

Компьютерная томография для анализа пространственной ориентации фибры

Возможности применения компьютерной томографии в исследовании сталефибробетона

Применение сталефибробетона открывает разнообразные возможности в отношении снижения издержек, сокращения сроков строительства и повышения экологичности. Стандартно из сталефибробетона изготавливаются композитные железобетонные перекрытия, несущие фундаментные плиты и стены, промышленные полы, торкрет-бетон, туннинги для тоннельного строительства и подводные подкладные плиты. Нерешенным остается вопрос об обеспечении контроля качества сталефибробетона и воспроизводимости этого качества в условиях стройплощадки. Используемые до сих пор методы очень затратны и рассчитаны на определение количества фибры. Однако они не позволяют провести надежный и достоверный анализ распределения и пространственного расположения фибры. В рамках совместного научно-исследовательского проекта, Технический университет Кайзерслаутерна и Институт технической и экономической математики общества Фраунгофера ITWM доказали, что компьютерная томография (КТ) в сочетании с современным программным обеспечением для обработки и анализа изображений подходит для определения пространственной ориентации и распределения фибры в фибробетоне. В отличие от предыдущих методик, компьютерная томография позволяет распознавать и анализировать особенности ориентации и распределения фибры по всему объему фибробетона или бетона с тканевым армированием.

■ Профессор, д.т.н. Юрген Шнелль, Фран Шулер, магистр технических наук, профессор, д.т.н. Вольфганг Брайт, доктор Рональд Рёш ■

По своей природе бетон отлично воспринимает напряжение на сжатие, однако его прочность на растяжение существенно уступает и зависит от множества внешних параметров. Именно при растущей прочности на сжатие стойкость к разломам неудовлетворительна. Для достижения требуемой пластичности и устранения хрупкости в бетонную смесь можно добавить фибру. Для улучшения свойств бетона решающее значение имеют количество, ориентация и распределение фибры. Это обуславливает необходимость отслеживания данных величин в рамках процедуры контроля качества на стройплощадке или проведения научных изысканий с целью оптимизации высокотехнологичных бетонов.

В сотрудничестве с институтом технической и экономической математики общества Фраунгофера (ITWM), Кайзерслаутерн, была разработана новая технология для анализа положения фибры в бетоне. Технология основывается на анализе снимков трехмерной компьютерной томографии исследуемого образца. Наряду с анализом фибры, эта методика позволяет также обнаружить дефекты (трещины, воздушные поры и даже каналы вырывания фибры).

На базе информации из первых технико-экономических обоснований ([1] и [2]) эта технология постоянно совершенствовалась, что вело к расширению областей ее применения.

В настоящей статье мы рассмотрим два примера практического применения данной методики.

Общие сведения об аналитической методике

Компьютерная томография

Трехмерная компьютерная томография основана на реконструкции объекта при помощи рентгеновских снимков, которые делаются в различных направлениях с использованием рентгеновского излучения. Исследуемый образец укладывается на поворотный диск и вращается с определенным шагом. В нашем случае для каждого из 800 положений было сделано по три рентгеновских снимка, которые были отправлены в программу оптимизации изображений. В результате томографической

реконструкции получается объемное изображение части исследуемого образца. На базе этих трехмерных изображений можно выделить компоненты с одинаковыми физическими свойствами. Различные компоненты исследуемого образца расцветаются соответствующими оттенками серого в зависимости от контраста поглощения. Оттенки шкалы серого соответствуют радиографической плотности. В случае микро-КТ (μ СТ), речь идет о технологии измерения маленьких конструктивных деталей в микродиапазоне (μ m), что предусматривает использование специальных источников рентгеновского излучения. При этом для получения большого геометрического

