교각일체형 연속 PSC 거더교의 동적거동 특성 연구

A Study on the Characteristics of Dynamic Behaviors for Continuous PSC Girder Bridges with Integral Pier Cap

정 영 도^{1)*} 구 민 세²⁾ 이 성 태³⁾ 김 희 성⁴⁾
Jeong, Young Do Koo, Min Se Yi, Seong Tae Kim, Hee Sung

Abstract

Recently, the construction industry has been changed in such a way that the cost for bridge construction should be optimized or reduced. Therefore, bridges are required be cost-effective in terms of initial construction as well as in the maintenance during service stage. In order to reduce the cost for bridge construction, the Rahmen typed structure, in which the bridge components from superstructure to substructure are integral, has many advantages to reduce the size of structural members including girders, since the loadings from superstructure may be transferred to substructure through the connecting rebars such as stud, etc. This paper studied on the continuous Up and Down Prestressed Concrete (UD PSC) girder bridge in which the reinforced concrete pier cap is integral with the part of girders in superstructure. In previous studies, it is known that the structural behavior of continuous UD PSC girder bridge is quite different compared to the one of the bridges with conventional bearings or shoes to support the loading from girders. Nevertheless, it has hardly been studied about the structural behavior of bridge with UD PSC girder. Therefore, in this study, various dynamic behaviors of continuous UD PSC girder bridge with integral pier cap have been analyzed using numerical method. Furthermore, an equation to evaluate the impact factor is suggested for the UD PSC girder bridge which has two to three continuous spans.

Keywords : Integral pier cap bridge, Dynamic behaviors, Time history analysis, Impact factor, Speed parameter

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(PSC) 부재는 1960년대 초 국내에서 처음 사용되었고 철근콘크리트 보에 비해 단면 감소 효과가 있어 경제적 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 국내 토목현장에서는 설계압축강도가 35~45 MPa 인 콘크리트로 제작되어 주로 20~45m 지간의 교량공사에 많이 사용되고 있다.

PSC 보를 이용한 거더교는 대부분이 단경간 형식으로 시공되고 있으며 다경간 교량에 사용할 때에는 지간의 연결부를 신축이음장치로 처리하여 시공한다. 이러한 시공

은 교좌장치와 신축이음장치의 개수가 많아지며 차량의 주행감이 나빠지고 장치의 파손으로 인한 누수 등으로 지속적인 보수 및 유지관리를 해야 한다. 연속형교의 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 PSC 보를 연속화하는 방법들이 개발되어 사용되고 있다. 연속화 방법을 크게 두 가지로 나누면 PSC 보를 가로보와 바닥판만으로 연속 처리하여 시공하는 방법과 바닥판과 보를 동시에 연속화 하는 방법으로 나눌 수 있다.

여러 PSC 연속화 공법들 중 지점 상승 및 하강을 이용한 PSC 거더교(이하 연속 UD(Up & Down) PSC 거더교)는 바닥판과 보를 동시에 연속화하는 방법 중의 하나

1) 정회원, (주)포스코건설 R&D Center 기술연구소 과장, 교신저자
2) 정회원, 인하대학교 토목공학과 명예교수
3) 정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수
4) 정회원, 동서대학교 건축토목공학부 토목공학전공 교수

* Corresponding author : jyd@poscoenc.com 032-200-2210

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이다. 이 방법은 보와 바닥판의 전 구간 콘크리트에 선압축력을 도입하기 위해 지점의 상승 및 하강의 방법을 사용한다. 이러한 연속 UD PSC 거더교는 내측 지점부의 바닥판에 선압축력을 도입하여 바닥판 콘크리트에 인장응력이 발생하지 않게 됨으로 사용성과 내구성이 우수하고, 형하공간 확보차원에서 중요한 형고를 상당히 줄일 수 있는 PSC 연속화 공법이다(Kim, 2004 : Kim, 2009).

건설환경의 지속적인 변화로 인하여 교량 건설비용의 최소화뿐만 아니라 공용기간중의 유지관리를 포함한 전체 비용의 최소화 및 최적화의 요구가 증가하고 있다. 이러한 이유로 상부구조에서 하부구조로 힘을 전달하기 위해 사용되는 교량받침 대신에 스티드나 연결철근 등과 같은 연결재를 사용하여 상부구조와 하부구조를 라멘식으로 일체화 시킨 교량형식이 제시되고 있다. 그 중 상부구조 형식을 위에서 설명한 연속 UD PSC 거더로 하여 철근 콘크리트 교각과 일체화 시킨 교각일체형 연속 UD PSC 거더교가 개발되었다. 이 교량공법은 연속 UD PSC 거더교의 장점과 라멘교의 장점을 결합한 형식으로 내측지점의 상승 및 하강을 통해 부모멘트에 대응하는 압축력을 바닥판 콘크리트에 도입시키고, 하부 구조물인 철근 콘크리트 교각과 상부 구조물을 일체화시켜 구조물의 안정성 및 내진성을 향상시키며 교대와는 일반지지 형식을 유지함으로써 토압 하중을 상부구조물에 영향을 주지 않도록 한 시스템의 교량이다.

