

조립식 경골잔교(Fish-bone Girder Pier)의 비틀림 거동분석을 통한 설계 시 고려사항

윤경민¹, 윤기용², 이진옥¹, 임남형^{1*}
¹충남대학교 토목공학과, ²선문대학교 토목공학과

Design Consideration of Fish-bone Girder Pier using the Analysis of Torsional Behavior

Kyung-Min Yun¹, Ki-Yong Yoon², Chin-Ok Lee¹ and Nam-Hyoung Lim^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Chungnam National University

²Department of Civil Engineering, Sunmoon University

요 약 조립식 경골잔교는 Spine-girder인 단일거더 시스템이므로 휨 뿐만 아니라 비틀림에 큰 영향을 받는 구조물이다. 본 연구에서는 경골잔교의 합리적인 설계를 위하여 설계 시 고려사항을 도출하고자 하였다. 거동분석을 위한 구조해석 유한요소모델을 개발하고, 실험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다. 경골잔교의 거동분석을 통하여 국부적인 과대응력 발생을 방지하기 위하여 Bone-beam 하단부에 보강재 설치가 필요하며, 플랜지의 법선응력은 뒤틀림, 플랜지와 웹의 전단응력은 순수비틀림에 의한 영향이 지배적으로 작용하는 것을 확인하였다.

Abstract A modular fish-bone girder pier consists of one main girder system named as "Spine Girder". Therefore, this pier can be most affected by torsion as well as flexural bending. The design considerations of the fish-bone girder pier are proposed to assure the reasonable design in this study. In order to investigate the behavior characteristics, structural analysis F.E model is developed, and the verification of the developed model is performed by comparison with experimental data. From the investigation of the structural behavior, the vertical stiffener is required at the bottom of bone-beams to prevent the excessive local stress. Also, it is found that the normal stress of the flange and the shear stress of the web and flange are dominantly affected by the warping torsion and pure torsion, respectively.

Key Words : Pier, Fish-bone girder, Spine girder, Bone beam, warping, torsion

1. 서론

최근 해양 관광인구 증가에 따른 바다낚시잔교, 휴양지 등의 관광용 보도 잔교와 같은 친수성 구조물이 많이 설치되고 있으며, 그에 따라 연구도 활발히 진행되고 있다.

현재 관광형 보도잔교는 별도의 설계규정 없이 항만 및 어항설계기준[1]을 준용하여 설계가 이루어지고 있으며, 또한 지역적 특성을 반영하지 못한 잔교의 설계기준이 아닌 대형 선박 및 작업 기계를 고려하여 과도한 설계를

유발하여 과도한 단면을 사용하는 경우가 많다. 또한 경제성이나 경관성을 갖추지 못한 경우가 많은 실정이다 [2]. 따라서 관광형 조립식 보도잔교의 경우 적재하중, 열차하중, 자동차하중, 선박관련 하중, 하역기계관련 하중 등을 고려할 필요 없으며 사하중, 균중하중, 풍하중 및 항력을 하중으로 고려해야함을 제안하였으며[3,4] 다양한 지반조건을 합리적으로 고려할 수 있는 해석모델에 대한 연구가 진행되었다.[5]

기존의 잔교(Fig. 1)는 파력 작용 시의 횡방향 안전성

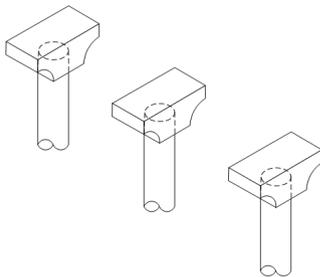
본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업(09지역기술혁신 B-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Nam-Hyoung Lim(Chungnam National Univ.)

