

Oszacowanie wartości i zmienności modułu sprężystości betonu w istniejącej konstrukcji na podstawie ciągłych pomiarów in situ

Estimation of the value and the variability of elastic modulus of concrete in existing structure on the basis of continuous in situ measurements

1. Wprowadzenie

Energia sprężysta skumulowana w odkształconym materiale pod wpływem przyłożonych sił była znana (intuicyjnie) i stosowana przez ludzkość od najdawniejszych czasów. Sprężystość rozumiana jako zdolność powrotu ciała do konfiguracji wyjściowej jest pojęciem nieco szerszym niż, wykorzystywane często w praktyce, liniowe prawo Hooke'a z 1679r.: „*ut tensio sic vis*” – *jakie wydłużenie, taka siła*.

Określenie sposobu pracy każdej nowoprojektowanej konstrukcji związane jest m.in. z koniecznością zbudowania jej modelu analitycznego, co wymaga zdefiniowania parametrów mechanicznych materiałów, z których ma ona zostać zbudowana. Konieczna jest również znajomość praw fizycznych opisujących zależności między naprężeniami, a odkształceniami dla poszczególnych materiałów. Zgodność wyników analiz teoretycznych z rzeczywistością związana jest z dokładnością modeli, a te wymagają kalibracji, najlepiej w warunkach in situ.

W artykule zawarto wyniki analiz wykonanych na podstawie prowadzonych w sposób ciągły pomiarów odkształceń i „naprężeń” w betonie pylonu Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu. Obliczenia miały na celu oszacowanie wartości i zmienności w czasie efektywnego modułu sprężystości betonu w rzeczywistej konstrukcji żelbetowej. Prowadzone pomiary in situ umożliwiły uwzględnienie wszystkich czynników mających wpływ na zmianę sztywności betonu, w tym również pełzanie.

2. Moduł sprężystości betonu

Beton, jako materiał niejednorodny, charakteryzuje się nieliniową zależnością σ - ε , jednak w analizach inżynierskich bardzo często wykorzystuje się funkcję liniową:

$$\sigma_c = E_{cm} \cdot \varepsilon_c \sigma_c = E_{mc} \cdot \varepsilon_c \quad [1]$$

1. Introduction

Elastic energy accumulated in a deformed material under the influence of applied forces has been known (intuitively) and used since ancient times. Elasticity understood as the ability of a body to return to the initial configuration is slightly broader concept than, often used in practice, linear Hooke's law of 1679: “*ut tensio sic vis*” – “as the extension, so the force”.

Definition of the behaviour of each newly designed structure is related, among other things, to the need of building an analytical model, which requires a definition of mechanical parameters for materials used in this structure. The knowledge of physical laws that describe the relationship between stress and strain for particular materials is also necessary. Compatibility of the reality with theoretical results is related to the accuracy of the models, and these require calibration, preferably in situ.

This paper contains the results of analyses carried out on the basis of continuously performed strain and “stress” measurements in the concrete pylon of the Rędziński Bridge in Wrocław. The purpose of calculation was to estimate the value and the variability in time the effective, elastic modulus of concrete in a real reinforced concrete structure. This measurements, performed in situ, allowed to take into account all the factors affecting the change of stiffness of concrete, including creep.

2. Elastic modulus of concrete

Concrete, as a heterogeneous material, is characterized by a non-linear relationship σ - ε , but in the engineering analysis a linear function is often used:

$$\sigma_c = E_{cm} \cdot \varepsilon_c \sigma_c = E_{mc} \cdot \varepsilon_c \quad [1]$$

where E_{cm} is the average secant modulus of elasticity estimated in the strain range $\sigma_c = 0$ and $0.4f_{cm}$ (1), where f_{cm} is the average

gdzie E_{cm} jest średnim siecznym modułem sprężystości wyznaczanym w określonym zakresie naprężeń. Według Eurokodu 2 (1) jest to teoretyczny zakres naprężeń między $\sigma_c = 0$ i $0,4f_{cm}$, gdzie f_{cm} jest średnią wytrzymałością betonu na ściskanie mierzoną na próbkach cylindrycznych o średnicy 150 i wysokości 300 mm. W normie (2), definiującej szczegółowe warunki badania modułu sprężystości betonu w warunkach laboratoryjnych, podano zakres naprężeń od 0,5 MPa do 1/3 wartości wytrzymałości betonu na ściskanie.

Wpływ na moduł sprężystości betonu ma wiele czynników, w tym jego jakościowy i ilościowy skład, sposób betonowania, itp. Na skutek upływu czasu i procesów fizyko-chemicznych zachodzących w stwardniałym zaczynie cementowym, w normalnych warunkach eksploatacji, obserwuje się zazwyczaj nieznaczny wzrost sztywności betonu. Efekt ten nie został jednak uwzględniony w przepisach normowych (1). Zależność naprężenia od odkształcenia związana jest także ze stopniem poprzecznego, w stosunku do analizowanego kierunku, skrzepowania betonu. Ograniczenie możliwości odkształcania się betonu skutkuje wzrostem jego wytrzymałości i sztywności. Ten drugi parametr mechaniczny także nie został opisany w normie (1).

Wprowadzenie do przekroju poprzecznego zbrojących beton prętów wykonanych ze stali o znacznie wyższym module sprężystości niż beton, powoduje wzrost sztywności całego elementu. Wzrost ten można uwzględnić poprzez zastosowanie tzw. sprowadzonego modułu sprężystości:

$$E_{cs} = \frac{E_{cm}A_c + E_s \cdot A_s}{A} \quad [2]$$

gdzie A_c jest polem powierzchni przekroju poprzecznego elementu, A_s , E_s – odpowiednio polem powierzchni przekroju poprzecznego stali zbrojeniowej i jej modułem sprężystości, A – sumą obydwu pól.

