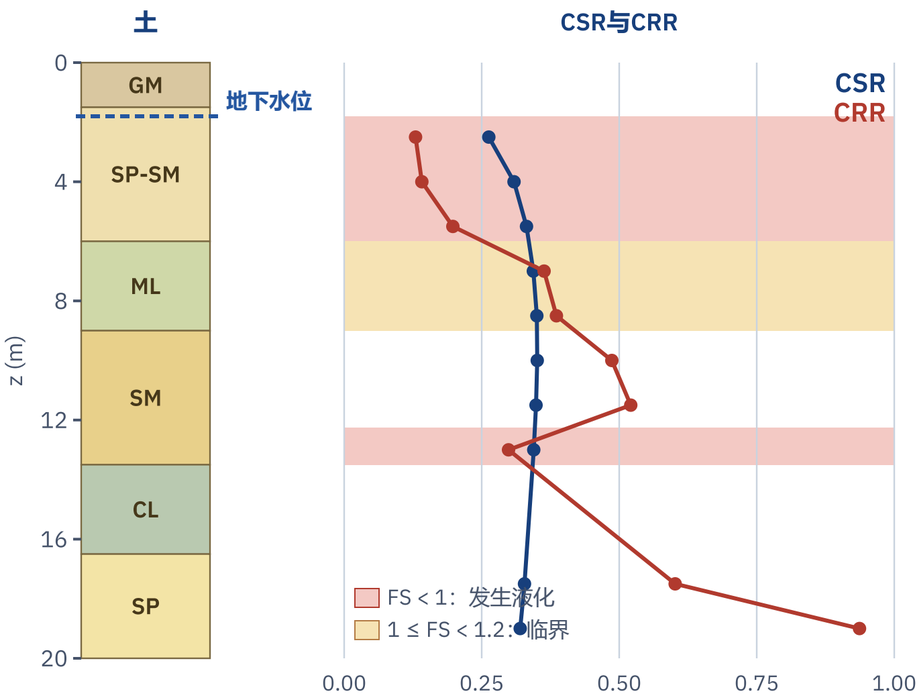
岩土工程讲义 · 砂土液化

基于SPT的砂土液化触发判别

讲义：基于SPT的砂土液化触发判别(Idriss–Boulanger)；对一个钻孔和一个试验点从头到尾手算，其余试验点以表格给出。

修正 | CSR · CRR | MSF · Kσ | FS与分区 | 可手算求解



引言

本讲内容

砂土液化的**基于应力的**评价：将地震作用下的需求**CSR**与土体抗力**CRR**相比较；**FS = CRR / CSR**

原始SPT锤击数N_{30}到$(N_1)_{60cs}$的各项修正：能量、杆长、上覆压力和细粒含量

CSR(r_d, σ_v/σ'_v)、CRR曲线、**震级修正**MSF以及**上覆应力修正系数**K_σ

了解哪些试验点因被**剔除**而不参与计算，以及分区和液化土层厚度如何确定

钻孔中**单个试验点的全过程手算**，其余各点按相同步骤列表计算

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：钻孔BH-1（地下水位1.80 m；0–1.5 m为填土，1.5–6 m为松散砂土…）；a_{max} = 0.35 g，M = 7.5，锤击能量比60%，$FS_{required}$ = 1.20。

评价哪种试验?

理论

一次试验仅当位于**地下水位以下**、深度不超过z_{max}（默认20 m）且处于**呈砂土性状**的土层中时，才予以评价

塑性指数PI ≥ PI_{lim}（默认值为7）的土属**黏土型**；若未给出PI，则以CL、CH、OL、OH或PT符号表示这一点

类黏土在循环荷载作用下可能**软化**，但不会发生此处所指意义上的液化：交由循环软化验算处理

未参与评价的试验**连同其原因**保留在所有表格中。砂土液化的后果（沉降、侧向扩展、承载力丧失）不在本版本范围之内

总应力、孔隙水压力与有效竖向应力

理论

地下水位以上取γ；其下取**γ_{sat}**；逐层累加。孔隙水压力自地下水位起为**静水压力**（z_w为钻孔处的地下水位深度）

有效应力σ'_v既用于CSR，也用于上覆压力修正

$$\sigma_v = \sum \gamma_i \, h_i \qquad u = \gamma_w \, (z - z_w) \qquad \sigma'_v = \sigma_v - u$$

