ضغط التربة على المنشآت الساندة

1. 1 نظريات ضغط التربة على الجدران الساندة

أول نظرية لضغط التربة الجانبي كانت للعالم الفرنسي كولومب (C.Coulomb) عام /1776/ ، حيث افترض أن أسطح الجدار يمكن أن تكون ملساء أو خشنة وأن التربة تنهار على شكل موشور صلب يميل عن الأفق بزاوية ψ، وقام بتحديد ميل مستوي الانهيار ψ والدفع الجانبي للتربة مستخدماً نظرية كولومب للانهيار للربط بين الاجهادات الناظمية والمماسية على مستوي الانهيار. ومن ثم قام العالم رانكين (Rankine)(1857) باقتراح طريقة مبسطة لحساب ضغط التربة الجانبي، معتبراً أن أسطح الجدار ملساء (الاحتكاك معدوم بين التربة و الجدار) والتربة تتلدن نتيجة لقوى الدفع الجانبي، وقد أوجد الدفع الجانبي للتربة اعتمادا على نظرية كولومب للانهيار. بعد ذلك ظهرت العديد من الأبحاث التي اعتمدت على هاتين النظريتين ولكن هذه الطرق المقترحة نتيجة لهذه الأعمال لم تستخدم كثيراً في التصميم الهندسي للجدران الساندة وإنما اقتصر استخداهما على الأبحاث.

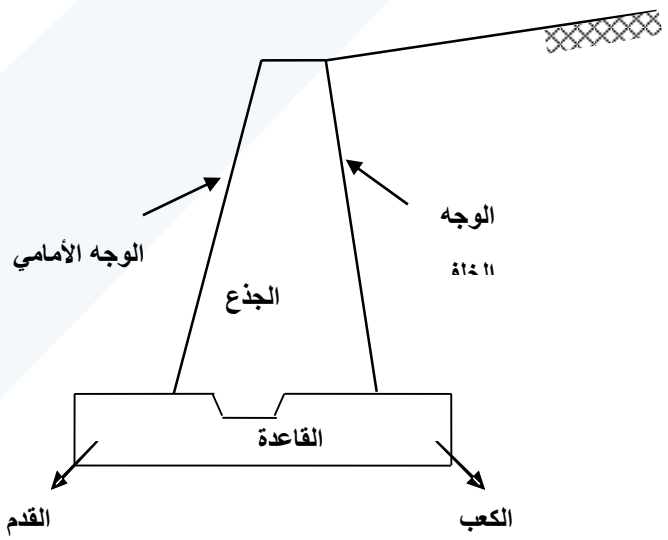
1. 2 الجدران الاستنادية

يمكن تعريف الجدار الاستنادي بأنه منشأة هندسية تستخدم لتأمين الدعم الجانبي للتربة أو لمادة أخرى عندما لا تسمح الظروف للمادة بأن تأخذ ميلها الطبيعي.

1. 2. 1 أقسام الجدار الاستنادي

يتألف الجدار الاستنادي عموماً من الأقسام الرئيسية التالية (الشكل 1. 1):

1- بلاطة القاعدة أو أساس الجدار (Base Slab, Footing): الجزء السفلي الذي يرتكز به الجدار على التربة
2- البلاطة الشاقولية أو جذع الجدار (Stem): الجزء الشاقولي من الجدار المعرض لدفع التربة
3- أوجه الجدار: أمامي و خلفي
4- قدم الجدار (Toe)
5- كعب الجدار (Heel)



الشكل 1. 1: الأقسام الرئيسية لجدار استنادي

1. 3 أنواع ضغوط التربة على الجدران الساندة

يتعلق الدفع الجانبي للتربة الموجودة وراء منشأة هندسية داعمة كجدار استنادي أو جدار وتدي بنوع التربة المحجوزة و بخواصها الأساسية (الوزن الحجمي γ ، زاوية الاحتكاك الداخلي ϕ و التماسك C) و بالانزياح أو الدوران الذي قد يصيب المنشأة. إذا تحرك المنشأ مبتعداً عن التربة (التربة تضغط على المنشأ) يدعى ضغط التربة في هذه الحالة بالضغط الفعال (σ_a)، أما إذا بقي ثابتاً في مكانه دون أي انتقال فيدعى ضغط التربة بالضغط الساكن (σ_0)، و إذا تحرك المنشأ باتجاه التربة (المنشأ يضغط على التربة) فيدعى ضغط التربة بالضغط المعاكس (σ_P). و تكون قيمة الضغط الفعال هي الأصغر بين القيم الثلاثة تليها الضغط الساكن و من ثم الضغط المعاكس أي $\sigma_a < \sigma_0 < \sigma_P$.

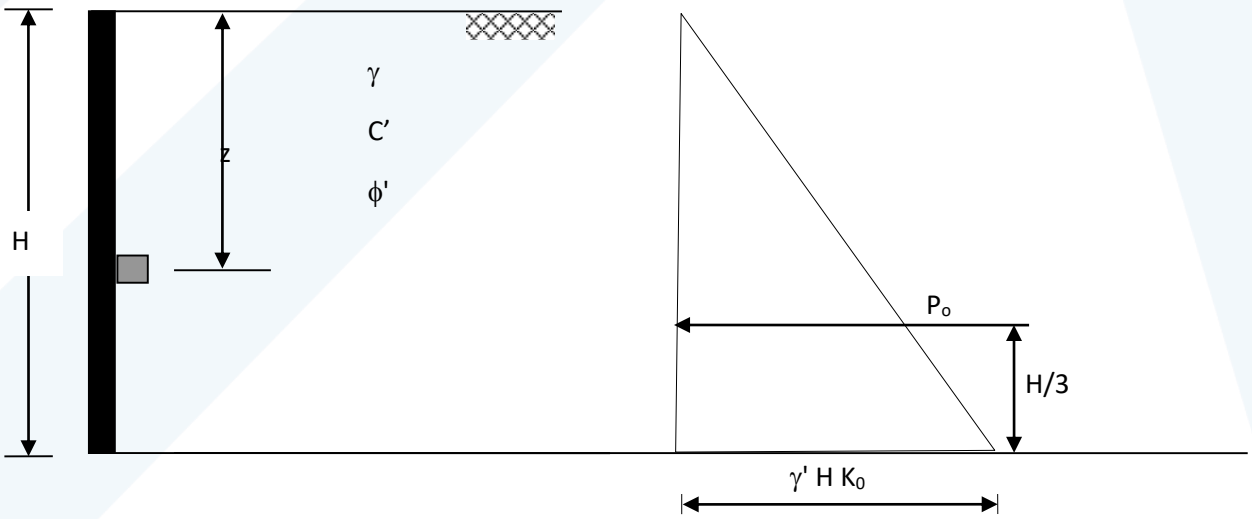
1. 4 ضغط التربة في وضع الراحة

ليكن لدينا الحاجز أو الجدار الشاقولي ذي الارتفاع H الذي يسند تربة ذات وزن حجمي γ و مطبق على سطحها حمولة موزعة بانتظام q ممتدة على مساحة كبيرة (الشكل 1. 2). يعطى الإجهاد الشاقولي على عمق Z تحت سطح التربة بالعلاقة:

$$\sigma'_v = \gamma'.Z \qquad (1.1)$$

إذا منع الجدار من الحركة تماماً سواء باتجاه التربة أو عكسها فإن الدفع الجانبي للتربة على العمق Z (σ_{0H}) هو نتيجة جداء σ_V بعامل ضغط التربة في وضع الراحة (أو السكون) K_0 و بالتالي يمكن تمثيل مخطط تغير الضغط الجانبي للتربة مع العمق كما هو موضح على الشكل (1. 2)

$$\sigma'_o = \sigma'_v.K_0 = \gamma'.Z.K_0 \qquad (2.1)$$



الشكل 1. 2 : ضغط التربة على حاجز شاقولي في حالة الراحة

تحديد K0:

1- اعتماداً على نظرية المرونة: $K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$ (3.1)

حيث ν هو عامل بواسون

2- اعتماداً على العلاقات التجريبية :

- للترب الرملية المشددة طبيعياء $K0 = 1 - \sin\phi'$ (4.1)

- للترب الغضارية المشددة طبيعيا : $K0 = 0.95 - \sin\phi'$ (5.1)

- للترب الغضارية مسبقة االتشديد : $K_0 = K_{0,NC} \cdot \sqrt{OCR}$ (6.1)

$K_{0,NC}$ عامل الدفع الجانبي للتربة الغضارية المشددة طبيعياً

OCR عامل التشديد المسبق $(OCR=\sigma'_p/\sigma'_{v0})$ (7.1)

يتم حساب القوة الكلية P_0 بواحدة الطول للجدار بحساب مساحة مخطط الضغط كما يلي:

$P_0 = 1/2\, \gamma'.H^2.K_0$ (8.1)

حيث :

P_1 محصلة الجزء المستطيل من مخطط الدفع الجانبي

P_2 محصلة الجزء المثلث من مخطط الدفع الجانبي

أما موقع محصلة القوى P_0 $(P_0=P_1+P_2)$ فيتم تحديده بمعادلة عزم حول أسفل الجدار:

$$\bar{Z} = \frac{P_1(\frac{H}{2}) + P_2(\frac{H}{3})}{P_1 + P_2} \quad (9.1)$$

لحساب ضغط التربة الفعال (أو المعاكس) نلجأ عادة إلى استخدام إحدى النظريتين الأساسيتين لدفع التربة الجانبي (نظرية كولومب و نظرية رانكين).

1. 5 نظرية رانكين (RANKINE' S THEORY)

درس رانكين حالة جدار أوجهه شاقولية وملساء (أهمل الاحتكاك بين أوجه الجدار والتربة) وسطح التربة أفقي وهذا أدى إلى تبسيط المعادلات .

1. 5.1 دفع التربة الفعال (الإيجابي) لرانكين (Rankine)

يعطى ضغط التربة الفعال على الجدار ، على عمق Z من سطح الأرض بحسب رانكين بالعلاقة التالية :

$$\sigma'_a = \gamma' Z K_a - 2C'\sqrt{K_a} \qquad (10.1)$$

C' تماسك التربة خلف الجدار

γ' الوزن الحجمي الفعال للتربة

K_a معامل دفع التربة الفعال، ويساوي

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right) \qquad (11.1)$$

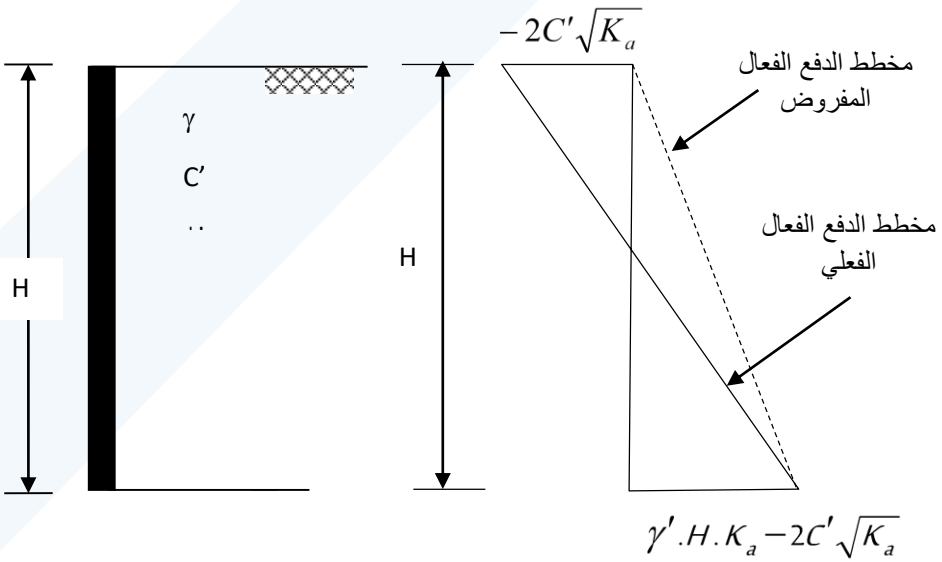
ϕ' زاوية الاحتكاك الفعالة للتربة

في أغلب الحالات يتولد كامل الضغط الفعال وذلك لأنه لا يحتاج سوى لانتقال بسيط للجدار.

من أجل أهداف حسابية لبعض مسائل تصميم الجدران الاستنادية، فإن مخطط الضغط الجانبي يعتبر كمخطط الضغط لتربة مفككة مع الحفاظ على قيمة الضغط المحسوب للتربة المتماسكة على العمق H (الخط المنقط على الشكل 3.1).

في مثل هذه الحالة فإن القوة الفعالة بواحدة الطول للجدار تساوي إلى:

$$P'_a = \frac{1}{2}H\left(\gamma' H K_a - 2C'\sqrt{K_a}\right) = \frac{1}{2}\gamma' H^2 K_a - C' H\sqrt{K_a} \qquad (12.1)$$



الشكل 3.1 : مخطط الدفع الفعال المفترض لتربة ردم متماسكة خلف الجدار

1. 2.5 دفع التربة السلبي (المعاكس) لرانكين

بحسب رانكين يعطى ضغط التربة السلبي على الجدار، على عمق Z من سطح الأرض بالعلاقة التالية :

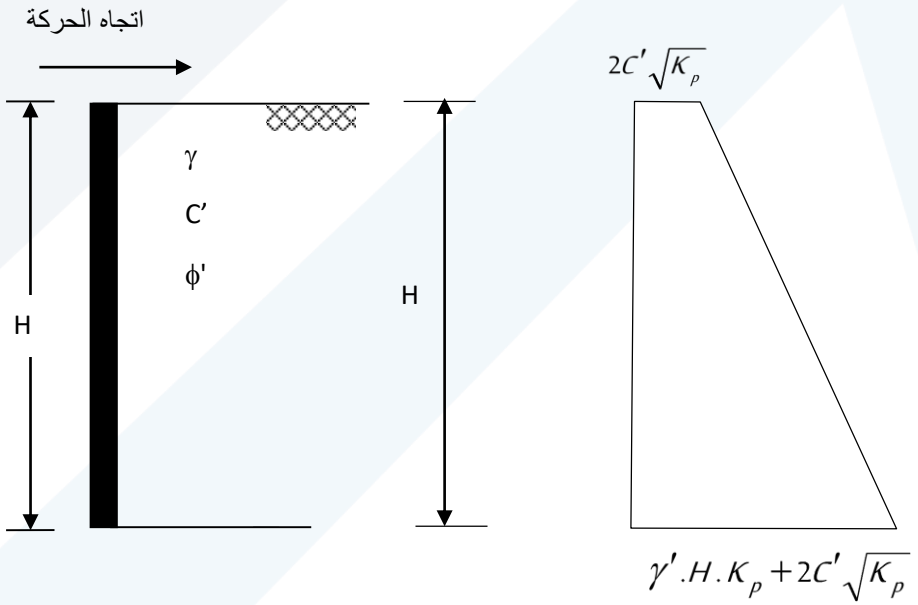
$$\sigma'_p = \gamma' Z K_p + 2C'\sqrt{K_p} \qquad (13.1)$$

Kp معامل دفع التربة السلبي، ويساوي

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi'}{2}\right) \qquad (14.1)$$

وتكون قوة الضغط السلبي بواحدة طول الجدار:

$$P'_p = \frac{1}{2}H\left(\gamma' H K_p + 2C'\sqrt{K_p}\right) = \frac{1}{2}\gamma' H^2 K_p + C' H\sqrt{K_p} \qquad (15.1)$$



الشكل 4.1 : مخطط الدفع السلبي لتربة ردم متماسكة خلف الجدار

يحتاج تشكل الضغط السلبي إلى انتقال للجدار أكبر بكثير من الانتقال اللازم لتشكل الضغط الفعال. يبين الجدول 1.1 الانتقال اللازم للجدار من أجل الوصول إلى كامل الضغط السلبي والضغط الفعال من أجل الترب المفككة والترب المتماسكة.

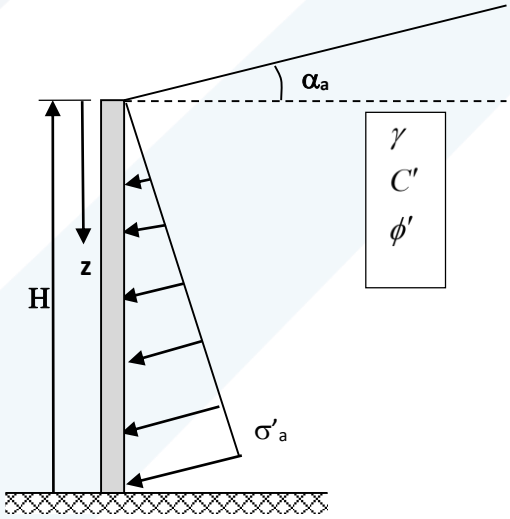
نوع التربة	انتقال الجدار من أجل الضغط السلبي، Δx	انتقال الجدار من أجل الضغط الفعال، Δx
رمل متراص	0.01H	0.001H
رمل متوسط الارتصاص	0.02H	0.002H
رمل مخلخل	0.04H	0.004H
سيلت متراص	0.02H	0.002H
غضار قاسي	0.1H	0.01H
غضار رخو (طري)	0.05H	0.004

الجدول 1. 2 : الانتقال اللازم للجدار من أجل الوصول إلى كامل الضغط السلبي والضغط الفعال من أجل الترب المفككة والترب المتماسكة.

1. 5. 3 تعميم نظرية رانكين لحالتي الضغط الفعال والسلبي

يمكن تعميم نظرية رانكين للضغط الفعال و للضغط السلبي لحالة الردم بتربة مفككة خلف الجدار كما هو مبين في الشكل 1. 5 :

الضغط الفعال



الشكل1. 5 : الحالة العامة لضغط رانكين الفعال

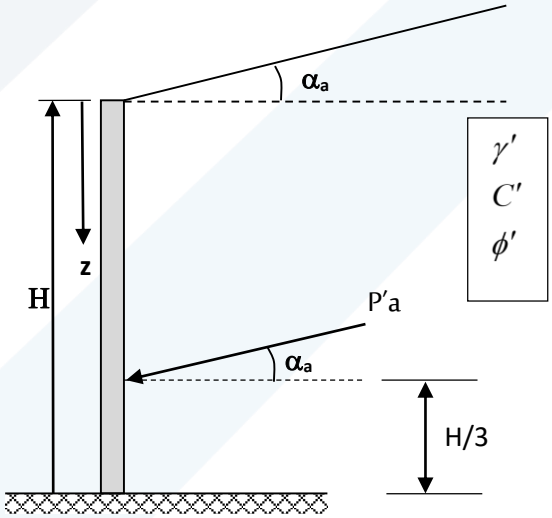
في حالة الترب المفككة، وفي حالة جدار وجهه الخلفي شاقولي وسطح التربة مائل بزاوية α_a، يعطى الضغط الجانبي الفعال على الجدار على عمق Z من سطح الأرض بالعلاقة التالية :

$$\sigma'_a = \gamma' z K_a$$

$$K_a = \cos\alpha_a \frac{\cos\alpha_a - \sqrt{\cos^2\alpha_a - \cos^2\phi'}}{\cos\alpha_a + \sqrt{\cos^2\alpha_a - \cos^2\phi'}} \qquad (16.1)$$

α_a ميل سطح التربة خلف الجدار، ويجب ألا تتجاوز قيمة α_a قيمة زاوية الاحتكاك ϕ' ($\alpha_{a,max} < \phi'$) وسيرمز لـ ميل سطح التربة خلف الجدار بـ α_p في حالة الضغط السلبي (المعاكس).

