

Nośność słupów z lekkiego betonu kruszywowego



dr inż.
EWELINA KOŁODZIEJCZYK
Politechnika Łódzka
Wydział Budownictwa,
Architektury i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0002-3533-4145



dr inż.
TOMASZ WAŚNIEWSKI
Politechnika Łódzka
Wydział Budownictwa,
Architektury i Inżynierii Środowiska
ORCID: 0000-0001-7303-4920

W pracy przedstawiono analizę numeryczną nośności przekrojów i smukłych elementów z betonu lekkiego kruszywowego (LWAC, z ang. *Lightweight Aggregate Concrete*) poddanych działaniu siły osiowej oraz momentu zginającego. Przyjęto nieliniowy model materiałowy betonu przedstawiony w Eurokodzie 2 (EC2).

Beton lekki kruszywowy (LWAC, z ang. *Lightweight Aggregate Concrete*) jest materiałem konstrukcyjnym, który znajduje szerokie zastosowanie przy produkcji elementów drobnowymiarowych, natomiast dużo rzadziej stosowany jest w konstrukcjach żelbetonowych monolitycznych czy prefabrykowanych. Głównym powodem zastępowania betonu zwykłego jego lżejszym odpowiednikiem jest redukcja ciężaru własnego konstrukcji. Z tego względu badania elementów wykonanych z tego materiału dotyczą głównie stropów [2–7], w których ciężar własny ma znaczący udział w całości obciążeń. Przypadkiem rzadko analizowanym są prętowe elementy z betonu lekkiego obciążone siłą osiową i momentem, jak słupy ram czy osiągnające znaczne ciężary transportowe słupy prefabrykowane. Duże możliwości dają w tym względzie nowoczesne mieszanki betonu lekkiego, które umożliwiają osiągnięcie wytrzymałości betonu konstrukcyjnego już dla gęstości od 1200 kg/m³ [8–10]. Główne obawy natomiast związane są z bardziej kruchym zachowaniem betonu lekkiego przy ściskaniu oraz zwiększonymi deformacjami związanymi z niskim modułem sprężystości. Kwestie te były poruszane m.in. w pracy [11] z 2004 roku, w której przedstawiono badania słupów wykonanych z betonu lekkiego o gęstości 1920 kg/m³ i wytrzymałości 60 MPa. Badania wykazały, że wprowadzenie skrępowania betonu poprzez silne zbrojenie poprzeczne wpłynęło korzystnie na zachowanie elementów w zakresie ciągłości przekroju oraz nośności pokrytycznej. W artykule analizowano również efekty drugiego rzędu i dokonano weryfikacji wyników uzyskanych metodą nominalnej krzywizny zawartej w EC2 [1], jednak badane słupy były stosunkowo krępe ($\lambda = 21$), co uniemożliwia odniesienie wyników do elementów, w których efekty drugiego rzędu są znaczące.

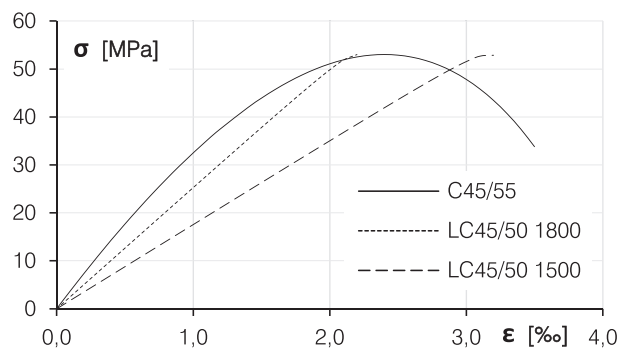
Celem tej pracy jest analiza przekrojów oraz słupów z LWAC z uwzględnieniem różnych gęstości betonu, stopnia zbrojenia oraz szerokiego zakresu smukłości zarówno w ujęciu nieliniowym, jak i w odniesieniu do uproszczonych metod zawartych w EC2 [1].

