# 좌굴손상이 발생한 강상형교량의 보수·보강대책 연구

## A Study on the Repair and Retrofit in Steel Box Girder Bridge occuring Buckling Damage

장 동일[1], 채 원규[2], 경 갑수[3], 민 인기[4], 홍 성욱[5], 김 동용[6]
Chang Dong Il, Chae Won Kyu, Kyung Kab Soo, Min In Ki, Hong Sung Wook, Kim Dong Yong

## 1. 서 론

강상형교(Steel Box Girder Bridge)는 휨강성 및 비틀림강성이 I형이나 Π형 단면에 비해서 현저하게 크고 가설시의 안전성도 우수하며, 완성후의 내하력도 크다는 장점을 갖고 있어 지간이 40~80m인 교량에 적용되는 대표적인 교량형식이며, 또한 경제적, 구조적인 특성을 고려하여 대분분이 연속교 형식으로 건설되고 있다.

강상형교의 대부분은 교량이 주형과 콘크리트 바닥판이 합성되어 있는 강합성교의 교량형식을 취하고 있으므로 콘크리트 상판에 의해 대략적으로 500kg/m$^2$의 사하중이 주형에 전달되며, 주형에 전달된 하중은 단면의 형상을 유지하고 강성증대를 목적으로 하는 다이아프램(횡격벽), 종리브 및 횡리브에 의해서 분산되는 역학적 경로를 나타내고 있는 것이 일반적이다.

그러나 강교량은 강재 제조과정에서의 강판자체의 초기부정, 부재 제작시의 잔류응력 및 용접변형에 의한 초기부정 등의 여러 외적요인에 의한 제작과정에서의 초기부정과 부재의 조립, 현장가설 및 공용의 각 단계에서 발생할 수 있는 여러 불완전인자에 의한 전체적인 초기부정이 구조물의 거동에 영향을 미치며, 이들 인자들 가운데는 각 과정에서 아무리 주의를 하여도 불가결하게 존재하는 인자들도 있게되어 경우에 따라서는 구조부재의 가조립 단계에서부터 이들 초기부정량들이 각 부재에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 초기부정량은 사하중이 작은 공장 가조립단계에서는 부재간에 큰 응력을 발생시키지는 않으나 현장시공에서부터는 점차적으로 추가되는 사하중 및 활하중의 작용에 의해 강교량의 거동에 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 지간이 60m, 총연장이 300m인 강상형 연속교 구간의 지점부 근처의 횡리브의 좌굴손상에 대해서 연속교 구간 지점부의 횡리브 좌굴손상과 주요 가설단계와의 관계를 검토하고 횡리브의 좌굴손상이 정지성인가 진행성인가에 대한 검토 및 좌굴손상에 대한 보수·보강방안을 수립하는 것을 본 연구의 목적으로 한다.

## 2. 대상교량의 제원

본 연구 대상교량에 대한 평면도, 종단면도 및 횡단면도는 그림 2.1 ~ 그림 2.3과 같다.

