차량속도와 라이즈비에 따른 타이드 아치형 거더의 동적증폭

Dynamic Amplification of Tied-Arch Girder due to Variations of Rise Ratio and Vehicle Moving Speed

홍상현* · 이종세** · 박경훈*** · 노화성****

Hong, Sanghyun*, Lee, Jong Seh**, Park, Kyung-Hoon***, and Roh, Hwasung****

Abstract

In this paper the effect of rise ratio on the dynamic amplification (DA) of the tied-arch girder is investigated through a finite element analysis. Equivalent nodal loads are considered for the modeling of moving vehicle loads, and several vehicle speeds ranged between 60 km/hr and 120 km/hr are applied for the DA investigation. For detailed investigation, the relationship between the first mode frequency of the girder and the DA at the middle of the girder is investigated. The results show that the DA of the girder sensitively varies according to the rise ratio; especially when the rise ratio is more than 0.03, the maximum DA is relatively larger than the cases of the smaller rise ratio. Such result is appeared since the girder becomes more flexible and the developing time of the maximum DA is close to the first natural period of the girder.

Key words : Tied-arch girder, Dynamic amplification, Rise ratio, Moving vehicle load, Natural period

요 지

본 논문에서는 타이드 아치형 거더의 라이즈비에 따른 동적증폭을 유한요소해석을 통해 분석하였다. 이동차량하중은 등가 절점하중으로 모델링하였으며 60 km/hr에서 120 km/hr까지의 다양한 범위의 차량속도에 따른 동적증폭을 비교하였다. 자세한 분석을 위해 거더 중앙부에 최대 동적증폭이 발생하는 시간과 1차 모드 고유주기와의 관계를 분석하였다. 해석결과, 거더의 동적증폭은 라이즈비에 따라 크게 변화하였으며, 특히 라이즈비 0.03 이상일 경우 최대 동적증폭은 크게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 거더가 보다 유연해지고 거더 중앙부에서의 최대 동적증폭의 발생시간이 거더의 1차 모드 고유주기에 가까워지기 때문으로 판단된다.

핵심용어 : 타이드 아치형 거더, 동적증폭, 라이즈비, 차량이동하중, 고유주기

1. 서 론

아치교는 아치 리브(arch rib)의 구조적 특징으로 인해 일반적인 단순보에 비해 휨모멘트를 확연히 줄여줄 수 있어 중·장지간의 교량에 효과적으로 적용할 수 있다. 이러한 타이드 아치 구조의 장점을 응용하여 최근 Kim *et al.*(2010)은 라이즈비(rise ratio)가 작은 콘크리트 충전 타이드 아치형(Concrete-Filled steel tubular Tied Arch, CFTA) 거더를 개발하였으며,

이는 강판주형 안에 콘크리트를 충전하여 거더의 강성을 증가시키고 외부 긴장재를 도입하여 수평력을 발현시키는 구조 형식이다. 참고로 도로교설계기준(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에 따르면 일반적인 아치교의 경우, 아치 리브의 단면이 거의 일정하고 아치의 라이즈비는 0.1에서 0.5 정도 사이의 값을 추천하고 있지만 제안된 CFTA 거더의 경우 0.04 미만의 라이즈비를 가지는 낮은 형식의 아치형 거더이다. 이러한 CFTA 거더의 개발과 설계에 관련된

*정회원. 한양대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: jerom1st@hanyang.ac.kr)
Member. Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**한양대학교 건설환경플랜트공학과 교수
Professor, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Hanyang University

***정회원. 한국건설기술연구원, 인프라구조연구실, 수석연구원
Member. Senior Researcher, Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

****교신저자. 정회원. 전북대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-63-270-2428, Fax: +82-63-270-2421, E-mail: hwasung@jbnu.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

연구는 최근까지 다양하게 수행되어 오고 있으며, 특히 정적 및 동적 안정성에 관한 다양한 검토가 이루어져 왔다. Lee *et al.*(2007)과 Kim *et al.*(2009)에서는 CFTA 거더 개발 단계에서의 콘크리트 충전 구조와 긴장재에 따른 정적 안정성을 실험과 유한요소해석을 통해 검증하였으며, Kim *et al.*(2012)에서는 CFTA 거더의 정적시험과 대칭거동 특성을 사용해 제조시 발생할 수 있는 콘크리트 충전 불량 결함을 탐지하기 위한 방법을 제안하였다. Roh *et al.*(2011)은 개발된 CFTA 거더에 차량이동하중이 작용할 경우 긴장재에 대한 영향을 유한요소해석을 통해 분석하였으며, 동적증폭계수(DAF)를 사용하여 동적 안정성을 검토하였다.