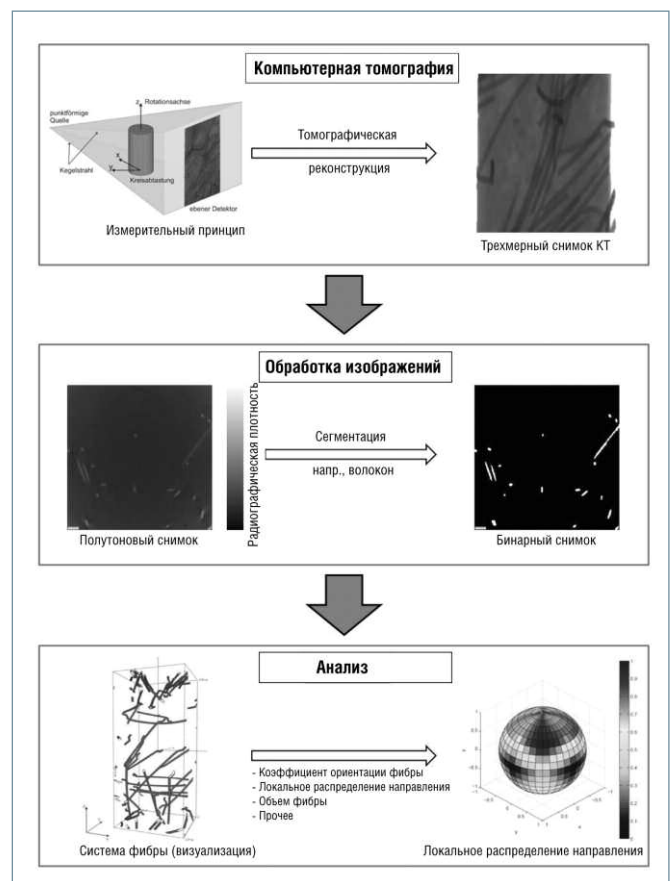


Рис. 1: Этапы КТ-анализа



tecno**com**

CONCRETE IN FORM

Powerful results

С 1976 компания tecno**com** занимается проектирование и производством форм и комплексных установок для жилищного, промышленного и дорожного строительства. Своим мировым успехом мы обязаны обширному технологическому опыту, надежности и вниманию к нуждам клиентов.





■ Фран Шулер, магистр технических наук (1976 г.р.); изучал гражданское строительство в Высшей школе Кайзерслаутерна. С 2005 г. по 2008 г. работал научным сотрудником на факультете монолитного строительства в Высшей школе Кайзерслаутерна. В 2008 г. защитил диссертацию на академическую степень магистра технических наук. С 2008 года является научным сотрудником на факультетах монолитного строительства и строительных технологий, а также строительных материалов в Высшей школе Кайзерслаутерна.

frank.schuler@bauing.uni-kl.de



■ Профессор, д.т.н. Вольфганг Брайт (1963 г.р.); изучал гражданское строительство в Рейнско-Вестфальской высшей технической школе в Аахене. С 1990 г. по 1997 г. работал научным сотрудником в институте строительных исследований (ibac) в Рейнско-Вестфальской высшей технической школе в Аахене. После защиты докторской диссертации в 1997 г. по теме «Критическое содержание хлоридов, вызывающее коррозию бетонов» работал в должности главного инженера в отделе бетонных технологий научно-исследовательского института цементной промышленности в Дюссельдорфе. С 2007 г. он руководит строительно-материаловедческим факультетом ТУ Кайзерслаутерна и в 2008 г. возглавил местную лабораторию по испытанию материалов.

wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de



■ Профессор, д.т.н. Юрген Шнелль (1953 г.р.); изучал гражданское строительство в технической школе Дармштадта. В 1979 - 2002 гг. работал ведущим техническим специалистом в компании Philipp Holzmann AG во Франкфурте-на-Майне и Дюссельдорфе. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию по теме ограничения ширины раскрытия трещин под руководством проф. Кёнига в ТУ Дармштадта. В 1991 - 2002 гг. он преподавал в Рурском университете в Бохуме. С 2002 г. руководит факультетом монолитного строительства и строительных конструкций в ТУ Кайзерслаутерна.

