

“Reasonable Safety” of Existing Structures, Part 3

Reading the structure

by David G. Tepke, Liying Jiang, Keith E. Kesner, and Stephen S. Szoke

Part 2 of this series focused on challenges associated with the availability of documentation, the evolution of the building codes and construction practices, and how these changes impact the assessment of structural safety.¹ The process of “reading” the structure typically starts with a visual survey to identify indicators of potential distress such as cracks, deterioration, excessive deformations, or signs of leakage (Fig. 1).

As described in Part 1 of this series, some milestone safety assessment ordinances have been adopted in the United States.² These ordinances all require an assessment of the structure, with only a limited number requiring anything beyond a visual survey. However, assessment from a visual survey alone is a difficult task, especially given the challenges posed by limited access to structural elements, the potential for hidden deterioration, and the aging of structures.

The goal of Part 3 is to discuss some of the intricacies associated with “reading the structure,” which is the process of examining the structure, determining the need for focused testing or further evaluation, and then deciding on a path forward. Part 4 will discuss how technological advancements may provide new hope for existing structures.

Visual Surveys

Visual surveys are the most common starting point in the evaluation of existing structures. ACI CODE-562-21,³ ACI 364.1R-19,⁴ and SEI/ASCE 11-99⁵ provide requirements and guidance for performing an initial assessment of a structure. Visual surveys are limited both in terms of the extent of the structure that can be examined and the types of defects that can be identified. Visual surveys also require discernment of the significance of cracking and other visible “defects” in an existing structure. Though not generally requisite, a visual survey may be supplemented with crack width measurements, limited deflection measurements, sounding for delaminations, or other nondestructive testing for the purposes of preliminarily supporting observations.



Fig. 1: Leakage with corrosion staining at an existing parking garage framing structure

Identifying potential hazards and vulnerabilities requires an understanding of the expected structural system encountered, and what constitutes unexpected behavior. Part 2 of this series described special considerations associated with the vulnerabilities of different structural systems. The licensed design professional (LDP) completing the visual survey needs to recognize that damage has different implications depending on the structural system and the age of the structure. Existing structures, through normal construction processes, routine service, and exposure conditions, generally have some level of “defects.” Defects may be in the form of cracks, surface blemishes, material degradation, variations in member geometry or location of embedments, unexpected structural response, or other conditions. In most cases, these “defects” will not significantly impact the intended use or overall stability of a structure. However, design or construction errors outside standard tolerances, misuse or unintended use of the structure, exposure to loads or conditions not accounted for in

design, or deterioration from longer-than-anticipated service in a given environment can lead to defects or damage that may be of concern. As described in ACI CODE-562-21, condition(s) observed during the visual survey perceived to be “potentially dangerous” or that give cause for the LDP to question the capacity of the structure or structural element—for example, the observed condition that is inconsistent with expectations of the design—must be further evaluated. This concept is illustrated in Fig. 2 and 3. Figure 2 shows a “typical” or “expected” crack on a concrete beam. This type of crack is common in concrete structures under “typical” service conditions. In contrast, Fig. 3 shows an example of atypical concrete cracking.

While visual surveys can provide indicators of unsafe conditions, structural elements are typically concealed by the presence of floor and wall coverings, ceilings, interior partitions, exterior envelope and veneer, ceiling-mounted mechanical equipment, and other obstructions. “Excessive” vertical deflections of structural members are commonly used as an indication of damage or unexpected performance, but these can only be observed when longer sections of the span are visible. It follows that a structure generally cannot be fully surveyed visually, and it is not reasonable to assume that all conditions that impact safety can be located. Structural capacity and serviceability of concrete structures are inherently dependent on the location, quantity, and type of embedded reinforcement; material properties are also heavily

dependent on concrete production and construction practices. Therefore, visual surveys may be used to identify unsafe conditions, but they may not always be a viable strategy for confirming “reasonable safety” to assess safety. Visual survey results are also a common trigger for additional investigation and other forms of analysis.

Cracks, Visual Defects, and Deterioration

Cracks and other visual defects are frequently observed on exposed concrete elements. While they may provide an indication of significant distress, such indications may also result from reasonable movement associated with volume change or minor construction blemishes. ACI 201.1R-08⁶ provides a pictorial description of different types of cracking and other types of defects in concrete structures. ACI 224.1R-07,⁷ ACI 224R-01,⁸ and ACI 224.4R-13⁹ provide information about causes, control, and detailing for mitigation of cracking, and ACI PRC-201.2-23¹⁰ provides information on materials-related distress mechanisms that may lead to cracking or distress. When cracks and other defects are observed in a visual survey, some critical questions that should be asked include:

- Are the shape, size, frequency, and orientation of cracks consistent with the expected structural behavior of the structure?
- Are the crack patterns, defect characteristics, effluent deposits, or associated staining consistent with possible deterioration or materials-related distress mechanisms?
- Does cracking or delamination represent a potentially dangerous condition associated with falling concrete, a tripping hazard, or loss of required fire protection?
- What are the possible future implications of cracking or observed defects on durability or prolonged continued use?
- Do similar members in the structure exhibit similar crack patterns and characteristics?
- Has cracking or distress worsened over time?

Concerns shall be raised if the cracks and visual damage are consistent with structural behavior issues or represent a reduction in capacity from excessive deterioration. These include but are not limited to the following conditions:



Fig. 2: A beam within a parking garage structure: (a) a general view; and (b) a close-up view of a crack on the beam face and soffit



Fig. 3: Vertical cracks and concrete delamination in a column

- Differential settlement, excessive deflections, or other deformations. In some cases, settlement cracks in walls, usually wider at one end than the other, may have stabilized and only warrant monitoring to determine if additional settlement occurs. If settlement creates cracks at connections, further investigation and assessment may be required;
- Cracks due to flexure or shear of structural elements may warrant further investigation, particularly wider cracks, cracks indicative of development failure, and cracks in members with limited redundancy. An example of a member with limited redundancy is a cantilever beam. Shear cracks, regardless of redundancy, require additional investigation due to the potential nature of the failure (Fig. 4);
- Cracks in elevated floor slabs that radiate outward from columns combined with cracks encircling the column are likely to be an indication of a condition that could result in punching shear failure. As discussed in Part 2, crack patterns that indicate the possibility of punching shear failure should be regarded as an eminent risk of catastrophic failure;
- Cracks in lateral force-resisting members may suggest deficiencies or previous overloading conditions that require investigation; and
- Widespread cracking with effluent material, cracking with corrosion stains, or cracking consistent with materials-related distress that could compromise the general integrity, quality of concrete, or embedded reinforcement should be investigated. Spalling and other losses of the section of concrete elements and corrosion and section loss of steel reinforcement can significantly impair the ability of concrete elements to resist nominal loads (Fig. 5). In addition to corrosion and losses of sections, the presence of moisture, water stains, corrosion stains on or near structural concrete, or finishes concealing concrete may warrant further investigation.

