

СТРОИТЕЛЬСТВО ИЗ ЛЕГКОГО БЕТОНА:

ОТ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДО РЕАЛИЗАЦИИ В СООРУЖЕНИЯХ



Карл-Христиан Тинель,

д-р наук, проф. Мюнхенского
университета Бундесвера

1961 г. р. Окончил Технический университет города Брауншвейг по специальности инженер-строитель, с 1988 по 1993 гг. — научный сотрудник Института строительных материалов, монолитного строительства и противопожарной защиты при Техническом университете города Брауншвейг, после защиты диссертации с 1993 по 1995 гг. — обучение в Центре перспективных материалов на цементной основе (АСВМ) при Северо-Западном университете США по стипендии им. Феодора Линена. С 1995 по 2003 гг. — сотрудник компании Liapor GmbH & Co. KG, с 1997 г. — руководитель отдела отдел научных разработок компании Liapor GmbH & Co. KG, с 2003 г. — профессор университета, руководитель Института строительных материалов при Мюнхенском университете Бундесвера.

ВВЕДЕНИЕ

Легкий бетон представляет собой бетон с объемной массой в сухом состоянии менее 2000 кг/м^3 . Легкие бетоны в зависимости от состава подразделяются на следующие группы:

- Конструкционный легкий бетон (с плотной матрицей),
- Беспесчаный крупнопористый легкий бетон,
- Пористый легкий бетон (пенобетон)
- Ячеистый бетон.

Данное разделение также означает различные сферы применения бетона. Конструкционный легкий бетон, как и обычный бетон, может использоваться как в монолитном строительстве для укладки на месте работ, так и для изготовления сборных бетонных элементов. Из беспесчаного легкого бетона и ячеистого бетона производят сборные бетонные блоки на заводах. Беспесчаный легкий бетон и пористый легкий бетон используются для нанесения изолирующего и выравнивающего слоев. Последующий обзор относится только к конструкционному легкому бетону (LC: Lightweight Concrete) согласно стандартам DIN 1045-2 [1] и DIN EN 1992-1-1 [2], а также к беспесчаному легкому бетону в соответствии с DIN EN 1520 [3] (LAC: Lightweight Aggregate Concrete).

Малая объемная масса легкого бетона по сравнению с обычным бетоном достигается за счет:

- использования легкого зернистого заполнителя (рис. 1 слева),
- целенаправленно создаваемых пустот (пор) между зернами заполнителя (рис. 1 в центре) или использования порообразующих добавок или

- вспенивателей (рис. 1 справа).

Эти три варианта в зависимости от целей применяются отдельно или в комбинации друг с другом.

Встречающееся иногда название «легкий обычный бетон» обозначает традиционный бетон с объемной массой от 2000 до 2200 кг/м^3 . В легком традиционном бетоне объемную массу сокращают до пределов, все еще позволяющих использовать положения стандартов DIN 1045-2 [1] и DIN EN 1992-1-1 [2] для традиционного бетона, например, в части прочности и деформации. Нормативного оформления данного понятия, однако, не существует.

Более 80% производства легких бетонов в Германии приходится на беспесчаные легкие бетоны (без ячеистого бетона). Благодаря своим высоким теплоизоляционным качествам они используются для изготовления строительных кирпичей, стеновых панелей и т.д. [4]. Легкий бетон с плотной матрицей занимает относительно небольшой сегмент бетонного рынка. Ежегодно используется лишь около $350\,000 \text{ м}^3$ легкого зернистого заполнителя, в первую очередь для изготовления сборных бетонных конструкций. Это соответствует объему $500\,000 \text{ м}^3$ бетона в год. В монолитном строительстве легкий бетон с плотной структурой используется довольно редко, несмотря на его высокий потенциал. Причинами тому, прежде всего, являются его малая доступность, более сложная технология изготовления по сравнению с традиционным бетоном и высокая стоимость исходных материалов [5].



