

ЭВОЛЮЦИЯ ОДНОПРОЛЕТНЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ: ОТ КАМЕННОЙ БАЛКИ ДО ВАНТОВОЙ ФЕРМЫ

Окончание. Начало в №3, 2011 г.

ШПРЕНГЕЛЬНЫЕ БАЛКИ С ЗАТЯЖКОЙ

Фермы применимы на пролетах в 18–48 м, отдельные промышленные фермы с параллельными поясами выполнялись пролетом 60 м. Двутавровая балка же рациональна без дополнительных ребер и стабилизирующих мероприятий на пролетах в 3–9 м, далее она становится слишком тяжелой. Ферма же на пролетах менее 15 м оказывается чересчур трудоемкой. Поэтому нишу пролетов в 10–18 м занимает шпренгельная балка с затяжкой. Принцип работы шпренгеля основан на том, что при превышении пролета балка начинает испытывать недопустимые прогибы, при этом не разрушаясь. Таким образом, снижение прогибов и повышение жесткости становится центральной проблемой для однопролетных балок. Выполнение оттяжек или подпорок балок не всегда возможно, поэтому простейший метод — установить снизу в центре пролета распорку с V-образной затяжкой к опорам (рис. 1). Такая простейшая шпренгельная система заставляет вытолкнуть центр пролета вверх и снизить прогиб балки, однако при этом верхний пояс подвергается не только изгибу, но и сжатию вследствие работы затяжки на растяжение.

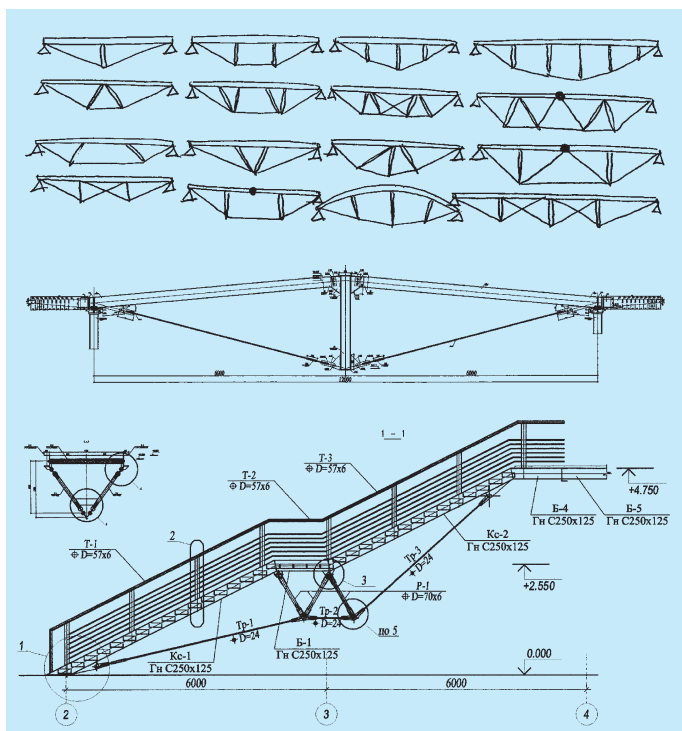


Рис. 1. Различные схемы шпренгельных ферм

Отличие работы фермы от шпренгельной балки состоит в следующем:

- верхний пояс, т. е. сама балка, работает на сжатие с изгибом, в ферме верхний пояс — на чистое сжатие;
- в ферме поперечная сила воспринимается целиком поясами с решеткой как единым целым, в шпренгеле большая часть поперечной силы воспринимается балкой, а затяжка лишь частично разгружает балку (подсказкой к этому является то, что у шпренгелей нет решетки, а есть только вертикальные стойки);
- в балке нагрузка — распределенная и сосредоточенная, а в ферме — только сосредоточенная.

Шпренгельная затяжка ни в коем случае не повышает прочность балки, а лишь повышает ее жесткость. Взглянув на простейший од-

ностоечный шпренгель, можно увидеть, что конфигурация троса рациональнее, если она имеет не две, а три и более грани, что приближает его конфигурацию к балочной эпюре изгибающих моментов.

