

В.Г.Федоровский (НИИОСП)

О характеристиках деформируемости грунтов и методах их определения

- Модули деформации
- Ограниченность зоны деформации и структурная прочность
- Логарифмический закон компрессии и давление предуплотнения
- Вторичная консолидация

Санкт-Петербург, 07 июня 2019 г.

Основные характеристики деформируемости и методы их определения

$$w = \int_{z_f}^{z_d} \beta \frac{\Delta\sigma}{E} dz = \int_{z_f}^{z_d} \frac{\Delta\sigma}{M} dz$$

E – модуль общей деформации (трехосные испытания, компрессионные испытания (?), штамп)

ν – коэффициент поперечной деформации (трехосные испытания)

G – модуль сдвига (простой сдвиг, прессиометрия)

M – модуль компрессионной деформации (компрессионные испытания)

Модули упругости

Ветви разгрузки и повторного нагружения

По скоростям распространения продольных и поперечных волн (M и G , соответственно)

Неувязка в определении модуля в СНиП и ГОСТ

В ГОСТ 12248-96

5.4.7.5 Модуль деформации E , МПа, в интервале давлений $p_i - p_{i+1}$ вычисляют с точностью 0,1 МПа по формулам:

$$E = \frac{p_{i+1} - p_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} \beta$$

β - коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе и вычисляемый по формуле

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}$$

где ν - коэффициент поперечной деформации, определяемый по результатам испытаний в приборах трехосного сжатия по 5.3.

При отсутствии экспериментальных данных допускается принимать ν равным: 0,30-0,35 - для песков и супесей; 0,35-0,37 - для суглинков; 0,2-0,3 при $I_L < 0$; 0,3-0,38 при $0 \leq I_L \leq 0,25$; 0,38-0,45 при $0,25 < I_L \leq 1,0$ - для глин. При этом меньшие значения ν принимают при большей плотности грунта.

В соответствии с последней рекомендацией получаются следующие значения β

ν	0,2	0,3	0,35	0,4	0,45
β	0,9	0,74	0,62	0,47	0,26

В СНиП 2.02.01-83 и СП 50-101-2004

$$\beta \equiv 0,8$$

Само по себе это отличие (если не используются соответствующие корректировки) дает завышение расчетных осадок для глинистых грунтов в 1,5 – 3 раза. Целесообразно поэтому в формуле послойного суммирования использовать модуль компрессионной деформации, не полагаясь на неопределяемое фактически значение коэффициента поперечной деформации.

Нормативные методы корректировки модуля общей деформации по данным компрессионных испытаний

СП 22.13330.2011

Таблица 5.1

Вид грунта	Значения коэффициента m_χ при коэффициенте пористости e , равном					
	0,45 — 0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супеси	4	3,5	3	2	—	—
Суглинки	5	4,5	4	3	2,5	2
Глины	—	6	6	5,5	5	4,5

Примечание — Для промежуточных значений e коэффициент m_χ определяют интерполяцией

СП 22.13330.2016

Таблица 5.1

Грунты	Значения коэффициента m_{oed} при коэффициенте пористости e , равном					
	0,45–0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супеси	2,8	2,5	2,1	1,4	-	-
Суглинки	3	2,7	2,4	1,8	1,5	1,2
Глины	-	2,4	2,4	2,2	2	1,8

Примечание — Для промежуточных значений e коэффициент m_{oed} определяют интерполяцией.

СП 23.13330.2011

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \beta m_c m_{pl}$$

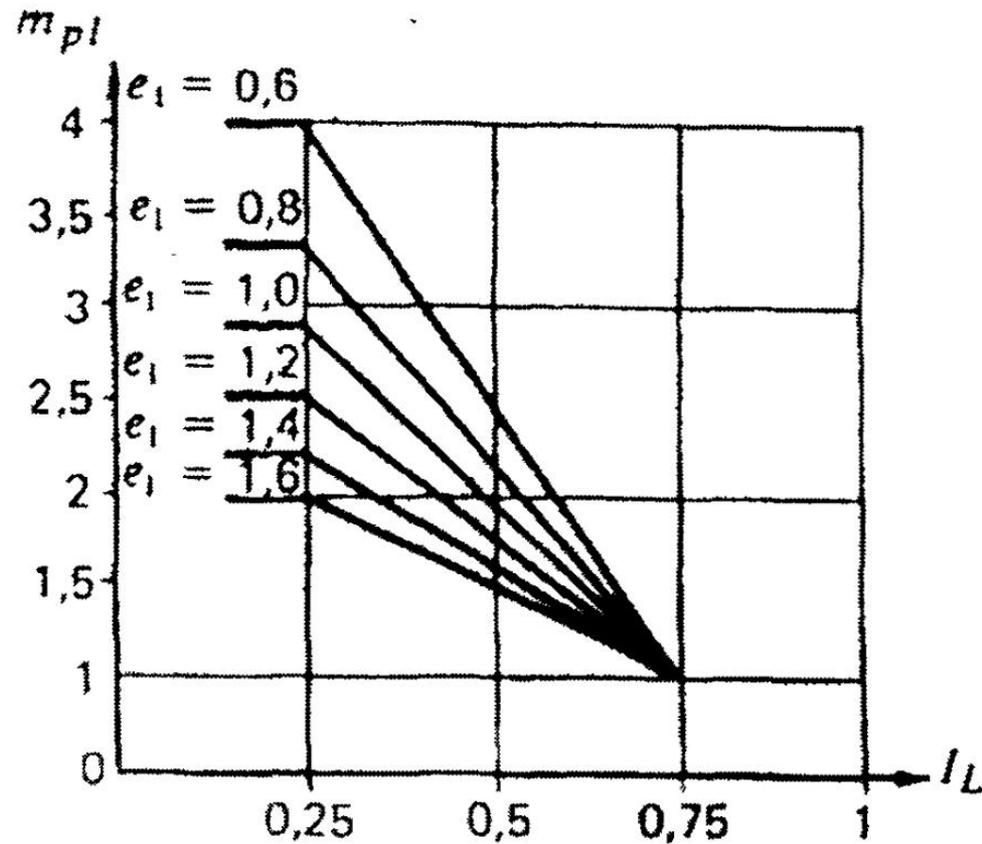
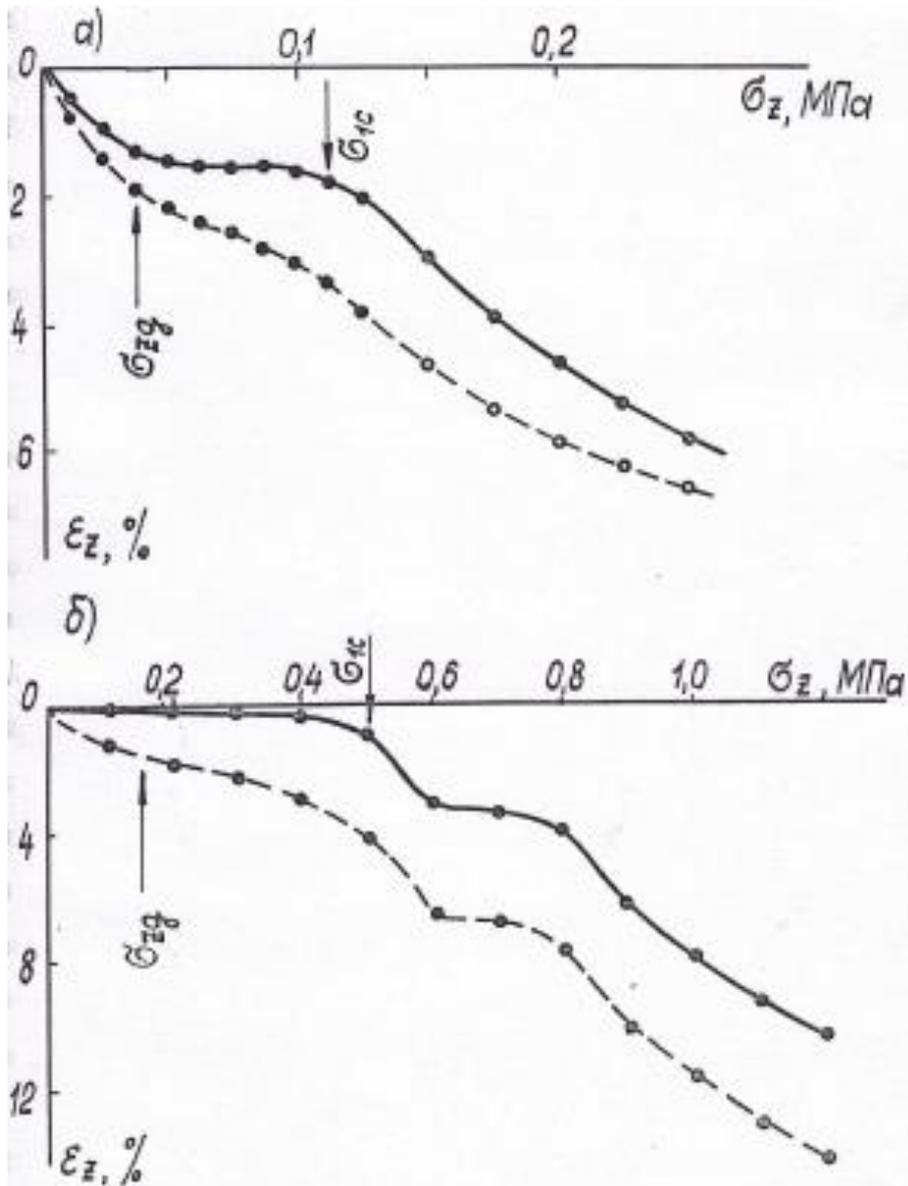


Рисунок В.1 – График для определения коэффициента m_{pl}

Неоднородность НДС грунта при испытаниях

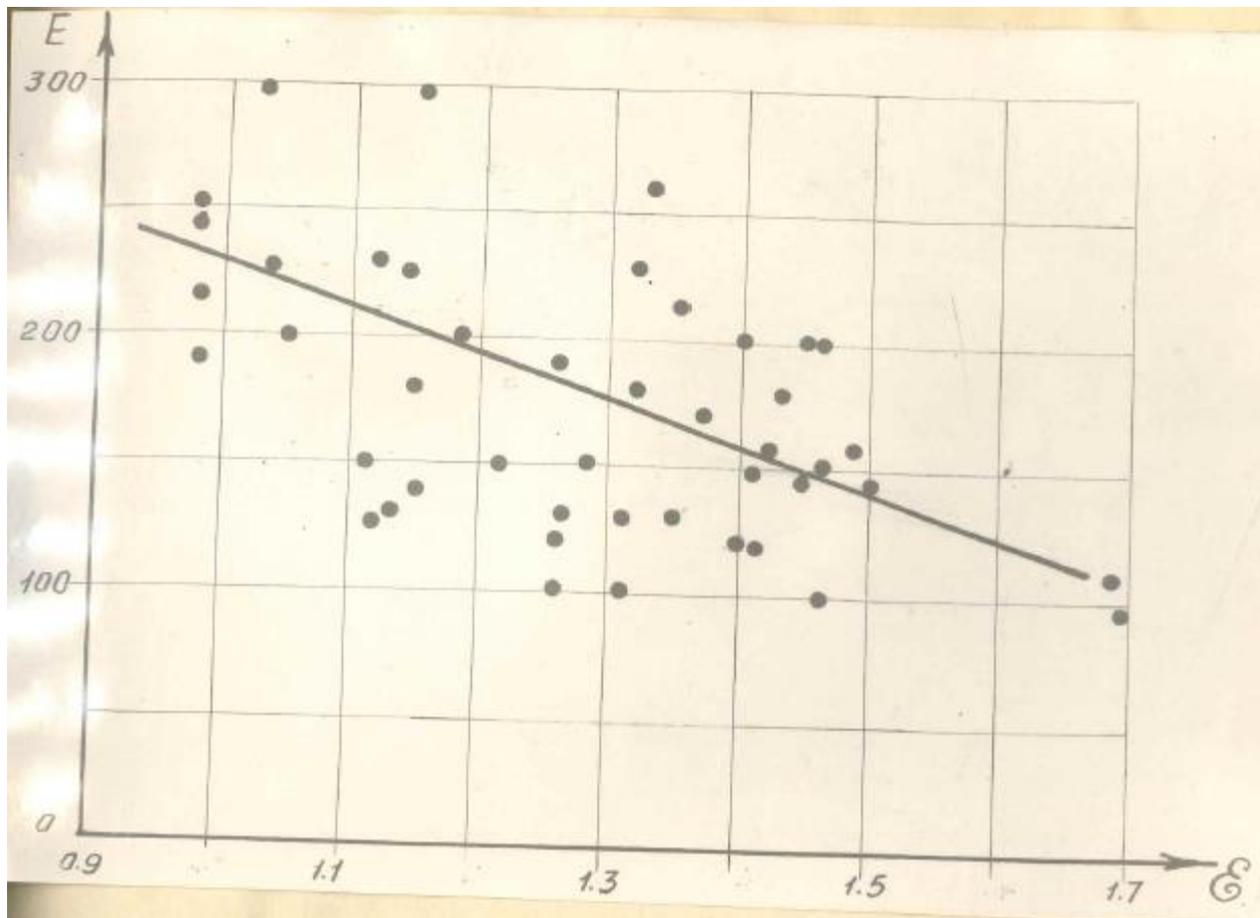


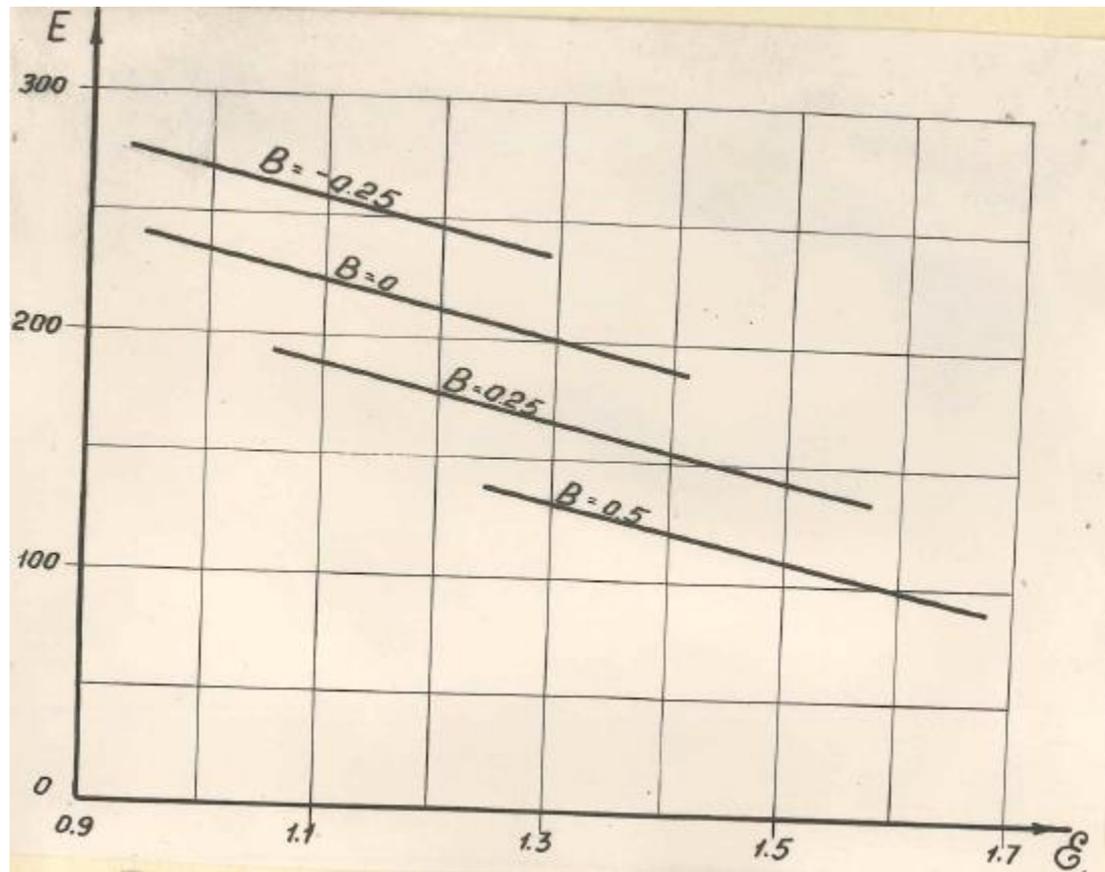
Компрессионные
испытания
В.Н.Широков, 1990
Измерения в
центральной части
образца (верхние линии)
и для образца в целом

Из графиков можно сделать качественные выводы о причинах расхождения «лабораторного» и «полевого» модулей. Наиболее вероятная причина состоит в том, что при отборе монолитов и подготовке образцов для испытания наиболее «страдают» тонкие области вблизи торцов образца. Поэтому к общей деформации образца при компрессии добавляется деформация обжатия торцов. При этом чем жестче в реальности грунт, т.е. чем меньше коэффициент пористости e и показатель текучести I_L , тем больше вклад деформации торцов и тем больше поправочный коэффициент. Добавим, что для трехосных испытаний вклад торцевых деформаций мал из-за того, что образец грунта много выше, чем в компрессионных, и потому в нормах и стандартах на получаемую в стабилометре величину модуля нет поправочных коэффициентов.

