

## **Badania nośności wewnętrznych słupów żelbetowych w obszarze połączenia z płytą żelbetową z betonu lekkiego**

**Tadeusz Urban<sup>1</sup>, Michał Goldyn<sup>2</sup>, Łukasz Krawczyk<sup>3</sup>**

*Katedra Budownictwa Betonowego, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, e-mail:<sup>1</sup>tadeusz.urban@p.lodz.pl <sup>2</sup>michal.goldyn@p.lodz.pl <sup>3</sup>lukasz.krawczyk@p.lodz.pl*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono problem nośności słupów wykonanych z betonu wysokiej wytrzymałości przedzielonych żelbetową płytą wykonaną z betonu lekkiego. Zaprezentowano wyniki własnych badań eksperymentalnych trzech modeli reprezentujących połączenie słupa wewnętrznego z płaską płytą żelbetową wykonaną z betonu lekkiego o trzykrotnie mniejszej wytrzymałości od betonu słupa. Parametrem zmiennym relacjonowanych była wielkość obciążenia płyty. Wykonane badania wykazały brak wpływu tego parametru na wytrzymałość efektywną betonu słupa.

**Słowa kluczowe:** beton lekki, beton wysokowartościowy, płyta żelbetowa, słup, węzeł płyta-słup, nośność

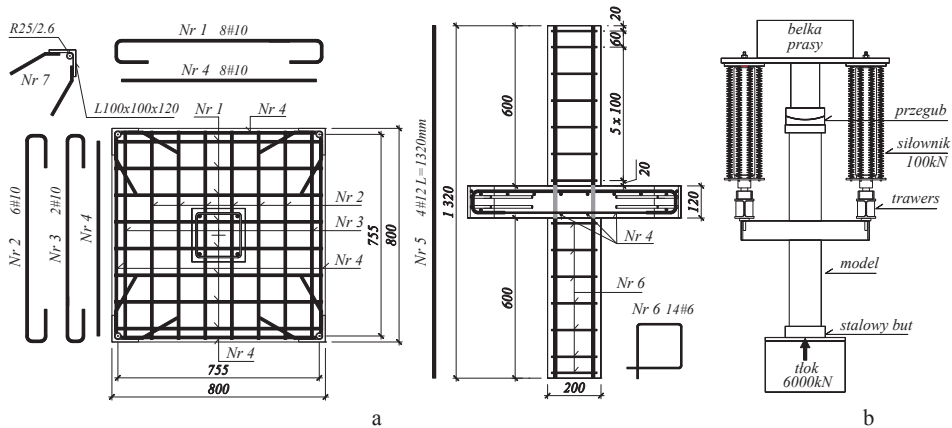
### **1. Wprowadzenie**

Postęp w technologii betonu odnotowany w ostatnich kilkunastu latach spowodował możliwość stosowania w warunkach budowy betonów wysokowartościowych o wytrzymałości rzędu 100 MPa. Tak znaczne wytrzymałości znalazły zastosowanie między innymi w wykonawstwie budynków wysokościowych. Beton o wysokich parametrach wytrzymałościowych jest potrzebny przede wszystkim do wykonywania ścian i słupów. Stropy wykonuje się zwykle z betonów o normalnej wytrzymałości (klasy C25/30 ÷ C35/45). Za takimi rozwiązaniami przemawiają przede wszystkim względy ekonomiczne, jak również technologiczne. W wypadku budynków wysokościowych istotnym problemem konstrukcyjnym są obciążenia stałe. Jedną z możliwości zmniejszenia oddziaływań grawitacyjnych jest zmniejszenie ciężaru konstrukcji stropów poprzez zastosowanie betonów lekkich kruszywowych (LWAC). Słupy i ściany pozostawia się zwykle z betonu normalnego (NWC).

Stan wiedzy na temat efektywnej wytrzymałości betonu w węzłach płytowo-słupowych wykonywanych z betonów o różnej wytrzymałości, został przedstawiony w pracy [1]. Dotychczasowe badania eksperymentalne dotyczyły wyłącznie węzłów z płytami i słupami wewnętrznymi wykonanymi z betonów normalnych (NWC). Badania prezentowane w tym artykule dotyczą połączeń płyty z betonu lekkiego kruszywowego (LWAC) ze słupami wewnętrznymi wykonanymi z betonu normalnego wysokiej wytrzymałości (NWC).

