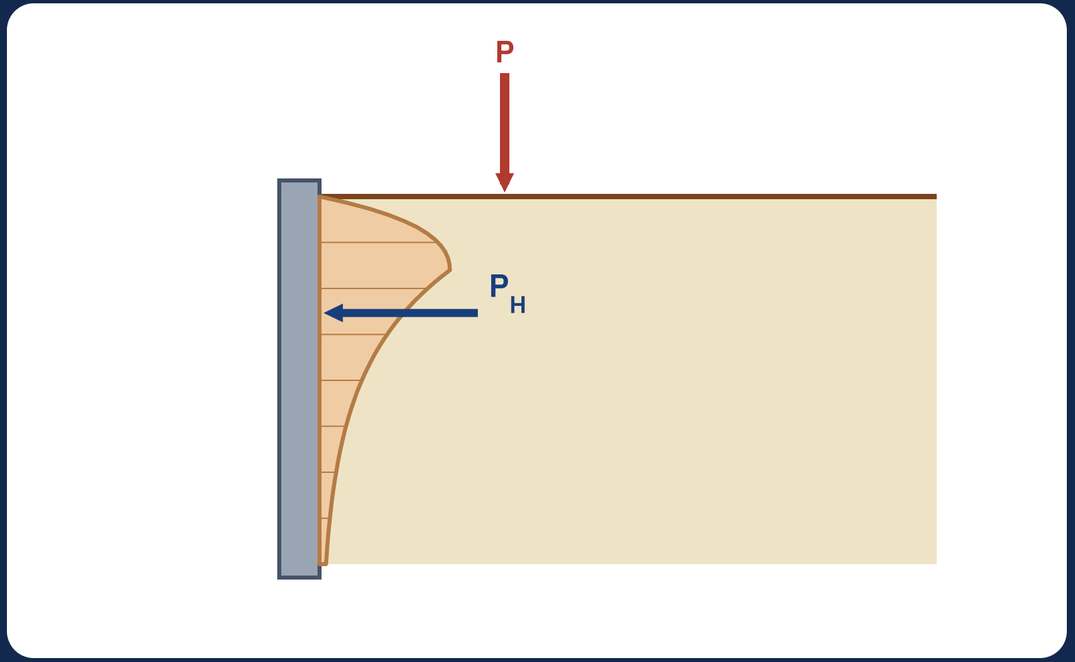
GeoTerva

地盤工学の講義スライド ・ 上載荷重

線状上載荷重

講義：壁に平行な線状荷重が壁に生じさせる土圧；2つの方法、合力とその作用線、計算例。

m = x/H · n = z/H　弾性剛体壁　Terzaghi–NAVFAC図表　$I_0 \cdot I_1$　P_Hとz_R



この講義で学ぶこと

- 線荷重の**無次元**幾何：荷重の距離**m = x/H**および深さ**n = z/H**
- **弾性（剛体壁）**解：半無限体応力の2倍。**x_{min} = 0.30 m**の規則
- **Terzaghi–NAVFACの図表**：m > 0.4およびm ≤ 0.4の場合；0.4H以内では距離の影響がないこと
- 合力を**$P_H = P \cdot I_0$**、作用線を**$z_R = H \cdot I_1/I_0$**の閉形式で表す
- 2つの方法を距離、壁高さおよび載荷重について比較した結果

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

例題の擁壁：H = 25 m、線荷重 P = 100 kN/mが壁からx = 5 mの位置にある。力は擁壁の単位長さ当たりである（kN/m）。

壁面に作用する線状荷重

理論

壁に平行な、単位長さ当たりの力として与えられる表面線荷重**P**が、壁から水平距離**x**の位置にある

水平上載荷重による土圧は、無次元の載荷位置 **m = x/H** と無次元の壁深さ **n = z/H** に依存する。

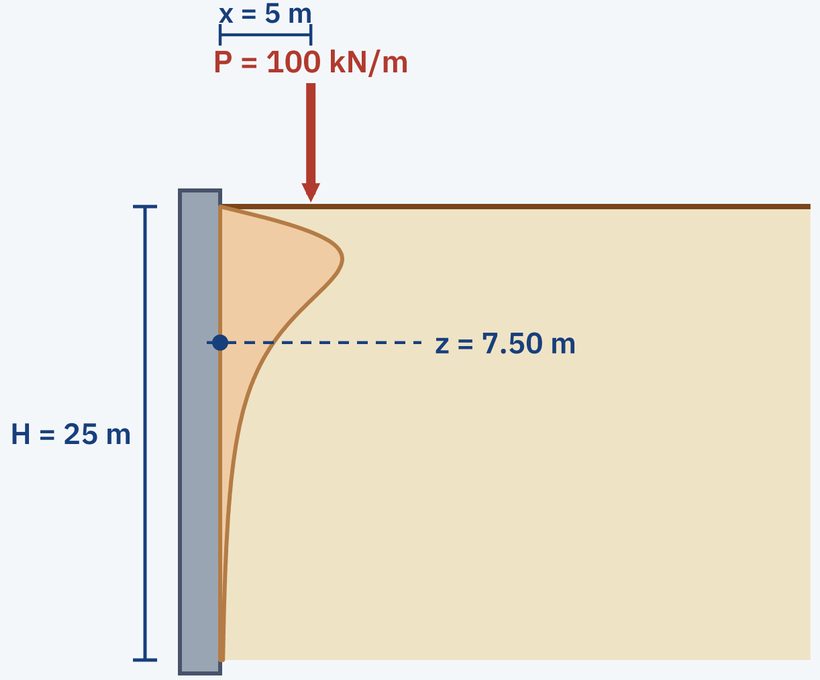
モジュールは2つの手法を提示する：**弾性（剛体壁）**解と **Terzaghi–NAVFAC図表**

