

**BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE ALBSKIEGO PIASKU
Z LUBELSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO**

UKD 624.131.439.5:551.763.13(438.14)

Badania wytrzymałości na ścinanie, a zwłaszcza ustalenie kąta tarcia wewnętrznego, albskiego piasku były związane z zagadnieniem obliczania parcia gruntu na obudowę szybu w jednej z kopalń w Lubelskim Zagłębiu Węglowym (LZW). Analizowany grunt stanowi piasek drobnodziarnisty wieku kredowego (alb). Występuje on na głębokości ok. 600 m ppt. Piaski albskie o miąższości wynoszącej w przybliżeniu 1 m stanowią jednocześnie poziom wodonośny o ciśnieniu piezometrycznym ok. 5,6 MPa. Szyb jest głęziony w zamrożonym masywie i zabezpieczany obudową, którą należy tak zaprojektować, aby po rozmrożeniu mogła przejść w sposób bezpieczny obciążenia od gruntu i wody. W celu scharakteryzowania piasku pod względem wytrzymałościowym przeprowadzono wiele badań w aparacie trójosiowego ściskania, z tradycyjnym sposobem wywierania obciążenia, wzrastającego naprężenia pionowego, stałego naprężenia poziomego w warunkach z odpływem bez odpływu wody. Wykonano również badania przy zwiększaniu ciśnienia wody w porach dla stałego stosunku naprężeń głównych. Ten ostatni schemat obciążeń uznano za najwłaściwszy – najwierniej modelujący wpływ wody podczas rozmrażania masywu.

Praca powstała w Zakładzie Prac Geologicznych UW, na podstawie wykonanego pod kierunkiem autora opracowania pt.: Charakterystyka wytrzymałościowa piasków albskich w warunkach wysokich ciśnień.

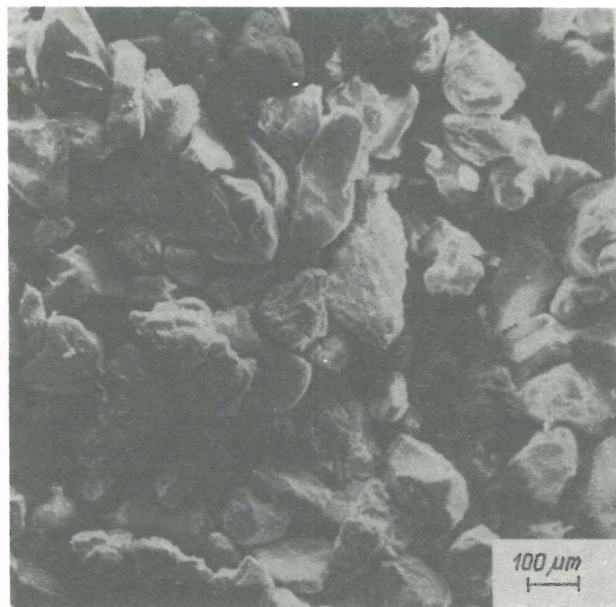
Analizowany grunt stanowi piasek kwarcowy ze znaczną, dochodzącą do 10%, domieszką glaukonitu. W obrazie mikroskopowym ok. 1% składu stanowią inne minerały, wśród których najczęstszy jest muskowitz, rzadziej minerały nieprzezroczyste (cyrkon i amfibole). W obrazie SEM (scanning electron micrograph) ziarna kwarcu w stanie naturalnym (próbki NNS) są dość silnie zagęszczone (ryc. 1–4). Według stosowanych skał klasyfikacji obtoczenia (Pettijohn, Powers, Krumbein, Sloss) można je uznać za półobtroczone, półostrokrawędziste o skali obtoczenia 0,4–0,6 i kulistości 0,5–0,7. Glaukonit tworzy typowe kuliste skupienia zbliżone do większości ziarn kwarcu, barwy zielonej. Muskowitz występuje w formie drobnych łusek.

Wykonane analizy sitowe piasków albskich wskazują, że są one piaskami drobnymi. Podstawową frakcją są ziarna o średnicach 0,10–0,20 mm. Stanowią one 70–78%. Ziarna powyżej 1 mm występują w ilości 0–2,7%, a cząstki poniżej 0,075 mm w ilości 3,0–3,9%. Piaski są jednorodne o wskaźniku różnodziarnistości Hazena 1,4–2,0. Wartości cechy dominacji Kolisa wahają się w granicach 0,70–1,40; wskazując na uziarnienie zbliżone do symetrycznego. Zawartość ziarn o średnicy mniejszej od 0,25 mm waha się w granicach 85–92%; średnica miarodajna odpowiadająca 50% zawartości i wynosi średnio $d_{50} = 0,16$ mm. Podstawowe parametry fizyczne piasku

w stanie zamrożonym i po rozmrożeniu zestawiono w tab. I.

W masywie naturalnym piasek jest zagęszczony maksymalnie*, a nawet w stosunku do geotechnicznych sposobów określania wskaźników porowatości przy maksymalnym i minimalnym zagęszczeniu piasek albski jest „za-

* Zagęszczenie określono na podstawie zbadania próbki piasku zamrożonego, pobranego z szybu górniczego.



Ryc. 1. Powierzchnia mikrostrukturalna piasku albskiego z LZW (obserwowana w SEM). Struktura NNS w stanie zamrożonym. Ziarna przede wszystkim kwarcu. Przed obciążeniem. Powiększenie 60 ×

Fig. 1. Microstructural surface of Albian sand from the Lublin Coal Basin (SEM micrograph). Undisturbed natural structure in the frozen state, before loading). Note predominance of quartz grains, × 60



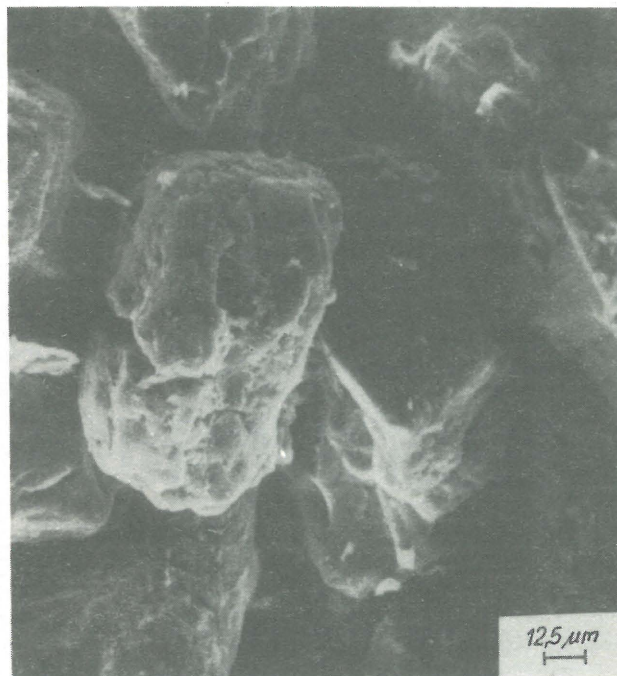
Ryc. 2. Jak na ryc. 1. Powiększenie 160 ×

Fig. 2. As in Fig. 1, × 160

gęszczony ponad miarę”. Wynika to z głębokości występowania i czasu obciążenia nadległymi warstwami skał i gruntów.