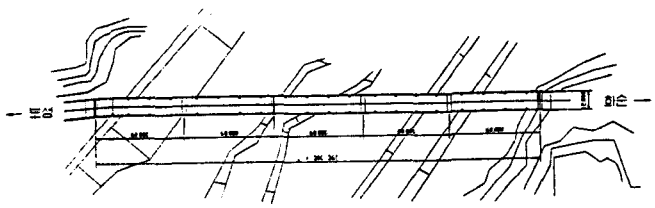



그림 2.1 평 면 도

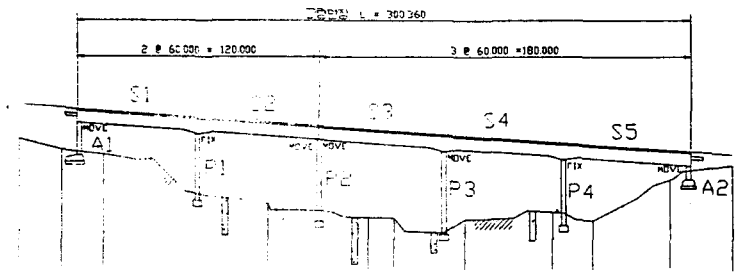
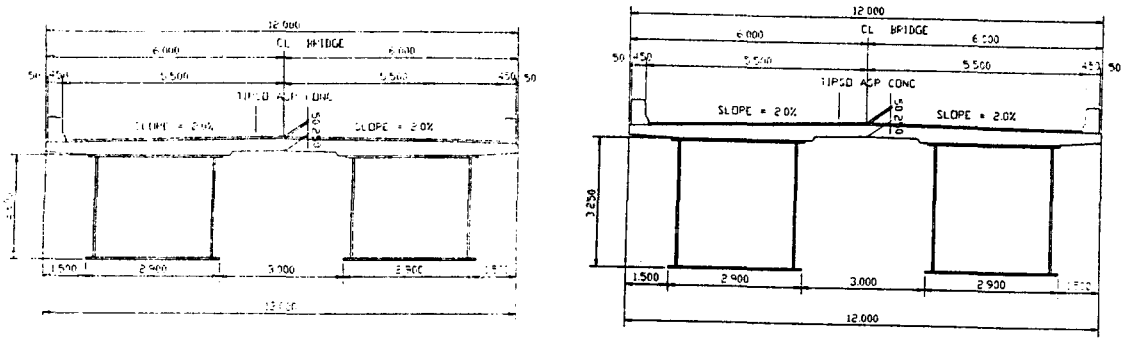



그림 2.2 종단면도

---

1) 한양대학교 지구환경건설공학부 교수
2) 신구대학 토목과 조교수
3) 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실 책임연구원
4) 대림산업 기술연구소 사원
5) 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정
6) 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정




(a) 중앙부 (b) 지점부

그림 2.3 횡단면도

한편 대상교량의 횡리브에서 발생한 좌굴손상상태의 일례를 나타내면 그림 2.4와 같다.

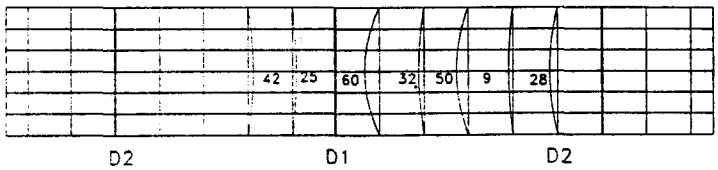



그림 2.4 횡리브의 좌굴손상 상황

## 3. 현장재하시험

본 연구에서는 연속교 구간의 지점부 근처의 횡리브에서 발생한 좌굴손상의 특성을 파악하기 위하여 현장재하시험을 실시하였으며, 좌굴손상의 발생특성과 주요가설단계와 관련지워 다음과 같이 분류하였다.

(1) 강재 거치만을 고려한 강재 중량에 의한 사하중 작용만에 의한 좌굴 발생 가능성
(2) 슬래브 및 난간 등을 포함하는 합성후 사하중에 의한 좌굴 발생 가능성
(3) 현 좌굴손상에 대한 활하중 작용에 따른 좌굴손상의 진행 가능성

위에서 나열한 3가지 경우 중 (1) 및 (2)의 경우에 대해서는 현 단계에서는 그 영향을 정량적으로 산출할 수 있는 자료가 존재하지 않으므로 현장재하시험에서는 (3)번의 경우를 가정하여 실시하였다. (3)의 경우 즉, 활하중이 작용하는 경우 기발생된 좌굴의 정지성 여부와 활하중이 교량각 단면력에 미치는 영향과 이들 단면력과 기좌굴과의 관련성을 파악하기 위하여 현장재하시험을 정적재하시험과 동적주행시험으로 구분하여 실시하여 각 하중경우에 따른 주형, 횡리브 및 종리브의 응력분포를 도출하였다.

현장재하시험은 각 부재에 최대모멘트와 최대전단력이 발생할 것으로 예상되는 지점에 시험용 재하차량을 재하시키는 정적재하시험과 동일한 지점에서의 동적하중에 대한 특성을 조사하기 위해서 시험용 재하차량을 주행시키는 동적주행시험을 실시하였다.

## 4. 현장재하시험 결과

정적재하시험은 횡리브의 좌굴손상이 발생한 지점부를 손상부로 하고 횡리브의 좌굴손상이 발생하지 않은 부분을 무손상부로 하여 동일한 하중조건에 대해서 손상부와 무손상부에서 주형의 휨응력 변화유무를 비교하고 종리브와 횡리브에서의 응력상태를 파악하였으며, 동적주행시험은 손상부와 무손상부에서 차량이 주행함에 따른 휨응력의 변화유무, 종방향과 횡방향의 응력상태의 변화유무 등을 파악하였다.

