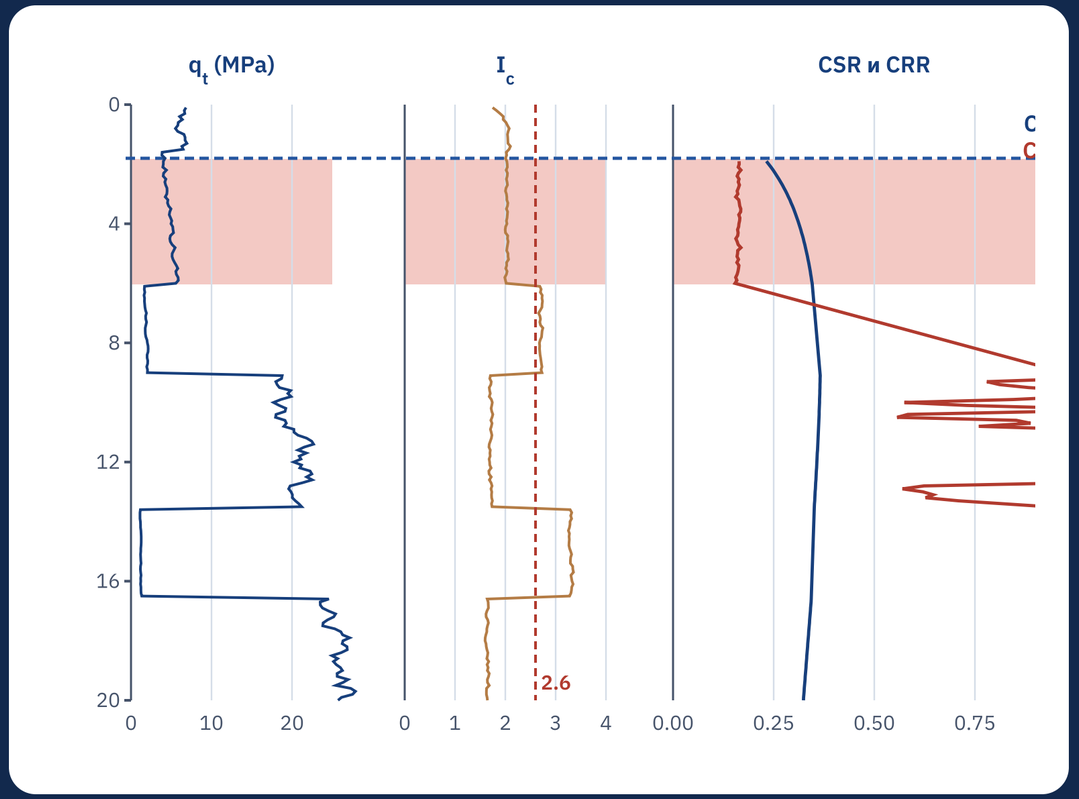
Презентация лекции по геотехнике · Разжижение грунтов

Возникновение разжижения по данным CPT

Лекция: возникновение разжижения по данным CPT; одно показание конуса решается вручную от начала до конца двумя методами (Boulanger–Idriss, Robertson–Wride), остальные показания — в таблицах.

Данные CPT · Ic | Два метода | CSR · CRR · FS | Зоны | Можно решить вручную



Что мы изучим на этой лекции?

Определение **скорректированного сопротивления конусу q_t, отношения трения R_f** и **индекса типа поведения грунта I_c** по записи конуса (q_c, f_s, u_2)

Оценка типа грунта, удельного веса и содержания пылевато-глинистых частиц **по данным испытания конусом** (таблица слоёв не вводится)

Два полных набора зависимостей: Boulanger–Idriss (2014) и Robertson–Wride (1998, NCEER); нормализация, кривая CRR, MSF и K_σ каждого из них внутренне согласованы

CSR, **FS = CRR/CSR**, исключённые показания, **зоны** и толщина разжижающегося слоя

Одно показание (4.00 m) в скважине вручную двумя методами; остальные показания в таблице по тем же шагам

ХОД ЛЕКЦИИ

Каждая тема излагается **в три шага**:

1 · **Теория**: формула и обоснование

2 · **Условие**: дано и требуется определить

3 · **Решение**: пошагово, с числами

Пример: CPT-1 (УГВ 1.80 m; глубина 20 m, шаг 5 cm); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, отношение площадей a = 0.80, $FS_{required}$ = 1.20.

q_t, R_f и единицы измерения

ТЕОРИЯ

Так как **конус** обеспечивает почти непрерывную запись (интервал считывания 1–5 cm), таблицы слоёв для ввода нет.

