

МІНІСТЕРСТВО КУЛЬТУРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ДИЗАЙНУ І МИСТЕЦТВ
Кафедра Архітектури



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Конструктивні системи» (5 семестр)
для студентів 3 курсу освітньо-професійної програми «Архітектурно-
ландшафтне середовище» спеціальності 191 «Архітектура та
містобудування»
денної форми навчання

Електронне видання

Затверджено
на засіданні кафедри Архітектури
Протокол № 31 від 31.08.2022 р.

Харків 2022

Конспект лекцій з дисципліни «Конструктивні системи» (5 семестр) для студентів 3 курсу освітньо-професійної програми «Архітектурно-ландшафтне середовище» спеціальності 191 «Архітектура та містобудування» денної форми навчання [Електронне видання] // Укладач: А.О. Єсіпов – Харків: ХДАДМ, 2022. – 51 с.

Укладач:

викладач кафедри Архітектури

А. ЄСІПОВ

Рецензент:

к.т.н., доц. каф. ОАП ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

Н. ІВАНОВА

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри Архітектури ХДАДМ
Протокол № 1 від 31 серпня 2022 р.

© А.О. Єсіпов, 2022.

ЗМІСТ

ЛЕКЦІЯ 1. ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	5
1.1 Вступ.....	5
1.2 Загальні положення.	6
1.3 Мета та завдання лекційного курсу.	7
1.4 Нормативна документація.	8
1.5 Класифікація.....	9
ЛЕКЦІЯ 2. СИСТЕМИ, АКТИВНІ ЗА ПЕРЕТИНОМ.....	11
2.1 Системи, активні за перетином	11
2.1.1. Балки.....	12
2.1.2. Перехресні балки.....	13
2.1.3. Плити	14
2.2 Матеріали.	15
2.3 Робота конструкцій.	16
2.4 Формоутворювання.....	18
ЛЕКЦІЯ 3. ФЕРМИ І СТРУКТУРИ.....	19
3.1 Еволюція просторової рами.....	19
3.2 Історія прогонових ферм.....	20
3.3 Триангуляція та внутрішня стійкість.....	22
3.4 Покрівельні системи зі сходу та заходу.....	23
3.5 Як працюють ферми.....	24
3.6 Спільні пригоди.....	25
3.7 Як виглядають ферми.....	25
3.8 Дві кроквяні дахи в Берліні та Берні.....	26
3.9 Тенсегріті - Коли летять колони.....	28
ЛЕКЦІЯ 4. ВАНТИ І МЕМБРАНИ.....	30
4.1 Португальська напруга.....	30
4.2 Підвішування на мотузці.....	31
4.3 Профілі тросів та зусилля тросів.....	33
4.4 Стабілізація та підтримка підвісних тросів.....	35
4.5 Відмінні маломасштабні системи.....	36
4.6 Кабельні мережі - сітка кабелів.....	37
4.7 Фрей Отто – майстер кабельних мереж.....	38
4.8 Тканинні мембрани – щільне переплетення волокон.....	39
4.9 Пневматичні конструкції.....	40
4.10 Ефемерні втручання.....	42
ЛЕКЦІЯ 5. АРКА ТА СКЛЕПІННЯ.....	44

5.1	Новий погляд на кам'яну арку.....	44
5.2	Форма арки як історичний індикатор.....	44
5.3	Еволюція форми арки.....	45
5.4	Розуміння поведінки арки.....	45
5.5	Підвішувати чи не підвішувати?	46
5.6	Сили стиснення та згинальні моменти в арках.....	46
5.7	Фундамент Арки.....	47
5.8	Ринок Санта-Катерина – дах злітає.....	47
5.9	Сховище та світло.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		49

ЛЕКЦІЯ 1

ВСТУП. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

План лекції:

1. Вступ.
2. Загальні положення.
3. Мета та завдання лекційного курсу.
4. Нормативна документація.
5. Класифікація.

Цей курс показує, як «бачити» структуру як невід'ємну частину архітектури. Він зачіпає предмет, який стосується як розуміння механічних аспектів конструкції, так і здатності пов'язати це з простором, формою та концептуальними дизайнерськими ідеями, притаманними будівельному мистецтву.

Аналізуючи структурні принципи, що лежать в основі багатьох найвідоміших архітектурних творів минулого та сьогодення, цей курс поміщає предмет у сучасний контекст. Предмет розглядається якісно та дискурсивно, ілюструється безліччю фотографій та діаграм структурної поведінки. Доступні математичні рівняння та розроблені приклади також включені, щоб поглибити фундаментальне розуміння теми.

Він ідеально підходить як вступний текст курсу по структурах, так і як довідник дизайнера для натхнення, оскільки тут паралельно вирішуються два важливі питання: «Як працюють структури?» та «Яку форму набувають структури в контексті архітектури і чому?» Таким чином, виникає багате, різноманітне та привабливе обґрунтування структурної форми в архітектурі.

Це курс про структури, точніше про структури та архітектуру. Тим не менш, він представляє наш погляд на те, як задіяти предмет, який стосується як розуміння механічних аспектів конструкції, так і здатності пов'язати це з простором, формою та концептуальними дизайнерськими ідеями, властивими будівельному мистецтву. - Іншими словами, як "побачити" структури як повністю невід'ємну частину архітектури. Це водночас і курс, яка розглядає предмет якісно та дискурсивно, ілюструє це обговорення за допомогою багатьох фотографій архітектурних проектів та структурних діаграм поведінки, і водночас не ухиляється від відносно доступних математичних методів. рівняння і розрахунки, які можна використовувати для зміцнення і розширення розуміння основ теми, що зароджується, — дійсно, є багато способів дізнатися про структури і з них. Уроки про структурні форми та

поведінку можна отримати з проектів будівель, які охоплюють протягом часу, і тут вони взяті як з архітектурного канону, так і з останніх проектів з усього світу. Крім цього, ми також коротко займаємося мистецтвом та дизайном меблів, серед інших суміжних галузей інтересів, як засіб поєднання структурних принципів з ширшим культурним контекстом та зовсім іншим фізичним масштабом.

З іншого боку, з погляду розвитку розуміння будівельної механіки, можна стверджувати, що речі стали набагато стабільнішими і що не так багато нового: статика залишилася колишньою, а балки і куполи охоплюють простір так само, як і раніше. що ми дізналися і зрозуміли за сотні років, не кажучи вже про останні 30. І хоча, безумовно, вірно, що комп'ютерні методи аналізу сил і напруг конструкцій сьогодні набагато поширеніші та ефективніші, ніж три десятиліття тому, проте ці програми не стільки змінили наше фундаментальне розуміння предмета, що прискорили його застосування. Дійсно, як у наукових колах, так і на практиці було визнано, що може бути певна небезпека в тому, щоб надто покладатися на «чорну скриньку» аналітичних програм без чіткого розуміння базової структурної поведінки. Таким чином, хоча ми визнаємо і в деяких місцях включаємо проекти, які демонструють результати структурного аналізу, отримані завдяки таким обчислювальним досягненням, протягом усього цього курсу стане очевидним, що ми, як і раніше, твердо віримо у використання предмета за допомогою простих алгебраїчних формул та математики. а також обговорення його у термінах, знайомих нам із нашого повсякденного життєвого досвіду. Ми розглядаємо цей підхід не тільки як засіб розвитку інтуїтивного базового розуміння того, як працюють конструкції та як їх форми мають сенс, але і як те, що він дозволяє архітекторам та інженерам-будівельникам концептуальніше мислити та екстраполювати їх на незвідані території. При цьому можна повною мірою стверджувати, що останнім часом цифрова технологія справила найбільший вплив на те, щоб кинути виклик віковій приказці про проектування будівель, згідно з якою простота, повторюваність і прямолінійність необхідні для того, щоб зробити будівництво економічно життєздатним. Сьогодні будівлі з, здавалося б, нескінченними варіаціями довжини елементів та геометричних деталей можуть бути збудовані відносно легко завдяки видатним досягненням в інтегрованих цифрових технологіях виробництва; деякі приклади цього підходу включені до наступних розділів, поряд з більш «традиційними» — але не менш винятковими — формами будівельних конструкцій.

Структурування простору

1.1 Структура як просторовий генератор та механічний об'єкт

1.2 Просторові аспекти

1.3 Механічні аспекти

Хоча легко уявити структури без архітектури, може бути архітектури без структур. Приклади першої категорії включають будівельні крани та опори електропередач – конструкції, єдина мета яких – утримувати вантажі, підняті над землею. В архітектурі проектування будівель зазвичай включає дахи, підлоги і стіни, вага яких також повинен нести і врівноважуватися за допомогою конструкцій. Але крім цього, ці елементи, як правило, визначаються вимогами та концептуальними ідеями для їх внутрішніх просторів та зовнішніх форм. Таким чином, структурні питання глибоко вкорінені в архітектурі. Однак конкретні відносини між архітектурою та структурою, при яких одне охоплює інше, можуть сильно відрізнятися від однієї архітектурної доби до іншої або навіть від однієї будівлі до іншої протягом одного й того самого періоду часу. Сьогодні ми, ймовірно, зіткнемося як з будинками, конструкції яких не становлять особливого інтересу для архітектурного вираження, так і з іншими, які демонструють особливо тісний зв'язок між структурною формою та її негативним відбитком, архітектурним простором.

Щоб пролити світло на конкретні зв'язки між структурами та архітектурою, нам спочатку потрібно встановити, що ми вважаємо основними структурними функціями. З цією метою ми можемо запитати: якою метою є структура? Якими вимогами керуються умови, що встановлюють його загальну та детальну форму, та як ці умови співвідносяться одна з одною? Відповідь на такі питання дозволяє нам не тільки отримати широкий огляд технічного предмета, але й сприяє глибшому розумінню того, що є структурами насправді і як їх можна оцінювати в контексті архітектурного проектування.

Фундаментальний момент, який слід встановити від початку, полягає в тому, що структури в архітектурі сприймаються і сприймаються інакше, ніж структури в інших контекстах, і тому їх слід оцінювати по-різному. При міркуванні про цілісні відносини, що існують між структурами та архітектурними просторами, формами та ідеями, виникають деякі проблеми, що відрізняють структури архітектури від структур інших видів. Найбільш очевидною і основною функцією конструкції є її здатність утримувати щось над землею за рахунок несучого навантаження, а практичне використання цієї здатності полягає в тому, щоб утримувати підлоги, стіни та дахи в піднесеному положенні, створюючи тим самим житла простору. Однак у багатьох випадках в архітектурі конструкції пов'язані не тільки з такими функціями, що несуть. І

в той час як проектування здатне вирішити необхідні вимоги безпеки, двері, на щастя, залишаються широко відчиненими для того, щоб зробити структуру ще більш глибоко продуманою концептуально. В ідеалі між структурою, простором і формальним виразом встановлюється тісний зв'язок, так що опис та характеристика конструкції виключно з точки зору її функції явно недостатні. Розуміти структури у ширшому сенсі як частину архітектурного контексту також означає розглядати їх форми як елементи, що визначають простір, або як пристрої, що модулюють кількість і якість денного світла, або що відображають сьогоденні проблеми сталого розвитку, або будь-яку низку призначених функцій. Таким чином, конструкції можуть служити багатьом цілям одночасно, витримуючи навантаження, і ми повинні пам'ятати про це не тільки для глибшого розуміння розвитку структурних форм, а й для проведення відповідної та обґрунтованої критики структур в архітектурному контексті.

Як можна створити концептуальну модель для цілісного розуміння структур? Як відправна точка ми можемо відзначити, що конструкції відіграють роль як джерела необхідної жорсткості і міцності (які є основними механічними передумовами для безпечного перенесення вантажу), так і як інструмент для створення архітектурних просторів, що втілюють деякі інші якості. Це поняття подвійний функції, як механічної, і просторової, виявляється корисним, коли доходить до розуміння і оцінки багатогранного дизайну структур у різних архітектурних умовах. Структури варіюються від тих, які задумані як чисті силові системи, які слідує логіці максимальної сили при мінімумі матеріалів (т. З одного боку, це функція, що несе, що допомагає пояснити конструктивну форму з точки зору техніки і науки, як об'єкти, необхідні для забезпечення жорсткості, міцності та стійкості, а з іншого, конструкція може брати участь в організації архітектурних просторів і створення архітектурного вираження. Більш того, ці двоїсті аспекти структури зазвичай не повністю відокремлені один від одного, а натомість мають тенденцію змішуватися, а їх поділ стиратися, так що певні формальні особливості структури можна пояснити з допомогою механіки, і навіть зрозумілі світлі.

1.2 Просторові аспекти

Основна причина існування структур — це, звичайно, практична мета, якій вони служать. Конструкції витримують навантаження від місця їхнього докладання до землі, хоча, як правило, не за допомогою найкоротшого можливого «маршруту» між цими точками, оскільки для розміщення в будівлі необхідні відкриті та вільні від конструкцій простору різних розмірів та форм.

Такий природний порядок відносин між «чому» і «як», між розумом і наслідком: на першому місці стоїть практична мета, а за нею слідує фізична необхідність. Практична мета, яку привласнює будову, аспект її корисності, досить просто прийняти і оцінити: у випадку з мостами, наприклад, це стає зрозумілим, якщо визнати той факт, що основна функція корисності, його «сенс існування» так би мовити, типова для перевезення людей та товарів через долину, річку або навіть через море; тобто вся справа в організації транспортної лінії з одного берега на інший. Пряма лінія зв'язку, до якої зазвичай наводять цей зв'язок, швидше за все, передбачає певну структурну конфігурацію або як конструкт, що стає складовою структурної системи, або як створення умов для того, як ця лінія повинна підтримуватися. У будь-якому випадку функція корисності забезпечує дуже важливу інформацію про те, як насправді спроектована конструкція, а також дає уявлення про можливу форму моста.

