

Развитие теории и аналитических методов расчета подземных сооружений на сейсмические воздействия

Анциферов С.В., Саммаль А.С., Деев П.В.
Тульский государственный университет

Содержание доклада

- ✓ Основные положения аналитических методов расчета подземных сооружений на статические нагрузки и сейсмические воздействия землетрясений (в квазистатической постановке)
- ✓ Решение динамической задачи теории упругости
- ✓ Сравнение результатов расчета
- ✓ Выводы

В Тульском государственном университете на протяжении более трех десятилетий функционирует научная школа в области геомеханики, коллектив которой разрабатывает оригинальные аналитические методы расчета подземных сооружений, в том числе – расположенных в сейсмических районах. Основателями школы геомехаников в ТулГУ являются заслуженные деятели науки и техники РФ, профессора, доктора технических наук Булычев Н.С., Фотиева Н.Н.

Основные положения аналитических методов расчёта обделок тоннелей, сооружаемых закрытым способом

- ❖ Рассматривается взаимодействие обделки (крепя) с массивом пород как элементов единой деформируемой системы, которая воспринимает внешние нагрузки и воздействия. Давление грунта (пород) на обделку не задаются априори, а определяются в процессе единого расчета.
- ❖ Используются теоретические положения механики сплошной среды для различных моделей поведения грунта (пород), в том числе – теории упругости, теории пластичности, а также присущие им методы решения соответствующих задач.
- ❖ Массив грунта считается линейно-деформируемой однородной изотропной средой.
- ❖ Используются расчётные схемы плоских задач теории упругости (длина сооружения превосходит его поперечные размеры более чем в 5 раз).

- ❖ Расчет конструкций подземных сооружений осуществляется на статические нагрузки и сейсмические воздействия землетрясений.
- ❖ Возможность учета ряда конструкционных и технологических особенностей строительства подземных сооружений: различные формы поперечного сечения выработок; обделки различных конструкций - монолитные, набрызгбетонные, в том числе – с анкерами, сборные, многослойные и т. д.; влияние земной поверхности, наличие параллельных близко расположенных тоннелей; последовательность сооружения тоннелей и отставание возведения обделок от забоя.
- ❖ Возможность учета специальных способов проходки – инъекционного укрепления и замораживания грунта, а также влияние зон грунта, ослабленного или разуплотненного в процессе сооружения тоннелей.
- ❖ Аналитические методы расчёта конструкций подземных сооружений стали основой теории расчета инженерных конструкций методами МЕХАНИКИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

Описание математического аппарата, использованного при решении задач

1. Переход от плоских задач теории упругости к соответствующим краевым задачам теории функций комплексного переменного.
2. Использование комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили, связанных с напряжениями и перемещениями в соответствующих областях известными формулами.
3. Применение методов теории функций комплексного переменного, включающих разложение функций в ряды Лорана, аналитическое продолжение комплексных потенциалов через границу полуплоскости (для тоннелей мелкого заложения), свойства интегралов типа Коши, конформное отображение (некруговое очертание сечения выработок).

Аналитические методы расчета обделок (крепи) подземных сооружений на статические нагрузки

- 1. Нагрузки - собственный вес грунта (пород), давление подземных вод, тектонические напряжения, вес зданий и сооружений на поверхности (тоннели мелкого заложения).**
- 2. Определяются расчётные значения напряжений, изгибающие моменты и поперечные силы для радиальных сечений обделки тоннеля.**
- 3. Учёт нелинейного поведения грунта осуществляется с использованием теории линейной наследственной ползучести.**
- 4. Прочность обделки (крепи) оценивается на основе величин суммарных напряжений от указанных выше нагрузок.**

