

BADANIA CIŚNIEŃ DOPUSZCZALNYCH CEMENTACJI W SKALACH LITYCH

UKD 624.131.24/25:551.491.7:624.138.232.1:624.138.24:627.810(438—13:234.42)

Skąły lite w podłożu zapór wodnych wymagają z reguły uszczelnienia dla zmniejszenia prędkości filtracji oraz ograniczenia wyporu lub ucieczek wody pod zaporą. Najczęściej stosowaną metodą uszczelnienia jest wykonanie zastrzyków, polegających na tłoczeniu pod ciśnieniem w odcinki otworów wiertniczych różnego rodzaju zaczynów, przeważnie cementowych lub cementowo-iłowych. O efektach i kosztach prac cementacyjnych decyduje dobór ciśnień oraz rodzaju i składu zaczynów zależnie od charakteru uszczelnianego ośrodka. Te podstawowe parametry powinny być ustalone wstępnie w trakcie badań geologiczno-inżynierskich, poprzedzających projektowanie i realizację przesłony uszczelniającej.

Przy pracach cementacyjnych na ogół dąży się do stosowania jak najwyższych ciśnień tłoczenia. Wysokie ciśnienia zwiększają zasięg rozchodzenia się zaczynów w masywie skalnym, co pozwala na ograniczenie ilości otworów, polepszając stopień wypełnienia próżni w podłożu i jakość wytworzonego kamienia cementowego. Wielkość stosowanych ciśnień cementacji jest ograniczona własnościami cementowanej skały. Zbyt wysokie ciśnienia mogą powodować naruszenie struktury masywu, związane z jego odkształceniami, stanowiącymi niebezpieczeństwo dla posadowionych na nim budowli oraz tworzeniem się nowych spękań (również w już uszczelnionych partiach skały). Szereg przypadków tego rodzaju jest znanych z praktyki wykonawstwa cementacji. Między innymi przykładem może być podniesienie odwodnej strony bloków zapory betonowej w Zermanicach (11), spowodowane stosowaniem nadmiernych ciśnień cementacji. Podłoże zapory stanowiły silnie naruszone łupki grodziskie serii śląskiej Karpat flišowych. Wielkość odkształceń dochodziła do 16,7 cm, przy czym proces podnoszenia został zahamowany dopiero przez 3-krotne obniżenie ciśnień cementacji (ryc. 1).

Innymi niekorzystnymi zjawiskami występującymi przy zbyt wysokich ciśnieniach są: bardzo duże zużycie zaczynów i wpływy powierzchniowe.

CIŚNIENIA DOPUSZCZALNE CEMENTU I ICH OKREŚLANIE

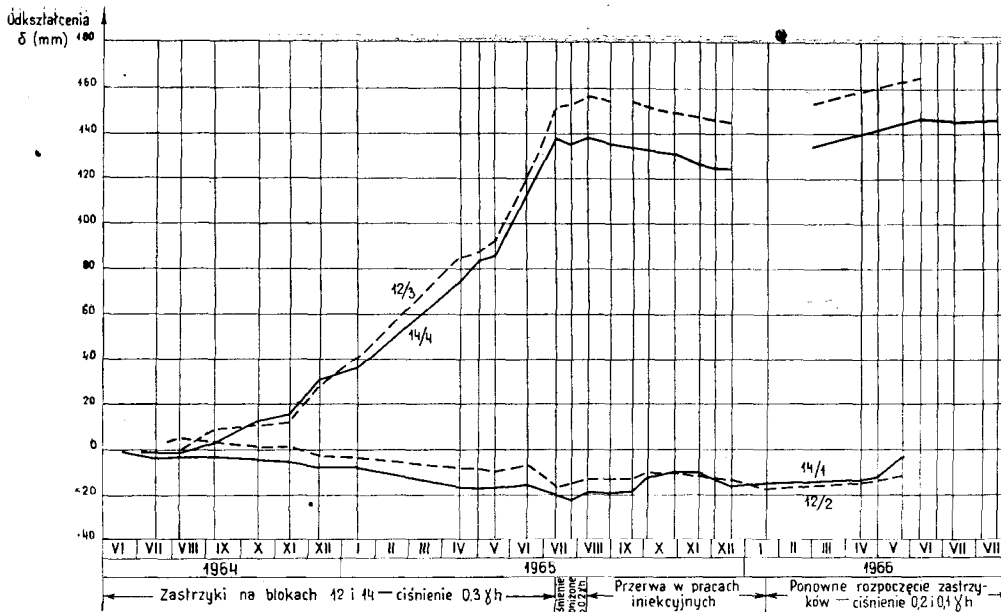
Maksymalne ciśnienie, przy którym nie dochodzi jeszcze w danych warunkach do naruszenia struktury

skały i nadmiernych jej odkształceń, nazywa się „dopuszczalnym ciśnieniem cementacji”. Jest ono uzależnione od wielu czynników, jak: głębokość cementowanej strefy, litologia podłoża skalnego, stopień spękania i charakter spękań skały, przestrzenny układ płaszczyzn podzielności, a także technologia cementacji (cementacja „od dołu” czy „od góry”, kolejność wykonania otworów).

Ciśnienia dopuszczalne f_d ustalane są na podstawie wzorów empirycznych (1, 8, 9, 112), uzależniających z zasady ich wielkość od głębokości cementowanej strefy pod stropem skały h . Odpowiednia zależność może być prosto lub krzywoliniowa. Najczęściej stosowane wzory zestawiono w tabeli I. W większości z nich występują współczynniki, uwzględniające wpływ własności cementowanej skały, a w niektórych przypadkach również technologii prac cementacyjnych na dobór ciśnień dopuszczalnych (8).

Wielkość ciśnień, wynikające z powyższych wzorów są bardzo zróżnicowane i wahają się przeważnie w granicach od jedno do sześciokrotnego ciężaru nadkładu nad cementowaną strefą ($0,1—0,6 \gamma h$; γ — ciężar objętościowy skały T/m^3), dochodząc niekiedy nawet do piętnastokrotnego ciężaru nadkładu ($1,5 \gamma h$; 1, 8). Ustalenie odpowiedniej wielkości ciśnień na podstawie wzorów empirycznych natrafia na duże trudności, wynikające z ogólnego i niedostatecznie ścisłego określenia zasad doboru współczynników jak również zakresu stosowania wzorów (szczególnie w uzależnieniu od warunków geologicznych). Wpływa na to znaczne zróżnicowanie własności skał w masywach, jak również wielka ilość działających czynników, utrudniające, a nawet uniemożliwiające przedstawienie ogólnie obowiązującego systemu doboru ciśnień na podstawie ograniczonej ilości danych empirycznych. Odpowiednie zastrzeżenia czynią również niektórzy autorzy wzorów, wskazując na celowość wykonywania specjalnych prac badawczych dla konkretnych warunków.

Badania tego rodzaju opierają się na pomiarze odkształceń masywu skalnego pod działaniem ciśnień (1, 7, 8, 10, 12), można się tu również posługiwać badaniami wodochłonności, wykonywanymi w cyklach ciśnień wzrastających i opadających (10, 12). Kryte-



Ryc. 1. Przebieg odkształceń bloków 12 i 14 zapory betonowej w Żermanicach podczas cementacji podłoża (wg Q. Zaruby).

