

ZAGADNIENIE OBLICZANIA STATECZNOŚCI STOKÓW W ODKRYWKACH GÓRNICZYCH

THE ISSUE OF CALCULATION OF SLOPE STABILITY IN THE OPENCAST MINING

Jan Sozański - Dolnośląskie Biuro Projektów Górniczych, Wrocław

Z okazji Jubileuszu 60 – lecia czasopisma „Górnictwo Odkrywkowe” („Surface Mining”) prezentacja reprodukcji artykułu zamieszczonego w numerze 1 w 1959 r. Biuletynu Techniczno - Ekonomicznego „Węgiel Brunatny”.

Słowa kluczowe: historia górnictwa odkrywkowego, stateczność stoków

On the occasion of the 60th anniversary of the „Górnictwo Odkrywkowe” („Surface Mining”) periodical, here is a presentation of the reproduction of the article published in issue 1 of the „Węgiel Brunatny”(„Lignite”) Technical and Economic Bulletin 1959.

Keywords: opencast mining history, slope stability

W odkrywce górniczej jest sprawą bardzo ważną, aby stoki wytworzone w czasie otwierania i eksploatacji kopalni, w złożu, nadkła - dzie i zwałach zachowywały stateczność w każdych warunkach pracy kopalni. Jest to konieczne dla zachowania ciągłości pracy - problem o zasadniczym znaczeniu dla ekonomiki pracy kopalni i związanych z nią zakładów przemysłowych - a również dla zachowania bezpieczeństwa życia i urządzeń w odkrywce.

Stok, po zniszczeniu równowagi się deformuje się, osuwa się. Zjawiska te, zwane ogólnie o s u w i s k a m i przebiegają różnie, w zależności od warunków równowagi, w jakich się one rozwijają, charakteru petrograficznego masy ziemnej, jej zawodnienia i t.p.

Bardzo istotną sprawą ze względów praktycznych jest szybkość rozwoju osuwisk. Osuwiska mogą przebiegać bardzo wolno, nawet z okresowymi przerwami, jak również bardzo szybko. Jest jasne, że ten ostatni rodzaj osuwisk jest wyjątkowo niebezpieczny dla eksploatacji kopalń odkrywkowych.

Jednym ze sposobów zapobiegania osuwiskom w odkrywkach górniczych jest projektowanie nachylenia stoków na podstawie analizy realnych warunków ich równowagi i przy zastosowaniu odpowiadających tym warunkom zasad obliczenia. Omówienie tych zasad jest przedmiotem niniejszego artykułu.

SIŁY DZIAŁAJĄCE NA STOK.

W normalnych warunkach odkrywek górniczych na stok działają następujące siły :

- A. Siły zachowujące istniejący stan równowagi :
1. wytrzymałość masy ziemnej na ścinanie,
 2. część ciężaru własnego badanego odłamu osuwiskowego. Jest to siła, która występuje, gdy najgłębszy punkt linii osuwiskowej nie leży na jej końcu,
 3. obciążenie statyczne części stoku lub dolnego poziomu, która wyznacza siłę wymienioną w p.2.

Pierwsza siła występuje zawsze; tylko w szczególnych okolicznościach może zmaleć /prawie/ do zera. Jest więc siłą naturalną, jakkolwiek można ją sztucznie zwiększyć. Na jej wielkość w przypadku gruntów spoiстых ma decydujący wpływ stopień nawilgocenia stoku.

- 55 -

cie wewnętrzne, ponieważ zmniejsza ciężar cząstek gruntu a tym samym wzajemny docisk ziarn.

Tarcie wewnętrzne zwykle wyraża się kątem tarcia wewnętrznego γ , którego tangens oznacza współczynnik tarcia f :

$$\operatorname{tg} \gamma = f$$

Według Bendel'a /1/ badania dotyczące kąta tarcia wewnętrznego wykazały, że :

1. wartości kąta tarcia wewnętrznego w płaskach przy luźnym i zwartym ułożeniu ziarn, mało różnią się między sobą, jeżeli średnice ziarn są mniejsze od 0,1 mm,
2. o wartości kąta tarcia wewnętrznego nie decyduje równomierność, czy nierównomierność uziarnienia, a tylko stopień rozdrobnienia ziarn,
3. wartość kąta tarcia wewnętrznego przy szczelnym ułożeniu ziarn, jest prawie ta sama dla piasku suchego, wilgotnego i mokrego,
4. ze zmniejszeniem się ziarn zmniejsza się na ogół wartość kąta tarcia wewnętrznego,
5. powiększenie wilgotności w gruntach spoistych decydująco zmniejsza ich kąt tarcia wewnętrznego,
6. dla luźnych piasków kąt tarcia wewnętrznego jest równy lub prawie równy kątowi stoku naturalnego.
Przez zagęszczenie można kąt stoku naturalnego powiększyć n.p. w pewnym przypadku powiększonego z 30° na 40° ,
7. w przypadku nadciśnienia porowego kąt tarcia wewnętrznego może obniżyć się do zera.

Keil /5/ podaje, że iły z przewagą minerałów grupy montmoryloni tu mają kąt tarcia wewnętrznego mniejszy aniżeli iły z przewagą minerałów grupy kaolinitu.

Według Prikłońskiego z minerałów ilowych najsilniej obniża kąt tarcia wewnętrznego w mączce kwarcowej montmorylonit sodowy, najmniej kaolinit.

Badania Ochotina /podaje Prikłoński /9/ wykazały :

1. Kąt tarcia wewnętrznego zmniejsza się ze zmniejszaniem się cząstek,
2. największy kąt tarcia wewnętrznego posiada ostrokrawędzisty kwarc, najmniejszy - kyszczyk,
3. kąt tarcia wewnętrznego ostrokrawędzistego kwarcu jest większy od obtoczonego.

Działanie elektrochemiczne podwyższa w ilach wartość kąta tarcia wewnętrznego, n.p. w pewnym przypadku uzyskano zwiększenie z 23° na 33° /5/.

Dla warunków średnich współczynniki tarcia wewnętrznego mieszczą się na ogół w niżej podanych granicach /5/:

dla gruntu sypkiego	0,65 - 0,70
dla gruntu słabospoistego	0,50 - 0,60
dla gruntu spódnego	0,40 - 0,50

- 56 -

O p ó r z a c z e p i e n i a wynika z zagębnienia się ziarn i jest tym większy im szczelniejsze jest ułożenie ziarn i im są one bardziej ostrokrawędziste. Dlatego w piasku jest on większy aniżeli w ilkach.

Zbadano, że opór ten wynosił /7/:

w piasku z domieszką żwiru	0,3 - 0,5 kg/cm ²
w otoczkach z domieszką piasku	1,0 - 2,0 kg/cm ²

Zwykle nie wyodrębnia się oporu zaczepienia, lecz traktuje się go łącznie z tarciem wewnętrznym, tzn. że mieści się on już w podanych wartościach tarcia wewnętrznego.

S p ó j n o ś ć w ł a ś c i w a składa się z kohezji i adhezji.

