

فؤاد سر رابعه  
رُشغال

1,70

111

4th Year Civil - Public works

Foundation Design

(11)

Supported deep excavation

(Sheet Pile Walls)

(1)

Cantilever SPW

# Supported deep excavation

## (Sheet Pile Walls)

### - Definition:-

- Sheet Pile Walls (SPW) are retaining structures used to retain soil or water. It consists of a group of piles, sheets or corrugated sheets driven tangent to each other to form a continuous retaining structure.

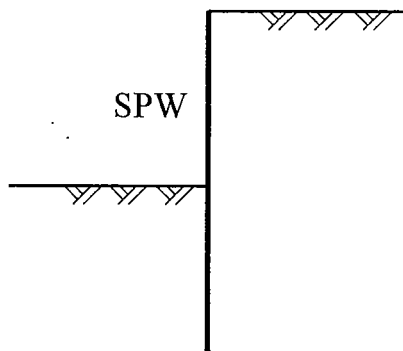
- الـ SPW عبارة عن منشآت سائدة تستخدم لسند التربة أو المياه.

- يتم تنفيذ الـ SPW قبل عملية الحفر ثم يتم حفر التربة بعد ذلك.

### - Applications of SPW: - استخداماتها

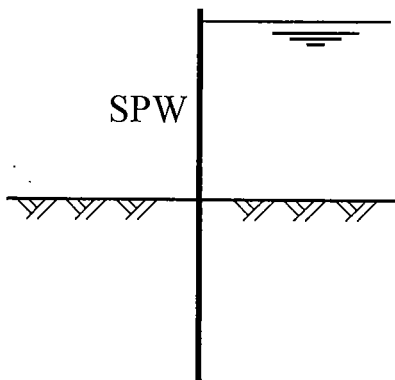
- There are many applications for Sheet Pile Walls such as:-

#### 1- To retain the sides of cuts made in earth:-



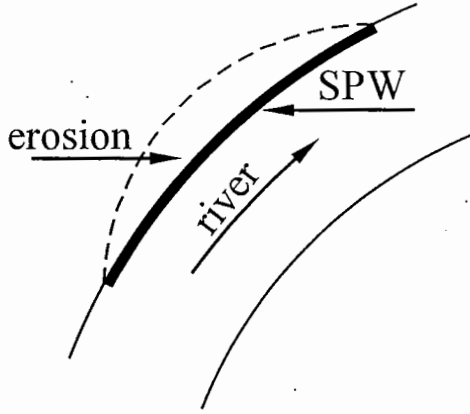
- تستخدم الـ SPW لسند جوانب الحفر وذلك عند وجود منشآت مجاورة حيث لا يمكن عمل ميول جانبية للحفر أو عمل حائط سائد.

#### 2- For construction of offshore structures:-



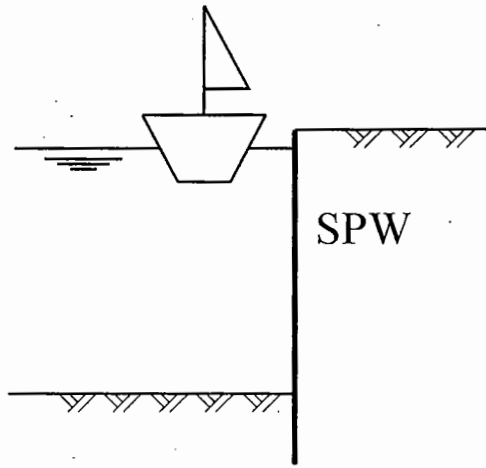
- تستخدم الـ SPW لنزح المياه من منطقة معينة داخل مجرى مائي لتنفيذ منشأ مثل أساسات الكبارى المنشأة على الأنهار والترع.

### 3- For river bank protection:-



- تستخدم الـ SPW لحماية جوانب المجرى المائى (مثل الأنهار أو الترعى) من عملية النحر **erosion** وذلك فى المناطق المنحنية من المجرى المائى.

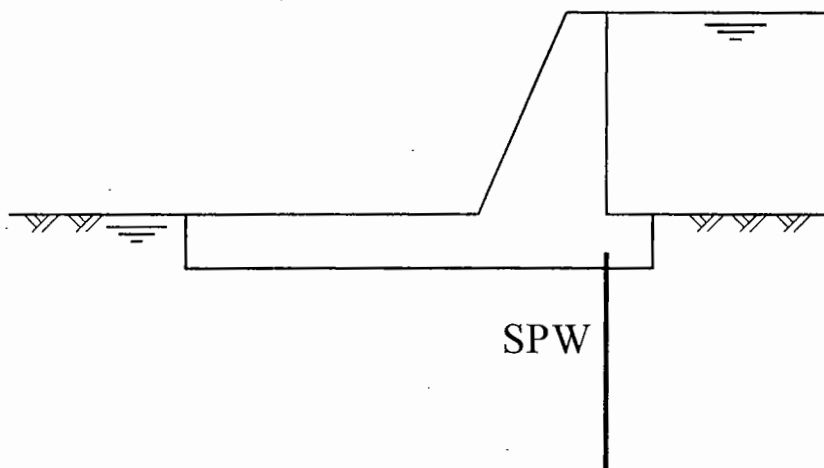
### 4- In water front structures:-



- تستخدم الـ SPW فى المنشآت الشاطئية مثل أرصفة الموانئ.

### 5- To reduce the uplift at the Weir base:-

- تستخدم الـ SPW أسفل السدود الخرسانية والهدارات للتقليل من تأثير الـ **Uplift** وكذلك التقليل من المياه المفقودة نتيجة للـ **Seepage**.



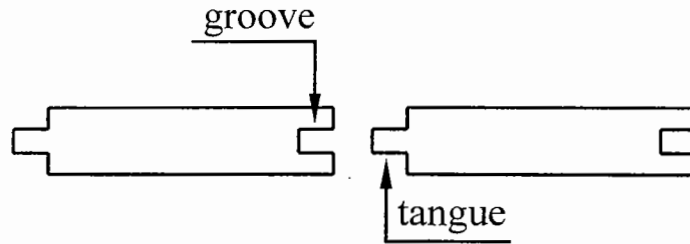
## - Classification of SPW according to material:-

- يستخدم العديد من المواد فى تنفيذ الـ SPW مثل الخشب Timber SPW والخرسانة المسلحة R.C. SPW والحديد steel SPW.

- يتوقف نوع المادة المستخدمة فى تنفيذ الـ SPW على الكثير من العوامل مثل عمق الحفر ووجود المياه الجوفية ونوع الـ SPW دائم أم مؤقت.

### 1- Timber SPW:-

- يستخدم الخشب فى الـ SPW فى حالة عمق الحفر الصغير وعند وجود مياه جوفية يجب معالجة الخشب وعادة يستخدم فى الأعمال المؤقتة مثل أعمال الحفر لتنفيذ شبكات المياه والكهرباء والصرف الصحى.