Konstrukcje żelbetowe podlegają wpływowi pełzania. Pomimo stałego obciążenia elementu w czasie ($\sigma_c = \text{const.}$) obserwuje się przyrost odkształceń ($\Delta\varepsilon_c \neq 0$). Chęć posługiwania się w obliczeniach inżynierskich prostą zależnością (liniową) σ - ε spowodowała konieczność wprowadzenia definicji tzw. efektywnego modułu sprężystości (1):

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad [3]$$

gdzie $\varphi(t, t_0)$ jest współczynnikiem pełzania w rozpatrywanym okresie czasu (tzn. między chwilą przyłożenia obciążenia t_0 i analizowanym wiekiem betonu t). Ze względu na zależność tej wielkości od czasu, efektywny moduł sprężystości również będzie funkcją czasu – rys. 1.

Norma (1) w sposób dosyć arbitralny uzależnia wartość modułu sprężystości od klasy betonu, a więc jego wytrzymałości na ściskanie. Przybliżone, stabelaryzowane wartości zaleca ona modyfikować jedynie w zależności od rodzaju zastosowanego kruszywa (wapienne, piaskowcowe, bazaltowe), przy czym brak jest wytycznych dla betonów wykonanych z popularnego w Polsce

compressive strength of concrete measured on cylindrical samples with the diameter of 150 and the height of 300 mm. In the standard (2), which defines specific conditions for testing the modulus of elasticity of concrete in the laboratory, the range of stress between 0.5 MPa and 1/3 of concrete compressive strength was recommended.

Many factors affect the modulus of elasticity, including its qualitative and quantitative composition, the concreting process, etc. As a result of the passage of time and the physical and chemical processes occurring in the hardened cement paste, under normal operating conditions, a slight increase in the stiffness of concrete is observed. This effect, however, was not included in the standard regulations (1). The stress-strain relationship is also related to the degree of transverse (to the analyzed direction) restraint of concrete. Limitation of concrete deformation results in the increase of its strength and rigidity. This second mechanical parameter is not described in the norm (1).

The application in the cross-section of rods made of steel of a substantially higher elastic modulus than concrete results in increasing the stiffness of the whole element. This increase can be taken into account by applying the so-called equivalent elastic modulus:

$$E_{cs} = \frac{E_{cm}A_c + E_s \cdot A_s}{A} \quad [2]$$

where A_c is the cross sectional area of the element, A_s , E_s - the cross sectional area of reinforcing steel and its modulus of elasticity, respectively, A - the sum of the two areas.

Reinforced concrete structures are affected by creep. Despite the constant loading over time ($\sigma_c = \text{const.}$), a strain increment is observed ($\Delta\varepsilon_c \neq 0$). The idea of using a simple equation (linear) σ - ε has resulted in the necessity of introducing a definition of the so-called effective elastic modulus (1):

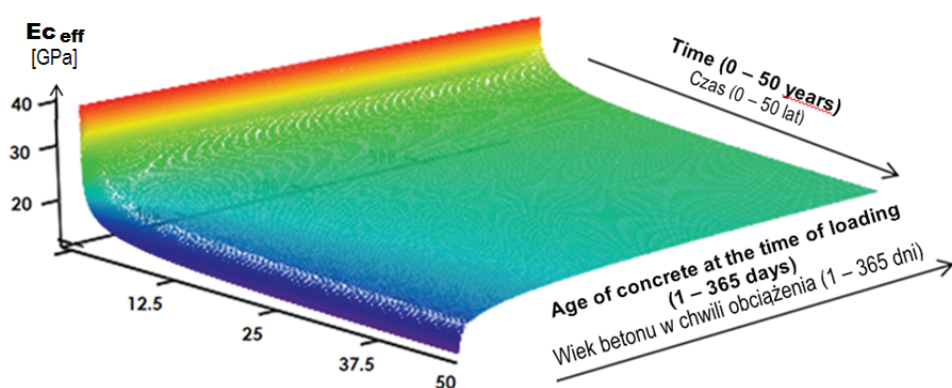
$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad [3]$$

where $\varphi(t, t_0)$ is the creep coefficient during the analysed period of time (i.e. between the time when the load is applied t_0 and the analysed moment t). Due to the time effect on creep coefficient, also the effective modulus of elasticity is the function of time – Fig. 1.

Standard (1) arbitrarily relates the value of the elastic modulus of concrete to its class, and therefore to its compressive strength. Approximated, tabulated values are modified only depending on the type of aggregate (limestone, sandstone, basalt), but there are no guidelines for concrete made with broken granite aggregate, which is popular in Poland. Also in the engineering practice special attention is paid to the definition of concrete compressive strength, treating the value of elastic modulus as slightly less important.

3. Engineering importance

Modulus of elasticity determines the rigidity of the structure. Its value is used, inter alia, in the calculation of deflections and



Rys. 1. Zmienność $E_{c,eff}$ w zależności od czasu i wieku betonu w chwili obciążenia

Fig. 1. The variability of $E_{c,eff}$ depending on time and the age of concrete in the time of loading

łamanego kruszywa granitowego (3). Również w praktyce projektowej szczególną wagę przykładają się do definicji wytrzymałości betonu na ściskanie, przesuwając nieco na drugi plan wartość modułu sprężystości.

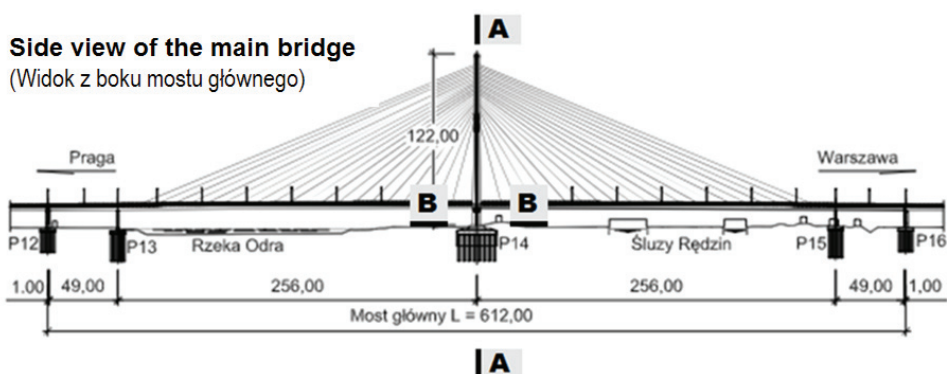
3. Znaczenie inżynierskie

Moduł sprężystości determinuje sztywność konstrukcji. Jego wartość jest wykorzystywana między innymi przy obliczaniu ugięć i zarysowań w stanie granicznym użyteczności, przy analizie stateczności konstrukcji, siły krytycznej, efektów drugiego rzędu,

