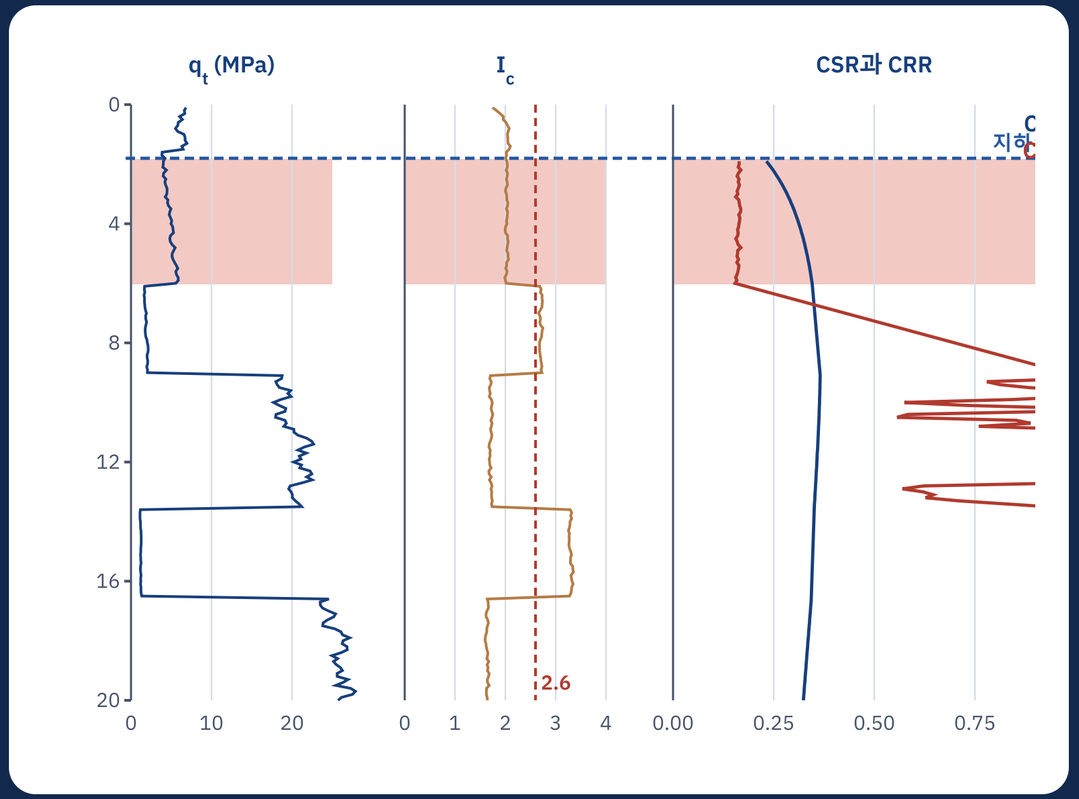
지반공학 강의 자료 · 액상화

CPT에 의한 액상화 발생 평가

강의: CPT를 이용한 액상화 유발 평가; 하나의 콘 측정값을 두 방법(Boulanger–Idriss, Robertson–Wride)으로 처음부터 끝까지 손으로 풀이하고, 나머지 측정값은 표로 제시한다.

콘 데이터 · Ic | 두 가지 방법 | CSR · CRR · FS | 구간 | 손계산 가능



개요

이 강의에서 다루는 내용

콘 기록(q_c, f_s, u_2)으로부터 **보정 콘저항치 q_t, 마찰비 R_f, 토질거동지수 I_c**의 산정

지반 유형, 단위중량 및 세립분 함유량을 **콘 관입 자료로부터 추정하기**(지층표는 입력하지 않음)

완결된 두 가지 방법 체계: Boulanger–Idriss (2014)와 Robertson–Wride (1998, NCEER); 각 방법의 정규화, CRR 곡선, MSF, K_σ는 그 방법 안에서 서로 일관된다

CSR, **FS = CRR/CSR**, 제외된 측정값, **구간** 및 액상화되는 층의 두께

한 시추공의 **단일 측정값(4.00 m)을 두 방법으로 수계산**; 나머지 측정값은 같은 단계로 표에 제시

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 공식과 그 근거

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

예제: CPT-1(지하수위 1.80 m; 깊이 20 m, 간격 5 cm); a_{max} = 0.35 g, M = 7.5, 순면적비 a = 0.80, $FS_{required}$ = 1.20.

q_t, R_f 및 단위

이론

콘이 거의 연속적인 기록을 제공하므로 (측정 간격 1–5 cm) 입력할 지층표가 없다.

