

Мост Сутун

Строительный анализ



РЕЗЮМЕ

Вантовый мост Сутун является основным мостом через реку Янцзы, соединяющим города Сучжоу и Наньтун в Китае. Его строительство стоило приблизительно 920 миллионов долларов США. Мост является важным проектом, цель которого состоит в том, чтобы сократить разрыв в экономическом развитии между городами Сучжоу и Наньтун и способствовать равномерному развитию в регионе. Мост Сутун был введен в эксплуатацию летом 2007 года, став самым длинным вантовым мостом в мире. Общая длина вантовой части проекта составляет 2088 м. Центральный пролет имеет длину 1088 м, а высота пилона составляет около 300 м. В данном документе коротко описан проект, а также представлен строительный и статический анализ, проведенный при проектировании моста Сутун.

ВВЕДЕНИЕ

Мост Сутун между городами Сучжоу и Наньтун через реку Янцзы находится в провинции Цзянсу в Китае. Это быстроразвивающаяся провинция с населением 74 миллиона человек. До последнего времени южная провинция Цзянсу динамично развивалась, но наличие реки Янцзы ограничивало доступ к северной части провинции, мешая ее развитию. Мост Сутун обеспечит важную связь между городами Сучжоу и Наньтун и будет способствовать достижению конечных целей, состоящих в том, чтобы искоренить бедность и ускорить общее процветание.

Общая длина мостовой части проекта составляет 8,2 км. Мост состоит из основного моста через фарватер (мост Сутун), специального моста через фарватер и обоих подходов пролетов. Основной мост через фарватер — это вантовый мост, а специальный мост через фарватер является предварительно напряженным, бетонным, неразрезным, рамным жестким мостом с расположением пролетов на расстоянии 140+268+140 (548) м. Подходные пролеты — это предварительно напряженные, бетонные, неразрезные, балочные мосты длиной 75 м, 50 м и 30 (155) м в длине пролета.

На месте расположения моста проходят два судоходных канала — основной и специальный — для исключительного использования портом Наньтуна.

Власти Китая горды тем фактом, что этот невероятно сложный проект был реализован собственными силами без привлечения иностранной помощи для производства компонентов или строительства. Основными подрядчиками для руководства и строительства были компании Jiangsu Sutong Bridge Construction Commanding Department (руководство проектом) и China Harbor Engineering Company Group (строительство).

Консультанты Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, Inc. (Китай) разработали мост в сотрудничестве с Институтом планирования и проектирования связи провинции Янцзы и исследовательским институтом архитектурного проектирования университета Тонджи. Несколько иностранных компаний выступали в роли консультантов при выполнении специальных задач в процессе проектирования и планирования. Это были фирмы COWI Consultants и CHODAI Co. Ltd., которые независимо оценивали проектную документацию.

Разрешение, предоставленное иностранным компаниям для содействия в выполнении специальных задач, позволили HPDI развернуть программное обеспечение RM Bridge. Дориан Янич (Dorian Janjic), вице-президент группы разработки программного обеспечения для проектирования мостов компании Bentley, поддерживал команду проектировщиков HPDI при использовании ими приложения RM в процессе проектирования.

Компания HPDI выбрала Bentley и программное обеспечение RM Bridge, исходя из проверенной универсальности приложения, а также опыта и направленности на результат команды консультирования и проектирования группы проектирования мостов компании Bentley. Универсальность программного обеспечения RM Bridge от Bentley была доказана его широким использованием при строительстве моста Стоункатерз в Гонконге — первого вантового моста, который превзошел достигнутый на то время предел в 1000 м для основного вантового пролета.

Это придало уверенности компании HPDI в том, что все преграды, даже непредвиденные, будут устранены совместными усилиями. Эта уверенность была оправдана. Несмотря на сложность проекта и высокие требования заказчика, команда сумела завершить проектное задание до июля 2004 года, как и было запланировано.

СЛОЖНОСТИ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

Различные факторы окружающей среды и текущие потребности сформировали чрезвычайно сложные задачи по проектированию, анализу и строительству.