Założenia obliczeniowe

Postanowienia odnoszące się do stosowania LWAC zawarto w EC2 [1] w rozdziale 11. Zawiera on informacje o modelu obliczeniowym betonu, jaki może być stosowany do analizy i projektowania przekrojów z tego materiału. W obliczeniach można uwzględnić beton o gęstości ρ od 1000 do 2200 kg/m³. Moduł sprężystości LWAC $E_{f,cm}$ oraz odkształcenie graniczne ϵ_{cl} można wyznaczyć z zależności uwzględ-

niających średnią wytrzymałość na ściskanie f_{cm} i gęstość ρ betonu. W przedstawionej analizie przyjęto beton o wytrzymałości 53 MPa (analizę wpływu wytrzymałości betonu na nośność przedstawiono w pracy [12]). Rozpatrywano dwie gęstości odnoszące się do odmian lekkich: 1500 kg/m³, 1800 kg/m³ oraz beton normalny o gęstości 2400 kg/m³.

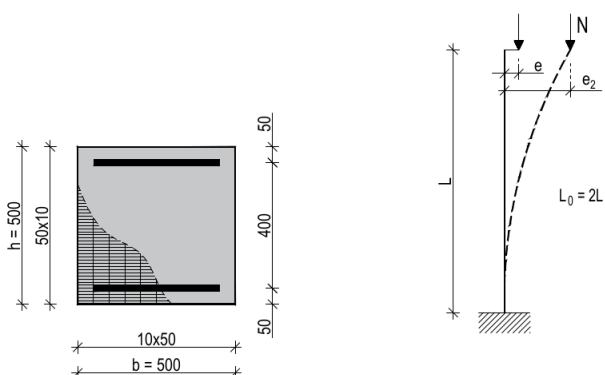
Nieliniową analizę parametryczną przeprowadzono w programie OpenSees. Model betonu ściskanego stosowany w obliczeniach przedstawiono na rys. 1., a wyznaczone parametry charakterystyki materiału zamieszczono w tabeli 1. Wytrzymałość betonu na rozciąganie pominięto. Przyjęto przekrój kwadratowy o boku 500 mm ($h = b$), którego model obliczeniowy pokazano na rys. 2. (po lewej). W obliczeniach zastosowano dwuliniowy model stali o granicy plastyczności 500 MPa bez wzmocnienia. Rozpatrywano dwa stopnie zbrojenia podłużnego: 2% oraz 0,5%.



Rys. 1. Nieliniowy model betonu w strefie ściskanej
Źródło: opracowanie własne

Tabela 1. Charakterystyka wytrzymałościowa betonu

Symbol	Gęstość kg/m ³	Wytrzyma- łość betonu MPa	Moduł sprężystości GPa	Odkształcenie przy największym naprężeniu ‰	Odkształcenie graniczne ‰
C45/55	2400	53	36,0	2,40	3,50
LC45/50 1800	1800	53	24,1	2,20	2,20
LC45/50 1500	1500	53	16,7	3,17	3,17

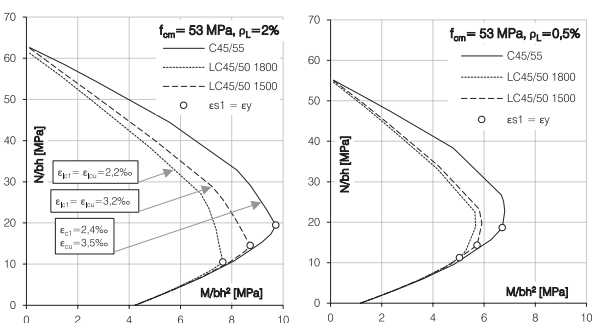


Rys. 2. Przekrój obliczeniowy (po lewej). Schemat statyczny (po prawej)
Źródło: opracowanie własne

Efekty drugiego rzędu analizowano dla słupa wspornikowego (założono 300 elementów typu nonlinearBeamColumn na długości). Schemat słupa przedstawiono na rys. 2. (po prawej). Analizowano trzy smukłości $\lambda = 42, 83$ i 125 , a w wybranych przypadkach również $\lambda = 62$ i 104 .

Nośność przekroju

Pierwsza część analizy dotyczyła przekroju żelbetowego wykonanego z betonu o różnych gęstościach. Na rys. 3. przedstawiono wykresy krzywych interakcji w układzie względnych wartości siły N/bh i momentu M/bh^2 . Zaprezentowano wyniki przekrojów o stopniu zbrojenia 2% (po lewej) i 0,5% (po prawej).



