

# **Питання поточного контролю:**

- 1. Опір зсуву зв'язних ґрунтів**
- 2. Умова міцності виражена через головні напруження**
- 3. Тиск на вертикальну підпірну стінку**

# **Лекція №8**

**Допустимі навантаження на  
грунт**

**Методи кількісної оцінки  
ступеня стійкості укосів і  
схилів**

# **1. Допустимі навантаження на грунт**

**В залежності від призначення споруди допустимі навантаження на ґрунт устанавлюють:**

- 1. Виходячи з несучої здатності ґрунту;**
- 2. Виходячи із заданої величини переміщення споруди.**

**В першому випадку виходять із граничної рівноваги ґрунту на зсув або обмежують розміри області граничного (пластичного) стану ґрунту в масиві.**

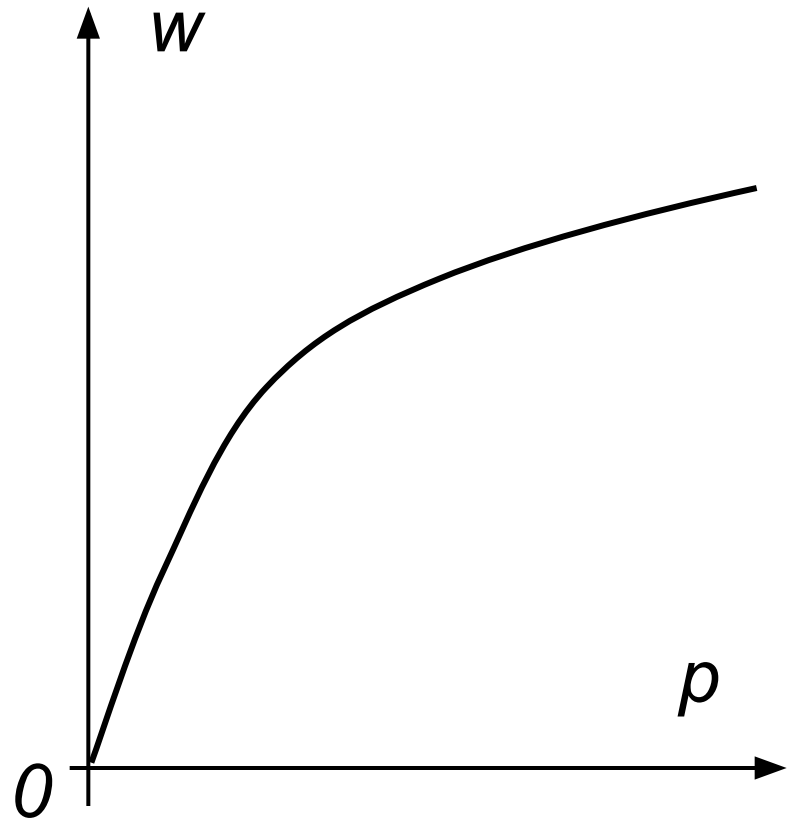
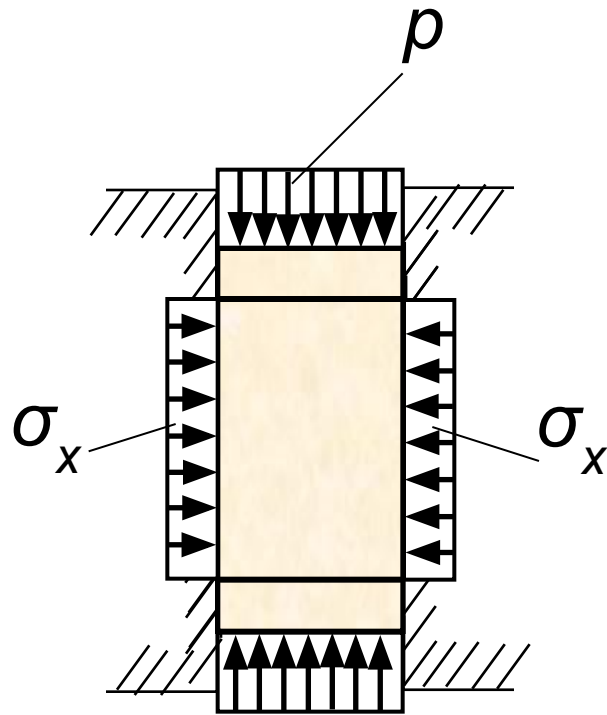
**В другому випадку виходять із експлуатаційних вимог відносно переміщення споруд (наприклад, вважають, що накопичене пластичне переміщення поверхні дорожнього покриття не повинно перевищувати деяку величину; обмежують осідання фундаменту під опорою моста, особливо нерозрізного).**

# 1.1 Визначення допустимого тиску, виходячи із несучої здатності ґрунту

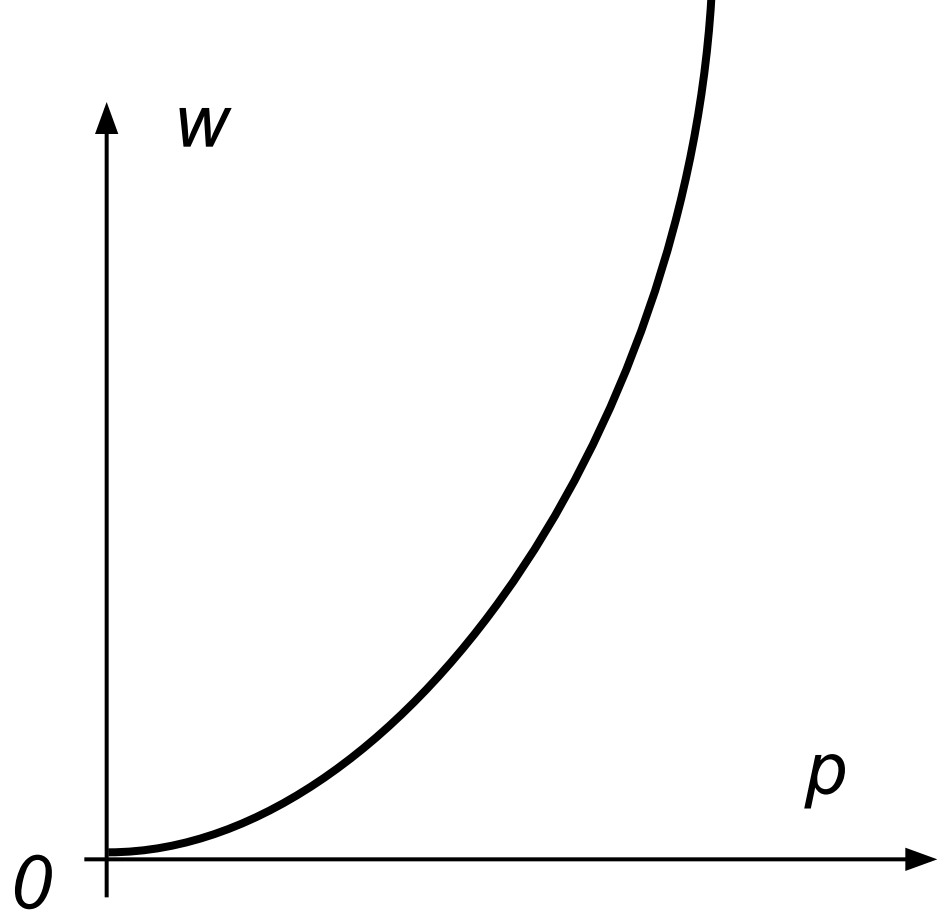
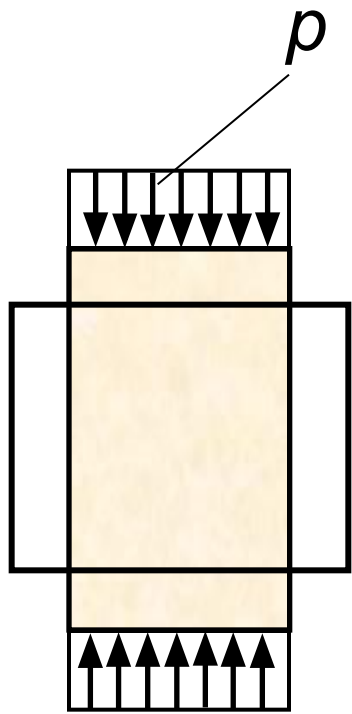
Розглянемо залежність вертикального переміщення поверхні ґрутового масиву  $w$  від вертикального тиску на цю поверхню.

