

On “Brittle Failures in Precast Parking Structures”

A letter to the editor and authors’ closure

by Ned M. Cleland, Sami H. Rizkalla, and Mark E. Patton

Ned M. Cleland and Sami H. Rizkalla were engaged as expert witnesses by the precast subcontractor who fabricated and erected precast, prestressed structural members at the Cherokee, NC, garages. They testified at the arbitration proceeding referenced herein and have been engaged as expert witnesses with respect to the third referenced structure by the precaster and precast specialty engineer, respectively. Mark E. Patton was retained as an expert witness by the precaster with respect to the third referenced structure.

This is a response to the article “Brittle Failures in Precast Parking Structures” by William L. Gamble, Gordon H. Reigstad, and Jason Reigstad (*CI*, V. 41, No. 9, September 2019, pp. 32-39). In the referenced article, the authors, all of whom have a significant conflict of interest they failed to disclose, take aim at the use of carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) grid as primary flange reinforcement in precast, prestressed concrete double-tee (DT) members and blame the CFRP grid for what the authors claim were brittle failures. This characterization and the authors’ comments, while favorable to their clients, ignore the facts and circumstances that led to the three reported failures and distort the record of resilience of CFRP-grid-reinforced DTs. In all known parking structures where these flanges have *not* been subjected to regular overloading with overweight tow vehicles and have been constructed with suitable welded flange-to-flange connectors, CFRP-grid-reinforced DTs are performing appropriately. This response is an attempt to set the record straight with respect to these CFRP-grid-reinforced DTs.

Concept and Design

It is well recognized in the industry that parking structures represent one of the most demanding applications for reinforced concrete with respect to environmental factors. These structures are exposed to severe environmental conditions and are subjected to a range of corrosive agents, including deicing chemicals used to clear roads of winter precipitation as well as chloride-laden air and moisture along coastlines. Use of CFRP strands as the primary flange reinforcement is a step toward corrosion-free parking structures. Unlike steel, CFRP used as reinforcement will not corrode.

CFRP strands are available in sizes and strengths that vary depending on the number of carbon fibers in the yarn or

“tow.” When used as reinforcement in parking structure flanges, these CFRP strands are laid up into a “mesh” or “grid” with carbon fiber in the transverse direction and crossing glass-fiber strands in the longitudinal direction of the DT stem. The strength of the assembly as a mesh depends on the size and spacing of the CFRP strands in position and contributes to the load resistance mechanism for applied loads. For prestressed concrete DTs, the stems below the flange are prestressed to the minimum requirements of ACI 318-14, Section 9.6.2.¹ Top reinforcement is only required in simple-span prestressed members when stress at transfer exceeds $6\sqrt{f'_{ci}}$ at the ends and $3\sqrt{f'_{ci}}$ at other locations (Table 24.5.3.2 in ACI 318-14). Conventional welded-wire reinforcement used in DT flanges recognizes the absence of a longitudinal reinforcement requirement in the top of prestressed beams and provides transverse reinforcement for flange flexure with widely spaced smaller wires running in the longitudinal direction only for the purpose of holding and developing the working reinforcement.

Because CFRP cannot corrode, it can be applied with less concrete cover than steel and may consequently be designed into thinner flanges. The high-strength carbon fibers used for CFRP grids are over five times stronger than conventional steel reinforcement. Their close spacing and near-surface placement contribute to superior crack control behavior in concrete structures.

Development

Extensive testing, research, and analysis of CFRP grid as reinforcement by industry and academics demonstrated conclusively that CFRP-reinforced DTs are capable of resisting the load combinations required by the ACI Code and perform better than steel with respect to fatigue. Initial tests

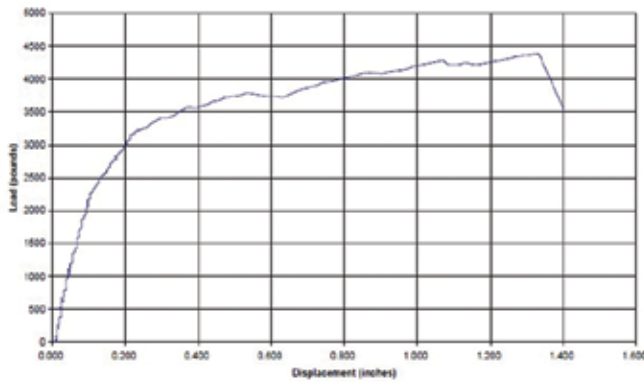


Fig. 1: Load displacement for CFRP-grid-reinforced slab tested in flexure²

were made to characterize the CFRP material itself. These tests included strength evaluations of the CFRP alone and as reinforcement, using small-scale and full-scale structural members subjected to sustained loads, environmental exposure, and fatigue loadings.

As part of this testing, the researchers evaluated the behavior of sections reinforced with multiple strand elements. A probability distribution study, verified by testing, showed that concrete members reinforced with CFRP grid do not reach a breaking point with sudden failure but instead continue to support additional loads as shown in Fig. 1.

CFRP grid as reinforcement is significantly different from individual fiber-reinforced-polymer (FRP) bars due to uniform distribution of the resistance provided by the grid within the member, and so it is treated differently in the design of members reinforced with CFRP grid. The authors of the referenced article insist that CFRP-grid-reinforced DTs are underdesigned by reference to ϕ factor and strength recommendations included in ACI 440.1R-15.³ However, ACI 440.1R expressly does not apply to the array of smaller-diameter strands that constitute CFRP grids (Section 6.6 in ACI 440R-07⁴). Therefore, the references made to ACI 440.1R in the article by Gamble, Reigstad, and Reigstad and their reliance on ACI 440.1R in drawing their conclusions of underdesign are neither appropriate nor germane.

After the basic characterization of the material, extensive testing was conducted to confirm that full-scale DT flanges would satisfy the strength requirements of the ACI Code when used in parking structures. These tests have included CFRP-reinforced flanges subjected to concentrated loading and uniform loading on different flange thickness and grid configurations. These tests involved full-scale members with loading applied in varied locations across the DTs and included testing and evaluation of cracked members as well as members fabricated with tooled joints to simulate cracking and tested to failure. Research findings, in a published technical paper,⁵ confirmed that the CFRP-reinforced flanges with a concrete depth of 3-1/4 in. or more are capable of resisting loads significantly in excess of code requirements for parking structures.

In-Use Strength Evaluations and Other Investigations

In addition to the laboratory and plant testing referenced above, there have also been full ACI 318-14, Chapter 27, strength-assurance tests made on in-place construction following years of use. The first of these tests was performed at the parking structure identified by the authors of the *CI* article as Structure A. The test was performed on a selected DT that was not subjected to severe overloading or rescue vehicles due to its remote location in the structure. In this test, the flange-to-flange connections that would typically act to distribute the concentrated load across the joint were removed. Loading was applied in two locations, both with preexisting cracks in the flange. The CFRP-reinforced flange passed both tests as a cantilever without the assistance from the load distribution to the adjacent DT that the flange-to-flange connections would ordinarily provide.

In Spring 2018, an additional series of tests was conducted on a structure that had been in use for more than 6 years. The entire structure was surveyed to map preexisting crack locations. Four sites were selected for testing that represented the greatest existing crack magnitude. The flange-to-flange connections were left intact at the test locations in the cantilevered portions of the DT, and the adjacent flanges were saw-cut and loads were applied to induce cracks to ensure that the CFRP grid was carrying the applied test loads on each adjacent flange. At each test location, the C-GRID[®]-reinforced flanges passed ACI 318, Chapter 27, strength-assurance tests and ACI 437.1R-07⁶ cyclical-load tests.

Additionally, at several structures, core samples were taken at cracked locations. In each instance, except for one corner crack where the concrete section had displaced, separated, and dropped, the CFRP was intact despite through-cracking of the concrete.

There are three cases of flange failures that are related to severe overloading or to unique issues in one case. In the other parking structures that have not been subjected to repeated abuse beyond the contemplation of the Code or to a defective flange connector design that magnified the effect of impact loading, the system continues to provide safe service, except where the authors of the *CI* article have frightened owners or operators. There are cases where excess loading on cracked flanges requires attention and remediation, but these are not sudden brittle failures that have occurred without warning. ACI, the Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), and the National Parking Association have published detailed (and nearly identical) guidelines for inspection of structural elements on an annual basis to detect unsafe conditions. The guidelines apply to all structural elements of the parking structure.

Specific Contentions by the Authors

The initial premise set out by the authors of the *CI* article is that there is only one way to design reinforced concrete: 1) such that all failures must be ductile; and 2) such that the

design will accommodate whatever unpredictable event might happen even if well beyond the loading requirements included in the legally adopted building code.

The first part of this premise is incorrect for three reasons. First, ACI 318 affords the designer relief from excessive reinforcement. In a beam, minimum reinforcement can be reduced provided that the strength is 1/3 greater than that required by the governing ultimate load combination (Section 9.6.1.3 in ACI 318-14). In a slab, the minimum reinforcement must only meet temperature and shrinkage requirements (Section 7.6.1.1 in ACI 318-14). (Note: The *PCI Journal* article quoted by the authors of the *CI* article was quoted out of context. It describes recommendations for overstrength in design of CFRP DT flanges.)

Second, there is no explicit requirement in ACI 318 that reinforcement be provided in mild-steel-reinforced slabs so that the strength exceeds concrete cracking strength. There *is* a requirement for prestressed members that flexural strength exceeds $1.2M_{cr}$ at critical sections (Section 9.6.2.1 in ACI 318-14), but that requirement does not apply to the transverse reinforcement of a DT flange, which is treated as a one-way, nonprestressed concrete slab.

Third, as indicated above, testing and experience with CFRP-reinforced flanges show that the load-deformation curve is not linear to failure, and cracking in the flange does not lead to immediate brittle failure, as illustrated in Fig. 1.

Extensive test results⁷ demonstrated that the reduced strength of the concrete slab reinforced with CFRP (using a 0.75 reduction factor) exceeded 1.33 times the moment due to factored load. Serviceability of the flange, in terms of deflection, is within the allowable limitations specified by ACI 318-11⁸ and ACI 440.1R-06⁹ design guidelines, and the DTs were not cracked under service load.

On the article's second contention, it appears that by stating "that reliable resistance is equal to or exceeds the maximum probable applied load," the authors contend that the limitations of the Code are not to be considered. Should or must a specialty engineer foresee uses and loads beyond the specifications provided by the owner's design team?

The 2012 International Building Code (IBC)¹⁰ requires a parking structure restricted to passenger vehicles to be designed for a uniform load of 40 psf and a single 3000 lb concentrated load over a 20 in.² area to simulate a jack (Note A, Table 1607.1). Also, the 2012 IBC introduced special provisions for parking structures with heavy vehicles that mandated that private passenger vehicle loading was not intended for vehicles that exceeded a 10,000 lb gross vehicle weight rating (GVWR). If the intended use of the parking structure includes heavy vehicle loading, then heavy loading must be specified.

Three Reported Flange Failures

In the consensus opinion of the undersigned, the failures at Structure A and Structure B in Cherokee, NC, were caused by repeated overloading of the DTs for several years. Records



Fig. 2: Water stains on a cracked flange in Structure B

from local wrecker companies showed that overweight tow vehicles entered and transited the parking structures, on average, every 3 to 5 days. The arbitration panel did not find a defect or deficiency in the CFRP-grid-reinforced DTs. The only fault found by the arbitration panel on the part of the precast subcontractor was a failure to disclose the limitations inherent to the design criteria specified by Reigstad and Associates as the engineer of record, which referenced the 40 psf uniform load/3000 lb concentrated load from the 2006 IBC¹¹ to the owner at the time of turnover. The same precast subcontractor had previously fabricated and erected DTs for the same owner, designed to the pre-2003 IBC, which required a 50 psf uniform load. The arbitration panel also found, however, that the owner ignored subsequent warnings about overweight vehicles (even those later delivered by the Reigstads) that were in some cases conveyed years before the failures.

In the *CI* article, the authors describe the failures at parking Structure A and Structure B. The immediate failure at Structure A was correctly identified as the result of an axle overload 4.5 times the code-required concentrated load. No mention is made of the pattern of continuous overloads that both parking structures experienced before the failures. In addition, no mention is made of the long-existing cracking, evidenced by the water stains in another cracked flange in Structure B shown in Fig. 2.

Rust and corrosion on the surfaces of the flange connections at the remnants of welds at the location of the second failure provide clear evidence that flange-to-flange connectors had been broken for a long time and not repaired. These overloads in Structure B continued to be allowed even after the failure in Structure A, and explicit warnings and directives by Reigstad and others to immediately cease subjecting the already-damaged ramps in Structure B to these overloads led directly and inevitably to the second failure. A surveillance video shows these heavy vehicles transiting the failure locations with and without lifted vehicles in tow at least twice in the 3 days prior to the second failure. These facts were not disclosed by the authors.

Figure 3 shows the condition of the speed ramp where the Structure B failure occurred, long before the failure. The flange cracking is evident as well as visible damage to the flange-to-flange connection.

