

ПРОИЗВОДСТВО БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДВУМЯ КРИВОЛИНЕЙНЫМИ КОНТУРАМИ

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕДОВЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕТОДОВ В СОЗДАНИИ СВОБОДНЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ



Рель Шиппер, доцент
Дельфтский Технический Университет,
факультет строительства и геолого-
геофизических наук, Нидерланды,
Кафедра строительных технологий,
проектирования и гражданского
строительства

ОТКРЫТИЕ ИЛИ СОЗДАНИЕ НОВЫХ РЫНКОВ?

Отслеживание новых разработок в архитектуре способствует успешному производству сборных бетонных конструкций. Новые требования архитекторов к форме, текстуре, цвету и прочности находят решения, по крайней мере, в тех случаях, когда они могут принести пользу и выгоду. Для производителей бетонных изделий необходимо все время находиться на уровне современных достижений в разработке бетонных смесей, продуктов и производственных технологий и, более того, опережать производителей конкурентных материалов и изделий. Альтернативным и даже более действенным подходом является создание новых рыночных возможностей путем создания продуктов, которые могут привлечь внимание архитекторов и стимулировать творческий процесс. Бетонные элементы с двумя криволинейными контурами могут быть такой интересной и перспективной группой продуктов.

ИЗОГНУТОСТЬ В АРХИТЕКТУРЕ

Слово изогнутость в данной статье используется в отношении широкого спектра свободных архитектурных форм, применение которых в значительной степени облегчилось внедрением программного обеспечения нового поколения при проектировании сооружений. В качестве примера на Рис. 1 показано новое здание, при конструировании которого применялись свободные изогнутые формы. Современные системы программного обеспечения для компьютерного создания чертежей (CAD), такие как Rhinoceros, Maya и ряд других, позволяют архитектору использовать криволинейность в качестве языка дизайна. Хотя использованию криволинейных форм столько же лет, сколько и истории строительства, сейчас у многих архитекторов интерес к таким формам возник с новой силой. Криволинейность дает архитектуре дополнительные возможности, которых не было бы, если бы в распоряжении архитекторов были только прямые линии и плоские поверхности. Использование криволинейности порождает изысканные и выразительные конструктивные решения [1, 4, 6], которые можно проиллюстрировать рядом проектов, представленных в табл. 1. Сам по себе простой факт, что программное обеспечение для компьютерного создания чертежей позволяет создание цифрового изображения и обработку сложных криволинейных форм, побуждает архитекторов экспериментировать с этими формами и использовать их при проектировании.



Рис. 1. Криволинейный контур может усилить эстетическую ценность дизайна здания (представлен фрагмент Города культуры, Сантьяго де Компостелла, Испания, архитектор Питер Эйзeman)

ПРОИЗВОДСТВО КОМПОНЕНТОВ СВОБОДНЫХ ФОРМ

Очевидно, что создание форм такого рода ставит сложную задачу перед производителями: если раньше основным было повторение и воспроизведение сходных бетонных компонентов, то теперь архитектура свободных форм ведет к совершенно противоположному, а именно: приспособление продукции для индивидуальных нужд потребителей в массовом масштабе, которое не предусматривает повторения — ни частичного ни полного. Более того изобразительная ценность таких проектов также требует материалов, обладающих отличными характеристиками, и строгого соблюдения допусков в части размера и качества. Можно определить целый ряд возможностей для элементов из сборного бетона, таких как создание выпуклого тонкого фасада и кровельных панелей, свободно сконструированные элементы несущих стен, изогнутых полов и крыш, нестандартные формы перекрытий и колонн.

Исследования, проводимые в докторантуре Дельфтского Технического Университета

Исследования в докторантуре Дельфтского Технического университета Нидерландов проводятся именно в этой области. Целью этих исследований является изучение и разработка методов производства бетонных элементов с двумя криволинейными контурами. Предметом докторского проекта, реализуемого в настоящее время являются новые методы производства выпуклых кровельных панелей из сборного бетона, изогнутых элементов конструкций фасадов и полов с широкими половицами. Причиной, по которой были выбраны именно эти продукты, явилось то, что в этом случае исследования охватывают как внешний фасад, так и все несущие конструкции здания. Планируется в будущем распространить исследование на другие конструктивные элементы здания. Исследование состоит из следующих тематических разделов, которые взаимосвязаны между собой:

1. Примеры архитектуры и зданий
2. Система CAD и комплексная геометрия
3. Технология производства бетонов и конструктивные аспекты
4. Технология производства
5. Функциональность элементов

В следующих разделах рассказывается о научно-исследовательских подходах и первых результатах исследования по каждой тематике.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 1: ПРИМЕРЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЗДАНИЙ

Для более глубокого понимания последних достижений в архитектуре предлагается иллюстративный взгляд на некоторые недавние проекты с применением криволинейности.