Щоб оцінити характер залежності  $w(p)$  візьмемо два крайні випадки:

- а) розміщений під навантаженою площиною “стовп” ґрунту стискується без можливості бокового розширення;
- б) це же “стовп” ґрунту стискується при повній можливості бокового розширення, тобто сприймає “чисте” стиснення.

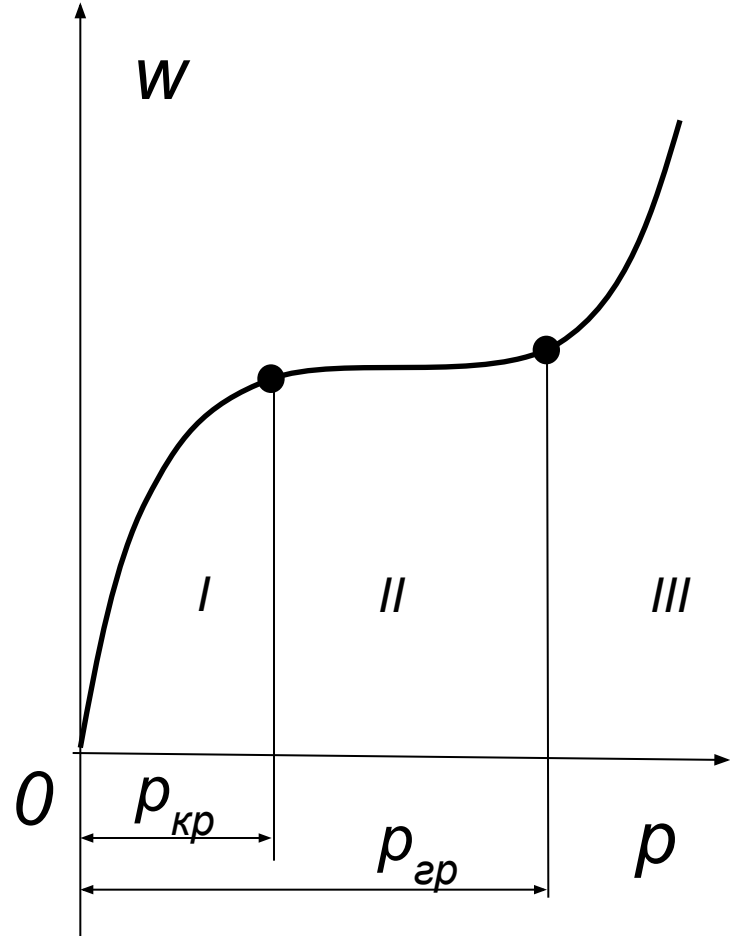
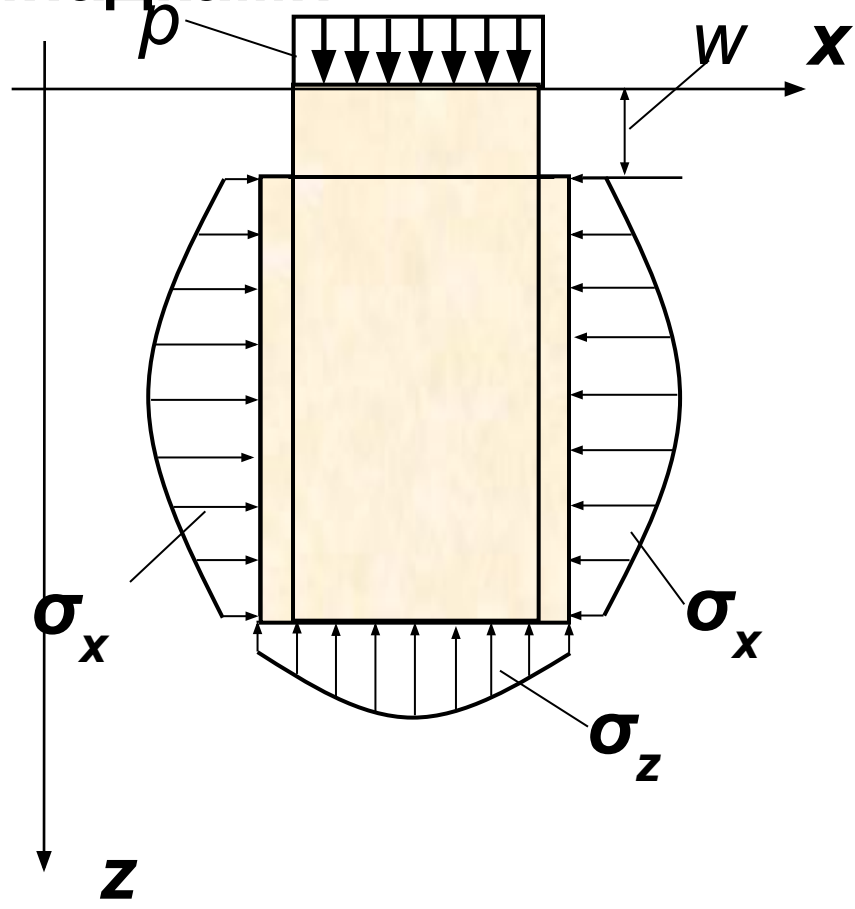


При стискуванні без можливості бокового розширення ґрунт доуцільнюється і зі збільшенням  $p$  збільшує боковий тиск (як у компресійному приладі). Тому темп росту  $w$  з ростом  $p$  поступово сповільнюється.



**При стискуванні з повною можливістю бокового розширення залежність  $w(p)$  має звичайний вигляд для випробовувань на чисте стискування: після лінійної ділянки темп росту переміщень з ростом тиску збільшується аж до руйнування.**

**В дійсності ґрунт деформується в умовах обмеженої можливості бокового розширення і фактична крива  $w(r)$  займає проміжне положення між викладеними граничними випадками.**



