

The Institute's Team for Damage Investigations

Lessons learned from field deployments

by Lucas A. Laughery, Aishwarya Y. Puranam, Christopher L. Segura Jr., and Anahid A. Behrouzi

ACI Committee 133, Disaster Reconnaissance, was conceived in the aftermath of the 2010 Chilean Earthquake, an event that affected thousands of structures. That event caused extensive damage to an estimated 50 to 100 mid-rise and high-rise reinforced concrete (RC) buildings, including seven that were damaged beyond repair.¹⁻³ Although ACI has had a strong history of publishing assessments of disasters (refer to textbox: Historical Disasters Examined in ACI Publications), the Institute had no formal mechanism in place to deploy a team to investigate and report on critical lessons to its technical committees and membership. Furthermore, the broadening international reach of the ACI 318 Building Code, which has been adopted or referenced in the national code of more than 30 countries, including Chile,⁴ highlighted the need for ACI liaisons to be on the ground immediately after a disaster to serve as a technical resource to local engineers. Recognizing these needs, former ACI Committee 318 Chair Jack Moehle consulted with former ACI Presidents José Izquierdo-Encarnación and Luis García about the formation of a committee with a disaster reconnaissance directive. In October 2012, a proposal was submitted to the ACI Board of Direction to establish and fund a new committee with the primary objectives of:

- Providing a mechanism for evaluating the application of ACI documents internationally; and
- Disseminating deployment findings to ACI technical committees and through ACI publications.⁵

To date, the Chairs of the resulting committee, ACI Committee 133, have included Jack Moehle, Ken Elwood, Michael Kreger, and Santiago Pujol. This committee has actively engaged a diverse group of practitioners and researchers.

Historical Disasters in ACI Publications

Engineers have gathered data about building performance after natural disasters since at least the 1920s,^{6,7} with some data available online from disasters as early as the 1931 Managua Earthquake.⁸ One of the oldest formal programs for post-disaster reconnaissance is the Earthquake Engineering Research Institute's (EERI) Learning from Earthquakes (LFE) program, which was established in 1973.⁹ Since its creation, EERI LFE has collected data after more than 300 earthquakes, and it has shared its findings in reports, in *Earthquake Spectra* articles, and in a centralized data repository.¹⁰ While ACI has had no formal reconnaissance committee until recently, structural engineers have long disseminated the findings from their field reconnaissance studies of RC structures through ACI's periodicals.



Fig. 1: Historical disasters reported in ACI publications (map data credits: Google, INEGI Imagery, NASA, TerraMetrics¹¹)

Figure 1 presents the locations and dates of 21 earthquakes, 10 structural collapses, and two hurricanes for which reconnaissance findings were published in the *ACI Structural Journal*, *Concrete International* magazine, and ACI Special Publications. Examples of important lessons include:

- 1961—Based on observations following earthquakes in Mexico (1956, 1957, and 1959), Japan (1923 and 1948), and Chile (1960), De Cossio and Rosenblueth¹² stressed the importance of adequate anchorage of reinforcement in beam-column joints and closely spaced ties and stirrups to prevent buckling of longitudinal reinforcement;
- 1981—Yanev¹³ reported that much of the low-rise RC building damage observed in the 1978 M7.8 Miyagi-Ken-Oki Earthquake in Japan occurred in buildings with torsional irregularities in their lateral force-resisting systems;
- 1982—Lew et al.¹⁴ indicated that the collapse of a five-story condominium building in Florida was likely caused by insufficient punching shear capacity in several of the structure’s slabs;
- 1989—Based on observations from the 1988 Armenian Earthquake, Wylie¹⁵ reiterated the importance of properly considering the connectivity of the elements in a building’s structural system to achieve the intended load path; and
- 1997—Hassan and Sozen¹⁶ described unitless indices that can be used to assess the vulnerability of buildings to seismic damage, tested using a group of buildings that suffered various levels of damage during the 1992 Erzincan, Turkey, Earthquake.

ACI Reconnaissance Activities

The decision to deploy an ACI reconnaissance team is based on several factors, including:

- Initial reports of structural damage;
- Potential for impacts to ACI standards as well as construction and engineering communities;
- Site/regional accessibility and safety; and
- Coordination with other agencies and universities.

Figure 2 shows 14 events that ACI Committee 133 has considered for deployment, including eight earthquakes, a structural fire, a wildfire, a dam failure, a tornado, a building collapse, and a bridge collapse. To date, an ACI team has been deployed to investigate six earthquakes, one bridge collapse, and one wildfire. Descriptions of these deployments, including references to reconnaissance reports and collected data, are provided in the following text. A summary of data links and counts of structures surveyed is provided in Table 1. For earthquakes, teams have collected building coordinates and addresses, approximate floor plan sketches, dimensions of

structural and nonstructural elements, and photographs and notes on location and severity of damage to these elements. In some cases, teams have also been provided formal architectural layouts, structural drawings, and structural analysis models. Also, teams have collected data for structures with various levels of damage rather than for only the most heavily damaged structures. For disasters other than earthquakes, a standardized data collection process has not yet been established; accordingly, data collection plans are made prior to each deployment.

2015 Nepal Earthquakes

Two major earthquakes occurred in Nepal in 2015: a moment magnitude (M_w) 7.8 on April 25, and a M_w 7.3 on May 12. These earthquakes were followed by more than 400 aftershocks with magnitudes larger than 4.0. About 500,000 buildings were destroyed and over 250,000 buildings were damaged during the earthquakes and their aftershocks.¹⁷ In



Fig. 2: Events evaluated for ACI Committee 133 deployment. Green markers indicate that an ACI reconnaissance team was deployed. Purple markers indicate that no team was deployed (map data credits: Google, INEGI Imagery, NASA, TerraMetrics¹¹)

Table 1: Summary of ACI Committee 133 deployments

Event	Data links	Structures
2015 Nepal Earthquakes	www.datacenterhub.org/resources/238	146 low-rise buildings
	www.datacenterhub.org/resources/242	30 high-rise buildings
2016 Taiwan Earthquake	www.datacenterhub.org/resources/14098	130 buildings
2016 Ecuador Earthquake	www.datacenterhub.org/resources/14160	173 buildings
2017 Mexico Earthquake	www.datacenterhub.org/resources/14746	125 buildings
2017 Pohang Earthquake	www.datacenterhub.org/resources/14728	75 buildings
2018 Chirajara Bridge collapse	N/A	1 bridge
2018 Camp Fire	N/A	36 buildings
2019 Albania Earthquake	N/A	55 buildings
Total = 770 buildings + 1 bridge		

mid-June 2015, ACI Committee 133 deployed a team to survey RC buildings in Nepal's capital, Kathmandu. Together with 17 volunteer civil engineers from local government and private industry, the team surveyed and collected data for low-rise and high-rise RC buildings. In general, low-rise buildings (less than eight stories) had nonengineered structural frames and clay brick masonry partition walls, while high-rise buildings (eight or more stories) had engineered structural frames and clay brick masonry

partition walls. Figure 3 shows severe damage to unreinforced masonry infill in low-rise and high-rise buildings.^{18,19} Collapse of the first story in the low-rise building (left) demonstrates the soft-story vulnerability. More information about the reconnaissance can be found in Shah et al.²⁰

2016 Taiwan Earthquake

On February 6, 2016, the M_w 7.8 Meinong Earthquake occurred in Kaohsiung City in southern Taiwan.

Much damage was observed in Tainan City, approximately 40 km (25 miles) from the epicenter. Reports suggested that most fatalities resulted from the collapse of a 14-story residential building. ACI Committee 133 deployed a team in March 2016, supported in part by the National Science Foundation (NSF), to join researchers from the Taiwanese National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) to investigate the effects of the earthquake on RC structures. Over 12 days, 119 low-rise school, residential, and government buildings and 11 structures between eight and 23 stories tall were surveyed around Tainan City. In addition to conventional techniques, teams used aerial drones to collect videos of structures. Members of the ACI team investigated the failure of a corner column in a 14-story building in Tainan City, and they concluded that the failure was the result of axial demands imposed from discontinuous RC walls intended to function as partitions.²¹ The team also conducted an evaluation of four different seismic vulnerability screening indices, including that proposed by Hassan and Sozen¹⁶ and another then used in Taiwan. Figure 4 shows damage that was observed in columns in two different buildings.²²



Fig. 3: Buildings damaged in the 2015 Nepal Earthquake: (a) low-rise building (after Reference 18, licensed under CC BY-SA 3.0); and (b) high-rise building (after Reference 19, licensed under CC BY-SA 3.0)



Fig. 4: Damage to columns in the 2016 Taiwan Earthquake: (a) axial compression failure; and (b) shear failure (after Reference 22, licensed under CC BY-NC-SA 4.0)

2016 Ecuador Earthquake

On April 16, 2016, a M_w 7.8 earthquake shook coastal Ecuador, causing severe damage to and collapse of structures, particularly around the coastal province of Manabí. Thousands of aftershocks were reported in the following months. In July 2016, ACI Committee 133 deployed a team that, together with faculty and students from Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), surveyed RC buildings over a period of 8 days. The buildings ranged from one to six stories in height. Most of the buildings had masonry infill walls. Figure 5 shows examples of damage observed in RC frame buildings.²³