### 4.1 정적재하시험 결과

하중재하경우에 따른 부재별 최대응력값은 주형의 경우 약 84(kg/cm$^2$), 횡리브의 경우 349(kg/cm$^2$), 종리브의 경우 309(kg/cm$^2$)으로 전체적으로는 매우 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 위의 결과로부터 주형단면에 대한 휨변형률 분포도의 일례를 도시하면 그림 4.1과 같으며, 횡리브, 종리브의 변형률분포의 일례를 나타내면 그림 4.2와 같다.

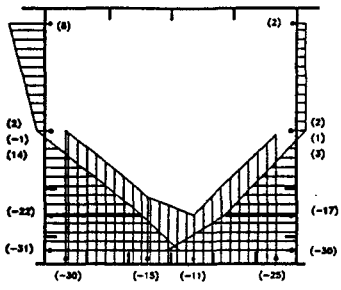


그림 4.1 주형단면에 대한 휨변형률 분포도

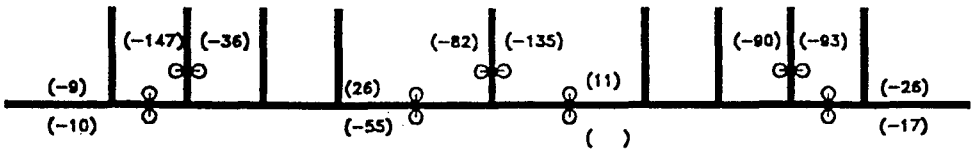



그림 4.2 종리브와 횡리브의 휨변형률 분포도

그림 4.1과 같이 주형의 변형률분포는 전체적으로 이상적인 변형률분포를 나타내고 있으나 지점부의 경우 복부판의 변형률분포가 다른 단면에 비해서 선형적인 경향을 가지고 있지 않음을 알 수 있는데 이러한 이유로는 지점부의 종방향 구속에 의한 영향인 것으로 생각된다.

또한 그림 4.2와 같이 횡리브 중앙부에 대한 변형률분포와 횡리브의 좌굴형상을 비교하면 횡리브의 좌굴손상이 비교적 현저하게 나타난 곳에서의 오목한 부분에서는 압축변형률이 발생하고 있으며, 볼록한 부분에서는 인장변형률이 발생하고 있으므로 좌굴손상이 현저한 부분을 방치하여 공용하는 경우에는 좌굴이 진행될 가능성이 있을 것으로 생각된다.

이것을 종리브의 변형률 분포와 관련하여 고찰하면 종리브의 변형률이 압축성분으로 나타나는 곳에서는 횡리브의 변형률 대부분이 인장성분을 나타내고 있는 것으로부터 횡리브에서의 좌굴은 지점부 이외의 곳에서는 활하중에 의해서는 추가적인 좌굴발생 가능성은 작을 것으로 생각된다.

또한 횡리브와 종리브의 응력은 하중경우에 따라서 주형에 비하여 상대적으로 큰 값을 나타내고 있으나 응력의 크기가 작으므로 구조물이 사용성에는 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

한편 주형 복부판에 작용하는 전단응력, 최대주응력, 주응력방향은 지점부의 경우 전단응력은 약 30.71(kg/cm$^2$), 최대주응력은 73.35(kg/cm$^2$), 주응력방향은 23° ~59° 를 나타나고 있으며, 중앙부의 경우 전단응력은 약 30.71(kg/cm$^2$), 최대주응력은 63.67(kg/cm$^2$), 주응력방향은 6° ~63° 로 나타나고 있다. 이 값으로부터 현단계에서 전단응력 대상교량의 사용성에는 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

## 4.2 동적주행시험 결과

동적주행시험 결과 대상교량의 주형, 횡리브에 대한 동적변형률 및 교축직각방향 가속도는 그림 4.3~그림 4.4와 같다.

