

이동차량 및 PT 텐던 영향에 따른 CFTA 거더의 동적증폭계수 비교

Dynamic Amplification Factor of Concrete-Filled Tubular Arch (CFTA) Girder due to the Effects of Moving Vehicles and PT Tendons

노 화 성* · 홍 상 현** · 이 상 윤*** · 박 경 훈**** · 이 종 세*****

Roh, Hwasung · Hong, Sanghyun · Lee, Sangyun · Park, Kyunghoon · Lee, Jong Seh

요 약

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 차량속도 및 긴장재의 설계에 따른 CFTA 거더의 동적거동 및 동적증폭계수를 분석하였다. 긴장재의 해석변수로서는 긴장재의 양과 긴장력을 고려하였으며 차량하중은 도로교설계기준의 DB-24 하중을 선택하였다. 차량하중은 3축-2트랙에 작용하는 등가질점하중으로 변환하여 속도에 따라 시간함수로 모델링하였다. 긴장재의 양은 외측 및 내측 덕트의 유무에 따라 변화시켰으며 긴장력은 설계긴장력의 0%에서 100%까지 25%씩 증가시켰다. 차량속도는 40km/hr에서 100km/hr까지 20km/hr씩 증가시켰으며, 해석결과 긴장재의 긴장력 변화는 거더의 동적거동에 영향을 주지 않았으며 초기치짐에만 영향을 주었다. 긴장재의 양에 따라서는 거더의 동적거동이 다르게 나타났으며 긴장재의 양이 적을 수록 동적치짐은 증가하였다. 이를 바탕으로 거더의 동적증폭계수(DAF)를 산출하였으며, 이 결과 긴장재가 없는 경우에도 도로교표준시방서에서 정한 기준 값보다 매우 작은 거동을 보였다.

keywords : CFTA 거더, 동적증폭계수, 긴장량, 긴장력, 차량속도

1. 서 론

CFTA(Concrete-Filled Tubular Arch) 거더는 폐단면의 강재를 주체로 충전콘크리트를 일체화시킨 합성구조이다. 이 CFTA 거더는 최근 몇 년 동안 정/동적 거동 및 안정성에 관한 많은 연구가 수행되어왔다 (김정호 등, 2009). CFTA 거더는 그림 1과 같이 질량이 중앙부보다 지점부에 상대적으로 집중되어 지간 중앙부의 가속도 응답은 작게 나타나므로 동적가속도응답에 유리한 구조형식으로 알려져 있다 (김정호 등, 2009).

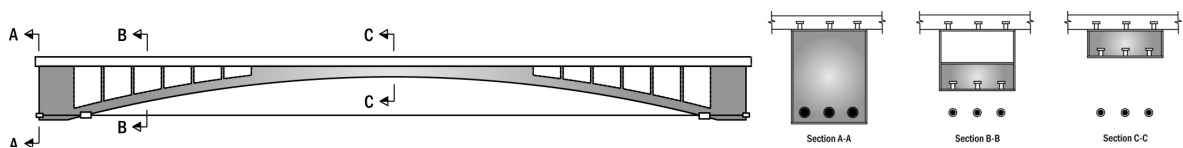


그림 1 CFTA 거더의 형상

하지만 강성의 분포는 중앙부가 상대적으로 다른 지점부에 비해 작아서 변위응답에는 취약할 수 있는 구조

* 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 연구교수 marsroh@hanyang.ac.kr
 ** 학생회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 jerom1st@hanyang.ac.kr
 *** 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 전임연구원 sylee@kict.re.kr
 **** 한국건설기술연구원 기반시설연구본부 수석연구원 paul@kict.re.kr
 ***** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 jonglee@hanyang.ac.kr

이며 긴장재를 통해 이러한 처짐을 제어하고 있다. CFTA 거더에서의 긴장재는 동적응답측면에서 다음과 같은 2가지 기능을 갖는다: i) 긴장재 양에 따른 거더의 강성변화: 긴장재가 구조부재로서 기능하게 되므로 긴장재 양은 거더의 동적거동에 영향을 줌 (박호 등, 2007), ii) 긴장력 정도에 따른 외력변화: 가해진 긴장력은 동적거동에 있어 외력으로 작용하여 동적처짐 및 가속도응답에 영향을 줌. 따라서 본 연구에서는 개발된 CFTA 거더에 차량이 통과할 때 긴장재 양과 긴장력을 변화시켜 동적거동을 보다 상세히 분석하였다.