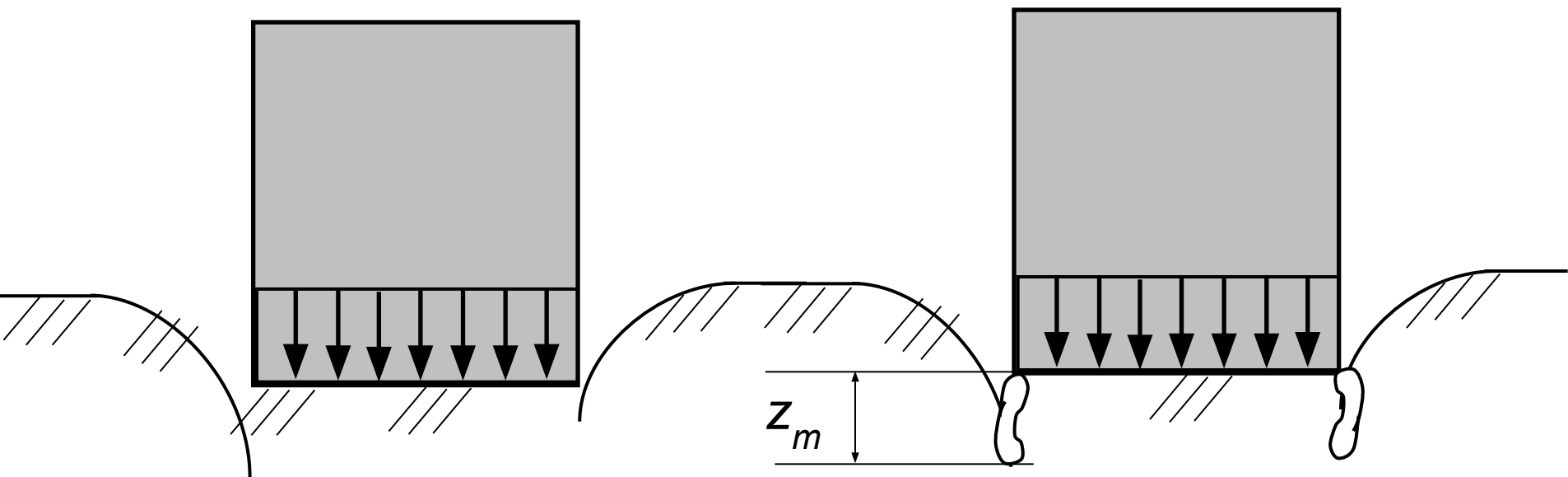


На кривій  $w(p)$  залежності переміщення від тиску визначають три ділянки, які відповідають трьом фазам роботи ґрунту: I – фаза ущільнення, II – фаза місцевих зсувів; III – фаза вичерпання несучої здатності. В I-й фазі відбувається ущільнення ґрунту під дією зовнішніх навантажень в умовах забезпеченої стійкості основи. В II-й фазі зі збільшенням тиску, крім ущільнення ґрунту, в краєвих зонах під контурами навантаженої площини з'являються пластичні області, всередині яких дотичні напруження від навантаження дорівнюють граничному опору зсуву (зони місцевих зсувів).

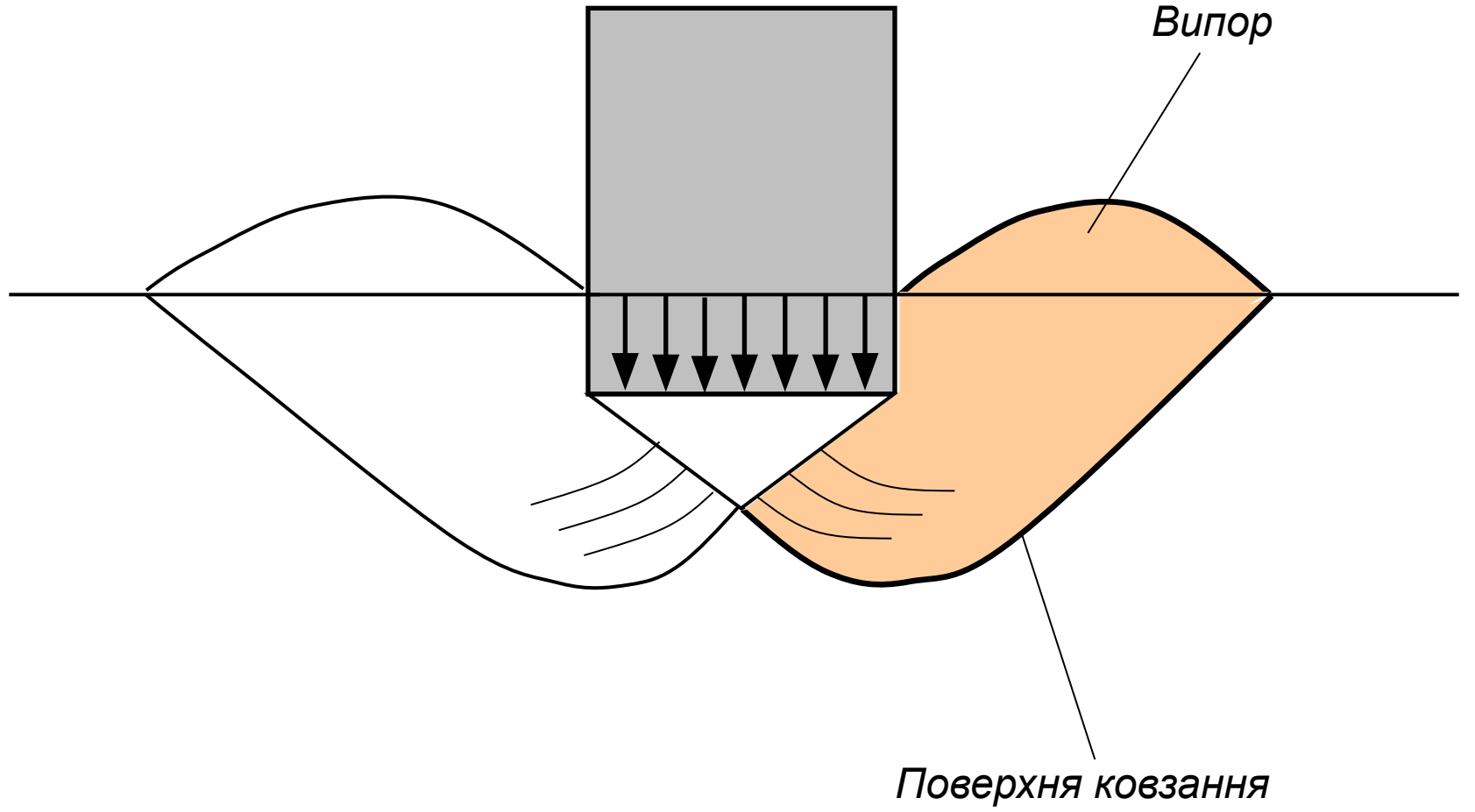
**При злитті зон місцевих зсувів з подальшим збільшенням тиску під навантаженою площиною створюється ущільнене ядро (трикутна область що заповнена точками). В III фазі - це ядро, просуваючись вглибину, подібно клину розсовує ґрунт, формується поверхня сковзання, по якій ґрунт зміщується і раптово відбувається випирання в один із боків.**

