

Earthquakes and Adobes

Effects and Systems for Intervention

Terremotos y Adobes *Efectos y Sistemas de Intervención*

In 1811, a series of three major earthquakes, estimated to have registered between 8.4 and 8.7 on the Richter scale, rocked the area of New Madrid, Missouri. Chimneys fell from buildings as far away as Georgia and South Carolina, and the effects were felt 1,100 miles away in Boston. Few deaths resulted because the area was so sparsely populated and because the buildings, most of which were log cabins, were relatively elastic. The 1960 earthquake in Agadir, Morocco, with a magnitude of only 5.8 destroyed the entire city and killed 12,000; in this case the epicenter of the earthquake was within 5 miles of the city center. Armenia's 1988 earthquake, with a magnitude of 6.9 on the Richter scale, resulted in the death of more than 25,000 persons. The magnitude of the Armenian earthquake was approximately 1/30 the magnitude of the New Madrid event, but because of poor building design (non-contiguous reinforced concrete structures with precast floor panels) and the buildings' poor condition, many structures failed traumatically. On the early morning of January 17, 1994, an earthquake that registered 6.8 struck the Los Angeles, California, suburb of Northridge. Eleven thousand residences were damaged and many were destroyed, as were 9 highway overpasses and several larger commercial structures. There was considerable damage to high-rise structures, and 250 gas lines ruptured; it was the costliest natural disaster in U.S. history. The Northridge earthquake resulted in the greatest loss of and most damage to California's historic adobe buildings than that wrought by any previous earthquake. The relative severity of these seismic events was dependent on many factors, the most important of which were the actual characteristics of the event and the design and condition of the buildings affected.

En 1811 una serie de tres grandes terremotos que pudieron haber registrado entre 8,4 y 8,7 en la escala de Richter sacudieron la región de New Madrid, Missouri. Cayeron las chimeneas de viviendas en regiones tan alejadas como Georgia y Carolina del Sur y sus efectos se hicieron sentir a 1.100 millas de distancia, en Boston. No hubo demasiadas muertes porque la región estaba apenas poblada y las construcciones eran más que nada cabañas de troncos relativamente elásticas. El terremoto de Agadir, Marruecos de 1960, con una magnitud de sólo 5,8 destruyó toda la ciudad y mató a 12.000 personas; en este caso el epicentro del terremoto estaba a cinco millas del centro de la ciudad; en el terremoto de Armenia de 1988, de magnitud 6,9 en la escala de Richter murieron más de 25.000 personas. La magnitud del terremoto de Armenia fue aproximadamente 1/3 de la magnitud del terremoto de New Madrid, pero debido al pésimo diseño de las edificaciones (estructuras de hormigón armado no contiguas con paneles de piso vaciados en obra) y el deficiente estado de las construcciones se derrumbaron dramáticamente muchísimas estructuras. Durante la mañana del 17 de Enero de 1994, un terremoto grado 6,8 sacudió el suburbio de Northridge en Los Angeles, California. Destruyó o causó daños en 11.000 viviendas, derrumbó nueve pasos superiores de autopistas y grandes edificios comerciales. Edificios de altura sufrieron graves daños y estallaron 250 cañerías de gas. Fue el desastre natural más costoso en la historia de los Estados Unidos. El terremoto de Northridge generó más daños y grandes pérdidas en las construcciones históricas de adobe de California que cualquier otro terremoto anterior. La gravedad relativa de estos eventos sísmicos depende de varios factores, de

The most commonly referred to characteristic of an earthquake is its magnitude, the quantitative measurement given by the Richter scale, an index of the amount of energy released. The second most familiar measurement of an earthquake is its intensity, indicated by the Modified Mercalli Intensity scale, which is based upon subjective observations of human reaction and structural damage. However, describing the severity of an earthquake is not a simple task. In addition to the magnitude measured by the Richter scale and the intensity measured by the Modified Mercalli scale, other characteristics such as acceleration, the duration of the event, and the location of the epicenter are important in assessing the overall severity. Geologic and soil conditions can exacerbate the severity as well, and aftershocks can destroy buildings that withstood the initial ground motion. All of these factors—the magnitude, the intensity, the acceleration, the duration, and the location—have a huge effect. The ground moves, often quickly and dramatically, and features located on the ground surface must absorb or withstand the motion in some way or they will be affected. A structure on the earth moves or vibrates in response to the seismically induced ground motion, and structures with different properties respond differently. A rigid structure will tend to move with the movement of the ground while a flexible structure will bend. Structures of mud brick, or of other load bearing earth systems, with thick walls in relationship to their height, a characteristic of many archeological monuments, will normally withstand ground motion with little or no damage. An approximate wall height-to-thickness ratio of five to one or less is considered stable. Walls of stronger or more elastic materials can have a much greater height-to-thickness ratio and still be stable. Like the severity of the seismic event itself, predicting the actual performance of a structure with floor and roof systems, combinations of thick and thin walls, intersecting walls, and walls of different heights, is complex.

