

Parking Structure Failure and Incidents

by William L. Gamble

Editor's note: This article was published posthumously. Information about the author's contributions to ACI and the industry can be found in the author's bio.

Concrete parking structures have been around for a long time, whether bar-reinforced cast-in-place, precast pretensioned, cast-in-place post-tensioned, or some combination of these construction types. This article is intended to provide a review of some of the structural problems with these structures. In addition, it will review incidents where vehicles have gone through, partially or completely, edge barriers in parking structures of all construction types.

This effort is complicated by the fact that, in most cases, the only information sources are newspaper or television reports found on the internet. *ENR* articles usually have more details. When thorough investigations have been done, the reports will generally not be available, and the owners of the structures are generally not willing to release much information.

Construction failures and failures during demolition, of which there have been far too many, are not considered, being a separate but important topic. Several construction failures of parking structures, among many failures, are reviewed in Reference 1.

Problematic Structures

Another category will be only briefly mentioned here: structures that have not failed but which can hardly be considered successful. As an example, two parking structures were built on the University of Illinois at Urbana-Champaign campus in 1969-1970. They consist of pretensioned single-tee members, reinforced precast columns, and considerable cast-in-place concrete. The single-tee beams were then post-tensioned with tendons passing through the columns to form rigid frames. These tendons were full-grouted. Cast-in-place concrete was added as topping to the single tees and to fill the spaces between these pretensioned members. This concrete was post-tensioned with unbonded tendons that were totally unprotected from corrosion by today's standards. Major work to repair broken unbonded tendons has been done

at least twice on these structures. In February 2020, the entrance ramp to one structure was heavily shored up. Refurbishments were started in mid-2021. As of April 2022, both structures were closed.

A similar case that did not result in a collapse but certainly was a failure was in a structure built near the University of Illinois campus in 1980. The structure was made of pretensioned double-tee members supported on cast-in-place columns, ledger beams, and inverted-tee sections. The ledges of the beam members were quite small—6 in. (152 mm) wide, as in current practice, but only 8 in. (203 mm) deep as compared to the normal 12 in. (305 mm). The reinforcement was quite different than shown in Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI) material of that era. Thin rubber or rubber-like bearing pads were to be placed below every double-tee stem, but placement was quite erratic. In some instances, the double-tee stems had only about 2 in. (51 mm) of bearing width. Fairly soon after construction, significant bearing area distress occurred in a few areas. These areas were patched but to no avail. Figure 1 shows a typical form of ledge distress. Later, in 1988, complex steel auxiliary supports



Fig. 1: A typical form of ledge distress



Fig. 2: Added steel support brackets under tee stems

were added under each double-tee stem, as shown in Fig. 2. The structure was abandoned and demolished not many years later. One of my musings at the time was that the designers forgot or did not know that pretensioned members get shorter with time, reducing the available bearing areas. Another musing was that perhaps the center beam line was slightly north of its intended position, because most of the short bearing-length problems were in the south span, with few in the north span.

Structural Failures

In May 1981, a small section of the parking structure under Grant Park in Chicago, IL, USA, collapsed.² The failed portion of the structure was supported on five cantilever beams, two of which failed and the other three were in distress. At the time of the failure, the structure was 27 years old, and the roof structure supported 2 ft (0.61 m) of soil that was believed to be thoroughly saturated by recent rains. The collapse occurred over a period of 4 hours. The initial assessment was that the shear reinforcement in the beams was inadequate. Whether the lack of adequate shear reinforcement was due to a design error or the significant deficiencies in the ACI Building Codes from 1956 and earlier is unknown. Those deficiencies were just becoming generally known about the time this structure was being designed.

In June 1984, a single-story reinforced concrete flat-plate parking structure collapsed in downtown Minneapolis, MN, USA.³ Badly corroded reinforcement was blamed for the collapse. The photo suggests a punching-shear failure. The age of the building seems obscure. The owner thought it dated to the 1920s, but evidence suggested a major reconstruction later. The deformation patterns on the reinforcement suggested 1950s and certainly not 1920s construction. Several vehicles were destroyed, but there were no injuries.

The 1997 partial collapse of a 15-month-old parking structure was traced to the fact that several haunches, or corbels, contained no reinforcement.⁴ There were no serious injuries, however, two cars were damaged. The rest of the

structure was being evaluated, with no other defects discovered by the time of the publication of Reference 4. Although it is not stated in the article, the structure appears to be primarily pretensioned double-tee members supported mostly on ledger beams.

About 20 cars were damaged when part of a parking structure in Irving, TX, USA, collapsed in late August 2018.⁵⁻⁷ While there were no injuries, there were some close calls. There were two separate collapses, about 5 hours apart. The structure consisted of pretensioned double-tee members supported on ledger beams. A news report said that an area of about 40 x 40 ft (12 x 12 m) collapsed, but the area shown in one photo of the site looks somewhat larger, closer to 50 x 50 ft (15 x 15 m). Several double tees and one ledger beam fell. It was constructed in about 1984, according to Reference 7. The cause of the failure is not reported. The flanges of the inverted-tee beams appeared to be intact. While nearly all parking spaces were occupied, the actual load would have been much less than the presumed 50 lb/ft² (2.4 kN/m²) design live load.

Reference 8 reports that at least six parking structures partially collapsed in 2015, with more in 2016. Information is provided on four cases. On January 24, 2015, a structure partially collapsed in Secaucus, NJ, USA. After a 4 in. (102 mm) of snowfall, a skid-steer loader was being used to clear the upper level. A pile over 4 ft (1.2 m) in height had been made when part of the deck collapsed, crushing one car and injuring the loader operator. The structural type is not clear in the one photo, but I surmise that it was of a double-tee construction.

On May 1, 2015, part of a three-level structure at the Watergate complex in Washington, DC, USA, collapsed. The 50-year-old complex was undergoing a major renovation, and a landscaping contractor had piled soil and debris on the top deck. The deck collapsed, taking the lower floors with it. Two people were injured, one seriously, and 35 cars were destroyed. The structure was a bar-reinforced flat plate, and the photo shows damage typical of punching-shear failures.

On October 23, 2015, a seven-level parking structure in Dallas, TX, partially collapsed. Renovation work was underway, and the contractor had piled soil and construction debris on the top deck, in a pile about 3 ft (0.9 m) high. While the pile was covered with plastic sheeting, that portion of the structure collapsed during a heavy rainstorm, pancaking all the way to the ground level. The structure appears to have consisted of double tees supported on ledger beams.

An underground parking structure with an at-grade floor partially collapsed on April 22, 2016, in Houston, TX. Part of the lower levels had been flooded, and water was to be pumped into tanker trucks and taken away. The entrance had an overhead warning bar and signage stating the load limit to be 4000 lb (17.8 kN). A truck driver had backed a tanker truck, which probably had tandem dual rear axles, into the structure adjacent to the entrance and started filling the tank

with water. At some point, the structure collapsed under the combined weight of the truck and water. The structural type is not given and is not clear from the available photos. Reference 9 has some additional photos.

On June 2, 2014, part of a top floor of a Houston, TX, parking structure fell to the next floor. Reference 10 provides very few details, but it was apparently a double-tee structure. No cars were present.