*I фаза*

*II фаза*



*III фаза*



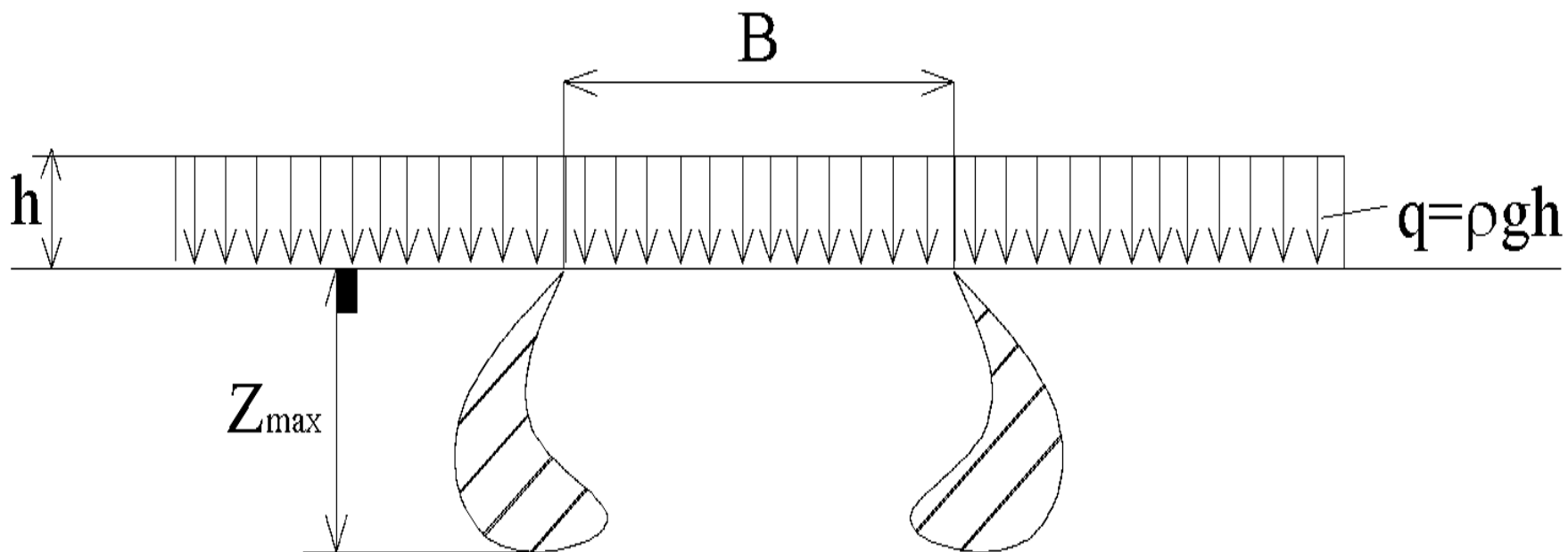
*Випор*

*Поверхня ковзання*

Між трьома фазами роботи ґрунту в основі виділяють дві границі:  $p_{кр}$  і  $p_{зр}$ . Критичний тиск  $p_{кр}$  встановлюють в залежності від допустимої максимальної глибини поширення  $Z_m$  пластичної зони. Якщо взагалі не допускати розвитку зон граничної рівноваги в ґрунті, то слід вважати глибину  $Z_m = 0$  і цьому відповідає початковий критичний тиск на ґрунт  $p_{кр}^{поч}$ . Він є цілком небезпечним. У будівельних нормах і правилах допускається розвиток пластичних зон до глибини, яка становить 1/4 найменшого розміру завантаженої площадки (1/4 ширини фундаменту):  $Z_{max} = B/4$ .

Виходячи з цього в нормативних документах встановлено допустимий тиск на ґрунт. Граничний тиск  $p_{gr}$  відповідає формуванню в ґрунті клиноподібного ядра, що розпирає ґрунт у боки.

Для смугового навантаження (плоска задача),



якщо знехтувати внутрішнім тертям ґрунту, тобто вважати  $\phi=0$  (це допустимо при  $\phi < 7\%$ ), то і  $p_{кр}^{поч}$  і  $p_{гр}$  можна визначити за формулами

$$p_{кр}^{поч} = \pi C + q \quad (1),$$

$$p_{гр} = (2 + \pi)C + q \quad (2)$$

Де  $C$  – питоме зчеплення в законі Кулона;  
 $q$  – бокове вертикальне привантаження.

Допустимий вертикальний тиск на ґрунт, встановлений виходячи з його несучої здатності, знаходиться між  $p_{кр}^{поч}$  і  $p_{гр}$ . При дозвільних  $\phi$ : критичний тиск (М.П. Пузиревський – М.М. Герсеванов, 1929р)

$$p_{кр} = \frac{\pi(\rho g z_{max} + q + C \cdot ctg\phi)}{ctg\phi + \phi - \frac{\pi}{2}} + q \quad (3)$$

звідки при

$$p_{кр}^{поч} = \frac{\pi(q + C \cdot ctg\phi)}{ctg\phi + \phi - \frac{\pi}{2}} + q \quad (4)$$



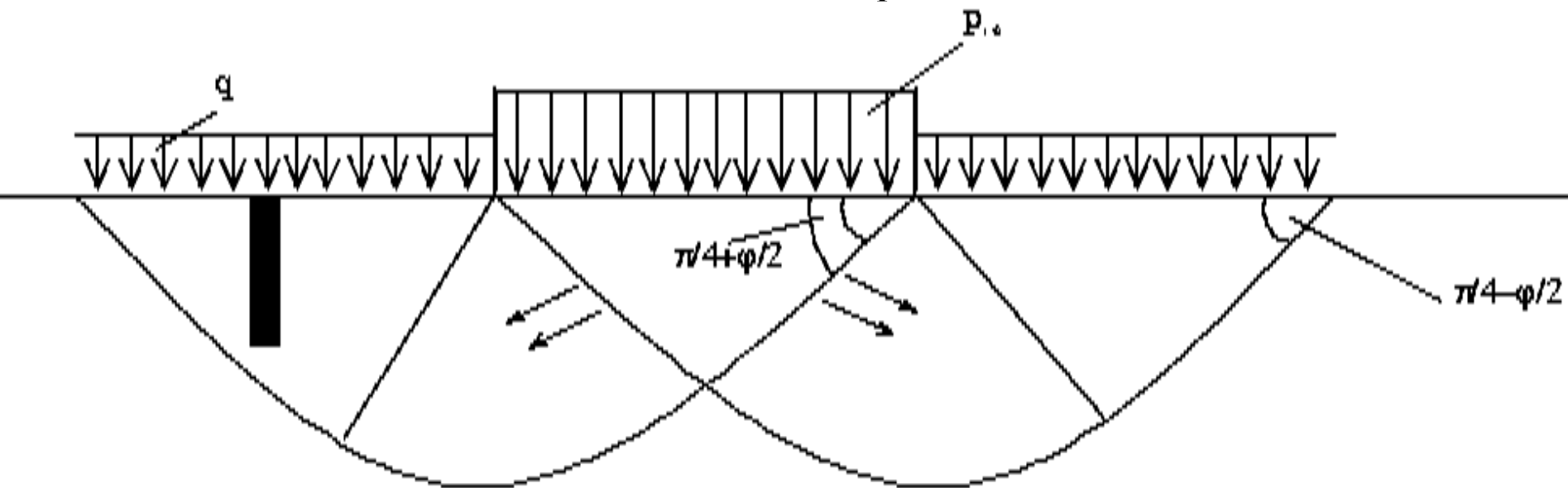
# Граничний тиск (Л.Прандтль, 1920р):

$$p_{gp} = (q + C \cdot ctg\varphi) \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} e^{\pi tg\varphi} - C \cdot ctg\varphi \quad (5)$$

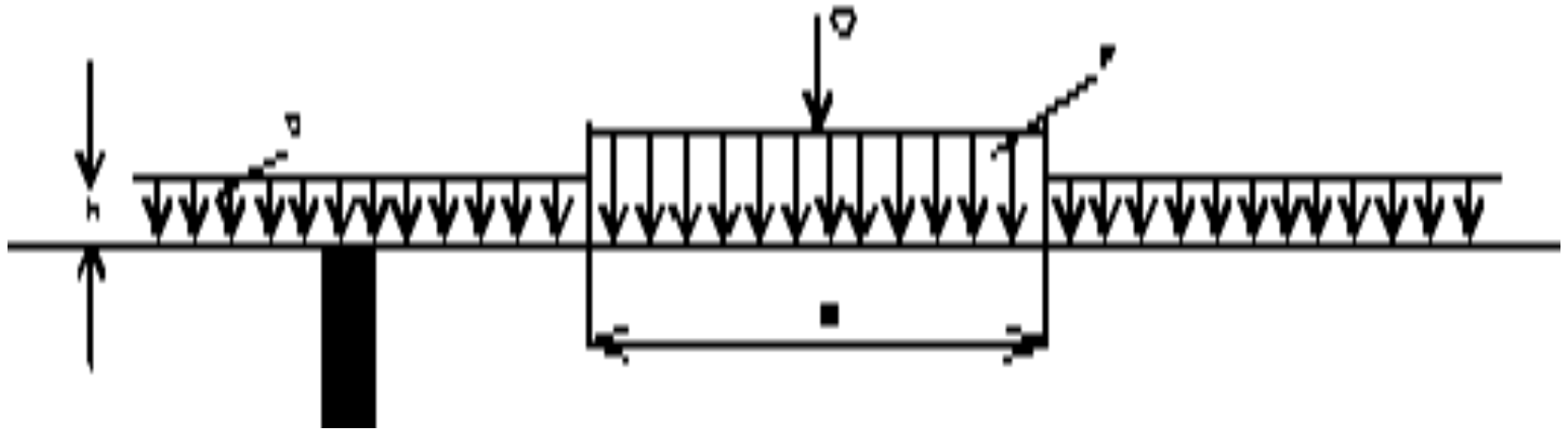
При  $\varphi \rightarrow 0$  з формули (4) приходимо до (1), а з (5) до (2)

