



Prof. dr hab. inż. Wiesław KURDOWSKI
Dr inż. Albin GARBACIK
Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych, Oddział w Krakowie

NAJCZĘSTSZE BŁĘDY W OCENIE PRZYCZYŃ USZKODZEŃ BETONU I JEGO ZAGROŻENIA AWARIĄ

FREQUENT MISTAKES IN CONCRETE DAMAGE EXPLANATION AND OF ITS FUTURE FAILURE PROGNOSIS

Streszczenie Występują stosunkowo często przypadki, że nawet doświadczony ośrodki badawcze popełniają błędy w ocenie przyczyn uszkodzeń betonu i mylnie przewidują jego zagrożenie awarią. Tok postępowania w badaniach, z pozoru prawidłowy, polega na wykonywaniu oznaczeń chemicznych zawartości siarczanów oraz sodu i potasu w próbce betonu. Jest on czasem uzupełniony analizą rentgenowską i termiczną. Te analizy chemiczne dają często „za duże” zawartości wymienionych składników co jest spowodowane analizowaniem za małej próbki betonu. Taka próbka nie jest reprezentatywna i z reguły zawiera zbyt dużo zaczynu, a więc także siarczanów i alkaliów. Na tej podstawie zakłada się „a priori” korozję siarczanową i reakcję kruszyw z alkaliom jako przyczyny powstałych uszkodzeń, które równocześnie stwarzają zagrożenie awarią badanego betonu. Nie bierze się przy tym pod uwagę szybkości przebiegu tych procesów, a więc czasu, który musi upłynąć od momentu betonowania do wystąpienia uszkodzenia betonu. Równocześnie zapomina się o przyczynach fizycznych, przede wszystkim związanych z pielęgnacją betonu. Uniknąć tych błędów można analizując reprezentatywną próbkę betonu, przeprowadzając obserwację jego mikrostruktury pod elektronowym mikroskopem skaningowym oraz biorąc pod uwagę możliwość wystąpienia przyczyn fizycznych, na przykład gradientu temperaturowego lub wysychania młodego betonu.

Abstract There are relatively frequent cases, that even the experienced research centers make mistakes in explanation of the reasons of concrete damage and erroneously foresee its failure threat. The research procedure, outwardly correct, consists in chemical determination of sulphates as well as sodium and potassium content in concrete sample. This approach is sometimes completed with X-ray and thermal analysis. The chemical analysis give frequently “too high” content of mentioned above components which is caused by too small, non representative sample of concrete in question. Such sample contains too much cement paste and consequently also too much sulphates and alkalis. On this basis it is supposed “a priori” sulphate corrosion and ASR as a reasons of damage which simultaneously gives threat of concrete failure. Simultaneously the kinetics of these processes are not taken into consideration, consequently the time which is necessary from concrete mix production until damage formation. Also the physical reasons are omitted, principally thermal gradient and concrete curing conditions. These mistakes can be avoided if representative i.e. greater concrete sample is under examination, and its microstructure observed under SEM. Also possible physical reasons of concrete damage should be taken under consideration.

1. Wstęp

Znaczne ożywienie w budownictwie, w tym także w zakresie związanym z infrastrukturą, pociągnęło za sobą wzrost realizowanych konstrukcji betonowych i występowanie

nieuniknionych, najczęściej drobnych, uszkodzeń betonu. Powstaje wówczas konieczność rozpoznania przyczyn tych uszkodzeń i ewentualnego zagrożenia jakie ono stwarza dla trwałości betonu oraz oczywiście metod naprawczych, które należy zastosować. Zleca się więc różnego rodzaju ekspertyzy, które najczęściej obejmują wykonanie analiz chemicznych materiału pobranego z obszaru uszkodzenia. Często wykonuje się również badania rentgenograficzne próbek betonu, uzupełnione termiczną analizą różnicową, połączoną z termograwimetrią. Uzyskane tymi metodami wyniki stanowią podstawę do opracowania oceny prawdopodobnej przyczyny uszkodzeń oraz prognozy dalszych zagrożeń i trwałości betonu.

W zakresie składu chemicznego największe zainteresowanie budzą dwa składniki: siarczany i alkalia, bowiem szczególną uwagę w tych badaniach zwraca się na potencjalną możliwość występowania pospolicie znanych mechanizmów korozji betonu, a mianowicie ekspansji betonu spowodowanej powstawaniem ettringitu, a więc korozji siarczanowej, oraz reakcji kruszywa z alkaliarnymi. Konsekwentnie na dyfraktogramach poszukuje się ettringitu oraz ewentualnie faz zawierających siarczany, którymi są z reguły gips i anhydryt. Potencjalne prawdopodobieństwo występowania tych faz w betonie, przynajmniej teoretycznie, wzrosło ostatnio w związku z pojawieniem się możliwości stosowania jako dodatku do betonu popiołów lotnych, które mogą zawierać produkty odsiarczania spalin.

W zasadzie ten sposób postępowania, a więc wykonanie analiz chemicznych próbek betonu, ich analiza rentgenograficzna i termiczna, stanowią poprawny tok postępowania badawczego i powinny doprowadzić do wyjaśnienia, a przynajmniej do wykluczenia, ewentualnych przyczyn powstałych uszkodzeń. W praktyce jednak bardzo często nie prowadzą do uzyskania prawidłowej oceny przyczyn powstałych uszkodzeń oraz stanu betonu i nie stanowią dobrego źródła informacji na temat zagrożeń jakie mogą się pojawić w przeszłości, a więc trwałości tego kompozytu.

Bardzo często bowiem droga poszukiwania przyczyn uszkodzeń w składzie chemicznym betonu stanowi za duże uproszczenie. Nie wolno pomijać drugiej bardzo ważnej grupy przyczyn, do których należy pielęgnacja młodego betonu. Powszechnie wiadomo, że należy zapobiegać ubytkowi wody z betonu, która prowadzi do zmniejszenia przyrostu wytrzymałości i do skurczu plastycznego. Szczególnie należy chronić beton przed nasłonecznieniem, które, obok intensywnego parowania wody z warstw powierzchniowych, wywołuje bardzo szkodliwy gradient temperatury, nawet w warstwie betonu o stosunkowo małej grubości. Oba te zjawiska prowadzą jak wiadomo do bardzo dużego skurczu suszenia oraz związanego z różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej i w konsekwencji powodują znaczne zarysowania betonu.

