

경골형 교량거더의 비틀림에 의한 말뚝연결부 응력저감기법

김재형¹, 윤경민², 윤기용³, 이진옥², 임남형^{*}

¹한국도로공사 대전충청본부, ²충남대학교 토목공학과, ³선문대학교 토목공학과

Stress Reducing Method in the Connection Area with Pier due to the Torsion of the Girder of Fish-bone Type Bridge

Jae-Heong Kim¹, Kyung-Min Yun², Ki-Yong Yoon³, Chin-Ok Lee²
and Nam-Hyung Lim^{2*}

¹Daejeon Chung chong Regional Headquarters, Korea Expressway Corporation

²Department of Civil Engineering, Chungnam National University

³Department of Civil Engineering, Sunmoon University

요 약 조립식지그재그 형태의 단일거더시스템이 적용되는 경골형 교량은 비틀림에 취약한 구조이다. 특히 거더와 PHC(Pretensioned spun High strength Concrete) 말뚝의 고정 연결부는 비틀림 하중에 의한 과도한 응력이 집중되는 취약부이므로 이를 저감시키기 위한 방안이 요구된다. 본 연구에서는 연결부에 발생하는 과도한 응력을 저감시키기 위한 다양한 보강재 형식의 효율성을 수치해석적으로 평가하였다.

Abstract A fish-bone type bridge is vulnerable to the torsional behavior due to the single girder system with planar zigzag conformation. The fixed connecting area between the girder and pier is the special weak point because the torsional load creates excessive stress concentration. Therefore, the method to reduce the stress concentration is required. In this study, the reduction efficiency of various reinforcing types to reduce the excessive stress occurring at the connecting area is evaluated by using numerical analyses.

Key Words : Fish-bone type bridge, Single girder system, Torsion, Warping, Stress reduction

1. 서론

최근 연안지역에서는 관광객들을 위한 새로운 형식의 친환경적 교량 개발의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 경제성과 안전성 및 미관성이 우수한 조립식 경골형 교량(Fish-bone type bridge)의 개발에 대한 연구가 진행되었다[1][Fig.1]. 기존 연구에서 경골형 교량의 거동특성을 분석하기 위하여 실험 및 수치해석 모델 개발을 통한 성능이 검증되었으며, 분석을 통해 비틀림이 거동에 지배적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 부재의 비틀림과 휨의 영향으로 응력상태가 매우 복잡하게 나타났으며, 연결부에서 발생한 과다 응력에 의해 양

끝단의 기둥과 거더를 연결하는 부위가 취약하여 이에 대한 안정성 평가에 대한 필요성이 도출하였다[2,3].

기존의 휨 및 비틀림을 받는 부재에 관한 대부분의 연구는 횡-비틀림좌굴 및 플랜지 국부좌굴등에 근거한 부재의 강도와 관련된 연구이며, 단부의 국부적인 거동에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[4]를 이용한 수치 해석적 연구 방법을 채택하여 연결부 설계 시 비틀림에 의해 발생하는 응력을 저감하기 위하여 다양한 보강재 설치 방안을 검토하였으며, 최적의 보강 방안을 도출하였다.

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업(09지역기술혁신 B-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

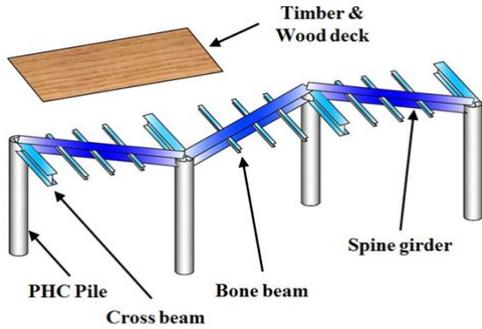
*Corresponding Author : Nam-Hyung Lim(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-821-7005 email: nhrim@cnu.ac.kr

