

GEOMETRYCZNA METODA BADANIA SZORSTKOŚCI CZĄSTEK GRUNTÓW NIESPOISTYCH

Krzysztof Parylak

Streszczenie: Jedną z najistotniejszych właściwości fizycznych gruntów jest kształt cząstek opisywany przez cztery parametry: kulistość, stopień zaokrąglenia naroży, stopień nieregularności cząstek i szorstkość powierzchni. Określenie wpływu każdej z tych cech cząstek oddzielnie na pozostałe właściwości fizykomechaniczne jest bardzo trudne do ustalenia, ale można połączyć je w jeden parametr. Badania szorstkości powierzchni cząstek gruntów prowadzono dotychczas kilkoma sposobami, lecz żaden z nich nie został uznany jako wystarczający i praktycznie użyteczny. W pracy przedstawiono nowy sposób pomiaru szorstkości, polegający na pomiarze mikroskopowego zdjęcia przekroju cząstki długości obwodu jej rzeczywistego przekroju poprzecznego i długości wieloboku opisanego na cząstce. Wielobok poprowadzono w ten sposób, aby jego powierzchnia była równa powierzchni przekroju cząstki. Ilorazem wyrażonym wzorem (3) określono wskaźnik szorstkości powierzchni (I_u). Wykonano ponad 150 eksperymentalnych oznaczeń tego wskaźnika dla gruntów o bardzo zróżnicowanym stopniu szorstkości cząstek. Przeprowadzono teoretyczną analizę szorstkości przy założeniu realnie ekstremalnych nierówności powierzchni, porównując uzyskane dla nich wskaźniki I_u z największym wskaźnikiem uzyskanym z pomiarów cząstek.

Słowa kluczowe: właściwości gruntów, kształt cząstek, grunty niespoiste, badania powierzchni cząstek

WSTĘP

W licznych problemach budownictwa, inżynierii środowiska, geologii inżynierskiej czy rolnictwa właściwości gruntów mają istotny wpływ na procesy wywoływane zarówno działaniem sił natury, jak i działalnością człowieka. Obejmuje to szereg zagadnień, a w tym wynikających m.in. z naturalnych obciążeń, efektów ruchu wód, działania wiatrów, zmian termicznych, trzęsień ziemi czy niezliczonych przypadków różnorodnej działalności człowieka. Mogą nimi być statyczne i dynamiczne obciążania i odciążania gruntu, formowania różnorodnych konstrukcji ziemnych, naruszania istniejącej struktury oraz zagęszczania i wzmacniania mas ziemnych. Zagadnienia te

ujmowane są w różnym stopniu przez wiele dyscyplin rozpoznających i opisujących poszczególne właściwości pod kątem określonych potrzeb.

We wszystkich tych problemach podstawową materią jest rozdrobniona skała ulegająca w wyniku procesów wietrzenia i przemieszczania siłami natury ciąglemu postępującemu rozdrabnianiu. Zróżnicowane właściwości minerałów budujących cząstki gruntowe oraz zmienność rozdrobnienia – od frakcji kamienistej po iłową – powodują, że powiązany ze sobą układ fazy stałej, ciekłej i gazowej decyduje o dużej zmienności właściwości fizycznych. W tej grupie zagadnień, oprócz cech uziarnienia, składu mineralnego i stopnia wilgotności, duży wpływ na szereg właściwości gruntów ma kształt i stopień skonfigurowania powierzchni cząstek, warunkujący zarówno wzajemne ich oddziaływanie w procesie przemieszczania, jak i możliwości utrzymywania oraz ruchu wody.

