

사장교형식 보도교의 보행진동제어를 위한 TMD 적용 Application of Tuned Mass Damper to Suppress Man-Induced Vibrations of Cable Stayed Foot-bridge

김윤석¹⁾·이승우²⁾·김재민³⁾·장성규⁴⁾
Kim, Yun-Seok·Lee, Seung-Woo·Kim, Jae-Min·Chang, Seong-Kyu

본 연구에서는 중앙경간 54m, 교폭 4m의 사장교형식의 보도교로 측경간은 계단으로 이루어진 1경간 케이블교량을 대상으로 보행하중에 의한 수직진동을 제어하기 위해 제진장치(TMD)를 적용하기로 하고 실물 TMD의 설계 및 제작 그리고 설치 및 제어성능실험을 수행하였다. 우선 사장교형식의 교량. 그리고 1경간 교량이라는 점에서 상대적으로 감쇠율이 낮을 것으로 예측되었고 또한 54m의 경간장이 보행자가 가진 주파수에 근접한 고유진동수를 나타낼 것으로 사료되어 Eurocode 2 part 2(EC5-2)의 규준에 따라 1인 및 다수 보행하중에 의한 보도교의 발생가속도를 산출하였다. 이 경우 최대가속도는 다수의 보행자가 연속적으로 진행할 때 발생하였으며, 수직방향의 가속도가 사용성기준을 초과하는 것으로 나타났다. 또한 구조해석프로그램에 의한 고유치 해석결과, 보행하중의 주파수대역내에 진동모드가 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 본 교량의 설계단계에 있어서 보행진동을 제어하기 위하여 유지관리가 용이한 수동형의 동조질량감쇠장치(Tuned Mass Damper)를 적용하기로 하였으며 TMD의 설계에서는 TMD의 제어목표를 만족시킬 수 있는 TMD의 가동질량(moving mass)을 우선적으로 결정하였고, 이로부터 Den Hartog의 제안식에 따라 TMD의 고유진동수비, 유효감쇠비를 산정하였다. 산정된 변수들을 이용하여 설계된 TMD는 현장설치 및 튜닝의 편의성을 고려하여 수평외팔보형식으로 설계, 제작되었으며 제작된 TMD의 경우 회전축에 대해 질량, 스프링, 댐퍼의 중심거리를 조정함으로써 TMD의 진동수, 강성, 감쇠력을 상대적으로 매우 용이하게 조절할 수 있으며, 조정범위 또한 광범위하여 일반 TMD에 비해 현장설치시 대상구조물에 동조시키기가 용이하며, 작동시 마찰감쇠가 거의 없다는 장점이 있다.

현장설치전에 제작된 TMD를 대상으로 자유진동 시험을 통하여 질량의 중심거리, 스프링 크기 그리고 댐퍼의 설치유무를 각각 변화시키며 TMD의 자유진동 데이터를 취득하였다. 각각의 시험에서 얻어진 데이터로부터 스펙트럼해석을 통하여 고유진동수를 구하였고, 자유진동 파형으로 부터 감쇠비를 구하였다.

TMD는 일반적으로 제어모드의 변형형상이 가장 큰 곳에 설치되었을 때 최대의 제진효과를 발휘할 수 있다. 그러나 현장여건상 설치가 불가능하거나 미관을 해치는 경우에는 가능한 범위 내에서 TMD 제어효율이 가장 크게 발휘할 수 있는 곳을 선택하여야 한다. 본 보도교의 경우, 중앙경간 중심부에서 가장 큰 모드변형형상을 나타내지만, 보도교의 상판 연결부 등에 따른 TMD 시공문제로 인하여 TMD 설치위치는 교량 중앙에서 양 방향으로 1.25m 떨어진 곳에 대칭으로 총 2기를 설치하기로 하였다.

일반적으로 TMD의 모든 설계변수는 구조물의 설계단계에서 수행된 구조해석결과에 근거하여 설정하므로 완공된 구조물, 즉 실제보도교의 동적특성을 계측하여 정확하게 진동수를 튜닝하여야 한다. 구조해석에 의한 보도교의 수직방향(TMD 작동방향) 고유진동수는 1.5225 Hz이며, 감쇠비는 규준에 의하여 0.6 %로 가정하였다. 그러나 이 값들은 구조해석모델 및 재료적 특성과 시공상의 오차에 의하여 실제와 다를 수 있으므로 현장계측에 의한 확인이 요구된다. 또한 TMD의 제진효율이 설계시의 목표대로 확보되었는지도 확인해야 하므로 현장튜닝 및 성능시험을 실시하였다. 보도교의 가진은 사전에 실시한 상시 미진동계측결과를 토대로 2Hz를 목표로 하여 인력가진실험을 수행하였고, 탁월진동 주파수는 1.9896Hz로 나타나 구조해석결과와 오차가 있음을 알 수 있다.

가진실험결과를 토대로 TMD의 진동수를 최적진동수비로 튜닝하고 인력가진 실험을 다시 실시하여 TMD의 진동제어 성능을 검토하였다. TMD 튜닝 전, 후의 보도교 감쇠비를 비교한 결과, TMD를 설치함으로써 약 4.218%의 감쇠비 증가가 있음을 알 수 있다.

핵심용어 : 보도교, 제진장치, 진동제어, TMD, Vibration Control

1) (주)티이솔루션 대표이사·(E-mail : yskim@tesolution.com)
2) 정회원, (주)티이솔루션 부장(교신저자)
3) (주)티이솔루션 과장
4) (주)티이솔루션 과장