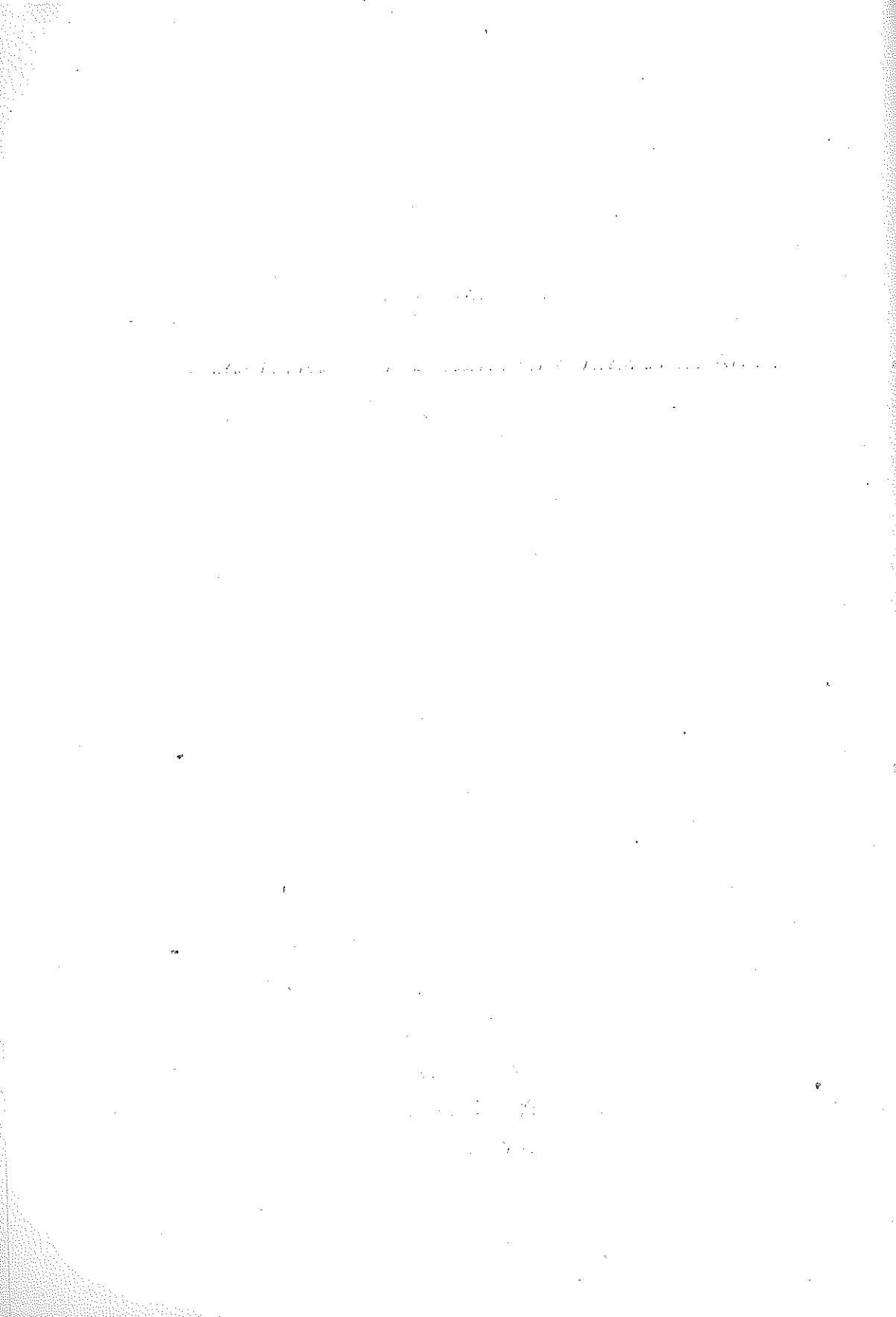


ALFRED HABERZAK

DOŚWIADCZENIA NAD PARCIEM GEOSTATYCZNYM

ROZPRAWY
INŻYNIERSKIE
XCIII



Parcie ziemi jako obciążenie zewnętrzne murów i ścian oporowych może być dwojakiego rodzaju: geodynamiczne i geostatyczne. Wielkość pierwszego możemy obliczać za pomocą różnych (lecz na wspólnej zasadzie opartych) teorii, wśród których metoda C o u l o m b a ogłoszona w 1773 r. jako jedna z prostszych i łatwiejszych w użyciu znajduje najszersze zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Wykorzystuje ona zjawiska ruchu i tarcia. Jej punktem wyjścia są założenia, że od znajdującej się poza murem masy ziemnej oddziela się pewna jej część w postaci tzw. klina odłamu oraz że ten klin wskutek pojawiających się sił tarcia na powierzchniach ograniczających go od muru i od pozostałej masy ziemnej znajduje się w stanie równowagi granicznej, tzn. znajduje się w równowadze w chwili, w której mur zaczyna się poruszać. Przyjęto również, że powierzchnia odłamu jest płaszczyzną przechodzącą przez dolną tylną krawędź muru oraz że klin odłamu jest bryłą jednolitą.

Założenia te (łącznie z przyjętym odpowiednio kątem wewnętrznego tarcia ziemi po ziemi i kątem tarcia ziemi po murze) posłużyły C o u l o m b o w i za podstawę wyznaczenia kierunków i wielkości sił oddziaływania pozostałej masy ziemnej i muru na pojawiający się klin odłamu, czyli umożliwiły w ogóle rozwiązanie zadania.

Klin odłamu może powstawać tylko wówczas, gdy mur zaczyna się oddalać od ziemi, a więc i parcie ziemi, w rozumieniu C o u l o m b a , może powstawać wyłącznie w takich tylko okolicznościach.

H. M ü l l e r - B r e s l a u wykonał szereg doświadczeń z piaskiem na aparacie w kształcie skrzyni prostopadłościennej o ścianach bocznych szklanych i utrwalił na zdjęciach obraz powstawania klina odłamu, [1]. Widzimy na tych zdjęciach wyraźnie rysującą się powierzchnię odłamu, która dla naziomu płaskiego zbliżona jest do płaszczyzny i przechodzi w pobliżu dolnej tylnej krawędzi ściany ruchomej traktowanej jako ściana oporowa. Z innych doświadczeń, należących do tej samej serii, wynika, że przy naziomach również poziomych, ale obciążonych w sposób zbliżony do skupionego lub o obciążeniu częściowym ciągłym, powierzchnia odłamu w żadnym razie nie może być uważana za płaszczyznę. Ponadto zdjęcia ilustrują wyjątkowo plastycznie, że z chwilą pojawienia się klina

odłamu wszystkie cząstki ziemi zawarte w jego obszarze ulegają przemieszczeniom, czyli że poszczególne cząstki ziemi, a nie klin odłamu, jak to przyjmuje Coulomb, znajdują się w stanie równowagi granicznej.

Przebieg odbywającego się tu zjawiska jest w zasadzie inny od podanego w założeniach Coulomba, w konsekwencji czego stosowanie teorii Coulomba parcia ziemi nasuwa z tego powodu uzasadnione zastrzeżenia, mimo że obliczane za pomocą tej teorii wielkości parcia ziemi, w danym przypadku piasku, mało różnią się od wielkości otrzymanych doświadczalnie przez Müllera-Breslaua, [1].

Ponadto trudno pogodzić się z faktem, aby parcie geodynamiczne należące do tego rodzaju obciążenia, które pojawia się dopiero wskutek zachodzących odkształceń czy w ogóle ruchów muru, mogło być uważane za obciążenie stanowiące podstawę do przeprowadzania obliczeń.

Wszystkie teorie parcia ziemi, dla których punktem wyjścia jest równowaga masy ziemnej przy wykorzystaniu powstających sił tarcia (bez względu na to czy operują klinem odłamu i czy traktują go jako bryłę jednolitą czy też nie) prowadzą do rozwiązań dających zawsze parcie geodynamiczne, a więc parcie ziemi będącej w ruchu.

