

dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK*
 dr hab. inż. Andrzej Garbacz, prof. PW**

Wielokryterialna analiza dobrej współpracy w doborze materiałów do naprawy konstrukcji betonowych

Zapewnienie trwałości konstrukcji betonowych traktowane jest obecnie jako jedno z najważniejszych wyzwań cywilizacyjnych. Przywrócenie obiektowi wyjściowego lub wymaganego projektem stanu użytkowania wymaga przeprowadzenia jego naprawy [1 – 3]. Skuteczność oraz trwałość naprawy i ochrony powierzchniowej betonu zależy od dobrej współpracy materiałów naprawczych z podłożem betonowym i ich odporności na czynniki środowiska zewnętrznego. Koncepcja doboru materiału do napraw zmieniała się z upływem czasu [4]. Obecnie powszechnie przyjętym podejściem jest spełnienie warunków dobrej współpracy (kompatybilności), czyli zapewnienie, że w przewidzianym czasie i w danych warunkach użytkowania obiektu wartości powstałych naprężeń i/lub odkształceń będą niższe od wartości granicznych [5 – 8]. Zagadnienie właściwego doboru materiałów do naprawy i ochrony staje się szczególnie istotne w przypadku stosowania współczesnych materiałów naprawczych. Modyfikacja kompozytów naprawczych polimerami oraz stosowanie kompozytów polimerowych sprawia, że zachowanie podobieństwa cech technicznych jest praktycznie niemożliwe [9 – 11].

Wprowadzona w ostatnich latach norma PN-EN 1504 kompleksowo ujmując tematykę naprawy i ochrony powierzchniowej konstrukcji betonowych. W części 10 tej normy pojawia się wymaganie zapewnienia kompatybilności między podłożem a materiałem stosowanym do jego naprawy lub ochrony, a także pomiędzy dwoma dowolnymi elementami układu. Norma nie precyzuje jednak pojęcia kompatybilności ani sposobu jej sprawdzenia. Często mimo dobrych cech fizykomechanicznych materiałów naprawczych oraz powłokowych w praktyce inżynierskiej obserwuje się zarówno realizację udane, jak i nieudane. Zasadniczy problem sprowadza się do właściwego doboru materiału naprawczego w zależności od charakterystyki podłoża betonowego, obciążeń działających na konstrukcję, a także jakości przeprowadzonych prac naprawczych [12 – 14]. Dobór materiału naprawczego jest więc zagadnieniem złożonym, zwłaszcza wobec dużego zróżnicowania przyczyn uszkodzenia konstrukcji, warunków, w jakich są one eksploatowane, obciążeń i ich kombinacji, klas i jakości betonu w konstrukcji. Pomocne mogą być w tym wielokryterialne modele dobrej współpracy prezentowane w artykule.

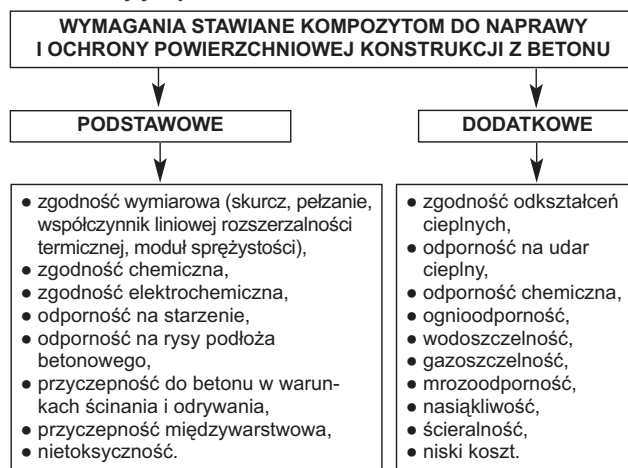
Wymagania i parametry dobrej współpracy

Dobór i ocena przydatności materiałów do naprawy i ochrony powierzchniowej betonu powinny być dokonywane na podstawie zbioru wymagań ujmujących odpowiednie relacje między cechami fizykomechanicznymi kompozytu i betonu w aspekcie obciążeń krótkotrwałych oraz długotrwałych [11, 12]. Relacje te muszą zapewnić dobrą współpracę zespolonych materiałów. Na jej podstawie wymagania fizykomechaniczne w odniesieniu do materiałów naprawczych

i powłok ochronnych (rysunek 1) można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- **wymagania podstawowe**, które powinny zapewnić dobrą współpracę zespolonych w wyniku naprawy materiałów w warunkach obciążeń stałych i użytkowych, oddziaływań chemicznych (nie dopuszczalne jest wystąpienie negatywnych oddziaływań między materiałem naprawczym a elementem naprawianym) i oddziaływań elektrochemicznych; wymagania te należy traktować jako warunek konieczny do spełnienia w każdorazowej naprawie betonu, ale nie zawsze jako wystarczający;

- **wymagania dodatkowe**, które wynikają z rodzaju konstrukcji i warunków jej użytkowania.



