



Odkształcalność słupa żelbetowego w systemie Polytech

Janusz Juraszek¹, Arkadiusz Grzywa², Hubert Walusiak³

STRESZCZENIE:

W artykule przedstawiono badania odkształcalności słupa żelbetowego stanowiącego łącznik ścian prefabrykowanych. Elementy prefabrykowane, wykonane z modyfikowanej zaprawy Polytech zawierającej polistyren ekspandowany pochodzący z recyklingu, zastosowano do wykonania budynku mieszkalnego. Słupy żelbetowe w postaci łączników ścian w systemie Polytech są elementami nośnymi. W celu przeprowadzenia badań odkształceń słupa żelbetowego, będącego zarazem łącznikiem ścian prefabrykowanych w warunkach użytkowych, zastosowano innowacyjną technikę pomiaru odkształceń, polegającą na wprowadzeniu światłowodowych czujników odkształceń z siatkami Bragga. Metoda ta umożliwia ciągły pomiar odkształceń elementu podczas eksploatacji, co stanowi dużą zaletę systemu pomiarowego w odniesieniu do klasycznych systemów pomiarowych. Istotą rozwiązania jest wprowadzenie czujników światłowodowych FBG w strukturę konstrukcji żelbetowej. Zastosowanie metody pomiaru opartej na czujnikach z siatkami Bragga umożliwia również analizę bezpieczeństwa pracy elementu na etapie budowy i w trakcie użytkowania zrealizowanego obiektu. Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie rzeczywistego odkształcenia słupa żelbetowego po zamontowaniu w budynku modelowym oraz analizę pracy słupa podczas obciążeń normatywnych.

SŁOWA KLUCZOWE:

monitoring; technologia kontroli; prefabrykowane budynki; czujniki z siatkami Bragga

1. Wprowadzenie

Badanie i monitorowanie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych wymaga zastosowania precyzyjnych urządzeń pomiarowych. Do monitorowania konstrukcji stosowane są czujniki światłowodowe z siatką Bragga (FBG), które umożliwiają ciągły pomiar odkształceń i naprężeń. Zaletą tych czujników jest możliwość pomiaru w wielu punktach przy zastosowaniu odpowiedniej konfiguracji urządzeń pomiarowych (interogator i switche) i systemu rejestrującego z dokładnością $\delta\epsilon = 1 \mu\text{strain}$. Czujniki FBG nie wymagają osobnego zasilania [1].

Materiał Polytech zawiera modyfikowaną zaprawę cementową (40%) i polistyren ekspandowany (60%) pochodzący z recyklingu [2]. Materiał zawierający w swoim składzie aż 60% odpadów styropianowych nie był do tej pory stosowany do wykonywania budynków. System prefabrykacji wymaga dokładnych badań w celu potwierdzenia odpowiedniej jakości i wytrzymałości innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych.

Obszar badań obejmuje monitorowanie elementu w postaci słupa żelbetowego stanowiącego łącznik ścian prefabrykowanych w budynku z prefabrykatów o powierzchni ok. 200 m²

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała, e-mail: jjuraszek@ath.bielsko.pl, orcid id: 0000-0003-3771-2776

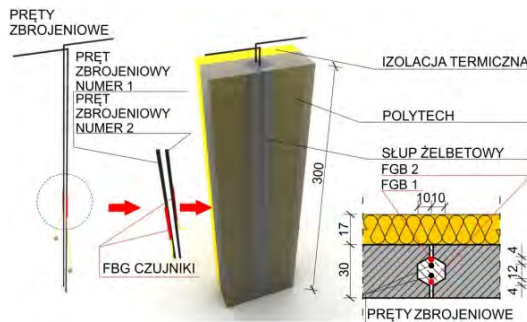
² Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała, e-mail: agrzywa@ath.bielsko.pl, orcid id: 0000-0003-1394-3342

³ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała, e-mail: hwalusiak@ath.bielsko.pl, orcid id: 0000-0002-9745-9592

i kubaturze ok 600 m^3 . Analizowany słup żelbetowy jest elementem nośnym i łączącym ściany prefabrykowane z materiału Polytech. Słup żelbetowy powstaje w szalunku traconym w kształcie sześciokąta (rys. 1), który tworzą odpowiednio ukształtowane boki ścian prefabrykowanych zamontowane obok siebie. Grubość ścian zewnętrznych wynosi 47 cm, 30 cm stanowi panel z materiału Polytech i 17 cm izolacja termiczna z polistyrenu ekspandowanego. Istotną podczas badań jest analiza współpracy zastosowanych różnych materiałów połączonych ze sobą, takich jak: beton, Polytech, styropian i stal [1, 3].