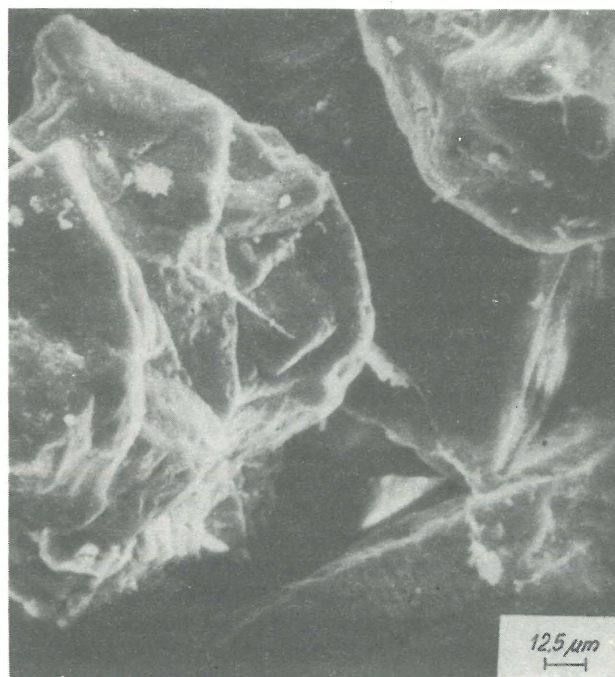
Mimo wyznaczenia na próbkach piasku zamrożonego niepełnego nasycenia, należy przyjąć, że w górotworze piasek jest nawodniony do stanu pełnego nasycenia.

W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych otrzymano współczynnik filtracji k i spadku krytycznego i_{kr} (przy wartości którego inicjują się deformacje filtracyjne) w zależności od zagęszczenia:



Ryc. 3. Jak na ryc. 1. Powiększenie 380 ×

Fig. 3. As in Fig. 1, × 380



Ryc. 4. Jak na ryc. 1. Powiększenie 380 ×

Fig. 4. As in Fig. 1, × 380

- maksymalnego, $k = 5 - 8 \times 10^{-3}$ cm/s; $i_{kr} = 1,0 - 1,2$
- minimalnego, $k = 1 \times 10^{-2} - 8 \times 10^{-3}$ cm/s; $i_{kr} = 0,80$.

Piaski albskie są drobne, dość jednorodne, ze względu na zawartość glaukonitu (możliwość powstawania hydrofilnych koloidów) mają właściwości kurzawkowe, w stanie naturalnym są maksymalnie zagęszczone i nawodnione. Woda jest pod dużym ciśnieniem. Wytworzenie swobodnej powierzchni lub rozgęszczenie piasku może spowodować szybkie jego przejście w stan upłynnienia.

Kąt tarcia wewnętrzznego piasków obliczony według wzoru Lungrena (jako funkcja: kształtu, wielkości ziarn, wskaźnika różnoziarnistości) w zależności od zagęszczenia wynosi dla stanu:

- zagęszczonego $\phi = 39^\circ$,
- średnio zagęszczonego $\phi = 33^\circ$,
- luźnego $\phi = 27^\circ$.

W wyniku przeprowadzenia badań w przyrządzie do oznaczania kąta naturalnego stoku (α) otrzymano dla piasku w stanie:

- powietrzno-suchym $\alpha_s = 32 - 34^\circ$
- pełnego nasycenia $\alpha_n = 30 - 31^\circ$,
- pod wodą $\alpha_w = 28 - 30^\circ$,
- pod wodą przy ruchu wody przy $i < i_{kr}$, $\alpha_{wL} = 27 - 28^\circ$,
- po zniszczeniu skarpy w wyniku zbyt intensywnej filtracji $\alpha_{wT} = 5 - 8^\circ$.

W stanie zagęszczonym piaski albskie charakteryzują się stosunkowo małą odkształcalnością. Moduł ścisłości

(badania w wysokociśnieniowym konsolidometrze) piasków w zależności od zakresu obciążeń wynosi dla:

- 0–1 MPa moduł ścisłości $M_o = 75$ MPa,
- 1–15 MPa moduł ścisłości $M_o = 175$ MPa.

Badania wytrzymałości na ścinanie piasków albskich przeprowadzono w aparacie trójosiowego ściskania w zakresie obciążeń 0–20 MPa. W badaniach stosowano dwa schematy obciążeń:

- zwiększanie naprężenia pionowego przy stałym ciśnieniu poziomym,
- zwiększaniu ciśnienia wody w porach przy stałym stosunku naprężeń głównych.

W schemacie I badania przeprowadzono:

- Ia z odpływem wody z próbki,
- Ib bez odpływu wody z próbki.

Piaski albskie zostały zbadane w trzech stanach zagęszczenia (maksymalnego, pośredniego, minimalnego) i dwu wariantach nasycenia (kapilarnego i pełnego nawodnienia). Badania były przeprowadzone na próbkach formowanych do określonego zagęszczenia. Zagęszczenie naturalne w maszywie skalnym określono z pobranych w szybie monolitów zamrożonego piasku z uwzględnieniem poprawki objętościowej (woda–lód). Część badań była przeprowadzona na próbkach wyciętych z monolitów.

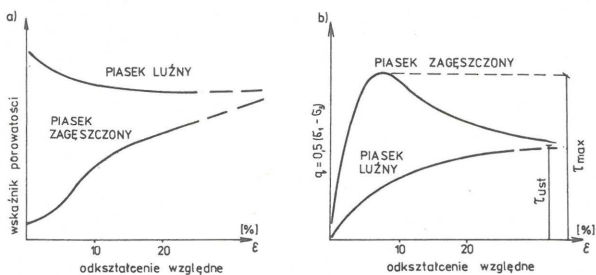
W badaniach (schemat I) prędkość odkształcenia próbki wynosiła 4 mm/godzinę. W badaniach o schemacie obciążenia II prędkość zmian ciśnienia wody w porach wynosiła 0,001 MPa/minutę.

