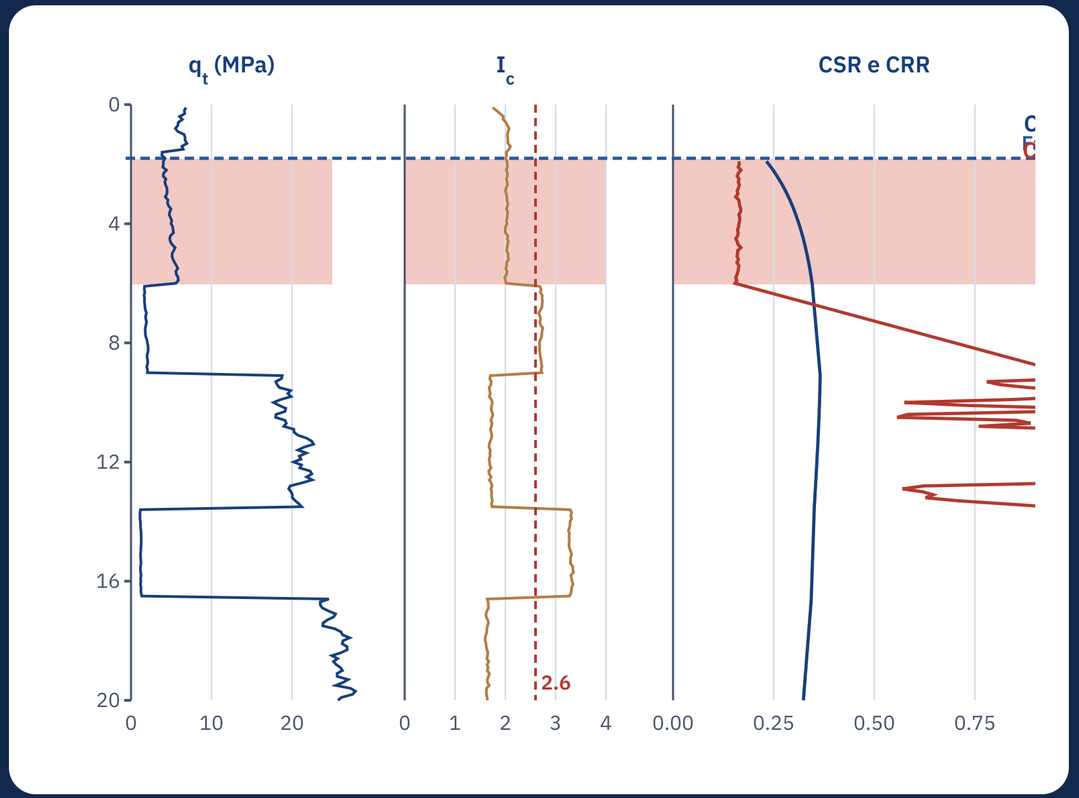
Lezione di geotecnica · Liquefazione

Innesco della liquefazione mediante CPT

Lezione: innesco della liquefazione mediante CPT; una lettura del cono è risolta a mano dall'inizio alla fine con due metodi (Boulanger–Idriss, Robertson–Wride), le letture rimanenti con tabelle.

Dati del cono · Ic | Due metodi | CSR · CRR · FS | Zone | Risolvibile a mano



Che cosa si impara in questa lezione?

La determinazione della **resistenza di punta corretta q_t**, del **rapporto di attrito R_f** e dell'**indice del tipo di comportamento del terreno I_c** a partire dalla registrazione del cono (q_c, f_s, u_2)

Stimare il tipo di terreno, il peso dell'unità di volume e il contenuto di fine dai dati del cono (non si inserisce la tabella degli strati)

Due pacchetti completi: Boulanger–Idriss (2014) e Robertson–Wride (1998, NCEER); la normalizzazione, la curva CRR, il fattore MSF e K_σ di ciascuno sono coerenti al suo interno

CSR, **FS = CRR/CSR**, letture scartate, **zone** e spessore liquefacibile

Una singola lettura (4.00 m) in un sondaggio a mano con due metodi; le altre letture nella tabella con gli stessi passaggi

SVOLGIMENTO DELLA LEZIONE

Ogni argomento è trattato in **tre passaggi**:

1 · **Teoria**: formula e relativa motivazione

2 · **Traccia**: dati e richiesto

3 · **Soluzione**: passo per passo, con i numeri

Esempio: CPT-1 (falda freatica 1.80 m; 20 m di profondità, intervallo 5 cm); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, rapporto dell'area netta a = 0.80, $FS_{richiesto}$ = 1.20.

q_t, R_f e unità di misura

TEORIA

Cono: poiché fornisce una registrazione quasi continua (intervallo di lettura 1–5 cm), non vi è una tabella degli strati da inserire.