2. Monitoring słupa żelbetowego – łącznika ścian prefabrykowanych

W pierwszym etapie przeprowadzono montaż czujników światłowodowych do prętów zbrojeniowych, których użyto do budowy słupa żelbetowego łączącego ściany prefabrykowane w systemie Polytech (rys. 2). W tym celu zbudowano układ pomiarowy składający się z dwóch czujników SG-01 z siatką Bragga, przewodu zasilającego zakończonego obustronnie złączkami jednomodowymi FC/APC, interrogatora optycznego (dynamiczny) model S-line 800D i rejestratora (rys. 3). Zastosowany interrogator FBG 800 umożliwia prowadzenie analiz dla fal świetlnych o długościach zawartych w przedziale $1515\text{--}1590 \mu\text{m}$ z częstotliwością 2 kHz. Sygnał przekazywany jest dalej do rejestratora wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie [4–6].



Rys. 1. Słup żelbetowy w systemie Polytech – rysunki (wymiar w cm)



Rys. 2. Słup żelbetowy w systemie Polytech – lokalizacja czujników



Rys. 3. Układ pomiarowy z rejestratorem i oprogramowaniem

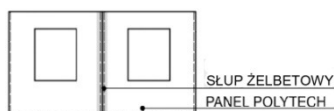
W analizowanym słupie żelbetowym umiejscowiono dwa pręty zbrojeniowe o średnicy $\varnothing 10 \text{ mm}$ o długości 320 cm. Pręty zostały wyposażone w czujniki światłowodowe z siatką

Bragga. Światłowody przymocowano za pomocą techniki ceramicznej na środku długości prętów w strefach zewnętrznych łącznika (rys. 1 i 3). Po zamontowaniu prętów zbrojeniowych z czujnikami FBG w szalunku traconym ułożono mieszankę betonową C16/20. Po 28 dniach sezonowania słup osiągnął odpowiednią wytrzymałość. Na poszczególnych etapach budowy zarejestrowano odkształcenia prętów w słupie żelbetowym: Etap 0 – obejmował montaż prefabrykowanych ścian na fundamencie i wykonanie łącznika ścian w postaci słupa żelbetowego i pomiar długości fali w sensorach światłowodowych znajdujących się na prętach zbrojeniowych słupa. Początkowe długości fal przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Parametry czujników – przed ułożeniem betonu w wieńcu na stropie (etap 0)

Parametry czujnika	FBG czujnik na pręcie nr 1	FBG czujnik na pręcie nr 2
1	2	3
długość fali	1557,780nm	1533,561nm

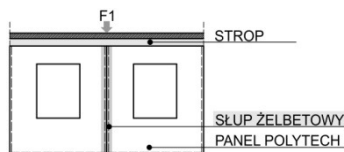
**Rys. 4.** Schemat zamontowanego słupa żelbetowego (etap 0)

Etap 1 – wykonano wieńiec i strop, te dwa elementy spowodowały nowy stan obciążeniowy (F1) nadproża analizowanego elementu prefabrykowanego (tab. 2).

Tabela 2

Parametry czujników – po ułożeniu betonu w wieńcu i stropie (etap 1)

Parametry czujnika	FBG czujnik na pręcie nr 1	FBG czujnik na pręcie nr 2
1	2	3
długość fali	1557,816nm	1533,548nm
odkształcenie	30,00 μ Strain	-11,00 μ Strain
napężenie w pręcie (MPa)	6,30 MPa	-2,31 MPa
napężenie w betonie (MPa)	0,60 MPa	-0,22 MPa

**Rys. 5.** Schemat zamontowanego słupa żelbetowego (etap 1 i 1')

Etap 1' – odczytano dane pobrane z czujników po dziesięciu dniach sezonowania betonu w wieńcu i stropie (tab. 3).