ФЕРМА ПАУЛИ

Первой оптимальной конструкцией на пути к облегчению является шпренгельная балка с затяжкой, у которой нижний пояс выполнен по эпюре изгибающих моментов. При этом стойки сжаты, а поперечную силу воспринимает сама балка. Полнее идею реализует ферма с поясами, повторяющими траектории главных напряжений (рис. 4).

ФЕРМЫ БОЛЬШИХ ПРОЛЕТОВ

В фермах при возрастании пролетов необходимо сохранение рационального соотношения пролета к высоте, равное 8–12. При этом гибкость верхнего пояса становится слишком велика, поэтому в фермах пролетом 36–60 м применяют шпренгельную решетку, которая раскрепляет стойки и верхний пояс в плоскости фермы. При этом нижний верхний пояс из плоскости раскреплен прононами, которые рационально укладывать с шагом в 3 м.

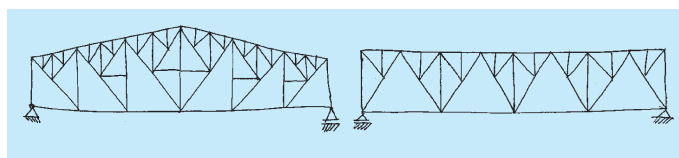


Рис. 2. Фермы больших пролетов со шпренгельной решеткой

БАЛОЧНАЯ АНАЛОГИЯ

Балка, ферма, арка, гибкая нить или рама по природе своей при равной нагрузке и одном и том же пролете L воспринимают абсолютно постоянный балочный момент — $M_b = qL^2/8$, который заключается в самой природе однопролетной разрезной конструкции заданных постоянных параметров. Однако каждая из названных конструкций воспринимает этот момент по-разному и реализует через это преимущество своей топологии. Поэтому каждая из этих конструкций может быть рассчитана по балочной аналогии. Балка воспринимает его за счет сечения (активность по сечению), внутренних нормальных напряжений σ_x и парных касательных напряжений $\tau_x = \tau_z$, возникающих под вертикальной нагрузкой q на пролете L . Арка воспринимает его парой сил, образуемых сжимающей силой в сечении в центре пролета арки N_a и опорами, воспринимающими сжимающий распор арки Na на плече этой пары сил, равной стреле подъема арки f .

$$Na = Na = Mb/f = qL^2/8f.$$

Гибкая висячая нить воспринимет балочный момент тоже парой сил, возникающих между усилием N_n в центре пролета свободно висящей нити и опорами, воспринимающими распор T на плече, равном стреле провисания f . При этом на основании статического уравнения распор T равен усилию в нити N_n :

$$T = N_n = Mb/f = qL^2/8f,$$

где: f — стрела провисания нити, м.

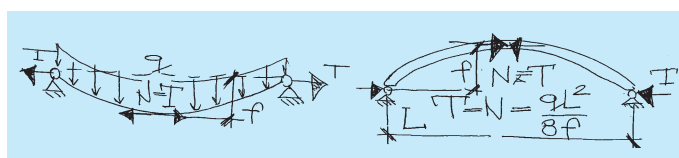


Рис. 3. Арка и однопоясная висячая система: принцип зависимости распора от стрелы подъема

Из указанных простых зависимостей видна полная зеркальная симметрия работы арки и нити под действием гравитационного поля. Однако если арка воспринимает пролетный момент за счет чистого сжатия, то растянутая нить работает на чистое растяжение. Усилия же в арке и нити при равных условиях равны и обратные по знаку (рис. 3).

ВВОД В КАЧЕСТВЕ НИЖНЕГО ПОЯСА ВАНТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Следующим этапом облегчения однопролетной балочной конструкции является замена всех растянутых элементов на тросы, работающие только на растяжение, но имеющие в 5–10 раз более высокую прочность. Она достигается за счет многоступенчатого вытягивания элемента, уплотнения кристаллической решетки и молекулярных связей на 75–95% и сокращения диаметра проволок с 6 до 2 мм. Это дает прочность канатам из низкоуглеродистой стали от 1 170 до 2 170 МПа, что от 5 до 8 раз больше, чем у обычной стали. Применяя высокопрочные канаты, можно значительно облегчить конструкцию, выполнив из них как нижний пояс, так и раскосы. При работе фермы в двух направлениях можно сделать тросовые раскосы крестовыми. Для постоянства усилия в нижнем поясе и полного использования его материала его также рекомендуется выполнять по эпюре изгибающих моментов (рис. 4).