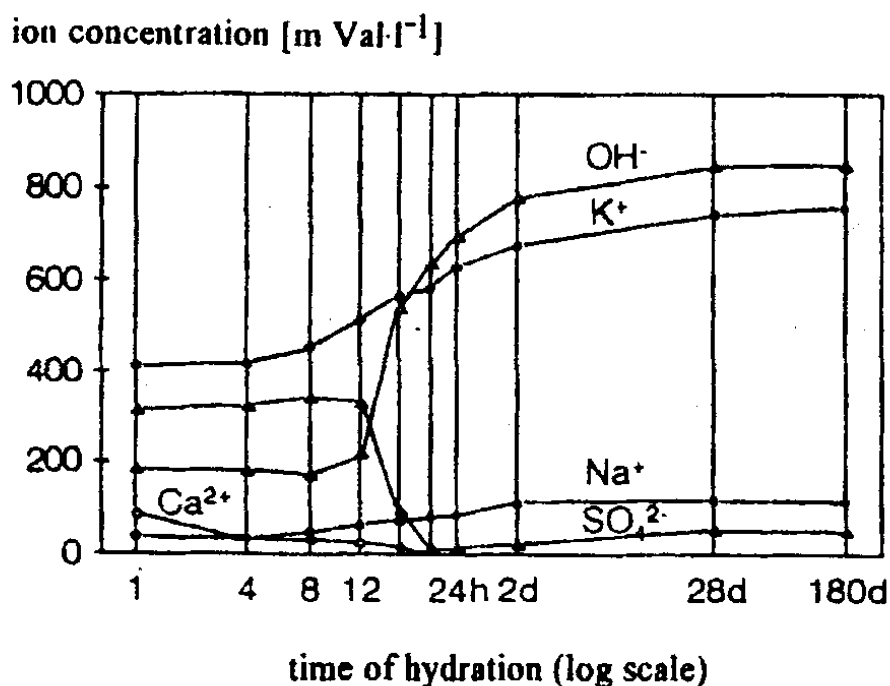
W niniejszym artykule autor pragnie poruszyć powody najczęściej spotykanych błędów w ocenie przyczyn uszkodzeń betonu, spotykanych w praktyce. Przegląd ten nie pretenduje do wyczerpania tego złożonego i bardzo zróżnicowanego zagadnienia, bowiem z konieczności opiera się na bardzo ograniczonej liczbie przypadków znanych autorowi. Celem tego przeglądu jest przede wszystkim zwrócenie uwagi młodym naukowcom i praktykom na pułapki jakie na nich czyhają przy wykonywaniu takich ocen, co może w przyszłości przyczynić się do ich uniknięcia.

2. Skład chemiczny betonu

Jak powszechnie wiadomo kruszywo ma w betonie największy udział objętościowy wynoszący około 70%, a zaczyn przeciętnie 30%. Udział piasku stanowi około 25%, a zaprawa 55%. Przy uwzględnieniu przeciętnej gęstości tych składników betonu można przeliczyć udziały objętościowe na masowe. Daje to następujący wynik: kruszywo 82%, a

zaczyn 18%. Na tej podstawie można ocenić zawartość siarczanów w betonie; przy założeniu, że cement ma maksymalnie 3% SO_3 w betonie powinno znajdować się przeciętnie około 0,4%, a w praktyce nawet nieco mniej. Jeżeli chodzi o alkalia to sprawa ma się inaczej; w kruszywie grubym występują minerały, które zawierają dużo sodu i potasu. Typowym przykładem są skalenie sodowo – potasowe, które stanowią minerały skałotwórcze wielu skał magmowych: granitów, sjenitów i metamorficznych gnejsów, amfiboli. Można przypomnieć skrajne człony tego szeregu skał, które stanowią albit $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ i ortoklaz $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$. Wyjątek pod tym względem będą stanowiły kruszywa wapienne i dolomitowe, które będą zawierały bardzo mało sodu i potasu.

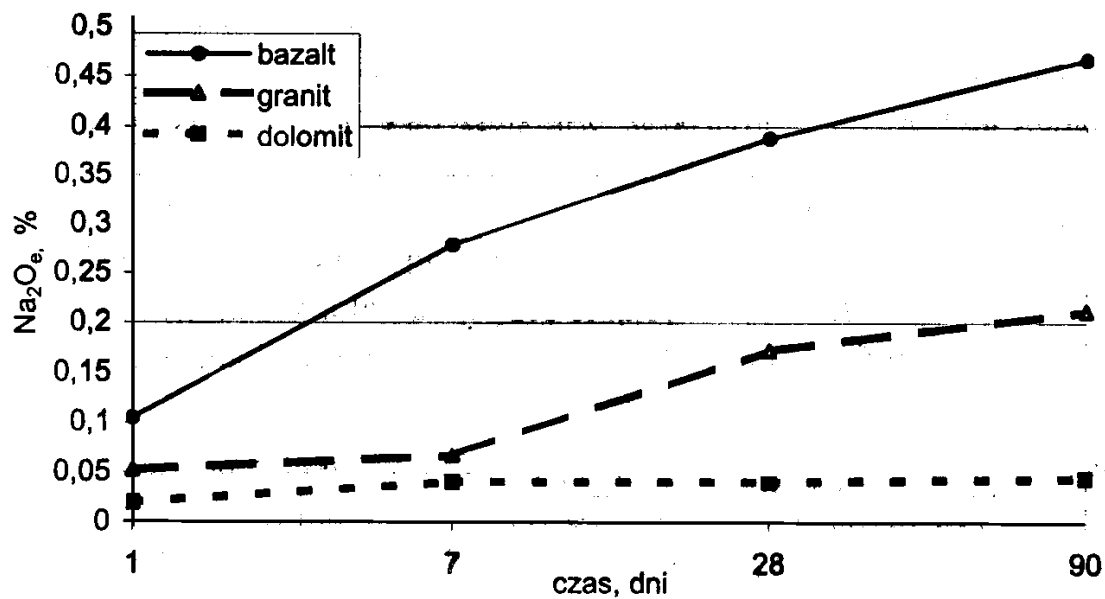
W toku analizy chemicznej betonu trzeba więc rozróżnić ogólną zawartość alkaliów od alkaliów rozpuszczalnych w wodzie. Te ostatnie występują w zaczynie z reguły jako wodorotlenki i to głównie w roztworze w porach betonu. Na rysunku 1 pokazano skład fazy ciekłej w zaczynie [1], przy czym będzie on w przybliżeniu taki sam w betonie. Wodorotlenki sodu i potasu z tego roztworu przechodzą więc bardzo szybko do wody w trakcie ługowania nią betonu. W celu oznaczenia zawartości rozpuszczalnych alkaliów w betonie można zastosować amerykańską normę ASTM C114, dotyczącą oznaczania zawartości rozpuszczalnych alkaliów w cemencie.



