

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE GRUNTU GRUBOOKRUCHOWEGO (MIESZANINY GRUNTÓW)

UKD 624.131.439.5:624.131.21

Niektóre grunty rodzime i nasypowe można traktować jak mieszaniny większych okruchów (otoczków) i ziarn w frakcji kamienistej i żwirowej zmieszanych z drobnodispersyjną masą spoiwą lub sypką zwaną niekiedy wypełniaczem. W gruntach rodzimych są to głównie gliny zwietrzelinowe, rumosze, gliniasto-kamienisto-piaszczyste grunty aluwialne, niektóre koluwia itp. Spośród gruntów nasypowych do mieszanin takich można zaliczyć odpady górnicze kopalń głębinowych (hałdy), grunty zwałowisk kopalń odkrywkowych, niektóre nasypy ziemne itp. Cechą charakterystyczną tych gruntów jest znaczne zróżnicowanie ich składu granulometrycznego i obecność dużych składników gruntu w masie drobnoziarnistej. Grunty takie nazywane są najczęściej grubookruchowymi (gruboklastycznymi). Według A.I. Szeki (5) jako grube składniki gruntu traktuje się okruchy i ziarna o średnicy ponad 2 mm.

Określenie wytrzymałości na ścinanie gruntów grubookruchowych napotyka trudności z powodu obecności większych okruchów, co w badaniach laboratoryjnych uniemożliwia wykorzystanie typowych aparatów do badań wytrzymałości. Oprócz rzadko stosowanych badań w specjalnych aparatach wielkowymiarowych (1, 6, 7, 8, 9) najczęściej w laboratoryjnych badaniach standardowych usuwa się z gruntu większe kawałki i okruchy lub bada tylko wytrzymałość samego wypełniacza. Zniekształca to ocenę wytrzymałości gruntu grubookruchowego. Grubsze okruchy są bowiem zazwyczaj elementami o większej wytrzymałości w obrębie słabszego wypełniacza, tworząc rodzaj szkieletu strukturalnego w jego masie.

Szkielet ten może składać się z okruchów jednej frakcji wymiarowej lub wielu frakcji. Elementy każdej frakcji mogą kontaktować się ze sobą i między sobą lub nie, zależnie od procentowego udziału okruchów w całej masie, ich średnic i sposobu przestrzennego rozmieszczenia. Okruchy danej frakcji wymiarowej kontaktując się ze sobą tworzą szkielet strukturalny zamknięty, w przeciwnym razie jest on otwarty w różnym stopniu (ryc. 1).

Formą ilościowej oceny stopnia zamknięcia struktury wg (5) może być wskaźnik upakowania okruchów (k)

$$k = \frac{l-d}{d} \quad [1]$$

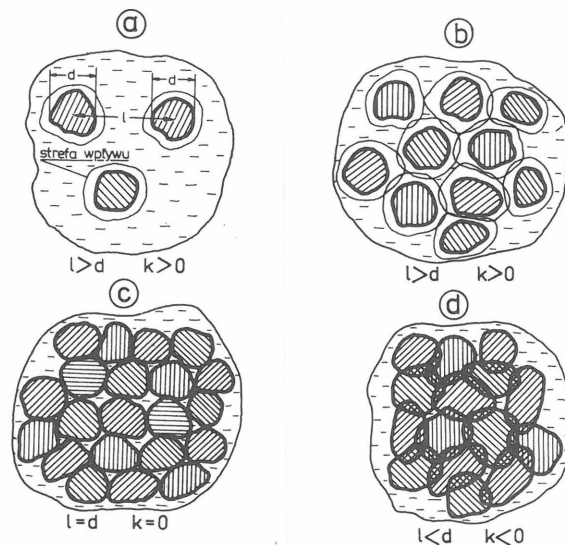
gdzie: l – odległość średnia między centrami okruchów danej frakcji wymiarowej,

d – przeciętna średnica okruchów danej frakcji.