Те саме загалом вірно і для структурування архітектурних просторів: вибір структурної системи та її конкретної артикуляції залежить від пов'язаної з нею практичної функції. Наприклад, у разі великих балок на верхньому рівні Великої арки Дефанс у Парижі архітектора Йохана Отто фон Спрекельсена (1929–1987) та інженера Еріка Рейцеля (1941–2012) немає можливості повністю зрозуміти вибір цього конкретного типу балки, не усвідомлюючи, що структура насправді пристосовує людську діяльність у межах своєї структурної глибини та дозволяє людям вільно ходити у великому просторі всередині та між цими балками, весь час спостерігаючи за художніми виставками. (Ілл. 1.5, 1.6.) Це співвідношення стало можливим, тому що балки мають великі прямокутні отвори в них, які називають Віренделем. Отже, те, що ми бачимо у внутрішніх просторах цього верхнього рівня, насправді є горизонтальною та вертикальною частинами цих величезних балок, які охоплюють вражаючі 70 м (219 футів) над відкритою суспільною площею, розташованою далеко внизу.

Це співвідношення стало можливим, тому що балки мають великі прямокутні отвори в них, які називають Віренделем. Отже, те, що ми бачимо у внутрішніх просторах цього верхнього рівня, насправді є горизонтальною та вертикальною частинами цих величезних балок, які охоплюють вражаючі 70 м (219 футів) над відкритою суспільною площею, розташованою далеко внизу.

Балка Віренделя - горизонтальний несучий конструктивний елемент перекриття у будівництві, що працює головним чином на вигин; різновид рами, що дозволяє перекрити прольоти до 40 метрів без проміжних опор[1]. Винайдено наприкінці XIX століття бельгійським інженером Артуром Віренделем.

З Великою аркою щодо просто вказати на функцію корисності використання простору як на фактор, що накладає обмеження на дизайн і, отже, має можливість впливати на вибрану структурну форму. Другий, можливо, дещо більш тонкий приклад такої функції корисності може бути в ситуації, коли основна увага приділяється поширенню природного світла, що у випадку Музею колекції Меніла в Х'юстоні, штат Техас, призвело до унікального дизайну покрівельних ферм/рефлекторів, виготовлених з комбінації різних матеріалів . (Ілл. 1.7.) Таким чином, загалом можна сказати, що для того, щоб люди могли робити те, що вони повинні робити в певному архітектурному просторі, або щоб забезпечити певну несучу роботу з боку структури, структурна форма іноді може бути сформована і налаштована дуже особливим чином. Таким чином, без знання ширшого спектра таких архітектурних корисних функцій у будівлі повне розуміння конкретної структурної конфігурації неможливе.

Музей колекції Меніла, Х'юстон, Техас (1983).

Крім виконання несучої функції, нижня частина прогонових будов покрівлі виконана за формою, що виконує роль світловідбивача; однак вони розташовані на точній відстані один від одного, щоб пряме сонячне проміння не потрапляло в музейні галереї. Нижня частина кожного з цих складових структурних елементів є вигнутою формою з фероцементу, а їх верхня частина (невидима на цьому зображенні) являє собою ферму. Механічні вимоги до сукупної міцності та жорсткості цих елементів відповідають вимогам певного типу просторової функції корисності.

Рекомендована література:

1. El Khouli S., John V., Zeumer M. Постійні проектування технологій: З структурного дизайну до матеріального selection: Assessing and improving the environmental impact of buildings. – DETAIL- Institut für internationale Architektur-Digland GmbH & Co. KG, 2015.
2. Emmitt S. Barry's introduction to construction of buildings. - John Wiley & Sons, 2018.
3. Erdey K. та ін. Earthquake engineering: application to design. - Wiley, 2007.

Питання для самоперевірки:

1. Охарактеризуйте взаємовплив архітектурних конструкцій і архітектури
2. Дайте визначення основним термінам, що характеризують роботу конструктивних систем
3. Назвіть основні класифікації конструктивних систем за їх роботою

ЛЕКЦІЯ 2

СИСТЕМИ, АКТИВНІ ЗА ПЕРЕТИНОМ

План лекції:

1. Системи, активні за перетином
 - Балки
 - Перехресні балки
 - Плити
2. Матеріали.
3. Робота конструкцій.
4. Формоутворювання.

Стійково-балкова система (post and lintel system). У своїй найпростішій формі конструкцією є дві вертикальні опори з горизонтальною опорою, покладеною між ними. Ця проста структурна конфігурація дозволила б людям пройти або заглянути крізь кам'яну стіну, що заважає або огорожує. Більше того, якщо цю базову форму зробити тривимірною, то вона веде до первозданного житла - чотирьох колон і даху - і, таким чином, являє собою, можливо, зачатки архітектури.

Такі стародавні споруди, як Стоунхендж у Великій Британії, були побудовані на основі стоечнобалкових конструкцій, які були основою архітектури з доісторичних часів.

Стоунхендж також є місцем культового будівництва, яке символізує силу і витривалість і було побудовано кілька тисяч років р. до н.е., зазвичай вважається, що він будувався у кілька етапів упродовж багатьох століть. Спочатку комплекс складався з кількох концентричних кіл скельних утворень, розташування та орієнтація яких дозволяють зробити розумний висновок, що це місце, ймовірно, використовувалося для поклоніння сонцю та для виконання астрономічних розрахунків, що передбачали зміну сільськогосподарських сезонів; тобто комплекс, ймовірно, функціонував принаймні частково, як свого роду небесний календар. Те, що ми бачимо сьогодні, є Стоунхендж в руїнах, оскільки багато великих каменів впали або використовувалися проміжними поколіннями для будівництва довколишніх будинків або ремонту доріг. Проте з того, що залишилося, ми все ще можемо уявити, як колись виглядав Стоунхендж. Наприклад, дані свідчать про те, що зовнішнє кільце з 30 масивних вертикально стоять каменів акуратної форми було увінчане горизонтальними перемичками, з'єднаними кінець до кінця в безперервне кам'яне коло, що підпирається високо над землею. (Сьогодні найбільш повна частина цього кола складається тільки з трьох балок, які все

ще знаходяться на місці.) Крім того, найграндіозніша і найбільш вражаюча частина всієї споруди, святилище, являла собою овал з відкритим кінцем, що включає три великі «трилітони» (відбувається від грецької і означає «три камені»): дві масивні стійки, увінчані горизонтальним прогоновим елементом. Нижні кінці цих вертикальних каменів вагою 40 тонн частково заглиблені, щоб надати їм бічну стійкість. Всі камені досить грубо вирізані та багато в чому передають природний характер матеріалу, з якого вони виготовлені; тобто особливий тип пісковика, званий сарсеном, у якому піщинки пов'язані разом кремнеземом.

Храм фараона Хефрена в долині фараона Хефрена, що є частиною прохідного порталу до таємниць комплексу гробниць Піраміди і Великого Сфінкса в Гізі, включає в себе добре збережені залишки церемоніального залу, що складається з 16 монолітних колон з рожевого граніту, кожна з яких стосів).) або більше. На невеликій відстані між цими стовпами розташовані горизонтальні кам'яні блоки з того ж матеріалу, які самі по собі настільки масивні і важкі, як і вертикальні елементи. Відповідно до того, що єгиптяни надавали перевагу чітким геометричним формам, цей храм складається з набору простих будівельних блоків, ретельно збалансованих, дуже точно вирізаних і відполірованих.

Внутрішні частини єгипетських храмів обнесені колонами з кам'яними перемичками. 2500 р.

З часом, очевидно, було багато інших будівель, як великих, так і малих, які включали такі ж масивні кам'яні балки. Однак, хоч би якими проголошеними були такі пам'ятки в нашій культурній історії, сьогодні з точки зору структури вони демонструють майже абсурдну масивність; тобто розміри їх кам'яних балок здаються сильно завищеними, якщо взяти до уваги короткі відстані, які вони охоплюють. (наприклад, рис)

Храм Афаї, острів Егіна, Греція (близько 500 р. до н.е.). Як ми невдовзі побачимо, ці вже не знайомі пропорції ясно висловлюють деякі основні проблеми з балочними конструкціями, проблеми, які лише посилюються, коли вони зроблені з каменю.

І по сьогоднішній день, Всі структурні отвори походять від цієї конструкції, яка у своєму чистому вигляді помітна тільки в колонадах і каркасних конструкціях, оскільки стійки та перемички дверей, вікон, стель та дахів зазвичай є частиною стіни.

Мабуть, не позбавлено підстав стверджувати, що балка була першим несучим елементом конструкції, що експлуатувалася людиною: десь у доісторичному лісі дерево, що впало через бурхливий потік, дозволило б

перетнути воду, не змите – таким чином, ймовірно, цілком випадково він став першим. у світі балочним мостом.

ВИЗНАЧЕННЯ:

НЕСУЧІ СИСТЕМИ, АКТИВНІ ЗА ПЕРЕТИНОМ – несучі конструкції з масивних, жорстких лінійних елементів, включаючи їх ущільнення у вигляді плит, в яких перерозподіл сил здійснюється шляхом мобілізації зрізаючих зусиль.

ЗУСИЛЛЯ:

Елементи системи відчують насамперед напруга на вигин, тобто. внутрішні стискаючі, розтягувальні та зрізувальні зусилля: СИСТЕМИ У СТАНІ ВИГИБУ.

ОЗНАКИ:

Типові структурні ознаки: ПРОФІЛЬ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕТИНУ ТА НЕРОЗРИВНІСТЬ МАСИ.

1. Балки

Балки, мабуть, найпоширеніші елементи, що використовуються у конструкціях. Як правило, вони горизонтальні, хоча можуть мати будь-яку орієнтацію. Дрібні компоненти, що несуть пластини, опорні плити колон, сходи і навіть окремі елементи жалюзі Levelog є переважно прості балки в невеликому масштабі. Якщо казати про несучі системи з балок, можна виділити наступні:

- Однопрольотні
- Нерозрізні
- Шарнірні
- Консольні

основне завдання балки полягає в тому, щоб витримувати навантаження, що діють перпендикулярно до її поздовжньої осі і напрямку прольоту. Як звичайно буває з цим типом умов навантаження, чи то штабелювання полиць стосами книг або ризиковане вистрибування на трамплін для підготовки до плавання, промінь реагує, відхиляючись у напрямі поперечно прикладеного навантаження; т. е. спочатку пряма поздовжня вісь балки в ненавантаженому стані перестає бути такою при додатку навантаження. Детальний розгляд рівноваги цієї, здавалося б, простої реакції дозволяє нам дійти фундаментального розуміння того, як працюють промені.

Момент сили - векторна фізична величина, що характеризує дію сили на механічний об'єкт, що може викликати його обертальний рух.

На горизонтальний стрижень діє три типи сил (вигин, зсув і відхилення), що вимагають, щоб він мав як розтягуючу, так і здатність стискати.

Навіть використовуючи цей простий принцип можна зрозуміти, чому давньоримські колони розташовані так близько один до одного. Камінь має малу здатність до розтягування, тому він перекриватиме лише короткі відстані у вигляді балки. Поєднання невеликої відстані між колонами та широкими капітелями зменшило проліт, щоб відповідати місткості каменю. (Золотий перетин був не єдиною рушійною силою!)

Якщо цей опис фундаментальної поведінки балки та деформації може здатися відносно простим, варто зазначити, можливо, із задоволенням, що історично це давалося нелегко. Леонардо да Вінчі (1452–1519) висунув гіпотезу про поведінку променя (серед іншого...) (ілл. 17.18), і, як ми бачили в розділі 7.3, Галілео Галілей (1564–1642) працював над проблемою настільки, що представив першу (Помилкова) формальна аналітична теорія з цього питання в 16385. Протягом наступних 200 років низка французьких математиків/вчених модифікувала гіпотезу Галілея, досягнувши кульмінації в 1826 році, коли Клод Луї Марі Анрі Нав'є (1785–1836) опублікував те, що сьогодні широко визнається правильним. рішення для поведінки балок при згинанні. Нав'є засновував свої теорії на щойно описаному припущенні, що спочатку «плоскі перерізи в балці залишаються плоскими» в деформованому стані під навантаженням, твердження, справедливості якого згодом була підтверджена експериментально. Сьогоднішні будівельні норми і правила щодо поведінки балок, як і раніше, засновані на цій гіпотезі, розробленій майже 200 років тому.

Консоль

Хоча з погляду поведінки консоль є невід'ємною частиною сімейства балкових конструкцій, консоль має особливий статус завдяки стану опори, профілю та номенклатурі. Тут ми говоримо про балку, яка виступає назовні у повітря, зафіксована від будь-яких відхилень та обертань у своїй основі, але зовсім не підтримується та не стримується на своєму вільному кінці. Загальні приклади цієї ситуації рясніють повсякденним життям: наприклад, як вертикальні стовбури дерев, так і їх горизонтальні гілки, трамплін, крила на фюзеляжі літака тощо. розвитку з погляду як наукового розуміння, так і підходів до проектування, які застосовувалися до навісів, балконів, вертикальних башт тощо.

Ми також інтуїтивно розуміємо із загального досвіду, що верхня частина горизонтальної консолі, навантаженої гравітацією, розтягується при розтягуванні, а нижня стискається - протилежно тому, що ми очікуємо, відбувається у вільно опертій балці.

Станція метро Yurakucho, Токіо, Японія (1996).

Скляні пластини, що перекриваються, поступово збільшуються в глибину у напрямку до опори основи консольного навісу; це пов'язано зі зміною внутрішніх згинальних моментів і сил, що перерізують, по довжині консольної конструкції.

Архітектор: Rafael Viñoly Architects.

Консольні тераси

Безумовно, однією з найвідоміших з архітектурної точки зору консольних споруд, коли-небудь побудованих, є Fallingwater, одна з найвідоміших і зухвалих робіт Френка Ллойда Райта (1867–1959). (Мал. 7.12.) Він був побудований в 1937 році як будинок вихідного дня для Едгара Дж. Кауфманна і розташований недалеко від Піттсбурга, штат Пенсільванія, на природній ділянці, що характеризується листяним лісом, дикими рододендронами та порогами. Побудований на набережній з пісковика, будинок був спроектований як серія виступаючих терас, які прямо нависають над водою та її водоспадами.

Фоллінгуотер, Мілл-Ран, Пенсільванія, США (1937; реставрація 2002). Консольні бетонні покриття, посилені перевернутими бетонними крайовими балками, які одночасно утворюють перила. Система тепер додатково посилена прихованими тросами із пост-натягом.