Рис. 1. Структура различных легких бетонов
Слева направо: конструкционный легкий бетон (LC) с плотной матрицей; беспесчаный легкий бетон (LAC); беспесчаный легкий бетон с поризованной матрицей (LAC)

БЕСПЕСЧАНЫЙ ЛЕГКИЙ БЕТОН

Легкий бетон с беспесчаной структурой (LAC: Lightweight Aggregate Concrete) характеризуется наличием пустот между зернистым заполнителем, которые остаются после уплотнения (ср. рис. 1 внизу). Эти поры возникают, когда содержание цементного теста снижается до такого объема, чтобы зернистый заполнитель только «точечно» сцеплялся друг с другом. Строительного стандарта для беспесчаного легкого бетона, аналогичного стандарту DIN EN 1045–2 [1], не существует. Для ориентировки можно использовать стандарт DIN EN 1520 [3]. Не существует и однозначного определения, с какого объема пор бетон может считаться беспесчаным. В качестве отправной точки может быть принят плановый объем пор от приблизительно 4%, который достигается без добавления порообразующей добавки. Окончательное решение однозначно может быть принято на основе расчета состава бетонной смеси.

Беспесчаный легкий бетон с легким зернистым заполнителем чаще всего используется для производства массивных (VBI, V) и пустотелых (HBI) блоков, для несущих и теплоизоляционных стеновых элементов (DIN EN 1520 [3]), а также для легких дренажных бетонов и — благодаря повышенному шумопоглощению — для шумозащитных стен (рис. 2).



Рис. 2. Шумозащитная стена из беспесчаного легкого бетона (Фото: Liapor)

Свойства материала

Разработка состава смеси для беспесчаного бетона значительно отличается от определения смеси бетона с плотной структурой. Исходным пунктом служит выбранный крупный зернистый заполнитель. В зависимости от состава используется немного более 1000 л навалного заполнителя на 1 м³ беспесчаного бетона. Песчаная фракция увеличивает объем цементного теста и, таким образом, площадь контакта между зернами (рис. 3 слева). Это положительно сказывается на прочности и уменьшает склонность к образованию усадочных трещин. Ориентировочно требуется около 200 л навалного легкого песка на м³ беспесчаного бетона. Благодаря цементному тесту и (легкому) песку объем может значительно увеличиться (как правило за счет

средней фракции песка) или уменьшиться (мелкая фракция и снижение трения). Количество оставшихся пор в уплотненном легком бетоне зависит от выбранной кривой гранулометрического состава и поддается лишь грубой оценке.

В беспесчаных легких бетонах водоцементное отношение цементного теста можно менять только в ограниченном диапазоне, так как иначе цементное тесто будет настолько сухим, что не будет достаточно обволакивать зерна, или будет настолько влажным, что не будет оставаться в структуре, начнет стекать и забивать расположенные ниже пустоты или собираться на дне

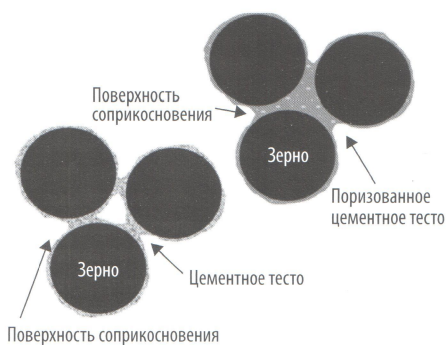


Рис. 3. «Точечные» поверхности соприкосновения между легким зернистым заполнителем беспесчаного легкого бетона (слева — с легким песком, справа — с поризованной матрицей)

опалубки. Равномерное обволакивание и, таким образом, «склеивание» зерен в беспесчаных бетонах важнее для прочности бетона, чем водоцементное отношение, так как прочность в значительной мере определяется прочностью используемого легкого зернистого заполнителя.

Один из вариантов беспесчаного легкого бетона можно получить, используя добавки, способствующие образованию воздушных пор. Такой легкий бетон, на первый взгляд, имеет матрицу, которая очень похожа на матрицу легкого бетона с плотной структурой. При более внимательном рассмотрении можно обнаружить в матрице мелкие рассеянные круглые поры (ср. рис. 1 справа сверху и рис. 3 справа), которые и образовались под воздействием добавки. Благодаря добавке возможно отказаться от использования в рецептуре бетонной смеси легкого песка. Трение между легким зернистым заполнителем при применении поризованного цементного теста снижается в сравнении с обычным цементным тестом. За счет этого повышается плотность упаковки легкого зернистого заполнителя. За счет этого требуется больше материала на м³. Одновременно улучшаются механические свойства в сравнении с обычным бес-

песчаным легким бетоном. Объемная масса и, таким образом, теплотехнические свойства остаются без изменений [6].