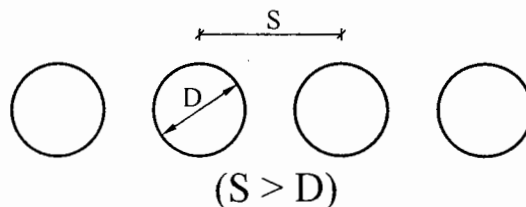
### 2- R.C. Piles:-

- تستخدم الخرسانة المسلحة فى الـ SPW الدائمة حيث لا يتم إزالتها بعد الإنتهاء من المشروع وتتميز بالقدرة على تنفيذها بأعماق كبيرة.

- تستخدم الخوازيق فى الـ SPW حيث يتم تنفيذ مجموعة من الخوازيق المتجاورة وتتوقف المسافة بين هذه الخوازيق على نوع التربة ووجود المياه الجوفية حيث يوجد ثلاثة طرق للتنفيذ وهى:-

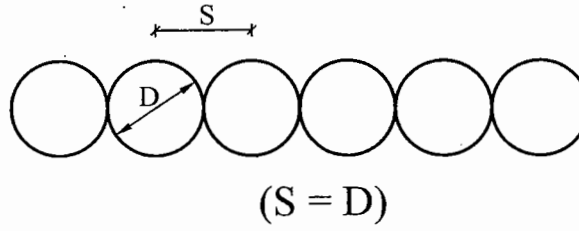
#### i- Adjacent Piles:-

- فى حالة التربة المتماسكة cohesive soil مع عدم وجود مياه جوفية يمكن استخدام الخوازيق المتجاورة Adjacent Piles.



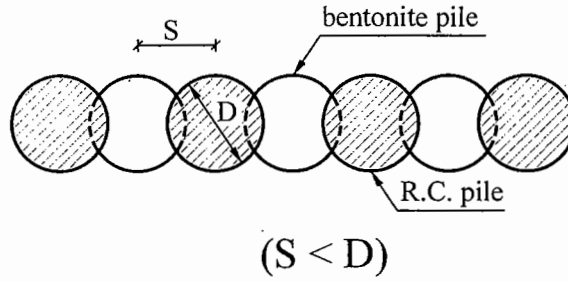
## ii- Tangent Piles:-

- فى حالة التربة الغير متماسكة **cohesionless soil** مع عدم وجود مياه جوفية يجب استخدام الخوازيق المتلاصقة **Tangent Piles** لمنع تسرب حبيبات التربة.

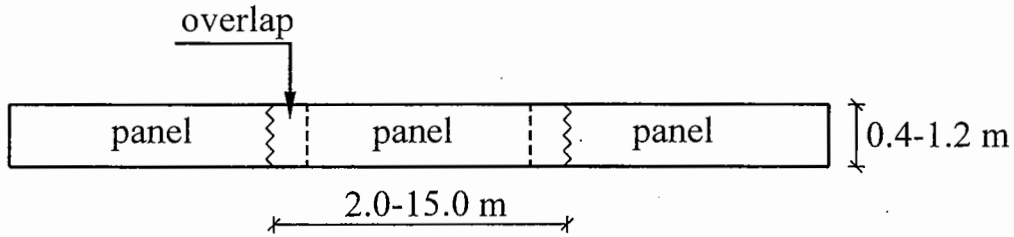


## iii- Secant Piles:-

- فى حالة وجود مياه جوفية يجب استخدام الخوازيق المتقاطعة **Secant Piles** لمنع تسرب المياه.



## 3- Diaphragm walls:-

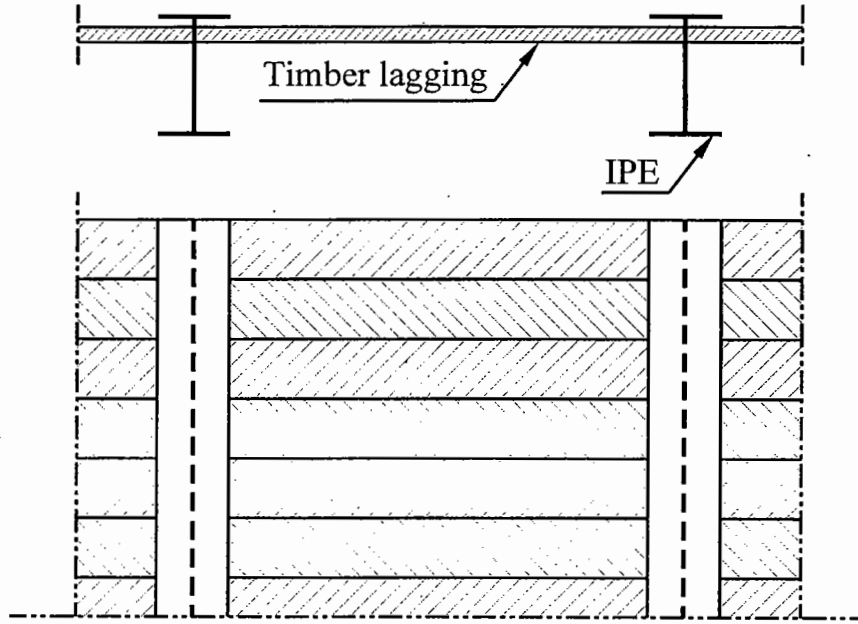


- وهى عبارة عن مقاطعات مستطيلة من الخرسانة المسلحة يتم تنفيذها مثل الخوازيق بواسطة ماكينات حفر خاصة وتتميز هذه الماكينات بالقدرة على الحفر بأعماق كبيرة جداً كما أن الـ **Diaphragm walls** ذات سطح مستوى وبالتالي لا نحتاج لعمل حوائط داخلية كما فى حالة الخوازيق.

- عند تنفيذ الـ **Diaphragm walls** يتم ترك مسافة بين الـ **panels** أقل من طولها ثم يتم حفر **panels** بينها بحيث تقوم الماكينة بتكسير جزء من الـ **panels** المجاورة حتى يحدث تماسك بين الـ **panels** مما يمنع تسرب المياه الجوفية.