K o h e z j a jest wynikiem wzajemnego przyciągania się, cząstek gruntowych. Woda zmniejsza jej wielkość. Zwykle pojęciem kohezji określa się całkowitą spójność.

A d h e z j a powstaje na skutek wzajemnego przyciągania się zagęszczonych błonki wodnej i cząstek stałych. Jest ona tym większa im błonka wodna jest cieńsza. Adhezja jest siłą o charakterze mineralno-chemicznym i elektrycznym. Występuje tylko w gruntach spoiowych. Wzrasta na skutek komprymacji. Pod wodą nie zanika.

S p ó j n o ś ć p o z o r n a jest wynikiem napięcia kapilarnego. Zmniejszenie wilgotności zwiększa, zwiększenie wilgotności zmniejsza ją. Pod wodą zanika zupełnie.

Kohezja /pojęta już jako całkowita spójność/ zwiększa się ze wzrostem zawartości cząstek ilastych, szczególnie Na - montmorylonitu, natomiast kwarc i wapień obniżają ją.

Kohezja jest poza tym zależna od obciążenia, mianowicie rośnie ze wzrostem obciążenia. Nie jest więc ona wartością stałą. W praktycznych obliczeniach przyjmuje się jednak tak kąt tarcia wewnętrznego jak kohezję jako wartości stałe.

W y t r z y m a ł o ś ć n a ś c i n a n i e gruntu sypkiego oblicza się zgodnie z prawem Coulomb'a, z wzoru :

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

przy czym $\operatorname{tg} \varphi = f$ mieści w sobie właściwe tarcie i opór zaczepienia.

Osiągnięcie wartości wytrzymałości na ścięcie w piaskach, nie wymaga praktycznie czasu i następuje natychmiast po obciążeniu, gdyż zostaje ono przyjęte natychmiast przez szkielet mineralny. Wytrzymałość ta w warunkach statycznych nie zależy praktycznie od wilgotności.

W y t r z y m a ł o ś ć n a ś c i n a n i e gruntu spoistego nienaruszonego jest funkcją tarcia wewnętrznego, kohezji i adhezji. W praktycznych badaniach nie oddziela się kohezji od adhezji i traktuje się je razem pod wspólnym symbolem /c/, tak, że wytrzymałość tę przedstawia się klasyczną formułą

- 57 -

Coulomb'a :

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$$

Cząstki ilowe są otoczone warstewkami wodnymi, które pod wpływem sił elektrostatycznych są związane z cząstkami mineralnymi bardzo dużymi siłami, /adhezja/. Im cieńsze są te otoczki wodne, tym silniej są związane przez nie cząstki mineralne, a więc tym większa jest adhezja, stąd ropy o małej wilgotności posiadają dużą wytrzymałość na ścinanie.

Odwrotnie, ze wzrostem grubości otoczki adhezja maleje.

Zmniejszenie grubości otoczki można uzyskać przez odparowanie albo przez komprymację.

Przy znacznych grubościach otoczki jej siły wiążące są tak małe, że pod wpływem wstrząsów woda otoczki, dotąd związana, staje się wodą wolną, na skutek czego masa gruntowa upłynnia się. To zjawisko, zwane tiksotropią, jest często wykorzystywane w technice budowlanej. Po ustaniu wstrząsów woda ponownie przechodzi w stan związania i tym samym powraca stan równowagi układu.

Celem wytworzenia tarcia wewnętrznego w ropy potrzebne jest odpowiednie zagęszczenie, aby obciążenie zostało przekazane na wytworzony dzięki temu szkielet mineralny z cząstek grubszych. Stwierdzono, że dla wywołania sił tarcia wewnętrznego w ropy potrzebny jest pewien czas, licząc od chwili obciążenia. Siły te, jak wykazały doświadczenia, rosną ze zwiększeniem obciążenia szybciej, aniżeli wynika to z zależności między siłą tarcia a obciążeniem /7/. Następuje to dlatego, że błonki wodne, otaczające cząstki stałe, pod wpływem obciążenia stają się coraz cieńsze. Odwrotnie, wskutek rozrzedzenia masy, szczególnie przez nawodnienie, kontakt między grubszymi cząstkami maleje coraz więcej i w końcu tarcie wewnętrzne zanika. Zatem w ropy ilastych istnieje zależność między ich wilgotnością a siłami tarcia wewnętrznego.

Ponieważ dwa podstawowe wskaźniki techniczne t.j. $f = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$ określające wytrzymałość na ścinanie ropy spoistego, są zależne przede wszystkim od wilgotności masy gruntowej i wzajemnego ciśnienia cząstek mineralnych, przeto wydaje się celowe omówić ją z uwagi na wspomniane dwa parametry w odniesieniu do dwóch zasadniczych rodzajów ropy spoistego a mianowicie :

- a/ ropy spoistego, pozbawionego tarcia wewnętrznego /idealnie spoiste tj. ropy o zdecydowanej przewodzie minerałów ilowych,
- b/ ropy spoistego, posiadającego tarcie wewnętrzne.

Wytrzymałość na ścinanie ropy idealnie spoistego wzrasta ze zmniejszaniem się wilgotności, w konsystencji miękkoplastycznej spada do zera. Zatem w ropy tych stateczność stoku zależy przede wszystkim od stosunków wodnych. Obciążenie działa tu w sposób długofalowy, mianowicie zwiększa wytrzymałość pośrednio wskutek zmniejszenia porowatości, a tym samym wilgotności masy gruntowej. Natomiast w przypadku ropy chudych, wytrzymałość ropy na ścinanie jest funkcją nie tylko wilgotności, ale też obciążenia /7/.

Wpływ obciążenia przedstawia się następująco :

W ropy idealnie spoistych wytrzymałość w ścinanie jest praktycz-

nie zależna tylko od wilgotności. Wpływ obciążenia na zwiększenie wytrzymałości, na skutek zmniejszenia wilgotności, wymaga długiego czasu i praktycznie nie wchodzi w rachubę.

W ilach posiadających tarcie wewnętrzne i glinach zwiększa się wytrzymałość na ścinanie ze zwiększeniem się obciążenia. Mogą tu wystąpić dwa przypadki:

1. kąt tarcia wewnętrznego jest stały bez względu na obciążenie,
2. kąt tarcia wewnętrznego wzrasta ze wzrostem obciążenia.

Pierwszy przypadek bierze się pod uwagę przy krótkotrwałych zmianach obciążeń. Wówczas wzrost wytrzymałości na ścinanie jest wprost proporcjonalny do wzrostu obciążenia.

W przypadku drugim grunt sukcesywnie zagęszcza się, zatem porowatość masy gruntowej pod wpływem obciążenia zmniejsza się. Uzyskana w czasie zagęszczania się masy zależność między wartością siły ścinającej a obciążeniem w ujęciu prawa Coulomb'a jest nieprawdziwa.