Особенности расчёта конструкций подземных сооружений на сейсмические воздействия

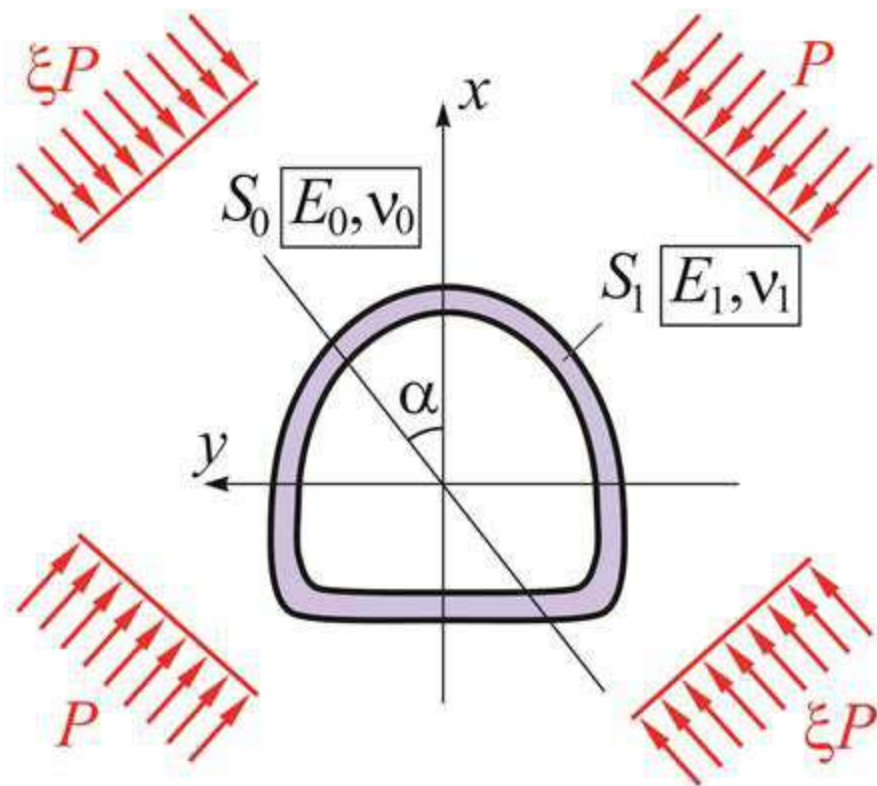
- ❖ Положение очага землетрясения заранее неизвестно.
- ❖ Направление распространения волн по отношению к сооружению заранее неизвестно.
- ❖ Наличие многократного отражения волн от границ раздела пород с разными механическими свойствами и свободной поверхности.
- ❖ Различные сочетания совместного действия волн разного характера.
- ❖ Напряжения в оболочке существенно зависят от направления и сочетания действия различных волн.

Аналитический метод расчета крепи подземных сооружений на сейсмические воздействия землетрясений (ВСН 139-81)

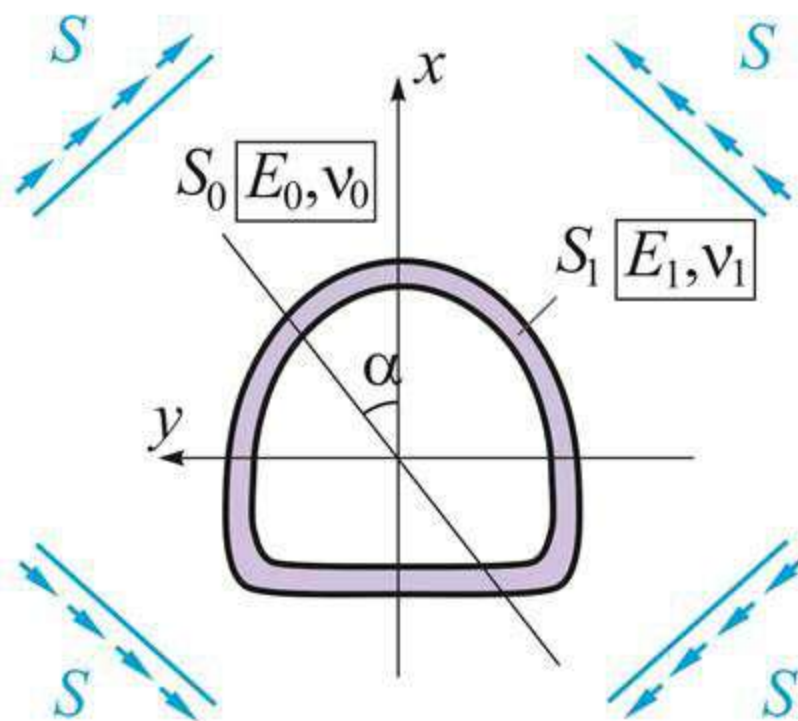
1. Сейсмические волны (продольные и поперечные) предполагаются плоскими упругими гармоническими; длина поперечных волн с преобладающим периодом колебаний превосходит линейные размеры сооружения не менее чем в три раза.
2. Используется расчётная схема плоской задачи теории упругости в квазистатической постановке.
3. Действие длинных продольных и поперечных волн моделируется наличием напряжений на бесконечности.
4. Величины напряжений зависят от параметров сейсмических волн, соответствующих интенсивности землетрясения.
5. Возможность расчета конструкции подземного сооружения на действие сейсмических волн заданного направления.
6. **Возможность определения наиболее неблагоприятного напряженного состояния** в каждом нормальном сечении обделки от одновременно приходящих продольных и поперечных волн в любом их сочетании и направлении распространения (огибающая напряжений).
7. При оценки прочности обделки напряжения от сейсмических воздействий суммируются с напряжениями от статических нагрузок.