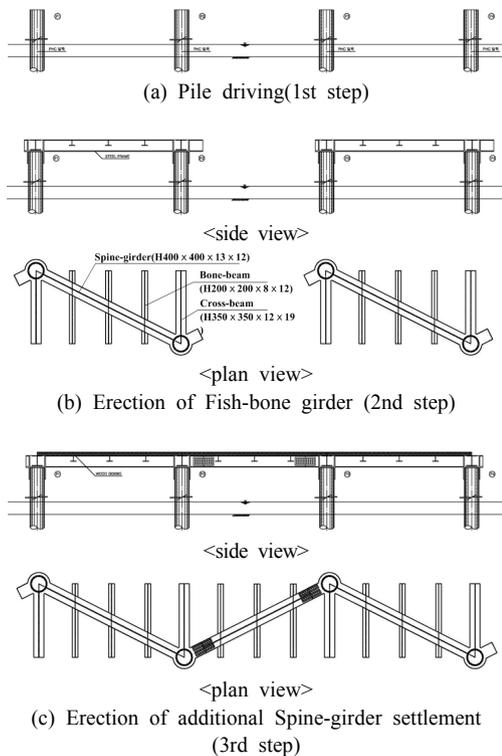
Tel: +82-41-821-7005 email: nhrlim@cnu.ac.kr

Received November 28, 2013 Revised January 8, 2014 Accepted January 9, 2014

문제, 활하중의 편측재하에 따른 불안전성 등과 같은 문제가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 상·하부 구조의 거동이 일체화 된 라멘구조의 역할을 종방향 및 횡방향으로 할 수 있는 지그재그 형태의 경골잔교(Fish-bone Girder Pier)를 개발하였다[6]. 경골잔교는 종·횡방향에 대하여 라멘구조의 거동을 하며, 하중의 편측재하를 저감시켜 안정성 확보를 하였다. 또한 지점마다 2개의 말뚝을 사용하여 시공되는 문형라멘 형식보다 경제성이 우수하며, 거더의 공장제작을 통한 품질 확보 및 시공성이 보장된다. Fig. 2는 경골잔교의 시공 순서를 보여준다.



[Fig. 1] Existing straight type of pier



[Fig. 2] Construction process of fish-bone girder pier

일반적인 토목구조물에서는 비틀림이 발생하지 않는 설계가 수행되지만, 경골잔교는 좌우 비대칭형상에 따른 자중 및 활하중에 의해 휨뿐만 아니라 비틀림이 과대하게 발생할 수 있다.

본 연구에서는 경골잔교의 비틀림관련 거동분석을 위하여 실험형실험을 수행하였으며, 유한요소해석에 대한 타당성을 검증하였다. 또한 거동분석을 통하여 설계 시 고려되어야 할 사항을 도출하였다.

2. 유한요소 해석 모델링

경골잔교의 시험체 제작과 거동특성분석을 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 시험체 형상 제작을 위한 모델링 시 GUI(Graphic User Interface)를 통해 복잡한 형상을 쉽게 모델링할 수 있는 ABAQUS 6.13[7]을 이용하였으며, 거동 분석을 위한 모델링 시 뒤틀림이 고려되는 자유도를 보요소를 통해 쉽게 고려할 수 있는 ADINA 8.9[8]를 사용하였다.

2.1 시험체 제작을 위한 해석모델

경골잔교는 비대칭 형상의 구조물로 비틀림이 과대하게 발생된다. 따라서 시험체 제작 시 비틀림이 과다하게 발생하는 경우의 조건을 고려하였다. 시험체의 국부적 최대응력 평가와 응력 분포에 따른 변형을 게이지 부착 위치를 결정하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.

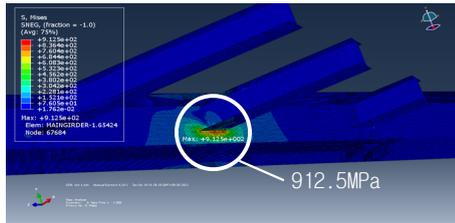
해석을 위하여 범용유한요소 해석 프로그램 ABAQUS(6.13)[9]를 사용하였으며, 4절점 쉘 요소인 S4R 요소를 이용하였다. 선형탄성 해석을 수행하였으며, 양 끝단은 전 자유도를 구속하였다.

