

Wpływ stanu podłoża betonowego na nośność na wrywanie stalowych kotew mocujących

INFLUENCE OF THE CONDITION OF THE CONCRETE SUBSTRATE ON THE STEEL FIXING ANCHORS LOAD CAPACITY

Streszczenie

Przedmiotem badań przedstawianych w niniejszym referacie była ocena wpływu czynników obniżających jakość betonu na rzeczywistą nośność na wrywanie kotew mocujących. Nośność na wrywanie, wraz z wytrzymałością na obciążenie ścinające oraz moment zginający są najważniejszymi charakterystykami złącza konstrukcyjnego. Na osłabienie złącza wpływają między innymi skarbonatyzowanie betonu wokół kotwy oraz nasycenie betonu wodą lub destrukcja betonu spowodowana niszczącym działaniem mrozu, którym poświęcono badania przedstawione w artykule. Scharakteryzowano trzy najczęściej występujące typy kotew, rozróżnione według kryterium sposobu połączenia, tj.: mechaniczne rozporowe, mechaniczne kształtowe i chemiczne. Przedstawiono wyniki badań na wrywanie kotew zamocowanych w betonie. Badania prowadzono na seriach niepoddanych starzeniu i poddanych starzeniu, jako całe układy narażone na działanie pojedynczo każdego z wymienionych wcześniej czynników niszczących. Wnioski z badań odnoszą się zarówno do porównania badanych czynników niszczących złącze, jak i porównania trzech wybranych typów kotew.

Abstract

The subject of the research presented in this paper was the assessment of the impact of the particular factors decreasing the quality of concrete substrate on the steel fixing anchors load capacity. Load capacity together with shear stress and bending moment are the most important characteristics of the structural joint. Factors deteriorating the joint include, among others, the carbonation of concrete around the anchor, saturation

of concrete with water and the destructive effects of frost. The abovementioned factors were the subject of the presented paper. Moreover, three most common types of anchors were characterized according to the criterion of the connection method, i.e.: mechanical expansion anchors, mechanical shaped anchors and chemical anchors and the results of pull-out tests of bolts anchored in concrete are presented. The tests were carried out on series of systems that were non-aged and aged (the whole systems exposed to one of the abovementioned destructive factors). The conclusions refer to the comparison of the tested factors destroying the joint as well as the comparison of three selected types of anchors.

1. Typy kotew według kryterium sposobu połączenia

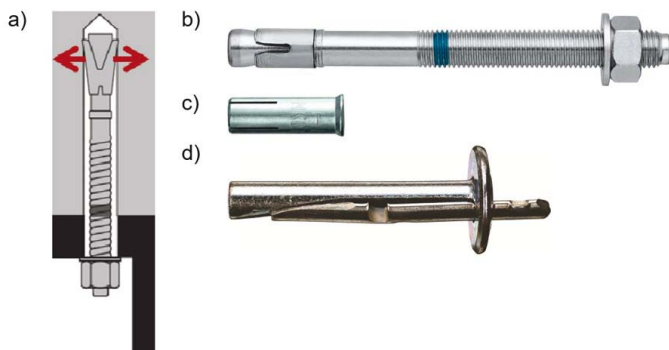
Kotwy można rozróżnić ze względu na materiał, z którego wykonana jest kotwa (stal, tworzywa sztuczne), ze względu na geometrię (średnica, długość i głębokość zakotwienia), która wynika z właściwości materiału oraz ze względu na sposób montażu kotwy, który zależy przede wszystkim od:

- materiału podłoża, do którego zamocowany ma być element – rozróżnia się kotwy do stosowania w betonie (przy czym znaczenie ma, czy kotwa ma się znajdować w strefie ściskanej, czy rozciąganej), w murach, czy w płytach gipsowo-kartonowych;
- środowiska aplikacji obejmującego wiele czynników szkodliwych, przed którymi kotwy muszą być dodatkowo zabezpieczone (np. poprzez ocynkowanie, galwanizację);
- typu połączenia i wynikającego z niego mechanizmów zapewniających pozostanie kotwy we właściwym miejscu w podłożu.

Z uwagi na ostatnie kryterium, tj. typ połączenia, wyróżnia się 2 podstawowe rodzaje kotew, w tym dwa rodzaje kotew mechanicznych – z połączeniem rozporowym i kształtowym oraz kotwy tzw. „chemiczne” – z żywicami iniekcyjnymi.