Принципиальные расчетные схемы задач теории упругости в квазистатической постановке

Действие продольных волн



Действие поперечных волн



Параметры поля напряжений на бесконечности

$$P = \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma c_1 T_0; \quad S = \frac{1}{2\pi} AK_1 \gamma c_2 T_0; \quad \xi = \frac{v_0}{1 - v_0},$$

где

A – коэффициент, соответствующий баллу землетрясения;

K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения подземного сооружения;

γ – объемный вес породы;

T_0 – преобладающий период собственных колебаний частиц породы;

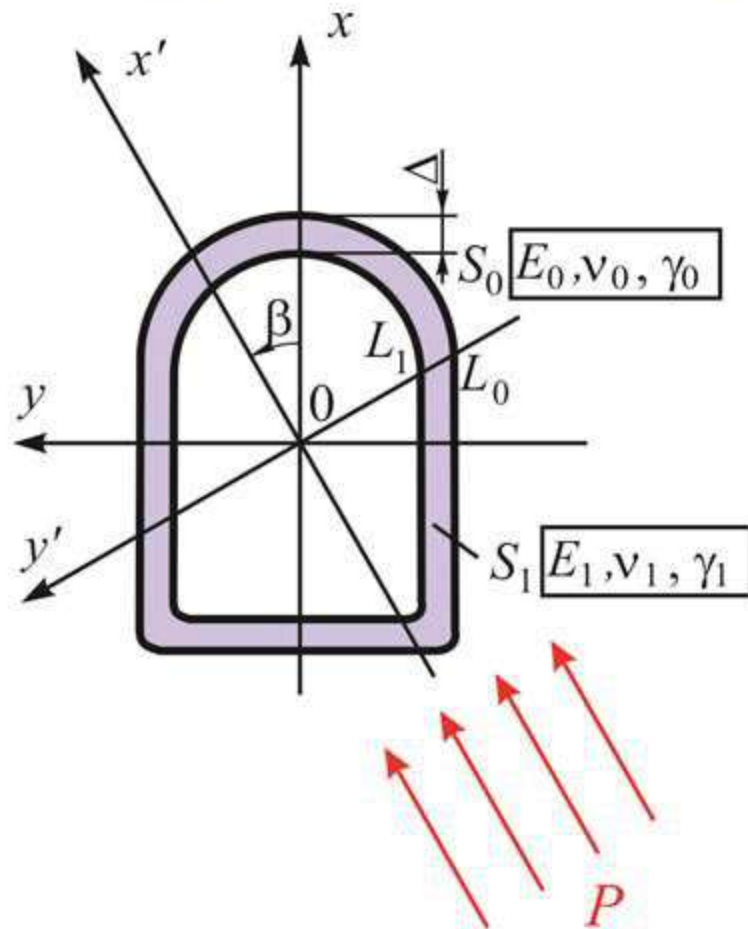
c_1, c_2 – скорости распространения продольных и поперечных волн, определяемые по формулам

$$c_1 = \sqrt{\frac{E_0 g}{\gamma} \cdot \frac{1 - v_0}{(1 + v_0)(1 - 2v_0)}}; \quad c_2 = \sqrt{\frac{E_0 g}{2\gamma(1 + v_0)}}.$$

$$\frac{\partial(\sigma_p \pm \sigma_s)}{\partial \alpha} = 0$$

- определение для каждого радиального сечения угла падения волн и наилучшего сочетания одновременно приходящих продольных и поперечных волн

