Prof. dr hab. inż. LEONARD RUNKIEWICZ
Instytut Techniki Budowlanej, Politechnika Warszawska
Dr hab. inż. TOMASZ BŁASZCZYŃSKI
Dr hab. inż. ALDONA ŁOWIŃSKA-KLUGE
Politechnika Poznańska

AWARIA STROPÓW MONOLITYCZNYCH W BUDYNKU UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ W WYNIKU DESTRUKCJI WEWNĘTRZNEJ

DAMAGE OF MONOLITHIC RC FLORS IN OF PUBLIC BUILDINGS AS RESULT OF INTERNAL ACTION

Streszczenie W czasie realizacji w budynku użyteczności publicznej w Poznaniu wystąpiły spękania żelbetowych płyt stropowych. Na podstawie badań na obiekcie i badań laboratoryjnych oraz badań strukturalnych (SEM, XRD, DTA) przeanalizowano przyczyny zaistnienia stanu awaryjnego i rozważono możliwości naprawy. Stwierdzono, że do betonu użyto oprócz kruszyw naturalnych kruszywo węglanowe oraz kruszywo z recyklingu. Ponadto zastosowane ilości cementu znacznie odbiegały od wartości recepturowych. Zastosowany rodzaj cementów jak i kruszyw wywołał podwyższoną zawartość magnezu, alkalii i związków siarki w uśrednionych (reprezentacyjnych) próbach badanych betonów. Niewłaściwy dobór składników do wytworzenia mieszanki betonowej wywołał spękania spowodowane odkształceniami skurczowymi i stwarzał możliwość wystąpienia „korozji wewnętrznej" betonu stropów w trakcie późniejszej eksploatacji, bowiem wystąpiły warunki do zaistnienia korozji siarczanowej.

Abstract In one of the public building in Poznań occur cracking of RC floors through the concrete-section during the construction phase. In order to identify the best rehabilitation strategy, the causes of the damage were analysed by means of in-situ and laboratory tests, and also the structural behaviour was investigated. It was found that – besides natural aggregates – the concrete contained some calcareous and recycled (pieces of bricks and of reinforcement) aggregates. Such an unsuitable mixture was one of the main culprit of both (a) concrete cracking (because of the differential shrinkage of the various components) and (b) concrete "inner corrosion" (undesirable chemical reactions, taking place in the whole volume of the concrete due to improper concrete quality or mixture composition, as well as the construction technology used), starting a few hours or days after concrete casting, and in spite of proper curing.