재료는 도로교 설계기준[11]에서 규정하고 있는 용접 구조용 압연강재 SM400을 사용하였으며, 탄성계수는 210 GPa, 포아송비 0.3을 사용하였다. 실험에서 고려하는 하중은 항만 및 어항 설계기준[1]에서 제안하는 균중하중 5 kN/m²이 반재하 된 경우를 고려하여 31.24 kN을 중앙 Bone-beam의 끝단에 재하하였다. Fig. 3은 시험체 형상을 보여준다.

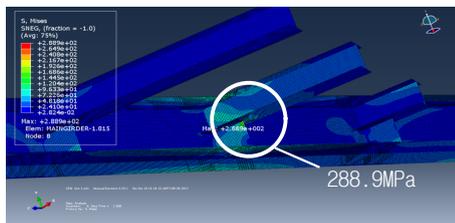


[Fig. 3] Specimen with bolted connection

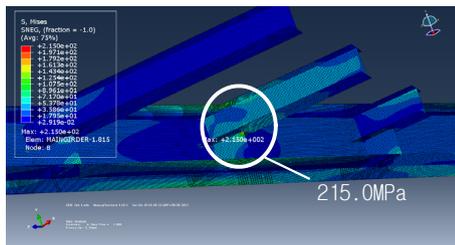
응력 분포를 살펴보기 위한 해석은 Fig. 3과 동일한 형상의 모델과 하중을 이용하였으며, 항복응력(235 MPa)이 초과하는 영역 발생 시 보강재를 설치하여 전 구간 탄성 영역내의 응력이 발생하도록 하였다. Fig. 4는 해석모델에 따른 최대응력 발생위치 및 크기를 보여준다.



(a) absence of stiffener



(b) Stiffener on one side



(c) Stiffeners on both sides

[Fig. 4] Location of maximum stress(vonmises stress)

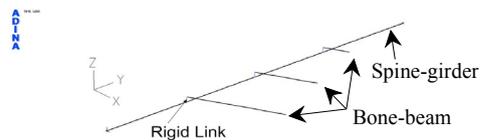
보강재가 없을 경우(a) 최대응력은 Bone-beam과 Spine-girder 접합부에서 약 912 MPa가 발생하였으며, 국부적인 응력 집중 현상을 막기 위하여 보강재를 설치 시 (b) 보강재와 Bone-beam 사이에서 약 289 MPa의 응력이 발생하였다. 보강재를 반대편에 추가 설치 시 최대응력이 약 215 MPa이 발생하였으며, 전 영역에서 항복응력보다

작은 응력이 발생함을 확인하였다. 따라서 최종 시험체는 Fig.4의 (c)로 택하였으며, 변형률 게이지 부착 위치 결정 시 응력 집중이 발생하기 쉬운 보강재 또는 Bone-beam 주변은 피하였다.

2.2 거동분석을 위한 해석모델

경골잔교는 휨과 비틀림이 동시에 발생하는 복잡한 구조이기 때문에 거동분석과 합리적인 설계를 위하여 해석을 통한 거동을 분석하고자 한다. 따라서 beam element를 사용하여 단면력을 도출 후 단면내 응력과 변위를 분석하였다.

수치해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램 ADINA 8.9[12]을 이용하였다. Fig. 5는 본 연구에서 사용된 시험체의 유한요소해석 모델을 나타낸다. Spine-girder는 뒀비틀림 자유도가 고려된 7자유도 Beam을 이용하여 모델링하였다. Spine-girder와 Bone-beam의 중립축의 위치는 Rigid-link element를 이용하여 실제 위치를 모사하였다[Fig. 5].



[Fig. 5] F.E.A. model(Beam element)

해석 시 선형 탄성해석을 수행하였으며, Spine-girder의 양단은 7자유도에 대하여 모두 구속하였다.

