

dr inż. Łukasz Sadowski¹⁾
mgr inż. Sławomir Czarnecki¹⁾
prof. dr hab. inż. Jerzy Hoła¹⁾

Ocena zespolenia warstw betonowych w podłogach o zmiennej grubości warstwy wierzchniej

Evaluation of the interlayer bond between concrete layers in floors with variable thick of added layer

DOI: 10.15199/33.2015.11.21

Streszczenie. W artykule podjęto próbę oceny przyczepności na odrywanie między wierzchnią a podkładową warstwą podłogi betonowej. Badania przeprowadzono w przypadku warstwy wierzchniej o zmiennej grubości na podstawie parametrów określanych metodami nieniszczącymi i parametru opisującego grubość warstwy wierzchniej, z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN). Opracowano do tego celu SSN, którą nauczono i przetestowano. Do uczenia sieci wykorzystano wzorce uczące w postaci wartości przyczepności na odrywanie, uzyskanych doświadczalnie metodą pull-off w tych samych miejscach badawczych, w których wykonano badania metodami nieniszczącymi.

Słowa kluczowe: warstwowe elementy betonowe, warstwa wierzchnia, przyczepność na odrywanie, metody nieniszczące, sztuczne sieci neuronowe.

Abstract. The authors undertook an attempt to identify pull-off adhesion of concrete layers, the the coating of variable thickness to the substrate, based on parameters defined using non-destructive methods and parameter describing the thickness of the coating layer, using artificial neural networks (ANN). For this purpose ANN were selected, taught and tested. Network learning patterns were used as the real values of pull-off adhesion, obtained experimentally using a pull-off method in the same places as the research tests were performed with non-destructive methods.

Keywords: layered concrete elements, added layer, pull-off adhesion, non-destructive methods, artificial neural networks.

Przykładem betonowych elementów warstwowych często wykonywanych w obiektach budownictwa przemysłowego i ogólnego są podłogi. Jednym z istotnych parametrów odpowiedzialnych za ich trwałość jest odpowiednie zespolenie warstw [1]. W artykule podjęliśmy próbę oceny zespolenia betonowej warstwy wierzchniej o zmiennej grubości z podkładową na podstawie parametrów ocenianych metodami nieniszczącymi i analizowanych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych (SSN). Określona została wartość przyczepności na odrywanie f_b , badana dotychczas seminieniszczącą metodą pull-off. Potrzeba opracowania nieniszczącego sposobu identyfikacji f_b podyktowana jest m.in. niedo- godnościami metody pull-off [2 ÷ 4].

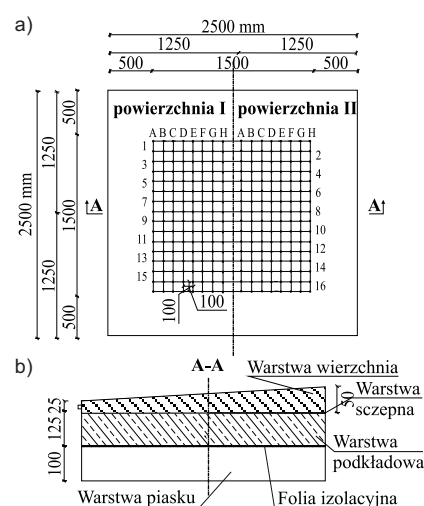
Na podstawie wcześniejszych badań autorzy opracowali już nieniszczący sposób badania przyczepności na odrywanie, ale w przypadku gdy betonowa warstwa wierzchnia ma stałą grubość [5, 6]. Przydatność tej metodyki potwierdzono na przykła-

dzie podłóg. W związku z tym, że w praktyce budowlanej warstwa wierzchnia ma często zmienną grubość, opracowany sposób nie zawsze jest przydatny. Nie można go wykorzystać np. w badaniach elementów naprawianych, ponieważ wtedy grubość warstwy wierzchniej w różnych miejscach jest zazwyczaj różna i dopasowana do podkładu betonowego przygotowanego do naprawy.

