

mgr inż. Dariusz Tomaszewicz^{1)*}

ORCID: 0000-0002-1359-902X

prof. dr hab. inż. Jerzy K. Szlendak²⁾

ORCID: 0000-0002-2304-970X

dr inż. Agnieszka Jabłońska-Krysiewicz³⁾

ORCID: 0000-0002-7888-1990

Oszacowanie teoretyczne nośności grup ukośnych kotew wklejanych na podstawie metody składnikowej

Theoretical estimation of the load-bearing capacity of groups of diagonal bonded anchors based on the component method

DOI: 10.15199/33.2022.10.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono metody oszacowania teoretycznego nośności kotew w elementach trójwarstwowych. Stanowią one interakcję dwóch sił składowych: nośności kotew na wyrywanie oraz ścinanie zewnętrznej warstwy fakturowej. Po raz pierwszy zastosowano procedurę obliczeniową zwaną metodą składnikową. W przypadku nośności na wyrywanie stożka betonu zaproponowano współczynnik empiryczny, dokładniej opisujący tę formę zniszczenia w przypadku badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: oszacowanie teoretyczne; ukośne kotwy wklejane; system dwukotwowy; metoda składnikowa; warstwa fakturowa.

Abstract. This paper presents methods for theoretical estimation of anchor resistance in three-layer elements. They represent the interaction of two component forces: the pullout resistance of the anchors and the shear of the outer textured layer. For the first time, a calculation procedure called the component method was used. For the pullout resistance of the concrete cone, an empirical coefficient was proposed to more accurately describe this form of failure with respect to experimental studies.

Keywords: theoretical estimation; diagonal bonded anchors; double anchor system; component method; texture layer.

Badanie i obliczanie nośności kotew wklejanych jest zagadnieniem powszechnie znanym [1 ÷ 4]. W tym artykule skupiono się na kotwach ukośnych, pracujących jako grupy kotew w systemach dwukotwowych. W rezultacie prowadzonych badań eksperymentalnych zaproponowano również wzory matematyczne do oszacowania nośności zakotwień ukośnych [5, 6]. Nowym podejściem obliczeniowym są propozycje oszacowania teoretycznego kotew.

Metoda składnikowa

Oszacowanie teoretyczne nośności kotew wynika ze znanego w literaturze tematycznej wzoru na zniszczenie zakotwienia stalowego w betonie na skutek wyciągnięcia [7]. Wzór na określe-

nie wartości siły wyrywającej kotwę ma postać:

$$T = \pi \cdot d \int_0^{l_f} \tau_p dx \quad (1)$$

gdzie:

d – średnica kotwy [mm]; τ_p – naprężenie przyczepności [N/mm²].

Metoda składnikowa wywodzi się z modeli mechanicznych. Polega na wyodrębnieniu składników z obszaru połączenia kotwy stalowej za pośrednictwem żywicy epoksydowej z betonem i zastąpieniu ich równoważnymi układami mechanicznymi. Zaletą metody składnikowej jest możliwość określenia właściwości połączeń (nośności, sztywności, rozciągania, interakcji ścinania i rozciągania/wyrywania kotwy) oraz uwzględniania zakresu sprężysto-plastycznego zachowania połączenia kotwy wklejanej w podłoże betonowe. W przypadku kotew wklejanych w beton, czyli połączeń typu żywica – beton i żywica – kotwa stalowa po raz pierwszy zastosowano metodę składnikową wg norm do projektowania konstrukcji stalowych i zespolonych. Podstawę tej metody stanowią cztery składniki mogące wystąpić w trakcie zniszc-

czenia połączenia. W przypadku oszacowania teoretycznego nośności kotew są to:

- zerwanie trzpienia kotwy;
- utrata przyczepności w połączeniu żywica – kotwa stalowa;
- utrata przyczepności w połączeniu żywica – beton;
- zniszczenie na skutek wyrywania stożka betonu.