Постановка и решение динамической задачи о распространении продольной волны в среде с подкрепленным отверстием некруговой формы



Комплексные потенциалы, характеризующие напряжения и смещения областей S_0 и S_1 , удовлетворяют волновым уравнениям Гельмгольца ($j = 0, 1$)

$$(\nabla^2 + \omega_j^2 \zeta_j^2) \tilde{\varphi}^{(j)} = 0;$$

$$(\nabla^2 + \omega_j^2) \tilde{\psi}^{(j)} = 0,$$

где ζ_j – отношение скоростей распространения продольных и поперечных волн в соответствующих средах; ω_j – относительная круговая частота колебаний частиц сред.

Решение получено с использованием теории функций комплексного переменного, конформного отображения, функций Бесселя, комплексных рядов и метода возмущения формы границ.

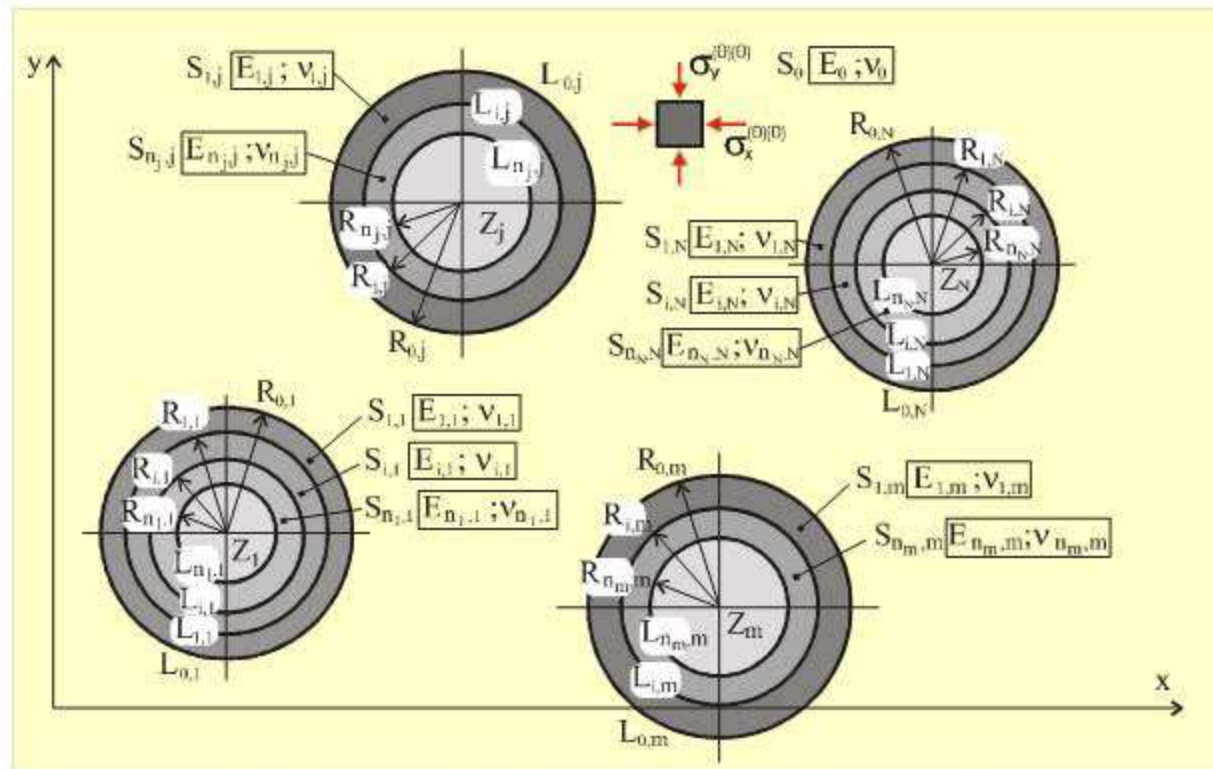
Компьютерная реализация решения и оценка достоверности получаемых результатов