W zagadnieniach praktycznych ruch muru ma postać przesuwania lub odkształcania się lub też jego obrotu dokoła pewnej osi. Ruch taki może być wywołany przez bezpośrednie działanie na konstrukcję oporową sił poziomych skierowanych od ziemi. W ogólności ruch może odbywać się i wtedy, kiedy na mur prócz parcia ziemi nie działają żadne siły. O ile założymy, że grunt pod ciężarem własnym muru nie osiada, to jest rzeczą oczywistą, że w tym przypadku przyczyną jego ruchu musi być tylko ziemia znajdująca się w spokoju, czyli parcie geostatyczne.

To ostatnie określane bywa często jako parcie ziemi na mur nieruchomy i nie odkształcający się, [2].

Wydaje się, że nie będzie błędem, jeżeli powiemy, że parcie geodynamiczne jest zjawiskiem wtórnym, ponieważ może ono pojawiać się dopiero wtedy, o ile przedtem powstanie parcie geostatyczne.

W zasadzie każda konstrukcja oporowa przenosi parcie geostatyczne, które w razie powstawania ruchu konstrukcji ustępuje miejsce parciu geodynamicznemu.

Jeżeli na mur obok parcia ziemi działają jednocześnie i inne siły, to i w tym przypadku parcie geostatyczne wyprzedzi ewentualne powstawanie parcia geodynamicznego, ponieważ przed pojawieniem się ruchu muru ziemia znajdująca się w spokoju musiała przylegać do tylnej jego powierzchni. Zachodzący tu ruch konstrukcji będzie skutkiem łącznego działania parcia geostatycznego i sił wyżej wspomnianych.

Podobny przebieg zjawiska może być i wtedy, gdy siły te będą działały na konstrukcję tylko w pewnych okresach czasu.

Wyżej przytoczone rozumowanie, a przede wszystkim przeprowadzona analiza istniejących na ten temat prac naukowych, w szczególności prac K. Terzaghiego, [3], i W. Wierzbickiego, [4], dowodzi, że pierwsze powstające w murze odkształcenia lub pierwsze pojawiające się jego ruchy wywoływane są przez ziemię znajdującą się w spokoju.

Czym więc należy tłumaczyć fakt, że podana przez Coulomba przybliżona metoda obliczania parcia geodynamicznego, dająca mniejsze spośród możliwych pojawiających się dwóch rodzajów parć, a więc parcie, które nie może być uważane za miarodajne, przetrwała okres czasu prawie dwóch wieków i nadal znajduje powszechne i prawie wyłączne zastosowanie w praktyce inżynierskiej?

Otóż wyznaczenie geostatycznego parcia ziemi sprowadza się do poszukiwania sposobów, za pomocą których można by wyznaczyć wielkości i kierunki sił wzajemnego oddziaływania poszczególnych cząstek ziemi znajdującej się w spokoju, czyli do rozwiązania zagadnienia wyjątkowo trudnego i skomplikowanego, a przy tym ze względu na jego charakter nietypowy niemożliwego w ogóle do rozwiązania przy użyciu ogólnie znanych i stosowanych metod w mechanice budowli.

Wszelkie rozważania natury teoretycznej, zmierzające do wyznaczenia geostatycznego parcia ziemi, z konieczności muszą być oparte na mniej lub więcej trafnych hipotezach.

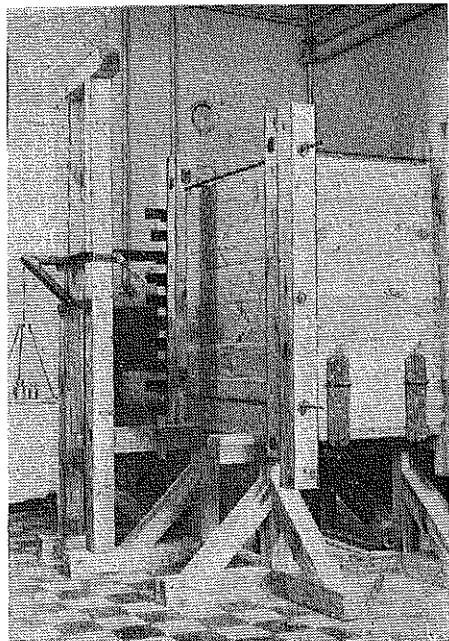
Stąd powstaje przeświadczenie, że w poszukiwaniu rozwiązań, które by dawały wielkości parcia geostatycznego jak najbardziej zbliżone do wielkości rzeczywistych, należałoby pójść w kierunku prac badawczo-doświadczalnych.

W tym celu zaprojektowano i wykonano odpowiedni aparat, za pomocą którego przeprowadzono pierwsze doświadczenia przy użyciu piasku wiślanego. Działanie aparatu oparte jest na następujących zasadach.

Między ziemią a ścianą przenoszącą parcie ziemi ułożono w pewnej od siebie odległości szereg cienkich i elastycznych taśm, tak że ich osie podłużne są równoległe do prostej poziomej. Ściskane obustronnie taśmy, mogące się przesuwac tylko po powierzchni ściany, przylegając do niej swym większym wymiarem poprzecznym wyciągamy kolejno w kierunku poziomym i mierzymy użyte do tego wielkości sił oporu. Znając te siły oraz znając pomierzone już uprzednio współczynniki tarcia dla poszczególnych taśm przy ich przesuwaniu znamy zarazem wielkości parć wywieranych przez ziemię na poszczególne taśmy znajdujące się w różnych pozycjach. Stąd już łatwo przejść do obliczenia parć jednostkowych drogą interpolacji liniowej i następnie do wyznaczenia składowej poziomej parcia całkowitego. Ponieważ szerokość jednej taśmy jest mała w porównaniu z wysokością ściany oporowej, więc dokładność interpolowanej wielko-

ści parcia jednostkowego do celów praktycznych można przyjąć za zupełnie wystarczającą.

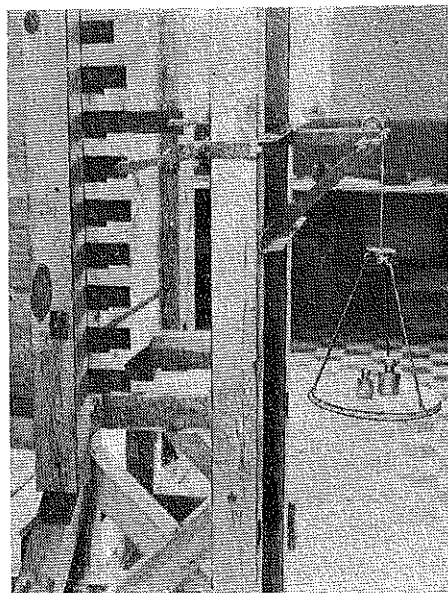
Następnie wyznaczamy składową pionową parcia całkowitego również przy wykorzystaniu sił tarcia przy przesuwaniu w sposób, którego opis podano przy szczegółowym omówieniu aparatury.



Rys. 1

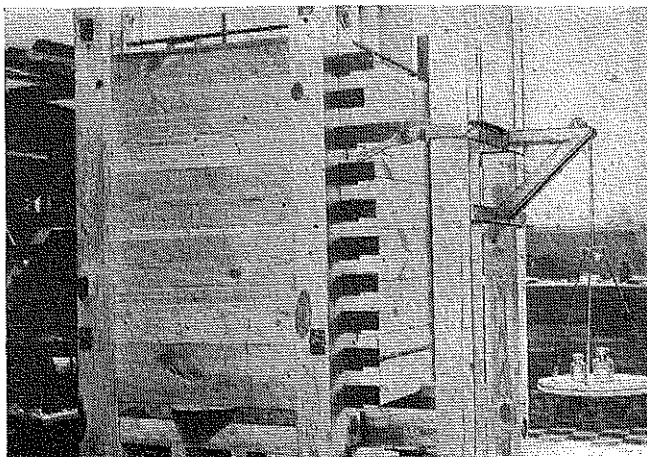
Całość aparatury i poszczególne jej części uwidocznione są na rys. 1, 2 i 3.