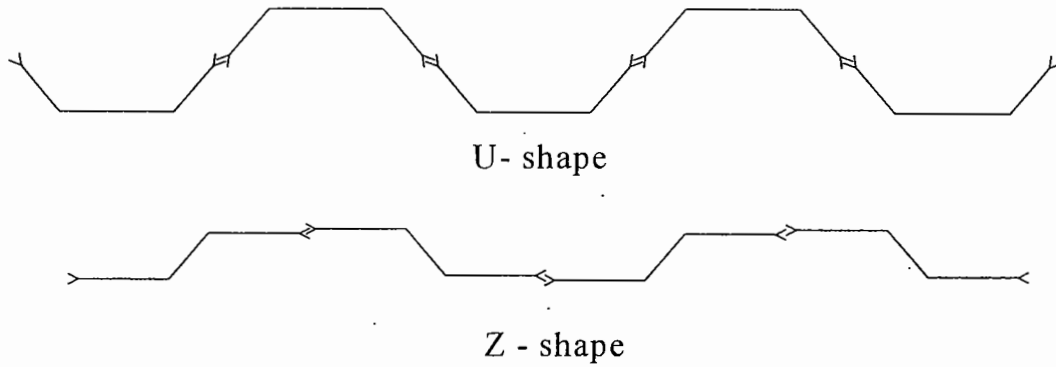
#### 4- Soldier piles and timber lagging:-

- وهى عبارة عن خوازيق معدنية ذات قطاعات IPE يتم دقها فى التربة ثم يتم وضع ألواح خشبية بينها أثناء الحفر.



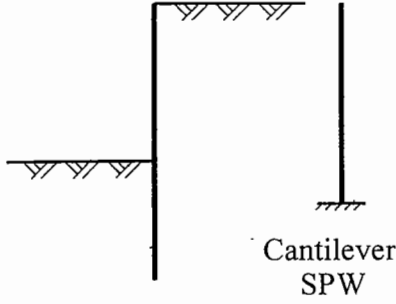
#### 5- Steel SPW:-

- وهى أكثر أنواع الـ SPW استخداماً نظراً لقدرة تحملها العالية وصغر مقطعها وسهولة تنفيذها سواء بالدق أو بالاهتزاز كما يمكن زيادة طولها باللحام ولها العديد من القطاعات.



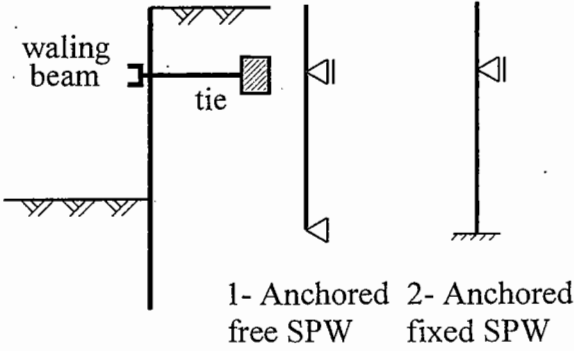
## - Classification of SPW according to statical system:-

### 1- Cantilever SPW:-



- فى حالة أعماق الحفر الصغيرة نكتفى بتثبيت الـ SPW فى التربة حيث نعتبر التربة فى هذه الحالة **Fixed support** ويتم تصميم الـ SPW على أنه **Cantilever**.

### 2- Anchored SPW:-



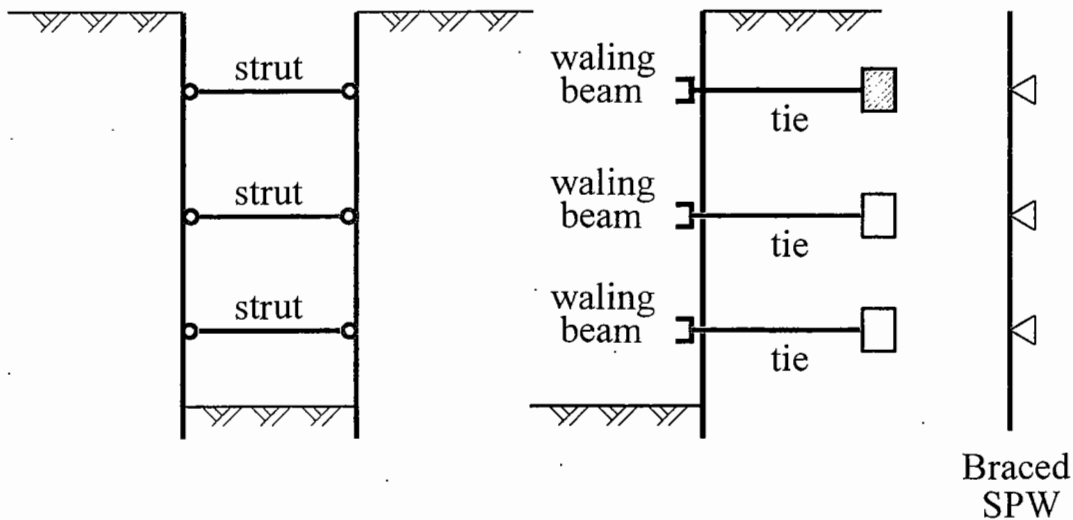
- فى حالة زيادة عمق الحفر نحتاج إلى تثبيت الـ SPW من أعلى فى التربة باستخدام **support** إضافى (**Anchor**) حيث يمكن أن نعتبر التربة فى هذه الحالة **Fixed support** أو **Hinged support** ويتم تصميم الـ SPW فى هذه الحالة بإحدى طريقتين:-

1- Anchored Free SPW

2- Anchored Fixed SPW

### 3- Braced SPW:-

- فى حالة زيادة عمق الحفر بقيمة كبيرة نحتاج إلى تثبيت الـ SPW من أعلى فى التربة باستخدام أكثر من **support** إضافى حيث يمكن فى هذه الحالة أن نستغنى عن تثبيت الـ SPW فى التربة من أسفل ونكتفى بتثبيتها عن طريق الـ **supports** الموجودة.



## Revision on Lateral Earth Pressure

### - Rankine earth pressure theory:-

$$- \sigma_a = K_a \times \sigma_v - 2c\sqrt{K_a}$$

$$- \sigma_p = K_p \times \sigma_v + 2c\sqrt{K_p}$$

- where:-

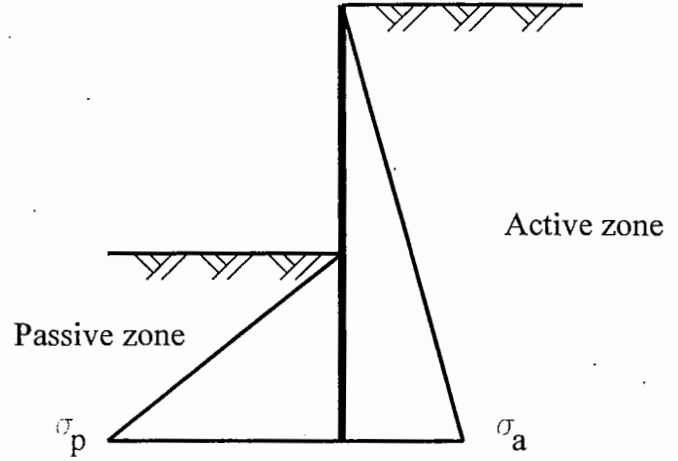
$$- K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \leq 1.0$$

