

Efektywność dobetonowania krótkich wsporników do istniejącego słupa żelbetowego

Dr hab. inż. Krystyna Nagrodzka-Godycka, mgr inż. Małgorzata Sikorska,
Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

Obecna sytuacja gospodarcza powoduje, że wiele obiektów budowlanych zmienia swoich właścicieli i konieczne jest dostosowanie istniejącej infrastruktury do wymagań nowego użytkownika. Modernizacja powoduje często przyrost obciążenia użytkowego lub modyfikację geometrii konstrukcji. Niejednokrotnie przebudowie nie musi ulegać cała konstrukcja, a jedynie jej poszczególne elementy, czego przykładem może być dołączenie wspornika stanowiącego podporę belki podsuwnicowej, do istniejącego w hali słupa żelbetowego.

Dołączenie krótkiego żelbetowego wspornika do istniejącego słupa, już niejako na wstępie eliminuje możliwość stosowania kotwienia zbrojenia głównego na końcu wspornika w postaci pętli, co jest zalecane przez normy zarówno polskie [1, 2], jak i europejską [3]. Na rynku budowlanym istnieją pręty zbrojeniowe ze specjalnie ukształtowaną główką mającą zapewnić odpowiednie zakotwienie. Skuteczność zakotwienia takich prętów oraz możliwość ich stosowania jako zbrojenia głównego wsporników słupa, była badana m.in. w University of Calgary przez Birkle i in. [4] oraz przez autorki na Politechnice Gdańskiej [5, 7]. Zamiast prętów ze specjalnie ukształtowanymi główkami, można też stosować sposób kotwienia wg zaleceń normy amerykańskiej ACI 318 [6].

W artykule przedstawiono wyniki serii badań, mające na celu eksperymentalne sprawdzenie rozwoju procesu zarysowania i sposobu wyczerpania nośności dobetonowanych wsporników zbrojonych stalowymi trzpieniami. Łącznie badaniu poddano 4 dwuwspornikowe elementy w skali naturalnej. W trzech dobetonowano wsporniki do wcześniej wykonanego słupa, natomiast czwarty był tzw. „wspornikiem referencyjnym” o identycznej geometrii, wykonany jako jednolity, monolityczny element zbrojony stalowymi trzpieniami ciągłymi.

2. Geometria i zbrojenie badanych wsporników

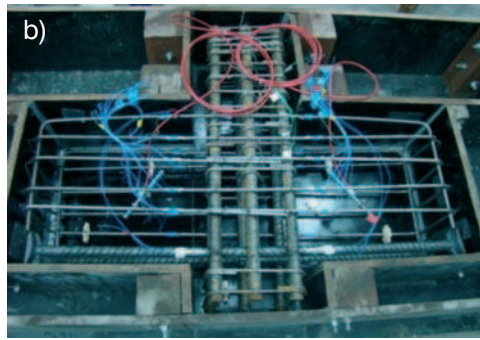
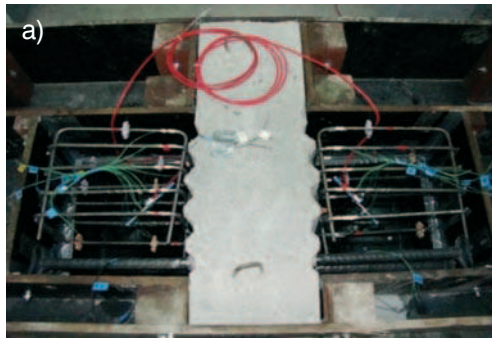
Badania przeprowadzono na symetrycznych elementach dwuwspornikowych o stałej smukłości ścinania $a_p/d = 0,6$ wyrażającej stosunek odległości siły F do krawędzi słupa do wysokości użytecznej. Wsporniki miały stałą zarówno wysokość $h = 40$ cm ($d = 35$ cm), jak też szerokość $b = 25$ cm. Badane wsporniki miały jednakową liczbę i średnicę trzpieni jako zbrojenia głównego. Seria WII-TD obejmowała trzy ele-

menty zbrojone stalowymi trzpieniami o średnicy $\varnothing 25$ mm z odpowiednio ukształtowaną końcówką w postaci główki (rys. 1). Granica plastyczności stali, z której wykonano trzpienie określona została eksperymentalnie, w próbie jednoosiowego rozciągania i wynosiła $f_y = 565$ MPa.

