# Composite SCC and 3-D-Printed Concrete Columns

by Johan L. Silfwerbrand

n 2024, the concrete industry marked the 200th anniversary of Joseph Aspdin's patent for portland cement. The methods used to produce concrete have developed successively since then, and much research currently focuses on reducing concrete's climate footprint, primarily by replacing parts of cement with industrial by-products and other alternative binders (supplementary cementitious materials [SCMs]).

In recent decades, new techniques have also been developed to produce concrete. Compaction through vibration, which is a labor-intensive job, can now be omitted through the use of self-consolidating concrete (SCC) or through the application of three-dimensional (3-D) printers. In the research project presented herein, both techniques have been combined in the casting of columns.

Traditionally, concrete columns have been produced by placing concrete into a mold or form made either of wood or steel. While steel molds can be used many times, wooden molds can at best be used two or three times. For either material, building and then removing the formwork takes time and labor, and eventual replacement of the formwork leads to increased material use and transport costs. A new alternative, investigated in this project, is a permanent 3-D-printed concrete (3DPC) form in which a core is cast with SCC.

The 3DPC can serve to protect reinforcement from corrosion and fire. If composite action between the 3DPC and the SCC in the column can be proven, the entire composite cross section can be taken into account for load-carrying capacity, providing further justification for the omission of the expensive and labor-intensive formwork.

One problem with current 3DPC technology is its high cement content due to the small maximum aggregate size required by most printing nozzles. However, if the 3DPC shell can be made thin and its high cement content can be used to provide a dense concrete cover for reinforcement in an SCC core with moderate cement content, the total cement content per composite column volume may be comparatively low, resulting in a durable and sustainable solution.

To study both load-carrying capacity and durability of such columns, tests on six columns and many cores were performed at the KTH Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, in cooperation with Research Institutes of Sweden (RISE) and two Swedish companies, ConcretePrint and Heidelberg Materials Betong Sverige.

### **Previous Research**

Composite columns made of 3DPC forms and SCC cores have been previously investigated by a limited number of researchers.<sup>1-5</sup> References 1 and 2 deal mainly with the architectural and aesthetic possibilities that this technology offers.

Zhu et al.<sup>3</sup> tested 600 mm (24 in.) tall composite and homogeneous 250 mm (10 in.) diameter columns with promising results. Their loading test results indicated that the 25 mm (1 in.) thick 3DPC form contributed to the loadcarrying capacity of the composite column.

Chen et al.<sup>4</sup> tested 630 mm (25 in.) tall composite concrete columns with a square-shaped cross section and a side length of 280 mm (11 in.). The authors disregarded the contribution of the 60 mm (2.4 in.) thick 3DPC form when calculating the load-carrying capacity, but the measured failure loads indicated that the form contributed substantially.

At KTH, two pilot studies were performed prior to the current research project.<sup>6</sup> The aim was to study the possibilities of producing composite columns made of 3DPC forms filled with SCC. In the second pilot study, three 500 mm (20 in.) diameter and 2.4 m (8 ft) tall composite columns were cast. The thickness of the 3DPC form was 50 mm (2 in.). The tests showed that it was possible to produce these composite columns (the pressure exerted by the SCC did not lead to cracking or leakage of the 3DPC form). The promising results from the pilot studies led to a larger research program, which is described in the following section.

## **Research Program**

The research consisted of 15 steps (refer to Table 1) conducted between August 2023 and January 2024. Both the 3DPC forms and the SCC cores of the composite columns, as well as test specimens for strength and durability tests, were cast at Heidelberg's ready mixed concrete plant in Tumba, a

Table 1: Steps and dates southern suburb of Stockholm. The loading tests of the columns were carried out at RISE's structural engineering laboratory in Borås, 405 km (251 miles) southwest of Stockholm. The mixture proportions for the 3DPC and SCC are listed in Table 2. The intended strength class of the SCC was C28/35 according to the European standard (aiming at a

| eteps t |  |                                      |                         |
|---------|--|--------------------------------------|-------------------------|
| No.     | Step   | Date                                 | Age <sup>*</sup> , days |
| 1       | Printing of 3DPC forms                                       | August 23, 2023                      | —                       |
| 2       | Installing reinforcement with strain gauges                  | September 2023                       | _                       |
| 3       | Casting of cylinders using the 3DPC mixture                  | September 14, 2023                   | —                       |
| 4       | Casting of SCC   | September 22, 2023                   | _                       |
| 5       | Testing of compressive strength and <i>E</i> modulus of 3DPC | October 12 to 13, 2023               | 28 to 29                |
| 6       | Testing of compressive strength and <i>E</i> modulus of SCC  | October 20, 2023                     | 28                      |
| 7       | Testing of compressive strength of SCC                       | November 2, 2023                     | 41                      |
| 8       | Transporting columns to RISE                                 | October 24, 2023                     | 32 and 62               |
| 9       | Testing chloride ingress                                     | October 31, 2023                     | 69                      |
| 10      | Loading tests on columns                                     | October 31 to November 3, 2023       | 39 to 42 and 69 to 72   |
| 11      | Coring of columns  | November 6 to 10, 2023               | 45 to 49 and 75 to 79   |
| 12      | Pullout tests  | November 13 and 15, 2023             | 52 to 54 and 82 to 84   |
| 13      | Testing of compressive strength and <i>E</i> modulus of 3DPC | November 22 to 23, 2023              | 69 to 70                |
| 14      | Freezing-and-thawing tests                                   | November 9, 2023 to January 4, 2024  | 78 to 134               |
| 15      | Carbonation tests  | November 3, 2023 to January 12, 2024 | 72 to 142               |
| *n 1    |  |                                      |                         |