교각일체형 연속 UD PSC 거더교는 라멘교 형식과 거더교 형식을 결합한 교량으로 그 거동특성이 일반 받침형식의 교량과는 다르며 교각일체형 교량에 대한 동적거동 연구가 전무한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 해석적 방법을 이용하여 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적거동 특성을 분석하였고 2·3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교에 적용할 수 있는 충격계수 산정식을 제시하였다.

2. 교각일체형 연속 UD PSC 거더교

2.1 공법개요

교각일체형 연속 UD PSC 거더교는 내측지점의 상승·하강을 이용하여 거더와 바닥판에 선압축응력을 도입한 후 상부주형과 철근콘크리트 교각을 일체화한 라멘구조형식의 연속교량이다. 기존의 연속 UD PSC 거더교와

Fig. 1 Concept of support type and rahmen type

는 달리 교각일체형 연속 UD PSC 거더교는 상부구조에 작용하는 하중을 하부구조에 전달하기 위해 교량받침을 사용하는 대신 연결철근 등을 사용하여 상부주형과 철근 콘크리트의 교각을 강결구조로 일체화 시킨다. Fig. 1은 받침구조 형식과 라멘구조 형식의 개념도를 나타낸다.

교각일체형 연속 UD PSC 거더교는 기존의 받침형식의 연속 UD PSC 거더교에 비해 다음과 같은 큰 특징을 가지고 있다.

- 1) 교각부에 교량받침이 불필요한 구조로서 초기 공사비가 절감되고 유지관리가 용이하다.
- 2) 상부의 주형과 하부의 교각을 강결함으로써 구조체로서의 부정정차수가 높아지고 내진성능이 향상되며 낙교방지 장치를 생략할 수 있다.
- 3) 교각 및 강결부의 정밀시공을 요하며 강결부의 콘크리트 타설시 밀실하게 채울 수 있는 자기충진형 고유동 콘크리트 타설이 필요하다.

2.2 시공방법

2경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 시공방법은 내측지점의 상승 및 하강을 이용하고 상부주형과 철근콘크리트 교각을 일체화하는 시공방법으로 Fig. 2는 시공순서도를 나타낸다. 3경간의 경우에도 동일한 방법으로 시공된다.

Fig. 2(a)는 현장의 제작장 또는 공장에서 제작된 PSC 거더를 교좌장치가 설치된 외측지점부인 2개의 교대와 교좌장치가 설치되어 있지 않은 내측지점부인 1개의 교각에 설치해 놓고 서로의 거더를 교각 위에서 연결한 상태이다. Fig. 2(b)는 연결된 거더를 교각 위에서 상승시킨 공정을 나타내고, Fig. 2(c)는 상승된 거더를 교각 위에서 거치고임체에 의해 안전하게 상승 상태를 유지시키고, 슬래브 콘크리트를 거더 위 전구간에 걸쳐 타설하는 공정을 나타낸 것이다. 타설된 슬래브 콘크리트를 충분히 양생시킨 후 상승시킨 거더를 하강시키는 공정은 Fig. 2(d)에 나타내었다. 그 후 교각과 상부 거더를 Fig.

Fig. 2 Construction process

3과 4에 나타난 방법과 같이 연결시키고 마지막으로 연결부 보호 콘크리트를 추가로 타설함으로써 상부 거더 구조물과 하부 교각의 완전한 일체화를 이루게 한다(Fig. 2(e) 참조).

2.3 상부거더와 교각의 연결방법

Fig. 3은 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 외측 거더 부분의 교각과 상부거더 연결부 형상 및 시공순서를 나타내고 Fig. 4는 내측 거더 부분의 연결부 형상을 보여 준다.

교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 상부거더와 교각의 연결부 시공과정을 살펴보면 먼저 교각의 코핑면에 미리 설치된 받침형강(support steel) 위에 제작된 PSC 거더를 Fig. 3(a)와 같이 거치한다. Fig. 3(b)는 슬래브 콘크리트 타설 및 내측지점 하강 후 PSC 거더의 하면에 설치된 연결플레이트(connection plate)와 교각 코핑을 철근 A, B, C (rebar A, B, C)체결에 의해 연결하는 그림을 나타낸다. 마지막으로 Fig. 3(c)는 상부구조와 교각을 연결철근(connection rebar)에 의해 연결한 후 연결철근과 연결플레이트를 보호하기 위해 연결부 보호 콘크리트(connection concrete)가 타설된 상태를 나타낸다. 연결철근 및 받침형강은 교각의 코핑 안으로 묻혀 있는 상태이다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 교각일체형 연속 UD PSC 거더교에서 상부구조와 교각의 일체거동을 도모하는 주요인자는 연결철근에 의한 연결이다. 상부구조와 교각연

