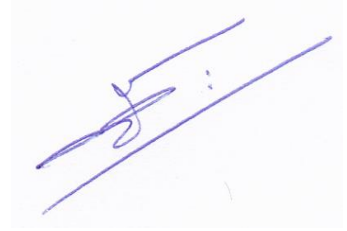


На правах рукописи



Шейн Аунг Тун

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА СБОРНЫХ КЛИНОВИДНЫХ
ТОННЕЛЬНЫХ ОБДЕЛОК В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва-2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ).

Научный руководитель : кандидат технических наук, доцент
Нестеров Иван Владимирович

Официальные оппоненты: **Зерцалов Михаил Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры
«Механики грунтов и геотехники» ФГБОУ ВПО
«Московский государственный строительный
университет»,

Купчикова Наталья Викторовна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технология и организация строительства,
экспертиза и управление недвижимостью»
Астраханский инженерно-строительный
институт АИСИ.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профес-
сионального образования «Московский
автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)».**

Защита состоится «20» ноября 2013 г., в 16:30 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 7618, (7-ой корпус МИИТа, Минаевский переулок, д. 2, ауд. 7618).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ).

Автореферат разослан «___» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Шавыкина М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие подземного строительства является наиболее эффективным средством решения транспортных проблем современного мегаполиса. Достижение высоких скоростей строительства возможно только при условии внедрения новой высокопроизводительной техники и прогрессивных строительных технологий. В российской и зарубежной практике тоннелестроения широко применяются универсальные клиновидные обделки, позволяющие использовать только один типовой клиновидный блок на всех участках трассы тоннеля, которая может включать в себя не только прямолинейные, но и сложные участки, задаваемые пространственной кривой. Использование этого типа конструкций позволяет добиться высоких темпов строительства подземных транспортных линий, а так же повысить качество и точность проходки тоннеля.

Диссертация посвящена вопросам совершенствования методов расчёта сборных железобетонных клиновидных тоннельных обделок при возведении их в сложных инженерно-геологических условиях.

В настоящее время большинство расчётов тоннельных конструкций выполняются по плоским расчётным схемам, что не всегда соответствует реальным инженерно-геологическим условиям. В стандартных программах, используемых для расчёта подземных сооружений, как правило, не учитывается влияние податливости стыков на статическую работу конструкции. Создание программно-математического обеспечения, с помощью которого можно выполнять прочностные расчёты сборных железобетонных клиновидных тоннельных обделок по пространственным расчётным схемам, учитывающих сложные инженерно-геологические условия и податливость стыковых соединений является задачей актуальной и востребованной для практического использования.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является совершенствование методов расчёта сборных железобетонных тоннельных обделок на базе универсальных клиновидных блоков в сложных инженерно-геологических условиях с учётом податливости стыковых соединений.

В работе решены следующие задачи:

- произведён анализ существующих способов прочностного расчёта тоннельных конструкций;
- произведён анализ конструкций сборных клиновидных обделок для последующей разработки базы данных расчётных схем этого типа конструкций;
- выявлены основные закономерности работы стыковых соединений и оценено влияние податливости стыков на

напряжённно-деформированное состояние сборных железобетонных тоннельных обделок;

- разработано программно-математическое обеспечение для пространственных расчётов сборных тоннельных обделок по методу конечных элементов с учётом податливости стыковых соединений и нелинейной работы грунтовой среды;
- разработана система автоматического формирования пространственной геометрии обделки и генерации расчётной схемы для прочностного расчёта;
- разработано программно-математическое обеспечение для расчётов тоннельных обделок с учётом цилиндрической анизотропии грунтовой среды в сложных инженерно-геологических условиях;

Научная новизна работы и личный вклад автора.

- модернизирована существующая аналитическая модель вычисления пространственных геометрических характеристик клиновидных колец для построения алгоритма автоматического формирования трёхмерной геометрии тоннельных обделок на базе универсальных клиновидных блоков;
- предложено для численной реализации модели Винклера грунтовой среды использовать концентрическую систему стержневых конечных элементов;
- предложено для учёта податливости стыковых соединений сборных тоннельных обделок использовать пространственную пластинчато-стержневую конечно-элементную модель с односторонней работой стержневых элементов;
- сформирован базовый набор вычислительных процедур метода конечных элементов для прочностного анализа сборных тоннельных обделок с учётом податливости стыковых соединений и нелинейной работы грунта;
- предложено для учёта цилиндрической анизотропии на границах раздела грунтовых сред использовать плоские пластинчатые расчётные схемы.

Методологической базой исследований является анализ взаимодействия системы «сборная тоннельная обделка - грунт» путем проведения численного анализа по методу конечных элементов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется хорошим совпадением результатов, полученных в данной работе, с известными аналитическими решениями, полученными методами строительной механики, а так же с теоретическими и экспериментальными данными других авторов

Практическая значимость и реализация работы.

- Разработанные методики расчёта реализованы в виде программного комплекса, с помощью которого можно выполнять прочностные расчёты сборных клиновидных тоннельных обделок с учётом работы стыковых соединений в сложных инженерно-геологических условиях;
- разработанные программы могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях, занимающихся проектированием подземных сооружений;
- использование разработанных программ позволяет определять напряжённо-деформированное состояние сборных тоннельных обделок и прилегающей грунтовой среды при пересечении осью тоннеля нескольких геологических пластов, а также в местах соединения подземных выработок;
- с помощью разработанных программ можно давать практические рекомендации по уточнению напряжённо-деформированного состояния сборных тоннельных обделок с учётом податливости стыковых соединений при проведении расчётов на базе стандартных методов, не учитывающих особенности статической работы сборных конструкций;
- с помощью разработанных программ был произведён сравнительный анализ пространственных расчётных схем тоннельной обделки для различных положений замкового элемента, а также при различных характеристиках грунтовой среды. На основании серии проведённых расчётов были выработаны практические рекомендации по выбору оптимального варианта взаимной ориентации клиновидных колец в зависимости от инженерно-геологических условий по трассе тоннеля.

Апробация работы: основные научные положения работы докладывались:

- на 70 Научно-методической конференции (МАДИ). Москва 2012 г.
- на 71 Научно-методической конференции (МАДИ). Москва 2013 г.
- на научно-практической конференции «Неделя науки-2013. Наука МИИТа - транспорту» в МИИТ г. Москва 25 апреля 2013.

На защиту выносятся:

- вычислительный алгоритм автоматического формирования пространственной геометрии тоннельных обделок на базе универсальных клиновидных блоков;
- модификация Винклеровской модели грунтовой среды, адаптированная для пространственных расчётов тоннельных конструкций по методу конечных элементов;
- вычислительный алгоритм конечно-элементного анализа сборной тоннельной обделки с учётом податливости стыковых соединений и нелинейной работы грунта;
- предложения по учёту цилиндрической анизотропии грунтовой среды при формировании расчётной схемы тоннельной обделки в сложных инженерно-геологических условиях.

Публикации.

По материалам выполненных исследований опубликовано 5 работ, из них 4 в издании, рекомендуемом ВАК РФ для кандидатских диссертаций.

Объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов - общим объемом 120 страниц печатного текста, включая 93 рисунка, 4 таблицы, список литературы из 53 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы исследований, сформулирована цель работы, обозначены решаемые автором задачи, обоснована достоверность полученных результатов. Кроме того, обоснована научная новизна и практическую значимость работы.

В первой главе диссертации выполнен литературный обзор, дан краткий анализ конструктивных схем тоннельных обделок из сборного железобетона, а так же экспериментальных и теоретических методов исследования работы этого класса конструкций.

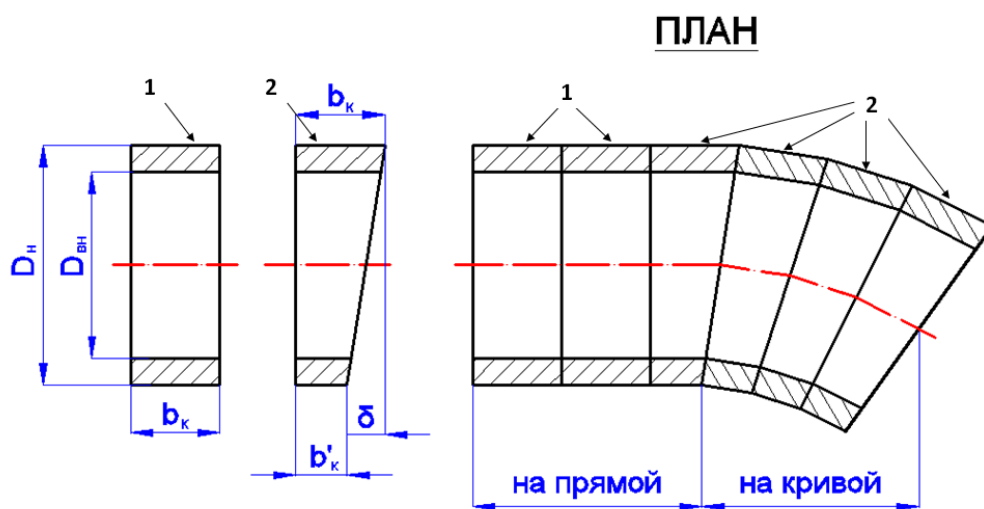
Вопросами проектирования сборных тоннельных обделок занимались: Орлов С.А, Волков В.П., Мюзимский В.А, Гельман Я.Г., Бодров Б.П., Ильин Н.П., Будаева А.Х, Лиманов Ю.А, Туренский Н.Г., Сергеев В.К., Сонин А.Н., Храпов В.Г, Эткин С.М., Часовитин П.А., Голицинский Д.М., Фролов Ю.С., Коньков А.Н., Иванес Т.В., Голубых А.Б. и др. Среди зарубежных следует отметить Anheuser L, Curtis D.J., Rock T.A. .

Вопросами прочностного анализа и взаимодействием с грунтом тоннельных конструкций занимались: Шапошников Н.Н., Розанов С.Н., О. Коммерель, Б. Хьюит, Давыдов С.С., Новиков А.М., Эристов В.С., Горелик Л.И., Клейн Г.К., Вауркин К.А., Бугаев О.Е., Матери Б.Ф., Бодров Б.П., Шпиро И.Г., Жемочкин Б.Н., Гарбер В.А., Булычев Н.С., Зерцалов М.Г., Кубышкин А.А., С. А. Орлов, Курбацкий Е.Н., В. Е. Меркин, В. Г. Голубов, Л. С. Афендилов, М. Г. Дмитриев, В. В. Сальников, Н В Смирнов, М. И. Краснов, О. Ю. Антонов и др. Анализ литературных источников обосновывает необходимость дальнейшего совершенствования методов проектирования и прочностного анализа тоннельных обделок из сборного железобетона с учётом современного уровня развития вычислительной техники.