- » **Требования судоходства** — Под мостом регулярно проходят крупные контейнеровозы и огромные караваны судов. Отверстие для морского пути требовало ширину больше 891 м и высоту больше 62 м. Более того, основной мост должен был выдерживать удар корабля весом 50 000
- » **Неблагоприятный климат** — Каждый год в регионе фиксируется в среднем 30 дней густого тумана, более 120 дней проливных дождей и ветра значительной скорости, вызываемые тайфунами и торнадо. Как результат, командам строителей необходимо было соблюдать интенсивный график, чтобы завершить работы в сезонные промежутки.
- » **Сложная гидрология** — Поскольку река является приливно-отливной, она характеризуется переменчивостью скорости потока, его направления и глубины. Волны иногда достигают 3 м в высоту, а течения могут быть очень мощными. Приливы и отливы могут изменяться на 4 метра. Конструкция позволяет в среднем выдерживать напор воды, проходящий через живое сечение реки, в 4,1 м в сек.
- » **Глубокий почвенный горизонт** — Почвенный горизонт находится на глубине 270 м и покрыт илом, песком и грунтом. Это означало, что для оснований необходимо было специальное решение — решение, не предусматривающее бурения почвенного горизонта

Эти сложные задачи требовали глубокого анализа больших смещений, вызванных различными потенциальными условиями. Особенно важным было изучение динамических свойств, обусловленных ветром, сейсмическими событиями и столкновениями кораблей с пилонами. Для полной последовательности выполнения строительных работ был проведен анализ с особым упором на оптимизацию натяжения канатов, что является ключевым фактором на каждой стадии строительства вантового моста. Анализ включал в себя указанные ниже аспекты.

- » **Оптимизация натяжения канатов** — Для вантовых мостов натяжение канатов является точно настроенным, чтобы достичь идеального распределения внутренних сил в готовой конструкции. Как правило в таких проектах идеальное конечное состояние заранее задается с помощью основных условий, в частности минимального изгибающего момента в плите проезжей части и пилонах под постоянными нагрузками. Эти критерии управляют стратегией регулировки натяжения канатов. AddCon, специальный модуль в приложении RM Bridge, автоматически рассчитал оптимальное распределение натяжения и необходимую последовательность напряжения канатов.
- » **Анализ на стадии строительства** — Упреждающий анализ с помощью модуля AddCon использовался на всех стадиях возведения для достижения оптимальной конечной нагрузки, требуемой проектировщикам. Модель анализа включала в себя ряд условий для различных стадий строительства. Участники команды также исследовали эквивалентное статическое действие ветра разных направлений на фазах строительства, которые считались наиболее проблематичными.
- » **Большие смещения** — Участники команды уделяли особое внимание геометрическим нелинейностям на протяжении всего процесса строительства. Инженеры провели специальное исследование нелинейных эффектов, результаты которого позволили получить значимые характеристики влияния геометрических нелинейностей.
- » На стадии строительства большие отклонения от конструктивной формы должны быть приняты как значения предварительного строительного подъема для получения требуемой постоянной нагрузки на конструктивную форму в конце последовательности выполнения строительных работ без допуска запрещенных внутренних сил связи.

- » **Воздействие ветра** — Участники команды провели несколько исследований, чтобы оценить воздействие сильного ветра.
1. Команда разработала соответствующее сечение пролетных строений моста, которое удовлетворяет текущим потребностям и требованиям к несущей способности, а также к ветровой нагрузке. Аэродинамические испытания, проведенные в университете Тонджи, привели к созданию обтекаемой, закрытой стальной балки коробчатого сечения с обтекателями от ветра.
 2. Команда изучила вибрацию канатов, вызванную ветром и дождем или периодическим возбуждением. С помощью приложения RM команда исследовала разные методы минимизации вибраций вантов.
 3. Был проведен полный анализ динамической нагрузки ветра на конструкцию моста с транспортом на нем и без него. Этот анализ основывался на аэродинамических коэффициентах и прочих данных, полученных в результате испытаний в аэродинамической трубе. Анализ включал в себя нелинейные демпферы, требуемые для стабилизации канатов, и соединения балок/пилонов.
- » **Динамические свойства** — большие смещения, часто вследствие изменений температуры, которые могут возникать в подобного рода конструкциях, — как при строительстве, так и при эксплуатации. Во время анализа эти смещения не должны быть ограничены во избежание перегрузки. Для данного проекта с этой целью и для динамических нагрузок были применены нелинейные демпферы. Однако эти демпферы не ограничивали смещения, вызванные естественными условиями. Обязательным моментом было определение соответствующих характерных конструктивных параметров демпферов, включая промежуток, упругую жесткость и динамические характеристики. Приложение RM Bridge использовалось для проведения требуемых параметрических исследований с целью проектирования макетов этих устройств. Динамические параметры основывались на результатах анализа временной диаграммы для некоторых типичных входных сейсмических воздействий.

