

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА МОСТОВ В ХОРВАТИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК МКЭ АНАЛИЗА SOFiStiK

Редакция журнала «ДОРОГИ. Инновации в строительстве» продолжает знакомить читателей с возможностями ПК SOFiStiK. Вниманию специалистов предлагается серия публикаций о мостах Хорватии, спроектированных при помощи этого уникального программного комплекса. Проекты мостовых переходов через реки Дубровачка, Крка, Мирна, а также стального моста в Ясеновицах, были разработаны конструкторским отделом факультета гражданского строительства Университета Загреба (Хорватия). Открывает серию статей материал о вантовом мосте со сталежелезобетонным пролетным строением через реку Дубровачка.

Мост через реку Дубровачка

Работы над проектом моста начались в 1990 году. Через несколько лет первоначальный проект был изменен, и работы возобновились только в 1999 году.

Проект

Несимметричное расположение моста с одним пилоном пришлось выбрать из-за того, что автомагистраль подходит к мосту с запада под острым углом, и строительство

более экономичной трехпролетной вантовой системы не представлялось возможным. Расположение моста в зоне высокой сейсмической и ветровой активности также оказало существенное влияние на проект.

Мост состоит из главного вантового моста с композитным пролетным строением $244,0 + 80,7$ м, и виадука подхода, с пролетным строением из предварительно напряженного железобетона коробчатого сечения длиной 87,4 м и 60-метровой консолью. Полная длина моста по граням устоев — 518,23 м (рис. 1.1).

Согласно первоначальному проекту, мост должен был состоять из двух отдельных частей — вантового моста и косо-изогнутого виадука подхода из преднапряженного бетона на западной стороне (рис. 1.2). Балка жесткости вантового моста состояла из преднапряженной железобетонной балки в крайнем пролете и стальной коробчатой балки в главном пролете, соединенными на опоре в неразрезную конструкцию. Соотношение бокового пролета из предварительно напряженного железобетона к главному стальному пролету было равно 0,30. А-образный железобетонный пилон был запроектирован высотой 163,6 м так, чтобы отношение высоты пилона к главному пролету составляло 0,37.

Для упрощения строительства и уменьшения затрат на техническое обслуживание и текущий ремонт подрядчик изменил этот проект. Были внесены следующие изменения:

- Длина виадука коробчатого сечения из преднапряженного железобетона на правом берегу была увеличена на 60 м, что избавило от необходимости сооружения промежуточной опоры и позволило на такую же величину сократить протяженность пролета, сооружаемого навесным методом.

- Сечение основного пролетного строения моста стало открытым,



Рис. 1.1. Мост через реку Дубровачка

композитного типа, включающим две стальные главные балки высотой по 2,0 м, поперечные балки и железобетонную плиту проезжей части толщиной 25 см. Последующее испытание в аэродинамической трубе показало, что для увеличения крутильной жесткости пролетного строения в нижней части должны быть установлены ветровые связи.

■ Высота пилона была уменьшена до 141,5 м.

Продольное расположение вант является модификацией типа «веер». Ванты закреплены в двух наклонных плоскостях, находящихся на расстоянии 20 м.

Балка жесткости опирается на консоль виадука, поперечную балку пилона и восточный устой. Класс прочности стали — St 52–3 DIN, бетона плиты проезжей части — С 35/45.

А-образный бетонный пилон имеет коробчатое сечение с максимальной толщиной стенок 60 см (рис. 1.3). В местах анкерки вант большие усилия передаются на вершину пилона, что потребовало его преднапряжения в продольном и поперечном направлениях. Проектировщиком был предложен вариант с использованием стальных анкерных приспособлений на пилоне (рис. 1.3, слева на первом плане), но по экономическим соображениям он был отвергнут.

Преднапряженное пролетное строение виадука подхода частично изогнуто в плане, его высота пролетного строения изменяется с 3,2 м на западной береговой опоре и в конце консоли до 8,2 м в месте соединения с опорой (рис. 1.3). Два продольных гидравлических демпфера, способных воспринять до 200 тонн, установлены в месте сопряжения виадука с устоем на западном берегу для того, чтобы в случае сильного землетрясения выступать в роли неподвижных опорных частей, и, таким образом, уменьшать сейсмическое воздействие на устой. Основание устоя запроектировано так, чтобы при землетрясении функционировать в качестве пластичного шарнира.

