

An Economical Solution for Strengthening Concrete Columns

by Mo R. Ehsani

Reinforced concrete columns in many older buildings may require strengthening. This need could arise from a variety of conditions. In warm and humid coastal regions and aggressive environments, the corrosion of reinforcing steel results in the loss of capacity of the columns. In other cases, poor quality control during the original construction may result in low compressive strength of the concrete and reduced capacity of the column. The author was personally involved with the retrofit of two such buildings in Florida, USA, where the concrete compressive strength was below 1500 psi (10.3 MPa), only a fraction of the strength specified in the design documents. Some of the investigations following the collapse of Champlain Towers in Surfside, FL, have also mentioned weak and “powder-like” concrete in the columns as a potential contributing factor to the failure.

This article describes a method for enhancing both the axial and flexural capacity of such columns. Implementing the technique is relatively easy, leading to a fast and economical solution with minimal disruption to the occupants. An additional feature of the repair is its small footprint, which minimizes floor space loss due to such modifications.

Conventional Solution

The author introduced the concept of repair and strengthening of structures with fiber-reinforced polymer (FRP) products in the late 1980s.¹ In that approach, known as a wet layup, sheets of carbon or glass fabric are saturated in the field with epoxy. They are bonded to the external surface of structural elements, such as beams, columns, or walls. Within several hours, the materials harden and the FRP strengthening serves as additional tension reinforcement that can contribute to the flexural and shear resistance of the host structure.

The FRP fabrics wrapped around the column confine the concrete and can increase its compressive strength. This results in an increase in the axial capacity of the column. While the technique is efficient for circular columns, the gain in axial capacity for rectangular columns is limited.

Because FRP cannot be easily extended through the floors, it is difficult to achieve significant axial and flexural enhancement of columns with these products. Furthermore, externally bonded FRP does not increase the stiffness of the column that much. These shortcomings can be overcome using FRP laminates.

FRP Laminates

Over a decade ago, a new type of FRP laminate (PileMedic[®], shown in Fig. 1) was introduced for applications in strengthening columns or piles and pipes.² These laminates are produced with specially designed equipment where sheets of carbon or glass fabric up to 9 ft (2.7 m) wide are saturated with resin and passed through a press that applies uniform heat and pressure. The laminates offer several advantages



Fig. 1: FRP laminates made of sheets of carbon or glass fabric up to 9 ft wide, saturated with resin and passed through a press

compared to the fabrics used in wet layup applications:

- Strength in both longitudinal and transverse directions, with tensile strength up to 155 ksi (1070 MPa), by using a combination of unidirectional and/or biaxial fabrics;
- Can be made as thin as 0.03 in. (0.8 mm), which allows them to be bent around a corner with a radius of 2 in. (50 mm);
- Manufactured in plants under high quality control standards, which improves the quality of the finished product;
- Strength can be tested before installation, which assures the design engineer that the specified strength is met, eliminating delays for corrective actions;
- Repairs can be completed much faster in the field;
- The number and pattern of the layers of fabrics in the laminates can be adjusted to produce an endless array of customized products that can significantly save construction time and money;



Fig. 2: Spacers that can be used to form the shell and position the longitudinal bars



Fig. 3: Installation of laminates around the column to create a shell

- They are used to build a structural stay-in-place form around the column, creating an annular space that can be filled with concrete and reinforcing bars³ and providing shear reinforcement and confinement for the column; and
- Specially designed spacers⁴ are used to hold longitudinal reinforcing bars in place and to help create a shell around the column (Fig. 2).

Application

PileMedic laminates are supplied in 4 ft (1.2 m) wide rolls to any desired length (wider rolls are also available). Typical detail requires the laminate to be wrapped two complete times plus an 8 in. (200 mm) overlap around the column. The laminate is cut to the desired length, and an epoxy paste is applied; the laminate is wrapped around the column and bonded to itself to create a two-ply shell at a distance of 1 to 2 in. (25 to 50 mm) from the face of the column. Additional 4 ft laminates are similarly installed and overlap the previous shell by 3 to 4 in. (75 to 100 mm) to cover the full height of the column (Fig. 3). Finally, the annular space between the column and the PileMedic jacket is filled with concrete or grout using a pump or the tremie method.

Lateral ties

The jackets also act as supplementary steel ties, which is a shortcoming in many older or corrosion-damaged

columns. Eliminating the need for ties around the longitudinal bars is a great advantage that results in easy installation.

Corrosion protection

The system provides an impervious jacket around the column that prevents the ingress of moisture and oxygen. By depriving the column of exposure to moisture, the corrosion rate is drastically reduced, resulting in the long service life of the repair.

Joint region

The retrofit of the frame, especially in seismic regions, requires attention to the beam-column joint region as well. One option is to epoxy anchor steel ties into the core of the column to provide support against buckling for the newly installed longitudinal column bars (Fig. 4). This region can subsequently be encased in concrete with additional reinforcement. Such enlargements are typically within the depth of the beam and can remain invisible above the ceiling.