Вторая глава посвящена вопросам формирования пространственной геометрии сборных тоннельных обделок из универсальных клиновидных блоков.

Для устройства сборных обделок на криволинейных участках трассы тоннеля используются так называемые клиновые кольца, характеризующиеся тем, что кольцевые борта сборных элементов не параллельны друг другу (рис. 1). В настоящее время для проходки криволинейного участка применяются два типа клиновых колец:

- 1 – сочетание прямых колец (с параллельными кольцевыми бортами) с клиновидными с односторонним (правым или левым) скосом (рис.1);
- 2 – использование универсальных клиновидных колец (рис.2).



- 1 – прямые кольца;
- 2 – клиновидные кольца с односторонним скосом;

Рис.1. Схема укладки колец обделки на прямом и криволинейном участке тоннеля с использованием прямых колец в сочетании с клиновидными (с односторонним скосом).

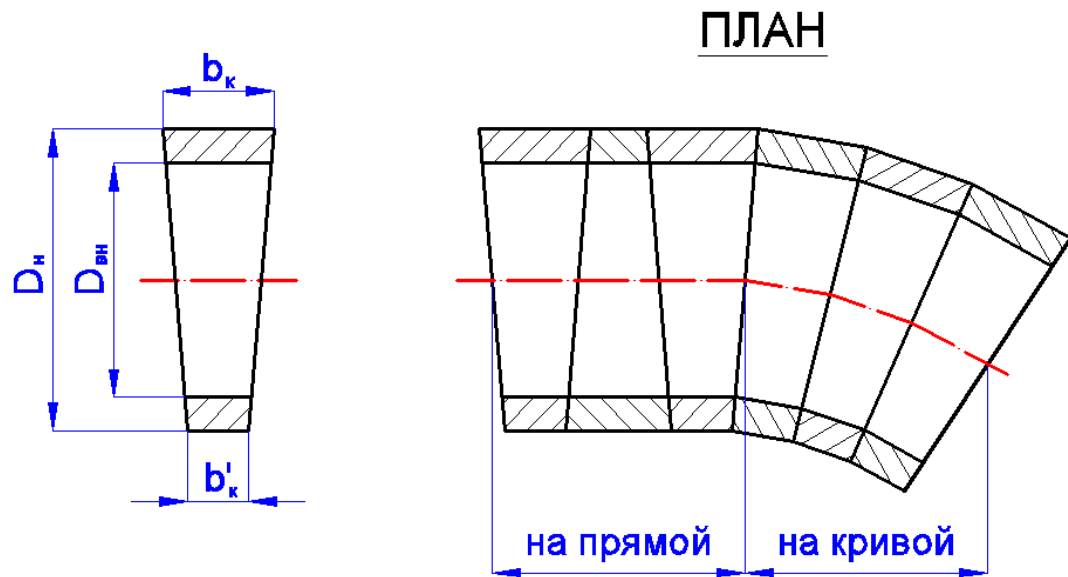


Рис.2. Схема укладки колец обделки на прямом и криволинейном участке тоннеля с использованием универсальных клиновидных колец.

Конструкция универсальных клиновидных колец позволяет проходить тоннель и на прямом (рис. 3) и на криволинейном участке тоннеля за счет поворота одного кольца относительно другого.

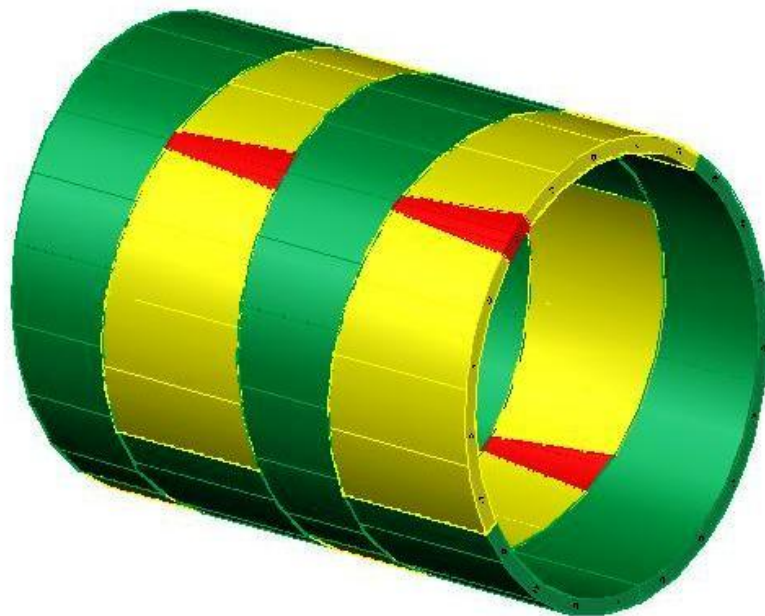


Рис.3. Обделка из клиновидных элементов на прямом участке тоннеля

В настоящее время при прокладке тоннелей проходческими щитами использование прямых колец в сочетании с кольцами с односторонним скосом практически не производится. Это невыгодно с экономической и технологической точки зрения, потому что приводит к увеличению числа

типов элементов обделки. Поэтому в современном строительстве обделка тоннеля сооружается в основном из универсальных клиновидных колец с двусторонним скосом (рис. 4).

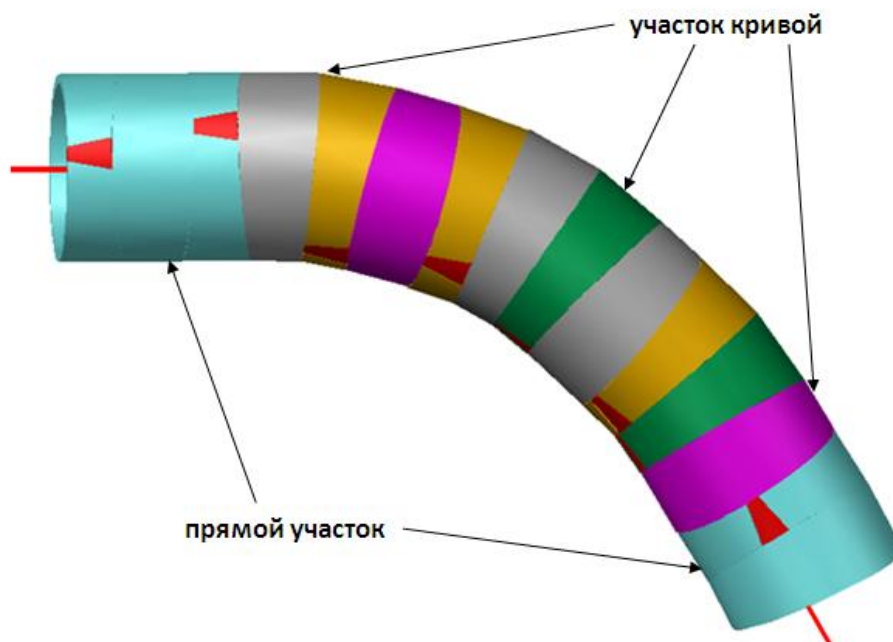


Рис.4. Тоннельная обделка с использованием универсальных клиновидных колец.

Формирование геометрии обделки на базе универсальных клиновидных блоков требует большого объёма вычислений, выполняемых в проектных организациях, как правило, вручную или с применением локальной автоматизации, незначительно ускоряющей процесс проектирования. В рамках диссертационного исследования был разработан программный комплекс, полностью автоматизирующий процесс формирования геометрии тоннельной обделки на базе универсальных клиновидных блоков. Комплекс оснащён удобным пользовательским интерфейсом и трёхмерной визуализацией результатов геометрического моделирования сборной обделки. Для удобства последующего монтажа обделки в программном комплексе предусмотрена подсистема автоматической генерации монтажных схем клиновидных колец. Программный комплекс функционирует в среде графического редактора AutoCAD, широко распространённого в проектных организациях строительного профиля, поэтому работа с программой не вызовет затруднений у инженеров-проектировщиков.

Рассмотрим основные шаги алгоритма формирования геометрии тоннельной обделки. Проектная ось тоннеля, состоящая из прямых и круговых участков, разбивается на прямолинейные участки (базисы), после чего формируются списки точек координат оси (рис. 5).

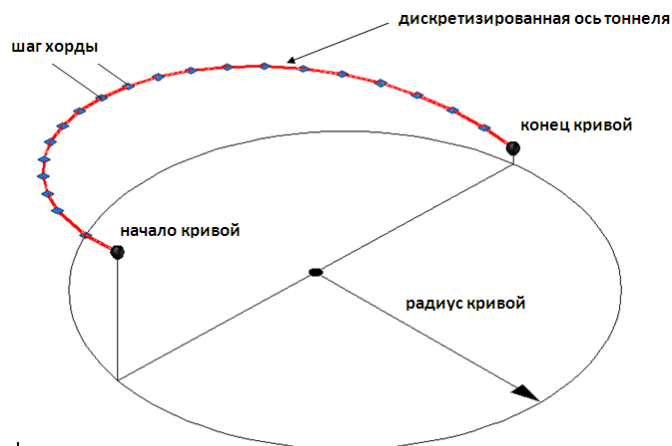


Рис.5. Дискретная модель оси тоннеля на пространственной кривой.

После формирования пространственной кривой проектной оси тоннеля начинается формирование геометрии обделки. Эта процедура состоит из следующих шагов:

- переход в локальную систему координат, у которой ось Z совпадает с первым отрезком оси тоннеля;
- вставка стартового клиновидного блока в начало оси тоннеля (рис. 6);

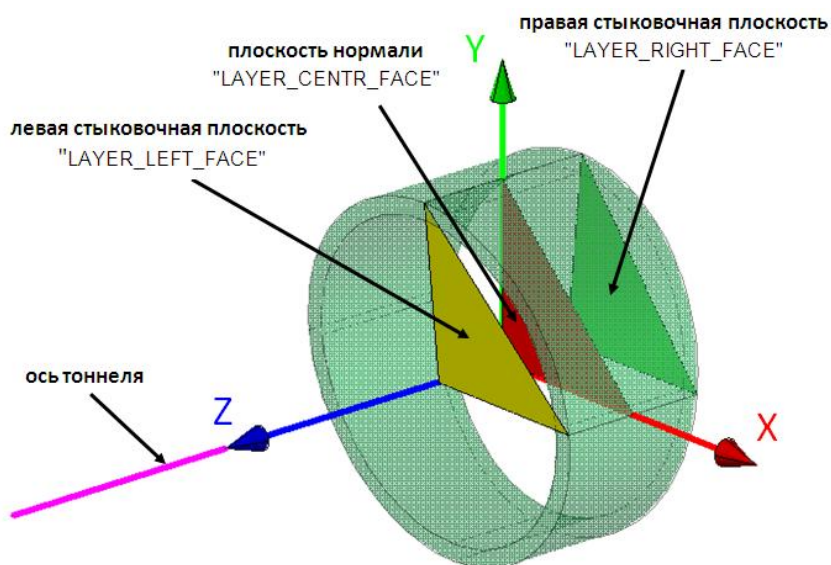


Рис.6. Вставка стартового клиновидного кольца.