Rys. 3. Krzywe interakcji przekrojów z betonu o wytrzymałości 53 MPa, różnej gęstości oraz stopniu zbrojenia 2% (po lewej) i 0,5% (po prawej)
Źródło: opracowanie własne

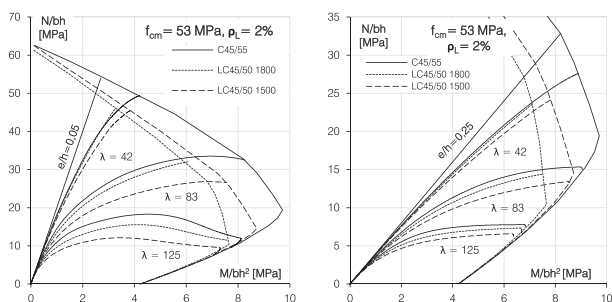
W obu przypadkach rodzaj betonu w niewielkim stopniu wpłynął na nośność przy osiowym ściskaniu. Spadek siły, który pojawił się dla przekroju z betonu LC45/50 1800, wynika z poziomu odkształcenia przekroju. Odkształcenie graniczne w tym wypadku wynosi $2,2\text{‰}$, co oznacza, że zbrojenie nie osiąga granicy plastyczności. Efekt zanika przy stopniu zbrojenia 0,5%, gdzie udział zbrojenia jest bardzo mały.

W obszarze bliskim czystego zginania (poniżej 10 MPa) wyniki są jeszcze bardziej zgodne. Analizując lokalizację punktów odnoszących się do osiągnięcia przez stal granicy plastyczności, widać, że po ich przekroczeniu o nośności decyduje zbrojenie.

Najbardziej znaczące różnice pojawiają się w połowie wysokości przekroju. Wpływ na to ma poziom odkształcenia zbrojenia. Uwidacznia się on na wykresie dla przekroju o silniejszym zbrojeniu i sprawia, że LC45/50 1500 o wyższym odkształceniu granicznym ($\epsilon_{ic1} = 3,2\text{‰}$) pozwala osiągnąć większą nośność przekroju niż LC45/50 1800 ($\epsilon_{ic1} = 2,2\text{‰}$). Drugi powód rozbieżności można zaobserwować na obu wykresach, ale jest on bardziej jednoznaczny dla niewielkiego stopnia zbrojenia 0,5% i jest to kształt charakterystyki betonu. Nieliniowa praca betonu zwykłego C45/55 poprzedzona wyższym modulem początkowym przekłada się na wyższą nośność przekroju w porównaniu do obu odmian lekkich.

Efekty drugiego rzędu

W pracy [12] analizowano nieliniowość geometryczną, która w przypadku elementów smukłych prowadzi do efektów drugiego rzędu. Przedstawiono wykresy siły osiowej w funkcji momentu zginającego. Analizowano dwie wartości względnego mimośrodu siły (e/h) 0,05 oraz 0,25 (rys. 4.).



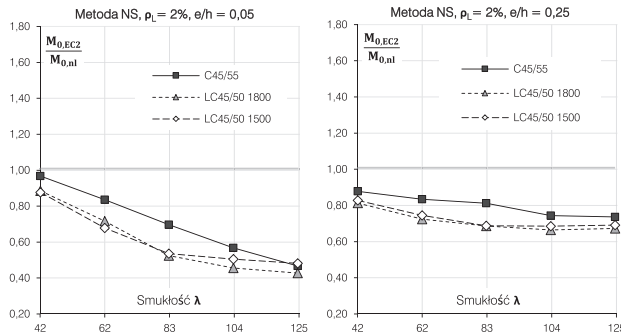
Rys. 4. Zależności N-M słupów o różnej smukłości z betonu o wytrzymałości 53 MPa i różnej gęstości. Mimośród względny siły $e/h = 0,05$ (po lewej) oraz $0,25$ (po prawej). Źródło: [12]