Тип грунта, удельный вес и содержание пылевато-глинистых частиц оцениваются **по данным конусного зондирования**.

Последствия разжижения — осадка, боковое растекание, потеря несущей способности — выходят за рамки данной версии.

Скорректированное сопротивление конусу вычисляется по соотношению $q_t = q_c + (1 - a)\cdot u_2$, где a — отношение площадей нетто конуса (0.65–0.85; обычное значение 0.80).

Поправка существенна в мягких глинах и пылеватых грунтах, где значение u_2 намного превышает гидростатическое, а в песках остаётся малой; если u_2 не регистрировалось, принимается $q_t = q_c$.

$$q_t = q_c + (1 - a)\, u_2 \qquad R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100\,\%$$

γ по данным CPT; две глубины УГВ

ТЕОРИЯ

Удельный вес оценивается по данным CPT при каждом показании; **R_f** выражается в %, а значение удерживается в пределах от 1.5 γ_w до 2.5 γ_w.

Удельный вес интегрируется от поверхности; в качестве альтернативы используются два постоянных значения: γ выше уровня грунтовых вод и γ_{sat} ниже него.

Поровое давление принимается гидростатическим от уровня грунтовых вод; для **C_N** и **I_c** используется уровень грунтовых вод на момент испытания, а для CSR и K_σ — расчётный уровень грунтовых вод.

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = 0.27 \log R_f + 0.36 \log \frac{q_t}{P_a} + 1.236 \qquad \sigma_v = \int \gamma \, dz \qquad u = \gamma_w (z - z_w) \qquad \sigma'_v = \sigma_v - u$$

I_c и показатель степени n

ТЕОРИЯ

Индекс типа поведения грунта вычисляется по зависимости I_c = [(3.47 – log Q)² + (log F + 1.22)²]^0.5.

Показатель n принимается равным 0.5 для песков и 1.0 для глин и определяется итерацией по Robertson & Wride (1998).

Колонка грунтов на чертежах основана на этой классификации; интервал тоньше h_{min} присоединяется к более протяжённому соседнему.

$$I_c = \left[(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2\right]^{0.5} \qquad Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \qquad F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100\,\%$$

Диапазон I_c	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
Грунт (Robertson 1990)	гравелистый – плотный песок	песок: чистый – пылеватый	песчаная смесь	смесь с пылеватым грунтом	глина	органический

Какое показание принимается в расчёт?

ТЕОРИЯ

Показание принимается в расчёт, если оно расположено ниже расчётного УГВ, не глубже z_{max} и в грунте, ведущем себя как песок.

Грунт, у которого значение I_c превышает $I_{c,lim}$ (по умолчанию 2.6), считается глиноподобным; такие грунты отнесены к проверке циклического разупрочнения.

Граница между поведением, подобным песку, и поведением, подобным глине, не является резкой; рекомендуется повторить расчёт с $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6 и 2.8.

При отсчёте, в котором сопротивление конусу нетто $q_t - \sigma_v$ не положительно, индекс типа поведения грунта определить нельзя, и отсчёт не оценивается; исключённые отсчёты сохраняются во всех таблицах с указанием причин.

$q_t \rightarrow q_{c1N} \rightarrow q_{c1Ncs}$

ТЕОРИЯ

Поскольку в нормализации по Boulanger & Idriss (2014) показатель степени зависит от результата, C_N находится итерациями, а в соотношении для m значение q_{c1Ncs} ограничивается диапазоном от 21 до 254.