- переход в локальную систему координат левой плоскости клина (рис. 7);

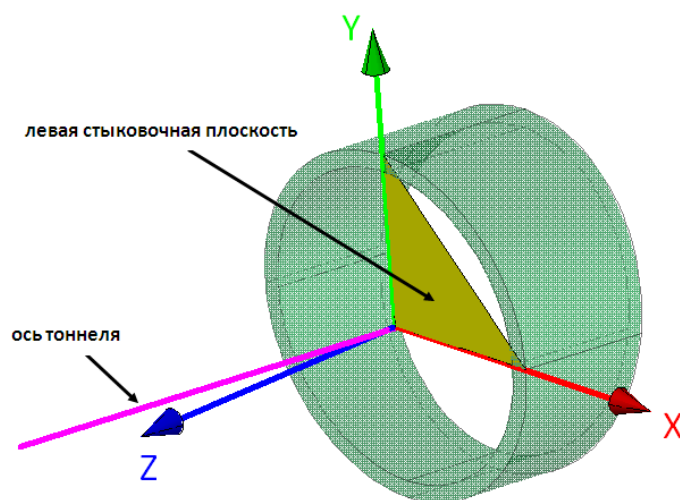


Рис.7. Переход в локальную систему координат левой плоскости клина.

- поиск стыковочной плоскости с наименьшим углом наклона нормали к оси тоннеля. Именно этот угол и будет оптимальным углом поворота текущего кольца вокруг своей относительно предыдущего. Также на этом шаге вычисляется число болтовых шагов, необходимое для поворота кольца (рис. 8);

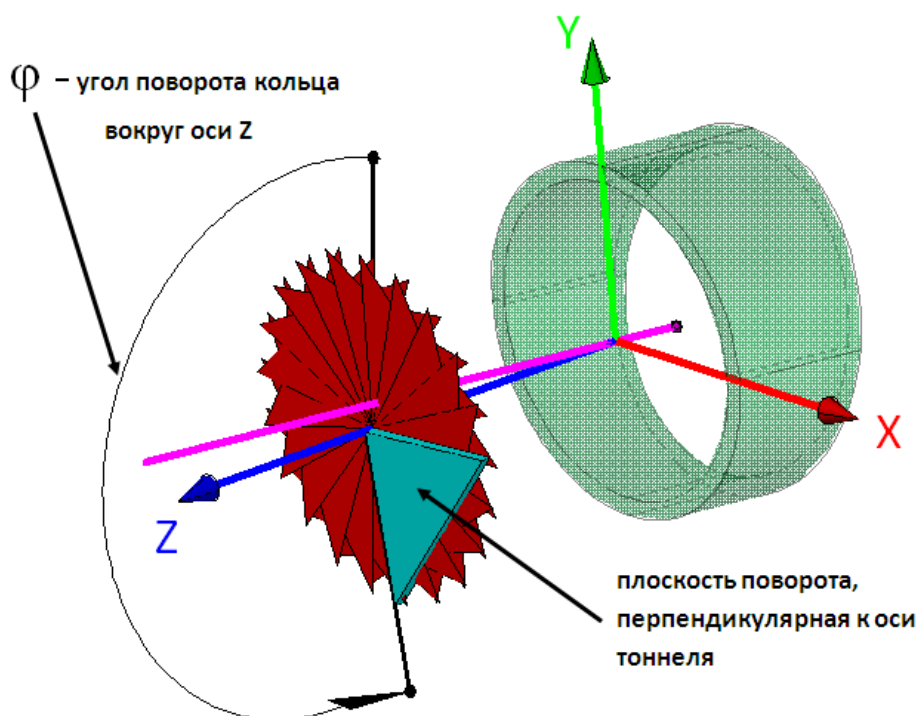


Рис.8. Поиск локальной плоскости поворота с наименьшим углом наклона нормали к оси тоннеля.

- вставка промежуточного блока. Вставка происходит в локальной системе координат левой плоскости клина (рис. 9);

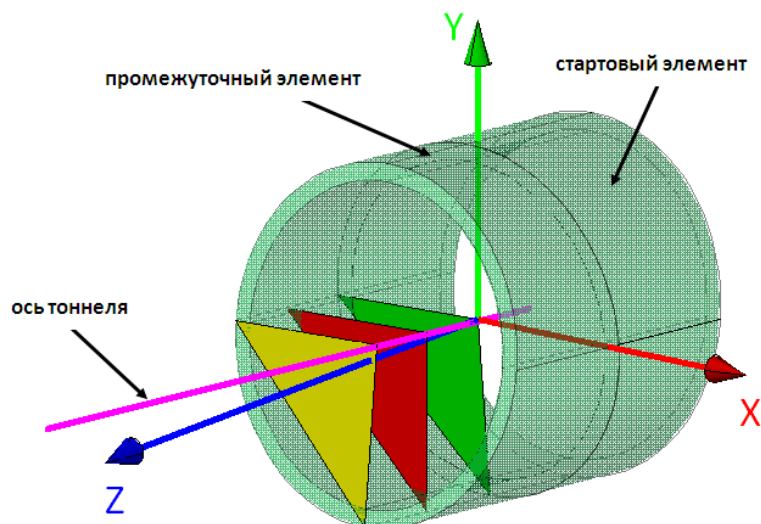


Рис.9. Вставка промежуточного блока.

- присоединение текущего элемента к предыдущему в системе координат левой стыковочной плоскости.

Результат работы программы представлен на рис.10.

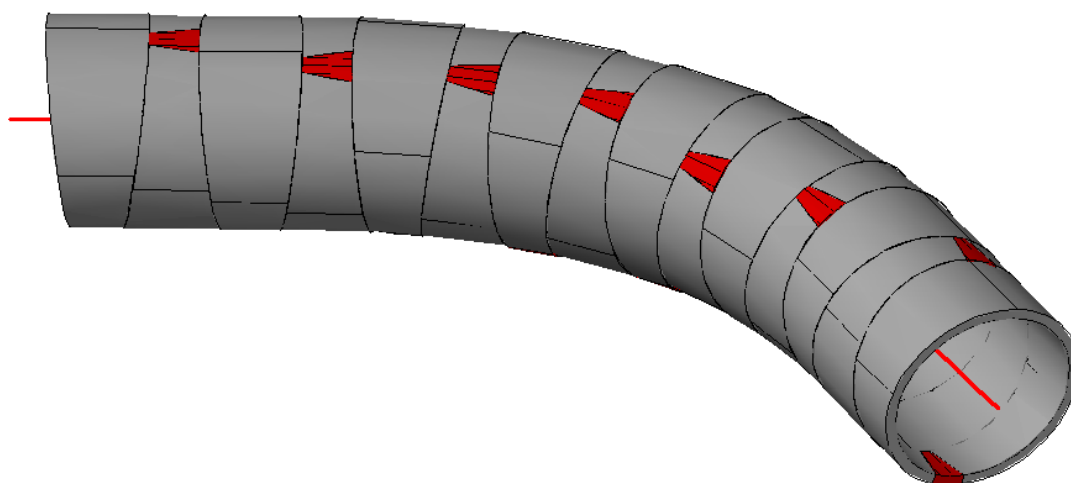


Рис.10. Результат работы системы формирования геометрии тоннеля.

Третья глава посвящена вопросам прочностного анализа сборных железобетонных обделок на базе универсальных клиновидных блоков. В главе приведён обзор прикладного программного обеспечения, применяемого для прочностного анализа тоннельных конструкций. Несмотря на всё многообразие и сложность решаемых задач с помощью этого программного обеспечения, вопрос об учёте работы стыковых соединений, особенно в случае пространственного расчёта, до сих пор остаётся открытым. Поэтому в рамках диссертационного исследования была поставлена задача создания собственного программного обеспечения для

прочностного анализа сборных конструкций тоннельных обделок с учетом работы стыковых соединений.

Основной сложностью прочностного анализа сборных тоннельных конструкций, является учёт податливости стыковых соединений. Для программной реализации была специально разработана расчётная схема, представленная на рис. 11.

