

Gliwice, 16 wrzesień 2019

dr hab. inż. Beata Łaźniewska-Piekarczyk, prof. PŚ  
Politechnika Śląska  
Wydział Budownictwa  
Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych

Recenzja rozprawy doktorskiej  
**mgra inż. Romana Zimki**  
**pt. Pełzanie betonu na szybkowiązącym**  
**cemencie siarczano-gliniano-wapniowym w okresie tężenia**

**1. Podstawa formalna recenzji**

Podstawę opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej z dnia 25.04.2019 oraz pismo WGiG.b.510-2-8/2019 nawiązujące do tej uchwały podpisane przez Dziekana Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie Pana prof. dra hab. inż. Marka Cały z dnia 15.05.2019.

**2. Przedmiot, treść pracy i układ redakcyjny pracy**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Romana Zimki pt. **Pełzanie betonu na szybkowiąjącym cemencie siarczano-gliniano-wapniowym w okresie tężenia**, promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Adam Więckowski, prof. AGH.

Recenzowana rozprawa doktorska to 114 stronicowe opracowanie, które składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu oraz jedenastu rozdziałów wraz z wnioskami oraz bibliografią. Część główna pracy to 101 stron tekstu podstawowego.

We wstępie, Autor bardzo zwięźle przybliżył zagadnienia dotyczące betonu i cementu siarczano-gliniano-wapniowego, zagadnienia związane z ich pełzaniem.

Rozdziale 1 omówiono przedmiot badań oraz określono nadrzędny cel badań, następnie zamieszczono cele podrzędne pracy oraz przyjęto następującą tezę pracy: „modele matematyczne pozwalają opisać wybrane właściwości pełzania przy wczesnym obciążaniu młodego betonu na cemencie siarczano-gliniano-wapniowym”. Dokonano także zwięzłej analizy stanu wiedzy w rozważanej tematyce rozprawy doktorskiej wraz z przykładami zastosowania betonów z cementami na bazie siarczano-glinianu-wapnia, nazywanymi od skrótu angielskiego cementami CSA.

Rozdział 2 dotyczy zasady produkcji cementów szybkowiązujących na bazie klinkieru cementu portlandzkiego, zakresu i możliwości stosowania cementów glinowych oraz problemów wynikających z możliwości zamiany ich wytrzymałości. Omówiony został także problem minimalnej ilości wody, celem uzyskania odpowiedniego przebiegu reakcji związanej z powstawaniem ettringitu i monosiarczanu.

Rozdział 3 wyjaśnia zjawisko pęcznienia, podstawowe modele reologiczne oraz sposób tworzenia wieloparametrowych modeli reologicznych. Autor przedstawił klasyczne teorie dotyczące pęcznienia betonu: teorie dziedziczności, starzenia i Maślowa-Arutiuniana. Następnie wymienione zostały współczesne modele: Kelwina i Bażanta B3. Dokonano także zwięzłego omówienia strukturalnej teorii pęcznienia. Rozdział kończy opis procedury obliczania pęcznienia betonu według normy Eurokod 2.

Rozdział 4 dotyczy wyników wstępnych badań wpływu proporcji w/c na rozwój wytrzymałości betonu na cemencie CSA w funkcji czasu. Tak jak można było się tego spodziewać, wraz z ilością wody w betonie następuje spadek wytrzymałości na ściskanie. Wykazano, że betony z CSA, ze względu na kilkunastominutowy początek wiązania cementu, wymagają specjalnej technologii produkcji.

W rozdziale 5 zamieszczono rezultaty badań mieszanek cementu siarczano-gliniano-wapniowych z cementem portlandzkim w układach: 100%, 75%, 50%, 25% i 0% CSA w stosunku do pozostałej ilości CEM I 42,5R. Wykazano, że mieszanka CSA i cementu portlandzkiego CEM I charakteryzuje się opóźnionym początkiem wiązania. Ponadto, beton osiąga niższe wartości wytrzymałości na ściskanie.

