

第 6 章

土 圧

参考文献

1. 當山道三：土質力学，コロナ社，1961
2. 箭川寛治，浅川美利：土質工学，彰国社，1991 .
2. 安川郁夫，今西清志，立石義孝：絵とき 土質力学(改定 2 版)，オーム社，2000 .

まえがき

クーロン土圧について，また勉強することができた．そんなに大それた問題ではないが，確認のため上記の参考文献で勉強しなおした．特に文献 1 は大変古い本であるが，私の学生時代の教科書で，土圧の諸式の誘導が詳しく書かれており，これを中心に勉強した．

例題は同じデータを使い，それを解く BASIC のプログラムを付記した．BASIC のシステムはフリーソフトの「N88 互換 BASIC for Windows95」を使用した．

プログラムは命令を上から下へ並べただけの，きわめて簡単なものである．

同時に，ランキンの土圧についても，全く同じ形態でまとめたが，ここでは割愛する．

また，ここで第 6 章とあるのは，前に書いた「土質力学ノート」の第 6 章に相当する．

共同組合島根県素質技術研究センター

浜野 浩 幹

(平成 22 年 3 月 10 日)

6.1 主働土圧と受働土圧

6.1.1 土圧

地表から z の深さにおける有効応力 σ'_v は

$$\sigma'_v = \gamma_t z \tag{6.1}$$

で表される。

これに対して構造物を水平方向に動かそうとする応力 σ'_h は次のような土圧として働く：

主働土圧：壁体が背面の土から土圧を受けてその土から離れるように動くとき，土が壁体に及ぼす圧力。

受働土圧：外部から力が加わって壁体が土の方に向かって動くとき，その反力として壁体に加わる圧力。

静止土圧：壁体の移動がないときに土が壁体に及ぼす圧力。

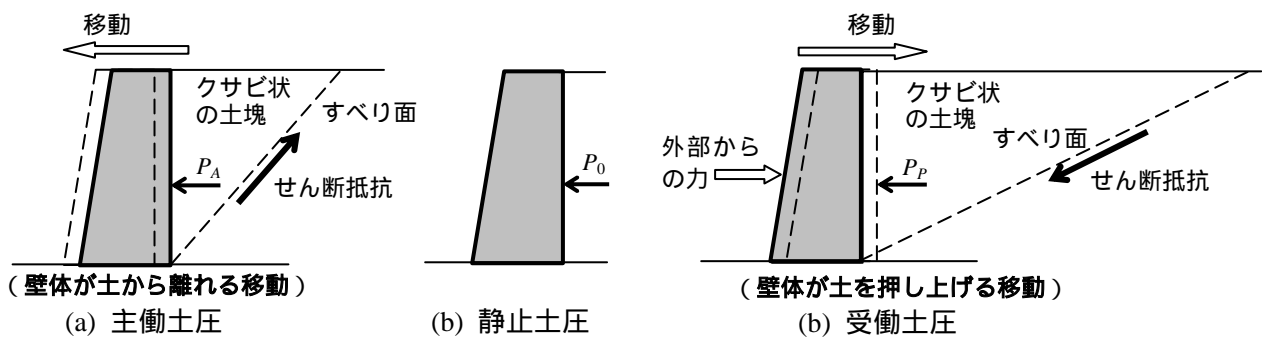


図 6.1 主働土圧と受働土圧

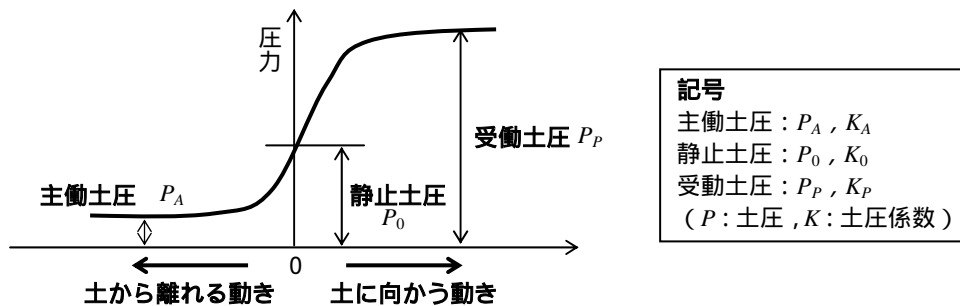


図 6.2 壁体の移動と土圧の変化

静止土圧：自然に堆積した地盤の水平応力や，地中に構築されたボックスカルバートなど全く動くことを想定しない壁体に加わる圧力と考えられ，水平方向の応力 σ'_h と鉛直方向の応力 σ'_v の比を静止土圧係数といい，次式で表す。

$$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v \tag{6.2}$$

鉛直応力 σ'_v は載荷重などが無い場合，土かぶり圧 $\gamma_t z$ で表されるから，静止土圧 σ'_h は

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v = K_0 \gamma_t z \tag{6.3}$$

静止土圧係数：地盤を弾性体と仮定して，通常次式で表される。

$$K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v = \nu / (1 - \nu), \quad \nu : \text{ポアソン比 (砂質土 } K_0 = 0.5, \text{ 粘性土 } K_0 = 1.0 \text{ 程度)} \tag{6.4}$$