$$- K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{1}{K_a} \geq 1.0$$

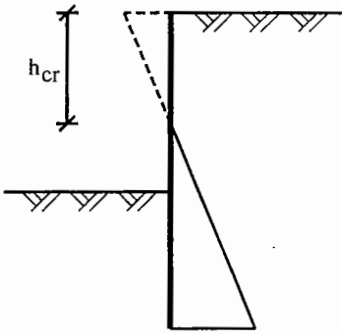
$$- \text{For } \phi = 0 \Rightarrow K_a = K_p = 1.0$$

$$- \sigma_v = \sum \gamma_{\text{eff}} \cdot h \quad \gamma_{\text{eff}} = \gamma_b \quad \text{above G.W.T.}$$

$$\& \gamma_{\text{eff}} = \gamma_{\text{sub}} \quad \text{below G.W.T.}$$



### - ملاحظات هامة عند حساب ال Earth pressure :-



- ١- فى حالة وجود تماسك للتربة ( $c \neq 0$ ) عند حساب ال  $\sigma_a$  قد تكون قيمتها سالبة مما يعنى وجود **Tension cracks** وفى هذه الحالة يجب حساب قيمة ال  $h_{cr}$  ثم نعتبر الضغط الجانبي للتربة فى هذه المنطقة يساوى صفر حيث لا يمكن أن تقوم التربة بشد الحائط حيث:-

### - For tension cracks:-

$$- \text{At } h = h_{cr} \quad \sigma_a = 0$$

$$\Rightarrow \sigma_a = \gamma \times h_{cr} \times K_a - 2c\sqrt{K_a} = 0$$

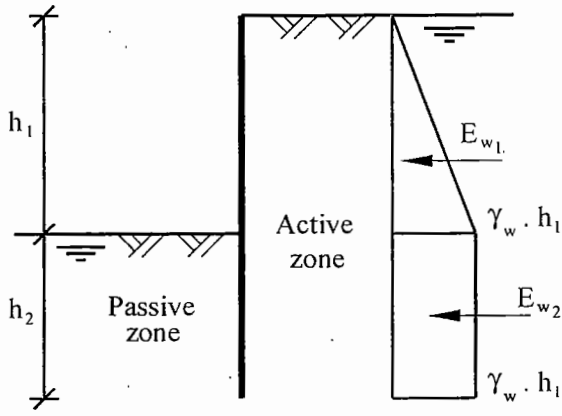
$$\Rightarrow h_{cr} = \frac{2c}{\gamma \cdot \sqrt{K_a}}$$

- ٢- فى حالة وجود طبقة من التربة معطى خواصها فى ال  $(c', \phi')$  Drained condition وكذلك خواصها فى ال  $(c_u)$  Undrained condition يتم حساب ال **L.E.P.** باستخدام

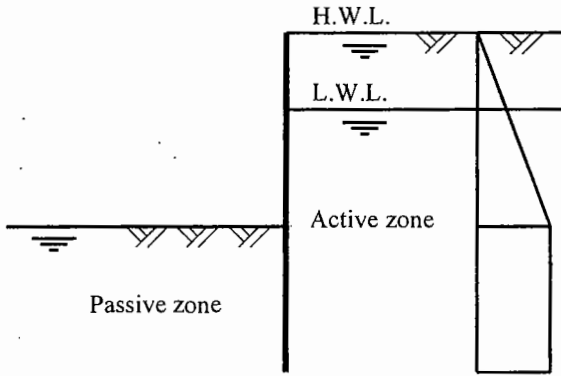
الخواص فى ال **Drained condition** لأنها **More critical**.



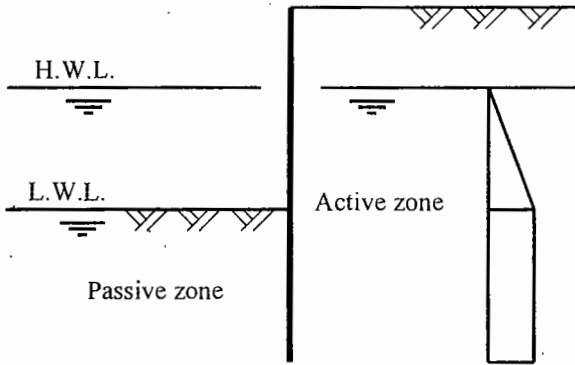
٣- يجب مراعاة أخذ تأثير الضغط الجانبي للمياه الجوفية أثناء حساب الـ **L.E.P.**



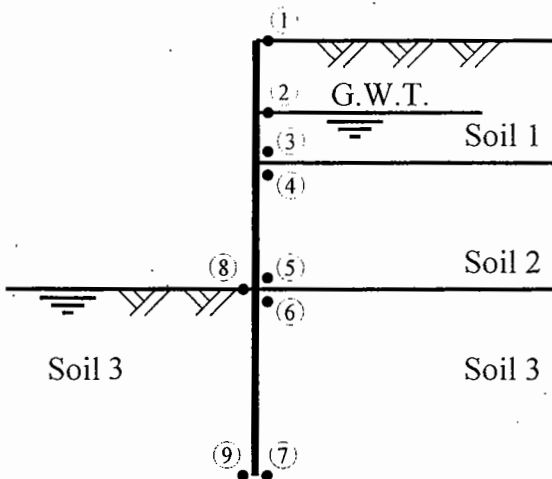
٤- عند وجود منسوبين للمياه الجوفية من ناحية الـ **active earth pressure** ومعنى ذلك أن منسوب المياه متغير تكون الحالة الـ **critical** هي منسوب المياه الأعلى لأنه يعطى ضغط جانبي أكبر.



٥- عند وجود منسوبين للمياه الجوفية من ناحية الـ **passive earth pressure** ومعنى ذلك أن منسوب المياه متغير تكون الحالة الـ **critical** هي منسوب المياه المنخفض لأنه يعطى مقاومة أقل.



٦- لرسم توزيع الـ **Earth pressure** على جانبي الـ **SPW** يجب حساب الضغط عند النقاط التالية:-

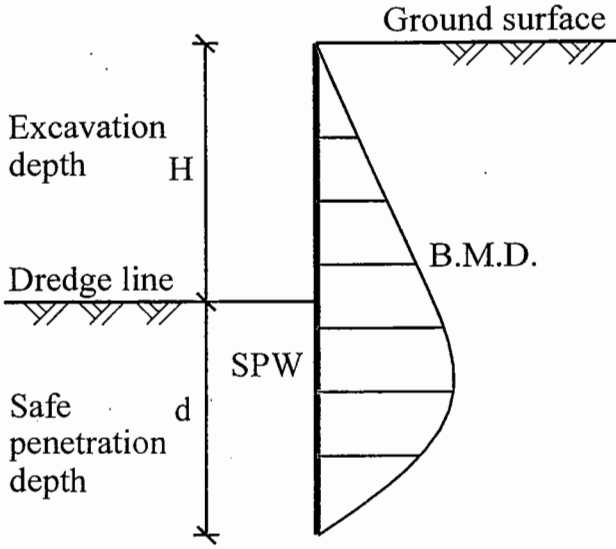


- ١- عند سطح الأرض.
- ٢- عند سطح المياه الجوفية.
- ٣- عند الحد الفاصل بين الطبقات يتم حساب الـ **Earth pressure** مرتين مرة في الطبقة الأولى ومرة في الطبقة الثانية.
- ٤- عند نهاية الـ **SPW**.

