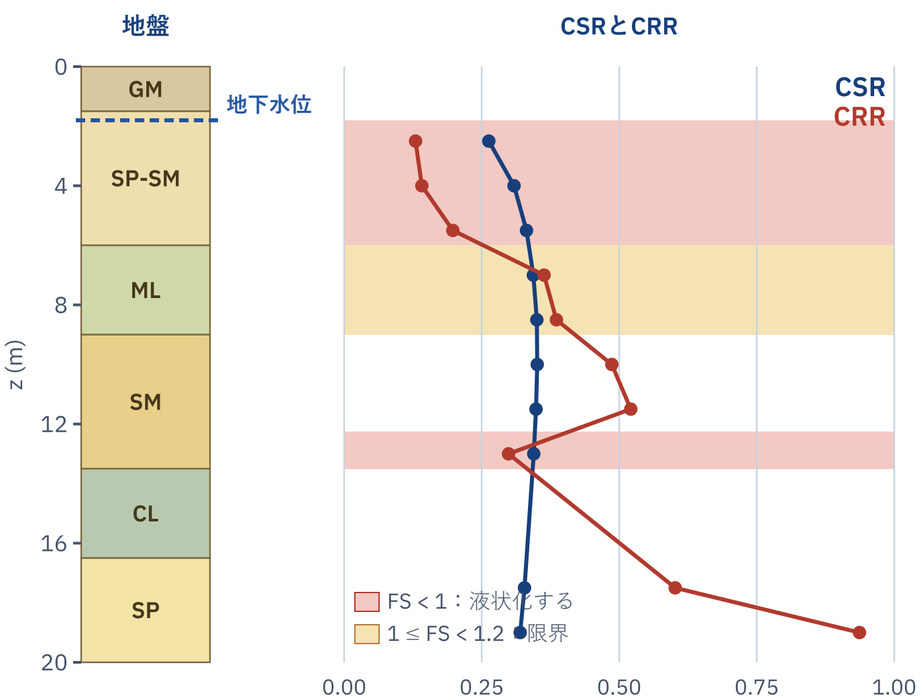
地盤工学の講義スライド・液状化

SPTによる液状化の発生判定

講義：SPTによる液状化の発生評価（Idriss–Boulanger）。1本のボーリングと1つの試験点を最初から最後まで手計算で解き、残りの点は表で処理する。

補正 | CSR・CRR | MSF・Kσ | FSと領域 | 手計算可能



はじめに

この講義で学ぶこと

液状化の**応力ベース**の評価：地震による要求**CSR**と地盤の抵抗**CRR**を比較する；**FS = CRR / CSR**

生のSPT打撃回数N_{30}から$(N_1)_{60cs}$に至る補正：エネルギー、ロッド長、上載圧、細粒分

CSR（r_d、σ_v / σ'_v）、CRR曲線、**マグニチュード換算**MSFおよび**上載荷重係数**K_σ

どの試験が**スクリーニング**によって計算から除外されるか；ゾーンと液状化層厚をどのように求めるか

1つのボーリングにおける**単一の試験点を最初から最後まで手計算**で、他は同じ手順で表にまとめる

講義の流れ

各項目は**3つの手順**で扱う：

1 · **理論**：式とその根拠

2 · **問題**：与条件と求めるもの

3 · **解答**：数値を用いて手順ごとに

例題：ボーリング孔BH-1（地下水位1.80 m；0〜1.5 mは盛土、1.5〜6 mは緩い砂…）；a_{max} = 0.35 g、M = 7.5、ハンマーエネルギー比60%、$FS_{required}$ = 1.20。

どの試験を評価するか

理論

ある試験は、**地下水位（地下水位）より下**にあり、深さz_{max}（既定値20 m）より深くなく、かつ**砂のように挙動する**地盤である場合に評価される

塑性指数 $PI \geq PI_{lim}$（既定値7）の地盤は**粘土質**である。PI が与えられていない場合は、CL、CH、OL、OH または PT の記号がこれを示す