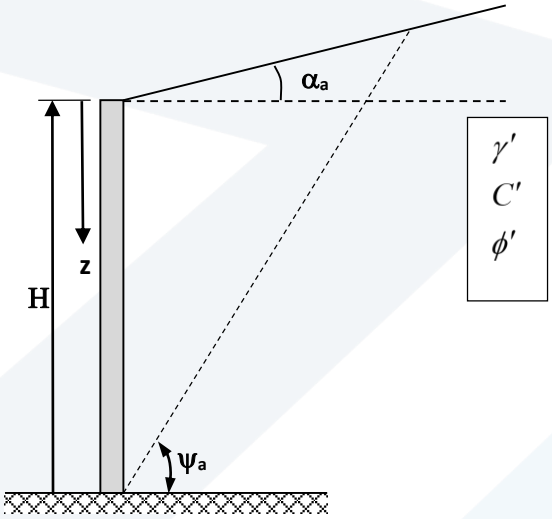
تميل محصلة قوى الضغط الفعال P'_a عن الناظم على الوجه الخلفي للجدار بزاوية ميل سطح الأرض α_a (الشكل 1. 6).



الشكل 1. 6 : موقع محصلة الضغط الفعال P′a

يميل مستوي الانهيار BC بالزاوية ψ_a (الشكل 1. 7)، التي تعطى بالعلاقة :

$$\psi_a = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} + \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2}\sin^{-1}\left(\frac{\sin\alpha_a}{\sin\phi'}\right) \qquad (17.1)$$



الشكل 1. 7 : ميل مستوي الانهيار لحالة الدفع الفعال لرانكين

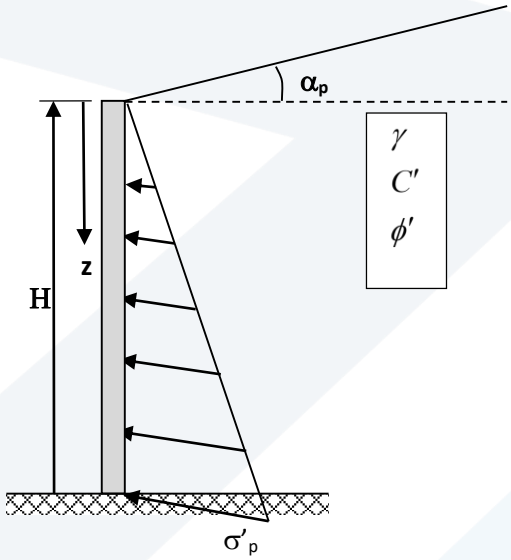
الضغط السلبي

في حالة الترب المفككة، وفي حالة جدار وجهه الخلفي شاقولي وسطح التربة مائل بزاوية α_p (الشكل 1. 8) ، يعطى الضغط الجانبي السلبي على الجدار على عمق Z من سطح الأرض بالعلاقة التالية :

$$\sigma'_p = \gamma' z K_p$$

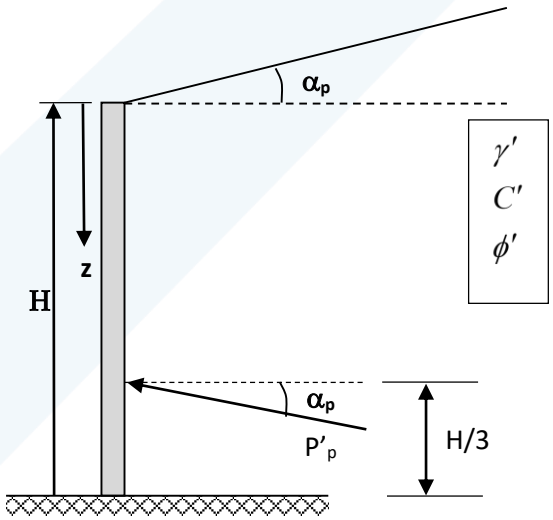
$$K_p = \cos\alpha_p \frac{\cos\alpha_p + \sqrt{\cos^2\alpha_p - \cos^2\phi'}}{\cos\alpha_p - \sqrt{\cos^2\alpha_p - \cos^2\phi'}} \qquad (18.1)$$

α_p ميل سطح التربة ، ويجب ألا تتجاوز قيمة α_p قيمة زاوية الاحتكاك ϕ' ($\alpha_{p,max}<\phi'$)



الشكل1. 8 : الحالة العامة لضغط رانكين السلبي

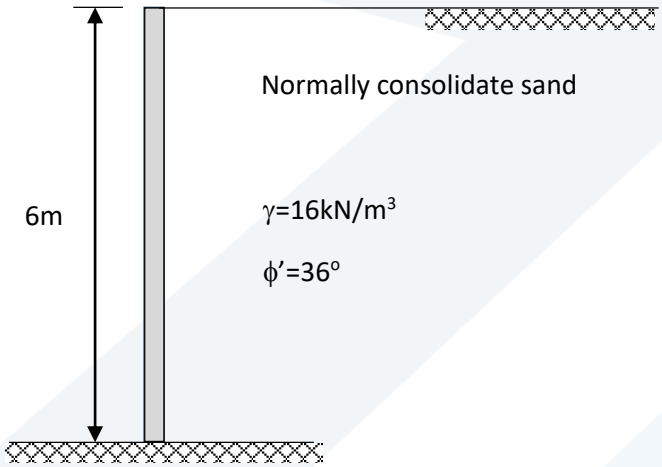
تميل محصلة قوى الضغط السلبي P'_p عن الناظم على الوجه الخلفي للجدار بزاوية $-\alpha_p$ (الشكل 1. 9) .



الشكل 1. 9 : موقع محصلة الضغط السلبي P'_p

مثال 1.1

جدار بارتفاع 6m مبين بالشكل (1. 10). احسب دفع رانكين الفعال و السلبي على واحدة طول الجدار .



الشكل 1. 10 : معطيات المثال 1

الحل :

$$K_a = \tan^2(45-\frac{\phi'}{2}) = \tan^2(45-\frac{36}{2}) = 0.26$$

$$K_p = \tan^2(45+\frac{\phi'}{2}) = \tan^2(45+\frac{36}{2}) = 3.85$$

$$At\ z = 0 : \sigma'_z = 0$$

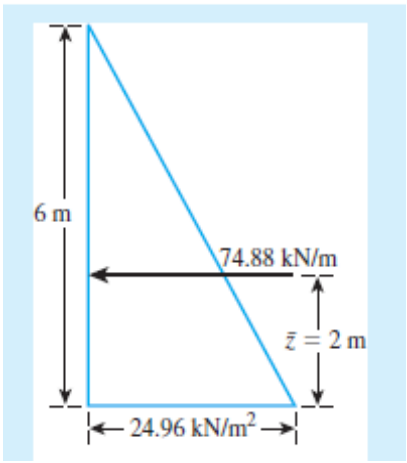
$$\sigma'_a = 0$$

$$\sigma'_p = 0$$

$$At\ z = 6m : \sigma'_z = 16*6 = 96kN/m^2$$

$$\sigma'_a = 96*0.26 = 24.96kN/m^2$$

$$\sigma'_p = 96*3.85 = 369.6\ kN/m^2$$



الشكل 1. 11 :دفع رانكين الفعال (المثال 1. 1)

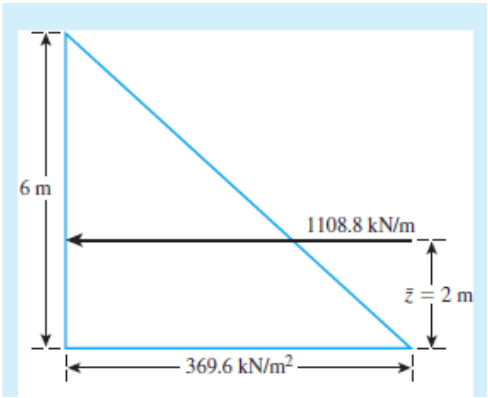
الشكل 1. 11 :دفع رانكين الفعال (المثال 1. 1)

$$P'_a = \sigma_a . \frac{H}{2} = 24.96*\frac{6}{2} = 74.88\ kN/m$$

$$\bar{Z} = 2m$$

$$P'_p = \sigma_p . \frac{H}{2} = 369.6*\frac{6}{2} = 1108.8\ kN/m$$

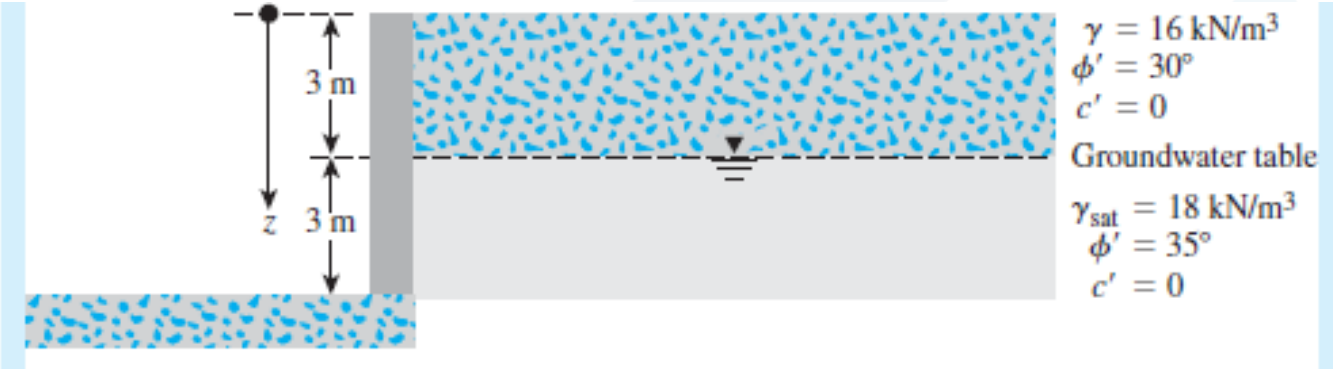
$$\bar{Z} = 2m$$



الشكل 1. 12 :دفع رانكين السلبي (المثال 1. 1)

مثال 2.1

جدار بارتفاع 6m يحجز خلفه تربة مكونة من طبقتين بارتفاع 3m لكل طبقة، مواصفات الطبقتين مبينة بالشكل (1.13). احسب دفع رانكين الفعال وموقع المحصلة على الجدار .



الشكل 1. 13 :دفع رانكين الفعال (المثال 2.1)

الحل :

$$K_{a1} = \tan^2(45 - \frac{30}{2}) = 0.333$$

$$K_{a2} = \tan^2(45 - \frac{35}{2}) = 0.271$$

$$At\ z = 0 : \sigma'_z = 0$$

$$\sigma'_a = 0$$

$$At\ z = 3m : \sigma'_z = 16*3 = 48 kN/m^2$$

$$\sigma'_{a-up} = 48*0.333 = 16 kN/m^2$$

$$\sigma'_{a-down} = 48*0.271 = 13 kN/m^2$$

$$At\ z = 6m : \sigma'_z = 48 + 8*3 = 72 kN/m^2$$

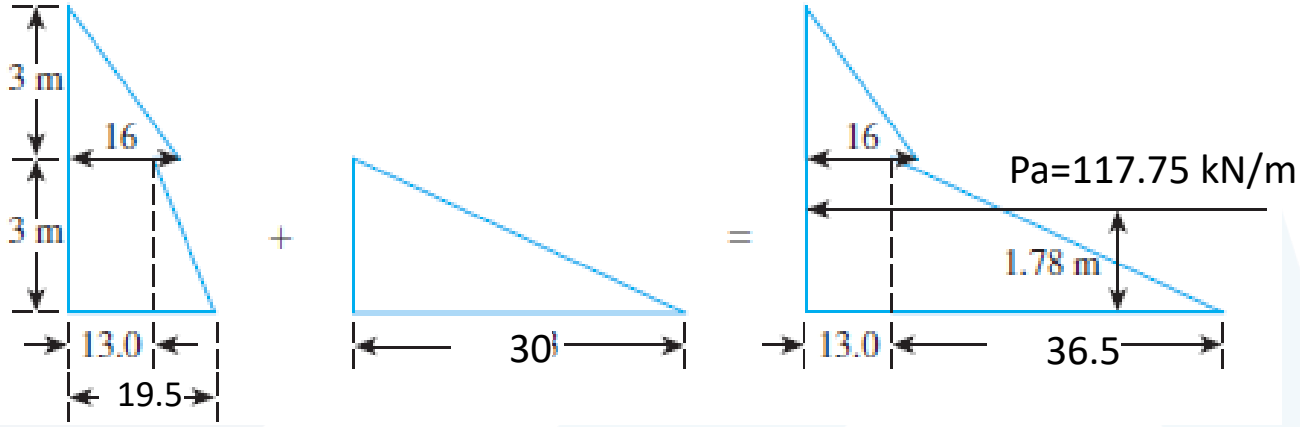
$$\sigma'_a = 72*0.271 = 19.5 kN/m^2$$

$$u = 10*3 = 30 kN/m^2$$

$$\sigma_a = 19.5 + 30 = 49.5 kN/m^2$$

$$P_a = 16.\frac{3}{2} + 13*3 + 36*\frac{3}{2}$$
$$= 24 + 39 + 54 = 117\ kN/m$$

$$\bar{Z} = \frac{24*4 + 39*1.5 + 54*1}{117} = 1.78m$$



الشكل 1. 14 : دفع رانكين الفعال وموقع المحصلة على الجدار (المثال 1. 2)

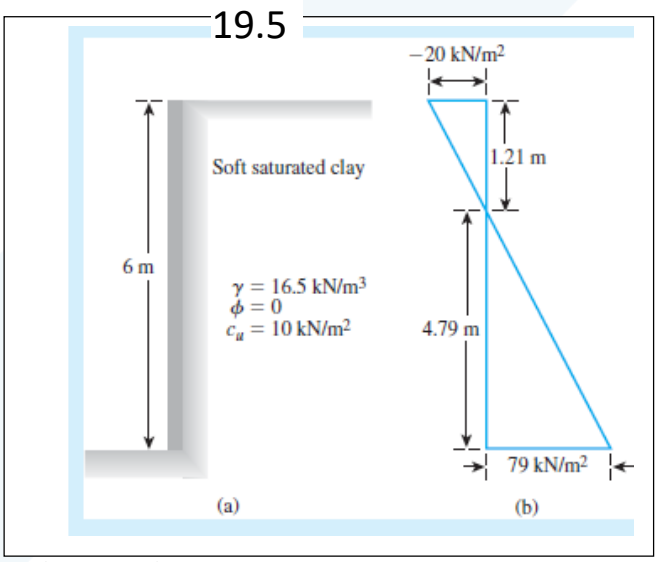
مثال 1. 3

جدار بارتفاع بارتفاع 6m يحجز خلفه تربة غضارية مشبعة مواصفاتها مبينة على الشكل (1. 15). يطلب ما يلي :

1- حساب العمق الأعظمي لشق الشد

2- حساب محصلة الدفع الفعال قبل حدوث الشق

3- حساب محصلة الدفع الفعال بعد حدوث الشق



الشكل 1. 15 : معطيات المثال (المثال 1. 3)

الحل :

-1

$$\sigma_a = \gamma . z . K_a - 2C . K_a$$
$$\sigma'_a = 0 \Rightarrow z = H_c = \frac{2C}{\gamma} = \frac{2*10}{16.5} = 1.21\ m$$

-2

$$\phi = 0 \Rightarrow K_a = 1$$
$$At\ z = 0, \sigma_a = -2C = -20\ kN/m^2$$
$$At\ z = 6m, \sigma_a = 16.5*6 - 2*10 = 79\ kN/m^2$$

محصلة الدفع الفعال قبل حدوث الشق :

$$P_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 - 2C\ H = 0.5*16.5*36 - 2*10*6 = 177\ kN/m^2$$

3-محصلة الدفع الفعال بعد حدوث الشق :

$$P_a = \frac{1}{2}\sigma_a.(H - H_c) = 0.5*79*(6 - 1.21) = 189.2\ kN/m^2$$

مثال 4.1

لدينا جدار استنادي أملس ارتفاعه 5.5m يسند تربة رملية لها الخواص التالية :

$$\phi = 35^\circ$$
$$c = 0$$
$$\gamma' = 17.KN/m^2$$

1- بافتراض أن سطح التربة يمتد أفقياً، احسب محصلة كل من دفع رانكين الفعال والسلبي ونقطة تأثي كل منهما.
2- بافتراض أن سطح التربة يميل بزاوية $\alpha = 10^\circ$. احسب محصلة دفع رانكين الفعال ونقطة تأثيرها

الحل:

أ) حالة امتداد سطح التربة أفقياً :

$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{35}{2}\right) = 0.271$$

$$K_P = \tan^2\left(45 - \frac{35}{2}\right) = 3.690$$

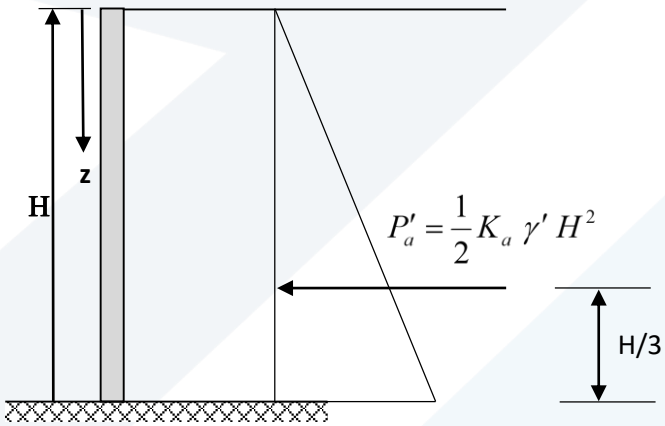
محصلة الضغط الفعال لكل متر طولي من الجدار الاستنادي:

$$P'_a = \frac{1}{2}K_a\gamma' H^2 = \frac{1}{2}\times 0.271\times 17\times (5.5)^2 = 69.68KN/m$$

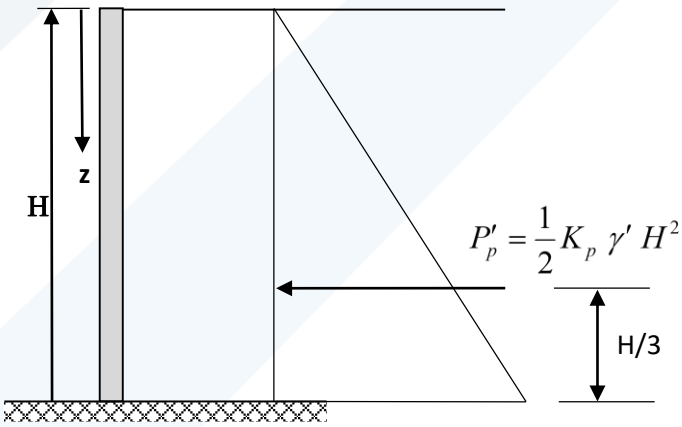
محصلة الضغط السلبي لكل متر طولي من الجدار الساند:

$$P'_P = \frac{1}{2}K_P\gamma' H^2 = \frac{1}{2}\times 3.690\times 17\times (5.5)^2 = 948.80KN/m$$

نقطة تأثير كلا المحصلتين تقع على ارتفاع $\frac{H}{3}=1.83m$ من قاعدة الجدار الساند.