Рис. 4. Фермы с предварительно напряженным нижним поясом и решеткой

ОДНОПОЯСНАЯ ВИСЯЧАЯ СИСТЕМА

Следующим этапом в стремлении отказа от тяжеловесных сжатых элементов могут быть полный отказ от верхнего пояса и решетки и работа системы в качестве однопоясной висячей нити. Такая система предельно легкая, ей свойственно самой находить свою оптимальную форму под нагрузкой. Однако недостатком однопоясной висячей системы является:

- ее неустойчивость под различными видами сосредоточенных и несимметричных нагрузок, под которыми она меняет свою геометрию;
- вследствие отсутствия верхнего сжатого пояса сжатие воспринимается внешним распором, который гасится жесткими фундаментами или опорами на диски перекрытий (в атриумах).

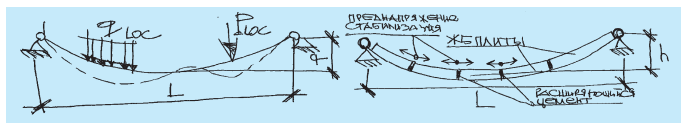


Рис. 5. Неустойчивость однопоясных систем и их стабилизация весом

Поэтому однопоясные системы требуют стабилизации. На расвете развития вантовых систем в 60-х гг. применяли два вида стабилизации (рис. 5):

- стабилизацию весом за счет опирания тяжелых железобетонных плит, которые пригружали ванты;
- стабилизацию предварительно напряженным диском покрытия, при котором стыки панелей замоноличивали расширяющимся цементом и создавали усилие предварительного напряжения диском покрытия.

Очевидно, что оба эти способа не соответствуют технологии и идут из тяжелого железобетонного прошлого.

Пути стабилизации однопоясной системы следует искать в дальнейшем применении вант.

ДУХПОЯСНЫЕ ВАНТОВЫЕ ФЕРМЫ

Следующий шаг заложен в попытке выполнить и верхний пояс фермы не из жесткого профиля, а из троса, что противоречит смыслу равновесия растяжения и сжатия в ферме.

Однако это возможно при условии фундаментального нововведения в конструкцию — предварительного напряжения.

Предварительное напряжение — это искусственное создание в системе донагружения усилий, обратных тем, которые возникнут от эксплуатационных нагрузок. При этом предварительное напряжение не повышает прочность конструкции (что часто является величайшим заблуждением), а лишь гарантирует геометрическую неизменяемость и повышает ее жесткость. В таких конструкциях функцию стабилизации выполняет верхний предварительно напряженный вантовый стабилизирующий трос. Он имеет обратную стрелу прогиба вверх, которая составляет 1/17–1/20 пролета и предварительно натягивается, передавая на него усилие через стальные стойки, чтобы гарантировать постоянную геометрию нижнего несущего троса и всей системы целиком. Для повышения поперечной жесткости вантовой фермы применяют также крестовую диагональную решетку из канатов.

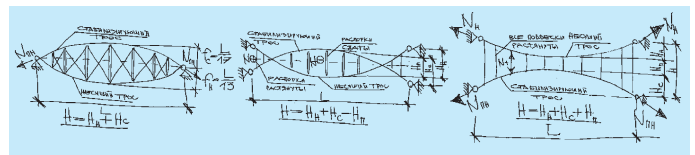


Рис. 6. Двухпоясные вантовые системы

Фермы с двумя вантовыми поясами могут быть при наличии, во-первых, жесткого опорного контура для восприятия распора и, во-вторых, различного предварительного напряжения в поясах (при условии сохранения растяжения во всех элементах при любых комбинациях нагрузок).

Двухпоясные вантовые системы бывают 3-х типов.

Несущий трос ниже стабилизирующего. Стойки полностью сжаты и выполняют функцию дистанцирующих элементов, которые сохраняют геометрию фермы наряду с ее жесткими опорами. Опорный контур один, что экономично, а отвод воды проще. Однако стойки сжаты, что при больших пролетах требует больших затрат материала.