Wsporniki tej serii: WII-TD-pg, WII-TD-pr, WII-TD-pr/c wykonywano w dwóch etapach. W pierwszym etapie zabetonowano słupy. W elemencie WII-TD-pr/c słup został zabetonowany wraz z dwoma ciągłymi trzpieniami (rys. 1a) stanowiącymi zbrojenie główne. W pozostałych dwóch elementach WII-TD-pg, WII-TD-pr, zbrojonych trzyczęściowymi trzpieniami stalowymi, w pierwszym etapie w słupie zabetonowano środkowy fragment zakończony mufami (rys. 1b). Przed betonowaniem dwustronnych wsporników styczne powierzchnie słupa ze wspornikiem były groszkowane, a środkowe części trzpieni skręcane z elementami skrajnymi z głowicami i podwieszano zbrojenie uzupełniające w postaci 4 rzędów strzemion powiązanych drutem z obwodowym zbrojeniem konstrukcyjnym



Rys. 1.
Trzpienie stosowane we wspornikach dobetonowanych do słupów: a) trzpień ciągły, b) trzpień trzyczęściowy



Rys. 2.
Zbrojenie wsporników:
a) WII-TD-pr/c ze słupem prefabrykowanym
b) WII-T-1, zbrojenie wspornika monolitycznego

(rys. 2a). Na rysunku 2b przedstawiono zbrojenie wspornika monolitycznego.

Geometrię i zbrojenie badanych elementów z dobetonowanymi wspornikami pokazano na rysunku 3. Program badawczy serii WII-TD obejmował również sprawdzenie wpływu na nośność rodzaju powierzchni styku słupa z dobetonowanym wspornikiem. Słup wspornika WII-TD-pg miał obie powierzchnie – przewidziane do dobetonowania wsporników – gładkie, zaś w elementach WII-TD-pr i WII-TD-pr/c powierzchnia styku słupa ze wspornikami była „ryflowana” (rys. 3).

Wyniki tej serii porównano z wynikami uzyskanymi dla elementu WII-T-1 o takich samych parametrach, ale wykonanego jednoetapowo, jako jednolity element monolityczny.

Podłużne zbrojenie słupa we wszystkich badanych elementach składało się z sześciu prętów $\varnothing 25$ mm ($f_y = 565,5$ MPa), natomiast poprzeczne stanowiły strzemiąca $\varnothing 6$ mm ($f_y = 575,5$ MPa) w rozstawie co 6 cm, zagęszczone do 2 cm na długości około 10 cm od strony przyłożenia siły $2F$. Ponadto we wszystkich wspornikach wykonano, niezależny od słupa, układ strzemion dwuciętych $\varnothing 8$ mm ($f_y = 598$ MPa) ułożonych w czterech rzędach, stabilizowany dwoma prętami konstrukcyjnymi $\varnothing 8$ mm ($f_y = 617,2$ MPa).

Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie badana na walcach 150/300 dla wsporników serii WTD wyniosła $f_c = 44,1$ MPa, natomiast średnia wytrzymałość na rozciąganie określana przez rozłupanie

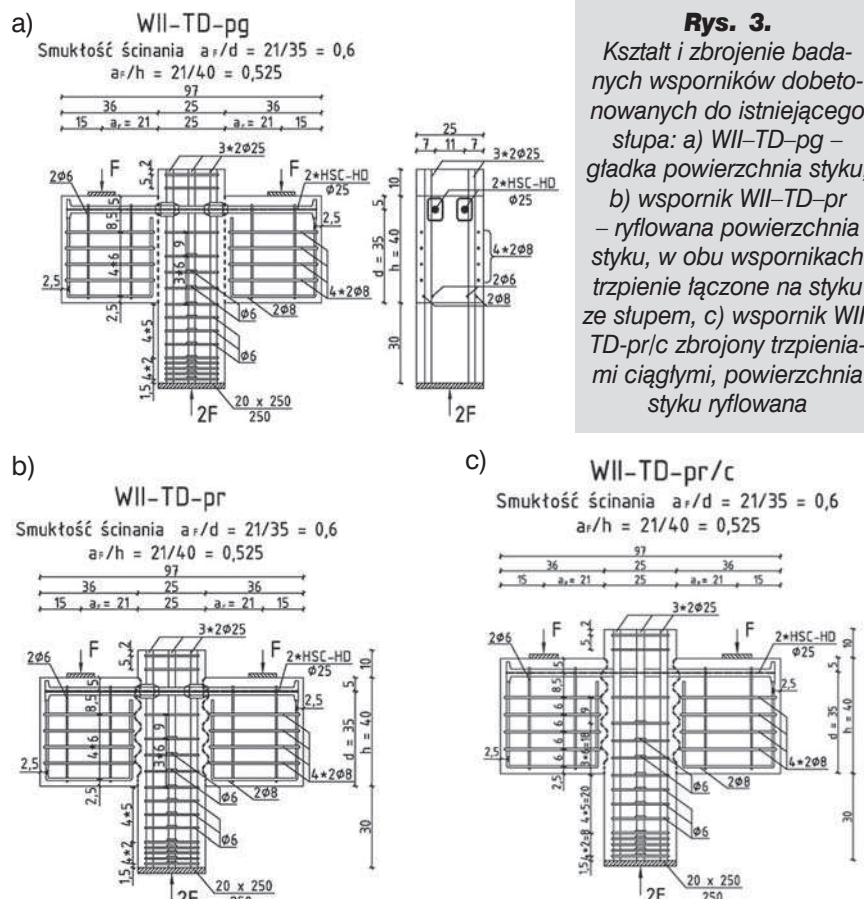
walca wyniosła $f_{ct} = 2,6$ MPa. Dla wspornika monolitycznego WII-T-1 wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła $f_c = 41,1$ MPa.