Работа ведущих архитектурных фирм по всему миру демонстрирует широкое использование скругленных форм. В таблице 1 приводятся примеры некоторых проектов, сочетающих криволинейность и бетон. Возможности использования сборно-блочной продукции показаны в таблице 1. В тех случаях, когда использовался монолитный бетон (проект а, с, е), (частичное) использование сборных бетонных конструкций могло бы стать решением, если бы на начало проекта существовали соответствующие методы производства. В других случаях, когда уже использовались сборные бетонные конструкции (b, d, f), это привело к интересным, иногда дорогостоящим, решениям, созданным в основном для рассматриваемого проекта. Полезный обзор многих других реализованных и нереализованных проектов можно найти среди работ на соискание Дальневосточной международной премии цифрового архитектурного дизайна (приведен в а. о. [3]), когда акцент делается на влияние эры цифровых технологий на архитектуру. Интересная, недавно обновленная база данных зданий свободных форм и, частично, зданий с криволинейным контуром, приводится в [7]. Изучение заявок на участие в последних международных архитектурных конкурсах и проектах в стадии строительства показывает, что использование криволинейности — широко распространенное явление, и производителям строительной продукции необходимо обратить внимание на этот рынок.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 2: СИСТЕМА CAD И КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОМЕТРИЯ

Элементы комплексной геометрии, присутствующие во многих современных программах CAD, ставят перед строительной промышленностью конкретные производственные задачи. Во-первых, взаимосвязь между чертежом и — в нашем случае — бетонным изделием в обязательном порядке становится более цифрово-ориентированной, следуя принципу «файл-производство». Помимо математически относительно простых элементов, таких как круги, эллипсы в 2D или конусы, сферы и торы в 3D, сегодня широко используются сложные элементы: сплайны и неравномерные рациональные B-сплайны — это изогнутые линии, определяемые интерполяциями более высокого порядка между контрольными точками в плоскости или трехмерном пространстве. NРBS-поверхности особо высокого порядка дают возможность построить чертеж почти любой криволинейной поверхности или объема в трехмерном пространстве.

[5]. Все чаще и чаще используется именно этот тип поверхностей. Данные формы практически невозможно выполнить без применения принципа «файл-производство». Рисунок 2 приводит пример такой комплексной геометрии. В первых экспериментах, использовались некоторые панели по геометрии данного рисунка в качестве примера.

Для создания таких форм на заводе или строительной площадке необходим ряд новых технологий. Перевод из файла на производство не только требует знания комплексной геометрии и связанной с ней математики, но и создает потребность в новых производственных процессах, способных трансформировать эти CAD-модели в строительные элементы в масштабе 1:1. На первом этапе необходима помощь компьютерщиков и математиков. Обычно поверхности свободной формы сначала переводятся в дискретные панели или элементы размера, подходящего для производства и транспортировки. После этого алгоритмы оптимизации помогут привести к рациональному виду бесчисленное множество различных элементов, каждый из которых имеет свою сложную форму. Это приводит к наборам сходных или связанных элементов

и позволяет уменьшить сложность формы, насколько это возможно в пределах границ архитектуры. Например, слегка изогнутые панели кровли можно заменить совершенно плоскими панелями, если на глаз нет разницы. Такие процессы оптимизации приводят к снижению общих строительных издержек [2]. В конечном итоге, файл CAD, содержащий набор панелей уменьшенной геометрической сложности, далее переходит в стадию производства. Даже после оптимизации, в комплексной геометрии свободных форм неизбежно остаются элементы с двойным криволинейным контуром, чтобы в точности повторить архитектурную форму.



Таблица 1. Иллюстрация проектов, использующих изогнутый бетон



(a) Ролекс Центр, Лозанна, SANAA (2010).

Изогнутый бетонный пол залитый на месте. Опалубка изготовлена при помощи КПЧУ по принципу «файл-производство»



(b) Der Neue Zollhof, Дюссельдорф, Фрэнк Гери и партнеры (1999)

Несущие изогнутые элементы внутреннего фасада из сборного бетона, опалубка из пены (PS), изготовлена с помощью КПЧУ



(c) Музей Мерседес-Бенц, Штутгарт, Студия ООН (2006).

Наклонная бетонная изогнутая конструкция, залитая на месте, находящаяся на виду



(d) Юбилейный собор, Рим, Ричард Майер (2000)

Кровельно-фасадные элементы из самоочищающегося сборного бетона



(e) Мост Спенсер Док, Дублин, Системы будущего/A_LA (2008).

Бетонный мост, залитый на месте на пенной опалубке, изготовленной при помощи КПЧУ



(f) Культурный центр им. Гейдара Алиева, Баку, Заха Хадид Архитектс (в стадии строительства).

Бетонные элементы кровли с двойным криволинейным контуром на стальной пространственной ферме.

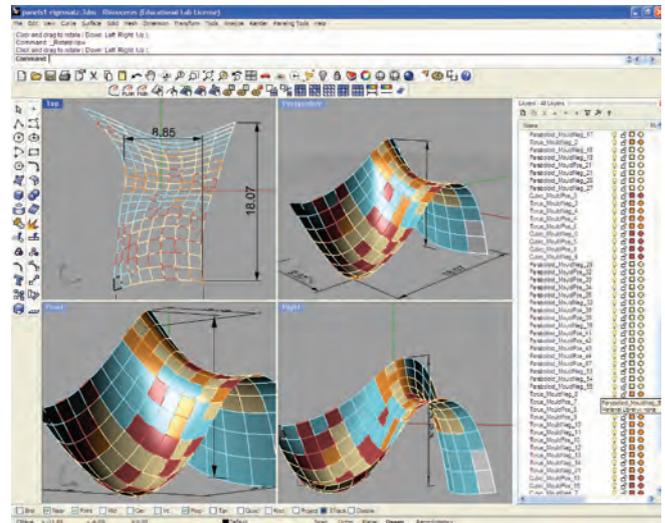


Рис. 2. Пример НРБС-поверхности виртуального здания, спроектированного при помощи Rhinoseros (R)

ТЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 3: ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОНОВ И КОНСТРУКТИВНЫЕ АСПЕКТЫ