Na obu rysunkach widać, że efekty drugiego rzędu stają się bardziej znaczące wraz ze wzrostem smukłości. Największe przyrosty momentu drugiego rzędu wystąpiły dla słupa z betonu LC45/50 1500, natomiast najmniejsze dla przypadku LC45/50 1800, co wynika z zakończenia obliczeń przy niskim odkształceniu granicznym. Prawidłowość, która się pojawiła w obliczeniach przekroju, gdzie mniejsza gęstość wiązała się z większą nośnością, dla smukłych słupów zmienia się na przeciwną. Sztwyńsze słupy z betonu o większej gęstości (LC45/50 1800) doznają mniejszej redukcji nośności niż te o niższym module sprężystości (LC45/50 1500) i ostatecznie elementy z betonu o najniższej gęstości prawie we wszystkich przypadkach odnotowały najniższe siły maksymalne.

W kolejnym kroku odniesiono się do metod uwzględnionych w EC2 [1]. Należy tu dodać, że rozdział 11. EC2 nie mówi o żadnych zmianach odnośnie do analizy smukłych elementów z betonu lekkiego obciążonych siłą i momentem, w związku z czym należy zakładać, że mają tu zastosowanie metody przedstawione we wcześniejszych rozdziałach EC2 dla betonu zwykłego, czyli metoda nominalnej krzywej (NK) oraz nominalnej sztywności (NS). W komentarzu do Eurokodu 2 (załącznik 2.) [13] przedstawiono wyniki analizy parametrycznej obliczeń tymi metodami oraz porównano je do metody nieliniowej (NL). Obejmowała ona tylko beton zwykły i pokazała, że wyniki są szczególnie wrażliwe na wartość smukłości oraz mimośrodu siły. Podobne rozumowanie przedstawiono poniżej w odniesieniu do betonu lekkiego o różnych gęstościach. W obliczeniach bazowano na wzorach 5,31–5,37 [1] dla NK oraz 5,22 [1] dla metody NS. W metodzie NS współczynnik odnoszący się do rozkładu momentu pierwszego rzędu c_0 przyjęto równy 8, natomiast w metodzie NK dla całkowitej krzywej rozpatrywano c równe 8 oraz 9,86 jako wartości graniczne. Analiza nie uwzględniała wpływu pełzania ($\varphi_{ef} = 0$). Porównania dokonano poprzez wartości maksymalnych momentów pierwszego rzędu M_0 uzyskanych różnymi metodami.

Na rys. 5. przedstawiono wpływ smukłości na zgodność momentów uzyskanych metodami NS i NL. Rozważano dwa przypadki mimośrodu $e/h = 0,05$ oraz $0,25$. Wszystkie wyniki uzyskane metodą uproszczoną dla obu odmian betonu lekkiego okazały się bardziej konserwatywne niż te uzyskane dla betonu zwykłego. Dla wszystkich rodzajów betonu jest natomiast widoczny wzrost rozbieżności dwóch metod wraz ze wzrostem smukłości. Należy zauważyć, że punkty nomogramu uzyskane dla odmian lekkich są bardzo bliskie lub się pokrywają. Wynika to z faktu, że zarówno w metodzie NS, jak i w NL o wartości przemieszczeń drugiego rzędu decyduje sztywność przekroju (wartość E_{cm}), w związku z czym iloraz tych wartości pozostaje zbliżo-

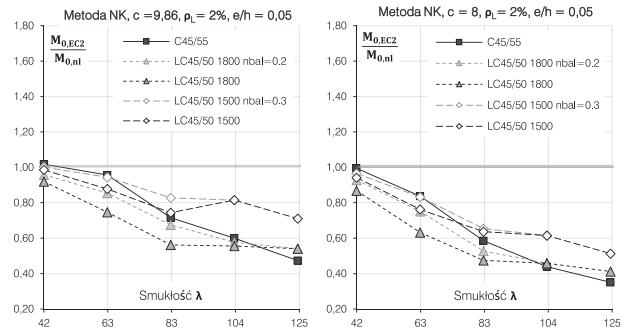
ny. Różnica w stosunku do betonu zwykłego wynika natomiast z empirycznej natury współczynników korekcyjnych K_c oraz K_s kalibrowanych zapewne głównie z wykorzystaniem wyników dla słupów z betonu zwykłego [13], których dwa zestawy przedstawiono w EC2 [1].