juergen.schnell@bauing.uni-kl.de



■ Доктор Рональд Рёш (1962 г.р.); изучал математику в Техническом университете Карл-Маркс-Штадта. В 1986 -1990 гг. защитил докторскую диссертацию в ТУ Хемница. С 1990 г. по 1995 г. работал научным сотрудником на математическом факультете в ТУ Кайзерслаутерна, специализируясь на обработке изображений. С 1996 г. является научным сотрудником Института технической и экономической математики общества Фраунгофера. С 1999 г. возглавляет отдел обработки изображений.

ronald.roesch@itwm.fraunhofer.de

увеличения испытательный образец помещается очень близко к источнику рентгеновского излучения, в то время как приемник располагается относительно далеко от источника рентгеновского излучения. Возможности геометрического увеличения ограничены образующейся размытостью и размером приемника.

На Рис. 1 показаны этапы анализа КТ-томографического снимка испытательного образца, начиная с обработки изображений до анализа положения фибры.

Обработка изображений

Для анализа системы фибры используется модульное программное обеспечение MAVI [3] Института технической и экономической математики общества Фраунгофера. Эта аналитическая программа позволяет наблюдать сложные геометрические микроструктуры. Изначально программа разрабатывалась для описания пеноматериала с открытыми порами, однако в ходе совместной работы по оптимизации было доработано под фибробетон. Реконструированные микротомографические снимки (μ СТ), которые изначально получают в формате 16-битной серой шкалы (65 536 оттенков серого), пересчитываются в 8-битный формат серой шкалы (256 оттенков серого) в целях сокращения времени расчетов. Наряду с обработкой трехмерных изображений может потребоваться обработка КТ-снимки по причине дефектов изображения. Для улучшения качества изображе-

ний предусмотрены разнообразные фильтры, которые позволяют, например, удалить с изображений артефакты, появляющиеся по техническим причинам. Кроме того, используемые фильтры делают возможным удаление частиц помех. Например, если необходимо определить ориентацию и количество стальной фибры, фибру сначала следует отделить от других компонентов (цементной матрицы, инертных, воздушных пор). В области обработки изображений этот процесс называется сегментацией объекта. При сегментации фибры используются пороговые величины. Трехмерный

КТ-снимок с градацией серой шкалы состоит из отдельных объемных вокселей, которые соответствуют пикселю в двумерном изображении. Каждый воксель окрашен в определенный оттенок серого, который отражает радиографическую плотность. При помощи пороговой величины объемному пикселю, который принадлежит фибре, присваивается значение «1» (белый), а всем другим объемным пикселям – значение «0» (черный) (Рис. 1, обработка изображений). Эта процедура называется бинаризацией, поскольку в результате остается лишь два значения.

Анализ

На основе сегментированной системы фибры можно судить об однородности структуры. Это позволяет определять важные параметры, такие как объемная доля фибры в образце целиком или его части. Для системы фибры определяются обобщенные проекции в 13 дискретных направлениях – три оси координат, шесть плоскостных диагоналей и четыре объемные диагонали. В случае этих проекций, фибра проецируется как линия.

Коэффициент ориентации фибры η_{or} , описывающий степень влияния ориентация фибры на ее эффективность, определяется отношением спроецированной общей длины фибры $l_{p, \phi}$ к фактической общей длине фибры l_V в рассматриваемом объеме V .

