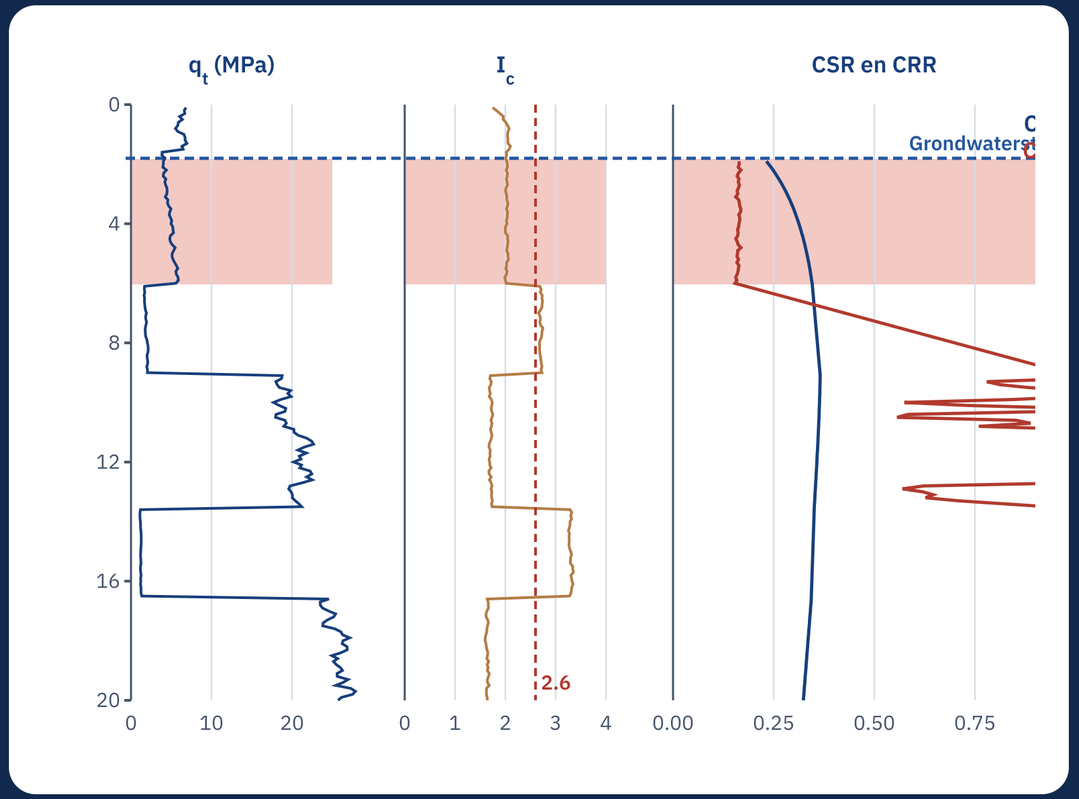
Geotechnisch college · Liquefactie

Liquefactie-opwekking volgens CPT

College: liquefactie-ontketening met de CPT; één conusmeting wordt met twee methoden (Boulanger–Idriss, Robertson–Wride) van begin tot eind met de hand uitgewerkt, de overige metingen met tabellen.

Conusgegevens · Ic | Twee methoden | CSR · CRR · FS | Zones | Met de hand oplosbaar



Wat leren we in dit college?

Het bepalen van de **gecorrigeerde conusweerstand q_t**, de **wrijvingsverhouding R_f** en de **grondgedragstype-index I_c** uit het conusprofiel (q_c, f_s, u_2)

Het **schatten van het grondtype, het volumiek gewicht en het fijngehalte uit conusgegevens** (er wordt geen laagentabel ingevoerd)

Twee volledige pakketten: Boulanger–Idriss (2014) en Robertson–Wride (1998, NCEER); de normalisatie, CRR-curve, MSF en K_σ van elk pakket zijn onderling consistent

CSR, **FS = CRR/CSR**, uitgesloten metingen, **zones** en liqueficeerbare dikte

Een enkele meting (4.00 m) in een boring met de hand volgens twee methoden; de overige metingen in de tabel met dezelfde stappen

COLLEGESTRUCTUUR

Elk onderwerp wordt in **drie stappen** behandeld:

1 · **Theorie**: formule en onderbouwing

2 · **Opgave**: gegeven en gevraagd

3 · **Oplossing**: stap voor stap, met getallen

Voorbeeld: CPT-1 (grondwaterstand 1.80 m; 20 m diepte, 5 cm interval); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, netto oppervlakteverhouding a = 0.80, $FS_{vereist}$ = 1.20.

q_t, R_f en eenheden

THEORIE

Omdat de **conus** een vrijwel continu profiel levert (leesinterval 1–5 cm), is er geen laagtabel om in te voeren.