Ostatni wymieniony składnik, czyli zniszczenie zakotwienia na skutek wyrywania stożka betonu zaproponowano obliczać wg dwóch wariantów, uwzględniając podstawowe warunki montażowe (wariant I) oraz niekorzystne warunki montażowe (wariant II). Mając na uwadze te czynniki, we wzorach na oszacowanie teoretyczne zaproponowano współczynnik empiryczny χ , który pomaga dokładniej oszacować nośność teoretyczną, uwzględniając parametry pojedynczych kotew ukośnych [6] w odniesieniu do systemów dwukotwowych. W poszczególnych składnikach uwzględniono w sposób dotychczas niestosowany oddziaływanie interakcyjnej nośności kotew, czyli jednocześnie oddziaływanie siły wyry-

¹⁾ Międzynarodowa Akademia Nauk Stosowanych w Łomży; Nauki Rolnicze i Inżynierijno-Techniczne

²⁾ Państwowa Uczelnia Zawodowa im. Edwarda F. Szczepanika w Suwałkach, Wydział Politechniczny

³⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

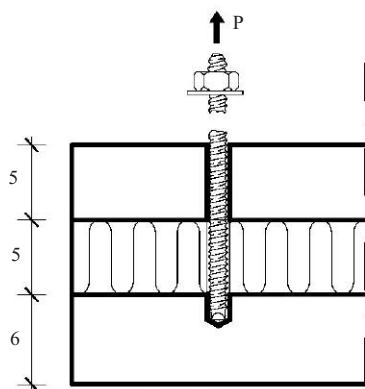
* Adres do korespondencji:

dariusz.tomaszewicz@poczta.wsa.edu.pl

wajacej kotwy (P) oraz siły ścinającej (V). Na podstawie wytycznych producentów żywic wzięto pod uwagę przy doborze współczynników czas wiązania i montażu kotew w zależności od temperatury. Zasada metody składnikowej dotyczy uzyskania najniższej otrzymanej obliczeniowej nośności zerwania połączenia i w efekcie wynik uzyskany dla drugiej kotwy nie jest już istotny.

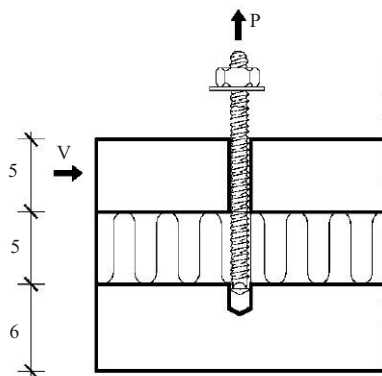
Składniki mające wpływ na nośność kotew wklejanych. Do wyznaczenia nośności obliczeniowej zniszczeń połączeń kotew wklejanych zastosowano procedurę obliczeniową bazującą na metodzie składnikowej, zaadaptowanej do składników modeli mechanizmów zniszczenia:

■ zakotwienia na skutek zerwania trzpienia kotwy (rysunek 1);



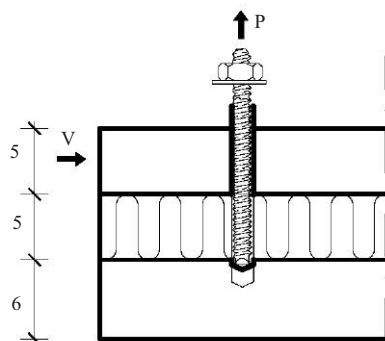
Rys. 1. Model systemu jednokotwowego – zerwanie trzpienia kotwy
Fig. 1. Model of one-anchor systems – anchor bolt breakage

■ zakotwienia na skutek wyciągnięcia kotwy przy zniszczeniu połączenia żywica – kotwa stalowa (rysunek 2);



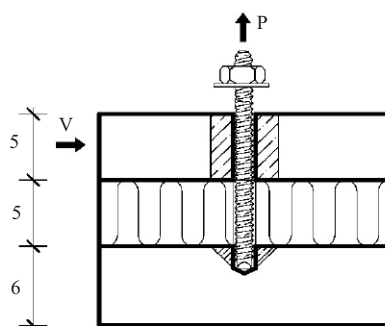
Rys. 2. Model systemu jednokotwowego – utrata przyczepności kotwa stalowa – żywica
Fig. 2. Model of one-anchor systems – loss of adhesion steel anchor – epoxy resin

■ zakotwienia na skutek wyciągnięcia kotwy przy zniszczeniu połączenia żywica – beton (rysunek 3);



Rys. 3. Model systemu jednokotwowego – utrata przyczepności żywica – beton
Fig. 3. Model of one-anchor systems – loss of adhesion epoxy resin – concrete

■ zakotwienia na skutek wyrwania stożka betonu (rysunek 4).



Rys. 4. Model systemu jednokotwowego – wyrwanie stożka betonu
Fig. 4. Model of one-anchor systems – breaking out a cone of concrete

Na rysunku 5 przedstawiono parametry wymiarowe oraz schematy obciążeń w przypadku grup kotew w systemie dwukotwowym z kotwami nachylnymi pod kątem 30°, a na rysunku 6 – pod kątem 45°.