In January 2006, a parking structure in Natick, MA, USA, was closed because of considerable visible distress.¹¹ The structure, built in about 1984, consisted of double-tee members supported on cast-in-place columns and beams. An area of significant slab distress in a cantilever flange was noted, and a deteriorated area 2 x 14 ft (0.6 x 4.3 m) had been “knocked out.” The structure was intended for passenger car use, but the entrance had no overhead warning bars or signage with load limits. It was reported that snow had been removed with a front-end loader and later with a pickup with a snowplow. Although deicing salt was not applied to the deck, it was obviously tracked in by cars, as the chloride content of the concrete was reportedly quite high. The deck was reported to have been sanded when icy,

using an unidentified vehicle. It was obvious that the snow removal and control equipment was much heavier than the design loads. The 4x4 - W4xW4 welded wire reinforcement was generally free of significant corrosion except in some limited areas. While it was probably adequate for design loads current at the time of construction, it was certainly inadequate for the snow removal equipment.

A major part of a parking structure collapsed on February 18, 2021, in Lexington, KY, USA.¹² A few days prior, there had been three significant snow plus freezing rain events. The total February snowfall was 8.6 in. (220 mm). Although it was not quantified, the freezing rain must have made a significant contribution to the total load on the top floor of the structure. Snow removal was in progress at the time of the collapse. One photo shows tire tracks that probably correspond to a pickup truck. Reports indicated that there had been previous concerns about the state of the structure, dating to at least 2018. A photo in Reference 13 shows hard-to-interpret damage at an external corner of the structure. There were reports of at least one hole in the double-tee flanges, and major work had been done on an interior beam. The owner expected to demolish the structure.

MASONRY BUILDING CODE REQUIREMENTS

ACI Offers All Recent Editions of Masonry Building Code Requirements

The American Concrete Institute offers the 2016, 2013, and 2011 editions of Building Code Requirements for Masonry Structures. Available in both print and digital formats.



Learn more at
www.concrete.org



American Concrete Institute
Always advancing

A significant area of a multi-level underground parking structure collapsed on December 23, 2021, in Lakewood, OH, USA. The roof supported a lawn area with an unknown thickness of soil.¹⁴ The concrete structure was built in the 1960s and was inspected annually. The structure was apparently bar-reinforced cast-in-place concrete. At the time of the failure, some unspecified work was underway, but no building permit had been issued. Reference 15 has some post-collapse photos, including one very disturbing photo taken the evening before the collapse showing two unshored, lower-level columns with only reinforcing bars and no concrete in the lower 2 ft or so. The bottom edges of the concrete had been cut quite cleanly, so the missing concrete clearly had been intentionally removed.

A long time ago, probably in the mid-1980s, there were brief presentations at several successive meetings of Joint ACI-ASCE Committee 423, Prestressed Concrete, showing multiple fractures of seven-wire strands in a parking structure that the presenter was monitoring. The fractured strands had popped out of the concrete, leaving an exposed loop in each case. Part of the structure eventually collapsed.

An important observation is that I could find no recent cast-in-place post-tensioned parking structure failures. Recent corrosion-inhibiting measures appear to be helping. Several double-tee structures failed due to significant overloads. One had significant construction errors, with missing reinforcement. Others had no evident cause based on the limited information available. The bar-reinforced cast-in-place failures had several causes, including possible design errors, major corrosion damage, major overloading, and incompetence.

Edge Barrier Penetrations

The deaths of an elderly couple whose car went through the edge barrier at the third level of a parking structure in Indianapolis, IN, USA, in October 2019 led the *IndyStar* to a lengthy investigation of the problem.¹⁶ *IndyStar* reporters found 46 such incidents in the previous 20 years. The cause was often putting the vehicle in drive rather than reverse or mistaking the accelerator pedal for the brake pedal. Because most involved only low speeds, the barriers should have held, but didn't. The reporters reached out to technical experts, who identified a basic problem: the various building codes had no edge barrier minimum force provisions until 1990, and they included no general retrofit requirements in later editions. The structure in this incident was built in 1975. A photo shows the concrete barrier wall to have been connected to the slab with no apparent connections to the columns, and it was rather cleanly broken off.

ASCE 7-22,¹⁷ Section 4.5.3, specifies a single 6 kip (27 kN) force to be applied on a 12 x 12 in. (305 x 305 mm) area, centered 1.5 to 2.25 ft (0.46 to 0.69 m) above the deck. How this is to be resisted is up to the designer, but most will transfer the load to the columns. It would seem nearly impossible to design a cable barrier, occasionally used in the

past, to meet these requirements, unless the cable spacing is very small.

STRUCTURE has published several articles on parking structure edge barriers, dating to at least 2008. Reference 18 starts with a photo of a car halfway off a parking area in the Marina City Towers in Chicago, IL. The article notes that IBC 2006¹⁹ prescribes the 6 kip force previously mentioned at 18 in. (457 mm) above the deck rather than the current variable distance. Several scenarios are considered, including runaway vehicles on sloped ramps. The author recommended designing for a 6000 lb (2700 kg) vehicle moving at 10 mph (16 km/h), resulting in a force of 20 kip (89 kN), from the included chart. The author notes five types of barriers in use: cast-in-place concrete cantilever walls, post-tensioned upturned beams, precast concrete spandrel beams acting as barrier walls, multi-strand steel cables, and steel members and rails.

Reference 20 continues developing the concepts from Reference 18, with examples involving much higher impact speeds or much heavier vehicles. The intentional ramming of a building is also mentioned. The military approach of building the barriers and then driving vehicles into them is cited. The two examples are for barrier types completely unsuited to multi-story parking structures. A photo shows a car that fell from the fourth level of a structure. The barrier was apparently a steel barrier that appeared to be not much heavier than an ornamental fence.

Reference 21 addresses the major difficulties in trying to design and detail a connection between a cantilever wall and a slab. The joint is subjected to an opening moment. A typical joint detail, shown in Fig. 2 of Reference 21, has long been known to be inefficient. The 1943 University of Iowa tests²² documented the deficiencies, but the use of this joint continued. A photo of an opening joint failure at 22% of member capacity is shown. An efficient joint for an opening corner is shown, but with the comment that it is not feasible for a 6 in. slab and wall joint. Reference 23 has much more discussion of the opening joint problem.

Properly anchoring a concrete perimeter wall to a concrete slab seems extremely difficult, and I believe it is impossible in the case of a double-tee structure. Reference 24 discusses moment distributions in barrier walls assumed to act as cantilevers above the slab. Moments due to concentration of the effects on a 12 in. strip, width equal to the width of the loaded area, and due to assuming a 45-degree spread of load effects are shown and, of course, are greatly different. The 45-degree spread was questioned; however, it seems to be a common engineering judgment call. Reference 25 explores this question for the rather similar case of concentrated loads acting at the edges of flanges in double-tee members. The 45-degree spread was shown to agree well with an elastic analysis of the case. The problems of connecting a perimeter wall to a slab alone seem insurmountable. Reference 24 recommends a wall above the slab integral with the slab and a wall below as a

solution, but steel details of the connection between wall and slab are not given.