الشكل 1. 16 : محصلة الضغط الفعال P'_a في حالة سطح التربة أفقي



الشكل 1. 17 : محصلة الضغط السلبي P'_p في حالة سطح التربة أفقي

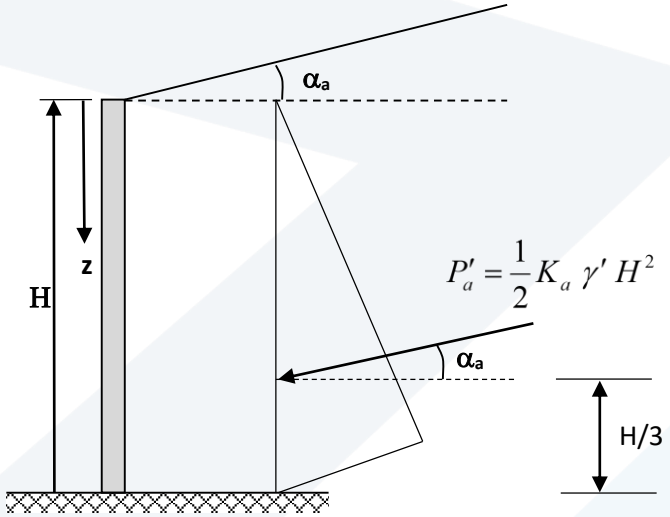
ب) حالة امتداد سطح التربة خلف الحائط بزاوية $\alpha=10^\circ$

$$K_a=\cos\alpha_a.\frac{\cos\alpha_a-\sqrt{\cos^2\alpha_a-\cos^2\phi'}}{\cos\alpha+\sqrt{\cos^2\alpha_a-\cos^2\phi'}}=\cos 10\times\frac{\cos 10-\sqrt{\cos^2 10-\cos^2 35}}{\cos 10+\sqrt{\cos^2 10-\cos^2 35}}=0.282$$

محصلة الضغط الفعال لكل متر طولي من الجدار الساند:

$$P'_a=\frac{1}{2}K_a\gamma' H^2=\frac{1}{2}\times 0.282\times 17\times(5.5)^2=72.51KN/m$$

نقطة تأثير محصلة الضغط الفعال تقع على ارتفاع $\frac{H}{3}=1.83m$ من قاعدة الجدار الساند.



الشكل 1. 18 : محصلة الضغط الفعال p'_a في حالة سطح التربة مائل بزاوية α_a

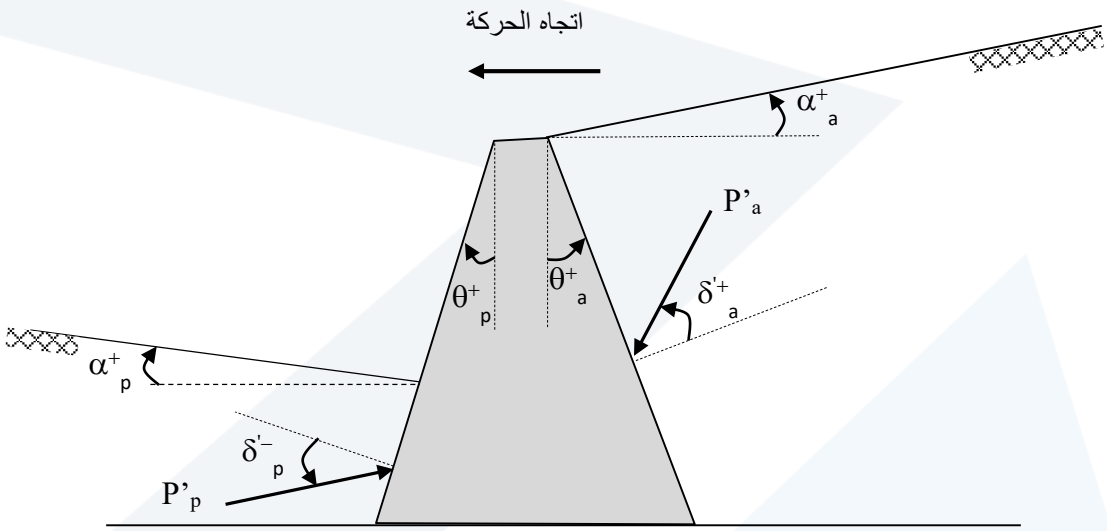
1. 6 نظرية كولومب (Coulomb's THEORY)

درس كولومب حالة جدار أوجهه مائلة وخشنة (زاوية الاحتكاك للسطح الفاصل بين التربة والجدار $\delta' \neq 0$) وسطح التربة مائل (الشكل 1. 19)، وهذا ماجعل علاقات دفع التربة أكثر تعقيداً.

1. 1.6 اصطلاح الإشارات

سوف يتم فيما يلي استخدام اصطلاح الإشارات المبين في الشكل 1. 19 والذي يمكن إيجازه بالتالي :

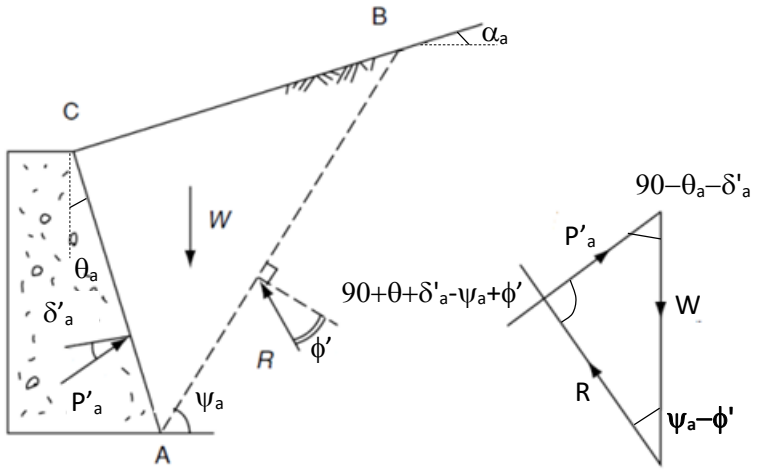
- زاوية ميل سطح الأرض عن الأفق α تكون موجبة إذا كانت باتجاه الأعلى وسالبة إذا كانت باتجاه الأسفل
- زاوية ميل أوجه الجدار عن الشاقول q تكون موجبة إذا كانت باتجاه التربة وسالبة إذا كانت باتجاه الجدار
- زاوية الاحتكاك للسطح الفاصل بين التربة والجدار δ' : في حالة الضغط الفعال تكون $\delta'a$ موجبة وذلك لأن موشور التربة يتحرك باتجاه الأسفل، و في حالة الضغط السالب تكون $\delta'p$ مسالبة وذلك لأن موشور التربة يتحرك باتجاه الأعلى.



الشكل 1. 19 : اصطلاح الإشارات

2. 1.6 الضغط الفعال لكولومب

ليكن الجدار المبين بالشكل (1. 20) ولنعتبر أن موشور التربة خلف الجدار متوازن. يتم اختيار الخط AB بشكل عشوائي ثم يتم حساب وزن هذا الموشور W واتجاه مقاومة التربة R ورد الفعل Pa اعتماداً على الوزن الحجمي γ وزاوية الاحتكاك الداخلي ϕ′ للتربة وزاوية الاحتكاك بين التربة والجدار δ′ . يتم تحقيق توازن الموشور عن طريق رسم مخطط القوى لهذا الموشور وتحديد قيم R و P_a من هذا المخطط. من أجل تحديد موشور الانهيار (الموافق لأكبر P_a)، يتم تغيير ميل المستقيم وتحديد القوى حتى الحصول على P_a الأعظمية. نظرية كولومب الأساسية تحدد قيمة محصلة الدفع الكلية P_a فقط. بفرض تتغير خطياً مع العمق من سطح التربة حتى قاعدة الجدار يصبح بالإمكان حساب عوامل الدفع الجانبي للتربة.



الشكل 1. 20 : الضغط الفعال لكولومب

من مغلف القوى المبين في الشكل، نستطيع كتابة :

$$\frac{P'_a}{\sin(\psi_a-\phi')}=\frac{W}{\sin(90+\theta+\delta'_a-\psi_a+\phi')} \qquad (19.1)$$

بترتيب هذه المعادلة، نستطيع كتابة :

$$P'a=\frac{1}{2}\gamma' H^2 K_a \qquad (20.1)$$

Ka معامل كولومب للدفع الفعال ويعطى بالعلاقة التالية :

$$K_a=\frac{\cos^2(\phi'-\theta_a)}{\cos^2\theta_a\cos(\delta'_a+\theta_a)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta'_a+\phi')\sin(\phi'-\alpha_a)}{\cos(\delta'_a+\theta_a)\cos(\theta_a-\alpha_a)}}\right]^2} \qquad (21.1)$$

δ'_a زاوية ميل محصلة الدفع الفعال عن الناظم على وجه الجدار الخلفي وباتجاه التربة.

θ_a زاوية ميل الوجه الخلفي للجدار عن الشاقول.

α_a ميل سطح الأرض خاف الجدار.

تقع هذه المحصلة على بعد H/3من القاعدة وتميل بزاوية δ'a عن الناظم على الوجه الخلفي للجدار.

وتكون المركبة الأفقية لمحصلة قوى الدفع الفعال :

$$P'_{a,h}=P'_a.\cos(\delta'_a+\theta_a)=\frac{1}{2}\gamma' H^2 K_a.\cos(\delta'_a+\theta_a)=\frac{1}{2}\gamma' H^2 K_{a,h} \qquad (22.1)$$

$$K_{a,h}=K_a.\cos(\delta'_a+\theta_a)$$

وتكون المركبة الشاقولية لمحصلة قوى الدفع الفعال :

$$P'_{a,v}=P'_a.\sin(\delta'_a+\theta_a) \qquad (23.1)$$

بفرض توزع الدفع الجانبي خطي مع العمق، يمكن كتابة علاقة الفعال على الجدار في حالة الترب المفككة (الشكل 1.21) :

$$\sigma'_a=\gamma' H K_a \qquad (24.1)$$

يميل مستوي الانهيار عن الأفق بالزاوية ψ_a التي تعطى بالعلاقة التالية :

$$\psi_a = \phi' + arc\cot\left[\tan(\phi'-\theta_a) + \frac{1}{\cos(\phi'-\theta_a)}\sqrt{\frac{\sin(\delta'_a+\phi')\cos(\alpha_a-\theta_a)}{\sin(\phi'-\alpha_a)\cos(\delta'_a+\theta_a)}}\right] \qquad (25.1)$$

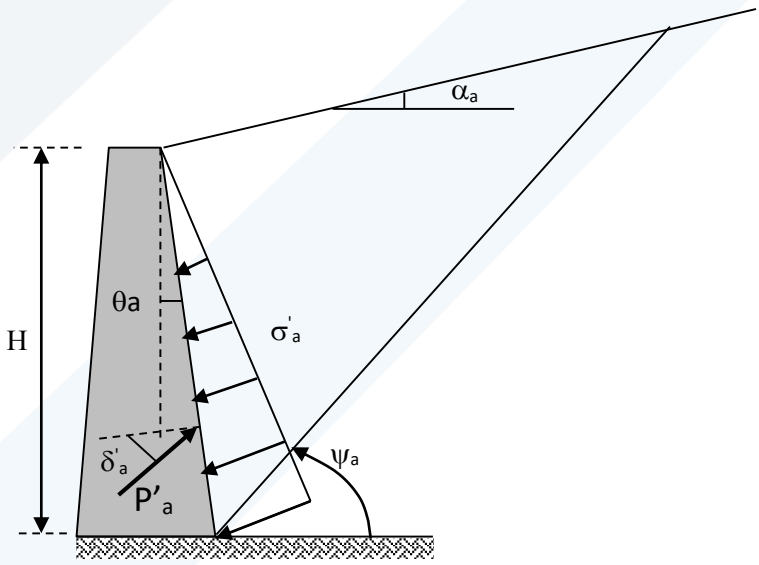
في حالة الترب المتماسكة، يعطى الدفع الفعال بالعلاقة التالية :

$$\sigma'_a = \gamma' H K_a - C' K_{a,c} \qquad (26.1)$$

حيث يمثل C' تماسك التربة خلف الجدار

$K_{a,c}$ عامل الدفع الجانبي الفعال للتماسك، ويعطى بالعلاقة التالية :

$$K_{a,c} = \frac{2\cos\phi'\cos(\theta_a-\alpha_a)}{\cos\theta_a\left[1+\sin(\phi'+\delta'_a+\theta_a-\alpha_a)\right]} \qquad (27.1)$$

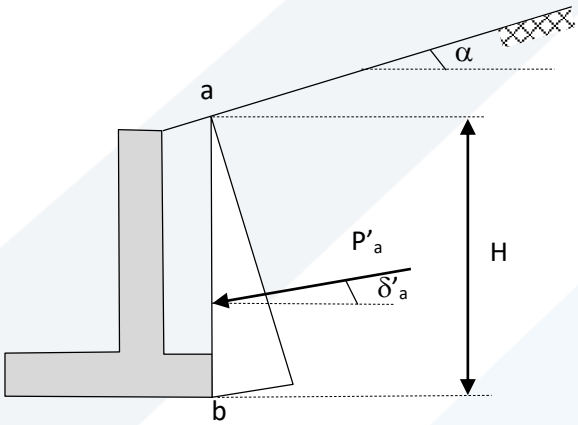


الشكل 21.1 : القوى المؤثرة على الجدار في حالة الضغط الفعال لكولومب

ملاحظة: فقط في حالة $\alpha = \theta = \delta' = 0$ يكون :

$$\sigma'_a = \gamma' H K_a - 2C'\sqrt{K_a} \qquad (28.1)$$

ملاحظة : في حالة الجدران المسلحة تبرز القاعدة عن الجذع بالقدم والكعب، ويعتبر الارتفاع H المستخدم في حساب محصلة الضغط الفعال مساوياً للارتفاع من منسوب أسفل القاعدة حتى سطح الأرض في نهاية كعب الجدار (الشكل 1. 22)

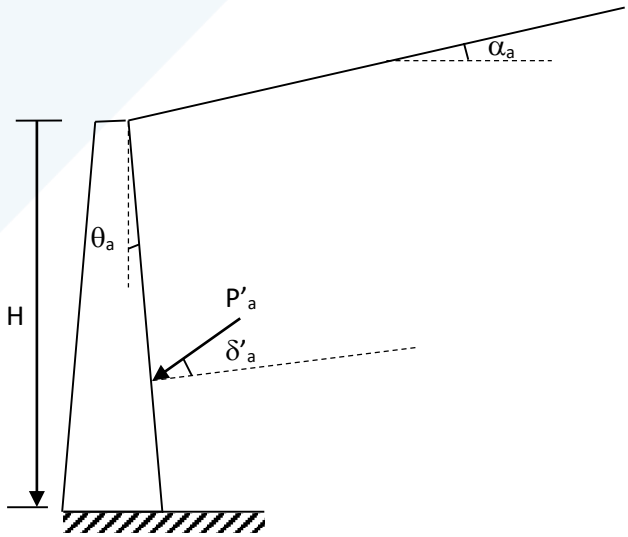


الشكل 1. 22 : الارتفاع H في حالة الجدران المسلحة

مثال 1. 5

لدينا الجدار المبين على الشكل 1. 23. إذا علمت أن $H = 4m, \theta = 5^O, \alpha = 10^O$ يحجز خلفه تربة رملية مواصفاتها كما يلي : $\gamma' = 15\,kN/m^3, \phi' = 30^O, \delta' = 15^O$. يطلب حساب محصلة قوى الدفع الفعال و اتجاه ونقطة تطبيق هذه المحصلة وذلك باستخدام نظرية كولومب.

الحل



الشكل 1. 23: معطيات المثال 1. 5

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta_a)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \alpha_a)}{\cos(\delta'_a + \theta_a)\cos(\theta_a - \alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(30-5)}{\cos^2 5 \cos(15+5)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(15+30)\sin(30-10)}{\cos(15+5)\cos(5-10)}}\right]^2} = 0.3872$$

محصلة الدفع الفعال على الجدار :

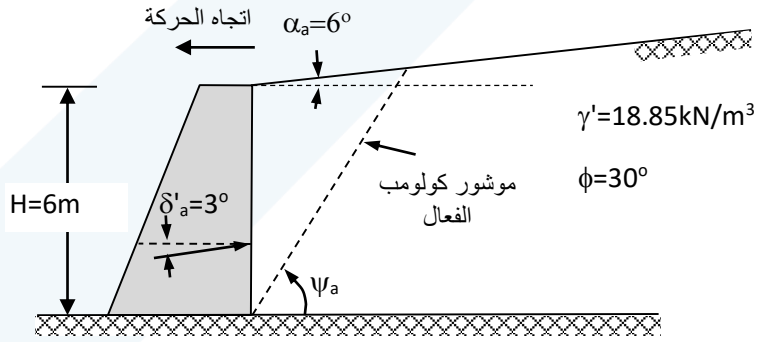
$$P'_a = \frac{1}{2}\gamma' H^2 K_a$$

$$P'_a = \frac{1}{2} * 15 * 4^2 * 0.3872 = 46.46\, kN/m$$

تقع هذه المحصلة على بعد H/3=4/3=1.33m من القاعدة وتميل بزاوية $\delta'=15^o$ عن الناظم على الوجه الخلفي للجدار.