Jeśli $k > 0$, okruchy przy deformacjach gruntu mogą się wzajemnie przemieszczać w obrębie wypełniacza, nie zaczepiając o siebie. Im większa liczbowo wartość k , tym swobodniejsze wzajemne przemieszczenia. Przy $k = 0$

okruchy stykają się ze sobą, a przy $k < 0$ zachodzą na siebie (ryc. 1). W tym stanie obciążenia na grunt przyjmowane są prawie w całości przez szkielet okruchów.

Na tle skąpych danych literaturowych (2, 3, 4) w badaniach własnych zmierzano do lepszego wyjaśnienia związku parametrów oporu ścinania z zawartością, wielkością i wytrzymałością okruchów głównie z wypełniaczem spoiwym i porównawczo z wypełniaczem piaszczystym. Do badań użyto okruchów (tłucznia) powietrzno-suchego iłu krakowieckiego o wymiarach 5–15 mm oraz okruchów (tłucznia) piaskowca karbońskiego o trzech wymiarach: 0,5–2 mm, 2–4 mm i 5–15 mm. Jako wypełniacza spoiwego użyto plastycznej pasty z iłu krakowieckiego ($I_L = 0,37$), a jako sypkiego – piasku średnioziarnistego. Badania wykonano w aparacie skrzynkowym o wymiarach 100 × 100 – bez użycia ramek. Kilka porównawczych badań



Ryc. 1. Schemat struktury mieszaniny gruntu spoiwego z jedną frakcją okruchów

a – struktura otwarta, b – struktura półzamknięta, strefy wpływu okruchów zachodzą na siebie, c – struktura zamknięta, okruchy stykają się ze sobą, d – struktura silnie zamknięta, okruchy nachodzą na siebie

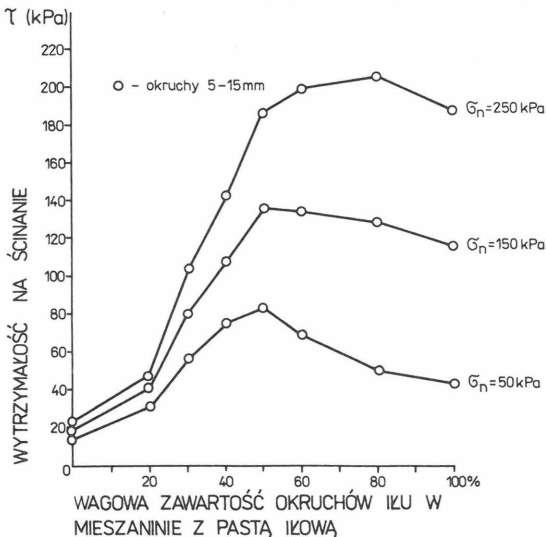
Fig. 1. Schematic texture of a compact soil mixed with mono-fractional fragments

a – open texture, b – semiclosed texture, zones of influence of fragments overlap, c – closed texture, fragments contact with each other, d – strongly closed texture, fragments overlap

wykonano w aparacie skrzynkowym z ramkami o łącznej grubości 15 mm oraz w aparacie trójosiowym dla próbek o średnicy 75 mm i wysokości 150 mm.