\*Dual ages or ranges correlate with SCC and 3DPC, respectively

#### Table 2: Mixture propertions for the

## Mixture proportions for the 3DPC and SCC

|                                     | 3DPC  |        | SCC   |        |
|-------------------------------------|-------|--------|-------|--------|
| Ingredients                         | kg/m³ | lb/yd³ | kg/m³ | lb/yd³ |
| Cement (CEM I <sup>*</sup> )        | 625   | 1053   | _     | _      |
| Cement (CEM II/A-LL <sup>*</sup> )  | —     | —      | 325   | 548    |
| Limestone filler                    | _     | _      | 83    | 140    |
| Water                               | 312   | 526    | 195   | 329    |
| Gravel (0 to 4 mm [0 to 0.16 in.])  | 1350  | 2275   | _     | _      |
| Gravel (0 to 8 mm [0 to 0.32 in.])  | —     | —      | 1032  | 1739   |
| Gravel (8 to 16 mm [0 to 0.64 in.]) | —     | —      | 685   | 1155   |
| Air-entraining admixture            | 1.25  | 2      | —     | _      |
| High-range water-reducing admixture | >0‡   | —      | 4.45  | _      |
| Accelerating admixture              | >0‡   | —      | _     | _      |
| Other chemicals                     | >0‡   | _      | _     | _      |
| Sum                                 | 2288  | 3857   | 2324  | 3917   |
| w/c                                 | 0.5   | —      | 0.6   | _      |

\*Contains 95% portland cement

<sup>†</sup>Contains >80% portland cement and <20% limestone filler <sup>‡</sup>Brands and volumes are proprietary cylinder compressive strength of 28 MPa [4060 psi]). Because the 3DPC had a lower water-cement ratio (w/c), it was anticipated that its strength would be 20% higher.

## **Loading Tests**

The research project included performing loading tests on four composite and two homogeneous concrete columns (Fig. 1). The columns were 3 m (10 ft) tall and had a circular 300 mm (12 in.) diameter cross section. The composite columns consisted of a 40 mm (1.6 in.) thick 3DPC form that was filled with SCC. The homogeneous columns were cast with the same SCC. All columns were reinforced with four vertical 8 mm (0.3 in.) diameter bars and ten 5 mm (0.2 in.) diameter stirrups. Tested compressive strengths were 56 MPa and 44 MPa (8120 psi and 6380 psi) for the 3DPC and the SCC, respectively.

The columns were simply supported at both the top and bottom (Fig. 2). They were loaded by a centrally placed hydraulic load, which was increased continuously with 350 kN (78.7 kip) increments until failure. For the columns showing the highest failure load, the failure occurred after the sixth load increment at approximately 24 minutes.

In a previous study,<sup>7</sup> testing of concrete-filled steel pipe columns (without bond between the steel and the concrete) showed that only the steel pipe carried the load when the load was applied on the steel pipe only (no load on the concrete core). In our research, we wanted to check if there is a difference between SCC-filled 3DPC pipe columns for which the entire cross section is loaded (Group A, 300 mm [11.8 in.] loading diameter) and similar columns for which only the area of the SCC core is loaded (Group B, 200 mm [7.9 in.] loading diameter). Two composite columns and one homogeneous column were included in each group.

The results from the loading tests are summarized in Table 3. Based on our observations:

- For the columns loaded at the entire cross section (Group A), the load-carrying capacity of the composite columns was equal to that of the homogeneous column;
- For the columns where only a central part of the cross section was loaded (Group B), the composite columns also developed load-carrying capacity equal to that of the homogeneous column;
- Columns in Group B developed only 60% of the obtained load-carrying capacity of the columns in Group A;
- None of the columns developed a load-carrying capacity close to the predicted value of 3100 kN (697 kip), calculated as the area of the cross section times the measured compressive strength; and
- The failure mode was similar for all columns (Fig. 3), and the compressive failure appeared suddenly.

The laboratory report<sup>8</sup> provides a discussion on the third and fourth observations. The SCC strength in the narrow column cores might have been less than the one measured on the control cylinders, and there might have been an unintended eccentricity, despite the technicians' efforts to



Fig. 1: 3DPC forms and a cardboard form prior to casting SCC. A rectangular 3DPC form is visible in the bottom left corner of the photo. This form was used for enabling coring of samples for subsequent durability tests



Fig. 2: The setup for the loading tests in the RISE laboratory in Borås, Sweden

avoid it. The eccentricity is likely to be greater in Group B than in Group A, which gives a possible explanation for the third observation. The relatively low column slenderness, height-to-diameter ratio of 10, implies that buckling can be excluded as an explanation.

The first and second observations are the most interesting ones, however. They show that the composite column was as strong as the homogeneous one, and they indicate a sufficient bond between the SCC core and the 3DPC form. This was also confirmed with pullout tests (taken from undamaged parts of the composite columns after the loading tests), which resulted in an average bond strength of 1.75 MPa (254 psi), considerably exceeding frequent values of the required bond strength of 1 MPa (145 psi), often used in Europe.

## **Durability Tests**

At present, 3DPC has a small maximum aggregate size and a high cement paste content. Usually, the w/c is low, resulting in a high cement content but also a dense concrete, which generally provides good durability.