В соотношении FC = 80(I_C + C_{FC}) − 137 величина C_{FC} — параметр подгонки корреляции между I_C и содержанием пылевато-глинистых частиц; значение 0 соответствует общей корреляции, а ±0.29 — одному стандартному отклонению этой корреляции.

Поскольку разброс корреляции велик, более подходящим является значение C_{FC}, характерное для площадки и определённое по лабораторному содержанию пылевато-глинистых частиц в образцах из скважин, расположенных рядом с точками CPT; его следует определять отдельно для каждого инженерно-геологического элемента.

$$q_{c1N} = C_N \frac{q_t}{P_a} \qquad C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \qquad m = 1.338 - 0.249\, q_{c1Ncs}^{0.264}$$

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 \qquad \Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left[1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right] \qquad q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N}$$

CRR, MSF и K_σ

ТЕОРИЯ

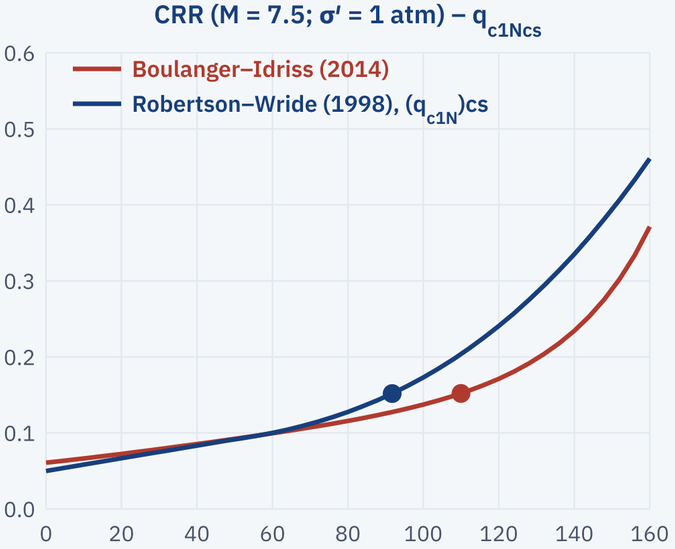
Кривая сопротивления Boulanger & Idriss (2014) — детерминированная кривая, приведённая в отчёте; она основана на 16-м процентиле данных по случаям (константа 2.80).

Кривая CRR(M=7.5; σ′=1) получается по значению q_{c1Ncs}; когда q_{c1Ncs} превышает 211, принимается значение 211, так как достигается предел C_σ.

σ'_v в зависимости для K_σ — эффективное напряжение, соответствующее расчётному уровню грунтовых вод.

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{q}{113} + \left(\frac{q}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q}{140}\right)^3 + \left(\frac{q}{137}\right)^4 - 2.80\right] \qquad q = q_{c1Ncs}$$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)(8.64e^{-M/4} - 1.325) \qquad MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q}{180}\right)^3 \qquad K_\sigma = 1 - C$$



Kc, CRR и MSF

ТЕОРИЯ

Скорректированное сопротивление конусу определяется соотношением $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$; K_c зависит от Ic и принимается равным 1 при Ic ≤ 1.64.

Для чистого песка при 1.64 < Ic < 2.36 и отношении трения ниже 0.5% принимается $K_c = 1$, и поправка на содержание пылевато-глинистых частиц не применяется.

Кривая для чистого песка заканчивается при $(q_{c1N})_{cs} = 160$; модуль продолжает то же кубическое соотношение вплоть до 250 ($CRR_{7.5} = 1.5$) и помечает полученный отсчёт.

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} \quad C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^n \le 1.7 \qquad (q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N} \qquad K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88$$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} + 0.05 \;(<50) \quad 93\left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000}\right)^3 + 0.08 \;(50\ldots160) \qquad MSF = \frac{102.24}{M^{2.56}} \quad K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{f-1}$$

CSR и зависимость r_d для двух методов

ТЕОРИЯ

Циклическое отношение напряжений выражается как CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d, где σ_v и σ'_v — напряжения, вычисленные для расчётного уровня грунтовых вод.

