

УДК 69.035.4

Марк Янкелевич

Строительно-проектная фирма «PARSONS» Нью-Йорк, США

ИЗ МОЕГО ОПЫТА В США: ПРОЕКТ CENTRAL ARTERY / TUNNEL (CA/T)

В статье рассмотрены основные моменты проектирования и строительства туннеля Central Artery / Tunnel в г. Бостон (штат Массачусетс, США). Приведены главные особенности технологического процесса возведения и принятые конструкторские решения. Обозначены инженерно-геологические и монтажные сложности площадки строительства, вызванные возведением объекта в условиях существующей застройки и действующей дорожно-транспортной развязки, а также пути их решения. Высветлены предпринятые инженерами проектно-расчетные решения.

Ключевые слова: туннель, эстакада, «стена в грунте», бентонит, метро.

Central Artery/Tunnel (туннель центральной артерии) был известен во всей Америке под неофициальным названием “Big Dig” (большие раскопки). Проект предусматривал строительство одной из крупнейших в мире магистралей, проходящей через центр Бостона, главного города штата Массачусетс в США. Магистраль включает несколько крупных туннелей, мостов, эстакад, дорог, в проектировании которых участвовал целый ряд проектных организаций, в одной из которых (“Weidlinger Associates, Inc.”) мне посчастливилось работать с 1993 по 2010 год.

Различные участки магистрали разрабатывались разными проектными организациями. Weidlinger Associates разрабатывала несколько участков проекта. Два из них, где я был одним из ведущих исполнителей, я описываю в этой статье. Первый находится в самом центре Бостона на пересечении Atlantic avenue с улицей State street, где туннель пересекает находящийся под ним туннель метро – у станции метро “Аквариум”. В этот проект, наряду со строительством автодорожного туннеля, входила реконструкция с существенным расширением станции метро и строительством новых входов в эту станцию. В дальнейшем изложении этот проект называем “Aquarium Station”. Этот проект был первым крупным проектом, над которым я работал в США. Он включал проектирование и контроль за строительством и продолжался с перерывами с 1993 до 2003 года. Второй проект выполнялся с 2000 по 2002 год по заказу строящей организации Modern Continental и заключался в организации строительства двухуровневой эстакады на магистрали Highway I – 93 в г. Кембридже.

Схематический генеральный план всей магистрали показан на рис. 1. Цифрами «1» и «2» на рисунке 1 отмечены участки проекта, описанные в настоящей статье.

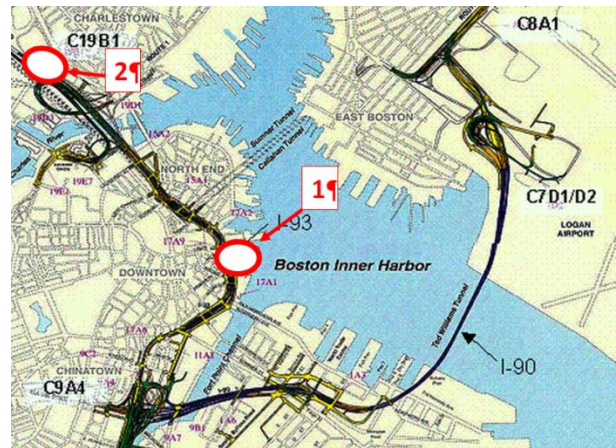


Рис.1. Генеральный план CA/T: 1 - Aquarium Station; 2 - эстакада на Highway I-93.

1. Aquarium Station

Разрез сооружения вдоль линии метро показан на рис. 2. В центре расположено поперечное сечение строящегося автодорожного туннеля (1), имеющего 4 полосы движения в каждом направлении и рампу для выезда на поверхность при движении в северном направлении. Поверх туннеля расположена эстакада (2) существующей магистрали. Эта эстакада была построена в 1960 году в составе магистрали Highway I-93 для обеспечения интенсивного движения автотранспорта, включая транзитный транспорт, идущий через Бостон. Эстакада проходила посередине проспекта Атлантик параллельно берегу океана, закрывала вид на океан от центра Бостона и подлежала сносу после завершения строительства туннеля и ухода транспорта под землю. На этом участке туннель пересекает линию метро (3), проходящую под ним. Туннель метро, построенный в первом десятилетии XX века, представляет собой замкнутую оболочку из монолитного бетона. Слева к туннелю примыкает

единственный существовавший восточный вестибюль метро (East Mezzanine), подлежащий реконструкции (на рисунке не показан). Справа

непосредственно примыкает новая западная подземная станция метро (4) с вестибюлями в двух уровнях (West Mezzanine).

