

Московский государственный университет путей
сообщения

Механика грунтов и
подземных сооружений

Лекция №1

Курбацкий Евгений Николаевич

Кафедра “Мосты и тоннели”,

д.т.н., проф.



ВВЕДЕНИЕ

Механика подземных сооружений – раздел механики, изучающий прочность и устойчивость, надёжность и долговечность подземных сооружений и возводимых в них конструкций, контактирующих с окружающим грунтовым массивом.



Определение механики горных пород академика Мельникова

«Механика горных пород – эта фундаментальная часть горной науки, изучающая свойства и состояния горных пород и массивов с учётом твёрдой, жидкой и газообразной фазы и естественного напряжённо-деформированного состояния для создания целесообразных методов разрушения горных пород, управления горным давлением и сдвижением, а также устойчивости обнажённых поверхностей».



Задачи механики подземных сооружений

Механика подземных сооружений представляет методы расчёта и проектирования подземных конструкций с учётом взаимодействия конструкций с массивом, как на стадии возведения сооружений, так и на стадии эксплуатации.



Методы решения задач механики подземных сооружений

До недавнего времени к обделкам и крепи горных выработок и подземных сооружений подходили как к обычной конструкции, расчленяя расчёт на три стадии:

- определение внешних нагрузок,
- определение внутренних усилий (напряжений),
- проверка прочности конструкций



Методы решения задач механики подземных сооружений (продолжение)

Обделка или крепь рассматривались отдельно от массива, воздействие которого заменялось заданной нагрузкой, либо как конструкция на упругом основании, испытывающая кроме внешних воздействий ещё и упругий «пассивный» отпор.



Методы решения задач механики подземных сооружений (продолжение)

Расчёт конструкций на заданную нагрузку не представляет больших трудностей.

Основная проблема состояла в определении нагрузок.

Предполагалось, что нагрузки можно определить, для чего предлагались различные теории и гипотезы горного давления: свода обрушения, свода давления, сползающего объёма, породной балки, плиты и т.д.



Современные методы решения задач механики подземных сооружений

В результате многочисленных экспериментальных и теоретических исследований появились новые понятия, которые не укладывались в рамки старых представлений. К числу таких понятий относятся **единая модель: «крепь (обделка)-массив грунта», а так же модель взаимодействие крепи с массивом.**



Основные методы механики подземных сооружений

Аналитические методы

- теории упругости,
- механики деформируемого твёрдого тела,
- механики сплошных сред.

Численные методы:

- метод конечных разностей,
- метод конечных элементов,
- граничных элементов и др.



Механика подземных сооружений при правильной постановке задач может объяснить все известные науке факты, позволяет предсказать вид возможных разрушений, подсказать какие параметры следует контролировать при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.



ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

**Составные части грунтов и их
свойства**



Грунт представляет трёхфазную среду,

состоящую из:

твёрдой фазы – минеральных частиц,

жидкой фазы – поровая жидкость,

газообразной фазы – газ в поровом

пространстве, незаполненном жидкостью.



Твёрдая фаза

Свойства грунтов зависят от гранулометрического, минералогического состава и формы частиц.

В инженерной практике выделяют четыре фракции:

крупнообломочную - частицы более 2 мм,

песчаную – размер частиц 2 – 0.05 мм,

пылеватую - размер частиц 0.05 -0.005мм,

глинистую - размер частиц менее 0.005мм,



Гранулометрический состав

Классификация крупнообломочных и песчаных грунтов

Разновидность грунта	Размер частиц d мм	Содержание частиц , % по массе
Крупнообломочные грунты валунный (глыбовый)	□200	□50
галечниковый (щебенистый)	□10	□50
гравийный (дресвяный)	□2	□50
Песчаные грунты		
гравелистый	> 2	> 25
крупный	>0,50	>50
средней крупности	>0,25	>50
мелкий	>0,10	>75
пылеватый	>0,10	<75