# 1- Design of Cantilever SPW (for $H \leq 5.0$ m)

- لتصميم الـ Cantilever SPW يلزم تعيين

التالى:-



١- تعيين طول الـ SPW الكافى لتثبيتها

٢- تعيين الـ B.M. على الـ SPW حتى

نستطيع تصميم القطاع cross-

section المناسب الذى يستطيع

مقاومة هذه العزوم.

٣- فى حالة استخدام steel SPW نقوم

بتعيين الـ Section Modulus (z) حيث:-

$$- z = \frac{M_{\max}}{f_s}$$

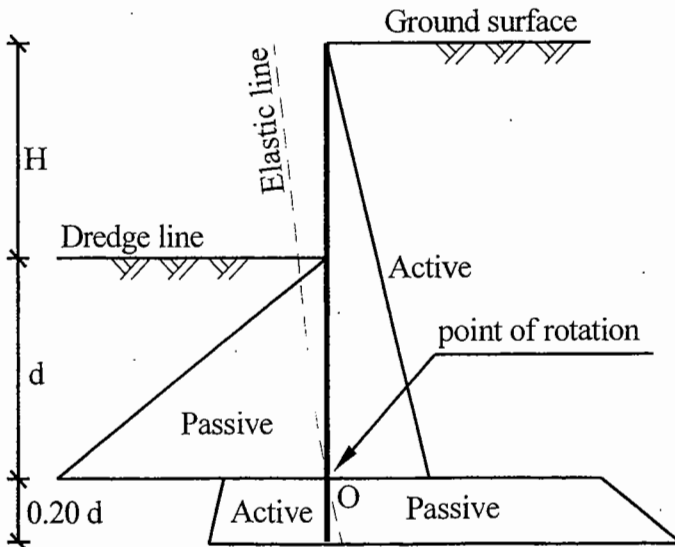
- Where:-

- z = Section Modulus

-  $M_{\max}$  = Max. B.M. on the SPW

-  $f_s$  = Allowable compression in steel = 160 N/mm<sup>2</sup> (For steel 36/52)

**- How would the SPW be fixed in soil:-**



- تعتمد عملية تثبيت الـ SPW فى التربة

على وجود (O) point of rotation

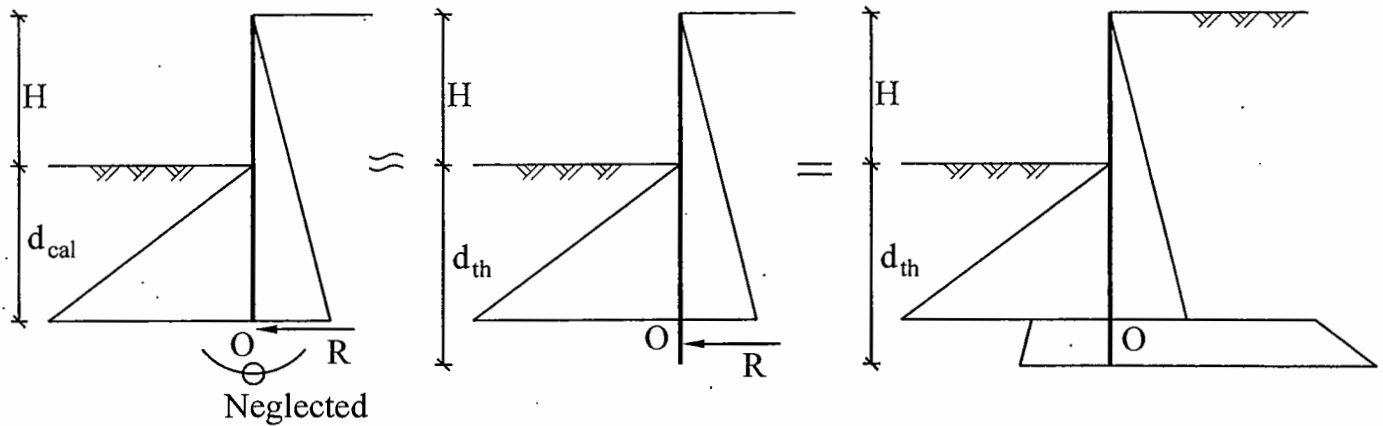
حيث يتغير اتجاه حركة الـ SPW

بالنسبة للتربة تحت نقطة O حيث يتغير

نوع الضغط الجانبي للتربة من Active

إلى Passive كما بالشكل المقابل.

- نظراً لصعوبة حل الـ **statical system** السابق بطريقة دقيقة فإننا نقوم بالإسعاضة عن الجزء الموجود أسفل نقطة **O** بقوة **R** تؤثر عند النقطة **O** مع إهمال العزم الناتج عن القوة **R** نظراً لصغر قيمته.

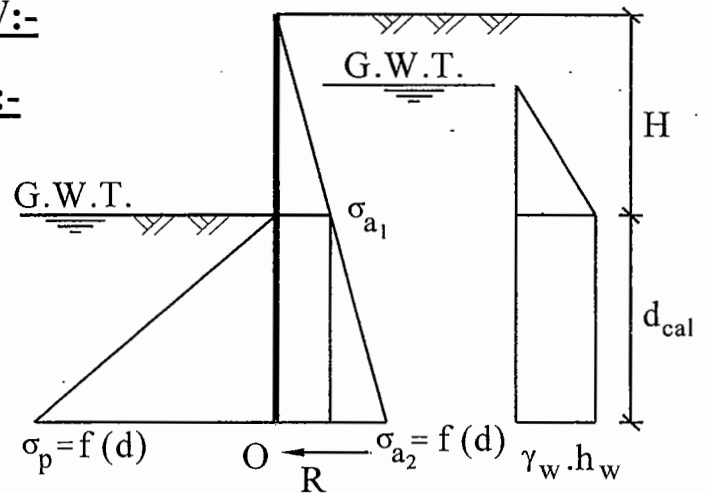


### - Steps for design of Cantilever SPW:-

#### 1- Calculate stresses acting on SPW:-

- Calculate active earth pressure, passive earth pressure and water pressure as a function of  $d_{cal}$ .