Do podstawy w kształcie ramy prostokątnej o wysokości 70 cm i wymiarach w planie 160×160 cm, wykonanej z krawędziaków o przekroju poprzecznym 10×10 cm, przytwierdzone jest na stałe poziome dno skrzyni o grubości 63 mm. Boczne ściany skrzyni, wykonane z bali o grubości 50 mm, ułożonych na zakład i połączonych na końcach sztywno na wpust i klej z krawędziakami 10×10 cm, opierają się w wycięciach znajdujących się wzdłuż obwodu dna. Są one połączone z sobą za pomocą śrub. Wymiary wewnętrzne skrzyni wynoszą: przekrój w planie 60×100 cm, wysokość 10 cm.



Rys. 2

Przyjęta duża grubość ścian i mocna ich konstrukcja mają na celu ograniczenie do minimum powstawania odkształceń i ewentualnych wstrząsów przy doświadczeniach. Jest to ważne, bowiem w przypadku ruchów ziemi mierzone parcie mogłoby nie być geostatyczne.



Rys. 3

Najważniejszą częścią aparatu jest ściana przednia skrzyni uważana za ścianę oporową, ponieważ w jej płaszczyźnie odbywa się pomiar parcia ziemi. Powierzchnia jej od strony wewnętrznej ma nacięcia w kształcie rowków prostokątnych o głębokości 4 mm i szerokości 51 mm. Nacięć takich jest dziesięć, odległości między nimi są równe, a osie ich po złożeniu aparatu mają położenie poziome. W każdym rowku ułożone są dwie taśmy o jednakowych przekrojach poprzecznych 2×50 mm. Ponieważ suma grubości obu taśm równa się głębokości rowka, więc po ułożeniu wszystkich taśm powierzchnia ściany od strony ziemi tworzy jedną płaszczyznę. Każda taśma opierając się mniejszym swoim wymiarem poprzecznym o poziomą płaszczyznę rowka zachowuje stale określone położenie w poziomie. Większy jej wymiar poprzeczny jest mniejszy o 1 mm od szerokości rowka; umożliwia to swobodne przesuwanie się taśmy w kierunku jej osi podłużnej. Rowki zatem spełniają rolę prowadnic dla ruchu taśm.

Długość taśmy wyciąganej równa się 1300 mm i jest większa od zewnętrznego wymiaru szerokości skrzyni o 500 mm. Na jednym z jej wystających końców osadzony jest sworzeń stalowy, o który (w razie wyciągania taśmy) zaczepiony jest odpowiedni uchwyt, połączony z jednym końcem elastycznej linki o kierunku pokrywającym się z kierunkiem podłużnej osi taśmy przerzuconej przez bloczek. Na drugim końcu linki

zwisającej swobodnie z bloczka zawieszono szalkę, na której układane są odważniki. Łączny ciężar odważników i szalki, powodujący ruch taśmy, jest miarą oporu przy jej wyciąganiu. Opór ten mierzony był również za pomocą dynamometru, a otrzymane wyniki w obu przypadkach okazały się praktycznie takie same.

Druga taśma, nieruchoma, umieszczona między taśmą ruchomą i ziemią, ma na celu zapobiegać wzruszaniu ziemi przez taśmę ruchomą w czasie jej wyciągania. Końce taśmy nieruchomej wychodzą poza ściany boczne skrzyni z każdej strony po 50 mm; umożliwia to kontrolę właściwego sposobu spełniania wyznaczonego jej zadania.

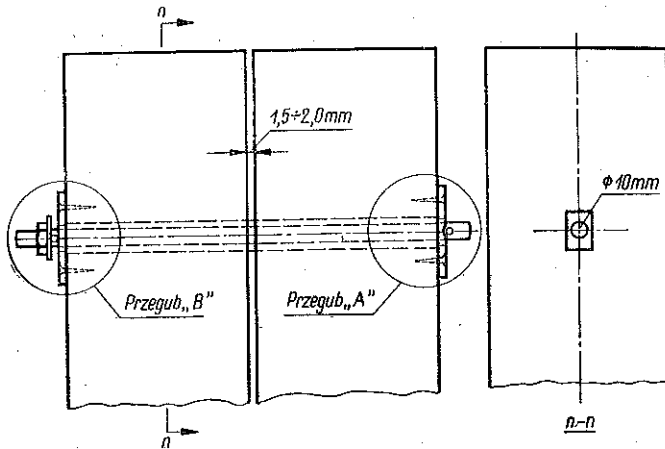
Ponadto wewnętrzną powierzchnię ściany oporowej izolowano od ziemi cienkim i przezroczystym materiałem styłonowym. Brak takiej osłony powodowałby zaklinowywanie taśm wyciąganych wskutek przedostawania się cząstek ziemi do luzów pomiędzy powierzchniami taśm a ściankami rowków oraz w przypadku użycia do badań ziemi mokrej; powodowałby również zwilżanie tych części aparatu, dla których pomierzone zostały współczynniki tarcia.

W jednej płaszczyźnie pionowej leżą: oś ramy prostokątnej opartej obok skrzyni na podstawie aparatu, osie symetrii poprzecznych przekrojów taśm ruchomych, równoległe do większych wymiarów tych przekrojów oraz płaszczyzna symetrii bloczka prostopadła do jego osi obrotu. Bloczek o łożyskach kulkowych i średnicy równej 50 mm osadzony jest na osi opierającej się końcami na poziomych półkach dwóch kątowników stalowych tworzących wspornik o wysięgu 200 mm. Ten ostatni połączony jest z odpowiednim urządzeniem dociskowym i za jego pomocą może być unieruchomiony na słupach ramy na dowolnym poziomie w granicach jej wysokości.

Ponieważ rozstaw w świetle pionowych półek kątowników wspornika jest większy od grubości bloczka, a ułożenie łożysk końców jego osi obrotu jest takie, że może ona przesuwac się w kierunku swej długości, przeto bloczek posiada również możliwość ograniczonego przesuwania się w kierunku poziomym.

Całość urządzenia pozwala na takie ustawienie i regulowanie bloczka, że oś każdej taśmy w czasie jej ciągnięcia za pomocą linki przerzuconej przez bloczek zachowuje stale położenie poziome, a taśma na całej swej długości znajduje się w płaszczyźnie dokładnie równoległej do powierzchni ściany oporowej. Gdyby warunki te nie były zachowane, wówczas powstałyby dodatkowe niepożądane opory, które sumowałyby się z oporami wywołanymi przez parcie ziemi i w rezultacie pomiarów dokonanych w taki sposób nie można byłoby uważać za prawidłowe.

Ściana przednia połączona jest ze ścianami bocznymi za pomocą czterech przegubów o jednakowej konstrukcji (rys. 4).



Rys. 4

Przez otwory o przekroju prostokątnym o boku większym w kierunku pionowym, wykonane w krawędziach ścian przedniej i bocznej, przechodzi śruba zaopatrzona na jednym końcu w trzpień stalowy, opierający się o wyrobioną w podkładce stalowej powierzchnię walcową — przegub A. Na drugim końcu śruba posiada nakrętkę i podkładkę, przy czym ta ostatnia opiera się o powierzchnię walcową dwóch odcinków pręta stalowego przyspawanych do podkładki, których osie pokrywają się z poziomą osią otworu w podkładce — przegub B.

Po ustawieniu i odsunięciu ściany przedniej na zewnątrz na odległość 1,5 - 2,0 mm od czoła ścian bocznych koniec śruby przy przegubie B utrzymuje się na jednym poziomie z jej końcem przy przegubie A.

Powyższa konstrukcja przegubów pozwala na swobodne przesuwanie się ściany przedniej względem ścian bocznych według schematu przedstawionego na rys. 5. Ponadto zapewnia również i to, że ściana całym swym ciężarem opiera się swą dolną krawędzią na płycie stalowej (widocznej na rys. 3) umieszczonej w specjalnie wyrobionym dla niej gnieździe w dnie skrzyni, przykrytym od góry blachą stalową, której górna powierzchnia tworzy z powierzchnią górną dna jedną płaszczyznę.

