

Witold Cezariusz KOWALSKI

Zróznicowanie korozji krasowej w zależności od kształtu korodowanej masy skalnej i jej stanu naprężeń

Badania korozji wapienia pelitycznego wykazały, że korozja krasowa zmienia się w przestrzeni i w czasie. Ze względu na kształt i powierzchnię właściwą skały i jej okruców wyróżniono korozję: narożną, krawędziową i płaszczyznową, a w zależności od stanu naprężeń skały korozję: zwykłą, rozciągania i intensywnego ściskania. Zmienność korozji w czasie i jej histereza powodują, że obliczenia prędkości denudacji krasowej, wyrażonej w mm/1000 a na podstawie danych dotyczących jednego roku, bez uwzględnienia wszystkich zmian czynników w całym tysiącleciu, powinno się traktować nie jako średnie, lecz przypadkowe.

PRZYCZYNA I CEL BADAŃ

W opracowywanych od lat planach uporządkowania gospodarki wodnej w dorzeczu Warty rozważano możliwości lokalizacji zapór wodnych i zbiorników retencyjnych w okolicach Działoszyna w Paśmie Krakowsko-Wieluńskim na obszarze występowania wapieni górnojurajskich. W wyniku projektowanego podniesienia poziomu wód powierzchniowych i związanego z nimi poziomu wód podziemnych w otoczeniu zbiorników należało się liczyć w jednych miejscach z możliwością odrodzenia się zmarłego krasu, a w innych z możliwością intensyfikacji współczesnych procesów krasowych – a wśród nich przede wszystkim korozji. Zwiększone spadki hydrauliczne – a zatem prędkości wody przepływającej pod zaporą i wokół jej przyczółków – mogłyby spowodować z jednej strony powstanie nieprzewidzianej i niekontrolowanej ucieczki wody ze zbiornika, a z drugiej osłabienie nośności podłoża zapory, co mogłoby doprowadzić do znacznych, nieplanowanych strat ekonomicznych, a nawet katastrofy. Dlatego też na etapie studiów projektowych okazało się konieczne opracowanie inżyniersko-geologicznej charakterystyki rozwoju krasu w okolicach Działoszyna nad Wartą na tle

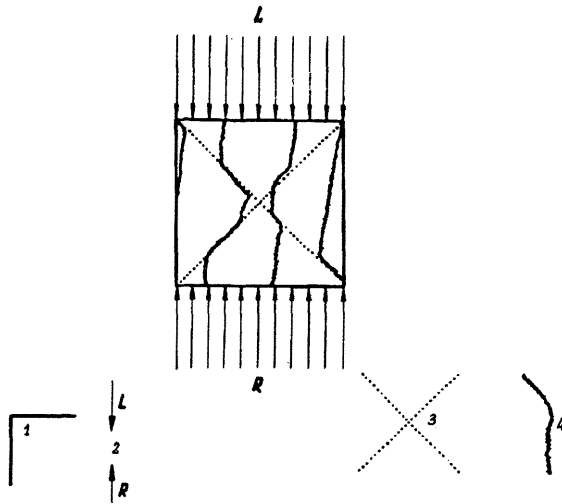


Fig. 1. Przykład ujawniania się utajonych powierzchni (strefy) osłabień wytrzymałości w trakcie oznaczania doraźnej wytrzymałości na ściskanie metodą normową próbki makroskopowo całkowicie jednorodnej opoki senońskiej w kierunku prostopadłym do uławicenia ($R_c \perp s$)

1 – zarys badanej próbki; 2 – naprężenie ściskające; L – obciążenie nadkładem; R – reakcja podłoża; położenie powierzchni ścięcia próbki: 3 – teoretycznie przewidywane, 4 – rzeczywiste, ujawnione w procesie ściskania i związanego z nim ścinania, z niewidocznymi, utajonymi powierzchniami w strefie osłabień wytrzymałościowych, równoległymi do pomierzonych w terenie kierunków płaszczyzn ciosowych i uskokowych

An example of manifestation of latent surfaces of some strength reduction in course of standard compressive strength determination in the perpendicular to bedding direction ($R_c \perp s$) of a macroscopically homogeneous Senonian chalky limestone

1 – contour of one tested sample; 2 – compressive stress; L – overburden load; R – reaction in underlying; shear surfaces in the sample: 3 – theoretically foreseen one, 4 – real one, in which come to light the latent surfaces of some strength reduction, which are orientated parallel to the measured in field joint directions

litologii utworów górnourajskich (J. Bednarek, 1966) oraz wykonanie badań laboratoryjnych, modelujących w pierwszym przybliżeniu korozję krasową w warunkach zmienionych przez budowę zapory.

Badaniom krasu w warunkach naturalnych w Paśmie Krakowsko-Wieluńskim poświęcono dotychczas wiele publikacji, z których należy wymienić dwie syntezy na temat krasu na obszarze całej Polski (R. Gradziński, Z. Wójcik, 1966; J. Głazek, 1989) oraz prace szczegółowe dotyczące południowej części Wyżyny Krakowskiej (R. Gradziński, 1962), okolic Częstochowy (J. Bażyński, 1960a, b) i Działoszyna (J. Samsonowicz, 1936; J. Bednarek, 1966; J. Głazek i in., 1976b, 1977, 1979).

Celem zaprojektowanych i wykonanych przed 25 laty modelowych badań laboratoryjnych było określenie intensywności i ewentualnego zróżnicowania korozji krasowej w zależności od kształtu fragmentów korodowanej masy skalnej i jej stanu naprężeń w warunkach przewidywanych po utworzeniu zbiornika retencyjnego. Wyniki tych badań

nadal zachowały swoją oryginalność, aktualność i elementy nowości, a z przyczyn od autora niezależnych mogą być opublikowane dopiero teraz.

ZAŁOŻENIA WSTĘPNE EKSPERYMENTU

Po wstępnym przeanalizowaniu teorii korozji i dotychczasowych wyników badań zaprojektowano badania laboratoryjne, modelujące przewidywane warunki rozwoju korozji po wybudowaniu zbiornika retencyjnego, przyjmując następujące założenia wstępne, które po przeprowadzeniu badań i uzyskaniu odpowiednich wyników mogły się stać tezami tej pracy.

a – intensywność korozji krasowej powinna być różna w różnych częściach fragmentów korodowanej masy skalnej: największa na ich narożach, duża wzdłuż krawędzi, a najmniejsza na płaszczyznach ścian; należało tego oczekiwać, biorąc pod uwagę różne powierzchnie właściwe, odpowiadające wymienionym elementom fragmentów masy skalnej;

b – intensywność korozji krasowej powinna być większa niż intensywność korozji na płaszczyznach ścian w tych częściach masy skalnej, w których występują naprężenia rozciągające, mogące być przyczyną powstawania – jeszcze przed widocznym spękaniami masy skalnej – utajonych powierzchni i stref osłabień wytrzymałościowych (fig. 1 – W.C. Kowalski, 1961, 1966); te ostatnie powinny ułatwiać przenikanie cząsteczek wody w głąb masy skalnej, co ułatwiałoby korozję;

c – intensywność korozji krasowej powinna rosnać w miarę wzrostu spadku hydraulicznego wody, nie będącej nasyconym roztworem korodowanej skały, do momentu powstania roztworu nasyconego;

d – intensywność korozji krasowej powinna maleć w obszarach wzrastania naprężeń ściskających w masie skalnej; przewidywano jednak, że przy niewielkich obciążeniach, wywołujących te naprężenia, w stosunku do wytrzymałości na ściskanie masy skalnej, zmniejszenie intensywności korozji w tych obszarach mogłoby być praktycznie niemierzalne.

Aby wykazać słuszność przyjętych założeń, należało tak przeprowadzić badania modelowe, aby mogły się ujawnić przede wszystkim te czynniki, które określono w tych założeniach. Niezbędne zatem było badanie korozji zawsze w jednakowych warunkach na skałach maksymalnie jednorodnych. W takim układzie można było odpowiedzieć na podstawowe pytania, czy intensywność korozji w każdej części skały jest zawsze identyczna, czy też nie, oraz poszukiwać przyczyn zróżnicowania tej intensywności.