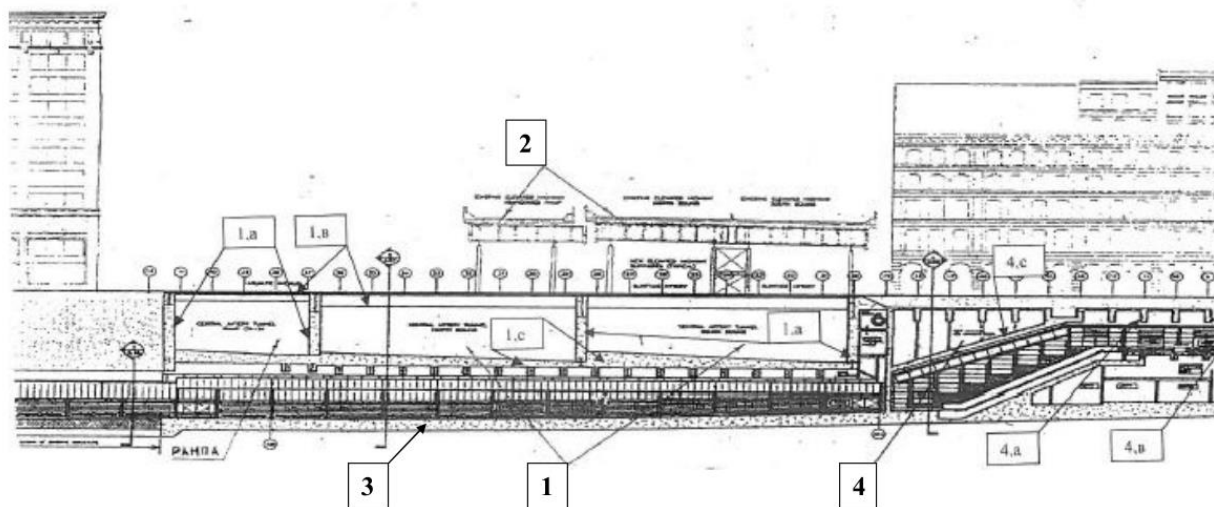


Рис. 2. Разрез вдоль линии метро: 1- автомобильный туннель (1,а – стены туннеля, 1,в – покрытие, 1,с – плита днища туннеля); 2 – существующая эстакада на Highway I-93; 3 – существующий туннель метро; 4 – новый вестибюль станции метро (4,а – покрытие, 4,в – междуэтажное перекрытие; 4,с – наклонный контрфорс).

Проектирование западной станции и реконструкция восточной выполнялась Weidlinger Associates одновременно с проектированием этой части автомобильного туннеля. Автомобильный туннель в этом месте имеет два пролета порядка 25 м и один пролет 12 м (рампа), разделенные сплошными стенами. Строительство стен автомобильного туннеля и станции метро велось методом «стена в грунте». Стены автомобильного туннеля (1,а) состоят из мощных обетонированных свай-двутавров – “Soldier Piles” W36 (высота сечения ≈ 91 см.), расположенных с шагом ≈ 180 см. При возведении, в первую очередь, бурились скважины, в них забивались двутавры, а затем выбирался грунт между двутаврами с заполнением траншеи “бентонитом” – специальным жидким глиняным раствором, который укрепляет грунт и препятствует его обрушению в траншее. Затем в глину опускался арматурный каркас, со дна подавался бетон, а сверху откачивалась глина.

Таким образом возводились стены глубиной порядка 30 м (до уровня скального грунта с заглублением на 1,5 м в скалу) на протяжении значительной части автомобильного тоннеля. На участке над туннелем метро стенами служили монолитные балки – стенки, опирающиеся на возведенные стены рядовых участков автомобильного тоннеля. Покрытие туннеля (1,в) – монолитная плита толщиной ≈ 30 см по стальным двутавровым балкам. Дно тоннеля (1,с) – монолитная плита до 3 м толщиной. Столь большая толщина плиты вызвана не столько обеспечением прочности от транспортных нагрузок и от давления грунтовой

воды, сколько увеличением веса для компенсации подпора высокой грунтовой водой (туннель находится на расстоянии около 150 м от океана).

