Check for updates

ISSN(print) 1226-363X ISSN(online) 2287-4054 DOI http://dx.doi.org/10.7781/kjoss.2018.30.6.355

# 강바닥판교 가로리브의 최적 시스템 연구

배두병<sup>1\*</sup>

교수, 국민대학교, 건설시스템공학부

# Studies on Optimum Systems of Cross Rib in Orthotropic Steel Deck Bridges

## Bae, Doobyong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, School of Civil and Environment Engineering, Kookmin University, Seoul, 02707 Korea

Abstract – Since the cross ribs and U-ribs of existing orthotropic steel deck system are designed by Pelikan-Esslinger method, dimensions and arrangements of cross ribs and U-ribs may be designed too conservatively. Also the Pelikan-Esslinger method does not consider fatigue problems at scallop where is crossing the longitudinal and lateral ribs(cross ribs), due to stress concentration. To improve the cross rib system, a parametric study which includes the distance of cross rib, the dimensions of web and the shape of scallop of cross rib was performed. Using the result of a parametric study, improved cross rib system which increases the fatigue strength by reducing the stress concentration at scallop and which is more economical is suggested.

Keywords - Orthotropic steel deck bridges, Cross rib, U-rib, Scallop, Stress concentration, Fatigue strength

# 1. 서론

2차세계 대전 이후 개발된 교량구조 형태 중에 하나인 직교이 방성 강바닥판은 현대의 교량이 대규모, 장지간화 되면서 고정하 중의 영향을 줄이기 위해 널리 사용하게 되었고, 금문교의 경우처 럼 노후화된 콘크리트 바닥판을 강바닥판으로 교체함으로서 교 량의 내하력을 높이는데 적용되기도 하였다.<sup>[11</sup>강바닥판은 비교 적 얇은 강판에 세로리브와 가로리브를 용접하여 조립한 구조인 데 교차연결부 등의 거동이 매우 복잡하여 스캘럽 등 구조상세부 에서 발생하는 국부적인 응력을 구하기가 매우 어렵고, 용접에 의 한 결함 및 변형에 따른 피로 균열이 발생하는 등의 문제를 갖고 있어 많은 실험적 이론적 연구를 통해 이를 극복하고 있다.

이런 문제를 해결하기 위하여 Williamsburg Bridge 강바닥

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction Corresponding author.

Tel. +82-02-910-4697 Fax. +82-02-910-4939 E-mail. dbbae@kookmin.ac.kr 판에 대한 피로실험 연구<sup>[2]</sup>와 기존의 강바닥판 시스템의 설계방 법이 실제 강바닥판 교량의 거동을 제대로 반영하는가에 대한 연 구인 귤현대교 현장 재하 실험 및 구조해석 연구<sup>[3]</sup> 등이 수행되었 으나, 실제 설계에 반영되기 위해서는 추가적인 실험 및 해석적 연구가 필요하다. 이 연구는 실제 설계 및 시공에 적용할 수 있는 최적의 가로리브 시스템을 개발하는데 목적이 있으며,<sup>[4]</sup> 2012년 준공된 강바닥판을 적용한 사장교인 신완도대교의 강바닥판 시 스템을 기본으로 하여 가로리브 시스템에 변화를 주면서 해석을 수행하고 그 결과를 분석하여 일반적으로 적용할 수 있는 개선된 가로리브 시스템 (간격, 단면, 스캘럽 형상)을 제안하고자 한다.

# 2. 가로리브의 거동

## 2.1 면내 거동

가로리브의 면내 거동을 크게 세로리브의 면외 비틀림에 의한 변형, 가로리브 면내 전단에 의한 변형, 가로리브 면내 휨모멘트 에 의한 변형으로 구분할 수 있다. 세로리브에 편재하중이 작용할 때, 이 하중을 일반적인 휨을 만드는 하중과 역대칭적인 비틀림을 만드는 힘으로 나눌 수 있으며, 비틀림은 다시 순수 비틀림과 뒤

Note.-Discussion open until June 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 22, 2018; revised November 14, 2018; approved on November 14, 2018.