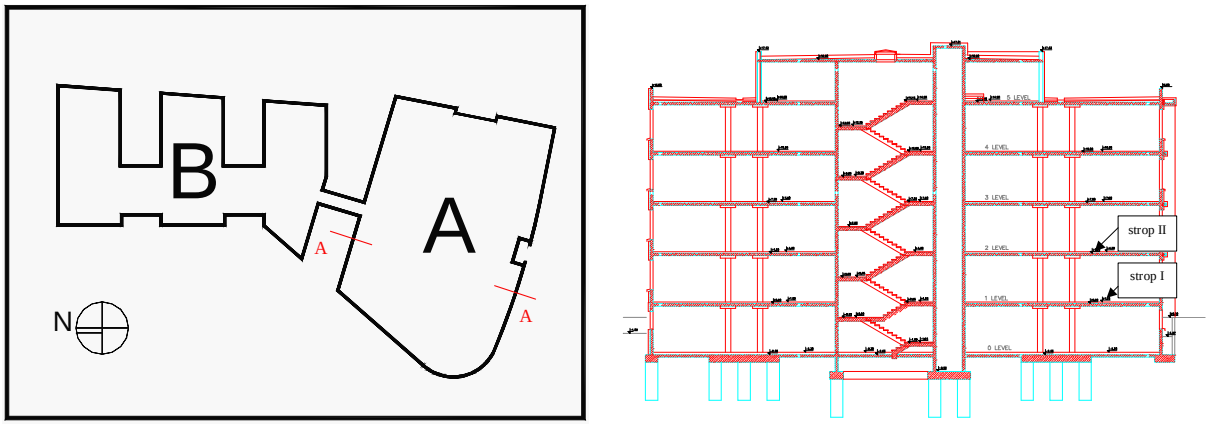
1. Wprowadzenie

Coraz częściej mamy do czynienia z występowaniem spękań żelbetowych płyt stropowych na całej wysokości przekroju betonowego w okresie do kilku dni od ich wykonania, pomimo prawidłowego wykonawstwa, właściwej pielęgnacji i braku oddziaływań dynamicznych. Takie spękania oznaczają, że płyty stropowe tracą swą sztywność i nie pracują jako pełny przekrój żelbetowy. Konieczne staje się wtedy określenie przyczyn powstania uszkodzeń. To samo zjawisko obserwuje się również w przypadku innych żelbetowych elementów konstrukcyjnych [1, 2, 3].

Jako jedną z przyczyn niszczenia betonu uznaje się destrukcję wewnętrzną spowodowaną niewłaściwym doborem składników mieszanek betonowych (tj. wchodzących ze sobą w niepożądane reakcje prowadzące do zniszczenia struktury betonu). Zjawiska te nasiliły się szczególnie od roku 2003, czyli po wejściu nowej normy określającej skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku [4]. Norma ta wprowadziła nowe rodzaje i składy cementów. Niestety wytwórcy betonu nie zawsze uwzględniają te dane stosując nadal wypełnienia i dodatki jak dla niemodyfikowanych cementów. Nie kontrolują przy tym efektów takich receptur i nie analizują niepożądanych reakcji pomiędzy składnikami, które mogą mieć miejsce. Z takim właśnie przypadkiem mamy do czynienia w analizowanych stropach.

2. Analizowany obiekt i jego stan istniejący

W trakcie realizacji obiektu budowlanego doszło do samoczynnego zarysowania się dwóch obszarów stropów w części A. Jeden strop zarysował się w miesiącu czerwcu (strop I na poz. +0,90m – temp. 26–30ºC, brak opadów), a drugi w miesiącu wrześniu (strop II na poziomie +4,20 m – temp. 6–22ºC brak opadów) – rys. 1, 2.



Rys. 1, 2. Rzut i przekrój analizowanego budynku

Na całej grubości przedmiotowych stropów, po kilkunastu godzinach od zabetonowania, pojawiły się rysy i spękania o układzie nieregularnym, wielokierunkowym, tworząc w efekcie rodzaj siatki rys (rys. 3, 4). W związku z istniejącymi warunkami pogodowymi po zabetonowaniu stosowano pielęgnację w postaci bezpośredniego stałego polewania wodą. W celu zinwentaryzowania powstałych zarysowań wykonano szczegółową dokumentację fotograficzną. W przypadku stropu I (poziom + 0,90m) generalny wykonawca dokonał sklejenia powstałych rys za pomocą systemu iniekcji grawitacyjnej o średniej lepkości.

Rys. 3, 4. Przykładowe zarysowania powstałe na stropie I i II

W przypadku stropu II (poziom + 4,20 m) nie realizowano żadnych prac naprawczych. W celu dokonania oceny przyczyn powstałych zjawisk z obu zarysowanych stropów (strop I i strop II) wykonano niezbędne odwierty próbek betonowych, na całą wysokość stropu. Na wykonanych odwiertach w miejscach występowania rys stwierdzono, że w każdym przypadku istniejące nawet niewielkie zarysowania widoczne na powierzchni dolnej płyty żelbetowej stropu, mają „wewnątrz" i na powierzchni górnej płyty stropowej znacznie większe szerokości rozwarcia. Tłumaczyć to można obecnością zbrojenia w dolnej rozciąganej strefie. Stwierdzono także układ siatkowy rys wewnętrznych, których nie widać na zewnątrz. W tych złożonych uwarunkowaniach dokonanie oceny przyczyn spękań stropów wymagało przeprowadzenia szeregu niezbędnych badań specjalistycznych.

