

W tym celu z punktu  $S$  przeprowadzamy proste mające kierunek sił  $R$ , reakcyj na dany klin ziemi pozostałej, przyczem reakcja  $R_4$  będzie miała tu kierunek pionowy, gdyż jest nachylona o kąt  $90^\circ - \psi_s$  względem prostej  $AC^{IV}$  nachylonej pod kątem  $\psi_s$  względem poziomu (rys. 422a).

Siły  $R$  tworzą między sobą kąty  $\omega$ . Wzdłuż prostej pionowej  $SR_4$  odkładamy odcinki  $e$  przedstawiające kolejno ciężary klinów  $ABC'$ ,  $C'BC''$  i t.d., na które klin  $BAC^{IV}$  został podzielony. Zamykając trójkąty  $e_1 Sf_1$ ,  $e_2 Sf_2$  i t.d. prostymi, równoległymi do kierunku  $Z$  nachylonego pod kątem  $\psi_m$  względem normali do powierzchni muru  $AB$  (rys. 422b), otrzymamy dla różnych klinów odłamu wielkości  $\dot{Z}$ , jako odcinki  $e_1 f_1$ ,  $e_2 f_2$  i t.d.

Łączymy wreszcie krzywą wszystkie punkty  $f$ , a do otrzymanej krzywej przeprowadzamy styczną równoległą do  $SR_4$ . Prosta  $\alpha\alpha$  (rys. 422a) równoległa do  $SR_4$  i przechodząca przez punkt styczności da nam

$$ef = Z = \max \dot{Z}$$

Aby znaleźć odpowiednie położenie płaszczyzny odłamu, odkładamy przedewszystkiem na rys. 422b od prostej  $SR_4$  kąt  $R_4 S (R_0)$  równy kątowi  $BAC^{IV}$  i zauważamy, iż kąty  $\Omega_1, \Omega_2$  i t.d., określające na rys. 422a możliwe położenia płaszczyzny odłamu będą równe kątom  $\Omega_1, \Omega_2$  i t.d. odkładanym od prostej  $S(R_0)$  na rys. 422b i określającym kierunki  $R_1, R_2$  i t.d. reakcyj na możliwe kliny odłamu pozostającej masy ziemnej.

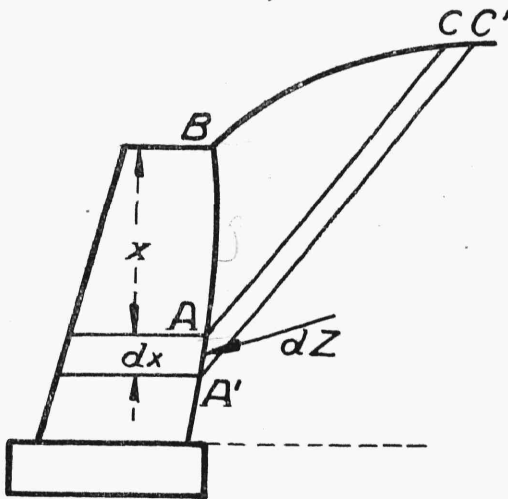
Znalazszy punkt  $f$  i kierunek reakcji  $R$ , odpowiadający największemu parciu ziemi  $Z$ , znajdujemy kąt  $\Omega$  określający położenie tej reakcji a zarazem położenie płaszczyzny odłamu (vid. rys. 422a).

#### 4. Parcie jednostkowe i punkt zaczepienia siły $Z$ .

Podstawowe założenia teorii Coulomb'a nie są wystarczające do wyznaczenia punktu zaczepienia parcia ziemi na mur. Aby to wyznaczenie umożliwić, robi się zwykle założenie dodatkowe, że masa ziemna za murem podporowym znajduje się w stanie równowagi granicznej na całej wysokości muru. Założenie to należy rozumieć w ten sposób, że nie tylko klin odłamu, odpowiadający całkowitej wysokości muru, znajduje się w stanie równowagi granicznej (rys. 423), lecz również i każdy klin, odpowiadający pewnej części muru o wysokości  $x$ . Mając to na uwadze, możemy ustalić potrzebne w danym razie pojęcie różniczki parcia ziemi.