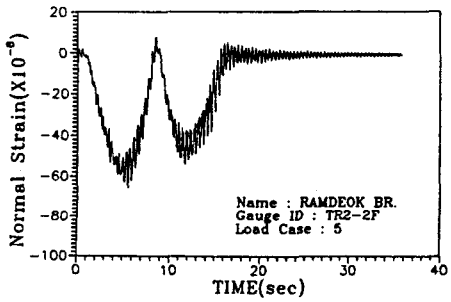



그림 4.3 변형률이력선도

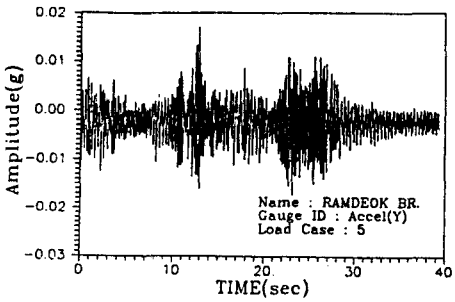



그림 4.4 가속도이력선도

동적주행시험 결과 최대응력은 하부플랜지에서 71.4(kg/cm$^2$)로 나타나고 있고, 횡리브의 경우 98.7(kg/cm$^2$)로 나타나고 있으므로 응력값은 비교적 작은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있었는데, 이는 정적재하시험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있는데 동적재하시험 결과를 정적재하시험 결과와 비교하면 동적주행시험의 경우에서 다소 응력이 상회하는 경향이 있으나 이는 노면요철 등 차량의 주행에 따른 충격이 가해진 결과로 생각된다. 따라서 동적주행시험 결과 활하중에 의한 응력값이 구조물의 거동에는 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

## 5. 구조해석

구조해석은 2경간 연속교의 지점부 부근의 부모멘트 구간 상형내부의 횡리브에 발생된 좌굴손상과 주요 가설단계와의 관련성을 조사하기 위하여 강상형교의 전체적인 거동특성과 국부좌굴 발생부인 횡리브의 국부적인 거동특성을 조사하였으며, 교량의 사용성 및 안전성을 확보하기 위한 적절한 보수·보강 방안의 제시 및 그에 따른 효과를 확인하고자 하였다.

### 5.1 모델링

본 연구에서는 대상구조물을 그림 5.1 및 그림 5.2와 같이 판요소(Plate/Shell Element)와 프레임요소를 사용하여 세부구조까지 직접 모델링하는 방법을 적용하였다. 판요소는 상형(Box Girder), 프레임 요소는 바닥판(Deck)의 모델링에 사용되었으며, 본 구조해석에 사용된 패키지는 범용 구조해석 프로그램인 SAP90을 이용하였다.

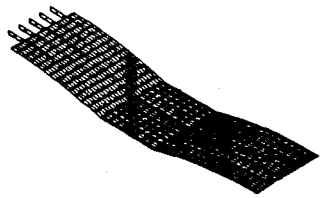


그림 5.1 하부플랜지의 요소분할

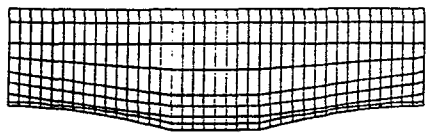


그림 5.2 복부판의 요소분할

### 5.2 해석결과 및 고찰

#### 5.2.1 상형만이 거치되었을 경우의 사하중

상형만이 거치되었을 경우 대상교량에 발생하는 응력분포를 나타내면 그림 5.3과 같다.

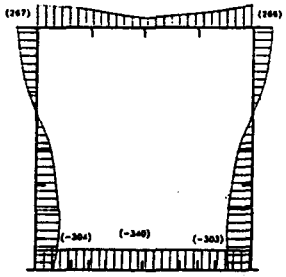



그림 5.3 상형의 응력분포도

그림 5.3과 같이 강상형에 사하중만 작용하는 경우 단면의 응력분포는 상형단면의 전형적인 응력분포를 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 단면의 응력값은 지점부에 가까와질수록 증가하는 경향을 나타내고 있는데 이 응력값은 대략 본 교량의 구조계산서에서 가정한 강중량(300kg/m$^2$)만을 고려한 사하중에 대한 응력값과 거의 일치하는 경향을 나타내고 있었다.

#### 5.2.2 상형과 바닥판이 합성된 후의 사하중

상형과 바닥판이 합성된 후 사하중이 작용하는 경우 단면의 응력분포는 그림 5.4와 같다.