Гранулометрический состав

Примерное содержание глинистой фракции в глинистых грунтах

Разновидность грунта	Размер частиц d мм	Содержание частиц , % по массе
Глинистые грунты		
супесь	< 0.005	3 - 10
суглинок	< 0.005	10-30
глина	< 0.005	> 30

Форма твёрдых частиц очень разнообразна:

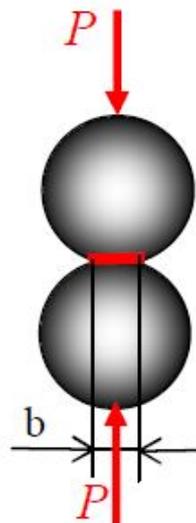
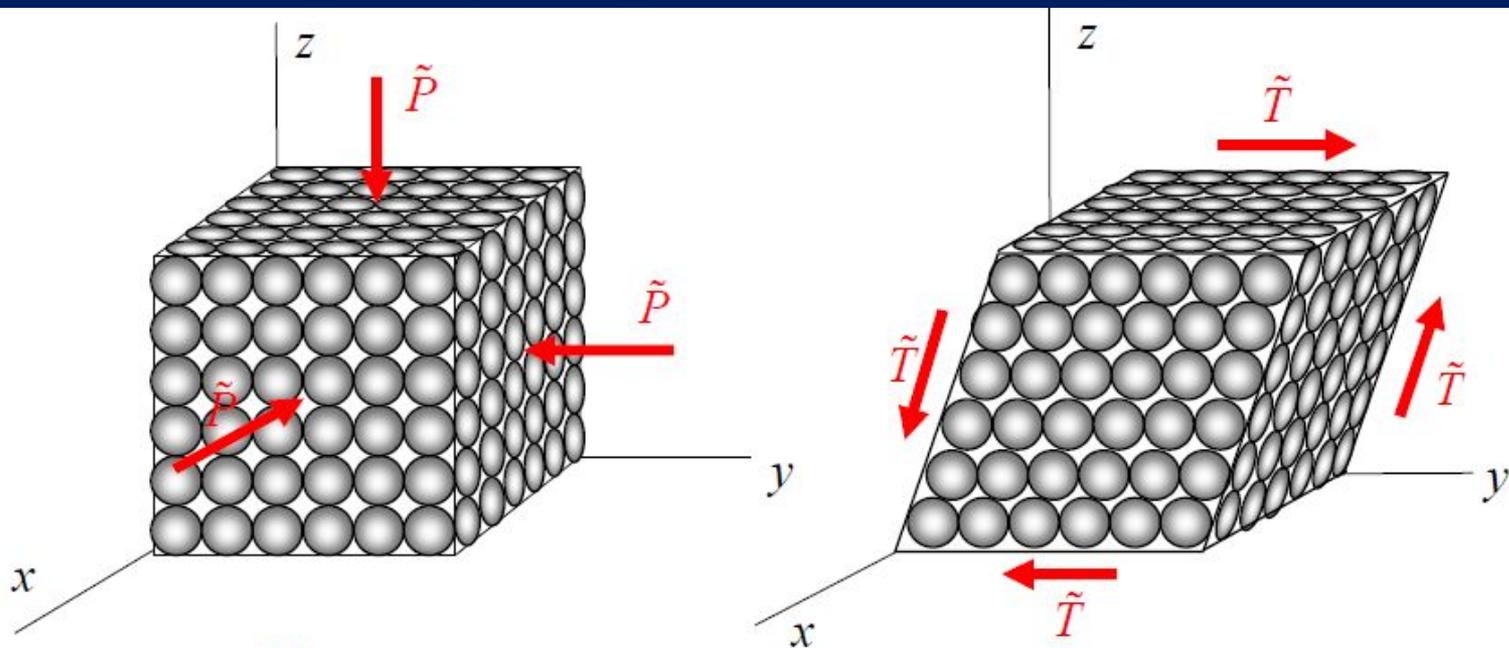
- шарообразная,
- пластинчатая,
- листообразная,
- тонкоигольчатая.

