

Comportamiento de Puentes con Apoyos Aislantes Durante el Sismo del Maule, Chile, del 27/2/2010

Mauricio Sarrazin,¹ Ofelia Moroni²

Resumen

El 27 de Febrero del 2010 ocurrió un sismo de Magnitud $M_w = 8.8$, con epicentro en Cobquecura, región del Maule, Chile. Posterior al sismo, ocurrió un tsunami causando gran cantidad de víctimas y daños en viviendas e infraestructura. En particular, un 6.5% de los puentes sobre nivel de la región afectada sufrieron algún tipo de daño y 16 puentes y varias pasarelas peatonales colapsaron. A esa fecha existían en Chile una decena de puentes con apoyos aislantes, dos de los cuales estaban instrumentados con redes de acelerómetros. Estos son: el Puente Marga Marga, ubicado en Viña del Mar a unos 300 km del epicentro y un tramo de la línea elevada del Metro de Santiago, a unos 400 km del epicentro. En este trabajo se describen las fallas detectadas en los puentes, se analizan los registros de aceleración obtenidos en las estructuras instrumentadas y se evalúan los efectos que tuvo la aislación sísmica en ellas.

Palabras claves: Puentes. Aislamiento sísmico. Registros sísmicos.

¹Prof. Titular, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

²Prof. Asociado, Depto. Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

1 Puente Marga Marga

El puente Marga Marga está ubicado en Viña del Mar, zona central de Chile. Una vista y un esquema general se presentan en la Figura 7. La superestructura consta de un tablero de hormigón armado de 0.27 x 18 m y 4 vigas I continuas de acero, las cuales se apoyan en 36 aisladores de goma de alto amortiguamiento ubicados sobre los estribos y 7 cepas de sección rectangular hueca de 2 x 10 m, 0.25 m de espesor. El tablero está impedido de moverse lateralmente en los estribos mediante topes deslizantes de acero contra acero. Todos los vanos, con la excepción del extremo sur tienen 50 m. La longitud total del puente es 383 m y las alturas de las cepas varían entre 22 a 32 m. Grupos de 10 pilotes de un metro de diámetro con profundidades variables entre 14 a 31 m soportan las cepas C2 a C6, mientras que las cepas C1, C7 y los estribos se encuentran apoyados directamente sobre la roca. Una descripción completa de este puente se encuentra en Borosc hek et al. (2003).

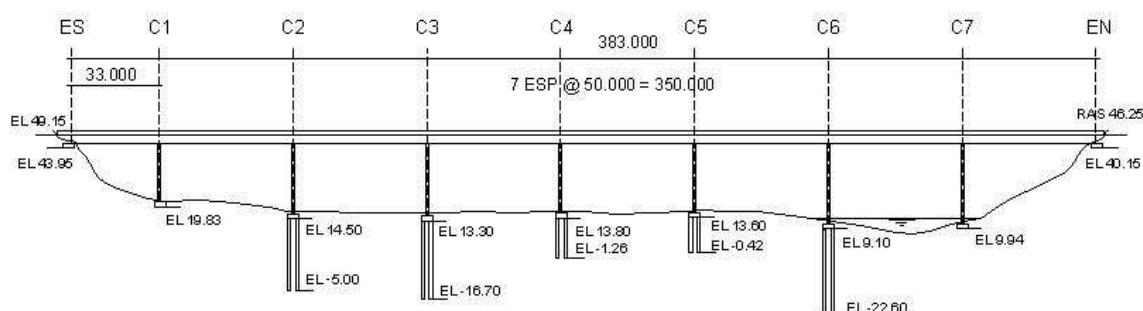


Figura 7: Esquema general del puente Marga-Marga

La sección de los aisladores varía dependiendo de la carga vertical aplicada. Sobre las cepas tienen 0.85 x 0.55 m; en el estribo norte tienen 0.5 x 0.7 m y los del estribo sur tienen 0.5 x 0.5 m. El módulo de corte de la goma requerido para un 50% de deformación fue 0.75 ± 0.05 MPa con un amortiguamiento equivalente de 8-10%.

La instrumentación del puente consiste en 24 sensores colocados en campo libre- valle, campo libre-roca, base y parte superior de cepa C4, estribos norte y sur y diferentes posiciones sobre el tablero, tal como se indica en la Figura 8. La parte superior de la figura muestra el tablero con los sensores en dirección transversal y longitudinal y en la cepa 4 se muestran además los sensores 2, 5, 8, 14 en dirección vertical.

Usando sismómetros se realizaron mediciones de vibraciones ambientales en el suelo, al pie de la cepa C4 y en el valle a 20 m hacia el poniente, identificándose una frecuencia predominante de 1.3 Hz en ambas direcciones horizontales y 1.8 Hz en la dirección vertical. Posteriormente, a partir de registros sísmicos moderados y usando el método de Nakamura, se determinó en dirección horizontal una frecuencia de 1.2 Hz en la zona valle y 4.4 Hz en roca sobre el estribo sur, (Taylor et al. 2008). Con la misma red anterior se determinaron frecuencias en dirección longitudinal (L) y transversal (T) y amortiguamientos en la superestructura mediante registros de microvibraciones, los que se muestran en la Tabla 1.