The conditions described previously are commonly triggers for additional investigation to determine how the capacity of the structure is affected.

Exterior conditions, particularly in corrosive environments, can result in deterioration and distress that may lead to safety issues. Impending detachment of concrete sections, sometimes referred to as incipient spalls, can present localized hazards, particularly when they may be tripping hazards or overhead falling hazards. As described in Tepke and Isgor¹¹ and ACI 222R-19,¹² corrosive conditions also can occur inside structures; for example, where exterior contaminants may penetrate to the interior, heightened moisture may be present, or chemicals or contaminants may exist. Therefore, consideration of corrosion where these conditions may exist should not be neglected during visual surveys.

Historical Exposure, Uses, and Changes

Repairs, alterations, and additions can significantly impact both structural performance and evaluation. Documents

related to maintenance, repair, alteration, or addition are often not available or are in partial form. Thus, it can be difficult to ascertain through document review what work has been done after initial construction, when it was done, and the possible implications with respect to building performance.

As discussed in Part 2, the state of practice and governing building codes at the time of construction should be considered when evaluating structures. One should also consider common practices with regard to maintenance and building use, as they may correlate with materials-related distress. For example, changes in processes in industrial or manufacturing facilities (such as textile mills and plating and food-processing facilities), or chemicals used in environmental structures or pools, can impact the expected rate of deterioration.

Quantification of Defects, Damage, and Deterioration

Quantification of defects, damage, or deterioration can be challenging. In addition to the aforementioned obstructions that limit ready access for visual surveys or testing, the variable nature of concrete, construction, and exposures can



Fig. 4: This wide diagonal crack near a support indicates the need for shoring and additional investigation



Fig. 5: Corroded reinforcing bars within a balcony (under repair)

lead to an array of conditions. ACI 228.2R-13,¹³ ACI 228.1R-19,¹⁴ ACI 437R-19,¹⁵ ACI 214R-11,¹⁶ and ACI 364.1R-19⁴ can be used to help develop a detailed investigation and evaluation plan. Plans may include a more detailed visual survey, testing analysis, or a combination of these at a subset or all the critical areas, depending on the suspected defects and potential deterioration mechanism, the likelihood for repetitive presence at the structure, the level of uncertainty based on the initial review, the ability to analytically assess the condition, the practical constraints (access), the exposure and loading, and the potential impact of a localized failure at the area. Investigation plans may include excavations, probes, or viewports to evaluate conditions identified through testing.

Evaluation of materials-related distress is one typical example. While concrete distress can often be evaluated using techniques described in ACI 228.2R-13,¹³ comprehensive evaluation of damage, including the bond between reinforcement and surrounding concrete, layered variation in damage, and specific section loss of hidden steel (in the case of corrosion) can be challenging. Deterioration rates, even if estimated with some accuracy, can be heavily dependent on environmental conditions and thus can vary. Damage from corrosion, alkali-silica reaction, delayed ettringite formation, or other issues generally requires specialized testing for evaluation.

In cases where the capacity of the structure or structural elements are in question, load testing in accordance with ACI 437.1R-07¹⁷ and ACI CODE-437.2-22¹⁸ can be used. The possibility of continued deterioration should be considered in further evaluations after the load testing.

Localized versus Global Evaluation

When attempting to understand overall structural safety, it is important to consider the safety of the building holistically as well as potential impacts from localized damage or defects. Random sampling may be adequate for evaluating the general

nature of a structure, but it is important to consider localized defects or damage that may be significant in nature, particularly if associated with elements of critical concern, as described earlier in this article and series. An adequate sampling and investigative plan must be established if there is concern that localized conditions may impact safety.

Evaluation of localized exposure requires considerations of potential atypical exposure conditions from previous spills, uses, or operations in chemical, manufacturing, or water treatment facilities, as well as those derived from wind patterns, orientation with respect to coastal exposures, shielding, and height of obstructions from corrosive exposures. Figure 6 shows the variability in required repairs and service-life extension measures for structures in coastal environments after approximately 20 to 25 years of service. Additional information on two of these repair projects is provided in Tepke et al.^{19,20}

Service Life and End of Service

Buildings do not last forever. Proper maintenance and implementation of proactive service-life extension measures can significantly extend their useful life. At the end of service, buildings are either strengthened sufficiently to extend service life, decommissioned, or reach an unplanned failure condition. Fortunately, condition assessments can significantly minimize the probability of the latter. It should be recognized, however, that at some point all structures if left in service and not evaluated, will develop potentially unsafe conditions as the end of service condition is approached. This is an important concept that transcends materials (wood, steel, masonry, or concrete). It places the concept of building service life and safety in perspective and reframes the question from “if” to “when.” Further, the concept emphasizes the importance of continued diligence. The more important question that must be answered by an LDP evaluating an existing building is, “How far along is this building in its service life?” While this

may be answered in the confines of a specific deterioration mechanism, based on averages of information obtained, it is difficult to explicitly determine for a given structure.

