

Влияние очертания водопропускной трубы в высокой насыпи дорожного полотна с учётом конструктивной нелинейности

А.Н. Попов

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: Рассматривается плоская задача расчёта взаимодействия водопропускной трубы разных очертаний с обоймой грунта с учётом конструктивной нелинейности. В силу невозможности грунта работать на растяжение, взаимодействие трубы и грунта принято односторонним. В задаче изменяется очертание трубы при прочих равных параметрах. В качестве результатов расчёта рассматривается область контакта/отрыва и сцепления/проскальзывания трубы с грунтом. По результатам расчётов даны рекомендации по выбору очертания водопропускных труб.

Ключевые слова: конструктивная нелинейность, контакт с трением, односторонние связи, линейная задача дополненности, численные модели, метод конечных элементов.

Введение

Определение условий взаимодействия деформируемых тел популярная задача при расчёте строительных конструкций. Когда площадь контакта элементов конструкций или их частей достаточно велика – учёт конструктивной нелинейности сильно влияет на конечный результат. Задача определения усилий взаимодействия, взаимных перемещений и зоны контакта для более точного описания напряжённо-деформированного состояния достаточно сложна и встречается повсеместно. В самых популярных программных комплексах эта задача сводится к решению вариационных неравенств. Предлагается рассмотреть влияние очертания металлических гофрированных труб на их напряжённо-деформированное состояние.

В настоящее время водопропускные трубы широко применяются при строительстве транспортных объектов как на дорогах общего пользования в качестве водопропускных труб и малых мостов, так и в городских условиях как элементы конструкций тоннельных развязок [1-3].

Однако имеется негативный опыт применения водопропускных труб на дорогах в нашей стране. Причинами дефектов сооружений становятся

неточности на стадии проектирования конструкций и отсутствие надёжных методов расчёта сооружений данного типа в связи с несовершенством и ограниченностью нормативной базы, сложностью моделирования грунтовой среды из-за значительного разброса физических характеристик.

Учёт одностороннего взаимодействия полагает уточнение работы рабочей схемы по сравнению с линейной постановкой. Учёные с начала 60х годов рассматривают [4, 5] задачи одностороннего контакта. Существует множество популярных задач контактной механики, которые рассматриваются и по сей день [6-8]. В качестве модели одностороннего контакта и её решения предлагаются линейная задача дополненности и метод Лемке [9].

Предметом исследования является учёт конструктивной нелинейности при инженерных расчётах конструкций с большой площадью одностороннего контакта с учётом трения [10].

Цель данной работы – определение влияния очертания водопропускной трубы на зону контакта этой трубы с грунтом. Для этого решается ряд задач с различным очертанием водопропускной трубы и проводится сравнительный анализ результатов решения.

Методы

Для расчётов используется метод конечных элементов (МКЭ). В рассматриваемой постановке задачи принят контакт «узел в узел» (контактная пара). Предполагается, что в каждой контактной паре точки соединены односторонними связями. Связь по нормали (работает только на сжатие) к зоне контакта включена, когда эти точки находятся в контакте, и выключена в противном случае. Связь по касательной к зоне контакта включена, если усилия взаимодействия меньше предельных сил трения и выключена, если усилия взаимодействия равны предельным силам трения.

Усилия взаимодействия x_i и взаимные перемещения z_i можно показать на простом примере отрыва односторонней опоры (рис. 1).