Reference 26 appears to have been written to dispute most of the conclusions and recommendations of Reference 21. The author cites Reference 23, saying that the “standard 90° hooks” detail will develop 100% of the member capacity, if the reinforcement ratio does not exceed 0.3%. However, Reference 23 has no test results at this reinforcement ratio. The lowest ratio in tests was about 0.5% and the efficiency was about 45%. The cited 0.3% case is from a calculated value and depends entirely on the tensile strength of the concrete to resist the forces. In a parking structure in a nonbenign climate, the available tensile strength after some considerable time is likely to be significantly reduced due to freezing-and-thawing and wetting-and-drying cycles. The reference cites reinforced concrete masonry unit walls but gives no details on how they might be connected to the structure.

While Reference 23 includes opening-corner reinforcement details that are quite efficient, they do not appear feasible for cases where the members are 6 or 8 in. thick and have the cover required in most parking structure exposures.

Reference 27 reported that a man accidentally drove his Jeep through a parking structure barrier in Santa Monica, CA, USA, in February 2020, and fell six stories. He survived. The barrier was not described. In addition, a car broke through a cable safety barrier, also in Santa Monica, CA, in June 2018, and fell an unspecified distance. Reference 16 is noted in the short article.

Reference 28 has a photo of a pickup that partly fell from one floor to the one below on December 9, 2021, in New Orleans, LA, USA. The rear wheels are on the upper deck, while the front wheels are on the lower deck. The photo does not show any trace of a barrier. Injuries were not reported.

A Post-Tensioning Institute (PTI) publication on parking structures²⁹ does not seem to have any mention of edge barriers. A parallel PCI publication³⁰ shows ledger beams as barriers, and also edge walls. In each case, the double-tee floor members are attached to the ledger beam or edge wall but few details are provided.

Recommendations about Barriers

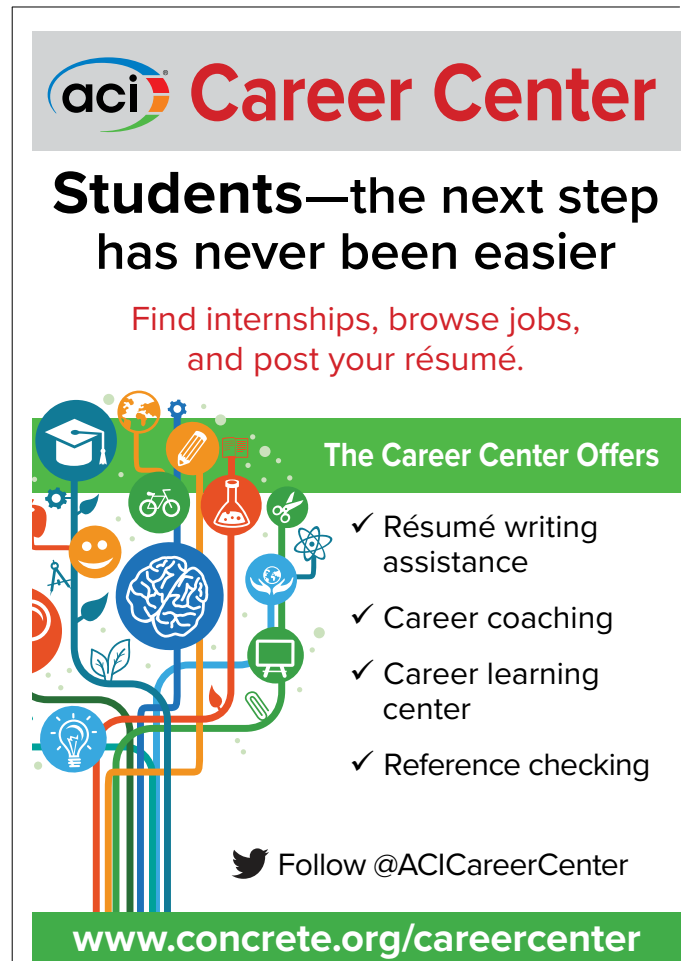
Code changes are almost never applied retroactively. However, the addition of specific requirements starting in 1990 seems so important, in light of the incidents just discussed, that the current requirements should be imposed without waiting for the usual trigger mechanisms. This is certainly possible on a local level, if not nationally. For example, about 1970, I was a member of The City of Champaign, IL, Building Code Committee. The Building Department had a policy that any changes to the General Building Code requiring improvements to building exits were immediately applied to all holders of liquor licenses. ICC should consider such a move relative to parking barriers.

Acknowledgments

Several former students alerted me to problems with parking structures on and near the University of Illinois campus. They were being nosy and aware, as they were encouraged to be. Jason Reigstad of Reigstad Engineering, St. Paul, MN, supplied several helpful suggestions and conducted an informal survey of designers and builders of post-tensioned parking structures. David P. Gustafson suggested this topic and provided leads to articles.

References

1. “Construction Incidents Investigation Engineering Reports,” United States Department of Labor, <https://www.osha.gov/construction/engineering>. (last accessed April 5, 2022)
2. “Garage Roof Section Falls,” *Engineering News-Record*, May 28, 1981, p. 15.
3. “Salt Flattens Old Garage,” *Engineering News-Record*, June 14, 1984, pp. 11-12.
4. “Probe Seeks Series of Event That Resulted in Absent Rebar,” *Engineering News-Record*, June 23, 1997, p. 12.
5. Gross, S.J., and Ortega, H., “What We Know About the Irving Parking Garage Collapse,” *The Dallas Morning News*, Aug. 2, 2018, <https://www.dallasnews.com/news/2018/08/02/what-we-know-about-the-irving-parking-garage-collapse/>.



The advertisement features a grey header with the ACI Career Center logo. Below is a large black headline, followed by red text about finding internships and jobs. A green banner lists services offered, accompanied by colorful icons representing various career and educational concepts. At the bottom, there is a Twitter follow prompt and the website URL.

aci Career Center

Students—the next step has never been easier

Find internships, browse jobs, and post your résumé.

The Career Center Offers

- ✓ Résumé writing assistance
- ✓ Career coaching
- ✓ Career learning center
- ✓ Reference checking

Follow @ACICareerCenter

www.concrete.org/careercenter

6. “‘Sounded Like a Dumpster Dropped’: Firefighters Search Parking Garage Collapse,” *CBS News Dallas Fort Worth*, updated July 31, 2018, <https://dfw.cbslocal.com/2018/07/31/firefighters-parking-garage-collapse-in-irving/>.

7. Zoga, D., “Irving Garage Collapse: What Went Wrong?” NBCDFW, Aug. 1, 2018, <https://www.nbcdfw.com/news/local/irving-garage-collapse-what-went-wrong/270304/>.

8. Caldwell, S.R., “Failure of Imagination,” *STRUCTURE*, June 2017, pp. 29-30.

9. “Tanker Truck Falls Through Parking Garage Roof in West Houston,” ABC, Inc., KTRK-TV Houston, Apr. 22, 2016, <https://abc13.com/taker-truck-accident-sinkhole/1304911/>.

10. Thompson, D., “Part of Parking Garage Collapses in Galleria Area,” *chron.com*, June 2, 2014, <https://www.chron.com/news/houston-texas/article/Part-of-parking-garage-collapses-in-Galleria-area-5523893.php>.

11. Lagodimos, F., “Double Tee Flange Failures,” *STRUCTURE*, July 2006, pp. 35-36.

12. WKYT News Staff, “WKYT Sky Eye: Part of Parking Garage Collapses in Downtown Lexington,” WKYT, Feb. 18, 2021, <https://www.wkyt.com/2021/02/18/crews-on-scene-of-parking-garage-collapse-in-downtown-lexington/>.