Tabela 1

Parametry jednorodności fizycznej badanego monolitu
i wyciętych z niego beleczek

Symbol beleczki	ρ_s	ρ_{os}	ρ_{ow}	n	$R_{c\perp w}$
A1	2,72	2,41	2,68	11,4	20,5
A2	2,72	2,41	2,69	11,4	20,8
A3	2,72	2,41	2,69	11,4	20,6
B1	2,72	2,41	2,69	11,4	20,8
B2	2,72	2,41	2,69	11,4	20,7
B3	2,72	2,40	2,68	12,0	19,5
C1	2,72	2,41	2,69	11,4	20,9
C2	2,72	2,42	2,69	11,0	21,6
C3	2,72	2,41	2,69	11,4	20,6

ρ_s – gęstość szkieletu skalnego w g/cm^3 ; ρ_{os} – gęstość objętościowa w stanie powietrzno-suchym w g/cm^3 ; ρ_{ow} – gęstość objętościowa w stanie nasycenia wodą w g/cm^3 ; n – porowatość w %; $R_{c\perp w}$ – wytrzymałość na ściskanie w kierunku prostopadłym do uławicenia w stanie nasycenia wodą w MPa

WYBÓR SKAŁY MODELOWEJ

Racjonalne przeprowadzenie badań korozji w warunkach laboratoryjnych przy ograniczonych środkach materialnych i w krótkim czasie wymagało wybrania jednorodnych litologicznie skał (W.C. Kowalski, 1961, 1978, 1988), podlegających korozji krasowej, chociaż niekoniecznie bardzo intensywnej. Makroskopowo najbardziej litologicznie jednorodnych ławic krasowięjących serii wapieni, których wiek A. Wierzbowski (1965) określił jako górny oksford, poszukiwano w okolicach Działoszyna nad Wartą w Paśmie Krakowsko-Częstochowsko-Wieluńskim, gdzie przewidywano lokalizację jednego ze stopni wodnych. Z możliwie najbardziej makroskopowo jednorodnych ławic wapieni minimalnie spękanych, pobrano 7 dużych próbek (monolitów), na których oznaczono gęstość objętościową (ρ_o) i wytrzymałość na ściskanie w kierunku prostopadłym do uławicenia w stanie nasycenia wodą ($R_{c\perp w}$) w środkowych częściach ścian monolitów. Stosując zaostrzoną kontrolę laboratoryjną, z próbek tych odrzucono wszystkie te monolity, dla których gęstości objętościowe stropu, środka i spągu różniły się o więcej niż $0,05 g/cm^3$, a wytrzymałości na ściskanie w kierunku prostopadłym uławicenia w stanie nasycenia wodą ($R_{c\perp w}$) odbiegały o ponad 2 MPa. W wyniku tych eliminacji do projektowanych badań modelowych wybrano jeden monolit o wymiarach $0,30 \times 0,35 \times 0,45$ m, wycięty z półmetrowej ławicy żółtawobiałego, zbitego wapienia pelitowego, odsłoniętego w odkrywcze w Wąsoszu Dolnym, w której przed laty J. Liszkowski znalazł okaz *Idoceras* sp., wskazujący na poziom *Idoceras planula* oksfordu górnego. Oznaczana gęstość objętościowa tego monolitu w stanie powietrzno-suchym

(ρ_{os}) wynosi średnio $2,41 \text{ g/cm}^3$, przy współczynniku zmienności $0,21\%$ (tab. 1), a wytrzymałość na ściskanie w kierunku prostopadłym do uławicenia w stanie nasycenia wodą ($R_{c \perp w}$) średnio $20,7 \text{ MPa}$, przy współczynniku zmienności $2,36\%$. Tak niewielkie zróźnicowanie tych parametrów w obrębie jednego monolitu, wyznaczonych według znormalizowanych metod z określoną dokładnością, pozwala przyjąć, że jest spowodowane przede wszystkim przypadkowymi błędami pomiarowymi, a nie fizyczną niejednorodnością monolitu.

Na ścianach badanego monolitu oznaczono powierzchnię stropową i spagową oraz kierunek północny. Zaznaczenie naturalnej orientacji przestrzennej na każdej próbce, wyciętej w kształcie prostopadłościanu – beleczki o wymiarach $4 \times 4 \times 25 \text{ cm}$ (z tolerancją odchyłań o $\pm 0,1 \text{ cm}$) – pozwalało na istotne ograniczenie w dalszych rozważaniach możliwości wpływu anizotropii wytrzymałościowej na zróźnicowanie korozji krasowej badanych skał.

Wytrzymałość na ściskanie w kierunku równoległym do uławicenia w stanie nasycenia wodą ($R_{c \parallel w}$) wahała się w granicach $19,1\text{-}21,2 \text{ MPa}$ (przy średniej $20,1 \text{ MPa}$), co wskazuje, że współczynnik anizotropii wytrzymałościowej może się co najwyżej wahać w granicach $0,88\text{-}1,07$, a najprawdopodobniej $0,97\text{-}0,98$ (przy średniej $0,97$). Zgodnie z publikacjami W.C. Kowalskiego (1961, 1966) pozwala to na określenie tych skał jako praktycznie wytrzymałościowo izotropowych, zwłaszcza że wszystkie różnice $R_{c \perp w}$ i $R_{c \parallel w}$ mieszczą się w granicach dopuszczalnych odchyłań, wywołanych przypadkowymi błędami pomiaru.

Litologiczna jednorodność monolitu określona makroskopowo znalazła odbicie w wynikach analizy mikroskopowej 6 płytek cienkich, wyciętych ze środkowych części jego ścian. Głównym składnikiem monolitu zbitego wapienia pelitowego jest kalcyt, tworzący masę drobnopelitycznego spoiwa podstawowego, na którego tle występują mniej więcej równomiernie rozmieszczone mikrokrystaliczne agregaty węglanów o kształtach nieregularnych, owoidalnych i sferoidalnych – być może pozostałości przekryształizowanych szczątków organicznych – a także mniej więcej równomiernie rozmieszczone żyłki i soczewki kalcytu o grubości $0,01\text{-}0,02 \text{ mm}$. Na tle węglanowego spoiwa podstawowego widoczne są bardzo nieliczne fragmenty spikul gąbkowych i również rzadkie pojedyncze ziarenka kwarcu detrytycznego o wymiarach poniżej $0,05 \text{ mm}$ oraz minerały iłowe (z reguły w postaci agregatów) i związki żelaza, będące składnikami wyraźnie akcesorycznymi. Makroskopowa jednorodność litologiczna znajduje częściowo potwierdzenie w mikroskopowo oznaczonej afanitowej strukturze i bezładnej dość zbitej teksturze jednocześnie słabomikroporowatej (z próżniami i porami często typu interkrystalicznego o rozmiarach rzędu $0,1\text{-}0,2 \text{ mm}$).

Z trzech analiz chemicznych próbek pobranych ze stropu, środka i spągu monolitu wynika, że zawartości poszczególnych składników wahały się w granicach: CaO $54,11\text{-}54,48\%$ (śr. $54,32\%$), MgO $0,39\text{-}0,55\%$ (śr. $0,47\%$), Al₂O₃ $0,18\text{-}0,73\%$ (śr. $0,48\%$), Fe₂O₃ $0,09\text{-}0,16\%$ (śr. $0,11\%$), SiO₂ $0,99\text{-}1,26\%$ (śr. $1,15\%$), przy stratach prażenia $43,14\text{-}43,56\%$ (śr. $43,37\%$).

Tabela 2

Ubytki masy beleczek w wyniku korozji

Symbol beleczki	M_{bd}	M_{pd}	ΔM_{dm}	D_{dm}	M_{bs}	M_{ps}	ΔM_{sm}	D_{sm}
beleczki obciążone w środku, podparte na końcach								
A1	943,73	877,70	66,06	0,070	1051,32	977,76	73,56	0,070
A2	964,00	896,52	67,48	0,070	1073,90	998,72	75,18	0,070
A3	967,86	900,11	67,75	0,070	1078,20	1002,72	75,48	0,070
beleczki obciążone na końcach, podparte w środku								
B1	960,14	892,93	67,21	0,070	1069,60	994,72	74,88	0,070
B2	967,86	900,11	67,75	0,070	1078,20	1002,72	75,48	0,070
B3	960,00	883,20	76,80	0,080	1073,28	987,42	85,86	0,080
beleczki nieobciążone, podparte w środku i na końcach								
C1	960,14	904,50	55,64	0,058	1069,60	1007,61	61,99	0,058
C2	968,00	920,81	47,19	0,049	1074,48	1022,10	52,38	0,049
C3	984,15	927,61	56,54	0,058	1096,34	1033,36	62,98	0,057

Masy beleczek w g w stanie powietrzno-suchym: M_{bd} – przed rozpoczęciem rozpuszczania, M_{pd} – po rozpuszczeniu; masy beleczek w g w stanie nasycenia wodą: M_{bs} – przed rozpoczęciem rozpuszczania, M_{ps} – po rozpuszczeniu; ubytki masy w wyniku rozpuszczania w g: ΔM_{dm} – całkowite, wyznaczone w stanie powietrzno-suchym, ΔM_{sm} – całkowite, wyznaczone w stanie nasycenia wodą; jednostkowe ubytki masy w g/g: D_{dm} – w stanie powietrzno-suchym, D_{sm} – w stanie nasycenia wodą

T a b e l a 3

Zmniejszenia objętości beleczek w wyniku korozji

Symbol beleczki	d	V_1	V_2	ΔV	D_{vt}	A_t	A_c	D_{vc}
beleczki obciążone w środku, podparte na końcach								
A ₁	3,9×4,0×25,1	391,59	364,18	27,41	0,070	427,78	391,78	0,070
A ₂	4,0×4,0×25,0	400,00	372,00	28,00	0,070	432,00	396,00	0,071
A ₃	4,0×4,0×25,1	401,60	373,49	28,11	0,070	433,60	397,60	0,071
beleczki obciążone na końcach, podparte w środku								
B ₁	4,0×4,0×24,9	398,40	370,51	27,89	0,070	430,40	394,40	0,071
B ₂	4,0×4,0×25,1	401,60	373,49	28,11	0,070	433,60	397,60	0,071
B ₃	4,0×4,0×25,0	400,00	368,00	32,00	0,080	432,00	396,00	0,081
beleczki nieobciążone, podparte w środku i na końcach								
C ₁	4,0×4,0×24,9	398,40	375,31	29,09	0,058	430,40	394,40	0,059
C ₂	4,0×4,0×25,0	400,00	380,50	19,50	0,049	432,00	396,00	0,049
C ₃	4,1×4,0×24,9	408,36	384,90	23,46	0,057	436,18	400,18	0,059

d – wymiary beleczek w cm; objętości beleczek w cm^3 : V_1 – początkowe, V_2 – końcowe; ubytki objętości beleczek: ΔV – całkowite w cm^3 , D_{vt} – jednostkowe całkowite na jednostkę objętości początkowej w cm^3/cm^2 , D_{vc} – jednostkowe całkowite na jednostkę rozpuszczanej powierzchni zewnętrznej w cm^3/cm^2 ; powierzchnie zewnętrzne beleczek: A_t – całkowite w cm^2 , A_c – rozpuszczane w cm^2

