

Miloš Jerman, Igor Medved', Robert Černý

Department of Materials Engineering and Chemistry, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic

Zmiany liniowe autoklawizowanego betonu komórkowego poddawanego cyklicznemu nawilżaniu i suszeniu

Length changes of autoclaved aerated concrete exposed to cyclic wetting and drying

Słowa-klucze: autoklawizowany beton komórkowy, cykliczne nawilżanie i suszenie, liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej, właściwości higromechaniczne, charakterystyczne odkształcenie wilgotnościowe

Keywords: autoclaved aerated concrete, cyclic wetting and drying, linear hygric expansion coefficient, hygro-mechanical performance, characteristic hygric strain

1. Wprowadzenie

Budynki z autoklawizowanego betonu komórkowego wznoszone są prawie wyłącznie przy zastosowaniu precyzyjnej technologii cienkospoinowej. W ten sposób ściana z autoklawizowanego betonu komórkowego może być postawiona szybciej niż przy klasycznym łączeniu na szeroką spoinę tradycyjnymi metodami murarskimi. Tak precyzyjne stawianie ścian wiąże się dodatkowo ze znacznie mniejszym zużyciem zaprawy i mniejszą ilością materiału odpadowego. Pozwala również na osiągnięcie znacznie lepszych właściwości termicznych w porównaniu z technologiami klasycznymi, ponieważ mostki termiczne, charakterystyczne dla ścian murowanych w sposób tradycyjny, są przy takim zastosowaniu autoklawizowanego betonu komórkowego praktycznie wyeliminowane.

Niewątpliwym korzyściom wynikającym z zastosowania precyzyjnej technologii cienkospoinowej towarzyszą jednakże znacznie większe wymagania odnośnie do projektu. Jak wykazało doświadczenie, przyjęcie powszechnie stosowanych metod empirycznych,

1. Introduction

Autoclaved aerated concrete (AAC) structures are built almost exclusively by the precise-walling technologies (thin joint systems), at present. In this way, an AAC wall can be constructed faster than using the classical systems (large joints), as the walling does not rely so heavily on traditional masonry methods. In addition, the precise walling also generates less waste from both the blocks and mortar on site and the amount of mortar used is much lower than in the classical walling. Compared to the classical technologies, the precise walling also leads to much better thermal properties of the envelopes because the thermal bridges characteristic for classical brick-like walling with AAC are practically excluded.

The apparent benefits of precise-walling systems are, though, accompanied by significantly higher requirements on their proper design. Experience has shown that the application of common empirical design methods suitable for brick structures often led to serious problems. Typical failure examples were cracking of both external and internal finishes, detachment of renders from the AAC blocks, sometimes with the AAC itself, cracks around windows or

odpowiednich dla konstrukcji z tradycyjnej cegły, wiąże się często z poważnymi problemami. Typowym przykładem niepowodzeń są spękania na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni, odspojenia tynku, czasem z fragmentem betonu komórkowego, spękania dookoła otworów okiennych i drzwiowych, uszkodzenia mrozowe tynku itp. Główną tego przyczyną są różnice właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego i tradycyjnej cegły, które powodują, że założenie analogii pomiędzy tymi materiałami jest błędne. Stało się oczywiste, że projektowanie budynków z autoklawizowanego betonu komórkowego powinno uwzględniać specyfikę precyzyjnej technologii cienkospoinowej, a nie powinno się opierać się na zwieńczonej wielowiekowym sukcesem technologii murowania z klasycznej cegły.

Obowiązujące normy nie pomagają, niestety, projektantom w uniknięciu potencjalnych uszkodzeń. Tematyka zawartości wilgoci w przepisach europejskich obejmuje jedynie zagadnienia związane z transportem pary wodnej w stanie ustalonym. W ten sposób można ocenić ryzyko wynikające z podciągania wody i magazynowania pary wodnej, ale nie są brane pod uwagę zjawiska, w których nakładają się efekty transportu ciepła i wilgoci w materiale. W ten sposób można przeszacować ilość wody w stanie ciekłym, a strefę kondensacji umiejscowić gdzie indziej, niż wynikałoby to z obliczeń standardowych.

Tak więc obecnie nawet doświadczony, biegły projektant miałby trudności w zgromadzeniu wystarczającej liczby danych w celu przeprowadzenia dokładnej analizy właściwości mechanicznych konstrukcji wykonanej z autoklawizowanego betonu komórkowego w zmiennych warunkach wilgotnościowych i termicznych. Katalogi producentów autoklawizowanego betonu komórkowego zawierają w większości dane dotyczące wytrzymałości na ściskanie, czy parametry opisujące transport pary wodnej i ciepła, wszystkie w postaci pojedynczych wskaźników. Jest to w znacznym stopniu niezadowalające. Kompletnych danych na temat właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego nie można znaleźć nawet w opracowaniach naukowych i dla najpowszechniej produkowanych typów autoklawizowanego betonu komórkowego. Najczęściej podawane parametry tego materiału to, jak dotychczas, przewodnictwo cieplne i wytrzymałość na ściskanie (1-10). Parametry związane z wilgotnością wyznaczone są znacznie rzadziej (11-15). Prawdopodobnie najbardziej wyczerpujące dane dotyczące właściwości najpopularniejszych typów autoklawizowanego betonu komórkowego opublikowano w pracach (16, 17), ale nawet te informacje nie są pełne.

Zmiany liniowe wyrobów pod wpływem zmian wilgotności środowiska są parametrami krytycznymi, które mogą tłumaczyć pewne zjawiska destrukcyjne zachodzące we współczesnych konstrukcjach z autoklawizowanego betonu komórkowego. Pomimo to, w obowiązującej normie europejskiej EN 680:2005 (18) zmiany liniowe pod wpływem wilgoci traktowane są w sposób dość uproszczony. Według przepisu normy (18) próbki autoklawizowanego betonu komórkowego nasycy się wodą w czasie 72h, a następnie przechowuje przez 24h w środowisku o wilgotności względnej 100%, aby rozprowadzenie wilgoci w próbce uśrednić.

doors, frost failure of external render, etc. The main reason was that the properties of AAC differed from those of common bricks to such a degree that using an analogy between these two systems was a mistake. It became apparent that the design of AAC building envelopes should respect the peculiarities of the thin joint systems and the brick-based technologies which were proven by their successful applications over centuries should not be applied to anything else than just the brick structures.

However, the current standards cannot help much the designers in preventing a failure. Moisture analysis in the European codes is restricted to water vapor transport in steady-state conditions. This presents a risk for a designer because the water suction, water vapor storage, and the cross effects between heat and moisture transport are not considered. Thus, the amount of liquid water in the envelope can often be underestimated and the condensation zone can appear in another place than predicted by the standard calculation.

It should be noted in this respect that nowadays, even for a very active and responsible designer, it would be quite difficult to gather enough data for a more precise analysis of hygrothermal and mechanical performance of AAC-based building envelope systems. The catalogue lists of AAC producers are mostly confined to the compressive strength, water vapor transport parameters and heat transport parameters, all given in a form of single value. This is far from satisfactory. However, complete sets of AAC properties cannot be found even in the scientific studies and for very common types of AAC. The AAC parameters most frequently published in the relevant data sources were thermal conductivity and compressive strength (1-10), until now. Hygric parameters were measured less frequently (11-15). Probably the most comprehensive sets of parameters of common AAC types were reported in (16, 17) but even these sets were not complete.

The length changes due to moisture variations belong to the critical parameters which can explain some failures of the contemporary AAC-based building envelopes. Nevertheless, in the current European standard EN 680:2005 (18) the moisture-induced length changes of AAC are treated in a rather simplistic way. According to (18), the AAC specimens are saturated by water during a 72-hour period and left further 24 hours in a 100% relative humidity environment to homogenize the moisture content. Then, the specimens are exposed to the laboratory conditions at $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ and $(45 \pm 5)\%$ relative humidity and their length and mass are measured periodically until a constant length value is achieved. The relative length change between the initial saturated state and the final state is denoted as total shrinkage, the relative length change between the states with 30% and 6% moisture content by mass is the conventional reference shrinkage. This kind of data is certainly useful for getting basic information on the magnitude of hygric movements. However, the single values of the relative length changes obtained using (18) cannot serve as input parameters of any computer codes simulating the moisture-induced damage. Also, the measurement method prescribed in the standard does not take into account the nonhomogeneity of moisture distribution

Następnie próbki kondycjonowane są w laboratorium w temperaturze 20 ± 2 °C, przy wilgotności względnej $45 \pm 5\%$, a ich wymiary liniowe i masa mierzone są do osiągnięcia stałych wartości. Względna zmiana długości próbek mierzona względem stanu po nasyceniu wodą jest traktowana jako skurcz całkowity; natomiast względna zmiana długości próbek mierzona względem stanu odpowiadającego zawartości wilgoci 30% i 6% masy próbki jest skurczem odniesienia. Dane te są z pewnością pożyteczne jako dostarczające informacji o przepływie wilgoci w próbce. Jednakże, pojedyncze dane odnoszące się do względnych zmian długości uzyskane na podstawie przepisu podanego w normie (18) nie mogą posłużyć jako dane wejściowe dla komputerowej symulacji mającej na celu przewidywanie potencjalnych uszkodzeń. Jak również metoda pomiarowa opisana w normie nie uwzględnia niejednorodnego rozmieszczenia wilgoci w próbce. Dlatego też pomiary przeprowadzone według (18) mogą dać wyniki względne, które pozwolą jedynie na porównanie różnych produktów, ale nie będą stanowić obiektywnych danych.

W prezentowanej pracy mierzono zmiany liniowe trzech próbek autoklawizowanego betonu komórkowego pochodzenia przemysłowego, w funkcji zawartości wilgoci, w zakresie od nasycenia wodą porów kapilarnych do stanu suchego, w dwóch następujących po sobie cyklach nawilżania i suszenia. Wyniki przedstawione są w postaci współczynników rozszerzalności liniowej w funkcji zawartości wilgoci; mają one bezpośrednie zastosowanie w tworzeniu symulacji komputerowych, w celu wyznaczenia właściwości mechanicznych. Przedstawiono również funkcje opisujące odkształcenie wilgotnościowe, w celu oszacowania zmian zachodzących w analizowanych betonach komórkowych. Otrzymane w ten sposób informacje zastosowano następnie do prognozowania zachowania się badanych betonów w konstrukcjach budowlanych.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

Badaniom poddawano różne próbki autoklawizowanego betonu komórkowego wyprodukowane przez firmę Xella CZ, Ltd., oznaczone jako P1.8-300, P2-350 i P4-500. W oznaczeniu produktu pierwsza liczba oznacza wytrzymałość na ściskanie w MPa, natomiast druga – gęstość w kg/m^3 . Według danych producenta (19) materiały te przeznaczone są na ściany działowe i konstrukcyjne, ściany ogniodoporne i wyłożenie wnętrza budynków. Odkształcenie wilgotnościowe podane jest jedynie jako pojedynczy parametr $\epsilon = 0.2$ mm/m (19), taki sam dla wszystkich materiałów, bez szczegółów dotyczących metody pomiarowej.

2.2. Metody

Badania przeprowadzono według normy ČSN EN 13009 (20). Zmiany liniowe mierzono dylatometrem kontaktowym z elektronicznym odczytem z dokładnością do ± 1 μm . Przyrząd kalibrowano za pomocą wzorca. Pomiarom poddawano belki o wymiarach 40 x 40 x 160 mm zaopatrzone w odpowiednie końcówki mocowane na ściankach czołowych.

within a specimen. Therefore, the measurements according to (18) can provide only some relative parameters, which can be applied for a comparison of different products only; they do not represent any objective physical quantities.

In this paper, the length changes of three commercial AAC are determined as functions of moisture content in the range from capillary water saturation to dry state. The measurements are performed in two consecutive wetting-drying cycles on the same specimens. The results are presented in the form of linear hygric expansion coefficient as a function of moisture content which is directly applicable in the hygro-mechanical computer simulation tools. The integral functions of hygric strain as a function of moisture content are given as well, in order to get an overall view of the moisture-induced movements in the analyzed AAC. The obtained data are then applied for a basic assessment of the supposed hygro-mechanical performance of the investigated AAC in common building structures.

2. Experimental

2.1. Materials

Three different autoclaved aerated concretes manufactured by Xella CZ, Ltd., were studied, P1.8-300, P2-350 and P4-500. In the marks of the particular products, the first number means the compressive strength in MPa, the second number the bulk density in kg/m^3 . According to the manufacturer's lists (19) their supposed application is for non-bearing- and load-bearing walls, fireproof walls and retention walls and linings in the interior. The hygric strain is expressed only by a single number, $\epsilon = 0.2$ mm/m (19), which is not exactly specified, as for the measurement method, and is the same for all products.

2.2. Methods

The experiments were performed in accordance with the general requirements of the European standard ČSN EN 13009 (20). The length changes were determined using a contact dilatometer provided with an electronic dial indicator (± 1 μm accuracy) and a standard. The 40 x 40 x 160 mm specimens had square gauge plugs glued on both face sides to facilitate the measurement.

At first, the tested specimens were fully immersed in water for 48 hours. Then, they were put in airtight bags and placed into a climatic chamber set to 25°C for another 48 hours. After that, they were taken out from the bags, and their mass, m_{sat} , was determined. The reference length, L_S , corresponding to the state of capillary water saturation was measured by a slide gauge with an accuracy of ± 10 μm , and the initial readings on the dial indicator of the contact dilatometer were recorded for both the measured specimen and the standard, $L_{S,0}$ and $L_{\text{ref},0}$, respectively.

In the next step, the specimens were put into a climatic chamber with constant relative humidity ϕ , and temperature 25°C and left there, until they achieved the constant mass, i.e., until they were in

Przed pomiarem próbki nasycano wodą przez 48h. Następnie próbki przetrzymywano w opakowaniach chroniących przed dostępem powietrza w komorze klimatycznej w temperaturze 25 °C przez kolejne 48h, po czym próbki wyjmowano z opakowań i ważono w celu określenia masy w stanie nasycenia wodą m_{sat} . Mierzono suwmiarką długość odniesienia L_S , odpowiadającą pełnemu nasyceniu kapilar próbki wodą, z dokładnością do $\pm 10 \mu\text{m}$ i odczytywano wskazanie początkowe dylatometru kontaktowego dla próbki oraz dla wzorca, odpowiednio $L_{S,0}$ i $L_{ref,0}$.

W kolejnym etapie próbki umieszczano w komorze klimatycznej przy stałej wilgotności względnej φ_i w temperaturze 25°C i przetrzymywano je tam do uzyskania stałej masy, to znaczy dopóki nie ustalił się stan równowagi pomiędzy ilością wilgoci w próbce i otoczeniu. Proces dochodzenia do równowagi trwał zazwyczaj 2 – 3 tygodnie. Wtedy próbki znów ważono (masa m_i) i odczytywano wskazania dylatometru odpowiadające zmianom długości odpowiednio próbek $L_{S,i}$ i wzorca $L_{ref,i}$. Odształcenie wilgotnościowe, ε_{wi} [m/m], obliczano jako

$$\varepsilon_{wi} = \frac{(L_{S,0} - L_{S,i}) - (L_{ref,0} - L_{ref,i})}{L_S} \quad [1]$$

Procedurę pomiarową powtarzano dla innej wilgotności względnej w komorze klimatycznej φ_i ; w ten sposób otrzymywano zależność $\varepsilon_w(\varphi)$, jako zbiór punktów $[\varphi_i, \varepsilon_{w,i}]$, gdzie $i = 1, \dots, n-1$.

Po zakończeniu pomiaru dla najniższej wartości wilgotności względnej w komorze klimatycznej, próbki umieszczano w eksykatorze nad żelazem krzemionkowym i zamykano w komorze klimatycznej w temperaturze 25 °C do czasu, gdy osiągnęły stan „chemicznie suchy” (to znaczy stan określony za pomocą absorbera wilgoci). Trwało to wiele tygodni. Oznaczano następnie masę końcową próbki m_n i dokonywano odczytów na zakończenie pierwszego cyklu pomiarowego, odpowiednio $L_{S,n}$ i $L_{ref,n}$.

Drugi cykl rozpoczynano również od 48 – godzinnej nasączenia próbek wodą i powtarzano wszystkie opisane wyżej etapy do osiągnięcia stanu „chemicznie suchego”.

Na zakończenie próbki suszono w temperaturze 105 °C, a następnie chłodzono w temperaturze 25 °C w eksykatorze nad żelazem krzemionkowym. Określano masę próbek w stanie „termicznie suchym” m_d , i dokonywano pomiarów długości odpowiednio $L_{S,d}$ and $L_{ref,d}$.

Zawartość wilgoci na jednostkę masy u_i , [kg/kg] odpowiadającą każdej wartości ε_i obliczonej na podstawie równania [1] wyznaczano ze wzoru

$$u_i = \frac{m_i - m_d}{m_d - m_{plug}} \quad [2]$$

gdzie m_{plug} jest masą końcówek do pomiaru długości; następnie wyrażano zawartość wilgoci w jednostkach objętości w_i [m³/m³] jako

$$w_i = u_i \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad [3]$$

gdzie ρ_d jest to gęstość materiału i ρ_w jest gęstością wody. W ten sposób funkcję $\varepsilon_w(w)$ opisaną jako zbiór punktów $[w_i, \varepsilon_{w,i}]$ określono

the hygric equilibrium with the chamber environment. The moisture equilibration process took usually two to three weeks. Then, the mass of the specimen, m_i , was recorded, and another readings on the dial indicators corresponding to the specimen and the standard, $L_{S,i}$ and $L_{ref,i}$, respectively, were taken. The hygric strain, ε_{wi} [m/m], was calculated as

$$\varepsilon_{wi} = \frac{(L_{S,0} - L_{S,i}) - (L_{ref,0} - L_{ref,i})}{L_S} \quad [1]$$

The measuring process was then repeated with other chosen values of relative humidity in the chamber, φ_i , and a function $\varepsilon_w(\varphi)$ defined by the set of points $[\varphi_i, \varepsilon_{w,i}]$, $i = 1, \dots, n-1$, was obtained.

After finishing the measurement for the lowest chosen value of relative humidity in the chamber, the specimens were put into a desiccator containing silica gel, placed in the climatic chamber set to 25°C and left there, until they reached the “chemical” dry state, i.e., the dry state established using a moisture absorbing agent. This took another several weeks. The final mass of the specimen, m_n , and the final length readings of the first cycle $L_{S,n}$ and $L_{ref,n}$ were then determined.

The second cycle began with the full immersion of the specimens in water for 48 hours and the whole measuring procedure was repeated, until the data for the “chemical” dry state were obtained.

Finally, the specimens were dried at the temperature of 105°C and then cooled at 25°C in a desiccator containing silica gel. The mass of the specimen in the “thermal” dry state, m_d , and the respective length readings $L_{S,d}$ and $L_{ref,d}$ were recorded.

The moisture content by mass, u_i , [kg/kg] corresponding to each ε_i value calculated using Eq. [1] was determined according to the formula

$$u_i = \frac{m_i - m_d}{m_d - m_{plug}} \quad [2]$$

where m_{plug} is the mass of the gauge plugs, and then recalculated to the moisture content by volume w_i [m³/m³] as

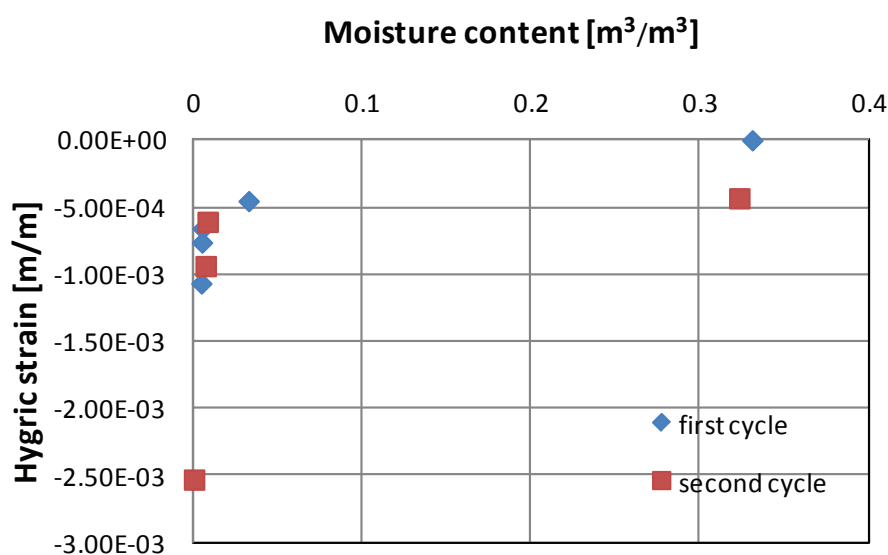
$$w_i = u_i \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad [3]$$

where ρ_d is the bulk density of the material and ρ_w the density of water. In this way, a function $\varepsilon_w(w)$ defined by the set of points $[w_i, \varepsilon_{w,i}]$ was determined for every particular wetting-drying cycle. The corresponding linear hygric expansion coefficient as a function of moisture content, $\alpha_w(w)$ [(m³/m³)⁻¹], which is already directly applicable in the hygro-mechanical computer simulation tools was calculated as

$$\alpha_w(w) = \frac{d\varepsilon_w(w)}{dw} \quad [4]$$

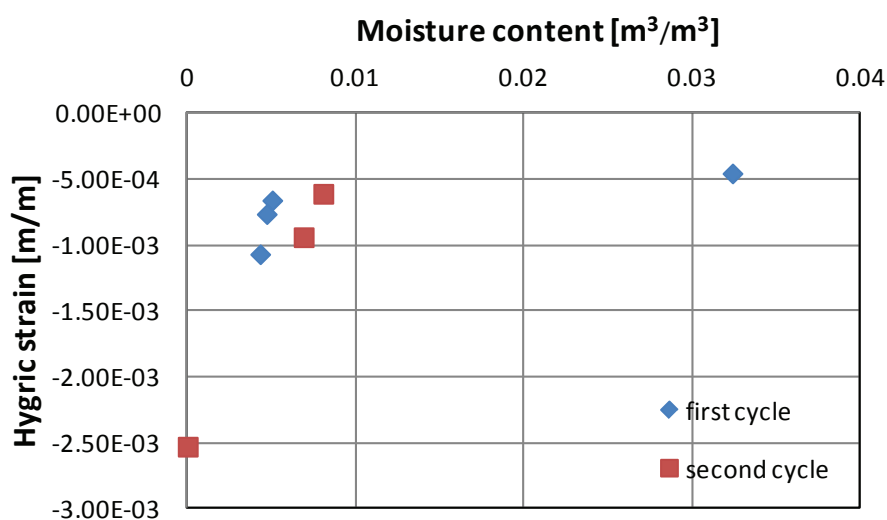
3. Results and discussion

Figs. 1a, 2a, 3a present the hygric strain as a function of moisture content by volume. The $\varepsilon_w(w)$ functions were very similar for all



Rys. 1a. Odształcenie wilgotnościowe autoklawizowanego betonu komórkowego P1,8-300

Fig. 1a. Hygric strain of AAC P1.8-300



Rys. 1b. Odształcenie wilgotnościowe autoklawizowanego betonu komórkowego P1,8-300 – powiększony fragment rysunku 1a

Fig. 1b. Hygric strain of AAC P1.8-300 - a detail of the hygroscopic range

dla każdego cyklu nawilżania wodą i suszenia. Właściwy współczynnik ekspansji wilgotnościowej w funkcji zawartości wilgoci $\alpha_w(w)$ $[(m^3/m^3)^{-1}]$, który można zastosować bezpośrednio w komputerowej symulacji prognozującej zmianę właściwości mechanicznych w zmiennych warunkach wilgotnościowych, oblicza się jako

$$\alpha_w(w) = \frac{d\varepsilon_w(w)}{dw} \quad [4]$$

3. Wyniki i dyskusja

Na rysunkach 1a, 2a i 3a przedstawiono odształcenie wilgotnościowe w funkcji zawartości wilgoci w jednostce objętości. Funkcje $\varepsilon_w(w)$ miały podobny przebieg dla wszystkich trzech badanych rodzajów autoklawizowanego betonu komórkowego. W zakresie

three analyzed AAC. In the overhygroscopic moisture range, i.e., from the saturation moisture content w_{sat} to $\sim 0.03 m^3/m^3$, the relative length changes were up to $\sim 5 \cdot 10^{-4} m/m$ in total. In the hygroscopic range, i.e., between the maximum hygroscopic moisture content w_{hyg} and the “chemical” dry state, the total strain was only slightly higher, up to $\sim 6 \cdot 10^{-4} m/m$ (Figs. 1b, 2b, 3b). The highest strain was observed between the “chemical” dry state and “thermal” dry state, up to $\sim 2 \cdot 10^{-3} m/m$.

In the beginning of the second cycle, the saturation moisture content w_{sat} was $\sim 1-2\%$ lower than in the first one (Figs. 1a, 2a, 3a) which was outside the error range of the experimental method, taking into account that the measurement was done on exactly the same specimens. In addition, a permanent deformation in a range of $\sim (5 - 8) \cdot 10^{-4} m/m$, i.e., well outside the measuring uncertainty, was observed for all studied AAC. It should be noted that these permanent changes appeared only as a result of variations in moisture content; the specimens were not even dried at the start of the experiment and the measurements were done under isothermal conditions. This indicated an important role of the surface phase of water in the studied materials, in particular the van der Waals bonds on the pore walls between the water molecules and the molecules of the AAC matrix.

The regression analysis of the measured $\varepsilon_w(w)$ relations showed that the hyperbolic function

$$\varepsilon_w(w) = -\frac{A}{w} + B \quad [5]$$

with the A, B constants given in Table 1 appeared as the most suitable mathematical representation of the experimental data. This led, according to Eq. [4], to the following equation for α_w :

$$\alpha_w(w) = \frac{A}{w^2} \quad [6]$$

Apparently, the linear hygric expansion coefficient decreased with the increasing moisture content very fast for all studied AAC (Figs. 4-6); the differences were within the range of several orders of magnitude, from $\sim 10^{-5} (m^3/m^3)^{-1}$ to $\sim 10^{-1} (m^3/m^3)^{-1}$. In the second cycle, the permanent deformations observed on the $\varepsilon_w(w)$ functions led to a decrease of the linear hygric expansion coefficient over the whole range of moisture content to approximately one half of the values determined for the first cycle.

A comparison with the results obtained by other investigators could be done in a limited extent only because the data interpretation

przesycenia wodą, to znaczy przy zawartości w_{sat} do $\sim 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$, względne zmiany długości kształtowały się na poziomie $\sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$ in. W zakresie zawartości wilgoci pomiędzy maksymalną zawartością w_{hyg} i stanem „chemicznie suchym” całkowite odkształcenie było jedynie nieznacznie wyższe, do $\sim 6 \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$ (rysunki 1b, 2b, 3b). Największe odkształcenie zaobserwowano pomiędzy stanem „chemicznie suchym” i „termicznie suchym”, aż do $\sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/m}$.

Na początku drugiego cyklu zawartość wilgoci w stanie nasycenia w_{sat} była o $\sim 1\text{-}2\%$ niższa niż w pierwszym cyklu (rysunki 1a, 2a, 3a), co stanowiło wartość większą niż błąd pomiaru, biorąc pod uwagę, że pomiary przeprowadzono na tych samych próbkach. Co więcej, stałą deformację w zakresie $\sim (5 - 8) \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$, a więc poza zakresem niepewności metody, zaobserwowano dla wszystkich próbek autoklawizowanego betonu komórkowego. Należy zauważyć, że te trwałe zmiany ujawniły się jako skutek zmian w zawartości wilgoci; próbki nie były suszone przed rozpoczęciem eksperymentów, a pomiary przeprowadzono w warunkach izotermicznych. Wskazuje to na istotne znaczenie wody obecnej na powierzchni próbek, a w szczególności na działanie sił van der Waalsa pomiędzy ściankami porów i cząsteczkami wody w matrycy autoklawizowanego betonu komórkowego.

Analiza regresji dla wyznaczonej wartości $\varepsilon_w(w)$ wykazała, że zależność ma charakter hiperboliczny

$$\varepsilon_w(w) = -\frac{A}{w} + B \quad [5]$$

gdzie stałe A i B podane w tabelicy 1 okazały się najbardziej właściwą matematyczną reprezentacją danych eksperymentalnych. Doprowadziło to, na podstawie równania [4], do kolejnego równania wyznaczającego α_w :

$$\alpha_w(w) = \frac{A}{w^2} \quad [6]$$

Jak widać, liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej zmniejszał się bardzo szybko ze wzrostem zawartości wilgoci dla wszystkich badanych betonów komórkowych (rysunki 4-6); a różnice obejmowały zakres wielu rzędów wielkości, od $\sim 10^{-5} (\text{m}^3/\text{m}^3)^{-1}$ do $\sim 10^{-1} (\text{m}^3/\text{m}^3)^{-1}$. W drugim cyklu stałe odkształcenie opisane funkcją $\varepsilon_w(w)$ spowodowało, że liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej zmniejszył się, dla całego zakresu zawartości wilgoci do około połowy wartości ustalonych w pierwszym cyklu.

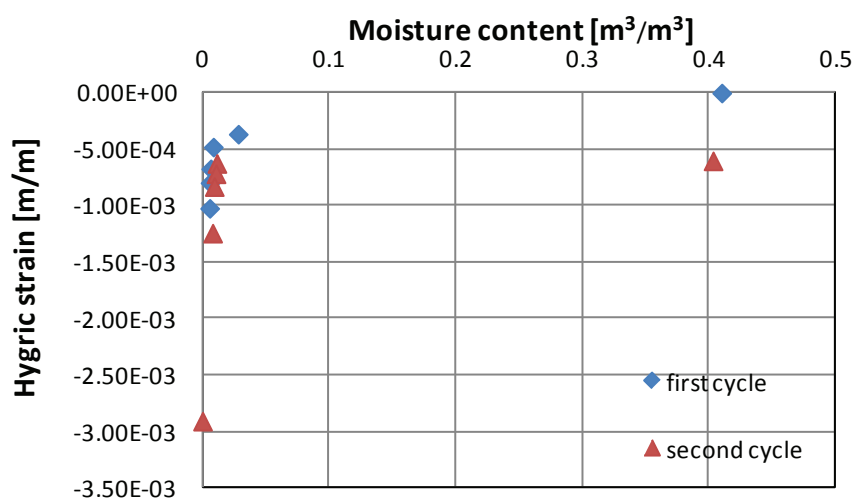
Porównanie z wynikami innych badaczy można przeprowadzić jedynie w ograniczonym zakresie, ponieważ interpretacji danych dokonano w inny sposób. Gottfredsen i wsp. (21) analizowali zmia-

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI ANALIZY REGRESJI POMIARÓW $\varepsilon_w(w)$

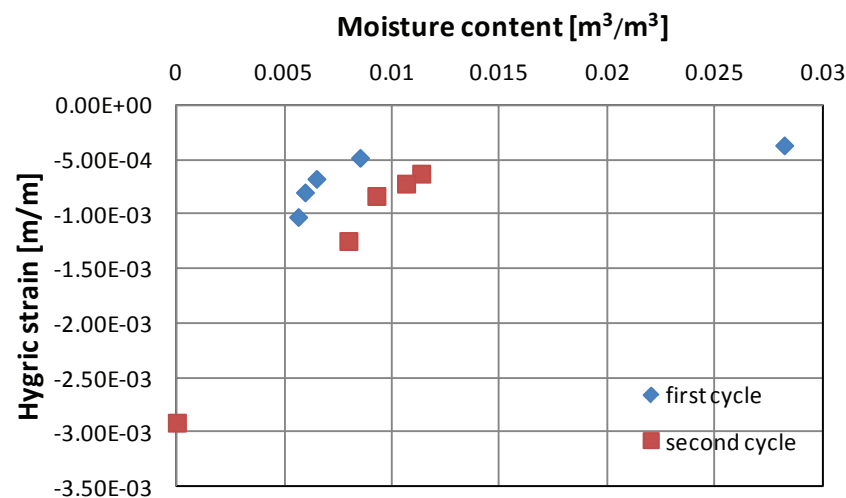
RESULTS OF THE REGRESSION ANALYSIS OF THE MEASURED $\varepsilon_w(w)$ RELATIONS

Material/Material	Cykl/Cycle	A · 10 ⁶	B · 10 ⁴	R ²
AAC P1,8-300	1	3.97	0	0.934
AAC P1,8-300	2	2.07	4.68	0.994
AAC P2-350	1	4.95	0	0.969
AAC P2-350	2	2.32	6.06	0.986
AAC P4-500	1	5.20	0	0.958
AAC P4-500	2	2.03	5.48	0.988



Rys. 2a. Odkształcenie wilgotnościowe autoklawizowanego betonu komórkowego P2-350

Fig. 2a. Hygric strain of AAC P2-350



Rys. 2b. Odkształcenie wilgotnościowe autoklawizowanego betonu komórkowego P2-350 - powiększony fragment rysunku 2a

Fig. 2b. Hygric strain of AAC P2-350 - a detail of the hygroscopic range

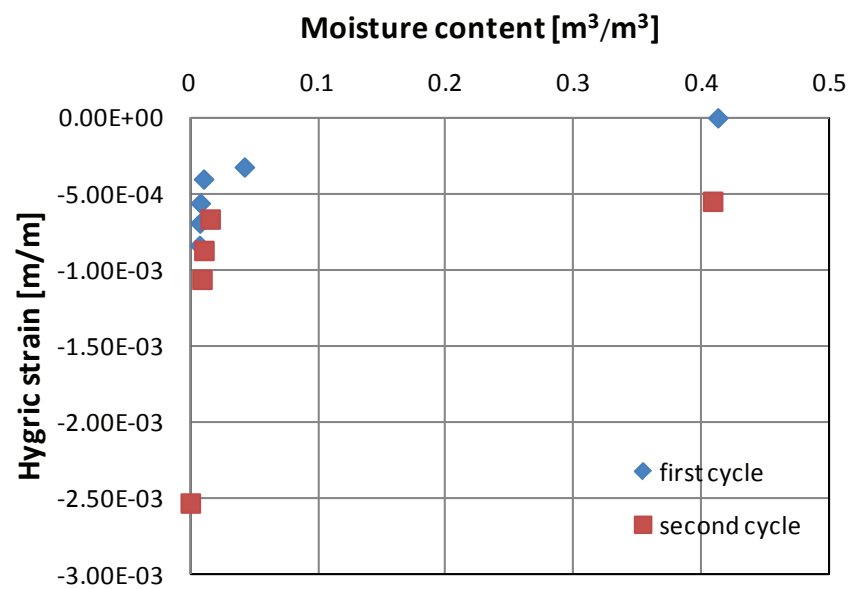
was mostly done in a different way. Gottfredsen et al. (21) analyzed the length changes of AAC produced by H+H-Industri A/S in a dependence on the relative humidity of the external environment. The total strain over the hygroscopic range was $\sim 7 \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$

ny długości autoklawizowanego betonu komórkowego wyprodukowanego przez firmę H+H-Industri S.A. w zależności od wilgotności środowiska zewnętrznego i oszacowali całkowite odkształcenie na $\sim 7 \cdot 10^{-4}$ m/m, co było wartością zbliżoną do naszego wyniku w zakresie $(5 - 6) \cdot 10^{-4}$ m/m. Wartości funkcji $\alpha_w(w)$ wymienieni autorzy nie obliczali w cytowanej pracy (21), ani nie podawali zawartości wilgoci, jak również nie przedstawili izotermy sorpcji; tak więc nie można tych wyników porównać. Doniesienia innych badaczy zawierają jeszcze mniej informacji. Ograniczają się przeważnie do określenia różnicy wymiarów liniowych pomiędzy materiałem w stanie nasycenia wodą w_{sat} i w stanie równowagi przy wilgotności względnej 45% ϵ_{tot} , to znaczy zgodnie z normą podającą sposób pomiaru skurczu całkowitego EN 680:2005. Ramamurthy i Narayanan (22) badali szereg betonów komórkowych wyprodukowanych z mieszaniny surowcowej zawierającej cement, wapno, piasek i stwierdzili, że $\epsilon_{tot} = (1 - 2) \cdot 10^{-4}$ m/m. Klimesch i in. (23) otrzymali dla autoklawizowanych zaczynów cementu z piaskiem kwarcowym $\epsilon_{tot} = (1.5 - 2.5) \cdot 10^{-3}$ m/m. Hauser i in. (24) dla autoklawizowanego betonu komórkowego z popiołu lotnego i wapna stwierdzili, że $\epsilon_{tot} = (2 - 5) \cdot 10^{-4}$ m/m. W naszych badaniach autoklawizowanego betonu komórkowego wartość $\epsilon_{tot} \sim 5 \cdot 10^{-4}$ m/m można ocenić jako całkiem realną, biorąc pod uwagę różnice składu materiałów. Ostatnio Drochytka i in. (25) określili zmiany liniowe autoklawizowanego betonu komórkowego wyprodukowanego z odpadów elektrowniowych w stanie suchym i przy zawartości wilgoci 40% na $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ m/m. Jednakże wyjściowy stan suchy był efektem suszenia materiału w temperaturze 105°C , co uniemożliwia dokonanie rzetelnego porównania z naszymi wynikami. Jak to pokazano na rysunkach 1a, 2a, 3a, suszenie w temperaturze 105°C prowadzi do dodatkowych zmian liniowych z uwagi na rozszerzalność termiczną materiału.

Porównanie naszych wyników z danymi producenta (19) przeprowadzono przy założeniu, że wartość $\epsilon = 0.2$ mm/m przedstawia skurcz odniesienia ϵ_{con} , wyznaczony w sposób konwencjonalny na podstawie normy EN 680:2005, to znaczy względną zmianę długości przy zmianie zawartości wilgoci w materiale pomiędzy 30% i 60% masy próbki (producent nie podaje wymagań odnośnie do wyniku). Otrzymaliśmy wartość $\epsilon_{con} = 0.11$ mm/m dla autoklawizowanego betonu komórkowego P 1.8-300, $\epsilon_{con} = 0.08$ mm/m dla P 2-350 i $\epsilon_{con} = 0.12$ mm/m dla P 4-500; były one we wszystkich przypadkach mniejsze niż podane przez producenta (19). Tak więc wydaje się, że dane producenta są w znacznym stopniu niepewne.

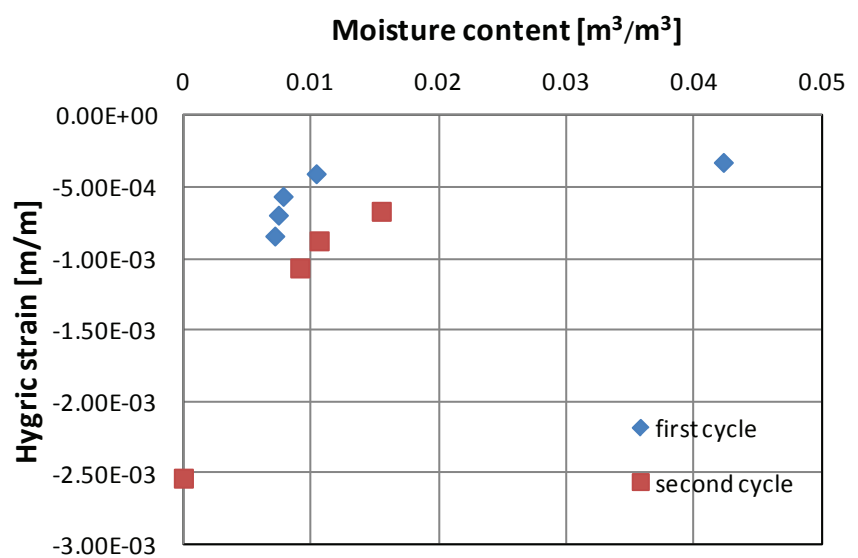
Funkcje $\epsilon_w(w)$ i $\alpha_w(w)$ wyznaczone w prezentowanej pracy dla trzech różnych typów autoklawizowanego

which was close to our measured values which were in the range of $(5 - 6) \cdot 10^{-4}$ m/m. The $\alpha_w(w)$ functions were not calculated in (21) and neither the moisture content nor the sorption isotherm were given so that any comparisons could not be done in that respect. Other researchers provided even less information; they mostly confined themselves to the determination of the length difference between w_{sat} and the equilibrium state at 45% relative humidity, ϵ_{tot} , which is defined by the standards (total shrinkage according to EN 680:2005). Ramamurthy and Narayanan (22) analyzed several cement-lime-sand-based AAC and found $\epsilon_{tot} = (1 - 2) \cdot 10^{-4}$ m/m, Klimesch et al. (23) obtained for the autoclaved cement-quartz pastes $\epsilon_{tot} = (1.5 - 2.5) \cdot 10^{-3}$ m/m, Hauser et al. (24) for lime-fly ash based AAC $\epsilon_{tot} = (2 - 5) \cdot 10^{-4}$ m/m. In our experiments we obtained



Rys. 3a. Odkształcenie wilgotnościowe autoklawizowanego betonu komórkowego P4-500

Fig. 3a. Hygric strain of AAC P4-500



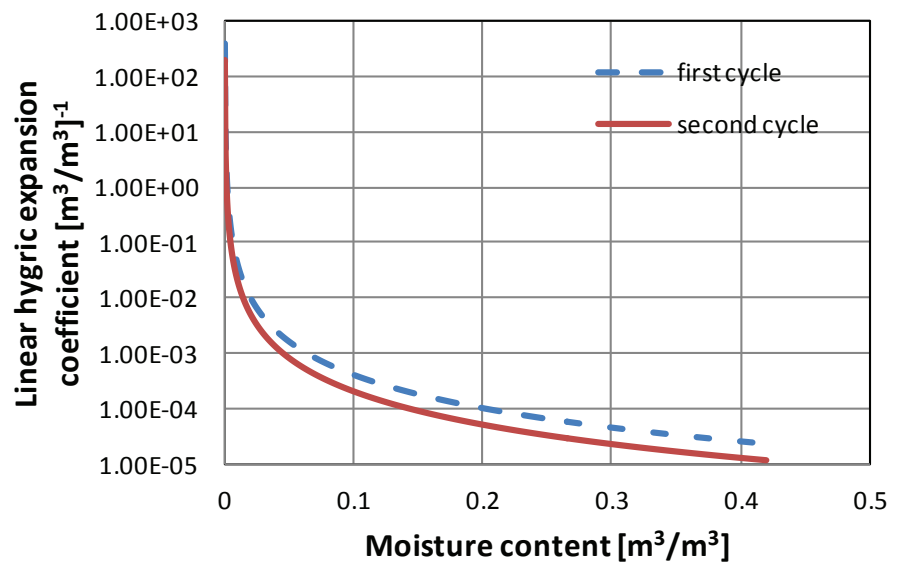
Rys. 3b. Odkształcenie wilgotnościowe autoklawizowanego betonu komórkowego P4-500 powiększony fragment rysunku 3a

Fig. 3b. Hygric strain of AAC P4-500 - a detail of the hygroscopic range

betonu komórkowego mogą stać się punktem wyjścia do dyskusji na temat ograniczonej przydatności metody standardowej określania zmian liniowych i oceny właściwości higromechanicznych autoklawizowanego betonu komórkowego z bieżącej produkcji, stosowanego powszechnie w konstrukcjach budowlanych.

Określony w sposób konwencjonalny skurcz ϵ_{con} , zgodnie z normą EN 680:2005 jest pochodną zmian długości materiału w stanie znacznego nasycenia wodą. Przyczyna takiego podejścia w przepisach normowych jest związana prawdopodobnie z relatywnie dużą zawartością wilgoci w autoklawizowanym betonie komórkowym opuszczającym zakład produkcyjny i spodziewanym częściowym wysuszeniem, zanim zostanie zabudowany. W każdym przypadku znaczenie praktyczne wartości ϵ_{con} dla projektanta konstrukcji jest małe. Najwyraźniej wartość ϵ_{con} ma bardziej znaczenie psychologiczne niż techniczne i ma na celu raczej przekonanie projektanta, że zastosowanie autoklawizowanego betonu komórkowego jest bezpieczne. Nawet najbardziej podstawowe oszacowanie maksymalnej wartości naprężenia związanego z odkształceniem wilgotnościowym σ_{con} , odpowiadającego wartości skurczu ϵ_{con} , jak to wyliczyli Trunk i in. (26) dla autoklawizowanego betonu komórkowego, daje jako wynik, przy $\epsilon_{con} \sim 1 \cdot 10^{-4}$ m/m (jak otrzymano dla autoklawizowanego betonu komórkowego w niniejszej pracy) wartość $\sigma_{con} \sim 0.15$ MPa, co stanowi mniej więcej połowę wytrzymałości na rozciąganie. Należy pamiętać, jak to wiadomo od wielu lat (27, 28), że znacznym zawartościom wilgoci towarzyszy niewielki skurcz, co znalazło potwierdzenie w niniejszej pracy, dla trzech autoklawizowanych betonów komórkowych różniących się gęstością.

Całkowity skurcz ϵ_{tot} , podany w normie EN 680:2005 jest parametrem bardziej informacyjnym, przynajmniej w warunkach jakie panują w Europie Środkowej, gdzie latem gdy suszenie materiału przebiega bardziej intensywnie, względna zawartość wilgoci rzadko spada poniżej 45%. W takich warunkach ϵ_{tot} jest dla projektanta przynajmniej górną praktyczną granicą odkształcenia wilgotnościowego. W niniejszej pracy otrzymaliśmy wartość $\epsilon_{tot} \sim 5 \cdot 10^{-4}$ m/m, co dałoby $\sigma_{tot} \sim 0.75$ MPa, a więc wartość naprężenia powyżej wytrzymałości na rozciąganie. Jednakże, wartość ϵ_{tot} wydaje się zbyt wysoka dla celów praktycznych. Na przykład w Pradze typowa wilgotność względna latem wynosi $\sim 70\%$, a w Czechach typowa zawartość wilgoci w wyrobach z autoklawizowane-



Rys. 4. Liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej autoklawizowanego betonu komórkowego AAC P1,8-300

Fig. 4. Linear hygric expansion coefficient of AAC P1.8-300

for all analyzed AAC $\epsilon_{tot} \sim 5 \cdot 10^{-4}$ m/m which could be considered as a reasonable agreement, taking into account the differences in composition. In a recent work, Drochytka et al. (25) determined the length changes of AAC made from power industry waste between the dry state and 40% moisture level to be $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ m/m. However, the initial state was achieved by drying at 105°C which did not make possible a serious comparison with our measurements. As it was shown in Figs. 1a, 2a, 3a, drying at 105°C leads to the additional length changes which are due to the thermal effects.

A comparison of our measurements with the data given by the producer (19) was done under the assumption that the value of $\epsilon = 0.2$ mm/m represented the conventional reference shrinkage, ϵ_{con} , according to EN 680:2005, i.e., the relative length change between the states with 30% and 6% moisture content by mass

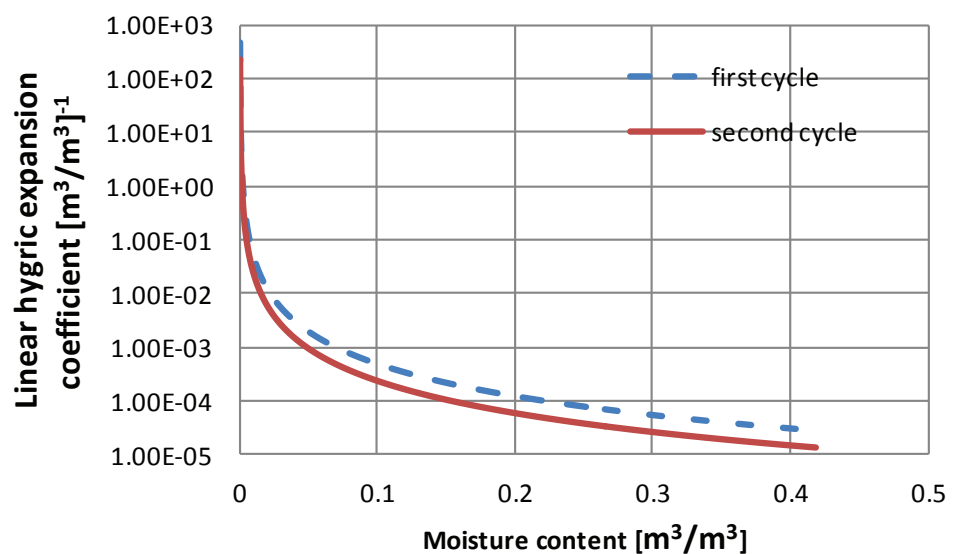


Fig. 5. Linear hygric expansion coefficient of AAC P2-350

Rys. 5. Liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej autoklawizowanego betonu komórkowego AAC P2-350

go betonu komórkowego opuszczających zakład produkcyjny wynosi $\sim 30\%$ masowy. Tak więc byłoby bardziej właściwe zastosować, przy obliczaniu maksymalnej wartości naprężenia rozciągającego σ_{\max} , typowe wartości odkształcenia wilgotnościowego ϵ_{char} , odpowiadającego zmianie długości pomiędzy wymienionymi, charakterystycznymi stanami odpowiadającymi podanym wilgotnościom.

W wyniku badań przeprowadzonych w prezentowanej pracy autorzy otrzymali wartość odkształcenia wilgotnościowego $\epsilon_{\text{char}} \sim 3 \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$, co pozwala określić naprężenie rozciągające jako $\sigma_{\max} \sim 0.45 \text{ MPa}$, a więc większe od wytrzymałości na rozciąganie. Tak oszacowana maksymalna wartość naprężenia, odpowiadająca warunkom wilgotnościowym charakterystycznym dla placów budowy w Pradze wskazywałaby, że klimat Pragi nie jest odpowiedni dla powszechnie stosowanych wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego. Oczywiście, taka podstawowa ocena warunków nie może zastąpić rzetelnych obliczeń, ale może przynajmniej wskazywać, że należy się spodziewać niekorzystnych zjawisk na placu budowy. Stąd wynika konieczność podejmowania rzetelnej analizy właściwości higromechanicznych wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego, przynajmniej z grupy najczęściej stosowanych w budownictwie. Zadanie to jest możliwe do wykonania za pomocą wyznaczonych w prezentowanej pracy współczynników ekspansji liniowej. Można zastosować komputerowe metody symulacji, znane w niektórych uniwersytetach.

4. Conclusions

Określono zmiany wymiarów liniowych dla trzech rodzajów autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) pochodzenia przemysłowego, w dwóch następujących po sobie cyklach nawilżania i suszenia, w zależności od zawartości wilgoci, w warunkach izotermicznych, od stanu nasycenia wodą porów kapilarnych do stanu suchego. Wyniki można podsumować następująco:

1. Liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej zmniejszał się bardzo szybko ze wzrostem zawartości wilgoci i dla wszystkich badanych betonów komórkowych może być opisany funkcją hiperboliczną $\alpha_w(w) = A/w^2$.
2. Trwałe odkształcenia w zakresie $\sim (5 - 8) \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$ wystąpiły po pierwszym cyklu nawilżania i suszenia, jedynie w wyniku zmian zawartości wilgoci.
3. W drugim cyklu nawilżania i suszenia liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej był około dwa razy mniejszy w całym zakresie zmian wilgotności.
4. Największe zmiany wymiarów liniowych, dochodzące do $\sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/m}$, występowały po drugim cyklu nawilżania i su-

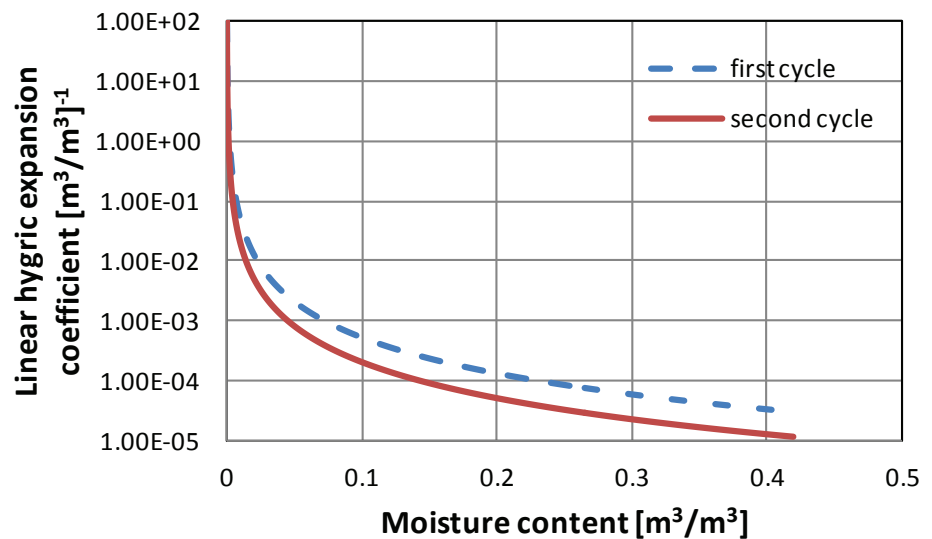


Fig. 6. Linear hygric expansion coefficient of AAC P4-500

Rys. 6. Liniowy współczynnik ekspansji wilgotnościowej autoklawizowanego betonu komórkowego P4-500

(the producer did not give an exact specification of his data). We obtained $\epsilon_{\text{con}} = 0.11 \text{ mm/m}$ for P 1.8-300, $\epsilon_{\text{con}} = 0.08 \text{ mm/m}$ for P 2-350 and for $\epsilon_{\text{con}} = 0.12 \text{ mm/m}$ P 4-500 which was in all cases lower than in (19). So, it seems that the data in (19) were obtained using a very high uncertainty level.

The $\epsilon_w(w)$ and $\alpha_w(w)$ functions determined in this paper for three different types of AAC can be used for at least a basic discussion on the usefulness of length-change data provided by the standard methods and a basic qualitative assessment of the supposed hygro-mechanical performance of current AAC commercial products in common building structures.

The conventional reference shrinkage, ϵ_{con} , specified in EN 680:2005 is derived on the basis of a difference in length between two states in the overhygroscopic range. The reason why such value appeared in the standard was probably the relatively high moisture content in the AAC products when leaving the production plant, perhaps also expected partial drying of an AAC element before being used in a real structure. In any case, the importance of ϵ_{con} for practical purposes of structural design is low. Apparently, the value of ϵ_{con} is more psychological than technical and its main purpose might be just to convince a designer that using AAC is safe. Even a most basic estimate of the maximum tensile stress, σ_{con} , corresponding to ϵ_{con} , as calculated using the data obtained by Trunk et al. (26) for commercial AAC, gives with $\epsilon_{\text{con}} \sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/m}$ (measured for the AAC studied in this paper) $\sigma_{\text{con}} \sim 0.15 \text{ MPa}$ which is about one half of the tensile strength. It should be noted in that respect that it has been well known for many years (27, 28) that in the range of higher moisture content a relatively small shrinkage occurs. This was confirmed in this paper for three AAC with different densities as well.

The total shrinkage, ϵ_{tot} , specified in EN 680:2005 has a more informative value, at least for the conditions of Central Europe where the relative humidity in the summer period, when drying can

szczenia pomiędzy stanem „chemicznie suchym” i „termicznie suchym”.

5. Stwierdzono, że tradycyjny skurcz odniesienia i skurcz całkowity podane w normie EN 680:2005, nie nadaje się do praktycznej oceny wpływu warunków higromechanicznych na właściwości elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego w konstrukcjach budowlanych. Pierwszy prowadzi, do niedoszacowania, a drugi do przeszacowania odkształceń wilgotnościowych w większości przypadków w praktyce.
6. Jako bardziej właściwe do oszacowania maksymalnego naprężenia rozciągającego zaproponowano przyjęcie odkształcenia spowodowanego zmianami wilgotności wyrażonymi jako zmiany długości w przypadku dwóch stanów równowagi wilgotnościowej: beton autoklawizowany opuszczający zakład produkcyjny i przeciętna wilgotność względna atmosfery w okresie letnim.
7. Zaleca się stosowanie szczegółowej analizy właściwości wilgotnościowo-mechanicznych elementów z autoklawizowanego betonu komórkowego praktycznie zastosowanych w budownictwie za pomocą odpowiednich komputerowych metod symulacji, w tych przypadkach, w których wykorzystanie typowych odkształceń wywołanych zmianami wilgotności prowadzi do nieprawidłowej oceny maksymalnych naprężeń.

Acknowledgement

This research has been supported by the Czech Science Foundation, under project No. P105/12/G059.

Literatura / References

1. M. Skorniewska, G. Zapotoczna-Sytek, Effect of cement type on the properties of cellular concrete. *Cement Wapno Beton*, **79**, 200-206 (2012).
2. L. Kubicar, V. Bohac, V. Vretenar, S. Barta, G. Neuer, R. Brandt, Thermo-physical properties of heterogeneous structures measured by pulse transient method. *International Journal of Thermophysics* **26**, 1949-196 (2005).
3. R. Cabrillac, B. Florio, A. L. Beaucour, H. Dumontet, S. Ortola, Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. *Constr. Build. Mat.*, **20**, 286-295 (2006).
4. S. Unčík, A. Struhárová, M. Hlavinková, A. Sabová, S. Balkovic, Effect of bulk density and moisture content on the properties of aerated autoclaved concrete. *Cement Wapno Beton*, **80**, 189-196 (2013).
5. A. Łagosz, P. Szymański, P. Walczak, Influence of the fly ash type on properties of autoclaved aerated concrete. *Cement Wapno Beton*, **78**, Special Issue, 22-25 (2011).
6. A. Laukaitis, J. Keriene, D. Mikulskis, M. Sinica, G. Sezemanas, Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products. *Constr. Build. Mat.*, **23**, 3034-3042 (2009).
7. C. Karakurt, H. Kurama, I.B. Topçu, Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. *Cem. Concr. Comp.*, **32**, 1-8 (2010).
8. X. Huang, W. Ni, W. Cui, Z. Wang, L. Zhu, Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. *Constr. Build. Mat.*, **27**, 1-5 (2012).

occur more intensively, only rarely decreases under 45%. In such conditions ϵ_{tot} presents for a designer at least a practical upper limit of hygric strain. In this paper we obtained $\epsilon_{\text{tot}} \sim 5 \cdot 10^{-4}$ m/m which would lead to $\sigma_{\text{tot}} \sim 0.75$ MPa, i.e., a stress value well above the tensile strength. However, the ϵ_{tot} value seems to be too high for practical purposes. For instance, in the city of Prague a typical value of relative humidity in the summer period is $\sim 70\%$, and in the Czech Republic a typical moisture content of AAC leaving the production plants is $\sim 30\%$ kg/kg. Therefore, it would be more appropriate to use for a basic estimate of the maximum tensile stress, σ_{max} , the characteristic hygric strain, ϵ_{char} , corresponding to the length changes between these two characteristic hygric states.

In the experiments presented in this paper, we obtained $\epsilon_{\text{char}} \sim 3 \cdot 10^{-4}$ m/m which gives $\sigma_{\text{max}} \sim 0.45$ MPa, i.e., a stress value higher than the tensile strength. Therefore, even a maximum stress estimate corresponding to the characteristic hygric conditions which could occur on the building site, was in the conditions of Prague climate unfavorable for common AAC. Of course, this basic estimate cannot substitute a real calculation but at least it can indicate that something may become wrong on the building site. This underlines the necessity of a serious hygro-mechanical analysis of at least the typical AAC elements in real buildings. Using the data for the linear hygric expansion coefficient determined in this paper, this task is feasible. The hygro-mechanical computer simulation tools available in some universities can be used for that purpose.

4. Conclusions

The length changes of three commercial AAC in two consecutive wetting-drying cycles were studied in a dependence on moisture content in isothermal conditions, in the range from capillary water saturation to dry state. The main results can be summarized as follows:

1. The linear hygric expansion coefficient decreased very fast with the increasing moisture content and for all three studied AAC it could be expressed by a hyperbolic function $\alpha_w(w) = A/w^2$.
2. Permanent deformations in a range of $\sim (5 - 8) \cdot 10^{-4}$ m/m appeared after the first wetting-drying cycle, as a result of variations in moisture content only.
3. In the second cycle, the linear hygric expansion coefficient over the whole range of moisture content was about two times lower than in the first cycle.
4. The most important length changes of up to $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ m/m were observed between the “chemical” dry state and “thermal” dry state after the second cycle.
5. The conventional reference shrinkage and total shrinkage specified in EN 680:2005 were found not suitable for a basic practical assessment of hygro-mechanical effects on the AAC elements in building structures, the first leading to an underestimation and the second to an overestimation of hygric strain in most practical cases.

9. W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, K. Pimraksa, A. Chaipanich, Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials. *Materials and Design*, **35**, 434–439 (2012).
10. M. Campanale, M. Deganello, L. Moro, „Effect of Moisture Movement on Tested Thermal Conductivity of Moist Aerated Autoclaved Concrete”. *Transport in Porous Media*, **98**, 125–146 (2013).
11. M. Janz, Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from a series of water absorption tests. *Mat. and Struct.*, **35**, 141-148 (2002).
12. M.S. Goual, A. Bali, F. de Barquin, R.M. Dheilily, M. Quéneudec, Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. *Cem. Concr. Res.*, **36**, 1768–1776 (2006).
13. Z. Pavlík, R. Černý, Determination of Moisture Diffusivity as a Function of Both Moisture and Temperature. *International Journal of Thermophysics*, **33**, 1704-1714 (2012).
14. S. Tada, K. Watanabe, Dynamic determination of sorption isotherm of cement based materials. *Cem. Concr. Res.*, **35**, 2271-2277 (2005).
15. O. Koronthalyova, Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials* **25**, 879–885 (2011).
16. M. Jerman, M. Keppert, J. Výborný, R. Černý, Moisture and heat transport and storage characteristics of two commercial autoclaved aerated concretes. *Cement Wapno Beton*, **78**, 18-29 (2011).
17. M. Jerman, M. Keppert, J. Výborný, R. Černý, Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. *Constr. Build. Mat.*, **41**, 352–359 (2013).
18. ČSN EN 680:2005 Determination of the drying shrinkage of autoclaved aerated concrete. Czech Standards Institute, Prague 2006.
19. <http://www.ytong.cz/cs/content/ytong.php>
20. ČSN EN 13009:2000 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygric expansion coefficient. Czech Standards Institute, Prague 2001.
21. F.R. Gottfredsen, H.H. Knutsson, A. Nielsen, Determination of length changes due to moisture variations in autoclaved aerated concrete. *Mat. Struct.*, **30**, 148-153 (1997).
22. K. Ramamurthy, N. Narayanan, Influence of composition and curing on drying shrinkage of aerated concrete. *Mat. Struct.*, **33**, 243-250 (2000).
23. D. S. Klimesch, A. Rayb, B. Sloane, Autoclaved cement-quartz pastes: the effects on chemical and physical properties when using ground quartz with different surface areas. Part I: Quartz of wide particle size distribution. *Cem. Concr. Res.*, **26**, 1399-1408 (1996).
24. A. Hauser, U. Eggenberger, T. Mumenthaler, Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. *Cem. Concr. Res.*, **29**, 297–302 (1999).
25. R. Drochytka, J. Zach, A. Korjenic, J. Hroudová, Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste. *Energy and Buildings* **58**, 319–323 (2013).
26. B. Trunk, G. Schober, A.K. Helbling, F.H. Wittmann, Fracture mechanics parameters of autoclaved aerated concrete. *Cem. Concr. Res.*, **29**, 855–859 (1999).
27. P. Schubert, Shrinkage behaviour of aerated concrete. In: F.H. Wittmann (ed.), *Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties*, pp. 207-217, Elsevier, Amsterdam 1983.
28. N. Narayanan, K. Ramamurthy, Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cem. Concr. Comp.*, **22**, 321-329 (2000).
6. The characteristic hygric strain expressed using the length changes between the hygric equilibrium states corresponding to a typical moisture content of AAC leaving the production plant and a typical relative humidity in the summer period is proposed as more appropriate for obtaining a basic estimate of the maximum tensile stress.
7. A detailed hygro-mechanical analysis of at least the typical AAC elements in real buildings using appropriate computer simulation tools is recommended in such cases when the application of characteristic hygric strain leads to an unfavorable maximum stress estimate.

Acknowledgement

This research has been supported by the Czech Science Foundation, under project No. P105/12/G059.