Repery 12/3 i 14/4 znajdują się po stronie odwodnej; repery 14/1 i 12/2 po stronie odpowietrznej obiektu. γ — ciężar objętościowy skały T/m^3 , h — głębokość cementowanej strefy.

ria ustalania ciśnien na podstawie tego rodzaju badań nie są ustalone w sposób ilościowy. Jedynie norma radziecka TU-31-54 (8) określa dopuszczalną wielkość odkształceń masywu skalnego przy cementacji na 0,02—0,05 mm, a więc jako praktycznie równą zeru. Odmienne stanowisko w tej sprawie reprezentują badacze francuscy (2), którzy podkreślają możliwość i celowość dopuszczenia do pewnych odkształceń skały i rozwarcia szczelin podczas procesu cementacji.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Powyższe trudności w ustalaniu ciśnien cementacji spowodowały konieczność przeprowadzenia odpowiednich badań na obszarze polskich Karpat. W rejonie tym wykonuje się z zasady w skałach podłoża (flisz, skały pieniniskiego pasa skałkowego) przesłony uszczelniające, przy czym problem ustalenia właściwych (możliwie jak najwyższych) ciśnien tłoczenia zaczynów dla spekanych maszywów warstwowych o przewodzie drobnych szczelin ma szczególnie istotne znaczenie, przede wszystkim ze względu na ekonomikę prac uszczelniających. We fliszu karpacim i kompleksach skalnych o zbliżonych właściwościach stosowane są na ogół niskie ciśnienia cementacji (do 0,2 γ/h), przy niewielkim rozstawie otworów w linii uszczelnienia (na ogół do 2,0 m). Zwiększenie odległości otworów, przy podwyższonych ciśnieniach tłoczenia, może przynieść znaczne zmniejszenie kosztów przesłon, które w skałach fliszowych dochodzą do piętnastu i więcej procent wysokości nakładów na wykonanie obiektu piętrzącego¹.

Badania przeprowadzono na dwóch odcinkach doświadczalnych — w Wiśle (Beskid Śląski) i Niedzicy (Pieniny)². Celem ich było ustalenie metodyki określania ciśnien dopuszczalnych w skałach uwarstwionych oraz kryteriów interpretacji doświadczeń, jak również sprecyzowanie wielkości dopuszczalnych ciśnien cementacji dla badanych ośrodków.

¹ Zapora Orawska (ČSR) — 13%, zapora Belanka (ČSR) — 15% (6), zapora w Tresnej — około 10%.

² Badania zostały przeprowadzone przy współudziale mgr inż. J. Pauli oraz mgr inż. M. Zaka (Katowickie Okręgowe Przedsiębiorstwo Miernicze). Konsultacje naukowe w trakcie badań były prowadzone przez doc. dr K. Thiela i doc. dr A. Kleczkowskiego, którym autor pragnie wyrazić podziękowanie za aktywną pomoc w realizacji doświadczeń.

Fig. 1. Course of deformations of blocks 12 and 14 of concrete screen at Żermanice during cementation of basement (according to Q. Zaruba).

Bench-marks 12/3 and 14/4 are situated on the water side; bench-marks 14/1 and 12/2 are situated on the windward side of the object. γ — rock bulk density T/m^3 , h — depth of cemented zone.

INŻYNIERSKO-GEOLOGICZNA CHARAKTERYSTYKA ODCINKÓW DOŚWIADCZALNYCH

Badania ciśnien dopuszczalnych w Wiśle zostały wykonane w skałach płaszczowiny śląskiej (warstwy istebniańskie i godulskie), badania w Niedzicy na obszarze pieniniskiego pasa skałkowego (wapienie rogowcowe serii braniskiej). W Wiśle (ryc. 2) występuje seria gruboławicowych i średnioławicowych piaskowców oraz zlepieńców o spoiwie krzemionkowo-łlastym z łupkami. Miąższość ławic piaskowca dochodzi do 2 m, zlepieńca do 3—5 m, łupku do 1—2 m (średnio kilkanaście cm), stosunek łupków do piaskowców wynosi średnio 1:10—1:3. W Niedzicy wapienie rogowcowe o grubości 4—30 cm (średnio 8—10 cm) są przeławiczone cienkimi (1—2 mm) warstewkami łupków. Podłoże skalne w obu przypadkach występuje pod cienkim (2—3 m) nadkładem żwirów i otoczków.

Zarówno badania w Niedzicy, jak i Wiśle przeprowadzono poniżej przypowierzchniowej strefy silnie zwietrzałej i rozluźnionej skały. W obrębie badanej partii podłoża stwierdzono w obu przypadkach nieznaną przepuszczalność, wyrażającą się niskimi wielkościami wodochłonności jednostkowej (w Wiśle średnio 0,05 $l/min/m/m$ maksymalnie do 0,1 $l/min/m/m$; w Niedzicy do 0,02 $l/min/m/m$ — przy ciśnieniu 3 at). Świadczy to o przewodzie drobnych szczelin otwartych (do 1—2 mm szerokości), co potwierdzają również bezpośrednie terenowe pomiary spekań. Wapienie rogowcowe odznaczają się dużym stopniem spekania³, większość spekań (70—80%) jest jednak wypełniona kalcytem bądź rozartym łupkiem. W obu przypadkach dominują płaszczyzny spekań poprzeczne do warstwowania o stromych kątach zapadania (w Wiśle 70—90%, w Niedzicy niemal 100% całości obserwowanych spekań), wytwarzające podzielność poszczególnych ławic na bloki i kostki o różnej wielkości.

Upad warstw w Wiśle waha się w granicach 20—35° (średnio około 25°), w Niedzicy wynosi 75—85°.

³ Ilość spekań na 1 m ławicy wapienia wynosi średnio około 10.

Zależność ciśnień dopuszczalnych od głębokości strefy	Wzór	Autor wzoru	Dobór współczynników w zależności od warunków geologicznych. Zakres stosowania wzorów	U w a g i
zależność prostoliniowa	$pd = k : h$	C F. Grundy (1; 12)	Brak danych	
	$pd = k \frac{\gamma h}{10}$	N. N. Trupak (9)	$k = 2-3$, zależnie od „zwięzłości” skały	
	$pd = p_0 + kyh$	J. Verfel (10) S. Kratochvil (6)	$k = 0,1$ — poziomo zalegające i naruszone łupki $k = 0,4-0,6$ — skały magmowe	„ k ” uzależnione od głębokości strefy i kolejności otworów
	$pd = p_0 + mh$	A. N. Adamowicz (1) Norma Radziecka Tu-31-54 (8)	$m = 0,25$ — silnie spękane skały osadowe z poziomym uwarstwieniem skały słabo zwięzłe $m = 0,5$ — skały słabo spękane i skały osadowe o większym kącie upadu warstw. $m = 1,0$ — skały słabo spękane o zwartej strukturze	„ m ” zależne od kolejności otworów, metody wykonania cementacji („od góry”, „do dołu”) i gęstości zaczynów
zależność krzywoliniowa	$pd = 0,31h + 0,02h^2$	Q. Zaruba (12)	wzór dla skał zwięzłych oraz masywów ze stromym kątem upadu warstw	Założenie $\gamma = 2,4 T/m^3$
	$pd = 0,25h + 0,005h^2$	Q. Zaruba (12)	wzór dla skał o poziomym lub łagodnym zapadaniu warstw	”
	$pd = h + 1,33h \times \left(\frac{f \cdot h_j}{400} + \frac{3 \sqrt{h_j}}{40} \right)$	W. P. Creager (1)	brak danych	”

Oznaczenia: pd — ciśnienie dopuszczalne cementacji na głębokości h — at, h — głębokość strefy uszczelnianej pod stropem podłoża skalnego — m, γ — ciężar objętościowy skały — T/m^3 , k , m — współczynniki empiryczne, p_0 — ciśnienie dopuszczalne w stropie skały — at.

W podłożu odcinków doświadczalnych nie stwierdzono występowania ważniejszych dyslokacji tektonicznych, którym towarzyszyłyby strefy silnego naruszenia i zbrekcjowania skały. Występujące w Wiśle (ryc. 2) skośne pęknięcia nie wpływa w większym stopniu na własności przyległych partii masywu.