Для коэффициента редукции по глубине r_d в методе B&I; используется соотношение Idriss, в методе R&W; — соотношение Liao–Whitman; поправки на магнитуду и бытовое давление применяются к сопротивлению, а не к нагрузке.

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d \qquad r_d^{BI} = \exp[\alpha + \beta M] \qquad r_d^{RW} = 1.0 - 0.00765z\ (z \le 9.15\ \text{m})$$

z (m)	2	4	6	8	10	15	20
r_d по Boulanger–Idriss (M = 7.5)	0.991	0.972	0.949	0.924	0.896	0.822	0.750
r_d по Robertson–Wride	0.985	0.969	0.954	0.939	0.907	0.773	0.640

FS = CRR / CSR

ТЕОРИЯ

Каждый отсчёт представляет половину расстояния до вышележащего и нижележащего отсчётов; это представительное расстояние в каждом направлении не превышает 0.25 m или, если оно больше, 3/4 обычного интервала между отсчётами.

Пропуск в записи не экстраполируется на результаты; он остаётся неоценённой серией с пометкой «нет показаний» и приводится в предупреждении.

Последовательные показания с одинаковым результатом образуют серию; серия с единственным результатом, более тонкая, чем h_{min} (по умолчанию 0.10 m), принимает результат более длинного соседа, а соседние серии с одинаковым результатом образуют зоны.

Каждый метод представляет собой единое целое; коэффициент редукции напряжений, нормализация, поправка для чистого песка, коэффициенты магнитуды и бытового давления и кривая сопротивления выведены совместно на основе базы данных случаев.

Источники обоих методов предписывают не смешивать составляющие одного метода с составляющими другого; в модуле выбор метода изменяет все эти составляющие одновременно.

$$FS = \frac{CRR}{CSR}$$ FS < 1 : разжижается $1 \le FS < FS_{req}\ (1.20)$: на границе

Условие

ПРИМЕР

Дано

Отсчёт	$q_c = 4.956$ **MPa,** $f_s = 46.2$ **kPa,** $u_2 = 21.6$ **kPa; отношение площадей нетто** $a = 0.80$
Площадка	**УГВ** $z_w = 1.80$ **m (расчётный УГВ тот же); удельный вес по CPT (80 показаний от 0 до 4 m)**
Землетрясение	$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; $C_{FC} = 0$; **Robertson–Wride** $f = 0.7$; $FS_{req} = 1.20$

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

q_t, σ'_v, I_c; по Boulanger–Idriss и Robertson–Wride — **q_{c1Ncs}, CRR, CSR, FS**.

Решение (1/8)

РЕШЕНИЕ

1 Скорректированное сопротивление конусу и коэффициент трения

$$q_t = q_c + (1-a)u_2 = 4956 + (1-0.80)(21.6) = \mathbf{4{,}960.32}\ \text{kPa}$$

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}960.32} \times 100 = \mathbf{0.9314\ \%}$$

2 Удельный вес (Robertson–Cabal)

$$\gamma = (0.27 \log R_f + 0.36 \log \tfrac{q_t}{P_a} + 1.236)\gamma_w = (1.8360)(9.81) = \mathbf{18.01}\ \text{kN/m}^3$$

3 Напряжения

$$\sigma_v = \sum \tfrac{1}{2}(\gamma_{k-1} + \gamma_k)\Delta z = \mathbf{73.64}\ \text{kPa} \qquad u = 9.81(4.00 - 1.80) = 21.58\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 73.64 - 21.58 = \mathbf{52.05}\ \text{kPa}$$

Эффективное вертикальное напряжение **σ′v = 52.05 kPa**.

