

## Exercice #13

### Paroi Ancrée

On considère l'excavation et la paroi de soutènement dont la géométrie et le profil géotechnique sont donnés sur la figure ci-dessous (e.g. cas d'un dispositif en berges de rivière). Le but de cet exercice est de déterminer la longueur totale d'une

1. paroi ancrée et butée en pied (et donc de déterminer l'effort repris par un ancrage) et
2. paroi ancrée et encastrée en pied (et donc déterminer l'effort repris par un ancrage) en utilisant la méthode dite de Blum / poutre équivalente), afin de satisfaire l'équilibre à l'état limite.

On fera l'hypothèse que les états de poussée et de butée sont complètement mobilisés. Le renforcement est espacé de 1 mètre (1 renforcement par mètre linéaire) et situé à une profondeur de  $\xi = 2 \text{ m}$ . La paroi sera supposée rugueuse. De plus, déterminer la longueur libre minimum d'ancrage (en faisant l'hypothèse d'une rupture plane de Coulomb) et la longueur de scellement (injection globale unique sous faible pression avec un diamètre de forage de  $D_d = 0.13 \text{ m}$ , on assimilera les dépôts lacustres à des sables/graves pour utiliser les abaques de Bustamante avec une valeur de  $N = 5 \text{ SPT}$  pour 15 cm). On supposera également  $\gamma = \gamma_{sat}$  partout pour simplicité.

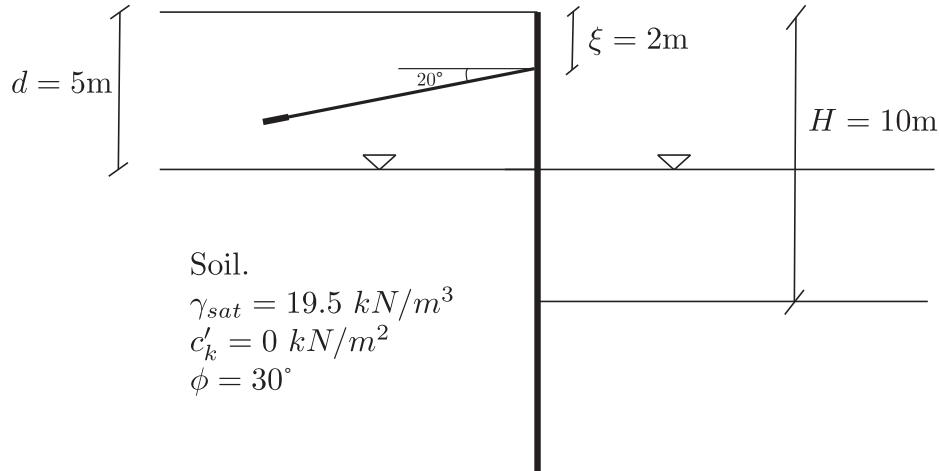


Figure 1: Géométrie de l'ouvrage et paramètres géotechniques.

## Correction Exercice #12 Paroi Ancré

Dans cet exercice, on va déterminer la longueur de la paroi ancrée et butée/ancrée et encastrée en pied et l'effort repris par l'ancrage.

### Hypothèses / observations:

- Déplacements de l'écran suffisant permettant d'atteindre les états limites actif et passif.
- Il n'y a pas de perte de charge hydraulique le long la paroi !

### 0.1 Détermination des actions

#### 0.1.1 Côté actif

Coefficient de poussée active en considérant une paroi rugueuse et un déplacement suffisant. L'évaluation peut être faite en utilisant les formules de Coulomb. On a

$$K_{ah} = \left( \frac{\cos(\phi)}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi-\beta)\sin(\phi+\delta)}{\cos(\beta)\cos(\delta)}}} \right)^2 \text{ avec } \phi = 30^\circ, \beta = 0 \text{ et } \delta = \frac{2}{3} \cdot \phi$$

soit ici

$$K_{ah} = 0.28$$

- Contrainte verticale totale :  $\sigma_v = \gamma_{sat} \cdot z$  avec:  $\gamma_{sat} = 19.5 kN/m^3$  et  $z \geq 0$ .
- Pression interstitielle :  $u_a = \gamma_w \cdot (z - d)$  avec:  $\gamma_w = 10 kN/m^3$  et  $z \geq d$ .
- Contrainte verticale effective :  $\sigma'_v = \sigma_v - u_a$
- Contrainte horizontale effective :  $\sigma'_{ha} = K_{ah}\sigma'_v$  avec  $c' = 0 kN/m^2$ .

