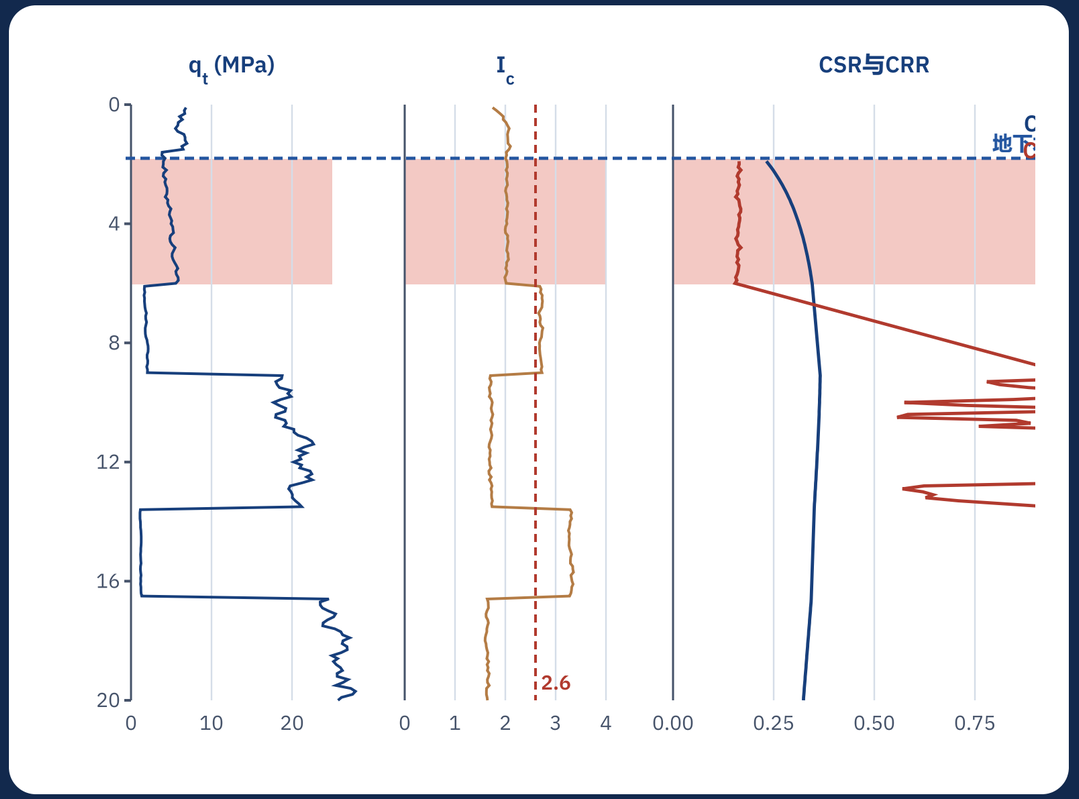
岩土工程讲义 · 砂土液化

基于CPT的液化触发判别

讲义：基于CPT的砂土液化触发判别；一个锥尖读数采用两种方法(Boulanger–Idriss, Robertson–Wride)从头至尾手算求解，其余读数以表格给出。

锥探数据 · Ic　两种方法　CSR · CRR · FS　分区　可手算求解



引言

本讲内容

由锥探记录(q_c, f_s, u_2)确定**修正锥尖阻力q_t**、**摩阻比R_f**和**土行为类型指数I_c**

由锥探数据估算土类、重度和细粒含量（无需输入土层表）

两套完整方法：Boulanger–Idriss (2014)与Robertson–Wride (1998, NCEER)；每套方法的归一化、CRR曲线、MSF和K_σ自身相互协调一致

CSR、**FS = CRR/CSR**、筛除的读数、**分区**和液化土层厚度

用两种方法手算钻孔中的单个读数(4.00 m)；其余读数按相同步骤列于表中

讲授流程

每个主题按**三个步骤**讲解：

1 · **理论**：公式及其依据

2 · **题目**：已知条件与所求

3 · **解答**：逐步计算，代入数值

算例：CPT-1（地下水位1.80 m；深度20 m，间距5 cm）；a_{max} = 0.35 g，M = 7.5，净面积比a = 0.80，$FS_{required}$ = 1.20。

