

dr inż. Rafał Szydłowski\*

# Przetworniki z drgającą struną w badaniach konstrukcji żelbetowych i sprężonych

*Monitoring of reinforced and prestressed structures with the vibrating wire transducers system*

**T**echnologia pomiarów wykorzystująca zasadę drgającej struny jest powszechnie stosowana w krajach wysokorozwiniętych od wielu lat. W Polsce stosowana była głównie do pomiarów ruchów górotworów [1], a w ostatnich latach znalazła zastosowanie w badaniach konstrukcji budowlanych. Wielkości określające deformację konstrukcji do niedawna w warunkach naturalnych budowli mierzono w sposób mechaniczny bądź geodezyjny. Dyskretny w czasie sposób pomiaru nie pozwalał jednak na stały monitoring konstrukcji, a pomiary z wykorzystaniem tensometrów i czujników indukcyjnych w warunkach budowy i rzeczywistego środowiska naturalnego nie zdawały egzaminu. System przetworników z drgającą struną redukuje część niedogodności i znacznie lepiej wpisuje się w warunki rzeczywistych konstrukcji.

## Teoretyczne podstawy pomiaru

Podstawą kontroli wszelkich wielkości fizycznych jest pomiar częstotliwości drgającej struny. Sformułowanie drugiej zasady dynamiki Newtona dla dowolnego punktu drgającej struny, po odpowiednich przekształceniach i podstawieniach, prowadzi do równania:

$$\varepsilon = f^2 \frac{4L_w \rho}{E \cdot g} \quad (1)$$

gdzie:

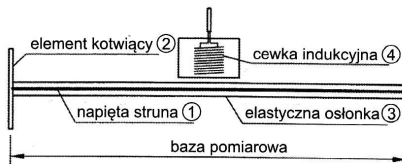
$\varepsilon$  – odkształcenie struny;  
 $f$  – częstotliwość drgań;  
 $L_w$  – długość;  
 $\rho$  i  $E$  – gęstość i moduł sprężystości materiału struny;  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Jeśli założymy, że  $4L_w \rho / (E \cdot g)$  jest stałą przetwornika  $k$ , to odkształcenie struny jest wprost proporcjonalne do

kwadratu jej częstotliwości drgań, a przedstawione równanie można sprowadzić do postaci:

$$\varepsilon = f^2 \cdot k \quad (2)$$

Budowę strunowego przetwornika odkształceń zatapianego w betonie przedstawiono na rysunku 1. Zasadniczym elementem jest stalowa struna (1), rozpięta pomiędzy elementami kotwiącymi (2) i umieszczona w elastycznej osłonce (3). Napiętej strunie towa-



Rys. 1 Budowa strunowego przetwornika odkształceń

rzy cewka indukcyjna (4), która wywołuje drgania struny, a następnie odczytuje jej częstotliwość drgań. Każdy z przetworników wyposażony jest dodatkowo w termistor do pomiaru temperatury. Zasada działania przetworników do pomiaru innych wielkości fizycznych niż odkształcenie (przemieszczenie, ciśnienie, siła itd.) opiera się również na kontroli zmiany napięcia struny przez pomiar jej częstotliwości drgań. Wobec czego budowa i podstawowe elementy wszystkich przetworników są analogiczne do przetwornika odkształceń. W przeciwieństwie do metody tensometrycznej czy indukcyjnej, gdzie mierzone są bardzo małe zmiany napięcia prądu, w przypadku drgającej struny wartością mierzoną jest częstotliwość. Wobec tego strunowy system pomiarów jest znacznie mniej podatny na zakłócenia wywołane czynnikami zewnętrznymi, takimi jak pola elektryczne, magnetyczne czy zmiana temperatury.

W ogólnym przypadku szukaną wielkość  $U$  wyznacza się z zależności:

$$U = (R_0 - R) \cdot k \quad (3)$$

gdzie:

$R_0$  i  $R$  oznaczają początkowe i bieżące wskazanie przetwornika,  $k$  jest natomiast stałą przetwornika wyznaczaną w procesie kalibracji i podawaną przez producenta.

Dodatkowo do wartości  $U$  należy dodać poprawkę  $U_{temp}$  wynikającą z odkształcalności termicznej betonu i stalowej struny, wyznaczoną ze wzoru:

$$U_{temp} = (T_0 - T) \cdot c \quad (4)$$

gdzie:

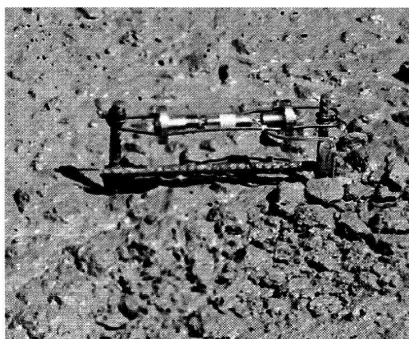
$T_0$  i  $T$  oznaczają początkową i bieżącą temperaturę przetwornika,  $c$  jest natomiast stałą wyznaczaną indywidualnie dla każdego przetwornika i uwzględniającą rozszerzalność termiczną betonu, stalowej struny i obudowy przetwornika.