On obtient donc la valeur caractéristique de la poussée active s'exerçant sur l'écran:

$$e_{ah} = \sigma'_{ha} + u_a$$

#### 0.1.2 Côté passif

Coefficient de poussée passive en considérant une paroi rugueuse et un déplacement suffisant. L'évaluation peut être faite en utilisant les tables de Caquot- Kerisel ou les abaques de l'annexe B de la SIA 261 ou Lancellotta (2002):

$$K_{ph} = 5.55 \quad (\text{Annexe B de la SIA 261}) \quad K_{ph} = 5.42 \quad (\text{Caquot-Kerisel})$$

$$K_{ph} = 4.63 \quad (\text{Lancellotta}(2002)) \quad K_{ph} = 4.86 \quad (\text{Sokolowski}(1965))$$

Il est à noter que les graphiques présentés à l'Annexe B de la SIA 261 sont obtenus à partir des valeurs tabulées par Caquot-Kerisel.

Considérons la valeur obtenue avec Lancellotta (2002) pour les calculs suivants avec  $\phi = 30^\circ$ , et  $\delta = \frac{2}{3}\phi$ :

$$K_{ph} = \frac{\left( \cos(\delta) \left( \sqrt{\sin(\phi)\sin(\phi) - \sin(\delta)\sin(\delta)} + \cos(\delta) \right) \right) \exp \left( \tan(\phi) \left( \sin^{-1} \left( \frac{\sin(\delta)}{\sin(\phi)} \right) + \delta \right) \right)}{1 - \sin(\phi)} = 4.63$$

- Contrainte verticale totale :  $\sigma_v = \gamma_w \cdot (H - d) + \gamma_{sat} \cdot (z - H)$  avec:  $\gamma_{sat} = 19.5 kN/m^3$  et  $z \geq H$

- Pression interstitielle :  $u_p = \gamma_w(z - d)$ , avec  $\gamma_w = 10kN/m^3$  et  $z \geq d$
- Contrainte verticale effective :  $\sigma'_v = \sigma_v - u_p$
- Contrainte horizontale effective :  $\sigma'_{hp} = K_{ph}\sigma'_v$  pour ce cas où  $c' = 0kN/m^2$

On obtient donc la valeur caractéristique de la poussée passive s'exerçant sur l'écran (du côté excavé - sous le fond de fouille):

$$e_{ph} = \sigma'_{hp} + u_p$$

### 0.1.3 Résultante

La résultante des actions sur la paroi se calcule ensuite en sommant/soustrayant les valeurs de calcul des actions exercées par le terrain et l'eau de part et d'autre de la paroi.

Vous trouverez dans la Figure ci dessous le diagramme des valeurs des diverses actions s'exerçant sur la paroi.