W badaniach z odpływem (schemat obciążenia I) piaski drobne zachowują się jak większość gruntów sypkich (ryc. 5–7). W trakcie obciążania piaski w stanie zagęszczonym zwiększają swoją objętość, po dość szybkim osiągnięciu maksimum wytrzymałości (5, 9, 12). Oznacza to rozluźnienie ośrodka (dylatacja). W wypadku zagęszczenia luźnego, wraz ze wzrostem odkształcenia rośnie systematycznie wytrzymałość do pewnej ustalonej wartości dla znacznej deformacji przy tzw. wskaźniku porowatości krytycznej. Próbkę takiego piasku, w pierwszej fazie badania, zmniejszają swoją objętość (kontrakcja). Uzyskane

Tabela I

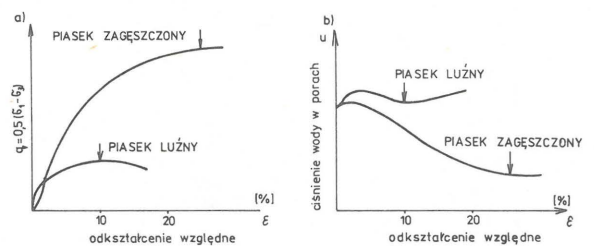
PARAMETRY FIZYCZNE PIASKU ALBSKIEGO
W ZALEŻNOŚCI OD JEGO STANU

Parametry	średnie	Po rozmrożeniu przy zagęszczeniu			Miano
		Po zamrożeniu	max.	pośredn.	
Gęstość właściwa ρ_s	2,69	2,69	2,69	2,69	Mg/m ³
Gęstość objętościowa ρ	2,00	2,05-2,07	1,92	1,84	Mg/m ³
Gęstość objętościowa szkieletu ρ_d	1,67	1,67-1,70	1,47	1,34	Mg/m ³
Gęstość objętościowa w stanie pełnego nasycenia ρ_{sr}	–	2,05-2,07	1,92	1,84	Mg/m ³
Gęstość objętościowa z uwzględnieniem wyporu wody ρ'	–	1,05-1,07	0,92	0,84	Mg/m ³
Wilgotność W_n	19,5	22,7	30,5	38,0	%
Porowatość n	37,7	37,0-37,7	4,5	50	%
Wskaźnik porowatości e_n	0,61	0,58-0,61	0,83	1,01	
Stopień wilgotności S_r	0,86	~1	~1	~1	
Wilgotność w stanie całkowitego nasycenia porów wodą W_r	22,7	22,7	30,5	38,0	%
Stopień zagęszczenia J_D	0,93	~1	0,42	~0	



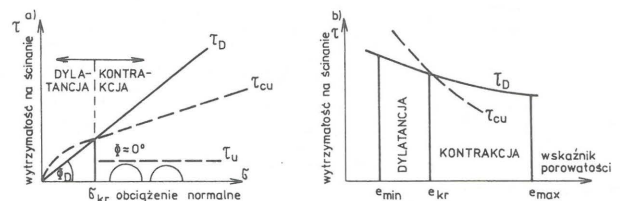
Ryc. 5. Wpływ zagęszczenia na zmianę objętości i dewiatora naprężeń przy ścinaniu gruntu sypkiego. Badanie z odpływem

Fig. 5. Influence of compaction of volume changes and stress deviator during shear test on non-cohesive soil; drained test



Ryc. 6. Badania ścinania piasku zagęszczonego i luźnego w warunkach bez odpływu

Fig. 6. Undrained shear test on compacted and loose sand



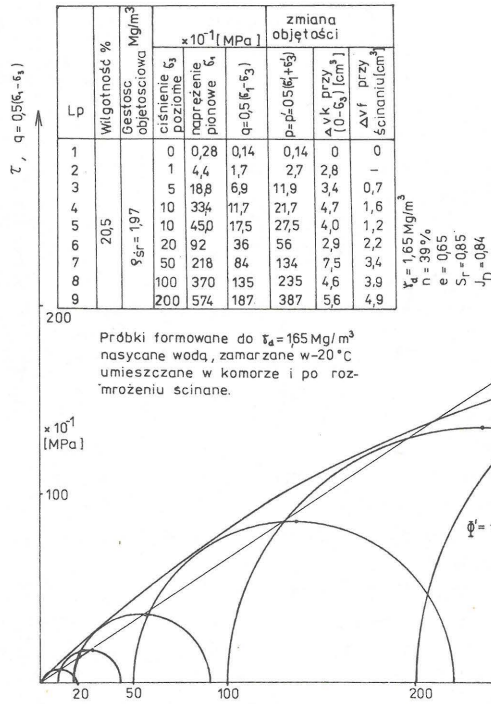
Ryc. 7. Porównanie wyników badań z odpływem i bez odpływu piasków nasyconych

Fig. 7. Comparison of results of drained and undrained tests on water-saturated sands

wyniki w przedziale obciążeń 0–20 MPa zostały przedstawione dla schematu obciążeń I na ryc. 8 i ryc. 9, a dla schematu II na ryc. 10.

Wartości kąta tarcia wewnętrznego są bardzo zróżnicowane; wahają się w granicach 0–41°. Są one zależne

przede wszystkim od: zagęszczenia piasku, sposobu wywierania obciążeń, nasycenia i warunków odpływu podczas ściskania. W zakresie obciążeń 0–1 MPa punkty ścieżki obciążeń w chwili zniszczenia próbek można aproksymować linią prostą. Natomiast w szerokim zakresie ob-



Ryc. 8. Obwiednia wytrzymałości na ścinanie piasku albskiego wg schematu obciążeń Ia

Badania trójosiowego ściskania z odpływem "D"

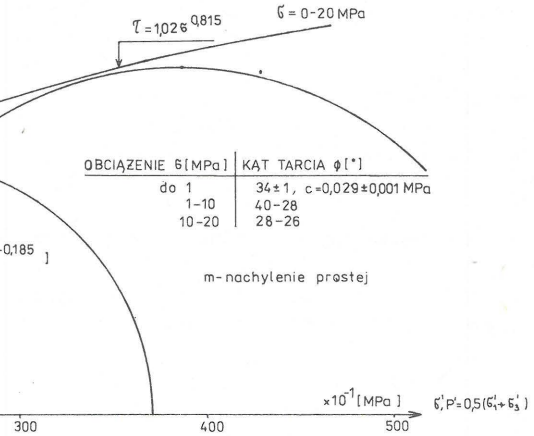
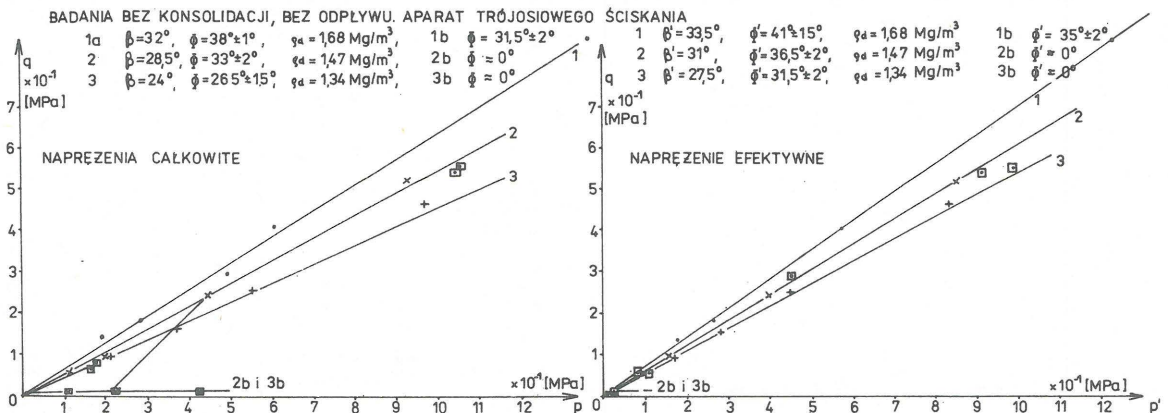