Rys. 1. Wymagania stawiane kompozytom polimerowym i cementowo-polimerowym stosowanym do napraw i ochrony powierzchniowej betonu [12]

Spełnienie wymagań podstawowych i dodatkowych można uważać za warunek wystarczający do zapewnienia skutecznej i trwałej naprawy betonu [4, 7, 12]. W tabeli 1 zestawiono parametry materiałów stosowanych do napraw i ochrony betonu oraz podłoża betonowego wynikające z wymagań podstawowych i dodatkowych, które wzięto pod uwagę w wielokryterialnej analizie dobrej współpracy.

Wielokryterialne modele dobrej współpracy

Na podstawie zdefiniowanych wymagań oraz parametrów charakteryzujących materiał naprawczy i podkład betonowy (tabela 1), a także przeprowadzonych badań eksperymentalnych [10, 12, 13, 16, 17] sformułowano 8 warunków ich dobrej współpracy z uwzględnieniem oddziaływań mechanicznych krótko- i długotrwałych oraz oddziaływań termicznych. W zależności od typu uszkodzenia betonu, rodzaju obciążenia (krótkotrwałe, długotrwałe) oraz rodzaju tworzywa powłokowego warunki dobrej współpracy odpowiednio pogrupowano, tworząc **trzy wielokryterialne modele obliczeniowe uwzględniające** (tabela 2):

* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

** Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

Tabela 1. Cechy techniczne materiałów naprawczych i powłok oraz betonu decydujące o dobrej ich współpracy [12, 15]

Cechy techniczne materiałów naprawczych i powłok ochronnych	Cechy techniczne betonu w konstrukcji
$f_{As}^{pi(pi+1)}$ – przyczepność międzywarstwowa w warunkach ścinania, f – wytrzymałość na rozciąganie, f_{pt}^{pi} – wytrzymałość na rozciąganie pod obciążeniem długotrwałym, E_{pt} – moduł sprężystości przy rozciąganiu, E_c – moduł sprężystości przy ścisaniu, ε_p^p – odkształcenie graniczne przy rozciąganiu, ε_s – skurcz utwardzania, α_{tp} – współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej, λ – współczynnik przewodności cieplnej, $\varphi_p(t, t_0)$ – współczynnik pęcznienia, ν – współczynnik Poissona, D – współczynnik dyfuzji, w_n – doraźna szerokość rysy niszczej powłokę, h_p – grubość warstwy, t – czas skutecznej ochrony betonu	f_c – wytrzymałość na ściskanie, f_{cm}^s – średnia wytrzymałość na rozciąganie, E_{cm} – moduł sprężystości przy rozciąganiu, ε_{ct} – odkształcenie graniczne przy rozciąganiu, α_{tp} – współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej, λ_{tp} – współczynnik przewodności cieplnej, $\varphi_c(t, t_0)$ – współczynnik pęcznienia, w_d – doraźna szerokość rozwarcia rysy, Δw – przyrost szerokości rysy wywołany obciążeniem, s_r – odległość między rysami prostopadłymi do osi elementu

f_{As} – przyczepność kompozytu do betonu w warunkach ścinania,
 f_{Ao} – przyczepność kompozytu do betonu w warunkach odrywania,
 ΔT – zmiana temperatury użytkowania

■ współpracę kompozytów polimerowych i cementowo-polimerowych z betonem w rysach i pęknięciach (model I);

■ współpracę kompozytów polimerowych i cementowo-polimerowych wypełniających ubytki w podłożu betonowym (model II);

■ współpracę powłok polimerowych oraz cementowo-polimerowych z zarysowanym i niezarysowanym podłożem betonowym (model III).

Szczególnie istotnym warunkiem współpracy z podłożem betonowym jest zdolność powłok ochronnych do mostkowania rys. Norma PN-EN 1504-2 określa kilka klas rysoodporności. Na potrzeby wielokryterialnej analizy dobrej współpracy **sformułowano odpowiednie kryteria rysoodporności dotyczące trzech grup materiałów** [12, 18]:

● **grupa 1** – powłoki o dużej wytrzymałości na rozciąganie przy założeniu, że nie następuje odspojenie powłoki od betonu na krawędzi rys;

● **grupa 2** – powłoki o dużej wytrzymałości na rozciąganie przy założeniu, że może nastąpić odspojenie powłoki od betonu po obu stronach rysy;

● **grupa 3** – powłoki o małej wytrzymałości na rozciąganie, małym module sprężystości i o dużej odkształcalności.

Każdy z przedstawionych w tabelach 2 i 3 modeli tworzy, w sensie matematycznym, układ nierówności liniowych i nieliniowych (zestaw warunków współpracy), których niewiadomymi są cechy materiałów naprawczych i powłokowych. Rozwiązanie takiego układu nierówności jest zagadnieniem złożonym. Zbiorem rozwiązań jest n-wymiarowa przestrzeń zawierająca punkty (układy liczb) spełniające jednocześnie wszystkie nierówności. Niespełnienie chociaż jednej z nich oznacza brak rozwiązania, co jest jednoznaczne z brakiem dobrej współpracy zespolonych materiałów.