Решение (2/8)

РЕШЕНИЕ

4 Нетто-сопротивление под нижним концом и F

$$q_t - \sigma_v = 4{,}960.32 - 73.64 = \mathbf{4{,}886.68}\ \text{kPa}$$

$$F = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \times 100 = \frac{46.2}{4{,}886.68} \times 100 = \mathbf{0.9454\ \%}$$

5 Итерация по показателю степени n (Robertson–Wride): сначала n = 1.0 (пробное значение для глины)

$$Q = \frac{q_t - \sigma_v}{P_a}\left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^{1} = 93.88$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 93.88)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{1.9162} \le 2.6 \Rightarrow \text{не глина}$$

Решение (3/8)

РЕШЕНИЕ

6 Пробуется n = 0.5 (песок)

$$Q = 48.2278 \left(\frac{101.325}{52.05} \right)^{0.5} = 67.29$$

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 67.29)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{2.0312} \leq 2.6 \;\Rightarrow\; n = 0.5$$

I_c = 2.031 ≤ 2.6: грунт не похож на глину, показание оценивается.

Решение (4/8)

РЕШЕНИЕ

7 Содержание пылевато-глинистых частиц (C_{FC} = 0)

$$FC = 80\,(I_c + C_{FC}) - 137 = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

8 m и C_N взаимосвязаны: итерация по q_{c1Ncs} ($x = q_t/P_a = 48.955$, $\sigma'_v = 52.05$)

Итерация	q_{c1Ncs} (входные данные)	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs} (результат)
1	48.955	0.6425	1.5341	75.100	44.128	119.227
2	119.227	0.4582	1.3569	66.427	42.590	109.017
3	109.017	0.4788	1.3756	67.342	42.752	110.094
4	110.094	0.4766	1.3736	67.242	42.734	109.977
…	…	…	…	…	…	…
13	109.988	0.4768	1.3738	67.252	42.736	109.988

Сходится за 13 итераций: **m = 0.4768, C_N = 1.3738, q_{c1N} = 67.252, Δq_{c1N} = 42.736 → q_{c1Ncs} = 109.988**.

Решение (5/8)

РЕШЕНИЕ

9 Базовое сопротивление (M = 7.5; 1 atm), MSF и K_σ (q_{c1Ncs} = 109.99)

$$CRR_{7.5,1} = \exp[q/113 + (q/1000)^2 - (q/140)^3 + (q/137)^4 - 2.80] \quad (q = 109.99)$$

$$CRR_{7.5,1} = \exp[-1.8840] = \mathbf{0.1520}$$

$$MSF_{max} = 1.09 + (109.99/180)^3 = 1.3181$$

$$MSF = 1 + (1.3181 - 1)(8.64e^{-7.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0000}$$

$$C_\sigma = 1/(37.3 - 8.27(109.99)^{0.264}) = 0.1150$$

$$K_\sigma = 1 - 0.1150 \ln(52.05/101.325) = \mathbf{1.0766}$$

$CRR_{7.5;1}$ = **0.1520**; MSF = **1.0000**; K_σ = **1.0766** → CRR = **0.1636**.

Решение (6/8)

РЕШЕНИЕ

10 Нагрузка (Idriss r_d) и коэффициент запаса

$$r_d = \exp[\alpha + \beta M] = \exp[-0.1971 + 0.0225(7.5)] = 0.9718$$

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9718) = \mathbf{0.3127}$$

$$CRR = CRR_{7.5,1}\cdot MSF\cdot K_\sigma = 0.1520(1.0000)(1.0766) = 0.1636$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.1636}{0.3127} = \mathbf{0.523}$$

Boulanger–Idriss: **FS = 0.523 < 1**, разжижение происходит.

Решение (7/8)

РЕШЕНИЕ

11 C_Q и q_{c1N} (n = 0.5 — то же)

$$C_Q = (P_a/\sigma'_v)^{0.5} = (101.325/52.05)^{0.5} = 1.3952$$

$$q_{c1N} = C_Q \frac{q_t}{P_a} = 1.3952(48.955) = 68.300$$

12 K_c (I_c = 2.031: 1.64 < I_c < 2.36, но F = 0.945% ≥ 0.5: поправка на содержание пылевато-глинистых частиц ПРИМЕНЯЕТСЯ)

$$K_c = -0.403I_c^4 + 5.581I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88 = \mathbf{1.3430}$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N} = 1.3430(68.300) = \mathbf{91.727}$$

В методе Robertson–Wride влияние содержания пылевато-глинистых частиц учитывается **множителем K_c** (1.343), в методе Boulanger–Idriss Δq_{c1N} **прибавляется** (+42.7); $(q_{c1N})cs$ = 91.73, q_{c1Ncs} = 109.99.

