

Industrial Fiber Concrete Floors

Research needs identified

by Johan L. Silfwerbrand

For more than 40 years, fiber concrete, especially steel fiber concrete, has been used in the Swedish construction industry. Two major examples are shotcrete for rock strengthening and steel fiber concrete for industrial concrete floors. Sweden is one of the pioneering countries using steel fiber-reinforced shotcrete, partly because of the country's high-quality rock deposits and partly due to research conducted primarily at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. For industrial fiber concrete floors, Concrete Report No. 4¹ was considered to be on the international forefront when it was published in the 1990s by the Swedish Concrete Association.

Industrial concrete floors are constructed either as slabs-on-ground or as pile-supported slabs. Because they do not carry load in the same, direct way as elevated slabs and beams, they are not considered load-carrying structures. Consequently, designers do not have to follow conventional design codes and regulations. In Sweden, this results in competition between design concepts with different degrees of safety.² For example, the traditional Swedish design method for industrial steel fiber concrete floors competes with a less-conservative method developed in Belgium, commonly called the continental method.³

In many cases, designs based on more venturesome methods result in well-performing, slender structures. However, they can also result in slabs with major cracking. The success stories are likely to be connected to some beneficial circumstances that are not considered in the design method. Possible factors (in alphabetical order) include:

- Arch effect in the slab;
- Concrete strength gain over time;
- Contribution from the ground supporting the slab;
- Edge effects (mainly negative) present in the test beams used in the development of the method do not exist in the slab;
- Membrane effect in the slab;
- More beneficial fiber orientation in the slab than in the test beams;

- Multiaxial stress state in the slab; and
- Reduced risk of weak zones in the slab.

The factors identified as having the most beneficial effects on slab strength are the arch effect, membrane effect, reduced risk of weak zones, and contribution from the grade or ground. This article describes these in more detail and identifies research that is needed to fill gaps in the knowledge base.

The Major Factors

Arch effect

The arch effect is illustrated in Fig. 1: a schematic of a rather thick, pile-supported slab loaded from the top surface. A part of the load is carried directly from a loading point to the supports through an arch. The arch effect increases with decreasing slenderness $\lambda = L/h$, where L is pile spacing and h is slab thickness. Theoretically, horizontal movements must be prevented or at least partly prevented for the arch action to develop. However, friction between the slab and the underlying layer might be sufficient for some arch action. If the load is located close to the pile or other support, an arch effect will develop without horizontal restraint, much as loads close to the support are dealt with when designing concrete beams for shear.

In Sweden, the arch effect in concrete slabs has been studied by Birke⁴ and Nilsson.⁵ Birke studied conventionally reinforced concrete slabs and Nilsson studied fiber-reinforced shotcrete anchored in rock. In cases with restrained horizontal movement, both found substantial contributions of the arch effect to the load-carrying capacity. Nilsson noted that the arch

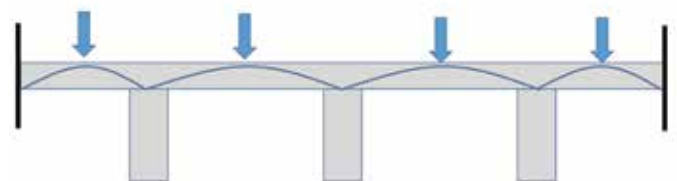


Fig. 1: Arch effect in a pile-supported slab

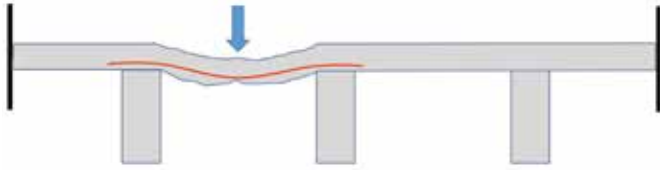


Fig. 2: Membrane effect in a pile-supported slab

effect decreases with increasing deformation due to a reduced versine (lever arm). To my knowledge, nobody has studied the arch effect in fiber concrete slabs-on-ground or piles.

The European standard for testing flexural tensile strength of fiber concrete, EN 14651,⁶ deals with three-point bending of a 550 mm (22 in.) long and 150 mm (6 in.) high beam. The shear-span-to-height ratio $a/h = 250/150 = 1.67$. In Eurocode 2,⁷ the limit for taking the positive arch effect into account when designing for shear is $a/d = 2$, where d is effective depth. While d is somewhat smaller than h , it is apparent that arch action in the EN 14651 test results is somewhat of an overestimation of tensile strength.⁸ Another test method, EN 14488,⁹ is used to measure the energy-absorption capacity of a mixture. A fiber-reinforced shotcrete slab with dimensions of 600 x 600 x 100 mm (24 x 24 x 4 in.) is supported on a frame that provides a rigid square support with clear spans of 500 mm (20 in.) in each direction. A 100 x 100 mm concentrated load is applied at the center, resulting in a rather small $a/h = 200/100 = 2.0$. In combination with the resistance for horizontal movements provided by the specified support conditions, it is likely the method results in a non-negligible arch effect.