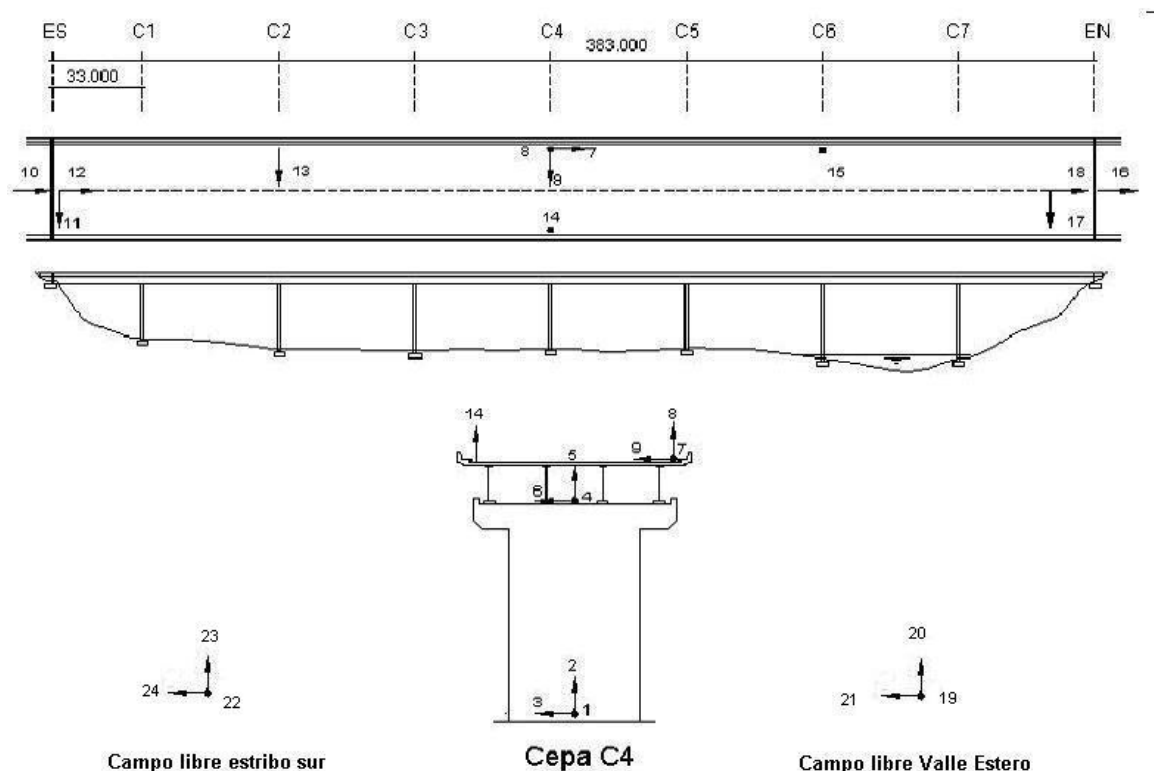


Figura 8: Posición de los acelerómetros.

Tabla 1: Frecuencias y amortiguamiento

Frecuencia Hz	Amortiguamiento %
1.05(T)	2.6
1.18(T)	1.9
1.5-1.7 (Cepa/tablero) 1.85(T-L)	1.2
1.8-2.1 (T)	1.4
	1.5

En las Figuras 9, 10 y 11 se muestran los registros de aceleración en fracciones de g, obtenidos el 27/2/2010 en las direcciones longitudinal, transversal y vertical, respectivamente. Se observa que en la dirección longitudinal hay una reducción importante entre la cepa y el tablero y los estribos y el tablero, además de los cambios de frecuencias predominantes existentes en los registros. En la dirección transversal, las aceleraciones sobre el tablero son del mismo orden que en la cepa, pero en los estribos las aceleraciones máximas en el tablero alcanzan a 1.9g y 1.4g, debido a la interacción entre tablero y estribos a través de los topes o guías laterales. Para sismos moderados se había observado que las aceleraciones horizontales en el valle eran mayores que al

pie de la cepa, lo cual parecía indicar que los pilotes atenuaban el movimiento del suelo; en esta ocasión ese efecto no se observa. Sin embargo, para la componente vertical se aprecia una importante reducción entre el campo libre y el pie de la cepa (primeros dos gráficos de Figura 11). Esto seguramente se debe al efecto de los pilotes que se empotran en el suelo a una profundidad en que éste es más duro.

