

Original

Prueba de carga dinámica del tramo atirantado del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz

Dynamic load testing for the Constitución de 1812 cable-stayed Bridge over the Cadiz Bay

Vicente Puchol de Celis^a, Jesús de los Ríos de Francisco^b y José Luis Castro Rubal^{b,*}

^a *Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Kinesia Ingeniería S.L., Madrid, España*

^b *Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Dragados S.A., Madrid, España*

Recibido el 26 de octubre de 2015; aceptado el 9 de diciembre de 2015

Disponible en Internet el 21 de enero de 2016

Resumen

Como estipula la normativa española para puentes de luz superior a 60 m, se realizó una prueba de carga dinámica del tramo atirantado con objeto de caracterizar adecuadamente los parámetros dinámicos de la estructura.

© 2015 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Puente atirantado; Prueba dinámica; Amortiguamiento; Fusible

Abstract

In order to comply with the requirements of the Spanish codes for bridges with a span over 60 m, a dynamic loading test was carried out to accurately obtain the dynamic parameters of the structure.

© 2015 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Cable-stayed bridge; Dynamic test; Damping; Fusible

1. Introducción

Entre los principales objetivos de las pruebas de carga dinámicas está la determinación de las frecuencias correspondientes a los primeros modos de vibración de la estructura, y, si es posible, de los coeficientes de amortiguamiento logarítmico asociados a ellas. En nuestro caso, por tratarse de una gran estructura expuesta a fuertes vientos, el conocimiento de la capacidad de amortiguamiento del puente es ineludible. Habitualmente, como medios de excitación, suelen utilizarse uno o más vehículos pesados circulando sobre obstáculos. Sin embargo, este

procedimiento no es de aplicación en el tramo atirantado debido a la separación neta entre la frecuencia principal de la estructura (0,27 Hz) y la del primer modo de un camión (entre 2 y 5 Hz), correspondiente al balanceo de caja o *body bounce*. Por ello, no se produce interacción relevante vehículo-estructura, y el uso de camiones no resulta apropiado. Como alternativa está la acción del viento, que por contener un espectro muy amplio (de tipo ruido blanco) contiene todas las frecuencias y resulta idóneo para la excitación del puente (de hecho, durante el proceso constructivo se fueron detectando y controlando las frecuencias propias por este procedimiento). A cambio, el viento resulta poco útil para la cuantificación del amortiguamiento, pues sería necesario que, tras inducir un estado vibratorio en la estructura, cesara repentinamente. Todo ello hizo necesario diseñar un ensayo *ad hoc* de liberación súbita de carga que provocase una deformación

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jlcastror@dragados.com (J.L. Castro Rubal).

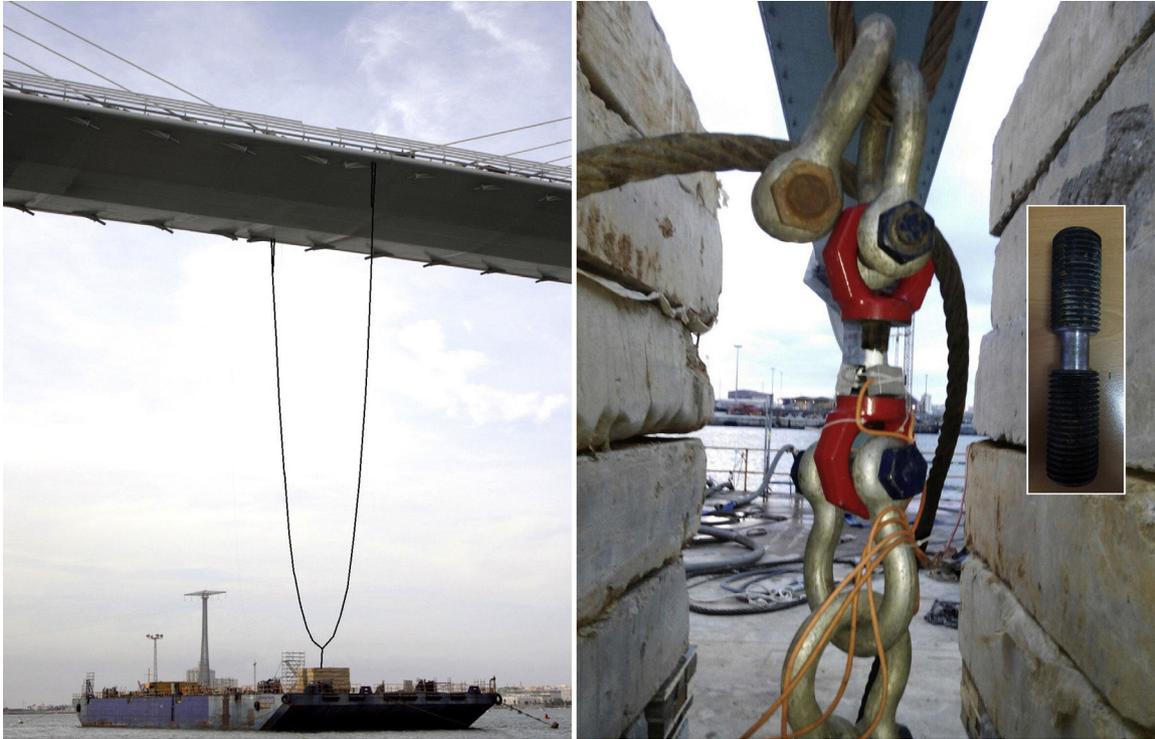


Figura 1. A la izquierda, vista general del montaje. A la derecha, detalle de cadena, fusible y eslinga de seguridad.