지반 종류, 단위중량 및 세립분 함유량은 **콘 관입 자료로부터** 추정한다.

액상화의 결과, 즉 침하, 측방 유동, 지지력 상실은 이 버전의 범위 밖이다.

보정 콘저항치는 $q_t = q_c + (1 - a)\cdot u_2$ 관계식으로 계산한다; 여기서 a는 콘의 순면적비이다(0.65–0.85; 통상값 0.80).

u_2 값이 정수압 값보다 훨씬 큰 연약 점토와 실트에서는 보정이 중요하며, 모래에서는 작게 유지된다. u_2가 기록되지 않았으면 $q_t = q_c$로 취한다.

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

CPT에서 구한 γ; 지하수위 두 깊이

이론

단위중량은 매 측정마다 CPT 자료로부터 추정한다; **R_f**는 % 단위이며 그 값은 1.5 γ_w와 2.5 γ_w 사이로 제한한다.

단위중량을 지표면부터 적분한다. 대안으로 지하수위 위에서는 γ, 아래에서는 γ_{sat}인 두 개의 상수 값을 사용한다.

간극수압은 지하수위로부터 정수압 분포로 가정하며, **C_N**과 **I_c**에는 시험 당시의 지하수위를, CSR과 K_σ에는 설계 지하수위를 사용한다.

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

I_c와 지수 n

이론

토질거동지수 $I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5}$ 식으로 계산한다.

지수 n은 모래에서 0.5, 점토에서 1.0의 값을 취하며 Robertson & Wride(1998)의 반복계산으로 결정된다.

그림의 지반 주상도는 이 분류에 근거하며, h_{min}보다 얇은 구간은 더 긴 인접 구간에 병합된다.

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

I_c 범위	< 1.31	1.31 – 2.05	2.05 – 2.60	2.60 – 2.95	2.95 – 3.60	> 3.60
지반 (Robertson 1990)	자갈질 – 조밀한 모래	모래: 깨끗한 – 실트질	모래 혼합	실트 혼합	점토	유기질

어느 판독값을 평가하는가?

이론

하나의 측정값은 설계 지하수위 아래에 있고 깊이가 z_{max}를 넘지 않으며 모래처럼 거동하는 지반에 위치할 때 평가한다.

I_c 값이 $I_{c,lim}$ 값(기본값 2.6)을 넘는 지반은 점토질로 간주하며, 이러한 지반은 반복 연화 검토에서 다룬다.

모래와 유사한 거동과 점토와 유사한 거동 사이의 경계는 뚜렷하지 않으므로, $I_{c,lim}$ = 2.4, 2.6, 2.8로 해석을 반복할 것을 권장한다.

순 콘저항 $q_t - \sigma_v$가 양(+)이 아닌 측정값에서는 토질거동지수를 정의할 수 없으므로 해당 측정값은 평가하지 않는다. 제외된 측정값은 그 사유와 함께 모든 표에 남는다.

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

이론

Boulanger & Idriss(2014) 정규화에서는 지수가 결과에 의존하므로 C_N은 반복 계산으로 구하며, m 관계식에서 q_{c1Ncs} 값은 21과 254 사이로 유지한다.

FC = 80(I_c + C_{FC}) − 137 관계식에서 C_{FC}는 I_c와 세립분 함유량 사이 상관관계의 적합 매개변수이다. 0은 일반 상관관계에 해당하며, ±0.29는 이 상관관계의 표준편차에 해당한다.

상관관계의 산포가 크므로, CPT 지점 인근 시추공에서 채취한 시료의 실내시험 세립분 함유량으로부터 결정한 현장 고유의 C_{FC} 값이 더 적절하며, 지질 단위별로 각각 따로 결정하여야 한다.