Следует отметить, что фундаменты существовавшей ранее эстакады, которая должна была эксплуатироваться вплоть до открытия туннеля, находились в местах, где должна была выполняться экскавация грунта и возведение туннеля. Поэтому фундаменты необходимо было демонтировать. Для этого поверх возведенных стен туннеля устанавливались стальные балочные клетки, которые рассчитывались на нагрузки, включающие реакцию стоек эксплуатируемой эстакады. Стойки закреплялись к этим балочным клеткам, после чего фундаменты стоек демонтировались. По балочным клеткам укладывались также преднапряженные сборные пустотные железобетонные плиты, по которым обеспечивалось временное движение транспорта. Подробнее об этих плитах будет сказано далее.

Поперечный разрез новой станции метро показан на рис. 3. Стены станции возводились в непосредственной близости от существующих зданий на улице State для обеспечения минимального требуемого объема вестибюлей станции. Расстояние в свету между стеной здания и стеной станции составляло всего 90 см. Нагрузки на стены были несимметричными. Это было вызвано тем, что у южной стены находится старинное каменное здание, стоящее на “висячих” (воспринимающих нагрузку в основном за счет бокового трения) деревянных сваях. У северной стены расположено высокое

здание, стоящее на стальных сваях-стойках, опирающихся на скальное основание.

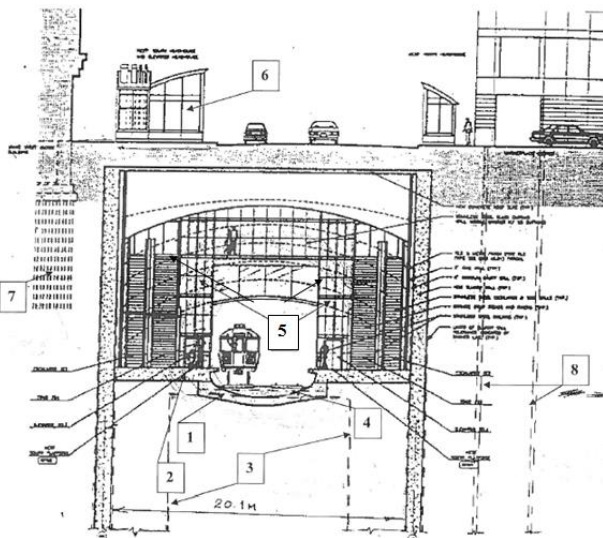


Рис.3. Поперечный разрез по станции метро: 1 - часть существующего туннеля метро; 2 – платформы метро; 3 – границы тавров стен; 4 – распорка; 5 - рама лифтов; 6 – павильон входа в метро; 7 - висячие деревянные сваи; 8 - сваи-стойки, опирающиеся на скальный грунт.

Нагрузки, учтённые при расчете поперечника станции, показаны на расчетной схеме (рис. 4). Там показаны и дополнительные горизонтальные нагрузки на южной стороне: статические нагрузки от давления на грунт здания на висячих сваях, а также сейсмические нагрузки. Расчет подпорных стен проводился на временные нагрузки по ступеням, соответствующим стадиям возведения, и на нагрузки, соответствующие стадии эксплуатации.

Стены станции метро, возводимые методом «стена в грунте», имели ниже уровня платформ ребра, соединяемые обетонированными стальными распорками ниже уровня рельсов метро. Стены возводились участками шириной 15 футов (≈4,5 м). С поверхности земли бурились траншеи. Одновременно с механизированной отрывкой участка траншеи в нее заливался бентонит. Затем в него заводились арматурные каркасы с арматурой, имеющей антикоррозийное покрытие эпоксидной смолой, вводились 2 трубы, через одну из которых со дна подавался бетон, а через вторую сверху откачивался вытесняемый бетоном бентонит. Участки стены станции метро имеют ниже уровня платформ тавровое сечение с полкой тавра толщиной 3,5 фута (≈106 см.). Высота стены над платформой 9м. Так как стена тавра в законченном сооружении отсутствует над уровнем платформы, рабочий арматурный каркас в ней располагался только в нижней части.

После заполнения стены бетоном до уровня платформы полка тавра отгораживалась от стенки, и бетон подавался только в стену (полку тавра).