W celu określenia i wyznaczenia przestrzeni współpracy opracowano w Politechnice Koszalińskiej oraz Politechnice Warszawskiej odpowiednie programy komputerowe [7, 8, 12]. W przypadku danych parametrów charakteryzujących uszkodzone podłoże betonowe, warunki użytkowania obiektu oraz określonego zakresu wartości cech użytkowych kompozytów PC i PCC, występujących w praktyce, sprawdza się, czy istnieje rozwiązanie układu nierówności, a następnie wyznacza zakres wartości cech kompozytów,

Tabela 2. Wielokryterialne modele dobrej współpracy kompozytów naprawczych z podłożem betonowym w warunkach obciążeń krótko- i długotrwałych [8, 12]

Postać warunków dobrej współpracy	MODEL I ¹⁾		MODEL II i III ²⁾
	Model Ia	Model Ib	
Warunek I: $f_{pt}^{pi}(t_0) \cdot k_t^p \cdot k_s \geq f_{cm}(t_0)$, $f_{Ao}(t_0) \cdot k_s \geq f_{cm}(t_0)$, $f_{As}(t_0) \cdot k_s \geq f_{cm}(t_0)$ przy zachowaniu minimalnych wartości przyczepności kompozytu do betonu	+	-	+
Warunek II: $f_{pt}^{pi}(t_0) \geq f_{As}^{pi(pi+1)}(t_0)$, $f_{As}^{pi(pi+1)}(t_0) \cdot k_s \geq f_{cm}(t_0)$	-	-	+
Warunek III: $f_{As}(t_0) \cdot k_s \geq C$ oraz $f_{Ao}(t_0) \cdot k_s \geq C$, $C = \frac{(\varepsilon_{pt}(t_0) \cdot k_s - \frac{f_{cm}(t_0)}{E_{cm}(t_0)}) E_{pt}(t_0) \cdot E_{cm}(t_0)}{E_{pt}(t_0) + E_{cm}(t_0)}$	-	-	+
Warunek IV: $s_r [(\varepsilon_{pt}(t_0) \cdot k_s) \cdot (1 + \varphi_p(t, t_0))] \geq \Delta w$	-	+	-
Warunek V: a) kryterium I: $f_{As}(t_0) \cdot k_s \geq D \cdot \Delta T$ oraz $f_{Ao}(t_0) \cdot k_s \geq D \cdot \Delta T$ $D = \frac{(\alpha_{tp} - \alpha_{tc}) E_{pt}(t_0) \cdot E_{cm}(t_0)}{E_{pt}(t_0) + E_{cm}(t_0)}$ b) kryterium II ³⁾ : $\alpha_{tp} \cdot E_p(t_0) \leq 0,13 \cdot \ln \frac{f_c^{c, cube}}{2,44}$	+	+	+
Warunek VI⁴⁾: $\frac{\lambda_{tc}}{\lambda_{tp}} < \frac{E_{cm}(t_0) \cdot \alpha_{tc}}{D}$ $D = \frac{(\alpha_{tp} - \alpha_{tc}) E_{pt}(t_0) \cdot E_{cm}(t_0)}{E_{pt}(t_0) + E_{cm}(t_0)}$	-	-	+
Warunek VII: $f_{pt}(t_0) \cdot k_t^p \cdot k_s \geq \frac{\psi_p \cdot E_p(t_0) \cdot \varepsilon_s(t, t_0)}{(1 - \nu_p)}$, $f_{Ao}(t_0) \cdot k_s \geq \frac{\psi_p \cdot E_p(t_0) \cdot \varepsilon_s(t, t_0)}{(1 - \nu_p)}$, $f_{As}(t_0) \cdot k_s \geq \frac{\psi_p \cdot E_p(t_0) \cdot \varepsilon_s(t, t_0)}{(1 - \nu_p)}$, $f_{As}^{pi(pi+1)}(t_0) \cdot k_s \geq \frac{\psi_p \cdot E_p(t_0) \cdot \varepsilon_s(t, t_0)}{(1 - \nu_p)}$	+	+	+
Przy obciążeniu długotrwałym zastępuje się moduł sprężystości $E(t_0)$ kompozytu i betonu przez efektywny moduł sprężystości E_{eff} wg wzorów: a) dla kompozytów PC i PCC: $E_{pt,eff} = \frac{E_{pt}(t_0)}{(1 + \varphi_p(t, t_0))}$ oraz $E_{p,eff} = \frac{E_p(t_0)}{(1 + \varphi_p(t, t_0))}$ b) dla betonu w konstrukcji: – faza I pracy konstrukcji: $E_{ct,eff} = \frac{E_{cm}(t_0)}{(1 + \varphi_c(t, t_0))}$ – faza II pracy konstrukcji: $E_{ct,eff} = \frac{E_{cm}(t_0)}{(1 + 0,3\varphi_c(t, t_0))}$			

+ warunek określający dobrą współpracę kompozytów z betonem zwykłym; - warunek nie występuje; ¹⁾ w przypadku iniekcji rys obowiązuje $f_{Ao}(t_0)$; ²⁾ model III dla powłok ochronnych zdefiniowany jest przez warunki I – VII oraz kryteria rysoodporności podane w tabeli 3; ³⁾ ważne tylko dla kompozytów polimerowych; ⁴⁾ dotyczy tylko powierzchniowo rozległych ubytków betonu; t – czas planowanej ochrony betonu powłoką; ψ_p – współczynnik uwzględniający części niesprężyste odkształceń końcowego skurczu utwardzania kompozytów PC i PCC; k_t^p – współczynnik uwzględniający wpływ obciążeń długotrwałych dla kompozytu PC i PCC.