Крупные фракции, как правило, имеют округлую или остроугольную форму.

Мелкие и мельчайшие частицы глинистых грунтов имеют пластинчатую или игольчатую форму.



Модель неконсолидированной гранулированной среды



Hertz relations

$$b = \left[\frac{3(1-\nu_s^2)rP}{4E_s} \right]^{1/3} \quad \text{-radius of flat circle contact,}$$

$$s = \left[\frac{9(1-\nu_s^2)^2 P^2}{2E_s^2 r} \right]^{1/3} \quad \text{- approachment of the two tangent spheres centers}$$

Распространение сейсмических волн в водонасыщенных средах

Формулы определения низкочастотной области:

$$f_{\max} = 0.1_{\text{Био}} = 0.1 \frac{\eta \phi}{2\pi k_n \rho_{\text{ж}}}$$

η Динамическая вязкость жидкости (Нс/м²);

ϕ Пористость насыщенной породы;

k_n Коэффициент проницаемости (м²);

$\rho_{\text{ж}}$ Плотность флюида (кг/м³)

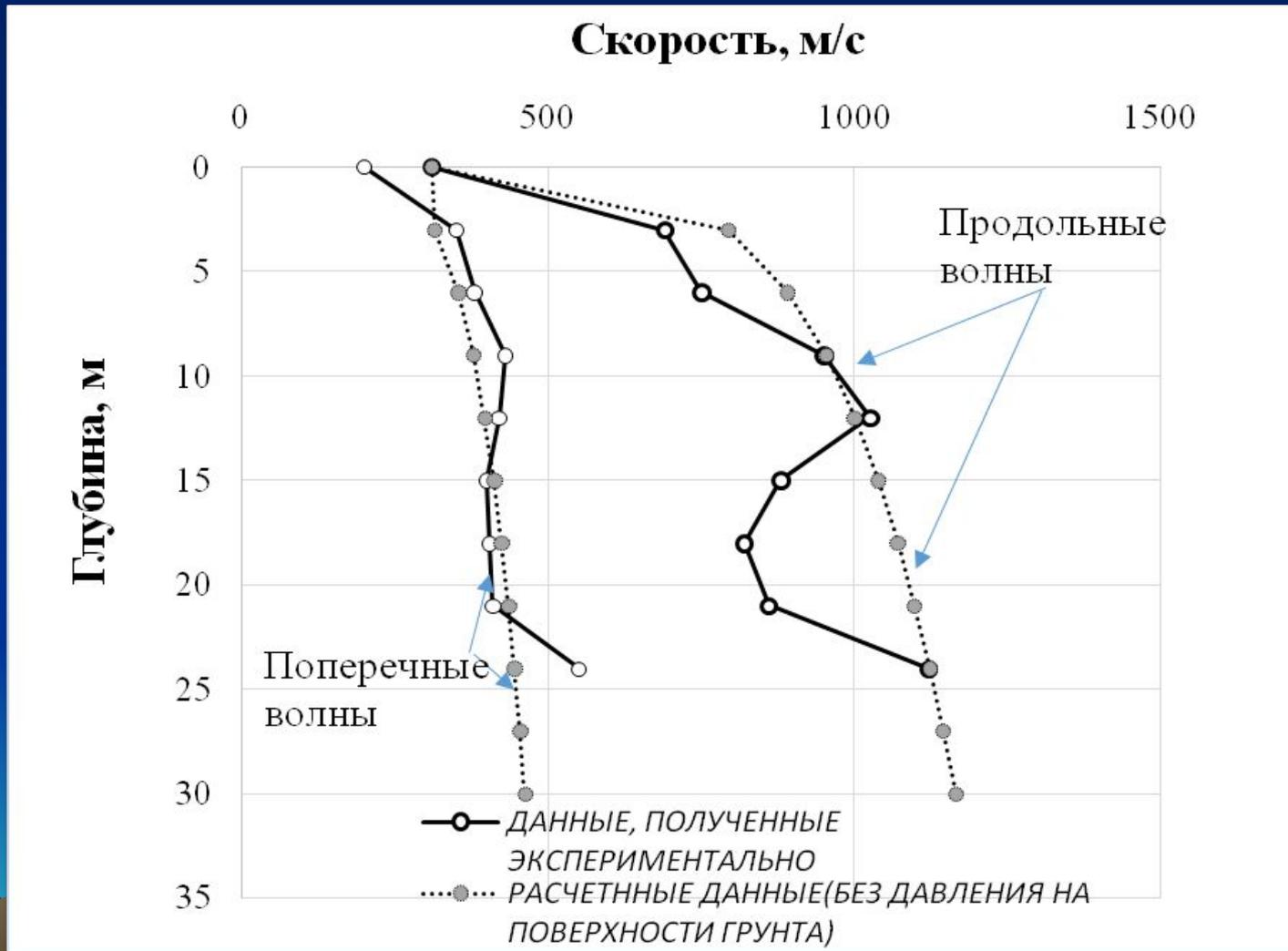
$$k_n = \frac{k_{\phi} \eta}{\gamma_{\text{ж}}}$$

