

PROPUESTA DE DISIPADOR MULTIPERFORADO PARA CONEXIONES TRABE - COLUMNA PREFABRICADAS DE CONCRETO REFORZADO

VLADIMIR RODRÍGUEZ MORENO,
HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA
Y JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

Resumen

Después del sismo de Puebla-Morelos (M 7.1) ocurrido el 19 de septiembre de 2017, el interés por limitar el daño a los componentes estructurales de los edificios ha aumentado significativamente en México. Como consecuencia, se ha popularizado el uso de dispositivos de disipación de energía. Siguiendo esa línea, se presenta un dispositivo multiperforado propuesto como un disipador pasivo de energía para conexiones trabe-columna prefabricadas de concreto reforzado. Se evaluó teórica y experimentalmente el comportamiento estructural del dispositivo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se realizaron ensayos cíclicos cuasi-estáticos incrementales y de amplitud constante en ocho especímenes, dos de ellos con costillas de sección no uniforme. El disipador propuesto mostró un comportamiento histerético estable y desempeño sísmico adecuado. El uso de costillas de sección no uniforme incrementó significativamente la capacidad de deformación y el desempeño ante cargas de fatiga del disipador, lo cual es deseable para zonas sísmicas donde se esperan sismos de larga duración como en la Ciudad de México.

1. Introducción

El uso de dispositivos de disipación de energía se ha vuelto cada vez más común en México. En particular, los sistemas de control pasivo se están utilizando cada vez más para el control estructural debido a su eficiencia en la mitigación del riesgo sísmico. Existen varios tipos de dispositivos pasivos de disipación de energía, como los disipadores histeréticos metálicos [1], los amortiguadores viscosos [2], los amortiguadores viscoelásticos [3] y los disipadores de fricción [4]. Una de las principales ventajas de los sistemas de control pasivo es que no requieren una fuente de alimentación externa ni algoritmos informáticos para operar; por tanto, se elimina el problema asociado con posibles

fallas en el suministro de energía y el control por computadora durante un evento sísmico [5]. Adicionalmente, si es necesario, los dispositivos dañados se pueden reemplazar con un tiempo y costo mínimos.

Los disipadores histeréticos metálicos son dispositivos de control pasivo efectivos y económicos para la disipación de la energía sísmica, la cual, se logra mediante la deformación plástica del material metálico [6]. Se han propuesto diversos disipadores metálicos como el dispositivo de amortiguamiento y rigidez añadida (ADAS) [6], el disipador de nido de abeja [7] el contraventeo restringido al pandeo [8] y el disipador multiperforado (DM), que por sí mismo tiene variaciones múltiples [5,9-11] y es en el que este estudio se ha enfocado.

Los DM son opciones económicas y confiables para conexiones trabe-columna de acero [11]. Estos dispositivos logran disipar energía a través de la deformación plástica de las costillas debido al momento flexionante y a la fuerza cortante actuantes en éstas. Presentan un comportamiento histerético estable y disipan cantidades sustanciales de energía bajo carga cíclica mientras mantienen a los elementos menos dúctiles esencialmente elásticos [9]. El DM propuesto aquí, tiene como objetivo la protección de estructuras prefabricadas de concreto reforzado construidas en zonas sísmicas. Como consecuencia, se necesitan datos confiables para fines de diseño como, por ejemplo, las relaciones de ductilidad máxima. Para ello, el desempeño sísmico del disipador se evaluó teóricamente, seguido de una verificación experimental. Se ensayaron un total de ocho DM bajo carga cíclica reversible incremental y de amplitud constante. Los resultados mostraron un comportamiento histerético estable y un desempeño sísmico adecuado.

2. Descripción del dispositivo

El DM está fabricado a partir de una sola placa de acero con ranuras alargadas con transiciones suavizadas en los extremos. Las franjas de acero que permanecen en el dispositivo, que le proporcionan al sistema la capacidad de disipación de energía, se denominan aquí como "costillas". En la Figura 1 se muestra una configuración típica del disipador propuesto y sus propiedades geométricas. Las costillas del disipador se pueden idealizar con líneas rectas, de acuerdo con Oh *et al.* [9], con un ancho de costilla constante b , y una longitud efectiva l_o .