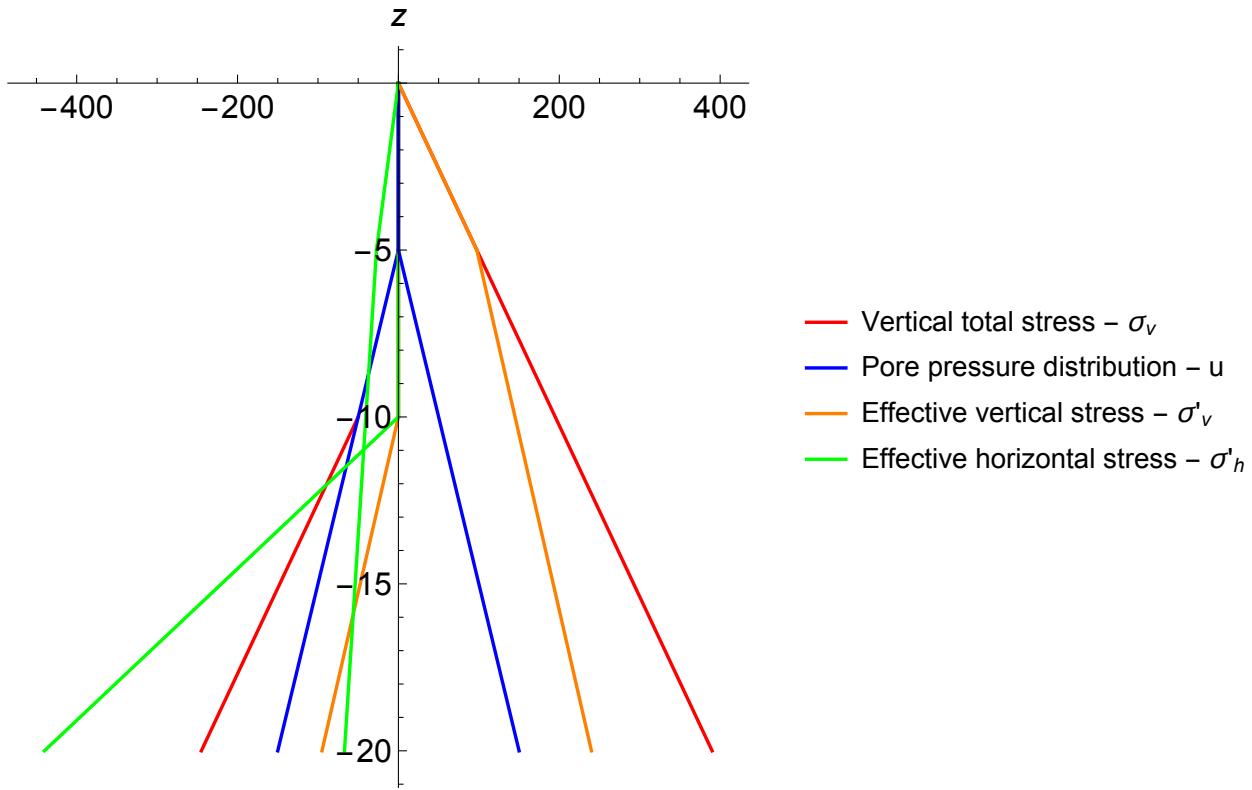


Figure 2: Diagramme des actions le long de la paroi (les z sont pris négatif sur cette figure).

Le calcul de la résultante se fait selon le schéma de la Figure 2 et en utilisant la formule suivante :  $r = (e_a + u_a) - (e_p + u_p)$ . On remarque évidemment ici que la répartition de la pression d'eau du côté actif s'annule avec celle du côté passif.

On a donc un profil de résultante suivant (linéaire par morceaux):

$$\begin{aligned} r(z) &= 5.45z \text{ pour } z < d \\ r(z) &= 13.9 + 2.65z \text{ pour } d < z < H \\ r(z) &= 454.08 - 41.36z \text{ pour } z > H \end{aligned}$$

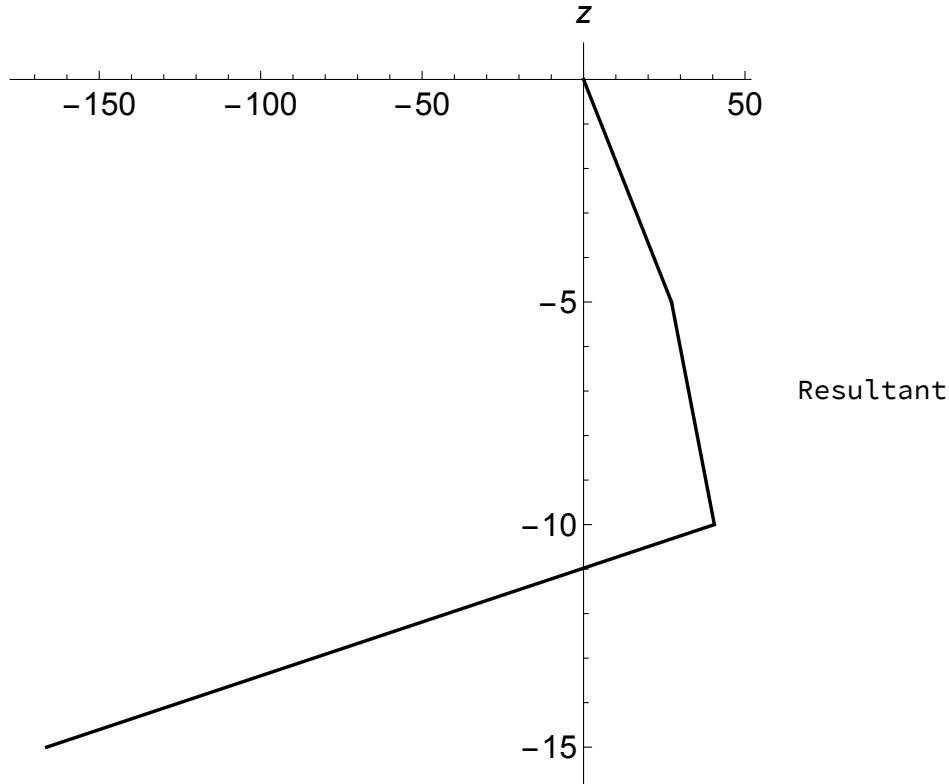


Figure 3: Profile de l'effort résultant des pressions actives, passives et d'eau.

