reforma del puente San Francisco-Oakland

N. C. RAAB, ingeniero

N. C. RAAB, ingeniero jefe de proyectos,
Division of San Francisco Bay Toll Crossings

569 - 7

Introducción

Como consecuencia del creciente tráfico por carretera todos los puentes construidos, con anterioridad a nuestros días, resultan incapaces de absorber la intensidad actual de dicho tráfico y, por ello, tanto los puentes como las propias carreteras experimentan una apremiante necesidad de reforma para poder seguir el movimiento ascendente de aquél.

En el caso que nos ocupa—puente de San Francisco-Oakland sobre la bahía de California (EE. UU.)—, la reforma consiste en modificar los dos tableros superpuestos, construidos en 1937, con seis bandas de circulación en el superior y sólo tres—para camiones—en el inferior, sobre el que se venían explotando dos vías férreas.

El puente, con un recorrido total de unos 9 km, se compone de dos partes: una suspendida, que va desde San Francisco hasta la isla Yerba Buena, y otra, en cantilever, desde esta isla hasta Oakland.

Para esta reforma se retiraron las dos vías de la calzada inferior, se habilitaron cinco bandas de circulación de mayor anchura en la superior, y otras cinco en la inferior, y se dio a cada una de estas calzadas una dirección única. Los accesos han experimentado también una profunda reforma.

La primera parte está terminándose, y para el siguiente tramo—entre la isla y Oakland—se han convocado varios concursos para la ejecución de la reforma. En la propia isla, la reforma introduce grandes mejoras. Las bandas de circulación son de 3,50 m de anchura.

Solución

Los soportes que sostenían la calzada superior se hallaban en la parte central de la inferior, y algunos de éstos que se encontraban en el eje, era preciso retirarlos, mientras que los de los extremos laterales debían correrse para permitir espacio y acceso.

sección del tablero

IGITUD TOTAL 17.780 m

alzado

planta

Como estos soportes trabajaban con cargas de 250 a 300 toneladas cada uno, soportando vigas transversales de 20 a 26 m de luz, fue imprescindible reforzar dichas vigas para dotarlas de la resistencia adicional que la supresión de soportes exigía.

Se estudiaron tres soluciones diferentes:

- 1.^a Reforzar la estructura resistente del tablero superior por medio de vigas metálicas.
- 2.^a Añadir vigas suplementarias pretensadas.
- 3.^a Pretensar las vigas existentes.

Las dos primeras soluciones daban lugar a un complejo mixto no sujeto a un análisis determinativo. Estos inconvenientes inclinaron la balanza hacia la tercera solución, es decir, pretensar las vigas existentes.

El refuerzo requerido para suplementar la resistencia perdida por supresión de soportes centrales consistió en un sistema de cables postesados que se anclaban en la parte exterior de los dos soportes laterales extremos, procedimiento utilizado por primera vez en América. La primera operación fue el comprobar si estas vigas transversales, que se debían postesar, presentaban la sección suficiente para poder resistir al esfuerzo introducido con el pretensado, que se eleva a unas 450 toneladas. Se comprobaron las vigas, que eran de tipo robusto, de un magnífico hormigón y de veinticuatro años de vejez, con resultados plenamente satisfactorios.

detalle de pretensado

ANALISIS DE ESFUERZOS

DIAGRAMA DE MOMENTOS

PESO PROPIO $\frac{M}{EI}$ DIAGRAMA

TORSIONES

$$\theta_L = \int_0^l \frac{(1-x)(Ft) dx}{EI}$$

$$\theta_R = \int_0^l \frac{x(Ft) dx}{EI}$$

$$\text{GRAFICAMENTE } \theta_L = \frac{F}{EI} \sum \Delta A_i \bar{r}_{Rt}$$

$$\theta_R = \frac{F}{EI} \sum \Delta A_i \bar{r}_{Lt}$$

MOMENTO EN LA EXTREMIDAD FIJA

$$M_{D.L.} = \frac{4EI\theta}{L_{col.}} ; \text{DISTRIBUCION DE MOMENTOS}$$

NOTA: LOS OTROS MOMENTOS, TALES COMO CARGAS MOVILES, TEMPERATURA, ETC, CALCULADOS POR MÉTODOS TRADICIONALES.

FLEXION

"y" QUE CUALQUIER PUNTO "a":

$$y = \delta - s = \int_0^a \frac{(1-x) Ft dx}{EI} - \int_0^a \frac{(a-x) Ft dx}{EI}$$

$$\text{GRAFICAMENTE } y = \frac{aF}{EI} \sum \Delta A_n \bar{r}_{L.t.} - \frac{F}{EI} \sum \Delta A (a-x)$$

CARGA TOTAL $\frac{M}{EI}$ DIAGRAMA

FORMA DEFORMADA

CARGA EN EL HORMIGON

$$f_c = \frac{F}{A} \pm Ft \frac{c}{I}$$

Para cotejar los cálculos teóricos de esfuerzos fue preciso tener en cuenta los diferentes módulos de elasticidad entre el nuevo hormigón y el original.

El análisis estructural se realizó calculando la curva de esfuerzos normales en los elementos deformados por flexión, determinando después las correcciones necesarias de momentos, esfuerzos cortantes y esfuerzos por flexión.

