Лабораторные испытания грунтов

Болдырев Г.Г., Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, ООО «НПП Геотек»

Проблемы Российских лабораторий

Решаемые или решенные: Оснащение современным оборудованием и приборами

Не решенные: 1. Качественное обучение и повышение квалификации

2. Издание: ГОСТ, пособий, рекомендаций, методических указаний

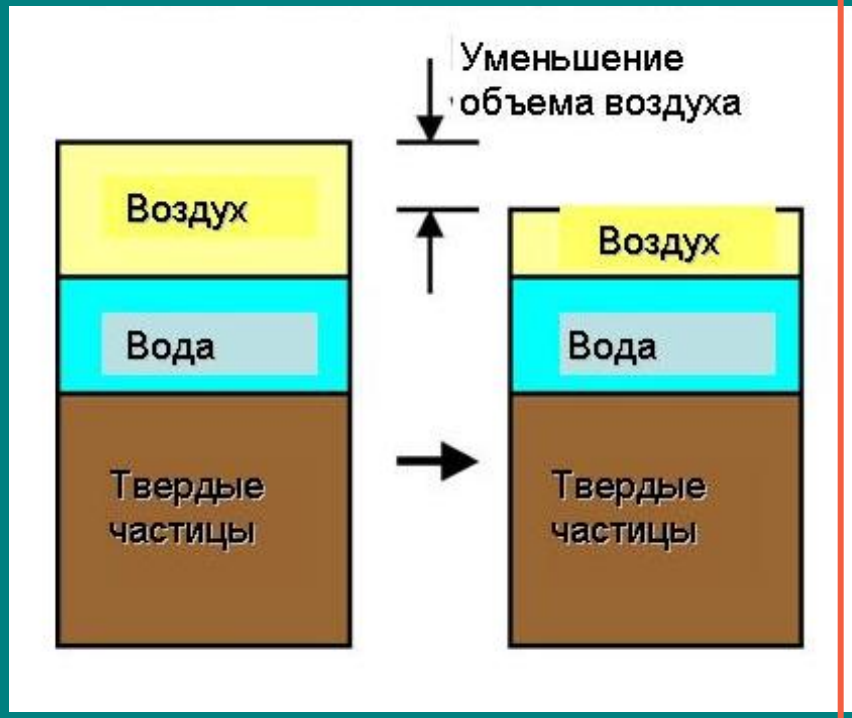
3. Перевод зарубежной литературы

Какие параметры нам необходимы для проектирования?

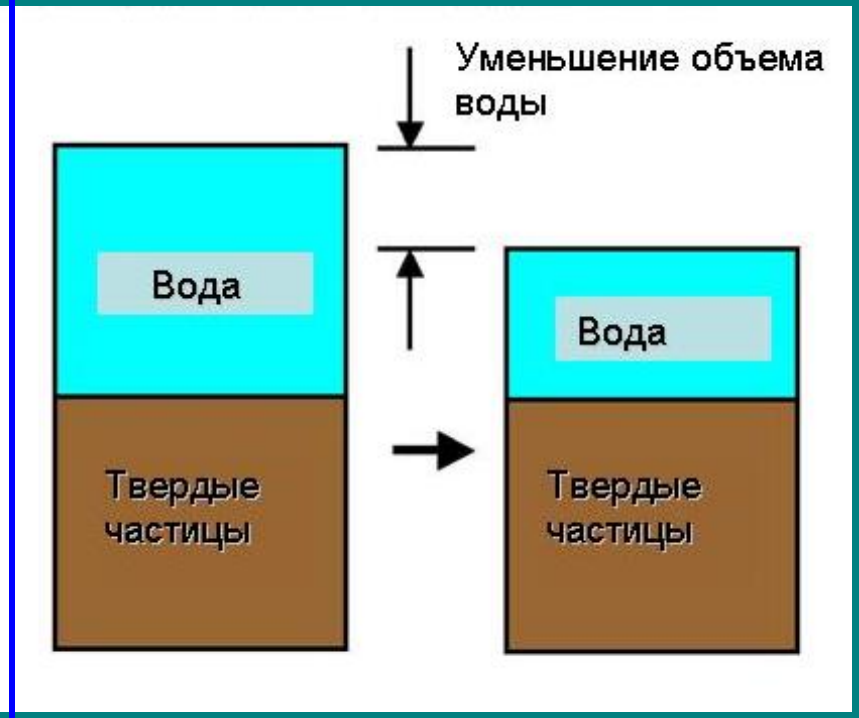
- Физические
- Деформационные
- Прочностные
- Начальное напряженное состояние

Грунты, как механическая система

Маловлажные грунты



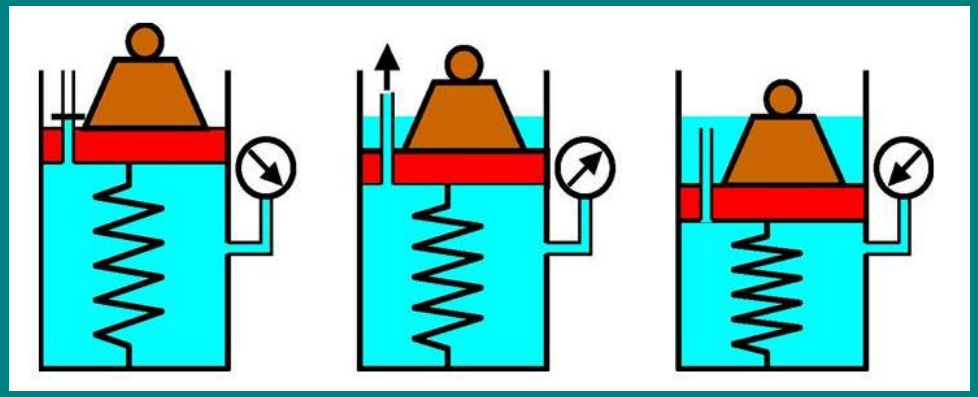
Водонасыщенные грунты



$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$$

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)\tan\phi'$$

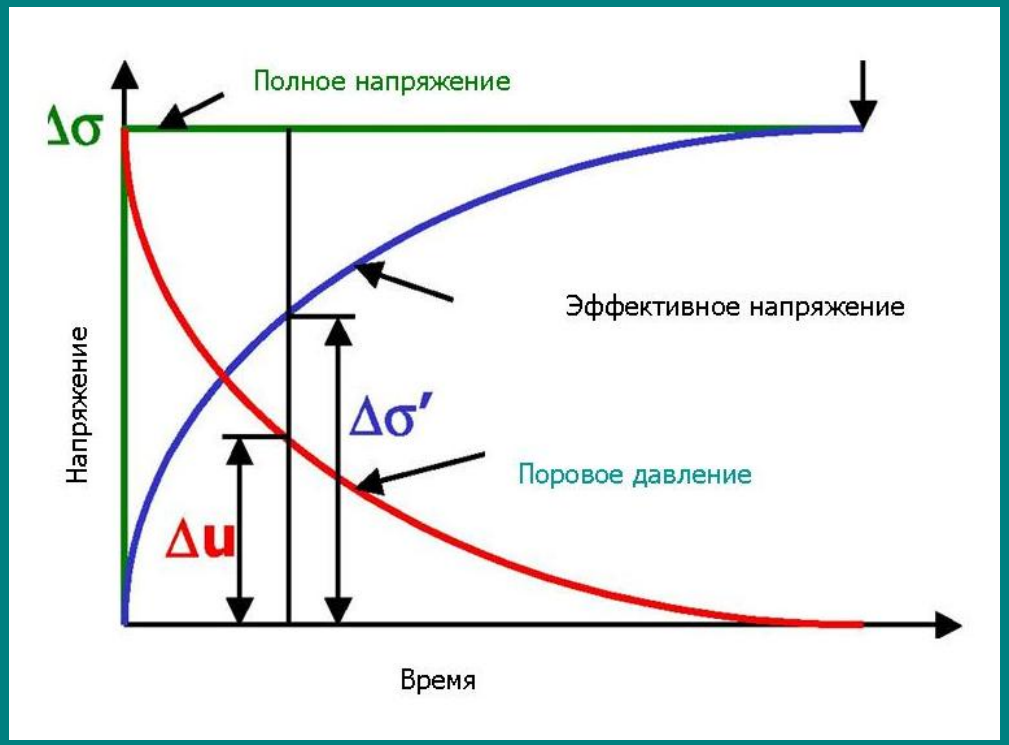
Механика водонасыщенных грунтов



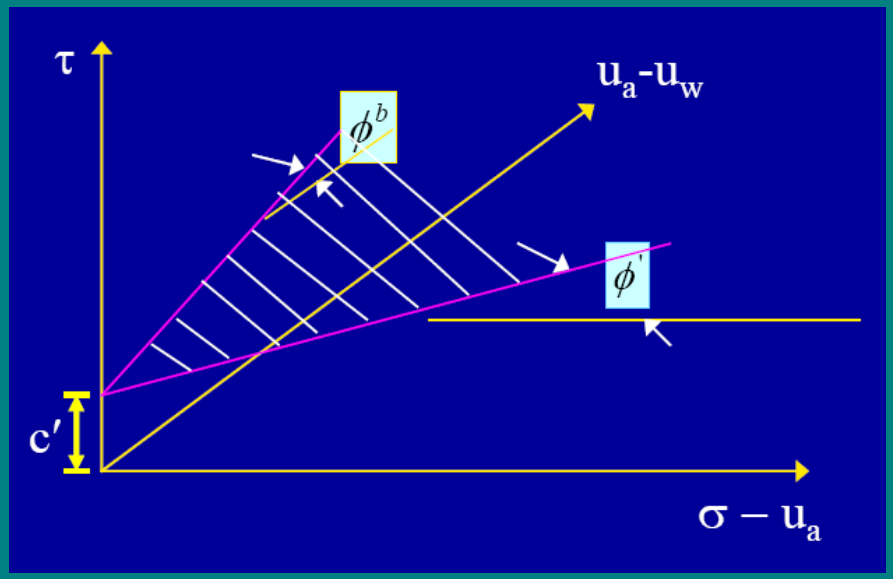
$$\sigma = \sigma' + u$$

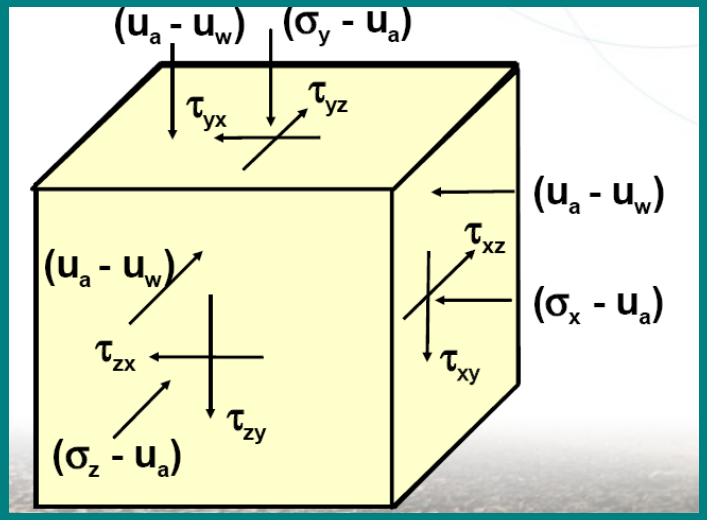
$$\sigma' = \sigma - u$$

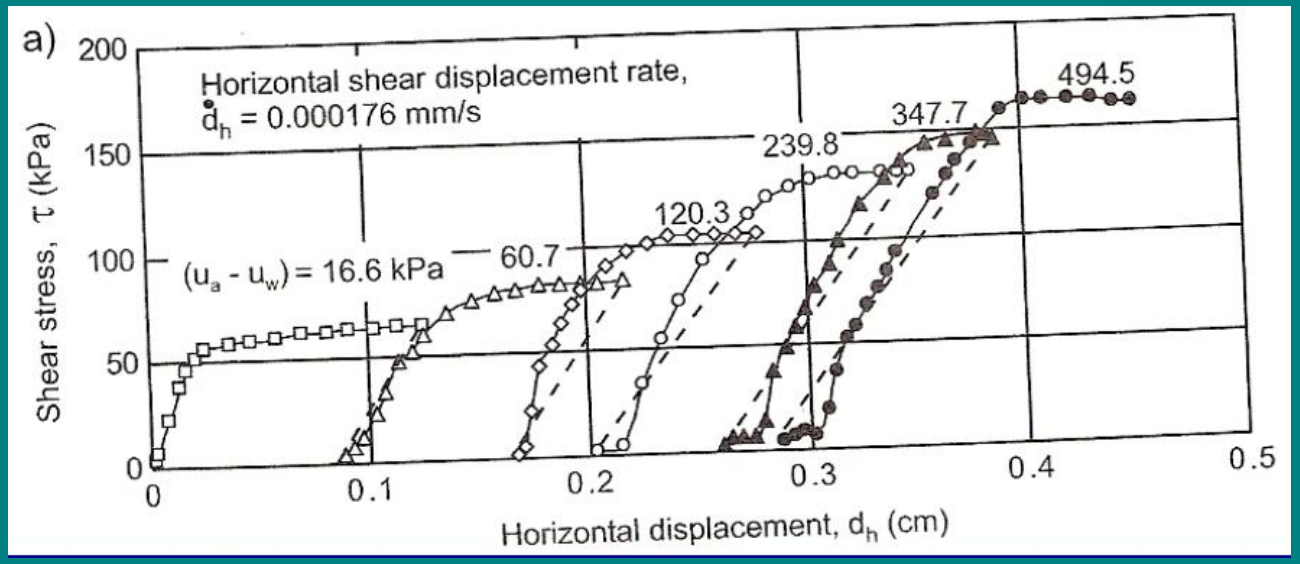
$$u = \gamma_w z_w$$



Механика маловлажных грунтов





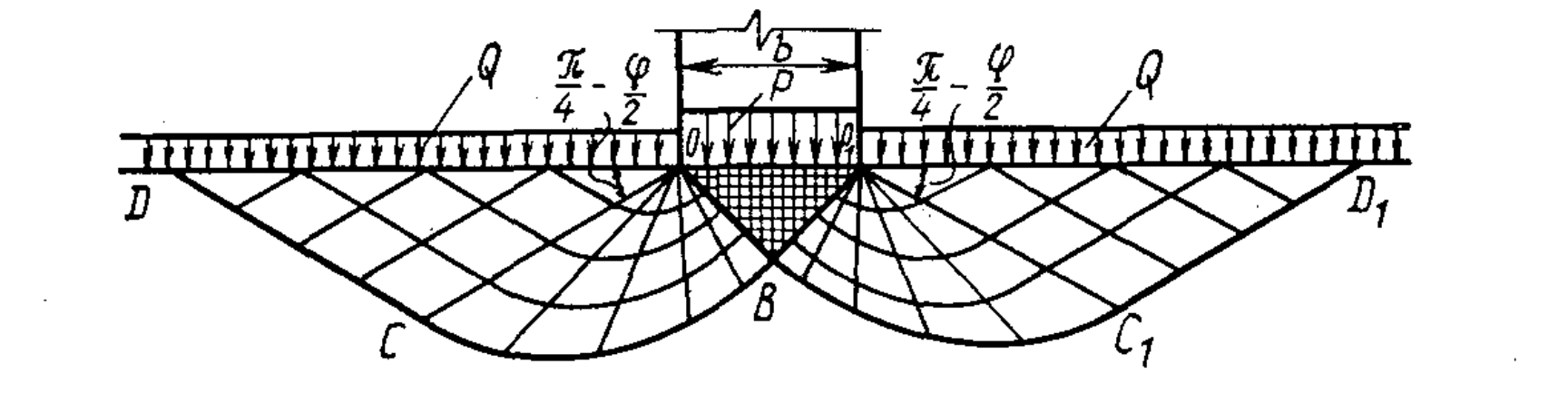


Параметры по ГОСТ 12248-2011

Таблица 1. Механические характеристики, применяемые при проектировании оснований зданий и сооружений

Наименование СНиП, СП, рекомендаций	Проектируемый тип фундаментов, оснований, сооружений	Используемые параметры механических свойств грунтов
СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*	Фундаменты мелкого заложения в обычных и структурно-неустойчивых грунтах; основания опор линий электропередачи; искусственные основания	Деформационные: E, E_e, ν Прочностные: φ, c, c_u
СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85	Сваи и свайные фундаменты	Деформационные: E, G, ν Прочностные: φ, c
СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»	Основания гидротехнических сооружений	Деформационные: E, E_e, ν, c_v Прочностные: φ, c, c_u Дополнительные: k, m_0, $\delta_{\alpha p}$, $\delta_{1,\alpha p}$, R_c, R_t
СНиП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги»	Проектирование земляного полотна автомобильных дорог	Деформационные: E, ν; e_p^c, c_α Прочностные: φ, c, $p_{стр}$