Архітектор: Френк Ллойд Райт

Для Райта принцип консольності був дуже особистим рішенням, таким самим природним, як гілка, що росте на стовбурі дерева, або витягнута рука: при вмілому та винахідливому використанні цей тип конструкції мав багато можливостей - з нього можна було зробити колону. вільний простір і створювати плити для підлоги незалежної форми і розміру одну поверх іншої. Головна тераса Fallingwater зроблена із залізобетону, і на той час це була високотехнологічна конструкція з консоллю близько 5 м (16,4 фути). Концепція була заснована на взаємодії між балками настилу та загнутими догори бетонними краями. Книга Дональда Хоффмана «Водоспад Френка Ллойда Райта та його історія» дає гарне уявлення про складні та часом драматичні етапи планування та процес будівництва цього будинку. Кілька разів сміливий і далекоглядний Кауфманн висловлював серйозні сумніви щодо здатності консолей правильно нести навантаження і змушував свого інженера самостійно перевіряти розміри Райта; крім того, він змушував його вимірювати вигин терас через рівні проміжки часу, доки він жив.

Очевидно, Кауфман інтуїтивно знав дещо про консолі. До 1985 року конструкція, що виступає, помітно провисла до 175 мм (7 дюймів), а бетонні парапети сильно потріскалися, що зажадало установки тимчасових підпірок,

що повністю підірвало плавучість будівлі. Щоб вирішити цю проблему, інженери-конструктори Robert Silman Associates розробили розумну тросову систему з наступним натягом, яка була непомітно пройдена в систему консольної підлоги. Таким чином, будинок знову стоїть у первісному вигляді і залишається одним із головних творів архітектури ХХ століття.

Ізогнуті балки

Інший дизайнерський підхід дає можливість урізноманітнити цю тему балок постійної глибини, як це можна побачити в аеропорту Мадрид-Барахас, розробленому у співпраці з архітекторами Річардом Роджерсом та Антоніо Ламелою. Тут ряд сталевих балок, як і раніше, має приблизно постійну глибину, але замість того, щоб бути прямим, їх вертикальний профіль сильно коливається вгору і вниз кілька разів по всій ширині будівлі аеровокзалу. Однак, незважаючи на зовсім інший вид, у таких випадках статика завдання щодо вертикального гравітаційного навантаження істотно не відрізняється від статички ідеально горизонтальної балки, а поперечна сила та згинальний момент вимагають і діаграми буде по суті те ж саме.

Вільно оперті балки з різною геометрією висот - одна пряма, інша криволінійна - але при однаковому навантаженні мають загальну діаграму моментів, що згинають.

Перетин балки

На даний момент ми встановили базове розуміння поведінки балок і факторів, що визначають їх конструкцію, але це розуміння також сприяє більш ранньому спостереженню: така структурна поведінка є дуже неефективним використанням матеріалу для несучого навантаження. Ми вже обговорювали, як згинальні моменти та поперечні сили змінюються по довжині балки, проте, як часто ми визначаємо їх тільки для пікових значень на цих діаграмах. Ця «проблема неефективності» посилюється діаграмою розподілу згинальної напруги, що лінійно змінюється, зверху вниз, яку ми описали в попередньому розділі; тобто на всіх рівнях перерізу балки, крім самого верху та низу, матеріал буде недонапружений, а на рівнях балки поблизу нейтральної осі матеріал буде особливо слабко навантажений.

Незважаючи на ці недоліки, балки, очевидно, були і залишаються одним із двох найпоширеніших конструктивних елементів (другим є колона), тому очевидно, що способи хоча б частково компенсувати цю неефективність давно шукали. Історично склалося так, що це «лихо» з балками напевно було зрозуміло з особистого досвіду; наприклад, різницю в жорсткості і несучій здатності між дерев'яною дошкою, протягнутою між двома опорами, коли вона укладена горизонтально, і вертикально, що стоїть на вузькому краю, можна легко спостерігати і випробувати на собі. Це розуміння також

проявляється в орієнтації сегментів кам'яних балок храму Афайї (показаної раніше) та практично вертикальної пластинчастої форми чавунних балок, розробленої в перші роки промислової революції

Десятиліття еволюції чавунної балки часів промислової революції. Метал значно зменшує розміри перерізу раніше дерев'яної балки, але різні показані залізні секції майже однакові по ширині, з невеликими виступами вниз, в основному для підтримки поперечних прольотів цегляної арки між сусідніми балками; Крім того, більше матеріалу на стороні розтягування балок допомагає компенсувати низьку міцність чавуну на розтяг.

Щоб спробувати нейтралізувати деяку неефективність балок, ми можемо концептуально подумати про видалення матеріалу із середньої області поперечного перерізу прямокутної балки та переміщення його у верхню та нижню частини перерізу (рис. 7.25), де він може піддаватися вищим навантаженням при згинанні і, отже, краще використовуватись; тобто ефективна відстань між парою сил S і T стане значно більшою (посилаючись на рис. 7.17 та рис. 7.18), що призведе до значно більшого внутрішнього моменту опору.

Таким чином, «полкоподібна» балка здатна розвивати набагато більшу несучу здатність при тій же кількості матеріалу, що використовується, і це логіка, що стоїть за частим використанням балок такої форми в повсякденному будівництві, наприклад, при постійному будівництві. - звичайна сталева двотаврова балка, наприклад, або виготовлені дерев'яні балки аналогічної форми, таким чином також можуть бути правильно зрозумілі.

Додавання фланців, які виступають в сторони від верхньої та нижньої частини секції балки, застосовується за тією ж логікою, розміщуючи значну кількість матеріалу якнайдалі від нейтральної осі балки. Наслідком цього ефекту є зменшення необхідної ваги балки і створення більш жорстких поперечних перерізів балки, що дозволяє досягти значно довших прольотів або витримувати набагато більше навантаження. Так чи інакше було знайдено дуже ефективний засіб усунення принципового недоліку механізму, що несе балки.

Будинок *Metrosorium*, Мадрид, Іспанія (2008).

Набір збірних залізобетонних балок особливо великих розмірів створює індивідуальність та визначає простір будинку. Різні форми поперечного перерізу виражають стратегію переміщення матеріалу від нейтральної осі, чи то фланцеве (видно торцем праворуч і поперечно зверху) або U-подібне (видно торцем, зручна форма для плавального басейну) або перевернута U-подібна (що проходить упоперек середини зображення).

Студія *Ensamble Studio*

Виступи і сили натягу використовуються для зменшення згинальних моментів і прогинів пористих балок

Вертикальні навантаження від перекриттів передаються на пористі балки, а потім від пористих балок на опорні колони. Звиси спеціально спроектовані в конструкції для зменшення згинальних моментів та прогинів стільникових балок. При огляді першого виступу два сталеві троси пов'язують вільний кінець виступу та бетонну опору. Нисхідна сила на вільному кінці звису забезпечується натягом тросів. Ця сила аналогічна силі P на рис. 4.2с, створить негативний згинальний момент у балці над опорою колони, який частково компенсує позитивні моменти балки, викликані навантаженням перекриття. Довжина виступів і сила сталевих тросів можуть бути конструктивними параметрами, активно обраними для зменшення моментів, що згинають, і прогинів стільникової балки.

На вільний кінець виступу діє зосереджена сила, тому згинальний момент лінійно змінюється вздовж виступу від нуля на вільному кінці до максимуму на опорі колони. Відбиваючи форму діаграми згинального моменту, виступ звужується до колони. Завдяки цьому звис здається легшим і елегантнішим, ніж якби по всій його довжині використовувався постійний поперечний переріз. Між бетонною опорою та кінцем колони виступу передбачена підпірка, яка надає жорсткість виступу, щоб запобігти його обертальній деформації через дії тросів, сприяє додатковому поперечному опору конструкції та забезпечує місця для кріплення тросів.

Рекомендована література:

1. Ballast DK Architect's handbook of construction detailing. - John Wiley & Sons, 2009.
2. Bizley G. Architecture in detail. - Routledge, 2007.
3. Boothby TE Engineering Iron and Stone: Understanding Structural Analysis and Design Methods of the Late 19th Century. - American Society of Civil Engineers, 2015.
4. Carroll J. The Complete Visual Guide до Building a House. - The Taunton Press, 2013.

Питання для самоперевірки:

1. Дайте визначення, що таке «балка», «плита», «консоль»
2. Назвіть основний принцип роботи, що об'єднує балку та плиту
3. В чому відмінність конструктивної роботи балки від роботи консолі?

ЛЕКЦІЯ 3

ФЕРМИ І СТРУКТУРИ

План лекції:

1. Еволюція просторової рами
2. Історія прогонових ферм
3. Тріангуляція та внутрішня стійкість
4. Покрівельні системи зі сходу та заходу
5. Як працюють ферми
6. Спільні пригоди
7. Як виглядають ферми
8. Дві кроквяні дахи в Берліні та Берні
9. Тенсегріті - Коли летять колони

Еволюція просторової рами

Конрад Ваксманн (1901–1980) зробив великий внесок у розвиток процесів промислового будівництва як педагога, і ініціатора дослідницьких проектів. Його кар'єра паралельна до кар'єри інших великих архітектурних особистостей, таких як Вальтер Гропіус і Міс ван дер Рое: Ваксманн народився в Німеччині і емігрував до Сполучених Штатів наприкінці 1930-х років.

Дослідницький проект для ВПС США привів, мабуть, до його найзначнішої роботи — розробки конструктивної системи, яку можна використовувати для великих ангарів. (Ілл. 9.2.) На відміну від знаменитого бетонного ангара П'єра Луїджі Нерві в Орвієто, Ваксманн вибрав як матеріал для таких конструкцій сталь.

Метою його дослідницької роботи, проведеної в інституті дизайну Чикаго в другій половині 1950-х років, була розробка будівельної системи для довгих прольотів і консолей, заснованої на використанні стандартних будівельних елементів, розміри яких варіювалися мінімально. Він вибрав структурну форму задля досягнення цієї мети у вигляді системи просторового каркаса, що складається з набору основних блоків у формі тетраедра. Це відкриті пірамідальні форми з чотирма рівносторонніми трикутними сторонами та конструктивними елементами, що з'єднують три суглоби геометричної форми.

Оскільки трикутники є стійкими структурними формами, немає необхідності в жорстких з'єднаннях — всі вони можуть бути більш простими і дешевими за допомогою штифтів. Хоча тоді потенціал просторової рами вже став відомий завдяки експериментам Олександра Грехема Белла, саме

Ваксманн першим широко застосував цю систему в архітектурному середовищі. Однак логістична проблема, з якою він зіткнувся при застосуванні системи просторового каркасу в масштабі будівельних конструкцій, полягала в пошуку ефективного сполучного стику, який був би відносно простим і дешевим — очевидно, критичний чинник, враховуючи кількість стиків у такій системі. Рішення, яке він вигадав, полягало у використанні сферичного з'єднання з хромистої сталі, яке могло з'єднувати до 20 сталевих трубних елементів, що входять під різними кутами; для утримання кінців цих елементів дома використовувався простий принцип клину.

Пропозиція Wachsmann щодо створення величезного просторового каркасу ґрунтувалася на ряді стійких багатокутників, побудованих з використанням тих самих основних принципів, що й конструкція даху. Тоді такі проекти несли у собі повідомлення у тому, що це новий тип архітектури пропонує можливість мати вільний, динамічний, захищений простір майже безмежних розмірів і легкості. Цей тип структури, звичайно, особливо добре підходить для функцій зайнятості, які вимагають великих відкритих просторів, таких як ангари аеропортів, виставкові зали і т.д. установки; тільки найздібніші архітектори розуміють та освоюють цю гру.

Світ BMW, Мюнхен.

Зовнішній вигляд хвилястої форми даху.

Майже через 50 років різні архітектори та інженери зіткнулися з аналогічним завданням: спроектувати конструкцію, яка могла б покрити виключно велику площу даху 120 на 200 м (394 на 656 футів) для «експериментального» та розподільчого центру в Мюнхені для виробник автомобілів БМ. Ще одним викликом для проектувальників - архітекторів Соор-Нimmelb(l)au та інженерів-будівельників Bollinger + Grohmann - став той факт, що будівельний майданчик знаходиться досить близько до знаменитого інноваційного та культового Олімпійського стадіону цього міста, який має свою знамениту та унікальну форму даху. та структурна система. (Ілл. 11.38).

Світ BMW, Мюнхен, Німеччина (2006).

У розрізі показані хвилеподібні форми ферми; триангуляція може легко адаптуватися до загальної структурної форми, що змінюється.

Для BMW World структура даху є такою ж яскравою, хоч і іншою візуальною особливістю, яку дизайнери концептуалізували як «хмару» з плавно зігнутою та хвилястою формою, особливо з нижньої сторони. (Мал. 9.3, 9.4.)

Верх даху злегка випирає вгору посередині, як подушка, і має сонячні панелі. Як верхній, так і нижній шари покрівельної системи складаються з сітки конструктивних елементів розміром 5 на 5 м (16,7 на 16,7 фута), і ці шари

з'єднані за допомогою численних діагональних стрижнів, які утворюють загальну просторову каркасну конструкцію, висота якої безперервно варіюється в межах 2 та 12 м (6 та 36 футів). Опори для цієї величезної системи даху є великою двоконусною конструкцією на одному кінці будівлі та кілька бетонних колон, а також сходові та ліфтові ядра в інших місцях.

Частина первісної ідеї хвилеподібної конструкції даху полягала в тому, щоб зробити простір між верхньою та нижньою структурними сітками доступними для функцій, пов'язаних з адміністративними офісами та зонами відпочинку. Цікава історія про те, як тоді була задумана дуже конкретна форма: дозволивши цим типам функцій представляти певні уявні гравітаційні сили, вони були застосовані до структури за допомогою комп'ютерної програми, яка здійснила віртуальну деформацію і таким чином запропонувала необхідний простір між шарами. Отримана конструкція, безумовно, візуально притягує погляд, а також відносно легка та незмінно ефективна: вона виготовлена із сталевих труб діаметром всього 324 мм (12 дюймів) для елементів верхнього та нижнього шарів та діаметром 244 мм (10 дюймів) для діагоналей. У той час як походження від ранніх просторових амбіцій та будівельних стратегій Wachsmann до цієї сучасної будівельної реальності очевидно, дизайнери BMW World також продемонстрували, що ферми та просторові рами двадцять першого століття не обов'язково повинні дотримуватися правильної прямолінійної геометрії конструкції. двадцятого.