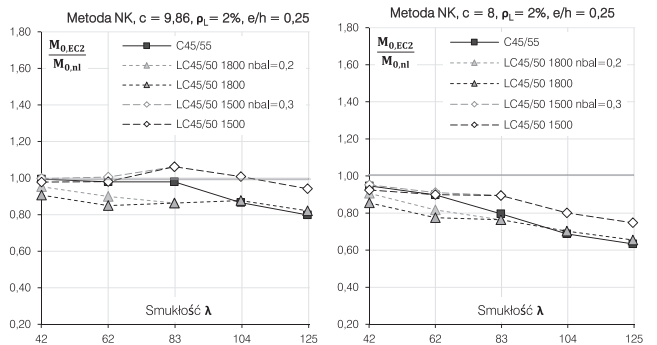
Rys. 5. Wpływ smukłości na zgodność wyników metody nominalnej sztywności (NS) z metodą ogólną dla słupów o wytrzymałości 53 MPa i różnej gęstości betonu (stopień zbrojenia 2%, mimośród względny siły $e/h = 0,05$ oraz $0,25$). Źródło: opracowanie własne

Wyniki porównania metody NK z metodą nieliniową przedstawiono na rys. 6. oraz 7. W każdym przypadku rozważono dwa przybliżenia rozkładu momentu całkowitego na długości elementu (moment stały i rozkład sinusoidalny). Należy zauważyć, że rzeczywisty rozkład momentu będzie wypadkową stałego momentu pierwszego rzędu oraz nieliniowego drugiego rzędu, a wartość odpowiadająca współczynnikowi c będzie zawierać się w zakresie przyjętych wartości, ale nie osiąga żadnej z nich. Przy braku możliwości oszacowania rzeczywistego współczynnika w zastosowaniach praktycznych należałoby posługiwać się bardziej konserwatywnym rozwiązaniem ($c = 8$). Najbardziej niepokojące wyniki uzyskano przy założeniu $c = 9,86$ dla betonu LC45/50 1500, gdzie maksymalny moment pierwszego rzędu uzyskany metodą uproszczoną przekroczył prawie o 10% moment z analizy nieliniowej (rys. 7.). Generalnie można stwierdzić, że metody NK i NL dają najbardziej zbliżone (iloraz około 1,0) wyniki dla słupów o niskiej smukłości (rys. 6. i 7.), a wraz ze wzrostem smukłości metoda NK daje wyniki coraz bardziej konserwatywne. Zgodnie z przewidywaniami efekt ten jest silniejszy przy założeniu stałego rozkładu momentu całkowitego. Trend uzyskany dla betonów lekkich wykazuje podobny przebieg, ale na różnych poziomach bezpieczeństwa. Zdecydowanie bardziej konserwatywne wyniki uzyskano dla betonu LC45/50 1800, dla którego dopuszcza się dużo niższe odkształcenie graniczne 2,2‰. Krzywna nominalna założona w EC2 [1] zakłada uplastycznienie zbrojenia dolnego i górnego, co w przypadku zbrojenia ściskanego w przekroju z tego betonu nie wystąpi. Podobne spostrzeżenia dla betonu zwykłego o wysokiej wytrzymałości przedstawiono w pracy [14]. Na wykresach można również zauważyć, że wyniki słupów z betonu zwykłego C45/55 dla małych smukłości zbliżają się do tych z betonu LC45/50 1500, natomiast dla dwóch największych smukłości do wyników elementów z LC45/50 1800. Można to wyjaśnić poziomem odkształcenia w rozważanych przypadkach. Przy małej smukłości słupów odpowiadające wyniki na krzywej interakcji znajdują się powyżej punktu odzwierciedlającego uplastycznienie stali rozciąganej (rys. 3., rys. 4.), w przekroju z betonu zwykłego osiąga jest odkształcenie bliskie granicznemu, zbliżone do wartości granicznej dla betonu LC45/50 1500 (3,2‰). Natomiast w przypadku dużych smukłości nie dochodziło do zniszczenia materiałowego, a odkształcenie we włóknie skrajnym ściskanym osiągało wartości zbliżone do tych dla betonu LC45/50 1800.