Nośność obliczeniową mechanizmów zniszczenia połączeń kotew wklejanych wyznaczono wg procedury obliczeniowej wynikającej z metody składnikowej:

■ zakotwienie na skutek zerwania trzpienia kotwy wg:

$$P_{gr1,2}^{L,P} = A_k \cdot f_{tk} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V \quad (2)$$

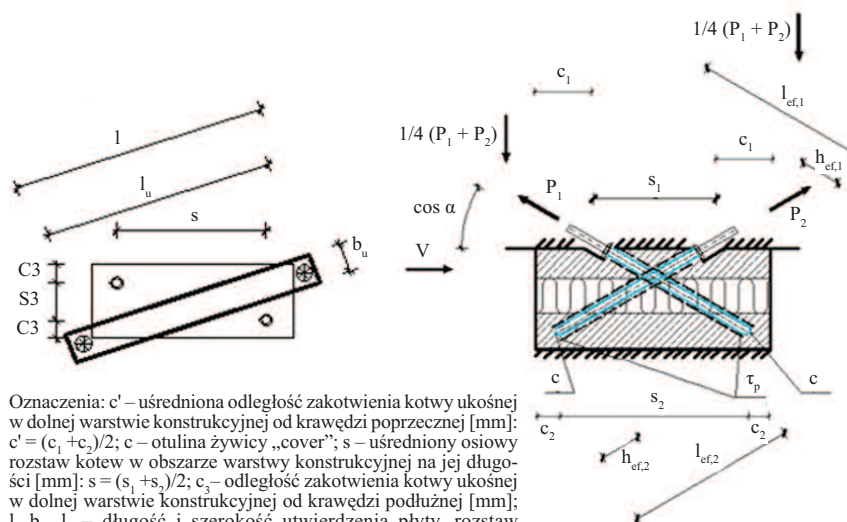
■ zakotwienie na skutek wyciągnięcia kotwy przy zniszczeniu połączenia żywica – kotwa stalowa:

$$P_{gr1,2}^{L,P} = P_{1,2gr} \pm 1/2 \cdot V/\alpha_M \cdot \cos \alpha_v = \pi \cdot d \cdot \tau_p \cdot h_{ef} \cdot \cos \alpha \pm 1/2 \cdot V/\alpha_M \cdot \cos \alpha_v \quad (3)$$

■ zakotwienie na skutek wyciągnięcia kotwy przy zniszczeniu połączenia żywica – beton:

$$P_{gr1,2}^{L,P} = P_{1,2gr} \pm 1/2 \cdot V/\alpha_M \cdot \cos \alpha_v = \pi \cdot d_0 \cdot \tau_p \cdot h_{ef} \cdot \cos \alpha \pm 1/2 \cdot V/\alpha_M \cdot \cos \alpha_v \quad (4)$$

■ zakotwienie na skutek wyrwania stożka betonu – wariant I (zakotwienie pod kątem 30°); wariant ten stanowi opis modelu obliczeniowego w przypadku podstawowych warunków montażu kotew, czyli montażu w temperaturze 10 ÷ 20°C:



Rys. 5. Model systemów dwukotwowych pod kątem 30°
Fig. 5. Model of two-anchor systems at 30° angle

Oznaczenia: c' – uśredniona odległość zakotwienia kotwy ukośnej w dolnej warstwie konstrukcyjnej od krawędzi poprzecznej [mm]; c' = (c₁ + c₂)/2; c – otulina żywicy „cover”; s – uśredniony osiowy rozstaw kotew w obszarze warstwy konstrukcyjnej na jej długości [mm]; s = (s₁ + s₂)/2; c₃ – odległość zakotwienia kotwy ukośnej w dolnej warstwie konstrukcyjnej od krawędzi podłużnej [mm]; l, b_u, l_u – długość i szerokość utwierdzenia płyty, rozstaw utwierdzenia; s₃ – osiowy rozstaw kotew w warstwie konstrukcyjnej po jej szerokości [mm]

$$P_{gr1,2}^{L,P} = \frac{P_{1,2gr} \cdot A_{pb}}{\chi_{p1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V = \frac{(\pi \cdot r \cdot (\sqrt{r^2 + (h_{ef} \cdot \cos \alpha)^2}) \cdot \tau_p) \cdot (c' + s)}{\chi_{p1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V \quad (5)$$