Історія прогонових ферм

Ферми мають довгу та видатну історію; Справді, як структурний тип їх можна простежити до античності. У дуже простих формах ферми часто використовувалися для скатних дахів, і римляни також широко застосовували ферми для будівництва мостів (наприклад, Илл. 9.5);

Колона Траяна, Рим, Італія (113 р. н.е.).

На рельєфній деталі показана розкісна форма дерев'яних рам для огороження понтонного мосту з розташованими поблизу човновими опорами.

дійсно, обидва вони розглядалися тоді як структури, які були частиною народної традиції. В епоху Відродження поступово розвивалося більш свідоме ставлення до особливого способу несучого навантаження ферми та їх можливого застосування, не в останню чергу це представлено теоретичними і практичними роботами італійського архітектора Андреа Палладіо (1508-1580). Однак тільки коли в першій половині дев'ятнадцятого століття інженерна справа стала професією, потенціал ферм почав систематично досліджуватися

(і розкриватися), хоча здебільшого будівельниками мостів. Більш довгі прольоти і більш важкі навантаження, викликані системою залізничного транспорту, що швидко розширюється, вимагали ефективних і надійних конструкцій. Отже, розвиток ферми насамперед мало місце у цивільних інженерних спорудах; в архітектурі як прольоти, так і навантаження зазвичай були меншими і не заохочували формальний розвиток ферм в тій же мірі. Крім того, традиції, стиль та звичай більшою мірою залежали від архітектурної практики, ніж від техніки, що частково пояснює, чому форми ферм загалом повільно допускаються у «висококласну» архітектуру. Проте щодо ранній приклад систематичного використання ферм як несучої конструкції і виразний архітектурний елемент можна знайти в Кришталевому палаці, побудованому для Всесвітньої виставки 1851 року, де ковані і чавунні фермові балки використовувалися в масштабне будівництво, нехай і тимчасове. (Мал. 9.6.)

Кришталевий палац, Лондон, Великобританія (1851).

Коротші ферми з прольотом 7,2 м (24 фути) були виготовлені з чавуну, а найдовші прольоти (21,6 м або 72 фути) були виконані з більш стійкого до вигину матеріалу з кованого заліза.

Але що це за річ, яку ми називаємо фермою? Ми можемо почати відповідати на це питання, сказавши, що у своїй основі ферма є конструкцією, що складається з лінійних елементів, розташованих у трикутній конфігурації. (наприклад, рис. 9.1.) Оскільки трикутник в цілому є стійкою конструктивною формою, тобто трикутник не буде суттєво деформуватися при додатку до нього зовнішніх сил у будь-якому напрямку в межах його площини, то таке розташування забезпечує високоефективний геометричний каркас, на якому можна будувати. Зокрема, і як ми незабаром обговоримо значно докладніше, таке трикутне розташування структурних елементів є дуже ефективним для опору великим загальним деформаціям.

У більш загальному сенсі можна сказати, що ферма складається з множини таких трикутних конфігурацій, з'єднаних один з одним пліч-о-пліч. Їх можна знайти у вигляді опорної конструкції для простого скатного даху, або замість довгої горизонтальної балки, або стабілізації вітрового будинку за допомогою діагонально розтягнутої рами, або навіть прийнявши загальний вигляд. форму стратегічно вигнутої арки і т. д. Хоча ці приклади здаються дуже різними за формою та функціями, їх усіх поєднує те, що їх розміри та відносні пропорції такі, що можна створити легку, відкриту структурну підсистему, яка називається ферма з безлічі лінійних конструктивних елементів, з'єднаних між собою у стійкі трикутні конфігурації.

Щодо матеріалів, ми можемо сказати, що до того, як метали, такі як залізо, а потім і сталь, стали широко використовуватися для фермових конструкцій, дерево було основним матеріалом, який використовується для цієї конструктивної форми, як ми тільки що бачили на рельєфних зображеннях. римські мости на колоні Траяна. Враховуючи, що окремі елементи ферми зазнають сили або осьового розтягування, або стиснення (докладніше про це трохи пізніше), а також оскільки деревина досить добре працює в будь-якій з цих умов напруги, логічно, що це був матеріал. вибір для ранніх ферм; звичайно, про камінь не могло бути й мови, враховуючи його фундаментальну слабкість у напрузі. Таким чином, історично це, мабуть, залишило б проектування та складання деталей з'єднання ферм як, можливо, найбільшу проблему для будівництва таких типів конструкцій. У дев'ятнадцятому столітті досягнення в галузі виробництва матеріалів привели до помітного розвитку ферм з чавуну і особливо з кованого заліза, при цьому пластичне поведінка матеріалу останнього було кращим для розтягнутих елементів ферми. , з чавуном у результаті переважно обмежується його елементами стискання.

Зверху: (а) гратчаста кроквяна балка або міська ферма; (b) ферма, запропонована Лонг; в) ферма Хоу; (г) ферма Пратта; та (е) ферма Уоррена

Період інтенсивного розвитку ферм, спричинений переважно швидким розширенням мережі залізничної інфраструктури, призвів до появи інноваційних форм фермових мостів, які часто називали на честь їхніх винахідників. (Мал. 9.2.) Першим прикладом цього була так звана гратчаста ферма (а), також відома як міська ферма (1820), в якій діагоналі чергуються напрямків утворюють щільну мережу елементів (вони названі на честь Ітіеля. місто, 1784-1844 рр.). "Міст Європи", як видно на картині на ілюстрації, є класичним прикладом саме такої форми ферми. У 1830 році було введено так звану довгу ферму (b) з вертикальними елементами, в якій отримані прямокутники були скріплені діагоналями в обох напрямках (Стівен Лонг, 1784–1864). Аналогічна ферма була запропонована Вільямом Хоу (1803-1852) у 1838 році, пізніше модифікована в так звану ферму Хоу (с), в якій прямокутники скріплені одинарними діагоналями, що діють на стиск. Примітно, що форми ферм, запропоновані Лонгом і Хоу, були передбачені Палладіо у шістнадцятому столітті, але, мабуть, без розуміння того, як вони працюють конструктивно. У 1844 р. було запропоновано ферму Пратта (d) (Томас Пратт, 1812-1875); ця версія є точним зверненням ферми Хоу, в якій діагоналі орієнтовані у протилежному напрямку, внаслідок чого, як ми побачимо пізніше, сили розтягування виникають у діагоналях, а сили стиснення – у вертикальних елементах, а не у зворотному напрямку. у Хоу.

Нарешті, так звана ферма Уоррена (е) 1846 року, названа на честь Джеймса Уоррена (1808–1908), має діагоналі, що мають напрямки, що чергуються.

"Le Pont de l'Europe", Париж, Франція (1876 р.).

Картина історичного мосту, де видно гратчасті залізні ферми. Картина Гюстава Кайботта.

Триангуляція та внутрішня стійкість

Оскільки ферми будуються з низки стійких трикутників, ми спочатку докладніше розглянемо геометричні та конструктивні властивості цієї форми. На відміну від чотирикутника, який може легко змінити форму з квадрата або прямокутника в паралелограм, якщо залишити кути між сторонами, що перетинаються вільними для зміни, трикутники фіксуються в одну форму в той момент, коли всі три сторони з'єднуються разом. (Мал. 9.3.) Це чудова геометрична властивість, яка має великий потенціал для проектування конструкцій, оскільки однією з основних умов несучих конструкцій є їх здатність утворювати стійкі каркаси.

Прямокутник, з'єднаний штифтами, та трикутник, з'єднаний штифтами. Коли діють навантаження, прямокутник утворює механізм руйнування, тоді як трикутник буде стійким і по суті збереже загальну форму.

В ідеалі (але також зазвичай) окремі компоненти ферми є лінійними, а сили в них чисто стискають або чисто розтягують. А оскільки осьові силові елементи можуть використовувати матеріал на повну силу по всьому поперечному перерізу елемента - хоча, за загальним визнанням, іноді менше при стисканні, ніж при розтягуванні через небезпеку короблення, - шляхом створення конструкцій зі складання лінійних елементів у трикутній конфігурації. самим просуватимемо стратегію ефективності несучої здатності. Як правило, ми знаємо, що елементи при чистому розтягуванні та стисканні будуть тоншими та ефективнішими з точки зору матеріалу, ніж у випадку елементів, які в основному використовують поведінку вигину для сприйняття навантаження (наприклад, балки). Як ми побачимо, все це вказує на те, що ферми мають якості щодо легких і відкритих конструкцій, що зводять до мінімуму фізичну та візуальну вагу. (наприклад, іл. 9.8, 9.9.)

Фермове розташування кістки крила стерв'ятника забезпечує більшу жорсткість при невеликій кількості матеріалу, що максимально знижує вагу. Після Д'Арсі Томпсона.

Високий міст Джосо через річку Снейк, між округами Франклін та Уолла-Уолла, Вашингтон, США (1914).

Подібності та відмінності між фермою та балкою без отворів у її стінці із сталевих листів очевидні: обидві тут повинні нести однакове поперечне навантаження поїзда, але ферма може використовувати свою стратегічну трикутну конфігурацію своїх складових частин для того, щоб перекрити набагато більшу відстань між опорами.

Попередньою умовою наявності суто осьових зусиль у всіх елементах ферми є те, що вони в принципі повинні мати можливість вільно обертатися відносно один одного навколо своїх точок з'єднання: для цього потрібні найпростіші з'єднання, і це концепція, яку намагаються відтворити в реальності. Історично такі з'єднання виконувались буквально петлями між елементами, виконаними за допомогою сталевих штифтів, звідси і назва штифтового з'єднання або штифтового з'єднання або просто шарніра. Слід зазначити, що всі осьові сили в елементах, сполучених шарнірному з'єднанні, вважаються діючими безпосередньо через одну і ту ж точку; Таким чином, шарнірні з'єднання завжди вважаються вільними від таких згинальних моментів.

Проста ферма з шарнірними з'єднаннями та навантаженнями, що діють у точках з'єднання, в результаті чого на елементи діють суто осьові сили або розтягування (Т) або стиснення (С). Конструктивні елементи, що визначають висоту ферми, називають поясами; в даному випадку нижній та верхній пояси відповідно. Елементи, що з'єднують хорди, називаються діагональними та вертикальними елементами або, як правило, проміжними елементами.

Друга попередня умова для ферми, в якій в окремих елементах відсутні згинальні моменти, полягає в тому, що повинні бути додані всі зовнішні навантаження і мають бути передбачені всі опори в точках з'єднання, шарнірних з'єднаннях. (наприклад, рис. 9.4.) Якби це було не так, а натомість навантаження були б прикладені поперечно по довжині елементів, то кожен з них повинен був би реагувати вигином між точками з'єднання, що призвело б до набагато менш ефективної конструкції. Строго кажучи, звичайно, щоб фермова конструкція була повністю вільна від згинальних моментів, нам довелося б знехтувати власною вагою кожного елемента (тобто сила тяжіння дійсно діє по всій довжині всіх елементів ферми). Але, на щастя, вплив осьових зусиль в елементах ферми, викликане навантаженнями, що діють на штифтові з'єднання, зазвичай набагато більше, ніж будь-який вплив, який може на них вага окремих елементів, і тому воно зазвичай не дуже далеко від норми. Знак ідеалізувати речі таким чином. Таким чином, як загальний підхід ми ігноруватимемо ефекти локального вигину через власну вагу елементів ферми, і це зазвичай можна вважати досить точним, якщо власна вага всієї конструкції включена в загальне прикладене навантаження. розрахунки.

Встановивши ці фундаментальні характеристики квінтесенції ферми, тобто трикутні конфігурації складових елементів, які з'єднані штифтами разом і піддаються тільки осьовим зусиллям, а навантаження і реакції забезпечуються тільки в місцях з'єднання, ми тепер можемо уважніше придивитися до їхньої поведінки. Але спочатку кілька слів про номенклатуру. Для ферми, орієнтованої горизонтально, конструктивні елементи, які проходять по довжині вгору і вниз, називаються поясами ферми, тоді як елементи, що їх з'єднують, називають діагональними і вертикальними елементами або, в більш загальному сенсі, можуть називатися проміжними елементами.

Першим кроком у проектуванні та аналізі ферми є визначення того, чи дійсно запропонована конструкція є стабільним розташуванням елементів. Якщо вона повністю складається з трикутних форм - як це часто і навіть зазвичай буває - тоді, як ми обговорювали, ми можемо покладатися на цю геометрію як повністю достатню для забезпечення внутрішньої стабільності форми ферми. Існують також випадки, коли у фермі більше елементів, ніж суворо потрібно для її стійкості, можливо, з «зайвими» діагоналями і трикутним розташуванням елементів, що перекривається, (це називається статично невизначеною конструкцією ферми), але ми не будемо розглянути ці ситуації на цьому вступному рівні.

Як правило, ретельного візуального огляду ферми зазвичай достатньо встановлення характеру сил, що впливають на її різні елементи; тобто, чи ймовірно, що в них відбудеться стиснення чи розтягування, чи фактично елемент взагалі не має сили для конкретної умови навантаження.

Дім Леонхардта, гавань Ллойда, Лонг-Айленд, Нью-Йорк, США (1956).

Наприклад, ми можемо розглянути будинок Леонхардта (1956) на Лонг-Айленді, спроектований архітектором Філіпом Джонсоном (1906-2005). (Мал. 9.10.) Його відкрита скляна скринька ширяє над ділянкою та відкритим ландшафтом унизу і підтримується колонами, розташованими по двох осях, поперечних до орієнтації цього основного житлового простору. Між цими опорними лініями коробка вільно пролітає за допомогою двох простих сталевих ферм на всю висоту вздовж зовнішніх скляних стін, а поза зовнішньою колоною ці ферми консольно тягнуться до відкритого вигляду. Вертикальні навантаження діють на кожну ферму внаслідок власної ваги даху та підлоги, а також динамічного навантаження на підлогу та потенційних снігових навантажень на дах.