仅对地下水位以下的试验计算有效应力：地下水位以上u = 0，该试验被剔除。

由N_{30}到N_{60}

理论

原始锤击数N_{30}（最后30 cm）换算为**60%能量**的标准杆：C_E = ER/60（锤）、C_B（钻孔直径）、C_S（取样管）

C_R取决于钻杆长度：钻杆长度等于z加上地面以上的长度（此处为1.5 m）

$$N_{60} = N_{30} \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_S \cdot C_R$$

杆长(m)	< 3	3 – 4	4 – 6	6 – 10	≥ 10
C_R	0.75	0.80	0.85	0.95	1.00

$N_{60} \rightarrow (N_1)_{60} \rightarrow (N_1)_{60cs}$

理论

C_N把测量值折算到1 atm (P_a = 101.3 kPa)有效应力下；由于指数m取决于结果本身，故需**迭代**求得；$C_N \le 1.7$

细粒会提高类砂土的抗力：利用FC（百分数；若已实测则取该试验自身的值，否则取该土层的值）换算为洁净砂等效值

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \le 1.7 \qquad m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} \qquad (N_1)_{60} = C_N N_{60}$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left[1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right] \qquad (N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

FC (%)	0	5	10	15	20	25	30	35	50
$\Delta(N_1)_{60}$	0.00	0.00	1.15	3.26	4.48	5.07	5.36	5.51	5.61

地震作用下的需求：CSR与r_d

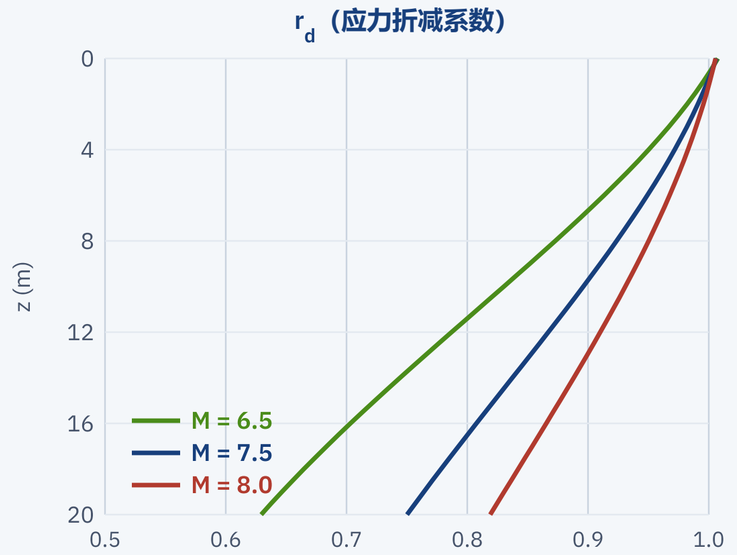
理论

CSR为地震作用于土体的循环剪应力与有效应力之比；0.65代表平均应力，σ_v/σ'_v体现深度的影响

r_d（应力折减系数）随深度和震级增大而减小；地表处为1

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d \qquad r_d = \exp[\alpha(z) + \beta(z)M]$$

$$\alpha = -1.012 - 1.126\sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \qquad \beta = 0.106 + 0.118\sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$