3. Przebieg badań

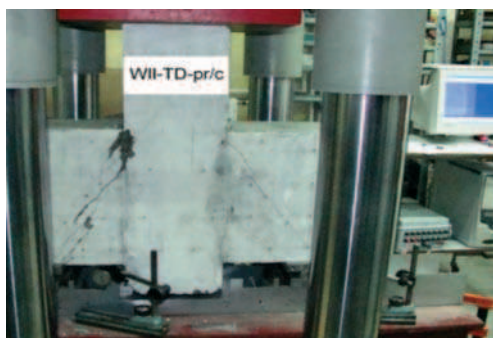
Wszystkie elementy badane były w pozycji odwróconej o 180° w stosunku do rzeczywistej pracy, na stanowisku pokazanym na rysunku 4. Do dwuwspornikowego symetrycznego elementu przykładano obciążenie siłą skupioną F , działającą na pojedynczy wspornik, zwiększając przy tym przemieszczenie tłoka prasy z prędkością 0,5 mm/

minutę. Dodatkowo siły, na każdym poziomie, były kontrolowane siłomierzami usytuowanymi pod każdym wspornikiem.

W trakcie obciążania badano odkształcenia stali zbrojeniowej, zarówno trzpieni, jak i strzemion, w przekroju przylupowym za pomocą tensometrii elektrooporowej sprzężonej ze stanowiskiem komputerowym. Do pomiaru odkształceń ściskanego pola betonu wykorzystano zatapiające w betonie czujniki strunowe Geokon 4200 o bazie pomiarowej 153 mm pokazane na rysunku 5, usytuowane pod kątem 55° odpowiadającym przebiegom naprężeń



Rys. 3.
Kształt i zbrojenie badanych wsporników dobetonowanych do istniejącego słupa: a) WII-TD-pg – gładka powierzchnia styku, b) wspornik WII-TD-pr – ryflowana powierzchnia styku, w obu wspornikach trzpienie łączone na styku ze słupem, c) wspornik WII-TD-pr/c zbrojony trzpieniami ciągłymi, powierzchnia styku ryflowana



Rys. 4.
Wsporniki na stanowisku badawczym

głównych, wyznaczonym na podstawie analizy MES.

Wyniki badań tensometrii strunowej porównano z uzyskanymi metodą tradycyjną, mechaniczną wykonaną ekstensometrem z odczytem cyfrowym, o bazie pomiarowej 100 mm. Bazy pomiarowe na powierzchni betonu wsporników rozmieszczone były pod tym samym kątem co czujniki strunowe. Usytuowanie czujników i odpowiadających im baz zewnętrznych załączono do wykresów na rysunkach 10 i 11. Dodatkowo badano przemieszczenia krawędzi wsporników za pomocą czujników zegarowych.

