

HANNA SUCHNICKA\*

**SHEAR STRENGTH PROPERTIES OF WASTE MATERIAL SEVERAL YEARS AFTER DISPOSAL****WYTRZYMAŁOŚĆ MATERIAŁU ZWAŁOWEGO PO KILKU LATACH OD ZDEPONOWANIA**

The primary objective of the study was to examine the strength properties of the waste material. So far, these properties have not been sufficiently well recognized and, what is more, they are known to vary with time and with the increasing thickness of the overlying material. This is mainly due to the ever changing structure of the material. At the first stage (I) the material assumes a *two-storey* structure (Fig. 1 a), which changes with time elapsed through stage II (Fig. 1 b) until the process of transformation has been completed at stage III (Fig. 1 c) to produce a breccia-like structure. The scheme of relations between successive stages (vertical stresses ( $\sigma$ ) and strains ( $\epsilon$ ) or shear stresses ( $\tau$ ) or density ( $\rho$ )) are plotted in Fig. 2 (solid lines). The same relations for undisturbed soils are shown in the same figure (dashed lines).

The laboratory tests were carried out on samples of waste material (set *S*) disposed of on a spoil heap about 5 years earlier and collected at the depth of 20 to 50 m. Those were unconsolidated undrained triaxial compression tests under strain-controlled conditions (at a strain rate ranging from 4.5 to 5.3 m/h) and at a cell pressure approaching that occurring in the waste heap.

Particular consideration was given to a detailed identification of the physical properties of the material. The variability of the basic physical parameters ( $w$ ,  $\rho$ ) in the *S*-set (sample 7) for three regions differing in size is shown in Table 1.

To support the experimental material for the needs of further analysis, the results of some previous tests were used in this paper. These previous tests were carried out on samples collected at the same spoil heap about 5 years earlier. The samples represented a much larger region because they were obtained from 15 boreholes at the depth of 5 to 90 m, although the scope of recognition of the physical properties was significantly simpler. This set of specimens is referred to as Set *T*. The larger number of specimens in Set *T* allowed statistical analysis of the effect of age and pressure on the water content and density values in the distinguished subsets.

The results of the investigations into the physical properties (for both sets) are plotted in Figs 3, 4, and 5.

\* INSTYTUT GEOTECHNIKI I HYDROTECHNIKI, POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, 50-370 WROCŁAW, WYBRZ. WYSPIAŃSKIEGO 27

Successive figures (Fig. 6 for specimen 4 and Fig. 7 for specimen 6 of Set *S*) show typical results of the strength tests. All shear strength data for this set are plotted in Fig. 8. For clarity, Fig. 9 includes only extreme values of the shear strength for the much larger sample set *T*.

The scattering of shear strength results for Set *S* and Set *T* is very large if the description is made in terms of total stresses, and surprisingly small if shear resistance is described in terms of effective stresses. It is the inhomogeneity of the material that should be blamed for the failed attempt to estimate the values of apparent strength parameters for each set of three specimens collected at the same depth. Only sometimes it was possible to estimate effective strength parameters (Table 5).

Figure 10 shows the distribution of shear resistance ( $q_f$ ) for the specimens of Set *S* in the vertical profile. On the left-hand side there are values of the cell pressure ( $\sigma_0$ ) at which each test was carried out, as well as the values of the pore pressure ( $u_0$ ) involved by this cell pressure. To compare these two quantities with the pressures generated by the self weight of the soil or water the values of the latter were shown in Fig. 10 by two lines — solid for soil and dashed for water.

There is no clear relationship between pore water pressure and current stress state irrespective of whether the loading is isotropic or anisotropic (i. e. at failure), Figs 11 and 12. And this means that Skempton's pore pressure parameters are very difficult to estimate (if at all), especially in the case of parameter *A*.

The test results are summarized in Fig. 13 and Table 6. The plots show areas of shear strength scattering for Set *S*, Set *T* and natural (undisturbed) soil displaying a physical state and plasticity similar to those of the waste material. Figure 13 also includes the resultant lines (lines with points).

Summing up, the investigations of the waste material even from the same borehole evidenced a strong random inhomogeneity, which manifested not only in the physical state (varying from very stiff or hard to very soft or even liquid) but also in the values of absolute shear strength, i. e. those described in terms of total stresses. On the other hand, it was surprising to find that both in the present test (Set *S*) and in our previous studies (Set *T*) the description of the shear strength in terms of effective stresses was incredibly precise. The problem calls for further reconnoitring (both laboratory and *in situ*) investigations. *In situ* investigations should primarily aim at measuring and describing the pore pressure distribution in the waste material. But is another major question which calls for answer: Does the age of the waste material and the pressure of the overlying strata affect the physical and mechanical properties or not, if the material has overlain the spoil heap for several years?

*In situ* investigations should also aim at providing data on the position of the weakness zones in the heap. Penetration tests seem to be best suited for this purpose.

**Key words:** waste material, laboratory tests, shear strength.

Przedmiotem szczegółowej analizy — przede wszystkim dotyczącej cech wytrzymałościowych, ale też i stanu fizycznego — są wyniki badań laboratoryjnych materiału zwałowego, zalegającego od ponad 5 lat, na głębokości 20—50 m. Porównywane są one z rezultatami wcześniejszych badań, przeprowadzonych na próbkach pochodzących wprawdzie z większego obszaru i z większych głębokości, lecz niestety o węższym zakresie. Badania zostały wykonane na próbkach o naturalnej wilgotności, w warunkach trójosiowego ściskania, z pomiarem ciśnienia wody w porach. Wymuszenie zadawane było w pomieszczeniach, z prędkością (4,5—5,3) mm/h, przy ciśnieniu bocznym (w komorze aparatu) zbliżonym do panującego w warunkach naturalnych.

Podczas interpretacji wyników badań, dużą uwagę poświęcono ocenie wpływu na wartości parametrów wytrzymałościowych wyboru warunku, jaki oznaczałby przejście materiału w stan graniczny.

Potwierdzona została ogromna — losowa — niejednorodność materiału zwałowego, manifestująca się nie tylko w dużych rozrzutach wartości parametrów fizycznych, ale też różnymi stanami materiału (niejednokrotnie próbki pochodzące z tego samego otworu wiertniczego wykazywały tak różne stany, jak np.: zwarty i półzwarty, czy miękkoplastyczny, a nawet płynny). Pewnym zaskoczeniem był fakt, odnotowany zarówno w badaniach ostatnio przeprowadzonych, jak i wcześniejszych, że mimo ogromnej zmienności bezwzględnych wartości oporu ścinania materiału zwałowego, oceny jego wytrzymałości, przeprowadzone w nawiązaniu do wartości naprężeń efektywnych, okazały się tak dokładne. Wyjaśnienie tego zagadnienia wymaga dalszych, pogłębionych studiów, a nade wszystko badań i to badań *in situ*, zarówno samego oporu ścinania, jak i ciśnienia wody w porach materiału.

**Słowa kluczowe:** grunty zwałowe, badania laboratoryjne, wytrzymałość.

## 1. Wprowadzenie

Pozyskanie kopaliny użytecznych, przy zastosowaniu odkrywkowych technologii wydobycia, związane jest z powstawaniem — niekiedy ogromnych — składowisk materiałów odpadowych. Tworzą je głównie grunty z warstw nadkładu, drobne przewarstwienia eksploatowanego surowca, jak też odpady przemysłowe, np. popioły, żużle itp. Z przyczyn ekonomicznych, składowiska umieszczane są w bliskim sąsiedztwie wkopu otwierającego, na terenach najmniej wartościowych rolniczo — często jednak mało korzystnych też pod względem cech geotechnicznych. Powstające obiekty, jeżeli nie są fachowo konstruowane i kontrolowane — chociażby w zakresie dotychczasowego doświadczenia inżynierskiego — mogą stanowić ogromne zagrożenie, tak dla samej kopalni, jak też innych, sąsiadujących z nią, obiektów inżynierskich i użyteczności publicznej (drogi, linie kolejowe, rzeki itp.). Zagrożenie to wzrasta wraz z rozmiarami, a przede wszystkim wysokością składowiska nazywanego w górnictwie odkrywkowym *zwałem*.

Brak informacji o właściwościach materiału mającego tworzyć zwał, nie tylko do chwili jego zdeponowania, ale też w trakcie budowy, a następnie istnienia zwału sprawia, że przy wznoszeniu takiego obiektu wykorzystuje się przede wszystkim doświadczenie i wyczucie inżynierskie. Było to uzasadnione w początkowym okresie rozwoju górnictwa odkrywkowego, niestety podejście takie obserwuje się do dnia dzisiejszego. Badania, których celem byłoby ustalenie właściwości materiału zwałowego — szczególnie w ostatnich latach — stanowią co najwyżej margines prac związanych z projektowaniem, budową i eksploatacją obiektów górnictwa odkrywkowego. Tymczasem, zarówno ze względu na obserwowane przypadki niestateczności, jak też przykład nowoczesnego spojrzenia na metodykę rozwiązania problemów inżynierskich, prowadzenie badań kontrolnych, jak też badań rozszerzających wiedzę

o problemie, winno być nie tylko dobrym zwyczajem, lecz — po wejściu w życie międzynarodowych przepisów zawartych w Eurokodach — i prawnym nakazem.

