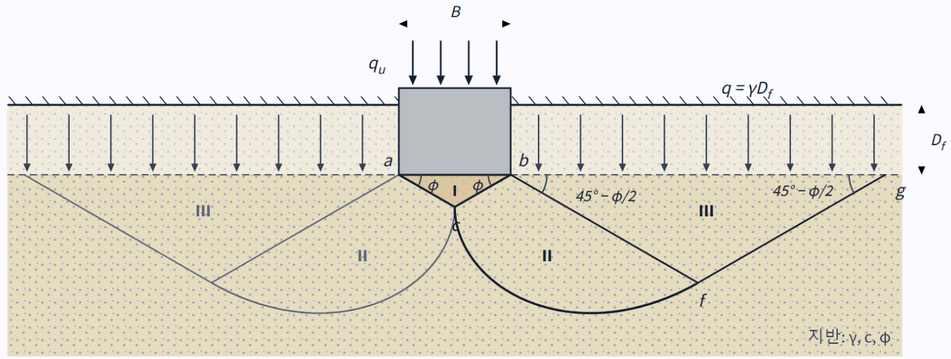
지반공학 강의 자료 · 기초

Terzaghi 지지력

강의: Terzaghi의 파괴 메커니즘과 유도 과정에서 출발하여 N_q, N_c, N_γ 계수, 정사각형 및 원형 기초, 국부전단파괴, 지하수까지; 주제별 계산 예제.

세 개의 영역 · 대수나선 · $N_c \cdot N_q \cdot N_\gamma$ · 정사각형 및 원형 기초 · 국부전단파괴 · 계산 예제



개요

이 강의에서 다루는 내용

- Terzaghi 식의 **가정사항**과 **전반전단 / 국부전단** 파괴의 구별
- 파괴 메커니즘(**세 영역**, 대수나선)과 수동력의 세 부분 분해를 따라가기
- **N_q와 N_c** 계수를 닫힌 형태 식으로, **N_γ**를 Kumbhojkar 표에서 구하는 방법
- **연속기초, 정사각형기초, 원형기초**의 식을 작성하고, 비배수($\varphi = 0$) 조건을 다루기
- **국부전단**에 대해 c'와 φ'로 같은 식을 적용하기
- **지하수**의 세 가지 경우와 전/순 허용압력을 계산하여 기초를 **검토**하기

강의 흐름

각 주제는 **세 단계**로 다룬다:

1 · **이론**: 규칙은 무엇이며 왜 그러한가?

2 · **문제**: 조건과 구하는 값

3 · **풀이**: 단계별 수치 계산

예제 기초(모듈의 초기 모델): $c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\gamma = 17.8$ kN/m³인 지반에 놓인 1.5 m × 1.5 m 정사각형 기초, $D_f = 1$ m, 지하수위 2 m.

Terzaghi 식의 근거

이론

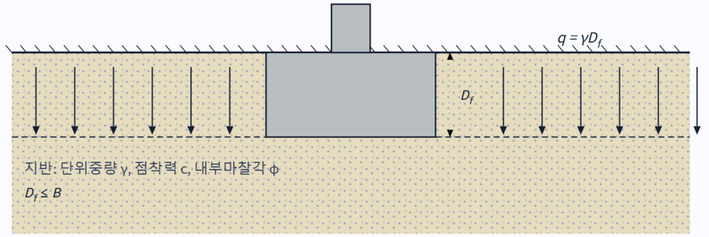
Terzaghi(1943)는 지지력 q_u, 즉 기초 아래 지반이 전단으로 파괴되는 평균 압력을, 가정한 파괴 메커니즘과 그 각 부분의 평형으로부터 구하였다. 이 유도는 다음 가정에 근거한다:

기초는 **긴 띠 형태**(평면변형률 조건)이며 강체이고 **저면이 거칠다**: 그 아래 지반은 저면에서 미끄러지지 못하고 기초와 함께 하나의 물체로 내려간다.

기초 저면 아래의 지반은 **균질**하고 매우 깊으며, 하중은 **연직이며 중심 하중**이다.

얕은기초 조건, $D_f \le B$: 기초 저면 위의 지반은 파괴 메커니즘에 참여하지 않고 **상재하중 $q = \gamma D_f$**로만 작용하며, 전단강도는 무시한다(안전 측 단순화).

지반은 **전반전단**으로 파괴되며, 국부전단파괴는 이후 저감된 매개변수로 다룬다.



전단강도는 Mohr–Coulomb 기준을 따른다:

$$s = c + \sigma' \tan\varphi$$

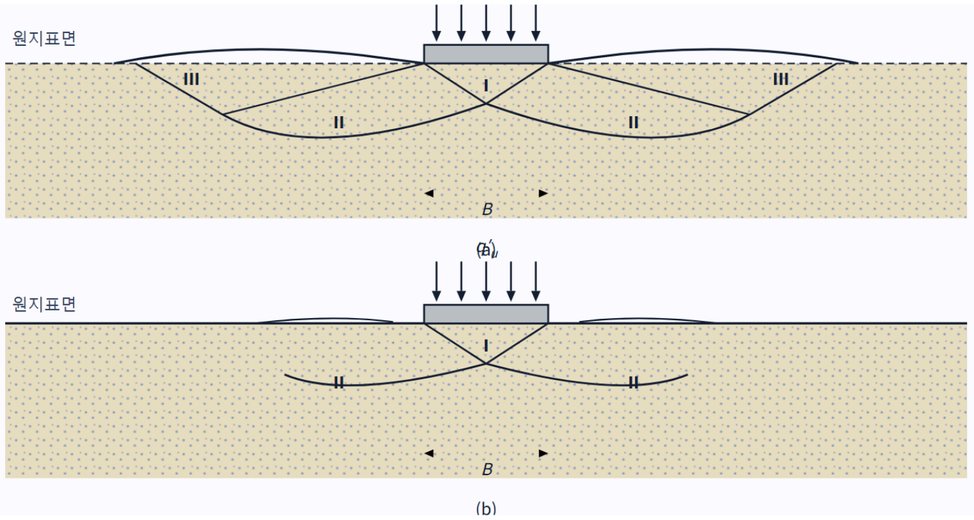
기초는 어떻게 파괴되는가?