Notamment on a:

$$r_1 = 27.24 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (\text{en } z_1 = 5\text{m}) \quad (1)$$

$$r_2 = 40.51 \text{ (kN/m}^2\text{)}; \quad (\text{en } z_2 = 10\text{m}) \quad (2)$$

$$r_3 = -124.92 \text{ (kN/m}^2\text{)}; \quad (\text{en } z_3 = 14\text{m}) \quad (3)$$

## 0.2 Paroi ancrée et butée en pied

Le point de pression nulle est forcément à une profondeur supérieure à celle de l'excavation ( $z_o > H$ ), i.e.:

$$r(z_o) = 454.08 - 41.36z_o = 0$$

d'où:

$$z_o = 10.98\text{m}$$

### 0.2.1 Détermination de l'effort tranchant et du moment au point de pression nulle -

C'est analogue au cas de la paroi simplement fichée, mais en introduisant l'existence d'une force d'appui A.

On intègre le profil de pression avec une force d'ancrage en  $z = \xi$ . Soit au point de pression nulle, on a l'effort tranchant:

$$V0 = -(r_1 \frac{d}{2} + r_1(H-d) + (r_2 - r_1) \frac{(H-d)}{2} + r_2 \frac{(|z_0| - H)}{2}) + A = -257.32 + A \text{ [kN/m']}$$

et le moment fléchissant au point de pression nulle:

$$M0 = r_1 \frac{d}{2} \left( |z_0| - \frac{2d}{3} \right) + r_1 (H-d) \left( |z_0| - d - \frac{(H-d)}{2} \right) + (r_2 - r_1) \frac{(H-d)}{2} \left( |z_0| - d - \frac{2(H-d)}{3} \right) \\ + r_2 \frac{(|z_0| - H)}{2} \frac{2(|z_0| - H)}{3} + A (|z_0| - \xi) = 1095.37 - 8.98 \cdot A \quad [kNm/m']$$

**0.2.2 Détermination de l'équation de l'effort tranchant et du moment sous le point de pression nulle**  
on utilise le fait que sous le point de pression nulle  $r(z) = -41.36(z - z_o) = \eta\zeta$  avec donc  $\eta = -41.36$  et  $\zeta = z - z_o$ .

$$V(\zeta) = V0 - \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \zeta^2 = -257.32 + A + 20.68 \cdot \zeta^2 \\ M(\zeta) = M0 - V0 \cdot \zeta + \frac{1}{6} \cdot \eta \cdot \zeta^3 = 1095.37 - 8.98 \cdot A + (257.32 - A) \cdot \zeta - 6.89 \cdot \zeta^3$$

**0.2.3 Détermination des inconnues du probleme (force A and longueur) en exprimant les équilibres horizontal et de rotation**

On résout les équations d'équilibres  $V(\zeta) = 0$ ,  $M(\zeta) = 0$ , pour les inconnues  $A$  and  $z$  (en prenant seulement les racines réelles):

$$A_p = 142.16 \text{kN/m} \\ \zeta_0 = 2.36 \text{m}$$

$$L = |z_0| + \zeta_0 = 13.34 \text{m}$$

L'effort repris par un ancrage est égal à la valeur  $A_p$  puisque les ancrage sont espacés de 1 m.

#### 0.2.4 Tirant d'ancrage

##### Longueur libre minimum d'ancrage

En prenant la loi des sinus, avec un mécanisme de ruine partant du bas de la paroi et en utilisant l'hypothèse conservatrice d'une surface de ruine selon l'équilibre du talus naturel:

$$\frac{L - \xi}{\sin(\theta)} = \frac{x}{\sin(\alpha)},$$

avec  $2\alpha = 90^\circ - \phi$  et  $\theta = 20^\circ + \phi/2 + 45^\circ$ . La longueur libre minimum d'ancrage est donc:

$$x = \frac{(L - \xi) \sin(\alpha)}{\sin(\theta)} = 5.76 \text{ m}$$

Pour des raisons de sécurité, il est typique d'augmenter la longueur libre de 0.2 la hauteur de l'excavation (ou 1.5m au minimum), soit ici 2mètres de plus, i.e

$$L_{libre} = 5.76 + 2 = 7.76 \text{ m}$$

##### Prédimensionnement la longueur de scellement

Injection globale unique sous faible pression, assimilé les dépôts lacustres à des sables/graves). En utilisant la formule de prédimensionnement selon Bustamante et les abaques reportées dans manuel, on a pour ces sols, on a une valeur de  $N = 5$  SPT pour 15 cm, soit 10 pour 30 cm.