Piaskowce i wapienie w Wiśle i Niedzicy wyróżniają się niską porowatością (1,5—3,0%); wytrzymałość na ściskanie wapieni w Niedzicy jest nieco wyższa⁴. Kompleks wapieni rogowcowych odznacza się stosunkowo wysokimi własnościami sprężystymi (wg badań doc. K. Thiela moduł sprężystości w sąsiedztwie odcinka doświadczalnego wynosi 60—70 tys. kg/cm^2).

METODYKA WYKONANYCH BADAŃ

W przeprowadzonych doświadczeniach przyjęto dwa kryteria, charakteryzujące nadmierne ciśnienia tłoczenia:

- 1) powstanie trwałych odkształceń masywu jako podstawowe kryterium naruszenia struktury skały;
- 2) silny wzrost chłonności jednostkowej badanej strefy ($l/min/m$ otworu/ m ciśnienia), jako kryterium uzupełniające.

W uzasadnieniu pierwszego z powyższych kryteriów należy podkreślić, że wystąpienie pewnych odkształceń odwracalnych (sprężystych) górotworu jest korzystne dla procesu cementacji. Towarzyszą one „rozwieraniu się” szczelin, co ułatwia penetrację zaczynu w drobne spęknięcia, w ostatecznym efekcie powodując lepsze wypełnienie próżni w masywie (2). Niedopuszczalne natomiast są odkształcenia trwałe, narastające w trakcie kolejnych cementacji poszczególnych stref i prowadzące do sukcesywnego „podnoszenia się” nadkładu nad uszczelnianą partią skały, odkształceń i ewentualnie uszkodzenia nadległych budowli i powstawania nowych spęknięć.

⁴ Wytrzymałość na ściskanie, określona w laboratorium na próbkach kostkowych, wynosi dla wapieni rogowcowych średnio 1000 kg/cm^2 , dla piaskowców istebniańskich w rejonie Wisły 500—750 kg/cm^2 .

Badania realizowano w zespołach złożonych z 4 otworów. Centralnie w stosunku do pozostałych był usytuowany otwór tłoczny (nr 1), w pozostałych (nr 2—4) założono repery do pomiaru odkształceń masywu⁵. Schematy wykonanych odcinków doświadczalnych przedstawiono na ryc. 2 i 3.

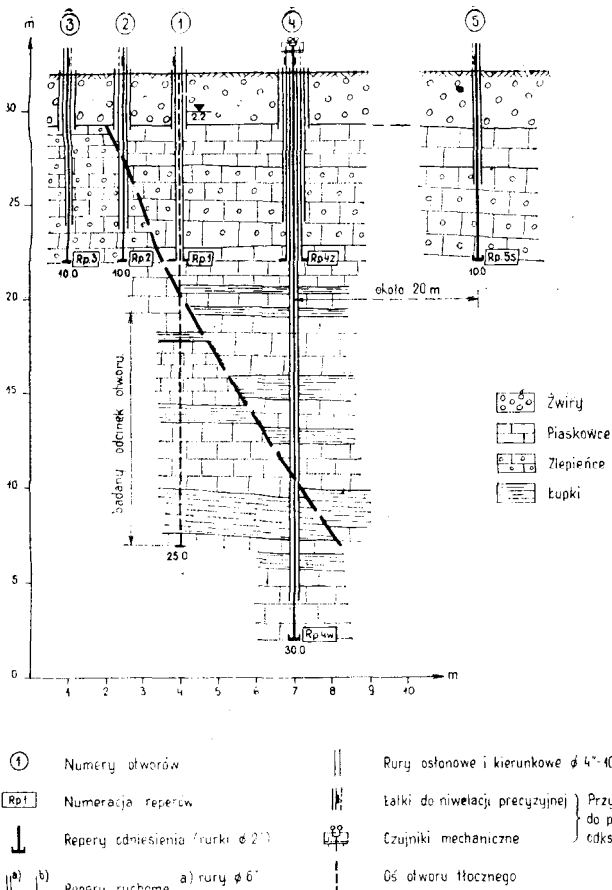
Główne próby wykonywane były strefami „od góry” otworu tłoczonego (długości stref w Wiśle 2 m; Niedzicy 5 m), badanymi w trakcie wiercenia otworu, już po osadzeniu wszystkich reperów pomiarowych. W czasie każdego badania rejestrowano odkształcenia i chłonność skały. Poszczególne strefy były izolowane od pozostałej części otworu za pomocą uszczelki obiegowej (5)⁶.

Badania strefowe rozpoczynano od ciśnień równych 0,5—0,7 at wielkości ciśnienia dopuszczalnego, ustalonego na podstawie wzorów empirycznych (wzory Q. Zaruby, tabela I). Następnie stopniowo zwiększano ciśnienie o 0,5—2,0 at (przeważnie o 1,0 at) aż do wystąpienia wyraźnego, skokowego przyrostu pionowych ruchów reperów, bądź chłonności jednostkowej, po czym wykonywano obserwacje zachowania się skały przy odciążaniu do pełnej stabilizacji odkształceń. Czas trwania badania dla jednej strefy wynosił przeważnie 2—4 godziny (wyjątkowo do 10 godzin), poszczególne ciśnienia utrzymywano przez 20—60 min.

Większość badań prowadzono przy tłoczeniu wody (badania wodochłonności). W Niedzicy wykonano dodatkowo, analogicznymi strefami „od dołu” otworu

⁵ Koncepcję zastosowanego układu badawczego oparto na schemacie prób tego rodzaju, stosowanych w CSRS (10, 12), wprowadzając konieczne zmiany konstrukcji układu i metodyki badań.

⁶ Pomiar ciśnień był dokonywany na manometrze, umieszczonym na zamkniętym zaworze przewodzie zwrotnym, co umożliwiło wyeliminowanie wpływu strat ciśnienia na długości przewodu (A_p) na wielkość ciśnień i chłonność jednostkową.



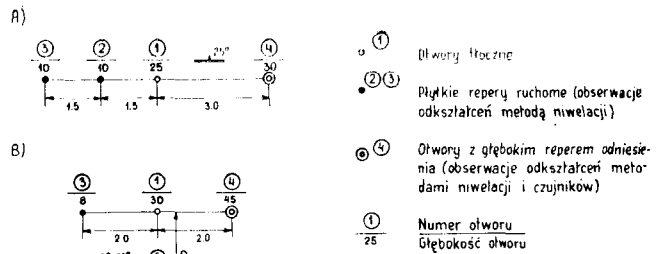
Ryc. 2. Przekrój przez odcinek doświadczalny w Wiśle.
Fig. 2. Cross section through a test sector in the Vistula River.

tlóconego, próby z zastosowaniem zaczynów cementowych.

Obserwacje odkształceń, obejmujące również otwór tłoczny, były prowadzone na tzw. reperach ruchomych (rurki Φ 2", rury obsadowe otworów Φ 6"), scementowanych ze skałą poniżej strefy maksymalnego zwietrzenia, 1–3 m ponad pierwszym badanym odcinkiem otworu tłoczonego (ryc. 2). Głębokość założenia reperów ruchomych była dla każdego zespołu badawczego jednakowa — 10 m (Wisła) i 8 m (Niedzica).