Metodyka badań

W celu opracowania nieniszczącego sposobu określania wartości przyczepności na odrywanie warstw betonowych, wierzchniej o zmiennej liniowo grubości do podkładowej, wykonano badania modelowego elementu betonowego o wymiarach 2500 x 2500 mm. Grubość warstwy wierzchniej tego elementu zmieniała się liniowo od 25 do 50 mm (rysunek 1). Warstwa ta została wykonana z betonu klasy C20/25 z kruszywem kwarcowym o wielkości maksymalnej ziarna 2 mm. Ułożono ją na warstwie podkładowej o stałej grubości 125 mm wykonanej z betonu klasy C30/37 i wielkości maksymalnej ziarna bazaltowego kruszywa łamanego wynoszącej 8 mm.

Na rysunku 1 przedstawiono przekrój przez warstwę oraz podział powierzchni warstwy podkładowej z uwagi na sposób przygotowania i rozmieszczenie miejsc ba-



Rys. 1. Szkic modelowego elementu betonowego: a) podział powierzchni elementu próbnego i rozmieszczenie miejsc badawczych; b) przekrój przez warstwy

Fig. 1. Draft of the model of the concrete element: a) dividing the surface of the element and the distribution of the research points; b) a section through the layers

dawczych. Na powierzchni warstwy podkładowej naniesiono siatkę miejsc badawczych o wymiarach 100 x 100 mm w odległości 500 mm od krawędzi. Kolumny siatki oznaczono literami od A do H, a wiersze od 1 do 16.

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*} Autor do korespondencji:
e-mail: lukasz.sadowski@pwr.edu.pl
(stypendysta wsparty finansowaniem Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (FNP))

W celu poszerzenia przedziału wartości przyczepności na odrywanie na styku warstw wierzchniej i podkładowej podzielono powierzchnię warstwy podkładowej na dwie części I i II, tak jak przedstawiono na rysunku 1, i przygotowano w następujący sposób:

- powierzchnia I: pozostawiona została w stanie otrzymanym bezpośrednio po betonowaniu;

- powierzchnia II: na powierzchnię otrzymaną bezpośrednio po betonowaniu naniesiono warstwę szepną zwiększającą przyczepność (gotowy preparat w formie koncentratu do rozcieńczania wodą przeznaczony do gruntowania podłoży betonowych pod podkłady podłogowe i posadzki).

Po 28 dniach od zabetonowania warstwy podkładowej przeprowadzono badania na jej powierzchni, w 256 wyznaczonych miejscach badawczych za pomocą metody optycznej skanowania laserowego 3D. W efekcie uzyskano przestrzenny obraz powierzchni o wymiarach 50 x 50 mm w obrębie każdego miejsca badawczego. Za pomocą oprogramowania komputerowego dokonano analizy danych, w wyniku której wygenerowano w każdym z badanych miejsc wartości dziewięciu parametrów chropowatości powierzchni oznaczonych symbolami Ssk, Sku, Sp, Sv, Sz, Sa, Smc i Sxp zgodnie z [7]. Następnie na powierzchnię II nałożono warstwę szepną. Warstwę podkładową gruntowano 4 h przed ułożeniem warstwy wierzchniej o liniowo zmiennej grubości i też naniesiono na jej powierzchnię siatkę miejsc badawczych w tych samych punktach jak na powierzchni warstwy podkładowej. Grubość T warstwy wierzchniej w każdym miejscu badawczym obliczono analitycznie. Po 90 dniach przeprowadzono badania na jej powierzchni nieniszczącymi metodami akustycznymi: impulse response i impact-echo, uzyskując następujące parametry: N_{av} ; K_d ; M_p/N ; v zgodnie z [8, 9] i f_r zgodnie z [10, 11]. Następnie w tych samych miejscach wykonano badania metodą pull-off, uzyskując wartość przyczepności na odrywanie f_b [$1 \div 3$]. Rezultaty te zostały wykorzystane jako wzorce do uczenia SSN.

Wyniki badań i ich analiza

W tabelach 1 i 2 zestawiono przykładowo kilka, z 256, zestawów wartości parametrów uzyskanych w poszczególnych miejscach badawczych na drodze doświadczalnej metodami nieniszczącymi: skanowania laserowego 3D (tabela 1); impulse response, impact-echo, pull-off oraz grubość T warstwy wierzchniej obliczoną analitycznie (tabela 2).