ОПИСАНИЕ МОСТА

Расположение пролетов

После изучения различных геотехнических условий на месте строительства моста, включая техническую выполнимость и возможность постройки, участники проекта сделали выбор в пользу проекта вантового моста с двумя несущими поверхностями и двумя пилонами для основного моста через фарватер с неразрезным пролетным строением длиной 2088 м (100+100+300+1088+300+100+100), как показано на рис. 1. На каждом боковом пролете были установлены две вспомогательные опоры и одна промежуточная опора. Главный пролет моста имеет длину 1088 м. Это самый длинный в мире главный пролет вантового моста в настоящее время.

Мост Сутун между городами Сучжоу и Наньтун через реку Янцзы находится в провинции Цзянсу в Китае. Это быстроразвивающаяся провинция с населением 74 миллиона человек. До последнего времени южная провинция Цзянсу динамично развивалась, но наличие реки Янцзы ограничивало

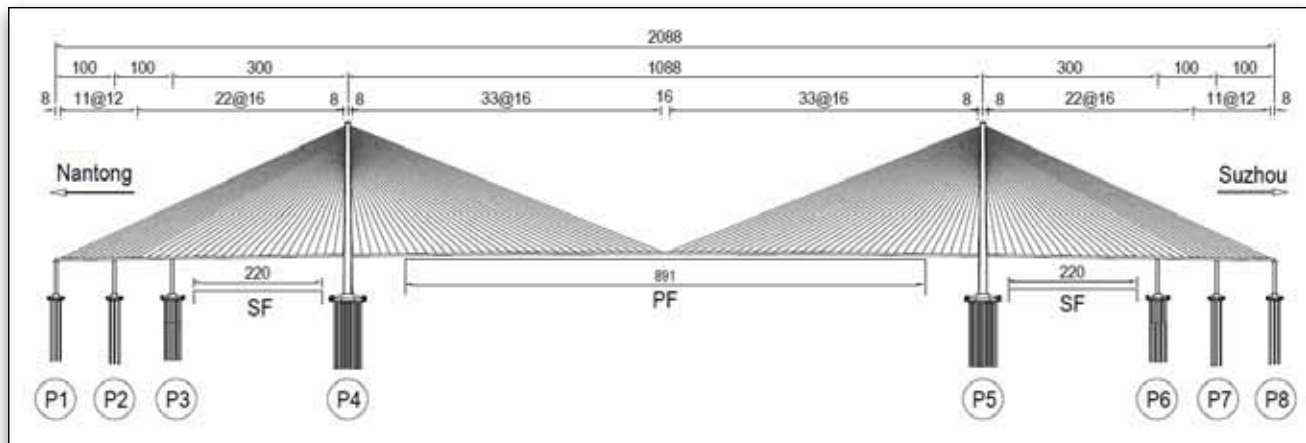


Рис 1: Расположение пролетов (м)

Балка

Балка моста — это обтекаемая, закрытая, плоская стальная балка коробчатого сечения. Общая ширина, включая обтекатель от ветра, составляет 41,0 м для установки восьми двойных полос движения. Высота сечения составляет 4,0 м. Стальная балка коробчатого сечения обычно крепится в продольном направлении с помощью закрытых стальных желобов. Поперечные диафрагмы жесткости установлены на расстоянии 4,0 м друг от друга и на меньшем расстоянии до 2,27 м локально вокруг двух пилонов. Нормативный предел текучести стали составляет 345 МПа и 370 МПа.