3. 경골잔교 시험체

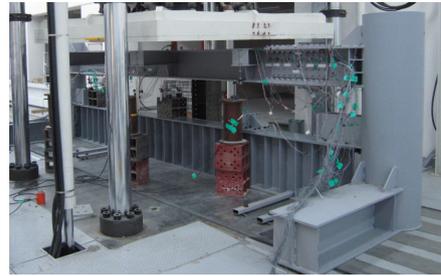
3.1 시험체 개요

2.1절에서 언급된 것과 같이 조립식 경골잔교는 비대칭으로 설치된 구조물로 비틀림이 크게 발생하는 조건을 모사하기 위하여 Spine-girder에 Bone-beam이 한쪽에만 설치되는 형상을 고려하였다. 또한 조립식 경골잔교 제작 시 공장 제작된 부재 간의 볼트 연결부에 의한 거동을 살펴보기 위하여 Spine-girder 시편은 볼트 연결부가 있는 시편과 볼트 연결이 없는 일체형 시편 2가지를 제작하였다[Fig. 6, 7].

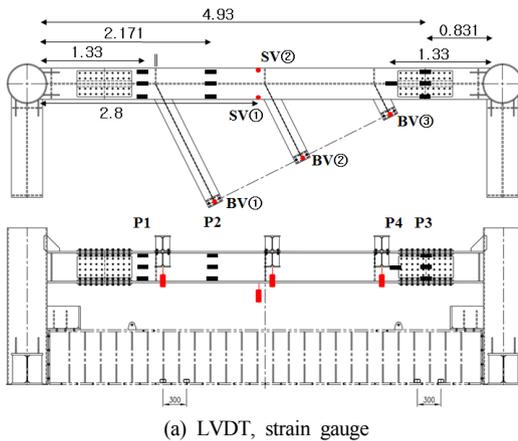
Spine girder의 양단은 과도한 비틀림이 발생하므로, 비틀림에 저항하는 완벽한 구속조건을 만들기 위하여 추가적으로 종방향 횡방향의 보강재를 설치하였다.



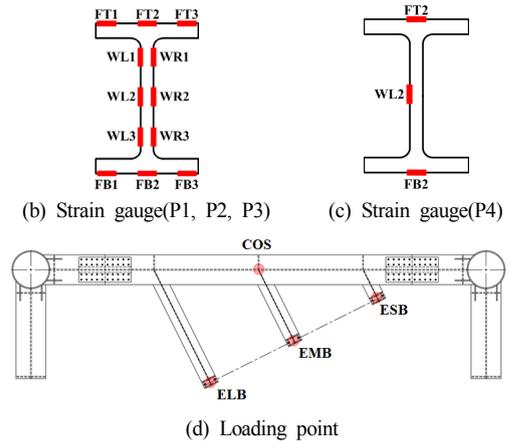
[Fig. 6] Fish-bone girder pier
(test body- without bolted connection)



[Fig. 7] Fish-bone girder pier
(test body- with bolted connection)



(a) LVDT, strain gauge



(b) Strain gauge(P1, P2, P3)

(c) Strain gauge(P4)

(d) Loading point

[Fig. 8] Installation location of LVDT, strain gauge and loading point

3.2 게이지 설치 및 하중재하방법

시험체는 비틀림과 휨이 동시에 발생하는 구조물로 3축 스트레인 게이지와 변위계를 이용하여 거동과 응력을 분석하였다.

변위계는 Fig. 8 (a)와 같이 수직변위가 가장 많이 발생할 것으로 예상되는 위치(BV1, BV2, BV3)와 Spine-girder의 처짐과 회전각을 측정하기 위한 중앙지점인 SV1과 SV2에 부착하였다.

스트레인 게이지는 Spine-girder 단면내의 응력 분포를 정확히 파악하기 위하여 상·하부플랜지, 좌·우 웹에 3축 스트레인 게이지를 3개씩 부착하였다. 부착위치는 Fig. 8 (a), (b), (c)와 같으며, 볼트연결부가 있는 모델은 P3 의 FT2, WL2에만 부착하였다.