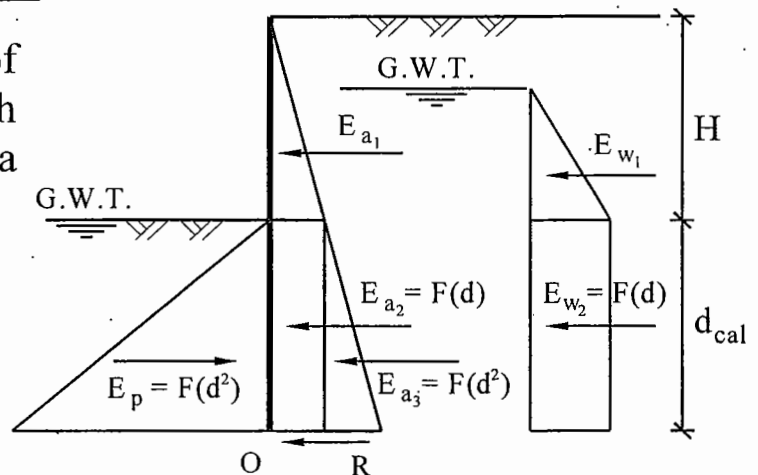
⇒ eq. in 1st degree in  $d_{cal}$



#### 2- Calculate forces acting on SPW:-

- Calculate the resultant forces of active earth pressure, passive earth pressure and water pressure as a function of  $d_{cal}$ .

⇒ eq. in 2nd degree in  $d_{cal}$



### 3- Calculate the safe penetration depth ( $d_{safe}$ ):-

$$\sum M_{@o} = 0 \Rightarrow \text{eq. in 3rd degree in } d_{cal}$$

- Find  $d_{cal}$  by trial & error

$$\Rightarrow d_{cal} = \sqrt{\quad} \Rightarrow d_{th} = 1.2 d_{cal}$$

$$\Rightarrow d_{safe} = 1.2 d_{th} = 1.44 d_{cal}$$

### 4- Calculate the maximum B.M. on the SPW:-

- At point of zero shear at depth  $z$  from dredge line

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow \text{eq. in 2nd degree in } z$$

$$\Rightarrow z = \sqrt{\quad} \Rightarrow M_{max} = M_z$$

### 5- Calculate the section modulus for steel SPW:-

$$- z = \frac{M_{max}}{f_s}$$

- Where:-

-  $z$  = Section Modulus

-  $M_{max}$  = Max. B.M. on the SPW

-  $f_s$  = Allowable compression in steel =  $160 \text{ N/mm}^2$  (For steel 36/52)

### - Example 1:-

- For the cantilever steel sheet pile wall, shown in Figure, it is required to:

- Determine the safe penetration depth of the wall.
- Calculate the maximum bending moment on the wall.
- Estimate the section modulus of the wall ( $f_{s-all} = 140 \text{ MPa}$ ).

### - Solution:-

#### 1- Stresses acting on SPW:-

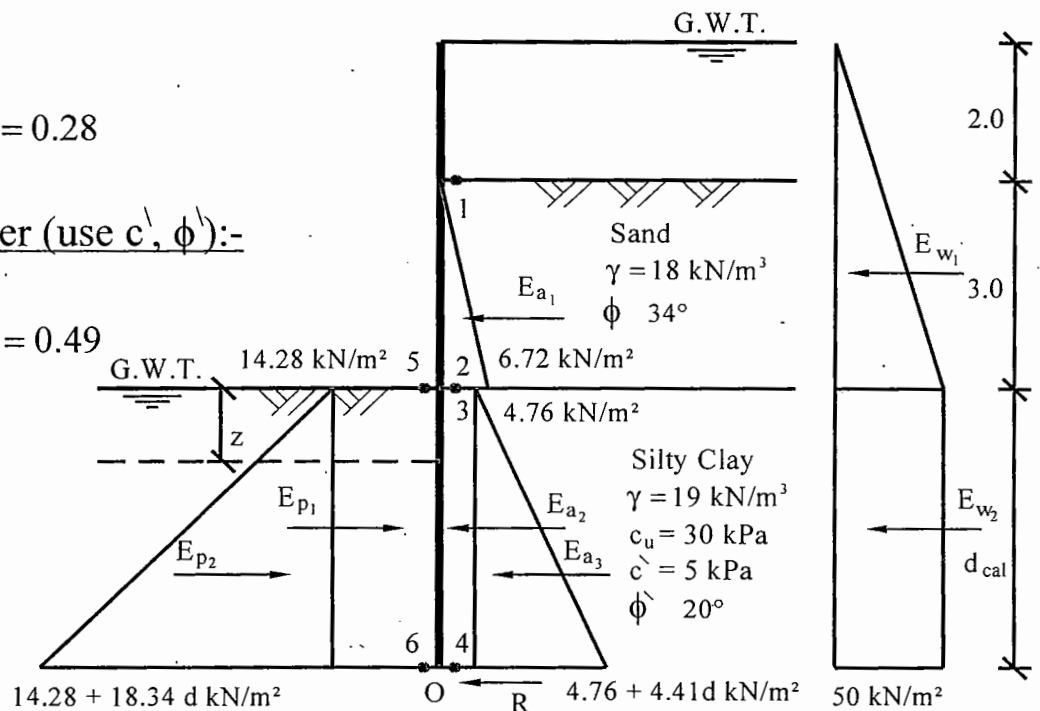
- For sand layer:-

$$- K_a = \frac{1 - \sin 34^\circ}{1 + \sin 34^\circ} = 0.28$$

- For silty clay layer (use  $c'$ ,  $\phi'$ ):-

$$- K_a = \frac{1 - \sin 20^\circ}{1 + \sin 20^\circ} = 0.49$$

$$- K_p = \frac{1}{K_a} = 2.04$$



Point	$K_a / K_p$	$c$ (kPa)	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_a / \sigma_p$ (kPa)
1	0.28	0	0	0
2	0.28	0	$3 \times 8 = 24$	6.72
3	0.49	5	24	4.76
4	0.49	5	$24 + 9 d$	$4.76 + 4.41 d$
5	2.04	5	0	14.28
6	2.04	5	$d \times 9 = 9 d$	$14.28 + 18.36 d$

## 2- Forces and $\Sigma M_{@o}$ :-

Force	Value (kN)	Arm (m)	B.M. (kN.m)
$E_{a_1}$	$0.5 \times 6.72 \times 3 = 10.08$	$d+1$	$10.08 \quad +10.08 d$
$E_{a_2}$	$4.76 d$	$d/2$	$2.38 d^2$
$E_{a_3}$	$0.5 \times d \times 4.41 d = 2.205 d^2$	$d/3$	$0.735 d^3$
$E_{w_1}$	$0.5 \times 50 \times 5 = 125$	$d+5/3$	$208.33 \quad +125 d$
$E_{w_2}$	$50 d$	$d/2$	$25 d^2$
$E_{p_1}$	$-14.28 d$	$d/2$	$-7.14 d^2$
$E_{p_2}$	$0.5 \times d \times 18.34 d = -9.17 d^2$	$d/3$	$-3.057 d^3$
$\Sigma$	$135.08 + 40.48 d - 6.965 d^2$		$218.41 \quad +135.08 d \quad +20.24 d^2 \quad -2.322 d^3$