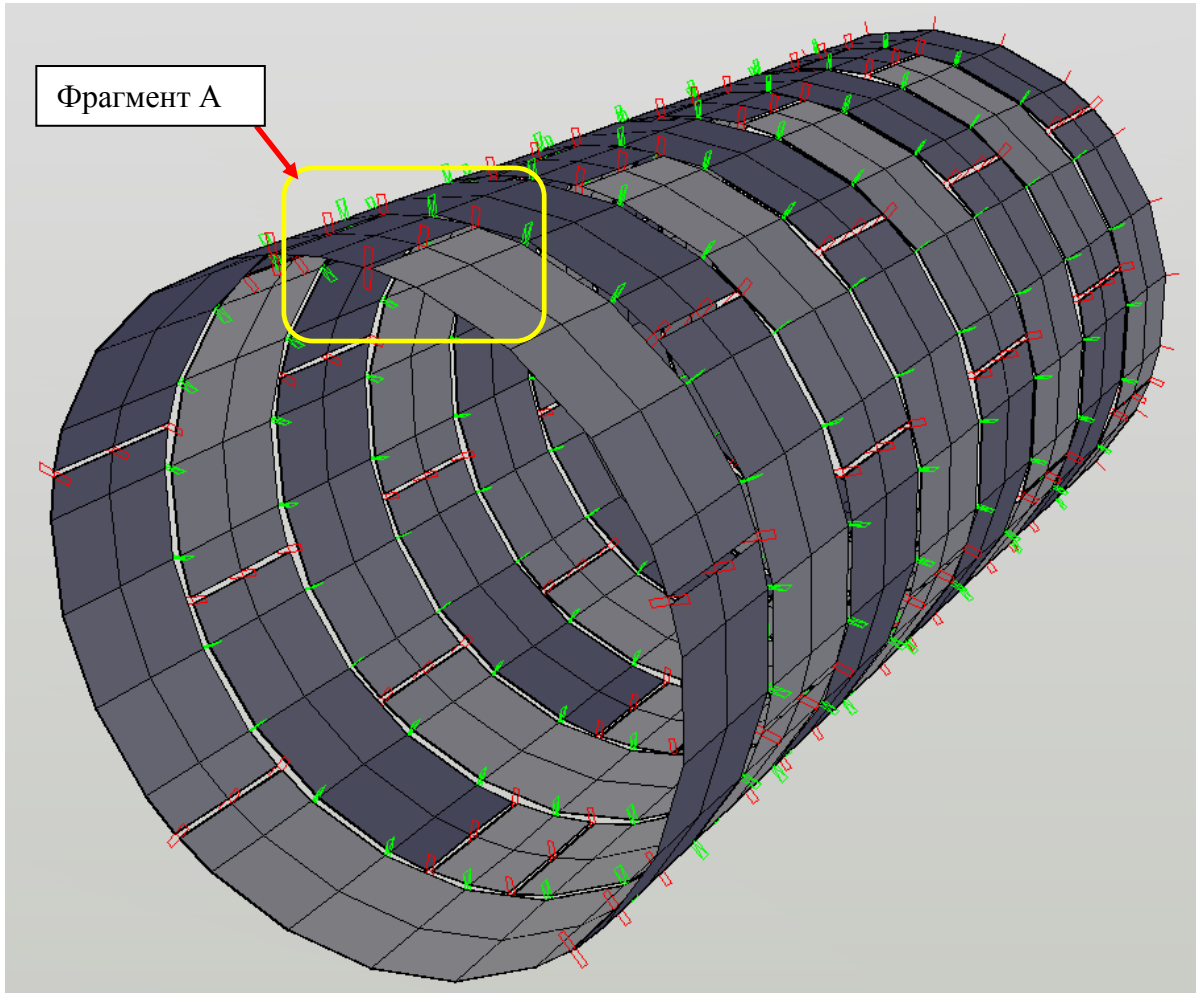


Рис.11. Общий вид расчётной схемы сборной железобетонной тоннельной обделки.

Рассмотрим более подробно элементы расчётной схемы, представленные на рис.11.

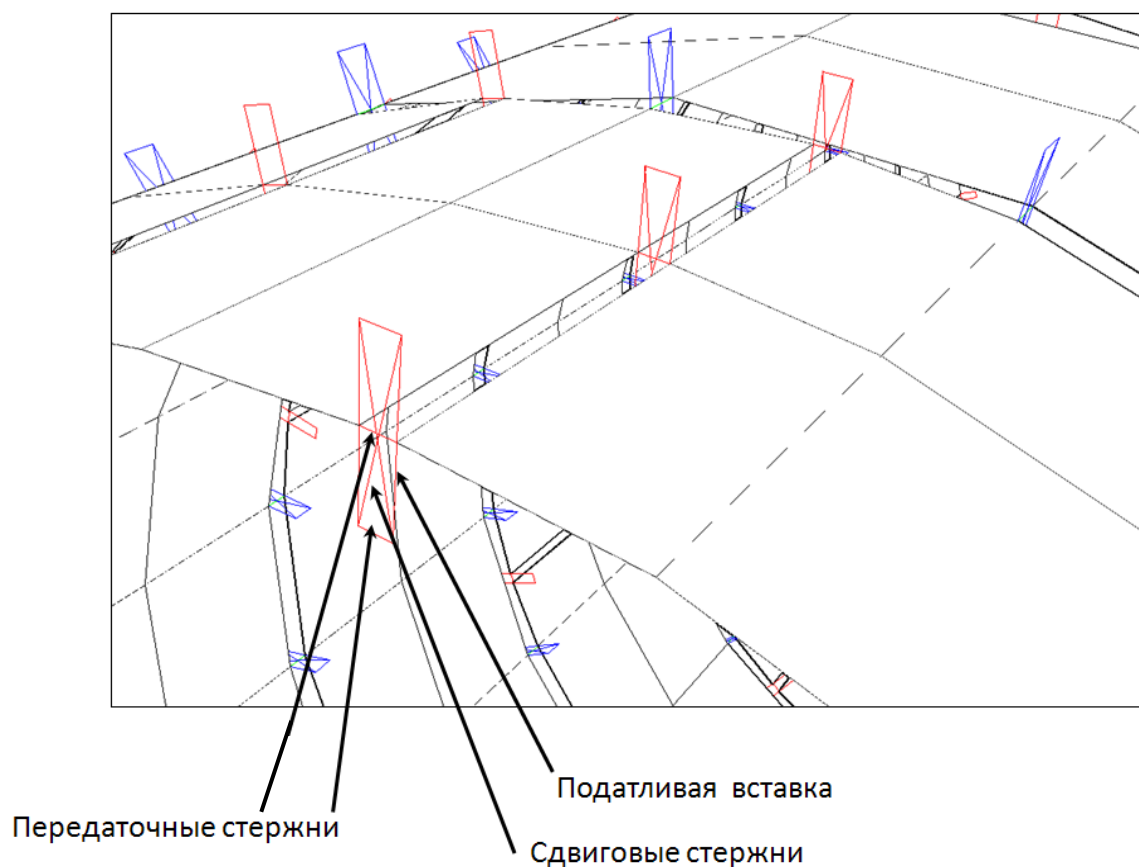


Рис.12. Фрагмент А. Расчётная схема стыкового соединения.

Конечно-элементная модель сборной тоннельной обделки строится с использованием двух типов конечных элементов. Обделки моделируется изгибной четырёхугольной пластиной с пятью степенями свободы в узле. Элементы стыкового соединения (рис. 12) моделируются пространственными стержневыми конечными элементами с шестью степенями свободы в узле.

Геометрические характеристики стержней, моделирующих податливые вставки и сдвиговые стержни, вычисляются с помощью аналогового расчёта по плоским пластинчатым и стержневым моделям. На рис. 13 представлены расчётные схемы для подбора геометрических характеристик податливой вставки поперечных стыков.

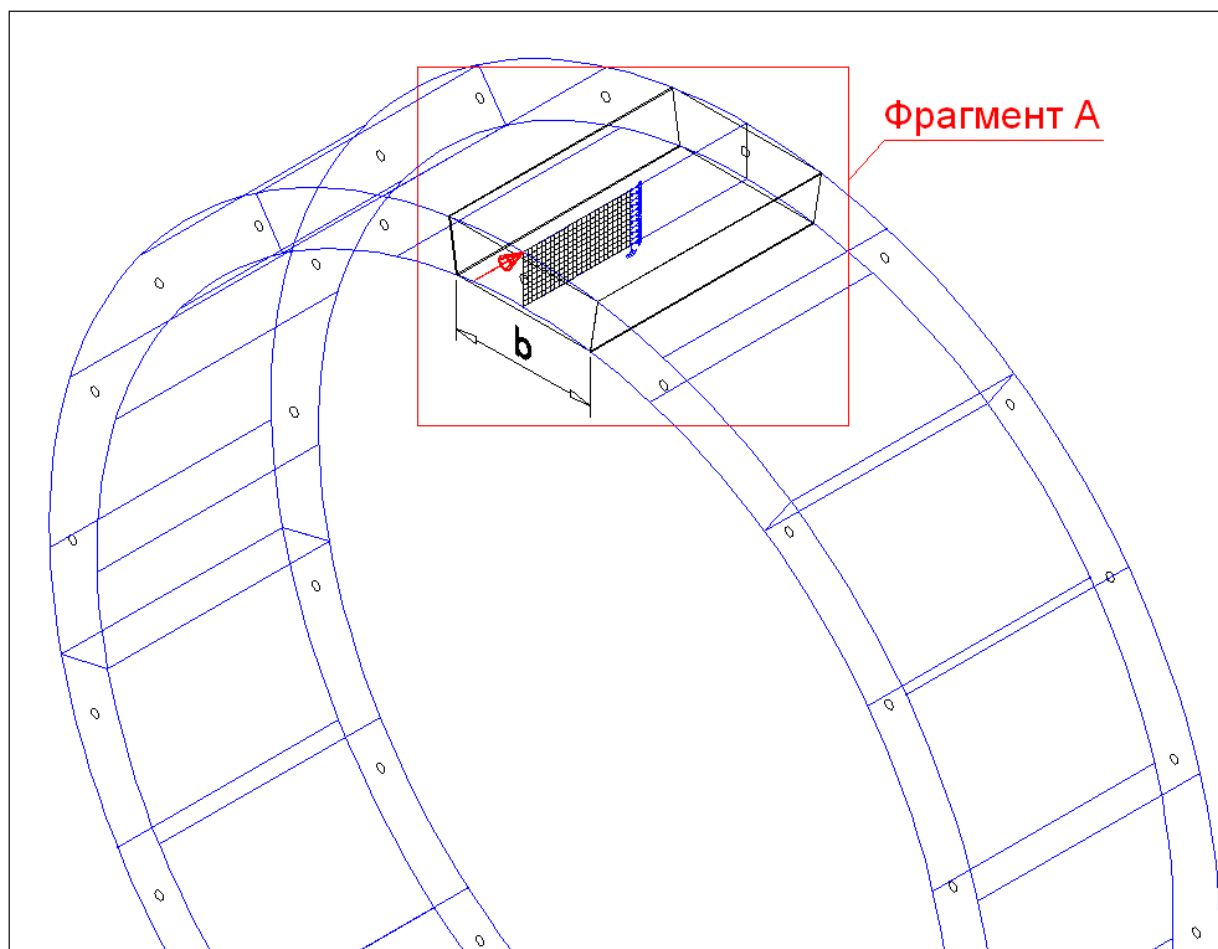


Рис.13. Общий вид расчётной схемы для определения податливости поперечных стыков.