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

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

CRR, MSF 및 K_σ

이론

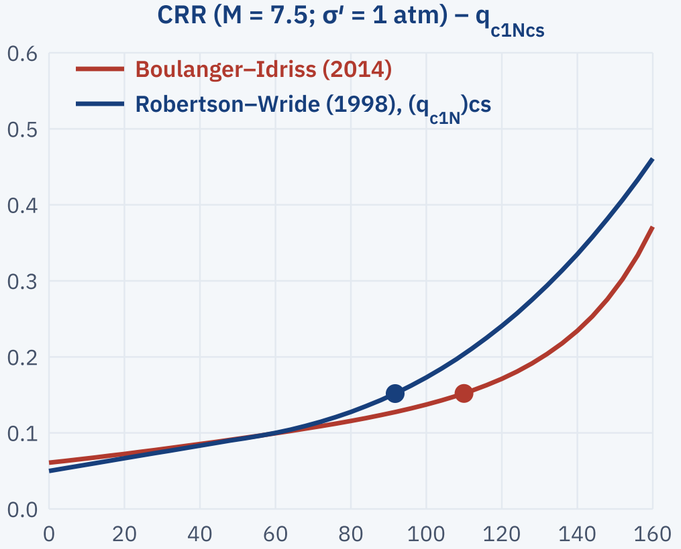
Boulanger & Idriss (2014)의 저항 곡선은 보고서에 제시된 결정론적 곡선이며, 사례 자료의 16번째 백분위수(상수 2.80)에 근거한다.

CRR(M=7.5; σ′=1) 곡선은 q_{c1Ncs} 값에서 얻는다; q_{c1Ncs}가 211을 넘으면 C_σ 한계에 도달하므로 211을 취한다.

K_σ 관계식의 σ'_v는 설계 지하수위에 대응하는 유효응력이다.

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

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



Kc, CRR 및 MSF

이론

보정 콘저항은 $(q_{c1N})_{cs} = K_c\, q_{c1N}$ 관계식으로 계산한다. K_c는 Ic에 따라 달라지며 $Ic \le 1.64$일 때 1의 값을 취한다.

$1.64 < Ic < 2.36$이고 마찰비가 0.5% 미만인 깨끗한 모래에서는 $K_c = 1$을 취하며 세립분 보정은 적용하지 않는다.

깨끗한 모래의 곡선은 $(q_{c1N})_{cs} = 160$에서 끝난다. 모듈은 같은 3차 관계식을 250($CRR_{7.5} = 1.5$)까지 이어 가며 해당 값을 표시한다.

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

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

CSR과 두 방법의 r_d 관계식

이론

반복응력비는 CSR = 0.65 (σ_v/σ'_v) a_{max} r_d로 나타내며, 여기서 σ_v와 σ'_v는 설계 지하수위를 기준으로 계산한 응력이다.

응력감소계수 r_d에는 B&I; 방법에서 Idriss 관계식을, R&W; 방법에서 Liao–Whitman 관계식을 사용하며, 규모 보정과 상재압 보정은 요구 전단응력비가 아니라 저항에 적용한다.

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

z (m)	2	4	6	8	10	15	20
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

이론

각 측정값은 위와 아래의 측정값까지 거리의 절반을 대표한다. 이 대표 거리는 양 방향 모두 0.25 m를 넘지 않으며, 통상 측정 간격의 3/4 값이 더 크면 그 값을 넘지 않는다.

기록 중의 결측 구간은 결과로 외삽되지 않으며, “판독값 없음”으로 평가되지 않은 구간으로 남아 경고에 기재된다.

동일한 결과를 갖는 연속된 측정값은 하나의 연속 구간을 이루며, h_{min}(기본값 0.10 m)보다 얇고 결과가 하나뿐인 구간은 더 긴 이웃 구간의 결과를 따르고, 결과가 같은 인접 구간들이 모여 구역을 이룬다.

각 방법은 하나의 통합된 체계이다; 응력감소계수, 정규화, 깨끗한 모래 보정, 규모 및 상재압 계수, 저항 곡선은 사례 데이터베이스로부터 함께 도출된 것이다.

두 방법의 출처 문헌은 한 방법의 구성 요소를 다른 방법의 구성 요소와 혼용하지 않도록 규정한다. 모듈에서는 방법을 선택하면 이 구성 요소 전체가 함께 바뀐다.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \qquad \text{FS} < 1: \text{ 액상화 발생} \qquad 1 \le FS < FS_{req}\,(1.20): \text{ 경계에서}$$

문제

예제

조건

판독	$q_c = 4.956$ MPa, $f_s = 46.2$ kPa, $u_2 = 21.6$ kPa; 순면적비 $a = 0.80$
현장	지하수위 $z_w = 1.80$ m (설계 지하수위도 동일); 단위중량은 CPT로부터 (0에서 4 m까지 80개 판독값)
지진	$a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$; $C_{FC} = 0$; Robertson–Wride $f = 0.7$; $FS_{req} = 1.20$

구하는 값

q_t, σ'_v, I_c; Boulanger–Idriss와 Robertson–Wride 방법에 따른 q_{c1Ncs}, CRR, CSR, FS.