W przypadku obciążeń krótkotrwałych współczynnik $\varphi_p(t, t_0) = 0$ oraz $k_t^p = 1,0$. Pozostałe oznaczenia jak w tabeli 1.

Tabela 3. Kryteria rysoodporności powłok [12, 18]

Grupa powłoki	Rodzaj obciążenia	
	krótkotrwałe	długotrwałe
Grupa 1	$\alpha \cdot [(2l_v \cdot \varepsilon_{pt}(t_0)) + \frac{f_{ct} \cdot l_v^2}{2h_p \cdot E_{pt}(t_0)}] \geq w_d + \Delta w$ gdzie: $l_v = \frac{f_{pt}(t_0) \cdot h_p}{f_{ct}}$	$\alpha \cdot [(2l_v \cdot \varepsilon_{pt}(t_0)) + \frac{f_{ct} \cdot l_v^2}{2h_p \cdot E_{pt}(t_0)}] \cdot (1 + \varphi_{pt(t_0)}) \geq w_d + \Delta w$ gdzie: $l_v = \frac{f_{pt}(t_0) \cdot k_{fs}^p \cdot h_p}{f_{ct}}$
	$\alpha = \frac{h_p}{w_n} \cdot \frac{f_{pt}(t_0)}{E_{pt}(t_0)}$	
Grupa 2	$\alpha \cdot [(2l_v \cdot \varepsilon_{pt}(t_0)) + \frac{f_{ct} \cdot l_v^2}{2h_p \cdot E_{pt}(t_0)}] + 2c \cdot \varepsilon_{pt}(t_0) \geq w_d + \Delta w$ gdzie: $\alpha = \frac{h_p}{(w_n + \varepsilon_{pt}(t_0) \cdot 2c)} \cdot \frac{f_{pt}(t_0)}{E_{pt}(t_0)}$	$\alpha \cdot [(2l_v \cdot \varepsilon_{pt}(t_0)) + \frac{f_{ct} \cdot l_v^2}{2h_p \cdot E_{pt}(t_0)}] + 2c \cdot \varepsilon_{pt}(t_0) \geq w_d + \Delta w$ gdzie: α, l_v – jak w przypadku grupy 1
	$\left(\frac{h_p}{w_n} \cdot \frac{f_{pt}(t_0)}{E_{pt}(t_0)} \right) \cdot h_p \geq w_d + \Delta w$	
Grupa 3	$\alpha \cdot [(2l_v \cdot \varepsilon_{pt}(t_0)) \cdot (1 + \varphi_{pt(t_0)})] \geq w_d + \Delta w$ gdzie: α, l_v – jak w przypadku grupy 1	

który spełnia jednocześnie wszystkie nierówności. Wyznaczone w ten sposób obszary współpracy pozwalają odpowiedzieć na pytanie, jakimi wartościami cech mechaniczno-fizycznych powinien charakteryzować się kompozyt użyty do naprawy bądź ochrony powierzchniowej betonu, aby zapewnić niezawodność i trwałość przyjętego rozwiązania materiałowego.

Badania przeprowadzone w Politechnice Warszawskiej oraz University of Michigan pokazały przydatność wielokryterialnego modelu kompatybilności do oceny skuteczności wzmacniania konstrukcji betonowych kompozytami polimerowymi zbrojonymi włóknami FRP [20]. Przydatność programu CCS do doboru wzmacniania konstrukcji żelbetowych została zweryfikowana z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych belek betonowych wzmocnionych taśmami (rysunki 2, 3).

Obecnie w Politechnice Warszawskiej we współpracy z Politechniką Koszalińską opracowano kolejną wersję programu do obliczania kompatybilności układów złożonych – ANCOMP (rysunek 3). W założeniach autorów program powinien być przyjazny dla użytkownika, a przede wszystkim umożliwiać łatwe edytowanie warunków kompatybilności i wprowadzanie danych dotyczących parametrów materiału naprawczego oraz podłoża betonowego. Program ANCOMP wyróżnia się w stosunku do poprzedniego programu CCS:

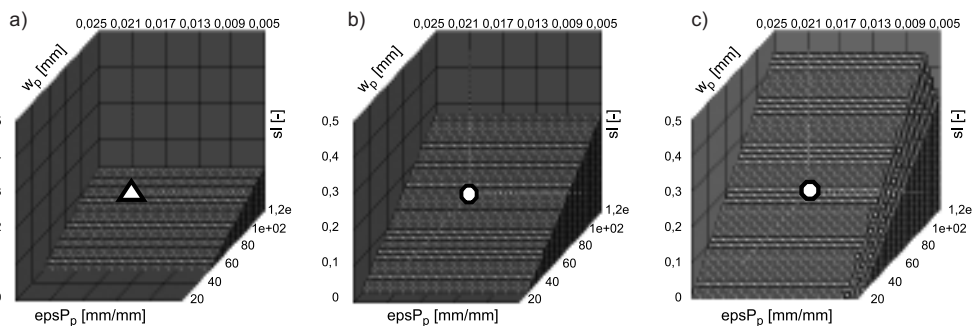
- zwiększeniem szybkości obliczeń i generowania przestrzeni kompatybilności dla wybranego układu parametrów materiałowych;

- zapewnieniem możliwości dowolnego obrotu przestrzeni kompatybilności w celu najlepszej wizualizacji cech szczególnych przestrzeni wygenerowanej dla wybranego zbioru parametrów materiału naprawczego oraz podłoża betonowego;

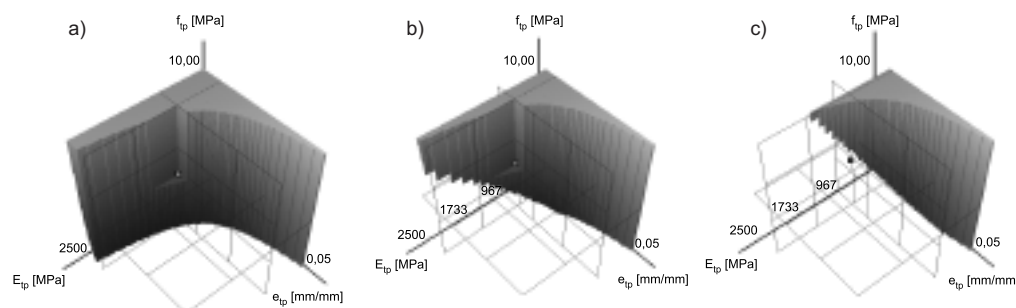
- zapewnieniem możliwości wizualizacji „głębokości” zlokalizowania punktu odzwierciedlającego właściwości ocenianego materiału w przestrzeni kompatybilności, co stanowi wizualną miarę kompatybilności przyjętego rozwiązania materiałowego.

Przykłady praktycznego wykorzystania modeli dobrej współpracy

Stosując wielokryterialne modele dobrej współpracy, dokonano doboru technologii naprawy i ochrony powierzchniowej obiektów mostowych, zbiorników i basenów, kominów przemysłowych, silosów oraz obiektów użyteczności publicznej [12, 21, 22]. W artykule przedstawimy niektóre przykłady zastosowania. Wytrzymałość betonu w konstrukcjach naprawianych i chronionych powłoką oceniono metodami nieniszczącymi, a obserwacje wymienionych obiektów



Rys. 2. Wpływ jakości podkładu betonowego na kształt podprzestrzeni kompatybilności w przypadku wzmacniania konstrukcji betonowych taśmami CFRP wyznaczony za pomocą programu CCS. Podprzestrzeń kompatybilności zdefiniowana została przez: szerokość w_p , wydłużenie przy zerwaniu ε_{ps}^p i współczynnik wzmacniania sl . Ze wzrostem wytrzymałości betonu na ścinanie odpowiednio: a) 0,9 MPa; b) 1,3 MPa, c) 2,0 MPa zwiększa się przestrzeń kompatybilności i występuje przejście ze stanu niekompatybilności (a) w stan kompatybilności (b, c) [20]



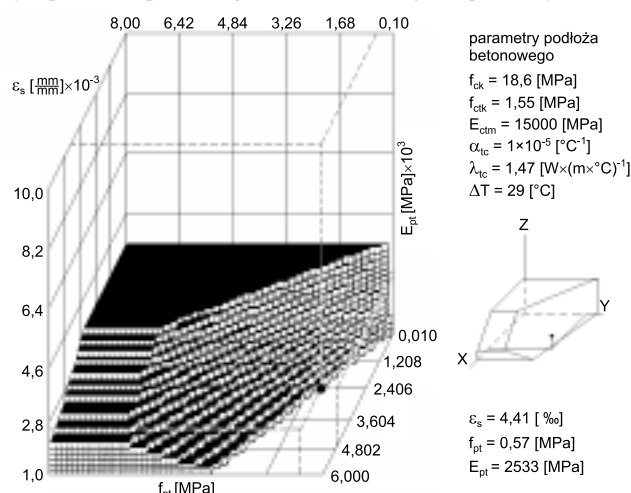
Rys. 3. Przykładowe podprzestrzenie kompatybilności powłoki PC wyznaczone za pomocą programu ANCOMP zdefiniowane przez moduł sprężystości E_{tp} , wydłużenie przy zerwaniu e_{tp} i wytrzymałość przy zerwaniu f_{tp} pokazujące wpływ możliwości zarysowania podkładu betonowego po jej nałożeniu na kształtowanie przestrzeni kompatybilności: a) powłoka nałożona na podkład zarysowany – szerokość rysy $w_{max} = 0,1$ mm (stan kompatybilny); powłoka nałożona na podkład niezarysowany, w którym w trakcie użytkowania obiektu pojawi się rysa: b) $w_{max} = 0,1$ mm, c) $w_{max} = 0,2$ mm [20]

prowadzono od chwili ich naprawy. W celu wykazania, że opracowane modele umożliwiają również wskazanie rozwiązań materiałowych nieprzydatnych w danym zastosowaniu, analizą objęto również realizacje nieudane.