Pomiar odkształceń pionowych na wszystkich reperach ruchomych prowadzono metodą niwelacji precyzyjnej (jednocześnie pomiar dwoma niwelatorami). Wyniki uzyskane za pomocą tej metody były podstawą interpretacji rezultatów badań. Na jednym z reperów każdego odcinka doświadczalnego wprowadzono dodatkowo jako metodę kontrolną czujniki mechaniczne, zapewniające ciągłość obserwacji i ich wysoką dokładność ($\pm 0,005$ mm²). Odkształcenia mierzone względem reperów odniesienia, przy czym do niwelacji precyzyjnej służyły płytke repery w otworach usytuowanych poza strefą wpływu ciśnienia (20–40 m od otworu tłoczonego — reper 5s na ryc. 2). Metoda czujników mechanicznych wymagała umieszczenia reperu stałego w bezpośredniej bliskości reperu ruchomego, w związku z czym zakładano tzw. „głęboki reper odniesienia” (rurka Φ 2"), scementowany ze skałą 5–15 m poniżej badanego odcinka otworu (reper 4w, ryc. 2). Stałość reperów odniesienia była w czasie prób kontrolowana metodą niwelacji. Wszystkie wykonane repery, a szczególnie głę-

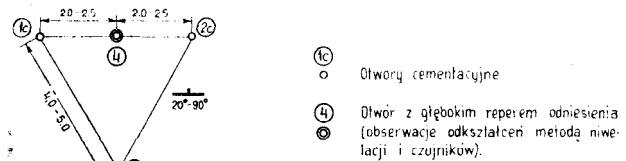
¹ Podczas pierwszych prób w Wiśle zastosowano również metodę niwelacji hydrostatycznej. Nie zdała ona jednak egzaminu w warunkach terenowych, przy konieczności rejestracji ciągłego ruchu reperów.



Ryc. 3. Rozmieszczenie otworów w odcinkach doświadczalnych.

A — Wisła, B — Niedzica.

Fig. 3. Distribution of bore holes within test sectors A — Vistula, B — Niedzica.



Ryc. 4. Rozmieszczenie otworów badawczych przy próbniej cementacji (Niedzica).

Fig. 4. Distribution of test bore holes during test cementation (Niedzica).

boki reper odniesienia, zabezpieczono przed bezpośrednim działaniem wody lub zaczynu za pomocą rur osłonowych (ryc. 2).

Układ otworów w zespołach badawczych dostosowano do warunków geologicznych. Dla uzyskania możliwie pełnej porównywalności — wielkości odkształceń mierzonych na wszystkich reperach, główną linię rozpoznawczą usytuowano wzdłuż biegu warstw (ryc. 2 i 3), dodatkowo wprowadzając w Niedzicy, ze względu na stromy upad, reper ruchomy usytuowany w przekroju prostopadłym do przekroju podstawowego (reper 2; ryc. 3). Odległość reperów ruchomych od otworu tłoczonego wynosiła 2–3 m; zmniejszono ją w Niedzicy, biorąc pod uwagę stromy upad warstw i dużą szczelność górotworu.

W uzupełnieniu powyższych badań na odcinkach doświadczalnych przeprowadzono w Niedzicy serię obserwacji odkształceń przy próbniej cementacji². Schemat usytuowania otworów badawczych podczas tych badań przedstawia ryc. 4. Odkształcenia były mierzone na jednym reperze ruchomym (otwór 4), umieszczonym w odległości 2–4 m od otworów cementacyjnych. Pomiar przeprowadzono metodami niwelacji precyzyjnej i czujników, konstrukcja otworu reperowego była analogiczna jak w czasie badań na odcinkach doświadczalnych (otwór 4, ryc. 2).

PRZEBIEG I WYNIKI DOŚWIADCZEN

Podczas badań wykonano łącznie 15 prób strefowych na głębokościach 12,7–25 m (Wisła) i 9–30 m (Niedzica), tj. 6–28 m pod stropem podłoża skalnego. Przebieg poszczególnych prób wykazywał (dla całości zrealizowanych doświadczeń) pewne wspólne charakterystyczne cechy. Przy podwyższaniu ciśnienia następował początkowo stopniowy przyrost odkształceń skały. Po osiągnięciu określonego ciśnienia, różnego dla poszczególnych stref głębokościowych, obserwowano nagły, skokowy przyrost ruchów pionowych reperów, któremu w czasie większości przeprowadzonych prób towarzyszył wyraźny wzrost chłonności jednostkowej. Ciśnienie, przy którym występowały powyższe zjawiska uznano za ciśnienie „naruszenia” masywu skalnego.

Wielkość odkształceń bezpośrednio poprzedzającą (δp) i występującą podczas ciśnienia „naruszenia” (δk) zestawiono w tabeli II. Wzrost odkształceń od-

² Badania były prowadzone pod kierunkiem mgr inż. E. Gąsiorowskiej.

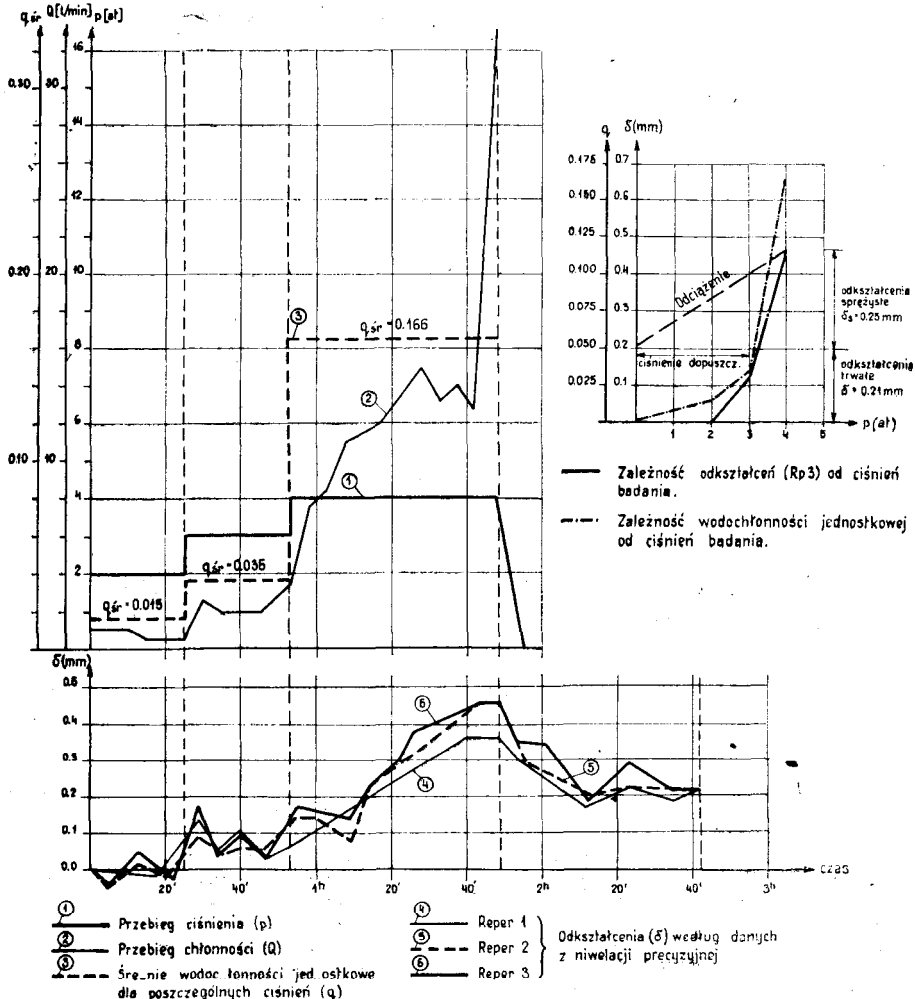
WIELKOŚĆ I ROZKŁAD ODKSZTAŁCEN NA POSZCZEGÓLNYCH REPERACH RUCHOMYCH **Tablica II**

	W I Ś Ł A			N I E D Z I C A		
	Rp1		Rp2 — Rp4z*	Rp1		Rp2 — Rp4z*
	mm*	%		mm*	%	
δ_p **	0,065 0,05—0,10	100%	127 115—137	0,135 0,07—0,18	100%	50 41—59
δ_k ***	0,26 0,20—0,35	100%	109 92—123	0,28 0,24 — 0,32	100%	50 48—52

* Wielkość średnia/minimalna, maksymalna, „naruszenia”. ** δ_p — odkształcenia bezpośrednio przed ciśnieniem „naruszenia”. *** δ_k — odkształcenia maksymalne przy ciśnieniu „naruszenia”.