k_{ϕ} Коэффициент фильтрации (м/с)

$$f_{\max} = 0.1 \frac{\eta \phi \gamma_{\text{ж}}}{2\pi k_{\phi} \eta \rho_{\text{ж}}} = 0.1 \frac{\phi g}{2\pi k_{\phi}} \approx 0.156 \frac{\phi}{k_{\phi}}$$



Скорости распространения сейсмических волн в зависимости от глубины в гранулированных средах



Жидкая фаза

Жидкая фаза, обычно вода, оказывает большое, часто определяющее влияние на свойства грунтов.

Прочносвязанная вода удерживается на поверхности частиц настолько сильно, что по свойствам приближается к твёрдому телу.

Рыхлосвязанная вода обладает слабыми связями с поверхностями частиц, поэтому при передачи давления может из него удалиться.

Свободная вода – это вода в порах.



Газообразная фаза

Поровый газ подразделяют на свободный, защемлённый и растворённый.

Свободный газ через поровое пространство сообщается с атмосферой и не оказывает влияние на свойства грунта.

Защемлённые (замкнутые) газы с атмосферой не сообщаются. Характерны для глинистых грунтов. Увеличивают упругость грунта в целом.

Растворённые газы, взаимодействия с поверхностью частиц могут вызывать различные реакции и изменять механические свойства грунтов.



**МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД**



Основные понятия механики сплошных сред

Массив горных пород – это слой верхней части земной коры, в которой производятся горные работы, и осуществляется подземное строительство.

Поскольку глубина, на которой располагаются подземные сооружения, мала по сравнению с радиусом земли 6370 км, грунтовый массив рассматривается как полупространство, или полуплоскость, если исследуется плоская задача.

Массив горных пород в механике подземных сооружений рассматривается как сплошная среда.



ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СРЕДЫ

Сплошность — означает заполненность материалом всего объёма тела, включая бесконечно малые объёмы в окрестности каждой точки.

Сплошность предполагает сохранение свойств материала в бесконечно малых объёмах, что даёт возможность использовать методы математического анализа.

При наличии пустот задаются границы полости.



ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СРЕДЫ (продолжение)

Однородность – одинаковость свойств в различных точках тела или какой-либо его части.

Изотропность – одинаковость свойств в различных направлениях. Если свойства материала различны в разных направлениях, материал называется **анизотропным**.

Деформируемость – способность материала изменять форму и размеры под действием внешних сил.



МОДЕЛИ СПЛОШНЫХ СРЕД СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ МОДЕЛЕЙ

Механико-математическая модель это такая система, которая, отображая объект исследования, позволяет получать новую информацию.

Применение механических моделей массива грунта позволяет получить описание массива в наиболее общей математической форме.



Наиболее часто применяемыми моделями массива являются:

- упругие (линейно деформируемые),
- пластические,
- реологические.