В проекте использован бетон класса прочности С 35/45. Защитный слой бетона составляет 5 см для пилона, устоя и пролетного строения, и 10 см — для фундаментов и свай ниже уровня моря.

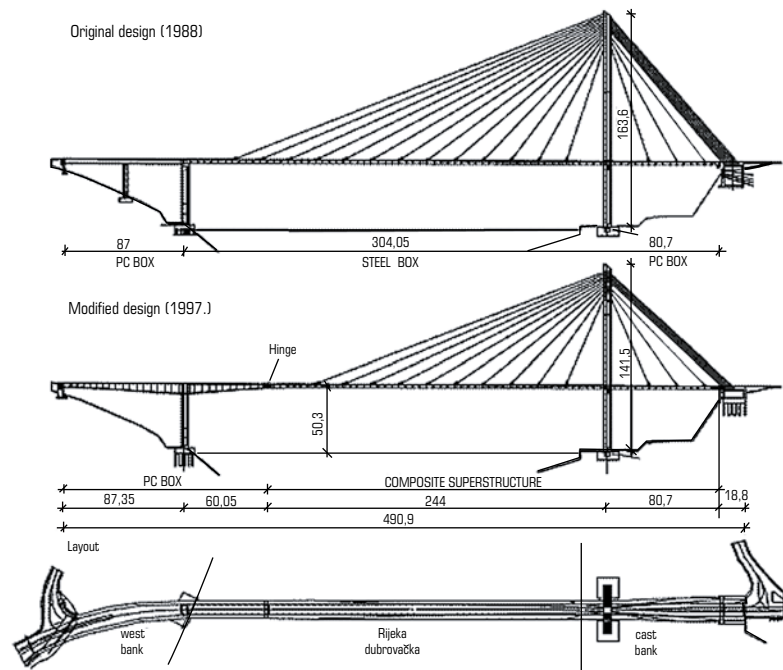


Рис. 1.2. Первоначальный (сверху) и обновленный (внизу) проекты моста

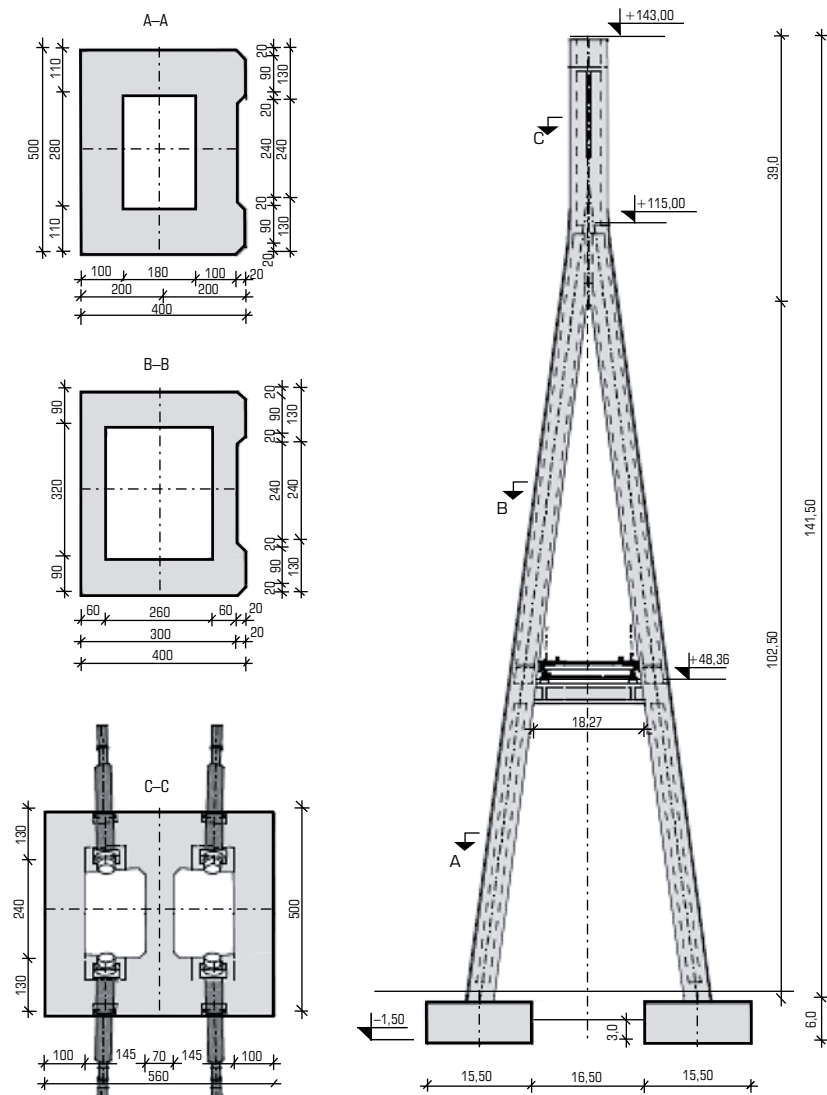


Рис. 1.3. Пилон моста

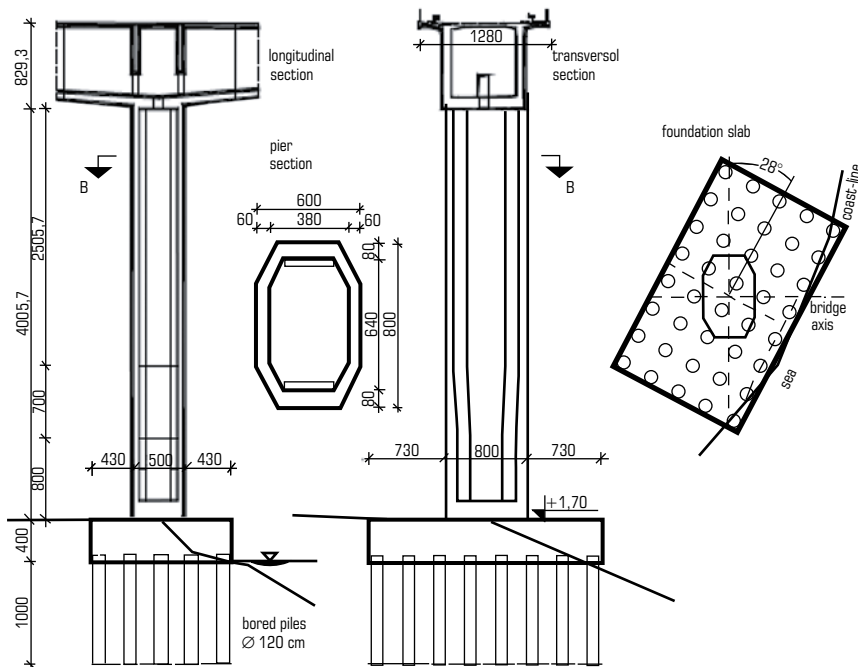


Рис. 1.4. Опора виадука подхода

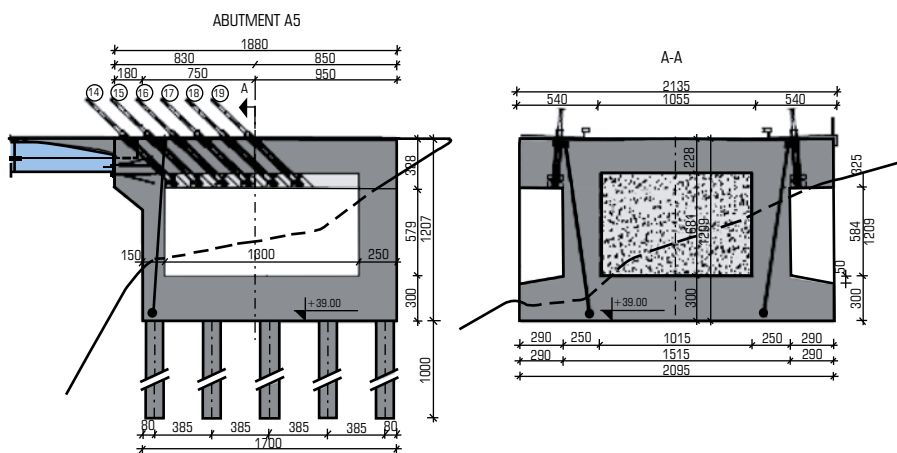


Рис. 1.5. Устой на восточном берегу

Фундамент моста через реку Дубровачка включает:

- Западный устой, воспринимающий большие вертикальные воздействия от пролетного строения и усилия отрыва в случае землетрясения:

- Опору виадука подхода (рис. 1.4);
- Пилон, основание которого расположено очень близко к морю;

- Восточный устой, воспринимающий значительную вертикальную силу благодаря анкеровке шести вант за устой.

Западный устой был построен по первоначальному проекту еще до войны. Влияние пролетного строе-

ния возросло из-за необходимого увеличения смежного пролета в новом варианте проекта (с 43,5 м до 87,35 м). Расположение опорных частей также было изменено. Дополнительные опорные части были установлены для восприятия вертикальных реакций. По указанным причинам устой пришлось реконструировать и усилить.