(a) setting PSC girder

(b) install the connection rebar

(c) connection concrete pouring

Fig. 3 Concept of connection part at outer girder

Fig. 4 Concept of connection part at inner girder

결부에 작용하는 힘을 Fig. 3, Fig. 4와 같이 설치된 연결철근이 모두 부담하는 것으로 설계한다. 실제 연결부에는 교각에서 수직으로 나와 있는 철근과 거더에서 수평으로 나와 있는 철근을 겹침이음 길이 규정에 맞게 연결하여

배근되어 있다(Fig. 3 및 4에서 철근 A 참조). 또한 Fig. 3 및 4에서 철근 B는 연결철근의 인발저항 성능을 보장하는 역할을 한다. 연결부에 작용하는 단면력에 대하여 연결철근이 인장력과 지압에 안전하게 설계된다.

3. 동적거동 분석을 위한 수치해석

본 연구대상인 교각일체형 연속 UD PSC 거더교는 상부주형과 교각을 일체화한 라멘구조형식의 연속교량으로 상부구조에 작용하는 하중을 하부구조에 전달하기 위해 교량받침을 사용하는 대신 연결강봉 등을 사용하여 상부주형과 철근콘크리트의 교각을 강결구조로 일체화시킨 신형식의 복합교량이다. 이러한 교량 형식에 대한 동적거동 연구가 전무한 상태이므로 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적거동을 분석하였다.

3.1 해석상의 가정

도로교에 발생하는 동적응답은 차량의 동적특성, 교량의 동적특성 및 교량의 노면조도 등 여러 가지 요소의 영향을 받는다. 이와 같이 다양한 요소에 의한 도로교의 동적응답을 정확하게 파악하기가 어렵기 때문에 현행 도로교설계기준에서는 충격계수를 규정하여 동적특성을 설계에 반영하고 있다. 따라서 본 연구에서는 교각일체형 연속 UD PSC 거더교를 대상으로 Table 1에 나타낸 경간별(2경간, 3경간, 지간길이, 교각높이, 차량속도 등의 다양한 변수를 적용하여 여러 가지 모델에 대한 유한요소 해석을 수행한 후 충격계수를 산정하였다. 그리고 충격계수가 여러 변수에 따라 어떤 경향을 나타내는지를 밝혀 교각일체형 UD PSC 거더교의 충격계수식을 제안하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구에 적용된 동적해석은 다음과 같은 가정을 근거로 해석하였다.

Table 1 Variables for analysis

variables	
span	2 span, 3 span
span length(m)	25, 30, 35, 40, 45, 50
pier height (m)	10, 15, 20, 25, 30
vehicle speed (km/hr)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120
condition of vehicle load	3 lane

- (1) 교량 바닥판의 상태는 평탄하다. 즉 조도계수를 고려하지 않는다.
- (2) 교량의 감쇠율은 PSC 교량에서 일반적으로 사용하는 0.3%~1.6% 사이의 값인 1%로 한다(Jeong, 2002).
- (3) 교량 내부지점의 거더와 거더사이 연결부 그리고 거더와 교각의 연결부는 완전 일체화 된 것으로 가정한다.
- (4) 차량-교량 상호작용의 영향은 고려하지 않는다.
- (5) 차량의 속도는 주행 중 일정하다.

3.2 모델링

교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적거동을 분석하기 위해 선정된 해석교량은 정적거동 분석에 사용된 교량을 대상으로 하고 차량은 현행 도로교설계기준에서 제시하는 DB-24 하중을 적용하였다. 동적해석은 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 사용하여 시간이력해석을 수행하였다.

3.2.1 해석교량의 모델링

Fig. 5는 해석교량의 횡단면도를 나타낸다. 거더 간격 2,750mm는 현재 PSC 연속교량의 설계에 가장 많이 쓰이는 간격이며 차량하중의 3차선 재하가 가능한 10,110mm의 교폭을 적용하였다. H_1 은 거더의 높이, H_2 는 교각기둥의 높이 그리고 D 는 교각기둥의 지름을 나타낸다. Fig. 5에서 거더의 코핑부 매입깊이는 안정적인 거동을 위해 거더의 중립축까지로 하였다.

거더의 높이 H_1 은 일반 받침형식의 UD PSC 거더교의 표준단면의 값이며 Fig. 6에서 나타내는 값을 가진다. 교

Fig. 5 Cross section of bridge

각높이 H_2 는 교각일체형 UD PSC 거더교의 교각높이에 따른 동적거동 분석을 위한 변수로 실제 연속 PSC 거더교에 많이 적용되고 있는 10m, 15m, 20m, 25m, 30m로 결정하였다. 교각기둥의 지름 D 는 지간과 교각높이에 따라 설계되어 결정되는 값으로 Table 2와 같다.