Il tipo di terreno, il peso dell'unità di volume e il contenuto di fine si stimano **dai dati del cono**.

Conseguenze della liquefazione — cedimenti, espansione laterale, perdita di capacità portante — sono fuori dall'ambito di questa versione.

La resistenza di punta CPT corretta si calcola con la relazione $\mathbf{q_t} = \mathbf{q_c} + (1 - a)\cdot\mathbf{u_2}$, dove a è il rapporto dell'area netta del cono (0.65–0.85; valore tipico 0.80).

Nelle argille e nei limi molli, in cui il valore di $\mathbf{u_2}$ è molto superiore a quello idrostatico, la correzione è rilevante, mentre nelle sabbie resta piccola; se $\mathbf{u_2}$ non è registrato si assume $\mathbf{q_t} = \mathbf{q_c}$.

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

γ da CPT; due profondità della falda freatica

TEORIA

Il peso dell'unità di volume è stimato dai dati CPT a ogni lettura; **R_f** è espresso in % e il suo valore è mantenuto tra 1.5 γ_w e 2.5 γ_w.

Il peso dell'unità di volume si integra dalla superficie; in alternativa si utilizzano due valori costanti: γ al di sopra della falda freatica e γ_{sat} al di sotto.

La pressione interstiziale è assunta idrostatica a partire dalla falda freatica; per **C_N** e **I_c** si utilizza la falda freatica al momento della prova, mentre per CSR e K_σ si utilizza la falda freatica di progetto.

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

I_c ed esponente n

TEORIA

L'indice del tipo di comportamento del terreno si calcola con la relazione I_c = [(3.47 – log Q)² + (log F + 1.22)²]^0.5.

L'esponente n assume il valore 0.5 nelle sabbie e 1.0 nelle argille ed è determinato con l'iterazione di Robertson & Wride (1998).

Il log stratigrafico dei disegni si basa su questa classificazione; una serie più corta di h_{min} viene accorpata a quella adiacente più lunga.

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

Intervallo di I_c	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
Terreno (Robertson 1990)	ghiaioso – sabbia addensata	sabbia: pulita – limosa	miscela sabbiosa	miscela di limo	argilla	organico

Quale lettura viene valutata?

TEORIA

Una lettura è valutata quando si colloca al di sotto della falda freatica di progetto, non più in profondità di z_{max} e in un terreno che si comporta come sabbia.

I terreni con valore di I_c superiore a $I_{c,lim}$ (predefinito 2.6) sono considerati argillosi; per questi terreni si rimanda alla verifica di softening ciclico.

Il confine tra comportamento sabbioso e comportamento argilloso non è netto; si raccomanda di ripetere l'analisi con $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6 e 2.8.

In una lettura in cui la resistenza di punta netta $q_t - \sigma_v$ non è positiva, l'indice del tipo di comportamento del terreno non può essere definito e la lettura non viene valutata; le letture eliminate restano in tutte le tabelle con le relative motivazioni.

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

TEORIA

Poiché nella normalizzazione di Boulanger & Idriss (2014) l'esponente dipende dal risultato, C_N si determina per iterazione e nella relazione di m il valore di q_{c1Ncs} è mantenuto tra 21 e 254.

Nella relazione FC = 80(I_c + C_{FC}) − 137, C_{FC} è il parametro di adattamento della correlazione tra I_c e il contenuto di fine; 0 corrisponde alla correlazione generale, mentre ±0.29 è una deviazione standard di tale correlazione.

Poiché la dispersione della correlazione è elevata, è più appropriato un valore di C_{FC} sito-specifico determinato dai contenuti di fine di laboratorio sui campioni prelevati da sondaggi adiacenti ai punti CPT, e va determinato separatamente per ciascuna unità geologica.