Cuando un DM se somete a una fuerza P en el plano, en una dirección perpendicular a la de las costillas, un momento flexionante y una fuerza cortante ocurren simultáneamente en las costillas. En los casos en que la relación de aspecto de la costilla, definida como la relación ancho-longitud efectiva (b/l_o), es relativamente pequeña, el comportamiento del disipador se rige principalmente por la flexión. Las costillas se comportan como

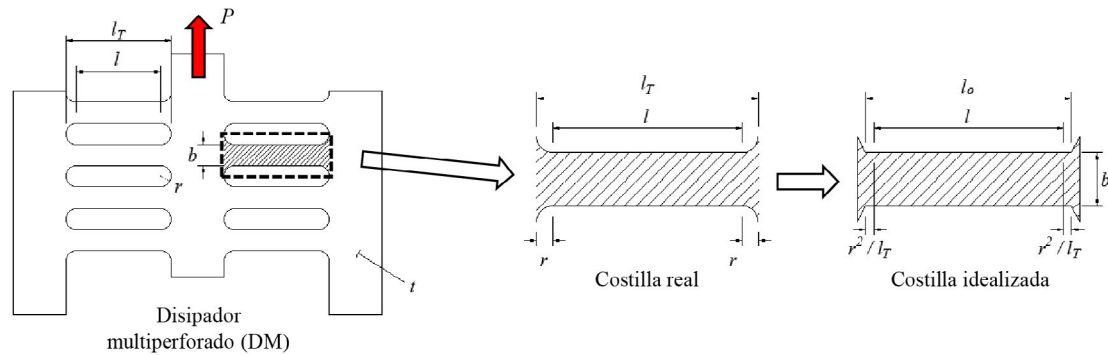


Figura 1. Características principales del dissipador propuesto e idealización de las costillas

vigas parcialmente empotradas y se deforman en doble curvatura. Bajo grandes desplazamientos, el momento flexionante puede causar que las fibras extremas rebasen el límite elástico y formen articulaciones plásticas en ambos extremos de la costilla.

Si se asume que el dispositivo tiene un comportamiento elasto-plástico perfecto, la carga de fluencia, $P_{y,c}$, puede determinarse con base en un análisis del mecanismo plástico cuando se forman articulaciones inelásticas en ambos extremos de las costillas. Esta carga es distribuida uniformemente en cada uno de las costillas, y el momento flexionante generado tiene una distribución lineal desde el centro del claro, donde el momento es cero, hasta los extremos, donde el momento es máximo.

En el caso de dissipadores multiperforados con costillas de sección no uniforme, se puede determinar el momento actuante sobre éstas, a una longitud x desde la mitad del claro, e igualarlo con el momento plástico $M_{p,c}$ de la sección transversal a la misma distancia. Haciendo lo anterior en toda la longitud de la costilla, se supone que toda la longitud alcanza el momento plástico, por tanto, se puede obtener el ancho optimizado (b_x) a una distancia x . Lo anterior asume que la

costilla sólo está sujeta a momento flexionante; sin embargo, el esfuerzo cortante también es introducido en la costilla, por lo que se debe contar con un ancho mínimo para evitar una falla frágil antes de la formación de las articulaciones plásticas debido al momento flexionante.

3. Evaluación experimental del dispositivo

Se ensayaron un total de ocho especímenes bajo carga cíclica reversible. Cinco de los especímenes se sometieron a carga cíclica reversible de manera incremental, mientras que los tres restantes se sometieron a carga cíclica reversible de amplitud constante. Las propiedades geométricas y mecánicas de los especímenes se muestran en la Tabla 1, donde n es el número de costillas, $P_{y,c}$ y $P_{u,c}$ son la carga de fluencia esperada y la carga última esperada, respectivamente; $\delta_{y,c}$ es el desplazamiento de fluencia, y $K_{SD,c}$ es la rigidez elástica. También se muestra el tipo de prueba aplicado a cada espécimen. Se estudiaron tres configuraciones del dissipador propuesto: SD1, SD2 y SD3-NU. Éstos se muestran en la Figura 2. Los especímenes con la notación NU se diseñaron con costillas de sección no uniforme.

Tabla 1. Especímenes de prueba.