Cechy kształtu cząstek gruntów niespoistych, to jest zawierających mniej niż 2% frakcji iłowej, opisywane są czterema parametrami: stopniem kulistości, nieregularnością kształtów, stopniem zaokrąglenia naroży i szorstkością powierzchni [Herdan 1953, Lees 1964, Kolbuszewski 1967, Frossard 1979]. Jednakże, prawdopodobnie ze względu na złożoność badań, w zastosowaniach nadal powszechnie stosowana jest uproszczona metoda oceny cech kształtu i stopnia zaokrąglenia naroży, polegająca na porównywaniu mikroskopowych obrazów zbiorowiska cząstek z wzorcowymi tablicami opracowanymi w 1941 roku przez Krumbeina (Koerner 1970a, Bora 1984, Wroth i Houlsby 1985). Pomijana jest przy tym szorstkość powierzchni, jak również współlistnienie tych cech jako jednego czynnika współoddziałującego na proces przemieszczania cząstek.

W świetle przedmiotowej literatury można zatem mówić o braku dostępnych i odpowiednio dokładnych metod badawczych w tym zakresie, gdyż metody pomiarów z zastosowaniem mikroskopu skaningowego z analizatorem kształtów [Matsoul i in. 1978, Frossard 1979] nie zostały dostatecznie opracowane i spopularyzowane. Najnowsze i nowe prace z zakresu badań właściwości gruntów niespoistych przy ocenie kształtu i powierzchni cząstek niekiedy pomijają to zagadnienie lub nadal posługują się bardzo ogólnymi pojęciami podziału, jak na przykład: zaokrąglony, nieregularny, bardzo nieregularny, cylindryczny, kulisty [Negussey i in. 1988, Novello i Johnston 1995, Hyodo i in. 1998]. Problem ten zostaje podkreślony w jednym z obszernych światowych podręczników [Bell i in. 1987], gdzie po przedstawieniu metody Krumbeina stwierdza się: „Kształt jest prawdopodobnie najbardziej podstawową właściwością cząstek, ale niestety jest on bardzo trudny do określenia”. W innej pracy [Homand-Etienne i in. 1989] stwierdza się, że nadal nie ma uznanych sposobów badania stopnia szorstkości powierzchni.

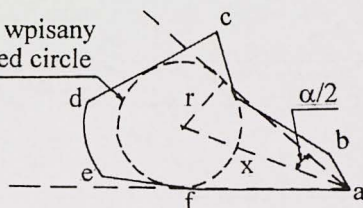
GEOMETRYCZNA CHARAKTERYSTYKA KSZTAŁTÓW CZĄSTEK

W poznawczych badaniach kształty cząstek opisywane są czterema charakteryzującymi je parametrami [Herdan 1953, Lees 1964]. Stanowią je:

– stopień kulistości (Φ), definiowany jako stosunku średnicy koła (d_c) o powierzchni równej powierzchni pola przekroju poprzecznego cząstki do średnicy najmniejszego okręgu (D_c) opisanego na tym przekroju [Herdan 1953, Kolbuszewski 1967],

– nieregularność kształtu (A), pomiar polega na obliczaniu sumy kątów ($180^\circ - \alpha_i$), gdzie kąty α_i wyprowadzane są z wierzchołków naroży przekroju cząstki w ten sposób, że tworzące kąta są styczne do największego okręgu wpisanego w cząstkę [Lees 1964] (rys. 1),

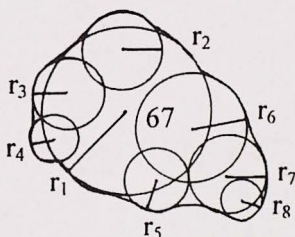
największy okrąg wpisany
maximum inscribed circle



$$A = \frac{\sum(180 - \alpha_i)}{x_i / r} \quad (1)$$

Rys. 1. Schemat ilustrujący sposób określania stopnia nieregularności kształtów cząstek
Fig. 1. Diagram which illustrate the method of determination of the degree of angularity particles

– stopień zaokrąglenia naroży (P), Wadell określił nim sumę stosunków promieni (r_i) okręgów wpisanych w naroża cząstki do promienia (r_1) największego okręgu wpisanego w cząstkę, którą to sumę podzielono przez liczbę okręgów [Lees 1964] (rys. 2),



$$P = \frac{\sum r_i / r_1}{N} \quad (2)$$

Rys. 2. Schemat ilustrujący sposób określania stopnia zaokrąglenia naroży cząstek
Fig. 2. Diagram which illustrate the method of determination of the roundness of particles