Przy nagłym obciążeniu masy spójnej nasyconej wodą powstaje n y d r o d y n a m i c z n y o p ó r t a r c i a. Jest to wytrzymałość na ścięcie jaką przedstawia komprimowana masa nasycona wodą, w której występuje n a d c i ś n i e n i e p o r o w e. Wynika ono stąd, że woda porowa, wskutek małej przepuszczalności masy, nie może szybko z niej wypłynąć i wskutek tego musi przejąć, przynajmniej częściowo, obciążenie. Ten stan trwa do czasu wytworzenia się nowego układu ziarn mineralnych.

W eksploatacji odkrywkowej zjawisko powyższe może wystąpić przy szybkim zwałowaniu mas spójnych lub gdy ilaste podłoże zwału jest zawadnione. Jeżeli w takim stanie zwiększonego ciśnienia porowego wystąpią drgania np. na zwałach wskutek przejeżdżających pociągów, pracy zwałowarek i t.p., wówczas mogą powstać zjawiska tiksotropii, masa gruntowa zaczyna falować pod gąsienicami poruszających się maszyn i w końcu maszyny grzęzną. Jeżeli wstrząsy sięgają głęboko w podłoże i zachodzą w pobliżu stoku, wówczas grunt może tak dalece się wplynnić, że nastąpi spływ stoku. Zjawiska te występują tak szybko, że nie ma czasu na usunięcie maszyn z zagrożonego miejsca i ulegają one zniszczeniu. Często łączy się z tym śmiertelne wypadki.

CIŚNIENIE SPŁYWOWE.

Ciśnieniem spływowym określa się siłę, jaką wywiera na cząstki mineralne przeciskająca się woda podczas filtracji. Wielkość tej siły, przypadająca na jednostkę objętości oblicza się z wzoru :

$$D = \gamma \cdot J$$

gdzie D - ciśnienie spływowe,
 γ - ciężar objętościowy wody filtrującej,
 J - spadek hydrauliczny.

- 59 -

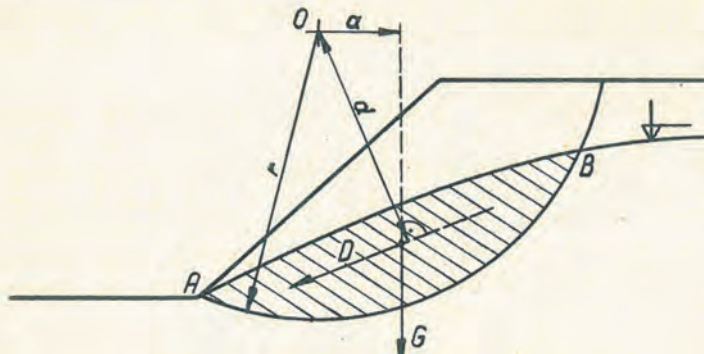
Wzór ten jest ważny dla warunków ruchu laminarnego. Ciśnienie spływowe jest niezależne od współczynnika filtracji, jest więc jednakowe dla wszystkich rodzajów gruntu.

Zgodnie z wyżej podanym wzorem, w objętości V masy, względnie w układzie płaskim na płaszczyźnie ω ciśnienie spływowe wynosi :

$$D_o = \gamma_w \cdot J \cdot V$$

$$D_p = \gamma_w \cdot J \cdot \omega$$

Jej kierunek jest wyznaczony liniami prądu filtracji. W zwykłych warunkach badania stateczności stoków nie wykreśla się siatki prądu, a kierunek ciśnienia spływowego wykreśla się przez środek ciężkości części zawadnionej odłamu, równoległe do odcinka AB /rys.1/.



Rys.1.

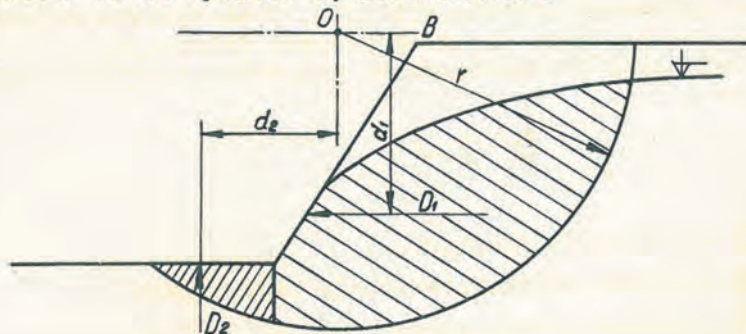
W przypadku cylindrycznej powierzchni poślizgu wielkość ciśnienia spływowego można obliczać z wzoru :

$$D = G \frac{a}{d}$$

gdzie : G - ciężar nawodnionej masy, objętej poślizgiem,
 a, d - ramiona sił G i D względem punktu obrotu O .

Gdy linia poślizgu wychodzi poza stopę stoku /rys.2/, ciśnienie spływowe można wyrazić przy pomocy dwóch składowych : poziomą, odpowiadającą powierzchni mierzonej, od pionowej przechodzącej przez dolną krawędź stoku w kierunku stoku oraz pionową, odpowiadającą pozostałej części /6/.

Powierzchnie te na rysunku są zakreskowane.



Rys.2

Wpływ filtracji na stateczność stoku można wyrazić również bez wprowadzenia do obliczeń ciśnienia spływowego, a mianowicie w ten sposób, że przy ustalaniu sił ścinających nie uwzględnia się wyporu wody, natomiast wypór ten uwzględnia się przy wyznaczaniu sił oporu /7/.

METODY BADANIA STATECZNOŚCI STOKÓW.

Równowaga masy gruntowej zależy od jej własności mechanicznych, które nie są stałe, lecz pod wpływem procesów fizyko-chemicznych ulegają stale zmianie. Dlatego przy rozpatrywaniu równowagi stoku należy ustalić jakie procesy działają w kierunku jej zmniejszenia i w jaki sposób odwrócić ich działanie. Przede wszystkim należy zbadać, czy nie istnieje niebezpieczeństwo suffozji mechanicznej i chemicznej, czy na skutek sposobu prowadzenia budowy /np. procesu usypywania zwałów / nie wytworzy się nadciśnienie parowe, czy ze względu na cechy materiału nie wytworzą się szczeliny, które po wypełnieniu wodą spowodują wytworzenie ciśnienia hydrostatycznego, itp.

Sposoby obliczeniowe uwzględniają cechy ośrodka gruntowego w pewnych określonych warunkach, z ich zmianą zmieniają się wskaźniki mechaniczne gruntu a tym samym wyniki obliczeń, uzyskane na ich podstawie. Te względy trzeba mieć na uwadze przy ustalaniu warunków równowagi stoków, zwłaszcza gdy czas ich trwania ma być dłuższy.

Co do analitycznych, względnie analityczno-wykreślonych metod badania stateczności stoków, to rozwinęły się one w dwu kierunkach.

Pierwszy z nich usiłuje stworzyć ścisłą teorię równowagi granicznej / Caquot, Sokołowski i inni/, drugi stawia sobie za cel opracowanie uproszczonej metody badania równowagi przy pomocy elementarnych środków matematycznych /Fellenius, Terzaghi, Masłow i inni/.