Table 3:Ultimate loads and deformations

| Group | Diameter of loading<br>area, mm (in.) | Column No. | Column type | Ultimate load, kN (kip) | Deformation at ultimate load,<br>mm (in.) |
|-------|---------------------------------------|------------|-------------|-------------------------|---|
|       | 300 (12)                              | I          | Composite   | 2240 (504)              | 6.8 (0.27)                                |
| А     |                                       | IV         | Composite   | 2529 (508)              | 8.2 (0.33)                                |
|       |                                       | V          | Homogeneous | 2074 (466)              | 14.7 (0.58)                               |
| В     | 200 (8)                               | Ш          | Composite   | 1410 (317)              | 3.1 (0.12)                                |
|       |                                       | III        | Composite   | 1411 (317)              | 4.6 (0.18)                                |
|       |                                       | VI         | Homogeneous | 1370 (308)              | 4.3 (0.17)                                |



Fig. 3: Column No. III after failure



Fig. 4: Scaling mass after freezing-and-thawing tests per Swedish standard SS 137244:2019<sup>9</sup> classification (Note: 1 kg/m<sup>2</sup> = 0.21 lb/ft<sup>2</sup>)



Fig. 5: Chloride migration coefficient D in relation to used classification (Note:  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10.76 \text{ ft}^2/\text{s}$ )

In our research, the durability of the 3DPC form working as concrete cover for column reinforcement was investigated through freezing-and-thawing tests and resistance to carbonation and chloride migration evaluation. The freezingand-thawing tests were carried out according to the Swedish standard SS 137244:2019,<sup>9</sup> requiring 56, 24-hour cycles between +20 and  $-20^{\circ}$ C (+68 and  $-4^{\circ}$ F). The accumulated volume of scaled mass was measured after 7, 14, 28, 41, and 56 days. The results demonstrated "good frost resistance" on the border of "very good frost resistance" according to that standard (refer to Fig. 4).

The resistance to carbonation was evaluated according to the Swedish and European Standard SS-EN 12390-12:2020.<sup>10</sup> The carbonation depth was measured after 7, 28, and 70 days. This test is an accelerated test because the carbonation depth is measured in a chamber having a carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration of 3%, roughly 70 times higher than in the current atmosphere (415 ppm = 0.04%). However, this test method has been shown to rank concrete mixtures correctly.<sup>11</sup> In our studies, a carbonation depth of 4.6 mm (0.18 in.) was measured after 70 days. This value is slightly lower than the ones of 6 to 12 mm (0.25 to 0.5 in.) recently measured by Heidelberg Materials Betong Sverige and RISE for concrete mixtures with the same cement type and a w/c = 0.5 to 0.6.<sup>8</sup>

The resistance to chloride migration was measured according to the Nordtest method NT Build 492.<sup>12</sup> This is also an accelerated test method where the chloride ingress depth is measured on test specimens subjected to a 10% NaCl solution. The method includes the calculation of chloride migration coefficient *D*, using the inverse error function to solve Fick's second law. The obtained mean value for three tested specimens was  $15.8 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s ( $1.7 \times 10^{-10}$  ft<sup>2</sup>/s). NT Build 492 does not provide any interpretation of the results. Instead, the obtained value may be compared with values found in the literature.<sup>13</sup> The result of the testing was determined to fall between the worst ("Low") and the second-worst class ("Mediate") on a five-grade scale (refer to Fig. 5).

The limited resistance to chloride migration might be attributed to the variation in the thickness of the printed form layers (thickest in the middle of a printed layer and thinnest between two layers), as well as the porosity of the interlayer between two layers, which is higher than that of an individual layer.

## **Concluding Remarks**

The technology of composite concrete columns with permanent 3DPC forms filled with SCC is promising. The columns developed load-carrying capacities corresponding to homogeneous ones. Pullout tests showed that it is possible to develop a bond strength exceeding 1 MPa (145 psi) between the 3DCP form and the SCC.

Many current 3-D concrete printers are provided with nozzles that cannot handle concrete mixtures with large aggregate particles. That means that the "ink" contains a lot of cement. However, if the cement-rich 3DPC can be combined with an SCC with a low cement content, it will still be possible to reach sustainability goals.

The idea behind the durability testing part of this research was to evaluate a dense 3DPC form working as cover for the reinforcement inside the SCC core of the column. The test results indicated that the 3DCP form is frost-resistant and has a good resistance to carbonation. The remaining issue is the resistance to chloride ingress. At this stage, the composite columns cannot be used in marine applications or in cases where deicing salts are present. The interlayer between two printed layers may be responsible for insufficient resistance to chloride migration. Impregnation with a hydrophobic agent for example, silane or siloxane—may be a possible solution. Further research and development of the concrete mixture and the printing process may solve this problem.

#### Acknowledgments

Financial support from Trafikverket (the Swedish Transport Administration) and SBUF (the Development Fund of the Swedish Construction Industry) through the Swedish contractor NCC is gratefully acknowledged. The author wants to thank Tobias v. Haslingen at ConcretePrint, Jonas Carlswärd and Mats Emborg at Heidelberg Materials Betong Sverige, Mikael Hallgren at Tyréns, and Gürsel Hakan Taylan and Viktor Brolund at KTH for their substantial contributions to the success of the project.

#### References

1. Gaudillière, N.; Duballet, R.; Bouyssou, C.; Mallet, A.; Roux, P.; Zakeri, M.; and Dirrenberger, J., "Building Applications Using Lost Formworks Obtained Through Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete," *3D Concrete Printing Technology*, first edition, J.G. Sanjayan, A. Nazari, and B. Nematollahi, eds., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2019, pp. 37-58.

2. Anton, A.; Reiter, L.; Wangler, T.; Frangez, V.; Flatt, R.J.; and Dillenburger, B., "A 3D Concrete Printing Prefabrication Platform for Bespoke Columns," *Automation in Construction*, V. 122, Feb. 2021, 16 pp.