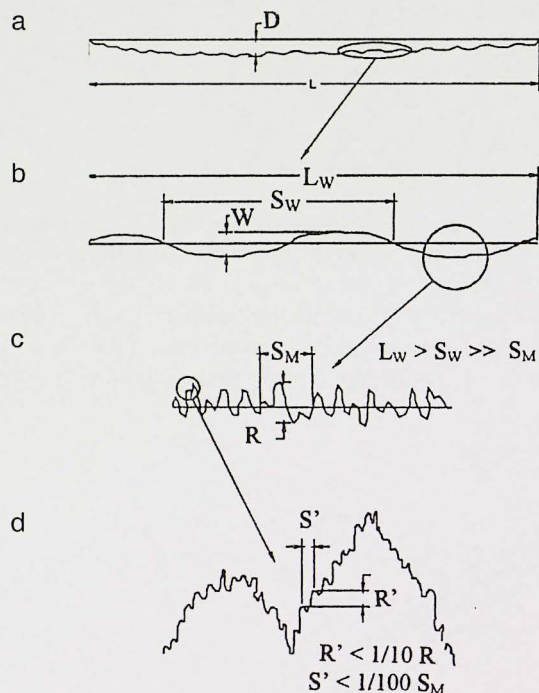
– szorstkość powierzchni.

ZAGADNIENIE WYMIARU FRAKTALNEGO

Powszechne podejście do zagadnień szorstkości jest bardzo uproszczone i często sprowadza się do określenia słownego (szorstki, średnio szorstki, gładki). Szorstkość jest najbardziej złożoną cechą powierzchni materiału. Stanowi ją zbiór nierówności powstający w wyniku różnorodnych procesów obrabiania powierzchni, których wysokość może wynosić od kilku mikrometrów do kilku milimetrów. Gradację tych zmian można zobrazować kolejnymi powiększeniami profilogramu (rys. 3). Ukazują one nierówności wyższych rzędów położone na odcinku szorstkiej powierzchni.

Pierwsze badania w tym zakresie za pomocą profilometru przeprowadzili Yoshimi i Kishid [1981], wyznaczając jednak tylko maksymalną wysokość profilu szorstkości (R – rys. 3c, d). Pomiary cech geometrycznych powierzchni cząstek gruntów są rzadkie

w praktyce geotechnicznej i głównie związane są z badaniami naukowymi w dziedzinach mechaniki skał, gdzie określa się szorstkość połączeń skalnych, oraz mechaniki warstwy kontaktowej. Ostatnio zagadnienia te rozwinęto także na potrzeby opisu cech powierzchni materiałów budowlanych współpracujących w bezpośrednim kontakcie z gruntem, a w tym na potrzeby nowego podejścia do pomiaru szorstkości geosyntetyków.



Rys. 3. Elementy powierzchni rzeczywistej: a – błąd kształtu, b – falistość, c – szorstkość, d – nierówności wyższych rzędów [Cudny 1998]

Fig. 3. Elements of profile of area real: a – element of shape, b – corrugation, c – roughness, d – unevenness of higher degrees [Cudny 1998]

W analizie profili szorstkich używanych w geotechnice wymiar fraktalny został przeniesiony z dziedzin: mechaniki ośrodków sproszkowanych, fraktografii metali, geofizyki, a także z mechaniki skał. Stanowi on porównawczą miarę odniesienia nierówności profilu szorstkiego do profilu o powierzchni gładkiej. Ideę wymiaru fraktalnego w mechanice gruntów jako pierwszy wprowadził w 1977 roku Madelbord, porównując długości obwodów na dwóch cząstkach o takiej samej powierzchni przekroju poprzecznego, lecz różniących się kształtem. Wyjściowym modelem do analizy był przekrój elipsy i zbliżony do niego przekrój cząstki o rozwiniętym obwodzie. Na parach takich przekrojów wprowadza się wariantowo linie prostoliniowych obrysów kształtu, obliczając fraktalny wymiar profilu szorstkości [Vallejo 1995, Cudny 1998].