The team focused on collecting data to evaluate Hassan Wall Index and Column Index, measures of first-story wall and column areas normalized by

total floor area that were observed to be good proxies for likelihood of damage in past investigations.¹⁶ Measurements by the team supported the usefulness of these indices, with smaller frequencies of damage for values with large wall and column indices. Noting the large quantity of buildings with captive columns, the team also measured window heights

adjacent to columns and floor-to-floor heights to see how the ratio of these two heights affected vulnerability to damage. They observed that, as the ratio of window height to floor height increased beyond 20%, there was a decrease in frequency of severe damage. More information about the reconnaissance and these findings is available in Villalobos et al.²⁴

2017 Puebla Earthquake

Two major earthquakes occurred in Mexico during September 2017: a M_w 8.1 on September 7 off the southern coast of Chiapas and a M_w 7.1 on September 19 about 55 km (34 miles) south of the city of Puebla. The second event caused significant loss of life and damage in Mexico City, including the collapse of more than 40 buildings.²⁵ In mid-October 2017, ACI Committee 133 deployed a team with funding support from the NSF. With the assistance of faculty from Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) and Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), the team surveyed RC buildings located in Mexico City. Most of the buildings surveyed were constructed prior to 1985, were five to 10 stories, and were comprised of RC framing with masonry infill. The most salient observation was that the affected structures were too flexible. Flexible RC frames without adequate transverse reinforcement lack the deformability to cope with large lateral drift demands. Continuous grade-to-roof infill walls were observed to increase stiffness and reduce drift, but these walls were seldom distributed in two directions on the floor plan. In most cases, continuous infill was present only along floor plan edges perpendicular to the street. In this direction, damage to the frame was infrequent and relatively minor. Continuous infill walls were rarely present parallel to the street, and in this direction building damage tended to be much more severe (Fig. 6).

Representatives of ACI 133 returned in January 2018 to conduct ambient vibration testing of 13 buildings, including five schools, to assess the dynamic properties of the buildings.

2017 Pohang Earthquake

On November 15, 2017, a M_w 5.4 earthquake struck Pohang, South Korea. Hundreds of houses and schools were damaged. In early December 2017, ACI Committee 133 deployed members to investigate the impacts of this earthquake on RC structures. Together with researchers from NCRE, nearby



Fig. 5: Damage caused in two buildings by the 2016 Ecuador Earthquake: (a) shear failures in masonry infill walls; and (b) shear failure in a short, ground-level column above infill walls (after Reference 23, licensed under CC BY-SA 3.0)



Fig. 6: A typical residential building affected by the 2017 Puebla Earthquake: (a) edge frames oriented perpendicular to the street had continuous infill walls and exhibited no significant damage; and (b) edge frames oriented parallel to the street had infill walls and fenestration and exhibited shear failure in first-story columns (after Reference 26, licensed under CC BY-NC-SA 4.0)

South Korean universities and engineering firms (Chang Minwoo Structural Consultants and faculty/students from Seoul National University, Ulsan National Institute of Science and Technology, Kyungpook National University, Daegu University, and Gyeongnam National University of Science and Technology), the team documented both damaged and undamaged buildings over the course of 6 days. The team collected dimensions of structural elements to evaluate the Hassan Index as well as stiffness irregularities.¹⁶ Of the 43 buildings with severe or moderate structural damage, 36 were “piloti” structures, residential buildings with three to four stories and an open first story for parking. The first-story structure comprised exposed RC columns with a single stairwell/elevator shaft of RC walls. Above the open first story, the structures included infill walls between residences. Architecturally, this configuration offered ample covered parking and sound-dampening between dwellings, but structurally it led to soft-story conditions that proved to be vulnerable to earthquake shaking as the first story sustained large drift demands. Security cameras captured dramatic video of the sudden failures of RC columns in such an apartment building.²⁷ Figure 7 shows the damage observed in two buildings.²⁸

2018 Chirajara Bridge collapse

On January 15, 2018, construction of the Chirajara Bridge, one of 47 bridges in a Colombian project to expand the Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) highway from Bogotá to Villavicencio, was nearing completion when its west tower collapsed, claiming the lives of nine construction workers. With the approval of ANI, members of ACI Committee 133 visited the site on January 25-26 to collect information that could assist in the development of improvements in design recommendations for bridge structures. The team evaluated footage of the collapse (Fig. 8) and conducted on-site inspections using a spotting scope, cameras, and unmanned aircraft systems

(UAS). A review of the design drawings revealed that the tower slab, which was apparently intended to act as a tie midway up the diamond-shape support

towers, had insufficient longitudinal reinforcement to support the gravity loading condition estimated on the tower at the time of the collapse. Findings



Fig. 7: Observed damage to RC structures in the 2017 Pohang Earthquake: (a) a first-story column; and (b) a structural wall in another building (after Reference 28, licensed under CC BY 3.0)



Fig. 8: Chirajara Bridge west tower failure sequence (after Reference 29)

from the ACI Committee 133 team's investigation illustrate the importance of: 1) exceeding Code minimum reinforcement ratios in critical members to allow spread of inelastic deformations, thus avoiding brittle behavior as a result of strain concentrations; and 2) the peer-review process, specifically for complex structures. Details of the investigation can be found in Pujol et al.²⁹

2018 Camp Fire

The November 8, 2018, Camp Fire burned over 150,000 acres (60,700 ha) in Butte County, CA, USA, resulting in the destruction of nearly 19,000 structures.^{30,31} ACI Committee 133 deployed two members, one of whom was supported by NSF and the Natural Hazards Center, to collect data on the effectiveness of wildfire mitigation efforts with regard to schools and

hospitals, and to investigate the performance of engineered structures throughout Paradise, CA, USA. The team visited 13 public and charter schools as well as 23 buildings on the Adventist Health campus in Paradise.

Typical commercial facilities consisted of RC or masonry wall structures with light-gauge steel joist roofs. One example was the Stratton Market, which collapsed due to the fire

Historical Disasters Examined in ACI Publications

1920s:

- See Reference 6.
- See Reference 7.
- Stineman, N.M., "The Cuban Hurricane," *ACI Journal Proceedings*, V. 23, No. 2, Feb. 1927, pp. 290-306.

1960s:

- See Reference 12.
- Kunze, W.E.; Sbarounis, J.A.; and Armhein, J.E., "The March 27 Alaskan Earthquake—Effects on Structures in Anchorage," *ACI Journal Proceedings*, V. 62, No. 6, June 1965, pp. 635-650.

1970s:

- Yerlici, V.A., "Performance of Reinforced Concrete Buildings in the March 4, 1977, Romanian Earthquake," *Concrete International*, V. 1, No. 9, Sept. 1979, pp. 52-57.

1980s:

- See Reference 13.
- Spyropoulos, P.J., "Report on the Greek Earthquakes of February 24-25, 1981," *Concrete International*, V. 4, No. 2, Feb. 1982, pp. 11-15.
- See Reference 14.
- Carino, N.J.; Leyendecker, E.V.; and Fattal, S.G., "Review of the Skyline Plaza Collapse," *Concrete International*, V. 5, No. 7, July 1983, pp. 35-42.
- Buchhardt, F.; Magiera, G.; Matthees, W.; and Plank, A., "Structural Investigation of the Berlin Congress Hall Collapse," *Concrete International*, V. 6, No. 3, Mar. 1984, pp. 63-68.
- Russell, H.G., and Rowe, T.J., "Collapse of Ramp C," *Concrete International*, V. 7, No. 12, Dec. 1985, pp. 32-37.
- Rosenblueth, E., and Meli, R., "The 1985 Mexico Earthquake," *Concrete International*, V. 8, No. 5, May 1986, pp. 23-34.
- "The Superstition Hills Earthquakes," *Concrete International*, V. 10, No. 6, June 1988, pp. 62-65.
- See Reference 15.

1990s:

- Vecchio, F.J., and Collins, M.P., "Investigating the Collapse of a Warehouse Structure," *Concrete International*, V. 12, No. 3, Mar. 1990, pp. 72-78.
- Saatcioglu, M., and Bruneau, M., "Performance of

- Reinforced Concrete Structures during the 1992 Erzincan Earthquake," *Concrete International*, V. 16, No. 9, Sept. 1994, pp. 51-56.
- Buslov, V.M.; Rowghani, M.; and Weismair, M., "Evaluating Earthquake Damage to Concrete Wharves," *Concrete International*, V. 18, No. 8, Aug. 1996, pp. 50-54.
- See Reference 16.
- Selby, R.G.; Vecchio, F.J.; and Collins, M.P., "The Failure of an Offshore Platform," *Concrete International*, V. 19, No. 8, Aug. 1997, pp. 28-35.
- Kosa, K.; Kimura, Y.; and Kitahara, H., "Survival of Bridge Foundations after the Great Hanshin Earthquake," *Concrete International*, V. 21, No. 1, Jan. 1999, pp. 43-46.
- Brøndum-Nielsen, T., "Collapse of Danish Prestressed Tanks," *Concrete International*, V. 21, No. 4, Apr. 1999, pp. 55-56.