Беспесчаный легкий бетон используется для производства стеновых элементов в соответствии со стандартом DIN EN 1520 [3] с объемной массой от 450 кг/м³. Достижимые классы прочности с данной объемной массой начинаются от LAC2 (номинальная прочность 2 МПа) и с возрастанием объемной массы увеличиваются до LAC25 (номинальная прочность 25 МПа). Теплопроводность начинается от 0,12 Вт/мК. Таким образом, элементы подходят для промышленного строительства, а также для жилого и многоэтажного строительства.

КОНСТРУКЦИОННЫЙ ЛЕГКИЙ БЕТОН

Конструкционный бетон имеет плотную матрицу (рис. 1, слева сверху) и снаружи ничем не отличается от обычного бетона. Низкая объемная масса достигается за счет замены плотного (тяжелого) обычного зернистого заполнителя пористым легким зернистым заполнителем. Обычная технология представляет собой частичную или полную замену крупного обычного зернистого заполнителя для достижения необходимой объемной массы. Далее можно заменить песчаную фракцию легким дробленным песком.

Прочность и объемная масса легкого бетона в значительной мере определяются типом используемого зернистого заполнителя и, кроме того, составом бетонного раствора. В Германии преимущественно используется керамзит и вспученный сланец. Спеченная летучая зола в настоящее время на немецком рынке не представлена. Пемза используется только для низких классов прочности. С увеличением объемной массы бетона возрастает достигаемый класс прочности легкого бетона. Благодаря использованию легкого песка можно значительно увеличить прочность, сохранив объемную массу. Это показано на рис. 4, где приведены исходные значения необходимой плотности в сухом состоянии для получения различных классов прочности, смотри [1, 2]. Использование легкого песка позволяет достичь соответствующего класса прочности с объемной массой меньше на 200 кг/м³, чем это было бы возможно с обычным песком. Помимо снижения конструктивной массы значительно уменьшается теплопроводность. Оба преимущества используются в современных сооружениях.

Свойства материала

Прочность и объемный вес

Прочность легкого бетона в значительной степени определяется выбранным легким зернистым заполнителем. Водоцементное отношение и содержание цемента, наоборот, играют второстепенную роль, но важны относительно требований к долговечности [7].

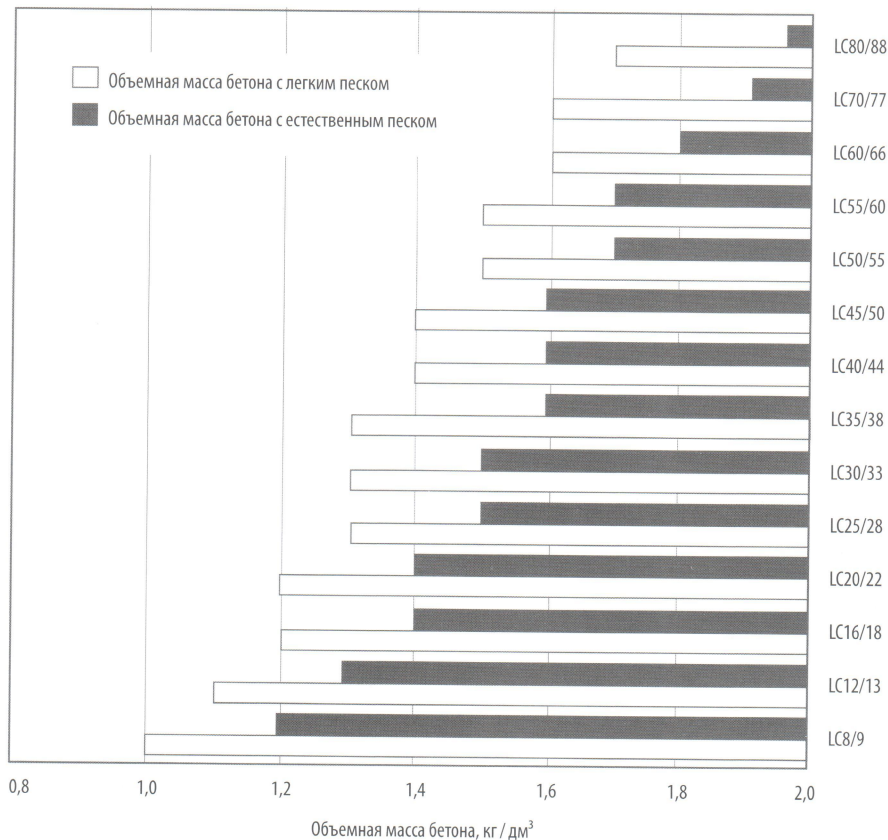


Рис. 4. Исходные данные необходимой плотности легкого бетона в сухом состоянии для достижения класса прочности [7]