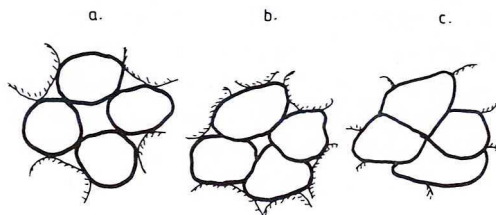
Zgromadzenie, w wyniku badań na obiektach rzeczywistych, odpowiednio bogatych zbiorów danych, umożliwi przeprowadzenie właściwych klasyfikacji oraz uogólnień, niezbędnych do precyzyjnego rozwiązania problemu, jakim jest projektowanie kolejnych obiektów inżynierskich.

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań laboratoryjnych wytrzymałości materiału zwałowego, po kilku latach od zdeponowania go w zwale — zatem materiału o względnie ustabilizowanej strukturze. Porównywane są rezultaty uzyskane w dość odległych od siebie okresach badania, co może być interesujące również i ze względu na postęp, jaki dokonał się w zakresie dokładności opróbowania górotworu oraz aparatury badawczej.

## 2. Właściwości materiału zwałowego — ogólne uwagi

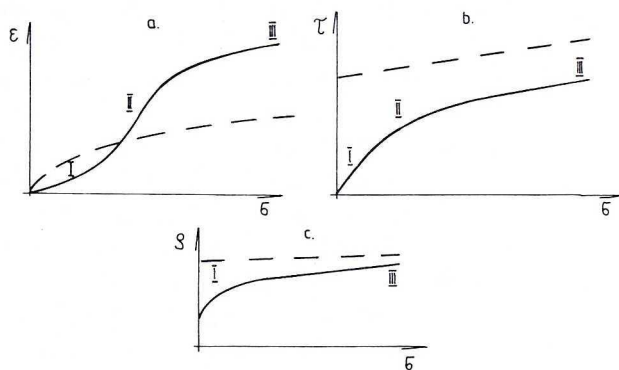
Pierwszymi w Polsce pracami dotyczącymi właściwości materiału zwałowego były opracowania profesorów D m i t r u k a i S z a f r a n a (1965, 1965). Szczególne znaczenie ma monografia D m i t r u k a (1965). Podano w niej koncepcję mechaniki gruntu zwałowego — *ośrodka rozdrobnionego drugiego rodzaju*. Wyróżnione zostały trzy etapy kształtowania się właściwości materiału; ich ilustracją są schematy na rys. 1. W pierwszym etapie (I) — bezpośrednio po zdeponowaniu urobku w miejscu przeznaczenia — materiał charakteryzuje się *piętrową strukturą*. Składa się na nią makrostruktura uformowana z odkształcalnych brył gruntowych oraz własna struktura każdej z brył (rys. 1 a). Etap drugi (II) dotyczy fazy przejściowej — zanikają makropory, rozwijają się powierzchnie kontaktowe między bryłami gruntu (rys. 1 b). W etapie trzecim (III) (rys. 1 c) materiał zatracą piętrową strukturę, a w miejscach stykania się pierwotnie odrębnych elementów pozostają, co najwyżej, strefy osłabienia. Przykłady krzywych doświadczalnych, w przypadku badań odkształcalności oraz wytrzymałości materiału zwałowego (linie ciągłe), przedstawia rys. 2. Istotne uzupełnienie tych związków stanowi wykres zmian gęstości materiału zwałowego w wyniku obciążenia zewnętrznego (zwykle ciężaru wyżej zalegających warstw) rys. 2 c.

Na ostateczną postać związków fizycznych, opisujących zachowanie się materiału zwałowego, ma wpływ wiele czynników. Najogólniej mówiąc są to: rodzaj



Rys. 1. Makrostruktura materiału zwałowego w kolejnych etapach jego formowania się

urabianego gruntu, sposób jego odspojenia, transportu i zazwałowania, jak też czas i ciśnienie jakemu poddany jest materiał. Z tych powodów, jak też z braku podobieństwa modelowego, w przypadku badań na próbkach formowanych z bryłek o małych wymiarach, właściwości materiału zwałowego najlepiej jest ustalać w warunkach naturalnych. Oczywiście, dotyczyć to winno każdego z wyróżnionych etapów tworzenia się materiału. Za najpilniejsze uważa się jednak ustalenia dotyczące właściwości materiału zwałowego po zakończeniu dynamicznego procesu, jakim jest przebudowa „ziarnistej” makrostruktury i wytworzenie się w masywie stanu podobnego warunkom pierwotnym. Wprawdzie najniekorzystniejsze cechy wytrzymałościowe występują w materiale tuż po zdeponowaniu go w zwale, stany te dotyczą jednak obszarów o niewielkiej miąższości, które, co ciekawe, ograniczone są stosunkowo stromymi zboczami. Znacznie większe zagrożenia może natomiast stwarzać materiał zwałowy głębiej zalegający, o np. dużej wilgotności lub małym oporze ścinania w strefach kontaktów międzybryłowych (co notabene idzie w parze). Obszary takie to potencjalne strefy zniszczenia wskutek osiągnięcia przez materiał granicznego oporu ścinania, czy też rozwoju lepko-plastycznych deformacji. Fakty te winny więc wzbudzać zainteresowanie tak z przyczyn naukowych, jak i zawodowych (bezpieczeństwo obiektu). Zachętą do podejmowania badań, na tym etapie budowy strukturalnej zwału, winna być możliwość wykorzystania klasycznych metod postępowania, zarówno przy opróbowaniu zwału, jak i podczas laboratoryjnych badań identyfikacyjnych.



Rys. 2. Doświadczalne związki między: a) odkształceniem i naprężeniem normalnym, b) oporem ścinania i naprężeniem normalnym, c) gęstością i naprężeniem normalnym w materiale zwałowym — linie ciągłe, w gruncie naturalnym — linie przerywane

### 3. Zakres badań: materiał i program badań

Badania wytrzymałości materiału zwałowego dotyczą jednego z większych zwałowisk zewnętrznych w Polsce. Wykonane zostały w Laboratorium Mechaniki Gruntów Politechniki Wrocławskiej. Główną część badań stanowią wyniki rozpoznania prze-

prowadzonego pod koniec 1997 r. Zbiór ten, z przyczyn redakcyjnych, oznaczono symbolem *S*. W artykule wykorzystuje się również rezultaty badań przeprowadzonych w połowie lat osiemdziesiątych; tworzą one zbiór *T*. W obu przypadkach, niektóre wyniki badań, wraz z ich interpretacją, prezentowane już były na konferencjach naukowych (Suchnicka, 1990; Suchnicka, Hawrysz, 1993).

Materiał zwałowy, w przeważającej części, stanowiły grunty nadkładowe: spoiste i sypkie, czwarto- i trzeciorzędowe z niewielkimi dodatkami części organicznych i popiołów. Nadkład urabiany był wielkonaczyniowymi koparkami i przekazywany taśmociągami na odległe o kilka kilometrów zwałowisko. Tam deponowano go za pomocą zwałowarek w piętra o wysokości 15—30 m. Wiek zwału — zależnie od obszaru — wynosi od kilku do kilkunastu lat. Podczas wierceń nie wykryto ciągłego horyzontu wody.

W latach osiemdziesiątych, próby do badań pobierane były z odcinków rdzeni wiertniczych — co 5 m — z umieszczane w stalowych cylindrach (NNS-ach). Pochodziły one z kilkunastu, nieregularnie rozmieszczonych na powierzchni około 7 km<sup>2</sup>, otworów wiertniczych, z głębokości od 30 do 90 m. Bardziej precyzyjnie dobierano materiał do badań w roku 1997. Wykorzystano w tym celu zestaw MOSTAP o wymiarach próbника:  $d = 65$  mm,  $l = 100$  cm, którym, z częstością co 3 m, opróbowano warstwę na głębokości 20—50 m, w zwale o wysokości ponad 100 m. Bez względu na miejsce pobrania, podczas makroskopowego rozpoznania prób, nie stwierdzono w nich „pustek” w sensie makroporów; zdarzały się natomiast przerwy w rdzeniu. W obrębie pojedynczych prób zaobserwowano, między innymi na podstawie barwy, duże przemieszanie różnych gruntów naturalnych, a także części organicznych — o zróżnicowanym stopniu rozkładu i przeobrażenia.

Sposób przeprowadzenia badań w połowie lat osiemdziesiątych (zbiór *T*) można uznać, na ówczesne warunki, za standardowy, tj. z wykorzystaniem aparatów trójosiowego ściskania typu EWA, o oprzyrządowaniu dostosowanym do manualnej rejestracji, ciśnieniu komorowym w przedziale 0—700 kPa, na próbkach o wymiarach:  $d = 38$  mm,  $h = 76$  mm. Badania wykonano przy stałej wilgotności materiału (wg schematu UU), z pomiarem ciśnienia wody w porach oraz wymuszeniu w postaci stałego przemieszczenia (około 3,5 mm/h). W podobny sposób zrealizowano badania próbek ze zbioru *S*. Skorzystano jednak z nowoczesnej aparatury firmy ELE, z automatyczną rejestracją wskazań elektronicznych czujników i pomiarem siły wewnątrz komory aparatu, starano się dostosowywać wielkości obciążeń do warunków w zwale. Ponadto wprowadzono do badań próbki o większych wymiarach, a mianowicie:  $d = 50$  mm,  $h = 100$  mm oraz nieco większe prędkości wymuszenia (4,5—5,3 mm/h).

By — względnie dokładnie — ocenić niejednorodność materiału, przeprowadzano szczegółową identyfikację każdej z próbek zbioru *S*. Obejmowała ona: badanie składu granulometrycznego, określenie gęstości objętościowej i szkieletu gruntowego, wyznaczenie granic konsystencji (plastyczności i płynności) oraz określenie wilgotności niezależnie dla obu końców próbki przed i po badaniu wytrzymałościowym oraz strefy ścięcia i dodatkowo przy wyznaczaniu granic konsystencji.