2000s:

- Pujol, S.; Ramirez, J.; and Sarria, A., "Behavior of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings," *Concrete International*, V. 22, No. 1, Jan. 2000, pp. 40-44.
- Tosolt, K.A., "ACI Assists Forensic Study of Terrorist Attack Damage," *Concrete International*, V. 23, No. 11, Nov. 2001, pp. 24-25.
- Saatcioglu, M.; Gardner, N.J.; and Ghobarah, A., "1999 Turkey Earthquake Performance of RC Structures," *Concrete International*, V. 23, No. 3, Mar. 2001, pp. 46-56.
- Prakash Rao, D.S., "Shaking Then Collapse of Indian Building... Why?," *Concrete International*, V. 24, No. 11, Nov. 2002, pp. 83-87.
- Leon, R.T.; Kam, W.Y., and Pampanin, S., "Performance of Beam-Column Joints in the 2010-2012 Christchurch Earthquakes," SP 269, *Concrete: The Sustainable Material Choice*, E. Lorenz, J. Buffenbarger, and C. Aldea, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, Mar. 2014, pp. 3.1-3.20.
- See Reference 20.
- See Reference 21.
- See Reference 29.



Fig. 9: Remains of buildings destroyed in the Camp Fire: (a) Stratton Market; and (b) Paradise Elementary School (photos courtesy of Erica Fischer)



Fig. 10: A damaged mid-rise RC-frame building in Albania

(Fig. 9(a)). One school building, Paradise Elementary School, had RC columns and timber framing. It also completely collapsed due to the fire (Fig. 9(b)). The ACI team also documented damage to a three-story residential building with RC framing. The fire caused buckling of the building's corrugated metal roof, cracking and spalling around flexural reinforcement in RC roof beams, and vertical splitting and spalling of third-story columns.

Data from the reconnaissance are now being curated, and a report is being prepared for publication in ASCE's *Natural Hazards Review*.

2019 Albania Earthquake

On November 26, 2019, a M_w 6.4 earthquake struck northwestern Albania. This earthquake was the strongest to hit Albania in more than 40 years. Cities such as Thumanë, Tirana, and Durrës suffered damage, but Durrës was hit hardest with several building collapses. A day after the event, ACI Committee 133 created a channel on the Slack messaging platform to share and discuss news within the committee, and it invited noncommittee members with firsthand knowledge to share their observations. Participants described typical construction practices and the seismic code used in Albania, and they provided estimates of the number of structures affected. Based on this information and information gathered from other organizations like EERI, ACI Committee 133 decided to deploy a team to Albania. ACI team members joined with researchers from Albania, Croatia, and Germany (Epoka University, Tirana, Albania; University of Osijek, Osijek, Croatia; and Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Germany) to document 55 buildings over the course of 4 days in January 2020. The team surveyed buildings that had RC frames as their main lateral resisting system. All buildings included unreinforced masonry infill walls (hollow clay bricks), and most also had ribbed or waffle slabs. Typical damage was in-plane or out-of-plane failure of nonstructural hollow clay brick walls (Fig. 10). In most cases, the hollow clay bricks were not connected to the RC frame. The team is in the process of uploading the collected data and preparing a manuscript about its findings.

External Coordination

Experiences gained through ACI Committee 133 deployments have illustrated the importance of partnering in the field with external researchers and organizations to leverage skill sets outside of the ACI committee. For example, during their second deployment to study the effects of the Puebla Earthquake in Mexico, ACI team members joined forces with researchers conducting terrestrial laser scanning (three-dimensional LiDAR scanning) of several buildings to assess their residual displacement and compare displacements with those predicted using nonlinear finite element models.³² Teaming with other researchers and organizations can also help to maximize productivity in the field and reduce overhead for the organizations involved.

ACI Committee 133 members are exploring ways to better coordinate field deployments with governmental organizations (for example, the Federal Emergency Management Agency [FEMA] and the National Institute of Standards and Technology [NIST]) that conduct reconnaissance activities under statutory programs such as the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), the National Windstorm Impact Reductions Program (NWIRP), and the National Construction Safety Team (NCST).

Developments

Through the course of eight deployments, ACI Committee 133 members have developed procedures for preparing teams to enter the field following major disasters. The committee has also worked to standardize data collection documents for describing building characteristics and damage.^{20,22,23,26,28} Other recent activities include implementation of new technologies, such as UAS and LiDAR, made possible through collaboration with the Natural Hazards Engineering Research Infrastructure (NERI) facility (commonly called the RAPID Facility: <https://rapid.designsafe-ci.org>).

ACI Committee 133 has also been exploring efforts to streamline post-processing of data collected in the field. One such effort involves using machine vision to automate structural damage detection in post-disaster images.³³ ACI Committee 133 continues to seek members and partners with an interest in advancing the approaches used for data collection and assessment of RC structural damage data to inform the evolution of ACI technical publications and their use worldwide.

Conclusions

Since its conception in 2013, ACI Committee 133 has deployed reconnaissance teams to eight areas affected by disasters. Members have surveyed more than 700 buildings and one bridge, collecting both qualitative and quantitative data (Table 1). During this time, the committee has streamlined its operating procedures, incorporated new technologies, and collected valuable data. Early deployments focused on reconnaissance of RC buildings affected by earthquakes. Because these disasters affect large regions with hundreds or thousands of buildings, they provide opportunities to collect building performance data across a wide spectrum of building configurations and damage levels. Data gained from these deployments have supported previously proposed measures for assessing the seismic vulnerability of structures,¹⁶ and they have provided valuable new information about other aspects of RC behavior during earthquakes. They have also showcased the merits of working closely with local researchers and government entities, the merits of pre-deployment of “digital reconnaissance” to maximize productivity in the field, and the usefulness of UAS for surveying large areas or areas with limited safe access. More recently, the committee has begun deploying after other disasters, including a bridge collapse and a wildfire. These

deployments have demonstrated to the committee different needs for collection of data after non-earthquake disasters. Interested readers are encouraged to attend ACI Committee 133 meetings at ACI Conventions and/or apply for membership.

Acknowledgments

Support for deployment activities discussed herein was provided by NSF through: CMMI #1637163 and 1637169 (Meinong Earthquake); CMMI #1810870, 1810876, 1810899, 1810907, and 1811084 (Puebla Earthquake); and CMMI #1917298 and 1917316 (Camp Fire). We also thank the committee Chairs who have led ACI Committee 133 since its inception: Jack Moehle, Ken Elwood, Michael Kreger, and Santiago Pujol. We also thank the greater committee for their contributions and work on deployments, and ACI staff for their continued support.

Disclaimer

Commercial software may have been used in the preparation of information contributing to this article. Identification of this software is not intended to imply recommendation or endorsement by the authors or their institutions and agencies, nor is it intended to imply that such software is necessarily the best available for the purpose.

References

1. Massone, L.M.; Bonelli, P.; Lagos, R.; Lüders, C.; Moehle, J.; and Wallace, J.W., “Seismic Design and Construction Practices for RC Structural Wall Buildings,” *Earthquake Spectra*, V. 28, No. S1, June 2012, pp. S245-S256.
2. Westenenk, B.; de la Llera, J.C.; Besa, J.J.; Jünemann, R.; Moehle, J.; Lüders, C.; Inaudi, J.A.; Elwood, K.J.; and Hwang, S., “Response of Reinforced Concrete Buildings in Concepción during the Maule Earthquake,” *Earthquake Spectra*, V. 28, No. S1, June 2012, pp. S257-S280.
3. Song, C.; Pujol, S.; and Lepage, A., “The Collapse of the Alto Río Building during the 27 February 2010 Maule, Chile, Earthquake,” *Earthquake Spectra*, V. 28, No. S1, June 2012, pp. S301-S334.
4. Awad, K.W., “News Detail: ACI and the World,” June 1, 2017. www.concrete.org/news/newsdetail.aspx?f=51700829.
5. Moehle, J.P., Personal communication, Mar. 14, 2019.
6. Hadley, H.M., “How Structures Withstood the Japanese Earthquake and Fire,” *ACI Journal Proceedings*, V. 20, No. 2, Feb. 1924, pp. 188-209.
7. Ruble, J.S., “The Earthquake in Japan,” *ACI Journal Proceedings*, V. 20, No. 2, Feb. 1924, pp. 210-220.
8. Sozen, M.; Pujol, S.; Irfanoglu, A.; Sim, C.; Puranam, A.; Laughery, L.; Seung, S.; Nelson, M.; and Usta, M., “Earthquake Reconnaissance Slides by Drs. Mete A. Sozen and Nathan M. Newmark,” July 14, 2015. www.datacenterhub.org/resources/240.
9. “Learning from Earthquakes,” Earthquake Engineering Research Institute, 2020a. www.eeri.org/projects/learning-from-earthquakes-lfe.
10. “Learning from Earthquakes Reconnaissance Archive,” Earthquake Engineering Research Institute, 2020b. www.learningfromearthquakes.org/archive/table-view.
11. Map Data: Google, INEGI Imagery, NASA, TerraMetrics, Google Earth Map, 2020.

12. de Cossio, R.D., and Rosenblueth, E., "Reinforced Concrete Failures during Earthquakes," *ACI Journal Proceedings*, V. 58, No. 11, Nov. 1961, pp. 571-590.

13. Yanev, P.I., "Effects of the Miyagi-Ken-Oki Earthquake on Reinforced Concrete Structures," *Concrete International*, V. 3, No. 11, Nov. 1981, pp. 42-48.