Решение (8/8)

РЕШЕНИЕ

13 Сопротивление, воздействие (Liao–Whitman r_d; $K_\sigma = 1$, так как $\sigma'_v < P_a$) и FS

$$CRR_{7.5} = 93\left(\frac{91.727}{1000}\right)^3 + 0.08 = 0.1518 \qquad MSF = \frac{102.24}{7.5^{2.56}} = 0.9996$$

$$r_d = 1 - 0.00765(4) = 0.9694 \qquad CSR = 0.65\left(\frac{73.64}{52.05}\right)(0.35)(0.9694) = 0.3120$$

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR}\,MSF\,K_\sigma = \frac{0.1518}{0.3120}(0.9996)(1) = \mathbf{0.486}$$

Оба пакета методов приходят к одному выводу: **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486**; оба < 1. Разница между ними обусловлена поправкой на содержание пылевато-глинистых частиц и r_d.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Скважина	**CPT-1: 20 m, 400 отсчётов с шагом 5 cm; УГВ** 1.80 **m**
Методы	**Boulanger–Idriss и Robertson–Wride; каждое показание рассчитывается по шагам из Примера 1**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Для показания на каждом метре: **q_t, R_f, I_c, грунт, σ'_v, q_{c1Ncs}, CSR, CRR, FS** (два метода) и заключение.

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

z (m)	q_t (MPa)	R_f %	I_c	Грунт	σ'_v	q_{c1Ncs} (BI)	CSR (BI)	FS (BI)	$(q_{c1N})cs$ (RW)	FS (RW)	Заключение (BI / RW)
1	6.58	2.27	2.04	песок	19.4	–	–	–	–	–	*выше УГВ*
2	4.02	0.93	2.04	песок	36.0	108.4	0.238	0.691	90.1	0.626	Разжижается / Разжижается
3	4.46	0.87	2.02	песок	43.9	107.1	0.283	0.569	88.8	0.514	Разжижается / Разжижается
4	**4.96**	**0.93**	**2.03**	**песок**	**52.1**	**110.0**	**0.313**	**0.523**	**91.7**	**0.486**	**Разжижается / Разжижается**
5	5.12	0.95	2.05	песок	60.3	109.7	0.332	0.483	90.2	0.445	Разжижается / Разжижается
6	5.57	0.84	2.02	песок	68.6	107.2	0.346	0.445	88.4	0.415	Разжижается / Разжижается
7	1.92	2.43	2.66	смесь с пылеватым грунтом	76.4	–	–	–	–	–	*подобный глине*
8	2.03	2.40	2.68	смесь с пылеватым грунтом	84.3	–	–	–	–	–	*подобный глине*
9	2.03	2.55	2.73	смесь с пылеватым грунтом	92.3	–	–	–	–	–	*подобный глине*
10	17.69	1.00	1.74	песок	102.5	173.9	0.364	1.579	184.9	1.808	Безопасно / Безопасно
11	20.25	1.03	1.72	песок	112.8	192.7	0.361	3.455	199.1	2.187	Безопасно / Безопасно
12	20.21	0.88	1.69	песок	123.3	186.2	0.357	2.527	186.1	1.821	Безопасно / Безопасно
13	19.88	0.95	1.73	песок	133.8	177.5	0.353	1.758	180.8	1.689	Безопасно / Безопасно
14	1.17	3.85	3.28	глина	142.9	–	–	–	–	–	*подобный глине*
15	1.21	3.91	3.30	глина	150.6	–	–	–	–	–	*подобный глине*
16	1.22	3.91	3.33	глина	158.3	–	–	–	–	–	*подобный глине*
17	24.54	0.77	1.63	песок	167.3	206.1	0.341	6.842	188.5	1.951	Безопасно / Безопасно
18	26.33	0.71	1.60	песок	177.7	218.9	0.335	9.233	196.2	2.212	Безопасно / Безопасно
19	26.27	0.79	1.64	песок	188.3	213.7	0.330	9.199	189.9	2.069	Безопасно / Безопасно
20	25.71	0.76	1.65	песок	198.9	203.9	0.324	5.959	181.1	1.868	Безопасно / Безопасно