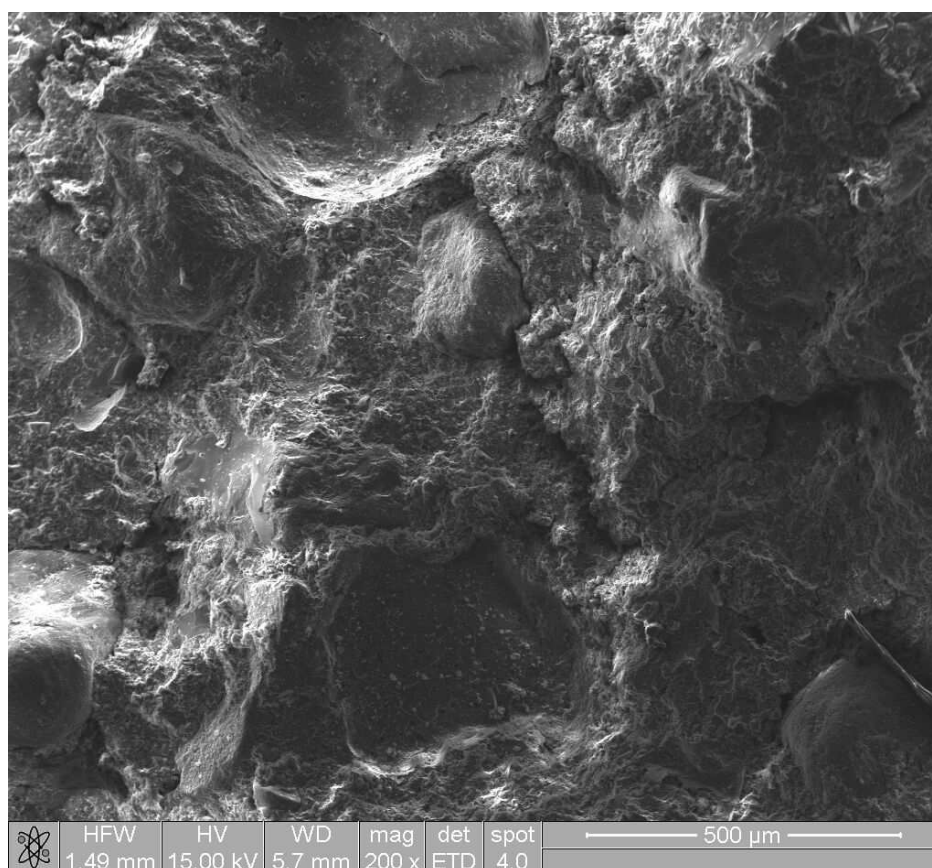
Rys. 1. Skład roztworu w porach betonu [1]

Natomiast alkalia z kruszywa są praktycznie nierozpuszczalne w wodzie, a tylko mała ich część może ulegać ługowaniu. Przechodzenie do roztworu alkaliów zawartych w kruszywie będzie procesem powolnym i będzie stopniowo zachodziło w betonie, bowiem środowisko betonu o wysokim pH jest potencjalnie korozyjne dla kruszyw.

Na rysunku 2 pokazano stopniowe ługowanie alkaliów z kruszyw [2], co jest jednak procesem powolnym i nie może wpływać na przebieg reakcji w betonie w okresie krótszym od kilku miesięcy. Kluczowe znaczenie dla uzyskania poprawnych wyników analizy ma wielkość pobranej próbki betonu. Pozornie w małej próbce powinniśmy raczej oczekiwać nadmiaru kruszywa. W praktyce jest odwrotnie, kruszywo, szczególnie grube bardzo łatwo wyłuskuje się z matrycy cementowej (rys. 3) i w małej próbce mamy przeważnie nadmiar zaprawy.



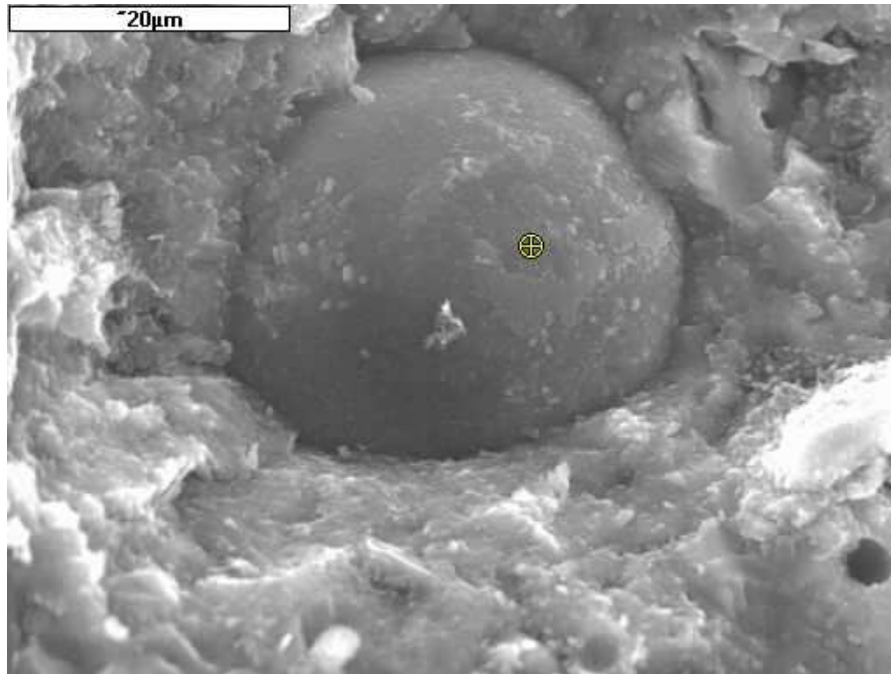
Rys. 2. Ilość wyciekających alkaliów z kruszyw w roztworze nasyconym $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [2]