Przypuśćmy, że klin  $ABC$  (rys. 423) wywołuje na mur parcie  $Z$  a klin  $A'BC'$  parcie  $Z_1$ . Przyrost parcia ziemi  $dZ = Z_1 - Z$ , wywołany przejściem od przekroju muru oddalonego od górnej krawędzi o  $x$  do przekroju

oddalonego o  $x + dx$ , nazywamy różniczką parcia ziemi. Przyrost ten wyraża parcie ziemi na nieskończenie małe pole powierzchni  $AA'$ .



Rys. 423.

Jeżeli przez  $s$  oznaczymy odległość punktu  $A$  od punktu  $B$  liczoną podług tylnej powierzchni muru, wówczas pochodna  $\frac{dZ}{ds} = f'(s)$  oznaczać będzie jed-

nostkowe parcie ziemi na tylną powierzchnię muru (o długości prostopadłej do płaszczyzny rysunku, równej 1). W ten sam sposób pochodna  $\frac{dZ}{dx} = f'(x) = z$

wyraża jednostkowe parcie ziemi na powierzchnię pionową, t. j. parcie ziemi w odniesieniu do jednostki powierzchni rzutu pionowego muru. W dalszym cią-

gu będziemy korzystali głównie z tego ostatniego pojęcia.

Jednostkowe parcie ziemi może być dokładnie obliczone drogą bezpośredniego różniczkowania wzorów dla  $Z$ , o ile tylko parcie ziemi może być przedstawione, jako funkcja analityczna  $x$ .

W razie parcia ziemi na mur pionowy bez tarcia, przy płaskim naziomiu nieobciążonym,

$$Z = \frac{\gamma \cdot x^2}{2} \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

Różniczkując wzór ten, otrzymujemy, że parcie jednostkowe równa się:

$$z = \frac{dZ}{dx} = \gamma x \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (857)$$

W razie naziomu obciążonego

$$Z = \frac{\gamma x}{2} (x + 2h_1) \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

a odpowiednie parcie jednostkowe wyniesie:

$$z = \frac{dZ}{dx} = \gamma(x + h_1) \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (858)$$

W razie jakiegokolwiek naziomu płaskiego wogóle kąt odłamu  $\varphi$  nie zależy od  $h$  (lub  $x$ ), a więc możemy w danym wypadku parcie ziemi przedstawić w formie:

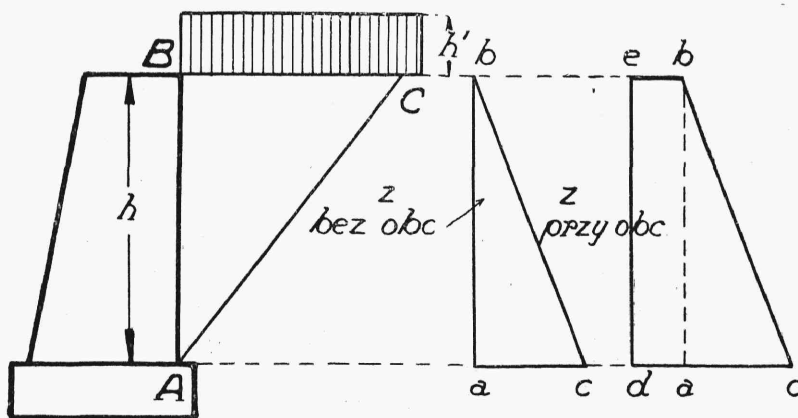
$$Z = K \cdot x^2 \quad (859)$$

gdzie  $K$  nie zależy od  $x$  (por. wzór 835). Jednostkowe parcie ziemi możemy tu więc otrzymać drogą różniczkowania wzoru (859):

$$z = \frac{dZ}{dx} = 2 Kx \quad (860)$$

W razie gdy kąt  $\varphi$ , odpowiadający  $Z$ , nie jest od  $h$  niezależny, np. w razie naziomu załamanego, obliczenie  $z$  drogą różniczkowania nie zawsze daje się uskuteczyć i wobec tego musimy się tu uciekać do bezpośredniego sporządzenia wykresów parć jednostkowych.

Sporządzenie wykresów parć jednostkowych dla naziomów płaskich może być wykonane na podstawie wzorów (857), (858) i (860), z których



Rys. 424.

wynika, że w razie naziomu nieobciążonego, odpowiedni wykres miałby kształt trójkąta; w wypadku zaś obciążonego naziomu poziomego (wzór 858) kształt trapezu (rys. 424).