The authors also speculate about the cause of failure at the



Fig. 3: Speed ramp cracks and damage in Structure B (Note: This photograph shows a different section of the speed ramp than the ultimate failure location, but the condition depicted is illustrative.)

Vulcan parking structure. The available visual evidence indicates that this was not a sudden failure without prior warning. There is evidence of water stains and wear at the crack location, suggesting that the crack existed long before the failure. The extent of the crack is greater than 40 ft, indicating that the influence area for resisting concentrated loads is greater than the 45-degree or 60-degree angle assumed by the authors.

Response to the Authors' Analysis

The authors rely on ACI 440.1R, a guideline for FRP bars, for evaluation of the CFRP grid strength and appropriate strength-reduction factors for the reinforcing material. However, 440.1R states that CFRP grid is not covered by the document, and research shows that the standards included in the ACI 440.1R guideline are not applicable. The conclusion of the research is different for the array of multiple strands across the flange. The use of a strength reduction factor of 0.75—the same as for shear behavior (Section 21.2 in ACI 318-14)—is reinforced by the recent decision of the American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) to use that value for CFRP in its bridge design specification.¹²

The load side of the equation

The old 45-degree angle of influence assumption has been replaced by a more realistic 3:1 slope in the eighth edition of the *PCI Handbook*¹³ and in *Precast Prestressed Concrete Parking Structures: Recommended Practice for Design and Construction*.¹⁴ Also, load testing of Structure A with flange

connections removed and at cracked sections was described to demonstrate that the flange design meets the requirements of the code.

Ductility demand

The description of the allowance for overstrength is discussed previously. It is not a requirement of the Code that all concrete behavior must result in a ductile failure.

Resilience of standard designs

The claim that the code limits are not important if something heavier might enter the parking structure is refuted by provisions in the 2018 IBC.¹⁵ The provisions make it clear that if a vehicle with GVWR greater than 10,000 lb is to be permitted into the structure, then passenger vehicle load criteria *should not be used*. It has been shown by testing that the flange designed with CFRP grid can carry the concentrated and uniform loads prescribed by the code as a cantilever. When the flange-to-flange connections are maintained and intact, the reserve strength is further increased. The failure events show that the CFRP flange design can withstand repeated and severe overloading before failure, but the reserve cannot reasonably be unlimited when subjected to repeated and persistent overloads, especially after cracking evident for years has given warning of the effect of these repeated and persistent overloads and has broken or damaged flange-to-flange connectors.

Required approvals for new systems

The manufacturers of DTs using CFRP for flange reinforcement have not hidden this system from owners, contractors, architects, or engineers. They have actively promoted the system as a means to avoid corrosion development in the structures. In most instances, the manufacturer or its consulting specialty engineer are delegated the detailed design of the structure, and then that detailed design is submitted to the structural engineer of record (SER) for review and approval. The precast subcontractor and the specialty engineer, as subsidiary to a subcontractor, do not have the direct relationship with the building official or authority having jurisdiction that the SER does. If there is a question about a delegated design conforming to the conditions of the building permit, in the opinion of these authors, it is the responsibility of the SER to raise that question and determine the steps necessary to ensure conformance. There is ample evidence from testing and experience to gain the necessary approvals.

Conclusion

The welded flanges of DTs used in the referenced parking structures were designed according to the loads specified by the codes. The failure was due to the severe overloading and the use of rescue vehicles in addition to failure of the flange connections due to corrosion and lack of maintenance. The Code does not currently require all nonprestressed slabs to meet

cracking capacity with mild-steel design, and to do so would dramatically increase the area of reinforcement in most slabs.

Typical practice does not require having every insert, fixture, or feature not mentioned in the code be subject to mandatory review by the building official when the SER can make a determination as to whether such a submittal is warranted or not. Although ACI 440.1R currently excludes CFRP grids, ACI Committee 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement, has reported that there is a committee that is actively working on establishing standards that address the unique properties of CFRP grids. The Code already includes provisions for heavy vehicles in parking structures, and the SER and the owner's design team must inform the client about these limitations and increase the scope and cost of the facility if heavier loading is desired or expected.

References

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.
2. Wagenbach, C.; Huevel, S.; Colclasure, D.; Broadway, A.; and Harmon, T., "Tests of Double Tee Flanges Reinforced with C-GRID Subjected to Concentrated Loading," AltusGroup Technical Committee Report No. 7.1, 14 pp.
3. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 83 pp.
4. ACI Committee 440, "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (ACI 440R-07)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 100 pp.
5. Botros, A.W.; Lucier, G.; Rizkalla, S.H.; and Gleich, H., "Behavior of Free and Connected Double-Tee Flanges Reinforced with FRP," *PCI Journal*, V. 61, No. 5, Sept.-Oct. 2016, pp. 49-68.
6. 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.
7. Lunn, D.; Lucier, G.; Rizkalla, S.; Cleland, N.; and Gleich, H., "New Generation of Precast Concrete Double-Tees Reinforced with Carbon-Fiber Reinforced Polymer Grid," *PCI Journal*, V. 60, No. 4, July-Aug. 2015, pp. 37-48.
8. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 503 pp.
9. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 44 pp.
10. "2012 International Building Code (IBC)," first edition, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2011, 694 pp.
11. "2006 International Building Code (IBC)," first edition, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2006, 666 pp.
12. "Guide Specifications for the Design of Concrete Bridge Beams Prestressed with Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Systems," first edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2018, 71 pp.
13. "PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete (MNL-120-17)," eighth edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2017, 886 pp.
14. "Precast Prestressed Concrete Parking Structures: Recommended Practice for Design and Construction (MNL-129-15)," third edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2015, 160 pp.
15. "2018 International Building Code (IBC)," first edition, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2017, 726 pp.

Selected for reader interest by the editors after independent expert evaluation and recommendation.

Ned M. Cleland, FACI, is owner and Principal of Blue Ridge Design, Inc., Winchester, VA. He is a past member of ACI Committee 318, Structural Concrete Building Code, and serves as a consultant to the AltusGroup, Inc., Greenville, SC.

Sami H. Rizkalla, FACI, is the Distinguished Professor Emeritus of Civil Engineering and Construction at North Carolina State University, Raleigh, NC; former Director of the Constructed Facilities Laboratory at that institution; past Chair of ACI Committee 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement; and a consultant to the AltusGroup, Inc. He was the principal researcher for several studies on the CFRP grid and CFRP-reinforced double-tees.

ACI member **Mark E. Patton** is owner of Mark E. Patton, Ltd Materials Consultants, and a member of the Precast/Prestressed Concrete Institute, the American Society of Civil Engineers, and ASTM International. He was a principal researcher for studies on CFRP-grid-reinforced double-tees and architectural panels for a member of the AltusGroup, Inc.

Authors' Closure

To quote from an earlier discussion of Lunn et al.,¹ "The authors of 'New Generation of Precast Concrete Double Tees Reinforced with Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Grid' still do not get it."²

The writers' opening statement regarding our article³ is odd. Our involvement in the subject projects was noted on the first page of the original *Concrete International* article. Odd also is the writers' lack of full disclosure regarding carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) grid used in precast concrete. Over the past 10 years, two of the three writers have been paid consultants to the AltusGroup, Inc., Greenville, SC, which is a trade organization controlling the CFRP grid material named C-GRID®. It appears the writers are advocates and not experts.

Engineers shall only advocate for the safety, health, and welfare of the public (section I. Fundamental Cannons in Reference 4). Under that paramount duty, all structural engineers must demand that safe structures fail at the time of an original overload. Would the described structures ever be

considered safe structures with the writers' claims? One day, a structure sees a load greater than code prescribed. If later (be it a day, a week, a month, a year, or 5 years on), that same structure fails at a load less than code prescribed, it is our opinion that this type of structure would never be approved and would be considered dangerous. It appears the advocates for this product clearly did not and do not understand the fundamentals of safe structural design.

To our knowledge, zero parking structures have been built with precast double-tee (DT) flanges reinforced with CFRP grid since the first failure, and the CFRP grid product for DT flanges is no longer marketed for this use. At least one of the writers was closely involved with the following: Several parking structures in the Commonwealth of Virginia constructed with CFRP-grid-reinforced DT flanges are being modified with a stainless steel reinforced/grouted slot system. This system is being installed, at no cost to the owner, following discussions between the original contractors, the structure owners, and the owners' structural consultants. The slotted reinforcement system concept was designed by an independent structural consultant retained by the parking structure contractors, and it was reviewed and approved by the Commonwealth's Division of Engineering and Buildings.

At least one of the writers is also aware that other CFRP-grid-reinforced parking structures have been modified, are in the process of being modified, or soon will be modified in a similar manner at no cost to the owner: three in Charlotte, NC; one in Pikeville, KY; one in California, PA; and one in Atlanta, GA. We were not involved in modification decisions other than the first two discussed in the original article.

ACI 318 Code

In our opinion, the writers' continued references to the ACI 318 Code more than likely is what got the writers into this mess. Steel and carbon reinforcement do not have similar material properties; this fact is an accepted truth with all industry experts. All the writers' claims referencing ACI 318 are completely misused. ACI 318-14, Provision 20.1.1,⁵ states:

"This chapter shall apply to steel reinforcement, and shall govern (a) through (c):

- (a) Material properties
- (b) Properties to be used for design
- (c) Durability requirements, including minimum specified cover requirements."

Commentary Provision R20.1.1 also states: "Fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement is not addressed in this Code. ACI Committee 440⁶ has developed guidelines for the use of FRP reinforcement (ACI 440.1R and 440.2R)." Therefore, the ACI 318 Code shall not be used for FRP, which includes CFRP grid.

The continued cherry-picking by the writers with regard to references to the ACI 318 standards demonstrates a complete lack of fundamental understanding of material properties. Steel-reinforced concrete was used long before the ACI 318 Code was even pondered; the entire ACI 318 Code was and is

written for steel-reinforced concrete due to its performance history, the availability of many thousands of tests, and reliable models for analyses. The recommendations in the ACI Committee 440 documents are distinctively different due to the brittle nature of FRP/CFRP reinforcement. For example, ACI 440R-07⁶ does not allow a designer relief from excessive reinforcement.

To quote from the response by two of the writers from a discussion of Lunn et al.,¹ "Currently, ACI 318-14 does not consider design of reinforced concrete members using fiber-reinforced polymer (FRP) material and its unique properties." Lunn et al.¹ also states: "However, CFRP grid reinforcement is believed to have uniform distribution of the reinforcement and the failure of one strand will not result in global failure." To our knowledge, this "belief" has been stated without verifying data. If the data exist, they should have been presented.

One need only to read Lunn et al.,¹ with which the writers cannot claim to be unfamiliar, to understand "... what the authors claim were brittle failures." Flanges in the test specimens described in Lunn et al.¹ were apparently identical to those in one of the parking structures in the Harrah's Cherokee Resort complex (Structure A in our article). In those tests, flanges failed at first cracking, with entire flanges falling completely free from supporting members. This is the same failure mode as would be observed in unreinforced concrete. Unreinforced concrete members in flexure, other than some slabs-on-grade, are not permitted under any recent ACI Code—see ACI 318-19, Provision 14.1.3.⁷

To the best of our knowledge, no similar failure has ever been observed in a steel-reinforced flange. One can find cases of local failures in which some wires in welded-wire reinforcement (WWR) fractured and small flange areas fell, but no complete flanges fell. The resort complex parking structures replaced an earlier structure that had steel reinforcement (WWR) in the DT flanges. That structure served for about 9 years under the same loading conditions as the structures with CFRP flange reinforcement, without failures or serious distress.

Figure 1

Based on the caption for Fig. 1 of the writers' response to our article (Fig. 12 in Wagenbach et al.⁸), the figure shows a load-displacement curve for CFRP-mesh-reinforced slab tested in flexure. However, the original caption for that figure reads: "PBM 12' Double Tee - Load vs. Displacement: hydraulic loading, C11000 @ 1.0 in. Cover."⁸ The report describes tests of two DT members with 2.5 in. thick flanges. One had C11000 CFRP strands at 1.0 in. cover and 0.5 in. cover in the two halves of the member. The other had C5500 strands with the same two covers. The strand spacing is not given and the C11000 CFRP is not described. Based on other reports, the C5500 strand is now labeled C50, the strand used in the two resort structures. The C11000 is presumably twice the area of the C5500, but that is speculation. The loading was

a single concentrated load applied near the edge of a flange, remote from the ends of the specimen. The photo of the failure area clearly shows a shear dominated failure.