$$m = \frac{x}{H}, \qquad n = \frac{z}{H}$$

P ― 壁に平行な、単位長さ当たりの表面線荷重

x = mH ― 壁から荷重までの水平距離；**z = nH** ― 表面からの深さ

σ_H、P_H、z_R ― 土圧、合力、合力の表面からの深さ



剛体壁：弾性応力の2倍

理論

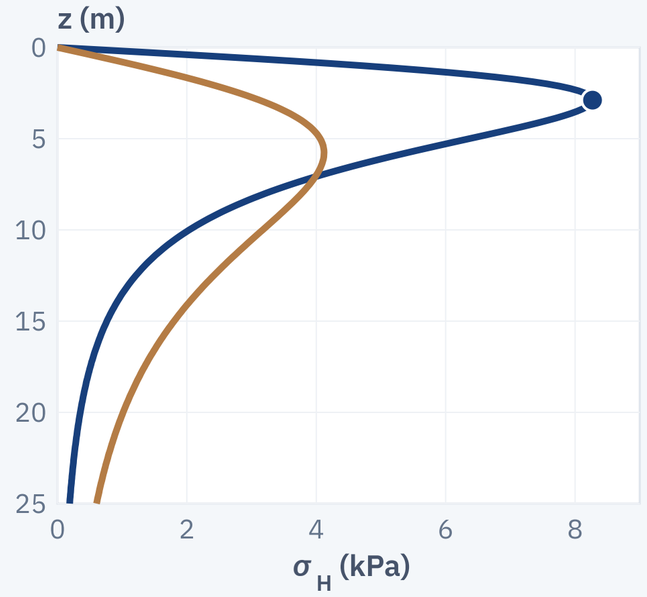
弾性半無限体において線荷重が生じる水平応力（Flamant、Boussinesq）の**2倍**である：変位しない壁は壁面の地盤の動きを妨げる。

任意の距離に対して成立する。最大圧力は深さ**n = m/√3**で生じる。

x_{min} = 0.30 mより近い荷重はこの距離で計算する：最大圧力は荷重が壁面に近づくほど限りなく増加する（合力は有限に留まる）。

$$\sigma_H = \frac{4P}{\pi H} \cdot \frac{m^2 n}{(m^2 + n^2)^2}$$

弾性プロファイル（m = 0.2）



ケース1（m ≤ 0.4）とケース2（m > 0.4）

理論

m > 0.4では弾性解と**同じ式**を用いる。**m ≤ 0.4**では図をm = 0.4で**一定に保つ**（mを含まないケース1）。

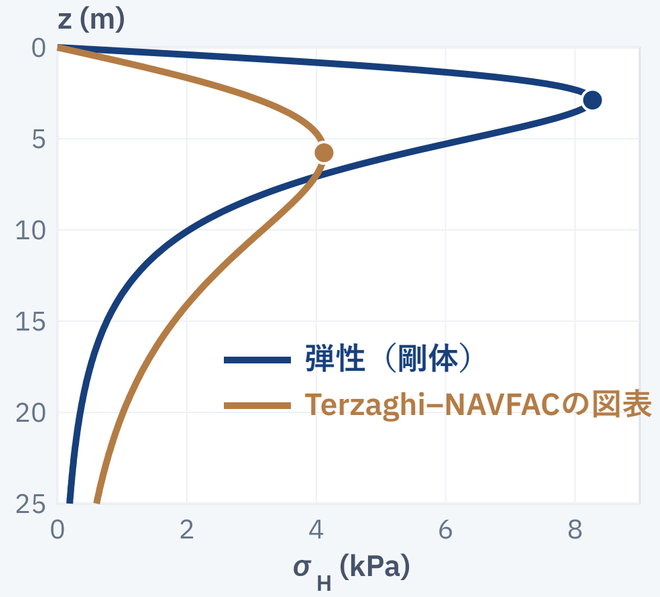
係数0.203は$4 \times 0.16/\pi$の値を丸めたものである；したがって**0.4H以内では距離の影響はない**