해석에 사용된 모델링 방법은 정적거동 분석을 위한 수치해석에 사용된 모델과 동일하게 유효폭을 고려한 3차원 격자해석방법을 사용하였고(Fig. 8 참조), Fig. 7과 같이 상부구조와 교각은 Rigid Link를 사용하여 연결시킴으로써 종속 절점의 자유도를 주 절점의 자유도에 종속시켜 구조물이 일체로 거동하도록 모델링 하였다. 거더와 코핑부 매입깊이를 고려하여 거더의 경우 절점은 중립축, 코핑 부재의 경우 절점은 부재 상단에 있도록 모델링하였다.

해석교량의 모델링에 사용된 재료 물성치는 Table 3과 같다.

3.2.2 차량의 모델링

본 논문에서 교각일체형 연속 UD PSC 거더교를 주행

Fig. 6 Cross section of girder (unit : m)

하는 차량하중은 도로교설계기준(2010)에서 제시하는 Fig. 9와 같은 DB-24하중을 적용하였다. 또한 재하되는 차량의 바퀴 간 횡방향 거리는 1.8m이고, 종방향 거리는 4.2m가 되게 재하시켰다. 주형간격에 따른 횡방향 재하 위치는 특정부재에 가장 불리한 위치에 놓이도록 하는 도로교설계기준의 원칙에 준하였다. 따라서 본 연구대상의 교량에서는 연석간의 교폭(W_c)이 10.11m이므로 설계차

Table 2 Diameter of pier(unit : m)

pan(m) pier height (m)	25	30	35	40	45	50
10	2.2	2.3	2.5	2.9	3.3	3.7
15	2.3	2.4	2.6	3.0	3.4	3.8
20	2.4	2.5	2.7	3.1	3.5	3.9
25	2.6	2.7	2.9	3.3	3.7	4.1
30	2.8	2.9	3.1	3.5	3.9	4.3

Fig. 7 Concept of modeling

Fig. 8 3D modeling of bridge

Table 3 Material property

material	PSC beam	slab and cross beam	pier
elastic (MPa)	28,571	25,743	24,422
mass density (kg/m^3)	2,500		
Poisson's ratio	0.18

Fig. 9 DB-24 load

Fig. 10 Location of DB-24 load

선폭(W)는 교폭(W_c)의 범위가 $9.1 \leq W_c \leq 12.8$ 일 때의 설계차선수(N)인 3차선으로 나누면($W = W_c/N$) $W = 3.4m$ 가 된다. 따라서 설계차선폭에 따른 차량하중 재하방법은 폭이 0.42m인 연석으로부터 0.6m 떨어진 곳에서 1차선이 시작되도록 Fig. 10과 같이 각각 재하시킨다.

3.2.3 수치해석 방법

교각일체형 UD PSC 거더교의 동적응답을 산정하기 위하여 고유치해석(Eigenvalue analysis)과 시간이력해석(Time history analysis method)을 수행한다. 보통 구조해석에서는 행렬 전체 크기까지의 고유치 해를 필요로 하지 않으므로 통상 근사 해법이 쓰이고 있고 본 논문에서는 MIDAS/CIVIL에 내장되어 있는 Subspace Iteration Method를 이용하여 고유치해석을 수행하였다. Subspace Iteration Method는 일련의 행렬 연산을 통해 구하고자 하는 고유치 개수 크기의 고유치 문제로 축소하고 이를 해석하여 원래 문제의 고유치 및 고유벡터를 산출하는 방법으로 큰 자유도를 가지는 문제의 해석에 적합하다.

교량의 동적응답을 구하는 방법은 크게 응답스펙트럼 법과 시간이력해석법으로 나눌 수 있고, 시간이력해석법은 크게 모드 중첩법과 직접적분법으로 분류된다. 본 연구에서는 모드 중첩법을 사용하여 동적응답을 구하였다.

모드 중첩법은 다 자유도계의 하중함수에 대한 동적응답을 구할 때 사용되는 방법으로 직접적분법과 달리 선형 구조물에 대해 효과적으로 계산할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 관성력이 고려되지 않은 집중 이동하중 모델을 사용하였다. 즉, 차량의 질량과 교량-차량 상호작용의 효과를 고려하지 않았다. 그 이유로는 차량과 교량의 질량비가 0.3 이하일 경우 차량의 질량 및 교량-차량 상호작용의 효과를 고려하지 않아도 충분한 거동 분석이 가능하기 때문이다. (Senthilvasan et al. 1997)

4. 수치해석 결과 및 분석

4.1 고유치 해석결과

교량의 특성으로 사용한 매개변수인 교각의 높이와 지간길이가 고유진동에 어떤 영향을 미치는가를 알기 위하여 Bathe가 제안한 부공간 반복법(Subspace Iteration Method)을 이용하여 고유진동 해석을 수행하였다.