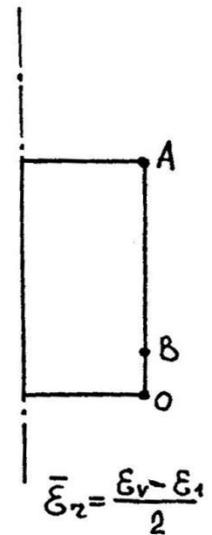
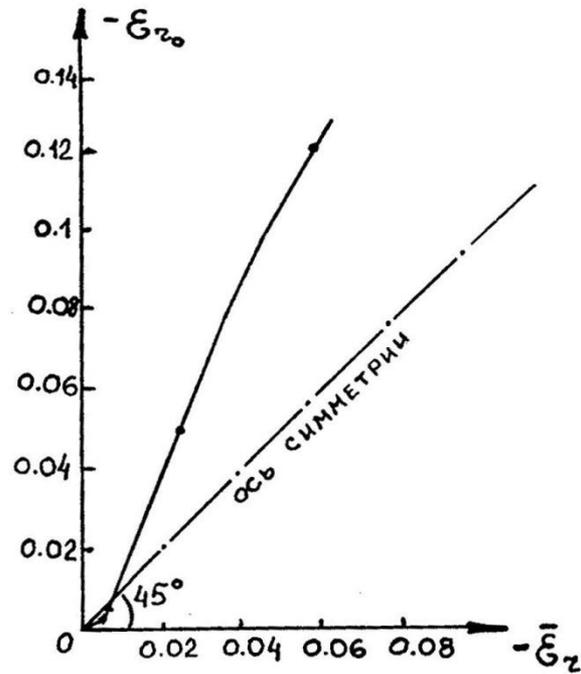
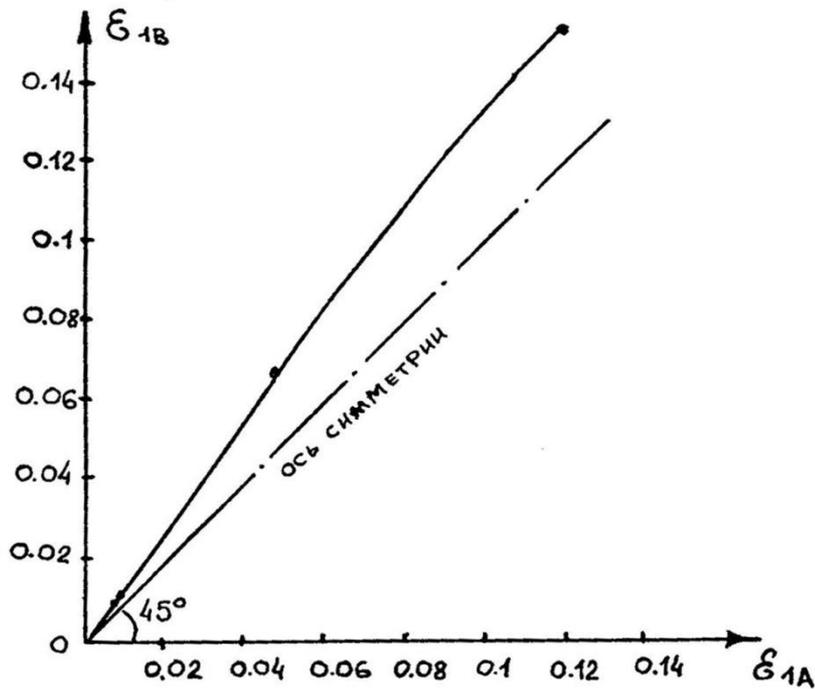
Отметим также, что поправочные коэффициенты находятся сравнением не попарных испытаний, а осреднений большой совокупности испытаний.

Пример осреднения экспериментальных данных, используемого при нахождении корреляции между компрессионным и штамповым модулями



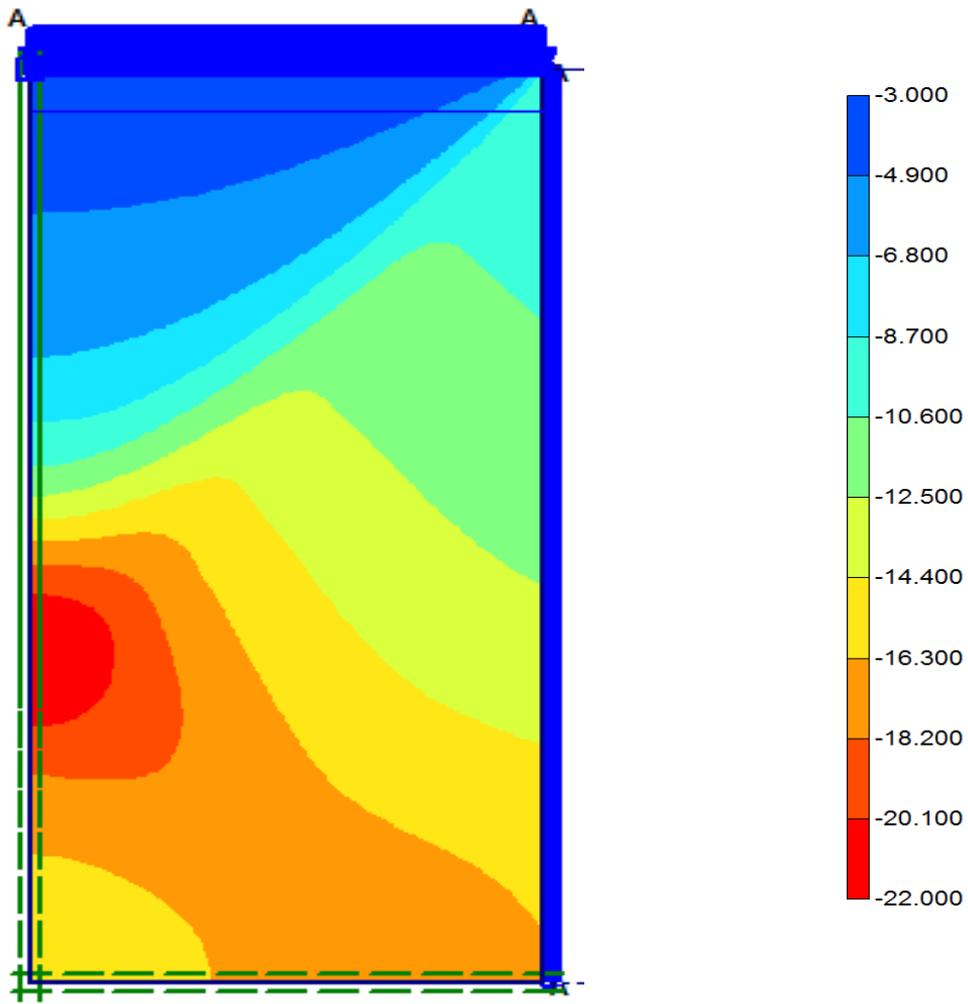


Неоднородность НДС грунта при испытаниях

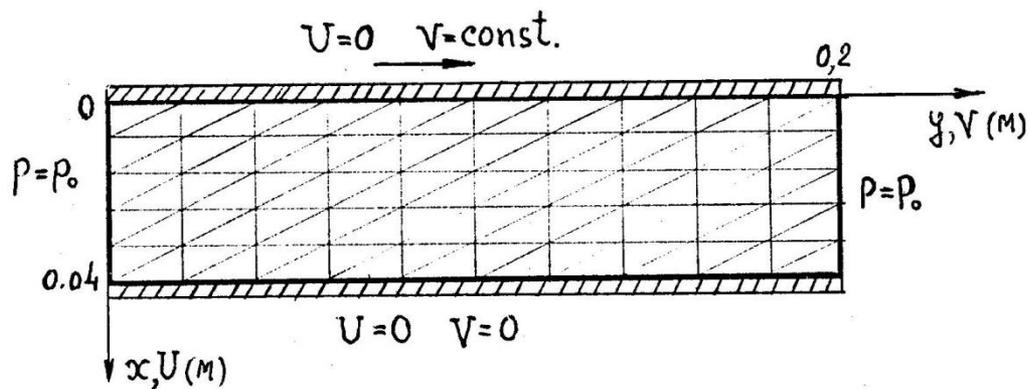


Трехосные испытания
В.Г.Федоровский, В.Ф.Александрович, 1985

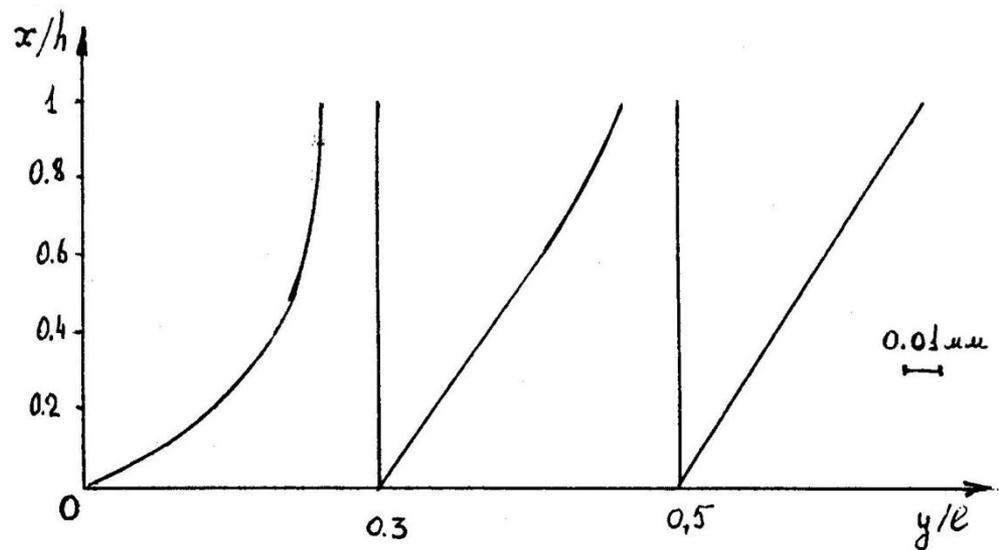
Моделирование трехосных испытаний в Plaxis по модели Hardening Soil



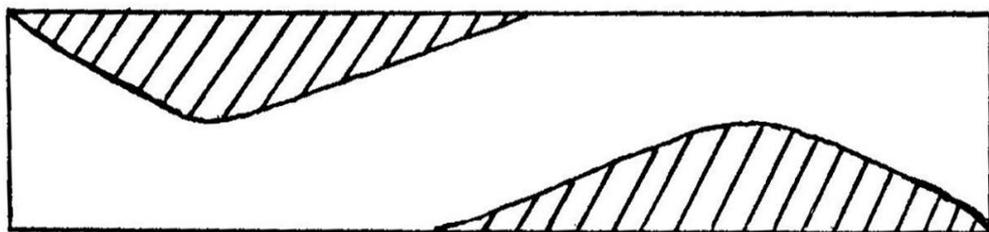
Неоднородность НДС грунта при испытаниях



Простой сдвиг
В.Г.Федоровский,
В.Ф.Александрович,
2008

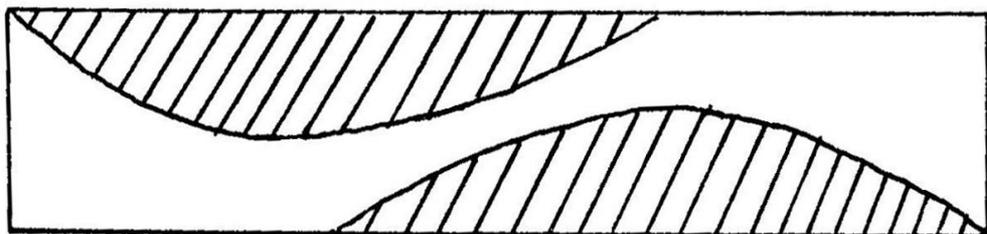


Неоднородность НДС грунта при испытаниях

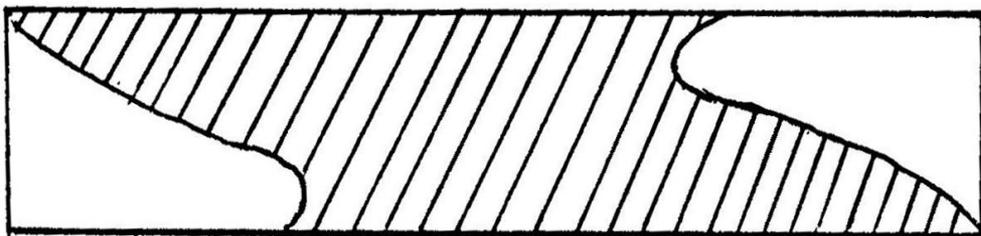


a)

Развитие пластических зон в испытаниях на простой сдвиг

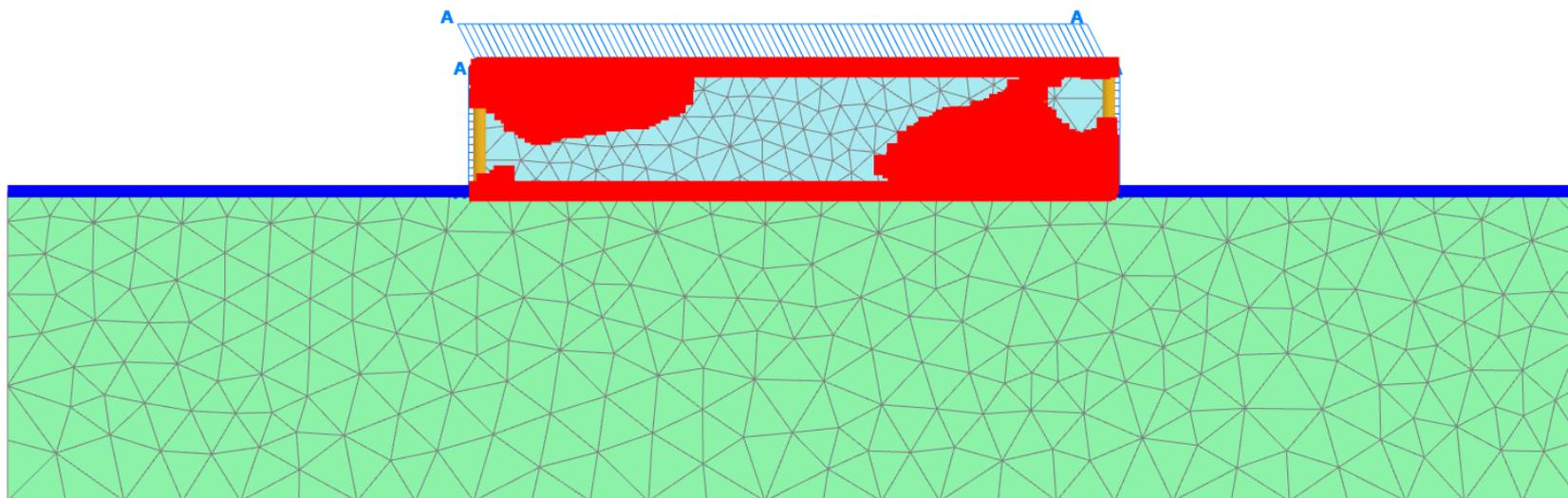


б)