그림 5.4와 같이 상형과 바닥판이 합성된 후 사하중작용에 대한 단면의 응력분포는 대략 바닥판의 사하중 증가분에 해당하는 정도의 응력증가가 나타나고 있으며, 합성효과로 인한 상형의 도심상향으로 인하여 복부판 하부에서의 응력이 상부에서보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

또한 상형 단면에서의 전형적인 전단지연에 의해서 웨브와 하부플랜지 교차부의 하부플랜지에서 응력상승효과가 나타나고 있음을 알 수 있었다. 응력값은 강중량만의 사하중을 고려한 응력의 경향과 유사하게 지점부에 가까와질수록 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

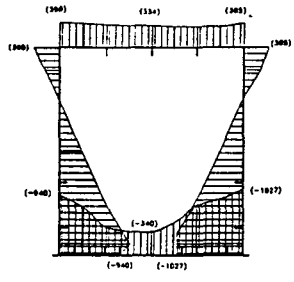


그림 5.4 상형의 응력분포도

### 5.2.3 정적재하시험에서의 하중경우

하중재하경우별 대상단면에 대한 응력분포의 일례를 나타내면 그림 5.5와 같다.

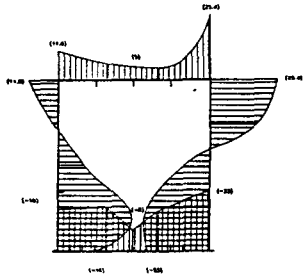


그림 5.5 상형의 응력분포도

각 단면에서 각 하중경우에 대한 응력분포도로부터 재하차량을 지점부에 재하하는 경우인 하중경우 1에 대한 응력분포는 강형이 가지는 일반적인 응력분포에 비해서 선형성을 나타내지 않는 경향을 보이고 있는데 이러한 현상은 현장재하시험 결과로부터 얻어진 응력분포도와 유사한 경향을 나타내고 있으며, 이러한 원인으로는 지점부에서 차량의 편심재하에 의한 영향으로 생각된다.

또한 재하차량을 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에 재하하는 경우에 대한 응력분포는 휨모멘트의 증가에 기인하여 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 그 경향은 현장재하시험의 계측결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 해석결과로부터 구한 응력값의 크기는 현장재하시험 결과로부터 구한 응력값과 비교하면 하부플랜지에서의 응력값은 해석값이 다소 상회하는 경향을 보이나 그것은 해석에서 일반적으로 나타나는 모델의 단순화, 실제 구조물과의 거동차이로 인한 오차의 범위내에 속하는 정도이며, 응력값의 변화는 실측치와 유사한 경향을 나타내고 있으므로 해석시 사용된 모델, 해석조건 및 기법은 타당함을 알 수 있었다.

### 5.2.4 보강후 구조해석

좌굴이 발생한 대상교량에 대한 보수·보강후의 구조해석은 보수·보강방안으로 제시하고 있는 X자 브레이싱(Bracing)과 상·하부에 스트럿(Strut)을 설치하는 방안에 기초하여 실시하였으며, 해석결과로부터 각 단면의 응력과 횡리브의 변형도를 검토하였다. 이 때 단면의 응력검토에 대해서 보강후 부모멘트 구간에 활하중이 재하되는 경우에 국한하였으며, 그 결과를 나타내면 그림 5.6과 같다.

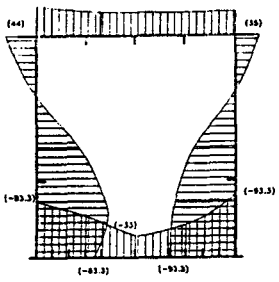


그림 5.6 상형의 응력분포도

그림 5.6과 같이 단면의 응력분포는 지점부에서 다소 떨어진 단면의 경우는 보강전의 응력값

과 거의 유사하고 지점부에서 가장 근접한 단면의 경우에는 하부플랜지에서 약 5~6%의 응력이 감소되는 것으로 나타나고 있다. 이는 보강후 증가된 단면의 강성과 보강전 단면의 강성을 고려해보면 보강효과는 상대적으로 우수하다는 사실을 알 수 있었다.

## 6. 보수·보강방안

본 연구에서는 좌굴손상이 발생한 횡리브의 문제를 해결할 수 있는 방안으로써 다음과 같은 보수·보강방안을 제시하고자 한다.