2. CFTA 거더의 FEM 동적 모델링

본 연구에서는 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였으며 고려된 CFTA 거더는 경간 30.6m, 폭 3.5m에 단순지지조건이며, 구성요소는 강재주형, 내부충진 콘크리트, 슬래브 콘크리트, 슬래브 철근, 긴장재로 되어 있다. 강재주형은 4절점 쉘 요소(S4), 내부충진 콘크리트와 슬래브 콘크리트는 8절점 솔리드 요소(C3D8), 그리고 슬래브 철근과 긴장재는 트러스 요소(T3D2)로 모델링 하였으며 총 48,960개의 요소를 사용하였다. 각각의 구성요소는 시공단계를 거친 후 일체거동을 하므로 슬래브 철근은 embed, 나머지 구성요소는 절점공유(tie)를 통하여 경계면을 모델링 하였으며, 긴장재의 긴장력은 트러스 요소에 initial stress를 작용함으로써 구현하였다.

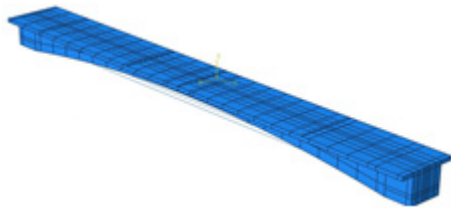


그림 2 CFTA 거더의 FEM 모델 (이학 등, 2007)

표 1 모델에 사용된 재원

	Mass density (ton/mm ³)	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson ratio
Steel	7.85E-09	210,000	0.3
Concrete	2.32E-09	29,000	0.167
Tendon	8.00E-09	200,000	0.3
Damping	2 %		

3. 이동하중의 모델링

본 연구에서 고려한 차량은 DB-24차량이며 중앙축과 후륜축 간격을 4.2m로 선정하였다. 이동하는 차량은 시간함수법으로 모델링하였다. 이는 차량하중을 그림 3(a)와 같이 등가절점하중으로 치환하여 속도에 따라 각 절점에 삼각형 형태의 impulse를 작용시켜 동적효과를 나타내는 모델링 방법이다(Brady 등, 2006). 그림 3(b)는 차량진행에 따른 등가절점하중을 3축-2트랙 모델로 나타낸 것이다.

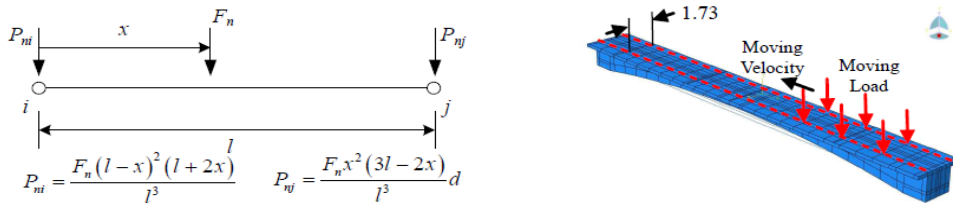


그림 3 차량모델링: (a) 등가절점하중, (b) 3축-2트랙 모델

4. 긴장재 조건에 따른 동적응답

4.1. 긴장재의 양 변화

CFTA 거더에 이동하중이 작용할 때 긴장재 양에 따른 동적거동을 분석하기 위해 다음과 같은 총 네 가지 조건을 설정하였다: Case 1: 긴장재 모두 적용된 상태; Case 2: 내부 긴장재만 존재; Case 3: 내부/외부

긴장재 하나씩 제거된 상태; Case 4: 긴장재가 없는 상태. 차량이동 속도는 100km/hr인 경우를 고려하였으며, 이에 따른 결과를 그림 4에 나타내었다. 30.6m의 길이를 가지는 CFTA 거더는 약 1.4초 이후에는 자유진동으로 거동하며, 긴장재 양이 적을수록 동적변위응답은 크게 나타났다. 이러한 결과는 긴장재의 양이 거더의 강성과 연결되어 있기 때문이다. 한편 40km/hr, 60km/hr, 80km/hr 의 경우에 대해서도 해석을 수행하였으며 그 결과 거더 중앙부에서의 동적상대변위가 점점 작게 나타났다.