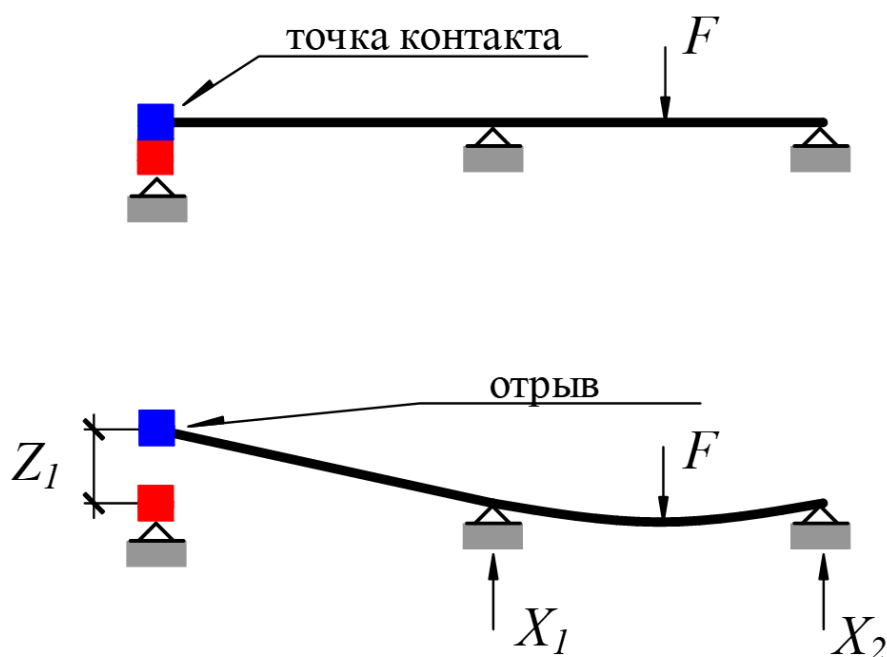


Рис. 1. – Усилия взаимодействия и взаимные перемещения

Для расчёта используется постановка задачи в виде линейной задачи дополненности (ЛЗД), данная постановка рассмотрена в [8].

Для решения предложенной постановки выбран метод Лемке. Он обладает рядом преимуществ:

1. Процесс решения шаговый, решение получается за конечное количество шагов;
2. Для ограниченной области контакта, по сравнению с общей размерностью задачи, задача определения области контакта решается достаточно быстро;
3. Метод способен решать задачи с вырожденными контактными матрицами. Вид матрицы соответствует постановке задачи в [8].
4. Такое физическое решение, с возможной интерпретацией каждого шага способно решать задачи в том числе, если одно из контактирующих тел способно перемещаться, как жёсткое целое.

В качестве результата решения контактной задачи с трением в виде ЛЗД методом Лемке получаются усилия взаимодействия и взаимные перемещения. Используя эту информацию, можно определить зоны отрыва/контакта и скольжения/сцепления в рассматриваемой задаче. На рис. 2 показаны схемы до деформации и поле деформации для контактной задачи. В зоне контакта можно выделить зону, где по нормали к этой зоне контактные пары остались неразрывны, внутри зоны контакта могут быть зоны сцепления и скольжения (перемещения и усилия по касательной).