Ductility

Contrary to some claims in the writers' response to our article, there is a general expectation of some ductility in all reinforced and prestressed concrete flexural members. Minimum reinforcement requirements, while not always adequate for slabs in the current ACI 318 Code, provide one of the checks. If one traces the origins of the slab minimum reinforcement requirements, which have existed since at least 1936, one will find that this reinforcement led to the nominal moment capacity exceeding the cracking moment by some small margin until concretes somewhat stronger than about 4500 psi compressive strength came into general use. To our knowledge, no checks on minimum reinforcement were ever done on flanges reinforced with CFRP. A sentence in the Introduction of ACI 440.1R-06⁹ reads: "Design procedures must account for a lack of ductility in structural concrete members reinforced with FRP bars." The same warning must apply to CFRP-grid reinforcement. A warning is also listed in the C-GRID technical data sheets: "Application Use Note: C-GRID® remains a relatively novel material without extensive performance history of traditional construction materials. Reported properties are average values, not design values. Structures and applications using C-GRID® should be designed using appropriate safety factors or load and strength reduction factors. All applications using C-GRID®, including critical life safety and fire rated structures, should be designed and reviewed by a licensed engineer experienced with FRP material."¹⁰⁻¹²

ACI 318-19 requires that the tensile strain in the extreme layer of steel reinforcement equals or exceeds the yield strain + 0.003 if ϕ is to be taken as 0.9 in the calculation of M_u . Smaller values of steel strain lead to reduced values of ϕ in beams and columns. This is a very clear requirement for measurable ductility.

ACI 440.1R-06⁹ was current when the resort parking structures were designed. The writers dismiss this as not relevant to grid-type CFRP reinforcement. This would be comparable to claiming that the general design principles of reinforced concrete do not apply to slabs with WWR because there are multiple closely spaced wires rather than discrete larger bars. The primary difference that is evident between the CFRP-grid strands and the usual FRP bar is that the CFRP-grid strands are very smooth while the FRP bars often have significant surface roughness, and hence better bond capacity. ACI 440.1R provided general guidance, and we claim that it can be ignored only at one's peril. In at least two instances, coefficients given in ACI 440.1R that are related to the computation of the reliable moment capacity were replaced by larger values. ACI 440.1R does not seem to explicitly exclude CFRP grids. A physical description of a strand from a CFRP grid matches the definition of a "bar, FRP" contained in ACI

440.1R. There are no restrictions of bar size, nor is there a requirement for roughened surfaces.

The writers dismiss the failure of the two flanges at the resort complex parking structures as entirely due to the overloads caused by tow trucks. However that may be, there are no known failures of steel-reinforced DT flanges where entire flanges fell, as happened in both structures at the resort. With ductility and safety factors, tow trucks entering parking structures are not causing failures all over the country. The writers claim "records" indicate overweight tow vehicles entered parking structures at the Harrah's Cherokee Resort on average every 3 to 5 days. That statement is simply false. Under-oath testimony from the owner of the company with the only "records" from local wrecker companies shows that an 11,400 lb tow truck entered parking structures at the resort a total of nine times in all of 2014.¹³

If one takes the failure moment capacities given in Lunn et al.¹ and the load distribution factors used by the writers, the tow truck in question should not have caused the first failure.

The tow-truck overload cannot be applied to the Vulcan parking structure (Structure C in our article). The owner believes that no tow truck was ever in the structure. We agree that there were preexisting cracks, including at least one in a video showing the failure. The failure occurred under a minivan that probably had a front axle load of about 3 kip, or two-wheel loads of about 1.5 kip, each spaced about 5 ft apart. The corrosion-proof CFRP in the cracked section clearly could not supply enough resistance for a loading that, the writers must surely agree, was less than any reasonable design load. A good deal of the flange fell, demonstrating an "unzipping," which has been claimed to be impossible in Lunn et al.¹

CFRP versus steel reinforcement

The writers claim superior fatigue performance of CFRP relative to steel, but that is based on very little data. We are aware of one publication by Harmon¹⁴ where strands, somewhat similar to those in the resort structures, were subjected to fatigue tests. Individual strands were tested in air, and slab elements with CFRP-grid reinforcement were tested. The material description is: "Two types of C-GRID were tested, C5500-AX1 in the warp direction and C5500-EX1 in the fill direction."¹⁴ The current designation of C5500 is C50, but an "*" in the table describing the then-current C5500-EX1 equivalent leads to: "These grids are typically used for reinforcing double tee products and include sacrificial longitudinal fiberglass yarns spaced between the carbon strands."¹⁴ The "warp" strands are the longitudinals in a roll of grid material and "fill" strands are transverse to the roll. A photo of a tension test specimen shows CFRP strands in both directions, so it is apparently of the C5500-AX1 material. The grid in the resort structures had CFRP as the flange (fill) direction reinforcement and small areas of GFRP in the span longitudinal (warp) direction.

Harmon¹⁴ includes a table listing 25 fatigue tests of each

type of the bare strand material. It also lists six fatigue tests of 3.25 in. thick slab specimens and nine of 2.0 in. thick slabs. None of these numbers match the number of data points shown in the graphs. No test went beyond 1,000,000 cycles, while twice that number seems to be the minimum required to understand steel fatigue specimens. In addition, the forces applied during testing were not given. The results were reported in terms of percentages of the average strength of a few statically tested specimens, usually with significant scatter. Thus, it is not possible to make an independent assessment of the test results in terms of computed stresses.

Load distribution

The writers claim that the $3l$ load spread given by the eighth edition of the *PCI Design Handbook*¹⁵ is reasonable. This is based on no facts known to us. Tests of steel-reinforced flanges under single concentrated loads lead to crack patterns spreading at about 60 degrees (about $1.75l$)—considerably less. An elastic analysis suggests that a 45-degree spread ($1l$) is appropriate. This loading represents a unicycle, not the four-wheeled vehicles common in parking structures. At the $3l$ spread, the width in a typical flange is enough to contain at least four- and perhaps six-wheel loads spaced at 5, 3, 5, 3, and 5 ft. The title of ASCE 7-16,¹⁶ the source of the 3-kip load, starts as “*Minimum Design Loads ...*” [emphasis added] with a clear implication that the designer is supposed to think about what happens in the structure under consideration. The commentary of ASCE 7 mentions a 10-kip vehicle, which obviously could apply four concentrated loads of 2.5 kip each, or perhaps two somewhere in the range of 2.5 to 3 kip each. In a total non sequitur, the commentary uses this vehicle to justify the single 3-kip load being increased from some previous, lower value. The members of the committee responsible for the standard are apparently unaware of four-wheeled vehicles or that they often appear side-by-side. Refer to Fig. A for a hypothetical but reasonable arrangement of vehicles in a parking structure with 60 ft spans and 90-degree parking. One can easily imagine a situation with eight-wheel loads on the junction line between adjacent flanges.

Systems not covered by ACI 318

The writers dismiss the relevance of the ACI 318 Code procedures for approval of systems not specifically covered by the Code. It somehow becomes the responsibility of the engineer of record or structural engineer of record (EOR or SER), rather than the entity doing the detailed member design or the fabricator, who has overall responsibility for the detailed design. In one case that we have specific knowledge of, a “board of examiners” was appointed only after six parking structures had been constructed with the CFRP-grid reinforcement. The conclusion of this group, a matter of public record, was that the material was not acceptable, at least in the quantities used. Under-oath testimony by the building official for the Harrah’s Cherokee Resort parking

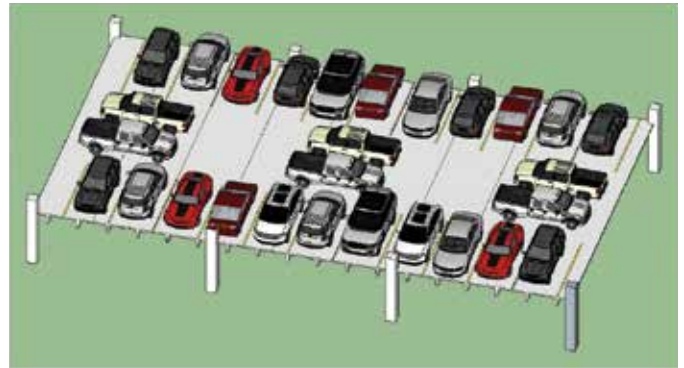


Fig. A: A schematic of vehicles parked, entering, and exiting a parking structure

structures stated that the CFRP grid should have been submitted to the building official for review. That building official also testified, after studying the CFRP product, that he would have rejected it.¹⁷

Fire resistance

Specific fire resistance is required in some structures, including the resort parking Structure B. A standard fire test has three failure criteria for slabs:

- (1) The temperature rise on the unexposed side cannot exceed an average of 250°F, or 325°F at any single point, at the end of the required time;
- (2) No structural failure; and
- (3) No transmission of flames or hot gases through the member.

In many steel-reinforced structures, the first criterion governs and often sets the minimum slab thickness. The third is almost never a factor in reinforced concrete structures. The resort parking Structure B had a fire resistance requirement of 2 hours. Why the flanges were 4.75 in. thick is a matter for speculation.

The fire resistance had been studied by others, but an important aspect of behavior was missed. The carbon fiber itself apparently is quite tolerant of the temperatures reached. However, the epoxy that binds the individual fibers into a strand is much less tolerant of heat, as noted in the next paragraph. The first sentence of Section 3.4 of ACI 440.1R-06 reads: “The use of FRP reinforcement is not recommended for structures in which fire resistance is essential to maintain structural integrity.”

ASTM A882/A882M, “Standard Specification for Filled Epoxy-Coated Seven-Wire Prestressing Strand,” has a test involving temperature versus bond capacity, and there are various requirements and warnings about not starting the test if the specimen temperature is more than 150°F. It appears that bond failure is expected to be reached by or before the temperature is 190°F. A note in this specification reads: “Note 1 – At temperatures above 165°F [74°C], currently available epoxy begins to soften and lose its ability to transfer prestress from the strand to the concrete by bond. At 200°F [93°C] practically all transfer capacity will be lost.”

Table 1:
Temperatures in DT flanges at CFRP level

Flange thickness, in.	Cover to CFRP strand, in.	Concrete material	Temp. at CFRP strand, °F		Time to 200°F at CFRP strand, minutes
			After 2 hours	After 1 hour	
4.75	4.0	Semi-lightweight	250	—	90
3.875	3.125	Semi-lightweight	320	—	55
3.5	2.75	Normal, carbonate	—	300	30

The 200°F temperature will be reached at the CFRP strand in much less than 1 hour for the 3.5 in. flange and less than 2 hours for the 4.75 in. flange. This observation is based on graphs in ACI 216.1-07/TMS-0216-07,¹⁸ which was current at the time these structures were designed. Table 1 has more information, including a third case that we are aware of. The numbers are approximate since they were read from graphs, but they clearly illustrate the problem. None of these temperatures would be problematic for steel reinforcement.

Once the epoxy reaches about 200°F, it loses nearly all its strength and the CFRP grid loses all bond capacity. The only anchorage available is provided by the loops at the ends of the grid sheets. The structural situation then becomes comparable to an unbonded post-tensioned member with tendons in friction-free ducts. In such members, a single large crack tends to form at the point of maximum moment, and the entire strand is subjected to uniform tensile stress as necessary for equilibrium if it is able to resist the required force.

The photo in Fig. B shows the final collapsed state of a specimen representative of DT flanges with CFRP-grid reinforcement fire tested per ASTM E119, “Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials.” The geometry is very similar to the resort parking Structure A in terms of flange thickness and length. The reinforcement was the same C50 strands, but the spacing was 3.2 in., while the spacing was 2.7 in. in the resort structures. Two single-tee members were tested, with appropriate flange connectors joining the adjacent flanges. The concrete comprised carbonate aggregate. This is the only fire test of a CFRP-reinforced member known to us.

The test is described in Reference 19. At 58 minutes into the test, the temperature at two thermocouples exceeded the 325°F temperature increase limit at the unexposed side of the flanges. The test was terminated at 60 minutes, and at 63 minutes and 55 seconds, the two interior flanges collapsed completely into the furnace. A mathematical correction to the test time, based on initial moisture content of the concrete, resulted in a test duration of 60 minutes—that is, 1 hour.

Flange connectors

The writers spend considerable wordage discussing problems with flange connectors. Perhaps they should be reminded that the flange connector devices were selected and installed by the DT fabricator, whom they represent in one way



Fig. B: Photo from p. B-3 of Reference 19. The original caption states: “Load Collapse At 3 Min 55 Sec After Fire Exposure Ended”

or another. The slug material and welding procedures were specified by the fabricator, or at least they should have been.

Overload testing

Related to the writers’ considerable wordage on overload and comparisons to “extensive testing,” it appears there is a serious disconnect. Test reports authored by one of the writers give results indicating a capacity 3.7 times greater than the service load. Because the DT flange self-weight/dead load part of the service load never changes, it could also be said the test capacity exceeded the required live load by 7.75 times (that is, a failure service load of 310 psf). Yet, most of the writers’ discussion is focused on an overload exceeding the code minimum uniform load of 40 psf and a jack load of 3000 lb.²⁰⁻²²

The “extensive testing” does not appear to represent behavior over time, as tests on steel-reinforced flanges do. Considering the comments at the end of the writers’ discussion, it is fairly obvious that recovery vehicles routinely enter most parking structures, both precast and cast-in-place. Yet we know of no reported flange or slab collapse due to recovery vehicle traffic of any parking structures reinforced with steel in accordance with the ACI 318 Code.²⁰⁻²²

The second level of Structure B described in our article had flanges reinforced with WWR. That level experienced the

same traffic pattern, including recovery vehicles, as the other levels of the structure. While the second level of the structure exhibited no flange distress or collapse issues, the same cannot be said for the flanges reinforced with CFRP.

