

CEMENTACJA SKRASOWIAŁEGO PODŁOŻA BUDOWLANEGO

Budownictwo wszelkiego typu napotyka na obszarach krasowych na obrzymie trudności spowodowane dużym niebezpieczeństwem uszkodzenia budowli, które powstają w wyniku załamania się podłoża budowlanego pod dodatkowym obciążeniem. Zapadanie się wewnętrznego systemu krasowego powoduje gwałtowne osiadanie podłoża. Koszty technicznej poprawy warunków posadawienia są na obszarach krasowych najczęściej tak duże, iż przekraczają koszty budowy.

Duże trudności i ryzyko, znaczny koszt petryfikacji podłoża budowlanego oraz przykre doświadczenia sprawiły, że obszary krasowe zaliczane są do najgorszej kategorii terenów budowlanych i z tego względu oceniane są jako nienadające się pod zabudowę. Ta opinia spowodowała, że przy projektowaniu przestrzennym skrzętnie się unika terenów krasowych. Z tego powodu doświadczenie w tej dziedzinie jest bardzo skąpe, a w literaturze mało spotykane.

W opracowaniu niniejszym chcę podać przykład racjonalnego i uzasadnionego pod względem ekonomicznym i geologicznym zagospodarowania obszarów krasowych. Przy czym chciałbym zaznaczyć, że w konkretnym wypadku koszt geologicznych badań inżynierskich wraz z petryfikacją nie przekroczył 1,5% kosztów budowy.

W artykule tym potraktuję nieco szerzej problemy geologiczne, dla lepszego udokumentowania możliwości budownictwa na krasie w niektórych ściśle określonych warunkach. Zbytne uogólnianie zagadnień geologicznych prowadzić by mogło do niesłusznych wniosków, że niebezpieczeństwo występowania form krasowych zostało w literaturze przecenione. Wnioski takie mogłyby spowodować przykre konsekwencje. Niedoceniając niebezpieczeństwa występowania w podłożu budowlanym form krasowych zmusza geologa zbyt często do walki o wprowadzenie odpowiednich zabiegów wzmacniających, których zastosowanie uzasadniają dla budowniczego dopiero awarie.

Z drugiej strony przez szersze potraktowanie geologicznego opisu zjawisk krasowych chciałbym wskazać na trudności w samych badaniach, spowodowanych pozorną nieregularnością w przestrzennym roz-

mieszczeniu form krasowych i zorientować czytelników w stosunkowo dużym nakładzie pracy przy małych wynikach tych badań.

Jeżeli w tym krótkim opracowaniu uda mi się przekonać czytelników, że obszary krasowe wymagają specjalnych, długotrwałych i żmudnych badań, wskazać na faktyczne, nieprzecenione niebezpieczeństwo dla budowli i przekonać o możliwości stosowania racjonalnej, skutecznej i oszczędnej metody cementacji, wówczas cel tego artykułu będzie osiągnięty.

OPIS GEOLOGICZNY

OPIS FORM KRASOWYCH I ICH GENEZA

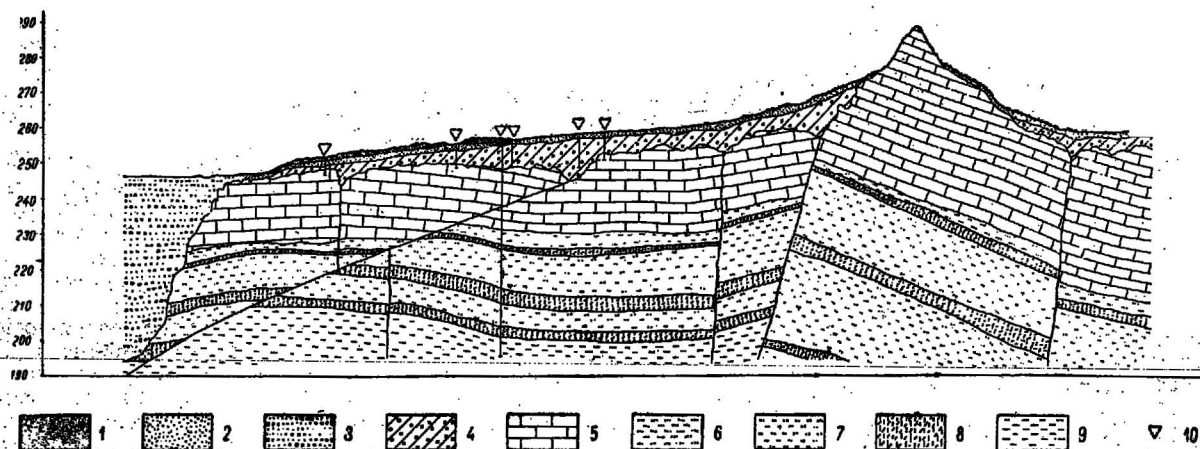
Geologiczne badania inżynierskie, które opisane zostaną poniżej, wykonane zostały na obszarze występowania kompleksu wapieni objętych procesami krasowymi o stosunkowo dużym natężeniu.

Pod względem geomorfologicznym teren przedstawia lekko sfałowaną płaszczyznę z występującymi tu i ówdzie ostrymi wzniesieniami wapieni (ryc. 1).

Formy krasowe występujące na omawianym obszarze możemy podzielić na trzy grupy.

I. Formy krasowe powierzchniowe. Występują one przede wszystkim w sąsiedztwie terenu, na którym wykonano iniekcje cementowe. Rozwinęły się one jako powierzchniowe nieckowate zagłębienia dochodzące do 35 m średnicy. Leje te łączą się nieraz w ciąg, tworząc głęboką bezodpływową dolinę o stromych i nieregularnych zboczach (ryc. 2). Do tej grupy zaliczyć należy również źródła krasowe. Formy krasowe grupy pierwszej rozwijają się współcześnie w pokrywę glin zwietrzelinowych leżących na wapieniu.

II. Formy krasowe w stropie wapienia. Strop wapienia wykazuje wyjątkowo duże zróżnicowanie. Powierzchnia wapienia zryta jest głębokimi, bardzo stromymi, miejscami o pionowych ścianach dolinkami. Dolinki te powstały z łączenia się lejów krasowych w nieregularny ciąg w strefach uskokowych. W stropie wapienia obserwować można również głą-



Ryc. 1 — 1) piaski wydymowe, 2) piaski rzeczno-lodowcowe, 3) piaski rzeczne, 4) gliny zwalowe i zwietrzelinowe, 5) wapień — m alm, 6) piaskowiec glaukonitowy — dogger, 7) piaskowiec wapnisty szary — dogger, 8) margle piaszczyste ciemnoszare — dogger, 9) iły piaszczyste czarne — dogger, 10) otwory wiertnicze.



Ryc. 2

bokie leje krasowe (zamarłe ponory) i ostre iglice wapienne. Głębokość dolinek i lejów krasowych dochodzi do 30 m, a szerokość rzadko przekracza 20 m. Bogata rzeźba stropu wapieni jest na powierzchni terenu niewidoczna. Formy krasowe rozwinięte w stropie wapienia są przykryte żółtymi glinami zwietrzelinowymi przechodzącymi w północnym obszarze w czerwone (terra rossa). Pod powierzchnią terenu na glinach zwietrzelinowych leżą 2-metrową warstwą piaski pochodzące z przemycia glin zwałowych i zwietrzelinowych.

Jak z tego krótkiego opisu wynika, formy krasowe w stropie wapieni zaliczyć należy według klasyfikacji Cvijiča do tzw. organów krasowych (Geologische Orgeln, gravel pipes).

Wiadomości o wyjątkowo zróżnicowanym stropie wapieni dostarczyły w pierwszym etapie badań wyniki badań sejsmicznych i elektrooporowych.

Obecnie wykonywane badania elektrooporowe prowadzą do wniosku, że występowanie organów krasowych obejmuje obszar co najmniej kilkuset kilometrów kwadratowych.