مثال 6.1

لدينا الجدار الاستنادي المبين بالشكل 24.1. احسب عامل الضغط الفعال لكولومب Ka وميل مستوي الانهيار ψ_a ومحصلة قوى الدفع الفعال على الجدار P'a



الشكل 24.1 : معطيات المثال 6.1

الحل

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta_a)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \alpha_a)}{\cos(\delta'_a + \theta_a)\cos(\theta_a - \alpha_a)}}\right]^2}$$

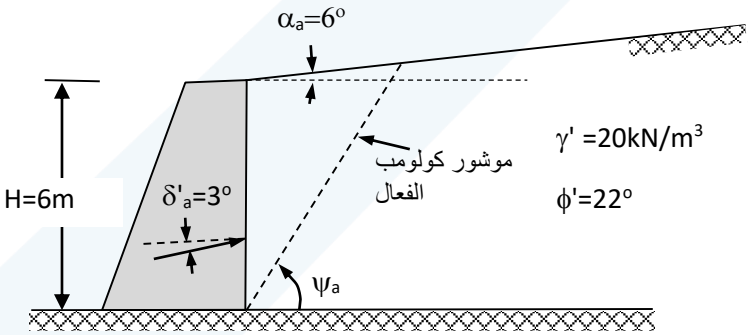
$$K_a = \frac{\cos^2(30-0)}{\cos^2 0 \cos(3+0)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(3+30)\sin(30-6)}{\cos(3+0)\cos(0-6)}}\right]^2} = 0.3465$$

$$\sigma'_a = \gamma' H K_a = 18.85*6*0.3465 = 39.19\ kN/m$$

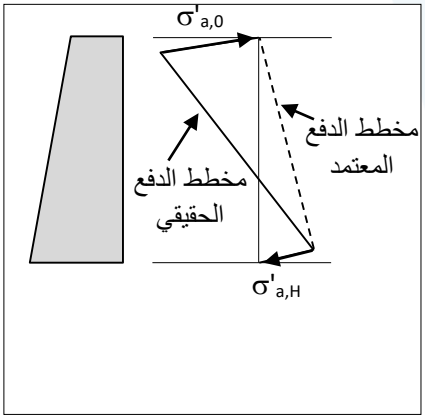
$$P'_a = \frac{H}{2}.\sigma'_a = \frac{6}{2}*39.19 = 117.6\ kN/m$$

مثال 1. 7

نفس المثال السابق ولكن التربة متماسكة وخواصها مبينة على الشكل 1. 25 . يطلب حساب عوامل الضغط الفعال لكولومب Ka و Ka,c ومحصلة قوى الدفع الفعال على الجدار P'a



الشكل 1. 25 : معطيات المثال 1. 7



$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta_a)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \alpha_a)}{\cos(\delta'_a + \theta_a)\cos(\theta_a - \alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(22-0)}{\cos^2 0 \cos(3+0)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(3+22)\sin(22-6)}{\cos(3+0)\cos(0-6)}}\right]^2} = 0.478$$

$$K_{a,c}=\frac{2\cos\phi'\cos(\theta_a-\alpha_a)}{\cos\theta_a\left[1+\sin(\phi'+\delta'_a+\theta_a-\alpha_a)\right]}=\frac{2\cos(22)*\cos(0-6)}{\cos(0)*[1+\sin(22+3+0-6)]}=1.391$$

$$\sigma'_{a,0}=-C'.K_{a,c}=-30*1.391=-41.73\,kN/m^2/m$$

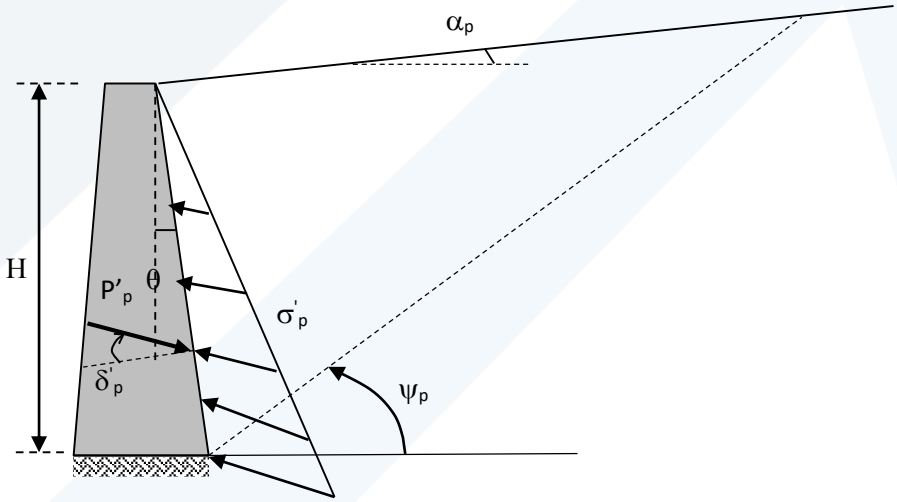
$$\sigma'_{a,H}=\gamma' H K_a-C'.K_{a,c}=20*6*0.478-30*1.391=15.63\,kN/m^2/m$$

بفرض الضغط على السطح =0 ($\sigma'_{a,0}$=0)، تكون محصلة قوى الدفع :

$$P'_a=\frac{H}{2}*\sigma'_{a,H}=\frac{6}{2}*15.63=46.9\,kN/m$$

1. 2.6 الضغط المعاكس (السلبي) لكولومب

ليكن الجدار المبين بالشكل (1. 27) :



الشكل 1. 27 : القوى المؤثرة على الجدار في حالة الضغط السلبي لكولومب

بحسب كولومب، يعطى الدفع المعاكس (السلبي) على عمق z من السطح بالعلاقة التالية :

$$\sigma'_{p,z}=\gamma' z K_p+C' K_{p,c} \qquad (29.1)$$

$$K_p=\frac{\cos^2(\phi'+\theta_p)}{\cos^2\theta_p\cos(\delta'_p+\theta_p)\left[1-\sqrt{\frac{\sin(\phi'-\delta'_p)\sin(\phi'+\alpha_p)}{\cos(\theta_p+\delta'_p)\cos(\theta_p-\alpha_p)}}\right]^2} \qquad (30.1)$$

ملاحظة : يجب الانتباه إلى إشارة δ'_p ، وهي سالبة في الشكل 1. 27 وذلك بحسب اصطلاح الإشارات المعتمد

ويحسب عامل الدفع الجانبي السلبي للتماسك $K_{p,c}$ بالعلاقة :

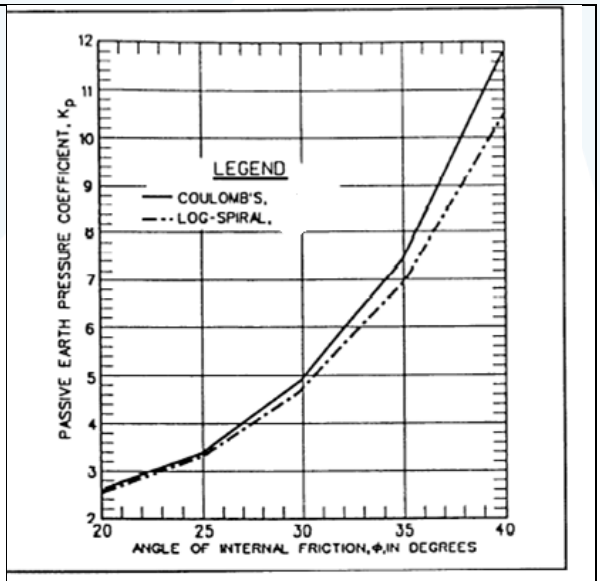
$$K_{p,c}=\frac{2\cos(\phi')\cos(\theta_p-\alpha_p)}{\cos(\theta_p)\left[1+\sin(\phi'-\delta'_p-\theta_p+\alpha_p)\right]} \qquad (31.1)$$

يميل مستوي الانهيار عن الأفق بالزاوية ψ_p التي تعطى بالعلاقة التالية :

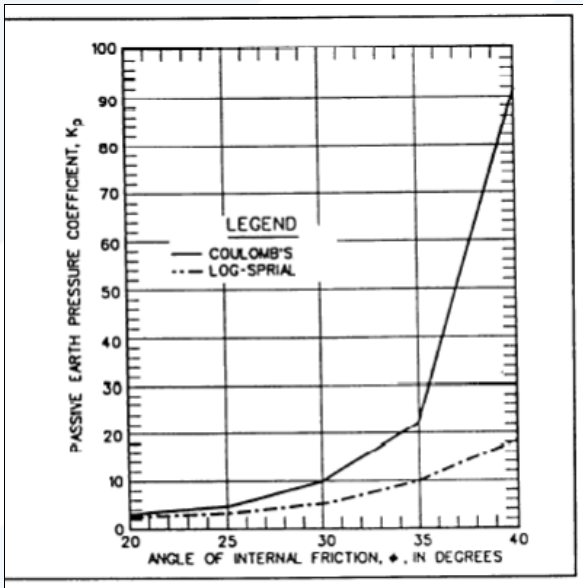
$$\psi_p=-\phi'+arc\cot\left[-\tan(\phi'+\theta_p)+\frac{1}{\cos(\phi'+\theta_p)}\sqrt{\frac{\sin(\delta'_p-\phi')\cos(\alpha_p-\theta_p)}{\sin(-\phi'-\alpha_p)\cos(\delta'_p+\theta_p)}}\right] \qquad (32.1)$$

1. 3.6 دقة نظرية كولومب في تحديد عوامل الدفع السلبي

طالما أن قيمة زاوية الاحتكاك بين التربة والجدار (δ'_p) لا تتجاوز قيمة $\phi'/2$ فإن فرضية سطح الانهيار المستوي تجعل نظرية كولومب تعطي قيماً معقولة لعامل الدفع السلبيKp ولميل مستوي الانهيار ψ_p. عندما تتجاوز δ'_p قيمة $\phi'/2$ فإن علاقة كولومب تضخم قيمة Kp. يبين الشكل 1. 28 قيم عامل الدفع السلبي Kp من أجل $\delta'_p=\phi'/2$ ولفرضيتي سطح الانهيار المستوي وسطح الانهيار على شكل قوس، ويبين الشكل 1. 29 مقدار تضخيم قيم عامل الدفع السلبي Kp عندما تكون $\delta'_p=\phi'$



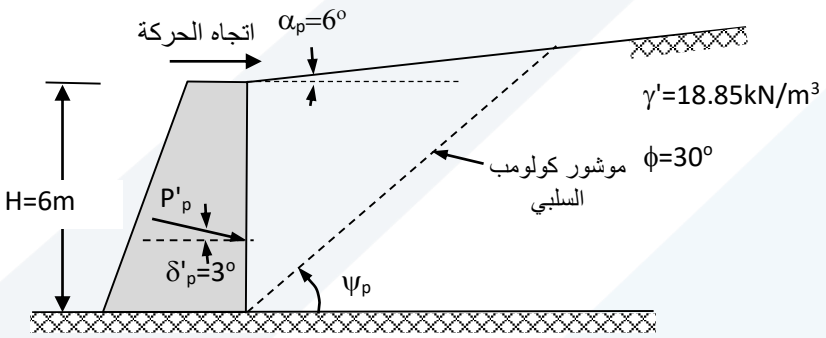
الشكل 1. 28 : الضغط السلبي لحالتي سطح الانهيار مستوي (نظرية كولومب) وسطح الانهيار سبيرال، من أجل $\delta'_p=\phi'/2$



الشكل 1. 29 : الضغط السلبي لحالتي سطح الانهيار مستوي (نظرية كولومب) وسطح الانهيار سبيرال، من أجل $\delta'_p=\phi'$

مثال 8.1

لدينا الجدار الاستنادي المبين بالشكل 30.1. احسب عامل الضغط السلبي لكولومب K_p وميل مستوي الانهيار ψ_p ومحصلة قوى الدفع الفعال على الجدار P'_p



الشكل 30.1: معطيات المثال 8.1

الحل

$$\sigma_{p,z} = \gamma' \, z \, K_p$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi' + \theta_p)}{\cos^2\theta_p \cos(\delta'_p + \theta_p)\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi' - \delta'_p)\sin(\phi' + \alpha_p)}{\cos(\theta_p + \delta'_p)\cos(\theta_p - \alpha_p)}}\right]^2}$$

$$K_p = \frac{\cos^2(30+0)}{\cos^2(0)\cos(-3+0)\left[1 - \sqrt{\frac{\sin(30+3)\sin(30+6)}{\cos(0-3)\cos(0-6)}}\right]^2} = 4.02$$

$$\sigma'_{p,z} = \gamma' \, z \, K_p = 18.85 * z * 4.02 = 75.78 \, z$$

$$\sigma'_{p,0} = 0$$

$$\sigma'_{p,6m} = 75.78 * 6 = 454.7 \, kN/m^2/m$$

$$P'_p = 454.7 * 6/2 = 1364.1 \, kN/m$$

حساب ψ_p

$$\psi_p = -\phi' + arc\cot\left[-\tan(\phi'+\theta_p) + \frac{1}{\cos(\phi'+\theta_p)}\sqrt{\frac{\sin(\delta'_p-\phi')\cos(\alpha_p-\theta_p)}{\sin(-\phi'-\alpha_p)\cos(\delta'_p+\theta_p)}})\right]$$

$$\psi_p = -30 + arc\cot\left[-\tan(30+0) + \frac{1}{\cos(30+0)}\sqrt{\frac{\sin(-3-30)\cos(6-0)}{\sin(-30-6)\cos(-3+0)}})\right] = 32^o$$

1. 4.6 حالة وجود حمولة خارجية خلف الجدار

في حال وجود حمولة خارجية خلف الجدار فيجب دراسة إن كانت هذه الحمولة تسبب ضغطاً على الجدار (حسب بعد الحمولة عن الجدار) فيجب إضافة هذا الضغط إلى الضغوط الأخرى المؤثرة على الجدار.

أ-حالة حمولة موزعة بانتظام ملاصقة للجدار وممتدة على مساحة كبيرة

تعتبر الحمولة ممتدة على مساحة كبيرة عندما تتجاوز حدوده امتدادها المساحة المحددة بالجدار ومستوي الانهيار (المستوي AB على الشكل 1. 31).

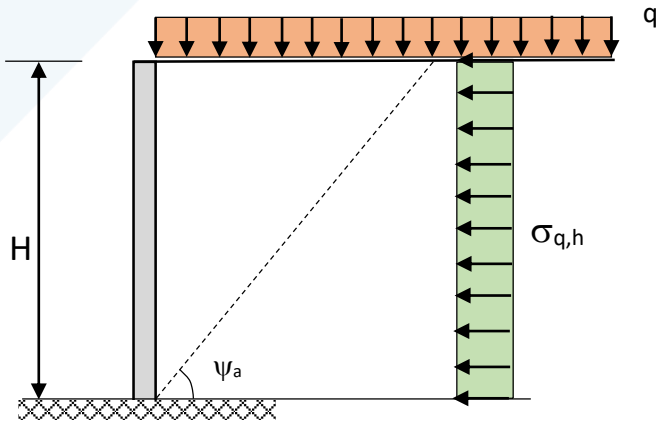
ينتج عن الحمولة الموزعة بانتظام q والممتدة على مساحة كبيرة ضغط جانبي ثابت وموزع بانتظام ،شدته σ_q ، حيث :

$$\sigma_q = q.\frac{\cos\theta.\cos(\alpha)}{\cos(\theta-\alpha)}.K_a \qquad (33.1)$$

وتعطى المركبة الأفقية للضغط الجانبي بالعلاقة :

$$\sigma_{q,h} = q.\frac{\cos\theta.\cos(\alpha)}{\cos(\theta-\alpha)}.k_{a,h} \qquad (34.1)$$

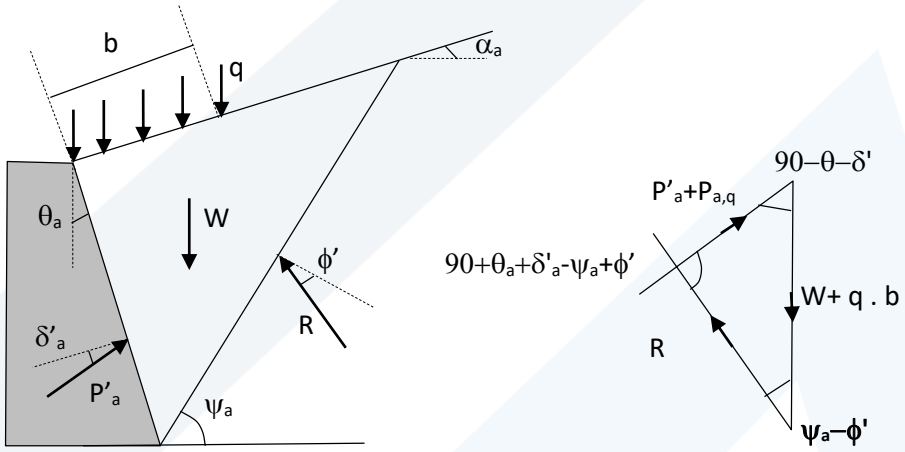
$$k_{a,h} = k_a.\cos(\delta'_a+\theta_a)$$



الشكل 1. 31: الدفع الجانبي الناتج عن موزعة بانتظام وممتدة على مساحة كبيرة

ب-حالة حمولة موزعة بانتظام وممتدة على مساحة محدودة

في حال وجود حمولة خارجية خلف الجدار فيجب دراسة إن كانت هذه الحمولة تسبب ضغطاً على الجدار (حسب بعد الحمولة عن الجدار) فيجب إضافة هذا الضغط إلى الضغوط الأخرى المؤثرة على الجدار (الشكل 32.1).



الشكل 32.1 : الضغط الجانبي للحمولة الشريطية على الجدار

من مخطط القوى، يمكن كتابة :

$$\frac{P_a'+P_{a,q}}{\sin(\psi_a-\phi')}=\frac{W+q.b}{\sin[90-(\psi-\phi'-\delta_a'-\theta_a)]}$$

$$but, \sin[90-(\psi-\phi'-\delta_a'-\theta_a)]=\cos(\psi-\phi'-\delta_a'-\theta_a)$$

$$\Rightarrow P_a'+P_{a,q}=(W+q.b).\frac{\sin(\psi_a-\phi')}{\cos(\psi-\phi'-\delta_a'-\theta_a)}$$

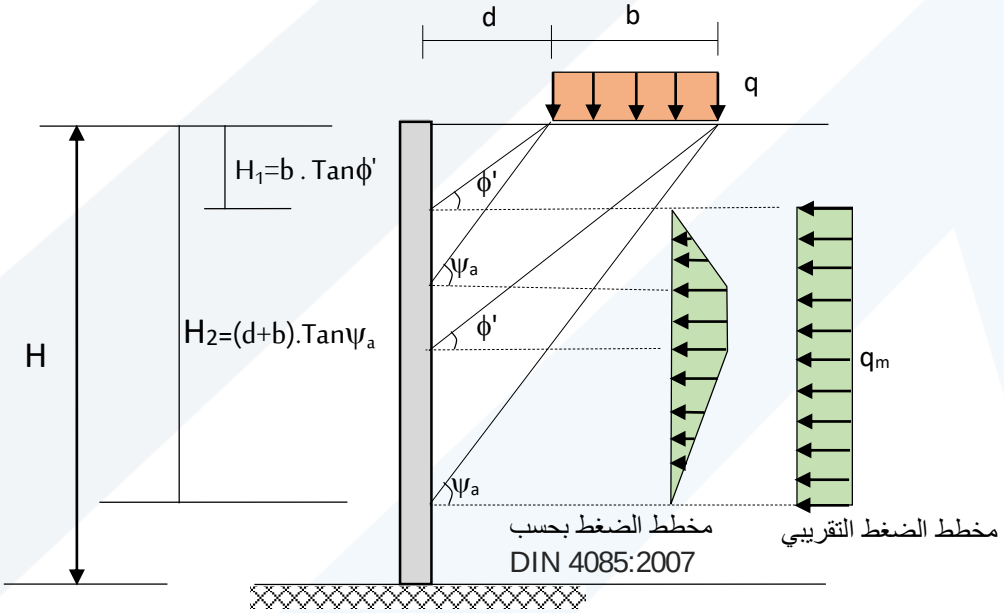
$$but, P_a'=\frac{W.\sin(\psi_a-\phi')}{\cos(\psi-\phi'-\delta_a'-\theta_a)}$$

$$\Rightarrow P_{a,q}=(q.b).\frac{\sin(\psi_a-\phi')}{\cos(\psi-\phi'-\delta_a'-\theta_a)}=q.b.k_{a,q} \qquad (35.1)$$

$$k_{a,q}=\frac{\sin(\psi_a-\phi')}{\cos(\psi-\phi'-\delta_a'-\theta_a)}$$

بحسب الكود الألماني DIN 4085:2007 يتم توزيع الضغط الإضافي على الجدار الناتج عن الحمولات الخارجية كما هو مبين في الشكل 1. 33.