Grondtype, volumiek gewicht en fijngehalte worden **uit conusgegevens** geschat.

Gevolgen van liquefactie — zetting, laterale spreiding, verlies van draagvermogen — vallen buiten het bereik van deze versie.

De gecorrigeerde conusweerstand wordt berekend met de betrekking $\mathbf{q_t} = \mathbf{q_c} + (1 - a)\cdot\mathbf{u_2}$, waarbij a de netto oppervlakteverhouding van de conus is (0.65–0.85; gangbare waarde 0.80).

In zachte klei en silt, waar de waarde $\mathbf{u_2}$ ver boven de hydrostatische waarde ligt, is de correctie van belang, terwijl zij in zand klein blijft; als $\mathbf{u_2}$ niet is geregistreerd, wordt $\mathbf{q_t} = \mathbf{q_c}$ aangehouden.

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

γ uit CPT; twee grondwaterstanden

THEORIE

Het volumiek gewicht wordt bij elke meting uit de CPT-gegevens geschat; **R_f** is in % en de waarde wordt tussen 1.5 γ_w en 2.5 γ_w gehouden.

Het volumiek gewicht wordt vanaf het maaiveld geïntegreerd; als alternatief worden twee constante waarden gebruikt: γ boven de grondwaterstand en γ_{sat} daaronder.

De poriënwaterspanning wordt hydrostatisch verondersteld vanaf de grondwaterstand; voor **C_N** en **I_c** wordt de grondwaterstand ten tijde van de proef gebruikt, terwijl voor CSR en K_σ de ontwerpgrondwaterstand wordt gebruikt.

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

I_c en exponent n

THEORIE

De grondgedragstype-index wordt berekend met $I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5}$.

De exponent n neemt de waarde 0.5 aan in zand en 1.0 in klei en wordt bepaald met de iteratie van Robertson & Wride (1998).

De grondlog in de tekeningen is op deze classificatie gebaseerd; een reeks dunner dan h_{min} wordt samengevoegd met de langere buurreeks.

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

Bereik van I_c	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
Grond (Robertson 1990)	grindhoudend – vast zand	zand: schoon – siltig	zandmengsel	siltmengsel	klei	organisch

Welke aflezing wordt beoordeeld?

THEORIE

Een meting wordt geëvalueerd wanneer deze onder de ontwerpgrondwaterstand ligt, niet dieper dan de diepte z_{max}, en in grond die zich als zand gedraagt.

Grond met een I_c-waarde boven $I_{c,lim}$ (standaard 2.6) wordt als klei-achtig beschouwd; deze grond wordt aan de toets op cyclische verzwakking overgelaten.

De grens tussen zandachtig en kleiachtig gedrag is niet scherp; aanbevolen wordt de berekening te herhalen met $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6 en 2.8.

Bij een meting waarbij de netto conusweerstand $q_t - \sigma_v$ niet positief is, kan de grondgedragstype-index niet worden bepaald en wordt de meting niet geëvalueerd; de uitgesloten metingen blijven met hun reden in alle tabellen staan.

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

THEORIE

Omdat in de normalisatie van Boulanger & Idriss (2014) de exponent van het resultaat afhangt, wordt C_N door iteratie gevonden en wordt in de betrekking voor m de waarde van q_{c1Ncs} tussen 21 en 254 gehouden.

In de betrekking FC = 80(I_c + C_{FC}) − 137 is C_{FC} de aanpassingsparameter van de correlatie tussen I_c en het fijngehalte; 0 komt overeen met de algemene correlatie en ±0.29 is één standaardafwijking van deze correlatie.

Omdat de spreiding van de correlatie groot is, is een locatiespecifieke C_{FC}-waarde, bepaald uit de fijngehaltes van laboratoriummonsters uit boringen naast de CPT-punten, geschikter; deze moet per geologische eenheid afzonderlijk worden bepaald.