해석결과 Fig. 11에서와 같이 2경간과 3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 고유진동수는 지간이 길어질수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 식 (1)에서 Tilly가 제시한 관계식과 유사한 경향을 나타내지만 동일한 지수함수의 관계는 나타내고 있지 않다.

$$f = 82 \times L_{\max}^{-0.9} \quad (1)$$

여기서, f : 교량의 고유진동수 (Hz)

$L_{\max}$: 교량의 최대지간 (m)

교각의 높이에 따른 고유진동수 변화는 2경간과 3경간 모두 교각의 높이가 증가함에 따라 고유진동수는 감소하는 경향을 나타낸다. 하지만 교각높이가 증가함에 따라 고유진동수의 감소비율은 2경간보다 3경간이 더 큰 비율로서 감소되고 있다. 그리고 2경간과 3경간에서 같은 지간의 경우를 비교하면 2경간의 고유진동수가 3경간의 고유진동수보다 모든 지간에서 크게 나타났다.

지간 25m, 교각높이 30m인 교각일체형 2경간 연속 UD PSC 거더교의 모드형상은 Fig. 12와 같다. Fig. 12(a), (b)는 수평방향 및 휨 진동형상을 나타내고, Fig. 12(b), (d)는 비틀림 진동 현상을 보이고 있다. 그리고 Fig. 12(e)는 수직방향의 진동현상을 나타내고 있다. 본 연구에서는

(a) natural frequency of 2span

(b) natural frequency of 3span

Fig. 11 Natural frequency

Fig. 12 Mode shape(span 25m, pier height 30m, 2pan)

충격계수 제안식에 사용되는 수정 속도매개변수를 구하는데 있어서 수직방향 질량참여율이 가장 큰 5차모드(수직방향 진동모드)의 고유진동수를 사용하였다.

Fig. 13은 지간 25m, 교각높이 30m인 교각일체형 3경간 연속 UD PSC 거더교의 모드형상을 보여준다. Fig. 13(a)는 수평방향 및 휨 진동형상을 나타내고, Fig. 13(b), (c)는 비틀 진동 현상을 보이고 있다. 그리고 Fig. 13(d)는 수직방향의 진동현상을 나타낸다. 2경간과 유사한 경향을 나타내고 있지만 수직방향의 진동현상에서 2경간의

Fig. 13 Mode shape(span 25m, pier height 30m, 3pan)

경우 교각의 변형이 발생하지 않지만 3경간에서는 교각의 변형이 발생하게 되어 좀 더 유연한 거동을 나타내게 된다. 고유진동수 값에 있어서도 2경간 교각일체형 교량이 3경간 교각일체형 교량보다 크게 나타나는 이유도 이러한 모드형상에 기인한다고 판단된다. 3경간의 충격계수 제안식에 도입되는 수정속도매개변수의 산정에 있어 2경간과 동일하게 수직방향 질량참여율이 가장 큰 4차모드(수직방향 진동모드)의 고유진동수를 사용하여 수정 속도매개변수를 계산하였다.

4.2 충격계수

4.2.1 충격계수 산정 방법

교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적 거동의 특성과 충격계수를 산출하기 위한 변수로 경간(2경간, 3경간), 지간길이, 차량의 속도 및 교각높이를 선정하였다. 먼저 동적 거동에 대표적으로 영향을 끼치는 변수인 지간

길이는 25m, 30m, 35m, 40m, 45m, 50m로 결정하였고, 교각의 높이는 실제 많이 적용되고 있는 10m, 15m, 20m, 25m, 30m를 적용하였다. 차량의 속도는 10km/h ~ 120km/h까지 10km/h씩 증가시키면서 해석에 적용하였다. 이때 정적응답을 결정하기 위해 의사정적속도 5km/h의 속도로 차량을 재하하여 정적응답을 산정하였다.

위와 같이 720가지 경우에 대하여 최대정적응답 및 동적응답이 발생하는 내·외측 주형에서 차량이 진입하는 지간의 중앙과 차량의 마지막 바퀴가 빠져나가는 지간의 중앙 처짐을 이용하여 식 (2)와 같이 충격계수를 산정하였다(Jeong, 2002).

$$\text{충격계수 } i = \frac{D_{dy} - D_{st}}{D_{st}} \quad (2)$$

여기서, D_{dy} : 동적 최대처짐(mm)

D_{st} : 정적 최대처짐(mm)

Fig. 14~16의 계열의 Specification code는 우리나라 도로교설계기준(2010)에서 제시하고 있는 상부구조의 충격계수를 나타내는 것으로 교량의 지간의 함수로 나타나 있으며 다음 식을 사용하여 산출하며 0.3을 초과할 수 없다.

$$\text{충격계수 } I = \frac{15}{40 + L} \leq 0.3 \quad (3)$$

여기서, L : 교량의 지간(m)