There is an increased concern about coastal buildings and parking structures exposed to chlorides, where corrosion of the embedded reinforcement and associated concrete deterioration is often the primary mechanism of deterioration. Many coastal condominiums and high-rises were built in the 1970s, 1980s, and 1990s, making many of these structures 30, 40, and 50 years old at present. Without proper evaluation and maintenance, questions of safety associated with these structures will increase as cracking,

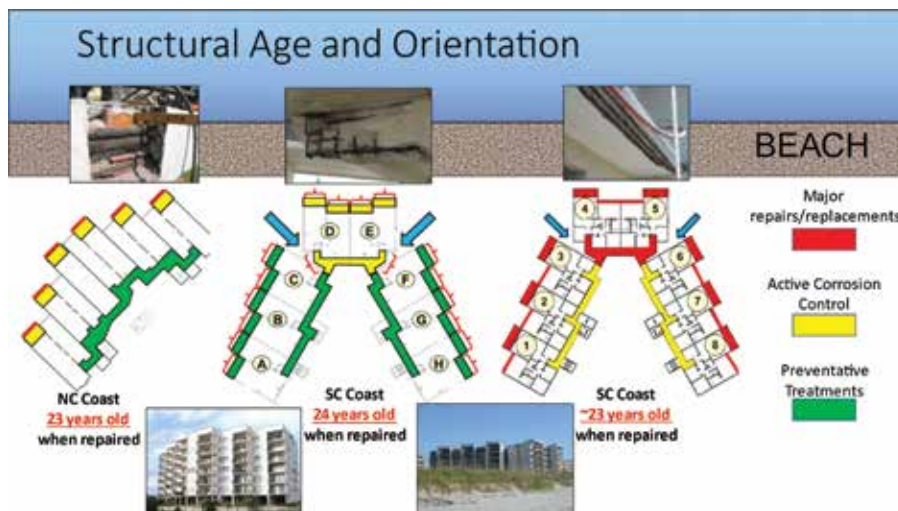


Fig. 6: Required major repairs/replacement and active corrosion control for structures in coastal environments after approximately 20 to 25 years of service

delamination, and spalling occurs. Figure 7 shows a graphical representation of the deterioration of a structure over time. Evaluation, maintenance, and repair of these structures in a timely manner is critical for extending service life and maintaining safe conditions.

Summary

The preceding sections describe some of the challenges and limitations associated with reading the conditions of a structure based upon visual surveys, and when survey results can act as a trigger for a more detailed evaluation. All structures will deteriorate over time and will eventually exhibit signs of aging. Determination of when and how these changes will affect the safety of a structure requires a detailed understanding of how the structure was built, the exposure conditions, and the measures already taken to prolong the service life.

Parts 1 through 3 of this series have described some of the challenges associated with existing structures, trying to examine what is reasonable when evaluating safety. However, the definition of “reasonable” was not provided, as “reasonable” is always conditional on what is known about the structure, the service environment, assumptions of analysis, and the time frame being considered. It is important for LDPs to understand and be able to accurately convey what can and cannot be said about the safety of the structure. It is unrealistic for an LDP to make absolute statements about safety. When one asks if a building or a specific component is safe, considerations must include the probability of failure, the implications of the failure, the duration being considered, and the implications of various assumptions that might be made in analyzing situations inconsistent with standard assumptions for new or undamaged components. Considerations must also include the possibility of hidden conditions that differ from what is known, or construction, service, or exposure conditions that are contrary to what is expected, reported, or determined from sampling.

“Is the structure safe?” or “Is the structure ‘reasonably’ safe in accordance with industry standards based on the ‘reasonable’ evaluation possible at this time?” When considering safety, one must consider the probability of an extraordinary event over a period of time and the potential localized conditions as discussed herein. “Is it likely to be unsafe in the next 30 minutes?” is a different question than “Is it likely to be unsafe in the next 6 months?” or “Is it likely to be unsafe in the next 50 years?”

When one asks about safety, one should ask:

- in comparison to...?
- with respect to...?
- in terms of...?
- under the conditions of...?
- with a probability of failure of...?
- in accordance with...?
- for a period of...?

References

1. Tepke, D.G.; Jiang, L.; Kesner, K.E.; and Szoke, S.S., “Reasonable Safety of Existing Structures, Part 2,” *Concrete International*, V. 45, No. 12, Dec. 2023, pp. 53-58.
2. Kesner, K.E.; Tepke, D.G.; Jiang, L.; and Szoke, S.S., “Reasonable Safety of Existing Structures, Part 1,” *Concrete International*, V. 45, No. 11, Nov. 2023, pp. 43-48.
3. ACI Committee 562, “Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures—Code and Commentary (ACI CODE-562-21),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 88 pp.
4. ACI Committee 364, “Guide for Assessment of Concrete Structures Before Rehabilitation (ACI 364.1R-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 20 pp.
5. SEI/ASCE 11-99, “Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings,” American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2000, 143 pp.
6. ACI Committee 201, “Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service (ACI 201.1R-08),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 16 pp.
7. ACI Committee 224, “Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures (ACI 224.1R-07),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 22 pp.

Service-Life Model for Chloride-Induced Corrosion

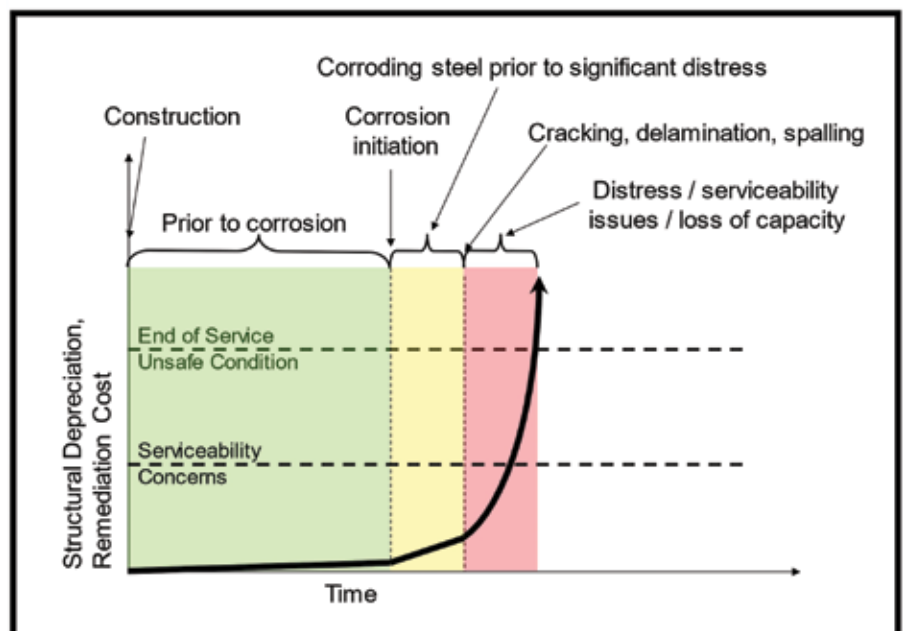


Fig. 7: Graphical representation of the deterioration of a structure over time

8. ACI Committee 224, “Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01) (Reapproved 2008),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 46 pp.

9. ACI Committee 224, “Guide to Design Detailing to Mitigate Cracking (ACI 224.4R-13),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 20 pp.