粘土質の地盤は繰返し載荷を受けると**軟化**することがあるが、ここで用いる意味での液状化は生じない：繰返し軟化の照査に委ねる

評価されない試験も**理由とともに**すべての表に残る。液状化の影響（沈下、側方流動、支持力の低下）は本バージョンの対象外である

全応力、間隙水圧および有効鉛直応力

理論

γは地下水位より上、γ_{sat}はその下で、層ごとに積算する。間隙水圧は地下水位から下向きに**静水圧**である（z_wはボーリング孔の地下水位深さ）。

有効応力σ'_vはCSRと上載圧補正の両方で用いられる

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

有効応力を計算するのは地下水位以下の試験のみである：地下水位より上ではu = 0となり、その試験は除外する。

N_{30}からN_{60}へ

理論

原打撃回数N_{30}（最後の30 cm）を**60%エネルギー**の標準ロッドに換算する：C_E = ER/60（ハンマー）、C_B（ボーリング孔径）、C_S（サンプラー）

C_Rはロッド長さに依存する：ロッド長さ = z + 地表面より上の長さ（ここでは1.5 m）

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

ロッド長さ (m)	< 3	3 – 4	4 – 6	6 – 10	≥ 10
C_R	0.75	0.80	0.85	0.95	1.00

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

理論

C_Nは測定値を有効応力1 atm（P_a = 101.3 kPa）に換算する。指数mは結果自体に依存するため**反復計算**で求める。$C_N \leq 1.7$