Odminnym sposobem analizy stopnia szorstkości i nieregularności kształtu cząstek jest zautomatyzowane badanie przy użyciu skaningowanego mikroskopu elektronowego

z analizatorem stopnia skonfigurowania powierzchni [Matsoul i in. 1978, Frossard 1979, Whalley 1980]. Stosując tę metodę, Frossard zaproponował również wprowadzenie wskaźnika chropowatości z uwzględnieniem stopnia nieregularności cząstek. Jednakże w dyskusyjnej ocenie Whalleya [1980] badania tak określonego wskaźnika szorstkości powierzchni nie są wystarczająco dokładne. W innych badaniach, o zbliżonym charakterze, wykonywanych na mikroskopie elektronowym, określano stopień wzajemnych kontaktów międzycząstkowych, analizując rolę filmów wodnych w procesie ścinania gruntów spoistych [Matsoul i in. 1978].

BADANIE STOPNIA SZORSTKOŚCI POWIERZCHNI

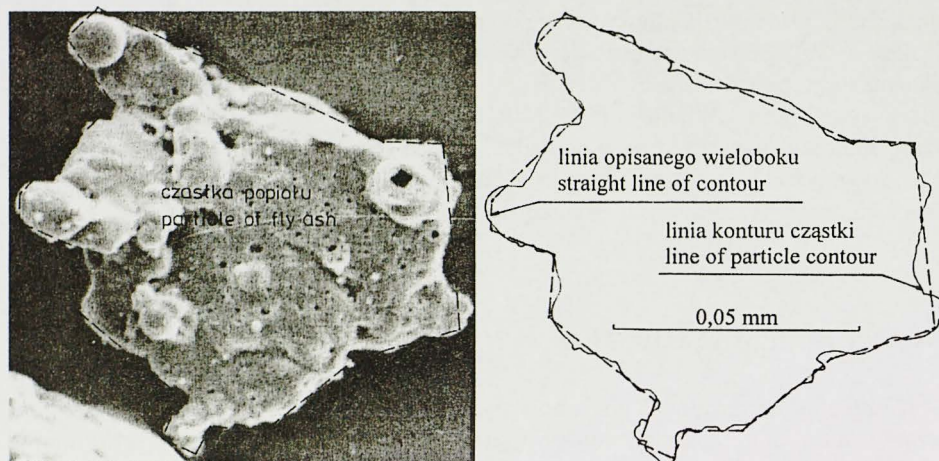
Uwzględniając złożoność podejmowanych prób i wymogi wysoce specjalistycznego oprzyrządowania, autor na potrzeby interpretacji wyników badań właściwości fizycznych gruntów opracował relatywnie prostszy sposób badania i definiowania szorstkości cząstek. Zdjęcia cząstek naturalnych i sztucznych piasków i piasków pylastych o 360- i 1000-krotnym powiększeniu wykonano w skaningowym mikroskopie elektronowym. Za pomocą sprzężonego z komputerem planimetru pomierzono powierzchnię przekroju poprzecznego badanej cząstki oraz długość jej obwodu. Następnie wzdłuż jej obrzeży poprowadzono wielobok w ten sposób, aby bok każdej większej nieregularności kształtu cząstki zastąpić odcinkami linii prostej tak, aby jego powierzchnia równa była powierzchni przekroju cząstki (rys. 4). W ten sposób równomiernie rozdzielono linią sieczną widoczne na krawędziach cząstek mikrozagłębienia i mikrowystępy. Duże powiększenie wizjera wodzika kartometru pozwoliło uniknąć znaczących niedokładności. Obliczenia wykonano za pomocą programu komputerowego. Uwzględniono w nich: długość obwodu cząstki (U_r) i długość obwodu wieloboku opisanego na cząstce (U_u).