10. ACI Committee 201, “Durable Concrete—Guide (ACI PRC-201.2-23),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 99 pp.

11. Tepke, D.G., and Isgor, O.B., “Is the Inside of Your Structure Safe from Corrosion?” *Concrete International*, V. 45, No. 8, Aug. 2023, pp. 31-36.

12. ACI Committee 222, “Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion (ACI 222R-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 60 pp.

13. ACI Committee 228, “Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.

14. ACI Committee 228, “Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength (ACI 228.1R-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 48 pp.

15. ACI Committee 437, “Strength Evaluation of Existing Concrete

Buildings (ACI 437R-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 28 pp.

16. ACI Committee 214, “Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11) (Reapproved 2019),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 16 pp.

17. ACI Committee 437, “Load Tests of Concrete Structures: Methods, Magnitude, Protocols, and Acceptance Criteria (ACI 437.1R-07),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 38 pp.

18. ACI Committee 437, “Load Testing of Concrete Structures—Code and Commentary (ACI CODE-437.2-22),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 22 pp.

19. Tepke, D.G.; Firlotte, C.; and Robinson, S.P., “A Decade After Cathodic Protection and Concrete Repairs at Sound of the Sea II Condominiums,” *Concrete International*, V. 42, No. 11, Nov. 2020, pp. 18-23.

20. Tepke, D.G.; Tribble, N.B.; and Robinson, S.P., “Design for Longevity: A Look Back at Concrete Rehabilitation and Preservation at Shipyard Village Condominiums,” *Concrete Repair Bulletin*, July-Aug. 2023, pp. 16-23.

Selected for reader interest by the editors.



David G. Tepke, FACI, is a Principal Engineer with SKA Consulting Engineers, Inc., in Charleston, SC, USA. He specializes in structural and materials evaluation, troubleshooting, repair, and service-life extension. He is an NACE/AMPP Certified Corrosion Specialist and Protective Coating Specialist. Tepke is Chair of ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, and a member of the

ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach; and a member of ACI Committees 201, Durability of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction; 321, Concrete Durability Code; and 329, Performance Criteria for Ready Mixed Concrete. He is a licensed professional engineer.



ACI member **Liying Jiang** is an Engineering Manager with Structural Technologies. She specializes in evaluations of existing structures; assessment of concrete materials; design of repair and rehabilitation measures; and development of management strategies for structures affected by alkali-silica reaction (ASR), corrosion, and other materials-related distress. She is Chair of

ACI Subcommittee 364-C, TechNote Subcommittee, and Secretary of ACI Subcommittee 228-B, Visual Condition Survey of Concrete. She is also a member of ACI Committees 228, Nondestructive Testing of Concrete; and 364, Rehabilitation.



Keith E. Kesner, FACI, is a Project Director with Simpson Gumpertz & Heger, Inc. He specializes in the evaluation and rehabilitation of existing structures. He is Chair of the ACI TAC Repair and Rehabilitation Committee, and ACI Subcommittee 562-E, Seismic. He is also a member of the ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach; the

ACI Technical Activities Committee; and ACI Committees 228, Nondestructive Testing of Concrete; 364, Rehabilitation; and 562, Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings; and ACI Subcommittee 318-C, Safety, Serviceability, and Analysis; and various state initiatives collaboration groups. He was a co-recipient of the 1998 ACI Construction Practice Award and received the 2005 ACI Young Member Award. Kesner received his BS from the University of Connecticut, Storrs, CT, USA, and his MS and PhD from Cornell University, Ithaca, NY, USA. He is a licensed professional engineer in several states and a licensed structural engineer in Hawaii and Illinois.



Stephen S. Szoke, FACI, ACI Distinguished Staff, is a Code Advocacy Engineer at ACI. He actively participates in the development of model building codes, referenced standards, rules, and regulations. Szoke is a Staff Liaison for the ACI Committee on Codes and Standards Advocacy and Outreach. He is a licensed professional engineer.

"Seguridad razonable" de las estructuras existentes, Parte 3

Lectura de la estructura

por David G. Tepke, Liying Jiang, Keith E. Kesner, y Stephen S. Szoke

La Parte 2 de esta serie se centra en los retos asociados a la disponibilidad de documentación, la evolución de los códigos de construcción y las prácticas de construcción, y cómo afectan estos cambios a la evaluación de la seguridad estructural¹. El proceso de "lectura" de la estructura suele comenzar con una inspección visual para identificar indicadores de posibles problemas, como grietas, deterioro, deformaciones excesivas o signos de filtraciones (Fig. 1).

Como se describe en la Parte 1 de esta serie, algunos hitos normativos de evaluación de la seguridad se han adoptado en Estados Unidos². Todas estas ordenanzas exigen una evaluación de la estructura, y sólo un número limitado exige algo más que una inspección visual. Sin embargo, la evaluación a partir de un mero reconocimiento visual es una tarea difícil, sobre todo teniendo en cuenta las dificultades que plantean el acceso limitado a los elementos estructurales, el potencial de deterioro no visible y el envejecimiento de las estructuras.



Fig. 1: Filtraciones con manchas de corrosión en una estructura de pórticos de un estacionamiento existente.

El objetivo de la tercera parte es debatir algunos de las complejidades asociadas a la "lectura de la estructura", es decir, el proceso de examinar la estructura, determinar la necesidad de realizar pruebas específicas o evaluaciones adicionales y, a continuación, decidir el camino a seguir. La cuarta parte tratará de cómo los avances tecnológicos pueden aportar nuevas expectativas a las estructuras existentes.

Inspecciones visuales

Las inspecciones visuales son el punto de partida más común en la evaluación de estructuras existentes. ACI CODE-562-21³, ACI 364.1R-19⁴, y SEI/ASCE 11-99⁵ proporcionan requisitos y lineamientos para realizar una evaluación inicial de una estructura. Las inspecciones visuales están limitadas tanto en términos de la extensión de la estructura que se puede examinar, como de los tipos de defectos que se pueden identificar. Las inspecciones visuales también requieren discernir la importancia de las grietas y otros "defectos" visibles en una estructura existente. Aunque generalmente no es un requisito, un estudio visual puede complementarse con mediciones de ancho de grietas, mediciones de deflexión, sondeos para detectar delaminaciones u otras pruebas no destructivas con el fin de respaldar preliminarmente las observaciones.