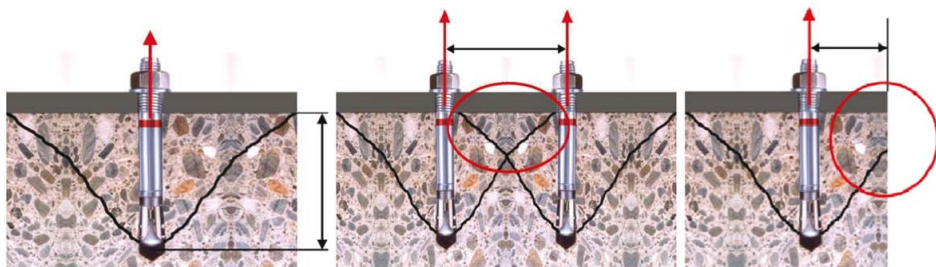
W **kotwach mechanicznych rozporowych** (rys. 1a) wykorzystuje się mechanizm polegający na wytworzeniu siły rozprężającej oddziałującej na ściankę otworu – wykorzystuje się tarcie pomiędzy ścianką otworu i kotwą. Wyróżnia się tzw. **Kotwy segmentowe**, składające się z kilku elementów, w tym z pierścienia rozpierającego (rys. 1b), co pozwala uzyskać dużą nośność połączenia, **kotwy wpuszczane** składające się z tulei i stożka rozporowego (rys. 1c) zagłębiane płytko – w obręb otuliny oraz **kotwy klinowe**, składające się z trzonu z kołnierzem oraz klina blokującego się w otworze (rys. 1d), przy czym dwa ostatnie charakteryzują się większą łatwością wykonania, ale także stosunkowo mniejszą nośnością.

Kotwy mechaniczne działające na zasadzie połączenia kształtowego charakteryzują się odmienną geometrią przekroju na długości – w określonym miejscu średnica kotwy jest większa, niż średnica wywierconego w podłożu otworu (rys. 2a). Rozróżnia się tzw. **kotwy wkręcane** – z kołnierzem, rdzeniem z gwintem i krawędzią tnącą (rys. 2b), która poszerza otwór i odprowadza urobek (kotwy przeznaczone do stosowania w różnych podłożach i w małym rozstawie), **kotwy samopodcinające** – z tuleją, rdzeniem z gwintem i owalną końcówką, z podkładką i nakrętką sprężającą (rys. 2c), co zapewnia takiej kotwie dużą nośność na ścinanie oraz tzw. **kotwy plastikowe** – z gwintowanym prętem i plastikową tuleją (rys. 2d) służące do stosowania w różnego typu podłożach.



Rys. 1. Schemat działania połączenia rozporowego (a) oraz typy kotew firmy Hilti: kotwa segmentowa (b), kotwa wpuszczana (c), kotwa klinowa (d) – na podstawie [12,13]

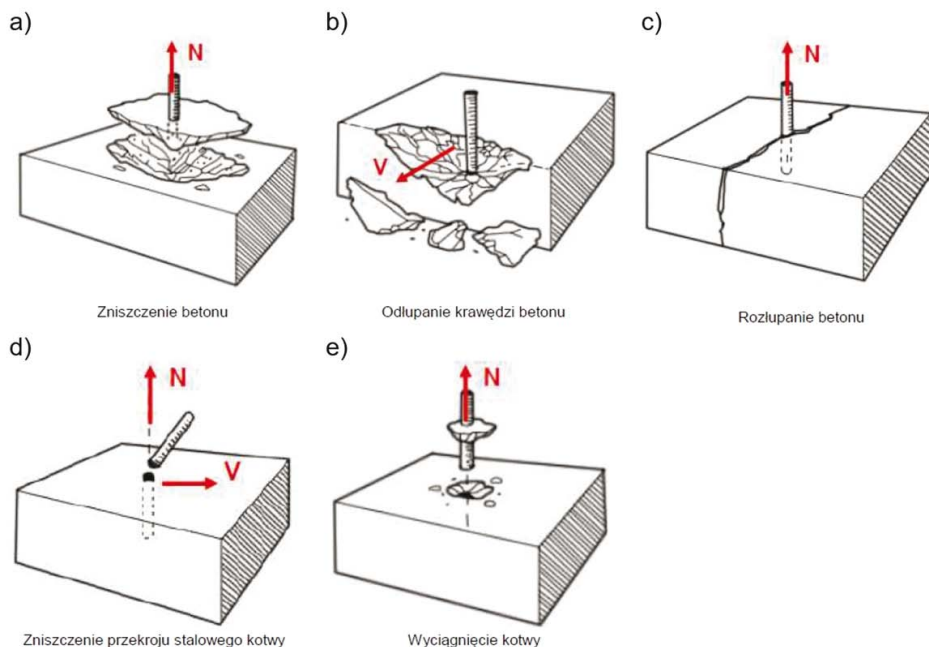
- zmniejszonej głębokości osadzenia kotwy, projektując złącze, należy uwzględnić odpowiednie współczynniki redukcyjne;
- zmniejszony rozstaw osiowy pomiędzy kotwami obniża wytrzymałość grupy kotew z uwagi na wzajemny wpływ stożków wrywania; rozstaw kotew, w którym stożki wrywania mają jeden punkt styku to **rozstaw krytyczny** – kotwy w takim lub większym rozstawie uzyskują pełną nośność; jeśli konieczne jest zmniejszenie rozstawu kotew, przy projektowaniu połączenia należy zastosować odpowiednie współczynniki redukcyjne;
- zredukowana odległość kotwy od krawędzi podłoża betonowego skutkuje zmniejszeniem objętości stożka wrywania oraz koncentracją naprężeń, która może doprowadzić do zniszczenia betonu; odległość zapewniająca zachowanie pełnego przekroju stożka to **odległość krytyczna** – kotwa zakotwiona przy krawędzi z zachowaniem tej odległości uzyskuje pełną nośność; dopuszcza się zmniejszenie odległości od krawędzi, co skutkuje ścięciem stożka, jeśli takiej nośności połączenia będzie wystarczająca, ale także takie rozwiązanie wymaga zastosowania przy projektowaniu odpowiednich współczynników redukcyjnych.