Membrane effect

The membrane effect has both similarities and differences in comparison with the arch effect (shown in Fig. 1 and 2). In both cases, a part of the load is distributed in the horizontal direction. In the latter case, however, the resistance is provided by tension rather than compression. The membrane effect increases with increasing deformation. The slab needs to have a considerable tension capacity that is most easily provided by conventional reinforcement. The tension capacity of a fiber concrete slab is much lower, but it increases with increasing fiber content, fiber strength, and fiber anchorage devices. A combination of fibers and conventional reinforcement is sometimes used in pile-supported slabs.

For fiber concrete slabs without conventional reinforcement, the membrane effect is fairly small. However, a quantification would be interesting and, consequently, there is a research need.

Reduced risk of weak zones

Fiber concrete is a heterogeneous material consisting of aggregate particles, cement paste, and fibers. Aggregate particles as well as fibers have essentially random locations and orientations in the concrete matrix. If the casting process has not been successful, there might be some segregation leading to higher aggregate and fiber concentrations in the

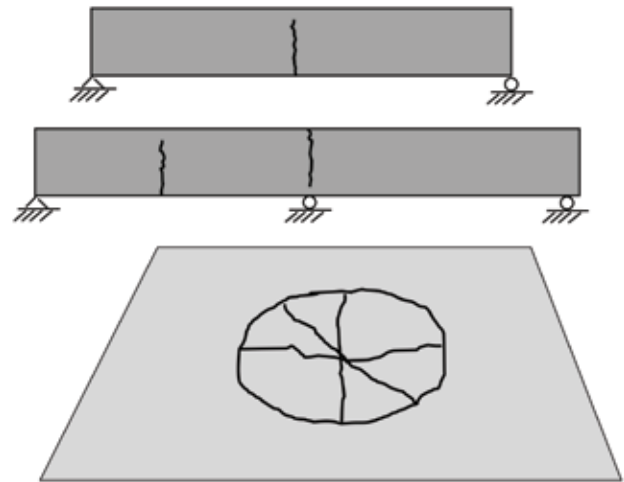


Fig. 3: The risk of collapse is highest in simply supported beams (top), moderate in statically indeterminate beams (middle), and lowest in the interior of slabs (bottom)

bottom of the slab. The casting process can to some degree govern the fiber orientation. However, the randomness is high in fiber concrete.

While the scatter in strength is rather high for plain concrete, the scatter is even higher in fiber concrete because the focus in this case is on flexural tensile strength. If we were to try to use traditional concepts of safety and probability when designing fiber concrete, we would end up with very low design strength values and, consequently, very thick and uneconomical fiber concrete structures. Consequently, we need to think differently.

In the Swedish fiber concrete design guide,¹⁰ the risk of weak zones in the fiber concrete structure has been considered. The basis for design is the design value of the flexural tensile strength that is calculated as the characteristic value of the measured strength divided by a partial safety factor $\gamma_f = 1.5$ for the ultimate limit state. This will usually lead to very low strength values in statically determinate structures like the simply supported beam (Fig. 3, top). Because most fiber concrete materials are strain softening, the simply supported beam will not be able to carry any higher load than the cracking load. The crack will develop in the weakest section along the part of the beam that is subjected to the highest flexural moment.

In a statically indeterminate beam (for example, the two-span beam in Fig. 3, middle), the beam will not collapse before the appearance of the second crack. The risk of two weak zones is smaller than the risk of just one weak zone. This beneficial condition has been considered in the Swedish design guide by multiplying the design value of the strength with a factor η_{det} that for the statically indeterminate beam is set to $\eta_{det} = 1.4$. In the interior of a fiber concrete slab (shown in Fig. 3, bottom), several cracks will appear before the collapse of the slab. We call it a yield line pattern. The risk of multiple weak zones is even lower in this case. According to

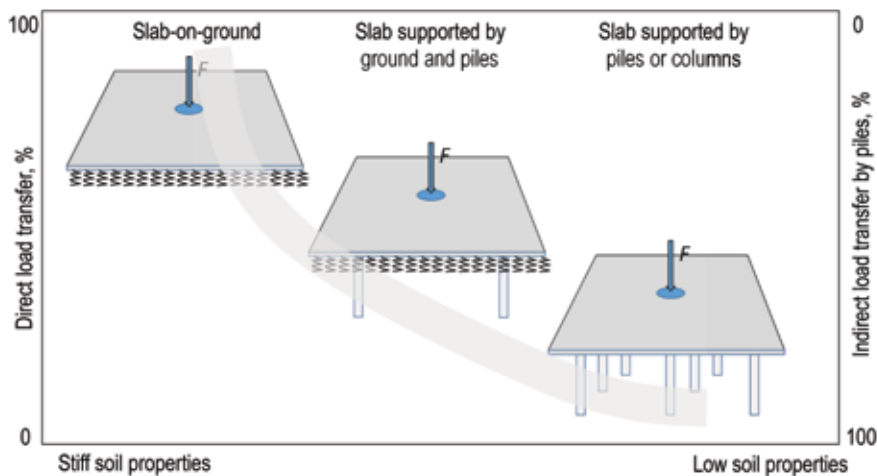


Fig. 4: Contribution from the ground (after Falkner and Gossila¹²)

the Swedish design guide, the factor considering the degree of static determination is set to $\eta_{det} = 2.0$. The background to these values is provided in a conference paper.¹¹