На рис. 2 показано стандартное сечение балки. Толщина отмосков и элементов жесткости отличается в продольном направлении моста.

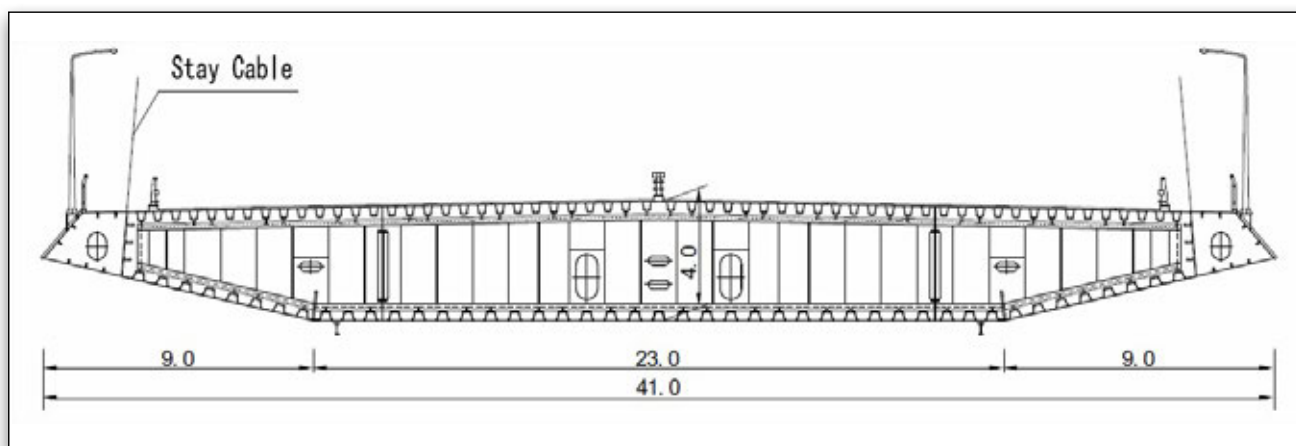


Рис. 2: сечение балки (единицы измерения: м)

Пилоны

Два 300-метровых, вогнутых, Y-образных пилона изготовлены из бетона марки C50 согласно китайскому стандарту JTJ01-89. Пилоны удерживают 36-тонные стальные коробки, прикрепленные к бетону срезными штифтами в верхней части пилон для закрепления вантов. Анкерные балки между пилонами предварительно напряжены для создания распора от опор пилонов под рабочей и сейсмической нагрузкой. Согласно проектным спецификациям и замечаниям консультантов COWI, ширина трещин стенки бетонного пилон допускается в пределах 0,2 мм.

Ванты

Ванты установлены в плоскости с двойным наклоном со стандартным расстоянием 16 м в центральном пролете и 12 м возле краев обратных пролетов вдоль балки. Для уменьшения воздействия ветровой нагрузки вантовые системы изготовлены из пучков параллельных прядей, состоящих из нитей проволоки толщиной 7 мм каждая с площадью поперечного сечения 38,48 мм². Номинальная прочность при растяжении тросов составляет 1770 МПа. Размеры тросов колеблются от PES7-139 для вантов главного пролета возле пилонов до PES7-313 для самой длинной ванты. Самый длинный трос имеет длину около 577 м и весит 59 т.

В процессе разработки участники проекта изучали проблему вибрации тросов, вызванной ветром в сочетании с дождем или параметрическим возбуждением. Разработчики исследовали разные способы минимизации вибраций вантов, включая два вида обработки поверхности тросов, чтобы предотвратить стекание дождевой воды по тросам и внутренним или дополнительным внешним демпфирующим устройствам. Окончательные меры будут выбраны после детальных испытаний.

Фундаменты

Пробуренные висячие сваи поддерживают опоры и пилоны от опоры 1 до опоры 8 с диаметром от 2,8 м возле головки сваи до 2,5 м вверху вдоль свай. Опоры 1, 2, 7 и 8 каждая имеют 19 свай, в то время как опоры 3 и 6 каждая имеют 36 свай. Каждая свая забита отдельно. Пилоны для опор 4 и 5 поддерживаются 131 сваями. Их длина колеблется от 108 до 116 м.

