

Структурный анализ моста Сутун

Краткое содержание

Сутун — это вантовый (подвесной) мост над главным фарватером реки Янцзы, построенный в рамках проекта возведения мостов между городами Сучжоу и Наньтун в Китае. Этот важный проект стоимостью приблизительно \$920 млн имеет целью сократить экономический разрыв между Сучжоу и Наньтуном и способствовать сбалансированному развитию региона. Сутун, строительство которого завершилось летом 2007 года, — самый длинный вантовый мост в мире. Общая протяженность подвесной части моста составляет 2088 м с центральным пролетом 1088 м и высотой пилонов около 300 м. В этой статье кратко описывается проект, а также рассматриваются некоторые детали строительного проектирования и статических исследований, принятых при проектировании моста.

Введение

Проект сооружения мостов на реке Янцзы между городами Сучжоу и Наньтун реализуется в китайской провинции Цзянсу — быстро растущем промышленном регионе с населением 74 млн человек. В последнее время южная китайская провинция Цзянсу быстро развивалась, но река ограничивала доступ в северную часть провинции, тем самым сдерживая ее развитие. Мост Сутун обеспечит надежную связь между городами Сучжоу и Наньтун и поможет в достижении конечных целей — искоренении бедности и общем преуспевании.

По проекту общая длина мостов составляет 8,2 км. Эта часть проекта включает мост над главным фарватером (Сутун), мост над специальным фарватером и подъездные пролеты обоих мостов.

Мост над главным фарватером является вантовым, а над специальным — рамным из преднапряженного железобетона со следующим расположением пролетов: 140+268+140 (=548) м. Подъездные пролеты — это балочные мосты из преднапряженного железобетона с длиной пролетов 75, 50 и 30 (=155) м. На занимаемом мостами участке имеются два судоходных фарватера, главный и специальный, последним пользуется исключительно порт Наньтун.

Китайские официальные лица гордятся тем, что этот чрезвычайно сложный проект осуществлен усилиями всего Китая без международной помощи в производстве или строительстве. Генеральными подрядчиками по управлению и строительству были главный департамент провинции Цзянсу по строительству моста Сутун (управление проектом) и China Harbor Engineering Company Group (строительство).

Китайский институт планирования и проектирования автомобильных дорог (China's Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, Inc.) спроектировал мост совместно с Институтом планирования и проектирования коммуникаций провинции Цзянсу, а также Институтом архитектурного проектирования и исследований университета Тондзи (Шанхай). Для решения специальных задач в процессе проектирования и планирования как консультанты привлекались несколько международных компаний, среди них COWI Consultants и CHODAI Co. Ltd. Они дали независимую оценку проектной документации.

Разрешение участвовать в решении специальных задач, данное зарубежным компаниям, позволило HPDI использо-

вать программное обеспечение RM Bridge.

HPDI выбрал программное решение RM компании Bentley, оценив проверенную временем гибкость продукта, а также безусловные достоинства команды Bentley, работающей над решениями для проектирования мостов: ее опыт, нацеленность на развитие решения и готовность предоставлять необходимые консультации пользователям. Гибкость программного обеспечения RM доказана его широким использованием при проектировании гонконгского моста каменотесов — первого вантового моста, длина которого превысила обычный до этого предел протяженности центрального подвесного пролета в 1000 м.

Это придало коллективу HPDI уверенность, что все преграды, даже непредвиденные, совместными усилиями будут преодолены. И эта уверенность себя оправдала: несмотря на серьезные проблемы при реализации проекта и строгие требования заказчика, проектировщики успели подготовить детальный проект к крайнему сроку (июль 2004 года).

Проблемы при реализации проекта

Разнообразные экологические факторы и эксплуатационные требования создали чрезвычайно сложные проблемы при проектировании, анализе и строительстве моста:

- требования судоходства — под мостом регулярно проходят большие контейнеровозы и крупные флотилии. Для прохода кораблей отверстие моста должно быть шире 891 м, а высота — превышать 62 м. Кроме того, центральный пролет должен быть спроектирован так, чтобы выдержать удар