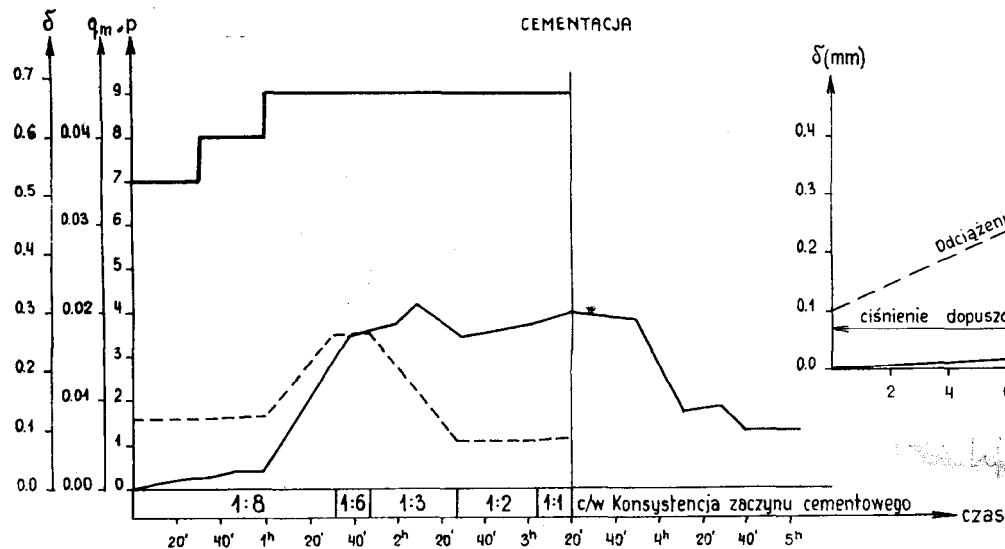
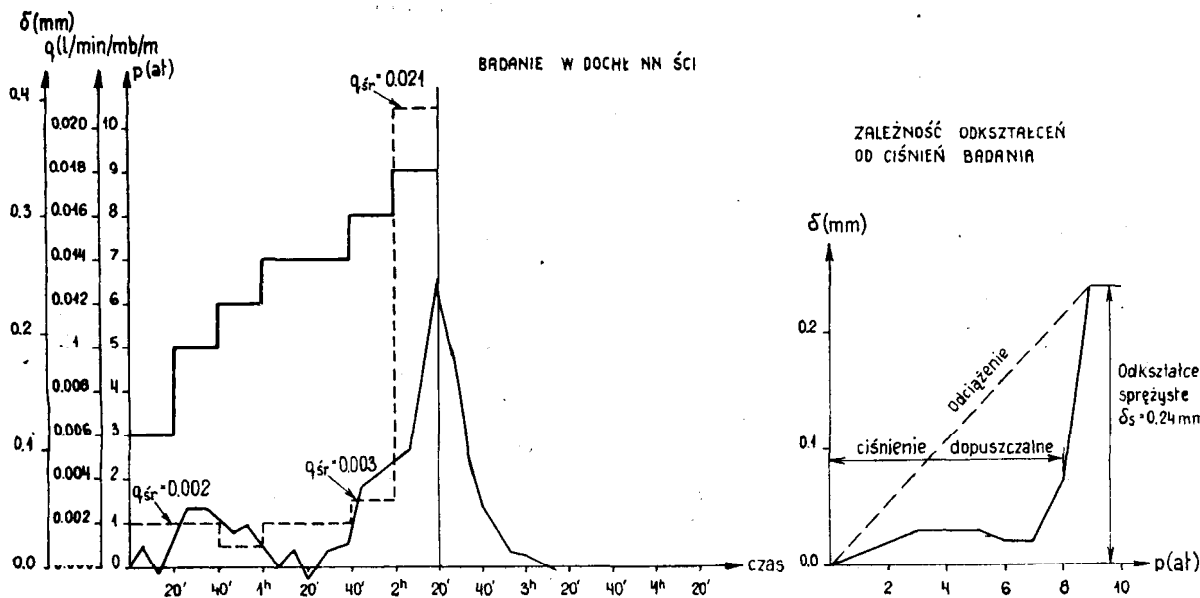
WIELKOŚĆ ODKSZTAŁCEN DLA POSZCZEGÓLNYCH STREF BADAWCZYCH **Tablica III**

Strefy głębokościowe	Odkształcenia przy ciśnieniu „naruszenia,, (δ_k)*				U w a g i
	W I Ś Ł A		N I E D Z I C A		
	mm	%	mm	%	
I	0,29	70	0,165	72	* średnie odkształcenia wszystkich reperów ruchomych (Rp1 — Rp 4z) I — najpłytsza strefa badanego odcinka otworu
II	0,41	100	0,23	100	
III	0,24	59	0,20	87	
IV	0,25	61	0,13	57	
V	0,185	45	0,105	46	
VI	0,045	11			



Ryc. 5. Przebieg badania ciśnień dopuszczalnych cementacji (Wisła; strefa 13—15 otworu I).

Fig. 5. Course of examination of admissible pressures of cementation (Vistula; zone 13 — 15, bore hole 1).



Ryc. 6. Przebieg badania ciśnień dopuszczalnych cementacji (Niedzica; strefa 15—20 m).

— ciśnienie badania (p) at; ——— wodochłonność jednostkowa wody (q) i zaczynu cementowego (q_m) l/min/mb/m; ——— odkształcenia (δ) reperu 1 (niwelacja precyzyjna) mm.

powiadający temu ciśnieniu był przeważnie 2—3-krotny, natomiast przyrost chłonności jednostkowej wynosił odpowiednio 70 do 600% (średnio — 150% w Wiśle i 300% w Niedzicy).

Badania przy tłoczeniu zaczynów cementowych (Niedzica) nie odbiegały w sposób istotny od prób wodochłonności, przy czym ciśnienia „naruszenia” dla analogicznych stref głębokościowych były w obu przypadkach identyczne. Powyższy przebieg ilustrują przykłady prób na dwóch strefach badawczych (ryc. 5 i 6). Odchylenia od typowego przebiegu badania występowały w najgłębszych strefach skały. „Naruszenie” masywu przejawiało się tu przede wszystkim silnym wzrostem chłonności (2—5 razy), natomiast nie obserwowano wyraźnego „skoku” odkształceń. Zjawisko to jest najprawdopodobniej związane z przejmowaniem części odkształceń przez zaciskanie otwartych szczelin i kompresję łupków, przy czym rola tych procesów narasta ze zwiększaniem się odległości — reper ruchomy — strefa. Tezę tą potwierdza ogólnie występująca tendencja do zmniejszania się bezwzględnej wielkości odkształceń z głębokością badanego odcinka otworu (tab. III).

Fig. 6. Course of examination of admissible pressures of cementation (Niedzica; zone 15 — 20 m).

— pressure of testing (p) at; ——— unit water absorption of water (q) and of cement grout (q_m) l/min/m/m, ——— deformations (δ) of bench-mark 1 (precise levelling) mm

Bardzo znaczną nieregularność wykazywało kształtowanie się chłonności jednostkowej. Podczas kilku prób (Wiśla) nie obserwowano w ogóle jej przyrostu, mimo skokowego zwiększenia się odkształceń, ponadto wahania chłonności (wzrost do 150%) następowały często również przy ciśnieniach znacznie niższych od ciśnienia „naruszenia”.

Rozkład odkształceń — na poszczególnych reperach ruchomych był odmienny w czasie badań w Wiśle i Niedzicy (tab. II, ryc. 7). W Wiśle wielkości odkształceń dla wszystkich reperów były zbliżone, obserwowano nawet nieco większe odkształcenia na reperach 2 i 3, umieszczonych w odległości 1,5—3,0 m od otworu tłocznego (prawdopodobnie wpływ poprzecznego pęknięcia — patrz ryc. 2). Podczas badań w Niedzicy wielkość poziomych ruchów masywu w odległości 2,0 m od otworu tłocznego była o 50% niższa niż na reperze 1, przy czym nie zawsze zaznaczał się nagły przyrost odkształceń przy ciśnieniu „naruszenia”.