所定のモデルではmは一定であり、nは深さとともに変化する

$$\sigma_H = \frac{P}{H} \cdot \frac{0.203\, n}{(0.16 + n^2)^2} \qquad m \le 0.4 \text{（ケース1）}$$

$$\sigma_H = \frac{4P}{\pi H} \cdot \frac{m^2\, n}{(m^2 + n^2)^2} \qquad m > 0.4 \text{（ケース2）}$$

2手法の分布形（m = 0.2）



面積、一次モーメントおよび I_0、I_1

理論

両手法とも**合力図の面積**が、表面からの深さで**一次モーメントが釣り合う点**であり、σ_Hをnの関数として表すと荷重と高さは積分の外に出る

弾性および図表における**m > 0.4**に対する閉形式表現。図表の合力 ≈ 0.64P/(1 + m²)。**m ≤ 0.4**の図表：I_0 = 0.5469（図表の0.55Pの値）

$$P_H = \int_0^H \sigma_H \, dz = P\, I_0 \qquad z_R = \frac{\int_0^H z\, \sigma_H \, dz}{P_H} = H\, \frac{I_1}{I_0}$$

$$I_0 = \frac{2/\pi}{1+m^2} \qquad I_1 = \frac{2}{\pi}\left[m \tan^{-1}\frac{1}{m} - \frac{m^2}{1+m^2} \right]$$

$$I_0 = 0.1015\left(\tfrac{1}{0.16} - \tfrac{1}{1.16}\right) = 0.5469 \qquad I_1 = 0.203\left[\frac{\tan^{-1} 2.5}{0.8} - \frac{1}{2.32}\right] \; (m \le 0.4)$$

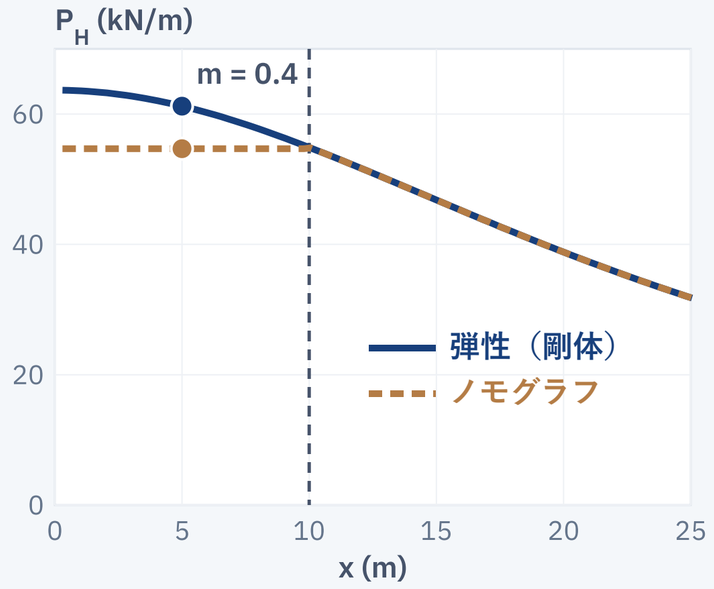
合力と作用線、荷重からの距離による

理論

x (m)	m	P_H 弾性	z_R 弾性	P_H 算定図表	z_R 図表	条件
0.50	0.020	63.64	0.77	54.69	9.81	ケース1
1.00	0.040	63.56	1.49	54.69	9.81	ケース1
2.00	0.080	63.26	2.84	54.69	9.81	ケース1
5.00	0.200	61.21	6.14	54.69	9.81	ケース1
8.00	0.320	57.75	8.56	54.69	9.81	ケース1
10.00	0.400	54.88	9.81	54.69	9.81	ケース1
12.50	0.500	50.93	11.05	50.93	11.05	ケース2
15.00	0.600	46.81	12.02	46.81	12.02	ケース2
25.00	1.000	31.83	14.27	31.83	14.27	ケース2