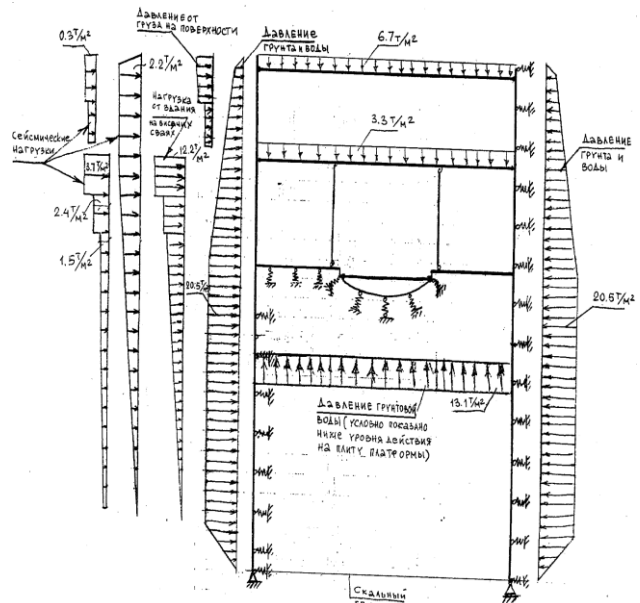


Рис.4. Нагрузки на поперечник станции метро.

Затем труба для подачи бетона в стенку тавра поднималась выше уровня платформы, и в верхней части стенки бентонит вытеснялся тощим бетоном, подлежащим последующей разборке.

На стены опирается поверху монолитное ребристое покрытие (4,а на рис. 2) с плитой толщиной 30 см и ребрами высотой ≈180 см, расположенными с шагом ≈ 3 м. Пролет 20,1 м в чистоте. Нагрузка на покрытие (дорожное покрытие + транспорт) - порядка 6,7т/м². Двухэтажная часть станции имеет перекрытие (4,в на рис. 2) - железобетонная плита по обетонированным двутаврам, на которое от платформы идут лифты, лестницы и эскалаторы. Участки стен в восточной части, где отсутствует перекрытие, подпираются наклонными железобетонными контрфорсами (4,с на рис. 2) сечением ≈ 3м х 30см расположенными над эскалаторами.

Ввиду того, что автомобильное движение по улице, под которой строилась станция метро, не разрешалось перекрывать полностью, кроме нескольких ночных часов, возведение железобетонного покрытия на земле выполнялось по полпролета. После набора прочности бетоном на возведенной половине, автомобильное движение перемещалось на неё, и возводилась вторая половина покрытия. Арматурные стержни стыковались с помощью специальных стыковочных устройств обеспечивающих 100% прочность стержней.

Подработка грунта проводилась после достижения бетоном проектной прочности по всему покрытию. На части покрытия оставлялось

временные технологическое отверстие для забора грунта, разборки тощего бетона стенок тавра над платформой и последующей установки механизмов и конструктивных элементов, необходимых для продолжения строительства ниже уровня покрытия. На рисунке 5 показана завершенная после строительства станция метро Аквариум (West Mezzanine) на уровне линии метро.



Рис. 5. Станция метро "Aquarium".

На рисунке 6 показано как выглядел проспект Атлантик после демонтажа эстакады и выполнения работ по благоустройству в 2007 году.



Рис.6. Проспект Атлантик возле Aquarium Station.

Теперь посреди проспекта над туннелем проходит пешеходная зона с водоёмами, фонтанами, цветниками. Слева на фото показано расположенное здесь историческое каменное здание (стоящее на деревянных сваях), справа высокое современное здание (опирающееся на стальные сваи-стойки). Между ними под землей находится станция метро **Aquarium Station**.

Павильон входа на западную станцию показан на рисунке 7.



Рис.7. Павильон входа в станцию метро.

Представляют, на наш взгляд, интерес сборные преднапряженные плиты, которые повторно применялись в целом ряде мест по длине туннеля в качестве временных перекрытий, обеспечивающих движение транспорта. Применение этих плит было отдельным заданием, полученным нашей компанией. Требовалось проверить возможность повторного применения существующих сборных преднапряженных плоских плит временных дорожных покрытий для различных условий опирания.