Fig. 8. Envelope of shear strength of Albian sand subjected to tests according to the loading scheme Ia

Z A G E S Z C Z E N I E																									
MAKSYMALNE					POŚREDNIE					MINIMALNE															
Lp	Wilgotność w [%]	Gęstość objętościowa [Mg/m³]	Stopień nasycenia SR	Cisnienie poziome σ_3	$q=0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$	$p=0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$	Cisnienie porowe u	Lp	Wilgotność w [%]	Gęstość objętościowa [Mg/m³]	Stopień nasycenia SR	Cisnienie poziome σ_3	$q=0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$	$p=0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$	Cisnienie porowe u	Lp	Wilgotność w [%]	Gęstość objętościowa [Mg/m³]	Stopień nasycenia SR	Cisnienie poziome σ_3	$q=0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$	$p=0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$	Cisnienie porowe u		
1a	20,5	2,02	0,9	0,5	1,35	1,75	1,85	2a	29,2	1,90	0,95	0,5	0,58	0,91	1,08	0,17	3a	32,5	1,78	0,87	1	0,90	1,60	1,90	0,30
				1	1,80	2,65	2,80					1	0,99	1,53	1,99	0,46				2	1,55	2,75	3,55	0,80	
				2	4,05	5,80	6,05					2	2,40	4,05	4,40	0,35				3	2,50	4,50	5,50	1,00	
				5	8,60	12,90	13,60					4	5,19	8,55	9,19	0,64				5	4,65	8,35	9,65	1,30	
Próbki nasycane kapilarnie					Próbki zagęszczane pod wodą					Próbki zagęszczane pod wodą															
1b	22,6	2,06	1	1	0,59	0,89	1,59	0,70	2b	30,8	1,92	1	0,5	0,04	0,04	0,50	3b	37,5	1,84	1	0,5	0,04	0,04	0,54	0,50
				2	2,90	4,65	4,40	0,25				1	0,06	0,06	1,06	1,00				1	0,06	0,06	1,06	1,00	
				5	5,50	9,90	10,50	0,60				2	0,13	0,13	2,13	2,00				2	0,08	0,08	2,08	2,00	
				5	5,40	9,10	10,40	1,30				4	0,16	0,16	4,16	4,00									



Ryc. 9. Linie wytrzymałości na ściskanie piasku albskiego wg schematu obciążeń Ib

Fig. 9. Shear strength lines of Albian sand subjected to tests according to the loading scheme Ib

ciżeń (do 20 MPa) najlepiej uzyskane wyniki opisuje równanie paraboli o ogólnej postaci $\tau = a(\sigma)^b$, gdzie $a = 1,02$, $b = 0,815$ są odpowiednimi współczynnikami liczbowymi ustalonymi podczas badań. Według tego wzoru kąt tarcia wewnętrznego piasku dla obciążenia 1 MPa – $\phi = 40^\circ$, a dla obciążenia 20 MPa – $\phi = 26^\circ$. Zmniejszenie kąta tarcia jest wywołane zmianami strukturalnymi.

Wykonane analizy sitowe piasku po badaniu ściskania trójosiowego stwierdzają w nim zwiększoną ilość ziarn o mniejszej średnicy w stosunku do piasku przed ściskaniem. Przykładowo, próbka przed badaniem zawierała frakcji $\leq 0,10$ mm 23,5%, a po badaniu 26,9%. Analizy wykonane na skaningowym mikroskopie piasku po badaniu w aparacie trójosiowego ściskania wskazują na to, że ziarna, głównie agregaty glaukonitu, ulegają pod wpływem wysokich obciążeń rozkruszaniu (ryc. 11–14). Podobne zachowanie się gruntów sypkich obserwowali dla: narzutu kamiennego R.J. Marsal (10), otoczków wapiennych M. Popowicz (11), granitowych otoczków J. Fedá (4), żwiru B. Hall, B.B. Gordon (6), piasków z Ham River – A.W. Bishop et al. (1, 2), z Chatahoochee River – A.S. Vesic, G.W. Clough (13), R.C. Hirschfeld, S.J. Paulus (7), J. Czubaszek (3). Wskazują oni, że przy wysokich ciśnieniach ujawniają się czynniki, których wpływ na wytrzymałość w zakresie niskich ciśnień był nieistotny. Obserwuje się obniżenie wartości kąta tarcia wewnętrznego przy wzroście naprężeń normalnych. Ten efekt zarejestrowano już po przekroczeniu 0,7–1,0 MPa.

W badaniach piasku bez odplywu, przy schemacie obciążeń I, otrzymano wyniki uzależnione przede wszystkim od zagęszczenia i nasycenia. Kąt tarcia wewnętrznego wyrażony w naprężeniach całkowitych w zakresie obciążeń do 1 MPa oraz w naprężeniach efektywnych w zakresie obciążeń do 20 MPa można aproksymować liniowo. Piasek nasycony kapilarnie charakteryzuje się wysokimi wartościami kąta tarcia. Natomiast próbki piasku nasyco-

nego w pełni wodą w stanie zagęszczenia pośredniego i luźnego wykazują kąt tarcia bliski zeru – ulegają one deformowaniu się już pod własnym ciężarem.