## 3- Safe penetration depth of SPW:-

$$- \Sigma M_{@o} = -2.322 d^3 + 20.24 d^2 + 135.08 d + 218.41 = 0$$

$$\Rightarrow d_{cal} = 13.53 \text{ m}$$

$$\Rightarrow d_{safe} = 1.2 d_{th} = 1.44 d_{cal} = 1.44 \times 13.53 = 19.5 \text{ m}$$

## 4- Maximum B.M. on the SPW:-

- At point of zero shear:-

$$- \Sigma F_x = 135.08 + 40.48 z - 6.965 z^2 = 0$$

$$\Rightarrow z = 8.18 \text{ m}$$

$$\Rightarrow M_{max} = -2.322 (8.18)^3 + 20.24 (8.18)^2 + 135.08 (8.18) + 218.41$$

$$\Rightarrow M_{max} = 1406.7 \text{ kN.m/m}^1$$

$$- \text{Section Modulus} = z = \frac{M_{max}}{f_s} = \frac{1406.7}{140 \times 10^3} = 10.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 10050 \text{ cm}^3$$

### - Example 2:-

- For the cantilever steel sheet pile wall, shown in Figure, it is required to:

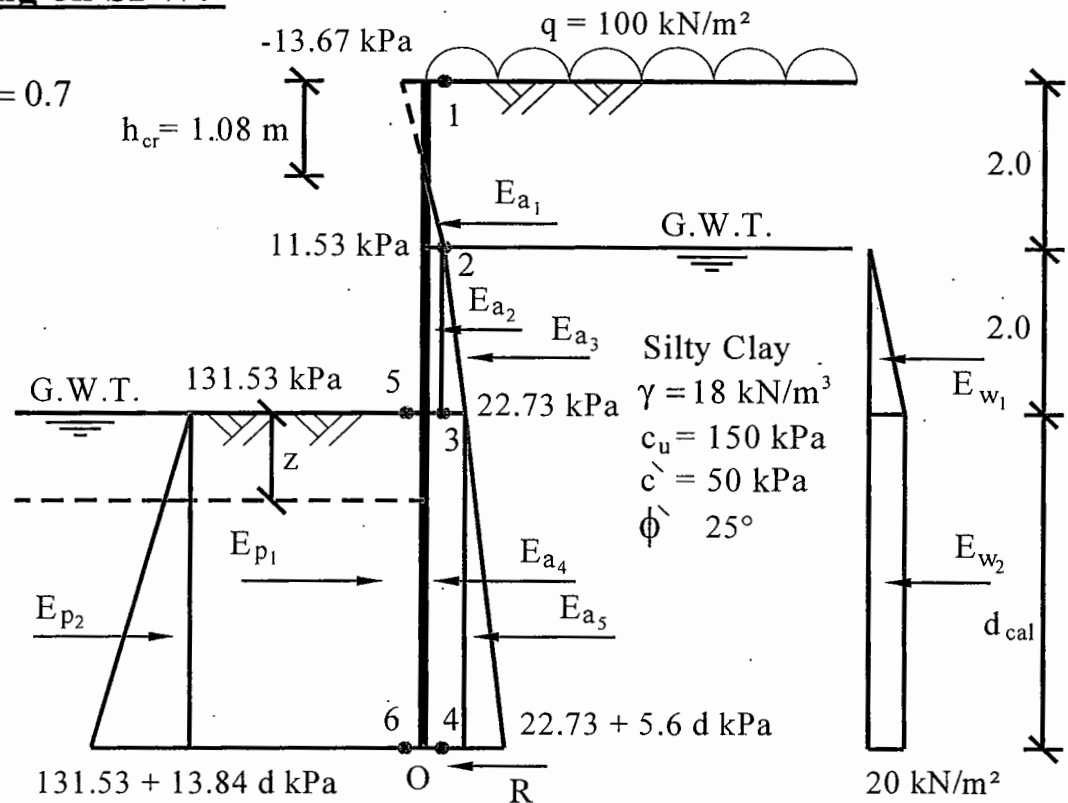
- Determine the safe penetration depth of the wall.
- calculate the maximum bending moment on the wall.
- Estimate the section modulus of the wall ( $f_{s-all} = 140 \text{ MPa}$ ).

### - Solution:-

#### 1- Stresses acting on SPW:-

$$- K_a = \frac{1 - \sin 25^\circ}{1 + \sin 25^\circ} = 0.7$$

$$- K_p = \frac{1}{K_a} = 1.73$$



Point	$K_a / K_p$	$c$ (kPa)	$\sigma_v$ (kPa)	$\sigma_a / \sigma_p$ (kPa)
1	0.7	50	100	-13.67
2	0.7	50	$100 + 2 \times 18 = 136$	11.53
3	0.7	50	$136 + 2 \times 8 = 152$	22.73
4	0.7	50	$152 + 8 d$	$22.73 + 5.6 d$
5	1.73	50	0	131.53
6	1.73	50	$8 d$	$131.53 + 13.84 d$

## 2- Forces and $\Sigma M_{@0}$ :-

- at  $h = h_{cr} \Rightarrow \sigma_a = 0$

-  $\sigma_a = 0.7(100 + 18 h_{cr}) - 2 \times 50 \times \sqrt{0.7} = 0$

$\Rightarrow h_{cr} = 1.08 \text{ m}$

Force	Value (kN)	Arm (m)	B.M. (kN.m)			
$E_{a_1}$	$0.5 \times 11.53 \times 0.92 = 5.3$	$d + 2.31$	12.24	$+5.3 d$		
$E_{a_2}$	$11.53 \times 2 = 23.06$	$d + 1$	23.06	$+23.06 d$		
$E_{a_3}$	$0.5 \times 2 \times (22.73 - 11.53) = 11.2$	$d + 0.67$	7.5	$+11.2 d$		
$E_{a_4}$	$22.73 d$	$d/2$	$11.37 d^2$			
$E_{a_5}$	$0.5 \times d \times 5.6 d = 2.8 d^2$	$d/3$	$0.93 d^3$			
$E_{w_1}$	$0.5 \times 20 \times 2 = 20$	$d + 0.67$	6.67	$+20 d$		
$E_{w_2}$	$20 d$	$d/2$	$10 d^2$			
$E_{p_1}$	$-131.53 d$	$d/2$	$-65.77 d^2$			
$E_{p_2}$	$0.5 \times d \times 13.84 d = -6.92 d^2$	$d/3$	$-2.31 d^3$			
$\Sigma$	$59.56 - 88.8 d - 4.12 d^2$		49.47	$+59.56 d$	$-44.4 d^2$	$-1.38 d^3$