—William L. Gamble, Gordon H. Reigstad, and Jason Reigstad

References

1. Lunn, D.; Lucier, G.; Rizkalla, S.; Cleland, N.; and Gleich, H., "New Generation of Precast Concrete Double Tees Reinforced with Carbon-Fiber Reinforced Polymer Grid," *PCI Journal*, V. 60, No. 4, July-Aug. 2015, pp. 37-48.
2. Gamble, W.L., Discussion of "New Generation of Precast Concrete Double Tees Reinforced with Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Grid," *PCI Journal*, V. 62, No. 1, Jan.-Feb. 2017, p. 90.
3. Gamble, W.L.; Reigstad, G.H.; and Reigstad, J., "Brittle Failures in Precast Parking Structures," *Concrete International*, V. 41, No. 9, Sept. 2019, pp. 32-39.
4. "Code of Ethics for Engineers," National Society of Professional Engineers, Alexandria, VA, www.nspe.org/resources/ethics/code-ethics. Accessed Aug. 31, 2020.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.
6. ACI Committee 440, "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (ACI 440R-07)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 100 pp.
7. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 pp.
8. Wagenbach, C.; Huevel, S.; Coleclasure, D.; Broadway, A.; and Harmon, T., "Tests of Double Tee Flanges Reinforced with C-GRID Subjected to Concentrated Loading," AltusGroup Technical Committee Report No. 7.1, 14 pp.*
9. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-06)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 44 pp.
10. "C25 – \emptyset x 2.3, Carbon Fiber Reinforcing Grids for Concrete Structures," C-GRID® Reinforced, Technical Data Sheet, Chomarat North America, Anderson, NC, Apr. 2010, 1 pp., <https://pdf.directindustry.com/pdf/chomarat/c-grid-c25-ox23/124027-524319.html>.
11. "C50 – 1.8 x 1.6, Carbon Fiber Reinforcing Grids for Concrete Structures," C-GRID® Reinforced, Technical Data Sheet, Chomarat North America, Anderson, NC, Apr. 2010, 1 pp., <https://pdf.directindustry.com/pdf/chomarat/c-grid-c50-ox40/124027-524345.html>.
12. "C50 – \emptyset x 2.7, Carbon Fiber Reinforcing Grids for Concrete Structures," C-GRID® Reinforced, Technical Data Sheet, Chomarat North America, Anderson, NC, Apr. 2010, 1 pp., <https://pdf.directindustry.com/pdf/chomarat/c-grid-c50-ox27/124027-524341.html>.
13. "Tribal Casino Gaming Enterprise v. W.G. Yates & Sons Construction Company, et al.," Case No. 01-16-0000-4761, Arbitration, Day 12 Hearing, Queen City Court Reporting, Oct. 26, 2017, pp. 177-224.*
14. Harmon, T., "Fatigue Strength of C-GRID Used as Flexural Reinforcement in Concrete Structures," AltusGroup Technical Committee Report No. 3.7, Mar. 2006, 13 pp.*
15. "PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete (MNL-120-17)," eighth edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2017, 886 pp.
16. "ASCE/SEI 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, 2017, 690 pp.
17. "Tribal Casino Gaming Enterprise v. W.G. Yates & Sons Construction Company, et al.," Case No. 01-16-0000-4761, Arbitration, Day 5 Hearing, Queen City Court Reporting, Oct. 17, 2017, pp. 169-231.*
18. Joint ACI-TMS Committee 216, "Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies (ACI 216.1-07/TMS-0216-07)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 28 pp.
19. Luna, M., and Janssens, M.L., "Fire Performance Evaluation of AltusGroup, Inc.'s Loaded Double Tee Floor/Ceiling System Tested in Accordance with ASTM E119-00, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials," final report, SwRI® Project No. 01.10550.01.001b, Southwest Research Institute®, San Antonio, TX, Mar. 2005, 44 pp.*
20. Lunn, D.; Lucier, G.; and Rizkalla, S., "Strength of Uncracked and Cracked Double-Tees Subjected to Uniform Load," Technical Report No. IS-13-08, Constructed Facilities Laboratory, North Carolina State University, Raleigh, NC, July 30, 2013, 49 pp.*
21. Lucier, G.; McEntire, J.; and Rizkalla, S., "Concentrated Load Test of Precast Concrete Double-Tee Flanges Reinforced with CFRP Grid," Technical Report No. IS-12-20, Constructed Facilities Laboratory, North Carolina State University, Raleigh, NC, June 2013, 18 pp.*
22. Lucier, G.; Walter, C.; Sumner, E.; and Rizkalla, S., "Full-Scale Testing of Prestressed Double-Tees Reinforced with CFRP Grid," Technical Report No. IS-08-02, Constructed Facilities Laboratory, North Carolina State University, Raleigh, NC, July 2008, 45 pp.*

*These references can be found on the Nomadic Engineer BLOG, <http://thenomadicengineer.org/blog>.

Note: Additional information on the ASTM standards discussed in this article can be found at www.astm.org.

Selected for reader interest by the editors.

Sign up for Concrete SmartBrief

Created by SmartBrief in partnership with ACI, Concrete SmartBrief provides a daily e-mail snapshot of the concrete industry with news from leading global sources. Summaries of what matters to you, written by expert editors, to save you time and keep you informed and prepared.

Welcome to Concrete SmartBrief; sign up at:

www.smartbrief.com/ACI

Sobre “Fallas Frágiles en Estructuras prefabricadas en Estacionamiento”

Una carta al editor y cierre de los autores

Por Ned M. Cleland, Sami H. Rizkalla, y Mark E. Patton

Ned M. Cleland y Sami H. Rizkalla fueron contratados como testigos expertos por el subcontratista de prefabricados que fabricó y erigió elementos estructurales prefabricados y pretensados en los garajes de Cherokee, Carolina del Norte. Ellos testificaron en el procedimiento de arbitraje al que se hace referencia en este documento y han sido contratados como testigos expertos con respecto a la tercera estructura referenciada por el prefabricante y el ingeniero especializado en prefabricados, respectivamente. Mark E. Patton fue contratado como testigo *experto por el pre-presentador con respecto a la tercera estructura referenciada*

Esta es una respuesta al artículo "Fallas Frágiles en Estructuras Prefabricadas para Estacionamiento " de William L. Gamble, Gordon H. Reigstad y Jason Reigstad (CI, V. 41, No. 9, septiembre de 2019, págs. 32-39). En el artículo de referencia, los autores, todos los cuales tienen un conflicto de intereses significativo que no revelaron, apuntan al uso de una malla de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP "carbon-fiber-reinforced polymer") como refuerzo de ala primaria en prefabricados de concreto pretensado de doble T. (DT "double-tee") y culpan a la red CFRP por lo que los autores afirman fueron fallas frágiles. Esta caracterización y los comentarios de los autores, aunque son favorables para sus clientes, ignoran los hechos y circunstancias que llevaron a las tres fallas reportadas y distorsionan el historial de resiliencia de los DT reforzados con la red CFRP. En todas las estructuras de estacionamiento conocidas donde los bordes no se han sometido a una sobrecarga regular con vehículos de remolque con sobrepeso y se han construido con conectores de borde-a-borde soldados adecuados, los DT reforzados con malla de CFRP están funcionando adecuadamente.

Concepto y Diseño

Es bien sabido en la industria que las estructuras de estacionamiento representan una de las aplicaciones más exigentes para el concreto armado con respecto a los factores ambientales. Estas estructuras están expuestas a condiciones ambientales severas y están sujetas a una variedad de agentes corrosivos, incluidos los químicos anticongelantes utilizados para despejar las carreteras de las precipitaciones invernales, así como el aire y la humedad cargados de cloruro a lo largo de las costas. El uso de cordones de CFRP como refuerzo primario del borde es un paso hacia estructuras de estacionamiento libres de corrosión. A diferencia del acero, el CFRP utilizado como refuerzo no se corroe. Las fibras de CFRP están disponibles en tamaños y resistencias que varían según la cantidad de fibras de carbono en el hilo o "estopa".

Cuando se utilizan como refuerzo en bordes de estructuras de estacionamiento, estas fibras de CFRP se colocan en una "malla" o "rejilla" con fibra de carbono en la dirección transversal e hilos de fibra de vidrio cruzados en la dirección longitudinal del vástago DT. La resistencia del conjunto como una malla depende del tamaño y el espaciado de los hilos de CFRP en posición y contribuye al mecanismo de resistencia de carga para las cargas aplicadas. Para DT de concreto pretensado, los vástagos debajo del ala están pretensados según los requisitos mínimos de ACI 318-14, Sección 9.6.2.¹ El refuerzo superior solo se requiere en elementos pretensados de tramo simple cuando la tensión en la transferencia excede $6 \sqrt{f'_{ci}}$ en los extremos y $3 \sqrt{f'_{ci}}$ en otros lugares (Tabla 24.5.3.2 en ACI 318-14). El refuerzo de malla electrosoldada convencional utilizado en los bordes DT reconoce la ausencia de un requisito de refuerzo longitudinal en la parte superior de las vigas pretensadas y proporciona un refuerzo transversal para la flexión del borde con alambres más pequeños ampliamente espaciados que se extienden en la dirección longitudinal solo con el propósito de sostener y desarrollar el trabajo. reforzamiento.

Debido a que el CFRP no se puede corroer, se puede aplicar con menos recubrimiento de concreto que el acero y, en consecuencia, se puede diseñar en bordes más delgadas. Las fibras de carbono de alta resistencia utilizadas para las mallas de CFRP son cinco veces más resistentes que el refuerzo de acero convencional. Su espacio reducido y su ubicación cerca de la superficie contribuyen a un comportamiento superior de control de grietas en estructuras de Concreto.

Desarrollo

Las pruebas, la investigación y el análisis exhaustivos de la malla de CFRP como refuerzo por parte de la industria y los académicos demostraron de manera concluyente que los DT reforzados con CFRP son capaces de resistir las combinaciones de carga requeridas por el Código ACI y funcionan mejor que el acero con respecto a la fatiga.

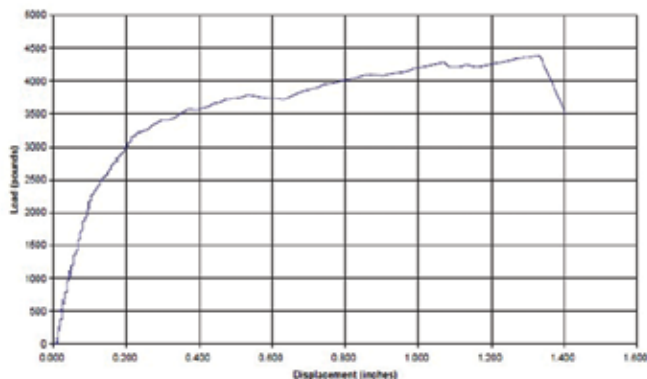


Fig.1: Desplazamiento de carga para losa reforzada con malla de CFRP ensayada a flexión2

Se realizaron pruebas iniciales para caracterizar el material CFRP en sí. Estas pruebas incluyeron evaluaciones de resistencia del CFRP solo y como refuerzo, utilizando miembros estructurales de pequeña y gran escala sujetos a cargas sostenidas, exposición ambiental y cargas de fatiga.

Como parte de esta prueba, los investigadores evaluaron el comportamiento de las secciones reforzadas con múltiples elementos de fibra. Un estudio de distribución de probabilidad, verificado mediante pruebas, mostró que los elementos de concretos reforzados con malla de CFRP no alcanzan un punto de ruptura con una falla repentina, sino que continúan soportando cargas adicionales como se muestra en la Fig.1.

La malla de CFRP como refuerzo es significativamente diferente de las barras individuales de polímero reforzado con fibra (FRP "fiber-reinforced-polymer") debido a la distribución uniforme de la resistencia proporcionada por la malla dentro del elemento, por lo que se trata de manera diferente en el diseño de elementos reforzados con malla de CFRP. Los autores del artículo de referencia insisten en que los DT reforzados con malla de CFRP no están diseñados en función de las recomendaciones de factor ϕ y resistencia incluidas en ACI 440.1R-15.3 Sin embargo, ACI 440.1R no se aplica expresamente a la matriz de fibra de diámetro más pequeño que constituyen las mallas de CFRP (Sección 6.6 en ACI 440R-074). Por lo tanto, las referencias hechas a ACI 440.1R en el artículo de Gamble, Reigstad y Reigstad y su resiliencia en ACI 440.1R para sacar sus conclusiones de bajo diseño no son apropiadas ni relevantes.

Después de la caracterización básica del material, se realizaron pruebas exhaustivas para confirmar que los bordes DT a gran escala cumplirían con los requisitos de resistencia del Código ACI cuando se usaran en estructuras de estacionamiento.

Estas pruebas han incluido bordes reforzados con CFRP sometidas a carga concentrada y carga uniforme en diferentes configuraciones de malla y espesores de borde. Estas pruebas involucraron miembros a gran escala con carga aplicada en diversas ubicaciones a través de los DT e incluyeron pruebas y evaluación de elementos agrietados, así como elementos fabricados con juntas labradas para simular grietas y probadas hasta fallar. Los resultados de la investigación, en un documento técnico publicado, 5 confirmaron que los bordes reforzados con CFRP con una profundidad de concreto de 3-1 / 4 pulgadas o más son capaces de resistir cargas significativamente superiores a los requisitos del código para estructuras de estacionamiento.