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

1 От показания к зоне: каждое показание представляет участок вплоть до соседних средних точек (не более 0.25 m); одинаковые результаты объединяются

Метод	Зона разжижения (m)	Толщина (m)	На пределе (m)	Наименьший FS	z (m)
Boulanger–Idriss	1.83 – 6.03	**4.20**	0.00	0.445	6.00
Robertson–Wride	1.83 – 6.03	**4.20**	0.00	0.415	6.00

Оба метода считают разжижающимся интервал **1.83 – 6.03 m** (4.20 m) в CPT-1; наименьший FS в обоих случаях на глубине 6.0 m. Строка 4.0 m — это Пример 1, решаемый вручную. Слой, подобный пылеватому грунту, между 6 – 9 m ($I_c > 2.6$) считается подобным глине и исключается в строках 7 – 9 m.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Скважины	**CPT-1 (УГВ 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m); одинаковые параметры**
Сравнение	**каждый метод со своим пакетом**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Минимальный FS каждой скважины, толщины **разжижающихся** и **пограничных** слоёв.

Решение

РЕШЕНИЕ

Скважина	УГВ (m)	Метод	Наименьший FS	z (m)	Зоны разжижения (m)	Толщина (m)	На пределе (m)
CPT-1	1.80	Boulanger–Idriss	**0.445**	6.00	1.83 – 6.03	4.20	0.00
		Robertson–Wride	**0.415**	6.00	1.83 – 6.03	4.20	0.00
CPT-2	2.40	Boulanger–Idriss	**0.605**	7.10	2.62 – 7.53	4.90	0.85
		Robertson–Wride	**0.640**	7.10	2.67 – 7.53	4.85	0.25
CPT-3	3.10	Boulanger–Idriss	**0.655**	8.50	5.03 – 10.03	5.00	0.00
		Robertson–Wride	**0.683**	8.50	5.03 – 10.03	5.00	0.00

В каждой скважине оба метода дают разжижение; толщины разжижающихся слоёв почти одинаковы (4.2 – 5.0 m). Различия — в граничных толщинах (CPT-2: 0.85 / 0.25 m) и в наименьшем FS. Наименьший FS **чувствителен к шумам**; толщина — более устойчивая величина.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Условие

ПРИМЕР

Дано

Базовый случай	**CPT-1:** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, **расчётный УГВ = УГВ при испытании (**1.80 **m)**
Переменные	**только один за раз:** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8;** C_{FC} ∓ 0.29**;** a_{max} **0.25g / 0.45g; расчётный УГВ 1.0 m**

ТРЕБУЕТСЯ ОПРЕДЕЛИТЬ

Наименьший FS и **толщина разжижаемого слоя** для CPT-1 (два метода); проверка вручную FC для C_{FC}.

Решение (1/2)

РЕШЕНИЕ

Состояние	Изменение	FS_{min} (BI)	z (m)	Толщина (m)	FS_{min} (RW)	z (m)	Толщина (m)
Подошва	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ уменьшается	2.4	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ возрастает	2.8	0.318	8.80	**7.20**	0.391	8.45	**7.20**
C_{FC}	−0.29	0.318	6.00	**4.20**	–	–	–
C_{FC}	+0.29	0.579	6.00	**4.20**	–	–	–
a_{max} уменьшается	0.25g	0.624	6.00	**4.20**	0.582	6.00	**4.20**
a_{max} увеличивается	0.45g	0.346	6.00	**4.20**	0.323	6.00	**4.20**
Расчётный УГВ повышается	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8 — наиболее влиятельный входной параметр: учитывается пылеватый песок на глубине 6 – 9 m (I_c 2.6 – 2.8), толщина разжижающегося слоя увеличивается с 4.2 до **7.2 m**, FS_{min} ≈ 0.32. C_{FC} присутствует только в B&I и изменяет FS в пределах от 0.32 до 0.58; a_{max} и расчётный УГВ толщину сильно не меняют.