あるいは，ヤーキーの式として次式がある。

$$K_0 = 1 - \sin \phi', \quad \phi' : \text{有効せん断抵抗角} \tag{6.5}$$

土圧係数

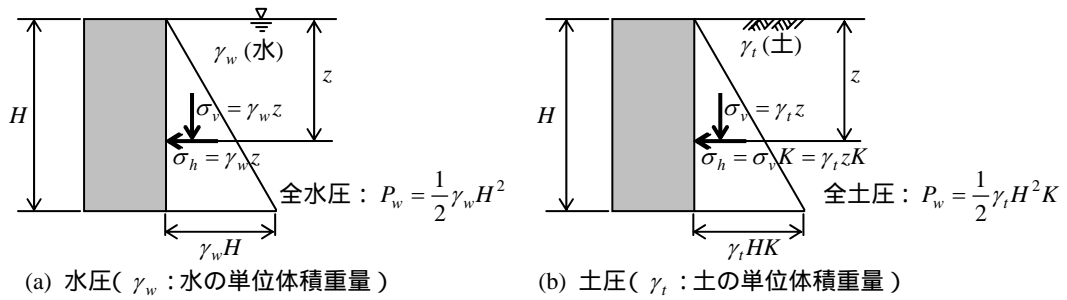


図 6.3 土圧係数の意味

水の圧力は等方的に働くため、垂直方向と水平方向の力は同じとなる。

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\gamma_w z}{\gamma_w z} = 1 \tag{6.6}$$

土はせん断強さをもっているため崩れようとする力に抵抗する。そのため、深さ z の水平土圧 σ_h は鉛直応力 σ_v より小さい。

水平土圧と鉛直土圧の比を K とおく。

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\sigma_h}{\gamma_t z} = K \tag{6.7}$$

$$\sigma_h = \gamma_t z K \tag{6.8}$$

K : 土圧係数 (土のせん断強さによって決まる係数)。

$\sigma'_v = \gamma_t z$: 土の自重による垂直方向の圧力。

壁体全体に作用する土圧の合力 P は、土圧応力が深さ方向に三角形分布すると考え、深さ H の点の土圧応力 σ_h は $\sigma_h = \sigma_v K = \gamma_t z K$ であるから

$$P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K \tag{6.9}$$

で表される。

上に見るように、水では $K=1$ であり、土では背面にある土の強さの影響による土圧係数で土圧が表されることになる。

注) 土圧：土が壁体などに及ぼす圧力 (クーロンの土圧論 (1773) またはランキンの土圧論 (1856))。

注) 土圧係数

- (1) 壁面摩擦角 δ の影響は、主動土圧に大してはあまり大きくないが、受働土圧に対しては非常に大きい。
- (2) 静止土圧の場合： 自然に堆積した砂：ゆるい密度のとき 0.4，密なとき 0.5，層ごとに締め固めたとき 0.8。

6.2 クーロンの土圧論

クーロンの土圧論は、壁背面の土が平面すべり面に沿って滑り出そうとする瞬間での、くさびの重量 W と擁壁 AB およびすべり面 BC の反力の釣合いから求めたものである。

図 6.4 の三角形 ABC をくさび(土塊)といい、 BC が滑り面である。

1. 主働土圧

壁体が土塊 ABC を支える力は、主働土圧 P_A に等しい。主働土圧 P_A は単位奥行きあたり

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A \quad (\text{kN/m}) \quad (6.10)$$

$$K_A = \frac{\sin^2(\theta - \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta + \delta)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2} \quad (6.11)$$

K_A : クーロンの主働土圧係数

θ : 壁体背面の傾斜角

β : 地表面の傾斜角

ϕ : 土の内部摩擦角

δ : 壁面摩擦角

γ_t : 土の単位体積重量 (kN/m³)

H : 壁体の高さ (m)

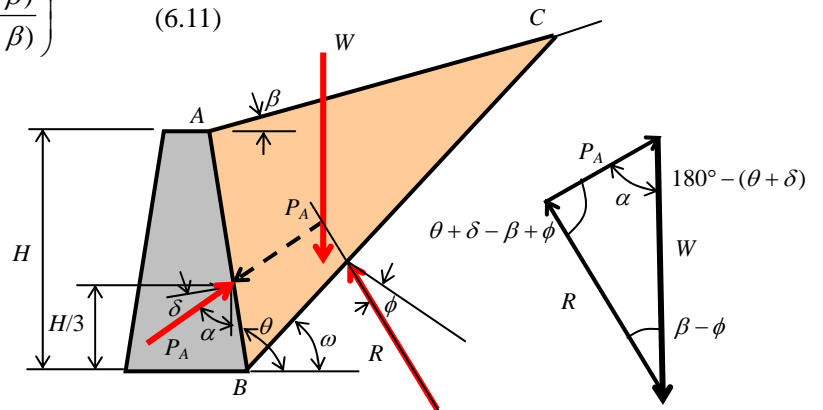


図 6.4 クーロンの主働土圧

図 6.4 において、壁体に働く主働土圧 P_A 、すなわち壁体が土塊を支える力と、すべり面に沿って働く摩擦力の合力 R とは、土のくさびの下向きの動きに抵抗するため、それらの作用面に垂直な線に対してそれぞれ摩擦角の値だけ上向きに傾いている。 P_A の傾き角は、壁面摩擦角 δ に等しく、また、 R の傾き角は土の内部摩擦角 ϕ に等しい。

地表面が水平で壁体背面が鉛直、かつ、土と壁体との間に摩擦がないとすると、 $\beta = 0$ 、 $\theta = 90^\circ$ 、 $\delta = 0$ となり、主働土圧 P_A は壁体背面に直角に作用し、次式のようなになる。

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (\text{kN/m}) \quad (6.12)$$

このような主働土圧 P_A は、壁体背面の下端から壁体の高さ $1/3$ の距離のところに作用する。

2. 受動土圧

この場合は、土のくさびが押し上げられるように働くことから、受動土圧 P_p および土の摩擦力 R の傾きは、図 6.5 のように主動土圧の場合と比べて反対になる。図に示した三つの力の釣り合いから、受動土圧 P_p は次式で与えられる。