4. Wyniki badań

4.1. Zarysowanie

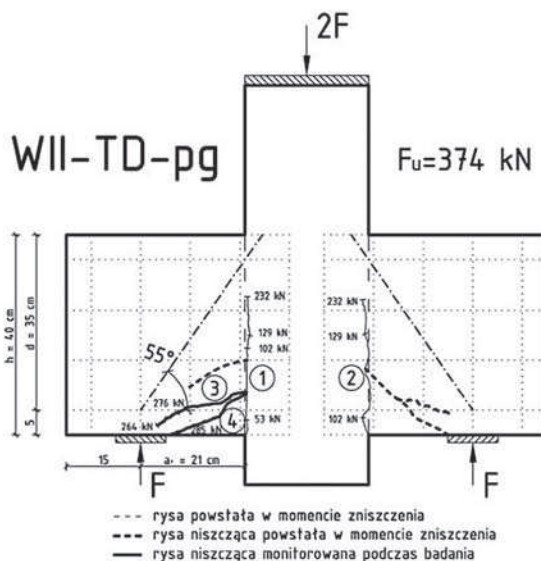
Obrazy zarysowania dobetonowanych wsporników różniły się pomiędzy sobą istotnie, w zależności od rodzaju powierzchni styku wspornika ze słupem podczas dobetonowywania. Wspornik WII-TD-pg o gładkiej powierzchni styku zarysował się przy sile około 30% F_{Vu} (rys. 6). Rysy pionowe pojawiły się wzdłuż słupa po obu jego stronach. Wpłynęły one na kształt rys usytuowanych w pobliżu naroża rozciąganego. Rysy te pojawiły się znacznie później w obszarze zbrojenia głównego. Morfologia rys potwierdza, że w przypadku gładkiego styku, beton środkowej części wsporników nie został wciągnięty do współpracy ze zbrojeniem.

Układ rys w pozostałych dwóch dobetonowywanych wspornikach z powierzchnią ryflowaną (rys. 7) jest zbliżony do obrazu zarysowania wspornika monolitycznego (rys. 8). Przy czym, nie było istotnych różnic pomiędzy wspornikiem ze zbrojeniem jednolitymi trzpieniami (WII-TD-pr/c) a wspornikiem z trzpieniami łączonymi przy słupie (WII-TD-pr). We wspornikach wykonywanych w dwóch etapach, rysy nie wnikają w głąb słupa, tak

pod obciążeniem użytkowym, jak i niszcącym była tylko nieznacznie większa od rys we wsporniku referencyjnym. Wartości sił rysujących, niszczących oraz szerokości rozwarcia rys wsporników serii WII-TD i wspornika referencyjnego WII-T-1 zestawiono w tabeli 1.

4.2. Sposób zniszczenia

W elemencie dobetonowywanym o gładkiej płaszczyźnie łączenia (WII-TD-pg), dobetonowane



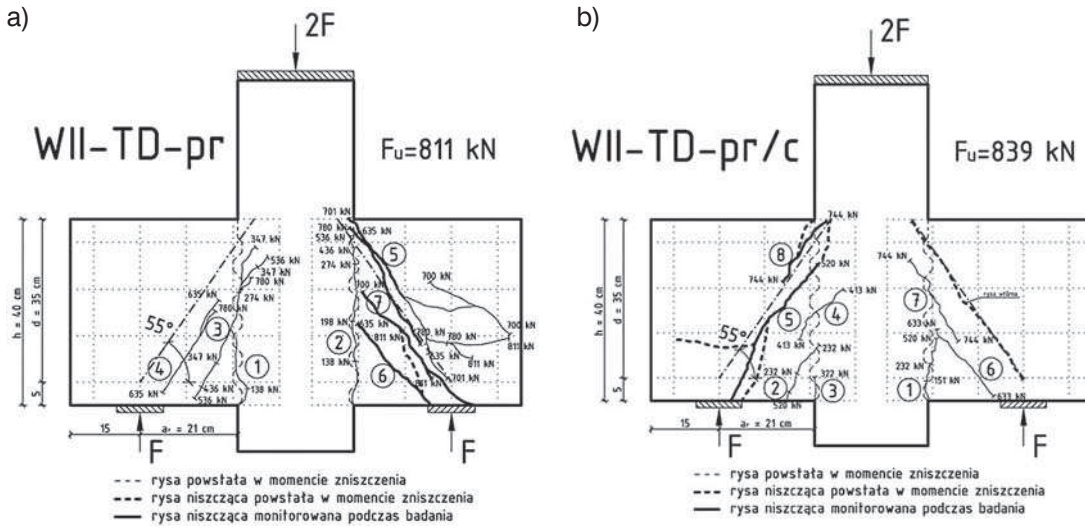
Rys. 6.
Obraz zarysowania wspornika dobetonowanego do gładkiej powierzchni słupa

jak w przypadku wsporników betonowanych w całości. Tym niemniej, dodatkowe rysy pojawiają się również w miejscu połączenia wspornika ze słupem, co świadczyło o współpracy betonu ze zbrojeniem. Szerokość rys wsporników dobetonowanych zarówno