3. Zhu, B.; Nematollahi, B; Pan, J.; Zhang, Y.; Zhou, Z.; and Zhang, Y., "3D Concrete Printing of Permanent Formwork for Concrete Column Construction," *Cement and Concrete Composites*, V. 121, Aug. 2021, 15 pp.

4. Chen, Y.; Zhang, W.; Zhang, Y.; Yu, Z.; Liu, C.; Wang, D.; Liu, Z; Liu, G.; Pang, B.; and Yang, L., "3D Printed Concrete with Coarse Aggregates: Built–in–Stirrup Permanent Concrete Formwork for Reinforced Columns," *Journal of Building Engineering*, V. 70, July 2023, 20 pp. 5. Raza, S.; Triantafyllidis, Z.; Anton, A.; Dillenburger, B.; and Shahverdi, M., "Seismic Performance of Fe-SMA Prestressed Segmental Bridge Columns with 3D Printed Permanent Concrete Formwork," *Engineering Structures*, V. 302, Mar. 2024, 17 pp.

6. Silfwerbrand. J., "Composite Concrete Columns with 3DP Concrete Forms," *Proceedings of the 6th fib International Congress on Concrete Innovation for Sustainability*, Oslo, Norway, June 2022, 10 pp.

7. Grauers, M., "Composite Columns of Hollow Steel Sections Filled with High Strength Concrete," PhD thesis, Division of Concrete Structures, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1993, 237 pp.

8. Silfwerbrand, J., "Samverkanspelare av 3D-utskriven och självkompakterande betong – Laboratorieförsök" ("Composite column of 3D printed concrete and self-consolidating concrete – Laboratory tests"), *Report*, Division of Concrete Structures, Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2024, 67 pp. (in Swedish)

9. SS 137244:2019, "Betongprovning - Hårdnad betong - Avflagning vid frysning" ("Testing Concrete – Hardened Concrete – Scaling at Freezing"), fifth edition, Swedish Institute for Standards, Stockholm, Sweden, 2019, 20 pp. (in Swedish)

10. SS-EN 12390-12:2020, "Testing Hardened Concrete – Part 12: Determination of the Carbonation Resistance of Concrete: Accelerated Carbonation Method," first edition, Swedish Institute for Standards, Stockholm, Sweden, 2020, 24 pp.

11. Harrison, T.A.; Jones, M.R.; Newlands, M.D.; Kandasami, S.; and Khanna, G., "Experience of Using the prTS 12390-12 Accelerated Carbonation Test to Assess the Relative Performance of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, V. 64, No. 8, July 2012, pp. 737-747.

12. NT Build 492, "Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments," NORDTEST, Espoo, Finland, 1999, 8 pp.

13. Nilsson, L.; Ngo, M.H.; and Gjørv, O.E., "High-Performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg," *Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading (CONSEC '98)*, O. E. Gjørv, K. Sakai, and N. Banthia, eds., Tromsø, Norway, June 21-24, 1998, pp. 1193-1198.

Selected for reader interest by the editors.



Johan L. Silfwerbrand, FACI, is a Professor in structural engineering and bridges at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. He is a member of ACI Committees 123, Research and Current Developments; 342, Evaluation of Concrete Bridges and Bridge Elements; 345, Bridge Construction and Preservation; and 546,

Repair. He is also active in the Swedish Concrete Association and the Fédération Internationale du Béton (*fib*). His research interests include industrial floors, fiber concrete, concrete repair, concrete roads, self-consolidating concrete, and concrete and fire.

## 01

## Concreto autocompactante compuesto y columnas de concreto impresas en 3D

Por Johan L. Silfwerbrand

En 2024, la industria del concreto conmemoró el 200 aniversario de la patente del cemento portland de Joseph Aspdin. Los métodos utilizados para producir concreto se han desarrollado sucesivamente desde entonces, y gran parte de la investigación se centra actualmente en la reducción de la huella climática del concreto, principalmente mediante la sustitución de partes del cemento por subproductos industriales y otros agregados alternativos (materiales cementicios suplementarios [SCM, por sus siglas en inglés]).

En las últimas décadas también se han desarrollado nuevas técnicas para producir concreto. La compactación mediante vibración, que es un trabajo intensivo de mano de obra, ahora puede omitirse mediante el uso de concreto autocompactante [SCC, por sus siglas en inglés] o mediante la aplicación de impresoras tridimensionales (3-D). En el proyecto de investigación que presentamos aquí se han combinado ambas técnicas en el colado de columnas.

Tradicionalmente, las columnas de concreto se han fabricado colocando concreto en un molde de madera o acero. Mientras que los moldes de acero pueden utilizarse varias veces, los de madera, como mucho, hasta dos o tres veces. Para cualquiera de los dos materiales, la fabricación y la extracción del molde requieren tiempo y mano de obra, y la eventual sustitución del molde conlleva un aumento del uso de material y de los costos de transporte. Una nueva alternativa, investigada en este proyecto, es un molde permanente de concreto impreso en 3D [3DPC, por sus siglas en inglés] en el que se vierte un núcleo con SCC.

El 3DPC puede servir para proteger la armadura de la corrosión y el fuego. Si puede demostrarse la acción compuesta entre el 3DPC y el SCC en las columnas, toda la sección transversal compuesta puede tenerse en cuenta para la capacidad de carga, lo que justifica aún más la omisión del costoso y laborioso molde. Uno de los problemas de la tecnología 3DPC actual es su alto contenido de cemento debido al pequeño tamaño máximo de los agregados que requieren la mayoría de las boquillas de impresión. Sin embargo, si la envoltura de 3DPC puede hacerse delgada y su alto contenido de cemento puede utilizarse para proporcionar una densa cobertura de concreto para el refuerzo en un núcleo de SCC con contenido moderado de cemento, el contenido total de cemento por volumen de columna compuesta puede ser comparativamente bajo, lo que resulta en una solución duradera y sostenible.