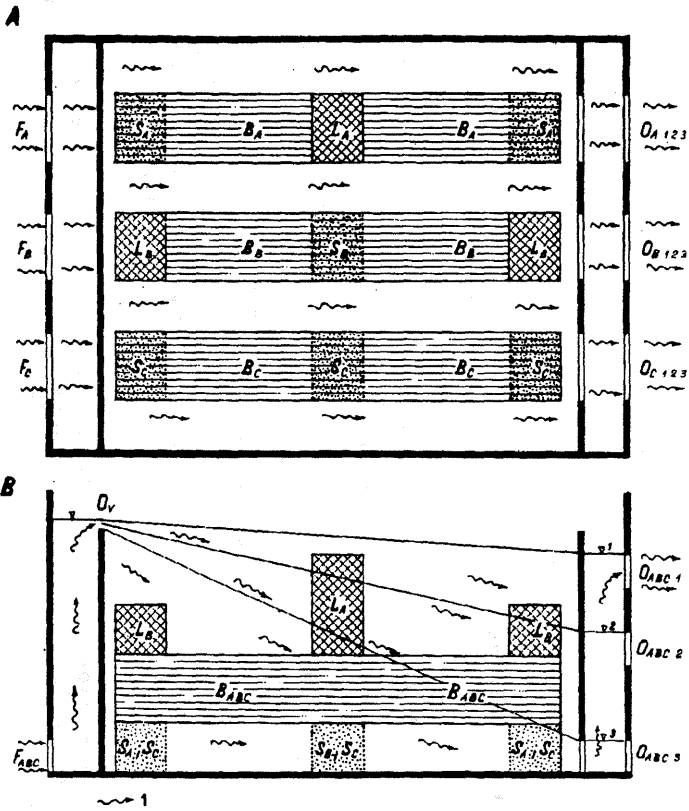


Fig. 2. Sposób przeprowadzania badań korozji: beleczek B_A podpartych na końcach na powierzchniach S_A i obciążonych w środku ciężarem L_A ; beleczek B_B podpartych w środku na powierzchni S_B i obciążonych na końcach ciężarami L_B ; beleczek B_C nieobciążonych i podpartych na końcach i w środku na powierzchniach S_C

1 – kierunek przepływu wody w zbiorniku z komorą główną z umieszczonymi beleczkami (B_A , B_B , B_C) oraz komorami wyrównującymi; F_A , F_B , F_C – otwory wprowadzające wodę; O_v – przelew; O_A , O_B , O_C – otwory odprowadzające wodę (z komory wylotowej); A – rzut z góry; B – rzut z boku

Method of the corrosion studies of rectangular prisms: beams B_A supported at their ends on surfaces S_A and loaded in their middle with load L_A ; beams B_B supported in their middle on a surface S_B and loaded at their ends with loads L_B ; beams B_C non-loaded and supported at their ends and their middle on surfaces S_C

1 – water flow directions in the tank with the main chamber (with located tested beams B_A , B_B , B_C) and the intake chamber; F_A , F_B , F_C – water – inlets; O_v – water – overfall; O_A , O_B , O_C – water – outlets; A – top view; B – side view

Można zatem uznać, że monolit wapienia, wytypowany do badania zróżnicowania intensywności korozji krasowej, jest ze względu na skład chemiczny również praktycznie jednorodny.

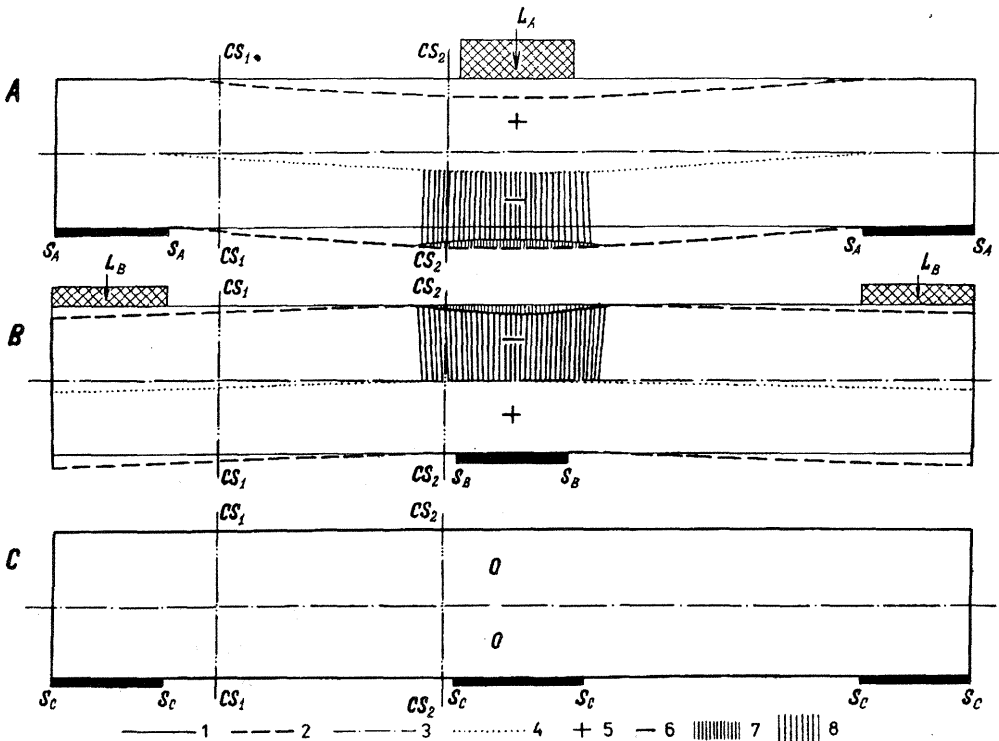


Fig. 3. Odształcenia beleczek: A – obciążonych w środku ciężarem L_A i podpartych na końcach na powierzchniach S_A ; B – podpartych w środku na powierzchni S_B i obciążonych na końcach ciężarami $L_B = 1/2 L_A$; C – nieobciążonych, podpartych na końcach i w środku na powierzchniach S_C równych sumie powierzchni podparć i obciążeń, uniemożliwiających rozpuszczalność beleczek na tych powierzchniach

1 – pierwotny kształt przekroju podłużnego beleczki przed obciążeniem; 2 – ugięcie stropu i spągu beleczki pod wpływem obciążeń; 3 – podłużne osie beleczek przed obciążeniem; 4 – położenie osi wygiętych pod obciążeniem; obszary zwiększonych naprężeń poziomych: 5 – ściskających, 6 – rozciągających; 7 – wyraźne zagłębienia na powierzchniach stropowej i spągowej beleczek obciążonych, wskazujące obszary zwiększonej korozji; 8 – obszary wytrzymałościowo osłabione przez powstanie poziomych naprężeń rozciągających, które mogą powodować powstawanie ukrytych powierzchni osłabień; O – obszar bez przyrostów naprężeń; CS_2 – przekrój poprzeczny w środkowej części beleczek (fig. 4)

Deformations of beams: A – loaded in their middle with a load L_A and supported and their ends on surfaces S_A ; B – supported in their middle on a surface S_B and loaded at their ends with loads $L_B = 1/2 L_A$; C – non-loaded and supported at their ends and their middle on surfaces S_C

1 – contour of a longitudinal beam section at the start, before loading; 2 – deflection curve of the roof or floor of a beam under loading; 3 – longitudinal axis of a beam before loading; 4 – deflected longitudinal axis of the beam under loading; areas of the horizontal greater stresses: 5 – compressive, 6 – tensile; 7 – depressions on the roof or floor surfaces of the loaded beams, pointing areas with the greater corrosion; 8 – areas with the weaker strength, with tensile stresses, in which latent surfaces of some strength reduction can arise; O – areas without any stress increase; CS_2 – cross-sections in the middle part of beams (see Fig. 4)

SPOSÓB PRZEPROWADZENIA BADAŃ

Ze zorientowanego przestrzennie monolitu wapienia pelitycznego wycięto 24 beleccki z zachowaniem ich orientacji przestrzennej takiej samej jak w całym monolicie. Kierunek długości każdej beleccki był zgodny z kierunkiem długości monolitu, który w terenie pokrywał się z azymutem 75° , będącym dwusieczną kąta, utworzonego przez pomierzone w odkrywce kierunki najliczniejszych spękań ciosowych o azymutach średnio 30 i 120° . Taki sposób postępowania pozwalał na uzyskanie wyników korozji maksymalnie nieobarczonych wpływami niejednorodności litologicznej i spękaniaowej korodowanych beleccek.