Przykład 1. Komin żelbetowy wysokości $H = 120$ m. Bez aktualnej oceny stanu technicznego obiektu przeprowadzono naprawę uszkodzeń zewnętrznej powierzchni płaszcza. Użytkownik obiektu,

kierując się sugestią wykonawcy, wyraził zgodę na uzupełnienie ubytków betonu zaprawą cementowo-akrylową, którą oznaczono symbolem MX-113. Prace naprawcze zakończyły się niepowodzeniem. Zaprawa MX-113 po roku eksploatacji kominą odspoiła się, a głębokość karbonatyzacji betonu sięgała powyżej powierzchni zbrojenia.

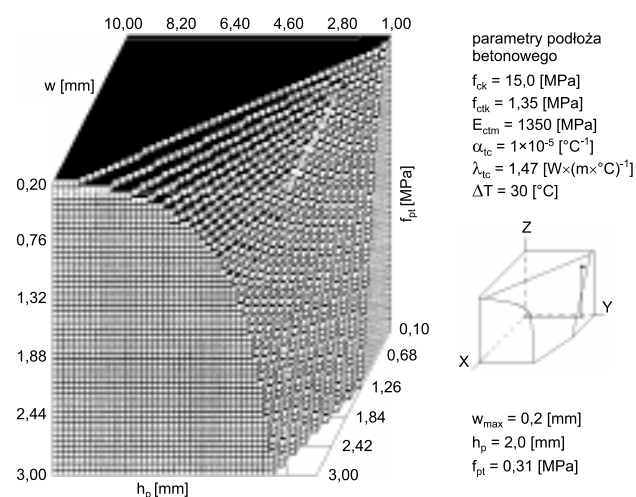
Badania cech fizykomechanicznych zaprawy MX-113 wykazały duży skurcz utwardzania (4,11 %) i małą wytrzymałość na rozciąganie zaprawy (0,56 MPa). Przyczepność zaprawy do betonu w warunkach odrywania, równa 0,9 MPa, nie odpowiada wymaganiom stawianym zaprawom do napraw konstrukcyjnych. Obliczenia wykonane z zastosowaniem przedstawionej metody analitycznej wykazały, że materiał MX-113 nie spełnia warunków dobrej współpracy z betonem w analizowanej konstrukcji (rysunek 4). Wyniki obliczeń analitycznych są zgodne z efektami uzyskanymi w praktyce. Zastosowanie do naprawy uszkodzeń trzonu kominą nieodpowiedniej zaprawy było powodem ponownego uszkodzenia miejsc naprawionych.



Rys. 4. Komin żelbetowy w Koszalinie – wycinek przestrzeni dobrej współpracy zapraw z betonem klasy B25 oraz punkt odzwierciedlający właściwości zaprawy MX-113 poza przestrzenią

Przykład 2. Komora napowietrzania ścieków. Została ona zaprojektowana jako otwarty zbiornik żelbetowy obsypany wałami gruntu do poziomu 0,4 m poniżej korony ścian. Ściany i dno zbiornika wykonano z betonu klasy B20, zbrojonego stalą gładką klasy A-I (St3S). Analiza obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, w której uwzględniono wszystkie możliwe kombinacje obciążeń wywołanych parciem gruntu, ścieków oraz wpływu temperatury ($\Delta T = 30$ °C) wykazała, że nośność ścian i dna komory jest zachowana. Obliczenia szerokości rozwarcia rys z uwzględnieniem wymuszonych naprężeń skurczowych, oszacowanych wg metody H. Trosta, wykazały, że w ścianach komory mogą wystąpić rysy o szerokości rozwarcia do 0,2 mm.

W celu zabezpieczenia wewnętrznych powierzchni zbiornika przed szkodliwym oddziaływaniem ścieków zaproponowano wykonanie elastycznej powłoki cementowo-akrylowej oznaczonej symbolem PCP-6, nakładanej metodą natrysku. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że wartości cech powłoki PCP-6 znajdują się w wyznaczonych przestrzeniach dobrej współpracy (rysunek 5). Powłoka ta, w analizowanych warunkach cieplno-wilgotnościowych, ma zdolność do przenoszenia rys o maksymalnej szerokości rozwarcia do 0,8 mm bez obawy, że nastąpi przerwanie ciągłości powłoki. Zalecona grubość powłoki (2 mm) jest wystarczająca z uwagi na naprężenia i odkształcenia, które mogą powstać w powłoce podczas tworzenia się rysy i przyrostu szerokości ich rozwarcia, spowodowa-



Rys. 5. Komora napowietrzania ścieków w Bytowie – wycinek przestrzeni dobrej współpracy powłok z betonem klasy B20 oraz punkt odzwierciedlający właściwości powłoki PCP-6