An earlier study demonstrated that as the flexural strength ratio increases, the required lateral ties in the joint region may be relaxed.⁵ Thus, the flexural strengthening of the column may result in easier retrofit for the joint.

Lower construction cost

The PileMedic retrofit solution has many inherent advantages that lead to cost savings. For example, the entire

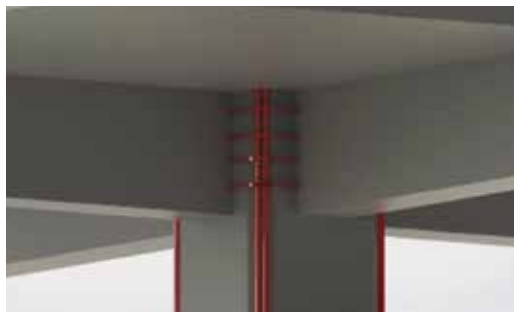
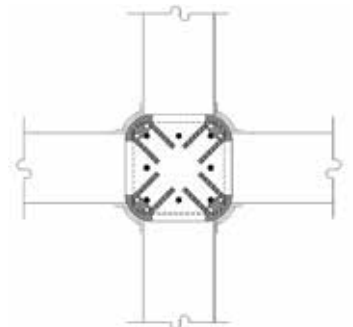


Fig. 4: Details of lateral ties for the longitudinal bars within the depth of the beam



system comprises lightweight materials that can be taken to any floor of the building using passenger elevators. Handling of the laminates to wrap them around the column requires no heavy lifting of equipment. The adjustability of the jacket size in the field leads to a smaller footprint and eliminates construction delays due to shipping the wrong size formwork to the site. The strength of the laminate that eliminates steel ties results in faster and less costly repairs. The estimated cost to retrofit a typical column is well below \$10,000.

Design Examples

Two retrofit alternatives are presented here. In both cases, the corners of the column that do not include any reinforcing steel can be easily cut and removed to minimize the enlargement of the column and loss of floor space. Two new No. 8 (25 mm) bars can be placed at each corner, and these bars extend to the floor above through the slab. This increases the flexural capacity of the column to ensure a “strong-column/weak-beam” at that location. Plastic spacers are attached on the column to define the annular space.

Option 1

In this case, the 18 x 18 in. (460 x 460 mm) column is enlarged to a 21 x 21 in. (533 x 533 mm) column (Fig. 5(a)). A biaxial glass FRP laminate is used to create a two-ply shell around the column.

The minimal enlargement is sufficient to accommodate the eight new reinforcing bars being installed. The shell around the column is made with two plies of PileMedic glass laminate, which represents the minimum number of layers for such applications.

The interaction diagram for the retrofitted column is calculated and is shown in the solid red line in Fig. 6, assuming the grout strength is 4000 psi (27.6 MPa). The axial capacity of the column is increased by 51% from 1460 to 2215 kip (from 6500 to 9850 kN). The flexural capacity is also increased by 220% from 215 to 485 kip-ft (from 291 to 657 kN·m). Therefore, the flexural strength ratio for the retrofitted frame is

$$M_R = \frac{2M_{col}}{2M_{beam}} = 1.76 > 1.2$$

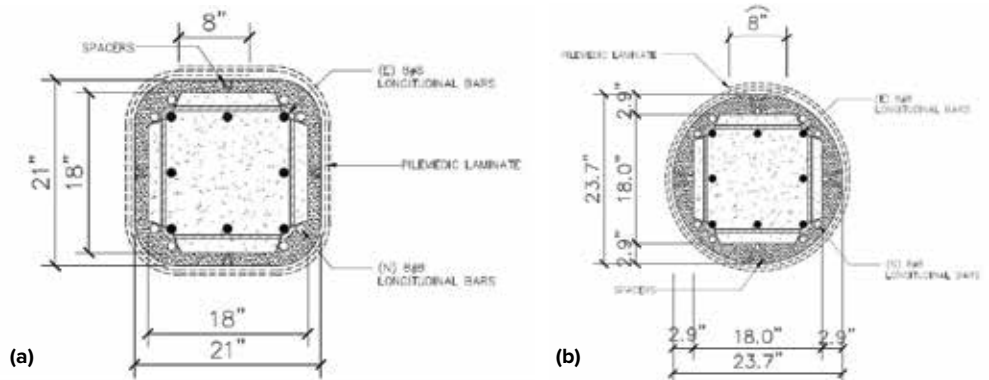


Fig. 5: Retrofit of an 18 x 18 in. concrete column: (a) Option 1; and (b) Option 2

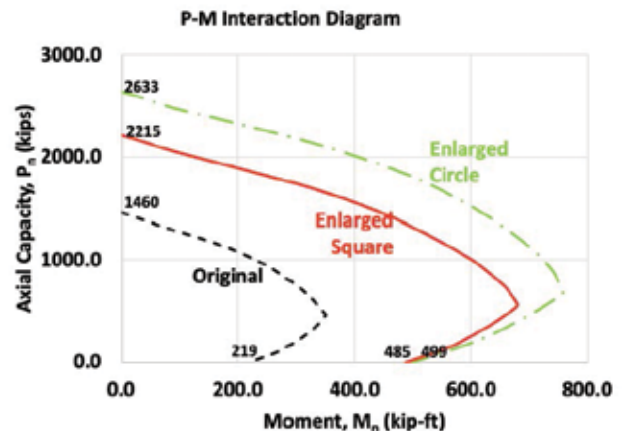


Fig. 6: Interaction diagram for the original and retrofitted columns. The red line represents Option 1, while the green line represents Option 2

This is larger than the minimum value of 1.2 and ensures that any plastic deformations are concentrated at the beam ends.