Espécimen	n	t (mm)	b (mm)	b/l_0	$P_{y,c}$ (kN)	$P_{u,c}$ (kN)	$\delta_{y,c}$ (mm)	$K_{SD,c}$ (kN-mm)	Tipo de prueba
SD1-I1	8	12.7	12.7	0.14	33.0	49.4	1.91	17.2	Incremental
SD1-I2									Incremental
SD1-C3	8	12.7	12.7	0.17	39.7	59.5	1.36	29.3	Amplitud constante
SD2-I1									Incremental
SD2-I2									Incremental
SD2-C3									Amplitud constante
SD3-NU-I1	8	12.7	12.3	0.14	31.0	46.4	2.97	16.0	Incremental
SD3-NU-C2									Amplitud constante

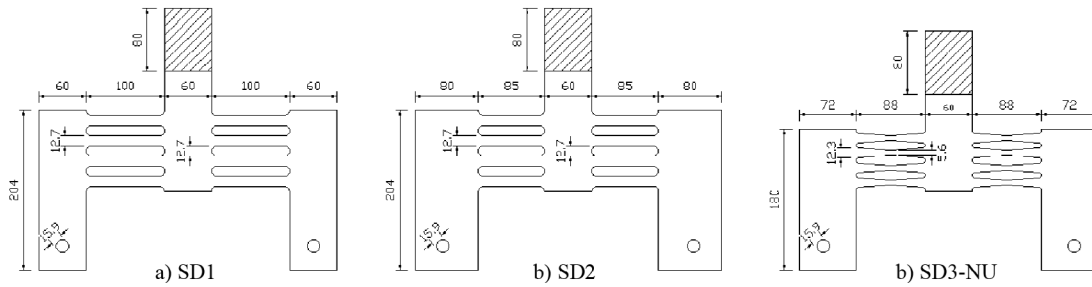


Figura 2. Croquis de especímenes de prueba

Una fotografía de la configuración del experimento se muestra en la Figura 3. Se perforaron dos orificios de 15.9 mm de diámetro en la parte inferior de los elementos verticales laterales de cada DM para conectar un sujetador de acero al disipador, mismo que fue sujetado por una mordaza del marco de carga. En la parte superior del disipador, aproximadamente a 80 mm del elemento central, los dispositivos fueron sujetos por una mordaza superior.

El protocolo de carga para las pruebas por amplitudes incrementales consistió de dos ciclos por cada desplazamiento objetivo. Se propuso un protocolo basado en la distorsión de la costilla, definida como la relación entre el desplazamiento al centro del disipador y la longitud total de la costilla. La relación entre un desplazamiento objetivo y el incremento subsecuente

fue entre 1.4 y 1.5, hasta una distorsión de 15%. Posteriormente, los incrementos se fijaron en 2.5% de distorsión hasta que se alcanzó la falla. Para las pruebas de amplitud constante, se propuso un protocolo de carga basado en una relación de ductilidad (μ) constante. Al principio de estas pruebas, se impusieron dos ciclos a una ductilidad de $\mu = 1$ y dos ciclos a $\mu = 2$ como procedimiento de evaluación del espécimen. Después, se impuso una amplitud de ductilidad constante de $\mu = 4$ hasta que se alcanzó la falla del espécimen. La ductilidad se definió como la relación entre el desplazamiento impuesto durante la prueba y el desplazamiento de fluencia basado en los resultados experimentales obtenidos de los ensayos cíclicos incrementales. En ambos tipos de prueba se consideró que se alcanzaba la falla cuando la carga máxima registrada disminuyó 20% o más.



Figura 3. Configuración del Experimento

4. Resultados y discusión

Las curvas de histéresis obtenidas de las pruebas cíclicas incrementales se muestran en las Figuras 4a-c y las envolventes de éstas se muestran en la Figura 4d. Como se puede observar, todos los especímenes desarrollaron ciclos de histéresis amplios y estables. Los especímenes SD1 perdieron su capacidad de carga después del primer ciclo aplicado a una distorsión de 0.2 rad, mientras que los especímenes SD2 sólo completaron el primer ciclo a la misma distorsión. La carga medida del espécimen SD3-NU-11 cayó ligeramente por debajo de 80% de la carga máxima registrada en el segundo ciclo a una distorsión de 0.3 rad. De la Figura 4d se puede notar que, a diferencia del resto de los especímenes, el espécimen SD3-NU-11 no exhibió una caída abrupta de su resistencia cerca de la falla, aún después de que se haya fracturado una costilla.