4.2.2 차량의 속도와 교각높이에 따른 충격계수

2경간과 3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 차량 주행속도와 교각높이에 따른 충격계수 산정결과는 Fig. 15, Fig. 16과 같다. 2경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 차량 주행속도와 교각높이에 따른 충격계수 산정결과 교각높이가 10m, 15m로 낮은 경우의 충격계수는

Fig. 14 Impact factor by pier diameter

Fig. 15 Impact factor by vehicle speed and span length (2span)

Fig. 16 Impact factor by vehicle speed and span length (3span)

차량의 속도가 증가됨에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으나 교각이 20m 이상으로 높은 경우에는 충격계수가 특정 속도대역에서 크게 증가하다 감소하는 경향을 나타내고 있다. 지간 25m에서 40m까지 이러한 경향이 나타나고 있으며 25m에서 40m로 지간이 길어질수록 충격계수가 증가하는 속도대역이 저속도에서 고속도대역으로 옮겨지는 것을 알 수 있다. 충격계수가 속도와 교각높이에 따라 이러한 거동 특성이 나타나게 되는 원인으로는 여러 가지가 있으나 주요 원인으로는 교각기둥의 높이 및 지름의 영향이라 판단된다. 지간 25m, 교각높이 30m의 교각일체형 2경간 연속 UD PSC 거더교의 교각기둥의 지름을 해석에 사용된 2.6m에서 0.8m씩 증가시킨 3.6m, 4.4m에 대해 차량 주행속도에 따라 해석하여 충격계수 거동 결과를 비교하였다. 그 결과 Fig. 14와 같이 교각의 기둥지름이 2.6m의 경우 특정 속도대역에서 증가하여 감소하는 경향을 나타내고 있으나 지름이 증가할수록 그 속도대역이 고속도 대역으로 옮겨지면서 충격계수 크기 역시 감소하고 있다. 따라서 이러한 결과를 통하여 교각일체형의 교량형식은 교각 기둥지름에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 더 나아가 기둥의 진동특성이 교량 상부구조물의 동적 처짐에 영향을 준다고 판단할 수 있다.

3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 차량 주행

속도와 교각높이에 따른 충격계수 산정결과 2경간의 경우보다 충격계수가 작게 나타났다. 이러한 이유로는 교각 일체형의 교량은 교각의 길이와 지름의 비에 영향을 지배적으로 받는 구조형식으로 2경간의 교각 길이와 지름의 비보다 교각이 두개인 3경간의 교각 길이와 지름의 비가 전체 구조시스템의 관점에서 판단하면 크기 때문이다. 충격계수의 크기는 2경간과 큰 차이를 나타내지만 전체적인 거동특성이 유사함을 Fig. 16을 통하여 알 수 있다.

5. 충격계수 산정식 제안

교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 충격계수를 다양한 매개변수에 의해 분석한 결과 교량의 경간, 지간, 고유진동수 그리고 차량의 주행속도뿐만 아니라 교각의 높이와 교각기둥의 지름이 충격계수에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

현행의 도로교설계기준에서 제시하는 충격계수식은 지간의 함수로만 이루어져 있기 때문에 이 식을 사용하여 설계할 경우 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적거동 특성이 반영되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 다양한 매개변수가 충격계수에 영향을 미치는 특성을 반영할 수 있는 수정속도매개변수(Modified Speed Parameter)를 도입하여 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 설계에 사용할 수 있는 충격계수식을 제안한다.

5.1 수정속도매개변수

교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 충격계수 산정식을 산출하기 위해 사용한 변수는 수정속도매개변수이다. 수정속도매개변수는 1995년 대만의 교수인 Yeong-Bin Yang이 단순교 및 3경간 연속교의 PC박스교의 충격계수 산정에 사용한 속도매개변수를 근간으로 하고 있다.

Yang의 속도매개변수(Speed Parameter)는 교량의 고유진동수(ω)에 대한 차량하중의 가진 진동수($\pi V/L$)의 비로 정의되는 무차원 함수이다. 이는 교량의 고유진동수, 지간 및 차량의 주행속도를 동시에 고려할 수 있는 장점이 있어 차량하중에 대한 교량의 동적거동 연구에 많이 사용되고 있다. Yang의 속도매개변수를 이용하여 충격계수 산정식을 제안한 경우로는 단경간 프리플렉스 합성형교의 충격계수 산정식(Kim, 2000), 2경간 PSC 철도교의 충격계수 산정식(Jeong, 2002) 그리고 단경간 강박스거더교의 격벽비에 따른 충격계수 산정식(Cho, 2004) 등에 사용되었다.