Wielobok opisany na cząstce kreślony był w taki sposób, aby jego powierzchnia równa była powierzchni splanimetrowanej cząstki.

Na tej podstawie określono wskaźnik szorstkości powierzchni cząstki (I_a) za pomocą zaproponowanego wzoru [Parylak 2000]:

$$I_a = \frac{U_r - U_u}{U_u} \quad (3)$$

Eksperymentalne badania wykonano na losowo wybranych cząstkach z przedziału uziarnienia 0,05–0,1 mm czterech jednakowo uziarnionych pyłów piaszczystych różniących się zmiennością kształtu cząstek. Statystyczne opracowanie wyników dla cząstek materiałów gruntowych o mocno zróżnicowanych nieregularnościach powierzchni podano w tabeli 1. W celu zmniejszenia wpływu przypadkowości doboru ziaren wytypowanych do badań analizy kształtu, zgodnie z wymogami statystyki badania wykonano na wymaganej liczbie 25 cząstek, a wyniki badań każdej cechy kształtu opracowano statystycznie jak w przykładzie (tab. 1). Uzyskane w badaniach wskaźnika szorstkości powierzchni duże wartości współczynnika zmienności (v) są dowodem obecności w badanym materiale cząstek zarówno o niskim, jak i wysokim stopniu szorstkości powierzchni.



Rys. 4. Schemat ilustrujący sposób określania stopnia szorstkości powierzchni cząstek
 Fig. 4. Diagram, which illustrate the method of determination of asperity index degree of particles

Tabela 1. Opracowanie statystyczne wyników badań wskaźnika szorstkości powierzchni
 Table 1. Statistical estimation of results tests of asperity index

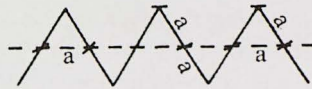
Rodzaj pyłu piaszczystego Sand – silt mixture type	Wartość średnia Average I_a	Odchylenie standardowe Standard deviation S	Błąd średniej Standard error se	Przedział ufności przy $1 - \alpha = 0,95$ 95 percent confi- dence for mean	Współczynnik zmienności Coefficient of variation v
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	0,08	0,04	0,009	0,05–0,15	52
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	0,08	0,03	0,006	0,04–0,14	32
Popiół lotny Fly ash	0,23	0,11	0,025	0,21–0,32	47

HIPOTETYCZNA ANALIZA ZAGADNIENIA

Istotne w tym zagadnieniu jest również ustalenie możliwej maksymalnej szorstkości powierzchni, do której można by porównawczo odnosić mierzone wartości. W uproszczeniu można przyjąć, że obserwowane na zdjęciach mikroskopowych wgłębienia i występy, zarówno ostrokrawędziste, jak i zaokrąglone, stanowią zasadniczo trójkąty, trapezy i półkola o kształtach i proporcjach jak na schematach podanych na rysunku 5. Wynika stąd, że umownemu odcinkowi długości a , upraszczającemu rozwiniętą linię krawędzi cząstki, odpowiadać będzie w przypadku trójkąta maksymalna długość odcinka obwodu rzeczywistego $2a$, w przypadku półkoli – $\pi a/2$, a w przypadku trapezu o przyjętych proporcjach boków – $2,5a$.