### **2. Program badań**

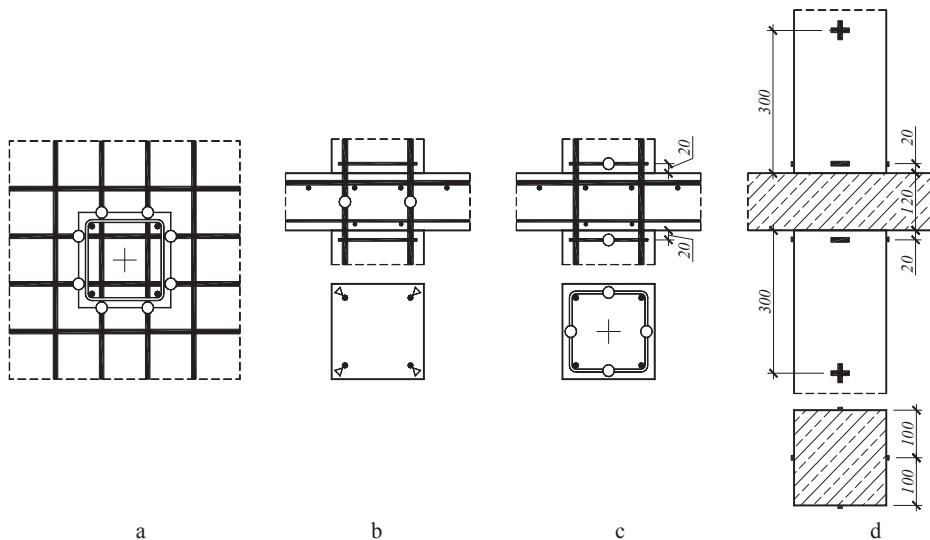
Program badań obejmował trzy modele węzłów płyta-słup wykonane w skali 1:2. Konstrukcję modeli pokazano na rys. 1. Modele wykonano w trzech etapach. Najpierw zabetonowano słupy dolne, następnie płytę i na końcu słup górny. Oprócz tych podstawowych modeli wykonano również modele świadki, reprezentujące słupy dolne i górne. Były one tak samo zbrojone, jak modele podstawowe i wykonane z tych samych zarobów betonu. Zakładano uzyskanie wytrzymałości betonu słupów - 80 MPa, a betonu płyty - 25 MPa. Do wykonania mieszanki betonowej płyty zastosowano kruszywo keramzytowe o maksymalnym wymiarze ziarna 10 mm.



Rys. 1. Badane modele: a) zbrojenie, b) schemat obciążania

Badania wykonano w maszynie wytrzymałościowej o maksymalnym nacisku 6000 kN. Płyta modelu była obciążana za pomocą dwóch siłowników po 100 kN każdy, sterowanych z oddzielnego pulpitu. Obciążanie modeli przebiegało następująco: najpierw obciążano słup do poziomu 300 kN, a następnie płytę do zamierzonych poziomów 50, 100 i 150 kN odpowiednio w poszczególnych modelach. Zachowując stały poziom obciążenia płyty, zwiększano obciążenie słupa aż do zniszczenia. Czas trwania badań jednego modelu wynosił średnio około 3 godziny.

W trakcie badań mierzono odkształcenia zbrojenia i betonu za pomocą tensometrów elektrooporowych w miejscach pokazanych na rys. 2.



Rys. 2. Lokalizacja tensometrów elektrooporowych: a) na zbrojeniu głównym płyty, b) na zbrojeniu głównym słupa, c) na strzemionach, d) na powierzchni betonu słupa

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Parametry materiałów badanych modeli

Wytrzymałość betonu modeli była określana na próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm. W dniu badania modelu wykonywano również badania części próbek na ściskanie. Po zakończeniu całego cyklu badawczego okazało się, że nie ma istotnych różnic wytrzymałościowych pomiędzy badaniami towarzyszącymi

poszczególnym modelom. Wiek betonu w trakcie prowadzenia badań mieścił się w przedziale 214 ÷ 218 dni. Różnice wytrzymałości wynikały wyłącznie z poszczególnych zarobów mieszanek betonowych. Parametry wytrzymałościowe materiałów zestawiono w tabelicy 1, a w następniej tabelicy 2 parametry zbrojenia.