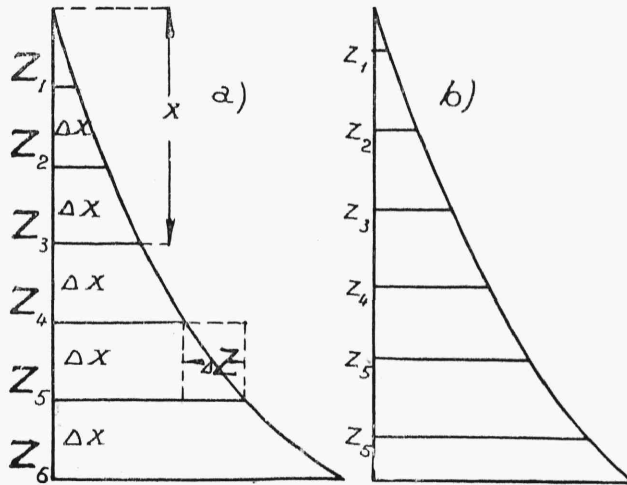
W ogólnym wypadku t. j. przy dowolnym kształcie naziomu, sporządzenie wykresu parć jednostkowych rozpoczynamy od sporządzenia wykresu parć całkowitych  $Z$  dla różnych wysokości muru. Odpowiedni wykres przedstawiony jest na rys. 425a, gdzie na osi pionowej odłożone są od punktu  $O$  wysokości muru  $x$ , poziomo zaś od końców odcinków  $x$  odpowiadające im wartości  $Z$ . Odstępy między kolejnymi odcinkami  $Z$  są wszystkie równe  $\Delta x$ .

Bierzemy jeden z kolejnych odcinków  $\Delta x$ , np. odcinek  $\overline{45}$ , i zauważamy, że parcie ziemi na część muru  $\overline{45}$  będzie się równało  $\Delta Z = Z_5 - Z_4$ .

Stosunek  $\frac{\Delta Z}{\Delta x}$ , który na rysunku odgrywa rolę pochodnej  $\frac{dZ}{dx}$ , oznacza parcie jednostkowe  $z$  równe

$$z_5 = \frac{\Delta Z}{\Delta x} = \frac{Z_5 - Z_4}{\Delta x} \quad (861)$$

i może być odłożony w formie pewnego odcinka na wykresie rys. 425b. Na rysunku tym  $x$  oznacza, jak poprzednio, odległości od górnej krawędzi muru, zaś w kierunku poziomym odłożone są tu odpowiednie odcinki  $z$ .



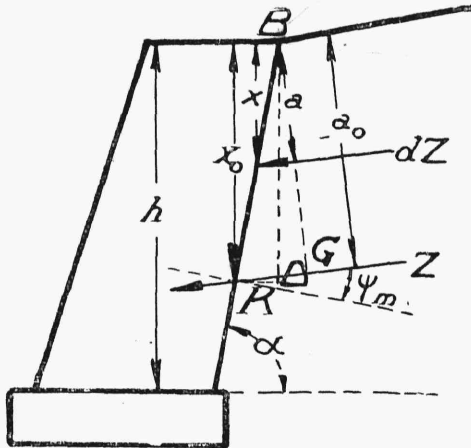
Rys. 425.

Im ściślejszy chcemy mieć wykres parć jednostkowych, tem mniejsze bierzemy odcinki  $\Delta x$  i tem większą liczbę parć  $Z$  wyznaczamy. Sposób, w jaki obliczamy parcie ziemi  $Z$ , nie odgrywa tu żadnej roli.



Pojęcie parcia jednostkowego  $z$  i wykresy parć jednostkowych znajdują bezpośrednie zastosowanie przy wyznaczeniu punktu zaczepienia parcia ziemi  $Z$ .

Przypuśćmy, że chodzi o wyznaczenie punktu zaczepienia parcia ziemi na mur o tylnej powierzchni płaskiej (rys. 427).



Rys. 427.

Na każdą nieskończenie małą część powierzchni muru działa siła parcia ziemi  $dZ$ . Moment tej siły względem górnej krawędzi muru  $B$  równa się  $a dZ$  zaś moment siły  $Z$  równa się  $a_0 Z$ , gdzie  $a$  i  $a_0$  są to ramiona odpowiednich momentów. Wobec tego, że siła  $Z$  jest wypadkową wszystkich sił  $dZ$ , mamy tu, że

$$a_0 Z = \int_0^h a dZ \quad (864)$$

Ponieważ kąt  $KBG$  równa się kątowi tarcia  $\phi_m$ , więc

$$a_0 = BK \cos \phi_m \quad (865)$$

Prócz tego mamy, że

$$x_0 = BK \sin \alpha \quad (866)$$

gdzie  $x_0$  i  $x$  oznaczają pionowe odległości punktów zaczepienia sił  $Z$  i  $dZ$  od krawędzi  $B$ .