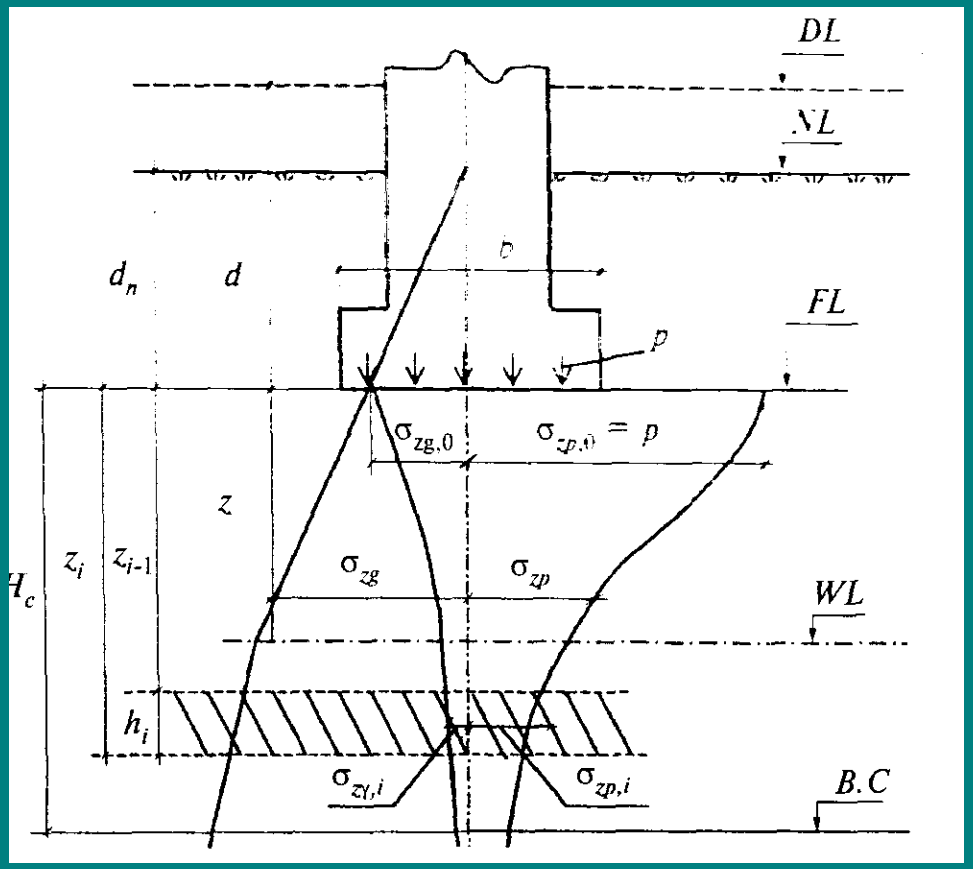
Расчет несущей способности



$$N_u = b'l'(N_\gamma \xi_\gamma b'\gamma_1 + N_q \xi_q \gamma_1' d + N_c \xi_c c_1), \qquad (5.30)$$

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)\tan\phi'$$

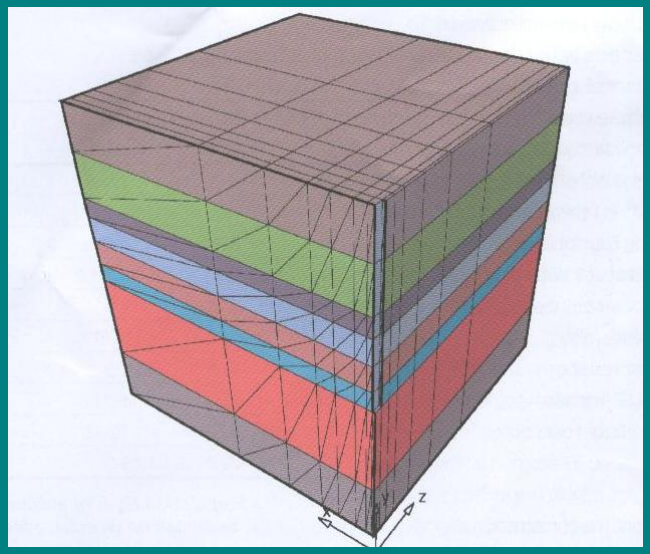
Расчет осадки фундаментов

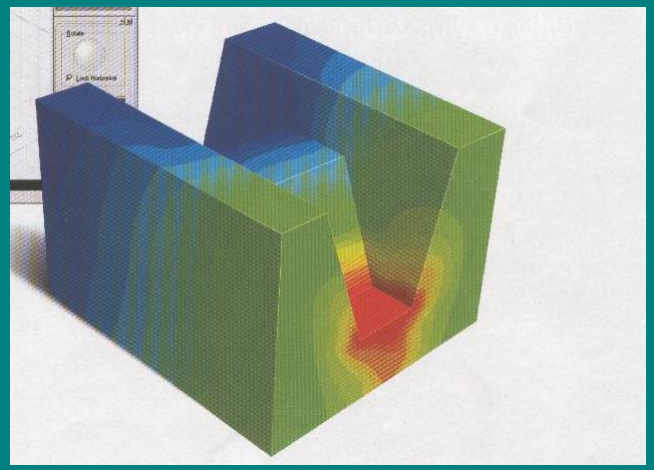


$$s = \beta \sum_{i=1}^{n} \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}) h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_{z\gamma,i} h_i}{E_{e,i}}, \quad (5.14)$$

Нелинейные методы расчета оснований

- Метод конечных элементов
- Метод конечных разностей
- Метод дискретных элементов





PLAXIS, FLAC, SEEP3d, ABAQUS, CRISP, ADINA, GEO-SLOPE, ANSYS, LS-DYNA

Параметры различных моделей грунта

Таблица 2. Некоторые модели грунтов и их параметры

Наименование программы	Модели грунта	Используемые параметры механических свойств грунтов
ABAQUS www.abaqus.com	Линейно и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условия прочности Друкера – Прагера, Мора – Кулона; КЭП (Cap); Кэм-Клей (Cam-Clay)	Деформационные: E, ν, k, λ, e_o Прочностные: φ, c, ψ Дополнительные: R, ε_v, α, K
ANSYS www.cadfem.com	Линейно- и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условия прочности Друкера – Прагера, Треска; КЭП; вязкопластическая	Деформационные: E, ν Прочностные: φ, c, ψ Дополнительные: α, γ, β, θ, W, D
FLAC www.itascacg.com	Линейно и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условия прочности Друкера – Прагера; Мора – Кулона; Кэм-Клей; модифицированная Кэм-Клей; вязкопластические; модели ползучести	Деформационные: E, ν, k, λ, e_o Прочностные: φ, c, ψ Дополнительные: σ^t, p_c, R, e^{pv}, h, K_c
SLOPE/W SIGMA/W www. geo-slope.com	Линейно и нелинейно-упругие, анизотропно упругая; Кэм-Клей; модифицированная Кэм-Клей; разупрочняющаяся; модель идеальной пластичности; гиперболическая	Деформационные: E_i, E_t, ν, k, λ, e_o Прочностные: φ, c, c_u, ψ Дополнительные: R_f, p_c, OCR
PLAXIS www.plaxis.com	Линейно и нелинейно-упругие; модель идеальной пластичности – условие прочности Мора – Кулона; гиперболическая упрочняющаяся; модель ползучести	Деформационные: E_0, E_{50}, E_{ur}, E_{oed}, m, p^{ref}, ν Прочностные: φ, φ_m, φ_{cv}, c, ψ Дополнительные: R_f, σ_t, α, β, p_p
SAGE-CRISP www.mycrisp.com	Линейно и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условие прочности Мора – Кулона; Кэм-Клей; модифицированная Кэм-Клей; модель Шофильда (Schofield); трехповерхностная кинематически упрочняющаяся; Дункана-Ченга гиперболическая	Деформационные: E, ν, k, λ, e_o Прочностные: φ_i, φ_f, ψ_i, ψ_f, c_i, c_f, h_c Дополнительные: p_c, G_{ec}, T, S, ψ, n, m

Какие стандарты определяют виды испытаний

1. **Россия:** **ГОСТ…..**
2. **Англия:** **BS1377 (1-9)**
3. **США**: **ASTM D….**
4. **Евросоюз:** **ISO…..**
5. **Япония:** JGS…..

Основные стандарты

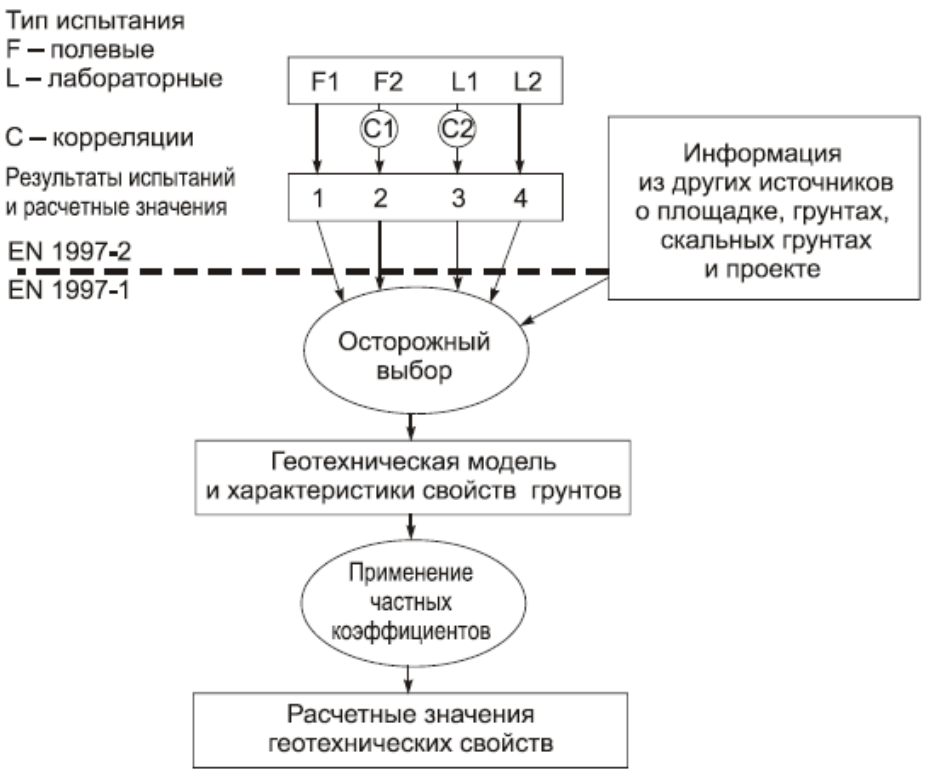
Таблица 3. Методы испытания грунтов в лабораторных условиях

Тип испытания	Наименование испытания	BS	ASTM	ГОСТ
1	2	3	4	5
Сжимаемость	Метод лабораторного определения характеристик сжимаемости при давлении до 600 кПа	BS 1377-6	D 698	12248-2011
	Метод лабораторного определения характеристик сжимаемости при давлении до 2700 кПа	BS 1377-6	D 1557	-
	Метод лабораторного определения характеристик просадочности	-	-	23161-78
	Метод лабораторного определения характеристик набухания и усадки	-	-	24143-80
Прочностные свойства	Метод определения прочности связных грунтов при одноосном сжатии	BS 1377-7	D 2166	12248-2011
	Метод определения неконсолидированной, недренированной прочности связных грунтов в условиях трехосного сжатия	BS 1377-8	D 2850	12248-2011
	Метод определения консолидированной, консолидированно-недренированной прочности связных грунтов в условиях трехосного сжатия	BS 1377-8	D 4767	12248-2011
	Метод прямого среза грунтов в консолидированно-дренированных условиях	BS 1377-7	D 3080	12248-2011
	Метод лабораторного испытания крыльчаткой водонасыщенных мелкозернистых глинистых грунтов	BS 1377-7	D 4648	-
	Метод определения модулей упругости и затухания грунтов с использованием метода резонантной колонны	-	D 4015	-

Еврокод-7, часть 1,2

- 1. EN 1997-2. Eurocode 7 - Geotechnical Design - Part 1: General rules.
- 2. EN 1997-1. Eurocode 7- Geotechnical Design - Part 2: Design assisted by laboratory and field testing.
- 3. EN 1998-1. Eurocode - 8. Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects.
- 4. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I. Общие правила производства работ. 1998.

Выбор и оценка параметров грунтов



Виды параметров грунта по Еврокод-7

1. **Derived parameters: Нормативные параметры**, полученные теоретически, корреляцией или эмпирически из результатов экспериментов, обработкой результатов испытаний грунтов

2. **Nominal parameters: Номинальные параметры**, полученные из существующих источников

3. **Design parameters: Расчетные параметры** получаются из нормативных введением коэффициентов надежности

4. **Characteristic parameters: Характерные параметры** – это осторожная оценка расчетных параметров, влияющая на достижение предельного состояния, учитывающая наиболее неблагоприятные комбинации локальных наименьших и наибольших расчетных параметров из доверительного интервала вероятности 95% (5% процентиль)

5. **Governing parameters: Управляющие параметры** – это расчетные параметры для больших массивов

6. **Representative parameters: Репрезентативные параметры** – это характерные параметры для больших массивов

Требования к качеству образцов

Табл. 1. Классы качества монолитов для лабораторных испытаний и используемые категори отбора монолитов

Свойства грунтов	1	2	3	4	5
Неизменяемые свойства грунтов:					
размер частиц	*	*	*	*	*
влажность	*	*	*		
плотность, коэффициент плотности, проницаемость	*	*			
сжимаемость, прочность	*				
Свойства, которые могут быть определены:					
последовательность слоев	*	*	*	*	*
границы пластов – общие	*	*	*	*	
границы пластов – точно	*	*			
пределы пластичности, плотность частиц, содержание органики	*	*	*	*	
влажность	*	*	*		
плотность, коэффициент плотности, пористость, проницаемость	*	*			
сжимаемость, прочность	*				
Категория отбора монолитов в соответствии с EN ISO 22475-1	A				
			B		
					C

Методы, рекомендуемые для определения прочностных и деформационных характеристик грунтов

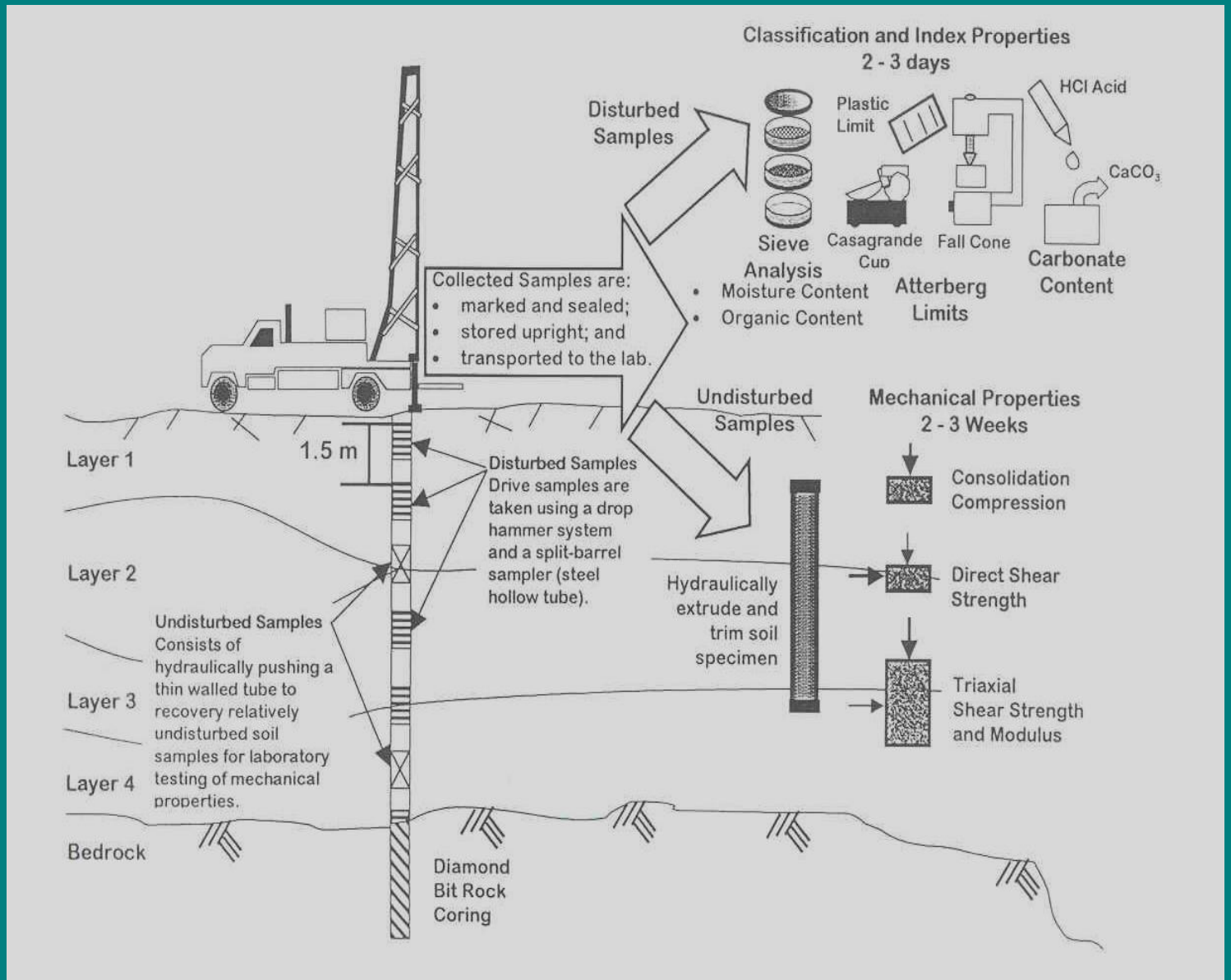
Табл. 2. Рекомендуемые методы лабораторных испытаний грунтов