Poza klasycznym schematem obciążenia stosowanym w badaniach trójosiowego ściskania (stałe ciśnienie poziome, zwiększające naprężenie pionowe), przeprowadzono cykl badań o zupełnie innym sposobie wywierania obciążenia na próbkę piasku. Zastosowano następujący schemat (II): stały stosunek naprężeń głównych, zwiększające się ciśnienie wody w porach. Taki system obciążenia uznano za właściwszy, modelujący w bardziej wierny sposób warunki rzeczywiste, istniejące w masywie gruntowym po jego rozmrożeniu. Na ryc. 10 przedstawiono wyniki badań dla 3 stanów, analogicznych jak dla schematu I. Otrzymano kąt tarcia wewnętrznego w zależności od zagęszczenia w granicach $22-41^\circ$. próbki piasku ściskane przez zwiększanie ciśnienia wody w porach przy stałym stosunku naprężeń głównych ulegały zniszczeniu od wewnątrz. W pierwszej fazie badania zwiększanie ciśnienia porowego powodowało nieznaczne odkształcanie się badanej próbki. Dopiero wytworzenie ciśnienia wody w porach o odpowiedniej wartości uruchamiało dość gwałtowny rozwój deformacji. Zniszczenie próbek przy tym schemacie obciążeń następowało wcześniej, to znaczy przy mniejszych wartościach odkształceń (ok. 1–3%) aniżeli w badaniach przy zwiększaniu pionowego naprężenia.

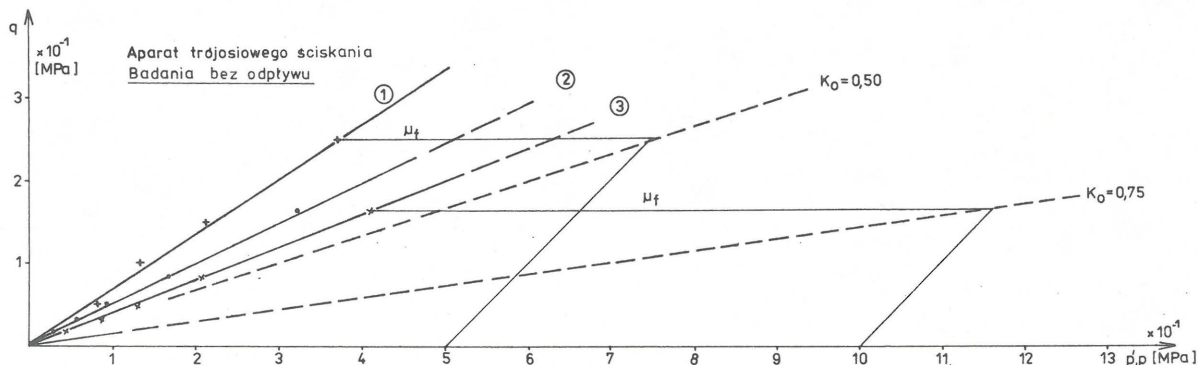
Dla porównania na ryc. 15 przedstawiono obwiednię wytrzymałościową dla piasku albskiego zamrożonego i piaskowca albskiego (ryc. 16) określoną na podstawie badań próbek w komorze OBRTG.

Całość uzyskanych wyników kąta tarcia wewnętrznego piasków albskich zestawiono w tab. II. Można je podsumować następująco:

– Piaski albskie są piaskami drobnymi, kwarcowymi, ze znaczną domieszką (ok. 10%) glaukonitu. Są to piaski jednorodnie o wskaźniku różnoziarnistości $U = 1,4-1,0$.

①*							②							③*						
Lp.	Wilgotność %	Gęstość objętościowa kg/m^3	× 10 ⁻¹ [MPa]				Lp.	Wilgotność %	Gęstość objętościowa kg/m^3	× 10 ⁻¹ [MPa]				Lp.	Wilgotność %	Gęstość objętościowa kg/m^3	× 10 ⁻¹			
			Ciśnienie poziome σ_3	Naprężenie pionowe σ_1	Ciśnienie porowe u	$q=0,5(\sigma_1-\sigma_3)$				$p=0,5(\sigma_1+\sigma_3)$	$p=0,5(\sigma_1+\sigma_3)$	Ciśnienie poziome σ_3	Naprężenie pionowe σ_1				Ciśnienie porowe u	$q=0,5(\sigma_1-\sigma_3)$	$p=0,5(\sigma_1+\sigma_3)$	Ciśnienie poziome σ_3
1	20,1	2	0,7	0,5	0,8	1,5	1	1,33	0,90	0,165	0,265	1,165	1	32,0	1,77	1,33	0,70	0,165	0,465	1,165
2		2	4	1,7	1,0	1,3	2	2,67	1,80	0,335	0,535	2,335	2		2	2,67	1,50	0,335	0,235	2,335
3		3	6	2,4	1,5	2,1	3	4,00	2,60	0,500	0,900	3,500	3		3	4,00	2,30	0,500	1,200	3,500
4		5	10	3,8	2,5	3,7	4	6,66	4,20	0,830	1,630	5,830	4		4	6,66	3,80	0,830	2,030	5,830
5		10	20	7,0	5,0	8,0	5	13,30	8,40	1,650	3,250	11,650	5		5	13,30	7,60	1,650	4,050	11,650

$m=0,651$, $\beta=33^\circ$, $\phi=41^\circ$, $K_0=0,50$, $\rho_a=168 \text{ Mg/m}^3$, $n=37,3\%$, $e=0,59$, $S_r=0,93$, $J_p=0,98$, $W_r=21,9\%$
 $m=0,487$, $\beta=26^\circ$, $\phi=29^\circ$, $K_0=0,75$, $\rho_a=147 \text{ Mg/m}^3$, $n=45,0\%$, $e=0,83$, $S_r=0,95$, $J_p=0,42$, $W_r=30,8\%$
 $m=0,387$, $\beta=21^\circ$, $\phi=22^\circ$, $K_0=0,75$, $\rho_a=134 \text{ Mg/m}^3$, $n=50,0\%$, $e=1,01$, $S_r=0,85$, $J_p=0$, $W_r=37,5\%$



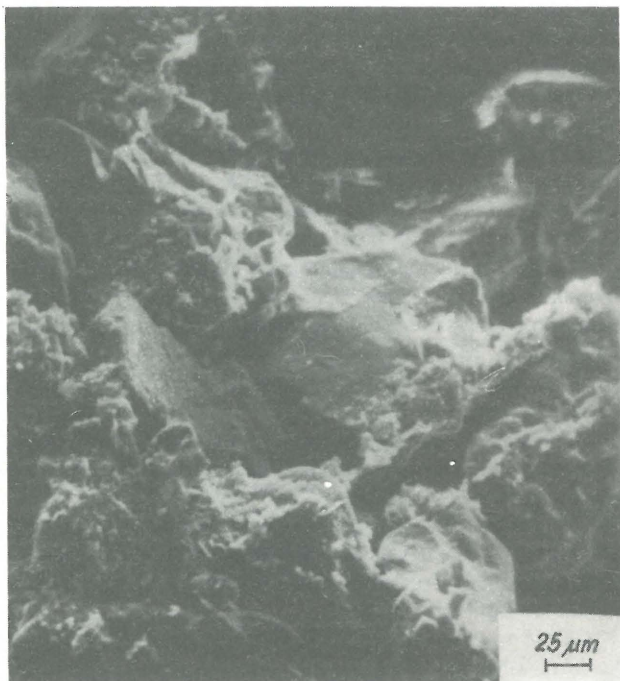
Ryc. 10. Linie wytrzymałości na ścinanie piasku albskiego wg schematu obciążeń II

Fig. 10. Shear strength lines of Albion sand subjected to tests according to the loading scheme II

W stanie naturalnym są silnie zagęszczone i nawodnione. Ze względu na zawartość glaukonitu piaski albskie należy zaliczyć do piasków drobnoziarnistych o właściwościach kurzawkowych, skłonnych do upłynniania.