Ruchy ściany przedniej w kierunku pionowym (spowodowane tym, że zarówno powierzchnia płyty wysuwanej jak i powierzchnia, po której ta płyta przesuwa się, nie są idealnie gładkie) będą wywoływały powstawanie sił tarcia w przegubach. Wielkość tych sił będzie jednak bardzo mała w porównaniu do mierzonej wielkości siły oporu wyciągania płyty stalowej.



Rys. 5

W związku z powyższym, a przede wszystkim z uwagi na to, że opór siły tarcia, użyty do wyciągania płyty, mierzony był w chwili jej pierwszego ruchu, powstające w tym momencie siły tarcia w przegubach zostały w ogóle pominięte. Mierzymy więc siły oporu wyciągania płyty stalowej przed i po wprowadzeniu do skrzyni piasku. Mając różnice tych oporów wyznaczamy składową pionową parcia i następnie wielkość parcia całkowitego jako sumę wektorową tej ostatniej i składowej poziomej pomierzonej poprzednio w sposób wyżej opisany przy użyciu taśm ruchomych.

Do przeprowadzenia pierwszych doświadczeń użyto piasku wiślanego powietrzno-suchego o ciężarze objętościowym przy luźnym jego usypaniu równym 1650 kG/m^3 i wyznaczono wielkość parcia przy naziomie poziomym płaskim dla trzech różnych wysokości — 50, 70 i 95 cm o tej samej oczywiście szerokości, bowiem równej wewnętrznemu mniejszemu wymiarowi skrzyni w planie wynoszącemu 60 cm.

Dla każdej z tych wysokości zarówno parcia jednostkowe jak i składowa pionowa parcia całkowitego pomierzone zostały dziesięciokrotnie, a średnie arytmetyczne dokonanych pomiarów przyjęto za wielkości ostateczne.

Otrzymywane wyniki doświadczeń wstępnych narzuciły z góry stosowanie określonej metody postępowania przy dokonywaniu pomiarów.

Przed wszystkim okazało się, że do ciągnięcia poszczególnych taśm po raz drugi i przy ciągnięciach następnych przy tym samym wypełnieniu skrzyni piaskiem użyć należy sił mniejszych od sił użytych przy pierwszym ich wyciąganiu. Przyczyna tego polega na tym, że powierzchnie taśm jak i powierzchnie wgłębień w ścianie, po których taśmy przesuwają się, nie są idealnie gładkie, wskutek czego już przy pierwszym ciągnięciu taśm ziarenka piasku znajdujące się w ich sąsiedztwie przemieszczają się w kierunku wnętrza skrzyni. Dlatego po każdym dokonanym pomiarze parć (bez względu na to, przy jakiej wysokości parcie to mierzymy) skrzynię opróżniano i następnie napełniano ją od nowa.

Należy podkreślić, że nieuniknione (bardzo małego rzędu w porównaniu do wymiarów aparatu i znajdującej się w nim masy ziemnej) lokalne ruchy ziarenek piasku czy w ogóle ziemi w pobliżu powierzchni taśm nie wpływają na doświadczenie i że mierzone tu parcie jest rzeczywiście parciem geostatycznym. Zostało to stwierdzone na podstawie wykonania, jak wyżej o tym wspomniano, szeregu wstępnych dość kłopotliwych i żmudnych prób prowadzących do możliwie dokładnego poznania wszystkich szczegółów, dotyczących pracy całej aparatury i mających na celu uchwycenie i wyeliminowanie tych wszystkich błędów, które mogłyby powtarzać się systematycznie.

Między innymi wykonano następującą próbę. Po nasypaniu piasku do skrzyni zmierzono siłę oporu przy wyciąganiu np. tylko piątej taśmy od dołu. Potem skrzynię opróżniono i napełniono w ten sam sposób i do tej samej wysokości oraz zmierzono siły oporu przy wyciąganiu wszystkich taśm. Podobny cykl doświadczeń powtórzono kilkakrotnie. Rząd wielkości sił oporu przy wyciąganiu tej samej taśmy, czyli w danym razie taśmy piątej, w obu przypadkach był taki sam. Otrzymane w ten sposób wyniki świadczą o tym, że małe ruchy ziarenek piasku w pobliżu ciągniętych taśm nie wpływają na zmianę wielkości oporu taśm sąsiednich, czyli rzeczywiście ruchy te są ruchami lokalnymi i mierzone tu parcie będzie istotnie parciem geostatycznym pod warunkiem jednak, że przy tym samym napełnianiu skrzyni do określonej wysokości opory wyciągania poszczególnych taśm, znajdujących się w granicach tej wysokości, mierzone będą tylko jeden raz z powodów wyżej uzasadnionych.

Aby wreszcie wyznaczone doświadczalnie wielkości parć dla różnych wysokości mogły być porównywalne między sobą i z wielkościami obliczonymi za pomocą sposobu *Coulomba*, należało przy każdorazowym napełnianiu skrzyni zachować ten sam sposób wprowadzania do niej piasku. Bez względu więc na wysokość, do której skrzynię napełniano, wsypywano piasek odpowiednimi porcjami na środek rzutu poziomego jej dna, następnie tworzące się stożki rozrzucano na boki równając każdorazowy zasyp do poziomu. Chodziło o to, aby na dowolnej wysokości ściany oporowej, czyli na poziomie każdej taśmy, zwartość piasku spowodowana jego wprowadzeniem do wnętrza była jak najbardziej do siebie zbliżona. Piasek nie był więc ubijany, lecz przy rozgarnianiu kolejnych wyżej wspomnianych stożków następowały lekkie uderzenia piaskiem o wewnętrzne powierzchnie ścian skrzyni. W ten sposób starano się osiągnąć możliwie równomierny stopień zwartości piasku w poszczególnych warstwach poziomych pod wpływem własnego jego ciężaru przy prawie luźnym sypaniu.

Doświadczenie przeprowadzono w pomieszczeniu znajdującym się w przyziemiu, ogrzewanym centralnie, w temperaturze 16° do 20° .

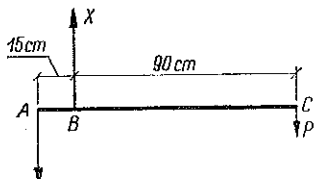
Wahania temperatury w granicach wyżej podanych nie wpływają na mierzone wielkości parć.

Zbadano również wpływ czasu. W tym celu po napełnieniu skrzyni piaskiem pozostawiano aparaturę na dłuższe okresy czasu w zupełnym spokoju. Parcie mierzone po upływie jednego miesiąca było nie większe od parcia mierzonego po upływie jednego lub kilku dni. Oczywiście, w warunkach odmiennych od warunków laboratoryjnych, a więc wszędzie tam, gdzie ziemia narażona jest na wpływy atmosferyczne lub mechaniczne, jak np. w przypadku rozchodzenia się w ziemi drgań zwiększają-

cych jej zwartość, wielkość wywieranego przez nią parcia z biegiem czasu będzie ulegała zmianom.

Współczynniki tarcia przy posuwaniu poszczególnych taśm zainstalowanych w ścianie przedniej, uważanej tu za ścianę oporową, wyznaczono przed złożeniem aparatu. Okazało się, że dla wszystkich taśm jest on jednakowy i równa się $f_1 = 4,5/7,5 = 0,6$, gdzie 4,5 kG jest siłą oporu przy ciągnięciu taśmy, 7,5 kG — pionową siłą dociskającą taśmę.

Współczynnik tarcia przy wyciąganiu płyty stalowej o ciężarze 3 kG, na której opiera się ściana przednia, oporowa, o ciężarze 29 kG, i która znajduje się w gnieździe wyrobionym w dnie skrzyni, mierzono za pomocą dźwigni jedno-ramiennej dziesięciokrotnie i jako wartość średnią otrzymano $f_2 = 0,64$.