m ≤ 0.4：図表は同じ P_H と z_R を与える；弾性解は荷重が近づくにつれ P_H を増大させ、z_R を上方へ引き上げる

m > 0.4：両手法は同じ結果を与える



問題

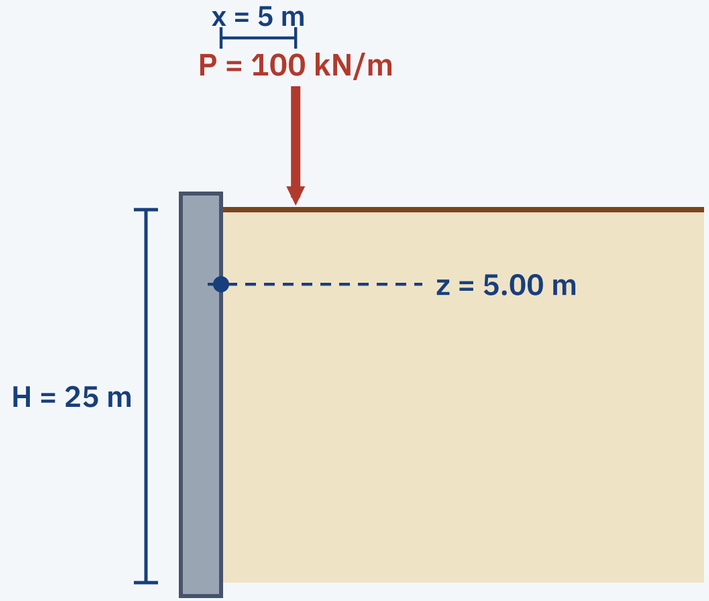
例題

求めるもの

m、**n**および**σ_H**：まず弾性（剛体壁）、次にTerzaghi–NAVFACの図表。

与条件

壁と荷重	$H = 25.00$ **m**；**線荷重**$P = 100.0$ **kN/m**、$x = 5.00$ **m**
深さ	$z = 5.00$ **m**



解答 (1/2)

解答

1 比

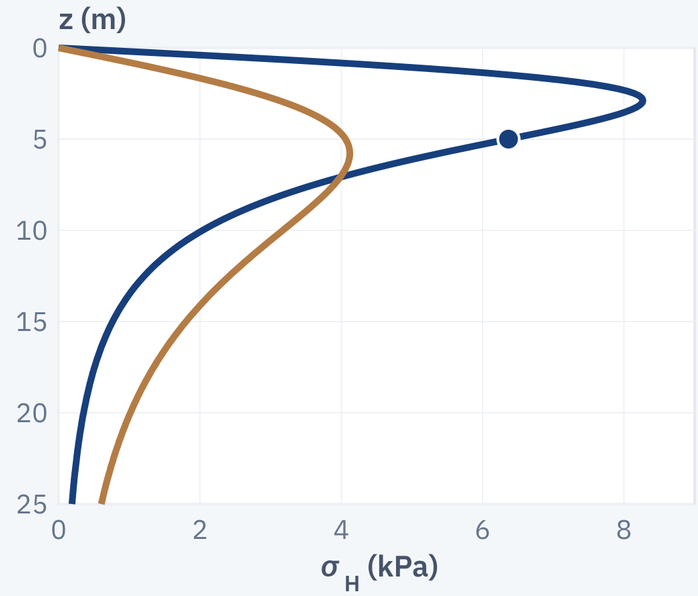
$$m = \frac{x}{H} = \frac{5}{25} = \mathbf{0.20} \qquad n = \frac{z}{H} = \frac{5}{25} = \mathbf{0.20}$$

2 弾性（剛体壁）の圧力

$$\sigma_H = \frac{4 \times 100}{\pi \times 25}\left[\frac{0.20^2 \times 0.20}{(0.20^2 + 0.20^2)^2}\right]$$

$$\sigma_H = 5.0930 \times 1.25 = \mathbf{6.37}\ \text{kPa}$$

z = 5 mでは弾性解により**6.37 kPa**となる。この深さは最大圧力（8.27 kPa、z = 2.89 m）より深い；分布は深さとともに急激に減衰する。



解答 (2/2)

解答

3 ケースの選択

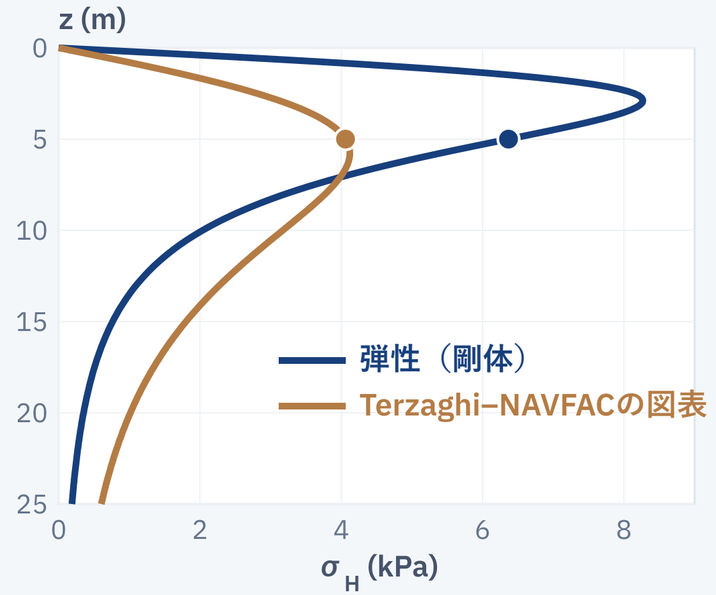
$$m = 0.20 \leq 0.4 \;\Rightarrow\; \text{ケース1（図 } m = 0.4 \text{で固定）}$$