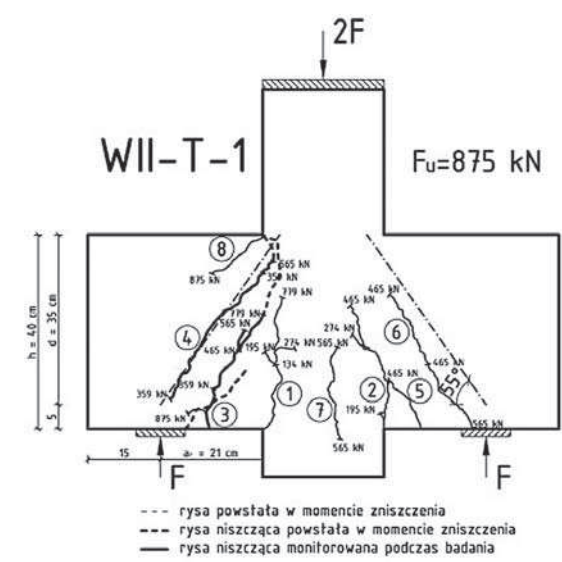
wsporniki po obu stronach słupa przemieszczały się w pionie, po pojawieniu się rysy pionowej na styku wspornika ze słupem. W fazie końcowej, ukośnemu miażdżeniu ulegał beton naroży rozciąganych w pobliżu prętów zbrojenia głównego. Po przekroczeniu przemieszczenia tłoka prasy wynoszącego 9,5 mm dalsze obciążanie nie powodowało przyrostu siły. Przesuwanie końca wspornika wyniosło 4,5 mm, przy przesuwie tłoka 9,5 mm. Wspornik



Rys. 5.
Czujnik strunowy o bazie 153 mm



Rys. 7. Obraz zarysowania wsporników dobetonowanych o ryflowanej powierzchni styku: a) trzpienie łączone w przekroju przy słupie, b) trzpienie jednolite



Rys. 8. Obraz zarysowania wspornika monolitycznego

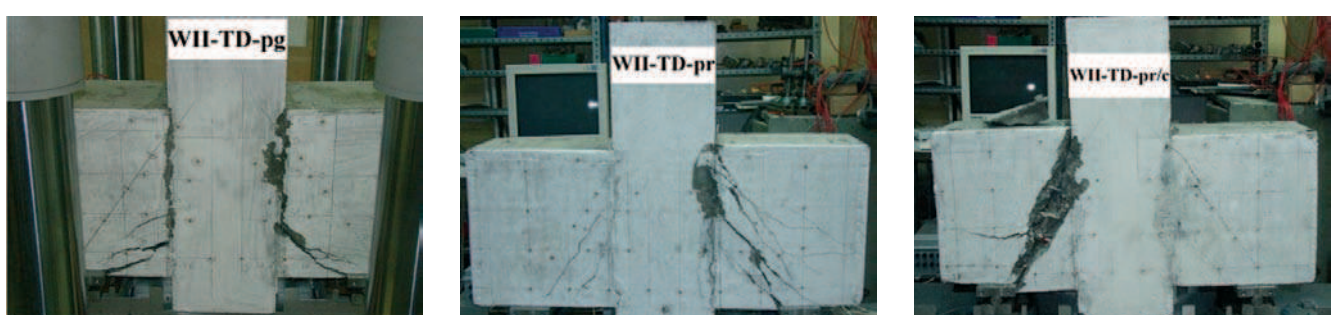
nych WII-TD-pg, WII-TD-pr, WII-TD-pr/c po zniszczeniu przedstawiono na rysunku 9.