Отже якщо  $q=0$  і  $\varphi=0$ ,  
то

$$\frac{p_{gp}}{p_{кр}^{поч}} = \frac{(2 + \pi)C}{\pi C} \approx 1,64$$



Приклад. Оцінити початкове критичне і граничне навантаження на ґрунт від довгого фундаменту. Глибина закладання фундаменту 1,5м; ширина підшви 3м; щільність ґрунту  $\rho=2\text{т/м}^3$ ;  $\phi=6^\circ$ ;  $C=0,02\text{МПа}$ .



$$1. \quad q = \rho g h = 2 \frac{\text{т}}{\text{м}^3} \cdot 10 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 1,5 \text{ м} = 30 \cdot 10^3 \frac{\text{кГ}}{\text{м} \cdot \text{с}} = 0,03 \text{ Мпа}$$

$$2. \quad p_{кр}^{noch} = \pi C + q = 3,14 \cdot 0,02 \text{ МПа} + 0,03 = 0,093 \text{ МПа}$$

$$Q_{кр}^{noch} = 0,093 \text{ МПа} \cdot 3 \text{ м} = 0,093 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot 3 \text{ м} =$$

$$= 0,279 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 297 \frac{\text{кН}}{\text{м}} (28 \text{ тс} / \text{м})$$

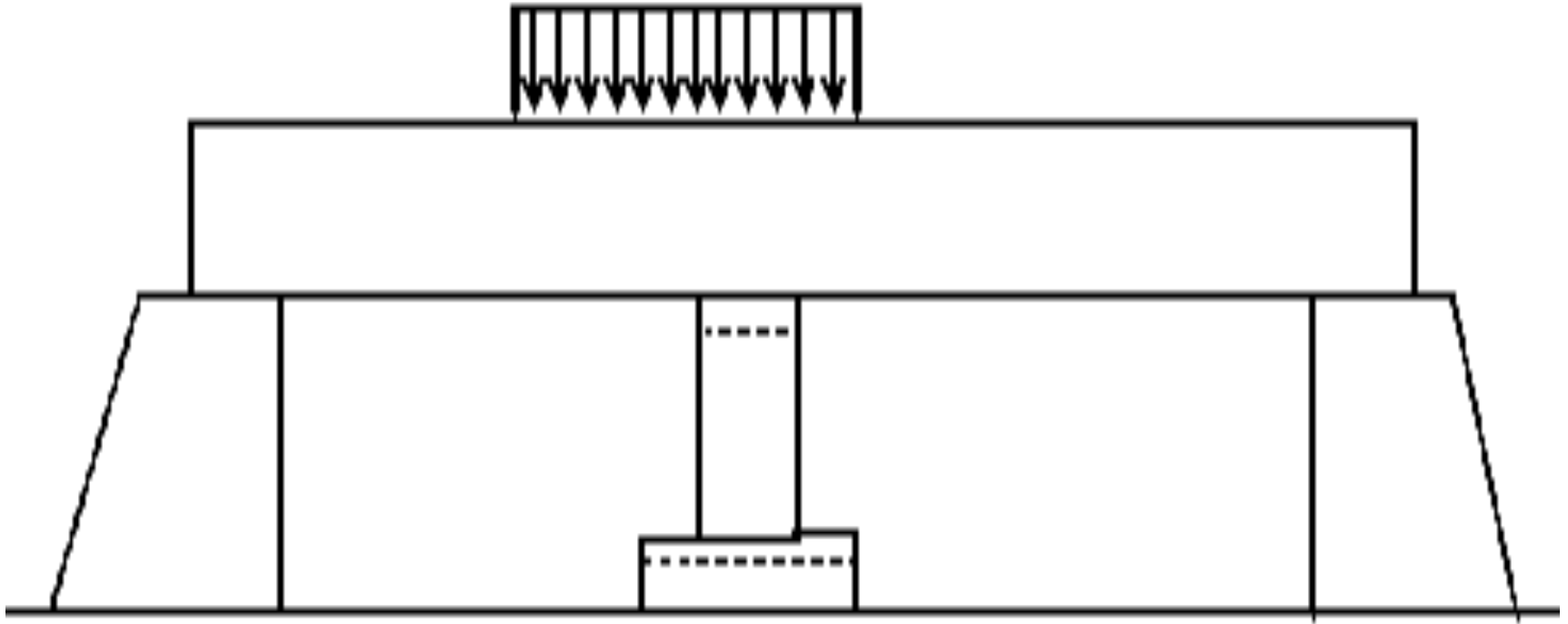
$$3. \quad p_{зр} = (2 + \pi)C + q = 5,14 \cdot 0,02 + 0,03 = 0,133 \text{ МПа}$$

$$Q_{зр} = 0,133 \text{ МПа} \cdot 3 \text{ м} = 399 \frac{\text{кН}}{\text{м}} (40 \text{ тс} / \text{м})$$

## **1.2 Визначення допустимого тиску виходячи з обмеженого переміщення поверхні масиву**

**В ряді випадків допустимий тиск на ґрунт встановлюється не в залежності від несучої здатності ґрунту (тобто не в залежності від показників міцності ґрунту  $C$  і  $\phi$ ), а виходячи з обмеження переміщення поверхні ґрунтового масиву. При цьому прагнуть запобігти надмірних осідань і прогинів споруди, які викликають перепони для її нормальної експлуатації.**

**Наприклад, надмірне осідання опори  
нерозрізного моста може викликати небезпечні  
напруження в прогоні будівлі.**



Якщо грунт піддається дії повторних навантажень, то обмежують значення накопиченого залишкового переміщення поверхні (земляного полотна автомобільних доріг і залізниць, ґрунту під фундаментами станків і т.і).

Випробовування ґрунтів повторними навантаженнями дозволили визначити, що залишкові переміщення  $w_N$  штампу, встановленого на поверхні ґрунтового масиву, після  $N$  навантажень приблизно пропорціональне його переміщенню  $w_1$  після прикладання першого навантаження і логарифмічно залежать від  $N$ .

$$w_N = w_1 (1 + b \lg N)$$

де  $b$  – емпірична постійна (для суглинків і супісків

**Якщо стосовно, до навантаження, розподіленого по площі круга, визначити  $w_1$  за формулою**

$$w_1 = \frac{pD(1 - \nu^2)}{E}$$

**То**

$$w_N = \frac{pD(1 - \nu^2)}{E} (1 + b \lg N)$$

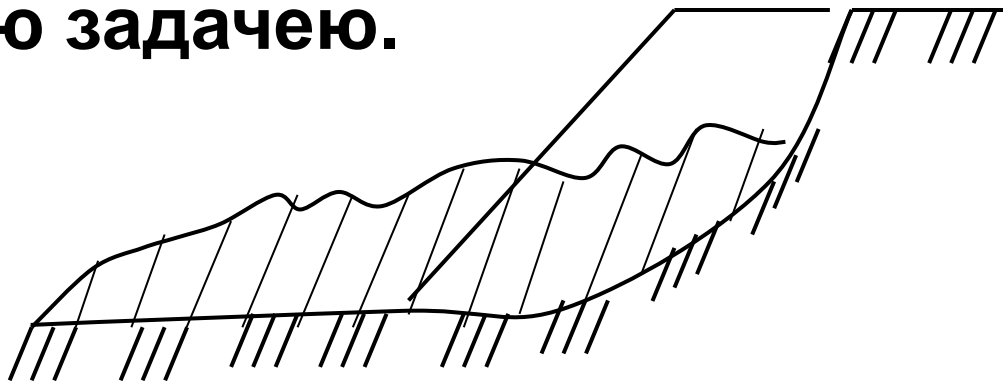
**звідки, обмеживши  $w_N$  значення  $w_{\text{доп}N}$ , одержимо допустиме значення тиску**

$$P_{\text{доп}} = w_{N_{\text{доп}}} \cdot \frac{E}{D(1 - \nu^2)} (1 + b \lg N)^{-1}$$