Вантовые мосты распределяют внутри силы в готовой конструкции с помощью очень специфических регулировок натяжения тросов.

Распределение сил тросов предназначено для минимизации или даже исключения изгибающих моментов в опорной плите и пилонах под постоянными нагрузками.

В то же время, исключаются существенные вариации между любыми смежными тросами.

Соединение между балкой и пилонами

Разработчики использовали тот же тип нелинейных демпферов, который использовался при строительстве моста Большой Бельт в Дании, чтобы выбрать постоянную связь между балкой и пилонами. Эти демпферы не ограничивают смещение стальной балки, вызванное температурой, умеренным ветром и движением транспортных средств. Вместо этого они передают нагрузки, вызванные порывами ветра, землетрясениями и другими силами от определенных сочетаний нагрузки, от балки на другой пилон.

Динамические характеристики одного демпфера описаны формулой $F=C \cdot V^\alpha$

- » V — скорость относительного смещения между пилоном и балкой.
- » α — постоянный показатель, равный 0,4.
- » C — постоянная величина, равная $3750 \text{ кН}/(\text{м}/\text{с})^{0,4}$.

На каждый пилон были установлены четыре демпфера с максимальным относительным смещением между балкой и пилонами менее 750 мм для соответствия требованиям проекта. Каждый из демпферов на одном пилоном имеет линейную жесткость 100 МН/м, чтобы противостоять относительному смещению более 750 мм. На рис. 3 показано отношение смещения под действием статической силы для каждого демпфера.

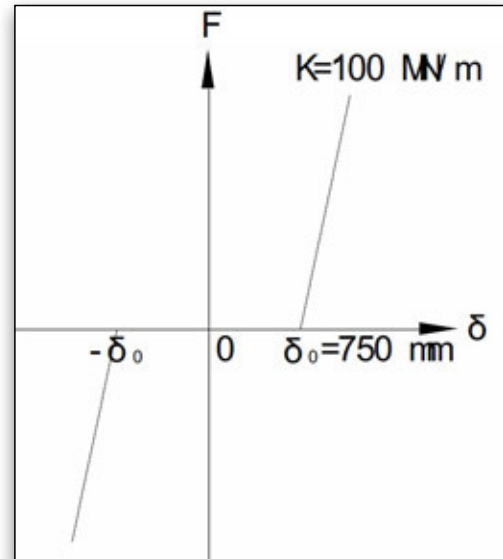


Рис. 3: Отношение смещения под действием статической силы для каждого демпфера

ОБЩИЙ СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Общая модель анализа

Команда HPDI использовала приложение RM Bridge для общего анализа вантового моста Сутун во время рабочего проектирования. На рис. 4 показана модель конечных элементов моста. Структурное моделирование вантов было выполнено согласно запланированным схемам строительства. Каждая ванта была разделена на восемь подэлементов для учета эффекта провеса вместо приближения этого эффекта с помощью действующего модуля упругости. Другие взаимодействующие нелинейные эффекты, в частности эффект Р-дельта, большие смещения и угловое перемещение, учитывались при расчете. Эффекты медленного перемещения и усадки были рассчитаны согласно коду СЕВ/FIP 90. Гибкость фундаментов пилонов была смоделирована с помощью упругих элементов. Соединения между балкой и обоими пилонами считались нелинейными статическими упругими элементами со значением промежутка 750 мм и линейной жесткостью 100 МН/м.