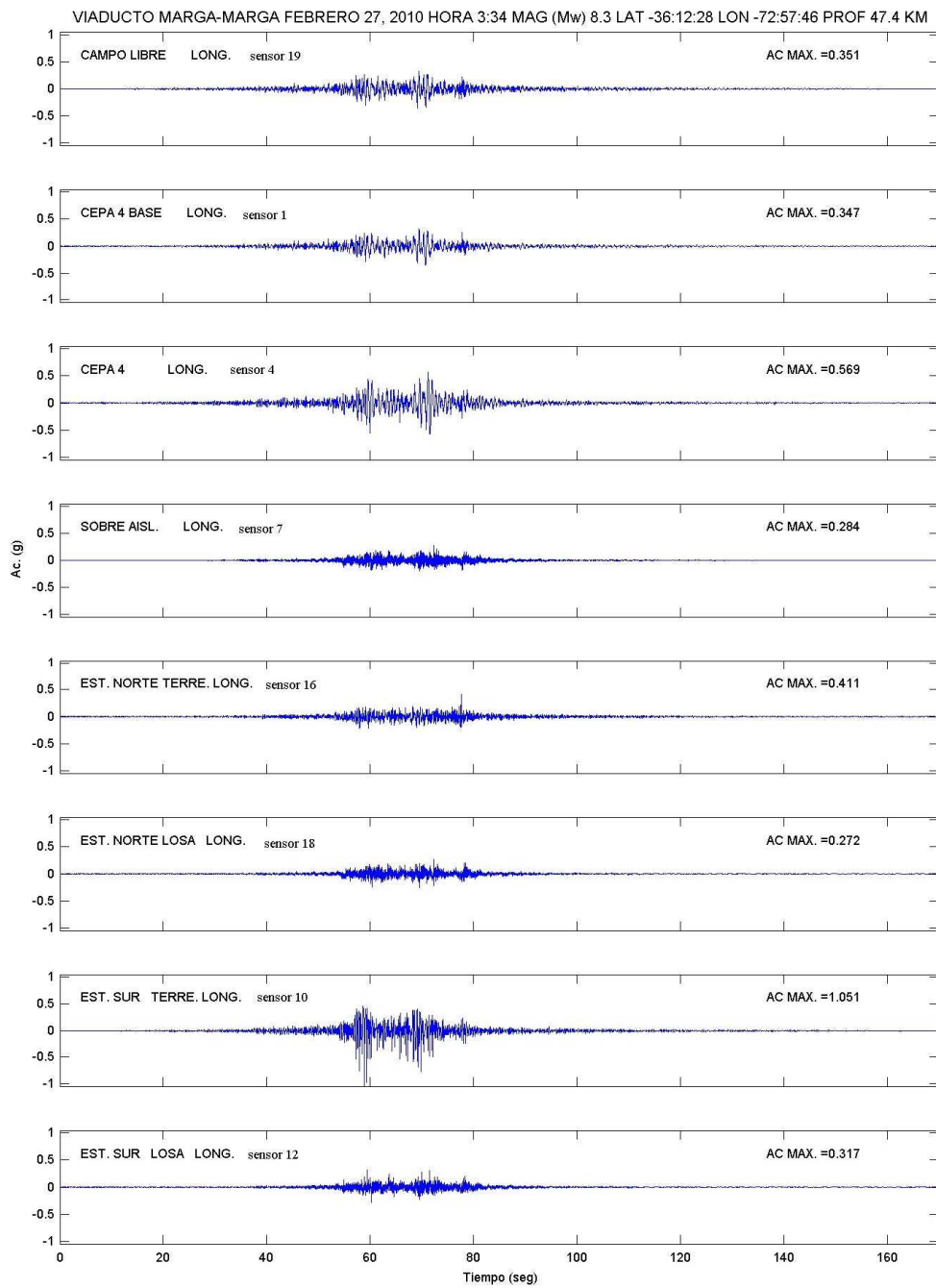


Figura 9: Dirección longitudinal

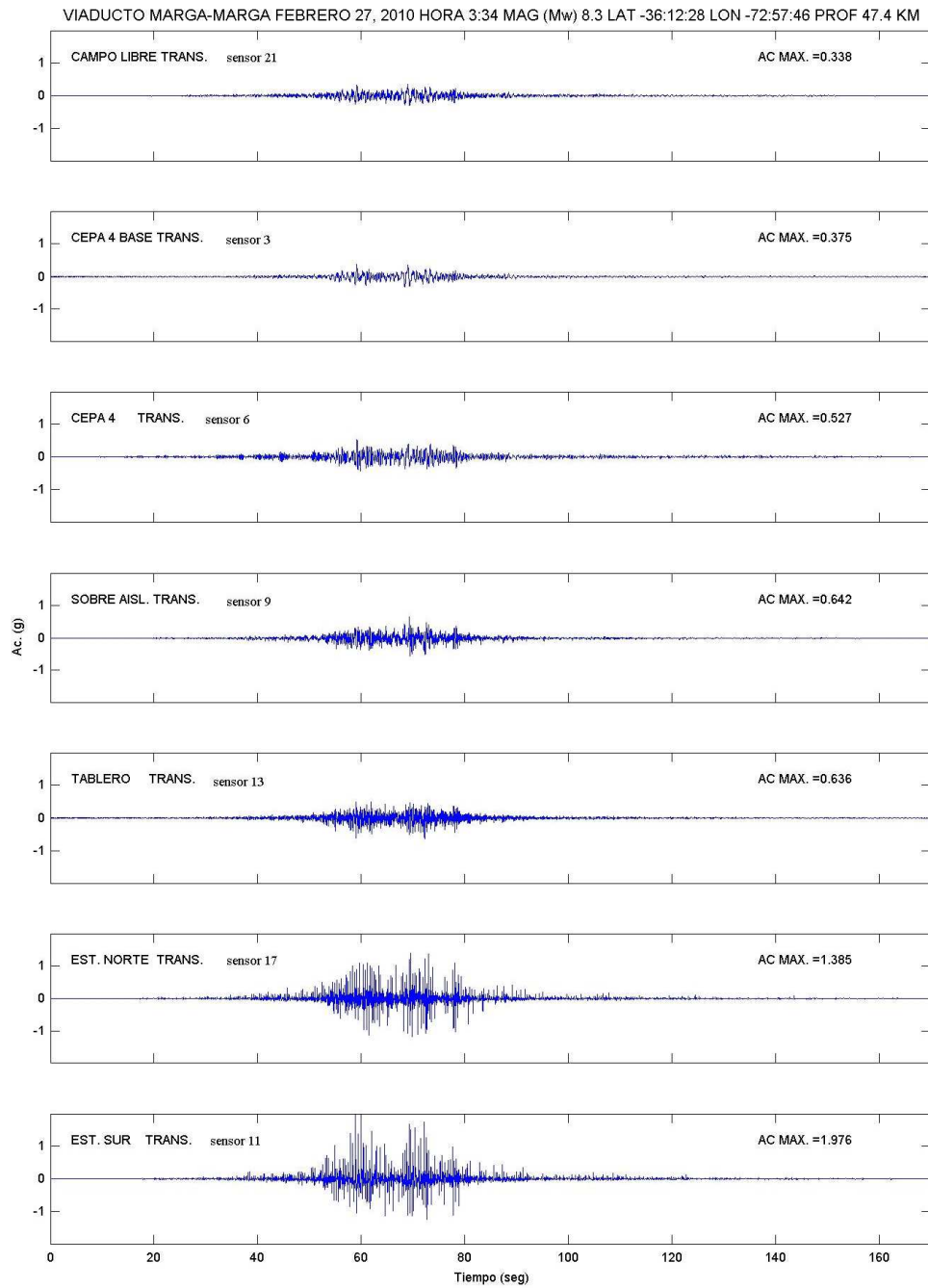


Figura 10: Dirección transversal

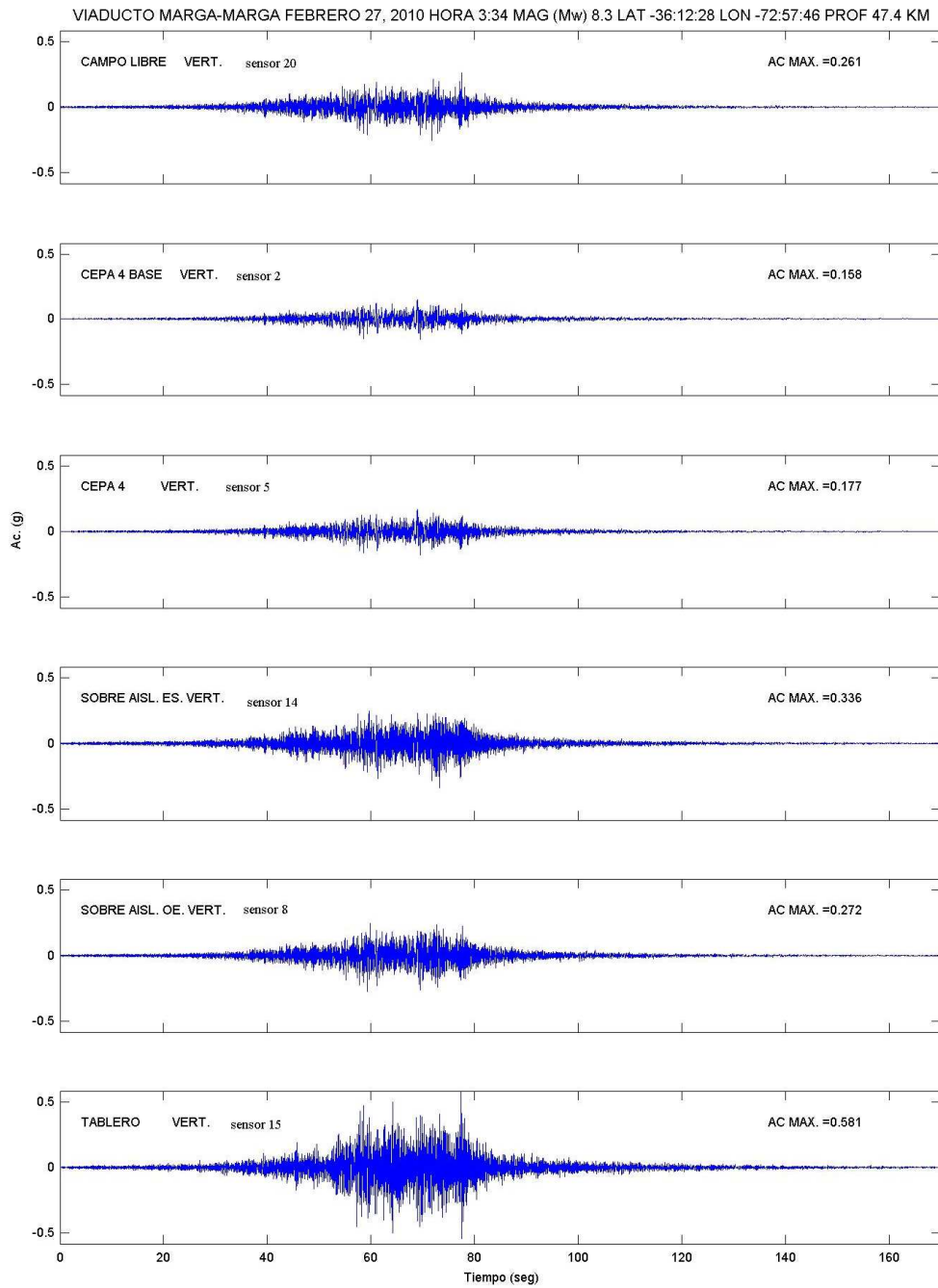


Figura 11: Dirección vertical

Realizando un análisis de Fourier, se obtiene frecuencias de vibración del tablero de 0.42 Hz y 1.1 Hz en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente y en el “campo libre valle” de

1.2 Hz, 1.0 Hz y 4.2 Hz en las direcciones longitudinal, transversal y vertical, respectivamente. La frecuencia longitudinal del tablero representa una disminución importante respecto de las medidas anteriores y es algo mayor de la considerada en la etapa de diseño. La frecuencia vertical del suelo también ha variado respecto de medidas anteriores.

2 Viaducto de Línea 5 del Metro de Santiago

La línea 5 del Metro de Santiago tiene un tramo elevado en forma de viaducto de 5.810 metros de longitud, que incluye las estaciones: Rodrigo de Araya, Carlos Valdovinos, Camino Agrícola, San Joaquín, Pedrero y Mirador. Estructuralmente, el viaducto está formado por losas de hormigón postensado, de 30 centímetros de espesor con largos que van de 27 a 36 metros y anchos de 6.3 a 7.5 metros. Las losas están soportadas por 2 vigas exteriores de hormigón pretensado, de 1.80 metros de altura, que se unen a la losa por su talón inferior mediante postensado transversal.

Las vigas están simplemente apoyadas a través de placas de neopreno reforzadas, de sección 30 x 60 cm y 5.2 cm de espesor, en los extremos de capiteles de hormigón armado soportados por una columna central hueca del mismo material, de 2.4 x 1.4 m y de 30 centímetros de espesor de pared. En las estaciones las columnas son de 2.4 x 2.2 m. Las columnas se conectan monolíticamente a sus fundaciones, las cuales consisten en un paralelepípedo recto de hormigón armado, de profundidad variable entre 7 y 12 metros, hueco, relleno interiormente con suelo de la excavación debidamente compactado. Información detallada se encuentra en Sarrazin et al. (2002). Una vista de un tramo y de la zona de estación se muestra en la Figura 12.