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

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

CRR, MSF en K_σ

THEORIE

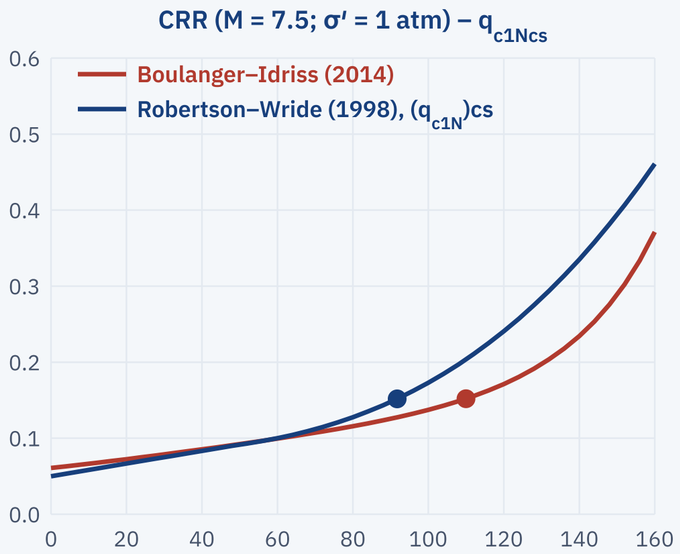
De weerstandscurve van Boulanger & Idriss (2014) is de deterministische curve die in het rapport wordt gegeven en is gebaseerd op het 16e percentiel van de gevalgegevens (constante 2.80).

De CRR(M=7.5; σ′=1)-curve wordt uit de waarde van q_{c1Ncs} verkregen; wanneer q_{c1Ncs} groter is dan 211, wordt de waarde 211 aangehouden omdat de grens van C_σ is bereikt.

σ'_v in de betrekking voor K_σ is de effectieve spanning die overeenkomt met de ontwerpgrondwaterstand.

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

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



Kc, CRR en MSF

THEORIE

De gecorrigeerde conusweerstand $(q_{c1N})_{cs}$ wordt berekend met de betrekking $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$; K_c is afhankelijk van I_c en neemt de waarde 1 aan voor $I_c \leq 1.64$.

Voor schoon zand met 1.64 < Ic < 2.36 en een wrijvingsgetal onder 0.5% wordt $K_c = 1$ genomen en wordt geen fijngehaltecorrectie toegepast.

De kromme voor schoon zand eindigt bij $(q_{c1N})_{cs} = 160$; de module zet dezelfde kubische relatie voort tot 250 ($CRR_{7.5} = 1.5$) en markeert de aflezing.

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

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

CSR en de r_d-relatie van de twee methoden

THEORIE

De cyclische spanningsratio wordt uitgedrukt als CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d, waarbij σ_v en σ'_v de spanningen zijn die ten opzichte van de ontwerpgrondwaterstand worden berekend.

Voor de dieptereductiecoëfficiënt r_d wordt bij de B&I;-methode de betrekking van Idriss gebruikt en bij de R&W;-methode die van Liao–Whitman; de correcties voor magnitude en deklaagdruk worden op de weerstand toegepast, niet op de belasting.

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

z (m)	2	4	6	8	10	15	20
r_d 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

THEORIE

Elke aflezing vertegenwoordigt de helft van de afstand tot de aflezing erboven en eronder; deze representatieve afstand overschrijdt in beide richtingen niet 0.25 m, of 3/4 van het gebruikelijke afleesinterval indien groter.

Een gat in het record wordt niet naar de resultaten geëxtrapoleerd; het blijft een reeks die niet als "geen meting" is beoordeeld en wordt in een waarschuwing vermeld.

Opeenvolgende metingen met hetzelfde resultaat vormen een reeks; een reeks met één resultaat die dunner is dan h_{min} (standaard 0.10 m) neemt het resultaat van de langere buurreeks over, en aangrenzende reeksen met hetzelfde resultaat vormen zones.

Elke methode vormt een geheel; de spanningsreductiecoëfficiënt, de normalisatie, de correctie voor schoon zand, de grootte- en deklaagcoëfficiënten en de weerstandscurve zijn samen afgeleid uit een gevaldatenbank.