#### 4. Wyniki badań

##### 4.1. Identyfikacja cech fizycznych

Wyniki badań materiału zwałowego, wraz z ich analizą, uzyskane w roku 1997 (zbiór *S*), stanowią zasadniczą część opracowania. Istotnym ich rozszerzeniem są natomiast odniesienia do wcześniejszych ustaleń — dotyczące próbek ze zbioru *T*. Każdorazowo jest to zaznaczane w tekście.

Podstawową trudnością przy określaniu wartości reprezentatywnych dla parametrów stanu fizycznego oraz składu granulometrycznego materiału zwałowego jest jego ogromna niejednorodność. W celu zilustrowania problemu, w tabeli 1 zestawiono wartości wilgotności i gęstości objętościowej, otrzymane dla jednej z prób NNS (Nr 7). Podane wartości uzyskano: w pojedynczym badaniu, dla

TABELA 1

Ilustracja niejednorodności materiału zwałowego

Nr NNS	Badanie	Symbol próbki i cecha materiałowa								
		A			B			C		
		$\rho$	$w_i$	$w_{\text{sr}}$	$\rho$	$w_i$	$w_{\text{sr}}$	$\rho$	$w_i$	$w_{\text{sr}}$
		[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]		[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]		[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	
7	górnica ATS <sup>1</sup> dół	1,70	34,8	33,4	1,81	35,8	(31,5)	1,82	32,9	31,0
		—	32,0		—	27,2		—	29,1	
		1,97	25,9	(27,7)	1,96	24,7	24,35	1,78	46,4	(49,55)
		—	29,5		—	24,0		—	52,7	
	średnia	<b>1,83</b>		<b>30,55</b>	<b>1,88</b>		<b>27,92</b>	<b>1,80</b>		<b>40,27</b>
	górnica ATS <sup>2</sup> dół		28,86	(32,17)		29,18			30,17	
			35,47			—			—	
			32,94			27,52	27,34		29,37	
			—			27,15			—	
	średnia	<b>1,78</b>		<b>32,55</b>	<b>1,87</b>		<b>28,26</b>	<b>1,80</b>		<b>29,77</b>
konsystencji		30,24 31,23	<b>30,74</b>		27,61 28,30	<b>27,95</b>		32,7 30,94	<b>31,84</b>	

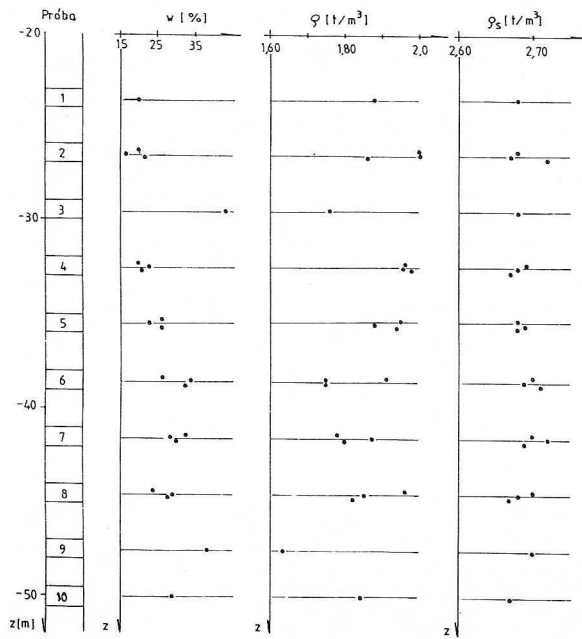
<sup>1</sup> badania gęstości metodą rtęci,

<sup>2</sup> średnia gęstość ustalona dla całej próbki przeznaczonej do badań wytrzymałości (ATS), przy małej ilości materiału wykonywano tylko jedno oznaczenie wilgotności.

W nawiasach podano wartości średnie w przypadku dużych rozrzutów pojedynczych ustaleń.

wydzielonego — małego — podobszaru (wartość średnia) oraz dla całej próbki przeznaczonej do badania wytrzymałości w warunkach trójosiowego ściskania. Dążono przy tym, by z każdego odcinka rdzenia wiertniczego (próby NNS) uzyskać co najmniej trzy próbki do badań wytrzymałości, które oznaczano: *A*, *B*, *C*.

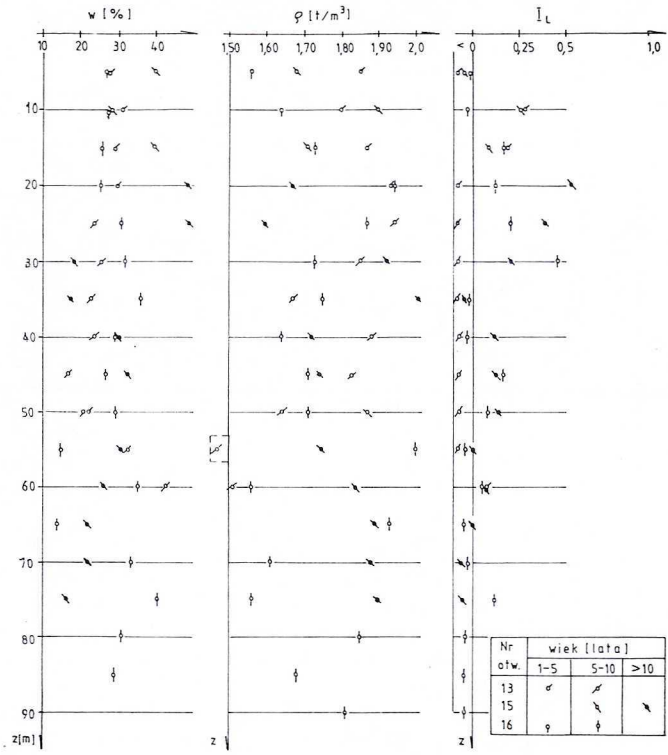
Jak wspomniano, różnice między poszczególnymi wartościami badanej cechy są ogromne, np. w przypadku wilgotności sięgają kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu procent, (patrz próbki: *B* i *C*). Z drugiej strony, rozrzuty wartości **średnich** parametru materiałowego, również gdy dotyczy to stosunkowo niewielkich obszarów, jakimi są próbki do badań wytrzymałości, zwykle są znacznie mniejsze. Ogromny wpływ na lokalne rozkłady wartości ma niewątpliwie udział części organicznych w badanej bryłce materiału.



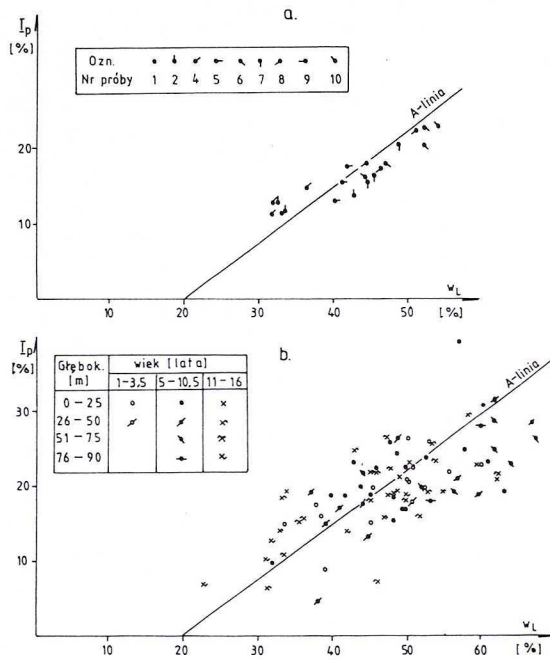
Rys. 3. Wartości podstawowych parametrów fizycznych w zbiorze próbek *S*

Celem zamieszczenia na rys. 3 i 4 tego rodzaju informacji było umożliwienie Czytelnikowi, na przykładzie opróbowanej części zwału, przeprowadzenia własnej oceny zmienności podstawowych parametrów materiałowych w zbiorach *S* i *T*. W przypadku zbioru *T* informacje dotyczą tylko otworów wiertniczych 13, 15 i 16. Ich wybór podyktowany został faktem, iż właśnie zalegający tam materiał, osiągał w badaniach wytrzymałościowych ekstremalne wartości oporu ścinania. Niejednorodność materiału, ze względu na cechę plastyczności, prezentują odpowiednio wykresy: rys. 5a — dla zbioru *S*, rys. 5b dla zbioru *T*.