III. Trzecia grupa obejmuje formy krasowe rozwinięte w wapieniu, jak: jaskinie, kawerny, korytarze, krasowo poszerzone fugi, szczeliny itd. (ryc. 3).

Przeprowadzone badania geologiczne pozwalają wyciągnąć następujące wnioski.

Formy krasowe na omawianym terenie powstały w kilku cyklach. Ostro od siebie odgraniczone są cykle: a) starszy — kredowy i b) młodszy — trzeciorzędowy.

a) Cykl krasowy starszy rozwinął się w wapieniach w znacznie mniejszym stopniu spękanych niż obecnie. Starsze formy krasowe powstały przede wszystkim w miejscach istniejących fug międzywarstwowych i stosunkowo nielicznych spękaniach. Starsze formy krasowe są rzadkie, lecz duże. Oczywiście jest, że woda przy mniejszej ilości szczelin i przy większej prędkości szybciej przechodzi w ruch turbulentny, a tym samym intensywniej ługuje wapienie. Jaskinie tego cyklu dochodzą do 30 m wysokości i kilkudziesięciu metrów długości. Połączenia między jaskiniami są raczej rzadkie, ale korytarze są często tak duże, że człowiek może nimi przechodzić. Jak wynika z analizy pionowego i poziomego rozmieszczenia jaskiń starszego cyklu, poziom wody krasowej (stagnacyjny), poniżej którego ruch wody praktycznie nie istnieje, leżał kilkadziesiąt metrów wyżej niż w następnym cyklu trzeciorzędowym. Dokładnej różnicy tych po-

ziomów nie można podać, gdyż obecnie wapienię po-przerzucany jest licznymi uskokami, które utrudniają wyciągnięcie dokładnych wniosków. Znamienny jest również fakt, że duże formy krasowe (jaskinie) nie występują na obszarach, na których miąższość wapienia jest mała.

Po starszym, najdłuższym czasowo i najbardziej intensywnym cyklu krasowym nastąpiło zamarcie form krasowych. Szczeliny, korytarze i jaskinie zostały pokryte kalcytem lub zupełnie nim wypełnione, a niektóre odcinki zostały częściowo zasmarowane glinami. Okres „zasmarowywania“ najstarszego cyklu trwał stosunkowo długo, lecz nie został zakończony.

b) W trzeciorzędzie, szczególnie w eocenie zapanały znowu dogodny warunki zarówno klimatyczne, jak i paleogeograficzne dla rozwoju form krasowych. Poziom wody gruntowej cyklu trzeciorzędowego ustalił się o kilkadziesiąt metrów niżej niż w cyklu starszym. Procesy krasowe w tym cyklu wykorzystwały częściowo starszy system spękani, mianowicie tę część, która nie została całkowicie „zasmarowana“. Młodszy cykl charakteryzuje się przede wszystkim tym, że procesy krasowe działają bardzo intensywnie w licznych strefach uskokowych i spękaniach, co potwierdza znaczny materiał wiertniczy i odkrywkowy. Na ten okres przypadają intensywne ruchy tektoniczne, które na- dały omawianemu obszarowi charakterystyczną tektonikę zrębową.

Formy krasowe tego cyklu są odmienne od form cyklu najstarszego. W młodszy cykl powstał skomplikowany labirynt drobnych i licznych korytarzy przez poszerzenie szczelin, szczególnie na ich skrzyżowaniu. Większe formy krasowe powstały w strefach uskokowych. Kawerny są tu bardzo rzadkie i żadna z zaobserwowanych nie przekroczyła średnicy 3 m. Formy krasowe tego cyklu rzadko i w nieznacznym stopniu są pokryte kalcytem.

Częściowe zamarcie zjawisk krasowych nastąpiło także w pliocenie. Spowodowane ono było niekorzystnymi zmianami klimatycznymi i podniesieniem się bazy erozyjnej na północy. Najprawdopodobniej procesy krasowe zostały tylko zahamowane. Działalność krasowa była słaba, ale lokalnie występowała, gdyż nie obserwuje się zasadniczych różnic w formach krasowych młodszych cykli.

Wnioski ten potwierdzają obserwacje przebiegu współczesnych zjawisk krasowych.

Odmłodzenie form krasowych nastąpiło również w plejstocenie. Działalność ta miała ograniczony charakter przypowierzchniowy. Wody roztopowe działały płytko i wskutek silnej erozji przypowierzchniowej większość form, szczególnie na wyniesieniach, została zdarta. Tylko w nielicznych punktach obserwować można akumulaty pochodzenia lodowcowego.

Obecnie procesy krasowe działają nadal. Dowodów dostarcza uboga sieć hydrograficzna na tym terenie, charakterystyczne formy lejkowe z kominami piaszczysto-pylastymi w glinach, powierzchniowe leje krasowe, źródła itd.

Z zebranych faktów przedstawionych w skrócie wynika, że wyraźnie odgraniczony jest tylko cykl najstarszy. W cyklach młodszych zmiany paleogeograficzne, klimatyczne i hydrologiczne nie pozwalały na całkowite zakończenie cyklu, tak że możemy mówić raczej o okresach zahamowania i intensywnego rozwoju.

Typ form krasowych zależy również od litologicznego charakteru skały. W skalistych wapieniach grubolawicowych lub tzw. masowych formy krasowe są rzadkie, lecz większych rozmiarów. W wapieniach pływowych ze względu na charakter licznych i krzyżujących się spękani formy krasowe są częste i drobne.

Dla geologicznych rozważań inżynierskich zasadnicze znaczenie ma cykl najstarszy. Formy krasowe tego cyklu ze względu na swą wielkość i bliskość powierzchni przedstawiają największe niebezpieczeństwo dla budownictwa przemysłowego.

FORMY KRASOWE NA TERENIE OBJĘTYM CEMENTACJĄ

Z kolei podam w streszczeniu wyniki geologicznych badań inżynierskich dotyczących obszaru mniejszego (o powierzchni kilku km²), na którym wykonano zastrzyki cementowe.

Teren ten leży w lekko sfalowanym zagłębieniu erozyjnym. Z trzech stron okalają go płaskie wzgórza zbudowane z wapieni skalistych i płytowych. Formy krasowe najstarszego cyklu występują w szczątkach na kulminacjach tych wzgórz. System krasowy na obszarze objętym cementacją należy do młodszych cykli. Jak tego wykazały setki wierceń, formy krasowe są bardzo liczne, lecz niewielkich rozmiarów, najczęściej występują krasowo poszerzone fugi i spękania dochodzące do 20 cm szerokości (ryc. 3). Ka-



Ryc. 3

werny występują rzadko. Dotychczas natrafiono na około 8 kawern, które nie przekraczały średnicy 3 m.

WSPÓLCZESNE PROCESY KRASOWE

Procesy krasowe na omawianym terenie działają także współcześnie. Poziom wody krasowej występuje na głębokości 6 — 18 m poniżej terenu. Wody opadowe są odprowadzane bezpośrednio z powierzchni do systemu krasowego. Wody te z jednej strony wykorzystują system krasowy starszy, z drugiej strony ługując wapieni tworzą system nowy — współczesny. Hamująco na rozwój współczesnych zjawisk krasowych wpływa:

- a) stosunkowo duża miąższość glin zwietrzelinowych (średnia miąższość 6 m). Wody opadowe docierają do wapienia przez kominy piaszczystopylaste w tych glinach,
- b) mała miąższość wapienia (od 15 do 60 m),
- c) wysoka lokalna baza erozyjna,
- d) mały obszar zlewiska wód krasowych.