Для экспериментального расчета коэффициента ориентации до сих пор применяли исследования поверхности излома или среза. Обзор этих аналити-

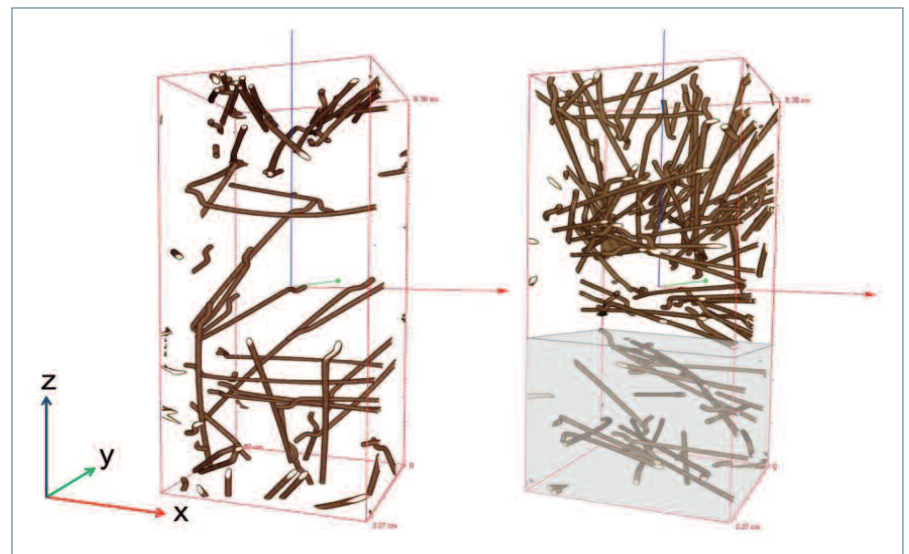


Рис. 2: верхняя и нижняя части ядра, рассматриваемая область: 33 x 33 x 83 мм, трехмерная визуализация стальной фибры ($l = 60$ мм, $d = 0,75$ мм), слева (верхняя часть): коэффициент ориентации фибры: $x = 0,53$, $y = 0,56$, $z = 0,37$, содержание фибры: 0,61 об.%, справа (нижняя часть): коэффициент ориентации фибры: $x = 0,57$, $y = 0,61$, $z = 0,35$, содержание фибры: 1,23 об.%