Rys. 4. Wybrane wartości podstawowych parametrów fizycznych ze zbioru próbek T (otw. 13, 15 i 16)



Rys. 5. Plastyczność materiałów zwałowych: a) zbiór S, b) zbiór T

Charakterystyki materiałowe próbek zbioru S

Głęb. zaleg.	Nr NNS	Sym- bol prób.	Zawartość frakcji				Sym- bol grun.	Parametry fizyczne* (stan: 0 przed, k po bad. wytrzym.)					Wskaźniki	
			$f_i$	$f_\pi$	$f_p$	$f_z$		$q_s$	$q_0$	$q_k$	$w_0$	$w_k$	$e_0$	$S_r$
[m]	—	—	[%]				—	[g/cm <sup>3</sup> ]			[%]		—	—
23,0— 24,0	1	A	24,8	31,4	34,4	9,4	$G_z$	2,68	1,88	1,88	19,3	23,2	0,70	0,74
26,0 — 27,0	2	A	15,8	35,0	33,2	16,0	$G$	2,68	1,99	1,93	19,9	19,6	0,61	0,87
		B	18,4	36,6	34,0	11,0	$G$	2,67	2,00	2,00	16,4	20,3	0,55	0,79
		C	45,1	27,8	23,1	4,0	$I$	2,72	1,86	1,86	21,4	27,6	0,78	0,75
29,0— 30,0	3		18,0	32,0	36,5	13,5	$G$	2,68	1,76		42,8		1,18	~ 1
32,0 — 33,0	4	A	23,9	34,1	30,5	11,5	$G_z$	2,69	1,96	1,97	19,9	18,8	0,65	0,83
		B	22,9	30,0	33,1	14,0	$G_z$	2,68	1,96	1,97	22,6	22,7	0,68	0,90
		C	15,9	31,1	37,5	15,5	$G$	2,67	1,98	1,98	20,8	19,7	0,63	0,88
35,0 — 36,0	5	A	24,6	39,0	32,4	4,0	$G_z$	2,68	1,95	2,01	25,7	26,0	0,73	0,95
		B	22,9	35,4	24,7	17,0	$G_z$	2,69	1,88	1,89	22,6	22,9	0,76	0,81
		C	25,8	45,1	20,1	9,0	$G_z$	2,68	1,94	1,98	25,8	26,5	0,74	0,94
38,0 — 39,0	6	A	36,7	54,5	8,8	0,0	$I_\pi$	2,70	1,91	1,91	26,2	29,6	0,78	0,90
		B	22,5	39,2	34,5	3,8	$G_z$	2,69	1,75	1,75	33,7	32,3	1,06	0,86
		C	30,8	53,1	16,1	0,0	$I_\pi$	2,71	1,75	1,75	32,4	33,3	1,05	0,84
41,0 — 42,0	7	A	30,1	60,5	9,4	0,0	$I_\pi$	2,70	1,78	1,79	32,6	31,1	1,01	0,87
		B	31,6	60,4	8,0	0,0	$I_\pi$	2,72	1,87	1,87	28,3	29,3	0,87	0,89
		C	24,2	35,6	29,2	11,0	$G_z$	2,69	1,80	1,80	29,8	31,0	0,94	0,86
44,0 — 45,0	8	A	32,9	56,3	10,9	0,0	$I_\pi$	2,70	1,96	1,96	23,7	24,0	0,70	0,91
		B	25,7	34,4	31,9	8,0	$G_z$	2,68	1,85	1,85	28,7	25,5	0,86	0,89
		C	24,8	47,2	21,9	6,1	$G_z$	2,67	1,82	1,82	27,4	25,5	0,87	0,84
47,0— 48,0	9	A	31,4	53,7	14,9	0,0	$I_\pi$	2,70	1,63	1,63	37,9	41,4	1,28	0,80
49,5— 50,5	10	A	21,0	41,0	30,5	7,5	$G_z$	2,67	1,84	1,84	28,6	27,4	0,87	0,88

\* średnie wartości dla próbki przeznaczonej do badania wytrzymałości.

Inne dane, odnoszące się do składu granulometrycznego i wartości parametrów fizycznych próbek przeznaczonych do badań wytrzymałości w zbiorze S, zamieszczono w tabeli 2. Opis materiału uzupełnia tabela 3, prezentująca wartości wybranych wskaźników materiałowych.

Informacje dotyczące zbiorów parametrów materiałowych dla badań etapu T, uzyskane z badań próbek pochodzących z 15 otworów wiertniczych, zestawiono

TABELA 3

Wartości wybranych wskaźników materiałowych — zbiór S

Głębokość	Próbka	w (z bad. konsys.)	$w_p$	$w_L$ metoda: penetrom. Casagr.		$I_L$ ( $w_L$ wg metody penetr. Casagr.)	
[m]		[%]	[%]	[%]		—	
23,0– 24,0	1	26,1	21,1	35,6	33,2	0,34	0,41
26,0 — 27,0	A 2 B C	21,8 20,5 21,9	21,8 19,8 29,2	8,8 33,2 50,7	33,4 32,6 42,9	0 0,06 –0,34	0 0,06 –0,53
29,0– 30,0	3	42,8	25,9	39,2		~ 1	1,27
32,0 — 33,0	A 4 B C	19,9 22,6 20,8	19,4 21,8 20,3	33,8 41,0 36,8	32,2 36,7 31,7	0,03 0,04 0,03	0,04 0,06 0,04
35,0 — 36,0	A 5 B C	23,7 21,0 22,9	24,3 27,2 26,0	42,3 44,9 45,1	41,8 40,2 41,3	–0,03 –0,35 –0,16	–0,03 –0,48 –0,20
38,0 — 39,0	A 6 B C	32,0 34,0 36,1	29,3 32,0 29,9	51,4 58,3 55,7	47,0 52,3 52,4	0,12 0,08 0,24	0,15 0,10 0,28
41,0 — 42,0	A 7 B C	30,7 28,0 31,8	28,4 29,4 29,2	51,4 48,1 49,5	48,8 45,6 44,6	0,10 –0,07 0,13	0,11 –0,09 0,17
44,0 — 45,0	A 8 B C	25,2 28,9 33,2	26,6 28,8 29,2	44,5 56,0 48,7	44,4 51,2 46,6	–0,08 0 0,21	–0,08 0 0,23
47,0– 48,0	9	45,3	31,5	56,4	54,1	0,55	0,61
49,5– 50,5	10	28,6	28,3	45,6	44,3	0,02	0,02

w tabeli 4. Bogatszy, w tym przypadku, materiał doświadczalny umożliwił przeprowadzenie w podzbiorach elementarnej charakterystyki statystycznej, ze względu na: głębokość zalegania materiału (warstwy o miąższości 25 m) oraz jego wiek (okresy 1–1,5; 6–11; 11–15 lat).

Nieliczne analizy uziarnienia, wykonane dla próbek zbioru *T*, nie pozwalają na przeprowadzenie porównań co do rodzaju gruntów składających się na zbiory *S* i *T*. Opierając się jednak na wynikach badań plastyczności, można uznać, że próbki ze zbioru *T* tworzyły grunty o średniej ( $w_L$ : 30–40%) i dużej (~60%) plastyczności, natomiast ze zbioru *S* — grunty średnioplastyczne ( $w_L$ : 30–50%).

Podstawowe charakterystyki materiałowe próbek ze zbioru *T*

Głębok. [m]	Statyst. charakt.	Wiek [lata]											
		1—3,5				6—11				11—15			
	zbior.	$\varrho$	$w$	$w_L$	$w_P$	$\varrho$	$w$	$w_L$	$w_P$	$\varrho$	$w$	$w_L$	$w_P$
—	—	[t/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]	[t/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]	[t/m <sup>2</sup> ]	[%]	[%]	[%]
0— 25	$n$	30	30	30	30	28	28	28	28	16	16	16	16
	$\bar{x}$	1,76	29,6	47,7	28,9	1,80	31,6	48,5	27,9	1,84	31,6	47,2	26,4
	$x_{min}$	1,50	20,1	33,8	19,1	1,38	13,0	32,2	17,9	1,60	19,8	33,2	15,1
	$x_{max}$	1,95	48,8	63,0	39,5	2,09	53,8	63,2	40,5	2,12	49,8	62,3	41,7
25— 50	$n$	16	16	16	16	19	19	19	19	24	24	24	24
	$\bar{x}$	1,73	31,8	48,9	31,2	1,77	27,9	48,5	28,5	1,85	27,3	46,0	26,0
	$x_{min}$	1,53	19,5	31,5	25,1	1,64	16,9	37,2	18,1	1,61	17,5	33,0	15,0
	$x_{max}$	1,90	43,2	59,9	40,1	1,94	36,2	67,0	41,0	2,08	46,7	62,4	45,4
50— 75	$n$	$n$ liczebność $\bar{x}$ wartość średnia				13	13	13	13	19	19	19	19
	$\bar{x}$					1,73	30,8	52,2	30,6	1,83	28,2	46,0	27,9
	$x_{min}$					1,51	14,2	38,8	20,5	1,66	12,5	33,9	20,1
	$x_{max}$					1,99	43,1	67,8	41,6	2,04	39,4	62,7	41,2
75— 90	$n$	$n$ liczebność $\bar{x}$ wartość średnia				6	6	6	6	6	6	6	6
	$\bar{x}$					1,82	30,0	48,7	29,2	1,94	23,7	38,8	24,3
	$x_{min}$					1,68	21,4	34,0	23,0	1,69	18,5	31,1	19,3
	$x_{max}$					1,96	39,7	60,1	35,5	2,08	28,8	50,0	31,2