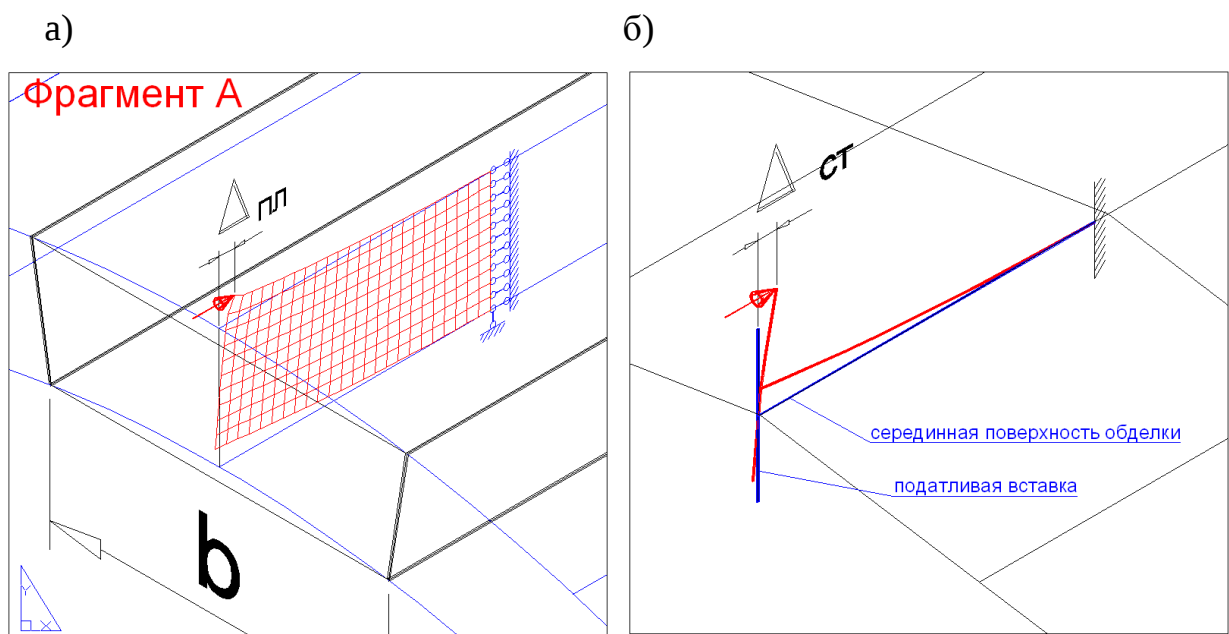


Рис.14. Расчётные схемы для определения геометрических характеристик податливой вставки поперечного стыка.

Для определения локальной податливости в окрестности болтового соединения (рис.13) выполняется расчёт на действие единичной силы плоской пластины толщиной b (рис.14 а,б). Физические характеристики пластины (рис.14а) пересчитываются для плоско-деформированного напряжённого состояния. После определения перемещения $\Delta_{пл}$, этот фрагмент обделки моделируется стержневой системой (рис.14б). Перемещения от единичной силы для стержневой модели $\Delta_{ст}$ несложно получить аналитически, методом Мора. Геометрические характеристики податливой вставки можно получить (рис.14б) из условия:

$$\Delta_{пл} = \Delta_{ст}$$

Податливость стержневой вставки продольных стыков определяется в том же порядке.

Для подтверждения достоверности предложенной методики было проведено численное моделирование, результаты которого сравнивались с экспериментальными, полученными по результатам стендовых сертификационных испытаний обделки мини-метро. Испытания проводились в тоннельной лаборатории ЦНИИСа. Результаты испытаний взяты из диссертации Кубышкина А.А. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 15. Сравнительные расчёты выполнялись для сосредоточенных сил $P=100$ т.

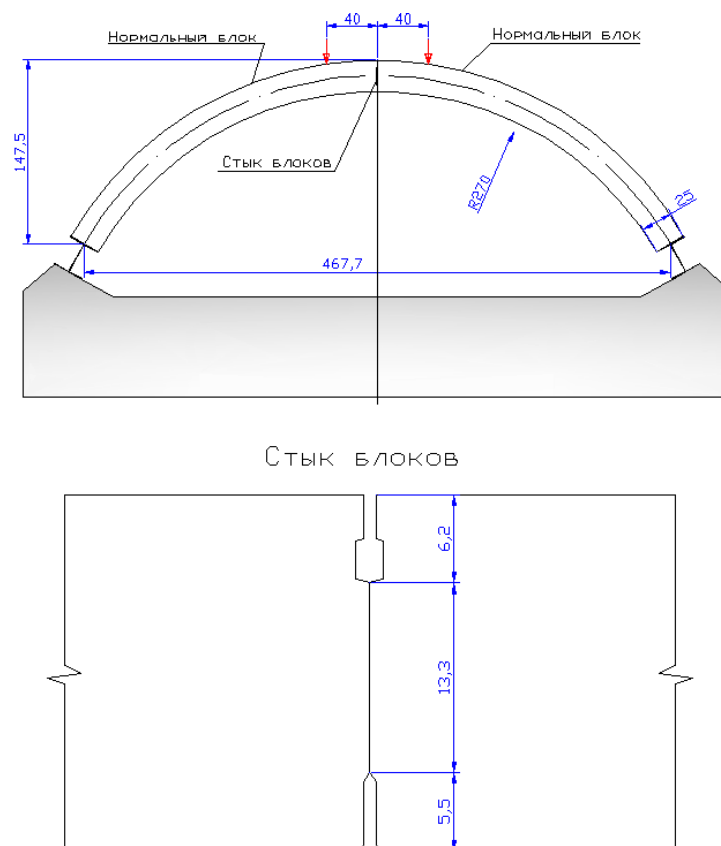


Рис.15. Схемы испытаний фрагментов обделки на стенде.

Сравнительный анализ выполнялся на трёх расчётных моделях. Плоской пластинчатой модели (рис. 16.а), плоской стержневой модели (рис. 16.б) и пространственной пластинчато-стержневой модели (рис. 19).

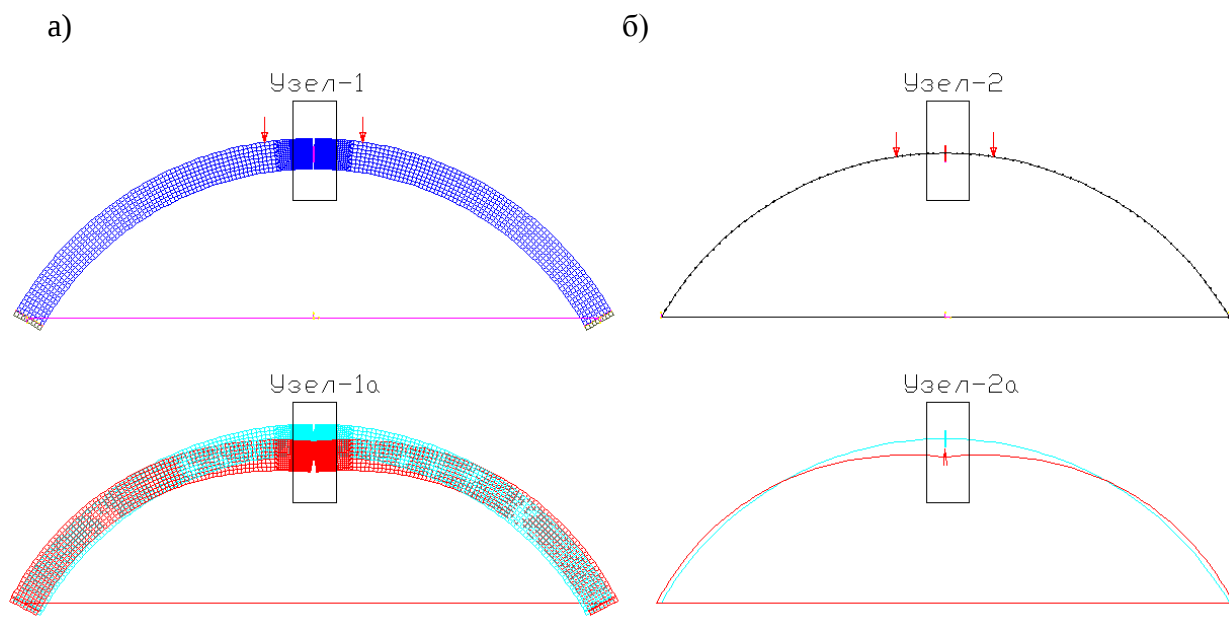


Рис.16. Пластинчатая и пластинчато-стержневая КЭ-модели обделки.

Деформированные схемы стыковых узлов для пластинчатой и пластинчато-стержневой модели обделки представлены на рис. 17. На рис. 18. представлены расчётные схемы для определения момента инерции податливой вставки в стыковом узле для стержневой и пространственной пластинчато-стержневой моделей.

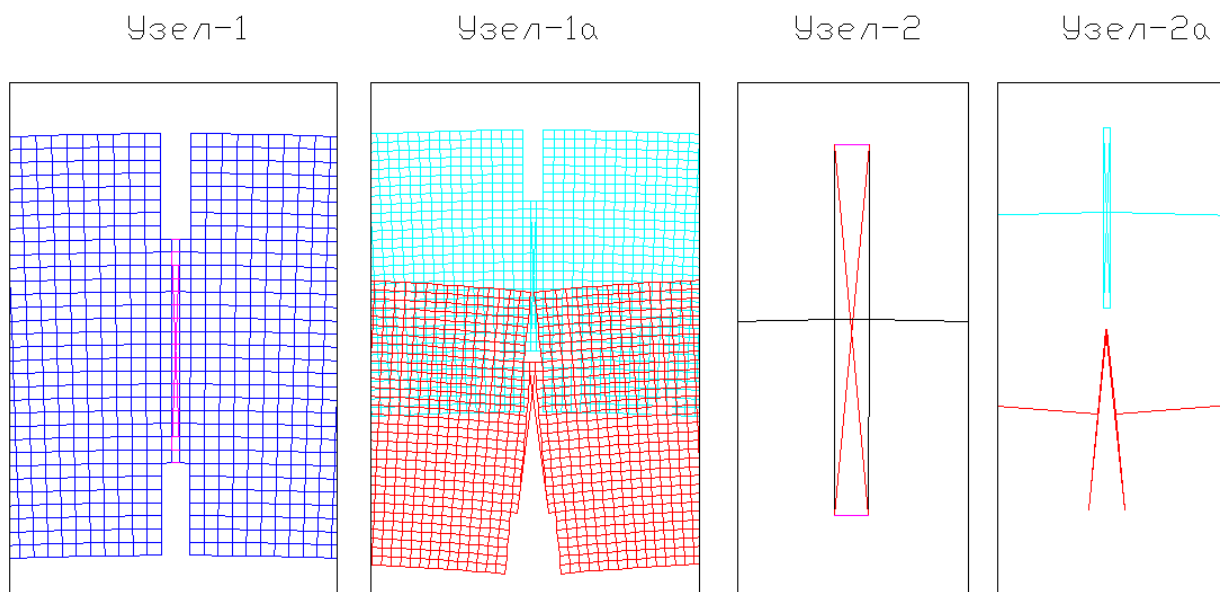


Рис.17. Деформированные схемы стыковых узлов для пластинчатой и пластинчато-стержневой КЭ-моделей обделки.

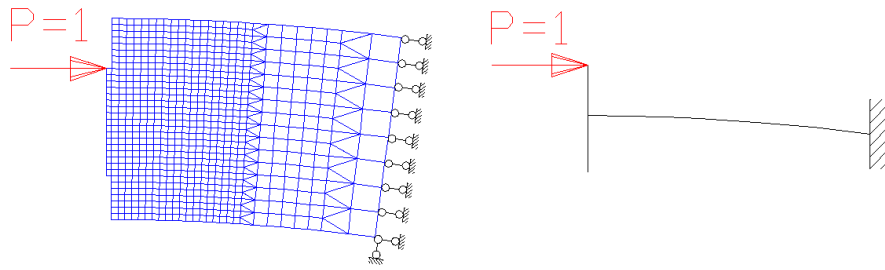


Рис.18. Расчётные схемы для определения момента инерции податливой вставки в стыковом узле.