La identificación de peligros y vulnerabilidades potenciales requiere una comprensión del sistema estructural encontrado y de lo que constituye un comportamiento inesperado. En la Parte 2 de esta serie se describen las consideraciones especiales asociadas a las vulnerabilidades de los diferentes sistemas estructurales. El profesional de diseño con licencia (LDP) que completa la inspección visual



Fig. 2: Una viga dentro de la estructura de un estacionamiento: (a) una vista general; y (b) una vista en primer plano de una grieta en la cara de la viga y la losa.

necesita reconocer que el daño tiene diferentes implicaciones dependiendo del sistema estructural y la antigüedad de la estructura. Las estructuras existentes, a través de procesos normales de construcción, servicio rutinario y condiciones de exposición, generalmente tienen algún nivel de "defectos". Los defectos pueden adoptar la forma de grietas, imperfecciones superficiales, degradación del material, variaciones en la geometría de los elementos o en la ubicación de las conducciones, respuesta estructural inesperada u otras condiciones. En la mayoría de los casos, estos "defectos" no afectarán significativamente al uso previsto o a la estabilidad general de una estructura.

Sin embargo, los errores de diseño o construcción fuera de las tolerancias estándar, el uso indebido o no previsto de la estructura, la exposición a cargas o condiciones no tenidas en cuenta en el diseño, o el deterioro debido a un servicio más prolongado de lo previsto en un entorno determinado pueden dar lugar a defectos o daños que pueden ser motivo de preocupación. Tal y como se describe en ACI CODE-562-21, la(s) condición(es) observada(s) durante la inspección visual percibida(s) como "potencialmente peligrosa(s)" o que dé(n) lugar a que el LDP cuestione la capacidad de la estructura o elemento estructural - por ejemplo, la condición observada que es inconsistente con las expectativas del diseño - debe(n) ser evaluada(s) más a fondo. Este concepto se ilustra en las figuras 2 y 3. La figura 2 muestra una grieta "típica" o "esperada" en una viga de concreto. Este tipo de grieta es común en estructuras de concreto bajo condiciones de servicio "típicas". Por el contrario, la Fig. 3 muestra un ejemplo de fisuración atípica del concreto.



Fig. 3: Grietas verticales y delaminación del concreto en una columna.

Aunque los estudios visuales pueden proporcionar indicadores de condiciones inseguras, los elementos estructurales suelen quedar ocultos por la presencia de revestimientos de suelos y paredes, techos, tabiques interiores, revestimientos y recubrimientos exteriores, equipos mecánicos montados en el techo y otros obstáculos. Las deflexiones verticales "excesivas" de los elementos estructurales suelen utilizarse como indicación de daños o de un comportamiento inesperado, pero sólo pueden observarse cuando secciones más largas del vano son visibles. De ello se deduce que, por lo general, una estructura no puede inspeccionarse visualmente en su totalidad, y no es razonable suponer que todas las condiciones que afectan a la seguridad puedan localizarse. La capacidad estructural y la capacidad de servicio de las estructuras de concreto dependen intrínsecamente de la ubicación, la cantidad y el tipo de refuerzo embebido; las propiedades del material también dependen en gran medida de la producción del concreto y de las prácticas de construcción. Por lo tanto, las inspecciones visuales pueden utilizarse para identificar condiciones inseguras, pero no siempre son una estrategia viable para confirmar una "seguridad razonable" para evaluar la seguridad. Los

resultados de las inspecciones visuales también suelen desencadenar investigaciones adicionales y otras formas de análisis.

Grietas, defectos visuales y deterioro

Las grietas y otros defectos visuales se observan con frecuencia en elementos de concreto expuestos. Aunque pueden ser una indicación de un deterioro significativo, tales indicaciones también pueden ser el resultado de un movimiento razonable asociado a un cambio de volumen o a pequeños defectos de construcción. ACI 201.1R-086 proporciona una descripción pictórica de los diferentes tipos de fisuración y otros tipos de defectos en estructuras de concreto. ACI 224.1R-07⁷, ACI 224R-01⁸, y ACI 224.4R-13⁹ proporcionan información sobre las causas, control y detallado para la mitigación del agrietamiento, y ACI PRC-201.2-23¹⁰ proporciona información sobre los mecanismos de deterioro relacionados con los materiales que pueden conducir al agrietamiento o deterioro. Cuando se observan grietas y otros defectos en una inspección visual, algunas preguntas críticas que deben hacerse incluyen:

- ¿Son la forma, el tamaño, la frecuencia y la orientación de las grietas coherentes con el comportamiento estructural esperado de la estructura?
- ¿Son los patrones de las grietas, las características de los defectos, los depósitos de efluentes o las manchas asociadas coherentes con un posible deterioro o con mecanismos de daño relacionados con los materiales?
- ¿Representa el agrietamiento o la delaminación una condición potencialmente peligrosa asociada a la caída del concreto, un riesgo de tropiezo o la pérdida de la protección contra incendios requerida?
- ¿Cuáles son las posibles implicaciones futuras del agrietamiento o de los defectos observados sobre la durabilidad o el uso continuado prolongado?
- ¿Miembros similares de la estructura presentan patrones y características de fisuración similares?
- ¿Se han agrietado o han empeorado con el tiempo?



Fig. 4: Esta amplia grieta diagonal cerca de un soporte indica la necesidad de apuntalamiento e investigación adicional.



Fig. 5: Barras de refuerzo corroídas en un balcón (en reparación).