STOPIEŃ KOMUNIKACJI FORM KRASOWYCH

Łączność między formami krasowymi jest zmienna zarówno w przekroju pionowym, jak i poziomym. Ze stopniem komunikowania się form krasowych wiąże się ściśle stopień ich zasmarowania. W stropowych partiach wapienia system form krasowych jest w dużym stopniu wypełniony glinami zwietrzelinowymi. Szacunkowo można określić, że 60 — 70% form krasowych w partii stropowej wapienia uległo zasmarowaniu. Pozostałe 30 — 40% form „żywych” zezwala na całkowite odprowadzenie powierzchniowych wód do systemu krasowego. W obecnych warunkach klimatycznych wytworzył się stan równowagi między ilością przenikających do poziomu wody krasowej wód powierzchniowych a sumą przekrojów w czynnym systemie krasowym w stropie wapienia. Wynika stąd, że nie wszystkie formy krasowe wzajemnie się komunikują. W tej części systemu krasowego, która obec-

nie nie jest czynna, komunikacja jest często przerwana. Prawie wszystkie przewężenia w systemie martwym są wypełnione glinami, które tworzą korki nie zezwalające na wzajemną komunikację wodną. Szersze odcinki systemu, a zwłaszcza kawerny i mniejsze jażskinie nie są całkowicie wypełnione glinami, gdyż na to nie zezwoliło wytworzenie się wspomnianych korków w przewężeniach.

Inne stosunki komunikowania się form krasowych panują w około 5-metrowej strefie w pobliżu poziomu wody krasowej. W strefie tej wody opadowe przechodzą z ruchu pionowego w poziomy w kierunku źródeł krasowych. Ilość wody przepływającej w tej strefie jest znacznie większa, gdyż w niej następuje kumulacja wód z większych obszarów. Częste zmiany poziomu wody krasowej i większa jej ilość sprawiają, że starszy system krasowy został tu w znacznie wyższym stopniu odmłodzony niż w strefie przystropowej. Należy przyjąć, że w poziomie tym system krasowy jest czynny w około 70%, a współczesne procesy krasowe działają najintensywniej.

Powyzsze uwagi dotyczące stopnia komunikowania się form krasowych należy odnieść do przepływu wody tymi formami.

Przy cementacji używa się mlecza cementowego o znacznej lepkości (stosunek cementu do wody 1 : 0,4), dlatego też, jak to dalej zobaczymy, stopień komunikowania się form krasowych przy zastosowaniu tak gęstego mlecza znacznie maleje.

Stopień łączności kawern w płaszczyźnie poziomej wykazuje również duże zróżnicowanie. Dotychczasowe wyniki cementacji dowodzą, że środkiem terenu objętego cementacją przebiega pas silnego skrasowienia. Pas ten w pewnym miejscu rozwidła się tworząc nieregularną literę y. Ogólny kierunek strefy silnego skrasowienia można określić jako SW — NE.

Poza wymienioną strefą istnieją jeszcze nieregularnie rozmieszczone ogniska o silnym skrasowieniu.

W tym miejscu należy podkreślić, że przestrzenne rozmieszczenie form krasowych jest pozornie nieregularne i z największą trudnością można ustalić pewne generalne strefy dużego nasilenia zjawisk krasowych. Dokładne zlokalizowanie tych stref wymagałoby takiego zagęszczenia badań, że opłacalność ich byłaby wątpliwa. Stwierdzić można jedno: największa koncentracja form krasowych występuje w strefach uskokuowych.

TEKTONIKA

Na opisywanym obszarze występuje typowa tektonika nieciągła, uskokuowa. Wielkości zrzutów są zmienne w szerokich granicach i wynoszą od kilku do 30 metrów. Bardzo często obserwować można uskoki schodowe. W tym ostatnim przypadku możemy mówić o zespole uskokuów. Strefy te są szczególnie podatne dla rozwoju form krasowych.

Na omawianym terenie wykonano około 1500 pomiarów spękań ciosowych i uskokuów. Ogólnie należy stwierdzić, że spękania ciosowe przebiegają w dwu zasadniczych kierunkach:

1. Kierunki pierwszego zespołu spękań wahają się w interwale od 40° do 65°. Pochył tych spękań zawarty jest w granicach od 80° na SE do 80° na NW.

2. W interwale od 125° do 150° wahają się kierunki drugiego zespołu, prostopadłego do poprzedniego.

Liczne uskoki wykazują na ogół kierunki zgodne z kierunkami spękań ciosowych. Pewien nieliczny odsetek uskokuów ma kierunki różne. Nachylenie płaszczyzn uskokuowych podobnie jak spękań ciosowych jest prawie pionowe. Należy tu nadmienić, że w wapieniu sporadycznie spotykamy kawerny i szerokie szczeliny pierwotne — tektoniczne, nie mające nic wspólnego z procesami krasowymi. Kawerny pierwotne łatwo można odróżnić od kawern wtórnych — krasowych: pierwsze nie posiadają na ścianach znamion ługowania przez wodę, powierzchni ścian są nierówne i nie wykazują zmian chemicznych.

Z powyższego opisu możemy wyciągnąć następujące wnioski geologiczno-inżynierskie:

1. Na obszarze o powierzchni około 5 km², na którym wykonano iniekcje cementowe, występują wszystkie trzy grupy form krasowych.

2. Formy krasowe powierzchniowe są zatarte. Przykryte są one piaskami przemytych glin zwałowych i lokalnie piaskami wydmywnymi. Istnienie powierzchniowych form krasowych zdradzają nam zagłębienia w stropie glin zwietrzelinowych i pylasto-piaszczyste korniny w tych glinach, którymi odprowadzona zostaje woda atmosferyczna. W warunkach naturalnych istnieje równowaga między przekrojem korninów, składem uziarnienia a ilością przepływającej wody. Upłynięcie podłoża następuje jedynie w wyniku zwiększonego przepływu wody spowodowanego nieuszczelnnością sztucznych zbiorników wodnych. Upłynięcie podłoża w konkretnym wypadku doprowadziło do osiadania powierzchni terenu do 80 cm.

3. Strop wapienia na omawianym terenie wykształcony jest w postaci „organów krasowych”. Deniwelacje stropu wapienia są duże, dochodzą do 30 m na odcinku 5 m. Wynikają stąd duże trudności dla budownictwa, spowodowane znacznymi różnicami osiadań glin zwietrzelinowych i wapienia.

przewodem z pompą płuczkową, którą wywiera się ciśnienie na powierzchnię mleczka cementowego pod przybitką wodną. Cementację przeprowadza się w tych poziomach, w których stwierdzono ucieczkę płuczki.

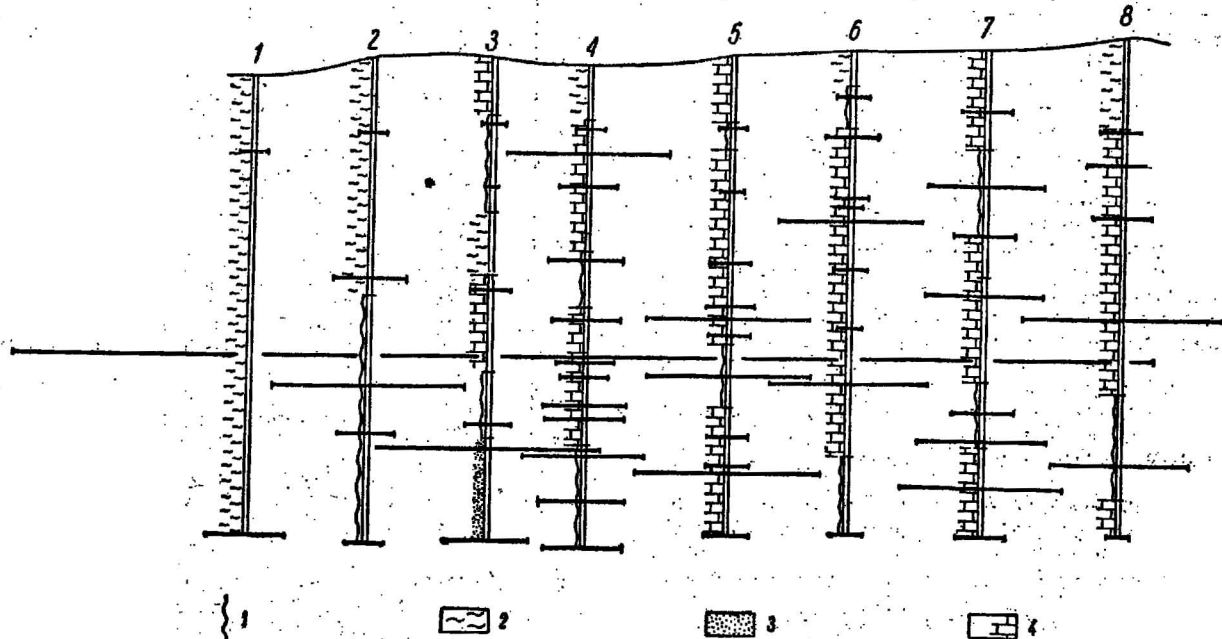
Mleczko cementowe miesza się w kolebie ręcznie, łopatą. Sposób ten nie zezwala na całkowite wymieszanie, wskutek czego do otworu wlewane zostają wraz z mleczkiem grudki nierozrobionego cementu dochodzące do wielkości pięści.