Metody uproszczone można z kolei podzielić na dwie grupy :

1. metody, w których zakłada się nachylenie stoku i określa się jego w s k a ź n i k s t a t e c z n o ś c i,
2. metody obliczenia przekroju stoku o j e d n a k o w e j s t a t e c z n o ś c i w każdym jego punkcie.

Metody pierwszej grupy polegają natym, że określa się stosunek między sumą sił, dążących do zniszczenia równowagi a sumą sił, starających się ją zachować. Siłami niszczącymi są siły ścinające: składowe ciężaru własnego i obciążenia, statycznego i dynamicznego, w kierunku stycznym do linii poślizgu oraz siła filtracji / inne siły, o charakterze przypadkowym, zostały wymienione poprzednio/, siłami zachowawczymi jest tarcie wewnętrzne i spójność.

Jeżeli pierwsze siły oznaczy się przez ΣT , drugie przez ΣR wtedy wskaźnik stateczności wynosi :

$$n = \frac{\Sigma R}{\Sigma T}$$

- 61 -

Gdy wskaźnik ten jest większy od jedności, stok znajduje się w równowadze stałej, gdy jest mniejszy od jedności, zaprojektowany stok nie utrzyma się i wręczcie, gdy jest równy jedności, stok znajduje się w równowadze granicznej.

Dla obliczenia wskaźnika stateczności potrzebna jest znajomość wielkości i położenia wszystkich sił.

Jeżeli rozpatruje się stoki z gruntów sypkich, to, jak to się zaraz wyjaśni, zagadnienie jest proste.

Sprawa staje się złożona, gdy w grę wchodzi grunt spoisty. W tym przypadku znajomość wielkości i położenia sił można jeszcze względnie łatwo określić, gdy znana jest powierzchnia poślizgu, określona budową geologiczną. Jeżeli jednak nic nie wskazuje na istnienie jednej czy ewentualnie kilku powierzchni poślizgu, wówczas potrzebne jest wprowadzenie dodatkowych założeń. Celem rozwiązania tego zagadnienia przyjmowano różne założenia co do kształtu powierzchni poślizgu, mianowicie, sprowadzając zagadnienie do układu dwuwymiarowego, przyjmowano ją jako linię łamaną, spiralę, cykloidę i łuk kołowy. To ostatnie założenie, z uwagi na prostotę metody, dla której stanowi podstawę, zostało powszechnie przyjęte.

Odnosnie drugiej grupy metod, których celem jest znalezienie stoku o jednakowej stateczności w każdym punkcie / z góry już można powiedzieć, że chodzi tu tylko o grunty spoiste/, to podstawowymi założeniami są tu te, które dotyczą rozkładu granicznych naprężeń ścinających, wpływu poszczególnych czynników mechanicznych na wielkość wytrzymałości gruntu na ścinanie itp.

Celem możliwie jasnego przedstawienia warunków stateczności stoków, rozpatrzy się je niżej, osobno w odniesieniu do gruntów sypkich, osobno do spoistych bez dodatkowego podziału na metody ścisłe i przybliżone.

S T O K I S Y P K I E . W szczególnym przypadku, gdy masa tworząca stok posiada tylko tarcie wewnętrzne / żwiry, piaski, pyły/ zagadnienie badania stateczności jest proste. Mogą tu wystąpić dwa przypadki, w zależności od tego czy jest czy nie ma filtracji.

Rozważania teoretyczne i badania praktyczne wykazały, że jeżeli na masę sypką, suchą lub wilgotną nie działa ciśnienie spływowe, wówczas stok o jednakowej stateczności jest płaszczyzną, a kąt jej nachylenia do poziomu wzdłuż największego spadku, w przypadku równowagi granicznej t.zw. kąt stoku naturalnego jest równy kątowi tarcia wewnętrznego. Zatem w tych warunkach równowaga będzie zachowana, gdy wielkość kąta stoku β nie przekroczy wielkości kąta tarcia wewnętrznego τ /:

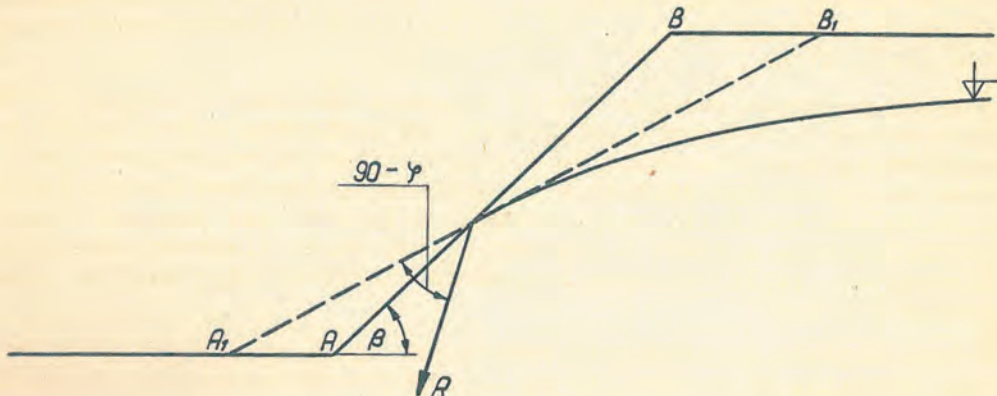
$$\beta \leq \tau$$

Kąt stoku naturalnego jest pojęciem ściśle związanym z masą sypką, o której wytrzymałości na ścinanie decyduje tylko tarcie wewnętrzne.

W przypadku, gdy stok znajduje się pod działaniem filtracji, na poszczególne cząstki stałe znajdujące się poniżej zwierciadła

- 62 -

wody gruntowej działa oprócz siły ciężkości, wypór wody i ciśnienie spływowe. Rozważania nad równowagą elementarnej cząstki, znajdującej się w stoku pod działaniem filtracji, wykazują, że stok ten w równowadze granicznej stanowi, podobnie jak w pierwszym przypadku, płaszczyznę, z tym jednak, że jego maksymalne nachylenie tworzy z kierunkiem wypadkowych, działających na poszczególne punkty stoku poniżej zwierciadła wody gruntowej, kąt $90^\circ - \gamma$ /rys.4/.



Rys.4.

Stwierdzenie powyższe przedstawia się w formie wzoru w następującej postaci :

$$\frac{\gamma \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\gamma_w \cdot n \cdot \operatorname{tg} \beta + \gamma \cdot \sin \beta} \geq 1$$

Z wzoru tego wynika, że graniczny stan równowagi części stoku, leżącej pod zwierciadłem wody gruntowej, będzie miał miejsce, gdy wyrażenie po lewej stronie jest równe jedności.

We wzorze tym oznacza :

β - kąt stoku / założony/

γ - ciężar objętościowy gruntu znajdującego się pod wyporem; wynosi on:

$$\gamma = (1 - n)(\gamma_s - 1)$$

gdzie : n - porowatość masy w stoku

γ_s - ciężar właściwy szkieletu mineralnego masy w stoku.