14. Lew, H.S.; Carino, N.J.; and Fattal, S.G., "Cause of the Condominium Collapse in Cocoa Beach, Florida," *Concrete International*, V. 4, No. 8, Aug. 1982, pp. 64-73.

15. Wyllie Jr., L.A., "Lessons from the Armenian Earthquake," *Concrete International*, V. 11, No. 8, Aug. 1989, pp. 21-26.

16. Hassan, A.F., and Sozen, M.A., "Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes," *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 1, Jan.-Feb. 1997, pp. 31-39.

17. Wendelbo et al., "The Crisis Response to the Nepal Earthquake: Lessons Learned," European Institute for Asian Studies, May 2016, 72 pp.

18. Shah, P.; Pujol, S.; and Puranam, A., "Database on Performance of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings in the 2015 Nepal Earthquake," 2015a. www.datacenterhub.org/resources/238.

19. Shah, P.; Pujol, S.; and Puranam, A., "Database on Performance of High-Rise Reinforced Concrete Buildings in the 2015 Nepal Earthquake," 2015b. www.datacenterhub.org/resources/242.

20. Shah, P.; Pujol, S.; Kreger, M.; and Irfanoglu, A., "2015 Nepal Earthquake," *Concrete International*, V. 39, No. 3, Mar. 2017, pp. 42-49.

21. Puranam, A.Y., and Pujol, S., "Investigation of Axial Failure of a Corner Column in a 14-Story Reinforced Concrete Building," *ACI Structural Journal*, V. 116, No. 1, Jan. 2019, pp. 93-101.

22. Purdue University, NCREC, "Performance of Reinforced Concrete Buildings in the 2016 Taiwan (Meinong) Earthquake," June 12, 2016. www.datacenterhub.org/resources/14098.

23. Sim, C.; Villalobos, E.; Smith, J.P.; Rojas, P.; Pujol, S.; Puranam, A.Y.; and Laughery, L., "Performance of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings in the 2016 Ecuador Earthquake," Aug. 24, 2016. www.datacenterhub.org/resources/14160.

24. Villalobos, E.; Sim, C.; Smith-Pardo, J.P.; Rojas, P.; Pujol, S.; and Kreger, M., "April 16, 2016 Ecuador Earthquake Damage Assessment Survey," *Earthquake Spectra*, V. 34, No. 3, Mar. 2018, pp. 1201-1217.

25. Alcocer et al., "Observations about the Seismic Response of RC Buildings in Mexico City," *Earthquake Spectra*, Aug. 2020, 21 pp.

26. Purdue University, "Buildings Surveyed after 2017 Mexico City Earthquakes," June 7, 2018. www.datacenterhub.org/resources/14746.

27. 필로티가 뭐길래...3초 만에 뼈대째 꺾인 기둥 / SBS [What's the piloti? Column shattered after 3 seconds / SBS], SBS News, 2017. www.youtube.com/watch?v=WRrhvcZPKvU.

28. Sim, C.; Laughery, L.; Chiou, T.C.; and Weng, P., "2017 Pohang Earthquake—Reinforced Concrete Building Damage Survey," Apr. 7, 2018. www.datacenterhub.org/resources/14728.

29. Pujol, S.; Kreger, M.E.; Monical, J.D.; and Schultz, A.E., "Investigation of the Collapse of the Chirajara Bridge," *Concrete International*, V. 41, No. 6, June 2019, pp. 29-37.

30. Cal Fire: Camp Fire Incident Information, California Department of Forestry and Fire Protection, 2019. www.fire.ca.gov/incidents/2018/11/8/camp-fire.

31. Löw, P., "The Natural Disasters of 2018 in Figures," Munich RE, Aug. 1, 2019. www.munichre.com/topics-online/en/climate-change-and-natural-disasters/natural-disasters/the-natural-disasters-of-2018-in-figures.html.

32. Liao, Y.; Wood, R.L.; Mohammadi, M.E.; Devkota, K.; and Wittich, C.E., "Damage Assessment of a Sixteen Story Building Following the 2017 Central Mexico Earthquake," *Proceedings of 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Québec City, QC, Canada, June 17-20, 2019, 7 pp.

33. Pantoja, M.; Behrouzi, A.A.; and Fabris, D., "An Introduction to Deep Learning," *Concrete International*, V. 40, No. 9, Sept. 2018, pp. 35-41.

Selected for reader interest by the editors.



West Lafayette, IN, USA.

ACI member **Lucas A. Laughery** is a Senior Launch Engineer at SpaceX in Hawthorne, CA, USA. He is a member of ACI Committees 123, Research and Current Developments, and 133, Disaster Reconnaissance, and ACI Subcommittee 445-B, Shear & Torsion-Seismic Shear. He received his MS and PhD in civil engineering from Purdue University,



ACI member **Aishwarya Y. Puranam** is an Assistant Professor in the Department of Civil Engineering at National Taiwan University, Taipei, Taiwan. She is a member of ACI Committee 133, Disaster Reconnaissance. She received her BSCE, MSCE, and PhD from Purdue University.

ACI member **Christopher L. Segura Jr.** is a Research Structural Engineer in the Earthquake Engineering Group at the National Institute of Standards and Technology. He is a member of ACI Committees 133, Disaster Reconnaissance; 369, Seismic Repair and Rehabilitation; and 374, Performance-Based Seismic Design of Concrete Buildings.



ACI member **Anahid A. Behrouzi** is an Assistant Professor of Architectural Engineering at California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, USA. She is a member of ACI Committee 133, Disaster Reconnaissance, and the ACI Foundation's Scholarship Council. She received her MS and PhD in civil engineering from the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.

El Equipo del Instituto para Investigación de Daños

Lecciones aprendidas de las implementaciones de campo

por Lucas A. Laughery, Aishwarya Y. Puranam, Christopher L. Segura Jr. y Anahid A.

El Comité 133 de ACI, Reconocimiento de desastres, fue concebido a raíz del Terremoto Chileno 2010, evento que afectó a miles de estructuras. Ese evento causó grandes daños a un estimado de 50 a 100 edificios de Concreto Reforzado (RC) de media y gran altura, incluidos siete que fueron dañados más allá reparación.¹⁻³ Aunque ACI ha tenido una sólida historia de publicación de evaluaciones de desastres (consulte el cuadro de texto: Desastres históricos Examinado en Publicaciones de ACI), el Instituto no tenía mecanismo implementado para desplegar un equipo para investigar e informar sobre lecciones críticas para sus comités técnicos y afiliación. Además, el alcance internacional cada vez mayor del Código de Construcción ACI 318, que ha sido adoptado o referenciado en el código nacional de más de 30 países, incluido Chile,⁴ destacó la necesidad de que los enlaces de ACI estén en el terreno inmediatamente después de un desastre para servir como recurso técnico para ingenieros locales.

Reconociendo estas necesidades, el ex presidente del Comité 318 de ACI, Jack Moehle, consultó con los ex presidentes de ACI José Izquierdo-Encarnación y Luis García sobre la formación de un comité con una directiva de reconocimiento de desastres.

En octubre de 2012, se presentó una propuesta a la Junta Directiva de ACI para establecer y financiar un nuevo comité con los objetivos principales de:

- Proporcionar un mecanismo para evaluar la aplicación de documentos ACI a nivel internacional; y
- Difundir los resultados de la implementación a los comités técnicos de ACI y a través de publicaciones de ACI.⁵

Hasta la fecha, los presidentes del comité resultante, el Comité 133 de ACI, han incluido a Jack Moehle, Ken Elwood, Michael Kreger y Santiago Pujol. Este comité ha involucrado activamente a un grupo diverso de profesionales e investigadores.

Desastres Históricos en las Publicaciones de ACI

Los ingenieros han recopilado datos sobre el desempeño de los edificios después de desastres naturales desde al menos la década de 1920,^{6,7} con algunos datos disponibles en línea de desastres desde el terremoto de Managua de 1931.⁸

Uno de los programas formales más antiguos de reconocimiento posterior a un desastre es el programa Aprendiendo de los Terremotos (Learning from Earthquakes - LFE) del Instituto de Investigación en Ingeniería Sísmica (Earthquake Engineering Research Institute's - EERI), que se estableció en 1973.⁹ Desde su creación, EERI LFE ha recopilado datos después de más de 300 terremotos, y ha compartido sus hallazgos en informes, en artículos de Earthquake Spectra y en un depósito de datos centralizado.¹⁰ Si bien ACI no ha tenido un comité de reconocimiento formal hasta hace poco, los ingenieros estructurales han difundido durante mucho tiempo los hallazgos de sus estudios de reconocimiento de campo de las estructuras de RC a través de las publicaciones periódicas de ACI.