Option 2

If, in addition to flexural capacity enhancement, a greater increase in the axial capacity of the column is also desired, it’s best to alter the column into a circular section (Fig. 5(b)). Because confinement is a function of the stiffness of the jacket, a carbon laminate can be used instead of the glass laminate used previously. A circle with a diameter of 23.7 in. (600 mm) has the same area as the 21 x 21 in. column used in Option 1, that is, the footprint of the repair for both options is the same. However, the combination of circular geometry and wrapping with the stiffer and stronger carbon laminate results in an increase in the compressive strength of the original concrete and the newly placed concrete in the annular space. ACI 440R.2-17⁶ provides guidelines for quantifying this strength gain and, for this example, the confined concrete

Table 1:
Comparison of 18 x 18 in. (460 x 460 mm) column retrofit options

Retrofit	Option 1	Option 2
Laminate type	PLG14.13	PLC150.10
Laminate construction	Biaxial glass	Unidirectional carbon
Tensile strength, ksi	28.7	156
Tensile modulus, ksi	2840	13,800
No. of plies in wrap	2	2
Equivalent lateral tie	No. 4 Grade 40 at 3.7 in.	No. 4 Grade 40 at 1 in.
Original column f'_c , psi	4000	4000
Enlarged shape	21 x 21 in. (square)	23.7 in. (round)
Enlarged area, in. ²	441	441
Confined f'_{cc} , psi	4000	5150
P_n , kip	2215	2633
M_n , kip-ft	485	499

Note: 1 in. = 25 mm; 1 ksi = 7 MPa; 1 psi = 0.007 MPa; 1 in.² = 645 mm²; 1 kip = 4.4 kN; 1 kip-ft = 1.4 kN-m

reaches a compressive strength of 5150 psi (35.5 MPa).

The compressive strength of concrete does not affect the flexural strength of the column significantly. In this case, the retrofitted column has a flexural capacity of $M_n = 499$ kip-ft (676 kN-m), which is slightly higher than in Option 1. However, as shown in the interaction diagram (Fig. 6), the axial capacity of the confined column increases greatly. In this case, an 80% increase from the original column and a 19% increase, when compared to Option 1 with a square shell with glass laminate, is achieved. Clearly, this option is preferred when the gain in axial capacity of the column is also desired. For example, this could be the preferred retrofit method when due to construction errors, the compressive strength in the column is lower than the specified value.

A summary of these retrofit alternatives is presented in Table 1.

Lateral Ties

ACI 440.2R-17 provides environmental reduction factors for FRP based on the use conditions, such as exterior versus

interior installation and the type of fibers used, carbon versus glass. Including these reduction factors, the glass laminate is equivalent to providing No. 4 Grade 40 (275 MPa) ties at a spacing of 3.7 in. (94 mm), while the carbon laminate is equivalent to No. 4 ties at a spacing of 1.0 in. (25 mm); refer to Table 1. In both cases, these values exceed what the current codes require.

Footprint

The footprint of the proposed retrofit is very small. In this example, the column cross-sectional area was increased by 36% for both the square and circular alternatives, while the flexural capacity of the column was more than doubled.

Field Application

Since the introduction of this system, many agencies have conducted independent tests to verify the efficacy of these laminates for a range of applications. These include a study funded by the National Science Foundation (NSF) and the California

Department of Transportation (Caltrans) for fast repair of earthquake-damaged bridge piers,⁷ a study funded by the Nebraska Department of Roads for strengthening deteriorated timber bridge piles,⁸ and another funded by the Texas Department of Transportation for the repair of corrosion-damaged steel H-piles.⁹

The most significant investigation was a 3-year study by the U.S. Army Corps of Engineers, which resulted in the military selecting a laminated product to repair submerged piles worldwide.¹⁰ The U.S. Navy's website reported that the product was used to repair concrete piles in Ukraine (www.tinyurl.com/PLM-UKR). The U.S. Army Corps of Engineers and the Federal Emergency Management Agency (FEMA) have also singled out these laminates as the selected product for repairing columns and piles that may be damaged in a disaster, including hurricane, earthquake, terrorism, and more in its 2013 Field Operations Guide.¹¹

References

1. Saadatmanesh, H., and Ehsani, M.R., "Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams," *Concrete International*, V. 12, No. 3, Mar. 1990, pp. 65-71.
2. Ehsani, M.R., "FRP Super Laminates," *Concrete International*, V. 32, No. 3, Mar. 2010, pp. 49-53.
3. Ehsani, M.R., "Reinforcement and Repair of Structural Columns," U.S. Patent No. US 9,890,546 B2, Feb. 13, 2018, 13 pp.
4. Ehsani, M.R., "Spacers for Repair of Columns and Piles," U.S. Patent No. US 10,808,412 B2, Oct. 20, 2020, 18 pp.
5. Ehsani, M.R., and Wight, J.K., "Confinement Steel Requirements for Connections in Ductile Frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 116, No. 3, Mar. 1990, pp. 751-767.
6. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete

Structures (ACI 440.2R-17),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017, 112 pp.