細粒分は砂質土的な抵抗を増大させる：FC（百分率、測定されていれば試験自身の値、なければ層の値）を用いて清浄砂の等価値に換算する

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

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

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

地震による作用：CSRとr_d

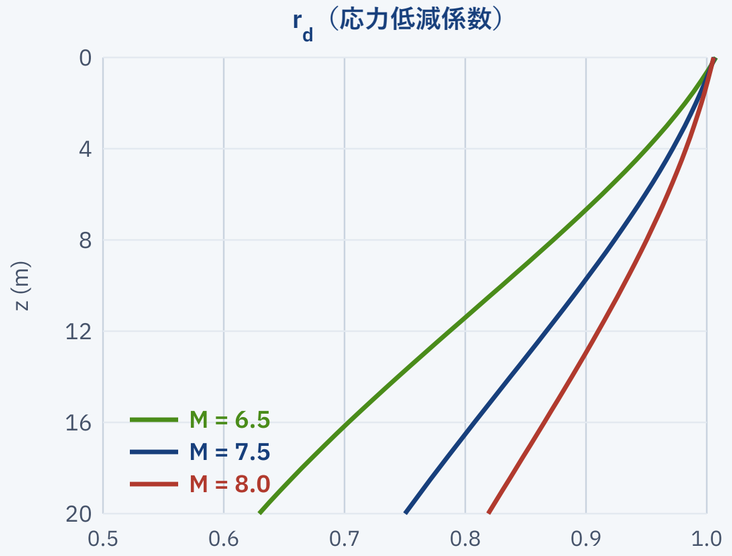
理論

CSRは地震が地盤に与える繰返しせん断応力の有効応力に対する比であり、0.65は平均応力を、σ_v / σ'_vは深さの影響を表す

r_d（応力低減係数）は深さとマグニチュードとともに減少する；地表では1である

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

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



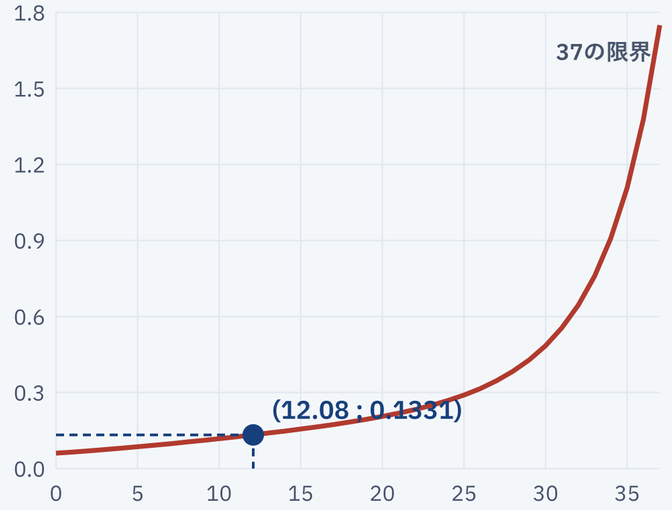
地盤の抵抗：CRR曲線

理論

CRR$_{M=7.5;\ \sigma'=1}$は$(N_1)_{60cs}$のみに依存する（Idriss–Boulanger曲線）。M = 7.5およびσ'_v = 1 atmに対して有効である。

曲線は$(N_1)_{60cs}$ = 37まで用いる；これより密な試験はこの限界で評価され、警告が表示される。

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



MSFとK_σ

理論

MSF マグニチュードスケーリング係数：CRRはM = 7.5に対する値であり、他のマグニチュードでは繰返し回数の差を反映する。M < 7.5ではMSF > 1となる。

K_σ 上載圧係数：CRRは1 atmに対する値であり、σ'_vが大きくなるほど抵抗比は減少する。$K_\sigma \le 1.1$

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

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

FS = CRR / CSR；ゾーンと層厚

理論

CRR = $CRR_{7.5;1}$ · MSF · K_σ；**FS = CRR / CSR**。FS < 1：**液状化が発生する**；1 ≤ FS < $FS_{required}$（1.20）：**境界的**；必要値はプロジェクト仕様書から取得する入力値である

評価対象の各試験はそれぞれの層を代表する：上下の試験の**中点**まで；層境界および地下水位で区間は止まる

隣接する区間が同じ結果ならば**ゾーン**に統合される；1本のボーリングの**液状化層厚**はFS < 1のゾーンの合計である

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

問題

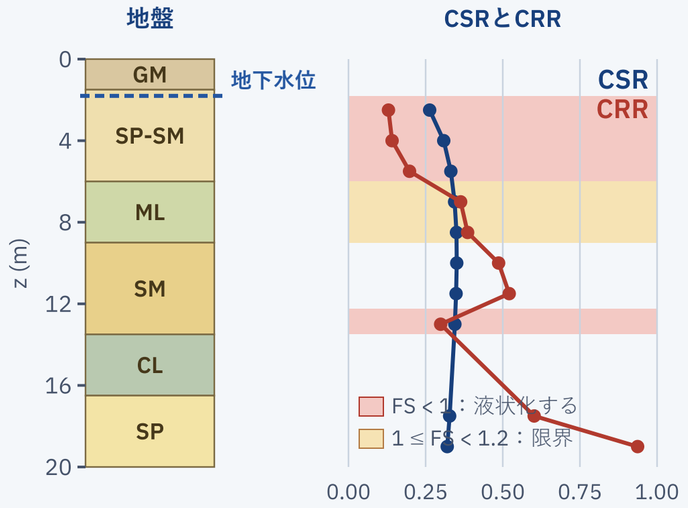
例題

与条件

ボーリング孔 BH-1	地下水位$z_w = 1.80$ m；0–1.5 mは盛土（GM）：$\gamma = 18.5$；1.5–6 mは緩い砂（SP-SM）：$\gamma = 18.0$、$\gamma_{sat} = 19.5$ kN/m³、FC = 8 %
試験	$z = 4.0$ の $N_{30} = 10$ m（地下水位の下）
地震と設備	$a_{max} = 0.35g$、$M = 7.5$；ER = 60%（$C_E = C_B = C_S = 1$）、ロッド長 = $z + 1.5$ m；$FS_{req} = 1.20$

求めるもの

応力、N_{60}、$(N_1)_{60cs}$（反復計算による）、CSR、CRRおよびFS。



解答 (1/5)