Evaluaciones de Resistencia en Uso y Otras Investigaciones

Además de las pruebas de laboratorio y de planta a las que se hace referencia anteriormente, también se han realizado pruebas completas de garantía de resistencia de ACI 318-14, Capítulo 27, en construcciones in situ después de años de uso. La primera de estas pruebas se realizó en la estructura de estacionamiento identificada por los autores del artículo de CI como Estructura A. La prueba se realizó en un DT seleccionado que no fue sometido a una sobrecarga severa o vehículos de rescate debido a su ubicación remota en la estructura. En esta prueba, se eliminaron las conexiones de borde a borde que normalmente actuarían para distribuir la carga concentrada a través de la junta. La carga se aplicó en dos lugares, ambos con grietas preexistentes en el ala. El borde reforzado con CFRP pasó ambas pruebas como voladizo sin la ayuda de la distribución de carga al DT adyacente que normalmente proporcionarían las conexiones de borde a borde.

En la primavera de 2018, se realizó una serie adicional de pruebas en una estructura que había estado en uso durante más de 6 años. Se inspeccionó toda la estructura para mapear las ubicaciones de grietas preexistentes. Se seleccionaron cuatro sitios para las pruebas que representaban la mayor magnitud de fisura existente. La conexión borde-a-borde se dejaron intactas en los lugares de prueba en las partes en voladizo del DT, y los bordes adyacentes se cortaron con sierra y se aplicaron cargas para inducir grietas para garantizar que la mallas de CFRP soportara las cargas de prueba aplicadas cada borde adyacente.

En cada lugar de prueba, los bordes reforzados con C-GRID® pasaron ACI 318, Capítulo 27, pruebas de aseguramiento de resistencia y pruebas de carga cíclica ACI 437.1R-076.

Además, en varias estructuras, se tomaron muestras de núcleos en ubicaciones agrietadas. En cada caso, a excepción de una grieta en la esquina donde la sección de concreto se había desplazado, separado y caído, el CFRP estaba intacto a pesar de la fisuración del concreto.

Hay tres casos de fallas en los bordes que se relacionan con una sobrecarga severa o con problemas únicos en un caso. En las otras estructuras de estacionamiento que no han sido sometidas a abuso repetido más allá de la contemplación del Código o a un diseño de conector de borde defectuoso que magnificó el efecto de la carga de impacto, el sistema continúa brindando un servicio seguro, excepto donde los autores del artículo de CI tienen dueños u operadores asustados. Hay casos en los que el exceso de carga en los bordes agrietados requiere atención y reparación, pero no se trata de fallas frágiles repentinas que se hayan producido sin previo aviso. ACI, el Instituto de Concreto prefabricado / pretensado (PCI) y la Asociación Nacional de Estacionamiento han publicado pautas detalladas (y casi idénticas) para la inspección de elementos estructurales anualmente para detectar condiciones inseguras. Las pautas se aplican a todos los elementos estructurales de la estructura del estacionamiento.

Contenciones Específicas de los Autores

La premisa inicial planteada por los autores del artículo de CI es que existe una sola forma de diseñar el concreto armado: 1) de forma que todas las fallas deben ser dúctiles; y 2) tal que el Fig.1: El desplazamiento de carga para el diseño de malla CFRP se adaptará a cualquier evento impredecible que pueda suceder incluso si supera los requisitos de carga incluidos en el código de construcción legalmente adoptado.

La primera parte de esta premisa es incorrecta por tres razones. Primero, ACI 318 brinda al diseñador un alivio del refuerzo excesivo. En una viga, el refuerzo mínimo puede reducirse siempre que la resistencia sea 1/3 mayor que la requerida por la combinación de carga máxima que rige (Sección 9.6.1.3 en ACI 318-14). En una losa, el refuerzo mínimo solo debe cumplir con los requisitos de temperatura y contracción (Sección 7.6.1.1 en ACI 318-14). (Nota: El artículo de PCI Journal citado por los autores del artículo de CI fue citado fuera de contexto. Describe recomendaciones para el exceso de resistencia en el diseño de bordes CFRP DT).

En segundo lugar, no existe un requisito explícito en ACI 318 de que se proporcione refuerzo en losas reforzadas con poco acero de manera que la resistencia exceda la resistencia al agrietamiento del concreto. Existe un requisito para los miembros pretensados que la resistencia a la flexión exceda de 1.2 Mcr en secciones críticas (Sección 9.6.2.1 en ACI 318-14), pero ese requisito no se aplica al refuerzo transversal de un borde DT, que se trata como una losa de concreto no pretensado unidireccional.

En tercer lugar, como se indicó anteriormente, las pruebas y la experiencia con bordes reforzados con CFRP muestran que la curva de carga-deformación no es lineal a la falla, y el agrietamiento en el borde no conduce a una falla por fragilidad inmediata, como se ilustra en la Fig.1.

Los extensos resultados⁷ de las pruebas demostraron que la resistencia reducida de la losa de concreto reforzada con CFRP (utilizando un factor de reducción de 0,75) excedía 1,33 veces el momento debido a la carga factorizada. La capacidad de servicio del borde, en términos de deflexión, está dentro de las limitaciones permitidas especificadas por las pautas de diseño ACI 318-118 y ACI 440.1R-069, y los DT no se agrietaron bajo la carga de servicio.

Sobre el segundo argumento del artículo, parece que al afirmar que "que la resistencia confiable es igual o superior a la carga máxima probable aplicada", los autores sostienen que las limitaciones del Código no deben ser consideradas. ¿Debería o debe un ingeniero especializado prever usos y cargas más allá de las especificaciones proporcionadas por el equipo de diseño del propietario?

El Código Internacional de Construcción de 2012 (IBC)¹⁰ requiere que una estructura de estacionamiento restringida a vehículos de pasajeros esté diseñada para una carga uniforme de 40 lb/ft² y una sola carga concentrada de 3000 lb en un área de 20 plg² para simular un gato (Nota A, Tabla 1607.1). Además, el IBC de 2012 introdujo disposiciones especiales para estructuras de estacionamiento con vehículos pesados que exigían que la carga de vehículos de pasajeros privados no estuviera destinada a vehículos que superaran una clasificación de peso bruto vehicular (GVWR "gross vehicle weight rating") de 10,000 lb. Si el uso previsto de la estructura de estacionamiento incluye la carga de vehículos pesados, se debe especificar la carga pesada.

Tres Fallas de Bordes Reportadas

En la opinión de consenso de los abajo firmantes, las fallas en la Estructura A y la Estructura B en Cherokee, NC, fueron causadas por la sobrecarga repetida de los DT durante varios años.



Fig.2: Manchas de agua en un borde agrietado en la Estructura B

Los registros de las compañías de camiones de auxilio locales mostraron que los vehículos de remolque con sobrepeso ingresaban y transitaban por las estructuras de estacionamiento cada 3 a 5 días, en promedio. El panel de arbitraje no encontró ningún defecto o deficiencia en los DT reforzados con mallas CFRP. La única falla encontrada por el panel de arbitraje por parte del subcontratista de prefabricados fue no revelar las limitaciones inherentes a los criterios de diseño especificados por Reigstad and Associates como ingeniero de registro, que hacía referencia a la carga uniforme de 40 lb/ft² / carga concentrada de 3000 lb del IBC11 de 2006 al propietario en el momento de entrega. El mismo subcontratista de prefabricados previamente había fabricado y erigido DT para el mismo propietario, diseñado para el IBC anterior a 2003, que requería una carga uniforme de 50 lb/ft². El panel de arbitraje también encontró, sin embargo, que el propietario ignoró las advertencias posteriores sobre vehículos con sobrepeso (incluso los entregados posteriormente por los Reigstads) que en algunos casos fueron transmitidos años antes de las fallas.

En el artículo de CI, los autores describen las fallas en el estacionamiento de la Estructura A y la Estructura B. La falla inmediata en la Estructura A se identificó correctamente como resultado de una sobrecarga del eje 4.5 veces la carga concentrada requerida por el código. No se menciona el patrón de sobrecargas continuas que experimentaron ambas estructuras de estacionamiento antes de las fallas. Además, no se menciona el agrietamiento de larga existencia, evidenciado por las manchas de agua en otra ala agrietada en la Estructura B que se muestra en la Fig.2.

El óxido y la corrosión en las superficies de las conexiones de los bordes en los remanentes de las soldaduras en la ubicación de la segunda falla proporcionan una clara evidencia de que los conectores borde-a-borde se han roto durante mucho tiempo y no se han reparado.

Estas sobrecargas en la Estructura B continuaron permitidas incluso después de la falla en la Estructura A, y las advertencias y directivas explícitas de Reigstad y otros para que dejaran de someter de inmediato las rampas ya dañadas en la Estructura B a estas sobrecargas llevaron directa e inevitablemente a la segunda falla. Un video de vigilancia muestra estos vehículos pesados transitando por las ubicaciones de la falla con y sin vehículos levantados a remolque al menos dos veces en los 3 días anteriores a la segunda falla. Estos hechos no fueron revelados por los autores.

La Figura 3 muestra la condición de la rampa de velocidad donde ocurrió la falla de la Estructura B, mucho antes de la falla. El agrietamiento del borde es evidente, así como el daño visible en la conexión borde-a-borde.

Los autores también especulan sobre la causa de la falla en la estructura de estacionamiento de Vulcan. La evidencia visual

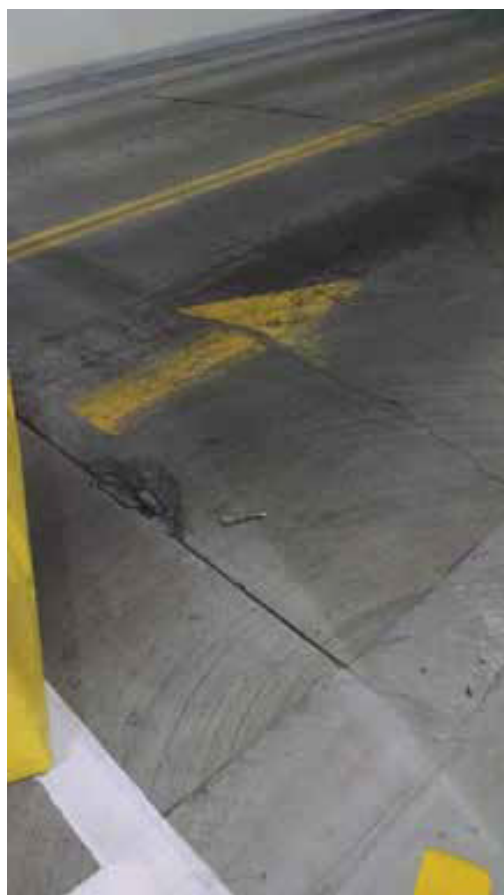


Fig.3: Grietas y daños en la rampa de velocidad en la Estructura B (Nota: esta fotografía muestra una sección diferente de la rampa de velocidad que la ubicación de la falla final, pero la condición representada es ilustrativa).

disponible indica que esto no fue un fallo repentino sin previo aviso. Hay evidencia de manchas de agua y desgaste en la ubicación de la grieta, lo que sugiere que la grieta existía mucho antes de la falla. La extensión de la grieta es mayor de 40 pies, lo que indica que el área de influencia para resistir cargas concentradas es mayor que el ángulo de 45 o 60 grados asumido por los autores.

Respuesta al Análisis de los Autores

Los autores confían en ACI 440.1R, una guía para barras de FRP, para evaluar la resistencia de la malla de CFRP y los factores de reducción de resistencia apropiados para el material de refuerzo. Sin embargo, 440.1R establece que la malla CFRP no está cubierta por el documento, y la investigación muestra que los estándares incluidos en la guía ACI 440.1R no son aplicables. La conclusión de la investigación es diferente para la matriz de múltiples fibras a lo largo del borde. El uso de un factor de reducción de resistencia de 0.75, el mismo que para el comportamiento de corte (Sección 21.2 en ACI 318-14), se ve reforzado por la reciente decisión de la Asociación Estadounidense de Oficiales de Transporte de Carreteras Estatales (AASHTO "American Association of State Highway Transportation Officials") de usar ese valor para CFRP en su especificación de diseño de puentes.¹²

El lado de la carga en la ecuación

El antiguo supuesto de ángulo de influencia de 45 grados ha sido reemplazado por una pendiente más realista de 3:1 en la octava edición del PCA Manual¹³ y en Estructuras de estacionamiento de concreto prefabricado: práctica recomendada para diseño y construcción.¹⁴ Además, se describieron las pruebas de carga de la Estructura A con las conexiones de los bordes retirados y en las secciones agrietadas para demostrar que el diseño del borde cumple con los requisitos del código.

Demanda de Ductilidad

La descripción de la tolerancia por exceso de resistencia se analiza anteriormente. No es un requisito del Código que todo comportamiento del concreto deba resultar en una falla dúctil.