## Pomiar wybranych wielkości w betonie

**Odształcenia.** Do pomiaru odkształceń betonu najczęściej stosuje się zatapiane przetworniki wgłębne. Na rynku dostępna jest cała gama czujników o różnych parametrach. Dobór bazy, zakresu pracy i typu przetworników należy przeprowadzić, uwzględniając warunki ich pracy w konstrukcji, maksymalny rozmiar ziaren kruszywa w mieszance betonowej, technologię betonowania oraz wymiary konstrukcji. Na fotografii 1 pokazano standardowy przetwornik o bazie 51 mm w trakcie betonowania.

Na rysunku 2 przedstawiono zastosowanie przetworników wgłębnych do określenia rozwoju odkształceń w czasie i na grubości sprężonej płyty betonowej, wykonanej na folii PE, na podłożu stalowym. Wykonano dwie płyty 1,0 × 0,16 × 3,6 m. Jedna z nich zosta-

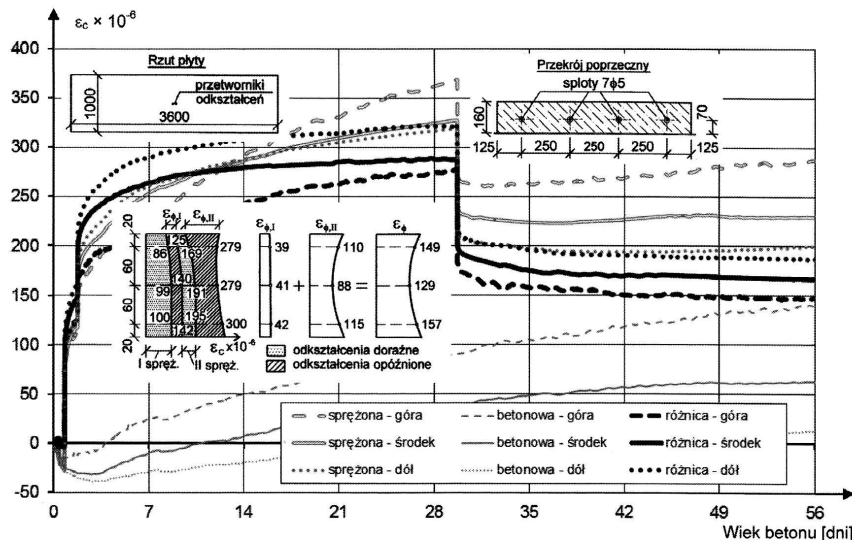
\* Politechnika Krakowska



Fot. 1. Standardowy przetwornik o bazie 51 mm w trakcie betonowania

twiącym (6). Wnętrze osłony w kształcie rury wypełnione jest tym samym betonem co w całej konstrukcji. Osłona taka separuje mechanicznie beton w jej wnętrzu od tego na zewnątrz, jednocześnie umożliwia swobodny przepływ wilgoci i przewodzenie ciepła, a tym samym zapewnia podobne warunki dojrzewania betonu. Wyizolowany słup betonowy średnicy 66 mm (7) wywiera nacisk na przetwornik ciśnienia (1), który reaguje swoim odkształceniem, powodując zmianę napięcia i częstotliwości

w modelach MES. Na rysunku 4 przedstawiono przykład takiego połączenia w ścianie zbiornika cylindrycznego średnicy wewnętrznej 18,0 m i wysokości 19,5 m. Ściana została sprężona 48 kablami obwodowymi 7 × 7φ5 mm. Proces sprężania (po 210 dniach od zabetonowania płyty dennej) został zarejestrowany przy użyciu przetworników odkształceń (rysunek 5a) oraz przetwornika naprężeń (rysunek 5b). Średnia wartość przyrostu odkształceń od sprężenia wyniosła  $407 \times 10^{-6}$ , a naprężenie 12,5 MPa, obliczona wartość modułu sprężystości – 30,7 GPa.