7. Yang, Y.; Sneed, L.; Saiidi Saiidi, M.; Belarbi, A.; Ehsani, M.; and He, R., “Emergency Repair of an RC Bridge Column with Fractured Bars Using Externally Bonded Prefabricated Thin CFRP Laminates and CFRP Strips,” *Composite Structures*, V. 133, Dec. 2015, pp. 727-738.

8. Gull, J.H.; Mohammadi, A.; Taghinezhad, R.; and Azizinamini, A., “Experimental Evaluation of Repair Options for Timber Piles,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, V. 2481, No. 1, Jan. 2015, pp. 124-131.

9. Dawood, M.; Karagah, H.; Shi, C.; Belarbi, A.; Vipulanandan., C.; Bae, S.-W.; and Lee, S., “Repair Systems for Deteriorated Bridge Piles: Final Report,” Report No. FHWA/TX-17/0-6731-1, Texas Department of Transportation, Austin, TX, 2017, 538 pp.

10. Hammons, M.I; Strickler, J.S.; Murphy, J.W.; Rabalais, C.P.; Crane, C.K.; and Barela, C., “Pile Wrapping for Expedient Port Repair,” Draft Report, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, Aug. 2018, 117 pp.

11. “Field Operations Guide,” seventh edition, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, June 2013, pp. 4-4 to 4-5.

Selected for reader interest by the editors.



Mo R. Ehsani, FCI, is President of QuakeWrap, Inc., Tucson, AZ, USA, and Centennial Emeritus Professor of Civil Engineering at the University of Arizona, Tucson, AZ.

An innovator in the field of repair and retrofit of structures with FRP products, he has 20 patents related to these techniques.

The NEW ACI Detailing Manual

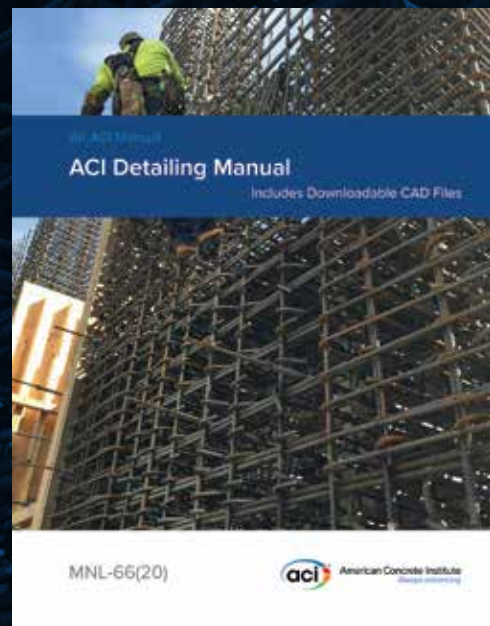
Includes FREE Downloadable CAD Files

The 2020 edition of the *ACI Detailing Manual* includes many new updates and revisions, plus the addition of valuable downloadable CAD files.

Visit concrete.org/store for more information.



American Concrete Institute
Always advancing



Una solución económica para reforzamiento de columnas de concreto

Por Mo R. Ehsani

Las columnas de concreto reforzado en muchos edificios antiguos pueden requerir reforzamiento. Esta necesidad podría surgir de una variedad de condiciones. En regiones costeras cálidas y húmedas y ambientes agresivos, la corrosión del acero de refuerzo resulta en la pérdida de capacidad de las columnas. En otros casos, el control deficiente de la calidad durante la construcción original puede resultar en una baja resistencia a la compresión del concreto y reducción de la capacidad de la columna. El autor participó personalmente en la rehabilitación de dos edificios de este tipo en Florida, EE. UU., donde la resistencia a la compresión del concreto era inferior a 1500 psi (10,3 MPa), solo una fracción de la resistencia especificada en los documentos de diseño. Algunas de las investigaciones posteriores al derrumbe de Champlain Towers en Surfside, FL, también mencionaron que el concreto débil y “polvozo” en las columnas era un posible factor que contribuyó a la falla.

Este artículo describe un método para mejorar tanto la carga axial como la de flexión de dichas columnas. La implementación de la técnica es relativamente fácil, lo que lleva a una solución rápida y económica con una interrupción mínima para los ocupantes. Una característica adicional de la reparación es su pequeño tamaño, que minimiza la pérdida de espacio en el piso debido a tales modificaciones.