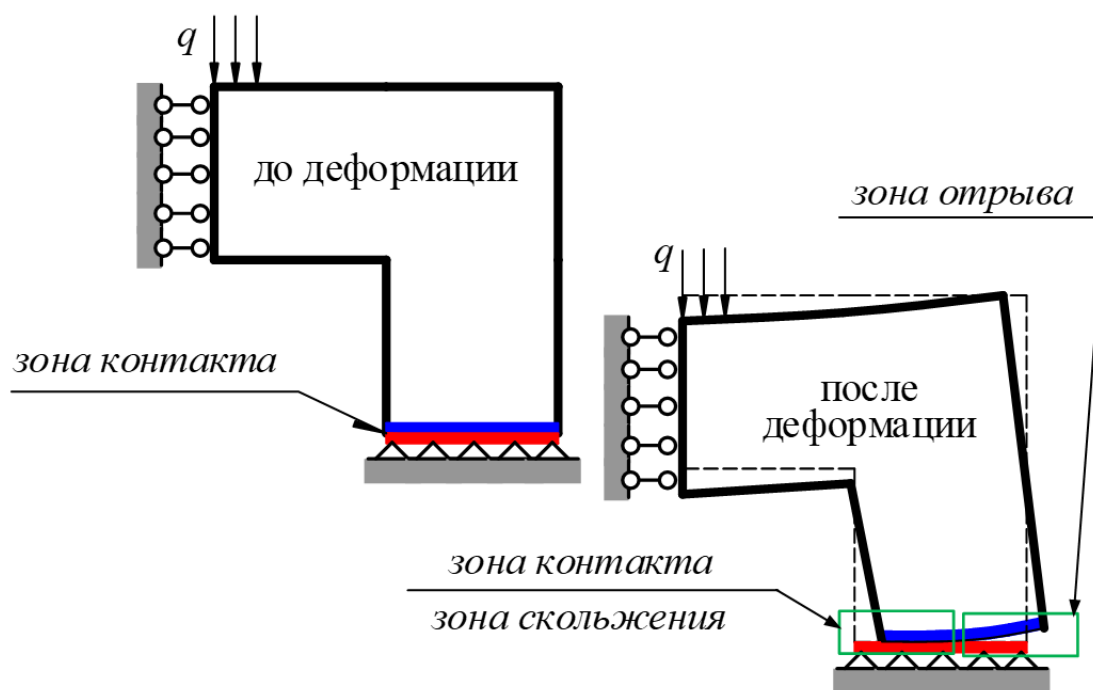


Рис. 2. – Усилия взаимодействия и взаимные перемещения

Предлагаемая для расчёта в данной работе задача контакта появляется в учёте одностороннего взаимодействия водопропускной трубы и насыпи автомобильной дороги.

Расчёт

В силу большой протяжённости трубы, рассматривается задача плоской деформации (рис. 3). Ширина вырезаемой полосы принята равной единице. Труба аппроксимируется аркой. Модель грунта принята линейной.

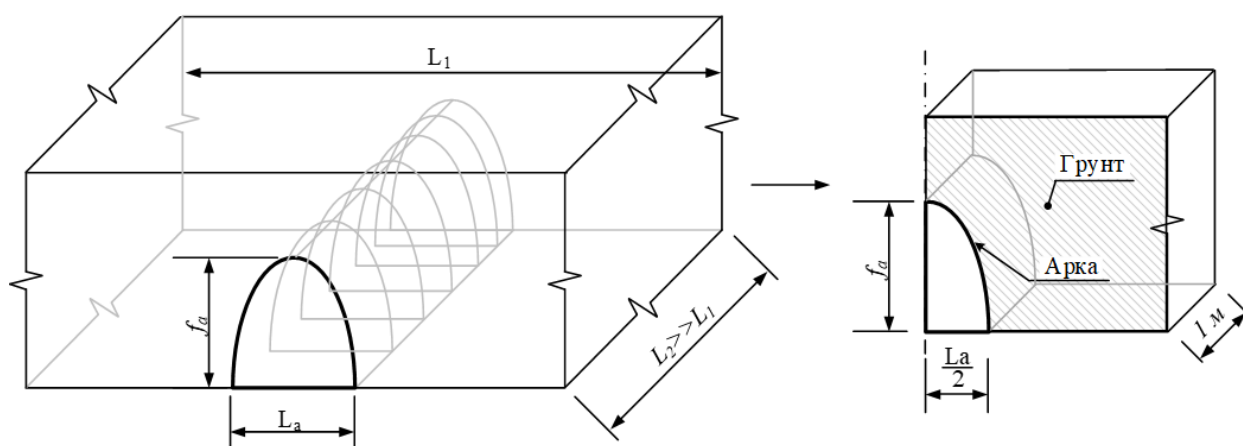


Рис. 3. – Переход к задаче плоской деформации

Для реализации МКЭ арка и сваи моделируется рамными элементами с тремя степенями свободы в узле. Грунт моделируется 4х узловыми линейными конечными элементами. Основание арки связано с оголовком сваи жёстко (степени свободы узлов общие). Нагрузкой в задаче является собственный вес грунта. Полезная нагрузка на дорожное полотно в насыпи высокой насыпи практически не влияет на НДС арки. Арка и сваи, как единая система, взаимодействуют с грунтом насыпи и основания посредством одностороннего контакта с трением. Таким образом, система труба-основание «висит» в грунте, что сильно осложняет решение задачи, поскольку у трубы и свай отсутствуют опоры. Грунт опирается в основании на вертикальные шарнирно подвижные опоры и горизонтальные шарнирно-подвижные опоры по бокам (рис. 4).