Рис. 4 показывает классы прочности легкого бетона [1, 2]. Решающей является цилиндрическая прочность на сжатие. В случае с легким бетоном следует осторожно относиться к соотношению цилиндрической и кубиковой прочности на сжатие, вытекающей из обозначения класса прочности (рис. 5)! Собственные исследования указывают на то, что соотношение, применимое для обычного бетона, является более подходящим [8].

Долговечность

Легкий бетон с правильно подобранным составом отличается высокой долговечностью и иногда превосходит в этом отношении обычный бетон [9], так как качество структуры легкого бетона значительно отличается от качества структуры традиционного бетона. В последнем структура представляет собой 3-компонентную систему из зерен, матрицы и относительно пористой зоны сцепления вокруг обычного зернистого заполнителя. В противоположность этому легкий бетон при правильном составе не имеет зоны сцепления (рис. 6). Причиной этому являются четыре механизма:

- Легкий зернистый заполнитель во время замеса впитывает воду. Вместе с водой затворения в пористое зерно попадает какая-то часть вяжущего. Продукты гидратации вяжущего, таким образом, нарастают не только снаружи на зерно, но и в огра-

ниченном объеме в самом зерне и из него. Зона сцепления в некотором роде зарастает. Одновременно повышается прочность зерна заполнителя в результате увеличения его объемной массы (и потери вяжущего в матрице). В конечном итоге, проникновение вяжущего в зерно приносит пользу, но более выгодным с экономиче-

ской точки зрения было бы удерживание вяжущего в матрице.

- Иногда в керамзите на поверхности зерен можно обнаружить реактивные клинкерные фазы, такие как геленит (C2AS). Эти зерна в ограниченном объеме могут вступать в реакцию с вяжущим.
- Поверхность зерен шершавая и пористая, поэтому она обеспечивает очень хорошее механическое сцепление зерен и окружающего цементного камня.
- Вода, впитанная легким зернистым заполнителем, во время гидратации обеспечивает оптимальный внутренний уход. Это свойство частично целенаправленно используется в высокопрочных обычных бетонах [10].

Так как прочность легкого бетона в значительной мере зависит от выбранного легкого зернистого заполнителя, не представляется возможным установить связь между классом прочности и долговечностью (классом экспозиции). Распределение по классам экспозиции может производиться только через эффективное водоцементное отношение и содержание цемента.

Еще одним преимуществом легкого бетона с точки зрения долговечности является очень хорошая стойкость к воздействию холода и антиобледенительной соли. Небольшая жесткость легкого зернистого заполнителя и низкое термическое растяжение по сравнению с обычным бетоном вызывают меньшие напряжения в структуре материала. Использование легкого дробленого песка дополнительно уменьшает коэффициент упругости раствора и, таким образом, структурные напряжения. Одновременно частицы легкого песка с мелкими порами оставляют пространство для замерзающей воды и, таким образом, оказывают воздействие, которое сравнимо с эффектом искусственно созданных воздушных пор [11, 12].