Resiliencia de los Diseños Estándar

La afirmación de que los límites del código no son importantes si algo más pesado pudiera ingresar a la estructura del estacionamiento es refutada por las disposiciones del IBC de 2018.¹⁵ Las disposiciones dejan en claro que, si un vehículo con GVWR superior a 10,000 lb debe ingresar a la estructura, entonces no se deben utilizar los criterios de carga del vehículo de pasajeros. Se ha demostrado mediante pruebas que el borde diseñado con malla de CFRP puede soportar las cargas concentradas y uniformes prescritas por el código como voladizo. Cuando la conexión borde-a-borde se mantienen e intactas, la resistencia de reserva aumenta aún más.

Los eventos de falla muestran que el diseño del borde de CFRP puede soportar sobrecargas repetidas y severas antes de fallar, pero la reserva no puede ser razonablemente ilimitada cuando se somete a sobrecargas repetidas y persistentes, especialmente después de que las fisuras evidentes durante años han advertido del efecto de estas sobrecargas repetidas y persistentes. sobrecargas y tiene conectores de borde-a-borde rotos o dañados.

Aprobaciones Necesarias para nuevos sistemas

Los fabricantes de DT que utilizan CFRP para el refuerzo de bordes no han ocultado este sistema a los propietarios, contratistas, arquitectos o ingenieros. Han promovido activamente el sistema como un medio para evitar el desarrollo de corrosión en las estructuras. En la mayoría de los casos, el diseño detallado de la estructura se delega en el fabricante o en su ingeniero consultor especializado, y luego ese diseño detallado se envía al ingeniero estructural (SER "structural engineer of record") para su revisión y aprobación. El subcontratista de prefabricados y el ingeniero especialista, como subsidiario de un subcontratista, no tienen la relación directa con el funcionario de construcción o autoridad competente que la SER. Si existe alguna duda sobre un diseño delegado conforme a las condiciones de la licencia de construcción, en opinión de estos autores, es responsabilidad de la SER plantear esa cuestión y determinar los pasos necesarios para asegurar la conformidad. Existe una amplia evidencia de pruebas y experiencia para obtener las aprobaciones necesarias.

Conclusión

Los bordes soldados de los DT utilizados en las estructuras de estacionamiento referenciadas se diseñaron de acuerdo con las cargas especificadas por los códigos. La falla se debió a la severa sobrecarga y el uso de vehículos de rescate, además de la falla de las conexiones de los bordes por corrosión y falta de mantenimiento. actualmente, el Código no requiere que todas las losas no pre-esforzadas cumplan con la capacidad de agrietamiento con el diseño de poco acero, y hacerlo aumentaría drásticamente el área de refuerzo en la mayoría de las losas. La práctica general no requiere que cada inserto, accesorio o característica no mencionada en el código esté sujeto a una revisión obligatoria por parte del funcionario drásticamente el área de refuerzo en la mayoría de las losas.

La práctica general no requiere que cada inserto, accesorio o característica no mencionada en el código esté sujeto a una revisión obligatoria por parte del funcionario de la construcción cuando el SER puede tomar una determinación sobre si dicha presentación está justificada o no. Aunque ACI 440.1R actualmente excluye las mallas de CFRP, el Comité 440 de ACI, Refuerzo de polímero reforzado con fibra, ha informado que hay un comité que está trabajando activamente para establecer estándares que aborden las propiedades únicas de las mallas de CFRP. El Código ya incluye disposiciones para vehículos pesados en estructuras de estacionamiento, y la SER y el equipo de diseño del propietario deben informar al cliente sobre estas limitaciones y aumentar el alcance y el costo de la instalación si se desea una carga más pesada.

Referencias

1. Comité 318 de ACI, “Requisitos del código de construcción para concreto estructural (ACI 318-14) y comentario (ACI 318R-14)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 págs.
2. Wagenbach, C.; Huevel, S.; Colclasure, D.; Broadway, A.; y Harmon, T., “Pruebas de bordes en doble T reforzadas con C-GRID sometidas a carga concentrada”, Informe del Comité Técnico de AltusGroup No. 7.1, 14 págs.
3. Comité ACI 440, “Guía para el diseño y construcción de concreto estructural reforzado con barras de polímero reforzado con fibra (FRP) (ACI 440.1R-15)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 83 págs.
4. Comité ACI 440, “Informe sobre el refuerzo de polímeros reforzados con fibra (FRP) para estructuras de concreto (ACI 440R-07)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 100 págs.
5. Botros, A.W.; Lucier, G.; Rizkalla, S.H.; y Gleich, H., “Comportamiento de Bordos de Doble T Libres y Conectadas Reforzadas con FRP”, PCI Journal, V. 61, No. 5, septiembre-octubre. 2016, págs. 49-68.
6. Comité ACI 437, “Pruebas de carga de estructuras de concreto: métodos, magnitud, protocolos y criterios de aceptación (ACI 437.1R-07)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 38 págs.
7. Lunn, D.; Lucier, G.; Rizkalla, S.; Cleland, N.; y Gleich, H., “Nueva generación de dobles T de concreto prefabricado reforzadas con malla de polímero reforzado con fibra de carbono”, PCI Journal, V. 60, No. 4, julio-agosto. 2015, págs. 37-48.
8. Comité ACI 318, “Requisitos del código de construcción para concreto estructural (ACI 318-11) y comentario”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 503 págs.
9. Comité ACI 440, “Guía para el diseño y construcción de concreto estructural reforzado con barras de FRP (ACI 440.1R-06)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 44 págs.
10. “2012 International Building Code (IBC)”, primera edición, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2011, 694 págs.
11. “2006 International Building Code (IBC)”, primera edición, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2006, 666 págs.
12. “Especificaciones de la guía para el diseño de vigas de puentes de concreto pretensados con sistemas de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP)”, primera edición, Asociación Estadounidense de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte, Washington, DC, 2018, 71 págs.
13. “Manual de diseño de PCI: concreto prefabricado y pretensado (MNL-120-17)”, octava edición, Instituto de concreto prefabricado / pretensado, Chicago, IL, 2017, 886 págs.
14. “Estructuras de estacionamiento de concreto prefabricado pretensado: práctica recomendada para el diseño y la construcción (MNL-129-15)”, tercera edición, Instituto de concreto prefabricado / pretensado, Chicago, IL, 2015, 160 págs.
15. “2018 International Building Code (IBC)”, primera edición, International Code Council, Inc., Washington, DC, 2017, 726 págs.

Seleccionado para el interés del lector por los editores después de la evaluación y recomendación de un experto independiente

Ned M. Cleland, FACI, es propietario y director de Blue Ridge Design, Inc., Winchester, VA. Es un miembro anterior del Comité ACI 318, Código de construcción de concreto estructural, y se desempeña como consultor de AltusGroup, Inc., Greenville, SC.

Sami H. Rizkalla, FACI, es profesor emérito distinguido de ingeniería civil y construcción en la Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, NC; ex Director del Laboratorio de Instalaciones Construidas de dicha institución; ex presidente del Comité ACI 440, Refuerzo de polímero reforzado con fibra; y consultor de AltusGroup, Inc. Fue el investigador principal de varios estudios sobre la cuadrícula CFRP y reforzado CFRP de doble T.

Mark E. Patton, miembro de ACI, es propietario de Mark E. Patton, Ltd Materials Consultants y miembro del Precast / Prestressed Concrete Institute, la American Society of Civil Engineers y ASTM International. Fue investigador principal de estudios sobre dobles-T reforzadas con malla CFRP y paneles arquitectónicos para un elemento de AltusGroup, Inc.

Cierre de los Autores

Para citar una discusión anterior de Lunn et al., 1 “Los autores de 'Nueva generación de doble T prefabricados de concreto reforzados con malla de polímero reforzado con fibra de carbono' todavía no lo entienden” 2.

La declaración de apertura de los escritores con respecto a nuestro artículo³ es extraña. Nuestra participación en los proyectos temáticos se señaló en la primera página del artículo original de Concrete International. También es extraña la falta de información completa por parte de los escritores sobre las mallas de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) que se utiliza en el concreto prefabricado. Durante los últimos 10 años, dos de los tres escritores han sido consultores pagados de AltusGroup, Inc., Greenville, SC, que es una organización comercial que controla el material de la malla CFRP llamado C-GRID®. Parece que los escritores son defensores y no expertos.

Los ingenieros solo defenderán la seguridad, la salud y el bienestar del público (sección I. Cánones fundamentales en la referencia 4). Bajo ese deber primordial, todos los ingenieros estructurales deben exigir que las estructuras seguras fallen en el momento de una sobrecarga original. ¿Las estructuras descritas se considerarían alguna vez estructuras seguras con las afirmaciones de los escritores? Un día, una estructura ve una carga mayor que el código prescrito. Si más tarde (ya sea un día, una semana, un mes, un año o 5 años en adelante), esa misma estructura falla con una carga menor que la prescrita por el código, es nuestra opinión que este tipo de estructura nunca se aprobaría y sería ser considerado peligroso. Parece que los defensores de este producto claramente no entendieron ni comprenden los fundamentos del diseño estructural seguro.

Según nuestro conocimiento, las estructuras de estacionamiento cero se han construido con bordes prefabricadas de doble T (DT) reforzadas con malla de CFRP desde la primera falla, y el producto de malla de CFRP para bordes DT ya no se comercializa para este uso. Al menos uno de los escritores estuvo involucrado de cerca con lo siguiente: Varias estructuras de estacionamiento en la Commonwealth de Virginia construidas con bordes DT reforzadas con malla CFRP

se están modificando con un sistema de ranuras reforzado / con lechada de acero inoxidable. Este sistema se está instalando, sin costo para el propietario, luego de las discusiones entre los contratistas originales, los propietarios de la estructura y los consultores estructurales de los propietarios. El concepto del sistema de refuerzo con conexiones de placas fue diseñado por un consultor estructural independiente contratado por los contratistas de estructuras de estacionamiento, y fue revisado y aprobado por la División de Ingeniería y Edificios del Commonwealth.

Al menos uno de los escritores también es consciente de que otras estructuras de estacionamiento reforzadas con malla CFRP se han modificado, están en proceso de modificación o pronto se modificarán de manera similar sin costo para el propietario: tres en Charlotte, NC; uno en Pikeville, KY; uno en California, PA; y uno en Atlanta, GA. No participamos en decisiones de modificación distintas de las dos primeras discutidas en el artículo original.

Código ACI 318

En nuestra opinión, es más que probable que las continuas referencias de los escritores al Código ACI 318 sea lo que metió a los escritores en este lío. El acero y el refuerzo de carbono no tienen propiedades materiales similares; este hecho es una verdad aceptada por todos los expertos de la industria. Todas las afirmaciones de los escritores que hacen referencia a ACI 318 están completamente mal utilizadas. ACI 318-14, Disposición 20.1.1,⁵ establece:

“Este capítulo se aplicará al refuerzo de acero y regirá (a) hasta (c):

- (a) Propiedades del material
- (b) Propiedades que se utilizarán para el diseño
- (c) Requisitos de durabilidad, incluidos los requisitos mínimos de cobertura especificados”.

La disposición de comentario R20.1.1 también establece: “El refuerzo de polímero reforzado con fibra (FRP) no se aborda en este Código. El Comité ACI 440⁶ ha desarrollado pautas para el uso de refuerzo de FRP (ACI 440.1R y 440.2R)”. Por lo tanto, el código ACI 318 no se utilizará para FRP, que incluye la cuadrícula CFRP.

La selección continua de los escritores con respecto a las referencias a los estándares ACI 318 demuestra una falta total de comprensión fundamental de las propiedades de los materiales. El concreto reforzado con acero se utilizó mucho antes de que se considerara siquiera el Código ACI 318; Todo el Código ACI 318 fue y está escrito para concreto reforzado con acero debido a su historial de desempeño, la disponibilidad de muchos miles de pruebas y modelos confiables para análisis.

Las recomendaciones de los documentos del Comité ACI 440 son claramente diferentes debido a la naturaleza frágil del refuerzo de FRP / CFRP. Por ejemplo, ACI 440R-076 no permite al diseñador un alivio del refuerzo excesivo.

Para citar la respuesta de dos de los escritores de una discusión de Lunn et al.,¹ "Actualmente, ACI 318-14 no considera el diseño de miembros de concreto reforzado utilizando material de polímero reforzado con fibra (FRP) y sus propiedades únicas". Lunn et al.¹ también afirma: "Sin embargo, se cree que el refuerzo de la red de CFRP tiene una distribución uniforme del refuerzo y la falla de una fibra no resultará en una falla global". Hasta donde sabemos, esta "creencia" se ha establecido sin verificar datos. Si los datos existen, deberían haber sido presentados.