Плиты длиной до 12 м проектировались как двух- и трехпролетные под тяжелую нагрузку от гусеничных кранов. Плиты имели напрягаемую арматуру (канаты) как в нижней, так и в верхней зоне, причем в некоторых из них сечение арматуры в нижней и верхней зоне было одинаковым. Стояла задача проверить, для каких пролетов плиты могут работать как однопролетные или двухпролетные. Формулы норм США [1] недооценивают несущую способность плит с двойным напрягаемым армированием. Вместе с тем, нормы разрешают выполнять расчет при соблюдении условий равновесия и совместности деформаций, пользуясь известными (параболическими, трапециевидной или др.) диаграммами напряжений при максимальной сжимаемости бетона $\epsilon_{\max} = 0.003$. Предполагается, что исчерпание несущей способности сечения наступает в крайнем сжатом волокне бетона при достижении бетоном предельной сжимаемости. В данном случае, использованы имеющиеся в литературе диаграммы работы арматурных канатов и трапециевидная эпюра напряжений в бетоне (диаграмма Прандтля) с ограниченной ветвью (подход примерно тот же, что применялся в лаборатории теории железобетона НИИСКА ещё в 1970 годы). Американские нормы [1] допускают применение такого подхода к расчету железобетона. Эпюры деформаций и усилий в сечении и расчетные формулы приведены на рис. 8.

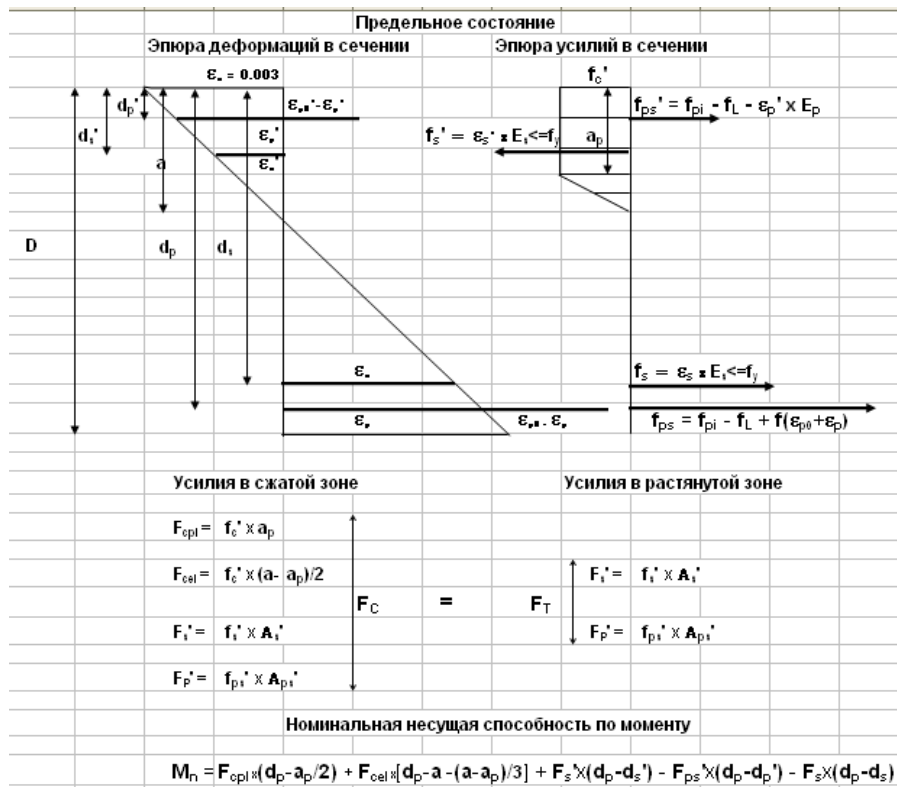


Рис. 8. Эпюры предельных усилий и деформаций в сечении. Расчетные формулы.

С использованием этого подхода был разработан алгоритм и программа расчета на языке MATCAD. Данная программа была использована для расчета более 40 плит для разных условий опирания. Я сделал сообщение в фирме, после чего эта программа использовалась и на других проектах сотрудниками компании для решения аналогичных задач.

2. Эстакада на Highway I – 93.

Эстакада, о которой идет речь, была запроектирована не нашей организацией. Weidlinger Associates была привлечена строительной компанией Modern Continental для выполнения конструкторских и расчетных работ к проекту организации работ в помощь монтажникам. Предусматривалось строительство четырех пролетов длиной от 30 до 45 м. двухуровневой автодорожной эстакады, соединяющей новый висячий мост через реку Чарльз в Бостоне с существовавшей магистралью. Требовалось проверить конструктивные элементы для условий монтажа, запроектировать необходимые временные конструкции и обеспечить соблюдение требуемых допусков.