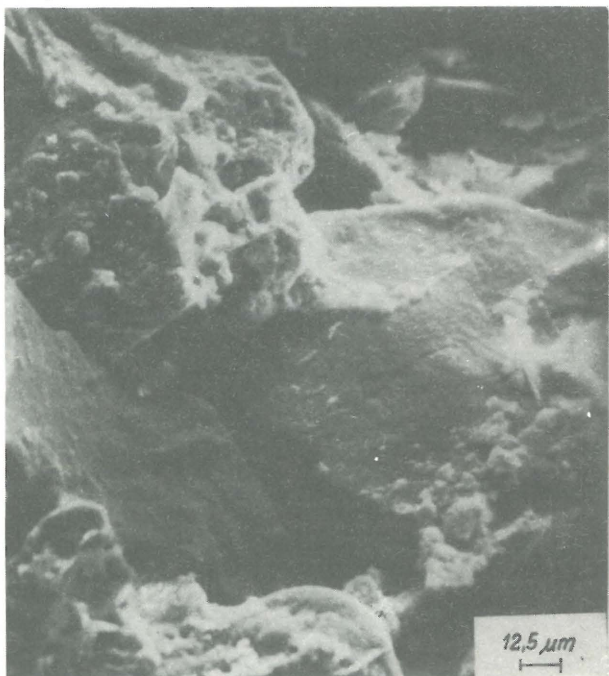
– W standardowych granicach naprężeń do 1 MPa praktycznie można uznać proporcjonalność między naprężeniem ścinającym a normalnym.

– W zakresie znacznych obciążeń do 20 MPa piaski zachowują się niejednakowo. W badaniach bez odpływu w naprężeniach całkowitych i w badaniach z odpływem w naprężeniach efektywnych otrzymano nieliniową odpowiednią wytrzymałościową. Zmniejszenie kąta tarcia wewnętrznego w badaniach z odpływem można wiązać ze



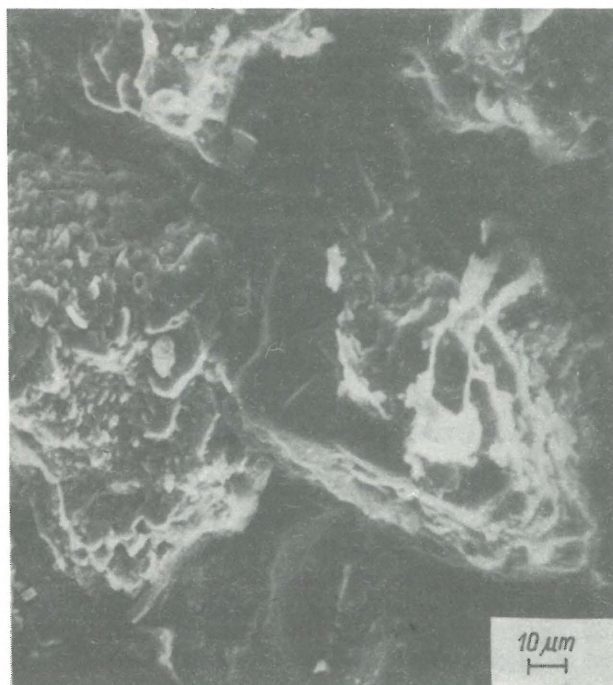
Ryc. 11. Powierzchnia mikrostrukturalna piasku kwarcowego, albskiego, z LZW po ścisnaniu przy obciążeniu 15 MPa. Widoczne rozkruszone cząstki glaukonitu. Powiększenie 220 ×

Fig. 11. Microstructural surface of Albian quartz sand from the Lublin Coal Basin after compression test under 15 MPa loading. Note crushed glauconite grains, × 220



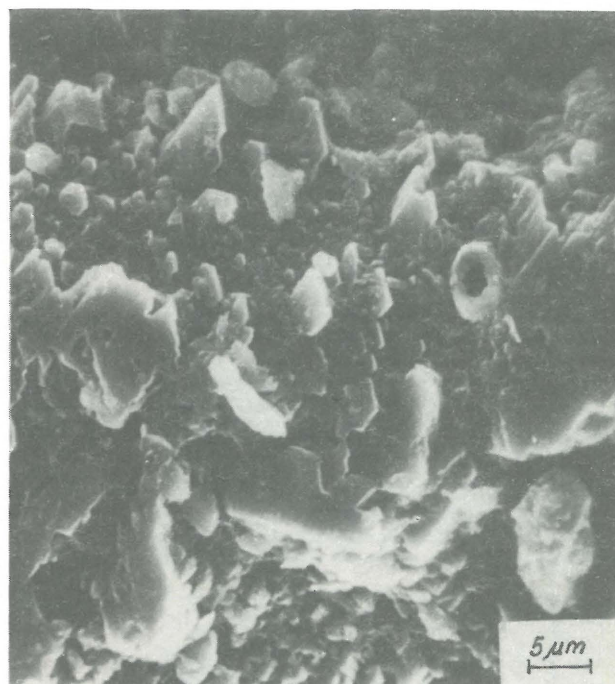
Ryc. 12. Jak na ryc. 11. Powiększenie 380 ×

Fig. 12. As in Fig. 11, × 380



Ryc. 13. Jak na ryc. 11. Powiększenie 470 ×

Fig. 13. As in Fig. 11, × 470



Ryc. 14. Jak na ryc. 11. Powiększenie 1600 ×

Wszystkie fotografie P. Dzierżanowski

Fig. 14. As in Fig. 11, × 1600

All the photos taken by P. Dzierżanowski

zmianami strukturalnymi, w tym wypadku z kruszeniem przede wszystkim agregatów glaukonitu.