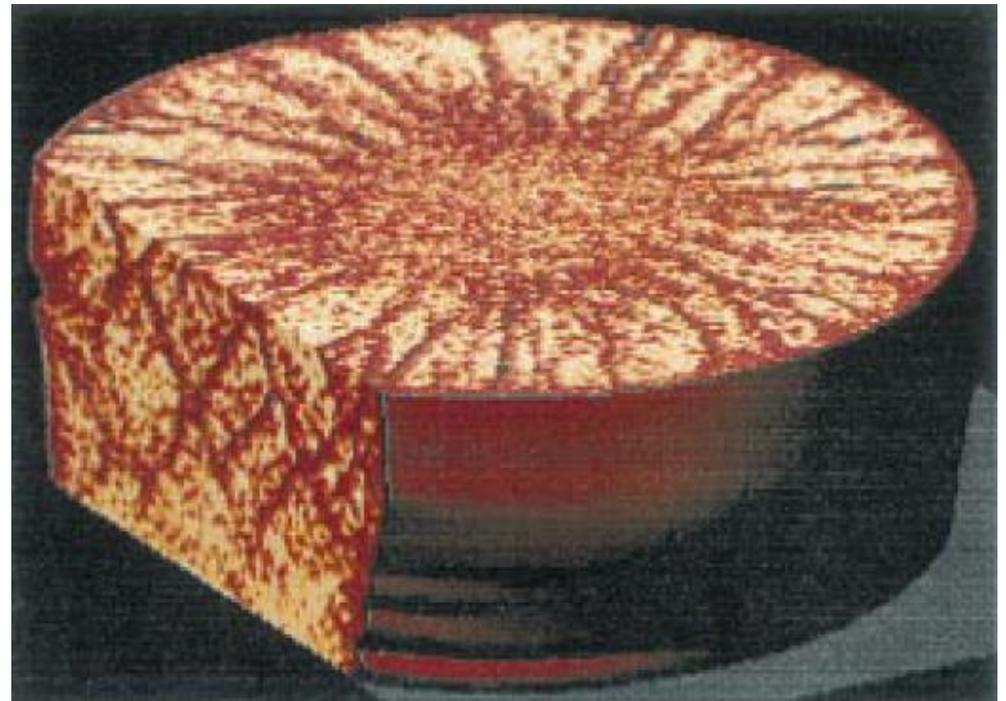
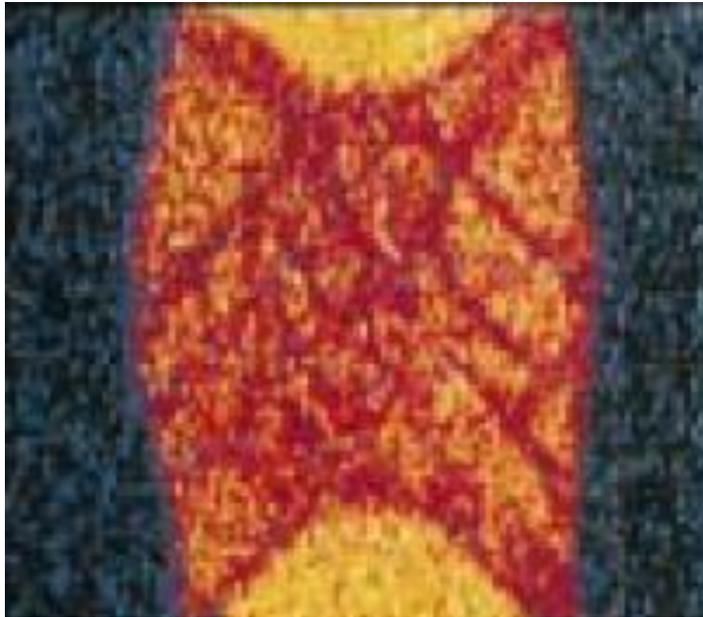


в)

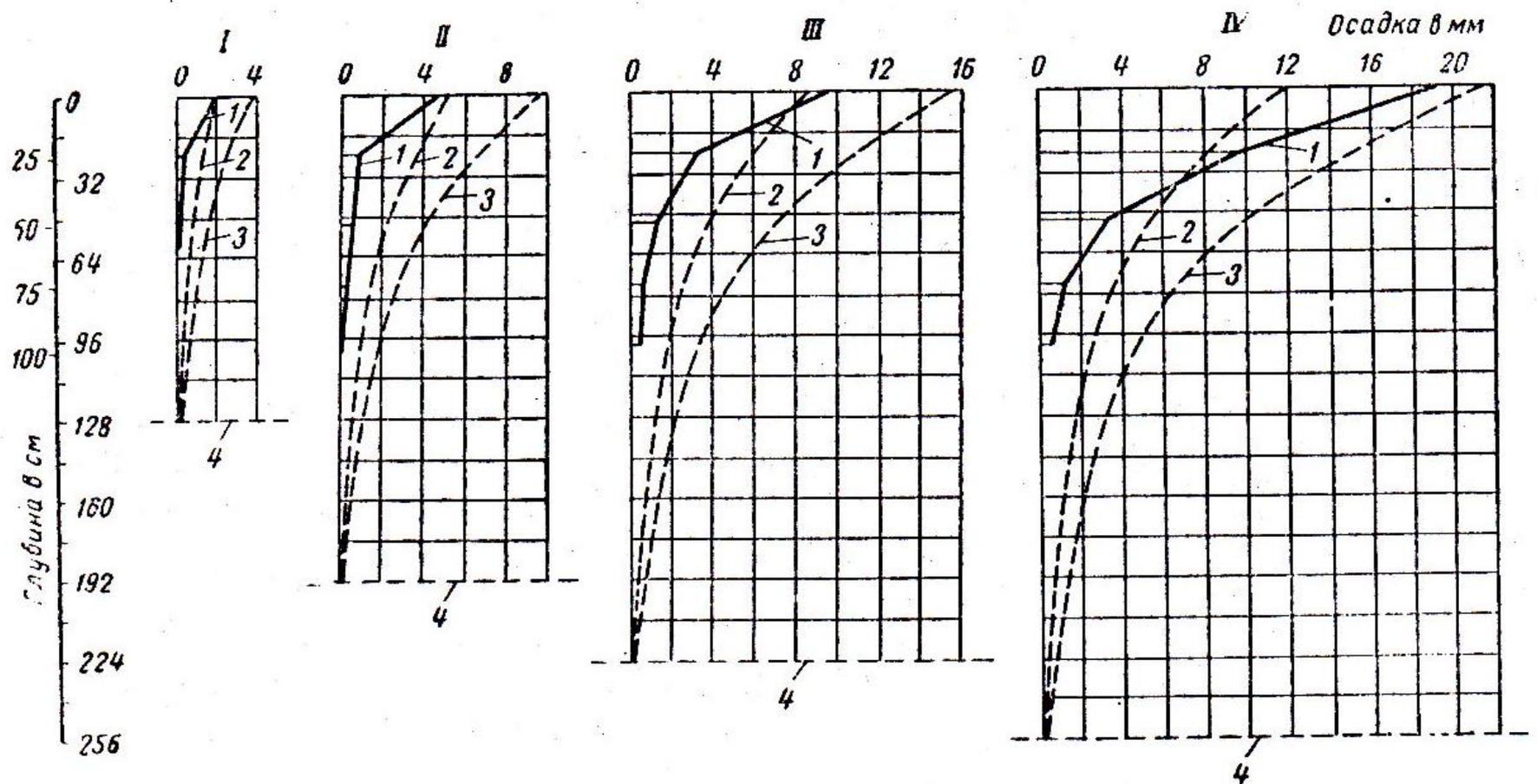
Простой сдвиг. Моделирование в ПК Plaxis. Пластические точки в начальной фазе разрушения



Локализация деформаций в песке (R.A.Alshibli et al, 2003)

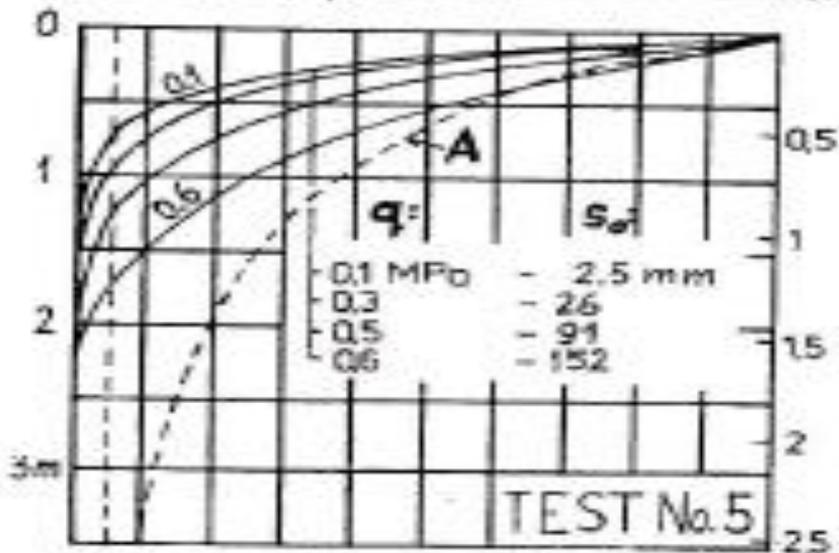
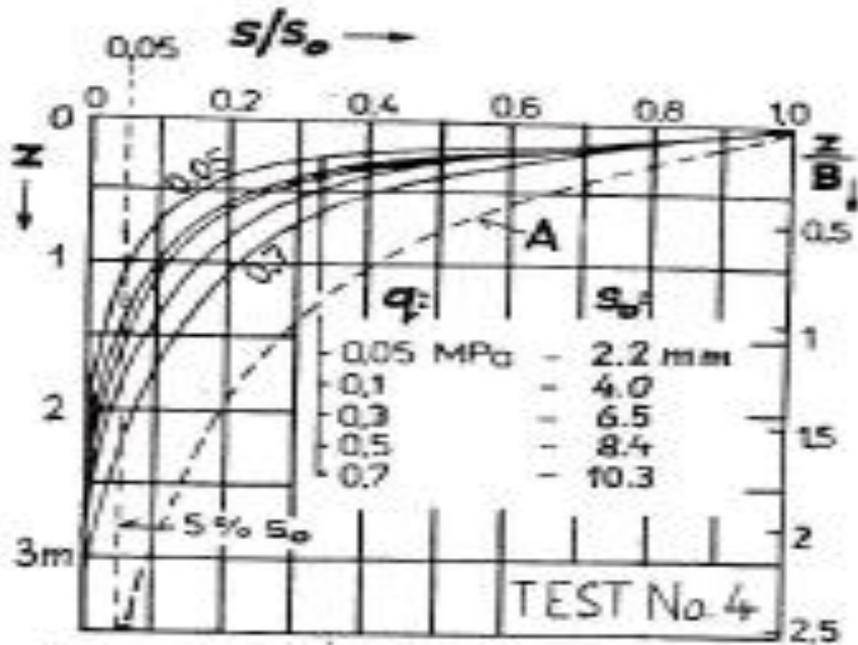


Ограниченность зоны деформации грунта под фундаментом



Полевые испытания штампа $\varnothing 0,80$ м П.А. Коновалов, 1966
Нагрузки 0,1 – 0,4 МПа

Ограниченность зоны деформации грунта под фундаментом



Полевые испытания
штампа $\varnothing 1,38$ м
J. Seyček, 1991

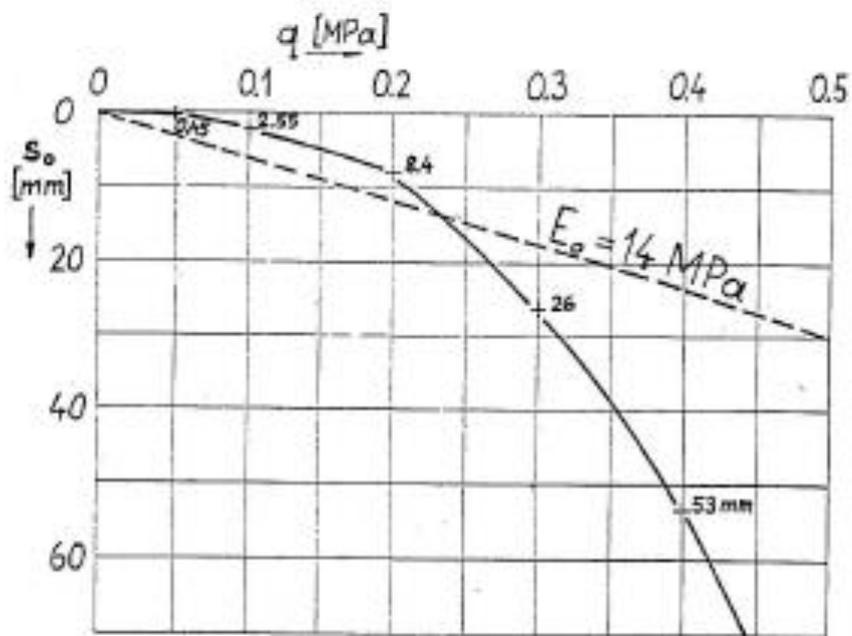
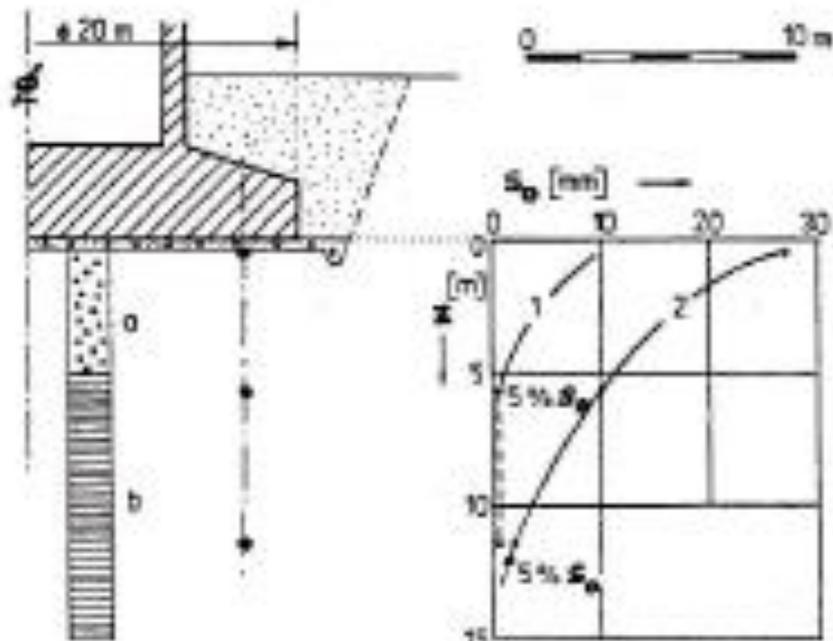
Вверху – штамп на
поверхности, внизу –
заглубленный штамп
($D/d = 1$)

A – теоретическое (для
однородного упругого
полупространства)
распределение осадок
по глубине

Аналогичный результат
получается для
большеразмерного
фундамента

1 – $q = 0,065$ МПа

2 – $q = 0,195$ МПа



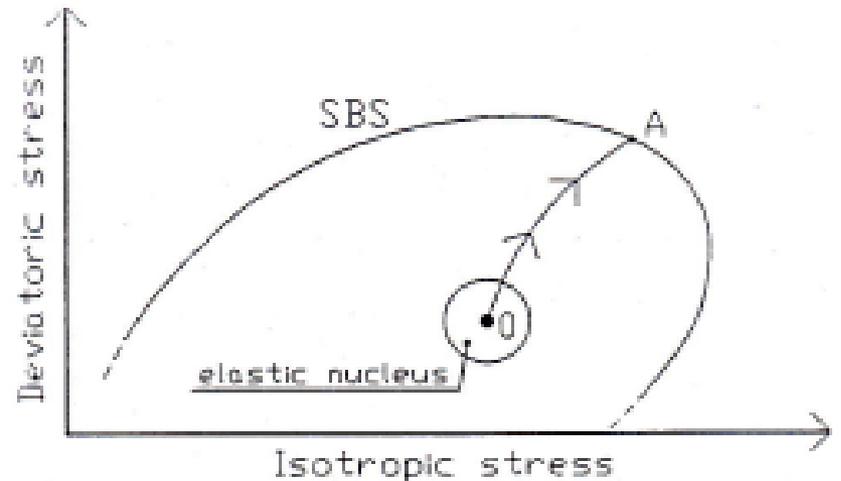
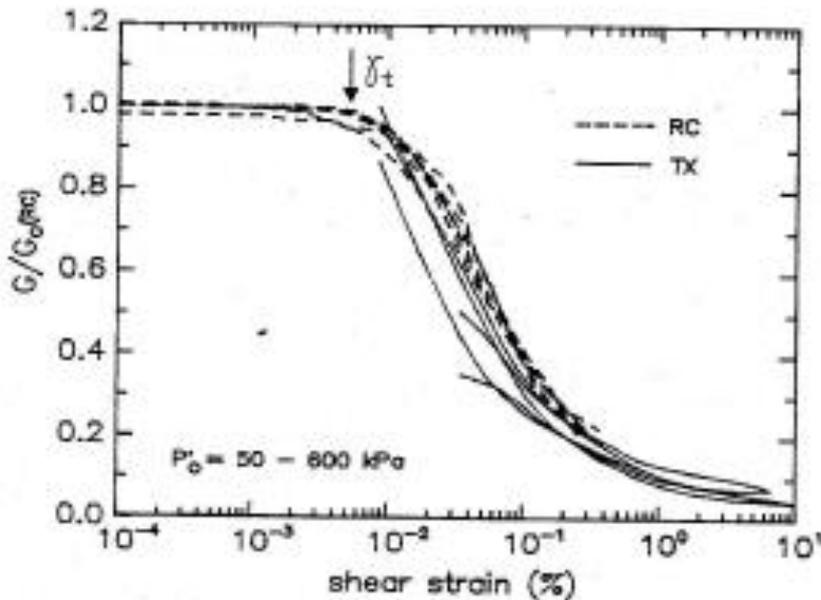
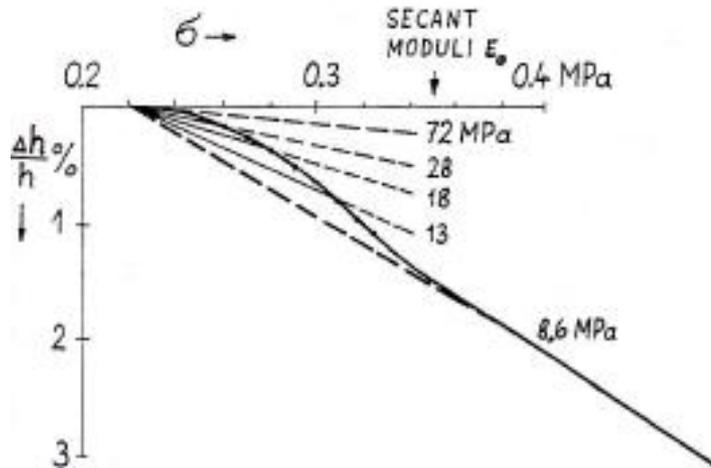
J. Seyšek связывает ограничение зоны деформаций с отсутствием осадок при малых нагрузках (в данном случае при $q < 0,05$ МПа), т.е. со структурной прочностью грунта.