Para estudiar tanto la capacidad de carga como la durabilidad de este tipo de columnas, se realizaron pruebas con seis columnas y muchos núcleos en el Real Instituto de Tecnología KTH (KTH) de Estocolmo (Suecia), en colaboración con los Institutos de Investigación de Suecia (RISE) y dos empresas suecas, ConcretePrint y Heidelberg Materials Betong Sverige.

## Investigaciones anteriores

Poco se ha investigado anteriormente en las columnas de material compuesto formadas por moldes 3DPC y núcleos de SCC.<sup>1-5</sup> Las referencias 1 y 2 tratan principalmente de las posibilidades arquitectónicas y estéticas que ofrece esta tecnología.

Zhu et al.<sup>3</sup> ensayaron columnas de material compuesto de 600 mm (24 pulgadas) de altura y columnas homogéneas de 250 mm (10 pulgadas) de diámetro con resultados prometedores. Los resultados de sus pruebas de carga indicaron que el molde 3DPC de 25 mm (1 pulg.) de grosor contribuía a la capacidad de carga de las columnas de material compuesto.

Chen et al.<sup>4</sup> ensayaron las columnas de concreto compuesto de 630 mm (25 pulg.) de altura con una sección transversal cuadrada y una longitud lateral de 280 mm (11 pulg.). Los autores no tuvieron en cuenta la contribución del molde 3DPC de 60 mm (2,4 pulg.) de grosor al calcular la capacidad de carga, pero las cargas de fallo medidas indicaron que el molde contribuía sustancialmente.

En KTH se realizaron dos estudios piloto antes del proyecto de investigación actual.<sup>6</sup> El objetivo era estudiar las posibilidades de producir las columnas de material compuesto hechas de moldes 3DPC rellenos de SCC. En el segundo estudio piloto, se moldearon tres columnas de material compuesto de 500 mm (20 pulgadas) de diámetro y 2,4 m (8 pies) de altura. El espesor del molde 3DPC era de 50 mm (2 pulgadas). Las pruebas demostraron que era posible fabricar estas columnas de material compuesto (la presión ejercida por el SCC no provocó grietas ni fugas en el molde 3DPC). Los prometedores resultados de los estudios piloto condujeron a un programa de investigación más amplio, que se describe en la sección siguiente.

## Programa de investigación

La investigación consistió en 15 pasos (véase la Tabla 1) realizados entre agosto de 2023 y enero de 2024. Tanto los moldes 3DPC como los núcleos de SCC de las columnas compuestas, así como las probetas para las pruebas de resistencia y durabilidad, se moldearon en la planta de concreto premezclado de Heidelberg en Tumba, un suburbio al sur de Estocolmo. Las pruebas de carga de las columnas se realizaron en el laboratorio de ingeniería estructural de RISE en Borås, a 405 km al suroeste de Estocolmo. Las proporciones de la mezcla para el 3DPC y el SCC se indican en la tabla 2. La clase de resistencia prevista para el SCC era C28/35 según la norma europea (resistencia a la compresión del cilindro de 28 MPa [4,060 psi]). Dado que el 3DPC tenía una relación agua-cemento (w/c) inferior, se preveía que su resistencia sería un 20% superior.



Fig. 1: Moldes de 3DPC y cartón antes del colado del SCC. Un molde rectangular de 3DPC es visible en la parte inferior izquierda de la imagen. Este molde fue utilizado para permitir la extracción de los núcleos de concreto para las pruebas subsecuentes de durabilidad.

### Tabla 1: Fases y fechas

| No. | Fase   | Fecha  | Edad*, días       |
|-----|--|--|-------------------|
| 1   | Impresión de moldes 3DPC                                   | 23 de agosto de 2023                                 | —                 |
| 2   | Instalación de refuerzos con medidores de tensión          | septiembre de 2023                                   | —                 |
| 3   | Fundición / Colado de cilindros con la mezcla 3DPC         | 14 de septiembre de 2023                             | —                 |
| 4   | Fundición / Colado de SCC                                  | 22 de septiembre de 2023                             | —                 |
| 5   | Pruebas de resistencia a la compresión y módulo E del 3DPC | Del 12 al 13 de octubre de 2023                      | 28 a 29           |
| 6   | Pruebas de resistencia a la compresión y módulo E de SCC   | 20 de octubre de 2023                                | 28                |
| 7   | Pruebas de resistencia a la compresión del SCC             | 2 de noviembre de 2023                               | 41                |
| 8   | Transporte de las columnas a RISE                          | 24 de octubre de 2023                                | 32 y 62           |
| 9   | Pruebas de penetración de cloruros                         | 31 de octubre de 2023                                | 69                |
| 10  | Pruebas de carga de las columnas                           | 31 de octubre al 3 de noviembre de<br>2023           | 39 a 42 y 69 a 72 |
| 11  | Extracción de núcleos de las columnas                      | 6 al 10 de noviembre de 2023                         | 45 a 49 y 75 a 79 |
| 12  | Pruebas de extracción (Pullout)                            | 13 y 15 de noviembre de 2023                         | 52 a 54 y 82 a 84 |
| 13  | Pruebas de resistencia a la compresión y módulo E de 3DPC  | 22 al 23 de noviembre de 2023                        | 69 a 70           |
| 14  | Pruebas de congelación y descongelación                    | Del 9 de noviembre de 2023 al 4 de<br>enero de 2024  | 78 a 134          |
| 15  | Pruebas de carbonatación                                   | del 3 de noviembre de 2023 al 12 de<br>enero de 2024 | 72 a 142          |

\*Las edades o rangos dobles se correlacionan con SCC y 3DPC, respectivamente.