4 図表の圧力

$$\sigma_H = \frac{100}{25}\left[\frac{0.203 \times 0.20}{(0.16 + 0.20^2)^2}\right]$$

$$\sigma_H = 4.00 \times 1.015 = \mathbf{4.06}\ \text{kPa}$$

図表は**4.06 kPa**、弾性解は**6.37 kPa**：この深さで図表の値は弾性値の64%である。図表は近接荷重の圧力を深さ方向に分散させる。



GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

壁と荷重	$H = 25.00$ m, $P = 100.0$ kN/m, $x = 5.00$ m $(m = 0.20)$
深さ	$z = 0$ – 25 m、2.5 mごと

求めるもの

σ_H分布（二つの方法）；**最大土圧**とその深さ。

解答 (1/2)

解答

z (m)	n = z/H	σ_H 弾性（kPa）	σ_H 算図（kPa）
0.00	0.00	0.000	0.000
2.50	0.10	8.149	2.810
5.00	**0.20**	**6.366**	**4.060**
7.50	0.30	3.616	3.898
10.00	0.40	2.037	3.172
12.50	0.50	1.211	2.415
15.00	0.60	0.764	1.802
17.50	0.70	0.508	1.345
20.00	0.80	0.352	1.015
22.50	0.90	0.254	0.777
25.00	1.00	0.188	0.603

弾性圧力は地表直下で最大値となり、深さとともに減少する；図表はより滑らかな分布を与え、より深い位置でピークとなる。z = 5.00 mの行が例題1である。

解答 (2/2)

解答

1 弾性：ピーク n = m/√3

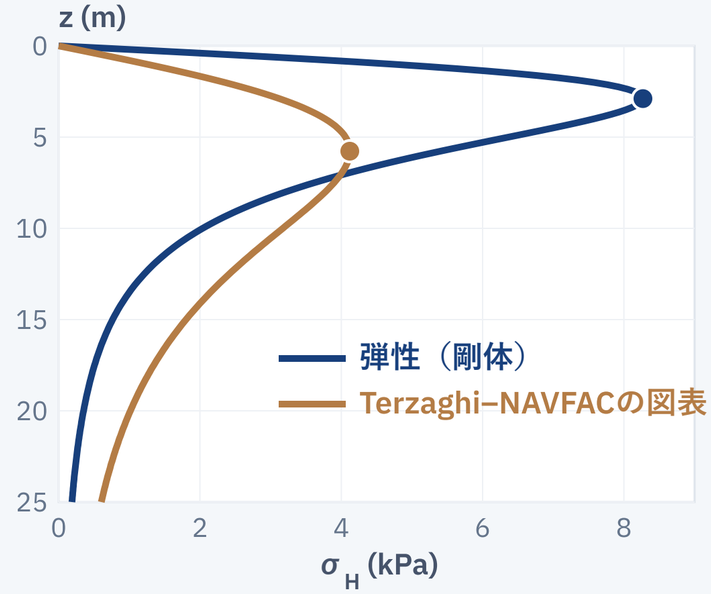
$$n = \frac{m}{\sqrt{3}} = \frac{0.20}{1.7321} = 0.11547 \;\Rightarrow\; z = nH = \mathbf{2.887}\ \text{m}$$

$$\sigma_{H,max} = \frac{9P}{4\sqrt{3}\,\pi\, x} = \frac{9 \times 100}{4(1.7321)\pi(5)} = \mathbf{8.270}\ \text{kPa}$$

2 図表（ケース1）：ピーク n = 0.4/√3

$$n = \frac{0.4}{\sqrt{3}} = 0.23094 \;\Rightarrow\; z = \mathbf{5.774}\ \text{m}$$

$$\sigma_{H,max} = 4\left[\frac{0.203 \times 0.23094}{(0.16 + 0.05333)^2}\right] = \mathbf{4.120}\ \text{kPa}$$



弾性解のピークは**8.27 kPa**（z = 2.89 m）、図表のピークは**4.12 kPa**（z = 5.77 m）である：弾性解は壁の上部に集中し、図表はより下方で半分程度のピークを与える。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