解答

1 全鉛直応力（層ごと；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 間隙水圧と有効応力

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

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

供試体は地下水位の**2.20 m**下にある：σ_v = 76.05、u = 21.58、**σ'_v = 54.47 kPa**。この点は、ボーリング孔で最小のFSが得られる位置である（問題ページの図）。

解答 (2/5)

解答

3 ロッド長補正と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 細粒分の増加

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

5 上載荷重補正：C_Nは$(N_1)_{60cs}$に依存するため、反復計算となる（σ'_v = 54.47 kPa）

反復計算	n（入力）	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

8回の反復で収束する：**C_N = 1.3784**、$(N_1)_{60}$ = 11.716、**$(N_1)_{60cs}$ = 12.08**。

解答 (3/5)

解答

6 応力低減係数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 繰返しせん断応力比

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

地震はこの深さで有効応力の**30.9%**に相当する繰返しせん断応力を作用させる（CSR = 0.3087）。

解答 (4/5)

解答

8 基礎先端抵抗、M = 7.5 および σ' = 1 atm に対する ($(N_1)_{60cs}$ = 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 マグニチュードと上載荷重の係数

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

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

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

$CRR_{7.5;1}$ = **0.1331**、MSF = **1.0000**、K_σ = **1.0619**：これら3つの数の積がCRRを与える（次スライド）。

解答 (5/5)

解答

10 抵抗と安全率

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

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

FS = 0.458 < 1：この試験では液状化が**発生する**。この試験は3.25 – 4.75 mの区間を代表する（上部の2.5 mの試験と下部の5.5 mの試験の中点）。同じ10手順を各試験で繰り返す。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

ボーリング孔 BH-1	**13 SPT：$z = 1.0$ – 19.0 m；地下水位 1.80 m；$z_{max} = 20$ m；$PI_{lim} = 7$**
層	**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)**

求めるもの

各試験について**評価する**／**評価しない**の判断とその根拠。

解答

解答

z (m)	N_{30}	地盤	PI	地下水位？	粘土質か	判定
1.0	9	GM	–	**上方**	–	**評価しない**：地下水位より上
2.5	7	SP-SM	–	下方	いいえ	評価する
4.0	10	SP-SM	–	下方	いいえ	評価する
5.5	16	SP-SM	–	下方	いいえ	評価する
7.0	21	ML	5	下方	いいえ	評価する
8.5	22	ML	5	下方	いいえ	評価する
10.0	27	SM	–	下方	いいえ	評価する
11.5	29	SM	–	下方	いいえ	評価する
13.0	25	SM	–	下方	いいえ	評価する
14.5	13	CL	18	下方	はい	**評価しない**：粘土質（PI ≥ 7）
16.0	15	CL	18	下方	はい	**評価しない**：粘土質（PI ≥ 7）
17.5	40	SP	–	下方	いいえ	評価する
19.0	44	SP	–	下方	いいえ	評価する

13試験のうち**3つを除外する**：1.0 m（地下水位より上）および14.5と16.0 m（CL、PI = 18 ≥ 7）。ML層（PI = 5 < 7）は粘土質とはみなさず、7.0と8.5 mの試験は**評価する**（FC = 62 %）。除外した試験も表には引き続き記載する。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

ボーリング	**例題1のBH-1とパラメータ；10個の手順は各試験で同一である**
ゾーン則	**各試験は、それぞれの層内で隣接する試験の中点まで；層境界および地下水位で止まる**

求めるもの

全試験の表；**液状化する領域、液状化層厚**および最小FS。

解答 (1/2)