기존의 연구에서 CFTA 거더와 관련하여 정적 및 동적 안정성에 대한 다양한 검토가 이루어졌지만 대상 모델이 30 m 정도의 단경간 교량으로서 보다 실용성이 높은 중지간 교량으로 확장하기에는 한계가 있다. 특히 동적 안정성의 경우 동적 특성의 상이함으로 인해 추가적인 검토가 필수적이다. 또한 이러한 아치형 거더는 질량과 강성의 분포가 거더 길이방향으로 일정하지 않기 때문에 라이즈비에 따라 거더의 동적 특성이 달라지며 이는 곧 거더의 동적 응답에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 보다 경간이 긴 중지간 아치형 거더를 고려하였으며, 이 때 라이즈비가 동적응답에 어떤 영향을 주는지 유한요소해석(FEM)을 통해 분석하였다. 특히 차량진행 속도에 따른 거더의 동적응답과 거더의 고유주기의 상호관계를 분석하였다. 한편 기존의 CFTA 거더는 강판주형 안에 콘크리트가 충전된 개념이지만 본 연구에서는 충전된 형태가 아닌 일반적인 타이트 아치형 거더를 대상으로 동적 거동을 분석하였으며, 거더의 명칭도 ‘타이드 아치형 거더’라 명명하였다. 한편 노면의 조도나 단차는 모두 양호한 것으로 가정하여 별도로 고려하지 않았다.

2. 거더의 모델링 및 동적특성

2.1 타이트 아치형 거더의 모델링

Fig. 1은 단순 지지된 거더 주형과 바닥판(slab), 그리고 네 개의 외부 긴장재로 구성된 타이트 아치형 거더를 나타낸 것

이다. 여기서 외부 긴장재는 아치형 구조의 특성인 축력저항을 발현하기 위해 구성되며, 이 긴장재가 없을 경우에는 단면이 비선형인 단순보(Beam)와 같게 된다. 거더 하부의 아치 곡선은 일반적으로 Eq. (1)과 같이 2차 포물선 형상으로 표현된다.

$$y = \frac{1}{4p} \left(x - \frac{L}{2} \right)^2 + h \quad (1)$$

여기서 L 는 아치 곡선부 경간, h 는 거더의 형고(H_e)와 중앙부의 두께(H_m)의 차로써 아치 곡선 하단의 정점 부 높이를 나타내며, p 는 포물선의 형상을 결정하는 계수이다. 이 포물선 계수는 아치 곡선의 높이를 결정하는 라이즈비($f = h/L$)에 따라서 각각 달라지며, x 와 y 에 영(0)을 대입함으로써 결정할 수 있다.

본 연구에서는 타이트 아치형 거더의 동적 특성 및 거동 분석을 위해 기저모델(Reference Model)을 설정하였으며, 이는 중지간 거더로서, 총 거더 길이(L)는 50m, 바닥판을 제외한 거더 단부의 형고(H_e)는 2.8m, 거더 중앙부의 두께(H_m)는 1.12 m, 폭은 2 m, 그리고 바닥판의 폭과 두께는 각각 3.5 m, 0.28 m로 설계 되었다. 거더의 지점부는 Fig. 1(a)와 같이 거더 양 끝단으로부터 0.3 m 떨어진 부분에서 단순지지로 모델링 하였다. 또한 포물선 아치 곡선부 경간(L)은 45 m로 설정하였으며, 이에 따른 기저모델의 라이즈비는 0.037가 된다. 이 기저모델과의 응답비교를 위해 본 연구에서는 다양한 범위의 라이즈비를 고려하였으며, 이는 Table 1에 정리하였다. 이때 아치 곡선부 경간과 거더의 형고는 고정하였다. 유한요소해석에 사용한 거더의 물성치는 등방성 균일재료로서 일반적인 콘크리트 재료값인 탄성계수 29,000 MPa, 밀도 2,350 kg/m³, 포와송비 0.167를 적용하였다. 외부 긴장재는 강재 물성값을 적용하였으며 탄성계수 200,000 MPa, 밀도 8,000 kg/m³, 포와송비 0.3으로 모델링하였다.