Received March 5, 2014

Revised March 12, 2014

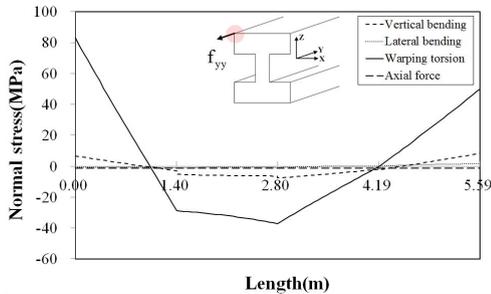
Accepted April 10, 2014



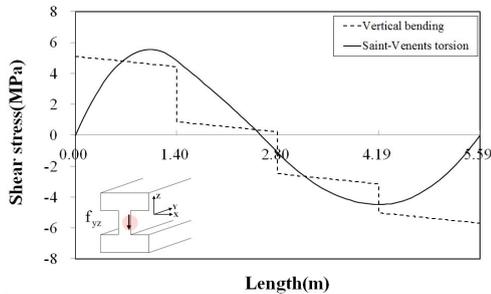
[Fig. 1] Fish-bone type bridge

2. 경골형 교량의 연결부

경골형 교량의 연결부에서 발생하는 응력을 살펴보기 위하여 사용하중을 고려한 해석 결과를 살펴보았다. 기존 연구[2]에 의하면 단부에서 발생하는 최대 범선응력과 전단응력은 자중, 균중하중의 반재하, 난간의 수평하중의 반재하, 풍하중이 작용 시 나타났으며, 플랜지와 웹에서 발생하는 응력은 다음과 같다. 범선응력과 전단응력은 각각 플랜지 상부 끝단과 웹의 중앙에서 분석하였다.



(a) normal stress



(b) shear stress

[Fig. 2] Stress in Spine girder

Spine girder의 플랜지에서 발생한 최대 응력은 연결부(끝단)에서 발생하였으며, 뒤틀림에 의한 응력이 전체 응력의 94.5%, 수직 휨에 의한 응력이 7.6%를 나타내 범선응력은 뒤틀림에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다[Fig. 2] (a). 또한 전단응력은 수직방향 휨과 순수비틀림에 의해 발생하였으며, 최대응력은 좌측끝단에서 약 1m 떨어진 지점에서 약 10MPa이 발생하였다[Fig. 2] (b).

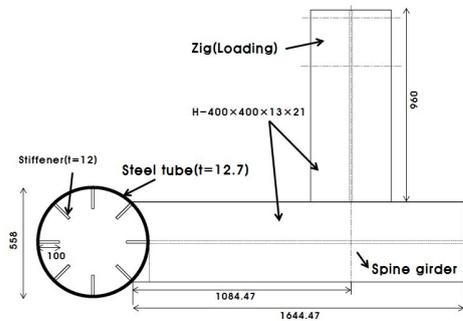
범선응력과 전단응력을 살펴본 결과 비틀림에 의한 영향이 가장 지배적으로 나타났으며, 단부에서 매우 큰 범선응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 실제구조물에서 곡면의 기둥에 거더의 연결방법에 따라 국부적인 추가 응력이 발생될 수 있다. 따라서 비틀림 거동에 의한 응력뿐만 아니라 연결부의 조건에 따른 국부적인 응력집중 또한 저감시키기 위하여 다양한 형식의 보강재 설치 방안을 모색하였다.

3. 연결부 응력 저감을 위한 수치해석

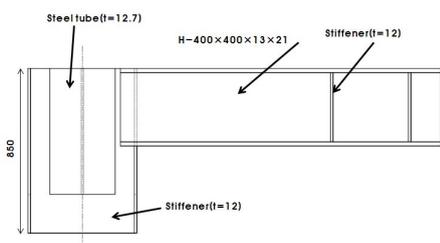
3.1 해석모델

구조물의 단부에서 발생하는 응력의 저감을 위하여 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.13[4]을 이용하여 수치해석적 연구를 수행하였다.

조립식 경골형 교량의 연결부에 과도한 비틀림이 발생할 수 있는 조건을 모사하기 위하여, Steel tube에 Spine girder를 부착하였으며 비틀림 하중을 재하할 수 있는 지그를 추가 모사하였다. 부재 크기는 향후 진행될 실험실험을 위해 구조검토가 수행된 단면 H 400×400×13×21을 사용하였다[5]. Fig. 3은 해석 모형이다.



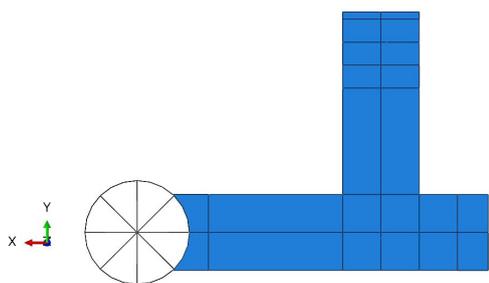
(a) plan view



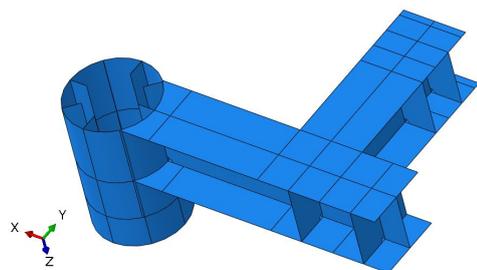
(b) side view

[Fig. 3] Connction model for analysis

4절점 Shell 요소(S4)를 이용하여 모델링하였으며, 물성치는 일반적으로 사용되는 강재의 탄성계수인 210 GPa, 포아송비 0.3을 사용하였다. 해석은 선형 탄성해석을 수행하였으며, Fig. 4는 유한요소해석프로그램 ABAQUS를 이용한 모델링 전경이다.