Структурная прочность

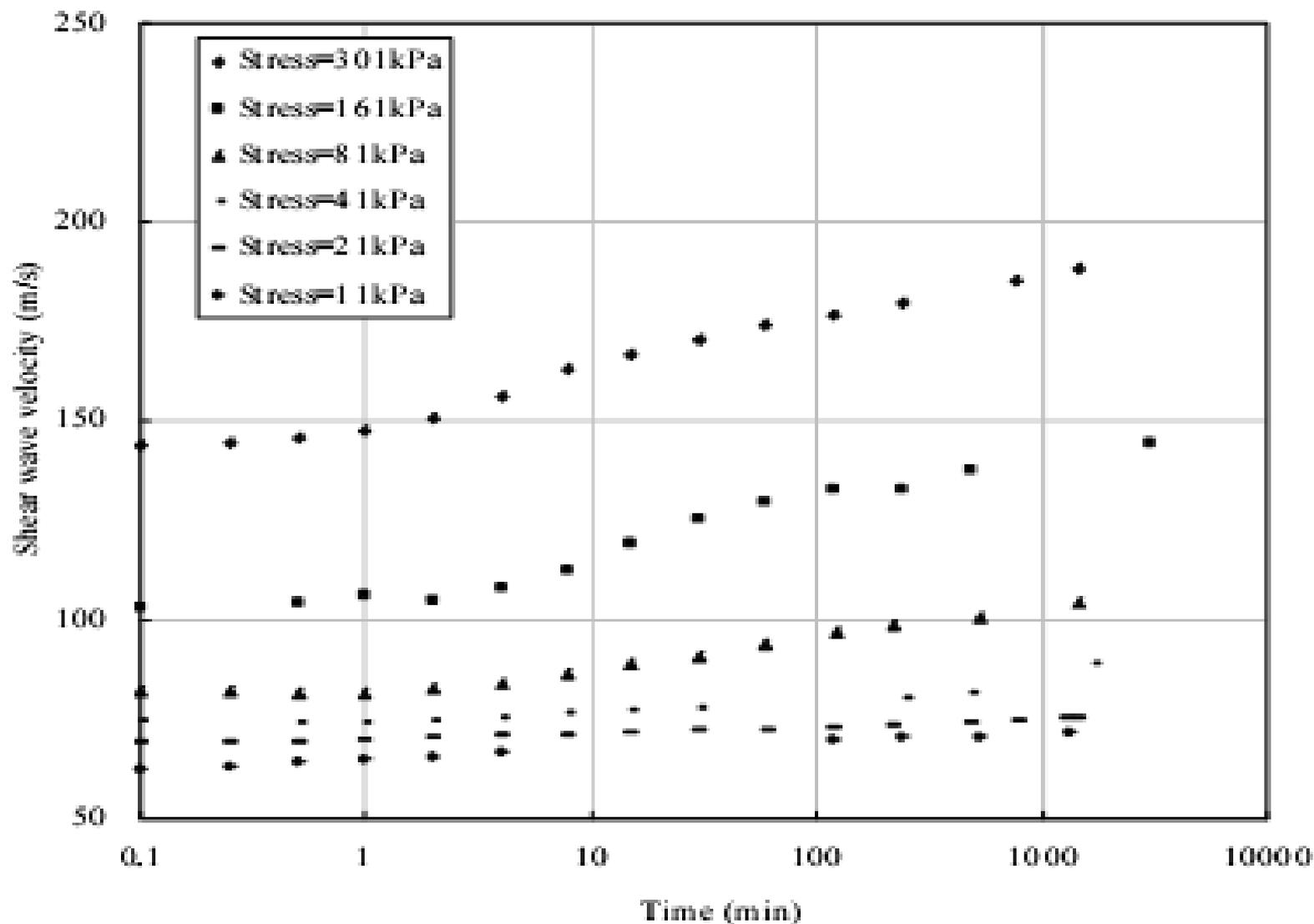
Компрессионное испытание
J. Seusek, 1991

Зависимость модуля сдвига от сдвиговой деформации

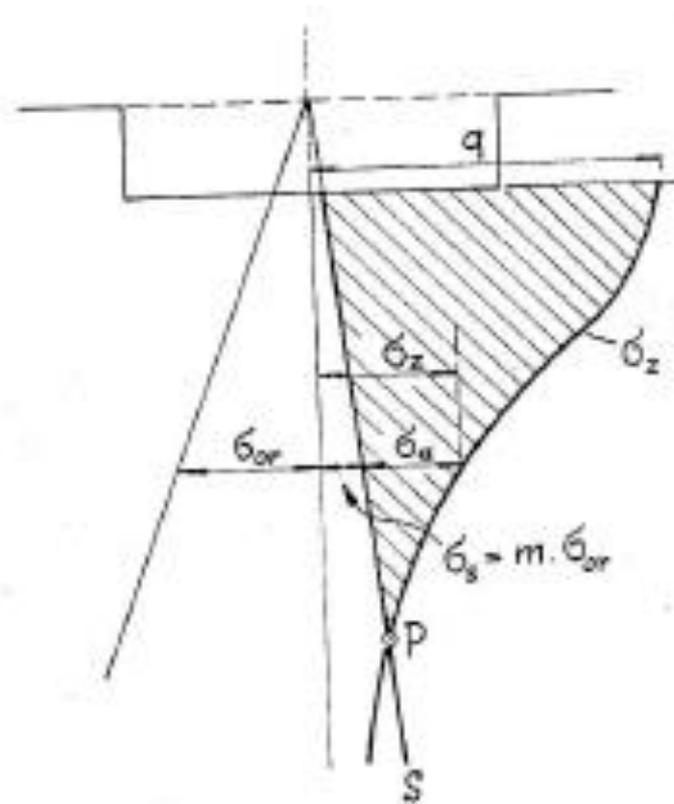
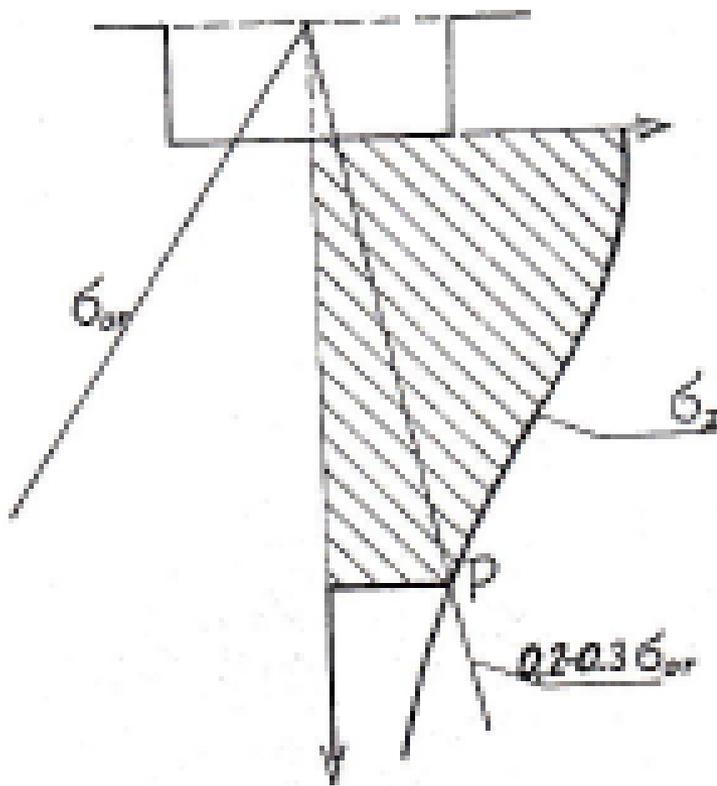
Описание структурной прочности при помощи многоповерхностной модели в рамках концепции критического состояния



Зависимость скорости поперечных волн (модуля упругого сдвига) от НДС образца (*Shi X.T., Lok T., 2008*)

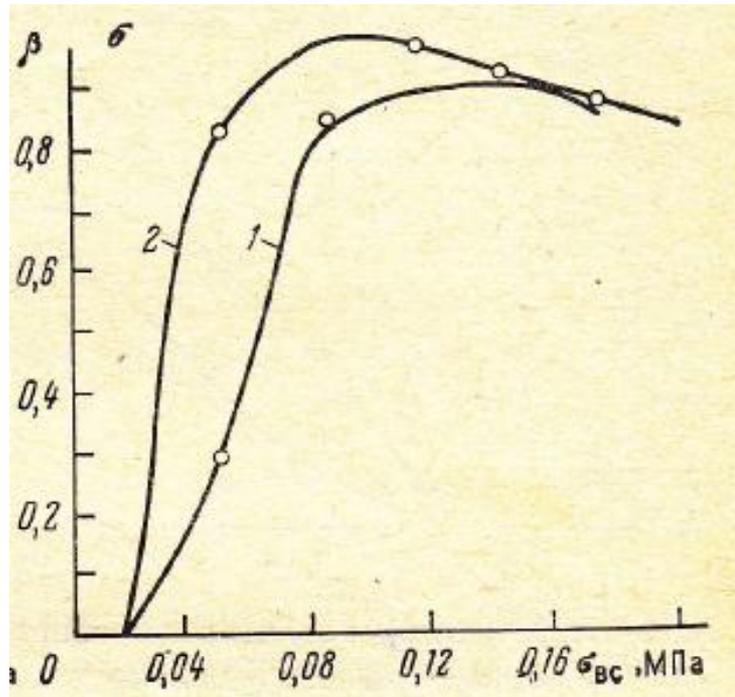


Учет структурной прочности в расчете осадок



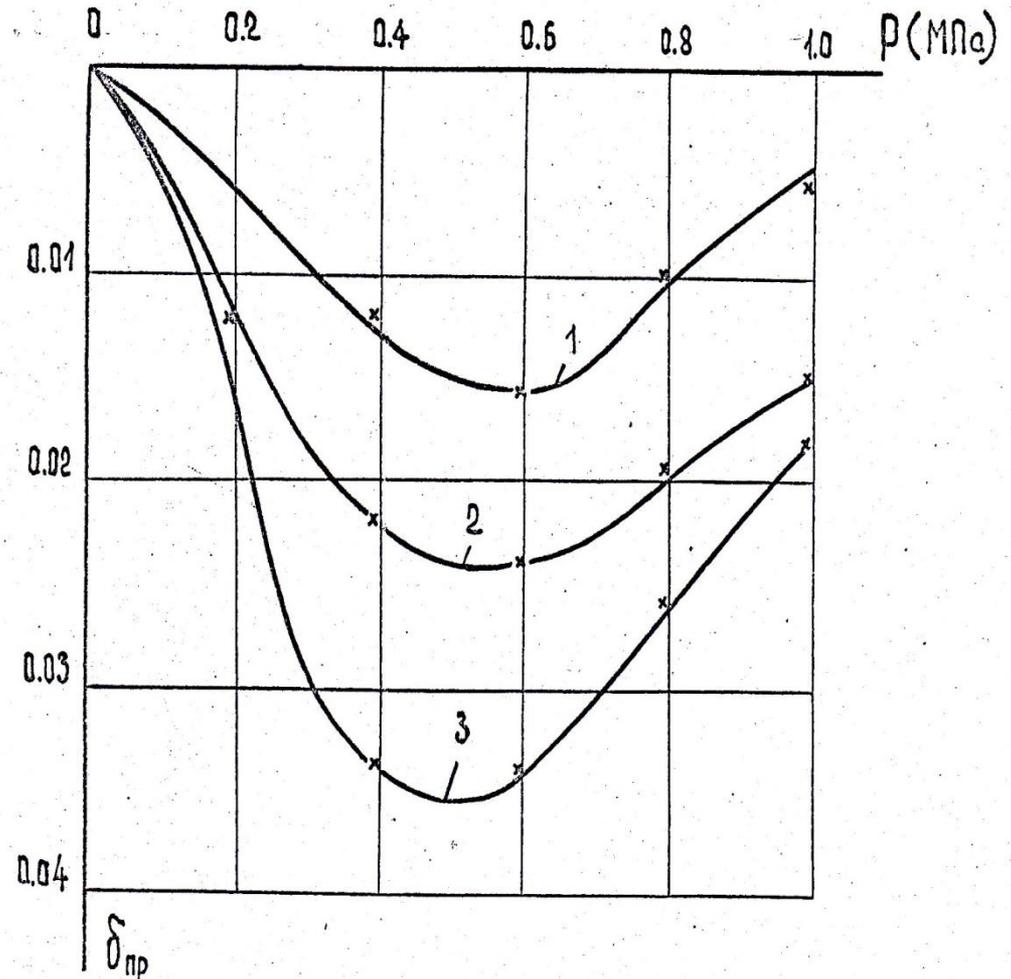
А) Отечественные нормы; Б) Чешские нормы
 $m = 0,1 \dots 0,5$ (в зависимости от вида и состояния грунта)

Другие проявления структурной прочности



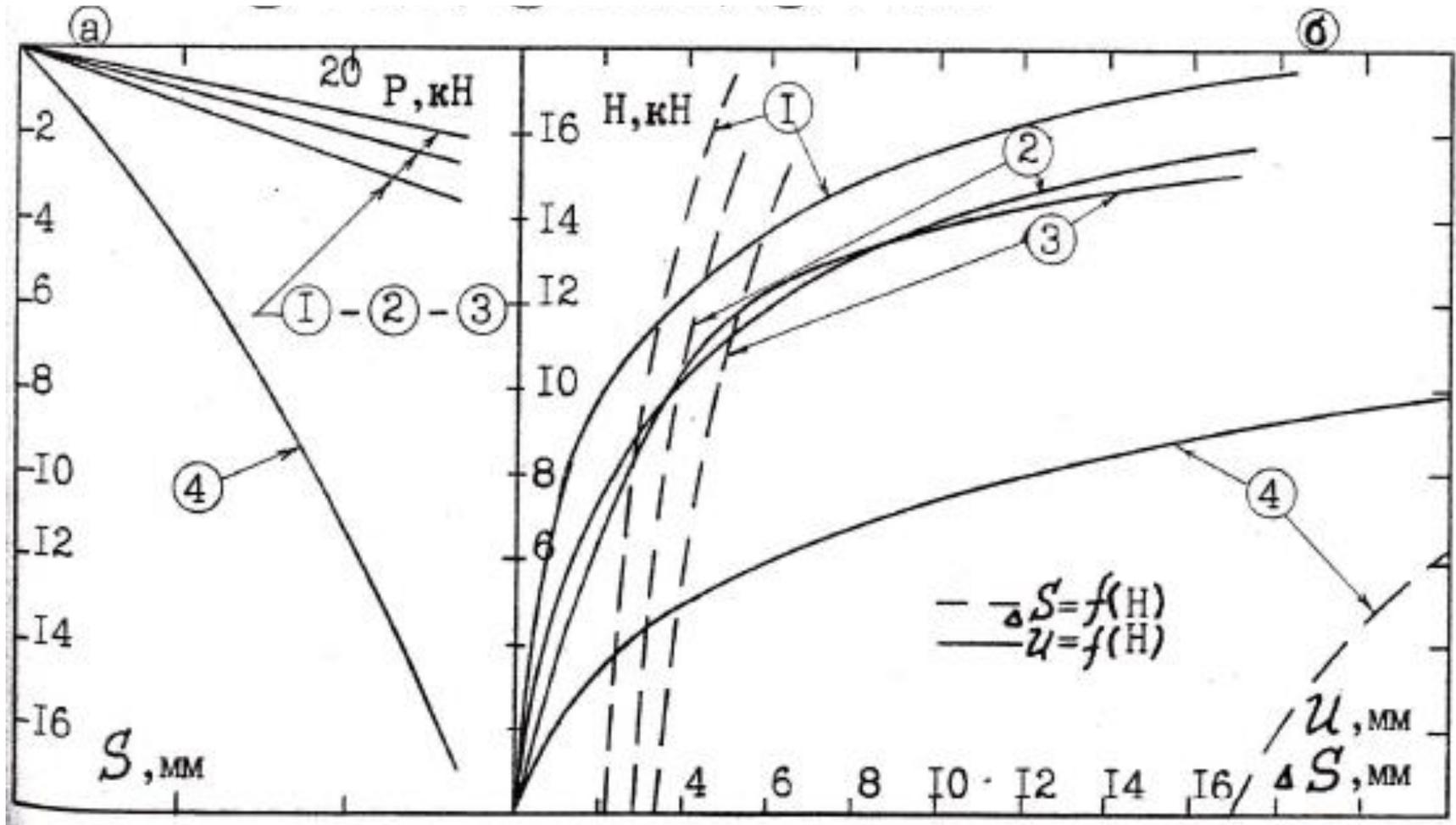
Развитие порового давления в супеси (Р.Э.Дашко)