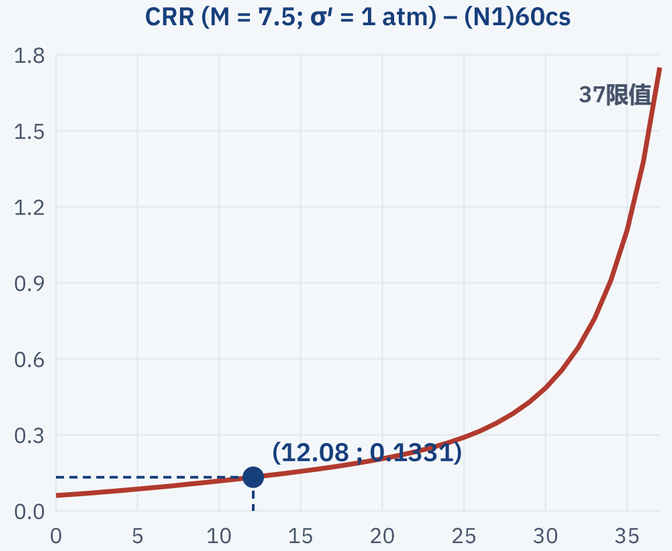
土的抗力：CRR曲线

理论

$CRR_{M=7.5;\ \sigma'=1}$仅取决于$(N_1)_{60cs}$（Idriss–Boulanger曲线）；适用于M = 7.5和σ'_V = 1 atm

曲线使用至$(N_1)_{60cs}$ = 37为止；更密实的试验点按此界限取值，并给出警告

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{n}{14.1} + \left(\frac{n}{126}\right)^2 - \left(\frac{n}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{n}{25.4}\right)^4 - 2.8\right] \qquad n = (N_1)_{60cs}$$



MSF与K_σ

理论

MSF震级调整：CRR对应于M = 7.5；对于其他震级，则反映了循环次数的差异。M < 7.5时，MSF > 1

K_σ上覆压力系数：CRR对应于1 atm；随着σ'_v增大，抗力比减小。$K_\sigma \le 1.1$

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1)\left(8.64\,e^{-M/4} - 1.325\right) \qquad MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31.5}\right)^2 \le 2.2$$

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\frac{\sigma'_v}{P_a} \le 1.1 \qquad C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \le 0.3$$

FS = CRR / CSR；区域与厚度

理论

CRR = $CRR_{7.5;1}$ · MSF · K_σ；**FS = CRR / CSR**。FS < 1：**触发砂土液化**；1 ≤ FS < $FS_{required}$ (1.20)：**临界状态**；所需值为取自项目技术规格书的输入参数

每个被评价的试验代表其自身所在的土层：范围延伸至与上、下相邻试验之间的**中点**；在土层界面和地下水位处，该范围终止

相邻区间结果相同时合并为一个**分区**；钻孔的**液化层厚度**为FS < 1各分区之和

$$CRR = CRR_{7.5,1} \cdot MSF \cdot K_\sigma \qquad FS = \frac{CRR}{CSR}$$

题目

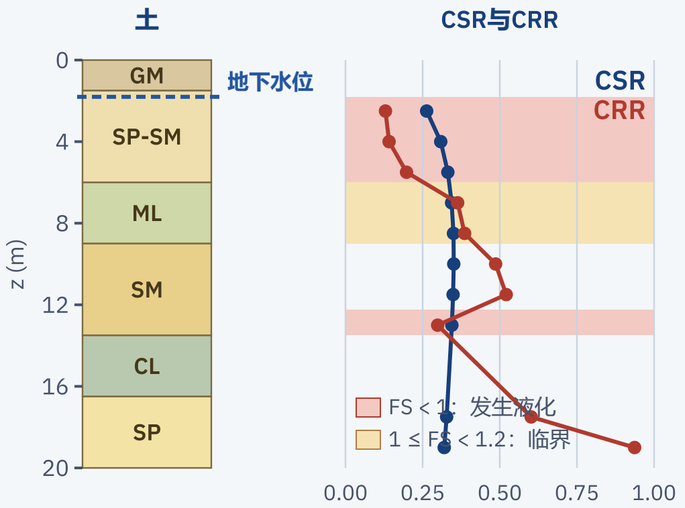
算例

已知条件

钻孔BH-1	**地下水位**$z_w = 1.80$ **m；0–1.5 m填土(GM)：**$\gamma = 18.5$**；1.5–6 m松散砂土(SP-SM)：**$\gamma = 18.0$**，**$\gamma_{sat} = 19.5$ **kN/m³，FC = 8 %**
试验	$z = 4.0$ **m处，**$N_{30} = 10$ **（地下水位以下）**
地震与设备	$a_{max} = 0.35g$**，**$M = 7.5$**；ER = 60% (**$C_E = C_B = C_S = 1$**)，杆长 =** $z + 1.5$ **m；**$FS_{req} = 1.20$