Do badań wybrano tylko 18 beleccek o szerokości w stropie i spągu dokładnie $4,0$ cm, długości 25 cm ($\pm 0,1$ cm) i wysokości $4,0$ cm ($\pm 0,1$ cm). Spośród nich 9 poddano pierwszej serii badań, stosując obciążenia mniejsze (5 kg w środku beleccki lub po $2,5$ kg na obu jej końcach). W drugiej serii badań kolejne 9 beleccek obciążano większym ciężarem (10 kg w środku beleccki lub po 5 kg na obu jej końcach). Przy zastosowaniu większych obciążeń znacznie wcześniej ujawniło się zróżnicowanie intensywności korozji w różnych częściach beleccek, dlatego też wszystkie dane i otrzymane na ich podstawie wyniki, przedstawione w tab. 1-5, dotyczą drugiej serii badań.

Jednorodność fizyczną całego monolitu i wyciętych z niego beleccek potwierdza gęstość szkieletu skalnego (ρ_s) oraz gęstość objętościowa w stanie powietrzno-suchym (ρ_{os}) i w stanie nasycenia wodą (ρ_{ow}). W tab. 1 podano wyniki oznaczeń tych wielkości oraz obliczone na ich podstawie porowatości (n).

Beleccki w stanie powietrzno-suchym ważono, oznaczając ich masę (M_{bd}) – tab. 2, a następnie nasycono powoli (w ciągu 2 tygodni) wodą od powierzchni spągowej o wymiarach $4,0 \times 25,0$ ($\pm 0,1$ cm) aż do przykrycia wodą ich stropu (o takich samych wymiarach) i odczekania do osiągnięcia stałej masy, po czym wyznaczono masę beleccek nasyconych wodą przed poddaniem ich korozji (M_{bs}) – tab. 2. Określono również objętość początkową nasyconych wodą beleccek (V_1) – tab. 3. Dane te posłużyły do skontrolowania wyznaczonych uprzednio gęstości objętościowych beleccek w stanie powietrzno-suchym (ρ_{os}) i w stanie nasycenia wodą (ρ_{ow}).

Beleccki nasycone wodą umieszczane były na specjalnie skonstruowanych podporach, których powierzchnia styku z beleccką miała zawsze kształt prostokąta o wymiarach 3×4 cm (fig. 2, 3). Beleccki oznaczone literą A w drugiej serii badań były obciążane ciężarem 10 kg w środku na powierzchni: $3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} = 12 \text{ cm}^2$ i podparte na końcach na łącznej powierzchni $2(3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}) = 24 \text{ cm}^2$. Beleccki oznaczone literą B w drugiej serii badań były obciążane ciężarami po 5 kg na końcach na łącznej powierzchni $2(3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}) = 24 \text{ cm}^2$ i podparte w środku na powierzchni $3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} = 12 \text{ cm}^2$. Beleccki oznaczone literą C nie były wcale obciążane, lecz podparte w 3 miejscach: w środku i na obu końcach na łącznej powierzchni $3(3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}) = 36 \text{ cm}^2$. Z całkowitej zewnętrznej powierzchni (A_t) każdej beleccki nie podlegała zatem bezpośredniej korozji powierzchnia styku z podporami i powierzchnia obciążana o łącz-

nych wymiarach: $3(3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}) = 36 \text{ cm}^2$. Beleczki były bezpośrednio korodowane tylko na powierzchni: $A_c = A_t - 36 \text{ cm}^2$.

Badania korozji przeprowadzono w specjalnie skonstruowanym zbiorniku z pleksiglasu (fig. 2). Zbiornik ten składał się z 3 komór: wlotowej, głównej (przepływowej) i wylotowej. U dołu zewnętrznej ściany komory wlotowej wykonano 3 otwory wlotowe dla wody, umieszczone: w środku (otwór F_B) i po bokach (otwory F_A i F_C) – fig. 2. Dopływy wody wodociągowej od dołu komory wlotowej zapewniały mniej więcej równomierne wypełnianie wodą komory wlotowej, a następnie po jej wypełnieniu równomierny dopływ do komory głównej przez przelew (O_v).

Beleczki (A i B lub C) nasycone wodą i obciążone lub nieobciążone umieszczone na podporach w komorze głównej podlegały korozji przy stałym spadku hydraulicznym przepływającej, ciągle nowej wody wodociągowej przez 9 miesięcy (273 dni). Przedstawione w tab. 2-4 wyniki dotyczą stale utrzymywanego spadku hydraulicznego wynoszącego 0,22, tj. mniej więcej takiego, jaki przewidywano wstępnie pod zaporą o szerokości podszwy fundamentowej około 27-45 m, powodującą piętrzenie do 6-10 m.

Oczywiście skład wody wodociągowej, użytej w badaniach, nie odpowiadał składowi naturalnych wód krasowych, jednak w grubym przybliżeniu modelował skład wody ze zbiornika retencyjnego, przepływającej pod zaporą i wokół jej przyczółków, i co najważniejsze był mniej więcej stały.

Po dziewięciomiesięcznym korodowaniu, bezpośrednio po wyjęciu z komory głównej (a więc w stanie nasycenia wodą), beleczki były ważone. Z różnicy mas beleczek w stanie nasycenia wodą sprzed rozpoczęcia korozji (M_{bs}) i po jej zakończeniu (M_{ps}) obliczono całkowity ubytek mas:

$$M_{bs} - M_{ps} = \Delta M_{sm}$$

Po doprowadzeniu beleczek do stanu powietrzno-suchego (do stałej wagi) ponownie je ważono (M_{pd}), aby wyznaczyć całkowity ubytek ich masy (ΔM_{dm}):

$$M_{bd} - M_{pd} = \Delta M_{dm}$$

Jednostkowy ubytek masy w odniesieniu do masy beleczek wynosi

$$\frac{\Delta M_{dm}}{M_{bd}} = D_{dm} = D_{sm}$$

Jak wynika z danych tab. 2, wynosi on średnio 0,066 g/g, przy czym dla beleczek nieobciążonych śr. 0,055 g/g, a dla obciążonych śr. 0,072 g/g.

Z ubytku masy (ΔM_{dm}) – tab. 2 – odniesionego do powierzchni zewnętrznej (A_c) – tab. 3 – podlegającej korozji, wyznaczono powierzchniowy jednostkowy ubytek masy (D_{mc}):

$$\frac{\Delta M_{dm}}{A_c} = D_{mc}$$

który wynosi śr. 0,160 g/cm², przy czym dla beleczek nieobciążonych śr. 0,134 g/cm², a dla obciążonych śr. 0,174 g/cm². Zatem ubytki masy beleczek nieobciążonych są zawsze mniejsze niż beleczek obciążonych.

Tabela 4

Grubości skorodowanej warstwy przypowierzchniowej beleczek w różnych częściach ich powierzchni

Symbol beleczki	d_t	A_t	h_t	ΔV_t	l_t	l_e	h_e	A_e	ΔV_e	ΔV_p	A_p	h_p
beleczki obciążone w środku, podparte na końcach												
A ₁	6,1×4,0	24,4	0,2	4,88	132,0	106,0	0,25	42,40	10,60	11,93	324,98	0,0367
A ₂	6,0×4,0	24,0	0,2	4,80	132,0	106,0	0,25	42,40	10,60	12,60	329,60	0,0382
A ₃	6,1×4,0	24,4	0,2	4,88	132,4	106,4	0,25	42,56	10,64	12,59	330,64	0,0381
beleczki obciążone na końcach, podparte w środku												
B ₁	5,9×4,0	23,6	0,2	4,72	131,6	105,6	0,25	42,24	10,56	12,61	328,56	0,0384
B ₂	6,1×4,0	24,4	0,2	4,88	132,4	106,4	0,25	42,56	10,64	12,59	330,64	0,0381
B ₃	6,0×4,0	24,0	0,2	4,80	132,0	106,0	0,30	42,40	12,72	14,48	348,80	0,0415
beleczki nieobciążone, podparte w środku i na końcach												
C ₁	—	—	—	—	131,6	105,6	0,25	42,24	10,56	12,53	352,16	0,0356
C ₂	—	—	—	—	132,0	106,0	0,20	42,40	8,48	11,02	353,60	0,0312
C ₃	—	—	—	—	132,0	106,0	0,25	42,40	10,60	12,86	357,78	0,0359

d_t – wymiary najbardziej wygiętych, środkowych części ścianek beleczek w cm; A_t – pola najbardziej wygięte ścianek beleczek w cm²; długości krawędzi beleczek w cm; l_t – całkowite, l_e – korodowane dwustronnie; A_e – pola korozji przykrawędziowej dwustronnej w cm²; A_p – pozostałe pola korozji na płaszczyznach zewnętrznych beleczek w cm²; przeciętne grubości skorodowanej warstwy w cm: h_t – na polu A_t , h_e – wzdłuż krawędzi, h_p – na płaszczyznach ścian; całkowite ubytki objętości: ΔV_t – na polu A_t , ΔV_e – wzdłuż krawędzi i naroży, ΔV_p – na płaszczyznach ścian