Rys. 6

Dźwignia o długości 105 cm przedstawiona jest na rys. 6. Punkt A jest stały, w punkcie C siła P mierzona jest za pomocą dynamometru, w punkcie B siła X jako siła poszukiwanego oporu przy ciągnięciu płyty stalowej jest równa $7P$. Uzyskano następujące pomiary:

$$P_0 = 3,2; 3,1; 3,3; 3,3; 3,4; 3,2; 3,0; 3,2; 3,0; 3,3 \text{ kG.}$$

$$\text{Średnio } P_0 = 3,2 \text{ kG więc } X = 7 \cdot 3,2 = 22,4 \text{ kG.}$$

Ciężar taśm zainstalowanych w ścianie wynosił 3 kG. Stąd

$$f_2 = \frac{22,4}{29 + 3 + 3} = 0,64.$$

Mając tak wyznaczone współczynniki tarcia przeprowadzono doświadczenia.

Tablica 1

Nr taśmy	Wielkości sił oporu przy ciągnięciu poszczególnych taśm w kG. Cyfry w kolumnach od 1 do 10 oznaczają kolejne pomiary										Średnie wielkości sił oporu przy ciągnięciu taśm w kG	Wielkości parcia na poszczególne taśmy przy współ. tarcia $f_1 = 0,6$ w kG	Średnie wielkości parcia na 1 cm szerokości każdej taśmy w kG
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	4,5	4,7	4,5	4,1	4,2	4,3	5,6	4,0	4,7	3,8	4,30	7,16	1,43
2	4,2	4,0	4,2	4,2	4,3	3,9	4,5	4,3	4,1	4,4	4,34	7,23	1,44
3	3,2	3,0	3,4	3,8	3,6	3,3	3,5	3,3	3,2	3,4	3,37	5,62	1,12
4	2,7	2,4	2,7	2,3	2,5	2,0	2,2	2,0	2,6	2,3	2,37	3,95	0,79
5	1,2	1,0	0,9	1,4	1,4	1,1	1,2	1,1	1,3	0,9	1,15	1,92	0,38
P	4,0	4,2	4,2	4,3	4,3	4,2	4,1	4,0	4,3	4,2	4,20		

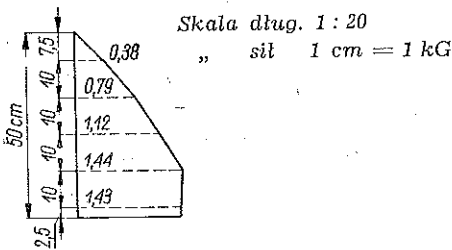
Tablica 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	5,0	5,5	6,0	5,9	6,5	6,2	6,5	6,6	5,7	6,0	6,00	10,00	2,00
2	4,3	5,0	6,3	6,4	6,1	6,3	6,0	6,1	6,2	5,8	5,85	9,75	1,95
3	4,3	4,8	5,3	5,7	5,3	5,7	4,9	4,5	5,2	5,0	5,07	8,55	1,71
4	3,8	3,9	4,7	4,7	3,9	4,2	3,8	4,0	4,4	3,7	4,11	6,86	1,37
5	2,7	2,7	3,6	3,1	2,8	3,2	3,4	3,5	3,0	2,8	3,10	5,17	1,03
6	2,2	2,0	2,3	2,7	2,0	2,1	2,0	2,4	2,2	2,3	2,22	3,70	0,74
7	1,5	1,4	1,1	1,0	1,1	1,3	0,9	0,8	0,7	0,9	1,06	1,76	0,35
P	4,8	5,0	5,2	5,5	5,2	5,0	5,1	5,3	5,4	5,2	5,17		

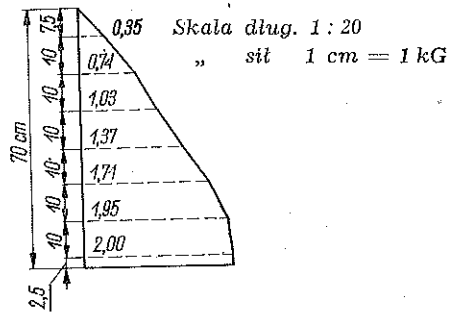
Tablica 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	7,0	9,0	6,5	7,8	6,5	6,8	7,5	7,5	8,2	7,8	7,46	12,95	2,49
2	6,5	8,0	6,1	7,0	8,2	7,5	8,0	9,5	7,9	7,4	7,61	12,70	2,54
3	7,5	9,5	7,0	6,0	7,1	7,9	9,0	7,9	7,5	7,2	7,16	11,95	2,39
4	6,0	6,5	5,8	5,5	6,7	6,1	6,7	6,8	6,0	6,3	6,24	10,38	2,07
5	5,3	5,4	5,4	5,4	5,7	5,4	5,5	6,0	5,2	5,8	5,47	9,12	1,82
6	4,7	4,4	4,2	4,6	4,7	4,1	4,8	4,5	4,7	4,4	4,51	7,52	1,50
7	3,8	3,8	3,8	3,7	3,8	3,7	3,8	4,0	3,7	3,7	3,78	6,30	1,26
8	3,3	3,4	3,0	3,1	3,3	3,3	3,7	3,1	3,5	3,3	3,30	5,50	1,10
9	2,0	2,2	1,9	2,1	2,0	2,1	2,2	2,2	2,1	2,0	2,08	3,47	0,69
10	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	1,1	0,7	0,6	0,81	1,35	0,27
P	7,2	7,0	7,1	7,0	7,0	7,3	6,9	7,5	6,8	7,0	7,9		

Wyniki pomiarów zestawiono w tablicach 1, 2 i 3, odpowiadających trzem różnym wysokościami, dla których zostały wyznaczone wielkości parę geostatycznych.



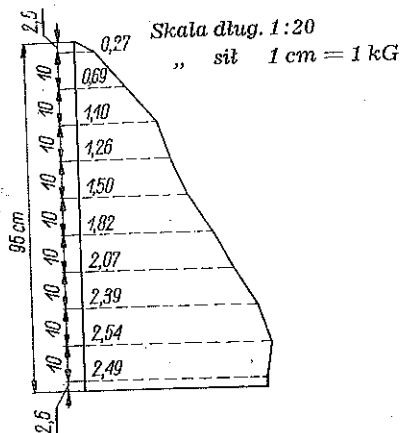
Rys. 7



Rys. 8

Dziesięć kolumn w tablicach odpowiada dziesięciu wykonanym pomiarom dla każdej z trzech wysokości, przy czym zgodnie z obraną metodą doświadczenie wymagało dziesięciokrotnego opróżniania i ponownego nasypywania skrzyni.

Liczby w ostatnim wierszu poziomym oznaczonym symbolem P oznaczają wielkości sił oporu przy ciągnięciu płyty stalowej, przenoszącej w sumie ciężar ściany przedniej i pionową składową parcia.



Rys. 9

Wykresy parę jednostkowych, (rys. 7, 8, 9) sporządzono na podstawie wielkości podanych w ostatniej kolumnie tablic.

Składowe parcia całkowitego dla poszczególnych wysokości — poziomą Z_{pz} i pionową Z_{pn} — wyznaczamy odpowiednio: pierwszą na podstawie wykresów parę jednostkowych, drugą na podstawie wzoru

$$(1) \quad Z_{pn} = 7(P - P_0) : f_2.$$

Dla wysokości $h = 50$ cm mamy

$$Z_{pz} = 47,05 \text{ kG} \approx 47 \text{ kG},$$

$$Z_{pn} = 7(4,20 - 3,20) :$$

$$: 0,64 = 10,95 \text{ kG} \approx 11 \text{ kG},$$

wobec czego wypadkowa $Z \approx 48$ kG.