Rozdział 6 dotyczy analizy wyników badań doświadczalnych związanych z rozwojem wytrzymałości betonu na ściskanie w funkcji czasu. Badania wytrzymałości betonu na ściskanie wykonano na próbkach walcowych  $\varnothing$  150 mm x 300 mm, po 1, 1,5, 2, 3, 24, 72, 168 i 672 godzinach od chwili zarobienia mieszanki wodą. Na podstawie uzyskanych wyników określono funkcję rozwoju wytrzymałości betonu CSA na ściskanie w czasie od 1 godziny do 28 dni. Następnie wykonano obliczenia wczesnej wytrzymałości betonu, według Eurokodu 2 z wykorzystaniem wyników doświadczalnych. Udowodniono, że wzoru normowego wg Eurokodu 2 nie należy stosować do betonów wykonanych na cemencie CSA.

Rozdział 7 dotyczy analizy wyników badań modułu sprężystości. Badania wykonano po 2, 3, 8 godzinach, następnie po 1 dniu i 3 dniach oraz 28 dniach. Badanie przeprowadzono wg instrukcji ITB 194/98, dotyczącej badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach. Wyniki badań dowiodły, że moduł sprężystości betonu na cemencie CSA i kruszywie krzemianowym jest znacznie mniejszy niż moduły sprężystości betonów zwykłych na cemencie portlandzkim, i wynosi 69,6 % wartości obliczonej zgodnie ze wzorem zalecanym w EC 2. Przy wcześnie działającym obciążeniu, współczynnik sprężystości podłużnej był jeszcze mniejszy i wynosił tylko 58,8 % wartości obliczonej wg zaleceń EC 2. Autor zaproponował analityczny sposób wyznaczania modułu sprężystości, w zależności od czasu dojrzewania i wytrzymałości na ściskanie betonów na cemencie siarczano-gliniano-wapniowym.

Rozdział 8 związany jest z analizą wyników pomiarów odkształceń, powstałych w wyniku skurczu betonu. Analiza wyników badań wskazała, że skurcz betonów na cemencie CSA jest mniejszy niż skurczu betonów wykonanych na cementach portlandzkich niskoskurczowych. Rezultaty pomiarów stanowiły bazę danych do określenia formuły matematycznej zależności skurczu od czasu.

W rozdziale 9 dokonano analizy wyników badań odkształcenia rzeczywistego betonu z cementem CSA. Celem było dowiedzenie, że beton na siarczano-gliniano-wapnia można

obciążyć, już po kilku godzinach od dodania wody do suchej mieszanki. Autor bazując na strukturalnej teorii pełzania betonu oraz przyjętym do analizy badań modelem reologicznym Burgersa, określił metodę analitycznego wyznaczania odkształcenia betonu w funkcji czasu jego tężenia, aż do 28 dni. Próbkę obciążono po 1 godzinie 45 minutach, 2 godzinach 20 minutach, 3 godzinach i po 8 godzinach, licząc od chwili zarobienia mieszanki wodą. Wartość oznaczonego odkształcenia została pomniejszona o wartość wcześniej pomierzonego odkształcenia, wynikającego ze skurczu betonu. W kolejnym kroku badań, obliczono wartości współczynników do wzoru na odkształcenie wg modelu Burgersa w funkcji czasu dojrzewania betonu. Następnie porównano rezultaty badań doświadczalnych z wartościami otrzymanymi wg zaleceń EC 2. Wykazano, że normowe wartości były większe o 60% do 90% od wartości uzyskanych z badań. Udowodniono tym samym, że sposób wyliczenia odkształcenia betonu wg Eurokodzie 2 nie jest słuszny do wyznaczania odkształcenia i pełzania betonów z cementem CSA, poddanych obciążeniu we wczesnym okresie jego dojrzewania.