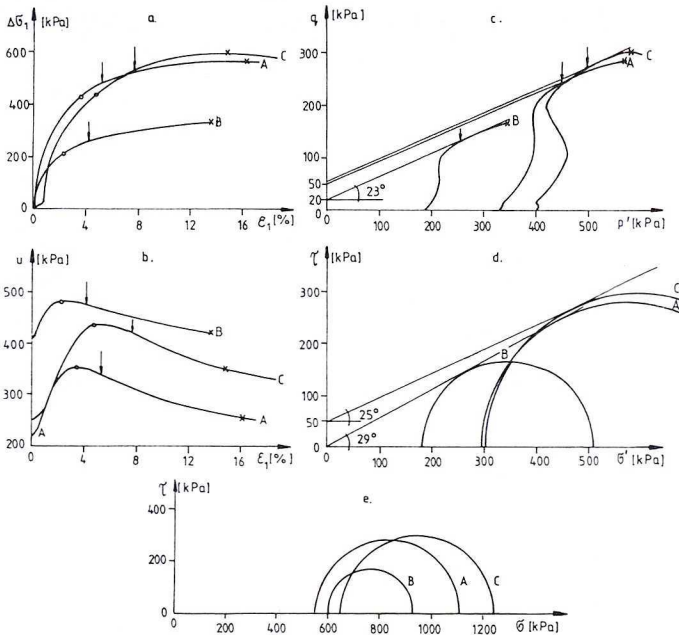
#### 4.2. Ocena wytrzymałości

Typowe dla próbek zbioru *S*, relacje między oporem ścinania lub wartością ciśnienia w porach i odkształceniem próbki oraz wykresy granicznych kół Mohra, pokazują rysunki 6 i 7. Na krzywych zaznaczono charakterystyczne zdarzenia, jakie miały miejsce w badaniu wytrzymałości materiału, a mianowicie fakt uzyskania maksymalnych wartości przez:  $\Delta\sigma_1$  — znak (*x*), *u* — znak (*o*). Wobec występujących, przy wzroście obciążenia, zmian wartości ciśnienia w porach pokazano również przebiegi ścieżek naprężenia na płaszczyznach występowania w materiale maksymalnych naprężeń stycznych (wykresy *c* na rys. 6 i 7). Wykorzystano je do postawienia jeszcze jednej hipotezy dotyczącej zaistnienia w materiale stanu granicznego. Jak wiadomo, przy tradycyjnym podejściu, stan ten utożsamiany jest z momentem

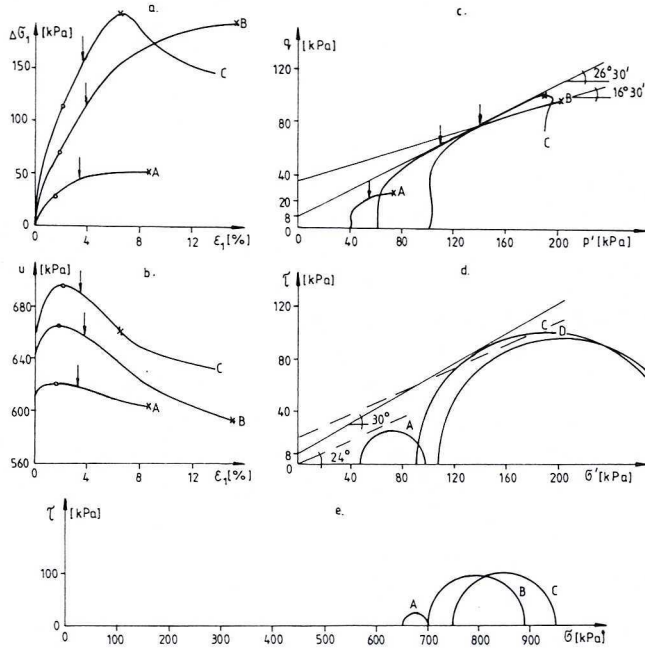
osiągnięcia przez  $\Delta\sigma_1$  lub  $\sigma_1'/\sigma_3'$  wartości maksymalnej. W zaproponowanym przypadku, za oznakę przejścia materiału w stan graniczny uważano fakt osiągnięcia przez ścieżkę naprężenia stałego nachylenia; na rysunkach moment ten zaznaczony został strzałką ( $\downarrow$ ).

Wykresy *d*, na tych samych rysunkach 6 i 7, przedstawiają graniczne koła Mohra, przy opisie procesu w naprężeniach efektywnych oraz przyjęciu jako kryterium zniszczenia stanu maksymalnego oporu ścinania, natomiast wykresy *e* — przy opisanie tego faktu w naprężeniach całkowitych. Niestety, dla większości badań dotyczących próbek pochodzących z tego samego NNS-u, nie udawało się, w sposób wiarygodny, ustalić położenia linii granicznej, a zatem i określić wartości parametrów wytrzymałościowych. Wyniki wszystkich badań wytrzymałościowych, identyfikujących ten stan z wystąpieniem w materiale maksymalnego oporu ścinania, pokazane zostały na rys. 8; pominięty został jedynie odcinek rdzenia 3, na którego długości materiał znajdował się na granicy stanów: miękkoplastycznego i płynnego, którego wytrzymałość praktycznie była równa 0.

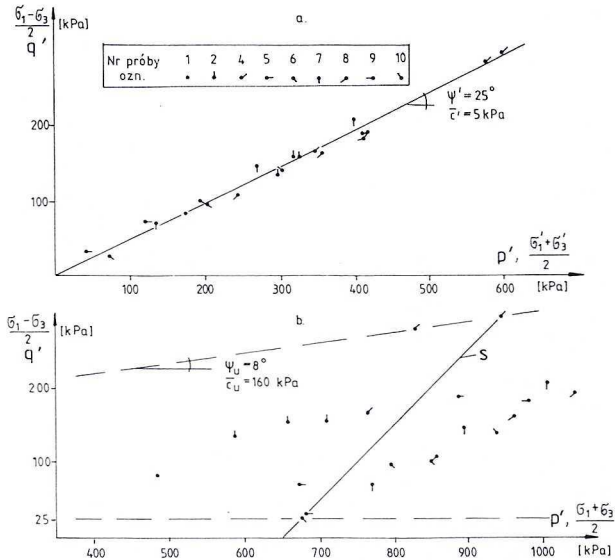
Podobne zestawienie wyników dla zbioru *T* przedstawia rys. 9. Ze względu na czytelność rysunku pokazano na nim rezultaty dotyczące tylko ekstremalnych reakcji materiału.



Rys. 6. Wyniki badań próby 4 ze zbioru *S*: a) relacja między przyrostem maksymalnego naprężenia głównego i odkształceniem osiowym, b) zmiany ciśnienia wody w porach, c) ścieżki naprężenia, d) graniczne koła Mohra dla efektywnych wartości naprężenia oraz e) dla wartości całkowitych

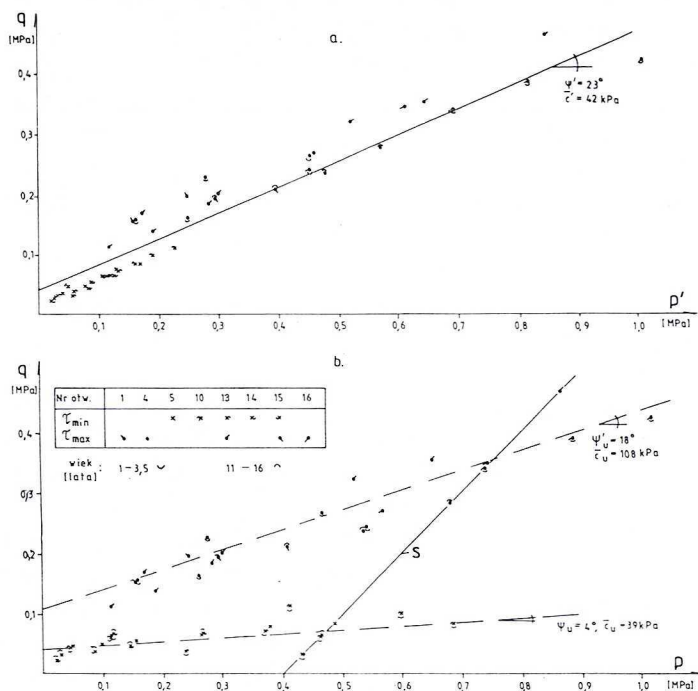


Rys. 7. Wyniki badań próby 6 ze zbioru S: a) relacja między przyrostem maksymalnego naprężenia głównego i odkształceniem osiowym, b) zmiany ciśnienia wody w porach, c) ścieżki naprężenia, d) graniczne koła Mohra dla efektywnych wartości naprężenia oraz e) dla wartości całkowitych



Rys. 8. Wyniki badań wytrzymałości próbek ze zbioru S; opis w naprężeniach: a) efektywnych, b) całkowitych; linia s — przykładowa ścieżka naprężeń całkowitych

Uzupełniając informacje o zastosowanej w latach osiemdziesiątych metodyce rozpoznania należy wyjaśnić, że dla każdej z prób NNS wykonywano oznaczenia wytrzymałości tylko przy dwu różnych ciśnieniach w komorze aparatu, jak też że badania wytrzymałości nie były tak regularnie prowadzone jak badania cech fizycznych oraz jak to miało miejsce w badaniach w roku 1997.



Rys. 9. Wyniki badań dla ekstremalnych przypadków wytrzymałości próbek ze zbioru T; opis w naprężeniach: a) efektywnych, b) całkowitych

## 5. Analiza i interpretacja wyników badań

Szczegółowe rozpoznanie parametrów fizycznych materiału zwałowego, jakie towarzyszyło badaniom próbek zbioru S (tab. 1), podyktowane było: 1) chęcią prześledzenia zmienności materiału w powiązaniu z wielkością obszaru, jakiego opis dotyczy, tj. poczynając od małych objętości, jakie stanowią próbki pobierane dla określenia pojedynczej cechy, np. wilgotności czy gęstości, przez większe — równoważne próbkom do badań wytrzymałościowych, aż do jeszcze większych — odpowiadających odcinkowi rdzenia pobieranego przy opróbowaniu górotworu, o długości około 1 m oraz: 2) chęcią przeprowadzenia porównań między wynikami badań dla materiału zwałowego, a właściwościami przypisywanymi gruntom naturalnym w podobnym stanie fizycznym. Osiągnięcie drugiego celu, utrudnia fakt istnienia

wtrąceń organicznych w materiale zwałowym. Obecność części organicznych w zwale była stwierdzona już w badaniu makroskopowym, natomiast za ich ilościowy wskaźnik przyjęto wielkość strat masy materiału podczas jego suszenia w przedziale temperatur 220°C—400°C. Z powodu małej dokładności takiej oceny podaje się jedynie, iż udział wtrąceń organicznych w materiale — z reguły — przekraczał 2%, natomiast lokalnie — sięgał 30%, a nawet więcej. Była to jedna z głównych przyczyn wspomnianej zmienności materiału zwałowego, tak pod względem cech fizycznych, jak i jego zachowania się w badaniu wytrzymałościowym.