q_t、R_f与单位

理论

由于**锥头**可提供几乎连续的记录（读数间隔1–5 cm），因此没有需要输入的土层表。

土的类型、重度和细粒含量由**静力触探数据**估算。

液化的后果——沉降、侧向扩展、承载力丧失——不在本版本范围之内。

修正后的锥尖阻力按关系式$q_t = q_c + (1 - a)\cdot u_2$计算；其中a为锥头的净面积比（0.65–0.85；常用值0.80）。

在u_2值远高于静水压力值的软黏土和粉土中，该修正意义重大，而在砂土中则始终较小；若未记录u_2，则取$q_t = q_c$。

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

由CPT确定γ；两种地下水位深度

理论

重度由每个读数处的CPT数据估算；**R_f**以%为单位，重度取值限制在1.5 γ_w与2.5 γ_w之间。

重度自地表起逐层积分；或者采用两个常数值：地下水位以上取γ，以下取γ_{sat}。

孔隙水压力自地下水位起按静水压力考虑；**C_N**和**I_c**采用试验时的地下水位，CSR和K_σ采用设计地下水位。

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

I_c与指数n

理论

土行为类型指数按关系式I_c = [(3.47 − log Q)² + (log F + 1.22)²]^0.5计算。

指数n在砂土中取0.5，在黏土中取1.0，并通过Robertson & Wride (1998)的迭代程序确定。

图中的土层柱状图基于该分类；厚度小于h_{min}的层段并入与其相邻的较长层段。

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

I_c范围	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
土类(Robertson 1990)	含砾–密实砂	砂土：洁净–粉质	砂土混合物	粉土混合物	黏土	有机土

应取哪一个读数?

理论

某一读数仅当其位于设计地下水位以下、不深于深度z_{max}且处于呈砂土性状的土中时，才予以评价。

I_c值大于$I_{c,lim}$（默认值2.6）的土被视为黏土类；这类土留待循环软化验算。

砂土型与黏土型性状之间的界限并不分明；建议分别取$I_{c,lim}$ = 2.4、2.6和2.8重复计算。

净锥尖阻力$q_t - \sigma_v$不为正的读数，无法定义土行为类型指数，该读数不予评价；被剔除的读数连同剔除理由保留在所有表格中。

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

理论

在Boulanger & Idriss (2014)的归一化中，指数取决于计算结果，因此C_N需迭代求得，且m关系式中的q_{c1Ncs}取值限制在21与254之间。

在关系式$FC = 80(I_C + C_{FC}) - 137$中，$C_{FC}$是$I_C$与细粒含量之间相关关系的拟合参数；取0对应一般相关关系，±0.29为该相关关系的一个标准差。

由于该相关关系的离散性较大，宜采用根据CPT测点附近钻孔所取试样的室内细粒含量确定的场地专用C_{FC}值，并应针对每一地质单元分别确定。

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

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

CRR、MSF和K_σ

理论

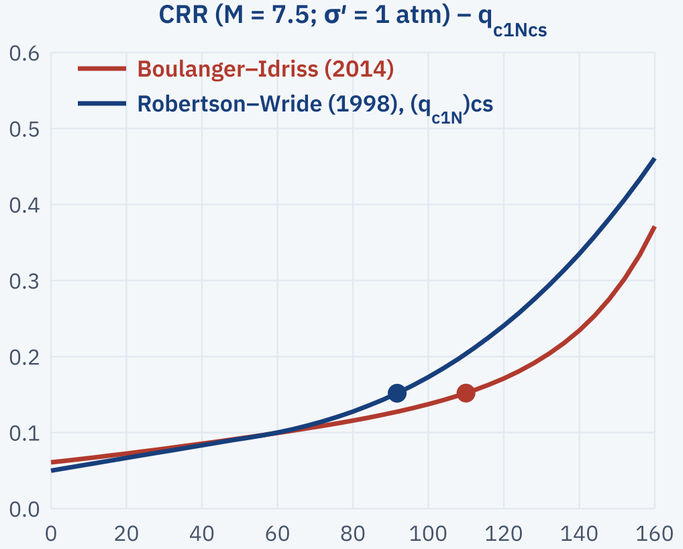
Boulanger & Idriss (2014)的抗力曲线为报告中给出的确定性曲线，基于案例数据的第16百分位值（常数2.80）。

CRR(M=7.5; σ′=1)曲线由q_{c1Ncs}值得到；当q_{c1Ncs}超过211时，由于达到C_σ的界限，取211。

K_σ关系式中的σ'_v是与设计地下水位对应的有效应力。

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

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



Kc、CRR和MSF

理论

修正锥尖阻力按$(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$计算；$K_c$取决于Ic，Ic ≤ 1.64时取1。