Ze wzorów (865) i (866) wynika, że

$$a_0 = \frac{x_0}{\sin \alpha} \cdot \cos \phi_m \quad (867)$$

a co za tem idzie, że i

$$a = \frac{x}{\sin \alpha} \cdot \cos \phi_m$$

Wstawiając otrzymane wartości  $a$  i  $a_0$  we wzór (864), otrzymujemy:

$$\frac{x_0}{\sin \alpha} \cdot \cos \psi_m = \int_0^h \frac{x}{\sin \alpha} \cdot \cos \psi_m dZ$$

czyli, że:

$$x_0 = \frac{1}{Z} \int_0^h x dZ \quad (868)$$

Pionową odległość punktu zaczepienia siły  $Z$  od dolnej krawędzi muru  $A$  otrzymujemy ze wzoru:

$$e = h - x_0 \quad (869)$$

Wzorowi (868) możemy nadać formę następującą:

$$x_0 = \frac{1}{Z} \int_0^h x f'(x) dx = \frac{1}{Z} \int_0^h x z dx \quad (870)$$

skąd wynika, że punkt zaczepienia siły parcia  $Z$  jest rzutem poziomym na tylną powierzchnię muru środka ciężkości wykresu parć jednostkowych.

W razie naziomu płaskiego nieobciążonego wzór (868) łącznie ze wzorami (859), (860) i (870) daje:

$$x_0 = \frac{1}{Kh^2} \int_0^h 2x^2 K dx = \frac{2}{h^2} \cdot \frac{h^3}{3} = \frac{2}{3} h \quad (870')$$

$$\text{i } e = \frac{1}{3} h$$

W razie naziomu poziomego, przy obciążeniu  $h_1$ , przy  $\alpha = 90^\circ$ , i  $\psi_m = 0$  wzór dla parcia jednostkowego ma formę następującą (wzór 858):

$$z = \gamma(x + h_1) \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = \gamma(x + h_1) K$$

Wstawiając otrzymane stąd  $z$  we wzór (870), po wykonaniu całkowania, otrzymujemy, że:

$$x_0 = \frac{2h}{3} \cdot \frac{2h + 3h_1}{h + 2h_1} \quad \text{a} \quad e = \frac{h}{3} \cdot \frac{h + 3h_1}{h + 2h_1} \quad (871)$$

Wykresy jednostkowego parcia ziemi pozwalają w dalszym ciągu na obliczenie parcia ziemi  $Z$  w wypadku ogólnym, t.j. przy naziomie dowolnym i tylnej powierzchni muru załamanej.

W razie, gdy tylna powierzchnia muru jest płaska a naziom zakrzywiony, samo parcie ziemi  $Z$  obliczamy jednym ze sposobów wykreślnych (np. sposobem Pillet'a) a punkt zaczepienia tej siły znajdujemy, rzutując środek ciężkości wykresu parć jednostkowych (rys. 425b) na płaszczyznę muru.

W razie tylnej powierzchni muru załamanej (rys. 426) znajdujemy punkt zaczepienia parcia ziemi na powierzchnię  $CD$ , jako rzut poziomy na nią środka ciężkości trójkąta  $cde'$ , punkt zaczepienia parcia ziemi na powierzchnię  $BC$ , jako rzut środka ciężkości trapezu  $c''c'b'b$  na tę powierzchnię i t.d.

Samą siłę parcia ziemi  $Z_3$  na powierzchnię  $CD$  znajdujemy, jako pole trójkąta  $cde'$ , siłę  $Z_2$ , jako pole trapezu  $c''c'b'b$  i t.d.

Siły  $Z_3$ ,  $Z_2$  i  $Z_1$  odkładamy w ich punktach zaczepienia w ten sposób, aby tworzyły one z normalami do odpowiednich odcinków muru kąty równe kątowi tarcia ziemi po murze  $\phi_m$ .