4.3. Odształcenia betonu i stali trzpieni

Na rysunku 10 przedstawiono wykresy odształceń betonu wsporników z ryflowaną powierzchnią styku. Odształcenia betonu dla wsporników z połączeniem ryflowanym wynosiły około $1,2 \div 1,6\%$ i były mniejsze od odształceń pomierzonych w referencyjnym wsporniku monolitycznym ($\approx 2\%$). Można zatem przyjąć, że odpowiednio ukształtowana powierzchnia styku (ryfle) zapewnia co najmniej w dziewięćdziesięciu procentach „monolityczność” dobetonowywanego elementu. Stal zbrojenia głównego uplastyczyła się we wsporniku z ryflowaną powierzchnią styku i ciągłymi trzpieniami – rysunek 12 (podobnie jak to miało miejsce we wsporniku monolitycznym). W pozostałych wspornikach wykonywanych dwu-

WII-TD-pg osiągnął najmniejszą nośność w serii WTD badanych elementów, która wynosiła 43% nośności wspornika monolitycznego. W pozostałych elementach WII-TD-pr/c oraz WII-TD-pr siła maksymalna była osiągnięta przy przesuwie tłoka 7,5 mm. Wsporniki dobetonowywane z połączeniem ryflowanym (WII-TD-pr,

WII-TD-pr/c) uległy zniszczeniu o charakterze ukośnego rozłupania. Osiągnęły one odpowiednio 93% i 96% nośności wspornika monolitycznego. We wsporniku z ciągłymi trzpieniami WII-TD-pr/c niszczenie nastąpiło z jednoczesnym uplastycznieniem się stalowych trzpieni zbrojenia głównego. Serię wsporników dobetonowywa-



Rys. 9. Wsporniki dobetonowywane WII-TD-pg, WII-TD-pr oraz WII-TD-pr/c po zniszczeniu

Tabela 1. Zestawienie sił rysujących, niszczących oraz szerokości rozwarcia rys

Wspornik	Charakterystyka	f_c [MPa]	F_{cr1} [kN]	$F_{cr1}/F_{vu,exp}$	W_1 $W_{serv. load}$ $W_{1,max}$ [mm]	$F_{cr,inc}$ [kN]	W_{inc} $W_{inc, serv. load}$ $W_{inc, max}$ [mm]	$F_{vu,exp}$ [kN]
WII-TD-pg	dobetonowywany, połączenie gładkie, pręty dokręcane	44,1	53	0,14	0,04 0,2 1,0	rysy ukośne w narożu rozciągającym w obszarze zbrojenia głównego		374
WII-TD-pr	dobetonowywany, ryflowany, pręty dokręcane	44,1	138	0,17	0,15 0,64 0,90	347	0,24 0,38 0,58	811
WII-TD-pr/c	dobetonowywany, ryflowany	44,1	151	0,18	0,08 0,3 0,50	520	0,18 -	839
WII-T-1	monolityczny	41,1	134	0,15	0,10 0,22 0,30	359	0,08 0,2 0,28	875

etapowo, naprężenia w prętach zbrojenia były mniejsze, a przy gładkiej powierzchni styku naprężenia w stali prętów zbrojenia głównego nie osiągnęły połowy granicy plastyczności.

5. Nośność obliczeniowa badanych wsporników

Analizę nośności – z uwagi na charakter pracy dobetonowanych wsporników – wykonano wykorzystując założenia hipotezy ścinania – tarcia (rys. 13) wg ACI 318 M – 2008 [6] (wersja metryczna nowej normy).

Do obliczeń przyjęto różne wartości współczynnika tarcia: $\mu=1,4$ – jak dla betonu monolitycznego, $\mu=1,0$ – jak dla tarcia pomiędzy betonem stwardniałym a monoli-

tycznym, przy szorstkiej powierzchni styku. Jedynie dla wspornika z gładką powierzchnią styku (WII-TD-pg) do obliczeń nośności przyjęto współczynnik tarcia $\mu=0,6$ (połączenie betonu stwardniałego z monolitycznym przy gładkiej powierzchni styku).