Основные параметры задачи: модуль упругости грунта $E_s = 4.5 \cdot 10^7 \text{ Па}$, коэффициент Пуассона грунта $\mu = 0.27$, ширина вырезанной полосы $t = 1 \text{ м}$, удельный вес грунта $\gamma = 2.26611 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$, модуль упругости трубы $E_a = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, момент инерции арки $I_{xa} = 2.110901 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4$, площадь поперечного сечения арки $A_a = 2.366322 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, коэффициент трения скольжения по грунту $f = 0.4$. Характеристики свай: $E_p = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, $A_p = 0.25 \text{ м}$, $I_p = 5.208333 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4$. В качестве опор добавлены

вертикальные ограничения в основании грунта и горизонтальные по бокам с учётом симметрии задачи. Учёт объёма грунта по бокам от трубы производился с учётом сходимости результатов решения с погрешностью менее 0.5%.

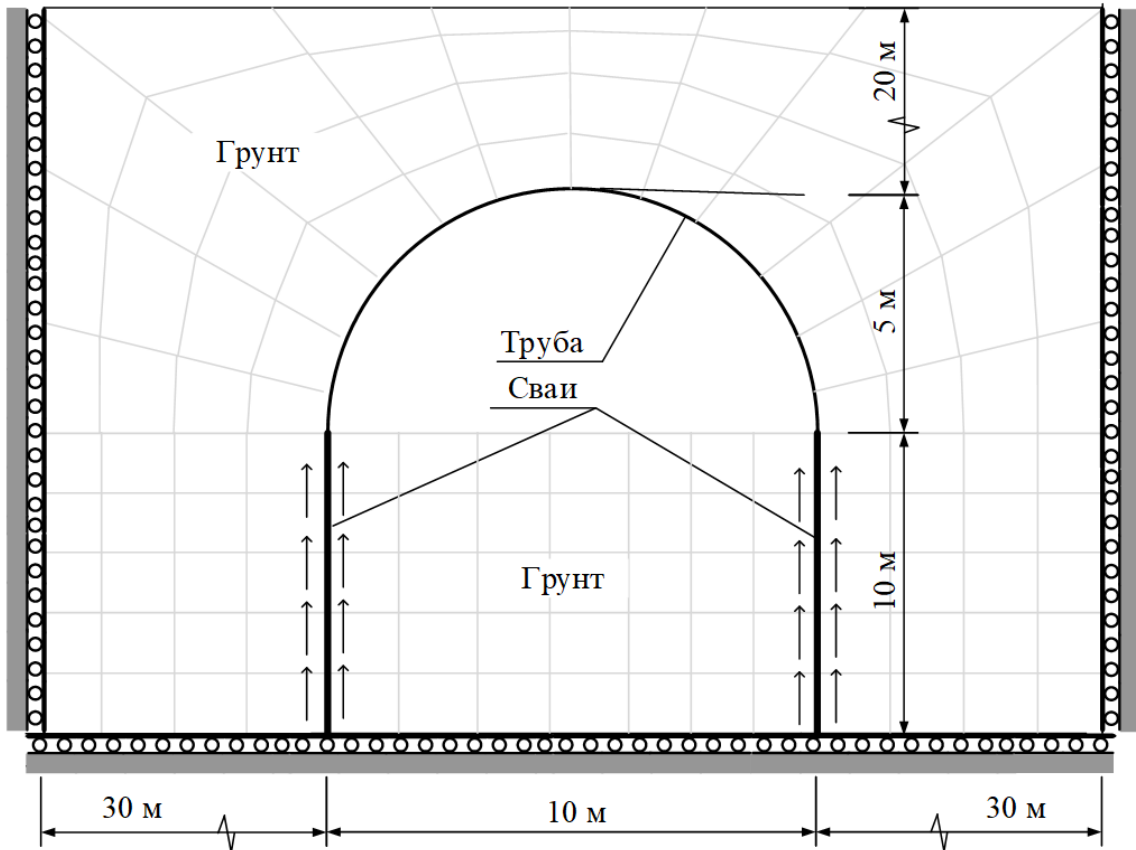


Рис. 4. – Схема системы труба-основание-насыпь

В качестве очертаний арки рассматриваются:

1. Синус $outline(x) = f \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{L}\right)$;

2. Круг $r = f/2 + \frac{L^2}{8f}$;
 $outline(x) = \sqrt{r^2 - (L/2 - x)^2} - r + f$

3. Парабола $outline(x) = \frac{4 \cdot f \cdot x}{L} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right)$;

4. Эллипс $outline(x) = 2 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{x}{L} \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right)}$;

где: f – стрела подъёма арки, L – пролёт арки. Следует отметить, что стрела подъёма арки для круглого очертания не может быть больше, чем половина её пролёта. Считается, что ось абсцисс x проходит у основания арки, а ось ординат y ровно по центру.