Rozdział 10 przedstawia przykładowe kolejne kierunki przyszłych prac badawczych autora. Przeprowadzone badania zostały wykonane wyłącznie dla jednej mieszanki betonowej na cemencie CSA o  $w/c = 0,5$  o temperaturze wynoszącej 20 °C. Konieczne jest rozszerzenie badań o inne betony o różnym  $w/c$  oraz stopniu wilgotności. Wobec docelowego sposobu wykorzystania takich betonów, tj. stosowania betonów na CSA do napraw dróg, zalecane jest zbadanie odporności na środowiska agresywne wg normy PN-EN 206, zgodnie z występującymi klasami ekspozycji betonu w przypadku konstrukcji drogowych, m.in. karbonatyzacji oraz mrozoodporności w obecności chlorku sodu lub chlorku wapnia.

Autor podkreślił brak bazy pomiarowej, szczególnie dotyczącej betonów o dużej wytrzymałości, bowiem badanie zagadnienia pełzania na próbkach normowych walcowych  $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  wymaga użycia pełzarek o większej sile obciążenia niż stosowanych dotychczas.

W ostatnim rozdziale 11 dokonano podsumowania uzyskanych wyników badań i dokonanych analiz. Autor rozprawy wnioskuje, że model Burgersa stosowany w strukturalnej teorii pełzania, poprawnie określa odkształcenia wcześniej obciążonego betonu na cemencie CSA. Podobnie, jak to ma miejsce w przypadku betonów na cemencie portlandzkim, w modelowaniu odkształceń pełzania betonu z CSA wcześniej obciążonego przyjęto, że są one stałą wartością parametrów materiałowych, z powodu trudności ich oszacowania i zmienności w trakcie działania obciążenia.

Rozprawa doktorska zawiera na końcu spis literatury wynoszący 106 pozycji.

### **3. Ocena merytoryczna pracy**

Uwzględniając zakres wykonanych w pracy doktorskiej badań i analiz można stwierdzić, że recenzowana praca doktorska ma przede wszystkim charakter analityczno-doświadczalny. Tytuł pracy dobrze odzwierciedla zakres prowadzonych badań i analiz. Problem pełzania betonu jest zagadnieniem wciąż aktualnym i złożonym. Wobec wciąż nowo powstającym rodzajom betonu, zjawisko ich pełzania każdorazowo wymaga nowego oznaczenia. W przypadku betonu z szybkowiążącym cementem siarczano-gliniano-wapniowym nie było wcześniej takich badań co stanowi o innowacyjności pracy. Teza określona w pracy została postawiona poprawnie. Kolejno po sobie występujące rozdziały stanowią spójną całość, w której poszczególne podrozdziały i określone w nich zadania podporządkowano nadrzędnemu celowi badań. Dokonano poprawnej analizy uzyskanych wyników badań. Badania niezwykle pracochłonne, przeprowadzono w prawidłowy i rzetelny sposób. Cel

badania został osiągnięty, a sformułowana przez Autora teza została udowodniona.

### **Główne osiągnięcia pracy**

Główne osiągnięcia pracy to analiza doświadczalno-teoretyczna wyników badań pęcznienia betonu na szybko wiążącym cemencie siarczano-gliniano-wapniowym w okresie tężenia. Badanie odkształceń betonu CSA należy do badań kosztochłonnych, pracochłonnych, wymagających dużej staranności i dokładności, a także uwzględnienia wpływu warunków otoczenia (temperatury i wilgotności), jak i zmiennych parametrów materiałowych składników betonu. Autor bardzo rzetelnie zrealizował założony przez niego program badań.

Za najważniejszy oryginalny dorobek poznawczy Autora uważam także analizę doświadczalno-teoretyczną zagadnienia pęcznienia betonu na szybko wiążącym cemencie siarczano-gliniano-wapniowym w okresie tężenia oraz adaptację modelu Burgersa na podstawie wyników badań własnych dla betonów CSA.