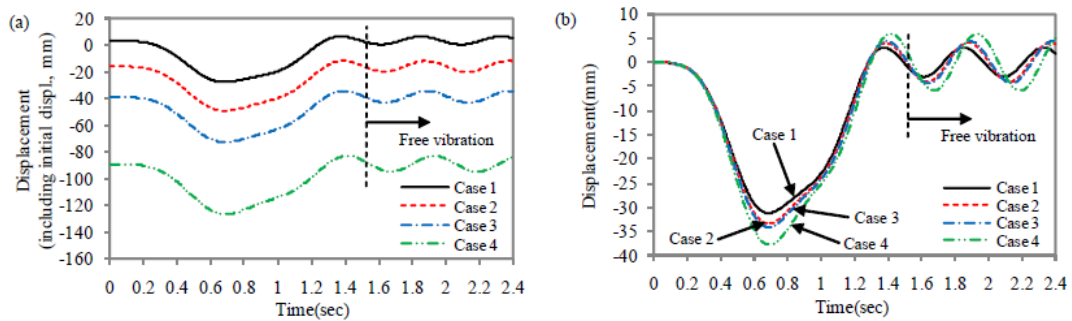


그림 4 긴장재 양에 따른 거더 중앙부에서의 동적변위 (V=100km/hr): (a) 초기 정적변위 포함 (절대변위), (b) 초기 정적변위 제외 (상대변위)

4.2. 긴장력의 변화

긴장재의 설계긴장력을 100%로 하여 75%, 50%, 25%, 그리고 0%로 변화시켜 각각 Case 1, 5, 6, 7, 8로 분류하였으며, 차량속도에 따라 Model A, B, C, D로 하였다. 긴장력과 차량속도의 조합은 각 Model에서 Case 1, 5, 6, 7, 8을 적용시켜 구성하였다. 그림 5는 각각의 Model에 대한 Case 1과 Case 8의 결과를 나타낸 것이며 정적초기변위는 긴장력 정도에 따라 다르게 나타나지만 차량이동에 따른 증가되는 동적응답은 일정한 속도하에서 같음을 알 수 있다. 이는 긴장력 방향이 거더의 진동방향과 직각으로 작용하기 때문이다.

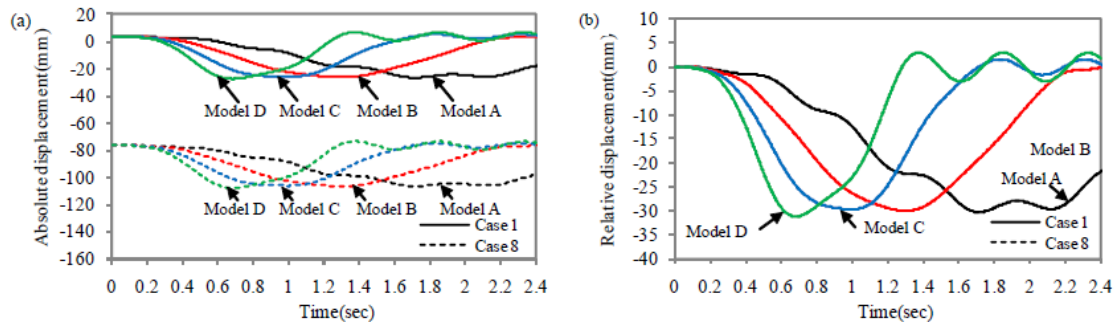


그림 5 Model A, B, C, D-Case 1과 Case 8의 거더 중앙에서의 동적변위: (a) 절대변위, (b) 상대변위

5. 동적 증폭 계수 (Dynamic Amplification Factor)

동적증폭계수(DAF)는 동적해석에서의 최대변위응답과 정적해석을 통한 최대변위의 비율로 나타낸 계수이며 다음과 같이 나타낸다: $DAF=1+DA$, $DA=(R_{dyn}-R_0)/(R_{st}-R_0)-1$. 여기에서 DA는 동적증폭이며 R_{dyn} 와 R_{st} 는 교량의 최대 동적 및 최대 정적 응답, R_0 는 초기 정적응답이다. 응답에는 일반적으로 최대변위 또는 변형률, 모멘트 등이 사용될 수 있으며 본 연구에서는 최대변위응답을 고려하였다. AASHTO Standard Spec.(1996)과 AASHTO LRFD(1998)에서는 이 동적증폭계수를 동적허용하중(DLA)으로 명명하고 있으며, 도로교설계기준(2005)에서는 충격계수로 불리고 있다. AASHTO Standard DLA 기준은 $50/(L+125)$ 로 계산되고 이때 교량 경간길이 L의 단위는 ft이며 계산된 DLA값이 0.3(또는 30%)을 넘지 않아야 한다. 이와 유사하게 도로교설계