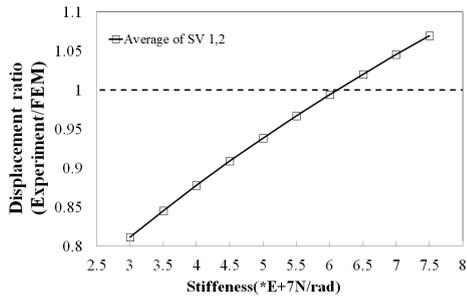
하중재하 시 KOCED 첨단건설재료시험센터의 5MN 대형부재구조재료시험기를 이용하였으며, 재하위치는 Fig. 8 (d)와 같다. Spine-girder의 중앙부(COS(Center of Spine-girder))와 Bone-beam의 끝단(ELB(End of Long Bone-beam), EMB(End of Middle Bone-beam), ESB(End of Short Bone-beam))에 균중하중을 고려하여 30kN의 하

중을 재하하였다.

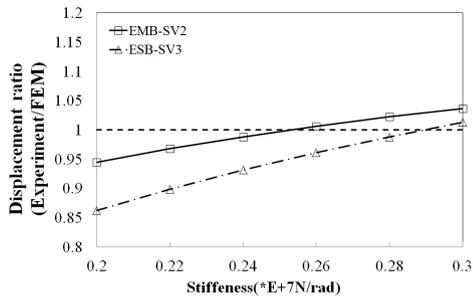
4. 모델 수정

비틀림이 발생하지 않도록 Spine-girder의 중앙(COS)에 하중을 재하 하였다.

Spine-girder 중앙부에 1mm 처짐이 발생하려면, 단순 지지 경계조건일 경우 38.3kN의 하중이 필요하며, 양단 구속된 조건에서는 153.3kN의 하중이 필요하다. 본 실험에서는 1mm 처짐 발생 시 53.7kN의 하중이 재하되어 시험체의 끝단은 단순지지조건과 양단구속조건 사이의 강성을 갖는 것으로 판단할 수 있다. 이를 고려하기 위하여 해석 모델의 양끝단에 스프링을 모델링하였다. 스프링은 휨에 의해 저항하는 회전스프링(Fig. 5의 Rx)과 비틀림에 저항하는 비틀림스프링(Fig. 5의 Ry) 2가지를 고려하였다. 스프링의 강성은 시험체 종류에 따라 2가지로 결정하였으며, COS하중(Fig.8 (d))에 의해 Rx산정 후 EMB, ESB하중(Fig.8 (d))에 의해 Ry를 산정하였다.

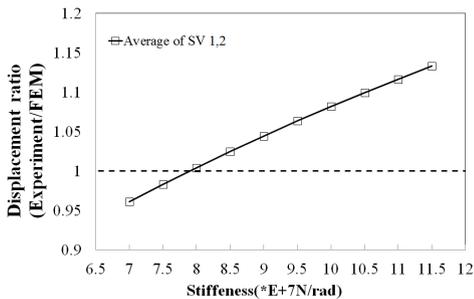


(a) Rx

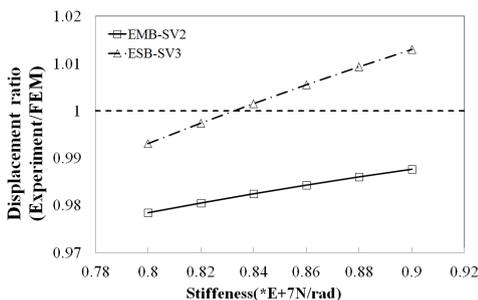


(b) Ry

[Fig. 9] Calibration of boundary condition (without bolted connection)



(a) Rx



(b) Ry

[Fig. 10] Calibration of boundary condition (with bolted connection)