Fig.1: Desastres históricos reportados en publicaciones de ACI (créditos de datos de mapas: Google, INEGI Imagery, NASA, TerraMetrics¹¹)

La Figura 1 presenta las ubicaciones y fechas de 21 terremotos, 10 derrumbes estructurales y dos huracanes cuyos hallazgos de reconocimiento se publicaron en ACI Structural Journal, revista Concrete International y ACI Publicaciones Especiales. Ejemplos de lecciones importantes incluyen:

- 1961 — Basado en observaciones posteriores a terremotos en México (1956, 1957 y 1959), Japón (1923 y 1948) y Chile (1960), De Cossio y Rosenbluth¹² enfatizaron la importancia de un adecuado anclaje del refuerzo en las uniones viga-columna y estrechamente amarres y estribos espaciados para evitar el pandeo del refuerzo longitudinal;
- 1981: Yanev¹³ informó que gran parte de los daños en edificios de baja altura de RC observados en el terremoto M7.8 Miyagi-Ken-Okii de 1978 en Japón se produjeron en edificios con irregularidades torsionales en sus sistemas de resistencia a la fuerza lateral;
- 1982: Lew et al.¹⁴ indicaron que el colapso de un edificio de condominios de cinco pisos en Florida probablemente fue causado por una capacidad insuficiente de corte por perforación en varias de las losas de la estructura;
- 1989 — Basado en observaciones del terremoto de Armenia de 1988, Wyllie¹⁵ reiteró la importancia de considerar adecuadamente la conectividad de los elementos en el sistema estructural de un edificio para lograr la trayectoria de carga prevista; y
- 1997 — Hassan y Sozen¹⁶ describieron índices sin unidades que pueden usarse para evaluar la vulnerabilidad de los edificios al daño sísmico, probados usando un grupo de edificios que sufrieron varios niveles de daño durante el Terremoto de Erzincan, Turquía de 1992.

Actividades de Reconocimiento ACI

La decisión de desplegar un equipo de reconocimiento ACI se basa en varios factores, que incluyen:

- Informes iniciales de daños estructurales;
- Potencial de impactos a los estándares de ACI, así como a las comunidades de construcción e ingeniería;
- Accesibilidad y seguridad del sitio / regional; y
- Coordinación con otras agencias y universidades.

La Figura 2 muestra 14 eventos que el Comité de ACI 133 ha considerado para su despliegue, incluidos ocho terremotos, un incendio estructural, un incendio forestal, la falla de una presa, un tornado, el colapso de un edificio y el colapso de un puente. Hasta la fecha, se ha desplegado un equipo de ACI para investigar seis terremotos, el colapso de un puente y un incendio forestal. Las descripciones de estas implementaciones, incluidas las referencias a los informes de reconocimiento y los datos recopilados, se proporcionan en el siguiente texto.

En la Tabla 1 se proporciona un resumen de los enlaces de datos y los recuentos de las estructuras encuestadas. Para los terremotos, los equipos han recopilado las coordenadas y direcciones de los edificios, los bocetos de planos de planta aproximados, las dimensiones de los elementos estructurales y no estructurales, y fotografías y notas sobre la ubicación y la gravedad del daño a estos elementos. En algunos casos, a los equipos también se les han proporcionado direcciones de los edificios, los bocetos de planos de planta aproximados, las dimensiones de los elementos estructurales y no estructurales, y fotografías y notas sobre la ubicación y la gravedad del daño a estos elementos. En algunos casos, a los equipos también se les han proporcionado diseños arquitectónicos formales, dibujos estructurales y modelos de análisis estructural. Además, los equipos han recopilado datos para estructuras con varios niveles de daño en lugar de solo para las estructuras más dañadas. Para desastres distintos de los terremotos, aún no se ha establecido un proceso de recopilación de datos estandarizado; en consecuencia, los planes de recopilación de datos se realizan antes de cada implementación.

Terremotos de Nepal de 2015

Dos grandes terremotos ocurrieron en Nepal en 2015: un momento de magnitud (Mw) 7.8 el 25 de abril, y un Mw 7.3 el 12 de mayo. Estos terremotos fueron seguidos por más de 400 réplicas con magnitudes mayores a 4.0. Aproximadamente 500,000 edificios fueron destruidos y más de 250,000 edificios sufrieron daños durante los terremotos y sus réplicas.¹⁷



Fig. 2: Eventos evaluados para el despliegue del Comité 133 de ACI. Los marcadores verdes indican que se desplegó un equipo de reconocimiento ACI. Los marcadores morados indican que no se desplegó ningún equipo (créditos de mapas: Google, INEGI Imagery, NASA, TerraMetrics¹¹)

Tabla 1

Resumen de las implementaciones del Comité 133 de ACI

Eventos	Enlace de Datos	Estructuras
Terremoto de Nepal 2015	www.datacenterhub.org/resources/238	146 Edificios de poca altura
	www.datacenterhub.org/resources/242	30 Edificios de gran altura
Terremoto de Taiwán 2016	www.datacenterhub.org/resources/14098	130 Edificios
Terremoto de Ecuador 2016	www.datacenterhub.org/resources/14160	173 Edificios
Terremoto de México 2017	www.datacenterhub.org/resources/14746	125 Edificios
Terremoto de Pohang 2017	www.datacenterhub.org/resources/14728	75 Edificios
Colapso del Puente Chirajara 2018	N/A	1 Edificios
Fuego Forestal 2018	N/A	36 Edificios
Terremoto de Albania de 2019	N/A	55 Edificios
Total = 770 edificios + 1 puente		

A mediados de junio de 2015, el Comité 133 de ACI desplegó un equipo para inspeccionar los edificios de CR en la capital de Nepal, Katmandú. Junto con 17 ingenieros civiles voluntarios del gobierno local y la industria privada, el equipo encuestó y recopiló datos para edificios RC de baja y alta altura. En general, los edificios de poca altura (menos de ocho pisos) tenían marcos estructurales no diseñados y paredes divisorias de mampostería de ladrillos de arcilla, mientras que los edificios de gran altura (ocho o más pisos) tenían marcos estructurales diseñados y paredes divisorias de mampostería de ladrillos de arcilla.

La Figura 3 muestra daños severos al relleno de mampostería no reforzada en edificios de baja y gran altura.^{18,19} El colapso del primer piso en el edificio de baja altura (izquierda) demuestra la vulnerabilidad de la historia blanda. Se puede encontrar más información sobre el reconocimiento en Shah et al.²⁰

Terremoto de Taiwán 2016

El 6 de febrero de 2016, el Mw 7.8 El terremoto de Meinong ocurrió en Ciudad de Kaohsiung en el sur de Taiwán. Se observaron muchos daños en la Ciudad de Tainan, aproximadamente a 40 km (25 millas) del epicentro.

Los informes sugirieron que la mayoría de las muertes se debieron al colapso de un edificio residencial de 14 pisos. El Comité 133 de ACI desplegó un equipo en marzo de 2016, apoyado en parte por la Fundación Nacional de Ciencias (National Science Foundation - NSF), para unirse a los investigadores Taiwanés del Centro Nacional de Investigación de Ingeniería Sísmica (National Center for Research on Earthquake Engineering- NCREE) para investigar los efectos del terremoto en las estructuras RC. Durante 12 días, se inspeccionaron 119 edificios escolares, residenciales y gubernamentales de poca altura y 11 estructuras de entre 8 y 23 pisos de altura en la Ciudad de Tainan. Además de las técnicas convencionales, los equipos utilizaron drones aéreos para recopilar videos de estructuras. Los miembros del equipo de ACI investigaron la falla de una columna de esquina en un edificio de 14 pisos en la Ciudad de Tainan, y concluyeron que la falla fue el resultado de demandas axiales impuestas por muros RC discontinuos destinados a funcionar como tabiques.²¹ El equipo también llevó a cabo una evaluación de cuatro índices de detección de vulnerabilidad sísmica diferentes, incluido el propuesto por Hassan y Sozen¹⁶ y otro utilizado en ese momento en Taiwán. La Figura 4 muestra los daños que se observaron en columnas en dos edificios diferentes.²²

Terremoto de Ecuador 2016

El 16 de abril de 2016, un terremoto de 7,8 Mw sacudió la costa de Ecuador, provocando graves daños y el colapso de estructuras, particularmente alrededor de la provincia costera de Manabí. Se informaron miles de réplicas en los meses siguientes.



Fig. 3: Edificios dañados en el terremoto de Nepal de 2015: (a) edificio de poca altura (después de la Referencia 18, con licencia CC BY-SA 3.0); y (b) edificio de gran altura (después de la Referencia 19, con licencia CC BY-SA 3.0)



Fig. 4: Daños a columnas en el terremoto de Taiwán de 2016: (a) falla por compresión axial; y (b) falla por corte (después de la Referencia 22, con licencia CC BY-NC SA 4.0)

En julio de 2016, el Comité 133 de ACI desplegó un equipo que, junto con profesores y estudiantes de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), inspeccionó los edificios de RC durante un período de 8 días. Los edificios tenían una altura de uno a seis pisos. La mayoría de los edificios tenían muros de relleno de mampostería. La Figura 5 muestra ejemplos de daños observados en edificios con estructura de RC.²³

El equipo se centró en la recopilación de datos para evaluar el índice de pared y el índice de columnas de Hassan, medidas de las áreas de la pared y columna del primer

piso normalizadas por el área total del piso que se observó que eran buenos indicadores de laprobabilidad de daños en investigaciones anteriores.¹⁶

Las mediciones del equipo respaldaron la utilidad de estos índices, con frecuencias de daño más pequeñas para valores con índices de pared y columna grandes. Al observar la gran cantidad de edificios con columnas cautivas, el equipo también midió las alturas de las ventanas adyacentes a las columnas y las alturas de piso a piso para ver cómo la proporción de estas dos alturas afectaba la vulnerabilidad al daño.