## **2. Методи кількісної оцінки ступеня стійкості укосів і схилів**



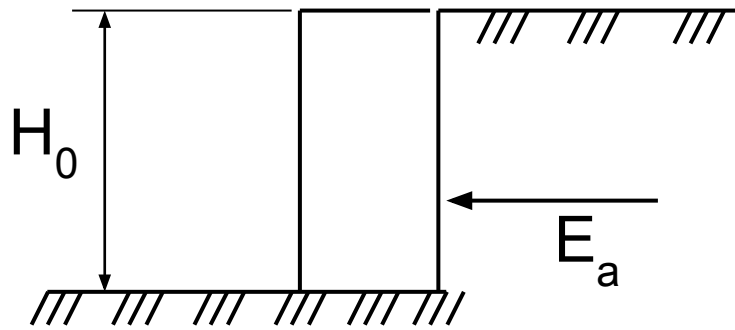
**При розробці котлованів, влаштуванні насипів, виїмок, зведення споруджень на схилах у ряді інших випадків необхідно оцінити стійкість масиву ґрунту в укосі. Круті укоси можуть привести до аварії: під дією власної ваги ґрунт сповзає по криволінійній поверхні ковзання (рис) чи по підстилаючій породі. Занадто пологі укоси сполучені з великим обсягом земляних робіт, здорожчують будівництво, приводять до непотрібної втрати родючих ділянок землі, що прилягають до дороги (на сьогоднішній день близько 5% земної поверхні займають автомобільні і залізничні дороги). Тому правильне визначення допустимої крутизни укосу є важливою задачею.**



## 2.1 Стійкість вертикального укосу

Дано:  $\rho$ ,  $C$ ,  $\varphi$ .

$H_{гр} = ?$



Визначимо приблизно максимальну висоту вільного устою вертикального укосу. Для цього уявимо, що укіс підкріплений підпірною стінкою висотою  $H_0$ . Знайдемо горизонтальний тиск на цю стінку

$$E_a = \frac{\rho g H_0^2}{2} \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2cH_0 \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Оскільки в дійсності стінка відсутня, варто вважати рівнодіючу горизонтального тиску на стінку рівною нулю:

$$E_a = 0; \quad \frac{\rho g H_0^2}{2} \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2cH_0 \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) = 0$$

**Звідси висота вертикального укосу, що не потребує підкріплення:**

$$H_0 = \frac{4C}{\rho g \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{4C \cdot \cos \alpha}{\rho g (1 - \sin \varphi)} \quad (1)$$

**На практиці в цю формулу вводять подвійний коефіцієнт запасу і визначають граничну висоту вертикального укосу, що зберігає стійкість без підпірної стіни по формулі**

$$H_{gp} = \frac{(2) \quad 2C}{\rho g \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}$$

**Метеорологічні впливи можуть знизити  $C$ . Тому незахищені вертикальні укоси можуть існувати не довго.**

**Примітка: Якщо**

$$\sigma_3(z) = \rho g H_{gp} \operatorname{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) - 2C \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) = 0$$

**то тоді відразу**

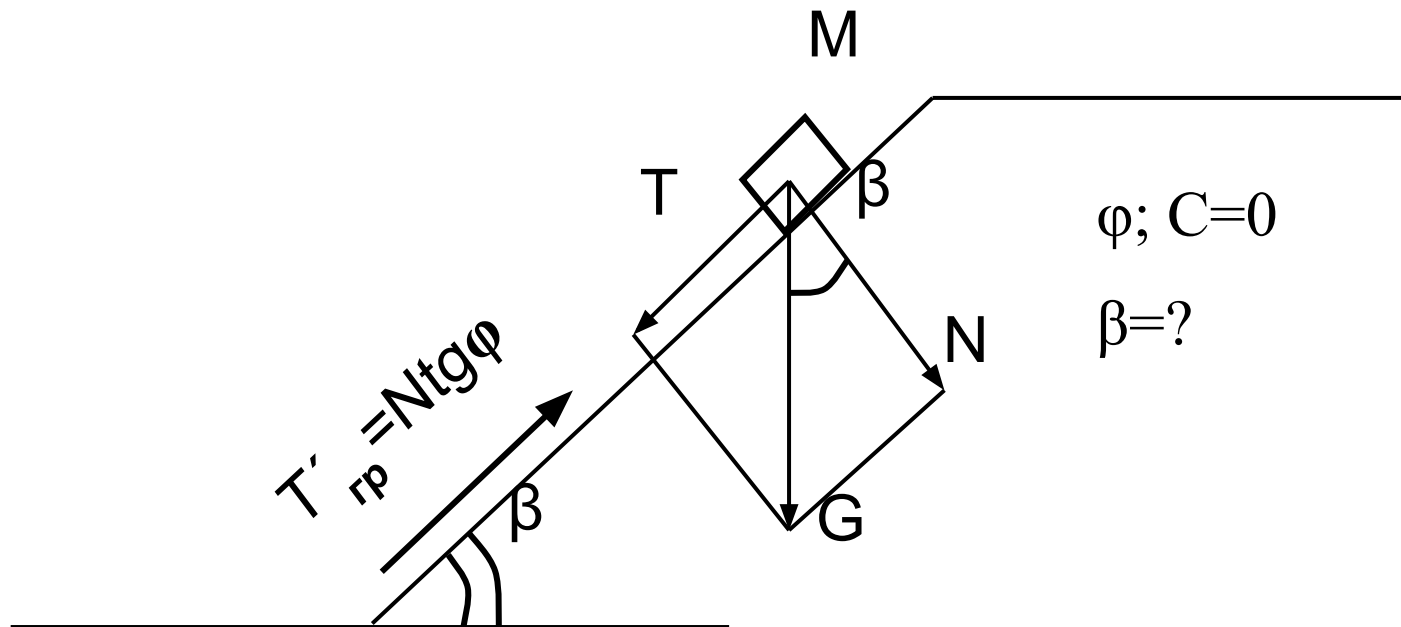
$$H_{gp} = \frac{2C}{\rho g \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)}$$

**Можна розглянути дві умови і наприкінці  $H_{gp}$  брати найменшим.**

**З формули (1) випливає, що при  $C=0$ ,  $H_0=0$ , тобто незв'язний ґрунт не може мати стійкість верхнього укосу. Чим більше  $\rho$ , тим менше  $H_0$ . Висота стійкого вертикального укосу (чи борта котловану) пропорційна  $C$ . Але метеорологічні впливи можуть знизити  $C$ . Тому не захищений вертикальний укис не може існувати довго.**

## 2.2 Стійкість укосу ідеального сипучого ґрунту

Розглянемо укіс ідеального сипучого ґрунту, у якого зчеплення дорівнює нулю (це приблизно відповідає великоуламковим і піщаним ґрунтам).



Нехай на укосі вільно лежить тверда частка ґрунту  $M$ . Розкладемо її вагу на складові нормальну  $N$  і дотичну до лінії укосу. Дотична складова прагне зрушити частку до підніжжя укосу, але їй протидіє сила тертя

де –  $T' = N \cdot f = N \cdot \operatorname{tg} \varphi$  коефіцієнт тертя. Щоб частка залишалася нерухомою, тобто не зрушувалася до підніжжя укосу, повинне бути виконана умова

$$T < T'$$

так як  $T = G \sin \beta$ , а  $T' = N \operatorname{tg} \varphi = G \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi$

то умова зсувостійкості будь-якої частки  
приймає вид

$$G \cdot \sin \beta \leq G \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

$$\operatorname{tg} \beta \leq \operatorname{tg} \varphi$$

$$\beta \leq \varphi$$

тобто  $\max \beta = \varphi$  Таким чином, граничний кут  
укосу сипучого ґрунту дорівнює куту  
внутрішнього тертя.

$$\beta_{\max} = \varphi$$

Це справедливо тільки для сипучих ґрунтів.  
Такий кут складає з горизонтальною площиною,  
твірна конуса, що виходить при вільному  
відсипанні ґрунту.