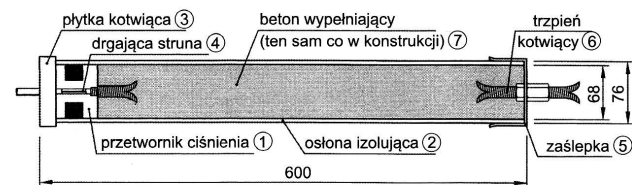
Rys. 2. Rozkład odkształceń w czasie i na wysokości płyt, wyznaczony wgłębniymi przetwornikami przemieszczeń

ła sprężona czterema cięgnami bez przyczepności 7φ5. Cięgna naciągnięto siłą 20 t w dwóch etapach: 50% siły po 20 h, doprężenie do 100% siły po 40 h. W środku rzutu obu płyt zainstalowano przetworniki odkształceń na trzech wysokościach przekroju. Monitoring obu płyt (betonowej i sprężonej) pozwolił na odseparowanie odkształceń wywołanych tylko działaniem sprężenia.

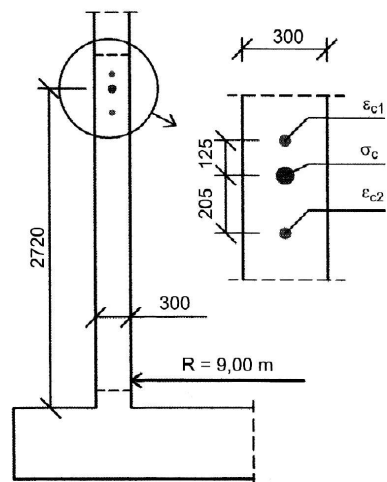
**Naprężenia.** Do kontroli naprężeń w betonie wykorzystuje się czujnik przedstawiony na rysunku 3. Strunowy przetwornik naprężeń tworzą trzy zasadnicze elementy, tj. przetwornik ciśnienia (1), porowata osłona izolująca (2) i zaślepka (5) wraz z trzpieniem ko-

drgań struny (4). Zakres pracy czujnika wynosi -3 do +25 MPa, a dokładność 0,25% zakresu pomiarowego, czyli 0,07 MPa. Jego użycie pozwala w sposób bezpośredni określić naprężenia w betonie, eliminując konieczność znajomości modułu sprężystości, co jest niezbędne przy wyznaczaniu naprężeń przez pomiar odkształceń betonu.

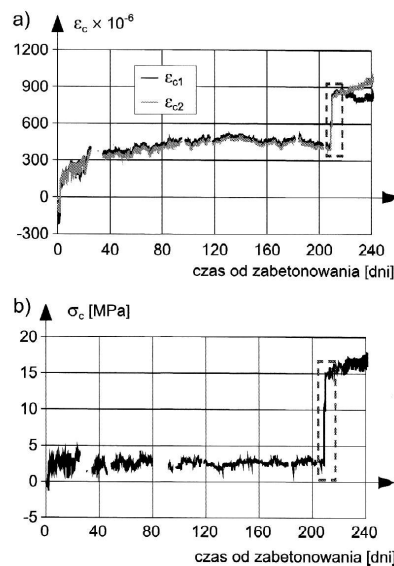
**Moduł sprężystości betonu.** Wartość modułu sprężystości w rzeczywistej konstrukcji dalece odbiega od wartości normowych oraz od otrzymanych z badań normowych próbek walcowych. Połączenie przetwornika naprężeń oraz kilku (min. 2) przetworników odkształceń pozwala na wyznaczenie rzeczywistej wartości modułu sprężystości w konstrukcji. Jego znajomość jest niezbędna do prawidłowego określenia deformacji i stanu wyężenia konstrukcji



Rys. 3. Strunowy przetwornik naprężeń w betonie



Rys. 4. Geometria ściany zbiornika



Rys. 5. Odkształcenia (a) i naprężenia (b) betonu zarejestrowane przy użyciu przetworników

**Przemieszczenia i szerokość rys.** Przemieszczenia wybranych punktów oraz szerokość rys i pęknięć mierzyć można za pomocą dylatometrów. Na

rysunku 6 przedstawiono schemat montażu dylatometru na pękniętej ścianie żelbetowej.

siła 180,4 kN, a na siłomierzach B – 174,6 kN. Średnie wartości sił uzyskanych na obu typach siłomierzy wprawdzie są różne, ale współczynniki zmienności obu wartości wynoszą 3,0% dla siłomierzy A i aż 23,3% dla siłomierzy B. Tak duże rozrzuty w przypadku drugiego siłomierza były spowodowane niewątpliwie nieodpowiednim dobraniem średnicy siłomierza i grubości płytki transferowej.

**Podsumowanie**

W artykule przedstawiłem jedynie kilka typów przetworników strunowych, które najczęściej stosowałem. Na rynku istnieje wiele innych czujników do pomiaru wielkości fizycznych w betonie i w konstrukcjach żelbetowych. Obecnie w IMIKB PK testowany jest pierwszy w Polsce system do pomiaru ugięć stropów działający na zasadzie naczyń połączonych. Pomimo licznych wad i ograniczeń, jako niewątpliwie zalety systemu można wymienić możliwość pracy czujników od początku wiązania betonu, stabilność pracy czujników deklarowaną na kilkadziesiąt lat oraz możliwość ciągłego monitoringu konstrukcji w czasie.