13. Searcy, L., “Some Had Safety Concerns Over Lexington Parking Garage Before Collapse,” *LEX 18*, Feb. 22, 2021, <https://www.lex18.com/news/covering-kentucky/some-had-safety-concerns-over-lexington-parking-garage-before-collapse>.

14. Anderson, C., “‘Pancake’ Collapse of Underground Parking Garage Prompts Evacuation of Lakewood Apartment Building,” 19 News (WOIO), Dec. 23, 2021, <https://www.cleveland19.com/2021/12/23/emergency-crews-respond-parking-garage-collapse-lakewood-apartment-building/>.

15. Vandenberg, J., “Tenant: Missing Concrete, Exposed Rebar Structure Found Night Before Parking Deck’s Collapse,” ABC News 5 Cleveland, Dec. 31, 2021, <https://www.news5cleveland.com/news/local-news/cleveland-metro/tenant-missing-concrete-exposed-rebar-structure-found-night-before-parking-decks-collapse>.

16. Cook, T.; Martin, R.; Hopkins, E.; and Evans, T., “Simple Mistakes Can Lead to Cars Falling From Parking Garages in ‘Freak’ Accidents,” *IndyStar*, Oct. 30, 2019, <https://www.indystar.com/story/news/2019/10/30/city-market-parking-garage-crash-among-46-last-20-years/2457201001/>.

17. ASCE/SEI 7-22, “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures,” American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2021, 1046 pp.

18. Iqbal, M., “Designing Edge Barriers in Parking Structures,” *STRUCTURE*, Oct. 2008, pp. 24-26.

19. “International Building Code (IBC) 2006,” International Code Council, Washington, DC, 2006, 663 pp.

20. Iqbal, M., “A Rational Method to Design Vehicular Barriers,” *STRUCTURE*, Sept. 2010, pp. 22-24.

21. Iqbal, M., “Design Deficiencies in Edge Barrier Walls in Parking Structures,” *STRUCTURE*, Apr. 2014, pp. 25-26.

22. Posey, C.J., and Kofoid, O., “Reinforced Concrete Corners in Tension,” *ACI Journal Proceedings*, V. 40, No. 1, Sept. 1943, pp. 41-52.

23. Nilsson, I.H.E., and Losberg, A., “Reinforced Concrete Corners

and Joints Subjected to Bending Moment,” *Journal of the Structural Division*, ASCE, V. 102, No. ST6, June 1976, pp. 1229-1254.

24. Iqbal, M., “Design of Vehicular Barrier Walls: ASCE 7-10 Requirements,” *STRUCTURE*, Nov. 2015, pp. 12-15.

25. Gamble, W.L., “Analysis and Design of Double-T Flanges,” *Concrete International*, V. 39, No. 10, Oct. 2017, pp. 43-47.

26. Cudney, G., “Design Considerations: Cast-in-Place Edge Barrier Walls in Parking Structures,” *STRUCTURE*, Apr. 2016, pp. 46-48.

27. Millán, N., “Parking Garage Barriers Fail to Prevent Six-Story Plunge,” *facilitiesnet*, Feb. 27, 2020, <https://tinyurl.com/4w6rcy58>.

28. Kollath Wells, C., “Pickup Truck Crashes off Upper Level of French Quarter Garage; Person Rescued,” *nola.com*, Dec. 10, 2021, www.nola.com/news/crime_police/article_9059e656-59cd-11ec-a2e9-135cbce2b395.html.

29. “Design, Construction, and Maintenance of Cast-in-Place Post-Tensioned Concrete Parking Structures,” first edition, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 173 pp.

30. MNL 129-15, “Precast Prestressed Concrete Parking Structures: Recommended Practice for Design and Construction,” third edition, Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2015, 174 pp.

Selected for reader interest by the editors.



ACI Honorary Member **William L.**

Gamble passed away on May 23, 2022, at age 85. He was Professor Emeritus of civil and environmental engineering at the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, USA.

Gamble taught five different undergraduate and graduate courses in reinforced and prestressed concrete, plus

a course on the fire resistance of structures. He co-authored (with Robert Park of New Zealand) *Reinforced Concrete Slabs*, second edition. He was a Life Member of the American Society of Civil Engineers and the Precast/Prestressed Concrete Institute, and he was a member of ASTM International. Gamble was a Fulbright Fellow in Australia in 1962-1963.

He served as past Chair and a member of ACI Committee 543, Concrete Piles; Joint ACI-TMS Committee 216, Fire Resistance and Fire Protection of Structures; and Joint ACI-ASCE Committee 421, Design of Reinforced Concrete Slabs. Gamble was a member of the ACI Awards for Papers Committee, Fellows Nominating Committee, and the Committee on Nominations; Joint ACI-ASCE Committee 423, Prestressed Concrete; and ACI Subcommittees 318-C, Safety, Serviceability, and Analysis; 318-DR, Flexure and Axial Loads; and 318-F, Foundations. He also served on ASTM Subcommittee A01.05, Steel Reinforcement.

Gamble received his BS from Kansas State University, Manhattan, KS, USA, in 1959; and his MS and PhD in civil engineering from the University of Illinois at Urbana-Champaign in 1961 and 1962, respectively. Gamble was a licensed structural engineer in Illinois.

Fallas e incidentes en las estructuras de estacionamiento

por William L. Gamble

Las estructuras de concreto para estacionamientos han existido desde hace mucho tiempo, ya sea que se trate de estructuras construidas en sitio reforzadas con varillas, prefabricadas y pretensadas, colocadas en sitio y postensadas, o alguna combinación de estos tipos de construcción. Este artículo pretende ofrecer una revisión de algunos de los problemas estructurales con este tipo de estructuras. Además, se revisarán los incidentes en los que los vehículos han atravesado, parcial o completamente, las barreras de los bordes en las estructuras de estacionamiento de todos los tipos de construcción.

Este esfuerzo se complica por el hecho de que, en la mayoría de los casos, las únicas fuentes de información son reportajes de prensa o televisión que se encuentran en Internet. Los artículos de ENR (Engineering News-Record) suelen tener más detalles. Cuando se han realizado investigaciones exhaustivas, los reportes generalmente no están disponibles, y los propietarios de las estructuras no están dispuestos a liberar información.

Las fallas de construcción y las fallas durante la demolición, de las cuales ha habido muchas, no fueron consideradas, siendo un tema aparte pero importante. En la referencia 1 se examinan algunas fallas de construcción de estructuras de estacionamiento, entre muchas otras.

Estructuras problemáticas

Aquí sólo se mencionará brevemente otra categoría: estructuras que no han fracasado pero que difícilmente pueden considerarse exitosas. Por ejemplo, entre 1969 y 1970 se construyeron dos estructuras de estacionamiento en el campus de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Estas estaban formadas por vigas T pretensadas, columnas prefabricadas reforzadas y una cantidad considerable de concreto colado en sitio. Las vigas de una sola T se postensaron con tendones que pasaban por las columnas para formar marcos rígidos. Estos tendones se rellenaron con grout. Se añadió concreto colocado en sitio para cubrir las vigas en T y para rellenar los espacios entre estos elementos pretensados. Este concreto fue postensado con tendones no adheridos que estaban totalmente desprotegidos contra la corrosión, según los estándares actuales. En estas estructuras se han realizado, al menos en dos ocasiones, importantes trabajos de reparación de los tendones rotos no adheridos. En febrero de 2020, la rampa de entrada a una de las estructuras fue fuertemente apuntalada. A mediados de 2021, se iniciaron las reparaciones. En abril de 2022, ambas estructuras estaban clausuradas.