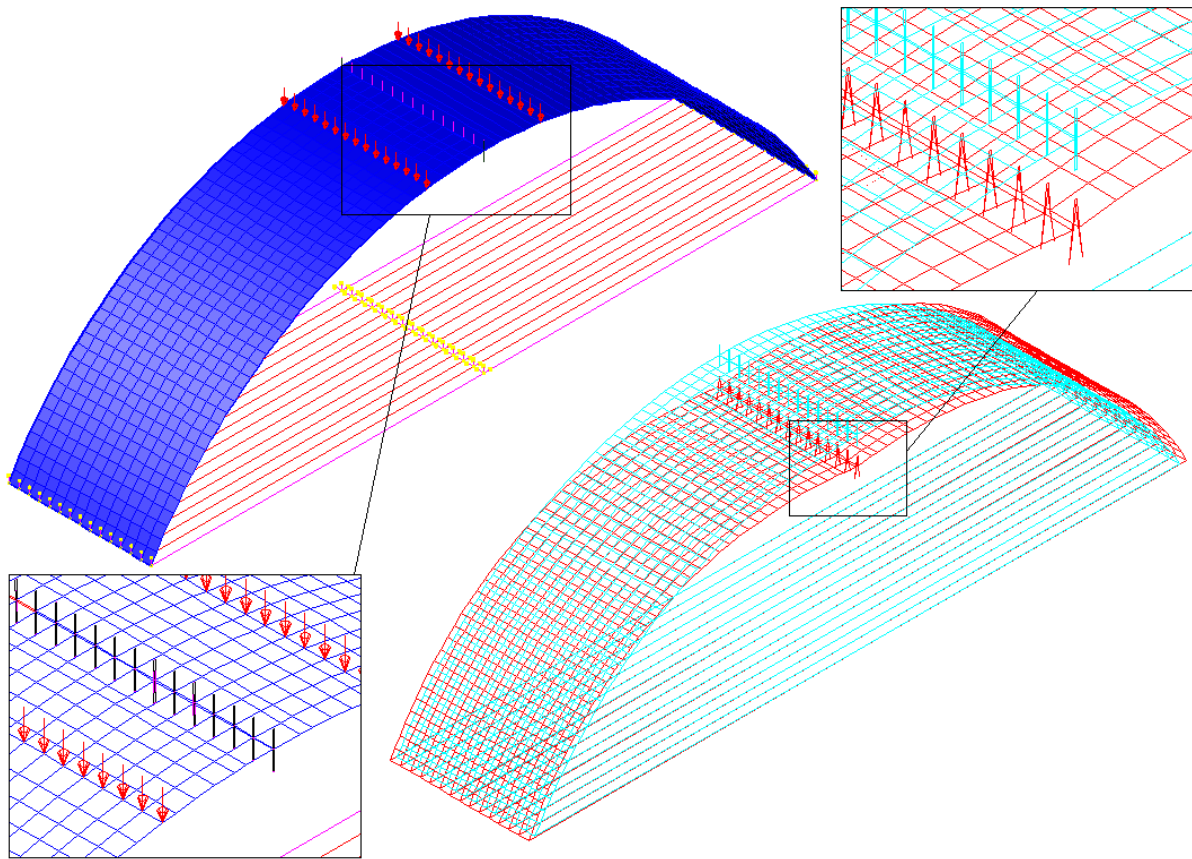


Рис.19. Пространственная пластинчато-стержневая КЭ-модель обделки. Деформированная схема.

В таблице 1 приведены вертикальные перемещения стыкового узла (мм).

Таблица 1. Вертикальные перемещения стыкового узла (мм)

Эксперимент	Плоская пластинчатая модель	Плоская стержневая модель	Пространственная пластинчато- стержневая модель
13.56	11.75	11.97	11.89

Создание пространственных расчётных схем клиновидных обделок обычными средствами графических редакторов - это очень трудоёмкая процедура, поэтому в рамках диссертационного исследования был разработан специализированный графический препроцессор, позволяющий полностью автоматизировать все этапы подготовки расчетной схемы обделки. На первом этапе дискретизации генерируется конечно-элементная модель универсального клиновидного блока (рис. 20). Исходной информацией для этой процедуры являются плоские проекции клиновидного блока и число болтовых шагов.

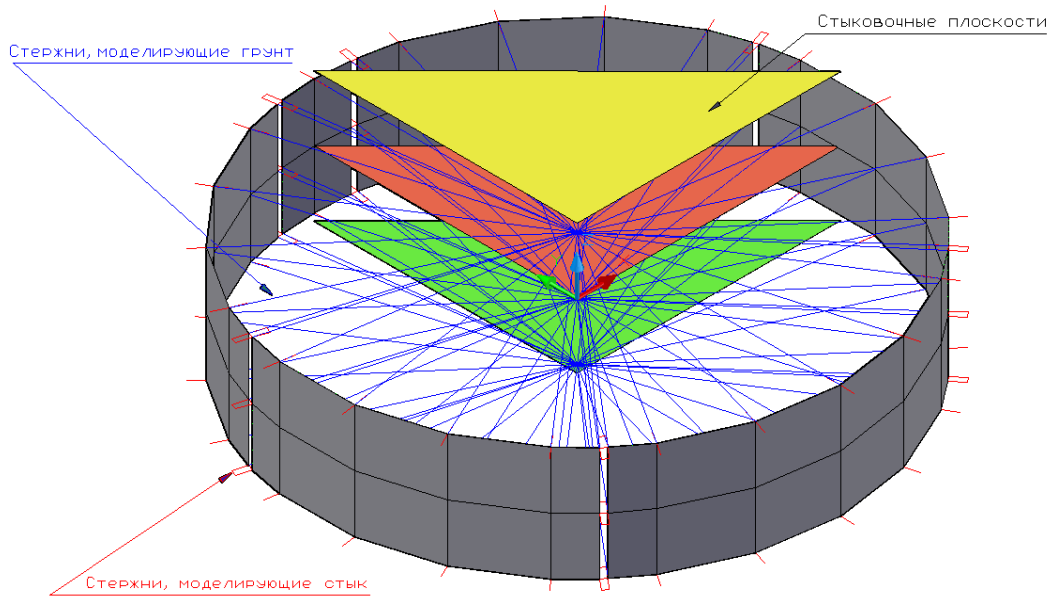


Рис.20. Дискретная модель клиновидного блока.

После формирования дискретной модели клиновидного блока формируется полная конечно-элементная модель сборной тоннельной обделки с использованием алгоритма формирования пространственной геометрии обделки. Описание этого алгоритма приведено во второй главе диссертации. Особенностью использования этого алгоритма при формировании конечно-элементной модели является наличие блока генерации расчётной схемы поперечного стыка. Результат работы процедуры генерации конечно-элементной модели приведен на рис. 11

Четвёртая глава посвящена вопросам взаимодействия конструкции обделки с окружающей грунтовой средой в сложных инженерно-геологических условиях. Наиболее распространённым способом решения этой задачи является использование винклеровской модели грунта. В конечно-элементных комплексах эта схема реализуется путём установки пружин в узлы, контактирующие с грунтом. Расчёт проводится в нелинейной постановке, и на каждой итерации исключаются пружины,

работающие на растяжение. При формировании матрицы жёсткости конечного элемента жёсткость пружины, вычисленная через коэффициент постели, добавляется на главную диагональ матрицы жёсткости конечного элемента. Этот подход не совсем удобен при использовании пространственных конечно-элементных моделей, так как в этом случае необходимо задавать положение грунта относительно плоскости (оси) элемента, что влечёт за собой дополнительные вычислительные сложности, связанные с заданием ориентации грунтового массива, а так же поиском “зоны отлипания”.

В рамках диссертационного исследования была разработана стержневая модель системы “обделка-грунт” (рис. 21).

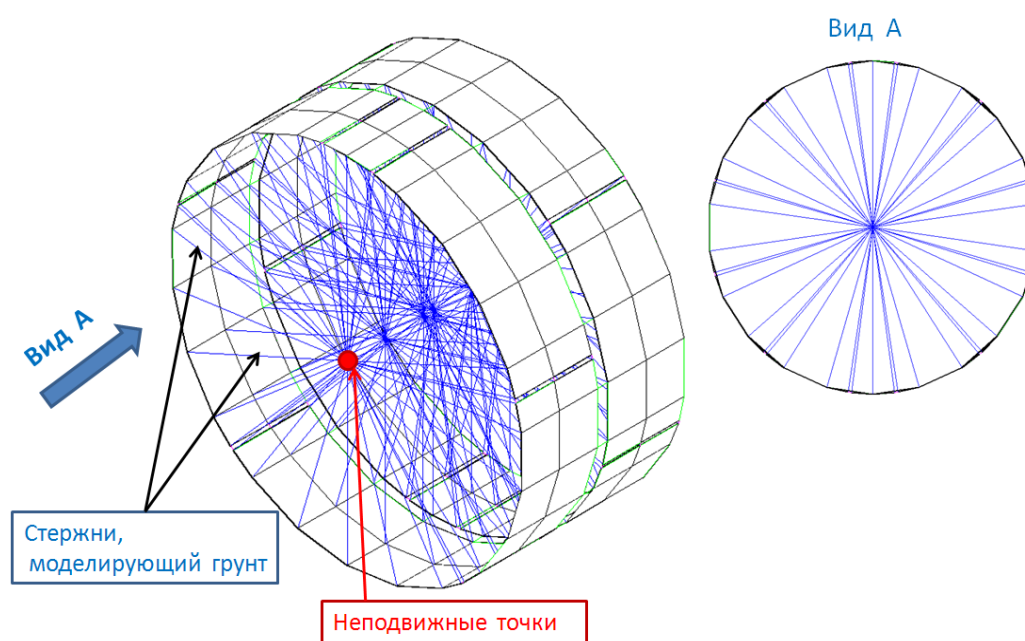


Рис. 21. Расчётная схема системы “обделка-грунт”

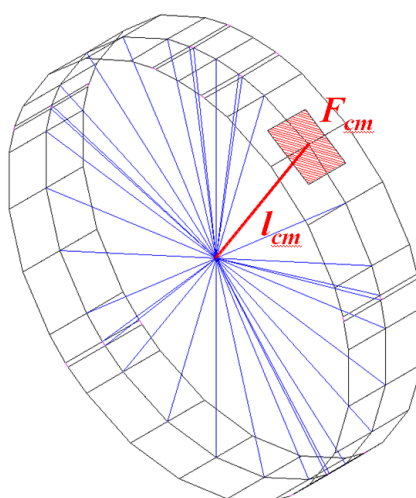


Рис. 22. Вычисление геометрических характеристик стержня, моделирующего грунт.