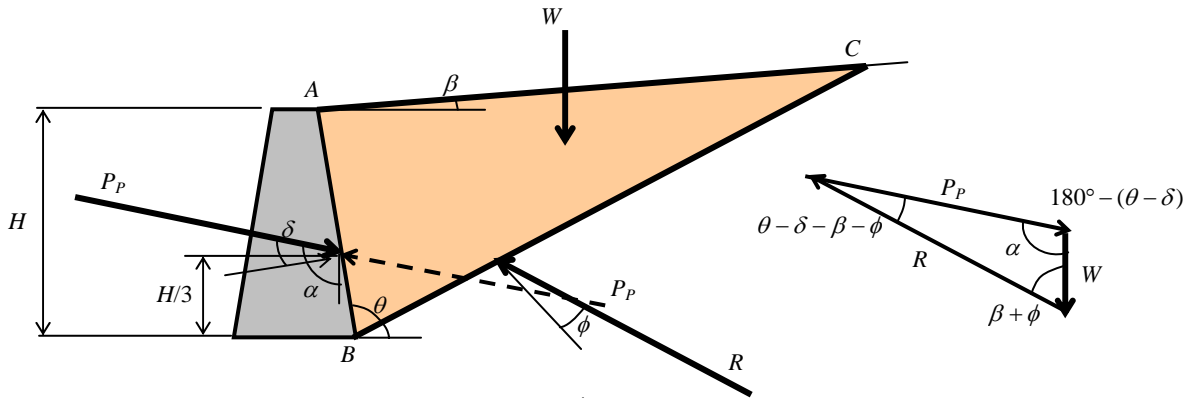


図 6.5 クーロンの受動土圧およびその方向と作用点の位置

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_p \quad (\text{kN/m}) \tag{6.13}$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta)} \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2} \quad : \text{クーロンの受動土圧係数} \tag{6.14}$$

主動土圧とは土塊がすべる向きが逆になるため摩擦抵抗が逆になり、力 P_p, R が壁面 AB , すべり面 BC に鉛直な方向から δ, ϕ だけ逆にずれることになる。すなわち式(6.14)では式(6.11)の δ, ϕ を $-\delta, -\phi$ と置けばよい。他の式も同様である。

[例題 6.1] 壁背面が鉛直 ($H=90^\circ$), 背面土が水平 ($\beta=0$), 壁面と土の間に摩擦がない ($\delta=0$) 場合の主働土圧を求めよ.

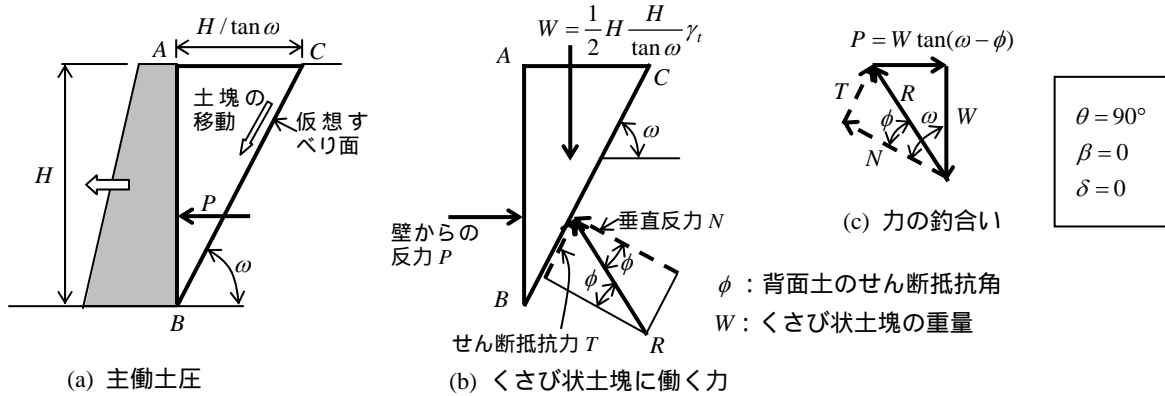


図 6.6 例題 6.1

[解] 背面土には粘着力が働かないとし, せん断抵抗角は ϕ とする. すべり面の角度を ω とする.

図(b)のくさび $\triangle ABC$ に働く力

くさびの重量 W : $W = \frac{1}{2} H \frac{H}{\tan \omega} \gamma_t$ (kN/m) (a)

壁面からの反力 P : $P = W \tan(\omega - \phi)$. (b)

P は壁面摩擦を考えないため壁面に垂直に作用する.

すべり面に作用する力 R : **R はすべり面の法線に対して土と土の摩擦角, すなわち, せん断抵抗角 ϕ だけ傾いて作用する.**

式(a)を式(b)に代入すると

$$P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \frac{\tan(\omega - \phi)}{\tan \omega} \text{ (kN/m)} \quad (c)$$

この P の最大値が主働土圧となる. ゆえに^{注)}

$$\frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \{ \cot \omega \sin^2(\phi - \omega) + \csc^2 \omega \tan(\phi - \omega) \} = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \frac{\sin \omega \cos \omega - \sin(\omega - \phi) \cos(\omega - \phi)}{\sin^2 \omega \cos^2(\omega - \phi)} = 0$$

より $\sin \omega \cos \omega = \sin(\omega - \phi) \cos(\omega - \phi)$

いま, $\cos \omega = \sin(90^\circ - \omega)$, $\sin \omega = \cos(90^\circ - \omega)$ であるから, これを変形して

$$\sin(90^\circ - \omega) \cos(90^\circ - \omega) = \sin(\omega - \phi) \cos(\omega - \phi)$$

この両辺は

$$90^\circ - \omega = \omega - \phi \quad (d)$$

のとき成り立つ. ゆえに

$$\omega = 45^\circ + \phi / 2 \quad (e)$$

これを式(c)に代入すると $\tan(45^\circ + a) = \frac{1 + \tan a}{1 - \tan a}$, $\tan(45^\circ - a) = \frac{1 - \tan a}{1 + \tan a}$ を用いて

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \tan^2(45^\circ - \phi / 2) = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A \text{ (kN/m)} \quad (e)$$

土圧 P は奥行き 1m についての合力として求められる.