## Tabla 2: Proporciones de mezcla para el 3DPC y el SCC

|  | 3DPC  |        | SCC   |        |
|--|-------|--------|-------|--------|
| Ingredientes                           | kg/m³ | lb/yd³ | kg/m³ | lb/yd³ |
| Cemento (CEM I*)                       | 625   | 1,053  |       |        |
| Cemento (CEM II/A-LL <sup>+</sup> )    |       |        | 325   | 548    |
| Relleno de piedra caliza               |       |        | 83    | 140    |
| Agua                                   | 312   | 526    | 195   | 329    |
| Gravilla (0 a 4 mm [0 a 0.16 pulg.])   | 1,350 | 2,275  |       |        |
| Gravilla (0 a 8 mm [0 a 0.32 pulg.])   | —     |        | 1,032 | 1,739  |
| Gravilla (8 a 16 mm [0 a 0.64 pulg.])  |       |        | 685   | 1,155  |
| Aditivo inclusor de aire               | 1.25  | 2      | —     |        |
| Aditivo reductor de agua de alto rango | >0*   |        | 4.45  |        |
| Aditivo acelerante                     | >0*   |        |       |        |
| Otros productos químicos               | >0*   |        |       |        |
| Suma                                   | 2,288 | 3,857  | 2,324 | 3,917  |
| w/c                                    | 0.5   |        | 0.6   |        |

\*Contiene 95% de cemento portland

+Contiene >80% de cemento portland y <20% de relleno de piedra caliza.

‡Las marcas y los volúmenes son patentados



Fig. 2: Preparación para la prueba de carga en las instalaciones de los laboratorios RISE en Borás, Suecia.

## Pruebas de carga

El proyecto de investigación incluía la realización de pruebas de carga en cuatro columnas de concreto compuesto y dos de concreto homogéneo (Fig. 1). Las columnas tenían una altura de 3 m (10 pies) y una sección transversal circular de 300 mm (12 pulgadas) de diámetro. Las columnas compuestas consistían en un molde 3DPC de 40 mm (1.6 pulgadas) de espesor que se rellenó con SCC. Las columnas homogéneas se fundieron con el mismo SCC. Todas las columnas se reforzaron con cuatro barras verticales de 8 mm (0.3 pulgadas) de diámetro y diez estribos de 5 mm (0.2 pulgadas) de diámetro. Las resistencias a compresión probadas fueron de 56 MPa y 44 MPa (8,120 psi y 6,380 psi) para el 3DPC y el SCC, respectivamente.

Las columnas estaban simplemente apoyadas tanto en la parte superior como en la inferior (Fig. 2). Se les aplicó una carga hidráulica colocada en el centro, que se aumentó continuamente con incrementos de 350 kN (78.7 kip) hasta el fallo. Para las columnas que mostraban la carga de falla más alta, el fallo se produjo después del sexto incremento de carga, aproximadamente a los 24 minutos.

En un estudio anterior,<sup>7</sup> las pruebas de columnas de tubos de acero rellenos de concreto (sin unión entre el acero y el concreto) mostraron que sólo el tubo de acero aguantaba la carga cuando ésta se aplicaba únicamente sobre el tubo de acero (sin carga sobre el núcleo de concreto). En nuestra investigación, queríamos comprobar si existe alguna diferencia entre las columnas de tubo 3DPC rellenas de SCC para las que se carga toda la sección transversal (Grupo A, 300 mm [11.8 pulgadas] de diámetro de carga) y columnas similares para las que sólo se carga el área del núcleo de SCC (Grupo B, 200 mm [7.9 pulgadas] de diámetro de carga). En cada grupo se incluyeron dos columnas mixtas y una columna homogénea.

Los resultados de las pruebas de carga se resumen en la Tabla 3. Según nuestras observaciones:

- Para las columnas cargadas en toda la sección transversal (Grupo A), la capacidad de carga de las columnas mixtas fue igual a la de la columna homogénea;
- Para las columnas en las que sólo se cargó una parte central de la sección transversal (Grupo B), las columnas de material compuesto también desarrollaron una capacidad de carga igual a la de la columna homogénea;
- Las columnas del grupo B desarrollaron sólo el 60% de la capacidad de carga obtenida de las columnas del grupo A;
- Ninguna de las columnas desarrolló una capacidad de carga cercana al valor previsto de 3,100 kN (697 kip), calculado como el área de la sección transversal multiplicada por la resistencia a la compresión medida; y
- El modo de fallo fue similar en todas las columnas (Fig. 3), y el fallo por compresión apareció repentinamente.

En el informe del laboratorio<sup>8</sup> se exponen las observaciones tercera y cuarta. La resistencia del SCC en los núcleos estrechos de las columnas podría haber sido inferior a la medida en los cilindros de control, y podría haberse producido una excentricidad involuntaria, a pesar de los esfuerzos de los técnicos por evitarla. Es probable que la excentricidad fuera mayor en el Grupo B que en el Grupo A, lo que da una posible explicación a la tercera observación. La esbeltez relativamente baja de las columnas, relación altura-diámetro de 10, implica que el pandeo puede excluirse como explicación.