Эта модель наглядна и компактна, так как приводит к незначительному увеличению размерности задачи. По этой модели удобно контролировать зону отлипания грунта и получать напряжения в грунтовом массиве через усилия в стержнях, моделирующих грунт. Приведенный модуль упругости стержня можно получить по следующему соотношению:

$$E_{cm} = k \cdot l_{cm}$$

Где k - коэффициент постели,

l_{cm} - длина стержня (рис. 22).

Площадь поперечного сечения F_{cm} стержня, моделирующего грунт вычисляется в соответствии с рис. 22. При учёте конструктивной нелинейности по этой схеме в зоне отлипания выключаются стержни, работающие на сжатие.



Рис.23. Блок-схема вычислительного ядра системы расчёта сборных тоннельных обделок.

Для численного моделирования по МКЭ конструктивной нелинейности, учитывающей работу стыковых узлов и взаимодействие конструкции обделки с грунтом, была разработана вычислительная процедура, реализованная в виде комплекса программ на языке C++. Блок-схема итерационного процесса приведена на рис. 23. На рис.24,25,26 представлены результаты работы программы для фрагмента обделки.

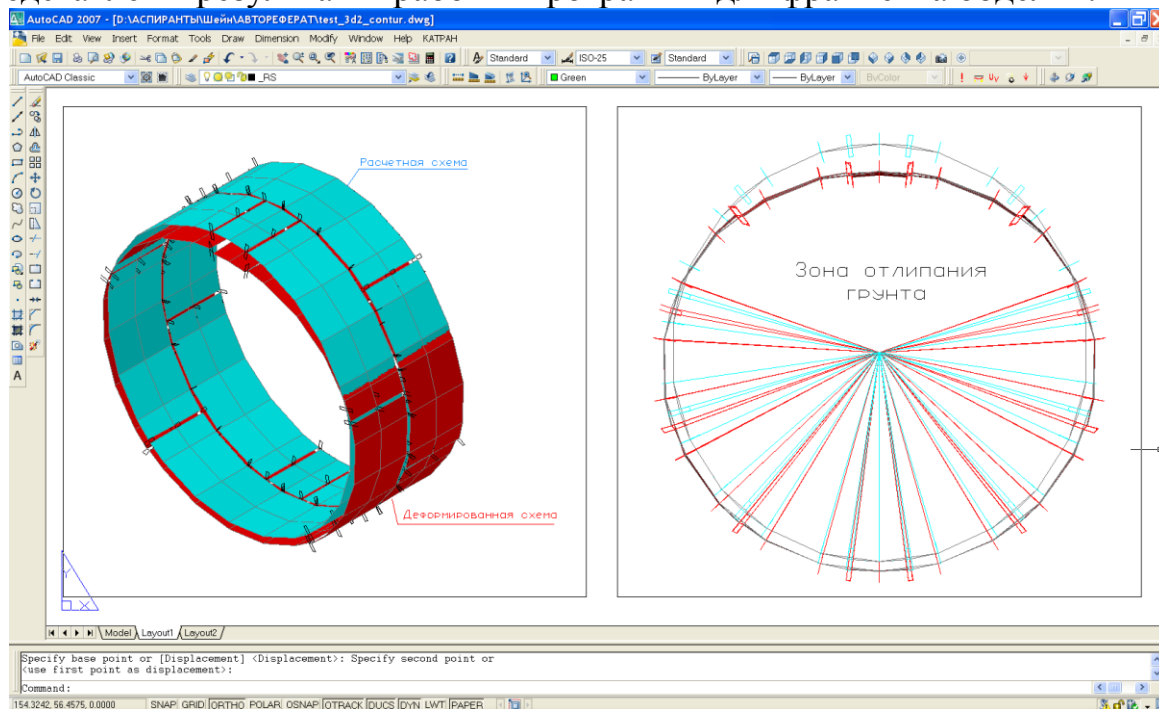


Рис.24. Результаты расчёта фрагмента сборной обделки. Перемещения.

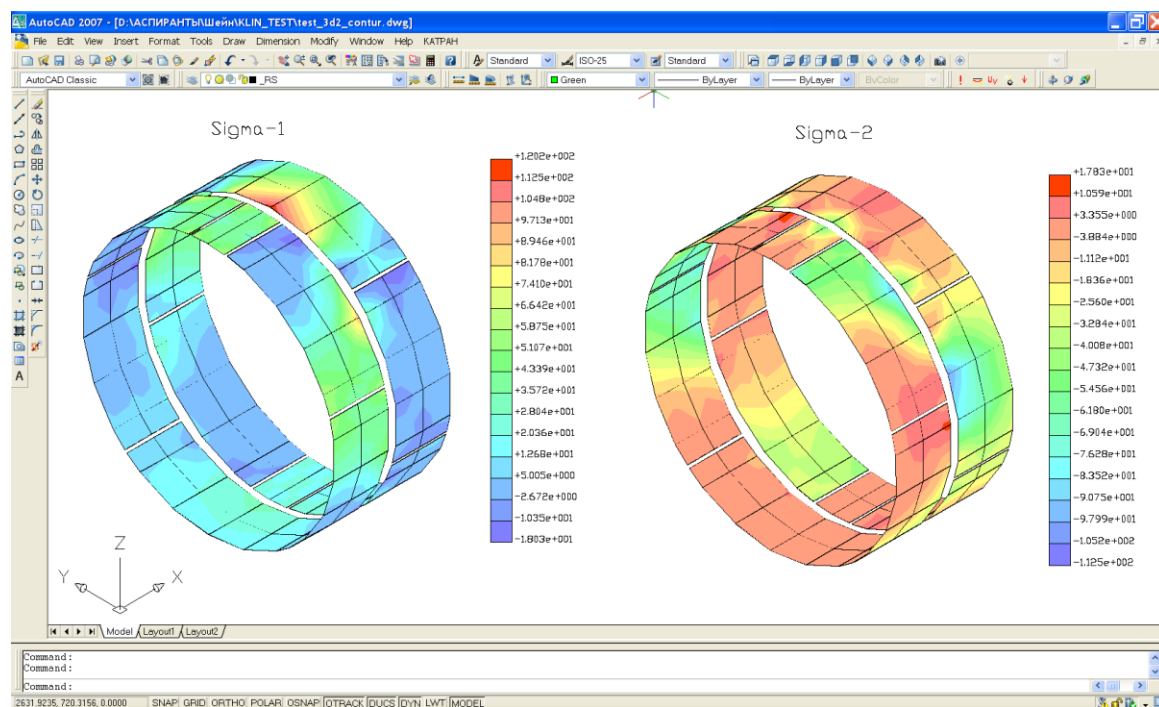


Рис.25. Результаты расчёта фрагмента сборной обделки. Напряжения на внешнем контуре обделки.

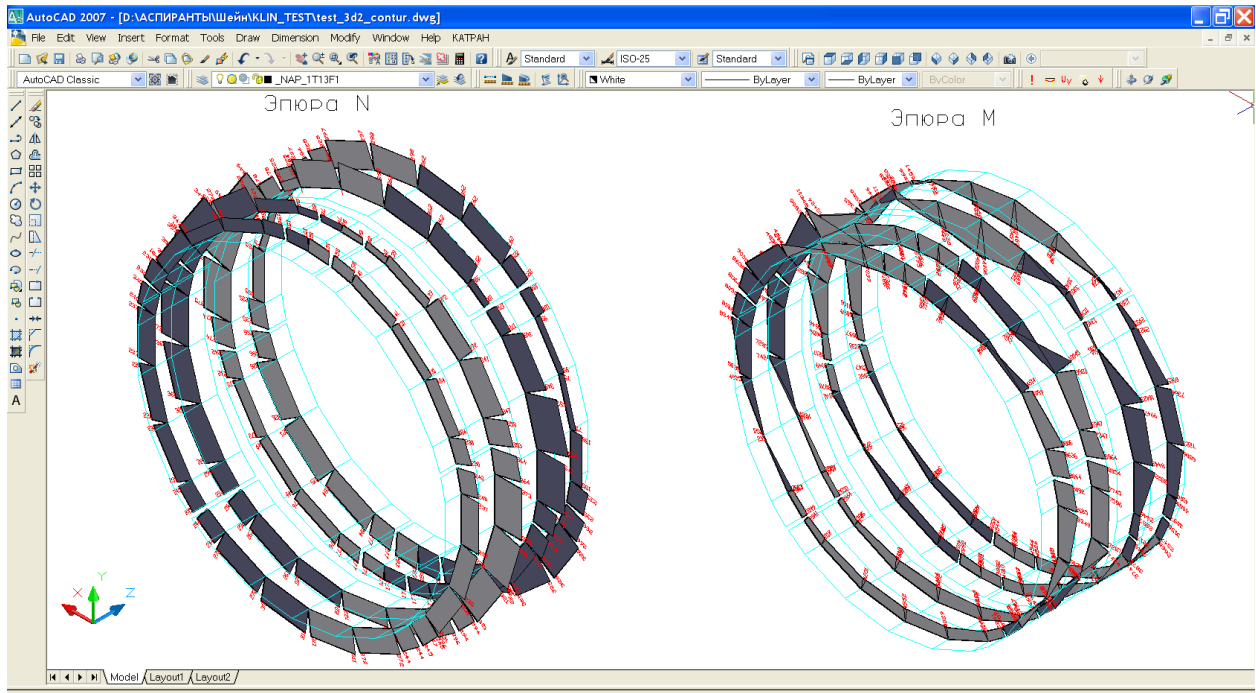


Рис.26. Результаты расчёта фрагмента сборной обделки. Эпюры внутренних усилий.

Если ось тоннеля пересекает несколько геологических слоёв (рис. 25) или проходит в непосредственной близости от ранее построенных подземных сооружений, то пространственный расчёт сборной обделки выполняется с учётом цилиндрической анизотропии грунтовой среды. Цилиндрическая анизотропия – это неравномерность распределения коэффициента постели по периметру обделки.