틀림(distortion)성분으로 나누어 진다. 가로리브의 면내 거동은 일반적인 휨 거동에 이러한 비틀림의 영향이 작용하게 되며, Fig. 1.과 같이 세로리브에 연결되는 좌우측 하단의 위치에서 상대적 인 수직 변위와 회전을 일으킨다. 가로리브의 면내 전단은 Fig. 2. 와 같은 변형을 발생시킨다.





Fig. 1. Deformation due to bending moment

Fig. 2. Deformation due to shear

이러한 면내 거동의 영향으로 세로리브와 연결된 스캘럽부에 서 발생하는 주응력이 Fig. 3 .과 같이 압축과 인장이 교번되는 응력 상태를 보이게 되며 연결부에서 Mode I 의 균열을 발생시 키려는 거동을 하게 된다.



Fig. 3. Stress concentration of cross rib

#### 2.2 가로리브의 면외 거동

가로리브의 면외 거동은 Fig. 4.와 같이 세로리브의 교축방향 휨모멘트 곡률에 따른 가로리브의 면외 회전에 기인한 것으로 세 로리브와 가로리브 접합부 하단에서 Mode III 형태의 균열을 일 으키려고 하는 거동을 하게 된다.



Fig. 4. Out-of-plane rotation of cross rib

## 3. 구조해석

#### 3.1 대상교량

비대칭 사장교이고 전 경간에 동일한 크기의 강바닥판이 적용 된 신완도대교를 최적 가로리브시스템 연구를 위한 대상교량으 로 선정하였으며, 가로리브 시스템의 적절성 평가에 사용할 가로 리브 스캘럽부의 최대 주응력을 산정하는 해석을 수행하였다. 신 완도대교는 총 연장이 500m인 5경간 1주탑 2면식 강바닥판 사 장교이고 교폭이 25.9m인 왕복 4차선 교량이다. Fig. 4.와 Fig. 5.는 신완도대교의 종단면도와 횡단면도를 보여주고 있다.







Fig. 6. Cross section

#### 3.2 유한요소해석

구조해석 시 신완도대교의 설계도면과 구조계산서를 참고하 여 가능한 전체 교량을 정확히 표현하고자 하였으며 MIDAS 프로 그램을 이용하였다.<sup>60</sup>

#### 3.2.1 모델링 개요

전체계 빔 해석모델을 통해 영향석 해석을 수행하였고 가장 큰 휨모멘트를 발생시키는 두 번째 경간 중앙부 10m는 3차원 plate 요소를 사용하여 실제 교량의 형상과 동일하게 모델링 하였으며, 그 외 구간은 beam 요소를 격자로 구성하여 구조해석을 수행하 였다. Fig. 7.은 해석모델 및 설계 활하중 재하시의 처짐을, Fig. 8.은 plate요소를 적용한 부분의 횡단면 형상을 보여주고 있으며 자세한 mesh형상은 Fig. 9.에 나타나 있다.



Fig. 7. Finite element model and deformed shape



Fig. 8. Modeling of cross section



Fig. 9. Mesh shapes of cross rib

### 3.2.2 적용하중 및 하중 경우

신완도대교는 DB24하중을 적용하여 단면설계가 되었으므로, 같은 조건의 비교 검토를 위해 이 연구에서도 DB24하중을 적용 하여 해석을 수행하였다. 하중 경우는 Fig. 10.과 같이 LC1~LC6 까지는 단일 트럭을 횡방향으로 옮겨가겨 해석을 수행하였고, 가 로리브 위에 2개 차선이 재하되는 경우인 LC4+LC5를 LC7으로, LC2+LC3를 LC8으로 하여 총 8개의 하중 경우에 대한 해석을 수행하였다.

각 하중 경우별 발생하는 최대주응력(인장)의 크기를 Fig. 11. 에 나타내었으며, LC8의 경우에 박스와 가로리브가 만나는 위치 의 가로리브 스캘럽부의 곡률 변화 지점에서 가장 큰 인장주응력 이 발생하는 것으로 나타났다. 다음 장의 개선된 가로리브 시스템 을 찾기 위한 변수해석은 LC8을 재하하여 해석을 수행하고 결과 를 분석하였다.