Fig. 17과 Fig. 18은 Yang의 속도매개변수를 도입한 2·3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 충격계수를 나타낸다. Fig. 17~20에 나타나 있는 계열 SL은 Span Length, PH는 Pier Height를 의미한다. 교각일체형 연속 UD PSC 거더교에 Yang의 속도매개변수를 도입하여 충격계수식을 산정하게 되면 교각의 높이와 교각기둥의 지름의 비에 따른 영향을 고려할 수 없게 되어 짧은 지간의 고교각 형식의 교량에 대해서는 충격계수가 과대평가되는 문제점이 있다. 예를 들면 2경간 지간 25m, 교각높이 30m의 경우 충격계수가 0.286이지만, Yang의 속도매개변수를 도입하여 작성된 충격계수 식을 사용하면 충격계수가 0.364 이상으로 결정되게 된다. 이러한 이유로 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적거동 특성의 중요한 요인인 α_y ($= h/D =$ 교각높이/교각기둥 지름)가 고려된 새로운 매개변수의 도입이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 Yang의 속도매개변수에 α_y 를 곱하여 구성된 수정속도매개변수를 제안하여 사용한다. α_y 의 실제적인 의미는 교각의 강성을 의미하지만 강성 값을 직접적으로 사용하지 않는 이유는 교각높이와 교각기둥 지름의 비로 충분히 교각 강성의 특성을 반영할 수 있고, 무차원화 된 변수의 사용이 편리하기 때문이다. 제안된 수정속도매개변수는 무차원 Yang의 속도매개변수를 근간으로 하고 식 (4)와 같다.

Fig. 17 Impact factor using speed parameter(2span)

Fig. 18 Impact factor using speed parameter(3span)

$$s_y = s \times \alpha_y = \frac{\pi V}{\omega L} \times \alpha_y \quad (4)$$

여기서, ω : 교량의 고유진동수(rad/sec)

V : 차량 주행속도(km/hr)

α_y : Youngdo factor, 교각높이/교각 기둥지름

L : 지간길이(m)

h : 교각높이(m)

D : 교각 기둥지름(m)

s : Yang이 제안한 무차원 속도매개변수

수정속도매개변수는 무차원 변수이며 교각일체형 UD PSC 거터교의 주요한 특성인 고유진동수, 지간길이, 교각높이, 그리고 이동하중의 특성인 차량의 속도를 동시에 반영시킬 수 있으므로 유용하다. 수치해석 결과를 통해 교각의 높이와 지름의 비가 충격계수에 영향을 미친다는 특성을 토대로 기존의 Yang의 속도매개변수에서 교각높이와 교각 기둥지름의 비(α_y)를 곱하는 형태로 구성되어 졌다. 2경간과 3경간의 충격계수의 크기가 큰 차이를 보이므로 수정속도매개변수를 이용하여 제안식을 2경간과 3경간의 경우로 분리하여 제시한다.

5.2 2·3경간 충격계수 산정식 제안

구조물의 고유진동수, 속도, 지간 그리고 교각의 강성을 고려할 수 있는 수정속도매개변수(s_y)를 이용하여 작성된 2경간 교각일체형 연속 UD PSC 거터교의 충격계수 산정식은 식 (5)와 같고 3경간의 충격계수 산정식은 식 (6)과 같다.

$$\begin{cases} s_y \leq 4.5 : i = 0.084 \times s_y + 0.004 \\ 4.5 < s_y \leq 6.0 : i = -0.101 \times s_y + 0.833 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} s_y \leq 5.0 : i = 0.046 \times s_y + 0.013 \\ 5.0 < s_y \leq 7.0 : i = -0.042 \times s_y + 0.453 \end{cases} \quad (6)$$

Fig. 19와 Fig. 20은 수치해석 결과에 의해 나온 값으로 수정속도매개변수를 계산하여 x 축항으로 설정하고, 그에 해당하는 충격계수 값을 y 축항으로 하여 작성한 그래프이다. 그래프에 표시된 실선은 각 변수를 내포하고 있는 많은 점들 중에서 최외측에 위치한 두 점을 이은 선으로 그 기울기 값과 절편 값을 가지고 여러 변수를 동시에 고려할 수 있는 2, 3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거터교에 적용 가능한 새로운 충격계수식(식 (5), (6))이다.

이 식을 사용하여 충격계수를 산정하면 2경간에서는 지간 25m에서 45m까지의 경우 교각높이 15m 이상에서 도로교설계기준에서 제시하는 충격계수보다 크게 산정되고, 지간 50m에서는 교각높이 20m 이상의 경우에 도로교설계기준 충격계수보다 크게 산정된다. 3경간에서는 지간 25m에서 40m까지의 경우 교각높이 20m 이상에서 도로교설계기준에서 제시하는 충격계수보다 크게 산정되고, 지간 45m에서는 교각높이 25m 이상, 지간 50m에서는 교각높이 30m의 경우에 설계기준 충격계수보다 크게

Fig. 19 Impact factor using modified speed parameter(2span)

Fig. 20 Impact factor using modified speed parameter(3span)