타이드 아치형 거더의 수치해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, Fig. 2와 같이 3차원으로 모델링 하였다. 유한요소모델에서 거더 주형과 슬래브는 Solid 요소(C3D8)를 사용하였으며 일체 거동을 위해 Tie 조

Fig. 1. Geometry and Components of Tied-Arch Girder.

Fig. 2. Three-Dimensional FE Model of the Tied-arch Girder.

건을 적용하였다. 긴장재는 트러스 요소(T3D2)를 사용하였으며, 비부착 조건과 함께 거더의 양단에서 MPC Tie를 통해 Solid 요소와의 자유도를 공유하였으며, 긴장력은 프로그램에서 제공하는 initial stress 옵션을 통해 구현하였다.

또한 Figs. 1(b) and 2에서와 같이 본 연구에서 고려된 타이 드 아치형 거더에는 총 네 개의 덕트가 있으며, 여기에 정착된 긴장재 중 내부의 두 가닥은 시공단계에서 1차 긴장재로 작용하며, 외측의 두 가닥은 2차 긴장재로 작용한다(Kim *et al.*, 2010)). 1차 긴장재는 거더 주형의 자중에 의한 처짐을 제어하는 역할을 하며, 2차 긴장재는 바닥판 콘크리트 타설에 의해 발생하는 처짐을 제어하여 최종적인 거더의 솟음(camber)을 유지하는 역할을 한다. 본 연구에서는 Table 2와 같이 외부 긴장재의 긴장력을 이러한 시공순서에 맞춰 적용하였으며, 이에 따른 기저모델의 최종 솟음량은 2.75 mm로 나타났다.

한편 라이즈비를 Table 1과 같이 0부터 0.04까지 변화시킬 경우, 거더 자중은 약간 변화하게 된다. 이로 인해 긴장재의 초기 긴장력(차량진행 직전 단계에서의 긴장력)이 조금 변화하게 된다. 하지만 그 변화는 1차 내부 긴장재의 경우 항복응력의 46.11~49.49%, 2차 외부 긴장재의 경우는 항복응력의 36.85~40.30% 수준으로 매우 작게 나타났다. 또한 자중 및 차량하중에 따른 각 Model들의 처짐은 도로교설계기준(2010)의 허용처짐값을 만족한다.

Table 1. Rise Ratios and Corresponding Thickness at the Center of Girder

Model	A	B	C	D	R (Ref.)	E
Rise ratio, f	0	0.01	0.02	0.03	0.037	0.04
H_m (m)	2.80	2.35	1.90	1.45	1.12	1.00

Table 2. Cross-Sectional Area and Applied Prestressing Tendon Forces

Tendons	Cross-sectional area (mm ²)	Yield stress (MPa)	Applied prestress (MPa)	Ratio to yielding stress (%)
Exterior tendons	1,387.0	1,600	606	37.90
Interior tendons	7,767.8		754	47.13

Fig. 3. DB-24 Vehicle Load.

2.2 차량이동하중 모델링

본 연구에서 고려한 차량하중은 Fig. 3과 같은 DB-24를 적용하였으며, 속도에 따른 차량이동하중은 Roh *et al.*(2011)에서와 같이 시간에 따른 two-track (line) 3축 등가점진 이동하중으로 모델링하였다.

차량이동에 따른 거더의 동적거동을 분석하는 한 지표(Index)로 동적해석에 의한 최대응답과 최대 정적응답의 비가 있으며, 이를 동적증폭(Dynamic Amplification, DA)이라고 하고 Eq. (2)와 같이 정의된다(Wolff and Starossek, 2008).

$$DA = \frac{R_{dyn} - R_0}{R_{st} - R_0} - 1 \quad (2)$$

여기서 R_{dyn} 는 교량의 최대 동적응답이며, R_{st} 는 최대 정적응답, 그리고 R_0 는 차량 이동하중이 작용하기 전의 거더 자중에 의한 정적응답이다. 일반적으로 거더의 최대 정적응답은 차량하중의 중심이 거더의 중간지점에 재하되었을 때 발생하며, 이러한 경우 Fig. 3과 같이 차량하중의 중심이 중앙 축에서 후륜 축으로 1.4 m 떨어진 곳에 위치하게 된다. Eq. (2)에 사용되는 응답변수로는 변위, 변형률, 휨모멘트 등이 사용될 수 있으나 가장 대표적인 변수는 변위응답이며, 본 연구에서는 거더 중앙의 슬래브 윗면의 변위를 고려하였다.