Для решения поставленной задачи написана программа на языке Python основе МКЭ. Для визуализации использовались модули: PyQt5, pyqtgraph. На рис. 5 представлена сетка КЭ (скриншот схемы из программы).

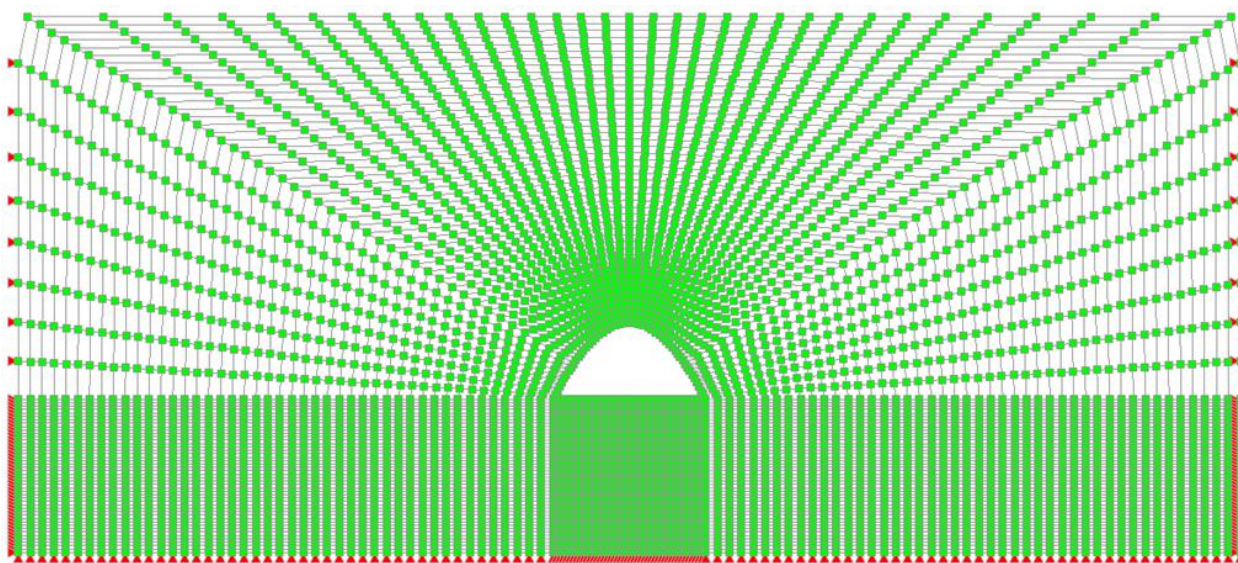


Рис. 5. – Схема задачи (программа)

Для всех далее рассмотренных результатов решения, грунт по сторонам от висячей сваи не отрывался и проскальзывал по всей длине свай. Результаты решения контактной задачи для синусоидального очертания арки показаны на рис. 6. Зона сцепления показана красным сплошным цветом, зона скольжения красным пунктиром с внутренней стороны арки; с внешней стороны показаны зоны контакта и открыва. В случае этого очертания арки, отрыв грунта от арки отсутствует. Внутри зоны контакта наблюдается зона проскальзывания в пяте арки.