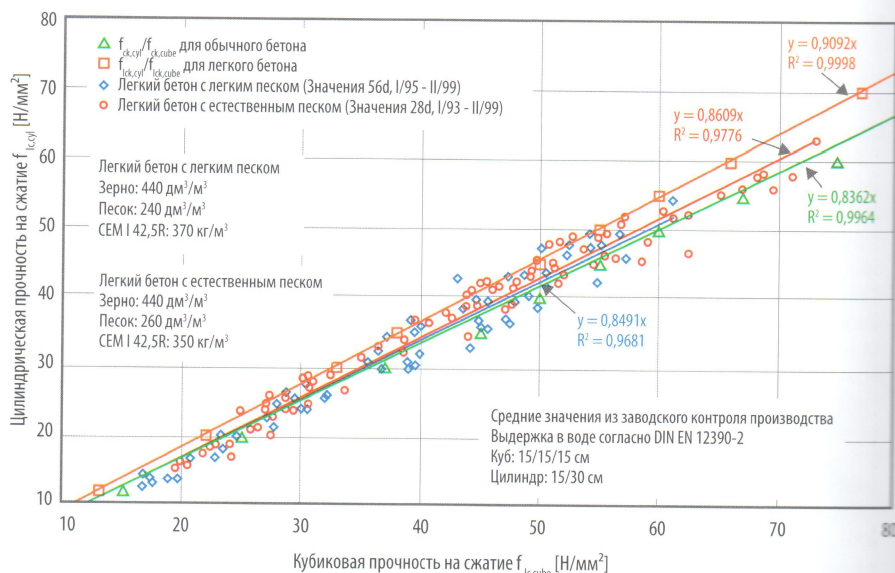


Рис. 5. Сравнение классов прочности по стандартам DIN 1045-2 и DIN EN 1992-1-1 с измеренными значениями [8]

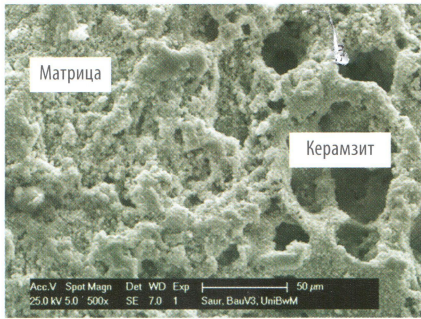


Рис. 6. РЭМ-снимок контактной зоны «матрица — керамзит» в легком бетоне

Подача насосом

В Германии легкие бетоны, как правило, изготавливаются с сухим или умеренно влажным легким зернистым заполнителем, так как это позволяет снизить расходы по транспортировке зернистого заполнителя и улучшить теплотехнические свойства. Подобная технология имеет недостатки, если на стройке приходится подавать легкий бетон насосом. В обычных рецептурах легкого бетона воздух в порах сжимается, а вода при этом вдавливается из матрицы в легкий зернистый заполнитель. Последнее приводит к изменению консистенции бетона, он становится более жестким. Когда давление на свежий легкий бетон на конце подающего трубопровода или, если обусловлено конструкцией насоса, в подающем трубопроводе падает, воздух в порах может высвободиться и расширяться. Одновременно с этим он выдавливает воду, запрессованную в зерно. Часто это ведет к расслоению легкого бетона и отказу процесса подачи насосом. Даже если подача насосом удалась, структура легкого бетона будет сильно повреждена [13]. Такая



Рис. 8. Здание участкового и земельного суда во Франкфурте-на-Одере с монолитными внешними стенами из бетона класса LC16/18 D1,2, B&J Architekten Berlin (Фото: Liapor)

реакция может произойти даже несмотря на предшествующую длительную (например, в течение 24 часов) выдержку легкого зернистого заполнителя в воде. Решением проблемы является применение специальных, очень подвижных рецептур, разработка которых опирается на концепцию само-

уплотняющихся бетонов. В настоящее время уже многие заводы по производству бетона поставляют легкие бетоны, пригодные для подачи насосом. Однако в большинстве случаев на строительных площадках рекомендуется перепроверить пригодность смеси, включая испытание подачи насосом.

Самоуплотняющийся легкий бетон

Для самоуплотняющегося легкого бетона в Германии действуют три совпадающие по содержанию допуска для бетонов класса LC30/33 D1,3, LC30/33 D1,4 и LC35/38 D1,6. Опыт показывает (рис. 7), что подобные самоуплотняющиеся легкие бетоны легче изготовить, чем самоуплотняющийся обычный бетон [12, 13]. Это особенно верно в тех случаях, когда используется легкий песок, благодаря которому, с одной стороны, уменьшается разница плотности между составными частями легкого бетона и, таким образом, сводится к минимуму склонность к расслоению. С другой стороны, легкий песок сглаживает разницу в содержании воды и, следовательно, повышает стабильность самоуплотняющегося легкого бетона. Механические свойства самоуплотняющегося легкого бетона совпадают со свойствами традиционного легкого бетона [14, 15]. Благодаря очень стабильной структуре самоуплотняющиеся легкие бетоны можно, как правило, без проблем подавать насосом.