Se deberán plantear inquietudes si las grietas y los daños visuales son coherentes con problemas de comportamiento estructural o representan una reducción de la capacidad debido a un deterioro excesivo. Esto incluye, pero no se limita a, las siguientes condiciones:

- Asentamientos diferenciales, deflexiones excesivas u otras deformaciones. En algunos casos, las grietas de asentamiento en los muros, normalmente más anchas en un extremo que en el otro, pueden haberse estabilizado y sólo es necesario vigilarlas para determinar si se producen asentamientos adicionales. Si el asentamiento crea grietas en las conexiones, puede ser necesaria una mayor investigación y evaluación;
- Las grietas debidas a la flexión o al cortante de los elementos estructurales pueden justificar una investigación más profunda, en particular las grietas más anchas, las grietas indicativas de falla en desarrollo y las grietas en miembros con redundancia

limitada. Un ejemplo de elemento con redundancia limitada es una viga en voladizo. Las grietas de corte, independientemente de la redundancia, requieren una investigación adicional debido a la naturaleza potencial de la falla (Fig. 4);

- Las grietas en losas de piso elevadas que se irradian hacia afuera desde las columnas, combinadas con grietas que rodean la columna, son probablemente una indicación de una condición que podría resultar en una falla por cortante de punzonamiento. Como se ha comentado en la Parte 2, los patrones de grietas que indican la posibilidad de fallo por cortante de punzonamiento deben considerarse como un riesgo notable de fallo catastrófico;
- Las grietas en los elementos de resistencia a fuerzas laterales pueden sugerir deficiencias o condiciones de sobrecarga previas que requieren investigación; y
- Deben investigarse las grietas generalizadas con material eflorescente, las grietas con manchas de corrosión o las grietas consistentes con problemas relacionados con los materiales que puedan comprometer la integridad general, la calidad del concreto o el refuerzo embebido. El desprendimiento y otras pérdidas de sección de los elementos de concreto y la corrosión y pérdida de sección de la armadura de acero pueden perjudicar significativamente la capacidad de los elementos de concreto para resistir las cargas nominales (Fig. 5). Además de la corrosión y las pérdidas de sección, la presencia de humedad, manchas de agua, manchas de corrosión en el concreto estructural o cerca de él, o acabados que oculten el concreto, pueden justificar una investigación adicional.

Las condiciones descritas anteriormente suelen ser desencadenantes de investigaciones adicionales para determinar cómo se ve afectada la capacidad de la estructura.

Las condiciones exteriores, sobre todo en entornos corrosivos, pueden provocar un deterioro y un peligro que pueden dar lugar a problemas de seguridad. El desprendimiento inminente de secciones de concreto, a veces conocido como desprendimientos incipientes, puede presentar peligros localizados, particularmente cuando pueden ser peligros de tropiezo o de caída por encima de la cabeza. Como se describe en Tepke e Isgor¹¹ y ACI 222R-19¹², también pueden darse condiciones corrosivas en el interior de las estructuras; por ejemplo, cuando los contaminantes exteriores pueden penetrar en el interior, puede haber una mayor humedad, o pueden existir productos químicos o contaminantes. Por lo tanto, la consideración de la corrosión donde puedan existir estas condiciones no debe descuidarse durante las inspecciones visuales.

Exposición histórica, usos y cambios

Las reparaciones, reformas y ampliaciones pueden afectar significativamente tanto en el rendimiento estructural como en la evaluación. Los documentos relacionados con el mantenimiento, la reparación, la reforma o la ampliación no suelen estar disponibles o lo están de forma parcial. Por lo tanto, puede resultar difícil determinar a través de la revisión de documentos qué trabajos se han realizado después de la construcción inicial, cuándo se hicieron y las posibles implicaciones con respecto al rendimiento del edificio.

Como se ha expuesto en la Parte 2, al evaluar las estructuras deben tenerse en cuenta el estado de la práctica y los códigos de construcción vigentes en el momento de la construcción. También deben tenerse en cuenta las prácticas habituales en relación con el mantenimiento y el uso de los edificios, ya que pueden estar relacionadas con el deterioro de los materiales. Por ejemplo, los cambios en los procesos de las instalaciones industriales o de fabricación (como fábricas textiles e instalaciones de revestimiento y procesamiento de alimentos), o los productos químicos utilizados en estructuras medioambientales o piscinas, pueden influir en la tasa de deterioro prevista.

Cuantificación de defectos, daños y deterioro

La cuantificación de los defectos, daños o deterioros puede resultar difícil. Además de los obstáculos antes mencionados que limitan el acceso para inspecciones visuales o pruebas, la naturaleza variable del concreto, la construcción y las exposiciones pueden conducir a una variedad de condiciones. ACI 228.2R-13¹³, ACI 228.1R-19¹⁴, ACI 437R-19¹⁵, ACI 214R-11¹⁶, y ACI 364.1R-194 pueden utilizarse para ayudar a desarrollar un plan detallado de investigación y evaluación. Los planes pueden incluir un estudio visual más detallado, análisis de ensayos o una combinación de estos en un subconjunto o en todas las áreas críticas, dependiendo de los presuntos defectos y el mecanismo de deterioro potencial, la probabilidad de presencia repetitiva en la estructura, el nivel de incertidumbre basado en la revisión inicial, la capacidad de evaluar analíticamente el estado, las limitaciones prácticas (acceso), la exposición y la carga, y el impacto potencial de un fallo localizado en la zona. Los planes de investigación pueden incluir excavaciones, sondeos o visores para evaluar las condiciones identificadas mediante pruebas.

La evaluación de los daños relacionados con los materiales es un ejemplo típico. Aunque el deterioro del concreto puede evaluarse a menudo utilizando las técnicas descritas en la norma ACI 228.2R-13¹³, la evaluación exhaustiva de los daños, incluyendo la unión entre la armadura y el concreto circundante, la variación de los daños por capas y la pérdida de secciones específicas de acero oculto (en el caso de la corrosión) puede ser un reto. Los índices de deterioro, incluso si se estiman con cierta precisión, pueden depender en gran medida de las condiciones ambientales y, por tanto, pueden variar. Los daños causados por la corrosión, la reacción álcali-sílice, la formación retardada de etringita u otros problemas suelen requerir pruebas especializadas para su evaluación.

En los casos en que se cuestione la capacidad de la estructura o de los elementos estructurales, puede recurrirse a pruebas de carga de acuerdo con ACI 437.1R-07¹⁷ y ACI CODE-437.2-22¹⁸. La posibilidad de que continúe el deterioro debe tenerse en cuenta en las evaluaciones posteriores a la prueba de carga.

Evaluación localizada frente a evaluación global

Cuando se intenta comprender la seguridad estructural general, es importante considerar la seguridad del edificio de forma holística, así como los impactos potenciales de daños o defectos localizados. El muestreo aleatorio puede ser adecuado para evaluar la naturaleza general de una estructura, pero es importante tener en cuenta los defectos o daños localizados que pueden ser de naturaleza significativa, especialmente si están asociados a elementos de preocupación crítica, como se ha descrito anteriormente en este artículo y en la serie. Debe establecerse un plan de muestreo e investigación adecuado si existe la preocupación de que las condiciones localizadas puedan afectar a la seguridad.