[例題 6.2] 壁背面が鉛直 ($H=90^\circ$), 背面土が水平 ($\beta=0$), 壁面と土の間に摩擦がない ($\delta=0$) 場合の受働土圧を求めよ.

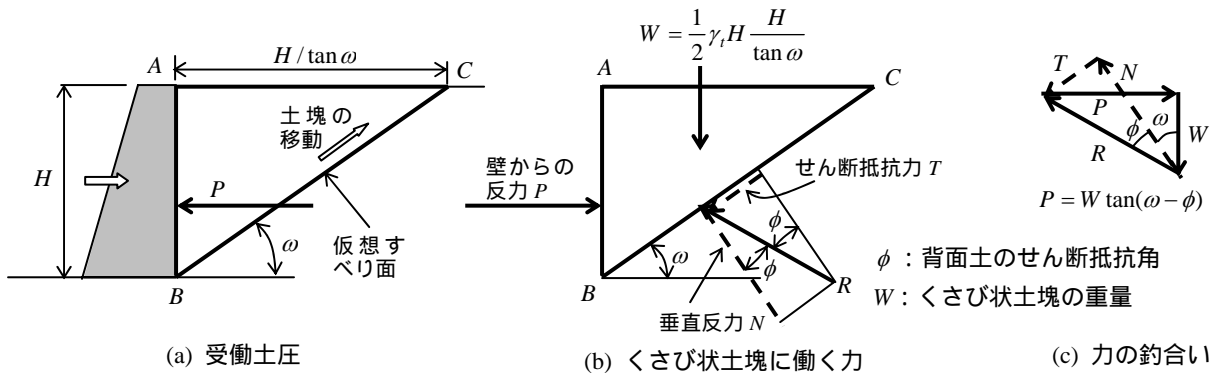


図 6.7 例題 6.2

[解] 例題 6.1 と同様に計算する. この場合は, 壁が土のくさびを押し上げるときの最小の力を求める. 図(c)の力釣合いから

$$P = W \tan(\omega + \phi) = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \frac{\tan(\omega + \phi)}{\tan \omega} \tag{a}$$

土圧 P が最小を示す角度で, くさびが滑り出す. この角度は

$$\omega = 45^\circ - \phi / 2 \tag{b}$$

ゆえに, このときの受働土圧は

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \tan^2(45^\circ + \phi / 2) \text{ (kN/m)} \tag{c}$$

式(c)は式(6.9)において, $\beta=0, \theta=90^\circ, \delta=0$ において得られ, このような受働土圧 P_p は, 壁体背面の下端から壁体の高さ $1/3$ の距離のところから作用する.

[例題 6.3] 図 6.8 に示す壁体に作用する主働土圧 P_A と受働土圧 P_p を求めよ (例題 1,2 の数値計算).

[解] 壁体背後の地表面が水平で, 土に粘着力がなく, 壁体の背面と土の間に摩擦力が働かない場合である (例題 1,2 に対するものであるから壁背面は鉛直とする. 式は θ に関与しない).

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 16 \times 6^2 \times \tan^2 \left(45^\circ - \frac{30}{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \times 16 \times 6^2 \times 0.577^2 = 96 \text{ kN/m}$$

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 16 \times 6^2 \times \tan^2 \left(45^\circ + \frac{30}{2} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \times 16 \times 6^2 \times 1.732^2 = 864 \text{ kN/m}$$

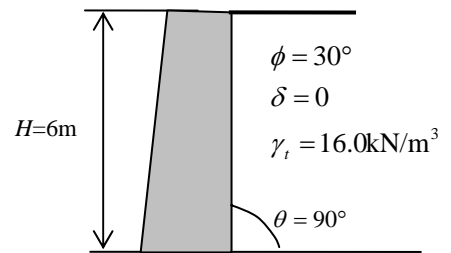


図 6.8 例題 6.4

壁背面が鉛直であるという条件で導いた例題 6.1,6.2 の式(e),(c)から計算する場合は, 壁背面の角 θ は考える必要はないが, 土圧係数の一般式(6.11),(6.14)から求める場合は, $\theta=90^\circ$ と与えればよい.

注) 微分公式 $y = \frac{f(x)}{g(x)} \rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{\{g(x)\}^2}$

【例題 6.4】図 6.9 に示す壁体に作用するクーロンの主働土圧 P_A 受働土圧 P_P を求めよ。

【解】一般的な場合であるから土圧係数から求める。

$$\begin{aligned}
 K_A &= \frac{\sin^2(\theta - \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta + \delta)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2} \\
 &= \frac{\sin^2(100^\circ - 30^\circ)}{\sin^2 100^\circ \sin(100^\circ + 20^\circ)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(30^\circ + 20^\circ) \sin(30^\circ - 10^\circ)}{\sin(100^\circ + 20^\circ) \sin(100^\circ - 10^\circ)}} \right)^{-2} \\
 &= \frac{0.940^2}{0.985^2 \times 0.866} \times \left(1 + \sqrt{\frac{0.766 \times 0.342}{0.866 \times 1}} \right)^{-2} = 0.438
 \end{aligned}$$