Tabela 1. Parametry wytrzymałościowe betonu modeli

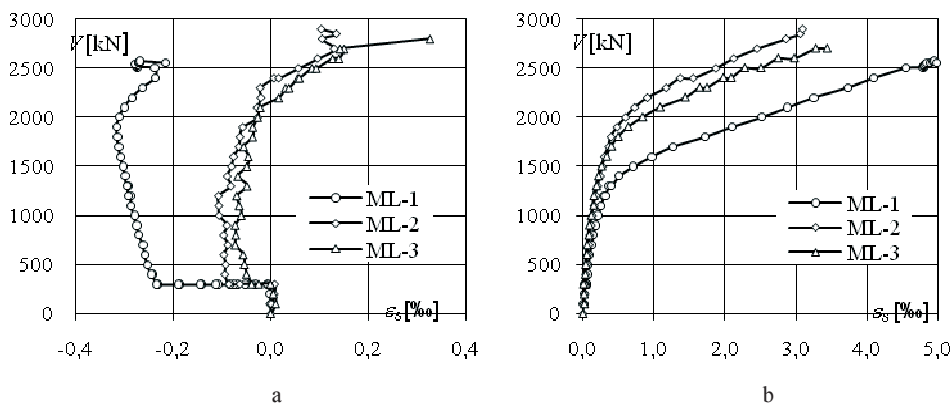
Model	Słup dolny		Słup górny		Płyta		
	$f_{cm}$ [MPa]	$E_{cm}$ [GPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$E_{cm}$ [GPa]	$f_{cm}$ [MPa]	$E_{cm}$ [GPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
ML-1					33,0	13,9	1722
ML-2	89,8	32,2	88,4	33,3	28,8	13,3	1705
ML-3					24,6	12,6	1688

Tabela 2. Parametry wytrzymałościowe zbrojenia modeli

Średnica nominalna prętów	Pole przekroju $A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	Granica plastyczności $f_{ym}$ [MPa]	Moduł sprężystości $E_s$ [GPa]
Ø12 – zbr. s <sup>3</sup> upa	109,1	594,2	209,8
Ø10 – zbr. p <sup>3</sup> yty	77,7	539,5	211,5
Ø6 - strzemiona	28,3	586,4	215,7

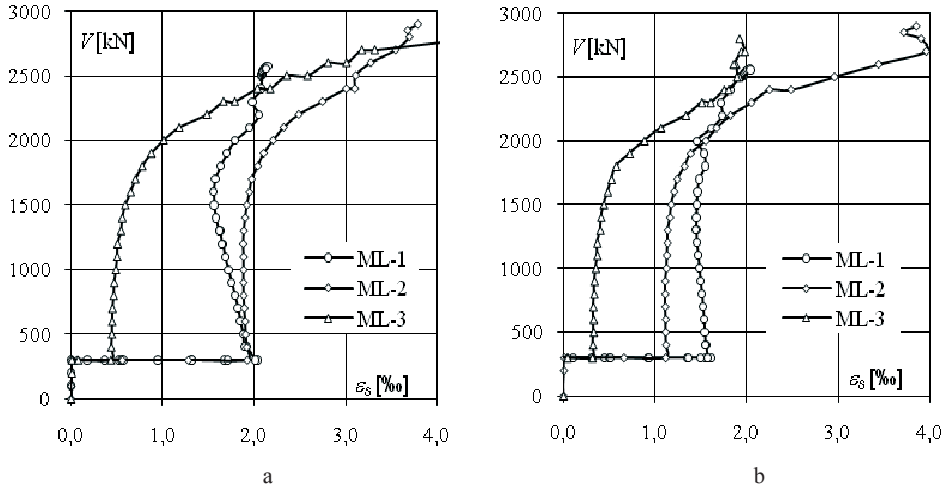
### 3.2. Wyniki pomiarów tensometrycznych