The primary method used to protect existing earth structures has been to increase the rigidity of the structural system. Often rigidity was achieved with the installation of reinforced concrete bond beams and columns, the installation of which destroyed significant amounts of historic fabric. Not only were these methods destructive to important values of these historic structures but they were often prohibitively

los cuales los más importantes son las características reales del evento y el diseño y condiciones de las edificaciones afectadas.

La característica más conocida de un terremoto es su magnitud o medición cuantitativa arrojada por la escala de Richter, un índice de la cantidad de energía liberada. La segunda medición más conocida de un terremoto es su intensidad medida por la escala de Intensidad Mercalli Modificada que se basa en observaciones subjetivas de la reacción humana y daños estructurales. Sin embargo, no es tarea fácil describir la gravedad de un terremoto. Además de la magnitud medida por la escala de Richter y la intensidad medida por la escala de Mercalli Modificada, existen otras características como la aceleración, la duración del evento y la ubicación del epicentro que son importantes a la hora de evaluar la gravedad total. Las condiciones geológicas y de suelo pueden aumentar la intensidad y las réplicas pueden destruir las edificaciones que habían resistido el primer movimiento telúrico. Todos estos factores, magnitud, intensidad, aceleración, duración y ubicación, producen un efecto terrible. La tierra se mueve con gran rapidez y fuerza y los elementos ubicados en la superficie terrestre deben ser capaces de alguna forma de absorber o soportar el movimiento, o se verán afectados. Una estructura sobre el suelo se mueve o vibra como respuesta al movimiento superficial inducido por el sismo y las estructuras responden de distinta forma según sus propiedades. Una estructura rígida tenderá a moverse con el movimiento del suelo, en tanto una estructura flexible se pandeará. Las estructuras de ladrillos de barro u otros sistemas de construcciones de tierra que soportan cargas, que tienen muros gruesos en proporción a su altura, característica de muchos monumentos arqueológicos, normalmente soportarán el movimiento telúrico prácticamente sin dañarse. Una proporción aproximada de alto por ancho en muros igual o inferior a cinco por uno se considera estable. Los muros de materiales más resistentes o elásticos pueden tener una relación alto/ancho mucho mayor y seguir siendo estables. Como en el caso de la gravedad de un sismo, es complejo predecir el comportamiento real de una estructura que presenta sistemas de piso y techumbre, muros gruesos y delgados, muros intersectados y de distintas alturas.



After being heavily damaged during the Northridge Earthquake, Rancho Camulos was seismically strengthened by less invasive approaches than usual. Photos courtesy the author.

Luego de sufrir graves daños durante el terremoto de Northridge, se le hizo un refuerzo antisísmico con técnicas menos invasivas que las precedentes. Fotos cortesía del autor.

expensive. Given the expense and invasiveness of this method, there was an increasing interest in developing better methods for achieving system rigidity. Significant work had been going on around the world for many years to achieve that goal.

The Northridge earthquake was a tragic event, but it came at a critical time in the recent development of a greater understanding of the performance of mud brick structures and appropriate strengthening technology. The goal of a major study sponsored by the Getty Conservation Institute (GCI) on the protection of California's historic adobe buildings was the development of specific recommendations for strengthening these important structures using less-invasive methods than had often been used in the past. A great deal of investigation and testing of possible strengthening methods utilizing seismic simulation was well underway when the earthquake occurred. Taking place at the same time in other parts of the world was similar test-

El método básico aplicado para la protección de las estructuras de tierra existentes ha sido aumentar la rigidez del sistema estructural. En ocasiones la rigidez se lograba instalando vigas y columnas de unión de hormigón armado cuya instalación ha destruido porciones significativas de la trama histórica. Estos métodos no solamente destruyeron partes valiosas e importantes de las estructuras históricas; también eran prohibitivamente caros. Dado la carestía y características invasivas de este método, se ha buscado con gran interés otros y mejores métodos para lograr rigidizar los sistemas. Por muchos años se ha estado trabajando con mucho empeño en todo el mundo con este objetivo.