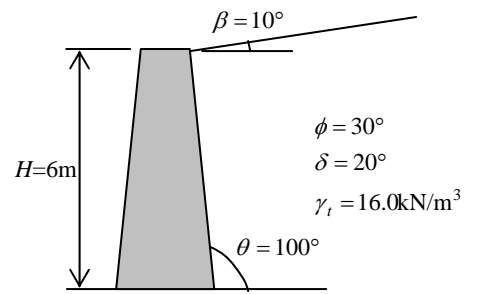


図 6.9 例題 6.4

$$\therefore P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A = \frac{1}{2} \times 16.0 \times 6^2 \times 0.438 = 126.14 \text{ (kN/m)}$$

$$\begin{aligned}
 K_P &= \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta)} \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2} = \frac{\sin^2(100^\circ + 30^\circ)}{\sin^2 100^\circ \sin(100^\circ - 20^\circ)} \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(30^\circ + 20^\circ) \sin(30^\circ + 10^\circ)}{\sin(100^\circ - 20^\circ) \sin(100^\circ - 10^\circ)}} \right)^{-2} \\
 &= \frac{0.766^2}{0.985^2 \times 0.985} \times \left(1 - \sqrt{\frac{0.766 \times 0.643}{0.985 \times 1}} \right)^{-2} = 7.140
 \end{aligned}$$

$$\therefore P_P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_P = \frac{1}{2} \times 16.0 \times 6^2 \times 7.14 = 2056.32 \text{ (kN/m)}$$

3 載荷重，粘着力による壁背面土の高さの変化

一般に，擁壁は土圧を受けると土から離れる方向に変位するため，擁壁に作用する土圧は普通主動土圧を用いて計算する．

(1) 載荷重のある場合（擁壁の背面度に等分布荷重 q が載荷された場合）

壁体背面の傾斜角が θ で，地表面の傾斜角が β である擁壁の背面度に等分布荷重 q が載荷された場合には，載荷重を土の高さに換算して，その荷重に相当する土の高さ

$$\Delta H = \frac{q}{\gamma_t} \cdot \frac{\sin \theta}{\sin(\theta - \beta)} \quad (\text{m}) \tag{6.15}$$

だけさらに土が地表面より上方に置かれたものと仮定し，これが擁壁の高さ H 区間に作用するものとして土圧を計算する．

いま，図 6.10 のような壁体背面が鉛直で，地表面が水平な場合を考えると，式(6.4)の ΔH は q/γ_t であるから，主動土圧 P_A は次のようになる．

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t (H + \Delta H)^2 K_A - \frac{1}{2} \gamma_t \Delta H^2 K_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A + qHK_A = \left(\frac{1}{2} \gamma_t H^2 + qH \right) K_A \quad (\text{kN/m}) \tag{6.16}$$

また，このときの P_A の作用点が壁体底面から h_A の高さのところにあるとすれば， h_A は次のようになる．

$$\begin{aligned} h_A &= \frac{P_{A1}h_1 + P_{A2}h_2}{P_A} \\ &= \frac{H}{3} \frac{H + 3\Delta H}{H + 2\Delta H} \quad (\text{m}) \end{aligned} \tag{6.17}$$

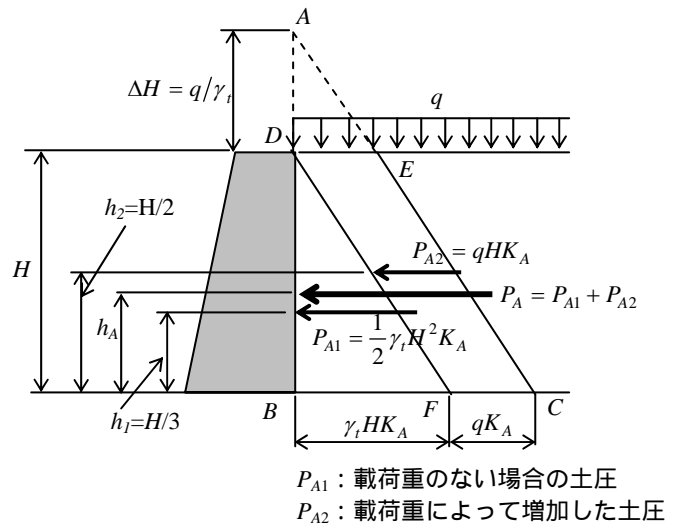


図 6.10 等分布荷重による土圧

注) 式(6.15)の誘導：図 6.11 より

$$\cos \beta = \frac{q/\gamma_t}{Ab}$$

ΔABA で正弦定理より

$$\frac{Ab}{\sin\{180^\circ - (\theta - \beta)\}} = \frac{Aa}{\sin\{90^\circ - \beta\}}$$

ここに

$$\Delta H = \overline{Aa} \sin(180^\circ - \theta)$$

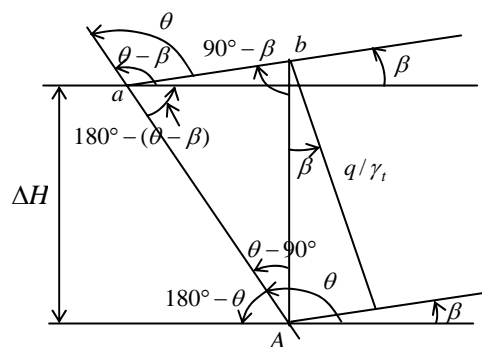


図 6.11 式(6.4)の誘導

(2) 粘着力を考える場合 (壁体背面の土が粘性土であり, 土の粘性力を考慮して計算する場合)

土が滑り面に沿ってすべるとき, 内部摩擦のほかに粘着力が抵抗するので, 粘着力の分だけさらに土圧が減少することになる. このときの主動土圧 P_A は, 図 6.12 のように, 壁体背面の土の高さ H を, 粘着力 c の効果に等しいだけ下げた $H - z_c$ として計算する.

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t (H - z_c)^2 K_A \quad (\text{kN/m}) \quad (6.16)$$

ここに

$$z_c = \frac{2c}{\gamma_t} \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (\text{m}) \quad (6.17)$$

また, このときの P_A の作用点は, 壁体底面から $(H - z_c)/3$ の高さにある.