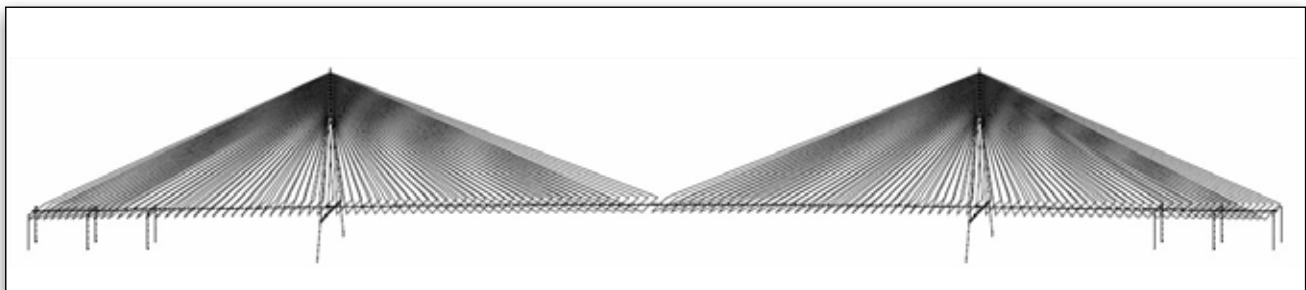


Рис. 4: модель конечных элементов моста

Определение конечного состояния моста и результаты анализа

Вантовые мосты распределяют внутренние силы в законченной структуре, используя регуляторы натяжения вантов. Вантовые распределения силы разработаны, чтобы минимизировать или даже устранить изгибающие моменты под постоянным нагрузкам в плите проезжей части и пилонах, в то же самое время, избегая критических изменений между двумя соседними вантами.

Коэффициент влияния транспортной нагрузки для моста Сутун был большим для напряжения плиты проезжей части и расположения противовесов в обратных пролетах. При определении конечного состояния были учтены ситуации с движением транспорта и без него. На рис. 5 показаны оболочки изгибающего момента в плите проезжей части под постоянной нагрузкой и сочетанием нагрузки. При $28,0 \text{ МН/м}$ максимальный момент пилонов (показан на диаграмме рис. 5) был очень незначительным. Результаты иллюстрируют соответствие достигнутого конечного состояния моста.