- судна водоизмещением в 50 тыс. т;
- плохие погодные условия — в среднем по 30 дней в году в этом районе бывает густой туман, более 120 дней идут проливные дожди; кроме того, здесь дуют сильные ветры, вызванные тайфунами и торнадо. В результате строители должны были придерживаться очень жестких графиков, чтобы завершить работу при благоприятных погодных условиях;
- сложные гидрологические условия — поскольку река Янцзы приливо-отливная, в ней есть течения, имеющие разную скорость, направление и глубину. Волны иногда достигают высоты 3 м, а течения могут быть достаточно сильными. При приливах и отливах разница в уровне воды может достигать 4 м. Мост спроектирован так, чтобы под русловой секцией моста средний речной поток проходил со скоростью 4,1 м/с;
- глубокое скальное основание — оно залегает на глубине 270 м и покрыто осадочными отложениями, песком и илом. Таким образом, для оснований моста необходимо было придумать какое-то особое решение, не предусматривающее бурения скального основания.

Эти проблемы потребовали проведения сложных исследований, в ходе которых были изучены большие смещения (деформации), вызванные множеством различных потенциальных факторов. Особенно важны были исследования ди-

намического поведения конструкции под воздействием ветра, при сейсмической активности и столкновении судов с опорами. Исследования провели для всего строительного цикла, уделив особое внимание оптимизации предварительного натяжения вант, так как это чрезвычайно важно на всех этапах строительства подвесного моста. Исследования включали:

- **оптимизацию распределения сил в вантах** — в подвесных мостах натяжение вант требует точной регулировки для достижения идеального распределения сил внутри завершенной конструкции. Как правило, в подобных проектах идеальное конечное состояние предопределяют основные условия, такие как минимальный изгибающий момент в полотне и пилонах моста под постоянной нагрузкой. Эти критерии определяют стратегию регулировки натяжения вант. AddCon, специальная функция RM, автоматически рассчитала оптимальное распределение сил в вантах и необходимую очередность нагрузки на них;
- **анализ этапов строительства** — предварительный анализ всех этапов сооружения моста проводился с помощью модуля AddCon — для достижения необходимого проектировщику оптимального конечного веса конструкции. Модель анализа включала самые разнообразные условия на различных этапах строительства. Проектировщики также исследовали рав-

нозначные статические воздействия дующего в различных направлениях ветра на тех этапах строительства, которые, как предполагалось, будут наиболее проблемными;

- **большие смещения** — особое внимание команда проектировщиков уделила геометрическим нелинейностям на протяжении всего процесса строительства. Инженеры провели специальное исследование нелинейных эффектов, результатом которого стали примечательные характеристики влияния геометрических нелинейностей. Каждая ванта была разделена на специально разработанные *цепные* элементы для более точного, чем при использовании модуля Янга, определения провисания ванта. Сравнения показали, что для вантовых мостов длиной более 1000 м подход с использованием цепных элементов существенно важен для достижения необходимой точности.

Во время строительства серьезные отклонения от проектной формы следовало принимать за величины *предварительного прогиба* моста, чтобы в конце строительства получить требуемую проектом форму под постоянной нагрузкой, не допуская возникновения запрещенных сил внутреннего напряжения;

- **воздействие ветра** — проектировщики провели несколько исследований для оценки воздействия сильных ветров:

1. Команда разработала подходящее поперечное сечение мостовой





фермы, которое отвечало бы требованиям эксплуатации и несущей способности, а также ветровой нагрузки. Тесты в аэродинамической трубе, проведенные в университете Тонджи, привели к созданию обтекаемой закрытой стальной коробчатой фермы с ветровыми обтекателями.

2. Проектировщики исследовали вибрацию ванты, вызванную воздействием ветра, дождя или периодического возбуждения. С помощью RM команда изучила различные методы минимизации вибрации вант моста.
3. Проектировщики произвели полные динамические исследования ветровой нагрузки на конструкцию моста с учетом и без учета движения транспорта. Эти исследования основывались на аэродинамических коэффициентах и других данных, полученных благодаря тестам в аэродинамической трубе. Исследования охватили нелинейные демпферы (гасители колебаний), необходимые для стабилизации вант и соединений балок с пилонами;

■ **динамическое поведение** — в такого рода сооружениях большие смещения, часто обусловленные температурными изменениями, могут происходить как во время строительства, так и при эксплуатации. При анализе эти смещения не следует ограничивать, стараясь избежать перегрузки. В проекте для этой цели и для динамических нагрузок были использованы нелинейные демпферы. Однако эти гасители

колебаний не ограничивали смещения, вызванные естественными причинами. Весьма существенным было определение подходящих проектных параметров этих демпферных элементов, в том числе величины зазора, упругой жесткости и динамических характеристик. Программное обеспечение RM использовали при проведении необходимых параметрических исследований, чтобы запроектировать расположение этих устройств. Их динамические параметры были основаны на результатах анализа динамики изменений для некоторых типичных сейсмических воздействий.