De bronnen van de twee methoden schrijven voor dat de componenten van de ene methode niet met die van de andere worden vermengd; in de module verandert de keuze van de methode al deze componenten tegelijk.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \text{FS} < 1 : \text{ liquefeert} \qquad 1 \leq FS < FS_{req}\,(1.20) : \text{ op de grens}$$

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Aflezing	$q_c = 4.956$ **MPa,** $f_s = 46.2$ **kPa,** $u_2 = 21.6$ **kPa; netto oppervlakteverhouding** $a = 0.80$
Locatie	**Grondwaterstand** $z_w = 1.80$ **m (de ontwerpgrondwaterstand is dezelfde); volumiek gewicht uit de CPT (80 metingen van 0 tot 4 m)**
Aardbeving	$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; $C_{FC} = 0$; **Robertson–Wride** $f = 0.7$; $FS_{req} = 1.20$

GEVRAAGD

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

Oplossing (1/8)

OPLOSSING

1 Gecorrigeerde conusweerstand en wrijvingsgetal

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

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

2 Volumiek gewicht (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 Spanningen

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

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

Effectieve verticale spanning **σ′v = 52.05 kPa**.

Oplossing (2/8)

OPLOSSING

4 Netto puntweerstand en 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 Iteratie van de exponent n (Robertson–Wride): eerst n = 1.0 (proef met klei)

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

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \log 93.88)^2 + (\log 0.9454 + 1.22)^2} = \mathbf{1.9162} \leq 2.6 \ \Rightarrow\ \text{geen klei}$$

Oplossing (3/8)

OPLOSSING

6 n = 0.5 (zand) wordt geprobeerd

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

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

I_c = 2.031 ≤ 2.6: niet klei-achtig, de meting wordt beoordeeld.

Oplossing (4/8)

OPLOSSING

7 Fijngehalte ($C_{FC} = 0$)

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

8 m en C_N zijn gekoppeld: iteratie met q_{c1Ncs} ($x = q_t/P_a = 48.955$, $\sigma'_v = 52.05$)

Iteratie	q_{c1Ncs} (invoer)	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs} (uitvoer)
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

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

Oplossing (5/8)

OPLOSSING

9 Puntweerstand (M = 7.5; 1 atm), MSF en 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**.

Oplossing (6/8)

OPLOSSING

10 Belasting (Idriss r_d) en veiligheidsfactor

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

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

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

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

Boulanger–Idriss: **FS = 0.523 < 1**, liquefactie wordt geïnitieerd.

Oplossing (7/8)

OPLOSSING

11 C_Q en q_{c1N} (n = 0.5 hetzelfde)

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

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

12 K_c (I_c = 2.031: 1.64 < I_c < 2.36 maar F = 0.945 % ≥ 0.5: correctie voor fijngehalte AANWEZIG)

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

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

In Robertson–Wride is het fijngehalte-effect de **vermenigvuldigingsfactor K_c** (1.343); bij Boulanger–Idriss wordt Δq_{c1N} **opgeteld** (+42.7); $(q_{c1N})cs$ = 91.73, q_{c1Ncs} = 109.99.

Oplossing (8/8)

OPLOSSING

13 Weerstand, belasting (Liao–Whitman r_d; $K_\sigma = 1$ omdat $\sigma'_v < P_a$) en FS

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

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

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

Beide pakketten komen tot dezelfde conclusie: **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486**; beide < 1. Het verschil tussen beide komt van de fijngehaltecorrectie en r_d.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Boring	**CPT-1: 20 m, 400 meetwaarden met intervallen van 5 cm; grondwaterstand** 1.80 **m**
Methoden	**Boulanger–Idriss en Robertson–Wride; elke meting wordt opgelost met de stappen uit Voorbeeld 1**

GEVRAAGD

Voor de aflezing per meter: **q_t, R_f, I_c, grond, σ'_v, q_{c1Ncs}, CSR, CRR, FS** (twee methoden) en de beslissing.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

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

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

1 Van aflezing naar zone: elke aflezing vertegenwoordigt de omliggende middens (maximaal 0.25 m); identieke resultaten worden samengevoegd

Methode	Liquefactiegevoelige zone (m)	Dikte (m)	Op de grens (m)	Kleinste 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

Beide methoden beschouwen in CPT-1 het bereik **1.83 – 6.03 m** (4.20 m) als liquefactiegevoelig; de kleinste FS ligt bij beide op 6.0 m. De rij van 4.0 m is Voorbeeld 1, met de hand opgelost. De siltachtige laag tussen 6 – 9 m ($I_c > 2.6$) wordt als kleiachtig beschouwd en in de rijen van 7 – 9 m buiten beschouwing gelaten.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Boringen	**CPT-1 (grondwaterstand 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m); dezelfde parameters**
Vergelijking	**elke methode met haar eigen pakket**

GEVRAAGD

Per boring de **minimale FS**, de **geliquefieerde** en de **grenswaarde**diktes.