Архитектурные элементы из сборного железобетона обычно изготавливаются из высококачественных бетонных смесей, особенно если эти элементы должны находиться на виду. Так как для приготовления таких смесей используются самые разные сочетания ингредиентов, наполнителей и добавок, то можно сделать бесконечное количество таких бетонных смесей, обладающих разными конкретными характеристиками. В архитектуре важными являются не только эстетические характеристики, такие как цвет, внешний лоск и текстура, но и более рациональные свойства, такие как износостойкость, прочность, расчет на долгосрочную перспективу (низкое содержание углерода и облегченность конструкции), и так далее. Результатом исследования в рамках проекта докторантуры явился конкретный способ производства (представленный в следующем разделе), где важным параметром являлась кривая затвердения. Особенно тот момент, когда можно изменить опалубку, являлся существенным для нашего метода. То есть речь идет

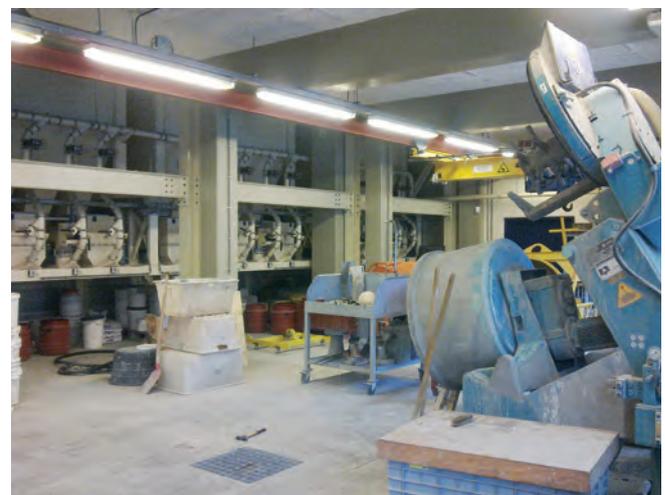


Рис. 3. Оборудование для приготовления бетонной смеси в лаборатории Стивин в Дельфте.

о той стадии, когда бетон уже достаточно затвердел и уже сохраняет форму опалубки, но еще достаточно мягкий, чтобы можно было изменить форму опалубки и соответственно, бетона, избежав появления трещин в бетоне. Поскольку желательно, чтобы цикл был коротким, такая стадия должна наступить как можно скорее после разлива бетонной массы.

Из-за быстрого набора прочности, свойств разжиженной самоуплотняющейся бетонной смеси, а также желательной гибкости формы элементов, оптимальной смесью для изготовления элементов с двояким криволинейным контуром, по-видимому, является (У) НРС. При этом присутствие волокон в такой смеси помогло бы избежать дополнительного усиления бетона. В лаборатории Стевин имеется отличное оборудование для смешивания бетона в разных объемах вплоть до 200 литров при том, что используются всевозможные фильтры, наполнители и добавки. См. Рис. 3. Однако высокая стоимость (У) НРС делает ее использование убыточным при экспериментальном применении. В ходе первого испытания, когда акцент делался в основном на разработку гибких опалубных систем, использовалась простая смесь, показанная в Табл. 2.

Табл. 2. Бетонная смесь, используемая в большинстве испытаний: E2 адапт. (волокон не учтены), для розлива в 45 литров

Содержание	Описание	Кол-во, кг
Цемент	Цем. 1 52.5 R	26,865
Наполнитель	Зола-унос	7,380
Добавка	BASF Glenium 51	0,190
Инертный материал	(сухой) песок 0.125–0.25 мм	8,479
	Песок 0.250–0.50 мм	11,305
	Песок 0.5–1 мм	16,958
	Песок 1–2 мм	14,131
	Песок 2–4 мм	5,653
Вода		10,783

В ходе последующих испытаний будут использоваться другие смеси.

Выпуклые элементы также требуют прочного армирования. Из-за специфики производства, армирование должно быть устроено так, чтобы следовать изгибу бетона. Диаметр обычно используемой стальной арматуры слишком большой для того, чтобы следовать изогнутости бетона. В ходе первых экспериментов использовалась лишь арматура малого диаметра (φ^3), позволяющая расформование и транспортировку изделия. Вместо традиционного армирования в ходе следующих испытаний будут использоваться новые методы, например использование волокон, нитей или может быть, других материалов.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 4: ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Считалось, что массовое изготовление бетонных элементов с двояким криволинейным контуром по техническим условиям заказчика возможно только после создания гибкой формы: регулируемой опалубки, сделанной из какого-то эластичного материала, позволяющего создать требуемую изогнутую поверхность при помощи пистонов, приводов, силы тяжести, оснований для стержней или других средств. В такую опалубку заливается бетонная смесь до или после деформации опалубки, так чтобы после затвердевания бетона нужный изогнутый элемент был готов. В зависимости от величины осадки бетонной смеси необходима контрформа, чтобы помешать вытеканию бетона из опалубки.