Solución convencional

El autor introdujo el concepto de reparación y fortalecimiento de estructuras con productos de polímeros reforzados con fibra (FRP) a fines de la década de 1980.¹ En ese enfoque, conocido como laminado en húmedo, las láminas de fibra de carbono o fibra de vidrio se saturan en campo con resina epóxica. Son adheridos a la superficie externa de elementos estructurales, como vigas, columnas o muros. En unas cuantas horas, los materiales se endurecen y el refuerzo de FRP sirve como refuerzo a tensión adicional que puede contribuir a la resistencia a la flexión y resistencia al esfuerzo cortante de la estructura.

Los tejidos de FRP envueltos alrededor de la columna confinan el concreto y pueden aumentar su resistencia a la compresión. Esto da como resultado un aumento en la capacidad axial de la columna. Mientras que la técnica es eficiente para columnas circulares, la ganancia en la carga axial para columnas rectangulares es limitada.

Debido a que el FRP no se puede extender fácilmente a través de los pisos, es difícil lograr una mejora axial y de flexión significativa en las columnas con estos productos. Además, el FRP adherido externamente no aumenta tanto la rigidez de la columna. Estas deficiencias se pueden superar utilizando laminados de FRP.



Fig. 1: Laminados FRP hechos de hojas de fibra de carbono o fibra de vidrio de hasta 9 pies de ancho, saturada con resina y probado a través de una prensa

Laminados de FRP

Hace más de una década, un nuevo tipo de laminado FRP (PileMedic[®], que se muestra en la Fig. 1) se introdujo para aplicaciones de refuerzo de columnas o pilotes y tuberías.² Estos laminados se producen con equipos especialmente diseñados donde las hojas de carbono o tejido de vidrio hasta 9 pies (2,7 m) de ancho son saturados con resina y se pasan a través de una prensa que aplica calor y presión uniformes.

Los laminados ofrecen varias ventajas comparados con las telas utilizadas en aplicaciones de laminado en húmedo:

- Resistencia en ambas direcciones longitudinal y transversal, con resistencia a la tracción de hasta 155 ksi (1070 MPa), mediante el uso de una combinación de telas unidireccionales y/o biaxiales

- Pueden hacerse tan delgados como 0,03 pulg. (0,8 mm), lo que permite doblarlos alrededor de una esquina con un radio de 2 pulg. (50 mm);

- Fabricado en plantas bajo altos estándares de control de calidad, lo que mejora la calidad del producto terminado;

- La resistencia se puede probar antes de la instalación, lo que asegura al ingeniero de diseño que se cumple con la resistencia especificada, eliminando los retrasos en las acciones correctivas;

- Las reparaciones pueden ser completadas mucho más rápido en campo;

- El número y patrón de las capas de tejidos en los laminados se pueden ajustar para producir una variedad infinita de productos personalizados que pueden ahorrar significativamente tiempo y dinero en la construcción;

- Son usados para construir un encofrado estructural fijo alrededor de la columna, creando un espacio anular que puede ser rellenado con concreto y barras de refuerzo³ y proporcionar refuerzo de cortante y confinamiento para la columna

- Los espaciadores especialmente diseñados⁴ para mantener las barras de refuerzo longitudinales en su lugar y para ayudar a crear un armazón alrededor de la columna (Fig. 2).



Fig. 2: Separadores que pueden ser utilizados para formar la carcasa y colocar las barras longitudinales



Fig. 3: Instalación de laminados alrededor de la columna para crear una carcasa

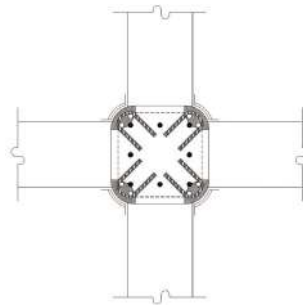
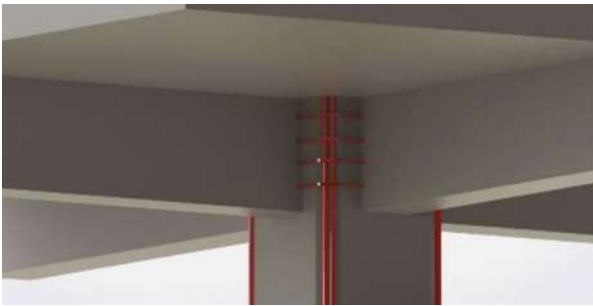


Fig. 4: Detalle de amarres laterales para las barras longitudinales dentro de la longitud de la viga

Aplicación

Los laminados de PileMedic® son suministrados en rollos de 4 pies (1,2 m) de ancho a cualquier largo deseado (también hay disponibles rollos más anchos). El detalle típico requiere que el laminado se envuelva dos veces completas más una superposición de 200 mm (8 pulg.) alrededor de la columna. El laminado se corta a la longitud deseada y es aplicada una pasta epoxi; el laminado se envuelve alrededor de la columna y se une a sí mismo para crear una cubierta de dos capas a una distancia de 25 a 50 mm (1 a 2 pulgadas) de la cara de la columna. Los laminados adicionales de 4 pies se instalan de manera similar y se superponen a la cubierta anterior de 3 a 4 pulgadas (75 a 100 mm) para cubrir la altura total de la columna (Fig. 3). Finalmente, el espacio anular entre la columna y la cubierta PileMedic se rellena con concreto o lechada utilizando una bomba o el método tremie.