Estación



Tramo

Figura 12: Viaducto de la línea 5 del Metro de Santiago.

La instrumentación instalada en la Línea 5 del Metro consiste en una red local de 3 acelerógrafos uniaxiales FBA-11 y 3 acelerógrafos triaxiales FBA-23, de Kinemetrics, tal como se indica en la Figura 13. A partir de registros de aceleración de sismos moderados se determinaron los rangos de frecuencias indicados en la Tabla 2 en las direcciones longitudinal, transversal y vertical.

Tabla 2: Rango de variación de las frecuencias, sismos moderados.

Modo	Dirección	Frecuencia (Hz)	
		Mínimo	Máximo
1	Longitudinal	1.5	2.6
2	Transversal	1.4	2.4
3	Vertical	2.6	3.1

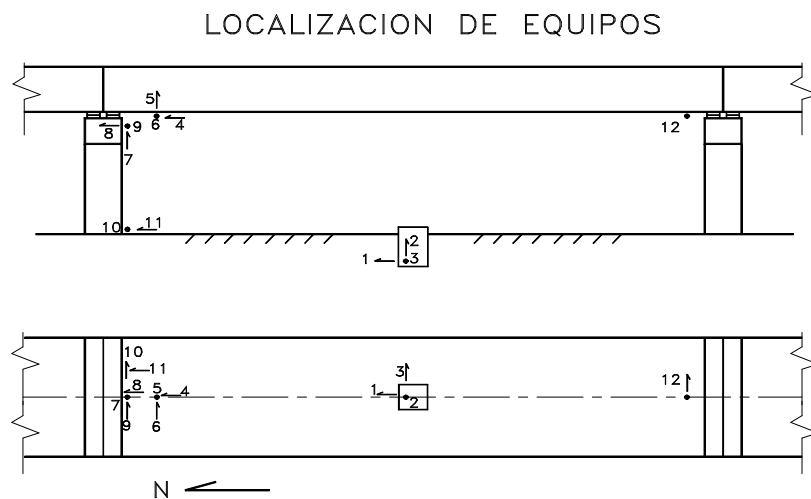


Figura 13: Localización de equipos.

El metro pudo operar normalmente con posterioridad al sismo del 27/2/2010, salvo algunos daños menores en elementos no-estructurales de algunas estaciones. En la Figura 14 se presentan los registros obtenidos el 27/2/2010. Se observa amplificación entre el campo libre y el extremo de la columna en las tres direcciones. Entre la columna y la viga hay también amplificación en dirección transversal y vertical, pero hay una reducción en la dirección longitudinal.

Es de interés observar el comportamiento de la estructura ante movimientos sísmicos a través de la amplificación (o reducción) de la señal en puntos de ella, para diferentes niveles de intensidad. Los resultados que se muestran a continuación indican que existe una fuerte no-linealidad de la respuesta con la aceleración máxima del sismo. En las Figuras 15 a 17 se comparan las aceleraciones máximas de los registros en los sensores ubicados en la parte superior de la pila y en la viga – en la dirección correspondiente- y los registros en las mismas direcciones en el “campo libre”.