Un caso similar que no resultó en un colapso pero que ciertamente fue un fracaso fue en una estructura construida cerca del campus de la Universidad de Illinois en 1980. La estructura estaba formada por miembros de doble T pretensados apoyados

en columnas colocadas en sitio, vigas de apoyo y secciones de T invertidas. Los bordes de las vigas eran bastante pequeños: 152 mm de ancho, como en la práctica actual, pero sólo 203 mm de profundidad, en comparación con los 305 mm habituales. El refuerzo era bastante diferente al mostrado en el material del Instituto de Hormigón Prefabricado/Pretensado (PCI) de aquella época. Debajo de cada vástago de doble T se colocaban unas finas almohadillas de goma o similares, pero su colocación era bastante errática. En algunos casos, los vástagos de doble T tenían sólo unos 51 mm de ancho de apoyo. Poco después de la construcción, se produjeron importantes problemas en las zonas de apoyo. Estas fueron reparadas, pero sin éxito. La figura 1 muestra una forma típica de peligro en la plataforma. Posteriormente, en 1988, se añadieron complejos soportes auxiliares de acero debajo de cada vástago de doble T, como se muestra en la Fig. 2.



Figura. 1: Una forma típica de peligro en la plataforma



Figura. 2: Incorporación de soportes de acero bajo los vástagos de las T

La estructura fue abandonada y demolida no muchos años después. Una de mis reflexiones en aquel momento fue que los diseñadores olvidaron o no sabían que los elementos pretensados se acortan con el tiempo, reduciendo las áreas de apoyo disponibles. Otra reflexión fue que tal vez la viga central estaba ligeramente al norte de su posición prevista, porque la mayoría de los problemas de longitudes de apoyo cortas estaban en el vano sur, y pocos en el vano norte.

Fallas estructurales

En mayo de 1981, se derrumbó una pequeña sección de la estructura del estacionamiento bajo Grant Park en Chicago, IL, Estados Unidos.² La parte de la estructura que falló se apoyaba en cinco vigas voladizas, dos de las cuales fallaron y las otras tres estaban en peligro. En el momento del fallo, la estructura tenía 27 años de antigüedad y la estructura del techo soportaba 0,61 m de suelo que se creía completamente saturado por las lluvias recientes. El colapso se produjo en un periodo de 4 horas. La evaluación inicial fue que el refuerzo a cortante en las vigas era inadecuado. Se desconoce si la falta de un adecuado refuerzo a cortante se debió a un error de diseño o a las significativas deficiencias de los códigos de construcción ACI de 1956 y anteriores. Dichas deficiencias empezaron a conocerse en el momento en que se diseñó esta estructura.

En junio de 1984, se derrumbó una estructura de estacionamiento de placa plana de concreto reforzado de un solo piso en el centro de Minneapolis, MN, EE.UU.³ Se atribuyó el derrumbe a un refuerzo gravemente corroído. La foto sugiere un fallo de corte por perforación. La antigüedad del edificio parece poco clara. El propietario creía que databa de la década de 1920, pero las pruebas sugieren una importante reconstrucción posterior. Los patrones de deformación de la armadura sugieren una construcción de los años 50 y, desde luego, no de los años 20. Varios vehículos quedaron destruidos, pero no hubo heridos.

El derrumbe parcial en 1997 de una estructura de estacionamiento con 15 meses de antigüedad se debió a que varias cartelas, o ménsulas, no estaban reforzadas.⁴ No hubo heridos graves, pero dos vehículos resultaron dañados. El resto de la estructura estaba siendo evaluada, sin que se descubrieran otros defectos en el momento de la publicación de la referencia 4. Aunque no se indica en el artículo, la estructura parece estar compuesta principalmente por elementos de doble T pretensados que se apoyan en su mayoría en vigas de soporte.

Alrededor de 20 vehículos resultaron dañados cuando parte de una estructura de estacionamiento en Irving, TX, Estados Unidos, se derrumbó a finales de agosto de 2018.⁵⁻⁷ Aunque no hubo heridos, hubo algunas llamadas cercanas. Hubo dos colapsos separados, con unas 5 horas de diferencia. La estructura consistía en miembros de doble T pretensados apoyados en vigas de soporte. Un informe de la prensa indica que se derrumbó una zona de unos 12 x 12 m, pero la zona que se muestra en una foto del lugar parece algo mayor, más cercana a los 15 x 15 m. Se derrumbaron varios vástagos de doble T y una viga reforzada. Según la referencia 7, se construyó alrededor de 1984. No se ha reportado la causa de la falla. Las alas de las vigas en T invertida parecían estar intactas. Aunque casi todos los espacios de estacionamiento estaban ocupados, la carga real habría sido mucho menor que la presunta carga viva de diseño de 50 lb/pie² (2,4 kN/m²).

La referencia 8 indica que al menos seis estructuras de estacionamiento se derrumbaron parcialmente en 2015, y algunas más en 2016. Se proporciona información sobre cuatro casos. El 24 de enero de 2015, una estructura se derrumbó parcialmente en Secaucus, NJ, Estados Unidos. Tras unas 4 pulgadas (102 mm) de nieve, se estaba utilizando una cargadora compacta para limpiar el nivel superior. Se había hecho una pila de más de 1,2 m (4 pies) de altura cuando parte de la cubierta se derrumbó, aplastando un vehículo e hiriendo al operador de la cargadora. El tipo de estructura no está claro en la única foto disponible, pero es posible suponer que era una construcción de doble T.

El 1 de mayo de 2015 se derrumbó parte de una estructura de tres niveles en el complejo Watergate de Washington, DC, Estados Unidos. El complejo,

de 50 años de antigüedad, estaba siendo sometido a una importante renovación, y un contratista de jardinería había apilado tierra y escombros en la cubierta superior. La cubierta se derrumbó, llevándose consigo los pisos inferiores. Dos personas resultaron heridas, una de ellas de gravedad, y 35 vehículos quedaron destruidos. La estructura era una placa plana reforzada con barras, y la foto muestra los daños típicos de los fallos por punzonamiento.

El 23 de octubre de 2015, una estructura de estacionamiento de siete niveles en Dallas, TX, se derrumbó parcialmente. Se estaban realizando trabajos de renovación y el contratista había apilado tierra y escombros de construcción en la cubierta superior, en una pila de unos 3 pies (0,9 m) de altura. Aunque la pila estaba cubierta con láminas de plástico, esa parte de la estructura se derrumbó durante un fuerte episodio de lluvia, llegando hasta el nivel del suelo. Al parecer, la estructura estaba formada por dobles T que se apoyaban en vigas de soporte.