3. Badania makroskopowe

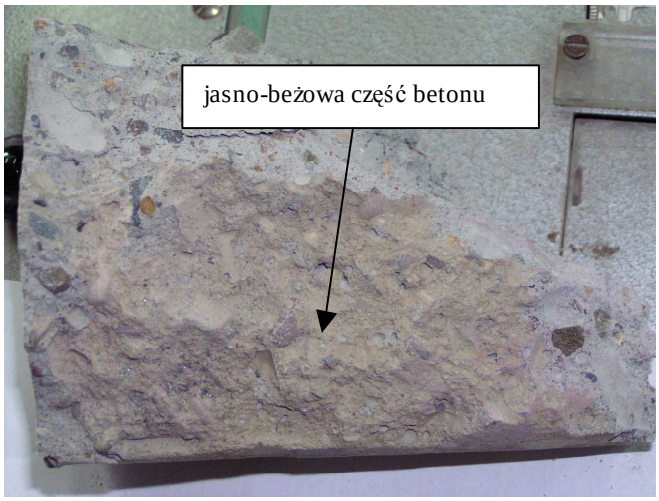
Z zarysowanych stropów wycięto po 6 próbek, w tym 3 w strefach zarysowanych i 3 w strefach niezarysowanych, które zostały przebadane w ośrodku poznańskim oraz 6 próbek (niezależnie od strefy), które zostały przebadane w laboratoriach ITB, Politechniki Krakowskiej i AGH. Na podstawie obserwacji makroskopowych stwierdzono występowanie pęknięć o rozwarciu od 0,32mm do 3,4 mm, które biegły przez całą wysokość próbek betonowych ze stropów I i II (rys. 5, 6). W próbkach wywierconych z niezarysowanych stref stropów zarysowanych, stwierdzono także rysy wewnętrzne, które nie objawiły się na żadnej z powierzchni. Beton we wszystkich próbkach zbrojony był dołem, zbrojenie górą występowało jedynie lokalnie.

a)

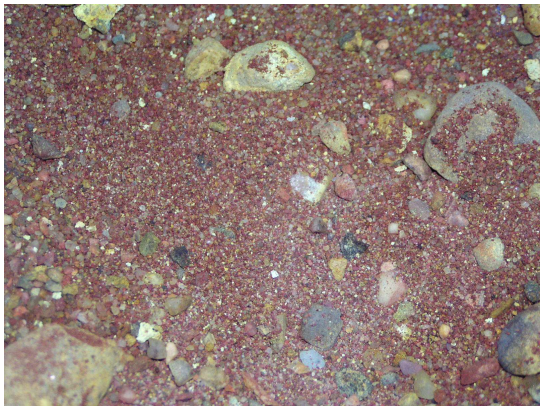
b)

Rys. 5, 6. Próbki betonu pobrane ze spękanych stropów: a/ ze stropu I z widocznymi spękaniami, zawilgoconymi pomimo sklejenia powstałych rys żywicą epoksydową, b/ ze stropu II z widocznymi spękaniami o znacznych rozwartościach do 3,4 mm, przebiegające na całej grubości stropu; widoczne zmniejszanie się rozwartości rys w dolnej części stropu

W betonie stropu I i II stwierdzono obecność kruszywa węglanowego. Dodatkowo w betonach z obu ocenianych stropów widoczne były niewielkie kawałki cegieł. Ponadto próbki po wycięciu miały powierzchnie zabrudzone szlamem o kolorze ceglasto-brunatnym (rys. 7, 8). Na przełomach próbek betonu wszystkich ocenianych stropów stwierdzono zmiany barwy od stalowoszarej poprzez jasno-beżową do ciemno-beżowej oraz niezwiązany, osypujący się popiół lotny i opiłki metalowe. Stwierdzono też, że w ramach każdego z badanych stropów stosowano betony o różnym składzie. Chcąc to sprawdzić próbki przedmiotowych betonów z różnych miejsc tych samych stropów poddano działaniu roztworu wodnego kwasu solnego (1:3), w taki sposób jak przy określaniu kruszywa i cementu wg [6]. Otrzymane w ten sposób kruszywa wysuszono w temperaturze 105ºC. Uzyskane wyniki ilustrują rys. 9, 10.