Oplossing

OPLOSSING

Boring	grondwaterstand (m)	Methode	Kleinste FS	z (m)	Geliquefieerde zones (m)	Dikte (m)	Op de grens (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 elke boring veroorzaken beide methoden liquefactie; de geliquefieerde dikten zijn vrijwel gelijk (4.2 – 5.0 m). De verschillen zitten in de marginale dikten (CPT-2: 0.85 / 0.25 m) en in de kleinste FS. De kleinste FS is **gevoelig voor ruis**; dikte is de stabielere waarde.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Opgave

VOORBEELD

Gegeven

Basisgeval	**CPT-1:** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, **ontwerp-grondwaterstand = grondwaterstand bij de proef** (1.80 **m**)
Variabelen	**slechts één tegelijk:** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8;** C_{FC} ∓ 0.29**;** a_{max} **0.25g / 0.45g; ontwerp-grondwaterstand 1.0 m**

GEVRAAGD

De **kleinste FS** en de **dikte van de geliquefieerde laag** van CPT-1 (twee methoden); handmatige controle van FC voor C_{FC}.

Oplossing (1/2)

OPLOSSING

Toestand	Wijziging	FS_{min} (BI)	z (m)	Dikte (m)	FS_{min} (RW)	z (m)	Dikte (m)
Basis	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ neemt af	2.4	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ neemt toe	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} neemt af	0.25g	0.624	6.00	**4.20**	0.582	6.00	**4.20**
a_{max} neemt toe	0.45g	0.346	6.00	**4.20**	0.323	6.00	**4.20**
Ontwerp-grondwaterstand stijgt	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8 is de meest invloedrijke invoerparameter: het siltige zand tussen 6 en 9 m (I_c 2.6 – 2.8) wordt meegerekend, de liquefactiegevoelige dikte gaat van 4.2 → **7.2 m** en FS_{min} ≈ 0.32. C_{FC} bestaat alleen in B&I en verschuift FS tussen 0.32 en 0.58; a_{max} en de ontwerp-grondwaterstand veranderen de dikte nauwelijks.

Oplossing (2/2)

OPLOSSING

1 Effect van C_{FC} op het fijngehalte bij de voorbeeldaflezing (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 % (onzekerheid in I_c verschuift FC sterk): de fijncorrectie Δq_{c1N} is daarom onzeker, en een **locatiespecifieke C_{FC}** vereist laboratoriumfijngehalten naast de boring.

Controleer de oplossing in GeoTerva ↗

Samenvatting

Belangrijkste punten

Conusrecord → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, R_f, γ (uit CPT), σ'_v, $\mathbf{I_c}$ (n iteraties); $I_c > 2.6$ klei-achtig, wordt uitgesloten

Twee pakketten: Boulanger–Idriss ($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ) en Robertson–Wride (vermenigvuldigt K_c, kubische CRR); de componenten worden niet gemengd

Voorbeeld (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**

Zone: voegt samen tot naburige middelpunten (≤ 0.25 m), onder h_{min} = 0.10 m; CPT-1 liqueficeerbaar 1.83 – 6.03 m (4.20 m)

Gevoeligheid: $I_{c,lim}$ en C_{FC} zijn van invloed; de minimale FS is gevoelig voor ruis, de dikte is stabieler; de resultaten betreffen alleen het optreden van liquefactie, de gevolgen (zetting, laterale spreiding) vereisen een aparte berekening

Literatuur

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.

OPMERKING

Alle numerieke voorbeelden zijn geproduceerd met de eigen berekeningsmotor van de module; de module geeft dezelfde waarden. Het openingsproject van de module bestaat uit deze drie boringen (a_{max} = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

Online geotechnische berekeningen

Van theorie naar praktijk

Plak uw eigen conuspenetratietests (q_c, f_s, u_2) of lees ze in uit een bestand; voer de grondwaterstand en de aardbevingsparameters in. Voor elke meting geeft de module tegelijk I_c, CSR, CRR, FS, de zones, de liquefactiedikte, de resultaten van de twee methoden, de doorsnede met kleurbanden, de stapsgewijze oplossing en het rapport.

Module openen →

Theoriepagina →

Openen op de smartphone
Proefmodules vereisen geen registratie.

Wilt u ze in uw colleges gebruiken: info@geoterva.com