**Поведение моделей можно представить
структурными элементами.**



Классификация грунтов

1. Скальные грунты.
2. Связные или пластичные.
3. Рыхлые, сыпучие.
4. Текучие.



Твёрдые грунты

Твёрдые минеральные частицы связаны между собой жёсткой связью, обеспечивающие сохранение формы. В этом классе выделяют скальные и полускальные породы в зависимости от прочностных свойств.

К скальным относят грунты с пределом прочности более 20МПа. При насыщении водой связи в этих грунтах не исчезают. Примеры: граниты и известняки.

К полускальным относят грунты, в которых кроме жёстких связей проявляются и пластические связи. При превышении предельных нагрузок деформации происходят по тем же законам, что и для рыхлых грунтов. При насыщении водой силы сцепления частиц уменьшаются.

Примеры: слабые известняки, доломиты, мергели, песчанистые и глинистые сланцы, аргелиты, алевролиты



Связные или пластичные грунты

Твёрдые минеральные частицы связаны между собой водно-каллоидной связью, обычно через тонкую плёнку воды, которая обволакивает твёрдые частицы.

В зависимости от водонасыщения изменяется степень их пластичности.

Примеры: глины, слабые глинистые сланцы, суглинки.



Рыхлые, сыпучие грунты

Связи между частицами либо отсутствуют или ничтожно малы. Грунты представляют собой механические смеси одного или нескольких минералов или состоят из обломков твердых грунтов. Эти типы грунтов подразделяются на **песчаные и крупнообломочные.**

Примеры: пески, гравийно-песчаные
отложения и т.п.



Текучие грунты

Частицы в таких грунтах разобщены водой, т.е. могут перемещаться с насыщающих их водой..

Примеры: насыщенные водой пески (пывуны) насыщенные водой суглинки и т.п.



Механические характеристики грунтов

Физические свойства грунтов, проявляющиеся при взаимодействии с подземными сооружениями другими объектами и явлениями материального мира, весьма разнообразны.

Для практических нужд механики подземных сооружений представляют интерес лишь те свойства грунтов, которые непосредственно связаны с механическими процессами, протекающими при нарушении природного равновесия в толще грунтового массива и при взаимодействии подземными сооружениями.



Механические характеристики грунтов (продолжение)

Свойства, которые характеризуют поведение грунтов при силовых воздействиях, принято называть механическими свойствами. Их разделяют на три группы:

прочностные, характеризующие предельное сопротивление грунтов различного рода нагрузкам;

деформационные, характеризующие упругую и пластическую деформируемость грунтов под нагрузками;

реологические, характеризующие деформирование грунтов во времени при заданных условиях нагружения

Прочностные свойства

Прочностные свойства определяют способность грунтов сопротивляться разрушению под действием приложенных механических нагрузок. Они характеризуются **пределами прочности** при сжатии и растяжении, **сцеплением** и **углом внутреннего трения**.

Пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ или растяжение σ_p называют максимальное значение напряжения, которое выдерживает образец до разрушения



Предел прочности при сжатии

Предел прочности при одноосном сжатии образцов грунтов наиболее часто используемая и определяемая характеристика грунтов.

Наибольшее значение: 500 МПа (прочные базальты, кварциты), минимальные значения измеряются десятками и даже единицами мегапаскалей (мергели, плотные глины).

В зависимости от состава и структуры грунтов одного петрографического наименования даже одного региона прочность на сжатие может колебаться в весьма широких пределах. Этот показатель для различных песчаников изменяется в диапазоне 70... 190 МПа, алевролитов - 50... 100 МПа, аргиллитов - 30...70 МПа.



Предел прочности при растяжении

Прочность грунтов σ при растяжении значительно ниже их прочности σ_p при сжатии. Это одна из характерных особенностей грунтов, определяющее их поведение в поле механических напряжений.

Грунты плохо сопротивляются растягивающим усилиям, появление которых в выработках выработки служит критерием возможных обрушений. Несвязные (рыхлые и сыпучие грунты не воспринимают растягивающих напряжений - связные воспринимают в очень узком интервале.