Tabela 1. Wartości parametrów uzyskanych w kilku przykładowych miejscach badawczych metodą skanowania laserowego 3D

Table 1. Values of parameters obtained in several evaluated sample research areas using 3D laser scanning method

Numer miejsca badawczego	Symbol parametru							
	Ssk [-]	Sku [-]	Sp [mm]	Sv [mm]	Sz [mm]	Sa [mm]	Smc [mm]	Sxp [mm]
1	0,826	4,180	1,720	1,000	2,720	0,448	0,443	0,511
2	0,579	6,160	2,180	1,500	3,680	0,210	0,443	0,725
3	0,389	4,250	1,500	2,330	3,830	0,428	0,568	0,948
4	0,147	2,910	1,380	1,350	2,740	0,387	0,467	0,607
5	0,490	3,690	1,560	1,170	2,730	0,407	0,440	0,569
6	0,387	3,570	1,500	1,260	2,760	0,421	0,454	0,559
7	0,071	6,040	2,42	2,010	4,430	0,469	0,470	0,898
8	0,355	3,890	1,66	1,090	2,750	0,469	0,384	0,577
...
256	0,653	6,750	1,150	2,040	3,190	0,448	0,327	0,486

Tabela 2. Wartości parametrów uzyskanych w kilku przykładowych miejscach badawczych metodami impulse response, impact-echo, pull-off oraz grubość warstwy wierzchniej T obliczona analitycznie

Table 2. The values of the parameters obtained in some sample areas using research methods impulse response, impact-echo, pull-off and T parameter that describes the thickness of the coating layer calculated analytically

Numer miejsca badawczego	Nazwa metody i symbol parametru						
	metoda impulse response				metoda impact-echo	grubość warstwy wierzchniej	metoda pull-off
	N_{av} [m/s·N]	K_d [-]	M_p/N [-]	v [-]	f_r [kHz]	T [mm]	f_b [MPa]
1	191,230	0,045	0,738	0,592	11,720	45	1,120
2	164,253	0,044	1,554	0,689	12,690	44	1,095
3	160,433	0,023	1,110	0,739	11,720	43	1,070
4	145,154	0,039	0,676	0,604	11,720	42	0,968
5	152,793	0,041	0,767	1,051	12,210	41	1,019
6	193,013	0,050	0,573	0,737	11,720	40	1,248
7	175,712	0,023	0,819	1,677	11,720	39	1,171
8	175,712	0,047	0,694	1,894	11,720	38	1,171
...
256	148,973	0,040	0,390	0,646	11,720	45	1,111

Na podstawie przeprowadzonych w [12] analiz statystycznych, jako zmienne wejściowe do SSN przyjęto: jeden parametr Sa opisujący chropowatość powierzchni warstwy podkładowej określony metodą skanowania laserowego 3D; dwa parametry N_{av} i K_d określone metodą impulse response, parametr f_r określony metodą impact-echo oraz grubość warstwy wierzchniej T w danym miejscu badawczym.

W wyniku przeprowadzonego wcześniej przeglądu literatury [13 ÷ 15] i przeanalizowania zebranych informacji, do wstępnych analiz numerycznych wytypowano sieć jednokierunkową wielowarstwową ze wstępną propagacją błędów i algorytmem uczenia Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS). W tabeli 3 przedstawiono średnie wartości współczynnika korelacji R, w zależności od liczby neuronów warstwy ukrytej, uzyskane w procesie uczenia i testowania sieci neuronowej BFGS.