Описание моста

Расположение пролетов

Проанализировав различные геотехнические условия на месте сооружения моста, в том числе техническую осуществимость проекта, команда отдала предпочтение проекту двухплоскостного со сдвоенными пилонами вантового моста над главным фарватером реки Янцзы с общей протяженностью пролетов 2088 м (100+100+300+1088+300+100+100 м). По две вспомогательных и одной промежуточной опоре были возведены с каждой стороны пролета. Центральный пролет моста равен 1088 м, и в настоящее время это самый длинный центральный пролет вантового моста в мире.

Мостовая ферма

Ферма моста — это обтекаемая закрытая плоская коробчатая стальная балка. Ее общая длина, включая обтекатели, составляет 41 м, что соответствует восьми

полосам двустороннего движения. Высота поперечного сечения фермы равна 4 м. Обычно в продольном направлении коробчатая стальная ферма усилена закрытыми стальными желобами. Перемычки поперечных плит имеют стандартный интервал в 4 м и меньшие интервалы — до 2,27 м — в определенном месте вокруг двух пилонов. Стандартный предел прочности конструкционной стали составляет 345 МПа и 370 МПа (мегапаскаль (МПа) — метрическая единица измерения прочности стали; 1 МПа = Н/мм²). Толщина краев и усилителей по длине моста меняется.

Пилоны

Два пилон в виде перевернутой буквы Y высотой 300 м возведены из бетона марки C50 для соблюдения китайского стандарта JTJ01-89. Пилоны поддерживают 36-тонные стальные короба, прикрепленные к бетону срезными штифтами на вершине пилонов для закрепления вант. Анкерные балки между основаниями пилонов полностью постнатянутые, чтобы таким образом получить внешний упор в основаниях пилонов при эксплуатации и сейсмических нагрузках. Согласно спецификациям проекта и критическим замечаниям консультантов COWI Consultants ширина трещин стены бетонного пилон не превысит 0,2 мм.

Ванты

Ванты смонтированы в двойные наклонные канатные плоскости со стандартным интервалом 16 м в центральном пролете и 12 м около концов задних пролетов вдоль фермы. Для снижения ветровой нагрузки системы вант изготовлены из параллельных проволочных жил, состоящих из проволоки толщиной 7 мм; каждая ванта в поперечном сечении имеет 38,48 мм. Номинальный предел прочности вант — 1,770 МПа. Размеры вант колеблются от PES7-139 для центрального пролета около пилонов до PES7-313 для самой длинной задней опоры. Самая длинная ванта моста имеет длину около 577 м и весит 59 т.

В процессе проектирования команда исследовала проблему вибрации вант, вызванной ветром в сочетании с дождем или параметрическим возбуждением. Проектировщики изучили различные способы минимизации вибрации вант моста, в том числе два способа обработки поверхности вант для предотвращения формирования на них потоков дождевой воды, а также внутренние или дополнительные внешние демпфирующие устройства. Окончательные меры по минимизации вибрации вант должны были быть избраны после детального тестирования.

Основания

Винтовые висячие сваи поддерживают опоры моста и пилоны, начиная с опоры 1 до опоры 8, имея диаметр от 2,8 м около вершины до 2,5 м в остальной части сваи. Каждая из опор 1, 2, 7 и 8 имеет по 19 свай, а опоры 3 и 6 — по 36 свай, и каждая управляется независимо друг от друга. Пилоны для опор 4 и 5 поддерживают 131 свая, их длина колеблется от 108 до 116 м.