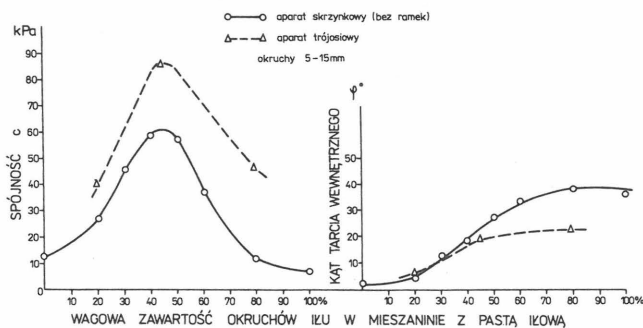
MIESZANINY OKRUCHÓW IŁU ORAZ PIASKOWCA Z WYPEŁNIACZEM SPOISTYM

Wytrzymałość na ścinanie (maksymalna) mieszaniny okruchów iłu z pastą iłową rośnie początkowo szybko w przedziale ok. 20–50% wagowej zawartości okruchów, osiągając maksimum przy ok. 50%, a następnie zmniejsza się (ryc. 2). Przy obciążeniach normalnych większych od 150 kPa maksimum to przesuwają się ku większej zawartości okruchów. Parametry wytrzymałości na ścinanie, spójność i kąt tarcia wewnętrzznego zmieniają się nieliniowo ze wzrostem zawartości okruchów (ryc. 3). Maksimum spójności mieszaniny jest osiągane przy ok. 45% wagowej zawartości okruchów iłu (46% objętościowo). Wartość kąta tarcia wewnętrznego dla samego wypełniacza wzrasta szczególnie szybko w przedziale ok. 20–60% zawartości okruchów, do wartości dla samych okruchów. Krzywa tych zmian ma swój punkt przegięcia przy ok. 45% zawartości okruchów, tj. przy maksimum spójności mieszaniny. Ten charakter zmian spójności i kąta tarcia uzyskany



Ryc. 2. Zależność wytrzymałości na ścinanie od wagowej zawartości okruchów iłu w mieszaninie z pastą iłową

Fig. 2. Relationship between the shear strength and the weight percentage of clay fragments mixed with a clay paste

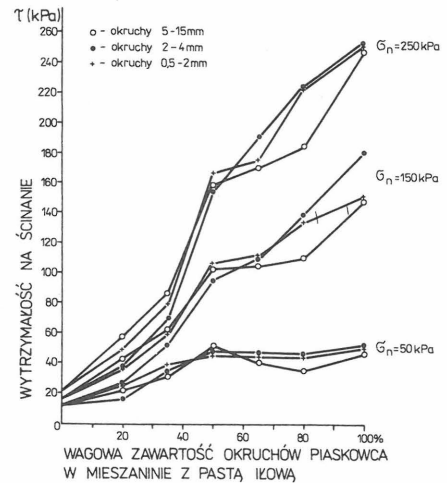


Ryc. 3. Zależność spójności i kąta tarcia wewnętrznego od wagowej zawartości okruchów w mieszaninie z pastą iłową

Fig. 3. Relationship between the cohesion and the angle of internal friction, and the weight percentage of fragments mixed with a clay paste

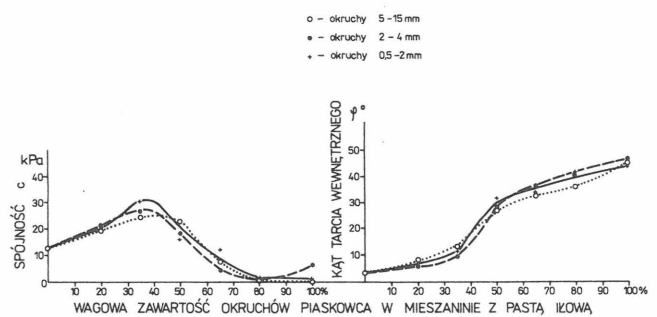
w aparacie skrzynkowym potwierdzają ogólnie porównawcze badania w aparacie trójosiowym. Należy zauważyć, że wyliczony współczynnik upakowania okruchów iłu osiąga wartość zero ($k = 0$) przy ich zawartości wagowej 46% (objętościowo 47%), co wskazuje, że maksymalna spójność mieszaniny i zmiana charakteru przyrostu kąta tarcia osiągane są dla stanu, gdy okruchy zaczynają stykać się ze sobą. W tym stanie sztywność mieszaniny jest największa, a możliwość wzajemnych przemieszczeń okruchów najmniejsza, gdyż wolne przestrzenie między okruchami zajmuje w całości wypełniacz.

