. 세로보 단부 절취부에서의 피로균열 발생을 예방하기 위해서는 세로보의 상, 하부플랜지가 가로보에 연결되도록 설계를 해야 한다. 그렇지 않을 경우 만일 세로보 단부 절취부에 피로균열이 발생 하였다면 균열 선단에 스톱 홀 보수를 한 후 연결판 보강과 브라켓 보강을 해야 한다. 그리고 복부판에 진전된 균열 길이가 어느 정도 길 경우에는 덧댐판 보강도 해야 한다.

참고문헌

- 이광일, 정시윤, 심낙훈, 박영석(2006) 강철도교 연결부의 세로보 절취부 형상에 따른 정적거동에 관한 실험적 연구. 2006년도 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 2306.
- 이광일, 정시윤, 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.
- 정시윤, 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: 2009.5.15)