Para todos los especímenes, las distorsiones de fluencia experimentales fueron aproximadamente 3% de la longitud total (l_f) de la costilla. Las rigideces experimentales iniciales fueron muy similares a las rigideces elásticas teóricas.

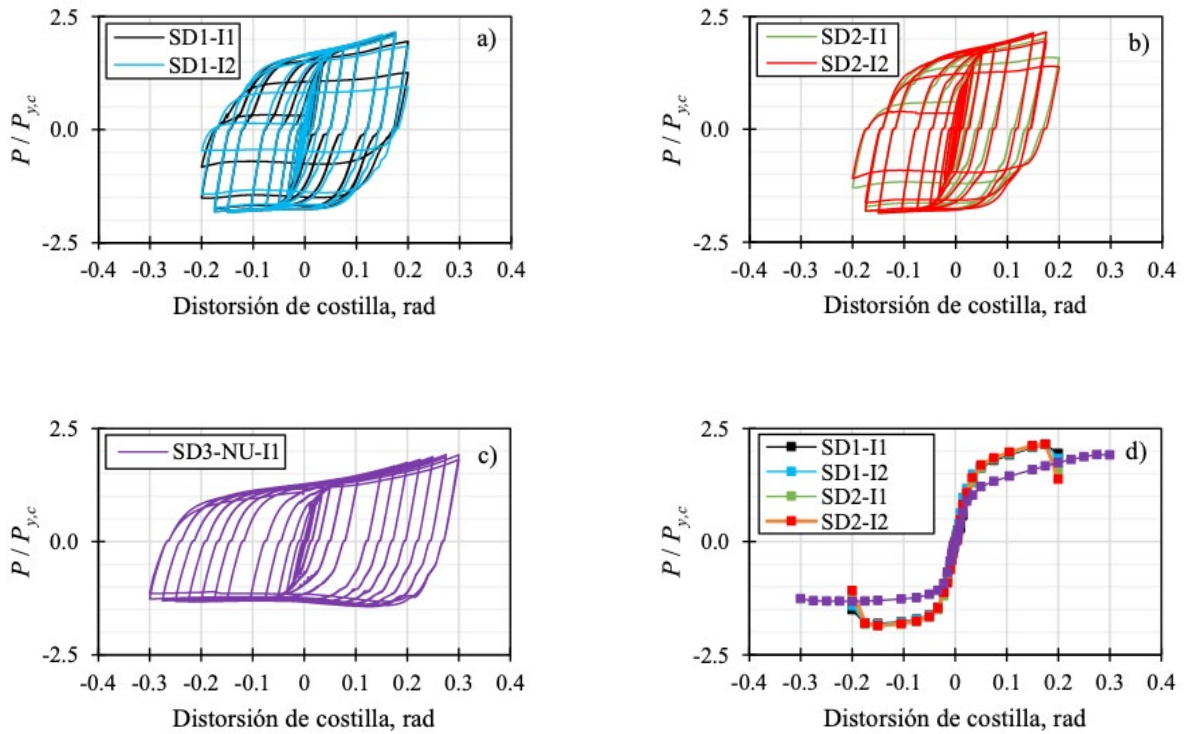


Figura 4. Curvas de histéresis

La rigidez inicial del espécimen SD3-NU-I1 fue similar a las de los especímenes tipo SD1. Esto sugiere que la rigidez elástica de un disipador con costillas de sección uniforme es similar a la de un disipador con costillas de sección no uniforme, siempre y cuando posean una relación de aspecto similar. Los especímenes con costillas uniformes desarrollaron una ductilidad promedio de 6.4, mientras que SD3-NU-I1 desarrolló una ductilidad promedio de 10.6, lo que pone en evidencia la principal ventaja de usar costillas no uniformes, que es incrementar significativamente la capacidad de deformación y de disipación de energía del DM.

Las curvas de fatiga de los especímenes se muestran en la Figura 5. El espécimen SD3-NU-C2 mostró un desempeño superior ante la fatiga, pues soportó 66 ciclos de carga. Su contraparte uniforme SD1-C3, que tiene una relación de aspecto similar, sólo aguantó 10 ciclos de carga. El espécimen SD2-C3 soportó 9 ciclos. Claramente se pueden ver las ventajas de usar costillas de sección no uniformes. Además de mejorar el desempeño ante la fatiga, el daño en el dispositivo se retrasó significativamente y se distribuyó a lo largo de las costillas, a diferencia de los especímenes SD1-C3 y SD2-C3 que presentaron daño mayormente concentrado en los extremos.