이론

조밀한 모래나 단단한 점토 위의 연속기초에 하중을 단계적으로 가한다고 하자. 침하는 처음에는 천천히 증가하다가 어느 압력에 이르면 **하중이 증가하지 않는데도** 침하가 급격히 진행된다. 기초 가장자리에서 지표면까지 이어지는 연속 활동면이 형성되고 기초 옆에서 지반이 융기한다. 이것이 **전반전단파괴**이며, 그 압력이 q_u이다.

느슨한 모래와 연약한 점토에서는 곡선에 정점이 없다. q'_u 이후 더 가파르지만 여전히 상승하는 직선으로 바뀌며, 활동면은 지반 내부에 머물고 융기는 작다: **국부전단파괴**.

기초 아래에는 세 영역이 있다. 하나의 강체처럼 내려가는 **쐐기(I)**, 쐐기가 밀어내는 **방사 영역(II)**, 위쪽과 옆쪽으로 밀리는 **수동 영역(III)**이다. 국부전단에서는 쐐기가 같은 방식으로 형성되지만 II와 III은 지표면에 도달하지 못하고 지반 속에서 소멸한다.



(b)

세 영역과 대수나선

이론

Terzaghi는 양쪽 지반을 세 영역으로 구분하였다:

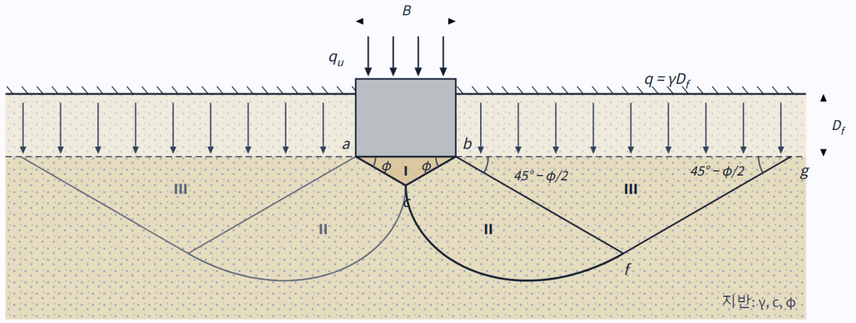
I · 쐐기 abc: 거친 저면에 밀착되어 기초와 함께 강체로 침하한다. 변 ac와 bc는 수평과 **α = φ**의 각을 이룬다.

II · 방사 영역 bcf(Prandtl): b에서 뻗어 나오는 모든 방사선은 활동선이며, 경계 cf는 극이 b인 **대수나선** 호이다.

III · 수동 Rankine 영역 bfg: bf와 fg는 수평과 45° − φ/2를 이루는 직선 활동선이다.

$$r = r_0\, e^{\theta \tan\varphi} \qquad \theta_1 = \angle cbf = 180^\circ - \varphi - \left(45^\circ - \tfrac{\varphi}{2}\right) = \frac{3\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$$

나선의 성질: 모든 점에서 극으로부터 그은 반지름은 곡선의 법선과 φ의 각을 이룬다. 따라서 나선 위의 마찰력은 극에 대해 **모멘트를 발생시키지 않으며**, 평형식은 이 극에 대한 모멘트로 작성한다.



연직이며 세 부분으로 나뉜다

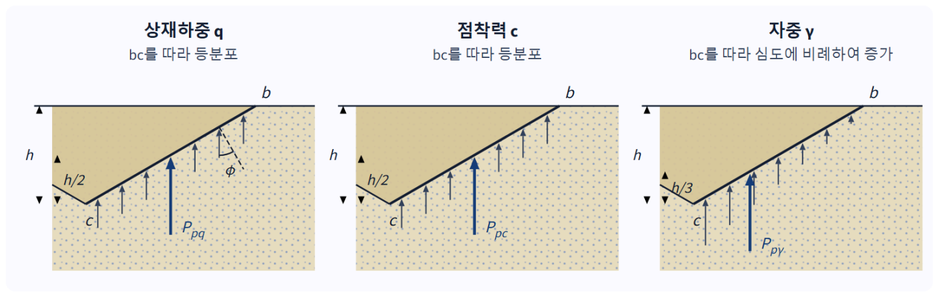
이론

기초는 쐐기를 아래로 밀고, II 및 III 영역의 흙은 각 면에서 **수동력 P_p**로 저항한다. 흙이 흙과 미끄러지므로 완전한 마찰각이 작용한다. P_p는 면의 법선과 φ의 각을 이룬다. bc 면이 수평과 φ의 각을 이루므로 그 법선은 연직과 φ의 각을 이루며, 이 법선에서 φ만큼 벗어난 힘은 **정확히 연직**이다.

P_p는 q, c, γ에 동시에 의존하며, 세 가지를 함께 고려하면 닫힌 형태의 해가 나오지 않는다. Terzaghi는 각 항을 나머지 둘이 0인 것처럼 구하여 **합산하였다** (중첩):

$$P_p = P_{pq} + P_{pc} + P_{p\gamma} \qquad h = \frac{B}{2}\tan\varphi$$

- P_{pq}: 상재하중만 고려(γ = 0, c = 0) → **N_q**
- P_{pc}: 점착력만 고려(γ = 0, q = 0) → **N_c**
- $P_{p\gamma}$: 지반 자중만 고려(q = 0, c = 0) → **N_γ**