对于1.64 < Ic < 2.36且摩阻比低于0.5%的洁净砂，取$K_c = 1$，不进行细粒修正。

纯净砂土曲线在$(q_{c1N})_{cs} = 160$处终止；模块沿用同一三次关系式直至250 ($CRR_{7.5} = 1.5$)，并标出该读数。

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

$$CRR_{7.5} = 0.833 \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} + 0.05 \;(< 50) \quad 93 \left(\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000}\right)^3 + 0.08 \;(50 \ldots 160) \qquad MSF = \frac{102.24}{M^{2.56}} \quad K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{f-1}$$

CSR与两种方法的r_d关系式

理论

循环应力比表示为CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d，其中σ_v和σ'_v是按设计地下水位计算的应力。

对于深度折减系数r_d，B&I;法采用Idriss关系式，R&W;法采用Liao–Whitman关系式；震级与上覆压力修正施加于抗力，而非需求。

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

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

FS = CRR / CSR

理论

每个读数代表其与上下相邻读数之间距离各一半的范围；该代表距离在每个方向上不超过0.25 m，或不超过通常读数间距的3/4（以较大者为准）。

记录中的空缺不向结果外推；该段保持为“无读数”，即未评价的序列，并在警告中列出。

具有相同结果的连续读数构成一个序列；厚度小于h_{min}（默认0.10 m）的单一结果序列取其较长相邻序列的结果，结果相同的相邻序列构成分区。

每种方法是一个整体；应力折减系数、归一化、纯净砂修正、震级和上覆压力系数以及抗力曲线，均由同一案例数据库共同推导得出。

两种方法的原始文献均要求不得将一种方法的各分量与另一种方法的分量混用；在模块中，选择方法时这些分量会一并改变。

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \text{FS} < 1：\text{液化} \qquad 1 \le FS < FS_{req}\ (1.20)：\text{临界}$$

题目

算例

已知条件

读数	$q_c = 4.956$ MPa，$f_s = 46.2$ kPa，$u_2 = 21.6$ kPa；净面积比$a = 0.80$
现场	地下水位$z_w = 1.80$ m（设计地下水位相同）；重度取自CPT（0至4 m共80个读数）
地震	$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; $C_{FC} = 0$; Robertson–Wride $f = 0.7$; $FS_{req} = 1.20$

求

q_t, σ'_v, I_c；按Boulanger–Idriss法和Robertson–Wride法求q_{c1Ncs}, CRR, CSR, FS。

解答 (1/8)

解答

1 修正后的锥尖阻力与摩阻比

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

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

2 重度（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 应力

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

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

有效竖向应力**σ'_V = 52.05 kPa**。

解答 (2/8)

解答

4 净桩端阻力与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 指数n的迭代(Robertson–Wride)：首先取n = 1.0（黏土试算）

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

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

解答 (3/8)

解答

6 试取n = 0.5（砂土）

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

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

I_c = 2.031 ≤ 2.6：不属黏土类，该读数纳入评价。

解答 (4/8)

解答

7 细粒含量(C_{FC} = 0)

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

8 m和C_N相互关联：以q_{c1Ncs}迭代(x = q_t/P_a = 48.955, σ'_v = 52.05)

迭代	q_{c1Ncs}（输入）	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs}（输出）
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

经13次迭代收敛：**m = 0.4768, C_N = 1.3738, q_{c1N} = 67.252, Δq_{c1N} = 42.736 → q_{c1Ncs} = 109.988。**

解答 (5/8)

解答

9 基准抗力(M = 7.5; 1 atm)、MSF和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**.

解答 (6/8)

解答

10 地震作用下的需求(Idriss r_d)与安全系数

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

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

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

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

Boulanger–Idriss：**FS = 0.523 < 1**，触发砂土液化。

解答 (7/8)

解答

11 C_Q和q_{c1N}（n = 0.5，取值相同）

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

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

12 K_c（I_c = 2.031：1.64 < I_c < 2.36，但F = 0.945% ≥ 0.5：需进行细粒修正）

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

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

在Robertson–Wride方法中，细粒含量的影响为**乘数K_c**(1.343)；在Boulanger–Idriss方法中则**加上**Δq_{c1N}(+42.7)；$(q_{c1N})cs$ = 91.73，q_{c1Ncs} = 109.99。

解答 (8/8)

解答

13 抗力、地震作用下的需求（Liao–Whitman r_d；因$\sigma'_v < P_a$，故$K_\sigma = 1$）及FS

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

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

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

两套方法得出相同的结论：**Boulanger–Idriss FS = 0.523**，**Robertson–Wride FS = 0.486**；二者均< 1。两者之间的差异来自细粒含量修正和r_d。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