Rys. 7, 8. Niejednorodność betonu ocenianych stropów: a/ szlam ceglasto-brunatny na powierzchni próbki betonu ze stropu I, b/ zmiany barwy w objętości betonu ze stropu II



Rys. 9, 10. Kruszywo otrzymane po ekstrakcji z próbek betonów pobrane z ocenianych stropów

We wszystkich ocenianych betonach zaobserwowano także brak właściwej przyczepności większych ziaren kruszywa do matrycy cementowej. W miejscach występowania pęknięć i rys, betony ze stropów I i II, były skarbonatyzowane na głębokości, szerokości i długości rysy. Beton w pozostałych częściach próbek miał odczyn zasadowy. Betony z obu stropów, od spodu płyt stropowych, były skarbonatyzowane na głębokość od 0,6 do 0,8 mm. Beton o kolorze beżowym nie miał odczynu zasadowego. Zbrojenie w stropach znajdowało się jeszcze w betonie o zasadowym pH. Na zbrojeniu obserwowano już ślady rdzy.

4. Badania wybranych cech mechanicznych i fizycznych

W celu określenia wybranych cech mechanicznych i fizycznych przeprowadzono badania gęstości objętościowej, nasiąkliwości wagowej oraz pH.

Badanie gęstości objętościowej przeprowadzono na wszystkich próbkach walcowych określając średnią gęstość objętościową dla zastosowanego betonu w każdym ze stropów. W efekcie badań wykonanych w ośrodku poznańskim oceniono, że beton ze stropu I posiada gęstość 2256 kg/m^3, a ze stropu II – 2446 kg/m^3. Wyniki te potwierdziły badania w laboratorium ITB, gdzie średnią gęstość oszacowano jako 2340 kg/m^3. Gęstość objętościowa pomiędzy 2300 i 2400 kg/m^3 jest gęstością dobrze charakteryzującą większość betonów konstrukcyjnych.

Dla ocenianych betonów określono także nasiąkliwość wagową, która wynosiła dla betonu ze stropu I – 6,9%, a ze stropu II – 6,1%. Badane stropy pod względem nasiąkliwości spełnia-

ły wymagania dla betonów osłoniętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych (nasiąkliwość wagowa < 9%).

Odczyny wyciągu wodnego rdzenia próbek betonu ze stropów I i II, oszacowane w ośrodku poznańskim, wynosiły odpowiednio: dla stropu I – 12,00, a dla stropu II – 11,96. Badania przeprowadzone w ośrodku krakowskim (Politechnika Krakowska) potwierdziły te wyniki oceniając pH odpowiednio jako 11,90 i 12,15. Przedstawione wartości odczynów pH świadczą o różnym stopniu hydratacji spoiw użytych do wykonania badanych stropów. Wartości te są niższe od typowych pH dla normalnych betonów (pH ~ 12,5).

5. Wybrane badania strukturalne

W celu określenia struktury i rodzaju powstałych związków oraz rodzaju dodatków dodanych do betonu, dla próbek pobranych ze stropów oznaczonych I i II, wykonano badania mikroskopowe. Badania mikroskopowe miały również służyć ocenie ewentualnych możliwości i kierunków zachodzenia dalszych reakcji w analizowanych betonach [5]. Na podstawie analizy obserwowanych obszarów, jak i zdjęć stwierdzono, że w badanych próbkach betonu występowały: portlandyt, fazy tobermorytowe żelowe i wykrystalizowane krótkowłókniste, niewielkie ilości węglanu wapniowego i żużel wielkopiecowy. W całej objętości widoczne były ziarna popiołu lotnego. W betonie ze stropu I występowało mniej żużla wielkopiecowego, niż w pozostałych betonach. W betonie ze stropu II występowały znaczne ilości „luźnego" popiołu lotnego, sferoidy tlenków żelaza i opiłki metaliczne połączone z matrycą cementową. Wykonane przy użyciu mikrosondy rentgenowskiej mikroanalizy bezwzorcowe EDX obserwowanych, w betonie ze stropu II, produktów reakcji wykazywały w nich obecność wapnia, krzemu, glinu, tlenu, węgla, magnezu, siarki i żelaza.

Badania rentgenowskie wykonano na preparacie proszkowym uzyskanym z wyekstraktowanego „kruszywa czerwonego", przy użyciu skomputeryzowanego dyfraktometru rentgenowskiego. Na dyfraktogramie dla tego kruszywa stwierdzono następujące fazy: kwarc, α – Fe_20_3, mulit, kaolinit. Odpowiada to w przybliżeniu składowi ceramiki, rdzy oraz naturalnemu kwarcowi.