Do cementacji używa się mleczka o stosunku cementu do wody 1 : 0,4.

WYNIKI STOSOWANEJ METODY

Dotychczas osiągnięte wyniki na otworach cementacyjnych wyglądają następująco.

Chłonność mleczka cementowego w otworach zastrzykowych jest bardzo nierówna. Przy głębokości otworu od 15 do 25 m wynosi ona od 400 do 30 000 kg mleczka cementowego, zatem na jeden metr bieżący otworu 20 — 1500 kg. Nieregularność w chłonności mleczka cementowego mimo dużej ilości wierceń nie pozwala na przewidywanie stopnia chłonności otworów wiertniczych w sąsiedztwie. Dla całego terenu można wydzielić jednak pewne strefy, w których chłonność



Ryc. 4 — 1) Strata rdzenia, 2) glina zwietrzelinowa, 3) piasek, 4) wapień

4. Formy krasowe wewnątrz wapienia należą do młodszych cykli krasowych. Jak już opisano, młodsze cykle wyróżniają się licznymi, lecz stosunkowo drobnymi formami krasowymi. Na terenie, na którym wykonano iniekcje cementowe, nie należy spodziewać się jaskiń.

Względy powyższe wskazują na możliwość posadowienia obiektów budowlanych przy zastosowaniu odpowiednich środków ostrożności, do których zaliczyć należy między innymi cementację.

CEMENTACJA

OBCENIE STOSOWANA METODA

Na opisanym w poprzednich rozdziałach terenie, wykonano kilkaset zastrzyków cementowych bardzo prymitywną metodą. Polega ona na tym, że do otworu wiertniczego, w którym osadzono uprzednio konduktor, wlewa się wiadrami mleczko cementowe. Po wypełnieniu wszystkich form krasowych w pobliżu otworu, na konduktor nakręca się głowicę połączoną

z cementu jest wysoka. Rzeczą charakterystyczną jest fakt, że w strefach tych przypadają również wysokie wskaźniki stopnia zróżnicowania stropu wapienia. Dla lepszej orientacji podaję zestawienie ośmiu kolejnych otworów cementacyjnych (ryc. 4).

Na ryc. 4 chłonność otworu cementacyjnego przedstawiono za pomocą odcinków umieszczonych w poziomie ucieczki płuczki. Długość odcinka mierzona z obu stron otworu odpowiada ilości mleczka cementowego, przy czym 1 mm odpowiada 50 kg mleczka cementowego.

Ponieważ cementacja otworu odbywa się każdorazowo po zaruwaniu ucieczki płuczki, należy przyjąć, że mleczko cementowe dostaje się w grunt budowlany na odcinku cementacji do poziomu następnej ucieczki płuczki. W praktyce jednak znaczna większość mleczka cementowego wypełnia system krasowy przez najszersze przewody, które zostały nawiercone w momencie ucieczki płuczki, i fakt ten zdaje się w dostatecznej mierze usprawiedliwiać to, że wykres chłonności mleczka cementowego przedstawiono w formie odcinków w poziomach ucieczki płuczki.

Na marginesie należy dodać, że istnieją inne sposoby graficznego przedstawiania chłonności podłoża. Między innymi istnieją sposoby przedstawiania chłonności otworów za pomocą prostokątów, kół lub wykresów obok otworu. Wydaje się jednak, że nie odzwierciedlałyby one w dostatecznej mierze przebiegu cementacji.

Wiercenia wykonane są w wykopie 6 m głębokości pod segmenty fundamentów między dylatacjami. Już z tego małego odcinka widać bogate urzeźbienie stropu wapienia. Otwór nr 1 zagłębił się do 20 m w lej krasowy wypełniony glinami zwietrzelinowymi. Otwór nr 2 od 10 mb nie dostarcza nam informacji o zachowaniu się stropu wapienia z powodu straty rdzenia.

Liczne straty rdzenia należy tłumaczyć silnym spekaniem i skrasowaniem wapieni oraz brakiem odpowiedniego sprzętu wierniczego. Na marginesie należy zauważyć, że przeciętny urobek rdzenia wynosi 5%.

Wapień w otworze nr 3, 5 i 7 podchodzi pod samą powierzchnię. Gliny w otworach nr 4, 6 i 8 wypełniają ścięte dnem wykopu zagłębienie krasowe.

Pierwsza cementacja ma na celu osadzenie konduktora. Osadzenie konduktora odbywa się w miarę możliwości pół metra w skałę. Na osadzenie konduktora zużywa się przeważnie 200 — 300 kg mlecza cementowego, w niektórych nielicznych wypadkach zużyto 700 — 1000 kg mlecza cementowego. Liczne obserwacje wskazują, że na kontakcie glin zwietrzelinowych i wapienia istnieją puste przestrzenie. Są one o tyle groźne dla budowli, że występują płytko pod stopami fundamentów. W ten sposób pierwsza cementacja prócz osadzenia konduktora ma również na celu zapelnienie „kawern” między glinami a wapieniem.

Jak wynika z załączonego profilu, nie da się również wydzielić wyraźnego poziomu o dużej chłonności. Składają się na to dwie przyczyny. Na obszarach o tak częstych uskokiach nie należy się spodziewać poziomej strefowości. W obszarach krasowych prześledzenie poziomych stref na małych przestrzeniach jest bardzo trudne, a najczęściej niemożliwe.

Jednym z bardzo ważnych sposobów kontroli cementacji jest analiza wykresów jej przebiegu.

Bernatzik podaje cztery charakterystyczne formy wykresów:

- Ciśnienie wzrasta powoli i jednostajnie, aż do wydolności pompy. Taki przebieg wykresu oznacza, że w podłożu istnieją puste przestrzenie, które zostają wypełnione mleczeniem cementowym. Jest to wypadek „normalny”.
- Po początkowym niedużym wzroście ciśnienie opada, co dowodzi, że mleczenie cementowe tłoczne zostaje w poziomą fugę, której strop zostaje jednocześnie podnoszony. Ciśnienie pozostające w otworze po zakończonym zabiegu potwierdza ten stan rzeczy.
- Po początkowym silnym wzroście ciśnienie nagle opada i następnie już wolniej i jednostajniej wzrasta. W tym wypadku struktura gruntu została zburzona, powstały szczeliny, które następnie wypełnia mleczenie cementowe.
- Ostatni wykres obrazuje wypadek, w którym po silnym początkowym wzroście ciśnienie raptownie spada i przechodzi następnie w prostą łagodnie opadającą. Początkowy wzrost ciśnienia powoduje zaburzenie struktury podłoża, tworzy się pozioma szczelina, której strop zostaje podniesiony.