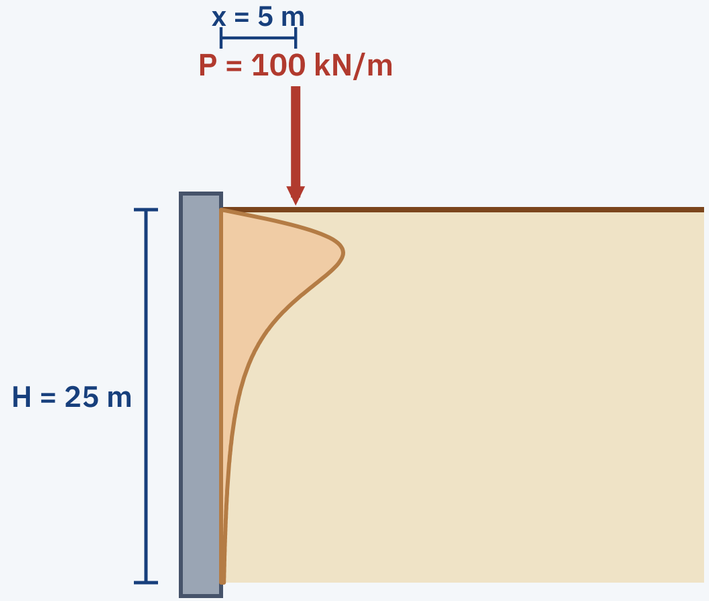
例題

求めるもの

I_0、I_1、合力P_H、z_Rおよび底面からの高さ（2つの方法について）

与条件

壁と荷重	$H = 25.00$ m, $P = 100.0$ kN/m, $x = 5.00$ m
手法	**弾性（剛体壁）とTerzaghi–NAVFACの図表**



解答 (1/2)

解答

1 I_0（面積）

$$I_0 = \frac{2/\pi}{1+m^2} = \frac{0.63662}{1+0.20^2} = \mathbf{0.61213}$$

2 I_1（モーメント）：$(2/\pi)[m\tan^{-1}(1/m) - m^2/(1+m^2)]$

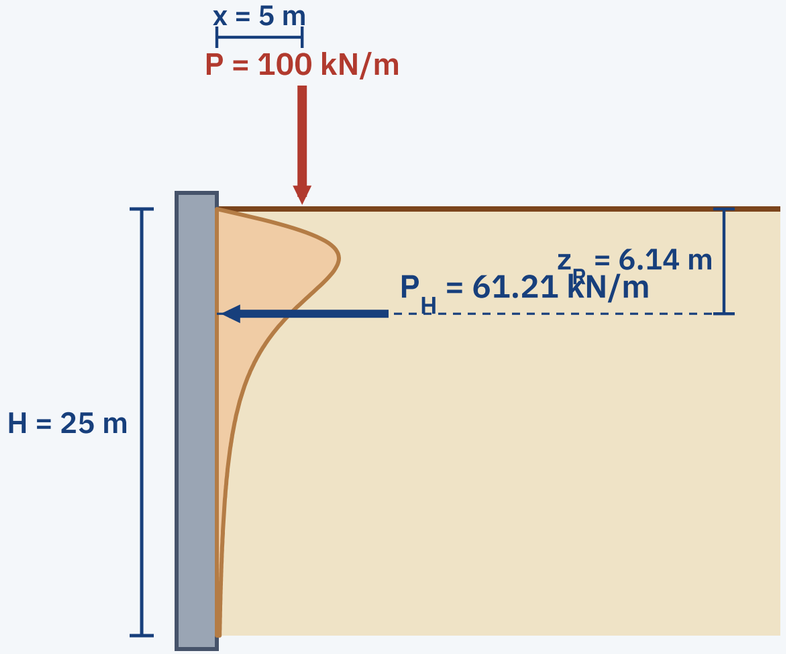
$$I_1 = 0.63662\,[0.20(1.37340) - 0.03846] = \mathbf{0.15038}$$

3 合力と作用線

$$P_H = P\,I_0 = 100 \times 0.61213 = \mathbf{61.21}\ \text{kN/m}$$

$$z_R = H\frac{I_1}{I_0} = 25 \times \frac{0.15038}{0.61213} = \mathbf{6.14}\ \text{m}$$

弾性：**P_H = 61.21 kN/m**、地表の**6.14 m**下方（底面から 18.86 m）。



解答 (2/2)