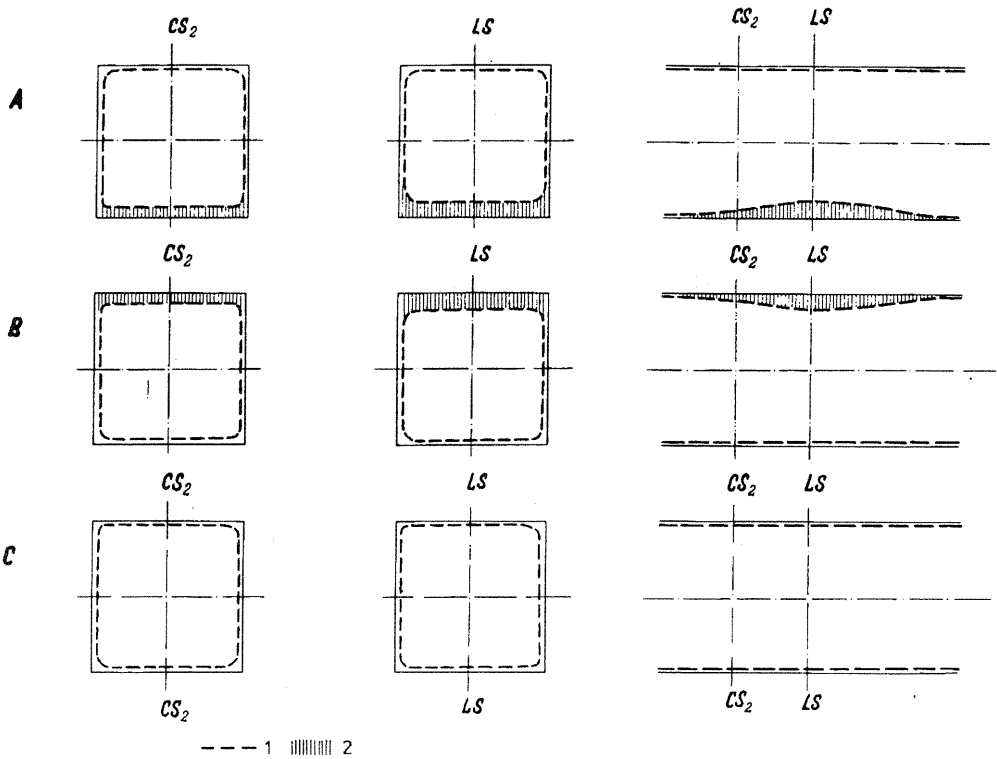


Fig. 4. Ubytek masy beleczek A, B, C w wyniku korozji: największy – na narożach i wzdłuż krawędzi, pośredni – na obszarach poziomych naprężeń rozciągających, najmniejszy – na płaszczyznach, w środkowych częściach ścian w obszarach pozbawionych naprężeń rozciągających

Przekroje poprzeczne: CS₂ – w części środkowej beleczki (fig. 3), LS – w środku beleczki; 1 – kształt beleczki po przeprowadzeniu doświadczenia; 2 – obszary zwiększonego ubytku masy

Differentiated voluminal losses of the beams (A, B, C) in course of corrosion: the greatest ones on quoins and along edges, the intermediate ones on areas with horizontal tensile stresses, the lowest ones on planes in the middle parts of the beam walls without any tensile stress

Cross-sections: CS₂ – in the middle parts of beams (see Fig. 3), LS – in midpoints of beams; 1 – contours of beams after corrosion in experiments; 2 – areas of the greater voluminal losses

Po oznaczeniu metodą rtęciową objętości początkowej beleczek (V_1) i objętości końcowej po zakończeniu korodowania (V_2 – tab. 3), można było obliczyć całkowite zmniejszenie objętości beleczek w wyniku korozji (ΔV) z różnicy:

$$V_1 - V_2 = \Delta V$$

Całkowite zmniejszenie objętości beleczek w badanym przypadku wynosi śr. 27,07 cm³, przy czym dla beleczek obciążonych śr. 28,59 cm³, a dla nieobciążonych śr. 24,02 cm³.

Jednostkowe zmniejszenie objętości (D_{Vt}) w odniesieniu do całej pierwotnej objętości beleczek (V_1) obliczono ze stosunku:

Tabela 5

Udział korozji na obszarach naprężeń rozciągających wzdłuż krawędzi i naroży oraz wzdłuż płaszczyzny zewnętrznej w korozji sumarycznej

Symbol beleczki	$\frac{\Delta V_f}{\Delta V}$	$\frac{\Delta V_e}{\Delta V}$	$\frac{\Delta V_p}{\Delta V}$
beleczki obciążone w środku, podparte na końcach			
A1	0,178	0,387	0,435
A2	0,171	0,379	0,450
A3	0,174	0,378	0,448
beleczki obciążone na końcach, podparte w środku			
B1	0,169	0,379	0,452
B2	0,174	0,378	0,448
B3	0,150	0,398	0,452
beleczki nieobciążone, podparte w środku i na końcach			
C1	0	0,457	0,543
C2	0	0,435	0,565
C3	0	0,452	0,548

Zmniejszenie objętości w cm^3 : ΔV – całej beleczki, ΔV_f – na najbardziej wygiętych pod obciążeniem częściach ściany, ΔV_e – na krawędziach i narożach, ΔV_p – na płaszczyznach ścian

$$\frac{\Delta V}{V_1} = D_{vt}$$

Jak wynika z tab. 3, jednostkowe zmniejszenie objętości odnieszone do jednostki objętości (D_{vt}) wynosi średnio $0,066 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, przy czym dla beleczek obciążonych śr. $0,072 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, a dla beleczek nieobciążonych śr. $0,057 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Jednostkowe zmniejszenie objętości (D_{vc}) w odniesieniu do bezpośrednio korodowanej, zewnętrznej, pierwotnej powierzchni beleczek (A_c) – tab. 3 – obliczono ze stosunku:

$$\frac{\Delta V}{A_c} = D_{vc}$$

Jak wynika z tab. 3, jednostkowe zmniejszenie objętości odniesione do jednostki bezpośrednio korodowanej, zewnętrznej, pierwotnej powierzchni beleczek (D_{vc}) wynosi średnio $0,0669 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \approx 0,067 \text{ cm}$, przy czym dla beleczek obciążonych śr. $0,0725 \text{ cm}$, a dla nieobciążonych śr. $0,056 \text{ cm}$.

Jednostkowe zmniejszenie objętości odniesione do jednostki bezpośrednio korodowanej, zewnętrznej powierzchni beleczek (D_{vc}) oznacza przeciętną grubość warstwy, jaka została usunięta z bezpośrednio korodowanej, zewnętrznej powierzchni beleczek.

ZMIANA KSZTAŁTU BELECZEK

Belecзки poddane 9-ciomiesięcznemu korodowaniu zmieniły swój kształt. Tak więc obliczone jednostkowe ubytki masy i zmniejszenia objętości, odniesione do jednostki bezpośrednio korodowanej zewnętrznej powierzchni beleczek, wskazują na sumaryczny, uśredniony wynik korozji. Zmiana kształtu belecзки wskazuje natomiast na różnice intensywności korozji w różnych częściach bezpośrednio korodowanej powierzchni.

We wszystkich badanych, ostrokrawędzistych i prostopadłościennych beleczkach naroża i krawędzie zaokrągliły się. Wydłużone belecзки kanciaste stały się obłe (fig. 4). Przeciętna grubość skorodowanej skały wzdłuż krawędzi beleczek wahała się w granicach 0,20-0,30 cm, wynosząc najczęściej w najbardziej jednorodnych beleczkach 0,25 cm, przy średniej 0,25 cm. Nieco mniejszy ubytek ($h_e = 0,20$ cm) wykazała belecзка o nieco mniejszej porowatości $n = 11,0\%$, a nieco większy – 0,30 cm belecзка o nieco większej porowatości $n = 12\%$. Na narożach grubość usuniętego przez korozję materiału była nieco większa – 0,30 cm.

Całkowity ubytek objętości wzdłuż krawędzi (ΔV_e) – tab. 4 – obliczono z iloczynu pola korozji przykrawędziowej (A_e) i przeciętnej grubości skorodowanej przy krawędzi warstwy (h_e):

$$h_e \cdot A_e = \Delta V_e$$

Wynosi on śr. $10,60 \text{ cm}^3$, przy czym dla beleczek obciążonych śr. $10,96 \text{ cm}^3$, a dla nieobciążonych śr. $9,88 \text{ cm}^3$.

Specyficzne, makroskopowo dobrze widoczne, duże wgłębienia na powierzchni beleczek zaobserwowano po zakończeniu badań w środkowych, najbardziej wygiętych częściach powierzchni: spagowych beleczek A (obciążonych w środku, a podpartych na końcach) oraz stropowych beleczek B (podpartych w środku i obciążonych na końcach – fig. 3 i 4). Głębokość tych wgłębień (h_f) w miejscach maksymalnie wygiętych była rzędu 0,2 cm. Wgłębienia te nie tylko jakby ścinały środkowe, najbardziej wypukłe części wygiętych powierzchni beleczek, lecz stanowiły miejscowe wklęsłości powierzchni.