Несущий трос частично выше, частично ниже стабилизирующего. Стойки сжаты там, где несущий трос ниже, и растянуты там, где несущий трос выше стабилизирующего. Система эта самая компактная по строительной высоте. Распор от несущих нитей воспринимается верхним опорным кольцом, а от стабилизирующих — колоннами.

Несущий трос выше стабилизирующего. Все элементы растянуты. Это самая легкая конструкция, однако, платой за это являются самые большие опорные усилия, а также затруднен отвод воды с покрытия.

ВАНТОВЫЕ ПОКРЫТИЯ

Дальнейшим развитием двухпоясной вантовой системы является ее установка на мачты-пилоны. В этом случае она становится самодостаточной конструкцией, в которой распор гасится диагональными оттяжками путем их анкерования в грунт (рис. 7).

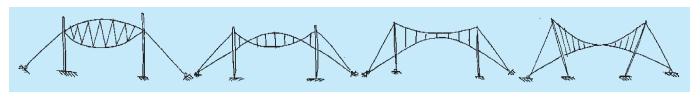


Рис. 7. Двухпоясные вантовые системы на мачтах с оттяжками

АРКА

Разделение полей напряжений на главные сжимающие и главные растягивающие позволяет воспринять изгиб балки за счет чистого сжатия, отказавшись от балластных зон. Так работают римские и романские арочные своды акведуков, аркад, арок и сводов мостов и храмов. Однако арка воспринимает только сжатие, а так как в системе «арка — опоры» необходимо равновесие внешних реакций и внутренних сил, в опорах появляется распор, который дол-

жен быть воспринят либо опорами, либо затяжкой. Распор является следствием той пары сил, которая образуется от пролетного момента. Однако чем выше стрела подъема арки, тем ниже распор.

Нужно заметить, что как бы мы не перекрыли каждый конкретный пролет при конкретной нагрузке на каждый метр этого пролета, изгибающий момент в его центре, восприятие которого является основной проблемой, остается постоянным и равен $M = qL^2/8$. Это означает, что распор не зависит не только от пролета и нагрузки, но и от стрелы подъема арки, которая для системы «опора — замок арки» является геометрическим эквивалентом плеча восприятия пролетного момента. Это значит, что при увеличении стрелы подъема f распор уменьшается: $T = M/f$. Поэтому распор был мал в средневековых стрельчатых сводах готических храмов XII — XV вв. и воспринимался весом тяжелых контрфорсов. Таким образом, отношение пролета арки L к высоте подъема f является основной геометрической характеристикой арки и называется коэффициентом смелости арки: $K = L/f$.

ШПРЕНГЕЛЬНЫЕ АРКИ

В арках развивается чистое усилие сжатия, только если их ось рациональна, т. е. соответствует параболе с функцией на два порядка выше функции нагрузки. При линейной нагрузке это квадратная парабола, при линейно-возрастающей — кубическая, и т. д. Однако часто нейтральная линия не только далека от оптимальной функции, но и не рациональна. При этом в ней развиваются большие изгибающие моменты, и она становится тяжелой при постоянном сечении. В этом случае наибольший эффект дают предварительно нажатые шпренгельные пояса со стороны растянутых волокон, плечо пояса для постоянства усилия в нем может быть переменным и пропорциональным значению момента. Это дает возможность выполнить арку изящного минимального сечения с усилением в виде шпренгельных поясов и стоек (рис. 8). Подобная конструкция применена на главном вокзале в Берлине.



Рис. 8. Эллиптическая шпренгельная арка

РАМЫ

При необходимости устройства под пролетной конструкцией прямоугольного пространства функционально образуется рама, которая по происхождению представляет собой арку с дважды ломаной осью. Рама образуется из стоек и ригеля, но наследует проблему распора. Однако, в отличие от арки и рамы, усилие здесь воспринимается одновременно и за счет изгиба (как в балке), и за счет распора (как в арке). Момент воспринимается здесь большей частью местом перелома оси или рамными узлами, а распор снова зависит от отношения пролета рамы к высоте стоек и снижается при его уменьшении.

Однако если при оптимальной кривой нейтральной линии арка может работать при симметричной нагрузке на чистое сжатие, то рама всегда работает на совместное действие изгиба и продольных сил, что делает ее менее экономичной, но более функциональной (рис. 9).