Estribo

La cubierta también actúa como tirante de acero suplementario, lo cual es una deficiencia en muchas columnas más antiguas o dañadas por la corrosión. Eliminar la necesidad de amarres alrededor de las barras longitudinales es una gran ventaja que resulta en una fácil instalación.

Protección contra la corrosión

El sistema proporciona una cubierta impermeable alrededor de la columna que evita la entrada de humedad y oxígeno. Al marginar la columna de la exposición a la humedad, la tasa de corrosión es reducida drásticamente, lo que da como resultado una larga vida útil de la reparación.

Zona de unión

La rehabilitación del marco, especialmente en regiones sísmicas, requiere atención a la zona de unión viga-columna. Una opción es anclar con epoxi los tirantes de acero en el núcleo de la columna para brindar apoyo contra la flexión de las barras longitudinales de la columna recién instaladas (Fig. 4). Esta región se puede revestir posteriormente con concreto y con refuerzo adicional. Tales ampliaciones se encuentran normalmente dentro de la longitud de la viga y pueden permanecer invisibles por encima del techo.

Un estudio anterior ha demostrado que a medida que aumenta la relación de resistencia a la flexión, se pueden debilitar los tirantes laterales requeridos en la región de la junta.⁵ Por lo tanto, el refuerzo a la flexión de la columna puede resultar en una readaptación más fácil para la junta.

Menor costo de construcción

La solución de actualización de PileMedic® tiene muchas ventajas inherentes que conducen a ahorros de costos. Por ejemplo, todo el sistema se compone de materiales ligeros que se pueden llevar a cualquier planta del edificio mediante ascensores de pasajeros. El manejo de los laminados para envolverlos alrededor de la columna no requiere el levantamiento de equipos pesados. La capacidad de ajustar el tamaño de la cubierta sobre el terreno reduce el espacio ocupado y elimina los retrasos en la construcción debidos al envío a la obra de encofrados del tamaño incorrecto. La resistencia del laminado, que elimina los tirantes de acero, hace que las reparaciones sean más rápidas y menos costosas. El costo estimado del reequipamiento de una columna típica es muy inferior a \$ 10.000.

Ejemplos de diseño

Dos alternativas de actualización se presentan aquí. En ambos casos, las esquinas de la columna que no incluyen acero de refuerzo pueden cortarse y retirarse fácilmente para minimizar la ampliación de la columna y la pérdida de espacio en el piso.

En cada esquina pueden colocarse dos nuevas barras del No. 8 (25 mm), que se extienden hasta el piso superior a través de la losa. Esto aumenta la capacidad de flexión de la columna para garantizar una "columna fuerte/viga débil" en ese lugar. Se colocan separadores de plástico en la columna para definir el espacio anular.

Opción 1

En este caso, la columna de 460 x 460 mm (18 x 18 pulg.) se amplía a una columna de 533 x 533 mm (21 x 21 pulg.) (Fig. 5(a)). Se ha utilizado un laminado de vidrio FRP biaxial para crear un revestimiento de dos capas alrededor de la columna.

La ampliación mínima es suficiente para acomodar las ocho nuevas barras de refuerzo que se instalan. La cubierta alrededor de la columna está hecha con dos capas de laminado de vidrio PileMedic®, que representa el número mínimo de capas para este tipo de aplicaciones.

Se ha calculado el diagrama de interacción de la columna rehabilitada y se muestra en la línea roja continua de la Fig. 6, suponiendo que la resistencia de la lechada es de 27,6 MPa (4000 psi). La capacidad de la carga axial de la columna aumenta en un 51%, de 1460 a 2215 kip (de 6500 a 9850 kN). La capacidad de la carga a la flexión también aumenta un 220%, de 215 a 485 kip-ft (de 291 a 657 kN·m). Por lo tanto, el coeficiente de resistencia a la flexión para el armazón adaptado es de

$$M_R = \frac{2M_{col}}{2M_{beam}} = 1.76 > 1.2$$

Este valor es superior al valor mínimo de 1,2 y garantiza que cualquier deformación plástica sea concentrada en los extremos de las vigas.

Opción 2

Si, además de mejorar la capacidad de flexión, también se desea un mayor aumento en la capacidad de la carga axial de la columna, es mejor cambiar la columna a una sección circular (Fig. 5(b)). Debido a que el confinamiento es una función de la rigidez de la cubierta, se puede usar un laminado de carbono en lugar del laminado de vidrio que se usaba anteriormente. Un círculo con un diámetro de 23,7 pulg. (600 mm) tiene la misma área que la columna de 21 x 21 pulg. utilizada en la Opción 1, es decir, la dimensión de la reparación para ambas opciones es la misma. Sin embargo, la combinación de la geometría circular y la envoltura con el laminado de carbono más rígido y resistente da como resultado un

aumento de la resistencia a la compresión del hormigón original y del hormigón recién colocado en el espacio anular. ACI 440R.2-17⁶ proporciona directrices para cuantificar esta ganancia de resistencia y, para este ejemplo, el concreto confinado alcanza una resistencia a compresión de 5150 psi (35,5 MPa).