- 63 -

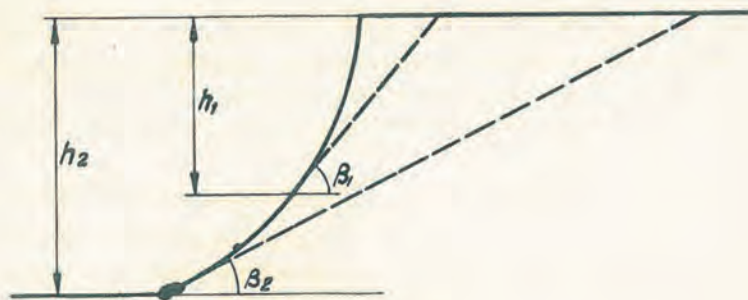
S T O K I S P O I S T E. Ścisłe ujęcie fizykalne i matematyczne warunków równowagi stoków w gruncie spoistym prowadzi do dużych komplikacji matematycznych i żmudnych obliczeń. Poprawność wyników, uzyskanych tą drogą jest przy tym rzeczą problematyczną ponieważ, jak to już podkreślono, wskaźniki mechaniczne gruntu nie są wartościami stałymi. Masa spoista posiada budowę trudniejszą do scharakteryzowania wskaźnikami, aniżeli ogromna większość innych materiałów użytkowanych w budownictwie, przy czym reaguje na czynniki fizyczne bardzo szybko. Poza tym wartości wskaźników, wskutek niedoskonałości obecnych metod ich ustalania, są obarczone stosunkowo dużymi błędami. Z tego powodu, przy projektowaniu z reguły korzysta się z metod przybliżonych, matematycznie znacznie prostszych.

Z wyżej podanych powodów wyniki uzyskane metodami obliczeniowymi stosowanymi w budownictwie ziemnym nie posiadają tego stopnia dokładności, jaki się uzyskuje w innych działach budownictwa. Będzie on jednak tym większy z im większą znajomością rzeczy zostaną ustalone wskaźniki mechaniczne, im lepiej będą poznane stosunki geologiczne i wodne a również im założenia fizykalne metody obliczeniowej lepiej w danym przypadku charakteryzują warunki równowagi w stoku.

Z tego względu zastosowanie takiej czy innej metody nie jest rzeczą obojętną, zwłaszcza, że są one oparte na różnych założeniach fizykalnych.

Poniżej podaje się krótką charakterystykę niektórych metod obliczeniowych z podkreśleniem przyjętych w nich założeń fizykalnych i podaniem zakresu ich stosowania.

Należy zaznaczyć, że stoki spoiste w warunkach równowagi granicznej /ogólnie o jednakowym wskaźniku stateczności/ posiadają kształt wklęsły. Podawanie dla tych stoków kątów stoku naturalnego jest teoretycznie niesłuszne i może tylko wówczas być celowe, gdy ze względów praktycznych chodzi o założeniu stoku o stałym spadku. Kąt ten wyznacza nachylenie powierzchni stoku do poziomu w najniższym punkcie stoku /rys.3/.



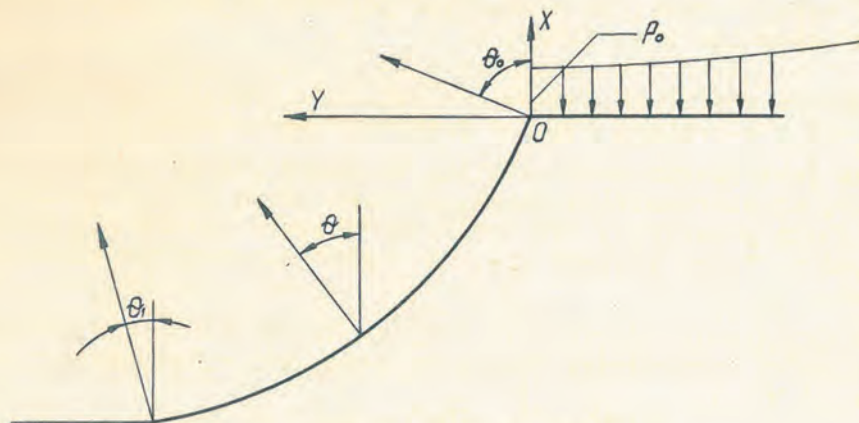
Zatem dla tych samych warunków stałe nachylenie stoku będzie tym łagodniejsze im stok ma być wyższy.

METODA W.W.SOKOŁOWSKIEGO. W metodzie tej rozpatrzono warunki równowagi granicznej stoku o jednakowej stateczności na całej jego długości, t.zn. że wszystkie punkty powierzchni stoku posiadają ten sam wskaźnik stateczności równy jedności. Założono przy tym, że ośrodek ziemny jest anizotropowy. Metoda jest matematycznie skomplikowana i z tego powodu w praktyce była rzadko stosowana. Ostatnio opracowano tablice i wykresy, które umożliwiają stosowanie tej metody w sposób szybki i łatwy, jednak tylko w zakresie ograniczonym do ośrodka jednorodnego i bez filtracji.

Sokołowski podał też wzór na obliczenie maksymalnej wartości obciążenia ciągłego na krawędzi naziomu / rys. 5/ :

$$p_0 = c \cdot \operatorname{ctg} \varphi \left[\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\pi + 2\theta_0) \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right]$$

gdzie :
 C - współczynnik spójności
 φ - kąt tarcia wewnętrznego,
 θ_0 - kąt nachylenia linii stoku o równowadze granicznej w p. 0.



W przypadkach granicznych otrzymuje się :

a/ dla $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$

$$1. \quad p_0 = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

2. wklęsły kształt stoku,

b/ dla $\theta_0 = \varphi$

$$1. \quad p_0 = c \cdot \operatorname{ctg} \varphi \left[\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} e^{(\pi - 2\varphi) \operatorname{tg} \varphi} - 1 \right]$$

2. prosty kształt stoku.

- 65 -

W przypadku, gdy naziom nie jest obciążony, górny odcinek stoku przechodzi w ścianę pionową w wysokości :

$$h_0 = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{\gamma(1 - \sin \varphi)}$$

Dla gruntu idealnie spoistego wartość ta wynosi :

$$h_0 = \frac{2c}{\gamma}$$

Niektórzy autorzy wartość tę podają dwukrotnie większą. Wynika to z przyjęcia stanu granicznego na całej wysokości warstwy pionowej. Sokołowski zwraca uwagę, że przyjęcie to jest niedopuszczalne.

Dla gruntu idealnie spoistego, gdy naziom poziomy jest obciążony równomiernie siłą p , podał Sokołowski następujące równanie krzywej stoku o równowadze granicznej :

$$y = \frac{2c}{\gamma} \ln \frac{\cos\left(\frac{p}{2c} - 1\right)}{\cos\left(\frac{p}{2c} - 1 - \frac{\gamma}{2c} x\right)}$$

Wzory wyżej podane, jak zaznaczono poprzednio, są ważne dla ośrodka jednorodnego bez filtracji.