극점 b에 대한 모멘트

이론

상재하중만 있을 때 극점은 b에 있다. 흙덩이 bcfj에는 bc를 따라 P_{pq}, bj를 따라 q, jf를 따라 Rankine 수동력, 나선을 따라 합력 F가 작용한다. F는 극점을 지나므로 모멘트 식에서 소거된다:

$$P_{p(1)} = q\,H_d \tan^2\!\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right) \qquad P_{pq}\frac{B}{4} = q\,\overline{bj}\,\frac{\overline{bj}}{2} + P_{p(1)}\frac{H_d}{2}$$

$$r_0 = \frac{B}{2}\sec\varphi \quad r_1 = r_0\, e^{\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi} \quad \overline{bj} = r_1\cos\left(45^\circ - \tfrac{\varphi}{2}\right) \quad H_d = r_1\sin\left(45^\circ - \tfrac{\varphi}{2}\right)$$

$\tan(45° + \varphi/2) = \cot(45° - \varphi/2)$이므로 두 항이 같아진다: $P_{pq} = (4/B)\, q\, r_1^2 \cos^2(45° - \varphi/2)$. 쐐기 평형 $q_q B = 2 P_{pq}$로부터:

$$q_q = qN_q \qquad N_q = \frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}}{2\cos^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right)}$$

결과

$\varphi = 0$일 때 $N_q = 1$: 마찰이 없으면 상재하중이 그대로 전달된다. $\varphi = 30°$일 때 **$N_q = 22.46$**.

문제

예제

조건

지반 $\varphi' = 30^\circ$ 및 $\varphi' = 20^\circ$ (모듈 모델)

식 $$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \varphi/2)\tan\varphi}}{2\cos^2(45^\circ + \varphi/2)}$$

구하는 값

각 φ′에 대해 **N_q** 값을 닫힌 형태의 식으로부터 구하라.

풀이

풀이

1 φ′ = 30° (3π/4 − φ/2 = 2.0944 rad; tan 30° = 0.5774; 45° + 15° = 60°)

$$N_q = \frac{e^{2(2.0944)(0.5774)}}{2\cos^2 60^\circ} = \frac{e^{2.4184}}{2(0.25)} = \frac{11.228}{0.5} = \mathbf{22.46}$$

2 φ′ = 20° (3π/4 − φ/2 = 2.1817 rad; tan 20° = 0.3640; 45° + 10° = 55°)

$$N_q = \frac{e^{2(2.1817)(0.3640)}}{2\cos^2 55^\circ} = \frac{e^{1.5881}}{2(0.3290)} = \frac{4.895}{0.6580} = \mathbf{7.44}$$

$N_q(30°)$ = **22.46**, $N_q(20°)$ = **7.44**; φ′ = 0일 때 N_q = 1이다. 이 값들은 모듈의 표에 수록된 값이다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

$\cot\varphi\,(N_q - 1)$

이론

점착력만 고려하면 극점은 다시 b에 있다. bcfj 영역에는 점착력 C = c·bc(반지름을 따라 작용하며 모멘트가 없음)가 작용하고, jf 위에는 점착력을 고려한 Rankine 수동력이, 나선을 따라서는 c가 작용한다. 나선 요소는 ds = r sec φ dθ이고 그 모멘트는 c r² dθ이다:

$$P_{p(2)} = 2cH_d \tan\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right) \qquad M_c = \int_0^{\theta_1} c\,r^2 d\theta = \frac{c}{2\tan\varphi}\left(r_1^2 - r_0^2\right)$$

모멘트 평형 $P_{pc}\,B/4 = P_{p(2)}\,H_d/2 + M_c$로부터 P_{pc}를 구하고, 쐐기 평형으로부터 **$q_c\,B = 2\,C\sin\varphi + 2\,P_{pc}$**가 성립한다(C의 수직 성분). 두 항등식을 적용하면 괄호 안의 항이 소거된다:

$$q_c = c\cot\varphi\left[\frac{e^{2\left(\frac{3\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}}{2\cos^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right)} - 1\right] = c\cot\varphi\,(N_q - 1) = cN_c$$

$$N_c = \cot\varphi\,(N_q - 1)$$

결과

φ → 0일 때 $N_c \to 3\pi/2 + 1 = 5.71$이다.

Terzaghi의 φ = 0 값은 **5.7**이다 (Prandtl의 5.14와는 다른 방법에 의한 값). φ = 30°에 대해 **N_c = 37.16**이다.

문제

예제

조건

지반	$\varphi' = 30^\circ$ **및** $\varphi' = 20^\circ$
이전 예제	$N_q(30^\circ) = 22.46,\ N_q(20^\circ) = 7.44$

구하는 값

N_c 값을 $N_c = \cot\varphi\,(N_q - 1)$로 구하고, $\varphi \to 0$일 때의 극한을 쓰라.

풀이

풀이

1 φ′ = 30° 및 φ′ = 20°

$$N_c(30^\circ) = \frac{22.46 - 1}{0.5774} = \mathbf{37.16} \qquad N_c(20^\circ) = \frac{7.44 - 1}{0.3640} = \mathbf{17.69}$$

2 φ → 0 극한

$$N_c \to \frac{3\pi}{2} + 1 = \mathbf{5.71} \approx 5.7 \text{ (Terzaghi의 값)}$$

$N_c(30°)$ = **37.16**, $N_c(20°)$ = **17.69**. 같은 φ′에서 N_c는 N_q보다 훨씬 크다: 점착력 항은 φ가 작을 때 지배적이 된다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

시행 극점과 닫힌 형태의 식이 없는 계수

이론

자중을 고려하면 극점 b의 나선은 더 이상 위험하지 않다. 극점 O는 직선 fb의 b 너머 연장선 위에서 **시행착오 방식으로** 이동시키며, 각 위치마다 새로운 나선과 새로운 bcfj 토체가 얻어진다. O에 대한 모멘트:

$$P_{p\gamma} = \frac{W\,l_w + P_{p(3)}\,l_R}{l_p} \qquad P_{p(3)} = \tfrac{1}{2}\gamma H_d^2 \tan^2\!\left(45^\circ + \tfrac{\varphi}{2}\right)$$