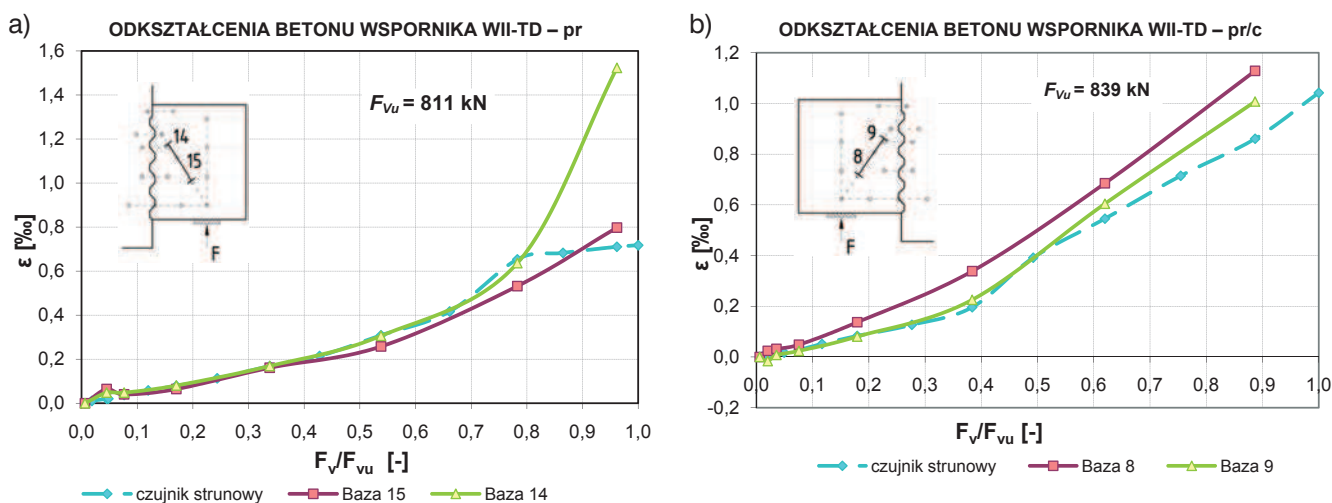
Nośność elementu obliczona z uwagi na uplastycznienie się zbrojenia opisana jest wzorem:

$$F_{Vu} = \mu \cdot f_y \cdot A_s \quad (1)$$

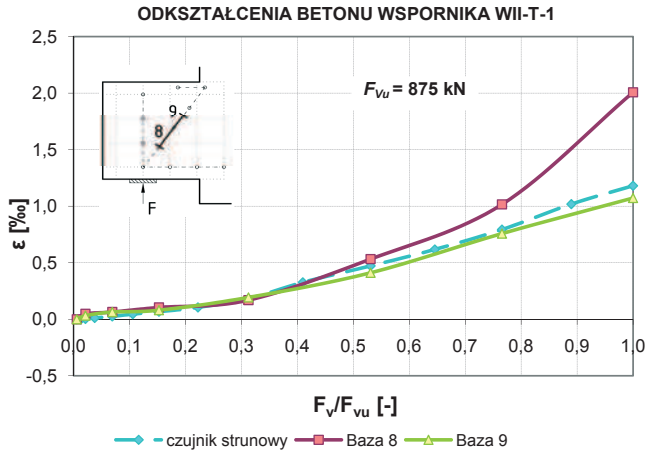
Przy czym siła F_{Vu} powinna spełniać następujące warunki:

$$\begin{aligned} F_{Vu} &\leq 0,2 f_c \cdot A_c \\ F_{Vu} &\leq (3,3 + 0,08 f_c) A_c \\ F_{Vu} &\leq 11 A_c \end{aligned} \quad (2)$$

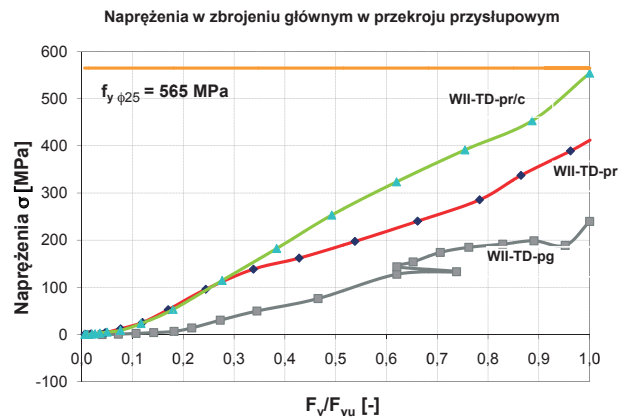
Wyniki obliczeń sił niszczących przedstawionych w tabeli 2 oparte są na założeniach normy amerykańskiej z roku 2008. Ostatnia kolumna przedstawia obliczoną siłę niszczącą według modelu kratownicowego [8]. Model ten zapewnia bezpieczne i zbliżone do eksperymentalnych nośności. Ograniczenia z uwagi na beton wg ACI 318M:08 [6] są zbyt restrykcyjne dla wsporników monolitycznych. Natomiast w przypadku procesu dobetonowywania wsporników do istniejącego stupa, warunki w praktyce są dużo trudniejsze niż możliwości precyzyjnego wykonania w laboratorium i z tego powodu restrykcyjne ograniczenie nośności wg ACI 318M-08 można uznać za uzasadnione.