В ходе всех испытаний, которые описаны в настоящей статье, сначала производится заливка бетона, затем дается какое-то время на то, чтобы бетон начал застывать, а потом опалубка де-

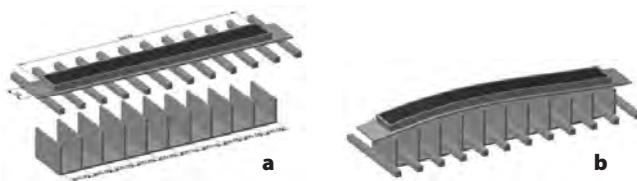


Рис. 4. Схема первого простого теста: простая линейчатая опалубка, в которую сначала заливают бетонную смесь в ситуации (а), и спустя несколько десятков минут эта гибкая опалубка с еще не затвердевшим бетоном деформируется до нужной конфигурации (б)

формируется до окончательной конфигурации. Преимуществом является то, что контрформы не требуются. После изменения формы опалубки происходит окончательное затвердевание бетонной массы. На Рис. 4 показан принцип первого разлива и последующего изменения конфигурации.

На основе этого принципа Б. Янссен, автор производства изогнутых элементов, имеющий степень магистра, построил трёхординатную систему (3D-setup): основание для стержней на 6x11 стержней, расположенных на площади $0,20 \times 0,20 \text{ м}^2$. Каждый стержень имеет две позиции: исходная высота для горизонтального разлива бетона, и вторая высота, соответствующая компьютерной модели (CAD) для ситуации деформации. В ходе первых испытаний в качестве подстилающего основания опалубки для бетонной массы использовали тонкую пластину. В ходе последующих испытаний использовались полоски.

Параметры механических свойств пластин и полосок были введены в механическую модель конструкции для того, чтобы правильно выбрать толщину и эластичность материала опалубки. Из-за того, что довольно трудно предсказать поведение поверхности формы под воздействием принудительной деформации, абсолютно необходимо использовать механическую модель конструкции, чтобы сделать процесс успешным. В качестве примера взяты три бетонных элемента из здания на Рис. 2: один элемент с положительной гауссовой кривизной, и два с отрицательной гауссовой кривизной (седлообразная кривизна). Форма точно соответствовала требуемой высоте стержня. В некоторых точках по кромкам опалубка слегка подтягивалась вниз к стержням. Профиль кромки, образованный мягкой и податливой пеной, удерживает бетон в форме перед и после деформации, хотя бетон все еще сохраняет пластичность. При горизонтальной нагрузке жидкой бетонной смеси, кромка остается практически перпендикулярной к поверхности формы. Расход бетонной смеси на элемент размером $2,00 \times 1,00 \times 0,05 \text{ м}^3$ составил 100 литров, Табл. 2. В некоторых случаях по качеству поверхности разных элементов были довольно неровными из-за того, что кремниевый наружный слой не был одинаковым, а также трудностей при ручном выравнивании отливки. В ходе процесса деформации толщина элемента изменилась незначительно. Рис. 5 на следующей странице дает общее представление о процессе деформации. На Рис 6. представлен участок поверхности в окончательном виде.

В ходе будущих экспериментов больший акцент будет сделан на гладкости поверхности формы и на масле, которое используется при демонтаже для улучшения эстетических свойств панелей в окончательном виде. Такие элементы, изготовленные фабричным способом, можно использовать для изготовления бетонных полов, когда заливка слоя, обеспечивающего давление, производится на месте на более позднем этапе. При этом на виду оказываются лишь две поверхности элемента, другой стороной поверхности является опалубка слоя давления. Возможно применение этого принципа при производстве тонких облицовочных панелей, хотя толщина (50 мм) во время первых испытаний делает элементы слишком тяжелыми для этого. В таком случае эстетические свойства элемента являются чрезвычайно важными.

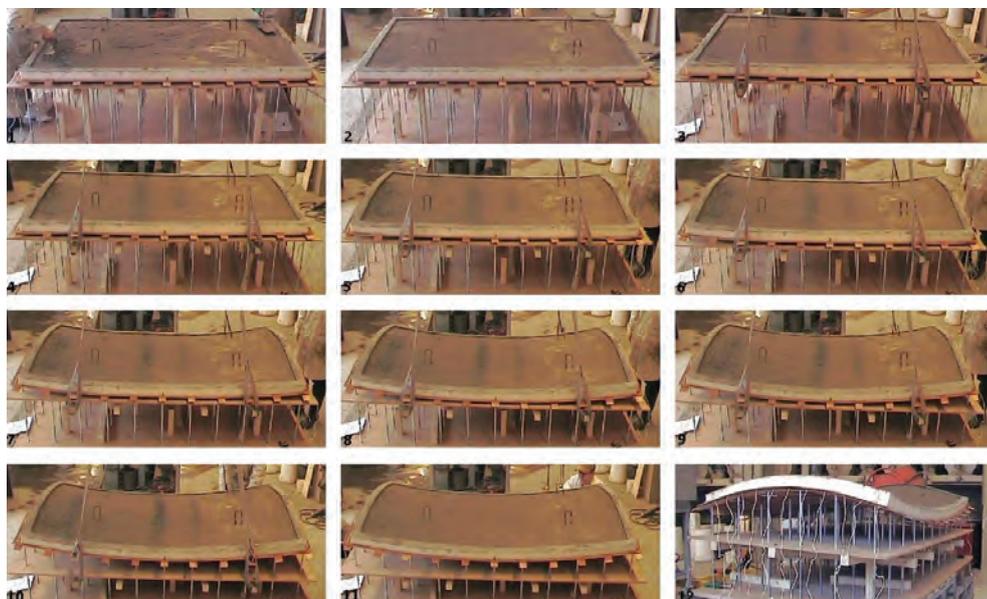


Рис. 5. Видеокadres процесса производства элементов с двойкой криволинейностью с использованием гибкой опалубки



Рис. 6. Конечный продукт — седловидная панель

ТЕМАТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ 5: ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