ينتج عن الحمولة الموزعة بانتظام والممتدة على مساحة محدودة بطول b وتبعد مسافة dعن الوجه الداخلي للجدار(الشكل 1. 33) ضغط جانبي متزايد خطياً، يبدأ من العمق $H_1=b\,.\,Tan\phi'$ ثم يصبح موزعاً بانتظام وبعدها يتناقص خطياً حتى الصفر عند العمق $H_2=(d+b).Tan\psi_a$.



الشكل 1. 33 : الدفع الجانبي الناتج عن حمولة موزعة بانتظام على مساحة محدودة

يمكن تقريب مخطط الضغط واعتباره موزعاً بانتظام شدته q_m ويمتد على الارتفاع (H_2-H_1) وبحيث تكون محصلة مخطط الضغط المعتبر مساوياً لـ $P_{a,q}$ المعطاة بالعلاقة 1. 33، أي أن :

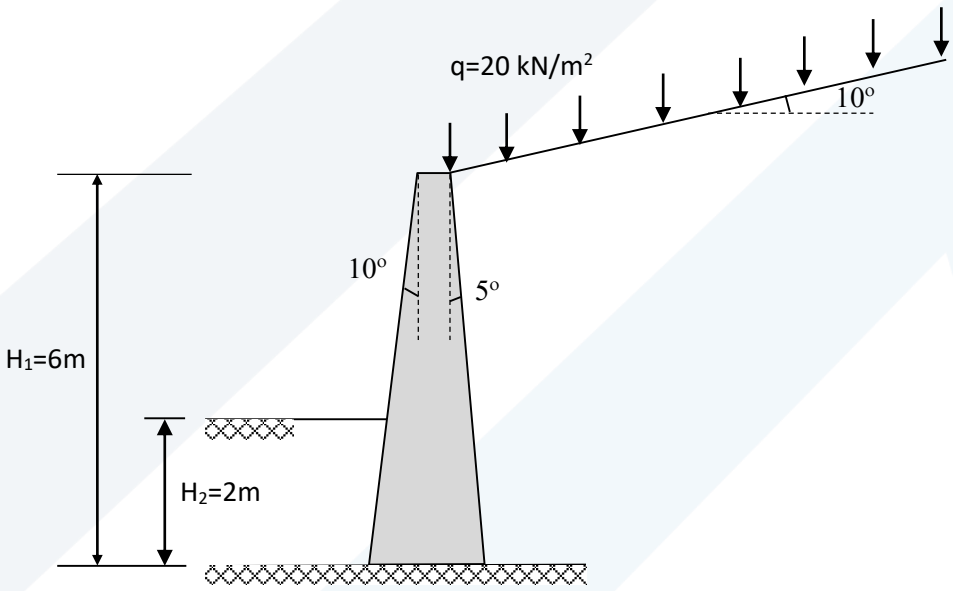
$$q_m=\frac{q.b}{H_2-H_1}\frac{\sin(\psi_a-\phi')\cos(\delta'_a+\theta_a)}{\cos(\psi_a-\phi'-\delta'_a-\theta_a)}=\frac{q.b}{H_2-H_1}K_{a,q,h} \qquad (36.1)$$

$$K_{a,q,h}=\frac{\sin(\psi_a-\phi')\cos(\delta'_a+\theta_a)}{\cos(\psi_a-\phi'-\delta'_a-\theta_a)}$$

ملاحظة : إذا نتج أن $H_2>H$ ، تعتبر $H_2=H$

مثال 9.1

لدينا الجدار المبين على الشكل 1. 34. يحجز خلفه وأمامه تربة مفككة مواصفاتها كما يلي : $\gamma' = 18\,kN/m^3, \phi' = 30^o, \delta' = 15^o$ بالإضافة إلى حمولة شاقولية موزعة بانتظام وممتدة على مساحة كبيرة $q=20kN/m^2$. يطلب حساب قوى الدفع الستاتيكية المؤثرة على الجدار وميل مستوي الانهيار للضغط الفعال باستخدام نظرية كولومب.



الشكل 1. 34 : معطيات المثال 9.1

الحل

1-الدفع الفعال

$$\theta_a = 5^o, \alpha_a = 10^o, \phi' = 30^o, \delta'_a = 15^o$$

أ-دفع التربة

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \alpha_a)}{\cos(\delta'_a + \theta_a)\cos(\theta - \alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(30-5)}{\cos^2(5)\cos(15+5)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(15+30)\sin(30-10)}{\cos(15+5)\cos(5-10)}}\right]^2} = 0.387$$

$$P'_a = \frac{1}{2}\gamma' H^2 \ K_a = \frac{1}{2} * 18 * 6^2 * 0.387 = 125.4\ kN/m$$

$$P'_{a,h} = P'_a.\cos(\delta'_a + \theta_a) = 125.4 * \cos(15+5) = 117.8 kN/m$$

ب-دفع الحمولة الشاقولية

$$P_q = q.H.K_a.\frac{\cos\theta.\cos\alpha}{\cos(\theta-\alpha)} = 20*6*0.387*\frac{\cos(5)*\cos(10)}{\cos(5-10)} = 45.7 kN/m$$

$$P_{q,h} = P_q.\cos(\delta'_a + \theta_a) = 45.7*\cos(15+5) = 43 kN/m$$

$$\psi_a = \phi' + arc\cot\left[\tan(\phi'-\theta_a) + \frac{1}{\cos(\phi'-\theta_a)}\sqrt{\frac{\sin(\delta'_a+\phi')\cos(\alpha_a-\theta_a)}{\sin(\phi'-\alpha_a)\cos(\delta'_a+\theta_a)}}\right]$$

$$\psi_a = 30 + arc\cot\left[\tan(30-5) + \frac{1}{\cos(30-5)}\sqrt{\frac{\sin(15+30)\cos(10-5)}{\sin(30-10)\cos(15+5)}}\right] = 55.5^o$$

2-الدفع السلبي

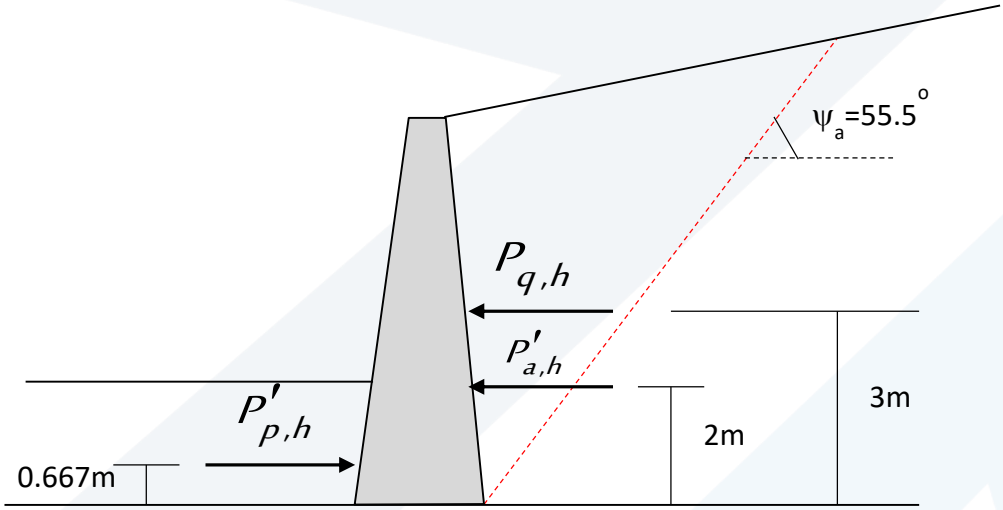
$$\theta_p = 10^o,\ \alpha_p = 0, \phi' = 30^o, \delta'_p = -15^o$$

$$K_p = \frac{\cos^2(\phi'+\theta_p)}{\cos^2\theta_p\cos(\delta'_p+\theta_p)\left[1-\sqrt{\frac{\sin(\phi'-\delta'_p)\sin(\phi'+\alpha_p)}{\cos(\theta_p+\delta'_p)\cos(\theta_p-\alpha_p)}}\right]^2}$$

$$K_p = \frac{\cos^2(30+10)}{\cos^2(10)\cos(-15+10)\left[1-\sqrt{\frac{\sin(30+15)\sin(30+0)}{\cos(10-15)\cos(10-0)}}\right]^2} = 3.8$$

$$P'_p = \frac{1}{2}\gamma' H^2 \ K_p = \frac{1}{2} * 18 * 2^2 * 3.8 = 136.8\ kN/m$$

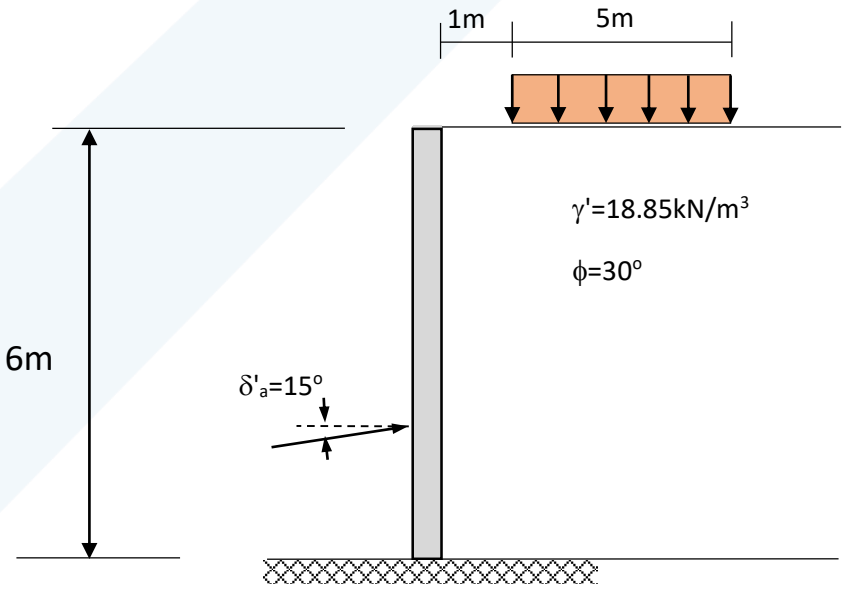
$$P'_{p,h} = P'_p.\cos(\delta'_p + \theta_p) = 136.8*\cos(-15+10) = 136.3 kN/m$$



الشكل 1. 35 : المركبات الأفقية لقوى الدفع الفعال والسلبي (المثال 1. 9)

مثال 1. 10

لدينا الجدار الاستنادي المبين بالشكل1. 36. محصلة قوى الدفع الفعال على الجدار P'a



الشكل 1. 36 : معطيات المثال 1. 10

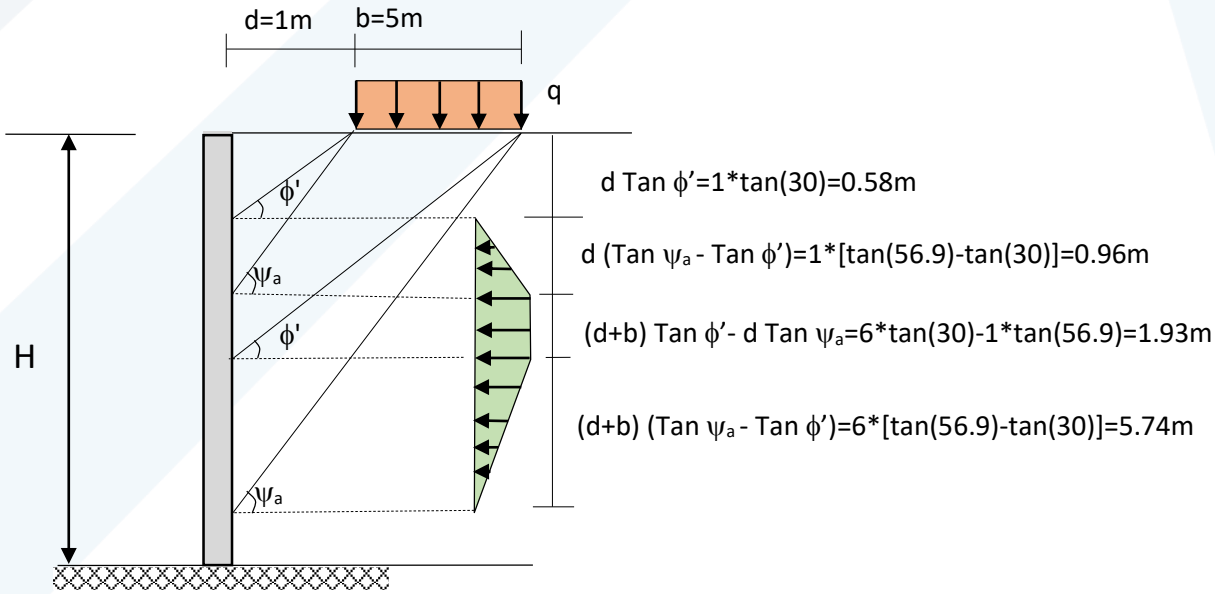
الحل

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta_a)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \alpha_a)}{\cos(\delta'_a + \theta_a)\cos(\theta_a - \alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(30-0)}{\cos^2 0 \cos(15+0)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(15+30)\sin(30-0)}{\cos(15+0)\cos(0-0)}}\right]^2} = 0.3014$$

$$\psi_a = \phi' + arc\cot\left[\tan(\phi' - \theta_a) + \frac{1}{\cos(\phi' - \theta_a)}\sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\cos(\alpha_a - \theta_a)}{\sin(\phi' - \alpha_a)\cos(\delta'_a + \theta_a)}}\right]$$

$$\psi_a = 30 + arc\cot\left[\tan(30-0) + \frac{1}{\cos(30-0)}\sqrt{\frac{\sin(15+30)\cos(0-0)}{\sin(30-0)\cos(15+0)}}\right] = 56.9^o$$



الشكل 1. 37 : شكل مخطط الدفع الفعال الفعلي (المثال 1. 10)

$$\sigma_q = q.K_{a,q}$$

$$K_{a,q} = \frac{\sin(\psi_a - \phi')}{\cos(\psi_a - \phi' - \delta'_a - \theta_a)} = \frac{\sin(56.9-30)}{\cos(56.9-30-15-0)} = 0.462$$

$$\sigma_q = q.K_{a,q} = 20*0.462 = 9.24\,kN/m/m$$

$$q_m = \frac{q.b}{H_2 - H_1} K_{a,q,h}$$

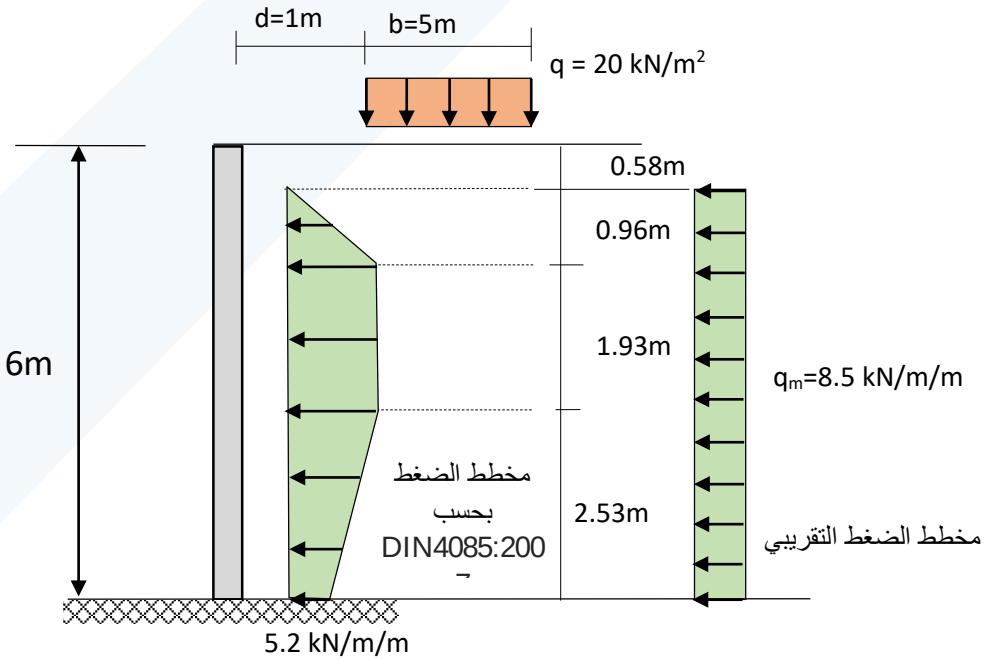
$$= \frac{q.b}{H_2 - H_1} . \frac{\sin(\psi_a - \phi')\cos(\delta'_a + \theta_a)}{\cos(\psi_a - \phi' - \delta'_a - \theta_a)}$$

$$= \frac{20*5}{6-0.58} . \frac{\sin(56.9-30)}{\cos(56.9-30-15-0)} = 8.5\,kN/m$$

$$\sigma'_a = \gamma' H K_a = 18.85*6*0.3014 = 34.1\,kN/m$$

$$P'_{a,soil} = \frac{H}{2}.\sigma'_a = \frac{6}{2}*34.1 = 102.3\,kN/m$$

$$Z_{Pa,soil} = \frac{H}{3} = 2m$$



الشكل 1. 38 : قيم الدفع الفعال لفعلي والتقريبي المعتمد في الحسابات (المثال 1. 10)

1. 7 قوى الدفع الفعال على الجدار مع قوى الزلازل

تعتبر الطريقة شبه الستاتيكية أكثر الطرق استخداماً لدراسة ضغط التربة على الحواجز في حالة الزلازل. بحسب هذه الطريقة, يمكن للزلزال أن يطبق على موشور الانهيار قوتين شبه ستاتيكية؛ أفقية وشاقولية.