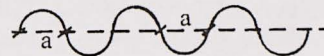
$$U_{\text{upr}} = a = 1,0a$$

$$U_{\text{rzecz}} = 2a = 2,0a$$



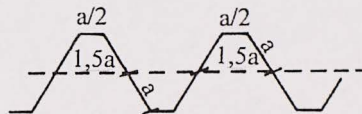
$$U_{\text{upr}} = a = 1,0a$$

$$U_{\text{rzecz}} = a = \pi a/2$$



$$U_{\text{upr}} = a = 1,0a$$

$$U_{\text{rzecz}} = 2a + a/2 = 2,5a$$



Rys. 5. Przyjęte schematy szorstkości powierzchni cząstek przy założeniu występowania nierówności wyłącznie trójkątnych albo półkolistych, albo trapezowych

Fig. 5. Used diagrams of asperity surface of particles in assumption, that roughness are triangles only, semicirculars only, or trapezoides only

Przyjmując, że jednostkowa długość odcinka (a) wynosi 1,0, wówczas maksymalny obwód, na którym występowałyby trzy pojedyncze kształty wgłębień i występów wyniósłoby: $2 + 1,57 + 2,5 = 6,07$. Odpowiadająca mu długość obwodu uproszczonego wyniesie 3,5. Na tej podstawie zgodnie ze wzorem (3) obliczono maksymalny wskaźnik szorstkości cząstek:

$$I_{a \text{ max}} = \frac{6,07 - 3,5}{3,5} = 0,73$$

Uzyskane wartości $I_{a \text{ max}}$ były następujące:

- dla przypadku występów trójkątnych i półkolistych 0,78,
- dla przypadku występów trójkątnych i trapezowych 0,80,
- dla przypadku występów półkolistych i trapezowych 0,63.

Niniejsze rozważania znajdują pewne uzasadnienie w pomiarach wykonanych na 150 cząstkach 6 pyłów piaszczystych i piasków, wśród których największe wartości I_a uzyskane dla agregatu popiołowego wyniosły 0,89.

PODSUMOWANIE

Jedną z najistotniejszych właściwości fizycznych gruntów jest kształt cząstek opisywany przez cztery parametry: kulistość, stopień zaokrąglenia naroży, stopień nieregularności cząstek i szorstkość powierzchni. Określenie wpływu każdej z tych cech cząstek na pozostałe właściwości fizykomechaniczne jest bardzo trudne do ustalenia, ale można połączyć je w jeden parametr.

Określanie szorstkości powierzchni cząstek jest niezwykle istotne zarówno w aspekcie poznawczego opisu gruntu, jak i wykorzystywania tej właściwości w inter-

pretacjach zagadnień praktycznych. Badania realizowane dotychczas kilkoma różnymi sposobami [Matsoul i in. 1978, Frossard 1979, Yoshimi i Kishid 1981, Vallejo 1995] nie umożliwiły przyjęcia relatywnie prostej metody uznanej za wystarczająco dokładną i praktycznie użyteczną [Homand-Etienne i in. 1989].

Zaproponowany w pracy sposób pomiaru szorstkości polega na pomiarze mikroskopowego zdjęcia przekroju cząstki. Określa się w nim stosunek długości rzeczywistego obwodu przekroju poprzecznego obrazu cząstki do długości opisanego na niej wieloboku, co wyraża się zaproponowanym wskaźnikiem szorstkości powierzchni (I_a):

$$I_a = \frac{U_r - U_u}{U_u}$$

Wielobok powinien być kreślony w ten sposób, aby jego powierzchnia była równa powierzchni przekroju cząstki, a liczba wystających mikrozagłębień i mikrowystępów poniżej i powyżej jego linii była taka sama.

Porównanie wskaźnika szorstkości obliczonego dla hipotetycznej szorstkości przy założeniu realnie ekstremalnych nierówności powierzchni, z największym wskaźnikiem I_a najbardziej szorstkich cząstek popiołów wykazało, że zastosowana metoda realnie odzwierciedla istotne nierówności powierzchni, a jej dokładność jednoznacznie zależy od stopnia powiększenia i ostrości zdjęcia. Duże wartości współczynnika zmienności (v) są dowodem obecności w badanych materiałach cząstek zarówno o niskim, jak i wysokim stopniu szorstkości powierzchni. Mogą one świadczyć również, że uznawana w badaniach statystycznych liczba 25 badanych cząstek jest niewystarczająca.