Решение (2/2)

РЕШЕНИЕ

1 Влияние C_{FC} на содержание пылевато-глинистых частиц при показании из примера (I_c = 2.031)

$$C_{FC} = -0.29: \; FC = 80(2.0312 - 0.29) - 137 = \mathbf{2.30\ \%}$$

$$C_{FC} = 0: \; FC = 80(2.0312) - 137 = \mathbf{25.50\ \%}$$

$$C_{FC} = +0.29: \; FC = 80(2.0312 + 0.29) - 137 = \mathbf{48.70\ \%}$$

FC 2.3 → 25.5 → 48.7 % (неопределённость I_c сильно изменяет FC): поправка на содержание пылевато-глинистых частиц Δq_{c1N} поэтому неопределённа, а для **C_{FC}, специфичного для конкретной площадки**, требуются лабораторные значения содержания пылевато-глинистых частиц рядом со скважиной.

Проверить решение в GeoTerva ↗

Резюме

Главное

Запись конуса → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, R_f, γ (по CPT), σ'_v, $\mathbf{I_c}$ (итерации по n); $I_c > 2.6$ — глиноподобный грунт, исключается

Два набора соотношений: Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ) и Robertson–Wride (множитель K_c, кубическая зависимость для CRR); компоненты не смешиваются

Пример (4.00 m): σ'_v 52.05 kPa, I_c 2.031; B&I q_{c1Ncs} 109.99, CRR 0.1636, CSR 0.3127 → **FS 0.523**; R&W $(q_{c1N})cs$ 91.73, $CRR_{7.5}$ 0.1518, CSR 0.3120 → **FS 0.486**

Зона: объединение до соседних средних точек (≤ 0.25 m), интервалы тоньше h_{min} = 0.10 m объединяются; CPT-1: разжижаемый интервал 1.83 – 6.03 m (4.20 m)

Чувствительность: существенно влияют $I_{c,lim}$ и C_{FC}; наименьший FS чувствителен к шуму, толщина устойчивее; результаты относятся только к инициированию, последствия (осадка, боковое растекание) рассчитываются отдельно

Список литературы

Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report UCD/CGM-14/01, University of California, Davis.

Robertson, P.K., Wride, C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 35(3), 442–459.

Youd, T.L., Idriss, I.M. et al. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127(10), 817–833.

Robertson, P.K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 151–158.

Robertson, P.K., Cabal, K.L. (2010). Estimating soil unit weight from CPT. Proc. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach.

Idriss, I.M. (1999). An update to the Seed–Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. Proc. TRB Workshop, FHWA-RD-99-165.

Liao, S.S.C., Whitman, R.V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. J. Geotech. Eng., ASCE, 112(3).

Hynes, M.E., Olsen, R.S. (1999). Influence of confining stress on liquefaction resistance. Proc. International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, Balkema.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. EERI Monograph MNO-12.

ПРИМЕЧАНИЕ

Все числовые примеры получены с помощью собственного расчётного ядра модуля; модуль даёт те же значения. Начальный проект модуля — эти три скважины (a_{max} = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

Геотехнические расчёты онлайн

От теории к практике

Данные собственных зондирований CPT (q_c, f_s, u_2) вставляются или считываются из файла; вводятся УГВ и параметры землетрясения. Модуль одновременно выдаёт для каждого отсчёта I_c, CSR, CRR, FS, зоны, толщину разжижающегося слоя, результаты двух методов, разрез с цветовыми зонами, пошаговое решение и отчёт.

Открыть модуль →

Страница теории →

Открыть на телефоне
Для пробных модулей регистрация не требуется.