Fig. 6: Reparaciones/reemplazos importantes necesarias y control activo de la corrosión para estructuras en ambientes costeros después de aproximadamente 20 a 25 años de servicio.

La evaluación de la exposición localizada requiere tener en cuenta las posibles condiciones de exposición atípicas derivadas de vertidos, usos u operaciones anteriores en instalaciones químicas, de fabricación o de tratamiento de aguas, así como las derivadas de los patrones de viento, la orientación con respecto a las exposiciones costeras, el blindaje y la altura de los obstáculos de las exposiciones corrosivas. La Figura 6 muestra la variabilidad de las reparaciones necesarias y las medidas de prolongación de la vida útil de las estructuras en entornos costeros después de aproximadamente 20 a 25 años de servicio. En Tepke et al.^{19,20} se ofrece información adicional sobre dos de estos proyectos de reparación.

Vida útil y fin de servicio

Los edificios no son eternos. Un mantenimiento adecuado y la aplicación de medidas proactivas de prolongación de la vida útil pueden extender significativamente su vida de servicio. Al final de su vida útil, los edificios se refuerzan lo suficiente como para prolongarla, se desmantelan o llegan a una situación de fallo imprevisto. Afortunadamente, las evaluaciones del estado pueden minimizar significativamente la probabilidad de que se produzca este último caso. Sin embargo, debe reconocerse que, en algún momento, todas las estructuras, si se dejan en servicio y no se evalúan, desarrollarán condiciones potencialmente inseguras a medida que se acerque la condición de fin de servicio. Se trata de un concepto importante que trasciende los materiales (madera, acero, mampostería u concreto). Sitúa el concepto de vida útil y seguridad del edificio en perspectiva y replantea la pregunta de "si" a "cuándo". Además, el concepto subraya la importancia de la diligencia continua. La pregunta más importante que debe responder un LDP que evalúa un edificio existente es: "¿En qué fase de su vida útil se encuentra este edificio?". Si bien esto puede responderse en los confines de un mecanismo de deterioro específico, basado en promedios de información obtenida, es difícil de determinar explícitamente para una estructura dada.

Existe una creciente preocupación por los edificios y estacionamientos costeros expuestos a los cloruros, en los que la corrosión de la armadura embebida y el deterioro del concreto asociado suelen ser el principal mecanismo de deterioro.

Muchos condominios y rascacielos costeros se construyeron en las décadas de 1970, 1980 y 1990, por lo que muchas de estas estructuras tienen 30, 40 y 50 años en la actualidad. Sin una evaluación y un mantenimiento adecuados, las cuestiones de seguridad asociadas a estas estructuras aumentarán a medida que se produzcan grietas, delaminación y desprendimientos. La figura 7 muestra una representación gráfica del deterioro

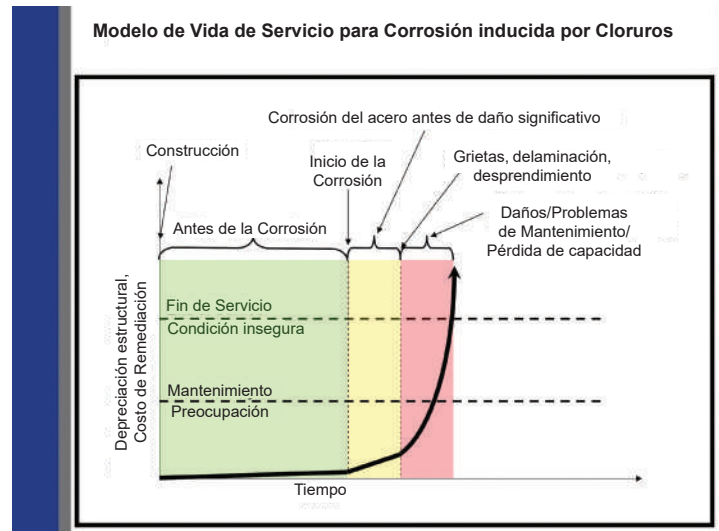


Fig. 7: Representación gráfica del deterioro de una estructura a lo largo del tiempo.

de una estructura con el paso del tiempo. La evaluación, el mantenimiento y la reparación de estas estructuras en el momento oportuno son fundamentales para prolongar la vida útil y mantener unas condiciones seguras.

Resumen

Los apartados anteriores describen algunos de los retos y limitaciones asociados a la lectura de las condiciones de una estructura basándose en inspecciones visuales, y cuándo los resultados de la inspección pueden actuar como desencadenantes de una evaluación más detallada. Todas las estructuras se deterioran con el tiempo y acaban mostrando signos de envejecimiento. La determinación de cuándo y cómo afectarán estos cambios a la seguridad de una estructura requiere un conocimiento detallado de cómo se construyó la estructura, las condiciones de exposición y las medidas ya adoptadas para prolongar su vida útil.

En las partes 1 a 3 de esta serie se han descrito algunos de los retos asociados a las estructuras existentes, tratando de examinar lo que es razonable a la hora de evaluar la seguridad. Sin

embargo, no se ha proporcionado la definición de "razonable", ya que "razonable" siempre está condicionado por lo que se conoce sobre la estructura, el entorno de servicio, los supuestos de análisis y el marco temporal que se está considerando. Es importante que los LDP comprendan y sean capaces de transmitir con precisión lo que puede y no puede decirse sobre la seguridad de la estructura. No es realista que un LDP haga afirmaciones absolutas sobre la seguridad. Cuando uno se pregunta si un edificio o un componente específico es seguro, las consideraciones deben incluir la probabilidad de fallo, las implicaciones del fallo, la duración que se está considerando y las implicaciones de varias suposiciones que podrían hacerse al analizar situaciones inconsistentes con las suposiciones estándar para componentes nuevos o no dañados. Las consideraciones también deben incluir la posibilidad de que existan condiciones ocultas que difieran de lo que se conoce, o condiciones de construcción, servicio o exposición que sean contrarias a lo que se espera, informa o determina a partir del muestreo.

"¿Es segura la estructura?" o "¿Es 'razonablemente' segura la estructura de acuerdo con las normas del sector basadas en la evaluación 'razonable' posible en este momento?". A la hora de considerar la seguridad, hay que tener en cuenta la probabilidad de que se produzca un suceso extraordinario durante un periodo de tiempo y las posibles condiciones localizadas, tal y como se ha comentado aquí. "¿Es probable que sea inseguro en los próximos 30 minutos?" es una pregunta diferente a "¿Es probable que sea inseguro en los próximos 6 meses?" o "¿Es probable que sea inseguro en los próximos 50 años?".