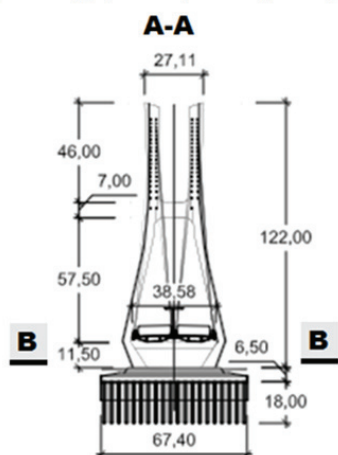
cracks in the serviceability limit state, in the analysis of structure stability, critical force, the second order effects and modal analysis (including determination of modal frequency and shapes). The results of researches carried out on samples taken during concreting or cut from existing structures indicate that very often the value of elastic modulus of concrete is lower than expected from the compressive strength values (4, 5). The influence of elastic modulus on theoretical deflection of e.g. reinforced concrete beam is inversely proportional. This means that a decrease in the modulus by 50% will result in a double increase in deflection.

The value of elastic modulus is determined following (2) in a uniaxial compression test. This document introduced two methods for determining the stiffness of concrete. From the computational analysis point of view the reduction of the upper stress value in the sample during the test to $0.33 f_{cm}$ is important. So far, the value has been adopted at the level of $0.40 f_{cm}$ [cf. (1)]. It results in a slight increase of the elastic modulus.

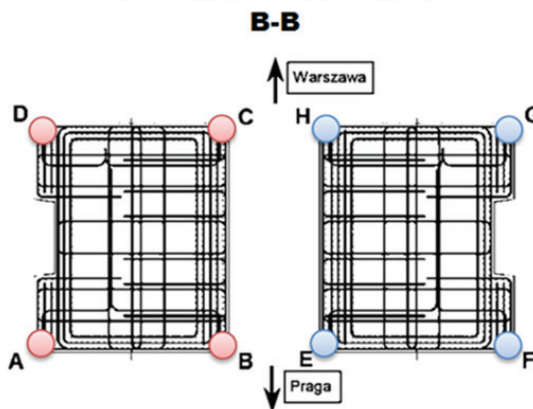
In a real structure concrete works mostly in the triaxial stress state. Moreover, it is reinforced. Therefore it seems reasonable



Cross section of the main bridge
(Przekrój poprzeczny mostu głównego)



Cross section of the pylon
(Przekrój poprzeczny przez pylon)



Rys. 2. Widok mostu głównego i analizowane przekroje (6)

Fig. 2. The view of the main bridge and analysed cross sections (6)

a także w analizie modalnej (obejmującej wyznaczanie częstotliwości i postaci drgań własnych). Wyniki badań prowadzonych na próbkach walcowych pobranych podczas betonowania lub wyciętych z istniejących konstrukcji wskazują, że bardzo często wartość modułu sprężystości betonu jest niższa niż wynikałoby to z wartości wytrzymałości na ściskanie (4, 5). Wpływ wartości modułu sprężystości na teoretyczną wartość ugięcia np. belki żelbetowej jest odwrotnie proporcjonalny. Oznacza to, że spadek wartości modułu o 50% spowoduje dwukrotny wzrost ugięcia.

Wartość modułu sprężystości wyznaczana jest zgodnie z normą (2) w jednoosiowej próbie ściskania. Norma ta wprowadziła dwie metody określania sztywności betonu. Z punktu widzenia analiz obliczeniowych istotne jest obniżenie górnej wartości naprężenia w próbce podczas badania do jednej trzeciej wytrzymałości betonu na ściskanie ($0,33 \times f_{cm}$). Do tej pory wartość tę przyjmowano na poziomie $0,4f_{cm}$ [porównaj (1)]. Powoduje to nieznaczny wzrost wartości modułu sprężystości.

W rzeczywistej konstrukcji beton pracuje najczęściej w trójosiowym stanie naprężeń. Dodatkowo jest to najczęściej beton zbrojony. Zasadnym zatem wydaje się przeprowadzenie badań, których celem byłoby oszacowanie wartości modułu sprężystości betonu wbudowanego w element konstrukcji. Pomiaru takie powinny być długookresowe, by móc uwzględnić efekty reologiczne i należy je prowadzić od momentu ułożenia mieszanki betonowej w konstrukcji.

4. Pomiar wybranych wielkości fizycznych w pylonie Mostu Rędzińskiego we Wrocławiu

Most Rędziński we Wrocławiu to most podwieszony do jednego pylonu w kształcie zbliżonym do litery A (6) – rys. 2. Obiekt został oddany do użytkowania w sierpniu 2011r. Przekrój poprzeczny pojedynczej gałęzi pylonu w poziomie górnej powierzchni fundamentu zbliżony jest do prostokąta – rys. 2.

W każdym z narożników przekroju pylonu w poziomie górnej powierzchni fundamentu (rys. 2) zainstalowano równolegle do zbrojenia po trzy strunowe czujniki odkształceń o bazie pomiarowej 150 mm oraz usytuowany między nimi czujnik strunowy „naprężenia” – rys. 3. Konstrukcja tego czujnika umożliwia pomiar odkształcenia krótkiego elementu stalowego połączonego szeregowo z betonowym walcem o średnicy 66 mm, oddzielonego od konstrukcji za pomocą porowatej rury z tworzywa sztucznego o długości ok. 600 mm. Określona na podstawie odkształceń stali siła, odniesiona do pola przekroju betonowego walca (rury) pozwala na obliczenie wartości panującego w betonie naprężenia. Należy podkreślić, że pomiary wykonywano w strefie ściskanej betonu.