Схематический чертеж участка верхнего уровня эстакады, где коробчатые балки настила стыкуются с опирающимися на круглые железобетонные колонны главными балками, приведен на рис. 9.

На нижнем уровне настилы стыкуются таким же образом только с примыканием к опорам ранее построенной части магистрали. По новым пролетам и

опорам настилы укладывались поверх балок опор и стыковались в пролете (рис. 10). Поверх стальных балок при последующем строительстве выполнялся монолитный железобетонный настил, включаемый в работу балок.

Перед проектной организацией были поставлены следующие задачи:

- предложить последовательность монтажа с учетом недостатка в месте для размещения кранов и складирования сборных элементов: наличие существующей магистрали, близкого расположения линии и станции метро, расположения пригородной железнодорожной линии и пр.;
- подобрать места расположения подъемных петель и длину стропов для сборных элементов эстакады. При этом, требовалось обеспечить уклоны концов длинномерных коробчатых балок, соблюдая допуски для выполнения болтовых соединений, в которых расстояние между нижним и верхним рядами болтов было более 1,5 м. При этом, требовалось учесть углы поворота опорных балок от ранее смонтированного пролета настила и пр.;
- выполнить проверку возможности отсоединения настилов от крана после выполнения в стыке только боковых накладок между настилами;
- запроектировать дополнительные временные башни опор необходимые для выполнения монтажа;
- проверить конструкции эстакады на восприятие временных нагрузок, возникающих при монтаже;
- вести надзор за строительством.

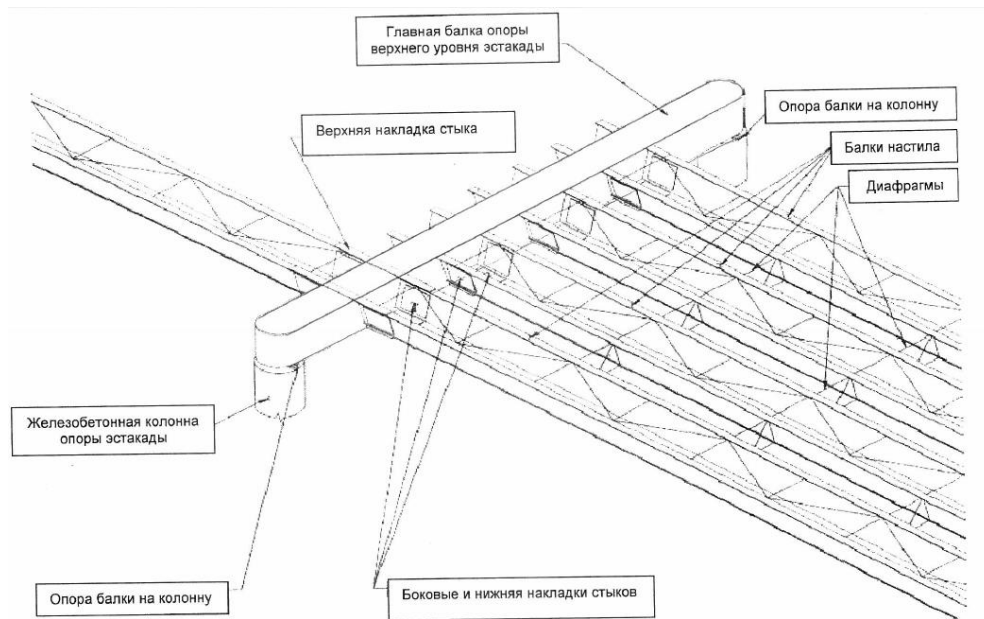


Рис. 9. Схема конструкции эстакады.



Рис.10. Первый пролет эстакады. Смонтирован настил нижнего уровня.



Рис. 11. Стыки балок настила нижнего уровня.

Остановимся подробнее на удовлетворении требования: обеспечить выполнение необходимых допусков для соединений между настилами, представлявшего наиболее трудоёмкую задачу.

В соединении каждой стенки настила по проекту требовалось использовать (рис.11) более 130 болтов диаметром 1” (25,4 мм). Стандартный диаметр отверстий для болтов по нормам США [2, 3] больше диаметра болта на 1/16” (≈1,6 мм). Таким образом, допуск в отклони угла поворота балки настила, висящей на кране и присоединяемого к ранее смонтированному настилу или главной балке опоры, от угла поворота смонтированного элемента не должен превышать ≈0,002 радиана. Чтобы обеспечить такой жесткий допуск требовалось:

1. четко обозначить последовательность монтажа сборных элементов;
2. определить угол поворота каждого смонтированного элемента в каждом узле соединения по ступеням монтажа;
3. подобрать для каждой балки настила места установки монтажных петель, и длину стропов для обеспечения угла поворота, примыкающего к стыку конца балки, монтируемой краном, в пределах допуска. При этом, учитывалось распределение нагрузок от собственного веса настилов по данным рабочих чертежей.