Charakter stwierdzonych ruchów pionowych masywu określono na podstawie kształtowania się odkształceń przy odciążeniu. Przy ciśnieniu „narusze-

CHARAKTER OBSERWOWANYCH ODKSZTAŁCEŃ

Odcinek doświadczalny	Odkształcenia odwracalne:		
	Rpl (mm)*	w stosunku do δ_k^{**} (%)	
		Rpl	Rp2 — Rp4*
WISŁA	0,16	62	68
	0,14—0,20		67—69
NIEDZICA	0,21	75	89
	0,15—0,26		83—100

* Wielkość średnia/minimalna — maksymalna. ** δ_k — odkształcenia maksymalne przy ciśnieniu „naruszenia”.

nia” występowały już znaczne trwałe odkształcenia górotworu. Udział odkształceń odwracalnych (δ_s) był większy w Niedzicy (średnio około 90%)⁹ niż w Wiśle (średnio 66%), zwiększając się z odległością od otworu tłoczego (tab. IV).

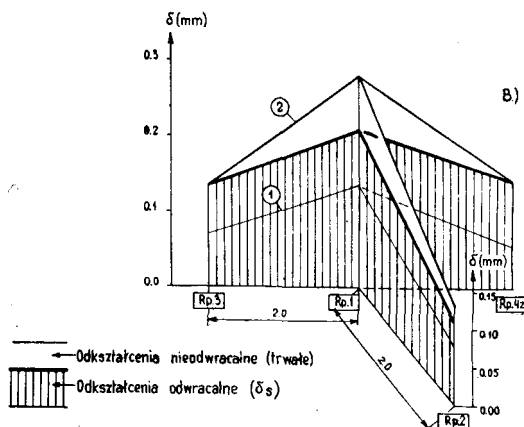
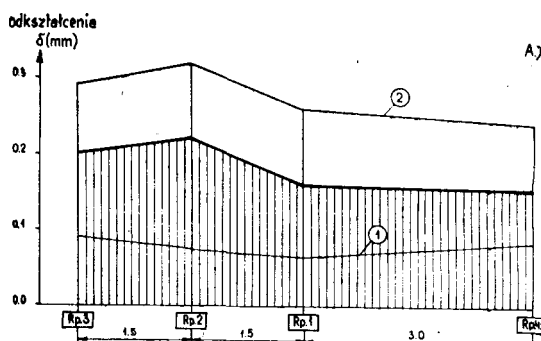
ANALIZA REZULTATÓW BADAŃ

Przy porównaniu wyników uzyskanych w Wiśle i Niedzicy zwraca uwagę odmienne działanie ciśnień na badane w obu przypadkach masywy skalne. W Niedzicy występuje wyraźny zanik odkształceń już w odległości 2,0 m od otworu tłoczego, znacznie większe są odkształcenia bezpośrednio przed ciśnieniem „naruszenia” (δ_p ; tab. II) wzrasta też udział odkształceń odwracalnych w całości ruchów skały (tab. IV). Powyższe różnice są spowodowane bardzo niską przepuszczalnością i niewielką szerokością szczelin oraz wysokimi właściwościami sprężystymi wapieni rogowcowych, przy czym pierwsze z wymienionych czynników wycy ują o niewielkim zakresie działania ciśnień na masyw skalny. W celu ustalenia ciśnień dopuszczalnych najbardziej istotne znaczenie posiada charakter odkształceń przed i w czasie ciśnienia „naruszenia”. Analiza materiału doświadczalnego wykazuje, iż wielkość odkształceń odwracalnych (δ_s) jest dla wszystkich prób wyższa od odkształceń przy ciśnieniu bezpośrednio niższym od ciśnienia „naruszenia” (δ_p , ryc. 7). Świadczy to o tym, że do momentu stwierdzenia skokowego wzrostu ruchów skały nie występują praktycznie trwałe odkształcenia masywu. Wniosek ten potwierdzają również bezpośrednie obserwacje oddziaływania skały, przed osiągnięciem ciśnienia „naruszenia”.

Odkształcenia nieodwracalne, o wielkości możliwej do stwierdzenia za pomocą zastosowanej metody pomiarowej, pojawiają się dopiero po osiągnięciu ciśnienia „naruszenia”. W związku z tym jako ciśnienia dopuszczalne dla danych stref głębokościowych przyjęto wielkości niższe o 1,0 at od ciśnienia „naruszenia”. Wahają się one od 2,5 do 6,5 at w Wiśle i od 4,5 do 19,5 at w Niedzicy (ryc. 8). Przy powyższych ciśnieniach występują już pewne odkształcenia masywu skalnego (δ_p — tab. II) o wielkości ok. 0,05—0,15 mm, które są praktycznie odwracalne. Należy podkreślić, że całkowite wyeliminowanie odkształceń skały w czasie prac cementacyjnych, zgodnie z zaleceniami normy radzieckiej (8), prowadziłoby (jak wykazały przeprowadzone badania) do stosowania bardzo niskich ciśnień, niższych średnio o połowę od powyżej ustalonych. Byłoby to niekorzystne zarówno dla uzyskiwanych efektów uszczelnienia, jak i ekonomiki prac cementacyjnych.

Wyniki przeprowadzonych doświadczeń wskazują na krzywoliniowe kształtowanie się zależności ciśnień dopuszczalnych od głębokości strefy. Wielkość ciśnienia jest uzależniona od upadu warstw (płaszczyzn podzielnosci). Dla stromych kątów upadu są one niemal dwukrotnie wyższe. W płaskich strefach skały do 10—20 m konieczne jest stosowanie w skałach

⁹ Podczas dwóch prób w Niedzicy całość odkształceń, mimo ich 2—3-krotnego wzrostu, a także bardzo znacznego przyrostu chłonności (4—6 razy) przy określonym ciśnieniu, była odwracalna. Przy tłoczeniu w analogiczne strefy czynników cementowych wystąpiły odkształcenia trwałe (δ_s około 60%).



Ryc. 7. Rozkład odkształceń na poszczególnych reperach.

A — odcinek doświadczalny w Wiśle, B — odcinek doświadczalny w Niedzicy. 1 — odkształcenia bezpośrednio przed ciśnieniem naruszenia (δ_p), 2 — odkształcenia maksymalne przy ciśnieniu naruszenia (δ_k).

Fig. 7. Distribution of deformations at the individual bench-marks.

A — test sector in the Wisła River, B — test sector at Niedzica. 1 — deformations immediately before pressure of disturbance (δ_p), 2 — maximum deformations during pressure of disturbance (δ_k).

uwarstwionych niskich ciśnieniach cementacyjnych (do 0,2—0,25 yh), natomiast dla stref głębszych w masywach skalnych o stromym upadzie możliwe jest znaczne (nawet 2—krotne) podwyższenie ciśnień w stosunku do obecnie stosowanych, co może przynieść poważne (orientacyjnie do 15—20%) oszczędności przy realizacji przesłon uszczelniających¹⁰.

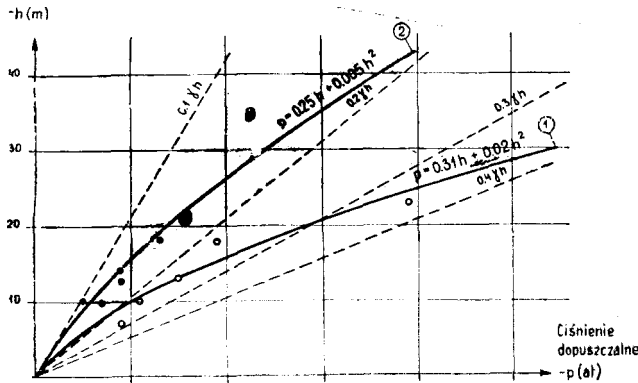
Uzyskane wielkości ciśnień dopuszczalnych (ryc. 8) wykazują dużą zgodność z wzorami Zaruby dla skał o stromym i łagodnym zapadaniu warstw (odchylenie średnio +10%). Większe niezgodności (ciśnienia niższe o około 20%) występują w strefach skały nieco silniej spękanych, w których stwierdzono lokalne pęknięcia i zaburzenia upadu warstw.