1 - начальный коэффициент порового давления; 2 - конечный



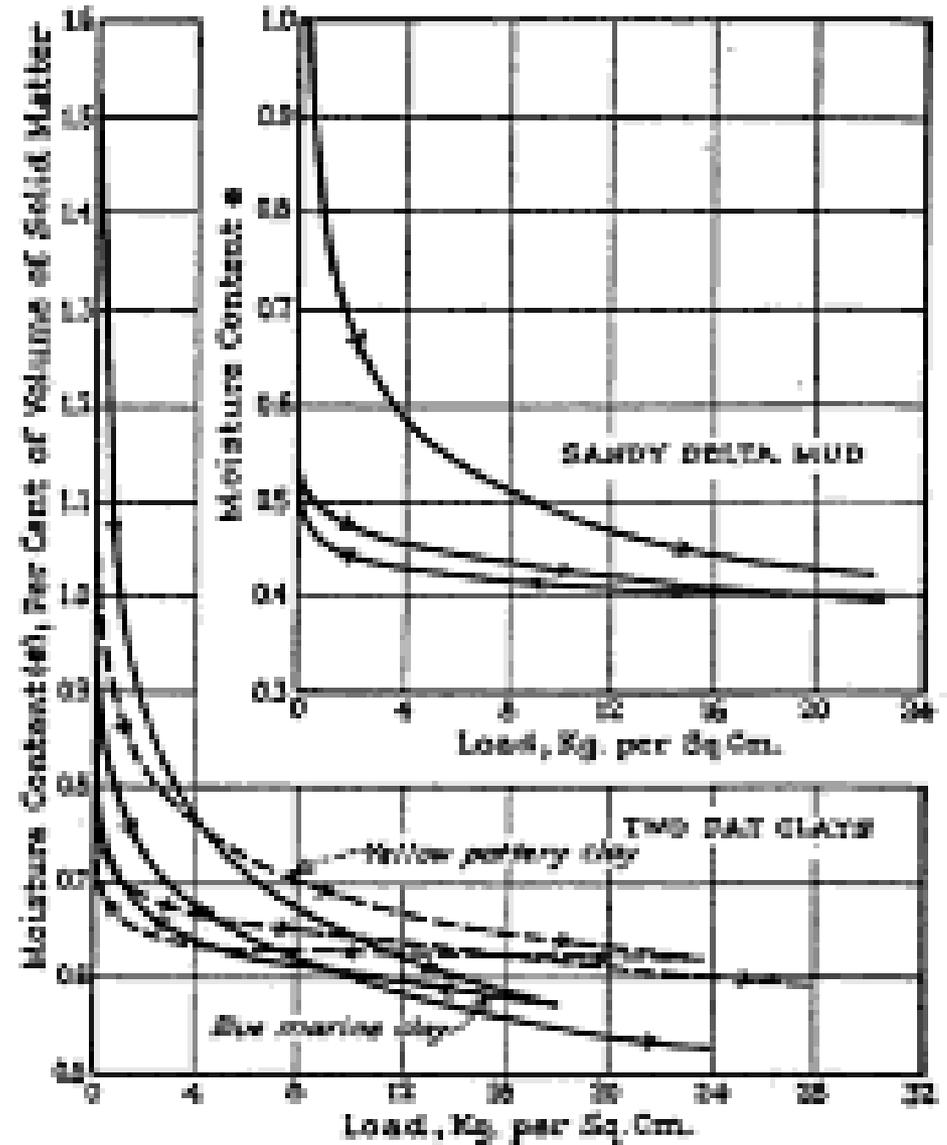
Зависимость относительной просадочности от давления (О.Н.Короткова)

Возможные проявления структурной прочности



Испытания штампа 1,06x0,66 м на песке средней плотности (1,2) и рыхлом (3,4) при естественной влажности (1,3) и водонасыщении (2,4)
 С.В.Курилло, А.Ф.Лунин, 1988

Компрессионные опыты К.Терцаги



Логарифмический закон компрессии К.Терцаги

Начальная форма (1925 г.)

$$e = -\alpha \ln(p + p_c) - \beta(p + p_c) + c$$

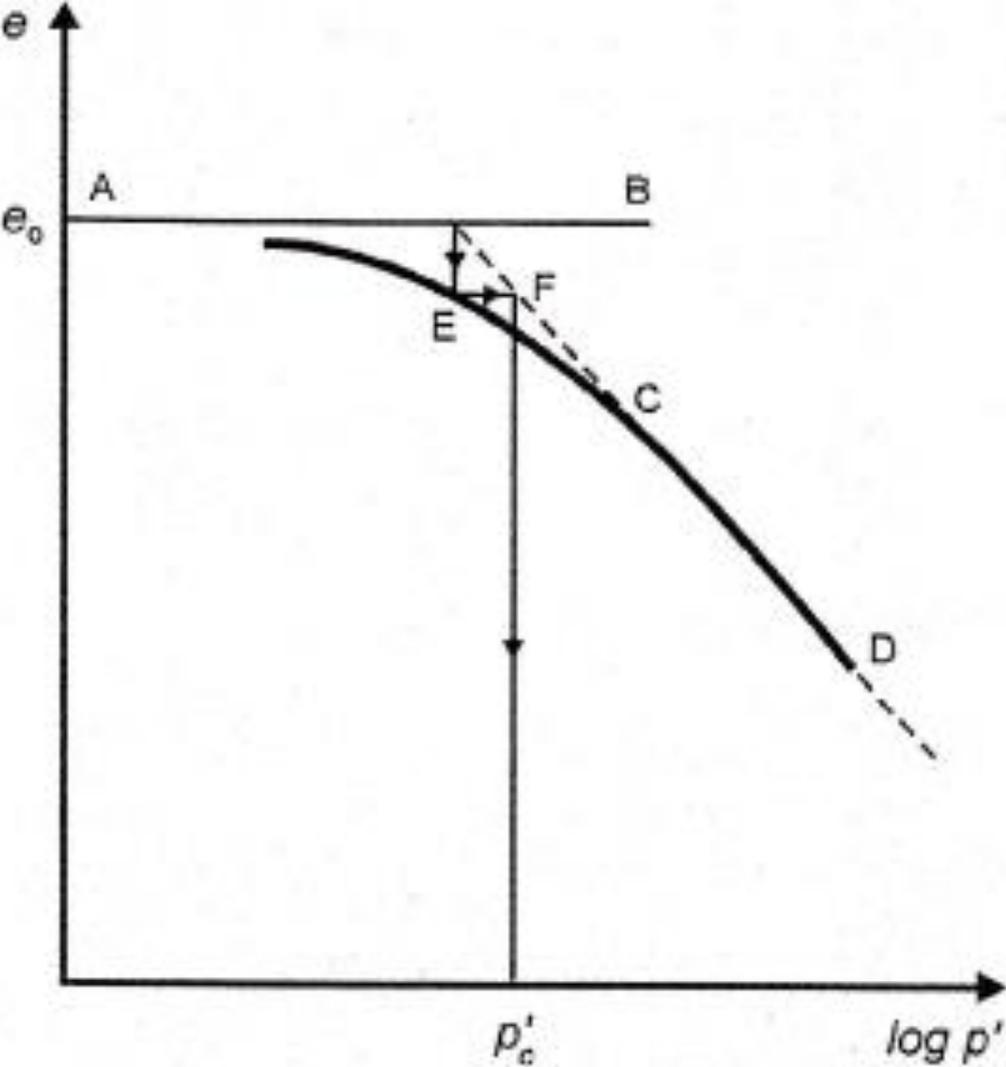
$$e = -\frac{1}{A} \ln(p + p_i) + c$$

Окончательная форма (1929 г.)

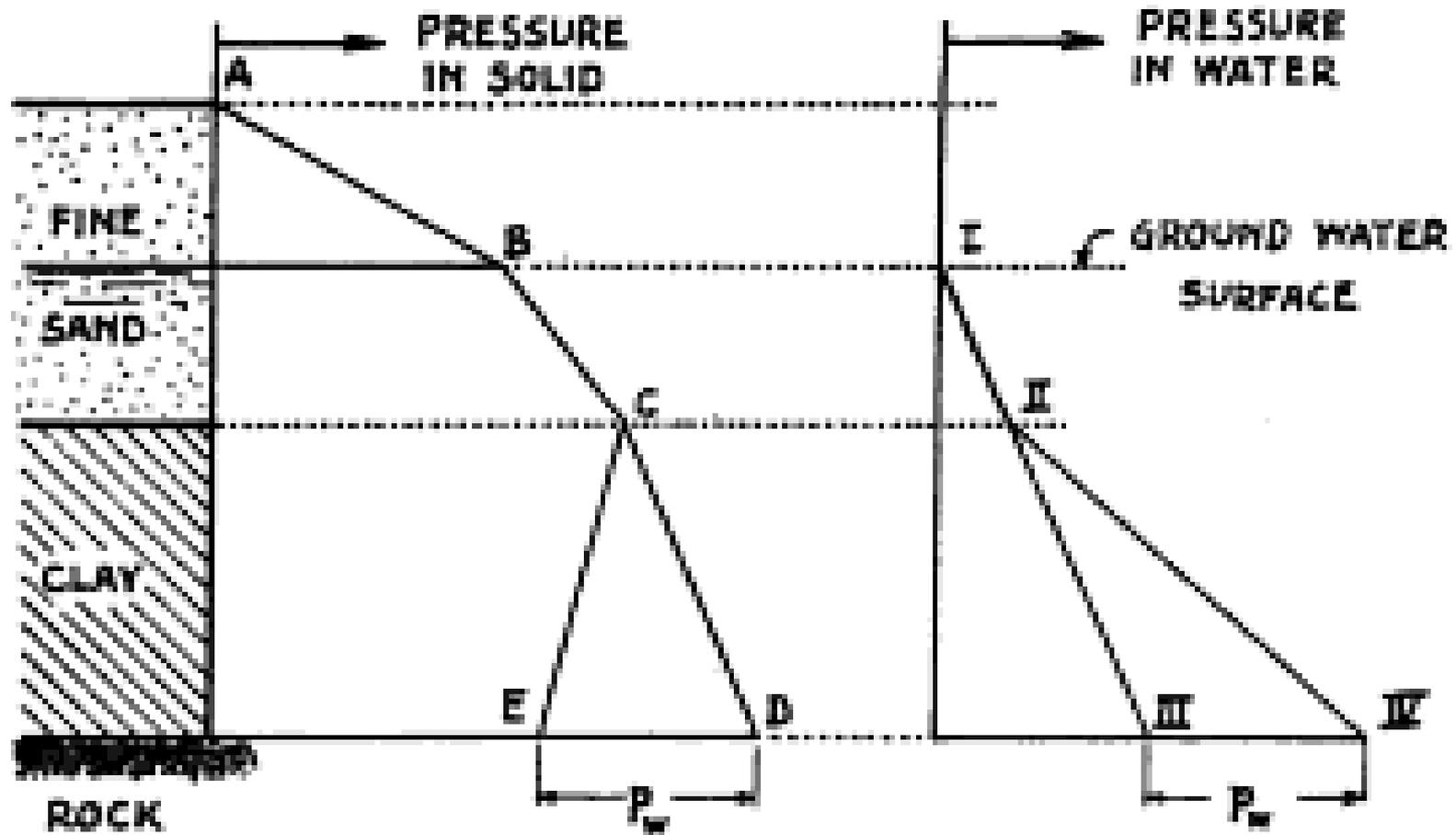
$$e = -C \ln(p + p_c) + c_1$$

$$e = -A \ln(p + p_i) + c_2$$

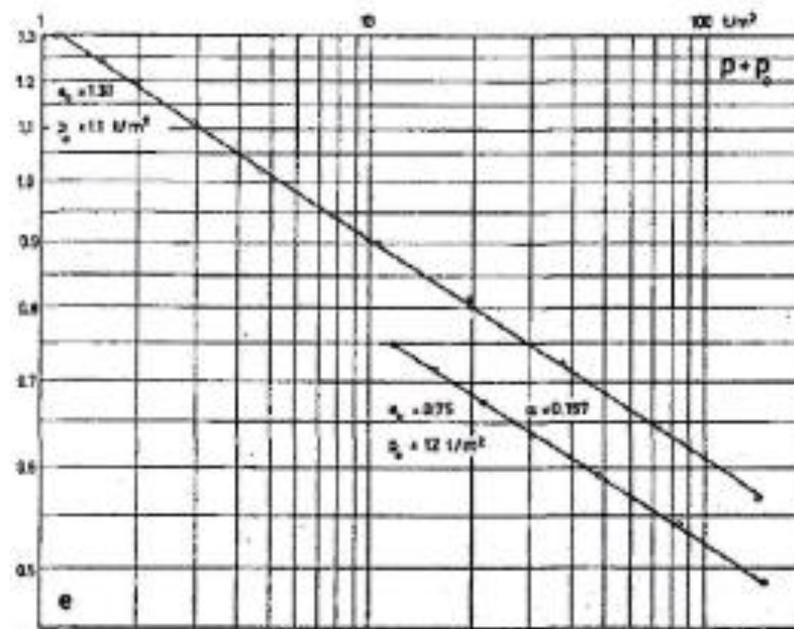
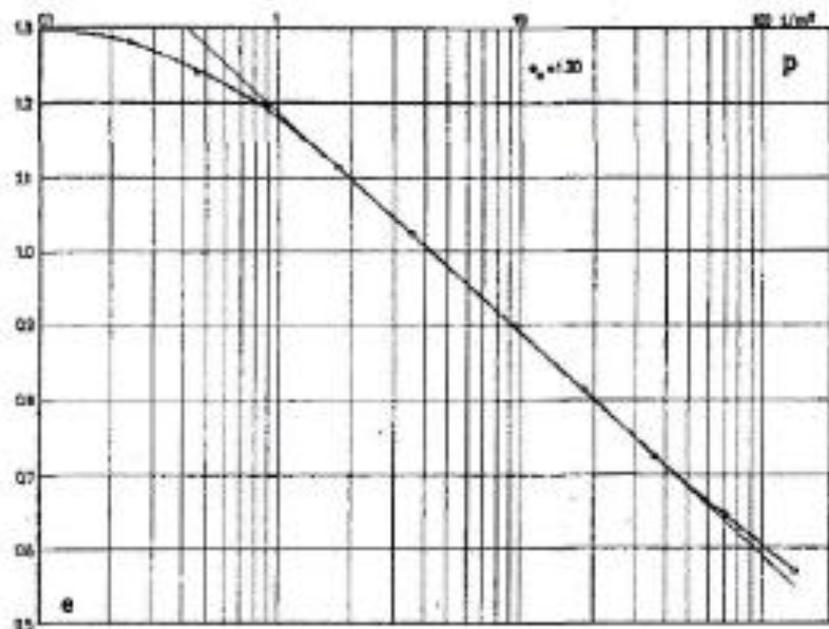
Давление предуплотнения по Ф.Рачесо Silva (1970 г.)