Na rysunku 3 pokazano średnie naprężenia odkształceń strzemion znajdujących się blisko powierzchni górnej i dolnej płyty. Na rysunku 3a widać wyraźnie wzrost odkształceń (ściskanie) w chwili przykładania obciążenia na płytę, co miało miejsce przy obciążeniu słupa siłą 300 kN. W przypadku strzemion nad płytą rejestrowano na wszystkich poziomach obciążeń słupa rozciąganie, a odkształcenia we wszystkich modelach przekroczyły granicę plastyczności przed osiągnięciem stanu granicznego nośności.

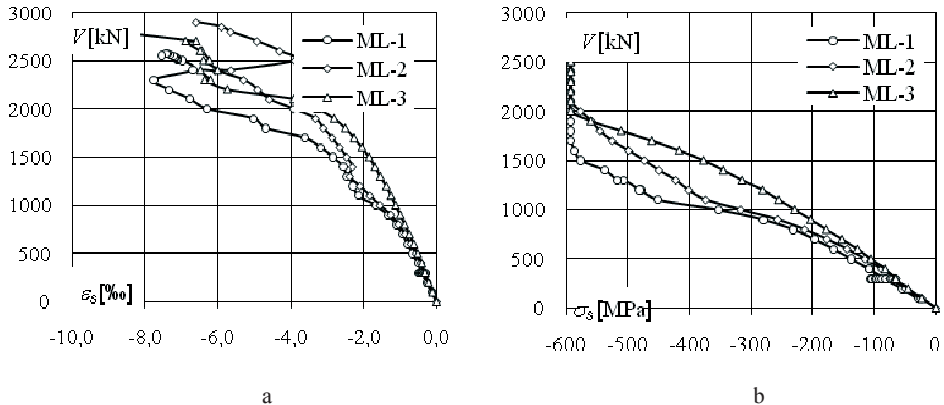


Rys. 3. Porównanie średnich odkształceń strzemion : a) pod płytą, b) nad płytą

Na rysunku 4 pokazano odkształcenia zbrojenia głównego płyty. Od poziomu obciążenia słupa około 1500 kN można zaobserwować wzrost odkształceń zbrojenia, mimo utrzymywania niezmiennego poziomu obciążenia płyty.



Rys. 4. Porównanie średnich odkształceń zbrojenia głównego płyty : a) górna warstwa, b) dolna warstwa

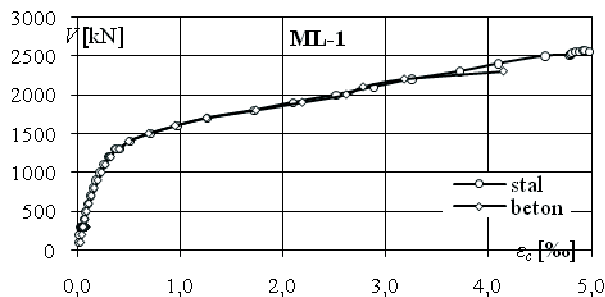


Rys. 5. Porównanie średnich odkształceń i naprężeń w zbrojeniu głównym słupa w strefie połączenia z płytą: a) odkształcenia, b) naprężenia