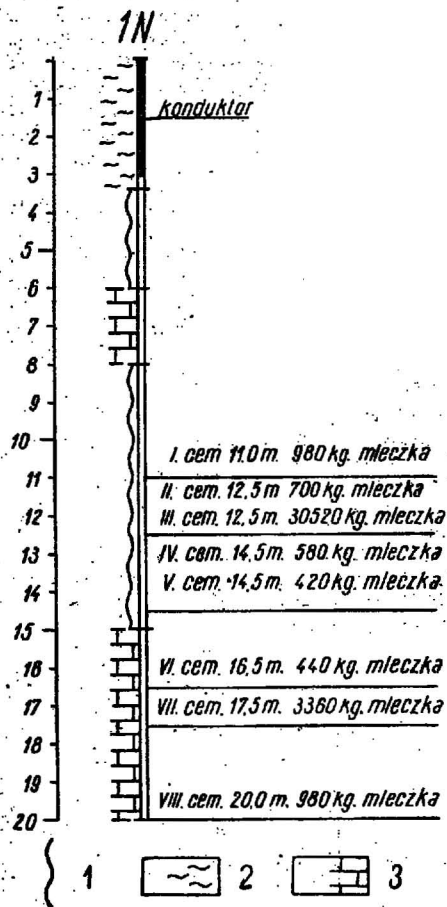
W terenie dla każdej cementacji wykonuje się wykresy z pomiarami co minutę. Tak rzadkie obserwacje nie pozwalają na wyciągnięcie wniosków odnośnie do prawidłowości przebiegu cementacji.

Materiału orientacyjnego dostarczają jednak wiercenia oznaczone jako naukowo-badawcze, wykonane pod nadzorem Instytutu Geologicznego w roku 1953. Wiercenia te zostały wykonane w narożach trójkąta równobocznego o boku długości 5 m. Przez je-

den otwór a między dwoma pozostałymi projektowano wykonanie rowu odkrywkowego do głębokości 10 m celem sprawdzenia efektu cementacji. Niestety, z powodu zmiany lokalizacji jednego z obiektów wykonania rowu odkrywkowego musiano zamiechać, by nie osłabić podłoża.

Dla przykładu podam przebieg cementacji jednego otworu (ryc. 5).

Konduktor został osadzony na głębokości 3,00 m.



Ryc. 5

- 1) strata rdzenia,
- 2) glina zwietrzelinowa,
- 3) wapień.

I cementacja. Po dwu dniach wiercenia zginęła płuczka na głębokości 11,00 m. Do otworu wiano w pięciu partiach 980 kg mlecza cementowego o stosunku cementu do wody 1 : 0,5 (100 kg cementu na 50 l wody). Każdorazowo wywierano pod przybitką wodną ciśnienie, które po dolaniu ostatnich 140 kg mlecza osiągnęło 11 atm. Podczas zwiercania korka cementowego zerwano rdzeniówkę, której nie udało się wydobyć.

II cementacja. Na głębokości 12,50 m stwierdzono ponowną ucieczkę płuczki. Cementację przeprowadzono w 3 etapach, wlewając w sumie 700 kg mlecza cementowego. W trzecim etapie przy 12 atmosferach ciśnienie wody zerwało wąż.

Na ryc. 6, na wykresach Ia, Ib i Ic pokazano przebieg trzech etapów cementacji. Z wykresów Ia i Ib możemy odczytać, że podczas wywierania ciśnienia za pomocą pompy płuczkowej nie wszystkie formy krasowe były wypełnione mleczeniem cementowym. Aby nie wprowadzać do podłoża wody, wywieranie ciśnienia musiano przerwać i dolać następną porcję mlecza cementowego. Wykres Ic wskazuje na wypełnienie wszystkich osiągalnych z tego poziomu form krasowych.

Wykresu Ic nie należy uważać za kompletny, gdyż brak mu końcowej fazy poziomej wskazującej na utrzymanie ciśnienia 12 atm w ciągu wymaganych 6 min., co potwierdziłoby, że wszystkie szczeliny są wypełnione.

III cementacja. Po zwierceniu następnego korka cementowego na tej samej głębokości co poprzednia (12,50 m) płuczka uciekła, przy czym rdzeniówka opadła pod własnym ciężarem o 0,5 m. Cementację wykonano w dwu etapach. W pierwszym etapie wiano 30 380 kg mlecza cementowego. Przy ciśnieniu 5 atm nastąpiło uszkodzenie pompy. Po dolaniu dalszych 140 kg mlecza cementowego i wprawieniu pompy w ruch starano się uzyskać wymagane ciśnienie 12 atm. Już przy 8 atm pękł wąż gumowy. Ten sam skutek uzyskano dwukrotnie przy ciśnieniu 10 atm. Wobec niemożności zastosowania 12 atm, ciśnienia cementację zakończono. Trzecia cementacja (druga w poziomie 12,50 m) trwała przeszło 5 dni.

IV cementacja. Po 3 dniach przy zwiercaniu korka zagwożdżono rdzeniówkę.

Podczas dalszego wiercenia na gł. 14,50 m nastąpiła czwarta ucieczka płuczki. Do otworu wiano 440 kg mlecza cementowego. Wzrastające początkowe ciśnienie przy 40 sekundach zaczynało spadać (wykres IIa). Do otworu wiano dodatkowo 70 kg mlecza cementowego. Przebieg cementacji obrazuje wykres IIb, z którego można wnioskować, że w 50 sekundzie przerwanu ulegają przeszkody, mleczo zaczyna wypełniać formy krasowe. Ten sam wypadek notujemy w 120—140 sek. Następnie dolano dalsze 70 kg mlecza cementowego. Przy ciśnieniu 5 atm zerwało wąż przy głowicy (wykres III C₁). Po naprawieniu uszkodzenia ten sam wypadek notujemy przy ciśnieniu 10 atm, (wykres III C₂). Również podczas trzeciej próby wymaganego ciśnienia 12 atm w ciągu 6 minut nie udało się osiągnąć, gdyż wąż uległ uszkodzeniu (wykres III C₃).

V cementacja. Po zwierceniu korka cementowego na głębokości 14,50 m nastąpiła druga w tym poziomie i piąta kolejna ucieczka płuczki. Cementacja

w drugim etapie przy 4 atm, ciśnienia doprowadzka do wylewu cementu na powierzchnię terenu w odległości 2,30 m od otworu (wykres III). W obu etapach do otworu wiano 420 kg mlecza cementowego.

VI cementacja. Szósta cementacja miała miejsce po stwierdzeniu ucieczki płuczki na głębokości 16,50 m.

Iniekcje przeprowadzono w 3 etapach dawkując kolejno: 350, 70, 70 kg mlecza cementowego. Wykresy tych zastrzyków są bardzo charakterystyczne. Pierwszy wykres (IVa) dowodzi, że przy ciśnieniu 2,5 atm nastąpiło poszerzenie komunikacji w systemie krasowym.