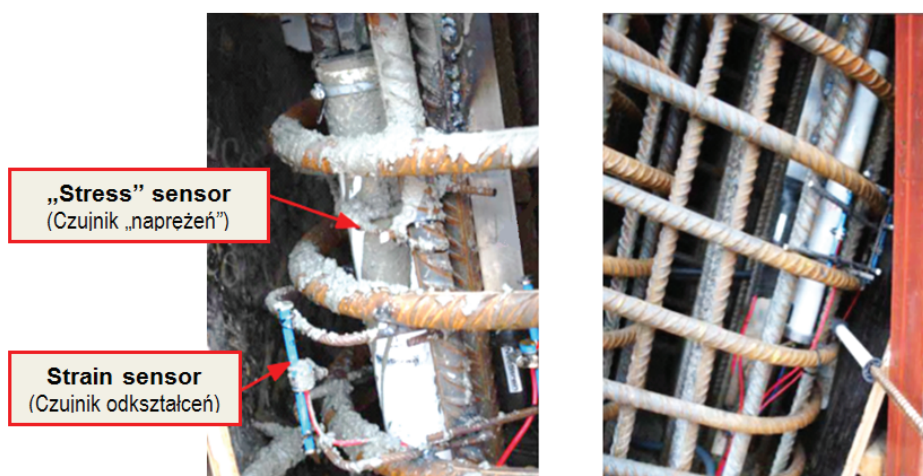
to conduct research which goal would be to estimate the value of elastic modulus of concrete embedded in a structural element. Such measurements should be done over a long term in order to take into account the effects of rheological phenomena and they should start just after concreting.

4. The measurement of selected physical values in the pylon of Rędziński Bridge in Wrocław

The Rędziński Bridge in Wrocław is suspended to one pylon in the shape similar to the letter A (6) – Fig. 2. The structure was put into service in August 2011. The cross section of a single pylon arm at the level of the foundation upper surface is approximately rectangular – Fig. 2.

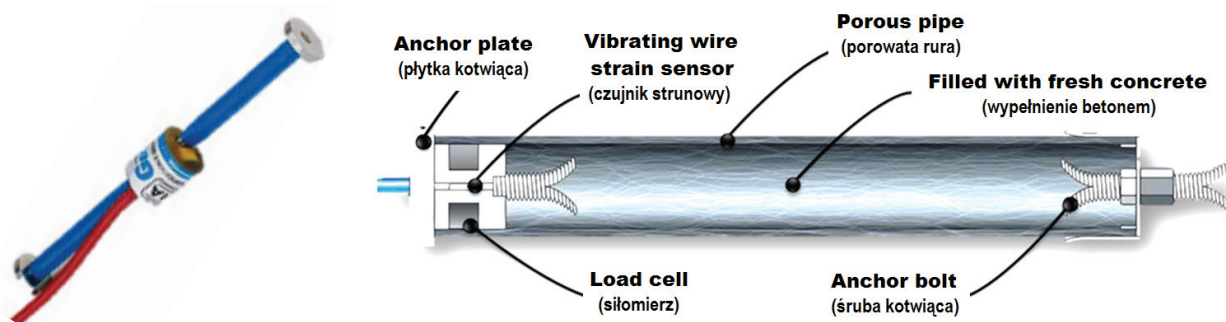
In each corner of analysed cross section at the level of foundation upper surface (Fig. 2) three string strain sensors were installed parallel to the reinforcement with the base of 150 mm together with a “stress” sensor located between them (Fig. 3). The design of this sensor allows measuring the strains of a short steel element connected in series with a concrete cylinder with a diameter of 66 mm isolated from the structure by a porous pipe of length of about 600 mm. The force determined on the basis of steel deformation, related to the cylinder (the pipe) cross-sectional area, allows the calculation of the value of stress. It should be noticed, that measurements were performed in the compression area of concrete.

The pylon was designed with concrete class C50/60 and granite aggregate of grain size up to 16 mm. The value of the modulus for such concrete can be adopted on the basis of (1) as equal 37 GPa. In (4) an extensive study of rigidity of concrete established on samples taken during the pylon construction was presented. The obtained results allowed to determine the average value of elastic modulus at ca. 32 GPa, which is ca. 13% less than the value recommended in (1) for the class C50/60. Additionally, the actual values of the compressive strength of concrete were overestimated, which confirms that the relationship between the value of elastic modulus and the class of concrete given in the norm (1) does not always conform with the reality.



Rys. 3. Widok czujników tuż przed betonowaniem (6)

Fig. 3. View of the sensors immediately prior to concreting (6)



Rys. 4. Czujnik odkształceń betonu (po lewej) i naprężeń (po prawej) (6)

Fig. 4. The strain sensor for concrete (left) and "stress" sensor (right) (6)

Pylon zaprojektowany został z betonu klasy C50/60 z użyciem łamanego kruszywa granitowego o uziarnieniu do 16 mm. Wartość modułu sprężystości dla takiego betonu można przyjąć na podstawie (1) na poziomie 37 GPa. W pracy (4) zaprezentowano obszernie badania sztywności tego betonu wyznaczonego na próbkach pobranych podczas wykonywania pylonu. Uzyskane wyniki pozwoliły ustalić średnią wartość modułu sprężystości na poziomie ok. 32 GPa, czyli ok. 13% poniżej wartości zalecanej przez normę (1) dla klasy C50/60. Co więcej, rzeczywiste wartości wytrzymałości na ściskanie betonu były wyższe, co potwierdza, że zależności między wartością modułu sprężystości, a klasą betonu podawane w normie (1) nie zawsze zgodne są ze stanem faktycznym.

Na rysunku 5 pokazano rozmieszczenie czujników w wybranym narożu przekroju poprzecznego pylonu. Odległości osiowe między czujnikami odkształceń betonu wynosiły od 150 do 200 mm. Ze względu na znaczne zagęszczenie zbrojenia, wszystkie czujniki znajdowały się stosunkowo blisko prętów o średnicy 32 mm.