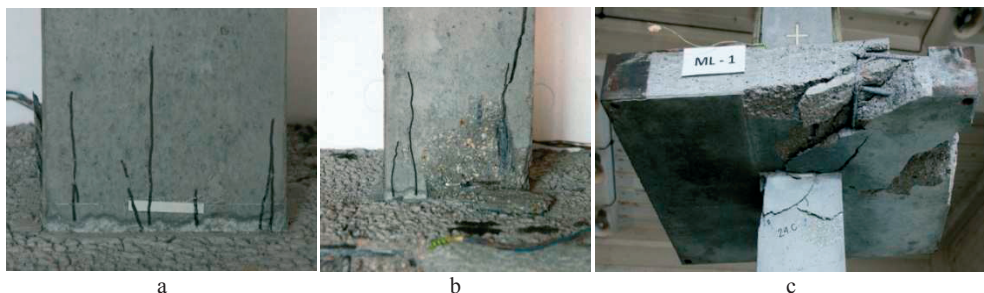
Istotnych informacji o zachowaniu złącza płytowo-słupowego dostarczają obserwacje odkształceń zbrojenia głównego słupa w strefie płyty. Do momentu osiągnięcia przez zbrojenie granicy plastyczności (patrz rys. 5b) obserwowano dość równomierny w nim przyrost naprężeń ściskających. Po przekroczeniu tej granicy, zaczęto obserwować zbrojeniu zwiększenie przyrostu odkształceń pomiędzy kolejnymi etapami obciążeń. Powyżej około 80% zaawansowania siły niszczącej obserwowano znaczną zmienność odkształceń skutkującą nawet spadkiem ich wartości. To dziwne zachowanie się można tłumaczyć uszkodzeniem czujników spowodowaną daleko posuniętą destrukcją betonu w strefie węzła płytowo-słupowego.

### 3.3. Obserwacje stanu granicznego nośności

Stan graniczny nośności sygnalizowany był znacznymi odkształceniami poprzecznymi słupa nad górną powierzchnią płyty. Pomiar odkształceń strzemion w tych miejscach (patrz rys. 3b) wykazały uplastycznienie zbrojenia ( $\epsilon_s > 3\%$ ). Zostało to potwierdzone również pomiarami odkształceń na betonie. Na rysunku 6 pokazano przykładowe wykresy otrzymane dla modelu ML-1. Czujniki na betonie ulegały wcześniej zniszczeniu, co było efektem propagacji rys (patrz rys. 7a).



Rys. 6. Porównanie odkształceń strzemion i betonu nad płytą modelu ML-1



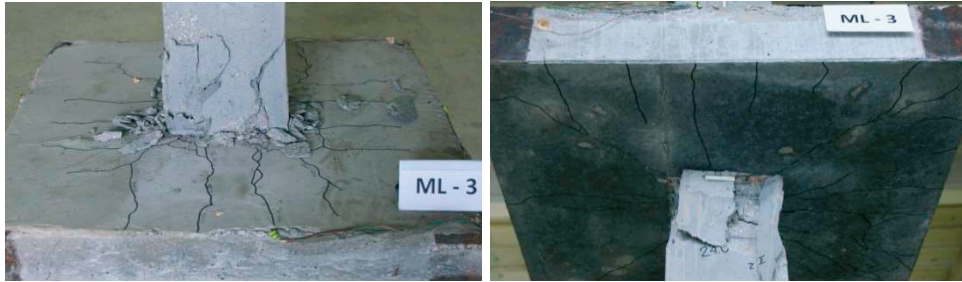
Rys. 7. Model ML-1 po zniszczeniu: a) widok rys na jednym z boków słupa, b) odspojenie otuliny i lokalne wybożenie pręta na jednej z krawędzi c) uszkodzony narożnik płyty inicjujący zniszczenie modelu

Niszczenie modelu ML-1 zostało zainicjowane ścięciem jednego z narożników płyty (patrz rys. 7c) w charakterystyczny sposób dla przebicia. W następstwie zniszczenia płyty został uszkodzony słup pod płytą i nad płytą. Na rysunku 7b pokazano uszkodzenie słupa nad płytą.

Pozostałe modele ML-2 i ML-3 osiągnęły swoje stany graniczne nośności bez uprzedniego przebicia płyty. Wyczerpanie nośności węzła było wynikiem wyczerpania się nośności słupa w strefie płyty. Destrukcja słupa ujawniła się w bezpośrednim sąsiedztwie górnej i dolnej powierzchni płyty, co zostało pokazane na rys. 9 i 10.



Rys. 9. Widok zniszczonych słupów modelu ML-2



Rys. 10. Widok zniszczonych słupów modelu ML-3

#### 4. Analiza wyników badań

Wyteżenie płyt modeli na przebiecie ustalono zgodnie z zasadami rozdziału 11 Eurokoðu 2. Naprężenia krytyczne na obwodzie kontrolnym  $u_1$  obliczono zgodnie ze wzorem:

$$v_{R,c} = C_{IR,c} k \eta_1 (100 \rho_l f_{cm})^{1/3} \quad (1)$$

w którym:

$$C_{IR,c} = 0,15,$$

$k$  – współczynnik skali,

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \rho / 2200,$$

$\rho$  – gęstość betonu w  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,

$\rho_l$  – stopień zbrojenia głównego płyty,

$f_{cm}$  – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie.