inicial suficiente y dejase después la estructura disipando energía en régimen de vibración libre.

2. Cálculo de la carga de ensayo

En un día en calma, la brisa ambiental puede mantener el tablero con una vibración de fondo cuasi continua del orden de 0,0005 a 0,001 g. Por este motivo, se buscó provocar una aceleración vertical (a) de al menos 0,01 g para tener un nivel de partida nítidamente diferenciado que tomar como referencia para evaluar el amortiguamiento. Este nivel de aceleración equivale a introducir una flecha inicial (d) relacionada con la frecuencia (f) del primer modo de vibración vertical en flexión del tablero según la siguiente expresión:

$$d = a / (2\pi f)^2 \quad (1)$$

Para una frecuencia (f) de 0,27 Hz, se deduce una flecha inicial necesaria (d) de 34 mm. Y, de acuerdo con la información facilitada por el proyectista de la estructura, dicha deformación se consigue con una carga de 490 kN suspendida del centro del vano principal [1].

3. Ensayo de liberación súbita de carga

La idea central fue unir el tablero a un peso situado sobre una embarcación dispuesta bajo el centro del vano principal y usar la marea descendente como elemento activo de tiro [2]. Esta unión dispondría de un elemento fusible tarado para romperse a una carga próxima a 490 kN.

Como embarcación se utilizó la pontona Dracaza XX. El cable de tiro se conectó a una viga metálica simplemente

apoyada sobre la cubierta y sobre la que se apoyaron 2 columnas de bloques de hormigón como contrapeso (fig. 1).

En el tablero, se escogió como diafragma de tiro el más próximo al centro del vano principal dotado de anclaje de tirantes. En cada extremo de dicho diafragma, bajo las vigas de borde, se soldaron 2 anillas de trincaje tipo D-ring. Cada pareja de anillas estaba unida mediante una eslinga metálica de 2 m de longitud.

La línea de unión se dividió en 2 tramos: un primer tramo vertical constituido por una cadena de grilletes con una longitud total de 2 m, donde se situó el fusible, y una eslinga metálica de 120 m de longitud que conectaba las 2 eslingas dispuestas en los extremos del diafragma de tiro a la vez que se enhebraba en el extremo superior del primer tramo. De esta forma se conseguía un tiro vertical centrado en sentido transversal.

Como elemento fusible se optó por una varilla metálica rosca M-42 de calidad 10.9 y 150 mm de longitud. Esta barra se mecanizó en sus 30 mm centrales hasta conseguir una sección maciza de 24 mm de diámetro (fig. 1).

Con esta disposición, la barra tenía una carga de rotura teórica situada entre 451 y 540 kN. Estos valores fueron confirmados mediante ensayos previos de rotura a tracción en los que se alcanzó una carga de rotura media de 506 kN.

Como sistema de control geométrico, se utilizaron 2 estaciones topográficas en modo *tracking* y 4 receptores GPS, todo ello dispuesto para monitorizar los movimientos del diafragma de tiro y de la pontona.

Como medidas de seguridad adicionales se decidió que todos los elementos que entraban en carga durante la prueba, excepto el fusible, tuvieran una carga de rotura al menos doble de la que teóricamente tendrían durante el ensayo y que los extremos de

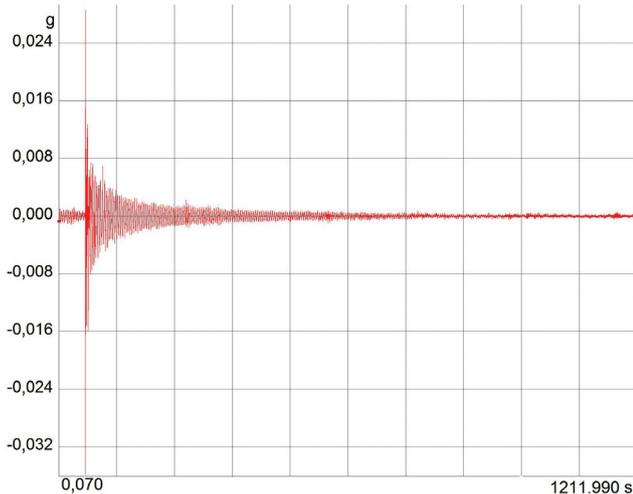


Figura 2. Acelerograma vertical en centro de vano.

los cables de tiro contasen con eslingas de seguridad para evitar caídas accidentales de los mismos y oscilaciones incontroladas.