– Stwierdza się wpływ sposobu obciążania na wartość kąta tarcia wewnętrznego, zwłaszcza dla słabo zagęszczonych piasków. Przy schemacie obciążeń podczas zwiększania ciśnienia wody w porach uzyskuje się niższe wartości kąta tarcia w stosunku do schematu obciążenia standardowego przez zwiększanie pionowego obciążenia.

– Wybór parametru obliczeniowego zależy od sposobu jego wyznaczenia i warunków oraz charakteru przyszłej pracy ośrodka gruntowego. W odniesieniu do piasków

albskich przyjęcie konkretnej wartości kąta tarcia do obliczeń ciśnienia gruntu na obudowę szybu uwarunkowane będzie stopniem naruszania struktury piasków przez wykonanie szybu i zabezpieczającej obudowy.

W zakończeniu pragnę podziękować Panu Prof. Zygmuntowi Glazerowi za wielokrotne dyskusje i krytyczne uwagi dotyczące metodyki i wyników badań wytrzymałościowych piasków albskich. Dziękuję również za przeprowadzenie badań wytrzymałościowych Panu A. Kasprzakowi oraz za wykonanie zdjęć SEM Panu dr P. Dzierżanowskiemu i za konsultacje dotyczące składu mineralogicznego piasku

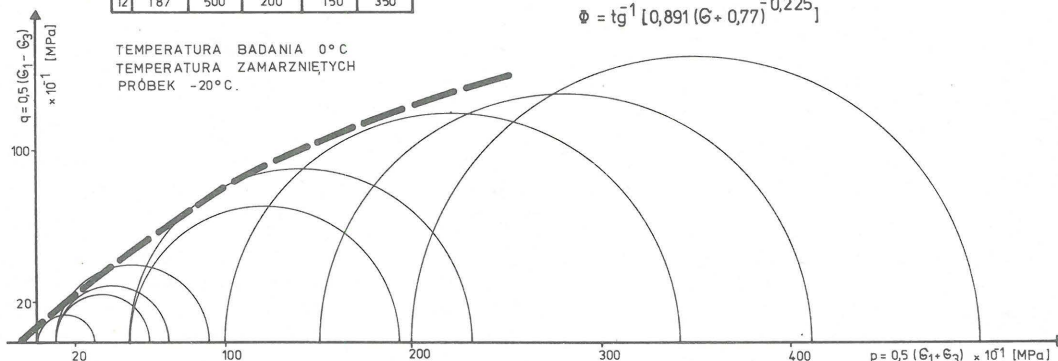
L/P	Gęstość objętościowa ρ [Mg/m ³]	Ciśnienie $\times 10^1$ [MPa]			
		Napężenie pionowe σ_1	Napężenie poziome σ_3	Polowa różnicy napr. główn. $0,5(\sigma_1 - \sigma_3)$	Polowa suma napr. główn. $0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$
1	1,93	-7,7	0	-	-
2	1,93	60	0	30	30
3	2,00	28	0	14	14
4	1,84	45	0	22,5	22,5
5	1,93	90	10	40	50
6	1,82	70	10	30	40
7	1,85	120	20	50	70
8	1,91	190	50	70	120
9	1,85	230	50	90	140
10	1,84	340	100	120	220
11	1,87	410	150	130	280
12	1,87	500	200	150	350

W = 19 %
 $S_d = 1,59 \text{ Mg/m}^3$
 $S_{Sr} = 1,89 \text{ Mg/m}^3$
 $S_s = 2,69 \text{ Mg/m}^3$
 $n = 40 \%$
 $e = 0,69$
 $R_r = 0,77 \text{ MPa}$
 $R_c = 4,43 \text{ MPa}$
 $R_c/R_r \approx 6$

ZAKRES OBCIĄŻEŃ [MPa]	ϕ [°]
0 – 5	43 – 31
5 – 10	31 – 27
10 – 20	27 – 24

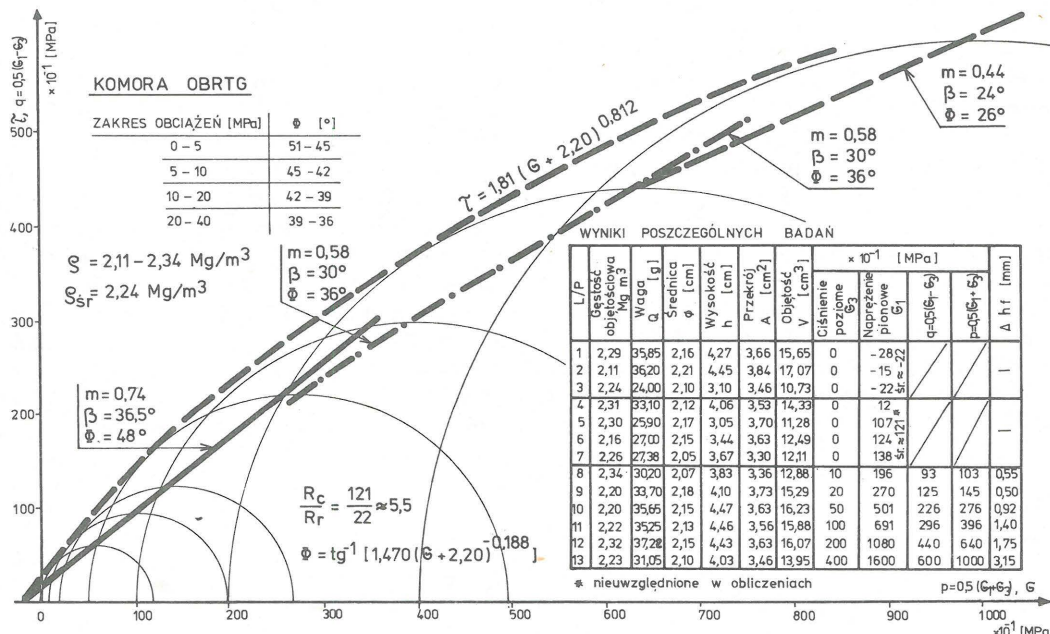
$$\zeta = 1,15 (0,77 + \sigma) 0,775$$

$$\phi = \text{tg}^{-1} [0,891 (\sigma + 0,77)^{-0,225}]$$



Ryc. 15. Obwiednia wytrzymałościowa piasku albskiego zamrożonego. Badania w komorze OBRTG

Fig. 15. Strength envelope of Albian sand in frozen state. Tests in the lab chamber of the Research and Development Center of Geological Techniques



Ryc. 16. Obwiednia wytrzymałościowa piaskowca albskiego z LZW

Fig. 16. Strength envelope of Albian sand from the Lublin Coal Basin

Tabela II

Kąt tarcia wewnętrznej albskiego piasku z LZW w zależności od stanu i warunków obciążania. Badania w aparacie trójosiowego ściskania.