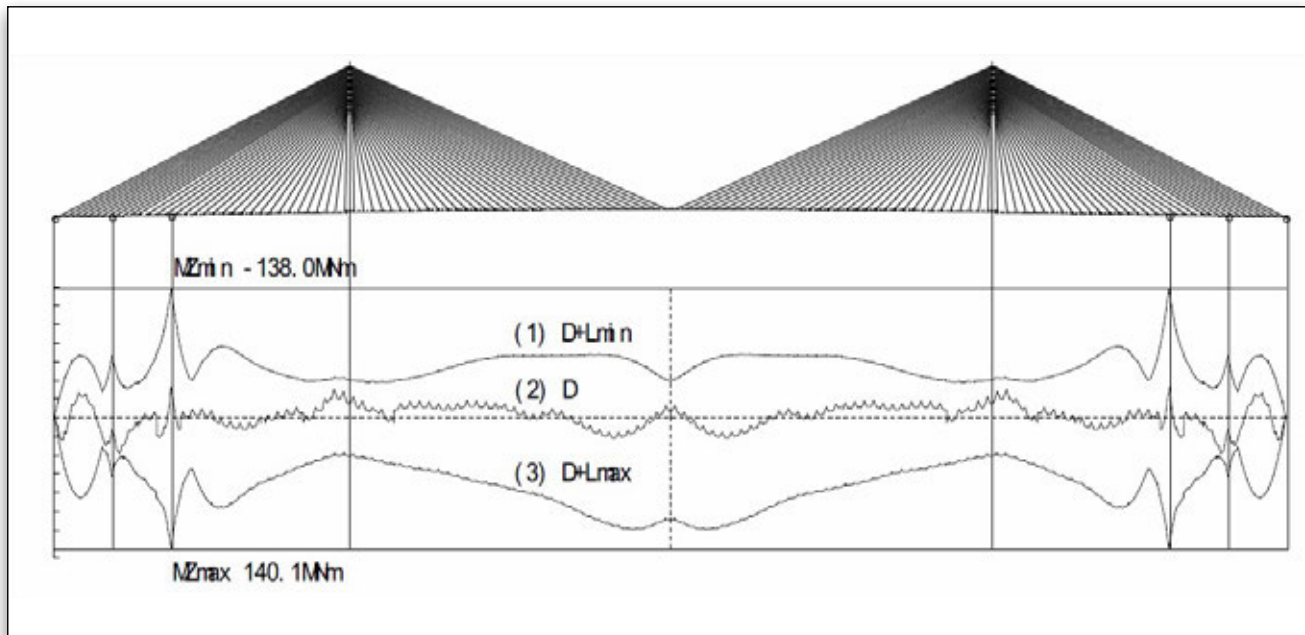


Рис. 5: Оболочка изгибающего момента в опорной плите

Стадийный анализ

С помощью метода упреждающего анализа RM ADDCON для стадий возведения разработчики смогли достичь условий конечного состояния, описанных выше, согласно изначальным графикам строительства разработчика. Модель анализа на различных стадиях включала все временные опоры, крепления и перемещения крана для строительства, временной нагрузки и постоянной нагрузки. Команда также исследовала эквивалентное статическое действие ветра разных направлений на наиболее сложных этапах строительства (максимальный двухконсольный образец, максимальный одноконсольный образец) и на стадии завершения моста.

Приложение RM автоматически рассчитало предварительное изгибание всей конструкции. За исключением проектной высотной отметки опорной плиты, был учтен эффект третьего порядка предварительного изгибания. Результаты анализа на этапе строительства показали минимальную величину жесткости перед закрыванием. Например, начальное натяжение самой длинной ванты в среднем пролете образовывало вертикальное отклонение 1,3 в конце консоли. Даже после закрытия, нагрузка от собственного веса покрытия проезжей части и всех элементов обустройства (включая дорожное покрытие, барьеры и пр.) создавала вертикальное отклонение 1,8 м в центре среднего пролета. Результаты четко показали преимущества анализа геометрической нелинейности с помощью приложения RM, особенно в отношении геометрии возведения опорной плиты.

Анализ конструктивной системы и параметров

Как уже упоминалось, демпферы не ограничивают смещение стальной балки, вызванное температурой, умеренными ветрами и движением транспорта. Они передают нагрузки на балку, вызванные порывами ветра, землетрясениями и другими силами, на пилон. Поэтому определение соответствующих конструктивных параметров демпферов, включая промежуток, упругую жесткость и динамические характеристики, является крайне важным для достижения желаемых результатов. Был также проведен соответствующий анализ некоторых основных случаев нагрузки, включая статические нагрузки и динамические входные воздействия.

Динамические параметры основываются на результатах анализа временной диаграммы для некоторых типичных входных сейсмических воздействий.

Для статического воздействия надлежащее значение промежутка являлось основным параметром. С учетом всех ответных реакций перечисленных выше нагрузок и текущих спецификаций больших компенсирующих стыков, был выбран промежуток в 750 мм для соответствия требованиям проекта.

Следовательно, были проведены некоторые параметрические анализы, чтобы определить жесткость пружин в соответствии с кривой взаимодействия между ответной реакцией изгибающего момента в нижней части пилона (продольное смещение в конце балки) и продольным воздействием ветра.

На рис. 6-8 отображены результаты параметрических исследований с жесткостью пружины в диапазоне от 1 до 1000 МН/м. На этих диаграммах показано, что жесткость пружины в 100 МН/м является практичной. Было выдвинуто предположение, что только демпферы на одном пилоне опоры 4 или опоры 5 будут задействованы перед другим пилоном. Данное предположение отражает конструкционную неточность и растяжение опорной плиты моста вследствие воздействия температуры.