Rys. 4. Wpływ usytuowania kotwy w betonie na przekrój stożka wrywania (od lewej): głębokość osadzenia kotwy warunkująca objętość stożka, zmniejszony rozstaw kotew i zmniejszona odległość kotwy od krawędzi betonu, skutkujące redukcją przekroju stożków i obniżeniem nośności połączenia – na podstawie [12,13]

2.2. Mechanizmy zniszczenia połączenia

Kiedy zostanie przekroczona nośność kotwy, połączenie ulega zniszczeniu. Mechanizmy zniszczenia można podzielić z uwagi na rodzaj siły, która doprowadziła do zniszczenia. W wyniku działania siły rozciągającej może nastąpić zniszczenie w strukturze betonu – wyrwana zostaje kotwa wraz z otulającym ją betonem (rys. 5a). W wyniku działania siły ścinającej może nastąpić zniszczenie podłoża przez odłupanie krawędzi (rys. 5b). Siła rozciągająca może doprowadzić do zarysowania lub pęknięcia betonu (rys. 5c). Działanie sił rozciągającej i/lub ścinającej może doprowadzić do zniszczenia przekroju stalowej części kotwy (rys. 5d). Natomiast w efekcie kotwienia w betonie niskiej jakości lub betonie uszkodzonym, czy zastosowania kotwy uszkodzonej, kotwa może zostać „wyrwana” z podłoża (rys. 5e).



Rys. 5. Mechanizmy zniszczenia połączenia kotwa–beton – na podstawie [12,13]

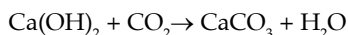
2.3. Wpływ jakości betonu na pracę złącza

Jakość betonu, w tym jego wytrzymałość na ściskanie, ma istotny wpływ na nośność połączenia kotwy z betonem. Praktycznie – im wyższa klasa wytrzymałości betonu, tym większa nośność połączenia na zniszczenie przez wyłamanie stożka betonu oraz przez rozłupanie. W sytuacji, kiedy należy zakotwić łącznik stalowy w nowo powstałej konstrukcji, nie ma trudności z oceną jakości podłoża – jeśli zostało dobrze wykonane (co zwykle jest potwierdzane testami), można przyjąć, że spełnia zakładane przy projektowaniu parametry. Jednak w przypadku mocowania do istniejącego podłoża ocena stopnia jego zniszczenia wymaga badań; w większości przypadków najszybszą i najłatwiejszą (a czasami jedyną) metodą jest wykonanie testu *in situ* i sprawdzenia, jakie nośności będą miały zakotwione w danym podłożu i poddane obciążaniu kotwy próbne.

Z uwagi na postępującą w czasie destrukcję betonu następuje obniżenie nośności wykonanych z niego elementów – podczas postępującej utraty wytrzymałości kolejnych warstw materiału (począwszy od powierzchniowej) zmniejszeniu ulega czynny przekrój elementów. O ile w przypadku części konstrukcji, jak słupy czy belki, przy szacowaniu nośności bierze się pod uwagę cały przekrój, o tyle dla nośności większości rodzajów kotew ważna jest strefa przypowierzchniowa, w której kotwy są mocowane (wyjątkiem mogą tu być kotwy o niestandardowych długościach lub pręty wklejane, które są mocowane głęboko w element). Poniżej omówiono dwa istotne czynniki, mające wpływ na osłabienie złącza – skarbonatyzowanie betonu wokół kotwy oraz nasycenie betonu wodą lub destrukcja betonu spowodowana niszcącym działaniem mrozu.

2.4. Karbonatyzacja

Karbonatyzacja jest jedną z głównych przyczyn niszczenia betonu, w tym betonu zbrojonego [1], [2], [3]. Jest to zespół przemian fizykochemicznych betonu pod wpływem długotrwałego oddziaływania dwutlenku węgla. Jest to proces, w którym dwutlenek węgla zawarty w powietrzu reaguje z produktami hydratacji cementu. Spośród związków tworzących strukturę betonu związkiem, który przede wszystkim ulega karbonatyzacji jest wodorotlenek wapnia. W wyniku jego reakcji z CO_2 w obecności wilgoci powstaje węglan wapnia. Reakcję tę można zapisać następująco:



Karbonatyzacja prowadzi do zubożenia betonu, co jest szczególnie istotne w przypadku, gdy beton jest zbrojony stalą. W wyniku obniżenia poziomu pH w pobliżu zbrojenia następuje destrukcja warstwy pasywacyjnej na stali zbrojeniowej, co umożliwia inicjację korozji zbrojenia. Zwiększenie objętości produktów korozji stali (tlenki i wodorotlenki żelaza), prowadzi do powstawania naprężeń w otulinie betonowej, a w efekcie – jej pęknięcia i stopniowego odsłaniania zbrojenia [1, 3]. Szybkość przemieszczania się frontu karbonatyzacji (linii brzegowej strefy o obniżonym pH) w dużej mierze zależy od warunków eksploatacyjnych elementu betonowego – podwyższone stężenie CO_2 w atmosferze oraz wysoka wilgotność przyspieszają karbonatyzację. Efektem pozytywnym jest jednak doszczelnienie mikrostruktury matrycy cementowej następujące w konsekwencji karbonatyzacji. Pory w matrycy są wypełniane krystalizującym węglanem wapnia, a wydzielana w procesie karbonatyzacji woda może wspomagać uwadnianie niehydratyzowanych wcześniej ziaren cementu, co skutkuje zwiększoną twardością warstw przypowierzchniowych betonu, a dodatkowo redukuje rozpuszczalność składników betonu w tej strefie [1]. Te efekty, pozornie negatywnego zjawiska karbonatyzacji, są bardzo pożądane odniesieniu do kotwienia łączników stalowych, zwłaszcza kotew krótkich do płytkiego mocowania.