求

各应力、N_{60}、$(N_1)_{60cs}$（迭代求得）、CSR、CRR和FS。



解答 (1/5)

解答

1 总竖向应力（逐层计算；地下水位1.80 m）

$$\sigma_v = 18.5(1.5) + 18.0(1.80 - 1.5) + 19.5(4.0 - 1.80) = 27.75 + 5.40 + 42.90 = \mathbf{76.05}\ \text{kPa}$$

2 孔隙水压力和有效应力

$$u = \gamma_w (z - z_w) = 9.81(4.0 - 1.80) = \mathbf{21.58}\ \text{kPa}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - u = 76.05 - 21.58 = \mathbf{54.47}\ \text{kPa}$$

试验点位于地下水位以下**2.20 m**处：σ_V = 76.05，u = 21.58，**σ'_V = 54.47 kPa**。该点即钻孔中最小FS所在之点（见题目页面中的图）。

解答 (2/5)

解答

3 杆长修正及N_{60}

$$L = z + 1.5 = 5.5\ \text{m} \Rightarrow C_R = 0.85 \qquad N_{60} = 10(1)(1)(1)(0.85) = \mathbf{8.50}$$

4 细粒含量增加

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp[1.63 + 9.7/8.01 - (15.7/8.01)^2] = \exp[-1.0008] = \mathbf{0.3676}$$

5 上覆压力修正：由于C_N取决于$(N_1)_{60cs}$，需迭代求解(σ'_v = 54.47 kPa)

迭代	n（输入）	m	C_N	$(N_1)_{60} = C_N N_{60}$	$(N_1)_{60cs} = + \Delta$
1	8.5000	0.5601	1.4158	12.0339	12.4015
2	12.4015	0.5135	1.3754	11.6912	12.0587
3	12.0587	0.5173	1.3786	11.7185	12.0861
…	…	…	…	…	…
8	12.0840	0.5170	1.3784	11.7165	12.0840

迭代8次后收敛：**C_N = 1.3784**，$(N_1)_{60}$ = 11.716，**$(N_1)_{60cs}$ = 12.08。**

解答 (3/5)

解答

6 应力折减系数r_d (z = 4.0 m, M = 7.5)

$$\alpha = -1.012 - 1.126\sin\left(\frac{4}{11.73} + 5.133\right) = -0.1971$$

$$\beta = 0.106 + 0.118\sin\left(\frac{4}{11.28} + 5.142\right) = 0.0225$$

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

7 循环应力比

$$CSR = 0.65\,\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\,a_{max}\,r_d = 0.65\left(\frac{76.05}{54.47}\right)(0.35)(0.9718) = \mathbf{0.3087}$$

地震在该深度处产生的循环剪应力相当于有效应力的百分之**30.9**(CSR = 0.3087)。

解答 (4/5)

解答

8 基准抗力，M = 7.5且σ′ = 1 atm时（$(N_1)_{60cs} = 12.08$）

$$CRR_{7.5,1} = \exp\left[\frac{12.08}{14.1} + \left(\frac{12.08}{126}\right)^2 - \left(\frac{12.08}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{12.08}{25.4}\right)^4 - 2.8\right]$$

$$CRR_{7.5,1} = \exp[-2.0168] = \mathbf{0.1331}$$

9 震级与上覆土压力系数

$$MSF_{max} = 1.09 + (12.08/31.5)^2 = 1.2372$$

$$MSF = 1 + (1.2372 - 1)(8.64\,e^{-7.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0000}$$

$$C_\sigma = 1/(18.9 - 2.55\sqrt{12.08}) = 0.0996 \qquad K_\sigma = 1 - 0.0996\ln(54.47/101.325) = \mathbf{1.0619}$$

$CRR_{7.5;1}$ = **0.1331**；MSF = **1.0000**；K_σ = **1.0619**：这三个数的乘积即为CRR（见下一页）。

解答 (5/5)