METODA SIŁ POZIOMYCH /MASŁOWA - BERERA/. Przy pomocy tej metody bada się stateczność stoku o założonym nachyleniu.

Metoda jest oparta na założeniu, że masyw ziemny osuwa się w ten sposób, że poszczególne bloki, uzyskane przez podział masywu płaszczyznami pionowymi, nie wywołują względem siebie sił tarcia i spójności, t.j. zakłada się, że w płaszczyznach podziału ich nie ma.

Celem uniknięcia oddzielnego rozpatrywania tarcia wewnętrznego i spójności wykorzystał Masłow pojęcie kąta wytrzymałości na ścianie ψ :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\tau}{\sigma} = \operatorname{tg} \varphi + \frac{c}{\sigma}$$

Wskaźnik stateczności stoku oblicza się ze stosunku sił przyjętych przez tarcie i spójność do sił poziomych, wywieranych przez elementy ześlizgujące się na elementy następne przy braku tarcia i spójności /rys. 6/ :

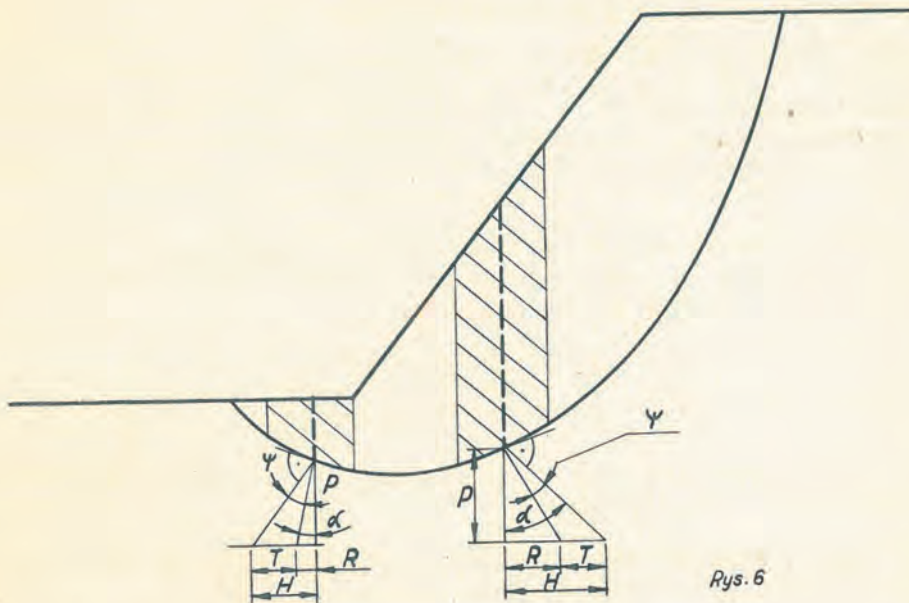
$$n = \frac{\sum T}{\sum R}$$

gdzie :

$$H = P \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$T = H - R = P [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(\alpha - \psi)]$$

- przy czym :
- α - kąt nachylenia stycznej w poszczególnych punktach krzywej ześlizgu do poziomu,
 - P - ciężar poszczególnego bloku,
 - R - część ciśnienia poziomego, która nie jest przejęta przez siły wewnętrzne /ciśnienie czynne/.



Kąt ψ odkłada się zawsze w tym samym kierunku.

Metodę sił poziomych można stosować dla dowolnych kształtów krzywej ześlizgu, np. / w przypadku budowy warstwowej / górna część wzdłuż krzywej, dolna - wzdłuż styku warstwy poziomej.

Metodę tę można stosować w sposób wykreślny lub analityczny.

METODA STAŁEJ STATECZNOŚCI. Metodą tą można badać stateczność stoku o założonym nachyleniu oraz projektować stoki o żądanym wskaźniku stateczności. Autorem jej jest N.N. Masłow. Przyjął on jako założenie podstawowe, że w równowadze granicznej kąt stoku jest równy kątowi wytrzymałości na ścinanie / ψ / oraz, że kąt ten odpowiada ciśnieniu panującemu w punkcie, który znajduje się na tej samej głębokości poniżej naziomu, w jakiej znajduje się dany punkt stoku. Założenie powyższe nie jest teoretycznie prawdziwe, dlatego metoda ta, według jej autora, ma charakter pewnego przewidywania inżyniersko-geologicznego. Nie mniej jednak jest ona w ZSRR chętnie stosowana przy projektowaniu obiektów ziemnych, z uwagi na swoje zalety konstrukcyjne. Przede wszystkim nie jest tu potrzebne znajdywanie położenia najniekorzystniejszej linii osuwiskowej i może być stosowana przy budowie jednolitej jak również warstwowej. Wyniki uzyskuje się szybko.

Obserwacje wykazały dużą zgodność wyników obliczeń w odniesieniu do masy o konsystencji miękkoplastycznej. Co do jej przydatności dla warunków, gdy masa jest konsystencji twardoplastycznej to sprawa

- 67 -

wa ta jeszcze nie została badaniami rozstrzygnięta.

Wskaźnik stateczności oblicza się z wzoru :

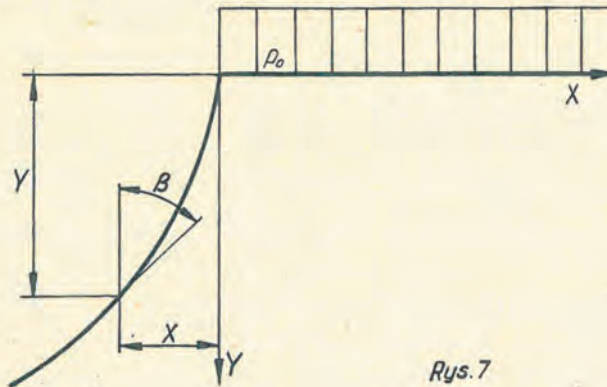
$$n = \frac{\tau}{\sigma \cdot \gamma}$$

gdzie:

$$\tau = \frac{\tau}{\sigma} = \tau_0 \cdot \gamma + \frac{c}{\sigma}$$

Metodę tę podał Masłow również w formie równania paraboli jako krzywej stoku o granicznej równowadze /rys. 7/:

$$x = \frac{1}{\gamma \cdot \tau_0 \cdot \gamma} \left\{ \tau_0 \cdot \gamma \cdot y + c \cdot \ln(p_0 \cdot \tau_0 \cdot \gamma + c) - c \cdot \ln[\tau_0 \cdot \gamma (y + p_0) + c] \right\}$$



Rys.7

Symbole w powyższym wzorze są zgodne z oznaczeniami na rys. 7 oraz z poprzednio przyjętymi.