2.5. Destrukcja mrozowa

Czynnikiem szczególnie zagrażającym konstrukcjom betonowym jest niszczące działanie mrozu. W okresach niskich temperatur cykliczne zamarzanie i rozmarzanie wody powoduje zniszczenie niepoprawnie zaprojektowanego i wykonanego betonu. Czynniki ją powodujące korozję można podzielić na dwie grupy – zewnętrzne i wewnętrzne, które omówiono poniżej.

Czynniki zewnętrzne powodujące korozję betonu obejmują:

- cechy klimatu, w tym zmiany wartości temperatury powietrza, przechodzenie przez 0°C , wilgotność powietrza, opady atmosferyczne,
- ekspozycja konstrukcji lub jej elementów na promieniowanie słoneczne,
- lokalizacja i kształt budowli,
- rodzaj obciążeń, którym poddana jest konstrukcja lub jej element,
- cykl oddziaływania wilgoci na beton (krótkotrwały, czy długotrwały),
- intensywność oddziaływania wilgoci na beton (kontakt z wilgotnym powietrzem, bezpośrednia styczność z wodą).

Czynniki wewnętrzne powodujące korozję betonu obejmują:

- wymiary i rozmieszczenie porów w mikrostrukturze betonu,
- obecność porów ciągłych o rozmiarze min. 120 nm (tzw. kapilary), które tworzą system połączonych losowo rozmieszczonych małych przestrzeni,
- obecność bardzo drobnych porów o strukturze nieciągłej,

- obecność pustek powstałych w wyniku uwięzienia wody pod ziarnem kruszywa lub niedostatecznego zagęszczenia mieszanki betonowej,
- nasycenie betonu wodą.

Wpływ zamrażania/rozmarzania na własności betonu.

W procesie utwardzania betonu powstają pory. Wnikająca do nich i wypełniająca je woda, która zmienia objętość podczas przechodzenia przez 0°C , powoduje mikropełnięcia w strukturze betonu. Skutkuje to postępowaniem procesu korozji mrozowej i w konsekwencji niszczeniem materiału. Jednym ze skutecznych sposobów poprawiającym mrozoodporność betonu jest wprowadzenie do jego struktury dodatkowych pęcherzyków powietrza, które przerywają kapilary i stwarzają dodatkową przestrzeń dla zamarzającej wody [4, 5]. Można to osiągnąć np. poprzez stosowanie domieszek napowietrzających.

Nasycenie betonu wodą.

W warunkach zewnętrznych nasycenie betonu wodą następuje podczas ekspozycji konstrukcji na czynniki atmosferyczne, takie jak opady lub zawilgocenie powietrza. W warunkach wewnętrznych przyczyną nasycenia betonu wodą jest najczęściej awaria budowlana, niewłaściwie wykonana izolacja lub błąd ludzki. Beton nasycony wodą wykazuje gorsze charakterystyki wytrzymałościowe. Ma to związek z jego strukturą, która jest porowata. W praktyce penetracja wody w zwykłym betonie klasy np. C20/25 osiąga głębokość ok. 2–3 cm, wystarczy to jednak, aby obniżyć jego wytrzymałość w strefie przypowierzchniowej. Wysokie nasycenie betonu wodą ma również swoje zalety – duża ilość wody w porach kapilarnych jest skutecznym ogranicznikiem tempa wnikania gazowej formy dwutlenku węgla, natomiast niskie nasycenie (zawilgocenie) betonu przed zamarznięciem sprzyja jego większej odporności mrozowej [5].

3. Ocena nośności na wyrywanie kotew zamocowanych w betonie

3.1. Sformułowanie problemu badawczego

Kotwy są elementem konstrukcyjnym mającym zastosowanie w wielu segmentach budownictwa, na różnych etapach konstrukcji budowli. Nie ma wątpliwości, że połączenia elementów konstrukcyjnych powinny spełniać swoją funkcję od strony bezpieczeństwa użytkownika i struktury budowli. W przypadku gdy np. zawiedzie połączenie kotwowe zastosowane do mocowania umywalki (tzw. „biały montaż”) efektem będzie zniszczenie ceramiki. Natomiast kiedy awarii ulegnie mocowanie np. tubingu w tunelu samochodowym lub barierki ochronnej na tarasie widokowym budynku wysokościowego skutki mogą być o wiele bardziej poważne. Mając na uwadze m.in. powyższe przykłady producenci kotew badają swoje wyroby na różne sposoby.