(a) plan view

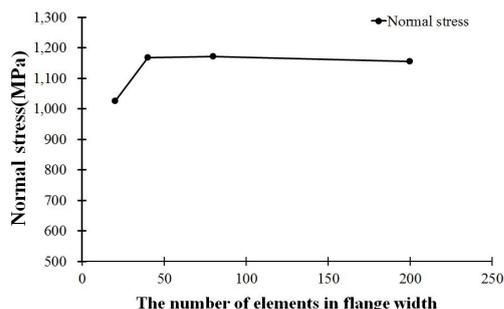


(b) whole view

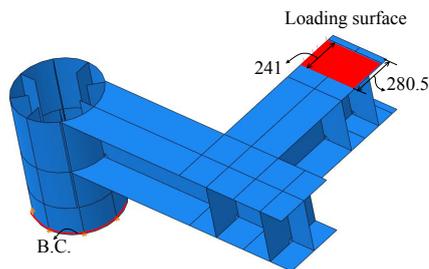
[Fig. 4] F.E.A model(Shell element)

일반적으로 유한요소해석의 결과는 해석모델의 요소 개수에 따라 상당한 차이를 보이며, 특히 본 연구에서 사용되는 모델은 Steel tube가 곡선으로 이루어져 있고, Steel tube와 Spine girder의 접합부에서는 곡면에 따라 거더의 폭이 줄어드는 형상을 보인다. 따라서 곡선부재 및 접합부의 거동을 표현하기 위해서는 충분한 요소 개수가 필요할 것으로 판단된다.

모델에 대하여 유한요소의 개수별 해석치를 비교하였으며, 요소의 수에 따른 해석결과와 수렴도를 검토하였다[Fig. 5]. 수렴도 검토 시 최대응력이 발생한 Steel tube에서 20mm 떨어진 플랜지 끝단의 법선응력을 비교하였으며, 10mm 이하의 요소크기에 대하여 유사한 거동을 보여, 10mm를 요소 크기로 선택하였다.



[Fig. 5] Convergence analysis of model



[Fig. 6] Loading surface and B.C.

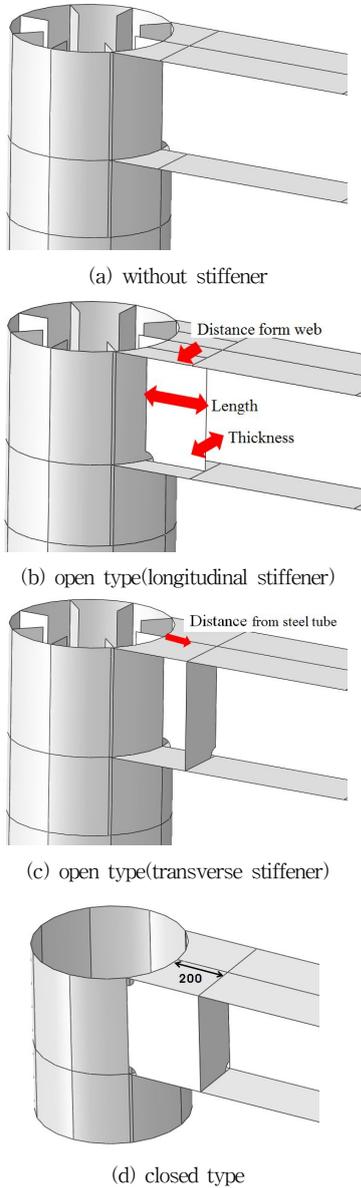
Fig. 6과 같이 30kN을 등분포하중으로 재하하였으며, 향 후 진행될 실물검증실험의 실제 시험조건을 고려하여 경계조건은 Steel tube의 하단부의 전자유도를 구속하였다.