El terremoto de Northridge fue un hecho trágico pero que ocurrió en un momento crucial en el desarrollo de una comprensión más amplia del comportamiento de las estructuras de ladrillos de barro y de la tecnología de refuerzo correspondiente. Un importante estudio patrocinado por el Getty Conservation Institute (GCI) sobre protección de los edificios históricos de adobe en California tiene por objetivo desarrollar recomendaciones específicas para fortalecer estas estructuras usando métodos menos invasivos que los usados en el pasado. La investigación y pruebas de nuevos métodos de refuerzo aplicando simulaciones sísmicas estaban ya bastante avanzados cuando se produjo el terremoto. Simultáneamente en otras partes del mundo se estaban haciendo las mismas pruebas con los mismos objetivos básicos - proteger las estructuras históricas de tierra con el mínimo de intervención.

A pocos días del sismo de Northridge un equipo de arquitectos, arquitectos conservadores e ingenieros inició una inspección y análisis sistemáticos de los daños. Hubo dos aspectos importantes dentro de esta evaluación y análisis de daños que no habían ocurrido antes. Como el terremoto de Northridge ha sido el sismo más monitoreado de la historia, se pudo estudiar con mayor detalle todas las características reales del sismo y relacionarlas con los daños reales. Otro aspecto importante es que los miembros del equipo de investigación ya conocían las estructuras que en gran parte ya habían sido documentadas y analizadas por el equipo del programa del Getty dos años antes del terremoto. Este conocimiento sirvió muchísimo para que los miembros del equipo

ing with the same basic goals—providing protection to historic earthen structures with the minimal amount of intervention.

Within days of the Northridge event, a team of architects, architectural conservators, and engineers began a systematic inspection and analysis of the damage. There were two important aspects of this damage assessment and analysis that had not occurred before. Because the Northridge earthquake was the most monitored of any earthquake in history, more detail of the actual characteristics of the event could be studied and related to the actual damage. Another important aspect was that members of the survey team were already familiar with the structures, many of which had been previously documented and analyzed by the Getty program team two years prior to the earthquake. This familiarity contributed to the team members' understanding of the effects of pre-existing conditions in relation to the level of earthquake damage. The report of that survey with subsequent development and analysis comparing the actual event to the specific damage to specific structures is the most comprehensive of its type. In addition, the report provides valuable information about failure typology of earthen structures and the effects of pre-existing conditions.

When developing a seismic protection system for a historic building, it is important to understand the values that are to be protected. As an example, building codes for seismic strengthening are directed first to the protection of human life and not to the protection of the structure. Even with our current state of knowledge, it is impossible to strengthen an earth structure so that it will not suffer any damage during an earthquake. The first priority will always be the protection of human life. While all damage can not be eliminated, a system can be designed so that damage is directed to parts of the structure or to its less significant features. Directed failure can take the form of isolating two building components that otherwise might cause damage to one another during ground motion. At California's Mission San Gabriel, the baptistry was structurally separated by cutting through the masonry, allowing the two components to move separately. Because of their specific geometric relationships, if not separated, they could cause severe damage to one another. During the Northridge earthquake, the two structural components did move independently and the only

lograran comprender los efectos de las condiciones pre-existentes, en relación con el nivel de daños causados por el terremoto. El informe del estudio y su desarrollo y análisis posterior que compara el hecho real con el daño específico causado en las estructuras respectivas es el más exhaustivo de su tipo. Además, el informe entrega una información muy valiosa sobre tipología de fallas en estructuras de tierra y los efectos de las condiciones pre-existentes.

Al desarrollar un sistema de protección antisísmica para un edificio histórico es importante comprender cuáles son los valores que deben protegerse. Como ejemplo, los códigos de construcción para refuerzo antisísmico están orientados en primer lugar a proteger la vida humana y no a proteger las estructuras. Incluso en nuestro estado actual de conocimiento es imposible reforzar una estructura de tierra para que no sufra ningún daño en un terremoto. La principal prioridad será siempre la protección de la vida humana. Si bien no puede eliminarse la posibilidad de daños, sí se puede diseñar un sistema que dirija el impacto de falla hacia ciertas partes de la estructura o a sus aspectos menos relevantes. Una falla dirigida podría consistir en aislar los componentes de dos construcciones que en caso contrario podrían impactar uno al otro durante un temblor. En la Misión San Gabriel de California, el baptisterio fue separado estructuralmente cortando a través de la mampostería, con lo cual ambos componentes pueden moverse individualmente. Debido a sus relaciones geométricas específicas, si no se los hubiese separado habrían causado graves daños al elemento vecino. Durante el terremoto de Northridge estos componentes estructurales se movieron independientemente y solamente se dañó la terminación de yeso que unía el corte en la mampostería. Esta es una forma de falla dirigida. Puede haber otra forma de falla dirigida adecuada para el caso de una superficie original de yeso decorada que está intacta, como en la Misión San Miguel de California. En este caso la superficie decorativa no podría sobrevivir si los muros sufrieran grandes agrietamientos sin moverse. Se puede crear aquí un punto de quiebre que permita que los muros oscilen sobre sus fundaciones en lugar de resquebrajarse.