解答

z (m)	N_{30}	地盤	FC %	σ_v	σ'_v	N_{60}	C_N	$(N_1)_{60cs}$	CSR	CRR	FS	条件
1.0	9	GM	20	–	–	6.75	1.700	15.95	–	–	–	*地下水位より上*
2.5	7	SP-SM	8	46.8	39.9	5.95	1.652	10.19	0.263	0.130	0.493	液状化する
4.0	**10**	**SP-SM**	**8**	**76.1**	**54.5**	**8.50**	**1.378**	**12.08**	**0.309**	**0.141**	**0.458**	**液状化する**
5.5	16	SP-SM	8	105.3	69.0	15.20	1.191	18.46	0.332	0.198	0.596	液状化する
7.0	21	ML	62	134.1	83.0	19.95	1.079	27.13	0.344	0.363	1.056	限界状態
8.5	22	ML	62	162.6	96.8	22.00	1.017	27.98	0.350	0.386	1.102	限界状態
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	液状化する
14.5	13	CL	88	–	–	13.00	0.816	16.12	–	–	–	*粘性土類似（PI ≥ 7）*
16.0	15	CL	88	–	–	15.00	0.788	17.34	–	–	–	*粘性土類似（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）。液状化領域：**1.80 – 6.00 m**および**12.25 – 13.50 m**；境界付近：6.00 – 9.00 m。液状化層厚 = 5.45 m。4.0 mの行は手計算で解いた例題1である。

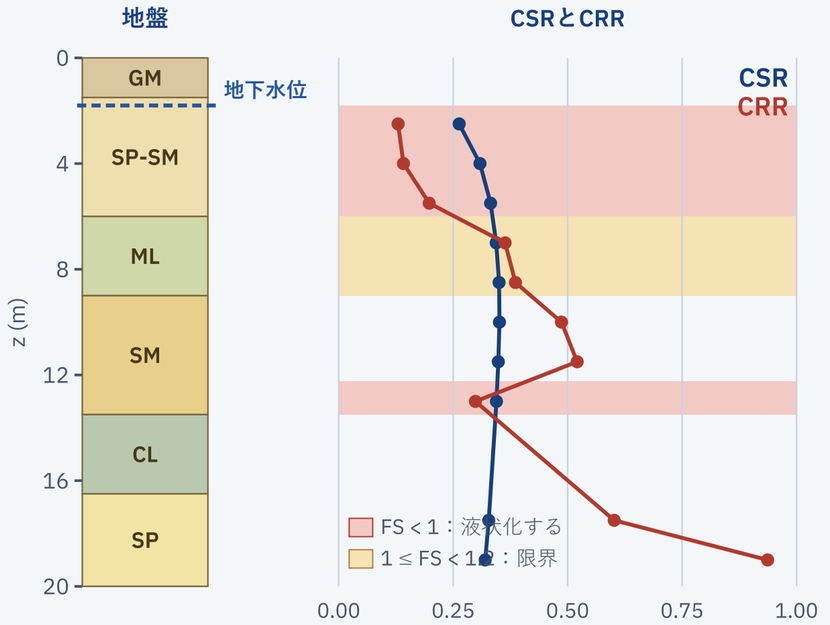
解答 (2/2)

解答

1 各試験はそれぞれの区間を代表する；同じ結果の隣接区間は統合する

地盤区分	範囲 (m)	厚さ (m)	試験	FSの範囲
液状化層 1	1.80 – 6.00	4.20	2.5; 4.0; 5.5 m	0.458 – 0.596
限界状態	6.00 – 9.00	3.00	7.0; 8.5 m	1,056 – 1,102
液状化層 2	12.25 – 13.50	1.25	13.0 m	0.867
液状化の合計		**5.45**		

例題：4.0 mの試験は3.25 – 4.75 mを代表する；2.5 mの試験は1.80 – 3.25 m（地下水位で止まる）、5.5 mの試験は4.75 – 6.00 m（層境界で止まる）を対象とする：合計**4.20 m**。ボーリングの液状化層厚は5.45 mである。



GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

基本ケース	**BH-1：$a_{max} = 0.35g$、$M = 7.5$、地下水位 1.80 m、ER = 60%**
変化させる量	**一度に1つのみ：$a_{max} = 0.25g$ / $0.45g$；$M = 6.5$ / 8.0；地下水位3.0 m / 1.0 m；ER 45% / 80%**