3. 라이즈비에 따른 거더의 동적특성

차량이동하중에 의한 거더의 동적거동은 모드별 고유진동수에 의해 영향을 받게 되며, 이러한 고유진동수는 거더의 질량과 강성의 구성에 따라 달라진다. 즉, 본 연구에서 고려한 라이즈비에 따른 각 Model의 기본적인 동적 특성을 분석하기 위해 고유치 해석을 수행하였으며, 질량참여율이 99% 이상인 4차 수직모드까지의 결과를 Table 3에 나타내었다. 결과에서 확인할 수 있듯이 각 Model은 일반적인 거더에 비해 다소 유연한 구조로 분류할 수 있으며, 라이즈비가 증가함에 따라 고유진동수는 점점 작아진다. 이는 라이즈비 증가함에 따라 거더 중앙부의 단면 감소로 휨강성이 작아지고 동시에 질량도 감소되지만, 질량보다는 휨강성의 감소가 상대적으로 더 크게 발생하기 때문이다.

Table 3. Natural Frequencies (Hz) of Vertical Modes for Each Model

Model Index	A	B	C	D	R (Ref.)	E
Rise ratio, f	0	0.01	0.02	0.03	0.037	0.04
1 st Mode	2.08	1.84	1.60	1.37	1.20	1.15
2 nd Mode	7.67	7.00	6.25	5.42	4.73	4.47
3 rd Mode	12.96	12.84	12.49	11.73	10.82	10.41
4 th Mode	19.00	17.77	16.61	15.63	15.01	14.77

Fig. 4는 라이즈비 변화에 따른 1차 고유진동수 변화를 나타낸 것으로서 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 또한 라이즈비가 0.04 (Model E)인 경우 라이즈비가 0 (Model A)인 경우에 비해 1차 고유진동수가 약 45% 감소하였다.

Fig. 5는 라이즈비에 따른 각 모드 별 질량참여율을 나타낸 것이다. 모든 경우에 있어서 1차 모드의 질량참여율이 매우 크게 나타났으며, 이는 1차 모드가 거더의 동적거동을 지배함을 의미한다. 또한 질량참여율의 감소폭도 라이즈비에 따라 일정한(선형) 경향을 보였다. 한편 2차 모드 질량참여율의 경우 라이즈비가 달라지더라도 0.3% 미만으로 상당히 작게 나타났으며, 3차 모드의 경우 라이즈비가 증가함에 따라 0.03%에서 6.44%까지 변화하였다. Fig. 5를 바탕으로 분석한 결과,

Fig. 4. Variations of 1st Mode Frequency.

Fig. 5. Variations of Modal Mass Contribution.

Model A~C는 1차와 4차 모드가 거더의 동적거동에 영향을 주게 되고, Model D~E는 1차, 3차, 4차 모드가 영향을 주게 된다. 하지만 상대적으로 보면 모든 Model에 있어서 1차 모드의 질량참여율이 매우 높게 나타나므로 본 거더의 동적거동은 이 1차 모드에 의해 지배될 것으로 판단된다. 또한 각 Model에서의 1차 고유진동수의 차이는 차량이동하중의 조건이 동일하기 때문에 각 Model에서 동적거동의 차이를 발생시키는 원인이 된다.