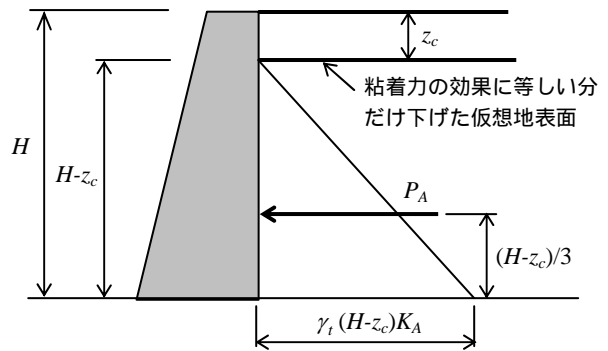


図 6.12 粘着力のある土の主動土圧の分布

[例題 6.5] 図 6.13 のような壁体の背面土に等分布荷重 $q=20\text{kN/m}^2$ を載荷したとき, 主動土圧 P_A とその作用点 h_A を求めよ (壁体背面土に粘着力がない場合の主動土圧の計算).

[解]

載荷重を土の高さに換算すると, 式(6.15)から

$$\Delta H = \frac{q}{\gamma_t} \frac{\sin \theta}{\sin(\theta - \beta)} = \frac{20}{16} \frac{\sin 100^\circ}{\sin(100^\circ - 10^\circ)} = \frac{20}{16} \frac{0.985}{1} = 1.23 \quad (\text{m})$$

したがって, この場合の仮想地表面の高さ H' は

$$H' = H + \Delta H = 6 + 1.23 = 7.23 \quad (\text{m})$$

クーロンの主動土圧係数は

$$\begin{aligned} K_A &= \frac{\sin^2(\theta - \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta + \delta)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2} \\ &= \frac{\sin^2(100^\circ - 30^\circ)}{\sin^2 100^\circ \sin(100^\circ + 20^\circ)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(30^\circ + 20^\circ) \sin(30^\circ - 10^\circ)}{\sin(100^\circ + 20^\circ) \sin(100^\circ - 10^\circ)}} \right)^{-2} \\ &= \frac{0.940^2}{0.985^2 \times 0.866} \left(1 + \sqrt{\frac{0.766 \times 0.342}{0.866 \times 1}} \right)^{-2} = 0.438 \end{aligned}$$

よって, 仮想地表面から深さ $\Delta H = 1.23\text{m}$ (実際の地表面の位置)

と深さ H' に生じる単位面積当たりの主動土圧は

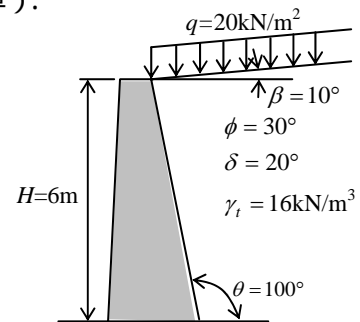
$$P_{A1} = \gamma_t \Delta H K_A = 16.0 \times 1.23 \times 0.438 = 8.6 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{A2} = \gamma_t H' K_A = 16.0 \times 7.23 \times 0.438 = 50.7 \text{ kN/m}^2$$

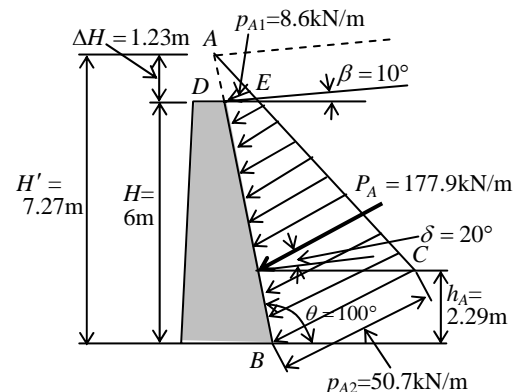
主動土圧 P_A は台形 $DBCE$ の面積となる.

$$P_A = (1/2) \cdot (P_{A1} + P_{A2}) \cdot (H' - \Delta H) = (1/2) \times (8.6 + 50.7) \times 6 = 177.9 \text{ kN/m}$$

$$P_A \text{ の作用位置は, } h_A = \frac{H}{3} \frac{2 \times P_{A1} + P_{A2}}{P_{A1} + P_{A2}} = \frac{6}{3} \times \left(\frac{2 \times 8.6 + 50.7}{8.6 + 50.7} \right) = 2.29 \text{ m}$$



(a) 問題



(b) 主動土圧の分布図

図 6.13 例題 6.5

[例題 6.6] 図 6.14 のような壁体の背面土に等分布荷重 $q=20\text{kN/m}^2$ を載荷したとき、主働土圧とその作用点を求めよ（壁体背面土に粘着力がある場合の主働土圧の計算）。

[解] 載荷重を土の高さに換算すると、式(6.15)から

$$\Delta H = \frac{q}{\gamma_t} \frac{\sin \theta}{\sin(\theta - \beta)} = \frac{20}{16} \frac{\sin 100^\circ}{\sin(100^\circ - 10^\circ)} = \frac{20}{16} \frac{0.985}{1} = 1.23 \text{ (m)}$$

粘着力 c の効果に等しい z_c は式(6.17)から

$$z_c = \frac{2c}{\gamma_t} \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) = \frac{2 \times 10}{16} \times \tan\left(45^\circ + \frac{30^\circ}{2}\right) = 1.25 \times 1.732 = 2.17 \text{ (m)}$$

したがって、この場合の仮想地表面の高さ H' は

$$H' = H + \Delta H - z_c = 6 + 1.23 - 2.17 = 5.06 \text{ (m)}$$

クーロンの主働土圧係数は

$$\begin{aligned} K_A &= \frac{\sin^2(\theta - \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta + \delta)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2} \\ &= \frac{\sin^2(100^\circ - 30^\circ)}{\sin^2 100^\circ \sin(100^\circ + 20^\circ)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(30^\circ + 20^\circ) \sin(30^\circ - 10^\circ)}{\sin(100^\circ + 20^\circ) \sin(100^\circ - 10^\circ)}} \right)^{-2} \\ &= \frac{0.940^2}{0.985^2 \times 0.866} \left(1 + \sqrt{\frac{0.766 \times 0.342}{0.866 \times 1}} \right)^{-2} = 0.438 \end{aligned}$$