钻孔	**CPT-1：20 m，间隔5 cm，共400个读数；地下水位**1.80 m
方法	**Boulanger–Idriss法和Robertson–Wride法；每个读数按算例1中的步骤求解**

求

每米读数对应的q_t、R_f、I_c、**土类**、σ'_v、q_{c1Ncs}、**CSR**、**CRR**、**FS**（两种方法）及判定结果。

解答 (1/2)

解答

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

解答 (2/2)

解答

1 由读数到分区：每个读数代表至相邻读数中点为止的范围（最大0.25 m）；结果相同的分区合并

方法	可液化区(m)	厚度(m)	临界状态(m)	最小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

两种方法均将CPT-1中**1.83 – 6.03 m**的范围(4.20 m)判为液化层；两者的最小FS均出现在6.0 m处。4.0 m一行即为手算的算例1。6 – 9 m之间的类粉土层(I_c > 2.6)被视为类黏土，在7 – 9 m各行中被剔除。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

钻孔	**CPT-1（地下水位1.80 m），CPT-2（2.40 m），CPT-3（3.10 m）；参数相同**
对比	**各方法采用各自的整套系数**

求

各钻孔的**最小FS**、**液化**厚度和**临界**厚度。

解答

解答

钻孔	地下水位(m)	方法	最小FS	z (m)	液化区段(m)	厚度(m)	临界状态(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

在每个钻孔中，两种方法均判定会触发液化；液化层厚度几乎相同(4.2 – 5.0 m)。差异在于临界土层的厚度(CPT-2: 0.85 / 0.25 m)和最小FS。最小FS**对噪声敏感**；厚度是更稳定的数值。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

基准工况	**CPT-1：** $a_{max} = 0.35g$，$M = 7.5$，$I_{c,lim} = 2.6$，$C_{FC} = 0$，**设计地下水位与试验地下水位相同**(1.80 m)
变量	**每次仅改变其中一项：** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8；** C_{FC} ∓ 0.29；a_{max} **0.25g / 0.45g；设计地下水位 1.0 m**

求

CPT-1的**最小FS**和**液化土层厚度**（两种方法）；针对C_{FC}对FC进行手算验算。

解答 (1/2)

解答

状态	变化	FS_{min} (BI)	z (m)	厚度(m)	FS_{min} (RW)	z (m)	厚度(m)
底面	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$减小	2.4	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$增大	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}减小	0.25g	0.624	6.00	**4.20**	0.582	6.00	**4.20**
a_{max}增大	0.45g	0.346	6.00	**4.20**	0.323	6.00	**4.20**
设计地下水位上升	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8是影响最大的输入量：6 – 9 m之间的粉质砂土(I_C 2.6 – 2.8)被纳入计算，液化土层厚度由4.2 → **7.2 m**，FS_{min} ≈ 0.32。C_{FC}仅存在于B&I法中，并使FS在0.32 – 0.58之间变动；a_{max}和设计地下水位对厚度影响不大。

解答 (2/2)

解答

1 算例读数处(I_c = 2.031)C_{FC}对细粒含量的影响

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

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

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

FC 2.3 → 25.5 → 48.7 %（I_c的不确定性使FC变化很大）：因此细粒修正量Δq_{c1N}是不确定的，而**针对具体场地的C_{FC}**需要钻孔旁的室内细粒含量。

在GeoTerva中验算解答 ↗

小结

要点回顾

锥探记录 → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$，R_f，γ（由CPT得出），σ'_v，$\mathbf{I_c}$（n的迭代）；$I_c > 2.6$为类黏土，予以剔除

两套方法：Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ)和Robertson–Wride（乘以K_c，CRR为三次式）；两套方法的各分量不混用

算例(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**

分区：延伸至相邻中点(≤ 0.25 m)，小于h_{min} = 0.10 m的层段合并；CPT-1液化层1.83 – 6.03 m (4.20 m)

敏感性：$I_{c,lim}$与C_{FC}影响显著；最小FS对噪声敏感，厚度较为稳定；结果仅反映液化触发，其后果（沉降、侧向扩展）需另行计算

参考文献

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.

注

所有数值算例均由模块自身的计算引擎生成，模块给出相同的数值。模块的初始项目即为这三个钻孔(a_{max} = 0.35g, M = 7.5)。

GeoTerva

在线岩土工程计算

从理论到应用

粘贴自己的静力触探孔数据(q_c, f_s, u_2)或从文件读取；输入地下水位和地震参数。对于每一个读数，模块一并给出I_c、CSR、CRR、FS、分区、液化土层厚度、两种方法的结果、带色带的剖面、分步解答和报告。

打开模块→

理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。