Які б навантаження не впливали на цю конструкцію в будь-який момент часу, вони неминуче призведуть до дуже незначної деформації всієї форми ферми в цілому, і саме очікування цієї реакції дозволяє нам передбачити, чи

різні елементи ферми діють на розтягування або стиснення. Щоб візуалізувати те, що відбувається, може бути корисно тимчасово представити ферму як горизонтальну балку і уявити, як ця вже знайома конструкція поводитиметься і прогинатиметься під поперечним навантаженням. По-перше, наприклад, уявімо, що у нас є вертикальне динамічне навантаження, що діє в точці посередині між опорами, і що це навантаження досить велике. (Мал. 9.5a.)

(a) Ферма будинку Леонхардта з навантаженням, що діє у середині прольоту. Імітуючи реакцію балки, очікувана деформація ферми дозволяє прогнозувати типи сил, що діють її елементи. T – розтяг, Z – стиск.

(b) Ферма будинку Леонхардта з навантаженням, що діє на вершину консольної частини ферми, деформованою формою її аналогічної балки та розрахунковими зусиллями на елемент ферми.

Результатом, очевидно, буде схильність уявної аналогічної балки провисати вниз між опорами, і з загальної точки зору ферма також деформуватиметься і поводитиметься аналогічним чином. Однак, оскільки форма ферменної конструкції складається з прямокутників (розкріплених по діагоналі), вони самі повинні деформуватися, щоб компенсувати загальне провисання ферми в середині прольоту. Вертикальний елемент у центрі ферми, очевидно, буде зрушений вниз по відношенню до рівня опор, а це означає, що обидві прямокутні панелі середнього прольоту ферми будуть деформовані паралелограми, які фактично змусять їх діагоналі розтягуватися. Подовження цих діагональних елементів свідчить, що у них діють сили натягу. У той же час два вертикальні елементи ферми безпосередньо над опорами колон трохи тягнуться всередину за рахунок натягу по діагоналях, що призведе до укорочення верхнього пояса. Таке скорочення, звісно, відповідатиме зусиллям стиснення, які у цих елементах.

Як другий приклад вважається, що велике навантаження діє саме по собі на кінець консольного кінця ферми. (Мал. 9.5b.) Таке навантаження змусить частину аналогічної уявної балки відхилитися вниз. При цьому зовнішня прямокутна панель ферми провисне на своєму кінці і деформується так, що діагональ стане довшою, що відповідає силі натягу, що діє в ній. Більш того, за аналогією з поведінкою аналогічної балки при згині вниз очікується, що нижня частина консольної ферми підштовхуватиметься до опори. Таким чином, можна передбачити, що стискаюча сила діятиме на елемент нижнього пояса ферми в цьому місці. З дещо більшими труднощами ми можемо також припустити, що для того, щоб консольна частина ферми зігнулася вниз, вертикальний елемент на опорі повинен буде трохи повернутись у напрямку консолі, яка, у свою чергу, залишить діагональ ліворуч від опори без іншого вибору, окрім як розтягнути відповідно до накладеного зміщення на її кінці.

Очевидно, що облік постійних навантажень ускладнить такий процес візуального аналізу, але в принципі він проходитиме за тим самим принципом. Завжди намагаючись уявити, який тип місцевої деформації (укорочення чи подовження) матиме місце у елементах ферми, можна зробити досить надійне передбачення типу сили, що можна очікувати у яких (т. перебувати у стані стиснення чи розтягування). Такий метод візуального контролю можна описати як якісне дослідження поведінки конструкції, і він може бути дуже корисним як для попереднього проектування конструкцій, так і для перевірки того, чи чисельний результат, отриманий яким-небудь іншим, більш складним способом, тому, що можна було б отримати. очікувати, що станеться.

Останнє, що слід зазначити в цьому короткому дослідженні ферм Leonhardt House: наш інтуїтивний аналіз для обох цих умов навантаження показав, що діагоналі його ферм були стратегічно орієнтовані на роботу як розтягуючі елементи для ключових умов навантаження, що означає, що вони могли бути (насправді вони були спроектовані як відносно тонкі структурні елементи в порівнянні з тим, якими вони були б, якби вони були орієнтовані по-іншому, працювали на стиск і, отже, піддавалися можливості руйнування через короблення. Тонка діагональ натягу, звичайно ж, чудово працює, коли майданчик та види крізь скляні стіни настільки вражають, що, безумовно, не є дизайнерською випадковістю. Наслідки такої стратегічної орієнтації діагоналей ферми, якими б не були задуми проекту, виходять далеко за межі цього прикладу. (наприклад, іл. 9.11.)

Інститут сучасного мистецтва, Бостон, Массачусетс, США (2006).

Консольні ферми підтримують об'єм верхнього поверху, який проектує основні приміщення художньої галереї у бік вод гавані Бостона. Скляна стіна на кінці консолі забезпечує безперешкодний вид на воду. Через їхню орієнтацію очікується, що діагоналі ферми діють на розтягування всередині консолі, що допомагає мінімізувати розміри поперечного перерізу цих елементів.

Рекомендована література:

1. Taranath BS Structural analysis and design of tall buildings: Steel and composite construction. - CRC press, 2016.
2. Underwood JR, Chiurini M. Structural design: A практичний guide для architects. - John Wiley & Sons, 1998.
3. Viljakainen M. The Open Timber Construction System // Архітектуральний дизайн. Wood Focus. - 1999.
4. Watts A. Modern construction handbook. - De Gruyter, 2013.

Питання для самоперевірки:

1. Дайте визначення, що таке «ферма»
2. Назвіть основний конструктивний принцип роботи ферми
3. За рахунок чого забезпечується стійкість та просторова незмінність ферми?
4. Назвіть основні види ферм

ЛЕКЦІЯ 4

ВАНТИ І МЕМБРАНИ

План лекції:

1. Португальська напруга
2. Підвішування на мотузці
3. Профілі тросів та зусилля тросів
4. Стабілізація та підтримка підвісних тросів
5. Відмінні маломасштабні системи
6. Кабельні мережі - сітка кабелів
7. Фрей Отто – майстер кабельних мереж
8. Тканинні мембрани – щільне переплетення волокон
9. Пневматичні конструкції
10. Ефемерні втручання

Португальська напруга

Португальський національний павільйон, Експо-98, Лісабон, Португалія (1998).

Підвісна конструкція даху складається з сильно натягнутих сталевих тросів, які укладені в тонку бетонну поверхню. Торцеві стінки забезпечують вертикальні та горизонтальні опорні реакції.

Архітектор: Альваро Сіза Віейра. Інженер-будівельник: Аруп.

Експо в Лісабоні в 1998 році включало дуже важливий архітектурний твір, який значною мірою спирався на унікальну форму і несучу здатність підвісного троса: Національний павільйон Португалії Альваро Сізи Віейри. (Мал. 11.2.) Це критий простір, значною мірою обмежений висячим дахом, який неглибоко задрапований між двома портиками, служив громадським майданчиком для офіційних церемоній Експо та критим входом усередину самого павільйону. Якщо дивитися з погляду цієї площі, з нависаючим дахом нагорі та її зігнутою тінню, окресленою на землі, обрамлений вид на сусіднє гирло річки та його нескінченну морську активність – справді надзвичайне видовище. І, простягнувшись на 70 м (230 футів) за такої мінімальної товщини, ця підвісна бетонна конструкція, звичайно ж, вражає сама по собі. При тому, що бетон здається натягнутим, але насправді це не так, а троси, що проходять через бетонну поверхню, є тут елементами натягу, цей бетонний «килим-літак» розкриває нові та несподівані ідеї про те, як вирішити конструктивні особливості такої «проста» структурна система.

Працюючи у співпраці з інженером-будівельником Сесілом Бальмондом з Arup, Сіза виключив тканинну мембрану для підвісного даху на сході частково через те, що така система потребує вторинної конструкції жорсткості (докладніше про цю тему буде розказано у розділі 11.4). особливість, яка б додала небажану візуальну глибину тонкому профілю даху. Натомість було обрано вигнуту бетонну плиту через її власну вагу, що робить її цілком здатною стабілізувати дах від будь-яких тенденцій підйому, викликаних вітром. Бетонна поверхня даху товщиною 200 мм (8 дюймів) підтримується серією підвісних тросів, які туго натягнуті над площею та закріплені у двох глибоких портиках з бетонними стінами, що обмежують відкритий простір. Щоб протистояти значному внутрішньому натягу сил натягу тросів даху, опорні портики включають ряд паралельних стінок зсуву, які вирівняні у напрямку тросів.

Слід зазначити, що бетонна поверхня даху не доходить до конструкцій з обох кінців, тим самим створюючи проміжки блакитного неба саме там, де очікується знайти дах, з'єднаний з її опорами. Однак ці зазори на поверхні дозволяють виставляти на загальний огляд короткі ділянки підвісних тросів з покриттям з нержавіючої сталі, тим самим показуючи і відзначаючи, як працює система даху. (Ілл. 11.3.) Але ця деталь, разом із прихованою промасленою обшивкою всередині бетонної поверхні, через яку проходять натягнуті троси, фактично дозволяє бетонному даху рухатися незалежно від її опор, що необхідно через значні ефекти температурних коливань і сейсмічної активності в цьому регіоні.

Національний павільйон Португалії.

Деталь, показуючи оголені сталеві троси біля опори. Крім того, кабелі кріпляться до горизонтальної балки, що проходить по верху стін, а також вирівнювання ряду зсувних стінок, які протидіють силам натягу в кабелях.

Стадіон Брага, Брага, Португалія (2004).

Підвісна конструкція, що проходить між двома трибунами та закриває їх. (Див. також Ілл. 11.12, 11.13.)

Архітектор Едуардо Соуто де Моура. Інженер-будівельник: AFA Associados

Рухаючись поруч із північним португальським містом Брага, знаходиться визначна пам'ятка: стадіон «Брага», місце збору футбольних фанатів. (Рис. 11.4.) Арена на 30 000 місць була спроектована архітектором Едуардо Соуто де Моура та інженерами-будівельниками AFA Associados для чемпіонату Європи з футболу 2004 року. Дві трибуни круто піднімаються довгими сторонами ігрового поля, тоді як кінці (зазвичай вигнуті і тому часто звані «вигинами») залишаються відкритими — один кінець звернений до

скелястого схилу, а з іншого відкривається вид на далекий краєвид. Соуто де Моура виступив проти традиційного розташування арени із сидячими місцями біля «вигинів», оскільки вважав, що спостерігати за грою з-за воріт було досить невдалим досвідом. Унікаючи такої конструкції, архітектор також створив надзвичайно відкриту футбольну арену, де навколишній ландшафт видно з будь-якого місця.

Щоб захистити глядачів від сонця та дощу, було збудовано унікальну конструкцію даху, що складається з двох частин, яка чітко підтримується серією підвісних тросів, натягнутих між вершинами двох трибун. Як і в Лісабоні, бетонні плити гарантують, що на висячу конструкцію даху завжди буде впливати певна вага, що запобігатиме її розгойдування на вітрі (і, звичайно, частково захистить глядачів від негоди). У цьому випадку плити відлиті на гофрованому металевому настилі, який знаходиться поверх підвісних тросів, але це робиться тільки над місцями для сидіння, таким чином троси залишаються повністю відкритими для огляду ігрового поля. Соуто де Моура спочатку припустив, що цей дах також буде безперервною бетонною плитою, подібною до тієї, яку Сіза спроектував у Лісабоні, але після візиту до Перу, щоб відвідати мотузкові мости інків, він натомість обрав структурну форму, натхненну пов'язаним культурним артефактом. власним набором кабелів/волокон: великий ткацький верстат із двома необробленими шматками тканини з кожного боку.

Уздовж східної сторони стадіону ряд похилих назовні бетонних стін піднімається на приголомшливу висоту 47 м (154 фути). (Див. малюнок у розрізі стадіону, рис. 11.12.) Звичайно, нахил цих стін стратегічно реагує на сильний внутрішній натяг натяжних тросів даху, а також зручно відповідає необхідному нахилу багаторівневих сидінь. Між цими вертикальними плоскими стінами ефектно оголюються консольні сходи, якими ходи глядачів піднімаються на свої місця, повторюючи вигляд віруючих на монументальних сходах в Escadaria de Bom Jesus. На західній стороні стадіону «Брага» існують зовсім інші просторові умови: конструкція трибуни розташована навпроти викопаної скелі на схилі пагорба, що створює вражаючий внутрішній простір між нижньою частиною бетонної конструкції для сидіння та підірваною гранітною скелею.

Нарешті, слід зазначити, що водовідведення з поверхні підвісного даху, такий як цей, пропонує свій власний набір цікавих дизайнерських завдань та можливостей. Через двосекційну конфігурацію даху на стадіоні «Брага» Соуто де Моура зіткнувся з перспективою стоку дощової води прямо на ігрове поле, що було явно неприйнятним. Натомість жолоби розташовані вздовж внутрішніх країв поверхонь даху, які злегка нахилені до одного кінця стадіону.

Таким чином, дощова вода стікає з даху в двох точках в ефектно виступають бетонні жолоби, з яких вона потім прямує вниз по схилу пагорба звивистим відкритим каналом.

Підвішування на мотузці

гамак; проста підвісна конструкція. Різні зміни навантаження впливають форму конструкції підвіски.