4. 차량이동속도에 따른 거더의 동적거동

4.1 기저모델의 동적 변위응답

본 연구에서는 중앙부를 관찰지점으로 선택하였으며, 차량하중의 이동속도는 60, 80, 100, 120 km/hr인 경우를 고려하였다. 이에 따른 동적 변위응답을 Fig. 6에 나타냈다. 전반적으로 거더 중앙부의 최대 동적변위는 차량의 이동속도가 증가할수록 커지지만 속도가 80 km/hr인 경우에는 오히려 감소하였으며, 최대 동적변위가 최대 정적변위와 거의 같은 수준으로 나타났다. 또한, 차량 이동속도에 따른 차량하중의 무게중심이 거더의 중앙을 통과하는 시간은 60, 80, 100, 120 km/hr에 대해서 각각 1.84, 1.38, 1.10, 0.92초로 계산되지만 실제적인 최대 동적변위가 발생하는 시점은 Fig. 6에 나타난 바

Fig. 6. Dynamic Displacements at the Center of the Girder (Reference Model).

Fig. 7. Locations of Vehicle at the Maximum Dynamic Displacement (Reference Model).

와 같이 60 km/hr를 제외하고는 어느 정도 차이를 나타내게 된다. 이는 차량하중의 무게중심이 중앙부에 도달하기 전이나 후에 최대 동적변위가 발생함을 의미한다. 이때의 차량위치를 도식적으로 나타내면 Fig. 7과 같다. 점선으로 나타낸 것은 최대 정적변위가 발생할 때의 차량하중 중심의 위치를 나타낸 것이며, 실선으로 표현된 화살표는 거더 중앙부에서 최대 동적변위가 발생할 때의 차량의 위치를 나타낸 것이다. 차량의 이동속도가 80 km/hr와 100 km/hr인 경우, 최대 동적변위가 발생할 때의 차량 위치는 거더의 중앙부(최대 정적변위 발생 위치)에서 상대적으로 많이 벗어남을 알 수 있다. 또한 각 차량하중의 이동속도마다 최대 동적변위는 60 km/hr인 경우 -35.58 mm, 80 km/hr인 경우 -34.01 mm, 100 km/hr인 경우 -36.74 mm, 120 km/hr인 경우 -42.51 mm로 나타났다. 즉, 최대 동적변위가 발생할 때 차량하중 중심이 거더 중앙에서 가장 많이 벗어난 80 km/hr인 경우에는 차량하중의 이동속도에 비례해 최대 동적변위가 증가하기 보다는 상대적으로 작게 발생하며, 이러한 결과는 거더의 고유주기와 관계가 있다.

4.2 라이즈비(Model A~E)에 따른 동적증폭

Fig. 8은 라이즈비에 따른 거더의 동적증폭을 차량이동속도 80 km/hr와 120 km/hr에 대해 비교한 것이다. 차량이동속도 80 km/hr의 경우, Model A와 E에서는 동적증폭이 거의 0에 가깝게 나타나지만 Model C와 D에서는 소폭 증가하였다. 반면에 차량이동속도 120 km/hr에서는 이와 반대로 Model C에서 가장 낮은 동적증폭을 보였으며, Model A와 E에서는 80 km/hr인 경우에 비해 오히려 증가하였다.

Fig. 8과 같은 동적증폭 경향은 거더 중앙부의 동적 변위 응답과 1차 모드 고유주기(T_1 , sec)의 관계를 통해 설명할 수 있다. Fig. 9는 각 Model 별 차량이동속도에 따른 거더 중앙부에서의 자중에 의한 초기처짐을 배제한 동적 상대변위와 1차 모드 고유주기(T_1)를 나타낸 것이다. 일반적으로 거더 중앙부에서 동적 변위의 최대값이 발생하는 시점은 라이즈비

Fig. 8. Variations of Dynamic Amplification due to Rise Ratios and Vehicle speeds.

와 속도에 따라 각각 다르지만 주로 1차 모드 고유주기의 배수(nT_1)인 시점에서 나타난다(Huang, 2012). 예를 들면 Fig. 9에서와 같이 1차 모드 고유주기가 상대적으로 짧은 Model A, B, C의 경우 최대 동적변위는 $2T_1$ 와 $4T_1$ 사이에서 발생하지만, 고유주기가 상대적으로 긴 Model D, R, E의 경우 $1T_1$ 와 $3T_1$ 사이에서 발생한다.