解答

10 抗力与安全系数

$$CRR = CRR_{7.5,1} \cdot MSF \cdot K_\sigma = 0.1331(1.0000)(1.0619) = \mathbf{0.1413}$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0.1413}{0.3087} = \mathbf{0.458}$$

FS = 0.458 < 1：该试验点**触发**液化。该试验点代表3.25 – 4.75 m区间（即上方2.5 m处试验点与下方5.5 m处试验点的中点）。每个试验点均重复同样的十个步骤。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

钻孔BH-1	**13个SPT测点：** $z = 1.0$ **–** 19.0 **m；地下水位** 1.80 **m；** $z_{max} = 20$ **m；** $PI_{lim} = 7$
土层	**GM (0–1.5), SP-SM (1.5–6), ML** $PI = 5$ **(6–9), SM (9–13.5), CL** $PI = 18$ **(13.5–16.5), SP (16.5–20)**

求

每项试验的**纳入评价/不纳入评价**判定及其依据。

解答

解答

z (m)	N_{30}	土	PI	地下水位?	黏土类?	判定
1.0	9	GM	–	**之上**	–	**不予评价**：位于地下水位以上
2.5	7	SP-SM	–	以下	否	进行评定
4.0	10	SP-SM	–	以下	否	进行评定
5.5	16	SP-SM	–	以下	否	进行评定
7.0	21	ML	5	以下	否	进行评定
8.5	22	ML	5	以下	否	进行评定
10.0	27	SM	–	以下	否	进行评定
11.5	29	SM	–	以下	否	进行评定
13.0	25	SM	–	以下	否	进行评定
14.5	13	CL	18	以下	是	**不予评价**：黏土类土(PI ≥ 7)
16.0	15	CL	18	以下	是	**不予评价**：黏土类土(PI ≥ 7)
17.5	40	SP	–	以下	否	进行评定
19.0	44	SP	–	以下	否	进行评定

13次试验中**有3次被剔除**：1.0 m（位于地下水位以上）以及14.5 m和16.0 m(CL, PI = 18 ≥ 7)。ML土层(PI = 5 < 7)不视为类黏土，7.0 m和8.5 m处的试验**予以评价**(FC = 62 %)。被剔除的试验仍列于各表中。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

钻孔	**算例1中的BH-1及参数；十个步骤在每项试验中均相同**
分区规则	**每个试验点在其所在土层内延伸至与相邻试验点的中点；在土层界面和地下水位处终止**

求

全部试验的汇总表；**液化区段**、**液化层厚度**和最小FS。

解答 (1/2)

解答

z (m)	N_{30}	土	FC %	σ_v	σ'_v	N_{60}	C_N	$(N_1)_{60cs}$	CSR	CRR	FS	状态
1.0	9	GM	20	–	–	6.75	1.700	15.95	–	–	–	*地下水位以上*
2.5	7	SP-SM	8	46.8	39.9	5.95	1.652	10.19	0.263	0.130	0.493	液化
4.0	**10**	**SP-SM**	**8**	**76.1**	**54.5**	**8.50**	**1.378**	**12.08**	**0.309**	**0.141**	**0.458**	**发生液化**
5.5	16	SP-SM	8	105.3	69.0	15.20	1.191	18.46	0.332	0.198	0.596	液化
7.0	21	ML	62	134.1	83.0	19.95	1.079	27.13	0.344	0.363	1.056	临界
8.5	22	ML	62	162.6	96.8	22.00	1.017	27.98	0.350	0.386	1.102	临界
10.0	27	SM	18	191.9	111.4	27.00	0.966	30.18	0.351	0.487	1.386	安全
11.5	29	SM	18	221.6	126.4	29.00	0.924	30.89	0.349	0.521	1.494	安全
13.0	25	SM	18	251.2	141.4	25.00	0.878	26.03	0.345	0.299	0.867	液化
14.5	13	CL	88	–	–	13.00	0.816	16.12	–	–	–	*类黏土(PI ≥ 7)*
16.0	15	CL	88	–	–	15.00	0.788	17.34	–	–	–	*类黏土(PI ≥ 7)*
17.5	40	SP	4	338.7	184.6	40.00	0.812	32.50	0.328	0.602	1.835	安全
19.0	44	SP	4	369.4	200.7	44.00	0.799	35.15	0.320	0.937	2.928	安全