산정된다. 본 논문의 해석에는 전후차량의 협동작용, 고정하중과 활하중의 비율 등이 반영되지 않았지만 교각일체형 형식의 PSC교량의 설계 시 참고자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 공용기간 중의 유지관리 비용의 최소화를 위해 도입되고 있는 교각일체형 교량 중 교각일체형 연속 UD PSC 거터교를 대상으로 동적해석을 수행하여 거동특성을 분석하고 충격계수 산정식을 제안하였다. 이

논문의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고유진동 해석결과 교각의 높이에 따른 고유진동수 변화는 2경간과 3경간 모두 교각의 높이가 증가함에 따라 고유진동수가 감소하였다. 이는 교각의 높이가 교각일체형 교량의 동적거동 특성에 영향을 미치는 주요 인자라는 것을 의미한다.
- (2) 2, 3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적해석을 통하여 충격계수 산정식을 제안하였다. 같은 지간의 경우라도 교각의 높이와 교각의 기둥 지름 즉, 교각의 강성에 따른 충격계수가 다른 값을 나타내므로 이러한 특성을 고려할 수 있는 수정 속도매개변수를 도입하여 효율적으로 설계에 반영할 수 있는 충격계수 산정식을 제시하였다.
- (3) 제시된 충격계수 산정식은 교량의 고유진동수, 차량의 주행속도, 지간 길이, 교각의 높이 및 교각 기둥의 지름에 따른 영향을 모두 고려할 수 있는 식이다. 특정 수정속도매개변수 영역에서는 도로교 설계기준에서 제시한 충격계수보다 큰 충격계수가 산정되므로 설계 시 참고하여 안전측의 설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Cho, K. H., "The formulas of impact factors using the speed parameters on a steel box girder bridge", Master's Degree Dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Korea, 2004. (in Korea)
2. Jeong, J. K., "Impact formulas for two span continuous PSC railway bridge", Master's Degree Dissertation, INHA University, Korea, 2002. (in Korea)
3. Kim, H. H., "Development of Design Method in Continuous PSC Girder Bridges using Up and Down of Supports", Ph. D. Dissertation, INHA University, Korea, 2009. (in Korea)
4. Kim, M. S., "Impact formulas for simple-span preflex composite girder bridges under moving vehicles", Master's Degree Dissertation, INHA University, Korea, 2000. (in Korea)
5. Kim, S. S., "The behavior of 3span continuous PSC beam bridge with a monolithic pier joints", Master's Degree Dissertation, INHA University, Korea, 2004. (in Korea)
6. Korea Road & Transportation Association, Design Criteria for Highway bridge, 2010. (in Korea)
7. Kyung, K. S., Lee, H. H., Jeon, J. C., Cho, K. H., "A Study on Structural Behaviour at Ridge Connection of Rahmen-Type Hybrid Bridge", Journal of Korea Society of Civil Engineering, vol. 23, No. 4A, 2003, pp.687-694. (in Korea)
8. Lee, J. S., "The bridge behavior analysis by means of time history analysis according to the Vehicle velocity", Master's Degree Dissertation, Chungbuk National University, Korea, 2004. (in Korea)
9. Senthilvasan, J., Brameld, G. H., Thambiratnam, D. P., "Bridge-vehicle interaction in curved box girder bridges", Journal of Microcomputers in civil engineering, vol. 12, No. 3, 1997, pp.171-181.
10. Y. B. Yang, S. S. Liao, B. H. Lin, "Impact Formulas for Vehicles Moving over Simple and Continuous Beams", Journal of Structural Engineering, vol. 121, No. 11, 1995, pp.1644-1650.

Received : 11/08/2012

Revised : 12/04/2012

Accepted : 12/05/2012

요 지

건설환경의 지속적인 변화로 인하여 교량 건설비용의 최소화뿐만 아니라 공용기간중의 유지관리를 포함한 전체 비용의 최소화 및 최적화의 요구가 증가하고 있다. 이러한 이유로 교량의 상부구조에서 하부구조로 힘을 전달하기 위해 사용되는 교량받침 대신에 스티드나 연결철근 등과 같은 연결재를 사용하여 교량의 상부구조와 하부구조를 라멘식으로 일체화 시킨 교량형식이 제시되고 있다. 이 논문은 교량의 상부구조 형식을 연속 UD PSC 거더로 하여 철근콘크리트 교각과 일체화 시킨 교각일체형 연속 UD PSC 거더교를 대상으로 한다. 교각일체형 연속 UD PSC 거더교는 라멘교 형식과 거더교 형식을 결합한 교량으로 일반 받침형식의 교량과 상이한 거동특성을 나타낸다. 하지만 거동 특성에 대해 명확히 규명되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 해석적 방법을 이용하여 교각일체형 연속 UD PSC 거더교의 동적거동 특성을 분석하고 2, 3경간 교각일체형 연속 UD PSC 거더교에 적용할 수 있는 충격계수 산정식을 제시하였다.

핵심 용어 : 교각일체형 교량, 동적거동, 시간이력해석, 충격계수, 속도매개변수