

Komentarz do warunków stosowania połączeń w zbiornikach żelbetowych wg Aneksu N w PN-EN 1992-3

Dr inż. Mariusz Zych, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

W niniejszym artykule skomentowano postanowienia PN-EN 1992-3 w zakresie stosowania połączeń ruchomych w aspekcie oddziaływań wymuszonych i kontroli zarysowania. Opisano podstawowe założenia, które należy przyjmować w różnych wariantach projektowania połączeń pozwalających na częściowe skrócenie termiczne betonu. Wyznaczono rozkłady stopnia skrępowania R_{ax} dla przypadku segmentu ściany zabetonowanej pomiędzy wcześniej wykonanymi segmentami, w połączeniu których uwzględniono różną sztywność. Wykazano m.in., że dla ww. przypadku stopień skrępowania nie jest wartością stałą po wysokości i wzdłuż długości segmentu, co bezpośrednio wpływa na zasięg ewentualnych rys i sposób zbrojenia w celu ograniczenia ich szerokości.

2. Połączenia wg PN-EN 1992-3

Zasady projektowania z zastosowaniem połączeń ruchomych zawarte w PN-EN 1992-3 [6] nie zostały szczegółowo objaśnione. W związku z tym w pracy autora [11] przedstawiono możliwości stosowania połączeń ruchomych w zbiornikach w świetle znacznie obszerniejszych wytycznych normy BS 8007 [4]. Rozwiązanie to zapewnia całkowitą lub częściową swobodę przemieszczeń krawędzi przyległych elementów. W tym wariantcie należy wykonać dodatkowe założenia obliczeniowe oraz spełnić inne wymagania konstrukcyjno-wykonawcze wynikające z rodzaju przyjętego połączenia ruchomego. Zgodnie z normą [6] rozwiązanie to należy zastosować

w sytuacji, gdy: „Jeżeli nie jest możliwe efektywne zastosowanie uzasadnionych ekonomicznie rozwiązań mających na celu ograniczenie zarysowania, w konstrukcjach zbiorników na ciecze należy przewidzieć styki ruchome”. Ponadto „Wybór możliwego do zastosowania podejścia zależy od warunków użytkowania konstrukcji i możliwego do zaakceptowania stopnia ryzyka wystąpienia przecieków”. W tym podejściu wg PN-EN 1992-3 [6] zakłada się, że wymagana jest tylko „umiarkowana” ilość zbrojenia „jedynie w celu transferu dowolnego przemieszczenia do przyległego styku”, gdyż nie powinno wystąpić znaczące zarysowanie pomiędzy połączeniami. W związku z zapisem o braku zasadniczego zarysowania należałoby w tym przypadku postąpić się kryterium weryfikującym możliwość powstania rys od obciążeń wymuszonych i zewnętrznych [6, 10]. W normie [6] nie podano procedur projektowania ani wykonywania połączeń ruchomych. Niniejsze zasady mają wynikać z ogólnych zasad projektowania i wykonywania połączeń stosowanych w danym kraju oraz dostępnych rozwiązań technologicznych. Ponadto w załączniku informacyjnym N [6] w tabeli N.1 (tabela 1) zawarto dodatkowe postanowienia dotyczące projektowania połączeń przy kontroli zarysowania.

Przykładową realizacją zbiorników wg wariantu pierwszego (tabela 1) wraz z analizą wyężenia i zarysowania ścian zbiornika średniej masywności przedstawiono w pracy [8]. W niniejszej technologii realne jest wykonanie średniomasywnych płyt dennych zbiornika w jednym cyklu betonowania o wymiarach rzutu poziomego 50x100 m oraz monolitycznie ciągłych średniomasywnych ścian długości 100 m z podziałem

Tabela 1. Projektowanie połączeń przy kontroli zarysowania [6]

Wariant	Metoda rozwiązania	Odległość pomiędzy połączeniami ruchomymi	Zbrojenie
Obliczanie przy założeniu oporów. Nie stosuje się połączeń ruchomych.	Ciągłość, pełne skrępowanie.	Na ogół bez połączeń ruchomych można rozważyć pewną liczbę rzadko rozstawionych połączeń, pożądanym wówczas, gdy oczekuje się wystąpienia odkształceń wymuszonych o znacznej wartości (od temperatury lub skurczu).	Zbrojenie zastosowane zgodnie z Rozdziałem 6 (tj. spełnienie wymagań SGN) i 7.3 (kontrola zarysowania – przy założeniu pełnych oporów).
Zarysowanie kontroluje się poprzez obecność połączeń ruchomych.	Minimalne skrępowanie, połączenia ruchome.	Wykonane połączenia ruchome w największym rozstawie 5 m lub 1,5-krotnej wysokości ściany.	Zbrojenie zastosowane zgodnie z Rozdziałem 6 (tj. spełnienie wymagań SGN), ale nie mniejsze niż minimum podane w 9.6.2 do 9.6.4, (tj. spełnienie wymagań dotyczących warunków konstrukcyjnych zbrojenia).

na krótsze segmenty, przy jednoczesnym spełnieniu warunku wodoszczelności. Rozwiązanie to wymagało, aby zbrojenie lokalnie ułożone było w kilku warstwach. Przykładowo w dolnych partiach ścian stopień zbrojenia wynosił 1,8%, co wynikało z konieczności ograniczenia maksymalnej szerokości rysy do 0,1 mm i skutkowało bardzo niskim stopniem wyężenia zbrojenia.

W drugim wariantcie (tabela 1) maksymalny rozstaw połączeń ruchomych jest ustalony jako maksymalna wartość spośród 5 m i $1,5H$ (gdzie: H – wysokość ściany). Rozstaw ten wynika z założenia, że gdyby nie było połączeń ruchomych, to rozstaw rys (w ścianie niespełniającej warunku minimalnego stopnia zbrojenia) wynosiłby $1,5H$. Założenie to nie jest zgodne z podejściem zawartym w p. 7.3.4 (5) [6], wg którego rozstaw rys, dla przypadku ścian skrępowanych w podstawie i poddanych obciążeniu wymuszonemu, należy przyjąć równy $1,3H$. W przypadku realizacji zbiorników dużych pojemności, konieczność wykonywania połączeń ruchomych, w małych rozstawach może być technologicznie kłopotliwa. Niemniej jednak wymagana tylko „umiarkowana” ilość zbrojenia oraz niemal całkowita eliminacja wpływu obciążeń wymuszonych od więzów zewnętrznych jest podstawową zaletą tego wariantu. Należy podkreślić, że połączenia ruchome są stosowane w celu uzyskania korzystniejszego schematu statycznego całej konstrukcji lub poszczególnych jej elementów. Z takiego rozwiązania wynikają przede wszystkim korzyści ekonomiczne, czasami też udogodnienia konstrukcyjno-wykonawcze. Efektywność ograniczenia zarysowania poprzez połączenia ruchome zależy od ich właściwej lokalizacji. Można ją zdefiniować jako miejsce, w którym mogą powstać rysy, gdy nie zastosujemy połączeń ruchomych. Wszystkie połączenia ruchome powinny być projektowane i konstruowane w ten sposób, aby zachowana była wodoszczelność przez cały okres pracy złącza. Połączenia ruchome mogą stanowić częściową lub całkowitą przerwę w przekroju elementu, która może być wykonana na etapie wznoszenia zbiornika lub powstanie po wystąpieniu obciążenia.

Zgodnie z tabelą 1 w drugim wariantcie ilość zbrojenia wynika ze SGN oraz warunków konstrukcyjnych rozmieszczenia zbrojenia. W tym podejściu nie stosuje się zbrojenia wynikającego z ograniczenia szerokości rys, gdyż całe odkształcenie ma być skumulowane w połączeniach ruchomych. W wariantcie pierwszym dodatkowo należy uwzględnić zbrojenie wymagane z uwagi na kontrolę zarysowania wg p. 7.3 [6]. Dopuszczalny stopień zbrojenia pionowego w ścianach, podany w p. 9.6.2 [5], jest w przedziale od 0,2% do 4%. Górną granicę można przekroczyć, gdy zostanie zapewnione właściwe zagęszczenie betonu i wymagana jego wytrzymałość. W miejscach zakładu zbrojenia granicę tę można podwoić. Ponadto wymaga się, aby odległość pomiędzy sąsiednimi prętami nie przekraczała trzech grubości ściany i 400 mm. Tak duży rozstaw prętów zbrojeniowych jest właściwy jedynie dla nielicznych przypadków ścian żelbetowych. Jednak w przypadku zbiorników rozstawy zbrojenia muszą być zdecydowanie mniejsze, co wynika zarówno ze SGN jak i SGU. Z kolei w p. 9.6.3 [5] wymaga się, aby minimalne zbrojenie poziome stanowiło 25% zbrojenia pionowego, a stopień zbrojenia

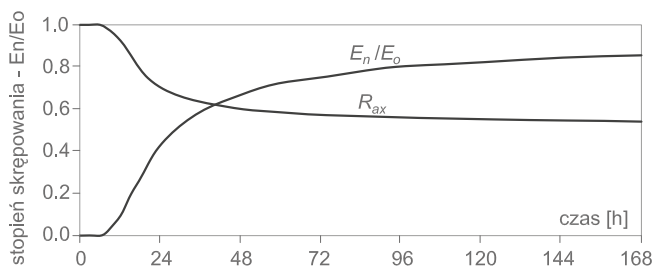
nie był mniejszy niż 0,1%. Ponadto rozstaw zbrojenia powinien być nie większy niż 400 mm. Analogicznie jak w przypadku zbrojenia pionowego nie spotyka się tak niskiego stopnia zbrojenia ścian zbiorników żelbetowych na ciecz, od których wymaga się spełnienia warunku szczelności. Przykład awarii cylindrycznego zbiornika żelbetowego podczas próby szczelności, w którym poziomy stopień zbrojenia równy był 0,38% i spełniał powyższe kryteria konstrukcyjne, przedstawiono w pracy [9]. Należy dodać, iż ściany zbiorników najczęściej pracują jako elementy rozciągane, zginane, mimośrodowo rozciągane lub ścisane zarówno na kierunku pionowym, jak i poziomym. Stąd też warunki konstrukcyjne rozmieszczenia zbrojenia muszą również uwzględniać wytyczne w zakresie konstruowania zbrojenia w płytach wg p. 9.3 [5].

3. Segment ściany skrępowanej na trzech krawędziach

Jednym z zaprezentowanych rozwiązań połączeń ruchomych w pracy [11] było połączenie pozwalające na częściowo ograniczone skracanie betonu. W tym przypadku, przy dopuszczeniu różnego poziomu naprężeń w zbrojeniu znajdującym się w połączeniu, należy oczekiwać każdorazowo innej podatności złącza oraz różnej szerokości rysy w połączeniu. Sposób zbrojenia w połączeniu będzie zasadniczo wpływał na wielkość skrępowanej części odkształcenia wymuszonego, które „zamrożone” w segmencie ściany skutkuje naprężeniami rozciągającymi, w następstwie których mogą powstać rysy w najbardziej skrępowanych częściach segmentu. W projektowaniu inżynierskim efekt ten uwzględnia się we współczynniku skrępowania R_{ax} [6]. Powszechnym rozwiązaniem występującym w praktyce jest segment ściany wykonany pomiędzy istniejącymi segmentami, tj. skrępowany na trzech krawędziach. W takim przypadku wg PN-EN 1992-3 [6] wartość poziomego stopnia skrępowania R_{ax} należy przyjąć równą 0,5, ponadto nie uwzględnia się ani sposobu połączenia krawędzi pionowych z istniejącymi segmentami, ani sztywności segmentów wcześniej wykonanych. Jak można dowiedzieć, wartość poziomego stopnia skrępowania R_{ax} podana w PN-EN 1992-3 [6] ustalono również przy całkowitym pominięciu wpływu skrępowania krawędzi pionowych na kierunku pionowym (pomimo wskazania wartości $R_{ay} = 0,5$ w dolnych partiach ściany). Gdyż jedynie przy takim założeniu wartość R_{ax} jest stała na całej wysokości i szerokości segmentu. Z punktu widzenia sposobu wykonywania połączeń konstrukcyjnych ścian zbiorników żelbetowych istotne jest określenie stopnia skrępowania dla warunków zamocowania krawędzi pionowych zbliżonych do tych występujących w praktyce.

Określenie wartości R_{ax} segmentów uzupełniających powinno być wykonane przy uwzględnieniu sztywności sąsiednich ścian (zwykle o tym samym przekroju poprzecznym, lecz odpowiednio wyższym module sprężystości). Ponadto istotne jest określenie wpływu samego zarysowania styku, a co za tym idzie stopnia zbrojenia połączenia pionowego na wartość R_{ax} .

W niniejszych obliczeniach styk pomiędzy segmentami zamocowano z uwzględnieniem elementów kontaktowych o różnej



Rys. 1. Zmiana stosunku sprężystości elementu zabetonowanego do modułu sprężystości jego fundamentu oraz wynikająca z tego zmiana zewnętrznego stopnia skrępowania określona na podstawie ACI 207 [1] według [2] (przy założeniu $A_n/A_o = 1$)

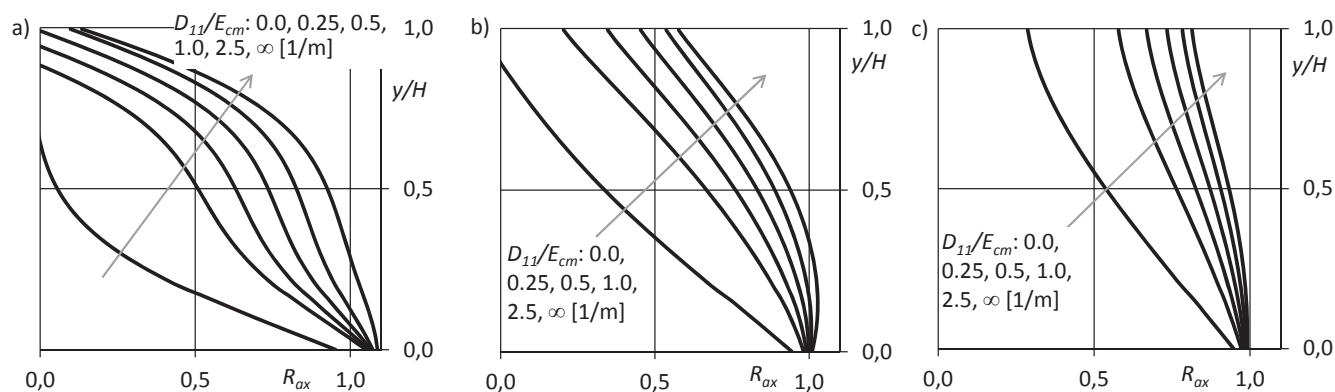
sztywności podłużnej D_{11} . Na podstawie niniejszego podejścia możliwe jest określenie dla danej sztywności D_{11} odpowiadającego jej stopnia zbrojenia w połączeniu, dla wcześniej ustalonych parametrów geometrycznych ściany. Przy obliczaniu zewnętrznego stopnia skrępowania według ACI 207 [1] rekomendowany stosunek modułów sprężystości ściany do modułu jej fundamentu jest w przedziale 0,7 do 0,8. Bamforth [2] uzasadnia ten przedział na podstawie analiz, które przeprowadzili w 1973 roku Browne i Blundell [3] (rys. 1).

Z rysunku 1 wynika, iż wskazany przedział $E_n/E_o = 0,7$ do $0,8$ odpowiada przedziałowi czasu od około 48 do 86 godzin. Przyrost wytrzymałości betonu wykonanego na cemencie CEM I nawet 20 lat temu był zdecydowanie szybszy niż na obecnie stosowanych niskokalorycznych cementach. Dodatkowo w betonach wykonywanych na niskokalorycznym cemencie wzrost właściwości mechanicznych betonu występuje jeszcze po 28 dniach jego dojrzewania. Przez co w praktyce wykonawczej często spotyka się niezyskanie w badaniach kontrolnych 28-dniowych projektowanych właściwości mechanicznych betonu. Jednak po upływie 90 dni beton ten ma często znacznie wyższe właściwości. Stąd też zdaniem autora w założeniach projektowych należy uwzględnić przede wszystkim różnice czasu w betonowaniu poszczególnych elementów, wynikające z realiów prowadzenia robót budowlanych na obiektach średniomasywnych. Zwykle po wykonaniu prac ziemnych wszystkie elementy

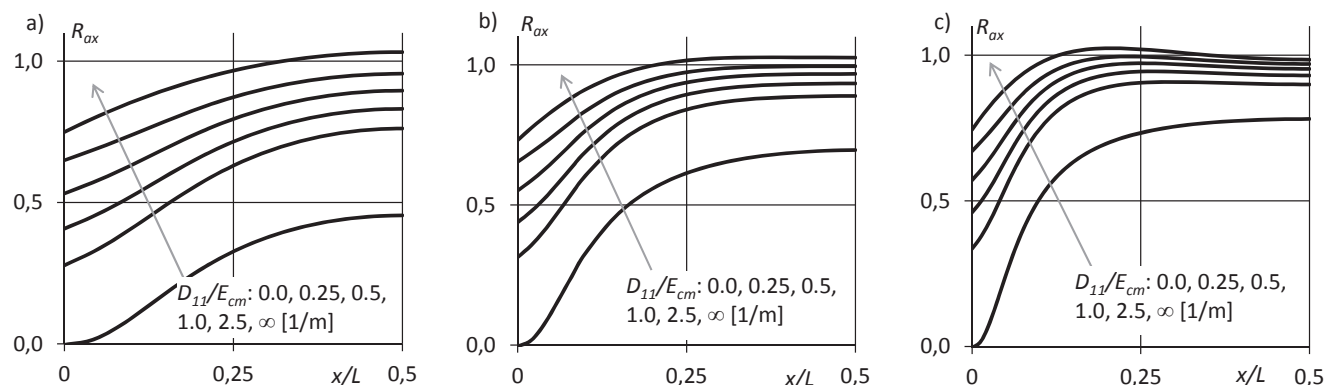
konstrukcyjne dużego zbiornika wykonywane są w ciągu niespełna jednego roku. W takich przypadkach różnice czasowe w betonowaniu płyty fundamentowej i partią ostatnich segmentów nierzadko wynoszą 6 miesięcy, co przekłada się na mniejszy stosunek E_n/E_o i odpowiednio większy stopień zewnętrznego skrępowania.

Kolejnym aspektem jest przyjęcie „skrajnego czasu”, w którym może powstawać rozciąganie, tj. jeszcze przed powstaniem pierwszej rysy. Praktyka budowlana pokazuje, że w przypadku braku wskazań (dokładniej zaniechań) ze strony projektanta, wykonawca z uwagi na koszty wypożyczenia większej liczby deskowań lub chęci przyśpieszenia tempa pracy na kolejnych częściach obiektu często zdejmuje deskowanie w kolejnym dniu po zabetonowaniu, co gorsze nie mając sprecyzowanego sposobu pielęgnacji, polewa ścianę silnym strumieniem wody, przez co doprowadza do nagłego jej schłodzenia. Dalsza zmiana temperatury ściany jest silnie zależna od wpływów klimatycznych.

Stąd też kolejne założenie w niniejszych obliczeniach dotyczy przyjęcia stałej wartości stosunku modułu sprężystości w segmencie skrępowanym (uzupełniającym) i krępującym odkształcenia (wykonanym wcześniej) $\alpha = 1/3 = E_{cm}(24h)/E_{cm}(28dni)$, co wynika bezpośrednio z własnych badań materiałowych [12] i zakłada ponadto: stosowanie cementów niskokalorycznych, co najmniej kilkumiesięczny okres przerwy pomiędzy betonowaniem fundamentu a ostatnimi segmentami zbiornika oraz przedwczesne zdjęcie deskowania (co według rysunku 1 np. dla 24 godzin (dla CEM I) odpowiadałoby wartości $E_n/E_o = 0,4$). Stosowanie mniejszych stosunków E_n/E_o w elementach połączonych monolitycznie będzie skutkowało znacznym wzrostem stopnia skrępowania, ale w przypadku modelowania połączeń, np. z zastosowaniem modelu rysy dyskretnej efektywność tego zmniejszenia stosunku modułów na wzrost stopnia skrępowania będzie zdecydowanie mniejsza. Ostatecznie w większości przypadków, na etapie chłodzenia segmentu, wartość α będzie zdecydowanie większa. Przyczyniać się to jednak będzie do uzyskania mniejszych wartości R_{ax} . Stąd też na etapie projektowania racjonalne jest przyjęcie zaproponowanej, zdaniem autora, całkowicie bezpiecznej wartości $\alpha = 1/3$. Dla tak przyjętych założeń wykonano obliczenia



Rys. 2. Stopień skrępowania R_{ax} w pionowym przekroju segmentu ściany (w odległości $x = L/2$) utwierdzonej na dolnej krawędzi oraz skrępowanych w różnym stopniu na krawędziach pionowych dla: a) $L/H = 1$, b) $L/H = 2$, c) $L/H = 3$



Rys. 3. Stopień skrępowania R_{ax} w poziomym przekroju segmentu ściany (na wysokości $y = 0,2H$) utwierdzonej na dolnej krawędzi oraz skrępowanych w różnym stopniu na krawędziach pionowych dla: a) $L/H = 1$, b) $L/H = 2$, c) $L/H = 3$

przyjmując stosunek D_{11} do E_{cm} ($24h$) równy: 0,0; 0,25; 0,5; 1,0; 2,5; ∞ [1/m], co dla teoretycznego przypadku np.: prętów $\varphi = 12$ mm, E_{cm} ($24h$) = 10 GPa oraz $\tanh(\lambda a) \approx 1,0$ (wg [7]) będzie stanowić odpowiednio stopień zbrojenia równy: 0,25; 0,5; 1,0; 2,5%.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono obliczone wartości stopnia skrępowania R_{ax} odpowiednio w przekroju pionowym ściany dla $x = L/2$ oraz wzdłuż jej długości dla $y = 0,2H$. Zdecydowanie największy wpływ mniejszej sztywności w połączeniu, tj. mniejszego stopnia zbrojenia, na wartość R_{ax} występuje w ścianach krótszych. W przypadku ścian dłuższych np. o stosunku $L/H = 8$ wpływ ten będzie pomijalnie mały.

4. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują na bardzo korzystny wpływ redukcji stopnia zbrojenia, w pionowych połączeniach segmentów ściany zbiornika, na stopień skrępowania segmentu. Takie rozwiązania można stosować jedynie przy zachowaniu wszelkich wymagań SGN i trwałości, gdyż szczelność, często też trwałość w tym miejscu zapewniona jest przez materiały uszczelniające.

Wartość współczynnika skrępowania R_{ax} nie jest, jak podano w PN-EN 1992-3 [6], stała po wysokości oraz wzdłuż długości segmentu skrępowanego na trzech krawędziach. Wraz ze wzrostem względnej wysokości ściany (y/H) oraz wzrostem podatności połączenia występuje znacząca redukcja R_{ax} i jest ona tym większa, im krótszy jest segment.

Zarówno stosunek L/H jak też stopień zbrojenia połączenia, poprzez stopień skrępowania R_{ax} ($L/2$; y), wpływa zasadniczo na wysokość rys. Praktycznym aspektem przeprowadzonej analizy jest możliwość określania znacznie mniejszych wartości R_{ax} dla górnych partii ścian, co bezpośrednio wpływa na znaczące oszczędności stali zbrojeniowej w tych obszarach.

Z otrzymanych wyników można wnioskować, iż nawet dla wartości $\alpha_D = 0$, tj. odpowiadającej braku zbrojenia w połączeniu (np. dylatacja), występuje w dolnych partiach ścian znaczącej wartości stopień skrępowania R_{ax} , który należy uwzględnić w sprawdzeniu kryterium zarysowania.

Wobec braku szczegółowych rozwiązań w PN-EN 1992-3 [6], przedstawionych w niniejszej pracy wyników analizy oraz

powyższych wniosków, można stwierdzić, że projektant stosując dany rodzaj połączenia powinien uwzględnić wpływ jego sztywności na rozkład stopnia skrępowania i wynikającą z tego wielkość skrępowanej części odkształcenia wymuszonego, która winna być uwzględniona w analizie zarysowania powłoki oraz sposobie jej zbrojenia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI Committee 207. Effect of Restraint, Volume Change and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete (ACI 207). American Concrete Institute, July 1973
- [2] Bamforth P. B., Early-age thermal crack control in concrete, CIRIA C660, London 2007
- [3] Browne R. D., Blundell R., Early age behaviour of mass concrete pours, Symposium on Large pours for R C structures, University of Birmingham, September, str. 42–65, 1973
- [4] BS 8007, Design of concrete structures for retaining aqueous liquids, British Standards Institution; London, Great Britain, 1987
- [5] Eurocode 2: PN-EN 1992-1. Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, str. 205, wrzesień 2008
- [6] Eurocode 2: PN-EN 1992-3. Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecz, str. 23, listopad 2008
- [7] Pettersson D., Thelandersson S., Crack development in concrete structures due to imposed strains. Part I: Modelling. Materials and Structures, 34(1), str. 7–13, 2001
- [8] Seruga A., Zych M., Research on Thermal Cracking of a Rectangular RC Tank Wall under Construction. I: Case Study. ASCE Journal of Performance Construction Facilities, 30(1): str. 04014198-1 ÷ 04014198-10, 2016
- [9] Seruga A., Zych M., Ślaga Ł., Awaria żelbetowego zbiornika WKF oraz sposób wzmocnienia stalowymi cięgnami bez przyczepności, Przegląd Budowlany 5/2015, str. 36–42
- [10] Zych M., Wpływ skrępowania elementów z betonu na wartość odkształceń wymuszonych według PN-EN 1992-3, Inżynieria i Budownictwo, 1/2015, str. 12–16
- [11] Zych M., Połączenia konstrukcyjne i ruchome w ścianach zbiorników żelbetowych w aspekcie obciążeń wymuszonych, Przegląd Budowlany 6/2017, str. 40–45
- [12] Zych M., Studium przypadku wzrostu właściwości mechanicznych betonu w oparciu o pomiary temperatury, Cement-Wapno-Beton, 6/2015, str. 383–392