Опора виадука подхода размещается в узком пространстве между морем и магистралью. Поперечное сечение опоры коробчатого типа, с внешними габаритами 8,0×5,0 м. Фундамент — на буронабивных сваях, объединенных сверху ростверком толщиной 4 м (рис. 1.4).

Устой на восточном берегу (рис. 1.5) запроектирован как монолитная коробчатая конструкция с вертикально преднапряженными боковыми стенками. Внутренняя полость заполнена камнем. В восточном устое заанкерованы шесть пар вант, в нем же закреплено и пролетное строение.

Первоначально для этого устоя был запроектирован низкий свайный ростверк. В окончательном варианте вместо него был принят высокий свайный ростверк, который предоставил возможность увеличить коэффициент запаса устойчивости для устоя до 1.5, в то время как ожидаемая несущая способность буронабивных свай была ограничена.

Нижние стойки пилона опираются на плиты с размерами в плане 15,5×15,5 м и толщиной 6,0 м. Плиты в поперечном направлении объединены балкой шириной 4,0 м и толщиной 3,0 м. Для ограничения перемещений фундамента из-за неблагоприятного уклона скальных слоев, в продольном направлении пришлось установить двадцать постоянных грунтовых анкеров.

Расчет конструкции

Местоположение моста охарактеризовано влиянием моря (соли), сильных ветров и высокой вероятности сильных землетрясений, так что потребовались предварительные исследования степени их влияния. Контракт между Правительством Хорватии и генеральным подрядчиком Walter-Bau, предписал использование Немецких норм DIN, за исключением сейсмического расчета, который должен был выполняться согласно EC 8.

Сейсмическое исследование местоположения было проведено Университетом Загреба. Институт RWTH выполнил нелинейный динамический расчет моста по искусственным акселерограммам, разработанным на основе регистрации фактических землетрясений. Расчетное ускорение принято равным 0,38g с 500-летним периодом повторяемости.

Порывы ветра с севера в местоположении моста могут достигать скоростей до 50 м/с. Испытание в аэродинамической трубе было вы-

полнено в RWTH, вместе с численным моделированием динамики конструкции. В результате была задана следующая ветровая нагрузка:

- Горизонтальная сила: 8,85 кН/м;
- Подъемная сила: 10,4 кН/м;
- Момент: 13,06 кН·м/м (балочный крутящий);
- Ветровая нагрузка на пилон: до 6,64 кН/м² в зависимости от высоты над уровнем моря.

Все численные исследования были выполнены с использованием пакета SOFiSTiK. Различные численные модели использовались для оценки поведения конечной конструкции, включая стадии строительства, а также поведения критических элементов конструкции, например, таких, как плита проезжей части композитного пролетного строения, зона анкерования на пилоне, шарнирное закрепление между вантовым пролетным строением и виадуком подхода, фундамент на буронабивных сваях и пр.