볼트연결부가 없는 시험체의 경우 휨에 저항하는 회전 강성은 $3E+7$ N/rad ~ $7.5E+7$ N/rad, 비틀림에 저항하는 회전강성은 $0.2E+7$ N/rad ~ $0.3E+7$ N/rad까지 변화시켜 가며, 강성을 도출하였다. (Fig. 9 (a), (b)) 볼트연결부가 있는 시험체의 경우 휨에 저항하는 회전강성은 $7E+7$ N/rad ~ $11.5E+7$ N/rad, 비틀림에 저항하는 회전강성은 $0.8E+7$ N/rad ~ $0.9E+7$ N/rad 까지 변화시켜가며, 강성을 도출하였다.(Fig. 10 (a), (b)) 스프링의 강성은 설계 시 안전측 설계를 위하여 해석에 의해 Bone-beam 끝단에서 발생한 변위값이 실험값보다 큰 경우에 대한 강성을 택하였다.

Fig. 9, 10을 통하여 볼트연결부가 없는 시험편과 볼트 연결부가 있는 시험편에서 휨에 저항하는 스프링의 강성을 각각 $6.0E+7$ N/rad, $7.5E+7$ N/rad 으로 하였으며 비틀림에 저항하는 스프링의 강성은 각각 $0.25E+7$ N/rad, $0.83E+7$ N/rad으로 하였다.

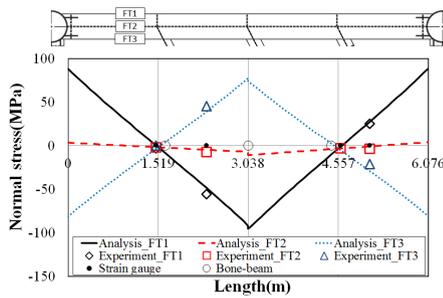
5. 거동분석

4장에서 도출된 스프링강성을 고려하여 2가지 시험체에 대하여 EMB하중(Fig. 8 (d))의 경우 단면의 응력 및 발생된 변위 및 회전각을 비교하였으며, 단면내 응력을 분석하였다.

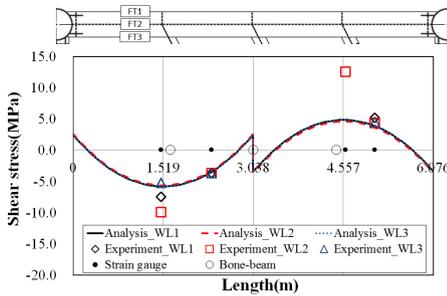
1) 응력비교

실험 및 해석에서 도출된 Spine-girder의 위치별 응력을 살펴보았다. Spine-girder의 길이방향으로 발생하는 법선응력은 플랜지, 수직방향으로 발생하는 전단응력은 웹에서 결과를 비교하였다.

Fig.11은 볼트연결부가 없는 시험체, Fig. 12는 볼트연결부가 있는 시험체에서의 플랜지 상면(FT1~3)과 웹의 좌면(WL1~3)에서의 비교 결과를 나타내며, Fig. 13는 하중에 따른 플랜지 상면의 응력 변화를 나타낸다. 실험 결과는 구조해석 결과와 매우 유사하게 나타났으며, 실험 하중 내에서 탄성거동을 하는 것을 확인하였다. 일부 웹에서의 계측결과와 해석결과가 차이가 발생하였으나, 이는 볼트 및 Bone-beam 연결부와 근접한 위치로써 국부적인 영향에 따른 영향으로 판단된다. 따라서 주변 영향이 최소로 고려되는 P2지점에서 실험결과와 응력을 비교하였으며(Table 1) 매우 유사함을 알 수 있다.

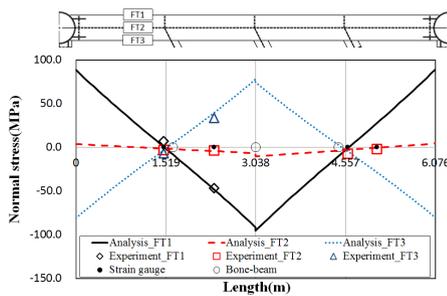


(a) normal stress(Flange-top)