Fig. 3: Columna nº III después del fallo

Sin embargo, la primera y la segunda observación son las más interesantes. Muestran que las columnas de material compuesto eran tan resistentes como las homogéneas, e indican una unión suficiente entre el núcleo de SCC y el molde 3DPC. Esto también se confirmó con las pruebas de arranque (tomadas de las partes intactas de las columnas de material compuesto después de las pruebas de carga), que dieron como resultado una resistencia media de la unión de 1.75 MPa (254 psi), lo que supera considerablemente los valores frecuentes de la resistencia de la unión requerida de 1 MPa (145 psi), utilizada a menudo en Europa.

| Tabla 3:                       |
|--------------------------------|
| Cargas últimas y deformaciones |

| ourgao artimao y aoronnacioneo |  |               |                    |                           |   |
|--------------------------------|--|---------------|--------------------|---------------------------|---|
| Grupo                          | Diámetro de la<br>zona de carga,<br>mm (pulg.) | Nº de columna | Tipo de<br>columna | Carga de rotura, kN (kip) | Deformación en carga de rotura,<br>mm (pulg.) |
| A                              | 300 (12)                                       | I             | Compuesto          | 2,240 (504)               | 6.8 (0.27)                                    |
|                                |  | IV            | Compuesto          | 2,529 (508)               | 8.2 (0.33)                                    |
|                                |  | V             | Homogéneo          | 2,074 (466)               | 14.7 (0.58)                                   |
| В                              | 200 (8)  | Π             | Compuesto          | 1,410 (317)               | 3.1 (0.12)                                    |
|                                |  | III           | Compuesto          | 1,411 (317)               | 4.6 (0.18)                                    |
|                                |  | VI            | Homogéneo          | 1,370 (308)               | 4.3 (0.17)                                    |



## Pruebas de durabilidad

En la actualidad, el 3DPC tiene un tamaño máximo de agregado pequeño y un alto contenido de pasta de cemento. Por lo general, la relación *w/c* es baja, lo que da como resultado un alto contenido de cemento pero también un concreto denso, que generalmente proporciona una buena durabilidad.

En nuestro trabajo, se investigó la durabilidad del molde 3DPC que funciona como cubierta de concreto para el refuerzo de las columnas mediante pruebas de congelación y descongelación y la evaluación de la resistencia a la carbonatación y la migración de cloruros. Los ensayos de congelación y descongelación se llevaron a cabo de acuerdo con la norma sueca SS 137244:2019,<sup>9</sup> que requiere 56 ciclos de 24 horas entre +20°C y -20°C (+68°F y -4°F). El volumen acumulado de masa escamada se midió después de 7, 14, 28, 41 y 56 días. Los resultados demostraron una «buena resistencia a las heladas» en el límite de la «muy buena resistencia a las heladas» según dicha norma (véase la Fig. 4).

La resistencia a la carbonatación se evaluó de acuerdo con la norma sueca y europea SS-EN 12390-12:2020.10 La profundidad de carbonatación se midió a los 7, 28 y 70 días. Esta prueba es una prueba acelerada porque la profundidad de carbonatación se mide en una cámara con una concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del 3%, aproximadamente 70 veces superior a la de la atmósfera actual (415 ppm = 0.04%). Sin embargo, se ha demostrado que este método de ensavo clasifica correctamente las mezclas de concreto." En nuestros estudios, se midió una profundidad de carbonatación de 4.6 mm (0.18 pula.) después de 70 días. Este valor es ligeramente inferior a los de 6 a 12 mm medidos recientemente por Heidelberg Materials Betong Sverige y RISE para mezclas de concreto con el mismo tipo de cemento y un w/c = 0.5 a 0.6.8



La resistencia a la migración de cloruros se midió según el método "Nordtest NT Build" 492.12 Se trata también de un método de ensavo acelerado en el que la profundidad de penetración de cloruros se mide en probetas sometidas a una solución de NaCl al 10%. El método incluye el cálculo del coeficiente de migración de cloruros D, utilizando la función de error inversa para resolver la segunda lev de Fick. El valor medio obtenido para tres probetas analizadas fue de 15.8 × 10-12 m<sup>2</sup>/s (1.7 × 10-10 ft<sup>2</sup>/s). "NT Build" 492 no proporciona ninguna interpretación de los resultados. En su lugar, el valor obtenido puede compararse con los valores encontrados en la bibliografía.<sup>13</sup> Se determinó que el resultado de la prueba se situaba entre la peor («Baja») y la segunda peor clase («Media») en una escala de cinco grados (véase la Fig. 5).

La resistencia limitada a la migración de cloruros podría atribuirse a la variación del grosor de las capas del molde impreso (más grueso en el centro de una capa impresa y más fino entre dos capas), así como a la porosidad de la capa intermedia entre dos capas, que es mayor que la de una capa individual.

## Conclusiones

La tecnología de las columnas de concreto compuesto con moldes 3DPC permanentes rellenos de SCC es prometedora. Las columnas desarrollaron capacidades de carga correspondientes a las homogéneas. Las pruebas de extracción mostraron que es posible desarrollar una resistencia de adherencia superior a 1 MPa (145 psi) entre el molde 3DCP y el SCC.

Muchas de las impresoras de concreto 3D actuales están provistas de boquillas que no pueden manipular mezclas de concreto con grandes partículas de agregados. Esto significa que la "tinta" contiene mucho cemento. Sin embargo, si el 3DPC rico en cemento puede combinarse con un SCC con un bajo contenido de cemento, seguirá siendo posible alcanzar los objetivos de sostenibilidad.