Параметр	Тип грунта					
	Гравий	Песок	Супесь	NC глина	OC глина	Торф, ил
Компрессионный модуль деформации, E_{oed} Индекс компрессии, C_c	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)
Модуль упругости, E Модуль сдвига, G	TX	TX	TX	TX	TX	TX
Консолидированно-дренированная прочность, c, φ	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB
Остаточная прочность, c_R, φ_R	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)
Недренированная прочность c_u	-	-	TX DSS SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT
Плотность грунта, ρ	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD
Коэффициент консолидации, c_v			OED TX	OED TX	OED TX	OED TX
Коэффициент фильтрации, k	TXCH PSA	TXCH PSA	PTC TXCH (PTF)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)

Обозначения:

BDD – определение плотности; DSS – простой сдвиг; OED – компрессионные испытания; PTF – испытания на проницаемость переменным напором; PTC – испытания на проницаемость при постоянном напоре; RS – кольцевой срез; SB – прямой срез; SIT – определение коэффициента прочности; PSA – гранулометрический состав; TX – трехосные испытания; TXCH – определение коэффициента фильтрации при постоянном напоре в приборе трехосного сжатия; - – не определяется; ( ) – применяется частично (см. разд. 5 Eurocode 7); NC – нормально уплотненная глина; OC – переуплотненная глина

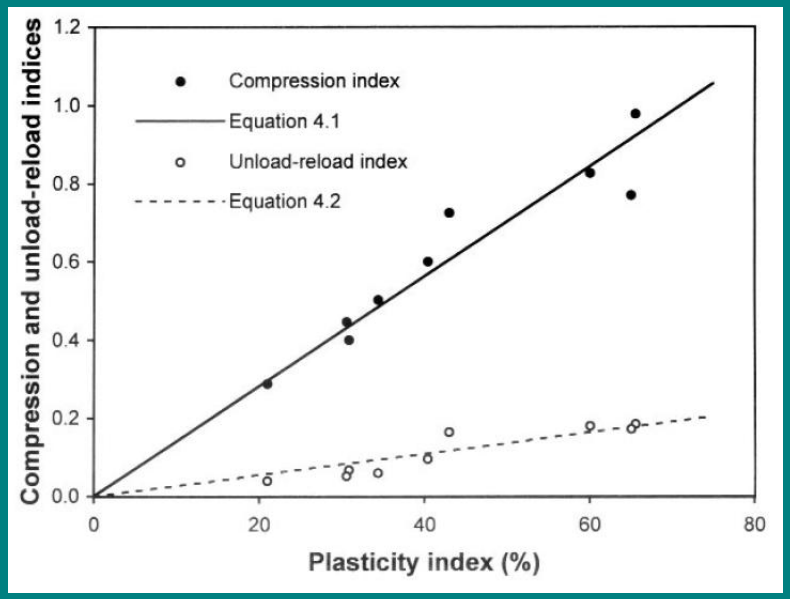
Процедура лабораторных исследований



Зачем столько методов испытаний?

Почему не используем корреляционные зависимости?

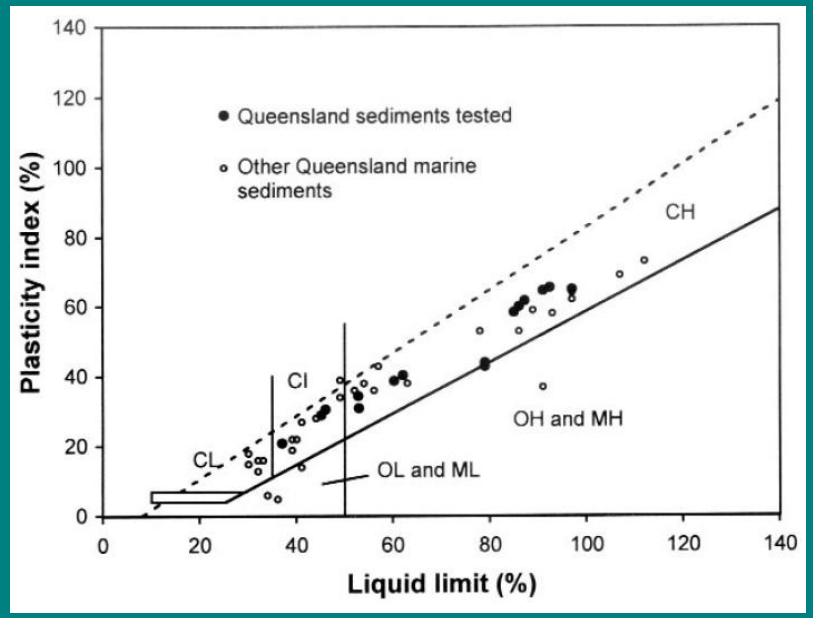
Число пластичности – коэффициенты компрессии



$$C_c = \frac{PI}{71}$$

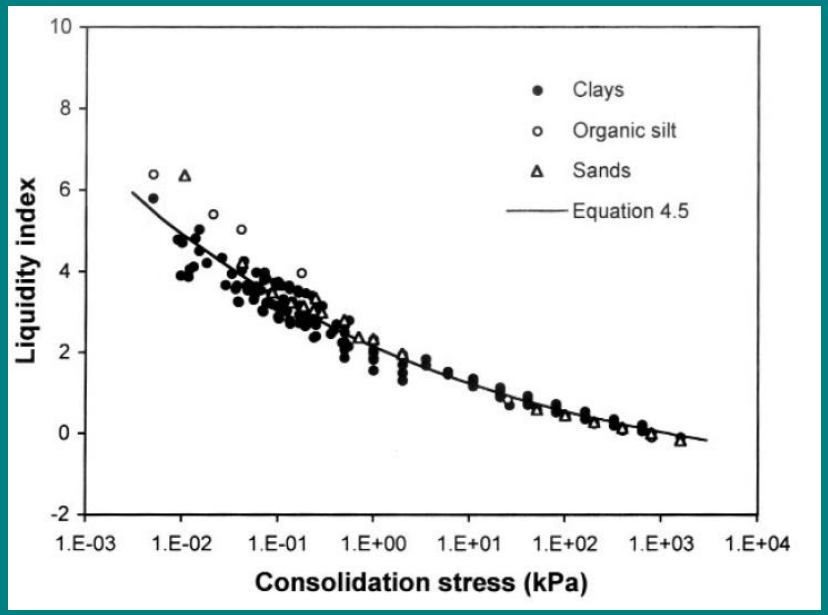
$$C_{ur} = \frac{PI}{368}$$

Число пластичности – верхний предел пластичности



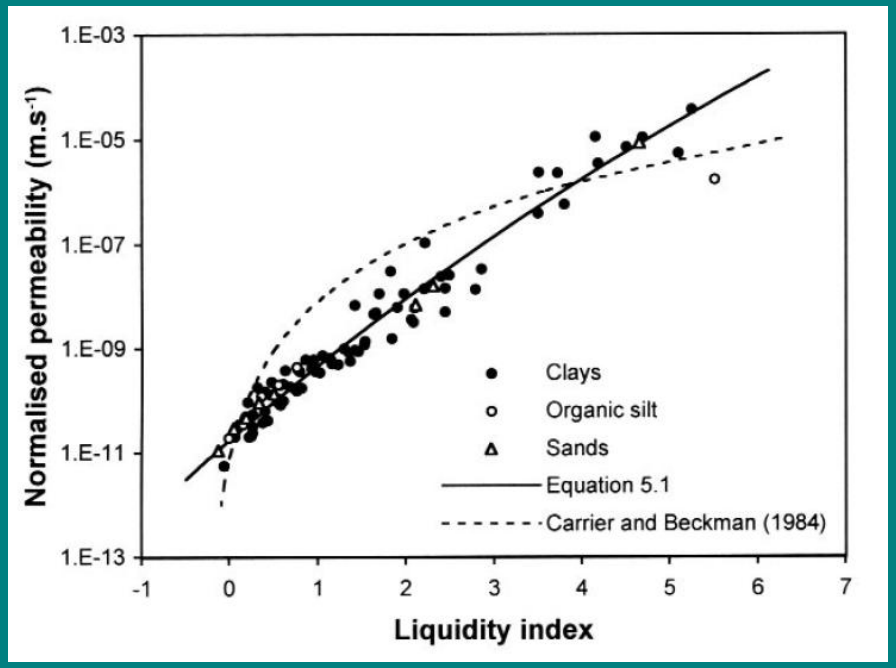
Продолжение

Давление консолидации – верхний предел пластичности



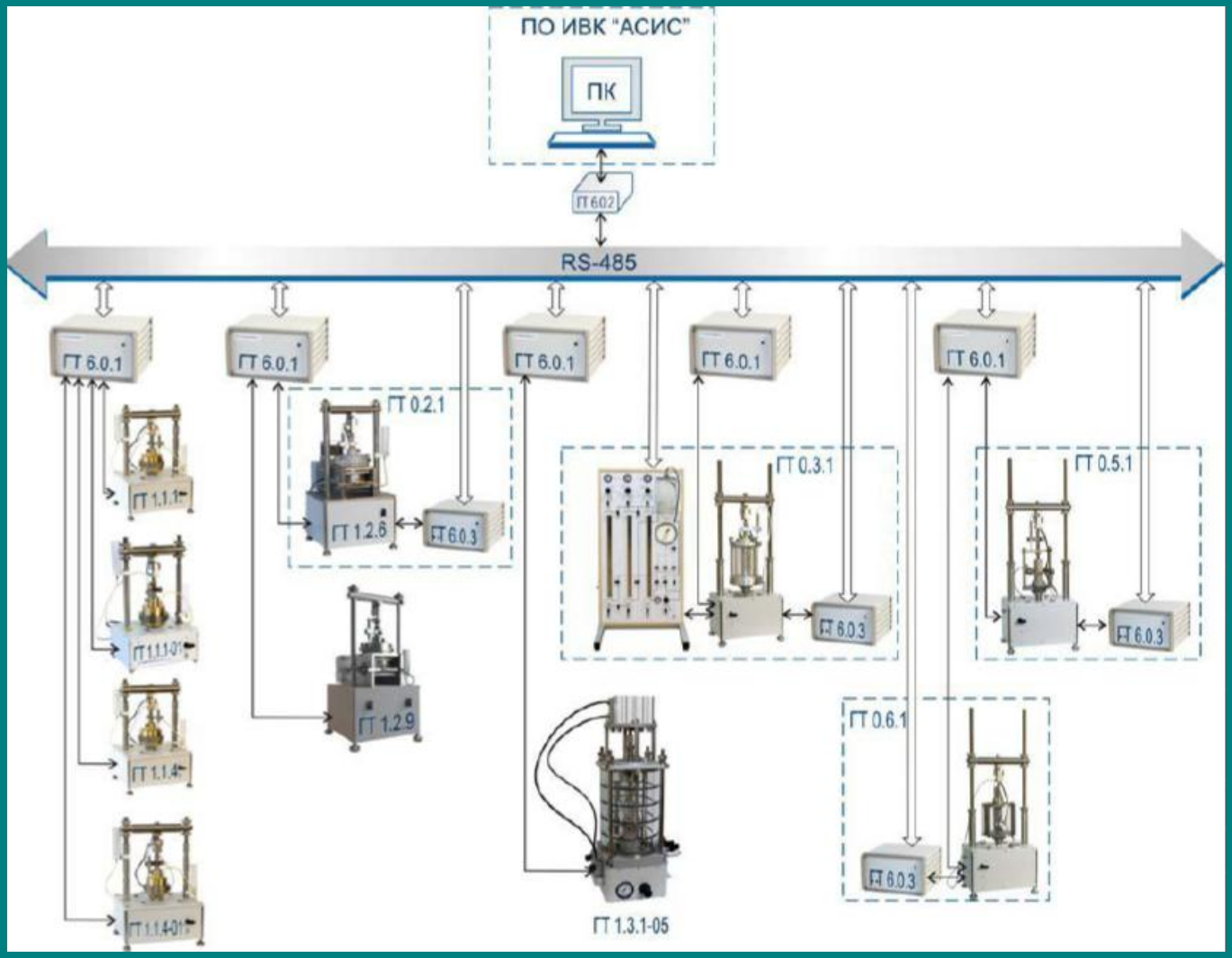
$$LI' = 2.384\sigma'^{-0.1027} - 1.194$$

Коэффициент фильтрации – верхний предел пластичности

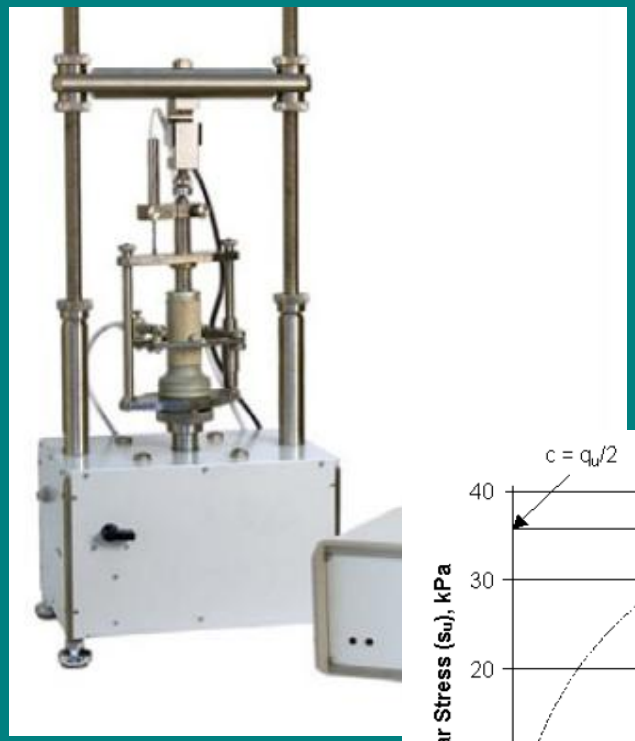


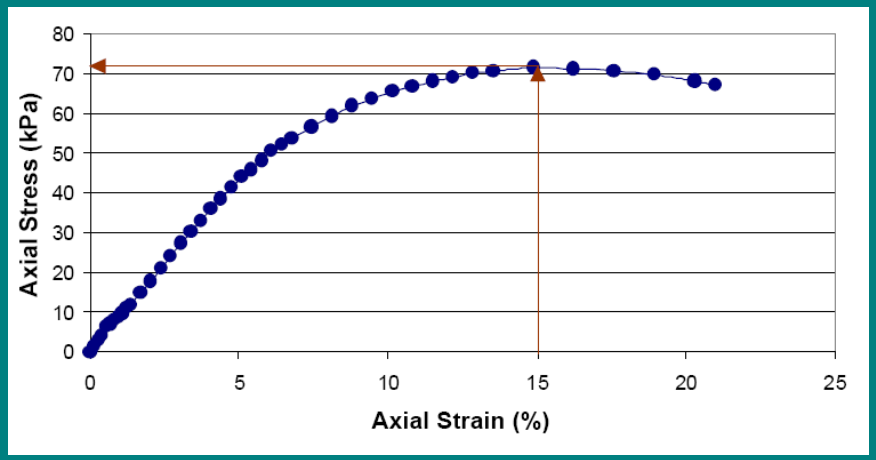
$$LI = 20.03(k(1+e))^{0.0314} - 9.192$$

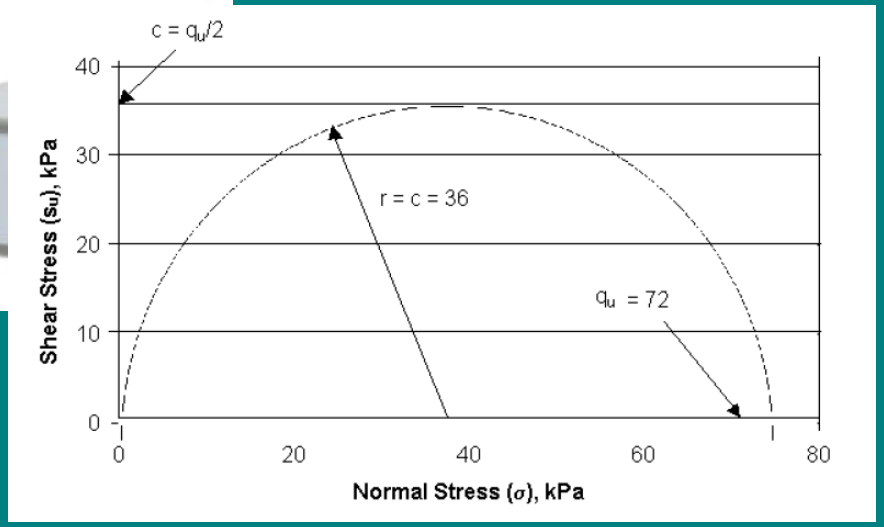
Измерительно-вычислительный комплекс АСИС