Wytrzymałość na ścinanie mieszaniny okruchów piaskowca z pastą iłową zmienia się ze wzrostem zawartości okruchów podobnie jak dla iłu (ryc. 4). Zmniejszenie oporu ścinania po osiągnięciu maksimum przy ok. 50% zawartości okruchów występuje tylko przy małych obciążeniach normalnych. Przebieg zmian wytrzymałości dla poszczególnych frakcji okruchów jest podobny, ze względu na zbliżone wartości ich kąta tarcia wewnętrznego. Zmiany spójności i kąta tarcia wewnętrznego mieszanin piaskowca z pastą iłową mają podobny charakter jak dla okruchów iłu (ryc. 5). Maksimum spójności mieszanin osiągane jest tu przy nieco mniejszej wagowej zawartości okruchów piaskowca, bo ok. 40% (objętościowo 33%). Należy to wiązać z bardziej ostrokrawędzistym charakterem tych



Ryc. 4. Zależność wytrzymałości na ścinanie od wagowej zawartości okruchów piaskowca w mieszaninie z pastą iłową

Fig. 4. Relationship between the shear strength and the weight percentage of sandstone fragments mixed with a clay paste



Ryc. 5. Zależność spójności i kąta tarcia wewnętrznego od wagowej zawartości okruchów piaskowca w mieszaninie z pastą iłową

Fig. 5. Relationship between the cohesion and the angle of internal friction, and the weight percentage of sandstone fragments mixed with a clay paste

okruchów (okruchy o kształcie zbliżonym do tetraedrów), dla których współczynnik upakowania $k = 0$ może być osiągnięty już przy zawartości wagowej ok. 30–39%.

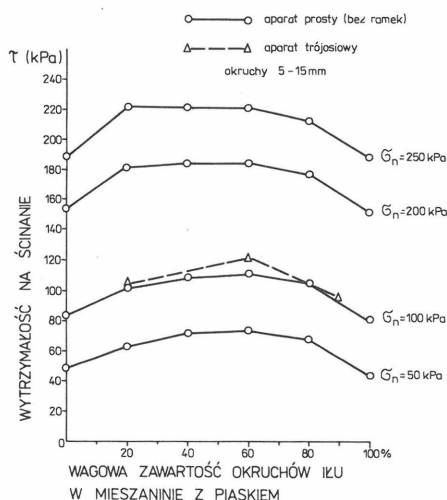
Maksymalna spójność mieszaniny jest dla okruchów piaszkowca ok. dwukrotnie mniejsza niż dla okruchów iltu. Wynika to z faktu, że w mieszaninie okruchów suchego iltu z pastą iltową następowało zmniejszenie jej stopnia plastyczności w sąsiedztwie okruchów i chłonięcie przez nie części wody z wilgotnej pasty.

Jeśli idzie o okruchy iltu, to zachodzi tu znaczne podobieństwo przebiegu zmian kąta tarcia wewnętrznego uzależnionego od zawartości okruchów piaszkowca. Zdaje się to wskazywać, że różniąc się wytrzymałość samych okruchów w mieszaninie z plastycznym wypełniaczem spoistym nie odgrywa tu istotniejszej roli przy dużej różnicy ich wytrzymałości w stosunku do wypełniacza.

Rola okruchów mocnych w stosunku do słabszych powinna się bardziej uwidaczniać przy malejącej różnicy wytrzymałości wypełniacza i okruchów. Należy tu podkreślić brak istotniejszego zróżnicowania kąta tarcia wewnętrznego mieszanin pasty iltowej i okruchów piaszkowca o różnej średnicy (w zakresie 0,5–2 mm, 2–4 mm i 5–15 mm), co potwierdza wyniki badań z prac (2, 4) o braku istotnego wpływu badanych wielkości okruchów (do 40 mm) na kąt tarcia wewnętrznego mieszaniny. Słuszny wydaje się również wniosek autorów pracy (3), że do jednej frakcji wymiarowej można zaliczać elementy gruntu o ok. 4–10-krotnym zróżnicowaniu ich średnicy.