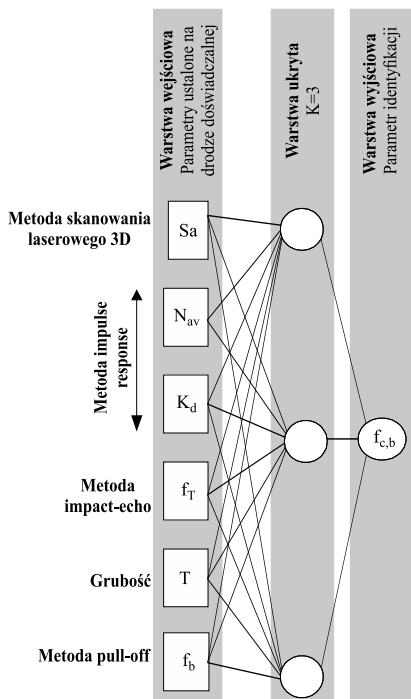
Tabela 3. Średnie wartości współczynnika korelacji R w zależności od liczby neuronów warstwy ukrytej uzyskane w procesie uczenia i testowania sieci BFGS

Table 3. The average value of the correlation coefficient R, based on the number of neurons of the hidden layer, obtained by the process of learning and testing BFGS network

Liczba neuronów warstwy ukrytej	R (-)	
	uczenie	testowanie
3	0,9691	0,9575
4	0,9561	0,9450
5	0,9499	0,9401
6	0,9300	0,9234
7	0,9399	0,9201
8	0,9201	0,9199

Na podstawie przeprowadzonych analiz wstępnych przyjęto sztuczną sieć neuronową ze wstępną propagacją błędów, algorytmem uczenia Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS), liczbą neuronów warstwy ukrytej 3. Strukturę tej sieci, oznaczonej jako BFGS, przedstawiono na ry-

sunku 2, a na rysunku 3 zależność między przyczepnością na odrywanie f_b uzyskaną na podstawie badań doświadczalnych wykonanych metodą pull-off a przyczepnością na odrywanie $f_{c,b}$ identyfikowaną przez sieć BFGS dla procesu uczenia, testowania i weryfikacji doświadczalnej.



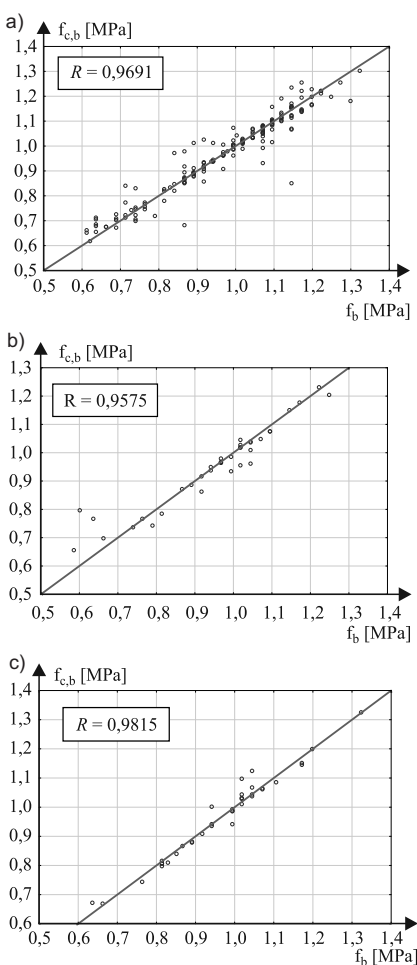
Rys. 2. Struktura sztucznej sieci neuronowej BFGS przyjęta do identyfikacji przyczepności na odrywanie $f_{c,b}$
 Fig. 2. Structure of BFGS artificial neural network accepted to identify pull-off adhesion $f_{c,b}$

Z rysunku 3 wynika, że sieć neuronowa BFGS zapewnia satysfakcjonujące wyniki procesu uczenia i testowania. Świadczy o tym położenie punktów wzdłuż linii regresji, odpowiadającej idealnemu odwzorowaniu. W procesie uczenia, testowania i weryfikacji doświadczalnej uzyskano wysokie wartości współczynnika korelacji liniowej R wynoszące odpowiednio 0,9691, 0,9575 i 0,9815. Na podstawie uzyskanych satysfakcjonujących rezultatów należy sądzić, że prawdopodobnie wartości współczynnika korelacji liniowej R dla uczenia, testowania i weryfikacji doświadczalnej byłyby jeszcze większe, gdyby grubość T warstwy wierzchniej określona została w każdym miejscu badawczym doświadczalnie, np. metodą geodezji precyzyjnej.