Wielkość parcia obliczona metodą *Coulomba* przy ścianie pionowej i naziemiu płaskim poziomym przy przyjęciu $\psi_z = 32^\circ$ i $\psi_m = 0$ wynosi

$$(2) \quad Z'_{pz} = 0,152 h^2 = 0,152 \cdot 0,5^2 t = 38 \text{ kG}.$$

Dla wysokości $h = 70$ cm z doświadczenia mamy

$$Z_{pz} = 85,56 \text{ kG} \approx 86 \text{ kG}, \quad Z_{pn} = 7(5,17 - 3,20) : 0,64 = 21,6 \text{ kG} \approx 22 \text{ kG}$$

i całkowite parcie $Z = 89$ kG. Natomiast według teorii *Coulomba* przy założeniach powyższych:

$$Z'_{pz} = 0,152 \cdot 0,7^2 t = 75 \text{ kG}.$$

I wreszcie dla wysokości $h = 95$ cm składowa pozioma obliczona z wykresu parę jednostkowych i pionowa według wzoru (1) odpowiednio wynoszą:

$$Z_{pz} = 154 \text{ kG}, \quad Z_{pn} = 7(7,09 - 3,20) : 0,64 \approx 42 \text{ kG},$$

a parcie całkowite $Z = 160$ kG.

Na podstawie teorii *Coulomba* przy tych samych założeniach mamy

$$Z'_{pz} = 0,152 \cdot 0,95^2 t = 137 \text{ kG}.$$

Stosunek poziomych składowych parcia geostatycznego do parcia geodynamicznego dla każdej z poszczególnych wysokości odpowiednio wynosi:

$$\frac{47}{38} = 1,23, \quad \frac{86}{75} = 1,15, \quad \frac{154}{137} = 1,12.$$

Stosunek składowych pionowej do poziomej parcia całkowitego geostatycznego rośnie wraz ze wzrostem wysokości i wyraża się liczbami

$$\frac{11}{47} = 0,234, \quad \frac{22}{86} = 0,255, \quad \frac{42}{154} = 0,272.$$

Obliczone kąty nachylenia, jakie tworzą z normalną do wewnętrznej powierzchni muru kierunki parć całkowitych, dla poszczególnych wysokości są odpowiednio równe:

$$\psi_m = 13^\circ 10', \quad \psi_m = 14^\circ 15', \quad \psi_m = 15^\circ 20'.$$

Z powyższego zestawienia wynika, że składowe poziome dla obu rodzajów parć różnią się w granicach od 12‰ do 23‰ i przy mniejszych wysokościach różnice te są większe i odwrotnie.

Z wykonanych wykresów parć jednostkowych dla trzech różnych wysokości widać wyraźnie, że w pobliżu podstawy skrzyni, czyli w bezpośrednim zetknięciu się piasku z podłożem sztywnym i w pewnej od niego odległości, zachodzi odchylenie w stosunku do normalnie odbywającego się rozkładu parć jednostkowych w wyżej położonych poziomach ściany oporowej. Mianowicie parcia jednostkowe poniżej pewnego poziomu w kierunku podstawy skrzyni przestają wzrastać. W związku z tym w przypadku zastąpienia dna skrzyni podłożem podatnym wielkości parć całkowitych byłyby nieco większe od mierzonych.

Otrzymane krzywe rozkładu parć jednostkowych o kształcie lekko wypukłym można by bez większego błędu uważać za proste. Mając na uwadze takie przyjęcie otrzymujemy ze wzoru

$$(3) \quad Z_{pz} = \zeta_0 \frac{\gamma h^2}{2}$$

dla poszczególnych wysokości, dla których doświadczalnie wyznaczone zostały składowe poziome parcia całkowitego, następujące wartości współczynników ζ_0 :

$$\text{dla wysokości } h = 50 \text{ cm} \quad \zeta_0 = \sqrt{\frac{0,047 \cdot 2}{1,650 \cdot 0,5^2 \cdot 0,60}} \approx 0,380,$$

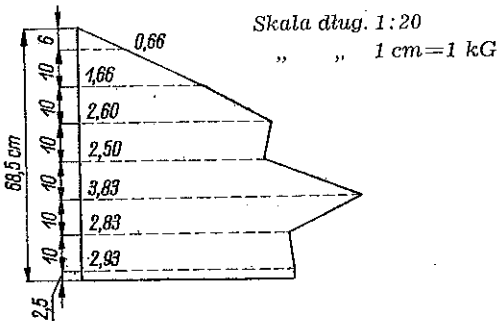
$$\text{dla wysokości } h = 70 \text{ cm} \quad \zeta_0 = \sqrt{\frac{0,086 \cdot 2}{1,650 \cdot 0,7^2 \cdot 0,60}} \approx 0,355,$$

$$\text{dla wysokości } h = 95 \text{ cm} \quad \zeta_0 = \sqrt{\frac{0,154 \cdot 2}{1,650 \cdot 0,95^2 \cdot 0,60}} \approx 0,345.$$

K. Terzaghi na podstawie przeprowadzonych doświadczeń podaje, że dla piasku niezależnie od wielkości ziaren $\zeta = 0,420$.

Skibiński na podstawie rozważań teoretycznych rozpatrując piasek jako układ złożony z ziarn o kształcie kulistym obliczył, że wielkość ζ_0 zależy od stopnia zagęszczenia piasku, przy czym jako maksymalną wartość podaje $\zeta_0 = 0,394$.

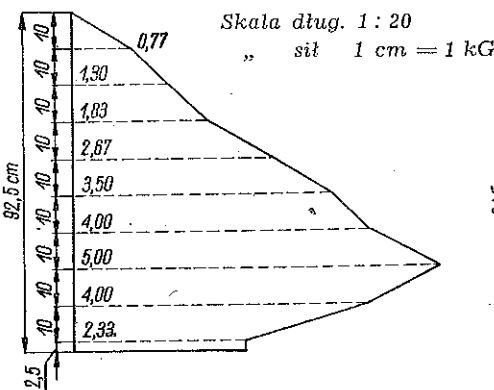
Terzaghi ponadto stwierdza, że współczynnik ζ_0 wraz ze wzrostem wysokości ściany oporowej maleje, co znajduje potwierdzenie w otrzymanych doświadczalnie wynikach, podanych w niniejszej pracy.



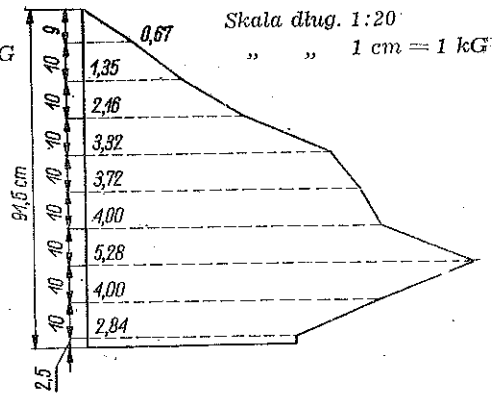
Rys. 10

wysokości 68,5 cm, o wysokości 95 cm — do wysokości 92,5 cm i przy dalszym zagęszczaniu ten ostatni obniżył się do wysokości 91,5 cm. Wszyst-

Wykonano również doświadczenia z piaskiem zagęszczonym przy nasypianiu piasku do wysokości 70 i 95 cm. Zagęszczenie powodowano za pomocą równomyernihych uderzeń o zewnętrzne powierzchnie ścian wzdłuż obwodu skrzyni w różnych poziomach jej wysokości poczynając od dołu i przesuwając się stopniowo ku górze. Przy zagęszczaniu słup piasku o wysokości 70 cm spadł do



Rys. 11



Rys. 12

kie pomiary dokonano w sposób analogiczny do sposobu stosowanego przy piasku nie zagęszczonym i stosownie do otrzymanych wyników zestawionych tablic 4-6 sporządzono wykresy parć jednostkowych (rys. 10, 11 i 12).