METODA SZWEDZKA. Metoda ta, zwana również metodą Fellenius'a, jest oparta na przyjęciu cylindrycznej powierzchni poślizgu. Stwierdzono zgodność tego przyjęcia z obserwacjami w naturze w odniesieniu do gruntów jednorodnych i to tym większą, im materiał stoku jest bardziej spoisty. Zakłada się dalej, co również potwierdzają badania w gruntach bardzo spoistych, że masa osuwa się w dół jako całość t.zn., że poszczególne punkty odłamu wykonują podczas przesuwu obrót wokół środka łuku, stanowiącego linię osuwiskową.

Praktycznie metodę tę stosuje się w ten sposób, że objętość ograniczoną powierzchnią osuwiskową dzieli się na pewną ilość bloków, a następnie układa się równanie momentów sił ścinających i sił zachowawczych względem osi obrotu.

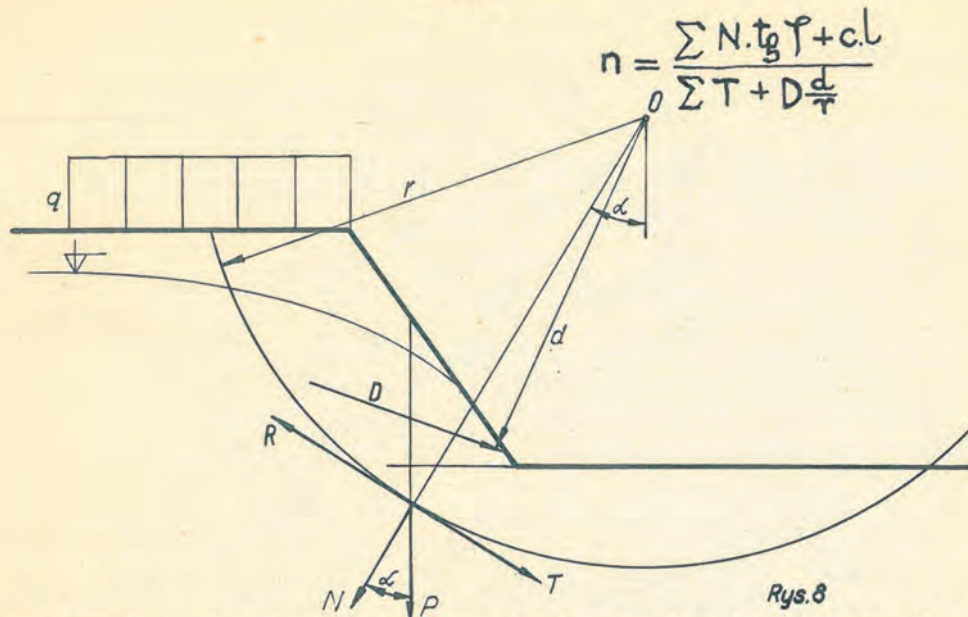
Wskaźnik stateczności wyraża się stosunkiem sił zachowawczych /tarcie wewnętrznie i spójność/ do sił ścinających /składowa ciężaru bloku w kierunku stycznym do linii osuwowej/ :

$$n = \frac{\sum N \cdot \tau_0 \cdot \gamma + c \cdot l}{\sum T}$$

gdzie l - całkowita długość linii poślizgu.

Występujące, w przypadku przepływu wody podziemnej, ciśnienie spływu uwzględnia się przy obliczaniu momentu sił obracających.

Wskaźnik stateczności wynosi wówczas /rys.8/:



Przy obliczeniu ciężaru bloków należy uwzględnić w przypadku filtracji wypór wody i obciążenie wodą kapilarną.

Ciężar wody kapilarnej na 1 m^2 rzutu poziomego powierzchni depresyjnej wynosi :

$$q = s \cdot \gamma_w \cdot n \cdot h_k$$

gdzie : s - współczynnik; należy przyjmować w granicach 0,3 - 0,4

γ_w - ciężar objętościowy wody kapilarnej,

n - porowatość gruntu w strefie kapilarnej,

h_k - kapilarne podniesienie zwierciadła wody.

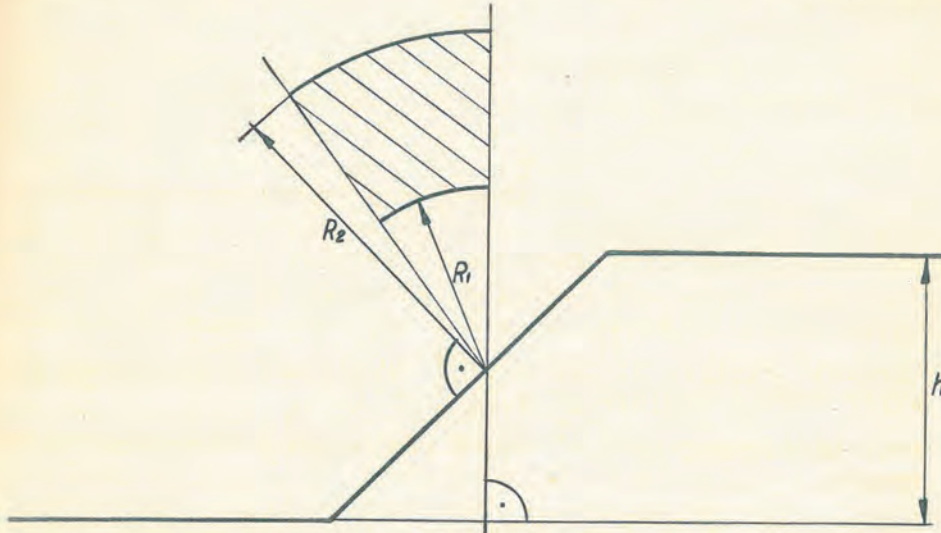
Celem znalezienia najniekorzystniejszego położenia linii poślizgu zwykle przyjmuje się pewną ilość / co najmniej 10, zwykle więcej / powierzchni osuwowych i oblicza się dla nich wskaźnik stateczności. Najniekorzystniejszy z tych wskaźników nie może być mniejszy od pewnego minimum, przyjętego w zależności od ważności budowli w granicach 1,1 - 1,5 /4/.

Stwierdzono, że środki tych niebezpiecznych łuków poślizgu dla różnych warunków mieszczą się w przedziale ograniczonym pionową do stoku i prostopadłą, poprowadzonymi ze środka stoku oraz łukami R_1 i R_2 , których wartości są podane w tablicy 1 /rys. 9/.

