연안역 조립식 경골잔교(Fish-bone Girder Pier)의 해석모델에 관한 연구

김화랑¹, 임남형², 박종섭³, 윤경민², 윤기용^{1*} ¹선문대학교 토목공학과, ²충남대학교 토목공학과, ³상명대학교 토목공학과

A Study on Analytical Model of Fish-bone Girder Pier

Hwa-Rang Kim¹, Nam-Hyoung Lim², Jong-Sup Park³, Kyung-Min Yun²

and Ki-Yong Yoon^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Sunmoon University ²Department of Civil Engineering, Chungnam National University ³Department of Civil Engineering, Sangmyung University

요 약 연안역 조립식 경골잔교는 단일거더 시스템이므로 비틀림에 큰 영향을 받는 구조물이다. 본 연구에서는 이 잔교를 합리적으로 해석하고 설계하기 위한 해석모델을 개발하고자 하였다. 뒴강성을 포함한 7자유도 보요소를 사용 한 해석모델의 구속조건을 조절하여 해석모델을 선정하였으며, 선정된 해석모델은 실물크기의 실험체를 이용한 정적 하중재하 실험을 통하여 검증하였다. 실험결과와의 비교분석을 통하여 개발한 해석모델을 입증하였으며, 이 해석 모 델을 이용하여 연결부의 단면력을 산정함으로써 합리적인 연결부 설계를 가능하게 하였다.

Abstract A fish-bone girder pier affects torsion severely because of the one girder system. This study was performed to develop an analytical model to analyze and design a fish-bone girder pier properly. This model consisted of a beam element with 7-degrees of freedom considering the warping rigidity. Several beam-column connection conditions were considered. The static load test was performed using a real size specimen. The validity of this model was tested by a comparison of the analytical results with the experimental results. This analytical model is useful for designing the bolt connection of a Spine girder.

Key Words : Analytical model, One girder system, Pier, Torsion, Warping rigidity

1. 서론

서해안을 방문하는 관광객 수가 꾸준히 증가하면서 항 만시설이 아닌 여가 시설로 관광용 보도 잔교가 많이 설 치되고 있다.

현재 국내에서 보도교 설계는 서울시 시설물 설계 및 시공편람[1]의 소규모 강교 및 보도육교에 대한 설계기준 또는 도로교설계기준[2]을 적용하고 있다. 한편 해안에 설치되는 보도용 잔교 설계는 특별한 기준이 없어 항만 및 어항설계기준[3]을 준용하고 있으나 이 기준은 선박 및 작업기계를 고려한 부두시설로써의 잔교를 대상으로 하여 보도용 잔교에 적용하면 과다한 설계를 유발하고 있는 실정이다. 따라서 합리적인 보도용 잔교를 설계하기 위해서는 서해안의 지역적 특성을 고려하여 시공 및 설 계기준이 마련될 필요가 있으며[4], 이 지역적 특성을 고 려해 산정된 설계하중 및 최적설계단면이 제안되었다[5]. 그러나 Fig. 1(1)과 같은 잔교의 경우에는 말뚝의 해상 항타 시 수직도 문제(a), 파력이 작용 시 수평안정성 문제 (b) 및 상부구조물의 편측재하에 따른 불안정성(c)과 같 은 문제점이 발생할 가능성이 크다. 이러한 문제점을 해

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업(09지역기술혁신 B-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. *Corresponding Author : Ki-Yong Yoon(Sangmyung Univ.) Tel: +82-41-530-2326 email: kyyoon@sunmoon.ac.kr Received November 19, 2013 Revised December 3, 2013 Accepted December 5, 2013 결하기 위하여 Fig. 2와 같이 거더를 지그재그 형식으로 배치하고 거더와 말뚝을 강결하여 Fig. 1(2)와 같은 라멘 구조물을 형성하는 새로운 형식의 Fish-bone girder pier 를 제안하였다[6].

이 교량은 상하부구조가 일체로 거동하여 앞에서 언급 한 문제점을 개선하였지만 단일 거더 시스템으로 구성되 어 비틀림의 영향이 크며, 좌굴안정성 및 거더 연결부 설 계를 위해 연결부의 단면력을 합리적으로 산정해야 하는 문제점이 야기되었다. 본 논문에서는 이상의 문제를 해결 하기 위하여 Fish-bone girder pier의 거동을 합리적으로 분석할 수 있는 해석모델을 7자유도 보요소를 이용한 해 석모델로 제안하고, 이 해석모델의 타당성을 검증하기 위 하여 정적하중재하실험을 실시하여 비교하였다.





(2) Fish-bone girder pier





[Fig. 2] Top view of Fish-bone girder pier

2. 유한요소해석 모델

Fish-bone girder pier는 비대칭 구조물로, 하중재하 시 전단, 휨 및 비틀림이 복합적으로 발생하여 Fig. 3과 Fig. 4와 같은 법선응력과 전단응력을 발생시키는 특징을 가 지고 있다.