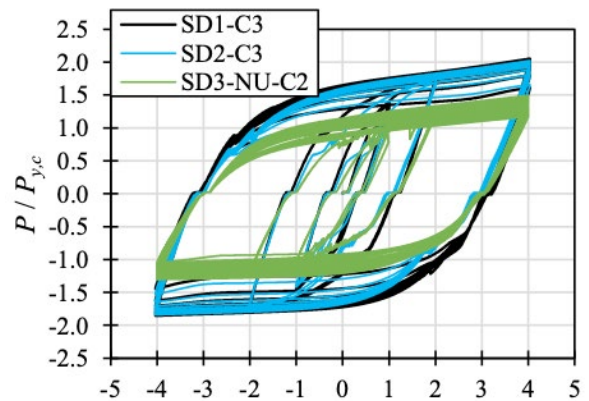


Figura 5. Curvas de Fatiga

Así mismo, la capacidad de carga de SD3-NU-C2 se redujo lentamente hasta la falla, aún con una costilla fracturada. Los especímenes SD1-C3 y SD2-C3 perdieron capacidad de carga inmediatamente después de la fractura de una costilla.

5. Conclusiones

Se presentó un disipador multiperforado que tiene como objetivo la protección de estructuras prefabricadas de concreto reforzado. Fue conceptualizado de tal manera que pueda ser instalado en la conexión trabe-columna y concentrar la mayor parte de la deformación plástica en sí mismo. Para verificar el desempeño del disipador propuesto, se realizaron pruebas cíclicas reversibles incrementales y uniformes en ocho especímenes. Los especímenes ensayados mostraron tener un comportamiento cíclico adecuado con ciclos de histéresis amplios y estables. Los especímenes con costillas de sección

no uniforme mostraron tener una capacidad de deformación y desempeño ante la fatiga superior a los disipadores con costillas de sección uniforme, lo que puede ser deseable para zonas sísmicas donde se esperan sismos de larga duración como en la Ciudad de México.

A pesar de que el disipador multiperforado propuesto ha demostrado ser un dispositivo de protección sísmica eficiente, su comportamiento aún no se ha evaluado en una conexión trabe-columna prefabricada real. La conceptualización del sistema trabe-columna y la evaluación teórica y experimental se llevarán a cabo en un estudio futuro y los resultados estarán disponibles próximamente. |

Referencias

1. Javanmardi A., Ibrahim Z., Ghaedi K., Benisi Ghadim H., Hanif M. U. State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development and implementation. *Archives of Computational Methods in Engineering* 27 (2020) 455-478.
2. Yang J., Lu Z., Li P. (2020). Large-scale shaking table test on tall buildings with viscous dampers considering pile-soil-structure interaction. *Eng Struct.* 220.
3. Chang K. C., Soong T. T., EERI M., Lai M. L., Nielson E. J. (1993). Viscoelastic dampers as energy dissipation devices for seismic applications. *Earthquake Spectra* 9 371-387.
4. Jaisee S., Yue F., Ooi Y. H. (2021). A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Eng Struct.* 235.
5. Chan R. W. K., Albermani F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Eng Struct.* 30 1058-1066.
6. Bergman D. M., Goel S. C. (1987). Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness, Report No. UMCE87-10, University of Michigan, Ann Arbor, Mich..
7. Kobori T., Miura Y., Fukusawa E., Yamada T., Takenake Y. (1992). Development and application of hysteresis steel dampers. In: *Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering*, 2341-2346.
8. Clark P., Aiken I., Kasai K., Ko E., Kimura I. (1999). Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices. *68th Annual Convention SEAOC*, 355-371.
9. Oh S. H., Kim Y. J., Ryu H. S. (2009). Seismic performance of steel structures with slit dampers. *Eng Struct.* 31 1997-2008.
10. Lee C. H., Ju Y. K., Min J. K., Lho S. H., Kim S. D. (2015). Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings. *Eng Struct.* 99 192-204.
11. Naeem A., Kim J. (2019). Seismic performance evaluation of a multi-slit damper. *Eng Struct.* 189 332-346.