Należy tu podkreślić, iż powyższe wielkości ciśnień ustalono dla konkretnych warunków inżyniersko-geologicznych (warstwowane masywy skalne o przewadze piaskowców i wapieni, nieznacznej przepuszczalności i wąskich szczelinach oraz stosunkowo niezbyt dużym stopniu naruszenia tektonicznego). Dla innych warunków (kompleksy łupkowe, strefy silnie naruszone tektonicznie i rozluźnione) może być niezbędne ich obniżenie. Przykład może tu stanowić cementacja strefy strzaskanej w podłożu zapory posadowionej na warstwach godulskich (4).

W tym przypadku okazało się niezbędne zmniejszenie ciśnień cementacji w otworach pierwszej kolejności do około 0,1—0,15 yh ze względu na konieczność ograniczenia zużycia cementu oraz wpływów powierzchniowych.

¹⁰ Oszczędność obliczono zakładając, że promień zasięgu cementacji z każdego otworu jest funkcją \sqrt{p} (1), a prace wiertnicze stanowią 60% kosztów przesłony uszczelniającej (4).

głębokość stropu
cementowanej strefy



Ryc. 8. Ciśnienia dopuszczalne cementacji dla poszczególnych stref głębokościowych.

Ciśnienia dopuszczalne według badań na odcinkach doświadczalnych: ● badania w Wiśle, ○ badania w Niedzicy; Ciśnienia dopuszczalne wg wzorów empirycznych: — wzory Q. Zaruby, 1 — dla stromego upadu warstw, 2 — dla poziomego i łagodnego zapadania warstw, — wielkości ciśnień równe 1–4-krotnemu ciężarowi nadkładu ($0,1 \gamma h - 0,4 \gamma h$, γ — ciężar objętościowy skały = 2,4 T/m³); pole zacieniowane — przedział ciśnień stosowanych przy pracach cementacyjnych w rejonie Karpat.

Fig. 8. Admissible pressures of cementation for the individual depth zones.

Admissible pressures according to measurements within test sectors:

● — tests in the Vistula River, ○ — tests at Niedzica; admissible pressures according to empirical formulae: — Q. Zaruba's formulae, 1 — for steep dips of beds, 2 — for horizontal and gentle dips of beds, — pressure values amounting to 1–4 — fold weight of overburden ($0,1 \gamma h - 0,4 \gamma h$; γ — bulk volume of rock = 2,4 T/m³); darkened field — interval of pressures used during the cementation works made in the region of the Carpathian Mts.

OCENA ZASTOSOWANEJ METODYKI

Metodyka prowadzenia doświadczeń okazała się prawidłowa w warunkach geologicznych obu odcinków doświadczalnych. Zdążył egzamin praktyczny wprowadzone kryteria określania ciśnień dopuszczalnych, przede wszystkim z powodu skokowego charakteru przyrostu przyjętych parametrów (odkształcenia i chłonność jednostkowa) przy „maruszeniu” masywów skalnych o wyraźnej przewodzie piaskowców i wapieni. Istotne znaczenie miała kompleksowa interpretacja przy wykorzystaniu obu zastosowanych kryteriów, pozwalająca na wyeliminowanie błędów przy określaniu wielkości dopuszczalnych ciśnień.

Jak wykazały wykonane badania zastosowanie przyrostu chłonności jako jedynego kryterium określania nadmiernych ciśnień tłoczenia pozwala jedynie na uzyskanie bardzo orientacyjnych danych, a to ze względu na znaczną nieregularność jej kształtowania się, spowodowana wpływem ubocznych procesów, towarzyszących działaniu wody na spękany masyw skalny, takich, jak: kolmatacja, rozmywanie wypełnienia szczelin, czy „przebicia”.

Prawidłowe okazało się również przyjęcie dwóch metod pomiarowych przy wyborze niwelacji precyzyjnej jako metody podstawowej. Uzyskano za jej pomocą dokładność pomiaru odkształceń $\pm 0,05$ mm ($\pm 0,07$ mm w niekorzystnych warunkach atmosferycznych), przy częstotliwości odczytów na poszczególnych reperach 3–5 min. Powyższa dokładność należy uznać za wystarczającą — średni błąd pomiarowy jest kilkakrotnie mniejszy od odkształceń występujących przy ciśnieniu „maruszenia” (δk).

Pomiary czujnikami nie dały we wszystkich przypadkach zadawalających wyników. Okazało się trudne zapewnienie pełnej stałości głębokiego reperu odniesienia (Wiśla), błędy określenia wielkości odkształ-

ceń wynikały również z niewłaściwego umieszczenia czujników na głowicy otworu (Niedzica). Powyższe braki muszą być usunięte przy orzysaniu z tej metody w dalszych próbach, praktycznie eliminując ją jako samodzielną metodę pomiarową, tym bardziej że koszt badań wykonywanych jedynie za pomocą czujników (zespół badawczy z głębokimi reperami nawiązania, stosowany w CSRS, 12) byłby wyższy o około 30%. Należy podkreślić pełną przydatność metody czujników jako metody kontrolnej ze względu na jej dokładność ($\pm 0,005$ mm) i możliwość ciągłej rejestracji odkształceń, której nie zapewnia niwelacja precyzyjna.

Podczas dalszych prób konieczny jest właściwy dobór odległości otworów obserwacyjnych od otworu tłocznego, szczególnie w skałach o niewielkiej przepuszczalności i stromym upadzie warstw (w Niedzicy — ok. 2 m ok. 45°). Ponadto określenia ciśnień dopuszczalnych w głębszych strefach są w pełni celowe — 25 m wyżej są celowe zastosowanie reperów ruchomych zakładanych na dwóch głębokościach, przy czym głębszy reper byłby instalowany po przebadaniu płytkich stref skały.

Badania w Niedzicy wykazały możliwość zastosowania dla określania ciśnień dopuszczalnych cementacji tłoczenia wody, przy którym uzyskuje się analogiczne ciśnienia dopuszczalne jak dla rzadkich zaczynów cementowych. Minimalny czasokres utrzymywania poszczególnych ciśnień, szczególnie bliskich ciśnieniu „maruszenia”, nie powinien być krótszy niż 30 min. ze względu na obserwowane w kilku przypadkach opóźnienie występowania odkształceń w stosunku do momentu przyłożenia ciśnienia (ryc. 5).

BADANIA UZUPEŁNIAJĄCE PRZY PRÓBNEJ CEMENTACJI

Wyniki badań na odcinku doświadczalnym w Niedzicy znalazły potwierdzenie w czasie próbnej uszczelniania wapieni rogowcowych, przeprowadzonego w trójkątach cementacyjnych. Obserwacje odkształceń skały dokonywano tu również dwoma metodami (niwelacja precyzyjna i czujniki), przeprowadzając je na 16 strefach podczas badań wodochłonności i cementacji. Z powodu dużej odległości reperu ruchomego od otworów cementacyjnych (do 4,0 m), rejestrowane wielkości odkształceń były nieznaczne (do 0,18 mm, przeważnie do 0,1 mm), co utrudniało w dużym stopniu interpretację wyników. Zmiany chłonności jednostkowej wody i zaczynu cementowego nie zawsze kształtowały się zgodnie z przebiegiem ruchów reperów i charakteryzowała je duża nieregularność. Podczas prób na jednym z trójkątów cementacyjnych powtórzyły się trudności uzyskania wiarygodnych danych metodą czujników, spowodowane niestalością głębokiego reperu nawiązania (reper 4w, ryc. 4).