В тех случаях, когда элемент с двойкой криволинейностью является фасадным или кровельным, возможно, было бы целесообразно включить другие функции в какой-нибудь из сэндвич-элементов: сочетание опоры конструкции, защиты от дождевой воды и ветра, теплоизоляции. Любой сэндвич элемент потенциально может сочетать конструктивную, физическую и эстетическую функциональность, если использовать для производства технологии изготовления и устройства ЧПУ (числовое программное управление). В этом направлении нужно работать в дальнейшем, так как целью настоящего проекта является только изготовление бетонных компонентов с двойким криволинейным контуром, без каких-либо других функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных архитектурных решениях широко используется криволинейность свободных форм. Именно поэтому изогнутые элементы из сборного бетона могут быть потенциальным рынком для производителей. В прошлом не существовало простого способа для производства таких компонентов. Исследования, проводимые в докторантуре Дельфтского Технического университета, направлены на разработку такого метода. Как теоретические исследования, так и испытания, показывают, что новый метод, при котором сначала происходит заливка бетона, а потом его изгиб в гибкой опалубке, является практически возможным и обладает конкретными преимуществами, как то: при его применении относительно легко регулировать толщину элемента, нет необходимости использовать контрформу, гибкая опалубка позволяет свободно и многократно изменять форму опалубки и поэтому использовать ее повторно раз за разом. Оптимизация бетонных смесей позволяет сократить цикл. Планируется провести больше испытаний в ближайшем будущем в целях дальнейшей разработки самого метода и оборудования. Приглашаем партнеров из промышленных и академических кругов к участию в проекте для совместной работы по разным темам, необходимой для успешного полномасштабного применения этой технологии на практике.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Сафдет Кайя Бекироглы. Монтаж зданий свободной формы из сборного бетона — Культурный центр им. Гейдара Алиева. Железобетон 2010 — *Net nieuwbouwen in prefab beton* — Монтаж зданий свободной формы из сборного бетона. Дельфтский Технологический Университет, 2010.
<http://repository.tudelft.nl/search/?q=precast2010>.
- [2] Михаэль Айгенцац, Марио Дьюс, Александр Шифтнеранд, Мартин Килиан, Нилой Дж. Митра, и Хельмут Поттманн и Марк Паули. Практический анализ облицовки архитектурных поверхностей свободных форм по оптимальной цене. В. Кристиано Чеккато и др., редакторы, Достижения в области геометрии архитектуры 2010, страницы 49–72. Спрингер, 2010.
- [3] Y-T. Лиу и С-К. Лим. Новая архитектура, в направлении новой теории цифровой архитектуры: 7-я Дальневосточная международная премия цифрового архитектурного дизайна. Биркхаузер, 2009.
- [4] У. Дж. Митчелл и М. МакКуллоу. Средства цифрового дизайна. Ван Ностранд Рейнхолд, Нью-Йорк, 1994.
- [5] Х. Поттманн, А. Асперл, М. Хофер и А. Килиан. Геометрия архитектуры. Бентли Институт Пресс — Экстон — Пенсильвания — США, 2007.
- [6] К. Дж. Воллерс. Изгиб в строительстве — создание неортогональной архитектуры- 010 Паблицерс, Роттердам, 2001.
- [7] К. Дж. Воллерс. www.free-d.nl, последнее посещение 201

Manufacturing of Double-Curved Concrete Elements

Enabling free-form architecture through advanced manufacturing
methods

Roel Schipper, MSc
Delft University of Technology, The Netherlands
Faculty of Civil Engineering and Geosciences
Dept. of Structural and Building Engineering

February, 2011 (Submission for Beton, St. Petersburg)

Discovering or creating new markets?

Manufacturers of architectural precast concrete products benefit from having a keen eye on new developments in architecture. New demands of architects in terms of shape, texture, colour and durability should be met, at least, if useful and potentially profitable. For precast concrete product manufacturers, the continuous development of mixtures, products and production methods is necessary to keep pace with -or preferably stay ahead of- producers of competitive materials and products. An alternative, even more pro-active approach is creating new market opportunities by developing seductive products that attract the attention and stimulate the creativity of architects. Curved concrete elements might form such an interesting and potentially promising family of products.

Curvature in architecture

The word curvature in this article is referring to a broad collection of free-form shapes applied in architecture, of which the use is made much easier by the new generation of computer aided design software. An example of such a new building making use of curvature is shown in Figure 1 on the following page. Modern CAD software, such as Rhinoceros, Maya and several others, allow the architect to use curvature as 'design language'. Although the use of curved shapes is as old as building history, there is a renewed appreciation of these shapes by many architects. Curvature adds possibilities to architecture that would not exist if only straight lines and flat surfaces made up the architect's toolbox. The use of curvature results in rich and expressive designs [1, 4, 6], which is demonstrated by an illustration of a number of projects in Table 1 on page 4. The simple fact that CAD software allows the digital representation and manipulation of complex curved shapes stimulates architects to experiment with these shapes and apply them in designs.

Manufacturing of curved elements

It is obvious that constructing this kind of shapes sets manufacturers a challenge: whereas in the past repetition and reproduction of similar concrete elements used to be a central theme, free-form architecture now leads to precisely the opposite: mass-customization of products with little repetition or no repetition at all. Furthermore, the iconic value of many of these projects also requires excellent material performance characteristics and strict size and quality tolerances. A variety of opportunities for precast concrete elements can be distinguished, such as production of curved thin facade and roof cladding panels, freely formed load bearing wall elements, curved floor and roof elements, special shapes of beams and columns.