Диапазон отношений

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} = \frac{1}{5} \div \frac{1}{80}$$

является характерным для различных типов грунтов.

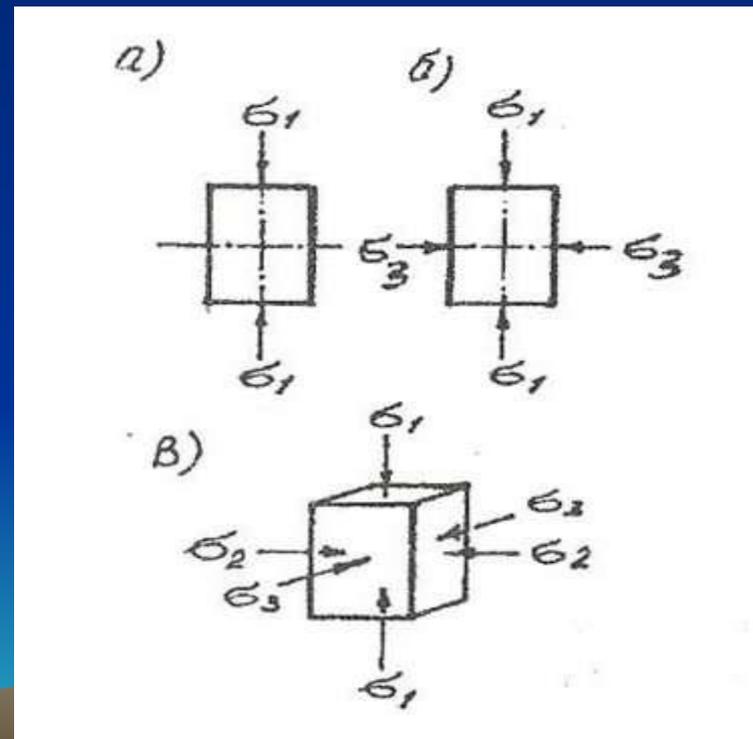
Паспорт прочности грунтов

По результатам испытаний образцов составляют паспорта прочности грунтов, которые позволяют оценить условия разрушения грунтов не только в одноосном, но также в плоском и в объемном напряженных состояниях.

а) одноосное ;

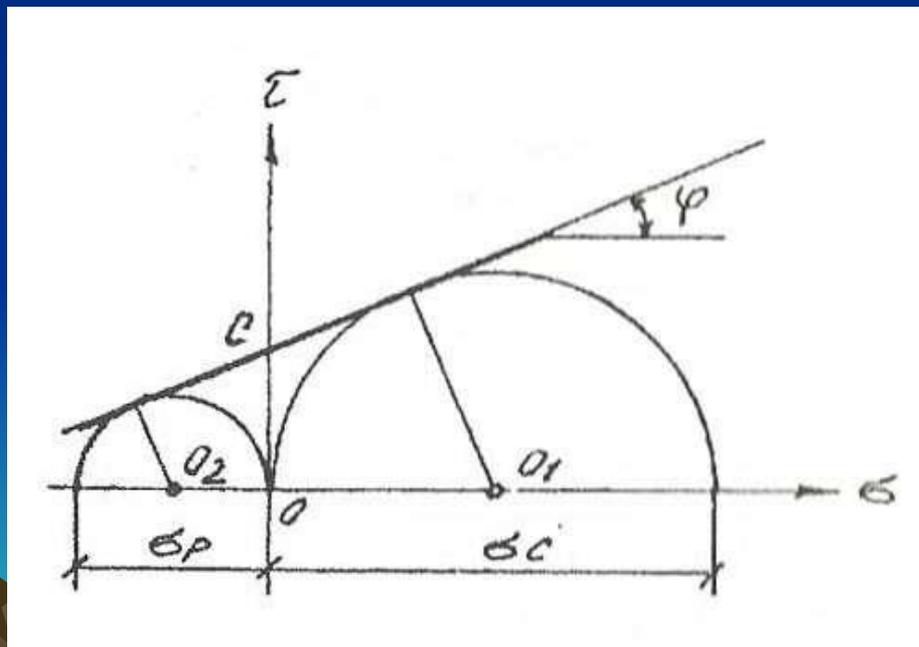
б) плоское;