## 2.3 Стійкість похилого укосу зв'язного ґрунту

*Увага до проблеми стійкості укосів підсилилося перед I світовою війною 1914-1918рр. До цього часу відбулися катастрофічні руйнування укосів Панамського каналу і земляних гребель у США, відбулося сповзання укосів виїмок на дорогах у Швейцарії (в одній з таких катастроф загинуло 40 чоловік). Згодом було розроблено кілька методів розрахунку ґрунтів на стійкість.*

Найпростішими є методи розрахунку, у яких заздалегідь задають форму поверхні ковзання: наприклад, площину чи циліндричну поверхню.

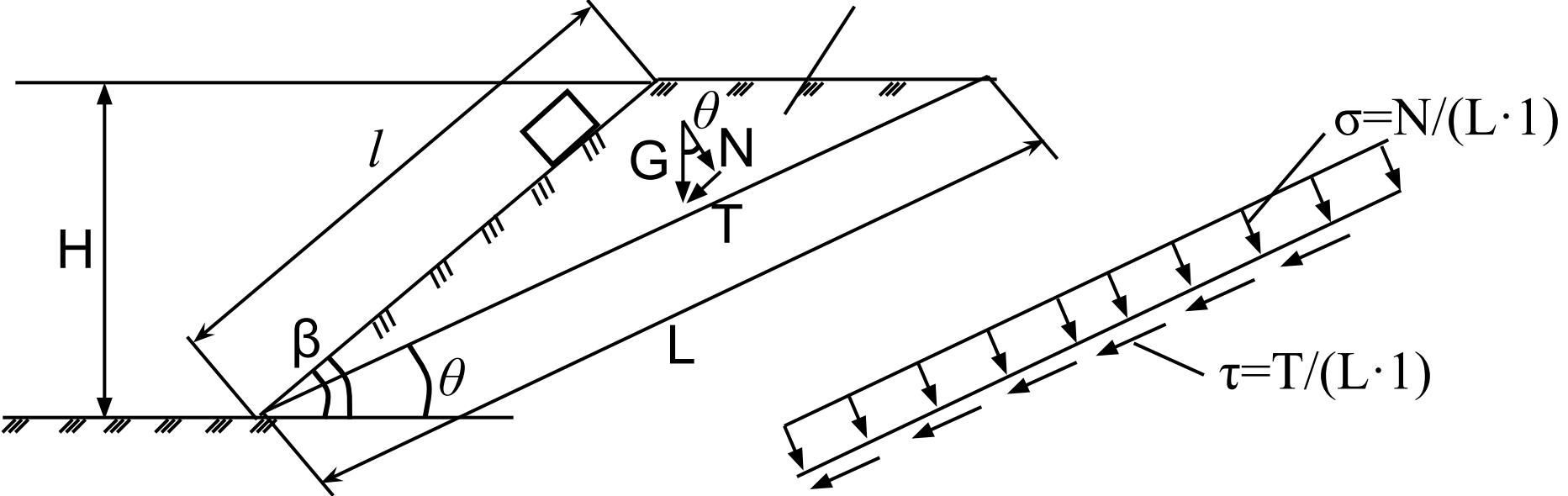


# 1. Розрахунок укосу на стійкість по методу плоскої поверхні ковзання.

Розглянемо укіс зв'язного ґрунту з кутом закладення  $\beta$ . Ґрунт має щільність  $\rho$ , кут внутрішнього тертя  $\varphi$ , зчеплення  $C$ .

Дано:  $\rho, \varphi, C, \beta$ . Знайти  $N_{гр}$  -?

Призма обвалення



**Задача полягає у визначенні граничної висоти укосу.**

**Допустимо, що поверхня ковзання є площина, що складає кут  $\theta$  з горизонтальною площиною. Допустимо також, що вага призми обвалення рівномірно розподілена по цій площині ковзання.**

**Маємо**

$$l = \frac{H}{\sin \beta} \qquad L = \frac{H}{\sin \theta}$$

**вага призми руйнування довжиною 1м уздовж  
укошу**

$$G = \frac{l \cdot L}{2} \sin(\beta - \theta) \cdot 1\text{м} \cdot \rho g$$

**Середнє напруження по площині ковзання**

$$\bar{\tau} = \frac{T}{L \cdot 1} = \frac{G \sin \theta}{L} \qquad \bar{\sigma} = \frac{N}{L \cdot 1} = \frac{G \cos \theta}{L}$$

## За умовою міцності Кулона повинно бути

$$\bar{\tau} < \bar{\sigma} \operatorname{tg} \varphi + C \quad \bar{\tau}_\alpha = \bar{\tau} - \bar{\sigma} \operatorname{tg} \varphi < C, \quad (2)$$

$$\bar{\tau}_\alpha = \frac{G \sin \theta}{L} - \frac{G \cos \theta \cdot \operatorname{tg} \varphi}{L} = \frac{G}{L} (\sin \theta - \cos \theta \cdot \operatorname{tg} \varphi) = \frac{G}{L \cos \varphi} \sin(\theta - \varphi)$$

так як  $\sin A \cdot \cos B - \sin B \cdot \cos A = \sin(A - B)$

то враховуючи (1)  $\bar{\tau}_\alpha = \frac{\rho g l}{2 \cos \varphi} \sin(\beta - \theta) \sin(\theta - \varphi)$  (3)

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\tau}_\alpha}{d\theta} &= \frac{\rho g l}{2 \cos \varphi} [\sin(\beta - \theta) \cos(\theta - \varphi) - \cos(\beta - \theta) \sin(\theta - \varphi)] = \\ &= \frac{\rho g h}{2 \cos \varphi} \sin[(\beta - \theta) - (\theta - \varphi)] = \frac{\rho g l}{2 \cos \varphi} \sin[\beta - 2\theta + \varphi] = 0 \end{aligned}$$

$$\theta_m = \frac{\beta + \varphi}{2} \quad (4),$$

пoдставивши в (3) враховуючи що

$$(\beta - \theta_m) = \beta - \frac{\beta + \varphi}{2} = \frac{\beta - \varphi}{2}$$

$$(\theta_m - \varphi) = \frac{\beta + \varphi}{2} - \varphi = \frac{\beta - \varphi}{2}$$

**ЗНАХОДИМО**

$$\bar{\tau}_{am} = \frac{\rho g l}{2 \cos \varphi} \sin^2 \left[ \frac{\beta - \varphi}{2} \right] = \frac{\rho g H}{2 \sin \beta \cos \varphi} \sin^2 \left[ \frac{\beta - \varphi}{2} \right]$$

## За умовою міцності в граничному стані

$$\tau_{ат} = C$$

$$\frac{\rho g H}{2 \sin \beta \cos \varphi} \sin^2 \left[ \frac{\beta - \varphi}{2} \right] = C$$

звідки отримуємо формулу Харра :

$$H_{зр} = \frac{2C \sin \beta \cos \varphi}{\rho g \sin^2 \left( \frac{\beta - \varphi}{2} \right)}.$$

При  $\beta = \frac{3\pi}{2}$  формули Харра

$$\begin{aligned}
 H_{gp} &= \frac{2C \sin \frac{\pi}{2} \cos \varphi}{\rho g \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{2C \cos \varphi}{\rho g \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{2C \cos \varphi - \cos \frac{\pi}{2}}{\rho g \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} = \\
 &= \frac{2C \cos \frac{\varphi + \frac{\pi}{2}}{2} \cdot \sin \frac{\varphi + \frac{\pi}{2}}{2}}{\rho g \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{4C \sin \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{2} \right)}{\rho g \sin \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{2} \right)} = \frac{4C \cos \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{2} \right)}{\rho g \sin \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{2} \right)} = \\
 &= \frac{4C}{\rho g} \frac{1}{\operatorname{tg} \left( \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{2} \right)}
 \end{aligned}$$

## Приклад.

1. У ядро греблі Нурекської ГЕС відсипали дресвяний супісок, що мав щільність ґрунту  $\rho = 2,2 \text{ т/м}^3$ , кут внутрішнього тертя  $27^\circ$  і зчеплення  $C = 0,086 \text{ МПа}$ . Оцінити критичну висоту укосу з кутом закладення  $45^\circ$ .