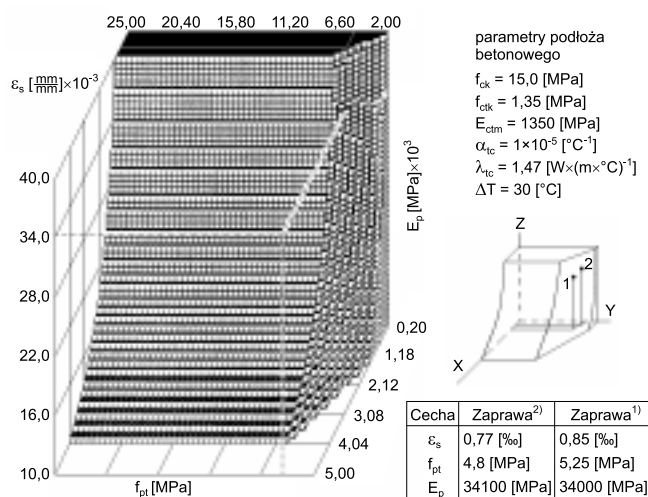


Widok ogólny komory napowietrzania ścieków w Bytowie – po naprawie

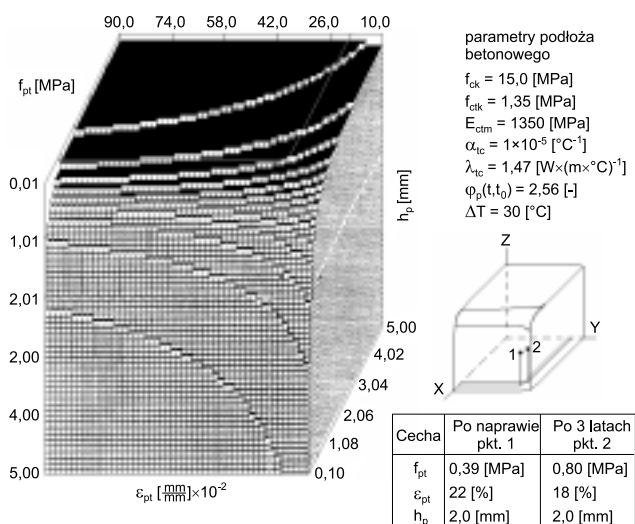
nego zmianami temperatury oraz odkształceniami wywołanymi skurczem betonu. Po siedmiu latach eksploatacji obiektu nie stwierdzono uszkodzeń powłoki (fotografia).

Przykład 3: Komora fermentacyjna i osadnik wstępny, stanowiące część ciągu technologicznego oczyszczalni ścieków, zostały zaprojektowane jako powłoka walcowa zamocowana w płycie dna. Oba zbiorniki wykonano w technologii monolitycznej, zgodnie z projektem technicznym, z niewielkimi odstępstwami konstrukcyjno-materiałowymi, które nie miały wpływu na nośność oraz bezpieczeństwo obiektów. Podstawową przyczyną zaistniałych uszkodzeń zbiorników były błędy wykonawcze (zbyt mała grubość otulenia prętów zbrojenia, nienależyte zagęszczenie betonu, zła jakość wykonania obiektów) oraz brak odpowiedniej ochrony betonu przed srodowiskiem agresywnym.

Projekt naprawy i ochrony powierzchniowej komory fermentacyjnej oraz osadnika wstępnego opracowano, stosując model II i III współpracy (tabele 2 i 3). Do odtworzenia monolityczności ścian i płyty dna zbiorników zalecono zastosowanie zapraw cementowo-akrylowych (zaprawy drobno- i gruboziarniste). Jako zabezpieczenie powierzchniowe ścian i płyty dna zbiorników wskazano wykonanie powłoki cementowo-akrylowej PCP-3. Przeprowadzone obliczenia współpracy zapraw cementowo-akrylowych i powłoki PCP-3 (w obliczeniach uwzględniono obciążenia długotrwałe i starzenie się powłoki) z betonem w konstrukcji wykazały przydatność przyjętych rozwiązań materiałowych (rysunki 6 i 7).



Rys. 6. Komora fermentacyjna w Stargardzie Gdańskim – wycinek przestrzeni dobrej współpracy zapraw naprawczych z betonem klasy B20 oraz punkty odzwierciedlające właściwości naprawczych zapraw cementowo-akrylowych (PCC)



Rys. 7. Komora fermentacyjna w Stargardzie Gdańskim – wycinek przestrzeni dobrej współpracy powłok z betonem klasy B20 oraz punkty odzwierciedlające właściwości powłoki PCP-3

Opisaną technologię zastosowano także w naprawach zbiorników oczyszczalni ścieków w Gryficach, Nakle i Zielonej Górze z takim samym pozytywnym rezultatem praktycznym.