В компании ТЕКА всё
вращается вокруг смешивания

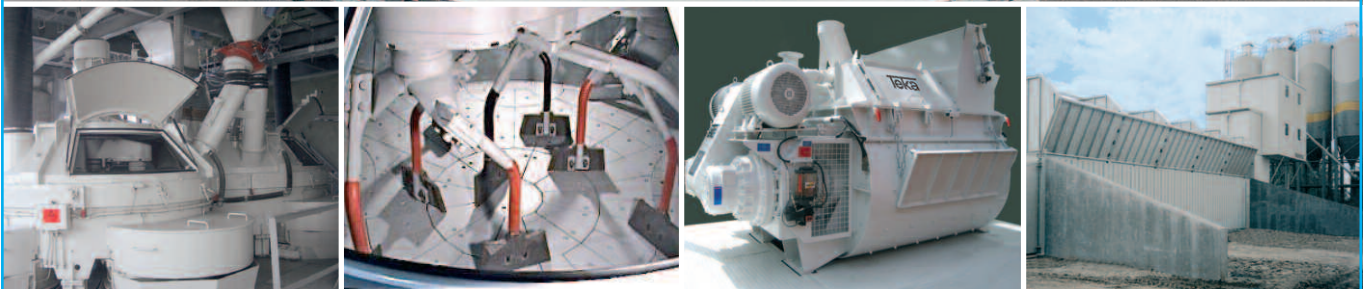
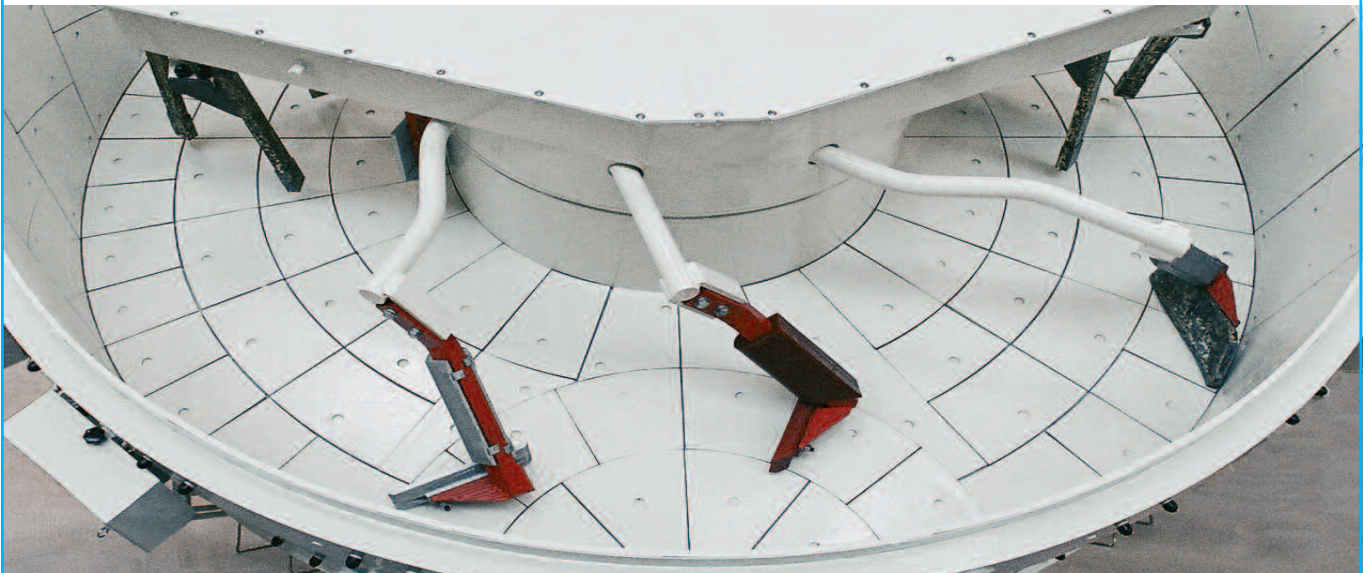
Тека

Кольцевые лотковые смесители – противоточные планетарные смесители Двухвалвные смесители

А также смесители специального изготовления для целенаправленного производства облицовочного бетона, фибробетона, самоуплотняющегося бетона, особо высокопрочного бетона

Более чем 50-летний опыт в разработке и внедрению смесительных и дозирующих технологий на мировом рынке.
Надёжное технологическое оборудование, долгосрочный срок службы.

Дополнительно к нашей программе смесителей мы предлагаем:
мобильные или стационарные смесительные установки, модернизацию установок, консультации, проектирование, изготовление, монтаж, сервис.



TEKA Maschinenbau GmbH, In den Seewiesen 2, D-67480 Edenkoben
Tel.: +49 (0) 63 23 8 09-0, Telefax: +49 (0) 63 23 8 09-10, info@teka-maschinenbau.de, www.teka.de

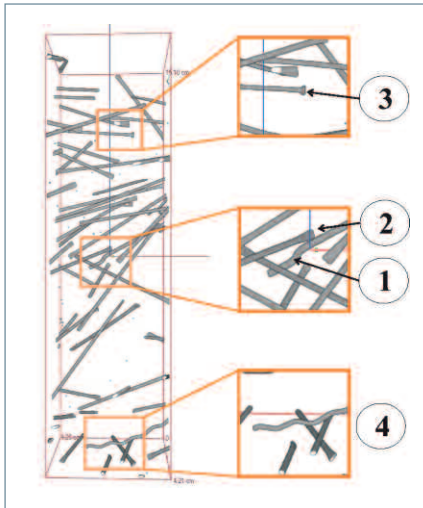


Рис. 3: Визуализация ядра, анализируемый участок образца 40 x 40 x 150 мм

ческих методик дан в [1], [4] и [5]. В отличие от них, КТ-анализ позволяет провести неразрушающее исследование всего объема испытательного образца. Наряду с определением коэффициента ориентации фибры, модульное программное обеспечение MAVI [3] делает возможным трехмерную визуализацию анализируемой системы фибры. Таким образом, распределение фибры в образце можно оценить уже чисто визуально.