본 연구에서는 차량이동하중으로 인한 거더의 최대 동적증폭 경향을 차량하중 중심의 중앙부 통과 시간과 최대 동적변위가 발생하는 시간, 그리고 1차 고유주기와 관계를 통해 분석하였다. 차량하중의 가진 특성은 차량하중 중심이 거더 중앙부를 통과할 때의 시간과 1차 고유주기와 비를 통해 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 본 논문에서는 이 비(n_c)를 중앙부 도달 시간비(Center arrival time ratio)라 명명한다.

$$n_c = \frac{t_c}{T_1}, \text{ 여기서 } t_c = L_c/v \quad (3)$$

여기서 L_c 는 거더 중앙까지의 거리이고, v 는 차량이동속도이다. 이와 더불어 거더 중앙에서 최대 동적변위가 발생하는 시간(t_{umax})과 1차 고유주기 비는 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 본 논문에서는 이 비(n_d)를 동적증폭 발생 시간비(DA development time ratio)라 명명한다.

$$n_d = \frac{t_{umax}}{T_1} \quad (4)$$

Eqs. (3) and (4)에 따르면 Model C의 120 km/hr인 경우 n_c 값은 1.47이고, n_d 값은 1.18이다. 이는 차량이 거더 중앙에 도달하기 전에 최대증폭이 발생함을 의미하며, 또한 최대 동적변위가 발생할 때 1차 모드 진동횟수는 1~2회 사이($1T_1 \sim 2T_1$)임을 알 수 있다. Model A의 80 km/hr에서는 n_c 와 n_d 값은 각각 2.86과 2.60으로 마찬가지로 중앙부 도달 전에 최대 동적증폭이 발생하며, 최대 변위 발생 시점은 $2T_1$ 와 $3T_1$ 사이에서 발생함을 의미한다. 만일 값이 보다 크면 최대 동적변위가 발생할 때 차량위치는 중앙부를 지난 지점에 있음을 나타낸다. 또한 차량 이동속도가 매우 느리면 n_c 값이 커지며, 이에 따라 동적효과가 미미해져서 최대 동적변위와 정적변위는 유사하게 나타나고 n_d 값과도 가까워진다.

Fig. 10은 라이즈비와 차량 이동속도에 따른 동적증폭(DA)을 나타낸 것이다. 라이즈비가 상대적으로 작은 Model A, B, C의 경우 전체적으로 10% 미만의 동적증폭이 발생하였다. 특히, Figs. 7(a)~(c)에서도 확인할 수 있듯이 60 km/h에서는 짧은 1차 고유주기로 인해 동적증폭 발생 시간비(n_d)는 3 이상의 값을 가지며, 이러한 경우 동적증폭은 1.53% 미만으로서 매우 낮게 나타난다. 라이즈비가 0.03 이상인 Model D, R, E의 경우 120 km/hr에서 비교적 큰 동적증폭이 발생하였지만 Model D의 100 km/hr와 Model R과 E의 80 km/hr의 경우 상당히 낮은 동적증폭이 나타났다. Fig. 10에서 확인할 수 있듯

(a) Model A

(b) Model B

(c) Model C

(d) Model D

(e) Model R

(f) Model E

Fig. 9. First Natural Period (sec) and Dynamic Displacement at the Center of the Girder.

Fig. 10. Effect of Vehicle Speeds on Dynamic Amplification of Each Model.

이 거더의 라이즈비를 달리한 각각의 Model에서 차량하중의 이동속도에 따라 동적증폭이 다양하게 나타나지만, 거더의 동적 안정성 평가를 위해서는 최대 동적증폭값을 고려하는 것이 보다 합리적이다.

Fig. 11은 라이즈비에 따른 거더의 최대 동적증폭(Max. DA)을 나타낸 것이며, 그림에 표시된 속도는 최대 동적증폭이 발생한 경우의 차량속도를 나타낸 것이다. 대부분 100 km/hr나 120 km/hr에서 최대 동적증폭이 발생하나 라이즈비가 0.02인 경우 이보다 낮은 80 km/hr에서 최대 동적증폭이 발생한다.

Fig. 11에 따르면 라이즈비가 0.02 이하일 때는 최대 동적증폭이 거의 일정하지만 라이즈비가 0.03 부터는 최대 동적증폭이 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 Fig. 11의 우측 세로축에

Fig. 11. Maximum Dynamic Amplification and DA Development Time Ratio.