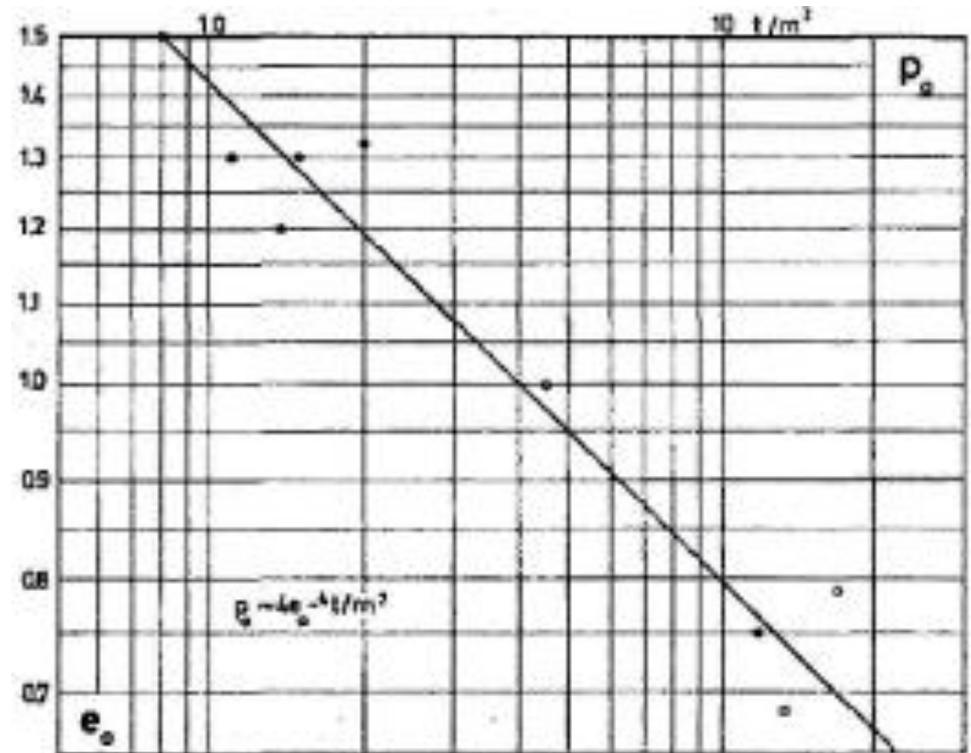
Ошибки, связанные с неточностью определения p_c по Казагранде



Отклонения от логарифмического закона компрессии (*J. Brinch Hansen, Ses Inan, 1969*)



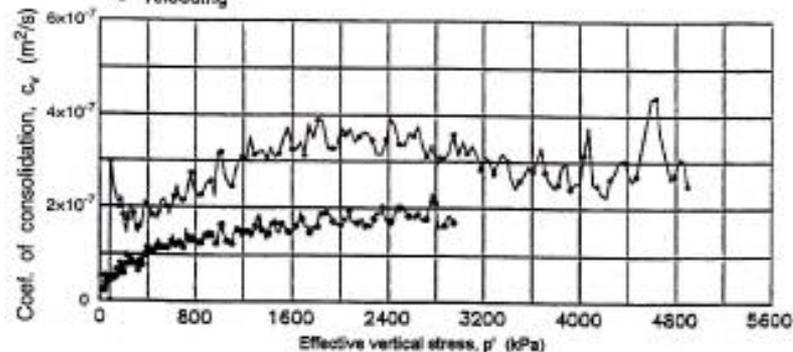
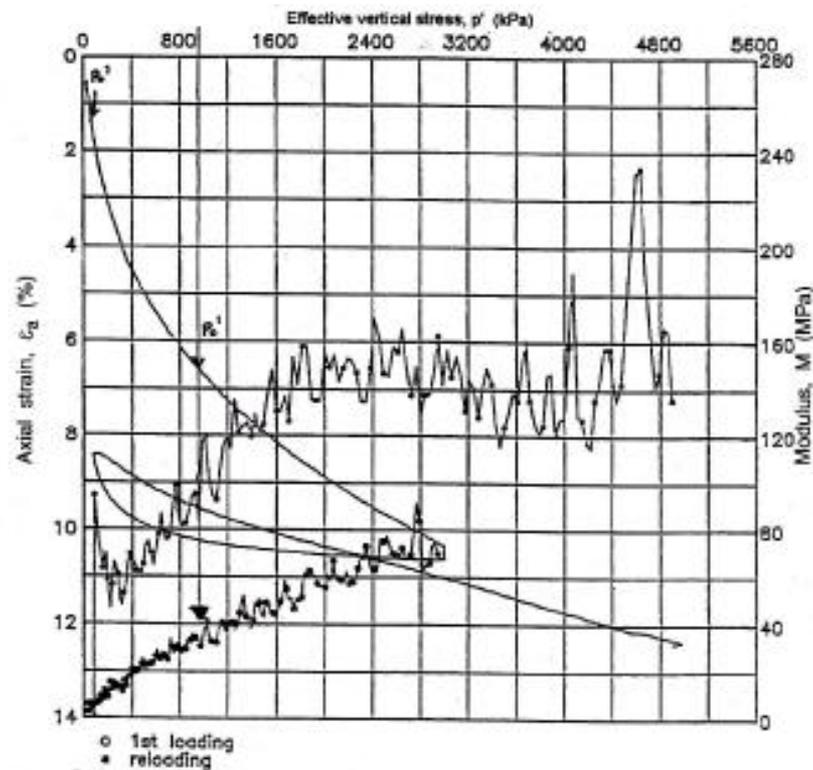
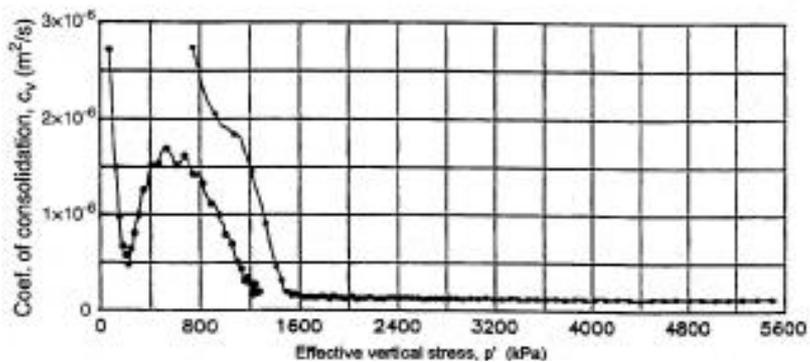
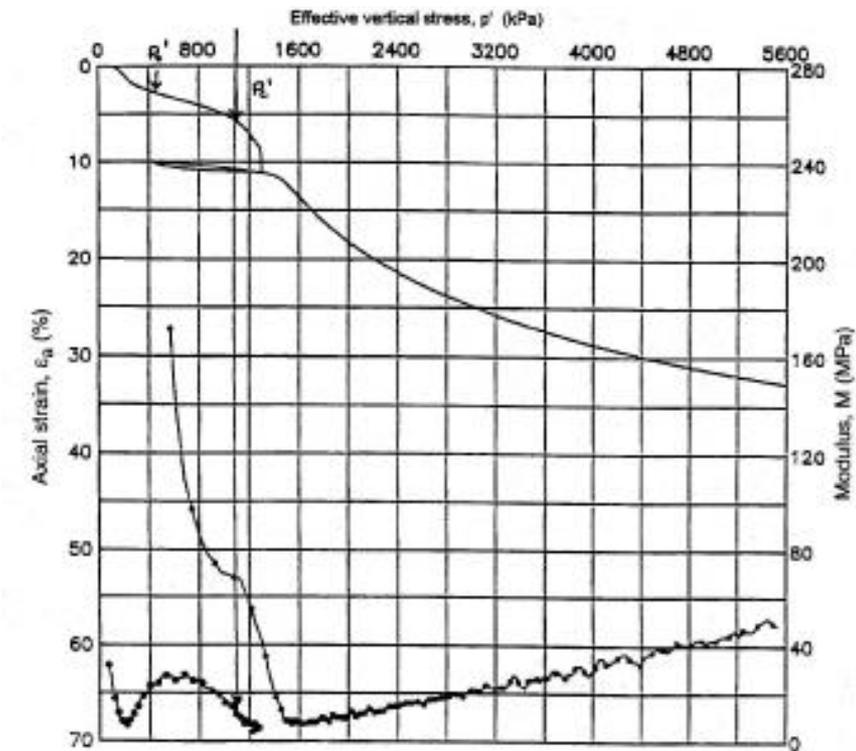
Зависимости, предложенные Й.Бринч-Хансеном



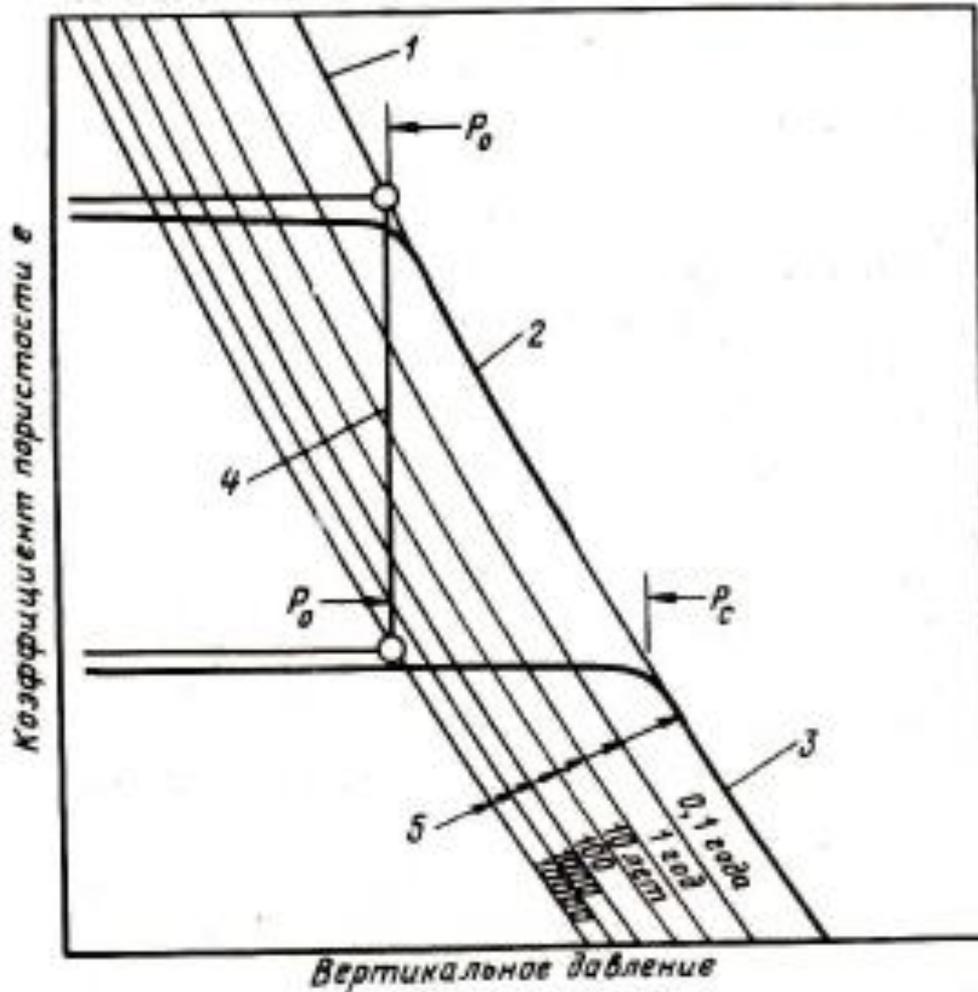
$$e = e_0 \left[1 + \frac{p}{p_0} \right]^{-a}$$

$$p_0 = 40e_0^{-4} \text{ kPa}$$

Одометрические испытания с постоянной скоростью деформации глин с различным OCR (J.Grozic, T.Lunne, S.Pande, 2003)

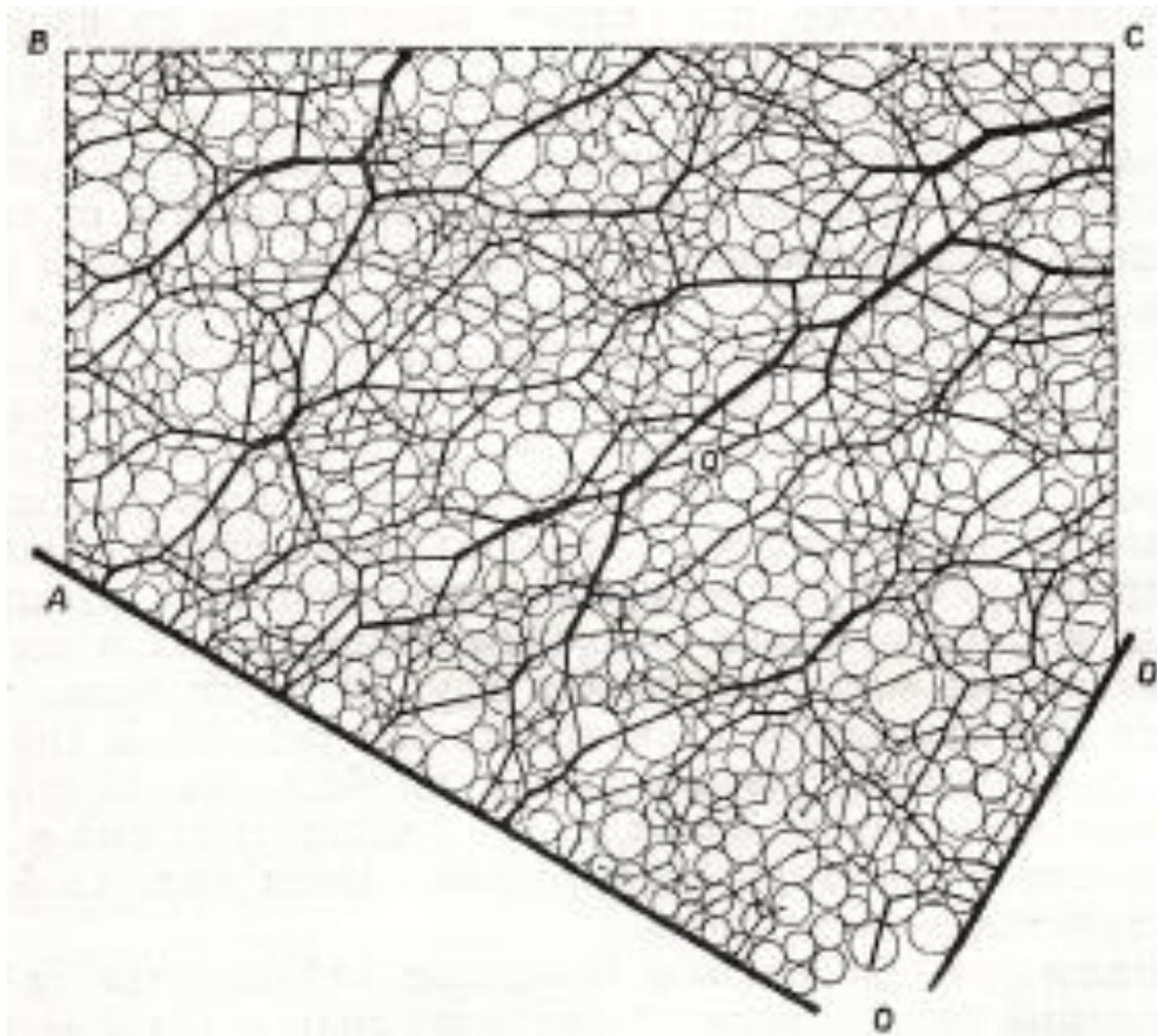


p_c – не всегда давление предварительного уплотнения.
 Диаграмма Л.Бьеррума (1967)



$$\sigma' = \sigma^{(s)} + \sigma^{(f)} + \sigma^{(c)}$$

Система контактных сил для фотоупругой модели зернистой среды
A.Drescher, G. De Josselin de Jong, 1972



**Паспорт испытания грунта методом компрессионного сжатия по определению
давления предуплотнения (p'_c) и коэффициента предуплотнения (OCR)**

Объект: Лахтинский пр-т д.2

Описание грунта: глины твердые слоистые

Лаб№ 1880

Скважина № 5-270

Глубина отбора образца, м: 54,5-54,7

ИГЭ - 8

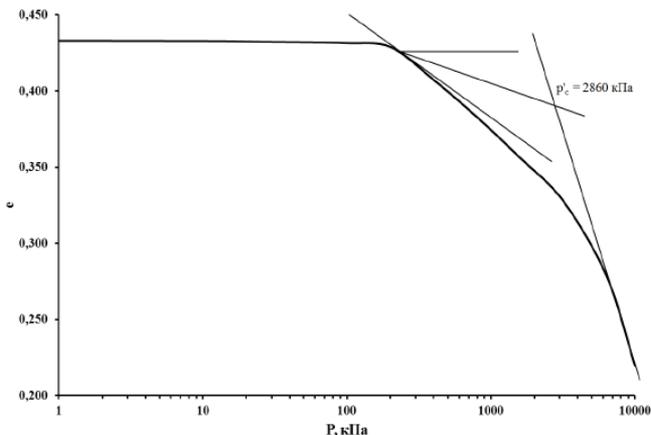
Природная влажность, % 15,3

Влажность после опыта, % 13,3

Плотность грунта, г/см³ 2,18

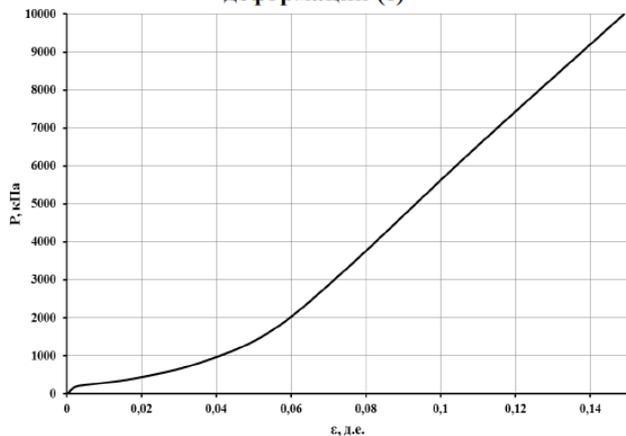
Модуль общей деформации(диапазон напряжений 0,4÷1,6 МПа), МПа 23,4

Метод Казагранде



P, кПа	ϵ , д.е.	e	W, кДж/м ³
0	0	0,433	0
12	0,0002	0,433	0,00
25	0,0005	0,432	0,01
50	0,0007	0,432	0,01
100	0,0011	0,431	0,04
200	0,0029	0,429	0,31
400	0,01795	0,407	4,83
800	0,03505	0,383	15,09
1600	0,0538	0,356	37,59
3200	0,07375	0,327	85,47
6400	0,1084	0,278	251,79
10000	0,149	0,219	584,71

Зависимость “напряжения (σ) – относительные деформации (ϵ)”



Бытовая нагрузка

$p'_{\text{быт}} = 654$ кПа.