MIESZANINA OKRUCHÓW IŁU Z WYPEŁNIACZEM SYPKIM

Porównawcze wyniki badań wytrzymałości (maksymalnej) na ścinanie okruchów iltu z piaskiem wykazały, że jest ona większa niż każdego ze składników z osobna (ryc. 6). Maksimum wytrzymałości osiągane jest tu przy ok. 60% wagowej zawartości okruchów w mieszaninie (58,1% objętościowo). Stosunkowo duża wartość spójności takiej mieszaniny zarówno w badaniach aparatem skrzynkowym, jak i trójosiowym (ryc. 7) zdaje się wskazywać, że dochodzi tu do ścinania niezbyt wytrzymałych okruchów iltu unieruchomionych w obrębie względnie wytrzymałego wypełniacza sypkiego. Sam piasek i same



Ryc. 6. Zależność wytrzymałości na ścinanie od wagowej zawartości okruchów iltu w mieszaninie z piaskiem

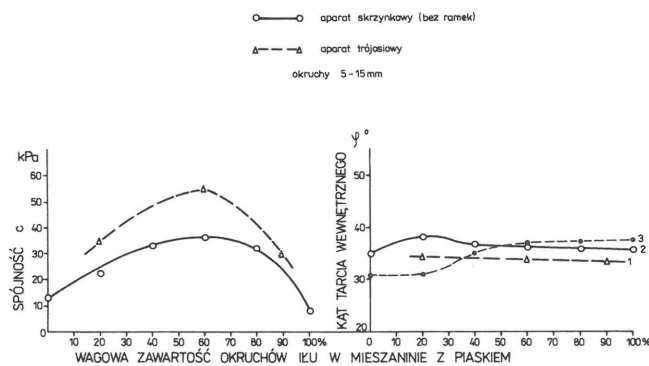
Fig. 6. Relationship between the shear strength and the weight percentage of clay fragments mixed with sand

okruchy wskazują bowiem znacznie mniejszą spójność zaczepową przy ścinaniu. Zmiany kąta tarcia wewnętrznego w badanej mieszaninie są niewielkie i prawie liniowe w stosunku do zawartości okruchów, na co wpływa mała różnica kąta tarcia wewnętrznego – piasku i okruchów. Z badań na podstawie pracy (2) można jednak zauważyć (ryc. 7, krzywa 3), że przy większej różnicy kątów tarcia wewnętrznego wypełniacza piaszczystego (30,8°) i równoziarnistych okruchów porfirytu (38°) o wymiarach 3–5 mm, krzywa zmian kąta tarcia zależna od zawartości okruchów ma podobny nieliniowy charakter, jaki uzyskano z badań własnych.

Reasumując przeprowadzone badania, jak również dane literaturowe, można stwierdzić, że o wytrzymałości na ścinanie gruntu grubookruchowego – jako mieszaniny dwuskładnikowej (okruchy, wypełniacz) – decyduje głównie ilościowa zawartość obu składników. Wytrzymałość mieszaniny nie jest jednak prostą sumą wytrzymałości składników z uwzględnieniem ich ilościowego udziału. Jej przebieg nie zmienia się liniowo ze wzrostem procentowego udziału okruchów, lecz zależy również od wartości obciążeń normalnych, wytrzymałości okruchów, rodzaju i stanu wypełniacza oraz różnicy wytrzymałości okruchów i wypełniacza. Dla okruchów o mniejszej wytrzymałości opór ścinania mieszaniny spoistej w funkcji zawartości okruchów ma charakter bardziej nieliniowy, niż dla okruchów o większej wytrzymałości. Podobnie nieliniowy przebieg zmian wytrzymałości wraz ze zmianą zawartości okruchów wykazuje mieszanina z wypełniaczem piaszczystym.