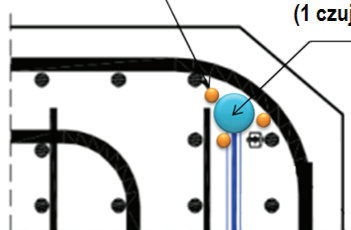
Na podstawie pomiaru odkształceń betonu nie można wyznaczyć w nim naprężeń ze względu na brak znajomości, zależnej od czasu, relacji fizycznej pomiędzy naprężeniem a odkształceniem. Miara naprężeniowa jest najbardziej intuicyjną i z niej korzystają normy [porównaj (1)] przy analizowaniu stanów granicznych nośności. Celem wykonywanych pomiarów była próba oszacowania modułu sprężystości betonu znajdującego się w rzeczywistej konstrukcji przy uwzględnieniu podejścia zaproponowanego w normie (1). Przyjęto zatem, że zależność $\sigma_c - \varepsilon_c$ w całym okresie czasu, w którym wykonywano pomiary, opisuje funkcja:

3 sensors of concrete strains

(3 czujniki odkształceń betonu)

1 sensor of concrete "stress"

(1 czujnik odkształceń "naprężeń" betonu)



Rys. 5. Rozmieszczenie czujników odkształceń betonu oraz „naprężeń” w wybranym narożu przekroju poprzecznego pylonu (6)

Fig. 5. Setting of "stress" and strain sensors in a selected corner of the cross-section (6)

Figure 5 shows the location of the sensors in a selected corner of the pylon cross section. The axial distances between strain sensors of concrete are 150 to 200 mm. Due to significant density of reinforcement all the sensors are relatively close to steel bars of the diameter of 32 mm.

Basing on measurement of concrete strain, the stress cannot be determined due to the lack of knowledge of the time-dependent physical relationship between stress and strain. The stress measure is the most intuitive and is used in standards [cf. (1)] to analyse ultimate limit state. The purpose of the measurements will be to estimate the elastic modulus for concrete located in a real structure, taking into account the approach proposed in the norm (1). Consequently, it was assumed that the relationship $\sigma_c - \varepsilon_c$ is represented in whole analysed period of time with the function:

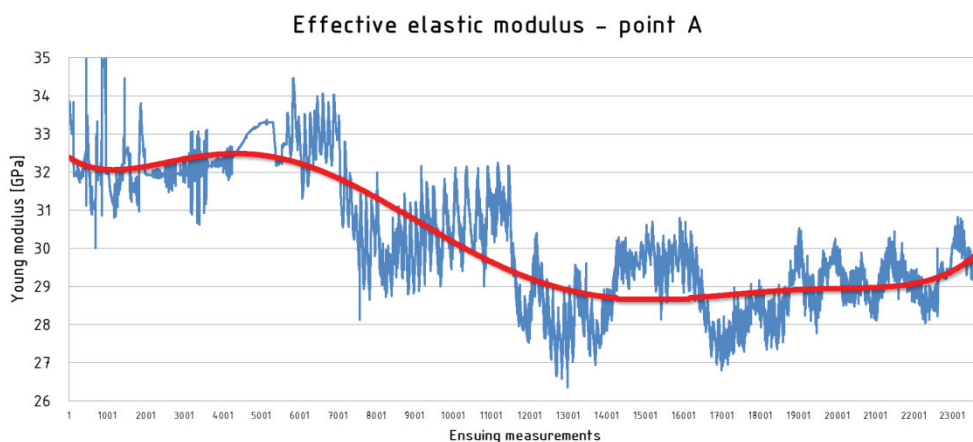
$$\sigma(t) = E_c(t) \cdot \varepsilon(t) \quad \sigma(t) = E_c(t) \cdot \varepsilon(t) \quad [4]$$

where the known values are stress and strain and the value of modulus $E_c(t)$ is searched for. In this case, the modulus is no longer the material property, but a parameter describing the elasticity of the structure element.

The relationship $E_c(t)$ for two selected measurement points is presented in Figs. 6 and 7. The strain values were averaged from the values obtained from particular sensors. Measurements were made in the period of five months, between 07. 08. 2011 and 28. 12. 2011. At the beginning of this period the age of concrete was about 20 months.

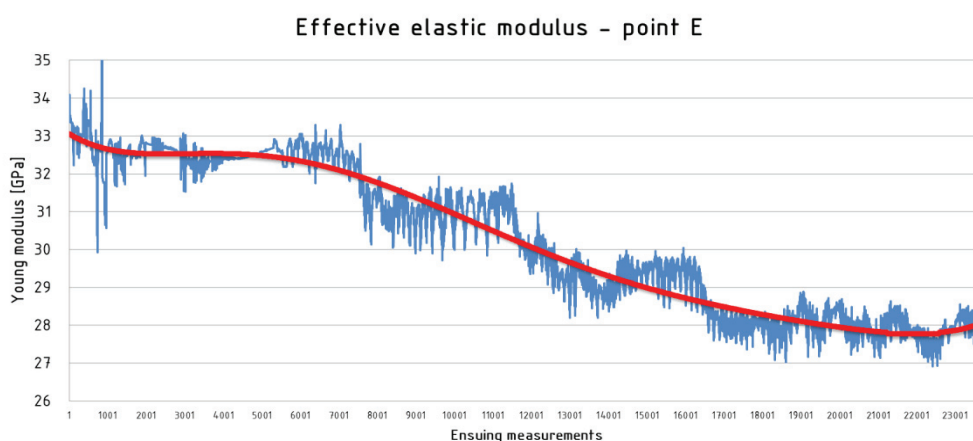
The relationships obtained from measurements at other points (Fig. 3) were very similar, i.e. the value of elastic modulus decreases in time, and therefore the shapes of plots, were congruent.

Table 1 shows the values of strain, stress and elastic modulus at point E in selected moments of time. Analysing the table it should be noticed that the value of stress over time decreased while the compression causing strain increased. This phenomenon is an effect of rheological properties of concrete (strain increment) and the resulting force (stress) transfer to the reinforcing bars (stress decrease).