Результаты испытаний:

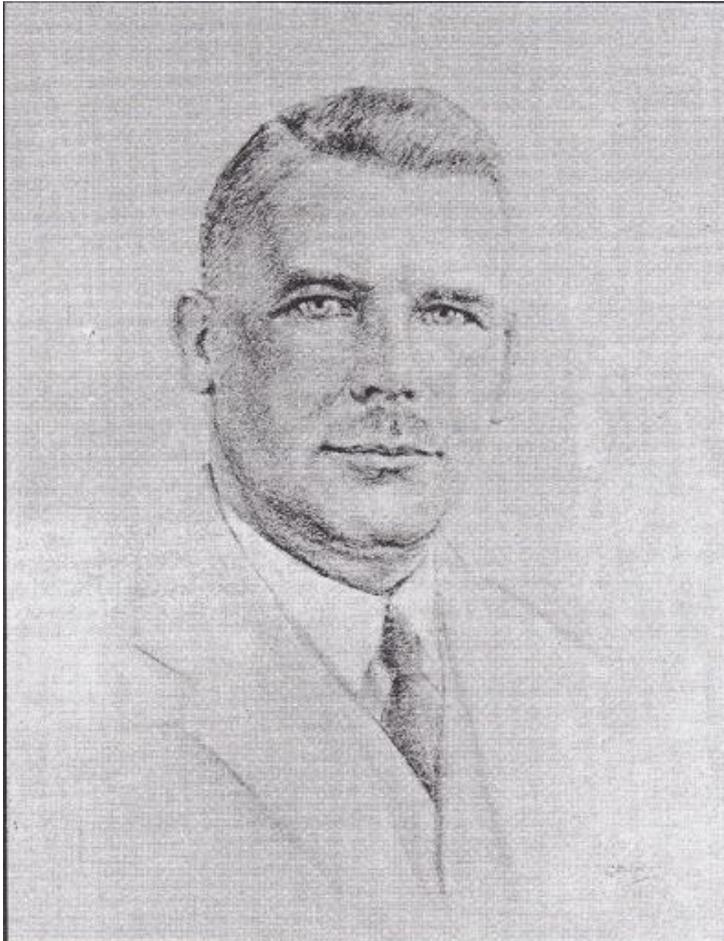
-методом Казагранде

$p'_c = 2860$ кПа,

OCR=4,37

Для аргиллитоподобных твердых глин график компрессии может иметь совсем иную форму, чем по теории Терцаги-Казагранде. Так, для вендских глин Санкт-Петербурга получен график с двумя точками перелома в полулогарифмических координатах, что соответствует, возможно, двум перестройкам структуры

Вторичная консолидация



A.S. Keverling Buisman (1890 – 1944)

Первоначальная форма записи (1936)

$$\Delta e = p(\alpha_1 + \alpha_2 \lg t)$$

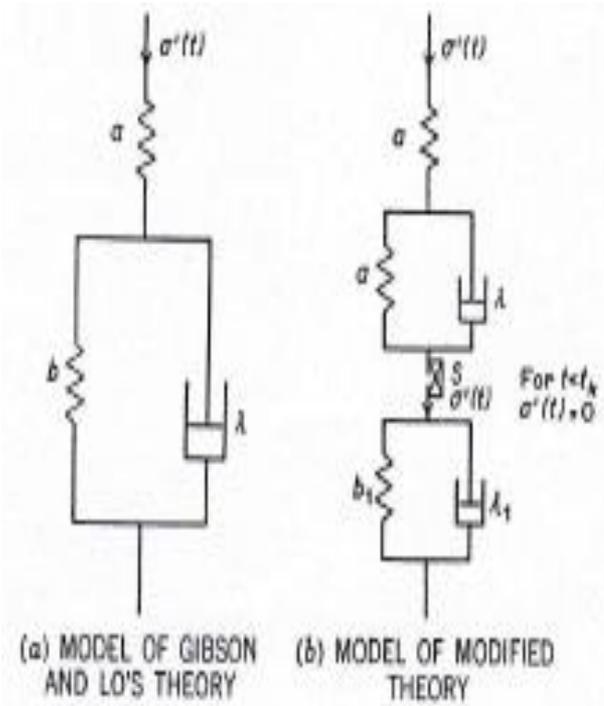
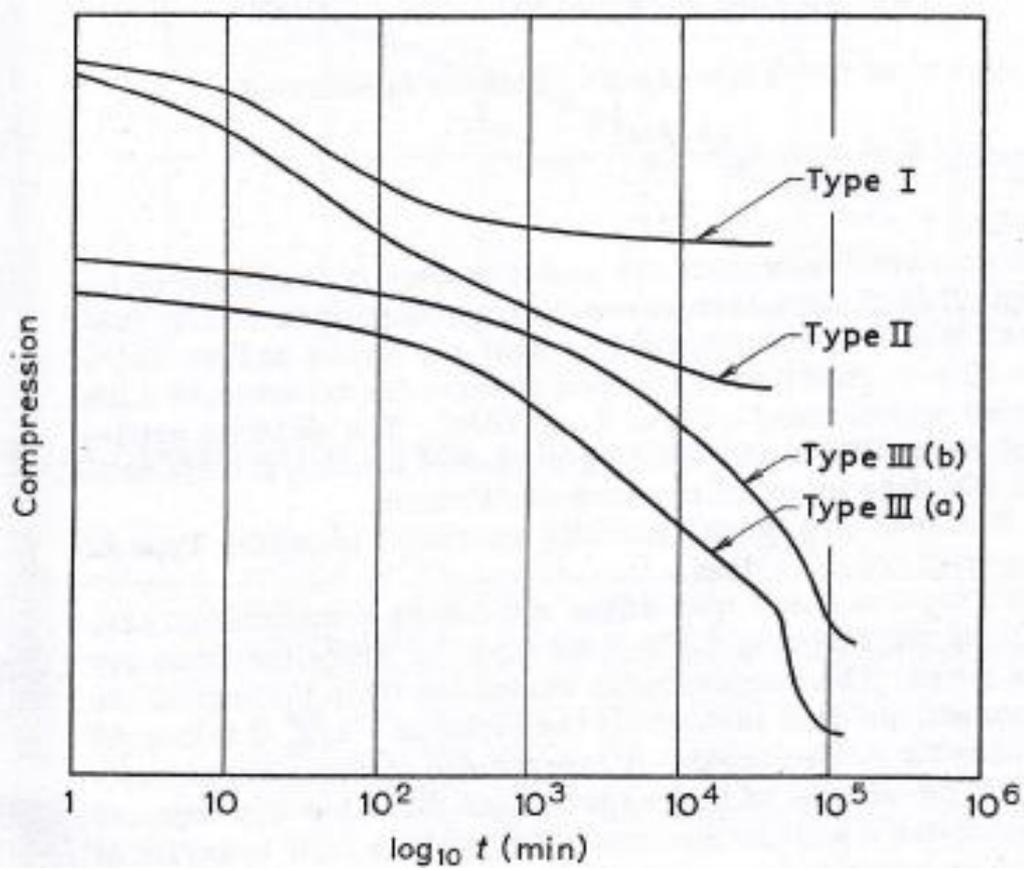
Современная форма записи

$$e_1 - e_2 = C_c \lg \frac{p_2}{p_1} + C_\alpha \lg t$$

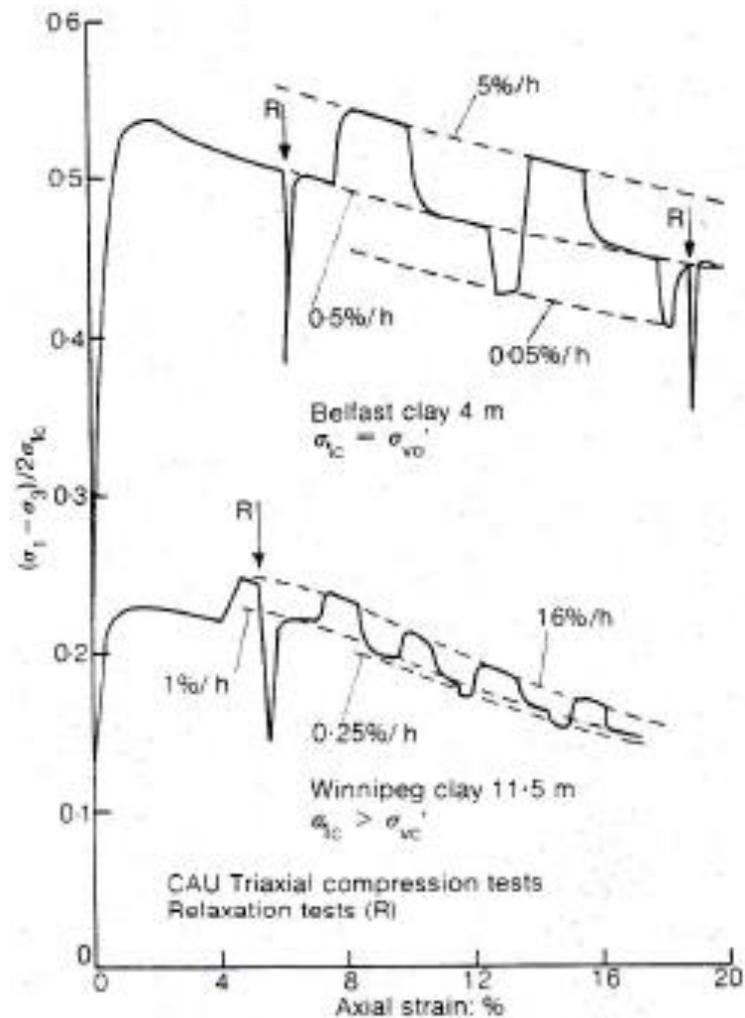
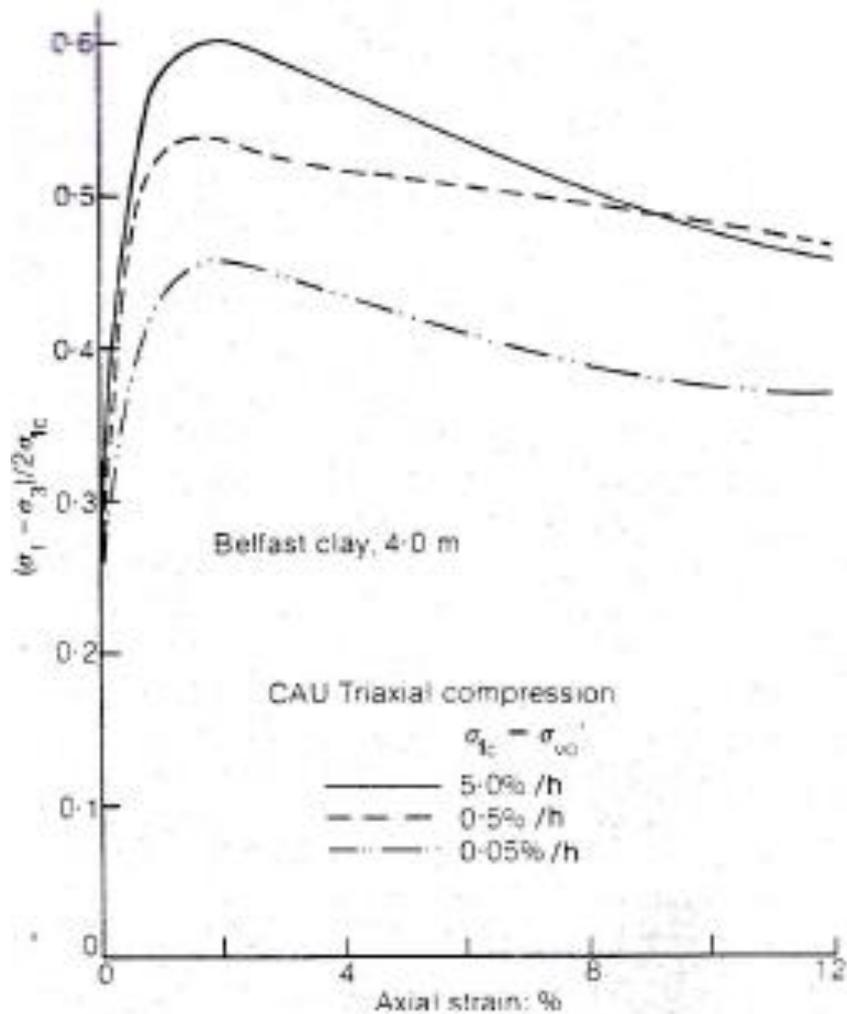
Соотношение между C_c и C_α
(G.Mesri, P.Godlewski, 1977)

$$0,025 \leq C_\alpha / C_c \leq 0,1$$

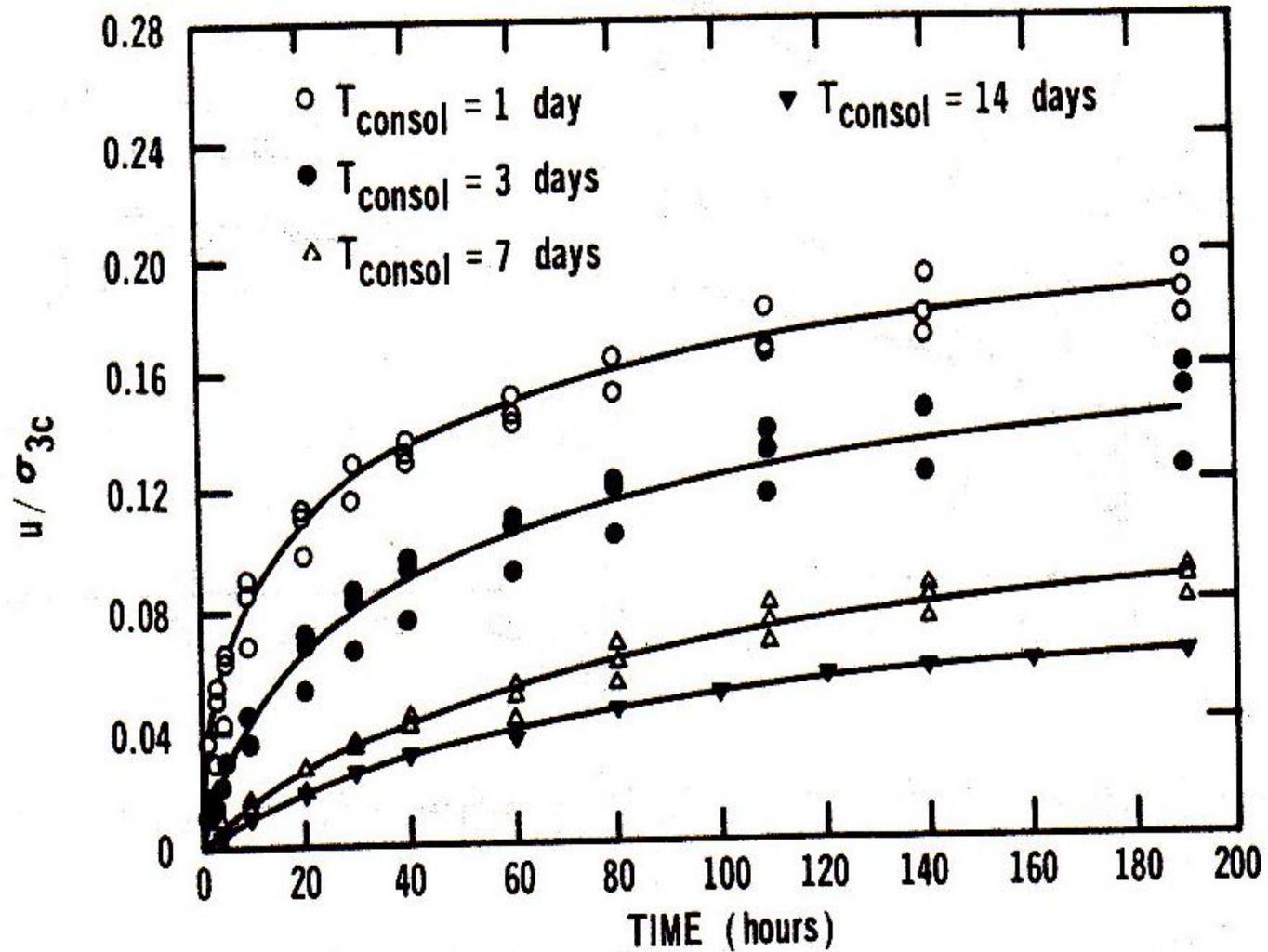
Экспериментальные формы кривых вторичной компрессии и реологические модели (К. У. Ло, 1961)