Расчет велся с помощью компьютерных моделей моста по этапам сборки и монтируемых элементов с варьированием расположения петель.

На рис. 12 показана схема монтажа одного из настилов верхнего уровня. С учетом вычисленных углов закручивания главных балок в данном конкретном месте, при учете нагрузки от ранее смонтированных элементов, подобрано расположение петель и длина стропов и определены углы поворота концов монтируемой балки настила.

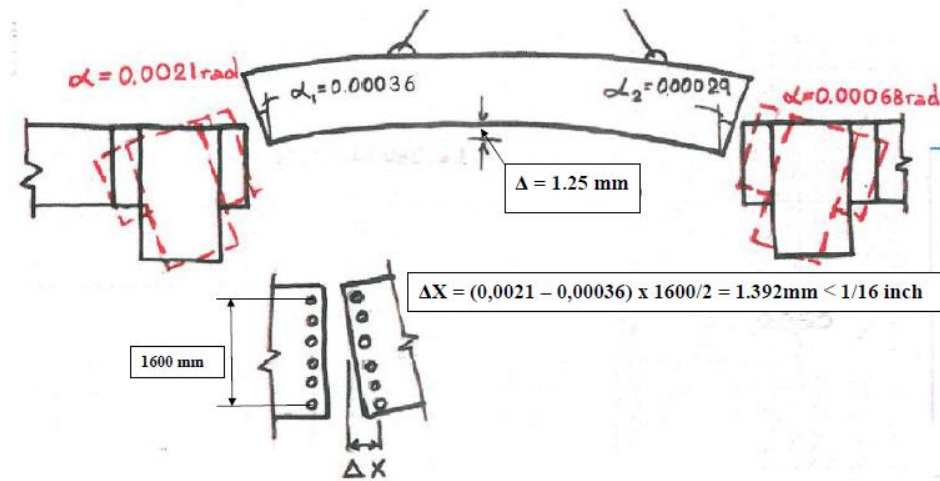


Рис. 12. Схема монтажа настила верхнего уровня.

На рис. 13 условно показаны деформации возведения, которые отмечены номерами на каждой настилов нижнего уровня эстакады по ступеням из балок настилов.