Podsumowanie

Zaprezentowane doświadczenia dowodzą, że wielokryterialne modele dobrej współpracy mogą posłużyć nie tylko do opracowania technologii napraw i ochrony powierzchniowej konstrukcji z betonu, ale również do wskazania rozwiązań materiałowych, nieprzydatnych w danym zastosowaniu. Umożliwiają także prognozowanie zachowania się układu: materiał naprawczy – beton w czasie użytkowania obiektu i wskazanie warunków dobrej współpracy, które nie zostaną spełnione bądź na etapie doboru technologii naprawy i powłoki ochronnej, bądź w czasie użytkowania obiektu. Program ANCOMP, wykorzystujący wielokryterialne modele dobrej współpracy przedstawione w artykule, może służyć jako użyteczne narzędzie do projektowania nowych kompozytów naprawczych i powłok ochronnych, spełniających wymagania skutecznej i trwałej naprawy betonu.

Artykuł powstał w ramach projektu POIG. 01.01.02-10-106/09-01 (PT2) pt. *Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju. Podczas jego przygotowania wykorzystano wyniki uzyskane przy realizacji prac statutowych Politechniki Koszalińskiej i Politechniki Warszawskiej.*

Literatura

- [1] Czarnecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków, 2003.
- [2] Czarnecki L., Uszkodzenia i naprawy betonu, Inżynieria i Budownictwo 2 (2002), 59 – 65.
- [3] Vaysburd A., Holistic system approach to design and implementation of concrete repair, Cement & Concrete Composites 28 (2006) 671–678.
- [4] Czarnecki L., Emmons P. H., Vaysburd A. M., Materiały do napraw konstrukcji betonowych w ujęciu holistycznym. Materiały Budowlane 5, 2000, 2 – 7.
- [5] Czarnecki L., Clifton J. R., Głódkowska W., Problem of compatibility of polymer mortars and cement concrete system, International Colloquium Materials and Restoration, Esslingen, 1992, 964 – 971.
- [6] Emmons P. H., McDonald J. E., Vaysburd A. M., Some compatibility problems in repair of concrete structures – fresh look, International Colloquium Materials Science and Restoration, Esslingen, 1992, 836 – 848.
- [7] Czarnecki L., Garbacz, Lukowski P., Clifton J., Polymer Composites for Repairing of Portland Cement Concrete: Compatibility Project, NIST Report (NISTIR 6394). United States Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 1999.
- [8] Głódkowska W., Compatibility of polymer composite – cement concrete system [in Polish], Dissertation, Warsaw University of Technology, 1994.
- [9] Czarnecki L., Głódkowska W., Piątek Z., An Assessment of Usability of Injection Materials for Crack Repairs in Concrete Structures. 2nd Inter. Symp. Adhesion Between Polymers and Concrete, Dresden 1999.
- [10] Garbacz A., Głódkowska W., Compatibility as an important factor affecting repair durability, in the CD Proc. ESPSC – Czarnecki Symposium, Warsaw, 6 – 7.09.2011
- [11] Głódkowska W., Staszewski M., Weatherability of Coating Materials for Protection of Concrete. Adhesion in Interfaces of Building Materials: a Multi-scale Approach. Advances in Materials Science and Restoration. AMSR No. 2. ISBN 978-3-931681-89-0. Aedificatio Publishers, Germany, 2007.
- [12] Głódkowska W., Podstawy i metoda doboru właściwości kompozytów do naprawy i ochrony betonu. Uczelniane Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. Koszalin 2003.
- [13] Głódkowska W., Garbacz A., Zagadnienie kompatybilności materiałowej w naprawach i wzmacnianiu konstrukcji betonowych, Inżynieria i Budownictwo, 1/2012, s. 13 – 17.
- [14] Głódkowska W., Charakterystyka materiałów do ochrony i naprawy konstrukcji z betonu. Materiały Budowlane, 8/2003, s. 39-40 i 86.
- [15] Garbacz A., del Mar Lopez M., Naaman A., Czarnecki L., Compatibility space model for strengthening reinforced concrete beams with CFRP laminates, Report No. UMCEE 00-07, The University of Michigan, Ann Arbor, USA, 2000, stron 30.
- [16] Głódkowska W., Method of selection of coat properties for protection of reinforced concrete construction, Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. No 26 (45), 2012, pp. 118-126.
- [17] Czarnecki L., Głódkowska W., Piątek Z., Compatibility of polymer and cement-polymer composites with ordinary concrete under short-time load conditions. Archives of Civil Engineering. XLIX, 1/2004, s. 133-150.
- [18] Głódkowska W., Forecasting crack resistance of short- and long- term loaded coatings. ACME Journal, Vol. XI, No. 1, 2011, pp. 33-44.
- [19] Głódkowska W., Piątek Z., Analityczna metoda oceny dobrej współpracy materiałów naprawczych z betonem podłoża. Inżynieria i Budownictwo, 7/2003, s. 375 – 378.
- [20] Garbacz A., Znaczenie przygotowania powierzchni betonu dla zapewnienia skuteczności napraw, Materiały Budowlane, 9 (493) 2013, 10 – 13.
- [21] Głódkowska W., Przykłady napraw konstrukcji z betonu. Przegląd Budowlany, 12/2002.
- [22] Głódkowska W., Verfahren zur Ermittlung der Qualität von Schutzbeschichtungen. Bautenschutz Bausanierung, 12/2002.