Wymagania, jakie powinny spełniać kotwy mocowane w betonie są przedstawione w Wytycznych do Europejskich Ocen Technicznych ETAG 001 „Kotwy metalowe do stosowania w betonie”. Część 1: Kotwy – zagadnienia ogólne” [6]. W powyższej pozycji można znaleźć różne wytyczne pośrednio dotyczące materiału podłoża, np. testy przydatności kotew sprawdzające funkcjonowanie:

- w betonie o niskiej wytrzymałości (C20/25),

- w betonie o wysokiej wytrzymałości (C50/60),
- jako stabilizacja rys.

W ETAG 001 [6] można również znaleźć wytyczne do testów trwałości, jakim powinna sprostać kotwa w zależności od czynników takich jak:

- wysoka alkaliczność ($\text{pH} \geq 13,2$),
- temperatura w zakresie od -40°C do $+80^{\circ}\text{C}$,
- oddziaływanie chlorków,
- oddziaływanie siarczanów,
- oddziaływanie amoniaku, itp.

Wytyczne ETAG001 informują o tym, że testy przydatności są kluczowe w ocenie kotew i ich przeprowadzenie ma swoje uzasadnione powody. W kwestii podłoża wytyczne mówią, że „kotwy nie powinny być zbyt wrażliwe na zmiany właściwości podłoża, ponieważ rzeczywista wytrzymałość betonu w konstrukcji może być wyższa niż wartość projektowana, kotwy powinny prawidłowo funkcjonować we wszystkich klasach wytrzymałości betonu objętych przez te Wytyczne, nawet, jeśli wytrzymałość charakterystyczna podana w Europejskiej Ocenie Technicznej jest ograniczona do najniższej klasy wytrzymałości” [6]. W praktyce przywołany zapis jest interpretowany w następujący sposób: producent testuje kotwy w betonie o najniższej dopuszczalnej wytrzymałości (C20/25) i w aprobach zamieszczona zostaje informacja, że kotwa wykazuje dane cechy w betonach w zakresie C20/25÷C50/60 [7]. Jest to jak najbardziej zgodne z prawem i wymaganiami wytycznych, ponieważ zgodnie z wyżej cytowanym fragmentem każda kotwa posiadająca parametry umożliwiające zastosowanie jej w betonie o klasie wytrzymałości C20/25 może być stosowana w betonach o wyższych klasach. Takie działanie ma jednak wadę w postaci braku znajomości parametrów kotwy dotyczących konkretnej, wyższej klasy niż C20/25. Niektórzy producenci jednak testują swoje produkty w pośrednich klasach betonu. Parametry kotwy wynikające z tych testów są zamieszczone w aprobach najczęściej w postaci współczynnika (mnożnik o wartości większej od 1) odnoszącego się do wartości uzyskanych dla betonu klasy C20/25 [8].

W wyżej cytowanym fragmencie napisano, że „Kotwy nie powinny być zbyt wrażliwe na zmiany właściwości podłoża”. Oznacza to, że kotwy powinny posiadać pewną tolerancję na zmiany podłoża, ale nie mówi nic o zakresie tych zmian oraz o czynnikach je powodujących. Celem badań zaprezentowanych w niniejszym artykule było określenie wpływu trzech czynników osłabiających podłoże betonowe (cykliczne zamrażania i rozmrażanie, karbonatyzacja oraz nasycenie betonu wodą) na nośność kotew na wrywanie – badano nośność kotew na działanie siły rozciągającej.

3.2. Przygotowanie układu do badań

Podłoże betonowe. W celu określenia nośności kotew w betonie na działanie siły rozciągającej przygotowano próbki sześciennie o boku 15 cm, w których zamocowano kotwy. W celu szybkiego uzyskania destrukcji podłoża betonowego pod wpływem czynników niszczących, próbki wykonano z betonu o klasie wytrzymałości C25/30. Zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R z cementowni „Odra” i wodę wodociagową (współczynnik woda/cement, $W/C=0,5$); kruszywo obejmowało piasek rzeczny (frakcja 0/2 mm, udział 38% mas.) i żwir płukany (frakcja 2/16 mm). Przygotowana z takich składników mieszanka betonowa charakteryzowała się klasą konsystencji oznaczoną metodą opadu stożka min. S3. W celu odwzorowania rzeczywistych warunków panujących na budowie, przez czas dojrzewania próbki były przechowywane na zewnątrz. Próbki nie były bezpośrednio narażone na opady atmosferyczne – zabezpieczono je folią, ale przez

pierwszy tydzień były polewane wodą (3 razy / dzień). Badania realizowano w miesiącach letnich (lipiec–wrzesień) – wahania temperatury panującej na zewnątrz w tym czasie wyniosły od 10 do 25°C.