Mimo bardzo szerokich przedziałów, w jakich zawierają się wartości parametrów fizycznych materiału zwałowego zbioru *S*, (rys. 3, 5 a i tab. 2, 3), nie znaleziono przesłanek, na podstawie których udałoby się przeprowadzić podział materiału na podobszary bardziej jednorodny. Kierując się składem granulometrycznym, można przypuszczać, że w dużej części rozpatrywany rejon zwału stanowią gliny zwięzłe (o licznych przewarstwieniach gruntami: mniej spoistym — w strefie 25—30 m i bardziej spoistym — na głębokości 38—48 m, licząc od wierzchołku) z domieszkami organicznymi. Rozrzuty wartości parametrów materiałowych — oceniając je zgodnie z regułami przyjmowanymi w geotechnice — są ogromne.

Wyniki badań z lat osiemdziesiątych (zbiór *T*) — generalnie biorąc — potwierdzają losową zmienność cech fizycznych materiału zwałowego i to bez względu na wielkość obszaru jaki się rozpatruje. Co więcej, w dużej liczbie przypadków, wartości średnie granic konsystencji w wyróżnionych, czy to z uwagi na wiek, czy też głębokość zalegania materiału (tab. 4) podzbiórach są podobne. Wskazuje to na *quasi*-jednorodność materiału, mimo iż mogłoby się wydawać, że z upływem czasu i wzrostem wysokości zwału, gęstość gruntu winna wzrastać, a wilgotność maleć. Śledząc wyniki badań (tab. 4), takiej prawidłowości nie doszukano się.

Biorąc pod uwagę rezultaty obu rozpoznań, nasuwa się — w pewnym stopniu przeciwstawne — spostrzeżenie, a mianowicie: w zwale — w obszarze pojedynczego piętra lub jego części — nie ma wyraźnych podziałów materiału ze względu na rodzaj; średnie wartości parametrów materiałowych, w tych podobszarach, tym mniej różnią się między sobą, im większych rejonów dotyczą (zbliżając się tym samym do wartości oczekiwanej — średniej dla populacji), z drugiej strony mogą w zwale występować strefy lub rejon, w których materiał wykazuje zdecydowanie inne, od wspomnianych (przeciętnych) właściwości. Przykładem tego — o tyle znaczącym, że związanym ze wzrostem zagrożenia dla stateczności obiektu — są podobszary, z których pochodzą próby: 3 i 9 zbioru *S*. W zbiorze *T* przypadki takie miały miejsce w różnych otworach i na różnych głębokościach. Wystarczy powiedzieć, że na ogólną liczbę 181 przebadanych NNS-ów, w 12 z nich materiał znajdował się w stanie miękkoplastycznym, natomiast w 28 — w stanie plastycznym. Niestety, podczas obu cykli badań rozpoznawczych, nie podjęto prób ustalenia, jak duże mogą to być obszary. Już teraz zwraca się więc uwagę na nieuniknioną konieczność — w przypadku rozwiązywania konkretnego zadania inżynierskiego — dokonywania tego rodzaju ustaleń. Tylko wówczas bowiem jest możliwa do



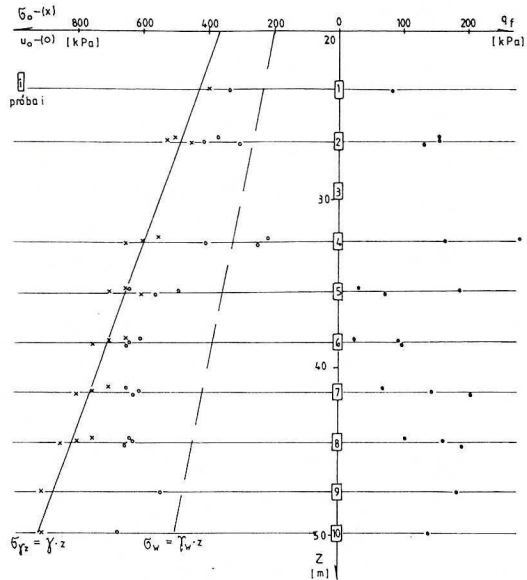
przeprowadzenia wiarygodna ocena zagrożenia w postaci utraty stateczności obiektu.

Jednym z głównych zadań do rozwiązania przez specjalistę geotechnika, zarówno w pracy badawczej, jak i praktyce inżynierskiej, jest ocena i odwzorowanie mechanicznych właściwości materiału. Z tego punktu widzenia, towarzyszące rozpoznaniu geotechnicznemu, badania stanu fizycznego materiału są przydatne i uzasadnione tylko wówczas, gdy związane są ze zmniejszeniem liczby drogich badań wytrzymałościowych. Ma to miejsce wówczas, gdy są dostępne wiarygodne opracowania prezentujące związki między wartościami parametrów mechanicznych materiału i — wyznaczanymi prostymi metodami — wskaźnikami klasyfikacyjnymi (testowymi), wprowadzonymi w celu identyfikacji tych właściwości. Dobrym przykładem takiego podejścia są metody postępowania stosowane w USA (Wagner, 1977).

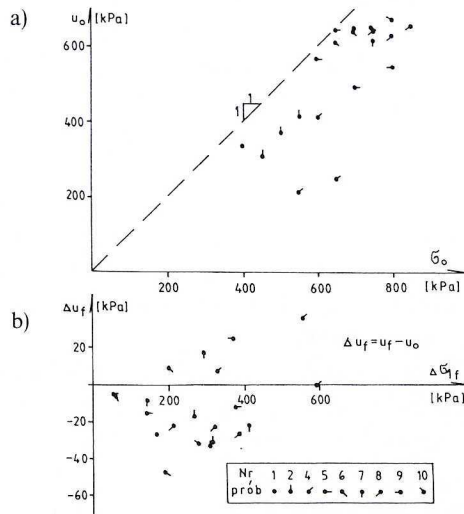
Niejednorodność materiału zwałowego, z uwagi na fakt jego przejścia w stan graniczny (utożsamiany z wystąpieniem maksymalnego oporu ścinania), wyraźnie widać na wykresach *b* rysunków 8 i 9. Jeszcze dokładniej można zaobserwować zmienność oporu ścinania w masie zwału w oparciu o informacje zamieszczone na rys. 10. Podane tam, dla każdej z próbek, wartości maksymalnego oporu ścinania  $-q_f = (\sigma_f - \sigma_0)/2$  i odpowiadające im: \*) wartości naprężenia pierwotnego —  $\sigma_{yz}$  (przybliżone ze względu na brak informacji o gęstości materiału w strefie od 0 do 20 m), \*\*) realizowane w badaniach ciśnienia początkowe —  $\sigma_0$ , \*\*\*) wywołane nimi ciśnienia w porach —  $u_0$ .

Po tak licznych dowodach zmienności właściwości materiału zwałowego pewnym zaskoczeniem staje się dokładność opisu jego wytrzymałości, jeżeli odniesie się ją do wartości naprężeń efektywnych. Ponieważ bezpośrednią tego przyczyną jest realizująca się w badaniu wytrzymałościowym wielkość ciśnienia wody w porach, dlatego poza informacjami zamieszczonymi na rys. 10 ( $\sigma_w$  w górotworze  $\sim u_0$ ) zostały sporządzone i inne wykresy, ilustrujące zmiany ciśnienia wody w porach. Prezentują one (rys. 11 i 12) wartości ciśnienia w porach materiału powodowane: albo ciśnieniem w komorze aparatu ( $\sigma_0$ ), albo obciążeniem granicznym ( $\Delta\sigma_{1f}$ ). W tym ostatnim przypadku, uzyskane wyniki wskazują na losowy charakter przyrostów ciśnienia wody w porach, co niewątpliwie wiąże się z niewielkimi zmianami tego ciśnienia na etapie badań niszczących. Zaznacza się natomiast wyraźnie prawidłowość, jaką jest maksymalny opór ścinania w próbkach o niewielkim ciśnieniu w porach wywołanym obciążeniem izotropowym, modelującym stan naprężenia w zwale od zalegającego wyżej materiału.