Одноосное сжатие

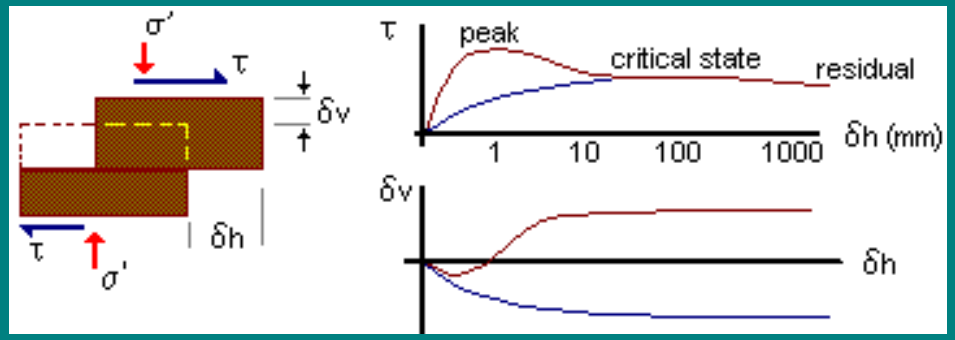




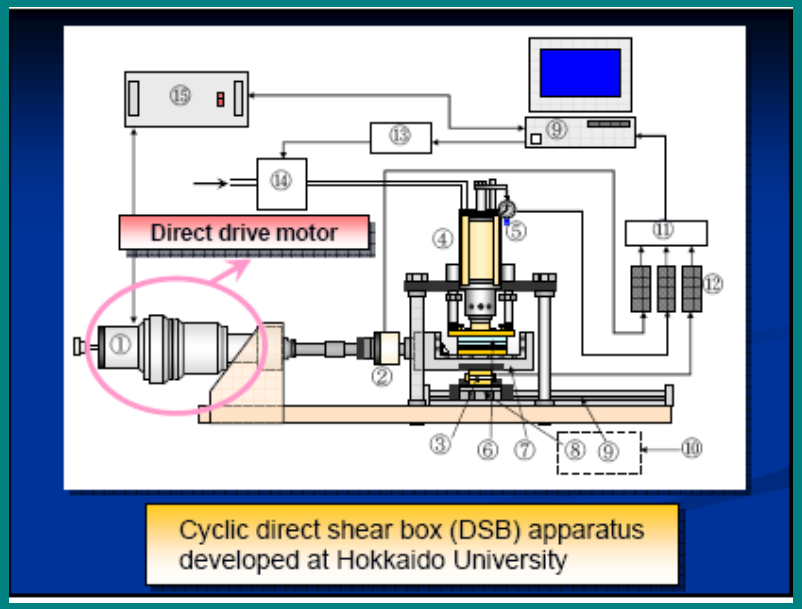


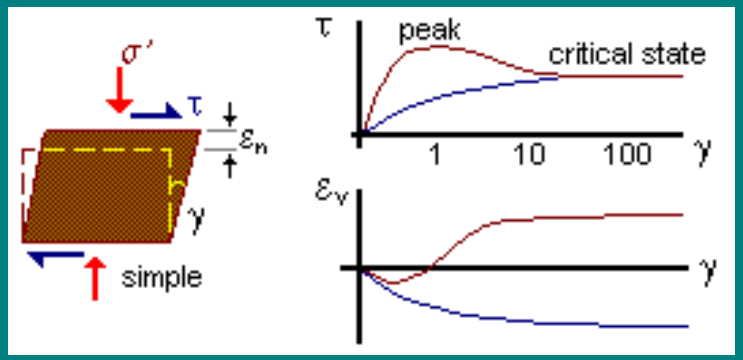
$$c = \frac{q_u}{2}$$

Одноплоскостной сдвиг



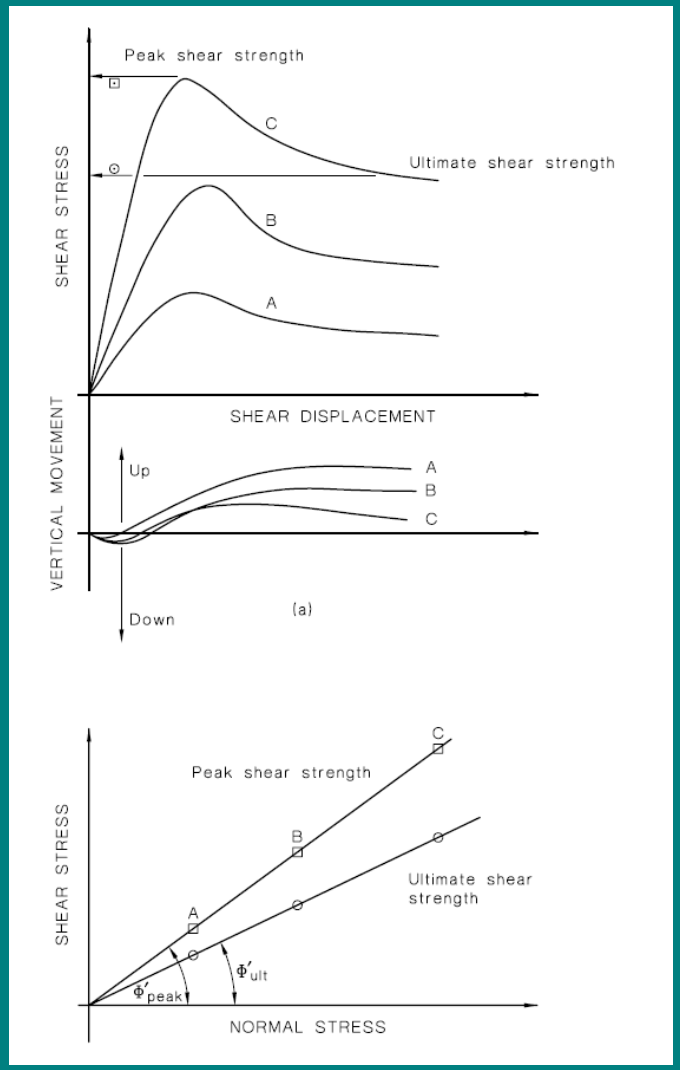
Испытания в условиях простого сдвига

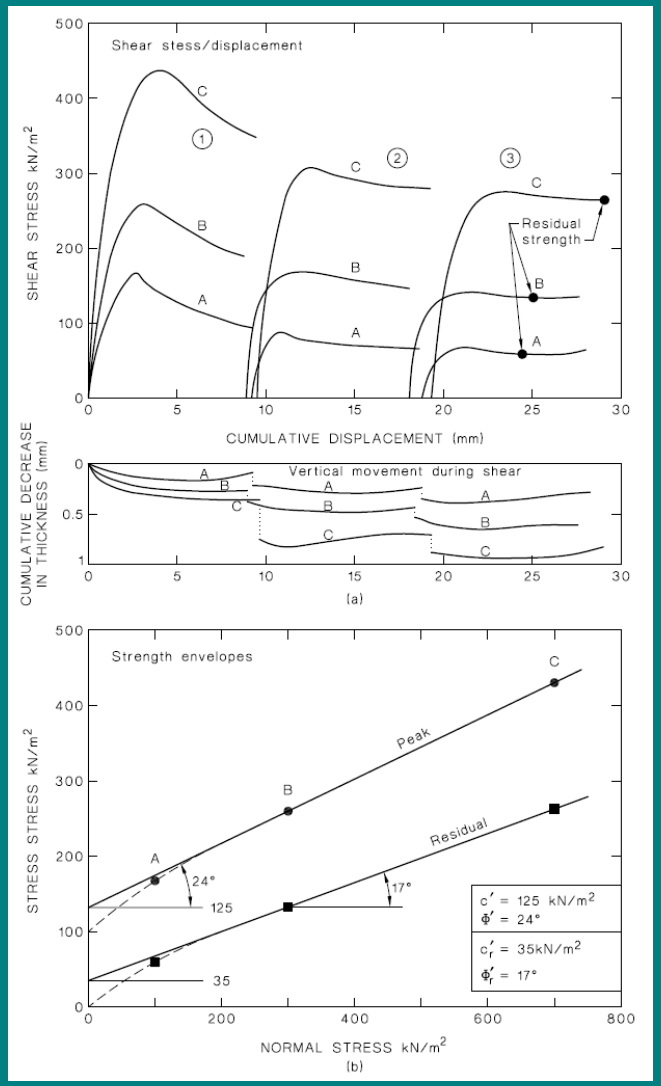




$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)\tan\phi'$$

Определение параметров прочности





Сдвиг «плашка по плашке»

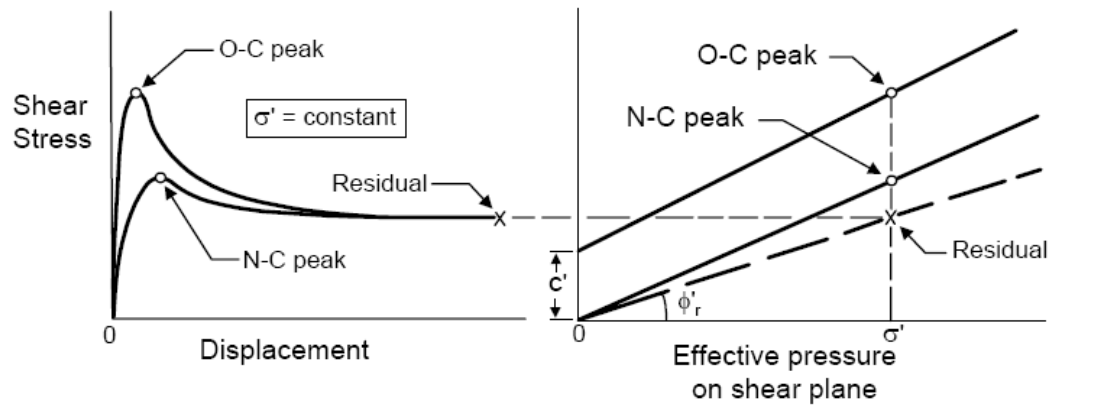


Figure 2-3. Simplified relation between normally and over-consolidated clay (Skempton, 1964).

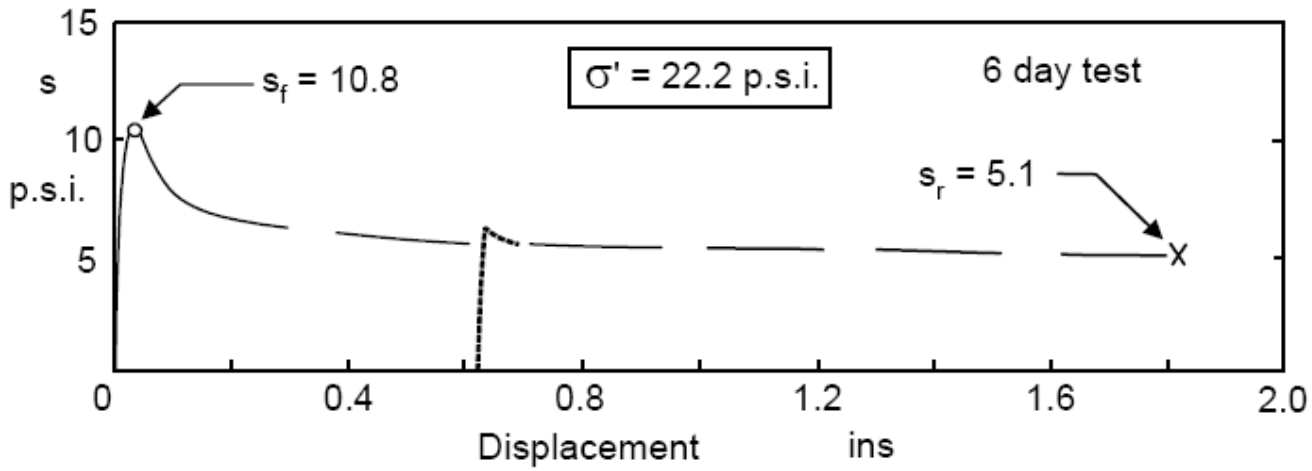
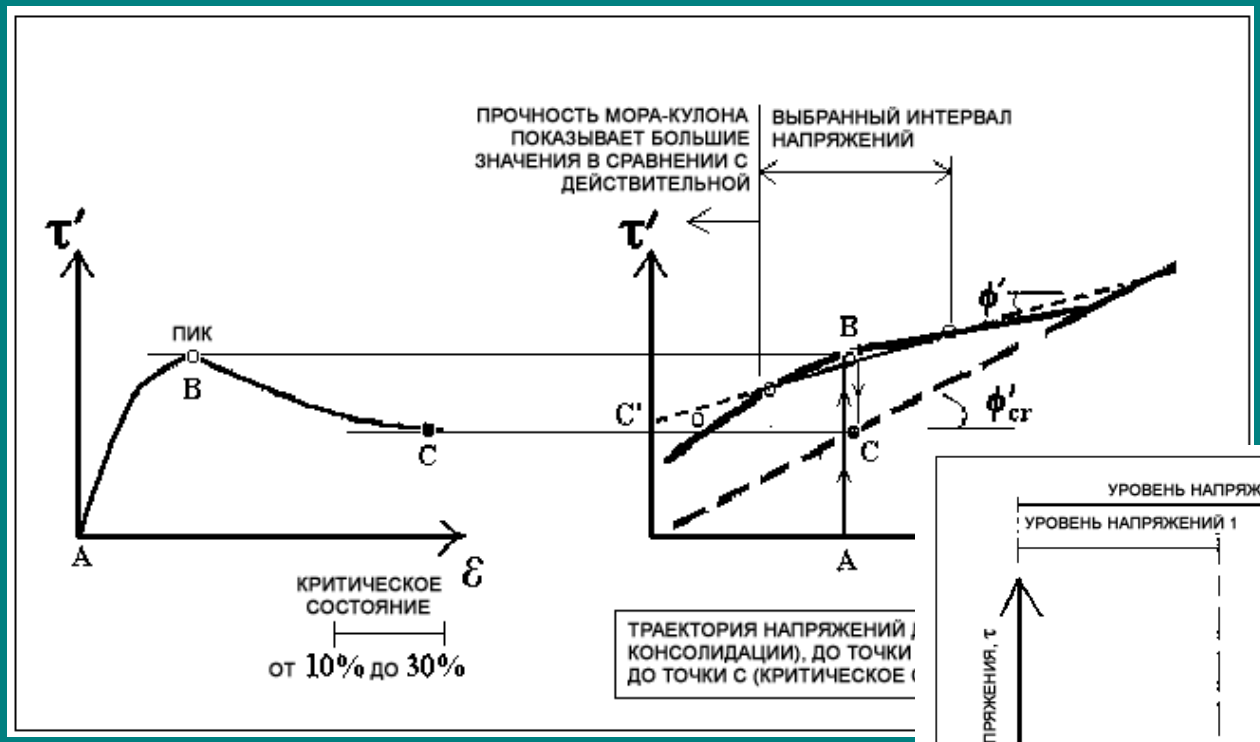
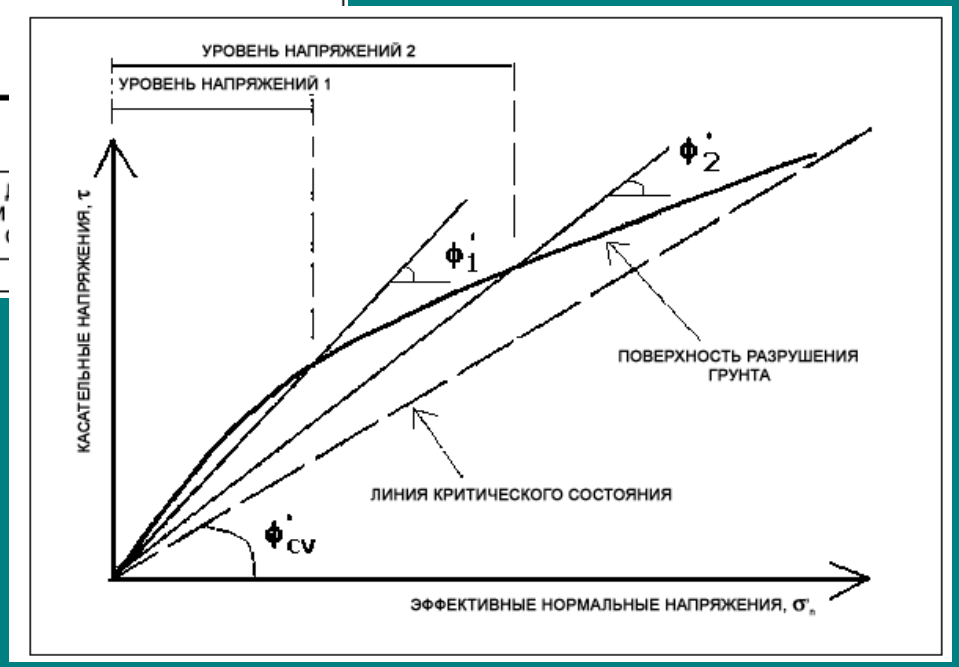