Una estructura de estacionamiento subterráneo con un piso a nivel se derrumbó parcialmente el 22 de abril de 2016, en Houston, TX. Una parte de los niveles inferiores se había inundado, y el agua debía ser bombeada en camiones cisterna y retirada. La entrada tenía una barra de advertencia superior y una señalización que indicaba que el límite de carga era de 4000 lb (17,8 kN). Un conductor del camión cisterna, que probablemente tenía ejes traseros dobles en tándem, entró en la estructura adyacente a la entrada y comenzó a llenar el tanque con agua. En algún punto, la estructura se derrumbó bajo el peso conjunto del camión y el agua. El tipo de estructura no se indica y no está claro en las fotos disponibles. La referencia 9 tiene algunas fotos adicionales.

El 2 de junio de 2014, parte de un piso superior de una estructura de estacionamiento de Houston, TX, cayó al siguiente piso. La referencia 10 proporciona muy pocos detalles, pero al parecer se trataba de una estructura de doble T. No había coches presentes.

En enero de 2006, se cerró una estructura de estacionamiento en Natick, Massachusetts (EE. UU.), debido a los considerables daños visibles.¹¹ La estructura, construida aproximadamente en 1984, estaba formada por elementos de doble T apoyados en columnas y vigas de concreto colado en sitio. Se observó una zona con un importante deterioro de la losa en un reborde en la viga voladiza, y una zona deteriorada de 0,6 x 4,3 m (2 x 14 pies) había sido "derribada". La estructura estaba destinada al uso de vehículos de pasajeros, pero la entrada no tenía barras de advertencia superiores ni señalización con límites de carga. Se informó que la nieve había sido retirada con una cargadora frontal y posteriormente con una camioneta con quitanieves. Aunque no se aplicó directamente sal de deshielo al tablero, es evidente que fue arrastrada por los vehículos, ya que el contenido de cloruro del concreto era bastante alto. Se informó que la cubierta había sido lijada cuando estaba congelada, utilizando un vehículo no identificado. Era evidente que el equipo de retirada y control de la nieve era mucho más pesado que las cargas de diseño. El refuerzo de alambre soldado 4x4 - W4xW4 estaba en general libre de corrosión significativa, excepto en algunas áreas limitadas. Aunque probablemente era adecuado para las cargas de diseño vigentes en el momento de la construcción, era ciertamente inadecuada para el equipo de remoción de nieve.

Una parte importante de una estructura de estacionamiento se derrumbó el 18 de febrero 2021, en Lexington, KY, Estados Unidos.¹² Unos días antes, se habían producido tres eventos significativos de nieve junto a lluvia helada. La nevada total del mes de febrero fue de 220 mm (8,6 pulgadas). Aunque no se cuantificó, la lluvia helada debe haber contribuido significativamente a la carga total en el último piso de la estructura. La retirada de la nieve estaba en proceso en el momento del colapso. Una de las fotografías muestra huellas de neumáticos que probablemente corresponden a una camioneta. Los informes indican que había habido preocupaciones previas sobre el estado de la estructura, que datan hasta al menos 2018. Una foto de la referencia 13 muestra daños

difíciles de interpretar en una esquina externa de la estructura. Había reportes de al menos un agujero en las alas de doble T, y se había realizado un trabajo importante en una viga interior. El propietario pensaba demoler la estructura.

Una zona importante de un estacionamiento subterráneo de varios niveles se derrumbó el 23 de diciembre de 2021 en Lakewood, OH, Estados Unidos. El techo soportaba una zona de césped con un grosor de suelo desconocido.¹⁴ La estructura de concreto se construyó en la década de 1960 y se inspeccionaba anualmente. Aparentemente, la estructura era de concreto colado en sitio y reforzado con barras. En el momento del colapso, se estaban llevando a cabo algunas obras no especificadas, pero no se había expedido ningún permiso de construcción. La referencia 15 contiene algunas fotos posteriores al derrumbe, incluida una foto muy inquietante tomada la noche anterior al derrumbe, que muestra dos columnas del nivel inferior sin apuntalar, con sólo barras de refuerzo y sin concreto en los 2 pies inferiores aproximadamente. Los bordes inferiores del concreto habían sido cortados muy limpiamente, por lo que el concreto faltante claramente había sido removido intencionalmente.

Hace mucho tiempo, probablemente a mediados de la década de 1980, hubo breves presentaciones en varias reuniones sucesivas del Comité Conjunto ACI-ASCE 423, Concreto Pretensado, que mostraban múltiples fracturas de torones de siete hilos en una estructura de estacionamiento que el presentador estaba supervisando. Los torones fracturados se habían salido del concreto, dejando un bucle expuesto en cada caso. Parte de la estructura terminó derrumbándose.

Una observación importante es que no se ha podido encontrar ninguna falla reciente de estructuras de estacionamiento postensadas en sitio. Las recientes medidas de inhibición de la corrosión parecen estar

ayudando. Varias estructuras de doble T fallaron debido a sobrecargas significativas. Una de ellas tenía errores de construcción importantes, con falta de reforzamiento. Otras no tenían una causa evidente según la escasa información disponible. Los fallos de las estructuras reforzadas con barras tuvieron varias causas, incluyendo posibles errores de diseño, daños importantes por corrosión, sobrecargas importantes e incompetencia.

Penetraciones de la barrera de borde

La muerte de una pareja de ancianos cuyo vehículo atravesó la barrera del borde en el tercer nivel de una estructura de estacionamiento en Indianápolis, IN, EE.UU., en octubre de 2019, llevó al IndyStar a realizar una larga investigación sobre el asunto.¹⁶ Los reporteros del IndyStar encontraron 46 incidentes de este tipo en los 20 años anteriores. La causa solía ser poner el vehículo en marcha en lugar de marcha atrás o confundir el pedal del acelerador con el del freno. Como la mayoría de los incidentes se producían a baja velocidad, las barreras debían haber resistido, pero no lo hicieron. Los periodistas se pusieron en contacto con expertos técnicos, quienes identificaron un problema básico: los diversos códigos de construcción hasta 1990 no tenían disposiciones sobre la fuerza mínima de las barreras de borde, y no incluyeron requisitos generales de adaptación en ediciones posteriores. La estructura de este incidente se construyó en 1975. Una foto muestra que el muro de barrera de concreto estaba conectado a la losa sin conexiones aparentes con las columnas, y que se rompió bastante fácilmente.

La norma ASCE 7-22,¹⁷ sección 4.5.3, especifica que se debe aplicar una única fuerza de 6 kip (27 kN) en un área de 305 x 305 mm (12 x 12 pulgadas), centrada entre 0,46 y 0,69 m (1,5 y 2,25 pies) por encima del tablero. La forma de resistirlo depende del diseñador, pero la mayoría transfiere la carga a las columnas. Parece casi imposible diseñar una barrera de cables, utilizada ocasionalmente en el pasado, para cumplir estos requisitos, a menos que la separación de los cables sea muy pequeña.