最小FS = 0.458(z = 4.0 m)。液化区：**1.80 – 6.00 m**和**12.25 – 13.50 m**；临界状态区：6.00 – 9.00 m。液化土层厚度为5.45 m。4.0 m一行即为手算的算例1。

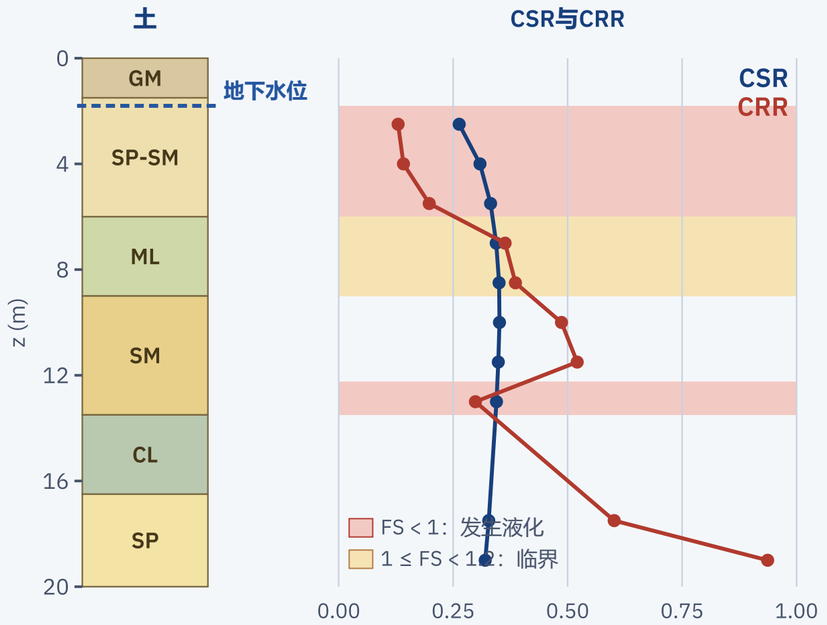
解答 (2/2)

解答

1 每项试验代表各自的深度区间；结果相同的相邻区间合并

区域	范围(m)	厚度(m)	试验	FS范围
可液化层1	1.80 – 6.00	4.20	2.5; 4.0; 5.5 m	0.458 – 0.596
临界	6.00 – 9.00	3.00	7.0; 8.5 m	1,056 – 1,102
可液化层2	12.25 – 13.50	1.25	13.0 m	0.867
液化合计		**5.45**		

算例：4.0 m处的试验代表3.25 – 4.75 m；2.5 m处的试验涵盖1.80 – 3.25 m（止于地下水位），5.5 m处的试验涵盖4.75 – 6.00 m（止于土层界面）：合计**4.20 m**。该钻孔的液化土层厚度为5.45 m。



在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

基准工况	**BH-1：$a_{max} = 0.35g$，$M = 7.5$，地下水位 1.80 m，ER = 60%**
变量	**每次只改变一项：$a_{max} = 0.25g$ / $0.45g$；$M = 6.5$ / 8.0；地下水位3.0 m / 1.0 m；ER 45% / 80%**

求

BH-1的**最小FS**和**液化层厚度**；4.0 m深试验点处MSF的手算验算。

解答 (1/2)