가장 작은 $P_{p\gamma}$가 지반이 발현하는 값이다. 쐐기는 이제 자신의 중량도 지지한다: $W_w = ½\ B\ h\ \gamma = (B^2/4)\ \gamma \tan\varphi$. $P_{p\gamma} = ⅛\ \gamma\ B^2\ K_{p\gamma} \tan^2\varphi$로 쓰면($K_{p\gamma}$는 φ에만 의존):

$$q_\gamma B = 2P_{p\gamma} - W_w \;\Rightarrow\; q_\gamma = \tfrac{1}{2}\gamma B\, N_\gamma \qquad N_\gamma = \tfrac{1}{2}K_{p\gamma}\tan^2\varphi - \tfrac{1}{2}\tan\varphi$$

$K_{p\gamma}$는 시행착오식 감소 과정에서 얻어지므로 **N_γ의 닫힌 형태는 없으며**, 각 φ에 대해 수치적으로 계산한다. 모듈은 **Kumbhojkar (1993)** 값(표 1)을 사용하고 그 사이는 선형으로 보간한다: φ = 30°일 때 N_γ = 19.13.

왜 표인가?

N_c와 N_q는 닫힌 형태의 식에서 구해진다. 반면 N_γ는 최소화의 결과이며, 같은 방법으로 쓰더라도 모두가 사용하는 하나의 공식은 없다.

문제

예제

조건

지반	$\varphi' = 20^\circ$ **(모듈 모델) 및** 30°**; 또한** 22.5°
출처	**Kumbhojkar (1993) 표 1: $N_\gamma(22°) = 5.09$, $N_\gamma(23°) = 6.00$**

구하는 값

$N_\gamma(20°)$, $N_\gamma(30°)$; 이로부터 $K_{p\gamma}$; 그리고 $N_\gamma(22.5°)$(선형 보간).

풀이

풀이

1 표 1 ($N_\gamma = \frac{1}{2} K_{p\gamma} \tan^2\varphi - \frac{1}{2}\tan\varphi \Rightarrow K_{p\gamma} = (2N_\gamma + \tan\varphi)/\tan^2\varphi$)

$$N_\gamma(20^\circ) = 3.64 \;\Rightarrow\; K_{p\gamma} = \frac{2(3.64) + 0.3640}{0.3640^2} = 57.7$$

$$N_\gamma(30^\circ) = 19.13 \;\Rightarrow\; K_{p\gamma} = \frac{2(19.13) + 0.5774}{0.5774^2} = 116.5$$

2 $\varphi' = 22.5°$: 22°와 23°의 중간 (t = 0.5)

$$N_\gamma = 5.09 + 0.5(6.00 - 5.09) = \mathbf{5.545}$$

$N_\gamma(20°) = \mathbf{3.64}$, $N_\gamma(30°) = \mathbf{19.13}$; $K_{p\gamma}$ 57.7 → 116.5. 모듈은 N_c와 N_q도 같은 표에서 선형 보간한다: 22.5°에서 $N_c = 21.01$, $N_q = 9.71$.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

세 부분의 합과 표 1

이론

세 항을 합하면 점착력, 마찰, 자중을 가진 지반에서 **연속기초**의 지지력은 다음과 같다:

$$q_u = q_c + q_q + q_\gamma = c\,N_c + q\,N_q + \tfrac{1}{2}\gamma B\,N_\gamma$$

N_q, N_c, N_γ는 **오직 φ에만** 의존하며, 표 1은 모듈이 읽는 값을 제시한다.

중첩은 엄밀하지 않다: N_q와 N_c는 극이 기초 가장자리에 있는 나선에서, N_γ는 극이 O에 있는 나선에서 구한다. 개별로 최소화한 부분들의 합은 결합 문제의 최솟값을 넘을 수 없으며, 오차는 **안전측**에 있다.

실험 결과는 쐐기 경사면의 각이 φ가 아니라 약 **45° + φ/2**임을 보여준다. Terzaghi의 계수(및 이 모듈)는 α = φ를 유지하며, 45° + φ/2 쐐기는 Prandtl–Reissner 계수(Meyerhof, Hansen, Vesic 모듈)의 기반이고 그 N_c, N_q 값은 이 때문에 다르다.

표 1 (Terzaghi)

φ′ (°)	N_c	N_q	N_γ
0	5.70	1.00	0.00
5	7.34	1.64	0.14
10	9.60	2.69	0.56
15	12.86	4.45	1.52
20	17.69	7.44	3.64
25	25.13	12.72	8.34
30	37.16	22.46	19.13
35	57.75	41.44	45.41
40	95.66	81.27	116.31
45	172.29	173.29	325.34
50	347.51	415.15	1,072.80

문제

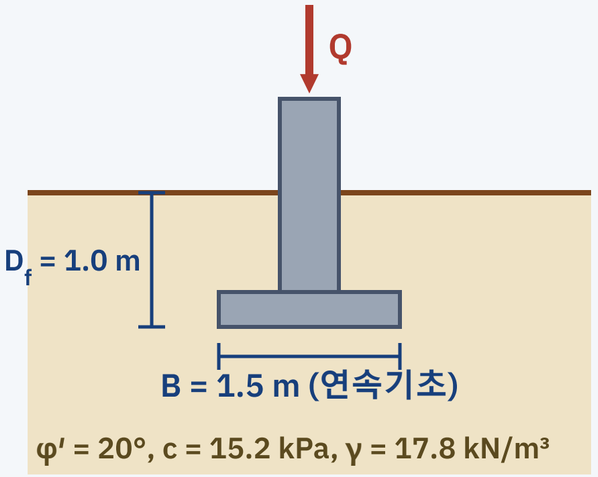
예제

조건

기초	**연속기초, B = 1.5 m, D_f = 1.0 m**
지반	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20°$, $\gamma = 17.8$ kN/m^3
지하수	**없음 (깊은 곳)**
표 1 (20°)	**N_c = 17.69, N_q = 7.44, N_γ = 3.64**

구하는 값

q_u와 단위 길이당 Q_u 값을 구하라.