Tabela 3

Parametry czujników – po dziesięciu dniach sezonowania betonu w wieńcu i stropie (etap 1')

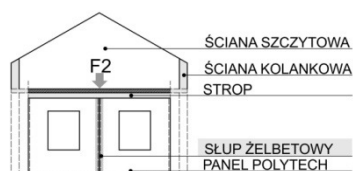
Opis parametru czujnika	FBG czujnik na pręcie nr 1	FBG czujnik na pręcie nr 2
1	2	3
długość fali	1557,775nm	1533,587nm
odkształcenie	4,16 μ Strain	22,00 μ Strain
napężenie w pręcie (MPa)	0,87 MPa	4,62 MPa
napężenie w betonie (MPa)	0,08 MPa	0,44 MPa

Etap 2 – dalszy etap robót budowlanych polegał na wykonaniu ściany szczytowej i kolankowej, co spowodowało wzrost obciążenia nadproża do stanu (F2) (tab. 4).

Tabela 4

Parametry czujników – po montażu ścian szczytowych i kolankowych (etap 2)

Opis parametru czujnika	FBG czujnik na pręcie nr 1	FBG czujnik na pręcie nr 2
1	2	3
długość fali	1557,782nm	1533,539nm
odkształcenie	1,66 μ Strain	-18,60 μ Strain
napężenie w pręcie (MPa)	0,34 MPa	-3,90 MPa
napężenie w betonie (MPa)	0,03 MPa	-0,37 MPa

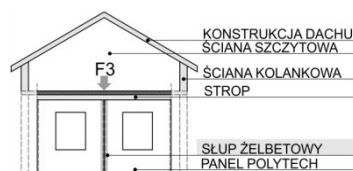
**Rys. 6.** Schemat zamontowanego słupa żelbetowego (etap 2)

Etap 3 – kolejny etap to wykonanie drewnianej konstrukcji dachu, która dodatkowo obciążyła monitorowane nadproże (F3) (tab. 5).

Tabela 5

Parametry czujników – po wykonaniu więźby dachowej (etap 3)

Opis parametru czujnika	FBG czujnik na pręcie nr 1	FBG czujnik na pręcie nr 2
1	2	3
długość fali	1557,688nm	1533,468nm
odkształcenie	-76,50 μ Strain	-78,60 μ Strain
napężenie w pręcie (MPa)	-16,06 MPa	-16,50 MPa
napężenie w betonie (MPa)	-1,53 MPa	-1,57 MPa

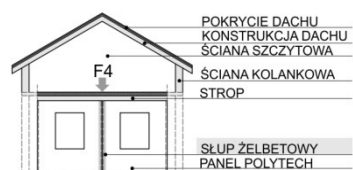
**Rys. 7.** Schemat zamontowanego słupa żelbetowego (etap 3)

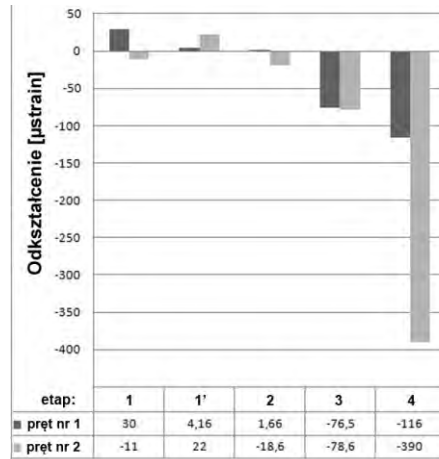
Etap 4 – ostatnim etapem budowy było wykonanie pokrycia dachu dachówkami ceramicznymi, które spowodowało dodatkowe obciążenie (F4). W trakcie budowy zaobserwowano narastający proces obciążania słupa żelbetowego (tab. 6).