STRUCTURE ha publicado varios artículos sobre las barreras de borde de las estructuras de estacionamiento, que datan al menos de 2008. La referencia 18 comienza con una foto de un vehículo a medio camino de una zona de estacionamiento en

las Torres Marina City de Chicago, IL. El artículo señala que el IBC 2006¹⁹ prescribe la fuerza de 6 kip mencionada anteriormente a 18 pulgadas (457 mm) por encima de la cubierta en lugar de la distancia variable actual. Se consideran varios escenarios, entre ellos el de los vehículos fugados en rampas inclinadas. El autor recomienda diseñarlo para un vehículo de 6000 lb (2700 kg) que se desplace a 10 mph (16 km/h), lo que resulta en una fuerza de 20 kip (89 kN), según la tabla incluida. El autor señala cinco tipos de barreras en uso: muros en voladizo de concreto colocado en sitio, vigas volteadas postensadas, vigas prefabricadas de concreto que actúan como muros de barrera, cables de acero de varios hilos y miembros, y rieles de acero.

La referencia 20 continúa desarrollando los conceptos de la referencia 18, con ejemplos que implican velocidades de impacto mucho mayores o vehículos mucho más pesados. También se menciona el choque intencionado contra un edificio. Se cita el enfoque militar de construir las barreras y luego conducir los vehículos contra ellas. Los dos ejemplos corresponden a tipos de barreras totalmente inadecuadas para los estacionamientos de varios pisos. Una foto muestra un vehículo que cayó desde el cuarto nivel de una estructura. La barrera era aparentemente una barrera de acero que no parecía ser mucho más pesada que una valla ornamental.

La referencia 21 aborda las principales dificultades al tratar de diseñar y detallar una conexión entre un muro en voladizo y una losa. La junta está sometida a un momento de apertura. Hace tiempo que se sabe que un detalle de unión típico, mostrado en la Fig. 2 de la referencia 21, es ineficiente. Las pruebas de la Universidad de Iowa de 1943²² documentaron las deficiencias, pero el uso de esta junta continuó. Se muestra una foto de la falla de una junta de apertura al 22% de la capacidad del miembro. Se muestra una junta eficiente para una esquina de apertura, pero con el comentario de que no es factible para una

junta de losa y pared de 6 pulgadas. En la referencia 23 se habla mucho más del problema de las juntas de apertura.

Anclar correctamente un muro de perímetro de concreto a una losa de concreto parece extremadamente difícil, y creo que es imposible en el caso de una estructura de doble T. En la referencia 24 se analizan las distribuciones de momentos en muros de barrera que se asume actúan como voladizos sobre la losa. Se muestran los momentos debidos a la concentración de los efectos en una franja de 12 pulgadas, con una anchura igual a la de la zona cargada, y los debidos a la suposición de una dispersión de 45 grados de los efectos de la carga y, por supuesto, son muy diferentes. La dispersión de 45 grados fue cuestionada; sin embargo, parece ser una decisión común de la ingeniería. La referencia 25 explora esta cuestión para un caso bastante similar de cargas concentradas que actúan en los bordes de las alas en miembros de doble T. Se demostró que la dispersión de 45 grados concuerda bien con un análisis elástico del caso. Los problemas de conectar un muro de perímetro a una losa por sí solos parecen insuperables. La referencia 24 recomienda como solución un muro por encima de la losa integrado en ésta y un muro por debajo, pero no se dan detalles de acero de la conexión entre el muro y la losa.

La referencia 26 parece haber sido redactada para refutar la mayoría de las conclusiones y recomendaciones de la referencia 21. El autor cita la referencia 23, diciendo que el detalle de los "ganchos estándar de 90°" desarrollará el 100% de la capacidad del miembro, si la relación de reforzamiento no supera el 0,3%. Sin embargo, la referencia 23 no tiene resultados de pruebas con esta proporción de refuerzo. La relación más baja en las pruebas fue de aproximadamente 0,5% y la eficacia fue de aproximadamente 45%. El caso citado del 0,3% procede de un valor calculado y depende totalmente de la resistencia a la tracción del concreto para resistir las fuerzas. En una estructura de estacionamiento en un clima no benigno, es probable que la resistencia a la tracción disponible después de un tiempo considerable se reduzca significativamente debido a los ciclos de congelación y descongelación y de humedad y secado. La referencia cita los muros de unidades de albañilería de concreto armado, pero no da detalles sobre cómo podrían estar conectados a la estructura.

Si bien la referencia 23 incluye detalles de refuerzo de esquinas de aberturas que son bastante eficientes, no parecen factibles para los casos en que los miembros tienen un espesor de 6 u 8 pulgadas y tienen la cobertura requerida en la mayoría de las exposiciones de estructuras de estacionamiento.

La referencia 27 informa que un hombre condujo accidentalmente su Jeep a través de la barrera de una estructura de estacionamiento en Santa Mónica, CA, EE.UU., en febrero de 2020, y cayó seis pisos. Sobrevivió. No se describió la barrera. Además, un coche atravesó una barrera de seguridad de cable, también en Santa Mónica, CA, en junio de 2018, y cayó una distancia no especificada. La referencia 16 se señala en el artículo corto.

La referencia 28 tiene una fotografía de una camioneta que cayó parcialmente un piso el 9 de diciembre de 2021, en Nueva Orleans, LA, USA. Las ruedas traseras están en el piso superior, mientras que las delanteras están en el piso inferior. La foto no muestra ningún rastro de barrera. No se ha informado de que haya habido heridos.

Una publicación del Post-Tensioning Institute (PTI) sobre estructuras de aparcamiento²⁹ no parece mencionar las barreras de borde. Una publicación paralela del PCI³⁰ muestra las vigas de la cornisa como barreras, y también los muros de borde. En todos los casos, los elementos de suelo de doble T se fijan a la viga de la cornisa o al muro de borde, pero se proporcionan pocos detalles.

Recomendaciones sobre las barreras

Los cambios en el código casi nunca se aplican con carácter retroactivo. Sin embargo, la adición de requisitos específicos a partir de 1990 parece tan importante, a la luz de los incidentes que acabamos de comentar, que los requisitos actuales deberían imponerse sin esperar

a los mecanismos habituales de activación. Esto es ciertamente posible a nivel local, si no a nivel nacional. Por ejemplo, hacia 1970, fui miembro del Comité del Código de la Construcción de la ciudad de Champaign, IL. El Departamento de Edificación tenía la política de que cualquier cambio en el Código General de Edificación que requiriera mejoras en las salidas de los edificios se aplicaba inmediatamente a todos los poseedores de licencias de bebidas alcohólicas. La CCI debería considerar una medida semejante en relación con las barreras de estacionamiento.

Agradecimientos

Varios ex alumnos me alertaron de los problemas de los estacionamientos en el campus de la Universidad de Illinois y sus alrededores. Estaban siendo entrometidos y conscientes, como se les animó a hacer. Jason Reigstad, de Reigstad Engineering, St. Paul, MN, aportó varias sugerencias útiles y realizó una encuesta informal entre los diseñadores y constructores de estructuras de estacionamiento postensadas. David P. Gustafson sugirió este tema y proporcionó pistas sobre artículos.