Kotwy zostały zamocowane w kostkach betonowych po 7 tygodniach od betonowania (fot. 1). Procedura montażu została przeprowadzona zgodnie z wytycznymi producenta. W badaniach wykorzystano 3 typy kotew Hilti – po jednej z opisanych wcześniej kategorii – tj. kotwę segmentową (HST3 M10x100), kotwę wkręcaną (HUS3-H M10x100) oraz układ: pręt kotwy (HIT-V 5.8 M10x95) + żywica (HIT-HY 200-A); przy czym wybrano kotwy o zbliżonych wymiarach. Taki dobór kotew pozwolił zbadać zachowanie połączenia rozporowego, kształtowego i tzw. „chemicznego”. W tabeli 1 zestawiono właściwości tych kotew. Częściowy współczynnik bezpieczeństwa jest używany na etapie projektowania i stosuje się go w przypadku braku innych przepisów krajowych. Z danych wynika, że zestaw kotwa + żywica są najbardziej predystynowane do stosowania w elementach o niewielkich grubościach – umożliwia mocowanie do elementów już o grubości 100 mm. Jest to efekt braku naprężeń montażowych, które występują w pozostałych typach połączeń. Najlepsze nośności w przypadku zniszczenia stali (zarówno przy rozciąganiu, jak i ścinaniu z momentem oraz bez momentu zginającego) wykazuje kotwa wkręcana, co wynika z powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia tej kotwy.



Fot. 1. Kotwy w próbkach betonowych (od lewej): segmentowe (HST3 M10x100), wkręcane (HUS3-H M10x100), chemiczne (HIT-V 5.8 M10x95)

Tabela 1. Parametry kotew zastosowanych w badaniach [dane producenta]

Parametr/Kotwa	HST3 M10x100	HUS3-H M10x100	HIT-V 5.8M10x95 + HIT-HY 200-A
Minimalna grubość element betonowego, $h_{\min}$, mm	120,0	130,0	100,0
Czynna głębokość osadzenia, h_{ef} , mm	60,0	58,6	60,0
Minimalny rozstaw kotew (beton zarysowany), $s_{\min}$, mm	40,0	50,0	50,0
Minimalna odległość od krawędzi (beton zarysowany), $c_{\min}$, mm	45,0	50,0	45,0
Minimalny rozstaw kotew (beton niezarysowany), $s_{\min}$, mm	40,0	50,0	50,0
Minimalna odległość od krawędzi (beton niezarysowany), $c_{\min}$, mm	50,0	50,0	45,0

Tabela 1. Cd. Parametry kotew zastosowanych w badaniach [dane producenta]

Parametr/Kotwa	HST3 M10x100	HUS3-H M10x100	HIT-V 5.8M10x95 + HIT-HY 200-A
Zniszczenie stali (rozciąganie)			
Nośność charakterystyczna, kN	32,5	62,2	39,2
Częściowy wsp. bezpieczeństwa, [-]	1,40	1,40	1,50
Zniszczenie przez wyciągnięcie kotwy (rozciąganie)			
Nośność charakterystyczna (beton zarysowany C20/25), kN	12,0	- ¹⁾	7,5 ²⁾
Nośność charakterystyczna (beton niezarysowany C20/25), kN	20,0	20,0	18,0 ²⁾
Częściowy wsp. bezpieczeństwa, [-]	1,00	1,00	1,00
Zniszczenie przez wyłamanie stożka betonu, rozłupanie podłoża (rozciąganie)			
Czynna głębokość osadzenia, h_{ef} , mm	60,0	58,6	60,0
Wsp. betonu zarysowanego, [-]	7,2	7,2	- ²⁾
Wsp. betonu niezarysowanego, [-]	10,1	10,1	- ²⁾
Rozstaw kotew, mm	3 h_{ef}	3 h_{ef}	210,0
Odległość od krawędzi podłoża, mm	1,5 h_{ef}	1,5 h_{ef}	105,0
Częściowy wsp. bezpieczeństwa, [-]	1,00	1,00	1,00
Współczynnik zwiększający dla betonu spękanego i nie-spękanego, [-]	C20/25	1,00	1,00
	C30/37	1,22	1,22
	C40/50	1,41	1,41
	C50/60	1,55	1,55
Zniszczenie stali (ściananie bez momentu zginającego)			
Nośność charakterystyczna, kN	23,6	30,0	19,6
Częściowy wsp. bezpieczeństwa, [-]	1,25	1,50	1,25
Zniszczenie stali (ściananie z udziałem momentu zginającego)			
Nośność charakterystyczna, kN	60,0	92,0	58,9
Częściowy wsp. bezpieczeństwa, [-]	1,25	1,50	1,25

¹⁾ Zniszczenie przez wyciągnięcie kotwy nie jest decydujące

²⁾ W przypadku kotew wklejanych podaje się parametr o nazwie „zniszczenie przez kombinację wyciągnięcia kotwy i wyłamania stożka betonu” – podaje się nośność charakterystyczną wiązania w betonie (zarysowanym lub niezarysowanym) w danym zakresie temperatur, a jednostką

3.3. Metodyka badawcza – długoterminowe obciążanie czynnikami niszczącymi

Próbki składające się z zestawu kotwa + kostka betonowa były wystawione na działanie czynników negatywnie wpływających na połączenie.

Karbonatyzacja. Badanie w komorze karbonatyzacyjnej zostało przeprowadzone w oparciu o normę PN-EN 13295:2005 – *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie odporności na karbonatyzację* [9]. Ze względu na ograniczenia czasowe skrócono czas przyspieszonego badania – próbki do badań

dojrzewały w wodzie przez 4 dni, następnie przez 3 dni następowała stabilizacja masy w warunkach wilgotności względnej $60 \pm 10\%$ i temperaturze $21 \pm 2^\circ\text{C}$. Karbonatyzacja w komorze trwała 49 dni w środowisku jw. oraz w stężeniu $\text{CO}_2 = 1\%$. Po tym czasie próbki zostały poddane testowi wyrywania.