в) объёмное;



Построение паспорта прочности грунта

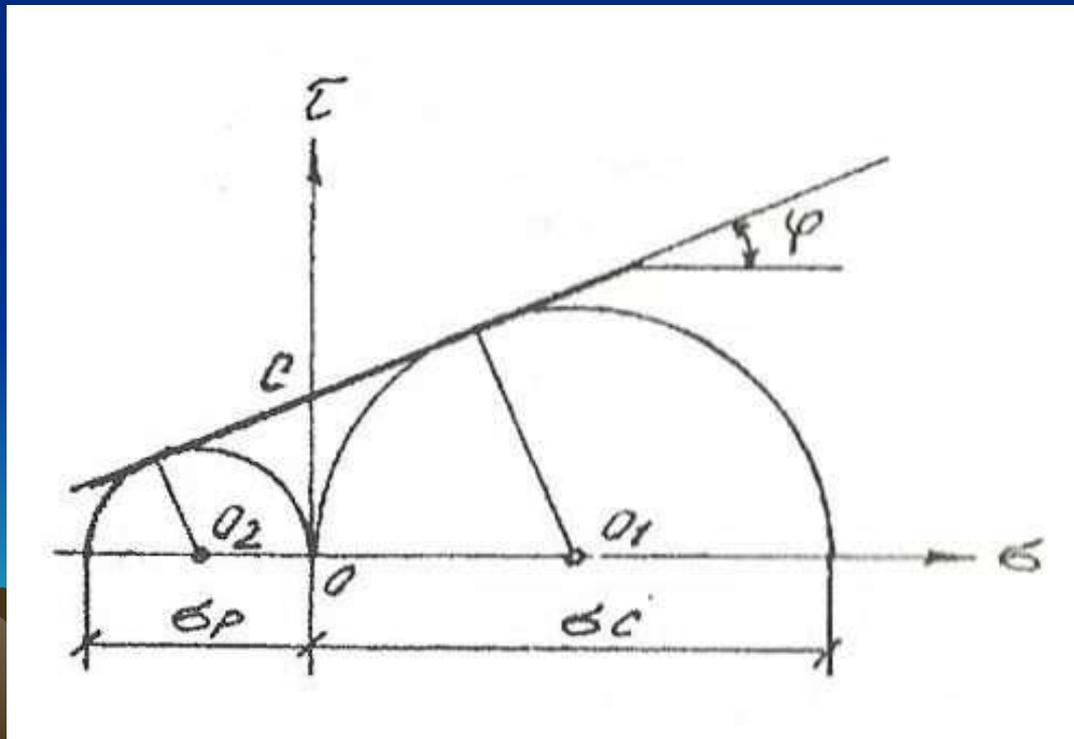
На горизонтальной оси откладывают от нуля вправо значение предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ влево: значение σ_p предела прочности на растяжение. На этих отрезках, как на диаметрах, строят окружности (так называемые круги напряжений Мора) и проводят общую касательную к ним, которая и представляет собой паспорт прочности.



Паспорт прочности грунта

Отрезок, отсекаемый касательной по оси ординат X , характеризует сцепление C образца грунта, а угол ее наклона - угол внутреннего трения.

Паспорт прочности при таком построении, полученный в виде прямой линии, достаточно точно описывает свойства грунтов, склонных к хрупкому разрушению, особенно и условиях действия малых напряжений.



Паспорт прочности грунта (продолжение)

Более точно и полно отражает поведение грунтов паспорт прочности, получаемый по результатам испытаний грунтов в условиях объемного напряженного состояния. Пример паспорта прочности грунта, построенного по результатам эксперимента грунта при объёмном напряжённом состоянии.