- 69 -

Tablica 1

Pochylenie stoku	1 : 1	1 : 2	1 : 3	1 : 5
R_1	0,75	0,75	1,0	2,2
R_2	1,50	1,75	2,3	4,8



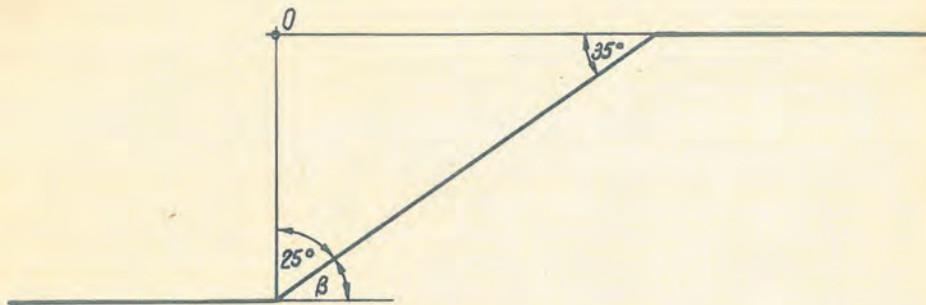
Rys. 9

Znalezienie najniekorzystniejszej powierzchni poślizgu w przypadku ogólnym / $f > 0$; $c > 0$ / można dokonać w ten sposób, że określone na rys. 9 pole środkowe niebezpiecznych łuków poślizgu pokrywa się siatką kwadratów o boku równym 1 - 2 m i z wierzchołków tych kwadratów wykreśla się łuki, dla których oblicza się wskaźniki stateczności na poślizg. W ten sposób łatwo jest znaleźć środek najniekorzystniejszego łuku poślizgu.

Zbadano, że łuki niebezpiecznych poślizgów nie schodzą poniżej poziomu dolnej krawędzi stoku więcej jak $1,5 h$, a ich punkty przecięcia z dolnym poziomem nie odbiegają od dolnej krawędzi stoku więcej jak $2 h / 4$.

Gdy grunt jest idealnie spoisty, względnie bliski temu stanowi, powierzchnia poślizgu przechodzi zwykle przez dolną krawędź stoku i wówczas środek najniekorzystniejszego łuku można dość dokładnie wyznaczyć przy pomocy wykresu, podanego na rys. 10. Z górnej i dolnej krawędzi stoku prowadzi się pod kątem 35° i 25° proste, przecinające się w punkcie, który jest szukanym środkiem najniekorzystniejszego łuku poślizgu.

- 70 -

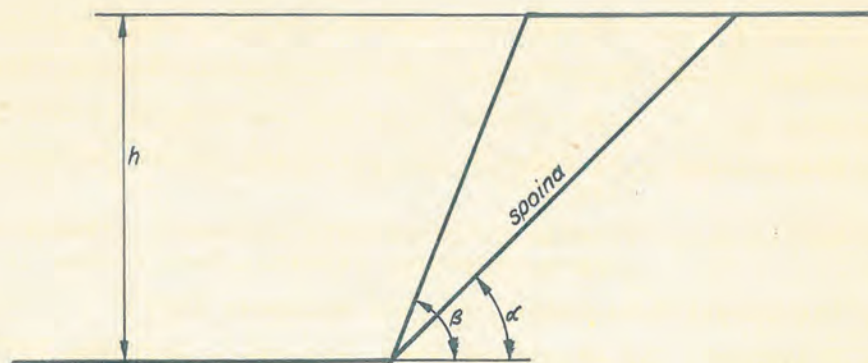


Rys. 10

Oprócz metod analityczno-wykreślnych, tego rodzaju jak wyżej podano, istnieją gotowe wzory, / Kaven, Stiny, Hennes, Fisenko i in ni/, które podają wysokość statecznego stoku o założonym nachyleniu i zbadanych wskaźnikach tarcia wewnętrznego i spójności. We wzorach tych nie uwzględnia się ciśnienia spływowego. Wyniki uzyskane tymi wzorami, nawet dla tych warunków są mniej dokładne od wyników badań analityczno-wykreślnych. Poniżej podaje się dwa wzory: pierwszy dla gruntu jednorodnego, drugi dla warunku równowagi na przesuw po warstwie /rys. 11/. / rys. 11/. Wzory tego rodzaju służą do pierwszej oceny warunków stateczności. / Symbol φ' oznacza kąt tarcia wewnętrznego w spoinie warstwy, /warstewka gruntu występująca wzdłuż płaszczyzny oddzielającej dwie różne warstwy geologiczne/ pozostałe symbole są zgodne z dotychczasowymi oznaczeniami :

$$h = \frac{4c}{\gamma \cdot \cos \varphi (1 - \operatorname{ctg} \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi)} \left[1 + \sin \varphi + \frac{\cos \beta (2\beta + 0,2)}{\cos \varphi} \right]$$

$$h = \frac{2c}{\gamma} \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \left(\frac{1}{1 - \operatorname{ctg} \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi'} \right)$$



Rys. 11

- 71 -

UWAGI KOŃCOWE.

Stoki w odkrywce górniczej można podzielić na trzy rodzaje :

1. stoki powstałe na skutek zbierania nadkładu i węgla,
2. stoki obiektów stałych w odkrywce,
3. stoki zwałów.

Stoki pierwszego rodzaju charakteryzują się tym, że ulegają ciągłej zmianie a przy tym tworzy je calizna, a więc grunt o strukturze nienaruszonej. Ponieważ z reguły posiada on po odwodnieniu dobre warunki stateczności, przeto przy projektowaniu stoków w takim gruncie można stosować wskaźnik stateczności o wartości mniejszej.

Stoki obiektów, przewidzianych do długiego użytkowania, budowanych na gruncie rodzimym lub usypowym, muszą być projektowane w taki sposób, aby ich stateczność była zachowana również w warunkach najniekorzystniejszych, jakie mogą wystąpić w okresie ich eksploatacji /np. katastrofalne opady/. Stoki nasypów pod te obiekty muszą być budowane z zachowaniem zasad stosowanych przy wykonywaniu budowli ziemnych, przewidywanych do długiej eksploatacji.

Stoki zwałów, zwłaszcza wysokich posiadają w naszych warunkach z reguły złe warunki stateczności. W przypadku gruntów skłonnych do osuwisk o wysokim stopniu wilgotności, względnie gdy w obrębie zwału wytworzą się warunki filtracji, należy bezwzględnie dążyć do odwodnienia zwałów lub przynajmniej do obniżenia zwierciadła wody gruntowej poniżej linii stoku.

Przy ustaleniu warunków stateczności stoków w odkrywce należy wziąć pod uwagę bezpieczeństwo ludzi, maszyn i urządzeń. W tym ostatnim przypadku należy uwzględnić wpływ wstrząsów na stateczność stoków.

L I T E R A T U R A
=====

1. Bendel L. Ingenieurgeologie T.I.Wien 1948
2. Cytowicz N.A. Mechanika gruntów /wyd.pol./Warszawa 1958
3. Fisenko T.L. Ustojcziwost bortow ugotnych karierow Moskwa 1956
4. Griszin M.M. Gidrotechniczeskoe Sooruzenia Moskwa 1954
5. Keil K. Ingenieurgeologie und Geotechnik Berlin 1951
6. Maliuszicki J.N. Uszkowia ustojcziwosti bortow karierow Kiew 1957
7. Masłow N.N. Ustowia ustojcziwosti skłonow i otkosow w gidro-jenergeticzeskom stroitelstwie Moskwa 1955
8. Piętkowski R. Mechanika gruntów Warszawa 1957
9. Prikłoński W.A. Gruntoznawstwo /Wyd.pol./. Warszawa 1955