- $q_s = 0.05 \text{ Mpa}$ ;

- $D_d = 0.130 \text{ m}$ ;
- $\alpha = 1.2$  (Sable-grave + IGU)
- $D_s = D_d \cdot \alpha = 0.156 \text{ m}$ ;
- $T_u = 2 \cdot A = 284.32 \text{ kN}$
- $L_s = \frac{T_u}{\pi \cdot D_s \cdot (10^3 \cdot q_s)} = 11.6 \text{ m}$ .

La longueur totale de forage est donc de  $7.76 + 11.56 = 19.27 \text{ m}$ .

### 0.3 Paroi ancrée et encastrée en pied - Méthode de Blum

Une résolution possible du cas de paroi ancrée et encastrée en pied consiste à imposer la position du point de moment fléchissant nul (méthode dite la poutre équivalente). En particulier, dans la méthode portant son nom, Blum fait l'hypothèse que le point de moment nul est confondu avec le point où la résultante de pressions s'annule. Ceci simplifie la résolution de l'écran en l'assimilant à deux poutres isostatiques. Notez que l'on a déjà calculé le point de pression nulle  $z_o = 10.98 \text{ m}$ .

#### 0.3.1 Equilibre de la poutre supérieure

c.f. précédemment, au point de pression nulle  $z = z_o$  on a:

$$V_0 = -257.32 + A \quad [\text{kN/m}]$$

$$M_0 = 1095.37 - 8.98 \cdot A \quad [\text{kN/m}]$$

En annulant le moment fléchissant en ce point, on obtient l'effort d'ancrage:

$$A = 121.98(\text{kN/m}')$$

et l'effort tranchant correspondant est:

$$V_0 = -135.33((\text{kN/m}'))$$

#### 0.3.2 Equilibre de la poutre inférieure

$$\begin{aligned} M &= -V_0 \zeta + \frac{1}{6} \eta \cdot \zeta^3 \\ V &= CB + V_0 + \frac{1}{2} \eta \zeta^2 \end{aligned}$$

On résout les équations d'équilibre

$$M(V_0 = -135.33 \text{kN/m}) = 0$$

$$V(V_0 = -135.33 \text{kN/m}) + CB = 0$$

pour les inconnus  $CB$  et  $\zeta$ :

$$CB = 270.66 \text{kN/m}, \quad \zeta_0 = 4.43 \text{ m}$$

La contre-butée s'exerce de part et d'autre du point de rotation en bas de paroi sur une longueur:

$$b = \frac{CB}{K_{ph} \gamma' (z - H) + 2c'_k \sqrt{K_{ph}}} = 1.14 \text{ m}, \quad \text{avec } z = |z_0| + \zeta_0$$

La longueur totale de la paroi est donc

$$L = |z_0| + \zeta_0 + \frac{b}{2} = 15.98 \text{ m}$$

### 0.3.3 Tirant d'ancrage

#### Longueur libre minimum d'ancrage

En prenant la loi des sinus, avec un mécanisme de ruine partant du bas de la paroi et en utilisant l'hypothèse conservatrice d'une surface de ruine selon l'équilibre du talus naturel:

$$\frac{L - \xi}{\sin(\theta)} = \frac{x}{\sin(\alpha)},$$

avec  $2\alpha = 90^\circ - \phi$  et  $\theta = 20^\circ + \phi/2 + 45^\circ$ . La longueur libre minimum d'ancrage est donc:

$$x = \frac{(L - \xi) \sin(\alpha)}{\sin(\theta)} = 7.1 \text{ m}$$

soit en rajoutant  $0.2H = 2\text{m}$ , une longueur libre de 9.1m.

#### Prédimensionnement la longueur de scellement

Injection globale unique sous faible pression, assimilé les dépôts lacustres à des sables/graves). En utilisant la formule de prédimensionnement selon Bustamante et les abaques reportées dans manuel, on a pour ces sols, on a une valeur de  $N = 5$  SPT pour 15 cm, soit 10 pour 30 cm.

- $q_s = 0.05 \text{ Mpa}$ ;
- $D_d = 0.130 \text{ m}$ ;
- $\alpha = 1.2$  (Sable-grave + IGU)
- $D_s = D_d \cdot \alpha = 0.156 \text{ m}$ ;
- $T_u = 2 \cdot A = 243.97 \text{ kN}$
- $L_s = \frac{T_u}{\pi \cdot D_s \cdot (10^3 \cdot q_s)} = 9.96 \text{ m}$ .

La longueur totale de forage est donc de  $9.1 + 9.96 = 19.06\text{m}$ .