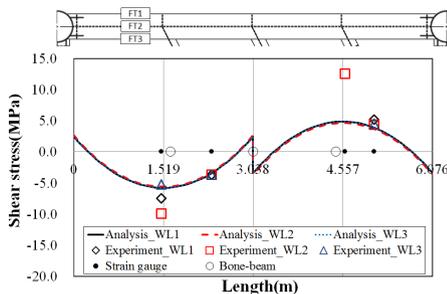


(b) shear stress(Web-left)

[Fig. 11] Comparison of results between experiment and analysis(without bolted connection)

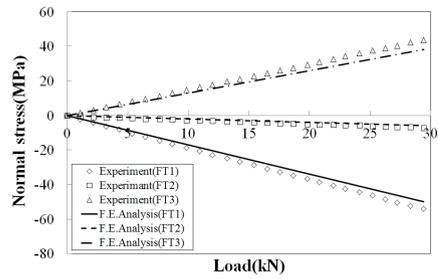


(a) normal stress(Flange-top)



(b) shear stress(Web-left)

[Fig. 12] Comparison of results between experiment and analysis(with bolt connection)



[Fig. 13] Load-stress curve (P2, without bolted connection)

[Table 1] Stress at P2

Types of stress	Location	Experimental result (MPa)	Theoretical analysis (MPa)	Difference ratio (Exp/FEM)
Normal stress	FT1	-56.1	-48.8	1.15
	FT2	-7.4	-4.8	1.54
	FT3	45.4	39.3	1.15
Shear stress	WL1	-3.7	-3.5	1.06
	WL2	-3.7	-3.3	1.12
	WL3	-3.7	-3.5	1.06

2) 변위 비교

Spine-girder의 비틀림 회전각과 Bone-beam 끝단의 수직변위를 비교하였다.

회전각은 Fig.8, (a)에서 SV1, SV2의 상대변위를 이용한 회전각을 산정하여 도출하였으며, 해석결과와 비교하여 Table 2에 나타났다. 비틀림각이 매우 작음을 고려하면 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

[Table 2] Torsional angle at center of span

test model	Experiment (deg)	Analysis (deg)	Difference ratio (Exp/FEM)
without bolted connection	0.98	1.22	0.81
with bolted connection	0.95	1.01	0.94

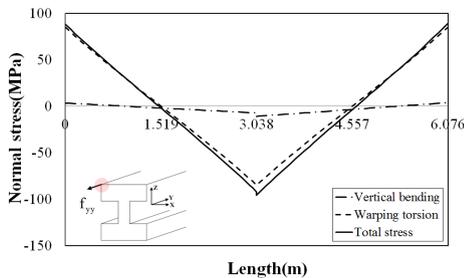
수직변위는 Fig. 8, (a)에서 BV2의 변위와 해석결과를 비교하였다. 하중에 의해 발생한 수직변위는 Table 3과 같으며 구조해석결과와 실험계측결과 값이 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

[Table 3] Vertical displacement at BV2

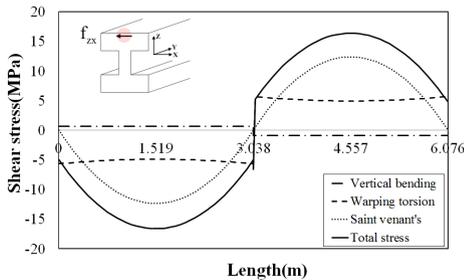
Test model	Experiment (mm)	Analysis (mm)	Difference ratio (Exp/FEM)
without bolted connection	22.09	22.14	1.00
with bolted connection	18.26	18.60	0.98

3) 응력 분석

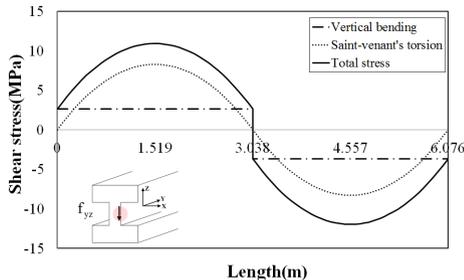
실험결과와 해석결과와의 비교를 통하여 해석모델의 타당성을 검증하였으며, 동일한 해석 모델을 이용하여 하중 재하 시(EMB) Spine-girder에서 발생하는 응력을 분석하였다.