The Swedish concept has been criticized by experienced structural engineers because it differs from how conventionally reinforced concrete structures are designed when using, for example, Eurocode 2.⁷ I believe that such a concept also could be used for designing reinforced concrete (RC) structures in flexure. However, the scatter in flexural moment capacity of an RC member is less than 10%. That would lead to η_{det} values between 1.0 and 1.1, thus the reduction in risk is almost negligible.

The Swedish design concept is an engineering way to solve the problem. More research to develop more detailed and accurate concepts would be welcomed.

Contribution from the ground

The contribution from the ground is obvious for slabs-on-ground. The pile-supported slab constitutes an intermediate case between the slab-on-ground and the column-supported slab (shown in Fig. 4) as the former is supported by both piles and the soil between the pile caps. Immediately after casting, the contribution from the ground is substantial; however, this contribution diminishes with time due to slowly developing ground settlement. (The piles are considered to be resting on rock or fixed in the vertical direction through other geotechnical measures.)

The contribution from the ground is usually neglected in design, and that leads to an underestimation of the load-carrying capacity of unknown but decreasing magnitude. However, we know from experience that loads from the construction stage quite often are the highest ones during the service life of an industrial concrete floor. At this early stage, the contribution from the ground is probably substantial. The ground may also contribute at a later time if the loading leads to large deformations. Assuming a ground settlement of 10 mm (0.4 in.), for example, the ground will carry a part of

the load when the slab deflection exceeds 10 mm. And 10 mm is not a large deflection if the pile spacing is, for example, 4 m (13 ft).

Research Needs

An industrial concrete floor is not considered a load-carrying structure in the sense that such structures are defined in the building codes. Not even severe floor cracking will lead to the collapse of the industrial hall and, because there are no occupied floors underneath, nobody can be injured or killed by falling debris. Consequently, the designer has great freedom in selecting the design method. In the long run, it is not desirable for design methods with

different degrees of safety to compete (at least without clearly acknowledging the degrees of safety). In Sweden, the design of industrial steel fiber concrete floors is usually made by either the steel fiber producer or a contractor who is qualified in concrete floor construction. Because different companies are using different design methods, the competition will not be comparable. On the one hand, the simple solution would be to strongly recommend the safer Swedish design method. But on the other hand, we do not want to set the safety demands so high that unnecessary natural resources (cement, concrete, and steel) are used. We need to know why the continental method often leads to successful solutions without cracking and other distresses, even with its lower safety level. In my opinion, the explanation lies in the four phenomena discussed in this article: arch effect, membrane effect, reduced risk of weak zones, and contribution from the grade or ground.

The arch effect ought to be studied through a combination of full-scale tests and numerical analyses. The influence of the slenderness $\lambda = L/h$ is important to investigate, and various types of horizontal restraint should be examined—including friction from the underlying soil.

The membrane effect is likely to be smaller than the arch effect in steel fiber concrete slabs. However, it will be greater than zero, and during a full-scale test it is likely to succeed the arch action when the deformations exceed certain values. Furthermore, the membrane effect is anticipated to be substantially higher in slabs with a combination of conventional reinforcement and fibers. The reduced risk of weak zones and how to consider that concept in the design process ought to be evaluated through a major numerical study combining the finite element method with theory of probability, perhaps also taking advantage of the Monte Carlo method.

The contribution from the ground must be investigated through field tests. Coring through the slab would be one way to estimate the settlement, if any, under an existing pile-supported slab, but it might be possible to use various

nondestructive testing (NDT) methods. Subsequently, load tests need to be performed on both slabs with detected settlements and reference slabs without any settlement.

Finally, it would be interesting to make field investigations on thin steel fiber concrete slabs designed by the continental method.

Floors both with and without severe cracking ought to be examined. Why did they crack and why did they not? Have the loads been higher or lower than the anticipated ones? Have the conditions for arch effect been especially beneficial in the slabs without cracking?

Concluding Remarks

Industrial steel fiber concrete floors statically regarded as slabs-on-ground and pile-supported slabs are not considered to be load-carrying structures, which means that designers have freedom in selecting the design method. In Sweden, two design methods with different safety levels are competing. This is not desirable. Research is needed to understand why, quite frequently, the less conservative continental design method leads to successful floors. To answer this question, four possible explanations need to be investigated: arch effect, membrane effect, reduced risk of weak zones, and contribution from the grade or ground.