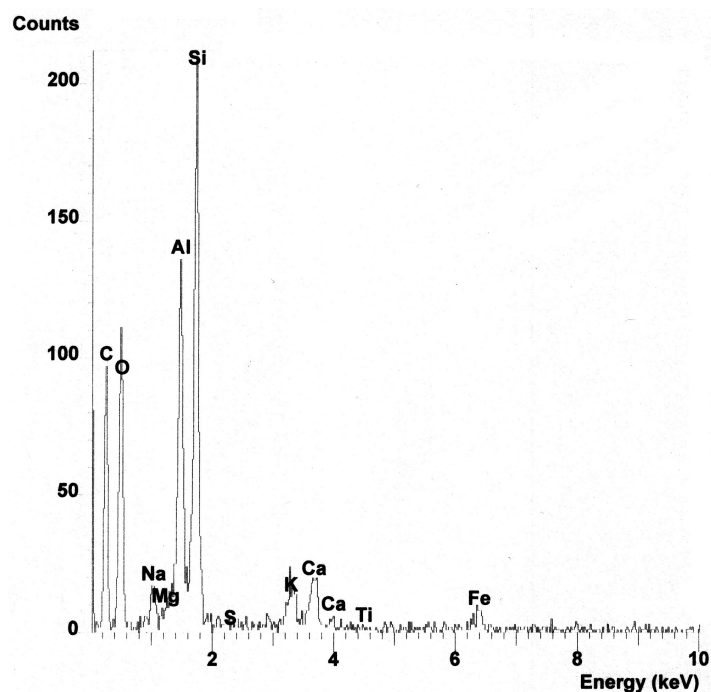
Rys. 3. Ślad po ziarnie kruszywa wyluskanym z matrycy cementowej

Analiza takiej próbki daje zbyt dużą zawartość siarczanów, zwykle znacznie powyżej 0,4%, na przykład 0,7% lub nawet 1%. Wniosek jest natychmiastowy, narzuca się wprost sam: korozja siarczanowa! Często możemy dopatrywać się przyczyny w dodatku do betonu popiołów zawierających produkty odsiarczania spalin. Najlepszą metodą na rozwianie

wątpliwości dotyczących popiołu jest przeprowadzenie obserwacji preparatów betonu pod elektronowym mikroskopem skaningowym, wyposażonym w analizator rentgenowski. Duże ziarno popiołu (rys. 4) jest doskonałym obiektem do analizy i uzyskany wynik jest obarczony małym błędem.



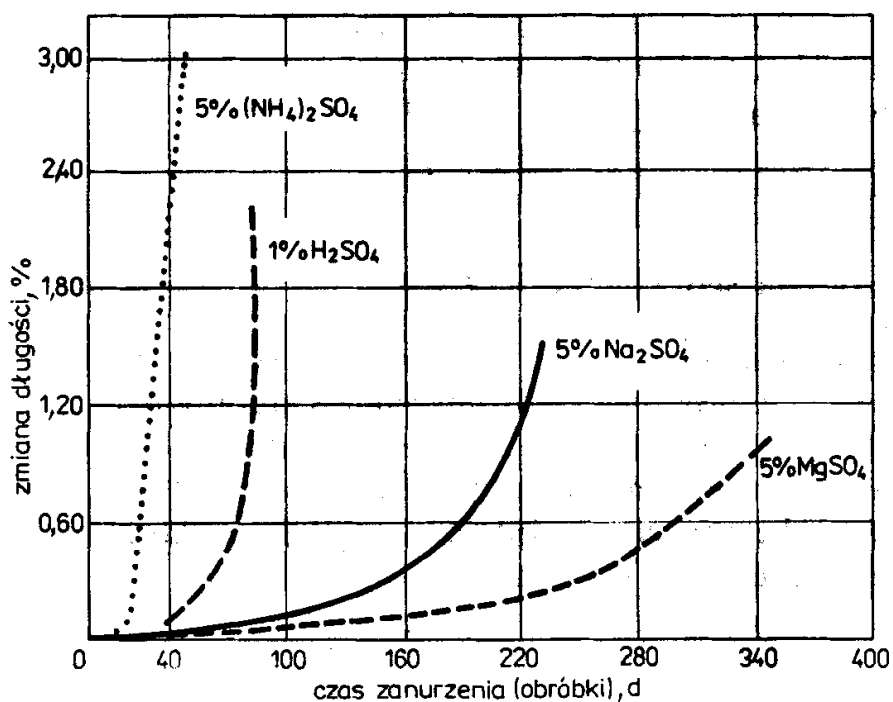
Rys. 4 a Ziarno popiołu w preparacie z betonu