PIŚMIENNICTWO

- Bell F. and contributors, 1987. *Ground Engineer's Reference Book*. Butterwords, London, Boston, Durbon, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington.
- Bora K., 1984. Shear failure in granular media. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110, 5.
- Cudny M., 1998. Badanie kontaktu gruntu niespoistego z geomembranami teksturowymi przy obciążeniach monotonicznych i cyklicznych. Praca doktorska – maszynopis, Gdańsk.
- Frossard A., 1979. Effect of sand grain shape an interparticle friction, indirect measurements by Rowe's stress dilatancy theory. *Geotechnique*, 3, 341–350.
- Herdan G., 1953. *Small particle statistics*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- Homand-Etienne F., Rapin H., Song Y., 1989. Effect of aggregates angularity on granular material behaviour. *Powders and Grains*, Biarez and Gourvès (eds), Balkema, Rotterdam.
- Hyodo M., Hyde A., Aramaki N., 1998. Liquefaction of crushable soils. *Geotechnique* 48, 4, 527–543.
- Koerner R., 1970. Behaviour of single mineral soils in triaxial shear. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 4, 1373–1390.
- Kolbuszewski J., 1967. Porowatość graniczna. Wykład na SGGW w Warszawie.
- Lees G., 1964. New method for determining the angularity of particles. *Sedimentology*, 3, 2–21.
- Matsoul T., Ito T., Mitchell J., Abe N., 1978. Microscopic study of shear mechanisms in soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 2, 137–152.
- Negussey W., Wijewickreme K., Vaid P., 1988. Constant – volume friction angle of granular materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 25, 50–55.

- Norma PN/86/B/0248. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- Novello E., Johnston I., 1995. Geotechnical materials and the critical state. *Geotechnique*, 2, 223–235.
- Parylak K., 2000. Charakterystyka kształtu cząstek drobnoziarnistych gruntów niespoistych i jej znaczenie w ocenie wytrzymałości (praca habilitacyjna). Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej w Gliwicach, 90. Gliwice.
- Whalley W., 1980. Discussion on the effect of sand grain shape on interparticle friction indirect measurements by Rowe's stress dilatancy theory. 1, *Géotechnique*, 161–165.
- Wroth C., Houlsby G., 1985. Soil Mechanics – Property characterization and analysis procedures. Proceedings XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, 1, 1–55.
- Vallejo L., 1995. Fractal analysis of granular materials. *Géotechnique*, 1, 159–163.
- Yoshimi Y., Kishid T., 1981. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces. *Geotechnical Testing Journal*, 4, 4.

THE GEOMETRICAL METHOD OF TEST OF ROUGHNESS PARTICLES COHESIONLESS SOILS

Abstract: Shape of particles is one of the most fundamental physical properties of soil. It is defined by four parameters; sphericity, roundness, degree angularity of particles and roughness. Determination of every single factor influence on others physical and mechanical properties of soils is very difficult, but it can be summarised in one parameter. Up to now the roughness of particles was determined by some methods, but they are very difficult to be used in practice. A new method of roughness measurements is presented in this paper. Measurements of geometrical particles parameters are on photos from electronic scanning microscope. On the photo the length of particle contour, and length of polygon circumscribed on particle was measured with planimeter. In this method the area of polygon circumscribed on particle and area particle shape on the photo are the same. The results are used for calculation of asperity index I_a (equation 3). The experimental part of this method was realised on photos of about 150 particles of several soils, which shapes and roughness were very differentiated. The theoretically analysis of asperity index determined for imagined surface is based on assumption, that roughness of the surface is composed only with triangles, semicirculars, or only with trapezoides forms (fig. 4). The value of maximal asperity index calculated for simplified shape very near to the maximal value I_a obtained for real shape of fly ash particle.

Key word: properties of soil, shape of particles, roughness of surface, cohesionless soil

K. Parylak, Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Geotechniki i Wód Podziemnych, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław