

Badania pełzania dojrzewającego betonu poddanego naprężeniom ścis kującym i rozciągającym

Research of concrete creep at early age under compressive and tensile stresses

1. Wprowadzenie

Emborg (1) dokonał bardzo pozytycznego przeglądu różnych czynników mających wpływ na pełzanie młodego betonu i różnorodność proponowanych modeli obliczeniowych. Według niektórych autorów [Morimoto i Koyangi (2), Umhera i in. (3), Westman (4)] pełzanie młodego betonu jest jedną z najważniejszych właściwości, uwzględnianych w analizie naprężeń termicznych. Pomijając odkształcenia pełzania w pełni skrępowanych konstrukcjach betonowych zarysowanie betonu nastąpi przy spadku temperatury o około 10°C. Wiarygodność i niezawodność takiej analizy zależy w dużym stopniu od dokładności przyjętego modelu opisującego rzeczywiste zachowanie się młodego betonu. Wyniki wielu prac badawczych wykazują, że do poziomu naprężzeń (0.4÷0.6) f_c odkształcenia pełzania zależą liniowo od naprężenia, podczas gdy przy większych obciążeniach odkształcenie opóźnione jest nieliniowe [Bažant i Kim (5)]. Tak zwane nieliniowe pełzanie spowodowane jest wzrostem uszkodzeń i mikrozarysowań w konstrukcyjnym betonie. Odkształcenie pełzania nie jest w pełni odwracalne. Nieodwracalne odkształcenie odnosi się także do zmian w konstrukcji podczas dojrzewania betonu, której pełny powrót do stanu wyjściowego jest ograniczony przez zachodzący proces hydratacji cementu. Według Emborga (1) czynniki wpływające na sprężystość i pełzanie betonu można podzielić następująco:

- czynniki wewnętrzne: wytrzymałość, rodzaj cementu i kruszywa [Ishtiaq i Roy (6)], moduł sprężystości kruszywa, frakcje kruszywa,
- czynniki zewnętrzne: wiek betonu w chwili obciążenia, czas obciążenia, rodzaj obciążenia [ściskanie lub rozciąganie], większy poziom obciążenia [efekty nieliniowe], temperatura, rozmiar elementu, wilgotność.

W przypadku młodego betonu pełzanie jest bardzo złożonym zjawiskiem i nie jest jeszcze w pełni rozpoznane. Zjawisko to ma miejsce, gdy beton poddany jest długotrwałemu naprężeniu powodującemu stopniowe odkształcenie w czasie, obejmujące lepkie płynięcie i opóźnione odkształcenia sprężyste. Ponadto wpływ na pełzanie ma dojrzałość betonu w chwili przyłożenia

1. Introduction

Emborg (1) elaborated an useful overview of different factors influencing the concrete creep at early age and variety of proposed models as well. Concrete creep at early age is one of the most important parameters in the analysis of thermal stress [Morimoto, Koyangi (2); Umhera et al. (3); Westman (4)]. Apart from viscous strains the cracks in fully confined concrete structures will appear when the concrete temperature decreases about 10°C. Credibility and reliability of such analysis depends significantly on accuracy of adopted model in describing the real behaviour of concrete at early age. Many studies indicate that to the stress level of concrete up to about (0.4÷0.6) f_c , the creep strains are a linear function of stress, while at higher loads, the delayed strain is characterized by non-linearity [Bažant, Kim (5)]. So-called non-linear creep is caused by increase of damage and micro-cracks in concrete structures. Creep strain is not fully reversible. The irreversible strain is also related to structural changes during hardening of concrete, in which a full return to the original state is limited by the ongoing process of cement hydration. Factors affecting elasticity and creep of concrete can be divided as follows [Emborg (1)]:

- internal factors: strength, type of cement and aggregate [Ish-tiaq and Roy (6)], aggregate modulus of elasticity, aggregate fractions,
- external factors: concrete age of loading, time of loading, the type of load [compressive or tensile], higher levels of load [nonlinear effects], temperature, size of element, humidity.

In the case of concrete at early age the creep presents a very complicated phenomenon, so far not fully understood. This process takes place when concrete is subjected to long-term stress and it is revealed as a gradual deformation in time, e.g. the viscous flow and the delayed elastic deformation. Moreover, it is influenced by the maturity of concrete when the load was first applied and it strongly depends on the magnitude and duration of the loading. In the case of concrete at early age these factors influence the final creep strain much stronger than after concrete hardening. Also the ambient temperature, the dimensions of element and the com-

pierwszego obciążenia i w dużym stopniu zależy od wielkości obciążenia i czasu jego trwania. W przypadku młodego betonu czynniki te w większym stopniu wpływają na wielkość końcowego odkształcenia pełzania niż w przypadku betonu stwardniałego. Na wielkość końcowego pełzania wpływa również temperatura otoczenia, wymiary elementu i skład mieszanek betonowej. W betonie obciążonym podczas twardnienia, tylko zhydratyzowany cement przenosi obciążenie. Narastający w sposób ciągły żel cementowy w stanie zerowych naprężeń przejmuje w późniejszym czasie część obciążenia. Zjawisko to powoduje spadek naprężeń w betonie wraz ze wzrostem pełzania. W wyniku ciągłych zmian właściwości betonu, modelowanie pełzania w młodym twardniejącym betonie jest znacznie bardziej skomplikowane i nie może uwzględniać czynników mających wpływ na to zjawisko, z odpowiednią dokładnością [Paulini i Gratl (7), Ohshita, Ishikawa, Tanabe (8)].

Van Breugel (9) przeprowadził porównanie odkształceń pełzania w dojrzewającej próbce betonu z jej odkształceniem, przy czym w próbce tej po obciążeniu nie zachodził proces hydratacji.

W przypadku młodego betonu wpływ temperatury jest dwójaki. Wyższa temperatura przyspiesza pełzanie, ale jednocześnie przyspiesza proces hydratacji i pośrednio wpływa na zmniejszenie pełzania.

W numerycznych modelach sprężysto-lepkie właściwości betonu często przedstawia się za pomocą modelu Kelvina-Voigta lub Maxwella, to znaczy odpowiednio połączonych sprężyn i tłumików. W praktyce inżynierskiej zjawisko to jest opisane za pomocą współczynnika pełzania i modułu sprężystości, albo odpowiedniej funkcji pełzania. W pierwszym przypadku całkowite odkształcenie musi być podzielone na odkształcenie sprężyste i odkształcenie pełzania, według następującego wyrażenia [Kieroński (10)]:

$$\varepsilon_{tot}(t, f) = \frac{\sigma(f)}{E(f)} + \varphi(t, f) \frac{\sigma(f)}{E(f)} \quad [1]$$

gdzie: $\varphi(t, f)$ – współczynnik pełzania, t' – czas obciążenia, t – rozważany wiek betonu, $\sigma(f)$ – naprężenia przyłożone w czasie t' , $E(f)$ – moduł sprężystości w czasie t' .

Stosując kolejne uproszczenie, wpływ pełzania przy stałym obciążeniu można określić stosując efektywny moduł sprężystości, to jest odpowiedni moduł styczny, a mianowicie:

$$E_{eff}(t) = \frac{E_{\sigma}(t)}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad [2]$$

W przypadku zmian temperatury naprężenia w konstrukcji występują w ciągu całego procesu dojrzewania betonu [Gutschi i Rostásy (11), Laube (12)]. Ponadto w przypadku bardzo młodego betonu zjawisko pełzania jest znacznie większe niż w przypadku stwardniałego betonu, którego wiek wynosi na przykład 28 dni (13). Ponieważ pełzanie powoduje częściowe zmniejszenie naprężeń ścisających lub rozciągających, ważne znaczenie ma uwzględnienie tego zjawiska w obliczeniach konstrukcji betonowych, we wczesnym okresie dojrzewania betonu.

position of concrete significantly influence the final creep. When concrete is loaded during its hydration, only hydrated components will carry the load. Cement gel content continuously increasing in the state of zero stress will later carry some parts of a load. This phenomenon causes the stresses in concrete decrease, with the increase of creep as well. Due to continuously changing concrete parameters, modeling of creep during concrete hardening at early age is much more difficult [Paulini, Gratl (7), Ohshita, Ishikawa, Tanabe (8)] and it could not take into account factors influencing this phenomenon with suitable accuracy.

Van Breugel (9) compared the creep strains in the hardening sample with a sample in which after loading the hydration process did not occur. In the case of concrete at early age temperature effect is double. High temperature increases concrete creep, but also accelerates the hydration process and indirectly influences the creep reduction.

In numerical models of viscoelastic concrete properties the Kelvin-Voigt or Maxwell model is often applied by suitably connected springs and dampers. In the engineering practice this phenomenon is described by creep coefficient and modulus of elasticity or by creep suitable function. In the first case the total strain must be divided into the elastic strain and creep strain according to the following expression [Kieroński (10)]:

$$\varepsilon_{tot}(t, f) = \frac{\sigma(f)}{E(f)} + \varphi(t, f) \frac{\sigma(f)}{E(f)} \quad [1]$$

where: $\varphi(t, f)$ – creep coefficient, t' – time of loading, t – time under consideration, $\sigma(f)$ – stresses applied at time t' , $E(f)$ – Young modulus at time t' .

As the result of following simplification the effect of creep under permanent load may be evaluated using an effective modulus and it is related to tangent modulus according to the following expression:

$$E_{eff}(t) = \frac{E_{\sigma}(t)}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad [2]$$

In the case of temperature changes during the hardening process stresses occur in the structure during the whole process of concrete hardening [Gutsch, Rostásy (11), Laube (12)]. Moreover, in the case of concrete at early age the creep phenomenon is much higher than in the case of hardened concrete, for instance at the age of 28 days (13). Because the creep provided some decrease of sustained compressive or tensile stresses, it is important to take this phenomenon into account during calculation of concrete structure at early age.

In Eurocode 2 Part 1 (13) there is an information that this method of calculation of $E_{eff}(t)$ compared to the computerized data bank of laboratory test results, gives the mean coefficient of variation of the order 20%. In the case of concrete at early age, when $t \leq 3$ days, this mean coefficient of variation will be much higher. In this approach a problem of the accurate identification of the suitable elastic modulus appears, because it is dependent on load rate,

W Eurokodzie 2 Część 1 (13) podana jest informacja, z której wynika, że obliczanie modułu sprężystości daje wyniki różniące się od wyników zgromadzonych w banku danych z badań laboratoryjnych, ze średnim współczynnikiem zmienności rzędu 20%. W przypadku bardzo młodego betonu gdy $t \leq 3$ dni, ten średni współczynnik zmienności będzie znacznie większy. W podjętych rozważaniach występuje problem dokładnego określenia odpowiedniego modułu sprężystości, ponieważ zależy on od szybkości wzrostu obciążenia, podczas którego zachodzi pełzanie betonu. Z tego też względu moduł sprężystości zależy od przyjętego poziomu odkształceń sprężystych i odkształceń pełzania. Wpływ ten jest większy w przypadku młodego betonu. Odkształcenie pełzania betonu $\varepsilon_c(t, t_0)$ w czasie t przy stałych naprężeniach ściskających σ_c , przyłożonych w wieku betonu t_0 , oblicza się stosując następujące wyrażenie:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c} \quad [3]$$

Pełzanie wzrasta z czasem trwania obciążenia i jego wielkością, ze wzrostem wilgotności betonu, ze zmniejszeniem jego wytrzymałości oraz miarodajnego wymiaru przekroju elementu (h_o), jak również ze spadkiem klasy cementu (13).

W drugim przypadku, dzięki stwarzyszonej funkcji pełzania $J(t, t')$ całkowite odkształcenia $\varepsilon(t, t')$ są opisane za pomocą następującego wyrażenia:

$$\varepsilon(t, t') = J(t, t') \cdot \sigma(t) \quad [4]$$

Stwarzyszona funkcja pełzania może być wyrażona w zależności od współczynnika pełzania równaniem:

$$J(t, t') = \frac{1 + \varphi(t, t')}{E(t')} \quad [5]$$

Jedną z najbardziej znanych funkcji pełzania jest funkcja Double-Power Law [DPL prawo dwu-potęgowe], w której pełzanie jest opisane funkcją potową i odwróconą funkcją potową:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot (t - t')^n \quad [6]$$

W celu dokładniejszego opisania pełzania w długim okresie, funkcja [6] została rozwinięta przez Bažanta i Cherna (14) do funkcji zwanej Triple Power Law (TPL):

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot [(t - t')^n - B(t, t', n)] \quad [7]$$

W dalszej kolejności Emborg (15) uzupełnił TPL o dodatkowe funkcje $G(t')$ i $H(t, t')$, zwiększając jej dokładność dla bardzo wcześniego wieku, to jest $t < 1,5$ dni:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot [(t - t')^n - B(t, t', n)] + \frac{G(t)}{E_0} + \frac{H(t, t')}{E_0} \quad [8]$$

during which the concrete creep occurs. Therefore, the elastic modulus is dependent on the adopted division of elastic and creep strains. This effect is higher in the case of concrete at early age. The creep strain of concrete $\varepsilon_c(t, t_0)$ at time t for a constant compressive stress σ_c applied at the concrete age t_0 , can be calculated using the following function:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c} \quad [3]$$

The creep increases with the duration and magnitude of loading, with concrete humidity increase, concrete strength decrease, nominal size of elements decrease (h_o) as well as with decrease of cement class (13).

In the second case, thanks to creep associated function $J(t, t')$ the total strains $\varepsilon(t, t')$ are described according to the following equation.

$$\varepsilon(t, t') = J(t, t') \cdot \sigma(t) \quad [4]$$

The creep associated function can be expressed depending on the creep coefficient by the formula:

$$J(t, t') = \frac{1 + \varphi(t, t')}{E(t')} \quad [5]$$

One of the best known creep function is that of Double-Power Law [DPL two-exponential law], in which creep is described by a power function and reverse power function:

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot (t - t')^n \quad [6]$$

To describe the creep with higher accuracy over a long period, the function [6] was developed by Bažant and Chern (14) to function called Triple Power Law (TPL):

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot [(t - t')^n - B(t, t', n)] \quad [7]$$

Subsequently, Emborg (15) supplemented TPL using additional functions $G(t')$ and $H(t, t')$ to increase the accuracy for a very early age, i.e. $t < 1.5$ days.

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} \cdot (t'^{-m} + \alpha) \cdot [(t - t')^n - B(t, t', n)] + \frac{G(t)}{E_0} + \frac{H(t, t')}{E_0} \quad [8]$$

where: $G(t')$ - describes time-dependent instantaneous strains (load duration 1.4 minutes), $H(t, t')$ - describes the increase of creep at an early period after load application.

Other authors [Dameron et al. (16); Lokhorst, Breugel (17), Rostásy, Gutsch, Laube (18)] were proposed more or less complicated model to describe concrete creep, or compare different models [Al-Manaseer et al. (19), Goel et al. (20)]: the ACI 209 model, the CEB 90 model, the B3 model and the GL 2000 model. Moreover, Salah et al. (21) tested the uniaxial confined concrete at early age

gdzie: $G(t')$ – opisuje zależne od czasu natychmiastowe odkształcenia (czas trwania obciążenia 1,4 minuty), $H(t,t')$ – opisuje wzrost pełzania we wczesnym okresie po przyłożeniu obciążenia.

Inni autorzy [Dameron i in. (16), Lokhorst i Breugel (17), Rostásy, Gutsch i Laube (18)] proponują bardziej lub mniej złożony model opisujący pełzanie betonu lub porównują inne modele [Al-Manaseer i in. (19), Goel i in. (20)]: ACI 209, CEB 90, B3 i GL 2000. Ponadto przeprowadzone przez Salah i in. (21) badania jednoosiowo skrępowanego młodego betonu, na próbkach potocznie zwanych „wioselkowymi”, pokazują złożoność pomiarów zachowania się betonu we wczesnym okresie dojrzewania. W pracy tej przedstawiono także liczne wyniki pomiarów i porównano z obliczeniami.

2. Badania pełzania

Zjawisko pełzania jest opisane w normach projektowych [Eurocode 2 (13)], jednak w odniesieniu do betonu dojrzałego. W przypadku bardzo młodego betonu normowe modele nie są przydatne. W celu oznaczenia potrzebnych właściwości betonów, z których wykonano ściany zbiorników, przeprowadzono badania pełzania młodego betonu obciążonego stałym naprężeniem ściskającym i rozciągającym. Badaniami objęto betony dwóch klas C20/25 i C30/37, których skład podano we wcześniejszej pracy jednego z autorów [Zych (22)]. Próbki zostały poddane bardzo wczesnym obciążeniom, spowodowanym zmiennym polem temperatury w rzeczywistej konstrukcji. Naprężenia ściskające pojawiają się w chwili wzrostu temperatury w wyniku hydratacji cementu, zatem już w pierwszym dniu po zabetonowaniu [Bernander i Gustafsson (23)]. Naprężenia rozciągające powstają w momencie znacznego spadku temperatury konstrukcji betonowej, a więc już kilka dni po jej wykonaniu. Wzrost właściwości mechanicznych betonu: modułu sprężystości, jak również wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przedstawiono w pracy jednego z autorów [Zych (22)]. Badanie przeprowadzono na betonowych elementach w formie walców o długości 1,2 m i średnicy 0,15 m. Czujnik strunowy do pomiaru odkształcenia betonu był zabetonowany w połowie długości próbki, dzięki czemu znajdował się w zakresie jednoosiowego stanu naprężenia [brak wpływu naprżeń brzegowych]. Elektroniczną rejestrację odkształceń prowadzono w podstawowym kroku 15 minut, natomiast podczas obciążania elementów częstotliwość rejestracji zwiększo do 1 minuty. Aby uzyskać podczas badań zmiany temperatury betonu zbliżone do temperatury wewnętrz konstrukcji (na przykład nawierzchni lub ściany), zastosowano twardą formę styropianową, o grubości 150 mm. Ponadto, taka izolacja cieplna zapewniła stosunkowo wolne zmiany temperatury w jądrze elementu betonowego, jak również zbliżoną temperaturę w poprzecznym przekroju próbki, a także radykalnie zmniejszyła wpływ zmian temperatury otoczenia. Aby wykluczyć przepływy wilgoci z badanych elementów do wewnętrznych powierzchni form styropianowych, przyklejono na nich folię.

Łącznie wykonano 9 jednakowych elementów betonowych, z których po 3 przeznaczono na badania pełzania przy ściskaniu i rozciąganiu, a pozostałe 3 były świadkami. Do badania pełzania przy

usually so-called “dog-bond” samples and show the complexity of measurements of concrete behavior at early age. They are also presented the results of measurements and compared them with calculations.

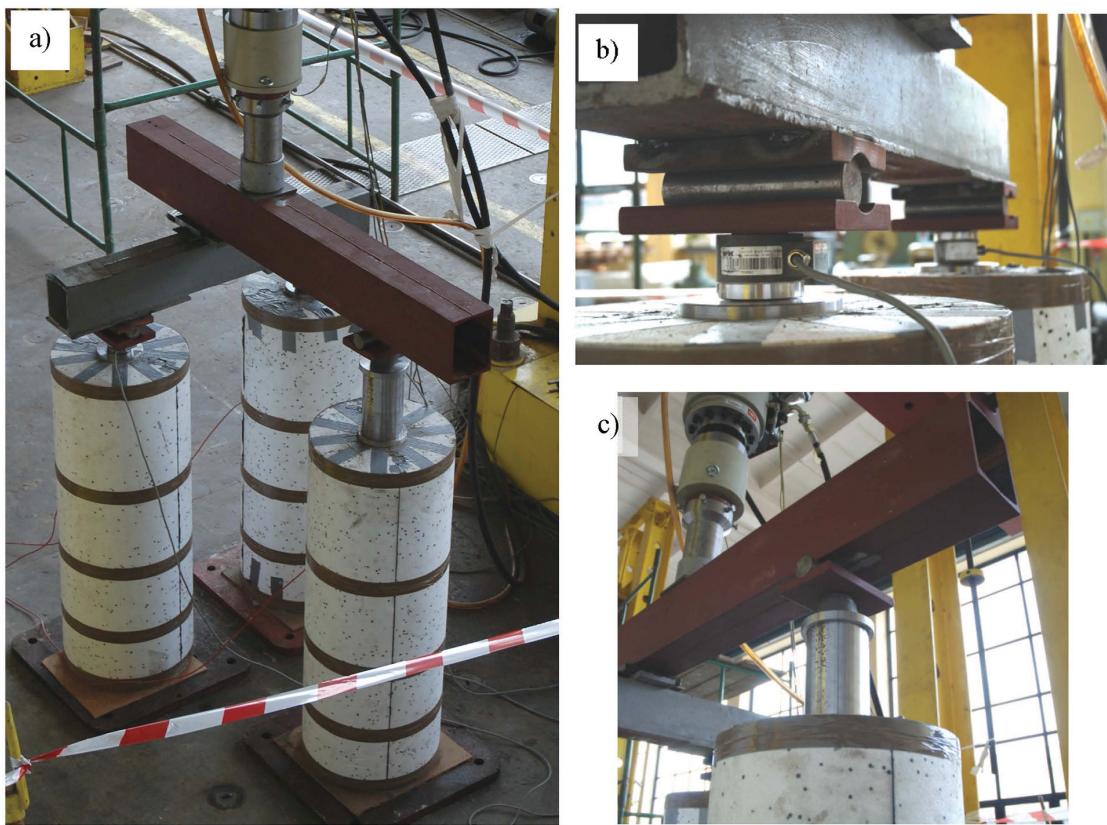
2. Creep test

The creep phenomenon is described in design codes [Eurocode 2 (13)], but in relation to mature concrete. In the case of concrete at early age these codes are not useful. Therefore, to obtain necessary parameters of concretes which were used in executing the tank walls, concrete at very early age under constant compressive and tensile stresses, were tested. These researches were performed for two classes concretes: C20/25 and C30/37, whose composition were presented in earlier work [Zych (22)]. The elements were loaded at the very early age, caused by changeable temperature field in real concrete structure. The compressive stresses appeared during the temperature increase caused by heat of cement hydration, therefore in the first day after casting [Bernander and Gustafsson (23)]. The tensile stresses appeared with the concrete structure temperature significant decrease, which occurred a few days after its casting. The development of the mechanical concrete properties: the modulus of elasticity, as well as compressive and tensile strength was presented in the earlier work [Zych (22)].

Concrete elements of 1.2 m length and 0.15 m diameter were tested. The vibrating wire strain gauges were concreted in the middle of the samples length, thus in one direction state of stress was located [lack of boundary stresses influence]. Electronic registration of strains was repeated with frequency of 15 min a step, however, during loading the step of registration was increased to 1 min. To achieve during the test the temperature changes in concrete similar to the temperature inside the structure (for instance pavement or wall), the 150 mm polystyrene form was applied. Moreover, such isolation secured relatively slow temperature changes in the core of element, uniform temperature in the cross-section of the sample and to a significant degree reduced cyclic changes caused by ambient temperature was assured. To exclude moisture flow from tested elements, the foil was stuck to the inside surface of the polystyrene forms.

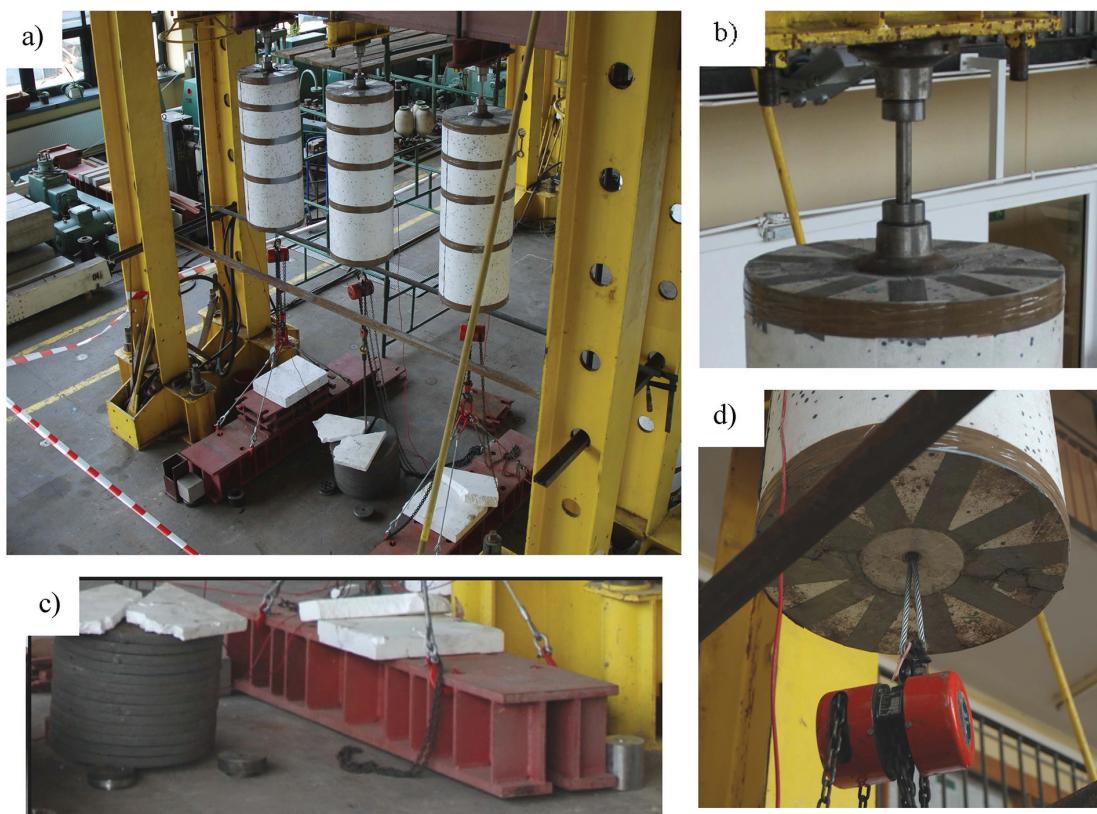
Finally nine identical concrete elements were casted. Three of them were designed for creep test under compression, three under tension and the last three as reference elements. To perform creep test under constant compressive force the Instron-Schenck machine was used. Thanks to transversely positioned of steel beam with additional bearing system it was possible to obtain uniform loading on each element [Fig. 1a]. During this test the forces acting on each element were recorded by force gauges located at the top of each sample [Fig. 1b,c].

The creep tests under constant tensile stress is rarely executed [Domone (24)] because there are big technological problems, especially in case of concrete at early age [Salah et al. (21)]. In



Rys. 1. a) Stanowisko do badania pełzania betonu przy stałym naprężeniu ściskającym; b), c) układ łożysk i siłomierzy

Fig. 1. a) The stand for concrete creep test under constant compressive stresses b, c) the system of bearing and forces gauges



Rys. 2. a) Stanowisko do badania pełzania przy stałym naprężeniu rozciągającym, b) przegubowe połączenie u góry, c) podwieszone obciążniki, d) przegubowe połączenie w dolnej części stanowiska

Fig. 2. a) The stand for concrete creep test under constant tensile stress, b) hinge connection at the top, c) hanged steel ballast, d) hinge connection at the bottom

stałej sile ściskającej zastosowano maszynę wytrzymałościową Instron-Schenck. Dzięki poprzecznemu ułożeniu stalowych trawersów z odpowiednim układem łożysk, możliwe było otrzymanie równomiernego obciążenia poszczególnych elementów [rysunek 1a]. Podczas obciążania rejestrowano cały czas siły przekazywane na poszczególne elementy betonowe, stosując siłomierze usytuowane na ich górnej powierzchni [rysunki 1b,c].

Badanie pełzania przy stałym naprężeniu rozciągającym jest rzadziej przeprowadzane ze względu na duże problemy technologiczne [Domone (24)], zwłaszcza na kilkudniowym betonie [Salah i in. (21)]. W niniejszej pracy elementy zostały podwieszone na stalowej ramie [rysunek 2a], a stałe naprężenia rozciągające zostały wywołane przez podwieszenie do tych elementów stalowych obciążników, ze względu bezpieczeństwa kilka centymetrów nad posadzką [rysunek 2c]. Górnny i dolny koniec badanych elementów zostały połączone przegubowo [rysunki 2b i d].

2.1. Beton klasy C30/37

Podczas całego okresu prowadzonych pomiarów, to jest od chwili zabetonowania elementów do zakończenia ich obciążania, mierzono temperaturę we wszystkich 9 elementach [rysunek 3]. Temperaturę mierzono dokładnie w połowie bazy czujnika do pomiaru odkształceń betonu. Można zauważyć, że różnice temperatur we wszystkich próbkach, w całym okresie pomiarowym, zawierają się w przedziale około 1°C. Z pewnością pewien niewielki wpływ na te różnice miały różne warunki brzegowe elementów ściskanych, rozciąganych i świadków. Ponadto, biorąc pod uwagę błąd pomiaru, wynikający z dokładności czujników pomiaru temperatury, można uznać otrzymane wyniki za bardzo dobre. Nie znaczy to jednak, że nawet niewielkie różnice temperatury nie będą miały wpływu na dokładność otrzymanych wyników.

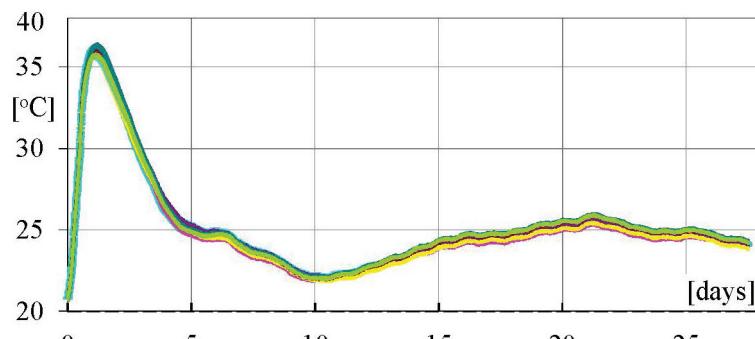
Trzy z tych elementów poddano naprężeniom ściskającym w bardzo wcześnieym okresie dojrzewania betonu, to jest 18 godzin po zabetonowaniu, co wynikało z wieku betonu w jakim powstają naprężenia ściskające w rzeczywistej konstrukcji. Elementy te obciążono siłami ściskającymi wywołując w nich bardzo małe naprężenia ściskające, wynoszące zaledwie 1,0 MPa. Taki mały poziom naprżeń może wystąpić w rzeczywistej konstrukcji podczas procesu dojrzewania betonu. Wytrzymałość betonu na ściskanie w tym momencie, badana na próbkach kostkowych, wynosiła 3,0 MPa. Podczas badań wystąpił problem z zapewnieniem ciągłej pracy maszyny obciążającej. Nastąpiły dwie przerwy w dostawie prądu. Pierwsza przerwa miała miejsce po 8, a druga po 16 dniach, po zabetonowaniu próbek. Po tych dwóch przerwach elementy ponownie obciążono trochę większą siłą, powodującą naprężenia na poziomie 7,4 MPa. Wytrzymałość betonu na ściskanie w tym momencie, zmierzona na próbkach kostkowych (15x15x15 cm) wynosiła 21,0 MPa. Rozkłady zmierzonych odkształceń betonu w tych elementach przedstawiono na rysunku 4a [3 krzywe odkształceń w zakresie ujemnym]. Wyniki te nie uwzględniają kompensacji wywołanej temperaturą czujników, jednak obejmują wszystkie składowe

this study the samples were hung on the steel frame [Fig. 2a] and constant tensile stresses were assured by hanging on them steel ballast [for security measure, only a few centimeters over the concrete floor as shown in Fig. 2c]. Both ends of the tested elements were hinged [Figs. 2b,d].

2.1. Concrete class C30/37

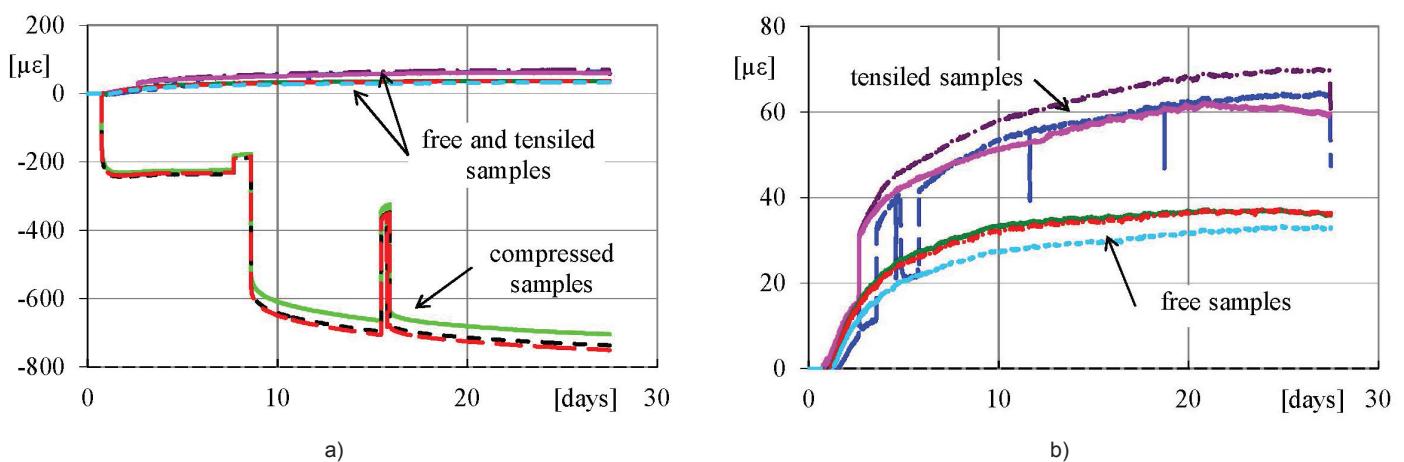
During the whole period of research, i.e. from the element concreting until the end of elements loading, the temperature was measured in all nine elements [Fig. 3]. The temperature was measured exactly in the middle of strain gauge. It can be observed that temperature differences for all samples in the whole measuring period, was in the range of about 1°C. Surely, different boundary conditions for compressed, tensioned and free elements had a certain small effect on this differences. If it will be taken into account the error caused by precision of temperature gauges, it can be concluded that these results are very good. But it does not mean that even small temperature differences would not decrease of accuracy of results obtained later.

Three of these elements were tested under compressive stress at very early age of concrete, i.e. 18 hours after casting and it was resulted from the age of concrete at which compressive stresses appeared in real structures. These elements were loaded with compressing forces which caused very low compressive stress, only just 1.0 MPa. Such stress level could appear in real structure during heating process. The concrete compressive strength simultaneously tested on cube was equal to 3.0 MPa. During the research it was a problem with continuity of machine functioning. Unfortunately, there appeared two brakes caused by lack of electricity supply; the first break was 8 and the second 16 days after concreting of elements. After these two breaks, the elements were again loaded with a little higher force which caused stresses at the level equal to 7.4 MPa. The concrete compressive strength simultaneously tested on cube (15x15x15 cm) was equal to 21.0 MPa. The changes of measured strains in these elements are presented in Fig. 4a [3 curves in negative range]. These results did not take into account the compensation resulted from gauges temperature, however, all components of strains during maturing of concrete, i.e. shrinkage and temperature of concrete are included.



Rys. 3. Zmiany temperatury we wszystkich dziewięciu elementach [beton C30/37]

Fig. 3. Temperature changes in all nine elements



Rys. 4. a) Przyrost zmierzonych odkształceń betonu w ściskanych elementach, b) przyrost zmierzonych odkształceń betonu w rozciąganych elementach oraz w świadkach

Fig. 4. a) Increase of measured concrete strains in compressed elements, b) increase of measured concrete strains in tensiled and reference elements

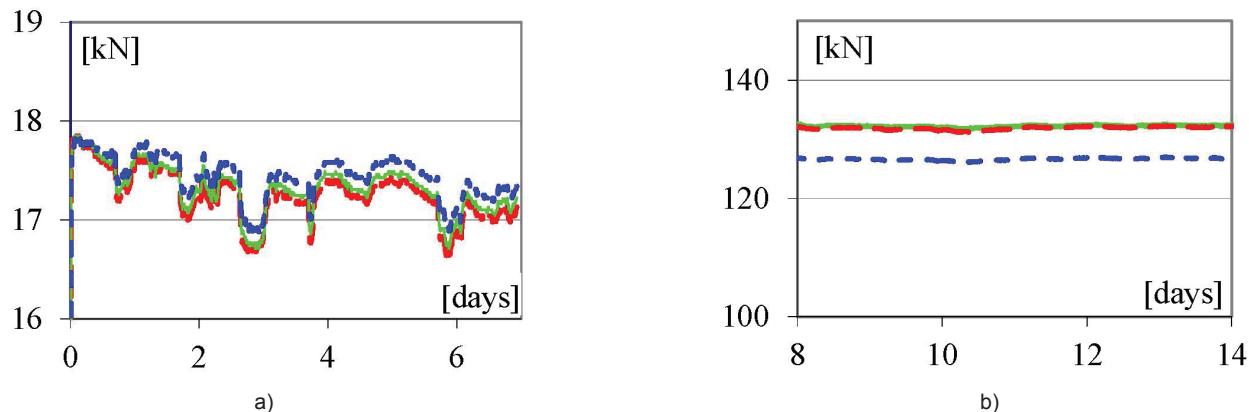
odkształcenia betonu podczas jego dojrzewania, to jest skurcz i temperaturę.

Trzy kolejne próbki poddano naprężeniom rozciągającym 65 h po zabetonowaniu. Czas obciążenia wynikał z okresu, w którym następuje spadek temperatury betonu w konstrukcji, jednak zmiany temperatury są już na tyle duże, że pojawiają się naprężenia rozciągające. Obciążenie ustalono na poziomie 0,36 MPa. Ponadto samo badanie było bardzo ryzykowne. Jeden element betonowy spadł nagle po kilku minutach w wyniku zerwania jego połączenia z górną metalową głowicą. Próbkę tę ponownie poddano obciążeniu, jednak przyjęty poziom naprężzeń wynosił 0,49 MPa. Zmiany odkształcenia betonu w trzech elementach referencyjnych [w zakresie do $40 \cdot 10^{-6}$] i zmiany odkształceń betonu w trzech elementach rozciąganych pokazano na rysunku 4b. Ze względu na to, że element nr 3 obciążono znacznie później, nie brano tych wyników pod uwagę przy obliczaniu średnich odkształceń rozciągających. Z tego też względu pomiary próbki nr 3 potraktowano tylko jako dodatkową informację o pełzaniu betonu obciążonego w późniejszym okresie i przy nieco wyższym poziomie naprężenia.

Jako początek pomiarów odkształceń w przypadku wszystkich

Three other samples were loaded by tensile stresses 65 hours after concreting. The time of loading was assessed based on the time at which the temperature in real structures decreases, but such temperature changes should be enough to cause tensile stresses. The loading was established at 0.36 MPa, but measurements themselves were hazardous. One of the sample fall down rapidly after few minutes, because the connection between concrete samples and metallic head failed. This sample was again loaded but the stress level was established at 0.49 MPa. The changes of concrete strains in three reference samples [up to level $40 \cdot 10^{-6}$] and changes of concrete strains in three tensiled samples are presented in Fig. 4b. Because sample no. 3 was loaded much later its measurements was not taken into account during calculation of the mean tensile strains. Therefore the results of element no. 3 provided only additional information of the creep for concrete loaded later and at the little higher level of stress.

The beginning of presented strains measurements, for all elements, was adopted as the beginning of external loading. Therefore in all Figs are introduced the strains equal to zero, before the external load applying. This assumption has no influence on the final results of measurements, i.e. strains caused only by external tensile and



Rys. 5. a) Siły ściskające przekazywane na elementy w pierwszej fazie pomiarów, b) siły ściskające przekazywane na elementy w drugiej fazie pomiarów

Fig. 5. a) The compressive forces imposed to elements in the first phase of experiment, b) the compressive forces imposed to elements in the second phase of experiment

elementów przyjęto czas przyłożenia zewnętrznego obciążenia. Z tego powodu na wszystkich rysunkach można zauważać odkształcenia równe zero przed przyłożeniem zewnętrznego obciążenia. To założenie nie wpływa na końcowe wyniki pomiarów, czyli odkształcenia wywołane tylko działaniem zewnętrznych rozciągających i ściskających obciążzeń, co było głównym celem prezentowanej pracy.

Siły ściskające, przekazywane na poszczególne elementy w okresie pierwszych 7 dni, czyli w pierwszej fazie pomiarów, pokazano na rysunku 5a. Dokładność ustawienia elementów zapewniająca równomierne przekazanie obciążenia była bardzo dobra [z różnicą nie większą niż 0,3 kN]. Przy ponownym obciążeniu do całkowitej siły 390 kN, dokładność ta niestety uległa pogorszeniu dla jednego z badanych elementów [rysunek 5b]. Różnice sił obciążających poszczególne elementy nie przekraczały 4%. Spowodowane to było nieznacznym przesunięciem punktu podparcia większego z trawersów.

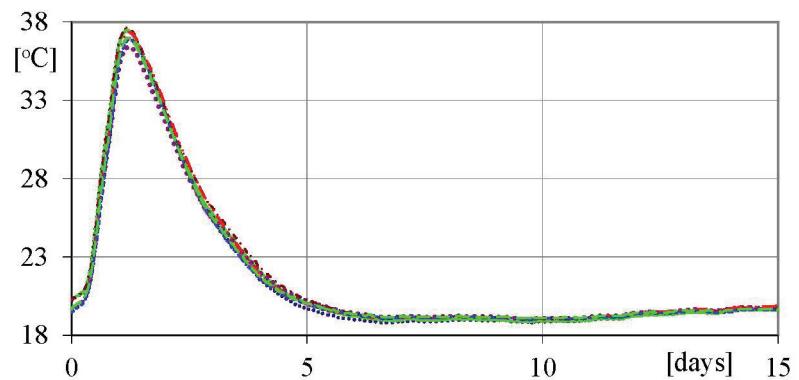
W celu obliczenia odkształceń wywołanych naprężeniami rozciągającymi i ściskającymi, stosowanymi w funkcji DPL, obliczono średnie wartości odkształceń trzech rozciąganych elementów, trzech świadków i dwóch ściskanych próbek. Następnie odjęto średnie wartości swobodnych odkształceń od średnich wartości odkształceń wywołanych naprężeniami rozciągającymi i ściskającymi, otrzymując w ten sposób tylko odkształcenia wywołane przez te obciążenia z wyłączeniem wpływu temperatury i skurcza [rysunki 9 a i b].

Oprócz zmian uśrednionych odkształceń dwóch elementów, na rysunku 9b pokazano również zmiany odkształceń próbki nr 3, spowodowanymi naprężeniami rozciągającymi. Pomimo, że próbka nr 3 była obciążona później w stosunku do dwóch pozostałych elementów, wykazała większe odkształcenia betonu ponieważ były one spowodowane wyższym poziomem naprężenia, wynoszącym 0,49 MPa.

2.2. Beton klasy C20/25

Analogicznie jak w przypadku betonu klasy C30/37 podczas całego cyklu prowadzonych badań prowadzono pomiary temperatury we wszystkich elementach [rysunek 6].

W tym przypadku skrajne różnice temperatur w różnych elementach były w zakresie 1,5°C. Z uwagi na niższą temperaturę początkową betonu i znacznie mniejszy jej przyrost w pierwszych 12 godzinach, a w konsekwencji niższy wzrost wytrzymałości, badanie ściskanych elementów rozpoczęto 40 godzin po zabetonowaniu. Elementy te poddano naprężeniom wynoszącym 3,05 MPa, zakładając poziom wytrzymałości 1/3 wytrzymałości betonu na ściskanie. Tym razem różnica w zarejestrowanych siłach ściskujących, przekazywanych na różne elementy była w zakresie 5%. Odkształcenia betonu zmierzone w tych elementach przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Zmiany temperatury we wszystkich dziewięciu elementach [beton C20/25]

Fig. 6. a) Temperature changes in all nine elements [concrete C20/25]

compressive loads, what is the main target of the presented work.

The compressive forces imposed to individual elements, in the first 7 days [in the first phase of experiment], are presented in Fig. 5a. The accuracy of elements arrangement, assuring the uniform transmission of load, was very good, with the difference in range of 0.3 kN. During renewed loading with total force of 390 kN this accuracy unfortunately became worsened for one tested element [Fig. 5b]. The difference between forces imposed to individual elements was in the range of 4%. It was caused by insignificant shifting of the supporting point under the greater beam.

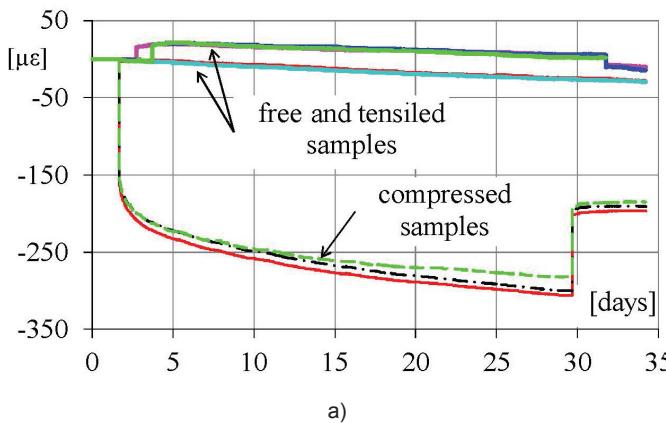
For calculation of concrete strains used in DPL function, caused by tensile and compressive stresses, the mean strains values of three tensile, three reference and two compressed elements were calculated. Further, the mean values of free strains were subtracted from the strains mean values caused by tensile and compressive stresses and in this manner only the strains caused by these loads, excluding temperature effect and shrinkage were obtained [Fig. 9ab].

Apart of the changes of the means strains of two elements, the changes of strains of sample no. 3 under tension, was also presented in Fig. 9b. In spite that sample no. 3 was loaded later than two others, it showed higher concrete strains because they were caused by higher level of stress, equal to 0.49 MPa.

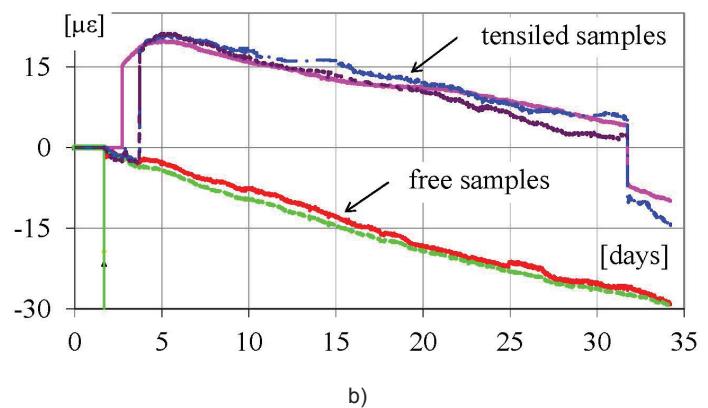
2.2. Concrete class C20/25

Similarly as in the case of concrete class C30/37 during the entire research cycle temperature of all elements was measured [Fig. 6].

In this case, extreme temperature differences in the different elements were in the range of 1.5°C. Because of the lower initial temperature of concrete and much lower its increase in the first 12 hours, and consequently lower strength increase, the test of compressed elements started 40 hours after concreting. These elements were loaded at the level of 3.05 MPa, assuming a level of effort equal to 1/3 of the current concrete compressive strength. Thereby the difference in registered compressive forces imposed to various elements was within 5%. The concrete strains measured in these elements are shown in Fig. 7.



a)



b)

Rys. 7. a) Przyrost odkształceń betonu w elementach ściskanych, b) przyrost odkształceń betonu w elementach rozciąganych oraz świadkach

Fig. 7. a) Increase of concrete strains in compressed elements, b) increase of concrete strains in the elements under tension and non-loaded ones

Obawy o wolniejszy wzrost wytrzymałości betonu w niższej temperaturze, w początkowym okresie twardnienia, potwierdziły się podczas badań, wcześniej niż przypuszczało. Elementy podwieszono 65 godzin po zabetonowaniu, jednak dwa elementy uległy uszkodzeniu. Podwieszono je ponownie po 24 godzinach.

Obciążenie ustalone na poziomie 0,36 MPa w przypadku pierwszej próbki i 0,49 MPa w przypadku pozostałych. Rysunek 7b przedstawia zmiany odkształceń w dwóch nieobciążonych elementach i zmiany odkształceń w trzech podwieszanych elementach.

Zmierzone odkształcenia rozciągające obu betonów [porównaj rysunki 4b i 7b] wykazują różne zmiany w czasie. Spowodowane jest to znacznie większym spadkiem temperatury betonu klasy C20/25, wynoszącym 18°C. W przypadku betonu klasy C30/37, do 5 dnia pomiaru spadek ten wynosił 11°C. Należy podkreślić, iż na obu rysunkach podane wielkości nie uwzględniają kompensacji związanej z wpływem temperatury czujnika na uzyskane w pomiarach wyniki odkształceń.

3. Kalibracja współczynników

Kalibrację parametrów wykonano dla jednej z często stosowanych, w modelowaniu numerycznym sprężysto-lepkiego zachowania się młodego betonu, funkcji pełzania $J(t, \tau)$ [9] opisanej przez Bažanta (DPL):

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} \cdot (1 + \alpha \cdot \tau^{-d} \cdot (t - \tau)^p) \quad [9]$$

gdzie: α , d , p są szukanymi współczynnikami stosowanymi w modelu obliczeniowym. Równanie [9] jest uproszczeniem równania [6], w którym współczynnik α , z uwagi na znikome jego znaczenie, przyjęto jako równy zero. W celu wyznaczenia współczynników równanie [9] zapisano w postaci [10]:

$$\varepsilon_K(t_j, \tau) = \frac{\sigma_K(\tau)}{E_K(\tau)} \cdot (1 + \alpha \cdot \tau^{-d} \cdot (t_j - \tau)^p) \quad [10]$$

Fears of the lower concrete strength development at lower temperature, at the beginning of hardening, were confirmed during the test earlier than it was suspected. Elements were suspended 65 hours after concreting, however, two elements were damaged. They were suspended once more 24 hours later.

The load was fixed at 0.36 MPa for the first sample and 0.49 MPa for the others. On Fig. 7b the deformation changes in the two non-loaded elements and strain changes in the three suspended elements are presented.

Measured concrete tensile strains in both cases [see Figs. 4b and 7b] show quite different change tendency in time. This is caused by much higher temperature decrease of concrete class C20/25 equal of 18°C. In the case of concrete class C30/37, this decrease was equal of 11°C till five days. It should be underlined that the compensation of the gauge temperature influence on its deformation is not taken into account, in the concrete strains values presented at both Figs.

3. Calibration of parameters

The calibration of parameters was applied in one of the often used in numerical modeling of elastic-viscous behavior of concrete at early age [9], creep functions $J(t, \tau)$, which was described by Bažant (DPL):

$$J(t, \tau) = \frac{1}{E(\tau)} \cdot (1 + \alpha \cdot \tau^{-d} \cdot (t - \tau)^p) \quad [9]$$

where: α , d , p are searching coefficients used in computational model. In order to determine these coefficients, the above equation was written in the form [10]:

$$\varepsilon_K(t_j, \tau) = \frac{\sigma_K(\tau)}{E_K(\tau)} \cdot (1 + \alpha \cdot \tau^{-d} \cdot (t_j - \tau)^p) \quad [10]$$

where: K – is the particular case of measurements (for example, in the case of concrete class C20/25: 1 – compression, 2 – tensile (sample No. 1), 3-tensile (samples No. 2 and 3), t_j – time after load

gdzie: K – oznacza poszczególne przypadki pomiarów [na przykład w przypadku betonu C20/25: 1 – ściskanie, 2 – rozciąganie (próbka nr 1), 3-rozciąganie (próbki nr 2 i 3)], t_1 – czas po przyłożeniu obciążenia ($t_1 \approx \tau + 3,6$ h, $t_2 = \tau + \Delta t/3$, $t_3 = \tau + \Delta t$), Δt – czas badania, $\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3$, (d, p – analogicznie jak α).

Po rozwiązaniu powyższego układu równań otrzymano następujące wartości współczynników: dla betonu C20/25: $\alpha = 0,284$; $d = 0,159$; $p = 0,413$ oraz dla betonu C30/37: $\alpha = 0,337$; $d = 0,236$; $p = 0,319$. Należy zaznaczyć, że ten sposób podejścia pozwala jedynie na matematyczny opis „dopasowania” równań do otrzymanych wyników doświadczalnych, bez fizycznej interpretacji poszczególnych współczynników. Dla potrzeb prowadzonych analiz, współczynniki tej funkcji musiałyby ulec znacznym zmianom aby odwzorować znaczny przyrost odkształceń pełzania w pierwszych dniach obciążania młodego betonu. Współczynniki α, d, p , określone w powyższy sposób, nie mogą być stosowane do opisu pełzania w dłuższym okresie, lub betonu obciążanego znacznie później (wartości będą znacznie przeszacowane).

W przypadku braku danych doświadczalnych, przybliżone wartości współczynników zostaną określone na podstawie składu mieszanki i wytrzymałości betonu [Bažant, Panula (25)]. Wartości α, d, p będą znacznie odbiegać od powyższych. Wynika to stąd, że ogólne zalecenia dotyczą dopasowania funkcji pełzania dla bardzo długiego okresu, przynajmniej kilku lat, i dają możliwość opisywania pełzania betonu obciążonego również po 28 dniach jego dojrzewania. Ponadto w równaniu [9] w miejscu $E(\tau)$ wprowadzony jest wirtualny, stały współczynnik sprężystości betonu E_o , który np. zgodnie z pracą Bažanta i Cherną (14) jest równy $1,5E_{28}$ i ma duży wpływ na pozostałe parametry α, d, p .

Przyrost odkształceń pełzania spowodowanych naprężeniami ściskającymi przedstawiono na rysunkach 8a i 9a. Niebieską linią oznaczono wartości zmierzone, a czerwoną linią obliczone. W pierwszym dniu pełzanie betonu wzrasta bardzo szybko, później jednak postępuje znacznie wolniej, ponieważ wytrzymałość betonu szybko wzrasta. Na rysunku 8b przedstawiono zmiany średnich odkształceń pełzania rozciąganych próbek nr 2, 3 ($0,98 \times 0,49$ MPa = 0,48 MPa – linia żółta).

Wyniki pomiarów elementu nr 1 ($0,98 \times 0,36$ MPa = 0,35 MPa) prezentuje zielona linia. Próbka ta była obciążona mniejszą siłą ponieważ beton był znacznie słabszy, stąd też odkształcenia były mniejsze. Na podstawie pomiaru pełzania, moduł sprężystości obliczony w przypadku elementów ściskanych wynosił $E_{oc}=19,9$ GPa, a dla elementów rozciąganych $E_{ot}=23,5$ GPa i 27,7 GPa. W przypadku betonu C30/37 odpowiednie wartości wynoszą: $E_c=5,8$ GPa, $E_{ot}=22,0$ GPa i 25,8 GPa. Należy zauważyć, że jest to moduł uzyskany przy pierwszym obciążeniu jednoosiowym elementu. Otrzymane wyniki są większe od modułu wyznaczonego metodą normową.

Zgodnie z normą EC2-3 (26) odkształcenia betonu skrępowanego, które należy uwzględnić w celu wyznaczenia niezbędnej powierzchni zbrojenia, podane są w postaci $\varepsilon_r = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free}$. Współczynnik skrępowania $R_{ax}=0,5$ podany w (26), zastosowano zgodnie

imposing ($t_1 \approx \tau + 3.6$ hours, $t_2 = \tau + \Delta t/3$, $t_3 = \tau + \Delta t$), Δt – duration of the test, $\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3$, (d, p – just like α).

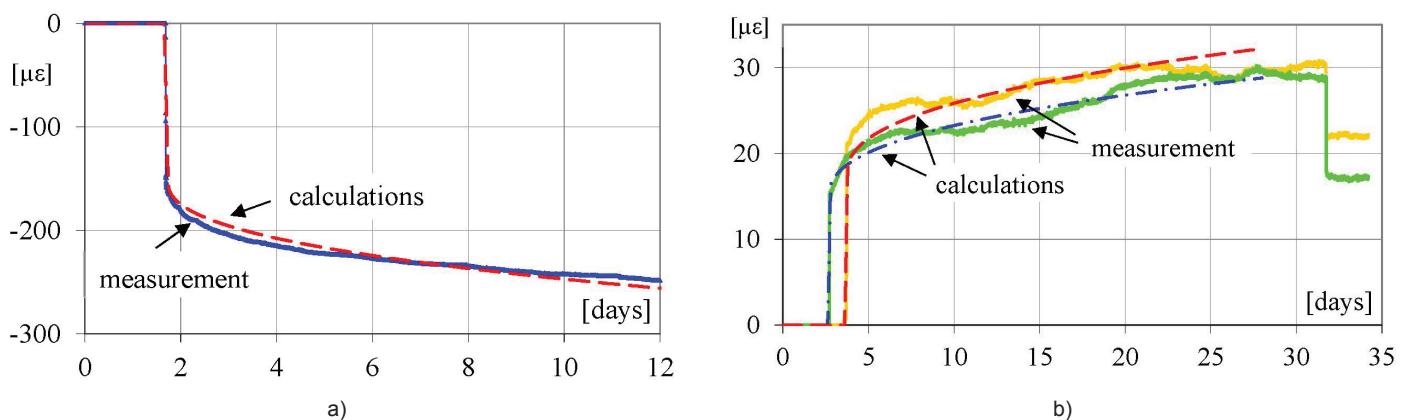
After solving of the above equations, the following values of the coefficients were obtained: for concrete class C20/25: $\alpha = 0.284$; $d = 0.159$; $p = 0.413$ and for concrete class C30/37: $\alpha = 0.337$; $d = 0.236$; $p = 0.319$. It should be noted that this approach allows only the mathematical description for the fitting of mathematical equations to the obtained experimental results, without physical interpretation of the individual coefficients. For the purposes of this analysis the coefficients of this function had to be essentially changed, to reflect the significant increase in creep strains in the first days of the concrete loading at early age. The coefficients α, d, p defined in this way cannot be used to describe the creep over an extended period of time or much later loaded concrete (values will be significantly overestimated).

In the case of the experimental data lack, the approximate values of the coefficients could be defined based on the mixture composition and concrete strength [Bažant, Panula (25)]. The values of α, d, p will differ from the mention above. The reason is that the general recommendation are related to fitting the creep function for a very long period, at least several years, and give the possibility to describe the creep of concrete loaded after 28 days of maturing. Moreover, in equation [9] in place of $E(\tau)$ a “virtual” permanent module of elasticity E_o is introduced, which for example in accordance with the work of Bažant, Chern (14) is equal to $1.5E_{28}$ and significantly affects the other parameters α, d, p .

The creep strains increment, caused by compressive stress, are shown in Figs. 8a and 9a. The blue line is designing the measured values and the red one the calculated values. During the first day the concrete creep is increasing quickly, but later its increase is much slower, because the concrete strength is rapidly increasing. This part of the creep is difficult for accurate defining, because the same coefficients are maintained as for the function of the creep strains under tensile stresses. Fig. 8b shows the changes of mean creep changes under tensile stresses of samples no. 2, 3 [0.98×0.49 MPa = 0.48 MPa - yellow line].

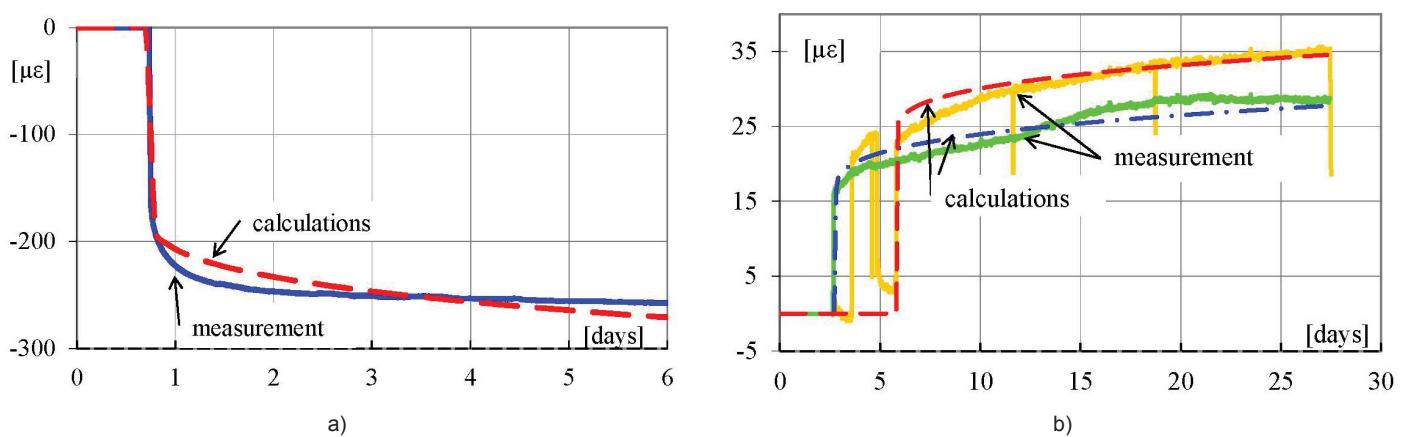
Results of measurements of sample no. 1 (0.98×0.36 MPa = 0.35 MPa) are presented by a green line. This element was loaded when the concrete resistance was significantly lower, so the load and the strains were a little smaller. Based on the concrete creep measurements the calculated modulus of elasticity for compressed elements was equal to $E_{oc}=19.9$ GPa, for elements under tension $E_{ot}=23.5$ GPa and 27.7 GPa. In the case of concrete class C30/37 the suitable parameters are as follows: $E_c=5.8$ GPa, $E_{ot}=22.0$ GPa and 25.8 GPa. It should be noted that this modulus of elasticity was obtained for the first uniaxial loading of element. These results are higher than that determined from standard test.

In agreement with EC2-3 standard (26) restrained concrete deformations, that should be taken into consideration in the case of calculation indispensable steel reinforcement area, are given in the form of relationship $\varepsilon_r = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free}$. Restrained coefficient $R_{ax} = 0.5$ given in (26) has been used according to British Standard



Rys. 8. a) Przyrost średnich odkształceń pełzania w elementach ściskanych: zmierzonych i obliczonych, b) przyrost zmierzonych i obliczonych odkształceń pełzania w elementach rozciąganych [C20/25]

Fig. 8. a) Increase of average creep strains in compressed elements measured and calculated, b) increase of measured and calculated creep strains in elements under tension [concrete C20/25]



Rys. 9. a) Przyrost średnich odkształceń pełzania w elementach ściskanych: zmierzonych i obliczonych, b) przyrost zmierzonych i obliczonych odkształceń pełzania elementów rozciąganych [C30/37]

Fig. 9. a) Increase of average creep deformations of compressed elements; measured and calculated, b) increase of measured and calculated creep strains of elements under tension [concrete C30/37]

z normą brytyjską BS8007 (27). Podany w normie brytyjskiej współczynnik uwzględnia wpływ pełzania w dojrzewającym betonie na zmniejszenie odkształceń w wyniku skrępowania. Cyt.: „Effective external restraint may be taken as 50% of the total external restraint because of internal creep” (27) Zdaniem autorów prezentowanej pracy, naprężenia w betonie powinno się obliczać według wzoru $\sigma_r = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free} \cdot E_{cm}(t)$. W normie EC2-3 (26) zaleca się stosowanie w obliczeniach naprężen efektywnego modułu sprężystości. Można zatem przypuszczać, że ponowne uwzględnienie pełzania w efektywnym module sprężystości może doprowadzić do nadmiernego zmniejszenia naprężzeń (w sumie o 75 %) również w przypadku skrępowanych ścian elementu betonowego o stosunku krawędzi $L/H > 8$ (np. 24 m x 3 m).

Z otrzymanych w badaniach wyników odkształceń pełzania, pod obciążeniem rozciągającym, w przypadku betonów klas C30/37 i C20/25, otrzymano współczynniki pełzania φ po 7, 14, 28 dniach (dla $t_0=65$ h) odpowiednio 0,29; 0,59; 0,79 i 0,53; 0,60; 1,03. Odpowiadające im współczynniki skrępowania betonu R_{ax} wynoszą: 0,78; 0,63; 0,56 i 0,65; 0,63; 0,49. Biorąc pod uwagę fakt, że za-

BS8007 (27). According to British Standard the influence of concrete creep of concrete at early age for the reduction of restrained deformation is included in the above mentioned coefficient R_{ax} . „Effective external restraint may be taken as 50% of the total external restraint because of internal creep.” (27). In the opinion of this paper authors the concrete stress should be calculated according to the relation $\sigma_r = R_{ax} \cdot \varepsilon_{free} \cdot E_{cm}(t)$. Standard EC2-3 (26) is recommending to use the effective modulus of elasticity in this calculation. It can be supposed that introducing for the second time of concrete creep in the effective modulus of elasticity, can cause excessive concrete stress reduction [75% in total] even in the case of restrained concrete wall of element with edge ratio $L/H > 8$ (for example 24 m x 3 m).

Based on the creep strains received from experimental investigations, under tensile loading, for concrete classes C30/37 and C20/25 creep coefficients φ was obtained after 7, 14 and 28 days ($t_0 = 65$ hours) accordingly 0.29, 0.59, 0.79 and 0.53, 0.60, 1.03. Corresponding to creep coefficients concrete restraint coefficients R_{ax} are the following: 0.78, 0.63, 0.56 and 0.65, 0.63, 0.49. Taking

rysowanie konstrukcji średnio-masywnych występuje w pierwszym tygodniu po zabetonowaniu, można wnioskować, że zmniejszenie współczynnika skrępowania do 0,5, tak jak zaproponowano w normie EC2-3 (26), w przypadku tych konstrukcji jest zbyt duże. We wczesnym okresie zarysowania betonu, spowodowanego zmianami temperatury spowodowanymi ciepłem hydratacji, na przykład w siódmym dniu, współczynniki te dla badanych betonów nie powinny być mniejsze niż 0,78 oraz 0,65. Współczynnik skrępowania $R_{ax} = 0,5$ zaproponowany w normie (26), jest odpowiedni w przypadku analizy naprężen po 28 dniu dojrzewania betonu, lub w przypadku skrępowanych elementów konstrukcji niemasywnych. W przypadku konstrukcji tego rodzaju wzrost właściwości mechanicznych betonu jest wolniejszy. W badanych betonowych konstrukcjach średnio-masywnych ciepło hydratacji może powodować zmiany temperatury betonu o kilkudziesiąt stopni [Zych (22)], stąd też w okresie chłodzenia konstrukcji, odkształcenia pełzania młodego betonu są zdecydowanie mniejsze, co powoduje powstanie większych naprężen.

4. Wnioski

Badania pełzania, z wykorzystaniem styropianowych form, spełniły przyjęte założenia w zakresie jednakowych i stabilnych zmian temperatury w każdej próbce. Ponadto zaprojektowane stanowisko badawcze i sposób przekazywania obciążenia zapewniły równomierny rozkład sił na elementy.

Doświadczenia wykazały, że odkształcenia pełzania młodego betonu maleją znacznie szybciej niż w przypadku dojrzałego betonu, ponieważ stosunek przyłożonego naprężenia do wytrzymałości betonu maleje szybciej podczas dojrzewania betonu.

Uzyskane w doświadczeniach wyniki pełzania, spowodowane obciążeniami ściskającymi i rozciągającymi, na elementach próbnych wykonanych z dwóch rodzajów mieszanek betonowych, dotyczą warunków zbliżonych do panujących w przypadku konstrukcji średnio-masywnych. Warunki badania próbek reprezentują jednoosiowy stan naprężenia, podobnie jak miejsce w środku ściany lub płyty podczas ich dojrzewania. Badania naśladują dobrze pełzanie młodego betonu pod wpływem ściskającego naprężenia w okresie wzrostu temperatury w rzeczywistej konstrukcji oraz pełzanie pod wpływem rozciągającego naprężenia w okresie spadku temperatury w rzeczywistej konstrukcji. Na podstawie tych wyników można modelować sprężysto-lepkie zachowanie się twardniejącego betonu, jednak tylko w bardzo krótkim okresie, to jest podczas pierwszego tygodnia dojrzewania betonu.

Dokonana kalibracja współczynników stosowanych w równaniu DPL (25) jest dostatecznie dokładna do analizy sprężysto-lepkiego zachowania się konstrukcji we wczesnym okresie dojrzewania betonu. W przypadku modelowania konstrukcji metodą elementów skończonych w 3D jest to szczególnie przydatne.

W przypadku konstrukcji średnio-masywnych, których zarysowanie występuje w pierwszym tygodniu po zabetonowaniu elementu, stosowanie współczynnika skrępowania $R_{ax} = 0,5$ zgodnie z (26),

into account that the cracking of semi-massive concrete structures is appearing in the first week after concreting, it can be concluded that the decrease of restraint coefficient to 0.5, as recommended in EC2-3 Standard (26), for this type of concrete structures is too high. At early age concrete cracking due to the temperature change caused by heat of hydration for example in seventh day, these coefficients for tested concrete should not be lower than 0.78 and 0.65. Restraint coefficient $R_{ax} = 0.5$ proposed in EC2-3 Standard (26) is suitable for the stresses analysis after 28 days of concrete maturing or in the case of non-massive restrained elements. In the case of structure of this type the development of concrete mechanical properties is much slower. In the semi-massive concrete structures under investigation the heat of hydration development can produce the concrete temperature rise a few dozen degree [Zych (22)] so during the structure cooling the creep strains of concrete at early age are much lower, what is generating larger stresses.

4. Conclusions

Concrete creep tests on cylindrical elements, with insulation of polystyrene moulds, fulfilled the condition of almost identical and stable development of temperature change in each element. Moreover, designed stands and method of load imposing ensured proper behavior of the elements during the test and almost uniform stresses in each of them.

The experimental results showed that the creep strains of concrete at early age are decreasing much quicker than in the case of mature concrete, because the ratio of applied stress to corresponding concrete strength decreases rapidly, during hardening of concrete.

The experimental results of concrete creep caused by compressive and tensile load, imposed on the tested elements from two types of concrete mixtures, assure similar condition existing in semi-massive structures. Testing condition of these samples represent a uniaxial state of stress like in the core of concrete wall or slab during concrete hardening. The presented investigations are good simulation of the concrete creep development under compressive stress at early age, in the period of temperature increase in the real structure and the concrete creep at early age under tensile stress in the case of temperature decrease in real structure. Based on these results it is possible of modeling the viscoelastic behavior of hardening concrete, but only in a very short period, e.g. during the first week of curing.

Performed calibration of parameters used in DPL equation (25) seems to be enough accurate to analyze viscoelastic behavior of the structures, of rapid concrete hardening at early age. It is especially very useful in the case of 3D structures modeled using FEM.

In the case of semi-massive structures, which cracking occurs in the first week after concreting of elements, using of restraint coefficient $R_{ax} = 0.5$ according to EC2-3 Standard (26), defined as the effective restraint coefficient including the creep effect (27), can cause too low tensile stresses resulted due to temperature decrease, after the period of rapid cement hydration. From the

zdefiniowanego jako efektywny współczynnik skrępowania uwzględniający efekt pełzania (27), może prowadzić do przyjęcia zbyt małych naprężzeń rozciągających, powstających w wyniku spadku temperatury po okresie szybkiej hydratacji cementu. Z przeprowadzonych badań dla $t = 7$ dni otrzymano współczynniki 0,78 oraz 0,65, odpowiednio dla betonu klasy C30/37 i C20/25. W przypadku konieczności analizy zarysowania przed 7 dniem po zabetonowaniu, współczynnik ten powinien być większy.

Literatura / References

1. M. Emborg, Development of Mechanical Behavior at Early Age, Rilem Report 15, Edited by R. Springenschmid, p. 76, London 1998.
 2. H. Morimoto, W. Koyangi, Estimation of stresses relaxation in concrete at early ages, Thermal Cracking in concrete at Early Age, Proceeding of the RILEM International Symposium, edited by R. Springenschmid, E and FN Spon, p. 95, London 1995.
 3. H. Umhera, T. Uehara, T. Iisaka, A. Sugiyama, Effect of creep in concrete at early age on thermal stresses, Thermal Cracking in concrete at Early Age, Proceeding of the RILEM International Symposium, edited by R. Springenschmid, E and FN Spon, p. 79, London 1995.
 4. G. Westman, Basic creep and relaxation of young concrete, Thermal Cracking in concrete at Early Age, Proceeding of the RILEM International Symposium, edited by R. Springenschmid, E and FN Spon, p. 87, London 1995.
 5. Z. P. Bažant, S. S. Kim, Nonlinear creep of concrete – adoption and flow, J. Eng. Mech. Div., (ASCE), 105, p. 419 (1979).
 6. S. Ishtiaq, S. Roy, Creep Behavior and its Prediction for Normal Strength Concrete Made from Crushed Clay Bricks as Coarse Aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, March, p. 308 (2012).
 7. P. Paulini, N. Gratl, Stiffness formation of early age concrete, Thermal Cracking in concrete at Early Age, Proceeding of the RILEM International Symposium, edited by R. Springenschmid, E and FN Spon, p. 63, London 1995.
 8. H. Ohshita, Y. Ishikawa, T. Tanabe, Creep mechanism of early age concrete modelling with two phase porous material, p. 465, RILEM Proceedings, no. 22, 1993.
 9. K. van Breugel, Relaxation of young concrete. Department of Structural Concrete, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Research Report 5-80-D8, p. 140, Delft 1980.
 10. W. Kiernozycki, Betonowe konstrukcje masywne, Polski Cement, Kraków 2003.
 11. A. Gutsch, F. S. Rostásy, Young concrete under high tensile stresses – creep, relaxation and cracking, Thermal Cracking in concrete at Early Age, Proceeding of the RILEM International Symposium, edited by R. Springenschmid, E and FN Spon, p. 111, London 1995.
 12. M. Laube, Werkstoffmodell zur Berechnung von Temperaturspannungen in massigen Betonbauteilen im jungen Alter, Universität Braunschweig, Doctoral Thesis, p. 251, 1990.
 13. Eurocode 2, Design of concrete structures – Part 1-1, General rules and rules for buildings, p. 205, September 2008.
 14. Z. P. Bažant, J. C. Chern, Triple Power Law for concrete creep, J. Eng. Mat., 3, 4, 63 (1985).
 15. M. Emborg, Thermal stresses in concrete structures at early ages, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Doctoral Thesis, p. 280, 1989.
- experimental investigation for $t=7$ days it was obtained restraint coefficient R_{ax} equal to 0.78 and 0,65 for concrete classes C30/37 and C20/25, respectively. In the case of cracking analysis before seventh day from concreting this coefficient should be higher.

16. R. A. Dameron, R.S.Dunham, R. J. James and Y. R. Rashid, Constitutive Modeling of Early time effects in concrete, p. 459.
17. S. J. Lokhorst, K. van Breugel, From microstructural development towards prediction of macro stresses in hardening concrete, Thermal Cracking in concrete at Early Age, Proceeding of the RILEM International Symposium, edited by R. Springenschmid, E and FN Spon, p. 111, London 1995.
18. F. S. Rostásy, A. Gutsch, M. Laube, Creep and relaxation of concrete at early ages – experiments and mathematical modelling, in creep and shrinkage of concrete, 5-th Rilem Symposium, Barcelona, p. 453, 1993.
19. A. Al-Manaseer, J. P. Lam, Statistical evaluation of shrinkage and creep models, ACI Materials Journal, **102**, 3, 170 (2005).
20. R. Goel, R. Kumar, D. Paul, Comparative Study of Various Creep and Shrinkage Prediction Models for Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering ASCE, **19**, 3, 249 (2007).
21. A. Salah, D. A. Lange, Tensile Basic Creep: Measurements and Behavior at Early Age. ACI Materials Journal, **98**, 5, 386 (2001).
22. M. Zych, Studium przypadku wzrostu właściwości mechanicznych betonu w oparciu o pomiary temperatury, Cement Wapno Beton, **82**, 6, 383-392 (2015).
23. S. Bernander, S. Gustafsson, Egenspänningar i ung betong på temperaturförfloppet under hydrationen (Temperature stresses in early age concrete due to hydration. In Swedish with English Summary). Nordisk Betong, nr 2, s. 25-31, Stockholm 1987.
24. P. L. Domone, Uniaxial tensile creep and failure of concrete, Magazine of Concrete Research, **26**, 88, 144 (1974).
25. Z. P. Bažant, L. Panula, Part II: Basic creep, *Materiaux et Constructions*, **11**, 65, 317 (1978).
26. Eurocode 2, Design of concrete structures – Part 3, Liquid retaining and containment structures, Brussels, p. 22, November 2008.
27. British Standards Institution, "Design of concrete structures for retaining aqueous liquids", first ed., BS 8007, London, Great Britain 1987.