Багато чого можна навчитися, відпочиваючи у гамаку (Ілл. 11.5); насправді, можливо, це не лише розваги, принаймні для тих із нас, хто цікавиться структурами. Насамперед, ми повинні визнати, що для підтримки гамака нам потрібно мати два дерева або аналогічні жорсткі вертикальні конструкції на його кінцях. Деревина повинні бути досить великими, щоб наша вага в гамаку не змушувала ці опори занадто сильно прогинатися всередину, через що наше підвісне ліжко може надмірно прогинатися і, можливо, торкатися землі. По-друге, з досвіду ми знаємо, що гамак є підвісною конструкцією з брезента або мотузки, і що відсутність жорсткості є проблемою, коли ми намагаємося в нього забратися: гамак просто змінює форму, коли ми намагаємося звиватися або розслаблятися. наш шлях до нашої улюбленої розслаблюючої пози. Коли ми спочатку сидимо в ньому, гамак розтягується, утворюючи дві досить прямі лінії від нашого тіла до опор. Однак, освоївши операцію залазу всередину, ми помічаємо, що гамак поступово змінює форму з V-подібної на неглибоку U-подібну, коли ми лягаємо. Дійсно, коли маса нашого тіла досить рівномірно розподіляється по довжині гамака, він приймає плавну вигнуту вгору увігнуту форму, досить зручну для відпочинку і навіть для сну. наші коліна вгору (за умови, що ми не випадаємо), ми знову змінимо форму гамака і маємо пристосуватися до іншого положення для відпочинку. Крім того, якщо хтось підійде і підштовхне нас, гамак буде вільно хитатися. Ця нескінченна адаптованість гамака може розглядатися як перевага для тимчасового спального місця (запитайте будь-якого моряка!), але до нестачі стійкості потрібно ставитися серйозно, якщо той самий конструктивний принцип використовуватиметься в контексті будівель. що нас тут насамперед цікавить. Ми повернемося до цього питання стійкості висячих конструкцій у розділі 11.4. Але перш ніж залишити це описове вивчення показників і поведінки гамака, слід належним чином відзначити і підкреслити одне з його незаперечних переваг: його вага, вірніше, його відсутність. Гамак здатний підтримувати людей будь-якої форми та маси тіла, і він може робити це, будучи дуже легким. Фундаментальна причина цього полягає в тому, що гамак працює за рахунок сил натягу, а, як ми вже бачили в

розділі 6, натяг - це дуже ефективний спосіб перенесення вантажу. Зверніть увагу, що основна відмінність між натяжними конструкціями, що розглядаються тут, і конструкціями з глави 6 полягає в тому, що в останньому випадку навантаження прикладалися в осьовому напрямку, т. елементи, що працюють на розтяг, коли навантаження прикладені поперек їх поздовжньої осі.

Застосовуючи спостереження цього неформального обговорення нашого досвіду в гамаку до аналогічної системи підвісних тросів, ми можемо зробити такі загальні твердження, які застосовуються до таких конструкцій:

- Підвішена мотузка, трос або ланцюг потребують досить жорстких опор на кінцях; тобто які не дуже сильно зміщуються в проліт.
- Вантова конструкція сама по собі не має жорсткості на вигин, і, отже, вона матиме форму відповідно до розташування та величини навантажень, які вона підтримує.
- Підвісний трос змінить свій профіль, якщо додані до нього навантаження змінять розташування.
- Найчастіше доводиться вирішувати проблему недостатньої жорсткості троса, щоб конструкція не переміщалася надмірно.
- Підвішена тросова конструкція також принципово нестійка у поперечному напрямку.
- Висячі вантові конструкції працюють в основному на розтяг, тому вони досить легкі.

Традиційний кочовий намет берберів, Марокко.

Мотузковий міст інків в Андах (дев'ятнадцяте століття).

Видно профіль підвісного троса, відчувається його «живий» характер. Якірне кріплення вагою видно ліворуч.

Гравюра Родольфо Кронау.

Історично склалося так, що ці основні характеристики підвісних тросових конструкцій були визнані та застосовані у таких (майже) первинних конструкціях, як намети та народні мотузкові мости. (наприклад, III. 11.6, 11.7.)

Наприклад, вважається, що Колізей в Римі (закінчений в 80 р. по Р.Х.) пропонував глядачам сховатися від палючого сонця за допомогою мотузки і тканинного даху, що забирається.

Але до нашого часу, звісно, це не збереглося.

На парусних судах високоефективний набір мотузок і тканин створюється з єдиною метою: ефективно ловити вітер і створювати рух уперед. Однак якою б ефективною не була така система для використання енергії, необхідно визнати, що її геометрія є абсолютно нестабільною; тобто

коли сила вітру дме на вітрила, вони випинаються в натягнуті вигнуті форми, але коли вітер припиняється, вітрила слабшають. Цілком очевидно, що це не та ситуація, яку ми хочемо відтворити в будівельних конструкціях, але в решті-решт ми побачимо, що шляхом попереднього натягу таких парусоподібних тканинних поверхонь у особливу вигнуту геометрію ми можемо зробити такі вражаючі форми досить жорсткими та стійкими, щоб вони могли, по суті, мають бути включені до сфери архітектури (розділи 11.6 та 11.8).

Висячий міст Фолл-Крік, кампус Корнельського університету, Ітака, Нью-Йорк, США (1961).

Підвісні троси тягнуться через ущелину з крутими схилами, а уривчасті вертикальні підвіски підтримують ефектну пішохідну доріжку. Стійкість вантового профілю забезпечують ферми жорсткості лише на рівні палуби, що утворюють перила; проте, конструкція все ще досить активна, і чітко відчуваються вібрації кроків.

Інженери-будівельники: професори С. К. Холістер та Вільям Макгуайр.

Ферми та інші стратегії також використовувалися для стабілізації підвісних канатних конструкцій як мостів, так будівель. (Ілл. 11.8.) Але тепер ми забігаємо далеко вперед; спочатку нам потрібно повернутися і докладно розглянути, як працюють підвісні троси і що потрібно, щоб зробити їх застосовними у контексті архітектури.

Профілі тросів та зусилля тросів

Кабель із точковим навантаженням. Формуються прямі кабельні лінії.

Як обговорювалося у зв'язку зі знайомим прикладом гамака в попередньому розділі, висячий підвісний трос за своєю природою є гнучким і змінює свою форму при зміні розподілу навантажень, що додаються до нього. Наприклад, при підтримці одностовового навантаження кабель набуває V-подібної форми, де нижня частина літери «V» є точкою, в якій знаходиться навантаження, а літера «V», очевидно, симетрична, якщо навантаження діє в середині прольоту. . (Рис. 11.1.) Відстань по вертикалі між нижчою точкою троса та рівнем опор називається провісом, f . Якщо це точкове навантаження перемістити до однієї з опор, трос скоригує свій профіль, утворюючи косу букву V, і провисання зменшиться.¹ Пізніше ми побачимо, що ця зміна профілю також тягне за собою збільшення зусиль троса. Якщо додамо до кабелю ще кілька точкових навантажень, його форма стане багатокутною; т. е. кабель утворює прямі лінії між навантаженнями, і скрізь, де діє точкове навантаження, відбувається зміна нахилу. (Мал. 11.2а.)

трос, що піддається (а) двоточковому навантаженню,

При цьому ми припускаємо, що вага троса досить мала в порівнянні з величиною навантаження; якщо це не так, кабель також матиме тенденцію злегка згинатися між точками точкових навантажень. Уявіть, тепер ми ще більше збільшуємо кількість точкових навантажень. Кількість змін напрямку вздовж кабелю збільшуватиметься, а прямі лінії між точковими навантаженнями ставатимуть усе коротшими і коротшими. (Наприклад, рис. 11.9.)

Білетна каса Букінгемського палацу, Лондон, Великобританія (1995).

Вертикальні підвіски, що підтримують навіс із тканинної мембрани, впливають на основний підвісний трос між опорами щогли в чотирьох точках, у результаті він приймає багатокутний профіль. Мембранна конструкція, натягнута між вішалками та системою розпірок та стяжок, захищає обшите деревом касу.

Коли стан навантаження наближається до того, що ми раніше визначили як розподілене навантаження, кабель має тенденцію ставати безперервно вигнутим, а не багатокутним. Для рівномірно розподіленого навантаження (UDL) форма кабелю фактично стає параболічною. (рис. 11.2б., наприклад, рис. 11.10.)

(б) навантаженню, рівномірно розподілене по прольоту, надає тросу форму параболи

Кліфтонський підвісний міст, Брістоль, Великобританія (1864).

У межах основного прольоту «троси», що складаються зі з'єднаних між собою ланцюгоподібних сегментів, мають в основному параболічний профіль через рівномірно розподілене навантаження від безлічі близько розташованих вертикальних підвісок, що підтримують настил, хоча значна власна вага ланцюгів також може також викликати певну тенденцію до ланцюгового профілю.

Якщо навантаження розподілене іншим чином, тобто розподілене не рівномірно по прольоту, а рівномірно по довжині троса, то форма перетворюється на те, що ми називаємо ланцюгову лінію (рис. 11.2с).

(с) навантаження, рівномірно розподілене по кривій надає тросу форму ланцюгової лінії

Ця конфігурація навантаження зазвичай пов'язана з власною вагою кабелю, а профіль контактної мережі формується, коли кабель або ланцюг вільно висять. Радіально доданий набір навантажень змусить кабель набути напівкруглої форми. (Мал. 11.2г.)

(d) радіальне навантаження, що надає кабелю форму кола

Спільним у кожному з цих випадків є те, що, незважаючи на різну форму, троси несуть навантаження лише за рахунок сил натягу, і що вони

роблять це за потребою. Кабелі, мотузки та ланцюги не мають іншої конструктивної поведінки, тому що всім їм не вистачає геометричних властивостей, які дозволили б їм діяти як елементи, що згинаються або стискаються. Такі конструкції, які реагують на конкретну ситуацію з навантаженням, створюючи суто осьові сили у своїх елементах (чи то при розтягуванні чи стисканні), називаються фунікулярними конструкціями.

Так як внутрішні сили в тросовій конструкції завжди чисто розтягують і ці сили обов'язково завжди спрямовані вздовж лінії троса, ми можемо в результаті порівняно просто спостерігати обов'язкову залежність між провисанням троса і величиною сили його натягу. Розглянемо, наприклад, силовий багатокутник сили натягу на кінці троса поруч із його опорою. (Мал. 11.3.)

Вплив провисання/нахилу кабелю на реакції опори: коли кабелі несуть вертикальні навантаження, зменшення провисання означає велику реакцію горизонтальної сили, отже, збільшується загальна сила натягу. Реакція вертикальної сили залишається незмінною.

Оскільки вертикальна рівновага всієї системи вимагає, щоб вертикальна складова опорної реакції була постійною (незалежно від провисання троса), загальна сила натягу троса повинна змінюватися в залежності від кута, при якому трос зустрічається з горизонталлю у опори. Отже, чим більше провисання, тим менша горизонтальна складова сили, необхідна для замикання багатокутника сил, і тим меншою буде загальна сила натягу троса. І навпаки, менше провисання відповідає необхідності більшої горизонтальної опорної реакції та більшої сили натягу троса.

Діаграма багатокутників сили, що зображує зміну величини сили натягу щодо зміни провисання/нахилу кабелю: тобто чим менше провисання, тим більша сила.

Оскільки трос із меншим провисанням означає, що на нього діятимуть великі сили (мал. 11.4), отже, необхідно, щоб він був товстішим, що, у свою чергу, означає, що з цієї причини він важитиме більше. З іншого боку, кабель з великим провисанням і, отже, меншими зусиллями визначення є довшим кабелем і, отже, також важитиме більше з іншої причини. Отже, для ефективності форми шукаємо компроміс між відносними пропорціями провисання до прольоту; для вантових дахів співвідношення між ними зазвичай знаходиться в діапазоні

$$1/15 < f/L < 1/10$$

де f = провисання та L = проліт. Для мостів ми могли б очікувати більшого провисання з коефіцієнтами в діапазоні від $1/12$ до $1/8$. Якщо f/L значно більше $1/8$, ситуація може вимагати невиправдано високих опорних

конструкцій. З іншого боку, дуже мале співвідношення між провисанням і прольотом може призвести до умови, за якої сили троса можуть стати дуже великими і, можливо, достатніми, щоб призвести до значних пружних деформацій троса. Тому зазвичай шукають оптимальне співвідношення між цими геометричними розмірами у щойно запропонованому діапазоні.

Міст Золоті Ворота, Сан-Франциско, Каліфорнія, США (1937).

Відносні пропорції прольоту до провису очевидні, як параболічний профіль троса, викликаний рівномірно розташованими підвісками.

Приклад може втілити це в життя: якщо ми розглянемо міст Золоті Ворота в Сан-Франциско (мал. 11.11), його основний проліт складає 1280 м (4200 футів), а провіс кабелю становить близько 152 м (500 футів), що означає коефіцієнт провисання -прольоту $1/8,4$.

Крім цих загальних спостережень про те, як відносні величини зусиль підвісних тросів змінюються в залежності від величини провисання, ми також можемо точно визначити величини і розподіл сил натягу в підвісних тросових конструкціях. Наприклад, трос, що підтримує точкове навантаження P у середині прольоту, може бути проаналізований відповідно до тих самих принципів рівноваги, які описані в контексті балок і ферм відповідно. Вимога врівноважування вертикальних сил у найнижчій точці, де розташоване навантаження P , дозволить встановити величину сили натягу в тросі, і, таким чином, ми можемо перевірити зроблене вище спостереження, що трос, що утворює менший кут з навантаження (відповідне більшому провисанню) буде меншим. силі натягу. (Див. рис. 11.4.) У разі одноточкового навантаження сила натягу, очевидно, буде постійною по всій довжині троса.

Діаграма вільного тіла половини кабелю, що під дією рівномірно розподіленого навантаження w .

Однак, якщо ми хочемо розглянути кабель, який підтримує UDL, картина трохи ускладнюється. Тут ми задовольнимо розглядом троса, дві опори якого розташовані на одній висоті, при цьому трос має довжину L і має провисання f під дією розподіленого навантаження w . (Рис. 11.5.) Сила натягу троса в точці максимального провису (в середині прольоту) називається T . Для рівноваги опорні реакції повинні мати такий самий напрям, як дотичні троса в двох точках. точки опори, і видно, що вони складаються з горизонтальної та вертикальної складових сили, H та V , відповідно.

Горизонтальна рівновага діаграми вільного тіла, що зображує половину троса, показує, що:

$$H = T$$

Вимога вертикальної рівноваги цієї частини вантової конструкції призводить до:

$$V = wL/2$$

Оскільки сила натягу T у нижній точці троса діє горизонтально, вона буде частиною наведеного вище рівняння вертикального рівноваги. Крім того, рівновага моментів щодо опори дає:

$$(wL/2)(L/4) - (T)(f) = 0$$

$$T = wL^2/8f$$

Оскільки $H = T$, величина горизонтальної складової на опорі також визначається цим рівнянням.

$$R^2 = H^2 + V^2$$

$$R^2 = (wL^2/8f)^2 + (wL/2)^2$$

Оскільки на трос не діють горизонтальні навантаження, складова горизонтальної сили H постійна по всій довжині троса і знаходиться в рівновазі з реакцією горизонтальної сили на опорах. У нижній точці троса (яка знаходиться в середині прольоту для симетричного випадку) ця горизонтальна сила є єдиним компонентом сили троса і, таким чином, являє собою загальну силу натягу троса в цій точці. Іншими словами, це мінімальне значення сили натягу троса будь-де по його довжині. В інших місцях завжди є вертикальна складова сили, яка змінюється по довжині і має найбільше значення на опорах, де ухил кабелю найбільший. Таким чином, ми можемо зробити висновок, що загальна сила натягу троса також найбільша на опорах і визначається наведеним вище рівнянням.

Стадіон Брага, Брага, Португалія (2004).

Креслення перерізу.

Згадуючи ситуацію зі стадіоном «Брага», яку ми обговорювали і чие зображення у розрізі показано на ілюстрації 11.12, тепер ми можемо зробити приблизний розрахунок деяких основних сил тросів у цій конструкції, щоб побачити рівні стресу, з якими вони повинні впоратися. (Однак при цьому слід розуміти, що контроль динамічних впливів вітру також є життєво важливим для стійкості та безпеки такого даху, але теоретичні основи для можливості включення такого аналізу поведінки конструкції виходить за рамки цього курсу.)

Підвісні троси на стадіоні «Брага» розташовані парами на відстані 3,75 м один від одного та закріплені у плитах на кожному кінці, які діють як горизонтальні балки між вершинами вертикальних опор стіни/пірсу. Як згадувалося раніше, унікальність вантової конструкції цього стадіону полягає в тому, що вона підтримує навантаження лише у зонах покриття трибун. Таким чином, підвісні троси в цьому випадку фактично не відчувають розподіленого навантаження по всій своїй довжині, а мають навантаження, що діють тільки на близькі до двох опор частини прольоту. На додаток до ваги бетонних плит

існують також точкові навантаження, що діють на кабелі, що створюються поперечними сталевими фермами на зовнішньому кінці критих площ даху. Ці ферми діють як балки жорсткості для системи даху та забезпечують зручне місце для встановлення прожекторів та гучномовців для пожвавлення подій внизу, а також для встановлення дренажного жолоба для відведення дощової води.

Для наших цілей тут буде достатньо розглянути лише ситуацію, коли на підвісну систему діють постійні навантаження від даху, а самих тросів ми знехтуємо. Враховуючи ці полегшення, можна вважати, що троси у відкритій частині між критими дахами практично не несуть поперечного навантаження, в результаті чого їх форма може бути апроксимована прямою горизонтальною лінією. Ця частина прольоту має розміри 88,4 м, у результаті довжина «а» двох критих частин даху становить 57,3 м кожна, а загальний проліт становить 203 м.

Стабілізація та підтримка підвісних тросів

- **Методи стабілізації кабелю**

Як ми описали щодо гамака, підвісні конструкції самі по собі не мають жорсткості на вигин, і тому вони потенційно вразливі для навантажень, величина і розподіл яких змінюються протягом більш коротких або триваліших періодів часу; наприклад, снігові навантаження на дах ілюструють тип гравітаційного навантаження, яке робить саме це, рухаючись вітром. На додаток до розуміння впливу асиметричних і динамічних навантажень, що змінюються, важливо відзначити, що динамічна реакція такої конструкції на вітер також може мати вирішальне значення для визначення того, що є конструктивно необхідним для стабілізації конструкції вантового даху. Вітрові навантаження постійно змінюються і можуть легко привести такий висячий дах у рух, створюючи силу всмоктування на верхньому боці даху, величина якого може перевищувати зазвичай невелику власну вагу системи. Ця умова призведе до того, що дах випиратиме вгору, що різко змінить її форму. Цей новий профіль даху, у свою чергу, по-різному реагуватиме на вітрове навантаження, і форма, ймовірно, знову зміниться, встановивши циклічний процес, який приводить дах у великомасштабне тріпотіння. І крім необхідності стабілізувати такі явно небажані великомасштабні геометричні зміни, вкрай важливо, щоб власні частоти коливань висячої конструкції були спроектовані таким чином, щоб вони сильно відрізнялися від частот будь-яких можливих поривів вітру, оскільки ця умова може викликати так звану

резонансну поведінку, яка може досить швидко привести до власних надмірних та сильних вібрацій.

Обвалення в 1940 році мосту Такома-Нарроуз у штаті Вашингтон у США є добре відомою структурною аварією, викликаною саме цим ефектом, і його широко доступний відеозапис вельми переконливо зображує крутильні коливання настила містка, що постійно посилюються, перш ніж зрештою катастрофічно вийде з ладу. Свіжий приклад проблем, які може викликати динамічна реакція конструкції, спостерігався в день відкриття мосту Міленіум у Лондоні (мал. 5.3), що призвело до його короткочасного закриття та модернізації; з того часу міст працює без подальших проблем.

Хоча аварія Tacoma Narrows може бути крайнім прикладом, зручним для ілюстрації, урок залишається ясным: необхідно вжити заходів для запобігання надмірному переміщенню та вібрації підвісних конструкцій. На щастя, є відносно прості способи досягнення цієї мети. Однак, кожен з доступних варіантів впливає на загальну структурну форму і візуальне вираження по-своєму, і тому вони будуть мати значні наслідки для дизайну, якщо розглядати їх у контексті архітектури.

Принципи стабілізації підвісних кабельних систем (а) шляхом додавання ваги, (б) шляхом з'єднання або формування жорстких конструктивних елементів, або за допомогою двотросової системи з тросами зустрічного вигину, (в) нижче основного троса, (г) над ним, або (д) внахлест з основним кабелем (Тобто частково зверху і частково знизу).

Один з фундаментальних способів стабілізації та надання жорсткості підвісним конструкціям, з яким ми вже знайомі з попередніх прикладів у цьому розділі, полягає в тому, щоб просто додати ваги до системи, тим самим протидіючи будь-яким тенденціям підйому, викликаним вітром або динамічним асиметричним навантаженням. (Рис. 11.6а.) Додаткове статичне навантаження має підтримуватися безпосередньо або підвішуватися на тросовій системі; як ми бачили, така додаткова вага може виходити від вторинних конструктивних елементів, які перекривають проміжки між паралельними підвісними тросами (наприклад, плити у разі обох португальських конструкцій, що обговорюються в розділі 11.1), та/або може виходити від додаткового баласту, який розміщується поверх поверхні даху (як буде видно у випадку з гаражем Nohenems, що обговорюється у розділі 11.5). Власна вага даху також діє на попереднє натяг тросів, тим самим покращуючи їхню реакцію з погляду природних періодів вібрації даху. Крім цієї додаткової переваги, основний підхід полягає в тому, щоб просто додати системі мертвий вантаж, що може здатися контрінтуїтивною стратегією для

використання зі структурною системою, призначеною для використання ефективності матеріалів.

Другою важливою стратегією стабілізації підвісного даху є з'єднання її з жорсткими конструктивними елементами, які можуть діяти як вигнуті балки або плити, забезпечуючи жорсткість на вигин, так і іноді вага вантової конструкції. (Рис. 11.6b.) У випадку лісабонського павільйону жорсткість безперервного бетонного «килима-літака» опиратиметься вигину поверхні і, отже, вона здатна зробити певний внесок у загальну стійкість підвісної системи. Для даху Королівського центру регати в доці Альберта підвісний дах із листової сталі надає поперечної жорсткості за рахунок жорстких на вигин Т-подібних сталевих ребер. (Рис. 11.14.) У підвісних мостах необхідна жорсткість вантової системи зазвичай забезпечується крайовими фермовими балками або конструкцією настилу моста (наприклад, див. пішохідний міст Корнельського університету та міст Золоті Ворота, показані раніше на рис. 11.8 та рис. 11.11 відповідно), та рис. це також іноді можна виявити в будинках, наприклад, у колишній будівлі Федерального резервного банку в Міннеаполісі, яка показана на ілюстрації 11.15 у процесі будівництва.

Королівський центр регати Альберт-Док, Лондон, Великобританія (1999).

Підвісний дах із сталевих листів з жорсткістю, що забезпечується стійкими на вигин Т-подібними профілями, стрижень Т-подібного профілю звернений вгору.

Маркет Плаза; раніше будівля Федерального резервного банку, Міннеаполіс, Міннесота, США (1973).

Ферма жорсткості верхнього рівня використовується для стабілізації профілю підвісних тросів, що підтримують перекриття цієї будівлі. Вертикальна опора для кабелів забезпечується двома бетонними торцевими стінками ядра; Ферма жорсткості діє також як горизонтальна розпірка стиснення, утримуючи вершини стін від прогину всередину.

У таких випадках відбувається те, що будь-які потенційні рухи кабелю обмежуються тим, що кабелі прив'язані до жорстких елементів на вигин, що змушує кабелі слідувати набагато більш обмеженою гнучкістю цих елементів. Вторинною перевагою жорсткості таких елементів на вигин є те, що вона дозволяє розподіляти точкові навантаження на більш довгий сегмент вантової конструкції, внаслідок чого зменшуються локальні деформації вант.

Третій загальний варіант стабілізації підвісних тросових систем включає використання двох тросів, тому називається системою з подвійним тросом; один із цих тросів є основним несучим підвісним тросом, а другий - перевернутим стабілізуючим тросом, який по довжині уривчасто з'єднаний з

основним тросом. (Рис. 11.6с; наприклад, троси такої протилежної кривизни чітко видно на моделі системи підвісного даху конференц-центру імені Лоуренса в Піттсбурзі (рис. 11.16) і в системі стабілізації скляної стіни муніципального будинку округу Фінгал у Дублін.) Будь-яка тенденція навантаженням одного з тросів у такій системі негайно протидіятиме викривленню його протилежного аналога. Два троси часто розташовуються в одній і тій же вертикальній площині (хоча, звичайно, можливі інші розташування, про що буде сказано нижче), але зазвичай вони мають різну кривизну, щоб мати різні власні частоти. Ця різниця у кривизні також означає, що сили натягу у двох тросах будуть різними, відповідно до нашого попереднього обговорення ефектів різних провисів тросів.

Конференц-центр Девіда Л. Лоуренса, Піттсбург, Пенсільванія, США (відремонтований у 2003 р.).

Криволінійний профіль підвісних тросів, що підтримують легкі ферми даху, стабілізований контркривими тросами знизу; два комплекти тросів мають помітно різну кривизну та з'єднані один з одним за допомогою вертикальних натяжних стяжок. Тросові кріплення також очевидні і створюють загальну систему, що самобалансується. Натхненням до створення цієї системи послужили численні сусідні висячі мости Піттсбурга.

Рекомендована література:

1. Smith P. Structural design of buildings. - Wiley Blackwell, 2016.
2. Stalnaker J., Harris E. Structural design in wood. - Springer Science & Business Media, 1997.
3. Tanner JE та ін. Masonry структурний дизайн. - McGraw-Hill Education, 2017.
4. Taranath BS Structural analysis and design of tall buildings: Steel and composite construction. - CRC press, 2016.

Питання для самоперевірки:

1. Назвіть основні зусилля та напруги, які діють на вантові конструкції
2. Дайте визначення мембранним системам
3. Дайте визначення вантовим конструкціям

ЛЕКЦІЯ 5

АРКА ТА СКЛЕПІННЯ

План лекції:

1. Новий погляд на кам'яну арку
2. Форма арки як історичний індикатор
3. Еволюція форми арки
4. Розуміння поведінки арки
5. Підвішувати чи не підвішувати?
6. Сили стиснення та згинальні моменти в арках
7. Фундамент Арки
8. Ринок Санта-Катерина – дах злітає
9. Сховище та світло

Церква Падре Піо, Сан-Джованні-Ротондо, Італія (2004 р.).

Арки, що перекриваються, зроблені з декількох великих кам'яних сегментів, утворюють характерний образ церкви; сегментований дах підпирається сталевими стійками; кам'яна бруківка поєднує внутрішній та зовнішній простір.

Падре Піо (1887–1968) був містичним монахом-капуцином, який став настільки відомий своїми кровоточивими стигматами та зцілюючими здібностями, що відносно швидко став святим у 2002 році. Південне італійське місто Сан-Джованні-Ротондо було його домом і місцем його останнього упокою. місце. Оскільки святість у сучасній Італії є серйозною справою і може залучити сотні тисяч вірян, архітектору Ренцо Піано було доручено спроектувати паломницьку церкву Падре Піо, щоб задовольнити духовні та практичні потреби такого сучасного масового шанування. (Ілл. 12.2.)

Паломники, що прямують маршрутом процесії, йдуть уздовж стіни вузької міської вулиці і несподівано опиняються на великому відкритому просторі. Зліва відкриваються краєвиди на горбисті зелені пейзажі Апулії та далеке узбережжя Адріатичного моря. Прямо попереду знаходиться вимощена каменем площа, яка спускається до передньої частини церкви; кам'яне мощення потім перетворюється на церкву, поєднуючи зовнішній і внутрішній простір і створюючи відчуття відкритого будинку.

Церква Падре Піо.

Загальне спіральне розташування арок фокусує простір та спрямовує циркуляцію до центрального вівтаря.

Модель Cornell Еріка Волмера.

Загалом розташування плану слідує спіралі, тонко залучаючи людей глибше до центру внутрішнього простору. (Ілл. 12.3.) Але насправді саме структурна форма цієї церкви є найбільш характерною і причиною нашого власного паломництва до неї, що складається з масивів кам'яних арок, що перекриваються, що розходяться променями від центрального вівтаря, де спочивають останки падре. Піо зараз брехня.