解答

4 I_0とI_1（$m \le 0.4$、ケース1）

$$I_0 = 0.1015\left(\frac{1}{0.16} - \frac{1}{1.16}\right) = \mathbf{0.5469}$$

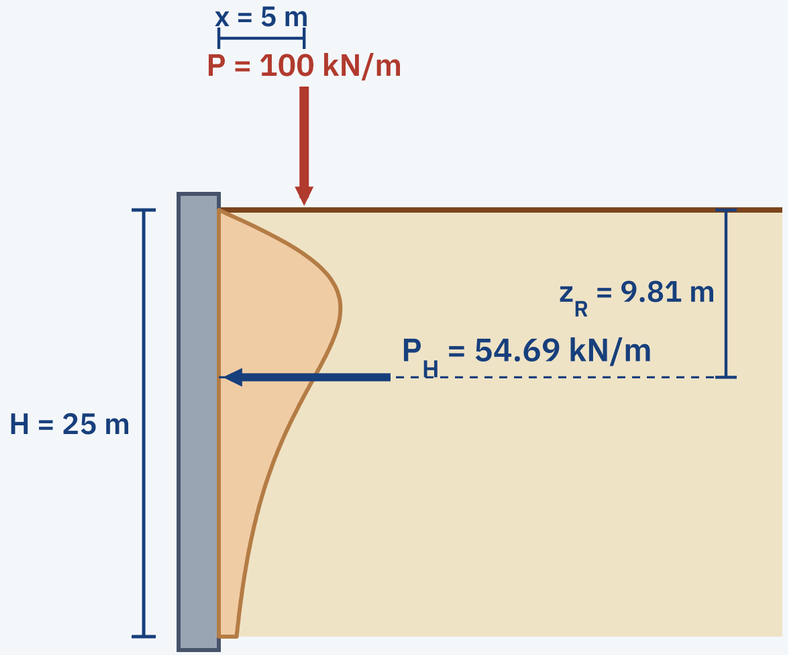
$$I_1 = 0.203\left[\frac{\tan^{-1} 2.5}{0.8} - \frac{1}{2.32}\right]$$

$$I_1 = 0.203\,[1.48786 - 0.43103] = \mathbf{0.21454}$$

5 合力と作用線

$$P_H = 100 \times 0.5469 = \mathbf{54.69}\ \text{kN/m}$$

$$z_R = 25 \times \frac{0.21454}{0.5469} = \mathbf{9.81}\ \text{m}$$



図表：**P_H = 54.69 kN/m**、**z_R = 9.81 m**。弾性解と比べて合力は10.7%小さく、作用線は3.67 m低い。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

壁と荷重	$H = 25.00$ m, $P = 100.0$ kN/m
距離	$x = 0.5;\ 1;\ 2;\ 5;\ 8;\ 10;\ 12.5;\ 15;\ 25$ m

求めるもの

2つの方法に対するP_Hとz_R；x = 12.5 mに対する手計算による照査。

解答 (1/2)

解答

x (m)	m	P_H 弾性（kN/m）	z_R 弾性（m）	P_H 図表（kN/m）	z_R 算定図表（m）	条件
0.50	0.020	63.64	0.77	54.69	9.81	ケース1
1.00	0.040	63.56	1.49	54.69	9.81	ケース1
2.00	0.080	63.26	2.84	54.69	9.81	ケース1
5.00	**0.200**	**61.21**	**6.14**	**54.69**	**9.81**	**ケース1**
8.00	0.320	57.75	8.56	54.69	9.81	ケース1
10.00	0.400	54.88	9.81	54.69	9.81	ケース1
12.50	0.500	50.93	11.05	50.93	11.05	ケース2
15.00	0.600	46.81	12.02	46.81	12.02	ケース2
25.00	1.000	31.83	14.27	31.83	14.27	ケース2

x ≤ 10 m (m ≤ 0.4)：図表は54.69 kN/mおよび9.81 mを与え、距離の影響はない；弾性合力は遠ざかるにつれて徐々に減少し（63.64 → 54.88 kN/m）、作用線は深くなる。**m > 0.4**：両手法は同一である。

解答 (2/2)

解答

1 比と状態

$$m = \frac{12.5}{25} = \mathbf{0.50} > 0.4 \;\Rightarrow\; \text{算図 ケース2：弾性解と同じ式}$$

2 I_0とI_1

$$I_0 = \frac{2/\pi}{1 + 0.50^2} = \frac{0.63662}{1.25} = \mathbf{0.50930}$$

$$I_1 = 0.63662\,[0.50(1.10715) - 0.2] = \mathbf{0.22509}$$

3 合力と作用線

$$P_H = 100 \times 0.50930 = \mathbf{50.93}\ \text{kN/m} \qquad z_R = 25 \times \frac{0.22509}{0.50930} = \mathbf{11.05}\ \text{m}$$

x = 12.5 mに対して両方法とも**50.93 kN/m**および**11.05 m**を与える。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

壁と荷重	$H = 25.00$ m, $P = 100.0$ kN/m
近接荷重	$x = 0.05;\ 0.1;\ 0.2;\ 0.3;\ 0.5;\ 1$ m
限界	**図表：**$x = 9.99;\ 10;\ 10.01$ m（$0.4H = 10$ m）

求めるもの

x_{min}の規則の影響；弾性最大圧力；m = 0.4の限界における図表の挙動。

解答 (1/2)