Fig. 5: Daños causados en dos edificios por el Terremoto de Ecuador de 2016: (a) fallas de corte en muros de relleno de mampostería; y (b) falla por cortante en una columna corta a nivel del suelo por encima de las paredes de relleno (después de la Referencia 23, con licencia CC BY-SA 3.0)

Observaron que, a medida que la relación entre la altura de la ventana y la altura del piso aumentaba más del 20%, había una disminución en la frecuencia de daños graves. Más información sobre el reconocimiento y estos hallazgos está disponible en Villalobos et al.²⁴

Terremoto de Puebla 2017

Dos grandes terremotos ocurrieron en México durante septiembre de 2017: un Mw 8.1 el 7 de septiembre frente a la costa sur de Chiapas y un Mw 7.1 el 19 de septiembre a unos 55 km (34 millas) al sur de la ciudad de Puebla. El segundo evento provocó importantes pérdidas de vidas y daños en la Ciudad de México, incluido el derrumbe de más de 40 edificios.²⁵ A mediados de octubre de 2017, el Comité 133 de ACI desplegó un equipo con apoyo financiero de la NSF. Con la asistencia de profesores de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), el equipo inspeccionó edificios de RC ubicados en la Ciudad de México. La mayoría de los edificios encuestados se construyeron antes de 1985, tenían entre 5 y 10 pisos, estaban compuestos de marcos de RC con relleno de mampostería. La observación más destacada fue que las estructuras afectadas eran demasiado flexibles. Los marcos flexibles de RC sin un refuerzo transversal adecuado carecen de la deformabilidad para hacer frente a las grandes demandas de desplazamiento lateral. Se observó que los muros de relleno continuos desde el nivel hasta el techo aumentan la rigidez y reducen la deriva, pero estos muros rara vez se distribuyen en dos direcciones en el plano del piso. En la mayoría de los casos, el relleno continuo



Fig. 6: Un edificio residencial típico afectado por el terremoto de Puebla de 2017: (a) los marcos de borde orientados perpendicularmente a la calle tenían muros de relleno continuos y no presentaban daños significativos; y (b) los marcos de borde orientados paralelos a la calle tenían muros de relleno y fenestración y exhibían fallas por corte en las columnas del primer piso (después de la Referencia 26, con licencia CC BY-NC-SA 4.0)

estructuras de RC. Junto con investigadores de NCREE, universidades cercanas de Corea del Sur y empresas de ingeniería (consultores estructurales de Chang Minwoo y profesores / estudiantes de la Universidad Nacional de Seúl, el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología de Ulsan, la Universidad Nacional de Kyungpook, la Universidad de Daegu, la Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología de Gyeongnam), el equipo documentó tanto los edificios dañados como los no dañados en el transcurso de 6 días. El equipo recopiló las dimensiones de los elementos estructurales para evaluar el Índice de Hassan, así como las irregularidades de rigidez.¹⁶ De los 43 edificios con daño estructural severo o moderado, 36 eran estructuras “piloti”, edificios residenciales de tres a cuatro pisos y un primer piso abierto para estacionamiento. La estructura del primer piso comprendía columnas RC expuestas con un solo hueco de escalera / ascensor de paredes RC. Sobre el primer piso abierto, las estructuras incluían muros de relleno entre las residencias. Arquitectónicamente, esta configuración ofrecía un

amplio estacionamiento cubierto y amortiguación de sonido entre viviendas, pero estructuralmente condujo a condiciones de pisos suaves que demostraron ser vulnerables a temblores sísmicos ya que el primer piso tenía grandes demandas de deriva. Las cámaras de seguridad capturaron un video dramático de las fallas repentinas de las columnas RC en un edificio de apartamentos de este tipo.²⁷ La Figura 7 muestra el daño observado en dos edificios.²⁸

Colapso del Puente Chirajara 2018

El 15 de enero de 2018, la construcción del Puente Chirajara, uno de los 47 puentes en un proyecto colombiano para ampliar la carretera de Bogotá a Villavicencio de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), estaba casi terminada cuando su torre oeste colapsó, cobrando la vida de nueve trabajadores de la construcción. Con la aprobación de ANI, los miembros del Comité 133 de ACI visitaron el sitio del 25 al 26 de enero para recopilar información que pudiera ayudar en el desarrollo de mejoras en las recomendaciones de diseño para estructuras de puentes.

El equipo evaluó las imágenes del colapso (Fig. 8) y realizó inspecciones en el lugar utilizando un telescopio, cámaras y sistemas de aviones no tripulados (Unmanned Aircraft Systems UAS). Una revisión de los dibujos de diseño reveló que la losa de la torre, que aparentemente estaba destinada a actuar como un amarre en la mitad de las torres de soporte en forma de diamante, tenía un refuerzo longitudinal insuficiente para soportar la condición de carga por gravedad estimada en la torre en el momento del colapso. Los hallazgos de la investigación del equipo del Comité 133



Fig. 7: Daño observado a las estructuras de RC en el terremoto de Pohang de 2017: (a) una columna del primer piso; y (b) un muro estructural en otro edificio (después de la Referencia 28, con licencia CC BY 3.0)



Fig.8: Secuencia de falla de la torre oeste del puente Chirajara (después de la Referencia 29)

de ACI ilustran la importancia de 1) exceder las proporciones mínimas de refuerzo del Código en elementos críticos para permitir la propagación de deformaciones inelásticas, evitando así un comportamiento frágil como resultado de concentraciones de deformaciones; y 2) el proceso de revisión por pares, específicamente para estructuras complejas. Los detalles de la investigación se pueden encontrar en Pujol et al.²⁹

Fuego Forestal 2018

El 8 de noviembre de 2018, Fuego Forestal quemó más de 150,000 acres (60,700 ha) en el condado de Butte, CA, USA., Lo que resultó en la destrucción de casi 19,000 estructuras.^{30,31} El Comité 133 de ACI desplegó dos miembros, uno de los cuales fue apoyado por NSF y el Natural Hazards Center, para recopilar datos sobre la efectividad de los esfuerzos de mitigación de incendios forestales en escuelas y

hospitales, e investigar el desempeño de estructuras de ingeniería en Paradise, CA, USA. El equipo visitó 13 escuelas públicas y autónomas, así como 23 edificios en el campus de Adventist Health en Paradise. Las instalaciones comerciales típicas consistían en estructuras de paredes de mampostería o RC con techos de vigas de acero de calibre ligero. Un ejemplo fue el mercado de Stratton, que colapsó debido al incendio (Fig. 9 (a)).

Desastres Históricos Examinados en Publicaciones de ACI

Década de 20s:

- Ver referencia 6.
- Ver referencia 7.
- Stineman, N.M., "The Cuban Hurricane", ACI Journal Proceedings, V.23, No. 2, febrero de 1927, págs. 290-306.

Década de 60s:

- Ver referencia 12.
- Kunze, W.E.; Sbarounis, J.A.; y Armhein, J.E., "The 27 March Alaskan Earthquake — Effects on Structures in Anchorage", ACI Journal Proceedings, V.62, No.6, junio de 1965, págs. 635-650

Década de 70s:

- Buchhardt, F.; Magiera, G.; Matthees, W.; y Plank, A., "Investigación estructural del colapso de la sala de congresos de Berlín", Concrete International, V.6, No.3, marzo de 1984, págs. 63-68.
- Russell, H.G. y Rowe, T.J., "Collapse of Ramp C", Concrete International, V.7, No.12, diciembre de 1985, págs. 32-37.
- Rosenblueth, E. y Meli, R., "The 1985 Mexico Earthquake", Concrete International, V.8, No.5, mayo de 1986, págs. 23-34.
- "Los terremotos de Superstition Hills", Concrete International, V.10, No.6, junio de 1988, págs. 62-65.

• Yerlici, V.A., "Rendimiento de edificios de hormigón armado en el terremoto rumano del 4 de marzo de 1977", *Concrete International*, V.1, No.9, septiembre de 1979, págs.

Década de 80s:

• Ver referencia 13.

• Spyropoulos, P.J., "Informe sobre los terremotos griegos del 24 al 25 de febrero de 1981", *Concrete International*, V.4, No.2, febrero de 1982, págs. 11-15.

• Ver referencia 14.

• Carino, Nueva Jersey; Leyendecker, E.V.; y Fattal, S.G., "Review of the Skyline Plaza Collapse", *Concrete International*, V.5, No.7, julio de 1983, págs. 35-42.

• Ver referencia 15.

Década de 90s:

• Vecchio, F.J. y Collins, M.P., "Investigating the Collapse of a Warehouse Structure", *Concrete International*, V.12, No.3, marzo de 1990, págs. 72-78.

• Saatcioglu, M., y Bruneau, M., "Performance of Reinforced Concrete Structures during the 1992 Erzincan Earthquake", *Concrete International*, V. 16, No. 9, septiembre de 1994, págs. 51-56.

• Buslov, V.M.; Rowghani, M.; y Weismair, M., "Evaluating Earthquake Damage to Concrete Wharves", *Concrete International*, V. 18, No. 8, agosto 1996, págs. 50-54.