Po wyznaczeniu głębokości wgłębień (h_f) i ich pola (A_f) – tab. 4 – można było łatwo obliczyć objętość całkowitego ubytku na wygiętych pierwotnie polach (ΔV_f) – tab. 4:

$$h_f \cdot A_f = \Delta V_f$$

która wynosi średnio $4,83 \text{ cm}^3$. Oczywiście dla beleczek nieobciążonych, na których powierzchni takich zagłębień nie obserwowano, $\Delta V_f = 0$.

Skutki działania korozji poza wymienionymi elementami były praktycznie makroskopowo niedostrzegalne, chociaż wydawało się, że w dotyku pozostałe powierzchnie stały się również mniej ostre, bardziej gładkie, tak samo jak na zaokrąglonych narożach i krawędziach. Bezpośrednie pomiary grubości i szerokości beleczek dokonane suwmiarką mniej więcej w tych samych miejscach dwukrotnie (przed rozpoczęciem badań i po ich zakończeniu) pozwoliły określić grubości warstewki skorodowanej na ścianach beleczek na 0,03-0,05 cm. Ponieważ wyniki te nie były jednoznaczne, grubość skorodowanej skały na ścianach beleczek (h_p) określono drogą pośrednią, wykorzystując wyz-

naczone uprzednio całkowite zmniejszenie objętości (ΔV) poszczególnych beleczek (tab. 3) oraz całkowite zmniejszenie objętości wzdłuż krawędzi i naroży (ΔV_e) – tab. 4 – i na pierwotnie wygiętych polach (ΔV_f) – tab. 4. Całkowite zmniejszenia objętości beleczek (ΔV_p) wzdłuż zachowanych płaszczyzn ścian beleczek obliczono z różnicy:

$$\Delta V - (\Delta V_e + \Delta V_f) = \Delta V_p$$

Po wyznaczeniu pola zachowanych, podlegających korozji płaszczyzn zewnętrznych beleczek (A_p), obliczono przeciętną grubość skorodowanej warstwy (h_p) z tego pola:

$$\frac{\Delta V_p}{A_p} = h_p$$

Przeciętna grubość warstewki skorodowanej (h_p) wzdłuż płaszczyzny (A_p) wynosi średnio 0,0371 cm, przy czym dla beleczek obciążonych śr. 0,0385 cm, a dla nieobciążonych śr. 0,0342 cm. Po odrzuceniu wartości skrajnych, tj. 0,0312 cm (dla beleczki C₂ o nieco mniejszej porowatości 11%) i 0,0415 cm (dla beleczki B₃ o nieco większej porowatości 12%), znacznie zmniejszają się różnice grubości (h_p) i wynoszą dla beleczek obciążonych śr. 0,0379 cm i nieobciążonych śr. 0,0358 cm.

W tab. 5 zestawiono, jaką część całkowitego zmniejszenia objętości beleczek (ΔV) stanowi zmniejszenie objętości na narożach i krawędziach (ΔV_e), na najbardziej wygiętych pod obciążeniem częściach ścian beleczek (ΔV_f) i na płaszczyznach ścian (ΔV_p):

$$\frac{\Delta V_e}{V}, \frac{\Delta V_f}{V}, \frac{\Delta V_p}{V}$$

Makroskopowo najłatwiej zauważalne zmniejszenie objętości beleczek na narożach i krawędziach (ΔV_e) w beleczkach obciążonych (A i B) stanowi ponad jedną trzecią całkowitego zmniejszenia objętości beleczek (śr. 0,383), a po odrzuceniu skrajnego wyniku, dotyczącego beleczki B₃ o większej niż inne porowatości, śr. 0,380.

Makroskopowo słabiej zauważalne zmniejszenie objętości beleczek na najbardziej wygiętych pod obciążeniem polach ścian (ΔV_f) stanowi około jednej szóstej całkowitego zmniejszenia objętości beleczek ΔV i wynosi śr. 0,169 cm³, a po odrzuceniu wyniku dotyczącego beleczki B₃ – 0,150 cm³, śr. 0,173 cm³.

Podczas badań makroskopowych praktycznie niezauważalne zmniejszenie objętości beleczek na płaszczyznach ścian (ΔV_p) beleczek nieobciążonych (C) wynosi ponad połowę, a w przypadku beleczek obciążonych aż prawie połowę całkowitego zmniejszenia objętości beleczek, tj. śr. 0,448 lub (po odrzuceniu wyniku dla beleczki B₃) śr. 0,447.

UŚREDNIONA PRĘDKOŚĆ KOROZJI

Z jednostkowego całkowitego ubytku (zmniejszenia) objętości przypadającego na jednostkę korodowanej powierzchni zewnętrznej (D_{vc} , cm³/cm² – tab. 3), czyli grubości skorodowanej warstwy z powierzchni zewnętrznej w centymetrach, oraz ze znanego czasu korodowania (273 dni = 9 miesięcy) można obliczyć średnią prędkość

korodowania powierzchni beleczek w ciągu 1 roku. Waha się ona w granicach 0,065-0,108 cm/a (śr. 0,0892 cm/a), a po odrzuceniu wartości skrajnych dla beleczek o porowatości najmniejszej (C₂ – 11%) i największej (B₃ – 12%) w granicach 0,076-0,093 cm/a, a śr. 0,0899 cm/a.

W przeliczeniu na stosowane w literaturze określenia prędkości denudacji krasowej w mm/1000a, w warunkach przeprowadzonych badań otrzymano przeciętną prędkość sumarycznego średniego korodowania powierzchni 899 mm/1000a. Porównując tę wartość z wartością 28 mm/1000a dla oksfordzkich wapieni i wapieni marglistych z okolic Działoszyna, podaną przez J. Głazka i M. Markowicz-Łohinowicz (1976), łatwo zauważyć, że pierwsza jest prawie 32 razy większa niż druga. Według wymienionych autorów maksymalna prędkość denudacji krasowej w Polsce dotyczy środkowotriasowej, cienkouławicowej serii dolomitów i wapieni w Kościeliskach 2 (Dolina Smytnia w Tatrach Zachodnich) i wynosi 115 mm/1000a; jest ona jeszcze około 8 razy mniejsza od prędkości korozji beleczek uzyskanej w warunkach laboratoryjnych.

Jednostkowe ubytki wyznaczone przez J. Liszkowskiego (1966) na podstawie badań górnourajskich wapieni scyfiowych o strukturze tuberolitowej z Przepaści oraz gruboziarnistych biokalkarenitów koralowych z Kolonii Stoki (północno-wschodnie obrzeżenie Gór Świętokrzyskich), zakopanych w zwietrzelinie na stropie krasowiejącego masywu skalnego w ciągu 400 dni, wynosiły odpowiednio 14,60, 38,23 i 19,12 mm/1000a. Były one zatem mniejsze odpowiednio 62, 23, 47 razy niż prędkości określone w warunkach laboratoryjnych.

Z porównania uśrednionych prędkości denudacji krasowej w warunkach naturalnych i laboratoryjnych, które miały modelować odbiegające od naturalnych warunki rozwoju korozji krasowej pod projektowaną zaporą w drobnospękanym podłożu skalnym przy ciągłym, stosunkowo szybkim przepływie, przy stałym i dużym spadku hydraulicznym wody ze zbiornika, wynika, że korozja krasowa pod zaporą odbywałaby się w wyjątkowo sprzyjających warunkach, sporadycznie tylko spotykanych w naturze. Prowadzi to do sformułowania następujących uwag ogólnych.

1. W warunkach naturalnych w strefie aeracji przepływ wody nie jest z reguły ciągły. Jego pojawienie się i zanikanie jest uwarunkowane częstością, intensywnością nieciągłego, w swej istocie przerywanego opadu, co należy uwzględnić, biorąc również pod uwagę wpływ opóźnień intensywności przepływu wody i intensywności korozji krasowej w stosunku do okresu pojawienia i trwania opadu, wynikających z retencji w gruntach nadległych. Jeśli pod zaporą zaistnieje przepływ wody, to będzie on stały i – by może – coraz intensywniejszy.

2. W warunkach naturalnych tak duże spadki hydrauliczne, jakich można się spodziewać pod zaporą, nie występują w całym masywie skalnym, lecz spotyka się je tylko w bardzo ograniczonym zakresie – przede wszystkim w strefach spękań, jak również w już rozwiniętym systemie krasowym – zwłaszcza w tunelach, kominach i jaskiniach krasowych, przy czym spadki te z reguły zmieniają się bardzo szybko w czasie.

3. W warunkach naturalnych wody opadowe, wnikające do masywu skalnego – nawet wzbogacone przy przenikaniu przez glebę w CO_2 – przy powolnym przepływie stosunkowo szybko nasycają się elementami skał krasowiejących, dzięki czemu zmniejsza się prawie do zera ich działanie korozyjne. Pod zaporę natomiast dopływają ze zbiornika stale nowe wody o dużej zdolności rozpuszczania, które przy względnie dużych prędkościach przepływu na krótkich odcinkach pod zaporą nie mogą stracić zdolności do intensywnej korozji chemicznej.

4. W warunkach naturalnych korodowana powierzchnia skały w stosunku do masy tej skały (bloku, głazu, okruchu) rzadko kiedy jest tak duża, jak w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych, co oczywiście powoduje zmniejszenie intensywności korozji w odniesieniu do korodowanej masy (objętości).