[Fig. 3] Normal stresses



[Fig. 4] Shear stresses

이와 같은 복잡한 응력상태의 Fish-bone girder pier의 거동을 분석하기 위해서는 Plate/Shell 요소를 사용한 해 석을 실시 할 수 있으나, 많은 수의 요소를 사용하여야 하며, 복잡한 기하형상을 모델링해야 하는 어려움과 연결 부 단면력 도출이 어려운 단점이 있다. 따라서 본 연구에 서는 유한요소해석 프로그램 ADINA(8.9.0)을 이용하여 비틀림의 영향을 정확히 고려할 수 있는 뒴이 고려된 7자 유도 보요소를 이용한 해석모델을 개발하고자 하였다.

2.1 해석모델의 제원

개발된 해석모델을 검증하기 위하여 정적하중 재하실 험을 실시하였기 때문에 실험체의 제원을 이용하여 Fig. 5와 같이 기둥, Spine girder 및 Bone beam으로 구성된 해석모델의 제원을 결정하였다. 모든 구성요소는 SM490 강종을 사용하였다. 양쪽 기둥과 강절된 거더인 Spine girder는 H형강 400x400x13x21, Bone beam은 H형강 200x200x8x12, 기둥은 지름 508mm, 두께 12.7mm인 원 형강관으로 구성되었다. 거더의 길이는 두 기둥의 중앙점 간 거리 6.076m이며, 기둥의 높이는 지면으로부터 거더 중심까지 1.454m이다. 거더와 Bone beam은 63.4°로 강절 되었다.



[Fig. 5] Size of Analytical Model

2.2 해석 모델

합리적인 해석모델을 개발하기 위하여 Table 1에서 보 는 바와 같이 3개의 모델을 비교하였다. 기둥과 Bone beam은 휨과 전단만을 전달하는 구조이므로 3개의 모델 모두 6자유도 보요소를 사용하였으며, 비틀림을 저항하 는 Spine girder는 6자유도 보요소(Model ①)와 뒴이 고 려된 7자유도 보요소를 사용하여 비교하였다. 7자유도의 Spine girder가 6자유도의 기둥과 강결되어야 하므로 이 부분의 연결조건을 뒴자유인 경우(Model ②)와 뒴구속인 경우(Model ③)로 구분하였다. 모든 모델에서 Spine girder와 Bone beam의 도심이 일치하지 않으므로 이 부 분은 rigid link요소를 이용하여 모델링하였다.

[Table 1] Classification of the model

Model	Column	Bone beam	Spine girder	
1	6-DOF	6-DOF	6-DOF	
2	6-DOF	6-DOF	7-DOF(Warping-free)	
3	6-DOF	6-DOF	7-DOF(Warping-fixed)	

3. 정적하중 재하 실험

Fish-bone girder pier는 비틀림이 크게 발생하는 비대 칭 구조물이므로 크기를 상사하지 않은 실제 구조물의 크기로 실험체를 제작하였으며, 비틀림이 지배하므로 Bone beam은 Spine girder의 한쪽에만 강절시켰다. 실물 크기의 실험체를 실험하기 위해서 분산공유형 건설연구 인프라 첨단건설재료실험센터(COMEC)의 5MN 구조재 료 시험기를 이용하여 실시하였다.

3.1 실험체 제원 및 계측센서의 위치

법선응력과 전단응력을 정확히 측정하기 위하여 3축 스트레인 게이지를 사용하였고, Fig. 6에서 보는 바와 같 이 한 단면에 12개를 부착하였다. 또한 길이 방향으로의 부착 위치는 국부 변형이 영향을 비교적 적게 받는 위치 로 선택하여 Fig. 7에 점으로 표시된 P1, P2, P3 및 P4에 부착하였다. 변위측정을 위한 LVDT는 지간 중앙에서 Spine girder 상하부 플랜지에서의 수평변위와 하부플랜 지 밑면에서의 수직변위, 그리고 Bone beam 끝단의 수직 변위를 계측하기 위하여 설치하였다. 또한 하중 재하점에 서 Load Cell을 설치하여 가력되는 하중의 크기를 측정하 였다.



[Fig. 6] Location of strain gauges at a section



[Fig. 7] Position of strain gages and LVDT

3.2 하중 재하 위치

하중재하는 구조재료 시험기를 사용하여 Fig. 8에서 보는 바와 같이 진행하였다. 하중의 크기는 Spine girder 에 비틀림을 가장 크게 할 군중하중을 고려하여 30kN을 가력하였다.