Zamrażanie i rozmrażania. Badanie to zostało przeprowadzone w oparciu o normę PN-88/B-06250 – *Beton zwykły* [10]. Próbki do badań dojrzewały w wodzie przez 7 dni, następnie zostały umieszczone w komorze zamrażalniczej. Okres trwania pełnego cyklu został ustawiony na 8 godzin i odbywał się w następujących cyklach: zamrażanie w powietrzu o temperaturze $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ przez min. 4 godziny oraz rozmrażanie w wodzie w temperaturze $+18 \pm 2^\circ\text{C}$ przez około 4 godziny. Po 9 dniach badania (27 cykli) próbki z kotwami rozprężnymi wykazywały zdecydowane oznaki zniszczenia, więc – w celu możliwości przeprowadzenia testu wyrywania – cykle zamrażania-rozmrażania zostały w ich wypadku przerwane. W przypadku pozostałych próbek testy przerwano (z tego samego powodu jw.) po 27 dniach (81 cykli).

Nasycenie betonu wodą. Próbki w tym badaniu były trzymane w kąpeli wodnej przez 49 dni, w temperaturze $21\text{--}22^\circ\text{C}$.

3.4. Metodyka badawcza – testy wyrywania

W początkowym etapie badań założono przeprowadzenie testów wyrywania przy pomocy testera HAT 28 firmy HILTI, przewidując, że wartość wytrzymałości połączenia na siłę rozciągającą nie powinna przekroczyć maksymalnego zakresu testera (30 kN). Jednak po przeprowadzeniu testów na próbkach po cyklach zamrażania i rozmrażania napotkano na przeszkodę w postaci osiągnięcia maksymalnej możliwej siły, w momencie, kiedy kotwa nadal pozostawała osadzona w betonie. Rozwiązaniem było zastosowanie testera o większym zakresie siły rozciągającej (176 kN) – HAT 180. Wielkość próbek (która ma wpływ na zamocowanie testerów) wykluczyła jeden z częściej występujących modeli zniszczenia – wyrwanie stożka betonu. Podczas testów wystąpiły następujące modele zniszczenia: wyciągnięcie kotwy, rozłupanie betonu oraz zniszczenie stali (Fot. 2).



Fot. 2. Modele zniszczenia (od lewej): wyciągnięcie kotwy, rozłupanie betonu oraz zniszczenie stali kotwy

3.5. Wyniki badań

Wytrzymałość na ściskanie betonu, z którego wykonano próbki została oznaczona po 104 dniach od wykonania. Ma to swoje uzasadnienie w tym, że tego samego dnia został przeprowadzony test na wyrywanie, co pozwala odnieść wyniki do uzyskanej klasy betonu. Wytrzymałość na ściskanie (wartość średnia) wyniosła $35,8 \text{ MPa}$, gęstość objętościowa

tego betonu to (wartość średnia) 2271 kg/m³. Natomiast w tabeli 2 przedstawiono wyniki testu wrywania kotew – wartości siły wrywającej w zależności od rodzaju obciążenia i typu kotwy. Wynika z nich, że w prawie każdym przypadku układy referencyjne nie poddane działaniu czynników destrukcyjnych wykazują nośność na wrywanie lepszą od tych poddanych działaniu czynników destrukcyjnych. Jedynym wyjątkiem jest kotwa segmentowa, która dla próbki skarbonatyzowanej wykazała nośność identyczną jak dla próbki porównawczej (21,5 kN). Destrukcja mrozowa okazała się czynnikiem, który najbardziej obniżył nośność połączeń – ponad 3-krotnie dla kotwy segmentowej, ponad 4-krotnie dla kotwy chemicznej oraz ponad 13-krotnie dla kotwy wkręcanej (różnica od 15 do 27 kN w zależności od rodzaju kotwy).

Tabela 2. Wyniki testu wrywania kotew różnego typu po niszczącym działaniu

Typ kotwy	Siła, kN	Śred., kN	Typ kotwy	Siła, kN	Śred., kN
Zamrażanie/rozmrażanie			Nasycenie betonu wodą		
Kotwy segmentowe (HST3 M10x100)	4,5	6,5	Kotwy segmentowe (HST3 M10x100)	19,0	19,3
	7,0			20,0	
	8,0			19,0	
Kotwy chemiczne (HIT-V 5.8 M10x95)	11,5	8,3	Kotwy chemiczne (HIT-V 5.8 M10x95)	24,5	30,7
	4,0			33,5	
	9,5			34,0	
Kotwy wkręcane (HUS3-H M10x100)	1,5	2,0	Kotwy wkręcane (HUS3-H M10x100)	21,0	20,8
	2,0			24,5	
	2,5			17,0	
Karbonatyzacja			Układ referencyjny (barak czynników niszczących)		
Kotwy segmentowe (HST3 M10x100)	20,0	21,5	Kotwy segmentowe (HST3 M10x100)	20,5	21,5
	20,0			21,0	
	24,5			23,0	
Kotwy chemiczne (HIT-V 5.8 M10x95)	25,5	28,8	Kotwy chemiczne (HIT-V 5.8 M10x95)	41,0	35,8
	32,0			39,5	
	29,0			27,0	
Kotwy wkręcane (HUS3-H M10x100)	30,0	24,3	Kotwy wkręcane (HUS3-H M10x100)	30,0	26,2
	19,5			23,5	
	23,5			25,0	