■ zakotwienie na skutek wyrwania stożka betonu – wariant II (zakotwienie pod kątem 30°); wariant ten stanowi opis modelu obliczeniowego w niekorzystnych warunkach montażu kotew, czyli montażu w temperaturze – 10 ÷ 5°C:

$$P_{gr1,2}^{L,P} = \frac{P_{1,2gr} \cdot A_{pb}}{\chi_{n1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V = \frac{(\pi \cdot r \cdot (\sqrt{r^2 + (h_{ef} \cdot \cos \alpha)^2}) \cdot \tau_p) \cdot (c' + s) \cdot (c_3 + s_3)}{\chi_{n1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V \quad (6)$$

We wzorze (6) uwzględniono empiryczny współczynnik proporcjonalności χ z uwagi na dokładniejsze oszacowanie nośności kotew wklejanych. Stanowi on integralny opis parametrów decydujących o nośności połączenia, tj. temperatury wiązania w warunkach podstawowych zbliżonych do rzeczywistych w trakcie kotwienia (mnożniki m_{wp} oraz m_{mp});

■ zakotwienie na skutek wyrwania stożka betonu – wariant I (zakotwienie pod kątem 45°):

$$P_{gr1,2}^{L,P} = \frac{P_{1,2gr} \cdot A_{pb}}{\chi_{p1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V = \frac{(\pi \cdot r \cdot (\sqrt{r^2 + (h_{ef} \cdot \cos \alpha)^2}) \cdot \tau_p) \cdot (c' + s) \cdot c_3}{\chi_{p1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V \quad (7)$$

■ zakotwienie na skutek wyrwania stożka betonu – wariant II (zakotwienie pod kątem 45°):

$$P_{gr1,2}^{L,P} = \frac{P_{1,2gr} \cdot A_{pb}}{\chi_{n1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V = \frac{(\pi \cdot r \cdot (\sqrt{r^2 + (h_{ef} \cdot \cos \alpha)^2}) \cdot \tau_p) \cdot (c' + s) \cdot c_3}{\chi_{n1,2} \cdot c \cdot l_{ef1,2}} \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{V}{\alpha_M} \cdot \cos \alpha_V \quad (8)$$

gdzie:

$P_{1,2gr}^{L,P}$ – interakcyjna nośność kotew [kN]; A_{pb} – pole przekroju czynnego kotwy [mm²]; f_{uk}^{gr1} – nominalna wytrzymałość na rozciąganie stali [N/mm²]; V – siła ścinająca [kN]; α_M – współczynnik mocowania elementu; $\cos \alpha$ – kąt nachylenia kotew [°]; d – średnica kotwy [mm]; τ_p – naprężenie przyczepności żywicy [N/mm²]; h_{ef} – efektywna głębokość zakotwienia [mm]; $P_{1,2gr}$ – nośność kotew bez wpływu siły ścinającej [kN]; r – promień stożka betonu [mm]; c' – uśredniona odległość zakotwienia kotwy ukośnej mierzona od krawędzi poprzecznej [mm]; s, s_3 – uśredniony i osiowy rozstaw kotew w warstwie konstrukcyjnej po jej długości i szerokości [mm]; c_3 – odległość zakotwienia kotwy ukośnej mierzona od krawędzi podłużnej [mm]; $\chi_{p1,2}$ – współczynnik empiryczny dla warunków podstawowych; $\chi_{n1,2}$ – współczynnik empiryczny dla warunków niekorzystnych.

Współczynnik empiryczny χ określany jest jako iloraz siły wyrwijającej pojedynczą kotew w badaniu eksperymentalnym do kotwy nachylonej pod tym samym kątem w układach dwukotwowych, pomnożony przez parametr m , który ulega zmianie ze względu na zróżnicowaną temperaturę montażu i parametry wytrzymałościowe żywicy [8]. Wtedy $P/P_{1,2} > 1,0$ – warunki podstawowe oraz $P/P_{1,2} < 1,0$ – warunki niekorzystne. Proponowany współczynnik empiryczny definiowany jest wzorem:

$$\chi_{p,n} = (P/P_1) \cdot m \text{ oraz } \chi_{p,n} = (P/P_2) \cdot m \quad (9)$$

m – mnożnik zależny od warunków kotwienia; p, n – współczynniki w zależności od warunków montażowych odpowiednio: podstawowych i niekorzystnych;

P – wartość otrzymana z badań eksperymentalnych pojedynczych kotew ukośnych wklejanych pod kątem 30° i 45° [kN];

P_1 i P_2 – wartości otrzymane z badań eksperymentalnych kotew [kN].