求めるもの

BH-1の**最小FS**と**液状化層厚**；4.0 mの試験におけるMSFの手計算による照査。

解答 (1/2)

解答

条件	変化	最小のFS	z (m)	液状化層厚 (m)	限界状態 (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} は減少する	0.25g	**0.641**	4.0	4.20	0.00
a_{max}は増加する	0.45g	**0.356**	4.0	8.45	3.25
マグニチュードが減少する	M 6.5	**0.510**	4.0	4.20	0.00
マグニチュードが増加する	M 8.0	**0.436**	4.0	8.45	3.25
地下水位が深くなる	3.0 m	**0.517**	4.0	4.00	3.00
地下水位が上昇する	1.0 m	**0.412**	2.5	5.75	3.00
エネルギーが減少する	ER %45 (C_E 0.75)	**0.388**	4.0	15.20	0.00
エネルギーが増加する	ER %80 (C_E 1.33)	**0.560**	4.0	4.20	0.00

a_{max}が最も影響の大きい入力である：0.25gで液状化する層厚は4.20 m、0.45gで8.45 mとなる。**ハンマーエネルギー**の影響は予想外に大きい：ER 45 %ではN_{60}が小さくなり、液状化する層厚は15.20 mに増加する。したがって、測定されたエネルギー比を**知る**ことが重要である。

解答 (2/2)

解答

1 M = 6.5およびM = 8.0に対するマグニチュード換算係数（$(N_1)_{60cs}$ = 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 同一試験 (4.0 m) における 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**

小さいマグニチュードは少ない繰返し回数を意味する：MSFは増大し、FSは0.458 → **0.510** となる。M = 8.0ではFSは0.436である。r_dとMSFはいずれもマグニチュードに依存し、両者は同じ向きに作用する。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

ボーリング	**BH-1（地下水位1.80 m）、BH-2（2.40 m）、BH-3（3.10 m）；同一パラメータ**
断面	**BH-1 $x = 0$, BH-2 $x = 32$, BH-3 $x = 70$ m**

求めるもの

各ボーリングの**最小FS**、**液状化**および**限界**の層厚。プロジェクトのまとめ。

解答

解答

ボーリング	地下水位 (m)	試験	スクリーニング済み	最小のFS	z (m)	液状化領域 (m)	厚さ (m)	限界状態 (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

3本のボーリングのすべてで液状化が発生する。最小FS = 0.458（BH-1、4.0 m）、液状化する層が最も厚いのはBH-1（5.45 m）。39試験のうち27を評価し、12を除外した（地下水位以浅または粘土質）。

断面線がある場合、色帯はボーリング間で線形補間される；灰色の領域は評価対象外の地盤である。

GeoTervaで解答を確認する ↗

まとめ

ポイントのまとめ

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)、C_Nは反復計算により求める。

例題（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**

選別：地下水位より上、z_{max}より下、および粘土質（PI ≥ 7）の試験は計算に含めない；**範囲**：試験は隣接する中点までとする

感度：a_{max} と実測ハンマーエネルギーが結果を最も大きく変える入力である。液状化の影響は別途の計算である

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).

注記

数値例はすべてモジュール自身の計算エンジンで作成したものであり、モジュールは同じ値を与える。モジュールの起動プロジェクトはこの3本のボーリングである（a_{max} = 0.35g、M = 7.5）。

GeoTerva

オンライン地盤工学計算

理論から実務へ

GeoTervaに独自のボーリング、SPT結果、地下水位、地震パラメータを入力する。モジュールは各試験の補正、CSR、CRR、FS、領域、液状化層厚、色帯付き断面を、手順ごとの解答およびレポートとともに出力する。

モジュールを開く →

理論ページ →

スマートフォンで開く
お試しモジュールは登録不要です。

講義で使用したい場合：info@geoterva.com