- ❖ Метод реализован в виде программного комплекса для ПК.
- ❖ Выполнено тестирование путём сравнения с результатами Г.Н. Савина для неподкреплённых отверстий **кругового, эллиптического и квадратного** отверстий при распространении гармонической волны сжатия.
- ❖ Воспроизведены результаты Н.Н. Фотиевой и В.Г. Гарайчука для выработки **произвольного сечения** при распространении продольной и поперечной волны.
- ❖ Получено практически полное совпадение напряжений для **обделки кругового тоннеля**, расчёт которой выполнен Ж.С. Ержановым, Ш.М. Айталиевым, Л.А. Алексеевой.

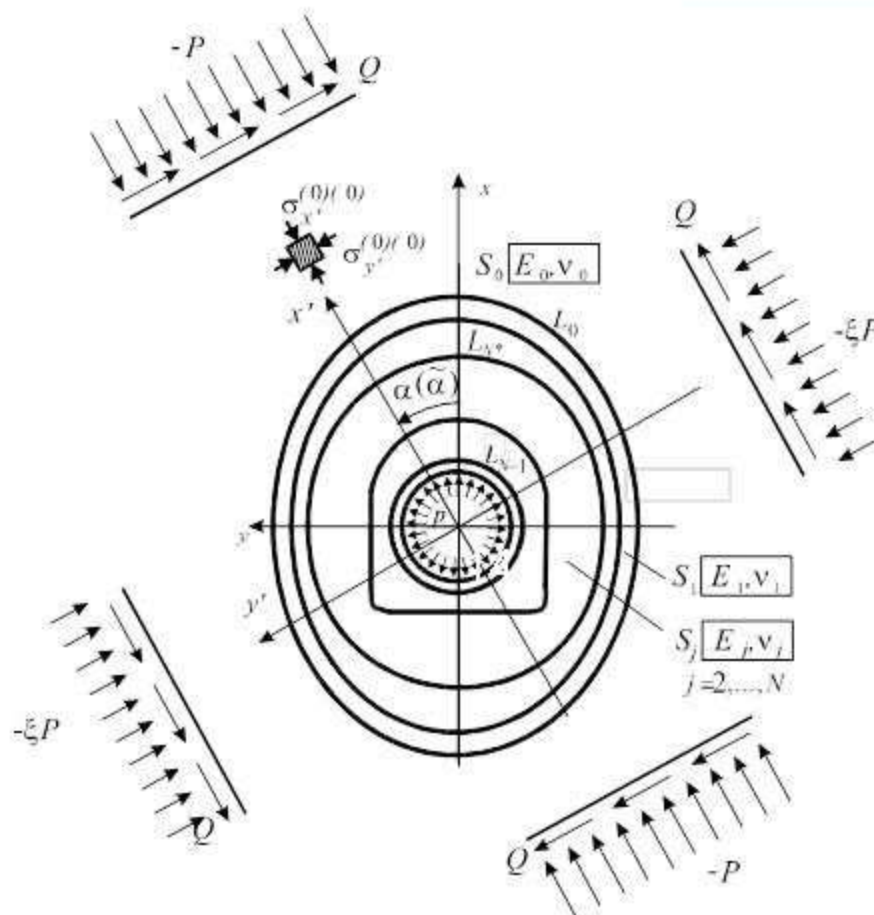
Выводы

- ❖ Использование решений соответствующих квазистатических задач при расчетах конструкций подземных сооружений на действие длинных сейсмических волн является вполне обоснованным.
- ❖ Максимальные отличия результатов, полученных с использованием решений динамических и квазистатических задач, не превышает 10 %.
- ❖ С ростом модуля деформации материала среды, моделирующей массив пород, отличия в результатах, полученных с использованием решений квазистатических и динамических задач, уменьшаются.