Рис. 7. Элементы из самоуплотняющегося бетона (LC25/28 D1,6) с высококачественными поверхностями для верхнего и нижнего ограждений верхней трибуны стадиона Фольксваген-Арена в Вольфсбурге (Фото: Liapor)



Рис. 9. Жилой дом Шлайха, Берлин, архитекторы Шлайх/Боннен (Фото: Liapor)

Объекты

Сооружения из архитектурного бетона в последние годы снова завоевали в Германии много приверженцев среди архитекторов и застройщиков. Стимулом послужили некоторые выдающиеся строения в Швейцарии [16, 17]. Построенные в последние годы в Германии сооружения из легкого бетона можно условно разделить на две группы.

К первой относятся здания с очень массивными наружными стенами. Толщина стен от 0,45 до 0,60 м определяется теплопроводностью используемого легкого бетона и требованиями к теплоизоляции. Требования к восприятию статической нагрузки обычно низкие. Как правило, для домов на одну семью используется бетон класса LC8/9 D1,1, а для более крупных объектов — LC 16/18 D1,2 (рис. 8). В отдельных случаях применяются более низкие значения (рис. 9). Подобные легкие бетоны предъявляют особые требования к ведению строительных работ. Из-за низкой объемной массы свежего бетона, его уплотнение требует большей тщательности, так как вибрация поглощается сильнее, а воздушные поры выходят на поверхность с большим трудом. С другой стороны, многие архитекторы очарованы именно грубой структурой пор, если она достаточно однородна. На всех предыдущих строительных площадках эффективным оказалось изготовление образца стен с трудными деталями, а также тренировки строительной бригады на этих стенах. Из-за небольшой объемной массы легкие

бетоны подаются не насосами, а ковшами, которые, как правило, обеспечивают хорошую выгрузку легкого бетона благодаря установленным вибраторам.

Ко второй группе сооружений из легкого бетона относятся офисные здания с сильно «изрезанными», высоко нагруженными фасадами. Выбор в пользу легкого бетона делается в данном случае с точки зрения несущей способности и теплотехники. Чаще всего применяется бетон классов прочности между LC16/18 и LC35/38. Для выполнения немецких требований к теплоизоляции выбирается, как правило, класс плотности в сухом состоянии максимум до D1,4 (ср. рис. 4). Благодаря легкому бетону данного класса плотности значительно проще получить высококачественную поверхность (рис. 10).

Еще одной областью применения легкого бетона с плотной структурой является возведение конструктивных инженерных сооружений. К комбинации прочности с низкой объемной массой в данной сфере присоединяются требования к долговечности. Это относится к мостам с большими пролетами и, прежде всего, к морским сооружениям [18]. В последние годы из легкого



Рис. 10. Берлин, Линиенштрассе, 40, архитектура: Bundschuh Architekten/Cosima von Bonin, LC16/18 D1,4 (Фото: Liapor)

бетона было возведено несколько морских платформ для добывающих скважин [18, 19]. Помимо такого преимущества, как небольшой вес, легкий бетон является таким материалом, который отличается превосходной долговечностью [9], что очень важно проектировщикам.

Последним на сегодняшний день проектом сооружения в открытом море из легкого бетона является спуско-подъемный комплекс MPU Heavy Lifter [20, 21]. Данная конструкция состоит из U-образных понтонов с четырьмя башнями. Она применяется для демонтажа снятых с эксплуатации платформ для добывающих скважин и для монтажа тяжелых фундаментов ветровых установок в Северном море. С точки зрения легкого бетона, комплекс MPU Heavy Lifter имеет несколько особенностей. Так, впервые для морского сооружения был использован легкий бетон с легким песком для получения бетона качества LC35/38 D1,4, необходимого для плавучести и прочности понтонов. Легкий бетон должен быть очень долговечным и стойким к воздействию морской воды, мороза и антиобледенительной соли. При выполнении строительных работ использовались различные технологии. Нижняя часть предварительно напряженной конструкции строилась при помощи подвижной опалубки, а башни возводились в скользящей опалубке (рис. 11). Подача бетона могла производиться только ковшами, так как при подаче насосом объемная масса бы немного увеличилась, что неприемлемо из-за жестко заданных значений объемной массы. Вследствие глобального финансового кризиса проект не был завершен [22]. Однако он показывает, какой потенциал кроет в себе конструкционный легкий бетон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Легкие бетоны подходят для широкого спектра применения. Беспесчаные легкие бетоны обладают хорошими теплоизоляционными свойствами и широко используются в сфере жилого и промышленного строительства. Новые технологии, например, поризация матрицы, улучшают свойства бетона и одновременно упрощают процесс производства.