よって、仮想地表面から深さ H' に生じる単位面積当たりの主働土圧は

$$p_A = \gamma_t H' K_A = 16 \times 5.06 \times 0.438 = 35.5 \text{ kN/m}^2$$

ゆえに、 $P_A = (1/2) \cdot p_A H' = (1/2) \times 35.5 \times 5.06 = 89.8 \text{ kN/m}$

P_A の作用位置は、 $h_A = H' / 3 = 5.06 / 3 = 1.69 \text{ m}$

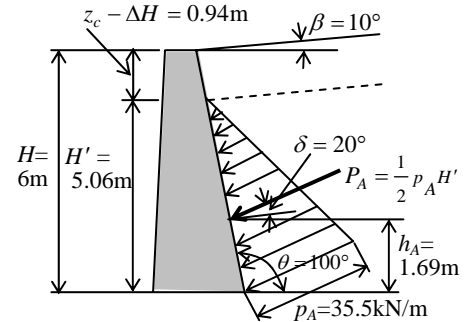
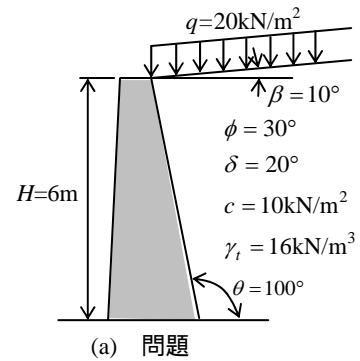


図 6.14 例題 6.6

[例題 6.7] クーロンの主働土圧を計算するプログラム

例題 6.3 から 6.6 のデータを列記する。

例題	H (m)					γ_t (kN/m ³)	q (kN/m ²)	c (kN/m ²)
6.3	6	90	0	30	0	16	0	0
6.4	6	100	10	30	20	16	0	0
6.5	6	100	10	30	20	16	20	0
6.6	6	100	10	30	20	16	20	10

例題 6.3 は壁面が鉛直であるから、このプログラムで $\beta=90^\circ$ とすればよいが、当然式(6.12)からも求められる。

データは行番号 160 から 220 の数値を変えればよい。

クーロンの主働土圧を計算するプログラム

```

100 'クーロンの主動土圧 (COULOMB.BAS,100306)
110 CLS 3
120 DEFSNG A-H,O-Z
130 PRINT " クーロンの主動土圧 (COULOMB.BAS,100306)" : PRINT
140 PI=3.1415927
150 '
160 H=6      : PRINT " 擁壁高           H= ",H      ;"   m"
170 THETA=100 : PRINT " 壁体背面傾斜角       = ",THETA ;"   度"
180 BETA=10   : PRINT " 地表面の傾斜角       = ",BETA  ;"   度"
190 FHI=30    : PRINT " 土の内部摩擦角       = ",FHI   ;"   度"
200 DELTA=20  : PRINT " 壁面摩擦角         = ",DELTA ;"   度"
210 GAMMA=16  : PRINT " 土の単位体積重量     = ",GAMMA ;"   kN/m3"
220 Q=20      : PRINT " 等分布載荷重       q= ",Q     ;"   kN/m2"
230 C=10      : PRINT " 粘着力           c= ",C     ;"   kN/m2" : PRINT
240 '
250 'INPUT " 擁壁高           H= ",H
260 'INPUT " 壁体背面傾斜角       = ",THETA
270 'INPUT " 地表面の傾斜角       = ",BETA
280 'INPUT " 土の内部摩擦角       = ",FHI
290 'INPUT " 壁面摩擦角         = ",DELTA
300 '
310 'INPUT " 土の単位体積重量     = ",GAMMA
320 'INPUT " 等分布載荷重       q= ",Q
330 'INPUT " 粘着力           c= ",C
340 '
350 THETA=PI*THETA/180 : 'PRINT "       = ",THETA ;"   度"
360 BETA =PI*BETA/180  : 'PRINT "       = ",BETA  ;"   度"
370 FHI =PI*FHI/180   : 'PRINT "       = ",FHI   ;"   度"
380 DELTA=PI*DELTA/180 : 'PRINT "       = ",DELTA ;"   度"
390 '
400 DH=(Q/GAMMA)*(SIN(THETA)/SIN(THETA-BETA)):PRINT USING "
    載荷重換算高   DH =####.## m ";DH
410 ZC=(2*C/GAMMA)*TAN(PI/4+FHI/2)           :PRINT USING "
    粘着力効果高   zc =####.## m ";ZC
420 HH=H+DH-ZC                               :PRINT USING
    " 仮想地表面高   H' =####.## m ";HH
430 PRINT
440 '
450 X1=(SIN(THETA-FHI))^2 :
460 X2=(SIN(THETA))^2*SIN(THETA+DELTA) :