Como material de construcción la tierra no tiene elasticidad o ductilidad real y tiene escasa resistencia a la flexión. Un material dúctil

damage was to the plaster finish that bridged the masonry cut. This is one form of directed failure. Another form of directed failure might be appropriate if an original decorative plaster surface remains intact, such as at California's Mission San Miguel. In this case the decorative surface would not survive if the walls were extensively fractured but remained in place. However, a weak point might be created that would allow the walls to rock on their foundations rather than fracture.

As a building material, earth has no effective elasticity, or ductility, as it has little resistance to bending. A ductile material, such as steel or wood, can deform to a certain degree and then return to its former shape and still perform its structural function. Stone as a material also has little ductility, but it is stronger than compacted earth, and it can resist more loads before failing. In places where earthquakes are an expected part of life, people have learned to build with earth material using a building system that has a greater degree of ductility than does the material itself. In many parts of the world with known seismic activity, a traditional building utilizes load bearing mud brick walls on the first floor level and timber frame with non-load bearing mud brick or wattle and daub walls on the upper floors. The system is somewhat ductile and often survives under the stresses of an earthquake.

Another strengthening method is to increase the system's elastic performance. If a structure cannot be made rigid, then it has to be able to perform with a certain level of elasticity to survive seismic ground motion. As building systems, the log cabins of the New Madrid earthquake were somewhat elastic in that they deformed and then returned to their previous form without suffering permanent damage. This elastic quality is referred to as ductility.

The most recent example of strengthening a historic adobe building that incorporates the latest concepts is at Rancho Camulos in Ventura County, California, approximately 30 miles north of Northridge. Rancho Camulos was one of the important adobe structures that suffered severe damage during the Northridge earthquake and was one of the structures included in the post-event survey. Rigidity was achieved by strengthening second story level floors and selected wall systems to perform as semi-rigid structural plates or diaphragms. System ductility was achieved by the installation of a series of cables and straps that, while not designed to pre-

como el acero o la madera se puede deformar hasta cierto punto y luego vuelve a su forma original, conservando siempre su función estructural. La piedra como material también es muy poco dúctil, pero es más fuerte que la tierra compactada y puede resistir más carga antes de romperse. En los lugares en que los terremotos son parte de la vida, la gente ha aprendido a construir con material térreo con un sistema de construcción que tiene un grado mayor de ductilidad que la del propio material. En muchas partes del mundo de conocida actividad sísmica la construcción tradicional utiliza muros de ladrillos de barro que soportan cargas en la planta baja y encofrados de madera con ladrillos de barro no soportantes, o muros de argamasa y fibras en los pisos superiores. Es un sistema bastante dúctil y que ha demostrado su sobrevivencia a las fuerzas de un terremoto.

Otro método de refuerzo consiste en aumentar el comportamiento elástico de un sistema. Si una estructura no puede rigidizarse, debe ser capaz de comportarse con un cierto grado de elasticidad para poder sobrevivir a los movimientos telúricos. Desde el punto de vista de los sistemas constructivos, las cabañas de troncos que soportaron el terremoto de New Madrid actuaron elásticamente, en el sentido que se deformaron y luego recuperaron su forma original sin sufrir daños permanentes. Esta cualidad elástica se conoce como ductilidad.

El ejemplo más reciente de refuerzo de una construcción histórica de adobe que incorpora los conceptos más avanzados es el Rancho Camulos en el condado de Ventura, California, aproximadamente 30 millas al norte de Northridge. Rancho Camulos fue una de las estructuras de adobe importantes que sufriera grandes daños durante el terremoto de Northridge y fue incluida en la revisión posterior al sismo. Se dio rigidez a la estructura al reforzar los pisos del segundo nivel y determinados sistemas de muros, para que se comportaran como placas o diafragmas estructurales semirígidos. Se logró dar más ductilidad al sistema con la instalación de una serie de cables y zunchos que, si bien no fueron diseñados para evitar resquebrajaduras o daños en un nuevo terremoto, podrían evitar la caída de los muros. Este sistema permite que los muros se muevan pero no fallen. El proyecto Camulos fue mucho más barato que otros sistemas de reacondi-

vent cracking or damage during another earthquake, would prevent the collapse of the walls. This system allows the walls to move but not to fail. The Camulos project also was less costly than other more traditional retrofit systems that utilize bond beams at the rooflines.