Все вышесказанное можно проиллюстрировать на примере бетонного ядра, взятого из промышленного пола. Для оценки однородности распределения фибры верхняя и нижняя часть анализируемого диапазона ядра изучались по отдельности. На Рис. 2 показан результат визуализации фибры. Даже чисто визуально в верхней части (Рис. 2, слева) наблюдается более высокая низкая концентрация фибры, чем в нижней части (Рис. 2, справа). На первый взгляд, фибра располагается трехмерно (изотропно) в обеих частях, что также подтверждается коэффициентами ориентации фибры. Однако, если повнимательнее присмотреться к небольшой области в нижней части, отмеченной на Рис. 2 (справа), то низкий коэффициент ориентации по оси z показывает двумерную ориентацию фибры в плоскости X-Y.

Практические применения

Исследование стальной фибры – промышленные полы

В рамках контроля качества производства и переработки сталефибробетона методика КТ-анализа позво-

ляет судить об ориентации, количестве и распределении добавленной фибры.

Для проведения полевых испытаний и взятия проб ядра компания Arcelor Mittal предоставила в распоряжение исследователей полы из сталефибробетона в своих промышленных цехах. Возможность взять более крупные образцы позволила испытать эффективность КТ-метода в больших масштабах в реальных эксплуатационных условиях.

На каждом забетонированном участке было определено по три измерительные точки, из которых было выбурено по три ядра.

Пространственное распределение фибры свидетельствовало об изотропной ориентации волокон. Однако анализ

соседних ядер показал неоднородное содержание фибры, что говорит о неравномерном распределении фибры.

Трехмерная визуализация позволила также определить тип используемой фибры и их параметры. На Рис. 3 показаны прямые волокна с вогнутыми ①, сплюснутыми ② и утолщенными концами ③, а также волнистые волокна ④.

Исследования коэффициента учета ориентации фибры k_f^t

Согласно директиве «Сталефибробетон» немецкого комитета по железобетону [6], в зависимости от прочности на растяжение после растрескивания, сталефибробетоны подразделяются на различные классы. Основным классифи-



Рис. 4: Динамометрический датчик



Максимальная гибкость при выполнении потребностей клиента

Wiggert® + Co.
KABAG®

Advanced Mixing Technology

Wiggert & Co. GmbH
Ваххаусштрассе, 3в, 76227 Карлсруэ, Германия
Тел: +49 (0) 721 94346-0 факс: +49 (0) 721 402208
email: info@wiggert.com

www.wiggert.com



Каждая установка по производству бетона это уникал. Поэтому мы понимаем всю важность решений для наших установок под ключ. Все установки для бетонной промышленности разрабатываются с учётом индивидуальных требований клиента.

Предоставьте нам возможность показать Вам, как благодаря инновационному проектированию установки могут повыситься Ваша прибыль и снизиться затраты.



WiCo-Group®
Wiggert + Co. LMP ACS Spoth



кационным критерием служит значение прочности на растяжение после растрескивания, которая устанавливается в ходе серии испытаний на растяжение на изгиб.

Для определения необходимого для измерений расчетного значения центрической прочности на растяжение после растрескивания, сначала, при помощи переводного коэффициента, значение характеристической прочности на растяжение после растрескивания пересчитывается в базовое значение прочности на растяжение после растрескивания. Умножение на коэффициенты влияния геометрии конструктивного элемента на коэффициенты варьирования и ориентацию фибры позволяет принять во внимание влияние этих параметров на свойства прочности на растяжение после растрескивания сталефибробетона.