### **Uwagi o charakterze dyskusyjnym**

Temat podjęty w pracy doktorskiej jest aktualny i ma charakter aplikacyjny. Zagadnienie odkształceń betonów naprawczych, szybko twardniejących jest zagadnieniem złożonym, skomplikowanym ze względu na zmienność czynników materiałowych i procentowy udział ich występowania. Literatura przedmiotu nie ujmuje zagadnienia pęcznienia betonu na szybko wiążącym cemencie siarczano-gliniano-wapniowym, obciążonym we wczesnym wieku jego dojrzewania, tj. w okresie od ok. 2 godzin do 8 godzin od momentu wymieszania składników z wodą. Stanowi to o zasadności podjęcia analizy rozważanego zagadnienia. Problematyka ta, istotna m.in. ze względu na określenie wielkości odkształceń pęcznienia elementów z betonu poddanych stałemu obciążeniu ściskającemu. Badania prowadzono zgodnie z założonym głównym celem pracy.

Dojrzewanie betonu w wodzie powoduje zwiększenie jego objętości, które jest spowodowane postępującą hydratacją cementu, powodującą zwiększenie zawartości fazy C-S-H oraz reakcjami związanymi ze wzrostem objętości, przede wszystkim krystalizacją ettringitu i uwodnienia wolnego wapna. Jednak, jeżeli po pewnym czasie beton znajdzie się w powietrzu, którego wilgotność względna nie przekracza zwykle 60%, to jego skurcz będzie większy od pęcznienia i dojdzie do zarysowania. W związku z występującą czasem w praktyce koniecznością zmniejszenia a nawet eliminacji skurczu betonu opracowano technologię produkcji cementów bezskurczowych, a także ekspansywnych. Polega ona na zwiększeniu ilości powstającego ettringitu zapewniającego taki wzrost objętości betonu w trakcie jego dojrzewania, który zrównoważy lub przekroczy jej zmniejszenie w procesie suszenia. Jest kilka reakcji ekspansywnych, które można by wykorzystać w tym celu, jednak łatwe wpływanie na przebieg powstania ettringitu, poprzez zmiany składu roztworu w porach betonu, zapewnia przewagę tej fazy. Z tego względu ettringit jest powszechnie stosowany w technologiach wytwarzania cementów ekspansywnych lub bezskurczowych. W tym celu stosuje się dodatek tak zwanego „kompleksu Kleina”, który jest siarczano-glinianem wapnia, o wzorze  $3(\text{CA}) \cdot \text{CaSO}_4$ . W reakcji tej fazy z wodą powstaje bardzo szybko ettringit, a w celu pełnego wykorzystania tego dodatku proces prowadzi się w roztworze o odpowiedniej zawartości jonów wapnia i siarczanowych. Dodatek siarczano-glinianu wapnia jest jedną

z metod zapobiegania skurczowi betonu. Istnieją handlowe dodatki zawierające tę fazę z pewnymi innymi materiałami, na przykład z anhydrytem lub tlenkiem wapnia. Szczególnie dodatek wapna ma korzystny wpływ na ekspansję cementu z dodatkiem siarczano-glinianu; zwiększa on ekspansję nie tylko w początkowym okresie, lecz aż do zakończenia procesu, co wykorzystano w cemencie wapniowo siarczano-glinianowym (CSA), mineralnym spoiwie hydraulicznym, wytwarzanym w wyniku przemiatu klinkieru wapniowo siarczano-glinianowego oraz siarczanu wapnia. Głównym składnikiem mineralnym klinkieru CSA jest ye'elimit ( $\text{Ca}_4(\text{AlO}_2)_6\text{SO}_4 / \text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ ). Prace badawcze nad właściwościami i wykorzystaniem ye'elimitu były prowadzone od lat 50- i 60-tych XX w. Klinkier wapniowo siarczanoglinianowy (CSA) charakteryzuje się odmiennym składem chemicznym i mineralogicznym niż klinkier portlandzki. W konsekwencji inny jest przebieg hydratacji spoiw z jego udziałem, co w głównej mierze decyduje o właściwościach cementu wapniowo siarczanoglinianowego i kompozytów z jego udziałem. Ye'elimit w reakcji z wodą tworzy uwodniony monosiarczanoglinian wapnia i wodorotlenek glinu, a w obecności siarczanu wapnia powstaje ettringit i wodorotlenek glinu. W obecności większej ilości wodorotlenku wapnia tworzy się tylko ettringit. Powstawanie ettringitu odpowiada za szybki przyrost wytrzymałości wczesnej oraz ograniczenie skurczu, a przy stosunkowo wysokim dodatku gipsu, również za ekspansję. Z powstawaniem dużych ilości ettringitu związane jest zjawisko „samoosuszania”, gdyż do wytworzenia ettringitu potrzebne są 32 cząsteczki wody. Klinkier siarczanoglinianowy, jako drugi pod względem ilościowym składnik fazowy, zawiera belit.

Cement CSA charakteryzuje się znacznie niższym skurczem w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I 52,5R, natomiast spoiwa otrzymane poprzez zmieszanie cementu siarczanoglinianowego z cementem portlandzkim CEM I pozwalają uzyskać kompozyty (zaczyny, zaprawy i betony) bezskurczowe lub wykazujące niewielką ekspansję. Bardzo ważna jest proporcja między ilością CSA i cementem portlandzkim ze względu na zmiany objętościowe twardniejącego zaczynu (skurcz/ekspansja). Literatura podaje, że najmniejszy skurcz występuje przy układzie 37% CEM I 52,5R oraz 63% cementu CSA (np. *Batog M., Synowiec K., Dziuk D., Właściwości betonu z cementem wapniowo-siarczanoglinianowym, Budownictwo-Technologie-Architektura, październik-grudzień 2018; Batog M., Synowiec K., Dziuk D., Maurizio M., Beton zawierający cement wapniowo-siarczanoglinianowy (CSA) Materiały Budowlane, 2018/10*). Autor rozprawy doktorskiej nie wykorzystał informacji na temat wielkości skurczu, podanego w literaturze projektując swoje badania i udziały CSA wobec cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Swoje badania ograniczył jedynie do badania wytrzymałości. Proszę Autora więc o wyjaśnienie takiego postępowania i zastosowania CEM 42,5R zamiast CEM I 52,5R. Ponadto, proszę o wyjaśnienie, dlaczego wytrzymałość mieszanin CEM 42,5R i CSA charakteryzuje się mniejszymi wartościami wytrzymałości niż sam cement CEM I 42,5R i CSA? Powstawanie ettringitu odpowiada za szybki przyrost wytrzymałości wczesnej. Czy zdaniem Autora, jest możliwe korygowanie składu mieszanki cementów CSA i cementu portlandzkiego, celem przyspieszenia narastania wytrzymałości wczesnej betonu? Brakuje wyjaśnienia na ten temat w rozprawie doktorskiej i analizie literatury. Proszę także o wyjaśnienie, dlaczego beton we wczesnym okresie twardnienia ma niższą wytrzymałość nawet niż beton z CEM I 42,5R? Beton z taką samą ilością CSA i cementu portlandzkiego względem siebie, tj. 50% i 50%, był analizowany m.in. w publikacji: *Synowiec K., Dziuk D., Marchi M., Beton zawierający cement wapniowo-siarczanoglinianowy (CSA), Materiały Budowlane, 2018/10- rys. 10*, gdzie potwierdzono niższą wytrzymałość betonu z CSA i CEM 42,5R w ilościach po 50%, ale wytrzymałość betonu z tymi cementami była większa w stosunku do betonu tylko z CEM I 42,5R. Ponadto, w pracy na str. 54 w tablicy 5.1.