Незважаючи на те, що освоєння мистецтва оформлення арок із каменю має у Європі дуже давні традиції, використання цього матеріалу для цієї мети сьогодні для нас дещо несподівано. Однією з відповідних точок порівняння структури церкви в Сан-Ротондо можуть бути готичні собори з контрфорсами, що ширяють: як і майстри-будівельники цих споруд свого часу, дизайнери церкви Падре Піо також використовували деякі з найпередовіших доступних будівельних технологій. ім. Кожна арка Падре Піо складається з 50 різних сегментів каменю, які були видобуті з місцевого блідого априценського мармуру, але в даному випадку кожен камінь був спроектований і вирізаний з використанням цифрових технологій, а не віковими методами. Таким чином, каміння арок можна було змусити витримувати стиснення виключно рівномірно один щодо одного, і вони могли мати незалежні розміри та форму з невеликими додатковими витратами. Крім того, тонкі варіації цифрового процесу різання каменю дозволили формам арок дотримуватися форм похилих парабол, а також стало можливим велика різноманітність прольотів для цього найбільш традиційного з будівельних матеріалів та конструктивних форм — з деякими досягненнями. приголомшливі 50 м (160 футів). (Мал. 12.4.)

Після встановлення кам'яні сегменти кожної арки попередньо напружуються та стабілізуються проти наслідків землетрусів за допомогою внутрішніх тросів із нержавіючої сталі.

Використання каменю як для арок, так і для підлоги надає церкві послідовну просторову єдність і пряме посилення на місцеві будівельні традиції; інші натуральні і довговічні матеріали, використані в проекті, - це клеєний брус модрина для балок даху і попередньо окислена мідь для самого даху, сегменти яких перекриваються на парах сталевих стійок, які виступають вгору з арок, пропускаючи промені. денного світла, що проникає глибоко у внутрішній простір. Рання робота над церквою Падре Піо була однією з останніх з кількох унікальних творчих спільних робіт архітектора Ренцо Піано та інженера-будівельника Пітера Райса (1935–1992), і вона відображає попередній досвід та сучасні експерименти Райс із найтрадиційнішими будівельними матеріалами та технологіями. структурні типи: кам'яна арка 1 (ми коротко зустрінемося з одним із цих ранніх «експериментів» трохи пізніше в цьому розділі (див. рис. 12.19).)

Форма арки як історичного індикатора

Арка є однією з найвідоміших і основних структурних форм і має довгу і видатну історію. Конкретні деталі форми арки, з іншого боку, розвивалися по-різному в залежності від культурного контексту та розуміння її поведінки під навантаженням упродовж століть.

Витоки арки губляться в давніх культурах уздовж річок Ніл, Тигр і Євфрат за століття до писемного часу. Однак у зерносховищах Луксора в Єгипті можна знайти довгі склепінчасті склади, побудовані з глиняної цегли, які простояли близько 3400 років. (Ілл. 12.5.)

Зерносховища Рамессеума, Луксор, Єгипет (приблизно 1400 до н.е.). Засипання щебенем над стінками склепін із глиняної цеглини допомагає стабілізувати форму; віщує обране. Римська техніка.

Чудова історична пам'ятка арочної форми, Так-і Кісра, стоїть у забутому місті Ктесіфон на північ від Багдада. (Ілл. 12.6.) Якщо дивитися здалеку, над пустелею височить видатна вигнута форма масивної цегляної будови; він складається з величезної арки, що піднімається приблизно на 40 м (131 фут) над землею, шириною 27 м (89 футів) в основі, що вважається найширшим прольотом з неармованої глиняної цегли у світі. Однак, крім величезного масштабу і конструктивної досконалості, ця структура має ще одну відмітну візуальну якість: майже параболічна крива надає їй вигляду височини і легкості, що дуже відрізняється від більш «приземленого» профілю напівкруглої арки, пізніше прийнятого і назавжди пов'язаного з нею. з римлянами.

Тріумфальна арка імператора Септимія Півночі, Рим, Італія (146-211).

Римські дизайнери дуже любили форму напівкруглої арки, яку прикрасили тут для святкових цілей на Римському форумі.

Прикладів цієї останньої форми арки достатньо, звичайно, під час прогулянки італійською столицею. Наприклад, по Віа Сакра від Кампідоле до Форуму можна пройти через Тріумфальну арку імператора Септимія Півночі. (Ілл. 12.7.) Цей пам'ятник було споруджено у другому столітті солдатом-імператором на честь однієї з його найбільших перемог, а типова напівкругла форма арки обрамляє вид на деякі з найважливіших історичних місць Риму. Неподалік цього є багато інших прикладів того періоду, у тому числі арочні форми Форо ді Аугусто, Колізею та арки, що охоплюють Тібр, Понте Фабриціо і Понте Честіо.

Пон-дю-Гар, неподалік Німа, Франція (перше століття).

Багатошарові ряди кам'яних арок, розташованих один над одним, разом допомагали постачати римські міста водою; Для цієї мети вздовж верху проходив канал, фанерований свинцевими пластинами.

Ще далі акведук Пон-дю-Гар неподалік Німа забезпечував водопостачання цього міста (нині) на півдні Франції і є лише одним із незліченних прикладів того, як римляни скористалися внутрішнім потенціалом арки для створення справді чудових споруд всюди. Їхня велика імперія.

У Шартрі (див. рис. 12.1), а невдовзі після цього і в Реймсі, Ам'єні, Бове та інших, готична арка розвивалася і доводилася до ймовірної досконалості форми. Характерний подовжений профіль цієї арки та супутня розробка системи аркбутанів для підтримки високих стін собору, звичайно, особливо добре відповідали прагненню їхніх дизайнерів до вертикальності та легкості простору. Ця тема еволюції профілю арки з часом і всередині одного собору перебуває у центрі уваги наступного розділу.

Відмітна форма арки в ісламській архітектурі також ясна у нашій уяві: вона спочатку згинається назовні від основи, але потім загинається назад у себе з її закриттям, і ми можемо знайти потомство цієї форми арки в мавританських палацах Іспанії та Венеції. (Ілл. 12.9.)

Палац Пена, Сінтра, Португалія (1847).

Отвори у стіні саду мають класичний профіль ісламських арок, нижня частина якого вигнута усередину від вертикального вирівнювання основи напівкруглої форми арки.

Починаючи з Середньовіччя і продовжуючись в епоху Відродження і до цього дня, були побудовані арки, що складаються з сегментів кола, а потім з парабол та еліпсів або комбінацій кількох з цих основних геометричних кривих. (Ілл. 12.10.)

Як ми невдовзі побачимо, арка у формі параболи, зокрема, може бути сприйнята як прояв прогресу в науковому розумінні того, як працюють арки (хоча, можливо, за іронією долі, якщо не випадково, арка дуже близька до такої форми була побудована в такій формі. -і-Кісра приблизно двома тисячоліттями раніше (див. рис. 12.6)).

Якщо брати до дужок століття, безумовно, найяскравіший сучасний приклад подібної форми можна знайти в арці воріт Сент-Луїса, пам'ятнику відкриття західноамериканського континенту. (Ілл. 12.11.)

Арка воріт, Сент -Луїс, Міссурі, США (1965).

Загальний профіль приблизно такий же, як у перевернутої контактної мережі (форма підвісного ланцюга, підвішеного на двох кінцях). Стійкість до поперечного вітру забезпечується вертикальною консольною дією широких і

порожнистих сталевих трубчастих ніг арки; Це також дозволяє використовувати внутрішній ліфт до оглядової колоди вгорі.

Архітектор: Ееро Саарінен. Інженер -будівельник: Severrud, Elstad, Kruger та Partners.

Завдяки своїм неймовірним розмірам та конструкції з металевих пластин, ця споруда також є зручним нагадуванням про важливі досягнення у виробництві заліза та сталі, які мали місце під час промислової революції та які так сильно вплинули на арки. і навіть інші види структурних форм протягом останніх 150 років. У поєднанні з потребою у великих відкритих просторах навісів поїздів і промислових будівель у середині-кінці дев'ятнадцятого століття це нововведення у матеріалах призвело до будівництва чудових просторів, створених довгими рядами арочних ребер, повністю покритих склом. система і комбінація, які мають як фізично, і метафорично глибокі перетворення, що відбувалися на той час у суспільстві.

Рекомендована література:

1. Carroll J. The Complete Visual Guide до Building a House. - The Taunton Press, 2013.
2. Charleson A. Структура як архітектура: source book for architects and structural engineers. - Routledge, 2014.
3. Ching FDK A visual dictionary of architecture. - John Wiley & Sons, 2011.
4. Ching FDK Building construction illustrated. - John Wiley & Sons, 2020.
5. Ching FDK, Eckler JF Introduction до архітектури. - John Wiley & Sons, 2012.

Питання для самоперевірки:

1. Дайте визначення арці та склепінню
2. Назвіть відомі приклади використання арки в архітектурі
3. Назвіть основні конструктивні відмінності арок в залежності від культури
4. Дайте характеристику основним напруженням в арці та в склепінні. Порівняйте.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Adriaenssens S. et al. (ed.). Shell structures for architecture: form finding and optimization. – Routledge, 2014.
2. Aghayere A., Vigil J. Structural Wood Design: ASD/LRFD. – CRC Press, 2017.
3. Aghayere A. O., Vigil J. Structural Steel Design. – Stylus Publishing, LLC, 2020.
4. Aksamija A. Integrating innovation in architecture: Design, methods and technology for progressive practice and research. – John Wiley & Sons, 2017.
5. Allen E. How buildings work: the natural order of architecture. – Oxford University Press, 2005.
6. Allen E., Iano J. Fundamentals of building construction: materials and methods. – John Wiley & Sons, 2019.
7. Allen E., Rand P. Architectural detailing: function, constructibility, aesthetics. – John Wiley & Sons, 2016.
8. Ballast D. K. Architect's handbook of construction detailing. – John Wiley & Sons, 2009.
9. Bizley G. Architecture in detail. – Routledge, 2007.
10. Boothby T. E. Engineering Iron and Stone: Understanding Structural Analysis and Design Methods of the Late 19th Century. – American Society of Civil Engineers, 2015.
11. Carroll J. The Complete Visual Guide to Building a House. – The Taunton Press, 2013.
12. Charleson A. Structure as architecture: a source book for architects and structural engineers. – Routledge, 2014.
13. Ching F. D. K. A visual dictionary of architecture. – John Wiley & Sons, 2011.
14. Ching F. D. K. Building construction illustrated. – John Wiley & Sons, 2020.
15. Ching F. D. K., Eckler J. F. Introduction to architecture. – John Wiley & Sons, 2012.
16. Choo B. S., MacGinley T. J. Reinforced concrete: design theory and examples. – CRC Press, 2002.
17. Corum N. Building a straw bale house: the red feather construction handbook. – Princeton Architectural Press, 2005.
18. Curtin W. G. et al. Structural foundation designers' manual. – Blackwell Science, 1994.
19. Domone P., Illston J. (ed.). Construction materials: their nature and behaviour. – CRC Press, 2010.

- 20.El Khouli S., John V., Zeumer M. Sustainable construction techniques: From structural design to material selection: Assessing and improving the environmental impact of buildings. – DETAIL-Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2015.
- 21.Emmitt S. Barry's introduction to construction of buildings. – John Wiley & Sons, 2018.
- 22.Erdey K. et al. Earthquake engineering: application to design. – Wiley, 2007.
- 23.Farrelly L. The fundamentals of architecture. – Bloomsbury Publishing, 2012.
- 24.Gutdeutsch G. Building in wood: construction and details. – Princeton Architectural Press, 1996.
- 25.Halliday S. Sustainable construction. – Routledge, 2008.
- 26.Hanses K. H. G., Hanses K. Basics Concrete Construction. – Birkhäuser, 2017.
- 27.Harris C. M. Dictionary of Architecture and Construction. – McGraw-Hill, 2006.
- 28.Hegger M. et al. Construction materials manual. – De Gruyter, 2006.
- 29.Herzog T., Krippner R., Lang W. Facade construction manual. – DETAIL-Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2004.
- 30.Hunter K., Kiffmeyer D. Earthbag building: The tools, tricks and techniques. – New society publishers, 2004. – T. 8.
- 31.Huth M. Understanding construction drawings. – Cengage Learning, 2013.
- 32.Kameswara Rao N. S. V. Foundation design: theory and practice //John Wiley & Sons, USA. – 2011.
- 33.Lstiburek J., Carmody J. Moisture control handbook: principles and practices for residential and small commercial buildings. – John Wiley & Sons, 1996.
- 34.Macdonald A. Structure and Architecture: Tectonics of Form. – Routledge, 2015.
- 35.Martin L., Purkiss J. Structural Design of Steelwork to EN 1993 and EN 1994. – Elsevier, 2008.
- 36.McRaven C. The Classic Hewn-log House: A Step-by-step Guide to Building and Restoration. – Storey Publishing, 2005.
- 37.Merritt F. S., Ricketts J. T. Building design and construction handbook. – McGraw-Hill Education, 2001.
- 38.Miller M. R., Miller R. Carpentry and construction. – McGraw-Hill Education, 2016.
- 39.Newton P. H. Structural Detailing: For Architecture, Building and Civil Engineering. – Macmillan International Higher Education, 1991.

40. Ochshorn J. Structural elements for architects and builders. – Butterworth-Heinemann, 2009.
41. Pilla D. R. Elementary Structural Analysis and Design of Buildings: A Guide for Practicing Engineers and Students. – CRC Press, 2017.
42. Porteous J., Kermani A. Structural timber design to Eurocode 5. – John Wiley & Sons, 2013.
43. Sandaker B. N., Eggen A. P., Cruvellier M. R. The structural basis of architecture. – Routledge, 2019.
44. Schierle G. G. Architectural Structures. – University of Southern California, 2006.
45. Smith P. Structural design of buildings. – Wiley Blackwell, 2016.
46. Stalnaker J., Harris E. Structural design in wood. – Springer Science & Business Media, 1997.
47. Tanner J. E. et al. Masonry structural design. – McGraw-Hill Education, 2017.
48. Taranath B. S. Structural analysis and design of tall buildings: Steel and composite construction. – CRC press, 2016.
49. Underwood J. R., Chiuini M. Structural design: A practical guide for architects. – John Wiley & Sons, 1998.
50. Viljakainen M. The Open Timber Construction System // Architectural Design. Wood Focus. – 1999.
51. Watts A. Modern construction handbook. – De Gruyter, 2013.