Tabela 6

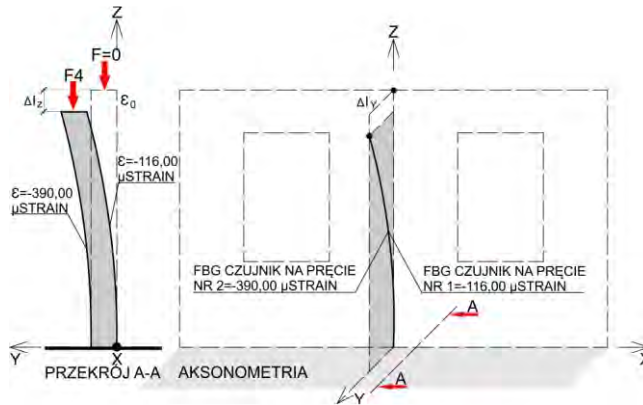
Parametry czujników – po wykonaniu pokrycia dachu (dachówka ceramiczna) – (etap 4)

Opis parametru czujnika	FBG czujnik na pręcie nr 1	FBG czujnik na pręcie nr 2
1	2	3
długość fali	1557,641nm	1533,100nm
odkształcenie	-116,00 μ Strain	-390,00 μ Strain
napężenie w pręcie (MPa)	-24,36 MPa	-81,90 MPa
napężenie w betonie (MPa)	-2,32 MPa	-7,80 MPa

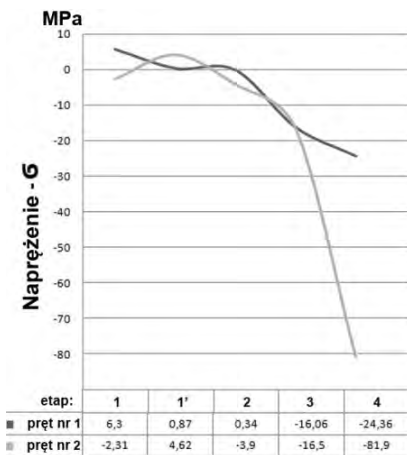
**Rys. 8.** Schemat zamontowanego słupa żelbetowego (etap 4)



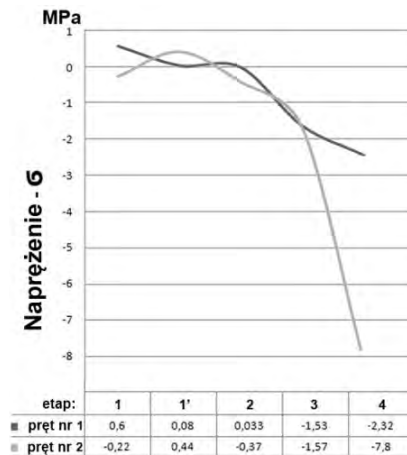
Rys. 9. Odkształcenie słupa żelbetowego podczas realizacji budynku



Rys. 10. Schematy odkształcenia słupa żelbetowego



Rys. 11. Napężenie w prętach zbrojeniowych słupa



Rys. 12. Napężenie w betonie słupa

3. Wyniki badań

Odształcenia prętów zbrojeniowych słupa żelbetowego były mierzone równocześnie na poszczególnych etapach budowy (tab. 1–6). Zarejestrowano narastające odształcenie słupa. Największą wartość odształcenia zarejestrowano na pręcie nr 2 (rys. 1) i wynosiła ona $-390 \mu\text{strain}$ (μstrain jest jednostką deformacji 10^{-6}). Na pręcie nr 1 zarejestrowano wartość odształcenia $-116 \mu\text{strain}$ po wykonaniu konstrukcji wieżby dachowej i pokrycia dachu (tab. 6). Na każdym etapie budowy elementy konstrukcyjne budynku, które były montowane nad badanym słupem żelbetowym i w jego pobliżu, wpływały na zwiększenie odształcenia zbrojenia zastosowanego w nadprożu. Zbrojenie w badanych punktach nie odształcało się w sposób jednakowy (tab. 6). Stosując związki fizyczne, można na podstawie wyznaczonych wartości odształceń wyznaczyć składowe naprężenia. Podczas obciążania słupa zaobserwowano wzrost co do wartości bezwzględnej wartości naprężenia występującego w pręcie nr 1, które wynosiło od 6,30 do $-24,36 \text{ MPa}$, a w pręcie nr 2 od $-2,31$ do $-81,90 \text{ MPa}$ po wykonaniu pokrycia dachu. Odnotowano wzrost naprężenia w betonie przy czujniku nr 1, a wynosiło ono od 0,60 do $-2,32 \text{ MPa}$, zaś przy czujniku nr 2 wynosiło od $-0,22$ do $-7,80 \text{ MPa}$ po ukończeniu budowy.