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

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

CRR, MSF e K_σ

TEORIA

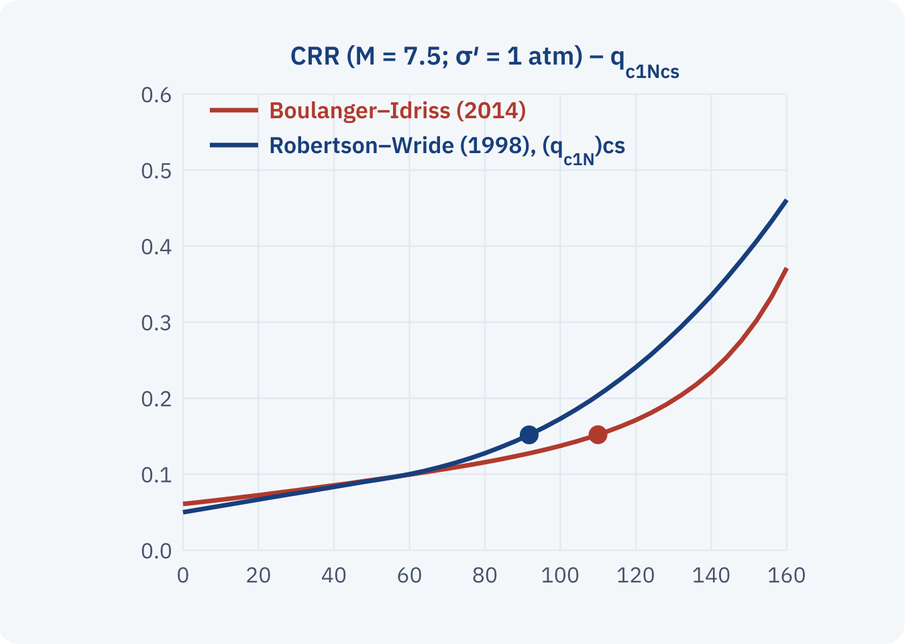
La curva di resistenza di Boulanger & Idriss (2014) è la curva deterministica riportata nella relazione e si basa sul 16° percentile dei dati dei casi (costante 2.80).

La curva CRR(M=7.5; σ′=1) si ottiene dal valore di q_{c1Ncs}; quando q_{c1Ncs} supera 211 si assume il valore 211, poiché si raggiunge il limite di C_σ.

Nella relazione di K_σ, σ'_v è la tensione efficace corrispondente al livello della falda freatica di progetto.

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

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



Kc, CRR e MSF

TEORIA

La resistenza di punta CPT corretta $(q_{c1N})_{cs}$ si calcola con la relazione $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$; K_c dipende da I_c e assume valore 1 per $I_c \le 1.64$.

Per sabbia pulita con 1.64 < Ic < 2.36 e rapporto di attrito inferiore a 0.5%, si assume $K_c = 1$ e non si applica la correzione per il contenuto di fine.

La curva della sabbia pulita termina a $(q_{c1N})_{cs} = 160$; il modulo prolunga la stessa relazione cubica fino a 250 ($CRR_{7.5} = 1.5$) e contrassegna la lettura.

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

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

CSR e la relazione di r_d dei due metodi

TEORIA

Il rapporto di tensione ciclica è espresso come CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d, dove σ_v e σ'_v sono le tensioni calcolate rispetto alla falda freatica di progetto.

Per il coefficiente di riduzione della profondità r_d, il metodo B&I; utilizza la relazione di Idriss e il metodo R&W; quella di Liao–Whitman; le correzioni per magnitudo e per sovraccarico si applicano alla resistenza, non alla sollecitazione.

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

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

FS = CRR / CSR

TEORIA

Ogni lettura rappresenta la metà della distanza dalla lettura superiore e da quella inferiore; tale distanza rappresentativa non supera 0.25 m in entrambe le direzioni, oppure i 3/4 dell'intervallo di lettura usuale se maggiore.

Una lacuna nella registrazione non viene estrapolata ai risultati; resta una serie non valutata come “nessuna lettura” ed è elencata in un'avvertenza.

Letture consecutive con lo stesso risultato formano una serie; una serie sottile con un solo risultato, inferiore a h_{min} (predefinito 0.10 m), assume il risultato della serie adiacente più lunga, e serie adiacenti con lo stesso risultato formano le zone.

Ciascun metodo costituisce un insieme organico; il coefficiente di riduzione della tensione, la normalizzazione, la correzione per sabbia pulita, i coefficienti di magnitudo e di pressione di sovraccarico e la curva di resistenza sono ricavati congiuntamente da una banca dati di casi.