풀이 (1/8)

풀이

1 보정 선단저항과 마찰비

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

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

2 단위중량 (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 응력

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

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

유효연직응력 **σ′v = 52.05 kPa**.

풀이 (2/8)

풀이

4 순 선단지지력과 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 지수 n의 반복 계산 (Robertson–Wride): 먼저 n = 1.0 (점토 시산)

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

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

풀이 (3/8)

풀이

6 n = 0.5 (모래)를 시도한다

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

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

I_c = 2.031 ≤ 2.6: 점토성이 아니므로 판독값을 평가한다.

풀이 (4/8)

풀이

7 세립분 함유량 (C_{FC} = 0)

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

8 m과 C_N은 서로 연관되어 있다: q_{c1Ncs}를 이용한 반복 계산($x = q_t/P_a$ = 48.955, σ'_v = 52.05)

반복 계산	q_{c1Ncs} (입력)	m	C_N	$q_{c1N} = C_N q_t/P_a$	Δq_{c1N}	q_{c1Ncs} (출력)
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

13회 반복에서 수렴한다: **m = 0.4768, C_N = 1.3738, q_{c1N} = 67.252, Δq_{c1N} = 42.736 → q_{c1Ncs} = 109.988**.

풀이 (5/8)

풀이

9 기준 저항 (M = 7.5; 1 atm), MSF 및 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**.

풀이 (6/8)

풀이

10 지진 하중에 의한 요구 전단응력비 (Idriss r_d)와 안전율

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

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

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

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

Boulanger–Idriss: **FS = 0.523 < 1**, 액상화가 발생한다.

풀이 (7/8)

풀이

11 C_Q 및 q_{c1N} (n = 0.5 동일)

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

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

12 K_c (I_c = 2.031: 1.64 < I_c < 2.36 범위이나 F = 0.945 % ≥ 0.5: 세립분 보정 적용)

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

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

Robertson–Wride에서 세립분 영향은 **K_c를 곱하는 방식**(1.343)이고, Boulanger–Idriss에서는 Δq_{c1N} 값을 **더한다**(+42.7). $(q_{c1N})cs$ = 91.73, q_{c1Ncs} = 109.99.

풀이 (8/8)

풀이

13 저항, 지진 하중에 의한 요구 전단응력비(Liao–Whitman r_d; $\sigma'_v < P_a$이므로 $K_\sigma = 1$) 및 FS

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

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

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

두 방법은 같은 결론에 이른다: **Boulanger–Idriss FS = 0.523**, **Robertson–Wride FS = 0.486**; 둘 다 < 1이다. 둘의 차이는 세립분 보정과 r_d에서 비롯된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

시추	**CPT-1: 20 m, 5 cm 간격으로 400개 측정값; 지하수위 1.80 m**
방법	**Boulanger–Idriss 및 Robertson–Wride 방법; 각 판독은 예제 1의 단계로 풀이한다**

구하는 값

매 미터의 측정값에 대해 **q_t, R_f, I_c, 지반 종류, σ'_v, q_{c1Ncs}, CSR, CRR, FS**(두 방법) 및 판정.

풀이 (1/2)

풀이

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

풀이 (2/2)

풀이

1 측정값에서 구간으로: 각 측정값은 인접한 측정값과의 중간점까지(최대 0.25 m) 대표하며, 동일한 결과는 하나로 합친다

방법	액상화 구간 (m)	두께 (m)	한계 시 (m)	최소 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

두 방법 모두 CPT-1에서 **1.83 – 6.03 m** 구간(4.20 m)을 액상화되는 것으로 보며, 최소 FS는 둘 다 6.0 m에서 나타난다. 4.0 m 행이 손으로 푼 예제 1이다. 6 – 9 m 사이의 실트 유사 층(I_c > 2.6)은 점토 유사 층으로 간주되어 7 – 9 m 행에서 제외된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

시추공	**CPT-1 (지하수위 1.80 m), CPT-2 (2.40 m), CPT-3 (3.10 m); 동일한 매개변수**
비교	**방법마다 고유의 패키지로**

구하는 값

각 시추공의 **최소 FS**, **액상화된** 층과 **경계 상태** 층의 두께.