Basta con leer Lunn et al.,¹ con lo que los escritores no pueden afirmar que no están familiarizados, para entender "... lo que los autores afirman que fueron fallas frágiles". Los bordes en las muestras de prueba descritas en Lunn et al.¹ eran aparentemente idénticas a las de una de las estructuras de estacionamiento en el complejo Harrah's Cherokee Resort (Estructura A en nuestro artículo). En esas pruebas, los bordes fallaron en el primer agrietamiento, con bordes enteros cayendo completamente libres de los miembros de soporte. Este es el mismo modo de falla que se observaría en el concreto no reforzado. Los elementos de concreto no reforzado en flexión, que no sean algunas losas a nivel, no están permitidos bajo ningún Código ACI reciente; consulte ACI 318-19, Disposición 14.1.3.7

Hasta donde sabemos, nunca se ha observado una falla similar en un bordo reforzado con acero. Se pueden encontrar casos de fallas locales en las que algunos cables en refuerzo de malla electrosoldada (WWR- welded-wire reinforcement) se fracturó y cayeron pequeñas áreas de ala, pero no cayó ninguna ala completa. Las estructuras de estacionamiento del complejo turístico reemplazaron una estructura anterior que tenía refuerzo de acero (WWR) en los bordes DT. Esa estructura sirvió durante aproximadamente 9 años bajo las mismas condiciones de carga que las estructuras con refuerzo de borde de CFRP, sin fallas ni averías graves.

Figura 1

Basado en el título de la Fig. 1 de la respuesta de los escritores a nuestro artículo (Fig. 12 en Wagenbach et al.⁸), la figura muestra una curva de carga-desplazamiento para losa reforzada con malla CFRP ensayada en flexión. Sin embargo, el título original de esa figura dice: "PBM 12 'doble T – Carga vs desplazamiento: carga hidráulica, C11000 @ 1.0 plg. Cubierta".⁸

El informe describe las pruebas de dos miembros DT con bordes de 2.5 plg. de espesor. Uno tenía fibra de CFRP C11000 con una cobertura de 1,0 pulgadas y una cobertura de 0,5 pulgadas en las dos mitades del elemento. El otro tenía fibra C5500 con las mismas dos cubiertas. No se proporciona el espaciado de las fibras y no se describe el CFRP C11000. Según otros informes, la cadena C5500 ahora está etiquetada como C50, la cadena utilizada en las dos estructuras del complejo. El C11000 es presumiblemente el doble del área del C5500, pero eso es especulación. La carga fue carga concentrada única aplicada cerca del borde de un borde, alejada de los extremos de la muestra. La foto del área de falla muestra claramente una falla principalmente por cortante.

Ductilidad

Contrariamente a algunas afirmaciones en la respuesta de los escritores a nuestro artículo, existe una expectativa general de cierta ductilidad en todos los elementos de flexión de concreto armado y pretensado. Los requisitos mínimos de refuerzo, aunque no siempre son adecuados para losas en el actual Código ACI 318, proporcionan una de las comprobaciones. Si se rastrea el origen de los requisitos mínimos de refuerzo de la losa, que han existido desde al menos 1936, se encontrará que este refuerzo condujo a que la capacidad de momento nominal excediera el momento de fisuración por un pequeño margen hasta que los concretos fueran algo más fuertes que aproximadamente 4500 psi de resistencia a la compresión entró en uso general. Hasta donde sabemos, nunca se realizaron comprobaciones del refuerzo mínimo en los bordes reforzados con CFRP. Una oración en la Introducción de ACI 440.1R-069 dice: "Los procedimientos de diseño deben tener en cuenta la falta de ductilidad en los miembros estructurales de concreto reforzados con barras de FRP". La misma advertencia debe aplicarse al refuerzo de malla CFRP. También se incluye una advertencia en las hojas de datos técnicos de C-GRID: "Nota de uso de la aplicación: C-GRID® sigue siendo un material relativamente nuevo sin un historial de rendimiento extenso de los materiales de construcción tradicionales. Las propiedades informadas son valores promedio, no valores de diseño. Las estructuras y aplicaciones que utilizan C-GRID® deben diseñarse utilizando factores de seguridad apropiados o factores de reducción de carga y resistencia. Todas las aplicaciones que utilizan C-GRID®, incluidas las estructuras críticas de seguridad vital y con clasificación contra incendios, deben ser diseñadas y revisadas por un ingeniero autorizado con experiencia en material FRP". 10-12

ACI 318-19 requiere que la deformación por tensión en la capa extrema de refuerzo de acero iguale o exceda la deformación de fluencia +0.003 si ϕ se toma 0.9 en el cálculo de Mu. Los valores más pequeños de deformación del acero conducen a valores reducidos de ϕ en vigas y columnas. Este es un requisito muy claro para la ductilidad medible.

ACI 440.1R-069 estaba vigente cuando se diseñaron las estructuras de estacionamiento del complejo. Los escritores descartan esto como no relevante para el refuerzo de CFRP tipo malla. Esto sería comparable a afirmar que los principios generales de diseño del concreto armado no se aplican a losas con WWR porque hay varios alambres estrechamente espaciados en lugar de barras lejanas más grandes. La principal diferencia que es evidente entre los alambres de la malla de CFRP y la barra de FRP habitual es que los alambres de la malla de CFRP son muy suaves, mientras que las barras de FRP a menudo tienen rugosidad superficial significativa y, por tanto, mejor capacidad de unión. ACI 440.1R proporcionó una guía general, y afirmamos que puede ser ignorado bajo su propio riesgo. En al menos dos casos, coeficientes dados en ACI 440.1R que están relacionados con el cálculo de la capacidad de momento confiable fueron reemplazados por valores mayores. ACI 440.1R no parece excluir explícitamente mallas de CFRP. Una descripción física de alambre de una malla CFRP coincide con la definición de una "barra, FRP" contenida en ACI 440.1R. No hay restricciones de tamaño de barra, ni existe un requisito para superficies rugosas.

Los escritores descartan la falla de los dos bordes en las estructuras de estacionamiento del complejo turístico como debido enteramente a las sobrecargas causadas por las grúas. Sea como fuere, no se conocen fallas de los bordes DT reforzadas con acero en las que cayeron bordes enteros, como sucedió en ambas estructuras del complejo. Con factores de ductilidad y seguridad, las grúas que ingresan a las estructuras de estacionamiento no están causando fallas en todo el país. Los escritores afirman que los "registros" indican que los vehículos de remolque con sobrepeso ingresaron a las estructuras de estacionamiento en el Harrah's Cherokee Resort en promedio cada 3 a 5 días. Esa afirmación es simplemente falsa. El testimonio bajo juramento del propietario de la empresa con los únicos "registros" de las empresas de demolición locales muestra que una grúa de 11,400 libras ingresó a las estructuras de estacionamiento en el resort un total de nueve veces en todo 2014.¹³

Si se toman las capacidades de momento de falla dadas en Lunn et al.¹ y los factores de distribución de carga utilizados por los escritores, la grúa en cuestión no debería haber causado la primera falla.

La sobrecarga de la grúa no se puede aplicar al Vulcan estructura de estacionamiento (Estructura C en nuestro artículo). El propietario cree que ninguna grúa estuvo nunca en la estructura. Estamos de acuerdo que había grietas preexistentes, incluida al menos una en un video que muestra la falla. La falla ocurrió bajo un minivan que probablemente tenía una carga en el eje delantero de aproximadamente 3,000 lb, o cargas de dos ruedas de aproximadamente 1,500 lb, cada una con una separación de aproximadamente 5 pies. El CFRP resistente a la corrosión en la sección agrietada claramente no podía proporcionar suficiente resistencia para una carga que, los escritores seguramente deben estar de acuerdo, era menos que cualquier diseño razonable de carga. Gran parte del borde cayó, demostrando un "Descompensación", que se ha afirmado que es imposible en Lunn et al.¹

CFRP vs Acero de Refuerzo

Los escritores afirman un rendimiento de fatiga superior de CFRP en relación con el acero, pero eso se basa en muy pocos datos. Estamos consciente de una publicación de Harmon¹⁴ donde fibras, algo similar a los de las estructuras del complejo, fueron sometido a pruebas de fatiga. Las fibras individuales se probaron en el aire, y se ensayaron elementos de losa con refuerzo de malla de CFRP. La descripción del material es: "Se probaron dos tipos de C-GRID, C5500-AX1 en la dirección de deformación y C5500-EX1 en la dirección de relleno".¹⁴ La designación actual de C5500 es C50, pero un "*" en la tabla que describe el equivalente de C5500-EX1 en ese momento conduce a: "*" Estas mallas se utilizan típicamente para reforzar productos de doble T e incluyen fibra de vidrio longitudinales de sacrificio espaciados entre las fibras de carbono".¹⁴ Los alambres de "deformación" son los longitudinales en un rollo de material de malla y los alambres de "relleno" son transversales al rollo. Una foto de una muestra de prueba de tensión muestra alambres de CFRP en ambas direcciones, por lo que aparentemente es del material C5500-AX1. La cuadrícula en las estructuras del complejo tenía CFRP como refuerzo en la dirección del ala (relleno) y áreas pequeñas de GFRP en la dirección longitudinal del tramo (deformación). Harmon¹⁴ incluye una tabla que enumera 25 pruebas de fatiga de cada tipo de material de alambre descubierto. También

enumera seis pruebas de fatiga de muestras de losas de 3.25 plg de espesor y nueve de losas de 2.0 plg de espesor. Ninguno de estos números coincide con el número de puntos de datos que se muestran en los gráficos. Ninguna prueba superó el millón de ciclos, mientras que el doble de ese número parece ser el mínimo requerido para comprender las muestras de fatiga del acero. Además, no se dieron las cargas aplicadas durante la prueba. Los resultados se informaron en términos de porcentajes de la resistencia promedio de algunas muestras ensayadas estáticamente, generalmente con una dispersión significativa. Por tanto, no es posible realizar una evaluación independiente de los resultados de la prueba en términos de tensiones calculadas.

Distribución de carga

Los escritores afirman que la distribución de carga 3I dada por la octava edición del PCI Manual de diseño¹⁵ es razonable. Esto se basa en hechos que no conocemos. Las pruebas de bordes reforzados con acero bajo cargas únicas concentradas conducen a patrones de grietas que se extienden a aproximadamente 60 grados (aproximadamente 1,75l) — considerablemente menos. Un análisis elástico sugiere que una extensión de 45 grados (1l) es apropiada. Esta carga representa un monociclo, no los vehículos de cuatro ruedas comunes en las estructuras de estacionamiento. En la extensión de 3l, el ancho en un borde típico es suficiente para contener al menos cargas de cuatro y quizás seis ruedas espaciadas a 5, 3, 5, 3 y 5 pies. El título de ASCE 7-16,¹⁶ la fuente de la carga de 3-kip, comienza como “Cargas Mínimas de Diseño...” [énfasis agregado] con una clara implicación de que se supone que el diseñador debe pensar en lo que sucede en la estructura bajo consideración. El comentario de ASCE 7 menciona un vehículo de 10,000lb, que obviamente podría aplicar cuatro cargas concentradas de 2,500 lb cada una, o quizás dos en algún lugar en el rango de 2,500 a 3,000 lb cada una. En un total no sigue, el comentario utiliza este vehículo para justificar que la carga única de 3,000 lb se incremente desde algún valor anterior más bajo. Los elementos del comité responsable de la norma aparentemente desconocen los vehículos de cuatro ruedas o que a menudo aparecen uno al lado del otro. Consulte la Fig. A para ver una disposición hipotética pero razonable de vehículos en una estructura de estacionamiento de 60 pies y estacionamiento a 90 grados. Uno puede imaginar fácilmente una situación con cargas de ocho ruedas en la línea de unión entre bordes adyacentes.

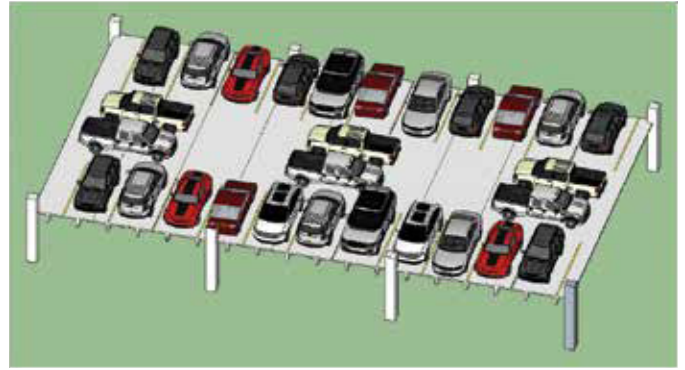


Fig. A: Esquema de vehículos estacionados, entrando y saliendo de una estructura de estacionamiento

cuadrícula de CFRP debería haberse presentado al funcionario de la construcción para su revisión. Ese funcionario de la construcción también testificó, después de estudiar el producto CRFP, que lo habría rechazado.¹⁷

Resistente al fuego

Se requiere una resistencia al fuego específica en algunas estructuras, incluida la Estructura B del estacionamiento del complejo. Una prueba de incendio estándar tiene tres criterios de falla para las losas:

- (1) El aumento de temperatura en el lado no expuesto no puede exceder un promedio de 250 °F, o 325 °F en cualquier punto, al final del tiempo requerido;
- (2) Sin falla estructural; y
- (3) Sin transmisión de llamas o gases calientes a través del miembro.