5. W warunkach naturalnych stopień rozdrobnienia skały większy niż w przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych charakteryzuje tylko stosunkowo niewielkiej miąższości strefy gruzu w profilu wietrzenia (W.C. Kowalski, 1988). W znacznie miększych, słabo zwietrzałych strefach bloków i monolitów, a zwłaszcza w masywie pierwotnym, stopień rozdrobnienia jest bez porównania mniejszy, co istotnie wpływa na intensywność korozji.

Na tle tych uwag staje się jasne, że:

1. Jak wynika z danych J. Głazka i M. Markowicz-Łohinowicz (1976), największą prędkość denudacji krasowej w Polsce stwierdzono w Tatrach Zachodnich (69-115 mm/1000a), gdzie opady atmosferyczne były i są maksymalne (obecnie rzędu 1200-1600 mm/a), spadki hydrauliczne przepływających wód powierzchniowych i podziemnych są wielkie, a masywy skalne, tworzące poszczególne góry, mogły się rozprężyć.

2. W paśmie Jury Polskiej (Pasma Krakowsko-Częstochowsko-Wieluńskie), gdzie opady były i są prawie o połowę mniejsze, spadki hydrauliczne znacznie mniejsze, a masyw skalny nie podzielony na wysokie góry mógł się odprężyć tylko w niewielkim stopniu, prędkość denudacji krasowej obliczona przez J. Głazka i M. Markowicz-Łohinowicz jest znacznie mniejsza: 28-40 mm/1000a.

3. Średnia prędkość denudacji krasowej w warunkach naturalnych, chociaż zróżnicowana, powinna być zawsze mniejsza (i to wielokrotnie) niż prędkość korozji wyznaczona w opisanych warunkach laboratoryjnych, które jednak wydają się znacznie bardziej zbliżone do przewidywanych warunków korozji pod zaporą niż do warunków naturalnych.

Analizując dane przedstawione w tab. 4 łatwo zauważyć, że grubość skorodowanej warstwy zewnętrznej powierzchni beleczek jest najmniejsza w środkowych częściach ścian poza strefami wygięć (h_p) i wynosi śr. 0,0371 cm, a po odrzuceniu wartości skrajnych grubości: minimalnej 0,0312 cm (dla beleczki C_2 o $n = 11\%$) i maksymalnej 0,0412 cm (dla beleczki B_3 o $n = 12\%$) – śr. 0,0373 cm = 0,373 mm. Zatem w warunkach badania prędkość korozji na płaszczyznach ścian beleczek wynosi śr. 0,4973 mm/a lub 497,3 mm/1000a.

Analogicznie z danych tab. 4 można wyliczyć, że w warunkach przykrawędziowych ścian beleczek wynosi średnio aż 0,3333 cm/a = 3,3333 mm/a lub 3333,3 mm/1000a.

Prędkość korozji na wygiętych polach środkowej części spągowych lub stropowych powierzchni obciążonych beleczek, w których mogą powstawać naprężenia rozciągające i ujawniać się ukryte powierzchnie osłabień wytrzymałościowych, wynosi śr. 0,26 cm/a = 2,6 mm/a lub 2667 mm/1000a.

ZRÓŻNICOWANIE KOROZJI KRASOWEJ

Zmiany kształtu praktycznie maksymalnie jednorodnych i możliwie identycznych beleczek skalnych, korodowanych w jednakowych warunkach, wskazują na przestrzenne zróżnicowanie korozji, która zależy także istotnie od kształtu korodowanych powierzchni i stanu naprężeń w korodowanej skale.

Ze względu na kształt korodowanej powierzchni można wyróżnić:

- korozję płaszczyznową, działającą na płaszczyznach skalnych, cechującą się najmniejszą możliwą powierzchnią właściwą i minimalną prędkością korozji;
- korozję krawędziową, działającą na krawędziach skalnych, charakteryzującą się większą powierzchnią właściwą i dużą prędkością korozji;
- korozję narożną, zachodzącą na narożach skalnych, wyróżniającą się największą z możliwych powierzchnią właściwą i największą prędkością korozji.

Przy stałości wszystkich innych, znanych od dawna czynników wpływających na korozję, korozja jest tym większa (a tym samym większa jej prędkość), im większa jest powierzchnia właściwa korodowanej warstwy skalnej. Oznacza to: im bardziej rozdrobniona jest korodowana warstwa, tym większa jest jej korozja. Tak więc w warunkach naturalnych najintensywniejsza jest korozja w strefie gruzu profilu wietrzeniowego (W.C. Kowalski, 1988), cechującej się brakiem lub minimalną zawartością rezydium ilastego. W tej strefie przeważa korozja płaszczyznowa. Powoduje ona stopniowe osiadanie powierzchni terenu, mniej więcej równomierne, chociaż nie zawsze, niezależnie od zawałów krasowych i niecek osiadań nad większymi pustkami (jaskiniami) krasowymi.

W strefie bloków profilu wietrzeniowego (W.C. Kowalski, 1988) – z uwagi na mniejsze rozdrobnienie masy skały korozja całkowita jest znacznie mniejsza niż w strefie gruzu – wzrasta istotnie znaczenie korozji krawędziowej w miejscach przecinania się spękań o różnych kierunkach. Korozja w tej strefie znacznie słabiej odbija się w równomiernym osiadaniu powierzchni terenu, natomiast zaznacza się wyraźnie w tworzeniu i poszerzaniu kominów krasowych w miejscach przecięcia się różnych spękań.

W strefie monolitowej (i tym bardziej w niezwietrzałym, pierwotnym masywie skalnym) korozja całkowita jest wielokrotnie mniejsza niż w wyższych strefach wietrzenia. W korozji całkowitej udział korozji krawędziowej jest bardzo istotny i prowadzi do poszerzania oraz pogłębiania kominów krasowych, zainicjowanych przez korozję w strefach wyższych. Poziome pustki (w tym jaskinie) krasowe, powstające w strefie monolitowej poniżej strefy aeracji przy poziomym przepływie korodujących wód krasowych, mogą uzewnętrznić się na powierzchni terenu dopiero wówczas, gdy w wyni-

ku ich poszerzania powstają punktowo lub na ograniczonej przestrzeni zawaliska i niecki obniżen (osiadań).

Istotną nowością w przeprowadzanych badaniach laboratoryjnych wydaje się zaobserwowanie różnic w zmianach kształtu praktycznie maksymalnie jednorodnych i możliwie identycznych, obciążonych i nieobciążonych beleczek skalnych, korodowanych w jednakowych warunkach, co wskazuje na istotny wpływ naprężeń – szczególnie rozciągających – na intensywność krasu. Dla beleczek obciążonych, wykazujących naprężenia rozciągające w częściach najbardziej wygiętych (fig. 3, 4), prędkość sumarycznego skorodowania powierzchni wahała się w granicach 0,093-0,095 cm/a, przy śr. 0,0944 cm/a = 0,944 mm/a, czyli 944 mm/1000a, natomiast dla beleczek niobciążonych – 0,065-0,067 cm/a, przy śr. 0,0742 cm/a = 0,742 mm/a, czyli 742 mm/1000a. Porównanie skorodowanej warstwy i prędkości jej korozji wskazuje, że prędkość korozji beleczek obciążonych, w których – w wyniku rozciągania ich części – mogą się ujawniać utajone powierzchnie lub strefy osłabień wytrzymałościowych, jest mniej więcej 1,27 razy większa niż beleczek nieobciążonych.

Ze względu na stan naprężeń korodowanych skał można wyróżnić:

- korozję zwykłą, gdy skała korodowana jest w stanie odprężenia lub niewielkich naprężeń ściskających;
- korozję rozciągania, gdy w korodowanej skale istnieją naprężenia rozciągające (korozja rozciągania i jej prędkość są większe od korozji zwykłej i jej prędkości);
- korozja ściskania, gdy w korodowanej skale naprężenia ściskające są odpowiednio duże (wówczas można oczekiwać, że korozja ściskania i jej prędkość mogą być mniejsze od korozji zwykłej i jej prędkości).

ZMIANY KOROZJI W CZASIE

Obserwacje zmian kształtu beleczek, przeprowadzone w jednakowych warunkach laboratoryjnych – zwłaszcza przy stałym przepływie zawsze praktycznie jednakowej wody ze stałą prędkością – wskazują, że korozja i jej prędkość zmieniają się w czasie nawet wówczas, gdy wszystkie inne – poza czasem – czynniki wpływające na korozję nie zmieniają się. Zaokrąglenie naroży i krawędzi prowadzi bowiem do zmniejszenia powierzchni właściwej, a więc musi prowadzić do zmniejszenia korozji narożnej i krawędziowej oraz ich prędkości. Granicą zaokrąglania naroży i krawędzi jest dla naroży wycinek powierzchni kuli, a dla krawędzi – fragment powierzchni walcowej. Powierzchnie te przechodzą stycznie w płaszczyzny przylegających ścian, na których korozja płaszczyznowa i jej prędkość są mniejsze.

Zmniejszenie korozji narożnej i krawędziowej oraz ich prędkości prowadzi do zmniejszenia sumarycznej korozji, w której korozja narożna i krawędziowa odgrywają znaczną rolę, co jednoznacznie wynika z danych w tab. 5.

Prędkość sumarycznej korozji początkowo, tj. gdy naroża i krawędzie są ostre, jest maksymalna; w wyniku zaokrąglania naroży i krawędzi szybko maleje; w końcowej fazie

zaokrąglania naroży i krawędzi maleje powoli, zbliżając się asymptotycznie do prędkości korozji płaszczyznowej.