[Fig. 8] Photos of the the real Test specimens loading

하중 재하 위치는 비틀림의 영향을 받지 않는 경우와 비틀림이 큰 경우를 비교하기 위하여 Fig. 9에서 보는 바 와 같이 Spine girder 중앙점과 Spine girder 중앙에 위치 한 Bone beam의 끝단으로 하였다. 따라서 해석 및 실험 모델명은 각각 COS(Center Of Spine girder)와 EMB(End of Middle Bone beam)로 구분하였으며, 모델명 뒤에 2.2 에서 언급한 바와 같은 해석조건을 붙여 구분하고자 하 였다.



[Fig. 9] Loading point of specimens

4. 실험 및 해석 결과

합리적 해석모델을 결정하기 위하여 변위와 응력에 대 한 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

4.1 변위 비교

Spine girder 중앙점에서의 변위는 Fig. 10에서 보는 바 와 같이 플랜지 상하에서 수평변위와 하부플랜지 2곳에 서 수직변위를 측정하여 측정결과를 평균하여 수평변위 와 수직변위로 산정하였으며, 두 변위차를 이용하여 단면 의 회전각을 산정하였다.



[Fig. 10] The displacement and the rotation angle at the center of Spine girder

COS의 경우 하중을 28.45kN까지 가력하였을 때 실험 및 해석결과는 Table 2와 같다. 실험 및 해석의 변위차가 큰 것은 LVDT의 지지점을 Fig. 7에서 양 기둥을 고정하 기 위해서 사용한 실험체 하부에 보이는 고정용 보 상부 플랜지에 위치시켜 완전한 0점을 확보하지 못하여 발생 한 것으로 판단된다. 해석모델간의 변위를 살펴보면 훰과 전단만을 받은 COS의 경우에는 3가지 해석모델의 차이 가 없음을 확인 할 수 있었다.

Positio	on Model	COS①	COS2	COS3
P1	Experiment(mm)	0.17	0.17	0.17
	Analysis(mm)	0.123	0.123	0.123
	Error(%)	-27.7	-27.7	-27.7
P2	Experiment(mm)	0.55	0.55	0.55
	Analysis(mm)	0.35	0.35	0.35
	Error(%)	-37.1	-37.1	-37.1

[Table 2] Experimental and Analytical Displacements of COS

EMB의 경우에는 하중을 29.4kN 재하하였을 때의 결 과를 Table 3에 정리하였다. COS와 같은 이유로 실험과 해석변위의 차가 큰 것으로 판단되나, EMB의 경우에는 비틀림이 크게 작용하여 해석결과는 COS의 경우와 상당 히 다른 것을 알 수 있다. 해석결과에서 Spine girder의 수 직변위는 해석모델간 차이가 없으나, 단면의 회전각은 각 모델별로 차이가 크게 발생하고 이로 인하여 Bone beam 끝단에서의 변위도 같은 양상으로 차이가 큰 것을 알 수 있다. 뒴을 고려하는 7자유도 보요소를 사용하고 Spine girder와 기둥의 강절을 뒴구속으로 모델링한 EMB③이 합리적인 결과를 제공하고 있는 것으로 판단된다.

[Table 3] Experimental and Analytical Displacements of EMB

Position Model		EMB(1)	EMB ₂	EMB3	
	Experiment(mm)	0.175			
P1	Analysis(mm)	0.107	0.107 0.107		
	Error(%)	39	39	39	
P2	Experiment(mm)	0.685			
	Analysis(mm)	0.355	0.355	0.355	
	Error(%)	48.2	48.2	48.2	
θ2	Experiment(mm)	1.16			
	Analysis(mm)	10	2.8	0.927	
	Error(%)	766	141	-20.1	
EMB	Experiment(mm)	22.1			
	Analysis(mm)	174	48.4	17.1	
	Error(%)	687	119	-22.7	

4.2 응력분포 비교

응력분포는 해석모델간 변위의 차이가 확연한 EMB의

경우만을 비교하였다. Spine girder 상부플랜지(FT)에서 발생하는 법선응력과 복부(WL)에서 발생하는 전단응력 을 위치별로 Fig. 11에 비교하여 정리하였다.



[Fig. 11] Normal and Shear stresses of EMB

Fig. 11을 종합적으로 살펴보면 비틀림을 받는 경우 Spine girder의 뒴강성이 미치는 영향이 매우 커서 해석결 과에 절대적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 6자유도 보요소를 사용한 EMB①은 뒴을 고려하지 못하고, 7자유 보요소를 사용하였으나 Spine girder와 기둥사이의 강결 부분에서 뒴구속을 시키지 않은 EMB②는 강결을 모사하 지 못하여 플랜지에서 발생하는 법선응력분포뿐만 아니 라 복부에서의 전단응력분포가 실험결과와 큰 차이가 있 는 것을 알 수 있다.