En muchas estructuras reforzadas con acero, el primer criterio rige y a menudo establece el espesor mínimo de la losa. El tercero casi nunca es un factor en las estructuras de concreto armado. La Estructura B del estacionamiento del complejo tenía un requisito de resistencia al fuego de 2 horas. Por qué los bordes tenían un grosor de 4.75 plg es un tema de especulación.

Otros habían estudiado la resistencia al fuego, pero se pasó por alto un aspecto importante del comportamiento. La propia fibra de carbono aparentemente es bastante tolerante con las temperaturas alcanzadas. Sin embargo, el epóxido que une las fibras individuales en una fibra es mucho menos tolerante al calor, como se indica en el siguiente párrafo. La primera oración de la Sección 3.4 de ACI 440.1R-06 dice: "No se recomienda el uso de refuerzo de FRP para estructuras en las que la resistencia al fuego es esencial para mantener la integridad estructural".

Tabla 1:**Temperaturas en bordes DT a nivel de CFRP**

Borde espesor, plg.	Cubierta de la fibra de CFRP, plg.	Material del Concreto	Temperatura, en la fibra CFRP, °F		Tiempo hasta 200 °F en la fibra de CFRP, minuto:a
			Después de 2 horas	Después de 1 hora	
4.75	4.0	Semi- ligero	250	—	90
3.875	3.125	Semi- ligero	320	—	55
3.5	2.75	Normal, Caliza	—	300	30

ASTM A882 / A882M, "Especificación estándar para fibras de pretensado de siete alambres recubiertas con epóxido", tiene una prueba que involucra la temperatura contra la capacidad de unión, y existen varios requisitos y advertencias sobre no comenzar la prueba si la temperatura de la muestra es superior a 150 °F. Parece que se espera que la falla de unión se alcance antes de que la temperatura sea de 190 °F. Una nota en esta especificación dice:

"Nota 1 - A temperaturas superiores a 165 °F [74 °C], el epóxido actualmente disponible comienza a ablandarse y pierde su capacidad de transferir pretensado de la fibra al concreto por adherencia. A 200 °F [93 °C] prácticamente se perderá toda la capacidad de transferencia".

La temperatura de 200 °F se alcanzará en la hebra de CFRP en mucho menos de 1 hora para el borde de 3,5 plg y menos de 2 horas para el borde de 4,75 plg. Esta observación se basa en los gráficos de ACI 216.1-07 / TMS-0216-07, 18 que estaban vigentes en el momento en que se diseñaron estas estructuras. La Tabla 1 tiene más información, incluido un tercer caso del que tenemos conocimiento. Los números son aproximados ya que se leyeron en gráficos, pero ilustran claramente el problema. Ninguna de estas temperaturas sería problemática para el refuerzo de acero.

Una vez que el epóxido alcanza aproximadamente 200 °F, pierde casi toda su resistencia y la malla de CFRP pierde toda la capacidad de unión. El único anclaje disponible lo proporcionan los ganchos en los extremos de las mallas. La situación estructural se vuelve entonces comparable a un miembro postensado no adherido con tendones en conductos sin fricción. En tales elementos, tiende a formarse una sola grieta grande en el punto de momento máximo, y toda la fibra está sujeta a un esfuerzo de tracción uniforme según sea necesario para el equilibrio si es capaz de resistir la fuerza requerida. La foto en la Fig. B muestra el estado colapsado final de una muestra representativa de bordes DT con refuerzo de malla de CFRP probado contra fuego según ASTM E119, "Métodos de prueba estándar para pruebas de fuego de materiales y construcción de edificios".

La geometría es muy similar a la Estructura A del estacionamiento del complejo turístico en términos de grosor y longitud del ala. El refuerzo era las mismas fibras C50, pero el espacio era de 3,2 plg, mientras que el espacio era de 2,7 plg en las estructuras del complejo. Se probaron dos miembros de una sola T, con los conectores de borde apropiados uniendo los bordes adyacentes. El Concreto estaba compuesto por agregados calizos. Esta es la única prueba de fuego de un elemento reforzado con CFRP que conocemos.

La prueba se describe en la Referencia 19. A los 58 minutos de la prueba, la temperatura en dos termopares excedió el límite de aumento de temperatura de 325 °F en el lado no expuesto de los bordes. La prueba se terminó a los 60 minutos, ya los 63 minutos y 55 segundos, los dos bordes interiores se colapsaron completamente en el horno. Una corrección matemática del tiempo de prueba, basada en el contenido de humedad inicial del concreto, dio como resultado una duración de la prueba de 60 minutos, es decir, 1 hora.

Conectores de brinda

Los escritores gastan bastantes palabras discutiendo problemas con los conectores de borde. Quizás debería recordarse que los dispositivos de conector de borde fueron



Fig. B: Foto de la pág. B-3 de la referencia 19. El título original dice: "Carga colapsada a los 3 minutos y 55 segundos después de que finaliza la exposición al fuego"

seleccionados e instalados por el fabricante de DT, a quien representan de una forma u otra. El material del taco y los procedimientos de soldadura fueron especificados por el fabricante, o al menos deberían haberlo sido.

Prueba de sobrecarga

En relación con la considerable redacción de los escritores sobre la sobrecarga y las comparaciones con las "pruebas exhaustivas", parece que existe una seria desconexión. Los informes de prueba creados por uno de los escritores dan resultados que indican una capacidad 3,7 veces mayor que la carga del servicio. Debido a que la parte del peso propio / carga muerta del borde DT de la carga de servicio nunca cambia, también se podría decir que la capacidad de prueba excedió la carga viva requerida en 7.75 veces (es decir, una carga de servicio de falla de 310 lb/ft²). Sin embargo, la mayor parte de la discusión de los escritores se centra en una sobrecarga que excede la carga uniforme mínima del código de 40 lb/ft² y una carga del gato de 3000 libras. 20-22

Las "pruebas extensivas" no parecen representar el comportamiento a lo largo del tiempo, como lo hacen las pruebas en bordes reforzadas con acero. Teniendo en cuenta los comentarios al final de la discusión de los escritores, es bastante obvio que los vehículos de recuperación ingresan rutinariamente a la mayoría de las estructuras de estacionamiento, tanto prefabricadas como colocadas en el lugar. Sin embargo, no conocemos ningún colapso de borde o losa debido al tráfico de vehículos de recuperación de cualquier estructura de estacionamiento reforzada con acero de acuerdo con el Código ACI 318.²⁰⁻²²

El segundo nivel de la Estructura B descrito en nuestro artículo tenía bordes reforzados con WWR. Ese nivel experimentó el mismo patrón de tráfico, incluidos los vehículos de recuperación, que el otro nivel de la estructura. Mientras que el segundo nivel de la estructura no exhibió problemas de falla o colapso de la borde, el mismo no se puede decir de los bordes reforzados con CFRP.

—William L. Gamble, Gordon H. Reigstad y Jason Reigstad

Referencias

1. Lunn, D.; Lucier, G.; Rizkalla, S.; Cleland, N.; y Gleich, H., "Nueva generación de doble T de concreto prefabricado reforzadas con Malla de polímero reforzado con fibra de carbono", PCI Journal, V. 60, No.4, Julio-agosto 2015, págs. 37-48.

2. Gamble, W.L., Discusión de "Nueva generación de Concreto prefabricado dobles T reforzados con rejilla de polímero reforzado con fibra de carbono," PCI Journal, V.62, No. 1, enero-febrero. 2017, pág. 90.

3. Gamble, W.L.; Reigstad, G.H.; y Reigstad, J., "Fallas frágiles en Estructuras de estacionamiento prefabricadas", Concrete International, V. 41, No. 9, sept. 2019, págs. 32-39.

4. "Código de Ética para Ingenieros", Sociedad Nacional de Profesionales Ingenieros, Alexandria, VA, www.nspe.org/resources/ethics/code-ethics. Último acceso: 31 de agosto de 2020.

5. Comité ACI 318, "Requisitos del código de construcción para Concreto (ACI 318-14) y Comentario (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 págs.

6. Comité ACI 440, "Informe sobre polímeros reforzados con fibra (FRP) Refuerzo para estructuras de concreto (ACI 440R-07)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 100 págs.

7. Comité ACI 318, "Requisitos del código de construcción para Concreto estructural (ACI 318-19) y comentario sobre el código de construcción Requisitos para concreto estructural (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 págs.

8. Wagenbach, C.; Huevel, S.; Colclasure, D.; Broadway, A.; y Harmon, T., "Pruebas de bordes en doble T reforzadas con C-GRID Sometido a carga concentrada", Comité Técnico de AltusGroup Informe No. 7.1, 14 págs. *

9. Comité ACI 440, "Guía para el diseño y construcción de Concreto estructural reforzado con polímero reforzado con fibra (FRP) Barras (ACI 440.1R-06)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 44 págs.

10. "C25 - \emptyset x 2,3, Mallas de refuerzo de fibra de carbono para estructuras de Concreto", C-GRID® reforzado, Ficha técnica, Chomarat Norteamérica, Anderson, NC, abril de 2010, 1 págs., <https://pdf.directindustry.com/pdf/chomarat/c-grid-c25-ox23/124027-524319.html>.

11. "C50 - 1.8 x 1.6, Mallas de refuerzo de fibra de carbono para Estructuras de Concreto", C-GRID® reforzado, ficha técnica, Chomarat Norteamérica, Anderson, NC, abril de 2010, 1 págs., <https://pdf.directindustry.com/pdf/chomarat/c-grid-c50-ox40/124027-524345.html>.

12. "C50 - \emptyset x 2,7, Mallas de refuerzo de fibra de carbono para Estructuras de Concreto", C-GRID® reforzado, Ficha técnica, Chomarat Norteamérica, Anderson, NC, abril de 2010, 1 págs., <https://pdf.directindustry.com/pdf/chomarat/c-grid-c50-ox27/124027-524341.html>.

13. "Tribal Casino Gaming Enterprise v. W.G. Yates & Sons Construction Company, et al.", Caso No. 01-16-0000-4761, Arbitraje, Audiencia del día 12, Informe del Tribunal de Queen City, 26 de octubre de 2017, págs. 177-224. *

14. Harmon, T., "Resistencia a la fatiga de C-GRID utilizada como refuerzo de flexión en estructuras de Concreto", Técnico del Grupo Altus Informe del Comité No. 3.7, marzo de 2006, 13 págs.

15. "PCI Manual de diseño: Prefabricado y Concreto pretensado (MNL-120-17)", octava edición, Concreto prefabricado / pretensado Institute, Chicago, IL, 2017, 886 págs.

16. "ASCE / SEI 7 16: Cargas de diseño mínimas y criterios asociados para edificios y otras estructuras", American Society of Civil Engineers, 2017, 690 págs.

17. "Tribal Casino Gaming Enterprise v. W.G. Yates & Sons Construction Company, et al.", Caso No. 01-16-0000-4761, Arbitraje, Audiencia del día 5, informe del tribunal de Queen City, 17 de octubre de 2017, págs. 169-231. *

18. Comité Conjunto 216 de ACI-TMS, "Requisitos del código para determinar la resistencia al fuego de ensamblajes de construcción de concreto y mampostería (ACI 216.1-07 / TMS 0216-07)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007, 28 págs. *

19. Luna, M., y Janssens, ML, "Evaluación de desempeño contra incendios del sistema de piso / techo en doble T cargado de AltusGroup, Inc. probado de acuerdo con ASTM E119-00, Métodos de prueba estándar para pruebas de fuego de materiales y construcción de edificios", Informe final, Proyecto SwRI® No. 01.10550.01.00b, Southwest Research Institute®, San Antonio, TX, marzo de 2005, 44 págs.*

20. Lunn, D.; Lucier, G.; y Rizkalla, S., "Resistencia de doble T sin fisuras y agrietadas sometidas a carga uniforme", Informe técnico No. IS-13-08, Laboratorio de instalaciones construidas, Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, NC, 30 de julio de 2013, 49 págs.*

21. Lucier, G.; McEntire, J.; y Rizkalla, S., "Prueba de carga concentrada de bordes de doble T de concreto prefabricado reforzadas con malla CFRP", Informe técnico No. IS-12-20, Laboratorio de instalaciones construidas, Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, NC, junio de 2013, 18 págs.*

22. Lucier, G .; Walter, C .; Sumner, E .; y Rizkalla, S., "Prueba a escala completa de doble T pretensados reforzados con malla CFRP", Informe técnico No. IS-08-02, Laboratorio de instalaciones construidas, Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, NC, julio de 2008, 45 págs. *

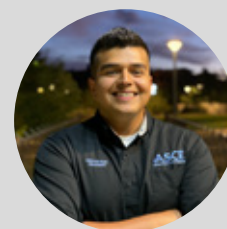
* Estas referencias se pueden encontrar en el BLOG de Nomadic Engineer, <http://thenomadicengineer.org/blog>.

Nota: Información adicional sobre las normas ASTM discutidas en este artículo se puede encontrar en www.astm.org.

Seleccionado para el interés del lector por los editores.

Artículo 1.- Corresponde a la Sección Noroeste de México.

Título: Fallas frágiles en estructuras prefabricadas en estacionamientos.



Traductor: Ing. Cristian Silva



Revisor técnico: Ing. Genaro Salinas