Autor wykazał, że wczesna wytrzymałość betonu z CEM I 42,5 R, w każdym okresie jego dojrzewania, jest większa niż betonu CSA. Proszę o wyjaśnienie powodu odmienności uzyskanych wyników przez autora.

Ponadto, pomijając cel pracy, dlaczego analizowano tylko wytrzymałość betonu do 7 dni jego dojrzewania, pomijając dalsze okresy narastania wytrzymałości betonu? Wytrzymałość 28 dniowa betonu z cementem CSA i cementem portlandzkim może być nieznacznie różna od wytrzymałości betonu wykonanego tylko z cementem CSA. Brak analizy literatury w tym zakresie.

Wykazano w badaniach wstępnych wpływ stosunku w/c na konsystencję i wytrzymałość betonu na ściskanie co jest zgodne z aktualnym stanem wiedzy w tym zakresie w technologii szeroko rozumianych betonów.

Analiza literatury poczyniona przez recenzenta wskazuje, że kompozyty z cementem wapniowo siarczanoglinianowym charakteryzują się bardzo dobrą odpornością na agresję siarczanową w porównaniu do cementu portlandzkiego CEM I. W cemencie portlandzkim czynnikiem decydującym o odporności na agresję siarczanową jest zawartość w klinkierze portlandzkim glinianu trójwapniowego  $C_3A$ , który wchodząc w reakcję z jonami siarczanowymi tworzy ettringit. Powoduje to wzrost objętości, a gdy na etapie, w którym matryca cementowa nie ma zdolności do odkształceń (jest już stwardniała) zachodzi tzw. wtórne powstawanie ettringitu, następuje jej stopniowa destrukcja. W kompozytach z cementu wapniowo siarczanoglinianowego, ettringit powstaje w wyniku reakcji ye'elimitu ( $C_4A_3S$ ) z wodą we wczesnej fazie hydratacji. Brak obecności glinianu trójwapniowego  $C_3A$  i innych źródeł glinu powoduje, że w okresie późniejszym nie powstaje „wtórny” ettringit. Skutkuje to wyższą odpornością na agresję siarczanową matrycy cementowej z cementów siarczanoglinianowych CSA. Odczyn pH w zaczynie z cementu wapniowo siarczanoglinianowego wynosi 10,5-11,0, a w zaczynie z cementu portlandzkiego jest powyżej 13, co jest korzystne z punktu widzenia zapobiegania reakcji alkalia-reaktywna krzemionka. Niższy odczyn pH cieczy porowej z cementem CSA przyczynia się natomiast do szybszego postępu karbonatyzacji, co może przekładać się na obniżenie zdolności do pasywacji stali zbrojeniowej przez otulinę zbrojenia. Wpływ na zdolność pasywacji stali zbrojeniowej ma także szczelność i grubość otuliny, która blokuje wnikanie szkodliwych czynników do powierzchni zbrojenia. Czynnikiem wpływającymi na zwiększenie możliwości pasywacji stali zbrojeniowej w kompozytach cementowych z udziałem cementu CSA są: dodatek cementu portlandzkiego CEM I > 15%, obniżenie porowatości poprzez zmniejszenie współczynnika woda/cement. Ponadto obecność cementu portlandzkiego obniża wysoką kosztowność betonu CSA. Wobec tego obecność CEM I jest pożądana z tego względu w składzie betonu CSA. Proszę o wyjaśnienie Autora, dlaczego tego zagadnienia nie uwzględniono przy kompozycji składu betonu w dalszej pracy doświadczalnej i wybranym składzie betonu do badań zasadniczych, skoro beton ma służyć szeroko rozumianym aplikacjom inżynierskim? Natomiast z punktu widzenia przeznaczenia takich betonów, ważne jest zachowanie konsystencji w czasie transportu w różnych warunkach temperatury otoczenia. Według zaleceń EC 2 wytrzymałość na ściskanie betonu w wieku  $t$ , zależy od rodzaju cementu, temperatury i warunków jego pielęgnacji, jak sam zresztą Autor pisze na str. 30 swej pracy., co ujmuje wzór (2.1) i (2.2). Zdaniem recenzenta prezentowana przez autora zależność obowiązuje jedynie dla zbadanych rodzajów betonu, a więc dla bardzo ograniczonego zbioru. Rozwój wytrzymałości na ściskanie w czasie dla betonu CSA bez udziału cementu portlandzkiego określono dla w/c = 0,5. Podstawowym tematem pracy było określenie odkształcenia wcześniej obciążonego betonu na cemencie siarczano-gliniano-