При определении классов прочности изготавливаются стандартные лабораторные образцы (700 x 150 x 150 мм) и перед установкой в лабораторный пресс поворачиваются на 90°.

Коэффициент ориентации фибры для стандартных балок $\eta_f = 0,6$ (φ соответствует направлению силы упругости) может применяться универсально для всей поверхности сечения (ср. [4] и [7]). Это значение можно рассматривать как одномерную ориентацию. Свободному распределению фибры препятствуют ограничительные поверхности (опалубка и поверхность изделия), расположенные относительно близко друг к другу. В ряде собственных работ эта тенденция подтвердилась [8].

В случае конструктивных элементов в форме плиты, на ориентацию фибры

оказывают влияние исключительно две ограничительные поверхности. Поэтому волокна, как правило, ориентируются параллельно верхней и нижней поверхности (двумерная ориентация). [7] Для тонких плит, опертых с четырех сторон, под точечной нагрузкой на сечениях изгибных трещин коэффициент ориентации фибры составил η_f от 0,45 до 0,55 в зависимости от доли фибры.

При определении коэффициента учета ориентации фибры k_f^f , авторы [6] свели ситуацию к двум упрощенно-обобщенным случаям: во-первых, ровные плоские конструктивные элементы, заливаемые горизонтально, в которых фибра ориентируется параллельно кромкам элемента в направлении изгибно-растягивающих напряжений ($k_f^f = 1,0$), и, во-вторых, вертикально бетонруемые конструктивные элементы, в которых волокна располагаются перпендикулярно направлению растягивающих усилий ($k_f^f = 0,5$).

Дальнейшей дифференциации в [6] не предусмотрено. Следовательно, возникает вопрос, как поступать с элементами, не подпадающими ни под одну из указанных категорий или не обладающими указанными коэффициентами учета ориентации фибры k_f^f .

Коэффициент учета ориентации фибры k_f^f не идентичен коэффициенту ориентации фибры η_f . Гораздо в большей степени этот коэффициент k_f^f описывает свойство фибры располагаться перпендикулярно направлению бетонирования и, соответственно, параллельно последующей изгибной нагрузке при заливке плит. Подобное двумерное рас-

положение фибры считается благоприятным, и для этих элементов задается коэффициент $k_f^f = 1$.

В отличие от вышеописанного сценария, в случае тонкостенных вертикально заливаемых элементов, направление бетонирования соответствует последующему направлению растягивающих напряжений. Фибра ориентируется, скорее, ортогонально к направлению изгибно-растягивающих напряжений. Однако, если под действием принудительного усилия в горизонтальном направлении возникает растяжение, то можно применить коэффициент $k_f^f = 1,0$ [9].

Если, согласно определению, деталь не вписывается ни в один из этих двух сценариев, то КТ-анализ позволяет выбрать применяемый коэффициент учета ориентации фибры k_f^f .

Например, при исследовании слегка изогнутых плит было зафиксировано в высшей степени однородное распределение фибры во всех слоях по высоте. Расслоения и седиментации обнаружено не было. Среднее значение коэффициента ориентации фибры в направлениях параллельных опалубке составило $\eta_{x/y} = 0,57$, превысив значения для плит $\eta_{x/y} = 0,45 - 0,55$ (ср. [7]). Таким образом, согласно [6], часть 1, пп. 9.6/9.7, можно рекомендовать коэффициент $k_f^f = 1,0$ для определения расчетного значения центрической прочности на растяжение после растрескивания.

Заключение и перспективы

КТ-анализ позволяет точно описать распределение и положение фибры на



Via Maestri del Lavoro, 23
12022 BUSCA (CN) - ITALY
PH. +39 0171 944834
FAX +39 0171 946716
info@bodrocasseforme.com



Bodrero
CASSEFORME

С 1983 года компания BODRERO CASSEFORME srl высоко зарекомендовала себя на рынке проектирования, производства и установки форм и оборудования для железобетонных предварительно напряженных конструкций. Благодаря преимуществам компьютерных технологий и высочайших навыков персонала BODRERO CASSEFORME srl готовы проектировать формы для любых отраслей строительства.