PhD research at TU Delft

It is in this field that a PhD-research is carried out at Delft University of Technology in The Netherlands. The research investigates and develops techniques for manufacturing double-curved precast concrete elements. The ongoing PhD project focuses on new manufacturing methods for curved cladding panels in precast concrete, curved structural façade elements and curved plank floors. The reason that



Figure 1: Curvature may add aesthetic value to the design of a building (shown is a fragment of City of Culture, Santiago de Compostella Spain, architect Peter Eisenman)

these products are chosen as example, is that by doing so, both the external envelope of a building and its possible load bearing structure are addressed. In the future other curved building elements will be taken into consideration. The research is organized around on the following interacting topics:

1. Architectural examples and cases
2. CAD and complex geometry
3. Concrete technology and structural aspects
4. Manufacturing technology
5. Functional aspects of the elements

In the following sections, per topic the research approach and some first results are discussed.

Topic 1: Architectural examples and cases

To gain insight in the current developments in architecture, a look at some recent projects in which curvature was applied is illustrative. Worldwide, the work of leading architectural firms shows a widespread use of rounded shapes. Some examples of projects in which the combination of curvature and concrete was present are shown in table 1 on the following page.

Possible applications of precast products can be derived from the projects in Table 1. In those cases where cast in site concrete was applied (project a, c and e), (partial) precasting might have been a solution if production methods would have existed at the start of the project. In the other cases where precast elements were already used (b, d and f), this led to interesting solutions, mostly designed especially for the concerning project, in some cases at high costs.

A useful overview of many more both realized and non-built designs can be found among the competitors for the yearly Far Eastern International Digital Architectural Design (FEIDAD) Award, reported in a.o. [3], an award that focuses on the impact of the digital era on architecture. An interesting and recent database with free-form, and partially also curved, buildings can be found in [7]. Looking at submissions for recent international architecture contests and projects that are under construction proves that the use of curvature is widespread, so that it is necessary for building product manufacturers to address this market.

Topic 2: CAD and complex geometry

The complex geometrical primitives available in many nowadays CAD packages lead to specific manufacturing issues for the building industry. In the first place, the relation between the drawing and -in our case- the concrete product necessarily becomes more digitally oriented, following the file-to-factory principle. Apart from mathematically relatively simple primitives, such as circles or ellipses in 2D and cones, spheres or tori in 3D, also complex primitives are commonly used nowadays: splines and NURBS are curved lines that are all defined by higher order interpolations between control points in a plane or in 3D space. Especially higher-order NURBS-surfaces allow the drawing of almost any curved surface or volume in 3D space



(a) Rolex centre Lausanne,
SANA A (2010)
*Cast in site curved concrete floor.
The formwork was CNC-milled
file-to-factory.*



(b) Der Neue Zollhof Düsseldorf,
Frank O. Gehry & Associates
(1999)
*Precast load bearing curved interior
facade elements, CNC-milled
PS-foam formwork.*



(c) Mercedes-Benz Museum
Stuttgart, UN Studio (2006)
*Cast in site sloping and curved
concrete structure, remaining in
sight*



(d) Jubilee Church Rome, Richard
Meier (2000)
*Precast self cleaning concrete
roof-facade elements.*



(e) Spencer Dock Bridge Dublin,
Future Systems / A_LA (2008)
*Cast in site concrete bridge on
CNC-milled foam formwork*



(f) Heydar Aliyev Cultural Centre
Baku, Zaha Hadid Architects
(under constr.)
*Double-curved concrete roof
cladding elements on steel space
frame.*

Table 1: Illustration of projects in which curved concrete was applied

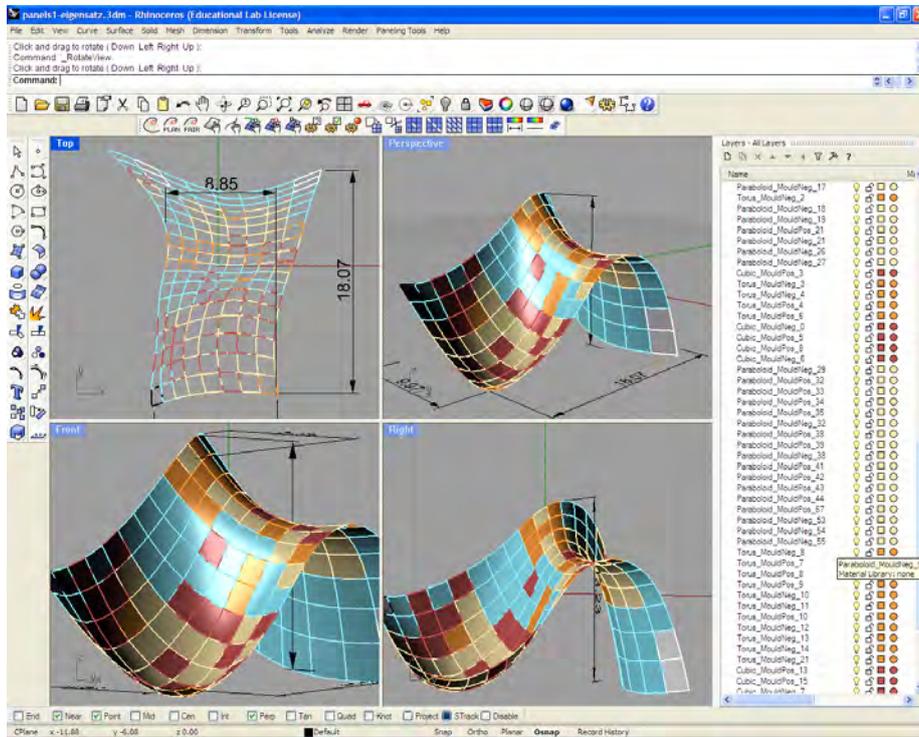


Figure 2: Example of a NURBS-surface of a virtual building drawn in Rhinoceros®

[5]. It is especially this type of surfaces that is used more and more. It is virtually impossible to realize this kind of shapes without the file-to-factory principle. Figure 2 gives an example of such complex geometry. In the first experiments, some panels from the geometry in this figure have been used as example.