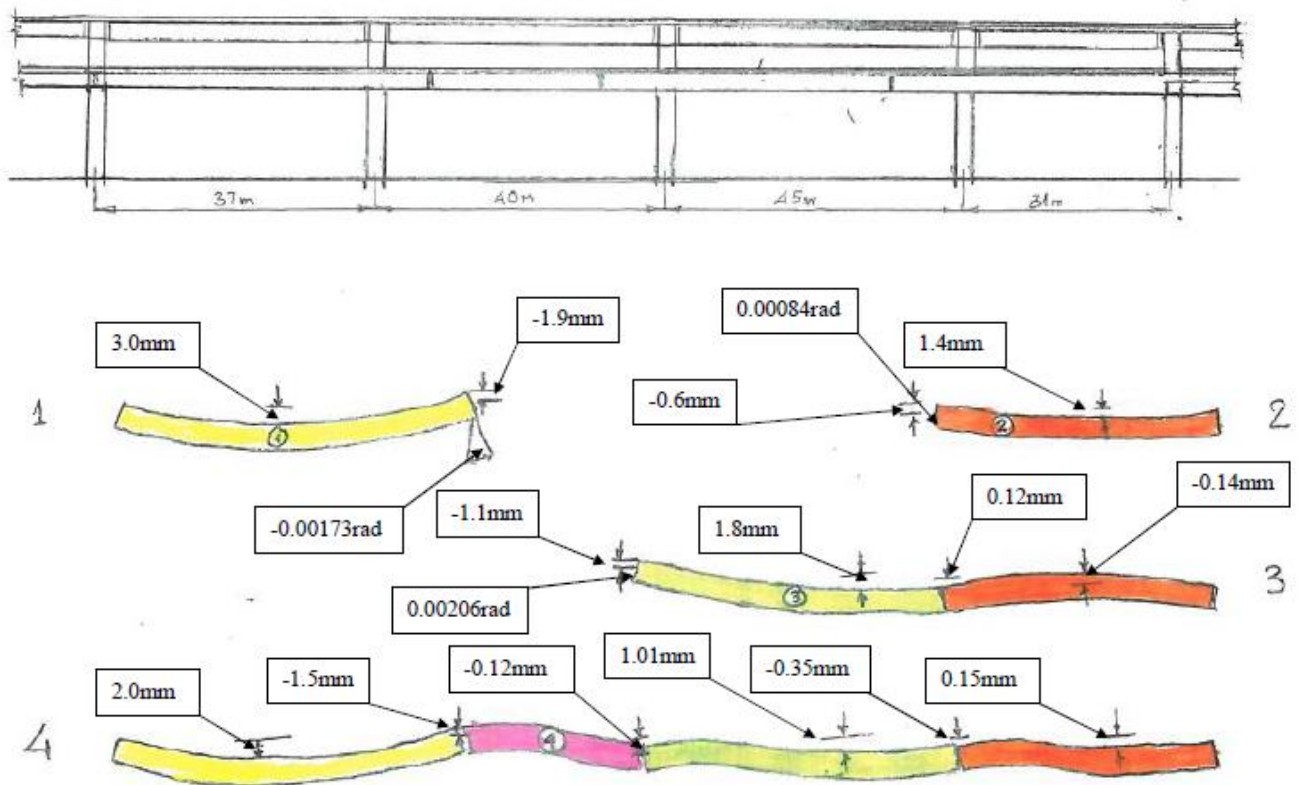


Рис. 13. Деформированная схема настилов нижнего уровня по ступеням монтажа.

По результатам проведенных расчетов, монтажникам была выдана таблица, в которой для всех 36 балок были представлены данные, обеспечивающие при подъеме краном требуемый наклон настила и углы поворота его концов. При этом, соблюдались допуски, требуемые для выполнения болтовых соединений:

- относительно последовательности возведения;
- относительно расстояния от каждого из концов балок до монтажных петель;
- относительно длины стропов и расстояние от крюка крана до каждой из подъемных петель;
- относительно требуемой несущей способности стропов.

Указанные данные строго соблюдались при подготовке и проведении монтажа.

Монтаж эстакады проводился с февраля по июнь 2002 года. Фрагмент смонтированной эстакады показан на рис. 14.



Рис. 14. Эстакада после завершения монтажа.

References

1. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)*. American Concrete Institute (ACI).
2. *Manual of Steel Construction. Allowable Stress Design*. American Institute of Steel Construction, Inc. (AISC). First Revision of Ninth Edition. 1989.

3. *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation officials, Inc. (AASHTO). Sixteenth Edition. 1996.

Автор: ЯНКЕЛЕВИЧ Марк
д.т.н., главный инженер проектов, строительно-проектная фирма «PARSONS» Нью-Йорк, США.

З МОГО ДОСВІДУ У США: ПРОЕКТ CENTRAL ARTERY / TUNNEL (CA/T)

Марк Янкелевич

У статті розглянуто основні моменти проектування і будівництва тунелю Central Artery / Tunnel у м. Бостон (штат Массачусетс, США). Наведено головні особливості технологічного процесу зведення і прийняті конструкторські рішення. Позначено інженерно-геологічні та монтажні складності майданчика будівництва, викликані зведенням об'єкта в умовах існуючої забудови та діючої дорожньо-транспортної розв'язки, а також шляхи їх вирішення. Висвітлені вжиті інженерами проектно-розрахункові рішення.

Ключові слова: тунель, естакада, «стіна в ґрунті», бентоніт, метро.

FROM MY EXPERIENCE AT THE UNITED STATES: CENTRAL ARTERY / TUNNEL (CA/T) PROJECT

Mark Yankelevich

The main points of the design and construction of the Central Artery / Tunnel in Boston (Massachusetts, USA) are described in paper. The major features of the construction process and design decisions are marked. Geotechnical and assembly complexities of the construction site due to the erection of the tunnel in terms of the existing building and operating road transport interchanges are named, as well as the solutions for their elimination. Clear up undertaken by engineers design and design solutions. Design and computational solutions undertaken by engineers are highlighted.

Keywords: tunnel, overpass, "slurry wall", bentonite, Metro.