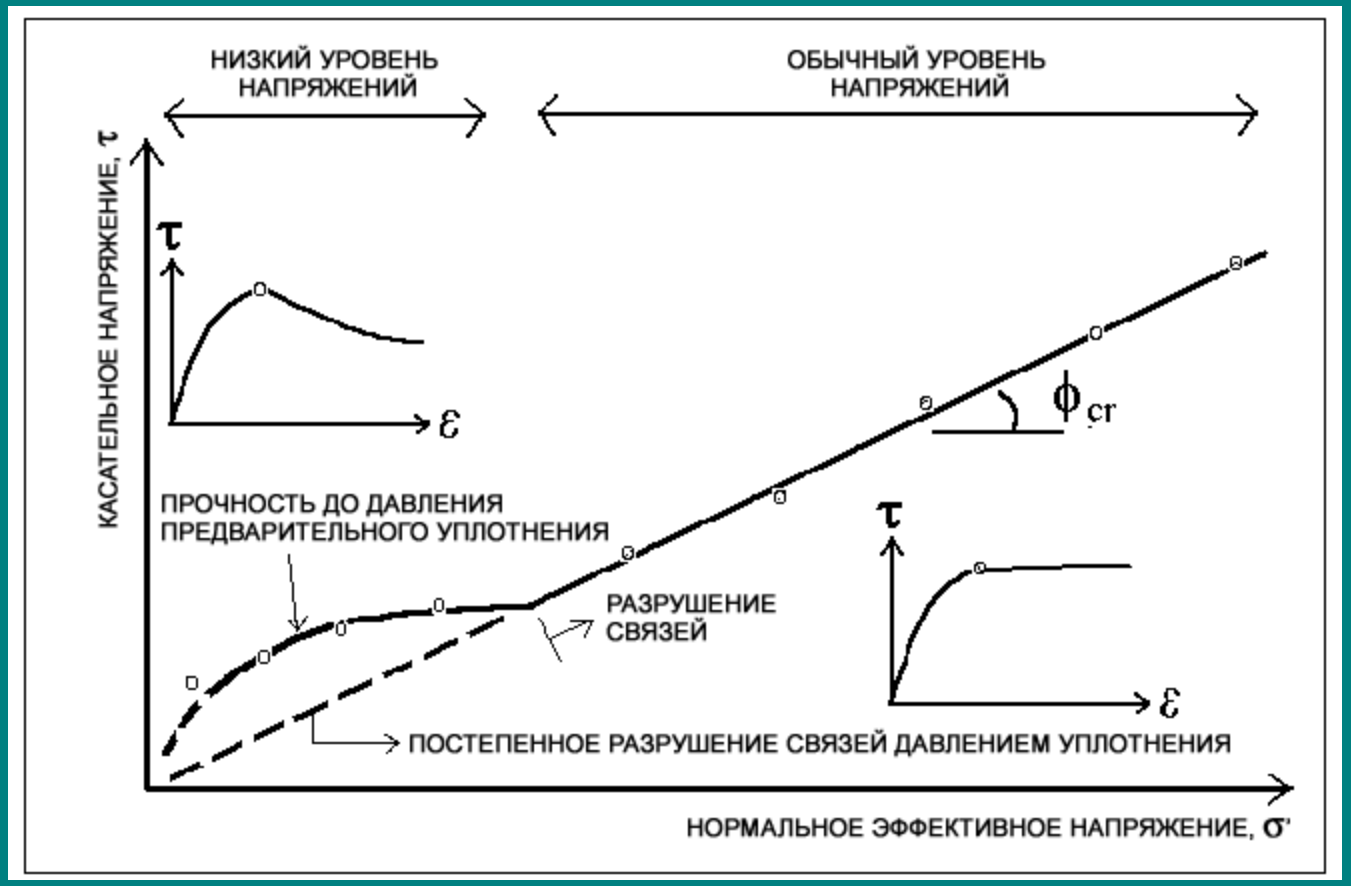
Figure 2-2. Effect of reversal in direct shear tests (Skempton, 1964).

Прочность переуплотненных грунтов

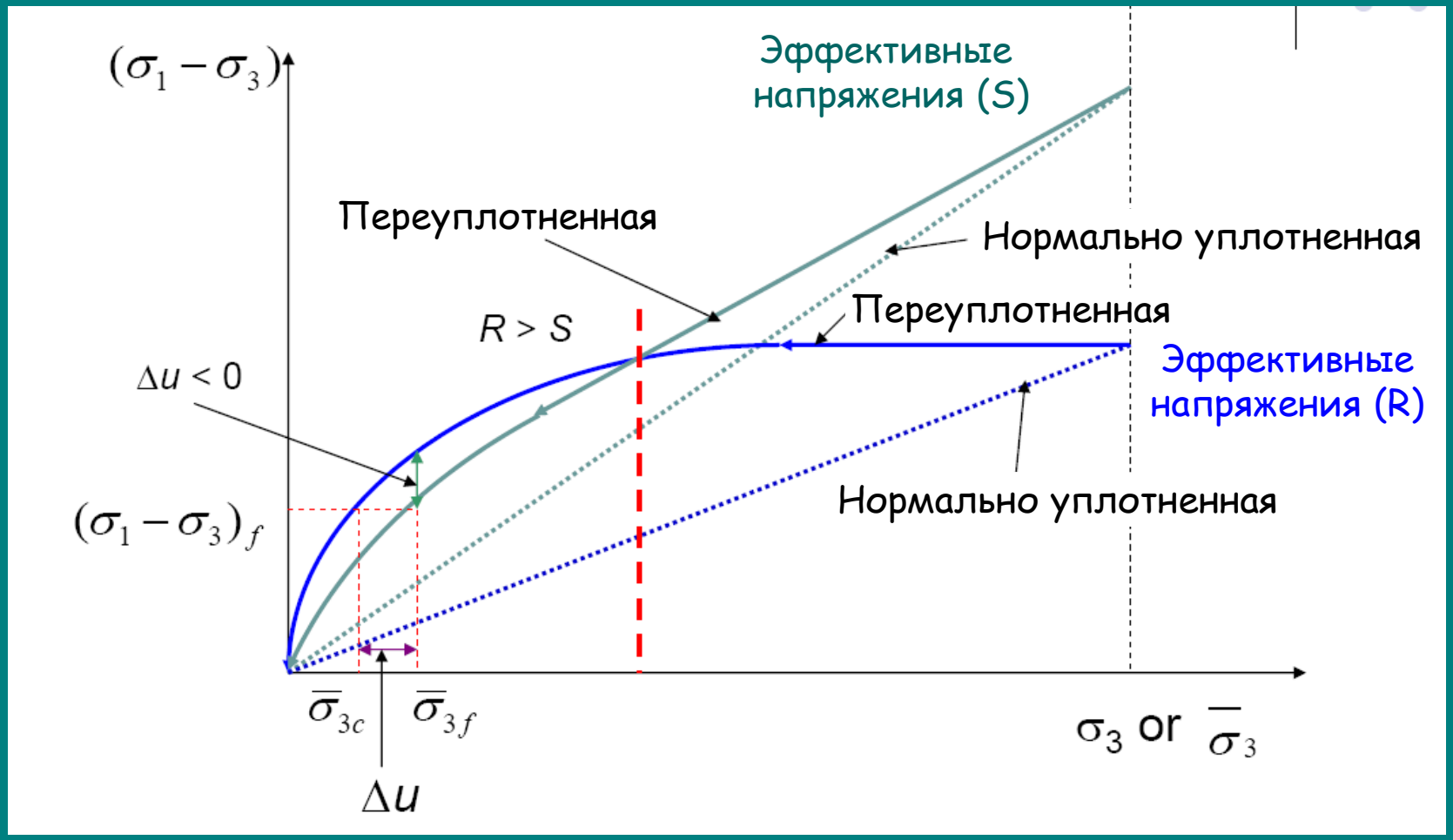




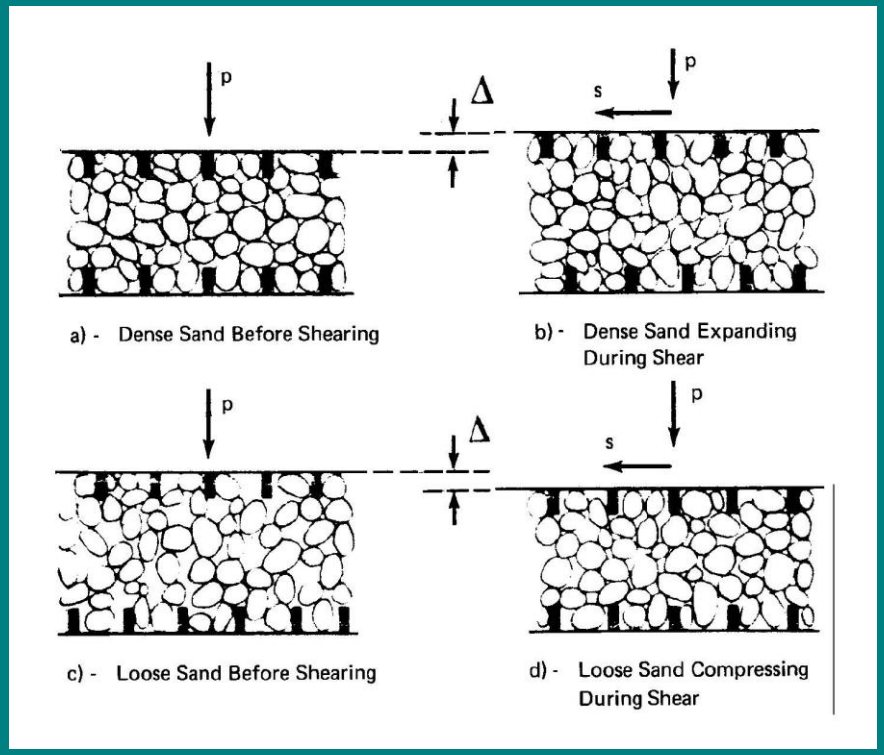
Прочность элювиальных грунтов

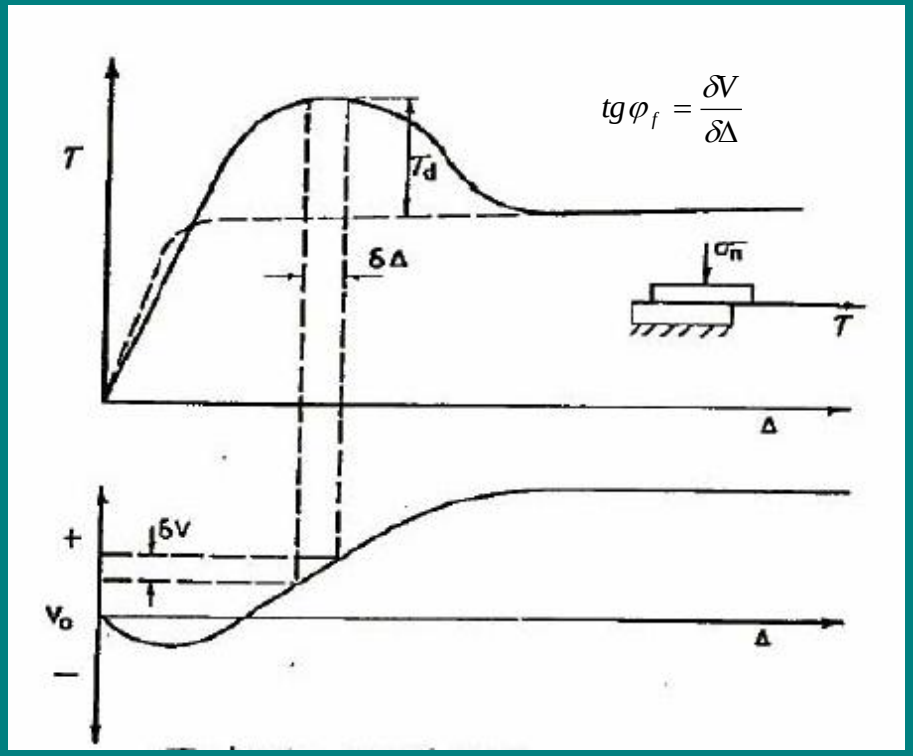


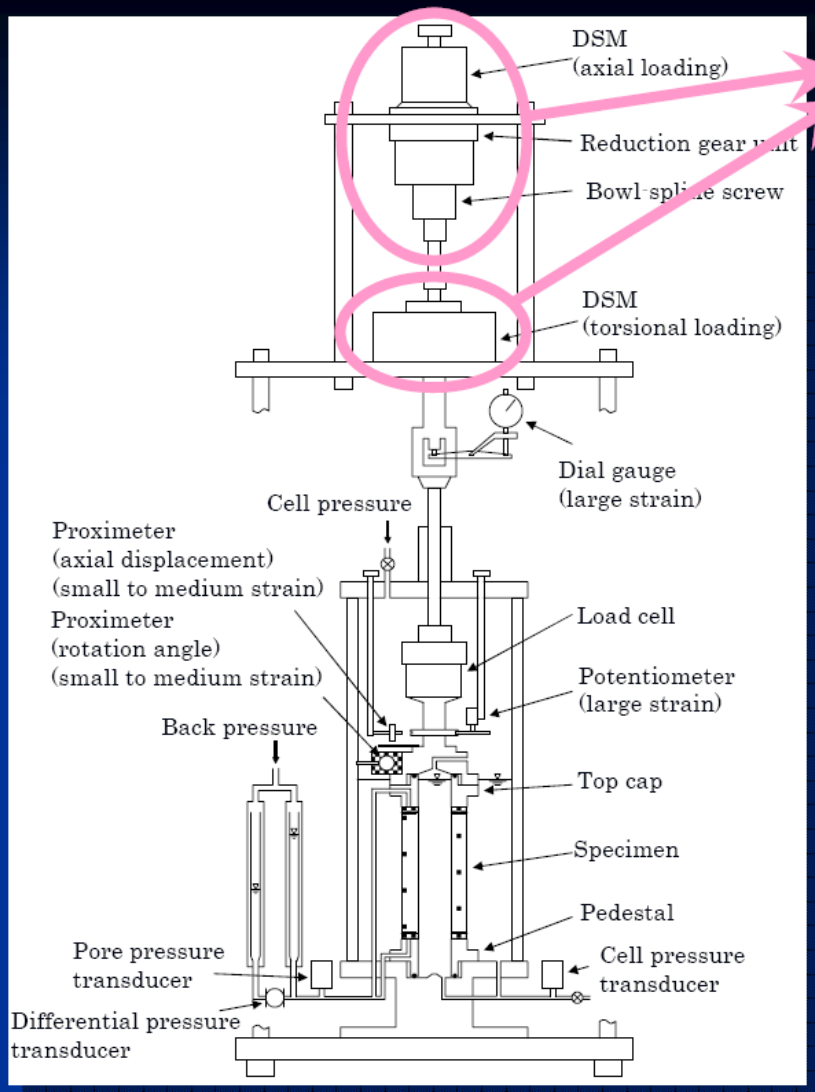
Переуплотненные и нормально уплотненные глинистые грунты