풀이

풀이

1 상재하중 $q = \gamma D_f = 17.8 \times 1.0 = 17.8$ kPa; 연속기초에는 형상계수가 없다

$$q_u = 15.2(17.69) + 17.8(7.44) + \tfrac{1}{2}(17.8)(1.5)(3.64)$$
$$= 268.89 + 132.43 + 48.59 = \mathbf{449.91}\ \text{kPa}$$

2 단위길이당 하중

$$Q_u = q_u B = 449.91(1.5) = \mathbf{674.9}\ \text{kN/m}$$

연속기초의 지지력은 **449.9 kPa**이다: 점착력 항 60%, 상재하중 29%, 자중 11%.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

반경험적 형상계수

이론

정사각형기초 또는 원형기초 아래의 지반은 평면 변형률 상태에 있지 않으므로 유도 과정을 그대로 적용할 수 없다. Terzaghi는 점착력 항과 단위중량 항에 대해 **반경험 계수**를 제안하였다:

$$q_u = 1.3\,c\,N_c + q\,N_q + 0.4\,\gamma B\,N_\gamma \qquad \text{(정사각형, B × B)}$$

$$q_u = 1.3\,c\,N_c + q\,N_q + 0.3\,\gamma B\,N_\gamma \qquad \text{(원형, 지름 B)}$$

포화 점토에서의 비배수 재하($\varphi = 0$, $c = c_u$; $N_c = 5.7$, $N_q = 1$, $N_\gamma = 0$):

$$q_u = 5.7\,c_u + q \text{ (띠)} \qquad q_u = 1.3 \times 5.7\,c_u + q = 7.41\,c_u + q \text{ (정사각형, 원형)}$$

모듈의 **형상** 옵션은 이 계수들을 선택한다. Terzaghi는 직사각형기초에 대한 계수를 제시하지 않았으며, 이 경우는 형상계수를 포함한 일반 지지력 공식(Meyerhof, Hansen, Vesic)이 다룬다.

계수

기초	c N_c	γ B N_γ	B
띠	1	0.5	폭
정사각형	1.3	0.4	가장자리
원	1.3	0.3	직경

문제

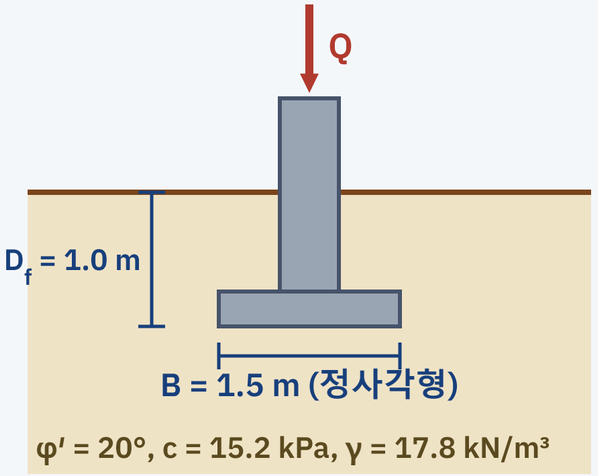
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.5 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
단위중량	$\gamma = 17.8$ kN/m^3 **(상단)**
지하수	**없음 (깊은 곳)**
비교	**원형, 지름 B = 1.5 m; 또한 점토: φ = 0, c_u = 40 kPa, γ = 18 kN/m³, D_f = 1 m**

구하는 값

정사각형기초와 원형기초에 대한 q_u와 Q_u;
점토에서 연속기초와 정사각형기초의 q_u.



풀이 (1/2)

풀이

1 정사각형(0.4)과 원형(0.3); $N_c = 17.69$, $N_q = 7.44$, $N_\gamma = 3.64$

$$\text{정사각형}: \; q_u = 1.3(15.2)(17.69) + 17.8(7.44) + 0.4(17.8)(1.5)(3.64)$$
$$= 349.55 + 132.43 + 38.88 = \mathbf{520.86}\ \text{kPa}$$
$$\text{원}: \; q_u = 349.55 + 132.43 + 0.3(17.8)(1.5)(3.64) = \mathbf{511.14}\ \text{kPa}$$

2 하중

$$Q_u^{square} = q_u B^2 = 520.86(2.25) = \mathbf{1{,}171.9}\ \text{kN}$$
$$Q_u^{circle} = q_u \frac{\pi B^2}{4} = 511.14(1.767) = \mathbf{903.3}\ \text{kN}$$

정사각형기초의 q_u는 원형기초의 값보다 1.9%만 더 클 뿐이다(γ 항만 다르다).

풀이 (2/2)

풀이

3 비배수 점토 (q = 18 × 1 = 18 kPa; N_c = 5.7)

띠 : $q_u = 5.7(40) + 18 = \mathbf{246.0}$ kPa

정사각형, 원형 : $q_u = 1.3(5.7)(40) + 18 = 7.41(40) + 18 = \mathbf{314.4}$ kPa

기초	c N_c 항	q	q_u (kPa)
띠	228.0	18.0	**246.0**
정사각형 / 원형	296.4	18.0	**314.4**

점토에서 지지력은 거의 점착력에서만 나오며, 정사각형기초와 원형기초는 연속기초보다 **28%** 더 큰 하중을 지지한다(계수 1.3).

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

동일한 식, 저감된 c와 φ

이론

지반이 국부 전단으로 파괴될 때에는 파괴 메커니즘이 완전히 발달하지 않으며 강도의 일부만 발현된다. Terzaghi는 **같은 식**을 유지하면서 강도 정수를 감소시켰다:

$$c' = \frac{2}{3}\,c \qquad \varphi' = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3}\tan\varphi\right)$$

수정된 N'_c, N'_q, N'_γ는 동일한 함수를 φ′에서 계산한 값이다(표 3):

$$q_u = c' N'_c + q N'_q + \tfrac{1}{2}\gamma B N'_\gamma \text{ (띠)} \qquad q_u = 1.3\,c' N'_c + q N'_q + 0.4\,\gamma B N'_\gamma \text{ (정사각형)}$$

c′ = ⅔ c이므로 정사각형기초와 원형기초에서 점착력 항은 1.3 × ⅔ = **0.867 c N′c**가 된다.