```

```

470 X3=SIN(FHI+DELTA)*SIN(FHI-BETA) :
480 X4=SIN(THETA+DELTA)*SIN(THETA-BETA) :
490 QKA=X1/X2*(1+SQR(X3/X4))^(2) : PRINT USING " 土圧係数          KA =####.### ";QKA : PRINT
500 '
510 PA1=GAMMA*DH*QKA : 'PRINT " pA1= ",PA1
520 PA2=GAMMA*HH*QKA : 'PRINT " pA2= ",PA2 : PRINT
530 IF HH>H THEN PA=0.5*(PA1+PA2)*(HH-DH) ELSE PA=0.5*PA2*HH
540 PRINT USING " 主働土圧          PA =####.### kN/m ";PA : PRINT
550 IF Q=0 AND C=0 THEN HP=H/3 ELSE IF Q>0 AND C>0 THEN HP=HH/3
      ELSE HP=(H/3)*((2*PA1+PA2)/(PA1+PA2))
560 '
570 PRINT USING " 作用点          HP =####.### m ";HP : PRINT
580 '
590 OMEGA1=SQR((SIN(THETA+DELTA)*SIN(FHI-BETA))/(SIN(FHI+DELTA)*SIN(THETA-BETA)))
600 OMEGA =ATN((SIN(FHI)+SIN(THETA)*OMEGA1)/(COS(FHI)+COS(THETA)*OMEGA1))
610 OMEGA2=OMEGA*180/PI
620 PRINT USING " 主働すべり角          =#####.##### rad ";OMEGA;
630 PRINT USING "          =####.## 度";OMEGA2
640 '
650 B=H*(1-TAN(OMEGA)/TAN(THETA))/(TAN(OMEGA)-TAN(BETA))
660 W=0.5*GAMMA*H^2*(SIN(THETA-OMEGA)*SIN(THETA-BETA))
      /(SIN(OMEGA-BETA)*(SIN(THETA))^2)+Q*B
670 PRINT USING " すべり土塊上幅    b =####.##  m";B
680 PRINT USING " すべり土塊重量    W =####.##  kN/m^2";W : PRINT
690 END

```

使用した計算式

$$\Delta H = \frac{q}{\gamma_t} \frac{\sin \theta}{\sin(\theta - \beta)}, \quad z_c = \frac{2c}{\gamma_t} \tan\left(\frac{\phi}{2} + \frac{\pi}{4}\right), \quad H' = H + \Delta H - z_c$$

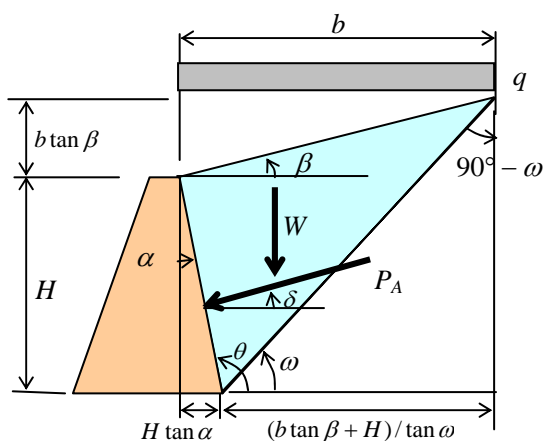
$$K_A = \frac{\sin^2(\theta - \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta + \delta)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2}$$

$$P_{A1} = \gamma_t \Delta H K_A, \quad P_{A2} = \gamma_t H' K_A, \quad P_A = \frac{1}{2} (P_{A1} + P_{A2}) (H' - \Delta H), \quad P_A = \frac{1}{2} P_{A2} H'$$

$$h_p = \frac{H}{3}, \quad h_p = \frac{H}{3} \frac{2P_{A1} + P_{A2}}{P_{A1} + P_{A2}}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{\sin(\theta + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\phi + \delta) \sin(\theta - \beta)}}, \quad \tan \omega = \frac{\sin \phi + \sin \theta \cdot \omega_1}{\cos \phi + \cos \theta \cdot \omega_1}$$

$$b = H \frac{1 - \cot \theta \tan \omega}{\tan \omega - \tan \beta}, \quad W = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \frac{\sin(\theta - \omega) \sin(\theta - \beta)}{\sin(\omega - \beta) \sin^2 \theta} + q \cdot b$$

注 1) 土圧係数・土塊の重量・すべり角



壁面傾斜角	$\theta = \alpha + \pi / 2$ (度 rad)
地表面の傾斜角	β (度 rad)
土の内部摩擦角 (せん断抵抗角)	ϕ (度 rad)
壁面摩擦角	δ (度 rad)
擁壁の高さ	H (m)
地表載荷荷重	q (kN/m)
土の単位堆積重量	$\gamma_t = 20$ (kN/m ³)

図(6.15) 土塊の重量・すべり角

主働土圧係数

$$K_A = \frac{\sin^2(\theta - \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta + \delta) \left\{ 1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sqrt{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right\}^2} \quad \text{(a)}$$

主働土圧合力 $P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A + q H K_A$ (b)

主働すべり角

$$\omega = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \phi + \sin \theta \sqrt{\frac{\sin(\theta + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\phi + \delta) \sin(\theta - \beta)}}}{\cos \phi + \cos \theta \sqrt{\frac{\sin(\theta + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\phi + \delta) \sin(\theta - \beta)}}} \right\} \quad \text{(c)}$$

土塊の重量

$$W = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \frac{\sin(\theta - \omega) \sin(\theta - \beta)}{\sin(\omega - \beta) \sin^2 \theta} + q \cdot b \quad \text{(d)}$$

$$b = \frac{H(1 - \cot \theta \tan \omega)}{\tan \omega - \tan \beta} \quad \text{(e)}$$

受働土圧係数 $K_P = \frac{\sin^2(\theta + \phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \delta) \left\{ 1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sqrt{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right\}^2}$ (f)

受働土圧合力 $P_P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_P + q H K_P$ (g)

受働すべり角

$$\omega = \tan^{-1} \left\{ \frac{-\sin \phi + \sin \theta \sqrt{\frac{\sin(\theta - \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\phi + \delta) \sin(\theta - \beta)}}}{\cos \phi + \cos \theta \sqrt{\frac{\sin(\theta - \delta) \sin(\phi + \beta)}{\sin(\phi + \delta) \sin(\theta - \beta)}}} \right\} \quad \text{(h)}$$