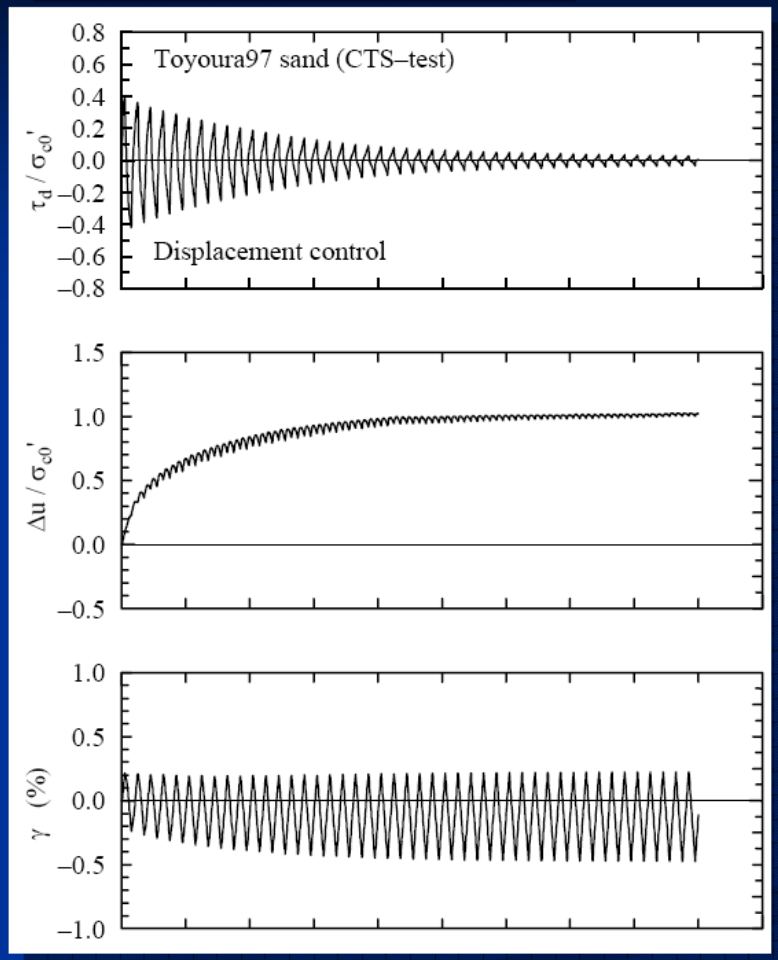
Угол дилатансии





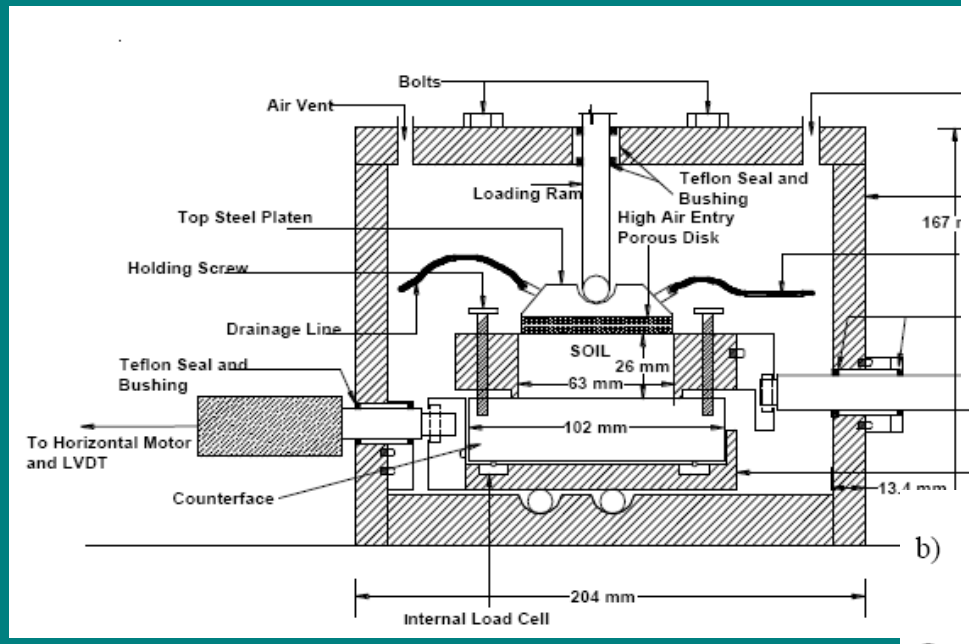


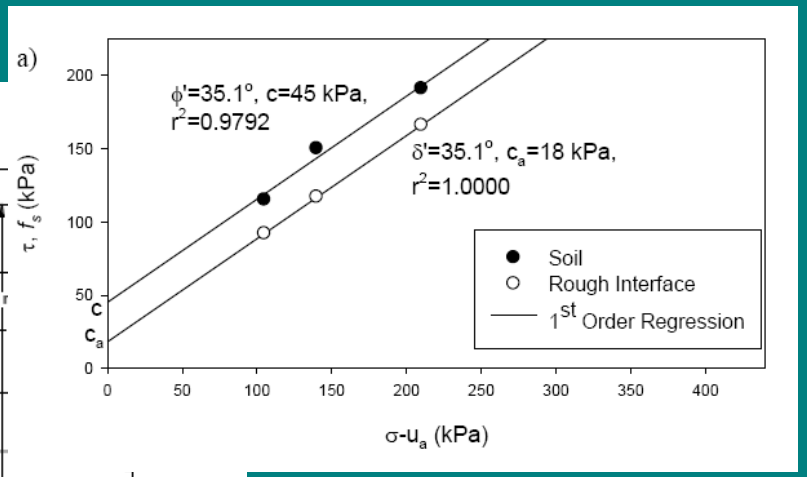
Direct drive motors



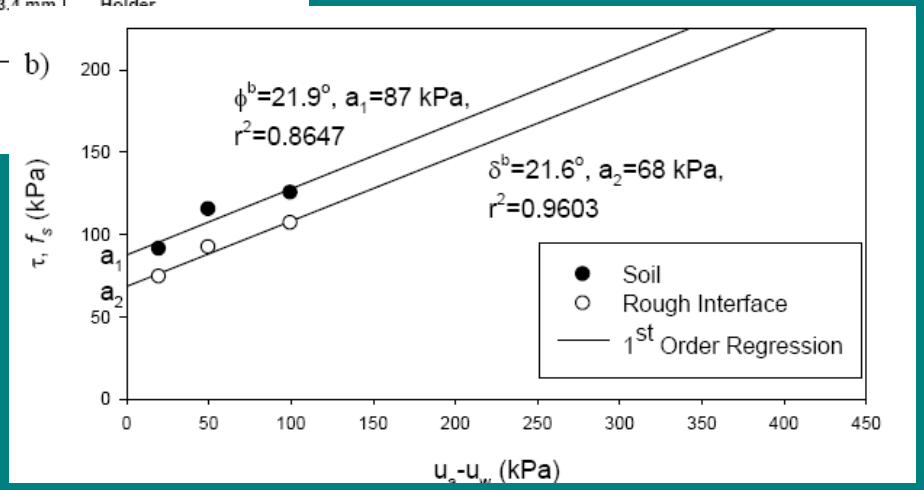
Hollow cylinder apparatus equipped with “dual” direct drive motors (Yamashita et al., 1999)

Прочность на границе «грунт-конструкция»

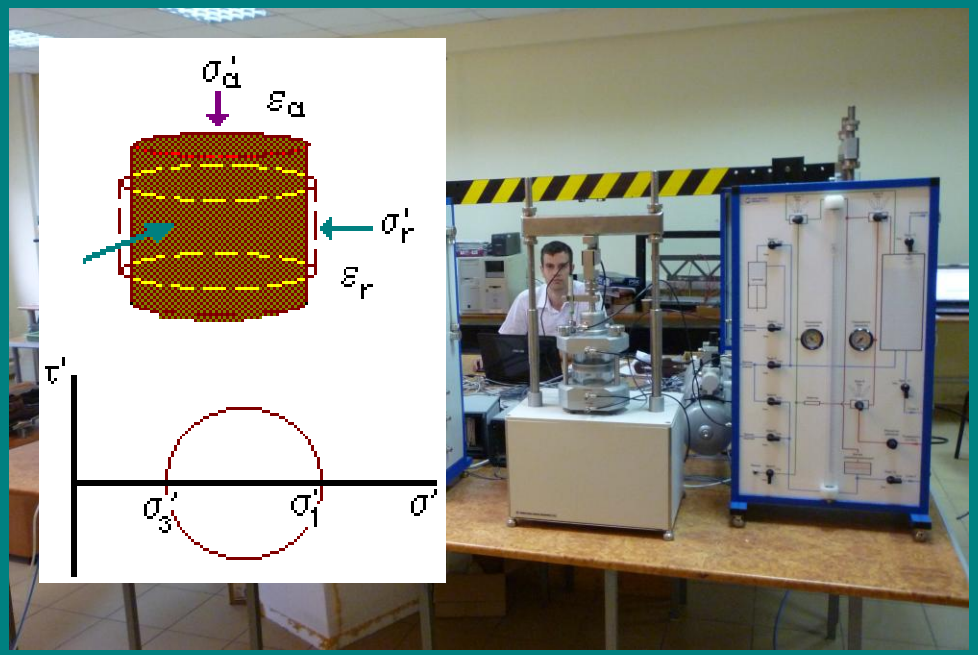




$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$$



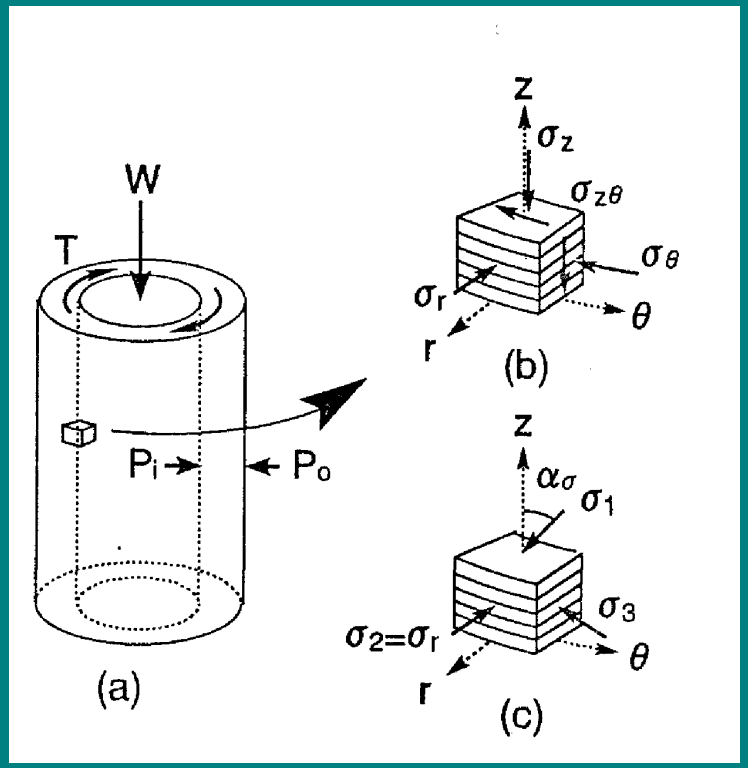
Трехосное сжатие

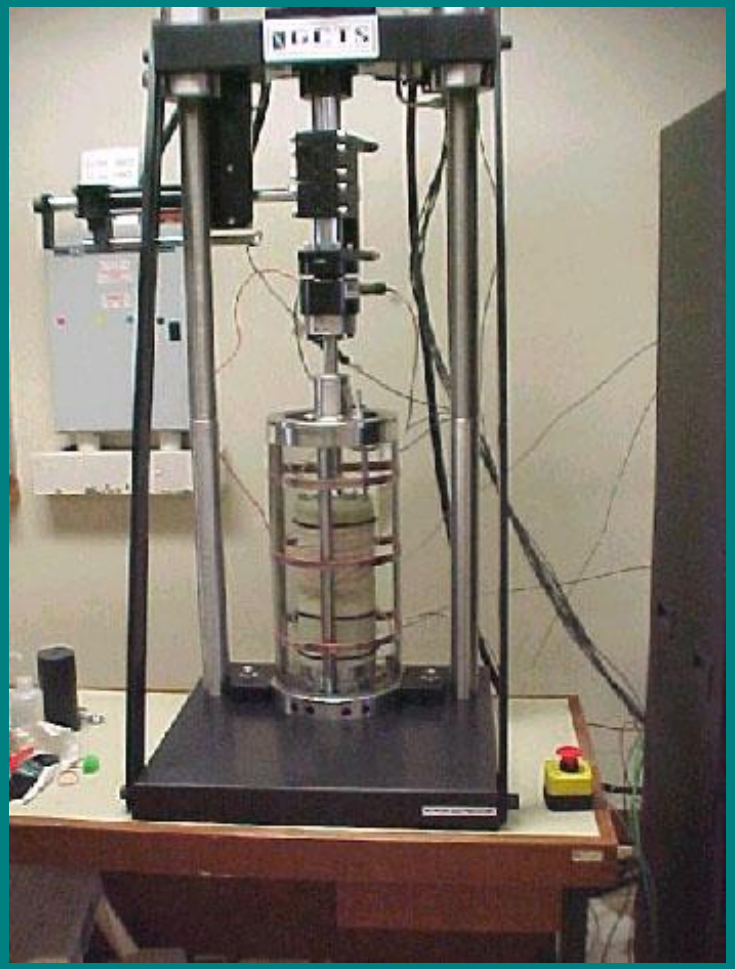


Статическое и кинематическое нагружение

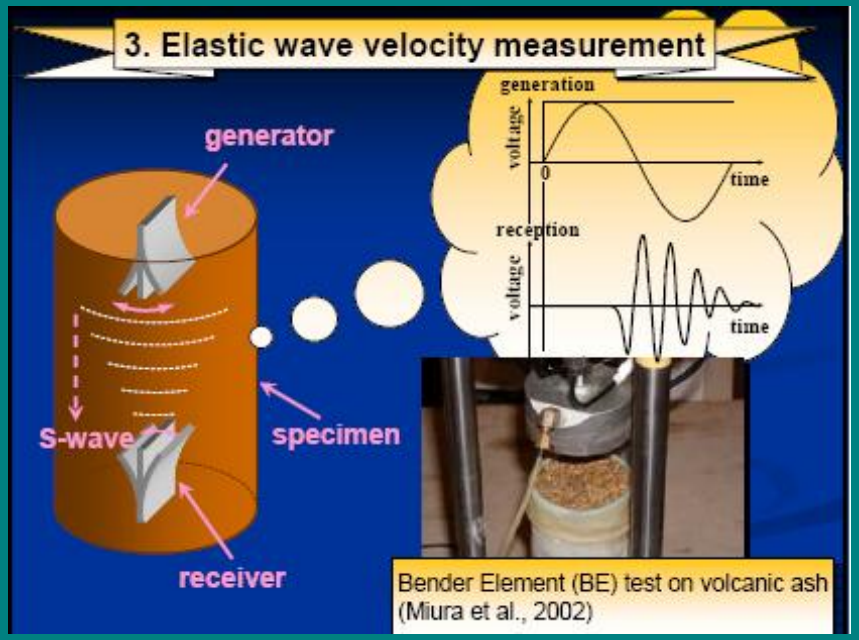
Динамическое нагружение

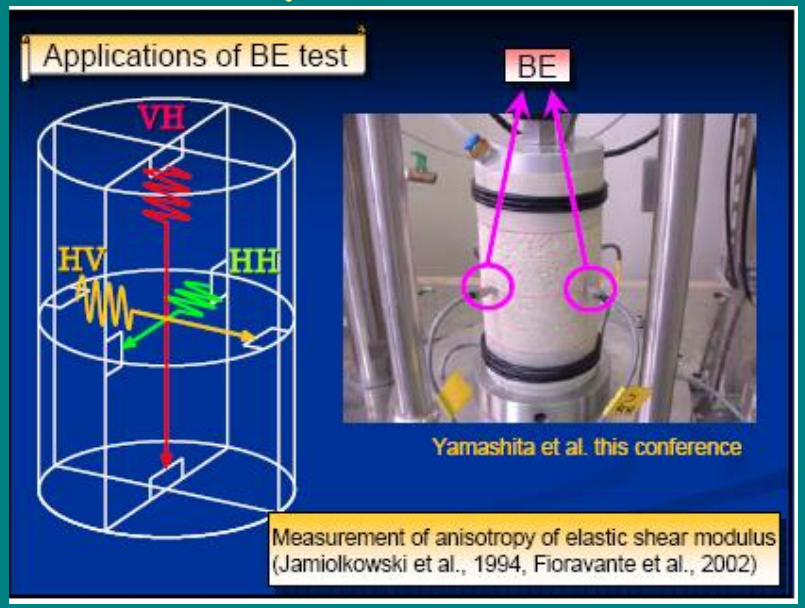
Испытания полых образцов

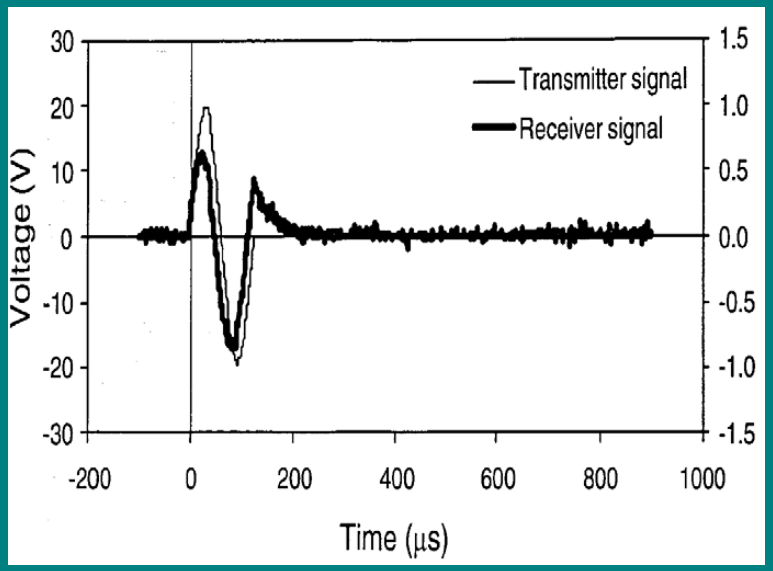




Определение упругого модуля сдвига G







Влияние деформации на модули

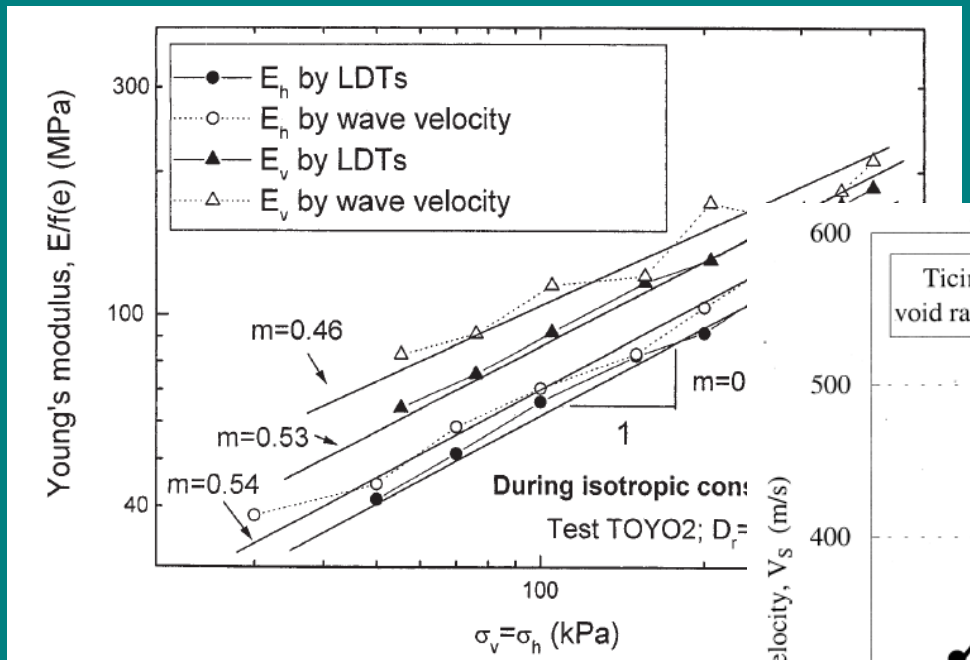


FIG. 8—*Young's modulus in both directions during isotropic consolidation after revising th*