References

1. "Stålfiberbetong—rekommendationer för konstruktion, utförande och provning (Steel Fibre Concrete—Recommendations for Design, Construction and Testing)," Concrete Report No. 4, second edition, Swedish Concrete Association, Stockholm, Sweden, 1997, 135 pp. (in Swedish)
2. Destrée, X., and Silfwerbrand, J., "Steel Fibre Reinforced Concrete in Free Suspended Slabs: Case Study of the Swedbank Arena in Stockholm," *Proceedings of 11th fib Symposium on Concrete Structures for Sustainable Community*, Stockholm, Sweden, June 11-14, 2012, pp. 97-100.
3. Silfwerbrand, J., "Safety Levels in Steel Fibre Concrete Floors," Publication No. 50, *Proceedings of XXII Nordic Concrete Research Symposium*, Reykjavik, Iceland, Aug. 13-15, 2014, pp. 75-78.
4. Birke, H., "Kupoleffekt vid betongplattor (Arch Action in Concrete Slabs)," Bulletin No. 108, Department of Structural Mechanics and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1975. (in Swedish)
5. Nilsson, U., "Structural Behaviour of Fibre Reinforced Sprayed Concrete Anchored in Rock," Bulletin No. 71 (Doctoral Thesis), Department of Structural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.
6. SS-EN 14651:2005+A1:2007, "Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality [LOP], Residual)," Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 2007, 28 pp.
7. EN 1992-1-1:2004, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004, 225 pp.
8. Silfwerbrand, J., "Codes for SFRC Structures—A Swedish Proposal," *Proceedings of 8th fib Symposium on Tailor Made Concrete Structures*, Amsterdam, the Netherlands, May 19-21, 2008, 6 pp.
9. SS-EN 14488-5:2006, "Testing Sprayed Concrete—Part 5: Determination of Energy Absorption Capacity of Fibre Reinforced Slab Specimens," Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 2006, 6 pp.
10. SS 812310:2014, "Fibre Concrete—Design of Fibre Concrete Structures," Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 2014, 38 pp.
11. Silfwerbrand, J., "How to Deal with Scatter in Steel Fibre Concrete Structures—A Swedish Proposal," *Proceedings of 14th fib Symposium on Performance-Based Approaches for Concrete Structures*, Cape Town, South Africa, Nov. 21-23, 2016.
12. Falkner, H., and Gossila, U., "Pile-Supported Reinforced or Prestressed SFRC Ground Slabs," *Proceedings of 3rd International RILEM Workshop on High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPRCC3)*, H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, eds, Mainz, Germany, May 16-19, 1999, pp. 595-602.

Selected for reader interest by the editors.

Errata for ACI Publications Available Online

Under the menu for "Publications" at www.concrete.org, document errata can be searched by document number or keywords.

Call ACI Customer Service at
+1.248.848.3700 for more information.



Johan L. Silfwerbrand, FACI, is Professor in Structural Engineering and Bridges at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. His research interests include industrial floors, fiber concrete, concrete repair, concrete roads, self-consolidating concrete, and concrete and fire. 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 of Concrete. He is also active in the Swedish Concrete Association and the Fédération Internationale du Béton (*fib*).

Pisos Industriales de Concreto con Fibras

Necesidades de investigación identificadas

Por Johan L. Silfwerbrand

Por más de 40 años, el concreto reforzado con fibra, en especial el concreto reforzado con fibra de acero, ha sido utilizado en la industria de la construcción Sueca. Dos grandes ejemplos son el concreto lanzado para el fortalecimiento de taludes, y el concreto con fibra de acero para pisos de concreto industrial. Suecia es uno de los países pioneros en utilizar concreto lanzado reforzado con fibra de acero, en parte por los depósitos de rocas de alta calidad del país, y en parte debido a la investigación llevada a cabo principalmente en KTH *Royal Institute of Technology*, Estocolmo, Suecia. Para pisos industriales de concreto con fibras, el *Concrete Report No. 4¹* se consideró que estaba a la vanguardia internacional cuando fue publicado en la década de los 1990's por la Asociación Sueca del Concreto.

Los pisos industriales de concreto son construidos como losas sobre el suelo, o como losas apoyadas en pilotes. Debido a que no cargan de la misma manera directa que las losas y las vigas elevadas, no se consideran estructuras portantes. Como consecuencia, los diseñadores no tienen que seguir los códigos y regulaciones de diseños convencionales. En Suecia, esto resulta en una competencia entre conceptos de diseños con diferentes grados de seguridad.² Por ejemplo, el método de diseño tradicional Sueco para pisos industriales de concreto con fibras de acero, compite con un método menos conservador desarrollado en Bélgica, comúnmente llamado método continental.³

En muchos casos, los diseños basados en métodos más aventureros, resultan en estructuras más delgadas y de buen rendimiento. Sin embargo, también pueden resultar en losas con mayor cantidad de grietas. Es

probable que las historias exitosas estén conectadas a algunas circunstancias beneficiosas que no son consideradas en el método de diseño. Algunos posibles factores incluyen:

- Efecto de arco en las losas;
- Aumento de la resistencia del concreto con el paso del tiempo;
- La contribución del suelo en soportar la losa.
- Los efectos de borde (mayormente negativos) presentes en las vigas de prueba utilizadas en el desarrollo del método, no existen en la losa;
- Efecto membrana en la losa;
- Orientación de la fibra más beneficiosa en la losa que en las vigas de prueba;
- Esfuerzos multi-axiales en la losa;
- Reducción del riesgo de zonas débiles en la losa.