## 3- Safe penetration depth of SPW:-

-  $\Sigma M_{@0} = -1.38 d^3 - 44.4 d^2 + 59.56 d + 49.47 = 0$

$\Rightarrow d_{cal} = 1.84 \text{ m}$

$\Rightarrow d_{safe} = 1.2 d_{th} = 1.44 d_{cal} = 1.44 \times 1.84 = 2.65 \text{ m}$

## 4- Maximum B.M. on the SPW:-

- At point of zero shear:-

-  $\Sigma F_x = 59.56 - 88.8 z - 4.12 z^2 = 0$

$\Rightarrow z = 0.65 \text{ m}$

$\Rightarrow M_{max} = -1.38 (0.65)^3 + 44.4 (0.65)^2 + 59.56 (0.65) + 49.47$

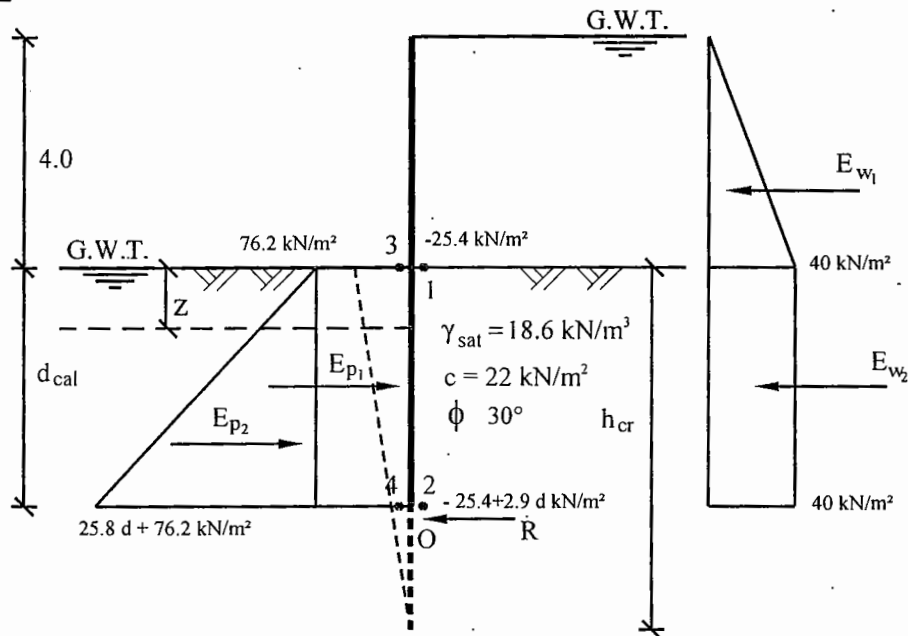
$\Rightarrow M_{max} = 69 \text{ kN.m/m}$



### - Example 3:-

- A cantilever steel sheet pile wall was driven across a water channel to allow for the construction of a new irrigation structure. The high water in this channel is 4m above the bed level. Soil below the bed consists of a thick layers of silty sand ( $\Phi=30^\circ$ ,  $C=22\text{kN/m}^2$ ), saturated unit weight  $= 18.6 \text{ kN/m}^3$ ). If the water level on one side of the sheet pile wall is lowered by 4m to reach the bed level:
  - Determine the safe penetration depth.
  - Calculate the maximum bending moment on the wall.

### - Solution:-



### 1- Stresses acting on SPW:-

$$\begin{aligned}
 - K_a &= \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{1 - \sin 30^\circ}{1 + \sin 30^\circ} = 0.33 & - K_p &= \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{1}{K_a} = 3 \\
 - \sigma_a &= \sigma_v' \times K_a - 2c \sqrt{K_a} \\
 - \sigma_{a1} &= (0) \times 0.33 - 2(22)\sqrt{0.33} = -25.4 \text{ kN/m}^2 \\
 - \sigma_{a2} &= (8.6 \times d) \times 0.33 - 2(22)\sqrt{0.33} = 2.9d - 25.4 \text{ kN/m}^2 \\
 - \sigma_p &= \sigma_v' \times K_p + 2c \sqrt{K_p} \\
 - \sigma_{p3} &= (0) \times 3 + 2(22)\sqrt{3} = 76.2 \text{ kN/m}^2 \\
 - \sigma_{p4} &= (8.6 \times d) \times 3 + 2(22)\sqrt{3} = 25.8d + 76.2 \text{ kN/m}^2 \\
 - \sigma_{w1} &= \gamma_w \times h_w = 10 \times 4 = 40 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

## 2- Forces acting on SPW:-

- at  $h = h_{cr} \Rightarrow \sigma_a = 0$
- $\sigma_a = 2.9 h_{cr} - 25.4 = 0 \Rightarrow h_{cr} = 8.8 \text{ m}$
- assume  $d_{cal} < h_{cr}$
- $E_{p1} = 76.2 \text{ d}$
- $E_{p2} = \frac{1}{2} \times d \times 25.8 \text{ d} = 12.9 \text{ d}^2 \text{ kN/m}^1$
- $E_{w1} = \frac{1}{2} \times 40 \times 4 = 80 \text{ kN/m}^1$
- $E_{w2} = 40 \times d = 40 \text{ d kN/m}^1$

## 3- Safe penetration depth of SPW:-

- $\sum M_{@o} = 0$
- $\Rightarrow E_{w1} \times (d + \frac{4}{3}) + E_{w2} \times (\frac{d}{2}) - E_{p1} \times (\frac{d}{2}) - E_{p2} \times (\frac{d}{3}) = 0$
- $80 \times (d + \frac{4}{3}) + 40 \text{ d} \times (\frac{d}{2}) - 76.2 \text{ d} \times (\frac{d}{2}) - 12.9 \text{ d}^2 \times (\frac{d}{3}) = 0$
- $80 \text{ d} + 106.67 + 20 \text{ d}^2 - 38.1 \text{ d}^2 - 4.3 \text{ d}^3 = 0$
- $\Rightarrow 4.3 \text{ d}^3 + 18.1 \text{ d}^2 - 80 \text{ d} - 106.67 = 0$
- $\Rightarrow d_{cal} = 3.4 \text{ m} < h_{cr} \Rightarrow \text{O.K.}$
- $\Rightarrow d_{th} = 1.2 d_{cal}$
- $\Rightarrow d_{safe} = 1.2 d_{th} = 1.44 d_{cal} = 1.44 \times 3.4 = 4.9 \text{ m}$

## 4- Maximum B.M. on the SPW:-

- At point of zero shear at depth  $z$  from dredge line
- $\sum F_x = 0$
- $\Rightarrow E_{w1} + E_{w2} + E_{p1} + E_{p2} = 0$
- $\Rightarrow 80 - 36.2 z - 12.9 z^2 = 0 \Rightarrow z = 1.46 \text{ m}$
- $\Rightarrow M_{max} = 4.3 (1.46)^3 + 18.1 (1.46)^2 - 80 (1.46) - 106.67$
- $\Rightarrow M_{max} = 171.51 \text{ kN.m/m}^1$