기준(2005)에서는 이 관계식은 $15/(L+40)$ 이며 이때 단위는 m이다. 이 계산치도 0.3(또는 30%)을 넘지 않아야 한다. AASHTO LRFD(1998)에서는 일괄적으로 0.33(또는 33%)까지 허용한다. 본 연구에서는 4.2장에서 보듯이 긴장력에 따른 거더의 동적거동에는 변화가 거의 없었으므로 증폭계산에 고려하지 않았으며 (Case 1과 동일) 그림 4를 바탕으로 긴장재 양과 차량속도 변화에 따른 동적증폭계수를 표 2에 나타내었다. 이 결과, 100km/hr 속도에서 긴장재의 양에 따른 거더의 동적증폭계수는 1.112 에서 1.064 까지 비교적 낮게 나타났다. 한편 40km/hr~80km/hr 속도에서도 증폭계수가 1.05 미만으로 나타났다.

표 2 동적증폭계수 비교 (V=100km/hr)

Case	Description	Initial displ. (R ₀ , mm)	Static	Dynamic	DAF	DLA (%)	도로교 Ch. 2.1.4 I (%)	AASHTO Standard Spec. Article 3.8.2 DLA (%)	AASHTO LRFD Sec. 3.6.2 DLA (%)
			Displ. (R _{st} , mm)	Displ. (R _{dyn} , mm)					
Case 1	Full tendons	3.843	-25.493	-27.365	1.064	6.4	21	22	33
Case 2	Only interior tendons	-15.575	-46.514	-48.996	1.080	8.0			
Case 3	Asymmetry tendons	-38.492	-69.931	-72.619	1.085	8.5			
Case 4	No tendons	-88.767	-122.701	-126.492	1.112	11.2			

6. 결론

본 연구에서는 긴장재 양과 긴장력, 그리고 차량이동속도에 따른 거더의 동적응답을 분석하였다. 긴장재 양과 긴장력 및 차량(DB-24)의 속도를 조합하여 다양한 경우들에 대해 FEM 해석을 수행하였다. 해석 결과 긴장력을 변화시켜도 거더의 동적변위응답(상대변위)은 같았으며 단지 초기 camber만 달라졌다. 하지만 긴장재 양을 달리할 경우 동적변위응답은 다르게 나타났으며, 긴장재의 양이 적을수록 그 응답은 크게 나타났다. 동적증폭계수는 긴장재가 없는 경우 1.112, 긴장재가 모두 존재하는 경우 1.064로 나타났다. 이 두 값은 한국 도로교와 AASHTO LRFD에서 규정하는 한계점인 1.21과 1.33보다 아래에 있어 안정적인 거동을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 신형식 거더 실용화사업 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2005), **도로교설계기준**, 한국도로교통협회.
- 김정호 등 (2009) **건설구조재료의 효율적 복합구조화를 통한 신형식 교량용 거더 시스템 개발**. 최종보고서, 국토해양부 건설기술혁신사업 R&D/06건설핵심D14, 한국건설기술연구원.
- 박호, 이은호, 박경훈, 박명균, 황윤국 (2007) 외부긴장재를 갖는 콘크리트 충전 강합성 아치거더 교량의 설계. **2007년도 한국강구조학회 학술발표회 논문집**, 한국강구조학회, pp. 552-557.
- 이학, 이상윤, 박경훈, 공정식 (2007) CFTA 거더의 선형 거동에 관한 연구. **2007년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 4016-4019.
- AASHTO (1996) *Standard specifications for highway bridges*. 14th ed., The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO (1998) *LRFD bridge design specifications*. 2nd ed., The American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Brady, S.P., O'Brien, E.J. and Znidaric, A. (2006) Effect of vehicle velocity on the dynamic amplification of a vehicle crossing a simply supported bridge. *J. of Bridge Engrg.*, 11(2), pp. 241-249.