Расчётные схемы задач, развивающие метод расчета на сейсмические воздействия

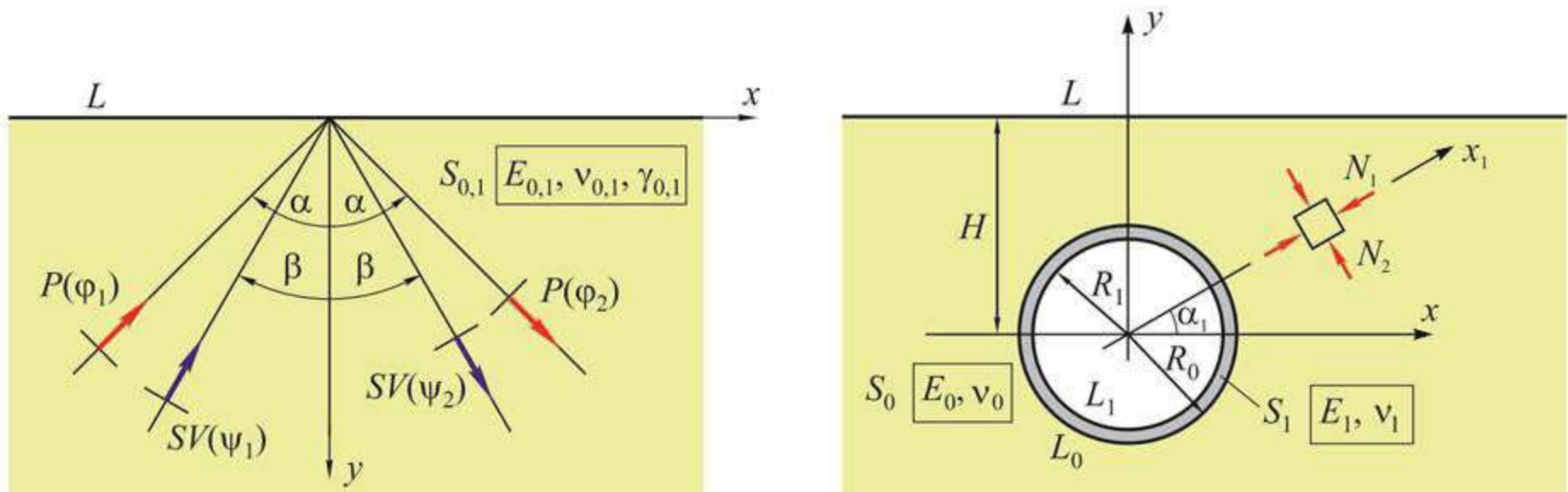


РАСЧЕТ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБДЕЛОК КРУГОВОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫХ ТОННЕЛЕЙ



РАСЧЕТ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОДЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩИХ СЛОИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Евразийский форум по сейсмической безопасности сооружений и городов
«SEISMO Euro-Asian Forum» 29.11.2017 – 01.12.2017



Расчет обделок тоннелей мелкого заложения

Аналитические методы расчета были применены при проектировании и строительстве тоннелей

- ❖ Тоннели БАМ: Байкальский, Кодарский, Нагорный, Северо-Муйский, Мысовые, обходные;
 - ❖ Тоннели Днестровской ГЭС-ГАЭС и Майхинского гидроузла;
 - ❖ Тоннели Байпазинской, Нурекской, Памирской, Рогунской, Ташкумырской ГЭС;
 - ❖ Комплекс перегонных и пешеходного тоннелей станции "Спортивная" в С.-Петербурге;
 - ❖ Тоннель № 6 на второй очереди строительства обхода г. Сочи;
 - ❖ Автодорожные тоннели на магистрали Ялта-Симферополь и на подъездной дороге к Ирганайскому гидроузлу;
 - ❖ Тоннели Male Lednitse и Polom в Чешской республике;
 - ❖ Тоннели через Высокое Плато в Алжире;
 - ❖ Крепи вертикальных шахтных стволов месторождений калийных солей в Пермском крае, Волгоградской и Калининградской областях (глубины более 1200 м)
-
- ❖ Основные положения расчёта подземных сооружений на сейсмические воздействия включены в СП «ТРАНСПОРТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ. Правила проектирования», СП 268.1325800.2016 введённые в действие с 16.06.2017 приказом МИНСТРОЯ РОССИИ от 16.12.2016.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

Евразийский форум по сейсмической безопасности сооружений и городов
«SEISMO Euro-Asian Forum» 29.11.2017 – 01.12.2017