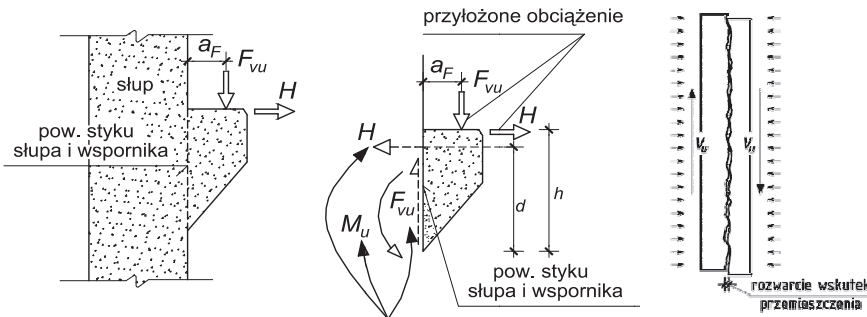
Rys. 10. Odształcenia betonu ściskanego krzyżulca na powierzchni wsporników dobetonowywanych z ryflowaną powierzchnią styku: a) WII-TD-pr bazy 14 i 15 (trzpienie łączone w przekroju przystupowym), b) WII-TD-pr/c bazy 8 i 9 (trzpienie ciągłe na długości wspornika) oraz wewnątrz elementu (czujniki strunowe)



Rys. 11. Odształcenia betonu ściskanego krzyżulca na powierzchni monolitycznego wspornika referencyjnego WII-T-1 bazy 8 i 9, oraz wewnątrz elementu (czujnik strunowy)



Rys. 12. Naprężenia w trzpieniach zbrojenia głównego wsporników dobetonowanych do istniejącego słupa



Rys. 13. Ogólna idea metody „ścianania – tarcia”

- Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN, Warszawa 2008, s. 210
- [3] EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rule and rules for buildings. European Committee for Standardization, December 2004, s. 225
- [4] Birkle G., Ghali A., Schäfer K., Double-Headed Studs Improve Corbel Reinforcement. Concrete International, 2002, 9, s. 77-94
- [5] Nagrodzka-Godycka K., Seroka D., Sikorska M., Wsporniki zbrojone trzpieniami stalowymi. Inżynieria Morska i Geotechnika, 2010
- [6] ACI Standard Code 318M – 08: Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, American Concrete Institute 2008, s. 473
- [7] Nagrodzka-Godycka K., Seroka D., Sikorska M., Krótkie wsporniki słupa w dwuetapowej realizacji konstrukcji wsporczych, 56. Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB Kielce-Krynica, 2010, Problemy Naukowo-Badawcze Budownictwa, s. 571-578
- [8] Nagrodzka-Godycka K., Przyczynek do projektowania krótkich wsporników żelbetowych obciążonych na górnej krawędzi, Archiwum Inżynierii Lądowej, t. 37, 1991

6. Wnioski

Zarysowanie i nośność wsporników dobetonowanych do prefabrykowanego słupa, w dużym stopniu zależy od powierzchni styku tych elementów.

Gładka powierzchnia styku nie zapewnia współpracy wspornika ze słupem i nie powinna być stosowana w praktyce.

Odpowiednio ukształtowana powierzchnia styku dobetonowanych wsporników w postaci tzw. ryfli zapewniła dostateczne zespolenie takiego połączenia i nośność porównywalną z wykonanym monolitycznie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. PKN, Warszawa, s. 142
- [2] PN-EN 1992-1-1:2008: Eurokod 2.

Tabela 2. Zestawienie obliczeniowych sił niszczących

Wspornik ($a_p/d=0,6$)	$F_{u,exp}$ kN	$f_{c'}$ MPa	ACI 318M-08 [6]					Met. krat. KNG [8]
			$u \cdot f_y \cdot A_s$		$0,2 f_c A_c$	$(3,3+0,08f_c') A_c$	$11 A_c$	
			$\mu=1,4$	$\mu=1,0$				
WII-TD-pg	374	44,1	–	554,8 333*	771,7	597,5	962,5	724,8
WII-TD-pr	810,5	44,1	776,8	554,8	771,7 910,7**	597,5 703,5**	962,5 1133,3**	724,8
WII-TD-pr/c	839	44,1	776,8	554,8	771,7 910,7**	597,5 703,5**	962,5 1133,3**	724,8
WII-T-1	875	41,1	776,8	–	719,2	576,5	962,5	714,1

* nośność obliczona dla współczynnika $\mu=0,6$; ** nośności obliczone z uwzględnieniem zwiększonej ryflowanej powierzchni styku