解答

x (m)	計算 x (m)	P_H 弾性（kN/m）	z_R 弾性（m）	$\sigma_{H,max}$ 弾性（kPa）	z (m)	P_H 図表（kN/m）
0.05	**0.30**	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.10	**0.30**	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.20	**0.30**	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.30	0.30	63.65	0.46	137.8	0.17	54.69
0.50	0.50	63.64	0.77	82.7	0.29	54.69
1.00	1.00	63.56	1.49	41.3	0.58	54.69

x < 0.30 mの荷重は0.30 mで計算する：合力、作用線および最大圧力は0.30 mでの値と同じである；弾性ピークはこの距離で**137.8 kPa**（z = 0.17 m）に上昇する。図表はどの距離でも54.69 kN/mを与える。

解答 (2/2)

解答

1 0.203および4 × 0.16/ π

$$\frac{4 \times 0.16}{\pi} = 0.2037 \approx 0.203 \;\Rightarrow\; \frac{I_0(m = 0.4^{+})}{I_0(\text{ケース}1)} = \frac{0.63662/1.16}{0.5469} = \mathbf{1.0033}$$

2 ノモグラムの合力が限界の両側にある

x (m)	m	条件	P_H 図表（kN/m）	z_R 算定図表（m）
9.99	0.3996	ケース1	54.6875	9.8074
10.00	0.4000	ケース1	54.6875	9.8074
10.01	0.4004	ケース2	54.8659	9.8130

丸めのため、合力がm = 0.4の限界を超える際に約**0.33%**跳ぶ（54.69 → 54.87 kN/m）；作用線は9.807 → 9.813 mとなる。この跳びは小さく、ノモグラフの公表された係数を保持する。

GeoTervaで解答を確認する ↗

問題

例題

与条件

荷重	$P = 100.0$ **kN/m,** $x = 5.00$ **m**
高さ	$H = 5,\ 10,\ 25,\ 50,\ 100$ **m**
載荷強度	$P = 50,\ 100,\ 200$ **kN/m** ($H = 25$ **m**)

求めるもの

両手法についてのP_Hおよびz_R；PとHの影響。

解答

解答

H (m)	m	P_H 弾性	z_R 弾性	P_H 算定図表	z_R 図表	条件
5	1.000	31.83	2.85	31.83	2.85	ケース2
10	0.500	50.93	4.42	50.93	4.42	ケース2
25	0.200	61.21	6.14	54.69	9.81	ケース1
50	0.100	63.03	6.93	54.69	19.61	ケース1
100	0.050	63.50	7.37	54.69	39.23	ケース1

高い擁壁ではmが小さくなる：弾性解のP_Hは0.64Pに近づく。図表のP_Hは変化せず（0.5469P）、一方z_RはHとともに増大する。

P (kN/m)	P_H 弾性	P_H 算定図表	z_R 弾性	z_R 図表
50	30.61	27.34	6.14	9.81
100	61.21	54.69	6.14	9.81
200	122.43	109.38	6.14	9.81

合力は**P**とともに**線形**に増加する；z_RはPに依存しない（弾性・計算図表）。

GeoTervaで解答を確認する ↗

まとめ

ポイントのまとめ

$m = x/H$、**$n = z/H$**；弾性（剛体壁）：**$\sigma_H = (4P/\pi H)\, m^2 n/(m^2 + n^2)^2$**、ピークは$n = m/\sqrt{3}$；**$x_{min} = 0.30$ m**

図表：$m > 0.4$では同じ式；**$m \le 0.4$**では$\sigma_H = (P/H)\, 0.203\, n/(0.16 + n^2)^2$、距離の影響なし

例（$H = 25$ m、$x = 5$ m、$P = 100$ kN/m）：$z = 5$ mで弾性6.37、図表4.06 kPa；最大圧力は8.27 kPa（$z = 2.89$ m）および4.12 kPa（$z = 5.77$ m）

合力$P_H = P \cdot I_0$、**$z_R = H \cdot I_1/I_0$**：弾性解で61.21 kN/mおよび6.14 m；図表で54.69 kN/mおよび9.81 m

比較：0.4Hより外側では両手法は一致する；内側では、荷重が近づくにつれ弾性理論の合力荷重は増大するが、図表の値は一定である

参考文献

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning。本ページはこの文献に従っています。

Terzaghi, K. (1954). Anchored bulkheads. Transactions of the ASCE, 119, 1243–1280.

NAVFAC DM-7.02 (1986). Foundations and Earth Structures. Naval Facilities Engineering Command.

注記

数値例はすべてモジュール自身の計算エンジンで生成しており、モジュールは同じ値を与える。モジュールの初期擁壁はH = 25 m、x = 5 m、P = 100 kN/mである（弾性法）。

GeoTerva

オンライン地盤工学計算

理論から実務へ

GeoTervaに独自の壁、線荷重の大きさと距離を入力する。モジュールは土圧分布、合力および作用線を2つの手法で、段階的な解答とレポートとともに与える。

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