Tablica 4

Po zagęszczeniu $h = 68,5$ cm

Nr taśmy	Wielkości sił oporu przy ciągnięciu taśm w kG	Wielkości parę na poszczególne taśmy przy współ. tarcia $f = 0,6$	Średnie wielkości parę na 1 cm szerokości każdej taśmy w kG
1	2	3	4
1	8,7	14,50	2,90
2	8,5	14,17	2,83
3	11,5	19,15	3,83
4	7,5	12,50	2,50
5	7,8	13,00	2,60
6	5,0	8,33	1,66
7	2,0	3,33	0,66
P	5,0		

$$Z_{pz} = 161 \text{ kG},$$

$$Z_{pn} = 7(5,0 - 3,2) : 0,64 \approx 20 \text{ kG},$$

$$\frac{Z_{pn}}{Z_{pz}} = 0,1241 \quad \psi_m \approx 7^\circ 0,9',$$

$$\zeta_0 = \frac{0,161 \cdot 2}{1,650 \cdot 0,685^2 \cdot 0,60} \approx 0,830.$$

Tablica 5

Po pierwszym zagęszczeniu
 $h = 92,5$ cm

1	2	3	4
1	7,0	11,66	2,33
2	12,0	20,00	4,00
3	15,0	25,00	5,00
4	12,0	20,00	4,00
5	10,5	17,50	3,50
6	8,0	13,35	2,67
7	5,5	9,16	1,83
8	3,9	6,50	1,30
9	2,3	3,84	0,77
P	6,8		

Tablica 6

Po drugim zwiększonym zagęszczeniu
 $h = 91,5$ cm

1	2	3	4
1	8,5	14,20	2,84
2	12,0	20,00	4,00
3	16,0	26,00	5,28
4	12,5	20,00	4,00
5	11,2	18,60	3,72
6	10,0	16,70	3,32
7	6,5	10,80	2,16
8	4,0	6,76	1,35
9	2,0	3,86	0,67
P	6,7		

Dla $h = 92,5$ cm

$$Z_{pz} = 248 \text{ kG}, \quad Z_{pn} = 7(6,8 - 3,2) : 0,64 = 39,4 \text{ kG},$$

$$\frac{Z_{pn}}{Z_{pz}} = 0,1589, \quad \psi_m = 9^\circ, \quad \zeta_0 = \sqrt{\frac{0,248 \cdot 2}{1,650 \cdot 0,925^2 \cdot 0,60}} \approx 0,750;$$

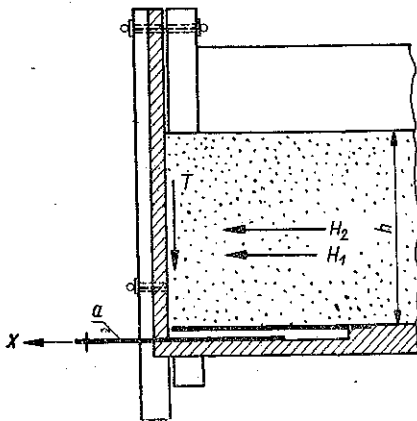
dla $h = 91,5$ cm

$$Z_{pz} = 268 \text{ kG}, \quad Z_{pn} = 7(6,7 - 3,2) : 0,64 = 38,4 \text{ kG},$$

$$\frac{Z_{pn}}{Z_{pz}} = 0,1435, \quad \psi_m = 8^\circ 10', \quad \zeta_0 = \frac{0,268 \cdot 2}{1,650 \cdot 0,915 \cdot 0,60} \approx 0,800.$$

Po zagęszczeniu piasku różnice pomiędzy wielkościami parć jednostkowych w poziomach leżących w pobliżu podstawy skrzyni są znacznie większe niż miało to miejsce przy piasku luźno usypanym, przy czym poczynając od podstawy skrzyni parcia jednostkowe rosną do pewnej wysokości, od której następnie już normalnie maleją. W przypadku zastąpienia sztywnego dna skrzyni masą piasku ułożonego poniżej dolnej krawędzi ściany oporowej należy oczekiwać, że w najniższych punktach ściany oporowej wystąpią największe parcia jednostkowe. Wówczas parcia jednostkowe w granicach całej wysokości ściany malałyby w kierunku góry. Oczywiście mogą tu być pewne odchylenia od regularnego ich przebiegu, co można zaobserwować na wykresie wykonanym dla $h = 68,5$ cm.

W praktyce ziemia wywierająca parcie na konstrukcję oporową jest nieraz zagęszczana, najczęściej przez ubijanie, i może spoczywać na podłożu zarówno sztywnym, jak i podatnym. O ile więc podłoże jest podatne, to wykres parć jednostkowych z wystarczającym dla celów praktycznych przybliżeniem przyjąć można za prostoliniowy z tym jednak, że poczynając od punktu, w którym wartość parcia jednostkowego jest największa, parcia jednostkowe będą rosły ku dołowi według prostej przechodzącej przez koniec największej współrzędnej poziomej i przez ślad górnej krawędzi ściany przedniej. Parcie całkowite obliczane według tak skorygowanego wykresu parć jednostkowych jest już większe od obliczonego, a punkt jego przyłożenia nieco się obniża. Łatwo sprawdzić, który z tych dwóch przypadków da obciążenie bardziej niekorzystne dla budowli.



Rys. 13

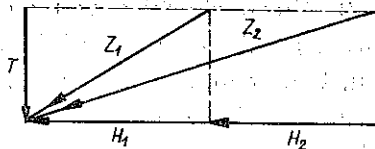
Istotne i interesujące jest tu zjawisko wykazujące, że przy zagęszczeniu piasku obok znacznego wzrostu (dochodzącego do 100%) składowej poziomej parcia całkowitego jego składowa pionowa nie wzrasta. Przy obliczaniu konstrukcji oporowych ma to oczywiście poważne znaczenie.

Przeprowadzone doświadczenia stwierdziły mianowicie następujący przebieg zjawiska:

Wysokość masy piasku w skrzyni przedstawionej schematycznie w przekroju pionowym na rys. 13 wynosiła np. h oraz H_1 i T — odpowiadające tej wysokości pomierzone składowe pozioma i pionowa parcia przy piasku luźno usypanym. Po uderzeniu piasku składowa pozioma wzrasta o H_2 , czyli pierwsza z nich równa się

teraz $H_1 + H_2$, a druga wynosi nadal T . Parcia całkowite Z_1 i Z_2 w obu przypadkach są różne i każde z nich tworzy inny kąt z normalną do powierzchni ściany oporowej, rys. 14.

Fakt powyższy przeczy pozornie dotychczas istniejącej, opartej na hipotezach, teorii tarcia. Mamy tu jednak do czynienia ze zjawiskiem tarcia statycznego, dla którego, jak dotąd, potrafimy wyznaczyć tylko graniczną górną wielkość tarcia. W doświadczeniu siłę T obliczano w zależności od siły X użytej do wyciągania blachy «a» i mierzonej na początku ruchu tej blachy (rys. 13). Jeżeli więc siła T mierzona w jednakowy sposób

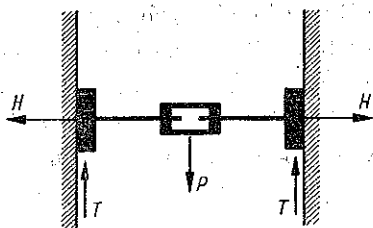


Rys. 14

przed i po zagęszczeniu piasku jest tej samej wielkości, to wynika stąd, że jest to istotą badanego zjawiska właśnie wtedy, gdy piasek i ściana znajdują się w spokoju, czyli wówczas, gdy nie zachodzi przesuwanie ich względem siebie.

Przypuśćmy, że na ścianę pionową, nieruchomą i nie odkształcającą się działają dwie siły — pozioma, prostopadła do ściany, i pionowa, do niej styczna. Jeżeli poziomą zwiększymy, to oczywiście styczna zachowa swą pierwotną wartość.

Rozpatrzmy np. rozporę o ciężarze P utrzymującą siłę w równowadze w położeniu poziomym między dwiema ścianami pionowymi wskutek istnienia sił tarcia T (rys. 15). Przy wzrastaniu sił poziomych H siły tarcia T jako siły równoważące się z siłą P będą zachowywały stale te same wartości. Podobnie w zjawisku parcia ziemi wzrost poziomej składowej parcia, spowodowany zagęszczeniem piasku, nie będzie wpływał na zmianę wielkości składowej pionowej, bowiem ciężar masy piasku znajdującego się poza ścianą przed i po jego zagęszczeniu był taki sam.