강절부분의 뒴구속을 실시한 EMB③의 경우에는 법선 응력분포와 전단응력의 분포뿐만 아니라 응력의 크기도 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4.3 거더 연결부 단면력

Fish-bone girder pier는 비틀림의 영향이 커서 플랜지

휨모멘트(Fig. 13(b))가 크게 발생한다. 따라서 Spine girder를 볼트연결하기 위해서는 이를 고려하여 설계하여 야 한다. 그러나 Plate/Shell요소를 사용한 해석으로는 연 결부의 단면력 도출이 어렵다. 따라서 볼트설계를 위해서 는 단면력의 크기를 산정할 수 있는 보요소의 사용이 필 수적이다. 실험을 통해서 검증된 해석모델③을 이용하여 볼트연결부에서 단면력을 산정하면 Table 4와 같다.



[Fig. 12] Connection Position

[Table 4] Stress resultants at the connection position of EMB

Re	Stress esultant Mw	N	Vw	Mf
Connection	(kN·m)	(kN)	(kN)	(kN·m)
Position	\searrow			
CP 1	6.01	18.34	12.14	6.02
CP 2	3.48	18.34	-17.26	6.02



(a) Web section force(b) Flange section force[Fig. 13] Web and Flange section force

따라서 비틀림 영향이 큰 Fish-bone girder pier의 Spine girder의 볼트연결은 복부뿐만 아니라 플랜지도 휨 과 전단을 받는 볼트연결로 설계하여야 하며, 이 때의 단 면력은 본 연구를 통하여 개발한 해석모델을 이용하여 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 비틀림의 영향을 크게 받는 Fish-bone girder pier의 거동분석과 연결부 설계를 위한 단면력을 산출 할 수 있는 합리적인 해석모델을 개발하기 위하여 정적하중 재하실험과 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 비틀림 영향을 크게 받는 Fish-bone girder pier의 성능을 평가하기 위해서는 Plate/Shell요소를 사용 한 유한요소해석이나 하중재하실험을 실시하여야 한다. 본 연구에서는 실물 실험체의 하중재하 실험 을 통하여 합리적이며 실용적인 해석모델을 검증 하고 제시하였다.
- (2) 실험 및 해석을 통하여 얻은 변위와 응력을 종합적으로 분석하면 비틀림의 영향을 크게 받는 Fish-bone girder pier는 Spine girder의 뒴강성을 고려하고, 거더와 기둥의 연결부에서 뒴구속을 실시하는 Model③이 가장 우수한 해석 모델인 것으로 판단된다.
- (3) 7자유도 보요소를 이용한 해석 모델을 이용하면 Spine girder의 플랜지에서 발생하는 플랜지휨모멘 트를 포함한 모든 단면력을 도출할 수 있어 합리 적인 연결부 설계를 가능하게 할 것으로 기대된다.

본 연구를 통하여 개발된 해석모델은 앞으로 Fish-bone girder pier의 성능평가, 좌굴거동 및 진동문제 등에 활용 될 것으로 기대된다.

References

- Seoul Metropolis, Facility Design and Construction Manual, Small steel Bridge and overpass, 2001.
- [2] Korea Road & Transportation Association, Highway Bridge Design Code, Ministry of Land, Transpor and Maritime Affairs, 2010.
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Harbor and aquarium design standard, 2005.
- [4] 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.
- [5] S.R. Yoo, J.S. Park, K.Y. Yoon, "A Numerical Study on Performance-Based Design for Pier and Superstructure in Pile Supported Modular Pedestian Pier", Journal of the Lorea Society of Hazard Mitigation, pp. 63-73, 2011.
- [6] G.S. Ham, K.Y. Yoon, N.H. Lim, J.S. Park, "A Study on Static Behavior of New Modular Pier in Coastal Zone 'Fish Bone Bridge'" Korea Institute of Disaster Prevention Conference, pp.154-159, 2013.

김 화 랑(Hwa-Rang Kim)



- 2011년 8월 : 선문대학교 토목공 학과 (공학사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 선문대학
- 교 대학원 토목공학과 석사과정

<관심분야> 구조공학

임 남 형(Nam-Hyoung Lim)

[정회원]

[준회원]

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

<관심분야> 구조공학, 강구조, 궤도공학

박 종 섭(Jong-Sup Park)

[정회원]



- 1994년 2월 : 고려대학교 토목환 경공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2002년 12월 : Auburn University (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 현재 : 상명대학
 교 건설시스템공학과 교수

<관심분야> 구조공학, 교량공학, 강구조좌굴, 유지보수

<관심분야> 구조공학, 강·

윤 경 민(Kyung-Min Yun) [정회원]



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

<관심분야> 구조공학, 강구조, 궤도공학

윤 기 용(Ki-Yong Yoon)

[정회원]



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

<관심분야> 구조공학, 합성구조, 강구조, 내진설계