Rys. 6. Zależność modułu sprężystości w punkcie A pylonu od czasu

Fig. 6. Elastic modulus vs. time at point A



Rys. 7. Zależność modułu sprężystości w punkcie E pylonu od czasu

Fig. 7. Elastic modulus vs. time at point E

$$\sigma(t) = E_c(t) \cdot \varepsilon(t) \quad \sigma(t) = E_c(t) \cdot \varepsilon(t) \quad [4]$$

gdzie znane są wartości odkształceń i naprężeń, natomiast poszukiwana jest wartość modułu sprężystości $E_c(t)$. W tym przypadku wielkość ta nie jest już charakterystyką materiałową, a raczej parametrem opisującym sprężystość elementu konstrukcji.

Przebieg zależności $E_c(t)$ dla wybranych dwóch punktów pomiarowych przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Wartości odkształceń z poszczególnych czujników uśredniono. Prezentowane pomiary wykonywano w okresie pięciu miesięcy, od 7 sierpnia do 28 grudnia 2011 roku. W chwili rozpoczęcia pomiarów wiek betonu wynosił około 20 miesięcy.

Zależności uzyskane z pomiarów w pozostałych punktach pomiarowych (porównaj rysunek 3) miały bardzo podobny przebieg, tzn. spadki wartości modułu sprężystości w czasie, a zatem kształty wykresów, były do siebie zbliżone.

W tabelicy 1 zestawiono zmierzone wartości odkształceń, naprężeń oraz obliczony na ich podstawie moduł sprężystości w punkcie E w wybranym czasie. Analizując wyniki pomiarów należy zwrócić uwagę na spadek wartości naprężeń w czasie oraz wzrost

The plots with the changes of concrete elastic modulus presented in Figs. 6 and 7 were estimated for the element that was loaded for over two years (in October 2009 the pylon concreting started). The stresses at the pylon base during the construction process increased to reach the value between 10 and 20 MPa, depending on the location of the measuring point. To estimate the value of the elastic modulus which would be probably for concrete at the beginning of pylon erection, the relationships for effective elastic modulus were used (1). Fig. 8 shows the value of elastic modulus in three analysed moments of time, depending on loading time t_0 , and Fig. 9 – the influence of three selected periods of load application on the elastic modulus over time t .

These plots do not yet include the impact of reinforcement on the effective modulus of elasticity. The cross-section of the pylon at the level of foundation upper surface was reinforced with ten I-beam HEB 320 and 520 bars of diameter of 32 mm. The ratio of the steel surface area to the cross-sectional area of the whole pylon arm is 2 %.

It is obvious that in the vicinity of the section edge the effect of reinforcement on stiffness is considerably higher than in the centre of gravity. Taking reinforcement into account the equivalent modulus for cross-section could be estimated to be 40.7 GPa.

Knowing the ranges of effective elastic modulus E_{eff} and its relationship with secant modulus E_{cm} , the corresponding ranges of probable "standard" values of E_{eff} can be determined - tab. 2. The estimated results should be treated with caution due to significant simplifications adopted in (1) while determining of the creep coefficient. The results presented in the table below were determined using the elastic modulus of equivalent cross section.

The values obtained from the measurements of elastic modulus at points A and E are at the level of 28 to 35 GPa. The effective modulus estimated theoretically for two years with the assumption of loading time of one year fits this range. It can therefore be assumed that despite the rough assumptions made in the standard (1), which are used to estimate a simple relationship between stress and strain in concrete element, the effective modulus obtained from measurements of strain and "stress" in the real structure is

odkształceń powodujących ścisnienie. Zjawisko to wynika zapewne z wpływu właściwości reologicznych betonu (przyrost odkształceń) i wynikającego stąd przekazania sił (naprężeń) na pręty zbrojeniowe (spadek naprężeń).

Krzywe zmian modułu sprężystości betonu prezentowane na rysunkach 6 i 7 zostały sporządzone dla rozpatrywanego przekroju, który obciążony był przez ponad dwa lata (w październiku 2009 roku rozpoczęto betonowanie pylonu). Naprężenia w podstawie pylonu narastały w czasie wraz ze wznoszeniem mostu, by osiągnąć wartość między 10 a 20 MPa w zależności od położenia punktu pomiarowego. Aby oszacować wartość modułu sprężystości jaką mógłby mieć beton w konstrukcji na początku wznoszenia pylonu, posłużono się zależnościami pozwalającymi wyznaczyć efektywny moduł sprężystości (1). Na rysunku 8 pokazano wpływ wieku betonu t_0 w chwili przyłożenia obciążenia na wartość modułu sprężystości w czasie t , a na rysunku 9 – wartość modułu sprężystości w trzech analizowanych okresach w zależności od wieku betonu w chwili przyłożenia obciążenia t_0 .

Omawiane krzywe nie uwzględniają jeszcze wpływu zbrojenia na efektywny moduł sprężystości. Przekrój poprzeczny pylonu w poziomie górnej powierzchni fundamentu został wzmocniony 10 dwuteownikami HEB 320 oraz 520 prętami o średnicy 32 mm. Stosunek pola powierzchni elementów stalowych do pola powierzchni przekroju poprzecznego dla jednej gałęzi pylonu wynosi 2%. Oczywiście jest, że w sąsiedztwie krawędzi przekroju, wpływ zbrojenia na sztywność betonu będzie znacznie większy niż w środku ciężkości. Uwzględnienie zbrojenia pozwoliło oszacować sprowadzony moduł sprężystości przekroju żelbetowego na poziomie 40,7 GPa.