La idea detrás de los ensayos de durabilidad de esta investigación era evaluar un molde 3DPC denso que funcionara como cubierta de la armadura dentro del núcleo de SCC de las columnas. Los resultados de las pruebas indicaron que el molde 3DCP es resistente a las heladas y presenta una buena resistencia a la carbonatación. El asunto pendiente es la resistencia a la entrada de cloruros. Por el momento, las columnas de material compuesto no pueden utilizarse en aplicaciones marinas ni en casos de presencia de sales de deshielo. La capa intermedia entre dos capas impresas puede ser responsable de una resistencia insuficiente a la migración de cloruros. La impregnación con un agente hidrófobo -por ejemplo, silano o siloxano- puede ser una posible solución. Una mayor investigación y desarrollo de la mezcla de concreto y del proceso de impresión pueden resolver este problema.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero de Trafikverket (la Administración Sueca de Transportes) y SBUF (el Fondo de Desarrollo de la Industria Sueca de la Construcción) a través del contratista sueco NCC. El autor quiere dar las gracias a Tobias v. Haslingen de ConcretePrint, Jonas Carlswärd y Mats Emborg de Heidelberg Materials Betong Sverige, Mikael Hallgren de Tyréns, y Gürsel Hakan Taylan y Viktor Brolund de KTH por su importante contribución al éxito del proyecto.

## Referencias

- Gaudillière, N.; Duballet, R.; Bouyssou, C.; Mallet, A.; Roux, P.; Zakeri, M.; and Dirrenberger, J., "Building Applications Using Lost Formworks Obtained Through Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete," 3D Concrete Printing Technology, first edition, J.G. Sanjayan, A. Nazari, and B. Nematollahi, eds., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2019, pp. 37-58.
- Anton, A.; Reiter, L.; Wangler, T.; Frangez, V.; Flatt, R.J.; and Dillenburger, B., "A 3D Concrete Printing Prefabrication Platform for Bespoke Columns," Automation in Construction, V. 122, Feb. 2021, 16 pp.
- Zhu, B.; Nematollahi, B; Pan, J.; Zhang, Y.; Zhou, Z.; and Zhang, Y., "3D Concrete Printing of Permanent Formwork for Concrete Column Construction," Cement and Concrete Composites, V. 121, Aug. 2021, 15 pp.
- Chen, Y.; Zhang, W.; Zhang, Y.; Yu, Z.; Liu, C.; Wang, D.; Liu, Z; Liu, G.; Pang, B.; and Yang, L., "3D Printed Concrete with Coarse Aggregates: Built-in-Stirrup Permanent Concrete Formwork for Reinforced Columns," Journal of Building Engineering, V. 70, July 2023, 20 pp.
- Raza, S.; Triantafyllidis, Z.; Anton, A.; Dillenburger, B.; and Shahverdi, M., "Seismic Performance of Fe-SMA Prestressed Segmental Bridge Columns with 3D Printed Permanent Concrete Formwork," Engineering Structures, V. 302, Mar. 2024, 17 pp.

- Silfwerbrand. J., "Composite Concrete Columns with 3DP Concrete Forms," Proceedings of the 6th fib International Congress on Concrete Innovation for Sustainability, Oslo, Norway, June 2022, 10 pp.
- Grauers, M., "Composite Columns of Hollow Steel Sections Filled with High Strength Concrete," PhD thesis, Division of Concrete Structures, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1993, 237 pp.
- Silfwerbrand, J., "Samverkanspelare av 3D-utskriven och självkompakterande betong – Laboratorieförsök" ("Composite column of 3D printed concrete and selfconsolidating concrete – Laboratory tests"), Report, Division of Concrete Structures, Department of Civil and Architectural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2024, 67 pp. (in Swedish)
- SS 137244:2019, "Betongprovning Hårdnad betong -Avflagning vid frysning" ("Testing Concrete - Hardened Concrete - Scaling at Freezing"), fifth edition, Swedish Institute for Standards, Stockholm, Sweden, 2019, 20 pp. (in Swedish)
- SS-EN 12390-12:2020, "Testing Hardened Concrete Part 12: Determination of the Carbonation Resistance of Concrete: Accelerated Carbonation Method," first edition, Swedish Institute for Standards, Stockholm, Sweden, 2020, 24 pp.
- Harrison, T.A.; Jones, M.R.; Newlands, M.D.; Kandasami, S.; and Khanna, G., "Experience of Using the prTS 12390-12 Accelerated Carbonation Test to Assess the Relative Performance of Concrete," Magazine of Concrete Research, V. 64, No. 8, July 2012, pp. 737-747.
- NT Build 492, "Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments," NORDTEST, Espoo, Finland, 1999, 8 pp.
- Nilsson, L.; Ngo, M.H.; and Gjørv, O.E., "High-Performance Repair Materials for Concrete Structures in the Port of Gothenburg," Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading (CONSEC '98), O. E. Gjørv, K. Sakai, and N. Banthia, eds., Tromsø, Norway, June 21-24, 1998, pp. 1193-1198.

Johan L. Silfwerbrand, FACI, es catedrático de ingeniería estructural y puentes en el KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia. Es miembro de los Comités ACI 123, Investigación y Desarrollos Actuales; 342, Evaluación de Puentes de Concreto y Elementos de Puentes; 345, Construcción y Preservación de Puentes; y 546, Reparación. También participa activamente en la Asociación Sueca del Concreto y en la Fédération Internationale du Béton (fib). Sus intereses de investigación incluyen los suelos industriales, el concreto con fibras, la reparación del concreto, las carreteras de concreto, el concreto autocompactante y el concreto y el fuego.



Título original en inglés: Composite SCC and 3-D-Printed Concrete Columns

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo Puerto Rico



Traductora: **Nicole Mejía** Borrero



Revisora Técnica: Anabel N. Merejildo