(1) 지점부를 기준으로 1번째 횡리브와 2번째 횡리브가 위치하고 있는 단면에서는 상부에 횡리브를 추가적으로 설치하고 수직브레이싱(Diagonal Bracing)을 설치한다.
(2) 지점부를 기준으로 양쪽 4개의 하부 횡리브에 대한 보수·보강은 횡리브 양쪽에 버팀보조재를 설치하고 횡리브를 앵글로 보강한다. 이 때 버팀보조재에 가해지는 힘을 적절하게 조정하여 복부판에 변형이 생기지 않도록 유의하여야 한다.
또한 하부 횡리브 중에서 좌굴손상이 심한 곳에서는 횡리브를 가스절단하여 좌굴손상이 심한 부분을 바로 편 후 절단부위를 용접하는데 용접비드는 그라인딩한 후 앵글을 좌·우로 부착하고 고장력볼트(High Tension Bolt)로 체결한다.
횡리브 절단시 절단길이를 200mm 이내로 하여야 하고 고장력볼트의 피치(Pitch)는 300mm 이내로 하여야 하며, 횡리브를 절단하여야 하는 경우에는 절단시 횡리브에 과도한 응력이 유발될 수 있으므로 반드시 다른 보강이 완료된 후에 실시하여야 한다.
(3) 압축영역에서의 종리브와 횡리브는 필렛용접을 실시도록 하며, 용접두께는 6mm로 한다

또한 보수·보강작업은 다음의 기본방침하에서 실시하는 것으로 한다.
(1) 보수·보강은 고장력볼트 이음을 원칙으로 하며 가능한 한 용접에 의한 방법은 피하는 것으로 하나 기존의 횡리브와 종리브의 연결은 용접에 의해 구속시킨다.
(2) 용접을 실시하는 경우에는 기존의 구조물의 용접변형을 방지할 수 있는 방안을 수립한 후 용접시공을 실시하며, 그 방안으로서 X자형의 수직브레이싱을 설치하는 것이 바람직하다.
(3) 보수·보강은 가능한 한 공기 및 작업의 특성을 고려하여 가벤트를 설치하지 않고 실시하는 것으로 한다.

## 7. 결 론

본 연구대상교량 2경간 연속교 지점부 부근의 횡리브에 대한 좌굴손상과 주요 가설단계와의 관련성을 검토하고 합리적인 보수·보강방안을 수립하기 위해서 현장재하시험 및 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 보수·보강 및 결론에 도달하였다.

(1) 정적재하시험 결과로부터 주형에서의 변형률 분포는 이상적인 변형률 분포를 나타내고 있으므로 활하중에 대해서 정상적으로 거동하고 있는 것으로 판단된다. 한편 횡리브에서의 좌굴손상은 좌굴손상이 현저한 부분을 그대로 방치하는 경우에는 진행 가능성이 있으나 지점부 이외의 곳에서는 활하중에 의해서는 추가적인 좌굴 발생 가능성은 작을 것으로 생각된다.
(2) 동적주행시험으로부터 도출한 응력은 비교적 작은 값을 나타내고 있으며, 이는 정적재하시험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서 현장재하시험 결과 사하중 및 활하중에 의한 응력값이 구조물의 사용성에는 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.
(3) 구조해석 결과 현장계측 결과로부터 얻어진 응력분포도와 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로부터 본 해석의 타당성을 검증할 수 있었으며, 보강후의 구조해석 결과 지점부에서 하부플랜지의 응력과 횡리브의 변형도는 보강전보다 약 5~10% 정도의 감소를 보이고 있어 좌굴손상에 대한 보강효과를 확인할 수 있었다.
(4) 현장재하시험 및 수치해석을 통하여 제시된 보수·보강을 실시하면 현 구조물의 향후 사용성에는 문제가 없을 것으로 생각되나, 추후 지속적인 정기점검과 유지관리를 수행하여야 할 것으로 생각된다.

## 8. 참고문헌


[1] Niwa Y., Watanabe E., Miyajima T., "Strength estimation of steel structures by means of Monte Carlo Simulation and Catastrophe Theory", ICOSSAR'85, Vol. I , pp.67~pp.76, 1985.
[2] Komatsu S., Kitada T., "Statistical Study on compression flange plates", Jr. of Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No.2, pp.404~pp.417, 1983.2.
[3] 小松定夫 他, "鋼橋部材の形狀初期不整と耐荷力の統計學的研究", 日本鋼構造協會紙, 第16卷, 第179號, 1980.
[4] 福本晴士, 伊藤義人, "鋼構造部材の耐荷力評價システムのための數値デ-タバンクの作成と利用", 日本土木學會論文報告集, 第312號, pp.59~pp.72, 1981. 8.