Rys. 4b Analiza ziarna popiołu wskazująca na popiół krzemionkowy

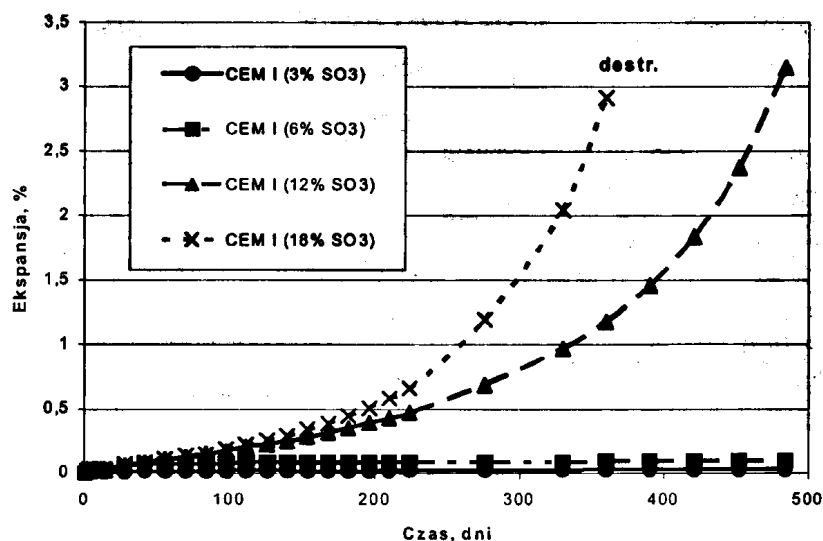
Jeżeli poruszyliśmy zagadnienie korozji siarczanowej to wypada poświęcić jej trochę uwagi, nie w aspekcie reakcji chemicznych, które są powszechnie znane, lecz aby przypomnieć szybkość zachodzenia ekspansji w czasie. W tym celu wystarczy popatrzeć na

dosyć już stary rysunek z badań Oberholstera et al.[3], pokazany pod numerem 5. Wynika z niego, że aby doszło do spękań w betonie potrzeba co najmniej 200 dni w roztworze Na_2SO_4 , a w roztworze MgSO_4 nawet ponad rok. Nie jest to więc proces szybki.



Rys.5. Rozszerzalność liniowa kostek z zaprawy zanurzonej w różnych roztworach siarczanowych [3]

Przedstawiony rysunek dotyczy zewnętrznej korozji siarczanowej podczas gdy w przypadku betonu będzie wchodzić w grę wewnętrzna korozja siarczanowa. Jest ona również bardzo mało prawdopodobna i nasze badania pokazują, że nawet 6% SO_3 w zaczynie nie powoduje ekspansji (rys. 6) [4]. Dopiero 12% powoduje niebezpieczną ekspansję jednak zniszczenie próbki występuje dopiero po 350 dniach.

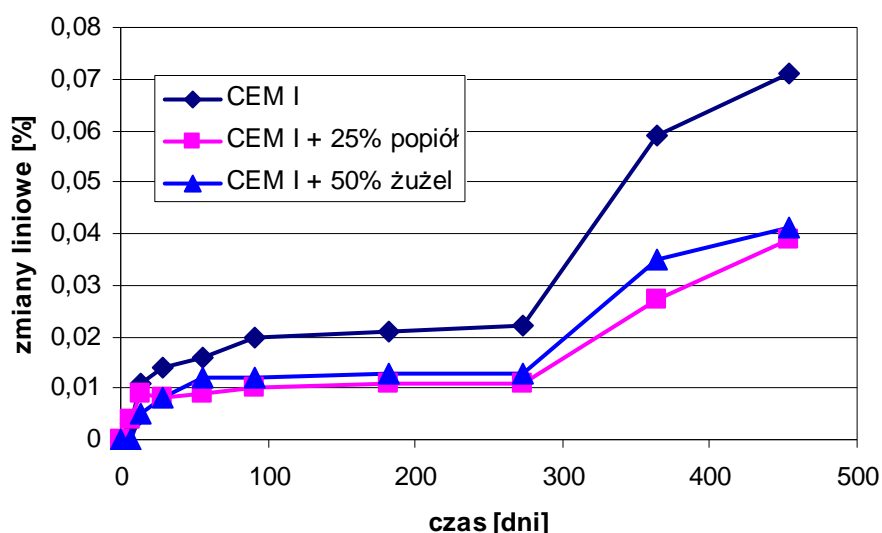


Rys. 6. Zmiany liniowe beleczek zaprawy z CEM I po różnym czasie dojrzewania w wodzie

Innymi składnikami „poszukiwanymi” w składzie chemicznym betonu są sód i potas. W cemencie jest ich sumarycznie od 0,7% do 0,8%, wyjątkowo 0,9%, jako Na_2O_e . Są one na ogół w całej ilości rozpuszczalne w wodzie, a więc w betonie można oczekiwać 0,08% - 0,1% Na_2O_e . Większe zawartości, a autorzy widzieli w ocenach uszkodzonego betonu nawet analizy przekraczające 4%, wywołują natychmiast wnioski o korozji kruszywa z alkaliami. Taki wynik analizy jest zrozumiały w świetle wcześniej omówionych przyczyn. Trzeba więc przestrzegać zasady analizowania dużej próbki betonu, a równocześnie rozpatrywać tylko zawartość alkaliów rozpuszczalnych.

Założmy jednak na chwilę, że stwierdziliśmy rzeczywiście dużą zawartość alkaliów w betonie, na poziomie na przykład 2%. Wówczas, nawet gdyby przypadkowo równocześnie kruszywo było reaktywne, trzeba pamiętać o szybkości przyrostu ekspansji w wyniku reakcji kruszywa z alkaliami. Jest to proces bardzo powolny, który może trwać kilka lat. W celu jego przyspieszenia w normach amerykańskich stosuje się bardzo duże stężenia NaOH i podwyższone temperatury.

Na rys. 7 pokazano przebieg ekspansji liniowej kruszywa reaktywnego badanego według metody ASTM C1290, w temperaturze 38°C [5]. Ekspansja przekraczająca krytyczną wartość 0,04% wystąpiła dopiero po roku, pomimo podwyższonej temperatury. Jej wartość nie może jednak jeszcze, z oczywistych względów, spowodować poważniejszego zarysowania betonu.