모래에 대해 Vesic(1973)은 고정값 ⅔ 대신 상대밀도에 따른 감소를 제안하였다: **φ′ = tan⁻¹(k tan φ)**, k = 0.67 + D_r − 0.75 D_r^2 (0 ≤ D_r ≤ 0.67).

표 3 (국부전단)

φ (°)	φ′ (°)	N′c	N′q	N′γ
10	6.70	8.03	1.94	0.25
15	10.13	9.67	2.73	0.58
20	13.64	11.86	3.88	1.18
25	17.27	14.82	5.61	2.29
30	21.05	18.99	8.31	4.35
35	25.02	25.18	12.75	8.38
40	29.22	34.89	20.53	16.84

문제

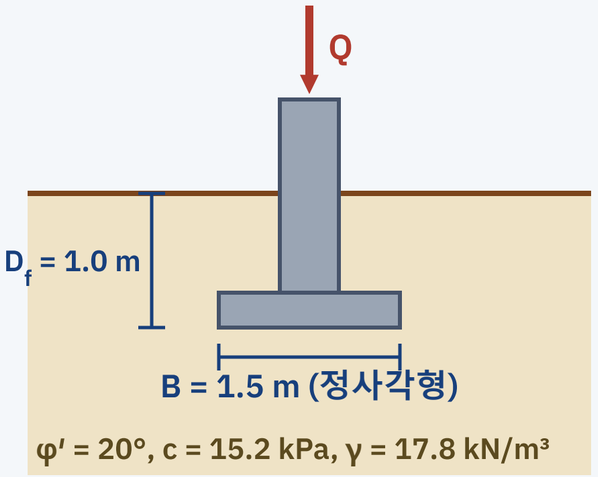
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.5 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
단위중량	$\gamma = 17.8$ kN/m^3 **(상단)**
지하수	**없음 (깊은 곳)**
파괴 형태	**국부전단**

구하는 값

c′, φ′, 보정 계수 및 **q_u**; 전반전단파괴 대비 비율.



풀이 (1/2)

풀이

1 감소된 강도 (tan 20° = 0.3640)

$$\varphi' = \tan^{-1}\left(\tfrac{2}{3}\cdot 0.3640\right) = \mathbf{13.64}^\circ \qquad c' = \tfrac{2}{3}(15.2) = \mathbf{10.13}\ \text{kPa}$$

2 표 3 (φ′ = 13.64°, 보간)

$$N_c' = \mathbf{11.86} \qquad N_q' = \mathbf{3.88} \qquad N_\gamma' = \mathbf{1.18}$$

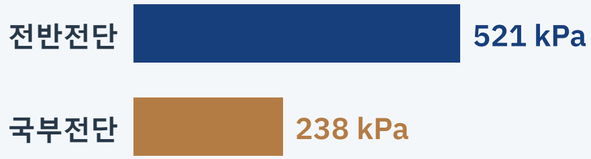
풀이 (2/2)

풀이

3 정사각형기초 (q = 17.8 kPa)

$$q_u = 1.3(10.13)(11.86) + 17.8(3.88) + 0.4(17.8)(1.5)(1.18)$$
$$= 156.20 + 69.05 + 12.61 = \mathbf{237.86}\ \text{kPa}$$

국부전단에서 q_u = **237.86 kPa**로, 전반전단의 값(520.86 kPa)의 **46%**에 불과하다. 느슨하거나 연약한 지반에서는 이 감소가 지지력의 **절반 이상**을 없앤다.



GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

물은 q와 γ만 변화시킴

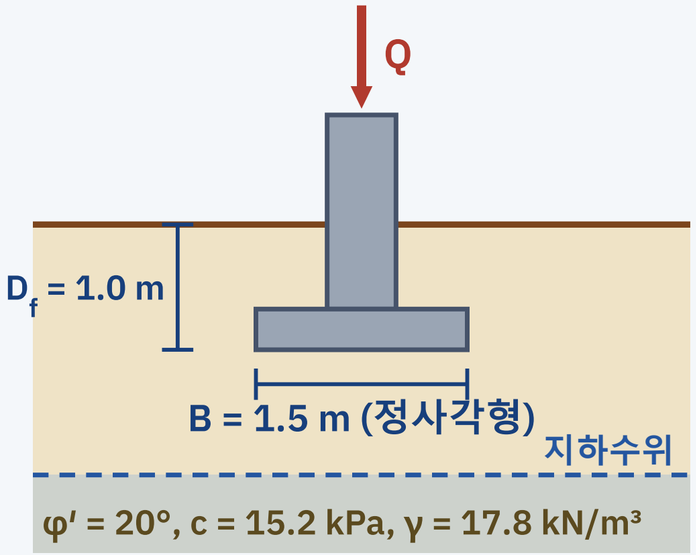
이론

유도 과정은 지하수가 매우 깊은 곳에 있다고 가정한다. 기초 저면 가까이에 물이 있으면 두 가지가 바뀐다. **상재하중 q**와 ½γBN$_\gamma$항의 **단위중량**이며, 계수는 결코 바뀌지 않는다. 지하수위 아래에서 유효단위중량은 γ′ = γ$_{sat}$ − γ$_w$(γ$_w$ = 9.81)이다. 모듈은 세 가지 경우를 구분한다(D$_w$는 지표면으로부터의 깊이):

$$\text{I } (D_w \le D_f):\ q = \gamma D_w + \gamma'(D_f - D_w),\ \ \gamma \to \gamma' \text{ (세 번째 항)}$$

$$\text{III } (D_w > D_f):\ q = \gamma D_f,\ \ \bar{\gamma} = \frac{1}{B}\left[\gamma D + \gamma'(B - D)\right],\ D = D_w - D_f \le B$$

D$_w$ = D$_f$ (경우 II)는 경우 I의 특수한 사례이다: q = γ D$_f$이며 세 번째 항에는 γ′를 사용한다. 지하수위가 기초 저면 아래 B보다 깊으면(D > B) 물은 파괴 영역 아래에 있으므로 지하수가 없는 것으로 보고 식을 적용한다.