Маємо

$$\sin \beta = \sin 45^\circ = 0,707,$$

$$\cos \varphi = \cos 27^\circ = 0,891,$$

$$\frac{1}{2}(\beta - \varphi) = \frac{1}{2}(45 - 27) = 9^\circ$$

$$\sin^2 \left( \frac{\beta - \varphi}{2} \right) = \sin^2 9^\circ = 0,1564^2 = 0,02446$$



$$\begin{aligned}
 H &= \frac{2c \sin \beta \cos \varphi}{\rho g \sin^2 \left( \frac{\beta - \varphi}{2} \right)} = \frac{2 \cdot 0,086 \text{ мПа}}{2,25 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} \cdot \frac{0,707 \cdot 0,891}{0,1564^2} = \\
 &= \frac{2 \cdot 86 \cdot 10^3 \text{ Па}}{2,25 \cdot 10^8 \cdot 9,8 \frac{\text{Па}}{\text{м}}} \cdot 25,75 = 200 \text{ м}
 \end{aligned}$$

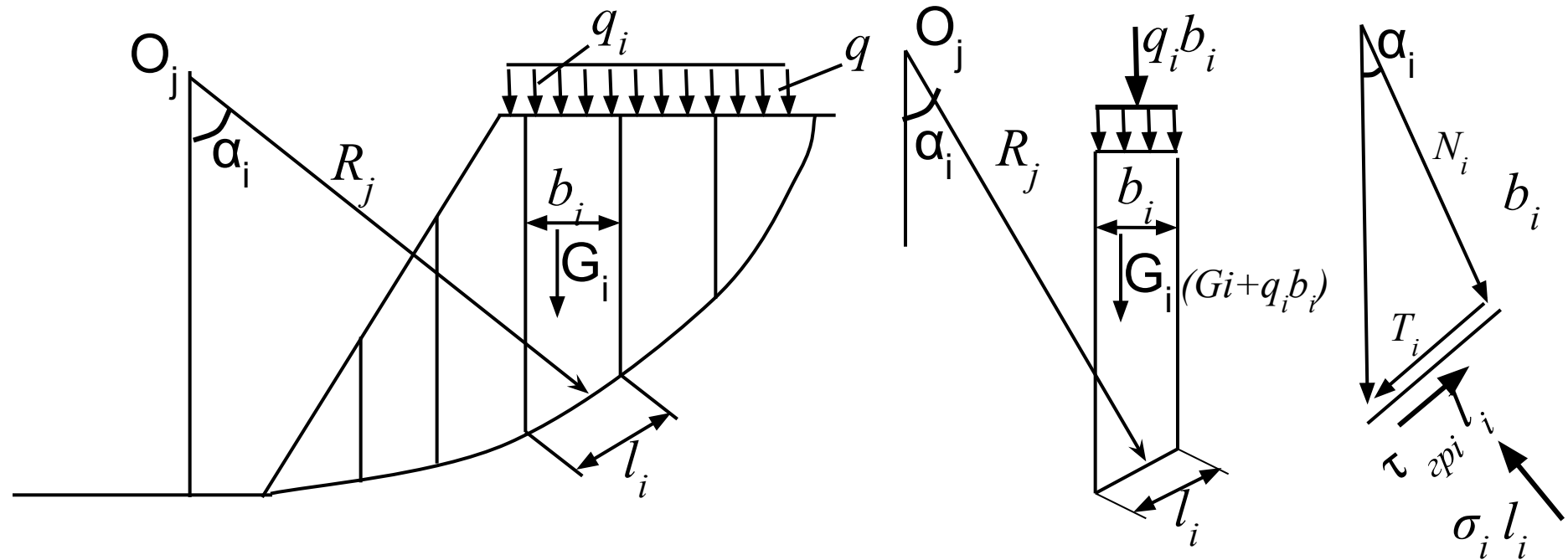
## **2. Розрахунок укосу на стійкість по методу відсіків і циліндричної поверхні ковзання.**

**Розглянемо укіс ґрунту, що має щільність  $\rho$ , кут внутрішнього тертя  $\phi$  і зчеплення  $C$ . На горизонтальній поверхні діє навантаження  $q$ , наприклад, від споруди. Завдання полягає в розрахунку укосу на стійкість.**

**Зробимо припущення, що поверхня ковзання є кругло-циліндричною. Це припущення основано на численних вимірах у природі. Однак положення цієї поверхні заздалегідь не відомо: найбільш не вигідне її положення повинне бути визначене розрахунком.**

Методика розрахунку полягає в наступному. Виділяємо 1м по довжині укусу перпендикулярно до площини креслення. Задаємося положенням центра  $O_j$  і значенням радіуса  $R_j$  поверхні ковзання. Сповзаючу частину ґрунту розділяємо на «відсіки» рівної ширини з вертикальними гранями. Тиском «відсіків» один на одного і тертям сусідніх відсіків по вертикальних гранях знехтуємо.

Дано:  $\rho$ ,  $\varphi$ ,  $C$ ,  $\beta$ . Знайти  $N_{гр}$  -?



**Сума ваги відсіку з навантаженням яке приходить на нього розкладається на нормальну  $N_i$  і дотичну  $T_i$  складові, прикладені в точці перетину середньої лінії відсіку з поверхнею ковзання**

$$N_i = (G_i + q_i b_i) \cos \alpha_i,$$

$$T_i = (G_i + q_i b_i) \sin \alpha_i$$

**Зсуваючими являються сили  $T_i$ , а утримуючими – сили граничного опору зсуву**

$$l_i \tau_{zp} = (\sigma_i \operatorname{tg} \varphi + c) l_i = N_i \operatorname{tg} \varphi + c l_i = \\ (G_i + q_i b_i) \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi + c l_i$$

$O_j$  При положенні центра кривої ковзання в точці

Момент сил, що утримують укіс від зрушення:

$$M_{ymp}^j = \sum_{i=1}^n [(G_i + q_i b_i) \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi + c l_i] R_j =$$

$$= R_j \left[ c L_j + \operatorname{tg} \varphi \sum_{i=1}^n (G_i + q_i b_i) \cos \alpha_i \right]$$

Тут  $n$ -число відсіків,  
ковзання.

$L_j = \sum_{i=1}^n l_i$  довжина дуги

Момент сил, що прагнуть зрушити укіс

$$M_{зр}^j = \sum_{i=1}^n T_i R_j = \sum_{i=1}^n (G_i + q_i b_i) \sin \alpha_i \cdot R_j =$$

$$= R_j \sum_{i=1}^n (G_i + q_i b_i) \sin \alpha_i$$

**Коефіцієнт запасу стійкості (при даному положенні центра окружності  $O_j$  і її радіусі  $R_j$ )**

$$k_j = \frac{M_{ymp}^d}{M_{зр}^j} = \frac{cL_j + tg\varphi \sum_{i=1}^n (G_i + q_i b_i) \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n (G_i + q_i b_i) \sin \alpha_i}$$

**Найбільш небезпечною є поверхня ковзання, для якої коефіцієнт запасу стійкості мінімальний. Цей мінімальний коефіцієнт запасу в залежності від класу спорудження не повинний бути менш 1,5 – 1,8.**

Положення найбільш небезпечної поверхні ковзання залежить від обрису укосу і величин  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $C$ ,  $q$ . Тому повторюють багаторазово розрахунок при різних  $O_j$  і  $R_j$ , і зіставляючи  $k_j$ , знаходять  $\min k_j$ .

Для скорочення кількості спроб запропоновано кілька графоаналітичних прийомів. Один з них запропонований Фелленіусом для випадку, коли зовнішнє навантаження відсутнє. Центр  $Q_j$  кругової поверхні ковзання рекомендується шукати на прямій АВ. При призначенні радіуса  $R_j$  приймають, що кругло-циліндрична поверхня ковзання проходить через підшву укосу, якщо насип зведена з щільного ґрунту. Якщо ж ґрунт основи слабкий, то крива ковзання може захопити основу.