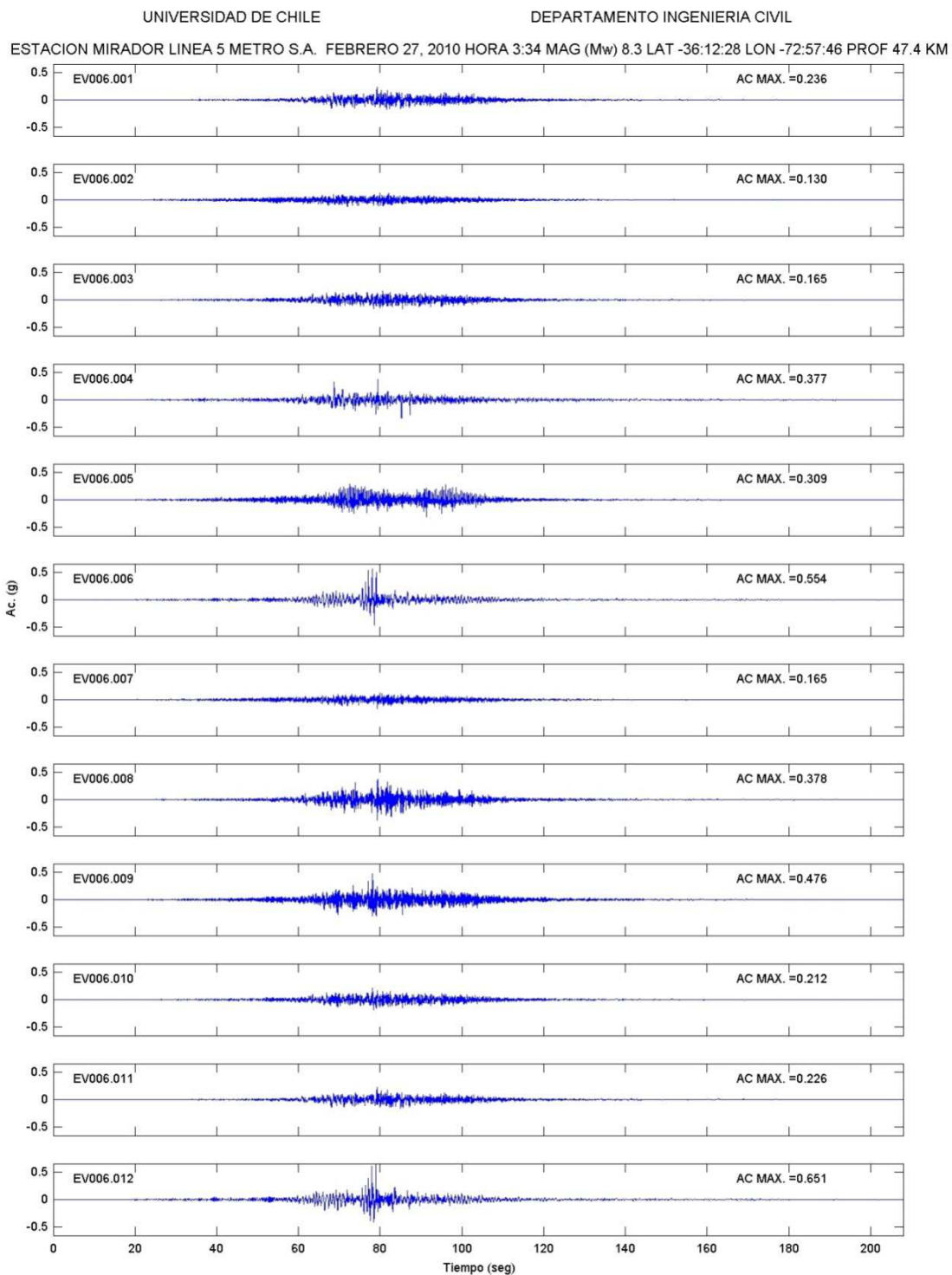


Figura 14: Registros Estación Mirador, 27/2/2010.

En la Figura 15 se aprecia una amplificación, para pequeñas aceleraciones del suelo, tanto en el extremo superior de la columna como en la viga (factor > 1). En el extremo inferior de la columna se registran aceleraciones similares a las de campo libre para todos los movimientos. Sin embargo, para niveles de excitación mayores, las aceleraciones en la viga se reducen a alrededor de la mitad de lo que se obtiene en “campo libre”. En la dirección transversal (Figura 17) ocurre algo similar, salvo que para el sismo del 27/2/2010 hay un leve aumento en la viga. En la dirección vertical, (Figura 16) en el extremo superior de la pila se registras aceleraciones parecidas a las de campo libre y hay un aumento al doble en las aceleraciones de la viga.

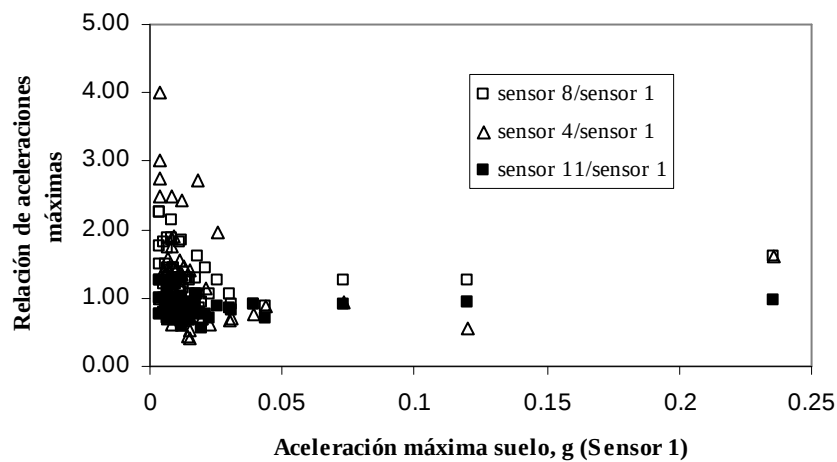


Figura 15: Relación de aceleraciones máximas longitudinales.

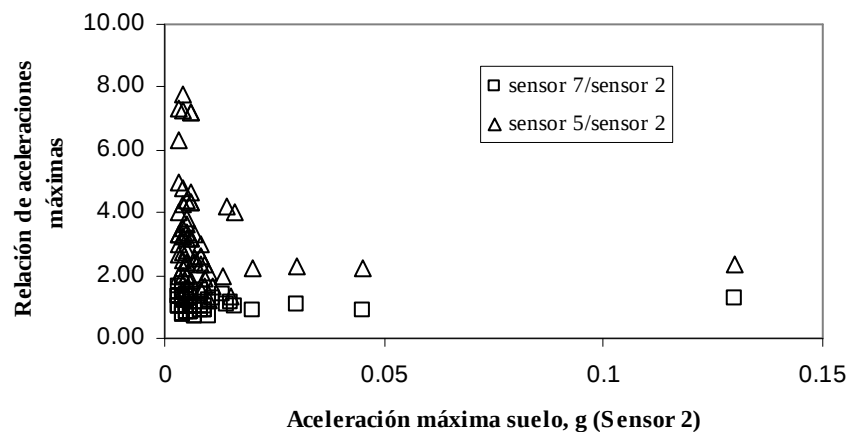


Figura 16: Relación de aceleraciones máximas verticales.

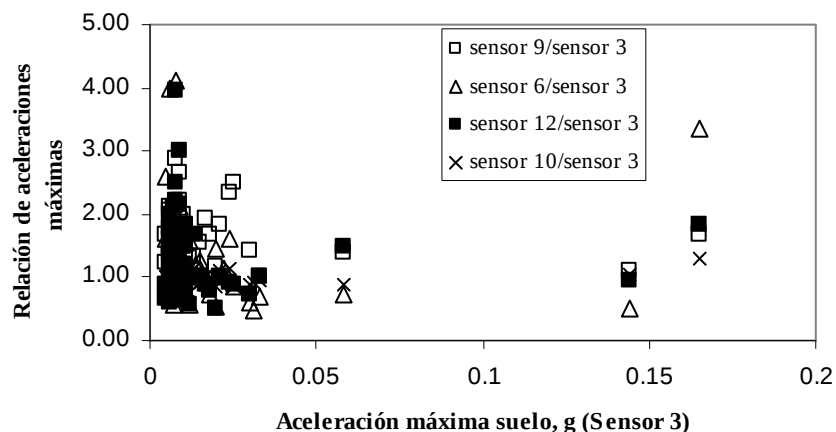


Figura 17: Relación de aceleraciones máximas transversales.