표시된 Eq. (4)에 따른 동적증폭 발생 시간비를 통해서 확인할 수 있듯이 n_d 값이 정수에 가까워도 단일 배수인 1에 가까울수록 최대 동적증폭값이 커짐을 알 수 있다. 이는 거더의 라이즈비가 커져 유연해질수록 그리고 최대 동적응답 발생시간이 1차 고유주기에 가까울수록 최대 동적증폭값이 커짐을 의미한다.

즉, 이러한 거더의 동적증폭은 차량하중의 이동속도에 따라 상이하게 발생되며, 최대 동적증폭의 경우 거더의 유연도를 반영하는 1차 고유주기에 의해 달라짐을 동적증폭 발생 시간비(n_d)를 통해 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 라이즈비에 따른 타이드 아치형 거더에 대한 동적증폭 변화를 유한요소해석을 통해 분석하였다. 거더의 라이즈비를 증가시킬수록 고유진동수는 중앙부 휨강성의 감소 영향으로 인해 점점 작아졌으며, 이런 변화는 차량이동하중이 작용할 때 거더의 동적응답에 직접적인 영향을 줄 수 있었다. 라이즈비가 작은 Model A, B, C의 경우 전체적으로 10% 미만의 동적증폭이 발생하였으며, 60 km/hr에서는 1.53% 미만의 매우 낮은 동적증폭을 보였다. 라이즈비가 상대적으로 큰 Model D, R, E의 경우 120 km/hr에서 비교적 큰 동적증폭이 발생하였지만 Model D의 100 km/hr와 Model R과 E의 80 km/hr의 경우 상당히 낮은 동적증폭이 나타났다. 이러한 차이는 거더의 1차 모드 고유주기와 차량의 이동속도와의 상호관계로 결정된다. 최대 동적증폭값의 경우, 라이즈비 0.02 이하에서는 10% 수준으로 거의 같지만 라이즈비가 0.03 이상일 때는 최대 동적증폭이 크게 증가하였으며, 특히 라이즈비가 가장 큰 경우(Model E)에는 약 30%의 높은 동적

증폭을 보였다. 이는 유연한 거더 일수록 최대 동적증폭값이 커짐을 의미한다. 한편 최대 동적증폭 발생시간이 거더의 1차 고유주기에 가까울수록 최대 동적증폭값이 커짐을 알 수 있었다. 이러한 결과를 타이드 아치형 거더의 설계에 반영한다면 거더의 라이즈비는 0.02 이하가 좋고, 고유주기를 증가시킬수록 보다 높은 동적안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- ABAQUS (2007) *ABAQUS/CAE User's Manual*, Version 6.7, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I..
- Huang, D. (2012) Vehicle-induced Vibration of Steel Deck Arch Bridges and Analytical Methodology, *J. of Bridge Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 241-428.
- Kim, D., Alfahdawi, N., Cui, J., and Park, K.-H. (2012) Detection of Manufacturing Defects in Stiffness of CFTA Girder using Static Loading, *J. of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol. 25, No. 1, pp. 109-116
- Kim, J.-H. et al. (2010) *The development of new type of bridge girder system taking advantage of the efficiently composite structurizing of structural construction materials*. Korea Institute of Construction Technology (KICT).
- Kim, J.-I., Kim, D., Lee, J., and Kim, J.-H. (2009) Static Behavior of Concrete-Filled and Tied Steel Tubular Arch(CFTA) Girder, *J. of the Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol. 13, No. 3, pp. 225-231.
- Lee, H., Park, H., Lee, S.-Y., Park, K.-H., and Kong, J.-S. (2007) Analysis of Static Behavior of CFTA composite girder, *Proceedings of the Conference on Korean Society of Steel Construction (KSSC)*, pp. 514-517.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Design Code for Highway Bridge (in Korea)*. Korea Road & Transportation Association.
- Roh, H., Hong, S., Park, K.-H., and Lee, J.S. (2011) Effects of Post-Tensioning Tendons and Vehicle Speeds on Dynamic Response of Concrete-Filled Steel Tubular Tied Arch Girder, *J. of the Korea Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 31, No. 3A, pp. 163-172.
- Wolff, M., and Starossek, U. (2008) Robustness Assessment of a Cable-stayed Bridge, *Proceedings of the 4th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, Seoul, Korea, pp. 690.

Received	August 25, 2014
Revised	August 26, 2014
Accepted	September 22, 2014