Los factores identificados con los efectos más beneficiosos en la resistencia de las losas son el efecto arco, efecto membrana, riesgo reducido de zonas débiles, y contribución del suelo o del terreno. Este artículo describe estos en más detalle, e identifica la investigación necesaria para llenar los espacios vacíos en la base de conocimientos.

Los factores principales:

Efecto arco

El efecto arco está ilustrado en la Figura 1: un esquema de una losa, apoyada en pilotes, cargada desde la superficie superior. Una parte de la carga es llevada directamente desde el punto de carga hasta los soportes, a través de un arco. El efecto arco aumenta con la disminución de la esbeltez $\lambda = L/h$, donde L es el espacio entre los pilotes o pilas, y h es el espesor

de la losa. Teóricamente, los movimientos horizontales deben ser prevenidos, o por lo menos parcialmente prevenidos, para que el efecto arco en acción se desarrolle. Sin embargo, fricción entre la losa y la capa subyacente podría ser suficiente para generar alguna acción del arco. Si la carga se encuentra cerca del pilote o de algún otro soporte, un efecto arco sin restricción horizontal se puede desarrollar, al igual que las cargas cercanas al soporte se consideran cuando se diseñan vigas de concreto para cortante.

En Suecia, el efecto arco en losas de concreto ha sido estudiado por Birke⁴ y Nilsson⁵. Birk estudió losas de concreto reforzado convencionalmente, y Nilsson estudió el concreto lanzado reforzado con fibras anclando en la roca. En casos con movimiento horizontal restringido, ambos encontraron contribuciones sustanciales del efecto arco a la capacidad de carga. Nilsson notó que el efecto arco disminuye con el aumento de deformación debido una reducción versine (brazo de palanca). Hasta donde yo sé, nadie ha estudiado el efecto arco en losas de concreto reforzadas con fibra soportadas sobre suelo o pilotes.

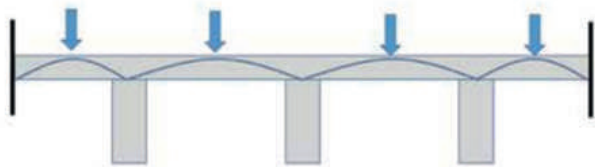


Fig. 1 Efecto arco en una losa apoyada



Fig. 2: Efecto membrana en una losa apoyada

El método europeo para ensayar la resistencia a la tracción por flexión del concreto reforzado con fibras, EN 14651⁶, trata sobre la flexión en tres puntos de una viga de 550 mm (22 in.) de largo y 150 mm (6 in.) de altura. La relación distancia entre corte y altura $a/h = 250/150 = 1.67$. En el Código Europeo 2,⁷ el límite para

tener en cuenta el efecto de arco positivo al diseñar para cortante es $a/d=2$, donde d es la profundidad efectiva. Si bien d es algo menor que h , es evidente que la acción del arco en los resultados de la prueba EN 14651 es una sobreestimación de la resistencia a la tracción. Otro método de prueba, EN 14488,⁹ se utiliza para medir la capacidad de absorción de energía de una mezcla de concreto. Una losa de concreto lanzado reforzado con fibra con dimensiones de 600 x 600 x 100 mm (24 x 24 x 4 in.) se apoya en un marco que proporciona un soporte cuadrado rígido con luces libres de 500 mm (20 in.) en cada dirección. Se aplica una carga concentrada de 100 x 100 mm en el centro, lo que da como resultado una $a/h = 200/100 = 2.0$ considerablemente pequeña. En combinación con la resistencia a los movimientos horizontales proporcionada por las condiciones de soporte especificadas, es probable que el método dé como resultado un efecto de arco no despreciable.

Efecto membrana

El efecto membrana tiene tanto similitudes como diferencias en comparación con el efecto arco (mostrado en la Fig. 1 y 2). En ambos casos, una parte de la carga es distribuida en la dirección horizontal. Sin embargo, en el último caso, la resistencia la proporciona la tensión en lugar de la compresión. El efecto membrana aumenta al aumentar la deformación. La losa debe tener una capacidad de tensión considerable que fácilmente sea proveída por refuerzo convencional. La capacidad de tensión de una losa de concreto con fibra es mucho más bajo, pero aumenta al aumentar el contenido de fibra, la resistencia de la fibra, y los dispositivos de anclaje de la fibra. Una combinación de fibras y refuerzo convencional algunas veces es utilizada en losas apoyadas en pilotes.