Rys. 7. Rozszerzalność próbek betonu dojrzewających w temperaturze 38°C [5]

Nie tylko jednak długi okres eksploatacji powinien być uwzględniony przy ocenie uszkodzonego betonu w przypadku brania pod uwagę reakcji kruszywa z alkaliami. Jak wiadomo bowiem reakcji tej towarzyszy z reguły wydzielanie się białego żelu z powstałych spękań (rys. 8).

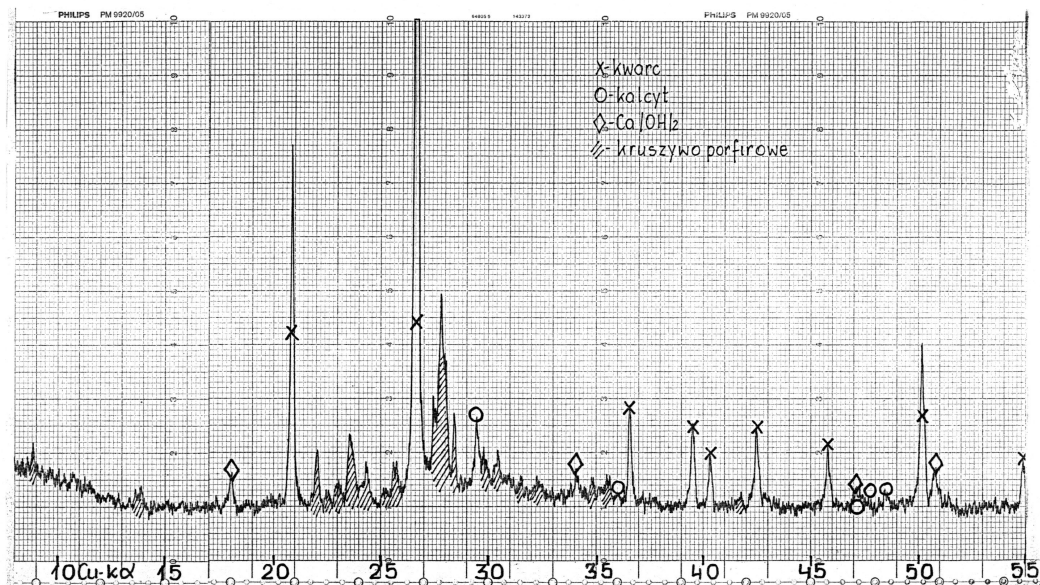
Aby zamknąć problem składu chemicznego betonu trzeba jeszcze raz powrócić do próbki reprezentatywnej, która powinna mieć odpowiednią wielkość. Wytyczne w tej sprawie można opierać na nieaktualnej już normie BN-88/ B-06250, która uzależniała wielkość próbki do badań wytrzymałości od wielkości maksymalnego kruszywa. Autorzy uważają, że powinien to być walec o średnicy 15 cm, a w ostateczności 10 cm. Taki walec zmielony na proszek pozwala dopiero na uzyskanie małej próbki średniej, którą można poddawać analizie.



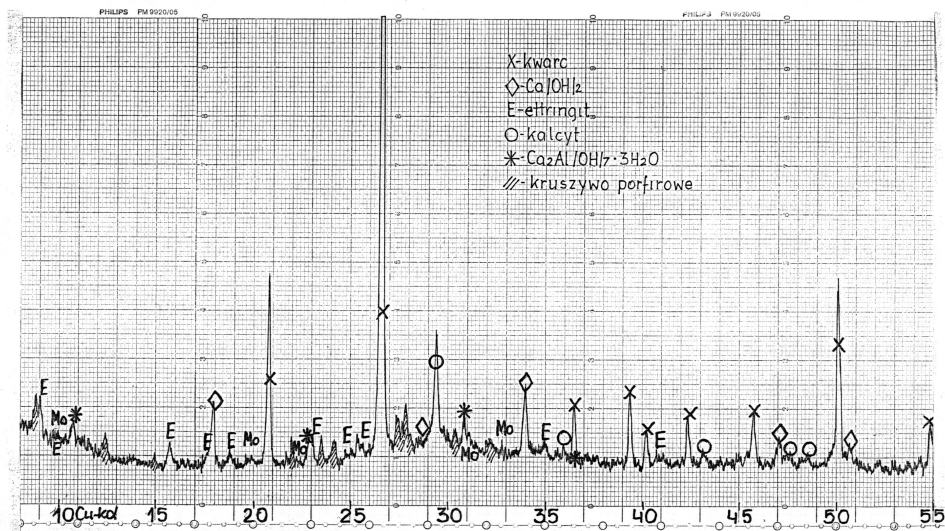
Rys. 8. Most w Holandii, typowy obraz betonu ulegającemu reakcji kruszyw z alkali

3. Badania rentgenograficzne

Rentgenografia jest doskonałym narzędziem dla badania składu fazowego betonu, w tym przede wszystkim matrycy cementowej. Jest kłopot z jej wydzieleniem z betonu, czego całkowicie nie można łatwo uzyskać. Jednak jak wykazało nasze doświadczenie postępowanie zgodnie z Instrukcją ITB 277/86 stosującą mechaniczne wzbogacanie próbki do badań daje zadowalające wyniki (rys.9a i rys.9b). Na rentgenogramie tak uzyskanej matrycy cementowej możemy oczekiwać wystąpienia refleksów od portlandytu i ettringitu.