Powyższe badania wykazały, iż ciśnienia dopuszczalne ustalone zgodnie z wzorem Zaruby dla skał o stromym upadzie warstw nie powodują żadnych przejawów naruszenia, poza strefami silnie spękanymi i zbrekcyjowanymi, w których upad warstw lokalnie spada poniżej 50°. Potwierdziły one również konieczność stosowania w strefach skały do 10 m ciśnień nie przekraczających $0,2 \gamma h$.

UWAGI KOŃCOWE

Badania ciśnień dopuszczalnych cementacji przeprowadzano w kompleksach piaskowców i zlepieńców oraz wapieni z drugorzędowymi przewarstwieniami łupków. Badane masywy skalne charakteryzowały się nieznaczną przepuszczalnością (wodochłonność jednostkowa do 0,1 l/m²/m/m) i niezbyt dużym naruszeniem tektonicznym. W wyniku badań ustalono kryteria przyjmowania ciśnień dopuszczalnych, metodą prowadzenia prób terenowych dla ich określenia, a także sprecyzowano wielkości ciśnień dopuszczalnych dla poszczególnych stref głębokościowych. Uzyskane rezultaty, ze względu na niezbyt dużą ilość

doświadczeń należy traktować jako wstępne i odnoszące się przede wszystkim do ośrodków o zbliżonych do badanych własnościach.

Wnioski szczegółowe, wynikające z przeprowadzonych prób, są następujące:

1) Kryteria określania ciśnień dopuszczalnych cementacji mogą stanowić: a) niedopuszczenie do trwałych odkształceń górotworu pod wpływem ciśnień b) silny wzrost chłonności jednostkowej, związany z „naruszeniem” masywu. Najlepsze rezultaty zapewnia jednoczesne stosowanie powyższych kryteriów. Przyjmowanie wzrostu chłonności jako jedynej przesłanki określania ciśnień dopuszczalnych może pozwolić na uzyskanie jedynie orientacyjnych danych.

2) Podstawowe badania ciśnień dopuszczalnych powinny być wykonywane w grupach otworów, przy pomiarze odkształceń dwoma metodami (niwelacja precyzyjna, czujniki). Możliwe jest także stosowanie tłoczenia wody. W czasie realizacji prób należy zwrócić uwagę na odpowiednią konstrukcję i dokładne wykonanie głębokiego reperu nawiazania dla metody czujników oraz dobór odległości reperów ruchomych od otworu tłocznego. Dla badań głębszych stref skały należy przewidzieć repery pogłębiane w trakcie realizacji doświadczeń. Uzupełnienie badań w zespołach mogą stanowić próby na pojedynczych otworach, przy rejestracji odkształceń rury obsadowej, spełniającej rolę reperu ruchomego.

3) Przeprowadzone badania wykazały wyraźny wpływ upadu warstw na wielkość ciśnień dopuszczalnych. Przy stromym upadzie ciśnienia cementacji mogą być w głębszych strefach skały (poniżej 20 m) podwyższone nawet dwukrotnie w stosunku do obecnie stosowanych w skałach warstwowych, co pozwoli na uzyskanie znacznych oszczędności przy realizacji przesłon uszczelniających (do 20%). Do wstępnych przeliczeń ciśnień dopuszczalnych cementacji w otworach pierwszej kolejności i przy cementacji bez przykrycia budowlami betonowymi oraz w przypadku warunków geologicznych nie odbiegających w sposób istotny od występujących w Wiśle i Niedzicy mogą być stosowane wzory Zaruby, uzależniające wielkości ciśnień od kąta upadu warstw (12).

SUMMARY

The paper deals with the examinations of admissible pressure of cementation made within the area of the Polish Carpathians in the complexes of sandstones and conglomerates, as well as in the limestones intercalated with shales, where dips of beds are about 25 and 80°. In both cases the complexes analysed show not too great degree of tectonical disturbances and only low unit absorbing capacity amounting to 0.1 l/min/m. The research works were made in groups of four bore holes at a depth from 6 to 28 m, under the top of the rock basement (Figs. 2—4). Into one of the experimental bore holes water or cement grout was pressed within zones from 2 to 5 metres. In the remaining bore holes deformation of rock massif due to pressures was observed using various method of precise levelling and measuring probes.

As criteria of excess pressure for a given depth zone were taken irreversible deformations of rock massif and an intense increase in unit absorbing capacity. The results of the researches within the experimental bore holes have been proved during tentative cementation. The researches have demonstrated that both criteria introduced are of fundamental importance for the proper interpretation of the results obtained. In addition, these researches prove also that Q. Zaruba's empirical formulae are here useful as well, mainly in preliminary calculations of the values of admissible pressures for the geological conditions resembling those found to occur within the basement rocks of the experimental areas.

РЕЗЮМЕ

В статье описываются испытания допустимых нагрузок цементации, проведенные в Карпатах среди песчаников, конгломератов и известняков с прослоями сланцев, залегающих с падением 25° и 80°. В obu случаях породы не были в значительной степени тектонически нарушены и характеризовались небольшим удельным поглощением до 0,1 л/мин/пог.м. Исследования проводились в кустах по четыре скважины в интервале глубины 6—28 м от поверхности коренных пород (фиг. 2—4). В одну из скважин накачивалась вода или цементный раствор, в остальных находились реперы для наблюдений деформации пород под влиянием давления методами точного нивелирования и индикаторов.

В качестве критерия чрезмерных давлений для данного интервала глубины было принято появление устойчивых деформаций пород и сильное увеличение удельной поглощаемости. Результаты полученные во время кустовых испытаний контролировались в процессе опытной цементации. Как показали исследования, существенную роль в правильной интерпретации результатов играет одновременно использование obu критериев. Кроме того была доказана пригодность эмпирических формул К. Зарубы для предварительных расчетов допустимых давлений в геологических условиях сходных с условиями опытных участков.

1. Adamowicz A. N., Kołtunow D. W. — Cementacja osnowanij gidrosoorużenij. Izd. Energija, Moskwa, 1964.
2. Cambefort N. — Injection des Sols. Eyrolles, Paryż, 1964.
3. Głęb W., Jawański W. — Zastosowanie pomiarów odkształceń masywów skalnych w badaniach geologiczno-inżynierskich. Mat. konf. nauk. pt.: „Pomiary odkształceń obiektów przemysłowych”. Katowice, listopad 1965.
4. Głęb W., Jawański W., Thiel K. — Badania nad uszczelnianiem podłoża zapory wodnej zaczynami cementowo-łkowymi. Prace IO MB, nr 524, Warszawa, 1965.
5. Jawański W. — Warunki porównywalności wyników badań wodochłonności skał. Prz. geol. 1965, nr 2.
6. Kratochvil S. — Vodni Nadrze a Přebrady. ČSAV. Praha, 1961.
7. Praca zbiorowa — Cement Grouting. Proc. of ASCE, Vol. 88, SM2, 1962.
8. Těchniczeskije usłowija na proizwodstvo gidrotěchniczeskich robot. Cementacija skalnych porod, TU 31—54, Gosenergo-izdat. Moskwa, 1955.
9. Trupak N. N. — Cementacija trieszczinowatych porod. Gosenergo izdat, Moskwa, 1955.
10. Verfel J. — Injektionsschleier in Felsgesteinen. Z. angewandte Geol. 1963, nr 5.
11. Zaruba Q., Rybař J. — Zkušēnosti z injektovanim tesnici člony v porušených břidlicích. Inž. Stavby, 1957, nr 4.
12. Zaruba Q. — Wasserdurchlässigkeitprüfungen und Probeinjektionen für den Talsperrenbau. Z. angewandte Geol. 1962, nr 3.