Rys. 15

Wprawdzie rozpora jest ciałem sztywnym i jej ciężar P przenoszony jest całkowicie przez siły tarcia T w przeciwieństwie do materiału sypkiego, jakim jest piasek, którego ciężar tylko w części przekazuje się na boczne ściany skrzyni wskutek występujących na ich powierzchniach sił tarcia, niemniej jednak w obu przypadkach powiększanie się sił poziomych w jednakowy sposób będzie wpływało na wielkość pionowych sił tarcia.

Otrzymane wyniki pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Składowa pozioma parcia geostatycznego jest większa od poziomej parcia geodynamicznego obliczonej według metody Coulomba przy założeniu $\psi_z = 32^\circ$ i $\psi_m = 0$ i dla zbadanych wysokości ich różnica waha się od 12 do 23%; dla wysokości większych różnica ta jest mniejsza i odwrotnie.

2. Stosunek składowej pionowej do składowej poziomej całkowitego parcia geostatycznego rośnie wraz ze wzrostem wysokości warstwy piasku, tzn. w miarę wzrostu wysokości masy ziemnej poza murem wzrasta stosunek składowych pionowej do poziomej, odpowiadający tej samej wysokości.

3. Parcie geostatyczne wywierane przez piasek wzrasta wraz ze wzrostem zagęszczenia piasku; doświadczenie wykazuje, że wzrost ten może dochodzić do 100%; na podstawie dotychczasowych doświadczeń nie można stwierdzić, czy nie może być również większy.

4. Pionowe składowe parcia całkowitego przy zagęszczonym piasku i przy piasku luźno nasypanym dla zasypu o tej samej wysokości są praktycznie biorąc sobie równe, a więc niezależnie od tego, czy piasek będzie nasypany luźno, czy też ulegnie zagęszczeniu (przy tej samej wysokości masy ziemnej poza murem), składowe pionowe parcia całkowitego będą takie same.

5. Przy założeniu prostoliniowego rozkładu parć jednostkowych obliczone wartości współczynników są na ogół różne dla różnych wysokości. Dla piasku niezagęszczonego otrzymane dla nich wielkości są mniejsze od wielkości podanych przez Terzaghię, mianowicie zawierają się w granicach od 0,380 do 0,345 i mniejsze z nich dotyczą wysokości większych. Dla piasku zagęszczonego, obliczone dla dwóch wysokości, wahają się w granicach od 0,830 do 0,750 i oczywiście rosną wraz ze wzrostem zagęszczenia piasku.

Literatura cytowana w tekście

- [1] H. Müller-Breslau, *Erdruck auf Stützmauer*, Stuttgart 1906.
- [2] W. Wierzbicki, *Mechanika budowli*, Warszawa 1955.
- [3] K. Terzaghi, *Erdbaumechanik*, Lipsk i Wiedeń 1925.
- [4] W. Wierzbicki, *Próby wyznaczenia geostatycznego parcia ziemi*, Przegł. Techn., Warszawa 1953, s. 22.
- [5] W. Wierzbicki, *W sprawie parcia na mur ziemi w spokoju*, Inżyn. Kol. 2 (114), Warszawa 1934.
- [6] W. Wierzbicki, *Parcie geodynamiczne i parcie geostatyczne* (w języku francuskim), Arch. Mech. Stos., Gdańsk 1950.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НАД ГЕОСТАТИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ

Геодинамическое и геостатическое давления являются двумя видами давления земли как наружная нагрузка кладки и опорных стен. Первое имеет место в случае, когда конструкция начинает деформироваться или перемещаться по направлению от находящейся за ней земной массы, а второе — когда конструкция и земная масса находятся в состоянии покоя. Геостатическое давление, как это доказывают сделанные заключения на основании проведенных анализов и экспериментов, больше геодинамического и поэтому должно учитываться при расчете опорных конструкций.

Однако определение геостатического давления вызывает трудности ввиду того, что при помощи методов, которыми располагает строительная механика, мы не умеем определять направлений и распределения напряжений в земной массе находящейся в состоянии покоя. Поэтому все исследования теоретического характера, имеющие целью определить геостатическое давление земли, должны в силу необходимости основываться на более или менее правильных гипотезах. Таким образом — значений геостатического давления хриближенных в максимальной степени к выступающим в действительности следовало бы искать экспериментальным путем.

Идея спроектированного автором аппарата состоит в использовании сил трения при перемещении.

На основании результатов произведенных измерений сил сопротивления при вытягивании эластических лент, расположенных на различных уровнях передней стенки аппарата, наполненной песком, определяется единичное давление и отсюда, горизонтальную составляющую полного давления. На том же основании, при помощи составляющей опоры и соединения передней стены с боковыми стенами определяется также вертикальную составляющую а затем равнодействующее давление.

Эксперимент проводился при использовании влажного песка, объемный вес которого составлял 1650 kG/m^3 при засыпке до высоты 50, 70 и 95 см.

Разницы между горизонтальными составляющими (при свободно насыпанном песке) геостатического давления определенного методом Кулона при принятых углах трения земли о землю и земли о поверхность конструкции и равняющиеся соответственно $\psi_z = 32^\circ$ и $\psi_m = 0^\circ$ — колеблются в пределах от 12 до 23% и уменьшаются с ростом высоты насыпи, тогда как вертикальные составляющие практически не изменяются.

Диаграммы единичных давлений имеют форму легковыпуклых кривых.

Проводимые измерения при более густом песке показали рост горизонтальной составляющей до 100% при одновременном сокращении постоянной величины вертикальной составляющей.

В этом последнем случае констатируется кроме того, что насколько земная масса будет покоится на жесткой постели, тогда максимальные единичные давления выступят выше нижнего края опорной стены.

Summary

SOME EXPERIMENTS CONCERNING GEOSTATIC PRESSURE

Geodynamic and geostatic pressure are two forms of soil pressure constituting the external load of retaining walls. The first takes place when the structure starts being deformed or moving in the direction of soil mass outside the structure; the second — when the both structure and soil are at rest. Analysis and experiments show that geostatic pressure is higher than the geodynamic pressure. In consequence it should be considered in calculating retaining structures.

However, the calculation of geostatic pressure presents considerable difficulties, the methods of structural mechanics being not adequate for determining the directions and the distribution of the stresses in soil at rest. Therefore, all theoretical considerations aiming at the computation of the geostatic soil pressure should necessarily be based on more or less justified hypotheses. The magnitudes of geostatic pressure approaching in an adequate manner the real values should therefore be sought by experimental methods.

The idea of the apparatus designed by the author is based on the utilization of the friction force during slip.

On the basis of results of measurements of the drag during the process of drawing of elastic bands at various levels of the front wall of a box filled up with sand, unit pressures were calculated, and hence the horizontal component of the total pressure. On the same basis, using a suitable support and a suitable connection between the front wall and the side walls, the vertical component was also determined, and then the resultant pressure.

The sand used was river sand of specific weight 1650 kg/m^3 , the box being filled to three different depths: 50, 70 and 95 cm.

The differences between the horizontal components of geostatic pressure, found experimentally, and geodynamic pressure, calculated by the

Coulombian method assuming that the soil-to-soil and soil-to-structure friction angle are equal to $\psi_s = 32^\circ$ and $\psi_m = 0^\circ$ respectively, range for loose sand, within the limits of 12% to 23% and decrease with decreasing depth of the sand layer. The vertical components remain practically unchanged.

The graphs of unit pressures have a slightly convex form.

The measurements for rammed sand show an increase in the horizontal component up to 100%, the vertical component remaining unchanged.

In the latter case, it was found moreover that if the soil mass rests on a rigid foundation, the maximum soil pressure will appear just above the lower edge of the retaining wall.

Praca została złożona w Redakcji 20 kwietnia 1957 r.