Schemat obciążenia	Rodzaj badania	Stan piasku i jego nawilgoconie	ZAGĘSZCZENIE	Parametry badanego piasku	Zakres obciążeń MPa	Kąt tarcia wewnętrzznego	
						Catkowity δ [°]	Efektyny δ [°]
ZNIEKSZANIE NAPRĘŻENIA PIONOWEGO	Bez konsolidacji bez odpływu. Z pomiarem ciśnienia wody w porach "UU"	Piasek drobny zagęszczony do gd_{max} i nasycony kapilarnie	Maksymalne	$gd=168 \text{ Mg/m}^3$ $n=37,3\%$ $e=0,59$ $Sr=0,93$	0-1	38±1	41±15
		Piasek drobny zagęszczony do gd_{max} pod wodą	Maksymalne	$gd=168 \text{ Mg/m}^3$ $n=37,3\%$ $e=0,59$ $Sr=1$		31,5±2	35±2
	Piasek drobny zagęszczony do gd pod wodą	Podśrednie	$gd=147 \text{ Mg/m}^3$ $n=45\%$ $e=0,83$ $Sr=0,95$	33±2		36,5±2	
	Piasek drobny zagęszczony do gd pod wodą	Podśrednie	$gd=147 \text{ Mg/m}^3$ $n=45\%$ $e=0,83$ $Sr=1$	-0		-0	
	Piasek drobny zagęszczony do gd_{min} i nasycony kapilarnie	Luźne	$gd=134 \text{ Mg/m}^3$ $n=50\%$ $e=1,01$ $Sr=0,83$	26,5±1,5		31,5±2	
	Piasek drobny zagęszczony do gd_{min} pod wodą	Luźne	$gd=134 \text{ Mg/m}^3$ $n=50\%$ $e=1,01$ $Sr=1$	-0		-0	
ZWIĘKSZANIE CIŚNIENIA WODY W PORACH	Badanie bez odpływu wem "D"	Piasek drobny zagęszczony do gd_{max} i nasycony kapilarnie	Maksymalne	$gd=165 \text{ Mg/m}^3$ $n=39\%$ $e=0,65$ $Sr=0,85$	0-1	—	34±1 $c=0,029+0,001$
			—	—	1-10	—	40-28
			—	—	10-20	—	28-26
ZWIĘKSZANIE CIŚNIENIA WODY W PORACH	Badanie bez konsolidacji bez odpływu "UU"	Piasek drobny zagęszczony do gd_{max} i nasycony kapilarnie	Maksymalne	$gd=168 \text{ Mg/m}^3$ $n=37,3\%$ $e=0,59$ $Sr=0,92$	0-1	$K_0=0,5$	41±2,5
			Podśrednie	$gd=147 \text{ Mg/m}^3$ $n=45\%$ $e=0,83$ $Sr=0,95$			
		Piasek drobny zagęszczony do gd_{min} pod wodą	Luźne	$gd=134 \text{ Mg/m}^3$ $n=50\%$ $e=1,01$ $Sr=0,83$			

gd - gęstość objętościowa szkieletu gruntowego
 n - porowatość
 e - wskaźnik porowatości
 Sr - stopień wilgotności

Panu dr J. Parafiniukowi. Osobne podziękowania należą się Dyrekcji Przedsiębiorstwa Robót Górniczych w Łęcznie, a zwłaszcza Panu mgr R. Wojczalowi, dzięki którym możliwe było w ogóle przeprowadzenie powyższych badań.

LITERATURA

- Bishop A.W., Webb D.L., Skinner A.F. — Triaxial test on soil at elevated cell pressure. Proc. 6th Inter. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Montreal 1965 vol. 1.
- Bishop A.W. — The strength of soils as engineering materials Sixth Rankine Lecture, Geotechnique London 1966 vol. 16.
- Czubaszek J. — Wytrzymałość doraźna ośrodków bez spójności na ścinanie w przypadku znacznych naprężeń. Pr. Nauk. Inst. Geotech. Pol. Wrocław 1972 nr 9.
- Feda J. — High-pressure triaxial tests of a highly decomposed granite. Proc. Geotechnics of structurally complex formations. Capri 1977.
- Głazer Z. — Mechanika gruntów. Wyd. Geol. 1977.
- Hall B., Gordon B.B. — Triaxial testing with large-scale high pressure equipment. Symp. Labor. Shear testing of Soils. ASTM. SPT. Ottawa 1963, no. 361.

- Hirschfeld R.C., Paulus S.J. — High-pressure triaxial tests on a compacted sand and a undisturbed silt. Ibidem.
- Kaczyński R. et al. — Charakterystyka wytrzymałościowa piasku albu w warunkach wysokich ciśnień dla kopalni K-2 w Stefanowie — LZW. Maszynopis. Arch. ZPG UW 1984.
- Madej J., Nitecki T. — Zmiany objętości i wytrzymałości piasku w procesie ścinania w aparacie trójosiowym. Mat. Geotechnika w ośrodku Koszalińskim. PAN Kom. Inż. Łąd. i Wod. Koszalin 1983.
- Marsal R.J. — Large scale testing of rockfill materials. J. Soil Mech. Found. Eng. ASCE New York 1967, vol. 93 no. 2.
- Popovič M. — Characteristic of shearing strength of coarsegrained limestone materials. 5th Danube Eur. Conf. SMFE CSRS Bratislava 1977.
- Rowe P.W. — The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear. Geotechnique London 1969 vol. 19 no. 1.
- Vesič A.S., Clough G.W. — Behaviour of granular materials under high stresses. J. Soil Mech. Found. Eng. ASCE New York 1968 vol. 94 no. 3.

SUMMARY

The paper presents results of triaxial compression tests of Albian sands. The samples were taken in the frozen state at the depth of 600 m below terrain surface in one of mines in the Lublin Coal Basin. The strength studies involved tests with loading applied in traditional way (i.e. by increasing vertical loading under conditions of constant horizontal stress and with or without drainage) and those made under conditions of increase of pore water pressure with the ratio of major stresses remaining constant. The latter scheme of loading was recognized as the most appropriate and reliable in modelling the influence of waters in the course of defreezing the rock massif.

РЕЗЮМЕ

В статье представлены результаты исследований сопротивления сдвигу альбских песков. Пробы этих песков были отобраны в замороженном состоянии в одной из шахт Люблинского угольного бассейна на глубине 600 м под поверхностью земли. В прочностных исследованиях, кроме традиционного способа оказывания давления (растущее вертикальное напряжение, постоянное горизонтальное напряжение в условиях с отливом и без отлива), были проведены исследования при увеличении давления воды в порах при постоянном соотношении главных напряжений. Эта последняя схема нагрузок принята самой правильной, лучше всего моделирующей влияние воды во время размораживания массива.