Several new technologies are necessary to construct these shapes in the factory or on the building site. A translation from file to factory not only requires knowledge of complex geometry and the underlying maths, but also creates the need for novel manufacturing processes that are able to transform these CAD models into 1:1 scale building elements. It is in the first step that the aid of mathematicians and computer scientists is necessary. Usually the free-form surfaces are first translated into discrete panels or elements of a size that can be manufactured and transported. After this optimization algorithms will assist in rationalizing the innumerable amount of different elements, each with its own complex shape. The rationalization leads to sets of similar or related elements and reduce shape complexity as far as possible within the boundaries of the architectural border conditions. E.g. slightly curved cladding panels can be replaced by real flat panels if the difference is not visible for the eye. Such optimization processes lead to a reduction of total building costs [2]. In the end, thus a CAD file containing a set of panels of reduced geometrical complexity is delivered, that, as next step, has to be manufactured. Even after optimization, in complex free-form geometry double-curved elements remain necessary to accurately follow the architectural shape.



Figure 3: Concrete mixing facilities in the Stevin-lab in Delft

Topic 3: Concrete technology and structural aspects

Architectural precast concrete products usually are manufactured from high quality concrete mixtures, especially if the products remain in sight. As a result of the many variations in quantities of e.g. aggregates, admixtures and fillers in concrete, an infinite amount of concrete mixtures can be made with specific properties. For architectural products, aesthetic properties such as colour, gloss and texture are very important, but also more rational qualities such as durability, strength, sustainability (low-carbon or lightweight) and so on. As a result of the specific production method developed in the PhD project (which will be discussed in the following section), the hardening curve was an important parameter. Especially the moment that the mould (formwork) could be deformed was important for our production method. This is the point in time that the concrete is hardened enough to stay in the mould during deformation, but is still fluid enough to take up the deformation of the mould without cracking. Since usually a short cycle is desired, this moment should be as soon as possible after pouring of the concrete.

Because of the fast strength development, the self compacting qualities, and desired overall slenderness of elements, (U)HPC seems the best mixture for double curved elements. Also the fibers in the mixture could make additional reinforcement superfluous. In the Stevin-lab excellent concrete mixing facilities are available for batches up to 200 litre, using all possible fillers, aggregates and admixtures, see Figure 3. But the high costs of (U)HPC makes the use of it in experiments detrimental. In the first test, when the focus was still mainly on developing the flexible mould system, a simple mixture has been used as shown in Table 2. In

Fraction	Description	Amount
Cement	Cem 1 52.5 R	26.865 kg
Filler	Fly ash	7.380 kg
Admixture	BASF Glenium 51	0.190 kg
Aggregates (dry)	Sand 0.125-0.25 mm	8.479 kg
	Sand 0.250-0.50 mm	11.305 kg
	Sand 0.5-1 mm	16.958 kg
	Sand 1-2 mm	14.131 kg
	Sand 2-4 mm	5.653 kg
	Water	10.783 kg

Table 2: Concrete mixture used in most tests: E2 adapted (fibres are left out), based on 45 litre batch

future tests other mixtures will be applied.

In the curved elements also sufficient reinforcement has to be integrated. Because of the method of producing, the reinforcement has to curve along with the concrete. The reinforcement steel diameters that are normally used would be too thick to follow the curvature. In the first experiments only small diameters ($\phi 3$) have been used, just enough to allow de-moulding and transport of the product. Instead of traditional reinforcement, in future tests new methods will be used, such as fibers, strands or possibly other materials.

Topic 4: Manufacturing technology

Mass-customized production of double-curved concrete elements has often been often regarded only possible after the realisation of a flexible mould: an adjustable formwork consisting of an elastic material that can be formed into the desired curved surface by the use of pistons, actuators, gravity, pin beds or other means. On this formwork the concrete is cast, either before or after deformation of the formwork, so that after the concrete has hardened, the curved element is ready. Depending on the slump value of the concrete, a contra-mould is necessary to prevent the concrete from running out of the mould.

In all tests described in this article, the concrete is first cast, than given some time to stiffen, and after that the formwork is deformed into its final shape. No contra-mould is necessary, which is an advantage. After deformation of the formwork the final hardening of the concrete takes place. Figure 4 shows an illustration of the principle of first casting and then deforming.