Una vez todos los medios auxiliares estuvieron en posición, se procedió a la unión de los 2 tramos de la línea de tiro. El proceso se inició con la marea en fase creciente de forma que el ascenso de la embarcación ayudase a la operación de conexión.

Una vez el tablero estuvo unido al contrapeso situado en la pontona, se inició el lastrado de la misma mediante bombeo que, junto con el descenso de la marea, puso progresivamente al sistema en carga hasta provocar la rotura del fusible.

El ensayo finalizó con un descenso máximo de la embarcación de 44 cm en 21 min, en el orden de lo previsto.

4. Instrumentación y resultados

La instrumentación utilizada fue, básicamente, la ya existente en la estructura para la monitorización de construcción [3]. A lo que este ensayo respecta, fueron de especial interés los 19 servo-acelerómetros y los 3 anemómetros-veleta disponibles. A estos 22 sensores se unieron 2 galgas extensométricas dispuestas sobre la barra fusible que permitieron controlar en tiempo real la carga que esta iba tomando. Los anemómetros sirvieron para vigilar que el viento se mantuviera en calma y no invalidara el largo registro que se planteaba realizar.

El ensayo tuvo lugar el 4 de septiembre de 2015. El sistema de adquisición de datos se programó para una captura continua a velocidad de 100 lecturas por segundo y sensor.

El disparo tuvo lugar automáticamente cuando el fusible se rompió, iniciándose el registro con un pre-evento de los 60 segundos anteriores para contextualizar adecuadamente las vibraciones subsiguientes. El viento se mantuvo constante, con una velocidad media de unos 2,8 m/s. La adquisición de datos se

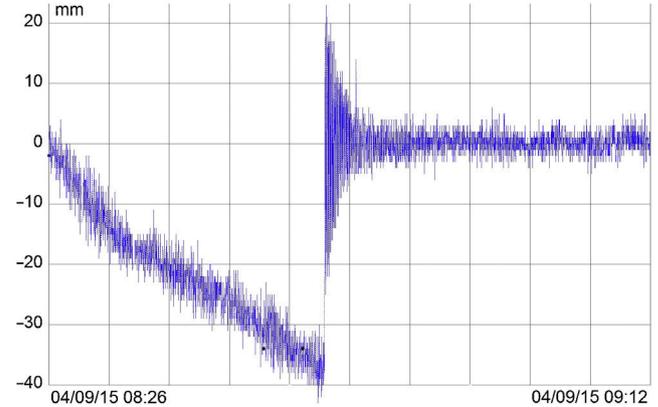


Figura 3. Flecha en borde de tablero.

prolongó durante 20 min (121.200 registros), hasta que las vibraciones residuales cayeron por debajo de las existentes antes de la rotura del fusible (que eran debidas a las oscilaciones de la pontona).

La figura 2 muestra el acelerograma vertical en centro de vano. Las vibraciones ambientales en el pre-evento son del orden de 0,0012 g. Tras la rotura del fusible, la aceleración vertical de pico asciende a 0,085 g y, tras medio segundo, baja al nivel de 0,01 g de referencia. De ahí en adelante, la disipación de energía se produce de forma suave y regular, terminando el ensayo con una vibración residual de apenas 0,0004 g. Esta amplitud, 3 veces menor que la del pre-evento, pone de manifiesto que la brisa ambiental no introdujo ninguna distorsión en el ensayo. La figura 3 muestra la flecha en borde tablero medida topográficamente de forma continua (*tracking*).

Las oscilaciones libres tienen lugar a una frecuencia casi pura (sinusoidal) de 0,25 Hz, muy similar a la teórica (recalculada en 0,24 Hz para la carga muerta existente en la fecha de ensayo). El coeficiente de amortiguamiento logarítmico resultante se ha cifrado en 0,05, lo que corresponde a una tasa de amortiguamiento crítico del 0,80%. Dicho valor es algo superior al que preconiza la norma UNE-EN 1991-1-4 para amortiguamiento de estructuras mixtas frente a la acción del viento.

Bibliografía

- [1] V. Puchol de Celis, *Análisis experimental de las vibraciones causadas por el viento en el puente sobre el río Tajo (Arcos de Alconétar)*, *Hormigón y Acero* (243) (2007) 51–66.
- [2] F. Myrvoll, A. M. Kaynia, E. Strømen, E. Hjorth-Hansen, C. Hansvold, R. Ronnebrant, *Field performance testing and instrumentation for design verification of the Uddevalla bridge*, *Proceedings of the 4th Symposium of Strait Crossings*. 2-5 Septiembre, 2001, Bergen (Noruega).
- [3] V. Puchol de Celis, *Instrumentación, monitorización y análisis del Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz*, *Hormigón y Acero* 67 (2016) 261–266.