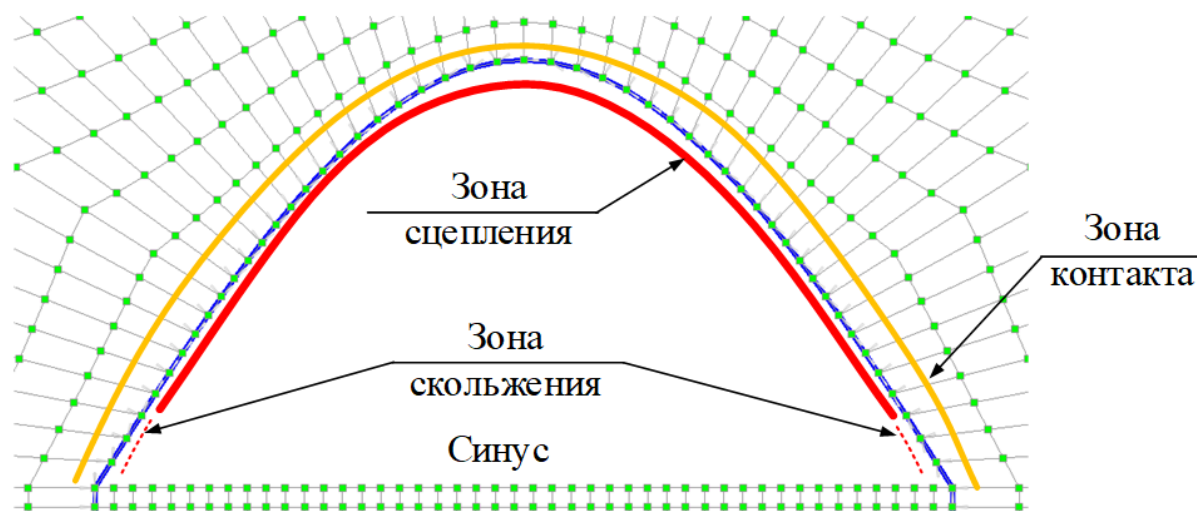


Рис. 6. – Зоны контакта синусоидальной арки

Результаты решения контактной задачи для кругового очертания арки показаны на рис. 7. В этом случае отрыв грунта наблюдается в пяте арки. Внутри зоны контакта, ближе к замку арки, наблюдается зона скольжения ближе к пяте арки.

Результаты решения контактной задачи для параболического очертания арки показаны на рис. 8. В случае этого очертания арки, отрыв грунта от арки отсутствует. Внутри зоны контакта наблюдается зона проскальзывания в пяте арки.