Spójność maksymalna mieszaniny spoistej może być osiągnięta przy zróżnicowanej zawartości wagowej okruchów, co jest uzależnione od ich rodzaju, gęstości objętościowej oraz kształtu, jak również różnicy gęstości objętościowej okruchów i wypełniacza. Wyniki badania wskazują, że maksymalna spójność mieszaniny osiągnięta jest przy wskaźniku upakowania okruchów $k = 0$, tj. gdy okruchy stykają się ze sobą, a przestrzeń między nimi w całości zajmuje wypełniacz. Okruchy mają wtedy najmniejszą swobodę wzajemnych przemieszczeń, co wpływa na zwiększenie sztywności struktury mieszaniny.

Różnice zawartości wagowej okruchów o jednakowych wymiarach dla $k = 0$ mogą się zawierać w granicach od ok. 20–30% dla okruchów o kształcie tetraedrycznym (przedział wynika z wpływu gęstości objętościowej), do ok. 70–80% dla okruchów kulistych. Kształt okruchów bywa najczęściej pośredni między tetraedrycznym a kulis-



Ryc. 7. Zależność spójności i kąta tarcia wewnętrznego od wagowej zawartości okruchów iltu w mieszaninie z pastą iltową

Fig. 7. Relationship between the cohesion and the angle of internal friction, and the weight percentage of clay fragments mixed with a clay paste

tym, dlatego też zawartość objętościowa okruchów dla maksymalnej spójności powinna wynosić najczęściej ok. 50%. Pewien wpływ na tę zawartość może mieć jeszcze zróżnicowanie uziarnienia okruchów. Badając więc próbki mieszaniny przy 50% wagowej zawartości okruchów, można oszacować wartość jej spójności (C_m) dla różnej zawartości okruchów ze wzorów:

$$C_m = C_w + \frac{C_p - C_w}{50} \cdot N \text{ w przedziale } 0-50\% \quad [2]$$

$$C_m = C_p \cdot \frac{100 - N}{50} \text{ w przedziale } 50-100\%$$

gdzie:

C_w – spójność wypełniacza

C_p – maksymalna wartość spójności (przy 50% okruchów)

N – wagowa zawartość okruchów w %.

Kąt tarcia wewnętrzznego mieszaniny zmienia się ogólnie od wartości dla samego wypełniacza do wartości dla samych okruchów. Zależność ta ma jednak charakter nieliniowy. Można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że w zakresie do 25% wagowej zawartości okruchów kąt tarcia mieszaniny jest równy kątowi tarcia samego wypełniacza, a przy zawartości okruchów powyżej 75% wagowych – kątowi tarcia samych okruchów. W przedziale 25–75% zawartości okruchów kąt tarcia wewnętrzznego mieszaniny może być określony z równania (dla $\varphi_k \geq \varphi_w$)

$$\varphi_m = \frac{\varphi_k - \varphi_w}{50} \cdot N - \frac{\varphi_k - \varphi_w}{2} + \varphi_w \quad [3]$$

gdzie:

$\varphi_m, \varphi_k, \varphi_w$ – kąty tarcia wewnętrzznego odpowiednio: mieszaniny, okruchów, wypełniacza

N – wagowa zawartość okruchów w %.

Zmiany kąta tarcia wewnętrzznego mieszaniny w przedziale 0–100% okruchów można też w przybliżeniu aproksymować linią prostą o równaniu

$$\varphi_m = \frac{\varphi_w \cdot N + \varphi_k(100 - N)}{100} \quad [4]$$

Zakładając, że kąt tarcia wewnętrzznego okruchów skał słabych (łupki, iłolupki, iłowce, margle itp.) $\varphi_k = 35^\circ$, a okruchów skał mocnych (piaskowce, wapień itp.) $\varphi_k = 45^\circ$, można określać w przybliżeniu kąt tarcia wewnętrzznego mieszaniny, badając tylko kąt tarcia wypełniacza i wykorzystując wzory [3] lub [4].

Przyjmując, że wielkość okruchów nie wpływa istotnie na kąt tarcia wewnętrzznego gruntu grubookruchowego, należy jednak w badaniach laboratoryjnych zachować procentowy udział ciężarowy większych okruchów w badanej próbce (przez rozdrobnienie i powtórne dodanie do mieszaniny).