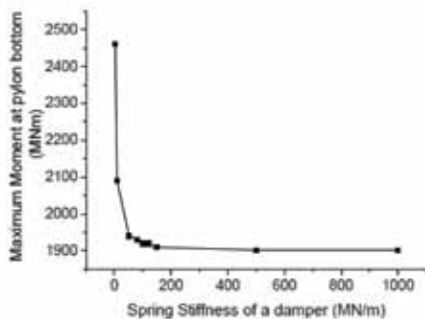


Рис. 6: максимальный момент в нижней части пилона

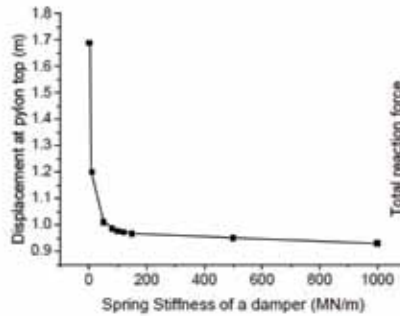


Рис. 7: смещение в верхней части пилона

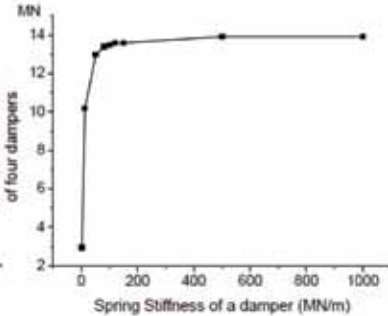


Рис. 8: общая сила реакции четырех демпферов

Для моста Сутун соединение между балкой и пилонами является обязательным для обеспечения безопасности пилонов при воздействии сильных порывов ветра и сейсмических нагрузок. Поэтому на основании проведенных подробных параметрических исследований и некоторых дальнейших факторов для допусков установки и коэффициентов безопасности максимальная сила для одного демпфера в приблизительно 10 МН (в абсолютном предельном состоянии) была принята как одно из обязательных требований проекта. При этом сравнение результатов HPDI и консультантов COWI подтвердило, что нелинейность материалов пилонов играет значительную роль в результирующих силах в предельном состоянии первой группы

Эффекты геометрической нелинейности

Разработчики уделили большое внимание геометрическим нелинейностям на всех этапах от предварительного проектирования до детального проектирования. Разработчики провели специальное исследование нелинейных эффектов. Два значительных примечания по геометрическим нелинейностям имеют указанный ниже вид.

- » По сравнению с линейным анализом, эффекты геометрической нелинейности могут привести к чистому смещению на 10—20 % от максимального/минимального напряжения балки и пилонов вместе со смещением в критическом месте этих напряжений.
- » Как правило, в модели конечных элементов вантов используется прямой элемент решетчатой фермы с эффективным модулем упругости, или же используется приложение RM для разделения каждой ванты на многие подэлементы. Может использоваться также новый подвесной элемент. Разные средства для обработки эффектов провеса вантов обеспечивают различные варианты для процесса изготовления или строительства. Средства эквивалентного элемента решетчатой фермы могут вызывать максимальное смещение на 0,538 м от желаемого места в конце анализа стадий. Одной из возможных причин являются неточные векторы нагрузки в длинных вантах. Для вантовых мостов, длина которых превышает 1000 м, это упрощение должно быть ограничено, особенно для процесса возведения. Конечно, использование подвесных элементов является более оптимальным, чем разделение на подэлементы, но в пределах диапазона допусков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несомненно, мост Сутун является замечательным проявлением дизайна и инженерной мысли. Проектирование и строительство самого моста способствовали сотрудничеству и взаимодействию между многими известными проектировщиками мостов из Китая и других стран. Это особенно характерно в этом быстрорастущем регионе мира. Более важным является то обстоятельство, что мост обеспечил новый уровень удобства для людей, живущих вдоль реки Янцзы. Он должен ускорить экономическое развитие и взаимное процветание городов, которые он соединяет.

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. TDV, 2008, руководство пользователя приложения RM, изм. 9.51.10.
2. Янич Д. (Janjic D.), Пирчер М. (Pircher M.), Пирчер Г. (Pircher H.) Оптимизация натяжения тросов в вантовых мостах, Journal of Bridge Engineering, ASCE, v8, n3, стр. 131-137, 2003 г.
3. MIAO Jiawu. Сравнительный анализ эффектов геометрической нелинейности для вантового моста Сутун. Материалы конференции 2003 г. подразделения по мостам и строительству дорог Китайской ассоциации строителей автодорог, сентябрь, 2003 г.
4. LIANG P. Геометрическая нелинейность и выборочная имитация сверх длинных вантовых мостов. Диссертация на степень доктора наук университета Тонджи, август, 2004 г.

Дополнительная информация о Bentley на сайте: www.bentley.com

Контакты Bentley

1-800-BENTLEY (1-800-236-8539)

За пределами США: +1 610-458-5000

Офис Bentley в России и СНГ

125040, г. Москва,

ул. Нижняя, 14, стр.2

Тел. +7 (495) 989-7164

www.bentley.com/Russia

Список международных офисов на сайте

www.bentley.com/contact