Le fonti dei due metodi prescrivono che le componenti di un metodo non siano mescolate con quelle dell'altro; nel modulo la scelta del metodo modifica tutte queste componenti insieme.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \text{FS} < 1 : \text{ si liquefà} \qquad 1 \leq FS < FS_{req}\,(1.20) : \text{ al contorno}$$

Traccia

ESEMPIO

Dati

Lettura	$q_c = 4.956$ **MPa,** $f_s = 46.2$ **kPa,** $u_2 = 21.6$ **kPa; rapporto dell'area netta** $a = 0.80$
Sito	**Falda freatica a** $z_w = 1.80$ **m (la falda freatica di progetto è la stessa); peso dell'unità di volume dalla CPT (80 letture da 0 a 4 m)**
Sisma	$a_{max} = 0.35g$**,** $M = 7.5$**;** $C_{FC} = 0$**; Robertson–Wride** $f = 0.7$**;** $FS_{req} = 1.20$

RICHIESTO

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

Soluzione (1/8)

SOLUZIONE

1 Resistenza alla punta corretta e rapporto di attrito

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

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

2 Peso dell'unità di volume (Robertson–Cabal)

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

3 Tensioni

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

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

Tensione verticale efficace **σ′$_V$ = 52.05 kPa**.

Soluzione (2/8)

SOLUZIONE

4 Resistenza netta alla punta e F

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

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

5 Iterazione dell'esponente n (Robertson–Wride): dapprima n = 1.0 (tentativo con argilla)

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

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

Soluzione (3/8)

SOLUZIONE

6 Si prova n = 0.5 (sabbia)

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

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

I_c = 2.031 ≤ 2.6: non assimilabile all'argilla, si valuta la lettura.

Soluzione (4/8)

SOLUZIONE

7 Contenuto di fine ($C_{FC} = 0$)

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

8 m e C_N sono accoppiati: iterazione con q_{c1Ncs} ($x = q_t/P_a = 48.955$, $\sigma'_v = 52.05$)

Iterazione	q_{c1Ncs} (dato di input)	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs} (risultato)
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

Converge in 13 iterazioni: **m = 0.4768, C_N = 1.3738, q_{c1N} = 67.252, Δq_{c1N} = 42.736 → q_{c1Ncs} = 109.988**.

Soluzione (5/8)

SOLUZIONE

9 Resistenza di base (M = 7.5; 1 atm), MSF e 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**.

Soluzione (6/8)

SOLUZIONE

10 Sollecitazione (Idriss r_d) e fattore di sicurezza

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

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

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

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

Boulanger–Idriss: **FS = 0.523 < 1**, si innesca la liquefazione.

Soluzione (7/8)

SOLUZIONE

11 C_Q e q_{c1N} (n = 0.5 identico)

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

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

12 K_c (I_c = 2.031: 1.64 < I_c < 2.36 ma F = 0.945 % ≥ 0.5: correzione per il contenuto di fine PRESENTE)

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

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

In Robertson–Wride l'effetto del contenuto di fine è il **fattore K_c** (1.343); in Boulanger–Idriss Δq_{c1N} si **somma** (+42.7); $(q_{c1N})cs$ = 91.73, q_{c1Ncs} = 109.99.

Soluzione (8/8)

SOLUZIONE

13 Resistenza, sollecitazione (Liao–Whitman r_d; $K_\sigma = 1$ poiché $\sigma'_v < P_a$) e FS

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

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

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

Entrambi i pacchetti giungono alla stessa conclusione: **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486**; entrambi < 1. La differenza tra i due deriva dalla correzione per il contenuto di fine e da r_d.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

ESEMPIO

Dati

Sondaggio	**CPT-1: 20 m, 400 letture a intervalli di 5 cm; falda freatica 1.80 m**
Metodi	**Boulanger–Idriss e Robertson–Wride; ogni lettura si risolve con i passaggi dell'Esempio 1**

RICHIESTO

Per ogni lettura al metro: **q_t, R_f, I_c, terreno, σ'_v, q_{c1Ncs}, CSR, CRR, FS** (due metodi) e la decisione.

Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

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

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

1 Dalla lettura alla zona: ogni lettura rappresenta fino ai punti medi adiacenti (al massimo 0.25 m); i risultati identici vengono combinati

Metodo	Zona liquefacibile (m)	Spessore (m)	Al limite (m)	FS minimo	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

Entrambi i metodi considerano liquefacibile, in CPT-1, l'intervallo **1.83 – 6.03 m** (4.20 m); il FS minimo si ha a 6.0 m in entrambi. La riga a 4.0 m è l'Esempio 1, risolto a mano. Lo strato di tipo limoso tra 6 e 9 m ($I_c > 2.6$) è trattato come argilloso ed escluso nelle righe da 7 a 9 m.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

ESEMPIO

Dati

Sondaggi	**CPT-1 (falda freatica 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m); stessi parametri**
Confronto	**ciascun metodo con il proprio pacchetto**

RICHIESTO

Il **FS minimo** di ciascun sondaggio, gli spessori **liquefatti** e **al limite**.