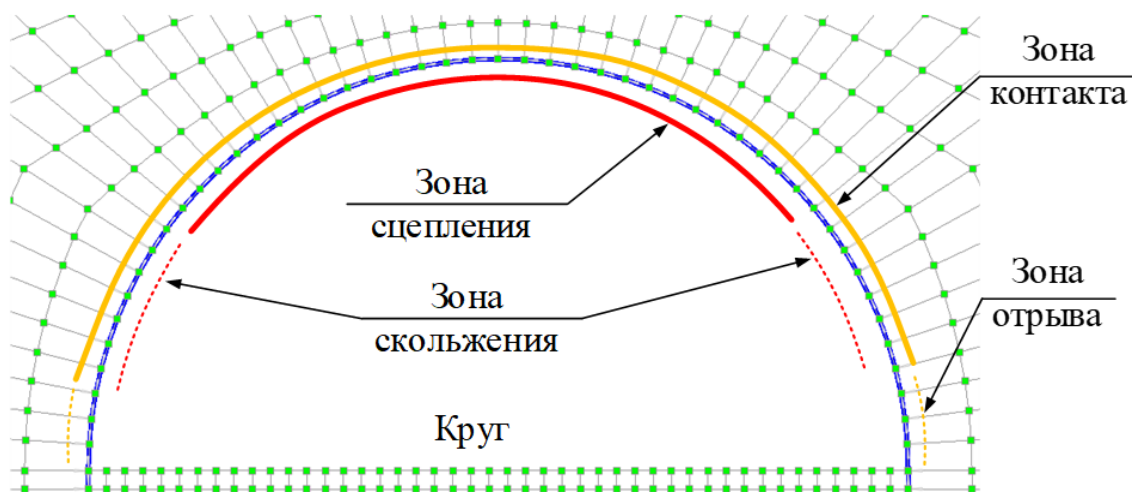


Рис. 7. – Зоны контакта круговой арки

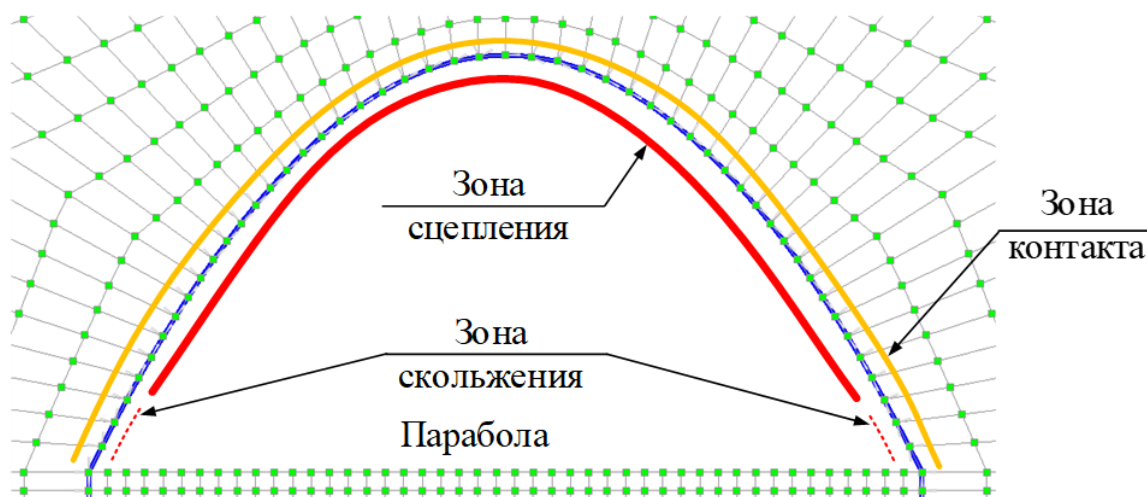


Рис. 8. – Зоны контакта параболической арки

Результаты решения контактной задачи для эллиптического очертания арки показаны на рис. 9. В этом случае отрыв грунта наблюдается в пяте арки. Внутри зоны контакта, ближе к замку арки, наблюдается зона скольжения ближе к пяте арки.

Наиболее оптимальным очертанием арки в высокой насыпи оказалось круговое очертание. Максимальные внутренние усилия в арке наблюдаются у её основания. Наличие зон отрыва у арок кругового и эллиптического очертания ведёт к некоторому увеличению внутренних усилий. В случае большого массива грунта над аркой, боковое давление грунта играет существенную роль в напряжённо-деформированном состоянии арки.

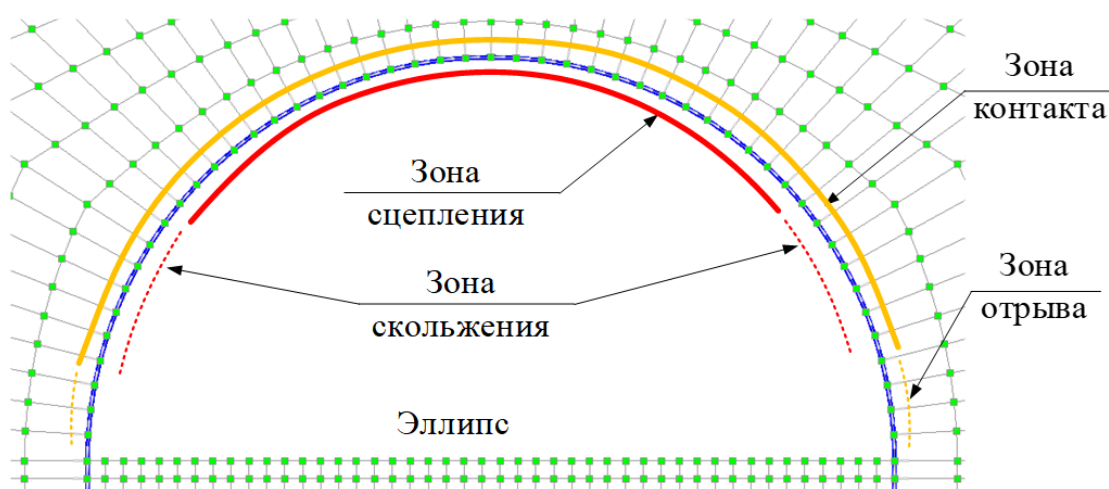


Рис. 9. – Зоны контакта эллиптической арки

Арки синусоидального и параболического очертания сдавливаются с боков, что приводит к увеличению изгибающего момента в замке. Арки кругового и эллиптического очертания сдавливаются грунтом более равномерно. Максимальное значение изгибающего момента наблюдается в арке параболического очертания 70.531 кН , минимальное значение в арке кругового очертания 53.245 кН .