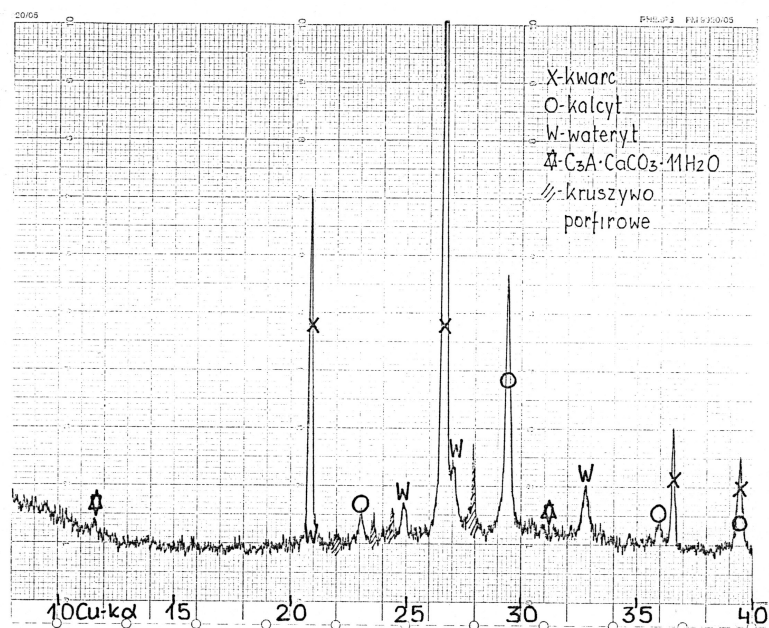
Rys. 9a. Rentgenogram betonu



Rys. 9b. Rentgenogram próbki wzbogaconej w matrycę cementową

Obie te fazy tworzą na ogół w betonie dobrze wykształcone kryształy i, szczególnie w przypadku ettringitu, którego zawartość jest mała, dają one refleksy o stosunkowo dużych intensywnościach. Portlandyt i ettringit, ten ostatni o umiarkowanej intensywności, świadczą o dostatecznej ilości cementu w betonie i prawidłowym postępie jego hydratacji. Czasem udaje się znaleźć refleks mullitu, co świadczy o zastosowaniu krzemionkowego popiołu lotnego, korzystnego dla właściwości betonu. Natomiast rentgenogram betonu pozwala zidentyfikować skład mineralny kruszywa i określić jego rodzaj z dużym prawdopodobieństwem.

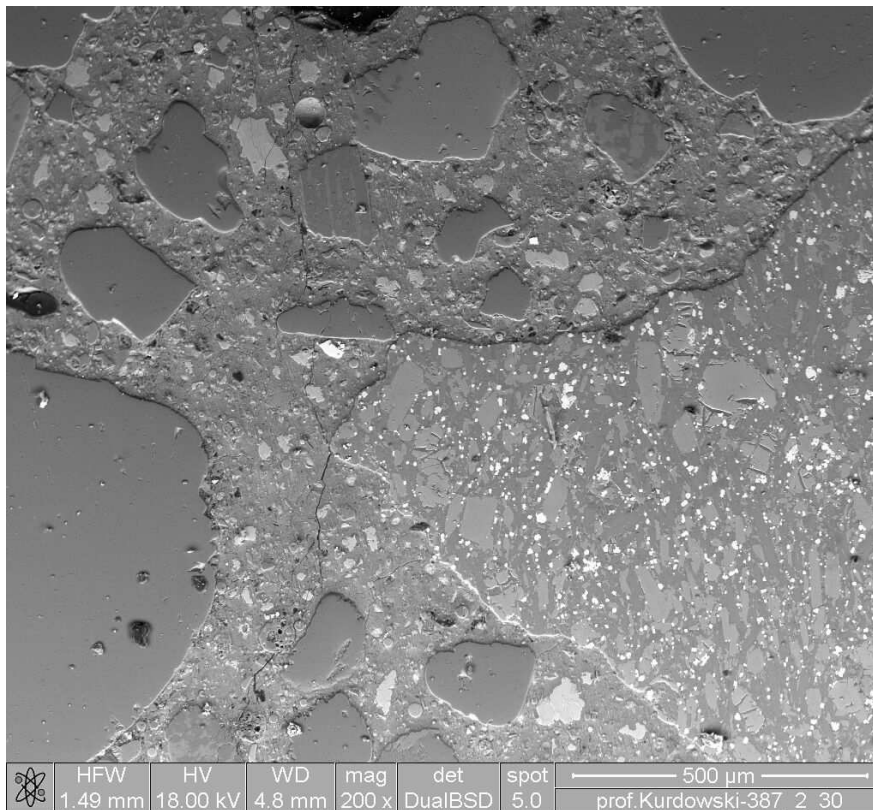
Często zdarza się, że na powierzchni betonu występują cienkie, odszczepiające się warstwy, które robią wrażenie objawów korozji. Jest to najczęściej wydzielanie mlecza cementowego, które bardzo szybko ulega karbonatyzacji. Zeskrobanie tej warstwy i jej rentgenogram rozstrzygają wątpliwości (rys. 10).



Rys. 10. Rentgenogram osadu, który jest mleczeniem po karbonatyzacji

4. Obserwacje pod elektronowym mikroskopem skaningowym

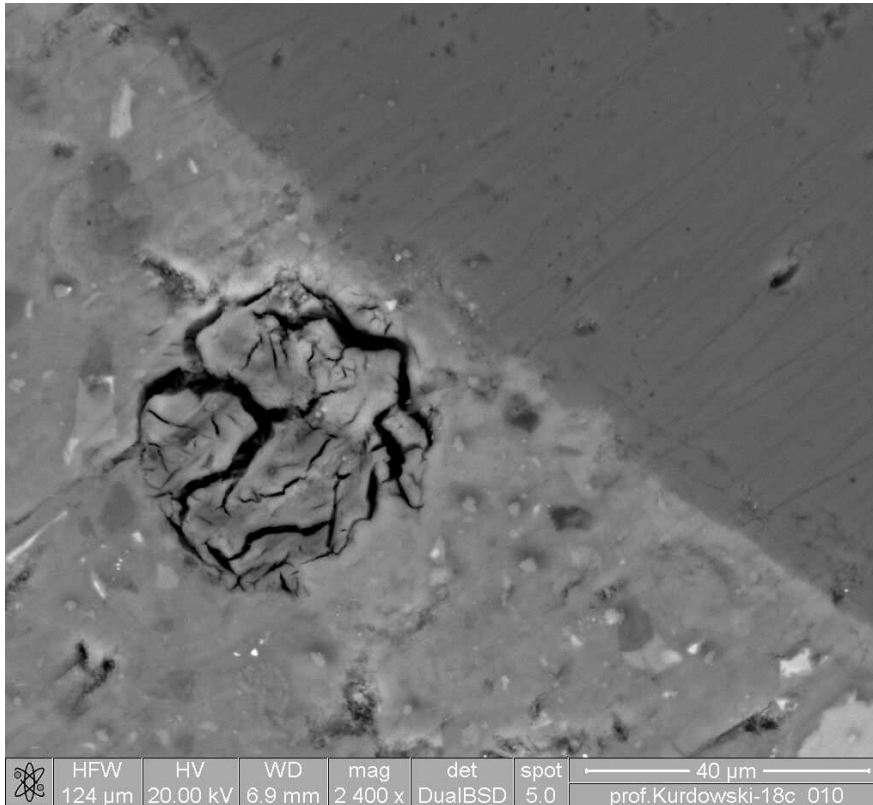
Analiza mikrostruktury betonu pod elektronowym mikroskopem skaningowym pozwala szybko ocenić czy jest poprawna. Należy jednak stosować nie przełamy a zgłady próbek (rys. 11). Można również łatwo stwierdzić czy beton jest jednorodny. Nieprawidłowości w budowie betonu dają również szybko wskazówki na temat prawdopodobnych przyczyn obserwowanych nieprawidłowości. Preparat dobrego betonu pokazano na rys.11. Dobry beton ma równomiernie rozmieszczone (rys. 11) kruszywo drobne i grube zanurzone w matrycy cementowej, w której występują ziarna cementu, które nie uległy hydratacji.