هناك عدة طرق لدراسة لدراسة ضغط التربة على الحواجز في حالة الزلازل أشهرها طريقة مونونوبي-أوكابة (Mononobe-Okabe).

قام الباحثان مونونوبي وأوكابة (1926-1929) بتطوير وتوسيع نظرية كولومب بحيث تشمل تأثير الزلازل، حيث تم الافتراض بأن كتلة التربة المنزلقة تخضع لتسارع أفقي ثابت ($a_h=k_h . g$) وتسارع شاقولي ثابت ($a_v=k_v . g$) مطبقان في مركز ثقل كتلة التربة المنزلقة، (K_h ثابت التسارع الأفقي ويمثل نسبة من عامل زلزالية المنطقة z و K_v ثابت التسارع الشاقولي، ويمثل أيضاً نسبة من عامل زلزالية المنطقة z وهو عادة أقل من kh ، g تسارع الجاذبية) (الشكل 1. 39).

في الشكل 1. 19 اتجاه a_v الموجب نحو الأسفل واتجاه a_h الموجب بعيداً عن الجدار . تؤثر قوى العطالة في الاتجاهات المعاكسة لاتجاهات التسارعات المطبقة من الحركة الزلزالية. من أجل التسارعات الموجبة، تكون قوى العطالة معاكسة لهذه الاتجاهات، فقوة العطالة الشاقولية ($k_v.W$) تتجه نحو الأعلى وقوة العطالة الأفقية ($k_h.W$) تتجه باتجاه الجدار، حيث تمثل W وزن التربة ضمن موشور الانزلاق.

بفرض مستوي الانزلاق التجريبي BC ، تكون القوى المؤثرة على موشور الانهيار ABC كالتالي :

- وزن التربة ضمن موشور الانهيار W
- محصلة القوى الناظمية و قوى القص المقاومة على طول سطح الانزلاق BC
- قوة الدفع الفعال لواحدة الطول P'_{ae}
- قوة العطالة الأفقية $k_h . W$
- قوة العطالة الشاقولية $K_v . W$

تتعلق قيمة ثابت التسارع الزلزالي k_h بشكل أساسي بعامل التسارع الزلزالي للمنطقة (Z) وبصلابة الجدار. بحسب الكود الهندي، يمكن حساب عامل التسارع k_h بالعلاقة التالية :

$$k_h = \frac{Z.I}{2R}\frac{S_a}{g} \qquad (38.1)$$

I معامل أهمية المنشأة (I=1)

R معامل السلوك اللامرن. من أجل الجدران غير المسلحة (الصلبة)، تؤخذ عادة R=1.5

Sa/g معامل التسارع الطيفي. تعتبر الجدران صلبة ولذلك يعتبر الدور يساوي الصفر ومعامل التسارع الطيفي (Sa/g=1)

هناك علاقات أخرى لحساب k_h. على سبيل المثال :

- حالة الجدران الصلبة (كالجدران الثقلية) :

$$k_h = (1.45 - Z)Z \qquad (39.1)$$

- حالة الجدران المرنة (كالجدران المسلحة) :

$$k_h = 0.74\,Z\left(Z.\frac{(25.4\,mm)}{U_x}\right)^{0.25} \qquad (40.1)$$

كما تفترض نظرية مونونوبي أن حركة مواشير الانزلاق خلف وأمام الجدار كافية لتوليد كامل مقاومة القص على طول مستوي الانزلاق، وقد بينت التجارب أن الحركة اللازمة لتوليد الدفع الفعال الكلي قريبة من حالة الدفع الستاتيكية.

1. 1.7 حالة الترب المفككة

1- قوة الدفع الكلية الفعالة

يمكن التعبير عن أكبر قوة دفع كلية (ستاتيكية + ديناميكية) فعالة P'_{ae} يمكن أن تطبق من أي موشور انزلاق بالعلاقة :

$$P'_{ae} = \frac{1}{2}\gamma' H^2 (1 - k_v) K_{ae} \qquad (41.1)$$

وهي تميل عن الناظم على الجدار بمقدار زاوية الاحتكاك بين التربة والجدار δ'

K_{ae} يمثل عامل الدفع الكلي الفعال، ويعطى بالعلاقة :

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi' - \bar{\beta} - \theta)}{\cos\bar{\beta}\cos^2\theta\cos(\delta'_a + \bar{\beta} + \theta)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \bar{\beta} - \alpha)}{\cos(\delta'_a + \bar{\beta} + \theta)\cos(\alpha - \theta)}}\right]^2} \qquad (42.1)$$

$\bar{\beta}$ زاوية العطالة السيسمية وتعطى بالعلاقة :

$$\bar{\beta} = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1 - k_v}\right) \qquad (43.1)$$

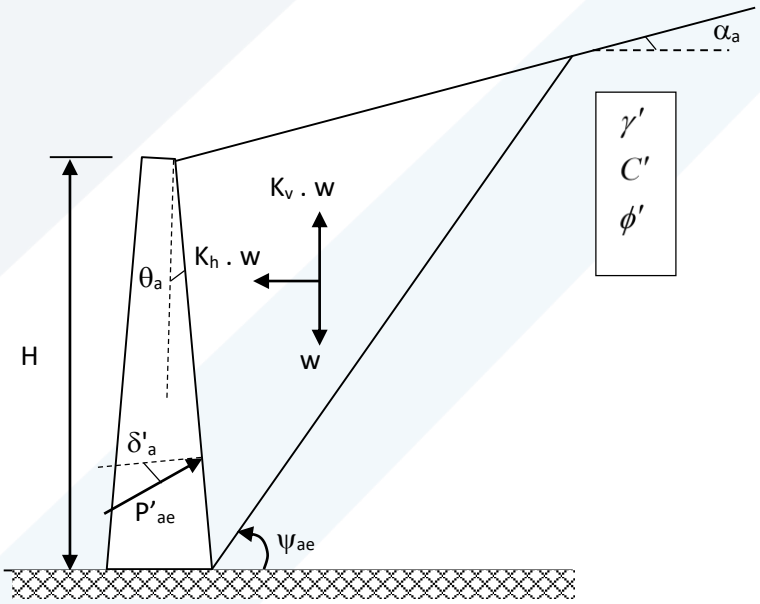
عادة يتم اعتبار K_v=0 وذلك لأن ذروتي التسارعات لا تحصلان في وقت واحد

يميل مستوي الانهيار عن الأفق بالزاوية ψ_{ae} التي تعطى بالعلاقة التالية :

$$\psi_{ae} = \phi' - \bar{\beta} + \tan^{-1}\left[\frac{-\tan(\phi' - \bar{\beta} - \alpha_a) + c_{1ae}}{c_{2ae}}\right]$$

$$c_{1ae} = \sqrt{\left[\tan(\phi' - \bar{\beta} - \alpha_a)\right]\left[\tan(\phi' - \bar{\beta} - \alpha_a) + \cot(\phi' - \bar{\beta} - \theta_a)\right]\left[1 + \tan(\delta'_a + \bar{\beta} + \theta_a)\cot(\phi' - \bar{\beta} - \theta_a)\right]} \qquad (44.1)$$

$$c_{2ae} = 1 + \left[\tan(\delta'_a + \bar{\beta} + \theta_a)\right]\left[\tan(\phi' - \bar{\beta} - \alpha_a) + \cot(\phi' - \bar{\beta} - \theta_a)\right]$$



الشكل 1. 39: طريقة مونونوبي أوكابة

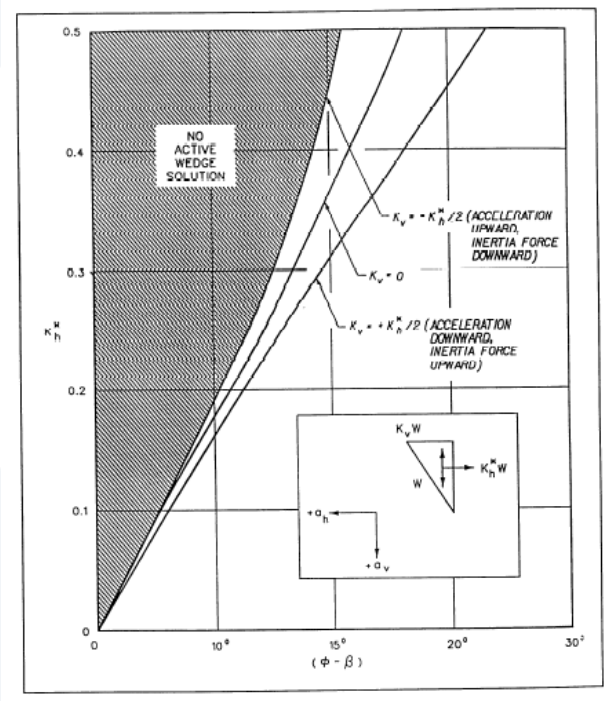
2- <u>حدود التسارع الأفقي</u>

لقد اشتر

ط Richards and Elms (1979) أن لا تتجاوز قيمة زاوية العطالة السيسمية $\bar{\beta}$ قيمة الزاوية $(\phi'-\alpha)$ ، وعند هذه القيمة تصبح القيمة الحدية لعامل التسارع الأفقي $k_{h,max}$ تساوي :

$$k_{h,\max} = (1 - k_v)\tan(\phi' - \alpha) \qquad (45.1)$$

وعندما تصبح $k_h = k_{h,max}$ يصبح الجدار في حالة عدم استقرار . يبين الشكل 1. 40 قيم عامل التسارع الأفقي الحدي $k_{h,max}$ بدلالة الزاوية $(\phi'-\alpha)$



الشكل 1. 40 : قيم عامل التسار ع الأفقي الحدي $k_{h,max}$ بدلالة الزاوية $(\phi'-\alpha)$

نلاحظ من العلاقة السابقة أنه في حال عدم وجود زلزال فإن: $\overline{\beta} = 0$ و بالتالي يكون: $K_{ae}=K_a$

3- موقع قوة الدفع الفعال P_{ae} على الوجه الخلفي للجدار

لم تحدد طر يقة مونونوبي أوكابة موقع القوة Pae ، وقد قام العديد من الباحثين (Parakash and Basavann a 1969, sherif and fang, ishihara and fang 1987) بدراســة حالة جدار يحجز خلفه تر بة ر ملية، وقد بينوا أن موقع القوة P'_{ae} يتعلق بمقدار وطبيعة حركة الجدار ، وأنها تبعد شــاقولياً عن قاعدة الجدار H(0.4-0.55)، حيث تمثل H ارتفاع الجدار. أي أن موقع P'_{ae} أعلى من موقع P_a وهذا ناتج بشكل أساسي عن التسارع الزلزالي الذي يؤ ثر في مركز ثقل موشور الانهيار والذي يقع أعلى من موقع القوة الســاتيكية P_a، وبالتالي فموقع القوة P_{ae} ســوف يتعلق بقيمة التســارع المطبق في مركز ثقل موشور الانهيار.

4- طريقة مبسطة لحساب الدفع الديناميكي

تم تعر يف قوة الدفع الكلية P'_{ae} بأنها مجموع قوة الدفع الســتاتيكي P'_a وقوة الدفع الديناميكي (الناتجة عن الزلزال) $\Delta P'_{ae}$ كما يلي :

$$P'_{ae} = P'_{ae} + \Delta P'_{ae} \qquad (46.1)$$

يمكن حساب قوة الدفع الديناميكي (الناتجة عن الزلزال) $\Delta P'_{ae}$ ونقطة تأثير قوة الدفع الكلية P'_{ae} باتباع الخطوات التالية:

1- حساب P'_{ae} (محصلة الدفع الفعال الكلي مع اعتبار تأثير الزلزال) من العلاقة 1. 41

2-حساب P'_a (محصلة الدفع الفعال الستاتيكي دون اعتبار تأثير الزلزال) من العلاقة 1. 20

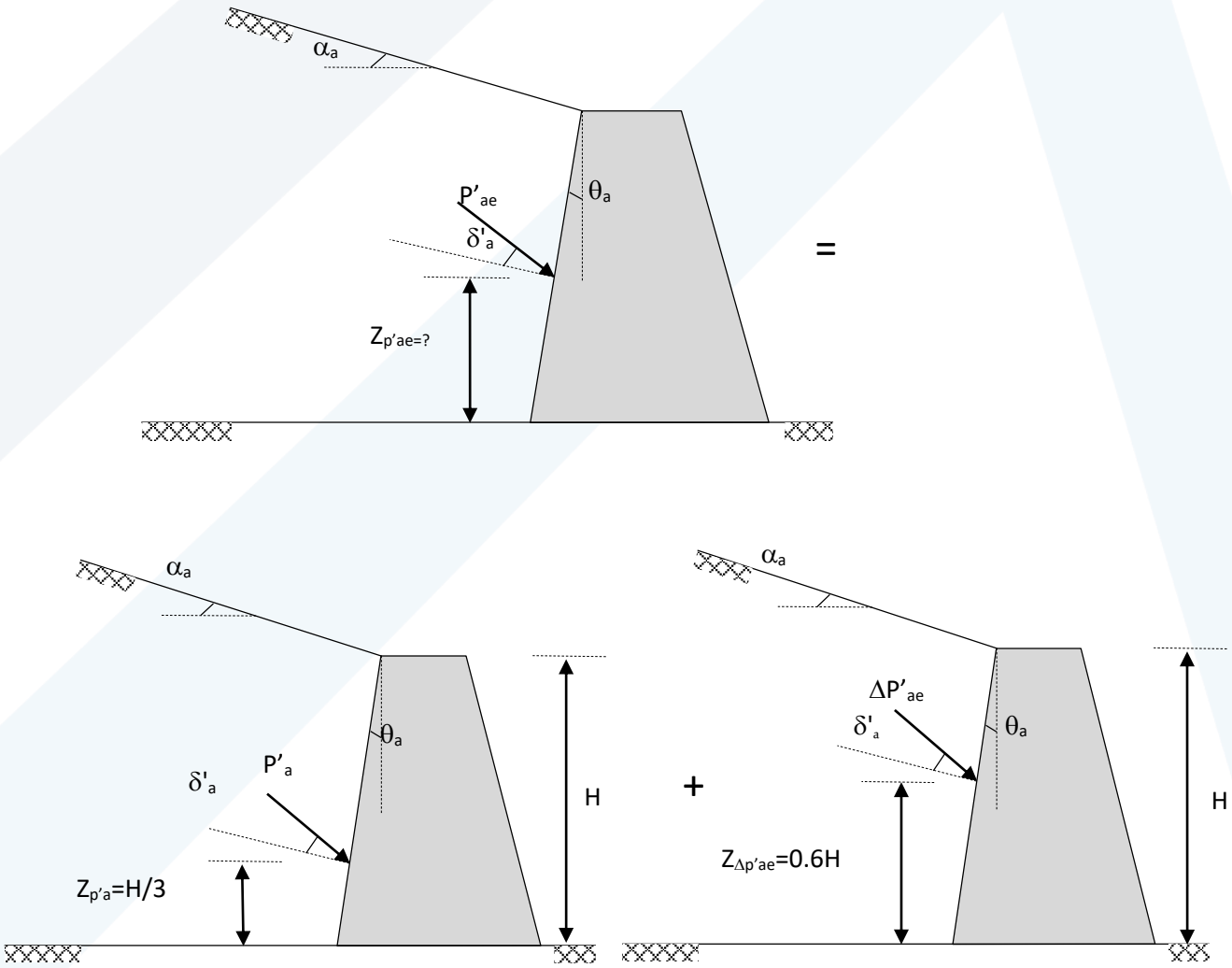
3- حساب $\Delta P'_{ae}$: الفرق في محصلة دفع التربة الناتج عن تأثير الزلزال $\Delta P'_{ae} = P'_{ae} - P'_a$

4- فرض أن P'_a تؤثر على مسافة H/3 من أسفل الجدار (الشكل 1. 41)

5- فرض أن $\Delta P'_{ae}$ تؤثر على مسافة 0.6H من أسفل الجدار (الشكل 1. 41)

6- حساب نقطة تطبيق المحصلة P'_{ae} من العلاقة التالية:

$$Z_{P'_{ae}} = \frac{\Delta P'_{ae}.(0.6H) + P'_a.\frac{H}{3}}{P'_{ae}} \qquad (47.1)$$



الشكل 1. 41 : تحديد نقطة تأثير محصلة قوة الدفع الفعال P_{ae}

مثال 11.1

لدينا جدار مواصفاته كما يلي :

زاوية ميل الوجه الخلفي للجدار عن الشاقول : $\theta=12^o$

زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة خلف الجدار : $\phi'=34^o$

زاوية الاحتكاك بين التربة والجدار : $\delta'=2/3\phi'$

سطح التربة خلف الجدار أفقي

عامل المنطقة الزلزالي : $Z=0.4$

الانتقال التصميمي المسموح للجدار = $Ux=76mm$

المركبة الشاقولية للزلزال مهملة : $Kv=0$

يطلب ما يلي :

1-حساب عامل الدفع الجانبي الفعال للتربة

2-حساب قوة الدفع الكلية P'_{ae} ونقطة تطبيقها

3-كرر حساب الطلبين 1 و 2 في الحالة التي يبقى فيها الجدار ثابتاً (Ux=0)

الحل

$$K_{ae}=\frac{\cos^2(\phi'-\theta-\bar{\beta})}{\cos^2\theta\cos\bar{\beta}\cos(\delta'+\theta+\bar{\beta})\left\{1+\left[\frac{\sin(\delta'+\phi')\sin(\phi'-\alpha-\bar{\beta})}{\cos(\delta'+\theta+\bar{\beta})\cos(\theta-\alpha)}\right]^{1/2}\right\}^2}$$

and

$$\bar{\beta}=\tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1-k_v}\right) \qquad (5-51)$$

1-حالة الجدار لا يتحرك أفقياً

$$K_h=(1.45-Z)\,Z=(1.45-0.4)*0.4=0.42\Rightarrow\bar{\beta}=\tan^{-1}(\frac{0.42}{1})=22.78^o=0.398\,rad$$

$$K_{ae}=\frac{\cos^2(34-12-22.78)}{\cos^2 12\cos 22.78\cos(22.67+12+22.78)\left\{1+\left[\frac{\sin(22.67+34)\sin(34-0-22.78)}{\cos(22.67+12+22.78)\cos(12-0)}\right]^{1/2}\right\}^2}=0.87$$

2-حالة الجدار يتحرك أفقياً (ux=76mm)

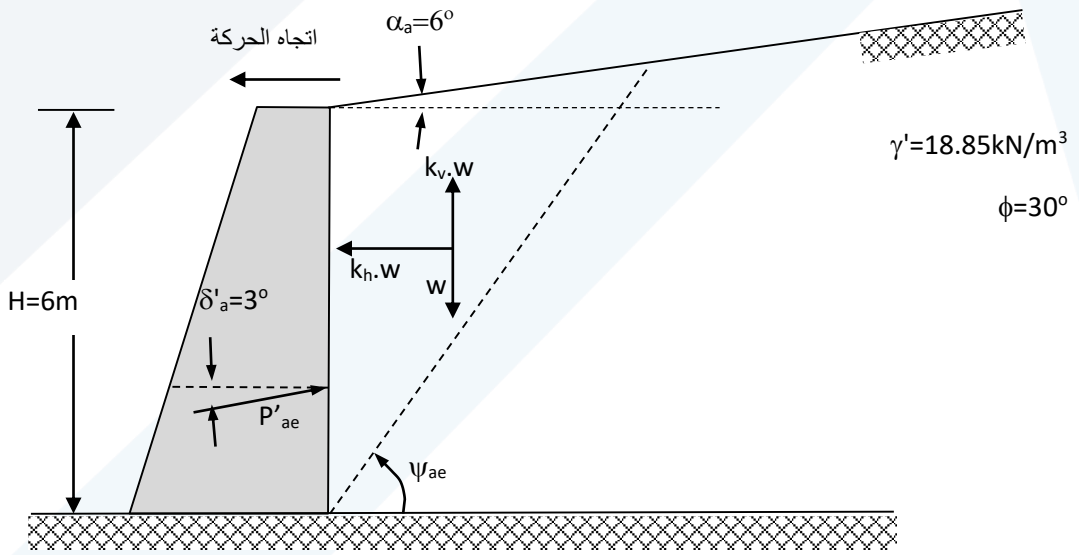
$$K_h = 0.74\,Z\,(\frac{Z\,.\,(25.4mm)}{76mm})^{0.25} = 0.74*0.4*(\frac{0.4*25\,.\,25.4}{76})^{0.25} = 0.179$$

$$\Rightarrow \bar{\beta} = \tan^{-1}(\frac{0.179}{1}) = 10.15^o = 0.177\,rad$$

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(34-12-10.15)}{\cos^2(12)\cos(10.15)\cos(22.67+12+10.15)\left\{1+\left[\frac{\sin(22.67+34)\sin(34-0-10.15)}{\cos(22.67+12+10.15)\cos(12-0)}\right]^{1/2}\right\}^2} = 0.497$$

مثال 1. 12

لدينا الجدار المبين بالشكل 1. 42. بفرض k_h=0.1 (التسارع kh . g باتجاه يبتعد عن الجدار وقوة العطالة kh . w باتجاه الجدار) و kv=0.067 (التسارع kv . g باتجاه الأسفل وقوة العطالة kv . w باتجاه الأعلى). احسب Kae و P'ae و ψae.