Wyteżenie płyty zdefiniowano jako iloraz  $v_E/v_{R,c}$  (naprężeń stycznych od oddziaływań zewnętrznych do naprężeń krytycznych zgodnych ze wzorem (1) na obwodzie kontrolnym  $u_1$ ). Wyniki obliczeń dla poszczególnych modeli zestawiono w tabelcy 3. W przypadku modelu ML-1, wyteżenie było równe prawie teoretycznej nośności płyty na przebiecie.

W tabelcy 4 porównano nośności modeli z nośnościami słupów świadków. Graficzne porównanie nośności słupów przedstawia rys. 11. Wynika z niego, że wyteżenie płyty nie wpływa w istotny sposób na nośność słupa w węźle płytowo-słupowym. Bez względu na wyteżenie płyty nośność słupa modeli wynosi około 80% nośności słupów świadków.

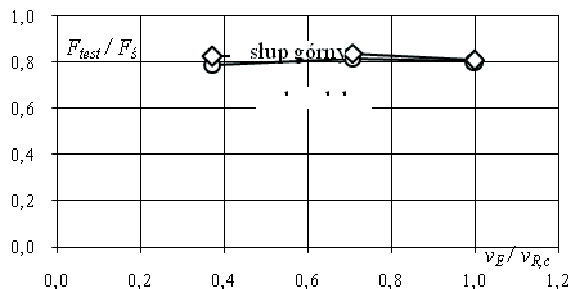
Tabela 3. Ustalenie wyteżenia płyt modeli na przebiecie

Model	$V_E$ [kN]	$d$ [mm]	$\rho_l$	$u_1$ [mm]	$\eta_1$	$k$	$v_{R,c}$ [MPa]	$v_E$ [MPa]	$v_E/v_{R,c}$
ML-1	150				0,8696		0,780	0,779	0,999
ML-2	100	96,0	0,0081	2006	0,8650	2	0,734	0,519	0,707
ML-3	50				0,8604		0,700	0,260	0,371

$V_E$  – obciążenie płyty,  $d$  – wysokość użyteczna płyty,  $u_1$  – obwód kontrolny,  $\eta_1$  – współczynnik we wzorze (1),  $v_{R,c}$  – naprężenia krytyczne na obwodzie kontrolnym,  $v_E$  – naprężenia styczne na obwodzie kontrolnym od oddziaływań zewnętrznych.

Tabela 4. Porównanie nośności modeli z nośnościami słupów świadków

Model	słup	$F_s$ [kN]	$F_{test}$ [kN]	$F_{test}/F_s$
ML-1			2850	0,801
ML-2	dolny	3560	2900	0,815
ML-3			2800	0,787
ML-1			2700	0,808
ML-2	górný	3340	2800	0,838
ML-3			2750	0,823



Rys. 11. Porównanie nośności słupów modeli z nośnościami słupów świadków

## 5. Wytrzymałość efektywna słupów

Autorzy badań [2] wprowadzili termin wytrzymałości efektywnej  $f_{c,eff}$  do określania nośności słupa w strefie słabszego betonu stropu. Wyniki ich badań zostały wykorzystane w przepisach poszczególnych edycji norm amerykańskich. Od 2008r. ACI 318 zaleca następujące zależności na wytrzymałość efektywną betonu słupów:

$$f_{c,eff} = f_{c,c} \quad \text{dla} \quad \frac{f_{c,c}}{f_{c,s}} \leq 1,4$$

$$f_{c,eff} = 0,75f_{c,c} + 0,35f_{c,s} \quad \text{dla} \quad 1,4 < \frac{f_{c,c}}{f_{c,s}} \leq 2,5 \quad (2)$$