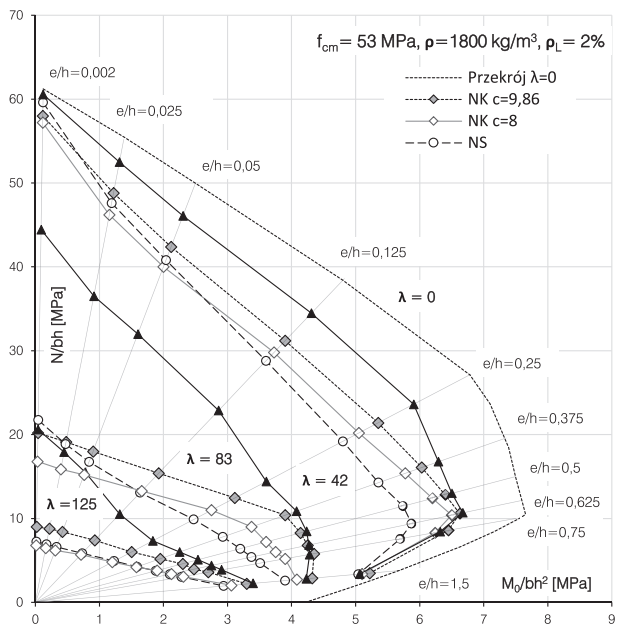
Na przedstawionych nomogramach uwzględniono również korektę zakładaną w obliczeniach wartości n_{bal} , przyjętą na podstawie krzywych interakcji uzyskanych dla poszczególnych odmian betonu (rys. 3.). Dla betonu LC45/50 1800 przyjęto $n_{bal} = 0,2$, natomiast dla LC45/50 1500 – $n_{bal} = 0,3$. Można zauważyć, że zmiana tego założe-



Rys. 6. Wpływ smukłości na zgodność wyników metody nominalnej krzywny (NK $c = 9,86$, NK $c = 8$) z metodą ogólną dla słupów o wytrzymałości 53 MPa i różnej gęstości betonu (stopień zbrojenia 2%, mimośród względny siły $e/h = 0,05$). Źródło: opracowanie własne



Rys. 7. Wpływ smukłości na zgodność wyników metod nominalnej krzywny (NK $c = 9,86$, NK $c = 8$) z metodą ogólną dla słupów o wytrzymałości 53 MPa i różnej gęstości betonu (stopień zbrojenia 2%, mimośród względny siły $e/h = 0,25$). Źródło: opracowanie własne



Rys. 8. Krzywa interakcji słupów z betonu o wytrzymałości 53 MPa i gęstości 1800 kg/m³ uzyskana różnymi metodami obliczeniowymi (stopień zbrojenia 2%). Źródło: opracowanie własne

nia pozwoliła uzyskać bardziej ekonomiczne wyniki dla słupów z betonu lekkiego o niższych smukłościach ($\lambda \leq 83$), szczególnie przy wyższym mimośrodku siły (rys. 6.).

Porównując wyniki dwóch odmian betonu lekkiego uzyskanych wg metody NS (rys. 5.) i NK (rys. 6., 7.), można zauważyć, że ta druga daje dużo mniej konserwatywne wyniki dla odmiany LC45/50 1500. Konkretnie war-

tości momentów maksymalnych pokazały, że tendencja uzyskana w metodzie NS pokrywa się ze spostrzeżeniami metody nieliniowej – smukłe słupy z betonu LC45/50 1800 miały wyższą nośność (rys. 4), odwrotnie było w metodzie NK: w tym przypadku we wszystkich rozważanych sytuacjach większą nośność miały słupy z betonu LC45/50 1500.