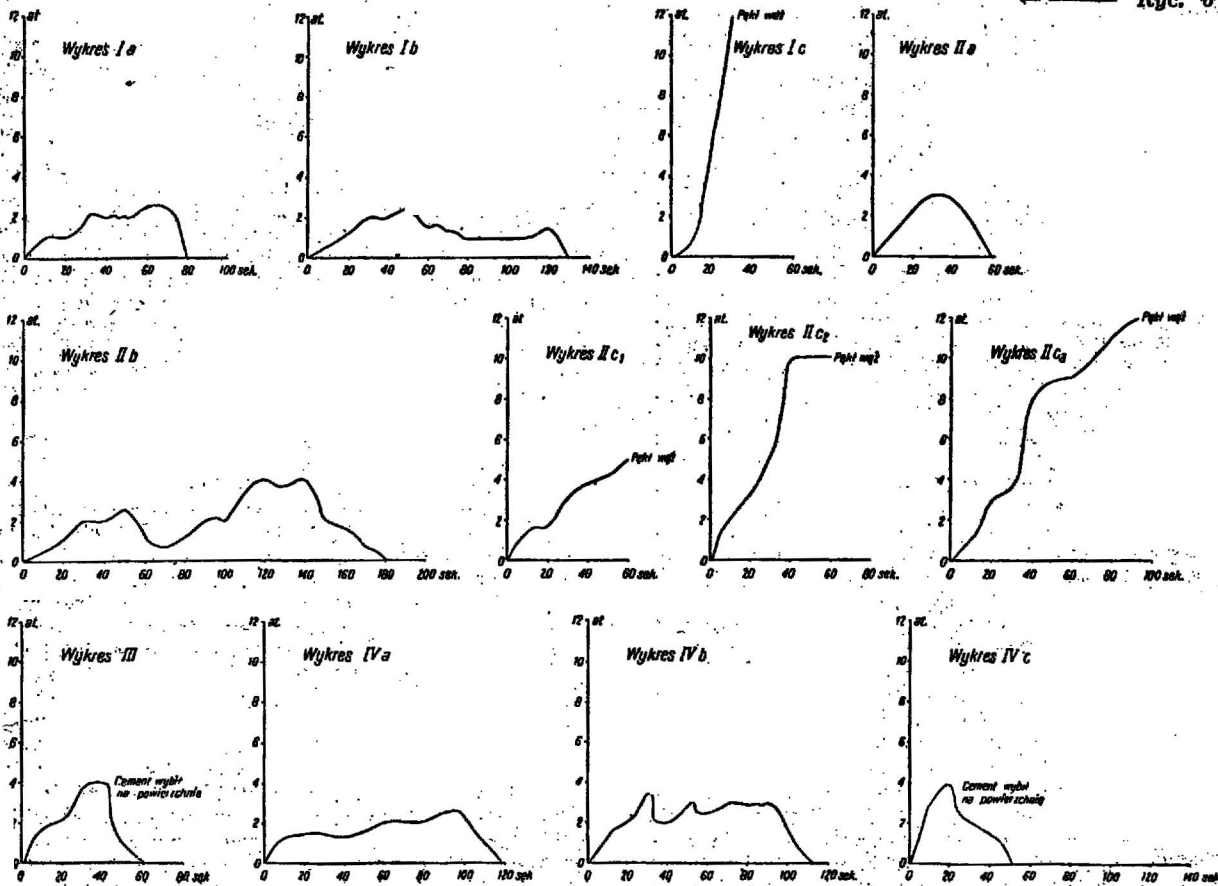
Ponieważ następny zastrzyk został wykonany po pewnym czasie, w którym ziarenka cementowe mogły osiąść i częściowo związać, na przewyżczenie oporu trzeba było użyć już ciśnienia 3 atm (IVb). W trzeciej iniekcji przy ciśnieniu 4 atm uzyskano przedarcie się cementu na powierzchnię terenu (IVc).

VII cementacja. W 4 etapach przeprowadzono również cementację na głębokości 17,50 m. Do cementacji użyto w sumie 3060 kg mlecza cementowego. Przy cementacji z powodu nieuszczelnności głowicy uzyskano tylko 6 atm ciśnienia.

Ostatnią cementację przeprowadzono na głębokości 20 m zużywając 980 kg mlecza cementowego.

Powtarzanie zabiegów cementacyjnych (wykresy Ia, Ib, IIa, IIb, IVa, IVb) wynika z konieczności doleniania mlecza cementowego do otworu, gdyż przy dłuższym okresie czasu woda tłoczona do otworu w celu wywarcia ciśnienia może zupełnie wyprzeć mleczo cementowe, znajdujące się w otworze, i wniknąć do systemu krasowego, co spowodowałoby niezabetonowanie tych odcinków form krasowych, w które wniknęła woda. Petryfikacja tego jednego otworu trwała 43 dni.

Wykresy przebiegu cementacji



Wady tej metody powodują duże ograniczenie zasięgu cementacji, co sprzeczne jest z założeniami iniekcji cementowych. Obraz przypadkowo odsłoniętego bezpośredniego sąsiedztwa otworów iniekcyjnych w kilku miejscach poucza, że cementacją objęty jest zasadniczo promień około 1,5 m. Przy niekorzystnych warunkach geologicznych taki zasięg cementacji może okazać się zbyt mały i doprowadzić do awarii.

W trakcie pisania tego artykułu udało się uzyskać tą metodą zupełnie zadowalające wyniki skontrolowane wierceniami między otworami zastrzykowymi. W żadnym wierceniu kontrolnym nie uciekła płuczka, co dowodzi, że podłoża zostało nie tylko wzmocnione, lecz nawet uszczelnione. Uzyskane rdzenie wykazywały wypełnienie mleczkiem cementowym wszystkich szczelin krasowych. Uzyskanie tych wyników przypisać należy wyjątkowo korzystnemu dla cementacji układowi systemu krasowego. Chłonność mleczka cementowego przypadająca na jeden otwór była wyrównana i mała, wahała się w granicach 800—3000 kg.

WADY STOSOWANEJ METODY CEMENTACYJNEJ

Uzyskanie w tym wypadku tak korzystnych wyników nie może przesłaniać zasadniczych wad opisanej metody cementacji, do której należy niemożliwość stosowania ciągłego zabiegu cementacji. Przerwy między jedną cementacją a drugą powodują, jak już wspomniano, osadzenie cementu, a nawet jego częściowe związanie (wykres IVa i IVb). Przykre konsekwencje, jakie mogą wynikać z niemożliwości stosowania ciągłego zabiegu iniekcji, obrazuje opisana uprzednio cementacja w poziomie I2,50 (II i III cementacji).

Do pierwszej cementacji w tym poziomie zużyto 700 kg mleczka cementowego. Przewiercenie konka cementowego spowodowało ponowną uteczkę płuczki na tej samej głębokości. Z zestawienia tych faktów wynikałoby, że cementacja nie dała kompletnie rezultatu, tym bardziej że na tej głębokości opadła pod własnym ciężarem o 0,5 m rdzeniówka, a więc istniała tu mimo cementacji kawerna. Czym to tłumaczyć?

Według wszelkiego prawdopodobieństwa paradoks ten powstał w wyniku różnicy w pomiarach głębokości. Różnice pomiarów głębokości na otworach wiertniczych dochodzą do 20 cm.

Przyjmijmy, że przy zwiercaniu konka rdzeniówką zagłębiła się o 10—20 cm poniżej głębokości poprzedniej. Fakt ten mógł być niezauważony przez nadzór, który jest niedostateczny i niezawsze przy otworze obecny. Droga łącząca szczelinę z otworem wiertniczym, którego dno leży o 10—20 cm powyżej szczeliny, mogła prowadzić przez układ krasowy nawet na odległość kilkunastu metrów. Stosowanie gęstego i nierównomiernie rozrobionego mleczka cementowego oraz przerwy w cementacji spowodowały, że cementacja nie objęła kawerny oddalonej o 10—20 cm.

Druga, już częściowo omówiona wada, jest brak odpowiedniego urządzenia zezwalającego na dokładne wymieszanie mleczka cementowego. Nierozrobione grudki cementu natrafiając na przewężenie w układzie krasowym, zatykają go i nie zezwalają tym samym na dalsze przenikanie mleczka cementowego. Drobniejsze szczelinki, które prowadzić mogą, jak to uprzednio wykazano, do kawern, zostają tuż przy otworze zatłakane, wskutek czego zasięg cementacji jest mniejszy, niż pierwotnie zakładano.

Dalszą wadą tej metody jest brak możliwości stosowania kontroli przebiegu cementacji.