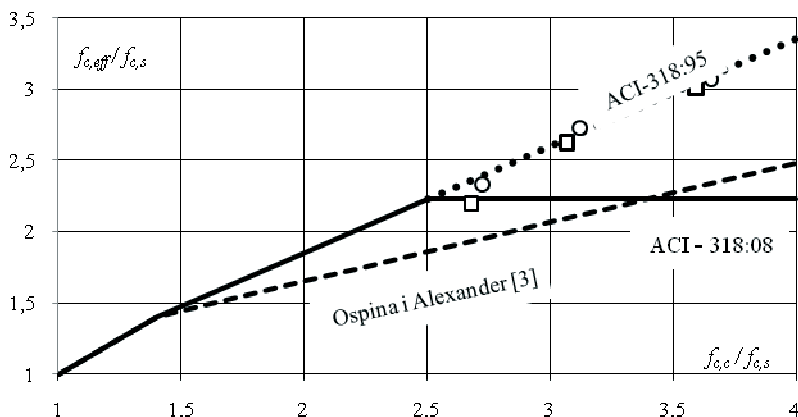
$$f_{c,eff} = 2,225f_{c,s} \quad \text{dla} \quad \frac{f_{c,c}}{f_{c,s}} > 2,5$$

gdzie  $f_{c,c}$  oznacza wytrzymałość betonu słupa, a  $f_{c,s}$  – wytrzymałość betonu płyty.

Autorzy pracy [3] zaproponowali sposób określania wytrzymałości efektywnej słupów uwzględniając proporcje grubości płyty do wymiaru boku słupa ( $h/c$ ), przy różnicy wytrzymałości betonów słupa i płyty  $f_{c,c}/f_{c,s} > 1,4$  wzór ma postać:

$$f_{c,eff} = \left(\frac{0,25}{h/c}\right)f_{c,c} + \left(1,4 - \frac{0,35}{h/c}\right)f_{c,s} \quad (3)$$

Na rysunku 12 pokazano wyniki badań własnych na tle przepisów ACI-318 z roku 1995 i 2008 oraz propozycji Ospina i Alexandra [3] dla  $h/c = 0,6$ .



Rys. 12. Porównanie wyników badań z procedurami obliczeniowymi

## 6. Wnioski

Przedstawione badania węzłów płytowo-słupowych z płytą wykonaną z betonu kruszywowego lekkiego, wykazały brak istotnego wpływu wyężenia płyty na nośność słupa. Procedura określania efektywnej wytrzymałości betonu słupa według ACI-318:95 okazała się najlepiej aproksymującą zaprezentowane wyniki badań.

## Literatura

- 1 Urban T.: Nośność słupa w strefie połączenia z płytą żelbetową. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 283, Budownictwo i Inżynieria Środowiska – Zeszyt 59, (nr 3/2012/II), s. 117÷124.
- 2 Bianchini A.C., Woods R.E., Kesler C.E.: Effect of Floor Concrete Strength on Column Strength. ACI Journal, Proceedings V.31, No.11, 1960, s. 1149-1169.
- 3 Ospina C.E., Alexander S.D.B.: Transmission of Interior Concrete Column Loads Through Floors. Journal of Structural Engineering ASCE, V.124, No.6, 1998, s. 602-610.

## The experimental investigations of RC internal columns in the connection zone with lightweight concrete slab

Tadeusz Urban<sup>1</sup>, Michał Goldyn<sup>2</sup>, Łukasz Krawczyk<sup>3</sup>

*Department of Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Łódź University of Technology, e-mail:<sup>1</sup>tadeusz.urban@p.lodz.pl  
<sup>2</sup>michal.goldyn@p.lodz.pl <sup>3</sup>lukasz.krawczyk@p.lodz.pl*

**Abstract:** This paper presents the problem of load carrying capacity of the columns made of high-strength reinforced concrete which are separated by slab made of lightweight concrete. The experimental investigations of three models representing the internal connection between column and flat slab made of lightweight concrete of the strength three times less than concrete strength of column are presented. The effort degree on the punching shear capacity stands for the variable parameter in the presented study. The performed study shows that there is no effect of this parameter on the effective concrete strength of the column.

**Keywords:** lightweight concrete, high strength concrete, reinforced concrete slab, column, slab-column connection