4. Wnioski

Monitoring za pomocą sensorów światłowodowych FBG umożliwił analizę odształceń słupa żelbetowego w systemie prefabrykacji Polytech. Przeprowadzone pomiary dostarczyły informacji o pracy badanego elementu konstrukcyjnego. Można przypuszczać, że niejednakowe odształcanie się zbrojenia zastosowanego w słupie żelbetowym wynika z mechanizmu odształcania się stropu budynku i wyboczenia słupa do środka budynku. Podczas badań zauważono odształcenie słupa żelbetowego w kierunku wewnętrznym budynku (rys. 10). System pomiarowy działał stabilnie podczas realizacji budynku i w czasie jego eksploatacji. Stała kontrola modelowego budynku zrealizowanego na podstawie indywidualnego projektu w technologii nietestowanej do tej pory w warunkach użytkowych była możliwa dzięki technologii FBG. Prowadzone badanie umożliwiły eliminację nieprzewidywanych zagrożeń podczas budowy i użytkowania budynku.

Literatura

- [1] Juraszek J., Grzywa A., Walusiak H., Control technology in prefabricated and modular green home, 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, SGEM2017 Vienna GREEN Conference Proceedings, Vol. 17, Issue 63, 471–478.
- [2] Juraszek J., Walusiak H., Properties of new construction material based on expanded polystyrene derived from recycling, 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, SGEM2017 Vienna GREEN Conference Proceedings, Vol. 17, Issue 63, 619–626.
- [3] Juraszek J., Monitoring in footbridge construction, 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017 Conference Proceedings vol. 17, 295–301.
- [4] Juraszek J., Grzywa A., Walusiak H., Konceptcja badań odształceń budynku z prefabrykatów nowej generacji za pomocą systemów światłowodowych FBG, Materiały Budowlane 2017, 33–34.
- [5] Kashyap R., Fiber Bragg Gratings, Academic Press, 1999.
- [6] Zhou Z., Graver T. W., Hsu L., Ou J., Techniques of advanced FBG sensors: fabrication demodulation, encapsulation and their application in the structural monitoring of bridges, Pacific Science Review 2003, 5, 1, 116–121.

Deformability of a reinforced concrete pillar in the Polytech system

ABSTRACT:

The paper presents technology of monitoring a reinforced concrete pillar–connector of prefabricated walls. Prefabricated units made from a modified Polytech mortar containing expanded polystyrene derived from recycling were used to build a residential object. Reinforced concrete pillars that serve as wall connectors in Polytech system are load-bearing elements. In order to control the reinforced concrete connector of pre-

fabricated walls under realistic conditions, a control technology was applied that involved introducing fiber Bragg gratings deformation sensors. FBG monitoring method enables constant measurements of deformations of a construction element during its exploitation. This is a big advantage of the measuring system. The most important aspect of this solution are FBG sensors introduced into the reinforced concrete structure. The use of measuring method based on sensors with Bragg's gratings allows constant analysis of operational safety of a given element both, in the construction phase and during the normal use of the building. Pillar reinforcement in the tested points did not deform identically. Localization of sensors in the controlled units is also important. Tests carried out by means of fiber optic sensors allow to determine the real scope of deformation of the monitored rebars used in the reinforced concrete pillar that is a connector of walls prefabricated in the Polytech system.

KEYWORDS:

monitoring; control technology; prefabricated buildings; sensors with Bragg's gratings