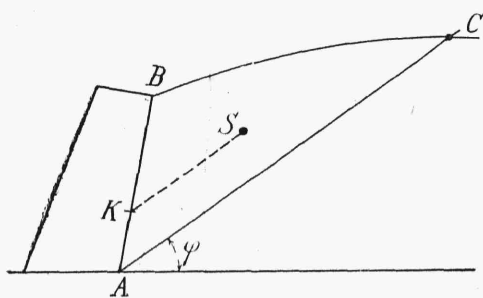
Znając w ten sposób siły  $Z_3$ ,  $Z_2$  i  $Z_1$ , zarówno co do wielkości, jak i kierunku, znajdujemy ich wypadkową zapomocą odpowiedniego wieloboku sił i wieloboku sznurowego (na rysunku nie uwidocz-nionych).

W sposób podobny do poprzedniego postępowalibyśmy, gdyby chodziło o wyznaczenie parcia ziemi na pewną tylko część muru  $mn$  (rys. 426).

Z pewnem przybliżeniem

punkt zaczepienia parcia ziemi można znaleźć, w razie płaskiej tylnej powierzchni muru i braku tarcia między murem a ziemią, drogą rzutowania środka ciężkości klina odłamu na powierzchnię muru, równoległe do płaszczyzny odłamu (vid. rys. 428). Twierdzenie to ściśle odpowiada tylko warunkom naziomu płaskiego, jak wynika ze wzoru (870).

Cdy chodzi o wyznaczenie parcia ziemi na odcinek  $mn$  powierzchni łuku, znajdującego się pod poziomem  $LM$  ziemi, wówczas parcie wyobrażamy sobie, jako rozłożone na siłę pionową, równą  $Z_1 = a \cdot \gamma \cdot h$  i na poziomą, równą parciu ziemi na powierzchnię  $sm$ . Co do tego ostatniego



Rys. 428.

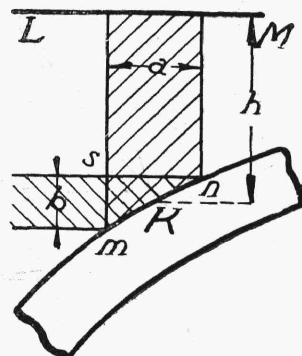


zakładamy, że jest ono równomierne na małym odcinku  $sm$  i wobec tego równa się (rys. 429):

$$Z_2 = b \cdot \gamma \cdot h \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (872)$$

t.j. iloczynowi parcia jednostkowego przez rzut powierzchni  $mn$  na płaszczyznę pionową.

Za punkt zaczepienia zarówno parcia poziomego, jak i pionowego, uważamy środek odcinka  $mn$ . (Przyjmujemy tutaj, że  $\phi_m = 0$ ).

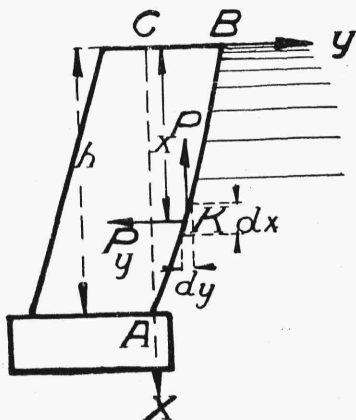


Rys. 429.

W wypadku szczególnym, gdy kąt tarcia  $\phi_s$  równy jest zeru, wzór (857) dla parcia jednostkowego przekształca się we wzór:

$$z = \gamma \cdot x = p \quad (873)$$

gdzie  $p$  jest to jednostkowe parcie (ciśnienie) hydrostatyczne.



Rys. 430.

Parcie hydrostatyczne na część muru  $ds$  (rys. 430) równa się  $p ds$ , gdzie  $ds$  oznacza długość odcinka śladu tylnej powierzchni muru. Odpowiednio pozioma i pionowa składowa tego parcia równa się  $\gamma x dx$  i  $\gamma x dy$ , wobec czego dla całkowitego parcia poziomego i pionowego cieczy mamy, że:

$$P_x = \int_0^h \gamma x dx = \frac{\gamma h^2}{2} \quad (874)$$

$$P_y = \gamma \int_0^h x dy = \gamma \cdot \text{pole } ABC \quad (875)$$

## 5. Stateczność stoków.

W masach ziemnych niepodpartych, np. w nasypach, wykopach i t.p. spoistość ziemi daje się dostrzec i zmierzyć łatwiej, niż w masach podpartych.

Wobec tego obliczenie stateczności mas niepodpartych możemy nie-raz z powodzeniem oprzeć na spoistości ziemi. Odpowiednie obliczenia porównawcze wykazują, że dla pewnych gatunków ziemi uwzględnienie