Cuando uno pregunta por la seguridad, debe preguntar:

- ¿en comparación con...?
- ¿respecto a...?
- ¿en términos de...?
- ¿en las condiciones de...?
- ¿con una probabilidad de fallo de...?
- ¿de acuerdo con...?
- ¿durante un periodo de...?

Referencias

1. Tepke, D.G.; Jiang, L.; Kesner, K.E.; and Szoke, S.S., "Reasonable Safety of Existing Structures, Part 2," *Concrete International*, V. 45, No. 12, Dec. 2023, pp. 53-58.
2. Kesner, K.E.; Tepke, D.G.; Jiang, L.; and Szoke, S.S., "Reasonable Safety of Existing Structures, Part 1," *Concrete International*, V. 45, No. 11, Nov. 2023, pp. 43-48.
3. ACI Committee 562, "Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures—Code and Commentary (ACI CODE-562-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 88 pp.
4. ACI Committee 364, "Guide for Assessment of Concrete Structures Before Rehabilitation (ACI 364.1R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 20 pp.
5. SEI/ASCE 11-99, "Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2000, 143 pp.
6. ACI Committee 201, "Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service (ACI 201.1R-08)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 16 pp.
7. ACI Committee 224, "Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures (ACI 224.1R-07)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 22 pp.
8. ACI Committee 224, "Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01) (Reapproved 2008)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001, 46 pp.
9. ACI Committee 224, "Guide to Design Detailing to Mitigate Cracking (ACI 224.4R-13)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 20 pp.
10. ACI Committee 201, "Durable Concrete—Guide (ACI PRC-201.2-23)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 99 pp.
11. Tepke, D.G., and Isgor, O.B., "Is the Inside of Your Structure Safe from Corrosion?" *Concrete International*, V. 45, No. 8, Aug. 2023, pp. 31-36.

12. ACI Committee 222, "Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion (ACI 222R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 60 pp.
13. ACI Committee 228, "Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.
14. ACI Committee 228, "Report on Methods for Estimating In-Place Concrete Strength (ACI 228.1R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 48 pp.
15. ACI Committee 437, "Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings (ACI 437R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 28 pp.
16. ACI Committee 214, "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11) (Reapproved 2019)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 16 pp.
17. ACI Committee 437, "Load Tests of Concrete Structures: Methods, Magnitude, Protocols, and Acceptance Criteria (ACI 437.1R-07)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 38 pp.
18. ACI Committee 437, "Load Testing of Concrete Structures—Code and Commentary (ACI CODE-437.2-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 22 pp.
19. Tepke, D.G.; Firlotte, C.; and Robinson, S.P., "A Decade After Cathodic Protection and Concrete Repairs at Sound of the Sea II Condominiums," *Concrete International*, V. 42, No. 11, Nov. 2020, pp. 18-23.
20. Tepke, D.G.; Tribble, N.B.; and Robinson, S.P., "Design for Longevity: A Look Back at Concrete Rehabilitation and Preservation at Shipyard Village Condominiums," *Concrete Repair Bulletin*, July-Aug. 2023, pp. 16-23.

Seleccionados por los editores por su interés para el lector.



Keith E. Kesner, FACI, es Director de Proyectos de Simpson Gumpertz & Heger, Inc. Está especializado en la evaluación y rehabilitación de estructuras existentes. Es presidente del Comité de Reparación y Rehabilitación del ACI TAC y del Subcomité 562-E, Sísmico, del ACI. También es miembro del Comité de Promoción y Divulgación de Códigos y Normas del ACI; del Comité de Actividades Técnicas; y de los Comités 228, Ensayos No Destructivos del Concreto; 364, Rehabilitación; 562, Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Edificios de Concreto; y de los Subcomités 318-C, Seguridad, Capacidad de Servicio y Análisis del ACI; y de varios grupos de colaboración de iniciativas estatales. Fue uno de los galardonados con el Premio a la Práctica de la Construcción de ACI en 1998 y recibió el Premio al Miembro Joven de ACI en 2005. Kesner obtuvo su licenciatura en la Universidad de Connecticut, Storrs, CT, EE.UU., y su máster y doctorado en la Universidad de Cornell, Ithaca, NY, EE.UU. Está colegiado como ingeniero profesional en varios estados y como ingeniero de estructuras en Hawai e Illinois.



Liying Jiang, Miembro del ACI y Directora de Ingeniería de Structural Technologies. Está especializada en evaluaciones de estructuras existentes, valoración de materiales de concreto, diseño de medidas de reparación y rehabilitación, y desarrollo de estrategias de gestión para estructuras afectadas por reacción álcali-silíce (ASR por sus siglas en inglés), corrosión y otros problemas relacionados con los materiales. Es presidenta del Subcomité 364-C del ACI, Subcomité TechNote, y Secretaria del Subcomité 228-B del ACI, Visual Condition Survey of Concrete. También es miembro de los Comités 228 (Ensayos no destructivos del hormigón) y 364 (Rehabilitación) del ACI.



David G. Tepke, FACI, es ingeniero principal de SKA Consulting Engineers, Inc. en Charleston, SC (EE.UU.). Está especializado en evaluación estructural y de materiales, resolución de problemas, reparación y prolongación de la vida útil. Es especialista en corrosión y especialista en revestimientos protectores certificado por NACE/AMPP. Tepke es presidente del Comité 222 del ACI, Corrosión de Metales en el Concreto, y miembro del Comité del ACI sobre Promoción y Divulgación de Códigos y Normas; y de los Comités 201, Durabilidad del Concreto; 301, Especificaciones para la Construcción de Concreto; 321, Código de Durabilidad; y 329, Criterios de Desempeño para Concreto Premezclado. Es ingeniero profesional licenciado.



Stephen S. Szoke, FACI, Personal Distinguido de ACI, es Ingeniero de Defensa del Código en ACI. Participa activamente en el desarrollo de modelos de códigos de construcción, normas de referencia, reglas y reglamentos. Szoke es miembro del personal de enlace del Comité de promoción y divulgación de códigos y normas de ACI. Es ingeniero profesional licenciado.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Perú

Título: "Seguridad razonable" de las estructuras existentes, Parte 3



*Traductor y Revisor Técnico:
Ing. Julio Antonio Higashi Luy*