Глобальное поведение моделировалось при помощи балочных элементов, в то время как детализированные модели совмещали стержневые элементы и элементы пластин.

Все основные нагрузки рассматривались в заданных комбинациях, для времени $t = 0$ и $t = \infty$:

- Основные нагрузки: собственный вес, постоянная нагрузка, подвижная нагрузка, ползучесть и усадка бетона;

- Дополнительные нагрузки: ветровая и температурная нагрузки, торможение;

- Случайные нагрузки: землетрясение.

- Основная схема загрузки подвижной нагрузкой по DIN — SLW 60.

Вантовый мост был рассчитан как пространственная рама, с учетом жесткости пролетного строения, — стального при расчете на собственный вес и композитного — при остальных нагрузках.

Модель плиты проезда включала оба типа конечных элементов, отображая 120 м плиты, — от восточного устоя до первого ванта перед пилоном. Это использовалось для учета влияния подвижной нагрузки и анкерных устройств, передающих плите большие нормальные усилия. На основе сопоставления результатов, полученных по глобальной и детальной численным моделям, была

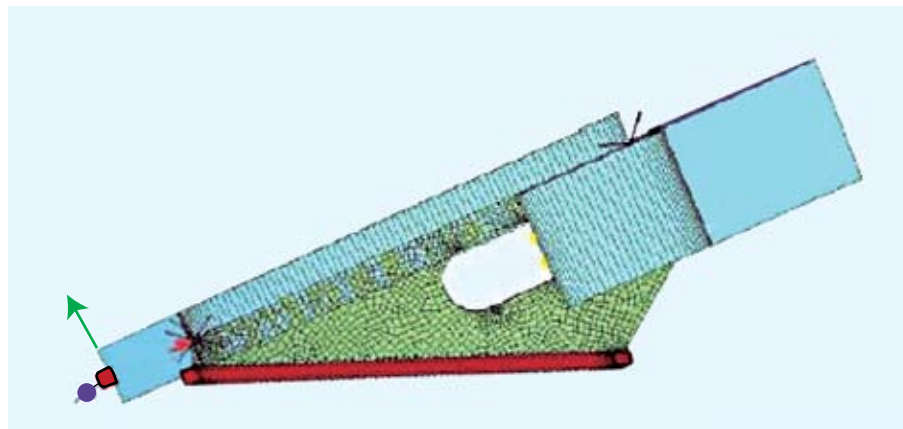


Рис. 1.6. Численная модель стальной пластины анкера для крепления ванта

запроектирована ненапрягаемая железобетонная плита.

Проверка прочности главных стальных балок была выполнена по допускаемым напряжениям, как предписано в соответствующих DIN кодах. Проверка устойчивости главных стальных балок была также выполнена согласно немецким нормам.

Размеры вант назначались исходя из величины напряжений $0,45 \times 1770 = 796,5$ Н/мм² для основных нагрузок и $0,5 \times 1770 = 885,0$ Н/мм² — для основных и дополнительных нагрузок.

Максимальное напряжение при проверке выносливости (116,9 Н/мм²) не превышало допускаемых 124 Н/мм².

Анкерные приспособления вант были запроектированы с допущением частичных пластических деформаций в опасных зонах (рис. 1.6).

Последовательность строительства была строго описана в окончательном проекте. Были проанализированы различные варианты сооружения плиты проезда: после рассмотрения сборной и сборно-монолитной была в итоге выбрана монолитная плита.

Для анализа стадий монтажа использовалась отдельная модель. Для учета укладки бетонной плиты отрегулировали жесткость сегментов пролетного строения. Была проанализирована 141 стадия в 12 различных моделях. Результатом этого стало создание регламента строительства, определяющего все стадии, в том числе и величины натяжения всех вант.