解答

状态	变化	最小FS	z (m)	液化土层厚度(m)	临界状态(m)
底面	a_{max} 0.35g；M 7.5；地下水位1.8；ER 60	**0.458**	4.0	5.45	3.00
a_{max}减小	0.25g	**0.641**	4.0	4.20	0.00
a_{max}增大	0.45g	**0.356**	4.0	8.45	3.25
震级减小	M 6.5	**0.510**	4.0	4.20	0.00
震级增大	M 8.0	**0.436**	4.0	8.45	3.25
地下水位下降	3.0 m	**0.517**	4.0	4.00	3.00
地下水位上升	1.0 m	**0.412**	2.5	5.75	3.00
能量减小	ER %45 (C_E 0.75)	**0.388**	4.0	15.20	0.00
能量增大	ER %80 (C_E 1.33)	**0.560**	4.0	4.20	0.00

a_{max}是影响最大的输入量：0.25g时液化层厚度为4.20 m，0.45g时为8.45 m。**锤击能量**的影响出乎意料地大：ER取45%时，N_{60}减小，液化层厚度增至15.20 m。因此**掌握**实测能量比十分重要。

解答 (2/2)

解答

1 M = 6.5与M = 8.0时的震级修正系数（$(N_1)_{60cs}$ = 12.08）

$$MSF_{6.5} = 1 + (1.2372 - 1)(8.64\,e^{-6.5/4} - 1.325) = \mathbf{1.0892}$$

$$MSF_{8.0} = 1 + (1.2372 - 1)(8.64\,e^{-8.0/4} - 1.325) = \mathbf{0.9631}$$

2 同一试验(4.0 m)处的FS

M	r_d	CSR	MSF	CRR	FS
6.5	0.9502	0.3018	1.0892	0.1539	**0.510**
7.5	0.9718	0.3087	1.0000	0.1413	**0.458**
8.0	0.9828	0.3122	0.9631	0.1361	**0.436**

震级较小意味着循环次数较少：MSF增大，FS 0.458 → **0.510**；M = 8.0时，FS为0.436。r_d和MSF均与震级有关；二者的影响方向相同。

在GeoTerva中验算解答 ↗

题目

算例

已知条件

钻孔	**BH-1（地下水位1.80 m），BH-2 (2.40 m), BH-3 (3.10 m)；参数相同**
剖面	**BH-1 $x = 0$, BH-2 $x = 32$, BH-3 $x = 70$ m**

求

各钻孔的**最小FS**，以及**液化**厚度和**临界**厚度；项目汇总。

解答

解答

钻孔	地下水位(m)	试验	已剔除	最小FS	z (m)	液化区段(m)	厚度(m)	临界状态(m)
BH-1	1.80	13	3	**0.458**	4.0	1.80–6.00; 12.25–13.50	5.45	3.00
BH-2	2.40	13	3	**0.697**	3.0	2.40–5.25	2.85	3.50
BH-3	3.10	13	6	**0.841**	6.0	5.00–8.25	3.25	1.75

三个钻孔全部触发液化。最小FS = 0.458（BH-1，4.0 m）；液化土层最厚处位于BH-1（5.45 m）。39次试验中，27次纳入评价，12次被剔除（位于地下水位以上或属类黏土）。

若设有剖面线，色带在钻孔之间按线性插值；灰色区域为未参与评价的地层。

在GeoTerva中验算解答 ↗

小结

要点回顾

FS = CRR / CSR; CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d; CRR = $CRR_{7.5;1} \cdot MSF \cdot K_\sigma$

N_{60} = N_{30} C_E C_B C_S C_R；**$(N_1)_{60cs}$** = C_N N_{60} + Δ(FC)，其中C_N通过迭代求得

算例（BH-1，4.0 m）：σ'_v 54.47 kPa；N_{60} 8.50；C_N 1.378；$(N_1)_{60cs}$ 12.08；CSR 0.3087；CRR 0.1413 (MSF 1.000, K_σ 1.062) → **FS 0.458**

筛选：地下水位以上、z_{max}以下以及类黏土(PI ≥ 7)的试验不参与计算；**分区**：试验影响范围延伸至相邻试验点的中点

敏感性：a_{max}和实测锤击能量是对结果影响最大的输入量；液化的后果需另行计算

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.

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

Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2006). Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(11).

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

Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J. Soil Mech. Found. Div., 97(SM9).

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

在GeoTerva中输入钻孔、SPT结果、地下水位和地震参数；模块给出每个试验的各项修正、CSR、CRR、FS、分区、液化层厚度和彩色分带剖面，并附分步解答和报告。

打开模块→

理论页面 →

用手机打开

试用模块无需注册。