La resistencia a la compresión del concreto no afecta significativamente la resistencia a la flexión de la columna. En este caso, la columna reacondicionada tiene una capacidad de flexión de $M_n = 499 \text{ kip}\cdot\text{ft}$ (676 kN·m), que es un poco más alta que en la Opción 1. Sin embargo, como se muestra en el diagrama de interacción (Fig. 6), la resistencia axial la capacidad de la columna confinada aumenta considerablemente. En este caso, se logra un aumento del 80% con respecto a la columna original y un aumento del 19%, en comparación con la Opción 1 con una carcasa cuadrada con laminado de vidrio.

Evidentemente, esta opción es preferida cuando también se desea aumentar la capacidad axial de la columna. Por ejemplo, éste podría ser el método de readaptación

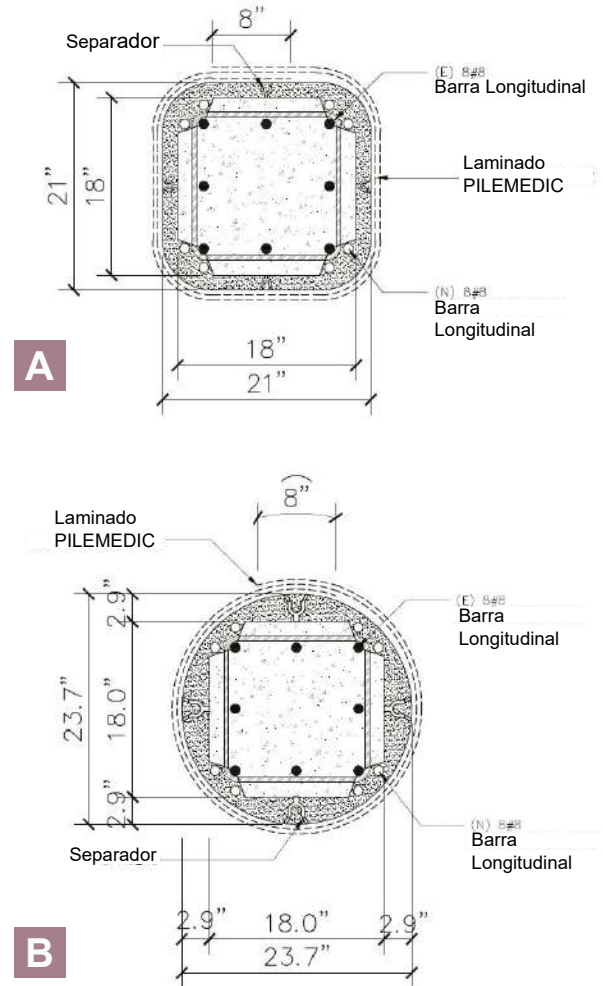


Fig. 5: Readaptación de una columna de hormigón de 18 x 18 in: (a) Opción 1; y (b) Opción 2

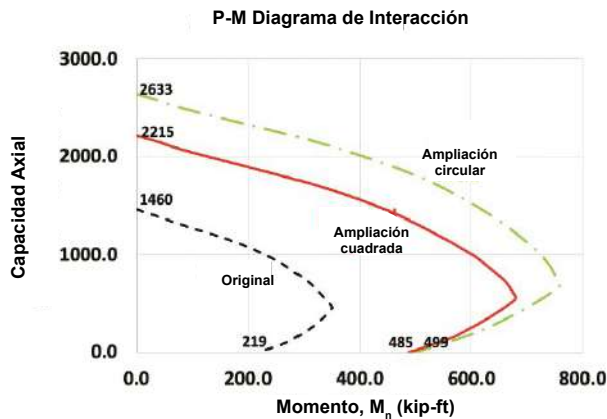


Fig. 6: Diagrama de interacción de las columnas original y readaptada. La línea roja representa la opción 1, mientras que la línea verde representa la opción 2

preferido cuando, debido a errores de construcción, la resistencia a compresión de la columna es inferior al valor especificado.

En la tabla 1 se presenta un resumen de estas alternativas de readaptación.

Estribos

ACI 440.2R-17 proporciona factores de reducción ambiental para FRP basados en las condiciones de uso, como la instalación exterior en comparación con la interior y el tipo de fibras usadas, carbono en comparación con vidrio. Incluyendo estos factores de reducción, el laminado de vidrio

equivale a proporcionar tirantes No. 4 de grado 40 (275 MPa) a una separación de 94 mm (3,7 pulg.), mientras que el laminado de carbono equivale a estribos No. 4 a una separación de 25 mm (1,0 pulg.); consulte la Tabla 1. En ambos casos, estos valores superan lo que exigen los códigos actuales.

Espacio ocupado

El espacio ocupado por la modificación propuesta es muy reducido. En este ejemplo, el área de la sección transversal de la columna se incrementó en un 36% tanto para la alternativa cuadrada como para la circular, mientras que la capacidad de flexión de la columna fue más de dos veces.