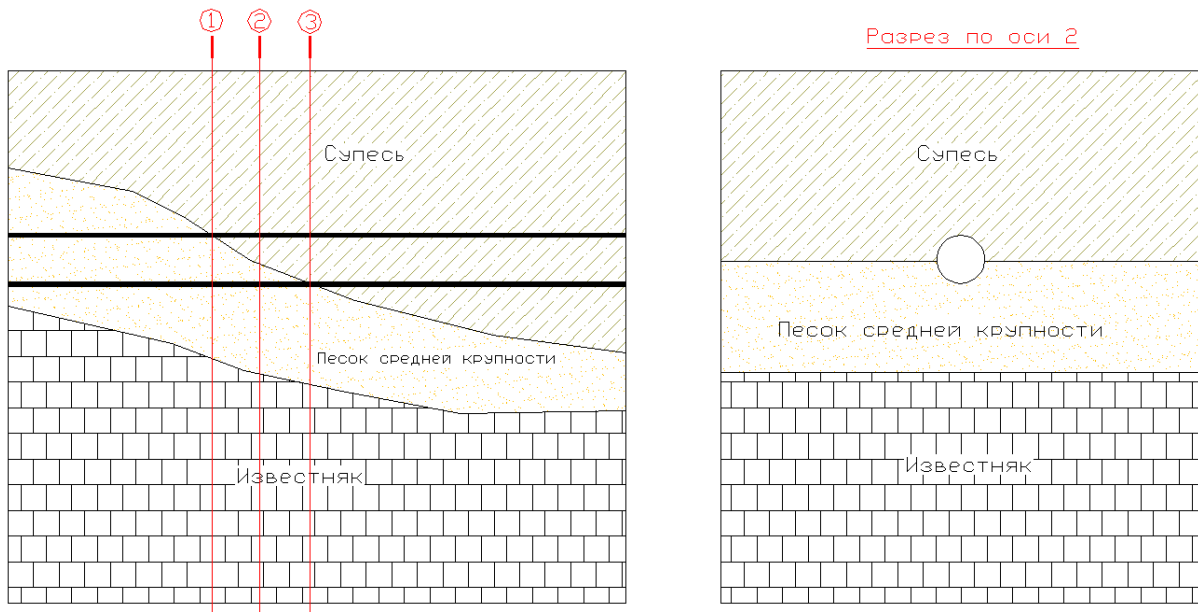


Рис.25. Пересечение осью тоннеля в нескольких геологических пластов.

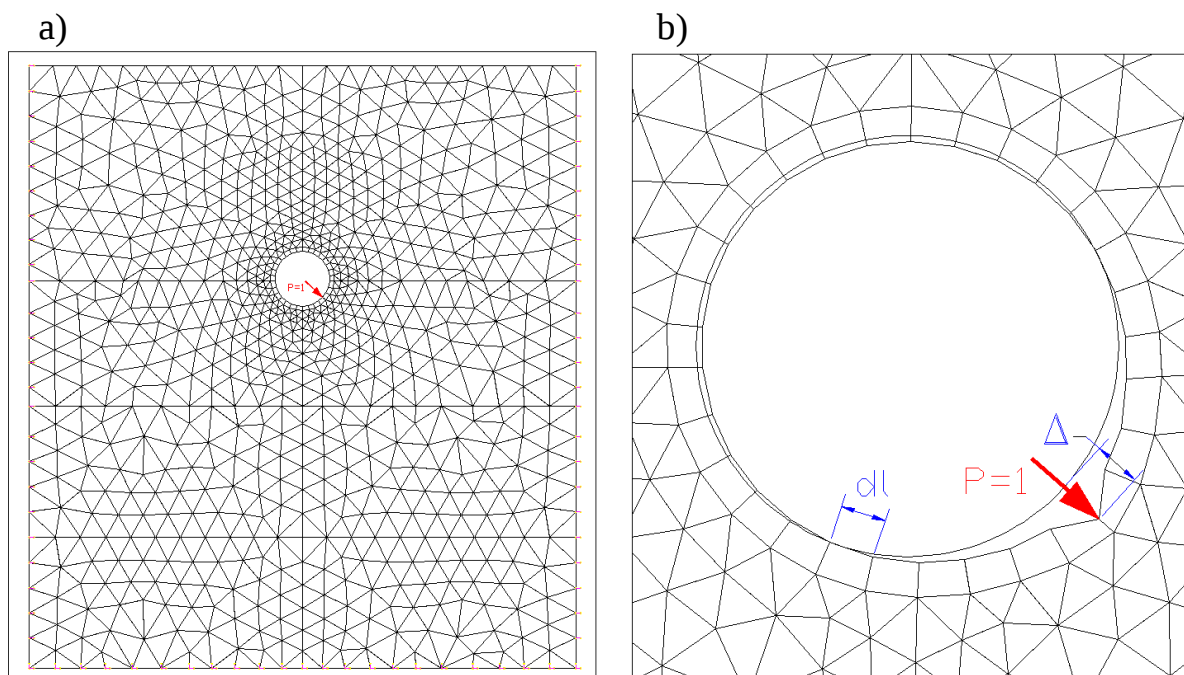


Рис.26. Расчётная схема для вычисления коэффициентов постели по периметру тоннельной выработки.

Для вычисления коэффициентов постели по периметру обделки с последующей интеграцией их величин в модуль статического расчёта клиновидных обделок по расчётной схеме, представленной на рис.19, была разработана специальная подсистема. Коэффициенты постели определяются численно по плоской расчётной схеме поперечного разреза тоннельной выработки (рис. 26.а). К точкам, находящимся на контуре выработки последовательно прикладываются единичные силы радиального направления (рис. 26.б). Определяются перемещения Δ по направлению действия силы (рис. 26.б) и вычисляется значение коэффициента постели в данной точке по соотношению:

$$k=1/(\Delta \cdot dl)$$

Подсистема вычисления коэффициентов постели включает в себя блоки автоматической триангуляции конечно-элементной сетки, генерации векторов загрузки контура обделки единичными силами и вычисления коэффициентов постели. На рис. 27 приведены графики распределения коэффициентов постели для поперечных разрезов 1,2,3 геологического разреза, представленного на рис. 25.

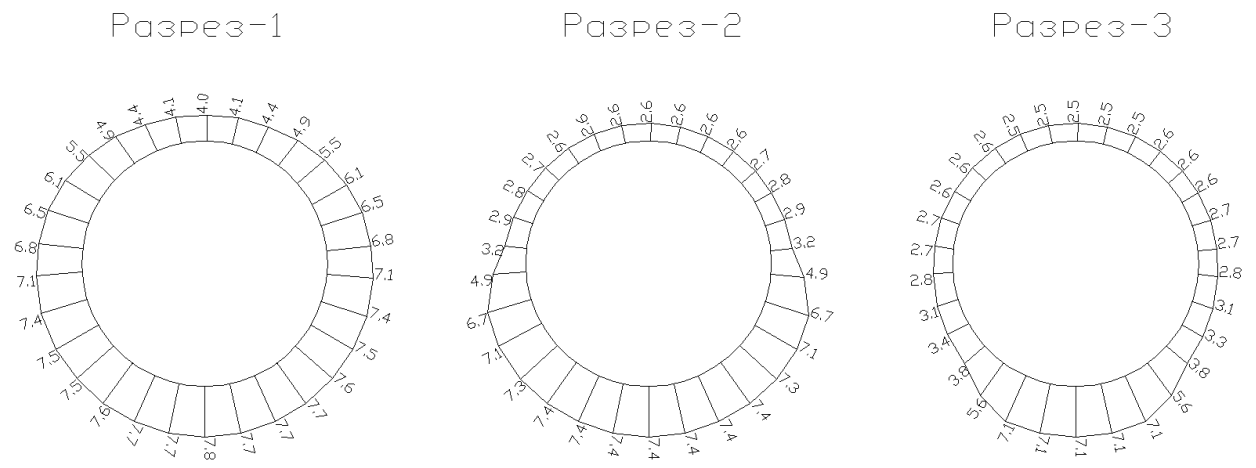


Рис.27. Графики распределения коэффициентов постели по периметру обделки на различных участках трассы тоннеля.

ВЫВОДЫ

1. В диссертационной работе разработана вычислительная технология формирования пространственной геометрии сборных тоннельных обделок на базе универсальных клиновидных блоков. Разработан программный комплекс, реализующий эту технологию на ЭВМ
2. Разработана новая модификация винклеровской модели грунтовой среды для пространственных расчётных схем сборных тоннельных обделок.
3. Усовершенствованы стандартные методы формирования пространственных расчётных схем стыковых соединений сборных тоннельных обделок для пространственных расчётов по методу конечных элементов.
4. Разработаны рекомендации по учёту цилиндрической анизотропии грунтовой среды при формировании расчётной схемы тоннельной обделки в сложных инженерно-геологических условиях. На базе этих рекомендаций разработано программно-математическое обеспечение с помощью которого учитывается неравномерность распределения физических характеристик грунта на контуре тоннельной выработки для последующих расчётов по схеме «обделка-грунт».
5. Разработаны алгоритмы автоматической генерации пространственной расчётной схемы сборной тоннельной обделки на базе универсальных клиновидных блоков.
6. Разработан специализированный программный комплекс для определения напряжённо-деформированного состояния сборных тоннельных обделок и прилегающей грунтовой среды с учётом податливости стыковых соединений в сложных инженерно-геологических условиях.

7. С использованием разработанного в рамках диссертационного исследования программного комплекса были выполнены пространственные расчёты сборных тоннельных обделок на базе универсальных клиновидных блоков в сложных инженерно-геологических условиях.

Публикации по теме диссертационной работы

1. Шейн Аунг Тун. Расчёт модели вертикальных подземных выработок [Текст] / Шейн Аунг Тун . // Мир транспорта – Москва: 2012. № 2/2012. – С.88-91.
2. Шейн Аунг Тун. Формирование дискретных моделей подземных сооружений сложной конфигурации [Текст] / Шейн Аунг Тун // Транспортное строительство – Москва : 2012. № 9/2012. – С. 25-27.
3. Шейн Аунг Тун. Моделирование тоннельных обделок [Текст] / Шейн Аунг Тун . // Мир транспорта – Москва: 2012. № 4/2012. – С.60-65.
4. Шейн Аунг Тун. Система автоматизированного расчёта железобетонных тоннельных обделок произвольного очертания. [Текст] / Шейн Аунг Тун // Транспортное строительство – Москва : 2012. № 9/2012. – С. 24-25.
5. Шейн Аунг Тун, Нестеров И.В. Моделирование работы плоских пластинчатых систем с использованием табличного процессора Excel. [Текст] / Шейн Аунг Тун, И.В. Нестеров // Инженерные сооружения на транспорте. Сборник трудов МИИТа. Выпуск 4. – Москва: 2012. С. 32-36.

Подписано к печати

Форма 60x84/16

Объем 1,5 п.л.

заказ №

Тираж 80 экз

127994, Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9,
УПЦ ГИ МИИТ