wapniowym. Autor słusznie podkreślił, że przy innych proporcjach w/c, innym doborze kruszywa, wilgotności i temperatury również wyniki obliczeń odkształcenia będą inne.

Analiza wyników badań podanych w literaturze krajowej i zagranicznej dowodzi, że betony wykonane wyłącznie na cemencie CSA charakteryzują się większym skurczem niż mieszanki cementów CSA i CEM I. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego do badań zasadniczych wybrano beton CSA, mimo dostępnej wiedzy na ten temat? Domniemam, że Autor kierował się swoimi wynikami wytrzymałości mieszanek CSA i CEM I 42,5R. Proszę zatem o wyjaśnienie, dlaczego wytrzymałości betonu z mieszankami CSA i CEM I 42,5R są niższe niż betonu wyłącznie z CSA lub z CEM 42,5R? Przecież cement CSA dodawany jest do cementu CEM I 42,5 R lub CEM I 52,5 R w celu przyspieszenia narastania wytrzymałości betonu w stosunku do betonu wykonanego tylko z cementem portlandzkim. Nie podjęto próby oceny skurczu betonu z cementem CSA i cementem CEM I 42,5 R.

Pełzanie betonu polega na przyroście odkształceń w wyniku stałego w czasie naprężenia. Pełzanie jest zależne od: klasy betonu, wieku betonu w chwili obciążenia, wilgotności środowiska, miarodajnego wymiaru elementu. Zjawisko to zachodzi w warunkach swobodnych odkształceń elementu przy długotrwałym działaniu obciążenia. W efekcie narastają plastyczne deformacje, wzrost odkształceń przy stałych naprężeniach. Pełzanie to rozluźnienie struktury betonu od obciążeń rozciągających oraz zagęszczenie struktury od obciążeń ściskających. Autor rozprawy do określenia autorskiej, zmodyfikowanej zależności analitycznej, opisującej pełzanie betonu na szybkowiązącym cemencie siarczano-gliniano-wapniowym przyjął wybrany przypadek wilgotności względnej powietrza, w której następuje skurcz betonu: jak napisano na str. 70 pracy: „próbki przechowywano w pomieszczeniu o wilgotności 50% i temperaturze 20°C”. Nie poddano kalibracji zaproponowanego wyrażenia analitycznego dla innych warunków cieplno-wilgotnościowych powietrza. W rzeczywistości, temperatura i wilgotność otoczenia są bardzo zróżnicowane i zmienne w czasie, co wpływa na tempo narastania wytrzymałości betonu, jego pierwotne jak i końcowe odkształcenia, a więc i pełzanie. Podobnym wpływem charakteryzuje się stosunek wodno-cementowy w betonie. Tak więc wnioski wyciągnięte z badań dotyczą szczególnego przypadku betonu, o ustalonym składzie. Niemniej jednak, należy też podkreślić dużą wartość naukową pracy, rzetelność prowadzenia prac laboratoryjnych oraz analiz teoretycznych dotyczących zagadnienia pełzania betonu, z których wyciągnięto poprawne wnioski.