При этом необходимо было принимать во внимание следующее:

- Натяжение вант должно быть в указанных пределах;

- Напряжения в главных балках и плите должны быть в допустимых пределах;

- Пилон должен оставаться вертикальным (за счет поочередного натяжения вант);

- Поперечная сила на вершине пилона должна быть ограничена;

- Перемещения композитного пролетного строения должны быть под контролем;

- Деррик-кран должен быть достаточно узким, чтобы продвинуться между уже установленными парами вант, перемещаясь по 10 метров вдоль моста.

Ветровая нагрузка на пилон основывалась на данных аэродинамических тестов. Величины, используемые для расчета на стадии процесса эксплуатации, были вычислены, основываясь на столетних периодах наблюдений, а для стадий строительства — на десятилетних периодах.

Пилон численно смоделировали балочными элементами, грунт — пружинами. Были проанализированы 26 стадий строительства. Все необходимые нагрузки были приняты во внимание: постоянный вес пилона, подмости и опалубка, влияние крана, закрепленного на стенках пилона, ветровая нагрузка. Из-за наклона стоек пилона происходили горизонтальные отклонения, которые были учтены в течение последующего строительства.

Пилон на этапе строительства — длинная консоль высотой 142,5 м. Позже, когда ванты уже были закреплены в нужном месте, податливость пилона частично ограничили и уменьшили. Ветровая нагрузка на завершеном и продольно свободном пилоне отличается в размере.

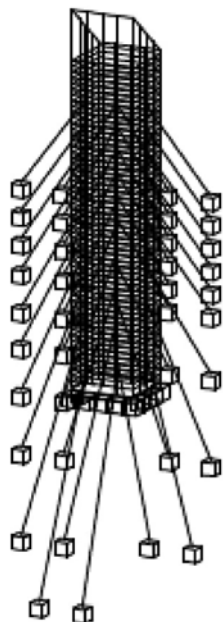


Рис. 1.7. Пространственная модель верха пилона с анкеровой вант

Были выполнены геометрически и физически-нелинейные расчеты. Увеличение нелинейного изгибающего момента, по сравнению с линейным, составило 38%.

Вершина пилона с закрепленными вантами была проанализирована отдельно, с использованием нескольких плоских и пространственных моделей (рис. 1.7). Ванты передают на пилон большие горизонтальные силы, которые должны были быть восприняты мощной арматурой, преднапряженной и ненапрягаемой, установленной в продольном и поперечном направлениях.

Статический анализ на ПК конструкций на западном берегу был выполнен отдельно, при строгом учете стадий строительства. Расчет ползучести и усадки бетона проводился на основе возраста рассматриваемой части пролетного строения. Воздействия от вантового пролетного строения были представлены в виде сосредоточенных нагрузок. Нагрузка от перемещающихся подмостей и опалубки составила 2×650 кН.

Для обеспечения проектной геометрии расчет строительного подъема был выполнен с учетом всех 120 стадий строительства, которые были проанализированы целиком, включая бетонирование, натяжение арматуры, перемещение подмостей, устройство и демонтаж временных опор. Все рассмотренные стадии были включены в заключительный строительный протокол.

Динамический сейсмический анализ выполнялся с использованием процедуры спектрального анализа, согласно ЕС 8, для класса грунтов В.

Особенно жесткими были требования к сейсмическому расчету моста на западном берегу, выполненному с использованием эквивалентного линейного динамического анализа. Полученные усилия были изменены с учетом коэффициентов согласно ЕС 8/2. Уменьшение сейсмических усилий на коэффициент $q > 1,2$, могло быть выполнено только при условии, что проведены точные измерения — во избежание преждевременного повреждения в зоне диссипации. Дополни-

тельный нелинейный анализ показал, что допустим коэффициент $q = 3,5$. Наиболее чувствительная часть — это зона диссипации в основании опоры. Предварительные исследования показали, что достаточная устойчивость достигается устройством пластичного шарнира в основании опоры. Исследование RWTH выявило, что соответствующие горизонтальные смещения должны быть в 1,43 раза выше упругих перемещений ($q = 1$). Действительные перемещения должны быть меньше из-за применения гидравлических демпферов.

Плита фундамента западного устоя была смоделирована с пластинами на упругом основании, а жесткость грунта — с недопущением напряжений растяжения в грунте.