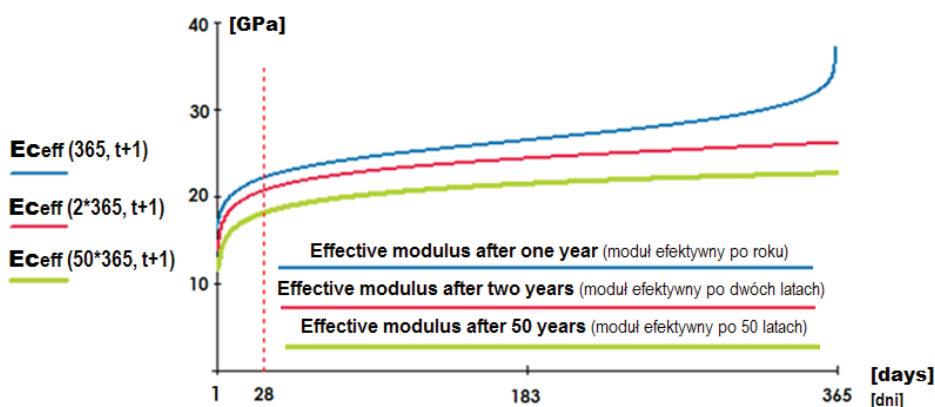
Znając przedziały wartości efektywnego modułu sprężystości $E_{c,eff}$ oraz relację, jaka wiąże go z modułem średnim E_{cm} , możemy okre-

Tablica 1 / Table 1

ODKSZTAŁCENIA, NAPRĘŻENIA I MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI BETONU W PUNKCIE E W WYBRANYCH OKRESACH

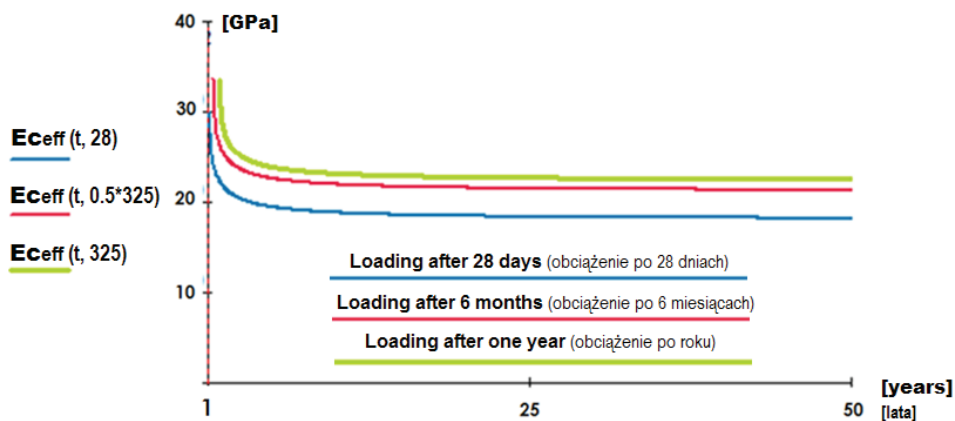
THE VALUES OF STRAIN, STRESS AND ELASTIC MODULUS AT POINT E IN SELECTED MOMENTS OF TIME

Data i godzina pomiaru Date and time of measurement	Średnie odkształcenia Average strains, $\times 10^{-6}$	Naprężenia Stress, MPa	Moduł sprężystości Elastic modulus, GPa
2011-08-07 13:20	-294.6	-9.8	33.3
2011-09-15 13:40	-281.8	-8.9	31.4
2011-10-15 13:40	-296.6	-8.7	29.3
2011-11-15 13:40	-296.1	-8.3	28.0
2011-12-15 13:40	-309.8	-8.5	27.5



Rys. 8. Efektywny moduł sprężystości w trzech rozpatrywanych okresach (1 rok, 2 lata i 50 lat) w zależności od wieku betonu w chwili obciążenia (1-365 dni)

Fig. 8. Effective elastic modulus in three analysed periods (one year, 2 years and 50 years) depending on the age of concrete at the time of loading (0-365 days)



Rys. 9. Efektywny moduł sprężystości dla różnego wieku betonu w chwili obciążenia (28 dni, 6 miesięcy i 1 rok) w zależności od czasu (0-50 lat)

Fig. 9. Effective elastic modulus for different concrete ages at the time of loading (28 days, 6 months and one year) depending on time (0-50 years)

close to the value calculated using standard formulas. Therefore, it will be important to carry out further observation of strain and "stress" changes in concrete. It is expected that with the progress

ślić odpowiadające przedziały prawdopodobnych wartości „normowego” modułu E_{cm} – tablica 2. Uzyskane oszacowania należy jednak traktować ostrożnie ze względu na znaczne uproszczenia przyjęte w (1) dla wyznaczenia współczynnika pełzania betonu. Wyniki zaprezentowane w poniższej tabeli wyznaczono przy wykorzystaniu modułu sprężystości przekroju sprowadzonego.

Wartości uzyskanego z pomiaru modułu sprężystości w analizowanych punktach pomiarowych pylonu kształtują się na poziomie 28 do 35 GPa. Oszacowany teoretycznie moduł efektywny dla wieku betonu wynoszącego 2 lata, przy założeniu obciążenia przyłożonego po roku, wpisuje się w ten przedział. Można zatem przyjąć, że pomimo zgrubnych założeń przyjętych w normie (1) służących wyznaczeniu prostej zależności pomiędzy naprężeniem, a odkształceniem w elemencie betonowym, wartość efektywnego modułu sprężystości uzyskana na podstawie rocznych pomiarów odkształceń i „naprężeń” w rzeczywistym elemencie jest zbliżona do wartości obliczonej przy zastosowaniu wzorów normowych. Istotne będzie zatem prowadzenie dalszych obserwacji zmian odkształceń i „naprężeń” betonu w czasie. Należy spodziewać się, że wraz z postępem pełzania obserwowane będzie dalsze odprężanie betonu i wzrost wyężenia prętów zbrojeniowych.

5. Podsumowanie

Do określania modułu sprężystości stanowiącego cechę betonu w danym elemencie konstrukcji można efektywnie wykorzystywać urządzenia do prowadzenia ciągłych pomiarów realizowanych in situ. Należy jednak wcześniej tak zaprojektować sposób prowadzenia tych pomiarów, by możliwe było uzyskiwanie zmian wartości odkształceń i „naprężeń” w czasie w jednym punkcie pomiarowym. Zamieszczone w artykule wyniki pomiarów czujnikami strunowymi zabetonowanymi wewnątrz dolnej części pylonu Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu umożliwiły oszacowanie wartości modułu sprężystości elementu konstrukcji przy uwzględnieniu wpływu pełzania, złożonego stanu naprężenia, zbrojenia oraz innych czynników (wilgotności, temperatury itp.). Spadek wartości modułu w czasie świadczy o ujawnianiu się wpływu zjawisk reologicznych i wynikającego stąd wzrostu udziału stali zbrojeniowej w przenoszeniu obciążeń. Uzyskano stosunkowo dobrą zgodność oszacowania wstecz sprowadzonego modułu sprężystości przy wykorzystaniu wyników pomiarów i wzorów normowych (1).