LITERATURA

1. Kawalec B. – Własności fizyczno-mechaniczne drobno skruszonych odpadów kopalnianych z punktu widzenia ich przydatności do robót inżynierskich. Prz. Gór. 1971 nr 1.
2. Krzyżanowski A.L., Mendosa T., Ukbajew E. – Sprotniwanije sđwigu smiesi sypuczich gruntow. Inżeniernaja Geologija 1985 nr 2.
3. Mielnikow B.N., Iwanienko W.I., Osipow B.I., Niestierow A.I. – Principy sozdanija geotiechnogniennyh massiwow i metodow ich rasczota. Ibidem 1986 nr 5.
4. Sidorow N.N., Sipidin W.P. – Sowriemiwanije metody opriedielenija charakteristik miechaniczskich swojstw gruntow. Leningrad 1972.
5. Szeko A.I. – Sostaw krupnoobłomowych porod. Rozdz. IV. Miedodiczeskoje posobie po inżenierno-geologiczeskom izuczeniju gornych porod. Izd. Moskow. Uniw. Moskwa 1968.
6. Śliwa J., Kawalec B. – Some properties of mine debris used to the construction of road embankments. Proc. of the IV Dunabe European Conf. of Soil Mech. and Found. Bled. Yougoslavia 1974 vol. 1.
7. Śliwa J., Kawalec B., Pieczyrak – Geotechnical properties of spoil. Istambul Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering 1975 vol. 1.
8. Wiłun Z. – Zagęszczalność i cechy fizyczno-mechaniczne gruntów nasypowych w budowlach ziemnych. Mat. IV Ogólnopol. Konf. Mech. Gruntów i Fund. Wrocław 1967.
9. Wiłun Z., Pisarczyk S. – Badania gruntów gruboklastycznych w aparacie wielkowymiarowym. Arch. Hydrotechnika 1969 z. 3.

SUMMARY

The article presents the results of investigations of the shear strength of fragments formed of the compact Krakowic Clay and of the Carboniferous sandstone, mixed with the plastic clay paste. For comparison, also the shear strength of compact clay fragments mixed with medium-grained sand has been determined. As a result of the present study it has been found that the shear resistance of the studied mixtures is a function of percentage of coarser fragments in a plastic or loose filler, while it is hardly related to a diameter of fragments. The strength and the parameters of the shear resistance, as well as cohesion and angle of friction of a mixture, change in a non-linear fashion with increasing percentage of fragments. The maximum cohesion is attained on average in mixtures with 50% of fragments, and generally within the limits of 25 to 75%. It is related to the shape of fragments and to the bulk density of fragments and of a filler. The formulas have been given, defining resistance and angle of internal friction of a mixture in terms of cohesion and angle of friction of a dense filler, and of angle of fragments' internal friction.

Translated by M. Narkiewicz

РЕЗЮМЕ

В статье представлены результаты исследований сопротивления сдвигу смеси обломков уплотненного краковецкого ила, а также обломков карбонского песчаника в смеси с глинистой пастой. Сравнительно было также определено сопротивление сдвигу смеси уплотненных обломков ила и среднезернистого песчаника.

В результате исследований было установлено, что сопротивление сдвигу исследованных смесей является функцией количественного участия крупнейших обломков в пластическом или сыпучем заполнителе; величина обломков имеет малое значение. Сопротивление, а также параметры сопротивления сдвигу, связность и угол трения смеси изменяются нелинейно с увеличением содержания обломков. Максимальную связность имеют смеси в среднем при около 50% содержании обломков, а в общем в интервале 25–75% обломков. Это зависит от формы обломков, а также от объёмного веса обломков и заполнителя. Приведены формулы для определения связности и угла внутреннего трения смеси в зависимости от связности и угла трения заполнителя и угла внутреннего трения обломков.