В последние годы легкий бетон с плотной структурой был усовершенствован настолько, что при правильном составе его можно целенаправленно подавать насосом и использовать в качестве самоуплотняющегося легкого бетона. Для архитекторов и инженеров, выдвигающих смелые творческие решения, конструкционный бетон открывает возможность перейти границы, которые иногда возникают за счет большого конструктивного веса обычного бетона.



Рис. 11. Вид на строительство спуско-подъемного комплекса компании MPU (MPU Heavy Lifter)

Литература

- [1] DIN 1045–2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton — Teil 2: Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität — Anwendungsregeln zu DIN EN 206–1, 08/2008
- [2] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, Januar 2011
- [3] DIN EN 1520: Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton. Deutsche Fassung EN 1520:2002 + AC:2003, Juli 2003
- [4] Weigler H.; Karl S.: Stahlleichtbeton — Herstellung, Anwendung, Ausführung. Bauverlag, 1972
- [5] Thienel K.-Ch.: Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton. Festschrift Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy, S. 203–210, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1997
- [6] Thienel K.-Ch.: Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit porosierter Matrix. Betonwerk + Fertigteiltechnik, Vol. 60, Nr. 1, S. 62–72, 2000
- [7] Thienel K.-Ch.: Besonderheiten bei Leichtbeton in DIN FB 100. In: «Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206–1, DIN 1045–2, DIN 1045–3, DIN 1045–4 und DIN EN 12620». DAFStb Heft 526, S. 77–81, Beuth Verlag, 2011
- [8] Thienel K.-Ch.: Umrechnungsfaktoren für die Festigkeitswerte von Leichtbeton. Vortrag 49. Ulmer Beton- und Fertigteiltage, Ulm 15. bis 17. Februar 2005
- [9] Helland S.; Aarstein R.; Maaga M.: In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance. Structural Concrete, Vol. 11, No 1, pp. 15–24, 2010
- [10] Weber S.; Reinhardt H.-W.: A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete. In: Proceedings: International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp. 662–671, Sandefjord, Norway, 1995
- [11] Thienel K.-Ch.: Freeze-Thaw Resistance of LWAC made without Air-Entraining Agents. Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, S. 757–766, Kristiansand, Norway, 18–22 June 2000
- [12] Thienel K.-Ch.; Schmidt-Döhl F.; Feldrappe V.: In-Situ Tests on Existing LWAC Structures. Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, S. 912–921, Kristiansand, Norway, 18–22 June 2000
- [13] Norden G.; Thienel K.-Ch.: Pumping of Lightweight Concrete Based on Expanded Clay in Europe. In: Proceedings: Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp. 823–832, Kristiansand, Norway, 2000
- [14] Müller H. S.; Haist M.; Mechtcherine V.: Selbstverdichtender Hochleistungs-Leichtbeton. Beton und Stahlbeton, Heft 6, 2002.
- [15] Cauberg N.; Kestemont X.: Lightweight Self-Compacting Concrete (L-SCC): Systematic approach and case study. Proceedings 5th International RILEM Symposium on Self-Compaction Concrete, 3–5-September, Ghent, pp. 899–905, 2007
- [16] Thienel K.-Ch.; Peck M.: Die Renaissance leichter Betone in der Architektur. DETAIL Heft 5, S. 522–534, 2007
- [17] A White Monolith. The Swiss National Park Visitor Center in Zernez. Concrete International, pp. 29–31, Vol. 32, No. 8, August 2010
- [18] Fergestad S.; Hagen T.: Design of Bridges and Offshore Structures Using LWA Concrete. International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Proceedings, S. 164–175, Sandefjord, 20–24 Juni 1995
- [19] South Arne, Denmark. <http://www.offshore-technology.com/projects/arne/>, Zugriff: 6.7.2012
- [20] Ludescher H.; Haugerud S. A.; Ruiz M. F.: Detail design of the MPU Heavy Lifter. Tailor Made Concrete Structures, fib Symposium, Amsterdam 2008, S. 931–937, Walraven & Stoelhorst (Herausgeber); Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8, 2008
- [21] MPU Enterprise AS: New Technologies — MPU Heavy Lifter. The 5th annual NPF North Sea Decommissioning Conference, 15–16 February 2005
- [22] Thienel K.-Ch.: Heavy Lifter — Konstruktion und Bautechnik. Beton, Jg. 61, Heft 6, S. 224–229, 2011