Soluzione

SOLUZIONE

Sondaggio	YASS (m)	Metodo	FS minimo	z (m)	Zone liquefatte (m)	Spessore (m)	Al limite (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

In ogni sondaggio entrambi i metodi attivano la liquefazione; gli spessori liquefatti sono quasi identici (4.2 – 5.0 m). Le differenze riguardano gli spessori marginali (CPT-2: 0.85 / 0.25 m) e il valore minimo di FS. Il valore minimo di FS è **sensibile al rumore**; lo spessore è il valore più stabile.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Traccia

ESEMPIO

Dati

Caso base	**CPT-1: $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, falda freatica di progetto = falda freatica della prova (1.80 m)**
Variabili	**uno alla volta: $I_{c,lim}$ 2.4 / 2.8; C_{FC} ∓ 0.29; a_{max} 0.25g / 0.45g; falda freatica di progetto 1.0 m**

RICHIESTO

Il **FS minimo** e lo **spessore liquefatto** di CPT-1 (due metodi); verifica manuale di FC per C_{FC}.

Soluzione (1/2)

SOLUZIONE

Condizione	Variazione	FS_{min} (BI)	z (m)	Spessore (m)	FS_{min} (RW)	z (m)	Spessore (m)
Base	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ diminuisce	2.4	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ aumenta	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} diminuisce	0.25g	0.624	6.00	**4.20**	0.582	6.00	**4.20**
a_{max} aumenta	0.45g	0.346	6.00	**4.20**	0.323	6.00	**4.20**
La falda freatica di progetto si innalza	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8 è il dato di input più influente: la sabbia limosa tra 6 e 9 m (I_c 2.6 – 2.8) viene inclusa, lo spessore liquefacibile passa da 4.2 → **7.2 m**, FS_{min} ≈ 0.32. C_{FC} è presente solo in B&I e fa variare FS tra 0.32 e 0.58; a_{max} e la falda freatica di progetto non modificano molto lo spessore.

Soluzione (2/2)

SOLUZIONE

1 Effetto di C_{FC} sul contenuto di fine nella lettura di esempio (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 % (l'incertezza su I_c fa variare molto FC): la correzione per il contenuto di fine Δq_{c1N} è pertanto incerta e un **C_{FC} specifico del sito** richiede contenuti di fine determinati in laboratorio su campioni prelevati accanto al sondaggio.

Verificare la soluzione in GeoTerva ↗

Sintesi

Punti chiave

Registrazione cono → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, R_f, γ (da CPT), σ'_v, $\mathbf{I_c}$ (n iterazioni); $I_c > 2.6$ tipo argilla, escluso

Due pacchetti: Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ) e Robertson–Wride (moltiplica K_c, CRR cubico); le rispettive componenti non si mescolano

Esempio (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**

Zona: si unisce fino ai punti medi adiacenti (≤ 0.25 m), sotto $h_{min} = 0.10$ m; CPT-1 liquefacibile 1.83 – 6.03 m (4.20 m)

Sensibilità: $I_{c,lim}$ e C_{FC} sono influenti; il valore minimo di FS è sensibile al rumore, lo spessore è più stabile; i risultati riguardano solo l'innesco, le conseguenze (cedimenti, estensione laterale) richiedono un calcolo separato

Bibliografia

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.

NOTA

Tutti gli esempi numerici sono stati prodotti con il motore di calcolo del modulo stesso; il modulo restituisce gli stessi valori. Il progetto di apertura del modulo è costituito da questi tre sondaggi (a_{max} = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

Calcoli geotecnici online

Dalla teoria alla pratica

Incollare le proprie prove penetrometriche al cono (q_c, f_s, u_2) oppure importarle da file; inserire la falda freatica e i parametri sismici. Per ogni lettura il modulo fornisce insieme I_c, CSR, CRR, FS, le zone, lo spessore liquefacibile, i risultati dei due metodi, la sezione a bande colorate, la soluzione passo per passo e la relazione.

Aprire il modulo → | **Pagina di teoria →**

Aprire dallo smartphone
I moduli di prova non richiedono registrazione.

Se si desidera utilizzarli nelle proprie lezioni: info@geoterva.com