Строительство

Пролетное строение виадука подхода было выполнено с помощью метода уравновешенного навесного монтажа. Две вспомогательные бетонные колонны стабилизировали конструкцию при сооружении пролета в 87,4 м (рис. 1.8).

Пролетное строение было преднапряжено в две стадии. На первой стадии во время сооружения консоли натягивались пучки в верхнем поясе и стенках. После завершения сооружения каждой секции натягивались как минимум два концевых пучка. После завершения стадии строительства для уменьшения изгибающих моментов натягивались дополнительные пучки нижнего пояса.



Рис. 1.8. Виадук подхода моста на стадии строительства



Рис. 1.9. Надвижка стального пролетного строения от восточного берега

При сооружении главного пролетного строения моста использовались два различных способа монтажа. Стальная часть бокового пролета длиной 80,7 м и смежной части главного пролета длиной 33,0 м были установлены путем продольной надвигки от левобережного устоя (рис. 1.9). Масса надвигаемой конструкции достигла 508,2 тонны.

Оставшиеся 211 м длины стального пролетного строения главного пролета сооружались сегментами по 20 м навесной сборкой. Для подъема секций с баржи использовался деррик-кран грузоподъемностью 90 тонн (рис. 1.10). Процедура монтажа была закончена через 4 месяца. Сочетание двух методов было выбрано во избежание устройства вспомогательных опор для бокового пролета в населенной местности.

Бетонирование плиты проезда осуществлялось последовательно с отставанием в две секции от текущего положения деррик-крана.

Заключительное выравнивание геометрии пролетного строения было успешно выполнено после размещения обустройств, за счет дополнительного натяжения вант, на основании точных данных численного анализа.

Выполненные испытания доказали точность проекта и статического анализа. Самые большие измеренные перемещения в главном пролете составили 289 мм (расчетное значение — 298 мм). Минимальный требуемый класс бетона для всех частей конструкции С45/55 был обеспечен в основном благода-

Технические характеристики моста

Конструкция	Количество	Качество материала
Опоры	Бетон: 614 м	C 45
	Арматура: 136 т	St 500
Пилон	Бетон: 3554 м ³	C 45 (C55 — верх пилона)
	Арматура: 1048 т	St 500
	Пучки: 11 т	St 1570/1770
Преднапряженное ПС	Бетон: 1,08 м ³ /м ²	C 45
	Арматура: 230 кг/м ²	St 500
	Пучки: 60 кг/м ²	St 1570/1770
Композитное ПС	Бетон: 0,3 м ³ /м ²	C 55
	Арматура: 129 кг/м ²	St 500

ря очень низкому водоцементному отношению, равному 0,35.

Основные данные:

- Полная длина моста 518,23 м.
- Ширина моста переменная, 12,60–16,25 м
- Высота пилона 141,5 м
- Высота пилона/длина главного пролета 0,33

■ Предварительно напряженная балка 147,4 м

■ Вантовый мост 324,7 м

Мост через реку Дубровачка был открыт для движения в мае 2002 года.

Основные участники проектирования и строительства:

■ Заказчик: Хорватские Дороги, Загреб

■ Генеральный проектировщик, выполнявший также проекты ж/б конструкций и проект строительства: факультет гражданского строительства, Университет Загреба

■ Чертежи стальных конструкций: CIMOLAI, Pordenone, Италия

■ Генеральный подрядчик: консорциум Walter-Bau AG — Konstruktor Inenjering, Split

■ Субподрядчик по монтажу стальных конструкций: CIMOLAI, Pordenone, Италия

Златко Савор,
факультет гражданского строительства, отдел конструкций, Университет Загреба, Хорватия

Авторы перевода:
Д.А. Ярошутин,
эксперт ПК SOFiStiK, зам. декана, ст. преподаватель;
Я.С. Баранова,
кафедра мостов и тоннелей АДФ СПбГАСУ

Продолжение следует



Рис. 1.10. Подъем стальной секции



Рис. 1.11. Последняя секция стальной конструкции была установлена с виадука подхода автомобильным краном