Para losas de concreto con fibra sin refuerzo convencional, el efecto membrana es considerablemente menor. Sin embargo, una cuantificación sería interesante y, por consecuencia, hay una necesidad de investigación.

Riesgo reducido de zonas débiles

El concreto con fibra es un material heterogéneo que consiste de partículas agregadas, pasta de cemento, y fibras. Las partículas agregadas, al igual que las fibras, tienen ubicaciones y orientaciones esencialmente aleatorias en la matriz de concreto. Si el proceso de fabricación no ha tenido éxito, podría haber alguna segregación que lleva a concentraciones más altas de agregados y fibra en la parte inferior de la losa de concreto. El proceso de fabricación puede definir hasta cierto grado la orientación de fibra. Sin embargo, la aleatoriedad es alta en concreto reforzado con fibra.

Mientras que la dispersión en fuerza es considerablemente alta para el concreto simple, la dispersión es aún mayor en el concreto reforzado con fibra debido a que el enfoque en este caso está en la resistencia a la tracción por flexión. Si fuéramos a utilizar conceptos tradicionales de seguridad y probabilidad al diseñar el concreto reforzado con fibra, terminaríamos con valores de resistencia de diseño muy bajos, y en consecuencia, estructuras de concreto reforzado con fibra sumamente gruesas y antieconómicas. En consecuencia, debemos pensar diferente.

En la guía de diseño de concreto reforzado con fibra sueca,¹⁰ el riesgo de zonas débiles en la estructura de concreto reforzado con fibra ha sido considerado. La base para el diseño es el valor de diseño de la resistencia a la tracción por flexión que se calcula a medida que el valor característico de la resistencia dividido por un factor de seguridad parcial $\gamma_f = 1.5$ para el estado límite. Por lo general, esto llevará a valores de resistencia muy bajos en estructuras determinadas estáticamente, como las vigas simplemente apoyadas (Fig. 3, arriba). Debido a que la mayoría de los materiales de concreto de fibra se ablandan por deformación, la viga simplemente apoyada no podrá soportar una carga mayor que la carga de agrietamiento. La grieta se desarrollará en la sección más débil a lo largo de la parte de la viga que está sujeta al mayor momento de flexión.

En una viga estáticamente indeterminada (por ejemplo, la viga de dos vanos en la Fig. 3, medio), la viga no colapsará antes de la aparición de la segunda grieta. El riesgo de dos zonas débiles es menor que el riesgo de una sola zona débil. Esta condición beneficiosa ha sido considerada en la guía de diseño sueca al multiplicar el valor de diseño de la resistencia por un factor η_{det} que para la viga estáticamente indeterminada se establece en $\eta_{det} = 1.4$. En el interior de una losa de concreto reforzada con fibra (mostrado en la Fig. 3, abajo), varias grietas aparecerán antes del colapso de la losa. Lo llamamos un patrón de línea de rendimiento. El riesgo de varias zonas débiles es mucho más bajo en este caso. De acuerdo a la guía de diseño sueca, el factor que considera el grado de determinación estática está establecido para $\eta_{det} = 2.0$. Los antecedentes de estos valores se proporcionan en un documento de conferencia.¹¹

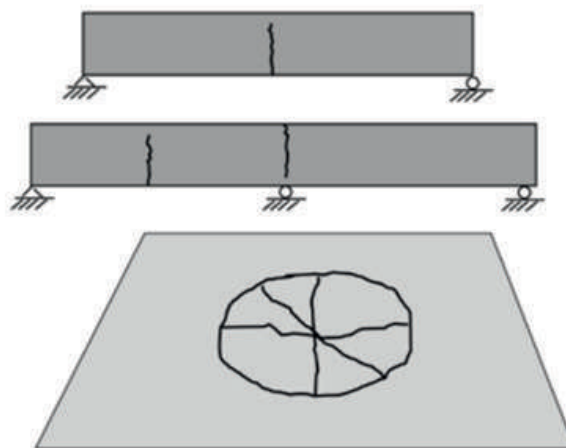


Fig. 3: El riesgo de colapso es mayor en vigas simplemente apoyadas (arriba), moderado en vigas estáticamente indeterminadas (medio) y menor en el interior de losas (abajo)

El concepto sueco ha sido criticado por ingenieros estructurales experimentados, porque difiere de cómo se diseñan las estructuras de concreto reforzado convencionalmente cuando se utiliza, por ejemplo, el Código Europeo 2.⁷ Creo que dicho concepto también puede ser utilizado para el diseño de concreto reforzado (RC) con estructuras en flexión.

Sin embargo, la capacidad de la dispersión de la flexión de un momento en un elemento RC es inferior

al 10%. Lo que conduciría a valores de η_{det} entre el 1.0 y el 1.1. Por lo tanto, la reducción del riesgo es casi insignificante.