Analogicznie z upływem czasu zmniejsza się korozja rozciągania: Początkowo w najbardziej wygiętej przypowierzchniowej warstewce w wyniku obciążania, w której może się najbardziej manifestować istnienie stref osłabień wytrzymałościowych w postaci niewidocznych makroskopowo mikrospektań, jest maksymalna. W wyniku postępu korozji rozciągania i korodowania kolejnych warstewek, położonych wgłąb od powierzchni, stopniowo maleje, gdyż niewidoczne makroskopowo mikrospektań stają się coraz mniejsze. W końcowej fazie, gdy korozja ta zbliża się do granicy obszaru występowania w skale naprężeń rozciągających, maleje powoli, zbliżając się asymptotycznie do korozji płaszczyznowej.

Z powyższych rozważań wynika, że utrzymywanie się ostrych krawędzi druzgotu w strefie gruzu profilu wietrzeniowego oraz w zwałowisku na dnie jaskini krasowej jest krótkotrwałe – zwłaszcza przy intensywnym przepływie korodującej wody, co należy uwzględnić przy próbach wnioskowania o peryglacjalnym pochodzeniu ostrokrawędzistego rumoszu skalnego w jaskiniach krasowych i jego zachowaniu w tym stanie do dzisiaj.

Jednocześnie należy zauważyć, że zaokrągleniu naroży i krawędzi towarzyszy z jednej strony zmniejszenie sumarycznej korozji, z drugiej zaś ułatwienie przepływu korodującej wody, co z kolei może wpływać na zwiększenie korozji, zwłaszcza płaszczyznowej, chociaż wydaje się z reguły w niewielkim zakresie.

WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

1. Korozja krasowa, będąca zasadniczym składnikiem rozwoju krasu i denudacji krasowej, jest różnorodna w przestrzeni i zmienna w czasie.

2. Do znanych czynników, powodujących różnorodność korozji i jej skutków, należy dołączyć kształt i powierzchnię właściwą skały i jej okrucichów, co prowadzi do wyróżniania korozji: narożnej, krawędziowej i płaszczyznowej.

3. Wartość i prędkość korozji zależą również od stanu naprężeń skały, co uzasadnia wyróżnianie korozji: zwykłej, rozciągania i wysokiego ściskania.

4. Zmienność korozji i jej prędkości w czasie oraz niewątpliwa ich histereza powodują, że obliczenia prędkości denudacji krasowej, wyrażanej w mm/1000a na podstawie danych dla okresu do 1 roku (lub co się też często zdarza nawet do okresu krótszego) bez uwzględniania zmian wszystkich powodujących korozję czynników w całym tysiącleciu (a tym bardziej w jego wielokrotności), można traktować tylko jako wartości przybliżone, z pewnością nie średnie, a wprost przeciwnie, wręcz przypadkowe.

5. Wartości korozji i jej prędkości uzyskane w wyniku badań laboratoryjnych, modelujących warunki najbardziej sprzyjające korozji bez jej ograniczeń w warunkach naturalnych, są wielokrotnie przewyższone w odniesieniu do korozji i jej prędkości w

warunkach naturalnych, a to przede wszystkim ze względu na udostępnienie ze wszystkich stron, prawie całej powierzchni zewnętrznej blozków, stałe utrzymywanie dużego spadku hydraulicznego przepływu wody (będącej roztworem nienasyconym elementami skały).

Podziękowania. Autor czuje się mile zobowiązany wyrazić podziękowania za owocne dyskusje nad naturą krasu i korozji krasowej doc.drowi hab. J. Liszkowskiemu, doc.drowi hab. R. Kaczyńskiemu i drowi hab. J. Głazkowi, a także p. K. Lecewicz, p. T. Krasnodębskiemu i mgrowi A. Niedkowi za pomoc techniczną przy wykonywaniu i wykończeniu tej pracy oraz p. B. Sawosko za wykonanie analiz chemicznych.

Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej
Uniwersytetu Warszawskiego
Warszawa, Al. Żwirki i Wigury 96
Nadesłano dnia 10 marca 1990 r.

PIŚMIENNICTWO

- BAŻYŃSKI J. (1960a) – Geologiczno-inżynierska charakterystyka krasu okolic Częstochowy. *Prz. Geol.*, **8**, p. 431-432, nr 8.
- BAŻYŃSKI J. (1960b) – Geologiczno-inżynierskie problemy Huty im. Bolesława Bieruta. *Biul. Inst. Geol.*, p. 1-77.
- BEDNAREK J. (1966) – Inżyniersko-geologiczna charakterystyka rozwoju krasu w okolicach Działoszyna nad Wartą na tle litologii utworów górnourajskich. *Arch. Kat. Geol. Inż. UW. Warszawa.*
- GŁAZEK J. (1989) – Paleokarst of Poland. In: *Paleokarst a systematic and regional review* (ed. P. Bosak, D.C. Ford, J. Głazek), p. 77-105. CAV Academia, Praha. Elsevier. Amsterdam.
- GŁAZEK J., BEDNAREK J., SZYŃKIEWICZ A., WIERZBOWSKI A. (1979) – Geneza jaskini Szachownica – największego systemu jaskiniowego Wyżyny Krakowsko-Wieluńskiej. *Kras Speleol.*, **11**, p. 40-50.
- GŁAZEK J., MARKOWICZ-ŁOHINOWICZ M. (1976a) – Remarks of the use of quantitative methods to karst denudation velocity. *Proc. 6th Inter. Congr. Speleology 1973*, p. 225-240. Academia. Praha.
- GŁAZEK J., SULIMSKI A., SZYŃKIEWICZ A., WYSOCZAŃSKI T. (1976b) – Middle Pleistocene karst deposits with *Ursus spelaeus* at Draby near Działoszyn, Central Poland. *Acta Geol. Pol.*, **26**, p. 451-466, nr 3.
- GŁAZEK J., RUDNICKI J., SZYŃKIEWICZ A. (1977) – Preglacial caves – a special genetic type of cave in glaciated areas. *Proc. 7th Inter. Speleol. Congr.*, p. 215-217. Sheffield. England.
- GRADZIŃSKI R. (1962) – Rozwój podziemnych form krasowych w południowej części Wyżyny Krakowskiej. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, **32**, p. 429-490, z. 4.
- GRADZIŃSKI R., WÓJCIK Z. (1966) – O krasie kopalnym w Polsce. *Pr. Muz. Ziemi*, **9**, p. 151-222.
- KOWALSKI W.C. (1961) – Wytrzymałość na ściskanie budowlanych skał senońskich przełomowego odcinka Wisły środkowej na tle ich litologii. *Biul. Geol. Wyd. Geol. UW*, **1**, cz. 2, p. 3-152.
- KOWALSKI W.C. (1966) – Anizotropia wytrzymałości i mięknięcie skał senońskich przełomowego odcinka Wisły środkowej. *Biul. Inst. Geol.*, **190**.
- KOWALSKI W.C. (1978) – Regionalna geologia inżynierska Polski. *Wyd. UW. Warszawa.*
- KOWALSKI W.C. (1988) – Geologia inżynierska. *Wyd. Geol. Warszawa.*

- LISZKOWSKI J. (1966) – Inżyniersko-geologiczna charakterystyka rozwoju krasu na tle litologii utworów górnourajskich północno-wschodniego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich. Arch. Kat. Geol. Inż. UW. Warszawa.
- SAMSONOWICZ J. (1936) – Zjawiska krasowe i trzeciorzędowa brekcja kostna w Wężach pod Działoszy-nem. Zabyt. Przyn. Nieożyw., 3, p. 147-158.
- WIERZBOWSKI A. (1965) – Problem granicy oksford-kimeryd w północnej części Jury Krakowsko-Częstochowskiej. Roczn. Pol. Tow. Geol., 35, p. 291-300, z. 2.

Witold Cezariusz KOWALSKI

KARST CORROSION DIFFERENTIATION ACCORDING TO SHAPES OF CORRODED ROCK MASSES AND THEIR STRESS-STRAIN STATE

S u m m a r y

To definite possibilities of a karst intensification under a designed water dam on the Warta River near Działoszyn (Middle Poland) the model laboratory studies of corrosion were executed on practically equal beams, cut from macro-physically homogeneous pelite limestone (Tab. 1), without any cracks and latent surfaces of the strength reduction (Fig. 1), in the specially constructed tank (Fig. 2), which has preserved a continuous flow of fresh tap water by same hydraulic gradient during 9 months. Observations (Fig. 3 and 4), measurements and calculations (Tab. 2-5), with regard to literature data, make possible to formulate the following general conclusions: 1 – the karst corrosion is differentiated in space and time; 2 – on the ground of shapes and specific surfaces of rocks and their fragments one can distinguish corrosions: angular, edge and plane ones; 3 – depends on the stress-strain state in rocks one can distinguish: normal corrosion, corrosion of tension and corrosion of high compression; 4 – corrosion variations in time and their hysteresis point out, that without taking into consideration each change of every karst factor during the whole period (e.g. 1000 a) a value of corrosion (e.g. mm/1000a) should not be estimated as mean value, but on the contrary it should be treated only as casual.

Translated by the Author