Los cables de pretensado debían ser poco numerosos para no debilitar los soportes en los que se anclan, y, como consecuencia de esto, se adoptó un tipo de cable de alta resistencia, con barra fileteada en la extremidad (manguito), dos barras de gran resistencia, placa, arandela y tuerca. En la parte central del trazado de cables se utilizó un solo cable, puesto que su flexibilidad permitiría una fácil adaptación a la configuración de la viga que debía postesarse.

La extremidad de la barra se fileteaba para permitir el paso de la tuerca de tesado. Como el diámetro de los taladros era reducido, se añadió un manguito troncocónico fileteado interiormente para poder utilizar toda la superficie de la barra, ya que la adaptación entre las barras y estos manguitos troncocónicos era perfecta.

Se preparó una silla invertida, de 1,05 m de radio, a través de la cual debían pasar los cables. Para reducir el rozamiento entre el cable y la silla se utilizó una lámina de plomo como elemento separador. Con objeto de permitir posibles asentamientos en la placa de enclaje, las extremidades de los cordones llevan unas esferitas que facilitan la adaptación de dicha placa a las nuevas posiciones requeridas. Esto permite dos grados de variación en las alineaciones horizontales o verticales.

La posibilidad de alargamiento en el cable, deformación central del hormigón, pérdidas en el tesado mecánico y en los cables, se estudiaron detenidamente antes de resolver el problema que todos estos detalles plantea. Como no se podía prever una pérdida exacta de tensión se volvió a repetir esta operación, una semana después de la operación de tesado, consiguiendo así recuperar las pérdidas.

La tensión en los gatos se iba midiendo con unos elongómetros debidamente colocados. Los cables se tesaron por parejas simétricas y a partir de las dos extremidades. También se midieron los alargamientos en los cables y el acortamiento elástico del hormigón. Todo esto permitió comprobar la buena calidad y disposición del tesado y anclajes, ya que las pérdidas podían rápidamente ser recuperadas apretando las tuercas de los manguitos. Estas pérdidas resultaron ser de un 15 % o, aproximadamente, unos 6 mm, en cada tuerca de ajuste en el momento del retesado.

Vigas colocadas en el túnel.

Suspensión temporal de vigas del acceso.

Al terminar el postesado se quitaron los soportes que sostenían el tablero superior y, tal como se esperaba, apareció una contraflecha de 3 a 9 mm. Estos datos fueron suficientes para poder comprobar los valores previstos en las tensiones introducidas por el postesado, pero, de no haber sucedido así, podía todavía ajustarse la contraflecha con un nuevo retesado. Con objeto de controlar debidamente todos estos movimientos fue necesario establecer una serie de puntos topográficos para tomarlos de referencia, no ya durante las operaciones de tesado, sino después de la entrada en servicio de la obra y en forma periódica.

Colocación de vigas en un acceso.
Vigas de un acceso.
Colocación de vigas de un tablero.
Formación de un tablero en el túnel.

Perforando para el paso de cables del pretensado.
Viga pretensada para tablero.

Contra costumbre, se llegó a un compromiso con las compañías aseguradoras para conceder, en caso de accidente, un premio o prima; pero como en estos casos la prima es elevada, las compañías aseguradoras necesitaban una información escrupulosa del alcance de todos estos cálculos y operaciones, ya que han de cerciorarse del buen comportamiento estructural y de la resistencia de los materiales empleados en la obra, y también se tuvo en cuenta que al postesar transversalmente se introducían esfuerzos cortantes en las vigas longitudinales del tablero superior. Esto exigió el cálculo de su posible cuantía y normal distribución de esfuerzos concentrados en los anclajes, cuestión que se resolvió utilizando una placa de distribución de cargas en la parte exterior de los soportes que apoyan la calzada superior.

Dstrucción del tablero del túnel
Calzada inferior del túnel.

Paso provisional durante la modificación.—Rampa del paso provisional.

Después de terminar todas las operaciones concernientes al pretensado, se inyectaron todas las vainas de los cables y se recubrieron los anclajes y placas con un hormigón ligero que servirá de protección de estas partes tan sensibles y delicadas de la estructura.

Conclusión

Las grandes posibilidades técnicas actuales permitieron realizar esta reforma en condiciones tales que, hace tan sólo diez años, hubieran sido totalmente imposibles.

Fotos: State of California Department of Public Works, Division of Highways, Sacramento - California

fases de reforma

- 1 Sección en estado original.
- 2 Supresión de vías.
- 3 Calzada inferior y supresión del muro central.
- 4 Reconstrucción de la calzada superior y paso superior del tráfico.
- 5 Pretensado de vigas en el tablero superior.
- 6 Anclaje de cables y relleno de huecos.

Asimismo, gracias a un esmerado cuidado y al justo aquilatamiento teórico-práctico, se han descrito las grandes posibilidades de mejora y nuevos campos de aplicación que abre la técnica del pretensado.

Prueba de ello es el haber podido llevar a cabo esta obra sin interrumpir el tráfico o, por lo menos, en limitadas ocasiones, sin que los que circulaban por arriba se dieran la menor idea de lo que estaba sucediendo por abajo.