El concepto sueco es una forma de ingeniería para resolver este problema. Se están desarrollando más investigaciones para obtener conceptos más detallados y precisos.

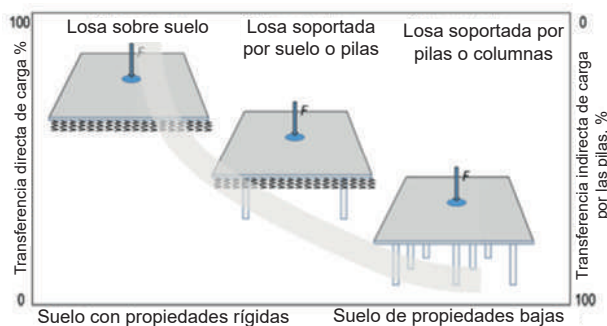


Fig. 4: Contribución desde el suelo (después de Falkner y Gossia¹²)

Contribución del suelo

La contribución del suelo es obvia para losas sobre suelo. La losa apoyada en pilotes constituye un caso intermedio entre la losa sobre suelo y la losa apoyada en columnas (mostrada en la Fig. 4) ya que la primera está apoyada por ambos pilotes y el suelo entre los remates. Inmediatamente después de fabricarse, la contribución del suelo es substancial; sin embargo, esta contribución disminuye con el tiempo debido al lento desarrollo del asentamiento del suelo. (Las pilas se consideran como si descansaran sobre roca o fijadas en la dirección vertical a través de otras medidas geotécnicas.)

La contribución del suelo usualmente se descuida en el diseño, y esto lleva a una subestimación de la capacidad de carga de magnitud desconocida pero decreciente. Sin embargo, sabemos por experiencia que las cargas de la etapa de construcción a menudo son las más altas durante la vida útil de un suelo de concreto industrial. En esta etapa temprana, la contribución del suelo probablemente es substancial. El suelo también puede contribuir en otro momento si la carga provoca grandes deformaciones. Suponiendo que un asentamiento del suelo de 10 mm (0.4 in.), por

ejemplo, el suelo llevará una parte de la carga cuando la deflexión de la losa exceda los 10 mm. Y 10 mm no es una deflexión grande si el espacio entre pilotes es, por ejemplo, 4 m (13 ft).

Necesidades de investigaciones

Un piso industrial de concreto no es considerado como una estructura de carga en el sentido de que dichas estructuras son definidas por los códigos de edificios. Ni siquiera el agrietamiento severo del suelo provocará el colapso de la nave industrial y, debido a que no hay pisos ocupados debajo, nadie puede resultar herido o muerto por caída de escombros. En consecuencia, el diseñador tiene gran libertad para seleccionar el método de diseño. A la larga, no es deseable que los métodos de diseños con diferentes grados de seguridad compitan (por lo menos sin reconocer claramente los grados de seguridad). En Suecia, el diseño de pisos industriales de concreto reforzado con fibra de acero es usualmente hecho por el productor de fibra de acero o un contratista que esté calificado en construcción de pisos industriales de concreto. Debido a que diferentes compañías están utilizando diferentes métodos de diseños, la competencia no será comparable. Por un lado, la solución simple sería recomendar fuertemente el método de diseño sueco más seguro. Pero por otra parte, no queremos poner las demandas de seguridad tan altas que genere el uso de recursos naturales innecesarios (cemento, concreto, y acero). Necesitamos saber por qué el método continental a menudo conduce a soluciones exitosas sin grietas y otros problemas, incluso con su nivel de seguridad más bajo. En mi opinión, la explicación se encuentra en los cuatro fenómenos discutidos en este artículo: efecto arco, efecto membrana, riesgo de zonas débiles reducido, y la contribución del suelo.

El efecto arco deberá ser estudiado a través de la combinación de pruebas de gran escala y análisis numéricos. La influencia de la delgadez $\lambda = L/h$ es importante para investigar, y varios tipos de restricciones deberán ser examinadas—incluyendo la fricción del suelo subyacente.

El efecto membrana es probable que sea más pequeño que el efecto arco en pisos de concreto reforzados con fibra de acero. Sin embargo, será mayor que cero, y durante una prueba a gran escala es probable que sea mejor que la acción del arco cuando las deformaciones superen ciertos valores. Además, se prevé que el efecto de membrana sea sustancialmente mayor en losas con una combinación de refuerzos y fibras convencionales. El riesgo reducido de puntos débiles y cómo considerar ese concepto en el proceso de diseño debe evaluarse mediante un importante estudio numérico que combine el método de los elementos finitos con la teoría de la probabilidad, quizás también aprovechando el método de Monte Carlo.

La contribución del suelo debe ser investigada a través de pruebas de campo. La extracción de testigos a través de la losa sería una forma de estimar el asentamiento, si lo hubiera, debajo de una losa soportada por pilotes existentes pero podría ser posible utilizar varios métodos de prueba no destructivos. Posteriormente, pruebas de carga deben realizarse en ambas losas con asentamientos detectados y losas de referencia sin ningún asentamiento.