3 Conclusiones

A pesar de la magnitud del sismo del 27/2/2010 la mayoría de las estructuras viales tuvieron un comportamiento apropiado. Sin embargo, aunque sólo el 4.6% de las estructuras expuestas en la zona afectada quedaron con daños o inutilizadas, se produjo una situación crítica para el transporte de superficie, lo cual era vital para el suministro de las comunidades amagadas.

Las estructuras con aislación sísmica tuvieron buen comportamiento, y gracias a la instrumentación instalada en algunas de ellas se obtuvo por primera vez importante información sobre su respuesta para sismos severos. En general, existen reducciones importantes en la dirección longitudinal, y aunque en vertical se amplifica el movimiento, esta parece estabilizarse en valores soportables para las estructuras.

4 Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias al apoyo financiero de la Universidad de Chile, MOP, Metro de Santiago y Fondecyt, quienes durante más de una década han aportado a la instalación de los equipos y su manutenzione.

Referencias

- BARRIENTOS S. (2010) *Terremoto Cauquenes 27 Febrero 2010, Informe Técnico Actualizado 27 Mayo 2010*, <http://ssn.dgf.uchile.cl>
- BOROSCHEK R., MORONI M., SARRAZIN M., (2003) Dynamic characteristics of a longspan seismic isolated bridge, *Eng. Struct.* V.25, p. 1479-1490
- BOROSCHEK R., SOTO P., LEÓN R., COMTE D. (2010) *Terremoto Centro Sur, 27 Febrero 2010, Informe Preliminar N°4*, www.renadic.cl
- MORONI M.O., SARRAZIN M., BENAVIDES C., DÍAZ A., (2004) Características dinámicas de puentes chilenos con protección sísmica, *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo*, v. 1, n. 2, p. 55-73.
- SARRAZIN, M., MORONI M.O., ROMO D., QUINTANA J., SOTO P. (2002) Respuesta sísmica de puentes chilenos con apoyos aislantes, *Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, v. 2, n. 2, p. 31-48.
- TAYLOR D., TRIGO T., MORONI M.O., SARRAZIN M. (2008) Análisis dinámico del puente Marga-Marga considerando variación espacial del movimiento sísmico, *Proc. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*.
- TCLEE, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (2010) Preliminary Report on the 27 February 2010 Mw 8.8 Off-shore Maule, Chile Earthquake, <http://www.eqclearinghouse.org/20100227-chile/published-reports>

Behaviour of seismic isolated bridges during the 27/2/2010 Maule Earthquake, Chile

Abstract

On February 27th 2010 an earthquake $M_w = 8.8$ hit central part of Chile. The epicentre was located in Cobquecura, Maule Region. After the earthquake a tsunami caused hundred of casualties and severe damage to housing and infrastructure. In particular, 6.5% of highway over-pass and several pedestrian bridges collapsed. On the other hand, seismic isolated bridges showed a good behaviour and seismic records were obtained in two of them: MargaMarga bridge, located in Viña del Mar, 300 km from the epicentre, and a viaduct of the Santiago Metro, 400 km from the epicentre. In this paper, some bridge failures are described and seismic records are analysed.

Keywords: Seismic isolation. Bridges. Seismic Records.

1 Introduction

A $M_w = 8.8$ earthquake hit the central part of Chile on February 27 2010 at 3:35 AM followed by a tsunami that affected the coast from Lebu to Lolleo. The epicentre was located at 35 Km depth, close to Cobquecura, Maule region. The Earthquake had a duration of near 140 s with a strong motion zone of 40 s to 50 s and maximum ground acceleration of 0.552 g (N-S), 0.640 g (E-W), and 0.352 g (U-D), registered at Constitución, 204 Km north from the epicentre. The zone concentrates more than 50% of the population and economical activities of Chile. Severe damage on housing, industries and infrastructure was reported.

During the last 15 years, a new four-lane highway system has been built in Chile, extending from La Serena in the north to Puerto Montt in the south, including many bridges. Due to the high seismic risk, vibration isolation bearings and passive energy dissipation devices have been included in the design of the majority of moderate to large span bridges. Two of them, located in the central part of Chile, were instrumented with local accelerometer network. They are the Marga-Marga bridge, located in Viña del Mar (about 300 Km from the epicentre) and a viaduct of the metropolitan train in Santiago (400 Km from the epicentre). These records and the behaviour of isolation devices on structures are analysed and discussed in this paper. Additionally, damages on over passes and pedestrian bridges are reported.

2 Description of damage in bridges

Most of bridges in Chile are simply supported beams, made of reinforced concrete, pre-stressed concrete or structural steel. There are transverse reinforced concrete elements that connect the beams over the abutments and at the piers and also vertical steel bars that connect the deck with piers and abutments (called “anti-seismic bars”). In year 2000, when massive use of pre-cast, pre-tensioned beams started, the previous practice changed in many cases, eliminating the transverse reinforced concrete stiffeners. Steel stoppers were included instead at bottom flange of beams, Fig.1.

High damping rubber or neoprene bearings and passive energy dissipation devices have been included in the design of the majority of moderate and large span bridges. Moroni et al. (2004) performed experimental determination of the dynamic properties of seven bridges with different structural and seismic protection systems subjected to ambient vibration. Horizontal frequencies ranged between 0.68 to 1.46 Hz and equivalent damping varied between 1 and 4.4%.

Due to the February 27th, 2010 earthquake, 6.5% of over pass and pedestrian bridges failed and 16 bridges collapsed. Considering that the collapsed structures didn't have, in general, the transverse concrete reinforcements, and that that was the main cause of failure, the Ministry of Public Works put back its compulsory use. Some of them had skew support that also contributed to the collapse. Fig. 2 and 3 show collapsed bridges in VespucioNorte Highway and Route 5. A strong soil amplification effect due to soft soil conditions was observed in most of the locations where the bridges had problems.