الشكل 1. 42 : معطيات المثال 1. 12

الحل

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi'-\theta-\bar{\beta})}{\cos^2\theta\cos\bar{\beta}\cos(\delta'+\theta+\bar{\beta})\left\{1+\left[\frac{\sin(\delta'+\phi')\sin(\phi'-\alpha-\bar{\beta})}{\cos(\delta'+\theta+\bar{\beta})\cos(\theta-\alpha)}\right]^{1/2}\right\}^2}$$

and

$$\bar{\beta} = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1-k_v}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{0.1}{1-0.067}\right) = 6.12^o$$

$$K_{ae}=\frac{\cos^2(30-0-6.12)}{\cos^2 0\cos 6.12\cos(3+0+6.12)\left\{1+\left[\frac{\sin(3+30)\sin(30-6-6.12)}{\cos(3+0+6.12)\cos(0-6)}\right]^{1/2}\right\}^2}=0.4268$$

$$P'_{ae}=\frac{1}{2}*18.85*(1-0.067)*(6)^2*0.4268=135.1\,kN/m$$

$$K_a=\frac{\cos^2(\phi'-\theta_a)}{\cos^2\theta_a\cos(\delta'_a+\theta_a)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta'_a+\phi')\sin(\phi'-\alpha_a)}{\cos(\delta'_a+\theta_a)\cos(\theta_a-\alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a=\frac{\cos^2(30-0)}{\cos^2 0\cos(3+0)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(3+30)\sin(30-6)}{\cos(3+0)\cos(0-6)}}\right]^2}=0.3465$$

$$\sigma'_a=\gamma' H K_a=18.85*6*0.3465=39.19\,kN/m$$

$$P'_a=\frac{1}{2}.\gamma' H^2 K_a=\frac{1}{2}*18.85*6^2*0.3465=117.6\,kN/m$$

$$\Delta P'_{ae}=P'_{ae}-P'_a=135.1-117.6=17.5\,kN/m$$

$$Z_{P'_{ae}}=\frac{\Delta P'_{ae}.(0.6H)+P'_a.\frac{H}{3}}{P'_{ae}}=\frac{17.5*0.6*6+117.6*2}{135.1}=2.21m$$

$$\psi_{ae}=\phi'-\bar{\beta}+\tan^{-1}\left[\frac{-\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)+c_{1ae}}{c_{2ae}}\right]$$

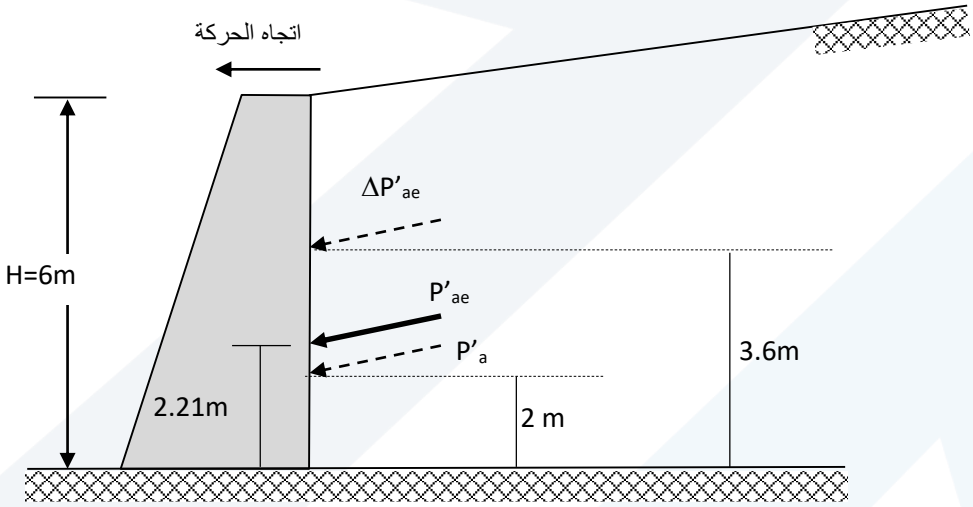
$$c_{1ae}=\sqrt{\left[\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)\right]\left[\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)+\cot(\phi'-\bar{\beta}-\theta_a)\right]\left[1+\tan(\delta'_a+\bar{\beta}+\theta_a)\cot(\phi'-\bar{\beta}-\theta_a)\right]}$$

$$c_{1ae}=\sqrt{\left[\tan(30-6.12-6)\right]\left[\tan(30-6.12-6)+\cot(30-6.12-0)\right]\left[1+\tan(3+6.12+3)\cot(30-6.12-3)\right]}=1.065$$

$$c_{2ae}=1+\left[\tan(\delta'_a+\bar{\beta}+\theta_a)\right]\left[\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)+\cot(\phi'-\bar{\beta}-\theta_a)\right]$$

$$c_{2ae}=1+\left[\tan(3+6.12+3)\right]\left[\tan(30-6.12-6)+\cot(30-6.12-3)\right]=1.414$$

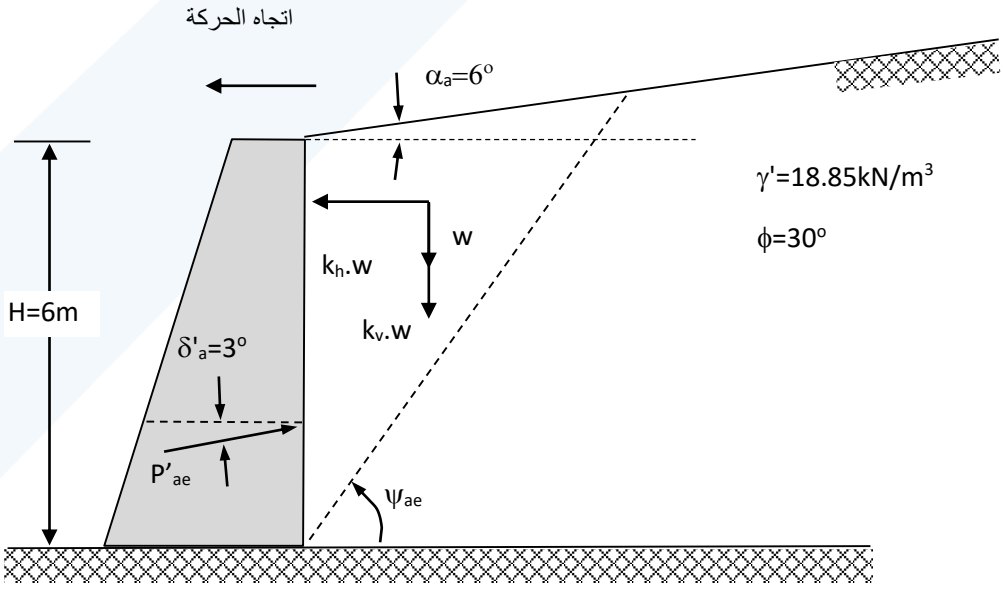
$$\psi_{ae}=30-6.12+\tan^{-1}\left[\frac{-\tan(30-6.12-6)+1.065}{1.414}\right]=51.5^o$$



الشكل 1. 43 : قوى الدفع الجانبي على الجدار وموقع المحصلة (المثال 1. 12)

مثال 1. 13

لدينا الجدار المبين بالشكل 1. 44 . بفرض k_h=0.1 (التسارع kh . g باتجاه يبتعد عن الجدار وقوة العطالة kh . w باتجاه الجدار) و v=0.067 (التسارع kv . g باتجاه الأعلى وقوة العطالة kv . w باتجاه الأسفل). احسب Kae و P'ae و ψae.



الشكل 1. 44 : معطيات المثال 1. 13

الحل

$$K_{ae}=\frac{\cos^2(\phi'-\theta-\bar{\beta})}{\cos^2\theta\cos\bar{\beta}\cos(\delta'+\theta+\bar{\beta})\left\{1+\left[\frac{\sin(\delta'+\phi')\sin(\phi'-\alpha-\bar{\beta})}{\cos(\delta'+\theta+\bar{\beta})\cos(\theta-\alpha)}\right]^{1/2}\right\}^2}$$

and

$$\bar{\beta}=\tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1+k_v}\right)=\tan^{-1}\left(\frac{0.1}{1+0.067}\right)=5.35^o$$

$$K_{ae}=\frac{\cos^2(30-0-5.35)}{\cos^2 0\cos 5.35\cos(3+0+5.35)\left\{1+\left[\frac{\sin(3+30)\sin(30-6-5.35)}{\cos(3+0+5.35)\cos(0-6)}\right]^{1/2}\right\}^2}=0.4155$$

$$P'_{ae}=\frac{1}{2}*18.85*(1+0.067)*(6)^2*0.4155=150.4\,kN/m$$

$$P'_a=117.6\,kN/m$$

$$\Delta P'_{ae}=P'_{ae}-P'_a=150.4-117.6=32.8kN/m$$

$$Z_{P'_{ae}}=\frac{\Delta P'_{ae}.(0.6H)+P'_a.\frac{H}{3}}{P'_{ae}}=\frac{32.8*0.6*6+117.6*2}{150.4}=2.35m$$

$$\psi_{ae}=\phi'-\bar{\beta}+\tan^{-1}\left[\frac{-\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)+c_{1aeE}}{c_{2ae}}\right]$$

$$c_{1ae}=\sqrt{[\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)][\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)+\cot(\phi'-\bar{\beta}-\theta_a)][1+\tan(\delta'_a+\bar{\beta}+\theta_a)\cot(\phi'-\bar{\beta}-\theta_a)]}$$

$$c_{1ae}=\sqrt{[\tan(30-5.35-6)][\tan(30-5.35-6)+\cot(30-5.35-0)][1+\tan(3+5.35+0)\cot(30-5.35-0)]}=1.0588$$

$$c_{2ae}=1+[\tan(\delta'_a+\bar{\beta}+\theta_a)][\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)+\cot(\phi'-\bar{\beta}-\theta_a)]$$

$$c_{2ae}=1+[\tan(3+5.35+0)][\tan(30-5.35-6)+\cot(30-5.35-0)]=1.3696$$

$$\psi_{ae}=\phi'-\bar{\beta}+\tan^{-1}\left[\frac{-\tan(\phi'-\bar{\beta}-\alpha_a)+c_{1aeE}}{c_{2ae}}\right]=30-6.12+\tan^{-1}\left[\frac{-\tan(30-5.35-6)+1.0588}{1.3696}\right]=52.45^o$$

5- حالة وجود مياه خلف الجدار

أ) ضغط الماء الهيدروستاتيكي

في حالة وجود احتمال لارتفاع منسوب الماء خلف الجدار فإن الماء يولد ضغوطاً هيدروستاتيكية وهيدروديناميكية كما يمكن أن يؤدي إلى زيادة ضغط الماء المسامي وانخفاض في خواص التربة وكذلك يمكن أن يخفض من الاحتكاك بين التربة والجدار، ويمكن أن يؤخذ أثر الماء بعين الاعتبار بطريقة تقريبية كما يلي :

1- يتم تخفيض زاوية الاحتكاك بين التربة والجدار δ' إلى النصف

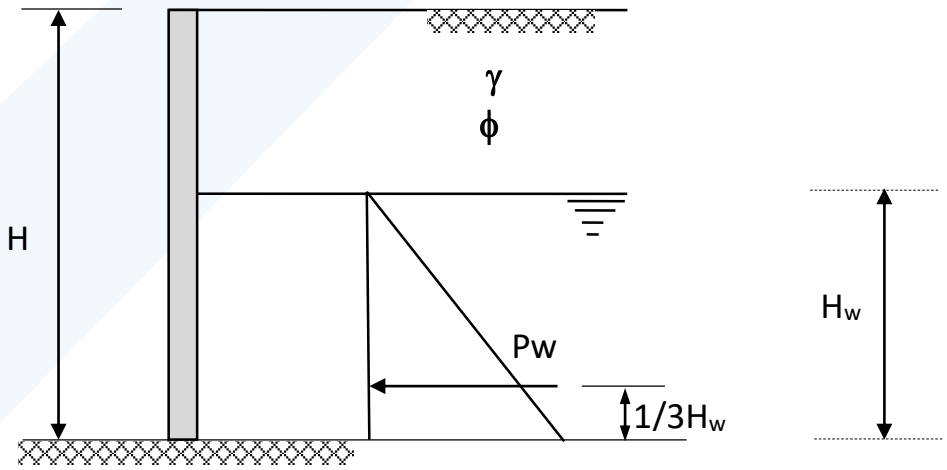
2- يحسب ضغط الماء الهيدروستاتيكي ويضاف إلى الضغوط المؤثرة على الجدار. بفرض ارتفاع سطح الماء فوق أسفل قاعدة الجدار Hw يكون فإن ضغط الماء أسفل الجدار :

$$\sigma_w = \gamma_w . H_w \qquad (48.1)$$

وتكون محصلة ضغط الماء على الجدار :

$$P_w = \frac{1}{2}\gamma_w . H_w^2 \qquad (49.1)$$

وهي قوة أفقية تبعد مسافة شاقولية عن قاعدة الجدار مقدارها $\frac{1}{3}H_w$ (الشكل 1. 45)



الشكل 1. 45 : دفع الماء على الجدار

ب) الأثر الديناميكي للماء

نتيجة لوجود الماء يمكن أن يتولد ضغط ماء هيدروديناميكي ويحصل زيادة لضغط التربة الديناميكي وكذلك يمكن أن يتغير ضغط الماء المسامي في التربة. سندرس هنا فقط قوى الضغط الهيدروديناميكي وتغير ضغط التربة الديناميكي ولن نتعرض لزيادة ضغط الماء المسامي التي يمكن أن تحدث.

افترض Matsuzawa Ishibaski, and Kawamura (1985) أن الماء نتيجة للاهتزاز يبقى محصوراً خلف الجدار ، واقترح تعديل k_h عن طريق ضربها بالنسبة γ/γ_{sub} وبالتالي نستطيع كتابة :

$$k_{h,w} = \frac{\gamma}{\gamma_{sub}} k_h \qquad (50.1)$$

$$\bar{\beta} = Tan^{-1}\left(\frac{k_{h,w}}{1-k_v}\right) \qquad (51.1)$$

وفق هذه الطريقة، يتم حساب P'a و P'ae و ΔP'ae ويتم تحديد نقطة تطبيق P'ae كما رأينا سابقاً.