The current state of knowledge about protecting historic earth buildings and monuments from seismic induced ground motion emphasizes providing an acceptable level of protection with the least impact on historic fabric or historic building systems. The approach takes advantage of the existing building systems and does not try to alter the system as happened in the most severe cases in the past when earthen load bearing systems were changed to reinforced concrete frames with adobe infill. When the original system is inadequate, measures are taken to increase the system's ability to perform.

The work continues. While much has been learned, the ability to predict when an earthquake will occur and to describe its characteristics beforehand is at best an inexact science. What we do know is that the "big one" will occur and that more heritage monuments of earth will suffer damage and be destroyed. What was learned from the Northridge earthquake is important, and our challenge—to improve the strengthening systems that will have even less impact on important heritage values and can be implemented at even lower costs—persists.

References

- Earthen Building Technologies. Workshop on the Seismic Retrofit of Historic Adobe Buildings. Report on the Workshop held March 10, 1995. Pasadena, Calif.
- Feilden, Sir Bernard M. *Between Two Earthquakes*. Rome: The International Center for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property, and Los Angeles: Getty Conservation Institute, 1987.
- Levy, Matthys and Mario Salvadori. *Why the Earth Quakes: The Story of Earthquakes and Volcanoes*. New York: W. W. Norton & Company, 1995.
- Tolles, E. Leroy; Frederick A. Webster; Anthony Crosby; and Edna E. Kimbro. *Survey of Damage to Historic Adobe Buildings after the January 1994 Northridge Earthquake*. GCI Scientific Program Report. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 1996.
- Robinson, Andrew. *Earthshock: Hurricanes, Volcanoes, Earthquakes, Tornados and Other Forces of Nature*. London: Thames and Hudson Ltd., 1993.

Anthony Crosby recently retired after 25 years with the National Park Service and is currently in private architectural conservation practice.

cionamiento más tradicionales que utilizan vigas de unión en las techumbres.

El estado actual de los conocimientos sobre protección de edificios y monumentos históricos de tierra ante movimientos de tierra inducidos por sismos pone el énfasis en ofrecer un nivel aceptable de protección, produciendo el menor impacto posible en la trama histórica o en los sistemas históricos de construcción. Este enfoque se basa en los sistemas constructivos existentes y no intenta alterar el sistema, como ocurrió en el pasado en los casos más graves, donde se cambiaron sistemas de soporte de carga construídos en tierra por hormigón armado con un relleno de adobes. Cuando el sistema original no es adecuado se deben tomar medidas para fortalecer la capacidad de respuesta del sistema.

El trabajo continúa. Se ha aprendido mucho pero la posibilidad de predecir cuándo se producirá un terremoto y describir sus características por anticipado es una ciencia por decir lo menos inexacta. Lo que sí sabemos es que habrá un "Big One" y que habrá más monumentos de tierra que sufrirán daños y serán destruídos. Las lecciones del terremoto de Northridge son importantes y nuestro desafío sigue en pie: mejorar los sistemas de refuerzo que tengan un impacto aún menor sobre los valores patrimoniales y que se puedan poner en práctica con costos aún menores.

Referencias

- Technologías de Construcción Tèrrea: Taller para la Preparación Sismica en Edificios de Adobe. Informe del Taller conducido el 10 Marzo de 1995 en Pasadena, California.
- Feilden, Sir Bernard M. *Entre Dos Terremotos*. Roma: Centro Internacional para el Estudio de la Conservación y Restauración del Patrimonio Cultural, y Los Angeles: Getty Conservation Institute, 1987.
- Levy, Matthys y Mario Salvadori. *Porque la Tierra Tiembla: La Historia de Terremotos y Volcanes*. New York: W. W. Norton & Company, 1995.
- Tolles, E. Leroy; Frederick A. Webster; Anthony Crosby; y Edna E. Kimbro. *Medición del Daño a Edificios Históricos de Adobe después del Terremoto de Northridge, Enero de 1994*. Reporte del Programa Científico del GCI. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 1996.
- Robinson, Andrew. *Impacto Terrestre: Huracanes, Volcanes, Terremotos, Tornados y Otras Fuerzas Naturales*. London: Thames and Hudson Ltd., 1993.

Anthony Crosby recién jubiló con 25 años de servicio en el National Park Service y ahora trabaja en la conservación de arquitectura.