Wyniki cementacji zostają również znacznie obniżone przez brak odpowiedniego sprzętu. Na przykładzie otworu I1N widzimy, że awarie w formie pęknięcia węży, uszkodzenia pompy, nieszczelności głowicy, należą do reguły. Należy się dziwić, że przy pracach cementacyjnych zakrojonych na taką skalę nie można preferować racjonalnej metody iniekcji.

Jak widzimy z powyższego opisu, cementacja do-

tychczasową metodą daje w zasadzie tylko kolumny spetryfikowanej skały. Tylko w wyjątkowych warunkach zasięgi poszczególnych otworów iniekcyjnych zążębiają się. Wyniki takiej cementacji nie są dostateczne, gdyż nie zawsze obejmują całą spetryfikowaną strefę. Zeskalenie całej przystropowej partii wapienia jest konieczne dla redukcji głębokości zastrzyków.

MOŻLIWOŚĆ REDUKCJI GŁĘBOKOŚCI ZASTRZYKÓW

Na podstawie doświadczenia górniczego możemy dojść łatwo do wniosku, że zasadniczo wystarczą całkowite spetryfikowanie 5—7 m strefy wapienia w jego stropie. Wysokość sklepienia ciśnien należy uważać 3—5 m nie uwzględniając szeregu dodatknych czynników, jak przybliżona kulistość form, kalcytowe naszkorupienia oraz naturalne stojaki powstałe z łączenia się stalaktytów i stalagmitów. Z tych względów zastosowanie takiej metody cementacji, która zezwoli na całkowite zeskalenie stropowej partii wapienia, doprowadzi z jednej strony do zwiększenia bezpieczeństwa, a z drugiej zezwoli na bardziej ekonomiczne rozwiązanie sposobów fundamentowania.

Nie posiadając w tej chwili jeszcze wyników badań wytrzymałościowych wapieni, można podać jedynie orientacyjną miąższość strefy, którą należy spetryfikować.

Przyjmując jednak dla opisanych wapieni silne pęknięcie i pewne bezpieczeństwo, za górną granicę wysokości sklepienia ciśnien należy uważać 3—5 m nie uwzględniając szeregu dodatknych czynników, jak przybliżona kulistość form, kalcytowe naszkorupienia oraz naturalne stojaki powstałe z łączenia się stalaktytów i stalagmitów. Z tych względów zastosowanie takiej metody cementacji, która zezwoli na całkowite zeskalenie stropowej partii wapienia, doprowadzi z jednej strony do zwiększenia bezpieczeństwa, a z drugiej zezwoli na bardziej ekonomiczne rozwiązanie sposobów fundamentowania.

Dla przykładu podam, że w jednym przypadku, w którym istniało wysokie prawdopodobieństwo całkowitej cementacji podłoża (otwory cementacyjne skrócono do 7 m i przyjęto stosunkowo wysokie dopuszczalne obciążenie. Rozwiązanie to przedyskutowane przez grupę rzeczoznawców pozwoliło na zaoszczędzenie 100 t stali, 500 t cementu, nie licząc robocizny, wylądowania konieczności przeprojektowania obiektu itd.

Możliwość redukcji głębokości wtęceń zastrzykowych, zwiększenie dopuszczalnych obciążeń przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa oraz wynikające stąd korzyści dla naszej gospodarki narodowej, mogące dojść w przyszłości w dziesiątki milionów złotych, stały się powodem opracowania nowej, racjonalnej i bardziej ekonomicznej metody cementacji.

Zanim przejdę do omówienia proponowanych sposobów cementacji, podam w skrócie zasadnicze wymagania, jakie stawia cementacji budownictwo na obszarach krasowych.

ZADANIA CEMENTACJI

Cele cementacji dla potrzeb budownictwa przemysłowego na obszarach krasowych są następujące:

1. Wypełnienie i usztywnienie wszystkich kawern, korytarzy i szczelin w zasięgu naprężeń wywołanych obciążeniem przez budowlę.
2. Wypełnienie pustych przestrzeni na granicy glin zwietrzelnowych i wapieni.
3. Możliwe związanie w monolit skrasowiałej skały.

Wypełnienie wszystkich kawern i szczelin natrafia na poważne trudności, gdyż system krasowy jest silnie zróżnicowany i liczne zagłębienia i przewężenia powodują silny spadek ciśnienia i prowadzą do wczesnego osadzenia cementu. Z drugiej strony, by zapobiec temu zjawisku, nie można stosować zbyt rozcieńczonego mleczka cementowego, gdyż grunt przyjmuje praktycznie nieograniczone ilości rozcieńczonego mleczka. W praktyce stosuje się proporcje cementu do wody 1:0,4 a nawet 1:0,3. Ciśnienie podczas cementacji musi być

na tyle wysokie, by wszystkie szczeliny w promieniu 3-4 m. zostały zabetonowane. Ruchliwość mlecza cementowego może zostać zwiększona przez zastosowanie zawieszin cementowo-gruntowych. Zagadnienie to zostało opracowane w ostatnich latach, przez mgr St. Piaskowskiego w Instytucie Techniki Budowlanej. Wykorzystanie wyników tej pracy w cementacji form krasowych z pewnością podniesie jakość zabiegów.

Całkowite związanie skały w monolit w praktyce również nie da się osiągnąć, gdyż część ścian form krasowych pokryta jest zmiennej grubości warstwą gliny.

Ostatnie obserwacje dowodzą jednak, że scementowaniu ulega znaczny odsetek szczelin.

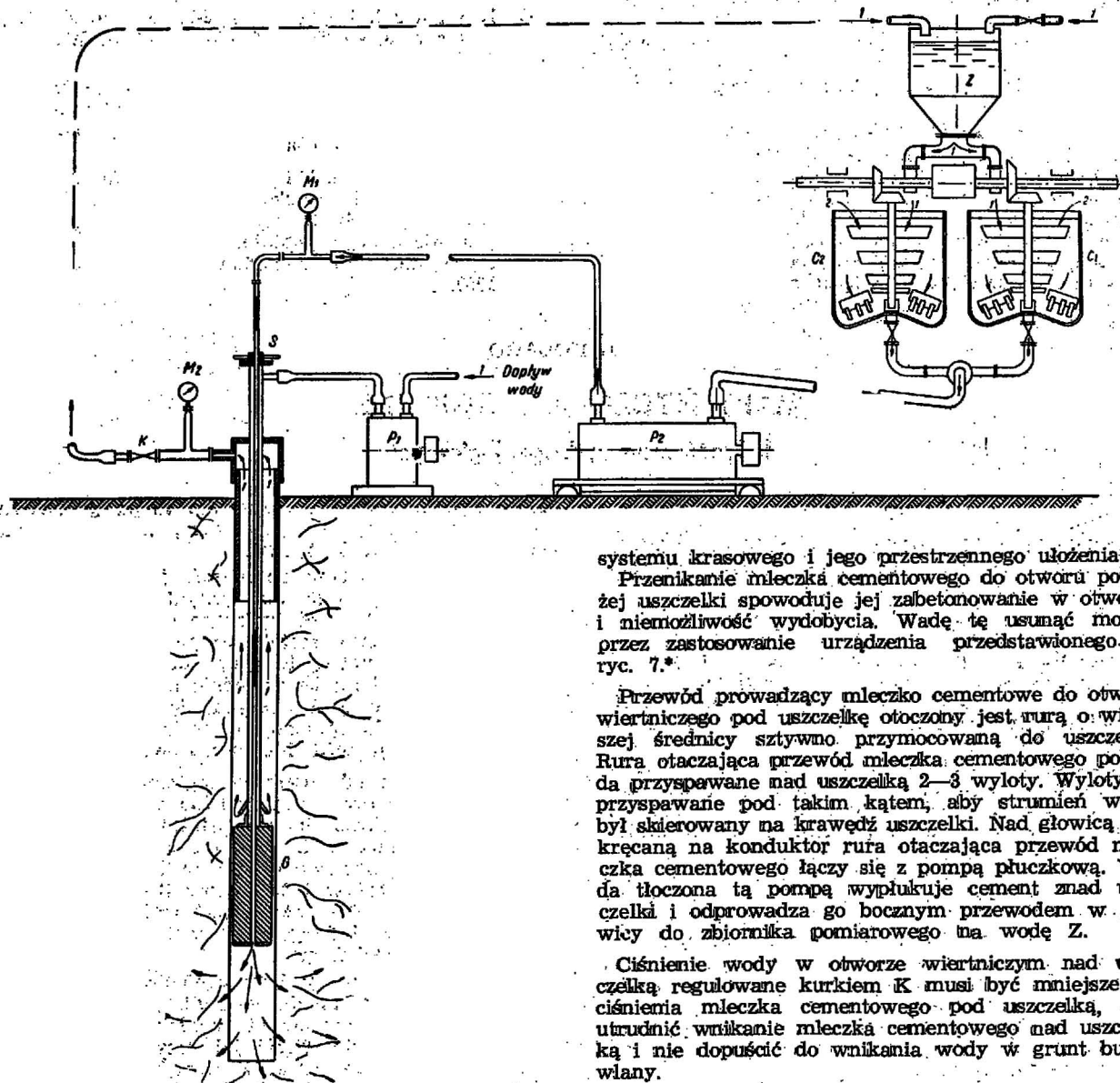
Z powyższych rozważań wynika dobitnie, że cementacja na obszarach krasowych musi być zgodna w ogólnym zarysie z klasycznymi wymaganiami. Konieczna jest przede wszystkim ciągłość procesu iniekcji, dobre wymieszanie mlecza cementowego i stały wzrost ciśnienia podczas zabiegu.