WWW.BODROCASSEFORME.COM

ОСНОВНАЯ ПРОДУКЦИЯ И СЕРВИС

- Формы для индустрии сборного бетона
- Сервис по установке и запуску
- Принадлежности
- Запасные части

образцах готовых элементов (например для промышленных полов). Эта методика дает значительные преимущества с точки зрения контроля качества и выявления дефектов.

Способность сталефибробетона передавать растягивающие усилия через трещину зависит, в том числе, от ориентации, распределения и количества фибры, перекрывающей трещины в зоне.

Для более точного определения других параметров, определяющих характеристики материала после разрушения, в том числе, сцепление фибры с матрицей, была разработана испытательная установка (Рис. 4), которая, посредством компьютерной томографии, позволяет наблюдать микроструктуру бетона и поведение фибры при приложении растягивающей нагрузки на образец. Результаты этих испытаний должны пролить новый свет на адгезивные свойства фибры и образование трещин, чтобы скорректировать или дополнить существующие измерительные модели для конструктивных элементов, изготовленных из фибробетона. ■

■ Литература

- [1] Schnell, J., Schuler, F., Sych, T.: Analyse der Faserverteilung in Betonen mit Hilfe der Computer-Tomographie, Bauforschungsbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2009.
- [2] Schnell, J.; Schladitz, K.; Schuler, F.: Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis der Computer - Tomographie, in: Beton- und Stahlbetonbau 105, Heft 2, 2010, S. 72–77.
- [3] Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, „MAVI-Modular Algorithms for Volume Images, Version 1.4.1,“ Kaiserslautern, 2012.
- [4] Lin, Y.-z.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 494, Beuth, Berlin, 1999.
- [5] Tue, N. V., Henze, S., Küchler, M., Schenk, G., Wille, K.: Ein optoanalytisches Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung und -orientierung in stahlfaserverstärktem UHFB. In: Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 10, 2007, S. 674–680.
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie „Stahlfaserbeton“, Beuth, Berlin, 2010-03.
- [7] Erdem, E.: Probabilistisch basierte Auslegung stahlfasermodifizierter Betonbauteile auf experimenteller Grundlage, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2002.
- [8] Schnell, J., Breit, W., Schuler, F.: Use of computer-tomography for the analysis of fibre reinforced concrete, in: fib Symposium Prague 2011, 1, fib-International Federation for Structural Concrete (Hrsg.), Prague, 2011, S. 583-586.

■ ДАЛЬНЕЙШАЯ ИНФОРМАЦИЯ



TU Kaiserslautern
Gottlieb-Daimler-Straße 47
67663 Kaiserslautern, Deutschland
T +49 631 205 2157
F +49 631 205 3555
frank.schuler@bauing.uni-kl.de
www.uni-kl.de



Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM
Fraunhofer-Platz 1, 67663 Kaiserslautern, Deutschland
T +49 631 316000
F +49 631 316001099
ronald.roesch@itwm.fraunhofer.de
www.itwm.fraunhofer.de

ГЛУБОКИЕ ЗНАНИЯ О ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА

ОБОРУДОВАНИЕ KAMET® PRECAST

Инновационные решения Kamet® Precast разработаны для удовлетворения потребностей заводов ЖБИ. В зависимости от потребностей клиента, они могут быть адаптированы для использования с любым оборудованием, предназначенным как для производства бетона, так и для изготовления железобетонных изделий, а также для качественной организации управления технологическими процессами по производству как бетонной массы, так и бетонной продукции.

Выбирайте лучшее, выбирайте Kamet® – проверенные передовые технологии, основанные на сорокалетнем опыте.