Cechy i zachowanie się materiału zwałowego, ustalone w badaniach przeprowadzonych w dwu różnych okresach i z różną szczegółowością, generalnie biorąc, są podobne, natomiast istotna różnica w jego reakcji na wymuszenie dotyczy wartości ciśnienia cieczy w porach. Wykorzystując dla jej oceny formułę Skempton'a (1954), można przypuszczać, że wartość parametru *B*, dla którego materiału próbki tworzą zbiór *S*, jest bliska 1, natomiast parametru  $A_f$  około 0 (rys. 11), tymczasem mierzone w badaniach ciśnienia wody w porach — w podobnych



Rys. 10. Wartości obciążeń początkowych w badaniach wytrzymałości próbek zbioru S oraz wywołane nimi ciśnienia wody w porach i wartości maksymalnego oporu ścinania

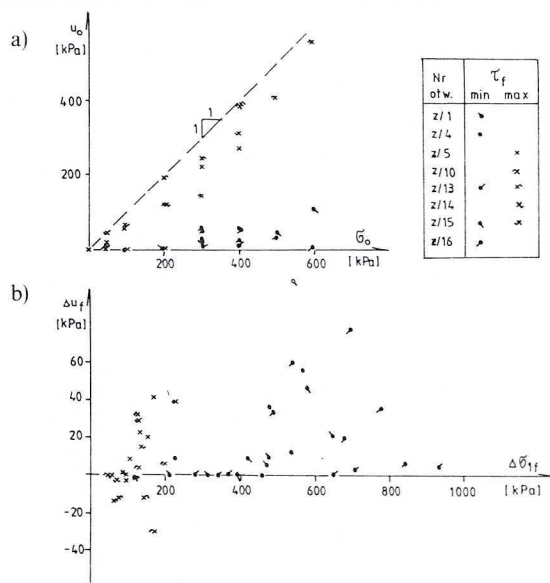


Rys. 11. Wartości ciśnienia wody w porach próbek ze zbioru S wywołane obciążeniem: a) izotropowym (stan początkowy), b) granicznym

warunkach obciążenia — przyjmowały dużo bardziej zróżnicowane wartości. Przykładem niech będą próbki 4 i 5, w których zaobserwowanych zachowań nie daje się wytłumaczyć ani różnicami składu granulometrycznego materiału, ani tym

bardziej stanu fizycznego (tab. 2, 3). Dlatego też wyjaśnień należałoby szukać gdzie indziej, np. w zaburzeniach towarzyszących opróbowaniu zwału i wycinaniu próbek.

Jeszcze większą zmienność wykazywał materiał próbek zbioru *T*. Oszacowania wartości parametru *B* mieściły się w całym możliwym dla niego przedziale, tj.: 0—1 (rys. 12), natomiast parametr *A*, wobec małego w większości próbek ciśnienia w porach i niemożności pomiaru podciśnienia, nie dawał się trafnie ocenić. Potwierdził się jedynie fakt, że następstwem dużego zróżnicowania wartości ciśnienia cieczy w porach materiału jest duża zmienność jego wytrzymałości — mierzonej maksymalnym oporem ścinania.



Rys. 12. Wartości ciśnienia wody w porach próbek ze zbioru *T* wywołane: a) ciśnieniem izotropowym (stan początkowy), b) obciążeniem granicznym

W obu zbiorach próbek pojawiały się oznaki, które można było uważać za wynik pewnego prekonsolidowania materiału zwałowego, nie towarzyszył temu jednak żaden lub jedynie bardzo mały opór spójności efektywnej. Opór taki, w małym stopniu, wykazywały jedynie najmocniejsze próbki zbioru *T*.

Analizując wyniki badań wytrzymałościowych materiału zwałowego, rozważano również, jaki wpływ na opis wytrzymałości może mieć wybór kryterium zniszczenia. W odróżnieniu od innych materiałów, np. metali, w materiałach porowatych fakt ten nie zawsze jest łatwy do ustalenia. Zauważmy bowiem, że osiągnięcie wytrzymałości lub stanu granicznego materiału, podczas badań wykonywanych ze stałą prędkością przemieszczenia, najczęściej nie oznacza ani „natychmiastowego” zniszczenia, ani też płynięcia idealnie plastycznego. Zwykle dochodzi do stopniowego słabnięcia materiału w tzw. fazie deformacji pogranicznych. Stąd też, dla jednoznacznej oceny tego

Wartości efektywnych parametrów wytrzymałościowych w zbiorze S

Nr pró- by	Kryterium zniszczenia					
	Ścieżka naprężenia		$q = \max$		$\sigma_1'/\sigma_3' = \max$	
	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kPa]	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kPa]	$\varphi'$ [°]	$c'$ [kPa]
1	26,5	13	$\sim 29^1$	0	$\sim 33,7$	0
2	31,5	0	28	0	31,5	0
4	25	22—61	29,5	0	32	0
5	26,5	17	25	20	30	10
6	17—30	37—9	$\sim (21—32)$	0	$\sim (23,5—34)$	0
7	33,7	0—12	30	10	34,7	0
8	25	22—33	27	0	31,3	0
9	18,3	58	$\sim 26,5$	0	$\sim 29,5$	0
10	21,7	32	$\sim 28$	$\sim 0$	$\sim 31$	0

<sup>1</sup> znak  $\sim$  odpowiada oszacowaniu, w którym przyjęto  $c' = 0$ .

Wartości całkowitych parametrów wytrzymałościowych dało się oszacować tylko dla próbki 2:

$$\varphi_u = 11,2^\circ, \quad c_u = 61 \text{ kPa}$$

przypadku, konieczne jest odwołanie się do konkretnego kryterium zniszczenia. Za najwłaściwsze uważać by można kryterium, które nie identyfikuje pojedynczego zdarzenia, lecz wskazuje na fakt, iż w materiale doszło do jakościowych zmian strukturalnych. Możliwości takie — niestety nie dla wszystkich gruntów — daje kryterium nawiązujące do przebiegu ścieżki naprężenia. Na prezentowanych na rys. 6d i 7d wykresach dość łatwo można oddzielić reakcje materiału charakterystyczne dla stanów naprężenia: przedgranicznego, granicznego, a nawet „pogranicznego” (jeżeli wystąpi w badaniu). Fizycznie potwierdzeniem zaistnienia stanu granicznego może być **zrealizowanie się w materiale oporu efektywnej spójności** — co można wiązać z warunkami, jakie wystąpią w procesie obciążenia w momencie zaznaczonym na wykresach strzałką. Dalszy przyrost oporu ścinania, w tej fazie deformacji materiału, da się wytłumaczyć zmianą efektywnego oporu tarcia wewnętrznego. Należy jednak pamiętać, że towarzyszące rozwijającym się w materiale deformacjom zmiany strukturalne są powodem zmniejszania się, nawet do zaniku, oporu spójności oraz, w pewnym stopniu, i tarcia wewnętrznego. Niestety, dokładna ocena spójności materiału może być trudna do przeprowadzenia w pojedynczym eksperymencie. Z drugiej strony, mimo że duża precyzja, przy tego rodzaju ustaleniach nie jest możliwa, to też i nie jest nieodzowna, a to ze względu na ogromną niejednorodność materiału zwałowego. Zaproponowana interpretacja ma zatem istotne praktyczne znaczenie, daje bowiem możliwość oszacowania wartości parametrów wytrzymałościowych materiału, nawet wówczas gdy dysponuje się tylko jednym ścięciem próbki. Przy materiałach niejednorodnych jest to niezwykle korzystna okoliczność.

Wartości efektywnych parametrów wytrzymałościowych, przy zastosowaniu różnych kryteriów zniszczenia: od konwencjonalnego, przez nawiązujące do przebiegu ścieżki naprężenia, aż do uznającego za stan graniczny fakt osiągnięcia przez stosunek  $\sigma'_1/\sigma'_3$  wartości maksymalnej, zostały podane w tab. 5. Niestety, przy tradycyjnym podejściu do zagadnienia, nie udawało się niezależnie oszacować wartości tych parametrów dla każdego z odcinków NNS-u. Przyczyny tego i trudności jakie napotymano podczas interpretacji wyników badań, ilustrują wykresy *d* na rys. 6 i 7. Widać na nich dość wyraźnie, jak mało precyzyjne mogą być ustalenia właściwego położenia linii granicznej.

Podobnej natury, lecz znacznie większe kłopoty sprawiają oceny wartości parametrów wytrzymałościowych, gdy opis zdarzenia odnoszony jest do naprężeń całkowitych. I tym razem ilustracją tego faktu są wyniki badań zamieszczone na wykresach *e* (rys. 6 i 7). Dlatego też w podobnych przypadkach — przy mechanicznym podejściu do zagadnienia — może dochodzić do ustaleń nawet niedopuszczalnych fizycznie.

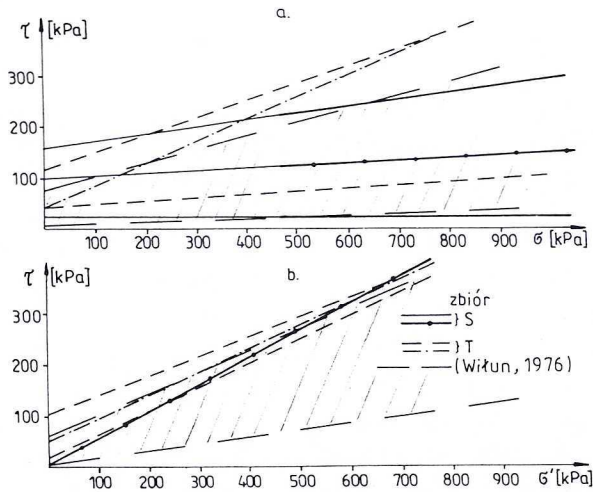
## 6. Uwagi końcowe

Ciekawe, choć trudne do przeprowadzenia, wydają się porównania między wytrzymałością: materiału zwałowego i gruntu naturalnego. Trudność dokonania tego rodzaju analiz leży między innymi w podnoszonej już kilkakrotnie, ogromnej zmienności materiału w zwale. Kolejnym potwierdzeniem tego jest fakt, iż materiał w przebadanych próbkach znajdował się w bardzo różnych stanach: od półzwarłego (a nawet zwałowego) do płynnego. Przyjmując tak ekstremalne warunki i — opierając się na polskim piśmiennictwie (PN-81/B-03020, Wiłun, 1976) — oszacowano dla gruntów podobnych do materiału zwałowego (zarówno pod względem składu granulometrycznego, jak i cech fizycznych), wartości parametrów wytrzymałościowych, (tab. 6). Na rysunku 13 przedstawiono odpowiednio przedziały zmienności oraz linie wypadkowe wytrzymałości. W przypadku materiału zwałowego tworzącego zbiór *S* są to linie ciągłe, pogrubione na odcinku naprężeń, przy których wykonane zostały badania (ze względu na małe rozrzuty, przy opisie nawiązującym do naprężeń efektywnych (rys. 8 a) pokazano jedynie położenie wypadkowej), zbiór *T* — linie gęsto przerywane, położenia wypadkowych przedstawiają linie z kropką. Ekstremalne opory ścinania dla gruntu naturalnego, wg Wiłuna (1976), wyznaczają linie rzadko przerywane (poła zakreskowane).