Fig. 11. Maximum principal stress for 8 Load cases

# 4. 변수해석

기존의 세로리브 및 가로리브의 설계는 Pelikan - Esslinger Method를 적용하였으나, 이에 의한 결과와 FEM해석을 수행한 결과를 비교해 보면 가로리브에 발생하는 응력은 비슷하나 세로 리브에 발생하는 응력은 50% 이상 크게 산정된다고 보고되었 다.<sup>[4],[5]</sup> 이에 따라 가로리브 간격이 2.0m 또는 2.5m 등으로 너무 작게 설정된 값이 현재 설계되는 강바닥판 시스템에 적용되고 있 다(신완도대교의 경우, 2m). 이 연구에서는 가로리브의 간격 및 단면 크기 등을 변수로 하고, 강바닥판 시스템에서 피로에 가장 취약한 부분인 가로리브 스캘럽부에 발생하는 최대주응력의 크 기를 비교 분석하여 최적의 가로리브 시스템을 찾고자 하였으며 모든 변수 해석 시 단면에 발생하는 공칭응력은 허용값 보다 작도 록 조정되었다.

#### 4.1 가로리브 간격 변화에 따른 최대주응력 변화

신완도대교의 경우 가로보는 8.0m 간격으로 배치되어 있고, 그 사이의 가로리브 간격은 2m이다. 본 연구에서는 가로리브 간 격 2m, 2.5m, 3.0m, 4.0m에 대한 해석을 수행하고 그 결과를

한국강구조학회 논문집 제30권 제6호(통권 제157호) 2018년 12월 357

비교하여 Fig. 12.에 나타내었다.





그래프에서 보는 바와 같이 가로리브 간격이 3m 까지는 약 8% 정도의 응력 증가를 보이고 4m인 경우는 31% 정도의 응력 증가 를 보임을 알 수 있다.

## 4.2 가로리브 단면 변화에 따른 최대주응력 변화

가로리브의 단면변화에 따른 가로리브의 응력변화를 보기 위 해 가로리브의 높이, 가로리브의 웨브 두께, 하부플랜지 폭을 변 수로 하여 구조해석을 수행하였다.

4.2.1 가로리브의 높이

가로리브의 높이를 신완도대교에 적용한 높이 900mm부터 1900mm까지 변화시키며 해석을 수행하였고, 그 결과가 Fig. 13.에 비교되어 있다. 정확한 비례 관계는 아니지만 가로리브의 높이가 증가하면서 최대주응력은 감소함을 알 수 있다.





### 4.2.2 가로리브의 웨브 두께 변화

가로리브의 웨브 두께를 신완도대교에서 적용한 10mm에서 16mm 까지 2mm씩 증가시키면서 해석을 수행하였고 그 결과 를 Fig. 14.에 나타내었다.



Fig. 14. Maximum principal stress for different thicknesses of web

가로리브의 높이 변화 경우와 마찬가지로 가로리브 웨브 두께 가 증가함에 따라 응력이 감소하는 것을 볼 수 있다.

#### 4.2.3 하부플랜지 폭의 변화

가로리브의 휨강성의 영향을 파악하고자 하부플랜지의 폭을 기존의 300mm와 500mm로 증가시킨 경우의 해석 결과가 Fig. 15.에 나타내었는데 보는 바와 같이 하부플랜지 폭 변화에 대한 응력변화는 거의 없는 것으로 보인다.



Fig. 15. Maximum principal stress for different width of flange

Distances Dimensions of cross rib of cross rib			2.0m			3.0m		
Height	Thickness	Area	Steel ratio	Maximum principal stress	Stress ratio	Steel ratio	Maximum principal stress	Stress ratio
900	10	9000	1.0	137	100.00%	0.67	148	108.30%
900	12	10800	1.2	121	88.40%	0.80	131	95.36%
900	14	12600	1.4	109	72.29%	0.93	117	85.27%

Table 1. Ratio of principal stress & weight of steel used

#### 4.3 단면 변화 해석결과 비교 분석

위의 결과를 살펴볼 때, 가로리브의 간격은 3m 정도로 증가시 켜도 문제가 없는 것으로 보이며, 웨브의 전단면적(웨브 높이 및 두께 함수)이 가로리브 스캘럽부에 발생하는 최대주응력 크기에 가장 큰 변수임을 알 수 있다.

Table 1에서는 변수해석 결과를 신완도대교의 경우 (높이 : 900mm, 웨브두께 : 10mm)를 기준으로 하여 발생 최대주응력 비, 강재비로 표현하여 나타내었다.

가로리브 스캘럽부의 응력상태는 가로리브의 전단면적에 반 비례함을 알 수 있고, 가로리브 간격을 3m로 증가시킬 경우 응력 은 8% 정도 증가하지만 가로리브 강재량은 33%줄일 수 있음을 알 수 있다. 만약, 응력수준을 그대로 유지하고 싶다면 간격은 3m로 하고 웨브 두께로 12mm를 적용하는 것이 강재량을 20% 정도 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.4 가로리브 스캘럽 형상 변화에 따른 주응력 변화

Fig. 16. (a)는 신완도대교에 적용된 세로리브와 가로리브 스캘 럽 상세를 보여주고 있으며 (b)는 유럽에서 적용되고 있는 상세를 보여주고 있다. 유럽상세는 스캘럽부 응력집중부의 최대주응력 을 감소시키려는 연구를 통해 개발된 형상이며다. 이 연구에서도 국내상세의 세로리브-가로리브 연결부 하부스캘럽 위치를 유럽 상세와 같이 위로 올려가면서 곡률을 변화시켜 가면서 해석을 수 행한 결과를 바탕으로, 제작은 국내의 기존과정과 유사하게 하고, 발생 최대주응력은 최대로 줄인 (c)의 상세를 제안하게 되었다.

Fig. 17.는 각 상세의 주응력 분포를 나타낸 것으로, 최대 인장 주응력이 국내의 기존상세의 경우는 137MPa, 유럽상세는 111MPa, 제안상세는 114MPa가 발생함을 보여주고 있다. 제안 된 상세는 기존의 상세보다 16%정도의 응력 감소를 가져오고, 유 립상세에 비해서는 2%정도 큰 응력을 발생시키나, 제작의 용이 성 등을 감안하여 이 상세를 제안하고자 한다.



(a) Domestic (b) Europe (c) Suggested Fig. 16. Shapes of scallop



Fig. 17. Contour of principal stress

# 5. 결론

이 논문은 케이블 교량 등 장경간 교량에 많이 적용되는 강바 닥판 시스템을 최적화 하는 연구의 일환으로 강바닥판 가로리브 의 간격, 단면, 스캘럽 형상 등을 변수로 한 해석적 연구를 통해 피 로에 취약한 가로리브 스캘럽부의 응력집중을 줄일 수 있고 기존 의 시스템보다는 경제적인 가로리브 시스템을 제안하고자 한다. 이 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 가로리브 간격을 기존의 2m에서 4m까지 증가시키며 해 석을 수행한 결과, 가로리브 간격을 3m까지 증가시키는 것이 가 장 효율적인 것으로 보인다. 간격이 2m인 경우보다 가로리브의 주응력이 양 7%정도 증가하는 것으로 나타났으나 이는 충분히 허 용 범위내에 있으며, 주응력을 감소시키고 싶다면 웨브의 두께를 증가시키는 것이 훨씬 경제적인 것으로 타나났다.

(2) 가로리브 전단면적(웨브의 높이 및 두께)을 변수로 하여구 조해석을 수행한 결과 정확한 비례 관계는 아니지만 가로리브의 전단면적이 증가함에 따라 스캘럽부의 최대주응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 스캘럽부의 주응력이 가로리브의 면내거 동(전단)에 의한 뒤틀림(distortion)에 의해 주로 발생된다는 것 을 보여준다.

(3) 기존의 가로리브 시스템(900mm × 10m, 2m 간격)과 간 격을 3m로 증가시키고 웨브두께를 12m, 14m로 증가시켜 해석 한 결과를 가로리브 웨브에 적용한 강재량의 비와 발생 응력비로 나타내어 가장 효율적인 단면을 찾고자 하였으며, 최대주응력(인 장)이 기존시스템보다 5%정도 작고 사용강재량은 20%정도 줄일 수 있는 가로리브시스템(900 × 12mm, 3m간격)을 최적시스템 으로 제안하고자 한다.

(4) 제작의 편의성 등을 감안하여 기존의 스캘럽 상세와 유사 하나 유럽상세와 같이 하부스캘럽의 세로리브와 가로리브연결부 위치를 변수로 하고 곡률을 변화시켜가며 해석을 수행한 결과를 반영한 스캘럽 형상을 제안하였다. 기존상세보다는 16%정도 주 응력 크기가 감소하고 유럽상세에 비해서는 약 2%정도 큰 응력이 발생되는 것으로 나타났다.

향후 세로리브의 뒤틀림(distortion)을 감소시켜 주응력의 크 기를 줄이기 위해 세로리브 내부에 벌크헤드 플레이트를 설치한 경우에 대한 연구가 필요하다.

# 참고문헌(References)

- Troitsky, M.S. (1987) Orthotropic Bridges: Theory And Design (2nd Ed.), The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, USA.
- [2] Kaczinski, M.R., Stokes, F.E., Lugger, P., and Fisher,

J.W. (1997) *Williams Bridge Orthotropic Deck Fatigue Test*, ATLSS Report No. 97-04, ATLSS Engineering Research Center at Lehigh University, USA.

- [3] Bae, D., Kong, B.S., and Oh, S.T. (2002) A Study on Improvement of the Design and the Constructibility of Orthotropic Steel Deck Bridge: The Final Report, Samsung Heavy Industries Co., Ltd., Korea (in Korean).
- [4] 배두병, 공병승, 오순택(2006) 완도대교 강바닥판의 횡리브 스캘럽 형상 및 케이블 정착부의 피로강도 개선 연구, 최종보고 서, 삼성물산 건설부문.

Bae, D., Kong, B.S., and Oh, S.T. (2006) A Study on Improvement of Fatigue Strength in Scallop of Cross-Rib and Cable Anchorage of New Wando Bridge: The Final Report, Samsung C&T Corporation, Korea (in Korean).

- [5] 이현기(2005) 사장교 강바닥판의 피로강도 개선을 위한 횡리 브 최적상세 연구, 석사학위논문, 국민대학교.
  Lee, H.G. (2005) Optimal Details of Transverse Rib for Improvement of Fatigue Strength in Orthotropic Steel Deck of Cable-Stayed Bridges, Master's Thesis, Kookmin University, Korea (in Korean).
- [6] Midas IT (2009) *Midas Civil 2009*, Midas Information Technology, Co. Ltd., Korea.
- [7] 국토해양부(2010) 도로교설계기준. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [8] 건설교통부(2006) 강도로교 상세부설계지침, 건설교통부. Ministry of Construction and Transportation (2006) *Design Manual for Details of Steel Bridges*, Korea (in Korean).
- [9] Federal Highway Administration (US Department of Transportation) (2012) Manual for Design, Construction and Maintenance of Orthotropic Steel Deck Bridges, FHWA, USA.
- [10] European Committee for Standardization (2006) Eurocode
   3: Design of Steel Structure, Part 2 : Steel Bridges (EN 1993-2: 2006), Belgium.

**요 약:** 기존의 강바닥판교 가로리브 및 세로리브 설계는 Pelikan-Esslinger 방법을 통해 해석한 결과를 적용하여 가로리브 간격 등 이 너무 보수적으로 배치되어 있어 비경제적이고 세로리브와 가로리브가 교차하는 스캘럽부의 응력집중에 대한 고려가 없어 피로에 취약한 문제가 있다. 이 연구에서는 최적의 강바닥판을 찾는 연구의 일환으로 강바닥판 가로리브의 간격, 단면크기, 스캘럽 형상을 변 수로 한 해석적 연구를 수행하여 피로에 취약한 가로리브 스캘럽부의 응력집중을 줄여 피로강도를 높이고, 기존의 시스템보다는 경제 적인 가로보 시스템을 제안하고자 한다.

핵심용어:강바닥판교, 가로리브, 세로리브, 스캘립, 응력집중, 피로강도