Wartość modułu sprężystości zwyczajowo podawana jest w normach jako cecha zależna od klasy wytrzymałości betonu. Badania wykonywane na próbkach pobranych podczas betonowania oraz z istniejących konstrukcji wskazują na różnice między wartościami doświadczalnymi, a zalecanymi (3, 5). Zasadnym zatem jest, aby w przypadku konstrukcji, dla których znajomość wartości modułu sprężystości jest szczególnie ważna (np. stropy o dużych rozpiętościach, konstrukcje sprężone, elementy masywne, konstrukcje poddane wpływom dynamicznym itp.), cecha ta była indywidualnie określana w ramach standardowo przeprowadzanej kontroli jakości betonu. Należy jednak pamiętać, że wyniki badań uzyskiwane będą w próbie jednoosiowego ściskania, a w rzeczywistości beton

Tablica 2 / Table 2

EFEKTYWNE MODUŁY SPRĘŻYSTOŚCI BETONU DLA PRZEKROJU SPROWADZONEGO W WYBRANYM WIEKU BETONU t W ZALEŻNOŚCI OD WIEKU BETONU W CHWILI OBCIĄŻENIA t_0

THE VALUES OF EFFECTIVE ELASTIC MODULUS FOR EQUIVALENT CROSS SECTION AT SELECTED PERIOD t (AGE OF CONCRETE) DEPENDING ON THE AGE OF CONCRETE AT THE TIME OF LOADING t_0

Analizowany wiek betonu: Analysed age of concrete:	1 rok 1 year	2 lata 2 years	50 lat 50 years
GPa	$E_{c,eff}$	$E_{c,eff}$	$E_{c,eff}$
Obciążenie po 28 dniach Loading after 28 days	24.1	22.6	19.8
Obciążenie po pół roku Loading after half a year	28.8	26.5	23.4
Obciążenie po roku Loading after one year	40.7	28.5	24.7
Obciążenie po dwóch latach Loading after two years	-	40.7	26.0

of creep, concrete will become unstressed while steel bars effort will increase gradually.

5. Summary

To determine the elastic modulus which is a characteristic of a specific structure element Structural Health Monitoring can be used. However, the measuring procedure should be designed in a way that would enable to obtain the changes of stress and strain over time in one measurement point. The measurements results obtained from the sensors concreted inside the base of the pylon of Rędziański Bridge in Wrocław, presented in this paper, made it possible to estimate the elastic modulus for the structure element. The following were taken into account: the effect of creep, complex state of stress, reinforcement and other factors (humidity, temperature, etc.). The decrease in the modulus value proves the effect of rheological phenomena and the resulting increase in reinforcing steel contribution in loads transfer. A relatively good agreement of the elastic modulus estimation was obtained by using the measuring results and procedure as in (1).

The value of this quantity is normally introduced in the standards as a characteristic dependent on the concrete class. Studies carried out on samples taken during concreting and from existing structures indicate a difference between the experimental and recommended values. It is therefore justified in the case of structures for which the value of elastic modulus is particularly important (e.g. large-span roofs, prestressed structures, massive elements, structures subjected to dynamic loads, etc.), to their individual determination basing on concrete samples. However, the test results will be obtained from uniaxial compression, while actually the concrete will work in a complex state of stress and interact with reinforcement.

będzie pracować w złożonym stanie naprężenia i współpracować ze stałą zbrojenią.

Obserwacje wskazań układu pomiarowego prowadzone będą dalej przez okres kilkudziesięciu lat. Możliwe będzie zatem wykonywanie dalszych analiz pracy rzeczywistej, silnie zbrojonej, masywnej, żelbetowej konstrukcji pylonu jednego z największych mostów podwieszonych w Europie. Wydaje się celowym podjęcie analogicznych badań w odniesieniu do elementów wykonanych z betonu wysokowartościowego. Możliwe byłoby wówczas zweryfikowanie stosowanych obecnie zależności σ - ε (8) również dla tego materiału.

Observations of SHM indications will continue over the next decades. It will be possible to perform further analyses of the work of a real, heavily reinforced, massive, concrete pylon, an element of one of the largest cable-stayed bridges in Europe. It seems reasonable to carry out analogical studies on elements made of high-strength concrete. It would be possible to verify the relationships σ - ε , used at present (6) also for this material.

Literatura / References

1. PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
2. PN-EN 12390-13:2014, Badania betonu, Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu.
3. W. Piasta, W. Budzyński, J. Góra, Wpływ rodzaju kruszywa grubego na odkształcalność betonów zwykłych, *Przegląd Budowlany*, nr 7-8 (2012).
4. A. Seruga, S. Kańka, T. Lisowicz, Moduł sprężystości betonów na kruszywie granitowym w świetle badań doświadczalnych, *Czasopismo Techniczne*, 21, **109**, 4-B (2012).
5. R. D. J. M. Steenbergen, A. H. J. M. Vervuurt, Determining the in situ concrete strength of existing structures for assessing their structural safety, *Structural Concrete*, **13**, 1 (2012).
6. W. Barcik, R. Sieńko, J. Biliszczyk, System monitorowania konstrukcji mostu Rędziańskiego we Wrocławiu, *Wrocławskie Dni Mostowe, Aktualne realizacje mostowe*, Wrocław, 24-25 listopada 2011.
7. Ł. Bednarski, R. Sieńko, Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi, *Inżynieria i Budownictwo*, 11, str. 615-619 (2013).
8. N. Al-Omaishi, M. K. Tadros, S. J. Seguirant, Elasticity modulus, shrinkage, and creep of high-strength concrete as adopted by AASHTO, *PCI Journal*, Summer 2009.