문제

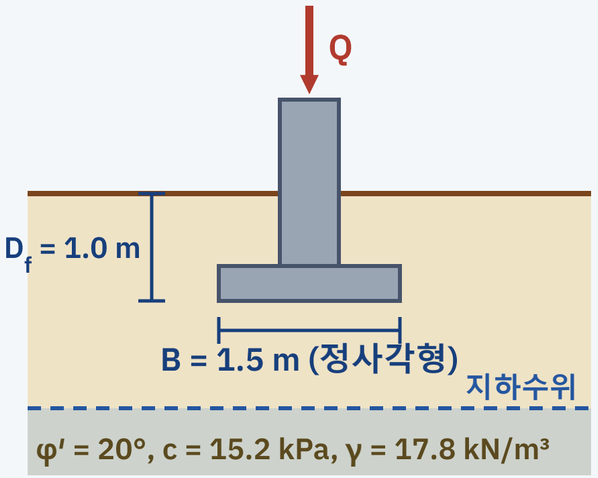
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.5 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
단위중량	$\gamma = 17.8$ kN/m^3 **(상단)**
지하수	$\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3; $D_w = 0.5;\ 1.0;\ 2.0$ **및** 3.5 m

구하는 값

각 경우에 대해 **q**, 세 번째 항의 단위중량 및 정사각형기초의 q_u 값을 구하라.



풀이 (1/3)

풀이

1 $\gamma' = 19 - 9.81 = 9.19$ kN/m³. 경우 I($D_w = 0.5$) 및 II($D_w = D_f = 1.0$)

$$D_w = 0.5: \ q = 17.8(0.5) + 9.19(0.5) = \mathbf{13.495}\ \text{kPa},\ \gamma' = 9.19$$

$$D_w = 1.0: \ q = 17.8(1.0) = \mathbf{17.8}\ \text{kPa},\ \gamma' = 9.19$$

2 경우 III($D_w = 2.0 \Rightarrow D = 1.0 \le B = 1.5$)와 물의 영향 없음($D_w = 3.5 \Rightarrow D = 2.5 > B$)

$$D_w = 2.0: \ \bar{\gamma} = \frac{1}{1.5}\left[17.8(1.0) + 9.19(0.5)\right] = \mathbf{14.93}\ \text{kN/m}^3,\ q = 17.8\ \text{kPa}$$

$$D_w = 3.5: \ q = 17.8,\ \gamma = 17.8$$

풀이 (2/3)

풀이

3 D_w = 2.0 m일 때의 q_u (정사각형기초; 첫째 항과 둘째 항은 변하지 않음)

$$q_u = 1.3(15.2)(17.69) + 17.8(7.44) + 0.4(14.93)(1.5)(3.64)$$
$$= 349.55 + 132.43 + 32.61 = \mathbf{514.59}\ \text{kPa}$$

모듈의 초기 모델(D_w = 2 m, 경우 III): q_u = **514.59 kPa**; 물이 없었다면 520.86 kPa.

풀이 (3/3)

풀이

D_w (m)	상태	q (kPa)	γ 세 번째 항	q_u (kPa)
0.5	I	13.50	9.19	**470.0**
1.0	II	17.80	9.19	**502.1**
2.0	III	17.80	14.93	**514.6**
3.5	영향 없음	17.80	17.80	**520.9**

지하수위가 0.5 m일 때 q_u = 470, 지하수위가 깊을 때 521 kPa(10% 차이)이다. 점착력 항(349.6 kPa)은 전혀 변하지 않는다: **물은 q와 γ를 통해서만 반영된다.**

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

전 값과 순 값, 작용 압력

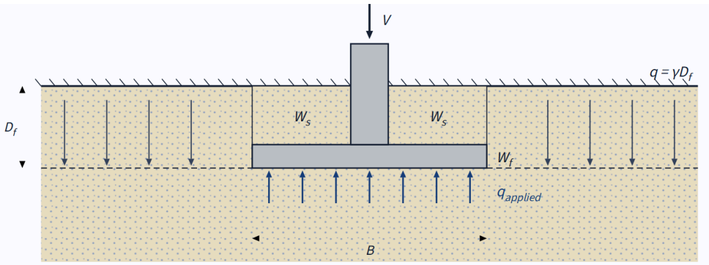
이론

q_u는 파괴 시점의 압력이다. 모듈은 이를 안전율 FS로 나누고 **전**압력과 **순**압력을 구분하여 다룬다. 순압력은 굴착 전부터 기초 저면에 존재하던 상재하중 q 위에 기초가 **추가로 가하는** 압력이다:

$$q_{u,net} = q_u - q \qquad q_{all,g} = \frac{q_u}{FS} \qquad q_{all,n} = \frac{q_{u,net}}{FS}$$

적용압력 $q_{applied}$는 사용하중 하에서 기초 저면의 **연직 전압력**이다: 기둥 하중 V, 기초 자중 W_f, 기초 위 지반 중량 W_s를 저면 면적으로 나눈 값이다(정사각형 B^2, 원형 $\pi B^2/4$, 연속기초 B). 기초는 다음 조건에서 적합하다:

$$q_{apply} = \frac{V + W_f + W_s}{A} \le q_{all,g} \qquad FS_{\text{실제}} = \frac{q_u}{q_{apply}} \qquad q_{apply} - q \le q_{all,n}$$



q ≥ 0이고 FS ≥ 1이면 **전압력 기준 검토가 지배한다**: 이를 통과하면 순압력 기준 검토도 통과한다. q_{app} 값을 입력하지 않으면 모듈은 지지력만 제공한다. FS ≈ 3은 통상적인 값이며, 이론보다는 강도 매개변수의 불확실성을 반영한다.