**Abstract**

The vibrating wire transducers system has been used to monitor the building structures in other countries for decades. It has been implemented to monitor the reinforced and prestressed concrete structures in Poland for several years. In the paper the some transducers designed to concrete control were described as soon as their theoretical basis. Some results, experiences and conclusions resulted from own concrete structures tests were drawn.

**Literatura**

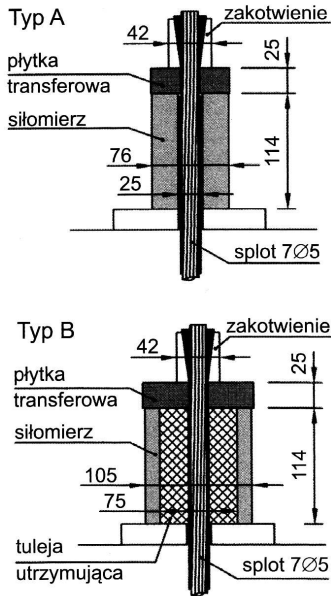
- [1] Kanciruk A.: Nowe przetworniki strunowe i ich zastosowanie. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN 2009, tom 11, nr 1 – 4, str. 63 – 77.
- [2] Polska aparatura strunowa PAS. Katalog, Zakład Aparatury Naukowej ZAN-UJ. Krajowy System Automatyki i Pomiarów „Polmatik”.
- [3] Materiały instruktażowe firmy Geokon Inc.

**Kontrola sił wciągach**

Kontrolę sił sprężających można prowadzić za pomocą tulejowych siłomierzy strunowych (fotografia 2).

Istotne jest, aby średnica siłomierza była odpowiednio dobrana do średnicy zakotwienia, a w przypadku znacznych rozbieżności należy dobrać płytkę transferową o odpowiedniej sztywności. Na rysunku 7 przedstawiono dwa typy zastosowanych w jednych z pierwszych badań siłomierzy. Typ A to siłomierz o nominalnym zakresie 300 kN i średnicy wewnętrznej 25 mm, typ B ma zakres 450 kN i średnicę wewnętrzną 75 mm. Obydwa typy zostały zastosowane do monitorowania siły w splotach 7φ5, sprężających poprzecznie płytę na gruncie szerokości 3,5 m (rysunek 8a). Zastosowano zakotwienia średnicy zewnętrznej 42 mm. W obydwu typach zakotwień zastosowano płytki transferowe grubości 25 mm. Każde z cięgien zostało napięte siłą 200 kN i zakotwione w bezpośrednim zakotwieniu gwintowanym. Wyniki zarejestrowanych sił wciągach po zakotwieniu przedstawiono na rysunku 8b. Średnia wartość sił zarejestrowanych na siłomierzach A wynio-

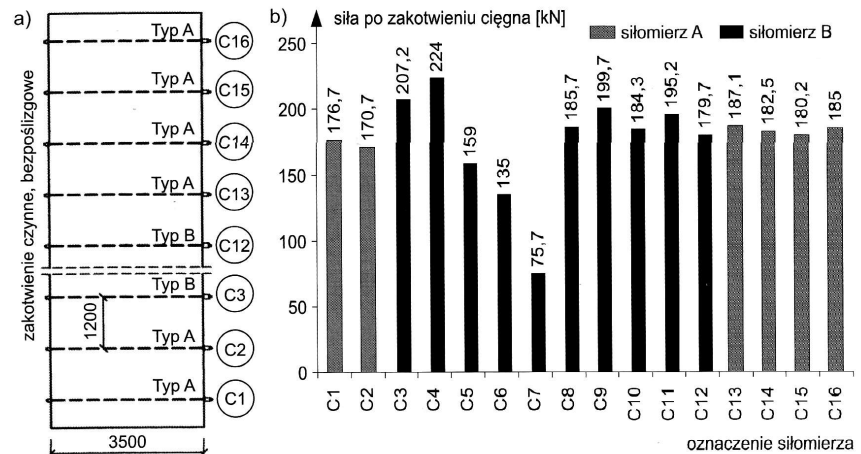
W kolejnych badaniach grubość płytki dla siłomierza B została zwiększona do 50 mm, co znacznie zmniejszyło rozrzut wyników.



Rys. 7. Dwa typy siłomierzy (opis w tekście)



Fot. 2. Przykład tulejowego siłomierza strunowego



Rys. 8. Rozmieszczenie siłomierzy na kablach poprzecznych sprężających płytę na gruncie (a), otrzymane wyniki sił po zakotwieniu (b)