• Ver referencia 16.

• Selby, R.G.; Vecchio, F.J.; y Collins, M.P., "The Failure of an Offshore Platform", *Concrete International*, V. 19, No. 8, agosto de 1997, págs. 28-35.

• Kosa, K.; Kimura, Y.; y Kitahara, H., "Survival of Bridge Foundations after the Great Hanshin Earthquake", *Concrete International*, V.21, No.1, enero de 1999, págs. 43-46.

• Brøndum-Nielsen, T., "Collapse of Danish Prestressed Tanks", *Concrete International*, V.21, No.4, abril 1999, págs. 55-56.

Década de 2000s:

• Pujol, S.; Ramírez, J.; y Sarria, A., " Behavior of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings", *Concrete International*, V.22, No.1, enero de 2000, págs. 40-44.

• Tosolt, K.A., "ACI Assists Forensic Study of Terrorist Attack Damage", *Concrete International*, V.23, No. 11, noviembre de 2001, págs. 24-25.

• Saatcioglu, M.; Gardner, Nueva Jersey; y Ghobarah, A., "1999 Turkey Earthquake Performance of RC Structures", *Concrete International*, V.23, No.3, marzo de 2001, págs. 46-56.

• Prakash Rao, D.S., "Shaking Then Collapse of Indian Building... Why?", *Concrete International*, V.24, No.11, noviembre de 2002, págs. 83-87.

• Leon, R.T.; Kam, W.Y. y Pampanin, S., "Performance of Beam-Column Joints in the 2010-2012 Christchurch Earthquakes", SP 269, *Concrete: The Sustainable Material Choice*, E. Lorenz, J. Buffenbarger y C. Aldea, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, marzo de 2014, págs. 3.1-3.20.

• Ver referencia 20.

• Ver referencia 21.

• Ver referencia 29.



Fig. 9: Restos de edificios destruidos en Camp Fire: (a) Stratton Market; y (b) Escuela Primaria Paradise (fotos cortesía de Erica Fischer)



Fig.10: Un edificio de estructura RC de mediana altura dañado en Albania

Un edificio escolar, Paradise Elementary School, tenía columnas de CR y entramado de madera. También colapsó por completo debido al fuego (Fig. 9 (b)). El equipo de ACI también documentó los daños a un edificio residencial de tres pisos con estructura RC. El incendio provocó el pandeo del techo de metal corrugado del edificio, agrietamiento y astillado alrededor del refuerzo de flexión en las vigas del techo de RC, y división vertical y desconchado de las columnas del tercer piso.

Los datos del reconocimiento ahora se están curando y se está preparando un informe para su publicación en la ASCE's Natural Hazards Review. Terremoto de Albania 2019

El 26 de noviembre de 2019, un terremoto de 6,4 Mw sacudió el noroeste de Albania. Este terremoto fue el más fuerte que golpeó a Albania en más de 40 años. Ciudades como Thumanë, Tirana y Durrës sufrieron daños, pero Durrës fue la más afectada con varios derrumbes de edificios. Un día después del evento, el Comité 133 de ACI creó un canal en la plataforma de mensajería de Slack para compartir y discutir noticias dentro del comité, e invitó a miembros que no eran del comité con conocimiento de primera mano a compartir sus observaciones. Los participantes describieron las prácticas de construcción típicas y el código sísmico utilizado en Albania, y proporcionaron estimaciones del número de estructuras afectadas. Sobre la base de esta información y la información recopilada de otras organizaciones como EERI, el Comité 133 de ACI decidió desplegar un equipo en Albania. Los miembros del equipo de ACI se unieron a investigadores de Albania, Croacia y Alemania (Universidad de Epoka, Tirana, Albania; Universidad de Osijek, Osijek, Croacia; y Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Alemania) para documentar 55 edificios en el transcurso de 4 días en enero de 2020. El equipo examinó los edificios que tenían marcos RC como su principal sistema de resistencia lateral. Todos los edificios incluían muros de relleno de mampostería no reforzada (ladrillos huecos de arcilla) y la mayoría también tenía losas nervadas o reticulares. El daño típico fue la falla en el plano o fuera del plano de las paredes de ladrillos de arcilla huecos no estructurales (Fig. 10). En la mayoría de los casos, los ladrillos de arcilla huecos no estaban conectados al marco RC. El equipo está en el proceso de cargar los datos recopilados y preparar un manuscrito sobre sus hallazgos.

Coordinación Externa

Las experiencias adquiridas a través de las implementaciones del Comité 133 de ACI han ilustrado la importancia de asociarse en el campo con investigadores y organizaciones externos para aprovechar los conjuntos de habilidades fuera del comité de ACI. Por ejemplo, durante su segundo despliegue para estudiar los efectos del terremoto de Puebla en México, los miembros del equipo de ACI unieron fuerzas con investigadores que realizaban escaneo láser terrestre (escaneo LiDAR tridimensional) de varios edificios para evaluar su desplazamiento residual y comparar los desplazamientos con los previstos, utilizando modelos de elementos finitos no lineales.³² Trabajar en equipo con otros investigadores y organizaciones también puede ayudar a maximizar la productividad en el campo y reducir los gastos generales de las organizaciones involucradas.

Los miembros del Comité 133 de ACI están explorando formas de coordinar mejor las implementaciones de campo con las organizaciones gubernamentales (por ejemplo, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias [Federal Emergency Management Agency-FEMA] y el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología [National Institute of Standards and Technology-NIST]) que llevan a cabo actividades de reconocimiento en el marco de programas estatutarios como el Programa Nacional de Reducción de Riesgos de Terremotos (National Earthquake Hazards Reduction Program-NEHRP), Programa Nacional de Reducción de Impactos por Tormentas de Viento (National Windstorm Impact Reductions Program-NWIRP) y Equipo Nacional de Seguridad en la Construcción (National Construction Safety Team-NCST).

Desarrollos

A lo largo de ocho despliegues, los miembros del Comité 133 de ACI han desarrollado procedimientos para preparar a los equipos para que ingresen al campo después de desastres importantes. El comité también ha trabajado para estandarizar los documentos de recopilación de datos para describir las características y daños de la edificación.^{20,22,23,26,28} Otras actividades recientes incluyen la implementación de nuevas tecnologías, como UAS y LiDAR, posible gracias a la colaboración de Investigación de Riesgos Naturales en Ingeniería e Infraestructura (Natural Hazards Engineering Research Infrastructure (NHRI)) instalaciones (comúnmente llamada Instalación RAPID: <https://rapid.designsafe-ci.org>).

CEI Comité 133 de ACI también ha estado explorando esfuerzos para simplificar el procesamiento posterior de los datos recopilados en el campo. Uno de esos esfuerzos implica el uso de la visión artificial para automatizar la detección de daños estructurales en imágenes posteriores al desastre.³³ El Comité 133 de ACI continúa buscando miembros y socios interesados en avanzar en los enfoques utilizados para la recopilación de datos y la evaluación de los datos de daños estructurales de RC para informar la evolución de las publicaciones técnicas de ACI y su uso en todo el mundo.

Conclusiones

Desde su concepción en 2013, el Comité 133 de ACI ha desplegado equipos de reconocimiento en ocho áreas afectadas por desastres. Los miembros han examinado más de 700 edificios y un puente, recopilando datos tanto cualitativos como cuantitativos (Tabla 1). Durante este tiempo, el comité ha simplificado sus procedimientos operativos, ha incorporado nuevas tecnologías y ha recopilado datos valiosos. Los primeros despliegues se centraron en el reconocimiento de edificios RC afectados por terremotos. Debido a que estos desastres afectan grandes regiones con cientos o miles de edificios, brindan oportunidades para recopilar datos de rendimiento de edificios en un amplio espectro de configuraciones de edificios y niveles de daños. Los datos obtenidos de estos despliegues han respaldado las medidas propuestas anteriormente para evaluar la vulnerabilidad sísmica de estructuras,¹⁶ y han proporcionado nueva información valiosa sobre otros aspectos del comportamiento de RC durante los terremotos. También han mostrado los méritos de trabajar en estrecha colaboración con investigadores locales y entidades gubernamentales, los méritos del despliegue previo del "reconocimiento digital" para maximizar la productividad en el campo y la utilidad de los UAS para inspeccionar grandes áreas o áreas con acceso seguro limitado. Más recientemente, el comité ha comenzado a desplegarse después de otros desastres, incluido el colapso de un puente y un incendio forestal. Estos despliegues han demostrado al comité diferentes necesidades de recopilación de datos después de desastres que no fueron terremotos. Se anima a los lectores interesados a asistir a las reuniones del Comité 133 de ACI en las Convenciones de ACI y/o solicitar su membresía.

Agradecimientos

El apoyo para las actividades de despliegue discuti-

aquí fue proporcionado por NSF a través de: CMMI # 1637163 y 1637169 (Terremoto de Meinong); CMMI # 1810870, 1810876, 1810899, 1810907 y 1811084 (terremoto de Puebla); y CMMI # 1917298 y 1917316 (Camp Fire). También agradecemos a los presidentes de los comités que han dirigido el Comité 133 de ACI desde su inicio: Jack Moehle, Ken Elwood, Michael Kreger y Santiago Pujol. También agradecemos al comité mayor por sus contribuciones y trabajo en las implementaciones, y al personal de ACI por su continuo apoyo.