Na rys. 8. przedstawiono przykładowe krzywe interakcji dla betonu LC45/50 1800 uzyskane różnymi metodami obliczeniowymi. Jak wspomniano powyżej, przebieg krzywych odpowiadający analizie nieliniowej można zauważyć jedynie dla słupa o najniższej smukłości. W pozostałych przypadkach przy znaczących siłach osiowych wyniki stają się bardzo konserwatywne. Bazując na wynikach przedstawionych na rys. 5., 6. oraz 7., podobnej tendencji należy się spodziewać również w przypadku pozostałych dwóch odmian betonu. Można zauważyć, że przyjęcie $c = 9,86$ dało niebezpieczne wyniki jedynie w obszarze bliskim maksymalnych momentów pierwszego rzędu.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że parametry betonu lekkiego powiązane z jego gęstością znacząco wpływają na nośność przekroju oraz smukłych elementów mimo zastosowania tej samej wytrzymałości betonu i jednakowego zbrojenia. We wszystkich analizowanych przypadkach nośność przekrojów oraz elementów z LWAC była niższa, co wynikało z charakterystyki materiałowej betonu. Występowały również znaczące różnice w wynikach pomiędzy betonami lekkimi o różnej gęstości, co było związane z poziomem dopuszczalnego odkształcenia granicznego. Można zauważyć dwie prawidłowości. Po pierwsze mniejsze odkształcenie graniczne prowadziło do redukcji nośności przekroju LWAC, po drugie większy moduł sprężystości prowadził od większej redukcji nośności smukłych słupów LWAC w stosunku do betonu zwykłego. Pokazano, że LWAC nie może być traktowany jako zamiennik betonu zwykłego jedynie na podstawie wytrzymałości na ściskanie.

Przybliżone metody obliczania efektów II rzędu (NS, NK) w smukłych elementach obciążonych siłą osiową i momentem zgodnie z EC2 [1] mają zastosowanie również dla słupów z betonu lekkiego. Analiza wykazała, że stosując metodę nominalnej sztywności, należy jednak spodziewać się wyników o ok. 10–20% bardziej konserwatywnych niż te uzyskiwane dla betonu zwykłego. W celu osiągnięcia bardziej zbliżonego poziomu bezpieczeństwa należałoby dokonać weryfikacji empirycznych współczynników korygujących w oparciu o wyniki elementów z betonu lekkiego. Wyniki weryfikacji metody NK są bardziej niejednoznaczne i wymagają analizy odkształcalności danej odmiany betonu. W przypadku betonów o niskim odkształceniu granicznym nominalna krzywiżna jest niemożliwa do uzyskania w analizie nieliniowej, co czyni metodę NK bardziej konserwatywną. Istotne okazało się także właściwe oszacowanie względnej siły n_{bal} , która decyduje o redukcji nominalnej krzywiżny przy dużych siłach osiowych, a która znacząco różni się dla rozpatrywanych tu odmian betonu. Zaproponowana wyżej korekta n_{bal} pozwoliła uzyskać bardziej ekonomiczne wyniki. W przypadku betonu lekkiego o wyższym odkształceniu granicznym LC45/50 1500 (3,2‰) wyniki dla słupów o dużej smukłości okazały się natomiast bardziej liberalne niż te dla odmiany zwykłej, co przy niedoszacowaniu krzywiżny całkowitej ($c = 9,86$) prowadziło do niebezpiecznych wyników.

Literatura

- [1] PN-EN 1992, 2008, 'Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] D. Dias-da-costa, R.N.F. Carmo, R. Graça-e-costa, J. Valença and J. Alfaiate, 2014, 'Longitudinal reinforcement ratio in lightweight aggregate concrete beams', *Engineering Structures*, vol. 81, pp. 219–229.
- [3] J. A. Øverli, 2017, Towards a better understanding of the ultimate behaviour of LWAC in compression and bending, *Engineering Structures*, vol. 151, pp. 821–838.
- [4] D. Bacinskas, D. Rumsys, A. Sokolov and G. Kaklauskas, 2020, Deformation analysis of reinforced beams made of lightweight aggregate concrete, *Materials*, vol. 13, no. 20, pp. 1–13.
- [5] Z. Wang, X. Li, L. Jiang, M. Wang, Q. Xu and K. Harries, 2020, Long-term performance of lightweight aggregate reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120231.