Соединение фермы с пилонами

Отдавая предпочтение постоянному соединению фермы с пилонами, проектировщики использовали тот же тип нелинейных демпферов, который применили при строительстве моста Большой Бельт в Дании. Эти гасители колебаний не ограничивают смещение стальной фермы, вызванное температурными изменениями, умеренным ветром, движением транспорта; вместо этого они переносят нагрузки, вызванные порывами ветра, землетрясениями и другими силами, обусловленными особыми комбинациями нагрузок, с фермы на пилон.

Динамические характеристики одного демпфера описывает формула $F=C \cdot V^\alpha$, где:

- V — скорость относительного смещения между пилоном и фермой;
- α — постоянная экспонента, равная 0,4;
- C — константа, равная 3,750 кН/(м/с)^{0,4}.

На каждом пилоне размещены по четыре демпфера с максимальным относительным смещением между фермой и пилонами менее 750 мм в соответствии с требованиями проекта. Для защиты от относительного смещения, превышающего 750 мм, каждый демпфер на пилоне имеет линейную жесткость 100 МН/м².

Общий статический анализ

Общая аналитическая модель

При создании детального проекта для общего анализа вантового моста Сутун проектировщики использовали программное обеспечение RM Bridge¹. Для проверки проекта также применялись программы QJX и VAR. Структурное моделирование опор осуществлялось в соответствии с запланированными схемами строительства. Каждая ванта была поделена на восемь составных элементов — скорее чтобы оценить последствия провисания венты, чем приблизительно рассчитать их с помощью эффективного модуля упругости.

Другие взаимодействующие нелинейные эффекты — эффект P-delta, большие смещения и смещения по срезу — рассчитали. Последствия оползней и усадки рассчитывались в соответствии со сборником правил СЕВ/FIP 90. Упругость оснований пилонов была смоделирована с помощью амортизационных элементов. Соединения фермы с обоими пилонами рассматривались как нелинейные статические амортизационные элементы с величиной зазора 750 мм и линейной жесткостью 100 МН/м².

Определение конечного состояния моста и аналитические результаты

Внутри вантовых мостов силы распределяются по всей конструкции с помощью очень специфических регулировок в натяжении вант. Распределение сил в вантах проектируется так, чтобы минимизировать или даже исключить изгибающие моменты в полотне и пилонах моста под постоянной нагрузкой, одновременно избегая существенных различий между любыми двумя соседними вантами.

Транспортная нагрузка на мост Сутун составляет значительную долю в нагрузке на полотно моста и противовесы на задних пролетах. Конечное состояние моста определялось как с учетом, так и без учета движения транспорта. При нагрузке 28 МН/м² максимальный момент пилонов был весьма незначителен. Результаты подтверждают пригодность моста для эксплуатации в его конечном состоянии.

Анализ этапов строительства

Используя метод предварительного анализа ADDCON² программы RM для анализа этапов строительства, проектировщики смогли привести в соответствие описанные выше условия конечного состояния моста с разработанными проектировщиком первоначальными графиками строительства. На разных этапах модель анализа включала все временные опоры, швартовочные канаты и различные подъемные механизмы, а также временную и постоянную нагрузку. Проектировщики также изучили равнозначное статическое воздействие дующего в различных направлениях ветра на самых важных этапах строительства — во время сооружения максимальной двойной консольной балки, максимальной одиночной консольной балки и на завершающем этапе строительства. Программа RM автоматически рассчитала *предварительный изгиб* всей конструкции. За ис-

ключением проектного профиля мостового полотна, был принят во внимание эффект третьего порядка форм предварительного изгиба. Результаты, полученные при анализе этапов строительства, показали минимальную величину жесткости (напряжения) до изоляции. Например, исходное предварительное напряжение самой длинной венты в середине пролета привело к вертикальному отклонению в 1,3 м на конце консольной балки. Даже после изоляции собственный вес конструкции (включая дорожное покрытие, ограждения и т.д.) все же дает вертикальное отклонение в 1,8 м в центре середины пролета. Полученные результаты ясно свидетельствуют о преимуществах метода программы RM для исследования геометрической нелинейности, особенно в отношении геометрии сооружения мостового полотна.

Конструктивная система и параметрические исследования

Как уже сказано, демпферы не ограничивают смещение стальной фермы, вызванное температурными изменениями, умеренными ветрами, движением транспорта, а переносят нагрузки, обусловленные порывами ветра, землетрясениями и другими силами, с фермы на пилон. Поэтому определение подходящих типовых проектных параметров демпферов, в том числе величины зазора, упругой жесткости и динамических характеристик, существенно важно для достижения желаемых результатов. Соответствующие параметрические исследования были проведены для некоторых случаев основных нагрузок, в том числе статических нагрузок и динамических воздействий.