Finalmente, sería interesante hacer investigaciones de campo en losas delgadas de concreto reforzado con fibra de acero diseñadas por el método continental.

Se deben examinar los pisos con y sin grietas severas. ¿Por qué se agrietaron y por qué no? ¿Las cargas han sido superiores o inferiores a las previstas? ¿Las condiciones para el efecto arco han sido especialmente beneficiosas en las losas sin agrietarse?

Observaciones finales

Los pisos industriales de concreto reforzados con fibra de acero considerados estáticamente como losas sobre el suelo y losas soportadas por pilotes no se consideran estructuras de carga, lo que significa que los diseñadores tienen libertad para seleccionar el método de diseño. En Suecia, compiten dos métodos de diseño con diferentes niveles de seguridad. Esto no es deseable. Se necesita investigación para comprender

por qué, con bastante frecuencia, el método de diseño continental menos conservador conduce a pisos exitosos. Para responder a esta pregunta, es necesario investigar cuatro posibles explicaciones: efecto arco, efecto membrana, riesgo reducido de zonas débiles y contribución de la pendiente o del suelo.

Referencias

1. "Stålfiberbetong—rekommendationer för konstruktion, utförande och provning (Steel Fibre Concrete—Recommendations for Design, Construction and Testing)," Concrete Report No. 4, second edition, Swedish Concrete Association, Stockholm, Sweden, 1997, 135 pp. (en Swedish)
2. Destrée, X., and Silfwerbrand, J., "Steel Fibre Reinforced Concrete in Free Suspended Slabs: Case Study of the Swedbank Arena in Stockholm," Proceedings of 11th fib Symposium on Concrete Structures for Sustainable Community, Stockholm, Sweden, June 11-14, 2012, pp. 97-100.
3. Silfwerbrand, J., "Safety Levels in Steel Fibre Concrete Floors," Publication No. 50, Proceedings of XXII Nordic Concrete Research Symposium, Reykjavík, Iceland, Aug. 13-15, 2014, pp. 75-78.
4. Birke, H., "Kupoleffekt vid betongplattor (Arch Action in Concrete Slabs)," Bulletin No. 108, Department of Structural Mechanics and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1975. (en Swedish)
5. Nilsson, U., "Structural Behaviour of Fibre Reinforced Sprayed Concrete Anchored in Rock," Bulletin No. 71 (Doctoral Thesis), Department of Structural Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2003.
6. SS-EN 14651:2005+A1:2007, "Test Method for Metallic Fibre Concrete—Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality [LOP], Residual)," Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 2007, 28 pp.
7. EN 1992-1-1:2004, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings," European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004, 225 pp.
8. Silfwerbrand, J., "Codes for SFRC Structures—A Swedish Proposal," Proceedings of 8th fib Symposium on Tailor Made Concrete Structures, Amsterdam, the Netherlands, May 19-21, 2008, 6 pp.
9. SS-EN 14488-5:2006, "Testing Sprayed Concrete—Part

5: Determination of Energy Absorption Capacity of Fibre Reinforced Slab Specimens,” Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 2006, 6 pp.

10. SS 812310:2014, “Fibre Concrete—Design of Fibre Concrete Structures,” Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden, 2014, 38 pp.

11. Silfwerbrand, J., “How to Deal with Scatter in Steel Fibre Concrete Structures—A Swedish Proposal,” Proceedings of 14th fib Symposium on Performance-Based Approaches for Concrete Structures, Cape Town, South Africa, Nov. 21-23, 2016.

12. Falkner, H., and Gossia, U., “Pile-Supported Reinforced or Prestressed SFRC Ground Slabs,” Proceedings of 3rd International RILEM Workshop on High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC3), H.W. Reinhardt and A.E. Naaman, eds, Mainz, Germany, May 16-19, 1999, pp. 595-602.



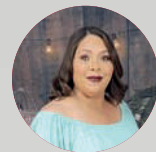
Johan L. Silfwerbrand, FAcI, es un profesor en ingeniería estructural y puentes en KTH Real Instituto de Tecnología, Estocolmo, Suiza. Sus intereses de investigación incluyen pisos industriales, fibrocemento, reparación de concreto, caminos de concreto, concreto autocompactante y concreto y fuego. Es miembro de los Comités 123 de ACI, Investigación y Desarrollos Actuales; 342, Evaluación de puentes y elementos de puentes de concreto; 345, Construcción y conservación de puentes; y 546, Reparación de concreto. También participa activamente en la Asociación Sueca del Concret0 y en la Fédération Internationale du Béton (fib).

La traducción de este artículo correspondió a la Sección Puerto Rico

Pisos Industriales de Concreto con Fibras



Traductor: Nicole Mejía Borrero



Revisor Técnico: Anabel N. Merejildo