4. Wnioski

Wyniki zaprezentowane w artykule zaledwie w ograniczonym stopniu wyjaśniają zagadnienia wpływu jakości podłoża betonowego na charakterystyki wytrzymałościowe kotew, a w szczególności na nośność na wrywanie. Mnogość czynników oddziałują-

cych na beton oraz różnorodność kotew (od typów, poprzez średnice i długości, a na zabezpieczeniu przeciwkorozyjnym kończąc) daje ogromne pole manewru, jeśli chodzi o możliwości badań. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było sformułowanie następujących wniosków.

Pośród trzech analizowanych czynników powodujących osłabienie podłoża betonowego, największy wpływ na nośność kotew wykazała korozja mrozowa betonu, w efekcie której nastąpiło znaczne obniżenie nośności połączenia kotwa-beton.

Najwyższą nośność niezależnie od zastosowanego czynnika destrukcyjnego wykazała kotwa tzw. „chemiczna”, na którą składał się zestaw pręt (HIT-V 5.8 M10x95) i żywica (HIT-HY 200-A). W przypadku tej kotwy (w sytuacji braku czynników destrukcyjnych) średnią wartość siły rozciągającej wyniosła 35,8 kN, podczas gdy w aprobacie ETA [11] nośność charakterystyczna dla zniszczenia stali przy sile rozciągającej wynosi 39,2 kN (por. tabela 1).

Najgorsze wyniki (wszystkie przypadki z wyjątkiem kategorii zamrażanie/rozmrężanie) uzyskano w przypadku połączenia za pomocą kotwy segmentowej (HST3 M10x100). Może to być spowodowane tym, że kotwa działa na zasadzie rozporu, generując przez to naprężenia większe niż pozostałe dwa typy kotew (zwłaszcza, że kotwiono w betonie niezbrojonym).

Brak wystąpienia modelu zniszczenia charakteryzującego się wyrwaniem stożka był spowodowany małym rozmiarem próbek i zastosowanym urządzeniem testującym – testery podparte w bliskim sąsiedztwie kotwy skutecznie uniemożliwiły powstanie stożka wyrwania.

Łączniki stalowe zostały zakotwione na minimalną głębokość nominalną (wymaganą przez producenta) do uzyskania gwarantowanej w aprobacie nośności. Zakładając pozostawienie identycznych wymiarów kostki betonowej oraz sposobu mocowania testera, zwiększenie tej głębokości zwiększyłoby nośność w przypadku zniszczenia przez wyrwanie stożka (potencjalnie) i wyciągnięcie kotwy, natomiast nie jest pewne polepszenie nośności w przypadku zerwania stali. Jak wcześniej wspomniano – osiągnięto niemal maksymalną wartość gwarantowaną przez aprobatę ETA.

Literatura

- [1] P.P. Woyciechowski (2013), Model karbonatyzacji betonu, *Prace Naukowe – Budownictwo*, z.157;
- [2] P.P. Woyciechowski, J.J. Sokołowska (2017) Self-Terminated Carbonation Model as an Useful Support for Durable Concrete Structure Designing. *Structural Engineering and Mechanics*. 63 (1), 55-64;
- [3] L. Czarnecki, P. Woyciechowski (2015), Prediction of the reinforced concrete structure durability under the risk of carbonation and chloride aggression, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* 61 (1), 173-181;
- [4] W. Jawański (2015), Struktura napowietrzenia mieszanki betonowej i betonu stwardniałego a jego rzeczywista mrozoodporność, *Budownictwo, Technologie, Architektura*, t. 4, 62-66;
- [5] P. Woyciechowski, W. Jackiewicz-Rek (2012), Rola pielęgnacji w kształtowaniu trwałości betonu, *Materiały Budowlane*, 44-48;
- [6] Wytyczne do Europejskich Ocen Technicznych ETAG 001 “Kotwy metalowe do stosowania w betonie”. Część 1: Kotwy – zagadnienia ogólne”;
- [7] Europejska Ocena techniczna ETA na kotwy rozporowe z kontrolowanym momentem dokręcania: PSRe-HP, PSRe-HPCR (ETA-14/0376 z 07/11/2014);
- [8] Europejska Ocena techniczna ETA na kotwy wkręcane do stosowania w betonie Hilti HUS3 (ETA-13/1038 z 8 grudnia 2016r.);
- [9] PN-EN 13295:2005 – *Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie odporności na karbonatyzację*;
- [10] PN-88/B-06250 – *Beton zwykły*;

- [11] Europejska Ocena Techniczna ETA na system iniekcyjny Hilti HIT-HY 200-A (ETA-11/0493 z 3 lutego 2017r.);
- [12] Podręcznik techniki zamocowań Hilti. Technika kotwienia. Hilti Polska 2017;
- [13] <https://www.hilti.pl/kotwy-i-akcesoria>, maj 2017.