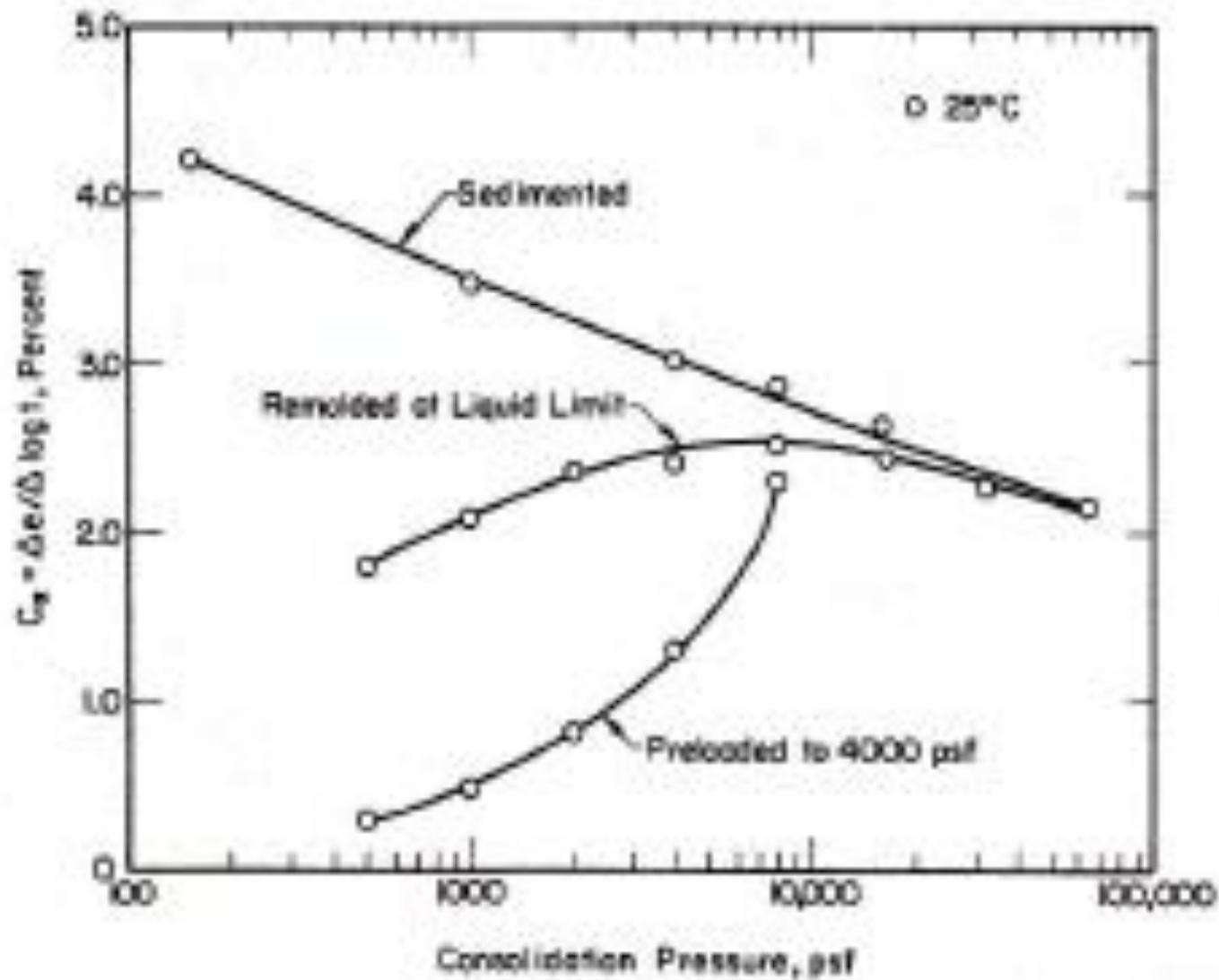
Влияние скорости нагружения (*J. Graham et al, 1983*)



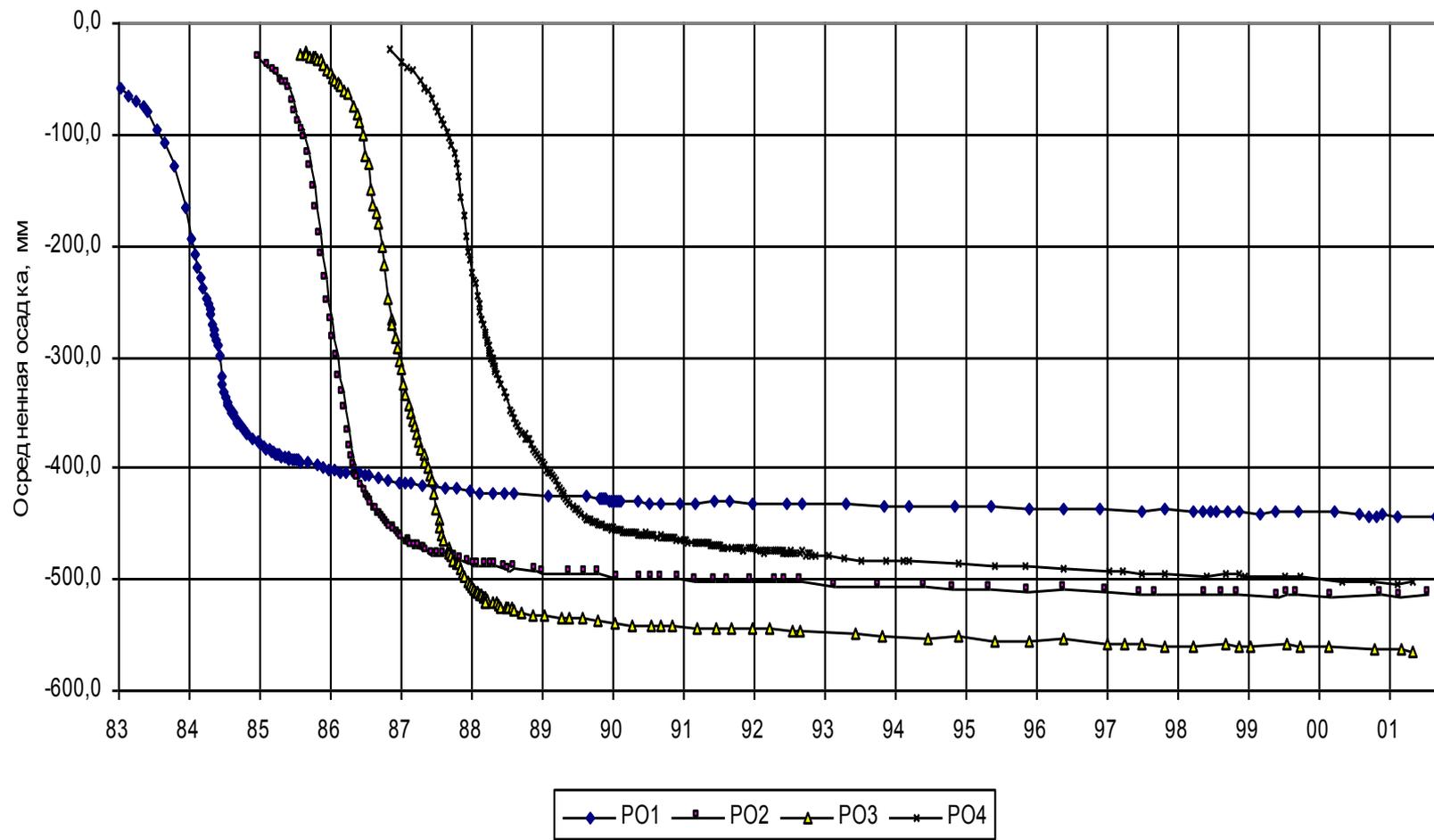
Рост порового давления после прерывания вторичной консолидации
(Chih-Kang Shen et al, 1973)



Влияние уровня напряжений и степени переуплотнения на коэффициент вторичной консолидации (*G.Mesri, 1973*)



«Вековая» осадка тяжело нагруженных фундаментов (А.Г.Зализский, 2007)



Компрессионное испытание вендской глины

ПРОТОКОЛ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТА № 10

Объект:
Заказ:
Место отбора:
Скважина №:
Глубина отбора образца, м

Лахтинский пр-т
40-270
57,0-57,2

Наименование грунта:
Консистенция:
Структура:
Генетический тип:

глина
твердая
не нарушена

Гранулометрический состав в % по фракциям в мм

>25	25-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,002	<0,002
	0.0	0.0	2.0	1.8	0.9	0.5	0.7	18.5	25.0	28.9	21.6

Физические свойства

Влажность природная	Плотность грунта	Плотность скелета грунта	Плотность частиц грунта	Пористость	Коэффициент пористости	Полная влагоемкость	Коэффициент водонасыщения	Влажность на границе текучести	Влажность на границе раскатывания	Число пластичности	Показатель текучести	Влажность при пробитии
W, д.е.	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	ρ_p , г/см ³	n, д.е.	e, д.е.	W _п , д.е.	S _r , д.е.	W _L , д.е.	W _p , д.е.	I _p	I _L , д.е.	W _с , д.е.
0.142	2.15	1.88	2.72	0.308	0.445	0.164	0.867	0.382	0.263	0.12	-1.02	

Результаты испытаний образца на консолидацию по ГОСТ 12248-96

Высота образца, мм:
Площадь образца, см²:

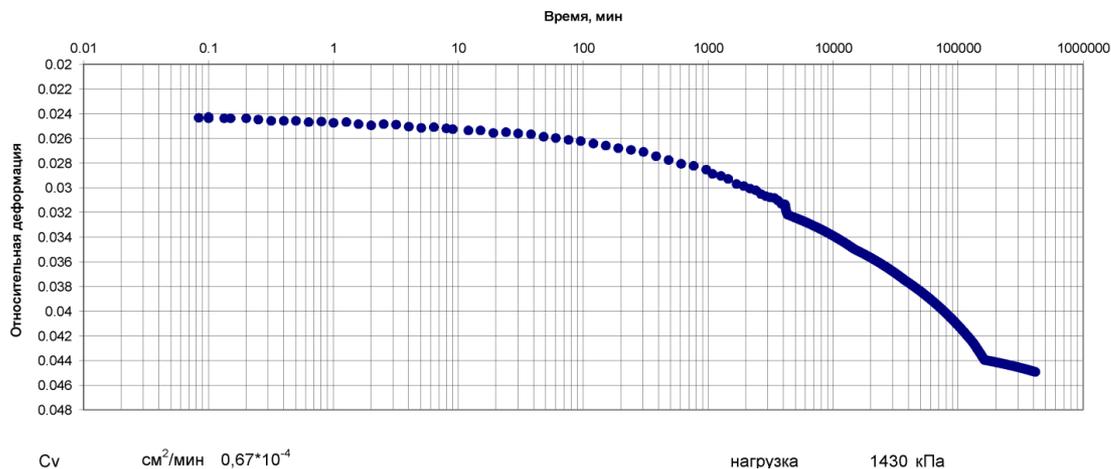
20
44.16

Масса кольца с грунтом, г:
Масса кольца, г:

296.2
106.4

Масса образца, г

189.8



Коэффициент вторичной консолидации отнюдь не исчерпывает описание видов ползучести. В частности, ползучесть при сдвиге принципиально отличается от ползучести при сжатии. При этом спрямление графика деформация-время в полулогарифмических координатах происходит при различных законах компрессионной ползучести, что означает, что само по себе это спрямление не имеет существенного физического смысла.

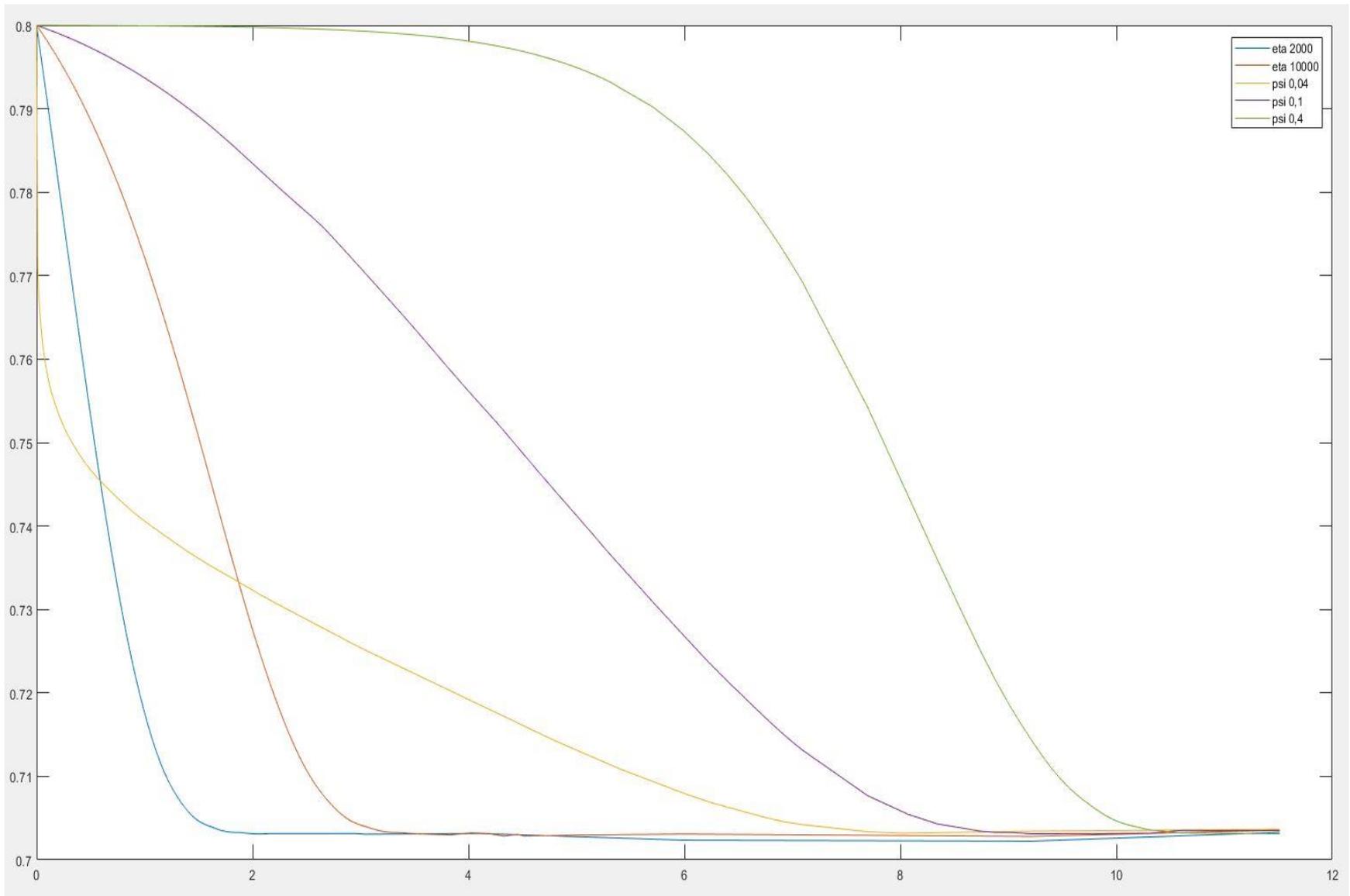
Рассмотрим, например два закона ползучести при компрессии бингамовского типа (хотя в реальности модель компрессии, скорее всего, не бингамовская):

а) нелинейная модель С.Г.Безволева

$$-\dot{e} = \nu \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_e} \right)^{\frac{1}{\psi}} - 1 \right]$$

б) простую линейную модель

$$-\dot{e} = \frac{\sigma - \sigma_e}{\eta}$$



Несколько замечаний в заключение

- Для практических расчетов осадок целесообразно ориентироваться на послойное суммирование с использованием модуля компрессионной деформации, структурной прочности, зависимости модуля от напряжения, учета первичного и повторного нагружения.
- Для этого необходимо совершенствовать методы отбора и испытания образцов, причем увеличение точности важнее, чем автоматизация.
- Следует развивать механику реальных грунтов, которая намного сложнее, чем механика водонасыщенных паст. То, что невозможно воспроизвести в лаборатории, можно узнать из наблюдений за поведением реальных объектов.
- Без внятной модели нет характеристик. Поэтому, например, лучше использовать самые простые модели ползучести, чем коэффициент вторичной консолидации.
- Модель должна хоть в минимальной степени быть адекватной натуре. Нельзя, например, применять теорию фильтрационной консолидации к твердым глинам на том основании, что из них можно выдавить немного воды.

Р.Пек об отношении К.Терцаги к «математикам»



Как ясно Карл Т. предвидел более 50 лет тому назад риски, связанные с участием математиков в развитии механики грунтов. Жарким летним вечером 1926 г. во время нашей ежедневной прогулки вокруг Зеркального бассейна напротив мемориала Линкольна Карл объяснял мне этот риск и затем резюмировал одной из своих характерных шуток: «Математики - полезные животные, которых следует держать в золотой клетке и умеренно кормить задачами».

Из письма А.Казагранде Р.Пеку

Р.Пек и К.Терцаги на озере Маракайбо в Венесуэле