Выводы

Представленные результаты расчёта показали наличие зон отрыва и скольжения обоймы дорожного полотна относительно водопропускной трубы. Рассмотрение линейной задачи взаимодействия грунта с трубой (двухстороннее взаимодействие) не даёт полной картины напряжённо-деформированного состояния рассчитываемого сооружения.

Написана программа на языке программирования Python. С использованием макроэлементов написан простой генератор сетки конечных элементов. В качестве модели задачи использовалась постановка в виде ЛЗД. Для решения задачи использовался шаговый метод Лемке.

Были рассчитаны ряд задач на различные очертания водопропускной трубы. Наиболее эффективным очертанием оказалось круговое. Наименее эффективным – синусоидальное. Такое поведение конструкции обуславливается боковым давлением грунта высокой насыпи.

Учёт конструктивной нелинейности, когда зона одностороннего контакта сопоставима с размерами контактирующего тела, способен сильно повлиять на итоговый результат расчёта.

Литература

1. Лопашук А.В., Малышев Н.М. Динамика изменения эксплуатационного состояния автомобильных дорог с переходным типом



дорожной одежды // Инженерный вестник Дона, 2023, №8. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8601

2. Перфилов В.А., Демин В.А. Утяжеляющие покрытия труб из высокопрочных мелкозернистых бетонов // Инженерный вестник Дона, 2023, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8606

3. Вайнштейн Е.В., Вайнштейн В.М., Нехорошков П.А. Исследование изменения касательных напряжений и вертикальных перемещений от лесовозного автопоезда в конструкции дорожной одежды и земляного полотна // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1399

4. Auricchio F., Sacco E. Augmented Lagrangian finite elements for plate contact problems // Int. J. for Num. Meth. Eng. 1996, № 39, pp. 4141-4158

5. Panagiotopoulos P.D., Lazaridis P.P. Boundary minimum principles for the unilateral contact problems // Int. J. Solids Structures, 1987, V. 23, № 11. pp. 1465- 1484.

6. Зеленцов В.Б., Митрин Б.И.. Об одном методе решения задач о термоупругодинамической неустойчивости скользящего фрикционного контакта // Инженерный вестник Дона, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2730

7. Мантурова Е.А. Применение наноматериалов и нанофункциональных присадок в перспективных технологиях лубрикации контакта гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса // Инженерный вестник Дона, 2010, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/197

8. Попов А.Н., Ловцов А.Д. Frictional contact problem in building constructions analysis // Magazine of Civil Engineering. 2020. №100(8). URL: engstroy.spbstu.ru/en/article/2020.100.1/

9. Lemke C.E. Some pivot schemes for the linear complementarity problem // Math. Programming Study. 1978, № 7. pp. 15 - 35.

10. Acary V., Brémond M., Huber O. On solving contact problems with coulomb friction: Formulations and numerical comparisons // Advanced Topics in Nonsmooth Dynamics: Transactions of the European Network for Nonsmooth Dynamics. 2018. №8. pp. 375-457. URL: inria.hal.science/hal-01878539/document

References

1. Lopashuk A.V., Malyshev N.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8601

2. Perfilov V.A., Demin V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8606Vajnshtejn

3. E.V., Vajnshtejn V.M., Nehoroshkov P.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1399

4. Auricchio F., Sacco E. Augmented Lagrangian finite elements for plate contact problems. Int. J. for Num. Meth. Eng. 1996, № 39, pp. 4141-4158

5. Panagiotopoulos P.D., Lazaridis P.P. Boundary minimum principles for the unilateral contact problems. Int. J. Solids Structures, 1987, Vol. 23, № 11. pp. 1465-1484.

6. Zelencov V.B., Mitrin B.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2730

7. Manturova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2010, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2010/197

8. Popov A.N., Lovtsov A.D. Magazine of Civil Engineering. 2020. №100 (8). Article No. 10001. URL: engstroy.spbstu.ru/en/article/2020.100.1/

9. Lemke C.E. Some pivot schemes for the linear complementarity problem. Math. Programming Study. 1978, № 7. pp. 15-35.

10. Acary V., Brémond M., Huber O. Advanced Topics in Nonsmooth Dynamics: Transactions of the European Network for Nonsmooth Dynamics. 2018. №8. pp. 375-457. URL: inria.hal.science/hal-01878539/document