#### **Uwagi o charakterze redakcyjnym**

Ogólnie praca napisana jest poprawnym językiem, myśli z reguły formułowane są jednoznacznie. Recenzent zauważył jednak pewne uchybienia. Nie mają one wpływu na merytoryczną ocenę pracy. Ważniejsze uwagi to: str. 4 – jest  $f_{ck}(t_0)$  – średnia wytrzymałość na ściskanie w  $t_0$  chwili obciążenia, powinno być  $f_{cm}(t_0)$ ; str. 65, 66, wzory 7.2 i 7.3: brak obliczeń istotności wpływu czynników. Rozdziały 5 i 9 powinny być poszerzone z uwzględnieniem wyników dostępnych w literaturze krajowej i zagranicznej.

#### **4. Wniosek końcowy**

Recenzowana rozprawa doktorska jest cenną analizą teoretyczną dotyczącą problemu pełzania betonu na szybkowiąjącym cemencie siarczano-gliniano-wapniowym

we wczesnym okresie tężenia. Rozważania teoretyczne powiązane z wynikami doświadczalnymi. Analiza pełzania betonu CSA we wczesnych okresach tężenia jest nowa, co stanowi o zasadności podjęcia tematu. Autor głównie zajmował się analizą teoretyczną pełzania betonu CSA w okresie tężenia. Praca ma również znaczenie praktyczne. Dużą popularność cementy wapniowo siarczanoglinianiowe (CSA) zyskały w Chinach, gdzie są produktami znormalizowanymi już od ponad 30 lat. Obecnie są tam produkowane w ilości około 2 mln ton rocznie. Betony wykonane na bazie cementu CSA znajdują coraz częściej zastosowanie przy naprawie i konserwacji dróg, mostów, wiaduktów, pasów startowych oraz szybkich prac naprawczych. W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz teoretycznych Autor rozprawy dowiódł, że jest możliwe bezpieczne obciążenie betonu CSA już w momencie 2 godzin od jego wykonania, z uwzględnieniem niższego modułu sprężystości niż dla betonów wykonanych z cementu portlandzkiego.

Ogólnie można stwierdzić, że został podjęty i rozwiązany (poprzez badania laboratoryjne i analizę ich wyników) problem naukowy o znacznym stopniu trudności. Wykonane analizy, badania, obliczenia oraz porównania pozwoliły na udowodnienie tezy pracy oraz realizację głównego celu pracy. Udowodniono, że stosowany powszechnie w strukturalnej teorii pełzania można z powodzeniem stosować do opisu odkształceń wcześnie obciążonego betonu z cementem CSA. Odkształcenia obliczone przez Autora wg wzoru Burgersa oraz wyniki rzeczywistych pomiarów uzyskanych w laboratorium wykazały istotną zbieżność. Udowodniono ponadto, że wzór normowy zalecany w Eurokodzie 2 nie powinien być stosowany do obliczenia odkształceń pełzania dla wcześnie obciążonych betonów wykonanych z cementem CSA. Potwierdzono, że skurcz betonu CSA jest mniejszy niż betonu z cementem niskoskurczowym.

Recenzowana rozprawa wskazuje na kompetencję doktoranta, w szczególności w zakresie badań laboratoryjnych i interpretacji ich wyników.

W kolejnych krokach pracy naukowej recenzent proponuje podjąć próbę szerszej oceny właściwości betonu CSA oraz betonu z cementem CSA i portlandzkim, zarówno mieszanek w stanie plastycznym jak i stwardniałego betonu.

## 5. Konkluzja

Oceniając przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Romana Zimki spełnia warunki Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r., Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz z uwzględnieniem przepisów wynikających z ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 ze zm.) oraz odpowiednio stosowanych przepisów ustawy z dnia 14 czerwca 1960 r. Kodeks postępowania administracyjnego (Dz. U. z 2018 r. poz. 2096).

Wobec tego wnoszę o dopuszczenie pracy doktorskiej mgr inż. Romana Zimki do publicznej obrony.

*Beata Łażniewska-Piekarczyk*

*Dr hab. inż. Beata Łażniewska-Piekarczyk, prof. PŚ,  
Gliwice, dn. 16.09.2019*