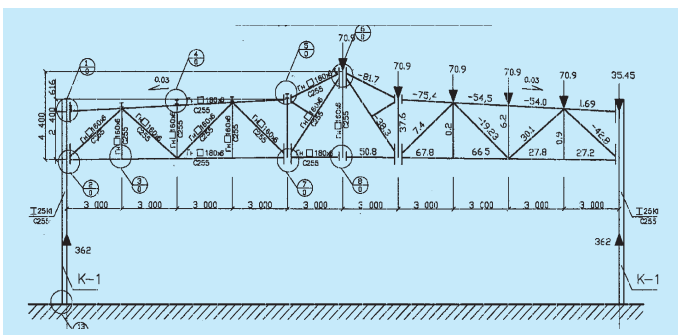


Рис. 9. Ферменная рама

ВАНТОВАЯ РАМА

Поля напряжений в раме показывают, что в ней также сжимающие напряжения направлены по восходящей арочной траектории, а растягивающие по эпюре моментов стремятся с внутренних волокон от опор к наружным волокнам в узле, а затем вновь спускаются вниз в центре пролета.

В массивной раме также образуются балластные зоны, так как картина полей напряжений выявляет их четкие направления, а в зоне нейтральной оси волокна практически не работают, за исключением связи наружных волокон и работы на поперечную силу. Поэтому трактовка рамы возможна также по пути максимальной концентрации материала по траектории главных нормальных напряжений. И поэтому развитием классической защемленной рамы является вантовая рама с жестким нижним поясом ригеля, стойками-мачтами, а также растянутым параболическим вантовым верхним несущим поясом с растяжками (рис. 10). Для устойчивости нижней балки жесткости и ее разгрузки от колоссального сжатия распорками рационально применять оттяжки, которые предварительно напряжены на основании и заанкерованы в грунт.

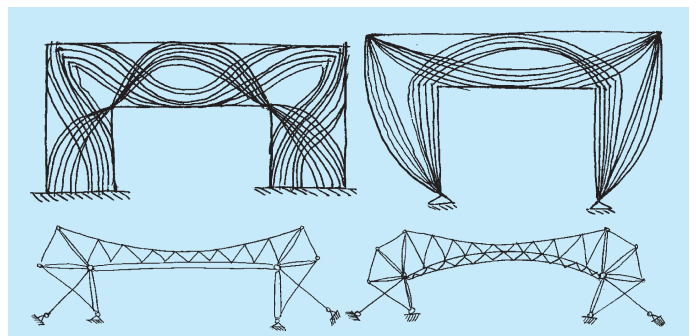


Рис. 10. Поля напряжений в непрерывной раме и схемы вантовых рам

Данный экскурс в различные виды конструкций можно было бы продолжить, однако цель его — проследить, что явление деформации изгиба и пролетный изгибающий момент при постоянных исходных данных (за исключением веса конструкции) является постоянной величиной, а принцип его восприятия можно творчески совершенствовать: перекрыть пролет различными типами конструкций — от безраспорных (как балка и ферма) до традиционных распорных (как рама и арка) или вантовой фермы и рамы. При этом эффективность системы конструкции заключается в нескольких простых интуитивно понятных принципах:

- дискретность системы, стержневая структура конструкции, которая допускает разделение функций различных стержней, их оптимальный подбор и оптимизация веса конструкции;
- оптимальное распределение высокопрочного материала по траекториям, максимально близким к полям главных напряжений;
- использование максимального количества растягивающих элементов в элементах решетки и связей;
- принцип концентрации материала, т. е. предпочтение большому количеству растянутых элементов, работа и распор от которых воспринимаются малым количеством массивных стержней (пилоны, мачты, распорки, колонны, балки жесткости), расположенных в местах их максимальной ответственности;
- принцип максимальной статической неопределимости вантовой комбинированной системы, которая гарантирует общую жесткость и надежность от прогрессирующего разрушения в случае отказа одного или нескольких элементов;
- принцип трехмерной ориентации как вантовых, так и стержневых элементов, который обеспечивает как прямое восприятие расчетных усилий, так и стабилизацию соседних элементов, и общую пространственную жесткость системы.

А. А. СМЕРНОВ, к. т. н., СПб ГАСУ