Aby określić czy w betonach były dodatki wapienia oraz by określić zawartość związków przyłączonych w trakcie wiązania i twardnienia cementu, dla próbek betonów pobranych z analizowanych stropów (I, II) przeprowadzono badania derywatograficzne. Próbki badano metodą termograwimetryczną na derywatografie w atmosferze N_2 w zakresie temperatur od 20 do 900°C.

Na krzywej DTA trzech próbek badanych betonów zaobserwowano trzy endotermiczne efekty cieplne w zbliżonym zakresie temperatur.

Pierwszy efekt w zakresie temperatur od 60 do 320°C związany był ze stratą wody związanej w uwodnionych glinianach, siarczanoglinianach i krzemianach wapnia. Największy ubytek masy w tym zakresie wykazywał beton ze stropu II, a w dalszej kolejności ze stropu I.

Drugi efekt w zakresie temperatur od 460 do 520°C związany był z rozkładem $Ca(OH)_2$.

Biorąc pod uwagę zbliżone ubytki masy i podobny zakres temperatur obu efektów endotermicznych można było wnioskować, iż ilości cementu w uśrednionych próbkach badanych betonów ze stropów I i II, były zbliżone do siebie.

Trzeci efekt endotermiczny w zakresie temperatur od 710 do 860°C związany był z rozkładem węglanów wapnia, przy czym dla próbki ze stropu II, ubytek ten był zbliżony (odpowiednio 3,76% i 3,32%). Największy ubytek wykazywała próbka betonu ze stropu I – 4,25%.

Ubytek masy przy ogrzewaniu do temperatury 580°C dla próbek z betonu stropów nr I i II, wynosił odpowiednio: 9,50% i 9,45%. Całkowity ubytek masy wynosił dla próbek betonu ze stropów I i II, odpowiednio: 15,05% i 13,63%. Po badaniu próbki nie zmieniły swej proszkowej postaci. Nie zauważono nadtopień.

6. Badania chemiczne

W celu dokładnego określenia ilości związków mogących wywoływać spękania i w przyszłości podczas eksploatacji mogących być przyczyną „korozji wewnętrznej", a mianowicie $SO_{3cał.}$, MgO, Na_2O, K_2O oraz Cl^- wykonano analizy chemiczne próbek betonów pobranych z ocenianych stropów. Na pobranych metodą kwartowania o odpowiedniej wielkości próbkach zmielonych betonów ze stropów I i II, wykonano analizy chemiczne zgodnie z normami [7÷10].

Oznaczone w ośrodku poznańskim ilości $SO_{3cał.}$ dla betonu z analizowanych stropów wahały się w granicach od 9,31% do 9,75% w odniesieniu do masy cementu. W laboratorium ITB wielkość ta wahała się od 12,53% do aż 24,21% (w odniesieniu do masy cementu). Otrzymane wielkości nie spełniają wymagań normy [10] dla cementu CEM II 32,5, która to wielkość zgodnie z normą nie może przekroczyć wartości 3,5% oraz dla cementu CEM III 32,5, która to wielkość zgodnie z normą nie może przekroczyć wartości 4,0%.

Oznaczona w badaniach ilość Cl^- (ośrodek poznański i AGH) w całości betonów spełnia wymagania normy [4].

Oznaczona w ośrodku poznańskim ilość MgO, wynosząca od 14,61 do 19,97% w odniesieniu do masy cementu przekraczała według [11] wartość dopuszczalną wynoszącą 4%. Przez wiele lat w normach większości krajów dopuszczano zawartość MgO w cemencie do 5%. Jednakże przypadki destrukcji wielu obiektów w USA i innych krajach, a także w wyniku długotrwałych badań wykazały, że niezbędne są dodatkowe gwarancje.

Oznaczona w ośrodku poznańskim ilość alkaliów (Na_2Oeq) wynosiła od 9,31 do 11,03% w stosunku do masy cementu. W laboratorium ITB wielkość tę określono na poziomie od 20,34 do 32,23%, w ośrodku krakowskim od 11,46 do 16,33%, a w laboratorium AGH o wartości ok. 19% (w stosunku do masy cementu). Wszystkie określone wartości znacznie przekraczały wartość dopuszczalną, wynoszącą według [11], 0,6%.