In Concepción, 3 bridges over Bio-Bio river collapsed disconnecting the south of the city from downtown due to soil liquefaction (Fig. 4). Between the cities of Curico and Talca, a historical masonry bridge collapsed (Fig. 5).

On the contrary, all bridges with seismic protection showed good behaviour (Fig. 6). The only exception was Cardenal Silva Henríquez bridge in Constitución, where the tsunami moved an steel beam 30 cm out of the supports along 6 spans (TCLEE report 2010).

3 MargaMarga bridge

The Marga-Marga bridge was the first bridge in the country that included a seismic isolation system under the superstructure. Located at Viña del Mar, in the coastal central zone of Chile, it is formed by four continuous steel girders separated 4.40 m between them with a total length of 383

m. They are supported on seven reinforced concrete piers, 20 m to 30 m height, and two abutments. Over these girders rests a slab 0.27 m thick and 28 m wide. The girders are supported by high damping rubber bearings, Figure 7.

The deck cannot move transversely over the abutments. Each span, with the exception of the south end, is 50 m long. Pier height varies from 22 to 32 m. Groups of ten one-meter diameter piles of variable length (14 to 31 m), resting on granular material, free of fines, support piers C2 to C6. Simple mat foundations support pier C1, C7, and the abutments. A complete description can be found in Boroschek et al. (2003).

The bearing sections vary according to the axial load: those located on the piers have a section of 0.85 x 0.55 m; those located at the North abutment are 0.5 x 0.7 m and those located at the South abutment are 0.5 x 0.5 m. Design shear modulus for the rubber at 50% shear strain was 0.75 ± 0.05 MPa and equivalent damping for the same shear strain was 8-10%.

The bridge was instrumented with a network of 24 force balance accelerometers, including 6 for the “free field” at the valley and rock, 6 at top and bottom of the central pier, C4, and the remaining 13 over the deck and the abutments. Fig. 8.

Ambient vibrations on the soil were recorded with sismometers at the bottom of pier C4 and at the valley surface, 20 m to the west. Predominant frequencies of 1.3 and 1.8 Hz were obtained in the horizontal and vertical direction, respectively. Later, using records of moderate earthquakes and the Nakamura method, a frequency of 1.2 Hz was determined at the valley and 4.4 Hz at the rock outcrop near the south abutment. (Taylor et. al., 2008). With the same array of instruments, the frequencies at the superstructure that are shown in Table 1 were computed.

Fig. 9, 10 and 11 show the acceleration records obtained in the longitudinal, transverse and vertical directions on 2/27/2010. An important reduction is seen in the longitudinal direction between the pier and the deck and between the abutments and the deck. Frequency changes are apparent. Acceleration in transverse direction in the deck and top of the pier are about the same, but peak accelerations at the abutments in the transverse direction are 1.9g and 1.4g due to interactions between the deck and the abutments. It had been observed during moderate earthquakes that peak acceleration at the valley were higher than at the bottom of pier C4, indicating that the piles filter the seismic waves. In the last earthquake that behaviour was not observed. An important reduction in the vertical direction between the free field and the bottom of pier C4 is observed. This is due to the fixed support effect imposed on the piles at some depth where the soil is stiffer.

4 Viaduct Metro line 5, Santiago

The viaduct Metro line 5 includes five stations: Rodrigo de Araya, Carlos Valdovinos, Camino Agrícola, San Joaquín, Pedrero and Mirador. The structure consists of a 30 cm thick pre-stress slab, 27 to 36 m long and 6.3 to 7.5 width. In the transverse direction the slab is connected to the bottom flange of I shaped precast beams, 1.8 m high.

The beams are simply supported on neoprene bearings (30 x 60 x 5.2cm) that are located at the top of hollow reinforced concrete columns, which dimensions are: 2.4 x 1.4 m and 30 cm thick. At the stations the columns are 2.4 x 2.2 m. A hollow parallelepiped 7 to 12 m depth filled with compact soil is used as columns' foundation. A complete description is in Sarrazinet. al. (2002). Fig. 12 shows Mirador station and the span where accelerometers are located.

The accelerometers' network consists of 3 uniaxial FBA-11 and 3 triaxial FBA-23, Fig. 13. Table 2 shows frequencies in longitudinal, transverse and vertical directions at the superstructure obtained from moderate seismic records.

The metro line service continued its operation normally after the earthquake. Only minor non-structural damage in some station were reported. Fig. 14 shows records obtained on 27/2/2010. There is amplification between the free field and the top of the columns in all directions and between the column and the deck in the transverse and vertical directions. However, there is reduction in the longitudinal direction between the column and the deck.

It is interesting to compare peak accelerations at different locations and how they depend on the seismic intensity: the behavior of this structure is highly non-linear with the peak ground acceleration. Figs. 15 to 17 show the relation between peak acceleration at the top of the column and at deck respect to the "free field".

In the longitudinal direction (Fig. 15) the ratio for the top of the column and the deck is larger than 1 for low accelerations but it reduces to 0.5 for higher accelerations. At the bottom of the column peak accelerations are always quite similar to the free field values.

A similar situation is observed in the transverse direction, although for the 27/2/2010 record there is a light amplification at the deck, (Fig. 17). In the vertical direction, peak acceleration at the deck is about twice the peak acceleration at the top of the column, which is similar to the free field value.

5 Conclusion

Despite the severity of the February 27th 2010 earthquake, most of the transport lines had an appropriate behaviour. The damaged building structures represent about 4.6% of the total that were located at the disaster zone, but the consequences were very important, the country was divided by the destroyed highways and roads, blocking the supply and help to the damaged zone.

The structures with seismic isolation had a good behavior, and for the first time records from a severe earthquake were obtained on them. In general, there were important reductions of peak accelerations in the longitudinal direction. There were amplifications in the vertical direction, but they were bounded to values that are affordable for the structures.