문제

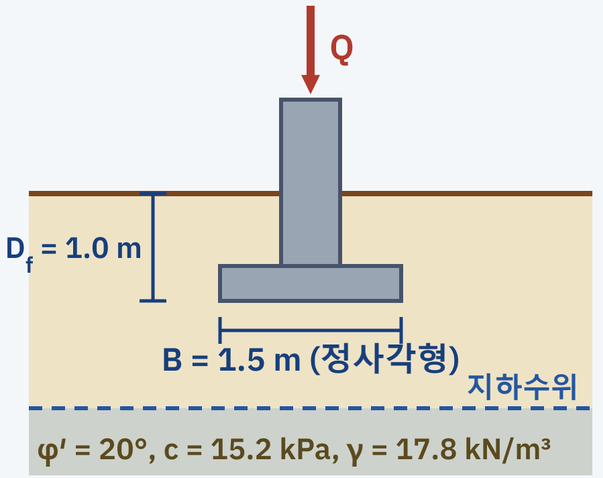
예제

조건

기초	**정사각형, B = L = 1.5 m, 기초 저면 깊이 D_f = 1.0 m**
지반	$c = 15.2$ kPa, $\varphi' = 20^\circ$
단위중량	$\gamma = 17.8$ kN/m^3 **(상단)**
지하수	$\gamma_{sat} = 19$ kN/m^3, $D_w = 2$ m **(예제 7: $q_u = 514.59$ kPa)**
안전	**FS = 3**
작용 압력	**(a) q_{app} = 150 kPa · (b) q_{app} = 200 kPa**

구하는 값

$q_{u,net}$, $q_{all,g}$, $q_{all,n}$, Q_{all} 및 각 $q_{applied}$에 대한 검토.



풀이

풀이

1 허용지지압력 (q = 17.8 kPa)

$$q_{u,net} = 514.59 - 17.8 = 496.79 \text{ kPa}$$

$$q_{all,g} = \frac{514.59}{3} = \mathbf{171.53} \text{ kPa} \qquad q_{all,n} = \frac{496.79}{3} = \mathbf{165.60} \text{ kPa}$$

$$Q_{all} = 171.53(1.5^2) = \mathbf{385.9} \text{ kN}$$

2 검토

$$\text{(a) } 150 \le 171.53 \Rightarrow \textbf{만족},\ FS_{\text{실제}} = \frac{514.59}{150} = 3.43 \ge 3$$

$$\text{(b) } 200 > 171.53 \Rightarrow \textbf{만족하지 않음},\ FS_{\text{실제}} = \frac{514.59}{200} = 2.57 < 3$$

q_{app} = 150 kPa에서는 순 지지력 조건도 만족한다(132.2 ≤ 165.6 kPa); 200 kPa에서는 전 지지력 조건과 순 지지력 조건 모두 만족하지 못한다. 전 지지력 조건을 만족하면 순 지지력 조건은 항상 만족한다.

GeoTerva에서 풀이 확인하기 ↗

요약

핵심 정리

Terzaghi (1943): 연속, 거친 저면, 얕은 ($D_f \le B$) 기초; 전반전단파괴; 쐐기(I), 방사(II), 수동(III) 영역; 쐐기 경계 $\alpha = \varphi$

중첩: $P_p = P_{pq} + P_{pc} + P_{p\gamma}$; $q_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma$

$N_q = e^{2(3\pi/4 - \varphi/2)\tan\varphi}/[2\cos^2(45° + \varphi/2)]$, $N_c = \cot\varphi\,(N_q - 1)$ (닫힌 해), **N_γ**는 Kumbhojkar 표에서 구한다($\varphi = 20°$: 17.69; 7.44; 3.64)

정사각형: 1.3 $cN_c + qN_q + 0.4\,\gamma B N_\gamma$; **원형**: 0.3; **비배수**: $N_c = 5.7$, 연속기초 5.7 $c_u + q$, 정사각형 7.41 $c_u + q$

국부전단: 같은 식에 $c' = \frac{2}{3}\,c$, $\varphi' = \tan^{-1}(\frac{2}{3}\tan\varphi)$ 적용 (예: 520.86 → 237.86 kPa)

지하수는 q와 γ만 변화시킨다 (3가지 경우): 예: 514.59 kPa

검토: $q_{app} \le q_{all,g}$, FS_{actual} 및 순 값; $Q_{all} = q_{all,g} \cdot A$

참고문헌

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Das, B.M. (2017). Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement, 3rd ed. CRC Press, Boca Raton — 섹션 2.2–2.3; 본 페이지는 이 서적의 유도 순서를 따른다.

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning — 장 16: 지하수위 조건, 안전율, 표 16.1.

Kumbhojkar, A.S. (1993). Numerical evaluation of Terzaghi's Nγ. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119(3), 598–607.

Prandtl, L. (1921). Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. ZAMM, 1(1), 15–20.

Vesic, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM1), 45–73.

본 페이지의 그림들은 해당 파괴 메커니즘을 직접 도시한 것이며, 수식, 그림 및 표 번호는 해당 문헌 고유의 번호이다.

참고

그림 중 일부는 GeoTerva 이론 페이지에서 가져왔으며, 수치 예제는 모두 모듈 자체의 계산 라이브러리와 표로 산출하였고 모듈도 같은 값을 준다.

온라인 지반공학 계산

이론에서 실무로

이 강의의 예제 기초를 GeoTerva에서 단계별로 계산해 보기: 모듈이 이 모델로 열린다.

모듈 열기 →

이론 페이지 →

스마트폰으로 열기

체험 모듈은 가입 없이 이용할 수 있습니다.

강의에서 사용하려면: info@geoterva.com