Based on the same principle, a 3D-setup was built by MSc graduate B. Janssen and the author for manufacturing double-curved elements: a pin bed of 6x11 pins, distributed over distances of $0.20 \times 0.20 \text{ m}^2$. Each pin has two positions: an initial height for casting the concrete horizontally and a second height corresponding to the CAD model for the deformed situation. In the first tests, a thin plate was used as sub-layer formwork to cast the concrete on. In later tests, a series of strips was

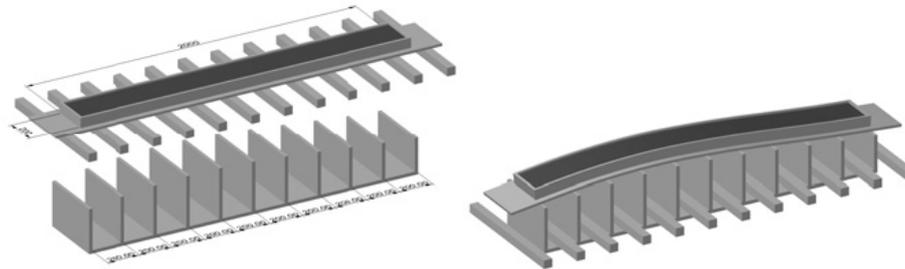


Figure 4: First simple test setup: a single-curved formwork, in which first the concrete is cast in situation (a), and after some tens of minutes the flexible formwork and the still unhardened concrete are deformed into the desired shape (b)

used.

The mechanical behaviour of plates and strips has been put in a structural mechanics model to choose the right thickness and elasticity of the formwork material. Since the behaviour of the mould surface under forced deformation is complex to predict, the use of such a structural mechanics model is an absolute need for the success of the process. Three concrete elements taken from the building in Figure 2 were chosen as example: one element with positive Gaussian curvature, and two with a negative (saddle-shaped) Gaussian curvature. The strip mould accurately followed the required pin height. At some points around the edges the formwork had to be pulled slightly downwards to the pins. The edge profile, formed by a soft and flexible foam, holds the concrete in the mould before and also after deformation, even though the concrete is still plastic. Under the horizontal load of the fluid concrete, the edge stays practically perpendicular to the mould surface. For the element with size $2.00 \times 1.00 \times 0.05 \text{ m}^3$ 100 litres of the concrete of Table 2 were used. The surface quality of the different elements in some cases was quite uneven, as a result of both inequalities in the used silicone finishing layer and difficulties in smoothing the casting side manually. The thickness of the element appeared not to change significantly as a result of the deformation process. Figure 5 on the next page gives an overview of the deformation process. Figure 6 on the following page shows the resulting panel.

In future experiments, more attention will be paid to the smoothness of the mould surface and the de-moulding-oil that is used, to improve aesthetic quality of the resulting panel. The manufactures elements can be applied as a precast plank floor, on which a pressure layer is cast in site in a later stage. In that application only one of the two faces of the element stays in sight, the other face will be the formwork for the pressure layer. It is also possible to use the same manufacturing principle for production of thin cladding panels, although the thickness used in the first tests (50 mm) leads to too heavy elements for this. In such a situation the aesthetic quality of the element is of high importance.

Topic 5: Functional aspects of the elements

In situations where the double-curved element is used as facade or roof element, it might be useful to think of inclusion of other functions in some type of sandwich element: a combination of structural support, protection against rain water, wind-



Figure 5: Video-stills of the manufacturing procedure of double-curved elements using a flexible mould



Figure 6: Resulting saddle-shaped panel

tightness, thermal insulation. A sandwich element has the potential of combining structural, physical and aesthetic functionality in one element, that can be produced with CNC production techniques. Further research on this has to be done; for now the project has concentrated on just casting double-curved concrete elements without additional functions.

Conclusion

Current architectural designs make extensive use of curvature in free-form shapes. Curved elements in precast concrete therefor form a potential market for concrete manufactureres. A simple method to produce this type of elements was not available in the past. A PhD research at TU Delft aims to develop such a method. The theoretical research and the tests demonstrate that a new technique of first casting and later deforming concrete in a flexible mould is feasible and has several advantages: it is a relatively easy way to control element thickness, there is no need for a contra mould, the flexible mould gives freedom to adjust the shape of the mould multiple times and thus reuse it time after time. By optimizing the concrete mixture, a short cycle time can be reached. In the near future more tests are planned to further develop and improve the method and equipment. Industrial or academic partners are invited to participate in the project, to work together on the different topics necessary to make this technology ready for full scale application in practice.

Bibliography

- [1] Saffet Kaya Bekiroglu. Assembling freeform buildings in precast concrete - heydar aliyev cultural center. In *Precast2010 - Het nieuwe bouwen in prefab beton - Assembling freeform buildings in precast concrete*. Delft University of Technology, 2010. <http://repository.tudelft.nl/search/ir/?q=precast2010>.
- [2] Michael Eigensatz, Mario Deuss, Alexander Schiftner and Martin Kilian, Niloy J. Mitra, and Helmut Pottmann and Mark Pauly. Case studies in cost-optimized paneling of architectural freeform surfaces. In Cristiano Ceccato et al., editors, *Advances in Architectural Geometry 2010*, pages 49–72. Springer, 2010.
- [3] Y-T. Liu and C-K. Lim. *New Tectonics, Towards a New Theory of Digital Architecture: 7th Feidad Award*. Birkhäuser, 2009.
- [4] W.J. Mitchell and M. McCullough. *Digital Design Media*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1994.
- [5] H. Pottmann, A. Asperl, M. Hofer, and A. Kilian. *Architectural Geometry*. Bentley Institute Press—Exton—Pennsylvania—USA, 2007.
- [6] K.J. Vollers. *Twist and Build—creating non-orthogonal architecture*. 010 Publishers, Rotterdam, 2001.
- [7] K.J. Vollers. www.free-d.nl, last visited 2011.