Związki siarki przeliczone na siarkę całkowitą mogły pochodzić od cementu i zastosowanego wypełnienia (kruszywa wolne są od związków siarki). Natomiast zawartość MgO i Na_2Oeq w ocenianych betonach pochodzić mogły z kruszyw i ich zanieczyszczeń, z cementu oraz zastosowanego wypełnienia.

Dodatkowo zgodnie z [6] dokonano oceny kruszywa węglanowego (z wapienia), którego ilość określono na podstawie badań derywatograficznych. Z badań wyniknęło, że zastosowane kruszywo zawierało ok. 10% kruszywa węglanowego.

7. Wnioski z przeprowadzonych badań

W betonach analizowanych stropów obserwowało się wpływy chemiczne ze strony zarówno cementu, jak i zanieczyszczeń czy innych zastosowanych materiałów. Wyniki badań chemicznych wskazywały na podwyższone zawartości magnezu, alkalii i siarki, w uśrednionych próbach betonów pobranych z badanych stropów. Oceniane betony cechowała duża niejednorodność. Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że w ramach każdego z badanych stropów stosowano betony o różnym składzie. Podwyższona zawartość związków magnezu, alkalii i siarki, w uśrednionych (reprezentatywnych) próbach badanych betonów oraz obecność kruszywa węglanowego wskazywały, że przy odpowiedniej wilgotności i temperaturze, spełnione były wszystkie warunki do zaistnienia pęcznienia alkalicznego i korozji siarczanowej. Wilgotność ta najintensywniej utrzymuje się w niewypełnionych żywicą strefach rys po iniekcji. We wszystkich ocenianych stropach stwierdzono obecność kruszywa węglanowego, kruszywa ceglanego i opiłków metali. Stwierdzono także, że użyto oprócz kruszyw naturalnych, również kruszyw z recyklingu. Na podstawie przeprowadzonych badań oznaczono szacunkowo użyte ilości cementu do mieszanek betonowych. Ilości te różniły się od deklarowanych wartości recepturo-

wych. W związku z tym oceniono, że należy spodziewać się większego zagrożenia destrukcją. Po wykonaniu wstępnych prac związanych z klejeniem widocznych rys stwierdzono nadal występowanie stref o silnym zawilgoceniu, zwłaszcza w strefach rys poklejonych i rys wewnętrznych (rys. 5). Zjawisko to było spowodowane brakiem możliwości wypełnienia sieci rys wewnętrznych oraz niecałkowitym wypełnieniem rys widocznych na zewnątrz. Stały dostęp wilgoci do wewnętrznej struktury betonu oraz do znajdującego się wewnątrz zbrojenia, z równoczesnym przekroczeniem zawartości magnezu, alkalii i siarczanów (w analizowanych betonach) stwarzało zagrożenie korozyjne zarówno dla betonów jak i stali zbrojeniowych. Ponadto, należy także pamiętać, że poprzez dostęp powietrza wraz z ewentualnymi czynnikami korozyjnymi może wystąpić stały postęp procesów korozyjnych.

8. Przyjęty sposób naprawy i wzmocnienia

W związku ze spękaniem stopów na całym przekroju w przypadku stropów I i II oraz wystąpieniem spękań wewnętrznych, których nie udało się naprawić w przypadku stropu I, stwierdzono, że analizowane płyty stropowe utraciły swoją projektowaną sztywność. Ze względu na brak ciągłości betonu w strefie rozciąganej i lokalnej utraty przyczepności do stali zbrojeniowej, nie było możliwości aktualnego ustalenia stanów granicznych (nośności i użytkowania) dla obu zarysowanych fragmentów stropów. Po procesie iniekcji brak jest kontroli nad przyczepnością stali zbrojeniowej do betonu, gdyż w strefie przyczepności występują różne strefy współpracy stali zbrojeniowej z betonem: stal zbrojeniowa-beton, stal zbrojeniowa-żywica, stal zbrojeniowa-powietrze (całkowity brak przyczepności). Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzono, że jedynym możliwym sposobem naprawy analizowanych stropów jest ich lokalne, etapowe wyburzenie, a następnie wzmocnienie.