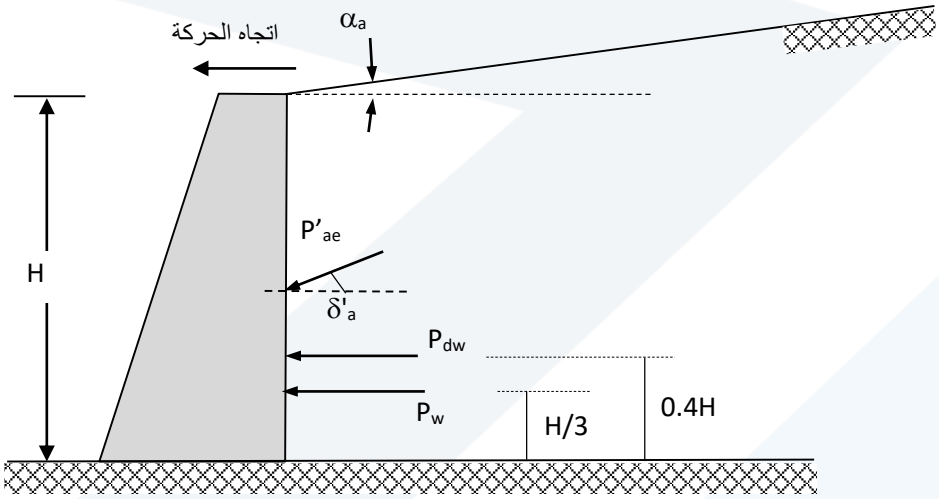
كما افترض فرضية أخرى أنه نتيجة للاهزازات يمكن للماء أن يكون حر الحركة خلف الجدار ، واقترح تعديل k_h عن طريق ضربها بالنسبة $\frac{G_s}{G_s - 1}$ (G_s تمثل الوزن النوعي للتربة) ، وبالتالي نستطيع كتابة :

$$k_{h,w} = \frac{G_s}{G_s - 1} k_h \qquad (52.1)$$

$$\bar{\beta} = Tan^{-1}\left(\frac{k_{h,w}}{1-k_v}\right) \qquad (53.1)$$

في هذه الحالة بالإضافة إلى الدفع الكلي Pae وضغط الماء الهيدروستاتيكي Pw تطبق على الجدار قوة ضغط ماء هيدروديناميكي P_{wd} تؤثر على ارتفاع 0.4H من قاعدة الجدار (الشكل 1. 46) و مقدارها :

$$P_{wd} = \frac{7}{12} k_h \gamma_w H^2 \qquad (54.1)$$



الشكل 1. 46 : دفع الماء الستاتيكي والهيدروديناميكي على الجدار

6. حالة وجود حمولات خارجية سطحية

تتسبب الاهتزازات الزلزالية بزيادة الضغوط الجانبية الناتجة عن الحمولات الخارجية كما تغير من نقطة تطبيق محصلة الضغط الجانبي الناتج عن الحمولة الخارجية وعادة يزداد بعد محصلة قوة الضغط عن قاعدة الجدار

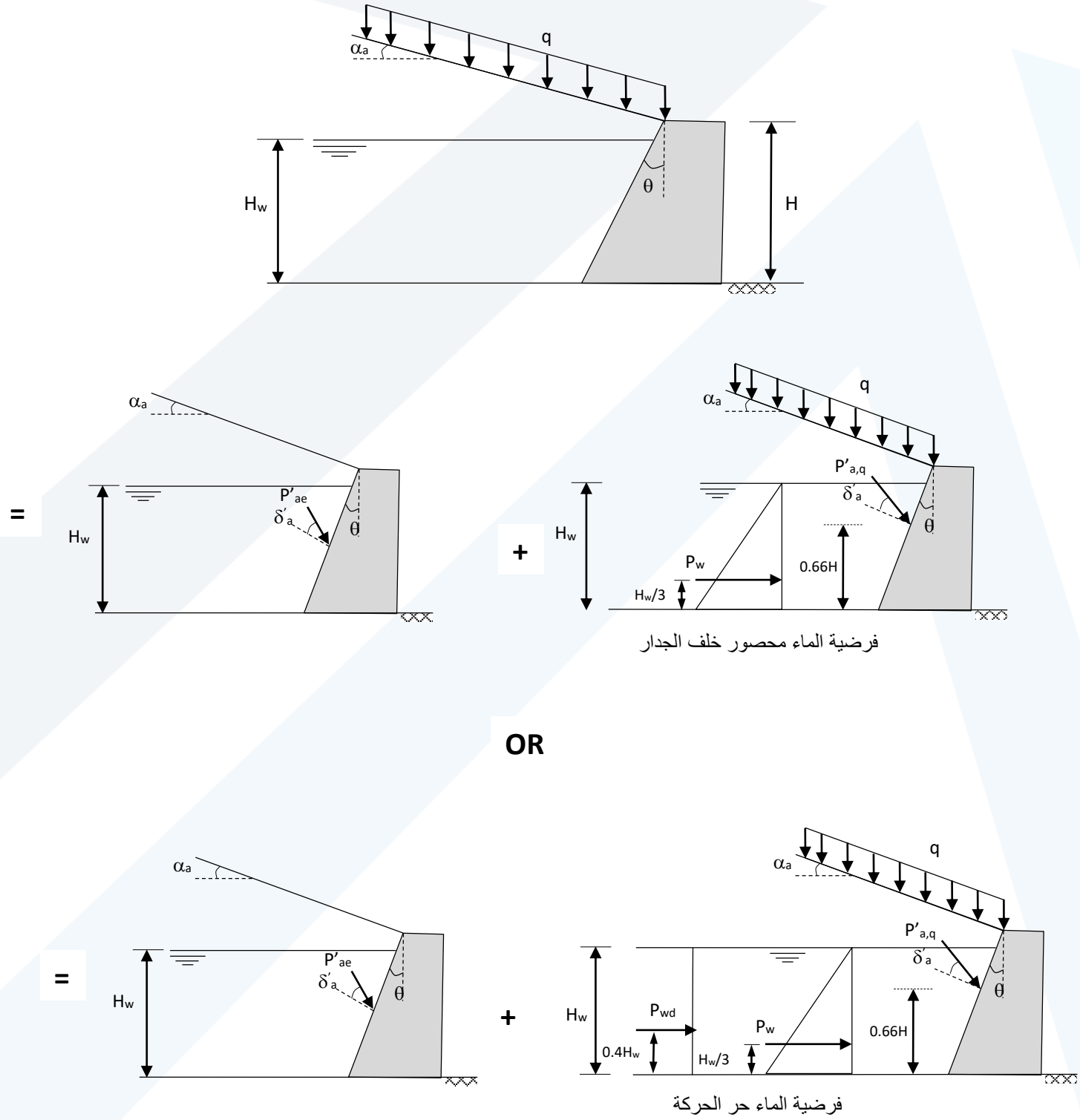
في حالة وجود حمولة سطحية q ممتدة على مساحة كبيرة (وهي الحالة الأكثر شيوعاً واستخداماً في التصميم) . يمكن حساب الضغط الجانبي الفعال الناتج عن هذه الحمولة بالعلاقة التالية :

$$p_{a,q} = q.H\frac{\cos\theta.\cos\alpha}{\cos(\theta-\alpha)}K_{ae} \qquad (55.1)$$

كما يحسب الضغط الجانبي السلبي الناتج عن هذه الحمولة بالعلاقة التالية :

$$p_{p,q} = q.H\frac{\cos\theta.\cos\alpha}{\cos(\theta-\alpha)}K_{pe} \qquad (56.1)$$

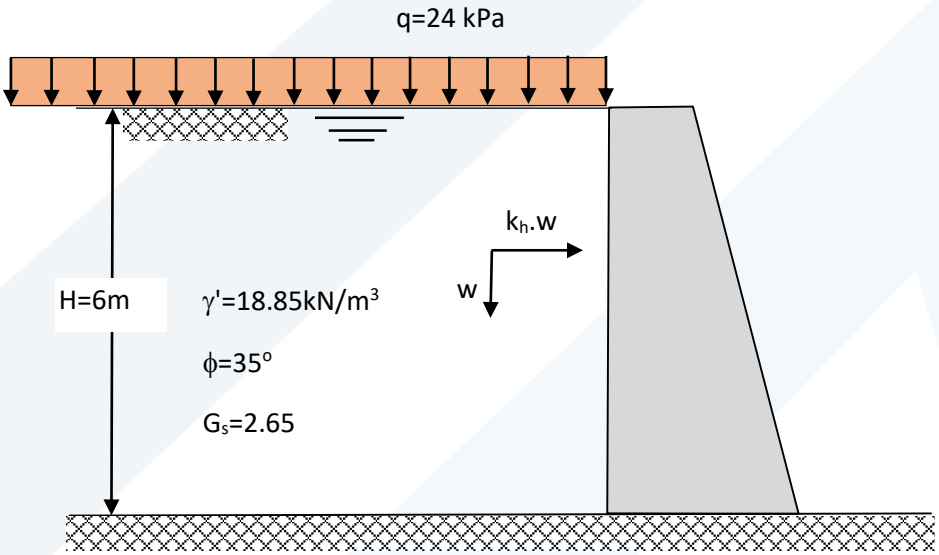
بحسب الكود الهندي (IS: 1893:1984), تقع نقطة تطبيق محصلة قوة الدفع الناتجة عن الحمولة الخارجية على بعد (0.66H) من قاعدة الجدار، وهي أعلى من نقطة تطبيق قوة الدفع في الحالة الستاتيكية والتي تقع على بعد (0.5H) من قاعدة الجدار (الشكل 1. 47).



الشكل 1. 47 : الدفع الجانبي الناتج عن الحمولات السطحية في حالة الزلازل

مثال 1. 14

جدار بارتفاع 6m يحجز خلفه تربة مفككة مغمورة بالماء مواصفاتها مبينة على الشكل 1. 48. بفرض k_h=0.2 (التسارع kh . g باتجاه يبتعد عن الجدار وقوة العطالة kh . w باتجاه الجدار) و kv=0 و δ'a=ϕ'/2=17.5° ، محملة بحمولة سطحية شدتها 24kN/m² ممتدة على مساحة كبيرة خلف الجدار، وأن الماء تؤثر على الجدار في حالة الوضع المحصور ضمن الردميات خلف الجدار. احسب دفع التربة ودفع الماء المؤثر على الجدار ومحصلة القوى الأفقية ونقطة تأثير هذه المحصلة.



الشكل 1. 48 : معطيات المثال 1. 14

الحل

- **ضغط الماء الهيدروستاتيكي**

$$P_w = \frac{1}{2}\gamma_w H^2 = \frac{1}{2}*10*6^2 = 180 kN/m$$

$$Z_{P_w} = \frac{H}{3} = 2m$$

- **ضغط التربة الكلي**

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi' - \theta - \bar{\beta})}{\cos^2\theta \cos\bar{\beta} \cos(\delta' + \theta + \bar{\beta})\left\{1 + \left[\frac{\sin(\delta' + \phi')\sin(\phi' - \alpha - \bar{\beta})}{\cos(\delta' + \theta + \bar{\beta})\cos(\theta - \alpha)}\right]^{1/2}\right\}^2}$$

and

$$\bar{\beta} = Tan^{-1}\left(\frac{k_{h,w}}{1 - k_v}\right) \quad and \quad k_{h,w} = \frac{\gamma}{\gamma_{sub}} k_h$$

$$k_{h,w} = \frac{18.85}{8.85} * 0.2 = 0.426$$

$$\bar{\beta} = Tan^{-1}(\frac{0.426}{1-0}) = 23.07^o$$

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(30-0-23.07)}{\cos^2 0 \cos 23.07 \cos(17.5+0+23.07)\left\{1+\left[\frac{\sin(23.07+35)\sin(30-0-23.07)}{\cos(23.07+0+17.8)\cos(0-0)}\right]^{1/2}\right\}^2} = 0.6387$$

$$P'_{ae} = \frac{1}{2} * (18.85-10) * (1-0) * (6)^2 * 0.6387 = 101.7\ kN/m$$

تحديد نقطة تطبيق P'_{ae}

$$P'_{ae} = P'_a + \Delta P'_{ae}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(\delta'_a+\phi')\sin(\phi'-\alpha_a)}{\cos(\delta'_a+\theta_a)\cos(\theta-\alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(35-0)}{\cos^2(0)\cos(17.5+0)\left[1+\sqrt{\frac{\sin(17.5+35)\sin(35-0)}{\cos(17.5+0)\cos(0-0)}}\right]^2} = 0.246$$

$$P'_a = \frac{1}{2}\gamma' H^2\ K_a = \frac{1}{2} * (18.85-10) * 6^2 * 0.246 = 39.2\ kN/m$$

$$\Delta P'_{ae} = P'_{ae} - P'_a = 101.7 - 39.2 = 62.5\ kN/m$$

$$Z_{\Delta P'_{ae}} = 0.6H = 0.6*6 = 3.6m$$

$$Z_{P'_{ae}} = \frac{\Delta P'_{ae}.(0.6H) + P'_a.\frac{H}{3}}{P'_{ae}} = \frac{62.5*3.6+39.2*2}{101.7} = 2.98m \approx 0.5H$$

قوة الدفع الناتجة عن الحمولة q

$$p_{a,q} = q.H\frac{\cos\theta.\cos\alpha}{\cos(\theta-\alpha)}K_{ae} = 24*6*1*0.6387 = 92\,kN/m$$

$$Z_{p_{a,q}} = 0.66H = 0.66*6 = 3.96m$$

- محصلة القوى الأفقية

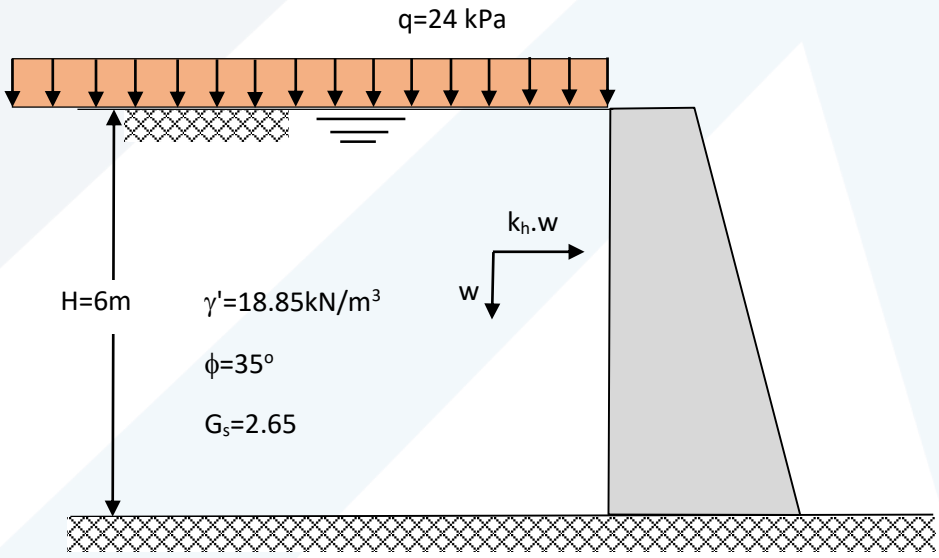
$$P_{tot,h} = (P'_{ae} + P_{a,q}) * \cos(\delta'_a + \theta_a) + P_w = (101.7+92) * \cos(17.5) + 180 = 364.7\,kN/m$$

- نقطة تطبيق محصلة القوى الأفقية

$$Z_{P_{tot,h}} = \frac{P'_{ae,h}.Z_{P_{ae}} + P_w.Z_{P_w} + P_{a,q,h}*Z_{pa,q}}{P_{tot,h}} = \frac{101.7*\cos(17.5)*2.98+180*2+92*\cos(17.5)*3.96}{364.7} = 2.73m$$

مثال 1. 15

جدار بارتفاع 6m يحجز خلفه تربة مفككة مغمورة بالماء مواصفاتها مبينة على الشكل 1. 49. بفرض k_h=0.2 (التسارع k_h . g باتجاه يبتعد عن الجدار وقوة العطالة k_h . w باتجاه الجدار) و k_v=0 و $\delta'_a=\phi'/2=17.5°$، محملة بحمولة سطحية شدتها 24kN/m² ممتدة على مساحة كبيرة خلف الجدار، وأن الماء تؤثر على الجدار في حالة الوضع الحر في الردميات. احسب دفع التربة ودفع الماء المؤثر على الجدار ومحصلة القوى الأفقية ونقطة تأثير هذه المحصلة.



الشكل 1. 49 : معطيات المثال 1. 15

الحل

- **ضغط الماء الهيدروستاتيكي**

$$P_w = \frac{1}{2}\gamma_w H^2 = \frac{1}{2}*10*6^2 = 180kN/m$$

$$Z_{P_w} = \frac{H}{3} = 2m$$

- **ضغط الماء الهيدروديناميكي**

$$P_{wd} = \frac{7}{12}k_h \gamma_w H^2 = \frac{7}{12}*0.2*10*6^2 = 42kN/m$$

$$Z_{P_{wd}} = 0.4H = 0.4*6 = 2.4m$$

- ضغط التربة الكلي

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi' - \theta - \bar{\beta})}{\cos^2\theta \cos\bar{\beta} \cos(\delta' + \theta + \bar{\beta})\left\{1 + \left[\frac{\sin(\delta' + \phi')\sin(\phi' - \alpha - \bar{\beta})}{\cos(\delta' + \theta + \bar{\beta})\cos(\theta - \alpha)}\right]^{1/2}\right\}^2}$$

and

$$\bar{\beta} = Tan^{-1}\left(\frac{k_{h,w}}{1 - k_v}\right) \quad and \quad k_{h,w} = \frac{G_s}{G_s - 1} k_h$$

$$k_{h,w} = \frac{2.65}{2.65 - 1} * 0.2 = 0.321$$

$$\bar{\beta} = Tan^{-1}\left(\frac{0.321}{1 - 0}\right) = 17.8^o$$

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(30 - 0 - 17.8)}{\cos^2 0 \cos 17.8 \cos(17.5 + 0 + 17.8)\left\{1 + \left[\frac{\sin(17.5 + 35)\sin(30 - 0 - 17.8)}{\cos(17.5 + 0 + 17.8)\cos(0 - 0)}\right]^{1/2}\right\}^2} = 0.4976$$

$$P'_{ae} = \frac{1}{2} * (18.85 - 10) * (1 - 0) * (6)^2 * 0.4976 = 79.3\, kN/m$$

تحديد نقطة تطبيق P_{ae}

$$P_{ae} = P_a + \Delta P_{ae}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\phi' - \theta_a)}{\cos^2\theta_a \cos(\delta'_a + \theta)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta'_a + \phi')\sin(\phi' - \alpha_a)}{\cos(\delta'_a + \theta_a)\cos(\theta - \alpha_a)}}\right]^2}$$

$$K_a = \frac{\cos^2(35 - 0)}{\cos^2(0) \cos(17.5 + 0)\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(17.5 + 35)\sin(35 - 0)}{\cos(17.5 + 0)\cos(0 - 0)}}\right]^2} = 0.246$$

$$P'_a = \frac{1}{2}\gamma' H^2 \; K_a = \frac{1}{2} * (18.85 - 10) * 6^2 * 0.246 = 39.2\, kN/m$$

$$\Delta P'_{ae} = P'_{ae} - P'_a = 79.3 - 39.2 = 40.1\, kN/m$$

$$Z_{\Delta P'_{ae}} = 0.6H = 0.6 * 6 = 3.6m$$

$$Z_{P'_{ae}} = \frac{\Delta P'_{ae} \cdot (0.6H) + P'_a \cdot \frac{H}{3}}{P'_{ae}} = \frac{40.1*3.6+39.2*2}{79.3} = 2.81m = 0.47H$$

قوة الدفع الناتجة عن الحمولة q

$$p_{a,q} = q.H\frac{\cos\theta.\cos\alpha}{\cos(\theta-\alpha)}K_{ae} = 24*6*1*0.6387 = 92kN/m$$

$$Z_{p_{a,q}} = 0.66H = 0.66*6 = 3.96m$$

- محصلة القوى الأفقية

$$P_{tot,h} = (P'_{ae} + P_{a,q})*\cos(\delta'_a + \theta_a) + P_w + P_{wd} = (79.3+92)*\cos(17.5)+180+42 = 385.4kN/m$$

- نقطة تطبيق محصلة القوى الأفقية

$$Z_{P_{tot,h}} = \frac{P'_{ae,h}.Z_{P'_{ae}} + P_w.Z_{P_w} + P_{wd}.Z_{P_{wd}} + P_{aq,h}*Z_{qa,q}}{P_{tot,h}}$$

$$= \frac{79.3*\cos(17.5)*2.81+180*2+42*2.4+92*\cos(17.5)*3.96}{385.4} = 265m$$