Динамические параметры основаны на результатах анализа динамики изменений для некоторых типичных сейсмических воздействий.

Для статических воздействий ведущим параметром был надлежащий размер зазора. Принимая во внимание все реакции на упомянутые выше нагрузки и учитывая текущие производственные спецификации узлов большой длины, для соответствия требованиям проекта был выбран зазор в 750 мм. Впоследствии были проведены некоторые параметрические исследования, чтобы определить подходящую жесткость амортизатора в соответствии с кривой взаимодействия между откликом изгибающего момента внизу пилон (продольное смещение на конце фермы) и продольным воздействием ветра.

¹TDV, 2008, RM User Guide, rev 9.51.10.

²Janjic D., Pircher M., Pircher H. Optimization of Cable Tensioning in Cable-Stayed Bridges, Journal of Bridge Engineering, ASCE, v8, n3, pp. 131-137, 2003.



Для моста Сутун соединение фермы с пилонами чрезвычайно важно для обеспечения безопасности пилонов при ураганном ветре и сейсмических нагрузках. Поэтому, исходя из результатов детальных параметрических исследований и некоторых дальнейших рассуждений о допусках при установке и запасе прочности, в качестве одной из предпосылок проекта для одного демпфера была принята максимальная сила приблизительно в 10 МН/м² (при предельно допустимой нагрузке). Между тем сравнение результатов, полученных командами HPDI и COWI Consultants, подтвердило, что материальная нелинейность пилонов играет важную роль для равнодействующей реакции при предельно допустимой нагрузке.

Эффекты геометрической нелинейности

Большое внимание проектировщики уделили геометрическим нелинейностям на всех этапах — от проектного задания до детального проекта. Проектировщики провели специальное исследование эффектов нелинейности³. Было сделано два примечательных наблюдения относительно геометрических нелинейностей. Вот они:

- в сравнении с линейным анализом результатом геометрической нелинейности может стать чистое отклонение в 10-20% от максимального/минимального напряжения фермы и пилонов моста вместе со сдвигом критического местоположения этих нагрузок;
- как правило, конечно-элементная модель вант использует или элемент прямой фермы с эффективным модулем упругости, или RM, чтобы разделить каждую ванту на множество меньших частей, или новый элемент цепного каната. Различные средства борьбы с последствиями провисания вант выражаются в разнообразных возможностях в процессе производства или строительства. Средства элемента равнозначной фермы могут вызывать максимальное отклонение 0,538 м от желаемого местоположения в конце анализа этапов строительства⁴. Одной из возможных причин этого являются неточные векторы сил пояса фермы в канатах длинных опор. Для вантовых мостов протяженностью более километра это упрощение должно быть ограничено, особенно для процессов строительства. Конечно, использование элементов цепных

канатов лучше, чем деление на меньшие элементы, но в допустимых пределах.

Заключительные примечания

Безусловно, мост Сутун — поразительное достижение проектирования и инженерного дела. Проектирование и строительство этого моста обеспечило прекрасную возможность для развития сотрудничества и взаимодействия между многими знаменитыми проектировщиками мостов из Китая и других стран — тем более оправданного в таком быстро развивающемся регионе мира. Самое главное, что мост создал новые благоприятные возможности для людей, живущих вдоль Янцзы, должен ускорить экономическое развитие и способствовать преуспеянию городов, которые он соединяет.

*Дориан Янич (Dorian Janjic),
вице-президент группы по
проектированию мостов
компании Bentley Software
685 Stockton Drive
Exton, PA 19341 USA*

*Перевод с английского
Владимира Марутика*

³MIAO Jiawu, Comparison Study on Geometrical Nonlinearity Effects for the Sutong Cable-Stayed Bridge. 2003 Conference proceedings of Bridge and Structure subdivision of Chinese Highway Association. Sep. 2003.

⁴LIANG P., Geometrical Nonlinearity and Random Simulation of Super Long Span Cable-Stayed Bridges. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy of Tongji University. Aug. 2004.