W przypadku gdy $P/P_1 > 1,0$ oraz $P/P_2 > 1,0$ – warunki standardowe – podstawowe;

$m_{wp} = (t_{w,min}^{20°C}) / (t_{m,min}^{10°C})$ – proponowany mnożnik w przypadku żywicy o większych parametrach wytrzymałościowych,

$m_{mp} = (t_{w,min}^{15°C}) / (t_{m,min}^{15°C})$ – proponowany mnożnik w przypadku żywicy o mniejszych parametrach wytrzymałościowych.

W przypadku, gdy $P/P_1 < 1,0$; $P/P_2 < 1,0$ – warunki standardowe – najbardziej niekorzystne;

$m_{wn} = (t_{w,min}^{5°C}) / (t_{m,min}^{-10°C})$ – proponowany mnożnik w przypadku żywicy o większych parametrach wytrzymałościowych;

$m_{mn} = (t_{w,min}^{5°C}) / (t_{m,min}^{-5°C})$ – proponowany mnożnik w przypadku żywicy o mniejszych parametrach wytrzymałościowych;

$t_{w,min}$ – minimalny czas wiązania,
 $t_{m,min}$ – minimalny czas montażu.

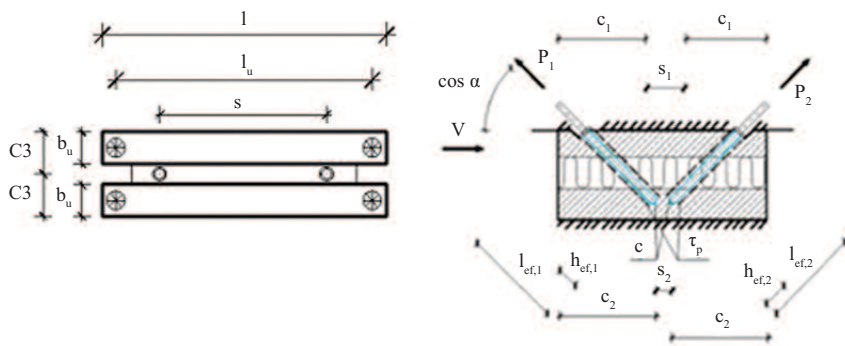
Podsumowanie

Zaproponowane formuły matematyczne do obliczania nośności układów dwukotwowych to niestosowane dotychczas rozwiązania analityczne, pozwalające określić minimalne wartości sił niszczących. Po raz pierwszy zastosowano procedurę obliczeniową, zwaną metodą składnikową. Przy oszacowaniu nośności teoretycznej wyrwania stożka betonu w systemach dwukotwowych zaproponowano współczynnik empiryczny χ w celu uzyskania dokładniejszego porównania obliczeń z badaniami eksperymentalnymi.

Literatura

- [1] Cook RA, Doerr GT, Klingner RE. Bond stress model for design adhesive anchors. ACI Structural Journal. 1993; 90: 514 – 524.
- [2] Fuchs W, Eligehausen R, Breen JE. Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete. ACI Structural Journal. 1995; 92 (1): 73 – 93.
- [3] Kijania M. Metody wyznaczania wartości naprężenia przyczepności pomiędzy betonem a stalą zbrojeniową. Przegląd Budowlany. 2015; 6: 38 – 42.
- [4] Barnat J, Bajer M. Glue-concrete interface of bonded anchor – experiment and model. VI International Conference on Adaptive Modeling and Simulation. ADMOS 2013.
- [5] Szlendak JK, Tomaszewicz D. Load capacity of anchors embedded into concrete and multi-layer façade slabs. ICMS'21 14th International Conference on Metal Structures. 2021. Poznań.
- [6] Baryłka A, Tomaszewicz D. Anchorages bonded system in experimental research and their comparison with FEM models. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2021; Volume 106, Issue 2.
- [7] Słowik M, Błazik-Borowa E. Wpływ doboru prętów zbrojeniovych na rozkład naprężeń w elemencie betonowym. Eksploatacja i Niezawodność. 2001; 5: 43 – 46.
- [8] PN-EN ISO 14126 Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem. Oznaczania właściwości podczas ściskania równoległe do płaszczyzny laminowania.

Przyjęto do druku: 30.09.2022 r.



Rys. 6. Model systemów dwukotwowych pod kątem 45°

Fig. 6. Model of two-anchor systems at 45° angle