- [6] L. Slabs, R. Szydłowski and M. Mieszczak, 2017, Study of application of lightweight aggregate concrete to construct post-study of application of lightweight aggregate concrete to construct post-tensioned long-span slabs, *Procedia Engineering*, vol. 172, no. February, pp. 1077–1085.
- [7] T. Urban, M. Góldyn, Ł. Krawczyk and Ł. Sowa, 2019, Experimental investigations on punching shear of lightweight aggregate concrete flat slabs, *Engineering Structures*, vol. 197, no. December 2018, p. 109371.
- [8] A. Rossignolo, M. V. C. Agnesini and J. A. Morais, 2003, Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates, *Cement & Concrete Composites*, vol. 25, pp. 77–82.
- [9] P. Suraneni, P. C. Bran Anleu and R. J. Flatt, 2015, Factors affecting the strength of structural lightweight aggregate concrete with and without fibers in the 1,200–1,600 kg/m³ density range, *Materials and Structures*, vol. 49, pp. 677–688.
- [10] M.-H. Zhang and O.E. Gjorv, 1991, Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *ACI Materials Journal*, no. 88, pp. 240–247.
- [11] D. Galeota, M.M. Giammatteo and A. Gregori, 2004, Ductility and strength in high-performance lightweight concrete columns, in 13th World Conference on Earthquake Engineering, no. 3414.
- [12] E. Kołodziejczyk and T. Waśniewski, 2020, Nonlinear analysis of lightweight aggregate concrete columns, *Budownictwo i Architektura*, vol. 19, no. 3, pp. 77–88.
- [13] AICAP, A.W. Beeby, H. Corres Peiretti, J. Walraven, B. Westerberg and R. V. Whitman, 2017, Eurocode 2. Commentary.
- [14] H. Barros, V.D. Silva and C. Ferreira, 2010, Second order effects in slender concrete columns-reformulation of the Eurocode 2 method based on nominal curvature, *Engineering Structures*, vol. 32, no. 12, pp. 3989–3993.

DOI: 10.5604/01.3001.0014.5102

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Kołodziejczyk Ewelina, Waśniewski Tomasz, 2020, Nośność słupów z lekkiego betonu kruszywowego, „Builder” 12 (281). DOI: 10.5604/01.3001.0014.5102

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę numeryczną nośności przekrojów i smukłych elementów z betonu lekkiego (LWAC) poddanych działaniu siły osiowej oraz momentu zginającego. Przyjęto nieliniowy model materiałowy betonu przedstawiony w Eurokodzie 2 (EC2) [1]. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie przyjęta w obliczeniach wynosiła 53 MPa. Rozważano kilka różnych gęstości betonu. Zaobserwowano, że właściwości wytrzymałościowe betonu zależne od gęstości wpływają na uzyskiwane wartości maksymalnej siły osiowej i momentu zginającego pomimo tej samej średniej wytrzymałości na ściskanie. W każdym przypadku nośność przekroju z betonu lekkiego była niższa niż betonu zwykłego. Ponadto wprowadzenie LWAC o większej gęstości i niższym odkształceniu granicznym oznaczało większą sztywność smukłych słupów, ale wiązało się z redukcją nośności samego przekroju. Wyniki analizy nieliniowej posłużyły do weryfikacji uproszczonych metod obliczeń II rzędu zawartych w EC2 pod kątem wpływu właściwości materiału na zgodność uzyskanych wyników z metodą ogólną. Wykazano, że wyniki w niektórych przypadkach są bardzo konserwatywne i nie uwzględniają innego poziomu odkształcenia w LWAC.

Słowa kluczowe: beton lekki, słupy żelbetowe, efekty drugiego rzędu

Abstract: LOAD BEARING CAPACITY OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE COLUMNS. The paper presents a numerical analysis of the load-bearing capacity of lightweight aggregate concrete (LWAC) cross-sections and slender elements subjected to bending with axial force. The nonlinear material model of concrete presented in Eurocode 2 (EC2) [1] was assumed. The mean compressive strength of concrete was 53MPa. There were considered several different densities of concrete. It was observed that density-dependent mechanical properties of concrete affect the obtained values of the maximum axial force and bending moment despite the same mean compressive strength. In every case, the capacity of the LWAC sections was lower than the normal weight ones. Moreover, LWAC with the higher density and the lower ultimate strain gave greater stiffness to slender columns but reduced the cross-sectional capacity. The results of the nonlinear analysis were used to verify the simplified calculation methods of 2nd order effects included in EC2 in terms of the influence of the material properties on the consistency of the obtained results with the general method. It was shown that the results in some cases are very conservative and do not include a different level of strain in LWAC.

Keywords: lightweight aggregate concrete, reinforced columns, second-order effects