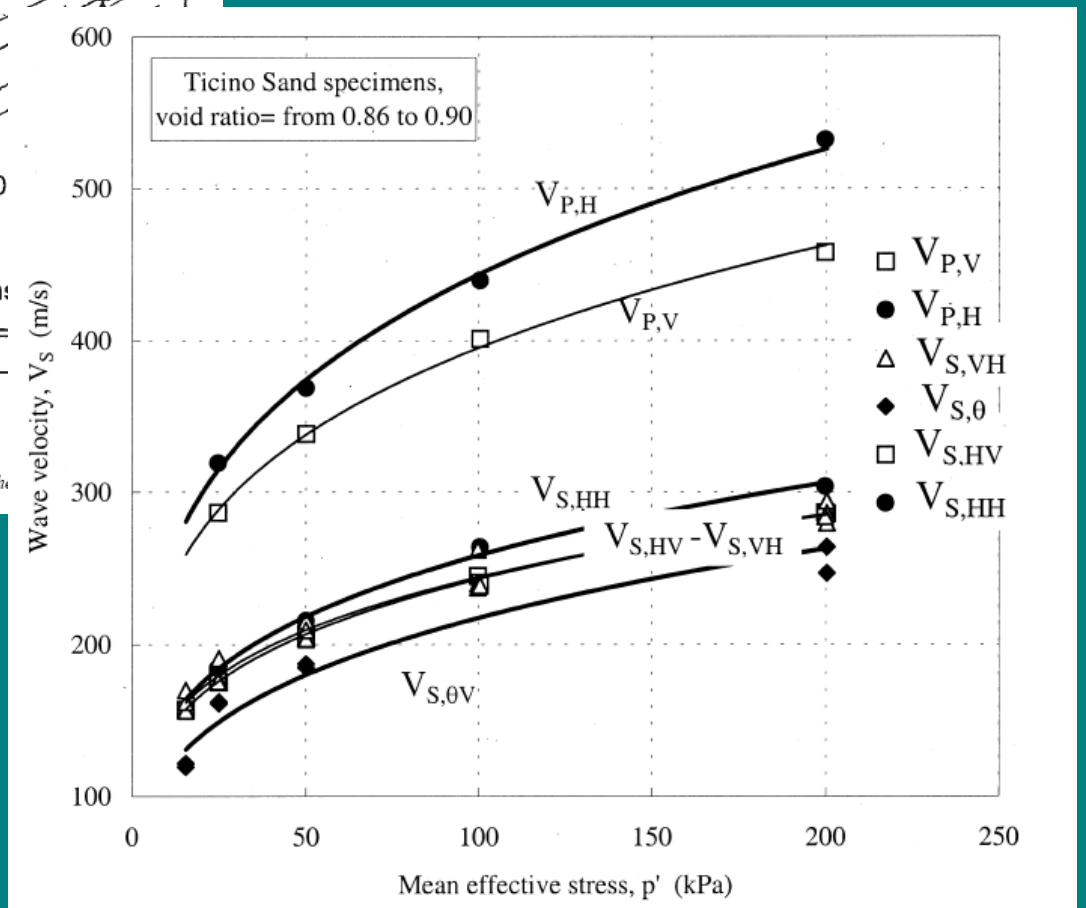
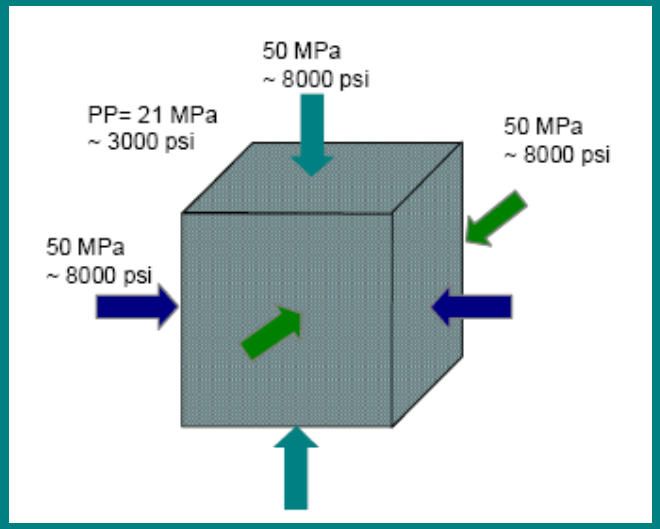
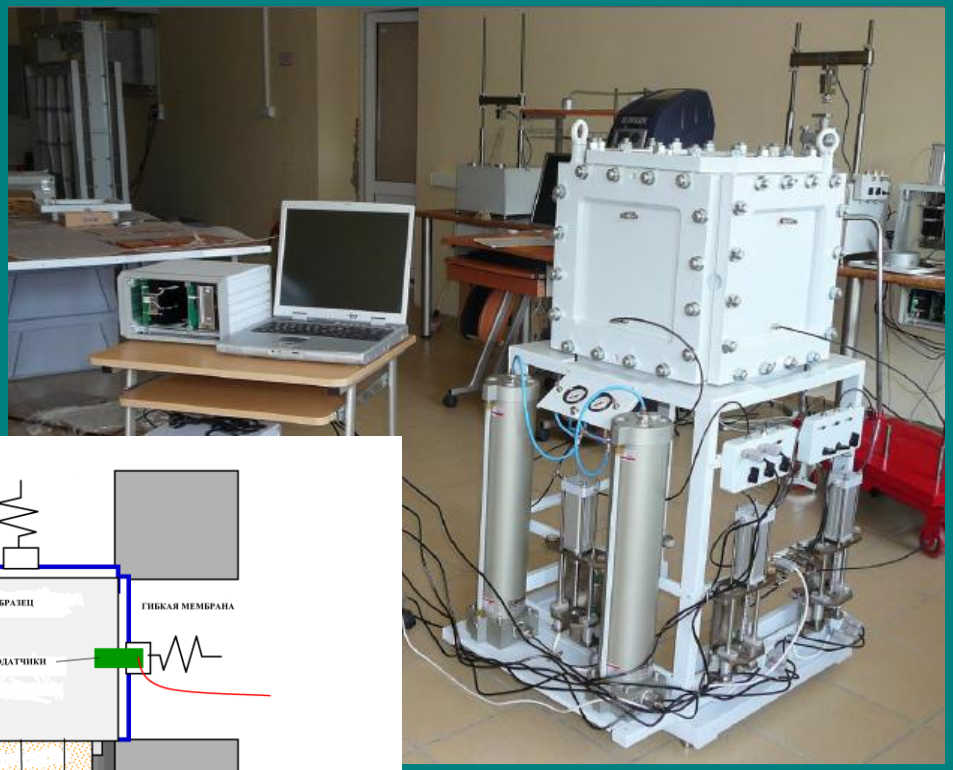


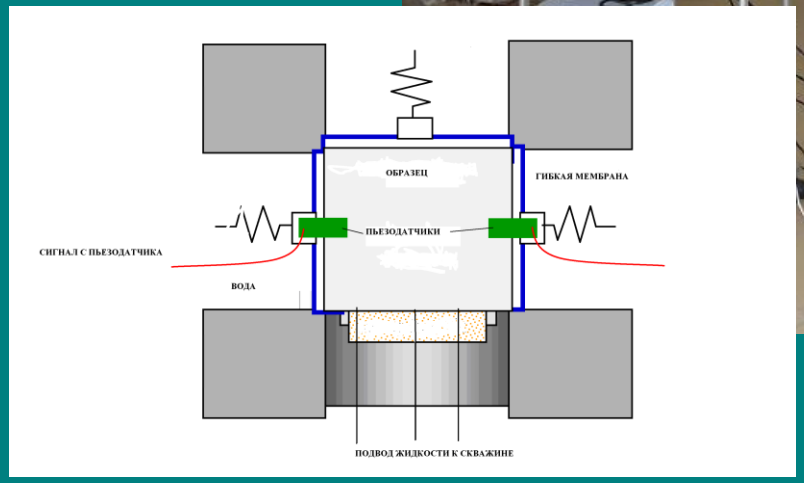
FIG. 10—*Effects of the mean effective pressure on the body wave velocities.*

$$M_0 = \rho V_P^2 \qquad G_0 = \rho V_S^2$$

Истинное трехосное сжатие







Испытания маловлажных грунтов

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$$

Компрессионные испытания

Экспресс лаборатория

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)\tan\phi'$$

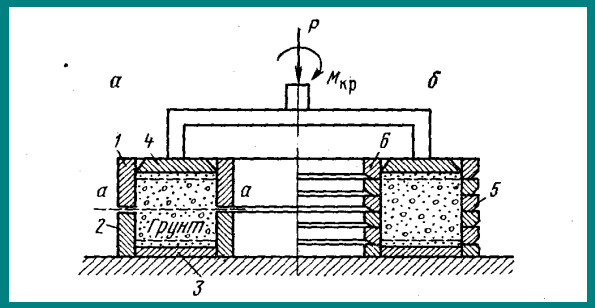
Испытания мерзлых и скальных грунтов

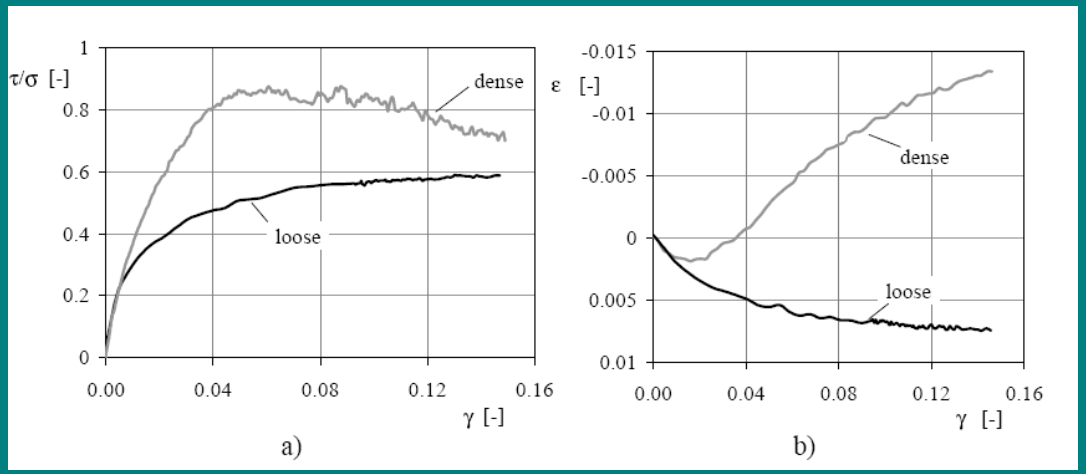
Мерзлые грунты

Скальные грунты

Одноосное сжатие

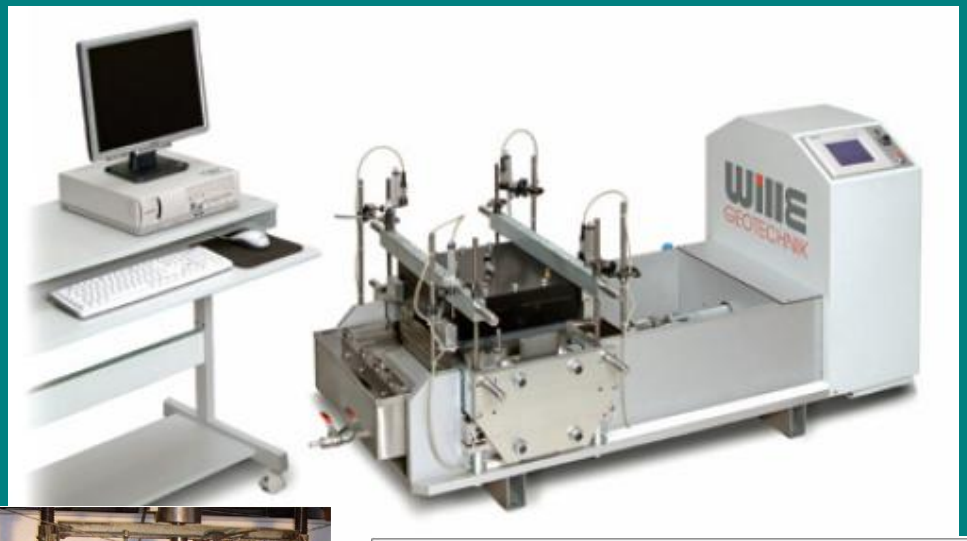
Испытания в условиях кольцевого среза





$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)\tan\phi'$$

Испытания армированных грунтов



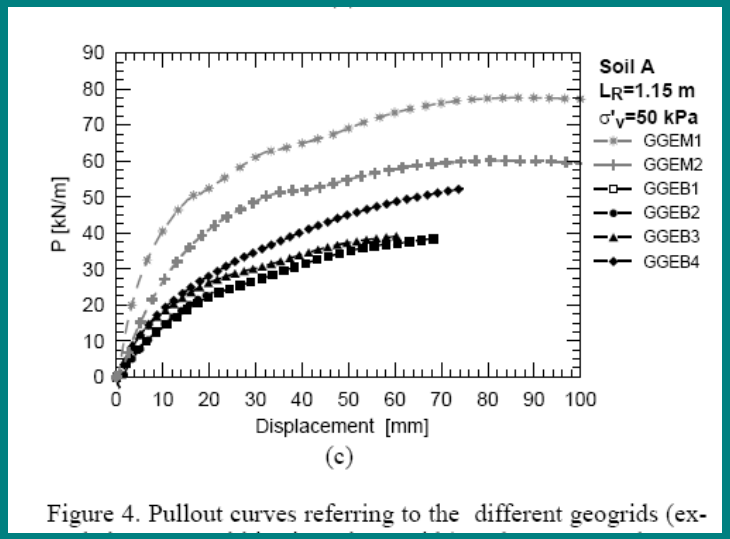
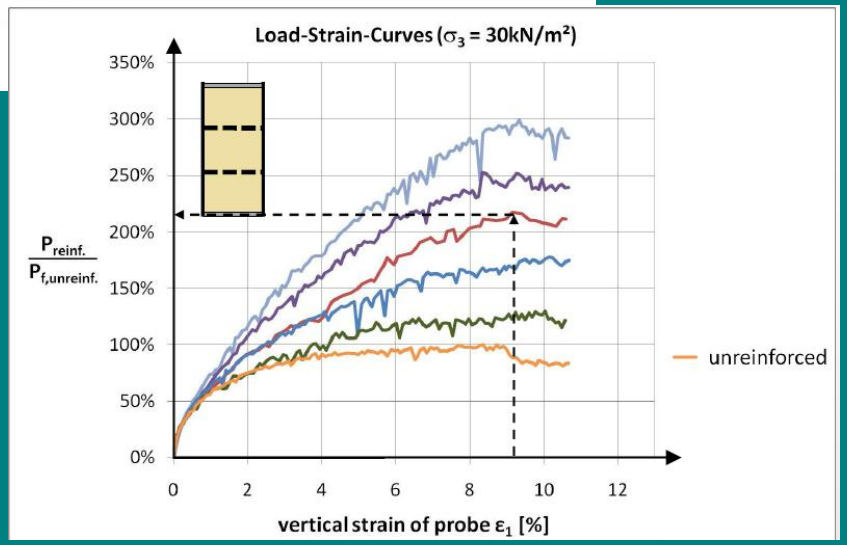


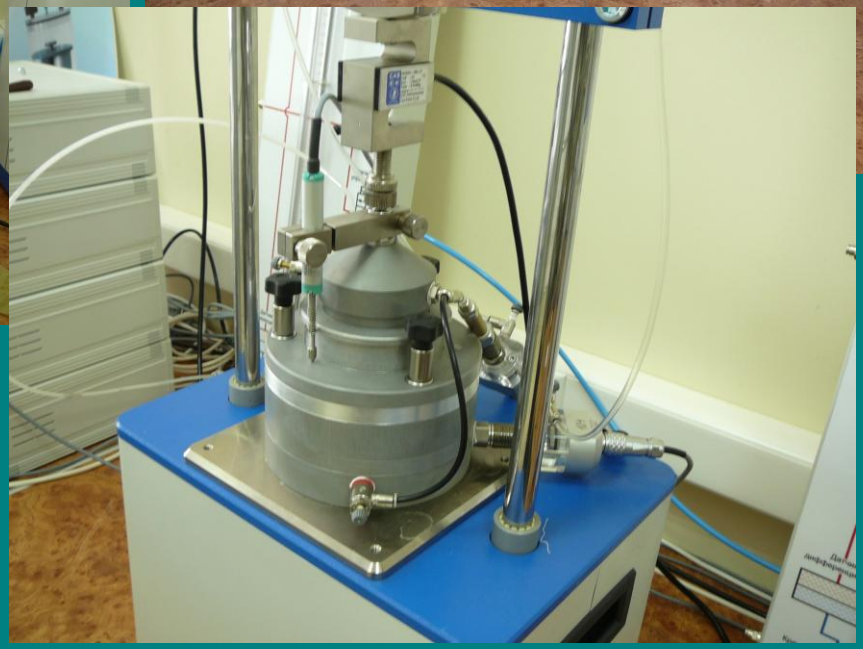
Figure 4. Pullout curves referring to the different geogrids (ex-