(a) normal stress in the flange



(b) shear stress in the flange



(c) shear stress in the web

[Fig. 14] Stress in Spine-girder by bending and torsion

Fig. 14는 플랜지와 웹에서 비틀림과 휨에 의해 발생하는 응력을 산정하였다. 법선응력과 전단응력은 각각 플랜지 상부 끝단과 플랜지 상부중양 및 웹의 중앙에서 분석하였다.

Spine-girder의 플랜지에서 발생한 최대 응력은 지간의 중앙에서 발생하였으며, 뒤틀림에 의한 응력이 전체 응력의 88.6%, 수직 휨에 의한 응력이 11.4%를 나타내 법선 응력은 뒤틀림에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다 (a). 플랜지의 전단응력은 지간의 1/4지점 최대 전단응력이 발생하였으며, 전체 전단응력 중 순수뒤틀림에 의해 74.2%, 수직휨에 의해 3.9%, 뒤틀림에 의해 29.6%로 나타나 순수뒤틀림, 뒤틀림에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다 (b). 웹에서 발생하는 전단응력은 지간의 3/4지점에서 최대응력이 발생하였으며, 전체 전단응력 중 순수뒤틀림에 의해 69.2%, 수직휨에 의해 30.8%로 나타나 순수뒤틀림에 의한 영향이 지배적인 것으로 판단된다 (c).

6. 결론

비틀림에 취약할 수 있는 구조인 조립식 경골잔교 (Fish-bone girder pier)의 거동을 분석하고자, 잔교의 실제 크기의 모형을 제작하여 균중하중재하에 따른 거동 예측 및 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 실험 및 해석을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 비틀림이 최대 발생할 수 있는 극한의 균중하중이 작용 시 경골잔교는 국부적으로 항복응력을 크게 상회하는 응력이 발생한다. 응력저감을 위하여 Spine-girder와 Bone-beam의 연결부에 보강재의 설치가 필요하다.
- (2) 실험과 유한요소해석에서 도출된 응력 및 변위 비교를 통하여 해석모델의 타당성을 검증하였으며, 해석을 통하여 경골 잔교의 거동을 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 연결부의 국부적인 응력 집중을 분석하기 위해서는 상세 해석이 필요하다.
- (3) 경골잔교는 비틀림에 취약한 구조로서 플랜지의 법선응력은 뒤틀림, 플랜지와 웹의 전단응력은 순수뒤틀림에 의한 영향이 지배적으로 작용하며, 볼트 연결부 설계 및 교각과의 접합부 설계 시 이를 고려해야 한다.

감사의 글

본 실험에 KREONET망 서비스를 이용할 수 있도록 해주신 KISIT에 감사 드립니다.

References

- [1] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Harbor and aquarium design standard, 2005.
- [2] H.K. Kang, J.S. Park, D.G. Kim, K.Y. Yoon, "A Study on Standard Specifications Coastal Safety Facilities", *Proceedings of the KAIS Spring Conference*, pp. 350-353, 2009.
- [3] S.R. Yoo, J.S. Park, K.Y. Yoon, "A Numerical Study on Performance-Based Design for Pier and Superstructure in Pile Supported Modular Pedestrian Pier", *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation*, pp. 63-73, 2011.
- [4] 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, 2011.
- [5] H.M. Sin, "A Study on the Behavior of Prefabricated Pier considering Design Parameters", A master's thesis, Graduate School Sun Moon University, 2011.
- [6] 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*, pp. 2000-2005, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.4.2000>
- [7] ABAQUS Version 6.13, Analysis User's Guide, Dassault Systemes, 2013.
- [8] ADINA Version 8.9, Theory and Modeling Guide, 2012.
- [9] Korea Road & Transportation Association, Highway Bridge Design Code(Limit State Design Method), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010.

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