Porównując i oceniając rezultaty badań należy stwierdzić, iż mimo szerokich przedziałów rozrzutu wyników badań przy opisie wytrzymałości materiału jako funkcji naprężeń całkowitych, które w dużej części pokrywają się, to położenia wypadkowych linii granicznych w zbiorach *T* i *S* wyraźnie wskazują na istniejące różnice w wytrzymałości materiałów. Grunt zbioru *T* można uznać za skonsolidowany, a nawet słabo przekonsolidowany, czego wynikiem są nieduże różnice między wartościami parametrów wytrzymałościowych dotyczących opisu w naprężeniach całkowitych i efektywnych. Tymczasem materiał próbek w zbiorze *S* jest

Zestawienie ekstremalnych i średnich wartości parametrów wytrzymałościowych

Zbiór	$\varphi'$	$c'$	$\varphi_u$	$c_u$	
—	[°]	[kPa]	[°]	[kPa]	
S	min.		0	25	
	max		8	162	
	śr.	<b>28</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>98</b>
T	min.	25	17	4	39
	max	21	106	19	114
	śr.	<b>25</b>	<b>46</b>	<b>24</b>	<b>38</b>
min. $I_L = 1$ wg (Wiłun, 1976)	8	5	2	6	
	max $I_r = 0$	23	60	15	72



Rys. 13. Linie graniczne i obszary zmienności wytrzymałości przy opisie w: a) naprężeniach całkowitych, b) naprężeniach efektywnych (pola zacienione — dla gruntów naturalnych)

niedokonsolidowany. Niemniej, w obu przypadkach opór ścinania jest bliski oporom, jakie według literatury stanowią górną granicę wytrzymałości analogicznych gruntów naturalnych.

Przeprowadzone porównania między wytrzymałością materiałów zwałowych oraz wytrzymałością podobnych, ze względu na stan fizyczny, gruntów naturalnych, nie dostarczają niestety wielu praktycznych informacji. Fakt, iż mimo niewątpliwego osłabienia materiału zwałowego w stosunku do materiału pierwotnego (między innymi na skutek zniszczenia struktury i wymieszania) jego wytrzymałość, odniesiona do całkowitych naprężeń, osiąga wartości zbliżone do zamieszczanych

w podręcznikach i normatywach dla gruntów naturalnych, dowodzi, jak duże zapasy bezpieczeństwa są tam wprowadzane. Te same wyniki badań wykazują, jak przybliżone są informacje podawane w podręcznikach co do wartości efektywnych parametrów wytrzymałościowych i jak są one zaniżone. Zauważmy bowiem, że położenie linii granicznej stanowiącej górną granicę pola zmienności wytrzymałości gruntów naturalnych jest bardzo bliskie położeniu linii wypadkowego oporu ścinania materiału zwałowego zarówno w zbiorze  $T$  jak i  $S$ .

Przedstawionych i omówionych wyników badań właściwości i zachowania się pod obciążeniem materiału zwałowego nie należy uważać za reprezentatywne dla wszystkich zwałów. Kształtujące się w zwale cechy materiałowe są rezultatem wielu czynników, a przede wszystkim objętości i właściwości materiału nadkładu zdeponowanego na zwałowisku. Z tego też względu, w ramach naturalnej dla tego procesu zmienności materiału, nie wolno nie brać pod uwagę możliwości tworzenia się w zwale podobszarów o zbliżonych — chociaż zasadniczo innych od otoczenia — właściwościach, np. wówczas gdy przez dłuższy okres zwałowany jest ten sam lub podobny rodzaj gruntu. Dalsze prace badawcze w celu potwierdzenia rozpatrywanych, jak też wykrycia innych, prawidłowości i zachowania się materiałów zwałowych są więc niezbędne.

Obecny stan rozpoznania zagadnienia niestety nie pozwala na jednoznaczne wyjaśnienie przyczyn tak dużych różnic w reakcjach materiału zwałowego na obciążenie — materiału, który pochodził z bliskiego sąsiedztwa, w którym jednak — jak wynika z badań — nie stwierdzano wyraźnych zmian, ani ze względu na jego wiek, ani na głębokość zalegania.

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań wytrzymałości materiału zwałowego, należy — poza potwierdzeniem jego ogromnej zmienności — powiedzieć, że — w naturalnych warunkach zarówno stopień wilgotności materiału zwałowego, jak jego stan są równie zróżnicowane, jak podstawowe cechy materiałowe,

— zmiany objętości materiału po wydobywaniu próbek ze zwału (odciążeniu) sprzyjają pojawieniu się sił kapilarnych (ssania) i obniżeniu wartości — w stosunku do stanu naturalnego — wyznaczanego stopnia wilgotności —  $S_r$ ,

— towarzyszące opróbowaniu zaburzenia powodują częściowy, a niekiedy całkowity zanik podciśnienia,

— przebieg wymienionych zjawisk jest całkowicie przypadkowy i niekontrolowany,

— wiele wskazuje, że rejestrowane w badaniach laboratoryjnych wartości ciśnienia w porach materiału nie są adekwatne do wartości *in situ*,

— wybór kryterium zniszczenia przy ocenach wartości parametrów wytrzymałościowych materiału zwałowego — wobec ogromnej jego niejednorodności — nie ma większego znaczenia ze względu na oszacowania ilościowe, może natomiast odegrać istotną rolę ze względu na praktyczne korzyści, jakie z tym się wiążą (głównie przy małej liczbie próbek do badań wytrzymałościowych).

Istotne spostrzeżenie, z punktu widzenia praktyki inżynierskiej, dotyczy kształtowania się właściwości wytrzymałościowych materiału zwałowego, a mianowicie

nawet w ustabilizowanych już warunkach, jakie mają miejsce np. w rejonach zwału odległych od aktualnie prowadzonych robót — po kilkuletnim w nim zaleganiu — zarówno stan fizyczny, jak i wytrzymałość materiału zmieniają się całkowicie losowo. Niemniej, odwzorowania wytrzymałości, oparte na efektywnych wartościach parametrów wytrzymałościowych są zaskakująco precyzyjne. Wypływa z tego faktu konkretny wniosek co do dalszych prac badawczych gruntów zwałowych, a mianowicie: *rozszerzenia ich o pomiary ciśnienia wody w porach in situ*.

Równie ważna obserwacja dotyczy sposobu niszczenia się próbki w badaniu wytrzymałościowym. Nie wskazuje on na istnienie „pamięci” materiału o pierwotnie piętrowej strukturze i co nie wynika np. ze zbyt małych wymiarów badanych próbek. Grunt zwałowy wykazywał z reguły cechy materiału niedokonsolidowanego lub skonsolidowanego. Natomiast nielicznym przypadkom kruchego zniszczenia nie towarzyszył znacząco wyższy opór ścinania.

Na koniec trzeba dodać, iż poza podstawowymi badaniami materiałów zwałowych, jakie należy jeszcze przeprowadzić, by możliwa była do opracowania ich klasyfikacja oraz ilościowy opis charakterystyk materiałowych, w zastosowaniach inżynierskich zawsze będą konieczne odpowiednio szczegółowe badania terenowe, by można było wyodrębnić w zwale ewentualne rejony czy strefy zagrożenia. W związku z tym należy opracować względnie tanią, ale skuteczną, metodykę takich badań. Do przydatnych rozwiązań można zaliczyć sondowania. Z uwagi jednak na specyfikę materiału zwałowego, muszą zostać wyznaczone wartości współczynników korekcyjnych, tj. przeprowadzone skalowanie aparatury.

#### LITERATURA

- Dmitruk S., 1965. Zadania mechaniki gruntów w wymiarowaniu zwałowisk. Praca habilitacyjna. Zesz. Nauk. Pol. Wr. Nr 116, Budownictwo XXV, Wrocław.
- PN-81/B-03020, Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Skempton A. W., 1954. The pore pressure coefficient A and B, *Geotechnique*, 4, (4), 143—147.
- Suchnicka H., 1998. Materiał zwałowy — ocena wytrzymałości. XXI Zim. Szkoła Mech. Górotw.: Geotechniczne problemy eksploatacji złóż i budownictwa specjalnego. Zakopane—Kościelisko, 413—422.
- Suchnicka H., Hawrysz M., 1993. Physical and strength properties of waste material — a case study. 4th Inter. Symp. on the Reclam. Treatm. and Util. of Coal Mining Wastes. Univ. of Agricul. in Kraków. Vol. I, Kraków, 143—150.
- Szafran Z., 1965. Zmiany cech brył gruntów spoistych w czasie transportu taśmowego. Praca habilitacyjna. Zesz. Nauk. Pol. Wr. Nr 105, Budownictwo XXIV, Wrocław.
- Wagner A. A., 1977. The Use of the Unified Soil Classification System by the Bureau of Reclamation. Proc. IVth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol. 1, London, 125—134.
- Wiłun Z., 1976. Zarys geotechniki. WKŁ., Warszawa.

REVIEW BY: PROF. DR HAB. INŻ. JERZY GUSTKIEWICZ, KRAKÓW

Received: 15 February 1999.