3.2 응력저감을 위한 보강재 설치

2절에서 기술한 것과 같이 경골잔교는 뒀비틀림에 의한 응력이 지배적으로 작용한다. 따라서 보강재설치에 따른 비틀림 저감이 요구되며, 이를 위하여 다양한 형식의 보강재를 검토하였다.

일반적으로 개방형 보강재의 경우 용접이 용이하고 유지관리가 쉬운 반면 폐쇄형 보강재에 비해 비틀림에 대한 저항능력이 약하다. 그러나 폐쇄형 보강재는 제작이 어렵고 현장이음이 곤란하여 제작과 건설에 상당한

주의가 요구되는 등의 단점이 있다. 따라서 개방형 보강재와 폐쇄형보강재에 대한 분석이 필요하며, 본 연구에서 제안된 보강재 형식은 Fig. 7과 같다.



[Fig. 7] Various types of stiffeners

보강재 형식은 보강재가 미설치된 경우(a), 종방향보강재가 웹에서 100mm 떨어진 길이 200mm 두께 12mm(default)에서 길이의 변화(100mm, 300mm), 두께 변화(6mm, 18mm), 거리변화(200mm)를 고려한 경우(b),

두께 12mm의 횡방향 보강재를 Steel tube로부터 거리를 100mm, 200mm로 고려한 경우(c) 그리고 박스형식의 폐쇄형보강재로 고려한 경우(d)이다. Steel tube 및 거더와의 접합부에 응력집중을 막기 위하여 모따기(R=30mm)를 수행하였으며, 각 형상에 대해 고려된 변수 및 해석 CASE는 Table 1과 같다.

[Table 1] Parameters of stiffeners

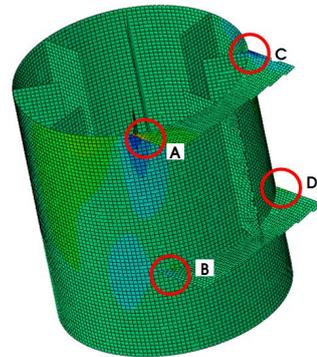
Parameters		Values
Without stiffener(a)		-(CASE1)
Open type (longitudinal, (b))	Length (mm)	100(CASE2), 200(CASE3), 300(CASE4)
	Thickness (mm)	6(CASE5), 12(CASE3), 18(CASE6)
	Distance (mm)	100(CASE3), 200(CASE7)
Open type (Transverse, (c))	Distance (mm)	100(CASE8), 200(CASE9)
Closed type(d)		-(CASE10)

4. 수치해석 결과 분석

보강재 설치에 따른 영향을 살펴보기 위하여 형강의 접합부에서 발생한 범선응력을 비교하였다.

4.1 보강재가 고려되지 않은 경우(CASE1)

개단면의 경우 뒀비틈에 의한 범선응력은 플랜지의 양끝단에서 가장 크게 발생하며, 끝단 상하면의 부호는 반대로 나타난다. Steel tube와 Spine girder의 접합부에서의 응력상태를 살펴보기 위하여 Fig. 8과 같이 A~D지점(플랜지 끝단)에서의 범선응력을 살펴보았다.

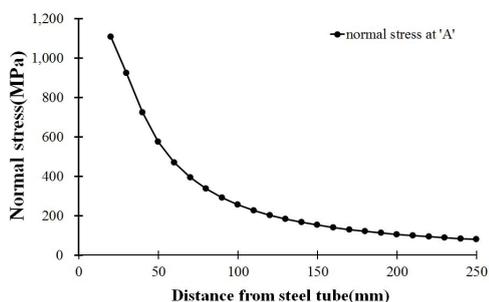


[Fig. 8] Normal stress of Spine girder(CASE 1)

최대응력이 발생한 Steel tube와 거더의 접합지점에서 20mm가 떨어진 플랜지 끝단에서의 범선응력을 살펴보았으며, Shell은 두께가 고려되는 요소로 최대응력이 발생한 바닥면에서 응력을 도출하였다. 결과는 Table 2와 같다.

[Table 2] Normal stress at Point(A~D)

Position	Stress(MPa)	Position	Stress(MPa)
A	1166.97	C	-736.94
B	-227.36	D	138.19



[Fig. 9] Growth of normal stress at connection

최대응력은 A에서 1166.97MPa이 나타났으며, A, D에서 인장이 발생, B, C에서 압축이 발생하였다. Steel tube

와 거더의 접합부에서 국부적으로 증가하는 응력을 살펴 보기 위하여 거더의 종방향길이에 따른 응력 변화를 살펴 보았다.

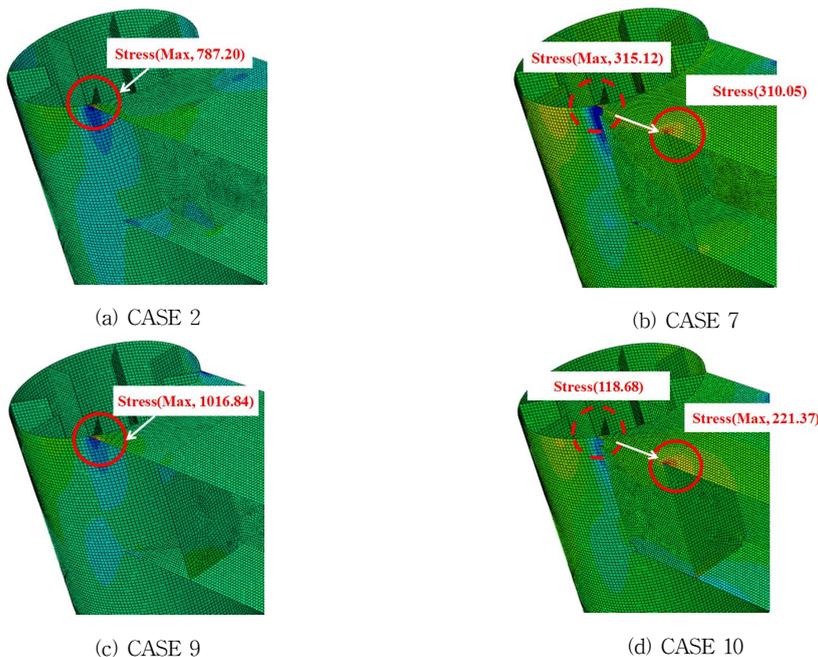
Fig. 9와 같이 접합부쪽에서 응력이 매우 크게 증가하는 것을 확인하였으며, 100mm 떨어진 곳과 비교하여 약 4배의 응력이 증가하였다. 따라서 국부적으로 매우 큰 응력이 발생하여 부분적인 소성구간이 발생할 수 있으며, 부재 전체에 영향을 미칠 수 있는 취약부위가 될 수 있다.

4.2 보강재 설치에 따른 응력 저감효과

4.1절에서 언급된 것과 같이 접합부에서 국부적으로 큰 응력이 발생하였으며, 보강재 설치에 따른 응력저감 효과를 살펴보았다. Table 3에서 변수(Table 1)에 따른 응력변화를 정리하였으며, 응력은 4.1절과 동일한 위치에서 도출하였다.

① 보강재 길이에 따른 효과(CASE 2,3,4)

보강재 길이를 100mm, 200mm, 300mm로 증가함에 따라 응력이 매우 감소하는 것을 볼 수 있으며, 보강재가 없는 경우와 비교 시 응력이 길이에 따라 각각 24.3%, 32.5%, 40.3% 저감된 것을 알 수 있다. 최대응력 발생 위치는 모두 동일하며(Fig. 10, (a)), 길이 200mm를 기준으로 길이의 증감에 따라 약 8%의 응력 증감을 보였다.



[Fig. 10] Stress contours(Unit : MPa)

[Table 3] Effect according to stiffener types

Parameters		Stress (MPa)	Reduction rate(%)
Without stiffener(CASE1)		1166.9	-
Open type (Longitudinal)	CASE2	883.29	24.3
	CASE3	787.20	32.5
	CASE4	696.88	40.3
	CASE5	808.56	30.7
	CASE6	767.44	34.2
	CASE7	315.12	73.0
Open type (transverse)	CASE8	836.50	28.3
	CASE9	1016.84	12.9
Closed type(CASE10)		118.68	89.8

② 보강재 두께에 따른 응력저감효과(CASE 3,5,6)

보강재의 두께를 6mm, 12mm, 18mm로 변화시킨 결과 두께가 증가함에 따라 플랜지에서 발생하는 응력이 저감하였다. 두께 12mm 기준으로 두께변화에 따라 약 2%정도의 응력차이가 발생하였다.

③ 보강재 위치에 따른 응력저감효과(CASE 3,7)

플랜지 끝단에 보강재설치 시 약 73.0%의 응력저감효과가 나타났으며, 보강재를 플랜지 끝단과 웹 사이에 설치한 경우보다 약 40.5% 추가 감소되었다. Fig.10, (b)와 같이 최대응력 발생위치는 동일하지만(a,b), 보강재 끝단에서 응력이 증가하여 접속부에 집중되었던 응력이 분산된 것으로 판단된다.

④ 횡보강재에 의한 영향(CASE 8,9)

횡보강재 설치 시 Steel tube로부터 거리에 따라 28.3%(100mm), 12.9%(200mm)의 응력 저감 효과가 나타났으며(Fig. 10, (c)), steel tube에 가까울수록 효과가 더 크게 나타났다.

⑤ 폐쇄형보강재에 의한 영향(CASE 10)

보강재를 ‘ㄱ’ 형태로 만들어 폐쇄형보강재로 제작하는 경우 89.8%의 응력 저감효과가 나타났다. 그러나 Fig.10, (d)와 같이 최대발생 응력 지점이 보강재끝단에서 발생된 것을 확인하였으며, 단부의 이동 효과에 따른 응력 저감으로 판단된다. 보강재 끝단에서 최대응력 재도출 결과 221.37MPa로 확인되었으며 응력 저감효과는 81.0%로 나타났다.

4.3 최적의 보강재 설치방안

본 연구를 통하여 과도한 비틀림이 발생하는 단면에서 접속부의 과다응력 발생 시 ‘ㄱ’자형의 보강재를 이용하여 폐쇄형단면으로 제작하여 큰 응력 저감효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 비틀림이 발생하는 구조인 조립식 경골형 교량의 단부에서 발생할 수 있는 문제점을 해결하기 위한 기초연구로써, 연결부 응력 저감을 위한 효과적인 보강재 설치방안에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 사용하중 조합 시 단부에서 뒤틀림에 의한 법선응력이 매우 크게 발생되며, 비틀 발생 시 국부적으로 매우 큰 응력이 발생한다. 따라서 응력 저감을 위하여 접합부에서의 보강재 설치가 필수적이다.
- (2) 또한 곡면의 형태를 갖는 Steel tube와 Spine girder의 연결부 형상에 따른 집중응력이 매우 크게 발생할 수 있으며, 보강재 설치를 통한 응력 분산이 필요하다.
- (3) 비틀림 저감을 위하여 종방향보강재 설치 시 두께 증가 및 길이 증가에 따른 효과보다 플랜지 끝단으로 이동시 응력 저감 효과가 더 크게 나타났으며, 횡방향보강재는 응력저감 효과가 낮게 나타났다.
- (4) 폐쇄형 보강재 설치에 따라 약 89.8%의 응력 저감 효과가 나타나 비틀림 발생 부재의 최적의 보강형상으로 판단된다. 이는 보강재 설치에 따른 응력 분배로 최대응력 발생위치가 보강재 끝단으로 이동한 것으로 판단되며, 접속부 끝단의 응력수준에 따라 추가 보강이 필요할 수 있겠다.

References

[1] B.S. Lee, J.Y. Yoon, N.H. Lim, K.H. Lee and J.S. Park, Improvement Technology of Safety Performance in the Coastal Zone, Land Transport and Maritime R&D Report, 2013.

[2] H.R. Kim, "An Experimental and analytical study on Structural Performance of Fish-bone Girder bridge", A

master's thesis, Graduate School Sun Moon University, 2014.

- [3] K.M, Yun, K.Y, Yoon, C.O, Lee, N.H, Lim, "Design Consideration of Fish-bone Girder Pier using the Analysis of Torsional Behavior", Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation, Vol.15, No.1 pp. 561-568, 2014
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.1.561>
- [4] ABAQUS Version 6.13, Analysis User's Guide, Dassault Systemes, 2013.
- [5] G.S, Ham, N.H, Lim, J.S, Park, K.Y, Yoon, "Evaluation of Structural Safety about the Bending and Torsion of Superstructure of the Fish-bone Girder Pier", Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation, Vol.14, No.4 pp. 2000-2005, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.4.2000>

김 재 형(Jae-Hyeong Kim) [정회원]



- 1985년 2월 : 충북대학교 토목공학과 (공학사)
- 2004년 8월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>
도로공학, 구조공학

윤 경 민(Kyung-Min Yun) [정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>
구조공학, 강구조, 궤도공학

윤 기 용(Ki-Yong Yoon) [정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
구조공학, 합성구조, 강구조, 내진설계

이 진 옥(Chin-Ok Lee) [정회원]



- 1980년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
구조공학, 내진공학

임 남 형(Nam-Hyoung Lim) [정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2005년 3월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2005년 4월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>
구조공학, 강구조, 궤도공학