Podsumowanie

W artykule wykazano, że możliwa jest wiarygodna nieniszcząca identyfikacja wartości przyczepności na odrywanie wierzchniej warstwy betonowej o zmiennej

grubości do podkładowej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych oraz rezultatów badań nieniszczących. W tym celu wymagana jest znajomość wartości pięciu parametrów określonych trzema metodami nieniszczącymi, a mianowicie: parametru S_a uzyskanego metodą skanowania laserowego 3D na powierzchni warstwy podkładowej; parametrów K_d i N_{av} uzyskanych metodą impulse response i parametru f_T uzyskanego metodą impact-echo na powierzchni warstwy wierzchniej oraz grubości T warstwy wierzchniej wyznaczonej analitycznie. Ten sposób identyfikacji jest znacznie bardziej uniwersalny w porównaniu z opracowanym w [5]. Jak



Rys. 3. Zależność między przyczepnością na odrywanie f_b uzyskaną na podstawie badań doświadczalnych metodą pull-off a przyczepnością na odrywanie $f_{c,b}$ identyfikowaną przez sieć BFGS dla procesu: a) uczenia; b) testowania; c) weryfikacji doświadczalnej

Fig. 3. The relationship between the pull-off adhesion f_b obtained on the basis of experimental studies using pull-off method and pull-off adhesion $f_{c,b}$ identified by the BFGS network for process: a) learning; b) testing; c) experimental verification

wykazano, predysponowana jest do tego celu sztuczna jednokierunkowa, wielowarstwowa sieć neuronowa, ze wsteczną propagacją błędów i algorytmem uczenia Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS). Świadczą o tym uzyskane duże wartości współczynnika korelacji liniowej R wynoszące 0,9691, 0,9575 i 0,9815 odpowiednio dla procesów uczenia, testowania i weryfikacji doświadczalnej.

Literatura

[1] Garbacz A., Application of stress based NDT methods for concrete repair bond quality control. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 63 (1), 2015, s. 77 – 85.
 [2] PN-EN 12504-3, 2005, Badania betonu w konstrukcjach. Część 3. Oznaczanie siły wyrwywającej.
 [3] ASTM D7234 – 05, 2005, Standard Test Method for Pull-Off Adhesion Strength of Coatings on Concrete Using Portable Pull-Off Adhesion Testers.
 [4] Santos, P., Júlio, E. N. B. S., and Santos, J., Towards the development of an in situ non-destructive method to control the quality of concrete-to-concrete interfaces. Engineering Structures, 32 (1), 2010, s. 207 – 217.
 [5] Sadowski Ł. and Hoła J., New non-destructive way of identifying the values of pull-off adhesion between concrete layers in floors, Journal of Civil Engineering and Management, 20-4, 2014, s. 561 – 569.
 [6] Sadowski Ł., Non-destructive identification of pull-off adhesion between concrete layers. Automation in Construction, 57, 2015, s. 146 – 155.
 [7] ISO 25178: 2010, Specyfikacje geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni.
 [8] American Concrete Institute Report ACI 228.2R-98: 1998, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures.
 [9] ASTM C1740-10: 2010, Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse-Response Method.
 [10] ASTM C 1383: 1998, Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-echo Method, American Society For Testing And Materials.
 [11] Sansalone M. and Streett W., Impact-echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, Ithaca, 1997.
 [12] Czamecki S., Hoła J. and Sadowski Ł., Analysis of the Possibility of Non-Destructive Identification of the Interlayer Bond of Variably Thick Concrete Layers using Artificial Neural Networks, in Kruijs J., Tsompanakis Y., B. H. V. Topping, (Editors), Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Civil-Comp Press, Stirlingshire, 2015, UK, Paper 285, doi: 10.4203/ccp.108.285.
 [13] Matthies H. and Strang G., The solution of non linear finite element equations, International Journal for Numerical Methods in Engineering 14 (11), 16131626, 1979.
 [14] Nocedal J., Updating Quasi-Newton Matrices with Limited Storage, Mathematics of Computation 35 (151): 773782, 1980.
 [15] Broyden C. G., The convergence of a class of double-rank minimization algorithms, Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications 6, 1970, s. 76 – 90.

Przyjęto do druku: 23.08.2015 r.