Aplicación sobre el terreno

Desde la introducción de este sistema, muchos organismos han realizado pruebas independientes para verificar la eficacia de estos laminados en diversas aplicaciones. Entre ellas se incluye un estudio financiado por la National Science Foundation (NSF)

y el Departamento de Transportes de California (Caltrans) para la reparación rápida de pilas de puentes dañadas por terremotos,⁷ un estudio financiado por el Departamento de Carreteras de Nebraska para el refuerzo de pilotes de puentes de madera deteriorados,⁸ y otro financiado por el Departamento de Transportes de Texas para la reparación de pilotes en H de acero dañados por la corrosión.⁹

La investigación más significativa fue un estudio de 3 años del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, como resultado del cual los militares seleccionaron un producto laminado para reparar pilotes sumergidos en todo el mundo.¹⁰ La página web de la Marina de Estados Unidos informó que el producto se utilizó para reparar pilotes de concreto en Ucrania (www.tinyurl.com/PLM-UKR). El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos y la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias (FEMA) también han señalado estos laminados como el producto seleccionado para reparar columnas y pilotes que puedan resultar dañados en una catástrofe, incluidos huracanes, terremotos, terrorismo, etc., en su Guía de Operaciones de Campo de 2013.¹¹

Readaptación	Opción 1	Opción 2
Tipo de Laminado	PLG14.13	PLC150.10
Estructura laminada	Vidrio biaxial	Carbon unidireccional
Resistencia a la Tracción, ksi	28.7	156
No. de capas en la cubierta	2	2
Estribos equivalente	No. 4 Grado 40, a (3.7 in.)	23.7 pulg. (redondo)
Columna original $f'c$, psi	4000	4000
Forma ampliada	21x21 pulg. (cuadrado)	23.7 pulg. (redondo)
Área ampliada. $pulg^2$	441	441
Confinado $f'cc$, psi	4000	5150
P_n , kip	2215	2633
M_n , kip·ft	485	499

Nota: 1 in. = 25 mm; 1 ksi = 7 MPa; 1 psi = 0.007 MPa; 1 in.² = 645 mm²; 1 kip = 4.4 kN; 1 kip·ft = 1.4 kN·m

Tabla 1: Comparación de readaptación de opciones de columnas de 18 x 18 in. (460 x 460 mm).

Referencias

1. Saadatmanesh, H., and Ehsani, M.R., "Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams," *Concrete International*, V. 12, No. 3, Mar. 1990, pp. 65-71.
2. Ehsani, M.R., "FRP Super Laminates," *Concrete International*, V. 32, No. 3, Mar. 2010, pp. 49-53.
3. Ehsani, M.R., "Reinforcement and Repair of Structural Columns," U.S. Patent No. US 9,890,546 B2, Feb. 13, 2018, 13 pp.
4. Ehsani, M.R., "Spacers for Repair of Columns and Piles," U.S. Patent No. US 10,808,412 B2, Oct. 20, 2020, 18 pp.
5. Ehsani, M.R., and Wight, J.K., "Confinement Steel Requirements for Connections in Ductile Frames," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 116, No. 3, Mar. 1990, pp. 751-767.
6. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017, 112 pp.
7. Yang, Y.; Sneed, L.; Saiidi Saiidi, M.; Belarbi, A.; Ehsani, M.; and He, R., "Emergency Repair of an RC Bridge Column with Fractured Bars Using Externally Bonded Prefabricated Thin CFRP Laminates and CFRP Strips," *Composite Structures*, V. 133, Dec. 2015, pp. 727-738.
8. Gull, J.H.; Mohammadi, A.; Taghinezhad, R.; and Azizinamini, A., "Experimental Evaluation of Repair Options for Timber Piles," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, V. 2481, No. 1, Jan. 2015, pp. 124-131.
9. Dawood, M.; Karagah, H.; Shi, C.; Belarbi, A.; Vipulanandan, C.; Bae, S.-W.; and Lee, S., "Repair Systems for Deteriorated Bridge Piles: Final Report," Report No. FHWA/TX-17/0-6731-1, Texas Department of

Transportation, Austin, TX, 2017, 538 pp.

10. Hammons, M.I.; Strickler, J.S.; Murphy, J.W.; Rabalais, C.P.; Crane, C.K.; and Barela, C., "Pile Wrapping for Expedient Port Repair," Draft Report, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, Aug. 2018, 117 pp.

11. "Field Operations Guide," seventh edition, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, June 2013, pp. 4-4 to 4-5.

Seleccionado para el interés del lector por los editores.



Mo R. Ehsani, F.A.C.I., es Presidente de QuakeWrap, Inc, Tucson, AZ, EE.UU, y Centennial Profesor Emérito de Ingeniería Civil en la Universidad de Arizona, Tucson AZ. Un innovador en el campo de la reparación y readaptación de las 20 patentes relacionadas con estas técnicas

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo Sureste de México.

Título: Una solución económica para reforzamiento de columnas de concreto



*Traductor:
Mtro. Josseph Eli
Mandujano Zavala*



*Traductor y Revisor Técnico:
M.I. Arturo Gaytán Covarrubias*