Rys. 11, 12. Prace wyburzeniowe na obu poziomach ocenianych stropów

Rys. 13, 14. Nowe betonowanie stropów

W pierwszym etapie zabezpieczono sztywność budynku poprzez stalowe rozpory rurowe. Następnie dokonano usunięcia skorodowanego betonu, wykonano niezbędne warstwy sczepne i ułożono nowy beton ze specjalnie uplastycznionej receptury (rys. 11–14).

Z doświadczenia z podobnymi żelbetowymi elementami płytowymi, które poddano procesowi naprawy poprzez iniekcję obszarów zarysowanych wynika, że ulegają one nadal postępującej korozji na skutek wzajemnego oddziaływania wilgoci i zawartych w nich czynników korozyjnych (Na_2O_{eq}, $CaCO_3$, MgO i SO_3), co doprowadza do całkowitego zniszczenia betonu. W przypadku pozostawienia analizowanych stropów i przeprowadzeniu jedynie ich naprawy, poprzez iniekcje rys, mogłoby dojść do konieczności ich wymiany już w trakcie eksploatacji obiektu, co wiązało by się nie tylko z kosztami ich wymiany, ale spowodowało by także straty związane z wyłączeniem tej strefy budynku z eksploatacji, a także brakiem zysków przez jego użytkownika. W podobnych przypadkach elementy takie powinny być wcześniej naprawione i wzmocnione poprzez wymianę betonu z dodatkowym zbrojeniem.

9. Wnioski

W celu określenia przyczyn spękania żelbetowego stropu w czasie realizacji przeprowadzono badania wytrzymałościowe, strukturalne i chemiczne.

Na podstawie badań na obiekcie, badań laboratoryjnych oraz badań strukturalnych (SEM, XRD, DTA) przeanalizowano przyczyny zaistnienia stanu awaryjnego i rozważono możliwości naprawy. Stwierdzono, że do betonu użyto oprócz kruszyw naturalnych kruszywo węglanowe oraz kruszywo z recyclingu. Ponadto zastosowane ilości cementu znacznie odbiegały od wartości recepturowych. Zastosowany rodzaj cementów jak i kruszyw wywołał podwyższoną zawartość magnezu, alkali i związków siarki w uśrednionych (reprezentacyjnych) próbach badanych betonów. Niewłaściwy dobór składników do wytworzenia mieszanki betonowej wywołał spękania spowodowane odkształceniami skurczowymi i stwarzał możliwość wystąpienia „korozji wewnętrznej" betonu stropów w trakcie późniejszej eksploatacji, bowiem wystąpiły warunki do zaistnienia korozji siarczanowej.

Po dodatkowych analizach stropy w obszarach spękanych wzmocniono je poprzez odtworzenie (po wyburzeniu starych fragmentów) z nowego zbrojonego betonu.

Literatura

1. Błaszczyński T., Łowińska-Kluge A., Zgoła B., Wpływ wykonawstwa na degradację betonu, Materiały Budowlane, Nr 9/2004.
2. Błaszczyński T., Łowińska-Kluge A., Zgoła B., Błędy wykonawcze jako przyczyna zagrożeń korozyjnych betonu na przykładzie fundamentów hali sportowej, XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Maj 17–20, 2005 Szczecin-Międzyzdroje.
3. Błaszczyński T., Łowińska-Kluge A., Durability assessment of RC floors based on concrete properties, AMCM 2008, Łódź.
4. PN-EN 206-1:2003. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
5. Łowińska-Kluge A., Jóźwiak K., A study of the resistance of concrete to corrosion using SEM and microanalysis, Microscopy and Analysis, vol. 20, No. 1, 2006.
6. ITB nr 277/86 Instrukcja określania składu stwardniałego betonu.
7. PN-EN 196-2:1996. Metody badania cementu. Analiza chemiczna cementu.
8. PN-EN 196-21:1997. Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie.
9. PN-EN 196-21/Ak:1997. Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie.
10. PN-EN 197-1:2002. Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
11. Peukert S., Cementy powszechnego użytku i specjalne, Polski Cement sp. z o.o., Kraków 2000.