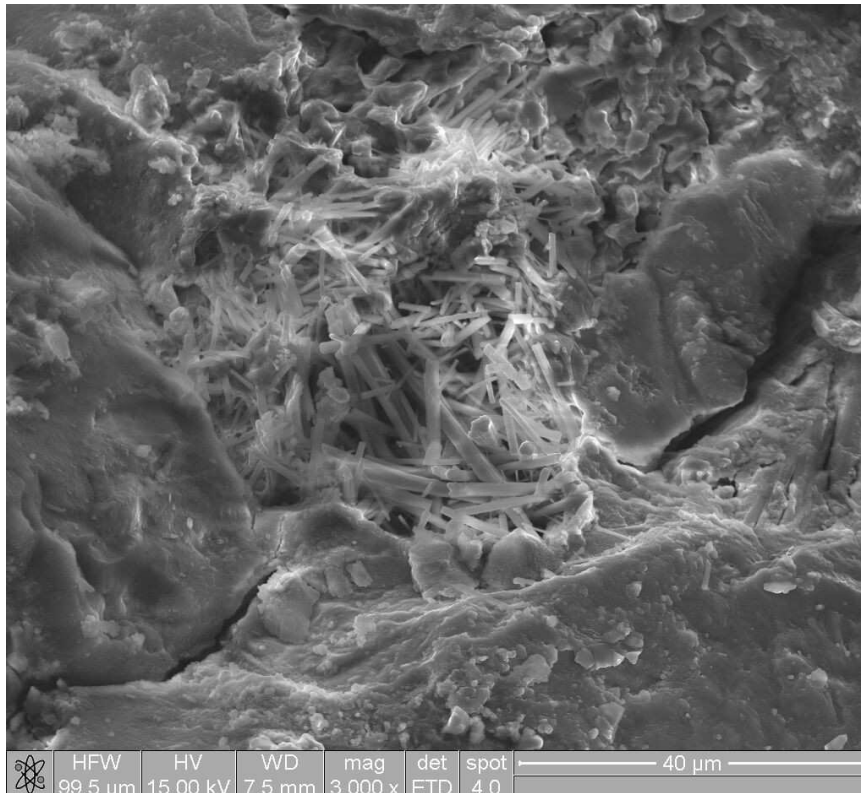
Rys. 11 Preparat dobrego betonu

Obserwacje mikroskopowe w połączeniu z analizatorem rentgenowskim umożliwiają łatwą identyfikację dodatków mineralnych typu II do betonu, którymi są żużel i popiół. Preparat z ziarnem popiołu pokazano na rysunku 4a i 4b. Łatwo także określić rodzaj popiołu; na powierzchni ziarn widać także często kryształki mullitu lub magnetytu.

Obserwacje pod mikroskopem elektronowym pozwalają na wykrycie również gniazd ettringitu, które występują na ogół w każdym betonie z cementu portlandzkiego CEM I. Pokazano takie obrazy na rysunkach 12 i 13. Nie stanowią one żadnego zagrożenia dla betonu, pomimo że czasem powodują powstawanie mikrospekkań, o małym zasięgu.



Rys.12. Gniazdo ettringitu



Rys.13. Gniazdo ettringitu przy większym powiększeniu

5. Wnioski

Omówienie kilku przyczyn błędów popełnianych przy ocenie uszkodzeń betonu pozwala na wyciągnięcie trzech wniosków generalnych:

- a) próbka do analizy powinna mieć dostateczną wielkość,
- b) wykonanie rentgenogramów mechanicznie wydzielonej matrycy cementowej pozwala na ocenę poprawności procesu hydratacji,
- c) obserwacje pod elektronowym mikroskopem skaningowym zglądów próbek betonu pozwalają na ocenę jego jednorodności, na wykrycie rodzaju cementu i dodatków mineralnych typu II do betonu.

Literatura

1. W. Wieker, R. Herr, H. Schubert, Corrosion of Cement Paste, Proc. Inter. Coll., Mogilany, ed. W. Kurdowski, 16-17 November 1994,
2. Z. Owsiak, Reakcje Kruszyw Krzemionkowych z Alkaliami w Betonie, Polski Biuletyn Ceramiczny, Ceramika vol. 72, 2002
3. R.E. Oberholster, J.H.P. van Aardt and M.P. Brandt, Structure and Performance of Cements, ed. P. Barnes, Appl. Scien. Pub., London, 1983
4. W. Kurdowski, A. Garbacik, Sł. Chłędzyński, Cement Wapno Beton, 71, s. 81, 2004
5. W. Kurdowski, A. Garbacik, B. Trybalska, T. Baran, Cement Wapno Gips, 73, s. 375, 2006