풀이

풀이

시추	지하수위 (m)	방법	최소 FS	z (m)	액상화 구간 (m)	두께 (m)	한계 시 (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

모든 시추공에서 두 방법 모두 액상화를 유발하며, 액상화 두께는 거의 같다(4.2 – 5.0 m). 차이는 경계 부근의 두께(CPT-2: 0.85 / 0.25 m)와 최소 FS에 있다. 최소 FS는 **잡음에 민감하며**, 두께가 더 안정적인 값이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

문제

예제

조건

기준 경우	**CPT-1:** $a_{max} = 0.35g$, $M = 7.5$, $I_{c,lim} = 2.6$, $C_{FC} = 0$, **설계 지하수위 = 시험 시 지하수위 (** 1.80 **m)**
변수	**한 번에 하나만:** $I_{c,lim}$ **2.4 / 2.8;** C_{FC} ∓ 0.29; a_{max} **0.25g / 0.45g; 설계 지하수위 1.0 m**

구하는 값

CPT-1의 **최소 FS**와 **액상화 층 두께**(두 방법); C_{FC}에 대한 FC의 수계산 검토.

풀이 (1/2)

풀이

상태	변화	FS_{min} (BI)	z (m)	두께 (m)	FS_{min} (RW)	z (m)	두께 (m)
저면	–	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ 감소	2.4	0.445	6.00	**4.20**	0.415	6.00	**4.20**
$I_{c,lim}$ 증가	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} 감소	0.25g	0.624	6.00	**4.20**	0.582	6.00	**4.20**
a_{max} 증가	0.45g	0.346	6.00	**4.20**	0.323	6.00	**4.20**
설계 지하수위 상승	1.0 m	0.400	6.00	**4.50**	0.368	6.00	**4.50**

$I_{c,lim}$ = 2.8이 가장 영향이 큰 입력값이다. 6 – 9 m 사이의 실트질 모래(I_c 2.6 – 2.8)가 계산에 포함되어 액상화 층 두께는 4.2 → **7.2 m**가 되고 $FS_{min} \approx 0.32$가 된다. C_{FC}는 B&I에만 있으며 FS를 0.32 – 0.58 사이에서 변동시킨다. a_{max}와 설계 지하수위는 두께를 크게 바꾸지 않는다.

풀이 (2/2)

풀이

1 예제 측정값(I_c = 2.031)에서 C_{FC}가 세립분 함유량에 미치는 영향

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

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

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

FC 2.3 → 25.5 → 48.7 %(I_c의 불확실성이 FC를 크게 변동시킨다): 따라서 세립분 보정 Δq_{c1N}은 불확실하며, **현장 고유의 C_{FC}**를 구하려면 시추공 인근의 실험실 세립분 함유량이 필요하다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

요약

핵심 정리

콘 기록 → $q_t = q_c + (1 - a)u_2$, R_f, γ (CPT로부터), σ'_v, $\mathbf{I_c}$ (n회 반복); $I_c > 2.6$이면 점토질로 보아 제외

두 가지 방법 체계: Boulanger–Idriss($FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137$, q_{c1Ncs}, CRR, MSF, K_σ)와 Robertson–Wride(K_c를 곱하며, CRR은 3차식); 두 체계의 구성 요소는 혼용하지 않는다

예제 (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**

구역: 인접한 중간점까지(≤ 0.25 m), h_{min} = 0.10 m 미만은 병합; CPT-1에서 액상화되는 구간 1.83 – 6.03 m(4.20 m)

민감도: $I_{c,lim}$과 C_{FC}의 영향이 크다; 최소 FS는 잡음에 민감하고 두께는 더 안정적이다; 결과는 액상화 발생 여부만을 의미하며, 그로 인한 영향(침하, 측방 유동)은 별도 계산으로 검토한다

참고문헌

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.

참고

수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 엔진으로 산출하였으며, 모듈도 같은 값을 준다. 모듈의 초기 프로젝트는 이 3개 시추공이다 (a_{max} = 0.35g, M = 7.5).

GeoTerva

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

자신의 콘 관입시험 자료(q_c, f_s, u_2)를 붙여 넣거나 파일에서 불러온 뒤 지하수위와 지진 매개변수를 입력한다. 모듈은 각 측정값에 대해 I_c, CSR, CRR, FS와 구간, 액상화 층 두께, 두 방법의 결과, 색상 띠가 있는 단면, 단계별 풀이 및 보고서를 함께 제공한다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com