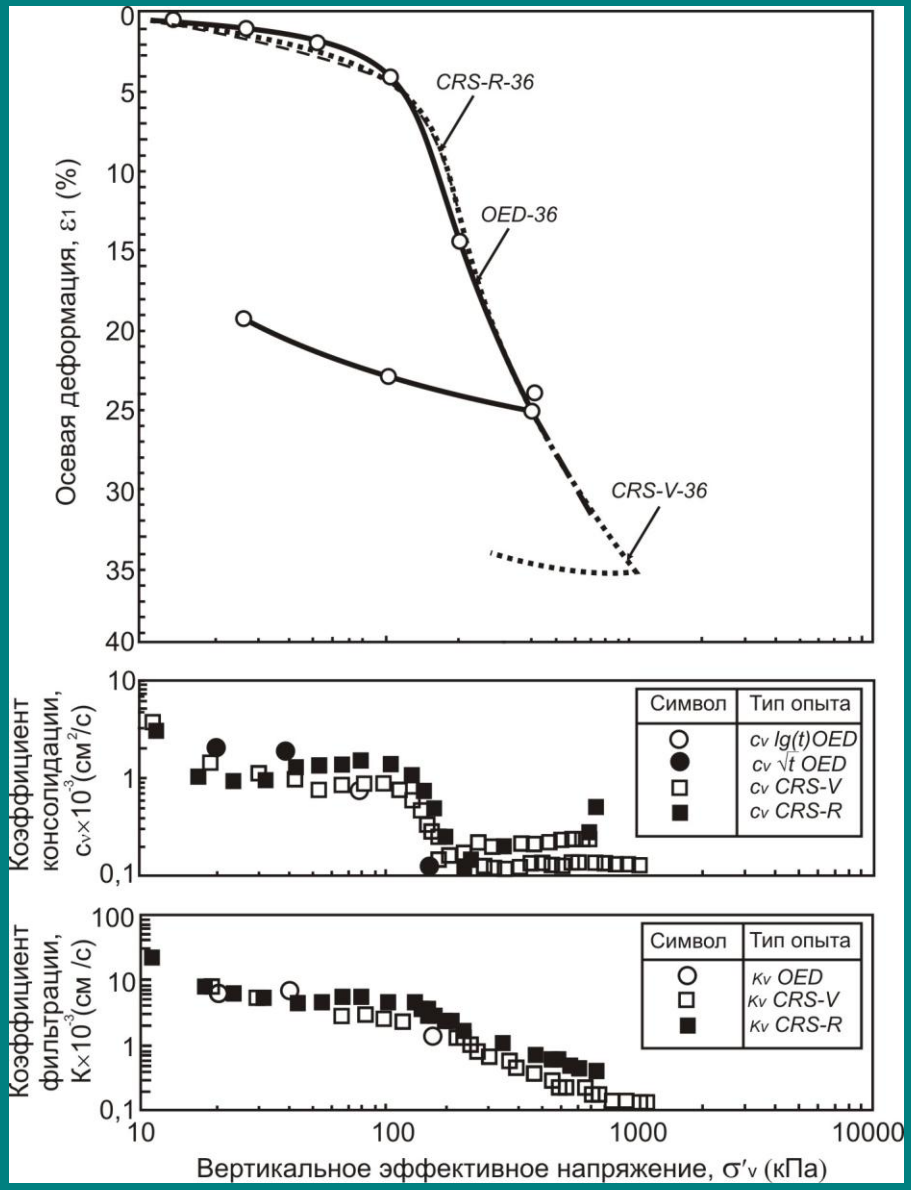
Стандарты испытаний методом CRS

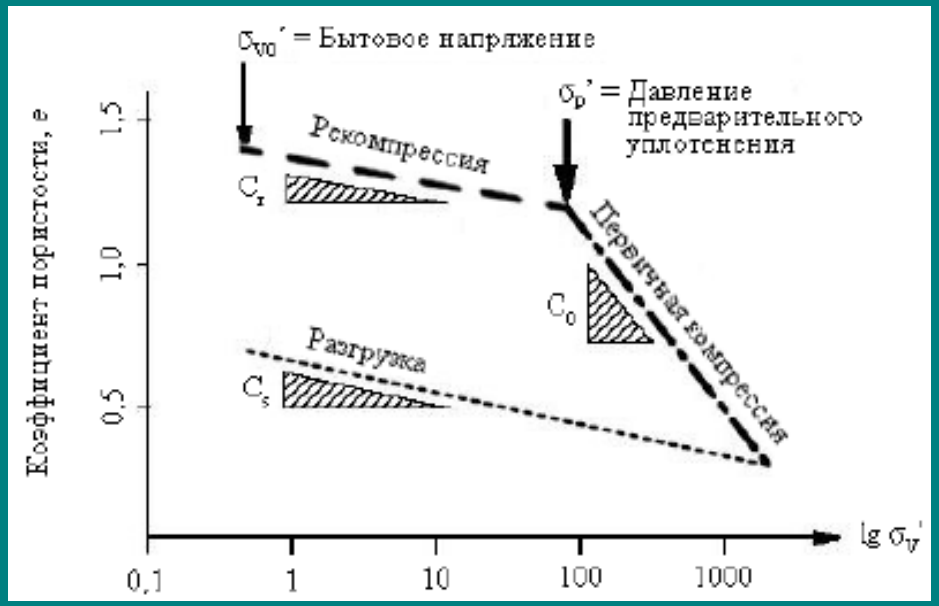
- Swedish Standard SS 027126. CRS Oedometer Test on Cohesive Soil
- ASTM D 4186. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading
- Eurocode 7 — Geotechnical design — Part 2: Ground investigation and testing
- Norwegian Geotechnical Institut
- JIS A 1227:2000.Test method for one-dimensional consolidation properties of soils using constant rate of strain loading

CRS - одометры

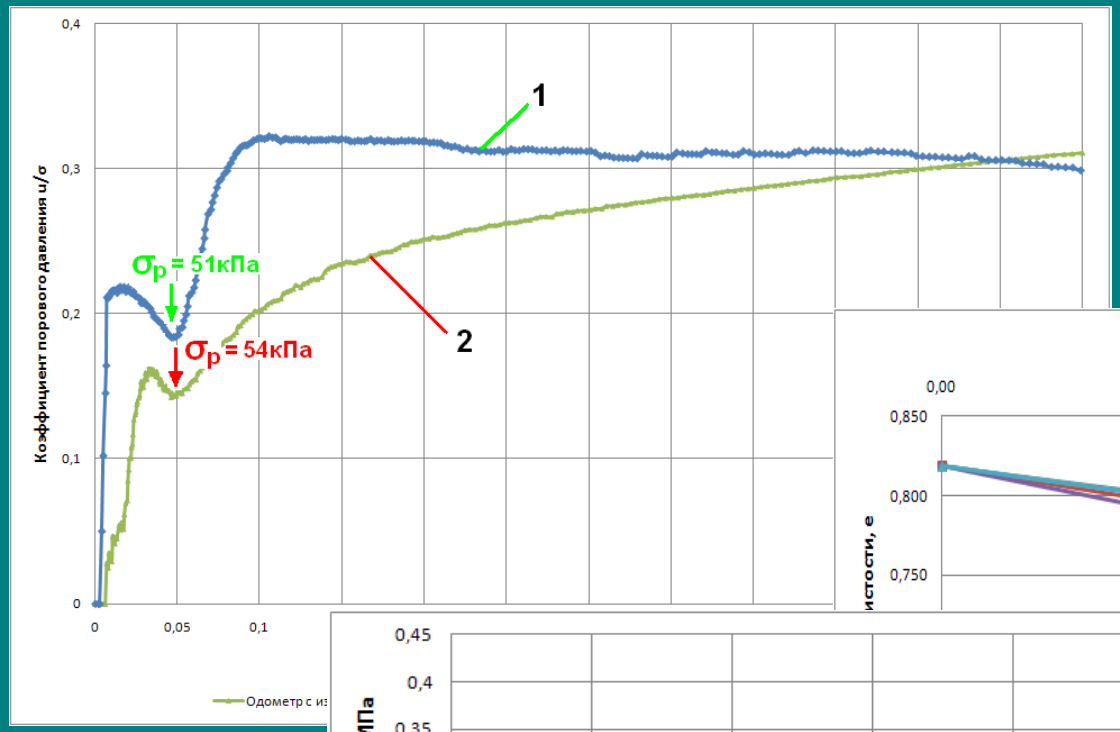


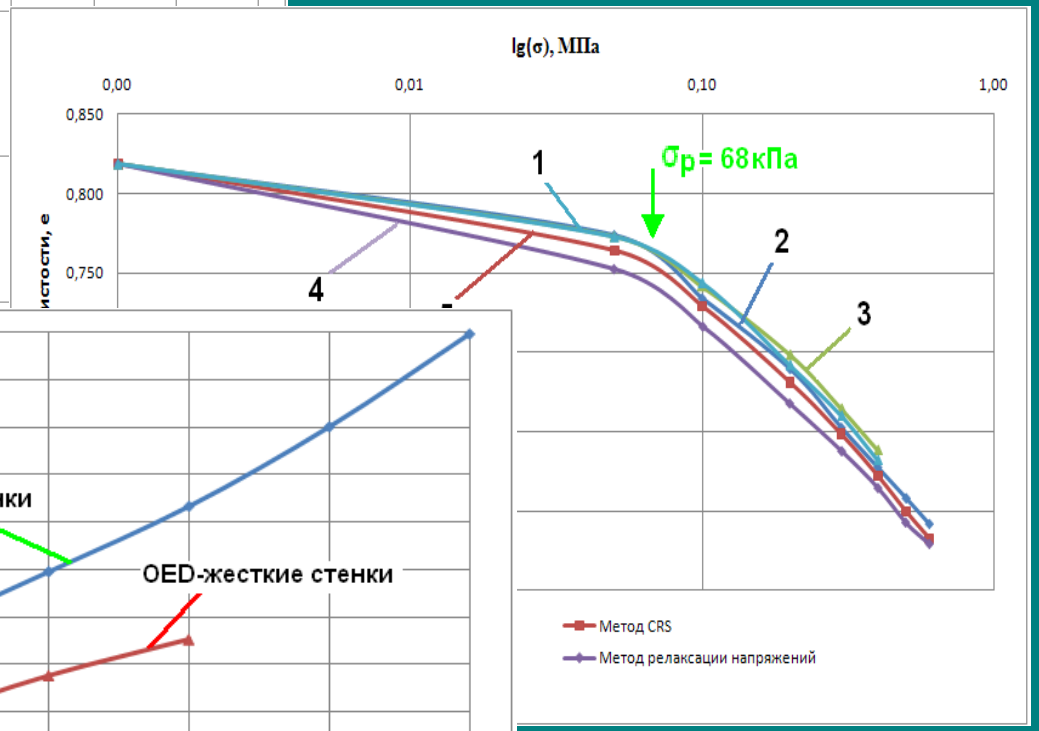
Результаты испытаний методом CRS

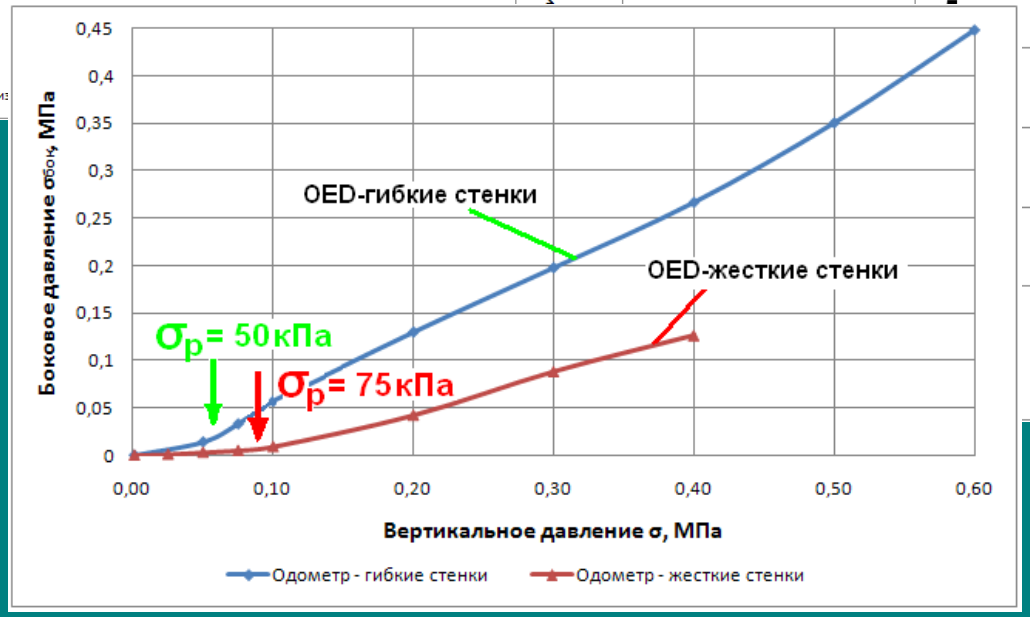




Результаты испытаний методом CRS

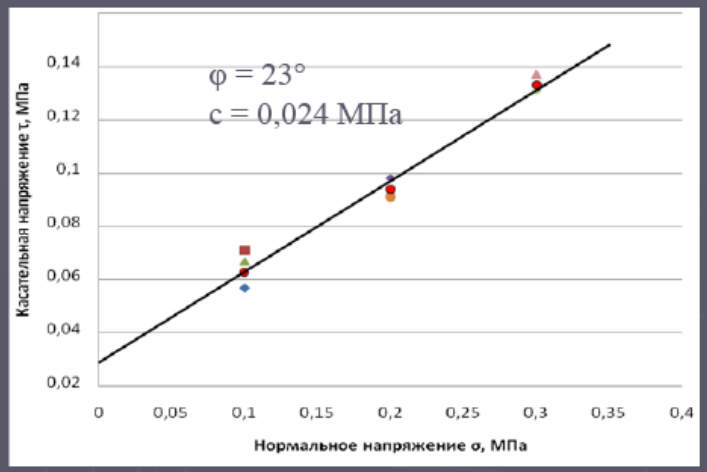




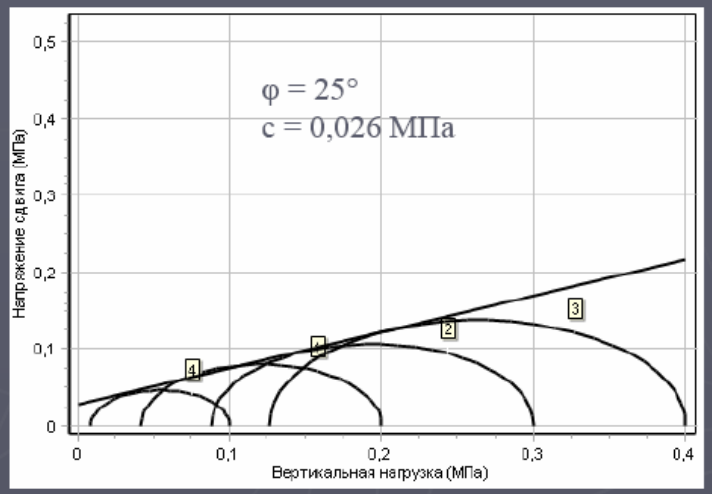


Определение параметров прочности

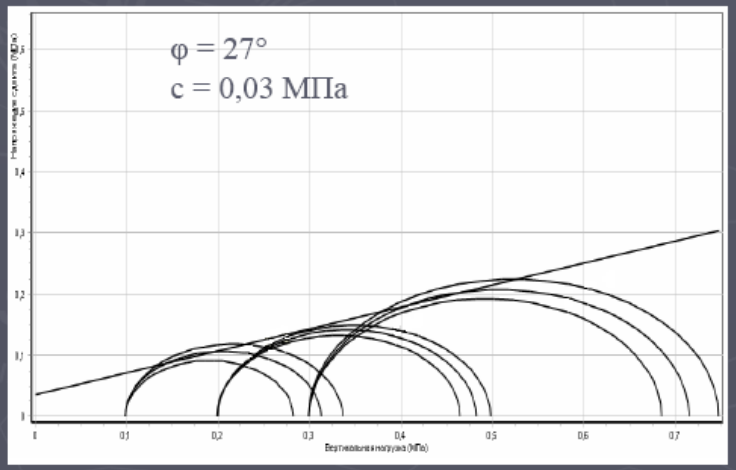
Устройство одноплоскостного среза



Устройство компрессионного сжатия с измерением боковых напряжений



Устройство трехосного сжатия



Метод определения параметра	Угол внут-реннего трения φ	Удельное сцеплен. c, МПа
Компрессионного сжатия с измерением боковых напряжений	25 град.	0,026
Одноплоскостного среза	23 град.	0,024
Трехосного сжатия	27 град.	0,03