METODA CEMENTACJI Z ZASTOSOWANIEM USZCZELKI GUMOWEJ

Za odrzuceniem dotychczasowej, sprzecznej z założeniami metody przemawiają również względy ekonomiczne. Zabetonowanie w kilku poziomach jednego otworu iniekcyjnego do głębokości 20 m wymaga przewiercenia przeciętnie 50 mb korka cementowego.

Zwiercania korka cementowego uniknąć można stosunkowo łatwo, stosując uszczelkę gumową i proste dodatkowe urządzenie.

Uszczelkę stosowano dotychczas do uszczelniania podłoża przeważnie pod zapory wodne. Z samego celu iniekcji cementowej przy uszczelnianiu podłoża wynika, że mleczo cementowe wciągane w dolne strefy otworu nie może przeniknąć przez już zacementowane, wyżej położone strefy. W skałach, w których silnie rozwinięte są formy krasowe, możliwość przenikania mlecza cementowego do otworu nad uszczelką nie ulega wątpliwości. Wynika to z charakteru połączeń



Ryc. 7 — Schemat połączenia urządzeń cementacyjnych — M1, M2 manometry, P1 — pompa płuczkowa, P2 — pompa cementacyjna, S — urządzenie do uszczelniania gumy, Z — pomiarowy zbiornik na wodę, C1, C2 — mieszadła, C — guma („tampon“), — mleczo cementowe, 1 — woda, 2 — cement.

systemu krasowego i jego przestrzennego ułożenia.

Przenikanie mlecza cementowego do otworu powyżej uszczelki spowoduje jej zabetonowanie w otworze i niemożliwość wydobywania. Wadę tę usunąć można przez zastosowanie urządzenia przedstawionego na ryc. 7.*

Przewód prowadzący mleczo cementowe do otworu wiertniczego pod uszczelką otoczony jest rurą o większej średnicy sztywno przymocowaną do uszczelki. Rura otaczająca przewód mlecza cementowego posiada przyspawane nad uszczelką 2-3 wyloty. Wyloty S przyspawane pod takim kątem, aby strumień wody był skierowany na krawędź uszczelki. Nad głowicą na kręcanej rurze otaczającej przewód mlecza cementowego łączy się z pompą płuczkową. Woda tłoczona tą pompą wypłukuje cement z uszczelki i odprowadza go bocznym przewodem w głowicy do zbiornika pomiarowego na wodę Z.

Ciśnienie wody w otworze wiertniczym nad uszczelką regulowane kurkiem K musi być mniejsze od ciśnienia mlecza cementowego pod uszczelką, aby utrudnić wnikanie mlecza cementowego nad uszczelką i nie dopuścić do wnikania wody w grunt budowlany.

Urządzenie cementacyjne poza wymienioną pompą płuczkową i uszczelką z przewodami składa się z pompy cementacyjnej i dwuzbiornikowego mieszadła ze zbiornikiem pomiarowym na wodę. Sposób połączeń przedstawiony jest na ryc. 7.

* Projekt techniczny opracował mgr inż. Witold Olencki.

UWAGI KOŃCOWE

Zastosowanie wyżej opisanego urządzenia pozwoli na ciągły przebieg cementacji, ziarenka cementowe będąc w stałym ruchu nie będą się przedwcześnie osadzały, a cement wiązał. Spowoduje to zacementowanie dalszych partii, co w konsekwencji może prowadzić do redukcji wierceń zastrzykowych przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa.

Znana jest jeszcze jedna metoda cementacji opracowana w ostatnich miesiącach, która jednak ze względu na zgłoszenie jej przez autorów w komórce racjonalizacji nie może być jeszcze w tej chwili omówiona. Ogólnie można tylko stwierdzić, że autorzy tej metody nieco jednostronnie opracowali projekt, mając na względzie oszczędności wypływające z wyeliminowania konieczności przewiercania korka cementowego, a nie podwyższenie jakości cementacji, co powinno być głównym celem projektu.

Mimo że opisana poprzednio metoda była im znana, nie wykorzystali oni licznych momentów, których zastosowanie zezwoliłoby na zwiększenie zasięgu cementacji i skrócenie czasu jej trwania. Usterki te nie są jednak zasadnicze, gdyż projekt można w prosty sposób uzupełnić.

Kończąc wspomnę, że literatura geologiczna, szczególnie obca, dotycząca krasu jest bogata, natomiast z geologii inżynierskiej jest bardzo skąpa. Z dostępnej mi literatury jedynie radziecka wspomina o budownictwie na obszarach krasowych. Brak jednak szczegółowych danych uniemożliwia wykorzystanie tych doświadczeń. A szkoda, bo obszarów objętych procesami krasowymi jest w Polsce dużo, o wiele więcej, niż by to wynikało

z polskiej literatury geologicznej i niejedno zagadnienie geologiczne trzeba będzie rozwiązać w przyszłości dla budownictwa na obszarach krasowych.

LITERATURA

1. C v i j i c J. — Das Karstphänomen. Geogr. Abh., herausgeben von A. Penck 1893.
2. Dokumentacje geologiczno-inżynierskie. Archiwum Rękopisów IG 1949 — 1953.
3. D ż u ł y ń s k i St. — Tektonika południowej Wyżyny Krakowskiej. „Acta Geologica Polonica“ Warszawa 1953.
4. G w o z d i e c k i j A.N. — Karst. Moskwa 1954.
5. K e i l K. — Ingenieurgeologie und Geotechnik. Halle (Saale) 1951.
6. K o w a ł s k i K. — Jaskinie Polski. Warszawa 1951.
7. K s i ą ż k i e w i c z M., S a m s o n o w i c z J. — Zarys Geologii Polski. Warszawa 1952.
8. L e h m a n n O. — Die Hydrographie des Karstes. Enzyklopedie der Erdkunde herausgeben von prof. dr Oskar Kende. Leipzig und Wien 1932.
9. P i a s k o w s k i A. — Opracowanie technologii i zasad projektowania zawieszin cementowo-gruntowych dla wzmocnienia i uszczelniania gruboziarnistego podłoża. Streszczenie ważniejszych prac naukowo-badawczych I. T. B. 1952 — 1953.