Descargo de Responsabilidades

Es posible que se haya utilizado software comercial en la preparación de la información que contribuye a este artículo. La identificación de este software no pretende implicar recomendación o respaldo por parte de los autores o sus instituciones y agencias, ni pretende implicar que dicho software sea necesariamente el mejor disponible para tal fin.

Referencias

1. Massone, L.M.; Bonelli, P.; Lagos, R.; Lüders, C.; Moehle, J.; y Wallace, J.W., "Seismic Design and Construction Practices for RC Structural Wall Buildings", *Earthquake Spectra*, V.28, No. S1, junio 2012, págs. S245-S256.
2. Westenek, B.; de la Llera, J.C.; Besa, J.J.; Jüne-mann, R.; Moehle, J.; Lüders, C.; Inaudi, J.A.; Elwood, K.J.; y Hwang, S., "Response of Reinforced Concrete Buildings in Concepción during the Maule Earthquake", *Earthquake Spectra*, V.28, No. S1, junio de 2012, págs. S257-S280
3. Song, C.; Pujol, S.; and Lepage, A., "The Collapse of the Alto Río Building during the 27 February 2010 Maule, Chile, Earthquake", *Earthquake Spectra*, V. 28, No. S1, junio 2012, págs. S301-S334.
4. Awad, K.W., "News Detail: ACI and the World," 1 de junio, 2017. www.concrete.org/news/newsdetail.aspx?f=51700829.
5. Moehle, J.P., comunicación personal, 14 de marzo de 2019.
6. Hadley, H.M., "How Structures Withstood the Japanese Earthquake and Fire," *ACI Journal Proceedings*, V.20, No. 2, febrero de 1924, págs. 188-209.
7. Ruble, J.S., "The Earthquake in Japan", *ACI Journal Proceedings*, V. 20, No. 2, febrero de 1924, págs. 210-220.
8. Sozen, M.; Pujol, S.; Irfanoglu, A.; Sim, C.; Puranam, A.; Laughery, L.; Seung, S.; Nelson, M; and Usta, M., "Earthquake Reconnaissance Slides by Drs. Mete A. Sozen and Nathan M. Newmark", 14 de julio de 2015. www.datacenterhub.org/resources/240.
9. "Learning from Earthquakes", Earthquake Engineering Research Institute, 2020a. www.eeri.org/projects/learning-from-earthquakes-lfe.
10. "Learning from Earthquakes Reconnaissance Archive", Earthquake Engineering Research Institute, 2020b. www.learningfromearthquakes.org/archive/table-view.
11. Map Data: Google, INEGI Imagery, NASA, TerraMetrics, Google Earth Map, 2020.
12. de Cossio, R.D., and Rosenblueth, E., "Reinforced Concrete Failures during Earthquakes", *ACI Journal Proceedings*, V. 58, No. 11, noviembre de 1961, págs. 571-590.
13. Yanev, P.I., "Effects of the Miyagi-Ken-Oki Earthquake on Reinforced Concrete Structures", *Concrete International*, V. 3, No. 11, noviembre de 1981, págs. 42-48.
14. Lew, H.S.; Carino, N.J.; and Fattal, S.G., "Cause of the Condominium Collapse in Cocoa Beach, Florida", *Concrete International*, V.4, No.8, agosto de 1982, págs. 64-73.
15. Wyllie Jr., L.A., "Lessons from the Armenian Earthquake," *Concrete International*, V. 11, No. 8, agosto de 1989, págs. 21-26.
16. Hassan, A.F., and Sozen, M.A., "Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes," *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 1, enero-febrero de 1997, págs. 31-39.
17. Wendelbo et al., "The Crisis Response to the Nepal Earthquake: Lessons Learned," *European Institute for Asian Studies*, mayo de 2016, pág. 72.
18. Shah, P.; Pujol, S.; and Puranam, A., "Database on Performance of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings in the 2015 Nepal Earthquake," 2015a. www.datacenterhub.org/resources/238.
19. Shah, P.; Pujol, S.; and Puranam, A., "Database on Performance of High-Rise Reinforced Concrete Buildings in the 2015 Nepal Earthquake," 2015b. www.datacenterhub.org/resources/242.
20. Shah, P.; Pujol, S.; Kreger, M.; and Irfanoglu, A., "2015 Nepal Earthquake," *Concrete International*, V. 39, No. 3, marzo de 2017, págs. 42-49.
21. Puranam, A.Y., and Pujol, S., "Investigation of Axial Failure of a Corner Column in a 14-Story Rain-forced Concrete Building", *ACI Structural Journal*, V. 116, No. 1, enero de 2019, págs. 93-101.
22. Purdue University, NCREC, "Performance of Reinforced Concrete Buildings in the 2016 Taiwan (Meinong) Earthquake", 12 de junio de 2016. www.datacenterhub.org/resources/14098.

23. Sim, C.; Villalobos, E.; Smith, J.P.; Rojas, P.; Pujol, S.; Puranam, A.Y.; and Laughery, L., "Performance of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings in the 2016 Ecuador Earthquake", 24 de agosto de 2016. www.datacenterhub.org/resources/14160.
24. Villalobos, E.; Sim, C.; Smith-Pardo, J.P.; Rojas, P.; Pujol, S.; and Kreger, M., "April 16, 2016 Ecuador Earthquake Damage Assessment Survey," *Earthquake Spectra*, V. 34, No. 3, marzo de 2018, págs. 1201-1217.
25. Alcocer et al., "Observations about the Seismic Response of RC Buildings in Mexico City", *Earthquake Spectra*, agosto de 2020, pág. 21.
26. Purdue University, "Buildings Surveyed after 2017 Mexico City Earthquakes", 7 junio de 2018. www.datacenterhub.org/resources/14746.
27. 필로티가 뭐길래...3초 만에 뼈대째 꺾인 기둥 / SBS [What's the piloti? Column shattered after 3 seconds / SBS], SBS News, 2017. www.youtube.com/watch?v=WRrhvcZPKvU.
28. Sim, C.; Laughery, L.; Chiou, T.C.; and Weng, P., "2017 Pohang Earthquake—Reinforced Concrete Building Damage Survey", 7 de abril de 2018. www.datacenterhub.org/resources/14728.
29. Pujol, S.; Kreger, M.E.; Monical, J.D.; and Schultz, A.E., "Investigation of the Collapse of the Chirajara Bridge", *Concrete International*, V. 41, No. 6, June 2019, pp. 29-37.
30. Cal Fire: Información sobre incidentos de incendios de campamento, California Department of Forestry and Fire Protection, 2019. www.fire.ca.gov/incidents/2018/11/8/camp-fire.
31. Löw, P., "The Natural Disasters of 2018 in Figures," Munich RE, 1 de agosto de 2019. www.munichre.com/topics-online/en/climate-changeand-natural-disasters/natural-disasters/the-natural-disasters-of-2018-infigures.html.
32. Liao, Y.; Wood, R.L.; Mohammadi, M.E.; Devkota, K.; and Wittich, C.E., "Damage Assessment of a Sixteen Story Building Following the 2017 Central Mexico Earthquake," *Proceedings of 12th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Québec City, QC, Canadá, 17-20 de junio de 2019, pág.7
33. Pantoja, M.; Behrouzi, A.A.; and Fabris, D., "An Introduction to Deep Learning," *Concrete International*, V. 40, No. 9, septiembre de 2018, págs. 35-41.

Seleccionado para el interés del lector por los editores.



Lucas A. Laughery, miembro de ACI, es ingeniero de lanzamiento sénior en SpaceX en Hawthorne, CA, USA. Es miembro de los Comités 123 de ACI, Investigación y Desarrollos Actuales, y 133, Reconocimiento de Desastres, y del Subcomité 445-B de ACI, Corte y Corte Sísmico de Torsión. Recibió su maestría y doctorado en ingeniería civil de la Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, USA.



Aishwarya Y. Puranam, miembro de ACI, es profesora asistente en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Taiwán, Taipéi, Taiwán. Es miembro del Comité 133 de ACI, Reconocimiento de desastres. Recibió su BSCE, MSCE y PhD de la Universidad de Purdue. su maestría y doctorado en ingeniería civil de la Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, USA.

Christopher L. Segura Jr., miembro de ACI, es un ingeniero estructural de investigación en el Grupo de Ingeniería Sísmica del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología. Es miembro de los Comités 133 de ACI, Reconocimiento de desastres 369, Reparación y rehabilitación sísmica; y 374, Diseño sísmico de edificios de hormigón basado en el rendimiento.



Anahid A. Behrouzi, miembro de la ACI, es profesora asistente de ingeniería arquitectónica en la Universidad Estatal Politécnica de California, San Luis Obispo, CA, USA. Es miembro del Comité 133 de ACI, Reconocimiento de Desastres y del Consejo de Becas de la Fundación ACI. Recibió su maestría y doctorado en ingeniería civil de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.

La traducción de este artículo correspondió a la Sección Noroeste de México.

Título: El Equipo del Instituto para Investigación de Daños.



Traductor: Cristian Silva



Revisor técnico: Ing. Genaro Salinas