Referencias

1. "Construction Incidents Investigation Engineering Reports," United States Department of Labor, <https://www.osha.gov/construction/engineering>. (last accessed April 5, 2022)
2. "Garage Roof Section Falls," *Engineering News-Record*, May 28, 1981, p. 15.
3. "Salt Flattens Old Garage," *Engineering News-Record*, June 14, 1984, pp. 11-12.
4. "Probe Seeks Series of Event That Resulted in Absent Rebar," *Engineering News-Record*, June 23, 1997, p. 12.
5. Gross, S.J., and Ortega, H., "What We Know About the Irving Parking Garage Collapse," *The Dallas Morning News*, Aug. 2, 2018, <https://www.dallasnews.com/news/2018/08/02/what-we-know-about-the-irving-parking-garage-collapse/>.
6. "'Sounded Like a Dumpster Dropped': Firefighters Search Parking Garage Collapse," *CBS News Dallas Fort Worth*, updated July 31, 2018, <https://dfw.cbslocal.com/2018/07/31/firefighters-parking-garage-collapse-in-irving/>.
7. Zoga, D., "Irving Garage Collapse: What Went Wrong?" *NBCDFW*, Aug. 1, 2018, <https://www.nbcdfw.com/news/local/irving-garage-collapse-what-went-wrong/270304/>.
8. Caldwell, S.R., "Failure of Imagination," *STRUCTURE*, June 2017, pp. 29-30.
9. "Tanker Truck Falls Through Parking Garage Roof in West Houston," ABC, Inc., KTRK-TV Houston, Apr. 22, 2016, <https://abc13.com/taker-truck-accident-sinkhole/1304911/>.
10. Thompson, D., "Part of Parking Garage Collapses in Galleria Area," *chron.com*, June 2, 2014, <https://www.chron.com/news/houston-texas/article/Part-of-parking-garage-collapses-in-Galleria-area-5523893.php>.
11. Lagodimos, F., "Double Tee Flange Failures," *STRUCTURE*, July 2006, pp. 35-36.
12. WKYT News Staff, "WKYT Sky Eye: Part of Parking Garage Collapses in Downtown Lexington," *WKYT*, Feb. 18, 2021, <https://www.wkyt.com/2021/02/18/crews-on-scene-of-parking-garage-collapse-in-downtown-lexington/>.
13. Searcy, L., "Some Had Safety Concerns Over Lexington Parking Garage Before Collapse," *LEX 18*, Feb. 22, 2021, <https://www.lex18.com/news/covering-kentucky/some-had-safety-concerns-over-lexington-parking-garage-before-collapse>.
14. Anderson, C., "'Pancake' Collapse of Underground Parking Garage Prompts Evacuation of Lakewood Apartment Building," *19 News (WOIO)*, Dec. 23, 2021, <https://www.cleveland19.com/2021/12/23/emergency-crews-respond-parking-garage-collapse-lakewood-apartment-building/>.
15. Vandenberg, J., "Tenant: Missing Concrete, Exposed Rebar Structure Found Night Before Parking Deck's Collapse," *ABC News 5 Cleveland*, Dec. 31, 2021, <https://www.news5cleveland.com/news/local-news/cleveland-metro/tenant-missing-concrete-exposed-rebar-structure-found-night-before-parking-decks-collapse>.
16. Cook, T.; Martin, R.; Hopkins, E.; and Evans, T., "Simple Mistakes Can Lead to Cars Falling From Parking Garages in 'Freak' Accidents," *IndyStar*, Oct. 30, 2019, <https://www.indystar.com/story/news/2019/10/30/city-market-parking-garage-crash-among-46-last-20-years/2457201001/>.
17. ASCE/SEI 7-22, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2021, 1046 pp.
18. Iqbal, M., "Designing Edge Barriers in Parking Structures," *STRUCTURE*, Oct. 2008, pp. 24-26.
19. "International Building Code (IBC) 2006," International Code Council, Washington, DC, 2006, 663 pp.
20. Iqbal, M., "A Rational Method to Design Vehicular Barriers," *STRUCTURE*, Sept. 2010, pp. 22-24.

21. Iqbal, M., "Design Deficiencies in Edge Barrier Walls in Parking Structures," STRUCTURE, Apr. 2014, pp. 25-26.

22. Posey, C.J., and Kofoid, O., "Reinforced Concrete Corners in Tension," ACI Journal Proceedings, V. 40, No. 1, Sept. 1943, pp. 41-52.

23. Nilsson, I.H.E., and Losberg, A., "Reinforced Concrete Corners and Joints Subjected to Bending Moment," Journal of the Structural Division, ASCE, V. 102, No. ST6, June 1976, pp. 1229-1254.

24. Iqbal, M., "Design of Vehicular Barrier Walls: ASCE 7-10 Requirements," STRUCTURE, Nov. 2015, pp. 12-15.

25. Gamble, W.L., "Analysis and Design of Double-T Flanges," Concrete International, V. 39, No. 10, Oct. 2017, pp. 43-47.

26. Cudney, G., "Design Considerations: Cast-in-Place Edge Barrier Walls in Parking Structures," STRUCTURE, Apr. 2016, pp. 46-48.

27. Millán, N., "Parking Garage Barriers Fail to Prevent Six-Story Plunge," facilitiesnet, Feb. 27, 2020, <https://tinyurl.com/4w6rcy58>.

28. Kollath Wells, C., "Pickup Truck Crashes off Upper Level of French Quarter Garage; Person Rescued," nola.com, Dec. 10, 2021, www.nola.com/news/crime_police/article_9059e656-59cd-11ec-a2e9-135cbce2b395.html.

29. "Design, Construction, and Maintenance of Cast-in-Place Post-Tensioned Concrete Parking Structures," first edition, Post-Tensioning Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 173 pp.

30. MNL 129-15, "Precast Prestressed Concrete Parking Structures: Recommended Practice for Design and Construction," third edition, Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2015, 174 pp.



William L. Gamble, El miembro honorario de ACI, falleció el 23 de mayo de 2022, a la edad de 85 años. Era profesor emérito de ingeniería civil y medioambiental en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Urbana, IL, Estados Unidos. Gamble dictó cinco cursos diferentes de grado y posgrado sobre concreto reforzado y pretensado, además de un curso sobre la resistencia al fuego de las estructuras. Fue coautor (con Robert Park, de Nueva Zelanda) de la segunda edición de Losas de Concreto Reforzado. Fue miembro vitalicio de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles y del Instituto de Concreto Prefabricado/Pretensado, y fue miembro de ASTM International. Gamble fue becario Fulbright en Australia en 1962-1963. Fue presidente y miembro del Comité 543 de la ACI, Pilas de Concreto; del Comité Conjunto ACI-TMS 216, Resistencia y Protección contra el Fuego de las Estructuras; y del Comité Conjunto ACI-ASCE 421, Diseño de Losas de Concreto Reforzado. Gamble ha sido miembro del Comité de Premios a los Trabajos del ACI, del Comité de Nominación de Socios y del Comité de Nominaciones; del Comité Conjunto ACI-ASCE 423, Concreto Pretensado; y de los Subcomités ACI 318-C, Seguridad, Capacidad de Servicio y Análisis; 318-DR, Flexión y Cargas Axiales; y 318-F, Cimientos. También formó parte del subcomité A01.05 de la ASTM, sobre refuerzos de acero. Gamble se licenció en la Universidad Estatal de Kansas, Manhattan, KS, EE.UU., en 1959, y obtuvo un máster y un doctorado en ingeniería civil en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign en 1961 y 1962, respectivamente. Gamble era ingeniero de estructuras autorizado en Illinois.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Perú

Título: *Fallas e incidentes en las estructuras de estacionamiento*



Traductor y Revisor Técnico:
Ing. Julio Antonio Higashi Luy